

愛知工科大学紀要

工学部・愛知工科大学自動車短期大学

第 8 卷



AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2010

愛知工科大学紀要 第 8 卷

目 次

研究論文

酸化チタン薄膜の光電流における拡張指数関数	坂口鋼一，嶋川晃一，畑中義式 1
Web を利用した就職活動報告書管理システムの開発	加藤高明，松下直樹 5
電気冷蔵庫の環境特性改善に関する LCA 検証	中西悠弥，矢野正孝 11
月面探査ローバの検討	中谷一郎，片山雄二，森 康夫 21
テラヘルツ波伝送用円形導波管の曲り部における電磁界特性の等角写像による解析	宮崎保光 29
Unsteady Thermal Stresses in the Functionally Graded Semi-infinite Body with Slanting Boundary to the Functional Graduation Subjected to Prescribed Surface Heat Flux	Manabu Ohmichi 37
RFID 信号伝搬の FDTD 法による電界分布および受信特性解析	宮崎保光，野村良雄，高橋港一 47
CSV ファイルと連携して簡便に XML データ処理を行うライブラリ・ソフトウェアの検討	吉田 茂 57
ドアセンサを利用した 24GHz 帯マイクロ波ドップラー速度計	藤本 裕，名和靖彦，相木国男 67
超音波を用いたレーダ原理の実験（第 2 報）リアルタイム表示と多重反射像の消去処理	西野 渉，名和靖彦，相木国男 73
高周波マグネトロンスパッタリングによる酸化チタン薄膜の伝導率特性	深澤正樹，坂口鋼一，嶋川晃一，畑中義式 77

コラム・エッセイ

大学の学部教育	基礎教育，工学専門教育と大学院	宮崎 保光	83
---------	-----------------	-------	----

玉虫にちなんで		橋本 孝明	89
---------	--	-------	----

研究ノート

クラウドコンピューティングサービスの有効活用に関する検証		加藤高明，小池章行	91
------------------------------	--	-----------	----

たんぼぼの種の抵抗係数の簡易推定		橋本孝明，池田八郎	97
------------------	--	-----------	----

ゲージ理論からのマクスウェル方程式		石川雄二郎	101
-------------------	--	-------	-----

報 告

授業評価アンケートに関する一考察	満足度との観点から	大迫尚行	115
------------------	-----------	------	-----

ドイツ・イギリスにおけるメディアアート・ビデオアート視察についての報告書		杉森順子	121
--------------------------------------	--	------	-----

愛知工科大学・愛知工科大学自動車短期大学教職員業績リスト（2010.1-2010.12）

愛知工科大学紀要規程

愛知工科大学紀要投稿細則

酸化チタン薄膜の光電流における拡張指数関数

坂口鋼一^{*}, 嶋川晃一^{**}, 畑中義式^{*}

(2010年11月25日受理)

Stretched exponential function in photocurrent of TiO_x films

Koichi Sakaguchi^{*}, Koichi Shimakawa^{**}, Yoshinori Hatanaka^{*}

(Received November 25, 2010)

Abstract

Decays of photocurrent after stopping the irradiation of UV light was reported in titanium oxide films. Excited electrons recombine with holes through the various routs. The photocurrent decay exhibits a stretched exponential form. In the mixture of argon and oxygen gas environment, oxygen reacting with electrons near the surface dominate recombination processes. Origin of stretched exponential dynamics in these recombination processes is discussed.

キーワード: 拡張指数関数, 光伝導, 酸化チタン薄膜, 再結合

Keywords: stretched exponential function, photoconduction, titanium oxide films, recombination

1. はじめに

酸化チタンは光触媒性の機能を利用する用途で多くの研究がなされている^{1),2)}. 汚れの分解, 抗菌性等の機能は, 酸化チタンに紫外線を当てると酸化チタンの電子が紫外線を吸収し励起電子と正孔ができ, 大気中の酸素分子が表面に吸着し, 励起電子や正孔が酸素と反応し活性酸素が作られることによって生じる. この活性酸素が表面に付着した有機物を酸化し, これを水や二酸化炭素などの無機物にまで分解するというメカニズムによっていることはよく知られている. この過程で, 光で励起された電子と正孔が重要な役割を果たす.

中村ら³⁻⁴⁾は, リモートプラズマ(RPE)CVD法により有機チタン原料から酸化チタン薄膜を作製したものについて研究を行い, 膜中の欠陥準位がOH基により不活性化されることにより, 高い光機能性と超親水性を示し, かつ, ガス雰囲気にも敏感な伝導特性を持つもので

あることを明らかにした. また, この方法で作製された薄膜は, 水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)と同じような考え方で, 水酸化アモルファス酸化チタン(a-TiO_x:OH)膜であると考えられた.

我々は, Ar雰囲気におけるa-TiO_x:OHの光伝導特性およびArに微量のO₂を導入した雰囲気におけるa-TiO_x:OHの光伝導特性について研究を行ってきている. 前報告において, 紫外線照射を停止した後の光電流の減衰は, 拡張指数関数, $\exp[-(t/\tau)^\beta]$ ⁵⁾で表され, Arに微量のO₂を導入した雰囲気においては, 減衰時定数 τ が酸素分圧に反比例し, 光電流の最大値が酸素分圧に反比例する実験結果を報告した^{6),7)}.

Arに微量のO₂を導入した雰囲気において, 紫外線停止後の光電流が拡張指数関数であらわされる実験結果が得られたが^{6),7)}, 本論文では, 酸素と電子の反応に分散があるものとして, 拡張指数関数の意味を考察をした.

^{*} 愛知工科大学工学部, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Japan

^{**} 岐阜大学工学部, 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1
Department of Electrical and Electronic Engineering, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

2. Oxygen-assisted recombination における 拡張指数関数の意味

RPE-CVD(Remote Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) で作製した酸化チタン薄膜の Ar 雰囲気における光伝導特性を Fig.1 に示す^{6,7)}。紫外線を停止した後の光電流の減衰は、次の拡張指数関数 (stretched exponential function)⁵⁾

$$I = I_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

であらわすことができた。この式で、 β は分散指数 (dispersion parameter ($0 < \beta < 1$)), τ は減衰時定数 (effective decay time) をあらわす。 $\tau=72\text{min}$, $\beta=0.47$ とした場合に、紫外線停止後の光電流を式 (1) で表わすことができた。 τ が極めて大きく、光で励起されたキャリアが容易には再結合できない状態にあると考えられる。

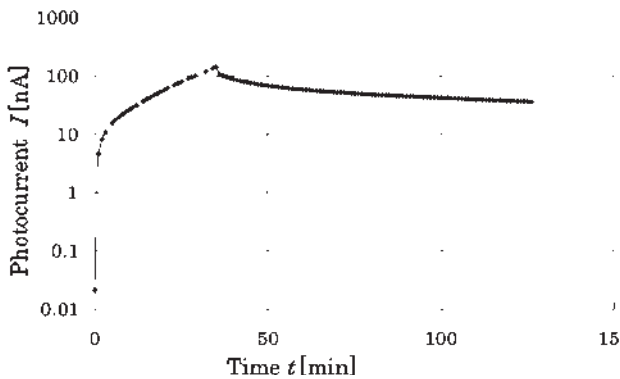


Fig.1 Photocurrent increases with UV light irradiation and decreases with the UV irradiation removed (in the atmosphere of argon, sample temperature=293K, applied voltage=20V)

次に、Ar で満たされた測定容器に微量の酸素を導入し、RPE-CVD(Remote Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) で作製した酸化チタン薄膜の光伝導特性を測定した。20V の電圧を印加し、試料温度を 303K とし、紫外線を照射し、照射中および照射停止後の光電流の変化を測定した。Ar ガスは流量 3 /min で流し、 O_2 ガスは、流量 10m /min ,20m /min ,30m /min ,50m /min で流した。測定結果を Fig. 2 に示す^{6,7)}。Fig. 2 の紫外線照射停止後の光電流を、縦軸を相対値として Fig. 3 に示す。酸素を導入することにより、光電流の減衰が速く進む結果が得られた。以下のように、表面に吸着した酸素が媒介 (酸素が再結合センターの役割を果たす) するため、減衰が速く進むと考えられる。

- 1) e (C.B. や localized center の e) + $O_2 \rightarrow O_2^-$
- 2) $O_2^- + h$ (V.B. や localized center の h) $\rightarrow 2O$

このようにして過剰キャリアは再結合するが、この再結合を本論文では Oxygen-assisted recombination (OAR) と名付けた。キャリア減衰 (実験結果) は式 (1) の拡張指数関数 (stretched exponential function) で表わすことができた。

紫外線停止後の光電流が拡張指数関数で表される起源を求めるために、我々は酸素と電子の反応に分散があるものとして、以下に議論を行った。

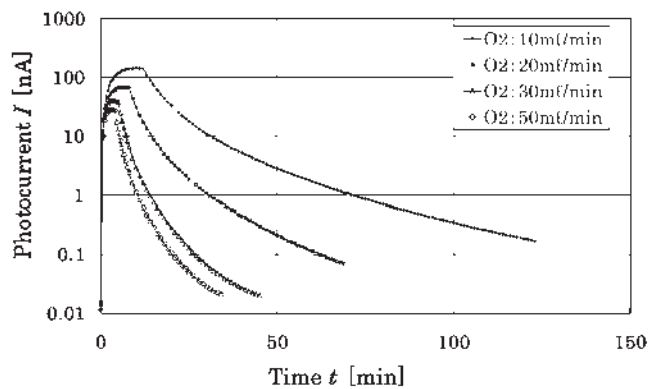


Fig.2 Photocurrent increases with the UV light irradiation and decreases with the UV irradiation removed.

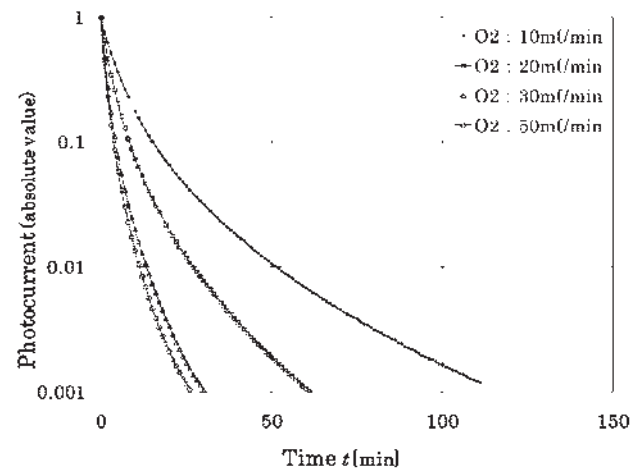


Fig.3 Absolute value of photocurrent with the UV irradiation removed

光電流がキャリア (電子) 数 n に比例するものとすれば、現象論的にはこのような拡張指数関数は、以下のレート方程式から導出できる。

$$\frac{dn}{dt} = -At^{\beta-1}n \quad (2)$$

ここで、 $At^{\beta-1}$ は分散型のレートを仮定した。このような分散型レート方程式を仮定すれば、この解は

$$n(t) = n(0)\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

となり、実験事実を説明することができる。なぜこのようなレート方程式が成り立つかを以下に考える。

ここでは、分散型のレート方程式が現れる様子を酸素の役割に注目して解析する。1)の過程でeが酸素と反応して(酸素の物理吸着)減衰する様子をレート方程式で記述してみる。

まず、 O_2 と電子の反応の速度定数を R とする。この場合、 $n=n(t)$ が、時刻 t における電子濃度とすると、 $-\frac{dn}{dt}$ は単位時間内の電子濃度の減衰量をあらわし、現在の電子濃度に比例するため、反応速度は

$$\frac{dn}{dt} = -Rn \quad (4)$$

の形で表すことができる。OARが起こるためには、反応が起るための待ち時間 t' があると仮定すると、熱エネルギーの尺度で次の関係が仮定できる。

$$t' = \tau_0 \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right) \quad (5)$$

実際の系では E_A はある一定値でなく、 $P(E_A)$ のように分布するであろう。それに従い待ち時間 t' も一定値ではなく $P(t')$ のような分布関数に従う。

ここで、 E_A は次のような指数分布をとると仮定する。

$$P(E_A) = \frac{1}{\varepsilon_0} \exp\left(-\frac{E_A}{\varepsilon_0}\right) \quad (6)$$

この式で ε_0 は、指数分布の期待値をあらわす。

待ち時間 t' の分布関数 $P(t')$ は

$$P(t') = \frac{P(E_A)}{\left|\frac{dt}{dE_A}\right|} = \beta \tau_0^\beta t'^{-1-\beta} \quad (7)$$

ここで、 $\beta = \frac{kT}{\varepsilon_0}$ (< 1.0)である。

つまり、待ち時間の分布関数は式(7)のように時間に依存することになる。待ち時間 t' の期待値は

$$\langle t \rangle = \int_0^\infty t' P(t') dt' = Ct^{-\beta+1} \quad (8)$$

ここで、 $C = \frac{\beta \tau_0^\beta}{1-\beta}$ である。

ここで、 $R = \frac{K}{\langle t \rangle}$ とおくと式(4)は

$$\frac{dn}{dt} = -K \frac{1-\beta}{\beta \tau_0^\beta} t^{\beta-1} n \quad (9)$$

$A = K \frac{1-\beta}{\beta \tau_0^\beta}$ とおくと式(2)と同じ式が得られ、式(9)の解は

$$n(t) = n(0)\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^\beta\right] \quad (10)$$

$$\tau = \left(\frac{\beta}{A}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \tau_0 \left(\frac{\beta^2}{K(1-\beta)}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (11)$$

となり、光電流を拡張指数関数で表すことができた。

式(5)で表現されるような反応における待ち時間が分散型レート方程式の起因と考えられる。

Fig. 4は、酸素ガスの流量比と減衰時定数 τ の関係を示す実験結果である^{6),7)}。この τ は、Fig. 3の減衰曲線に式(2)の拡張指数関数をfittingさせることにより得た値である。Fig. 4は、 τ が酸素分圧に反比例することを示している。

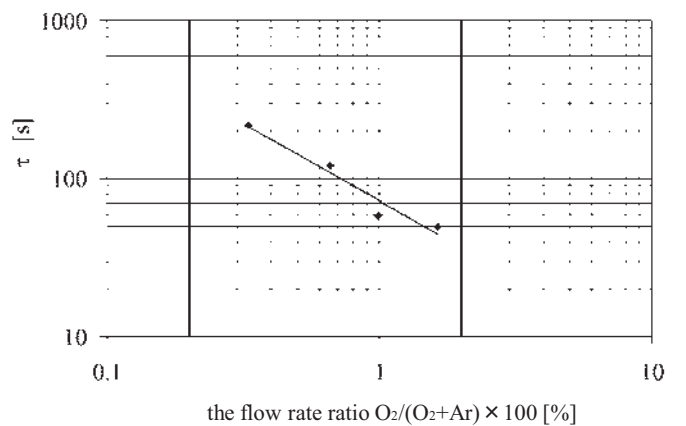


Fig.4 Dependence of τ on the flow rate ratio of oxygen with the UV irradiation removed. (sample temperature=303K, applied voltage=20V, the flow rate of Ar : 3l/min)

τ が酸素分圧に反比例するという関係を理論式 (11) に代入して検討する。[O₂] を酸素分圧とすると、

$$\tau \propto \frac{1}{[\text{O}_2]} \propto \left(\frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (12)$$

各辺を - 乗することにより、

$$[\text{O}_2]^{\beta} \propto k \quad (13)$$

従って

$$R = \frac{k}{\langle t \rangle} \propto [\text{O}_2]^{\beta} \quad (14)$$

となる。これは、再結合反応速度が 乗に比例することを示している。

4. 討論と結び

我々は、Ar に微量の O₂ を導入した雰囲気における水酸化アモルファス酸化チタン (a-TiO_x:OH) 膜の光伝導特性について研究を行い、Ar に微量の O₂ を導入した雰囲気において、紫外線停止後の光電流が拡張指数関数 $\exp[-(t/\tau)^{\beta}]$ であらわされる実験結果を報告したが^{6,7)}、本論文では、酸素と電子の反応に分散があるものとして、拡張指数関数を導くことができた。

Ar に微量の O₂ を導入した雰囲気においては、減衰時定数 τ が酸素分圧に反比例する実験結果を報告したが^{6,7)}、同様に酸素と電子の反応に待ち時間が存在し、ここに分散があるものとして、実験結果を説明することができた。このとき、反応速度が酸素分圧の 乗に比例するという結果が得られた。この反応過程に対する詳細な物理的意味は今後に残された問題である。

参考文献

- 1) C. D. Jaeger and A. J. Bard: J. Phys. Chem. **83**(1979)146.
- 2) H. Tada and M. Tanaka: Langmuir **13**(1998)5918.
- 3) M. Nakamura, T. Aoki, Y. Hatanaka, D. Korzec, and J. Engemann: J. Mater. Res. **16**(2001)621.
- 4) M. Nakamura, S. Kato, T. Aoki, L. Sirghi, and Y. Hatanaka: Jpn. Appl. Phys. **90**(2001)3391.
- 5) J. Singh and K. Shimakawa: *Advances in Amorphous Semiconductors* (Taylor & Francis, London and New York,2003)p.247
- 6) 坂口綱一, 嶋川晃一, 畑中義式: 愛知工科大学紀要 **3**(2006)55
- 7) K.Sakaguchi, K.Shimakawa, Y.Hatanaka: Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 5A(2006)4183

Web を利用した就職活動報告書管理システムの開発

加藤高明*, 松下直樹**

(2010年9月30日受理)

Development of the Management System for Job Hunting Report Using Web

Komei Kato*, Naoki Matsushita**

(Received September 30, 2010)

Abstract

Nowadays, as personal computers and the Internet are widely used, the relevant documents of job hunting are digitalized. We can easily search and brows them using the computer network. However the job hunting reports which our university has preserved are not digitalized, stored in paper at the career support office. Therefore, students in our university must visit to the career support office to check the reports. This paper describes the design and development of the management system for job hunting report using Web, which was developed by using HTML and PHP, students can entry and check the reports without circumstance by the Web browser .

キーワード : HTML, PHP, LAMP

Keywords : HTML, PHP, LAMP

1. はじめに

就職活動をする上で、企業からの求人票や各学生の就職活動報告書というものは、その企業の情報や、就職試験の内容などを知り得たりする上で非常に有用かつ必要なものであり、多くの資料の中から目的とする資料をすぐに見つけだせることは特に重要である。そのため、パソコンやインターネットの普及した現在では、求人票を電子化して、ネットワークを介してそれらのデータを検索、閲覧できるようになっているのが一般的である。

本学への求人票も電子化されているが、各学生の就職活動報告書に関しては電子化されておらず、紙媒体での保存となっている。そのため、就職活動をするうえで貴重な情報源となる就職活動報告書があまり利用されていないのが現状である。そこで、報告書を有効活用するため、デジタルデータ化された活動報告書の格納用データベースを構築し、格納されているデータの検索や閲覧、

および新規登録が可能なシステムの開発を試みた。

HTMLとPHPを用いているため、Webブラウザを通して検索・閲覧・登録が可能であり、学内ネットワークの利用で本学内のどこからでもその利用ができるものである。

本稿では、開発したシステムの機能や操作手順について説明を行う。

2. 本学における就職関連資料の現状と課題

2.1 現状

本学の就職関連資料の現状は、Fig.1のとおりである。

Fig.1にあるように就職関連資料の多くは、本学の就職・進学情報ページよりデジタルデータとして閲覧やダウンロードができるようになっている。しかし、個人の就職活動を行ったことを報告する就職活動報告書に関しては、本学キャリアセンターに紙媒体として複数のファ

* 愛知工科大学工学部 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

** 愛知工科大学大学院工学研究科 博士前期課程 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Graduate School of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

パソコンを使用し閲覧可能 (デジタルデータ)	キャリアセンターで 閲覧可能(紙媒体)
<ul style="list-style-type: none"> ・ 求人票 ・ 地区別求人票 ・ 大学院進学支援情報 ・ 国家公務員採用試験情報 ・ 地方公務員採用試験情報 ・ 短大説明会・試験日案内 ・ 合同企業説明会案内 ・ 企業別就職者数一覧 ・ 大学院進学者一覧 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 求人票 ・ 就職活動報告書

Fig.1 本学の就職関連資料の現状

イルにまとめられた状態で保存されているのみで、デジタルデータとしての保存はされていない。そのため、学生はこの資料を閲覧したい場合はキャリアセンターに行き、手作業で膨大な数の資料から自分の必要とする資料を探さなくてはならない。

2.2 課題としての必要機能

前述したように、就職活動を行うために非常に有用な情報源である活動報告書があまり利用されていないのが現状である。これらを電子化しデータベースに蓄積することによって、Web ブラウザを利用してどこからでも検索・閲覧できるシステムを開発することは、就職活動報告書をより就職活動に有効利用することに繋がるはずである。また、電子化したデータの管理、つまり登録されているデータの修正や不要なデータの削除を行うためのページも合わせて作成しなければならないが、これらも Web ブラウザから操作が可能とする必要がある。

3. 就職活動報告書管理システムの設計

本システムを開発するにあたり求められる性能と条件は次のとおりである。

3.1 性能

就職活動報告書というものは、活動したことを報告するためのものであり、それらが毎年蓄積されることによって、より資料としての価値が出てくるものである。短期大学、大学院までを含めて毎年、卒業生数×受験企業数の報告書が発生し、その量は膨大なものとなるため、データベース用のサーバを用いてデータを保存・蓄積していくことが必要である。

また、キャリアセンターには就職活動のパソコンが6台設置してあり、それらからのアクセスはもちろんのこ

と、学内ネットワーク接続パソコンからもアクセスできるようにするために、サーバサイド Web プログラムを用いて、利用者は特別なアプリケーションソフトを使用することなく本システムを利用できなくてはならない。

3.2 機能

登録機能では学科の入力のラジオボタン化や、都道府県の入力のリスト化、注意書きの追加など、利用者の使いやすさを考慮したページ作成を重視し、また、入力した内容をそのまま印刷することで就職活動報告書として利用できるように、印刷用ページを用意し内容を A4 用紙 1 枚に収める。

検索・閲覧機能では、検索結果一覧ページと報告書詳細表示ページを分割することで、閲覧したい企業や資料を選びやすくし、また、報告書詳細表示ページは比較をしやすいするために別画面で開く。さらに、このページも印刷時に A4 用紙 1 枚に収まるようなレイアウトを検討する。

登録データの管理を行う機能を作成するにあたり、この機能に関しては一般の利用者からは全く独立させる必要がある。今回は管理用ページのアドレスを管理者にのみ通知するという形で機能の独立を行う。なお、管理用ページのほとんどは検索・閲覧機能のページからの流用が可能で、それらに修正・削除の機能を追加することで実現できる。

4. 開発したシステムの説明

4.1 開発に使用したソフトウェア

以上のような性能や機能を考慮して、フリーソフトであっても保守性や信頼性などで高い実績がある LAMP を採用してシステム開発を行った。ここで LAMP とは、データベース連動型 Web アプリケーションを開発するのに人気の高いオープンソフトの組み合わせを示し、OS に Linux、Web サーバに Apache、データベースに MySQL、プログラミングに PHP か Perl か Python を用いたシステムのことである。

4.1.1 活動報告書の登録、検索・閲覧、およびデータの管理部の作成に使用したソフトウェア

Web ブラウザを用いて活動報告書の登録や検索・閲覧、およびデータの修正削除の管理機能を HTML と PHP を用いて作成した。PHP を用いることで活動報告書データベースへのデータの登録や、データの抽出を Web ブラウザを用いて行うことができ、プログラムの追加や修正も容易である。なおサーバについては、Linux 系 OS を

用いてすでに構築済みの Web サーバを活用した。

4.1.2 活動報告書データベースで使したソフトウェア

活動報告書データベースにおいては、以下のソフトウェアを使用して、Web サーバ及びリレーショナルデータベースを構築した。

- ・ Ubuntu8.10 OS
- ・ Apache2.0 Web サーバ
- ・ MySQL データベース
- ・ PHP5.0 データベース検索

4.2 システム全体の流れと画面構成

本システムの流れとして、Fig.2 に報告書の登録、検索・閲覧の流れを、また、登録済みデータの修正や削除の流れを Fig.3 に示す。また Fig.4, Fig.5 は、それぞれの画面構成図を示した。

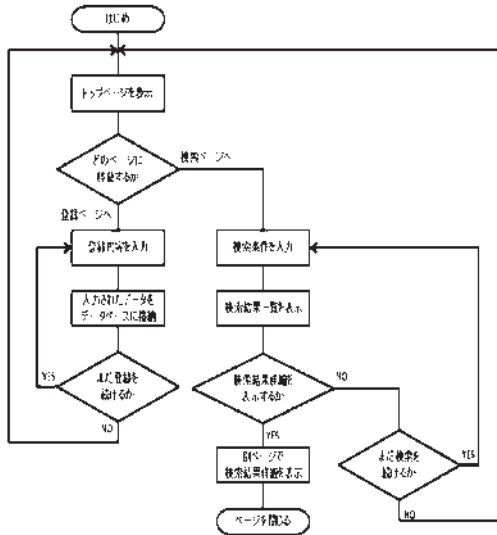


Fig.2 報告書の登録、検索・閲覧の流れ

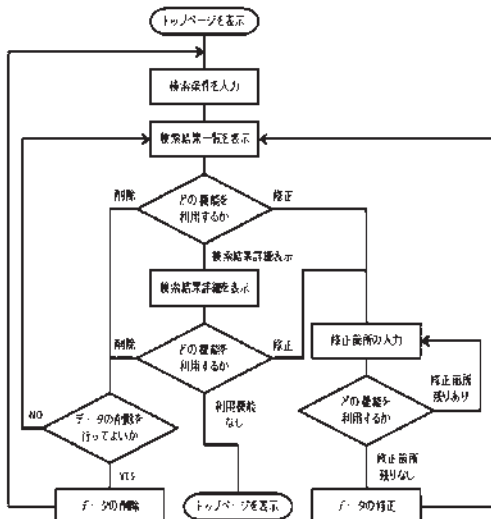


Fig.3 登録データの修正と削除の流れ

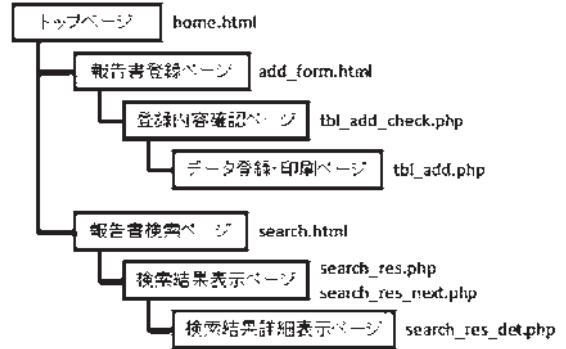


Fig.4 画面構成図 1

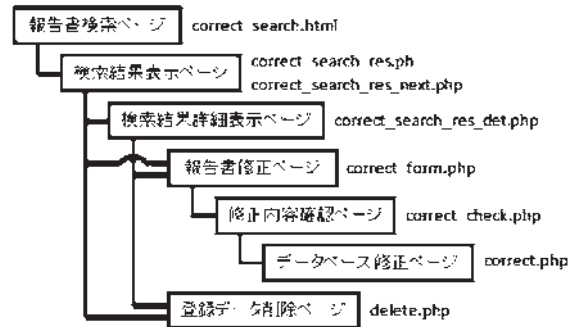


Fig.5 画面構成図 2

4.3 各プログラムの説明

トップページ (home.html)

登録ページと検索ページに移動するための、目次のページである。

就職活動報告書管理システム

- ・活動報告書登録 活動報告書登録ページへ
[活動報告書登録フォームへ](#)
- ・活動報告書検索 活動報告書検索ページへ
[活動報告書検索フォームへ](#)

Fig.6 トップページ

報告書登録ページ (add_form.html)

活動報告書をデータベースに登録するために各項目を入力するためのフォームである。

Fig.7 報告書登録ページ

検索結果詳細表示ページ

(correct_search_res_det.php)

登録データの詳細を表示するためのページである。ユーザー用の検索結果表示ページと同様であるが、データの削除や修正を行うためのリンクをページ下部に追加している。

報告書修正ページ (correct_form.php)

登録されている報告書を修正するためのページである。元のデータからの修正箇所をテキスト入力やリストボックスより選択するようになっている。

Fig.13 報告書修正ページ

修正内容確認ページ (correct_check.php)

修正箇所の確認を行うためのページである。

データベース修正プログラム (correct.php)

修正内容をデータベースに反映させるためのプログラムである。修正完了後の内容を確認するために登録データ詳細ページ、もしくは他のデータの管理のために検索ページに移動することができる。

登録データ削除プログラム (delete.php)

登録データの削除を行うためのプログラムである。削除を行う前に警告を出し、確認を行う。削除完了後は検索ページに移動できる。

4.4 操作手順

ここでは、活動報告書の登録や検索・閲覧、登録データの削除・修正の操作手順を説明する。

4.4.1 活動報告書の登録と印刷

トップページより報告書登録ページに移動後、データベースに登録する事項をフォームに入力して確認ページにて登録内容の確認を行う。確認終了後、不備がなければサーバにデータを送信しデータベースに登録される。

また、登録を行うと同時にその内容をもとに、印刷時

に A4 用紙 1 枚に収まるようになっている就職活動報告書の印刷用ページを別ページで開く。

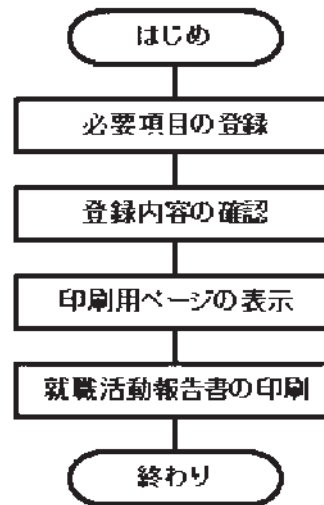


Fig.14 登録・印刷の手順

4.4.2 活動報告書の検索・閲覧

トップページより報告書検索ページに移動後、検索フォームに検索条件を入力し、条件に一致したデータを一覧表で表示する。なお、条件を設定しなかった場合は全件検索を行う。

一覧表には 1 ページ当たり 20 件まで表示し、検索結果が 20 件以上ある場合は、2 ページ目以降へ移動でき、20 件ごとに表示する。

また、一覧表より詳細ボタンをクリックすることで詳細な情報を見ることができる。詳細な内容は別ウィンドウで開き、複数と比較できる。また、このページは印刷画面も兼ねていて、印刷時に A4 用紙 1 枚に収まるようになっている。

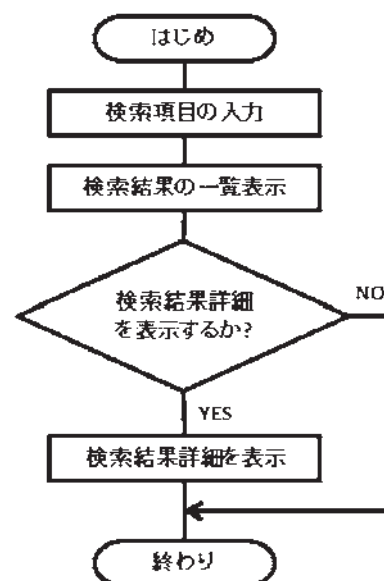


Fig.15 検索・閲覧の手順

4.4.3 登録データの修正・削除

管理者用のトップページより検索項目を入力し、検索条件に一致した登録データの一覧表を表示する。

一覧表には、修正・削除のボタンがあり、そのボタンよりデータの修正ページへの移動および削除をすることができる。また、登録データの詳細表示ページにも修正・削除ボタンを設置し、詳細を確認後に修正・削除が可能である。

データの修正は、修正ページから必要な部分を変更するようになっている。修正後、ページ下部にある修正内容確認ボタンを押すことにより修正内容確認ページに移動し、変更箇所を確認ができる。変更箇所不備がない場合、更新ボタンを押すことでデータの修正は完了する。

データの削除は、削除したいデータの削除ボタンを押すことを行うことができる。このとき、警告メッセージを表示させ、削除の確認を行う。警告メッセージのOKボタンを押すと直ちに該当データの削除を行う。

Fig.16 に登録データ修正の手順、Fig.17 に登録データ削除の手順を示す。

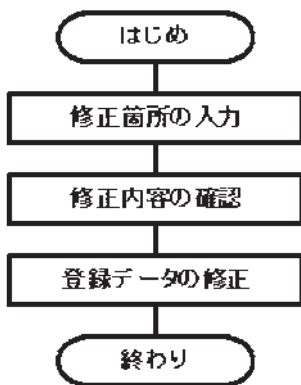


Fig.16 登録データ修正の手順

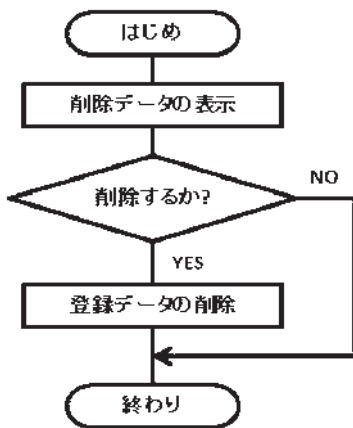


Fig.17 登録データ削除の手順

6. まとめ

就職活動報告書を報告書登録サーバ内のデータベースに格納し、そこにあるデータを、Web ブラウザを用いて検索・閲覧、および修正・削除を行うシステムを開発した。

Web ブラウザから検索・閲覧ができるために、学内ネットワークを使用している利用者・管理者は特別なアプリケーションソフトを必要とせずにシステムを使用することができる。また、プログラムはHTML と PHP で開発したため、各部の修正や追加を行う際も容易である。本システムの開発にあたっては、キャリアセンター職員とのヒアリングによりその要望も取り入れたことによって、よりシステムとして使いやすいものを開発することができた。

また、試験運用前の5名による入力テスト、および同時登録時の挙動に関するテストを行った結果、特に目立った不具合もなく、同時登録を行った際の挙動も問題がないことが確認された。

今後の課題としては、運用時と同じ状況での運用テストを行い、運用した際の不具合や使用者からの要望などを集め、それを基により完成度を高めることである。また、本システムは、企業からの求人票管理システムと連携してその企業に対する過去の就職活動報告書を参照できるようにすることも可能であり、拡張性についても検討の余地がある。また、紙媒体として保存されている過去の報告書が電子化されれば、よりシステムとしての有効性が高まり、その積極的活用が期待できる。

参考文献

- 1) 田中ナルミ、阿部忠光：標準 MySQL 改定版、ソフトバンクパブリッシング株式会社 (2005)
- 2) 株式会社オフィスエム：10日でおぼえる PHP 入門教室、株式会社翔泳社 (2003)
- 3) 西沢直木：PHP による Web アプリケーションスーパーサンプル 第2版、ソフトバンククリエイティブ株式会社 (2006)
- 4) WINGS プロジェクト：基礎 PHP、株式会社インプレス (2004)
- 5) 佐藤和人 / できるシリーズ編集部：できる大辞典 HTML&CSS、株式会社インプレスジャパン (2007)

電気冷蔵庫の環境特性改善に関する LCA 検証

中西悠弥*, 矢野正孝**

(2010年9月30日受理)

LCA Verification Concerning Environmental Characteristics Improvement of Electric Refrigerator

Yuya Nakanisi*, Masataka Yano**

(Received September 30, 2010)

Abstract

Environmental impact of refrigerator since 1990 (Base period of Kyoto Protocol) was inspected based on LCA methodology. Environmental impact for “Ozone depletion” was reduced to nearly zero, and that for “Global warming” was reduced to 11% due to the application of new technologies and recycling systems. Those are the “Change of refrigerant to the non-CFCs gas”, “Development of energy-saving technology”, and enforcement of “Electric household appliance recycling law”.

キーワード：LCA, 電気冷蔵庫, オゾン層破壊, 地球温暖化, 経済的価値

Keywords : Life Cycle Assessment, Electric Refrigerator, Ozone Depletion, Global Warming, Economical Value

1. はじめに

地球温暖化防止は世界各国にとって喫緊の課題である。しかし、温暖化ガスの排出量低減は経済発展と相反する側面を持つため、遅々として成果が上がっていないのが現状である。1992年開催の地球サミットで採択された「気候変動枠組み条件」では、温室効果ガスの削減、安定化を目的として1994年に発効、現在我が国を含む191ヶ国および欧州共同体が締結している。(2009年7月現在)

気候変動枠組み条約の目的を達成するため、第3回締結国会議(COP3)で採択された京都議定書では、先進国に対して温室効果ガスを1990年比で、2008～2012年までの5年間に一定数値(日本6%、米国7%(離脱)、EU8%)の削減を義務付けている。

我が国は、対1990年比6%の温室効果ガス削減を義務付けられているものの、2007年実績では逆に9%増となっており、原因の究明と対策の実行が必要とされる。¹⁾

CO₂排出量の増加率を部門別に分析すると、家庭部門41.2%、業務その他部門(事務所、学校、ホテル等)43.8%と民生に関わる部門が最も増加していることが分かる。

2007年度の家庭部門(自動車は含まない)におけるCO₂排出量を見ると、電力の使用に伴うCO₂排出が全体の65.7%を占めており、電力消費量は基準年度より58.0%の増加となっている。(Fig.1-1)

家庭における機器毎の電力消費量割合は、Fig.1-2のように示されており¹⁾、照明、冷蔵庫、エアコン、テレビにおける電気使用比率が高い。従って、これら電気機器の環境特性が1990年頃に比べてどの様に変化しているのか、定量的検証が必要である。

一方家電業界では、家庭用電気機器に対して種々の省エネ技術を開発実施したとしてエコ家電を宣伝し、政府も環境対策の一環としてエコポイント制度を設けて買替えを推奨するなど、社会動向から見ると家庭部門のCO₂排出量はむしろ減少に転じていると考えられるなど、統計実績と宣伝内容に相当な乖離がある。

* 愛知工科大学大学院工学研究科 博士前期課程 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Graduate School, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori 443-0047

** 愛知工科大学工学部、〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, Gamagori 443-0047

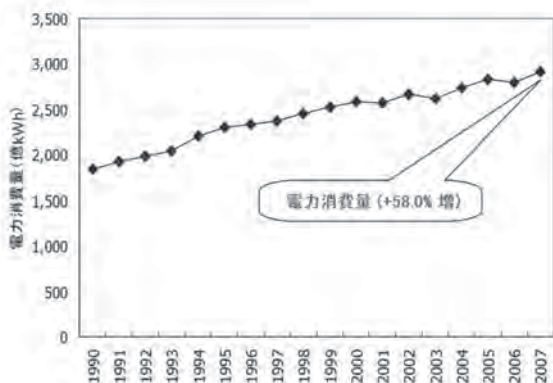


Fig.1-1 家庭部門における電力消費量の推移

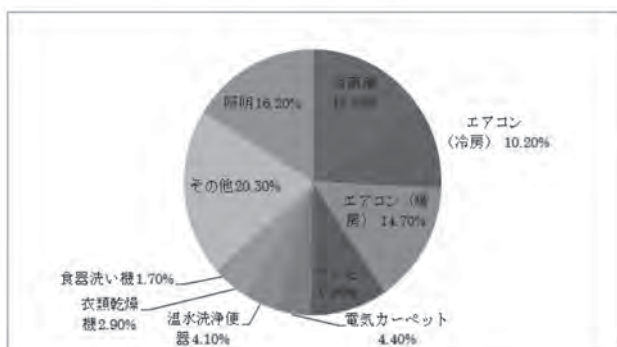


Fig.1-2 家庭における機器毎の電気使用量割合

このような背景のもとで本研究では、家電の代表製品として、常時稼働し家庭部門での CO₂ 排出比率でも大きな値を有す電気冷蔵庫について、LCA 手法により 1990 年以降の環境負荷トレンドを明確化にし、環境負荷改善経緯を検証することとした。

電気冷蔵庫の電力消費量に関しては、メーカーのカタログ値と、消費者団体による実績値で 2 ~ 4 倍程度の大きな乖離があるとの指摘があり²⁾、JIS 規格での電力消費測定法が過去 3 回に亘って改訂された経緯もある。従って、本研究では過去のカタログデータを現在の JIS 測定法に基づくよう補正し、また 2001 年以降施行された家電リサイクル法への対応結果も LCA に反映させることにした。

冷蔵庫の LCA は、1994 年に日本電機工業会 (JEMA) で調査・整備した結果を元にした報告書 (NEDO 1995)³⁾ や、1999 年に同じく JEMA により実施されたデータ (LCA 日本フォーラム DB2004)⁴⁾ を使用したケーススタディなどがある。

しかし、

- 1) 同一測定条件での電力消費データでないため、冷蔵庫の省エネ特性評価ができない
 - 2) 素材リサイクルの評価が含まれていない
 - 3) 最新のノンフロン冷蔵庫の評価がなされていない
- など、冷蔵庫の省エネ技術発展に伴う環境負荷低減ト

レンドを評価するには適切な知見とはなっていない。

本研究ではこれら不明部分に新たな検討を加え、消費者の立場での環境負荷改善評価を行い、併せてこれによる経済効果を、消費者の買い替え視点、および排出量取引の視点から評価することにした。

2. 電気冷蔵庫における、省エネ技術実装経緯と省エネ効果

2-1 省エネ技術実装経緯

1990 年以降、日本の電気冷蔵庫における環境対応技術は、冷却技術、断熱技術、制御技術の 3 つの基本要素技術に関する改善の積み重ねで実施されてきた。

Table2-1 に、冷蔵庫において採用された主要な省エネルギー技術を、さらに Table2-2 には、主として冷凍冷蔵庫における主要な省エネルギー技術の、消費電力削減への寄与度 (従来機比) を示す。⁵⁾

冷凍冷蔵庫の省エネには多くの技術が採用されてきたが、特にインバータ制御、真空断熱材の採用が近年の省エネに大きく寄与している。以下にこれらの技術の概要を示す。

インバータ制御⁶⁾

圧縮機駆動用のモータを、従来の交流誘導モータから回転数可変の直流ブラシレスモータとすることによりモータ効率の向上を図っている。

インバータ制御はモータを回す電源の周波数を可変にすることで回転速度を広範囲にかつスムーズにコントロールして冷却能力を保つため、低消費電力と静粛性、さらにきめ細かな温度調整が可能となる。

真空断熱材⁷⁾

真空断熱材は、繊維系芯材 (ガラス繊維) を、外被材 (プラスチック・金属箔ラミネートフィルム) でパッキング

Table2-1 冷蔵庫で採用された主な省エネ技術

	改善項目	具体的項目
[入力低減]	1) コンプレッサのエネルギーロス改善	・モータ効率、体積効率、機械効率向上、低粘度冷凍機油の採用
	2) ヒーターの廃止・低入力化	・凝縮機・高圧パイプの排熱利用 ・冷凍・冷気の適正分配 ・電子制御化 (感温制御)
	3) 制御機器の入力低減	・要素部品の効率向上と通電時間短縮
	4) モータ効率の改善	・ランニングコンデンサの採用
[効率の向上]	1) 冷凍サイクルの効率化	・熱交換効率の改善 ・冷媒の流路損失の改善
	2) 冷房サイクルの効率制御	・停止中の冷蔵制御
	3) キャンベットの断熱材向上	・高効率ウレタンフォーム採用 ・パッキングのシール特性向上 ・凝縮機と断熱壁の適正配置 ・開口部隙間の減少

Table2-2 冷凍冷蔵庫における主要な省エネ技術の消費電力削減への寄与度（従来機比）

省エネルギー技術	寄与度(%)
インバータ制御	3~10
ファンモーターのDC化	1~2
熱交換率の効率アップ	0~1
冷気風路の最適化	0~1
専用冷気機の採用	2~5
扉パッキンの改良	1~2
断熱材の性能アップ	0~10
真空断熱材の採用	3~10

し、内部圧力を真空度 1 ~ 10Pa へ減圧することにより、気体の熱伝導を低減させた厚み 4 ~ 15mm の断熱デバイスである。中でも P 社製の最新真空断熱材 (U-Vacua) は世界最高水準の熱電導率 0.0012W/mK(24) を達成した高性能真空断熱材で、従来の U-Vacua(Ver.I) に比べ 2.1 倍性能向上を達成しており、グラスウールの約 38 倍、硬質ウレタンフォームの約 20 倍の断熱性能を有している。

冷媒・断熱材発泡材

一方、冷媒と断熱材に使用される発泡剤は、オゾン層保護、温暖化防止のための法規制により、当初の特定フロンから代替フロン、ノンフロンと転換され、冷却特性、断熱特性が悪化し増エネ要因となった。

しかし、上記に代表されるような省エネ技術の適用により増エネ要因は相殺解消されてきた。

2-2 電力消費量の推移

本研究では、我が国で使用されてきた電気冷蔵庫の平均的容量として 351 ~ 400L の冷凍冷蔵庫を検証対象とした。

元データとして 1997 ~ 2008 年における 351 ~ 400L 冷凍冷蔵庫の年間電力消費量カタログ値 (省エネセンター)⁸⁾、および 1997 年以前の冷蔵庫、冷凍庫、冷凍冷蔵庫の 1L 当たり年間電力消費量を統計値を用いた。⁵⁾

これらを元に、1990 年以降における年間電力消費量の推移を示すと Fig.2-1 のようになる。同図から分かるように、公知データでは 2005 ~ 2006 年、1998 ~ 1999 年、1992 ~ 1993 年にかけて電力消費量は前年を上回っている。これは、JIS の消費電力測定法が家庭での冷蔵庫使用実態に合っていないとの消費者団体からの指摘等で、Table2-3 のように測定法が大幅に改訂された結果であると解釈してよい。

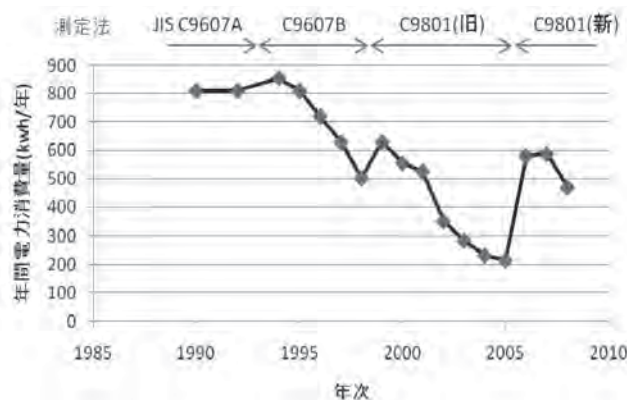


Fig.2-1 電力消費量の推移 (351 ~ 400L 冷凍冷蔵庫)

Table2-3 冷蔵庫の電力消費電力測定法の変遷

時期(年)	JIS 規格	周囲温度	周囲湿度	扉の開閉	設定温度	壁間距離
2006~	JIS C9801(新)	30°C(180 日) 15°C(185 日)	-70±5% +55±5%	冷蔵室 35 回/日 冷凍室 8 回/日	→<4°C →-18°C	5cm
2005 ~ 1999	JIS C9801	25°C	70±5%	冷蔵室 25 回/日 冷凍室 8 回/日	→<5°C →-18°C	30cm
1998 ~ 1993	JIS C9607B	25°C	45~85%	開閉なし	→<5°C →<-18°C	30cm
~1992	JIS C9607A	30°C(100 日) 15°C(265 日)	75±5%	冷蔵室 50 回/日 冷凍室 15 回/日	→3±0.5°C →-18±0.5°C	5cm

3. 研究目的および研究方法

本研究の目的は以下の 2 点とした。

- 1) 電気冷蔵庫の環境負荷特性が、京都議定書基準値年である 1990 年に比較して、どのような改善経過をたどっているのかを、定量的に評価する。
- 2) 環境負荷低減結果がもたらす経済効果について考察する。

1990 年以降、電気冷蔵庫の生ずるライフサイクル環境負荷には、冷媒・断熱材として使われたフロンに起因するオゾン層破壊問題、フロンおよび電力消費に起因する地球温暖化問題、および大量廃棄から生ずる産業廃棄物問題があった。これらの問題を解決するために、種々の法改正、および技術革新が積み重ねられたが、本研究では、この問題を大きく 4 つのフェーズ (Table4-1) に分類して LCA を実施することとした。

Table4-1 LCA 検証対象とした電気冷蔵庫製造使用時期

	フェーズ 1 (1990 年)	フェーズ 2 (1995 年以降)	フェーズ 3 (2001 年以降)	フェーズ 4 (2008 年)
法関連の動向	京都議定書基準年	特定フロン全廃	家電リサイクル法施行	
冷媒・発泡剤 (回収率)	特定フロン(0%)	代替フロン(0%)	代替フロン(32%)	ノンフロン(0%)
廃棄条件	埋立て	埋立て	リサイクル(50%)	リサイクル(70%)

研究に用いたデータは、公的機関発表の緒資料^{3)~5), 8)}より抽出した。また、LCA 計算には(独)産業技術総合研究所が共同開発した LCA ソフトウェア「JEMAI-LCA Pro」⁸⁾を使用した。本ソフトウェアは、LCA に関する国際規格「ISO14040 シリーズ」に準拠し、バックグラウンドデータとして約 500 項目を、また環境影響評価手法として「日本版被害算定型環境影響評価手法 (LIME)」を取り入れている。

4. LCA 対象とする電気冷蔵庫の諸元の設定

4-1 対象時期と 4 フェーズの設定

LCA 対象とした時期は、冷蔵庫に関連する環境法が、国際協定ないし国内法として制定された年とし、直近は 2008 年を対象とした。(Table4-1)

4-2 調査採用したベースデータ

電気冷蔵庫に関して、過去公開されている以下の資料、ネット情報をベースデータとして採用した。

電気冷蔵庫の容量と消費電力量に関する年次データ

1997 ~ 2008 年：「家電製品の省エネ性能カタログ」(財)省エネルギーセンター⁸⁾

1990 ~ 1996 年：「総合エネルギー調査会省エネルギー基準部会 電気冷蔵庫判断基準小委員会取りまとめ」通産省機械情報産業局⁵⁾

電気冷蔵庫の素材構成

フェーズ 1 ~ 3 冷凍冷蔵庫：「エネルギー使用合理化手法国際協力調査, 平成 7 年 3 月」(新エネルギー・産業技術総合開発機構, 委託先(社)産業環境管理協会)³⁾

フェーズ 4 冷凍冷蔵庫：「冷蔵庫：環境適合製品リスト・データシート, 冷蔵庫の素材構成」(H 社)¹⁰⁾

4-3 対象機種と容量

近年の統計によれば、一般家庭で使用される冷蔵庫の容量は次式で推定されている。¹¹⁾

$$\text{冷蔵庫の容量} = 70L \times n + 100L + 70L \quad \dots \dots (4-1)$$

ここで、70L：1 人分の容量，n：家族人数，

100L：情備品容量，70L：予備スペース

平成 17 年統計¹²⁾によれば、日本全国の 1 所帯当たり人数は 2.58 人で、これを当てはめると内容積の目安は 350.6L，1 所帯 3 人では 380L が必要容量の目安となる。また、この範囲の冷蔵庫は大型冷凍冷蔵庫として仕分けられる製品が殆どである。LCA では機能単位を設定する必要があり、ここでは内容積を 351 ~ 400L(平均をとり、以降 375L 冷凍冷蔵庫と記述)，寿命を 12 年の冷凍冷蔵庫と設定して以下の計算を進めた。

4-4 材料構成と重量

2003 ~ 2004 年に発売された 300 ~ 450L 容量冷凍冷蔵庫の容量と重量および素材構成データを元に、定格容量と本体重量，鉄とプラスチックの重量比の関係を Fig.4-1, Fig.4-2 のように示す。他の金属素材，包装材料を含めて回帰式とこれに基づき算定した 375 L 冷蔵庫の算定重量を Table4-2 に示した。

4-5 電力消費量の設定

JIS に定められた冷蔵庫の消費電力測定法は、Table2-5 に示されるように、1993 年、1999 年、2006 年の 3 度にわたって改訂されている。変更内容は、周囲温度，扉の開閉頻度，設定温度などが、消費者の使用実態に近い条件に変更されている。

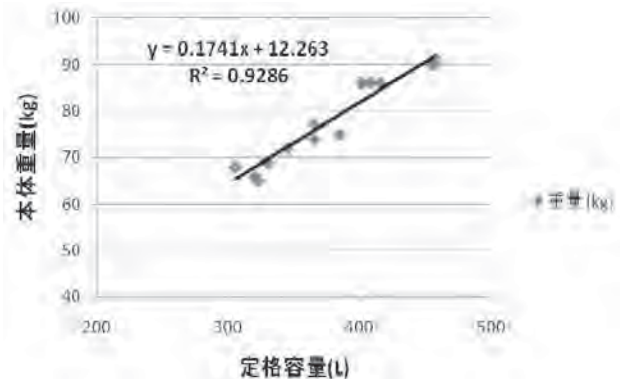


Fig.4-1 定格容量と本体重量の関係

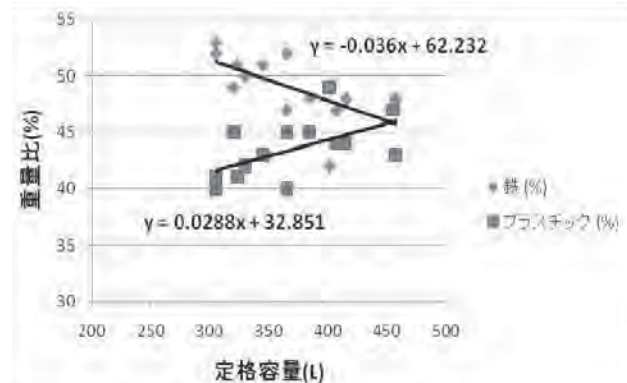


Fig.4-2 鉄, プラスチックの重量比

Table4-2 375L 冷蔵庫の算定重量

	算定式	375L 冷蔵庫
本体重量	$y = 0.174x + 12.263(\text{kg})$	77.6(kg)
鉄	$y = -0.036x + 62.232(\%)$	48.7(\%)
プラスチック	$y = 0.0288x + 32.851(\%)$	43.7(\%)
銅	3.0(\%)	3.0(\%)
アルミニウム	1.0(\%)	1.0(\%)
包装材料重量	$y = 0.0068x + 3.1226(\text{kg})$	5.7(kg)
段ボール	$y = 0.0091x + 87.055(\%)$	90.5(\%)
プラスチック	$y = -0.0041x + 7.8556(\%)$	6.3(\%)

y：重量
x：定格容量

カタログから、同一機種種の測定法変更前後における電力消費量を比較すると Table4-3 のようになる。

すなわち、2006 年の JIS C9801 から JIS C9801(新)への変更での新旧比平均は 2.83, 1999 年の JIS C9607B から C9801 への変更では 1.42, 1993 年の JIS C9607A から C9607B への変更では 1.4((社)日本電機工業会の推定値)を設定して現状値から順次補正を加えた。375L 冷凍冷蔵庫の年間電気消費量の経年変化を, Fig.4-6 にを图示した。

これによると、1994 年の特定フロンから代替への変更に伴う若干の電力消費量増が認められるものの、以降は省エネ技術の開発実装により着実に省エネルギー化が進んできている。

4-6 リサイクル(高度中間処理)におけるエネルギー消費量と素材回収量

一般家庭から排出される廃家電は年間約 60 万 t に上り、そのほとんどが埋立て処分されてきたことから、資源の有効利用と廃棄物減量のため同法が制定された。2001 年に施行された家電リサイクル法によって再商品化率は、重量比でテレビ 55%, エアコン 60%, 冷蔵庫と洗濯機 50% とされたが、冷蔵庫・冷凍庫の再商品化率実績は初年度 59% から着実に上昇し、2007 年度には 73% に達している。¹³⁾

家電リサイクル法施行前のフェーズ 1, 2 においては、基本的に減容化処理ののち埋立て廃棄を行っていたが、同法律施行後は冷媒、発泡剤に使われたフロンの回収破壊および、素材のリサイクルが義務付けられた。従っ

Table4-3 測定法の更新による電力消費量の変化

メーカー	機種	電力量(kwh/年)		新旧比
		旧'05冬	新'06夏	
松下電器産業	NR-C375MS	210	490	2.33
松下電器産業	NR-E384U	180	540	3.00
シャープ	SJ-PV37K	180	570	3.17
日立	R-S37VMV	240	590	2.46
日立	R-S40VPAM	210	620	2.95
日立	R-SF40VPAM	210	640	3.05
平均				2.83

1999年: JIS C9607B→C9801

メーカー	機種	電力量(kwh/年)		新旧比
		旧'98/4月	新'99/4月	
日立製作所	R-38MVP2	384	670	1.74
三洋電機	SR-38VP	405	740	1.81
東芝	GR-M37K	432	730	1.69
松下電器産業	NR-C37T2	528	680	1.29
松下電器産業	NR-CE40S2	552	760	1.38
東芝	GR-M40T	576	650	1.16
日立製作所	R-37V2	588	660	1.12
日立製作所	R-L36X6	645	720	1.11
平均				1.42

1993年: JIS C9607A→C9607B

ISOに準じた測定法に変換。A法はB法の1.4倍の電力消費量ありと推定(社)日本電機工業会)
--

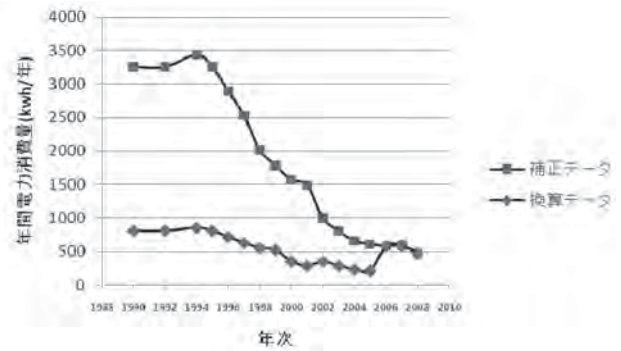


Fig.4-3 電力消費量の推移 (375L 冷凍冷蔵庫)

て、フェーズ 3 では冷蔵庫のリサイクルを法定値 50% に、フロン回収率を 2006 年実績値の 32% に設定した(環境省国内ニュース, 2006.11.24)¹³⁾。さらにフェーズ 4 では、ノンフロンガスを使用しているため放散による環境への影響はほぼ無視できるレベルであり、法的にも回収義務はないため回収率はゼロと設定した。また、素材のリサイクル率は 70% 強まで上がってきており、法改正後は 70% へ改訂の見通しがあるためこの数値設定で計算を行った。各素材別リサイクル率は、LCA 日本フォーラム DB2004 から編集された「LCA 概論」に示される数値を適用した。¹⁷⁾

5. 電気冷蔵庫環境負荷の LCA 計算内容と結果

5-1 調査範囲の設定

(1) 検証対象とする製品システムとシステム境界、および 4 フェーズの LCI データ

Fig.5-1 に検証対象とした製品システムとシステム境界を示す。また、調査結果に基づき、本研究で想定した 1990 年以降 4 フェーズの冷蔵庫の LCI データを Table5-1 に示す。

(2) 機能と機能単位

4 フェーズの冷蔵庫の環境負荷特性を比較するためには、その機能および機能単位を同一に設定しておく必要がある。冷蔵庫の機能単位は、一定容量の庫内を冷やして低温状態に保つことであり、機能単位は前期調査調査を踏まえて、「定格容量 375L 程度の冷凍冷蔵庫を 12 年間使用する」ものとする。(12 年寿命は平成 9 年度の経済企画庁「消費動向調査」に基づき、NEDO 報告書で設定された値と同一とした。)

(3) 選択した環境影響領域、環境評価の方法

冷蔵庫のライフサイクルでの環境影響を評価する場合、オゾン層破壊、地球温暖化が最も重要なカテゴリーであるが、他に酸性化、富栄養化、光化学オキシダントの生成、廃棄物の発生量についても改善効果を検証した。



Fig.5-1 冷蔵庫の製品システムとシステム境界

Table5-1 想定した4フェーズの冷蔵庫の LCI データ

設定条件	フェーズ1		フェーズ2		フェーズ3		フェーズ4	
	特定フロン全量放散 埋立て (1990年)	代替フロン全量放散 埋立て (1995年)	代替フロン全量放散 埋立て (1995年)	代替フロン全量放散 埋立て (1995年)	代替フロン回収(32%) 素材リサイクル(50%) (2001年以降)	代替フロン回収(32%) 素材リサイクル(50%) (2001年以降)	ノンフロン全量放散 素材リサイクル(75%) (2008年)	ノンフロン全量放散 素材リサイクル(75%) (2008年)
定格内容積(L)	375	375	375	375	375	375	375	375
本体素材量	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%
塗装鋼板	10.09	13	10.4	13.4	10.4	13.4	11.24	14.5
溶融メッキ鋼板	5.82	7.5	5.28	6.8	5.28	6.8	5.7	7.3
電気メッキ鋼板	5.82	7.5	5.28	6.8	5.28	6.8	5.7	7.3
ステンレス鋼板	0.23	0.3	0.54	0.7	0.54	0.7	0.59	0.8
電磁鋼板	2.87	3.7	2.79	3.6	2.79	3.6	3.02	3.9
冷間圧延鋼板	11.95	15.4	12.26	15.8	12.26	15.8	13.25	17.1
小計(鉄および鉄合金)	36.78	47.4	36.63	47.2	36.63	47.2	39.58	51
銅	3.1	4	3.1	4	3.1	4	2.33	3
アルミニウム	0.93	1.2	1.01	1.3	1.01	1.3	0.78	1
ABS	6.13	7.9	5.9	7.6	5.9	7.6	5.51	7.1
PS	8.54	11	8.3	10.7	8.3	10.7	7.75	10
PP	8.3	10.7	8.3	10.7	8.3	10.7	7.75	10
PE	0.39	0.5	0.39	0.5	0.39	0.5	0.36	0.5
PVC	2.17	2.8	2.1	2.7	2.1	2.7	1.96	2.5
PET	0	0	0	0	0	0	0	0
その他熱可塑性樹脂	1.32	1.7	1.32	1.7	1.32	1.7	1.23	1.6
PUR	6.98	9	7.68	9.9	7.68	9.9	7.17	9.2
小計(プラスチック)	33.83	43.6	34.07	43.9	34.07	43.9	31.82	41
ガラス	0.23	0.3	0.23	0.3	0.23	0.3	0	0
その他	1.63	2.1	1.71	2.2	1.71	2.2	3.1	4
冷媒								
特定フロン(CFC-12)	0.23	0.3						
代替フロン(HFC-134a)			0.16	0.2	0.16	0.2		
ノンフロン(R600aイソブタン)							0.05	0.1
断熱材発泡剤								
特定フロン(CFC-11)	0.85	1.1						
代替フロン(HCFC-141b)			0.7	0.9	0.7	0.9		
シクロペンタン							0.8	1
本体合計	77.6	100	77.6	100	77.6	100	77.6	100
包装材								
紙、段ボールなど	5.7	100	5.7	100	5.7	100	5.13	90
プラスチック							0.4	7
木材、その他							0.17	3
包装材合計	5.7		5.7		5.7		5.7	
組立に要するエネルギー								
電力(kWh)	70.8		70.8		70.8		29.9	
天然ガス(kg)	5.46		5.46		5.46			
都市ガス13A(m ³)							1.5	
LPG(kg)							0.01	
軽油(kg)	0.33		0.33		0.33			
重油(kg)	1.87		1.87		1.87		0.97	
素材の輸送シナリオ	20tトラックで毎分200km輸送							
製品の輸送シナリオ	10tトラックで東京~大宮間輸送(往分200km)							
使用段階の電力量(12年間)	38700		38700		17868		5640	
廃棄・リサイクルシナリオ	10tトラックで50km輸送							
産業・中間処理のための輸送	10tトラックで100km輸送							
中間処理~再生工場間の輸送	10tトラックで100km輸送							
シュレッダー電力量(kWh)			1.3		1.3		1.31	
回収される鉄の質量(kg)			35.67		38.54			
回収される銅の質量(kg)			1.13		0.85			
回収されるアルミニウム質量			0.37		0.28			
回収されるプラスチック質量			18.53					
シュレッダー屑(kg)			38.37		19.4			
回収鉄の比率(%)			97.38		97.38			
回収銅の比率(%)			36.42		36.42			
回収アルミニウムの比率(%)			36.45		36.45			
回収プラスチックの比率(%)			58.23		58.23			

ISO では、影響評価は特性化までが必須検討項目とされ正規化、統合化は任意とされているが、本研究では今後の課題での重要影響領域を明らかにするために、正規化までの検討を行った。

5-2 インベントリ分析結果

Table5-2 に、フェーズ1 冷蔵庫のインベントリ分析結果を示す。

果を示す。同表には、消費資源、大気圏排出物、水圏廃棄物、固形廃棄物の重量をライフサイクルにおける製造、使用、処分の各ステージと、ステージ間輸送合計の値として示した。

また主要な資源消費、環境への排出量を Fig.5-2 に示す。

資源消費の主な物は、製造段階における鉄、アルミニウム、使用段階における一般炭、原油である。前2 資源は冷蔵庫本体の主要材料に、後2 資源は電力用一次エネルギーとして消費される。

大気圏排出物は使用段階での電力消費に伴う CO₂ と、

Table5-2 フェーズ1 冷蔵庫のインベントリ分析結果

入出力項目	単位	全体	製造	使用	処分	ステージ間輸送計	
消費資源	Al(資源)	kg	1.64E-01	7.64E-01		1.37E-06	
	Cr(資源)	kg	5.03E-02	7.05E-02			
	Cu(資源)	kg	3.93E-04	3.69E-04		2.83E-07	
	Fe(資源)	kg	2.71E+01	2.71E+01			
	Mn(資源)	kg	1.78E-01	1.78E-01			
	Ni(資源)	kg	3.84E-02	3.84E-02			
	Pb(資源)	kg	7.58E-02	7.58E-02		1.04E-06	
	原油(資源)	kg	3.32E-01	9.71E-04	3.31E-04	1.09E-05	3.82E-08
	Zn(資源)	kg	1.42E-01	1.42E-01		5.78E-08	
	ケイ砂	kg	6.76E-01	6.76E-01		8.45E-08	
	その他鉱類	kg	4.74E-01	4.74E-01			
	トロマイト	kg	1.42E+00	1.42E+00			
	リン酸	kg	3.02E-04	3.02E-04			
	一般炭	kg	3.78E+03	1.99E+01	3.78E+03	1.24E-01	4.33E-04
	空気	kg	3.99E+01	3.99E+01			
	珪石	kg	2.04E-01	2.04E-01			
	鉛石	kg	2.96E-01	2.96E-01			
	黒油(資源)	kg	1.42E+02	4.02E+01	6.99E+02	9.56E-02	2.23E+00
	原料炭	kg	1.91E+01	1.91E+01		3.98E-01	
	砂鉄	kg	2.16E-02	2.16E-02			
	硫酸	kg	5.71E-02	5.71E-02			
	水資源	kg	8.86E-01			8.80E-01	
	水力発電	kg	1.14E+06	4.89E+03	1.14E+06	3.76E+01	1.31E-01
	石灰石	kg	7.98E+00	7.98E+00		6.60E-02	
	膨土水	kg	8.61E-01			8.61E-01	
鉄マンガン	kg	9.34E-03	9.34E-03				
天然ガス	kg	1.17E+03	1.49E+01	1.17E+03	5.97E-02	2.07E-04	
灰石	kg	4.61E-02	4.61E-02				
大気圏排出物	CO2	kg	1.75E+04	2.24E+02	1.72E+04	8.08E+00	7.13E+00
	As	kg	3.15E-04	9.08E-07	3.14E-04	1.04E-08	3.62E-11
	Cl2	kg	2.61E-05	7.51E-08	2.60E-05	8.97E-10	2.99E-12
	CFC-11	kg	8.00E-01			8.00E-01	
	CFC-12	kg	2.30E-01			2.30E-01	
	CH4	kg	3.74E-01	4.69E-03	3.69E-01	8.57E-05	4.25E-08
	C12	kg	2.21E-11	2.20E-11		4.66E-14	
	CO	kg	3.52E+00	3.61E-02	3.44E+00	1.5E-04	2.74E-02
	Cr	kg	5.74E-04	1.68E-05	5.72E-04	1.89E-08	6.59E-11
	Hg	kg	3.81E-04	1.10E-06	3.80E-04	1.26E-08	4.37E-11
	NO2	kg	7.38E-03	9.70E-03	7.47E-03	2.37E-04	1.15E-06
	NH3	kg	6.43E-04	1.86E-06	6.43E-04	2.72E-08	7.41E-11
	NMHC	kg	6.94E-01	2.00E-03	6.92E-01	2.28E-05	7.87E-08
	NOx	kg	1.32E+00	1.17E-01	1.19E+00	1.27E-03	1.19E-04
	NO2(移動)	kg	2.13E+00	4.65E-02	2.08E+00	6.88E-05	6.46E-02
	Pb	kg	1.51E-03	4.35E-05	1.51E-03	4.87E-08	1.72E-10
	PM10(移動)	kg	1.59E+01	3.34E-03	1.49E+01	5.72E-06	6.07E-03
	SO2	kg	6.56E-01	1.50E-01	5.88E-01	3.03E-05	8.42E-03
	SOx	kg	2.75E+00	1.63E-02	2.73E+00	3.20E-03	1.46E-03
	V	kg	1.58E-03	4.50E-05	1.58E-03	5.4E-08	1.79E-10
	Zn	kg	4.56E-03	1.32E-05	4.57E-03	1.57E-07	5.27E-10
	ばいじん	kg	1.57E-01	2.08E-02	1.35E-01	6.78E-04	1.23E-03
	ベンチガス	kg	1.70E-08	1.70E-08			
	排水水素	kg	3.97E-01	7.05E-03	3.78E-01	1.35E-05	1.43E-07
	水圏排出物	As	kg	1.36E-11			1.36E-11
BOD		kg	1.23E-03	1.00E-03			
Cl2		kg	2.04E-12			2.04E-12	
CO2D		kg	5.62E-03			5.62E-03	
Cr		kg	4.08E-11			4.08E-11	
Fe		kg	2.04E-10			2.04E-10	
Hg		kg	1.36E-12			1.36E-12	
Mn		kg	2.04E-10			2.04E-10	
SS		kg	4.99E-03			4.99E-03	
濁水		kg	9.48E+02	9.48E+02		3.92E-03	
固形排出物	がれき類(埋)	kg	4.24E-10			4.24E-10	
	汚泥(埋)	kg	1.33E+02			1.33E+02	
	騒音(埋)	kg	8.85E+00	8.85E+00		5.47E-07	
	底層埋立	kg	8.42E+01	2.06E+01		8.40E+01	
	ほね埋立	kg	2.32E-01	6.78E-04	2.32E-01	7.64E-06	2.67E-05
	土砂(埋)	kg	1.64E+00	1.64E+00			
廃プラスチック	kg	2.13E+00			2.13E+00		
廃液(埋)	kg	2.79E-05	2.79E-05				

