

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7巻



AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2009

愛知工科大学紀要 第7巻

目次

研究論文

- ガリガリとんぼの羽根の回転に関する研究（第1報，羽根の回転方向の実験）
..... 太田 博，半田 毅 1
- ガリガリとんぼの羽根の回転に関する研究（第2報，羽根の回転の発生機構）
..... 太田 博，半田 毅，壁谷哲矢 7
- Unsteady Thermal Stresses in the Infinite Strip with Slanting Boundaries to the Functionally Graded Direction
..... Manabu Ohmichi 15
- 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
..... 藤本 裕，名和靖彦，相木国男 25
- 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
..... 深澤正樹，坂口鋼一，嶋川晃一，畑中義式 31
- 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
..... 坂口鋼一，嶋川晃一，畑中義式 35
- 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
..... 宮崎保光，今泉良彦 39
- 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
..... 宮崎保光，野村良雄，水谷聡志 49
- 圧縮 XML 文書のデータ処理用 API ソフトウェアの検討
..... 吉田 茂，井谷宣子 57
- 携帯電話による通信状態と電磁放射雑音に関する研究
..... 杉浦伸明，山我拓也 63
- ### 研究ノート
- PIP（Person In Presentation）を用いた本学への交通アクセス動画の制作
..... 加藤高明，三宅 透 67

コラム・エッセイ

“五井山”は“ごいさん”ではなくて，“ごいやま”だ.	橋本孝明	73
-------------------------------------	------	-------	----

総説・解説

微分形式によるマクスウェル方程式の4次元定式化	石川雄二郎	75
----------------------------------	-------	-------	----

単一正弦波の交流理論 再考	石川雄二郎	85
------------------------	-------	-------	----

報 告

新エネルギー利用による温室用エネルギー削減の研究	橋本孝明, 井上久弘, 山本照美, 永田英雄, 鈴木宏和 竹内嗣昇, 尾崎 勝, 浅野由久, 坂田栄太郎	93
-----------------------------------	---	-------	----

自動車整備士試験問題検索システムの開発	高田浩充, 大場正人, 小野淳一	99
------------------------------	------------------	-------	----

人力飛行機第2号機の試験飛行	橋本孝明	103
-------------------------	------	-------	-----

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 (2009.1-2009.12)

愛知工科大学紀要規程

愛知工科大学紀要投稿細則

研究論文

ガリガリとんぼの羽根の回転に関する研究 (第1報, 羽根の回転方向の実験)

太田 博*, 半田 毅**

(2009年9月30日受理)

Research on Rotation of a Rotor in Gari-Gari Dragonfly (1st Report, Experiments on Rotating Direction of a Rotor)

Hiroshi Ota* and Tsuyoshi Handa**

(Received September 30, 2009)

Abstract

The gari-gari dragonfly is a toy in which the rotor is attached by a pin so that a rotor can be rotated to both directions at the tip of notches of main body¹⁾⁻⁴⁾. Rotation of the rotor is generated by rubbing the edge of notches of this toy. The influence on the rotation is admitted by the difference between the inside diameter of the hole of the rotor and outside diameter of the pin. The rotating direction of pin track will be explained in the following paper.

キーワード: ガリガリとんぼの羽根の回転方向, 羽根とピンの隙間の効果, 本体が重力方向のときの効果, こすり棒の角度効果

Keywords: Rotating direction of rotor in Gari-Gari Dragonfly, Clearance effect between rotor and pin, Gravitational effect of main body, Angular effect of stroking stick

1. まえがき

ここで取り上げるテーマは「ガリガリとんぼ」と呼ばれる玩具の羽根の回転方向に関する研究である。

ガリガリとんぼは Fig.1 に示すように, のこぎり歯状に15個(長手方向15cm)ほどの三角形のくぼみが等ピッチに削られた竹製の本体の先端に竹を薄く削ったねじれない羽根(ロータ)をピンでゆるく付け, 羽根はどちら方向にも回転できるようにしたものである。このガリガリとんぼの羽根の回転方向に関する研究は, 愛知県三州足助屋敷(現, 豊田市足助町)で大山鐘一(1903~1997)さんから平成4年(1992)6月に入手してから続けてきたものである。¹⁾⁻⁴⁾ この研究は, 1992年採用の新幹線「のぞみ号」の駆動用モータの取り付けボルトの

脱落などボルト・ナットのゆるみの原因究明に役立つであろう。第1報では実験結果のみを報告するが, 理論結果はつづいて第2報で示す。

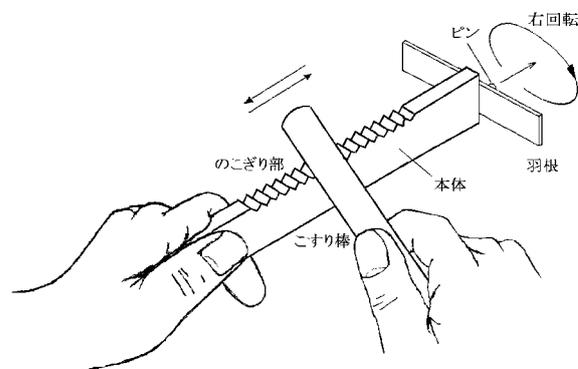


Fig.1 Gari - Gari Dragonfly (Oyama)

* 愛知工科大学名誉教授, 〒480-1121 愛知県愛知郡長久手町武蔵塚 1212
Emeritus Professor, Aichi University of Technology, 1212 Musashizuka, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi-ken 480-1121, 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, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

2. 強制外力の作用方向（角度 β ）の影響

ガリガリとんぼの羽根の回転のさせ方は、先端の羽根と反対側の本体を左手で持ち、右手で持ったこすり棒で本体の三角形のくぼみ（のこぎり部）の右縁をこすると左手側から本体を見て羽根は右回りの回転をはじめ、またのこぎり部の左縁をこすると羽根は左回りの回転をする。竹製ガリガリとんぼ（大山）のこすり棒を Fig.1 の矢印方向の往復に要する時間は約 0.5s（1 往復で約 20 山をこする）、したがってピンの強制外力の振動数はほぼ $f=40\text{Hz}$ （角振動数 $\omega=250\text{rad/s}$ ）であった。Fig.1 のほかにも、本体の断面形状、のこぎり部の位置などの異なるものがあり、その代表的なものを Table 1 に示す。本研究では、主として竹製のガリガリとんぼ（大山）の回転実験を示し、最後に木製のガリガリとんぼ（ドイツ製やダイソー社製）の羽根の回転実験を報告する。

Table 1 Various kinds of Gari-Gari Dragonfly

ガリガリとんぼ	材料	本体断面図とのこぎり部
おかしな棒, モーじィ・クリーク木工所 ウエズリィ, アーカンソー州, アメリカ	木	
ドイツの玩具	木	
大山鐘一 (1903~1997) 大山英利 (1926~) 三州足助屋敷, 豊田市 足助町	竹	
和田太郎 (1917~2002) 岐阜県恵那市岩村町	竹	
半田 毅 (1952~) 愛知工科大学開学パーティの記念品 (2000年6月11日), 蒲郡市	アクリル樹脂	
ダイソー会社, 東広島市	木	

本体のこぎり部をこする時、こすり棒から本体に対して振動的な外力を与えることになる。Fig.2 のように、水平軸とこすり棒のなす角 α を変える、すなわち Fig.2 の外力の作用する角度 $\beta = 90^\circ - \alpha$ を変えることにより、羽根がどちらの方向に回転するか、または羽根が回らないのかを本体先端から 280mm のところを左手で持ち、それぞれ 20 回ずつ同じ角度 β で回転実験をした。羽根の穴径 $D=2.1\text{mm}$ 、ピンの外径 $d=1.6\text{mm}$ ($D/d=1.31$) で実験を行った。

竹製のガリガリとんぼ（大山）の羽根回転の実験結果を Fig.3 に示す。ガリガリとんぼ（大山）の本体の断面は長方形（Fig.2）であり左手で本体を水平に持ち、のこぎり部を右手のこすり棒でこすった。まず (a) のこぎり部の右縁 A をこすったとき ($60^\circ \geq \beta \geq 30^\circ$)、羽根

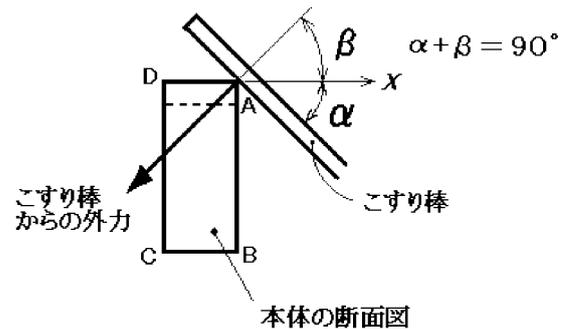


Fig.2 Direction of external force (Oyama)

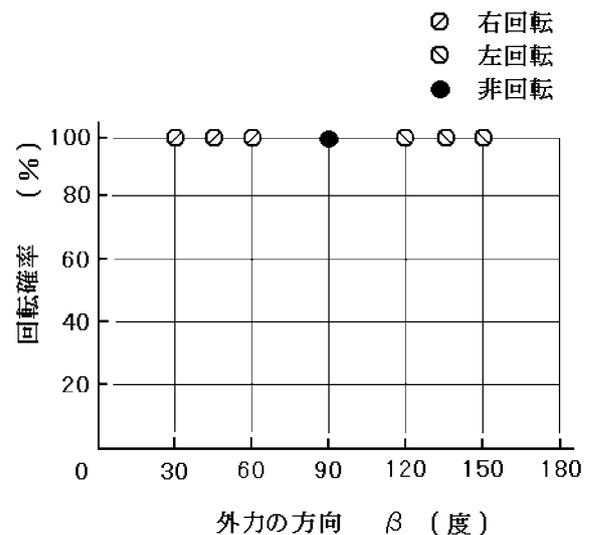


Fig.3 Gari - Gari Dragonfly (Oyama, $D/d=1.31$)
Hole diameter $D=2.1\text{mm}$, pin diameter $d=1.6\text{mm}$

は勢いよく本体から見て右回転する。(b) のこぎり部の左縁 D をこすったとき ($150^\circ \geq \beta \geq 120^\circ$)、羽根は勢いよく左回転する。

また、(c) のこぎり部の真上 (A-D 面) をこすったとき ($\beta = 90^\circ$) は、羽根はまったく回転しない。具体的には、 $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ で羽根は本体後方から見て確率 100% の右回転 (○印)、また $\beta = 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$ で確率 100% の左回転 (⊙印) であった。なお、 $\beta = 90^\circ$ では羽根がまったく回転しない確率 100% (●印) であることがわかった。

3. 羽根の穴とピンとのすき間の影響 (本体は手持ち)

3.1 本体が水平方向の場合

次に、羽根の穴とピンとのすき間による羽根の回転方向への影響を調べるために、竹製のガリガリとん

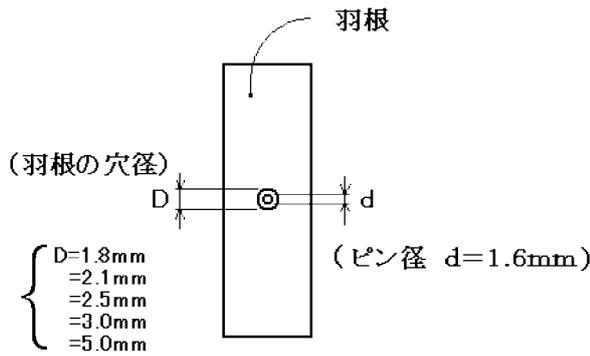


Fig.4 Hole diameters of rotor and pin diameter (Oyama)

ぼ (大山) を使用してその羽根の穴径を Fig.4 のごとく $D=2.1\text{mm}$ 以外に 4 種類について、すき間の大小による羽根の回転への影響を調べてみた。なお、本体は水平に保ち、ピンの外径は $d=1.6\text{mm}$ の一定である。

2 章と同様、本体先端から 280mm のところを左手で持ち、羽根の穴径 D を変化させそれぞれ 20 回ずつ回転実験をしたところ、羽根の穴径が $D=1.8\text{mm}$ ($D/d=1.13$), $D=2.5\text{mm}$ ($D/d=1.56$) の場合は Fig.3 とまったく同じ結果となったのでここでは図を示さない。また、羽根の穴径が大きい $D=3.0\text{mm}$ ($D/d=1.88$) の場合は Fig.5 に示すように角度 $\beta=90^\circ$ の場合のみ羽根が回らなかったり、左か右へ羽根が回転したりと回転方向が不確定であった。その他の角度 β では Fig.3 と同様の回転結果となった。

さらに羽根の穴径が大きい $D=5.0\text{mm}$ ($D/d=3.13$) の場合は、Fig.6 のごとく角度 $\beta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の場合には羽根は右回転する傾向はあるが回らない時も多い。角

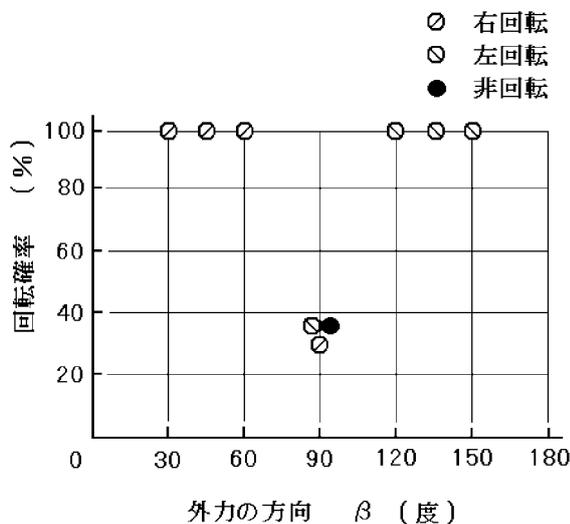


Fig.5 Gari - Gari Dragonfly (Oyama, $D=3.0\text{mm}$, $D/d=1.88$)

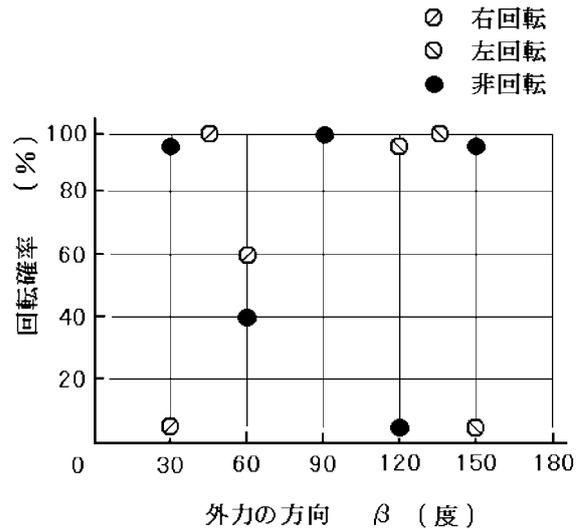


Fig.6 Gari - Gari Dragonfly (Oyama, $D=5.0\text{mm}$, $D/d=3.13$)

度 $\beta=120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$ の場合も羽根は左回転の傾向は示すが回転確率は 100% ではない。

以上より、羽根とピンのすき間が大きくなると回転方向は変わらないものの、回らない場合が現れ回転方向は不確定となることがわかる。

なお、以上の結果を Fig.7 に示す。図の横軸に羽根の穴の内径とピンの外径の比 (D/d) をとり、外力の方向 $\beta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の場合で羽根が右回転する確率をまとめたものである。

Fig.7 より、羽根の回転方向が 100% の確率で決まるためには、羽根の穴の内径とピンの外径との直径比 D/d および、こすり棒から本体に対して振動的な外力を与える角度 β が影響していることがわかる。大山の羽根の穴とピンの直径比 $D/d=1.31$ は経験に基づき求められたものと思われるが、回転実験から見ると最適値に近いところでガリガリとんぼが作られていると言える。

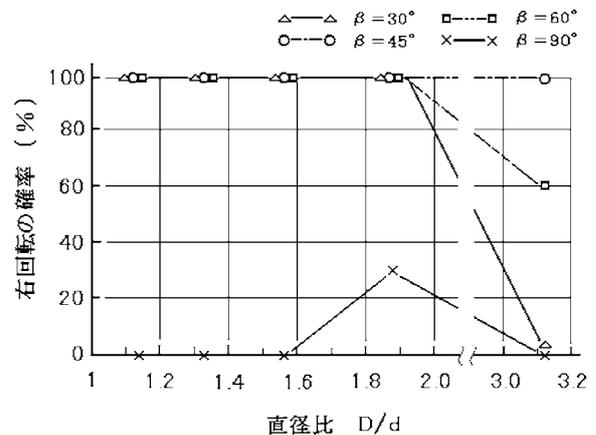


Fig.7 Effect of diameter ratio D/d (Oyama, $90^\circ \geq \beta > 0^\circ$)

3.2 本体が垂直の場合（羽根を下に向ける）

重力が羽根の回転方向にどれだけ影響を与えるのかを確認するため羽根を下側に向け 3.1 節と同様、本体先端から 280mm のところを左手で持ち、20 回ずつ同じ羽根の穴径 D で回転方向の実験をした。羽根の穴径とピンのすき間を変えているため、ピンの先端と羽根の間にビーズを入れ両者間の摩擦を少なくし、羽根が下に抜けないうようにして実験を行った。Fig.7 と比較できるようにまとめた実験結果を Fig.8 に示す。Fig.8 より外力の作用する角度 $\beta = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ の場合は、羽根の穴とピンの直径比 $D/d = 1.13 \sim 1.88$ までは Fig.7 と同様、羽根が右回転する確率は 100% であることがわかる。

羽根の穴径 $D = 5.0\text{mm}$ ($D/d = 3.13$) の場合は Fig.7 と比較して右回転する確率が低下している。これは水平の場合は羽根が重力で常にピンに接しているため右回転する確率が高いためと思われる。

また、 $\beta = 90^\circ$ の場合はもともと回転方向が不確実な領域である。以上のことより、羽根の穴の内径とピンの外径のすき間があまり大きくならなければ ($D/d = 1.13 \sim 1.88$ の範囲にあれば) 重力の影響は考えなくて良いことがわかった。

4. 本体の支持方法の違い（手持ちと固定支持）の影響

4.1 本体が水平の場合

本体の支持方法により羽根の回転方向に差が出るか確かめるため、竹製のガリガリとんぼ（大山, $D = 2.1\text{mm}$, $D/d = 1.31$ ）を用い本体を先端から 280mm のところを万力で水平に固定し、20 回ずつ同じ角度 β で羽根の回転方向の実験を行った。実験結果を Fig.9 に示す。Fig.9 の

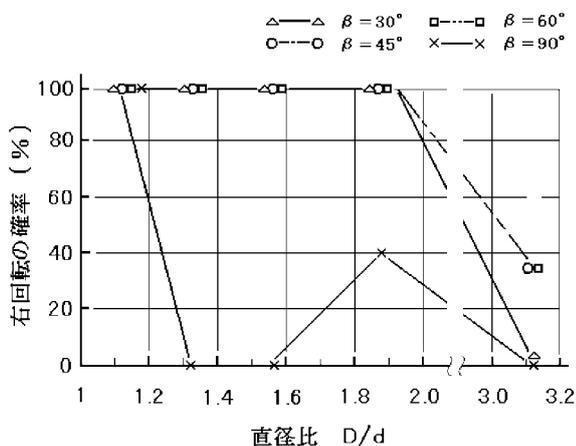


Fig.8 Gravitational effect of the rotor (Oyama, $90^\circ \geq \beta > 0^\circ$)

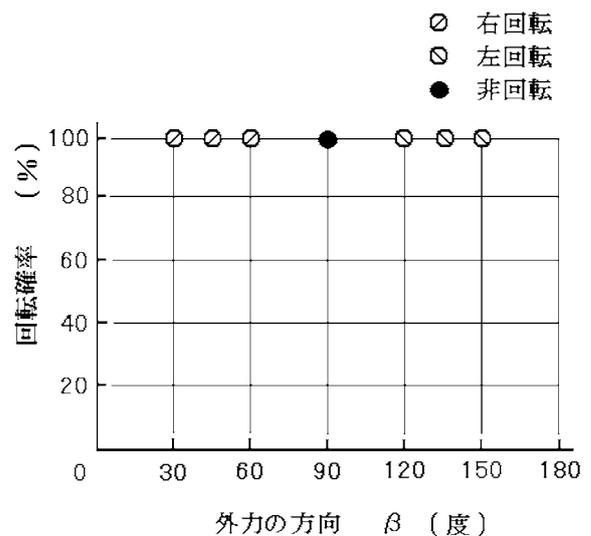


Fig.9 Main body fixed with vise (Oyama)

結果は本体を手で持った時の実験結果である Fig.3 とまったく同一となり、水平支持の場合は本体を手で持った場合と万力で固定した場合による回転方向の違いは差がないことがわかった。

4.2 本体が垂直の場合

次に、羽根を下に向けた場合で、本体を手で持った場合と万力で固定した場合の本体の支持方法の違いによる回転方向の実験を竹製のガリガリとんぼ（大山, $D = 2.1\text{mm}$, $D/d = 1.31$ ）を用い 4.1 節と同一条件で行った。

Fig.10 は羽根を下に向けて本体を手で持った場合を示し、Fig.11 に羽根を下向きにして本体を万力で固定した場合の実験結果を示す。角度 $\beta = 90^\circ$ のとき、回転方向は不確実であるため差が出たものの角度 $\beta = 30^\circ, 45^\circ$,

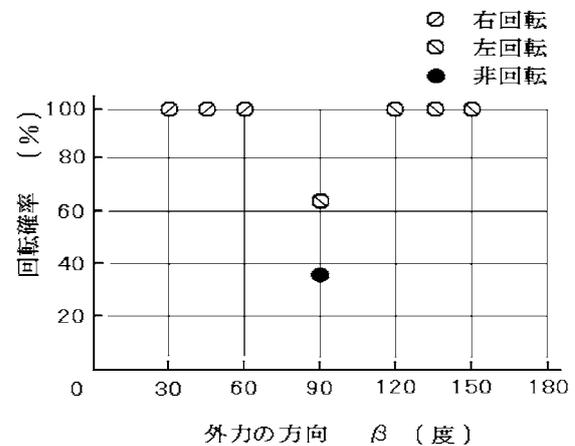


Fig.10 Main body supported by hand (Oyama)

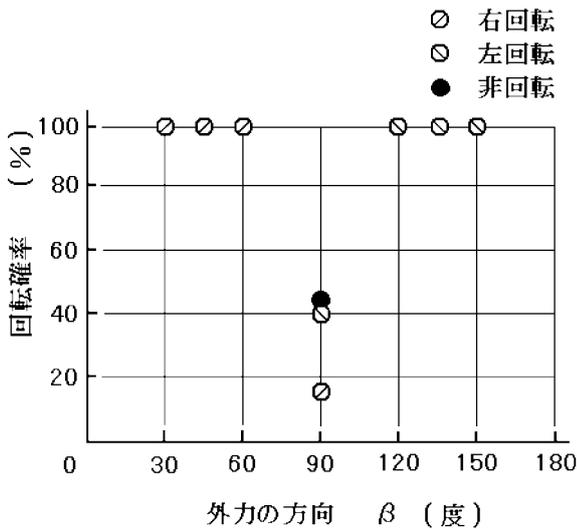


Fig.11 Main body fixed with vise (Oyama)

60°で Fig.10, Fig.11 とも確率 100% で本体から見て羽根は右回転し、角度 $\beta = 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$ で Fig.10, Fig.11 とも確率 100% で本体から見て羽根は左回転した。

以上のことより、本体が垂直の場合も本体を手で持った場合と万力で固定した場合で回転方向に差は生じないこともわかった。

5. 本体の一部分を2指で接触した時の回転実験 (本体固定支持)

竹製のガリガリとんぼ (大山) を使用して、本体先端から 280mm のところを万力で固定し、Fig.12 のように万力固定部より $a=50\text{mm}, 100\text{mm}, 150\text{mm}$ の3箇所の本体内部分をそれぞれ (1) 両側面を2指で接触する (2) 本体上下面を2指で接触する、の二つの場合で羽根の回転方向の実験を行った。 $a=50\text{mm}, 100\text{mm}$ では (1), (2) の方法とも羽根の回転は Fig.9 (本体は固定支持) に示す結果と同一となった。しかし、 $a=150\text{mm}$ の場合は外力の作用する角度 β がどの角度であっても羽根は回転しない

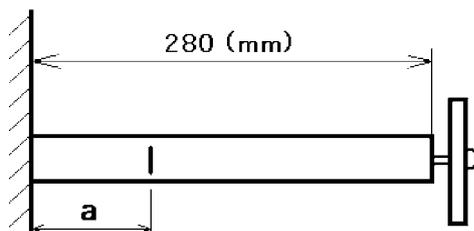


Fig.12 Position where a main body is touched by two fingers

い結果となった。このことは、 $a=150\text{mm}$ では本体の振動減衰がオーバードamping状態でピンの振幅が著しく小さく羽根が回転できないことを示している (つづく第2報の Table 1 (2) を参照のこと)。

6. ドイツ製, ダイソー社製の木製ガリガリとんぼ (本体は手持ち)

木製のガリガリとんぼ (ドイツ製) と木製のガリガリとんぼ (ダイソー社製) の断面図を Fig.13 に示す。

木製のガリガリとんぼ (ドイツ製) と木製のガリガリとんぼ (ダイソー社製) の羽根の回転実験の結果を Fig.14, Fig.15 に示す。

木製ガリガリとんぼ (ドイツ製) は Fig.13 の左図でわかるように本体の断面が正方形を 45° 回転させた本体稜線 A にのこぎり部が作られているため外力の作用する角度は $\beta = 90^\circ$ だけとなる。 Fig.14 の左図は、左手で本体を持ち、右手で持った水平のこすり棒でのこぎり部をこすった場合である。 Fig.14 の右図は、右手で本体を持

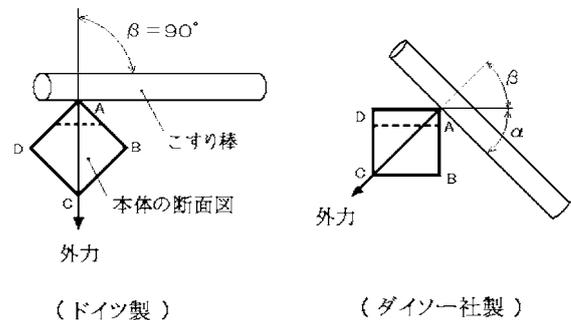


Fig.13 The sectional views of the Gari-Gari Dragonfly made of Germany and Daiso Co.

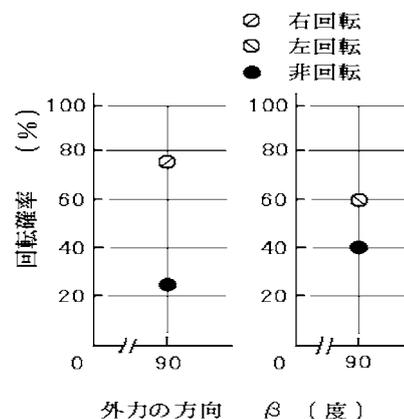


Fig.14 Gari-Gari Dragonfly (Germany)

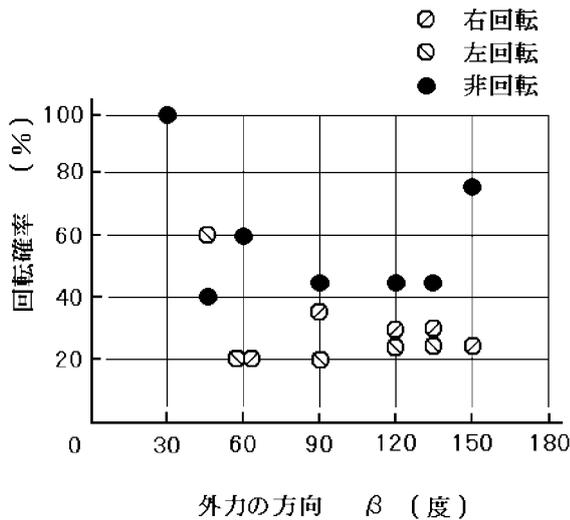


Fig.15 Gari-Gari Dragonfly (Daiso Co.)

ち、左手で水平にこすり棒を持ちのこぎり部をこすった結果を示す。持ち方で結果に若干の差が見られる。また、木製ガリガリとんぼ（ダイソー社製）の本体断面は正方形であり Fig.13 の右図のようにのこぎり部は上部 A—D 面に切つてある。Fig.14 と Fig.15 よりドイツ製およびダイソー社製には、こすり棒でこすっただけでは羽根の回転方向に規則性は認められなかった。

7. まとめ

ガリガリとんぼ（大山）の羽根（ロータ）の回転方向に関する実験により (1) ~ (4) の結論を得た。

- (1) 強制外力の作用方向（角度 β ）により羽根の回転方向が決まる。
- (2) 羽根の回転方向の規則性に関して、羽根の穴の内径とピンの外径との直径比 D/d には最適な範囲があることが確認できた。
- (3) ガリガリとんぼの本体が水平方向と垂直方向の違い（重力の影響）は羽根の回転方向にほとんど影響しない。
- (4) 本体の支持方法として、手で持つ場合と万力で固定する場合には羽根の回転方向に大きな差は生じないことが確認できた。
- (5) ドイツ製・ダイソー社製のガリガリとんぼでは、羽根の回転方向の規則性がほとんどない。

最後に、本研究に対し励ましと助言をいただいた酒井高男・東北大学名誉教授に感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 太田 博：機械と運動の科学，トヨタ技術会ジャーナル，2（1993-9），3.
- 2) 太田 博：機械と運動の科学（身近なふしぎ現象の解明），マルヤス技術会会報，38（1996-7），4.
- 3) 太田 博：ガリガリとんぼ，愛技短通信，11（2000-3），8.
- 4) 太田 博：振動工学の雑話3題，機械学会創立110周年記念・機械工学最近10年のあゆみ，（2007-8），随想4.

補足

この研究に興味を持たれる読者にとり、参考文献^{1)~4)}を参照・検討しようとしても、いずれも不定期刊行物のため入手が困難と思われる。そこで、「ガリガリとんぼ」に関連する部分のみを文献からそのまま引用して「補足」とする。

引用に当り内容の重複はできるだけ避け、羽根の回転方向の定義は、本研究（Fig.1）に統一しました。

(1) のこぎり部をこすり棒でこすると、竹製のこぎり部先端のピンに回転自由に取り付けた竹とんぼは回転を始める。こする場所がのこぎり部の手前（Fig.1）か奥側かにより、竹とんぼの回転方向が逆転するのは、ピンのだ円運動の向きによる¹⁾。

(2) アメリカ・アーカンソー州の木製の「おかしな棒（Hooey stick）」と似た三州足助屋敷の大山鐘一さんの竹製のガリガリとんぼは非常に優れた玩具である。

のこぎりの上面を棒でこするとプロペラは回転しないが、のこぎりのエッジをこするとエッジが手前か裏側により、のこぎり部を保持する左手前から見たプロペラの回転方向は、時計方向（Fig.1）か反時計方向かが決まる。ピンの描くだ円運動の向きとプロペラの回転方向とは正しく一致することが観察される²⁾。

(3) のこぎり部の断面が長方形のために2方向の固有振動数が異なり、低い振動数の方が高い振動数の方より与えられた強制外力に対して振動の位相が遅れ、ピンの先端がだ円を描くためである³⁾。

(4) 木魚や鳴き蛙は楽しい強制振動の例であるが、ガリガリとんぼは難解な強制振動の問題である。のこぎり部の曲げの固有振動数が x, y の2方向に異なれば、強制外力に対して低い固有振動数側の強制振動 x が高い固有振動数側の強制振動 y より位相が遅れる。いま、 x, y 直交座標系の第1象限と第3象限の方向に強制外力を与えれば（Fig.1），羽根は右回転し、反対に第2象限と第4象限の方向に強制外力を与えれば羽根は左回転する⁴⁾。

研究論文

ガリガリとんぼの羽根の回転に関する研究
(第2報, 羽根の回転の発生機構)

太田 博*, 半田 毅**, 壁谷哲矢***

(2009年9月30日受理)

Research on Rotation of a Rotor in Gari- Gari Dragonfly
(2nd Report, Theoretical Consideration on Rotation of a Rotor)

Hiroshi Ota*, Tsuyoshi Handa** and Tetsuya Kabeya***

(Received September 30, 2009)

Abstract

The gari- gari dragonfly is the toy in which the rotor is attached by a pin so that a rotor can be rotated in both directions at the tip of a notched body. Rotation of the rotor is generated by rubbing the edge of a notched body of this toy and the rotating direction is explained by the rotating direction of pin track , and gari- gari dragonfly can be analyzed perfectly by the forced vibrations x, y , and phase lags δ_x, δ_y of gari-gari dragonfly.

キーワード：強制振動 x, y , 羽根の回転, 位相遅れ δ_x, δ_y とその位相差 $\delta_x - \delta_y$, 本体剛性の異方性 k_x, k_y , 本体の減衰係数 n_x, n_y

Keywords : Forced vibration x, y , Rotating direction of rotor, Phase lag of vibration δ_x, δ_y and difference of phase lags $\delta_x - \delta_y$, Unequal rigidity of main body k_x, k_y , Damping ratio of main body n_x, n_y

1. まえがき

玩具のガリガリとんぼの羽根の回転については報告がなされている^{1)~8)}。しかし、羽根の回転の発生機構を明確に述べているものではなく、本論文では、羽根の回転の発生機構を本体の振動^{9)~11)}から考察する。その方法として、本体先端の横振動（本体と垂直方向の振動）を Fig.1 に示すように x と y 方向について算出し、さらにガリガリとんぼ本体に加わる強制外力 P を x, y 方向に分解して P_x, P_y とし、 x, y 方向の円振動数、ばね定数と減衰係数を求め、強制外力によってピンがどのように動くかを計算結果と実験結果で比較する。

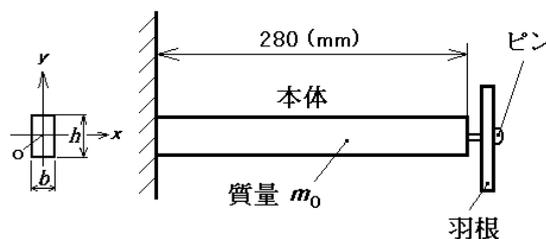


Fig.1 Left hand side of Gari-Gari Dragonfly (Oyama) is fixed with vise

本研究は玩具のガリガリとんぼの羽根（ロータ）の回転の発生機構を論じたものであるが、今なお発生するボルト・ナットのゆるみの原因究明にも役立つであろう。

* 愛知工科大学名誉教授, 〒480-1121 愛知県愛知郡長久手町武蔵塚 1212
Emeritus Professor, Aichi University of Technology, 1212 Musashizuka, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi-ken 480-1121, 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, Nishihama-cho, Gamagori 443-0047, Japan
*** トヨタ車体(株)吉原工場, 〒473-8512 豊田市吉原町上藤池 25 番地
Toyota Autobody Co., Ltd. 25, Kamifuji-ike, Yoshiwara-cho, Toyota 473-8512, Japan

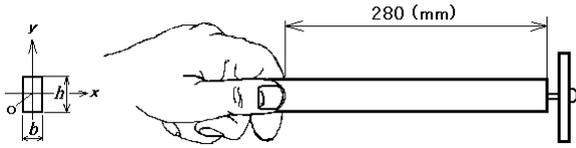


Fig.2 Gari-Gari Dragonfly (Oyama) is supported by left hand

2. ガリガリとんぼの振動測定とモデル化^{9)~11)}

2.1 ガリガリとんぼの振動測定

竹製ガリガリとんぼ（大山）の本体を先端から280mmのところを手で持って、(1) 本体だけの振動、(2) 本体に羽根をつけた場合の振動、をそれぞれ測定した。

測定項目は、Fig.2のごとく本体を左手で持った方向から見て横軸を x 、縦軸を y として、 x 方向と y 方向の円振動数 p (rad/s)、減衰係数 n (rad/s)および減衰率 n/p を求め、それぞれ下つきの添字 x, y を付けた。測定結果をTable 1 (1), (2) に示す。

Table 1 (2) から本体に羽根をつけた場合はピンと羽根のすきま間のために大きな衝突減衰効果が生じ、円振動数は測定できず、減衰率 $n/p > 1$ のオーバードampingの状態であることがわかった⁹⁾。

Table 1 Gari-Gari Dragonfly supported by hand (Oyama)

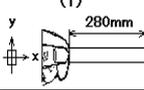
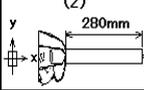
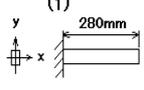
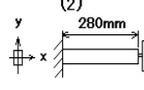
手支持	(1) 		(2) 	
	y	x	y	x
円振動数 p_x (rad/s)	50.3	—	—	—
円振動数 p_y (rad/s)	74.0	—	—	—
減衰係数 n_x (rad/s)	3.70	—	—	—
減衰係数 n_y (rad/s)	8.14	—	—	—
減衰率 n_x/p_x	0.074	—	—	過減衰
減衰率 n_y/p_y	0.110	—	—	過減衰

Table 2 Gari-Gari Dragonfly fixed with vise (Oyama)

万力固定	(1) 		(2) 	
	y	x	y	x
円振動数 p_x (rad/s)	256	201	—	—
円振動数 p_y (rad/s)	556	509	—	—
減衰係数 n_x (rad/s)	6.65	13.8	—	—
減衰係数 n_y (rad/s)	12.46	28.1	—	—
減衰率 n_x/p_x	0.0260	0.0685	—	—
減衰率 n_y/p_y	0.0224	0.0552	—	—

また、本体の固定の仕方が円振動数、減衰係数および減衰率にどのような影響を与えるかを調べるために、本体先端から280mmの左端部を万力で固定してTable 1と同様の実験を行った。その結果をTable 2 (1), (2) に示す。

本体が長方形断面 ($b < h$) のためにTable 2 (1), (2) とも円振動数 p_x は p_y の1/2~1/3倍となる。また減衰率 n/p は x 方向、 y 方向とも羽根なしに比べて羽根を取り付けた場合が2~3倍も大きい。

Table 1 (1) とTable 2 (1) の実験結果より、本体だけの振動を比較すれば本体を左手で持った場合の減衰率 n/p が約0.1であるのに対し、本体を万力で固定した場合の減衰率 n/p は約0.02と、1/3~1/5倍も小さな値になっていることもわかる。また、手持ちに比べて万力固定の場合は円振動数 p_x は5倍、 p_y は8倍も大きくなる。このように手持ちと万力固定では大きな違いがあることは当然のことである。

上述のように手持ちと万力固定とはガリガリとんぼの円振動数、減衰係数、減衰率など大差があるが、羽根の回転実験（第1報）⁸⁾ に関してはほとんど差異がないので、羽根の回転の発生機構のモデルとしてTable 2 (2) の場合を検討すればよい。

2.2 ガリガリとんぼの振動モデル

ガリガリとんぼを1質点とばねと粘性ダンパに置き換えた x, y それぞれ1自由度振動系の振動モデル (Fig.3) を考える。

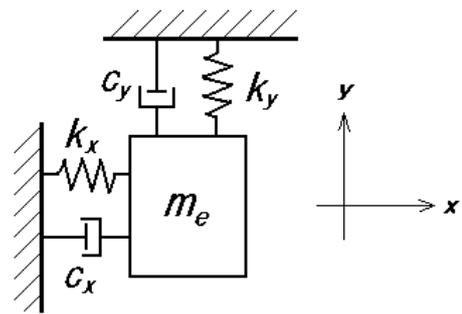


Fig.3 Vibration model of one degree of freedom system x, y

まず始めに、ガリガリとんぼ（大山）の x 方向と y 方向の円振動数 p_x, p_y を求める。ガリガリとんぼは本体を万力で固定し、本体上部にあるのこぎり部を棒でこする。ガリガリとんぼ本体を片持ちはりに置き換え、さらにFig.1の連続体振動系をFig.4の先端の等価集中質量系に置き換える¹¹⁾。

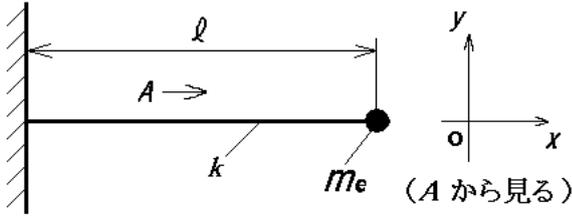


Fig.4 Vibration of a concentrated mass system x, y

次に本体の断面二次モーメント I_0 とヤング率 E , はりの長さ l からガリガリとんぼ本体先端の上下, 左右方向のばね定数 k を出す. 最後に, ばね定数と等価集中質量から円振動数が求まる. ここで, 実験に用いる竹製ガリガリとんぼ (大山) の質量 m_0 および比重は次の通りである.

ガリガリとんぼの全質量	$m = 0.030 \text{ kg}$
本体の振動部分の質量	$m_0 = \rho l = 0.02023 \text{ kg}$
先端の羽根 (ロータ) とピンの質量	$m_1 = 0.0030 \text{ kg}$
孟宗竹の比重	0.903

ここで, Fig.1 の本体断面の寸法は, $b = 5 \text{ mm}$, $h = 16 \text{ mm}$ である. 先端に集中質量のある片持ちはりの1自由度系 (Fig.4) の横方向の円振動数 $p = \sqrt{k/m_e}$ と, Fig.1 の連続体振動系の1次モードの円振動数⁹⁾ $p_1 = (1.875/l)^2 \sqrt{EI_0/\rho}$ とを $p = p_1$ と置くことで等価集中質量 m_e は次式で与えられる^{9)~11)}.

$$m_e = 0.2427m_0 \quad (1)$$

本研究のガリガリとんぼの等価集中質量 m_e は, さらに先端部の羽根 (ロータ) とピンの質量 m_1 を加える.

$$m_e = 0.2427m_0 + m_1 = 0.00791 \text{ kg} \quad (2)$$

次に, ガリガリとんぼ本体の断面二次モーメント I_0 を用いて先端のばね定数 k を求める. 孟宗竹のヤング率は $E = 1.225 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ であり, $O-x$ 軸まわりの断面二次モーメントは $I_{0x} = bh^3/12 = 1.71 \times 10^{-9} \text{ m}^4$, $O-y$ 軸まわりの断面二次モーメントは $I_{0y} = bh^3/12 = 1.71 \times 10^{-9} \text{ m}^4$ となり, 長さ $l = 0.280 \text{ m}$ より, x 方向のばね定数は $k_x = 3EI_{0y}/l^3 = 279.6 \text{ N/m}$, y 方向のばね定数は $k_y = 3EI_{0x}/l^3 = 2863.0 \text{ N/m}$ より本体の円振動数 p_x, p_y は

$$p_x = \sqrt{\frac{k_x}{m_e}} = 188.0 \text{ rad/s} \quad (3)$$

$$p_y = \sqrt{\frac{k_y}{m_e}} = 601.6 \text{ rad/s} \quad (4)$$

となる. 式 (3), (4) の計算値は Table 2 (2) の実測値 p_x, p_y に近い値である. 固有振動数 f_x, f_y は次式(5)となる.

$$f_x = \frac{p_x}{2\pi} = 29.9 \text{ Hz}, \quad f_y = \frac{p_y}{2\pi} = 95.8 \text{ Hz} \quad (5)$$

3. 減衰があるガリガリとんぼの強制振動

ガリガリとんぼ本体の先端に作用する強制外力 P を Fig.5 に示す.

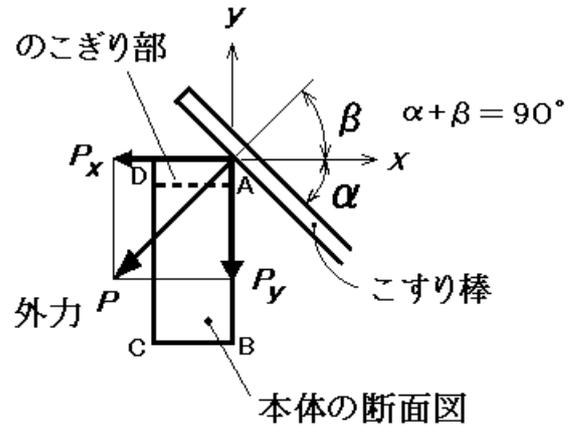


Fig.5 Direction angle β of external force P

強制外力 P は, のこぎり (ノッチ) 部をこするため時間 t とともに基本振動の周期 $T = 2\pi/\omega$ で変化する

$$P = P_0 + P_1 \cos \omega t + P_2 \cos(2\omega t + \beta_2) + P_3 \cos(3\omega t + \beta_3) + \dots \quad (6)$$

となる. 一般的には, 羽根を回転させるのに関係が深いのは式 (6) の角振動数の最も低い第2項 $P_1 = \cos \omega t$ である. よって, x 方向と y 方向の強制外力は

$$P_x = P_{1x} \cos \omega t, \quad P_y = P_{1y} \cos \omega t \quad (7)$$

とする. 次にガリガリとんぼは Fig.3 のように, ばね定数 k_x, k_y とダンパの減衰係数 c_x, c_y で書き表され x, y の2方向にそれぞれ独立の1自由度振動系を考える (Fig.3). 強制外力が作用すると質点に加わる力は, ばね力, 減衰

力，強制外力の三つであるから，ニュートンの第2法則を用いて， x, y に関する運動方程式を求めてみると，まず

$$x = \delta'_{sx} M_{fx} \cos(\omega t - \delta_x) \quad (8)$$

を得る．ここに x 方向の静たわみは $\delta'_{sx} = P_x/k_x$ である．また，減衰係数 $n_x = c_x/2m_e$ を用いて式 (8) の振幅拡大率 M_{fx} ，位相遅れ δ_x は次式 (9)，(10) となる^{9), 10)}．

$$M_{fx} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p_x^2}\right)^2 + \left(\frac{2n_x}{p_x} \cdot \frac{\omega}{p_x}\right)^2}} \quad (9)$$

$$\delta_x = \tan^{-1} \frac{\frac{2n_x}{p_x} \cdot \frac{\omega}{p_x}}{1 - \frac{\omega^2}{p_x^2}} \quad (10)$$

y 方向の静たわみ $\delta'_{sy} = P_y/k_y$ を用いれば y は

$$y = \delta'_{sy} M_{fy} \cos(\omega t - \delta_y) \quad (11)$$

となる．式 (11) の M_{fy} ， δ_y は次式 (12)，(13) で与えられる^{9), 10)}．ここで， $n_y = c_y/2m_e$ を用いる．

$$M_{fy} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p_y^2}\right)^2 + \left(\frac{2n_y}{p_y} \cdot \frac{\omega}{p_y}\right)^2}} \quad (12)$$

$$\delta_y = \tan^{-1} \frac{\frac{2n_y}{p_y} \cdot \frac{\omega}{p_y}}{1 - \frac{\omega^2}{p_y^2}} \quad (13)$$

羽根つきガリガリとんぼ (大山) の左端を万力で固定した Table 2 (2) の実験結果から減衰率 $n/p = n_x/p_x = n_y/p_y = 0.1$ を用いて，式 (9)，(12) より計算した振幅拡大率 M_f の強制外力の角振動数 ω に対する変化の様態を Fig.6 に示す⁹⁾．

また式 (10)，(13) を用いて計算した位相遅れ δ の強制外力の角振動数 ω に対する変化の様態を Fig.7 の実線で示す⁹⁾．Fig.7 中の破線は位相差 $\delta_x - \delta_y$ で，ピンの軌跡の右向き，左向きを決める大切な値となる．Fig.6, Fig.7 から振幅拡大率や位相遅れが同じ角振動数 ω に対して x, y 方向で大幅に違うことがわかる．Fig.7 の位相差 $\delta_x - \delta_y$ は x 方向の共振点 p_x を超えた ω で大きな値 (160°)

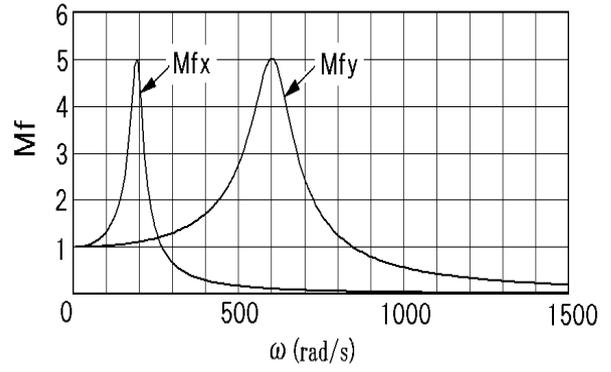


Fig.6 Magnification factor M_{fx} , M_{fy} and angular frequency ω (Oyama)

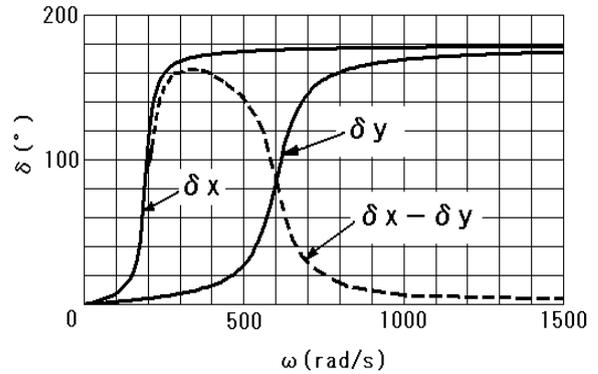


Fig.7 Phase angle of lag δ_x , δ_y , $\delta_x - \delta_y$ and ω (Oyama)

を示す．なお，ガリガリとんぼの，のこぎり部をこする場合の強制外力の振動数は $f = 24 \sim 48\text{Hz}$ (角振動数 $\omega = 150 \sim 300 \text{ rad/s}$) である．

4. 振動を与えたときのピンの運動

前章と同様に，減衰率 n/p を $n/p=0.1$ の値を用い，Fig.5 の外力の働く角度 $\beta=45^\circ$ と固定して考え，角振動数 ω を変えたときピンにどのような振動が発生するかを調べてみた． $\omega=150 \text{ rad/s}$ のときの振幅拡大率 M_{fx} ， M_{fy} ，位相遅れ δ_x ， δ_y ，位相差 $\delta_x - \delta_y$ は，式 (9)，(12) および式 (10)，(13) より

$$M_{fx} = 2.5196, \quad \delta_x = 0.4138 \text{ rad} = 23.707^\circ$$

$$M_{fy} = 1.0648, \quad \delta_y = 0.0531 \text{ rad} = 3.044^\circ$$

$$\delta_x - \delta_y = 20.7^\circ$$

が求められる．このときの x, y 方向の振動波形は式 (8)，(11) より求められる．この二つの振動波形を時間幅 $\Delta t = 0.003\text{s}$ ごとに無次元変位 x/δ'_{sx} ， y/δ'_{sy} を示すと Fig.8 のような波形となる．

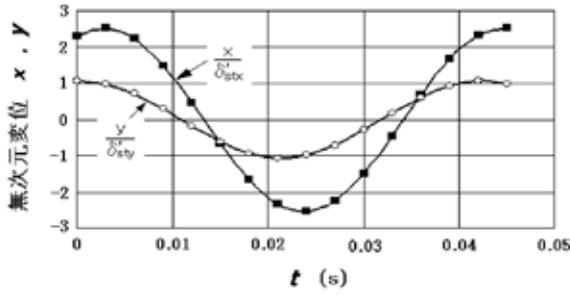


Fig.8 Non-dimensional displacements and time ($\omega=150$ rad/s, $\delta_x-\delta_y=20.7^\circ$)

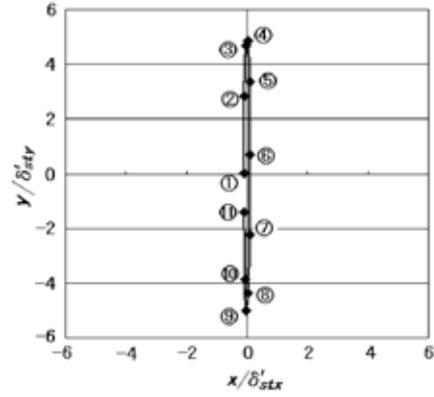


Fig.11 Tracks of pin ($\omega=600$ rad/s, $\delta_x-\delta_y=86.1^\circ$)

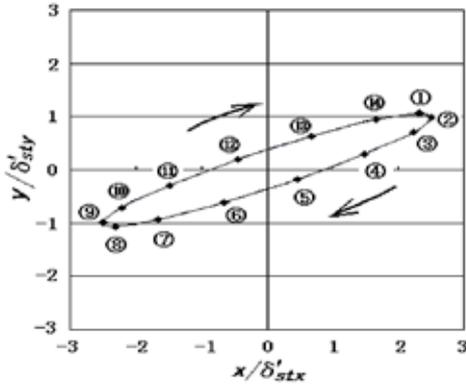


Fig.9 Tracks of pin ($\omega=150$ rad/s, $\delta_x-\delta_y=20.7^\circ$)

この二つの変位 x, y を直角座標 (x, y) 上に合成すると Fig.9 となり、ピンの動きと軌道がわかる。Fig.9 中の数字は $\Delta t = 0.003$ s ごとの印である。また、 $\omega=150$ rad/s のときピンの動きは①→⑭の右まわりの楕円軌跡を描くことがわかる (周期 $T=0.042$ s)。

同様に、 $\omega=200$ rad/s のときの $M_{fx}=3.996$, $M_{fy}=1.1211$,

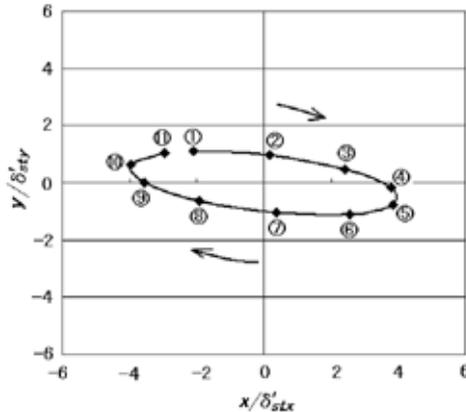


Fig.10 Tracks of pin ($\omega=200$ rad/s, $\delta_x-\delta_y=117.5^\circ$)

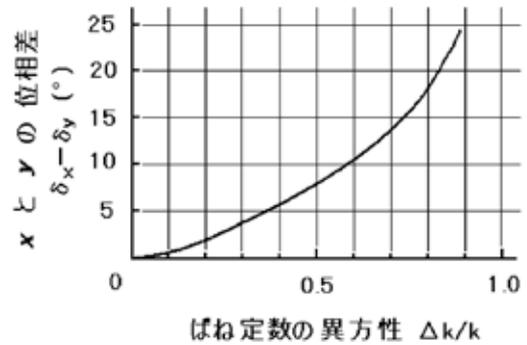


Fig.12 Phase difference due to inequality of spring constant (Oyama)

$\delta_x=2.1252$ rad, $\delta_y=0.0748$ rad を与えれば、 x, y の合成図は、Fig.10 の①→⑭の右まわりの軌跡となる (周期 $T=0.031$ s)。

また、 $\omega=600$ rad/s のとき $M_{fx}=0.1086$, $M_{fy}=5.0116$, $\delta_x=3.0772$ rad, $\delta_y=1.5688$ rad を与えれば、 x, y の合成図は、①→⑭の右まわりの軌跡の Fig.11 となる (周期 $T=0.010$ s)。

次に、本体の剛性の異方性の影響を見るために、ガリガリとんぼ (大山) の本体の断面積 $A=b \times h=80$ mm² の条件で b と h を変えて、剛性の異方性の無次元量 $\Delta k/k=(k_y-k_x)/(k_x+k_y)$ に対する x 方向と y 方向との間の位相差 $\delta_x-\delta_y$ の変化を Fig.12 に示す。

ここで、 $\beta=45^\circ$, $\omega=150$ rad/s, $n_x/p_x=n_y/p_y=n/p=0.1$ とする。

Fig.12 より、剛性の異方性 $\Delta k/k$ が大きくなると位相差 $\delta_x-\delta_y$ は 2 次関数的に大きくなり、本体の長方形断面形状がピンの楕円軌跡の形に大きく影響していることがわかる。またガリガリとんぼ (大山) は $\Delta k/k=0.822$ であり、