処分段階における特定フロンで、地球温暖化には両者が、オゾン層破壊には後者が悪影響を与えるとして問題視された。

水圏排出物としては、製造および処分段階でのBOD、CODがあるが、特に埋立て処分における水質汚濁が問題であった。

これと比較して、省エネ化、ノンフロン化、リサイクル化を実現した直近のフェーズ4冷蔵庫のインベントリ分析結果をフェーズ1と比較して Fig.5-3 に示した。

製造段階の資源消費はほぼ同等であるが、処分段階の鉄資源消費がマイナスとなる。

これは廃棄冷蔵庫の鉄を97.4%リサイクルすることにより、鉄鉱石資源を節約でき、かつ同量の鉄鋼を製造するエネルギーを節約できることによる。

一般炭、原油消費量は、使用時の電力消費量の大幅減により約1/7に激減しており、これに伴って、大気圏排出物のうち、CO₂は1/7程度に減少している。

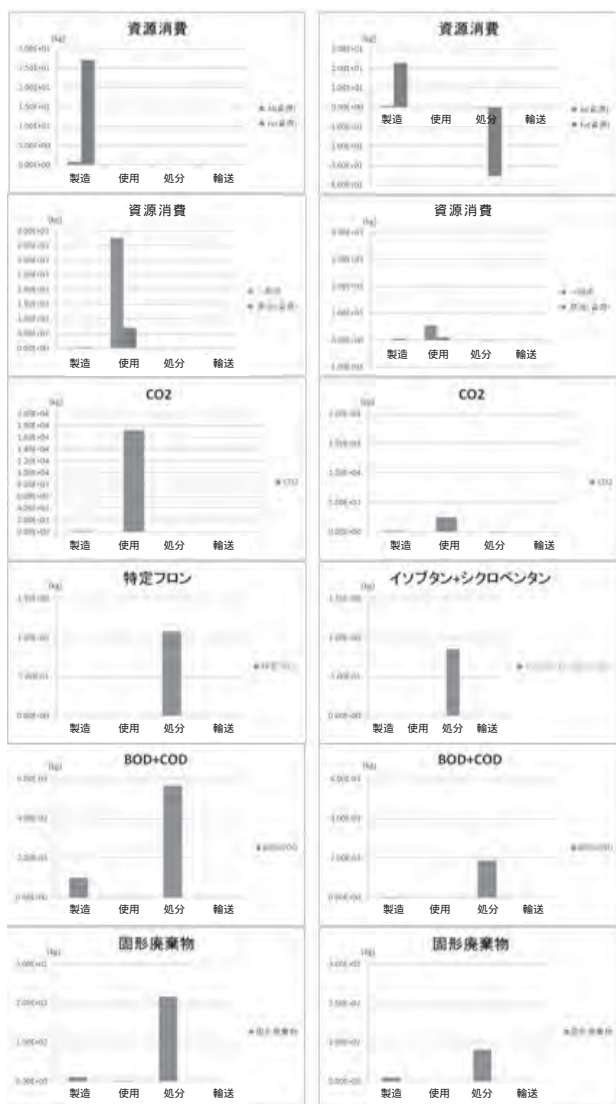


Fig.5-2 フェーズ1のインベントリ分析結果

冷媒および断熱材発泡剤として当初使われたフロンは、炭化水素系ガスに置き換わったためフロンの排出はないが、処分時にイソブタン、シクロペンタンが排出されている。ただし、両ガスとも極微量で、温暖化係数も3と小さく、環境上はほとんど問題とはならない。

さらに、水圏排出物、固形排出物とも処分時に大幅な低減がなされているが、これは家電リサイクルにより、埋立て処分量が軽減されたことによる。

以上の分析により、フェーズ1からフェーズ4に至る間に、環境負荷物質が激減していることが分かるが、主要な環境影響領域について、各フェーズ毎の変化をインパクト評価手法を用いて以下に解析する。

5-3 インパクト評価結果

(1) 特性化結果

特性化では、同一の影響領域に割り振られた複数の環境負荷物質が、当該影響領域に及ぼす寄与度の違いを考慮して、評価対象が及ぼす環境影響量について評価する。

その計算は、先に算出したインベントリデータと特性化係数を用いて次式により行う。

$$CL_i = \sum_i CF_{i,s} \times LCI_s \cdots \cdots (5-1)$$

ただし、

CL_i: カテゴリーインディケータ (影響領域における特性化結果)

CF_{i,s}: 特性化係数 (物質sの環境領域におよぼす寄与度)

LCI_s: インベントリデータ (物質sの環境負荷量)

本式をもとに、例えばフェーズ1における地球温暖化の特性化結果を示すと Table5-3 のようになり、温暖化影響はCO₂の他、CFC-11、CFC-12による影響も大きいことがわかる。

Table5-3 特性化計算例 (フェーズ1の温暖化影響)

物質名	単位	特性化係数	インベントリデータ	カテゴリーインディケータ
		CF _{i,s}	LCI _s	CL _i
CO ₂	kg	1.00E+00	1.75E+04	1.75E+04
CH ₄	kg	2.30E+01	3.74E-01	8.60E+00
N ₂ O	kg	2.96E+02	7.58E-01	2.24E+02
CFC-11	kg	4.60E+03	8.50E-01	3.91E+03
HCFE-141b	kg	7.00E+02		
HFC-134a	kg	1.30E+03		
合計				2.41E+04

同様の計算を、主要な影響領域 (地球温暖化、オゾン層破壊、酸性化、富栄養化、光化学オキシダント、廃棄物) に対して実施し、フェーズ1の結果を1とした相対値を Fig.5-3 に示した。

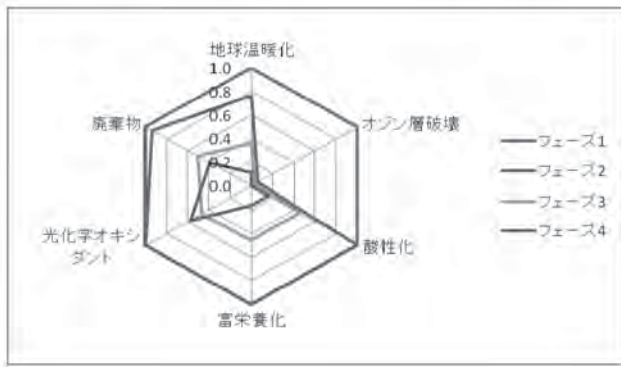


Fig.5-3 フェーズ1～4の特性化結果相対比較

同図より、フェーズ2における代替フロン化によりオゾン層破壊強度は6%、温暖化強度は77%程度まで低減されること、さらにフェーズ3でこれを回収、破壊することにより前者は4%、後者は36%まで低減されていることが分かる。フェーズ3では廃冷蔵庫の50%リサイクル効果もあり、酸性化、富栄養化、光化学オキシダント、廃棄物等も半減されている。

さらにノンフロン化し、リサイクル率を75%に上げたフェーズ4では、オゾン層破壊はゼロ、地球温暖化は11%、酸性化、富栄養化は16%、廃棄物は39%まで低減されている。ただ、ノンフロンガス(NMHC)は光化学オキシダント生成物質であるためその負荷はフェーズ3より若干増加するものの、極微量であるため特に問題とはならない。

冷蔵庫の環境問題として特に強調されてきたオゾン層破壊と地球温暖化への影響について、その改善経緯をさらに検討してみる。

オゾン層破壊

Fig.5-4 にフェーズ1～4のオゾン層破壊ガス排出量を示す。(WMO1998(World Meteorological Organization, 世界気象機構発表の1998年値)に基づく特性化係数ODP(Ozone Depletion Potential)を用いて計算したカテゴリインディケータであるが、これはCFC-11を基準値1と定めており、計算結果はCFC-11等量と同一である。)

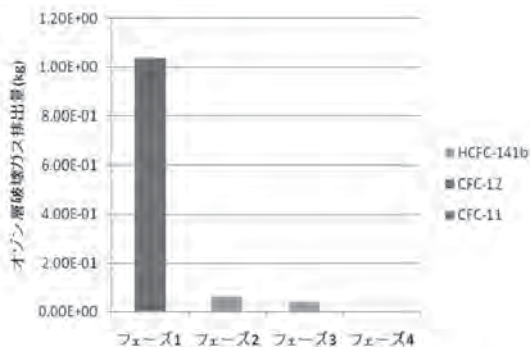


Fig.5-4 フェーズ1～4のオゾン層破壊ガス排出量

オゾン層破壊ガスは、代替フロン(HFC, HCFC)に切り替えたフェーズ2,3で激減するものの、HCFCの影響が残り、オゾン層破壊ガス量はゼロになっていない。フェーズ4でノンフロン(イソブタン,シクロペンタン)に切り替わった時点で初めてオゾン層破壊ガス排出量はゼロとなった。

地球温暖化

Fig.5-5 にフェーズ1～4の地球温暖化ガス排出量を示す(2001年発表のIPCC-100年指数(GWP)に基づき計算)が、フェーズ1から段階を追って着実に減少していることが分かる。

フェーズ1では24.1t/台の温暖化ガス排出量があるが、うち約26%にあたる6.2t/台は特定フロン(CHC-11, CFC-12)に起因している。従って、特定フロンをGWPの小さい代替フロン(HFC-134a, HCFC-141b)に切り替えたフェーズ2、かつ回収破壊を実施したフェーズ3では、フロンによる温暖化影響は大きく減少し、ノンフロンに切り替えたフェーズ4では温暖化影響は実質ゼロとなった。

しかし、温暖化ガス排出量が激減したのは、フェーズ3,4にかけて省エネ技術(特にインバータ制御,真空断熱材)が電力消費量の低減に大きく寄与したためで、フェーズ4での温暖化ガス排出量は2.69t/台と、フェーズ1の11.2%まで激減したことになる。

(2) 正規化結果

正規化によれば、次元の異なる影響領域間での影響度の大小比較を行うことができる。その計算は次式により行う。

$$N_{i} = \frac{C_{i}}{N_{i}} \cdots \cdots (5-1)$$

ただし、

N_{i} : 影響領域*i*の正規化結果

C_{i} : 影響領域*i*特性化結果

N_{i} : 影響領域*i*の規格値(国内における影響領域*i*の総特性化結果)

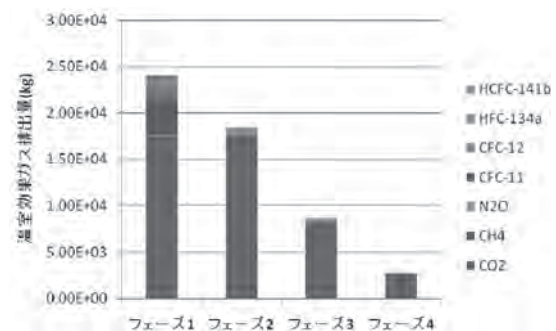


Fig.5-5 フェーズ1～4の温暖化ガス排出量(CO2当量)

規格化地域を日本全体とし、JEMAI-LCA Pro 記載の規格値を基に計算したフェーズ4の正規化結果を Fig.5-6 に示した。

フェーズ1ではオゾン層破壊が突出して大きい環境汚染要因であったが、代替フロンを使用し、かつ回収破壊を義務付けたことにより大幅に改善され、さらにノンフロン化によりほぼ完全に解決された。

この間、省エネ技術の実装化により電力消費も大幅に低減してきたものの、フェーズ4では相対的に地球温暖化、廃棄物が環境汚染要因としてクローズアップされてきている。

従って、冷凍冷蔵庫の今後の環境対応としては、

- 1) さらなる省エネ技術の開発による電力消費量の低減
- 2) リサイクル率（再商品化率）のさらなる向上によるシュレッターダスト埋立て量の低減が課題であることが判明した。

6. 考 察

6-1 最新型ノンフロン冷蔵庫への買い替えによる経済効果

本研究のLCA検証により、冷凍冷蔵庫のライフサイクルにおけるCO₂排出量は、1990年以降89%減と京都議定書目標を大きく凌駕していることが明らかとなった。しかし、この削減効果が顕在化するためには、最新型ノンフロン冷蔵庫の普及が社会全体に及ぶ必要があり、そのためには消費者の立場で買い替えの経済効果が享受されなければならない。

そこで、従来型冷蔵庫を、直近の省エネ型ノンフロン冷蔵庫（フェーズ4冷蔵庫）に買い替えた場合の総費用と償還年数について以下に考察してみた。

2008年発売のフェーズ4冷凍冷蔵庫（ノンフロン、インバータ制御、真空断熱材等を装備、351～400L）4機種¹⁴⁾を参考に買換えによる経済価値を算出した。

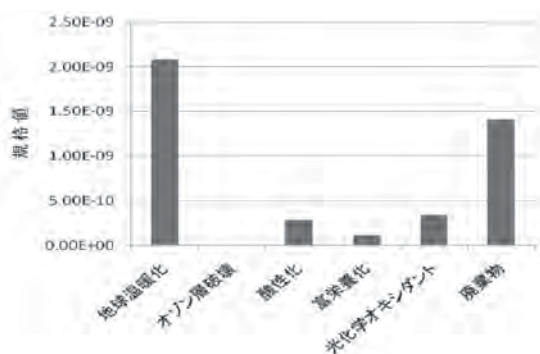


Fig.5-6 フェーズ4の正規化結果

フェーズ1,2および3の従来型冷蔵庫を買い替える場合は、最新冷蔵庫の購入費用（平均111,272円）と、廃冷蔵庫のリサイクル費用（輸送費込みで4,700円）が必要であるが、Fig.6-1に示すように、この初期投資分を電力料金の低減で回収することになる。（電気料金は22円/kwhを使用¹⁵⁾）

同図より、フェーズ1,2冷蔵庫を買い替える場合は約1.9年で、フェーズ3冷蔵庫を買い替える場合は5.2年で償還できることが分かる。従って、未だ十分に冷却機能を果たしている冷蔵庫についても、早期に買い替えを検討する価値がある。

6-2 温室効果ガス排出低減による経済性評価

2007年度統計によれば、日本全国の温暖化ガス排出量は1990年比9.0%増と大幅に超過しており、政府としては国を挙げての削減努力はするにしても、国際市場での排出量取引で削減不足分を賄わなければならない見通しにある。CO₂の排出量取引は欧州市場で先行しているが、日本では2007年末より国際協力銀行と（株）日本経済新聞デジタルメディアが、金融5社（2009年では8社）の協力のもと、円建て価格気配動向情報を「日経・JBIC排出量取引参考気配」として公表を開始している。¹¹⁾

これによると排出量価格は世界の景気動向に大きく影響され、ここ数年間に1000～3800円/t-CO₂の振れ幅を示している。2010年5月以降は1500円/t-CO₂前後の参考気配値となっており、これを基に、温室効果ガス削減量の経済性評価と、削減に対する報奨的意味のあるエコポイントの妥当性について検討してみる。

冷蔵庫のライフサイクルにおける温室効果ガス排出量は1990年頃製造冷蔵庫で24.1t/台であったが、2008年製造ノンフロン冷蔵庫では2.69t/台で、この間の削減量は22.41t/台であり、これにCO₂排出量価格を乗じた値を、排出ガス削減による市場経済効果とみなすことができる。最近の排出量価格約1500円/t-CO₂で計算すると、

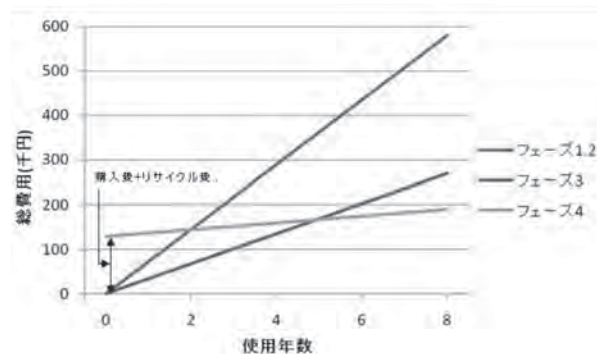


Fig.6-1 従来冷蔵庫継続使用時と、ノンフロン冷蔵庫へ買い替え使用時の総費用比較

1990年頃の冷蔵庫を買換えることにより、冷蔵庫1台当たり約34,000円/台の市場価値が生み出されていることになり、従来型冷蔵庫の買換え促進は社会全体にも大きな経済価値を生むことが分かる。(Fig.6-2)

政府は、京都議定書で規定された6%CO₂削減のうち、1.6%分を京都メカニズム(排出量取引、クリーン開発メカニズム、共同実施)で対処するとしているが、現状ではこの数倍の対応が必要と考えられる。このため各製品毎にLCAを実施し、温暖化ガス削減ポイントを明確化すると共に削減技術の積み上げ努力を重ねることが必要であると考えられる。

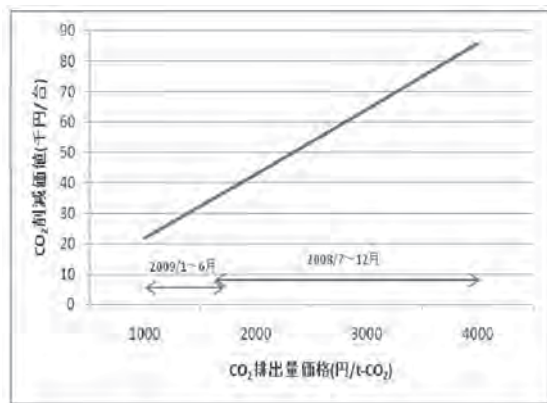


Fig.6-2 冷凍冷蔵庫のCO₂削減による経済効果

7. まとめ

電気冷蔵庫の環境負荷のうち、「オゾン層破壊」に関しては、冷媒・断熱ガスの代替フロンへの切り替え、ガスの回収破壊、ノンフロンガスへの切り替えへとステップを踏み、最新冷蔵庫を使用する限り問題はすべて解決している。

「地球温暖化」に関しては、当初使用電力に起因するCO₂以外に、フロンガスの放散による温暖化への悪影響も重なっていたが、上記のように冷媒・断熱ガスのノンフロン化、および各種省エネ技術の装備により1990年以降89%の温暖化ガス削減に至っている。

これを経済効果で評価すれば、1995年以前製造の冷蔵庫を買替えるとすれば約2年で、2001年頃製造の冷蔵庫では約5年で償還できることが分かった。また、温暖化ガス削減による排出量取引市場における経済価値は、例えば、直近(2009年5月)の日経・JBIC排出量取引参考価格1500円前後で計算すると約34,000円/台となり、温暖化ガス排出権取引上、高い経済価値を生んでいることが判明した。

参考文献

- 1) 環境省：2007年度(平成19年度)温室効果ガス排出量について
<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg/2007gaiyo.pdf>
- 2) 京都 省エネラベル協議会：経済産業省、電気工業に冷蔵庫の年間消費電力量の計測方法についての申し入れを行いました
http://www.syoene-label.org/event/event_005.html
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構、委託先(社)産業環境管理協会「エネルギー使用合理化手法国際協力調査、平成7年3月」
- 4) LCA日本フォーラム：JLCA-LCAデータベース、2004.12
- 5) 通商産業省機械情報産業局、総合エネルギー調査会 省エネルギー基準部会：電気冷蔵庫判断基準小委員会最終とりまとめ
<http://www.eccj.or.jp/toprunner/ref/index.html>
- 6) エアコンなど省エネ、静寂性、きめ細かな温度制御に貢献するインバータ制御用マイコン
http://www.necel.com/magazine/ja/vol_0052/vol_0052_1.html
- 7) Panasonic：省エネ大賞受賞商品 高性能、高機能真空断熱材 U-Vacua | Chip-Vacua | ホームアプライアス社 | Panasonic
http://panasonic.co.jp/ha/eco/eco_h1804.html
- 8) ECCJ省エネルギーセンター / 省エネ性能カタログ 総目次
<http://www.eccj.or.jp/catalog/index.html>
- 9) (社)産業環境管理協会：ライフサイクルアセスメント実施支援ソフトウェア「JEMAI-LCA Pro」
- 10) 日立：冷蔵庫、環境適合製品リスト・データシート
<http://www.hitachi.co.jp/environment/ecoproducts/personal/refrigerator/D7>
- 11) 価格.com：容量で選ぶ冷蔵庫特集
http://kakaku.com/kaden/freezer/article/c_2120_001.html
- 12) 総務省統計局：平成17年国勢調査
<http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/index.htm>
- 13) 環境省：家電リサイクル法施行状況について
<http://www.env.go.jp/recycle/kaden/shiko/index.html>
- 14) 価格.com - 冷蔵庫・冷凍庫の製品一覧
http://kakaku.com/kadenfreezer/ma_0/s1=300-400/
- 15) ECCJ省エネルギーセンター：省エネ効果の算出根拠
<http://www.eccj.or.jp/qanda/household/00.html>
- 16) 総務省：温室効果ガス排出・吸収目録、住民基本台帳に基づく人口・人口動態及び所帯数
- 17) 伊坪徳宏、田原聖隆、成田暢彦：LCA概論、(社)産業環境管理協会、2007年11月、P.238-239

月面探査ローバの検討

中谷一郎*, 片山雄二**, 森 康夫***

(2010年9月30日受理)

A Study on a Lunar Exploration Rover

Ichiro Nakatani*, Yuji Katayama**, Yasuo Mori***

(Received September 30, 2010)

Abstract

Lunar and planetary explorations have been increasingly planned across the world where mobility on the planetary/lunar surface plays a crucial role. In this paper we propose a new type of rover dedicated to the exploration of the central hill of lunar craters. A 100kg class rover for this mission has been designed which is operated semi-autonomously. The harsh conditions such as large temperature range, slippery regolith, steep slope and limited communication link with the operators on the ground have been tackled.

KeyWords : Lunar Exploration, Rover, Semi-autonomous Operation, Manipulator

1. はじめに

近年, 月・惑星・小惑星の探査が数多く計画され人類のフロンティア拡大を目指す活動が活発化している。わが国でも, ひてん(月), のぞみ(火星), はやぶさ(小惑星), かぐや(月), あかつき(金星)などの月・惑星探査計画が次々に実現している。

月・惑星表面の科学探査は, 次のようなステップで進んできた。フライバイによる短時間の観測 周回衛星による詳細なりもトセンシング 着陸船による表面のポイントの観測 ローバによる「面」の観測。

一方, わが国では, ローバによる月・惑星の表面探査はまだ成功しておらず, 月面(米・ソ), 火星(米)などの観測が先行している。内閣官房宇宙開発戦略本部の主導で, 月探査の方針が検討された¹⁾。これによれば, ロボットを中心に探査を行い, 2020年ころを目処に月面の無人観測基地を構築することを提言している。ちょうど南極に観測基地が運用されているように, 月面基地

が当面はロボットにより運用されるようになるのも夢ではない。

2. JAXA 月面ロボットチャレンジ

2.1 コンテスト概要

上述のような背景の下に, 宇宙航空研究開発機構(JAXA)が月面ロボットチャレンジというキャンペーンを2010年2月より開始した²⁾。これは, 宇宙ロボットコミュニティの裾野の拡大と成熟を目的として, 月面ロボット設計コンテストを行うものである。コンテストの募集対象は, 大学・研究所, 企業などに所属し, 月探査の研究・開発に興味をもつ研究者・技術者である。

テーマは以下の3種あり, それぞれの部門別に審査が行われ入賞者はJAXAと研究契約を結び, 試作・デモ走行に進むことになる。(後に, 方針が変わり, デモ走行に代えて, 研究成果発表会を行うこととなった。)

* 愛知工科大学工学部 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho Gamagori-shi 443-0047

** (株)サンリツオートメーション 〒194-0045 東京都町田市南成瀬 4-21-5
Sanritz Automation Co.Ltd 4-2-1 Minami-naruse, Machida-shi, Tokyo 194-0045

*** (株)スマッツ 〒491-0918 愛知県一宮市末広 2-8-19
SMATS Corporation 2-9-19 Suehiro, Ichinomiya-shi 491-0918

- (1) 月クレータの中央丘からの岩石採取作業
- (2) 月の表面へのモジュール埋設作業
- (3) 自由課題（応募者各自が設定）

本稿は、筆者らが、上記のテーマ(1)に応募した際に検討した月面ローバの概要を報告するものである。

2.2 ローバへの要求条件

JAXA ロボットチャレンジコンテストで設定されたローバのミッションは、将来（2025年以降）のJAXAの月探査で想定されるもので概要は以下のとおりである。

- 1) 探査機（母船）が月面のクレータ内に着陸し搭載したローバを月面に降ろす。
- 2) ローバは、母船から離れて、クレータの中にある中央丘に登頂する。
- 3) 中央丘は標高 2000m 底面の半径が 8678m あり、平均の斜度は 25°である。
- 4) 中央丘の頂上付近は半径 100m の平坦な地形で、月の深部物質が露出している。ローバは、頂上付近で岩石を採取する。採取する岩石の大きさは、最大 $5 \times 3.5 \times 2.5$ cm、重量は 100g(地球上換算)
- 5) ローバは麓に降り、母船に搭載する物質分析装置に採取した岩石サンプルを受け渡す。

上記ミッションを遂行する環境条件は以下のとおりである。

- 1) 重力加速度は地球の 1/6
- 2) 高真空 (1×10^{-7} Pa 以下) とする。
- 3) 月面温度 $-20^{\circ} \sim 120^{\circ}$ の範囲で変化。
- 4) 太陽仰角
 ミッション開始時: 20°
 ミッション終了時: 160°
- 5) 月レゴリス（注1）の特性
 内部摩擦角: 46 deg
 かさ密度: 1.58 g/cm^3
 粘着力 0.9 kPa

また、ローバに関する制約条件は以下のとおりである。

- 1) 母船に収納状態で、1m 立方以内、重量 100kg（地球上換算）以内
- 2) 実施期間: 14 日
- 3) 通信
 アップリンク: 1kbps
 ダウンリンク: 100kpbs（常時）

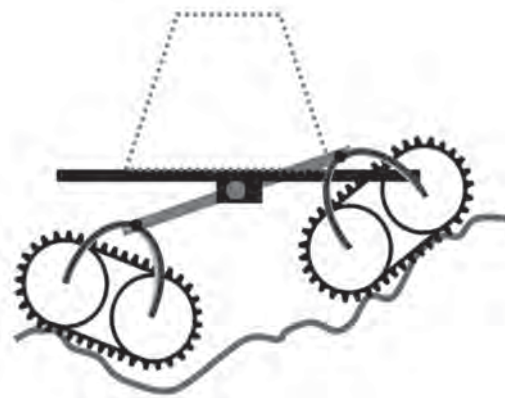


Fig.1 Concept of suspension mechanism

3. ローバの基本設計

3.1 走行系

前・後進タイプの変形ロッカー・ボギー(注2)とクローラ(注3)を組み合わせたセミ・クローラ方式を用いる。Fig.1 にその概念図を示す。NASA のローバは火星表面に適した 6 輪のロッカー・ボギーを用いている。しかし、この方式では、前進を主体に設計されているので、月面クレータの中央丘のような険しい地形を走行するにはスイッチ・バックを繰り返す度に向きを 180° 変える必要があり効率が極めて悪い。

また、月面の急傾斜のレゴリス上を走行するには、NASA 方式では、車輪が地面を掘ることにより沈み込み、容易にスタックする。これに対してわれわれが提案するセミ・クローラ方式では、前・後輪は 2 つの sprocket がペアになっているので履帯を掛けてクローラ方式にすることができる（NASA のロッカー・ボギー方式では、後輪は左右に 1 輪のため、履帯を追加できない！）これにより、急斜面にレゴリスが積もった月面でも接地面積を十分にとることにより沈み込みを防ぐことが可能である。

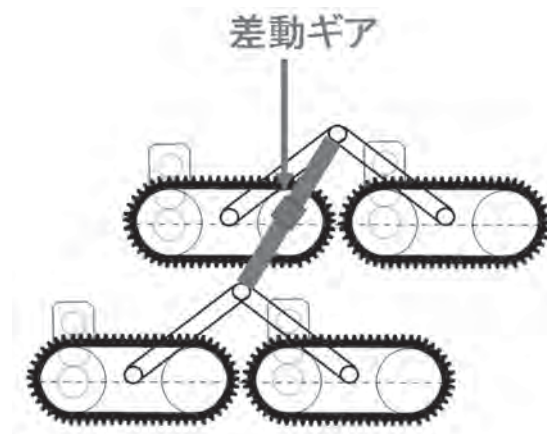


Fig.2 Rocker-bogie suspension system

クローラ方式の欠点である重量増を防ぐため以下のような対応をする。

8つのスプロケットは、FRP製とし軽量・高強度を達成する。

履帯は網状の軽量の樹脂を用いる。

8個のスプロケットのうち、モータで駆動するのは4個のみとし、NASAの6輪駆動に比してモータおよびその駆動系を軽量化する。

Fig.1に示した2個の(前進・後進に対して)対称なボギーを支えるロッカーは左右で、対になっている。その2つのボギーはFig.2に示すように差動ギアで接続され、さらに、その差動機構は、ローバのボディに取り付けられる。これはいわゆるロッカー・ボギー方式に準拠した構成である。

以上の構成の走行系の側面図と上視図をFig.3に示す。履帯は幅を大きくとり設置面積を広くしてレゴリスで滑ったり埋まることを防ぐ設計としている。

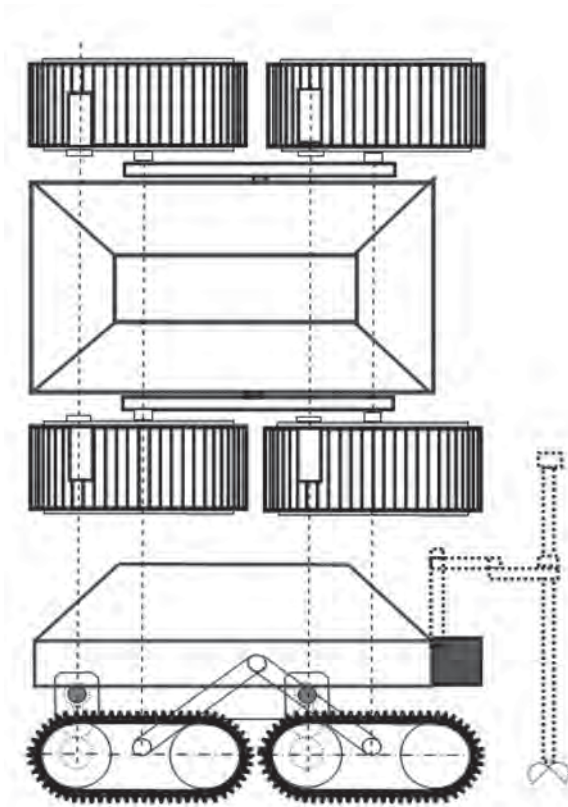


Fig.3 Side view and top view of the rover

3.2 電源系

太陽電池を主電源とし、バックアップとして充電式のリチウムイオン電池を併用する。太陽電池は、 $\pm 30^\circ$ の

緩い精度で太陽方向を追尾することにより、マージンを含んで190Wの電力を供給する。太陽電池パドルの出力電力は次のような前提で求めた。

1m²あたりの太陽エネルギー：1.37kW

太陽電池セルの効率：28% ガリウム・ヒ素 / ガリウム3 接合タイプ

パドルに占めるセルの面積率：71.4% (セル間にOSRを貼る)

パドル面積：1m × 0.8m = 0.8m²

太陽光入射角(最悪値) 30°

以上の積をとって、得られる電力(最悪値)Pは以下のとおりである。

$$P = 1.37 \text{ kW} \times 0.28 \times 0.714 \times 0.8 \times \cos 30^\circ = 190 \text{ W}$$

正常な状態ではローバの全消費電力を太陽電池のみでまかなう。次のような緊急事態には、バッテリー運用を行い、この間にできるだけ速やかに太陽電池モードへの自律的な復帰を行う。

一時的に大きな障害物の日陰に入り、太陽電池パドルに太陽光が当たらなくなったとき

太陽電池パドルの太陽方向追尾制御系が一時的に目標の捕捉に失敗して太陽電池パドルに太陽光が当たらなくなったとき

このような緊急事態に余裕を持って対処するため、バッテリーの容量は2時間の運用を可能とするものとし、360Whとする。

Fig.4に示すように、太陽電池パドルは、太陽方向を追尾する。回転軸はFig.4に示した矢印のように垂直(yaw軸)および水平軸(pitch軸)の2軸である。

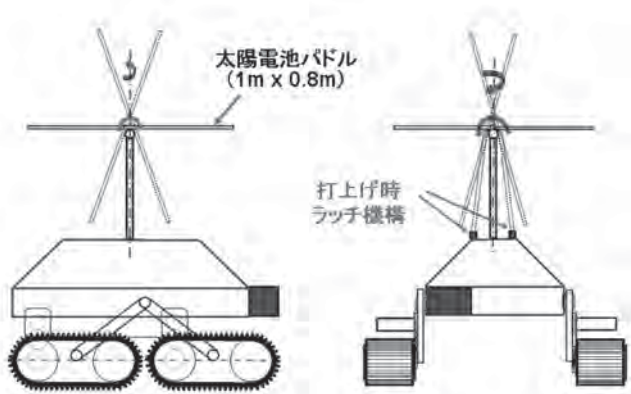


Fig.4 Sun tracking axes for the solar panel

Table1 に、ローバのモード別の消費電力を示す。各モードは次のような運用の違いによる。

- ・ローバが走っている (A1, A2) が静止している (B1 ~ C2) が、
 - ・周囲温度が低く (A2, B2, C2) ヒータをオンにする必要があるか、
 - ・常温・高温で (A1, B1, C1) ヒータをオフにするか、
 - ・マニピュレータを運用している (B1, B2) が、
- などの組み合わせである。最も消費電力が多いのは低温の走行状態 (A2) で、180.9W を必要とする。最悪条件での発生電力 190W は、これをクリアする。

3.3 航法系

航法センサとしては以下の装置を搭載する。

ステレオカメラ (前方と後方に各 1 組)

次の 3 つの役割を果たす。

- 前方監視ステレオカメラは、マニピュレータの運用に際して把持対象付近を視るためのセミ自律方式 (後述) のセンサとして用いる。(マニピュレータ運用中はローバは静止しているので、前方監視は必要がない。)
- 移動中は前 (後) 方監視カメラとして用いる。
- 進行方向の 3D の詳細地図を作成。カバー範囲は、1m ~ 5m。
スキャン型レーザ測距器 LRF (Laser Range Finder)
スキャン型のレーザ測距器を前方ステレオカメラの近傍に搭載し、近距離の 3D の DEM (Digital Elevation Map) を作成する。ステレオカメラに比し

て分解能が高く、近傍の障害物の認識および経路計画に有効である。

姿勢基準ジャイロ

直交 3 軸回りのジャイロ (3 個) とプロセッサを用いてバーチャルな安定化姿勢基準を構成する。主たる目的は、短時間 (5 分間) の姿勢変化の計測である。ローバの揺れが一定の範囲を超え、TV カメラ画像が目標とするランドマークを見失ったときに、速かに目標点を再捕捉することをアシストする。

位置、姿勢基準の要求性能は以下のように緩いため、ジャイロは MEMS の超小型、低電力のものを用いることができる。

姿勢保持精度 (ドリフト量):

3 分間に $\pm 1.5^\circ$ ($\pm 30^\circ$ / 時間)

傾斜計

2 軸 (ピッチ軸およびロール軸) 方向に入力軸を有する加速度計を搭載し、傾斜角を計測する。要求精度は緩く ($\pm 1^\circ$)、MEMS の超小型、低電力のものを用いることができる。本傾斜計の主な目的は次の 2 項である:

- ローバボディーの傾斜を常時モニタし、過度の傾斜を避けるような操縦を行う。
- ジャイロにより、構成されるバーチャルな姿勢基準プラットフォームの 2 軸 (pitch/roll 軸) 回りのドリフトを定期的に (6 分間に 1 回) リセットする。

Table 1 Power consumption for each mode

	モードの概要	走行車輪 駆動系	マニピュレータ	通信系 制御系	ヒーター	消費電力
A1 モード	常 / 高温環境・走行					163.70(W)
A2 モード	低温環境・走行					180.9(W)
B1 モード	常 / 高温環境 マニピュレータ操作					71.5(W)
B2 モード	低温環境 マニピュレータ操作					88.7(W)
C1 モード	常 / 高温環境・待機					33.6(W)
C2 モード	低温環境・待機					50.8(W)

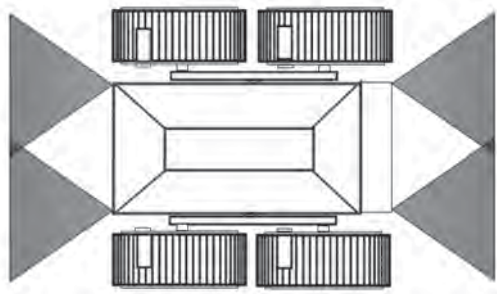


Fig.5 View angle of LRFs for collision avoidance

レーザ衝突防止センサ

障害物に不測の衝突を防ぐ緊急停止センサとして用いる。前方に2個，後方に2個搭載する。最大検出距離は30 cm としレーザ出力は1mW とする Fig.5に視野を示す。

3.4 マニピュレータ系

岩石サンプルを採取するために以下に提案する6自由度のマニピュレータを搭載する。Fig.6に示すように，スカラ型とし，自由度は水平面内の回転2自由度，上下の線形運動1自由度，ハンドの軸回りの回転1自由度の計4自由度に加えてスクープタイプのハンドの開閉1自由度である。重量は7.5 kg，ローバ先端より最大到達距離は400 mm，最大消費電力は35Wである。

スカラタイプを採用する理由は，以下のとおりである。

構造が単純で信頼性が高い。

リンクの移動範囲と搭載機器との干渉の制約が有利。

操作が直観的で，オペレータの負担が軽減される。

上下運動をする軸の上には前方監視用のステレオカメラを搭載する。このカメラはマニピュレータ操作時に把持対象をモニタするためにも用いる。マニピュレータ操作時には，ローバは静止しているので前方監視の必要がないため，このカメラは2つの目的を兼用することができる。

3.5 熱制御系

基本的な設計方針は以下のとおりである (Fig.7 参照)

- (1) 上からは太陽光が直接当たり，下からは，月面からの熱輻射を受ける。したがって，熱の放射面は側面斜め上方に限定する。
- (2) 太陽電池パドルは太陽方向を向くよう2軸回りに制御されるので，面に垂直な方向 ($\pm 30^\circ$) から常時，太陽光を受ける。



Fig.6 SCARA type manipulator

(3) 太陽電池パドルの裏側は MLI (Multi Layered Insulator) で被い，熱輻射は遮断する。高温時の熱放射は，上面の太陽電池セルの間に貼られた OSR (Optical Solar Reflector) による。

(4) 搭載電子機器は，他の系とは熱的に遮断し温度制御は，低温側ではヒーターにより，高温側では放熱面の OSR とサーマルルーバによる。

一方，放熱面と搭載電子機器の間の熱伝導はヒートパイプによるものとし，外部が低温状態のフェーズでは，パッシブに熱伝導が遮断される方式とする。

(5) バッテリーは特に MLI で外部と熱的に遮断し低温時はヒーターで保温する。

4. 運用システム

4.1 ローバ走行制御

ローバの走行制御は，地上局からの遠隔制御と自律制御とを複合したセミ自律制御を提案する。

地上局オペレータはローバから送られてくるステレオカメラ映像とステレオ画像認識結果および LRF による障害物のマップ情報から走行経路を決める。

さらに，その経路の中間目標地点座標をオペレータが指示する。中間目標地点は現在地から直線的に到達可能な地点を指定する。

オペレータからの指示を受けて，ローバは，次の3種の制御を自律的に行う。

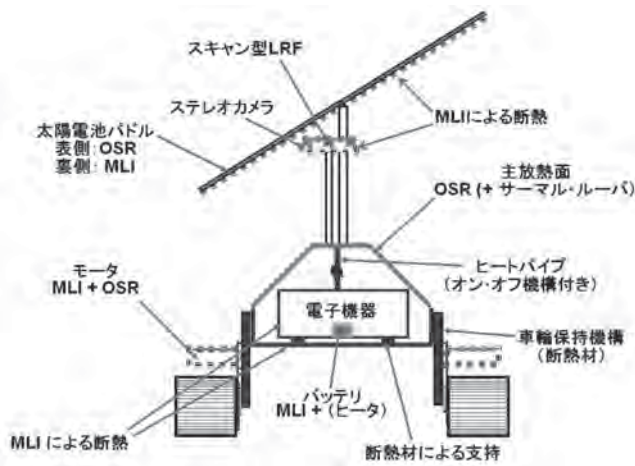


Fig.7 Concept for the thermal control system

(1) 誘導制御

ステレオ画像認識およびLRFによって得られたランドマーク座標とオペレータが指示した中間目標地点の座標の照合を行い、中間目標地点の方位と距離を求める。走行中は走行方位のズレを検出し、軌道修正を行う。

(2) 方位制御

誘導制御プロセスで得られた走行方向と移動距離を基にステレオ画像認識とLRFによるランドマーク追尾処理によって、中間目標地点座標に向かって走行する。ローバ走行時には地面の起伏により、姿勢が大きく変化し、ランドマーク見失うことも想定される。

その間は、航法センサー（ジャイロ、加速度計）を使用して、ランドマークの再補足を試みる。ランドマークを見失った時間が60秒を超えた場合は、ローバの姿勢が安定した状態で走行停止し地上オペレータの判断を仰ぐ。

(3) 障害検知制御

ローバの前方と後方に搭載したレーザ衝突防止センサー（計4基）によって、不測の障害物を検出し、緊急停止する。

また、地上との通信回線の状態監視を行い、通信断を検出すると通信復旧位置までローバを戻す。復旧探査モードに入る条件は、通信断の検出時間が3秒以上とし、21cm（走行速度 = 7cm/sec）戻ると通信が回復すると想定する。

4.2 マニピュレータ制御

(1) アーム制御

スカラタイプのマニピュレータの水平2自由度のアーム回転軸にはポテンショメータを備える。マニピュレー

タは、地上操作卓から把持対象サンプルの直交座標情報を受取って、逆運動学によって各軸の回転角度を求め、ハンド部をサンプルの真上まで自律的に移動する。

1) ハンド制御

地上操作卓からのハンド降下指示は、地表からのハンドの高さにより行う。ハンドの降下開始から停止まではローバ側の自律制御による。

ハンド降下指示はマイナスの値（レゴリス表面の下側）の指定により、レゴリスに埋まったサンプルも採取可能とする。ハンドの上下移動に際しては、ハンド部分に搭載した距離センサーにて地表面との距離を計測し、ハンドが地表面に激突するのを防ぐ。

ハンド内に搭載しているフォトインタラプタはサンプルの高さを計測し、サンプルがハンドに収まる位置にあるかを地上操作卓に通知する。

地上操作卓からの指示でハンドを閉じる場合は、開閉機構軸のポテンショメータにより開閉状態を検出する。完全に閉じていない場合は、ハンドを数mm上昇させて、オペレータが開閉状態およびハンドの状態をカメラ情報により判断して、採取続行か中止かを判断する。

5. 月面での作業手順

5.1 作業手順

月面着陸の後、ミッション達成までの作業手順は以下のとおりである。

(1) ローバを母船から分離する前の点検

母船のテレメータ、コマンド回線経由でローバの各サブシステムの点検、航法系初期値の設定、2次電池の充電、諸パラメータの初期化を行う。この間は、ローバの太陽電池への太陽光の当たる角度は保証されないゆえ、母船の電源を用いる。

(2) ローバの月面への展開

ローバを月面に降ろし着陸船近辺にて走行テストを行う。また、周辺の岩石をマニピュレータで採取し、母船に受け渡す。科学的成果を得るとともに地上オペレータの遠隔運用の訓練を兼ねる。

(3) 中央丘に接近、登坂を開始する

ローバから送られてくるカメラ映像及び障害物情報を基に、登坂の経路を地上オペレータが決め、ローバは、セミ自律制御モードにて走行する。

(4) 頂上付近でのサンプル採取作業

ローバが頂上付近に到着後、オペレータは、カメラ映像で複数の岩石の中からサンプル候補を選ぶ。選択した岩石を、マニピュレータによって採取し、収納箱に入れ

る．1つのサンプル採取時間を3分以内で作業を繰り返し行い，5～6個のサンプル採取作業を行う．

(5) 下山

下山は登坂と全く同じ運用を行う．

(6) 麓における母船へのサンプルの受け渡し

麓に到着後，母船の分析装置がローバの真正面になるように移動する．分析装置に向かって地上操作卓の操作画面上に表示されたガイドラインに沿って前進する．分析装置の手前50cmに近づいた時，カメラを下方に向け，アームを収納箱上部に移動する．母船の分析装置(20cm立方)の真上に，ローバの収納箱が来るように移動した後，収納箱の底面を開けて，サンプルを分析箱に落下させる．

5.2 作業時間見積もり

作業時間は以下のような前提で配分する．

1) 全活動時間：14日

2) 1日の活動時間：8時間(追跡局は，日本のみとする)
なお，緊急事態に備えて海外局のバックアップを考慮する．その場合1日の運用時間は24時間となり，日本の追跡局に限定したときの3倍の運用時間を確保することができる．

3) 全走行距離

直線距離： $2000 \text{ m (標高)} / \sin 25^\circ \times 2$ (登り・下り往復) = 9,465 m

障害物の迂回(1.5倍)を考慮： $9,465 \text{ m} \times 1.5 = \mathbf{14,198 \text{ m}}$

4) 平均速度

ローバの秒速は7cm/secとする．これは，15%のマージンを含む．

【根拠】以下の通りである．

$14,198 \div 8$ (走行日数) = 1,775 m : 1日の平均走行距離

$1,775 \div 8$ (1日の運用時間) = 222 m : 平均時速

$222 \text{ m} \div 60 \text{ 分} = 3.7 \text{ m/分}$: 平均分速

$3.7 \text{ m} \div 60 \text{ 秒} = 6.1 \text{ cm/秒}$: 平均秒速

$6.1 \text{ m} \times 1.15 = \mathbf{7 \text{ cm/秒}}$: 設定する秒速(15%のマージンを含む)

上記1)～4)を前提として，作業時間の見積もりをする．以下では「」内に「所要時間/着陸後から何日目か」を示す．なお各項目の作業内容の詳細は，3.1節に記述したとおりである．以下1)～7)は時間順でかつ番号順に連続した運用を意味する．

1) ローバを母船から分離する前の点検 [4時間/着陸後1

日目]

2) ローバの月面への展開 [4時間/着陸後1日目]

3) 中央丘に接近，登坂を開始する [8時間/着陸後2日目]

4) 登坂 [32時間/着陸後3日～6日目]

5) 頂上付近での岩石採取作業 [16時間/着陸後7日～8日目]

6) 下山 [32時間/着陸後9日～12日目]

7) 麓の母船への採取岩石の受渡し [16時間日/着陸後13日～14日目]

6. 通信系

地上との通信はUplink 1kbps，Downlink 100kbpsとし，通信遅延時間を片道3秒とする．通信のデータ種別はテレメータ・データ(Downlink)とコマンド・データ(Uplink)の大別し，Table2に示す．カメラ画像は10Kbyte程度に圧縮し，2秒周期で地上に伝送する．Table2にその概要を示す．

7. おわりに

月面探査ローバの設計を行った．クレータの中央丘の厳しい傾斜角に対応しかつ月の表面を覆うレゴリスでスタックしないためにクローラとロッカーボギーを組み合わせたセミクローラ方式を提案した．

操縦は地球からの遠隔操作を基本とするが一定の自律性を有する方式を提案した．ここではこの方式をセミ自律と呼ぶこととした．

また，-20～+120の範囲で変化する厳しい温度環境に対応するような熱制御方式を提案した．特に昼間に走行するローバは上面からは太陽光による熱入力があり，下面からは表面からの熱輻射を受け，通常の衛星のような熱設計が成立しない．

このため，OSR(Optical Solar Reflector)を多用して上部から熱を捨てる方式を採用した．

クレータの中央丘の頂上でサンプルを採取するためのマニピュレータには，メカニズムが簡単で動きが直観的なスカラタイプを採用することとし，運用は地球からのセミ自律方式を採用することとした．

電力は太陽追尾型の太陽電池とリチウムバッテリーにより，190Wの電力を確保することとした．

上記のような設計思想に基づくローバ諸元をTable3に示す．

今後，モデルの試作を通して設計の実現性の検証を進める予定である．

Table 2 Communication parameters

No	データ名称	説明	Size(Byte)	通信周期
テレメータ・データ (100 kbps)				
1	カメラ画像 (ステレオ)	ローバ両脇に搭載したステレオカメラ画像	10,240	2 秒
2	ランドマーク位置情報	ステレオカメラで画像認識した情報	2,048	6 秒
3	姿勢情報	ローバの姿勢情報など	192	1 秒
4	マニピュレータ情報	アーム及びハンドの位置情報など	40	1 秒
5	その他センサー情報	バッテリー及び太陽電池の電圧, 電流など	1024	1 秒
コマンド・データ (1Kbps)				
1	誘導コマンド	地上からのローバの移動指示するコマンド	Max 64	6 ~ 10 秒
2	マニピュレータ コマンド	マニピュレータ制御コマンド	Max 32	6 ~ 10 秒
3	太陽電池パドルコマンド	手動制御コマンド, 自動追尾切換	Max 24	6 ~ 10 秒
4	管理コマンド	プロセッサ制御コマンド	Max 16	6 ~ 10 秒

Table 3 Rover parameters

	名称	寸法, 能力等
1	全体寸法	1m × 1m × 1m
2	質量	100 kg
3	速度	70 mm / s
4	登坂能力	25 度
5	クローラ寸法	180 mm 幅 × 1480 mm 長 × 1200 mm 高 × 4 基
6	ボディ	460 mm 幅 × 780 mm 長 × 300 mm 高, 変形台形型
7	ソーラパネル	1000 mm × 800 mm, 迎角 20 度で 360 度回転可
8	ロボットアーム	可動範囲 400 mm スカラ型, ハンド Z 方向移動 500mm
9	サンプル収納箱	150 mm × 150 mm × 100 mm 高さ, 上下開閉蓋付き

参考文献

- 1) 内閣官房宇宙開発戦略本部：月探査に関する懇談会「わが国の月探査戦略」, 2010 年 7 月 29 日
- 2) JAXA 月面ロボットチャレンジ開催： : <http://www.jsass.or.jp/web/modules/wordpress/attach/Lunar%20Robotics.pdf>

【注】

- (注 1) 月レゴリス (regolith): 月の表面を覆う細かい砂。数センチから数十メートルの厚さ。
- (注 2) ロッカー・ボギー (Rocker-Bogie): NASA の JPL が火星探査車に用いているリンク機構で段差乗り越え能力が高い。
- (注 3) クローラ (Crawler): 土木工用の車両や雪上車など滑りやすい不整地で用いられる車両で帯状の接地面を有する無限軌道。キャタピラと一般に呼ばれるが、これはキャタピラ社の登録商標。

テラヘルツ波伝送用円形導波管の曲り部における電磁界特性の 等角写像による解析

宮崎 保光 *

(2010年9月30日受理)

Electromagnetic Analysis of Curved Circular Waveguides for Tera Hertz Transmission Using Conformal Mapping

Yasumitsu Miyazaki*

(Received September 30, 2010)

Abstract

Extremely high radio frequency technology of Tera Hertz frequency band is rapidly developed recently, particularly for electromagnetic wave generation of Tera Hertz frequency band. These frequency bands are between Giga Hertz frequency band of millimeter waves and optical band of far infrared waves. However, transmission waveguides for Tera Hertz frequency bands have not been studied. The TE_{01} mode of circular waveguide has been enough investigated for low loss transmission of 50GHz millimeter waves. In this paper, the TE_{01} modes in circular waveguides of over sizes are discussed for Tera Hertz electromagnetic waves. The TE_{01} modes have low loss characteristics for large radiuses of circular waveguides compared with wavelengths of Tera Hertz electromagnetic waves and are proportional to inverses of three powers of radiuses and roots of frequencies, when conductors of waveguide walls have non dispersive conductivities. Particularly, mode conversions and reflections of the TE_{01} mode of Tera Hertz frequency band in curved circular waveguides are studied by mixed method of conformal mapping and integral equation with Green's dyadics.

キーワード：テラヘルツ電磁波，円形導波管，モード変換，等角写像

Keywords: Tera hertz electromagnetic wave, Circular waveguide, Mode conversion, Conformal mapping

1. はじめに

ギガヘルツのミリ波帯と赤外線周波帯の中間の周波数帯であるテラヘルツ帯の電磁波技術が近年急速に進展してきている¹⁻³⁾。とくに，テラヘルツ帯の電磁波発生について多くの試みが行われてきている。しかしながら，テラヘルツ帯の電磁波伝送に関する伝送路の研究は殆んどされていない。円形導波管の TE_{01} モードを用いたテラヘルツ帯電磁波伝送は，分光計測および通信に極めて有用である。円形導波管における TE_{01} モードは，50GHz 帯ミリ波伝送に関して多くの成果が得られてきている⁴⁻⁶⁾。本論文では，波長 $300\mu\text{m}$ 以下のテラヘルツ帯の伝送に関して，オーバーサイズの数 mm の円形導波

管における TE_{01} モード伝送について論じている⁷⁻¹⁰⁾。

金属の導電率は，ミリ波帯以下の周波数については，直流特性にくらべ，分散特性は小さいが，周波数がテラヘルツ帯の高い周波数帯においては分散特性が無視できなくなるが，これまで十分明らかにされていない。導波管の導電率が分散性を有していないとすれば，テラヘルツ帯 TE_{01} モードは，波長にくらべ十分径の大きい円形導波管においては，径の3乗と周波数の平方根に逆比例する低損失特性となる¹¹⁻¹³⁾。導波管の管壁の導電率が分散性を有しているより高いテラヘルツ周波数帯の場合には，テラヘルツ帯伝送の場合には，ミリ波伝送の特性と異なった特性を示す。導波管の管壁の物質である金属の

* 愛知工科大学工学部，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

導電率の分散特性について基本的に論じている．

本論文は，テラヘルツ帯における円形導波管における TE_{01} モードの伝送に関する基本特性を示し，とくに，伝送において重要となる導波管の曲り部における TE_{01} モードのモード変換と反射特性について，等角写像と Green dyadic を用いた積分方程式による手法により，解析している^{8,10)}．

2. テラヘルツ帯における導体の分散特性

導体におけるテラヘルツ帯の電磁波特性は，導電率と誘電率によって示される．電気変位 \mathbf{D} と電界 \mathbf{E} ，分極 \mathbf{P} ，誘電率 ε に関して，

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1)$$

ここに，分極 \mathbf{P} は，導体中の電子の質量 m ，位置ベクトル変位 \mathbf{r} に対し，

$$\mathbf{p} = -e\mathbf{r}$$

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} + \gamma \frac{d\mathbf{r}}{dt} + c\mathbf{r} = -e\mathbf{E} \quad (2)$$

時間因子を $e^{j\omega t}$ とし，荷電密度を N とすれば

$$\mathbf{P} = \frac{-Ne^2}{m\omega^2 - j\gamma\omega + c} \mathbf{E} \quad (3)$$

すなわち，

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{Ne^2}{m\omega^2 - j\gamma\omega + c} \quad (4)$$

導体における複素誘電率をとすれば

$$\varepsilon = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega} = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

式(4)より複素誘電率 ε は，

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + f \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\gamma'\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma'^2\omega^2} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 + f \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma'^2\omega^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon'' = \frac{-\gamma'\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma'^2\omega^2} \quad (7)$$

ここに，共振パラメータ ω_0 ，緩和パラメータ γ' ，密度パラメータ f は，

$$\omega_0^2 = \frac{c}{m}, \quad \gamma' = \frac{\gamma}{m}, \quad f = \frac{Ne^2}{m}$$

式(2)において，輸送現象に関して，左辺第2, 3項に注目して，

$$\gamma \frac{d\mathbf{r}}{dt} + c\mathbf{r} = -e\mathbf{E}$$

において輸送パラメータ $\tau = \frac{c}{\gamma}$ ， $\mu = -\frac{e}{\gamma}$ とすれば

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} + \tau\mathbf{r} = \mu\mathbf{E} \quad (8)$$

さらに， τ ， $c \geq 0$ のとき，

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \bar{\mathbf{v}} = -\frac{e}{\gamma}\mathbf{E}$$

電荷の流れによる電流 \mathbf{J} は

$$\mathbf{J} = -eN \frac{d\mathbf{r}}{dt} = -eN\bar{\mathbf{v}}$$

導電率 σ_0 について， $\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E}$ とすれば， γ は

$$\gamma = \frac{Ne^2}{\sigma_0}$$

式(2)，(3)において，拘束特性が弱いレベルでは $c \geq 0$

として， $\gamma = \frac{Ne^2}{\sigma_0} = f \frac{m}{\sigma_0} = fm\omega_3$ を用いて

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{1}{\frac{\omega}{\sigma_0} j - \frac{m\omega^2}{Ne^2}} \quad (9)$$

式(9)において， ω_1 ， ω_2 ， ω を

$$f = \omega_1^2 = \frac{Ne^2}{m}, \quad \omega_2 = f\omega_3 = \frac{Ne^2}{m\sigma_0}, \quad \omega_3 = \frac{1}{\sigma_0}$$

とすれば，導電率 σ を用いて，

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 - \frac{f}{\omega^2 + f^2\omega_3^2} \left(= (n^2 - k^2)\varepsilon_0 \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon'' = \frac{f\omega_3}{\omega} \frac{f}{\omega^2 + f^2\omega_3^2} \left(= 2nk\varepsilon_0 \right) \quad (11)$$

$$= \frac{\sigma}{\omega}$$

ここで， $\omega \geq 0$ のとき， $\sigma = \sigma_0$ ．

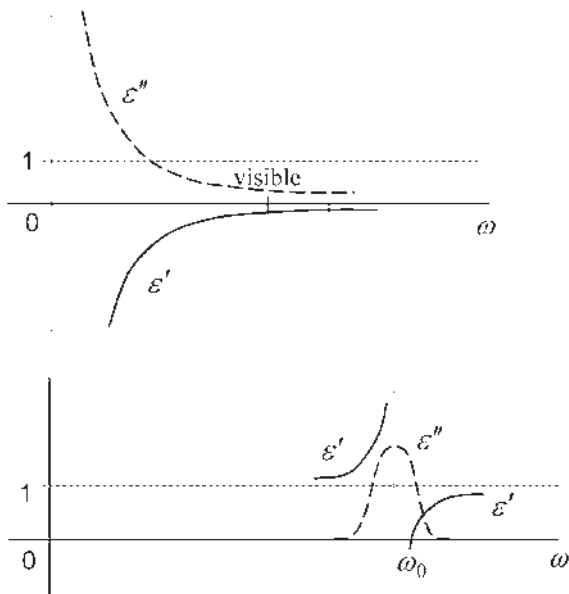


Fig.1 金属の複素誘電率

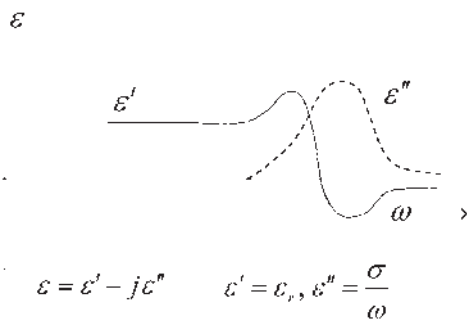


Fig.2 複素誘電率の分散特性

式(2)において、左辺第1項に注目して、 $m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -e\mathbf{E}$ について、 $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ を用いれば、 $0 \sim \tau$ の時間積分より

$$m \int_0^\tau dv = -e \int_0^\tau E dt = -e\tau E$$

ここで、 $\bar{v} = \frac{v}{2}$ として、 $\tau = \frac{mv}{eE} = \frac{2m\bar{v}}{eE}$.

$\bar{v} = \frac{eE}{\gamma}$ を用いれば、 $\tau = \frac{2m}{\gamma}$. $\tau = \frac{2}{\omega_2}$, さらに、 $\bar{\tau} = \frac{\tau}{2}$ と

すれば、 $\bar{\tau} = \frac{\tau}{2} = \frac{1}{\omega_2}$.

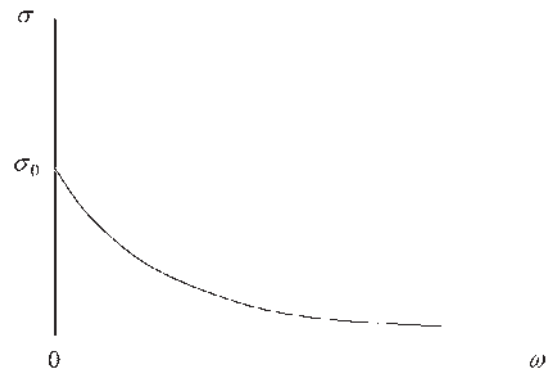


Fig.3 金属の導電率

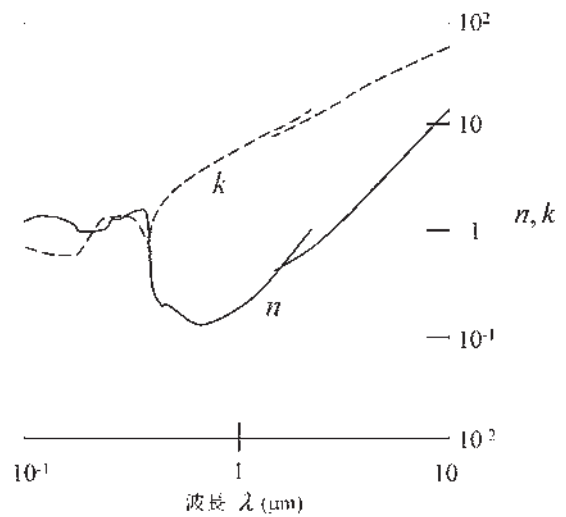


Fig.4(a) 銀の複素屈折率 n, k

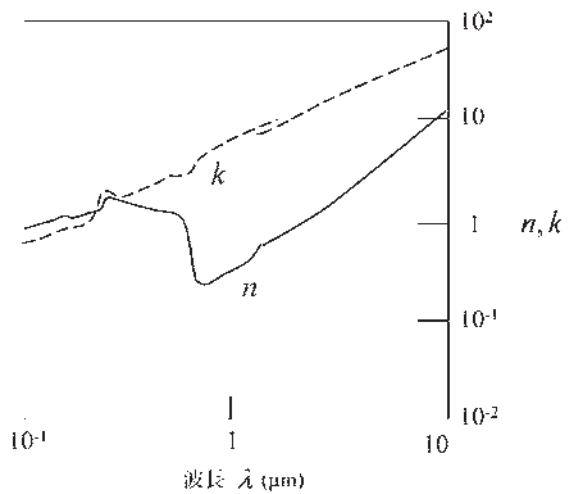


Fig.4(b) 金の複素屈折率 n, k

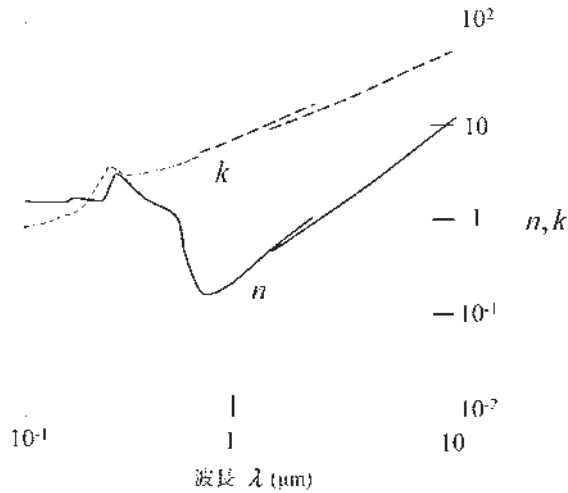


Fig.4(c) 銅の複素屈折率 n, k

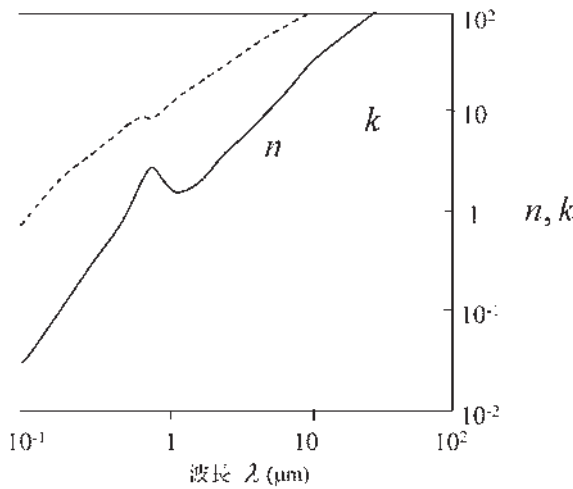


Fig.4(d) アルミニウムの複素屈折率 n, k

導体における誘電率 ϵ 、導電率 σ は (4) ~ (7), (9) ~ (11) によって示される。Fig.1,2,3 は誘電率、導電率の分散特性を示す。Fig.4 は代表的な金属の実測例である¹⁴⁾。テラヘルツ帯における ϵ 、 σ は、実験値としては十分示されていないが、さらに、今後詳細なデータが示されると思われる。銅の場合導電率はミリ波帯以下の高くない周波数帯では $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ と示されている。

3. 円形導波管における固有電磁界

半径 a の円形導波管の管壁が完全導体でなく、導電率 σ が有限である場合、管壁の電磁界特性がインピーダンス境界条件によって与えられる。すなわち、 r 方向の単位ベクトルを \mathbf{n}_r とし、

$$\mathbf{n}_r \times \mathbf{E} = \frac{1}{2} \delta \mu \omega (1 + j) \mathbf{H}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (12)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \sigma}}$$

円形導波管の場合、横方向固有界は

$$\psi_{[mn]}(r, \theta) \psi_{[mn]}(r', \theta') = \frac{(2)_m}{\pi} \cos m(\theta - \theta') \frac{J_m(\chi_{mn}' r) J_m(\chi_{mn}' r')}{(x_{mn}'^2 - m^2) J_m^2(x_{mn}')} \quad (13)$$

$$\varphi_{(mn)}(r, \theta) \varphi_{(mn)}(r', \theta') = \frac{(2)_m}{\pi} \cos m(\theta - \theta') \frac{J_m(\chi_{mn} r) J_m(\chi_{mn} r')}{x_{mn}^2 J_{m+1}^2(x_{mn})} \quad (14)$$

ここで、 $J_m^0(x_{mn}^0) = 0$ 、 $\chi_{mn}^0 = \frac{x_{mn}^0}{a}$ 、 $\beta^{2(r)0} = \beta^2 - \chi_{mn}^2$ 、 $(2)_m = 2$ ($m=0$)、 0 ($m \geq 1$) である。

管壁が完全導体でない場合、表皮厚さ δ は

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

δ が半径 a より十分小さいとき $r=a$ において、 r 方向の単位ベクトルを \mathbf{n}_r とし、

$$\mathbf{E}_t = -(1 + j) \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \sigma}} \mathbf{n}_r \times \mathbf{H}$$

管壁に垂直に侵入する電力 W_r は

$$W_r = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*)_r a d\theta$$

減衰定数 β' について、伝搬方向の電力 W_z に対して、

$$\frac{dW_z}{dz} = -2\beta' W_z = -W_r, \quad \beta' = \frac{W_r}{2W_z}$$

完全導体の固有電磁界からの摂動として、 TM_{mn} 、 TE_{mn} モードの伝搬定数 β_{mn} 、 β_{mn}' の虚数部 $\beta_{mn}^{(i)}$ 、 $\beta_{mn}^{(i)'}$ は、

$$\zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{として、}$$

$$\beta_{mn} = \beta_{mn}^{(r)} - j\beta_{mn}^{(i)}, \quad \beta_{mn}^{(i)} = \frac{R_s}{\zeta a} \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 - \chi_{mn}'^2}} \quad (15)$$

$$J_m^0(x_{mn}^0) = 0, \quad \chi_{mn}^0 = \frac{x_{mn}^0}{a}$$

$$\beta_{mn}^{(i)'} = \frac{R_s}{\zeta a} \left\{ \frac{m^2}{x_{mn}^2 - m^2} + \frac{\chi_{mn}^2}{\beta^2} \right\} \frac{\beta}{\sqrt{\beta^2 - \chi_{mn}'^2}}$$

Fig.5 は管壁が銅の導電率 $\sigma_1 = 5.8 \times 10^7$ S/m, $\sigma_2 = 5.8 \times 10^6$ S/m のときの TE₀₁ 波の減衰特性を示す。

ここでは, dyadic Γ として, つぎの微分方程式と境界条件を満足する dyadic Green's function $\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ を考える。

$$\nabla \times \nabla \times \Gamma - \beta^2 \Gamma = \Gamma = \mathbf{I} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (16)$$

$$[\mathbf{n} \times \Gamma]_{r=a} = 0$$

ただし, \mathbf{I} は unit dyadic である。また, 式(16) で示される dyadic Green's function Γ は, 具体的には, 横断面についての固有系 $\{\psi_{mn}\}, \{\phi_{mn}\}$ を用いてつぎのように示される。

$$\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \left(\mathbf{i}_z \mathbf{i}_z - \frac{1}{\beta^2} \nabla \nabla' \right) G^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \nabla_i \nabla_i' H^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + \mathbf{i}_z \times \nabla \mathbf{i}_z \times \nabla_i' H^{(2)}$$

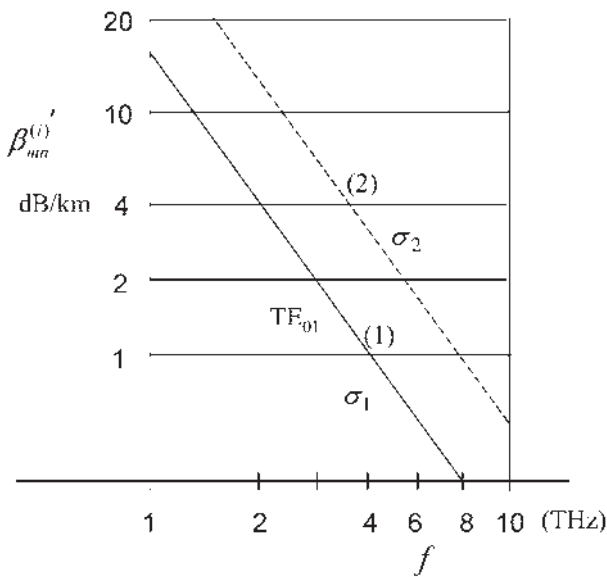


Fig.5 内径 2=5mm の円形導波管の減衰特性
(1) $\sigma_1 = \sigma$, (2) $\sigma_2 = \frac{\sigma}{10}$, $\sigma = 5.8 \times 10^7$ S/m

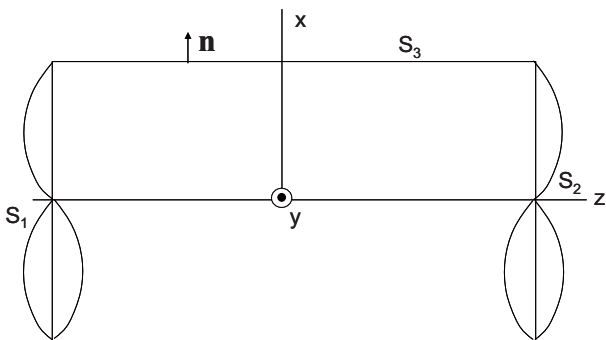


Fig.6 円形導波管

ただし,

$$G^{(1)} = \sum_{m,n} \frac{\chi_{mn}^2 \varphi_{(mn)}(x,y) \chi_{mn}^2 \varphi_{(mn)}(x',y')}{2j\beta_{mn}} e^{-j\beta_{mn}|z-z'|} \quad (18)$$

$$H^{(1)} = \sum_{m,n} \frac{\varphi_{(mn)}(x,y) \varphi_{(mn)}(x',y')}{2j\beta_{mn}} e^{-j\beta_{mn}|z-z'|} \quad (19)$$

$$H^{(2)} = \sum_{m,n} \frac{\psi_{[mn]}(x,y) \psi_{[mn]}(x',y')}{2j\beta_{mn}} e^{-j\beta_{mn}|z-z'|} \quad (20)$$

$$\nabla^2 G + \beta^2 G = -\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}'), \quad [G^{(1)}]_{r=a} = 0.$$

$\nabla_t = \nabla - \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{i}_z$ で, $\psi_{[mn]}$, $\varphi_{[mn]}$ はそれぞれ, 横断面境界において, Neumann および Dirichlet 型境界条件を満たす固有関数であり, 直交条件

$$\int \psi_{[mn]} \psi_{[m'n']} dS = \chi_{mn}^2 \delta_{mm'} \delta_{nn'}$$

$$\int \varphi_{(mn)} \varphi_{(m'n')} dS = \chi_{mn}^2 \delta_{mm'} \delta_{nn'}$$

を満たす。また, $\beta_{mn}^{(r)2} = \beta^2 - \chi_{mn}^{(r)2}$, $\delta_{mm'} = 1 (m=m')$, $0 (m \neq m')$, $m=0,1,2, \dots, n=1,2, \dots$, 連続スペクトル伝送路

の場合には, $\sum_{m,n}$ を積分 $\iint dmdn$ にすればよい。

4. 曲り円形導波路内の電磁界

Fig.7 に示されるような直径 $2a$ の曲り円形導波管内の電磁界について考える。Fig.7 のように, 直角座標系 (X,Y,Z) 内の空間におかれた曲率半径 R の円形導波管を考える。導波管内の媒質は等方均質であり, 媒質の誘電率を ϵ , 透磁率を μ , 位相定数を $\beta = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu}$ とし, 時間因子を $e^{j\omega t}$ とすれば, Maxwell の方程式より, 電界 \mathbf{E} について次式が導かれる。

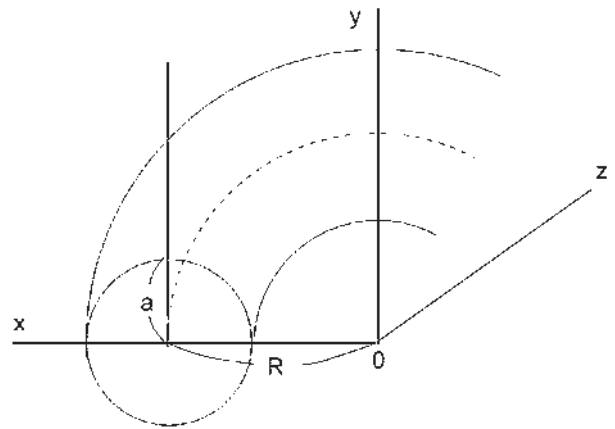


Fig.7 曲り円形導波管

$$\nabla_{x,y,z} \times \nabla_{x,y,z} \times \mathbf{E} - \beta^2 \mathbf{E} = 0, \nabla_{x,y,z} \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (21)$$

電磁界の境界条件については，導波管壁の外向単位法線 vector を \mathbf{n} とすれば，壁面による効果は摂動的に伝搬定数が与えられるとして，壁面上で $\mathbf{E} \times \mathbf{n} = 0, \mathbf{H} \cdot \mathbf{n} = 0$.