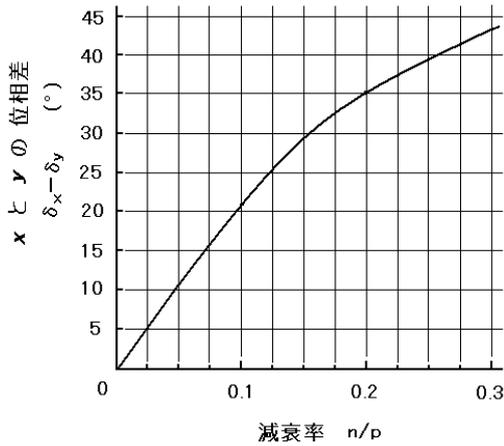


Fig.13 Phase difference due to damping ratio (Oyama)

本体先端のピンが楕円軌跡を描きやすい本体断面寸法になっている。

次に、減衰率 $n/p = n_x/p_x = n_y/p_y$ の大きさを 0 ~ 0.3 の間で変化させた場合の位相差 $\delta_x - \delta_y$ を求めたものが Fig.13 である。条件として、ガリガリとんぼ (大山) の剛性の異方性 $\Delta k/k = 0.822$ を一定として $\beta = 45^\circ$, $\omega = 150 \text{ rad/s}$ とした計算結果を示す。Fig.13 より減衰率 n/p が大きくなるにしたがい位相差 $\delta_x - \delta_y$ はほぼ比例的に大きくなり、Fig.12 と同様に減衰率が本体先端のピンの楕円軌跡に大きく影響していることがわかる。

また、減衰係数の異方性 $\Delta n/n = (n_y - n_x)/(n_y + n_x)$ に対する位相差 $\delta_x - \delta_y$ を計算した結果を Fig.14 に示す。計算条件は $n_x/p_x = 0.1$ に固定し $n_y/p_y = 0 \sim 0.2$ まで変化させた場合を実線で示し、破線は $n_y/p_y = 0.1$ に固定し $n_x/p_x = 0.05 \sim 0.32$ まで変化させたときであり、その他の条件は Fig.13 と同一とした。

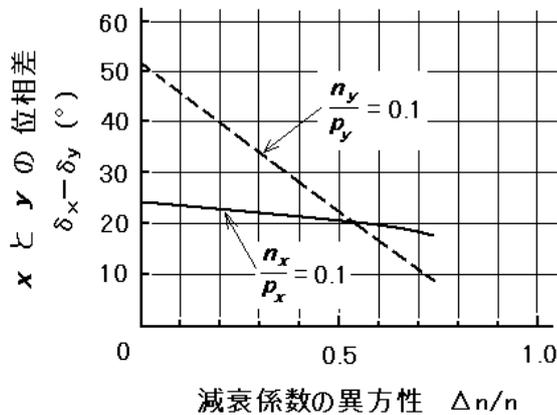


Fig.14 Phase difference due to inequality of damping ratio

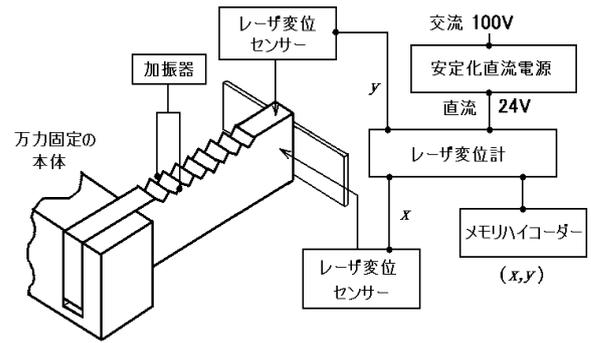


Fig.15 Arrangement of experimental apparatus (Gari-Gari Dragonfly is fixed with vise)



Fig.16 Photograph of experimental apparatus

$n_x/p_x = 0.1$ に固定し n_y/p_y を変化させた場合の位相差 $\delta_x - \delta_y$ の値 (実線) より、 $n_y/p_y = 0.1$ に固定し n_x/p_x を変化させた場合の $\delta_x - \delta_y$ の方 (破線) が大きな値を示している。

5. 実験結果

ガリガリとんぼのこぎり部を本体方向に棒でこする場合は、加振点が固定端から先端へと移動するが、角振動数 ω はほぼ一定で、加振力の大きさ P のみが増大する。そこで本実験では安定したデータを取るため Fig.15 に示すように、ガリガリとんぼの本体の一点に加振器で強制外力を与え、先端の x 方向と y 方向の変位をレーザー変位センサーで測定し、その動きをメモリハイコーダーで記録した。Fig.16 は実験装置の写真である。

ガリガリとんぼ本体の右縁 (Fig.5 の $\beta = 45^\circ$) を角振動数 $\omega = 150, 200, 600 \text{ rad/s}$ で加振した実験結果をそれぞれ Fig.17, Fig.18, Fig.19 に示す。

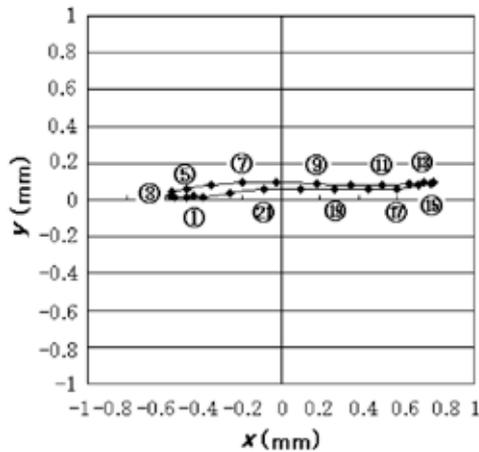


Fig.17 Tracks of pin ($\omega=150$ rad/s)

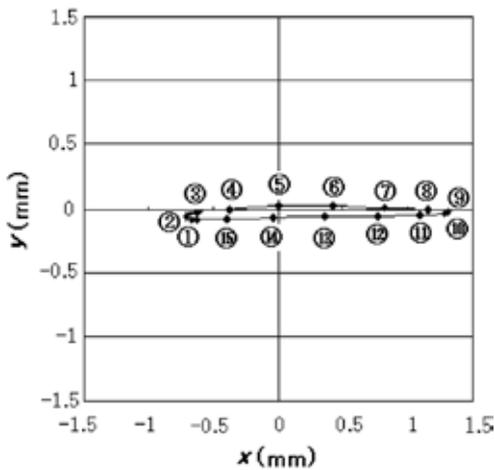


Fig.18 Tracks of pin ($\omega=200$ rad/s)

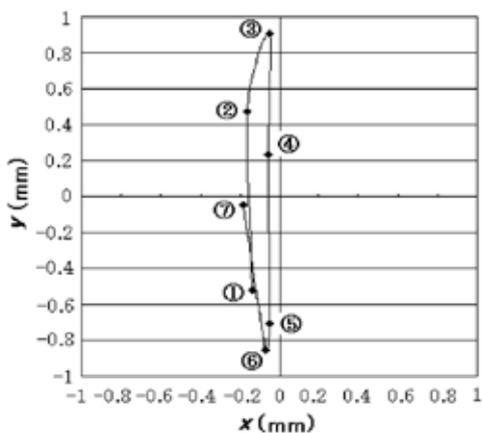


Fig.19 Tracks of pin ($\omega=600$ rad/s)

ガリガリとんぼ（大山）の断面は長方形のため、円振動数が $p_x < p_y$ とその差が大きいとき、 $\omega = p_x$ 付近ではピンの変位は $x \gg y$ かつ位相遅れは $\delta_x \gg \delta_y$ となりピンは右回りの楕円形を描くことを3章、4章で述べたが、実験で同様の結果を確かめることができた。

ガリガリとんぼの羽根（ロータ）の回転を考える場合、 x 方向と y 方向の円振動数 p_x, p_y に大きな差が生じることが必要であり、その原因として本体剛性の異方性 $\Delta k/k$ が考えられるが、その影響を確認することができた。このことは本体の断面形状が羽根の回転に大きく影響を与えている。また、本体の減衰率 n/p も羽根の回転に大きく影響を与えていることがわかった。

位相差 $\delta_x - \delta_y$ が大きいときピンの楕円運動は、その軌跡の長径付近でピンが羽根と接触しピンとの摩擦力が羽根をピンの軌跡方向に回転させることになる。

また、位相差 $\delta_x - \delta_y$ が小さい場合には強制外力の初期条件により羽根の回転方向が偶然的に決まり、羽根の回転の方向が不規則となる。

6. まとめ

ガリガリとんぼ本体の強制振動とピンの楕円軌跡から次のことが明らかになった。

- (1) ガリガリとんぼの振動測定から、手持ちと万力固定とではガリガリとんぼの円振動数、減衰係数、減衰率は大きな差があるが、羽根の回転実験⁸⁾ に関してはほとんど差異がないので、羽根の回転の発生機構のモデルとして羽根つきガリガリとんぼの万力による固定モデルで検討した。
- (2) 強制外力の角振動数 ω と本体の横方向の円振動数 p が近くなったとき、 x, y の2方向の位相差 $\delta_x - \delta_y$ が大きくなり楕円軌跡の向きが羽根の回転方向を決める。
- (3) 位相差が小さい場合には強制外力の初期条件により羽根の回転方向が偶然的に決まるため、羽根回転の方向が不規則となる。
- (4) ばね定数の異方性の無次元量 $\Delta k/k$ が大きくなると位相差 $\delta_x - \delta_y$ は2次関数的に大きくなる。このことは本体の長方形断面形状がピンの楕円軌跡の向きに大きく影響している。
- (5) 減衰率 n/p が大きくなるにしたがい位相差 $\delta_x - \delta_y$ もほぼ比例的に大きくなり、減衰率が本体先端のピンの楕円軌跡の向き（羽根の回転方向）に大きく影響している。
- (6) 減衰係数の異方性 $\Delta n/n$ も位相差 $\delta_x - \delta_y$ にかなりの影響を与えている。

参考文献

- 1) 太田 博：機械と運動の科学，トヨタ技術会ジャーナル，2 (1993-9)，3.
- 2) 太田 博：機械と運動の科学（身近なふしぎ現象の解明），マルヤス技術会会報，38 (1996-7)，4.
- 3) 太田 博：ガリガリとんぼ，愛技短通信，11 (2000-3)，8.
- 4) 太田 博：振動工学の雑話 3 題，機械学会創立 110 周年記念・機械工学最近 10 年のあゆみ，(2007-8)，随想 4.
- 5) 酒井高男：おもちゃの科学，講談社 (1977)，164-173.
- 6) 戸田 盛和：動くおもちゃ，日経サイエンス社 (1983)，98-99.
- 7) 戸田 盛和：おもちゃの科学 1，日本評論社 (1995)，159-163.
- 8) 太田 博・半田 毅：ガリガリとんぼの羽根の回転に関する研究（第 1 報），愛知工科大学紀要 7 (2010-3).
- 9) 山本敏男・太田 博：機械力学（増補改訂版），朝倉書店 (1986)，63.
- 10) 太田 博・加藤正義：わかりやすく例題で学ぶ機械力学，共立出版 (2001)，113.
- 11) 太田 博・半田 毅：ガリガリとんぼの研究に必要な等価集中質量の決定法，愛知工科大学紀要 4 (2007-3)，67-71.

研究論文

Unsteady Thermal Stresses in the Infinite Strip with Slanting Boundaries to the Functionally Graded Direction

Manabu Ohmichi*

(Received September 30, 2009)

Abstract

Unsteady thermal stresses in the infinite strip with slanting boundaries to the functionally graded direction are studied theoretically. The rigorous solution is derived using the stress function method. The material properties are assumed to be exponential functions of the position along the functionally graded direction. The strip is free of surface traction and the prescribed surface temperatures are given. The initial temperature is assumed to be zero over the body. The numerical calculations are carried out for $ZrO_2/Ti-6Al-4V$ functionally graded materials (FGMs). The relationship between thermal stresses and elapsed time is illustrated for certain slanting angle.

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

Introduction

The concept of FGMs was first proposed as high temperature resistant and heat barrier materials by Niino and his colleagues^{1),2)} in 1984. At early stage of the studies for the thermal stresses in FGMs, the one-dimensional steady problem was discussed by Noda and Tsuji^{3),4)} and Tanigawa et al.⁵⁾. Obata and Noda⁶⁾ also investigated steady thermal stresses in FGMs for a hollow circular cylinder and a hollow sphere. The one-dimensional unsteady thermal stresses in FGM plate was discussed by Obata and Noda⁷⁾. After then, main discussions of thermal stresses in FGMs were performed for plane problems. In plane problems, Shabana and Noda⁸⁾ studied combined macroscopic and microscopic analysis of thermo-elasto-plastic stresses in functionally graded material plate by the finite element method (FEM). Shabana and Noda^{9),10)} discussed thermo-elasto-plastic stresses of FGMs with a substrate and a coating, and thermo-elasto-plastic stresses in functionally graded ceramic/metal composite with two-dimensional temperature gradient by the FEM.

On the other hand, plane thermoelastic problems in a functionally graded plate (FGP) with an slanting boundary to the functional graded direction are discussed for the semi-

infinite body¹¹⁾, the strip¹²⁾ and the plate¹³⁾ by Ohmichi and Noda. When FGMs are heated cyclically, since the maximum thermal stresses in FGMs are predicted to occur during the unsteady state, it is very important to study unsteady thermal stresses in FGMs. It becomes indispensable to analyze the unsteady thermal stresses in FGMs with slanting boundaries to the functionally graded direction upon the design of FGMs. The target of this study is to clarify the effects of slanting angle on unsteady thermal stresses in the functionally graded strip with slanting boundaries to the functionally graded direction.

1. The Unsteady Heat Conduction in the Functionally Graded Infinite Strip

The functionally graded strip subjected to partial heating $f(X)$ whose width is $2a$ on the upper surface is shown in **Fig.1**. 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 strip. The relationship between two coordinate systems is

* Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori,

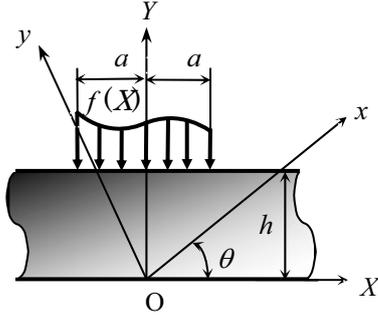


Fig.1 Functionally graded strip subjected to partial heating

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

where θ denotes the slanting angle between x axis and X axis. When the thermal conductivity $k(y)$ upon the design of FGMs 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 strip. 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 temperature boundary conditions, the prescribed temperatures on the surface $Y=0$ and $Y=h$ are assumed to be:

$$T(X, h, t) = \tau_0 \tau(X) \quad (8)$$

$$T(X, 0, t) = 0 \quad (9)$$

where τ_0 denotes the constant temperature and $\tau(X)$ is the known geometric function of temperature on the surface. The non-dimensional variables are introduced.

$$\left. \begin{aligned} x^* &= x/h, \quad y^* = y/h, \quad t^* = t\kappa_0/h^2, \quad T^* = T/\tau_0, \quad \lambda^* = \lambda h, \\ X^* &= X/h, \quad Y^* = Y/h \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

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 strip 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 temperature boundary conditions (8) and (9) expressed by non-dimensional variables is

$$T^*(X^*, 1, t^*) = \tau^*(X^*) \quad (13)$$

$$T^*(X^*, 0, t^*) = 0 \quad (14)$$

where $\tau^*(X^*)$ denotes non-dimensional geometric function of temperature. By means of variable separation, the temperature which satisfies the boundary condition (13) and (14) is obtained:

2. Analysis of Unsteady Thermal Stresses in the Infinite Strip

$$T^*(X^*, Y^*, t^*) = e^{(\lambda^*/2)(X^* \sin \theta - Y^* \cos \theta)} \times \left\{ \int_0^\infty [T_A^*(\beta^*) \cos \beta^* X^* + T_B^*(\beta^*) \sin \beta^* X^*] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2} Y^* d\beta^* + \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty e^{-\frac{(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2}/4)t^*}{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2}} [T_I^*(\beta^*) \cos \beta^* X^* + T_J^*(\beta^*) \sin \beta^* X^*] \sin n\pi Y^* d\beta^* \right\} \quad (15)$$

where $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ are the coefficients which are determined by boundary conditions and Fourier integral theorem:

$$T_A^*(\beta^*) = \frac{e^{\frac{\lambda^*}{2} \cos \theta}}{\pi \sinh \sqrt{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2}} \int_{-\infty}^\infty e^{-\frac{\lambda^*}{2} s \sin \theta} \tau^*(s) \cos \beta^* s ds \quad (16)$$

$$T_B^*(\beta^*) = \frac{e^{\frac{\lambda^*}{2} \cos \theta}}{\pi \sinh \sqrt{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2}} \int_{-\infty}^\infty e^{-\frac{\lambda^*}{2} s \sin \theta} \tau^*(s) \sin \beta^* s ds \quad (17)$$

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 $T_I^*(\beta^*)$ and $T_J^*(\beta^*)$ in Eq. (15) can be determined.

$$T_I^*(\beta^*) = \frac{2n\pi(-)^n \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4}}{\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2}/4} T_A^* \quad (19)$$

$$T_J^*(\beta^*) = \frac{2n\pi(-)^n \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4}}{\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2}/4} T_B^* \quad (20)$$

Substituting Eqs. (19) and (20) into Eq. (15), the temperature which satisfies boundary and initial condition is obtained:

$$T^*(X^*, Y^*, t^*) = e^{(\lambda^*/2)(X^* \sin \theta - Y^* \cos \theta)} \int_0^\infty [T_A^*(\beta^*) \cos \beta^* X^* + T_B^*(\beta^*) \sin \beta^* X^*] \times [\sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* d\beta^* - 2 \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty e^{-\frac{(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2}/4)t^*}{\beta^{*2} + (\lambda^*/2)^2}} \times \frac{n\pi(-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4}}{\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2}/4} \sin n\pi Y^* d\beta^*] \quad (21)$$

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

The equilibrium equations for the plane problem are given by

$$\frac{\partial \sigma_{XX}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{YX}}{\partial Y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{XY}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_{YY}}{\partial Y} = 0 \quad (22)$$

The compatibility equation has the form

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{XX}}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{YY}}{\partial X^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{XY}}{\partial X \partial Y} \quad (23)$$

The constitutive equations are

$$\varepsilon_{XX} = \frac{1}{E^e} (\sigma_{XX} - \nu^e \sigma_{YY}) + \alpha^e T, \quad \varepsilon_{YY} = \frac{1}{E^e} (\sigma_{YY} - \nu^e \sigma_{XX}) + \alpha^e T,$$

$$\varepsilon_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{2G} \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} E^e = E, \nu^e = \nu, \alpha^e = \alpha & \quad \text{for plane stress} \\ E^e = \frac{E}{1-\nu^e}, \nu^e = \frac{\nu}{1-\nu^e}, \alpha^e = (1+\nu)\alpha & \quad \text{for plane strain} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

and the material properties depend on the position. The plane problems in FGMs can be solved by stress function method proposed by Noda and Jin¹⁴. We introduce the stress function χ which relates the stress components as:

$$\sigma_{XX} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial Y^2}, \quad \sigma_{YY} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial X^2}, \quad \sigma_{XY} = -\frac{\partial^2 \chi}{\partial X \partial Y} \quad (26)$$

Substituting Eqs. (26) into Eqs. (24) and Eq. (23), the governing equation of plane thermal stresses for FGMs which the stress function must satisfy is obtained:

$$\nabla^2 \left(\frac{1}{E^e} \nabla^2 \chi \right) - \frac{\partial^2}{\partial X^2} \left(\frac{1+\nu^e}{E^e} \frac{\partial^2 \chi}{\partial Y^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left(\frac{1+\nu^e}{E^e} \frac{\partial^2 \chi}{\partial X^2} \right) + 2 \frac{\partial^2}{\partial X \partial Y} \left(\frac{1+\nu^e}{E^e} \frac{\partial^2 \chi}{\partial X \partial Y} \right) + \nabla^2 (\alpha^e T) = 0 \quad (27)$$

Young's modulus E^e and the coefficient of the linear ther-

mal expansion α^e may be expressed as a function of a variable y , and Poisson's ratio is constant:

$$E^e = E_0 e^{\gamma y}, \alpha^e = \alpha_0 e^{\delta y}, \nu^e = \nu_0 = \text{const.} \quad (28)$$

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

$$\gamma = (1/y_1) \ln(E_1/E_0), \quad \delta = (1/y_1) \ln(\alpha_1/\alpha_0) \quad (29)$$

Substitution of Eqs. (28) into Eq. (27) and introducing non-dimensional variables yields the governing Eq. for FGMs whose boundary is slanting to the functional gradation.

$$\begin{aligned} & \nabla^4 \chi^* + 2\gamma^* \sin \theta \frac{\partial}{\partial X^*} (\nabla^2 \chi^*) - 2\gamma^* \cos \theta \frac{\partial}{\partial Y^*} (\nabla^2 \chi^*) + \gamma^{*2} \nabla^2 \chi^* \\ & - \gamma^{*2} (1 + \nu_0) (\cos^2 \theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial X^{*2}} + \sin^2 \theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial Y^{*2}} + \sin 2\theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial X^* \partial Y^*}) \\ & = -e^{(\gamma^* + \delta^*)X^*} (-\chi^* \sin \theta + Y^* \cos \theta) \\ & \times (\nabla^2 T^* - 2\delta^* \sin \theta \frac{\partial T^*}{\partial X^*} + 2\delta^* \cos \theta \frac{\partial T^*}{\partial Y^*} + \delta^{*2} T^*) \end{aligned} \quad (30)$$

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

$$\chi^* = \frac{\chi}{\alpha_0 E_0 \tau_0 h^2}, \quad \gamma^* = \gamma h, \quad \delta^* = \delta h \quad (31)$$

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

$$\chi^* = \chi_c^* + \chi_p^* \quad (32)$$

We assume the complementary solution χ_c^* of Eq. (30) by

$$\chi_c^* = e^{d^* X^*} \int_0^\infty g(Y^*) (F_1 \cos \beta^* X^* + F_2 \sin \beta^* X^*) d\beta^* \quad (33)$$

where d^* is an unknown constant and F_1 and F_2 are unknown

coefficients. By substituting (33) into the left-hand side of Eq. (30), the following equations are obtained

$$G_1 g(Y^*) F_1 + G_2 g(Y^*) F_2 = 0 \quad (34)$$

$$G_2 g(Y^*) F_1 - G_1 g(Y^*) F_2 = 0 \quad (35)$$

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. (34) and (35) yields

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

where

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

$$\begin{aligned} D_2(p^*) &= 2\beta^* (2d^* + \gamma^* \sin \theta) p^{*2} - 2\beta^* \gamma^* \cos \theta [2d^* + (1 + \nu_0) \gamma^* \sin \theta] p^* \\ &+ 2\beta^* [2d^* (d^{*2} - \beta^{*2}) + (3d^{*2} - \beta^{*2}) \gamma^* \sin \theta + d^* \gamma^{*2} - (1 + \nu_0) d^* \gamma^{*2} \cos^2 \theta] \end{aligned} \quad (41)$$

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

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

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

and

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

The complementary solution (33) becomes

$$\chi_c^* = e^{d^*X^*} \int_0^4 [A_k^*(\beta^*)e^{\tilde{p}_k^*Y^* - i\beta^*X^*} + \tilde{A}_k^*(\beta^*)e^{\tilde{p}_k^*Y^* + i\beta^*X^*}] d\beta^* \quad (44)$$

In the next place, we consider the particular solution of governing Eq. (30). Substituting the temperature distribution (21) into the right-hand side of Eq. (30) yields

$$\begin{aligned}
& \nabla^4 \chi^* + 2\gamma^*\sin\theta \frac{\partial}{\partial X^*} (\nabla^2 \chi^*) - 2\gamma^*\cos\theta \frac{\partial}{\partial Y^*} (\nabla^2 \chi^*) + \gamma^{*2} \nabla^2 \chi^* \\
& - \gamma^{*2} (1 + \nu_0) (\cos^2\theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial X^{*2}} + \sin^2\theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial Y^{*2}} + \sin 2\theta \frac{\partial^2 \chi^*}{\partial X^* \partial Y^*}) = -e^{(\gamma^* + \delta^* \frac{\lambda^*}{2})(-X^* \sin\theta + Y^* \cos\theta)} \\
& \times \int_0^\infty \left\{ [(\lambda^{*2}/2 - \delta^*\lambda^* + \delta^{*2})T_A^* + (\lambda^* - 2\delta^*)\beta^*T_B^* \sin\theta] \sinh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* \right. \\
& + (2\delta^* - \lambda^*)T_A^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} \cos\theta \cosh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* \cos\beta^* X^* \\
& + \{[(2\delta^* - \lambda^*)\beta^*T_A^* \sin\theta + (\lambda^{*2}/2 - \delta^*\lambda^* + \delta^{*2})T_B^*] \sinh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* \\
& + (2\delta^* - \lambda^*)T_B^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} \cos\theta \cosh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* \} \sin\beta^* X^* \Big) d\beta^* \\
& + 2e^{(\gamma^* + \delta^* \frac{\lambda^*}{2})(-X^* \sin\theta + Y^* \cos\theta)} \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2\pi^2 + \lambda^{*2}/4)t} \frac{n\pi(-)^{n+1} \sinh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4}}{\beta^{*2} + n^2\pi^2 + \lambda^{*2}/4} \\
& \times \left\{ (2\delta^* - \lambda^*)n\pi T_A^*(\beta^*) \cos\theta \cos n\pi Y^* + [(\lambda^{*2}/4 - \beta^{*2} - n^2\pi^2 + \delta^{*2} - \delta^*\lambda^*)T_A^*(\beta^*) \right. \\
& + \beta^*(\lambda^* - 2\delta^*)T_B^*(\beta^*) \sin\theta] \sin n\pi Y^* \} \cos\beta^* X^* + \{ (2\delta^* - \lambda^*)n\pi T_B^* \cos\theta \cos n\pi Y^* \\
& + [(2\delta^* - \lambda^*)\beta^*T_A^* \sin\theta + (\lambda^{*2}/4 - \beta^{*2} - n^2\pi^2 + \delta^{*2} - \delta^*\lambda^*)T_B^*] \sin n\pi Y^* \} \sin\beta^* X^* \Big) d\beta^*
\end{aligned} \quad (45)$$

where $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ are given by (16) and (17). We assume the particular solution χ_p^* of governing Eq. (30) by

$$\begin{aligned}
& \chi_p^* = e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^\infty [(A_p^* \sinh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* + B_p^* \cosh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^*) \sin\beta^* X^* \\
& + (C_p^* \sinh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^* + D_p^* \cosh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} Y^*) \cos\beta^* X^*] d\beta^* \\
& + e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^\infty e^{-[\beta^{*2} + \mu^{*2} + (\lambda^*/2)^2]t} \pi(-)^{n+1} \sinh\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} \\
& \times E_p^* (\cos\beta^* X^* + F_p^* \sin\beta^* X^*) (\cos n\pi Y^* + G_p^* \sin n\pi Y^*) d\beta^* \quad (46)
\end{aligned}$$