5. 新座標系 (x,y,z) による電磁界表示

これらの基本式をもとに，等角写像によって得られる新しい空間での電磁界表示を次節以下で展開する．

Fig.7 に示される半径 a ，曲り半径 R の円形導波管において $Y = \text{一定}$ の平面を考え，その面において，複素面 $Z = X + jZ$ と複素面 $z = x + jz$ に関して， $X + jZ = R \left(1 + \frac{x}{R}\right) e^{j\frac{z}{R}}$ なる等角写像を行い， $Y = y$ とすれば，Fig.7 の半径 a の曲り導波管は，Fig.8 に示されるように，新直角座標系 (x,y,z) の空間内におかれた真直な半径 a の導波管にうつされる．このとき，線素 ds^2 は， $ds^2 = dX^2 + dY^2 + dZ^2 = dx^2 + dy^2 + h^2 dz^2$ で与えられる．

ここで，測度係数 h は， $h^2 = \left(1 + \frac{x}{R}\right)^2$ ．

また，電界 \mathbf{E} についての方程式 (21) は，新座標系 (x,y,z) においては，各座標単位 vector を $\mathbf{i}_x, \mathbf{i}_y, \mathbf{i}_z$ とし， $\mathbf{E}_t = E_x \mathbf{i}_x + E_y \mathbf{i}_y$ とすれば，管内のすべての点で成立する式として，

$$\begin{aligned} \nabla_{x,y,z} \times \nabla_{x,y,z} \times \mathbf{E} - \beta^2 \mathbf{E} = & - \left(1 - \frac{1}{h^2}\right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}_t}{\partial z^2} \\ & + \left(\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) \mathbf{i}_y \\ & - \left\{ \left(1 - \frac{1}{h}\right) \cdot \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{1}{h^2} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial E_x}{\partial z} \right\} \mathbf{i}_z \end{aligned}$$

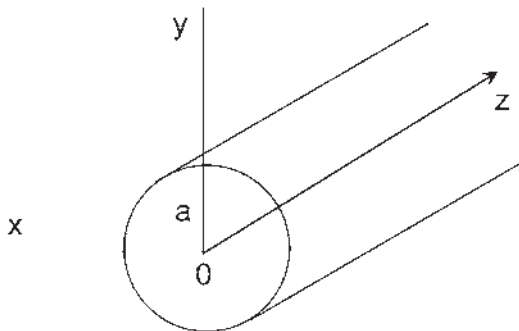


Fig.8 新座標系表示の真直な円形導波管

$$\begin{aligned} & - \left[\left\{ \frac{1}{h^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial^2 E_z}{\partial x \partial z} \right\} \mathbf{i}_x \right. \\ & + \left. \left\{ \left(\frac{1}{h} - 1 \right) \frac{\partial^2 E_z}{\partial z \partial y} - \left(\frac{1}{h} - 1 \right) \frac{1}{h} \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} \right\} \mathbf{i}_y \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x} E_z \right) \right] \mathbf{i}_z \\ = & F(\mathbf{E}) \end{aligned} \quad (22)$$

式 (22) の右辺は，曲りによる非同次項を示し， $F(\mathbf{E})$ と定義した．式 (22) が非同次の微分方程式として示されたことは，写像された新座標 (x,y,z) 空間内の真直な円形導波管内の媒質が不均質であるか，あるいは，内部に等価的源が存在するとみなすことができる．また，境界条件 $\mathbf{E} \times \mathbf{n} = 0$ を新座標系 (x,y,z) において，電界 \mathbf{E} の条件として示せば，新座標系 (x,y,z) の円柱座標を (r,θ,z) として，半径 a の円形導波管の場合，つぎの式が成立する．

$$[E_\theta]_{r=a} = [E_z]_{r=a} = 0$$

6. 積分方程式の構成

つぎに，写像された新座標 (x,y,z) 空間における導波管内の波動方程式は非同次項を有すること（物理的には等価的源が存在するとみなされること）に注意して，新座標 (x,y,z) 空間において，半径 a の真直な円形導波管の内部に，vector に関する Green の公式を適用することを考える．すなわち，dyadic $\Gamma(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ を fundamental dyadic Green's function, vector \mathbf{E}_{scatt} を散乱界 $\mathbf{E}_{scatt} = \mathbf{E}_{totl} - \mathbf{E}_{inc}$ (\mathbf{E}_{totl} を全電磁界， \mathbf{E}_{inc} を入射界)，以下， $\nabla_{x,y,z}$ を単に ∇ とすれば，導波管の内部の領域について，

$$\begin{aligned} & \int_V [\mathbf{E}_{scatt} \cdot \nabla \times \nabla \times \Gamma - \Gamma \cdot \nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_{scatt}] dv \\ = & \int_{S_1, S_2, S_3} \mathbf{n} \cdot [(\Gamma \times \mathbf{E}_{scatt}) - \mathbf{E}_{scatt} \times (\nabla \times \Gamma)] dS \end{aligned} \quad (23)$$

ここに， \mathbf{n} は導波管の外向単位法線 vector， S_3, S_1, S_2 は，それぞれ，導波管の管壁および左右の導波管の端面である．したがって，式 (17) ~ (23) より，全電磁界をあらわす vector 関数 \mathbf{E}_{totl} は，

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{totl} = & \mathbf{E}_{inc} + \int_V \Gamma \cdot \{ \nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_{inc} + F(\mathbf{E}_{totl}) \} dv \\ & - \int_V \beta^2 \mathbf{E}_{inc} dv + \int_{S_1, S_2, S_3} \mathbf{n} \cdot [\Gamma \times (\nabla \times \mathbf{E}_{scatt}) - \mathbf{E}_{scatt} \times (\nabla \times \Gamma)] dS \end{aligned} \quad (24)$$

ここに， $F(\mathbf{E}_{totl})$ は，式 (22) の右辺によって与えられる．とくに，入射波 \mathbf{E}_{inc} が，同次方程式 $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}_{inc} - \beta^2 \mathbf{E}_{inc}$

= 0 を満し，端面 S_1 から入射する正方向進行波ならば，

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{tot} = & \mathbf{E}_{inc} - \int \Gamma \cdot \left[\left(1 - \frac{1}{h^2}\right) \frac{\partial^2 \mathbf{E}_t}{\partial z^2} - \left(\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x}\right) \right. \\ & + \left. \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}\right) \mathbf{i}_y + \left\{ \left(1 - \frac{2}{h}\right) \frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial E_x}{\partial z} \right\} \mathbf{i}_x \right. \\ & + \left. \left\{ \frac{1}{h^2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial^2 E_z}{\partial x \partial z} \right\} \mathbf{i}_x \right. \\ & + \left. \left(\left(\frac{1}{h} - 1 \right) \frac{\partial^2 E_z}{\partial z \partial y} - \left(\frac{1}{h} - 1 \right) \frac{1}{h} \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} \right) \mathbf{i}_y \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{h} \frac{\partial h}{\partial x} E_z \right) \mathbf{i}_z \right] dv \\ & + \int_{S_1, S_2} \mathbf{n} \cdot \left[\Gamma \times (\nabla \times \mathbf{E}_{scatt}) - \mathbf{E}_{scatt} \times (\nabla \times \Gamma) \right] dS \quad (25) \end{aligned}$$

ただし，上式第 2 項の被積分関数の電界 $\mathbf{E}_t = E_x \mathbf{i}_x + E_y \mathbf{i}_y$ ， E_x ， E_y は \mathbf{E}_{tot} の成分である．曲り導波管の 2 つ両端面 S_1 ， S_2 での電磁界の matching を仮定すれば，式 (25) 第 3 項は省略しうる．

式 (23) を導波管の TE, TM 波表示に適する形に変形することを考える．一般に， \mathbf{U} を任意の vector とすれば，

$$\begin{aligned} \mathbf{E} = & \int \Gamma \cdot \mathbf{U} dv' = \sum_{m,n} V_{(mn)}^{(R)}(z) \frac{\mathbf{i}_z}{(\pm j \beta_{mn})} \nabla_t^2 \varphi_{(mn)} \\ & + \sum_{m,n} V_{(mn)}^{(R)}(z) \nabla_t \varphi_{(mn)} + \sum_{m,n} V_{[mn]}^{(R)} \mathbf{i}_z \times \nabla_t \psi_{[mn]} \quad (26) \end{aligned}$$

ただし，上，下符号は，それぞれ，進行波 m ，反射波に関するものとする．また， $V_{[mn]}^{(R)}$ ， $V_{(mn)}^{(R)}$ は， TE_{mn} ， TM_{mn} 波の振幅であり， $U_z \mathbf{i}_z$ を \mathbf{U} の管軸方向成分， U_t を横方向成分とすれば，

$$V_{[mn]}^{(R)} = \frac{1}{2j\beta_{mn}'} \int \mathbf{i}_z \times \nabla_t \psi_{[mn]} \cdot \mathbf{U}_t e^{-j\beta_{mn}|z-z'|} dv' \quad (27)$$

$$\begin{aligned} V_{(mn)}^{(R)} = & \frac{1}{2j\beta_{mn}} \int \left\{ (\pm j) \chi_{mn}^2 U_z \varphi_{(mn)} \right. \\ & \left. - \beta_{mn} \nabla_t \varphi_{(mn)} \cdot \mathbf{U}_t \right\} e^{-j\beta_{mn}|z-z'|} dv' \quad (28) \end{aligned}$$

すなわち，上述の議論によって，曲り導波管の電磁界を求めるためには，式 (25) で与えられる vector 積分方程式を解けばよいことになった．

vector 積分方程式 (25) の解は，Born 近似により逐次解として得られる．

ここでは，以下半径 a のミリ波円形導波管における TE_{01} 波入射について考察する．入射波が端面 S_1 から入射する TE_{01} 波であれば，

$$H_z = \chi_{01}^2 B_{01} J_0(\chi_{01}' r) e^{-j\beta_{01} z},$$

$$E_\theta = j\omega\mu\chi_{01}' B_{01} J_0'(\chi_{01}' r) e^{-j\beta_{01} z}$$

として式 (27),(28) より反射および姿態変換が求められる．すなわち， $1/R$ のオーダーに注意すれば，一般の大きさの曲りにおいては，曲りの一次の微小量で反射 TE_{1n} , TM_{11} 波および透過 TE_{1n} , TM_{11} 波が，二次の微小量で反射および透過 TE_{0n} , TE_{2n} , TM_{0n} , TM_{2n} 波が発生し，他の姿態は三次以上の微小量で発生することがしられる．また，上述の展開より，この結果は，とくに反射波については， $1/(\beta_{01}' + \beta_{mn}^{(0)})a$ の漸近形になっていることより，位相定数 $\beta_{mn}^{(0)}$ と管径 a の積が 1 より十分大きいときにはよい近似を与えることがしられる．

つぎに，電力 1 なる TE_{01} 波は入射したとき発生する反射および透過 TE, TM 波の大きさを電力の平方根の dimension を示す変換係数 S なる記号で表すことを考える．すなわち， TE_{mn} , TM_{mn} 波についての変換電力は，式 (27), (28) の $V_{[mn]}^{(R)}$ ， $V_{(mn)}^{(R)}$ を用いて，それぞれ，

$$\left\{ S_{[mn]}^{(01)} \right\}^2 = \frac{\beta_{mn}'^2}{\beta_{01}^2} \frac{[V_{[mn]}^{(R)}]^2}{[j\omega\mu\sqrt{\pi}\chi_{01}' B_{01} a J_0(x_{01}')]^2} \quad (29)$$

$$\left\{ S_{(mn)}^{(01)} \right\}^2 = \frac{\beta^2}{\beta_{01}' \beta_{mn}} \frac{[V_{(mn)}^{(R)}]^2}{[j\omega\mu\chi_{01}' B_{01} a J_0(x_{01}')]^2} \quad (30)$$

上式で， TE_{01} 波がゆるやかな曲り導波管に入射した場合発生する TE_{1n} , TM_{11} 波の透過および反射係数 $S_{[1n]}^{(01)}$ ， $S_{(11)}^{(01)}$ を具体的に示せば，

$$\begin{aligned} S_{[1n]}^{(01)} = & \frac{x_{01}' x_{1n}^2}{\sqrt{2} \sqrt{\beta_{01}' \beta_{1n}' \sqrt{x_{1n}'^2 - 1} (x_{1n}'^2 - x_{01}'^2)^2}} \frac{(\beta_{1n}'^2 + 3\beta_{01}'^2)}{(\beta_{01}' \mp \beta_{1n}') R} \\ & \cdot \frac{e^{(-j\beta_{01} \pm j\beta_{1n})l} - 1}{\beta_{01}' \mp \beta_{1n}'} \quad (31) \end{aligned}$$

$$S_{(11)}^{(01)} = j \frac{\beta}{\sqrt{2}} \frac{a}{x_{11}} \left\{ \frac{1}{\beta_{11}^2} \right\} \left\{ \frac{l}{e^{-j\beta_{01}l - j\beta_{11}l} - 1} - 1 \right\} \frac{1}{R}$$

7. まとめ

テラヘルツ帯の電磁波伝送路として、オーバサイズの円形導波管を提案し、TE₀₁モードの伝送の基本特性を示した。等角写像を用いた2つのscalar Hertz関数についての連立積分方程式の方法を、vector境界値問題として、dyadic Green's functionを用いて検討し、テラヘルツ帯電磁波伝送に関し、一様曲りの円形導波管内の電磁界について詳細に論じた。反射波についても統一的に検討が加えられた。テラヘルツ帯電磁波伝送の基本的課題の基礎を示した。

文献

- 1) B. Ferguson and X.C. Zhang, Materials for terahertz science and technology, Nature Materials, Vol.1, pp.26-33 (2002).
- 2) J. Nishizawa, Proceedings of 8th Symp. on Microwave and Optical Tech., Montreal, Canada, pp.33-36 (2001).
- 3) 西澤潤一, テラヘルツ波の基礎と応用, 工業調査会 (2005).
- 4) S.E. Miller and A.C. Beck, Low-loss waveguide transmission, Proc. IRE, vol.41, no.3, pp.348-358 (1953).
- 5) A.E. Karbowiak, Trunk waveguide communication, Chapman and Hall LTD (1965).
- 6) 日本電電公社電気通信研究所研究発表論文集第8号, ミリ波通信方式の研究 (1963).
- 7) 宇田川, 宮崎, ミリ波円形導波管の折れ曲りによる反射と姿態変換の等角写像による考察, 信学誌, 47, 8, pp.1186-1195 (1964).
- 8) K. Udagawa and Y. Miyazaki, Theory of reflection and mode conversion through tilt of millimeter circular waveguide by conformal transformation, Proc. I.C.M.M.I., M2-2, pp.21-22, Tokyo (1964).
- 9) 宇田川, 宮崎, 円錐形開きをもつ円形導波管における反射と姿態変換, 信学誌, 49, 12, pp.2407-2417 (1966).
- 10) 赤尾, 宮崎, ミリ波円形導波管の曲り部における反射と姿態変換の等角写像による考察, 信学会論文誌, 51-B, 11, pp.553-558 (1968).
- 11) 宮崎, テラヘルツ帯円形導波管における電磁界特性の等角写像による解析, 信学技報, MW2006-26, pp.5-10 (2006).
- 12) Y. Miyazaki, Electromagnetic Analysis of Circular Waveguides for Tera Hertz Transmission Using Conformal Mapping, Proc. PIERS 2006 Tokyo, pp.290-294 (2006).
- 13) Y. Miyazaki, Electromagnetic Analysis of Tera Hertz Waves in Curved Circular Waveguides Using Conformal Mapping, Proc. AP-RASC 2010 Toyama, B1-5 (2010).
- 14) E.D. Palik, Handbook of Optical Constants of Solids, Academic Press (1985).

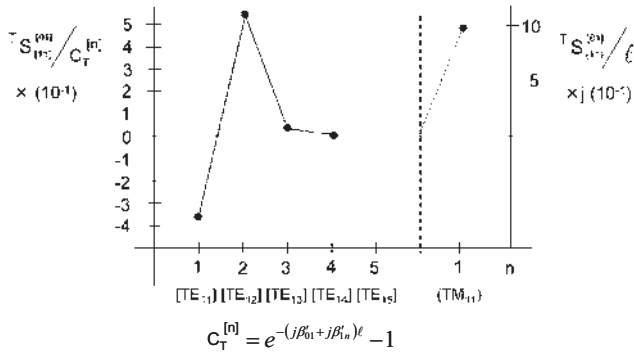


Fig.9 透過 TE_{1n}モードおよび TM₁₁モードの変換係数
f =5THz, 2 a =5mm, R =10m

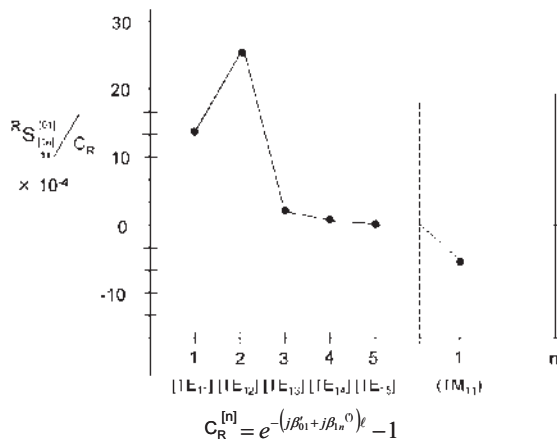


Fig.10 反射 TE_{1n}モード, TM₁₁モードの反射係数
f =5THz, 2 a =5mm, R =10m

以上の結果を用い、導波管直径 $2a=5\text{mm}$ 、周波数 5THz 、曲り半径 $R=10\text{m}$ の場合について計算した反射および透過係数の数値例を Fig.9, 10 に示す。図に示された反射、姿態変換は TM₁₁, TE₁₁, TE₁₂ 波が大きく、周波数の増加とともに、姿態変換が増加する。また、反射波は、 5THz では、透過波の高次姿態変換にくらべば 10^{-3} 程度の微量であることがしられる。

Unsteady Thermal Stresses in the Functionally Graded Semi-infinite Body with Slanting Boundary to the Functional Graduation Subjected to Prescribed Surface Heat Flux

Manabu Ohmichi*

(Received September 30, 2010)

Abstract

Unsteady temperature and thermal stress distributions are evaluated for functionally graded semi-infinite body to investigate the effect of slanting boundary to the functional graduation. The problem is formulated as that of a semi-infinite body subjected to prescribed surface heat flux. Two dimensional analysis is performed and temperature distribution is evaluated using the Fourier's integral theorem. Thermal stresses are evaluated using the Airy's stress function in conjunction with the assumption of exponential change of functional graduation. Numerical computations of the temperature and stress distributions for $ZrO_2/Ti-6Al-4V$ functionally graded materials (FGMs) are carried out and represented graphically.

Keywords: Functionally Graded Materials (FGMs), Unsteady Thermal Stresses, Slanting Boundary, Partial Heating, Stress Function Method

Introduction

Functionally graded materials (FGMs) have the outstanding characteristics of thermal insulation and mechanical toughness at high-temperature. They are realized by varying their composition from the high temperature side to the low temperature side continuously, thereby removing the discontinuities of thermal stresses associated with a layered plate. They are expected to find applications in a wide range of fields, including reusable high performance engines for aerospace vehicles, the turbine blades of thermoelectric power plants, and heat-resistant tools. Thermal stress problems for FGMs have accordingly been studied by many authors, an overview of these studies is provided by Noda¹⁾. Earlier studies of the thermal stress in FGMs have treated one-dimensional problems. Attention has now largely shifted from one-dimensional problems to plane problems or three dimensional problems.

Regarding plane problems, Shabana and Noda²⁾ considered a combined macroscopic and microscopic analysis of thermo-elasto-plastic stresses in functionally graded material plates

using the finite-element method (FEM). Shabana and Noda^{3,4)} discussed thermo-elasto-plastic stresses of functionally graded materials with a substrate and a coating, and also thermo-elasto-plastic stresses in functionally graded ceramic/metal composite with a two-dimensional temperature gradient, again using the FEM. Nemat-Alla⁵⁾ has investigated the reduction of thermal stresses in the functionally graded materials plate (FGMP) with two-dimensional variable material properties. However, there are as yet few analytical solutions of plane problems or three-dimensional problems in FGMs. Ootao and Tanigawa⁶⁾ have discussed three-dimensional transient thermal stresses of a functionally graded rectangular plate due to partial heating by use of an approximation method derived by considering a multi-layered composite plate.

Recently, plane thermo-elastic problems with a slanting boundary to the functional graduation are discussed by Ohmichi and Noda. They analyzed steady temperature distribution⁷⁾ and steady thermal stresses of finite plate⁸⁾, semi-infinite body⁹⁾ and infinite strip¹⁰⁾. Although these analyses are valuable upon the design of FGMs, it is well known from experiment that large thermal stresses occur

* Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

within a short period after the thermal shock. For these reasons, the unsteady analyses are essential in the practical use. The unsteady analysis for infinite strip subjected to prescribed surface heat flux is already reported by the author et al.¹¹⁾, this paper shows the analytical method for semi-infinite body with the same boundary conditions.

1. Unsteady Heat Conduction in Functionally Graded Semi-Infinite Body

The functionally graded semi-infinite body (FGSIB) subjected to prescribed surface heat flux $f(X)$ whose width is $2a$ on the surface is shown in **Fig.1**.

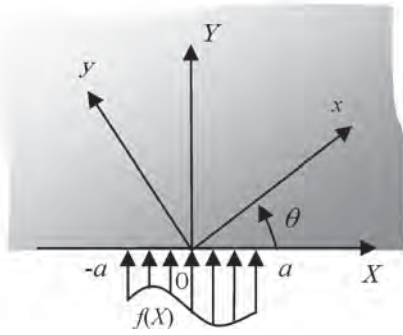


Fig.1 Functionally graded semi-infinite body subjected to prescribed surface heat flux

Two Cartesian coordinate systems are defined. One Cartesian coordinate system (x, y) is concerned with a functional graduation, the other coordinate system (X, Y) refers to geometry of the FGSIB. The relationship between two coordinate systems is

$$\left. \begin{aligned} X &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ Y &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} x &= X \cos \theta + Y \sin \theta \\ y &= -X \sin \theta + Y \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

where θ denotes the slanting angle between x axis and X axis. When the thermal conductivity $k(y)$ depends on only the variable y , the unsteady plane heat conduction equation in the coordinate system (x, y) is

$$c(y)\rho(y)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[k(y)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[k(y)\frac{\partial T}{\partial y}\right] \quad (2)$$

where $T(x, y, t)$ denotes the temperature, $\rho(y)$ is the density and $c(y)$ the specific heat of the semi-infinite body. We assume the thermal conductivity $k(y)$ expressed in the exponential form:

$$k(y) = k_0 e^{\lambda y} = k_0 e^{\lambda(-X \sin \theta + Y \cos \theta)} \quad (3)$$

where k_0 is the thermal conductivity at the origin. When k_1 is a known conductivity at the position $(y = y_1)$ along the y -axis, the coefficient λ is given from relation (3) in terms of k_0 and k_1 by

$$\lambda = (1/y_1) \ln(k_1/k_0) \quad (4)$$

By substituting the relation (3) into Eq. (2), we obtain

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa(y)(\nabla^2 T + \lambda \frac{\partial T}{\partial y}) \quad (5)$$

where $\kappa(y)$ is the thermal diffusivity which is given by

$$\kappa(y) = \frac{k(y)}{c(y)\rho(y)} \quad (6)$$

To simplify the problem, let it be supposed that the thermal diffusivity is a constant.

$$\kappa(y) = \kappa_0 \quad (7)$$

As the thermal boundary conditions, the prescribed surface heat flux on $Y=0$ and the temperature on $Y=\infty$ are assumed to be:

$$T(X, \infty, t) = 0 \quad (8)$$

$$-k(y)\frac{\partial T}{\partial Y}\bigg|_{Y=0} = q_0 q(X) \quad (9)$$

where q_0 denotes the constant heat flux and $q(X)$ is the known geometric function of heat flux. The non-dimensional variables are introduced.

$$\left. \begin{aligned} x^* &= x/a, \quad y^* = y/a, \quad t^* = t \kappa_0 / a^2, \quad \lambda^* = \lambda a, \\ T^* &= k_c T / q_0 a, \quad X^* = X/a, \quad Y^* = Y/a \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

By the use of these non-dimensional variables, Eq. (5) reduces to

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \nabla^2 T^* + \lambda^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \quad (11)$$

Transformation of Eq. (11) from the coordinate (x^*, y^*) which relates to functional graduation to the coordinate (X^*, Y^*)

which relates to geometry of the FGSIB gives

$$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \nabla^2 T^* + \lambda^* (-\sin \theta \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + \cos \theta \frac{\partial T^*}{\partial Y^*}) \quad (12)$$

The thermal boundary condition (8) and (9) expressed by non-dimensional variables are given by:

$$T^*(X^*, 0, t^*) = 0 \quad (13)$$

$$-k^*(y^*) \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} \Big|_{Y^*=0} = q^*(X^*) \quad (14)$$

where $q^*(X^*) = k_c q(X) / k_0$ denotes non-dimensional geometric function of heat flux and k_c is the thermal conductivity of ceramic at the position $(b^*, 0)$. By means of variable separation, the temperature which satisfies the boundary condition (13) and (14) is obtained:

$$\begin{aligned} T^*(X^*, Y^*, t^*) = & e^{\lambda^*(X^* \sin \theta - Y^* \cos \theta)/2} \\ & \times \left\{ \int_0^\infty [T_A^*(\beta^*) \cos \beta^* X^* + T_B^*(\beta^*) \sin \beta^* X^*] \exp(-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^*) d\beta^* \right. \\ & + \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-s^* t^*} T_C^*(\beta^*) [\cos \beta^* X^* + T_D^*(\beta^*) \sin \beta^* X^*] \\ & \left. \times (\cos \mu^* Y^* + \frac{\lambda^* \cos \theta}{2\mu^*} \sin \mu^* Y^*) ds^* d\beta^* \right\} \quad (15) \end{aligned}$$

where s^* is a constant concerning time, while $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ are the coefficients which are determined by boundary conditions and Fourier integral theorem:

$$T_A^*(\beta^*) = \frac{1}{\pi(\frac{\lambda^*}{2} \cos \theta + \sqrt{\beta^{*2} + \frac{\lambda^{*2}}{4}})} \int_{-\infty}^\infty e^{\frac{\lambda^*}{2} \zeta \sin \theta} q^*(\zeta) \cos \beta^* \zeta d\zeta \quad (16)$$

$$T_B^*(\beta^*) = \frac{1}{\pi(\frac{\lambda^*}{2} \cos \theta + \sqrt{\beta^{*2} + \frac{\lambda^{*2}}{4}})} \int_{-\infty}^\infty e^{\frac{\lambda^*}{2} \zeta \sin \theta} q^*(\zeta) \sin \beta^* \zeta d\zeta \quad (17)$$

As the initial condition, we assume that the temperature is zero over the body:

$$T^*(X^*, Y^*, 0) = 0 \quad (18)$$

By using the initial condition (18) and Fourier integral theorem, the coefficient $T_C^*(\beta^*)$ and $T_D^*(\beta^*)$ in Eq. (15) can be determined.

$$T_C^*(\beta^*) = -\frac{T_A^* T_B^*}{2} \quad (19)$$

$$T_D^*(\beta^*) = -\frac{T_A^* T_B^*}{2T_C^*} \quad (20)$$

where T_e^* is given by

$$T_e^* = \frac{2\mu^* (\frac{\lambda^*}{2} \cos \theta + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4})}{\pi(\beta^{*2} + \mu^{*2} + \lambda^{*2}/4)[\mu^{*2} + (\lambda^{*2}/4)\cos^2 \theta]} \quad (21)$$

The temperature which satisfies boundary and initial conditions is obtained:

$$\begin{aligned} T^*(X^*, Y^*, t^*) = & e^{\lambda^*(X^* \sin \theta - Y^* \cos \theta)/2} \int_0^\infty [T_A^*(\beta^*) \cos \beta^* X^* + T_B^*(\beta^*) \sin \beta^* X^*] \\ & \times \left[e^{-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^*} d\beta^* - \int_0^\infty e^{-[\beta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^{*2}/4)] Y^*} \right. \\ & \left. \times T_e^* (\mu^* \cos \mu^* Y^* + \frac{\lambda^* \cos \theta}{2} \sin \mu^* Y^*) d\mu^* \right] d\beta^* \quad (22) \end{aligned}$$

where $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ are given by (16) and (17).

2. Unsteady Thermal Stresses in Functionally Graded Semi-Infinite Body

The equilibrium equations for the plane problem are given by

$$\frac{\partial \sigma_{XX}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{YX}}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{XY}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{YY}}{\partial Y} = 0 \quad (23)$$

The compatibility equation has the form

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{XX}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{YY}}{\partial X^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{XY}}{\partial X \partial Y} \quad (24)$$

The constitutive equations are

$$\begin{aligned} \varepsilon_{XX} = & \frac{1}{E^e} (\sigma_{XX} - \nu^e \sigma_{YY}) + \alpha^e T, \quad \varepsilon_{YY} = \frac{1}{E^e} (\sigma_{YY} - \nu^e \sigma_{XX}) + \alpha^e T, \\ \varepsilon_{XY} = & \frac{\sigma_{XY}}{2G} \quad (25) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} E^e = E, \nu^e = \nu, \alpha = \alpha & \quad \text{for plane stress} \\ E^e = \frac{E}{1-\nu^2}, \nu^e = \frac{\nu}{1-\nu}, \alpha^e = (1+\nu)\alpha & \quad \text{for plane strain} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

and the material properties depend on the position. The

plane problems in FGMs can be solved by stress function method. By putting the following expressions for the stress components, the equilibrium Eqs. (23) are satisfied.

$$\sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial Y^2}, \quad \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial X^2}, \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 \chi}{\partial X \partial Y} \quad (27)$$

Substituting Eqs. (27) into Eqs. (25) and Eq. (24), the governing equation of plane thermal stresses for FGMs which the stress function must satisfy is obtained:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \left(\frac{1}{E^e} \nabla^2 \chi \right) - \frac{\partial^2}{\partial X^2} \left(\frac{1+\nu^e}{E^e} \frac{\partial^2 \chi}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left(\frac{1+\nu^e}{E^e} \frac{\partial^2 \chi}{\partial X^2} \right) \\ + 2 \frac{\partial^2}{\partial X \partial Y} \left(\frac{1+\nu^e}{E^e} \frac{\partial^2 \chi}{\partial X \partial Y} \right) + \nabla^2 (\alpha^e T) = 0 \end{aligned} \quad (28)$$

Young's modulus E^e and the coefficient of the linear thermal expansion α^e may be expressed as a function of a variable y , and Poisson's ratio is constant:

$$E^e = E_0 e^{\gamma y}, \quad \alpha^e = \alpha_0 e^{\delta y}, \quad \nu^e = \nu_0 = \text{const.} \quad (29)$$

where E_0 , α_0 , ν_0 , γ and δ are material constants. When Young's modulus and the coefficient of the linear thermal expansion at the origin ($y=0$) are given by E_0 and α_0 , and those inside the body ($y=y_1$) are given by E_1 and α_1 respectively, coefficients γ and δ become

$$\gamma = (1/y_1) \ln(E_1/E_0), \quad \delta = (1/y_1) \ln(\alpha_1/\alpha_0) \quad (30)$$

Substitution of Eqs. (29) into Eq. (28) and introducing non-dimensional variables yields the governing Eq. for FGMs whose boundary is slanting to the functional gradation.

$$\begin{aligned} \nabla^4 \chi^* + 2\gamma^* \sin \theta \frac{\partial}{\partial X^*} (\nabla^2 \chi^*) - 2\gamma^* \cos \theta \frac{\partial}{\partial Y^*} (\nabla^2 \chi^*) + \gamma^{*2} \nabla^2 \chi^* \\ - \gamma^{*2} (1+\nu_0) (\cos^2 \theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial X^{*2}} + \sin^2 \theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial Y^{*2}} + \sin 2\theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial X^* \partial Y^*}) \\ = -e^{(\gamma^* + \delta^*)(-X^* \sin \theta + Y^* \cos \theta)} \\ \times (\nabla^2 T^* - 2\delta^* \sin \theta \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + 2\delta^* \cos \theta \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} + \delta^{*2} T^*) \end{aligned} \quad (31)$$

where non-dimensional stress function χ^* , non-dimensional material constants γ^* and δ^* are given by:

$$\chi^* = \frac{(1-\nu_0)k_c a \chi}{\alpha_c E_c q_0}, \quad \gamma^* = \gamma a, \quad \delta^* = \delta a \quad (32)$$

The general solution can be expressed as sum of the complementary solution χ_c^* and the particular solution χ_p^* :

$$\chi^* = \chi_c^* + \chi_p^* \quad (33)$$

In the first place, we assume the complementary solution χ_c^* of Eq. (31) by

$$\chi_c^* = e^{d^* X^*} \int_0^\infty g(Y^*) (F_1 \cos \beta^* X^* + F_2 \sin \beta^* X^*) d\beta^* \quad (34)$$

where d^* is an unknown constant while F_1 and F_2 are unknown coefficients. By substituting (34) into the left-hand side of Eq. (31), the following equations are obtained

$$\begin{aligned} G_1 g(Y^*) F_1 + G_2 g(Y^*) F_2 = 0 \\ G_2 g(Y^*) F_1 - G_1 g(Y^*) F_2 = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

where G_1 and G_2 are differential operators given by

$$\begin{aligned} G_1 = \frac{d^4}{dY^{*4}} - 2\gamma^* \cos \theta \frac{d^3}{dY^{*3}} + [2(d^{*2} - \beta^{*2}) + 2d^* \gamma^* \sin \theta + \gamma^{*2} - (1+\nu_0)\gamma^{*2} \sin^2 \theta] \frac{d^2}{dY^{*2}} \\ + 2\gamma^* \cos \theta [\beta^{*2} - d^{*2} - (1+\nu_0) d^* \gamma^* \sin \theta] \frac{d}{dY^*} + d^{*4} - 6d^{*2} \beta^{*2} + \beta^{*4} \\ + 2d^* \gamma^* (d^{*2} - 3\beta^{*2}) \sin \theta + (d^{*2} - \beta^{*2}) \gamma^{*2} [1 - (1+\nu_0) \cos^2 \theta] \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} G_2 = 2\beta^* (2d^* + \gamma^* \sin \theta) \frac{d^2}{dY^{*2}} - 2\beta^* \gamma^* \cos \theta [2d^* + (1+\nu_0)\gamma^* \sin \theta] \frac{d}{dY^*} \\ + 2\beta^* [2d^* (d^{*2} - \beta^{*2}) + (3d^{*2} - \beta^{*2}) \gamma^* \sin \theta + d^* \gamma^{*2} - (1+\nu_0) d^* \gamma^{*2} \cos^2 \theta] \end{aligned} \quad (37)$$

The function $g(Y^*)$ is assumed to be

$$g(Y^*) = e^{p^* Y^*} \quad (38)$$

Substitution of Eq. (38) into Eqs. (35) yields

$$[D_1(p^*) - iD_2(p^*)][D_1(\tilde{p}^*) + iD_2(\tilde{p}^*)] = 0 \quad (39)$$

where

$$\begin{aligned} D_1(p^*) = p^{*4} - 2\gamma^* \cos \theta p^{*3} + [2(d^{*2} - \beta^{*2}) + 2d^* \gamma^* \sin \theta + \gamma^{*2} - (1+\nu_0)\gamma^{*2} \sin^2 \theta] p^{*2} \\ + 2\gamma^* \cos \theta [\beta^{*2} - d^{*2} - (1+\nu_0) d^* \gamma^* \sin \theta] p^* + d^{*4} - 6d^{*2} \beta^{*2} + \beta^{*4} \\ + 2d^* \gamma^* (d^{*2} - 3\beta^{*2}) \sin \theta + (d^{*2} - \beta^{*2}) \gamma^{*2} [1 - (1+\nu_0) \cos^2 \theta] \end{aligned} \quad (40)$$

$$D_2(p^*) = 2\beta^* (2d^* + \gamma^* \sin \theta) p^{*2} - 2\beta^* \gamma^* \cos \theta [2d^* + (1+\nu_0)\gamma^* \sin \theta] p^*$$

$$+2\beta^*[2d^*(d^{*2}-\beta^{*2})+(3d^{*2}-\beta^{*2})\gamma^*\sin\theta+d^*\gamma^{*2}-(1+\nu_0)d^*\gamma^{*2}\cos^2\theta] \quad (41)$$

Two characteristic equations are obtained from Eq. (39):

$$\begin{aligned} p^{*4}-2\gamma^*\cos\theta p^{*3}+[2(d^{*2}-\beta^{*2})+2d^*\gamma^*\sin\theta+\gamma^{*2}-(1+\nu_0)\gamma^{*2}\sin^2\theta-2i\beta^*(2d^*+\gamma^*\sin\theta)]p^{*2} \\ +2\gamma^*\cos\theta\{\beta^{*2}-d^{*2}-(1+\nu_0)d^*\gamma^*\sin\theta+i\beta^*[2d^*+(1+\nu_0)\gamma^*\sin\theta]\}p^* \\ +d^{*4}-6d^{*2}\beta^{*2}+\beta^{*4}+2d\gamma^*(d^{*2}-3\beta^{*2})\sin\theta \\ +(d^{*2}-\beta^{*2})\gamma^{*2}[1-(1+\nu_0)\cos^2\theta]-2i\beta^*[2d^*(d^{*2}-\beta^{*2}) \\ +(3d^{*2}-\beta^{*2})\gamma^*\sin\theta+d^*\gamma^{*2}-(1+\nu_0)d^*\gamma^{*2}\cos^2\theta]=0 \quad (42) \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \tilde{p}^{*4}-2\gamma^*\cos\theta\tilde{p}^{*3}+[2(d^{*2}-\beta^{*2})+2d^*\gamma^*\sin\theta+\gamma^{*2}-(1+\nu_0)\gamma^{*2}\sin^2\theta+2i\beta^*(2d^*+\gamma^*\sin\theta)]\tilde{p}^{*2} \\ +2\gamma^*\cos\theta\{\beta^{*2}-d^{*2}-(1+\nu_0)d^*\gamma^*\sin\theta-i\beta^*[2d^*+(1+\nu_0)\gamma^*\sin\theta]\}\tilde{p}^* \\ +d^{*4}-6d^{*2}\beta^{*2}+\beta^{*4}+2d\gamma^*(d^{*2}-3\beta^{*2})\sin\theta \\ +(d^{*2}-\beta^{*2})\gamma^{*2}[1-(1+\nu_0)\cos^2\theta]+2i\beta^*[2d^*(d^{*2}-\beta^{*2}) \\ +(3d^{*2}-\beta^{*2})\gamma^*\sin\theta+d^*\gamma^{*2}-(1+\nu_0)d^*\gamma^{*2}\cos^2\theta]=0 \quad (43) \end{aligned}$$

Taking characteristic roots whose real parts are negative obtained from Eqs. (42) and (43), the complementary solution (34) becomes

$$\chi_c^*=e^{d^*X^*}\int_0^\infty\sum_{k=1}^2[A_k^*(\beta^*)e^{p_k^*Y^*-i\beta^*X^*}+\tilde{A}_k^*(\beta^*)e^{\tilde{p}_k^*Y^*+i\beta^*X^*}]d\beta^* \quad (44)$$

In the next place, we consider the particular solution of governing Eq. (31). Substituting the temperature distribution (22) into the right-hand side of Eq. (31) yields

$$\begin{aligned} \nabla^4\chi^*+2\gamma^*\sin\theta\frac{\partial}{\partial X^*}(\nabla^2\chi^*)-2\gamma^*\cos\theta\frac{\partial}{\partial Y^*}(\nabla^2\chi^*)+\gamma^{*2}\nabla^2\chi^* \\ -\gamma^{*2}(1+\nu_0)(\cos^2\theta\frac{\partial^2\chi^*}{\partial X^{*2}}+\sin^2\theta\frac{\partial^2\chi^*}{\partial Y^{*2}}+\sin 2\theta\frac{\partial^2\chi^*}{\partial X^*\partial Y^*})=-e^{(\gamma^*+\delta^*\frac{\lambda^*}{2})(-X^*\sin\theta+Y^*\cos\theta)} \\ \times\int_0^\infty\left\{\left[(\lambda^{*2}/2-\delta^*\lambda^*+\delta^{*2}+(\lambda^*-2\delta^*)\cos\theta\sqrt{\beta^{*2}+\lambda^{*2}/4})T_A^*+(\lambda^*-2\delta^*)\beta^*\sin\theta T_B^*\right]\cos\beta^*X^* \right. \\ \left. +[(2\delta^*-\lambda^*)\beta^*\sin\theta T_A^*+\frac{\lambda^{*2}}{2}-\delta^*\lambda^*+\delta^{*2}+(\lambda^*-2\delta^*)\cos\theta\sqrt{\beta^{*2}+\lambda^{*2}/4})T_B^*\sin\beta^*X^*\right\}\exp(-\sqrt{\beta^{*2}+\lambda^{*2}/4}Y^*)d\beta^* \\ -e^{(\gamma^*+\delta^*\frac{\lambda^*}{2})(-X^*\sin\theta+Y^*\cos\theta)}\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-[\beta^{*2}+\mu^{*2}+(\lambda^*/2)^2]Y^*}T_c^* \\ \times\left(\mu^*\{[\beta^{*2}-\delta^{*2}+\mu^{*2}+(\lambda^{*2}/4)\cos 2\theta+\delta^*\lambda^*\sin^2\theta]T_A^*(\beta^*) \right. \\ \left. +(2\delta^*-\lambda^*)\beta^*\sin\theta T_B^*(\beta^*)\}\cos\beta^*X^*\cos\mu^*Y^* \right. \\ \left. +\{[(\lambda^*\cos\theta/2)(\beta^{*2}-\mu^{*2}-\lambda^{*2}/4+\delta^*\lambda^*-\delta^{*2})+2\delta^*\mu^{*2}\cos\theta]T_A^*(\beta^*) \right. \\ \left. +\beta^*\lambda^*\sin\theta\cos\theta(\delta^*-\lambda^*/2)T_B^*\}\cos\beta^*X^*\sin\mu^*Y^* \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} +\{\beta^*\mu^*(\lambda^*-2\delta^*)T_A^*+\mu^*[\beta^{*2}-\delta^{*2}+\mu^{*2}+(\lambda^{*2}/4)\cos 2\theta+\delta^*\lambda^*\sin^2\theta]T_B^*(\beta^*)\} \\ \times\sin\beta^*X^*\cos\mu^*Y^*+\{\beta^*\lambda^*\sin\theta\cos\theta(\lambda^*/2-\delta^*)T_A^* \\ +[(\lambda^*\cos\theta/2)(\beta^{*2}-\delta^{*2}-\mu^{*2}-\lambda^{*2}/4+\delta^*\lambda^*) \\ +2\delta^*\mu^{*2}\cos\theta]T_B^*\}\sin\beta^*X^*\sin\mu^*Y^*)d\mu^*d\beta^* \quad (45) \end{aligned}$$

where $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ are given by (16) and (17) and T_c^* is given by (21). We assume the particular solution χ_p^* of governing Eq. (31) by

$$\begin{aligned} \chi_p^*=e^{\xi^*X^*+\eta^*Y^*}\int_0^\infty(A_p^*\cos\beta^*X^*+B_p^*\sin\beta^*X^*)\exp[-\sqrt{\beta^{*2}+(\frac{\lambda^*}{2})^2}Y^*]d\beta^* \\ +e^{\xi^*X^*+\eta^*Y^*}\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-[\beta^{*2}+\mu^{*2}+(\lambda^*/2)^2]Y^*}T_c^*C_p^*(\cos\beta^*X^*+D_p^*\sin\beta^*X^*) \\ \times(\cos\mu^*Y^*+E_p^*\sin\mu^*Y^*)d\beta^*d\mu^* \quad (46) \end{aligned}$$

In the particular solution (46), A_p^* and B_p^* are constants which are determined by solving the following equations which are derived by substituting (46) into Eq. (45):

$$\begin{bmatrix} C_1^* & C_2^* \\ -C_2^* & C_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p^* \\ B_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^* \\ R_2^* \end{bmatrix} \quad (47)$$

where

$$\begin{aligned} C_1^*= \xi^{*4}+2\gamma^*\sin\theta\xi^{*3}+[-4\beta^{*2}+\gamma^{*2}+2\eta^{*2}-2\gamma^*\eta^*\cos\theta+2(\lambda^*/2)^2 \\ +2(\gamma^*\cos\theta-2\eta^*)\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\xi^{*2}+2\gamma^*\sin\theta \\ \times[-2\beta^{*2}+\eta^{*2}+(\lambda^*/2)^2-2\eta^*\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\xi^*+\eta^{*4}-2[\gamma^*\cos\theta+2\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\eta^{*3} \\ +[4\beta^{*2}+\gamma^{*2}+3\lambda^{*2}/2+6\gamma^*\cos\theta\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\eta^{*2} \\ -\{2\gamma^*\cos\theta[2\beta^{*2}+3(\lambda^*/2)^2]+(2\gamma^{*2}+\lambda^{*2})\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}\}\eta^* \\ +(\lambda^*/2)^4+(\lambda^*/2)^2[\gamma^{*2}+2\gamma^*\cos\theta\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]+(1+\nu_0)\gamma^{*2}\{(\beta^{*2}-\xi^{*2})\cos^2\theta \\ -[\beta^{*2}+\eta^{*2}+(\lambda^*/2)^2-2\eta^*\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\sin^2\theta-\xi^*\sin 2\theta[\eta^*-\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\} \quad (48) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2^*= 4\beta^*\xi^{*3}+6\beta^*\gamma^*\sin\theta\xi^{*2} \\ +\beta^*[2\gamma^{*2}+\lambda^{*2}+4\eta^*(\eta^*-\gamma^*\cos\theta)+4(\gamma^*\cos\theta-2\eta^*)\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\xi^* \\ +2\beta^*\gamma^*\sin\theta[\eta^{*2}+(\lambda^*/2)^2-2\eta^*\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}] \\ -2(1+\nu_0)\beta^*\gamma^{*2}\cos\theta\{\xi^*\cos\theta+[\eta^*-\sqrt{\beta^{*2}+(\lambda^*/2)^2}]\sin\theta\} \quad (49) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1^*=-\{[\frac{\lambda^{*2}}{2}-\delta^*\lambda^*+\delta^{*2}+(\lambda^*-2\delta^*)\cos\theta\sqrt{\beta^{*2}+(\frac{\lambda^*}{2})^2}]T_A^* \\ +(\lambda^*-2\delta^*)\beta^*\sin\theta T_B^*\} \quad (50) \end{aligned}$$

$$R_2^* = -(2\delta^* - \lambda^*)\beta^* \sin \theta T_A^*(\beta^*) \\ + \left[\frac{\lambda^{*2}}{2} - \delta^* \lambda^* + \delta^{*2} + (\lambda^* - 2\delta^*) \cos \theta \sqrt{\beta^{*2} + \left(\frac{\lambda^*}{2}\right)^2} \right] T_B^*(\beta^*) \quad (51)$$

$$\xi^* = -(\gamma^* + \delta^* - \frac{\lambda^*}{2}) \sin \theta \quad (52)$$

$$\eta^* = (\gamma^* + \delta^* - \frac{\lambda^*}{2}) \cos \theta \quad (53)$$

Similarly, in the particular solution (46), C_p^* , D_p^* , and E_p^* are constants which are determined by solving the following equations which are derived by substituting (46) into Eq. (45):

$$\begin{bmatrix} H_1^* & H_2^* & H_3^* & H_4^* \\ -H_2^* & H_1^* & -H_4^* & H_3^* \\ -H_3^* & -H_4^* & H_1^* & H_2^* \\ H_4^* & -H_3^* & -H_2^* & H_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_p^* \\ C_p^* E_p^* \\ C_p^* D_p^* \\ C_p^* D_p^* E_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^* \\ S_2^* \\ S_3^* \\ S_4^* \end{bmatrix} \quad (54)$$

where

$$H_1^* = (\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - \mu^{*2}) + (2\gamma^* \xi^* \sin \theta - 2\gamma^* \eta^* \cos \theta + \gamma^{*2})(\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - \mu^{*2}) \\ + 4(\gamma^* \eta^* \mu^* \cos \theta - \beta^{*2} \xi^{*2} - \eta^{*2} \mu^{*2} - \beta^{*2} \gamma^* \xi^* \sin \theta) \\ - (1 + \nu_0) \gamma^{*2} [(\xi^{*2} - \beta^{*2}) \cos^2 \theta + (\eta^{*2} - \mu^{*2}) \sin^2 \theta + \xi^* \eta^* \sin 2\theta] \quad (55)$$

$$H_2^* = 2\mu^* (2\eta^* - \gamma^* \cos \theta)(\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - \mu^{*2}) + 4\gamma^* \xi^* \eta^* \mu^* \sin \theta - 4\gamma^* \eta^{*2} \mu^* \cos \theta \\ + 2\gamma^{*2} \eta^* \mu^* - (1 + \nu_0) \gamma^{*2} \mu^* (2\eta^* \sin^2 \theta + \xi^* \sin 2\theta) \quad (56)$$

$$H_3^* = 2\beta^* (2\xi^* + \gamma^* \sin \theta)(\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - \mu^{*2}) + 4\beta^* \gamma^* \xi^{*2} \sin \theta - 4\beta^* \gamma^* \xi^* \eta^* \cos \theta \\ + 2\beta^{*2} \gamma^{*2} \xi^* - (1 + \nu_0) \beta^{*2} \gamma^{*2} (2\xi^* \cos^2 \theta + \eta^* \sin 2\theta) \quad (57)$$

$$H_4^* = \beta^* \mu^* [8\xi^* \eta^* + 4\gamma^* \eta^* \sin \theta - 4\gamma^* \xi^* \cos \theta - (1 + \nu_0) \gamma^{*2} \sin 2\theta] \quad (58)$$

$$S_1^* = -\mu^* [\beta^{*2} - \delta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^{*2} / 4) \cos 2\theta + \delta^* \lambda^* \sin^2 \theta] T_A^*(\beta^*) \\ - \beta^* \mu^* (2\delta^* - \lambda^*) \sin \theta T_B^* \quad (59)$$

$$S_2^* = -[(\lambda^* / 2) \cos \theta (\beta^{*2} - \delta^{*2} - \mu^{*2} - \lambda^{*2} / 4 + \delta^* \lambda^*) + 2\delta^* \mu^{*2} \cos \theta] T_A^*(\beta^*) \\ - \beta^* \lambda^* (\delta^* - \lambda^* / 2) \sin \theta \cos \theta T_B^* \quad (60)$$

$$S_3^* = -\beta^* \mu^* (\lambda^* - 2\delta^*) \sin \theta T_A^* \\ - \mu^* [\beta^{*2} - \delta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^{*2} / 4) \cos 2\theta + \delta^* \lambda^* \sin^2 \theta] T_B^*(\beta^*) \quad (61)$$

$$S_4^* = -\beta^* \lambda^* (\lambda^* / 2 - \delta^*) \sin \theta \cos \theta T_A^*$$

$$-[(\lambda^* / 2) \cos \theta (\beta^{*2} - \delta^{*2} - \mu^{*2} - \lambda^{*2} / 4 + \delta^* \lambda^*) + 2\delta^* \mu^{*2} \cos \theta] T_B^*(\beta^*) \quad (62)$$

Thermal stresses can be obtained from Eq. (27) using (44) and (46):

$$\sigma_{XX}^*(X^*, Y^*) = e^{d^* X^*} \int_0^{\infty} \sum_{k=1}^2 (p_k^{*2} \tilde{A}_k^* e^{p_k^* Y^* - i\beta^* X^*} + \tilde{p}_k^{*2} \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^* + i\beta^* X^*}) d\beta^* \\ + e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^{\infty} [\beta^{*2} + \eta^{*2} + \lambda^{*2} / 4 - 2\eta^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4}] [A_p^* \cos \beta^* X^* + B_p^* \sin \beta^* X^*] \exp[-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^*] d\beta^* \\ + e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-[\beta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^* / 2)^2] Y^*} T_e^* C_p^* (\cos \beta^* X^* + D_p^* \sin \beta^* X^*) \\ \times \{(\eta^{*2} - \mu^{*2} + 2\eta^* \mu^* E_p^*) \cos \mu^* Y^* + [-2\eta^* \mu^* + (\eta^{*2} - \mu^{*2}) E_p^*] \sin \mu^* Y^*\} d\mu^* d\beta^* \quad (63)$$

$$\sigma_{YY}^*(X^*, Y^*) = e^{d^* X^*} \int_0^{\infty} \sum_{k=1}^2 [(d^{*2} - \beta^{*2} - 2id^* \beta^*) \tilde{A}_k^* e^{p_k^* Y^* - i\beta^* X^*} + (d^{*2} - \beta^{*2} + 2id^* \beta^*) \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^* + i\beta^* X^*}] d\beta^* \\ + e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^{\infty} \{[(d^{*2} - \beta^{*2}) A_p^* + 2\beta^* d^* B_p^*] \cos \beta^* X^* + [-2\beta^* d^* A_p^* + (d^{*2} - \beta^{*2}) B_p^*] \sin \beta^* X^*\} \exp[-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^*] d\beta^* \\ + e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-[\beta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^* / 2)^2] Y^*} T_e^* C_p^* \{[(\xi^{*2} - \beta^{*2}) + 2\beta^* \xi^* D_p^*] \cos \beta^* X^* \\ + [-2\beta^* \xi^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) D_p^*] \sin \beta^* X^*\} (\cos \mu^* Y^* + E_p^* \sin \mu^* Y^*) d\beta^* d\mu^* \quad (64)$$

$$\sigma_{XY}^*(X^*, Y^*) = -e^{d^* X^*} \int_0^{\infty} \sum_{k=1}^2 [(d^* - i\beta^*) P_k^* A_k^* e^{p_k^* Y^* - i\beta^* X^*} + (d^* + i\beta^*) \tilde{P}_k^* \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^* + i\beta^* X^*}] d\beta^* \\ - e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^{\infty} [\eta^* - \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4}] [(d^* A_p^* + \beta^* B_p^*) \cos \beta^* X^* + (-\beta^* A_p^* + d^* B_p^*) \sin \beta^* X^*] \exp[-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^*] d\beta^* \\ - e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} e^{-[\beta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^* / 2)^2] Y^*} T_e^* C_p^* \{[(\xi^* + \beta^* D_p^*) \cos \beta^* X^* + (-\beta^* + \xi^* D_p^*) \sin \beta^* X^*] \\ [(\eta^* + \mu^* E_p^*) \cos \mu^* Y^* + (-\mu^* + \eta^* E_p^*) \sin \mu^* Y^*]\} d\beta^* d\mu^* \quad (65)$$

The boundary conditions for stresses are assumed to be:

$$\sigma_{YY}^* = \sigma_{XY}^* = 0 \quad \text{on } Y^* = 0 \quad (66)$$

The unknown coefficients d^* , $A_k^*(\beta^*)$, $\tilde{A}_k^*(\beta^*)$

($k = 1, 2$) in thermal stresses expressed by Eq. (63), (64) and (65) can be determined by the following equations obtained from the boundary conditions (66).

$$d^* = \xi^* \quad (67)$$

$$\sum_{k=1}^2 \{[\beta^{*2} - \xi^{*2} + 2i\beta^* \xi^*] A_k^* + [\beta^{*2} - \xi^{*2} - 2i\beta^* \xi^*] \tilde{A}_k^*\} = (\xi^{*2} - \beta^{*2}) A_p^* + 2\beta^* \xi^* B_p^* \\ + \int_0^{\infty} e^{-(\beta^{*2} + \mu^{*2} + \lambda^{*2} / 4) Y^*} T_e^* C_p^* (\xi^{*2} - \beta^{*2} + 2\beta^* \xi^* D_p^*) d\mu^* \quad (68)$$

$$\sum_{k=1}^2 \{ [2\beta^* \xi^* - i(\beta^{*2} - \xi^{*2})] A_k^* + [2\beta^* \xi^* + i(\beta^{*2} - \xi^{*2})] \tilde{A}_k^* \} = -2\beta^* \xi^* A_p^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) B_p^* + \int_0^\infty e^{-(\beta^{*2} + \mu^{*2} + \lambda^{*2}/4)t^*} T_e^* C_p^* [-2\beta^* \xi^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) D_p^*] d\mu^* \quad (69)$$

$$\sum_{k=1}^2 [(\xi^* - i\beta^*) A_k^* p_k^* + (\xi^* + i\beta^*) \tilde{A}_k^* \tilde{p}_k^*] = -(\xi^* A_p^* + \beta^* B_p^*) [\eta^* - \sqrt{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2}] - \int_0^\infty e^{-(\beta^{*2} + \mu^{*2} + \lambda^{*2}/4)t^*} T_e^* C_p^* (\xi^* + \beta^* D_p^*) (\eta^* + \mu^* E_p^*) d\mu^* \quad (70)$$

$$\sum_{k=1}^2 [(\beta^* + i\xi^*) A_k^* p_k^* + (\beta^* - i\xi^*) \tilde{A}_k^* \tilde{p}_k^*] = -(\beta^* A_p^* - \xi^* B_p^*) [\eta^* - \sqrt{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2}] + \int_0^\infty e^{-(\beta^{*2} + \mu^{*2} + \lambda^{*2}/4)t^*} T_e^* C_p^* (-\beta^* + \xi^* D_p^*) (\eta^* + \mu^* E_p^*) d\mu^* \quad (71)$$

3. Results and Discussions

The numerical calculations are carried out for unsteady thermal stresses of semi-infinite body whose boundary is slanting to the functional gradation. The non-dimensional geometric function $q^*(X^*)$ of heat flux in boundary condition (14) is definitely given by the following forms.

$$q^*(X^*) = H(1 - |X^*|) \quad (72)$$

where $H(\cdot)$ denotes the Heaviside's step function. Substituting Eq. (72) into (16) and (17) gives the definite form of coefficients $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ in temperature distribution (15).

$$T_A^*(\beta^*) = \frac{\lambda^* \sin \theta \cos \beta^* \sinh(\lambda^* \sin \theta / 2) + 2\beta^* \sin \beta^* \cosh(\lambda^* \sin \theta / 2)}{\pi[(\lambda^* / 2) \cos \theta + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4}][\beta^{*2} + (\lambda^{*2} \sin^2 \theta / 4)]} \quad (73)$$

$$T_B^*(\beta^*) = \frac{\lambda^* \sin \theta \sin \beta^* \cosh(\lambda^* \sin \theta / 2) - 2\beta^* \cos \beta^* \sinh(\lambda^* \sin \theta / 2)}{\pi[(\lambda^* / 2) \cos \theta + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4}][\beta^{*2} + (\lambda^{*2} \sin^2 \theta / 4)]} \quad (74)$$

The thermo-mechanical properties are determined by the following manner. When the thermal conductivity k_c , Young's modulus E_c and coefficient of thermal expansion α_c for ceramic at some position $(b^*, 0)$ are known and k_m , E_m and α_m for metal at another position $(-b^*, h^*)$ are known, then the non-dimensional values of λ in Eq.3 and γ , δ in Eq.29 are given by the following relations.

$$\delta^* = \ln(\alpha_m / \alpha_c) / (2b^* \sin \theta + h^* \cos \theta), \gamma^* = \ln(E_m / E_c) / (2b^* \sin \theta + h^* \cos \theta) \\ \lambda^* = \ln(k_m / k_c) / (2b^* \sin \theta + h^* \cos \theta) \quad (75)$$

where $\delta^* = \delta a$, $\gamma^* = \gamma a$, $\lambda^* = \lambda a$, $b^* = b/a$, $h^* = h/a$. The values of κ_0 , E_0 and α_0 in Eq.3 and Eq.29 are given by the following relations.

$$\alpha_0 = \alpha_c e^{\delta^* b^* \sin \theta}, E_0 = E_c e^{\gamma^* b^* \sin \theta}, k_0 = k_c e^{\lambda^* b^* \sin \theta} \quad (76)$$

Non-dimensional temperature and stresses are defined by the followings:

$$T^* = T k_c / (q_0 a), \sigma_{xx}^* = \sigma_{xx} (1 - \nu_0) k_c / (\alpha_c E_c q_0 a), \\ \sigma_{yy}^* = \sigma_{yy} (1 - \nu_0) k_c / (\alpha_c E_c q_0 a), \sigma_{xy}^* = \sigma_{xy} (1 - \nu_0) k_c / (\alpha_c E_c q_0 a) \quad (77)$$

Functionally graded semi-infinite body (FGSIB) which is made by the partial stabilized zinc (ZrO₂) and Titanium alloy (Ti-6Al-4V) is considered. The material properties of ZrO₂ and Ti-6Al-4V are shown in **Table 1**. Poisson's ratios ν for both ZrO₂ and Ti-6Al-4V are assumed to be 0.333. Two constants to indicate the positions for known properties of ceramic and metal are taken as $b^* = 2.0$, $h^* = 0.2$.

Table 1 The thermo-mechanical properties of ZrO₂ and Ti-6Al-4V

Material	Thermal Conductivity W/(mK)	Coefficient of linear thermal expansion $\times 10^{-6}$ 1/K	Young's Modulus GPa
ZrO ₂	2.036	7.11	110
Ti-6Al-4V	18.1	10.3	66.2

Fig.2 shows the variation of surface temperature in process of time with slanting angle $\theta = 15^\circ$. The range of partial heating is $-1.0 \leq X^* \leq 1.0$ on the surface. The initial temperature at $t^* = 0.0$ is kept to zero over the body. The temperature rises with the lapse of time. The temperature of ceramic rich (right-hand) side is higher than that of metal rich (left-hand) side because of small thermal conductivity of ceramic.

The position of the maximum temperature approaches to $X^* = 0.60$ from the right side with the lapse of time.

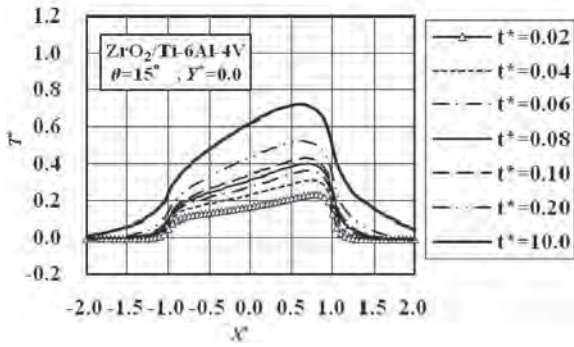


Fig.2 The variation of the surface temperature in process of time with slanting angle $\theta=15^\circ$

The surface thermal stress σ_{xx}^* in process of time with slanting angle $\theta=15^\circ$ is depicted in **Fig.3**. The maximum compressive stress occurs at time $t^*=0.2$. The position of the maximum stress ($X^*=0.65$ at $t^*=0.002$) moves to the left side ($X^*=0.35$ at $t^*=10.0$) with the lapse of time.

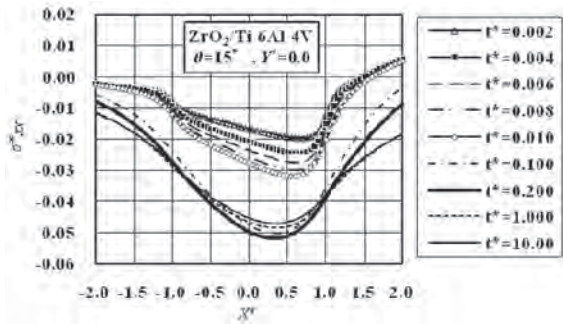


Fig.3 The surface thermal stress σ_{xx}^* in process of time with slanting angle $\theta=15^\circ$

The effect of increasing angle θ on surface thermal stress σ_{xx}^* at time $t^*=0.2$ is seen in **Fig.4**. The stress distribution is symmetric with $\theta=0^\circ$, but the position of maximum compressive stress for each angle shifts from the center ($\theta=0^\circ$) to the right (ceramic rich) side with increasing angle.

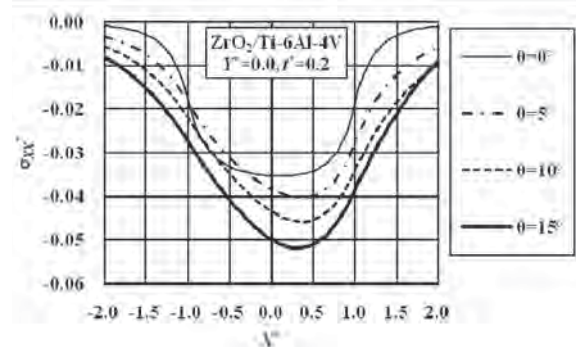


Fig.4 The effect of increasing angle on surface thermal stress σ_{xx}^* at time $t^*=0.2$.

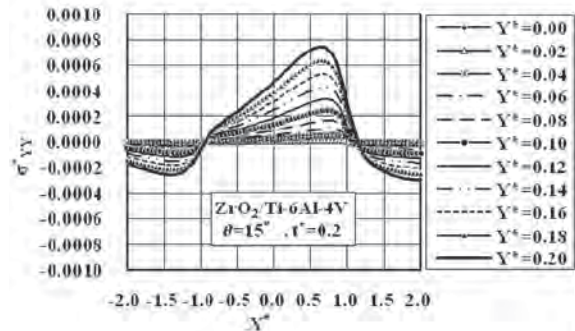


Fig.5 The thermal stress σ_{yy}^* for various depth from the surface with slanting angle $\theta=15^\circ$ at time $t^*=0.2$

compressive stress occurs on the right (ceramic rich) side, but the absolute value of σ_{yy}^* is also much smaller than that of σ_{xx}^* .

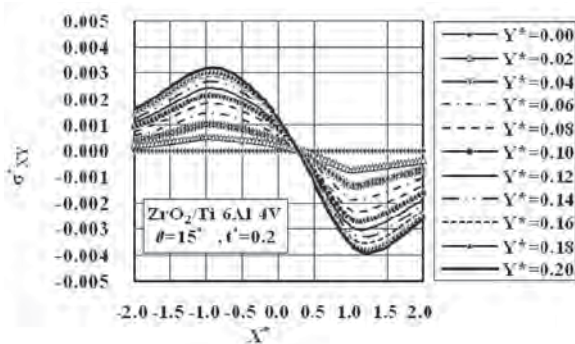


Fig.6 Thermal stress σ_{xy}^* for various depth from the surface with slanting angle $\theta=15^\circ$ at time $t^*=0.2$.

4. Conclusions

Two dimensional unsteady thermal stress field in the functionally graded semi-infinite body (FGSIB) with the slanting boundary to the functional graduation subjected to

prescribed surface heat flux is discussed. Thermal stresses in process of time with certain slanting angle in the $ZrO_2 / Ti-6Al-4V$ FGM are shown in figures.

The conclusions are:

- (1) An analytical technique for two dimensional unsteady thermal stresses in the FGSIB with the slanting boundary to the functionally graded direction is proposed by introducing the stress function.
- (2) The maximum compressive stress on the heating surface with slanting angle $\theta=15^\circ$ occurs at time $t^*=0.20$.
- (3) The position of maximum compressive stress for each angle shifts from the center to the right side with increasing angle.

References

- 1) N. Noda, Thermal stresses in functionally graded materials, *Journal of Thermal Stresses*, Vol.22, No.4/5, pp.477-512, (1999).
- 2) Y. M. Shabana and N. Noda, Combined macroscopic and microscopic analysis of thermo-elasto-plastic stresses of functionally graded material plate, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 24, No. 8, pp. 799-815, (2001).
- 3) Y. M. Shabana and N. Noda, Thermo-elasto-plastic stresses of functionally graded materials with a substrate and a coating, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 25, No. 12, pp.1133-1146, (2002).
- 4) Y. M. Shabana and N. Noda, Thermo-elasto-elastic stresses of functionally graded ceramic/metal composite with two-dimensional temperature gradient, *International Journal of Computational Engineering Science*, Vol. 5, No. 4, pp. 893-911, (2004).
- 5) M. Nemat-Alla, Reduction of thermal stresses by developing two-dimensional functionally graded materials, *Int J Solids Structures*, Vol. 40, No. 26, pp.7339-7356, (2003).
- 6) Y. Ootao, and Y. Tanigawa, Three-dimensional transient thermal stresses of functionally graded rectangular plate due to partial heating, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 22, No.1, pp.581-589, (1999).
- 7) Ohmichi, M. and Noda, N., Two-dimensional heat conduction problem in a functionally graded plate with a slanting boundary to the functional gradation, *J. Thermal Stresses*, 30-7, pp.715-730, (2007).
- 8) Ohmichi, M. and Noda, N., Plane thermo elastic problem in a functionally graded plate with an oblique boundary to the functional graded direction, *J. Thermal Stresses*, 30(8), 779-799, (2007).
- 9) Ohmichi, M. and Noda, N., Thermal stresses in the semi-infinite body with an oblique boundary to the functionally graded direction, *J. Solid Mech. and Materials Eng.*, 1(10), 1238-1250, (2007).
- 10) Ohmichi, M. and Noda, N., The effect of oblique functional gradation to thermal stresses in the functionally graded infinite strip, *Acta Mechanica*, 196(3/4), 219-237, (2008).
- 11) Ohmichi, M. and Noda, The effect of oblique functional gradation to transient thermal stresses in the functionally graded infinite strip, *Acta Mechanica*, 212-3/4, .219-232, (2010).