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

$$\begin{bmatrix} C_{AS} & C_{BS} & C_{CS} & C_{DS} \\ C_{BS} & C_{AS} & C_{DS} & C_{CS} \\ -C_{CS} & -C_{DS} & C_{AS} & C_{BS} \\ -C_{DS} & -C_{CS} & C_{BS} & C_{AS} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p \\ B_p \\ C_p \\ D_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{SS} \\ T_{CS} \\ T_{SC} \\ T_{CC} \end{bmatrix} \quad (47)$$

where

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

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

$$\begin{aligned}
C_{CS} & = -4\beta^*\xi^{*3} - 6\beta^*\gamma^*\xi^{*2}\sin\theta - 2\beta^*\xi^*(2\eta^{*2} + \lambda^{*2}/2 - 2\gamma^*\eta^*\cos\theta + \gamma^{*2}) \\
& - 2\beta^*\gamma^*\sin\theta(\eta^{*2} + \lambda^{*2}/4) + 2(1 + \nu_0)\beta^*\gamma^{*2}\cos\theta(\xi^*\cos\theta + \eta^*\sin\theta) \quad (50)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{DS} & = -4\beta^*\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} (2\xi^*\eta^* + \gamma^*\eta^*\sin\theta - \gamma^*\xi^*\cos\theta) \\
& + (1 + \nu_0)\beta^*\gamma^{*2}\sin 2\theta \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} \quad (51)
\end{aligned}$$

$$T_{SS} = \beta^* (\lambda^* - 2\delta^*) T_A^*(\beta^*) \sin \theta - (\lambda^{*2} / 2 - \delta^* \lambda^* + \delta^{*2}) T_B^*(\beta^*) \quad (52)$$

$$T_{CS} = (\lambda^* - 2\delta^*) T_B^*(\beta^*) \cos \theta \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} \quad (53)$$

$$T_{SC} = -(\lambda^{*2} / 2 - \delta^* \lambda^* + \delta^{*2}) T_A^*(\beta^*) + (2\delta^* - \lambda^*) \beta^* T_B^*(\beta^*) \sin \theta \quad (54)$$

$$T_{CC} = (\lambda^* - 2\delta^*) T_A^*(\beta^*) \cos \theta \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} \quad (55)$$

$$\xi^* = -(\gamma^* + \delta^* - \frac{\lambda^*}{2}) \sin \theta \quad (56)$$

$$\eta^* = (\gamma^* + \delta^* - \frac{\lambda^*}{2}) \cos \theta \quad (57)$$

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

$$\begin{bmatrix} H_1^* & H_2^* & H_3^* & H_4^* \\ -H_2^* & H_1^* & -H_4^* & H_3^* \\ -H_3^* & -H_4^* & H_1^* & H_2^* \\ H_4^* & -H_3^* & -H_2^* & H_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p^* \\ E_p^* G_p^* \\ E_p^* F_p^* \\ E_p^* F_p^* G_p^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^* \\ S_2^* \\ S_3^* \\ S_4^* \end{bmatrix} \quad (58)$$

where

$$\begin{aligned} H_1^* &= (\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - n^2 \pi^2) + (2\gamma^* \xi^* \sin \theta - 2\gamma^* \eta^* \cos \theta + \gamma^{*2})(\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - n^2 \pi^2) \\ &+ 4(\gamma^* \eta^* n^2 \pi^2 \cos \theta - \beta^{*2} \xi^{*2} - \eta^{*2} n^2 \pi^2 - \beta^{*2} \gamma^* \xi^* \sin \theta) \\ &- (1 + \nu_0) \gamma^{*2} [(\xi^{*2} - \beta^{*2}) \cos^2 \theta + (\eta^{*2} - n^2 \pi^2) \sin^2 \theta + \xi^* \eta^* \sin 2\theta] \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} H_2^* &= 2n\pi(2\eta^* - \gamma^* \cos \theta)(\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - n^2 \pi^2) + 4\gamma^* \xi^* \eta^* n\pi \sin \theta - 4\gamma^* \eta^{*2} n\pi \cos \theta \\ &+ 2\gamma^{*2} \eta^* n\pi - (1 + \nu_0) \gamma^{*2} n\pi(2\eta^* \sin^2 \theta + \xi^* \sin 2\theta) \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} H_3^* &= 2\beta^*(2\xi^* + \gamma^* \sin \theta)(\xi^{*2} + \eta^{*2} - \beta^{*2} - n^2 \pi^2) + 4\beta^* \gamma^* \xi^{*2} \sin \theta - 4\beta^* \gamma^* \xi^* \cos \theta \\ &+ 2\beta^* \gamma^{*2} \xi^* - (1 + \nu_0) \beta^{*2} \gamma^{*2} (2\xi^* \cos^2 \theta + \eta^* \sin 2\theta) \end{aligned} \quad (61)$$

$$H_4^* = \beta^* n\pi [8\xi^* \eta^* + 4\gamma^* \eta^* \sin \theta - 4\gamma^* \xi^* \cos \theta - (1 + \nu_0) \gamma^{*2} \sin 2\theta] \quad (62)$$

$$S_1^* = -\frac{2(2\delta^* - \lambda^*) n^2 \pi^2 \cos \theta}{\pi(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4)} T_A^*(\beta^*) \quad (63)$$

$$S_2^* = \frac{2n\pi\{[\beta^{*2} + n^2 \pi^2 - \lambda^{*2} / 4 + \delta^* \lambda^* - \delta^{*2}] T_A^*(\beta^*) + (2\delta^* - \lambda^*) \beta^* \sin \theta T_B^*(\beta^*)\}}{\pi(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4)} \quad (64)$$

$$S_3^* = \frac{2(\lambda^* - 2\delta^*) n^2 \pi^2 \cos \theta}{\pi(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4)} T_B^*(\beta^*) \quad (65)$$

$$S_4^* = \frac{2n\pi[(\lambda^* - 2\delta^*) \beta^* \sin \theta T_A^*(\beta^*) + (\beta^{*2} + n^2 \pi^2 - \delta^{*2} + \delta^* \lambda^* - \lambda^{*2} / 4) T_B^*(\beta^*)]}{\pi(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4)} \quad (66)$$

Thermal stresses can be obtained from Eq. (26) using (44) and (46):

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^*(X^*, Y^*) &= e^{\xi^* X^*} \int_0^\infty \sum_{k=1}^4 [(p_k^{*2} A_k^* e^{p_k^* Y^*} + \tilde{p}_k^{*2} \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^*}) \cos \beta^* X^* \\ &- i(p_k^{*2} A_k^* e^{p_k^* Y^*} - \tilde{p}_k^{*2} \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^*}) \sin \beta^* X^*] d\beta^* \\ &+ e^{\xi^* X^* + \eta^{*2} Y^*} \int_0^\infty \{ [(\beta^{*2} + \mu_n^{*2} + \lambda^{*2} / 4) A_p^* + 2\eta^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} B_p^*] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \\ &+ [2\eta^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} A_p^* + (\beta^{*2} + \mu_n^{*2} + \lambda^{*2} / 4) B_p^*] \cosh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \} \sin \beta^* X^* \\ &+ \{ [(\beta^{*2} + \mu_n^{*2} + \lambda^{*2} / 4) C_p^* + 2\eta^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} D_p^*] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \\ &+ [2\eta^* \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} C_p^* + (\beta^{*2} + \mu_n^{*2} + \lambda^{*2} / 4) D_p^*] \cosh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \} \cos \beta^* X^* \} d\beta^* \\ &+ \pi e^{\xi^* X^* + \eta^{*2} Y^*} \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) Y^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} E_p^* (\cos \beta^* X^* + F_p^* \sin \beta^* X^*) \\ &\times \{ (\eta^{*2} - n^2 \pi^2 + 2n\pi \eta^* G_p^*) \cos n\pi Y^* + [-2n\pi \eta^* + (\eta^{*2} - n^2 \pi^2) G_p^*] \sin n\pi Y^* \} d\beta^* \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy}^*(X^*, Y^*) &= e^{\xi^* X^*} \int_0^\infty \sum_{k=1}^4 \{ [(\xi^{*2} - \beta^{*2} - 2i\xi^* \beta^*) A_k^* e^{p_k^* Y^*} + (\xi^{*2} - \beta^{*2} + 2i\xi^* \beta^*) \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^*}] \cos \beta^* X^* \\ &+ [-2\beta^* \xi^* + i(\beta^{*2} - \xi^{*2})] A_k^* e^{p_k^* Y^*} + [-2\beta^* \xi^* - i(\beta^{*2} - \xi^{*2})] \tilde{A}_k^* e^{\tilde{p}_k^* Y^*} \} \sin \beta^* X^* \} d\beta^* \\ &+ e^{\xi^* X^* + \eta^{*2} Y^*} \int_0^\infty \{ [(\xi^{*2} - \beta^{*2}) A_p^* - 2\beta^* \xi^* C_p^*] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \\ &+ [(\xi^{*2} - \beta^{*2}) B_p^* - 2\beta^* \xi^* D_p^*] \cosh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \} \sin \beta^* X^* \\ &+ \{ [2\beta^* \xi^* A_p^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) C_p^*] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2} / 4} Y^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + [2\beta^* \xi^* B_p^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) D_p^*] \cosh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 Y^* \cos \beta^* X^* \Big) d\beta^* \\
& + \pi e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 \\
& \times E_p^* \{ (\xi^{*2} - \beta^{*2} + 2\beta^* \xi^* F_p^*) \cos \beta^* X^* + [-2\beta^* \xi^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) F_p^*] \sin \beta^* X^* \} \\
& \times (\cos n\pi Y^* + G_p^* \sin n\pi Y^*) d\beta^* \quad (68)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{XY}^*(X^*, Y^*) &= -e^{\xi^* X^*} \int_0^\infty \sum_{k=1}^4 \{ [(\xi^* - i\beta^*) P_k^* A_k^* e^{\rho_k^* Y^*} + (\xi^* + i\beta^*) \tilde{P}_k^* \tilde{A}_k^* e^{\tilde{\rho}_k^* Y^*}] \cos \beta^* X^* \\
& - [(\beta^* + i\xi^*) p_k^* A_k^* e^{\rho_k^* Y^*} + (\beta^* - i\xi^*) \tilde{p}_k^* \tilde{A}_k^* e^{\tilde{\rho}_k^* Y^*}] \sin \beta^* X^* \} d\beta^* \\
& - e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^\infty \{ [\eta^* (\xi^* A_p^* - \beta^* C_p^*) + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 (\xi^* B_p^* - \beta^* D_p^*)] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 Y^* \\
& + [\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 (\xi^* A_p^* - \beta^* C_p^*) + \eta^* (\xi^* B_p^* - \beta^* D_p^*)] \cosh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 Y^* \} \sin \beta^* X^* \\
& + \{ [\eta^* (\beta^* A_p^* + \xi^* C_p^*) + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 (\beta^* B_p^* + \xi^* D_p^*)] \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 Y^* \\
& + [\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 (\beta^* A_p^* + \xi^* C_p^*) + \eta^* (\beta^* B_p^* + \xi^* D_p^*)] \cosh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 Y^* \} \cos \beta^* X^* \} d\beta^* \\
& - \pi e^{\xi^* X^* + \eta^* Y^*} \int_0^\infty \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 [E_p^* (\xi^* + \beta^* F_p^*) \cos \beta^* X^* + (-\beta^* + \xi^* F_p^*) \sin \beta^* X^*] \\
& \times [(\eta^* + n\pi G_p^*) \cos n\pi Y^* + (-n\pi + \eta^* G_p^*) \sin n\pi Y^*] d\beta^* \quad (69)
\end{aligned}$$

The boundary conditions for stresses are assumed to be:

$$\sigma_{XY}^* = \sigma_{XY}^* = 0 \quad \text{on} \quad Y^* = 0, 1 \quad (70)$$

The unknown coefficients A_k^* (β^*), \tilde{A}_k^* (β^*), ($k=1,4$) in thermal stresses expressed by Eq. (67), (68) and (69) can be determined by the following equations obtained from the boundary conditions (70).

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 \{ [\xi^{*2} - \beta^{*2} - 2i\beta^* \xi^*] A_k^* + [\xi^{*2} - \beta^{*2} + 2i\beta^* \xi^*] \tilde{A}_k^* \} = -2\beta^* \xi^* B_p^* + (\beta^{*2} - \xi^{*2}) D_p^* p \\
& + \pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* (\beta^{*2} - \xi^{*2} - 2\beta^* \xi^* F_p^*) \quad (71)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 \{ [-2\beta^* \xi^* + i(\beta^{*2} - \xi^{*2})] A_k^* - [2\beta^* \xi^* + i(\beta^{*2} - \xi^{*2})] \tilde{A}_k^* \} = (\beta^{*2} - \xi^{*2}) B_p^* + 2\beta^* \xi^* D_p^* \\
& + \pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* [2\beta^* \xi^* + (\beta^{*2} - \xi^{*2}) F_p^*] \quad (72)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 [(\xi^* - i\beta^*) A_k^* p_k^* + (\xi^* + i\beta^*) \tilde{A}_k^* \tilde{p}_k^*] = -\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 (\beta^* A_p^* + \xi^* C_p^*) - \eta^* (\beta^* B_p^* + \xi^* D_p^*) \\
& - \pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* (\xi^* + \beta^* F_p^*) (\eta^* + n\pi G_p^*) \quad (73)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 [(\beta^* + i\xi^*) A_k^* p_k^* + (\beta^* - i\xi^*) \tilde{A}_k^* \tilde{p}_k^*] = \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 2 (\xi^* A_p^* - \beta^* C_p^*) + \eta^* (\xi^* B_p^* - \beta^* D_p^*) \\
& + \pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} (-)^{n+1} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* (-\beta^* + \xi^* F_p^*) (\eta^* + n\pi G_p^*) \quad (74)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 \{ [\xi^{*2} - \beta^{*2} - 2i\beta^* \xi^*] A_k^* e^{\rho_k^*} + [\xi^{*2} - \beta^{*2} + 2i\beta^* \xi^*] \tilde{A}_k^* e^{\tilde{\rho}_k^*} \} \\
& = -(e^{\eta^*} / 2) \{ [2\beta^* \xi^* (B_p^* + A_p^*) + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) (D_p^* + C_p^*)] e^{\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + [2\beta^* \xi^* (B_p^* - A_p^*) + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) (D_p^* - C_p^*)] e^{-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + 2\pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* (\xi^{*2} - \beta^{*2} + 2\beta^* \xi^* F_p^*) \} \quad (75)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 \{ [2\beta^* \xi^* + i(\xi^{*2} - \beta^{*2})] A_k^* e^{\rho_k^*} + [2\beta^* \xi^* - i(\xi^{*2} - \beta^{*2})] \tilde{A}_k^* e^{\tilde{\rho}_k^*} \} \\
& = -(e^{\eta^*} / 2) \{ [(\beta^{*2} - \xi^{*2}) (B_p^* + A_p^*) + 2\beta^* \xi^* (D_p^* + C_p^*)] e^{\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + [(\beta^{*2} - \xi^{*2}) (B_p^* - A_p^*) + 2\beta^* \xi^* (D_p^* - C_p^*)] e^{-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + 2\pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* [-2\beta^* \xi^* + (\xi^{*2} - \beta^{*2}) F_p^*] \} \quad (76)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 [(\beta^* + i\xi^*) p_k^* A_k^* e^{\rho_k^*} + (\beta^* - i\xi^*) \tilde{p}_k^* \tilde{A}_k^* e^{\tilde{\rho}_k^*}] \\
& = (e^{\eta^*} / 2) \{ [\eta^* + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4] [\xi^* (B_p^* + A_p^*) - \beta^* (D_p^* + C_p^*)] e^{\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + [\eta^* - \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4] [\xi^* (B_p^* - A_p^*) - \beta^* (D_p^* - C_p^*)] e^{-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + 2\pi \sum_{n=1}^\infty e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2} / 4) t^*} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4 E_p^* (-\beta^* + \xi^* F_p^*) (\eta^* + n\pi G_p^*) \} \quad (77)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^4 [(\xi^* - i\beta^*) p_k^* A_k^* e^{\rho_k^*} + (\xi^* + i\beta^*) \tilde{p}_k^* \tilde{A}_k^* e^{\tilde{\rho}_k^*}] \\
& = -(e^{\eta^*} / 2) \{ [\eta^* + \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4] [\beta^* (B_p^* + A_p^*) + \xi^* (D_p^* + C_p^*)] e^{\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \\
& + [\eta^* - \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4] [\beta^* (B_p^* - A_p^*) + \xi^* (D_p^* - C_p^*)] e^{-\sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}} / 4} \}
\end{aligned}$$

$$+2\pi \sum_{n=1}^{\infty} e^{-(\beta^{*2} + n^2 \pi^2 + \lambda^{*2}/4)\tau^*} \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \lambda^{*2}/4} E_p^* (\xi^* + \beta^* F_p^*) (\eta^* + n\pi G_p^*) \} \quad (78)$$

3. Results and Discussions

The numerical calculations are carried out for unsteady thermal stresses of infinite strip whose boundaries are slanting to the functional gradation. The boundary conditions of temperature in Eq. (13) and (14) are definitely given by the following forms.

$$\tau^*(X^*) = H(1 - |X^*|) \cos \frac{\pi X^*}{2} \quad (79)$$

where $H()$ denotes the Heaviside's step function. Substituting Eq. (79) into (16) and (17) gives the definite form of coefficients $T_A^*(\beta^*)$ and $T_B^*(\beta^*)$ in temperature distribution (21).

$$T_A^*(\beta^*) = \frac{e^{\frac{\lambda^* \cos \theta}{2}} \{ \beta^* \lambda^* \sin \theta \sin \beta^* a^* \sinh \frac{\lambda^* a^* \sin \theta}{2} + \cos \beta^* a^* \cosh \frac{\lambda^* a^* \sin \theta}{2} [(\frac{\lambda^* \sin \theta}{2})^2 - \beta^{*2} + \frac{\pi^2}{4a^{*2}}] \}}{a^* \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \frac{\lambda^{*2}}{4}} [(\beta^* + \frac{\pi}{2a^*})^2 + (\frac{\lambda^* \sin \theta}{2})^2] [(\beta^* - \frac{\pi}{2a^*})^2 + (\frac{\lambda^* \sin \theta}{2})^2]} \quad (80)$$

$$T_B^*(\beta^*) = \frac{e^{\frac{\lambda^* \cos \theta}{2}} \{ \beta^* \lambda^* \sin \theta \cos \beta^* a^* \cosh \frac{\lambda^* a^* \sin \theta}{2} - \sin \beta^* a^* \sinh \frac{\lambda^* a^* \sin \theta}{2} [(\frac{\lambda^* \sin \theta}{2})^2 - \beta^{*2} + \frac{\pi^2}{4a^{*2}}] \}}{a^* \sinh \sqrt{\beta^{*2} + \frac{\lambda^{*2}}{4}} [(\beta^* + \frac{\pi}{2a^*})^2 + (\frac{\lambda^* \sin \theta}{2})^2] [(\beta^* - \frac{\pi}{2a^*})^2 + (\frac{\lambda^* \sin \theta}{2})^2]} \quad (81)$$

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 $(-b^*, 1)$ are known and k_m , E_m and α_m for metal at another position $(b^*, 0)$ are known, then the non-dimensional values of λ in Eq.3 and γ, δ in Eq.28 are given by the following relations.

$$\delta^* = \ln(\alpha_c / \alpha_m) / (2b^* \sin \theta + \cos \theta), \gamma^* = \ln(E_c / E_m) / (2b^* \sin \theta + \cos \theta) \quad (82)$$

$$\lambda^* = \ln(k_c / k_m) / (2b^* \sin \theta + \cos \theta)$$

where $\delta^* = \delta h$, $\gamma^* = \gamma h$, $\lambda^* = \lambda \eta$, $b^* = b/h$. The values of κ_0, E_0 and α_0 in Eq.3 and Eq.28 are given by the following relations.

$$\alpha_0 = \alpha_m e^{\delta^* b^* \sin \theta}, E_0 = E_m e^{\gamma^* b^* \sin \theta}, k_0 = k_m e^{\lambda^* b^* \sin \theta} \quad (83)$$

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

$$T^* = T / \tau_0, \sigma_{XX}^* = \sigma_{XX} (1 - \nu_0) k_c / (\alpha_c E_c k_0 \tau_0), \sigma_{YY}^* = \sigma_{YY} (1 - \nu_0) k_c / (\alpha_c E_c k_0 \tau_0), \sigma_{XY}^* = \sigma_{XY} (1 - \nu_0) k_c / (\alpha_c E_c k_0 \tau_0) \quad (84)$$

Functionally graded strip 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. The constant to indicate the positions for known properties of ceramic and metal are taken as $b^* = 5.0$.

Fig.2 shows the unsteady temperature in the strip $Y^* = 0.5$ with slanting angle $\theta = 30^\circ$. The initial temperature is kept at zero over the body and the temperature rises with the lapse of time.

The unsteady thermal stress σ_{XX}^* on the heating surface $Y^* = 1.0$ with slanting angle $\theta = 30^\circ$ is depicted in **Fig.3**. The maximum compressive stress occurs at initial time $t^* = 0.0$.

Fig.4 shows unsteady thermal stress σ_{XX}^* in the strip $Y^* = 0.5$ with oblique angle $\theta = 30^\circ$. The tensile stress reaches to the maximum value at $t^* = 0.04$ at the position $X^* = 0.0$. After that, it decreases with the lapse of time.

Fig.5 shows unsteady thermal stress σ_{XX}^* on the lower surface $Y^* = 0.0$ with slanting angle $\theta = 30^\circ$. The compressive stress reaches to the maximum value at $t^* = 0.04$ at the position $X^* = 0.0$. After that, it decreases with the lapse of time.

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

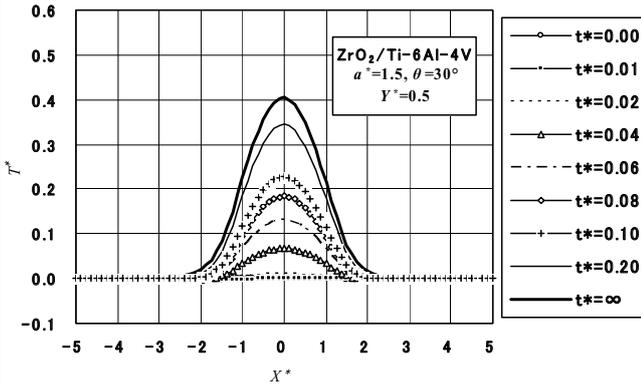


Fig.2 The unsteady temperature in the strip $Y^*=0.5$ with slanting angle $\theta=30^\circ$

The effect of slanting angle θ on thermal stress σ^*_{xx} on the surface $Y^*=1.0$ at initial time is seen in Fig. 6. The compressive stress increases with increasing the slanting angle.

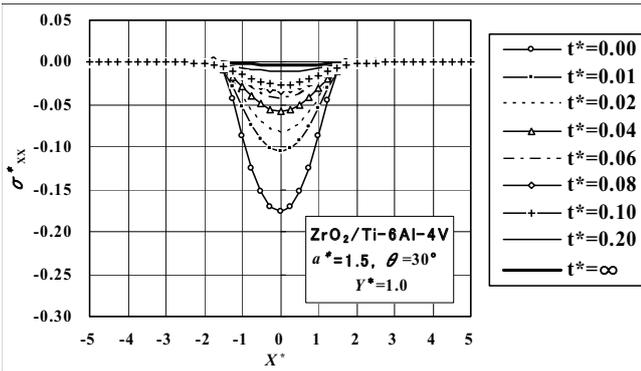


Fig.3 Unsteady thermal stresses σ^*_{xx} on the heating surface $Y^*=1.0$ with slanting angle $\theta=30^\circ$

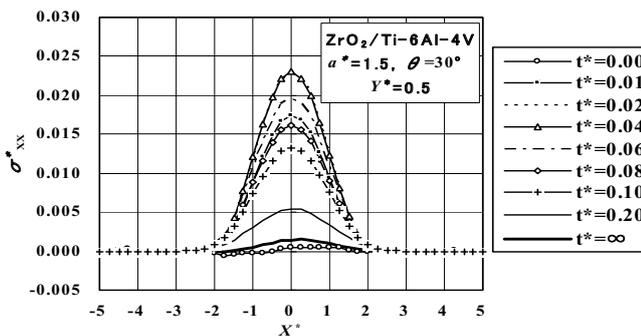


Fig.4 Unsteady thermal stresses σ^*_{xx} in the strip $Y^*=0.5$ with slanting angle $\theta=30^\circ$

4. Conclusions

Two dimensional unsteady thermal stress field in the functionally graded infinite strip with slanting boundaries to the functionally gradation subjected to partial heating on the

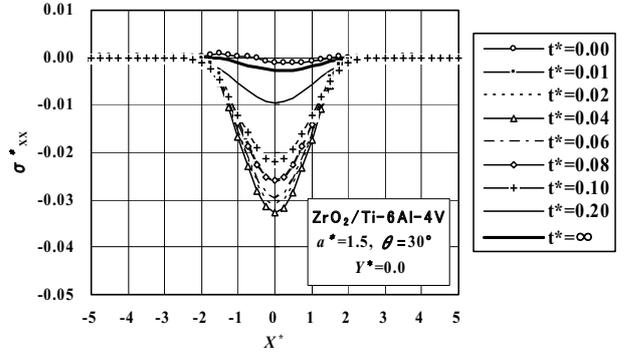


Fig.5 Unsteady thermal stresses σ^*_{xx} on the lower surface $Y^*=0.0$ with slanting angle $\theta=30^\circ$

upper surface is discussed. Unsteady thermal stresses with certain slanting angle in the $ZrO_2/Ti-6Al-4V$ FGM are shown in figures for prescribed temperature boundary condition.

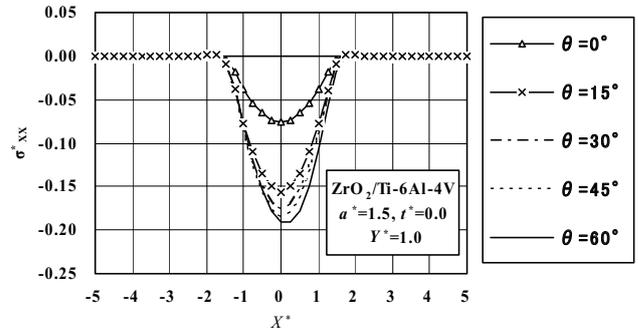


Fig.6 The effect of slanting angle on thermal stress σ^*_{xx} on the heating surface $Y^*=1.0$ at initial time.

The conclusions are:

- (1) An analytical technique for two dimensional unsteady thermal stresses in the infinite strip with slanting boundaries to the functionally graded direction is proposed by introducing the stress function.
- (2) The maximum compressive stress on the heating surface with slanting angle $\theta=30^\circ$ occurs at initial time $t^*=0.0$, while the maximum tensile stress in the body $Y^*=0.5$ occurs at $t^*=0.04$.

- (3) The compressive stress on the heating surface at initial time $t^* = 0.0$ increases with increasing the slanting angle.

References

- 1) Yamanouchi, M., et al., Proc. First Int. Sympos. on Functionally Gradient Materials, Sendai, (1990).
- 2) Koizumi, M., The concept of FGM, Trans. The American Ceramic Society, Functionally Gradient Materials, **34**, Holt, J. B., Koizumi, M., Hirai, T. and Munir, Z. A. (eds.), 3-9, (1993).
- 3) Noda, N. and Tsuji, T., Steady thermal stresses in a plate of functionally gradient material. Proc. First Int. Symposium of Functionally Gradient Materials, 339-344, (1990)
- 4) Noda, N. and Tsuji, T., Steady thermal stresses in a plate of functionally gradient material (Consideration of temperature dependent material properties). JSME, Ser. A, **57**(535), 625-631, (1991).
- 5) Tanigawa, Y., Ootao, Y. and Kawamura, R., Thermal bending of laminated composite rectangular plates and nonhomogeneous plates due to partial heating, J. Thermal Stresses, **14**(3), 285-308, (1991).
- 6) Obata, Y. and Noda, N., Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of a functionally gradient material. J. Thermal Stresses, **17**, 471-487, (1994).
- 7) Obata, Y. and Noda, N., Unsteady thermal stresses in a functionally gradient material plate (Analysis of one-dimensional unsteady heat transfer problem). JSME, Ser. A, **59**(560), 1090-1096, (1993).
- 8) Shabana, Y. M. and Noda, N., Combined macroscopic and microscopic analysis of thermo-elasto-plastic stresses of functionally graded material plate, J. Thermal Stresses, **24**, (8), 799-815, (2001).
- 9) Shabana, Y. M. and Noda, N., Thermo-elasto-plastic stresses of functionally graded materials with a substrate and a coating, J. Thermal Stresses, **25**, (12), 1133-1146, (2002).
- 10) Shabana, Y. M. and Noda, N., Thermo-elasto-elastic stresses of functionally graded ceramic/metal composite with two-dimensional temperature gradient, International Journal of Computational Engineering Science, **5**(4), 893-911, (2004).
- 11) 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).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) Noda, N. and Jin, Z., Steady Thermal Stresses in an infinite nonhomogeneous elastic solid containing a crack, J. Thermal Stresses, **16**, 181-196, (1993).