RFID 信号伝搬の FDTD 法による電界分布および受信特性解析

宮崎保光, 野村良雄, 高橋港一

(2010年9月30日 受理)

FDTD Analysis of Electric field Intensities and Receiving Characteristics of Signal Propagation for RFID Systems

Yasumitsu Miyazaki, Yoshio Nomura and Koichi Takahashi

(Received September 30, 2010)

Abstract

In recent years, RFID systems have received much attention in information management and security. For evaluation of RFID systems, study of electromagnetic wave propagation and scattering of UHF wave and microwave transmitted from tag antenna to reader antenna in in-door and out-door is indispensable. In this paper, we describe the characteristics of electromagnetic wave scattering, diffraction and interference by obstacles in propagation channel and show the distribution of received level using FDTD method. In transmitting and receiving points of the weak electromagnetic wave, receiving characteristics are influenced by the propagation environment. In RFID systems, receiving characteristics are strongly influenced by the structure of roads and buildings for out-door environment and rooms, doors and windows for in-door environment. Three-dimensional analysis is studied by numerical simulation for the optimum design of RFID system. Comparing the results of two dimensional analysis and three dimensional analysis, the effects of the earth of roads and building with finite heights for out-door application and effects of ceil and floor of buildings for in-door application can be evaluated. Signal processing and control are important to recognize each tag code correctly even if multiple codes from tags are received by a reader simultaneously. In this paper, received characteristics when multiple tags transmit a pulse are studied by FDTD method and compared with the analytical results.

キーワード: RFID, 無線通信, 伝搬, 散乱, FDTD 法

Keywords: RFID, Radio communication, Propagation, Scattering, FDTD method

1. はじめに

近年, RFID システムは情報管理, セキュリティや運送および医療の分野等において注目を集めている¹⁻³⁾. 医療分野においては, 中高年の増加と老人の高齢化についての医療福祉, 地域における地方病院および開業医の医師不足, 緊急医療の不十分な体制が重要な課題になっており, これらの課題を情報技術および高度なネットワーク技術によって解決することが期待されている.

患者や医師, 薬剤にタグを貼り付けてその動きを監視することにより, 危険な行為を防止したり, 患者の取り違えや投薬ミスなどの医療過誤を未然に防ぐことができる. また, 患者が人目のつかない場所で倒れた場合など

の緊急事態にも迅速に対処できる. 電子カルテは, 患者の病歴や診療経過, 医療行為の実施情報を電子化してサーバに記録することにより, 医療情報を共有し, 医療の安全, 質の向上, 情報の一元管理によるコストの削減が期待できる⁴⁾. この電子カルテと RFID を組み合わせることにより, 患者の本人確認が正確かつスムーズになり, 医療事故の防止に貢献できる. アクティブ RFID を用いた電子カルテシステムの構成例を Fig.1 に示す. この他, 医療器具にタグを貼り付けることにより, 貸し出された医療器具の位置をリアルタイムで把握したり, 体内置き忘れなどの医療事故も防ぐことができる.

リーダの存在に無関係に, タグ自身が発信するアクティブ RFID はパッシブ RFID に比べ, 約数十メートルの

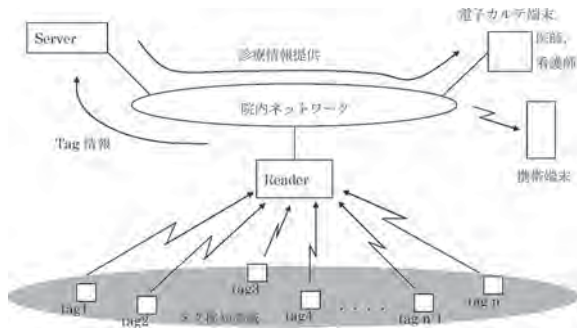


Fig.1 RFIDによる電子カルテシステム

長距離伝送が可能となる利点がある．アクティブRFIDでは，屋内外に設置されたリーダアンテナへタグアンテナからUHF帯およびマイクロ波帯電波を送信するため，タグ・リーダ間に障害物が存在すれば，長距離伝送の利点が活かされない．また，電波の受信特性は道路環境や建物，部屋構造によって強い影響を受けるため，道路や建物を含む様々な環境についての電波伝搬特性の検討がRFIDのシステム評価に必要となる^{5,6)}．

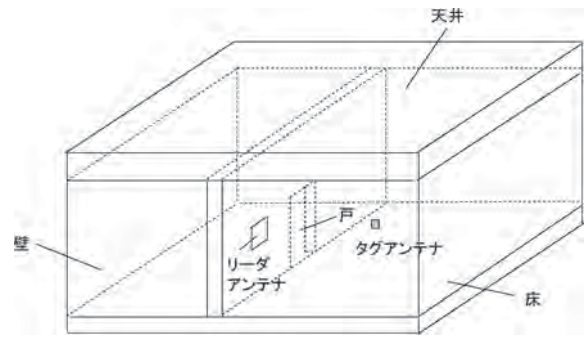
無線システムを効率良く設計するためには，伝搬路上に障害物があるときの電波伝搬特性の把握が必要であり，これまで筆者らはFDTD法の並列計算を用いて，都市部におけるマイクロ波を用いた高速データ通信について検討してきた⁷⁾．ここでは，物体による電波の散乱，回折，干渉などによる電波伝搬特性をFDTD法で解析し，受信電界強度分布を示す^{8,9)}．3次元シミュレーション解析によって，効率良く送受信するための最適なシステム設計を見出すことができると思われる¹⁰⁾．

本研究では，アクティブタグからの送信信号を受信可能なリーダ位置の推定および屋内外の様々なモデルにおける受信レベル分布のFDTD法による評価を目的として，RFIDに関する受信電界強度分布を求める．また，複数タグからの信号が重畳したときの，各符号系列を認識するための信号処理の検討として，複数タグから符号パルスを同時に送信したときのリーダにおける受信特性をFDTD法によって求め，解析解と比較する．

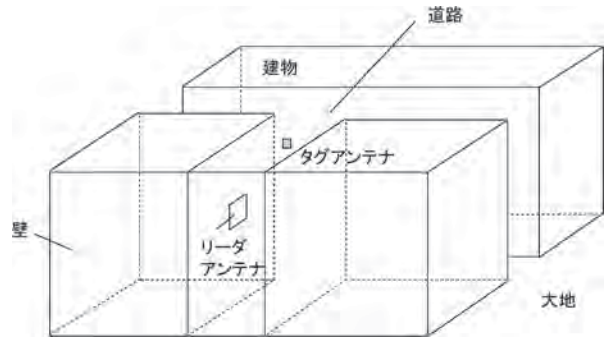
Fig.2(a)に示すように，室内伝搬モデルとして，複数の部屋とドアがある建物を考える．また屋外伝搬モデルとして建物に囲まれた道路モデルを考える．Fig.2(b)はT字路モデルを示している．

2. FDTD法による建造物内外電界分布解析

RFIDなどの無線システムを効率的に設計するためには，その利用環境における電波伝搬特性を詳細に把握する必要がある．特に室内においては，建物の構造や什器



(a) 屋内におけるRFIDシステム



(b) 屋外におけるRFIDシステム

Fig.2 RFIDシステムの利用例

による影響が大きく，複雑な伝搬となる．ここでは建物内における電磁波の散乱，回折，干渉による受信電界強度分布を示すために，FDTD法による解析を行った．これらの解析により，建造物外のリーダアンテナから建造物内のタグアンテナに電波を送信したときの様々な建造物の構造における受信特性について議論する．数値解析結果では，建造物内での電界強度分布が示され，特に受信電界強度が弱く，-30dB程度になるような場所について議論する．解析の対象となる無線システムの周波数として250MHz, 1GHzの代表的な周波数について示した．

FDTD法による解析では，解析領域内で平面波を励振させることにより，無線電波が遠方のアンテナから到来する状況を想定している．平面波の励振法として全電磁界/散乱界の定式化を用いている．FDTD法では座標についての離散化を $x=(i-i_0)\Delta s$, $y=(j-j_0)\Delta s$, $z=(k-k_0)\Delta s$ ($0 \leq i \leq N_x, 0 \leq j \leq N_y, 0 \leq k \leq N_z$) , 時間についての離散化を $t=n\Delta t$ とする．入射平面波は次式によって与える．

$$\mathbf{E} = E_z^n(i, j, k) \mathbf{i}_z = \mathbf{i}_z E_0 \sin(\omega n \Delta t - \mathbf{k}_r \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}'))$$

$$\mathbf{H} = H_x^n(i, j, k) \mathbf{i}_x + H_y^n(i, j, k) \mathbf{i}_y = \frac{k}{\omega \mu} \mathbf{i}_r \times \mathbf{E} \quad (1)$$

ここに， $\mathbf{i}_r = \cos \alpha \mathbf{i}_x - \sin \alpha \mathbf{i}_y$, $k = \omega / c$, $\omega = 2\pi f$,

$$\begin{aligned} \mathbf{r} - \mathbf{r}' &= (x - x')\mathbf{i}_x + (y - y')\mathbf{i}_y + (z - z')\mathbf{i}_z \\ &= (i - i_0)\Delta s + (j - j_0)\Delta s + (k - k_0)\Delta s \end{aligned}$$

c は真空中における光速, α は入射角度, f は周波数である.

3次元のFDTD法の差分式は, たとえば E_x について

$$\begin{aligned} E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) &= C_1 E_x^{n-1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \\ &+ C_2 \left\{ H_z^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2}, k\right) \right. \\ &\left. - H_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}\right) + H_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k - \frac{1}{2}\right) \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

H_x について

$$\begin{aligned} H_x^{n+1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) &= H_x^{n-1/2}\left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}\right) \\ &- C_3 \left\{ E_z^{n-1/2}\left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}\right) - E_z^{n-1/2}\left(i, j, k + \frac{1}{2}\right) \right. \\ &\left. - E_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1\right) + H_y^{n-1/2}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

式(2), (3)の係数 $C_1 \sim C_3$ は

$$C_1 = \frac{1 - \sigma\Delta t / (2\varepsilon)}{1 + \sigma\Delta t / (2\varepsilon)}, C_2 = \frac{\Delta t / (\varepsilon\Delta s)}{1 + \sigma\Delta t / (2\varepsilon)}, C_3 = \frac{\Delta t}{\mu_0\Delta s}$$

i, j, k は x - y - z 空間上の座標位置, n は時間ステップ数, $\Delta s = \Delta x = \Delta y = \Delta z$ は空間増分, Δt は時間増分である. ε, μ, σ はそれぞれ媒質の誘電率, 透磁率, 導電率である. コンクリート建物の比誘電率は $\varepsilon_r^* = 5.0 - j0.1$ を用いた. 解析結果として, 定常状態における電界強度

$$I(x, y) = 20 \log_{10} \left| \frac{E_{z, \max}(x, y)}{E_0} \right| \quad (4)$$

を示す. ただし E_0 は入射波の振幅, $E_{z, \max}(x, y)$ は定常電界の振幅を表している.

2.1 建造物内の電界分布

建造物内伝搬の2次元解析モデルを Fig.3 に示す.

周波数が 250MHz のときの解析結果を Fig.4 に示す. 建物が完全導体であるときの結果を Fig.4(a) に示す. Fig.4(b) はコンクリート建物の場合であり, 完全導体に比べて電界強度は全体的に強くなっているが, 窓の後方で弱くなっている場所がある. 周波数が 1GHz の場合の解析結果を Fig.5 に示す. 建物が完全導体であ

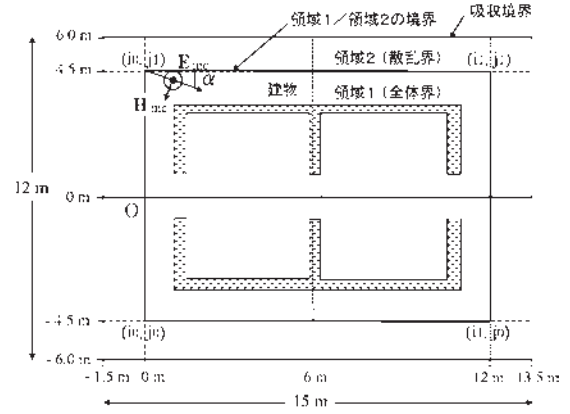
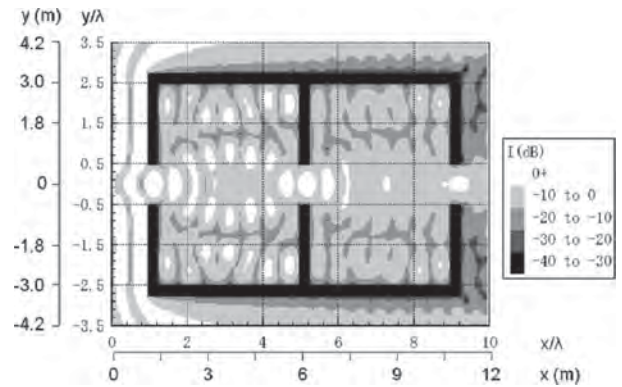
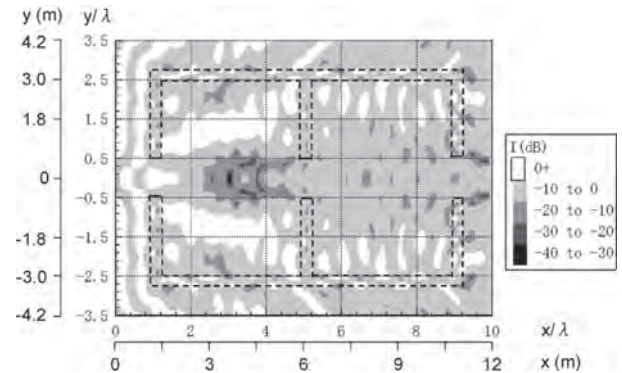


Fig.3 建造物内伝搬の解析モデル



(a) 完全導体建物



(b) コンクリート建物

Fig.4 周波数 250MHz(波長 $\lambda = 1.2$ m), 入射角度 $\alpha = 0^\circ$ による解析結果

る Fig.5(a) では, 窓を通り抜ける直線上に沿って電界強度が強くなっているが, 建物がコンクリートである Fig.5(b) では, 逆に窓の後方における強度が周囲の強度よりも弱くなる傾向がみられる.

3. FDTD 法による屋外電界分布解析

これまで, 遠方から平面波が入射したときの屋内外における電界強度分布を, 2次元 FDTD 法により検討した. ここでは, Fig.6 のように, 屋外に設置したリーダアンテナへタグアンテナから電波を送信したときの, 道路構

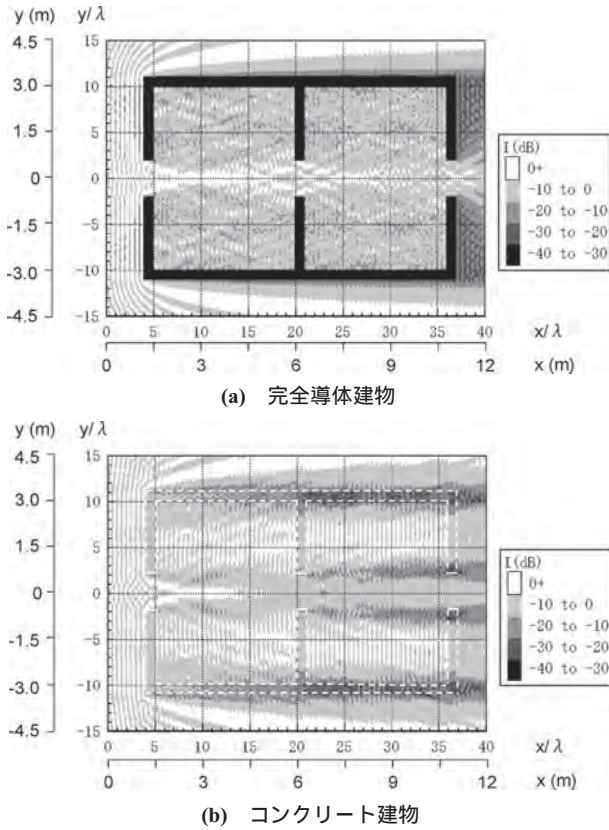


Fig.5 周波数 1GHz(波長 $\lambda=0.3\text{m}$), 入射角度 $\alpha=0^\circ$ による解析結果

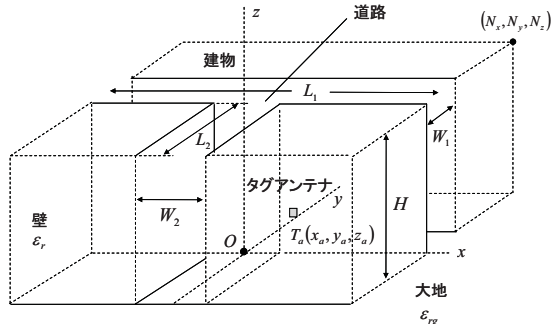


Fig.6 屋外伝搬の3次元解析モデル(T字路)

造による受信特性を示す. 3次元解析を行うことにより, 空と大地の影響を評価する. 3次元FDTD解析において, 解析領域内の波源は z または y 方向の線形偏波のダイポールアンテナとし, アンテナの給電点 $(x_a, y_a, z_a) = (i_a \Delta s, j_a \Delta s, k_a \Delta s)$ における電流 $J_s^n(i_a, j_a, k_a)$, $s = y, z$ を次式で与える.

$$J_s^n(i_a, j_a, k_a) = J_d \sin(2\pi f n \Delta t) \quad (5)$$

ここで, $f = 426\text{MHz}$, $J_d [\text{A}/\text{m}^2]$ は電流密度の振幅値, FDTD法における分割 Δs , Δt はそれぞれ $\Delta s = \lambda/15 = 0.047[\text{m}]$, $\Delta t = 0.09[\text{ns}]$ とする. 建物の壁は, 比誘電率 ϵ_r が6.0のコンクリートとする. 道路の比誘電率 ϵ_{rg} はCase 1において6.0, Case 2において4.0とする.

3.1 受信電界強度分布の数値例

実際の屋外伝搬路は様々な障害物が存在し, 複雑な環境となる. 簡単なモデルとして Fig.6 のように建物の壁に囲まれた道路モデルを考える. Fig.6 の T 字路モデルにおける大地による道路パラメータを, 幅 $W_1 = W_2 = 2[\text{m}]$, 建物の高さ $H = 5[\text{m}]$ とする. Fig.7, 8 は $(x_a, y_a, z_a) = (2\text{m}, 0.14\text{m}, 1\text{m})$ に位置するダイポールアンテナから, 周波数 $f = 426\text{MHz}$ の連続波を送信したときの, $z = 0.5 \sim 5[\text{m}]$ における受信レベル $20 \log|E_z| [\text{dB}]$ を示している. Fig.7, 8 のように, 水平方向道路にタグがある場合, 水平方向道路内では見通し内通信となるが, 垂直方向道路内では受信レベルが弱い場所がある.

つぎに, FDTD法で得られた結果の内容を, 物理現象として解釈するため, 解析解の近似法による検討を示す. ダイポールアンテナから遠方における受信電界強度は, 反射平面境界が存在する場合, 単純な界の干渉によって与えられる. 境界のない自由空間において Fig.9 のように, z 偏波として, z 方向を向いた, 原点におかれた長さ dl の微小ダイポールを考える. 電流が $\mathbf{J}(t, \mathbf{r}) = J_0(t) dl \mathbf{i}_z \delta(\mathbf{r})$, $J_0(t) = I_0(\omega) e^{j\omega t}$ で与えられるとき, 対応する微小ダイポールのモーメントは, 電流 $I = \frac{dq}{dt}$, 双極子 $p = qdl$ より時間因子 $e^{j\omega t}$ の定常界について, $\hat{\mathbf{p}}(\omega, \mathbf{r})$ は,

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(t, \mathbf{r}) &= j\omega_c \hat{\mathbf{p}}(\omega, \mathbf{r}) e^{j\omega_c t} \\ \hat{\mathbf{p}}(\omega, \mathbf{r}) &= \frac{I_0 dl}{j\omega_c} \mathbf{i}_z \delta(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (6)$$

原点からの距離 r における放射電磁界は,

$$\begin{aligned} \hat{E}_r(\omega) &= \frac{I_0 dl e^{-j\beta r}}{j2\pi\omega_c \epsilon} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\beta}{r^2} \right) \cos\theta \\ \hat{E}_\theta(\omega) &= \frac{I_0 dl e^{-j\beta r}}{j4\pi\omega_c \epsilon} \left(\frac{1}{r^3} + \frac{j\beta}{r^2} - \beta^2 \right) \sin\theta \\ \hat{H}_\phi(\omega) &= \frac{I_0 dl e^{-j\beta r}}{4\pi} \left(\frac{1}{r^2} + \frac{j\beta}{r} \right) \sin\theta \end{aligned} \quad (7)$$

$$dl \ll \lambda = \frac{2\pi}{\beta}, \quad \beta = \frac{\omega_c}{c}$$

ダイポールから受信点までの距離が十分遠方のとき $\beta r \gg 1$ で, $\beta_c = \omega_c \sqrt{\epsilon\mu}$,

$$\begin{aligned} \hat{E}_\theta(\omega) &\approx -\frac{I_0 dl \beta_c^2 \sin\theta}{j\omega_c 4\pi\epsilon r} e^{-j\beta_c r} \\ &= -\frac{I_0(\omega) dl \mu \omega_c \sin\theta}{j4\pi r} e^{-j\beta_c r} \\ &= -I_0(\omega) C \frac{\sin\theta}{r} e^{-j\beta_c r} \end{aligned} \quad (8)$$

伝達関数は

$$\frac{\hat{E}_\theta(\omega)}{I_0(\omega)} = -C \frac{\sin\theta}{r} e^{-j\beta_c r}$$

ここに, $C = \frac{d\ell\omega_c\mu}{j4\pi}$

$$C = \frac{d\ell\omega_c\mu\beta_c}{j4\pi} \frac{1}{\beta_c} = \frac{d\ell\omega_c^2\mu\sqrt{\epsilon\mu}}{j4\pi} \frac{1}{\beta_c}$$

受信点の高さがタグのアンテナの高さと等しいとき,

$$\theta = \frac{\pi}{2} \text{ で}$$

$$\hat{E}_z(\omega) = -\sin\theta E_\theta = I_0(\omega) \frac{C}{r} e^{-j\beta_c r} \quad (9)$$

同様に, 磁界について

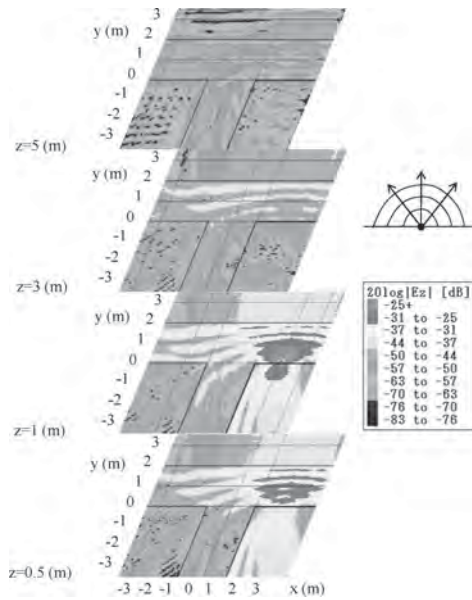
$$\begin{aligned} \hat{H}_\phi(\omega) &\approx \frac{jI_0(\omega)d\ell\beta_c}{4\pi r} \sin\theta e^{-j\beta_c r} \\ &= -I_0(\omega) \frac{C \sin\theta}{Z} \frac{1}{r} e^{-j\beta_c r} \end{aligned} \quad (10)$$

ここに, $Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$

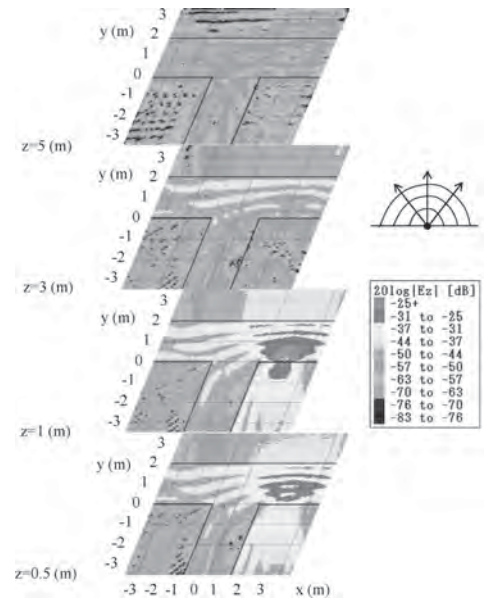
ダイポールから十分遠方における伝送電力 W_r は,

$$\begin{aligned} W_r &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \hat{E}_\theta \hat{H}_\phi^* r^2 \sin\theta d\theta \\ &= 40\pi^2 \left(\frac{I_0(\omega)d\ell}{\lambda} \right)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

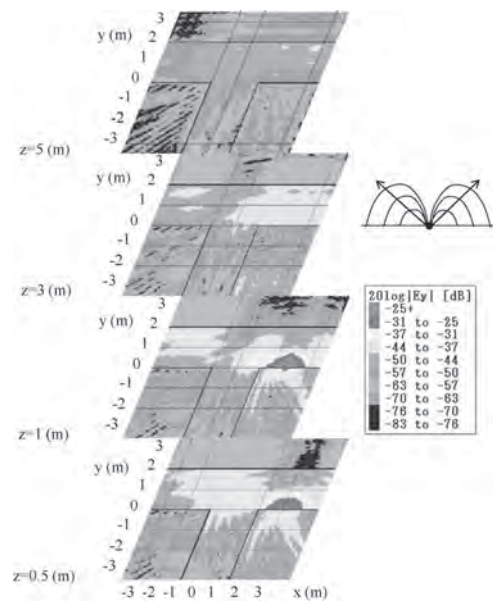
で求められる. ここに, λ は真空中における波長で $\lambda = \frac{2\pi}{\beta_c}$ である.



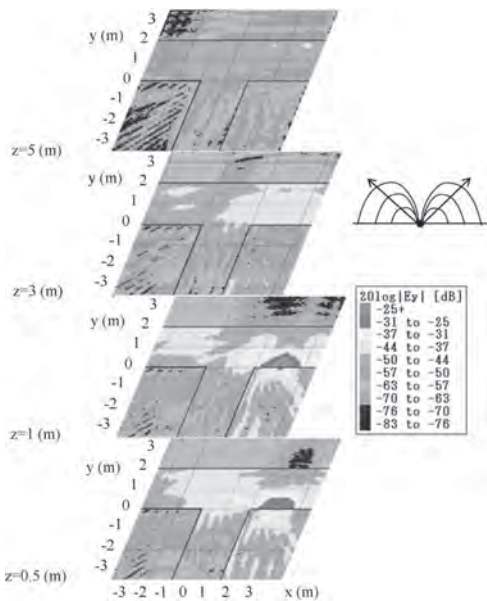
(a) z 偏波



(a) z 偏波



(b) y 偏波



(b) y 偏波

Fig.7 定常状態時の受信レベル (Case 1)

Fig.8 定常状態時の受信レベル (Case 2)

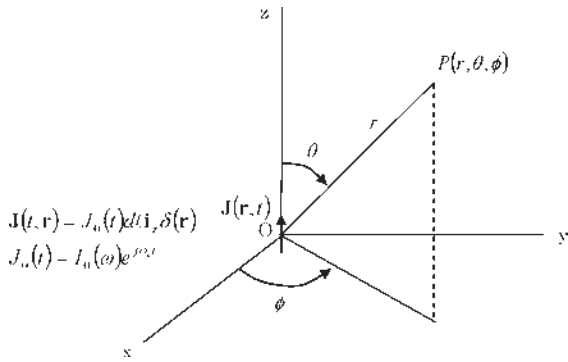


Fig.9 原点におかれた微小ダイポール

電流値換算は、波源（タグ）を1点に電流源を配置したとき、 Δs を分割セルサイズとして

$$\text{面積} : (\Delta s)^2 = 0.047 \times 0.047 = 2.209 \times 10^{-3} [\text{m}^2],$$

電流値 $I_0[\text{A}]$ のとき、電流密度は $J_d = I_0 / (\Delta s)^2$. 電流値は、出力電力 $1[\text{mW}]$ のとき、微小ダイポールアンテナの放射電力

$$W_r = 40\pi^2 \left(\frac{I_0(\omega) d\ell}{\lambda} \right)^2 = 10^{-3} [\text{W}]$$

$$f_c = 426[\text{MHz}], \lambda = \frac{c}{f_c} = 0.704[\text{m}]$$

より、 $I_0 = 0.0237[\text{A}]$.

FDTD 解析において、波源（タグ）は1点に電流密度を配置している．このとき面積は $(\Delta s)^2$ で、電流値 $I_0[\text{A}]$ のとき、電流密度は $J_d = I_0 / (\Delta s)^2 [\text{A}/\text{m}^2]$ となる．FDTD 解析では $J_d = 1[\text{A}/\text{m}^2]$ を用いたため、解析式では電流値を $I_0 = 1 \times (\Delta s)^2 [\text{A}]$ として比較する．

受信点における電界強度は、壁などの境界による反射散乱がある場合、 z 偏波として、

$$E = E_a + E_r^{(1)} + E_r^{(2)} + \dots \quad (12)$$

によって与えられる．ここで E_a は自由空間におけるアンテナからの第1次の直接放射界で、式(9)で与えられる． $E_r^{(1)}$ は壁による反射波である． $E_r^{(2)}$ は、アンテナの偏波による指向性に依存したイメージによる放射波と考えることができ、受信電界はアンテナからの直接放射波とイメージアンテナによる放射界である反射波との干渉によって与えられる．Fig.10の、 z 軸に平行な完全導体板の壁面に囲まれた領域 I, II における受信電界強度分布をイメージアンテナを用いて計算した近似解析解の結果を Fig.11 に示す．ここで、それぞれの領域における電界強度は次式によって求めた．各領域 I, II について、

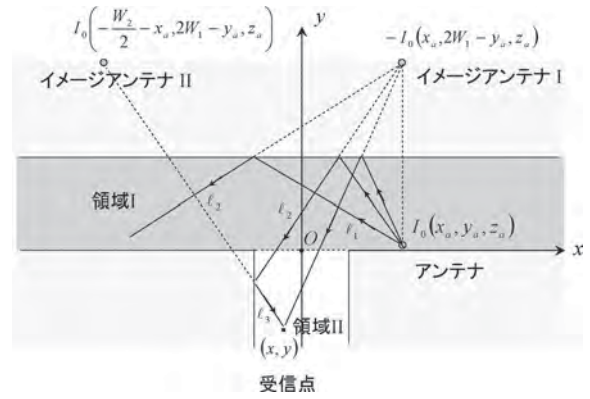


Fig.10 道路上の受信点における直接波と反射波の干渉

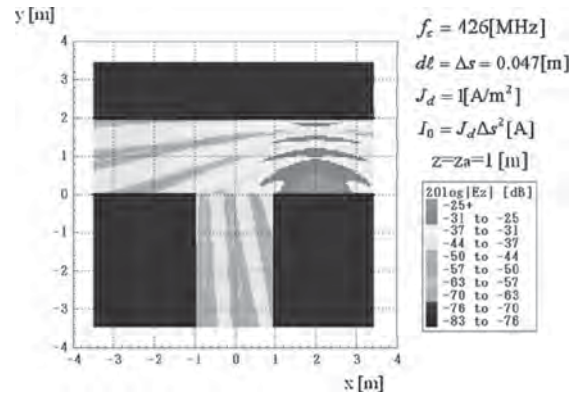


Fig.11 定常状態時の受信レベル（イメージアンテナを用いた近似解析解）、壁は完全導体タグの位置 $(x_a, y_a, z_a) = (2\text{m}, 0.14\text{m}, 1\text{m})$ (T字路の場合、アンテナ： z 偏波)

領域 I $(-3.5[\text{m}] \leq x \leq 3.5[\text{m}], 0[\text{m}] \leq y \leq 2[\text{m}])$ において、

$$E_a = C \frac{I_0}{r_1} e^{-j\beta r_1}, \quad E_r^{(1)} = -C \frac{I_0}{r_1'} e^{-j\beta r_1'}$$

$$|E_z| = |E_a + E_r^{(1)}| = I_0 |C| \left| \frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} - \frac{e^{-j\beta r_1'}}{r_1'} \right| \quad (13)$$

領域 II $(-1[\text{m}] \leq x \leq 1[\text{m}], -3.5[\text{m}] \leq y < 0[\text{m}])$ において、

$$E_r^{(2)} = C \frac{I_0}{r_2'} e^{-j\beta r_2'}$$

$$|E_z| = |E_r^{(1)} + E_r^{(2)}| = I_0 |C| \left| -\frac{e^{-j\beta r_1'}}{r_1'} + \frac{e^{-j\beta r_2'}}{r_2'} \right| \quad (14)$$

Fig.11 の近似解析解の分布は、壁の比誘電率 $\epsilon_r = 6$ 、 $J_d = 1[\text{A}/\text{m}^2]$ $\Delta s = 0.047[\text{m}]$ のときの Fig.7(Case 1) (a) z 偏波、 $z = 1[\text{m}]$ の FDTD の結果と対応している．ただし、FDTD 法では壁は誘電体としており、近似解析解は完全導体としているが、干渉パターンの相似性が確認できる．

3.2 RFID の信号伝搬についての時間応答

つぎに、解析式によって受信特性を考察し、FDTD 法で得られた受信特性を検討する．

ダイポールアンテナの電流が z 方向で、 $\mathbf{J}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{i}_z J(t) d\ell \delta(\mathbf{r})$ のとき、距離 r 離れた受信点での z 方向

成分の電界 $E(t,r)$ を示す．定常電流，定常電界 $\hat{J}(\omega)$ ， $\hat{E}(\omega,r)$ より

$$\hat{J}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} J(t) e^{-j\omega t} dt \quad (15)$$

$$J(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{J}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (16)$$

$$\hat{E}(\omega,r) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t,r) e^{-j\omega t} dt \quad (17)$$

$$E(t,r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{E}(\omega,r) e^{j\omega t} d\omega \quad (18)$$

$\hat{J}_0(\omega) = I_0(\omega)$ として ここに， $J_0(t) = I_0(\omega) e^{j\omega t}$

$$\hat{E}(\omega,r) = C J_0(\omega) \frac{e^{-j\beta_c r}}{r} \quad (19)$$

伝達関数は，

$$\frac{\hat{E}(\omega,r)}{\hat{J}_0(\omega)} = C \frac{e^{-j\beta_c r}}{r}$$

(18) と (19) 式より

$$E(r,t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} C \hat{J}_0(\omega) \frac{e^{-j\beta_c r}}{r} e^{j\omega t} d\omega \quad (20)$$

$\frac{\beta_c}{\omega} = \frac{1}{c}$ ，搬送周波数を ω_c のとき， $C = \frac{d\ell \omega_c \mu}{j4\pi}$ を用いて， $\hat{J}(\omega)$ を $\frac{\hat{J}_0(\omega)}{r}$ ， t を $t - \frac{r}{c}$ として，

$$E(r,t) = \frac{C}{r} J_0(t - r/c)$$

$J_0(t) = I_0(\omega) e^{j\omega t}$ に対し， $J_0(t) = A(t) \sin \omega_c t$ の場合には，式 (20) より channel u に対し送信時刻を t_u とし，ここで t を $t - t_u$ として

$$J_0(t - t_u) = A(t - t_u) \sin \omega(t - t_u)$$

より，

$$J_0(t - t_u - r/c) = A(t - t_u - r/c) \sin \omega_c(t - t_u - r/c)$$

とすれば式 (20) は

$$E(r,t) = \frac{C}{r} A(t - t_u - r/c) \sin \omega_c(t - t_u - r/c) \quad (21)$$

変調方式として ASK, FSK を用いたときの送信信号波形を Fig.12 に示す．

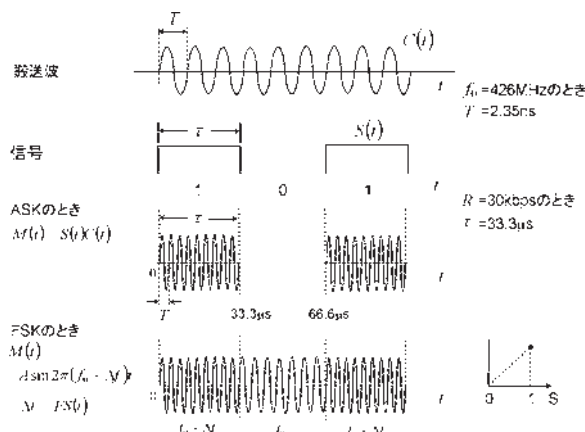


Fig.12 ASK, FSK を用いたときの送信波形

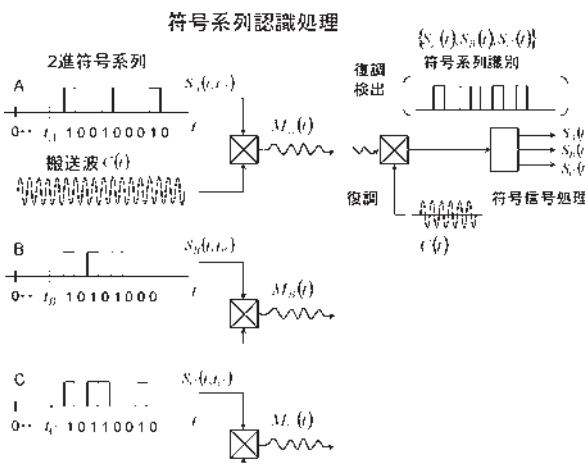


Fig.13 符号系列認識処理

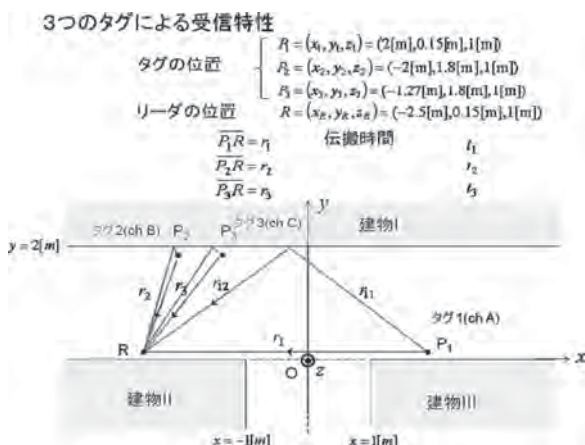


Fig.14 3つのタグによる受信特性の伝搬路モデル

3.3 複数タグがあるときの受信信号の数値例

つぎに，実際の通信波形を用いて，複数のタグからの信号を同時に受信したときの受信特性を考察する．このとき，Fig.13のようにリーダが受信信号から各符号系列を認識するための処理が課題となる．ここでは数値例として，3つのタグによる受信特性を示す．このときの伝搬路モデルを Fig.14 に示す．

それぞれのタグの位置を

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1) = (2[\text{m}], 0.15[\text{m}], 1[\text{m}])$$

$$P_2 = (x_2, y_2, z_2) = (-2[\text{m}], 1.8[\text{m}], 1[\text{m}])$$

$$P_3 = (x_3, y_3, z_3) = (-1.27[\text{m}], 1.8[\text{m}], 1[\text{m}])$$

リーダの位置を

$$R = (x_R, y_R, z_R) = (-2.5[\text{m}], 0.15[\text{m}], 1[\text{m}])$$

とする．

タグ1～3から, Fig.15のような符号系列を送信する．

リーダ位置 R における受信信号を FDTD 法で解析した．ここで t_A, t_B, t_C はそれぞれ各タグの送信開始時刻である．アンテナの電流振幅 I_0 は, 送信出力が 1mW になる値を用いた．アンテナ長 $d\ell = \Delta s = 0.047$ m, 周波数 426MHz のとき, アンテナの出力を 1mW とすれば, 式 (11) より電流の振幅は $I_0 = 0.0237[\text{A}]$ となる．したがって FDTD 法で与える電流密度の振幅は $J_d = I_0 / (\Delta s)^2 = 10.73$ $[\text{A}/\text{m}^2]$ とした．FDTD 法によって求めた受信点 R における受信信号を Fig.16 に示す．

RFID が ASK 方式のとき, $A_0 = \frac{I_0 d\ell \omega_c \mu_0}{4\pi}$, $\omega_c = 2\pi f$ として, 符号1を表すパルスは, パルス幅を τ としたとき

$$I(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & t < 0, \tau < t \end{cases} \quad (22)$$

タグ1のアンテナの電流が $t = t_A$ より送信されるとして $J_0(t-t_A) = A_0 I(t-t_A) \sin \omega_c(t-t_A)$, $A_0 = C$ のとき, タグ1からの受信電波信号は式(21)の $\frac{C}{r} A(t-t_u - r/c)$ を $A_i(t-t_A - t_i^{(A)})$ として

$$E_z^{(A)} = \sum_{i=1}^{N_A} A_i(t-t_A - t_i^{(A)}) \sin[2\pi f_c(t-t_A - t_i^{(A)})] \quad (23)$$

$$A_1(t-t_A - t_1^{(A)}) = \frac{A_0}{\ell_1^{(A)}} I(t-t_A - t_1^{(A)}),$$

$$A_i(t-t_A - t_i^{(A)}) = R_i^{(A)} \frac{A_0}{\ell_i^{(A)}} I(t-t_A - t_i^{(A)})$$

ここで A_1 は, タグ1からの直接波が受信されたときの電界振幅で, 式(21)の $r = \ell_1^{(A)}$ とした．

タグ2のアンテナの電流が $t = t_B$ より送信されるとして $J_0(t-t_B) = A_0 I(t-t_B) \sin \omega_c(t-t_B)$, $A_0 = C$ のとき, タグ2からの受信電波信号は式(21)の $\frac{C}{r} A(t-t_u - r/c)$ を $B_i(t-t_B - t_i^{(B)})$ として

$$E_z^{(B)} = \sum_{i=1}^{N_B} B_i(t-t_B - t_i^{(B)}) \sin[2\pi f_c(t-t_B - t_i^{(B)})] \quad (24)$$

$$B_1(t-t_B - t_1^{(B)}) = \frac{A_0}{\ell_1^{(B)}} I(t-t_B - t_1^{(B)}),$$

$$B_i(t-t_B - t_i^{(B)}) = R_i^{(B)} \frac{A_0}{\ell_i^{(B)}} I(t-t_B - t_i^{(B)})$$

ここで B_1 は, タグ2からの直接波が受信されたときの

電界振幅で, 式(21)の $r = \ell_1^{(B)}$ とした．

タグ3のアンテナの電流が $t = t_C$ より送信されるとして, $J_0(t-t_C) = A_0(t-t_C) \sin \omega_c(t-t_C)$, $A_0 = C$ のとき, タグ3からの受信電波信号は式(21)の $\frac{C}{r} A(t-t_u - r/c)$ を $C_i(t-t_C - t_i^{(C)})$ として

$$E_z^{(C)} = \sum_{i=1}^{N_C} C_i(t-t_C - t_i^{(C)}) \sin[2\pi f_c(t-t_C - t_i^{(C)})] \quad (25)$$

$$C_1(t-t_C - t_1^{(C)}) = \frac{A_0}{\ell_1^{(C)}} I(t-t_C - t_1^{(C)}),$$

$$C_i(t-t_C - t_i^{(C)}) = R_i^{(C)} \frac{A_0}{\ell_i^{(C)}} I(t-t_C - t_i^{(C)})$$

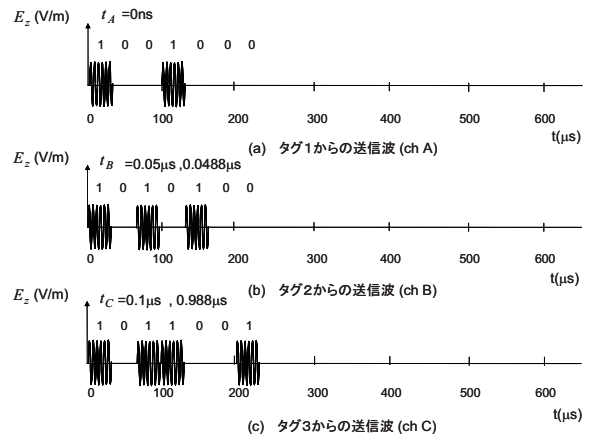
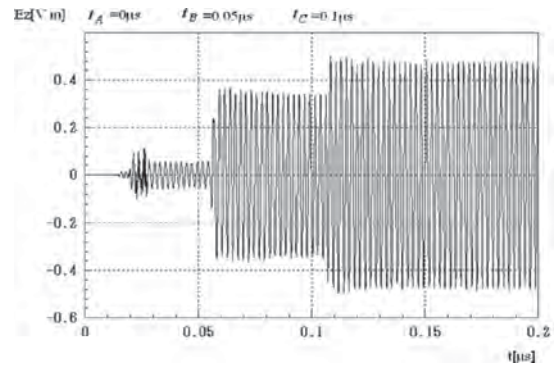
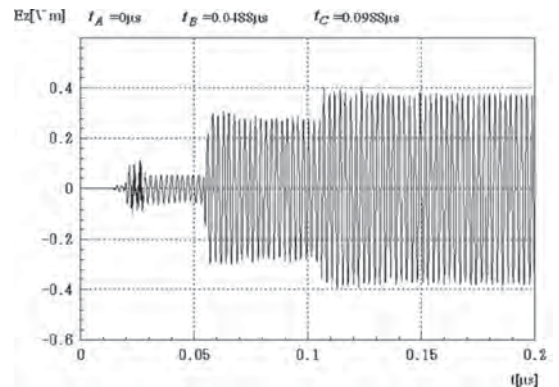


Fig.15 タグ1,2,3からの送信波



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig.16 受信点 R における受信電波信号, ASK 方式 タグ1, 2, 3から送信 (ch A, B, C), FDTD 法

ここで C_1 は、タグ3からの直接波が受信されたときの電界振幅で、式(25)の $r = \ell_1^{(C)}$ とした。

リーダの位置R点における受信電波信号は、タグ1~3からの受信電波信号が重畳した信号として

$$E_z = E_z^{(A)} + E_z^{(B)} + E_z^{(C)} \quad (26)$$

で与えられる。

Table 2の数値例を用いて式(23)~(26)の解析式で求めた受信点Rにおける受信信号をFig.17, 18に示す。

Case 1は $t_A = 0\mu s$, $t_B = 0.05\mu s$, $t_C = 0.1\mu s$, Case 2は $t_A = 0\mu s$, $t_B = 0.0488\mu s$, $t_C = 0.988\mu s$ とする。Case 1とCase 2では、各チャンネルの送信信号の立上り開始時間が異なるため、搬送波の位相特性に差を生じている。受信電波では、各チャンネルの位相干渉がとくに、信号立上り部において異なっていることがしられる。

Table 1 屋外伝搬の各受信点における受信レベル (z,y 偏波)

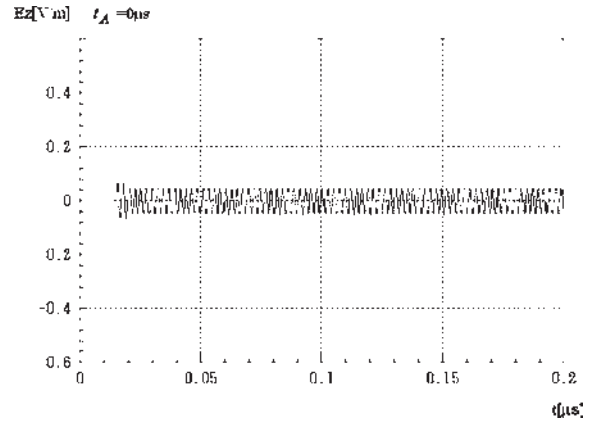
Model	受信点の高さ z[m]	zy方向電界強度 [mV/m] {s=z,y}					
		z A y		z B y		z C y	
Case 1	0.5	6.80	7.64	3.53	3.76	2.86	1.54
	1.0	7.82	3.10	5.29	3.47	3.42	1.12
	3.0	3.02	3.91	3.41	2.65	0.52	1.36
	5.0	1.66	5.43	2.70	1.04	0.60	0.41
Case 2	0.5	11.56	7.62	4.05	3.28	3.40	2.66
	1.0	13.11	3.49	4.02	3.58	3.12	3.61
	3.0	2.90	4.05	3.71	2.62	0.47	1.24
	5.0	1.63	5.14	2.61	1.02	0.64	0.45

A(x=0,y=2,z), B(x=-2.5,y=0,z), C(x=1,y=-2,z)

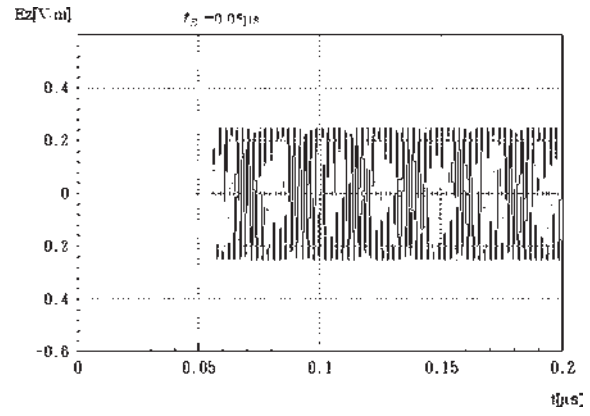
建物の比 誘電率 $\epsilon_r = 8.0$ 道路の比 誘電率 $\epsilon_r = 8.0$ (Case 1), 4.0 (Case 2)

Table 2 受信電波信号の解析解の数値例

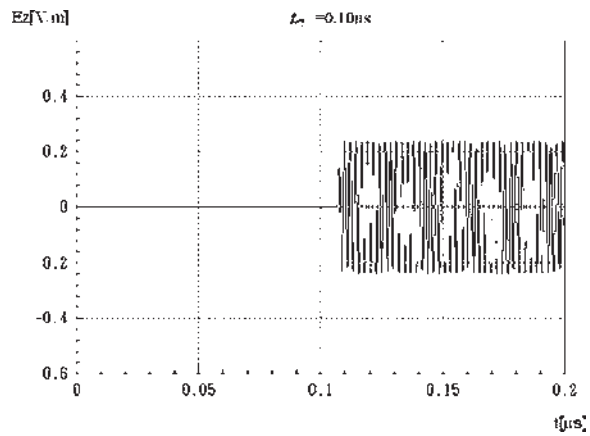
		$f_c = 426\text{MHz}$			
A (P ₁)	直接波	$I_0 = 0.0237\text{[A]}$	$A_1 = \frac{A_c}{\ell_1^{(A)}} = 0.066$	$\ell_1^{(A)} = r_1 = 4.5\text{[m]}$	$t_1^{(A)} = \frac{\ell_1^{(A)}}{c} = 15\text{[ns]}$
		$A_0 = 0.298$	$t_A = 0$	$\ell_2^{(A)} = 5.8\text{[m]}$	$t_2^{(A)} = \frac{\ell_2^{(A)}}{c} = 19.4\text{[ns]}$
	反射波	$A_2 = R_2^{(A)} \frac{A_c}{\ell_2^{(A)}} = -0.029$	$R_2^{(A)} = -0.57$	$\ell_2^{(A)} = 5.8\text{[m]}$	$t_2^{(A)} = \frac{\ell_2^{(A)}}{c} = 19.4\text{[ns]}$
		$B_1 = \frac{A_c}{\ell_1^{(B)}} = 0.173$	$\ell_1^{(B)} = r_2 = 1.72\text{[m]}$	$t_1^{(B)} = \frac{\ell_1^{(B)}}{c} = 5.74\text{[ns]}$	
B (P ₂)	直接波	$t_B = 0.05\text{[}\mu\text{s]}$	$t_B = 0.05 - \frac{T}{2} = 0.0488\text{[}\mu\text{s]}$	$\ell_1^{(B)} = r_2 = 1.72\text{[m]}$	$t_1^{(B)} = \frac{\ell_1^{(B)}}{c} = 5.74\text{[ns]}$
		$B_2 = R_2^{(B)} \frac{A_c}{\ell_2^{(B)}} = -0.08$	$R_2^{(B)} = -0.57$	$\ell_2^{(B)} = 2.1\text{[m]}$	$t_2^{(B)} = \frac{\ell_2^{(B)}}{c} = 7.03\text{[ns]}$
	反射波	$C_1 = \frac{A_c}{\ell_1^{(C)}} = 0.145$	$\ell_1^{(C)} = r_3 = 2\text{[m]}$	$t_1^{(C)} = \frac{\ell_1^{(C)}}{c} = 6.86\text{[ns]}$	
		$C_2 = R_2^{(C)} \frac{A_c}{\ell_2^{(C)}} = -0.108$	$R_2^{(C)} = -0.76$	$\ell_2^{(C)} = 2.1\text{[m]}$	$t_2^{(C)} = \frac{\ell_2^{(C)}}{c} = 7.97\text{[ns]}$
C (P ₃)	直接波	$t_C = 0.1\text{[}\mu\text{s]}$	$t_C = 0.1 - \frac{T}{2} = 0.0988\text{[}\mu\text{s]}$	$\ell_1^{(C)} = r_3 = 2\text{[m]}$	$t_1^{(C)} = \frac{\ell_1^{(C)}}{c} = 6.86\text{[ns]}$
		$C_2 = R_2^{(C)} \frac{A_c}{\ell_2^{(C)}} = -0.108$	$R_2^{(C)} = -0.76$	$\ell_2^{(C)} = 2.1\text{[m]}$	$t_2^{(C)} = \frac{\ell_2^{(C)}}{c} = 7.97\text{[ns]}$
	反射波	$C_1 = \frac{A_c}{\ell_1^{(C)}} = 0.145$	$\ell_1^{(C)} = r_3 = 2\text{[m]}$	$t_1^{(C)} = \frac{\ell_1^{(C)}}{c} = 6.86\text{[ns]}$	
		$C_2 = R_2^{(C)} \frac{A_c}{\ell_2^{(C)}} = -0.108$	$R_2^{(C)} = -0.76$	$\ell_2^{(C)} = 2.1\text{[m]}$	$t_2^{(C)} = \frac{\ell_2^{(C)}}{c} = 7.97\text{[ns]}$



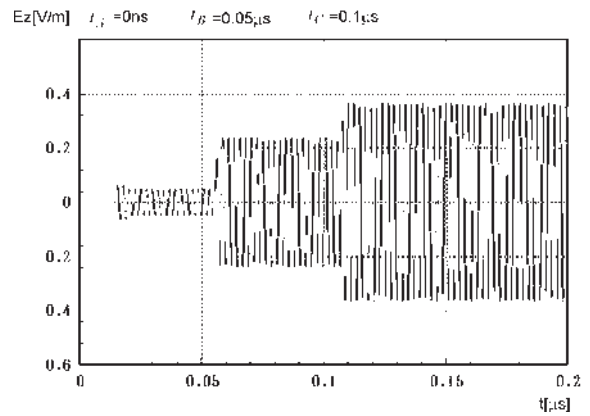
(a) タグ1からの直接波+反射波 (ch A)



(b) タグ2からの直接波+反射波 (ch B)

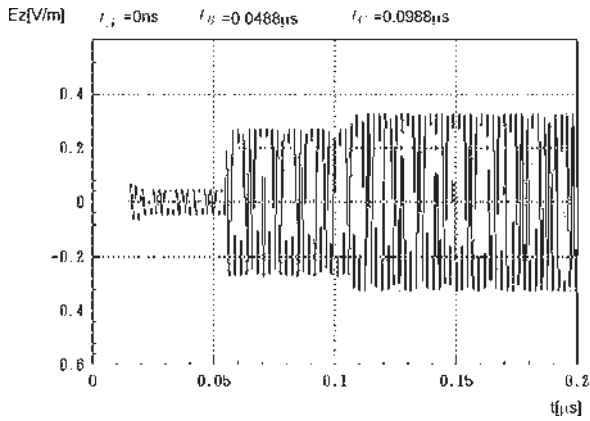


(c) タグ3からの直接波+反射波 (ch C)



(d) タグ1,2,3から送信 (ch A,B,C)

Fig.17 受信点Rにおける受信電波信号の解析解 ASK方式 (Case 1)



タグ 1,2,3 から送信 (ch A,B,C)

Fig.18 受信点 R における受信電波信号の解析解
ASK 方式 (Case 2)

4. まとめ

本論文では、屋内および屋外で用いる RFID システムにおいて、建造物内および道路上で送信されるタグ ID 信号に対する電波信号の伝搬特性および受信特性を FDTD 法により解析を行った。建物モデルとして窓と部屋があるモデルを用いて、入射角度に対する室内電界強度分布の変化を調べた。道路モデルとして、T 字路モデルについて解析し、リーダの最適設置位置に関する基礎データを得ることができた。

今後の課題としては、並列計算による 3 次元解析領域の拡大、これまでに得られている 2 次元解析結果と 3 次元解析結果の詳細な比較検討が必要と考えられる。また複数のタグをランダムに配置し、複数のタグ信号を識別するための符号化および信号処理方式の検討が必要である。

- 1) A. Nakajima, T. Inoue and A. Tsuneda, A Proposal of a Novel RFID Tag with Biomedical Signal Sensing Functions, IEEJ Trans. EIS, Vol.130, No.5, pp.790-798 (2010).
- 2) K. Taki and Y. Miyazaki, Input Impedances and Current Distributions for Meander Line Antennas with Planar Coupled Parasitic Meander Element, Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium, Beijing, China, pp.1700-1703 (2007).
- 3) K. Taki and Y. Miyazaki, Radiation Characteristics of Meander Line Antennas with Planar Coupled Parasitic Meander Elements for RFID Tags, Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium, Tokyo, Japan, p.256 (2006).
- 4) 吉原, 電子カルテとインターネット, 日本 ME 学会雑誌, Vol.10, No.2, pp.21-28 (1996).
- 5) 増田忠弘, 宮崎保光, 地上構造物による電磁波の散乱に関する電磁環境特性, 電学論 C, vol.118-C, no.1, pp.112-117 (1998).
- 6) Y. Miyazaki and K. Takahashi, Electromagnetic compatibility characteristics of wireless LAN for indoor environment of buildings by FDTD method, Proc. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, Shanghai, China, pp.251-256 (2000).
- 7) G. Rodriguez, Y. Miyazaki and N. Goto, Matrix-based FDTD Parallel Algorithm for Big Areas and its Applications to High-speed Wireless Communications, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol.54, No.3, pp.785-796 (2006).
- 8) T. Masuda, Y. Miyazaki and Y. Kashiwagi, Analysis of Electromagnetic wave Propagation In Out-door Active RFID System using FD-TD Method, Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium, Beijing, China, pp.1713-1715 (2007).
- 9) Y. Miyazaki, T. Hashimoto and K. Takahashi, FDTD Analysis of Electromagnetic Wave Propagation for Out-door Active RFID System, Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium, Beijing, China, pp. 1383-1387 (2009).
- 10) Y. Miyazaki, T. Hashimoto and K. Takahashi, Signal Analysis of Electromagnetic Wave Propagation for RFID Systems in In-door and Out-door, Proc. Progress in Electromagnetic Research Symposium, Cambridge, USA, pp.993-998 (2010).

CSV ファイルと連携して簡単に XML データ処理を行う ライブラリ・ソフトウェアの検討

吉田 茂*

(2010年9月30日受理)

A Study on Library Software That Makes XML Data-Processing Easy in Cooperation with CSV Files

Shigeru Yoshida*

(Received September 30, 2010)

Abstract

This paper describes library software that makes XML (eXtensible Markup Language) data-processing application easy to use. The library software consists of dedicated XML API (Application Program Interface) for this data-processing and data-converting to / from XML documents. To avoid the troublesome work brought by XML documents, the processing data was limited to the record composition of the table form. As a result, the dedicated XML API operations was simplified. Moreover, user's data can be made as CSV (Comma Separated Values) files by using GUI (Graphical User Interface) of MS Excel, and is converted into the XML documents when processing the data. The XML documents of processing result is reversely converted into the CSV files and given back to the user. A general-purpose format of the CSV files for converting to their XML documents was provided. The library software for trial purpose was implemented, and the effectiveness was evaluated in an application of attendance-book management.

キーワード：XML データ処理，CSV 形式，エンドユーザコンピューティング

Keywords：XML data processing, CSV format, End User Computing

1. はじめに

企業や団体などの組織で使われるデータは「定型文書」「半定型文書」「非定型文書」の3種類に分類される¹⁾。「定型文書」は構造が予め決まっている伝票や表形式データであり、「半定型文書」は構造がある程度決まっているがその時々で多少変化するもの、「非定型文書」はプレゼン資料など、その時々で構造自体が変化するものである。従来、定型文書の大量データの管理にはRDB(Relational DataBase)、半定型文書や非定型文書のデータにはXML(eXtensible Markup Language)で対応するのが適切とされてきた。RDBは、構造が変化するデータには不向きであり、一度設計したデータ構造に、新たに項目を追加する場合は、大幅に費用と時間を費やす。

一方、XMLは、必ずしも構造が定まっていないデータを「そのまま」扱うことができ、構造変動に対応できることが特徴であった。しかし、XML文書はテキストファイルとして保存され、処理の効率が低いため、大容量のデータに対してはXMLデータベースとして処理速度の向上が図られてきた²⁾。

昨今は、パソコンの性能向上には目を見張るものがあり、数M～10MBのデータならばファイルベースでも楽に扱える状況になっている。また、新たな情報系のシステムを作る場合、最初から厳密なスキーマ情報を決めるより、暫定的なスキーマを決めて、追加要求や環境変化をみて、スキーマを変更して行く方が、システムの設計・運用は容易である。このような状況を鑑みて、本報では、定型データであるが、時々スキーマ変更の要求

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

に対応しながら、XMLのファイルベースで、簡便にデータ処理を行えるシステムについて検討を行った。日常的に、比較的少人数の利用者で使われる中小規模のデータにおいて、この種の小回りの効くシステムが、特に求められるものとする。しかしながら、XML技術は、XML標準API、XML Schema、XSLT、XQuery、XML Bindingなど膨大な大系をなしており、EUC (End User Computing)などで対応するには、ハードルが高いという課題があった^{3),4)}。

本報では、組上げやすく、使いやすいデータ処理システムが構築できるライブラリ・ソフトウェアを作ること目標にした。このため、扱うデータを、表形式のレコード構成のものに限定した。これにより、XMLのデータ処理を担うAPI (Application Program Interface)の操作を簡単にした。また、利用者が扱うデータはCSV (Comma Separated Values) ファイルとしてMS Excelで開いて読み書きするようにし、データ処理をXML文書に変換して行うようにした。このために、CSVファイルとXML文書を双方を使えるように、変換・逆変換しやすい汎用のCSV形式の書式を規定した。そして、実際にソフトウェアを試作し、擬似的な学校業務の出席簿管理のアプリケーションに適用して、柔軟なシステムを組める効果を確かめた。以下、ファイルベースで簡便にXMLデータ処理が行えるライブラリ・ソフトウェアについて検討した結果を報告する。

2. 目標と課題、従来技術

2.1 目標と課題

中小規模のデータを対象に、拡張性のある柔軟な処理システムを作るライブラリ・ソフトウェアについて、EUCでも使えるように、次の目標を設定した。

- (a) 小規模のデータに対して、組上げやすく、使いやすいデータ処理システムが実現できること
- (b) データ処理にXMLを用いるが、XML技術について最小限の知識で扱えること

この目標を実現するには、XMLにより生じる次のような煩雑さを回避することが課題になる⁵⁾。

- ① XMLプログラミングは、XMLの標準APIソフトウェアを介して行うのが一般的である。XML文書の更新には標準APIのDOM (Document Object Model) が用いられる。DOMソフトウェアはXML文書をメモリ上にツリー構造に展開し、ツリーを辿ってXML文書の要素のノードをアクセスする。このため、間接

的でまわりくどいプログラミングを強いられる。

- ②ある程度規模の大きなアプリケーション開発では、肝心のロジックのコーディングよりも、何百行もあるXMLファイルの記述に時間を費やすことになる。

2.2 課題と従来技術

上記の課題に対して次の方針で検討を行った。課題①に対しては、レコード構成のデータを扱うという点に着目して、標準APIよりも操作が簡単な専用のAPIを作ることに対応する。課題②に対しては、データ処理に用いるXML文書を、XMLエディタなどの専用ツールを用いなくても作れるソフトウェアを考える。次に、これらの方針について、従来技術を絡めて詳細に述べる。

(1) レコード構成XML文書の専用API

XML標準APIは、あらゆるXMLデータ形式に対応するため、結果として複雑な構成となっている。そこで、対象とするデータ形式を、表形式のレコード構成のデータだけに限定する。我々は、多くの場合、表形式のデータを扱っていることから、この制限は、それ程強いものにはならず、むしろ、操作が単純化されるメリットの方が大きいと考える。

レコード構成のXML文書を扱うAPIソフトウェアとしては、従来、RAX(Record oriented API for XML)がある⁶⁾。RAXは、XML文書を入力して、時系列的に要素を分解するSAX(Simple API for XML)タイプのAPIである。このため、XML文書の変更や更新には用いることはできない。そこで、レコード構成のXML文書が簡単に扱える、メモリ蓄積タイプの専用のXMLAPIを作る。

筆者らは先に、ファイルベースで大きいXML文書をオンメモリ処理のときに所要メモリ量を抑える「XML文書のCSV圧縮」と呼ぶ技術を発表している⁷⁾。このときは、レコード構成のXML文書を扱うAPIソフトを試作しているが、それは書込み更新機能のないものであった。ここでは、先に試作したAPIソフトを改良し、圧縮なしで、書込み更新機能も備えたソフトを作る。

(2) 利用者データ形式と、処理データ形式の分離

データを表形式に制限したことから、データをCSV形式のファイルとして、利用者はMS ExcelのGUI (Graphical User Interface) を用いて作るようにする。

Microsoft Officeは、Office2007以降、出力にXML形式であるOffice Open XML (OOXML)を採っている^{8),9)}。しかし、OOXMLは、データと書式情報が複数個のファイルに分けられ、機能が豊富過ぎて、仕様が複雑であり、

EUCの開発者にとって必ずしも扱いやすい形式ではない。また、Excel 2007はXML文書にして読み書き備えている¹⁰⁾。通常は、1個の表を1ファイルに格納するようになっており複数個の表を1ファイルに格納するというExcelデータ本来の使い良さが失われる。そこで、本検討は、データ作成の作業をシンプルにするため、CSV形式を使ってデータを作る。

CSVファイルとして作ったデータを、データ処理ではXML文書に変換して行う。本データ処理システムの手順は、Fig.1に示すようになる。データ処理結果は、Fig.1の太線のパスで示すように、CSV形式に逆変換し、再度、利用者はデータの追加修正が行えるようにする。結果を再利用できることより、データ処理と利用者からの細かい修正をつなぐことができるようになる。CSVファイルとXML文書の2本立てでデータを扱う理由は、利用者がデータを手操作で読み書きする際はExcelのGUIを利用する方が使いやすく、一方、データ処理ではXML形式の方が便利だからである。また、CSVファイルを扱う直接の利用者から、XML文書を隠すことができるので、利用者はXMLについて知らなくても済む。

Fig.1において、点線で示したブロックは、入力したデータの書式が適性を判定する部分であり、利用者が多数になる場合は必須になる。しかし、この部分は、そのものが従来技術であるので、本報では特に触れない。

CSVからXMLへの変換、あるいは、XMLからCSVへの変換のソフトウェアは従来、幾つか作られている。しかし、それらは一方向の変換であって、汎用の双方向の変換・逆変換を最初から意図したものではなかった¹¹⁾⁻¹⁴⁾。例えば、CSVファイルのテキストの第1行目が、以降のデータの各列の要素名を表していることを、暗黙の了解として変換したり、要素名と要素内容を対応付けるスキーマがあらかじめ決まっていたり、別途用意し

たりした。しかし、それらのやり方では、単純な表形式データしか使えないし、また、スキーマを使えば利用者がXMLの知識を持つことが前提になる。

スキーマなどの補助的ファイルを用いずに、対象とするCSVファイルだけからXML文書に変換できると便利になる。そこで、本検討では、CSVファイルの汎用の記述形式を新たに規定して、XML文書との変換・逆変換を実現する。

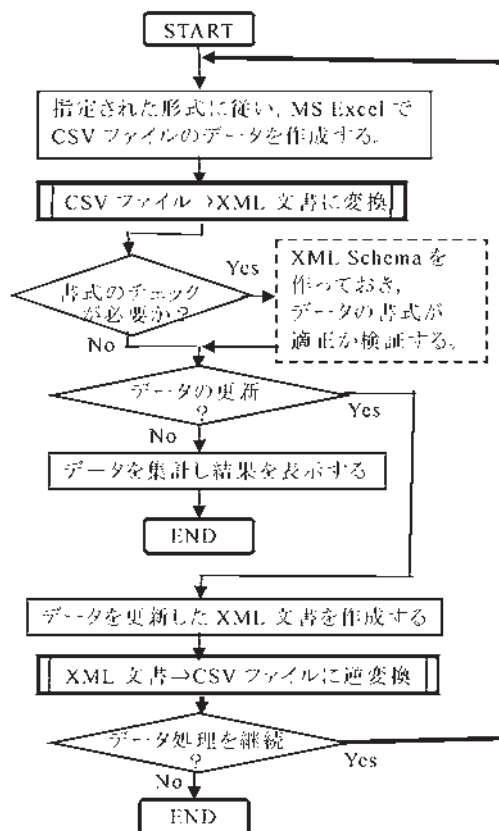


Fig.1 本システムによるデータ処理の手順

Table 1 XML API ソフトウェアのメソッドの仕様

機能	メソッド名(引数), [返却値]
①XML 文書操作オブジェクトの作成(初期化)	XMLHandlingAPI(), [データ格納・操作用オブジェクト]
②入力文書のオープン	openFile("ファイル名", "レコード要素名") [なし]
③文書のクローズ	closeFile() [なし]
④XML 文書のレコード数の通知	recordLength() [レコード数]
⑤レコード内の要素数の通知	ElementLength() [レコード内の要素数]
⑥レコード要素名の通知	getRecordName() [レコード要素名]
⑦レコード内の i 番目の要素名の通知	getElementName(i) [要素名]
⑧第 k レコードの要素名による要素内容の読み出し	getElement(k, "要素名") [要素内容]
⑨第 k レコードの要素名による要素内容の書き込み	putElement(k, "要素名", "要素内容") [なし]
⑩出力文書のオープン	openOutputFile("ファイル名", "ルート要素名") [なし]
⑪メモリに展開したレコードへの書き出し	save () [なし]
⑫出力文書のクローズ	closeOutputFile() [なし]

3. 表形式のレコード構成 XML 文書の専用 API

3.1 専用 XML API の仕様

表形式のデータのみを対象にすることから、データ操作を簡単にするため、専用 API は、文書上の同一レコード名の箇所をオブジェクトとして取り出して扱うようにする。この API には、Table 1 に示すメソッドを持たせる。Table 1 のメソッドを用いて、XML 文書のデータを読み出す Perl 言語のプログラム例を Fig.2 に挙げる。

また、Fig.3 に (a) 同一レコードの要素内容の配列と、(b) 要素名を格納する配列のデータ格納形式を示す。すなわち、(a) はレコード番号を添字とする 1 次元配列の下に、レコードごとに、要素名で要素内容を参照する連想配列 (ハッシュ) を用いる。(b) に示す要素名配列を備えることによって、Fig.2 (b) のプログラム例のように、レコード内の要素名を知らなくても、for 文を用いて全要素を順に読み出すことができる。

3.2 専用 XML API の使い方

Table 1 のメソッドを持つ API をソフトウェアにした場合、次のようになる。

①で入力文書のオブジェクトを初期化し、②で XML ファイル中の同一レコード名の要素をメモリ上の配列に格納する。③は処理終了後、入力文書オブジェクトのクローズに用いる。④により読み込んだレコード数を取得する。⑤によりレコード内の要素数を取得する。⑥はレコード要素名を確認する場合に用いる。レコード内の要素名には出現順に番号が付されていて、⑦はその番号を指定して要素名を取得するのに用いる。

⑧によりレコード番号とレコード内の要素名を指定して要素内容を取得する。⑨によりレコード番号、レコード内要素名、その要素内容を指定して、メモリに格納されている要素内容を書き換える。⑩～⑫は更新した内容を、出力文書に保存するために用いるメソッドである。⑩は出力文書のオブジェクトを、ルート要素名を指定して初期化する。⑪によりメモリに展開した配列の内容を出力文書に書き出す。⑫により出力文書をクローズする。

ここで、XML 文書は CSV ファイルを変換して作るため、XML 文書は CSV ファイルの書式を引き継ぐものとし、新たな要素を追加せず、要素内容の更新のみを行うことにする。また、一時に開ける出力文書は 1 個だけとし、その出力文書に、他の入力文書の更新した内容を書き出すことにする。

本 API によれば、レコード要素名を指定して、XML 文書を読取った後、レコード番号と要素名を指定して読み書できるので、表形式データを行番号と項目名を指定

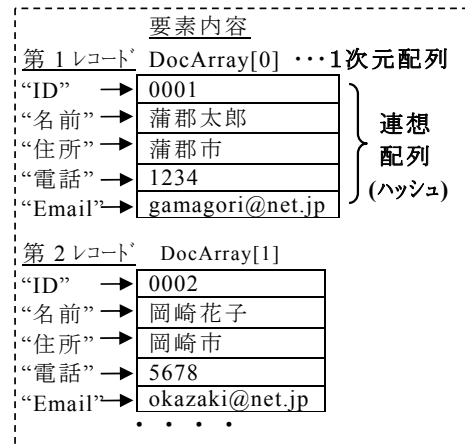
```
<住所録>
<個人>
  <ID>0001</ID>
  <名前>蒲郡太郎</名前>
  <住所>蒲郡市</住所>
  <電話>1234</電話>
  <Email>gamagori@net.jp</Email>
</個人>
<個人>
  <ID>0002</ID>
  <名前>岡崎花子</名前>
  <住所>岡崎市</住所>
  <電話>5678</電話>
  <Email>okazaki@net.jp</Email>
</個人>
....
</住所録>
```

(a) 表形式のレコード構成 XML 文書 (test.xml) の例

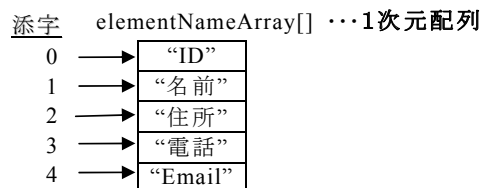
```
use XMLHandlingAPI;
my $doc = new XMLHandling();
$doc->openFile("test.xml", "個人");
# Display all elements
my $recordN = $doc->getRecordLength();
my $elementN = $doc->getElementLength();
my $i, $j, $elemName, $elemValue;
for ( $i=0; $i < $recordN; $i++ ) {
  for( $j=0; $j < $elementN; $j++ ) {
    $elemName = $doc->getElementName( $j );
    $elemValue = $doc->getElement( $i, $elemName);
    print "第$iレコード $elemName : $elemValue ¥n";
  }
}
```

(b) Perl プログラムでの Table 1 のメソッドの使用例

Fig.2 専用 XML API を用いたプログラム例



(a) Fig.2 の XML 文書のデータ格納



要素の順番と要素名を対応付ける1次元配列

(b) Fig.2 の XML 文書の要素名の格納

Fig.3 専用 XML API のデータ格納形式

して読み書きする感覚で、容易にプログラミングを行うことができる。項目名を指定して参照するので、新たな項目を追加して、CSV ファイルのデータの列が、ずれてもプログラミングに影響することはない。

4. XML 文書に変換するための CSV ファイル書式

4.1 CSV ファイルの書式の規定

XML 文書への変換を行うために、汎用の CSV ファイルの書式を、次のように規定する。

- ・ CSV ファイルの第 1 列目に Table 2 に示すキーワードを置き、第 2 列目以降に記述する XML 文書の要素の種類を、次のように行単位に識別する。
- ・ **ルート要素行**、**レコード要素行**： ルート要素、レコード要素は、1 行分を取って記述する。
- ・ **要素名行**： レコード内の各要素名は 1 列内に記述し、その並びを 1 行に収める。
- ・ **要素内容行**： レコード内の各要素名に対応する要素内容は、要素名行以降に続けて、1 レコード分を 1 行で記述する。
- ・ **テキスト行**： キーワード “text” は、CSV ファイルの記述を見やすくするものである。XML 文書には text タグを付けて、第 2 列目を要素内容とするように変換される。XML 文書の規格にあるコメント文 <!--...--> とは異なり、この text タグの内容は、

Table 2 CSV ファイルの書式での XML 文書の要素指定

1 列目のキーワード	2 桁目以降に記述する XML 文書の対応する内容 [使用する列]
①root	ルート要素名 [第2列]
②record	レコード要素名 [第2列]
③element	レコード内の要素名 [第2列以降]
④value	レコード内の要素の要素内容 [第2列以降]
⑤text	空白行、コメントを入れる [第2列]

XML 文書を CSV ファイルに逆変換する際にも、そのまま CSV ファイルに反映されるようにする。つまり、キーワード text の内容は、テキストを生データとして入れたい場合に用いるものである。

この規定に従ってデータ更新結果の XML 文書を作成して、この CSV ファイルの書式に逆変換すれば、利用者が更新結果を含めたデータを再利用することができることになる。

4.2 CSV ファイル書式の使い方

この CSV ファイル書式を用いて、データを記述した例を Fig.4 に示す。Fig.4 は学校業務における科目(英語)の学生の出席簿を示すデータである。この出席簿 CSV ファイルを変換した XML 文書を Fig.5 に示す。

変換された XML 文書の形式は、ルート要素、レコード要素の開始タグ 終了タグがそれぞれ 1 行に書かれる。レコード内の要素は、1 個ごとに、開始タグ、要素内容、終了タグの 3 つが 1 行に書かれる。

Fig.5 の例では、「学生」のレコードに、一人一人の番号、名前と、各講義日の出欠情報を記述している。また、「科目情報」のレコードに、この科目の選択・必修、講義の曜日・時限などの科目としての情報を記述し、「日付情報」のレコードには講義日を記述している。この CSV ファイル書式によって、1 個のファイルの中にレコード名の異なる複数個の表を置くことができる。これは複数個の表からなる関係する情報を、1 個のファイルにまとめることができるので便利である。

4.3 CSV ファイルと XML 文書の変換・逆変換

この汎用形式の CSV ファイルの XML 文書への変換、及び、XML 文書から CSV ファイルに逆変換するプログ

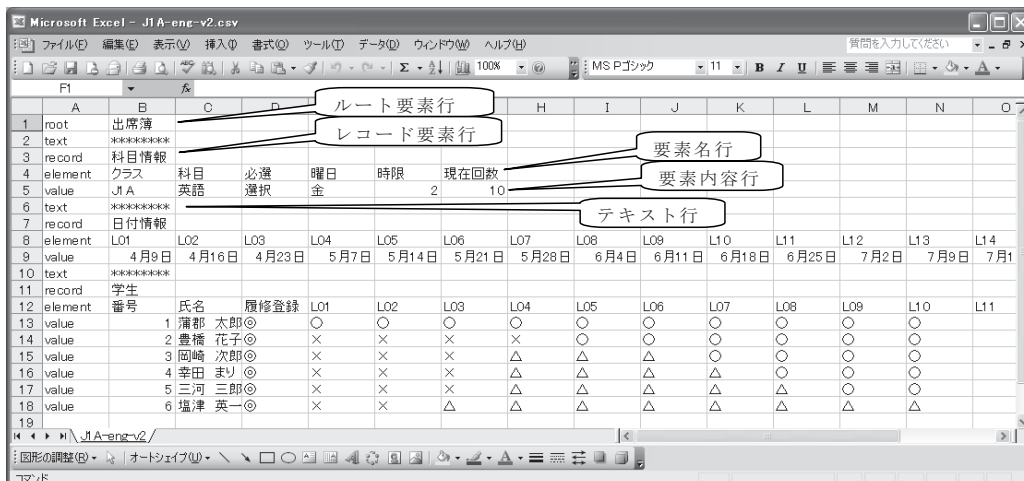


Fig.4 Excel での CSV ファイルのデータ記述例

ラムのフローチャートを、Fig.6 に示す。変換、逆変換とも先に規定した CSV ファイル書式、XML 文書の形式の特徴に基づいて、変換を行うプログラムになっている。なお、Fig.6 のフローチャートでは見通しを良くするために、CSV ファイルのキーワード “text” と、XML 文書の text タグを扱う箇所を省いた。

Fig.6(a) の XML 文書への変換プログラムのフローチャート中で、CSV ファイルから全行、全列を読み込んで、2次元配列に格納するブロック 100 で、1 行分の CSV 形式を分解するには、ほとんどのプログラム言語が備えている標準関数 split() を使えばよい。一方、Fig.6(b) の CSV ファイルへの逆変換プログラムのフローチャート中で、要素名と要素内容を 1次元配列より読み出して、コンマ区切り形式に合併するブロック 200 と 201 では、標準関数 join() を使えばよい。

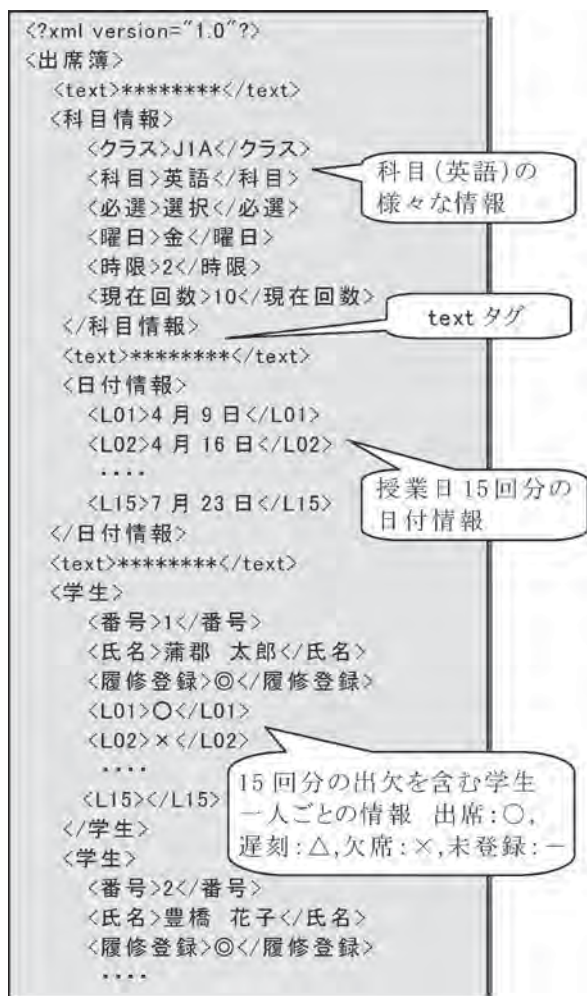
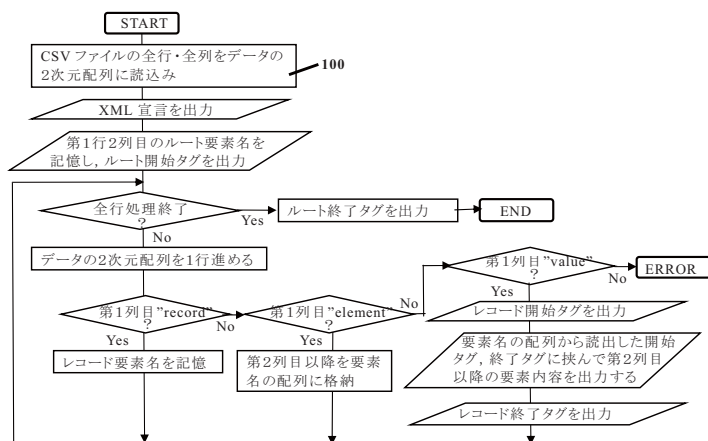
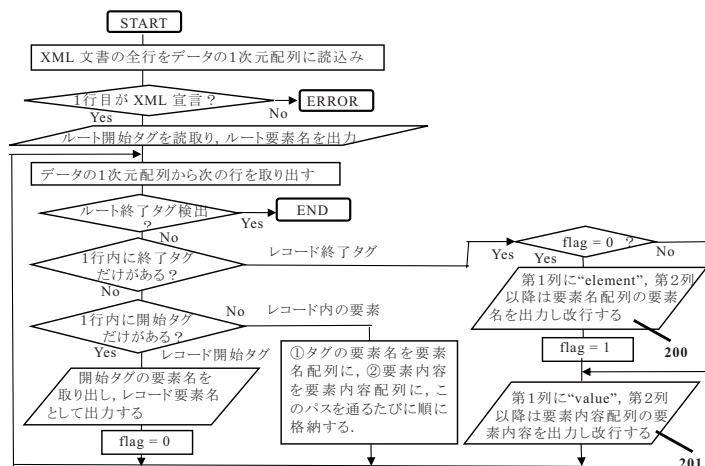


Fig.5 Fig.4 を変換して生成される XML 文書



(a) CSV ファイルから XML 文書への変換プログラム (CSV2XML) のフローチャート



(b) XML 文書から CSV ファイルへの逆変換プログラム (XML2CSV) のフローチャート

Fig.6 CSV ファイルと XML 文書との変換・逆変換プログラムのフローチャート

5. ソフトウェア試作と評価

5.1 専用 API と XML 変換・逆変換のソフト試作

専用 XML API と CSV ファイルと XML 文書との変換・逆変換のライブラリ・ソフトウェアを、プログラム言語 Perl を用いて試作実装した。XML ソフトは Java で実装されることが多いが、Perl も早くから XML に取り組んでおり、XML のライブラリが豊富に揃っている。

専用 XML API ソフト内で使う XML パーサーには、Active Perl 5¹⁵⁾ に標準装備されている SAX ライクなライブラリである XML::Parser を用いた。

従来ソフトと試作ソフトのソースプログラムの行数は、おおよそ次のようになった。

Table 3 試作ソフトのプログラム規模

機能 “プログラム名”	ソース行数
(a) 従来 API “RAX” ⁶⁾	267 行 (コメント行を除く)
(b) 専用 XML API “XMLHandlingAPI”	234 行
(c) CSV⇒XML 変換 “CSV2XML”	47 行
(d) XML⇒CSV 逆変換 “XML2CSV”	75 行

5.2 機能評価

(1) 適用する評価用アプリケーションの概要

評価のために、本検討の技術を適用するアプリケーションとして、学校業務における授業科目の出席簿管理を取り上げた。Fig.7 に出席簿管理システムが行う処理の全体像を示す。また、Fig.7 図中の関係する各データファイルに、おおよそ必要となる項目を、Table 4 に示す。表中で、(・・・) はレコード要素内の要素を表し、{・・・} はその要素の組が繰返すことを表す。下線を引いた要素は、他のデータファイルから転記される。データファイル間で様々な要素が相互に絡みあっており、転記されることで、各データファイルを見れば必要な情報が得られるようになっている。

(2) 評価用アプリケーションでの効果の検証法

RDB を用いる場合は、データの正規化を行って、データの冗長性を排除し、データの一貫性と整合性を保つために「1 事実 1 箇所」の原則を採る。このため、最初に、データベースのテーブル設計を用意周到に行う必要がある。運用後の項目の追加・削除には多大の手間が掛かるため、将来の拡張も考慮して全体システムを作り、準備・開発期間が長くなる。

一方、XML を用いた場合は、冒頭で述べたように、運用後も項目の追加・削除に、RDB 程は手間が掛からない。このため、暫定版のシステムで運用を開始し、後から修正を重ねて、完成度を上げるやり方が採れる。

そこで、前述の学校業務の出席簿管理のアプリケーションに対して、暫定版として部分的に利用できそうなものを作り、効果を検証することにした。Fig.7 における (a)、(c)、(d) の各アプリケーション・ソフトを試作した。

次の (3) 節において、(c) の処理プログラムの作りを取り上げ、その特徴を述べる。

(3) 科目出席簿からクラス出席簿への転記

XML 文書の操作を簡単にするために、データ加工の処理は、新たな要素を追加するのではなく、前述したよ

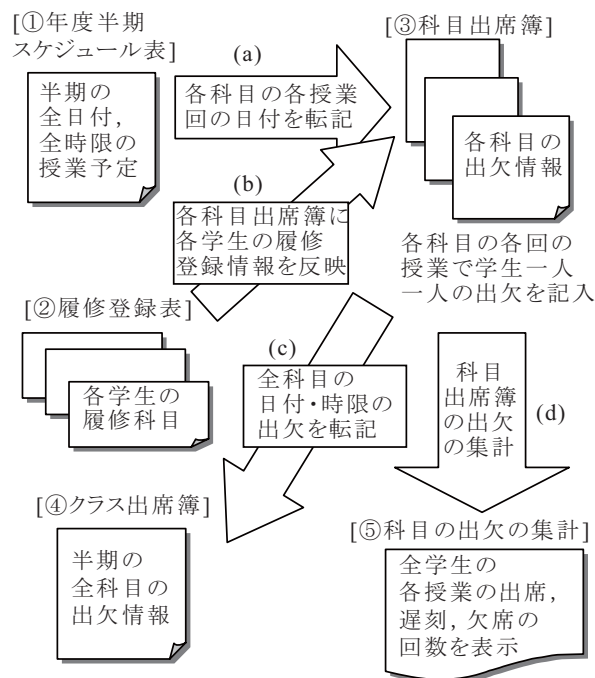


Fig.7 出席簿管理と、実現すべきデータ処理、関係するデータファイル

Table 4 各データファイルの必要項目

データファイル	必要項目 (注) レコード要素名(レコード内要素名,・・・)
①スケジュール表	・{行事(日付,時限,授業回数,備考予定)}
②履修登録表	・{学生(番号,氏名,{履修科目})}
③科目出席簿	・科目情報(科目,曜日,時限,担当,現在回数) ・日付情報(15 回分の授業の日付) ・{学生(番号,氏名,履修登録,15 回分の出欠)}
④クラス出席簿	・クラス情報(クラス名,{番号,氏名}) ・{出欠情報(日付,曜日,時限,科目,その日付・時限の授業の全学生の出欠)}

うに、空要素を更新するようにする。クラス出席簿は、その CSV ファイルから転記する箇所を空要素にした XML 文書 (Fig.8) を作っておく。

Fig.9 に、科目出席簿からクラス出席簿に出欠を転記するプログラムの主要部を示す。転記元の全ての科目出席簿を一つのフォルダに入れておき、そのフォルダ内の科目出席簿の情報をオブジェクトの配列に読み込んで、必要な情報を全てオンメモリで扱えるようにした後、データ処理する。科目出席簿は、学生ごとのレコードに全授業日の出欠情報が入っているのに対して、クラス出席簿では、各授業日・時限のレコードに全学生の出欠情報が入ることになる。すなわち、行と列の入れ替えが必要になるのである。これもオンメモリで扱うことにより、

```

<クラス名簿>
<クラス情報>
  <クラス名>J1A</クラス名>
  <在籍者数>6</在籍者数>
  <S01>蒲郡 太郎</S01>
  <S02>豊橋 花子</S02>
  <S03>岡崎 次郎</S03>
  <S04>幸田 まり</S04>
  <S05>三河 三郎</S05>
  <S06>塩津 英一</S06>
</クラス情報>
<text>*****</text>
<出欠情報>
  <日付>4月7日</日付>
  <曜日>水</曜日>
  <時限>1</時限>
  <科目></科目>
  <授業回数>1</授業回数>
  <S01></S01>
  <S02></S02>
  <S03></S03>
  <S04></S04>
  <S05></S05>
  <S06></S06>
</出欠情報>
<出欠情報>
  <日付>4月7日</日付>
  <曜日>水</曜日>
  <時限>2</時限>
  <科目></科目>
  <授業回数>1</授業回数>
  <S01></S01>
  ....
</出欠情報>
....
</出席簿>

```

Fig.8 転記前のクラス出席簿のXML文書

```

use XMLHandlingAPI;
$directory = $ARGV[0];
$postfile = $ARGV[1];
$outfile = $ARGV[2];
opendir(DIR, $directory) or die "??? Directory cannot open !?n";
@files = readdir DIR;
$num = 0;
foreach $infile ( sort @files ) {
  unless ( $infile =~ /^./ ) {
    open(IN, "$directory/$infile");

    $doc11[$num] = XMLHandlingAPI->new();
    $doc12[$num] = XMLHandlingAPI->new();
    $doc13[$num] = XMLHandlingAPI->new();
    $doc11[$num]->openFile( "$directory/$infile", "科目情報" );
    $doc12[$num]->openFile( "$directory/$infile", "日付情報" );
    $doc13[$num]->openFile( "$directory/$infile", "学生" );
    $num++;
  }
}

$doc21 = XMLHandlingAPI->new();
$postfile = XMLHandlingAPI->new();
$postfile->openFile( $postfile, "クラス情報" );
$postfile->openFile( $postfile, "出欠情報" );

...[日付, 時限に対応する科目番号$kを見つける処理]...

for($j=0; $j<$gakuseiN; $j++) { # $jは<学生>を走査
  $nm = $doc13[$k]->getElement($j, "番号");
  $nm1 = sprintf("%02d", $nm); #学生番号を2桁にする
  $tag2 = "S".$nm1; #学生番号 xxよりタグ Sxxを作成
  $element_value1 = $doc12[$k]->getElement($j, $tag1);
  $doc22->putElement($j, $tag2, $element_value1);
}

$doc3 = XMLHandlingAPI->new();
$doc3->openOutputFile( $outfile, "クラス名簿" );
$doc21->save(); $doc22->save();
$doc3->closeOutputFile();

```

Fig.9 科目出席簿からクラス出席簿に転記するプログラムの主要部分

スムーズなデータ処理ができる。

(4) Perl ソフトで扱えるデータ規模の調査

試作した評価用アプリケーション・ソフトについて、どの程度のデータ規模まで扱えるか処理時間を調べた。週5日として毎日4時限分の授業があるとすれば、フルで週20科目となる。1クラス30人分とし、20科目×30人分、半期の授業15回/科目として、その出欠データを作り、Fig.7 (a)(c)(d)のPerlソフトウェアのデータ処理の時間を求めた。Table 5に測定結果を示し、Table 6に処理時間を測定した環境を示す。

なお、科目出席簿 CSV ファイル (2.5KB) の XML 文書 (12KB) への変換と逆変換の時間は、ディスク・アクセス時間を含み、いずれも 0.08 秒であった。クラス出席簿 CSV ファイル (10KB/月) と XML 文書 (50 ~ 60KB/月) の変換は 0.10 秒、逆変換は 0.21 秒であった。

C 言語や Java と比較して Perl プログラムはインタプリタであるため、処理速度が遅いが、Table 5 の処理時間の結果は十分実用的な性能が得られている。30人1クラスで20科目の半期分出席データを、全科目のクラ

ス出席簿に日付と時限の順に転記する処理は、CSV ファイルの変換・逆変換も含め、トータルで10秒程あれば完了することになる。

5.3 考察

API と変換・逆変換のライブラリの試作と、アプリケーション適用を通して、得られた知見について述べる。

(1) システムの拡張性

XML の利用により、全ての情報を、オブジェクト名、レコード番号、要素名のみで参照するので、CSV データに新たな項目 (列) の追加、あるいは、使っていない項目 (列) の削除があっても影響しない。Fig.7 (b) の各学生の履修登録を反映させる部分は現段階で未実装になっている。しかし、データの未対応部分は手作業でデータを加えて、暫定版で運用して、後でデータ処理を追加するやり方が採れるだろう。

(2) ファイルベースで扱うことの利点

データの論理的な階層 (フォルダとファイル、API の

Table 5 評価用アプリケーションの規模と性能

機能	ソース 行数	処理時間
(a)科目出席簿に各回の 授業日付を転記	40行	@0.26秒 20件で5.2秒
(c)クラス名簿に全科目の 日付・時限の出欠を転記	65行	@1.8秒/月 4カ月分7.2秒
(d)各科目学生の出席, 遅刻,欠席回数を表示	42行	テキストファイル 出力で1.2秒

Table 6 処理時間の測定環境

項目	内容
コンピュータ	ノート PC DELL VOSTRO 1000
OS	Windows XP Version2002 SP3
CPU	AMD Turion Doual core 1.90GHz
メモリ	1.87 GB RAM
Perl インタープリタ	ActiveState 社 Active Perl 5.8.9

レコード・オブジェクトとレコード内要素)が有効に使い、プログラムの作成が楽だった。また、各データファイルが CSV ファイルとして独立していて、利用者が自分に必要なファイルだけを参照・修正するため、不用意に他者のファイルを壊す危険性が防げる。

(3) 対象データを表形式に限定したことの利点

データが、CSV ファイルとして Excel GUI を用いて作れるようになった。この記述形式を規定することにより、XML エディタなしでも、XML 記述の冗長性にわずらわされないで済んだ。また、本専用 API は、扱うのが表形式のデータだけなので、使い方が簡単で、プログラムも見通しが良くなった。さらに、データ処理結果の XML 文書が、CSV ファイルに逆変換できるので、今までの処理結果を反映したファイルを再度利用することができる。これはデータ処理に少しの修正が必要になるときに、処理結果を一覧して手作業で行えることに繋がった。今回の CSV ファイルの作成時の課題として、Excel で開いたとき、各列が英字 8 桁 (漢字 4 桁) のような幅で表示される。要素名、要素内容が短い場合はこれでいいが、長い場合は、見やすくするために、記述形式を別途工夫する必要があるだろう。

以上、本検討技術は、大量・少項目のデータ処理の高速化ではなく、少量・多項目のデータ処理の現場での開発効率化に向くと考える。

6. まとめ

扱う対象の XML 文書を表形式のレコード構成のデー

タに限定して、XML 処理の API を簡単化し、利用者が CSV ファイルとして作ったデータを自動的に XML 文書に変換してデータ処理するライブラリについて検討した。XML 文書の利用は広がっているものの、日常業務の中では、めったに目にするのではなく、裏方として、データ交換、データ処理の用途で効果を上げている。本検討でも、XML 文書は裏方として動かす方法を採用し、システム構築時に厳密なスキーマを前提にせずに、逐次拡張ができること、データ処理のプログラムが組みやすいなどの利点を引き出すようにした。これを、学校業務の出席簿管理のアプリケーションに適用して、その効果などを確かめた。結果として、組上げやすく、使いやすいシステムを作るライブラリ・ソフトという今回の目標を、ほぼ達成できたものと考えられる。

本検討により、機能面の有効性と、性能面の実用性が確認できた。利用者が多人数になる場合は、セキュリティ面、データの正誤の検証や、同時アクセスへの対処等が、別途課題となる。

また、本検討では、利用者のデータ作成は CSV ファイルとしたが、CSV 形式は各列の幅の設定が保存できない。これは、Excel 形式を用いれば開発者のアプリケーション作成は手間が掛かるようになるものの、利用者側は便利になるだろう。

本報の今のやり方は、専用 API を用いて開発者が XML のアプリケーション・プログラムを一から組上げるようになってきている。今後は、各種のアプリケーションで、データ処理の仕方を分析して、マクロ的なデータ処理のライブラリも作り、ファイルベースの小規模のアプリケーションを、もっと手軽に作れる方向を目指したい。

参考文献

- 1) XMLDB 解説：今なぜ、XML データベースなの？
http://www.xmldb.jp/xmldb/rdb_xmldb.php/.
- 2) 下佐粉 昭・野間愛一郎・久保俊彦・高橋賢司：XML-DB 開発 実技コース，翔泳社 (2008.4).
- 3) 中山幹敏・浅井康弘・日本ユニテック：改訂版標準 XML 完全解説 <上>，技術評論社 (2001.4).
- 4) 中山幹敏・浅井康弘・日本ユニテック：改訂版標準 XML 完全解説 <下>，技術評論社 (2004.3).
- 5) 道本健二：XML が嫌われている？
<http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20071011/284276/>，(2007.10).
- 6) S.McGrath, "RAX: An XML Database API",
<http://www.xml.com/pub/a/2000/04/26/rax/index.html>, April 26, (2000.7).
- 7) 吉田茂・井谷宣子：圧縮 XML 文書のデータ処理用 API ソフトウェアの検討，愛知工科大学紀要，第 7 巻 (2009 年度) pp.57-62 (2010.3).

- 8) msdn : Office (2007) Open XML ファイル形式
[http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/aa338205\(office.12\).aspx](http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/aa338205(office.12).aspx)
- 9) Standard ECMA-376 Office Open XML File Fromats 1st edition (2006.12) and 2nd edition(2009.12)
<http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-376.htm>
- 10) 古川順平：仕事に役立つ Excel データベース，ソフトバンククリエイティブ (2009.6)
- 11) たのしい XML：XML を IE で表示 (基礎編) CSV ファイルへの変換 (2004.11)
<http://www6.airnet.ne.jp/manyoxml/xslt/step23.html>
- 12) XML2CSV で学ぶ実践的な Xpiori プログラミング 第 1 回
http://www.xmldb.jp/dev/tutorial_xml2csv_1.php.
- 13) ChangeXMLforMOC コンバートデータ仕様 (Ver1.02)
<http://www.geocities.co.jp/SiliconValley-SanJose/5380/workshop/dgxmlcnv.htm>
- 14) PFU XML データコンバータ
<http://www.pfu.fujitsu.com/psw/product/converter.html>
- 15) ActiveState 社の Active Perl のサイト
<http://www.activestate.com/activeperl>.

ドアセンサを利用した 24GHz 帯マイクロ波ドップラー速度計

藤本 裕*, 名和靖彦**, 相木国男**

(2010年9月30日受理)

A 24GHz Microwave Doppler Speedometer make use of an Auto-door Sensor

Yu Fujimoto*, Yasuhiko Nawa**, Kunio Aiki**

(Received September 30, 2010)

Abstract

A microwave Doppler sensor commonly used in the automatic door system has been applied to compose a speedometer. The microwave of a frequency of 24.15GHz has been collimated by using a dish antenna of a diameter of 0.3m. Intermediate-frequency output from the sensor has been processed and fed to a counter, a decoder and a display. The maximum detectable ranges observed were about 300m for cars and 80m for men. The setup is easy to be manufactured and can be used as an apparatus for electronics experiments.

キーワード：ドップラー効果，マイクロ波，速度計

Keywords : Doppler effect ,Microwave ,Speedometer

1. はじめに

理工学分野では波動が種々の場面に登場し重要な役割をなしている^{1,2)}。マイクロ波技術は、Bluetooth や無線 LAN, 衛星通信, レーダその他多くの分野で利用されており、エレクトロニクスを学ぶ学生に欠くことのできない学習対象である。ここでは、自動ドア用として身近に使用されているマイクロ波ドップラーセンサを利用し、速度計を製作し評価する。

本研究ではマイクロ波のビーム成形や信号の雑音処理、波形成形、数表示などの回路設計とその製作を介して、マイクロ波の性質やドップラー速度計の動作原理を理解する教材の試作を目指す。本研究では、24.15GHz のセンサを使用しマイクロ波ビームの指向性を向上させ、前報の 10GHz ドップラー速度計³⁾の結果と比較検討する。また、進行方向判別の機能などを付加する。

2. 動作原理

2.1 移動体反射によるドップラー効果

マイクロ波ドップラー速度計では、観測者に対し速度 v で移動する物体にマイクロ波を放射し、反射波を観測する。発振源と観測者は同じ位置にあって停止しているとする。発振周波数を f_s とし、移動体が速度 v で遠ざかっているとする。この時観測される反射波の周波数 f_o は、次式で表される³⁾。

$$\begin{aligned} f_o &= \left(\frac{c-v}{c+v} \right) f_s \\ &\cong \left(1 - \frac{v}{c} \right)^2 f_s \\ &\cong \left(1 - \frac{2v}{c} \right) f_s \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここで c は光速で、 $v \ll c$ である。

* 愛知工科大学大学院 博士前期過程, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Graduate school, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihazama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

** 愛知工科大学工学部, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihazama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

移動体が遠ざかる時には、観測周波数 f_o は、発振周波数 f_s より低く、逆に接近する場合は高くなる。

マイクロ波ドップラーセンサは、受信した反射波と送信波の一部をミキサ回路に導いて、これらの周波数差を中間周波信号として出力する仕組みとなっている。出力信号は周波数差の絶対値であるから、次式で表される。

$$|f_o - f_s| \cong \frac{2|v|}{c} f_s \quad \dots \dots \dots (2)$$

観測される周波数差から、速度 v の大きさを知ることができるが、接近か後退かの移動方向は分からない。

2.2 接近と後退の判別

接近、後退を判別できるドップラーセンサのブロック図を Fig.1 に示す。発振回路からの出力は送信アンテナから移動体に向け放射される。発振回路とアンテナとの間に 1/4 波長の距離を隔てて、2つの方向性結合器が置かれている。方向性結合器の出力電圧をそれぞれ、 e_1 および e_1' 、出力電圧の最大値を A_1 、時間を t とすると、 e_1 および e_1' は次式のようになる。

$$e_1 = A_1 \sin(2\pi f_s t) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$e_1' = A_1 \sin(2\pi f_s t - \frac{\pi}{2}) \quad \dots \dots \dots (4)$$

反射波の受信電圧 e_2 は、受信電圧の最大値を A_2 とすると、次式のようになる。

$$e_2 = A_2 \sin(2\pi f_o t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ミキサは、2つの入力の積を生成するので、ミキサ1の出力は、次式で表される。

$$\begin{aligned} e_2 \times e_1 &= A_2 \sin 2\pi f_o t \times A_1 \sin 2\pi f_s t \\ &= \frac{A_1 A_2}{2} [\cos 2\pi (f_o - f_s) t \\ &\quad + \cos 2\pi (f_o + f_s) t] \quad \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

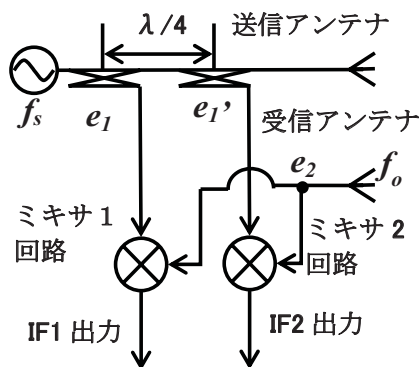


Fig.1 接近後退を判別するドップラーセンサ

ここで、センサ回路内のフィルタ効果により(6)式の周波数の和($\sim 48\text{GHz}$)を表す第2項はカットされ、出力されない。その結果、(6)式は次式のように表される。

$$e_2 \times e_1 = \frac{A_1 A_2}{2} \cos 2\pi (f_o - f_s) t \quad \dots \dots \dots (7)$$

上式が検出信号として出力される。同様にミキサ2の出力は、次式のように表される。

$$\begin{aligned} e_2 \times e_1' &= \frac{A_1 A_2}{2} \left[\cos \left\{ 2\pi (f_o - f_s) t - \frac{\pi}{2} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \cos \left\{ 2\pi (f_o + f_s) t - \frac{\pi}{2} \right\} \right] \quad \dots \dots (8) \end{aligned}$$

更に(8)式は次式のように表される。

$$e_2 \times e_1' = \frac{A_1 A_2}{2} \sin 2\pi (f_o - f_s) t \quad \dots \dots \dots (9)$$

(7)式はCOS関数、(9)式はSIN関数であるから、IF1出力とIF2出力には $\lambda/4$ の位相差が生じている。接近時にはIF1よりIF2の信号が $\pi/2$ 遅れ、後退時にはIF2が $\pi/2$ 進むので、位相差を検知することで接近か後退かを判別できる。言うまでもなく、 f_o と f_s の周波数差からは速度が得られる。

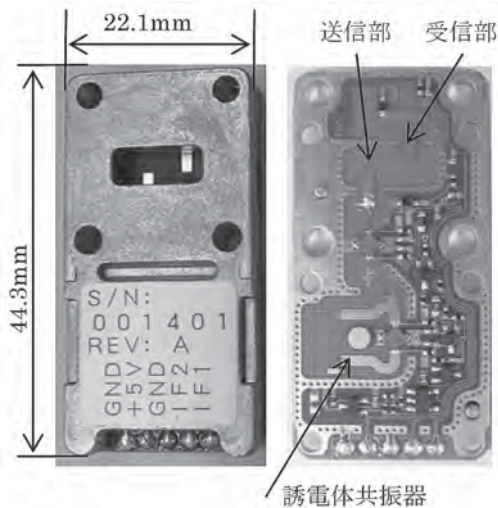
3. 実験装置

3.1 ドップラーセンサ

用いたセンサは新日本無線株式会社のNJR4261JB1724を使用した。その外形と内部構造を Fig.2 に示した。このセンサは誘電体共振器を用いて、特定小電力無線局の24.15GHzの周波数を発振しており、出力は7mWである。

3.2 回路構成

製作回路のブロック図を Fig.3 に示した。(2)式より、センサの出力周波数は1m/sの移動体速度に対し161Hzであり、100km/hでは4.47kHz、200km/hでは8.94kHzである。センサ出力(IF1, IF2)をセンサ背面に取り付けた低雑音プリアンプで34.2dB増幅した後、本体アンプで49.9dB増幅し、総合利得を84.1dBとした。2km/hから200km/hの速度範囲を計測できるように、プリアンプの周波数帯域を100Hz \sim 10kHzとした。センサ雑音による誤動作を低減するため、プリアンプの後にヒステリシスコンパレータを設置した。IF1信号とIF2信号のヒ



(a)外観 (b)内部構造

Fig.2 ドップラーセンサ

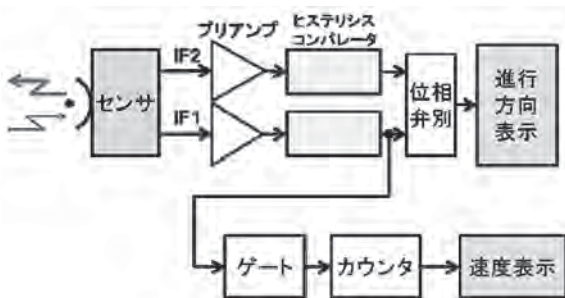


Fig.3 ドップラー速度計のブロック図

ヒステリシスコンパレータ出力を位相弁別器に導き、後退時 IF2 信号の位相が進んだとき赤色、接近時位相が遅れたとき青色 LED を点灯させ進行方向を表示した。一方のヒステリシスコンパレータ出力をカウンタ回路に導いて、速度を表示した。速度表示には 3 桁の 7 セグメント LED を用いた。速度表示回路では、カウンタ回路のゲート時間を変化させ、km/h レンジと m/s レンジを切り替えられるようにし、000 ~ 999 の範囲で表示した。km/h レンジのゲート時間は 22.37ms、m/s レンジでは 6.21ms である。速度が変化している場合、表示される速度は、これらゲート時間内の平均速度となる。ゲートパルスの繰り返し時間を 330ms とし、0.33 秒毎に測定数値が更新されるようにした。

3.3 ヒステリシスコンパレータ回路

移動体からの反射波がない状態では、センサの IF1、IF2 出力端子には約 0.06mV の雑音信号が発生する。観測時の反射信号が雑音と同レベルの弱い場合に生じる誤表示を低減するため、ヒステリシスコンパレータを用いた⁴⁻⁶⁾。本回路では、入力レベルが閾値 V_H を越えると

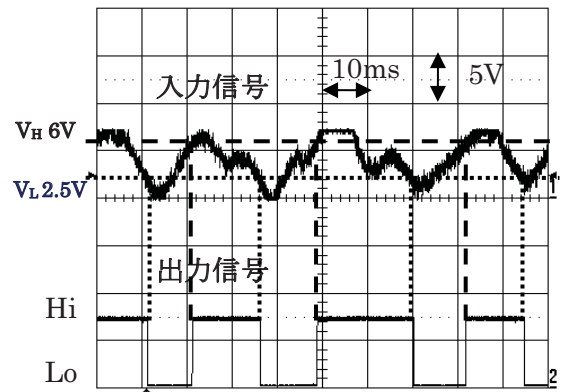


Fig.4 ヒステリシスコンパレータの入出力波形

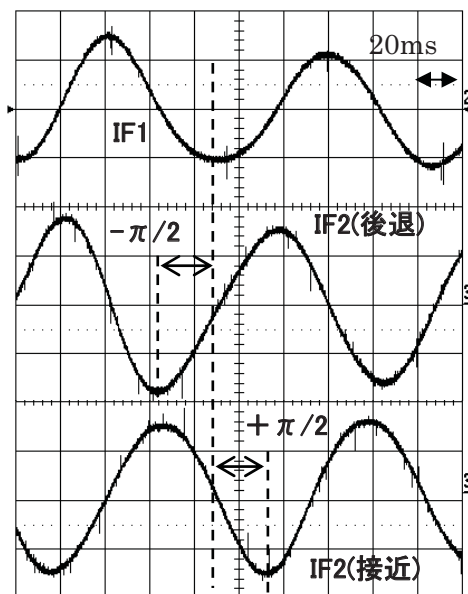


Fig.5 接近、後退時のセンサ出力

Hi 信号が出力される。Hi 信号状態は入力レベルが変動しても維持され、閾値 V_L を下回ると Lo 信号を出力する。Lo 信号は同様にして入力レベルが V_H を上回るまで維持される。

ヒステリシスコンパレータへの入力と出力の一例を Fig.4 に示した。ここではセンサ出力が 84dB 増幅され、雑音信号は 1V、反射信号は 7V の場合を示した。閾値電圧として、 $V_H = 6.0V$ 、 $V_L = 2.5V$ とした。入力信号が V_L を割った後 Lo 信号状態が維持され、 V_H を越えると Hi 信号状態が維持されていることが分かる。

検知距離を増すために V_H と V_L の値を接近させると誤動作が起きやすくなるので最適化が必要である。

3.4 位相弁別回路

移動体が接近、後退したときのドップラーセンサ出力の測定例を Fig.5 に示した。IF 1 信号に対し、後退時

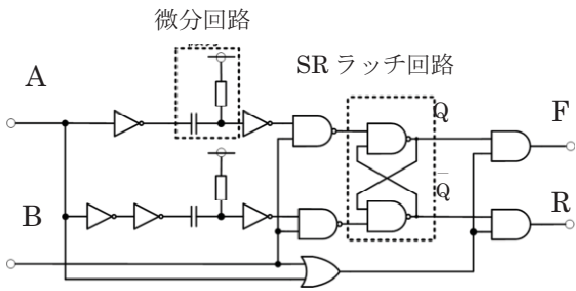


Fig.6 位相弁別回路のブロック図



Fig.7 製作したドップラー速度計

IF2 信号が $\pi/2$ 進み, 接近時には $\pi/2$ 遅れていることが分かる. ヒステリシスコンパレータで IF1, IF2 信号が方形波に変換された後も IF1, IF2 の位相関係は維持されている. これらの信号を Fig.6 の位相弁別器入力 A, B に導いた. A 信号に対し, B 信号の位相が $\pi/2$ 進んでいるとき, SR ラッチ回路出力 Q が 1 となり接近を示す. $\pi/2$ 遅れでは \bar{Q} が 1 で後退を示す. さらに, 入力信号と SR ラッチ回路の出力信号の AND をとり, 反射信号がないときは出力 $F=R=0$ とした. 出力 F と R には赤色と青色 LED を接続し, 接近の時, 青色, 後退の時, 赤色が点灯, 信号無しでは赤青ともに消灯とした.

4. 結果と考察

製作したドップラー速度計を Fig.7 に示した. 凹面鏡⁷⁾ は厚さ 1mm のアルミ板を直径 30.0cm, 曲率半径 36.4cm に加工し製作した.

電源と表示部を含む回路基板を凹面鏡の背後に設置し, 三脚に固定した. ドップラーセンサにはビームの収束性を改善するホーンを取り付け, 焦点位置に固定した.

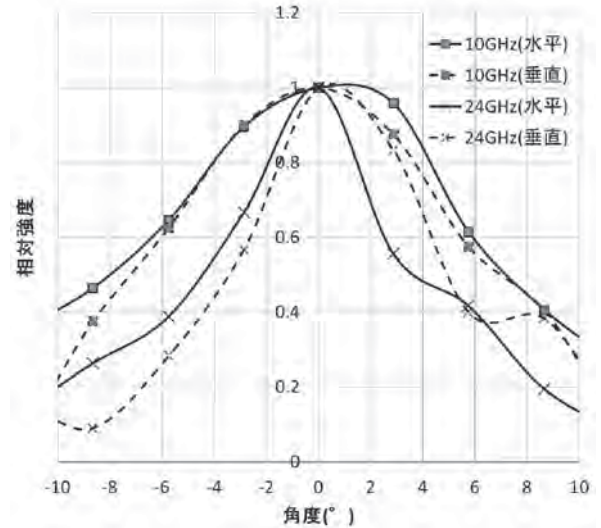


Fig.8 ビーム放射パターンの比較

Table 1 ヒステリシスコンパレータの有無と閾値電圧最適化前後の反応限界距離

	ヒステリシスコンパレータ		
	無し	調整前	調整後
廊下	9.0 m	23.5 m	30.0 m
グラウンド	37.2 m	63.7 m	80.6 m

4.1 ビームの広がり角

凹面鏡から放射されているマイクロ波ビーム^{8,9)}の広がり角を実測した結果を Fig.8 に示した. Fig.8 には前報の 10GHz ドップラーセンサの結果³⁾も合わせて示した. 半値半角は 10GHz では, 水平 7.5° , 垂直 7.0° , 24GHz では水平 4.4° , 垂直 4.3° であった.

波長 λ , 直径 D のガウスビームに対する広がり角の理論値は, 次式で表される.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{1.2\lambda}{D}\right) \dots \dots \dots (10)$$

従って, 10GHz でおよそ 7° , 24GHz ではおよそ 3° である.

実際のビームはガウス形状ではなく, 水平と垂直方向も対称でない. また, 凹面鏡の面精度誤差もあるため, 理論値より大きな広がり角が観測されたが定性的には理論値に近い.

4.2 ヒステリシスコンパレータの閾値

ヒステリシスコンパレータ無しと, 有りで閾値電圧 V_H, V_L の最適化前後の結果を Table 1 にまとめた. 反射体は移動する人体とし, 廊下とグラウンドにおいて反応

限界距離を観察した。ヒステリシスコンパレータが無い状態と比べ、有りで最適化前では約2倍、最適化後では3倍となっている。最適化前の閾値は $V_L = 3.0V$, $V_H = 5.0V$ 最適化後は $V_L = 2.5V$, $V_H = 6.0V$ と容幅を広く取った。ヒステリシスコンパレータには単電源オペアンプを電源電圧 8.5V で用い、信号の平均電圧は 4.25V とした。

Table 2 センサ反応限界距離の比較

周波数	人	乗用車	大型車
24GHz	80.6 m	180 m	294 m
10GHz	27 m	56 m	77 m

4.3 実測結果

屋外において、人物、乗用車、大型車のセンサ反応限界距離を 10GHz と 24GHz で調べた。5 回の測定の平均値を Table 2 にまとめた。24GHz では、10GHz の場合に比べ測定距離がおおよそ 3 ~ 4 倍向上している。これはビームの指向性が鋭くなった効果による。またこの結果、特定の移動対象物をねらいやすくもなった。接近、後退の表示機能は、限界距離まで正常に動作することが分かった。測定精度は表示桁数とゲートパルス幅の精度によって決まる。今回の 3 桁表示では、最小桁の 1 デジットが誤差となる。ゲート幅精度は、タイマ IC で構成したクロック発振器の安定度であり、スイッチ ON 後安定するまで 30 秒かかることが分かった。安定後の変動は 3% 以内であった。今後、アンテナの小型化や移動体を聴覚的検知することを検討していきたい。

5. まとめ

自動ドアセンサを利用した 24GHz 帯ドップラー速度計を製作し、前報の 10GHz 帯センサと比較評価した。対象物の接近と後退を表示する回路を附加し正常動作確認した。また誤動作を改善するため、ヒステリシスコンパレータの条件を最適化した。24GHz としたことでビームの広がり角が 4.4° と 10GHz の時の 2/3 に鋭くできたため、センサ反応限界距離が向上した。大型車では約 3.8 倍であった。ここに述べたドップラー速度計の製作は、学部学生の知識と技術、身近にある機器と手軽に入手できる材料で可能である。製作と評価実験を通し、ドップラー速度計の動作原理、マイクロ波の性質や様々な電子回路を理解するのに適しており、教材として有効に利用できる。

参考文献

- 1) 名和靖彦・相木国男：愛知工科大学紀要，第 4 巻，P.41，(2007)
- 2) 名和靖彦・相木国男：愛知工科大学紀要，第 6 巻，P.49，(2009)
- 3) 藤本裕・名和靖彦・相木国男：愛知工科大学紀要，第 7 巻，P.25，(2010)
- 4) 岡山努：オペアンプ基礎回路 再入門，日刊工業新聞社，P.85，(2005)
- 5) 馬場清太郎：OP アンプによる実用回路設計，CQ 出版株式会社，P.192，(2004)
- 6) アナログ・デバイセズ(株)：OP アンプによる増幅回路の設計技法，CQ 出版株式会社，P.190，(2005)
- 7) 新井宏之：新アンテナ工学，総合電子出版社，P.76，(1998)
- 8) 谷口慶治：アンテナと電波伝搬，共立出版，(2006)
- 9) AMNON YARIV:光エレクトロニクスの基礎，P.38，(1974)

超音波を用いたレーダ原理の実験 (第2報)

リアルタイム表示と多重反射像の消去処理

西野 渉*, 名和 靖彦**, 相木 国男**

(2010年9月30日受理)

An Experiment of Radar Principal make use of the Ultrasonic Wave part II Real-time Display and Canceling of Multiple-Reflection Images

Wataru Nishino*, Yasuhiko Nawa**, Kunio Aiki**

(Received September 30, 2010)

Abstract

To promote understanding of the radar principal for junior students who study electronics engineering, two dimensional in-air sonars have been demonstrated. Ultrasonic pulses with the width of 1.5ms and the wavelength of 8.6mm (the frequency of 40kHz) have been used. Reflected pulse signals are A/D converted and processed in a PC equipped with the VB.NET program. Objects located within a radius range of about 20m have been displayed as a radar chart image.

キーワード：レーダ, 超音波, 多重反射

Keywords: Radar, Ultrasonic, Multiple reflection

1. はじめに

マイクロ波を対象物に照射し、反射波の到達時間から距離や形状を計測するレーダ技術は、ミリ波や光波、超音波などにも適用され、今日広く利用されている^{1,2)}。製作や実験を通して理工学を学ぶ学生にその動作原理を理解させることを目的とし、超音波レーダを製作し評価する。

前報²⁾では、対象物からの反射信号をデジタルオシロスコープでA/D変換後保存し、オフラインでパソコンに取り込んだ。その後、Excelファイルに変換し、数式処理ソフトを使用して対象物画像を円柱座標表示した。今回、これをリアルタイムシステムに改善する。反射信号をA/D変換し、パソコンで信号処理と表示を行う。凹面鏡アンテナの回転を描画に同期させるため、パルスモータを同期信号で駆動する。

前報で見いだされた表示画像に現れる多重反射に基づく虚像を、ソフト的に除去することを試みる。

2. 実験方法

2.1 実験装置

実験装置のブロック図をFig.1に示した。超音波周波数に相当する40kHzの信号を発生させ、幅1.5ms、間隔310msのタイミングパルスでゲートをかけ送信信号を得た。この信号をトランスデューサに加えて超音波パルスを発生させた。トランスデューサはアルミ板を加工した直径20cmの凹面鏡アンテナの焦点に配置し、広がり角 $\pm 3^\circ$ の超音波ビームを形成した³⁾。反射波は、別の直

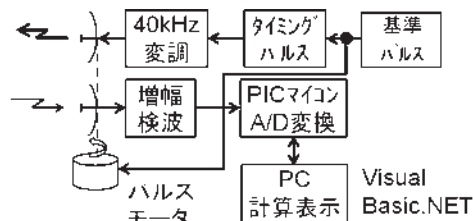


Fig.1 実験装置の構成

* 愛知工科大学 博士前期過程, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Graduate school, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihazama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

** 愛知工科大学工学部, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihazama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

径 20cm の凹面鏡で収束し，トランスデューサで電気信号に変換後，増幅，検波して，PIC マイコン（18F2550）で構成した A/D コンバータに導いた．パルスモータを駆動し，アンテナの回転と描画の同期を取った．A/D 変換信号は USB ケーブルを介してパソコンに導き Visual Basic.NET プログラムで信号処理して円柱座標に画像表示した．

製作した超音波レーダの外観を Fig.2 に示す．本体は，トランスデューサを取り付けた送信および受信凹面鏡とそれらの背後に取り付けた送受信回路及び電池からなる．パルスモータの回転をギヤベルトで 1/6 に減速し本体を回転する仕組みとした．パルスモータは 1 パルスあたり 1.8° 回転する．本体を 310ms 毎に 1 ステップ (1.2°) 回転させるため，4 パルス / 0.31s = 13pps でパルスモータを駆動した．13Hz のクロック発振信号でパルスモータを駆動し，これを 1/4 分周して 310ms 間隔のタイミングパルスを得た．

A/D コンバータ基板を Fig.3 に示した．3 個のタイマー IC555 は，13Hz クロック発振，40kHz 発振，タイミングパルス形成に用いた．

プリント基板は，回路図からプリントパターンを自動作成する CAD (EAGLE) を用い，このデータをプリント板加工 CAM (ミッツ社製 EP-7 型加工機) に取り込んで製作した．Fig.4 に加工後のプリント基板を示した．

2.2 実験条件

Visual Basic.NET プログラムのウィンドウ上で A/D コン

バータのサンプリング間隔とサンプリング回数を設定できるようにした．本報告の実験は以下の条件で行った．

超音波周波数	40kHz
超音波波長 (20)	8.6mm
パルス間隔	310ms
パルス幅	1.5ms
サンプリング間隔	1 ms or 0.5ms
サンプリング回数	120 回
動径データ数	120 個
偏角ステップ	1.2° / 0.31s

サンプリング間隔はサンプリングの速度であり，数値が少ないほど細かなデータを取ることが出来る．サンプリング回数は動径の線を一本引く際に行うサンプリングの回数で，この数字が大きいほどレーダの描画が細くなる．

2.3 信号処理

信号処理の流れを Fig.5 に示した．PIC マイコンでは，タイミングパルス A の立ち上がりで A/D コンバータをトリガし，反射信号 B のサンプリングを開始する．サンプルデータを一旦メモリに蓄える．USB ケーブルを介してデータを PC に転送し，円柱座標変換などの処理を経て最初に偏角 = 0° の動径を PC のモニタ上に描画する．描画が終わると再びサンプリングを開始し，同様にして = 1.2° の動径を描画する．これを 300 回繰り返して，360° の全画面を描画する．サンプリング数を 120 としたとき，全画面は 36000 のデータで構成される．一回の描画に要する時間はおよそ 90 秒である．

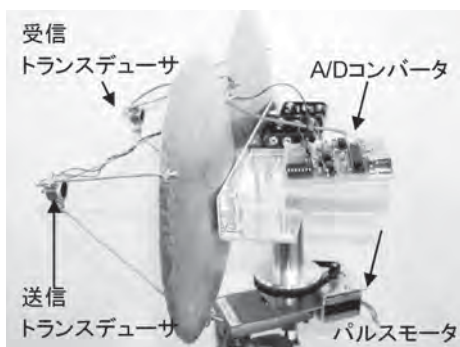


Fig.2 製作した超音波レーダ

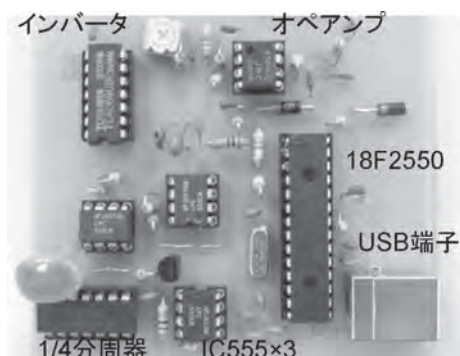


Fig.3 A/D コンバータ基板



Fig.4 A/D コンバータプリント基板

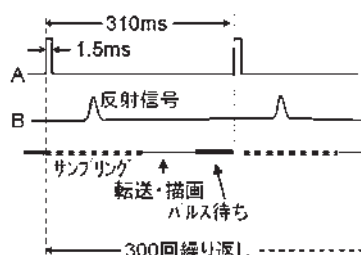


Fig.5 信号処理の流れ

2.4 多重反射像の除去

レーダは対象物からの散乱波を受信して位置や形状を忠実に表示することを目的としている。対象物が平面の場合、散乱が起きにくく反射されてしまうので信号を捉えるのが困難となる。多面体で構成されたステルス機はこの理由でレーダに捉えにくい。平面壁の室内ではこの結果多重反射が発生する。その状況を Fig.6 に示した。観測点 C から B に向けたビームは、B で散乱と反射を生じる。散乱波の一部が観測点に戻り画面に像 B が表示される。残りの反射波は A 点に達しここで散乱と反射を生じる。散乱波の一部は B で反射され C に戻るの、画像上では A の位置に表示される。このような多重反射により生じた A は対象物が実在しない虚像であり、正しい計測の妨げとなる。

ここでは、B 点からの反射波の後から来る信号をプログラム上で消去し、多重反射による障害を回避することを試みた。

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果

Fig.7 に示すトレーニングルーム内での観測結果を Fig.8 に示した。Fig.7 に示されている灰色の薄い円は、レーダの検出範囲を示している。本機の設置点から最も離れた壁 (a) までの距離は 20m であり、これが表示されている。壁は凹凸が少なく平面であるため、主に壁に対し垂直な反射が顕著に現れる。画面左上の強い反射像は、この部分に深い凹凸がある棚が備え付けられていることによる。室内の図と見比べると柱があまりはっきり写っ

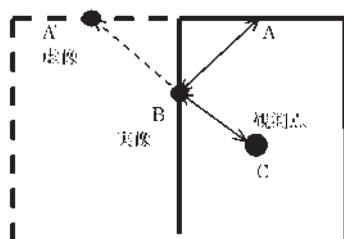


Fig.6 多重反射による虚構の発生機構

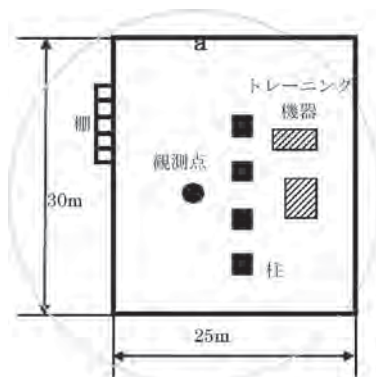


Fig.7 観測場所 1

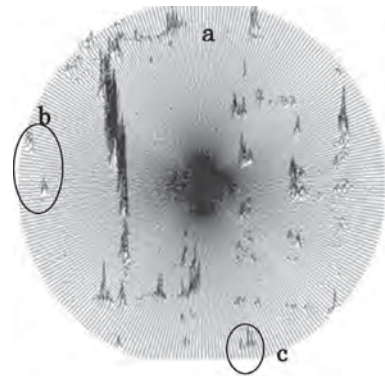


Fig.8 観測結果 1

ていない。柱は平面で構成されているため散乱せず、強い反射波が返ってこない。トレーニング機器はパイプで構成されたものが多く、超音波を反射する面積が少ないため反射が弱い。しかし観測地点から垂直方向にあるトレーニング機器は比較的是っきりと写っている。このような広い部屋では、反射波が戻るまでに減衰するので、多重反射像は顕著には現れない。一部 Fig.8 の b, c に多重反射像が認められる。

3.2 検出能力

検出能力を調べるため、三種類のアルミニウム等辺山形鋼 (c: 幅 15mm, b: 幅 25mm, a・f: 幅 30mm) と塩化ビニル樹脂パイプ (d: 直径 26mm) 及び人体 (e) を観測した。観測した対象物はそれぞれ観測点から 7m の地点に円弧状に、Fig.9 のように配置した。これらの観測結果を Fig.10 に示した。レトロ反射条件 (後述) で設置したアルミニウム等辺山形鋼 (アングル) c, b, a は幅に対応する強度の反射が見られた。象を構成する線の数が 5 程度であることがわかる。線と線の角度幅は 1.2°

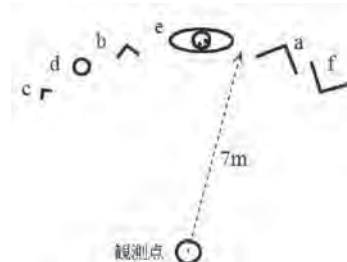


Fig.9 配置図

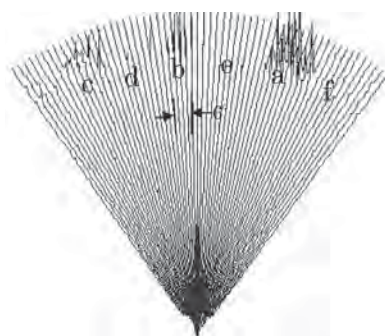


Fig.10 検出能力測定結

なので象の角度幅はおよそ 6° ということになり、ビームの広がり角が $\pm 3^\circ$ 程度だということがわかる。逆さ向きに置いた幅30mmのアンテナfでは、1mまで接近させても反射波がほとんど見られなかった。パイプdと人体eからの反射波は弱く、1~5m程度まで接近させないと認められなかった。レトロ反射条件を満たしたアンテナaにタオルを巻くと反射強度が半減した。

3.3 多重反射像の消去処理

多重反射の影響が出やすい Fig.11 に示す狭い部屋で観測を行った。プログラムで虚像を消去処理する前と処理後の結果を Fig.12, Fig.13 に示した。時間分解能を改善するためサンプリング間隔 0.5ms で観測した。Fig.13 では、Fig.12 の多重反射像 a, b などが消去され、本来の像がすっきり表示されていることが分かる。今回の処理条件は、最初の信号のあとに来た信号の強度が、最初のものよりも小さい時のみこれを消去するようにした。しかし、例えば Fig.12, Fig.13 の c, d などの多重反射虚像は消去されていない。平面壁であっても、壁に垂直にビームが当たる場合は反射像が現れるのでその後に来る多重反射像 (a, b) は削除されている。ビームが垂直からそれると反射波が戻らないので壁の像 c, d が出ず、この後に来る信号の削除はなされない。この結果多重反射像 c, d などが表示されてしまう。ビームが垂直からさらにそれ、コーナー部に当たると、ここでは強い反射

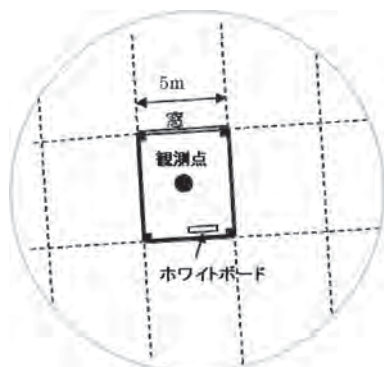


Fig.11 観測場所 2

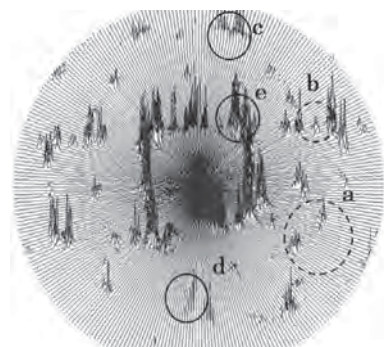


Fig.12 観測結果 2

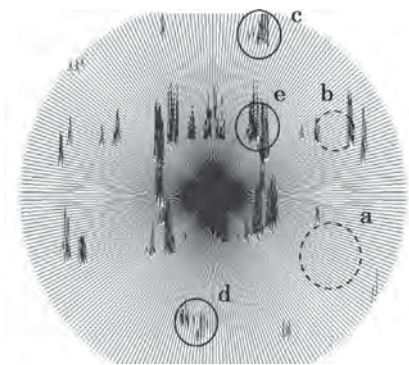


Fig.13 観測結果 3

像 e が出ている。これは、コーナーがレトロ反射鏡（逆反射鏡，リバーサルミラー）として働くためである。レトロ反射鏡では、入射方向にかかわらず、入射と逆方向に反射が戻る。画像をよく見ると、反射像はコーナー e でははっきりと確認でき、その前後の角度では実像はなく、代わりに虚像 c が強く表示されたことが分かる。

今回の処理条件は、最初の信号のあとに来た信号の強度が、最初のものよりも小さい時のみこれを消去するようにした。壁からの反射よりも強度の大きい多重反射波が返ってきた場合、これが残る結果となった。

4. まとめ

電子工学を学ぶ学生が、エレクトロニクス技術の高度に結集されたレーダの基本原則を平易に理解することを目的とし、超音波レーダを試作した。周波数 40kHz の超音波パルスの反射信号を A/D コンバータで数値化し、USB ケーブルを介して PC に転送し、Windows 上で動作するプログラムで円柱座標表示した。パルス波の発生から反射波の信号処理、画面表示の過程はレーダの基本原則を理解する上で効果的である。映像化することで、多重反射波の様子をじかに目視することができ、多重反射など波動の特異な性質の理解に役立つ。また、A/D コンバータ、画像表示プログラムを製作することで、A/D 変換の仕組みや、プログラムの動作などの理解にも役立つ。

今回の実験では多重反射像消去処理を行った際に特定の条件下で、改善の余地が残ることがわかった。

参考文献

- 1) 名和靖彦・相木國男：愛知工科大学紀要，第 4 巻，P.41 (2007)
- 2) 名和靖彦・相木國男：愛知工科大学紀要，第 6 巻，P.49 (2009)
- 3) 新井宏之：新アンテナ工学，総合電子出版社，P.76

高周波マグネトロンスパッタリングによる 酸化チタン薄膜の伝導率特性

深澤正樹*, 坂口鋼一**, 嶋川晃一***, 畑中義式**

(平成22年9月30日受理)

Conductivity characteristics of titanium oxide films by high frequency magnetron sputtering

Masaki Fukazawa*, Koichi Sakaguchi**, Koichi Shimakawa*** and Yoshinori Hatanaka**

(Received September 30, 2010)

Abstract

Recently Transparent Conductive titanium oxide films have been reported. TiO_x films deposited by high frequency magnetron sputtering showed highly conductive characteristics in the condition of high pressure. When the sputtering pressure was changed from 0.1 Pascal (Pa) to 25 Pa, films deposited at 25 Pa showed high conductivity transition in 7 orders from $10^{-5} Scm^{-1}$ to $10^2 Scm^{-1}$. Optical absorption edges characteristics showed the Burnstein-Moss shift of 0.05eV, and carrier density $2.0 \times 10^{20} cm^{-3}$ was deduced from Infrared absorption data.