研究論文

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

藤本 裕*, 名和靖彦**, 相木国男**

(2009年9月30日受理)

Experiments of a Microwave Doppler Speedometer Make Use of an Automatic Door Sensor

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

(Received September 30, 2009)

Abstract

An X-band microwave Doppler sensor commonly used in the automatic door system has been applied to compose a speedometer. The microwave of a frequency of 10.525GHz 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, decoder and display. The maximum detectable range observed was about 77m for cars and 27m 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

理工学の分野では、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)}。マイクロ波を利用した技術は、Bluetooth や無線 LAN, 衛星通信, 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・製作を介して、マイクロ波の性質やドップラー速度計システムの動作原理を理解する教材を目指す。

2. 測定原理

マイクロ波ドップラー速度計の原理を Fig.1 に示した。

観測者は発信源と受信機を持っており、移動できるものとする。観測者より発射されたマイクロ波は目標とする移動体で反射され受信機に戻る。受信周波数は移動体速度に対応したドップラーシフトをしている。ドップラーシフトを観測し、以下の関係から移動体速度を求めている。

高校の物理でドップラー効果の式は式(1)のように記述されている。Fig.2 に示すように、媒質に対する速度が v の波があるとき、周波数 f の発信源が観測者に向け

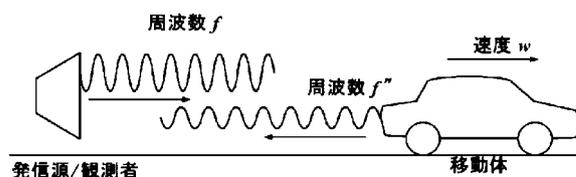


Fig.1 ドップラー速度計の原理

* 愛知工科大学大学院 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



Fig.2 ドップラー効果



Fig.3 移動体反射波のドップラー効果

速度 u 、観測者が同じ方向に速度 w で移動する。このときの観測者における周波数 f' は、

$$f' = \frac{V-w}{V-u} f \quad (1)$$

となる。今回のドップラー速度計では発信源と同じ位置にいる観測者が移動体からの反射波を観測する。その為、反射周波数 f'' は式 (1) を再度用いて式 (2) のように求められる。

$$f'' = \frac{V+u}{V+w} f' = \frac{V+u}{V+w} \times \frac{V-w}{V-u} f \quad (2)$$

Fig.3 のように反射体を周波数 f' の新たな発信源と見なし、観測者は観測点での周波数 f'' を求めている。このとき新たな発信源から観測点に向かう方向を正とするので u と w の符号が反転する。マイクロ波の伝搬速度は光速 $C = 3 \times 10^8$ (m/s) であり、速度 u 、 w に比べて著しく大きい。したがって、

$$\begin{aligned} f'' &= \frac{C+u}{C+w} \times \frac{C-w}{C-u} f \\ &= \frac{1+\frac{u}{C}}{1+\frac{w}{C}} \times \frac{1-\frac{w}{C}}{1-\frac{u}{C}} f \\ &\cong \left(1+\frac{u}{C}\right) \left(1-\frac{w}{C}\right) \times \left(1-\frac{w}{C}\right) \left(1+\frac{u}{C}\right) f \\ &= \left\{1+\left(\frac{u}{C}-\frac{w}{C}\right)-\frac{uw}{C^2}\right\}^2 f \\ &\cong \left\{1+\left(\frac{u}{C}-\frac{w}{C}\right)\right\}^2 f \end{aligned} \quad (3)$$

と近似してよい。発信源と観測者が移動しないと $u=0$ とする。ドップラーセンサからは、次に述べるように周波数差の絶対値、 $|f''-f|$ の周波数の信号が出力される。周波数差は式 (3) より、

$$f''-f = -\frac{2w}{C} f + \left(\frac{w}{C}\right)^2 f \cong -\frac{2w}{C} f \quad (4)$$

と近似できる。従って、周波数差は反射体の移動速度 w に比例しており、観測者から遠ざかる場合は、観測周波数 f'' は低くなる。使用したマイクロ波周波数 $f=10.525$ GHz に対して $w=1$ m/s の速度で遠ざかる物体からの反射波の周波数は、発信源のものより 70.17Hz 低くなる。

3. 実験装置

3.1 マイクロ波ドップラーセンサ

本実験で使用したマイクロ波ドップラーセンサは新日本無線株式会社の NJR4178J である。その外観と内部構造を Fig.4 に示した。ドップラーセンサの内部は電界効果トランジスタと誘電体共振器で構成されており、発振器の出力を右のパッチアンテナから放射する構造となっている。発振周波数は、特定小電力無線局に許可された 10.525GHz の周波数を用いており、出力は 0.1W 以下である。ドップラーセンサのブロック図を Fig.5 に示した。このセンサは、マイクロ波を送信アンテナから送信し、移動体からの反射波を受信アンテナで受信する。受信信号をショットキーバリアダイオードで発振器出力信号と混合して発振周波数と受信周波数の差を中間周波数として出力する仕組みとなっている。中間周波数は発振器出力信号と受信信号の周波数差の絶対値となるので、反射物体が近づいているか、遠ざかっているかはこの回路では判別できない。

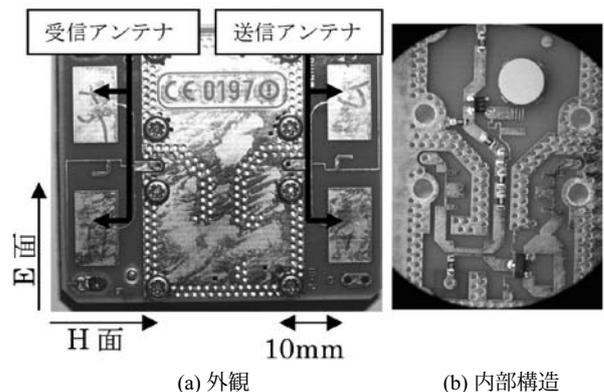


Fig.4 マイクロ波ドップラーセンサ

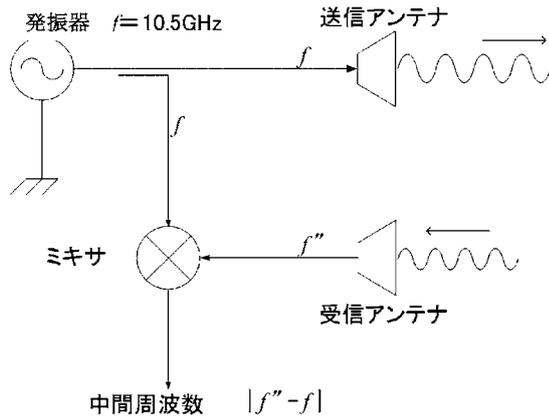


Fig.5 ドップラーセンサブロック図

凹面鏡アンテナの設計に必要なセンサからのマイクロ波放射パターンの測定結果を Fig.6 に示した。Fig.4 のパッチアンテナの電界 (E) 面内と磁界 (H) 面内のそれぞれについて、標準アンテナとなる半波長ダイポールアンテナでドップラーセンサからの送信波を受信し、スペクトラムアナライザを用いてその信号強度を読み取った。その結果、約±45°で電界 E が -12dB(0.25 倍) となる。H 面内についてはより広い指向性が観測された。上記の結果を用い、次節で説明する凹面鏡アンテナは±45°の範囲を取り込めるようにした。

3.2 凹面鏡アンテナ

センサ単体では、Fig.6 のようにマイクロ波の発射角度が広いと発散してしまう。そこで、凹面鏡アンテナを取り付けることにより、マイクロ波ビームを形成した。製作した凹面鏡の寸法図を Fig.7 に示した。曲率半径 34cm、直径 30cm として±45°の角度範囲を取り込めるようにした。アンテナの製作は厚さ 1mm のアルミ板を鉄床上でハンマーを用い打ち出す方法で行った。アルミ板に型紙を当てながら、凹面鏡の湾曲精度が使用波

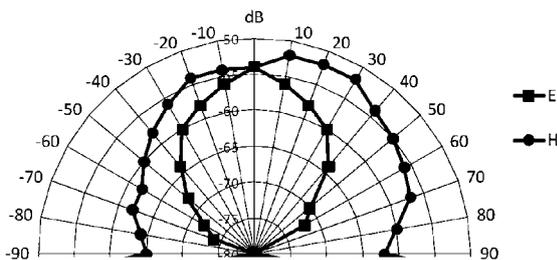


Fig.6 マイクロ波放射パターン

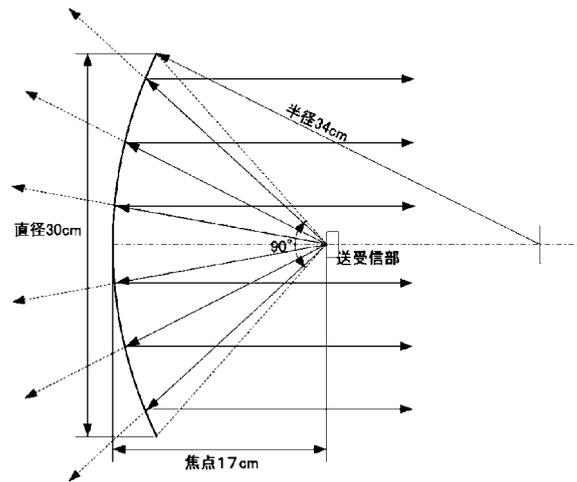


Fig.7 凹面鏡断面図

長 3cm の 10 分の 1 以下 (< 3mm) になるように仕上げた。センサの設置部となる焦点の調節として凹面鏡を太陽に向けた時の光の集光状態から焦点位置の調整を行った。

3.3 回路設計

製作した回路のブロック図を Fig.8 に示した。センサ出力周波数は 1m/s の移動体速度に対して 70.17Hz であり、100km/h では、1.95kHz、200km/h では 3.90kHz である。ドップラーセンサの出力信号をセンサ背面に取り付けた低雑音プリアンプと本体アンプで増幅し、総合利得 70dB が得られるようにした。センサ出力信号には雑音があり、雑音レベルを測定したところ、およそ 30 μVrms であったので、雑音除去のため増幅回路の周波数帯域幅を 50Hz ~ 4kHz とした。更に増幅回路の後

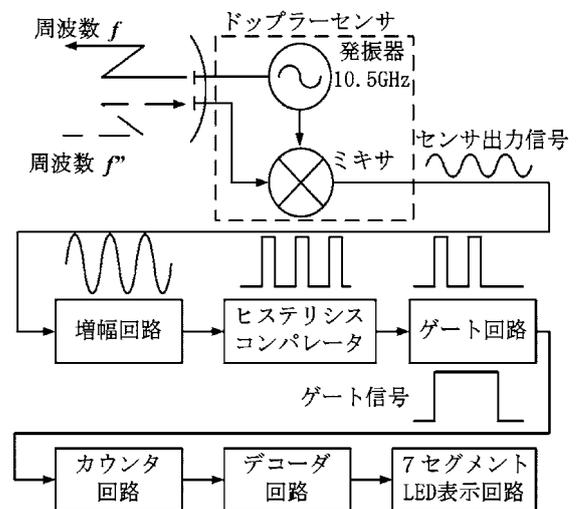


Fig.8 ドップラー速度計ブロック図

にヒステリシスコンパレータを置くことにより、増幅された出力信号を矩形波に成形し、速度の誤表示の原因となる雑音の除去を行った。矩形波に成形された出力信号は、ゲート回路、カウンタ回路、デコーダ回路を通り、3桁の数表示回路で速度表示された。この時、カウンタ回路に加えるゲート回路からのゲートパルス幅を替えることにより、秒速 (m/s) と時速 (km/h) のレンジ切り替えを行えるようにした。数表示は小数点以下1桁まで表示するようにした。すなわち、秒速レンジでは、1m/s を [1.0] と表示させる。1m/s の速度では、1秒あたり70.17個のパルスが発生するので、ゲートパルス幅 t はパルスが10個入力される時間に設定した。

すなわち、

$$t = \frac{10}{70.17} \cong 0.1425 \text{ (s)} = 142.5 \text{ (ms)} \quad (5)$$

とした。同様に時速の場合は、

$$t = \frac{10}{70.17} \times \frac{3600}{1000} \cong 0.5130 \text{ (s)} = 513.0 \text{ (ms)} \quad (6)$$

とした。

4. 実験方法

回路基板はプリアンプ基板と本体基板の2枚で構成した。利得33dBの低雑音プリアンプ基板 Fig.9(a) をセンサの背後に設置した。電源、表示部を含む Fig.9(b) の本体基板を、凹面鏡アンテナの背後に設置し、凹面鏡アンテナを三脚に固定した。最大観測距離の測定は屋外の開けた場所で測定を行った。測定対象として人と車の2種類について、計測可能な最大測定距離を調べた。測定

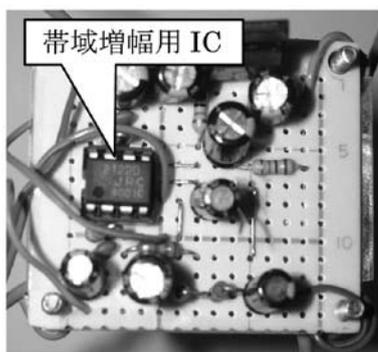


Fig.9(a) プリアンプ基板

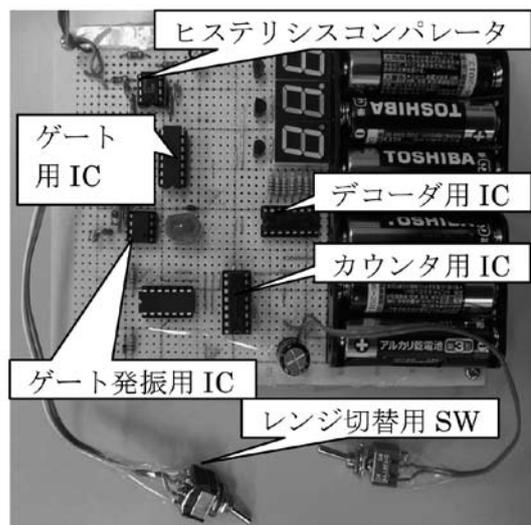


Fig.9(b) 本体基板

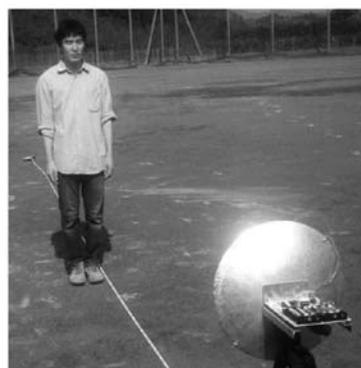


Fig.10 測定風景

の様子を Fig.10 に示した。マイクロ波ビームの広がり角については、ダイポールアンテナとスペクトラムアナライザを用いて計測した。ドップラーセンサ本体を固定し、アンテナを水平移動させて信号強度変化を観測しながら、ビームの広がり角を測定した。

5. 結果と考察

5.1 最大観測距離

製作した速度計で観測できる最大距離を人と乗用車の2種類について調べた。最大距離を求めるに当たって、6回ずつ計測を行い、それらの平均をとった。結果を Table 1 に示した。乗用車の速度測定では、使用した増幅部利得を62dBと74dBの二通りで測定した。利得を62dBから12dB増加させることで、観測距離が Table 1 に示すように48%向上した。これ以上に利得を増加さ

Table 1 測定可能な最大距離

測定物	人		車	
増幅率 (dB)	62	62	62	74
最大測定距離(m)	27.0	52.3	52.3	77.4

せると、測定物以外からの反射波や増幅器からのフィードバック雑音などの影響が出ることが分かった。次に対象物を人にして測定した。対象物が反射の少ない人の場合には、観測できる距離はおおよそ半分程度に低下することが分かった。

測定できる速度の範囲は、Fig.9(a)のプリアンプ基板にあるバンドパスフィルタの帯域によって決まる。ここでは、入力信号の通過帯域を50Hz～4kHzとしたので、測定できる速度範囲は0.7m/s～57.0m/s(2.6km/h～206.0km/h)である。

5.2 測定精度

測定精度はゲートパルス幅の精度によって決まる。今回の製作では、小数点以下1桁の精度が得られるようにした。小数点以下2桁までの精度にするには、ゲートパルス幅を秒速では1425ms、時速では5130msにすればよい。しかし、自動車の速度は通常時々刻々と変化しているため、表示される速度はゲート時間内の平均速度である。今回の実験では3桁の数表示を用いたので、110.5km/hの場合、最上位桁はなく、10.5km/hと表示される。

5.3 指向性の評価

凹面鏡アンテナのビーム広がり半角 θ は、アンテナの直径を D 、マイクロ波の波長を λ としたとき次の式で表される^{3,4)}。

$$\tan \theta = \alpha \frac{\lambda}{D} \quad (7)$$

ここで α は定数であり、ガウシアンビームで強度 $1/e^2$ のとき0.64、強度 $1/2$ のとき1.1、均一ビームフラウンホーファ回折第一暗線のとき1.22となる。今回はガウシアンビームに近いので $\alpha=1.1$ 、 $\lambda=0.0285\text{m}$ 、 $D=0.3\text{m}$ とすると、

$$\tan \theta \cong \theta = \alpha \frac{\lambda}{D} = 0.105 \text{ (rad)} \quad (8)$$

従ってビーム広がり角の理論値は $\pm 6^\circ$ 程度となる。実測値は $\pm 10^\circ$ であった。

5.4 雑音除去

速度を表示する際、センサ信号を増幅し、矩形波に成形したものを直接カウンタ回路に導いた。しかし、センサ信号が弱いと、その信号に乗っている雑音信号も同様に増幅し、センサ信号と雑音信号が同じようなレベルになってしまうので、カウンタ回路がその雑音信号を正規の信号としてカウントしてしまい、速度表示が正しくされない。この症状を抑えるために、増幅回路の増幅率を抑える必要があった。増幅回路の増幅率を抑えた状態では、乗用車の最大観測距離はおおよそ50mが限界であった。更に乗用車などの最大観測距離を伸ばす為に、カウンタの前にヒステリシスコンパレータ回路を設け、雑音信号による誤表示を回避した^{5,7)}。この動作をFig.11に模式的に示した。センサ出力に、信号と同程度の雑音が存在する場合の増幅段出力を上段に示す。ヒステリシスコンパレータの出力は、下段に示すように入力値が V_H を超したとき、Hi信号となる。入力値が V_L を下回ったとき、Low信号を出力する。製作回路では V_H 、 V_L の値を信号最大値の61%とした。この結果雑音による過剰カウントを効果的に改善することができた。

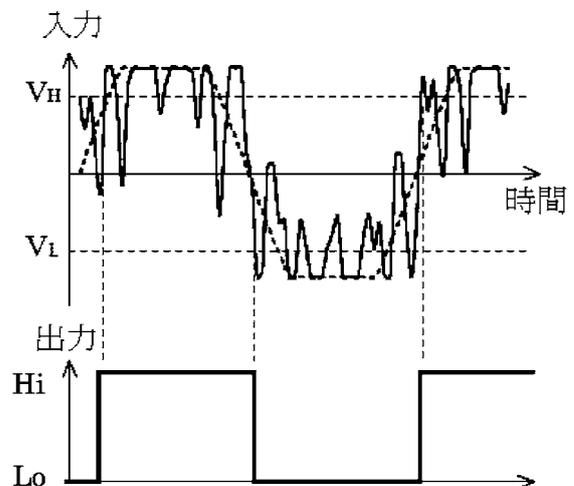


Fig.11 ヒステリシスコンパレータによる雑音除去

6. まとめ

広く自動ドアに使用されているセンサを利用して、10GHz帯マイクロ波ドップラー速度計を製作し、評価した。直径0.3mの凹面鏡アンテナで、広がり角 $\pm 10^\circ$ のマイクロ波ビームに形成した。製作回路ではセンサから中間周波信号を50Hz～4kHzの帯域で増幅し、ヒステリシスコンパレータによる雑音除去を介し、カウンタ、デコーダ、数表示に導いた。最大測定距離は、測定対象が人の場合、27.0m、乗用車では77.4mが得られた。このように本教材がドップラー速度計として正常に動作することを確認した。以上のことから、ドップラー速度計の製作と評価実験を通し、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ための教材として利用できることが分かった。今後、指向性がより向上出来る24GHz帯についても検討して行きたい。

参考文献

- 1) 名和靖彦・相木国男：超音波素子を用いた波動実験教材，愛知工科大学紀要，Vol. 4, 2007.3, P.41
- 2) 名和靖彦・相木国男：超音波を用いたレーダ原理の実験，愛知工科大学紀要，Vol. 6, 2009.3, P.49
- 3) 谷口慶治：アンテナと電波伝搬，共立出版，2006
- 4) AMNON YARIV：光エレクトロニクスの基礎，1974，P.38
- 5) 岡山努：オペアンプ基礎回路 再入門，日刊工業新聞社，2005，P.85
- 6) 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，2004，P.192
- 7) アナログ・デバイスズ(株)：OPアンプによる増幅回路の設計技法，CQ出版株式会社，2005，P.190

研究論文

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

深澤正樹*, 坂口鋼一*, 嶋川晃一**, 畑中義式*

(2009年9月30日受理)

Photo-conduction Characteristics of Titanium Oxide Films obtained by Rf Sputtering Method

Masaki Fukazawa*, Koichi Sakaguchi*, Koichi Shimakawa** and Yoshinori Hatanaka*

(Received September 30, 2009)

Abstract

Photo-conduction characteristics of titanium oxide films prepared by rf magnetron sputtering method with introducing water vapor were investigated. Photo-response current was drastically increased and transient response time constants were decreased. These mean that OH groups terminate the dangling bonds in the film and electrical defect states are non-activated. Further it is found that oxygen ambient gas influences on the recombination process for the UV excited conduction electrons.

キーワード: 光伝導特性, アモルファス酸化チタン薄膜, 拡張指数関数

Key word: Photoconductive characteristics, Amorphous titanium oxide films, Stretched exponential function

1. はじめに

21世紀は科学技術発展が目覚ましく、今日、その恩恵に預かっているが、代償として地球を取り巻く環境の悪化が問題となっている。こうした問題に対して、環境を改善してゆくための知識、技術の開拓が、強く要求されている。そうした中で酸化チタンは、有害物質の除去材料、殺菌材料、生体適応材料、超親水性材料として広い応用技術が展開されている。

酸化チタンは3種類の結晶性を持ち、その中で、アナターゼ型が光活性であることが知られており、その作製、応用方法が多く研究されている¹⁾。一方、薄膜の製法で、多く用いられる蒸着法、スパッタリング法、CVD法では結晶性薄膜よりアモルファスの混在する薄膜が多い^{2, 3)}。

本報告では、スパッタリング法を用いて薄膜を作製した場合、その作製法によって、光活性の特性が大きく影

響することを実験的に示し、光活性の高い薄膜を作製する方向性を検討したものである。光活性特性は、光伝導の特性を評価することで行った。この実験の基礎にあるものは、プラズマCVDにおける薄膜作製の実験において⁴⁾、薄膜中にOH基を含むものが光活性特性がすぐれているという事実があったために、本スパッタリングの実験においても、OH基を含ませる方法を行ったものである。

2. 実験

実験において、酸化チタン薄膜はマグネトロンスパッタリングにより作成した。Fig.1にスパッタリング装置全体の概略図を示す。この実験では、導入ガス(Ar)を加温水中をバブリングすることにより、水分をスパッタリングチャンバー内に導入して、得られる薄膜中にOH

* 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

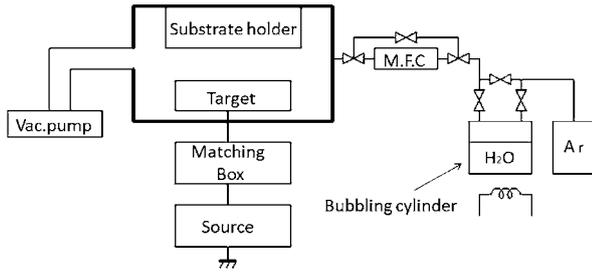


Fig.1. Schematic drawing of the RF sputtering system.

Table.1 Deposition conditions for the TiO₂ film sputtering.

	試料 1 (#1)	試料 2 (#2)
Rf power, 13.56MHz	250[W]	250[W]
Gas flowrate	2.0[ccm]	2.0[ccm]
Vacuum pressure	3~4[Pa]	3~4[Pa]
Deposition time	2[hour]	2[hour]
Target	TiO ₂	TiO ₂
Sub target	Quartz, Si(100)	Quartz, Si(100)
Water bubbler temperature	70℃	

基を導入した。導入ガスは、マスフローコントローラを経て、スパッタリング装置に導入されている。

今回スパッタリングによって作成した薄膜の作成条件を Table.1 に示す。スパッタリングは、水バブリングを通さないで作成した薄膜と、アルゴンガスに水のバブリングにより水分を含ませて作成した薄膜を用意した。水を含ませた場合は、バブラーから真空チャンバーに至る間は、露結しないようにバブラーの温度以上に導管を加熱するようにした。アルゴンガスに水のバブリングにより作成した薄膜を試料 1 (#1)、アルゴンガスのみで作成した薄膜を試料 2 (#2) とする。

Teten の式 (1) により⁵⁾、バブラー内の気温 T℃から飽和水蒸気圧 E(T)hPa が求まる。

$$E(T) = 6.11 \times 10^7 \frac{7.5T}{T+237.3} \text{ [hPa]} \quad (1)$$

また、気体の状態方程式 (2) から 70℃における飽和水蒸気量 a [g/m³] を求めることができる。

$$a = 217 \times \frac{E(T)}{(T+273.15)} \text{ [g/m}^3\text{]} \quad (2)$$

上記によりアルゴンガス中にどれだけの水蒸気量が含まれているかを求めることができる。上記式から飽和水蒸気圧 31.2kPa となる。アルゴンガスの気圧が 0.1MPa であるのでガス中に 31.2% の水蒸気が含まれることになる。

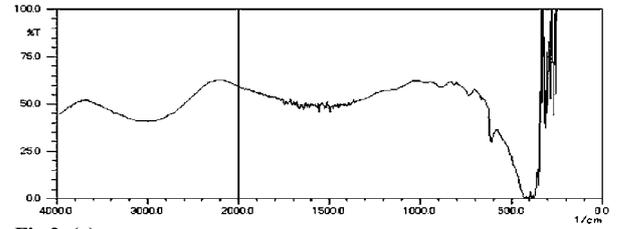


Fig.2. (a)

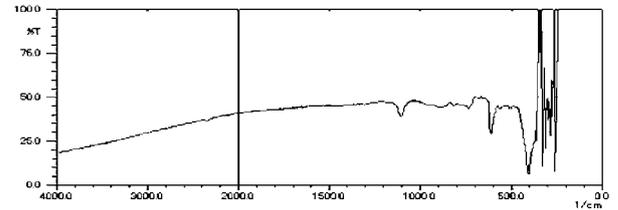


Fig.2. (b)

Fig.2. FT-IR spectrums for of #1 film(a) and #2 film(b).

作成された薄膜の光伝導電流の測定は、前報の方法と同じようにアルゴンガス雰囲気及び、アルゴン酸素雰囲気で行った。^{6, 7)}

3. 結果と討論

3.1 FTIR による評価

試料 1(#1) と試料 2(#2) の FT-IR による分子結合状態の測定結果を Fig.2 に示す。両者ともに 300 cm⁻¹付近に反応が見られる吸収のピークは、シリコン基板によるものである。400 cm⁻¹に見られるピークは酸化チタンのものであり、薄膜として TiO₂ の結合が形成されていることが分かる。違いが表れているのは 2000 ~ 4000 cm⁻¹である。#2 にはピークは見られないが、#1 には 2900 cm⁻¹ にブロードなピークが見られ、薄膜に OH 基が含まれていることが示唆できる。

3.2 光伝導による評価

アルゴン雰囲気中にある試料の光伝導電流を測定した結果を Fig.3(a) 及び (b) に示す。Fig.3(a) は OH 基を含ませたもの、(b) は含ませないものである。照射時間 0 分から 60 分では高圧水銀灯による紫外線 (16.5mW/cm²) を照射し、60 分以降は紫外線を遮断した後の光電流の測定値である。測定装置は前報と同じものである⁷⁾。用いた材料 #1 及び #2 の両者ともに紫外線に反応し、光電流の増加特性が見られる。特に #1 では最大で 1.67mA と非常に高い電流値を示した。その応答特性は、40 分辺りから飽和する傾向を示した。これに対し、#2 では光電流の増加は緩やかで、60 分での光電流は 2 桁ほど小さい。

各薄膜における光電流応答の時定数 τ (min) を、立上

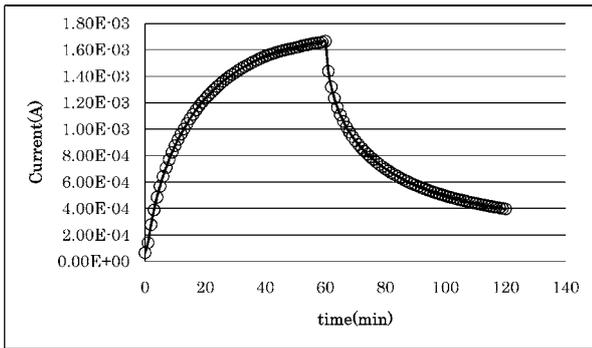


Fig.3. (a)

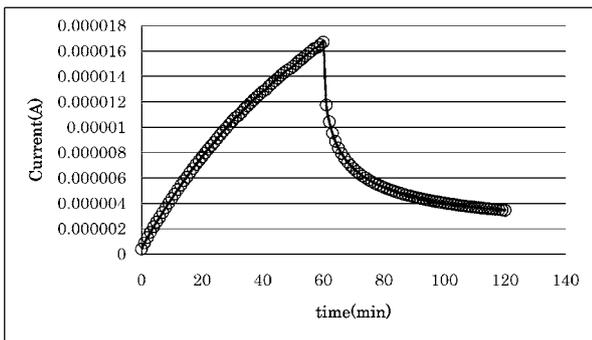


Fig.3. (b)

Fig.3. Photo-response for the electrical conductivity of the #1 film (a) and #2 film (b) (UV light intensity: 16.5mW/cm²).