キーワード：酸化チタン，透明電極，マグネトロンスパッタリング，導電性薄膜

Key word : Titanium oxide, Transparent conducting electrode, Magnetron sputtering, Conductive film

1. はじめに

酸化チタン薄膜は光触媒材料，超親水性材料または抗菌材料など様々な目的のために応用されている．通常，これらの薄膜は透明であるが，非常に抵抗値が高いものである¹⁻²⁾．また，酸化チタン薄膜に紫外線を照射すると半導体材料のように光電流が発生するため³⁻⁶⁾，伝導現象についても研究がなされている．最近では，酸化チタンの高伝導現象を利用した透明電極として応用するための研究が数多く行われている．これまでの透明電極では，酸化インジウムスズ (ITO) がオプトエレクトロニクスの応用として最も多く使われているが，In が希少金属のため高コストであり，また侵食性などの点で弱点を持つため，他の透明伝導性酸化物 (TCO) 薄膜の探索がなされている．その TCO の候補として，酸化チタンと酸化ニオブが報告されている⁷⁻¹⁰⁾．

本報告の高周波マグネトロンスパッタリング法で作製

した TiO_2 薄膜は，薄膜の堆積条件を調節し，ニオブをドーピングせずに高伝導率を示すものである．この薄膜について，電気的特性とともに，光学的特性との対応を議論する．

2. 実験

本実験では，高周波マグネトロンスパッタリング法により薄膜を作製した．実験装置全体の概略図を Fig.1 に示す．スパッタリングのターゲットにはドーピングの無い多結晶 TiO_2 粉末 (99.99%) をホットプレスしたディスクを使用した．チャンバー内の気圧は，0.6Pa から 25Pa とし，導入ガスにはアルゴンを使用した．また，このアルゴンガスの導入経路において，バブリングにより水蒸気を含ませた．この水蒸気圧はバブラーの温

* 愛知工科大学大学院工学研究科 (博士前期課程)，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Graduate school, Aichi University of Technology, 50-2 Manori nishihazama-cho, Gamagori 443-0047 Japan

** 愛知工科大学工学部，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, nishihazama-cho, Gamagori 443-0047 Japan

*** 岐阜大学工学部，〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

度を調節することにより決定している。

薄膜を作製する基板には、高抵抗率（ $\sim 100\Omega\text{cm}$ ）のシリコン(100)基板と石英ガラスを使用した。シリコン基板上に作製した薄膜は、FT-IRによる赤外線の透過率と反射率の測定に用いた。このFT-IR測定は島津FT-IR8300を用いて行った。また、赤外領域での反射率と透過率とを細部の測定をするために、日本分光社製マイクロFT-IR (JASCO Janssen MFT-2000)を用いた。石英基板上に作成した薄膜は、光の透過測定と電気伝導率の測定に用いた。島津分光計UV-2400PCを用いて紫外線及び可視光領域の透過率の測定を行い、光学バンドギャップと透明性の評価を行った。

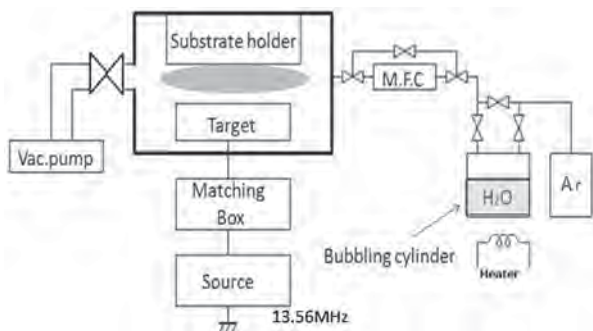
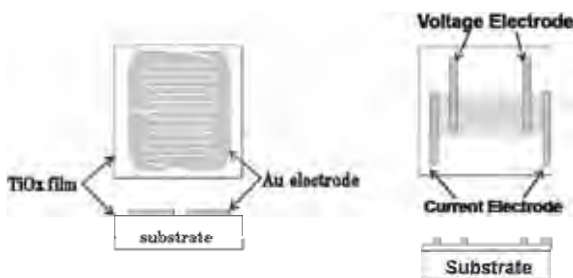


Fig.1 Diagram of magnetron sputtering setup

電気伝導率の測定では、Fig.2に示すような金の電極を真空蒸着により作成した。伝導率の低いサンプルには二端子法で測定するため、(a)に示すような楕型の電極を使用し、伝導率の高いサンプルでは4端子法での測定のため(b)に示すような電極を使用した。



(a) High Resistivity Measurement (b) Low Resistivity Measurement

Fig.2 Electrodes configuration for conductivity measurements

導入したアルゴンガス中の含まれている水蒸気を見積もるため、Tetensの式¹⁶⁾を用いて計算した。水蒸気圧 $E(T)$ は、バブリングの温度 T 、 $a=7.5$ 、 $b=237.5$ (水の場合)としたとき、次式のようになる。

$$E(T) = 6.11 \times 10^{\frac{aT}{b+T}}$$

この温度と含有する水分の蒸気圧の関係を Fig.3 に示す。

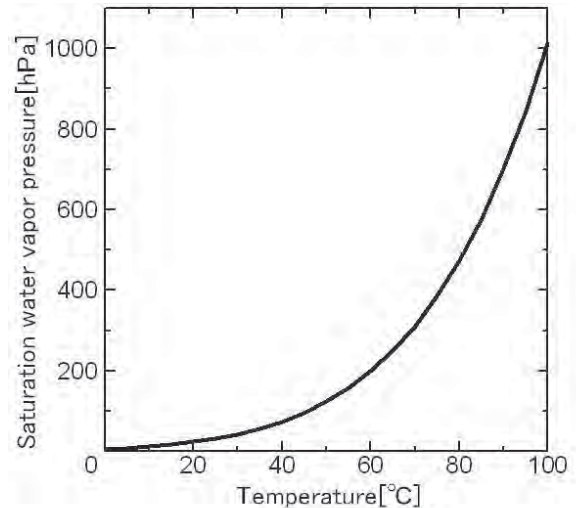


Fig.3 Saturation water vapor pressure

バブリングの温度を 70 とした場合、バブリングによる水蒸気圧は 312.23hPa となる。導入されるアルゴンガスの気圧が 1000hPa であるため、ガス中に含まれる水蒸気の割合は約 30% となる。

3. 結果と討論

スパッタリングの圧力依存と伝導率の特性をまとめたものを Fig.4 に示す。低圧領域での伝導率は非常に低く約 10^{-8}Scm^{-1} であるが、圧力を約 10Pa にしたところ、伝導率は半導体領域の 10^{-5}Scm^{-1} 程度に増加した。さらに圧力を増加させ 25Pa をこえたところから伝導率は飛躍的に 7 桁以上増加し、約 10^2Scm^{-1} となった。

気圧 25Pa で作製した高伝導性酸化チタン薄膜の伝導率の温度依存性を Fig.5(a) に示す。これらの高伝導薄膜は Fig.5(a) に示すように 0 ~ 55°での範囲でマイナスの温度係数を示した。次に、抵抗率の温度依存性を Fig.5(b) に示す。(a)と同様の範囲で、抵抗率の温度係数はプラスの係数を示した。

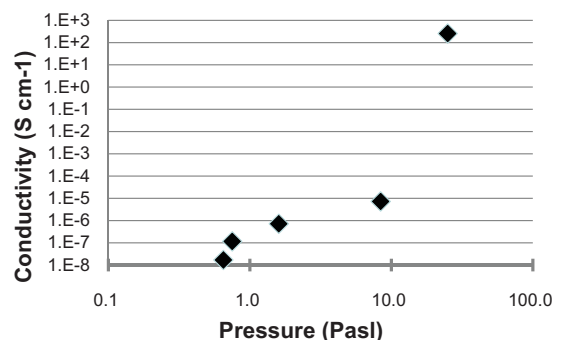


Fig.4 Electrical conductivity dependence on the Sputtering pressure

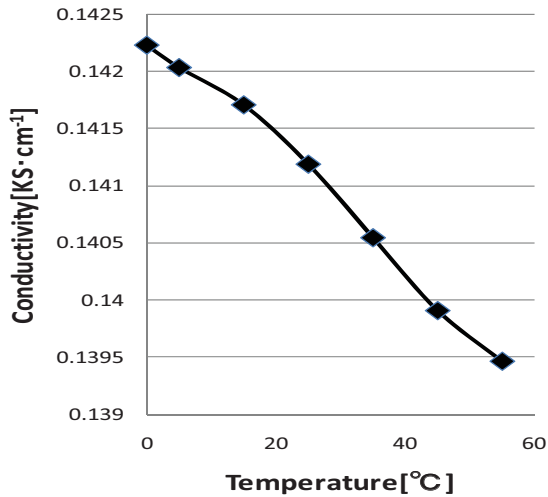


Fig.5 (a) Temperature dependence of conductivity

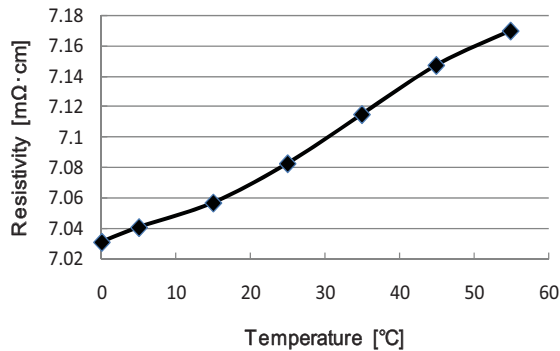


Fig.5 (b) Temperature dependence of resistivity

この酸化チタン薄膜は、可視光領域において透明であり、紫外領域に吸収端がある。Fig.6 に石英ガラス基板に堆積された低い伝導率の薄膜、及び高い伝導率の薄膜の光透過率を示す。この薄膜の膜厚は 0.46 μm であり、可視領域では透明であり、干渉による周期的な変化がみられる。約 387nm(3.2eV) 付近でどちらも吸収が見られ、酸化チタンのバンドギャップに対応している。吸収端を詳細に測定すると、高伝導薄膜のバンド端は低い伝導率のものと比較して、波長 6nm だけ短い波長側、すなわち高いエネルギー側に移っている。この効果は Burnstein-Moss shift (B-M shift) と呼ばれている現象に対応していると思われる¹¹⁻¹²⁾。

赤外領域の透過特性を示すと Fig.7(a) のように透過率 T は大変低い値を示した。この現象が反射によるものか、吸収によるものかを調査するためには、反射と吸収を同時に測定することが必要になる。そのため、マイクロ FT-IR を用いて赤外領域における透過特性と吸収の特

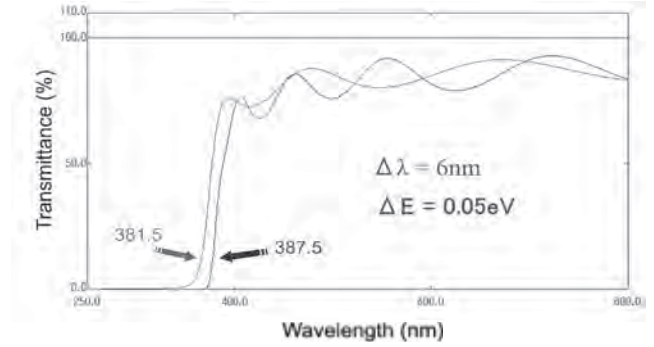


Fig.6 UV transmittance characteristics

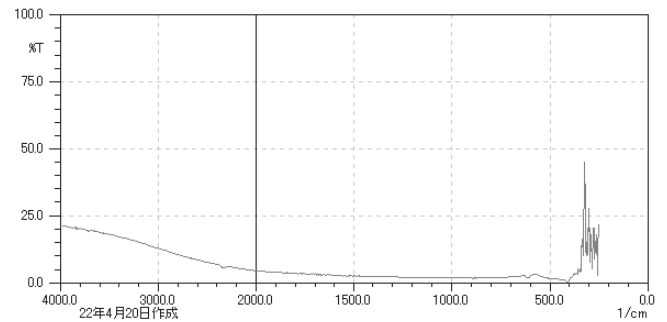


Fig.7 (a) Transmittance measured by micro FT-IR in Infrared region

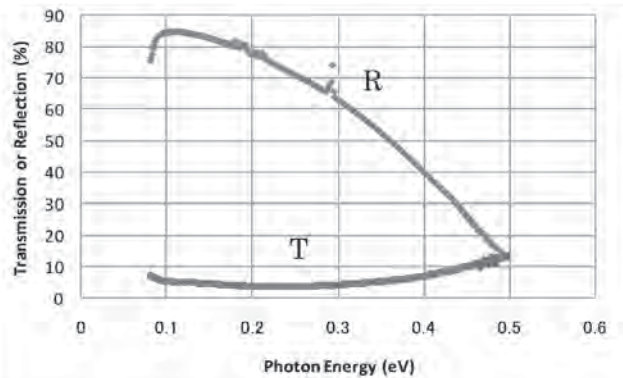


Fig.7 (b) Transmittance and reflectance measured by micro FT-IR in Infrared region

性を測定した。測定結果を Fig.7 (b) に示す。Fig.7 (b) は、シリコン基板に堆積された高伝導薄膜の赤外領域で測定した透過率 T と反射率 R の特性を示している。透過率 T は非常に低くなっているが、反射率 R は赤外領域では非常に高くなっている。

この結果は、酸化チタン中の自由電子による吸収の現象があらわれているものと考えられる。また、高伝導薄膜の赤外光学特性から、誘電率 ϵ を求めることができる。実数部を ϵ_1 、虚数部を ϵ_2 とする。透過率の強さはきわめて小さいので、複数回の繰り返し反射効果を無視した場合、透過率 T は、反射率 R 、薄膜の吸収 α 、薄膜の膜厚 d によって次式のようになる。

$$T = (1 - R) \exp(-\alpha d) \quad (1)$$

このとき、消衰係数 k と屈折率 n との関係は、次のようになる¹⁷⁾。

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (2)$$

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3)$$

(2)式と(3)式から、 n と k を求めることができ、さらに次の関係のように ϵ_1 と ϵ_2 を求めることができる。

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (5)$$

ϵ_1 と ϵ_2 はFig.8のように示すことができ、図からマイナス領域にある ϵ_1 は金属の特性と同じ伝導率と温度依存を示している。さらに、 ϵ_2 から、光学伝導率 σ_{op} を求めることができる。すなわち、

$$\sigma_{op} = \omega \epsilon_0 \epsilon_2 \quad (6)$$

ここで、 ω は赤外線振動角周波数であり、 $2\pi/\lambda$ である。 ϵ_0 は真空の誘電率であり、 8.9×10^{-12} F/mである。 σ_{op} は上述の赤外線のデータからの ϵ_2 を代入することにより光学的な伝導率を求めることができたことになる。結果は 53 Scm^{-1} である。次にDrude'sの公式より、誘電率は以下の通りに用いることができる¹³⁾。

$$\epsilon_1 = \epsilon_\infty \left[1 - \frac{(\omega_p \tau)^2}{1 + (\omega \tau)^2} \right] \quad (7)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_\infty \left[\frac{\omega_p^2 \tau}{\omega \{1 + (\omega \tau)^2\}} \right] \quad (8)$$

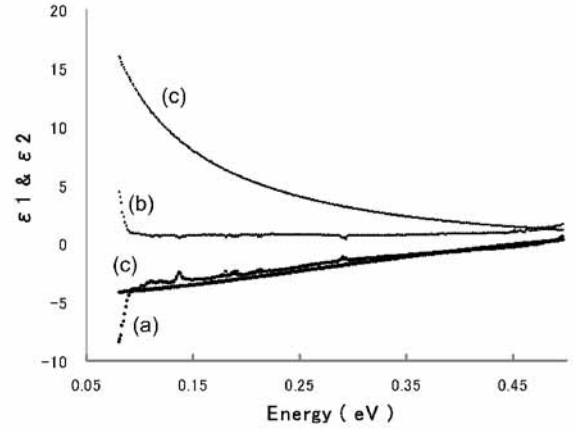


Fig.8 Complex dielectric constants, (a) experimental ϵ_1 , (b) experimental ϵ_2 , (c) theoretical ϵ_1 and (d) theoretical ϵ_2

ここで、 τ は電子の衝突による時間 $\tau \approx 2.5 \times 10^{-15}$ sである。また、プラズマ角周波 ω_p との関係は、実験値とのフィッティングによって決定される値である。また ϵ_∞ は光学誘電率であり、 n^2 の関係がある。ここでは4としている。そしてFig.8のフィッティングによる手順から与えられる ω_p を用いてキャリア濃度 N を求めると

$$N = \frac{m^*}{e^2} \epsilon_0 \epsilon_\infty \omega_p^2 \quad (9)$$

としてキャリア濃度が求められる。ここで ϵ_∞ は4とした。また、有効質量 $m^* \approx 4.5 \times 10^{-31}$ kg、真空の誘電率 $\epsilon_0 \approx 8.9 \times 10^{-12}$ F/m、電子の電荷 $e \approx 1.6 \times 10^{-19}$ 、プラズマ角周波数 $\omega_p \approx 5.8 \times 10^{14}$ s⁻¹とした場合、キャリア濃度 N は 2.1×10^{26} m⁻³と見積もられる。通常キャリア濃度の単位はcm⁻³で表示するので、これに換算すると N は 2.1×10^{20} cm⁻³となる。ここで、赤外分光結果から得られたキャリア濃度 N とB-M shiftにおいて、出てきた伝導帯底におけるキャリア濃度との関係を考える。もし、B-M shiftによって ΔE が与えられるなら、キャリア濃度は以下の関係式となる¹⁴⁾。

$$N^* = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{2m^* \Delta E}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

式(10)より、紫外線の吸収端のB-M shift ΔE を0.05eVとして与えた場合、キャリア濃度は 2.0×10^{19} cm⁻³となる。この N^* の値は式(9)によって与えられたキャリア濃度 N と比較すると1桁程度小さい。これは完全な結晶ではなく欠損などによる実行状態密度が大きいため、(10)式の簡単な関係からは、小さく見積もられたと考えられ

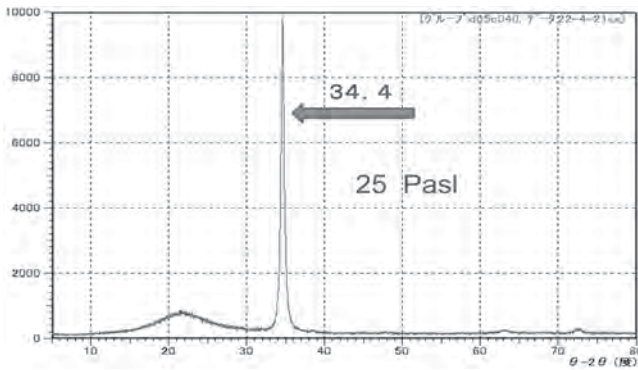


Fig.9 X-ray diffraction spectrum for highly conductive titanium oxide film in the sputtering pressure of 25[Pa]

る。さらに、キャリアの移動度 μ は et/m^* であり、これらから得られるように $5.3 \text{ cm}^2/Vs$ として与えられたとき、 $eN\mu$ による伝導率は実験データである 256 Scm^{-1} に近い値である 178 Scm^{-1} という結果が得られた。

次に結晶の特性を調査するために、薄膜を X 線回折で測定した。低圧で作成した抵抗値の高い薄膜はアナターゼとルチルが混在した多結晶構造を示している。しかし、25Pa で作成した伝導率の高い薄膜は Fig.9 に示されるように一軸配向の多結晶の形を見せている。

X 線回折のピークと FWHM の解析から、Scherrer s の式¹⁵⁾を用いることで結晶のサイズが 200 であることが分かった。

22°付近ではアモルファスのブロードなピークを見ることができ、このサンプルは石英基板上に堆積していることから、その基板の一部が影響している。しかし、 $\theta - 2\theta$ におけるピーク角度 34.4° のピークはアナターゼ、ルチル、ブルッカイトなどの酸化チタンの結晶ピークに対応していないが、その理由及び、他の影響については現在のところ不明である。

4. 結 論

高周波スパッタリングにより作製した酸化チタン薄膜の電気伝導特性について研究を行った。圧力の比較的低い 1Pa 以下の条件で作製した薄膜では高抵抗を示し、 10^{-5} S/cm 以下の低い伝導率を示すものであるが、圧力の高い 25Pa の条件で作製したものは、7 桁以上の変化が現れ 10^2 S/cm という導体としての伝導率になった。この特異な現象を理解するために、変化の前後で薄膜を作製し、比較した。

低い伝導率の薄膜の抵抗率の温度変化は負の温度係数を持つのにに対し、高い伝導率の薄膜は、正の温度係数を持ち、金属と同じ傾向を示した。その他の物性的諸量の検討もあわせて行った。光の吸収端の B-M shift は 0.05 eV 生じ、これから見積もられるキャリア濃度は $2.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ であった。

赤外線の反射と透過特性から得られる自由キャリアの特性から見積もられている複素誘電率から、Drude の理論との適合化から見積もられるキャリア濃度は $2.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ であった。このとき同時に見積もられるキャリア移動度は $5.3 \text{ cm}^2/Vs$ であった。 $2.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の濃度と、移動度から求められる伝導率は約 178 S/cm となり、測定値の 256 S/cm とかなり近い値となることが分かった。

X 線回折の結果からは、この薄膜の結晶性が検討された。高い伝導率を示すものは堆積速度が約 1/3 程度となり、一軸配向の多結晶となっていることが分かった。しかし、詳細についてはまだ不明な点が多い。

謝 辞

本論文の遂行のために、愛知工科大学グループ研究 2009-05 による補助を受けた。また、赤外透過、及び反射の FT-IR 測定については、静岡大学早川泰弘教授、友田和一技官に御協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

- [1] R.W.Mathew: J. Phys. Chem. 91, 3328 (1987)
- [2] T.Watanabe, A.Nakajima, R.Wang, M.Minabe, S.Koizumi, A.Fujishima and K.Hashimoto: Thin Solid Films, 351, 260 (1999)
- [3] M.Nakamura, S.Kato, T.Aoki, L.Sirghi and Y.Hatanaka: J. Appl. Phys. 90, 3391 (2001)
- [4] K.Sakaguchi, K.Shimakawa, and Y.Hatanaka: Jpn.J. Appl. Phys. 45, 4183 (2006)
- [5] N.Golego, S.A.Studeniki and M.Cocivera: Phys. Rev. B 61, 8262 (2000)
- [6] T.Car, N.Radic, and A.Turkovic: Jpn. J. Appl. Phys. 41, 5618 (2002)
- [7] T.Hitosugi, Y.Furubayashi, A.Ueda, K.Itabashi, K.Inaba, Y.Hirose, G.Kinoda, Y.Yamamoto and T.Shimada: Jpn. Appl. Phys. 44 L1063 (2005)
- [8] D.Kuraita, S.Ohta, K.Sugiura: J. Appl. Phys. 10009615-1 (2007)
- [9] S.X.Zhang, S.Dhar, W.Yu, H.Xu, S.B.Ogale and T.Venkatesan: Appl. Phys. Letters 91, 112113 (2007)
- [10] T. Hitosugi, H. Kamisaka, K. Yamashita, H. Nogawa, Y. Furubayashi, S. Nakano, N. Yamada, A. Chilamatsu, H. Kumigashira, M. Oshima, Y. Hirose, T. Hirose, T. Shimada and

- T.Hasegawa: Appl. Phys. Letts, Appl. Phys. Express 1 (2008)
- [11] E.Burnstein, Phys. Rev, 93 632 (1954)
- [12] T.S.Moss: Proc. Phys. Soc. (London) B76, 775 (1954)
- [13] K.Shimakawa, H.Naito and S.O.Kasap: Philosophical Magazine Letters, 17, 1 (2009)
- [14] K.Shimakawa, S.Narushima, HHosono and H.Kawazoe, Philos. Mag. Lett. 79, 775 (1999)
- [15] P.Scherrer: Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, 26, 98-100 (1918)
- [16] Tenens.O: Uder einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift fur Geophysik, 6, 297-309 (1930)
- [17] Adrianus J. Dekker: Solid State Physics, Printice-Hall, Inc. P156 (1957)

大学の学部教育 基礎教育，工学専門教育と大学院

宮崎保光*

(2010年9月30日受理)

Undergraduate (Bachelor) Education in Universities Fundamental Education, Engineering Education and Graduate School

Yasumitsu Miyazaki*

(Received September 30, 2010)

1. はじめに

1970年以降，大学の大衆化が生じると，同時に先端技術の進展による専門教育の重視が必要となり，世界各地において対策が行われるようになってきている．そうした時代を迎えてから，すでに，40年を経ているが，その間，教養部の組織改革と専門化重視が並行して行われ，とくに一部の大学では，大学院重視による大学教育重心の高年化も進められてきている．伝統的な大学における教育，基礎教育の重要性について，ここに，思っていること，考えていることを述べてみる．

2. 大学教育の改革と先端技術

名古屋大学・大学院を卒業し，教官となった頃，世界各地で大学の大学の大衆化と大学機関の混乱が生じていた．そんな時代に専門の情報通信分野をさらに深く進めるため，当時のソ連，ついでアメリカにおける国際会議に出席し，世界の代表的大学を訪問し，大学の教官としての基礎を身に付けようと努めた．そんな中，西ドイツのAlexander von Humboldt財団の研究者として1973年よりBraunschweig工科大学のProf. H.G. Ungerの研究所(Institut)で2年間研究を進めることになり，とくに，ドイツでの教育組織についても学習することとした．留学してしばらく経った6月に，日本の大学改革を進めるために，調査団として国立大学協会の理事の学長達がドイツを訪問され，その折私は案内担当者となり，いろい

ろ，学長方々と意見交換する貴重な機会を持つことが出来た．このとき地元紙 Braunschweiger Zeitung に大学前に集合したときの写真が掲載された (Fig.1)．

Humboldt財団は研究教育国際交流として重要な役割を担っている．A. v. Humboldtは数学者 Carl Friedrich Gaussとの交流でもよく知られている (Fig.2, 3)．

電磁界理論の研究の開発者の1人でもある数学者 C. F. Gaussは，1777年 Braunschweig工科大学の南300mの家で誕生し，工科大学の前身である Collegium Carolinumにおいて学生生活を過している (Fig.4)．また，Wilhelm Eduard Weberと1831年，世界初の電信機を発明しており，電磁気の理論と，応用技術の開発に貢献している．



Fig.1 国立大学協会のドイツ大学訪問 (左2人目 宮崎，左5人目 東大の加藤一郎学長，左3人目 名大の芦田淳学長，左6人目 広大の飯島宗一学長，左8人目 東京工大の加藤六美学長)

* 愛知工科大学工学部，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan



Fig.2 Alexander von Humboldt (1769-1859)



Fig.3 Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

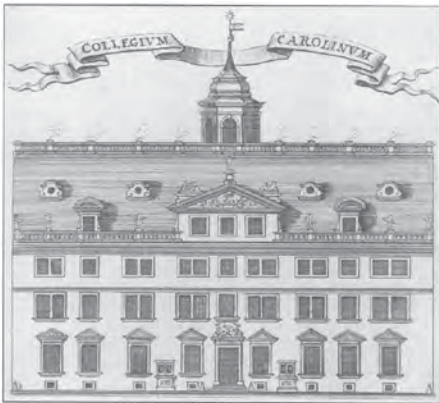


Fig.4 Collegium Carolinum in Braunschweig, 1746

微分法を開発した Gottfried Wilhelm Leibniz は、1676 年より Braunschweig 南 20km の Wolfenbiitel の図書館長を務めている。

Prof. H. G. Unger のもとでは、こうした歴史環境のもとで次の時代の先端技術である情報通信分野の研究・教育が行われていた。私は、1965 年頃より始めていた光ファイバ通信の研究を、米国の Bell 研究所より、母校に戻って研究を始められて間もない Prof. Unger のもとで続けて推進することが出来た。

電波工学は James Clark Maxwell によって 1864 年、理

論が示されて以来、1888 年 Hermann von Helmholtz (Berlin 大学、国立物理工学研究所 Physik. Tech. Bund.) の弟子の Heinrich Rudolf Hertz によって実験的に確認された。Prof. H. G. Unger は第 1 回目の Hertz 賞を受賞している (Fig.5)。2009 年には、この分野において当時から私どもと並行して研究を進めていた、Dr. Charles Kuen Kao がノーベル賞 (物理学) を受賞された (Fig.6)。

ドイツの大学滞在中に一番大切に思ったことは、歴史に基いた基礎教育の大切さと未来指向の先端技術研究のバランス感覚である。学部・大学院の専門教育に対しても、最も大切なことは、基礎となる学力を十分に理解し、応用力を発揮できる能力である。とくに、基礎となる学力を十分深く身に付けることが、将来自立するための必須条件であり、専門教育は、後でもゆっくり適用することで十分である。その際重要なことは、歴史観である。



Fig.5 Prof. H. G. Unger と私 (1971 年)



Fig.6 Dr. Charles Kuen Kao (ノーベル賞受賞者) と私

3. 教育と国際社会

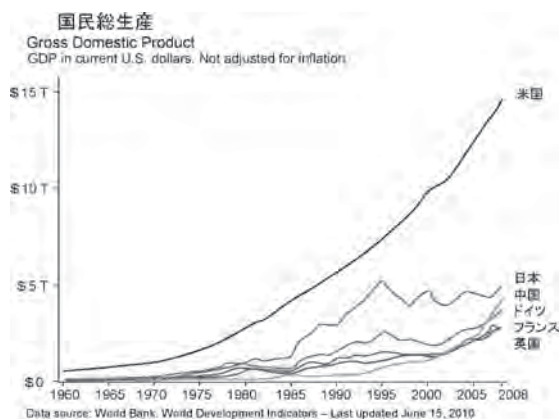
小学生の時、私塾の絵画の前衛作家の師である久野真に師事し、高校 2 年頃まで画家になることを志していたころは美術文化に関心が集中していたが、高校 2 年の時、数学、物理の美しさに魅力を感じ、数理科学の世界に入った。

大学3年の時、宇田川銈久教授室を訪問した日の翌日より研究室の一員としてミリ波の数理工学理論研究を始め、電子技術と経済の将来の相関を常に考えるようになった。

文化と技術・経済の関係については歴史的にもシステムの考察、実力が伴う人材育成が極めて必要であると



Fig.7 3分野のバランス

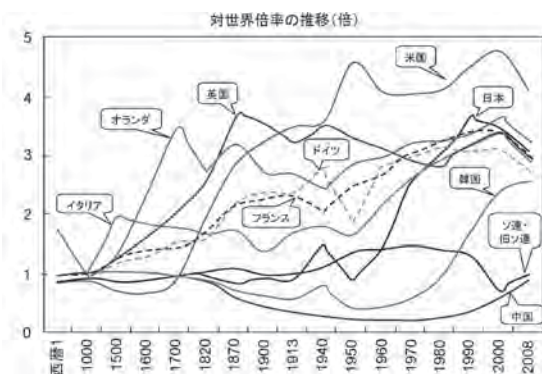


(a)

1人当たりGDPの歴史的推移(日本と主要国)



(b)



(注) 1人当たりGDPの単位は購買力平価で換算した実質ドル(1990 International Geary-Khamis dollars)。

(資料) Angus Maddison HP 2010.7.13 (<http://www.gdcd.net/maddison/>)

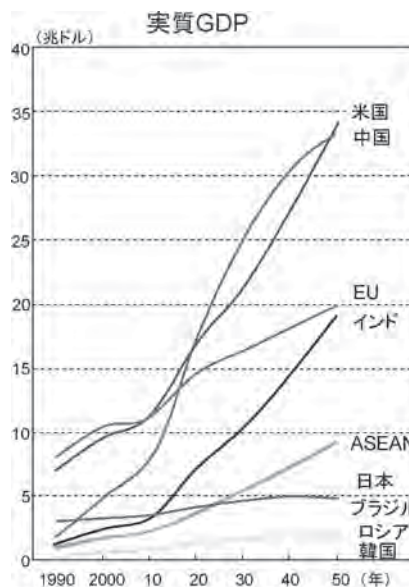
(c)

Fig.8 国民総生産 GDP 世界の推移

思う。この20年の日本の停滞は、こうした考えの欠如が大きな問題と思われる。欧米にくらべ、総合的考察が極めて低い結果である。偏った成長、偏ったネガティブ思考は避けなければならない。青少年の教育には、技術、経済、文化の各分野が時代とともにどのように相互作用があり、欧米、日本の時代変化、アジアの新興国の成長など世界の国際化がどのように進んできているのかについての歴史観が必要である (Fig.7, 8)。これまで、名古屋大学の後、豊橋技術科学大学および愛知工科大学の創設期の構築に協力してきた。

Fig.9 は今後40年間の欧米、日本、新興国のGDPの予想を示している。教育は国の発展の原資の1つと思われるため、日本においても社会を担う実力ある人材育成の対策を十分検討する必要がある。とくに、世界の時代変化、グローバル化を考えると、また、長期的社会発展に基いた教育を考えたとき、時代変化に長期的に対応できる基礎教育が必要である。その延長として、専門教育を考察することが大切であり、短期的理由による専門教育、カリキュラムは大学学部では避けるべきことと思われる。

学問の基礎は100年200年あまり変化せず、新しい専門も基礎原理に基いていることを忘れてはならない。新しい原理は否定から生じるものというより、一般化、学際化、総合的システム概念によるものが多い。また、時代の国際化は、交通・通信の著しい進歩により、一般化している。



注: 2005年は一部推計値。2006年以降は日経センター予測。EUは主要19カ国が対象。1990年の実績値にチェコは含まない

資料: 内閣府「国民経済計算年報」、World Bank, World Development Indicators.

Fig.9 GDPの予測

4. 初等中等高等教育

現在、すでに日本および欧米における大学進学率は50%を越えている。過去30年以前に比べ、少年の教育率、高校構成との関連から考えると、18才から20才の青年に対する大学での中等教育の重要性は極めて高まっている。大学においては、従来通り、単なる高等教育、専門教育に重点を置くことは望ましくない。大学においても中等教育の必要性は、部署によっては極めて高まっている。もちろん、大学の一部においては、従来通りの高等教育、専門教育を続ける必要がある。新興国は過去の先進国欧米、日本の形態になりつつある。欧米日本にお

いては新しい形の大学での中等教育、基礎教育を十分重点的に追加し、補充を考慮することが重要である。すなわち、大学においては、中学、高校レベルの中等教育に十分な時間を当てる必要のある時代に入りつつあることの認識が必要である (Fig.10, 11)。一方過去に比べ伝統面維持として、高等教育の焦点、力点の置き方の再検討が必要である。

5. 基礎教育と技術

工学部における教育は技術進歩に適応した体質でなければならないが、1つの技術の発想から応用実現においても最低30年程度は必要となっている。しかも、発想から進展において必要とされる技術能力は、過去の科学技術の原理に基いたものである。したがって、一人の若人が仕事を始めて、退くまでの20才から60才までの適応力を考えたとき、技術教育は、基礎原理に基いた基礎教育が極めて重要である。時事ニュースとしての技術はあくまで表面的なものである。実力ある技術者には、基礎原理の理解とその理解に基いた応用力が必須である (Fig.12, 13)。

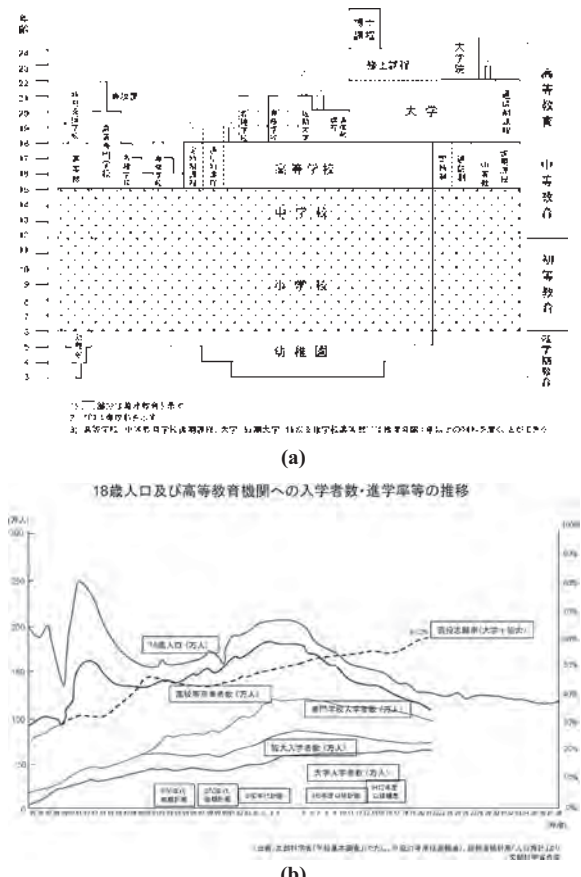


Fig.10 日本の学校 (文部科学統計要覧)

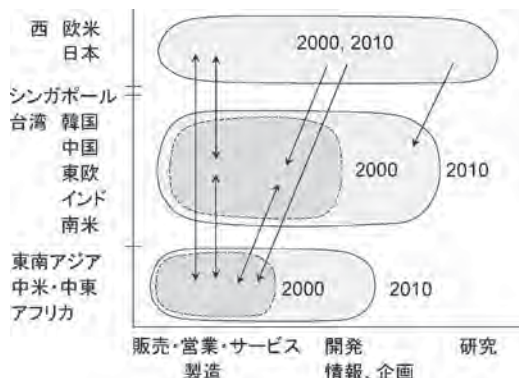
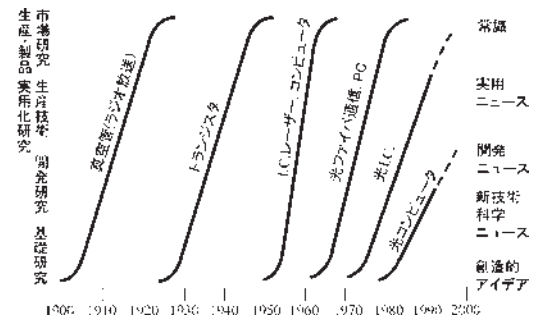
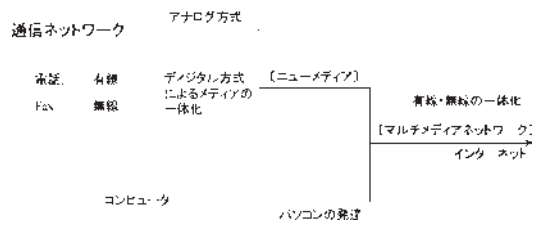


Fig.11 各国の人材育成、産業と人材育成



(a) 先端技術分野における研究開発プロセス



(b) ネットワークとコンピュータ

Fig.12 技術発展

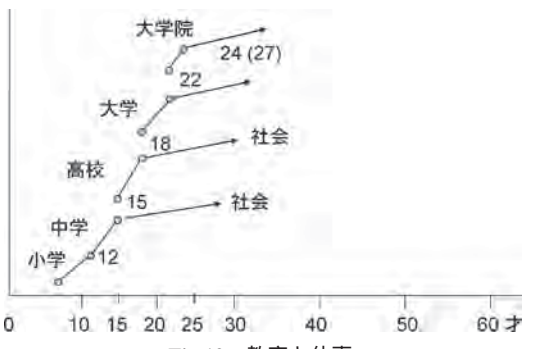


Fig.13 教育と仕事

6. 基礎実力の育成

人間の学習方法は、時代が進んでも基本的部分は変化していない。新しい知識の追加は、多くが学習方法、解明方法において伝統的手法あるいはその改善によって行われていることに注意しなければならない。手法と知識が全く新規にあることは特別なケース、あるいは、極めてまれである。しかし、その場合においても、多くが以前の延長あるいは概念の拡大拡張によっている。したがって、温故知新の面の重要性の認識は教育の場では十分配慮が必要である。新しい局面を新しい手法によって解決する場合の歴史観を忘れてはならない。歴史の実例学習と発見の組合せは極めて重要である。

一度学習したことを何度もくりかえし身に付けること、自分の方法で計画を立ててみること、考えたことの確認を実際に試してみること、学習したことを整理して、まとめることの教育は必須である (Fig.14)。こうした

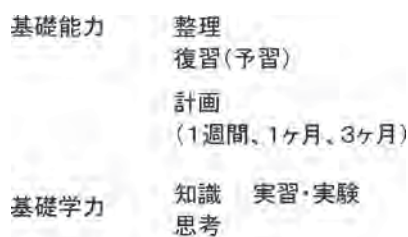
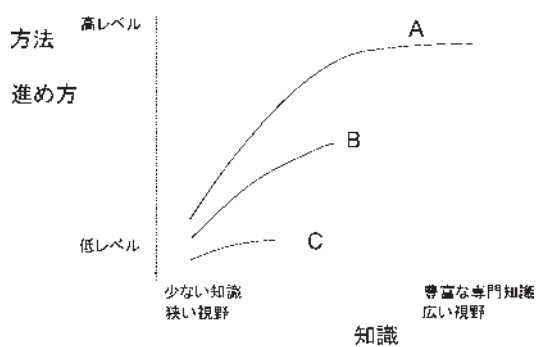


Fig.14 基礎能力と学習



(a)

ノート	整理	記憶
	論理	
	記述	表現
	考える	練習

(b)

書物	読書
資料	調査
	講義・実習・演習
	見聞, 話す

Fig.15 学習法

基礎能力を身に付け、基礎知識を体系的に学習し、その後ゆっくり専門学習に入っていくことが重要である。

学習過程は、方法、進め方によって知識が拡大されている程度に差が生じる。システム化、ブロック化の論理整理が良い場合と良くない場合によって進歩程度の成果に差が生じる。そのためには、整理の仕方、記録の取り方が大切である。基本部分は十分記憶し、憶える必要がある。練習によってはじめて応用力、活用力が育成される。また、読書により、見聞を広めることにより知識が広まり、考えることにより系統的に整理できる。記述したり、話をしたりして表現力が育つ。自分の意見をまとめ、討論する術を身につけるよう努める (Fig.15)。

小学校、中学校で学習したこと、高校で学んだことを復習する。教科書など要点を自分流に要点をまとめる (Fig.16)。

英語、語学は基本の文を暗記し憶え、ノートに作文し、話すこと、ヒアリングの訓練をする。

大学においては、授業ばかりでなく、クラブ活動によって、他の専門の学生とも交流し、文化活動、スポーツで楽しむ時間を十分持つとよい。とくに、週末、夏、冬の休暇時には、友人とも旅行できるとよい (Fig.17)。クラブ活動、課外活動によって、他大学の学生との交流も、将来社会人として仕事する際にも貴重な経験になる。

こくご	→ 読書 作文	
さんすう	→ 計算 論理	科学技術
りか	→ 自然、実験	
しゃかい	→ 歴史、経済、世界	
こうさく	→ 芸術、技術、実習	
えいご	→ 読書、作文、ヒアリング、会話	

Fig.16 初等中等学習

授業	
クラブ	文系 スポーツ
課外活動・趣味	

Fig.17 クラブ活動

7. 人間の基礎教育

人間の個人生活、社会生活の基本は、心、体が健康であることが第一である。疲れたときは、十分休む。元気の体調のよいときは集中的に忍耐し、努力し、継続する。あわてず、あせらず、朝夕には軽い体操等スポーツをする。忍耐力、努力する習慣をつける。自分からする。

考え方にはいろいろある，東洋の考えの例として，弘法大師空海は，30才頃に西安の青龍寺の恵果和尚に密教を学び，日本に帰り，828年綜芸種智院を設置し，教育に努めた。「十住心論」は人間の成長を論じた私の愛読書である．Martin Luther は信仰の本質を論じ Johannes Gutenberg 印刷術により 1534年 Bibel を著し，宗教改革を進めている．René Decartes は 1637年方法叙説を著し，解析幾何の手法を示し，現在のCGの基礎を与えている．これらの書物は，現在でも，いろいろの基本手法を示してくれている (Fig.18)．

成長に従って，両親，友人，先生と多くの人々との交流の中で人は育てられていくこと，ほんとうの幸せとは何か，無理をせずときには思いめぐらし，自然の姿を保

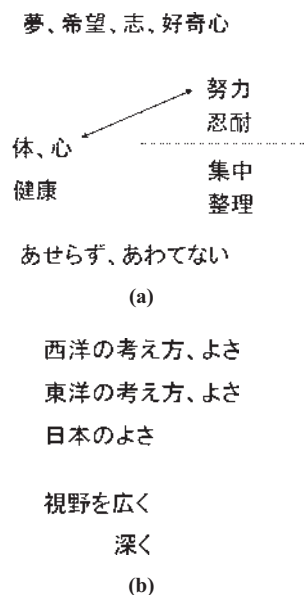


Fig.18 ものの考え方

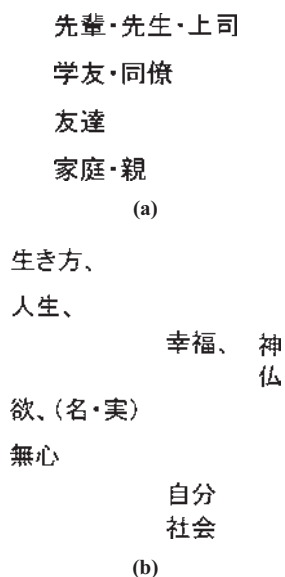


Fig.19 人の生き方

つことが大切と思う．René Decartes は「Cogito, ergo sum (私は考える．だから，私は存在する)」といい，弘法大師空海は，大日経の「実の如く自心知るなり」のことはを学んだ．基礎教育の根本にはこうした考えが大切と思う (Fig.19, 20, 21) ．



Fig.20 恵果と空海



Fig.21 Martin Luther

8. まとめ

大学における学部教育は基礎教育が最も重要である．少なめの，精選した内容をくりかえし学習し，基本的内容を十分理解し，頭に記憶し，ノートに整理をし，十分使いこなす応用力が大切である．

専門教育は学部では専門基礎に絞り，専門的教育は，大学院において実行する．時代に適応した内容に柔軟に対応する必要がある．

これまで，日本の大学，ドイツの大学で教育，研究を進めてきた体験をもとに述べた．この10年余り，新しい時代の流れの中で，教養課程，大学院教育体制改革が行われてきたが，基礎教育の重視が大学の大衆化によってより重要になりつつあること，また大学院における専門教育，先端研究の準備期間として，20才前後の若い学部教育期間において，歴史観のある基礎教育が，将来の先端研究にとって，極めて重要であることが再認識されていくことを望んでいる．

玉虫にちなんで

橋本孝明*

(平成22年9月30日受理)

Association with an Iridescent Insect

Takaaki Hashimoto*

(Received September 30, 2010)

1. はじめに

筆者は昭和20年に蒲郡市(当時宝飯郡蒲郡町)で生まれたので、今年平成22年の誕生日がくると65歳となる。高校卒業の昭和39年3月まで、蒲郡市で生活し、その後名古屋市、豊田市と転居したが、平成12年4月に故郷蒲郡市に居を戻して現在に至っている。

筆者が子どもの頃生活した蒲郡は、昭和20年代後半から昭和30年代後半であり、山、海、池、川などの自然が現在よりもはるかに身近なものであり、田や畑も子どもにとって格好の遊び場であった時代である。COP10だとか、生物多様性だとか難しいことを言わなくても、ドジョウ、メダカ、イモリ、トンボ、ホタル、クワガタムシ・・・などいくらかでも捕まえることのできた時代である。ところが、その当時においても、数年に一度か二度しかお目にかかることのできなかつた昆虫がある。タマムシ(玉虫)である。ところが意外にも本学において数度タマムシと出逢う機会があり、今年も縁あって本学のタマムシを見ることができたので、タマムシについてちょっと触れてみたいと思ったのである。

2. 本学におけるタマムシ

筆者が愛知工科大学自動車短期大学の前身である愛知技術短期大学自動車工業学科に赴任した平成1年に、現在の7号館東側で3号館北側の通路上でタマムシ(生きていた)を見つけたのである。しばらく観察した後、放したのであるが、「え、こんなところにタマムシがいるの?」と非常に驚いた覚えがある。その後、2、3年後だったと思うが、今度は死骸であったが、ほとんど同じ

場所でタマムシを見たのである。この時は、ふと、「この大学の環境がタマムシの棲息条件に適うのかな?」と思ったりもしたのである。それで、百科事典か広辞苑が何か(どうも記憶がはっきりしないのは歳のせいと思われるのであるが)のタマムシの項を読んだことを覚えている。すると、タマムシの棲息にはケヤキ(欒)が関係しているとの記述があった(ように記憶している)。

合点がいく記述であった。確かに立派なケヤキがあるではないか。数えてみたら11本あった。ここで、タマムシとケヤキの関係をもっと深く追求すれば、博士論文が書け、農学博士も取得できたのではないかと今になれば思ったりもするのであるが、当時はそれだけで納得していた。生来の早呑み込み、早納得の性格が災いしたのかなと残念な気がしないでもない。

愛知技術短期大学自動車工業学科に赴任以来21年が過ぎたが、この間に大学構内でタマムシに遭ったのは4、5度(明確な記録は取っていないが)はあったと思っている。

3. 玉虫の厨子

ちょっと歴史好きな人にとって、タマムシということばを聞くと、真っ先に、法隆寺の玉虫の厨子を思い起こすのではないだろうか。法隆寺は平城京時代よりも前の時代ではあるが、今年(平成22年)は平城遷都1300年とかで奈良に縁のある年である。

昔、法隆寺を訪れて玉虫の厨子を見たとき、黒く薄汚れたもので、期待はずれであったことを思い出すが、1000年以上も前のものがそれこそピカピカと玉虫色に

* 愛知工科大学自動車短期大学 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

光っていると考える方がどうかしているわけであった。しかし、自分にとって玉虫の厨子の印象はあまり芳しいものではなかった。

Fig.1は平成22年7月8日の午後3時、体育館3階にて、保健体育担当の安井講師が拾った玉虫である。たまたま、今年6月に、つれづれ話に小生が本学におけるタマムシの話をしたとき、安井講師も本学におけるタマムシの存在に気がついていただけであったことが幸いした収獲物である。すぐに連絡をもらい、譲り受けた実物である。安井講師は、東北出身、学生時代重量挙げの選手であったということで、まさに、「気は優しく、力持ち」を絵に描いたような好人物である。さらにいえば、自然を大切にしたいとの思いの非常に強い人という印象を受けた。愛知技術短期大学時代からの同僚であるが、愛知工科大学が創立された平成12年からは大学に所属して活躍されている。

このタマムシの体長は約4センチメートルである。緑色を基調にして、頭部に2本、胴体部に2本、こげ茶色

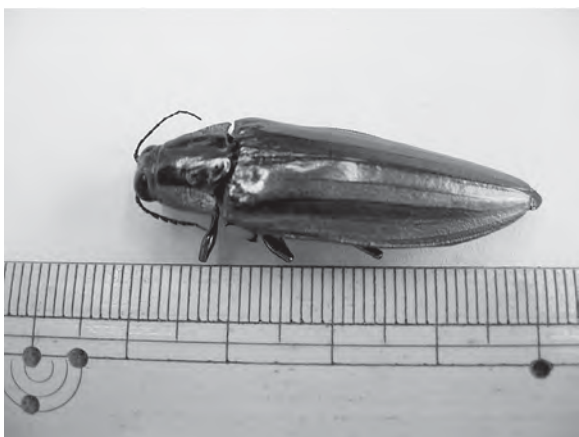


Fig.1 Iridescent Insect

の線がアクセントに入っている。あちこちから眺めると、光が当たると、緑色が若草色にあるいは黄色に輝くのである。実に美しい姿の虫である。タマムシとは言いえて妙なネーミングである。タマムシは手元に置いてあり、ときどき眺めてその絶妙な色に魅入っている。これを見ていれば、法隆寺の玉虫の厨子の悪印象は払拭できるのである。タマムシ色に輝く理由を探るのも研究対象として面白そうである。

4. 玉虫色

タマムシが政治の世界で使われることになるちょっと様子が違ってくる。「タマムシ色の決着」である。まさに解釈七変化である。眺める方向によって輝く色が異なるタマムシになぞらえて、人によって解釈が異なるという言い回しである。文言はひとつなのに、関係者がひとりひとり、自分の都合のよいように解釈できるという代物である。

政治の世界では、揉めごとが起こるのをできるだけ抑えようという知恵者の妥協の産物なのであろう。しかし、後になって大きな問題が生じるのではないかと、凡人の小生には危惧されるのである。タマムシこそいい迷惑かも知れない。

5. おわりに

安井謙講師と立ち話をしたおかげで、本学におけるタマムシの継続的な棲息が明らかになったようであり、さらに実物まで入手することができた。工科系の大学であるだけに、身のまわりの自然に眼を向けてくれていた教員氏の存在が妙にうれしく感じたことである。

研究ノート

クラウドコンピューティングサービスの有効活用に関する検証

加藤高明* , 小池章行**

(2010年11月25日受理)

Verification of the Effective Use of Cloud Computing Service

Komei Kato* Akiyuki Koike**

(Received November 25,2010)

Abstract

In recent years, various information technologies are developed by spread of a computer network and many services are providing. In particular, cloud computing service brings to public attention. Cloud computing service is Internet-based computing, whereby shared resources, software, and information are provided to computers and other devices on demand, like the electricity grid. In this paper, we examine the effective use of cloud computing service through using the free cloud computing service, Google Apps.

キーワード：クラウドコンピューティング , Google Apps

Keywords : Cloud Computing , Google Apps

1 はじめに

近年、急速なコンピューターネットワークの普及に伴い、様々な技術やサービスが開発・提供されてきた。そうした技術の中でもクラウドコンピューティングという技術が注目を集めている。

クラウドコンピューティングとは、ネットワーク、特にインターネットを利用してパッケージソフトウェアやハードウェアの提供などのサービスが受けられる技術のことである。ユーザーはインターネットへの接続環境等、最低限の用意をすれば、サービスを提供するコンピューターに集約された機能を使うことができ、利用した分の料金を支払うという形のため、今まで個人または企業で保有するハードディスクやサーバーなどの資源に投資していたコストを削減することが可能となるものである。また、資源の管理・運用の手間を省けること、インターネットに接続できる場所からならどこからでも同じような環境で作業できること等から、企業などでの導入が進

んでいる。

本稿では、教育機関において無料で使用できるGoogleのクラウドコンピューティングサービスの有効的な利用方法を検討すると共に、実際に研究室内で利用し、各種作業やコミュニケーションに活用することでその利便性を検証する。

2. クラウドコンピューティングとは

クラウドコンピューティングとは、明確な定義を持たないいわゆるバズワードであるが、近年ではネットワークを利用した高度なサービスを示す用語として用いられている。従来のコンピューター利用では、ハードウェアやソフトウェア、データなどの資源を自分自身で管理するという形であったが、ネットワーク技術の発達により、そういった資源の管理を外部に移し、必要なサービスのみを受けるといった形が普及してきた。高度に発達したサ

* 愛知工科大学工学部 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

** 愛知工科大学大学院工学研究科 博士前期課程 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Graduate School of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori, 443-0047, Japan

サービスでは、提供の仕組みがわからなくても利用でき、雲のように中身が見えにくくなることからクラウドコンピューティングと呼ばれている。

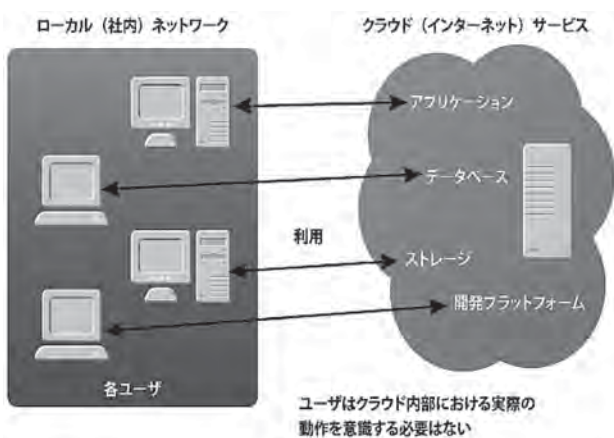


Fig.1 クラウドコンピューティングイメージ図
(出所 <http://codezine.jp/article/detail/3970>)

クラウドコンピューティングの利点として、以下の点が挙げられる。

- ・サービス提供側が計算処理を行うため、インターネット環境があればサービスを受けられる。
- ・サーバーなどの購入費用が必要なく、データ管理などの負担も軽減される。
- ・どのコンピューターから接続しても同じ環境で作業できる。

上記のような理由からクラウドコンピューティングを導入する企業が増えてきている。

主なサービスの提供形態は次の3つに分類される。

SaaS (Software as a Service)

アプリケーションソフトウェアの必要な機能を必要な分だけ提供し、それに応じた利用料金を支払う。

PaaS (Platform as a Service)

アプリケーション実行用のプラットフォームを提供する。

HaaS (Hardware as a Service),

IaaS (Infrastructure as a Service)

ハードディスクやインフラ提供、仮想化サーバーや共有ディスクなど。ユーザーが自分でOSなどを含めてシステム導入・構築できる。

これらのサービスを XaaS^(注1) としてまとめる場合もある。

3. 研究目的

本研究では、Google が提供するクラウド型のアプリケーション群 Google Apps が、研究室でのコミュニケーション手段の提供および各種作業の効率向上に応用できるかを検証することが目的である。なお今回は、「無料」に着目し、教育機関向けに提供されている Google Apps Education Edition を使用して、無料のクラウドサービスをどこまで活用できるかについて、実際に利用することで検証を行った。

4. Google Apps の概要

Google Apps とは、Google が提供しているクラウド型のアプリケーションサービスである。独自ドメインで Google のアプリケーションサービスが使用できる。使用できる機能などにより、3つのエディションに分けられるが、主な違いは Table.1 のとおりである。

Table.1 Google Apps エディション比較

利用料主	Standard Edition	Education Edition	Premier Edition
	無料	認定された教育機関は無料	1ユーザーあたり年間1000円
稼働率保障	なし	99.9%保障	99.9%保障
メール容量	7GB	7GB	25GB
PC対応サービス	なし	あり(有料)	あり
APIの提供	なし	あり	あり
利用できる機能	Gmail Googleカレンダー Googleドキュメント Googleサイト	Gmail Googleドキュメント Googleドキュメント Googleサイト Googleグループ	Gmail Googleカレンダー Googleドキュメント Googleサイト Googleグループ

Google Apps はオフィススイート^(注3) のような機能が、次のものが提供されている。

- ・G-mail・・・メール機能を提供する。また、Google ビデオ & ボイスチャットのプラグインをインストールすることでビデオチャットが可能となる。
- ・Google ドキュメント・・・文書、プレゼンテーションなどを作成することができる。また、Wordなどで作成した文章を Google Apps 上にアップロードすることもできる。
- ・Google カレンダー・・・スケジュールの作成又は特定のユーザーとのスケジュール共有を行う機能。
- ・Google チャット・・・文字・音声・映像を使用してコミュニケーションを行う機能。

- ・ Google グループ・・・メーリングリスト機能．任意のグループでのメーリングリストが作成できる．
- ・ Google ビデオ・・・独自ドメインの Google Apps ユーザー間で動画を配信・視聴を行える機能．
- ・ Google サイト・・・サイト作成機能．あらかじめ用意されているテンプレートを組み合わせて容易にサイトを作成することができる．

5. 研究室での利用

今回は，Google カレンダー，Google ビデオ & ボイスチャット，Google サイトを選択し，実際に研究室内のメンバーで利用した．各機能の活用方法と利用状況を順に説明する．

5.1 Google カレンダー

スケジュール管理を容易に行うことができ，次のような特徴がある．

- ・ 共有機能・・・ユーザー同士でカレンダーを共有することでお互いの予定を確認することができる．
- ・ 通知機能・・・カレンダー上に書き込んだ予定を特定のユーザーと共有したい場合，通知機能を利用することによって，Gmail の機能で任意のユーザーのみに予定を公開できる．
- ・ 検索機能・・・予定をキーワードから検索することができる．
- ・ モバイルからのアクセス・・・カレンダーを携帯電話などのモバイル端末から利用することができる．外出先からも予定が確認できる．
- ・ 複数のカレンダー作成・・・複数のカレンダーを作成することができる．「仕事用」・「プライベート用」など，用途に応じたカレンダーが作成できる．

研究室のメンバーがそれぞれの予定を把握できるようにするため，Fig.2 のような形で Google カレンダーの共有を行った．

研究室共有用のカレンダーとして研究室のメンバー全員が編集できるカレンダーを作成し，そこに予定を書き込むことで，他のユーザーの共有用カレンダーにも予定が反映される．共有用のカレンダーで公開したくない予定などは個人用のカレンダーに書き込むといった形で使用している．また，個人間での予定の調整をする場合は，

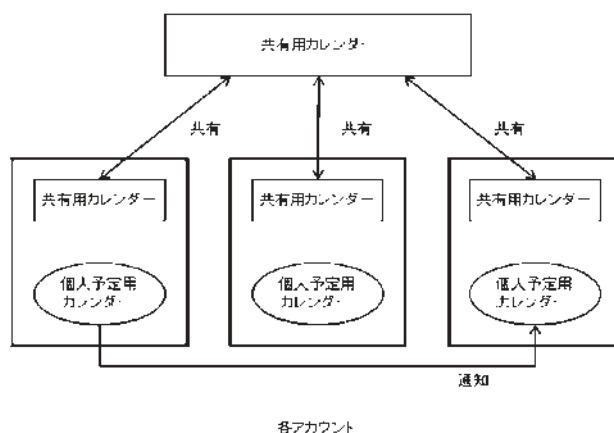


Fig.2 Google カレンダー利用モデル図

通知機能を利用して，任意の相手と予定の共有を行う．

Fig.3 はオープンキャンパスの役割分担を Google カレンダーで管理したものである．

Google カレンダーに搭載された次のような機能を使うことにより，より便利なカレンダーとして利用できる．

・ ToDo リスト

ToDo リストとは，現在するべきことを書き出したメモのようなもので，期限付きの予定や順序だてて作業などを行う場合に利用し，作業効率向上が期待できる．

・ モバイルへの予定の通知

予定をモバイルに通知することができる．予定ごと個別に通知を設定することも可能である．



Fig.3 カレンダー利用例

・ 予定への地図情報入力

Google マップと連携し、予定に地図情報を入れることができる。モバイルからも閲覧可能で、外出先などで目的地を容易に確認できるため、就職活動などでの訪問先の所在地確認にも利用可能である。

5.2 Google ビデオ&ボイスチャット

Gmail にビデオ&ボイスチャットプラグインをインストールすることで、ビデオチャットが可能になる。通信料などは必要なく、Web カメラやマイクが準備できれば利用できる。

これを利用することで、お互いに直接会えない状況でもディスカッションなどを行うことができる。

夏休み中の就職活動状況の確認にビデオチャットを利用し、学生と卒業研究担当教員との面談に利用した。画質が少々粗いという点が気になったが、面談をするには問題なく機能し、コミュニケーションツールとして十分利用できることを確認した。

5.3 Google サイト

Google Apps で提供されているサイト作成のための機能で、あらかじめ用意されているテンプレートを組み合わせることで容易にサイトを作成することができる。また、Google カレンダーやドキュメントなどのさまざまなコンテンツをサイト内に組み込むことも可能である。さらにメーリングリストである Google グループを使うことで、任意のグループのみに公開されるサイトとなる。

今回は、研究室のメンバーが利用できるサイトを作成し、夏休み中の研究の進捗状況や就職活動などの報告



Fig.5 Google サイト画面

を行うために利用し、Web 上の報告書として利用した。Fig.5 は作成したサイトの画面である。また、ドキュメントなどをアップロードできるページを作成し、Web 上のストレージとしても使用できるようにした。

6. 有料および今後活用予定の機能

今回の検証では対象としなかったが、学内において有効活用できると考えられる機能について検討した。

6.1 Call Phone

2010 年 8 月から開始されたサービスで、Gmail から固定電話や携帯電話に電話できるサービスである。通話料金は 2010 年 8 月現在、カナダ・アメリカ国内は無料となっており、日本で利用する場合は、固定電話が 0.02 ドル/分、携帯電話が 0.11 ドル/分となっている。

これを利用すれば、大学内の電波が届きにくい場所からでも電話の着受信ができるため、学内でのコミュニケーションの幅が広がる。

6.2 Google Video for Business

独自ドメインの Google アカウントを持っているユーザー間で動画ファイルをアップロード・ストリーミング配信できる機能である。この機能で、プライベートな環境での動画投稿サイトをつくることができる。動画ごとに共有設定をすることができるので、特定のユーザーのみにビデオを配信することもできる。

この機能で学内向けの動画チャンネルなどとして利用したり、講義を撮影した動画をアップロードして後で復習するといったことができるため、学生の学習にも活用できる。

現在は、保存容量が 10GB しかなく、保存容量を追加できない状態であるため、今後のバージョンアップによる改善が期待される。



Fig.4 ビデオ&ボイスチャット画面

6.3 Google ドキュメント

ブラウザ上でドキュメント作成が行え、文章、プレゼンテーション、スプレッドシート、アンケートフォームなどの作成も可能である。また、作成したドキュメントをアップロードすることで、他の場所で作業をすることもできる。ドキュメントを共有することもでき、作成したドキュメントを別のユーザーに公開したり、共同編集することが可能である。

アンケートフォームを利用して研修旅行の目的地を決めたり、スプレッドシートを利用してガントチャートを作成・共有することで研究の進捗状況を把握するといった利用方法が考えられる。

6.4 他のクラウドサービスとの連携

Google Apps は、他のクラウドサービスと連携することが可能であり、今後も連携できるサービスは増えていくと思われる。

例として salesforce.CRM^(注4) や Oracle CRM On Demand^(注5) などの業務用アプリケーションと連携ができ、業務用アプリケーションから Google Apps の機能を利用したり、メールやカレンダーの情報を共有することで、業務効率の向上を図ることができる。

7. まとめ

クラウドサービスである Google Apps のうち 特に「カレンダー機能」、「ビデオチャット機能」、「サイト作成機能」を利用し、研究室内でのコミュニケーション手段の提供や各種の作業効率向上に活用できるかを検証した。

以下に示すように、研究室内の作業効率を向上させるとともに、コミュニケーション手段の提供を行うことができた。

カレンダー機能

研究室共有カレンダーにより、予定の管理が容易になり、各自の予定を把握できるとともに、自宅からでも学校や研究室の行事を把握できる。

ビデオチャット機能

お互いに直接会えない状態でも面談やディスカッ

ションが可能となる。夏休み中であっても学生と指導教員とのコミュニケーションが、お互いの顔を見ながらできることは有用性が高い。

サイト作成機能

研究室のメンバーのみが閲覧でき、自由に書き込めるサイトを作成し、連絡・報告に利用した。これにより、全メンバーへの周知連絡が容易となり、連絡手段として有効に機能する。

今後の課題としては、今回利用しなかった Google Apps の他機能や、Windows Live などの他の無料クラウドサービスの活用方法を検証すること、また有料提供の各サービスや CRM(Customer Relationship Management)^(注6) ソフトとクラウドサービスとの連携を含め、利用範囲を学内に広げて各種情報管理や手続き、コミュニケーション手段提供への応用を検討していきたい。

注

- (注1) 略称の先頭の文字がサービスによって変わるため、X に置き換えられる。
- (注2) メールフィルタやウイルスメール駆除など、メールシステムを強化する機能。
- (注3) オフィス業務に必要なソフトウェアをセットとしてパッケージ化したもの。
- (注4) Salesforce 社が提供するクラウドコンピューティングモデルの顧客関係管理アプリケーション。
- (注5) オラクル社が提供するクラウドコンピューティングモデルの顧客関係管理アプリケーション。
- (注6) 情報システムを応用し、顧客との長期的な関係を築く手法。

参考文献

- 1) 林雅之：クラウド・ビジネス入門 - 世界を変える情報革命 - 創元社 (2009)
- 2) 中島洋：クラウドコンピューティングバイブル ジョルダン (2009)
- 3) 今すぐ使える！クラウド・コンピューティング知的生産活用術 洋泉社 (2010)
- 4) 月刊 ビジネスアスキー 2010年3月号 アスキー・メディアワークス pp.24-31 (2010)

たんぽぽの種の抵抗係数の簡易推定

橋本孝明*, 池田八郎**

(2010年9月30日受理)

A Preliminary Estimation on Drag Coefficient of Seed of Dandelion

Takaaki Hashimoto*, Hachiro Ikeda**

(Received September 30, 2010)

Abstract

A preliminary estimation on the drag coefficient of seed of dandelion is stated in this report. The estimation is based on both the measured falling velocity and the measured mass of the very small matter. The authors do not have the apparatus to measure the mass of very small matter at present. They hope that the mass of very small matter will be able to be measured and the drag coefficient of very small matter will be able to be determined in the future.

Keywords: Very Small Matter, Drag Coefficient, Preliminary Estimation

1. まえがき

白い綿毛に包まれた球状のたんぽぽの種が、そよ風が吹くたびに、ひとつまたひとつと、傘状に分かれて、風に乗って空中に舞っていく様子はよく見かける光景である。たんぽぽの種は、大自然の摂理による子孫繁栄を目指して、飛行を続けるといわれているが、流体力学的に見ると、「抵抗によって飛ぶ」物体である。本稿は、たんぽぽの種のように非常に小さくて軽い物体が、どのくらいの抵抗係数であるのかを簡易的に求める方法について考察したものである。なお、たんぽぽの種と同じように、小さくて軽い花粉、黄砂、黒煙などが、空中を浮遊する場合の抵抗係数を簡易的に求める場合にも応用できるものと考えている。

果たして、本稿の方法で妥当であるのか、あるいはどのくらいの精度で調べられるのかなどは不明であるが、一応こんな方法もあるのではないかと速報的にまとめたものである。読者諸賢からの御意見を頂ければ幸いです。

2. 抵抗係数の求め方

Fig.1 に示すような、空気中を重力の作用によって落下する物体の運動方程式は、空気による浮力は無視できるものとして、次のようになる。

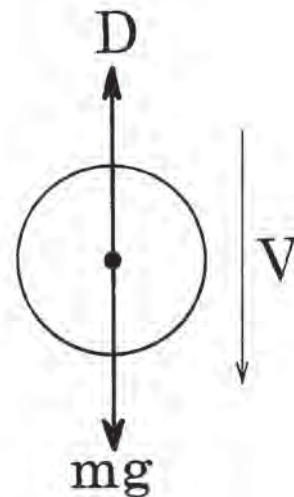


Fig. 1 Free Fall of Matter

* 愛知工科大学自動車短期大学 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

** 愛知工科大学 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Aichi University of Technology, 50-2 Manori Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

$$m \frac{dV}{dt} = mg - D \quad (1)$$

ここで、 m は物体の質量、 V は落下速度、 t は時刻、 g は重力加速度、 D は空気抵抗である。空気抵抗 D は、抵抗係数 C_D を使用して記述すると、

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D S \quad (2)$$

となる。 ρ は空気密度、 S は前面投影面積である。

一般に、物体の抵抗係数 C_D は、風洞実験によって空気抵抗 D を測定して、(2) 式から求めることになる。しかし、たんぼの種などのように、極めて小さな物体の場合には風洞実験によって空気抵抗 D を求めることがほとんど不可能である。

しかし、落下速度が一定の場合には、(1) 式から

$$D = mg \quad (3)$$

となるので、(2) 式を考えれば、

$$C_D = \frac{mg}{\frac{1}{2} \rho V^2 S} \quad (4)$$

のようになって、[1] 落下速度 V が測定でき、[2] 物体の質量が測定できれば、適当な前面面積に対して、この(4)式から計算によって、抵抗係数 C_D を求めることが可能である。

本稿におけるたんぼの種の抵抗係数の簡易推定は、この考え方に基づくものである。

3. 落下速度の測定実験

雨滴と同じように、たんぼの種はある程度の高さから落下させてやれば、一定の落下速度になることが想定できる。どの程度の落下高さを必要とするか正確には不明であるが、目視の試行実験によって、著者等は 1[m] 程度の落下高さでよさそうであると判断して実験することとした。

3.1 実験器具

実験に使用した器具は、落下時間測定用の機械式ストップウォッチとたんぼの種を掴むためのピンセットの 2 つ (Fig.2) である。機械式ストップウォッチは



Fig.2 Measuring Instruments

1/10[s] の目盛が刻んであるもので、落下時間は目分量で 5/100[s] まで読み取ることとした。

実際の実験には、1[m] のところにセロテープで印をつけた約 2[m] の長さの竹ざおを 1 本準備して実施した。

3.2 実験方法

実験者は 2 人で、測定のし易さを考えて、机上で実施した。

ひとりが、ピンセットで掴んだたんぼの種を、準備した約 2[m] の竹ざおの先端付近から落下させて、声で落下スタートの合図をする。合図を受けたもうひとりがたんぼの種の落下を眼で追い、机上から 1[m] の印のつけてある場所を通過する瞬間に、ストップウォッチを押し、たんぼの種が机上につくまでの時間を測定する。

少しでも精度の高いデータを得るために、練習して実験に臨んだ。また、合図の声で風を起こさないように極力注意した。

3.3 予備実験

前述の方法で、落下時間の測定で、果たしてどの程度の精度のある実験かの目安を立てるため、直径 50[mm] のプラスチックボール (Fig.3) で同じような落下実験を予備的に実施した。落下高さは 1.17[m] で行った。実験回数は 10 回である。Table 1 に実験回数と測定された落下時間を示す。測定値は、落下速度の関係で、ストップウォッチに刻んである目盛 1/10[s] を読み取ることとした。平均は 0.41[s] であった。

したがって、この間の平均速度は、1.17[m]/0.41[s] によって、2.85[m/s] と計算できる。

ところで、物体の自由落下の計算式は、(1) 式で抵抗 D を重力 mg に対して無視して、速度 V と落下距離 H は、



Fig.3 Plastic Ball

Table 1 Preliminary Experimental Results

Number of Experiment	Falling Time [s]
1	0.5
2	0.3
3	0.3
4	0.4
5	0.5
6	0.5
7	0.4
8	0.5
9	0.3
10	0.4
平均	0.41

$$V = -gt + V_0 \quad (5)$$

$$H = -\frac{1}{2}gt^2 + H_0 \quad (6)$$

のように表される． V_0 は初速度， H_0 は初期高さである．

ここで，初速度 $V_0=0$ ，初期高さ $H_0=1.17$ [m]，重力加速度 $g=9.8$ [m/s²] とすると，落下時間は 0.49[s] と計算でき，この時の落下速度は 4.8[m/s] である．したがって，1.17[m] からの高さの物体の自然落下の平均速度は， $1.17/0.49 = 2.39$ [m/s] である．

予備実験に使用したプラスチックボールは，たんぼぼの種と異なり，重力に対して空気抵抗は無視できると考えられるので，1.17[m] の落下距離で平均速度を比較すると，測定値 2.85[m/s] に対して計算値 2.39[m/s] である．計算値を基準にして落下時間を比較すると， $(0.41-0.49)/0.49 \times 100 = -16.3\%$ で，15% 強の違いがある．

高さを高くしたり，実験回数を増やしたり，慣れることにより実験精度は上がることになろうが，特に精度が悪すぎることはないと思われる．たんぼぼの落下をあまり高くするのは，風の影響を受けること，たんぼぼの背丈を考えると 1[m] 程度の実験で良いものと考えている．

3.4 実験結果

3.2 実験方法で述べたようにたんぼぼの種の落下実験を行い，Table 2 のような落下時間に関する結果を得た．実験に使用したたんぼぼの種は可能な限り似たサイズを選んでいるが，すべて別のものであり，質量，大き

Table 2 Experimental Results

Number of Experiment	Falling Time [s]	Number of Experiment	Falling Time [s]
1	2.90	11	2.85
2	3.10	12	3.90
3	2.55	13	1.50
4	3.10	14	2.00
5	3.10	15	2.40
6	2.55	16	3.00
7	3.15	17	2.20
8	2.40	18	3.70
9	2.25	19	2.50
10	2.70	20	3.00

さ、形状等は全く同じというわけではない。

実験は20回実施した。落下時間を合計すると、54.85[s]である。したがって、高さ1[m]の平均落下時間は $54.85/20=2.743[s]$ であり、平均落下速度は $0.365[m/s]$ となる。

4. 考察

4.1 抵抗係数の計算結果

たんぽぼの種の抵抗係数を求めるには、(4)式からわかるように、たんぽぼの種の質量を知らなければならない。しかし、著者等は現在のところ、これほど軽量の質量を測る計器を持ち合わせていないので、Table 3に示すように、数値を与えることにした。とりあえず、範囲は $1[g] (=1 \times 10^{-3}[kg])$ から $1[ng] (=1 \times 10^{-9}[kg])$ とした。

たんぽぼの種はFig.4に示すようであり、(2)式の前面投影面積 S は、Fig.4に示した傘の直径に対する射影面積とすることとした。直径はたんぽぼの種ごとに異なるが、約 $10 \times 10^{-3}[m]$ であるため、射影面積を算出する値には、 $10 \times 10^{-3}[m]$ を使った。

実験日における空気密度は、気温 $28[]$ 、気圧 $1010.6[hPa]$ から計算して、 $1.169[kg/m^3]$ であった。

たんぽぼの種の抵抗係数を推定する計算結果はTable 3のようである。



Fig.4 Seed of Dandelion

Table 3 Drag Coefficient of Seed of Dandelion

Mass[kg]	C_D
1×10^{-3}	1.6×10^3
1×10^{-4}	1.6×10^2
1×10^{-5}	1.6×10
1×10^{-6}	1.6
1×10^{-7}	1.6×10^{-1}
1×10^{-8}	1.6×10^{-2}
1×10^{-9}	1.6×10^{-3}

4.2 考察

たんぽぼの種の質量が測定できれば、抵抗係数をほぼ推定でき、Table 3の中に含まれている値ではないかと考えている。

レイノルズ数にもよるが、無限円柱の長手方向に直角に風が当たる場合には、抵抗係数は2程度、半球の凹面に風が当たる場合の抵抗係数は1.3程度である。たんぽぼの種とその傘を、球(種に相当)と円柱の集団(傘に相当)とみなすと、たんぽぼの種は非常に小さくて軽い。ため、少なくとも2以上の抵抗係数があるのではないかと推測している。

5. むすび

たんぽぼの種を題材にして、非常に小さくて軽い物体の抵抗係数を簡易的に求める方法を速報的に考察した。正確な抵抗係数の値を求めるには、非常に軽い質量を測る技術と、非常に小さな寸法を測る技術が必要であり、今後調査していきたい。

ゲージ理論からのマクスウェル方程式

石川雄二郎¹

(2010年9月30日受理)

Maxwell Equation in Gauge Theory

Yujiro Ishikawa¹

(Received September 30, 2010)

Abstract

In this paper, the author considers Maxwell equation as geometrical systems. The geometrical elements such as parallel displacement, connections, curvature, and differential forms play very important rolls. The ultimate form of Maxwell equation derived from Maxwell connection geometry is introduced in tensor form. There are interesting correspondences between differential geometry and gauge theory (as the expansion of electromagnetic theory) like (1) connection \Leftrightarrow gauge potential, (2) curvature \Leftrightarrow field strength. Finally, the equivalence between the derived tensor form Maxwell equation and the familiar vector analysis form Maxwell equation is confirmed.

キーワード：マクスウェル方程式，平行移動，接続，曲率，ゲージ理論，微分形式

Keywords: Maxwell equation, Parallel Displacement, Connection, Curvature, Gauge Theory, Differential form

1 はじめに

ニュートンの運動方程式は，その基礎となる（空間と時間は独立な諸元とする）絶対空間が特殊相対性理論の成功により否定されたため，物体が高速で運動する場合には適用できないことが分かった．ところが電磁気学の基本方程式であるマクスウェル方程式は特殊相対性理論の要請に解釈の変更で耐えた．¹⁾

また，マクスウェル方程式は本文で一部考察するゲージ理論の原型であり，マクスウェル方程式の一般化理論としてゲージ理論を捉えることもできる．これは，マクスウェル方程式が究極的に昇華された方程式であり，真に自然現象を記述できる方程式であったため，歴史の変遷にともなう新たな要求に打ち勝った優れたものであることを示しているように思われる．

電磁気学のクーロンの法則のようにプラスとマイナスの符号を考慮して電荷間の相互作用（引力とか斥力等）を考察する場合は，遠隔作用を認める立場に立てば，その原理を含めてとても理解しやすい．ところが，この遠隔作用に基づく立場では，電荷あるいは磁荷をもたない物体にも作用する重力を原理的に説明するのは困難である．このような現象に対しては近接作用の立場に立たざるを得ない．すべての自然現象の解析にあたり，どんな原理・原則に基づいて得られた方程式でも，最後は現象論的にならざるを得ない．すなわち，方程式の解により現象がうまく説明できれば（将来説明不可能な現象が発見されるかもしれないが，現時点では）正しい方程式である．しかし，電荷間に働くクーロン力に関しては，遠隔作用と近接作用のどちらの原理に基づいても得られるクーロン力の説明力は差がないように思われるが，重力等も考慮すれば近接作用の考え方によらなければならない．すなわち，近接作用に基づくのがより一般的であり，近接作用は場に基づくので，自然現象の幾何学化とみることができる．このような幾何学化は，電磁気学やそれを一般化したゲージ理論でも成功を収めている．微分幾何学と（電磁気学の一般化としての）ゲージ理論の密接な関係は

接続 \longleftrightarrow ゲージポテンシャル

曲率 \longleftrightarrow ゲージ場，または，場の強さ

¹ 愛知工科大学 工学部 情報メディア学科・基礎教育，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori 443-0047

とまとめられる²⁾。このような立場では、場の強さは曲率、すなわち、空間の曲がり方によるので電荷、磁荷のない物体に働く重力に関しても（単なる結果論ではなく）原理的に説明できる。

本文では、ファイバー束の幾何学に基づけば、マクスウェル方程式は極めて簡潔に表現できることを示す。最後に、得られた方程式は実際にマクスウェル方程式であることを確認する。

2 マクスウェル方程式のいろいろな表現

諸元の詳細は 3 以降で述べるが、3 次元空間におけるマクスウェル方程式は次の 4 式である。

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

上式はいわゆる 3 次元ベクトル解析による表現である。

筆者は微分形式による 4 次元定式化についてはすでに考察した³⁾。結果のみ示すと、ミンコフスキー空間のある 1- 次微分形式 A を外微分して得られる 2- 次微分形式 $\omega \equiv d(A_\mu dx^\mu)$ と 4 次元電流密度 j により、マクスウェル方程式 (1), (2) はそれぞれ

$$d * \omega = \mu_0 * j, \quad (3)$$

$$d\omega = 0 \quad (4)$$

と極めて簡潔に表すことができる。

さらに、本文では微分幾何学によるマクスウェル方程式 (4 次元) の表現について考察する。結論を述べると、

$$D * F = \mu_0 * J, \quad (5)$$

$$DF = 0 \quad (6)$$

となる。ここで、詳細は後述するが、 D は共変微分（作用素）、 F は電磁場テンソル、 J は 4 次元電流密度、また左肩に * をつけて双対なテンソルを表す。

(3), (4) と (5), (6) は外観上非常によく似た方程式であることから推察されるように、実はそれぞれがマクスウェル方程式である。すなわち、マクスウェル方程式を (3), (4) では外微分 d と微分形式により表現した式で、また (5), (6) は共変微分 D とテンソルにより表現した式であるに過ぎない。しかし、マクスウェル場（マクスウェル方程式）に限れば両者の表現力はほとんど差がないと思われるが、もっと一般の場（ヤン-ミルズ場等）に対しては前者の外微分と微分形式による表現には限界があるようである。

3 マクスウェル方程式再考

3.1 3 次元のマクスウェル方程式の諸元

(1), (2) について補足する。(1) の第 1 式はクーロンの法則、第 2 式は電流の磁気作用アンペールの法則であり、(2) の第 1 式は磁荷は単独では存在しないこと、すなわち磁束密度は連続であることを示し、(2) の第 2 式はファラデーの電磁誘導の法則である。 D と B は電束密度と磁束密度であり、 E と H は電場と磁場である。また、 ρ は荷電密度、 $j = (j_1, j_2, j_3)$ は電流密度である。 D と B 、 E と H は真空中では、構成方程式

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$$

で結ばれている。 ε_0 は真空の誘電率、 μ_0 は真空の透磁率とよばれる定数で、 $\mu_0 \varepsilon_0 = c^{-2}$ である。

3.2 マクスウェル方程式の 4 次元定式化^{3),4)}

次に、(3), (4) について補足する。マクスウェル方程式の定式化は 4 次元のミンコフスキー空間を想定している。ただし、第 1 成分は時間、第 2 から第 4 成分は空間成分を表す。(3) において、* はホッジの星印作用素であり、また、電流密度 j は、(1) の第 2 式と同じ記号を（拡張）流用しているが、ミンコフスキー

空間へ拡張された電流密度である．すなわち，相対論のローレンツ変換の要請を考慮し時間成分が追加され，4次元ベクトル化されている²⁾．

3.3 アハロノフ・ボーム効果

電磁気学の初歩では，電場 E と磁場 B は測定可能であることから，電場 E と磁場 B の組による電磁場の解析がより根本的で，ベクトルポテンシャル A とスカラーポテンシャル ϕ による電磁場の解析は2次的であると考えられてきた．ところが近年量子論等も加味した考察により， E と B の組では説明できないが， A と ϕ の組を用いれば説明できる電磁現象が発見されている．その有名な例がアハロノフ・ボーム効果である．アハロノフ・ボームの実験における干渉縞の変化（アハロノフ・ボーム効果）は， E と B の組では説明できないが， A と ϕ の組では説明できることはよく知られている．つまり，電磁場は A と ϕ の組による解析が， E と B の組によるよりも，より原理的であるといえる．

3.4 マクスウェル方程式とゲージ変換¹¹⁾

電磁場の解析は，電界 E と磁界 B で解析する方法と，ベクトルポテンシャル A とスカラーポテンシャル ϕ の組で解析する方法の他にも各種知られている．

特に A と ϕ の組による電磁界解析の場合，マクスウェル方程式 (2) の第1式よりベクトル解析の定理（あるいは，ポアンカレの補題⁴⁾）により，ベクトルポテンシャル A を導入して $B = \nabla \times A$ とおくことができる．また，このとき，任意の微分可能な関数 ϕ に対しベクトル解析の公式 $\nabla \times \nabla \phi \equiv 0$ を用いて，マクスウェル方程式 (1) の未知数を E と B から A と ϕ へ (8) を用いて変数変換すると

$$\nabla \left(\nabla \cdot A + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) + \left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \Delta \right) A = \mu_0 j, \quad -\nabla \cdot \left(\frac{\partial A}{\partial t} \right) - \Delta \phi = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (7)$$

を得るので，この方程式を解いて A と ϕ とを求め，次に代入すれば E と B が得られる．

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \phi, \quad B = \nabla \times A \quad (8)$$

ところが任意の微分可能な関数 χ を用いて

$$A' = A + \nabla \chi, \quad \phi' = \phi - \frac{\partial \chi}{\partial t} \quad (9)$$

としても

$$E = -\frac{\partial A'}{\partial t} - \nabla \phi', \quad B = \nabla \times A' \quad (10)$$

が成立するので， A' と ϕ' の組からもまったく同じ場の量 E と B が得られる．言い換えると A と ϕ には任意関数 χ の不定性がある．この不定性を利用して，(7) を例えば独立した4個の波動方程式に変換することも可能である．このように (9) を1種の変換と考えて，これをゲージ変換という．

代表的なゲージ変換の条件（ゲージ）として，ローレンツゲージとクーロンゲージがある．

4 主ファイバー束と接続

本文の主題である (5) と (6)，すなわち，マクスウェルの方程式の幾何学化について以下に詳細に考察する．

4.1 平行移動と接続

ニュートンの運動方程式で仮定されているような平坦な空間（ユークリッド空間）では，ベクトルの平行移動に関しては何の疑念もなく定義（議論）できる．これは空間はどこでも同様（平坦）と仮定されているからであるが，本文では，考察する空間は同様ではなく曲がっていて，その曲がり具合（曲率）により場の強さが与えられると考える．このような空間ではベクトルの平行移動は単純明白な概念ではない．そして空間の離れた2点（正確には2点での接空間）を比較するために，微分幾何学では接続という概念が導入されている．

以下においては、空間（曲面）を拡張した一般的な概念である多様体として記述する．多様体に関する接続とか平行移動という概念は（例え 2 点間の距離は無限小であっても）孤立している 2 点に関しては定義できず、2 点を結ぶ曲線を介して定義される．つまり、多様体上のベクトルの 2 点間の平行移動の結果は 2 点間を結ぶ曲線によって変わる（結果は積分量である）と考える．

最も直観的な平行移動は次のようにして導入される⁵⁾． n 次元多様体 M 上の 2 点を p, q とし、 p, q はともに局所座標近傍 $\{U_\alpha, x^i\}$ の中にあるとして、曲線 $C = \{x(t) = (x^1(t), \dots, x^n(t)) \mid 0 \leq t \leq 1\}$ を $p = x(0)$ から $q = x(1)$ への U_α 内の C^∞ （滑らかな）曲線とする．このとき、 C 上の微分方程式

$$\frac{dY^i(t)}{dt} + \Gamma^i_{jk} \frac{dx^j(t)}{dt} Y^k(t) = 0, \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, M \text{ の次元}) \quad (11)$$

によりベクトルの平行移動が定義される．すなわち、点 p における接ベクトル P を初期値とし、微分方程式 (11) を積分し解 $Y(t) = (Y^1(t), \dots, Y^n(t))$ を求める．そしてベクトル $Q = Y(1)$ を、 p 点のベクトル P を曲線 C に沿って点 q まで平行移動したベクトルと定義する．ここで Γ^i_{jk} は U_α 上の関数で、 $\frac{dx^j(t)}{dt}$ は曲線 C の $x(t)$ での接ベクトルである．微分方程式 (11) は

1. $Y^1(t), \dots, Y^n(t)$ について線形
2. 曲線の接ベクトル $\frac{dx^j(t)}{dt} = \left(\frac{dx^1(t)}{dt}, \dots, \frac{dx^n(t)}{dt} \right)$ に関係したもの

としてつくる場合、最も単純な形をとるものとして解釈される方程式である．このように、関数 Γ^i_{jk} が与えられれば接ベクトルの平行移動は (11) により計算できることになる．結局、空間の性質を表す関数 $\Gamma = \{\Gamma^i_{jk}\}$ が与えられれば、曲線 C に沿って p 点の接ベクトル P を平行移動する「手続き」を与える「機構」も与えられたと考えることができる．もちろん、 $\Gamma = \{\Gamma^i_{jk}\}$ が多様体上の概念となるためには局所変数の変換に関する条件は満たさなければならない．関数 $\Gamma = \{\Gamma^i_{jk}\}$ は線形接続係数とよばれる．そして、関数 $\Gamma = \{\Gamma^i_{jk}\}$ の与えることが各種空間の性質を決めると考える．

4.2 主ファイバー束²⁾

接続をより一般的に考察するため主ファイバー束を導入する．物理学における量子場の記述に関して、ファイバー束とそのトポロジーは指導原理の一つとなっている．特に本文はファイバー束の電磁気学への応用であるので、ファイバー自身が構造群である主ファイバー束を考察する．最初にファイバー束の定義をまとめる．

定義 ファイバー束 (E, π, F, G, M) は次に述べるものの総称として定義される．

1. 束空間と呼ばれる位相空間 E ．
2. 底空間と呼ばれる位相空間 X ，および E から X の上への射影 $\pi: E \rightarrow X$ ．
3. ファイバーと呼ばれる位相空間 F ．
4. 構造群とよばれるファイバー F の同相写像の群 G ．
5. 底空間 M の開被覆 $\{U_\alpha\}$ ．各座標近傍 U_α は同相写像 $\phi_\alpha: \pi^{-1}(U_\alpha) \rightarrow U_\alpha \times F$ ，
および $\pi \phi_\alpha^{-1}(x, f) = x$ ，ここで $x \in U_\alpha, f \in F$ で特徴付けられる． □

そして、ファイバー F 自身が構造群 G となる場合、このファイバー束は主ファイバー束と呼ばれる．構造群の相違により各種の場の幾何学が構築されている．構造群 G とそのファイバー束の幾何学との対応例としては、

1. マクスウェル場の幾何学 構造群 G : 大きさが 1 の複素数を元とする群 $U(1)$
2. ヤン-ミルズ場の幾何学 構造群 G : 非可換リー群
3. リーマン幾何学 構造群 G : 直交群 $O(n)$

等があげられる．

本文のマクスウェル場の幾何学の場合、構造群は可換である $U(1)$ であり、その幾何学は後述のように非常に簡単化される．マクスウェル場の幾何学をその特別な場合として含むヤン-ミルズ場の幾何学では、構造群はより一般的な特殊直交群 $SO(n)$ や特殊ユニタリー群 $SU(n)$ といった非可換群に拡張される．このときは、リー群 G に対応するリー代数を \mathfrak{g} 、 \mathfrak{g} の生成子を $\{T_a\}$ で表すと、ゲージポテンシャルはリー代数

\mathfrak{g} で値をとるとすれば,

$$A_\mu = A^a{}_\mu T_a \quad (12)$$

と展開される．ゲージポテンシャル A_μ のゲージ変換 (9 参照) と電磁場テンソル (52 参照) は

$$A_\mu \longrightarrow A'_\mu = g A_\mu g^{-1} + g \partial_\mu g^{-1} \quad (g \in G) \quad (13)$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu + [A_\mu, A_\nu] \quad (14)$$

と一般化される．(14) はヤン-ミルズテンソル場とよばれる．

4.3 水平部分空間と垂直部分空間への直和分解^{2),6)}

本文では共変微分と曲率 (場の強さに相当) を, 特別な局所座標表現が不要である, 接空間を水平部分空間と垂直部分空間へ直和分解する方法により考察する．

u を主ファイバー束 (P, π, G, M) の元とし, G_p を多様体 M 上の点 $p = \pi(u)$ におけるファイバー, $T_u(P)$ を $u \in P$ における接空間, u において G_p に接する $T_u(P)$ の部分空間を垂直部分空間 $V_u(P)$, 部分空間 $V_u(P)$ の接空間 $T_u P$ に対する補空間を水平部分空間とよび $H_u(P)$ で表す．

$$T_u(P) = V_u(P) \oplus H_u(P) \quad (15)$$

ここで記号 \oplus は直和を表す．

さて, 空間 $V_u(P)$ はその定義より P のファイバー束としての構造だけで定まるが, 水辺部分空間は $H_u(P)$ は $V_u(P)$ に対して一意に定まらない．そこで, さらに条件

$$\begin{aligned} & \text{群 } G \text{ の作用により同じファイバー上の } 1 \text{ つの水平} \\ & \text{部分空間から他の水平部分空間へ移ることができる．} \end{aligned} \quad (16)$$

を追加し自由度を固定する．

接空間 $T_u(P)$ を $V_u(P)$ と $H_u(P)$ に系統的に分解するには, 接続 1-形式とよばれるリー環に値をもつ 1-次微分形式 $\omega \in \mathfrak{g} \otimes T^*P$ を導入すればよいことが知られている⁶⁾．ここで記号については, 構造群をリー群 G としたとき, \mathfrak{g} は G のリー代数, T^*P は主ファイバー束の接空間 TP の双対空間, \otimes はテンソル積である．つまり, ω はリー代数 \mathfrak{g} に値をとる 1-次微分形式である．

主ファイバー束 P の局所座標を, $x \in M, g \in G$ として (x, g) で表す．リー群 G に対応するリー代数 \mathfrak{g} の元を $\{\lambda_a\}$, 構造定数を f_{abc} とする．すなわち, 交代積を $[A, B] = AB - BA$ として

$$\left[\frac{\lambda_a}{2i}, \frac{\lambda_b}{2i} \right] = f_{abc} \frac{\lambda_c}{2i}. \quad (17)$$

そして, 次のように定義する²⁾．

$$A = A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu, \quad (18)$$

$$\omega = g^{-1} dg + g^{-1} A g = (g^{-1})_{ik} dg_{kj} + (g^{-1})_{il} A^a{}_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} dx^\mu g_{kj}. \quad (19)$$

この場合, $A^a{}_\mu$ を接続, (18) の A を接続形式, (19) の ω を接続 1-形式とよぶ．このとき, 接続 1-形式 $\omega \in \mathfrak{g} \otimes T^*P$ は接空間 $T_u P$ を垂直部分空間 $V_u(P) \simeq \mathfrak{g}$ に射影することが知られている⁶⁾．すなわち, 水平部分空間 $H_u(P)$ は

$$H_u(P) = \{X \in T_u P \mid \omega(X) = 0\} \quad (20)$$

として得られる ($\omega(X) = \langle \omega, X \rangle$ については (25) 参照)．言い換えると, $H_u(P)$ は ω の核として定義される．条件 (20) により, X に対して条件 (15), (16) を満たす X の水平部分空間成分を一意に決定することができる．実際, 多様体 M の次元を n , 構造群 G の次数を d とすれば, 接空間 $T_u(P)$ の次元は $n + d$ である．接空間 $T_u(P)$ の水平部分空間 $H_u(P)$ と垂直部分空間 $V_u(P)$ への分解を (15) で表すと, $V_u(P)$ の次元は d であり, その基底を

$$\frac{\partial}{\partial g_{ij}} \quad (21)$$

で表し, $H_u(P)$ の次元は n であり, その基底を

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} + C_{\mu ij} \frac{\partial}{\partial g_{ij}} \quad (\mu = 1, 2, \dots, n) \quad (22)$$

で表す. このとき, $C_{\mu ij}$ が決まれば $H_u(P)$ は決定されたことになる. 以下では, ギリシャ文字は $1, 2, \dots, n$, アルファベットは $1, 2, \dots, d$ を表す.

条件 (20) により, $C_{\mu ij}$ は以下のように決定できる. 接空間 $T_u(P)$ の任意のベクトル X は, 基底 (21), (22) より

$$X = a_{ij} \frac{\partial}{\partial g_{ij}} + \beta_\mu \left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} + C_{\mu ij} \frac{\partial}{\partial g_{ij}} \right) \quad (23)$$

と書ける. ここで, β_μ は関数で $X \in V_u(P)$ でない限り $\beta_\mu \neq 0$ である. (23), (19) より

$$\begin{aligned} \omega(X) &= \langle \omega, X \rangle \\ &= \left\langle (g^{-1})_{ik} dg_{kj} + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} dx^\mu g_{kj}, a_{lm} \frac{\partial}{\partial g_{lm}} + \beta^\nu \left(\frac{\partial}{\partial x^\nu} + C_{\mu lm} \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right) \right\rangle \\ &= (g^{-1})_{ik} a_{lm} \left\langle dg_{kj}, \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right\rangle + (g^{-1})_{ik} \beta^\nu \left\langle dg_{kj}, \frac{\partial}{\partial x^\nu} \right\rangle + (g^{-1})_{ik} \beta^\nu C_{\mu lm} \left\langle dg_{kj}, \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right\rangle \\ &\quad + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} a_{lm} \left\langle dx^\mu, \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right\rangle + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \beta^\nu \left\langle dx^\mu, \frac{\partial}{\partial x^\nu} \right\rangle \\ &\quad + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \beta^\nu C_{\mu lm} \left\langle dx^\mu, \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right\rangle \\ &= (g^{-1})_{ik} a_{lm} \left\langle dg_{kj}, \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right\rangle + (g^{-1})_{ik} \beta^\nu C_{\mu lm} \left\langle dg_{kj}, \frac{\partial}{\partial g_{lm}} \right\rangle \\ &\quad + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \beta^\nu \left\langle dx^\mu, \frac{\partial}{\partial x^\nu} \right\rangle \\ &= (g^{-1})_{ik} a_{lm} \delta_k^l \delta_j^m + (g^{-1})_{ik} \beta^\mu C_{\mu lm} \delta_k^l \delta_j^m + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \beta^\nu \delta_\nu^\mu \\ &= (g^{-1})_{ik} a_{kj} + (g^{-1})_{ik} \beta^\mu C_{\mu kj} + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \beta^\mu \\ &= \left\{ (g^{-1})_{ik} a_{kj} + (g^{-1})_{ik} C_{\mu kj} + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \right\} \beta^\mu. \end{aligned} \quad (24)$$

ここで, 記号 $\langle \cdot, \cdot \rangle_p$ は多様体上の点 p に関して $T_p^*(M)$ の元と $T_p(M)$ の元の組から実数 \mathbb{R} への写像 (内積)

$$\langle \cdot, \cdot \rangle_p : T_p^*(P) \times T_p(P) \longrightarrow \mathbb{R} \quad (25)$$

であり

$$\left\langle dx^\mu, \frac{\partial}{\partial x^\nu} \right\rangle = \delta^\mu_\nu, \quad \left\langle dg_{ij}, \frac{\partial}{\partial g_{kl}} \right\rangle = \delta^i_k \delta^j_l$$

をみताす.

いま, $X \in H_u(P)$ ならば ((15) より $X \notin V_u(P)$ となり)

(1) (23) において, $a_{ij} = 0$ かつ $\beta_\mu \neq 0$.

(2) ω は X を $V_u(P)$ へ射影するので $\omega(X) = \langle \omega, X \rangle = 0$

以上が成り立つ. よって, (24) より

$$(g^{-1})_{ik} C_{\mu kj} + (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} = 0$$

を得る. 両辺に g_{mi} をかけて, 添え字 i について和をとれば,

$$\begin{aligned} g_{mi} (g^{-1})_{ik} C_{\mu kj} + g_{mi} (g^{-1})_{il} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} &= \delta_{mk} C_{\mu kj} + \delta_{ml} A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{lk}}{2i} g_{kj} \\ &= C_{\mu mj} + A^a_\mu \frac{(\lambda_a)_{mk}}{2i} g_{kj} = 0 \end{aligned}$$

より

$$C_{\mu ij} = -A^a_{\mu}(x) \frac{(\lambda_a)_{ik}}{2i} g_{kj}, \quad (\mu = 1, 2, \dots, n) \quad (26)$$

となる． $C_{\mu ij}$ が得られたので，水平部分空間の基底が定まり，結局 $H_u(P)$ が決定できた．こうして，(19) の接続 1-形式 ω を用いて， $T_u(P)$ は (15) のごとく直和分解可能であることが示された． ■

次に，このようにして得られる水平部分空間を經由して，平行移動の概念をファイバー束の幾何学へ拡張する．

4.4 微分幾何学と（電磁気学の一般化としての）ゲージ理論との対応

接続形式 (18) に戻り，主ファイバー束 P の局所座標変換について考察する²⁾．ファイバー束の局所座標が $h \in G$ の左からの作用により， (x, g) から $(x, g' = hg)$ に変わったとする．このとき， ω の不変性 $\omega = \omega'$ は (19) より

$$g^{-1}dg + g^{-1}Ag = (g')^{-1}dg' + (g')^{-1}A'g' \quad (27)$$

を意味する． $g' = hg$ を右辺に代入し整理すると（接続形式 A の変換式）

$$A' = hAh^{-1} + hdh^{-1} \quad (28)$$

が得られる．(28) はヤン-ミルズ場でのゲージポテンシャルのゲージ変換 (13) と同じ形をしている．これより微分幾何学と（電磁気学の一般化としての）ゲージ理論の間に

接続 \longleftrightarrow ゲージポテンシャル

主ファイバー束のファイバーの局所座標変換 \longleftrightarrow ゲージ変換

なる対応が得られる．

5 平行移動，共変微分，曲率

続いて，ファイバー束の幾何学における平行移動を定義し，平行移動の引き起こす接続について考察する．

5.1 平行移動

平坦でない空間の平行移動に関しては，レビ・チビタにより最初に提案された⁸⁾．本文では，4 の接空間 $T_u(P)$ の水平部分空間および垂直部分空間への分解に基づいた平行移動（の定義）を考察する．

多様体 M 上の点 p と q を通る曲線を

$$\gamma(t) : [0, 1] \rightarrow M, \quad p = \gamma(0), q = \gamma(1)$$

とする． p 上のファイバー $\pi^{-1}(p)$ の点（切断と呼ばれる）から点 q 上のファイバー $\pi^{-1}(q)$ の点への曲線 $\gamma(t)$ に沿った移動 $\bar{\gamma}(t)$ で，つまり $\pi(\bar{\gamma}) = \gamma$ であって，さらに $\bar{\gamma}(t)$ の接ベクトルが常に水平部分空間 $H_u(P)$ （のみ）に属するとき， $\bar{\gamma}(t)$ を $\gamma(t)$ の水平リフトという．与えられた $\gamma(t)$ と点 $u_0 \in \pi^{-1}(p)$ に対し，始点を u_0 とする水平リフトは唯 1 つである．この $\bar{\gamma}(t)$ に沿ってのファイバーの点の移動をファイバーを γ に沿っての平行移動させる規則とする．

5.2 接続

平行移動が定義されたので，この平行移動が引き起こす接続について考える．曲線 $\gamma(t)$ と水平リフト $\bar{\gamma}(t)$ を，おのおの局所座標で表す．

$$\gamma(t) = (x^\mu(t)), \quad \bar{\gamma}(t) = (x^\mu(t), g(t)) . \quad (29)$$

曲線 $\bar{\gamma}(t) \in P$ の接ベクトルは (29) 第 2 式より

$$\frac{d}{dt} = \dot{x}^\mu \frac{\partial}{\partial x^\mu} + \dot{g} \frac{\partial}{\partial g} \quad (30)$$

で与えられる．一方，(30) の接ベクトルは平行移動の定義より $H_u(P)$ の元であり， $H_u(P)$ の基底は (22)，(26) より

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} - A^a{}_\mu(x) \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \quad (31)$$

であったので， $\bar{\gamma}(t)$ の接ベクトルはあるベクトル $(\beta^1, \dots, \beta^n)$ を用いて

$$\frac{d}{dt} = \beta^\mu \left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} - A^a{}_\mu(x) \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \quad (32)$$

とも書ける．(30) と (32) を比べると

$$\dot{x}^\mu(t) = \beta^\mu, \quad \dot{g}(t) = -\beta^\mu A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g \quad (33)$$

が得られる．上 2 式より β^μ を消去すると

$$\dot{g} + \dot{x}^\mu A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g = 0 \quad (34)$$

であり，これは接続と平行移動の関係を表し，平行移動方程式とよばれる．これは，

$$\dot{x}^\mu A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g = A^a{}_\mu \frac{(\lambda_a)_{jl}}{2i} \frac{dx^\mu}{dt} g_{lk}, \quad \Gamma^j{}_{\mu l} = -A^a{}_\mu \frac{(\lambda_a)_{jl}}{2i}$$

とおけば，(34) は

$$\dot{g}_{jk} + \Gamma^j{}_{\mu l} \frac{dx^\mu}{dt} g_{lk} = 0$$

とも書ける ((11) 参照) ． $g(t)$ をこの方程式の解に限定したときに，接ベクトルの $\bar{\gamma}(t)$ に沿っての平行移動が得られる．

5.3 共変微分

共変微分は微分操作を，垂直部分空間成分は無視し，水平部分空間成分のみ考慮した微分として定義される⁹⁾．よって共変微分 D_μ は，水平リフト $\bar{\gamma}(t)$ に沿っての t に関する変化の割合を $\dot{x}^\mu D_\mu$ と書くことによって定義される．すなわち，(32) と (33) より

$$D_\mu = \frac{\partial}{\partial x^\mu} - A^a{}_\mu(x) \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \quad (35)$$

となる．これより， $H_u(P)$ の基底は D_μ であり，また， $V_u(P)$ の基底は $\frac{\partial}{\partial g}$ であるから，接空間 $T_u(P) = H_u(p) \oplus V_u(P)$ 内の任意のベクトルは

$$X = a \frac{\partial}{\partial g} + \beta^\mu D_\mu \quad (36)$$

と表すことこともできる．

5.4 曲率

曲率は共変微分を用いて (37) により定義される．共変微分は偏微分とは異なり微分する順序に依存する (非可換) ．共変微分は定義

$$[D_\mu, D_\nu] \equiv D_\mu D_\nu - D_\nu D_\mu \quad (37)$$

より明らかなように，この非可換性をを測る尺度とみなすことができる．実際に， $[D_\mu, D_\nu]$ を計算する．

(35) を (37) 代入すると

$$\begin{aligned}
& [D_\mu, D_\nu] \\
&= \left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} - A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x^\nu} - A^b{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) - \left(\frac{\partial}{\partial x^\nu} - A^a{}_\nu \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} - A^b{}_\mu \frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \\
&= \frac{\partial}{\partial x^\mu} \frac{\partial}{\partial x^\nu} - \frac{\partial}{\partial x^\mu} \left(A^b{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) - A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g \left(\frac{\partial}{\partial g} \frac{\partial}{\partial x^\nu} \right) + \left(A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \left(A^b{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \\
&\quad - \frac{\partial}{\partial x^\nu} \frac{\partial}{\partial x^\mu} + \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) + A^a{}_\nu \frac{\lambda_a}{2i} g \left(\frac{\partial}{\partial g} \frac{\partial}{\partial x^\mu} \right) - \left(A^a{}_\nu \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \left(A^b{}_\mu \frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \\
&= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} \left(A^b{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) + \frac{\partial}{\partial x^\nu} \left(A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \\
&\quad + A^a{}_\mu A^b{}_\nu \left(\frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \left(\frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) - A^b{}_\nu A^a{}_\mu \left(\frac{\lambda_b}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right) \left(\frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} \right). \tag{38}
\end{aligned}$$

を得る .

次に

$$R_a = \frac{\lambda_a}{2i} g \frac{\partial}{\partial g} = \frac{1}{2i} (\lambda_a)_{jk} g_{kl} \frac{\partial}{\partial g_{jl}} \tag{39}$$

と定義すると , R_a の交換関係として (17) より

$$[R_a, R_b] = -f_{abc} R_c \tag{40}$$

が得られる . このとき , (40) を用いると , (38) の右辺は

$$\begin{aligned}
r.h.s. &= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} (A^b{}_\nu R_b) + \frac{\partial}{\partial x^\nu} (A^a{}_\mu R_a) + A^a{}_\mu A^b{}_\nu R_a R_b - A^b{}_\nu A^a{}_\mu R_b R_a \\
&= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^b{}_\nu R_b + \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu R_a + A^a{}_\mu A^b{}_\nu (R_a R_b - R_b R_a) \\
&= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu R_a + \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu R_a + A^a{}_\mu A^b{}_\nu [R_a, R_b] \\
&= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu R_a + \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu R_a - A^a{}_\mu A^b{}_\nu f_{abc} R_c \\
&= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu R_a + \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu R_a - A^b{}_\mu A^c{}_\nu f_{bca} R_a \\
&= -\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu R_a + \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu R_a - A^b{}_\mu A^c{}_\nu f_{abc} R_a \\
&= -\left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu - \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu + A^b{}_\mu A^c{}_\nu f_{abc} \right) R_a \\
&\equiv -F^a{}_{\mu\nu} R_a
\end{aligned}$$

となる . ただし

$$F^a{}_{\mu\nu} = \frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu - \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu + A^b{}_\mu A^c{}_\nu f_{abc} \tag{41}$$

である . 結局 , (38) は

$$[D_\mu, D_\nu] = -F^a{}_{\mu\nu} R_a \tag{42}$$

と書ける .

(42) で定義した $F^a{}_{\mu\nu}$ は曲率テンソルとよばれる . ここで (41) を (14) , (52) と比較すると , 微分幾何学と (電磁気学の一般化としての) ゲージ理論の密接な関係は

曲率 \longleftrightarrow ゲージ場 または 場の強さ

となる .

5.5 曲率2-形式

曲率テンソルから曲率2-形式をつくり，微分形式での表式と関係づける．曲率2-形式 F を

$$F = \frac{1}{2} F_{\mu\nu} dx^\mu \wedge dx^\nu, \quad F_{\mu\nu} = F^a{}_{\mu\nu} \frac{\lambda_a}{2i} \quad (43)$$

と定義する．このとき (41), (18) より

$$F = dA + A \wedge A \quad (44)$$

と書ける．実際，(18) を (44) に代入すると

$$\begin{aligned} dA + A \wedge A &= d \left(A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu \right) + \left(A^b{}_\mu \frac{\lambda_b}{2i} dx^\mu \right) \wedge \left(A^c{}_\nu \frac{\lambda_c}{2i} dx^\nu \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu dx^\nu \wedge \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu + A^b{}_\mu A^c{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} dx^\nu \wedge dx^\mu + A^b{}_\mu A^c{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \end{aligned} \quad (45)$$

を得るが

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu \frac{\lambda_a}{2i} dx^\nu \wedge dx^\mu \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu dx^\nu \wedge dx^\mu + \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu dx^\nu \wedge dx^\mu \right) \frac{\lambda_a}{2i} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu dx^\nu \wedge dx^\mu + \frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu dx^\mu \wedge dx^\nu \right) \frac{\lambda_a}{2i} \\ &= \frac{1}{2} \left(-\frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu dx^\mu \wedge dx^\nu + \frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu dx^\mu \wedge dx^\nu \right) \frac{\lambda_a}{2i} \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu - \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu \right) \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \end{aligned}$$

であり，また (17) より

$$\begin{aligned} &A^b{}_\mu A^c{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{1}{2} \left(A^b{}_\mu A^c{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu + A^b{}_\mu A^c{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \right) \\ &= \frac{1}{2} \left(A^b{}_\mu A^c{}_\nu \frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu + A^c{}_\nu A^b{}_\mu \frac{\lambda_c}{2i} \frac{\lambda_b}{2i} dx^\nu \wedge dx^\mu \right) \\ &= \frac{1}{2} A^b{}_\mu A^c{}_\nu \left(\frac{\lambda_b}{2i} \frac{\lambda_c}{2i} - \frac{\lambda_c}{2i} \frac{\lambda_b}{2i} \right) dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{1}{2} A^b{}_\mu A^c{}_\nu \left[\frac{\lambda_b}{2i}, \frac{\lambda_c}{2i} \right] dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{1}{2} (A^b{}_\mu A^c{}_\nu f_{abc}) \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \end{aligned}$$

であるので，結局 (45) は (41) より

$$\begin{aligned} dA + A \wedge A &= \left(\frac{\partial}{\partial x^\mu} A^a{}_\nu - \frac{\partial}{\partial x^\nu} A^a{}_\mu + f_{abc} A^b{}_\mu A^c{}_\nu f_{abc} \right) \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{1}{2} F^a{}_{\mu\nu} \frac{\lambda_a}{2i} dx^\mu \wedge dx^\nu = F \end{aligned}$$

となる．

この F は行列に値をとる 2-形式であるので， F の共変微分 DF は

$$DF = dF + A \wedge F + (-1)^{2+1} F \wedge A = dF + A \wedge F - F \wedge A$$

と計算される²⁾。これに (44) を代入すると

$$\begin{aligned} DF &= d(dA + A \wedge A) + A \wedge (dA + A \wedge A) - (dA + A \wedge A) \wedge A \\ &= d^2 A + d(A \wedge A) + A \wedge dA - dA \wedge A \\ &= d^2 A + dA \wedge A - A \wedge dA + A \wedge dA - dA \wedge A = 0. \end{aligned}$$

すなわち、ビアンキ恒等式

$$DF = dF + A \wedge F - F \wedge A = 0 \quad (46)$$

が得られる。

6 ゲージ理論からのマクスウェル方程式

6.1 (電磁気学の一般化としての) ゲージ理論

接続や曲率を使って、前述のように各種の幾何学を議論することができる。電磁気学はマクスウェル場の幾何学であり、その底空間 M は 4 次元ミンコフスキー空間

$$x^0 = ct, \quad x^1 = x, \quad x^2 = y, \quad x^3 = z$$

であり、 $J = (c\rho, j_1, j_2, j_3)$ は 4 次元電流である。マクスウェル場の幾何学の構造群は、絶対値が 1 である複素数のなす群 $U(1)$ である。 $U(1)$ は可換群であるから、その幾何学は以下のように非常に簡単化される。特に曲率 2-形式は、 $U(1)$ が可換であることから $A \wedge A = 0$ となる。このとき (44) で定義した曲率 2-形式 F は

$$F = dA + 0 = dA \quad (47)$$

与えられる。また、ビアンキ恒等式 (46) は (47) を代入すると

$$DF = dF + A \wedge dA - dA \wedge A = dF + 0 = dF = 0 \quad (48)$$

と簡単になる。これは、(47) から明らかに成立しなければならない関係式である。以下に示すように (48) は、マクスウェル方程式 (2) であることが確認できる (6.2 参照)。また、残りのマクスウェル方程式 (1) は、双対なテンソルを、左肩に * をつけて

$${}^*F_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\varepsilon_{\alpha\beta\mu\nu}F^{\alpha\beta}, \quad {}^*J_{\mu\nu\rho} = \varepsilon_{\alpha\mu\nu\rho}J^\alpha \quad (49)$$

と定義すれば

$$D^*F = d^*F = \mu_0 {}^*J \quad (50)$$

と書ける (6.2 参照)。ここで、 ε_{ijkl} はレヴィ・チビタの記号²⁾で

$$\varepsilon_{ijkl} = \begin{cases} +1 & (i, j, k, l) \text{ が } (1, 2, 3, 4) \text{ の偶置換の場合} \\ -1 & (i, j, k, l) \text{ が } (1, 2, 3, 4) \text{ の奇置換の場合} \\ 0 & (i, j, k, l) \text{ に同じものがある場合} \end{cases}$$

により定義される。

6.2 マクスウェル方程式であることの確認

ここで、(48) はマクスウェル方程式 (2) であり、(50) はマクスウェル方程式 (1) であることを確認する。電場 $E = (E_1, E_2, E_3)$ と磁場 $B = (B_1, B_2, B_3)$ および

$$E_i = cF_{i0} = -cF_{0i}, \quad B_i = \frac{1}{2}\varepsilon_{ijk}F_{jk} \quad (51)$$

を導入すると，電磁テンソル $F_{\mu\nu}$ は

$$(F_{\mu\nu}) \equiv (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = \begin{pmatrix} 0 & F_{01} & F_{02} & F_{03} \\ F_{10} & 0 & F_{12} & F_{13} \\ F_{20} & F_{21} & 0 & F_{23} \\ F_{30} & F_{31} & F_{32} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{E_1}{c} & -\frac{E_2}{c} & -\frac{E_3}{c} \\ \frac{E_1}{c} & 0 & B_3 & -B_2 \\ \frac{E_2}{c} & -B_3 & 0 & B_1 \\ \frac{E_3}{c} & B_2 & -B_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (52)$$

である．

最初に，(48) はマクスウェル方程式 (2) であることを証明する．(43) を (48) に代入すると

$$\begin{aligned} dF &= d\left(\frac{1}{2}F_{\mu\nu}dx^\mu \wedge dx^\nu\right) \\ &= d(F_{01}dx^0 \wedge dx^1 + F_{02}dx^0 \wedge dx^2 + F_{03}dx^0 \wedge dx^3 \\ &\quad + F_{12}dx^1 \wedge dx^2 + F_{13}dx^1 \wedge dx^3 + F_{23}dx^2 \wedge dx^3) \\ &= \frac{\partial}{\partial x^2}F_{01}dx^2 \wedge dx^0 \wedge dx^1 + \frac{\partial}{\partial x^3}F_{01}dx^3 \wedge dx^0 \wedge dx^1 + \frac{\partial}{\partial x^1}F_{02}dx^1 \wedge dx^0 \wedge dx^2 \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x^3}F_{02}dx^3 \wedge dx^0 \wedge dx^2 + \frac{\partial}{\partial x^1}F_{03}dx^1 \wedge dx^0 \wedge dx^3 + \frac{\partial}{\partial x^2}F_{03}dx^2 \wedge dx^0 \wedge dx^3 \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x^0}F_{12}dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \frac{\partial}{\partial x^3}F_{12}dx^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \frac{\partial}{\partial x^0}F_{13}dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x^2}F_{13}dx^2 \wedge dx^1 \wedge dx^1 + \frac{\partial}{\partial x^0}F_{23}dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial}{\partial x^1}F_{23}dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= \left(\frac{\partial}{\partial x^2}F_{01} - \frac{\partial}{\partial x^1}F_{02} + \frac{\partial}{\partial x^0}F_{12}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \\ &\quad + \left(\frac{\partial}{\partial x^3}F_{01} - \frac{\partial}{\partial x^1}F_{03} + \frac{\partial}{\partial x^0}F_{13}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + \left(\frac{\partial}{\partial x^3}F_{02} - \frac{\partial}{\partial x^2}F_{03} + \frac{\partial}{\partial x^0}F_{23}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &\quad + \left(\frac{\partial}{\partial x^1}F_{23} - \frac{\partial}{\partial x^2}F_{13} + \frac{\partial}{\partial x^3}F_{12}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= \left(-\frac{1}{c}\frac{\partial E_1}{\partial x^2} + \frac{1}{c}\frac{\partial E_2}{\partial x^1} + \frac{\partial B_3}{c\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \left(-\frac{1}{c}\frac{\partial E_1}{\partial x^3} + \frac{1}{c}\frac{\partial E_3}{\partial x^1} - \frac{\partial B_2}{c\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + \left(-\frac{1}{c}\frac{\partial E_2}{\partial x^3} + \frac{1}{c}\frac{\partial E_3}{\partial x^2} + \frac{\partial B_1}{c\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \left(\frac{\partial B_1}{\partial x^1} + \frac{\partial B_2}{\partial x^2} + \frac{\partial B_3}{\partial x^3}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= \frac{1}{c}\left(\frac{\partial E_2}{\partial x^1} - \frac{\partial E_1}{\partial x^2} + \frac{\partial B_3}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 - \frac{1}{c}\left(\frac{\partial E_1}{\partial x^3} - \frac{\partial E_3}{\partial x^1} + \frac{\partial B_2}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + \frac{1}{c}\left(\frac{\partial E_3}{\partial x^2} - \frac{\partial E_2}{\partial x^3} + \frac{\partial B_1}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \left(\frac{\partial B_1}{\partial x^1} + \frac{\partial B_2}{\partial x^2} + \frac{\partial B_3}{\partial x^3}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= 0. \end{aligned}$$

すなわち，マクスウェル方程式 (2)

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

を得る．

続いて，(50) はマクスウェル方程式 (1) であることを証明する．(52) の電磁テンソル $F_{\mu\nu}$ の添え字の上げ下げは，計量

$$g_{\mu\nu} = (-1, 1, 1, 1) \quad (53)$$

よるとすれば，

$$(*F_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 0 & B_1 & B_2 & B_3 \\ -B_1 & 0 & \frac{E_3}{c} & -\frac{E_2}{c} \\ -B_2 & -\frac{E_3}{c} & 0 & \frac{E_1}{c} \\ -B_3 & \frac{E_2}{c} & -\frac{E_1}{c} & 0 \end{pmatrix} \quad (54)$$

を得る．ここで左肩の*は双対テンソルを表す．結局 $*F_{\mu\nu}$ は， $F_{\mu\nu}$ で $B_i \rightarrow \frac{E_i}{c}, E_i \rightarrow -cB_i$ として得られることが分かる．この変換に関する規則を用いて $D*F = d*F$ を同様に計算すると， $c^{-2} = \mu_0\varepsilon_0$ であったことに注意して

$$\begin{aligned} d*F &= d\left(\frac{1}{2}*F_{\mu\nu}dx^\mu \wedge dx^\nu\right) \\ &= \frac{1}{c}\left(-c\frac{\partial B_2}{\partial x^1} + c\frac{\partial B_1}{\partial x^2} + \frac{1}{c}\frac{\partial E_3}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 - \frac{1}{c}\left(-c\frac{\partial B_1}{\partial x^3} + c\frac{\partial B_3}{\partial x^1} + \frac{1}{c}\frac{\partial E_2}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + \frac{1}{c}\left(-c\frac{\partial B_3}{\partial x^2} + c\frac{\partial B_2}{\partial x^3} + \frac{1}{c}\frac{\partial E_1}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{1}{c}\left(\frac{\partial E_1}{\partial x^1} + \frac{\partial E_2}{\partial x^2} + \frac{\partial E_3}{\partial x^3}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= -\left(\frac{\partial B_2}{\partial x^1} - \frac{\partial B_1}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial E_3}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \left(\frac{\partial B_1}{\partial x^3} - \frac{\partial B_3}{\partial x^1} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial E_2}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad - \left(\frac{\partial B_3}{\partial x^2} - \frac{\partial B_2}{\partial x^3} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial E_1}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{1}{c}\left(\frac{\partial E_1}{\partial x^1} + \frac{\partial E_2}{\partial x^2} + \frac{\partial E_3}{\partial x^3}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= -\left(\frac{\partial B_2}{\partial x^1} - \frac{\partial B_1}{\partial x^2} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E_3}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \left(\frac{\partial B_1}{\partial x^3} - \frac{\partial B_3}{\partial x^1} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E_2}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad - \left(\frac{\partial B_3}{\partial x^2} - \frac{\partial B_2}{\partial x^3} - \mu_0\varepsilon_0\frac{\partial E_1}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{1}{c\varepsilon_0}\left(\varepsilon_0\frac{\partial E_1}{\partial x^1} + \varepsilon_0\frac{\partial E_2}{\partial x^2} + \varepsilon_0\frac{\partial E_3}{\partial x^3}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &= -\mu_0\left(\frac{\partial H_2}{\partial x^1} - \frac{\partial H_1}{\partial x^2} - \frac{\partial D_3}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \mu_0\left(\frac{\partial H_1}{\partial x^3} - \frac{\partial H_3}{\partial x^1} - \frac{\partial D_2}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad - \mu_0\left(\frac{\partial H_3}{\partial x^2} - \frac{\partial H_2}{\partial x^3} - \frac{\partial D_1}{\partial t}\right)dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{1}{c\varepsilon_0}\left(\frac{\partial D_1}{\partial x^1} + \frac{\partial D_2}{\partial x^2} + \frac{\partial D_3}{\partial x^3}\right)dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \quad (55) \end{aligned}$$

が得られる．一方，

$$\mu_0 *J = c\rho dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 - \mu_0 j_1 dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \mu_0 j_2 dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 - \mu_0 j_3 dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \quad (56)$$

であるので，(55),(56)より

$$\mu_0\left(\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\right) = \mu_0(j_1, j_2, j_3), \quad \frac{1}{c\varepsilon_0}\nabla \cdot \mathbf{D} = \mu_0 c\rho \quad (57)$$

を得る．整理すると(57)は結局

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j}, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (58)$$

となる．すなわち，マクスウェル方程式(1)である．ここで，(58)において， $\mathbf{j} = (j_1, j_2, j_3)$ ， $\mathbf{J} = (c\rho, \mathbf{j})$ である．

■

7 おわりに

筆者は，幾何学的なアプローチでマクスウェルの方程式を長年考察してきた「特殊相対論は電磁気学に始まり，電磁気学に終わるといっても過言ではない」¹⁰⁾から推察されるように，マクスウェル方程式は特殊

相対論とは深く関わっており、4次元で定式化するのが自然である。実際、4次元ミンコフスキー空間において定式化すると、これ以上の簡潔な表現はないと確信させるほど整理された方程式が得られる。すなわち、マクスウェル方程式の最も簡潔と思われる表現は(3)、(4)あるいは(5)、(6)であることを数年かけて確認した。その表現式は、(3)、(4)は微分形式の理論、(5)、(6)は(電磁気学の一般化としての)ゲージ理論により導出されるので、見かけ上の形式は異なるがその内容は同等である。

今後の課題は、このようにして確認できた簡潔なマクスウェル方程式を、如何に離散化するかである。基本的には「微分形式の積分法」、特にその数値積分法が主題となる。ベクトル解析によるマクスウェル方程式(1)、(2)に対しては、境界要素法、有限要素法をはじめ非常に多くの数値計算法が実用化されている。これらの方法に相当する計算法を、境界値の組み込み法を含め、今後開発する予定である。

なお、本文は多くの参考文献によっているが、解説にも重きを置いているので、有用と思われる場合は、数式展開は省略せず原著より丁寧に冗長を厭わず導出過程を示している。

参考文献

- 1) 中野董夫：物理入門コース9「相対性理論」岩波書店、(2006.4)
- 2) 和達三樹：理工系の基礎数学10「微分・位相幾何」岩波書店、(2005.5)
- 3) 石川雄二郎：「微分形式によるマクスウェル方程式の4次元定式化」愛知工科大学紀要 第7巻、(2010.3)
- 4) 菅野礼司：「微分形式による特殊相対論」丸善、(1996.10)
- 5) 丹野修吉：「多様体の微分幾何学」実教出版、(1990.11)
- 6) 中原幹夫：「理論物理学のための幾何学とトポロジー」ピアソン・エデュケーション、(2005.6)
- 7) 小林昭七：「接続の微分幾何とゲージ理論」裳華房、(2007.1)
- 8) 矢野健太郎：「接続の幾何学」森北出版、(1977.7)
- 9) 小林昭七：「曲線と曲面の微分幾何」裳華房、(1977.8)
- 10) 佐武一郎：「リー群の話」日本評論社、(1987.11)
- 11) 砂川重信：「理論電磁気学」紀伊國屋書店、(1975.4)
- 12) 守末利弥：「数値電磁気学のためのゲージ理論」森北出版、(1996.4)

授業評価アンケートに関する一考察

- 満足度との観点から -

大迫尚行*

(2010年9月30日受理)

A Study on the Questionnaire Results for Evaluating Mathematical Classes

- From the viewpoint of student satisfaction -

Naoyuki Ohsako*

(Received September 30, 2010)

Abstract

For the questionnaire results of the author's mathematical classes, a regression analysis was applied and the relationships between student satisfaction and other factors were analyzed. The results show that the student satisfaction is a close relation with understanding grasp by the teacher. It implies that teachers should make all possible efforts to grasp whether almost students can understand well.

キーワード：授業評価アンケート，授業満足度，理解把握，回帰分析

Keywords：Questionnaire for evaluating classes, Student satisfaction, Understanding grasp, Regression analysis

1. はじめに

本学では、学生による授業評価アンケート結果について毎年度公開しているが、それについての詳細な分析はこれまでなされてこなかった。そこで、著者が担当する数学系科目の授業評価アンケート結果を分析し、平成22年4月6日にAUTホールで開かれたFDミーティングにおいて「授業評価についての所感」というテーマで発表した。本論文は、その資料をもとに補足し、まとめたものである。

近年、少子化と理工系離れにより、入学者数が定員を充足しない大学が増しており、本学もその例外ではない。この状況下において、教育の問題の根源を探るためには、大学志願者の学力を偏差値という尺度ではかり、学力および学生数の全体的な分布を俯瞰してみる必要がある。これによって入学者の状況・学力が明らかになり、

それに応じた教育のあり方が、実のあるものとして論じられるのではないかと考える。

本学工学部では、学生数確保の戦略として、平成19年度から、従来の機械システム工学科と電子情報工学科の2学科体制から、機械システム工学科、ロボットシステム工学科および情報メディア学科の3学科体制に改組した。これに伴い、カリキュラムも大幅に変わった。特に情報メディア学科は、他学科と異なり、文系志向の学生（デザイン系）と理系志向の学生（システム系）の2種類のタイプが混在する。このため、Fig.1の情報メディア学科の平成22年度の基礎教育科目の講義概要に示すように、数学系科目は全て選択科目となっている。一方、基礎教育科目群の1期から3期までの全ての選択科目26単位中、数学系の科目は14単位と過半数を占めている。このように、科目数が理系に偏っているため、デザイン系の学生は科目選択の幅が狭く、数学系科目の履

* 愛知工科大学工学部，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

修を余儀なくされている．このようなカリキュラムの整合性が必ずしもとれていない状況下で，学生が不満感を募らせ，それが授業評価に反映されているのではないかと考え，このことが授業評価結果について分析してみる契機となった．

		1期(1年前期)	2期(1年後期)	3期(2年前期)
基礎教育科目	総合科目	哲学 2	心理学 2	社会学 2
	体育系科目	レクリエーション 2	スポーツと健康 2	政治学 2
基礎科目群	基礎数学 I	2	2	2
	基礎数学 II	2	2	2
	線形代数 I	2	2	2
	線形代数 II	2	2	2
	解析学	2	2	2
	幾何学	2	2	2
	コンピュータサイエンス I	2	2	2
	コンピュータサイエンス II	2	2	2
	技術文書作成技術	2	2	2
	化学	2	2	2
基礎物理	2	2	2	

選択科目 26 単位中
数学は 14 単位
(過半数を占める)

Fig.1 平成 22 年度講義概要 (- J6 -) 一部抜粋
情報メディア学科 (1 期 ~ 3 期) 基礎教育科目

本論文では，著者の担当する数学系科目に対する学生による授業評価アンケート結果に基づき，質問項目間の回帰分析を行い，教育効果を上げるためには何が重要で効果的な要素であるかを明らかにしていく。

2. 本学学生の基礎学力

大手予備校の代々木ゼミナールが発表した平成 22 年度の私立大学の偏差値に基づいて，学生数と全国私立大学の学部数を整理してみれば Fig.2 に示ようになる．横軸は偏差値を区間ごとに分けたものである．縦軸はそれぞれの区間に属する正規分布を仮定した受験者数の相対度数および私立大学の学部数の相対度数である．

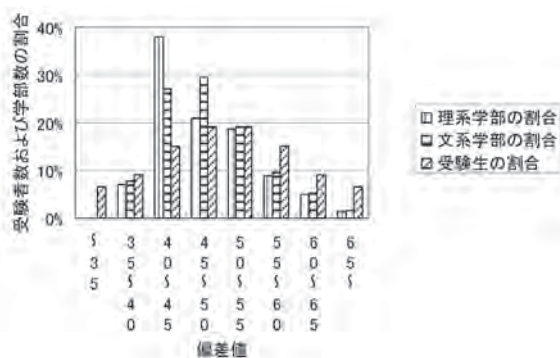


Fig.2 H.22 の私立大学の偏差値の分布

代々木ゼミナールの評価では本学の偏差値を 40 としている．この数値は，正規分布を表すガウス曲線の変曲点に相当しているが，偏差値が 40 から 45 の区間に注目すれば，私立大学の理系学部数の割合が 4 割近くを占めており，文系学部数も 3 割近くあり，競合する私立大学

の学部数が最も多い区間となっている．これに対して志願者数の割合は，全体に対して 15% 程度で，相対的に低い．一方，偏差値が 35 から 40 の区間においては，学部数および受験者数の割合がともに低い．また，著者が以前高校訪問したときの進路指導の教諭によれば，偏差値が低いこれらの区間に属する生徒は，数学や物理を敬遠し，理系学部よりも文系学部へ進学する者が多いとのことである．したがって，本学の属する偏差値の区間は，学生確保が最も厳しい区間であるといえる．偏差値 40 より上の大学を目指していた学生が，その大学の受験に失敗して，本学に入学してくる場合も充分あり得る．そのような学生の中には，意中の大学に入学できなかったため，目的意識が希薄で，学習意欲も乏しいという学生が多いと思われる．より偏差値の高い大学に位置付けられることが重要であることを Fig.2 は端的に示している．

本学の一般入試の受験者数は年々減少し，推薦入試，特に指定校推薦からの入学者数が増している．推薦入学者は，一般に，比較的基礎学力が低い．このため，1 年次の数物系基礎科目および英語は，習熟度別にクラス分けして，きめ細かい指導を行っている．しかしながら，それでも授業内容が理解できない学生も散見され，そのような学生は，科目担当者のオフィスアワーおよび基礎教育センターにおける個別指導（高橋義則教授）で対応している．意欲的な学生は，習熟度別授業と個別指導が功を奏して，基礎学力が向上していることが，オリエンテーション時に実施される素養試験の結果に現われている．

その一方で，基礎学力も低く，目的意識を持たずに入学してきた意欲でない学生は，授業に不満感を持ち，否定的な授業評価をするのではないかと推察される．その背景には，高校までの数学教育が暗記主体で，内容を十分に把握させるまでになされておらず，数学的に思考する習慣のない学生を生じさせ，ひいては，数学嫌いの学生も生み出している．内容をしっかり説明した上で，学生自らに考えさせ，答えを出させる授業が理想であるが，授業時間の都合上，内容には深く立ち入らず，結果のみを数多く暗記させ，答えにいたる途中経過の指導が充分になされていなかったためではないかと推察している．そのような学生に対して，数学の中に秘めた面白さを伝えることで数学に関心をもたせ，学生自らに考えさせる習慣を持たせていくことが，数学教師の使命であると考えている．要するに，学生に自分で考えて答えを出す姿勢を身につけさせることができれば，学習意欲も上がり，授業評価の満足度も高まることが期待できると考えている．

3. 著者の授業に対する学生の評価

平成19年度から21年度までに著者が担当した科目を、学科別および開講期別に Table 1 に示す。

Table 1 著者の担当科目リスト

学科	科目群	1期(1年前期)	2期(1年後期)	3期(2年前期)
K	基礎教育科目 (工学基礎科目群)	基礎数学Ⅰ、Ⅱ	線形代数Ⅰ	
R	基礎教育科目 (工学基礎科目群)	微分積分Ⅰ	微分積分Ⅱ	
J	基礎教育科目 (基礎科目群) 専門教育科目 (専門科目群)	基礎数学Ⅰ、Ⅱ	線形代数Ⅰ プログラミング	幾何学

(注) K科：機械システム工学科，R科：ロボットシステム工学科，J科：情報メディア学科

授業評価アンケートの項目は全部で15項目あり，そのうち学生自身の評価項目5（理解度）を含めて教員側にかかわる項目（6～15）を Table 2 に示す．各質問項目に対する回答の選択肢は肯定的な順にアからオである．本学では，これら評価回答に対し，評価の最上位（ア）を5，最下位（オ）を1とする5段階で重みを付けて評価を数値化し，全教員の平均値と対比して評価できるような形をとっている．

Table 2 授業評価アンケート項目（一部抜粋）

自分自身の評価	
5	理解度 ア:90%以上 イ:70%台 ウ:50~60%台 エ:20~40%台 オ:殆ど分からない
授業の評価	
6	教科書・教材の適切性 ア:適切 イ:概ね適切 ウ:普通 エ:やや不適切 オ:不適切
7	内容・意義・背景の説明 ア:詳しくされた イ:概ねされた ウ:普通 エ:少し オ:無し
8	話し方 ア:聞き取り易い イ:概ね聞き取り易い ウ:普通 エ:あまり オ:聞き取り難かった
9	板書(OHP含む)の仕方 ア:分かり易い イ:概ね分かり易い ウ:普通 エ:少し分かりにくい オ:分かりにくい
10	理解把握(理解度をチェックしながら，丁寧に教えたか?) ア:丁寧 イ:概ね丁寧 ウ:普通 エ:あまり オ:丁寧ではない
11	進度 ア:分かり易い イ:概ね分かり易い ウ:普通 エ:少し分かりにくい オ:分かりにくい
12	教員態度 ア:感心 イ:概ね感心 ウ:普通 エ:あまり オ:感心なかった
13	授業中の準備保持 ア:良い イ:概ね良い ウ:普通 エ:少し騒がしい オ:騒がしくて授業にならなかった
14	授業分野への関心度の高まり ア:高まった イ:概ね高まった ウ:普通 エ:あまり オ:高まらなかった
15	授業の満足度 ア:満足 イ:概ね満足 ウ:普通 エ:あまり オ:不満

著者の担当科目で学科共通の科目の中から，基礎数学および線形代数 に対する平成19年度から21年度までの学生による授業評価の推移をそれぞれ Fig.3, Fig.4 に示す．図の縦軸は，各評価項目につき著者に対する授業評価10項目の値を積算して，その平均値を示してある．

これらの図において，線形代数 の平成19年度の情報メディア学科の評価以外は全て3.5以上で，いずれも全学平均を上回っている．ただし，学科改組年度である平成19年度の値は，情報メディア学科の評価が他学科と比べていずれも低く，特に線形代数 ではそれが顕著に現われており，かつ全学平均の値を大幅に下まわっている．しかし，年度が進むにつれ，後述するような授業

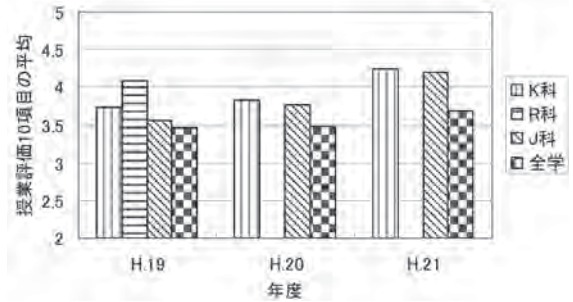


Fig.3 著者の担当する基礎数学 の授業評価の結果

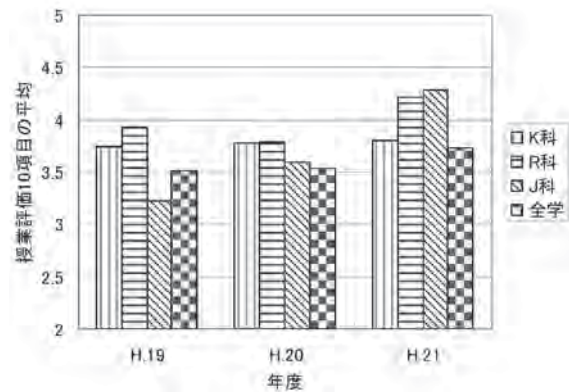


Fig.4 著者の担当する線形代数 の授業評価の結果

改善の効果が現われ，概ね評価が高くなっている．

一方，情報メディア学科向けの確率・統計と幾何学の授業に関しては，学生の要望からか，クラス担任を通して，退屈な数学の座学よりもソフトウェアを取り入れて欲しいとの依頼があり，授業にはソフトウェアの活用を試みた．しかしながら，授業準備に精力を注いだ甲斐もなく，学生による授業評価アンケート結果は思わしくなかった．

平成19年度の確率・統計および平成21年度の幾何学の授業評価の結果をそれぞれレーダーチャート Fig.5, Fig.6 に示す．多角形の頂点に時計回りに並んでいる5から15までの値はアンケート質問項目（Table 2）の番号であり，多角形の頂点から中心へ向かって並ぶ5から2までの数値は各質問項目に対する学生の評価値である．したがって，レーダーチャートにおいては，それぞれの項目ごとにプロットされている点が頂点に近いほど，学生からの授業評価が高く，逆に中心に近いほど評価が低いことを表している．

図から，いずれの科目も点線で表された全学平均の値を下まわっており，特に，確率・統計の全ての評価項目は4に比べて極めて低い評価であった．したがって，これらの授業は，学生にとって満足するものではなかったと考えられる．この原因を分析した結果を次章で述べるが，この分析結果は，後の授業改善に大きく結びついた．

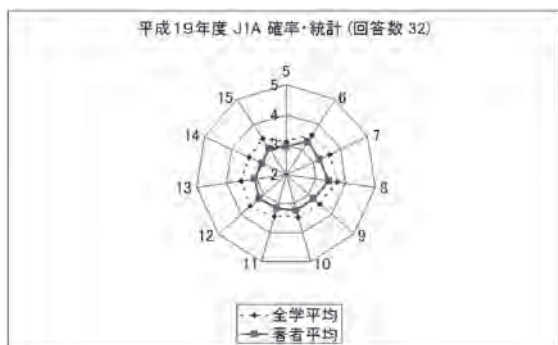


Fig.5 著者の担当する確率・統計の授業評価の結果

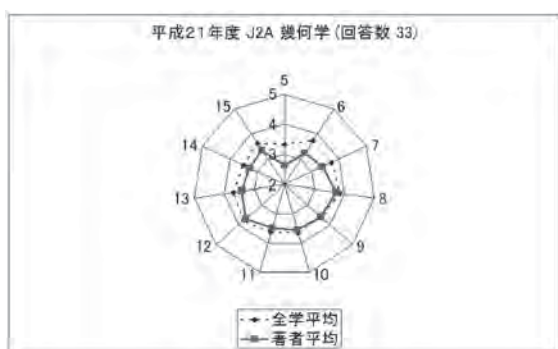


Fig.6 著者の担当する幾何学の授業評価の結果

4. 授業評価の満足度と他の評価項目との相関関係

平成 19 年度から 21 年度までの著者の担当科目 (Table 1) に対する学生の授業評価アンケート結果 (回答者数: 延べ 756 名) を分析した結果について述べる。

授業評価アンケート項目 (Table 2) の中で最も重要な項目は最後の項目である「授業の満足度」であり、これは評価全体の包括的な指標であるとも考えられる。そこで、著者の授業に対する 5 ~ 14 項目と満足度との評価結果について、それらの相関係数および回帰直線の傾きを算出してみれば、Table 3 のようになる。

表において、特に相関係数が 0.85 以上でかつ回帰直線の傾きが 0.95 以上の値の項目は、9 の「板書の仕方」、10 の「理解把握」および 12 の「教員熱意」の 3 項目に

Table 3 著者の授業に対する満足度と他の項目との相関係数と回帰直線の傾き

番号	内容	相関係数	回帰直線の傾き
5	理解度	0.70	0.50
6	教科書・教材の適切度	0.78	0.88
7	内容・意義・背景の説明	0.83	1.06
8	話し方	0.82	0.93
9	板書(OHP含む)の仕方	0.86	0.97
10	理解把握	0.89	0.95
11	進度	0.85	0.77
12	教員熱意	0.86	0.96
13	授業中の環境保持	0.68	0.75
14	授業分野への関心度の高まり	0.80	0.87

なり、これらは他のアンケート項目の中でも特に重要な指標であると考えられる。これらの回帰分析結果を図示すれば Fig.7, Fig.8 および Fig.9 のようになる。

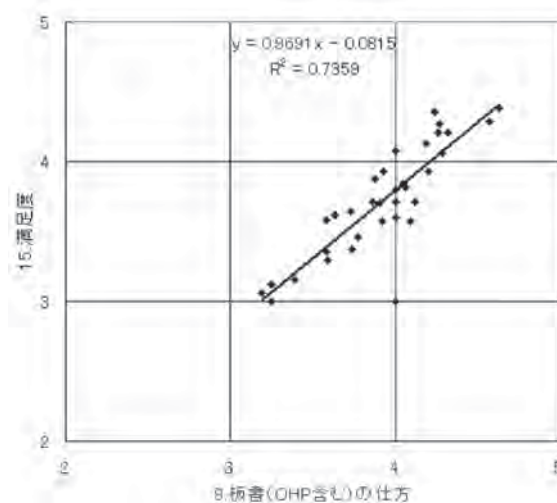


Fig.7 板書の仕方と満足度との回帰分析結果

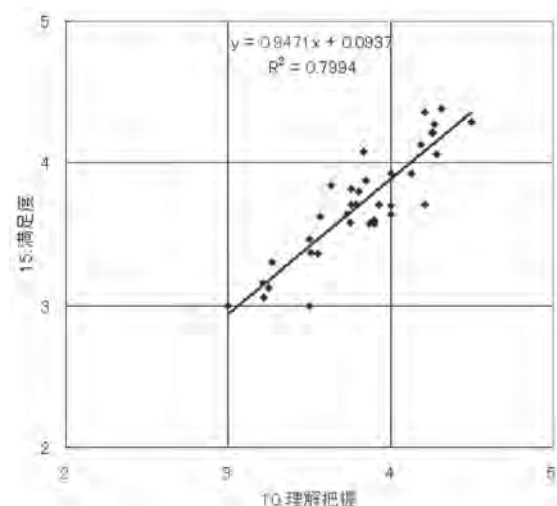


Fig.8 理解把握と満足度との回帰分析結果

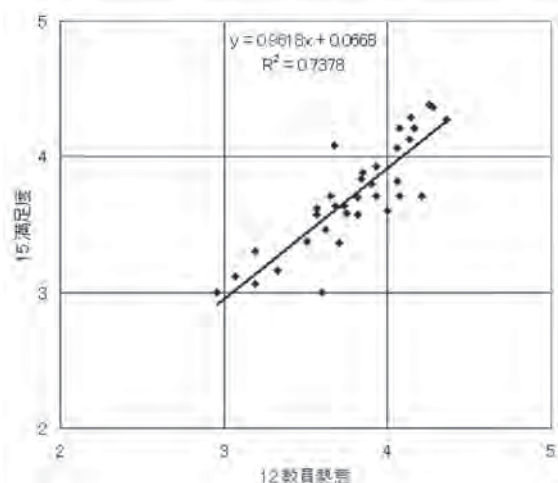


Fig.9 教員熱意と満足度との回帰分析結果

それぞれの図中に記載してある一次関数の式は回帰直線を表し、定数 R は相関係数であり、その 2 乗は決定係数とよばれ、この値が大きいほど相関関係は強い^[1]。

図から、高い相関係数が示すとおり、ほぼ回帰直線付近にデータが分布している。回帰直線の傾きの数値もほぼ 1 であるから、これら 3 項目のどれかの評価が 1 ポイント上がれば、それに伴い満足度も 1 ポイント上がり、授業改善に大きく寄与することを示している。

これら 3 項目のうち「教員熱意」については、一般に、教員と学生との温度差があると考えられるので、改善の具現化が難しい。そこで、「教員熱意」におよぼす要因を掘り下げたため、「教員熱意」と残り 2 項目「板書の仕方」と「理解把握」との相関関係を回帰分析によって求めてみれば Fig.10 および Fig.11 のようになる。

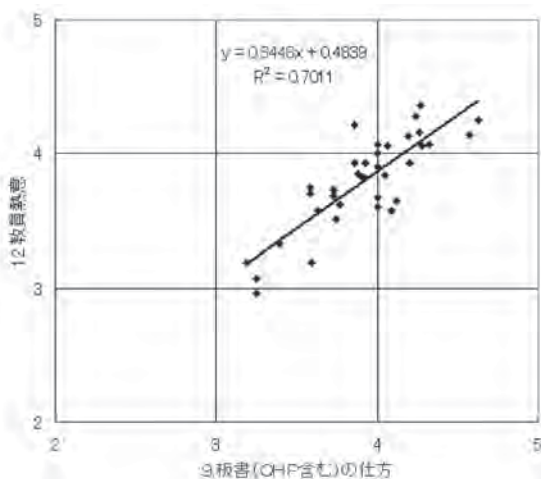


Fig.10 板書の仕方と教員熱意との回帰分析結果

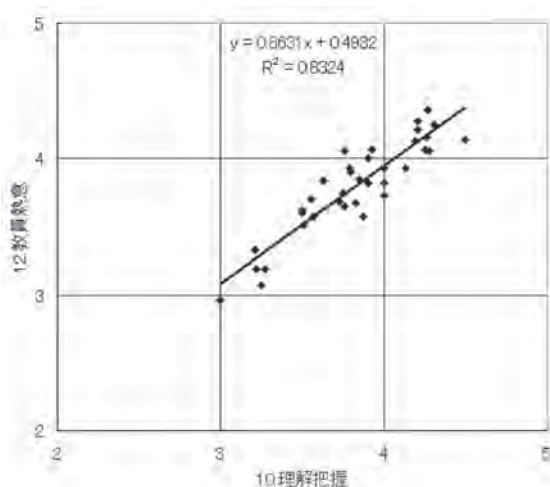


Fig.11 理解把握と教員熱意との回帰分析結果

両図において、「教員熱意」との相関係数 R は、「板書の仕方」に関しては 0.84、「理解把握」に関しては

0.91 である。この結果より、「理解把握（理解度をチェックしながら、丁寧に教えたか？）」の項目の評価が上がれば、それに伴い教員熱意および満足度が対応して上がることが分かる。したがって、昔のように大学の教員が一方向的に説明し、学生は板書された内容をノートする伝統的な講義スタイルを踏襲することでは、今の学生は満足しないことが分かる。

著者は、授業内容のポイントと例題を手短に説明し、できるだけ学生に考えさせる時間を与えるために、授業に演習を取り入れている。学生に演習の強要はしないが、黒板で解答または提出すれば成績に加点することを伝えると、ほとんどの学生は演習に熱心に取り組んでくれる。学生が黒板で演習を解答した後に、著者が黒板で解説し、解答の仕方を指導する。学生の提出した演習は、個別に添削指導することでフィードバックを行っている。学生には、正解よりもむしろ自主的に取り組んで考える姿勢を求めている。学生の演習の進捗状況によっては、授業の進度が遅れ、授業内容を一部割愛することもありうるが、重要な内容に絞り込んであれば問題はないと考えている。演習は、学生の自主性の向上と自分の考えに自信を持たせるための一つの良い手段だと考えている。

前述 (Fig.5, Fig.6) のように、著者が担当する科目のうち、ノートパソコンを活用した「確率・統計」と「幾何学」の授業評価の結果は思わしくなかった。いずれのクラスも受講者数は 30 名程度であるが、各学生のノートパソコンの環境が必ずしも統一されておらず、そのような状況下で、各学生の操作のフォローが著者一人では充分に行うことができなかった。したがって、学生の理解把握が疎かになったことが要因で、満足度が低かったと考えられる。この反省点を踏まえて、計算機を授業で活用する際には、統一された計算機環境の下で実施し、個人のノートパソコンは授業の予習、復習用に活用したほうが望ましいと考えるようになった。以後、計算機を活用する授業は、計算機室で実施している。

また、幸いなことに、平成 20 年度以降、確率・統計の授業は習熟度別ごとに分かれて実施され、著者の担当する basic クラスでは、教員 2 人で対応している。一方、幾何学の授業では、パソコンを活用し始めた平成 21 年度は、準備と操作の対応に苦慮したが、平成 22 年度には院生のティーチングアシスタント 2 人が計算機ソフトウェアの操作のフォローに加わり、負担が軽くなった。いずれの科目も理解把握が以前と比べて行いやすくなったので、いずれの科目とも授業評価に大幅な改善が見られた。

5. おわりに

本学志願者の学力を偏差値の観点から全国の入学生数や私立大学の学部数と対比して考察した。また、著者の数学授業に対する学生の授業評価アンケート結果に基づき回帰分析して、以下の結論を得た。

1) 本学の偏差値が代々木ゼミナールが発表した数値 40 の通りであるとすれば、この値より高い偏差値 40 から 45 の区間においては、私立大学の学部数が相対的に多く、かつ受験者数は少ない。一方、偏差値 35 から 40 の区間においては、学部数および受験者数の割合がともに少ない。偏差値が低いこれらの区間に属する受験者は、文系志向の傾向が強いので、大学として学生確保と入学者への教育に、より一層の努力が必要になる。

2) 学生の授業評価アンケートの回帰分析結果は、「板書の仕方」、「理解把握（理解度をチェックしながら、丁寧に教えたか?）」および「教員熱意」が「授業の満足度」と強い相関関係にあることを示している。その中でも「理解把握」は、「教員熱意」とも強い相関関係にあり、授業改善には特に重要な指標である。

謝辞

著者に本論文を執筆するように薦めてくださった基礎教育センター長の峯村吉泰教授および論文の推敲に尽力いただいた情報メディア学科の吉田茂教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 田久浩志, Excel で学ぶやさしい統計学, オーム社, (2005)

報告

ドイツ・イギリスにおけるメディアアート・ビデオアート 視察についての報告書

杉森順子

(2010年9月30日受理)

Recent Tendencies of Media/Video Arts in Germany and the U.K.