がり時、立下り時の両方の場合について下記の式により求めた。まず、立上がり時の時定数 τ_r (min) を求めるために、実験値と計算値を全領域にわたってフィッティングを行うことにより τ 及び α を決定した。次に立下りでは、紫外線照射時の熱の影響があると考え、遮断 5 分後を初期値として減衰特性における時定数 τ_f 及び、 β を求めた。

立ち上りの応答として、

$$I = I_0 \left\{ 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\tau_r} \right)^\alpha \right] \right\} \quad (3)$$

立下りの応答として

$$I = I_0 \exp \left[-\left(\frac{t}{\tau_f} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

(3) 式により立上がり時の時定数 τ_r を求めた結果、#1 では $\tau_r = 16$ (min)、#2 では $\tau_r = 100$ (min) となり後の方が時定数が長くなっている。この結果を Fig.4(a), (b) 薄膜に紫外線を照射したとき価電子帯にある電子が励起し伝導帯に移る。このとき、通常の酸化チタン薄膜では酸素欠損により生じた電子捕獲準位に電子が捕獲され、電流値が低くなるが、OH 基を含ませることにより欠損が不活性になり、電流値としては高くなったと思われる。また、時定数の点では OH 基を含ませることにより、価

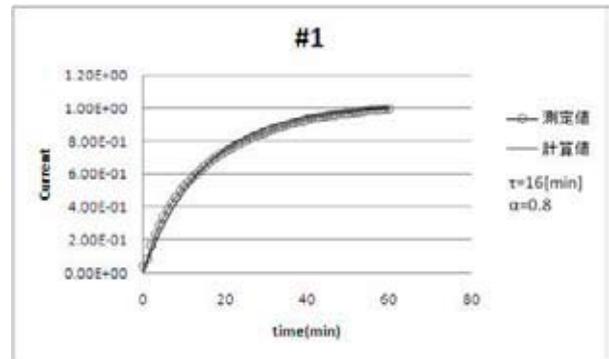


Fig.4. (a)

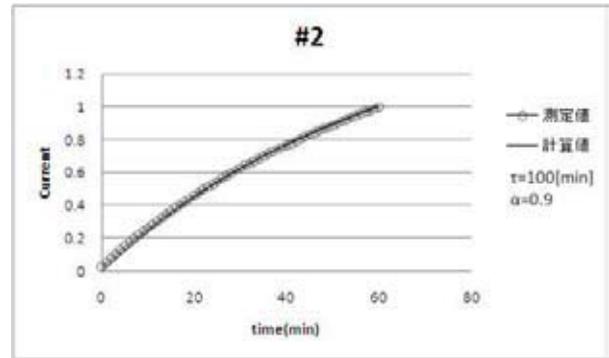


Fig.4. (b)

Fig.4. Photocurrent increases for #1 film (a) and #2 film (b).

電子帯近傍の局在準位が少なくなり、薄膜中に保持される電荷量が少なくなったためと思われる。すなわち、欠陥に保持される量は #2 の方が多いと思われるけれども、光電流値として流れる電流量は #1 の方が大きい。

(4) 式により立下りの時定数 τ_f を求めた。#1 は $\tau_f = 50$ (min)、#2 では $\tau_f = 80$ (min) となり、こちらも #1 のほうが寿命が短くなっている。結果を Fig.5(a), (b) に示す。立上がりと立下りの時定数 τ を比較してみると立ち上りの方が時定数が短いことがわかった。これらの結果は立ち上りの時定数よりも減衰の時定数のほうがかなり長くなっていることから、光照射時における再結合過程と、暗時の再結合過程は異なることが考えられる。

紫外線照射による光伝導電流の測定について、アルゴン雰囲気中に酸素を加え、測定した結果を Fig.6 に示す。アルゴン中の酸素濃度は 0%、5%、10%、20% とした。#1 の薄膜は Fig.6 に示すように、酸素濃度に敏感に反応している。酸素濃度を上げるときに光電流が減少していることがわかる。このことは、励起された電子の再結合過程に酸素が関与し、寿命を短くしているものと考えられる。それぞれの時定数を見積もると τ_r は酸素濃度 0% では 30min、5% では 2.0min、10% では 2.5min、20% では 3.0min であった。また、#2 のものでは酸素の混入

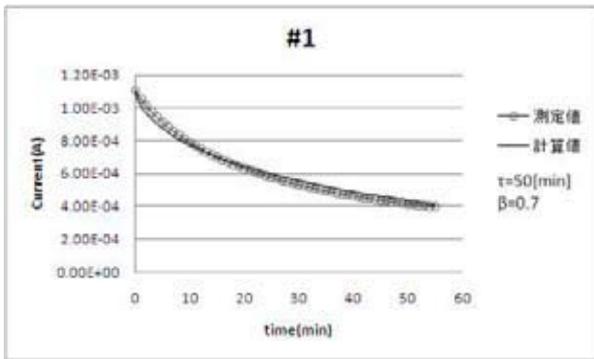


Fig.5. (a)

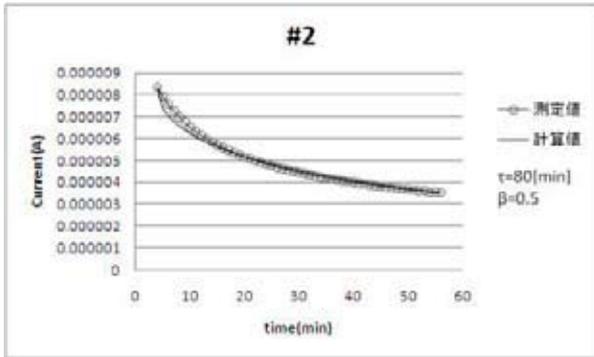


Fig.5. (b)

Fig.5. Photocurrent decreases for #1 film (a) and #2 film (b).

Table.2 Results obtained from fitting procedure between photocurrent and calculation value on the #1 and #2 films.

	Current	τ_r	α	τ_f	β
試料1(#1)	1.67mA	16min	0.8	50min	0.7
試料2(#2)	16.5 μ A	100min	0.9	80min	0.5

Table.3 Influence on photoconduction parameters by introducing oxygen gas.

酸素濃度 %	0	5	10	20
τ_r (min)	30	2	2.5	3
α	0.8	0.7	0.7	0.7

による変化はあらわれなかった。酸素の介在による再結合過程の詳細については、さらなる実験及び検討が必要である。

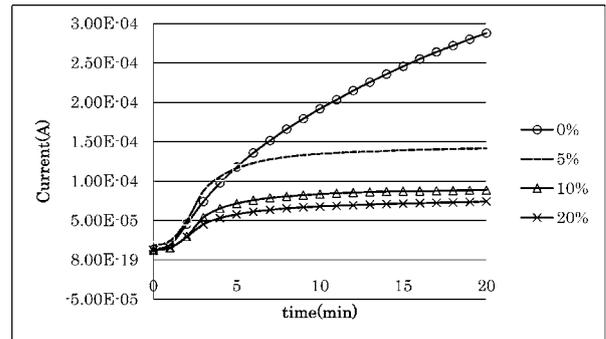


Fig.6. Influence on photo-current characteristics by introducing oxygen gas, parameters are oxygen percents in argon gas.

4. 結論

高周波スパッタリングによって酸化チタン薄膜を作成した。アルゴンガスに水蒸気を含ませることによってスパッタリングで作製した薄膜に OH 基が含まれていることが FT-IR での解析によりわかった。光伝導電流による評価では、OH 基を含んだ薄膜では光電流が著しく増加し、同時に光の立ち上がり、立ち下り応答の時定数が減少することが分かった。このことは、薄膜中の欠損を OH 基が不活性化し、光電流が増えること、また、電子の捕獲準位密度が下がり、電流密度としては増加することが分かった。

アルゴン酸素雰囲気中で光伝導を測定したところ、酸素に敏感に反応し、酸素濃度が高くなるほど光電流が減少していった。

参考文献

- 1) C.D.Jaeger and A.T.Bard J.Phys.Chem. 83. (1979) 3146
- 2) M.Nakamura, T.Aoki, Y.Hatanaka, D.Korzec, J.Engemann, J.Meter. Res, vol 16,(2001) 621
- 3) M.Nakamura, D.Korzec, T.Aoki, J.Engemann, Y.Hatanaka, Appl. Surf. Sic. 175/176 (2001) 697
- 4) M.Nakamura, S.Kato, T.Aoki, L,Sirghi, Y.Hatanaka, J. Appl. Phys. 90 (2001) 3391
- 5) Tenens.O.1930: Uder einige meteorologische Begriffe. Zeitschrift fur Geophysik, 6, 297-309
- 6) K.Sakaguchi, K.Shimakawa, Y.Hatanaka, Jpn. J. Appl. Phys. vol 45 (2006) 4183
- 7) 坂口, 嶋川, 畑中, 愛知工科大学紀要 vol 3 (2005) 55

研究論文

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

坂口鋼一*, 嶋川晃一**, 畑中義式*

(2009年9月30日受理)

Recombination Process of Photo-excited Carriers in TiO_x Films Prepared by Rf Sputtering Method

Koichi Sakaguchi*, Koichi Shimakawa**, Yoshinori Hatanaka*

(Received September 30, 2009)

Abstract

Decay kinetics of photoconduction has been discussed in titanium oxide films prepared by rf magnetron sputtering method. It is proposed that the localized electrons in the conduction band tails recombine with the band-tail holes in valence band through the percolation path in the conduction band. This process produces a long term decay of photoconductivity. From the decay time constant important physical parameters such as electron-hole pair distance can be estimated.

キーワード: 光伝導, 酸化チタン薄膜, 再結合, トラップ, 捕獲準位

Keywords: photoconduction, titanium oxide films, recombination, trap, capture states

1. はじめに

酸化チタンは最近光触媒性の機能を利用する用途で多くの応用がなされている。空気の浄化、水の浄化、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。

我々は、高周波スパッタリング法によって作成した酸化チタン薄膜の、紫外線照射における光伝導効果について研究を行ってきている^{1), 2)}。前報告において述べているように、UV光を照射することにより光伝導効果が

生ずるが、光を遮断した後、酸素のない雰囲気中では光伝導で増大した電流はほとんど減少することなく流れ続け、極めて長い減衰時定数を持ち数時間におよび流れつづける。これは、励起電子と正孔が再結合をする機会が少ないためと考えられ、光触媒性のためには望ましい特性である。このようにして、長時間の間流れ続ける現象の再結合過程をアモルファス材料の伝導現象から検討を行った。

アモルファス材料、とくに微結晶の混在した薄膜では、エネルギーバンドの空間的ゆらぎが大きく、伝導帯の電子は複雑なパーコレーション経路をとる^{3), 4)}。伝導帯におけるゆらぎと同様に価電子帯においても大きなゆらぎがあり、伝導帯の最下部と価電子帯の最上部のエネルギー位置が必ずしも空間的に一致するものではない。

* 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

伝導帯および価電子帯のゆらいだ経路をたどって流れるキャリアの再結合は極めて起こりにくいものとして考えられる。これが酸化チタンの光活性、光触媒に有効かもしれないが明確ではない。

本論文では、この励起電子の再結合の過程を議論し、局在状態間距離の概算を試みる。

2. 光電流の減衰特性

酸化チタンにおける光伝導現象として、光の ON, OFF に対して、光伝導の応答は単純な指数関数で表わすことができず、拡張指数関数として表わすことができることが確かめられている⁵⁾。すなわち、光を ON とした場合について

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

ここで、 I_0 は飽和光電流、 τ_n はステップ状に光を照射したときの応答の時定数である。光電流は光の遮断後、励起キャリアの再結合によって減少する。その減少過程も拡張指数関数⁶⁾で表わされることは、実験結果の報告^{1), 2), 5), 7)}のとおりである。すなわち、

$$I = I_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_f} \right)^\beta \right] \quad (2)$$

この式で、 β は分散指数 (dispersion parameter ($0 < \beta < 1$)), τ_f は減衰時定数 (effective decay time) をあらわす。Fig.1 の実験結果¹⁾は、高周波スパッタ法で作成さ

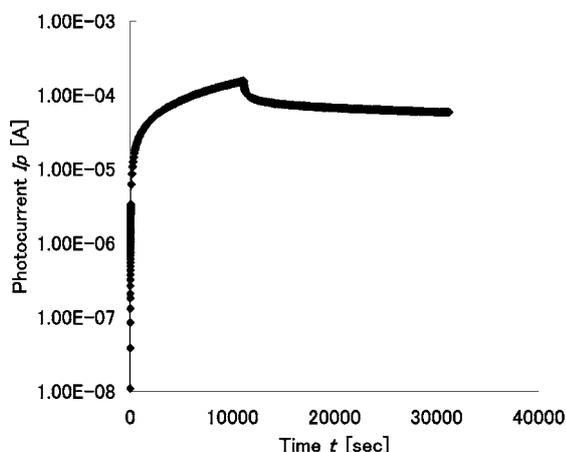


Fig.1 紫外線照射時及び停止後の光電流 (作成条件: rf スパッタリング法, 200W, Ar2ccm, $4 \sim 5 \times 10^{-3}$ Pa, 2hour, 測定条件: Ar 雰囲気 1ℓ/min, 298K, 印加電圧 2V)

れた酸化チタン薄膜に Ar 雰囲気中で紫外線を照射した場合の、照射時と停止後の光電流を示す。光電流が短時間で $0.01 \mu\text{A}$ から $10 \mu\text{A}$ まで増加し、その後、ゆるやかに増加し続けた。紫外線照射を停止すると、光電流は極めてゆるやかに減少した。 $\tau_f = 350\text{min}$, $\beta = 0.2$ とした場合に、紫外線停止後の光電流を式 (2) で表すことができた。350min という極めて長い減衰時定数が得られた。

式 (2) の減衰時定数 τ_f について、298K ~ 343K の温度範囲で、温度変化の特性をとると

$$\tau_f = \tau_0 \exp \frac{\delta}{kT} \quad (3)$$

の関係が得られた²⁾。この式から、再結合プロセスが温度依存性を持ち、あるレベルへの熱的励起が存在することがわかる。 δ は伝導電子が、ある準位からより高い準位まで励起されるのに必要なエネルギーである。

酸化チタンは、酸素欠陥により n 型半導体の性質を示すといわれており⁸⁾、酸素欠陥と合わせてアモルファス微結晶との混在によって空間的ゆらぎがもたらされる。この不均質構造のため、酸化チタンのバンドは、Fig.2 に示すようにバンド端にゆらぎを生ずると考えられる。Fig.2 のパーコレーション閾 E_{pc} は、アモルファス物質において空間的に変動するエネルギー状態の中を電流が流れるとき、空間的にジグザグの経路をたどって電流が流れ (パーコレーション理論)、 E_{pc} を越えるエネルギーの電子だけが伝導に寄与できると解釈されるものである^{9), 10)}。直流伝導、交流伝導の実験からバンド端ゆらぎの程度が得られ、ゆらぎの大きさは 0.26eV でバンドギャップの 8% 程度であった^{1), 11)}。Fig.2 に示すようにバンド端にゆらぎがあるものとして以下の再結合モデルを考え

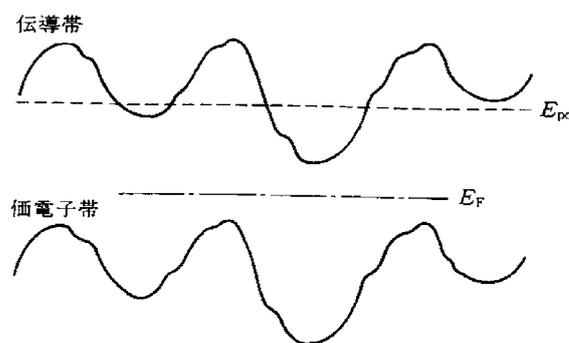


Fig.2 半導体のバンド端ゆらぎとパーコレーション閾 E_{pc}

3. 再結合過程

3.1 伝導帯と価電子帯の間の電子—正孔対再結合

Fig.3(a) は、バンド端にゆらぎがある場合の、伝導帯の電子と価電子帯の正孔が再結合する過程を示す。

Fig.3(a) の経路 I は、空間的に位置が異なる伝導帯の底と価電子帯の頂上との間の遷移を示す。この遷移確率は極めて小さいことが知られている。また、この過程は温度に依存しない。

経路 II は、伝導帯の底からパーコレーション閾 E_{PC} に熱活性化された自由電子がトンネルを伴って価電子帯に再結合する過程を示す。この場合は、活性化エネルギーが現れるが、伝導電子の禁制帯へのトンネル確率が小さいので、この再結合過程が起きる確率は極めて小さいものと考えられる。

3.2 Tail states を介しての再結合

Fig.3(b) は、伝導帯および価電子帯の近傍に tail states があり、それぞれ tail states に局在した電子と正孔が再結合する過程を示す。

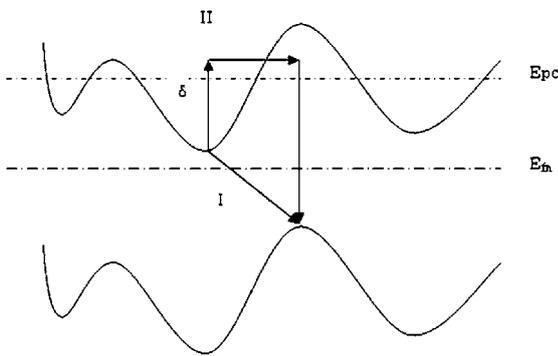


Fig.3(a) 再結合過程 I, II

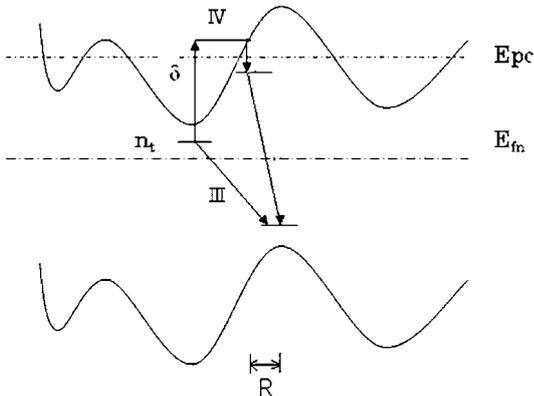


Fig.3(b) 再結合過程 III, IV

経路 III の過程は states 間の再結合を示す。この過程は温度に依存しない。

経路 IV の過程は、tail states にトラップされた電子が、 δ だけの熱エネルギーによってパーコレーション閾 E_{PC} より高い準位に上がった後、 E_{PC} 近傍の tail states に遷移し、そこからドナー、アクセプター間遷移がおこる場合である。

この場合、遷移確率 P は、

$$P = \nu \exp\left(-\frac{2R}{a}\right) \exp\left(-\frac{\delta}{kT}\right) \quad (4)$$

$$\nu = N_c \nu \sigma_t$$

ν は、電子がバンド状態に励起される試行回数をあらわし、 N_c は有効状態密度 ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)、 ν は熱速度 ($\sim 10^7 \text{ cm/s}$)、 σ_t は捕獲断面積 ($\sim 10^{-15} \text{ cm}^2$) をあらわす。したがって、 ν は $5 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ となる。

$$\nu \exp\left(-\frac{\delta}{kT}\right) [\text{s}^{-1}]$$

tail states にトラップされた電子が熱的活性化によってトラップレベルから δ だけ上にある E_{PC} レベルの伝導帯に励起される確率

a ボーア半径 (Bohr radius)

局在した電子が空間をどの程度に広がっているかの目安

R 局在した状態間の距離

$\exp\left(-\frac{2R}{a}\right)$ 局在した状態間の遷移確率

実効寿命 τ (the time spent in the trap) と遷移確率 P (the escape probability) の関係は

$$\tau = \frac{1}{P} \quad (5)$$

であるから

$$\tau = \frac{1}{P} = \nu^{-1} \exp\left(\frac{2R}{a}\right) \exp\left(\frac{\delta}{kT}\right)$$

この式において

$$\nu^{-1} \exp\left(\frac{2R}{a}\right) = \tau_0 \quad (6)$$

とおくと

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\delta}{kT}\right) \quad (7)$$

が得られ、実験²⁾で得られた式(3)と同じ式が得られた。

τ_0 は式(3)において再結合過程の時定数の温度依存性における指数関数の係数(前指数項)として実験により求められるものであるが、 τ_0 を求めることにより、式(6)を変形して得られる

$$R = \frac{a}{2} \ln(\tau_0 \nu) \quad (8)$$

を用いて、局在した状態間の距離 R が求められる。

この局在状態間の距離は、大きければ大きいほど再結合が生じにくくなり、長い時定数をもつものと解釈できる。

5. 討論と結び

これまでの酸化チタンの紫外線照射による光伝導、交流伝導の実験結果^{1), 2), 5), 7), 11)}をもとに、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非常に長い時定数をもつ光励起電流の再結合過程について検討した。

結果として再結合過程が温度依存性を有することの事実から、**Fig.3(b)** IVに示すように tail states にトラップされた電子が、 δ だけの熱エネルギーによってパーコレーション閾 E_{pc} より高い準位に上がった後、 E_{pc} 近傍の tail states に遷移し、そこからドナー、アクセプター間遷移

がおこると仮定して、式(8)に $\nu = 5 \times 10^{11} \text{s}^{-1}$, $a = 1 \text{nm}$ と実験結果²⁾ $\tau_0 = 0.5 \text{s}$ を代入すると $R = 13 \text{nm}$ となり、この値はポテンシャル揺らぎの空間距離で予想される値と同程度となり妥当な値が得られた。

紫外線照射後の長い残留光電流の原因は、伝導帯近傍の tail states のトラップ電子が、 δ だけの熱エネルギーによってパーコレーション閾 E_{pc} より高い準位に上がった後、 E_{pc} 近傍の tail states に遷移し、そこからドナー、アクセプター間の遷移により再結合がおこるためと考えられる。

参考文献

- 1) 坂口鋼一, 嶋川晃一, 畑中義式: 愛知工科大学紀要 6 (2009) 43
- 2) 坂口鋼一, 深澤正樹, 嶋川晃一, 畑中義式: 第 56 回応用物理学関係連合講演会 1a-P12-25(2009.3)
- 3) K.Shimakawa, A.Kondo, M.Goto, and A.R.Long: J.Non-Cryst. Solids 198-200 (1996) 157.
- 4) K.Shimakawa and A.Ganjoo: Phys. Rev. B65(2002)165213.
- 5) 坂口鋼一, 嶋川晃一, 畑中義式: 愛知工科大学紀要 3 (2006) 55
- 6) J. Singh and K. Shimakawa: *Advances in Amorphous Semiconductors* (Taylor & Francis, London and New York, 2003) p.247
- 7) K.Sakaguchi, K.Shimakawa, Y.Hatanaka: Jpn. J. Appl. Phys. 45, 5A(2006)4183
- 8) 清野学: 酸化チタン (技法堂出版株式会社, 東京, 1991)
- 9) 嶋川晃一: 応用物理 65 (1996) 256.
- 10) 嶋川晃一: 固体物理 31 (1996) 437.
- 11) K .Sakaguchi, K.Shimakawa, Y.Hatanaka: Jpn. J. Appl. Phys. 48 (2009) 071601

研究論文

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

宮崎保光*, 今泉良彦*

(2009年9月30日受理)

Restoration of Bandainagon-emaki Based on Restoration Copy of Genjimonogatari-emaki and Data Bases

Yasumitsu Miyazaki* and Yoshihiko Imaizumi*

(Received September 30, 2009)

Abstract

Around 1980 years, restoration technology of damaged old painting has not been well developed. After technical development of image processing and material analysis of old painting structures, restoration of damaged old painting is rapidly accomplished, mainly by handwork with cooperation of traditional Japanese artists, without computer processing.

Recently, restoration of Genjimonogatari-emaki was shown by traditional Japanese artist. The authors make up data-base programs of color transformation between damaged old painting of Genjimonogatari-emaki and artificial restoration performed by traditional Japanese artists without computers. In this paper, based on data-base tables of the color transformation concerned with restoration of Genjimonogatari-emaki, restoration of damaged old painting – bandainagon – emaki is studied by computer image and color software such as Photoshop.

キーワード: 復元模写, 画像処理, 日本絵巻

Keywords: restoration, image processing, Japanese-emaki

1. はじめに

1980年頃の画像解析技術では、劣化した絵画を復元することは容易ではなく、かなり困難であった^{1,2)}。しかし、近年の画像解析技術の向上により、劣化した絵画の下書きの線画や、顔料の成分の構成なども分かるようになり、従来の復元作業より遥かに完成度の高い復元が可能になってきた³⁻⁸⁾。日本画の専門家が共同作業により、源氏物語絵巻(げんじものがたりえまき)の復元制作を行った、「よみがえる源氏物語絵巻」の出版物を基にデータベース作成し、他の復元されていない歴史的文物の絵画を、パソコンを使うことにより簡易的に短時間に復元し、今後の絵画の復元にも基礎を提供することが本研究の目的である。今回復元する伴大納言絵巻(ばんだいなごんえまき)は、源氏物語絵巻と制作された年代が近いと推測により選んでいる。

2. 絵巻物

絵巻物は、日本の絵画形式の1つで、料紙や絹を横長につないで長大にし、情景や物語などを連続して表現したものである⁹⁻¹¹⁾。絵画と詞書が交互にあるものも多いが、絵画のみのものもある。最初の絵巻物は、奈良時代に制作された「絵因果経」(えいんがきよう)であると言われ、巻物の上段に絵画、下段に経文が描かれている。平安時代になると、王朝文学の物語、説話などを題材とした絵巻が制作されるようになり、金銀箔や花鳥などの下絵をあしらった料紙に、連綿体(れんめんたい)で書かれた詞書と、絵画が交互ある独特の様式が生まれた。物語絵巻で、「源氏物語」、「枕草子」(まくらのそうし)、「伊勢物語」(いせものがたり)などは独特の表現で描写され、様々な技法で描かれている。鎌倉時代には、「歌仙絵巻」(かせんえまき)、「戦記絵巻」(せんきえまき)など多くの絵巻が制作された。「源氏物語絵巻」、「伴大納言絵巻」、

* 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

「信貴山縁起」(しぎさんえんぎ)、「鳥獣人物戯画」(ちょうじゅうじんぶつぎ)は、日本の四大絵巻物と称されている。

3. 源氏物語絵巻

3.1 源氏物語絵巻

源氏物語絵巻は、源氏物語を題材にした絵巻物で、「源氏物語絵巻」と名付けられた絵巻物は複数存在する。その中で「隆能源氏」(たかよしげんじ)は、源氏物語を題材にして制作された絵巻としては現存最古のもので、平安時代末期の制作とされている。源氏物語を題材にした絵巻物は数多く存在し、「源氏物語絵巻」という絵巻物はいくつか存在する。「隆能源氏」以外では、狩野尚信(かのうなおのぶ)、久隅守景(くすみもりかげ)、狩野栄川(かのうえいせん)のものなどがある。しかし、説明無しに「源氏物語絵巻」と呼ぶ場合には「隆能源氏」を指すことが多い。1120～1140年頃に、院や女院を中心として制作されたものと思われ、「源氏物語」54帖の各帖から1～3場面を抜き出して絵画が描かれ、対応する詞書も書かれている。当初は80～90場面が10～12巻くらいの絵巻に構成されたとされているが、現在では19段の画面と20段の詞書が徳川黎明会と五島美術館とに分蔵され、その他に詞書の断簡8種、絵の断簡1種が残っている。詞書の書風が5種類ほどに分類され、途中に表現の相違が指摘できることから、複数の画家や書家が、物語の各部分を分担したと思われる。いずれも「つくり絵」という技法によって制作されている。画中の人物は「引目鉤鼻」(ひきめかぎはな)という技法で描かれ、その他にも屋内の様子は「吹抜屋台」(ふきぬきやたい)という技法で描かれている。

3.2 源氏物語絵巻の表現技法

・つくり絵

墨線で下描きし、その上から彩色を施し、最後に人物の顔や衣の輪郭などを墨線で描き起こす。大和絵の技法の1つ。

・引目鉤鼻(ひきめかぎはな)

人物の描き方で、下ぶくれの顔に目は墨で細長く描き、眉は細い墨の線を引き重ね、鼻は短く「く」の字に描き、口は朱で点を打つようにする。大和絵の技法の1つ。

・吹抜屋台

平安・鎌倉時代の絵巻類によく用いられた室内描写法。屋根・天井などを省いて、斜め上から見下ろすように室内の情景を描く。大和絵の技法の1つ。

3.3 源氏物語絵巻の種類

- ・蓬生 《第十五帖》 源氏二十八歳秋～翌年初夏
- ・関屋 《第十六帖》 源氏二十九歳九月
- ・柏木一 《第三十六帖》 源氏四十八歳正月～秋
- ・柏木二 《第三十六帖》 源氏四十八歳正月～秋
- ・柏木三 《第三十六帖》 源氏四十八歳正月～秋 他

4. 伴大納言絵巻

4.1 伴大納言絵巻

伴大納言絵詞(ぼんだいなごんえことば)とも言う。応天門の変を題材にした平安時代末期の絵巻物。「応天門の変」の約300年後、後白河法皇が「年中行事絵巻」(ねんじゅうぎょうじえまき)とともに常盤光長(ときわみつなが)に描かせたとされる。作成年は1177年とも言われるが定かではなく、冒頭の詞書は失われている。応天門の変における、大納言伴善男(だいなごんぼんよしお)の陰謀を描いた作品で、放火され炎上する応天門、無実の罪で捕らえられる左大臣源信(さだいじんみなもとのまこと)と嘆き悲しむ女房達、舎人の子供の喧嘩から真犯人が発覚し、伴善男を捕らえる検非違使の一行、以上の全3巻の巻物構成になっている。平安時代の人々を描いたもので、特に検非違使の活動が具体的に描かれている。人物や炎の表現に優れ、大胆な画面構成がされている。事件の真相解明のきっかけとなった子供の喧嘩の場面では「異時同図法」(いじどうずほう)という手法が用いられている。2004年9月から東京文化財研究所が、蛍光X線分析法や高精細デジタル画像解析などで化学的分析を行っており、顔料には純度の高い品質のよい物(おそらくは輸入品)が使用されている事や、人物や炎については下書きがなく一気に描かれたことなどが判明した。全て分析するにはまだ数年かかる見込みである。

4.2 伴大納言絵巻の表現技法

・異時同図法

同一画面内に同一人物が複数回登場して、その間の時間的推移が示されている。「伴大納言絵巻」では、3つの場面を1つの画面に描かれているものなどがある。

5. 代表的な色の顔料、染料の例

- ・CMYK: 色の表現方式の一つで、藍色(Cyan)、深紅色(Magenta)、黄色(Yellow)、黒(black)の配合比率を変

化させて、すべての色を表現する。

・RGB: 色の表現方式の一つで、赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の配合比率を変化させて、すべての色を表現する。この3色は光の三原色と呼ばれている。例として、

・黄丹 (おうたん)

CMYK 0, 65, 90, 0 RGB 247, 130, 37

冴えた赤橙色。支子で下染めし、紅花で上掛けした。色名は、顔料「鉛丹」の別名を借りたもの。

・瑠璃色 (るりいろ)

CMYK 95, 70, 0, 0 RGB 0, 91, 160

紫みの冴えた青色。仏教の七宝の1つに数えられる玉石、瑠璃 (ラピスラズリ) に由来する。天然の藍からこの色を染め出すことはかなり難しい。

・琥珀色 (こはくいろ)

CMYK 10, 55, 95, 0 RGB 234, 147, 10

琥珀の石の色に似た、茶がかった黄橙色。琥珀は太古の樹脂類が土中で化石した鉱物で、瑪瑙 (めのう) などとともに貴石とされ、大部分は不透明な黄橙色をしている。

6. 色彩

6.1 色について

色は形と並ぶ重要な要素で、形は比較的容易に計測できるのに対して、色を客観的に伝達することは難しい。色の表現は長年の課題で、さまざまな研究が行われてきた。

6.2 色の三属性

色には「いろいろ」のある有彩色と、ない無彩色があり、これらの色は明度、色相、彩度の3つの属性をもっている。

6.3 有彩色と無彩色

白、灰色、黒などの「いろいろ」のない色を無彩色、それ以外の「いろいろ」のある色を有彩色という。同じ灰色でも白の純色と黒の純色の混合で得られるものは無彩色だが、有彩色どうしの混合または無彩色に微量の有彩色を混合した灰色は有彩色になる。

6.4 明度

色のもつ明るさを明度という。明度は白がもっとも高

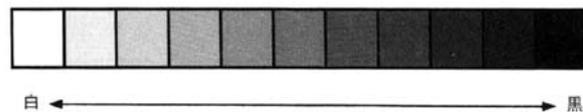


Fig.1 グレースケール

く、黒がもっとも低い。両端に白と黒を配して、その間で連続的に明度を変化させた灰色を配置したものを明度段階 (グレースケール) という。一般的に明度段階は0から10までの11段階に区分される。無彩色だけでなく有彩色もそれぞれ固有の明度をもっている。

6.5 色相

光をプリズムで分光し、その波長によって赤から紫までの区別ができる (スペクトル)。このような色みの系統を色相といい、最も波長の長い赤と最も短い紫をつなげて環状に配置したものが色相環という。赤と紫の間は、スペクトルには存在しない赤紫を加えて、連続的に色相を変化させる。色相環上の中には主要色相と呼ばれるものがあり、色相環は主要色相の間が等間隔になるように配置されている。主要色相の数は5~8の間に設定されることが多く、それぞれの中間位置の色も含めて10色、12色、24色などの色相環が一般的である。無彩色はどの色からも等距離で、色相環の中心に位置し、色相を示す値はない。

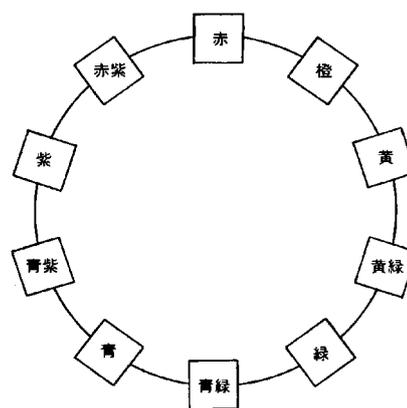


Fig.2 色相環

6.6 彩度

同一色相・明度であっても、色みの強い色と、色みの弱い色があり、このような色みの強弱の度合いを彩度という。無彩色の彩度を0とし、色みが増すごとに彩度は高くなる。各色の最高彩度は色相によって異なり、同一色相の中で最も彩度の高い色を純色という。また、純色

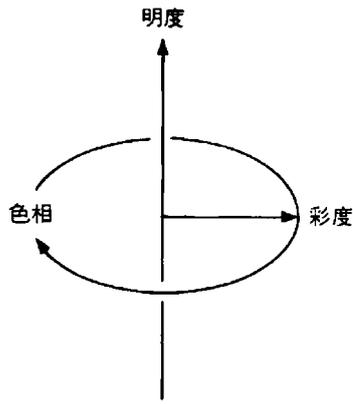


Fig.3 色立体の概要図

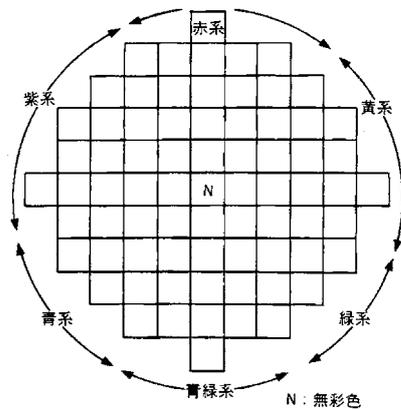


Fig.4 色立体の水平断面

の明度も色相によって異なる。色の三属性により、3次元的に色の配置をしたものを色立体といい、白を上、黒を下にした無彩色の軸を中心に、明度が同じ高さで色相が同じ方向になるように色相環を配置する。色立体を軸に垂直な平面で切断すると、同一明度の色相環が現れる。なお色相環は純色で表現するのが多い。

6.7 色彩体系

同一品質のものを大量に生産するためには、「少し明るい赤」とか「青みがかった灰色」などの曖昧な表現ではなく、色を正確に伝達する必要がある。このために色に数値や記号を付けて、色の三属性を表現する色彩体系（表色系）が考え出された。代表的な色彩体系を次に紹介する。

6.8 マンセル表色系

アメリカのマンセルによって考案された色彩体系で、赤 (R)、黄 (Y)、緑 (G)、青 (B)、紫 (P) を主要色相とし、それぞれの中に黄赤 (YR)、黄緑 (GY)、青緑 (BG)、青紫 (PB)、赤紫 (RP) を設け、この 10 色相を 10 等分して 100 色相にし、1R ~ 10R、1YR ~

1YR、1Y ~ 10Y、・・・、1RP ~ 10RP のように表現する。主要色相は中心の 5R や 5RP となる。明度は白を 10、黒を 0 とする 11 段階で、N0 ~ N10 で表す。彩度は無彩色を 0 とし、赤の純色を最高彩度の 14 に設定している（現在は新しい顔料の開発によってより高彩度の色もある）。以上の色相、明度、彩度を、「色相 明度 / 彩度」のように表し、赤の純色は 5R4 / 14 のようになる。マンセル表色系を測色技術などによって改良した、改良マンセル系という表色系もあり、日本では工業規格 (JIS) における表色系に指定採用されている。

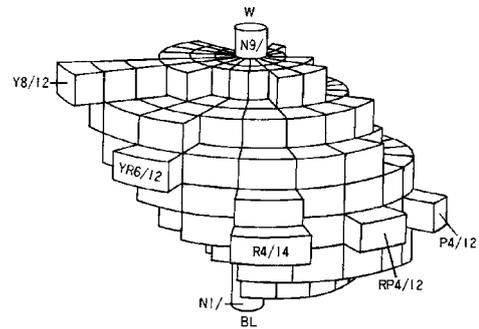


Fig.5 マンセルの色立体

6.9 オストワルト表色系

ドイツの科学者オストワルトが考案した表色系で、すべての色は純色と黒と白の混合により表せるという理論に基づいている。黄、橙、赤、紫、青、青緑、緑、黄緑の 8 色を主要色相とし、これを 3 分割した 24 色相を設定している。明度は 8 段階とし、白から黒に向かって a, c, e, g, i, l, n, p の順に記号で分類する。この明度段階の垂直軸を 1 辺とする正三角形を作り、頂点に各色相の純色を配置する。オストワルト表色系の色立体は 2 つの円錐を底面で合わせた形状になる。

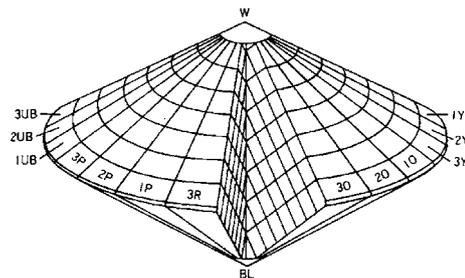


Fig.6 オストワルトの色立体

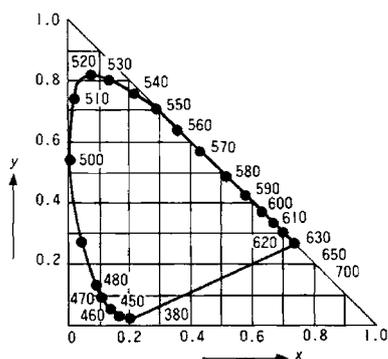


Fig.7 色度座標

6.10 CIEの色度座標

国際証明委員会（CIE）によって1931年に定められた表色系で、色光測定色の国際的な標準となっている。加法混色の三原色である赤・緑・青の組み合わせで色を表しおり、三角形の色度座標上の位置で色を表現する。

6.11 日本色研の表色系（PCCS）

日本色彩研究所が定めた表色系で、赤、橙、黄、緑、青、紫の6色を主要色相とし、それを4分割した24色相を用いている。明度はマンセル表色系と同じ11段階だが、黒を10、白を20とし、彩度は無彩色を0、赤の純色を10とする。最高彩度は色相によって異なる。

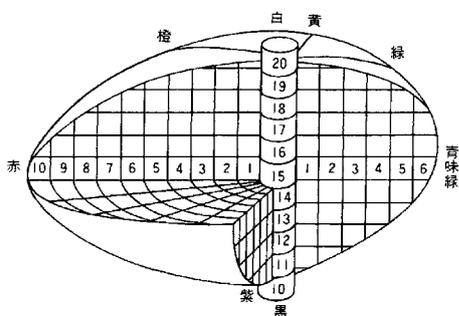


Fig.8 色研色立体

7. Photoshop を使用しての復元工程

画像編集などの専門ソフトとして、多くのユーザーに支持されている Photoshop を使用して、復元作業に入る。作業工程は次のとおりである^{12,13)}。

- 工程 1. 源氏物語絵巻の復元前後の画像の取り込み
- 工程 2. 取り込んだ画像の画像補正作業
- 工程 3. 源氏物語絵巻の復元前後の色対応データベース制作
- 工程 4. 復元の元となる伴大納言絵巻の画像の取り込み

- 工程 5. 取り込んだ画像の画像補正作業
- 工程 6. 作成した色対応データベースを基に伴大納言絵巻の色対応データベースの制作
- 工程 7. 取り込んだ伴大納言絵巻の画像を基に線画を制作
- 工程 8. 線画に伴大納言絵巻の色対応データベースを基に彩色
- 工程 9. 修復前後の画像を比較

以下より各工程の説明を行う。

工程 1. 源氏物語絵巻の復元前後の画像の取り込み

復元作業をするにあたり、まず源氏物語絵巻を基に色対応データベースを制作する。そのために以下の図の画像をパソコンに取り込む。今回使用したのは、復元前後の源氏物語絵巻 柏木二である^{1,14)}。



Fig.9 復元前の源氏物語絵巻 柏木二



Fig.10 復元後の源氏物語絵巻 柏木二

工程 2. 取り込んだ画像の画像補正作業

取り込んだ画像の仕様を統一するために画像補正をする。作業の手順は以下の通りとする。

- ・レベル補正

Fig.11 の入力補正において、入力レベルの値を左から a, b, c とし、a は最も暗い所 (シャドウ), b は中間調 (グ

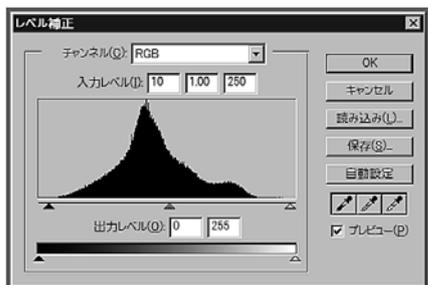


Fig.11 レベル補正



Fig.13 番号を振った復元後の源氏物語絵巻 柏木二

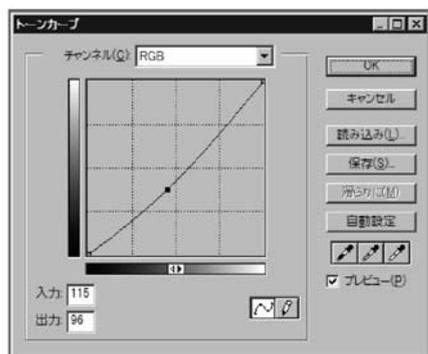


Fig.12 トーンカーブ



Fig.14 番号を振った復元後の源氏物語絵巻 柏木二

レー), cは最も明るい所(ハイライト)を示す。

ここでは入力レベルの値を「10, 1. 00, 250」で画像を統一する。

・トーンカーブ

Fig.12のトーンカーブとは中間調の値を示し、入力を上げると暗くなり、下げると明るくなるのに対し、出力はその逆になる。

ここでは入力を「115」、出力を「96」で画像を統一する。

工程3. 源氏物語絵巻の復元前後の色対応のデータベース制作

復元前後の色を調べることにより、劣化した色を復元したときの色対応データベースを制作する。比較部に番号を振る。(*比較箇所は5箇所だが、実際は5箇所以上色を抽出している。)

番号を振った部分をスポイトツールで色を採取し、カラーピッカーで源氏物語絵巻の色対応データベースを制作する。

データベース 1. 復元前の髪(黒)



Fig.15 復元前の源氏物語絵巻 柏木二 (HSB : 10, 53, 17 RGB : 43, 24, 20)

データベース 1. 復元後の髪（黒）

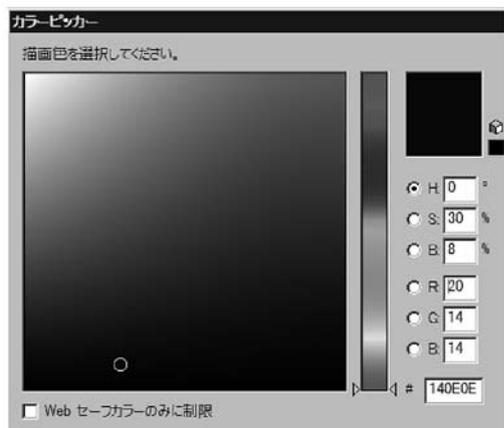


Fig.16 復元後の源氏物語絵巻 柏木二
(HSB: 0, 30, 13 RGB: 20, 14, 14)

工程 4. 復元の元となる伴大納言絵巻の画像の取り込み

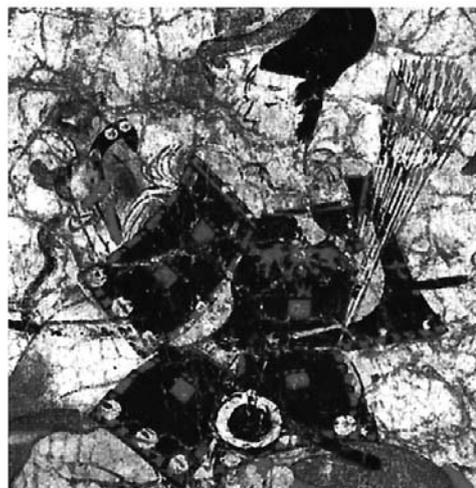


Fig.19 復元前の伴大納言絵巻

データベース 2. 復元前の顔（肌）



Fig.17 復元前の源氏物語絵巻 柏木二
(HSB:24, 38, 71 RGB:180, 139, 111)

工程 5. 取り込んだ画像の画像補正作業

工程 3 と同様に、レベル補正の入力レベルの値を「10, 1. 00, 250」, トーンカーブの入力を「115」, 出力を「96」で画像を統一する.

工程 6. 作成した色対応データベースを基に伴大納言絵巻の色対応データベースの制作

比較部に番号を振り、制作した色対応データベースを基に、番号を振った部分をスポイトツールで色を採取し、カラーピッカーで伴大納言絵巻の色対応データベースを制作する. 復元後の色は源氏物語絵巻と伴大納言絵巻に使われている絵の具の顔料等が同じものと仮定して、伴

データベース 2. 復元後の顔（肌）



Fig.18 復元後の源氏物語絵巻 柏木二
(HSB:32, 6, 99 RGB:252, 245, 237)

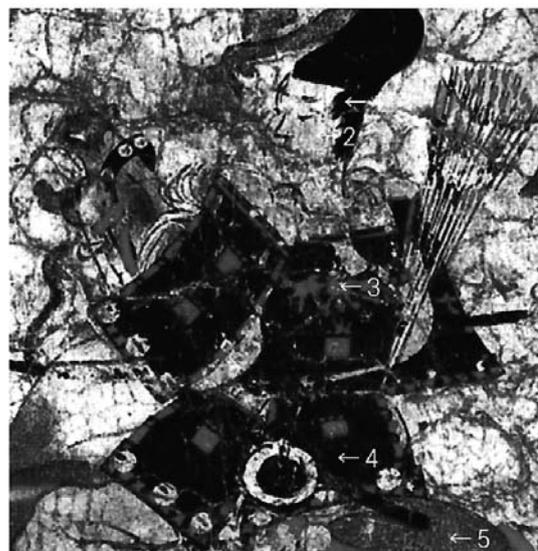


Fig.20 番号を振った復元前の伴大納言絵巻

大納言絵巻の復元後の色は源氏物語絵巻の復元後のいろとする¹⁵⁾。

データベース 1. 復元前の髪 (黒)

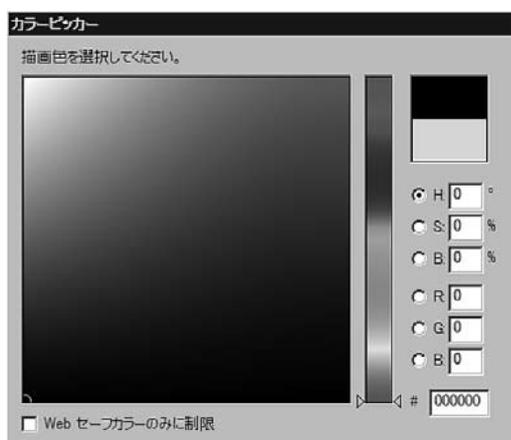


Fig.21 復元前の伴大納言絵巻 (HSB:0, 0, 0 RGB:0, 0, 0)

データベース 1. 復元後の髪 (黒)



Fig.22 復元後の伴大納言絵巻 (HSB: 0, 30, 13 RGB: 20, 14, 14)

データベース 2. 復元前の顔 (肌)



Fig.23 復元前の伴大納言絵巻 (HSB:36, 22, 98 RGB:249, 227, 193)

データベース 2. 復元前の顔 (肌)



Fig.24 復元後の伴大納言絵巻 (HSB:32, 6, 99 RGB:252, 245, 237)

工程 7. 取り込んだ伴大納言絵巻の画像を基に線画を制作

ペンタブレットを使って線画を制作する。(その際に、パスツールを使うと綺麗な曲線が画けるが、簡易的に短時間に復元することを目標にしているため、今回は使用しない。)

工程 8. 線画に伴大納言絵巻の色対応データベースを基に彩色する

(ここでも簡易的に短時間に復元するため、作業レイヤーを分けたり、クイックマスクモード等の機能を使わずに彩色する。)

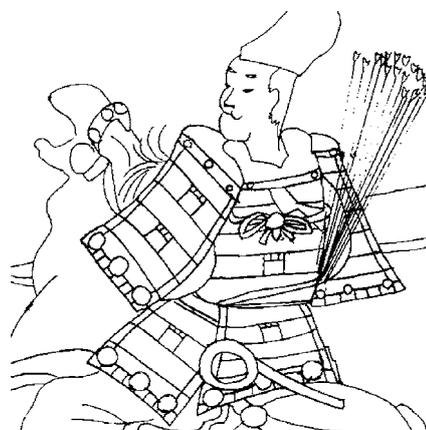


Fig.25 伴大納言絵巻の線画

文 献



Fig.26 伴大納言絵巻の彩色図

工程 9. 修復前後の画像を比較する.

8. まとめ

完成度については課題が残されているが、コストや時間を掛けずに制作できたので、復元作業の基礎方法の一つとして十分実行できたと思われる。今回の様に Photoshop の最低限の機能を使用するだけでなく、様々な機能を使いこなせれば、時間短縮や完成度を上げることができる可能性がある。更に、色対応データベースを製作する方法として、絵の具や染料の歴史および解析法を調べることにより、絵画の描かれた時代別に色対応データベースを構築すれば、より完成度の高い当時の絵に近いものが復元できると思われる。

- 1) 徳川美術館, 五島美術館, よみがえる源氏物語絵巻～平成復元絵巻のすべて～, NHK 名古屋放送局, NHK 中部ブレイズ (2005).
- 2) 秋山光和, 原色日本の美術 8 絵巻物, 小学館 (1968).
- 3) 篠田博之, 藤枝一郎, 色彩工学入門 定量的な色の理解と活用, 森北出版 (2007).
- 4) 田村正隆, 日本の伝統色 配色とかさねの事典, ナツメ社 (2008).
- 5) コンピュータイメージ研究所, 対策 CG 検定 '96, 新紀元社, ソレカラ社 (編) (1995).
- 6) 藪田織也, 神崎洋治, 土屋徳子, Adobe Photoshop CS3 パーフェクトマスター秀和システム (2007).
- 7) Bono, CG 彩色テクニック vol.1, ビー・エヌ・エヌ新社, 柿崎俊道 (編) (2008).
- 8) ゆきうさぎ, CG 彩色テクニック vol.9, ビー・エヌ・エヌ新社, 柿崎俊道 (編) (2008).
- 9) 源氏大学 .com <http://www.genjidaigaku.jp/index.asp>
- 10) 源氏物語絵巻の塗り絵 <http://www.21j.com/genji-nurie/genji-toha.htm>
- 11) 伴大納言絵巻 <http://inoues.net/tenno/dainagon.html>
- 12) 建築情報 .net <http://www.kentikulink.net/index.html>
- 13) Photoshop 使い方サイト <http://web.kyoto-inet.or.jp/people/hikeda/>
- 14) 池田祐樹 (宮崎研究室): 源氏物語絵巻の復元模写を利用し葉月物語絵巻の復元をする研究, 愛知工科大学 平成 18 年度卒業論文 (2006)
- 15) 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, 平成 21 年度 電気関係学会東海支部連合大会 O-016 (2009)

研究論文

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

宮崎保光*, 野村良雄*, 水谷聡志*

(2009年9月30日受理)

Telemedical and Welfare Network Using Digital AV System

Yasumitsu Miyazaki*, Yoshio Nomura* and Satoshi Mizutani*

(Received September 30, 2009)

Abstract

Digital AV equipments, particularly, network consumer electronics and digital consumer electronics have been very rapidly developed. However, audio-visual medical and welfare systems in hospitals mostly consist of analog AV systems. Computer digital network including internets are now in progress with PC clients of home terminals, as broadband network for visual image contents. Digital AV consumer electronics have reached to high level technologies of image processing, memories and transmissions, as terminals of client-server network systems. These digital AV information technologies can be applied to effective medical and welfare systems, as digital AV-LAN systems in hospitals for normal image information contents. In this paper, suitable and effective designs of digital AV and computer networks for audio-visual medical and welfare multimedia systems are shown. Further, a new routing algorithm with neural network was proposed and practical video coding for digital AV systems are shown.

キーワード: AV 医療システム, デジタル通信, 経路選択アルゴリズム, ニューラルネットワーク, 動画診断
Keywords: AV medical system, Digital communications, Routing algorithm, Neural network, Diagnostic imaging

1. はじめに

近年, 高速かつ大容量の画像処理を迅速に行えるコンピュータが開発されるとともに, ネットワーク技術の発達により, 分散するデータのアクセスや通信を簡単かつ迅速に行うことができるようになってきている. 一方, 医療技術の進歩により, X線CTやMRIのような高度医療用の機器が各病院に普及し, 医療現場では画像が, 医師の病気診断や手術計画の構成のための重要な資料データになっている^{1,2)}. 現在から近未来の状況においては, 高齢化社会, 福祉社会にとって医療画像処理に関するより進んだ技術の開発が不可欠である. 社会の都市集中現象, 遠隔地方の過疎化, 中高年人口の増加に伴い, 地域の健康福祉に関しては, 新しい課題が生まれている. 現在, 地域社会における重要な課題は, 中高年の増加と老人の高齢化, 地域における地方病院および開業医の医師不足, また, 緊急医療対応の医療機関の体制である³⁻⁵⁾.