Junko Sugimori

(Received September 30, 2010)

キーワード：メディアアート, ビデオアート, 映像インスタレーション

Keywords : media art, video art, video installation

「オブジェ¹を立体スクリーンとするビデオアート¹¹の効果的な投影方法」の研究活動の一環として、世界的な現代美術の拠点である、ドイツ・イギリスの現代アート(コンテンポラリーアート)をメディアアート・ビデオアートを中心に視察を行った。

本研究の目的は、オブジェのみに投影するシステムを開発して、美術的な映像表現の支援をする事である。システムの開発を通じて、工学者とアーティストが協力する事で、工学と芸術に対する理解を相互に深め、共に発展していく事も目指している。

オブジェを立体スクリーンとして投影する場合、立体(オブジェ)のシルエットを抽出し、マスクを作成して映像を合成する。この作業が手作業の場合、オブジェと映像を正確に一致させる事は難しく、投影時に映像ずれが生じ易い。研究を進めるにあたり、他にもこの研究と同じ映像ずれの問題が生じている事例があるか、あるいは立体に投影するニーズがあるかを確認するのが視察の目的である。

また、近年美術館・博物館内の展示に、プロジェクターや大型モニター、コンピュータ等の機器が、様々な形で利用されている。映像という視点から、海外におけるハードウェアの活用事例を視察する事で、今後のこの研究の発展や新たな活用方法を見出す事も目指している。

同時に、美術的な映像表現の支援には、単に工学的な側面からだけではなく、背景にある文化、歴史、美術的な周辺状況について知り、ビデオ・メディアアートに対する理解をより深める事が欠かせない。そのために、メ

ディアアート以外のファインアート系の美術館や博物館等も視察した。

筆者自身が映像インスタレーション作品の制作を進めるうえで、他のアーティストの作品を実際に自分自身の目で見ると、あるいは、空間感を感じ取る事も重要な要素である。

こうした観点から見て、印象的な事例について報告したい。

1. ZKM Center for Art and Media Karlsruhe

(1) ZKM 施設概要

ZKMはドイツのフランクフルトから電車で一時間ほどの地方都市、カールスルーエ市にあり、メディアアート・ビデオアートによる世界有数の現代美術館である。



Fig. 1 ZKM Center for Art and Media Karlsruhe

美術館は、カールスルーエ造形大学に隣接し、メディアアートに関係した情報技術や理論の研究、デジタル作品のアーカイブが行なわれている。(Fig. 1)

館内には、ブルース・ナウマン Bruce Nauman, レベッカ・ホルン Rebecca Horn, ヴォルフ・フォステル Wolf Vostell, ナム・ジュン・パイク白南準, シュテファン・フォン・ヒューネ Stephan von Huene, マリー・ジョーラフォンテーヌ Marie-JoLafontaine, 藤幡正樹といった著名なアーティストの映像・サウンドインスタレーション, インタラクティブ作品が常設展示されている。(Fig. 2, 3, 4)

展示には、プロジェクター、コンピュータなどの機器が数多く使用されていた。筆者自身が、資料館などの展示映像を手がけた経験から、このような機器設置や運営には技術的なサポートと多額のコストが掛かると推測出来る。こうした運営資金は公的な機関によって提供されていると聞いた。資金面から見ても、ドイツが日本よりアートの支援環境が整っている事が伺える。

館内には ZKM EXHIBITIONS としてビデオアートの fast forward 2. The Power of Motion 展, Jürgen Klauke .

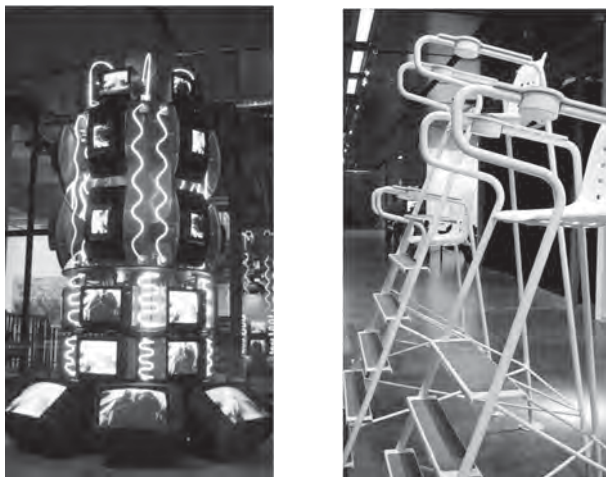


Fig. 2, 3



Fig. 4 ZKM 館内

Aesthetic Paranoia 展, Robert Wilson . VIDEO Portraits 展などが同時に開催されていた。

(2) ウォルフ・カーレン Wolf Kahlen 展

ZKM Media Museum では「ウォルフ・カーレン Wolf Kahlen . VideoTapes 1969-2010」が展示されていた。ウォルフ・カーレンはドイツのビデオアートの代表作家のひとりである。見学者が動かす、参加するといった、インタラクティブな作品が多くみられた。

3D用のメガネをかけ、円形のスクリーンに映された様々な映像をリモコンで選択すると、映像が飛び出して見える作品や、落ちてくる映像のシャボン玉を自分の影を使って、跳ね返すというエンタテインメント性のある作品も展示されていて興味深い。(Fig. 5)

こうしたインタラクティブな作品は、子供たちが興味を持って、意欲的に参加する姿が印象的である。



Fig. 5 Wolf Kahlen

(3) 共通の問題点

「オブジェを立体スクリーンとするビデオアートの効果的な投影方法」の研究目的は、任意の立体(オブジェ)に適応した映像(オブジェのみに投影)を合成するシステムを開発する事である。

これは、筆者自身が、オブジェに映像を投影する作品「R + R + R」を制作した過程で、映像データの作成が非常に難しく、オブジェと映像の相互に微妙な位置合わせが必要で、映像にずれが生じ易い事が分かった。

こうしたニーズから生まれたのが、今回の研究テーマである。(Fig. 6, 7)



Fig. 6 「R + R + R」Sugimori Junko

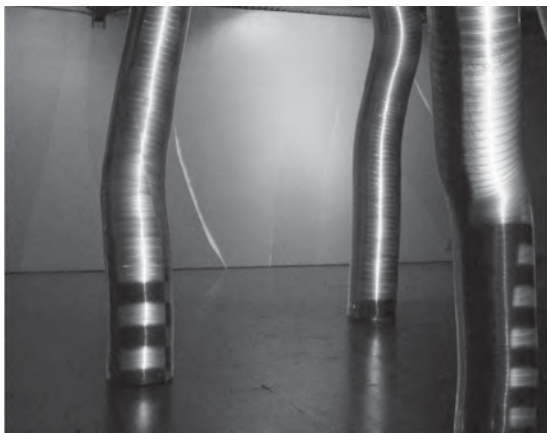


Fig. 7 オブジェとの映像ずれ(壁面) Sugimori Junko

同様に Wolf Kahlen も、白い直方体状のオブジェに斜め上方から4台のプロジェクターで映像を投影する作品を制作している。(Fig. 8)



Fig. 8 Wolf Kahlen

この作品でも、筆者の作品と同様に、直方体のオブジェに映像を投影すると、オブジェと映像がずれて映像がはみ出してしまうという問題が見られた。オブジェとプロジェクターからの映像を正確に合わす事が、いかに難しいかが伺える。

その結果、今回の研究テーマである「オブジェを立体スクリーンとするビデオアートの効果的な投影方法」の研究が、個人だけでなく他のアーティスト、あるいは作品を設置する美術館などのためにも有効な手段であり、活用の可能性を確認する事が出来た。(Fig. 9)

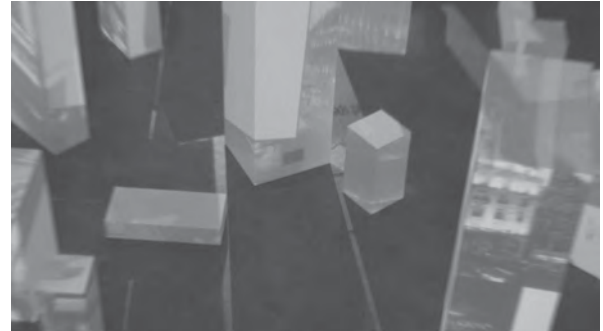


Fig. 9 オブジェとの映像ずれ(床面) Wolf Kahlen

2. ランゲ邸エスターズ邸美術館

Museum Haus Lange Museum Haus Esters

デュッセルドルフ近郊のクレフェート krefeld の住宅街に建つランゲ邸とエスターズ邸は、ミース・ファン・デル・ローエ Ludwig Mies van der Rohe に設計を依頼した個人住宅である。

ミース・ファン・デル・ローエは、バウハウスの第3代校長でありモダニズム建築を代表する建築家で、その後の建築界に大きな影響を与えた人物でもある。現在は2軒とも、クレフェート市の所有物となり、現代美術の美術館として公開されている。(Fig. 10)

ジュリアス・ポップ Julius Popp による、メディアアートが展示されていた。流れ落ちる水を機器でコントロールして水で文字を描く作品「BIT・FALL」などが映



Fig. 10 ランゲ邸エスターズ邸美術館

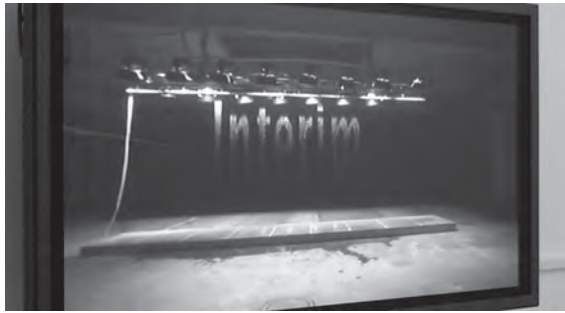


Fig. 11 Julius Popp

像で紹介されていた。(Fig. 11)

アドルフ・ルーザー Adolf Luther はキネティックアート、オプティカルアートの第一人者である。

ガラス、鏡など組み合わせて使い錯視を利用した作品などは、エレクトロニクスを使う事なく動きや図形が見えてくる。電氣的なメディアアートを見慣れた目には、時代を経たアナログ作品が新鮮に感じられた。(Fig. 12)

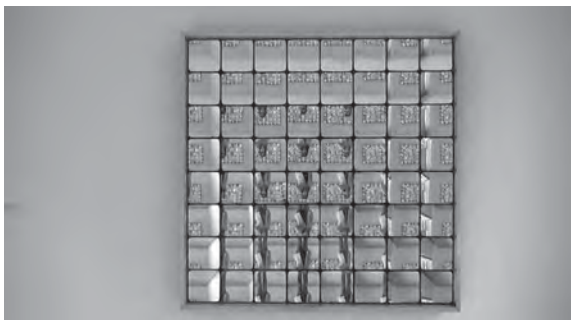


Fig. 12 Adolf Luther

3. コロンバ美術館 Art Museum Kolumba

ケルンの大司教区に2007年スイス人のペーター・ツムトール Peter Zumthor により設計されたコロンバ美術館は、ローマ人によって造られた遺跡の上に建てた構造となっている。

美術館は、教会が収集、保存してきたキリスト教関連のコレクションと、現代美術を一緒にして展示するという試みがなされていた。

こうした展示方法は、古いものに新たな価値を見出す事にも繋がると感じさせる。

4. アプタイベルク美術館 Museum Abteiberg

デュッセルドルフの郊外のメンヒェングラードバッハ Monchengladbach にあるアプタイベルク美術館は、オー

ストリアの著名な建築家であるハンス・ホライン Hans Hollein によって設計された建築である。(Fig. 13)



Fig. 13 アプタイベルク美術館

美術館内部は、様々な広さで、天井の高さも異なる部屋が、いくつかの階段でつながり、個性的な展示空間となっている。

マン・レイ Man Ray, ルチオ・フォンタナ Lucio Fontana, ヨゼフ・ボイス Joseph Beuys, ゲルハルト・リヒター Gerhard Richter などといったコンテンポラリーアートを中心に作品が収蔵されている。

クリスチャン・ボルタンスキー Christian Boltanski の作品は、ナチスによるユダヤ人への迫害の歴史が、今もドイツに影を落としている事を感じさせた。

ミルチャ・カントル MIRCEA CANTER は、ルーマニア生まれのアーティストで、特別展として、オブジェ展示と共に、映像作品の上映が館内数箇所で行われていた。(Fig. 14)

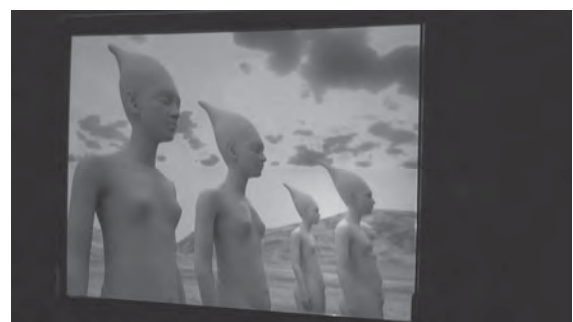


Fig. 14 MIRCEA CANTER

5. ケルン大聖堂 Kölner Dom

ケルンの大聖堂はゴシック様式の教会としては世界最大である。600年以上かけて完成した教会は、その大きさと存在感で見るものを圧倒し、また宗教の持つ力の強さを感じさせる。

第二時世界大戦で壊された、ケル大聖堂のステンドグラスの修復にあたり、ゲルハルト・リヒター Gerhard Richter がそのデザインを行った。ゲルハルト・リヒターは、2002年にニューヨーク近代美術館で作品展が開かれるなど、世界で最も注目を集めている画家のひとりである。



Fig. 15

このステンドグラスのデザインについては、賛否両論があるとも聞いたが、世界遺産の建築物を単に再現するのではなく、現代のアーティストとコレレーションするという試みが行われた事に注目した。(Fig. 15)

6. ホロコースト記念碑 Holocaust-Denkmal Berlin

ベルリン市の中心に第二次大戦でナチスにより大量虐殺されたユダヤ人の犠牲者を慰霊する、「虐殺されたヨーロッパのユダヤ人のための記念碑 Denkmal für die ermordeten Juden Europas」(通称)ホロコースト記念碑で、ピーター・アイゼンマン Peter Eisenman が設計した。(Fig. 16)

大型のコンクリートブロックが、グリッドに連なる様は墓石とも感じられ、無機質で異様な空間を作り出している。ブロックの中を歩くと迷路のなかに迷い込んだかのような、圧迫感・不安感を感じる。地下には、「情報センター」(資料館)が併設され戦争犠牲者についての展示がされていた。



Fig. 16 ホロコースト記念碑

7. ユダヤ博物館 Judisches Museum Berlin

ダニエル・リベスキンド Daniel Libeskind によって設計された館内には、床の平行が意識的にずらされた廊下、鋭角になった部屋、閉鎖的な空間など、歩くと何処か違和感や不安感を感じるように意図された構造の建物である。ユダヤの歴史や文化、迫害などについて紹介されている。

展示の一部に、プロジェクターによる演出やインタラクティブなコンテンツが利用されていたのも印象的であった。(Fig. 17, 18)

博物館を単にホワイトキューブの箱としてではなく、設計者が、展示と建築が一体の空間と捉えている事が伺える。



Fig. 17 映像コンテンツ



Fig. 18 デジタルコンテンツ

8. バウハウス アーカイブ Bauhaus archiv

バウハウス Bauhaus は、ヴァルター・グロピウス Walter Gropius が1919年、ワイマールに作った造形美術学校である。学校として存在したのは、わずか14年間と短い期間であるが、そこで生まれた合理主義・機能主義は、その後の建築・工芸・写真・デザインなど世界中の様々な分野に、現在も大きく影響を与えている。

バウハウスアーカイブでは、日本語オーディオガイド

機器で教育課程の内容についての説明や作品が紹介されていた。(Fig. 19)



Fig. 19 バウハウスアーカイブ

9. テイトモダン Tate Modern

2000 年を記念し、かつての火力発電所を改装してきた英国最大の現代美術館である。(Fig. 20)



Fig. 20 テイトモダン

フランシス・アリス Francis Alÿs 展
メキシコで活動しているベルギー人、フランシス・アリス Francis Alÿs の映像展が開かれていた。

映像作品の中には、一見ハプニングやドキュメンタリー的に、ありのままの映像を撮っている様に見せながら、実際は、シナリオに沿って絵コンテで構成し制作された、意図的な映像であるという点が興味深い。

ビデオアートと共に、ドローイングやそのコンセプトメイキングに関わる資料も展示され、映像だけの展示では見えにくい側面からも紹介されていた。

10. ロンドンのギャラリーとメディアアート

(1) サーペンタイン ギャラリー Serpentine Gallery

ロンドンのケンジントン公園になかにある小さな美術館で、近代・現代アーティストの作品を紹介している。

また、隣地に期間限定で、一流建築家にパピリオンの設計を依頼し、建築後カフェとして利用する試みを行っている。日本からも、伊東豊雄や SANAA が設計を担当している。

写真家のヴォルフガング・ティルマンス Wolfgang Tillmans 展が開かれていた。写真でありながら、抽象絵のような作品も見られ、またティルマンスのクオリティに対する強いこだわりを感じた。

また、作品をテープや虫ピン、クリップで留めて展示していたのも印象的である。こうした額を使わないラフなスタイルの展示方法は、ドイツ・ケルンのコルバイン美術館などいくつかでも見られた。

(2) サーチギャラリー Saatchi Gallery

サーチギャラリーは、広告代理店の創業者チャールズサーチのコンテンポラリーアートコレクションをもとに始められ、ダミアン・ハースト Damien Hirst などヤング・ブリティッシュ・アーティスト Young British Artists : YBA を見出した事でも知られている。現在も、若手アーティスト作品のコレクションを中心に展示されている。

ロンドンでは 1990 年代後半から、当時の首相トニー・ブレアの戦略としての後押しもあり、「クール・ブリタニア」としてアート界が活発化した。

一頃より落ち着いたとはいえ、世界的なギャラリーがありアート活動が活発である。しかし、ビジネスとしては、機器管理のリスクからビデオアート・メディアアート系のコレクションは少ないとの事である。

11. 視察先一覧

ZKM (Center for Art and Media Karlsruhe)
Museum für Moderne Kunst , Frankfurt am Main
Goethe-Haus museum
Stadt FRANKFURT AM MAIN
Art Museum Kolumba
Kölner Dom
Museum Haus Lange Museum Haus Esters
Museum Abteiberg
Pergamonmuseum

Neues Museum
Alte Museum
Alte Nationalgalerie
Holocaust-Denkmal Berlin
Judisches Museum Berlin
Gemäldegalerie Berlin
Bauhaus archive
Neues Nationalgalerie
Deutscher Bundestag "Reichstag"
Windsor Castle Drawing Gallery
Tate Modern
The Surrey Institute of Art & Design ,
University College
Goodwood House
Serpentine Gallery
London Tower
Royal Academy of art
WhiteChapel Art Garelly
National Garelly

印は、映像機器などによって、映像作品の展示、展示内容の説明映像、映像を使った空間演出が行われていた施設である。

12. 最後に

ドイツ・イギリスへの視察を通じて、筆者の研究テーマと同じ問題点を持つ作品を確認出来た事から、本研究がアーティストのために、あるいは、美術館や博物館などの設置者双方にとっても、役に立つ研究であると言える。

また、海外の美術館等の文化施設では、ビデオアートなど映像作品の上映、映像展開催が増加の傾向にある。

加えて、作品などの紹介・解説用ビデオとして、大型スクリーンに投影した映像を使う事例も格段に増えていると、実感出来た。映像を活用して「より分かりやすく」説明する、あるいは、映像を利用した斬新な展示方法や空間演出をする傾向は、今後ますます進むと思われる。

研究の成果を、当初の目的である美術的な映像表現にシステムを利用する事だけに限らず、美術館・博物館の展示方法の新たなバリエーションとして、立体をスクリーンとして投影するニーズが生まれる余地があると確信出来た。工学と芸術が共に理解し協力する事で、映像で建物や空間全体を演出するなど発展の可能性が広がると言える。

同時に映像をメディアアートの面から見ると、機器に大きく依存する点がある事も否めない。そこにハードウェア、ソフトウェア技術が進歩する事によって、作品が陳腐化する危険性をも感じた。特にインタラクティブな作品は、単にエンタテインメント性でなく、アート作品としての価値をどのように保っていくかが課題であろう。工学と芸術がどのように関わるのか、今後、こうした観点からも継続して考察して行きたい。

作品制作者としては、ビデオアート、メディアアート、映像インスタレーションには様々な表現の可能性もある事も再認識出来た。今回の視察を生かして研究を進めて、これからの新しい作品制作にも繋げたいと考えている。

本研究は科研費(22500099)の助成を受けたものである。このような機会を与えていただき、研究にご協力頂いている小沢慎治教授には、心より感謝の意を申し上げます。

-
- I オブジェ(仏 objet):現代美術では一般に彫刻ではない石、木、金属で作られた作品のこと
 - II ビデオアート:ビデオ、モニター、プロジェクターを利用した芸術的な映像

1. 著 書

大西 清, 大西正敏: JIS にもとづく標準製図法, 第 13 全改版 (全章の改定作業), 理工学社 (2010.7)

大西 清, 大西正敏: 機械設計入門, 第 3 版改版 (全章の改定作業), 理工学社 (2010.)

安達理恵: 英語教育学大系第 3 巻「英語教育と文化」第 10 章第 12 節「初等・中等教育で 小学校での異文化理解を目的とした英語活動の実践」, pp.246-248. 大修館書

店 (2010.11)

橋本一徑: 指紋論 心霊主義から生体認証まで, 青土社 (2010.11)

ジョルジュ・ヴィガレロ編, 橋本一徑ほか計 10 名 (学術翻訳): 身体の歴史 I 16-18 世紀 ルネサンスから啓蒙時代まで, 藤原書店 (2010.3)

2. 論文・国際会議

小松康俊, 中野正行, 茅根直樹, 篠崎 誠: “多元多点光ファイバセンシングによる省エネ・防災システムの開発” 埼玉県産業技術総合センター研究報告 第 8 巻 (2010)

Toshiyuki SUZUKI, Kazuhisa FUJITA, Takeharu SAKAI, Kei-ichi OKUYAMA, Sumio KATO and Seiji NISHIO: Evaluation of Prediction Accuracy of Thermal Response of Ablator Under Arcjet Flow Conditions, AIAA2010-4787, 10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, Chicago, Illinois, 28 June - 1 July 2010

Masahiro Isogai, Toshio Fukuda: Moving Mechanism and Control Method for Micro Robot(Experiment of Turing Control), Proceedings of the 13th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, pp.1145-1152, Sep.2010.

Masahiro Isogai, Toshio Fukuda: Moving Mechanism and Control Method for a Micro-Robot(Characteristics of Running Straight), Proceedings of International Conference on Advanced Mechatronics 2010, pp.663-668, Oct.2010.

坂口鋼一, 嶋川晃一, 畑中義式: 高周波スパッタ法で作成された酸化チタン薄膜における光励起電流の再結合過程, 愛知工科大学紀要, 7 巻, pp.35-38 (2010.3)

深澤正樹, 坂口鋼一, 嶋川晃一, 畑中義式: 高周波スパッタリングによる酸化チタン薄膜の光伝導特性, 愛知工科大学紀要, 7 巻, pp.31-34 (2010.3)

Koichi Sakaguchi, Koichi Shimakawa, and Yoshinori Hatanaka: Dynamic Responses of Photoconduction in TiOx Films Prepared by Radio Frequency Magnetron Sputtering, Jpn. J. Appl. Phys. 49 (2010) 091103 1-3

Koichi Sakaguchi, Koichi Shimakawa, and Yoshinori Hatanaka: Transport and Recombination of Photo-carriers under Potential Fluctuation in TiOx Films Prepared by Rf Magnetron Sputtering Method, presented on Fourth International Conference on Optical ,Optoelectronic and Photonic Materials and Applications (ICOOPMA10) (2010.8 Budapest)

Yoshinori Hatanaka , Koichi Sakaguchi, Masaki Fukazawa, and Koichi Shimakawa: Highly Conductive Titanium Oxide Films by Rf Magnetron Sputtering, presented on Fourth International Conference on Optical ,Optoelectronic and Photonic Materials and Applications(ICOOPMA10) (2010.8 Budapest)

名和靖彦: 半導体レーザーの自己結合効果を用いた微小振動センサに関する研究, 博士論文 愛知工業大学 (2010.3).

藤本 裕, 名和靖彦, 相木国男: 自動ドアセンサを利用したマイクロ波ドップラー速度計の製作と実験, 愛知工科大学紀要, 7, pp.25-30 (2010.3).

大江貴之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: Nondestructive Internal Defect Detection using Photoacoustic and Self-Coupling Effect, Electronics and Communications in Japan, Vol. 93, No. 7, pp.17-23 (2010.7).

宮崎保光, 野村良雄, 水谷聡志: デジタル AV システムを用いた遠隔医療福祉ネットワーク, 愛知工科大学紀要, 7, pp.49-56 (2010.3)

宮崎保光, 今泉良彦: 源氏物語絵巻の復元模写を基にした伴大納言絵巻の復元とデータベース, 愛知工科大学紀要, 7, pp.39-47 (2010.3)

宮崎保光, 高田卓哉, 高橋港一: WiMAX 通信におけるランダム森林媒質中のマイクロ波伝搬・散乱特性のFDTD解析, 電気学会論文誌C, **130**, 4, pp. 637-643 (2010.4)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Recognition of Optical Layered Binary Phase Shift Keying Labels Using Coherent Acoustooptic Processor for Hierarchical Photonic Routing, Jpn. J. Appl. Phys., **49**, 07HB14, 7, pp.07HB14-1- 07HB14-6 (2010.7)

Yasumitsu Miyazaki: Spectral Theory of Beam Scatterings For Object Imaging Using Scanning Millimeter Wave Radar Sensor, Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2010), Xi an, China, pp.1366-1371 (2010.3)

Yasumitsu Miyazaki, Nobuo Goto and Koichi Takahashi: FDTD Parallel Computing of Electromagnetic Wave Scattering by Clouds for Microwave Remote Sensing of Weather Satellite, Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2010), Xi an, China, pp. 1372-1377 (2010.3)

Yasumitsu Miyazaki: Analysis of Electromagnetic Guided Waves on Curved Conducting Biological Surface by Conformal Mapping Method, Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2010), Cambridge, USA, pp.1092-1096 (2010.7)

Yasumitsu Miyazaki, Tadahiro Hashimoto and Koichi Takahashi: Signal Analysis of Electromagnetic Wave Propagation for RFID Systems in In-door and Out-door, Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2010), Cambridge, USA, pp. 1097-1102 (2010.7)

Yasumitsu Miyazaki: Spectral Expansion Method of Beam Wave Scattering by Objects with Smooth Surfaces and Wedges, Proceedings of URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS 2010), Berlin, Germany, pp.609-612 (2010.8)

Yasumitsu Miyazaki: Electromagnetic Analysis of Tera Hertz Waves in Curved Circular Waveguides Using Conformal Mapping, Proceedings of Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2010), Toyama, Japan, B1-5 (2010.9)

Yasumitsu Miyazaki, Nobuo Goto and Koichi Takahashi: FDTD Parallel Computing of Microwave Scattering and Polarization Characteristics by Raindrop Models, Proceedings of Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2010), Toyama, Japan, BEFKb-2 (2010.9)

Yasumitsu Miyazaki and Kouhei Kouno: Grid-Type Spatial Filter Characteristics of Scattered Waves in Biomedical Tissues For Optical CT Image, Proceedings of Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2010), Toyama, Japan, BEFKa-3 (2010.9)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Wavelength-Select-

ive Switching of Optical High-Bit- Rate Pulses with Weighted Acoustooptic Devices, Proceedings of The 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, Denver, TuAA4, pp.319-320 (2010.11)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Switching Characteristics of Optical High-Bit-Rate Pulses with Weighted Acoustooptic Devices, Proceedings of 31st Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2010), Tokyo, Vol.31, 1J-3, pp.5-6 (2010.12)

荒井伸太郎, 井上修, 小沢慎治: アフィン変換を用いた特徴平面の移動に基づく車両前面検出, 電気学会論文誌C, Vol. 130, No. 9, pp. 1604-1613, Sep. 2010.

Shintaro ARAI, Osamu INOUE and Shinji OZAWA : Following Vehicle Detection Based on Shift of Feature Plane Using Affine Transform, Proceedings of the 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 10), pp. 881-886, Sep. 2010.

杉浦伸明, 山我拓也: 携帯電話による通信状態と電磁放射雑音に関する研究, 愛知工科大学紀要, 第7巻, pp.63-66 (2010.3)

吉田 茂, 井谷宣子: 圧縮XML文書のデータ処理用APIソフトウェアの検討, 愛知工科大学紀要, 第7巻, pp.57-62 (2010.3)

Kenji Okajima: Direction selective cells generated through an Infomax based learning algorithm, Neuroscience Research, Volume 68, Page e321, Supplement 1, 2010,

加藤高明, 三宅 透: PIP(Person In Presentation)を用いた本学への交通アクセス動画の制作, 愛知工科大学紀要, 7, pp.67-72(2010.3)

石川雄二郎: 微分形式によるマクスウェル方程式の4次元定式化, 愛知工科大学紀要, 第7巻, pp.75-83(2010.3)

Kotaro Ogino, Takatoshi Jitsuhiro, Chiyo mi Miyajima, Kazuya Takeda: Analyzing Grasping for Inferring Cognitive States of users, Proc. of ICASSP2010, pp.2230--2233 (2010.3)

杉森順子: 個展, Link展 - 映像インスタレーション -, ギャラリーサイズ, 静岡県静岡市 (2010.11).

杉森順子: 明日があるさ Dream of the Shadow, 第12回遠州横須賀街道ちっちゃな文化展 招待作品, 静岡県掛川市 (2010.10).

杉森順子: 常葉学園大学造形学部研究紀要 第8号 抜刷, 静岡アートドキュメント 2008, p.105 (2010.3).

杉森順子: 図録 第24回国文化祭・しずおか2009 街並みと3城を結ぶアートフェスティバル事業 遠州横須賀街道ちっちゃな文化展, p.35 (2010.10).

安達理恵: 小学校外国語活動における動機づけの変化

担任による活動時間増加に伴う変化を中心に , 中部地区英語教育学会紀要第 38 号 , pp.71-78. (2010.1)

安達理恵 : 中学生の外国人に対する態度意識と影響要因一地域における実証的事例調査より , 名古屋外国語大学現代国際学部紀要第 6 号 , pp.255-278. (2010.3)

R. Adachi: A structural equation model of motivation and attitudes of young Japanese foreign language learners, *Language Education and Technology* , 47,pp.205-226. (2010.5)

R. Adachi: Motivation and Sociocultural Attitudes of pupils learning English in Japan: Beyond Integrative and Instrumental orientation: Intercultural orientation , The 8th ASIA TEFL International Conference , La Thanh Guest House in Hanoi , Vietnam , p.218. (2010.8)

橋本一径 : 医学のエコグラフィ 9 睡眠薬 , 看護管理 , Vol. 20, No. 1, pp. 72-73(2010.1)

橋本一径 : 医学のエコグラフィ 10 聴診 , 看護管理 , Vol. 20, No. 2, pp. 168-169(2010.2)

橋本一径 : 医学のエコグラフィ 11 救急医療 , 看護管理 , Vol. 20, No. 3, pp. 262-263(2010.3)

橋本一径 : 名・身体・同一性 19 世紀フランスにおける新生児の出生確認 , 19 世紀学研究 , Vol. 4, pp. 93-105(2010.3)

ムハンマド・イドリース・アーマド , 橋本一径 (学術翻訳) : 自らの敵を作り出すパキスタン , 世界 , No. 803, pp. 182-189(2010.4)

橋本一径 : パスポート写真論 , Photographers Gallery Press, No. 9, pp. 126-132(2010.5)

ロラン・コルドニエ , 橋本一径 (学術翻訳) : 国は破産できるか? , 世界 , No. 805, pp. 267-271(2010.6)

セドリック・グヴェルヌール , 橋本一径 (学術翻訳) : スリランカ 動揺する少数派タミル人 , 世界 , No. 810, pp. 263-269(2010.11)

橋本一径 : 「属性」は誰のものか? 「“これも自分と認めざるをえない”展」をめぐって , REAR, No. 25(2010.12) (印刷中)

M. Chen, S. Mizutani and T. Nakagawa : Optimal Backward and Backup Policies in Reliability Theory, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 53, No. 2, pp. 101-118 (2010.6).

T. Nakagawa, S. Mizutani and M. Chen : A summary of periodic and random inspection policies , *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95, No. 8, pp. 906-911 (2010.8)

S. Mizutani and T. Nakagawa : Optimal Maintenance Policy with an Interval of Duplex System , 4th Asia-Pacific International Symposium (APARM2010), Newzealand, pp. 496-503 (2010.12).

Kohei Nakashima, Sumio Teramoto, Yoshio Murakami, Soichi Ishihara, Masago Yamamoto and Masao Yoshida : Improving Cylinder Cooling Using Tapered Fins and Baffle Plates between Fins in Air-Cooled Engines, *SAE Technical Paper Series SAE 2010-01-0323*(2010.4).

小野淳一 , 高田浩充 , 大場正人 , 平野博敏 , 長谷川康和 , 岩瀬正幸 : 携帯電話を利用した学習システムの構築とその検証 , 自動車技術に関する研究報告誌第 39 号 , pp.27-32 (2010.8)

服部幸廣 , 中林功一 , 鬼頭修己 , 伊藤基之 : プッシュプル完全局排方式に関する基礎研究 (第 2 報 プッシュプル流れの乱れ特性) , 日本機械学会論文集 , B 編 , 第 76 巻 , 第 772 号 , pp.8-16 (2010.12)

Yukihiro Hattori, Koichi Nakabayashi, Osami Kitoh, and Motoyuki Itoh : Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation, *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics*, Dhaka, Bangladesh (2010.12)

Shinji Tamano, Motoyuki Itoh, Katsuo Kato, and Kazuhiko Yokota : Turbulent drag reduction in nonionic surfactant solutions, *Physics of Fluids*, Vol.22, No.055102, pp.1-12 (2010.5)

玉野真司 , 伊藤基之 , 高木綾子 , 横田和彦 : 部分回転円板による高分子水溶液の容器内旋回流れにおけるリング渦の可視化観察 , 日本機械学会論文集 , B 編 , 第 76 巻 , 第 761 号 , pp.4-10(2010.1)

玉野真司 , 伊藤基之 , 高木綾子 , 横田和彦 : 部分回転円板による高分子水溶液の容器内旋回流れにおけるリング渦の PIV 計測 , 日本機械学会論文集 , B 編 , 第 76 巻 , 第 761 号 , pp.11-19(2010.1)

玉野真司 , 伊藤基之 , 楊文彬 , 横田和彦 : 部分回転円板による粘弾性流体の容器内旋回流れの数値シミュレーション , 日本レオロジー学会誌 , Vol.38 , No.1 , pp.9-15(2010.2)

Manabu Ohmichi : The effect of oblique functional gradation to transient thermal stresses in the functionally graded infinite strip, *Acta Mechanica*, 212-3/4, pp.219-232, 2009.

Yasuaki Shiina and Makoto Hishida : Critical Rayleigh number of natural convection in high porosity anisotropic horizontal porous layers, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol.53, pp.1507-1513(2010)

3. 特 許

奥山圭一：ブレーキパッド及びその製造方法，特許 4478801 (2010年3月26日登録)

小掠真貴，斎藤 彰，上條憲一，岡島健治，喜友名朝春：病理診断支援装置，病理診断支援プログラム，病理診断支援方法，及び病理診断支援システム，特許 4496943 (2010年03月23日登録)

Ogura Maki, Saitou Akira, Kamijo Kenichi, Okajima Kenji, Kiyuna Tomoharu : Pathological diagnosis support device, program, method, and system, United States Patent 7,693,334, April 6, 2010

喜友名朝春，岡島健治，鳥居宏在，上條憲一，黒田雅彦，吉田恵一，向井 清：染色体状態の評価方法および評価システム，特願 2005-512081, (2010年09月14日登録)

4. 解説・総説

伊藤良一，茅根直樹：“半導体レーザーの歩みと今後の展開”(招待)，応用物理，第 79 巻，第 6 号，p.0496-0501 (2010)

大西正敏：パネルディスカッション，ロボット感動教育提案，ロボット感動教育シンポジウム 2010，東京大学工学部 (2010.3)

大西正敏：飛行船ロボット，あい ROBO 応援キャラバン，愛知県次世代ロボット市場化支援事業，<http://www.robot-fes.com/pdf/caravan09.pdf> (2010.12)

Yasumitsu Miyazaki, Nobuo Goto and Takanori Innami: Analysis of Dispersion Characteristics in Photonic Crystal Consisting of Periodic Atoms for Nanometer Waveguides, X 線電磁界応用技術調査専門委員会編，X 線電磁界応用技術，6，電気学会技術報告，pp.7-10 (2010.12)

Yasumitsu Miyazaki: Electromagnetic Characteristics

of Grid Structures for Scattering Fields of Nano-meter Electromagnetic Waves and X-rays, X 線電磁界応用技術調査専門委員会編，X 線電磁界応用技術，7，電気学会技術報告，pp.11-15 (2010.12)

Koichi Takahashi, Yasumitsu Miyazaki and Nobuo Goto: FDTD Parallel Computing of Fundamental Scattering and Attenuation Characteristics of X-ray for Medical Image Diagnosis, X 線電磁界応用技術調査専門委員会編，X 線電磁界応用技術，8，電気学会技術報告，pp.16-19 (2010.12)

石川雄二郎：単一正弦波の交流理論 再考，愛知工科大学紀要，第 7 巻，pp.85-91(2010.3)

玉野真治，伊藤基之：リブレットおよび毛皮表面の流体摩擦低減，トライボロジスト，Vol.55，No.7，pp. 447-452(2010.7)

5. 口頭発表

井上久弘，打田和馬，打田昌昭：CFRP 材端部に発生する損傷の超音波探傷器による観察方法の提案．55th FRP CON-EX 2010 Pp69-71

中谷一郎，鬼頭 徹，中島陽介，森島一樹：月惑星探査小型ローバの提案，第 54 回宇宙科学技術連合講演会予稿集 2A06, Nov. 18, 2010

春山純一，澤井秀次郎，水野貴秀，吉光徹雄，福田盛介，中谷一郎：小型探査機による月の溶岩チューブにつながると思われる縦穴構造探査について，第 54 回宇宙科学

技術連合講演会予稿集 1A16, Nov. 17, 2010

黒田和明，中谷一郎，他：大型重力波望遠鏡 (LCGT) 計画 XIII, 日本物理学会 2010 年秋期大会講演集 14aSH, Sept. 14, 2010

黒田和明，中谷一郎，他：重力波プロジェクト (LCGT), CRC 将来計画シンポジウム，Sept.16, 2010

鈴木俊之，藤田和央，酒井武治，奥山圭一，加藤純郎，西尾誠司：EFD/CFD 融合技術に基づくアブレーション

熱防御システム評価手法の研究第 42 回流体力学講演会 / 航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 2010.6.24-25, 米子コンベンションセンター

奥山圭一, 金田照彦, 加藤純郎, 大矢洋明: 超低密度 CFRP アプレータの熱化学的特性, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010.9.5-8, 名古屋工業大学

金田照彦, 奥山圭一, 加藤純郎, 大矢洋明: 加熱された超低密度 CFRP アプレータ内部の温度挙動, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010.9.5-8, 名古屋工業大学

金田照彦, 奥山圭一, 加藤純郎, 藤田和央, 鈴木俊之, 酒井武治, 西尾誠司: 超軽量 CFRP 熱防御材の熱特性, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会 2010 年 11 月 17 日 ~ 19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター

飯島健介, 奥山圭一, 澤井秀次郎: 月小型実験機用の CFRP 製着陸衝撃吸収脚, 第 54 回宇宙科学技術連合講演会, 2010 年 11 月 17 日 ~ 19 日, 静岡県コンベンションアーツセンター

金田照彦, 都築広明, 鈴木貴寛, 奥山圭一: 高エンタルピ環境下における超軽量 CFRP アプレータの耐熱特性, 第 47 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2010.11.26, 名城大学

飯島健介, 大林達矢, 小川記央, 奥山圭一: 月小型実験機用の CFRP 着陸脚, 第 47 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2010.11.26, 名城大学

坂口鋼一, 深澤正樹, 嶋川晃一, 畑中義式: 高周波スパッタリングにより作成された高電気伝導酸化チタン薄膜, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 17p-TQ-2 (2010.3)

深澤正樹, 坂口鋼一, 嶋川晃一, 畑中義式: 高周波スパッタリングによる酸化チタン薄膜の光伝導特性, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18a-TQ-1 (2010.3)

名和靖彦, 藤本 裕, 相木国男: 自動ドアセンサを利用したマイクロ波ドップラー速度計, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18a-P5-9 (2010.3).

名和靖彦, 相木国男, 西野 渉: 超音波を用いたレーザ原理実験, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, 18a-P5-10 (2010.3).

山田浩之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: 半導体レーザーによる自己結合効果を用いた微小変位センサ, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O3-1 (2010.8).

若狭和孝, 大西正敏: GPS 搭載型探査ロボットの機能設計の研究, 日本設計工学会平成 22 年度秋季大会研究発表講演会論文集, PP15-16(2010.10) .

小澤佳由, 大平 聖, 大西正敏: 筋電位を利用したりハビリテーション向けロボットの研究, 日本設計工学会平成 22 年度秋季大会研究発表講演会論文集, pp169-170(2010.10) .

田宮 直, 大西正敏, 野村良雄: 創造的応用教育を実践するためのロボット用インターフェイス教材の研究, 日本設計工学会平成 22 年度秋季大会研究発表講演会論文集, pp73-74(2010.10) .

大西正敏, 田宮 直, 野村良雄: ものづくり教育をベースとしたロボット創造カリキュラム, 第 28 回日本ロボット学会, 学術講演会講演論文集, pp163, 1L3-7(2010.9) .

大平 聖, 小澤佳由, 飯島健介, 大西正敏: ロボットによる構内案内システムの一検討, 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 Vol.5, pp347-348(2010.9) .

田宮 直, 林 寛幸, 小林一信, 上田貴子: CAD/CAM による 3 次元教育の実践, 精密工学会, 日本機械学会, 日本設計工学会, 日本建築学会, 日本デザイン学会, 人工知能学会, Design シンポジウム 2010, dss10-0072 (2010.11) .

宮崎保光: 散乱・吸収に関する電磁波 CT における画像再構成理論, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-10-119, pp.99-104 (2010.11)

宮崎保光: ドイツにおける最近の電磁界理論研究について, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-10-150, pp.101-106 (2010.11)

宮崎保光, 後藤信夫, 高橋港一: RFID 情報システムの FDTD 解析による信号応答特性と信号処理, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-10-107, pp.29-34 (2010.11)

宮崎保光, 河野鉦平: 光 CT における生体組織内散乱光に対する画像グリッド型空間フィルタの 3 次元 FDTD 解析, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-10-118, pp.93-98 (2010.11)

宮崎保光: 3 次元 TV における画像再生に関する立体光結像表示法, 電子情報通信学会技術研究報告, 画像工学研究会 CS2010-57, IE2010-96, pp.35-40 (2010.12)

宮崎保光: (特別講演) 電磁波・高周波工学と環境電磁技術の展開, 電子情報通信学会技術研究報告, 環境電磁工学研究会 EMCJ2010-99, pp.105-110 (2010.12)

宮崎保光, 後藤信夫, 高橋港一: WiMAX 高速データ通信に関する環境伝搬特性の FDTD 法シミュレーション, 電子情報通信学会技術研究報告, 環境電磁工学研究会 EMCJ2010-90, pp.51-56 (2010.12)

宮崎保光: 曲り導電性生体表面における電磁波導波特性の等角写像法による考察, 2010 年電子情報通信学会総合大会 エレクトロニクス講演論文集 1, C-1-29, p.29 (2010.3)

宮崎保光, 河野鉦平: 光 CT における生体組織内散乱光に対する画像グリッド型空間フィルタ特性, 2010 年電子情報通信学会総合大会 エレクトロニクス講演論文集 1, C-1-37, p.37 (2010.3)

宮崎保光, 橋本忠弘, 高橋港一: 屋内外における RFID に関する電波伝搬の FDTD 法による信号解析, 2010 年電子情報通信学会総合大会 エレクトロニクス講演論文集 1, C-1-19, p.19 (2010.3)

宮崎保光, 水谷聡志, 野村良雄, 黄 新民: 医療情報ネットワークのニューラル学習手法によるルーター構成, 第 24 回日本レーザー医学会東海地方会プログラム・抄録集, p.11 (2010.8)

宮崎保光, 河野鉦平: グリッド型空間フィルタを用いた光 CT 画像診断の 3 次元シミュレーション, 第 24 回日本レーザー医学会東海地方会プログラム・抄録集, p.10 (2010.8)

宮崎保光: 散乱・吸収に関する電磁波 CT における画像再構成理論, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, L4-8 (2010.8)

宮崎保光, 橋本忠弘, 高橋港一: RFID に関する信号伝搬の FDTD 法による受信特性解析, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, L4-6 (2010.8)

水谷聡志, 宮崎保光, 黄 新民: 医療情報ネットワークのニューラル学習手法によるルータ構成, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, M5-8 (2010.8)

宮崎保光, 河野鉦平: 光 CT における生体組織内散乱光に対する画像グリッド型空間フィルタの 3 次元 FDTD 解析, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, L4-7 (2010.8)

今泉良彦, 宮崎保光: 復元模写事例を基にしたコンピュータによる絵巻物の復元とデータベース, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, Q3-5 (2010.8)

宮崎保光: 散乱・吸収に関する電磁波 CT における画像再構成理論, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 エレクトロニクス講演論文集 1, C-1-18, p.18 (2010.9)

宮崎保光, 橋本忠弘, 高橋港一: RFID に関する信号伝搬の FDTD 法による受信特性解析, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 エレクトロニクス講演論文集 1, C-1-32, p.32 (2010.9)

宮崎保光, 河野鉦平: 光 CT における生体組織内散乱光に対する画像グリッド型空間フィルタ特性の 3 次元 FDTD 解析, 2010 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 エレクトロニクス講演論文集 1, C-1-31, p.31 (2010.9)

後藤信夫, 宮崎保光: 重み付けコリニア音響光学素子における高ビットレート光パルススイッチング特性の検討, 平成 22 年度電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, 12-11, p.132 (2010.9)

尾林史章, 小澤慎治, 小塚一宏: ドライバの挙動の計測と運転に対する集中力の評価指標の提案, 電子情報通信学会 ITS 研究会 技術報告, Vol. 110, No. 150, ITS2010-12, pp. 37-42, Jul. 2010.

神藤善洋, 荒井伸太郎, 小沢慎治: 画像処理による料金所進入車両の挙動抽出, 電子情報通信学会 ITS 研究会 技術報告, Vol. 109, No. 459, ITS2009-101, pp. 95-100, Mar. 2010.

荒井伸太郎, 井上 修, 小沢慎治: 特徴平面の移動に基づく後方車両検出システム, 電子情報通信学会 ITS 研究会 技術報告, Vol. 109, No. 459, ITS2009-102, pp. 101-106, Mar. 2010.

神藤善洋, 手島知昭, 荒井伸太郎, 小沢慎治: 料金所におけるアシスト画像を用いた動的な背景更新手法, 電子情報通信学会 ITS 研究会 技術報告, Vol. 110, No. 150, ITS2010-7, pp. 7-12, Jul. 2010.

杉浦伸明: IEC SC48D の規格概要と応用, IEC SC48D 「電子機器装置, 制御装置・制御盤の機械的構造寸法・性能規格標準化セミナー」, (社) 電子情報技術産業協会, 2010 年 11 月 26 日

岡島健治: 「情報量最大化学習」による運動方向選択性細胞の自己組織化, Neuro2010, 2010 年 9 月 3 日, 神戸

加藤高明, 三宅 透: PIP(Person In Presentation) の開発と商品開発への応用の可能性, 商品開発・管理学会第 14 回全国大会 講演論文集, pp.52-57(2010.6)

荻野恒太郎, 實廣貴敏, 宮島千代美, 武田一哉: 把持動作から認知状態を推定するための信号処理手法の検討, 信学技報, パターン認識・メディア理解研究会 (PRMU) (2010.1)

杉森順子: テクノロジーとアートの融合「メディアアート」, 蒲郡技術科学振興会公開講座講演 (2010.7).

安達理恵: 小学生の外国語活動増加による社会文化意識およびコミュニケーション態度への影響: 外国語活動増加の課題, 大学英語教育学会 中部支部, 中部大学 (2010.6)

安達理恵: 小学校外国語活動体験と動機づけ 活動形態の影響, 外国語教育メディア学会, 第 50 回全国研究大会 横浜市立横浜サイエンスフロンティア高等学校 (2010.8)

安達理恵: 小学生の社会文化意識およびコミュニケーション態度外国語活動の活動形態による影響を中心に, 大学英語教育学会 中部支部, 中部大学 (2010.12)

リュシアン・ジョーム, 橋本一徑: 自由民主主義の諸問題 スタール夫人, コンスタンとトクヴィル, 名古屋大学大学院経済学研究科課題設定型ワークショップ (2010.4)

橋本一径：同一性の判定 身元確認における指紋と写真，日本記号学会，第 30 回大会，神戸大学 (2010.5)

橋本一径：現代フランス身体論におけるスポーツ，21 世紀スポーツ文化研究所月例会，名古屋経済大学 (2010.5)

中川覃夫，水谷聡志：並列システムに対する MTTF の近似計算，日本 OR 学会 2010 年度春季研究発表会アブストラクト集，pp. 38-39 (2010.3).

水谷聡志，中川覃夫：二重系運用期間をもつ最適代替方策，日本 OR 学会 2010 年度秋季研究発表会アブストラクト集，pp. 66-67 (2010.9).

中島 守，川村貴裕，平野博敏，小野秀文，吉田昌央：自動車整備における事故予防教育プログラムの開発 - 第 2 報 大学生の整備技術の実態 - ，(社) 日本工学教育協会 平成 22 年度 工学・工業教育研究講演会講演論文集，pp.38-39 (2010.8)

橋本孝明，井上久弘，尾崎 勝，長谷川康和，浅野由久：航空工学を題材とした子どもたちへの創造教育：(社) 日本設計工学会平成 22 年度春季研究発表講演会講演論文集，pp.39-42 (2010.5)

橋本孝明，井上久弘，竹内嗣昇，長谷川康和：自然エネルギー活用による温室用エネルギー削減に関する考察 第 20 回環境工学総合シンポジウム 2010 講演論文集，pp.240-243 (2010.6)

橋本孝明，井上久弘，長谷川康和，鶴飼達也：小学生への工学教育を通じたひとつの社会貢献，(社) 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 Vol.5，pp.283-284 (2010.9)

森 勝行，中島 守，橋本孝明，永田英雄，平野博敏，鶴飼達也，小野淳一：短期大学授業改善研究，愛知工科大学平成 21 年度グループ研究発表会 (2010.4)

森 勝行，堀内 豊，石原 昭，松橋卓也，平石義博：電気に関する技術資格と学習意欲の向上 (2)，(社) 日本工学教育協会平成 22 年度工学・工業教育研究講演会講演論文集，pp.156-157(2010.8)

掛布知仁，小野秀文，中島 守：整備作業における学習者の有する寸法認識能力と実習作業成績の関係 (社) 日本工学教育協会平成 22 年度工学・教育研究講演会講演論文集，pp.40-41(2010.8)

寺本純生，中島公平，村上好生，石原荘一，山本匡吾，吉田昌央：縮流フィンと導風板による空冷シリンダの冷却効果，日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集，Vol.59th，pp. 197-198(2010.3) .

中西悠弥，矢野正孝：電気冷蔵庫の環境特性改善に関する LCA 検証，第 5 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集 p.258-259 (2010.3)

椎名保顕：異方性水平多孔質層における熱伝達特性，日本機械学会東北支部第 45 期講演論文集 216 (2010.3)

6. その他

井上久弘，鶴殿 徹：機械加工と測定・計測について，蒲郡技術科学振興会主催第 1 回機械加工技術講座 (2010.10.5)

井上久弘，鶴殿 徹：放電加工について，蒲郡技術科学振興会主催第 2 回機械加工技術講座 (2010.10.12)

井上久弘，鶴殿 徹：レーザー加工，ウォータージェット加工について，蒲郡技術科学振興会主催第 3 回機械加工技術講座 (2010.10.19)

井上久弘，鶴殿 徹：トヨタ生産方式について・・・その 1，蒲郡技術科学振興会主催第 4 回機械加工技術講座 (2010.10.26)

井上久弘，鶴殿 徹：トヨタ生産方式について・・・その 2，蒲郡技術科学振興会主催第 5 回機械加工技術講座 (2010.11.2)

畑中義式，橋本孝明，紺谷和夫，井上久弘，永田英雄，坂口鋼一，渡部吉規，鈴木宏和，長谷川康和，浅

野由久：太陽光発電と風力発電のエコキャンパス利用，COP10 社会と学術の対話フォーラム「生物多様性を主流に」ポスター展示，名古屋大学豊田講堂 1 階ホワイエ (2010.9)

奥山圭一，伊藤智啓：深宇宙へ飛び出せ！ 民間発の探査機 UNITEC-1，がまごおりロボット講演会，2010 年 2 月 27 日

奥山圭一：愛知工科大学の宇宙への挑戦，東三河懇話会，ホテルアークリッシュ豊橋，2010 年 10 月 19 日

大西正敏：ロボットとは何だろう，日本学術振興協会ひらめき・ときめきサイエンス講演 (2010.7)

大西正敏：現在のロボット技術から未来へ，東三河高大連携協議会，夏季大学体験講義 (愛知工科大学) (2010.8)

杉森順子，小沢慎治：正面スクリーンと床面スクリーンへのリンク映像の研究，愛知工科大学平成 21 年度グ

ループ研究報告会 (2010.4).

橋本一径：医学と芸術展（展覧会レビュー），ART iT，2010年2月3日，http://www.art-it.asia/u/admin_exrev/Wj8nJGBxPriOEDHydQRo/

橋本一径：指紋を通して見えてくるもの，東京藝術大学大学院映像研究科博士後期課程特別講義，2010年7月28日

橋本一径：指紋と犯罪捜査の歴史，AUT文化講演会，愛知工科大学，2010年10月16日

橋本一径：トーマス・ハイガー『大気を変える錬金術』，AUT図書館だより，No. 3, pp. 4-5(2010.10)

橋本一径ほか計3名：はぐらかされる同一性 指紋と写真をめぐって，Photographers Gallery, 2010年11月12日

橋本一径（司会）：メディア・テクノロジーのポリティクス，表象文化論学会，第5回研究発表集会，東京大学駒場キャンパス，2010年11月13日

橋本孝明：本光寺の発掘調査に関連して，松平庶家を偲ぶ，愛知工科大学・愛知工科大学自動車短期大学附属図書館報 No.2 (2010.4)

橋本孝明，尾崎勝，田宮直：平成22年度家庭の日親子教室「手回し発電工作教室」，蒲郡市教育委員会青少

年センター (2010.5)

橋本孝明，長谷川康和：夏休み理科教室「身近な材料で風力発電をしよう」，幸田町図書館 (2010.7)

橋本孝明，尾崎勝：「作って飛ばそう，はがきブーメラン & 紙トンボ」，蒲郡市図書館 (2010.7)

橋本孝明，尾崎勝，田宮直：親子でチャレンジ工作教室「リモコンロボット工作」，蒲郡市教育委員会文化スポーツ課 (2010.8)

橋本孝明，井上久弘，田宮直：もっと身近に科学・工学を・・・，愛知工科大学社会貢献事業，蒲郡市図書館 (2010.8)

加藤寛，橋本孝明，渡部吉規，鶴飼達也，大場昭一，河合武明，井戸田敦：廃油からのバイオ燃料生成とキャンパス利用，COP10社会と学術の対話フォーラム「生物多様性を主流に」ポスター展示，名古屋大学豊田講堂1階ホワイエ (2010.9)

矢野正孝：金属材料の特徴，岡崎ものづくり推進協議会，岡崎商工会議所主催，金属材料学講座 (2010-10-19)

矢野正孝：鉄鋼材料，岡崎ものづくり推進協議会，岡崎商工会議所主催，金属材料学講座 (2010-10-26)

矢野正孝：鉄鋼材料，岡崎ものづくり推進協議会，岡崎商工会議所主催，金属材料学講座 (2010-11-2)

愛知工科大学紀要規程

- 第1条 愛知工科大学および愛知工科大学自動車短期大学（以下本学という。）における学術研究の進歩と発展に貢献し、その成果を内外に公表することを目的として紀要を発行する。
- 第2条 紀要の名称は、「愛知工科大学紀要」とする。
- 第3条 愛知工科大学紀要の編集、発行等についてはこの規程の定めるところによる。
- 第4条 愛知工科大学紀要は、原則として、毎年3月に発行するものとする。
- 第5条 愛知工科大学紀要に投稿できる者は、本学専任教員、職員、その他本学教授会で認められた者とする。
- 第6条 投稿者は、別に定める愛知工科大学紀要投稿細則に従い愛知工科大学紀要編集委員会（以下編集委員会という。）に原稿を提出するものとする。
- 第7条 編集委員会は、投稿原稿を審査し、その採否を決定する。
2. 研究論文等については、前項の審査をするに当たり、学内外の学識経験者に査読を依頼するものとする。
- 第8条 愛知工科大学紀要の発行部数と送付先については、編集委員会が決定する。
- 第9条 この規程の改廃は、編集委員会の議を経て、本学教授会が行う。

附 則 この規程は、平成15年4月1日から施行する。

附 則 この規程は、平成19年4月1日から施行する。

愛知工科大学紀要投稿細則

- I. 愛知工科大学紀要の体裁、A4版、左開きとし、原則として横2段組みとする。
- II. 投稿原稿
 1. 投稿原稿は原則として未発表の論文・研究ノート・報告・翻訳・書評・資料・随筆等とする。ただし、既に発表したものでも、その旨明記し、また未発表の事項を含む場合は審査の対象となり得る。
 2. 原稿の長さの上限は原則として刷上がり10頁以内とする。
 3. 研究論文の投稿は1人につき1編を原則とする。ただし、共同研究者として主研究者以外に名前を連ねることは、その限りではない。
- III. 投稿原稿の体裁
 1. 原稿は日本語または英語を原則とする。
 2. 数字はアラビア数字を用い、数量の単位は原則として国際単位系による。
 3. 図、表は、コンピュータでプリントアウトするかトレースしたもの、また、写真はそのまま掲載できるようにしたものを用いる。これらの図、表、写真には必要に応じて縮尺または縦、横の寸法を入れるものとする。
 4. 原稿に図、表、写真を入れる位置を指定し、明示する。
 5. 日本語原稿の場合は英語表題と英語氏名をつけるものとする。
 6. 引用文献等は原則として最後に一括し、順に番号をつけて列記する。本文中では引用箇所（1）、（2）等の上つき番号を記入する。引用文献の表記は原則として、編著者名、書名（または雑誌名、巻数）、発行年、発行所、ページの順とする。
 7. 論文には英語のアブストラクトおよび日本語と英語でキーワードをつけるものとする。
 8. 執筆に関する詳細は紀要委員会の指示によるものとする。
- IV. 投稿原稿の受付
 1. 投稿原稿は、紀要編集委員会に提出すること。
 2. 投稿原稿の締切日は、編集委員会が決めるものとする。
 3. 投稿原稿受理年月日は編集委員会が投稿原稿を受けた日とする。

Essay

Undergraduate (Bachelor) Education in Universities Fundamental Education, Engineering Education and Graduate School Yasumitsu Miyazaki 83

Association with an Iridescent Insect Takaaki Hashimoto 89

Note

Verification of the Effective Use of Cloud Computing Service Komei Kato and Akiyuki Koike 91

A Preliminary Estimation on Drag Coefficient of Seed of Dandelion Takaaki Hashimoto and Hachiro Ikeda 97

Maxwell Equation in Gauge Theory Yujiro Ishikawa 101

Reports

A Study on the Questionnaire Results for Evaluating Mathematical Classes
— From the Viewpoint of Student Satisfaction — Naoyuki Ohsako 115

Recent Tendencies of Media/Video Arts in Germany and the U.K. Junko Sugimori 121

List of Publications during 2010.1 - 2010.12

愛知工科大学紀要

第8巻 平成23年3月25日

編集委員会

委員長 橋本孝明
委員 井上久弘 椎名正顕
吉田 茂

(五十音順)

発行者

学校法人 電波学園 愛知工科大学
愛知工科大学自動車短期大学

〒443-0047
愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
TEL : 0533-68-1135
FAX : 0533-68-0352
URL : <http://www.aut.ac.jp>

印刷 / 株式会社長尾印刷 / 〒438-0086 磐田市見付 1198 / TEL 0538-32-4702

BULLETIN
OF
AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Vol.8, 2010

CONTENTS

Papers

Stretched Exponential Function in Photocurrent of TiO _x films Koichi Sakaguchi, Koichi Shimakawa and Yoshinori Hatanaka	1
Development of the Management System for Job Hunting Report Using Web Komei Kato and Naoki Matsushita	5
LCA Verification Concerning Environmental Characteristics Improvement of Electric Refrigerator Yuya Nakanisi and Masataka Yano	11
A Study on a Lunar Exploration Rover Ichiro Nakatani, Yuji Katayama and Yasuo Mori	21
Electromagnetic Analysis of Curved Circular Waveguides for Tera Hertz Transmission Using Conformal Mapping Yasumitsu Miyazaki	29
Unsteady Thermal Stresses in the Functionally Graded Semi-infinite Body with Slanting Boundary to the Functional Graduation Subjected to Prescribed Surface Heat Flux Manabu Ohmichi	37
FDTD Analysis of Electric field Intensities and Receiving Characteristics of Signal Propagation for RFID Systems Yasumitsu Miyazaki, Yoshio Nomura and Koichi Takahashi	47
A Study on Library Software That Makes XML Data-Processing Easy in Cooperation with CSV Files Shigeru Yoshida	57
A 24GHz Microwave Doppler Speedometer make use of an Auto-door Sensor Yu Fujimoto, Yasuhiko Nawa and Kunio Aiki	67
An Experiment of Radar Principal make use of the Ultrasonic Wave part II Real-time Display and Canceling of Multiple-Reflection Images Wataru Nishino, Yasuhiko Nawa and Kunio Aiki	73
Conductivity Characteristics of Titanium Oxide Films by High Frequency Magnetron Sputtering Masaki Fukazawa, Koichi Sakaguchi, Koichi Shimakawa and Yoshinori Hatanaka	77

(continued)

Published by
Aichi University of Technology
50-2 Manori Nishihasama-cho Gamagori
Aichi 443-0047, JAPAN