これらの課題は, 先進国の共通の緊急課題であるが, とくに, 日本においては地方において切実な問題となっている. 情報技術および未来型のブロードバンド型CATVネットワークおよびWiMAXのネットワーク技術を用いることによって, こうした医療問題および介護福祉の問題を解決する手法は, 地方自治体および地方医師会が期待している解決法の1つである.

本研究では, 大学病院および大病院を中核として, 地方病院, 開業医, 救急対応の消防署の支援体制を, 精密画像が伝送可能なブロードバンド情報ネットワークによって構築する.

地域の医療機関における医療情報ネットワークとして, 中核の大学病院, 地方大病院をサーバ, 中小医療機関をクライアントとしたサーバ・クライアント型のブロードバンドネットワークは, 地域社会にとり極めて有効な医療福祉システムと思われる. 各種の医療福祉データベースを中核の医療機関の大型サーバに蓄積し, 情報

* 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

データを中小医療機関が小型 PC によって簡易に利用できることが望まれる。また、医療機関内においても、高精密な画像情報をコンテンツとして、伝送、処理、記憶するブロードバンド LAN は今後重要なシステムとして構築されていくものと思われる。都市、地方において、高度な医学診断、治療が推進維持され、医師の過労を防ぎ、医師不足を補う手段としても、また、高齢化および地方の過疎化対応、緊急医療対応に対しても、ブロードバンド医療福祉ネットワークは有効な1つの補助的な解決手段を提供するものと思われる。

これまで、コンピュータネットワークは、数 Mbps の有線の伝送系と数 Kbps の無線伝送系およびアナログ型の動画コンテンツに関する AV・CATV 伝送系により、構成されてきた。とくに、動画像については、特殊な高価なシステムを除きアナログ型の CATV 系が主体であった。また、コンテンツについてのアクセス系については多くのシステムが画像入力、表示についてもアナログ AV 系であった。

デジタルコンピュータネットワークの進歩に従い、伝送系の Gbit LAN、ブロードバンド通信の光ファイバ伝送である FTTH の発達が進み、現在多くの画像 AV 系の入力、表示システムもデジタル機器が供給されつつある。インターネット IP アドレス系を用いることにより、アナログ AV 系がデジタル AV 系に置換され、伝送系も Gbit 伝送可能な光ファイバ伝送システムである統合的システムに、コンピュータネットワーク系とデジタル AV 系が一体化されるものと思われる。ここでは、医療機関内のコンピュータネットワーク LAN、デジタル AV-LAN の一体化および、地域の大小医療機関内のクライアント・サーバ系のコンピュータネットワーク、デジタル AV ネットワークシステム、さらには、ブロードバンド無線ネットワークである WiMAX を含む緊急医療システムの構築について示す。

1970 年には医用工学としての手法が検討されてきた。1980 年代のニューメディア時代には、視聴覚コミュニケーションとしての統合デジタル通信によるシステムが進められ、1990 年代には、PC の発達とともに、マルチメディアとしての教育システムが検討され、ISDN、インターネットによる遠隔医療、衛星通信を用いたシステムが開発されてきた⁶⁻¹⁰⁾。

デジタル AV 機器の発達は、ネットワーク家電、デジタル家電分野を中心に、近年急速に進歩してきている。これまで、視聴覚医療福祉の現場の多くは、アナログ AV 機器が主流となってきた。インターネットをはじめとするデジタルネットワークであるコンピュータ

ネットワークは、家庭端末としての PC クライアントの増加とともに画像コンテンツ利用のブロードバンドネットワークとして著しく発展してきている。クライアント・サーバネットワークシステムの端末として、デジタル AV 家電の多くは、画像処理・メモリ・伝送機器として十分な画質レベルに達しつつある。視聴覚医療福祉事業においても、一般的コンテンツ利用である範囲では、デジタル AV 機器の多くは、デジタル AV-LAN の利用として、効率的システムの構築が可能である。ここでは、デジタル AV ネットワークの設計ビジョンを示す。

動画像アナログ映像配信は、膨大な情報量を有するため、今までは専用伝送路に頼らざるを得ない状況であった⁶⁻⁸⁾。

しかし、デジタルコーデックの開発が進み、デジタル化した動画像は、高品質な SDTV、HDTV 動画像の伝送が可能となった。MPEG-2 をはじめ、H.263、MPEG-4 といった低ビットレートにおいてもこれまでのテレビ電話画質と比較して、高度の品質向上を実現している。

デジタル AV ネットワークシステムにおいて、デジタル化された映像信号は、アナログ専用回線ではなく、有線（光、メタリック）、無線（衛星、LDR）、STM、ATM、Ethernet、モデム、IP などの回線やプロトコルに対応することができ、伝送速度は、数十 Mbit/s の高品質レベルの映像伝送が可能となってきている⁹⁻¹¹⁾。

IP 映像伝送は、インターネットとの接続性、他のメディア/データの共存、多重、既存ソフトウェアの有効利用等の観点から、有用なネットワーク利用である。

本研究のネットワークシステムのビデオエンコーダとして、画質の劣化を抑え、高い圧縮率が可能な XVD 動画圧縮方式を検討した。

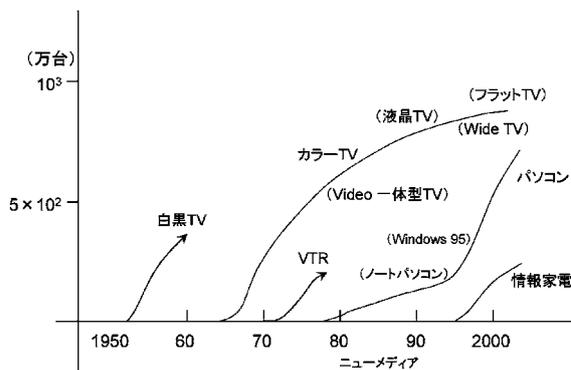


Fig.1 民生機器と情報家電

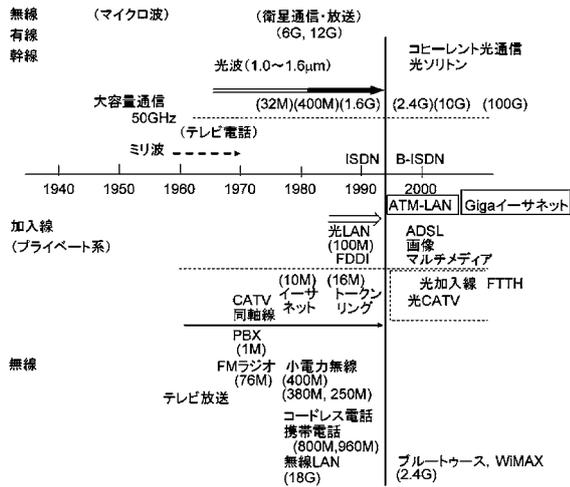
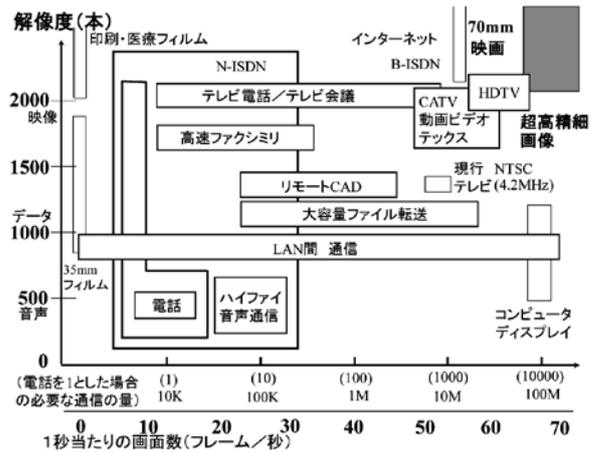


Fig. 2 電磁波と光波のシステム



(a) 各種メディアの伝送速度と1秒当たりの画素数

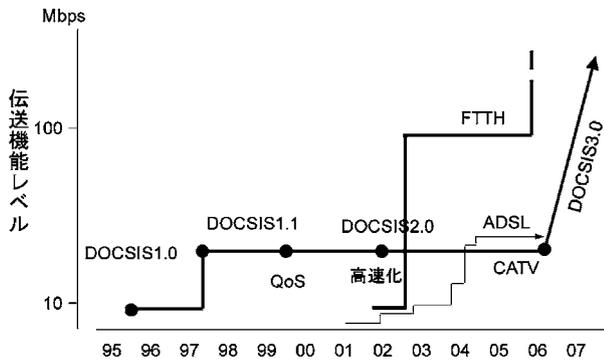
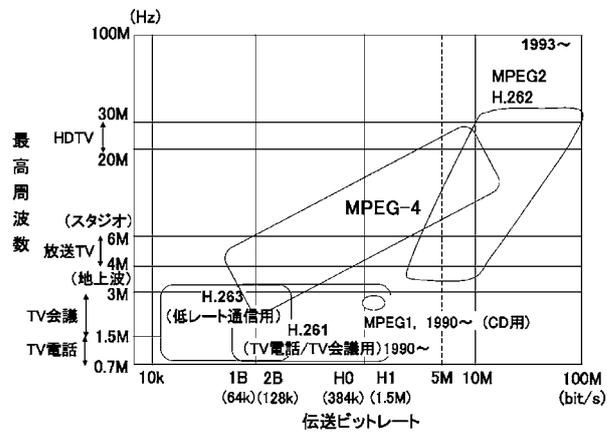


Fig. 3 ブロードバンドネットワークケーブル



(b) 画像の解像度と符号化方程式

Fig. 4 情報圧縮技術による画質と符号化

2. 情報システムと視聴覚医療福祉事業

視聴覚医療福祉事業は、TV放送を用いた伝送型のメディア、VTRなどの記録型のメディア、パソコンを用いた処理型のメディアによる進歩によって発展してきている。Fig.1は、これらのTV、VTR、パソコンのAV機器の時代進展を示している。ラジオ放送を用いた視聴覚医療福祉事業は、もっとも初段階のシステムであり、パッケージ媒体、放送、通信は医療福祉手段の重要手法である。

Fig. 2, 3は通信媒体の転送速度と遷移を示している。

情報コンテンツに関する各種メディアの伝送速度、コンテンツの情報精度、解像度および情報圧縮効率を Fig. 4に示す。MPEG-4は、特性範囲が高品質の画質向けに開発されている。AVコンテンツを医療福祉に用いる場合にはデジタル情報圧縮技術が有効である。

医療福祉における情報化は、情報ネットワークと情報

利用サービスの分野に関して、2000年以後検討が進められている。医療福祉における情報化として、PC、ネットワークのハード面の推進とコンテンツ制作、ライブラリー、センターサイトのソフト面の実施が進められている。医療福祉の情報化の内容項目について Fig.5, 6に示す。

これまでの医療福祉の情報システムは、コンピュータネットワークとPC、サーバを中核としたデジタルシステムであり、視聴覚医療福祉に関した映像と音についてのアナログ型AV機器とは統一的に一体化されたものではなく、インターネット、LANのネットワークにおける音画像伝送について、接続がアナログ型AV系と十分整合がとられてきていない。

Fig.7は医療福祉対応の基幹病院、地方病院、医院、患者宅を接続した情報通信ネットワークを示す。また、各医療機関のLANについて示している。

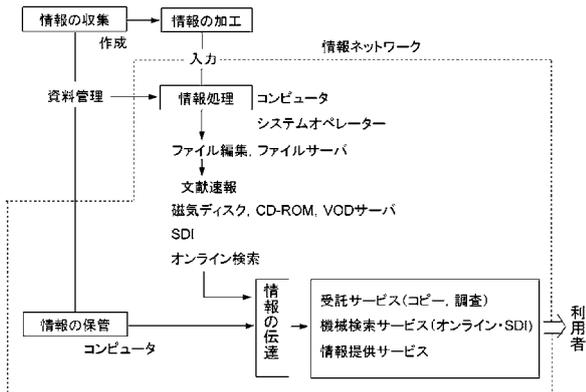
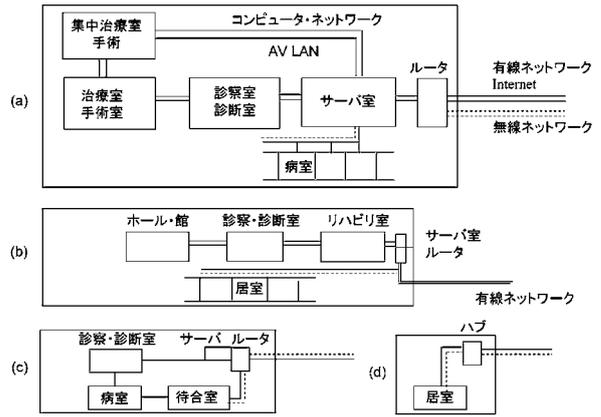


Fig. 5 情報ネットワークと情報サービス



(b) 病院・医院・福祉施設・在宅におけるコンピュータネットワーク、AV LAN ネットワーク

Fig. 7 医療福祉対応ネットワーク

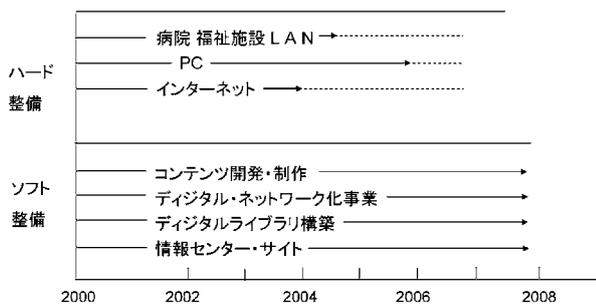
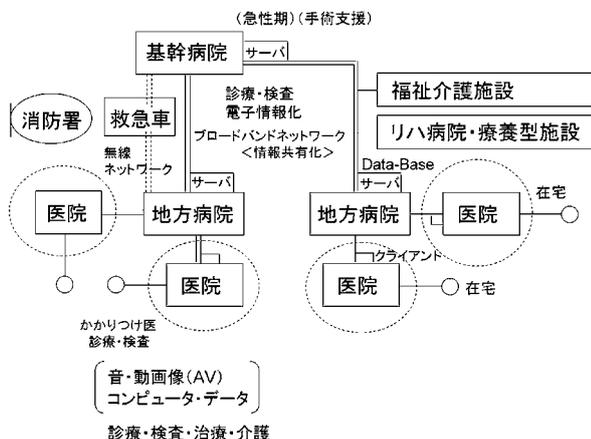


Fig. 6 医療福祉の情報化

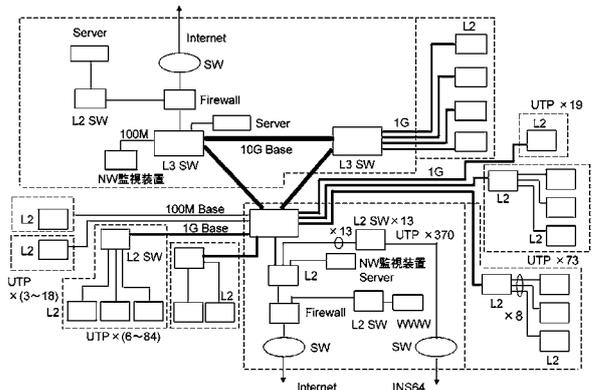
Fig. 8 は、Layer 3 Switch (Router) をコアとした 10Gbps のバックボーンとし、各棟、フロア (階) に Layer 2 Switch (Router) を中継器とした病院・福祉施設における LAN ネットワーク設計例を示している。10Gbps、1Gbps の伝送路は光ファイバ線路であり、L3 Switch の Port 両端、L2 Switch の片端は OE、EO 変換のメディアコンバータを用いている。また、L2 Switch の出力端 Port の UTP 端子は 12, 24, 48 型のものを用いている。

Audio-Visual の有線伝送路の多くは現在 CATV ケーブルである。とくに、アナログ TV の共視聴システムは TV アンテナ、チューナ、ブースター (増幅器)、分岐器を同軸線によって構成するシステムである。また、診察・治療・手術・病室におけるアナログ AV 端末系は、コンピュータネットワークの LAN とは独立の伝送路である。

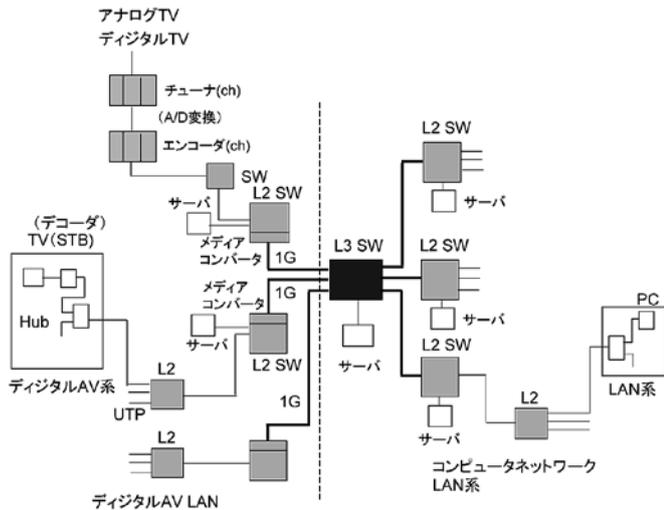
また、各部屋の AV 系は下り伝送のみであり、上り伝送は構築されていないが多い。普及されている PC コンピュータと AV 装置を混合した情報 AV 室では、システムは制御卓が大規模であり、PC ネットワークと AV 系が統一されていない、経済的とはいえない。



(a) 医療福祉コンテンツと情報通信ネットワーク



(a) 病院・福祉施設 LAN



(b) デジタル AV LAN 系 (マルチメディアネットワーク)
Fig. 8 デジタル AV 医療福祉ネットワーク

AV系をデジタルLANとして構成するには、AVコンテンツをチューナによってベースバンドに変換し、エンコーダ、MPEG-2、MPEG-4方式によって効率的デジタル符号信号とし、LANのスイッチL2のポートに入力し、L2 SWよりL3 SWを通じて各端末AV LAN系に伝送する。この伝送はチューナ・エンコーダ部をヘッドエンドとすれば、下り波と考えることができる。LAN光ファイバケーブル幹線とデジタルAV LAN幹線とは光ファイバケーブル芯線を分割して使用することにより経済的な共用使用とすることができる。光ファイバ端部はL2 SW、L3 SWのPort入出力部にメディアコンバータ(OE、EO変換器)を用いる。デジタルAV LANの端部であるL2 SWからホール、各室へは、部屋内のHubに接続し、部屋内の加入線部からは、AVコンテンツ信号は、Hub、L2 SWを通じ、双方向として、全体に配信することができる。これらのシステムをFig. 8(b), 9に示す。出力系は、スピーカとプロジェクタであり、外部へはAV-LANとして出力される。入力系はカメラ、OHC、メモリ(DVD)、PCであり、無線LANによる無線マイクである。入出力指定は、IP Address指定により、プライベートAddressを用いることができる。各入力、各出力の切替は、伝送回路の入出力UTP、LANケーブル、USBケーブルの回線切替として、機械式切替ボタンで十分である。

また、音量は、卓上のアンプの増幅度変換回転つまみで十分である。機器のインフラとしての全体調整は専門担当者が事前に行い、使用者は最低限必要な操作のみで実行可能とする方式が望ましい。機器選択は、機械式切替ボタンで行い、カメラ、スピーカの方向は、独立の

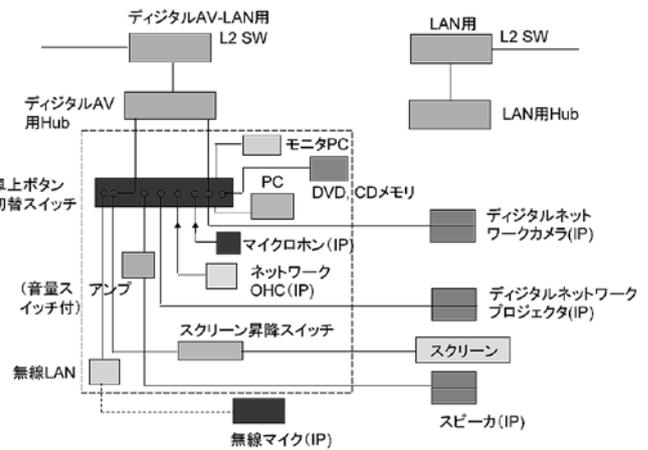


Fig. 9 デジタル AV LAN 診察・診断・治療・手術室

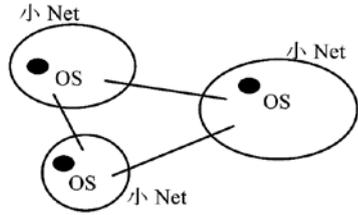
リモート制御が望ましい。機器操作が簡単であることは、安定性を高めることができる。

3. 医療福祉ネットワークの経路選択

医療福祉デジタルAVネットワークでは、地方病院や救急車などのクライアントから基幹病院のサーバに、高精細な動画情報を送る必要がある。クライアントの多様性を確保するために、専用回線ではなく、IPアドレスを用いたインターネットを利用する必要がある。そのため、通信速度の遅延は、重大な問題である。とくに、自然災害などの緊急時における通信速度の保障を考慮する必要がある。ネットワークの遅延を避けるため、パケットの優先順位を適切に定めるとともに、最短経路を瞬時に選択しながらパケットを転送する必要がある。ここでは、最短経路を求めるアルゴリズムとしてニューラルネットワーク法を用いた手法を提案する。

複雑なネットワークの全体を把握することは、多くの時間と通信量が必要となるため現実的ではない。そこで、ネットワークをランダムな大きさの小区分にわけ、各区分ごとに最短経路を導出する。小区分の具体例として、LANや自律システム(AS)が考えられる。各区分に1台の監視ステーションを配置する。監視ステーションは所属する小区分全体を把握し、最短経路を導出する。Fig. 10に監視ステーションの概念を図に示す。¹²⁾

本モデルでは、ニューラルネットワーク法を用いた最短経路導出のための基本モデルを提案する。回路網における神経細胞をルータとみなし、ルータの性能や伝送速度を考慮した上でパケットの到達時間を数式化する。とくに、回路網の構成は階層型を想定する。ニューラルネッ



OS：監視ステーション

Fig. 10 ネットワークの監視ステーション

ネットワーク法を用いるため、通信量の変化を学習することにより、緊急時などにも柔軟に対応可能な経路選択が期待できる。

ニューラルネットワーク法を用いた最短経路の導出を考える。ここでは、以下のようにモデル化する。相互結合型回路網における神経細胞をルータとみなし、入力パケットが s ステップ ($s=1,2,\dots$) に通過するルータを $R_i^{(s)}$ ($i=1,2,\dots,m$) とする。Fig. 11 に神経細胞によるネットワークの構成を示す。

s ステップのルータ $R_i^{(s)}$ における入力パケット数の総和を $x_i^{(s)}$ 、出力パケット数の総和を $x_i^{(s+1)}$ とする。これらは通常 0 または 1 の値をとる。また、 s ステップのルータ $R_j^{(s)}$ から $s+1$ ステップのルータ $R_i^{(s+1)}$ への結合荷重を $w_{ji}^{(s)}$ とする。ルータ $R_i^{(s)}$ の閾値を θ_i とする。

これより、 s ステップのルータ $R_i^{(s)}$ における入力パケット数の総和 $x_i^{(s)}$ は、

$$x_i^{(s)} = \sum_{j=1}^m w_{ji}^{(s-1)} x_j^{(s-1)} - \theta_i. \quad (1)$$

このとき、 $s+1$ ステップにおけるルータ $R_i^{(s+1)}$ への入力の総和 $x_i^{(s+1)}$ は、次式で与えられる。

$$x_i^{(s+1)} = f \left(\sum_{\substack{j=1 \\ (i \neq j)}}^m w_{ji}^{(s)} x_j^{(s)} - \theta_i \right). \quad (2)$$

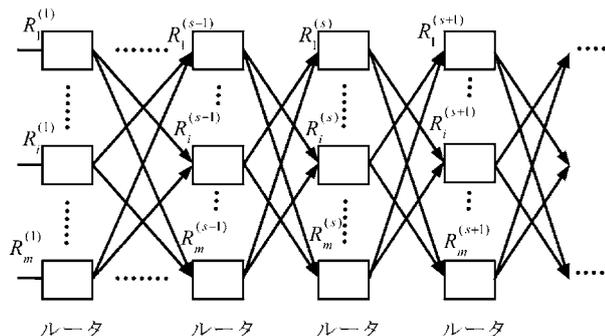


Fig. 11 神経細胞によるネットワークの構成

次に s ステップのルータ $R_i^{(s)}$ から出発したパケットが次のルータに到達までの到着時間を導出する。 s ステップのルータ $R_i^{(s)}$ からの伝送速度 $C_i^{(s)}$ は、 $K_j^{(s)}$ を比例定数とすると次式で与えられる。

$$C_i^{(s)} = \frac{K_j^{(s)}}{x_i^{(s)}}. \quad (3)$$

このとき伝送時間 $\tau_i^{(s)}$ は、 $l_i^{(s)}$ をルータ $R_i^{(s)}$ から他のルータへの総伝送路長とすると次式で与えられる。

$$\tau_i^{(s)} = \frac{l_i^{(s)}}{C_i^{(s)}}. \quad (4)$$

また、 s ステップのルータ $R_i^{(s)}$ における処理時間 $P_i^{(s)}$ は、 $R_i^{(s)}$ の関数として与えられるとする。すなわち、関数 g により次のように記述できる。

$$P_i^{(s)} = g(R_i^{(s)}). \quad (5)$$

このとき、 n ステップ目における各ルータから次のルータへのパケットの到達時間 T は、

$$T = \sum_{i=1}^m (\tau_i^{(n)} + P_i^{(n)}) \quad (6)$$

で与えられる。このとき、 T が最小になるように出力パケットを決める。すなわち、上式の条件下で最適な結合荷重 $w_{ji}^{(s)}$ ($i, j=1,2,\dots,m$) を求める。また、目的の到達時間を達成するルータ $R_i^{(s)}$ の性能を決定する。

4. XVD 動画圧縮方式による伝送

音と画像コンテンツの違いは、1次元の時間変数の情報、2次元空間変数の情報としての次元の違いである。情報の変数に対する値は、標本化定理により、Nyquist 周波数に対応する標本値によって与えられ、離散値であるデジタル値によって、連続値であるアナログ値が完全に示される。1次元の場合、帯域巾 W (Nyquist 周波数 $f = W/2\pi$, 周期 $T = 2\pi/W$) である有限帯域情報 $x(t)$ は、

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \frac{\sin W(t-nT)}{W(t-nT)}. \quad (7)$$

人間の知覚特性は、細やかな変化については認知に限界があること、標本化値については、大きな値についての変化については、小さな値に比べて、絶対値よりも相対変数化が重要であることが知られている。 $x(nT)$ の標本化値を 0, 1 のデジタル符号にするには、アナログ値を離散値に変換する量子化演算が必要である。時間変化、空間変化の大きさは、時間についての周波数、位置座標についての空間周波数の表現が重要であり、これらは、2次元画像 $f(j,k)$ の場合、2次元周波数特性 $F(u,v)$ は、

離散コサイン変換によって示される。

$$F(u,v) = \frac{2}{\sqrt{M}\sqrt{N}} C(u)C(v) \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{k=0}^{N-1} f(j,k) \cos(j,u,M) \cos(k,v,N), \quad (8)$$

$$f(j,k) = \frac{2}{\sqrt{M}\sqrt{N}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} C(u)C(v) F(u,v) \cos(j,u,M) \cos(k,v,N). \quad (9)$$

ここに、

$$\cos(j,u,M) = \cos\left\{\frac{(2j+1)u}{\sqrt{M}\sqrt{N}}\right\},$$

$$C(u) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & u=0 \\ 1 & u \neq 0 \end{cases}.$$

情報は、隣り近くの変数に対する標本値は、相関特性によって、変化を評価することができ、これらの特性を用いることにより、120MbpsのアナログTV画像圧縮は、MPEG-2方式の場合、4～6Mbpsに情報圧縮が可能である。圧縮率は20～30倍である。JPEG方式の静止画は、10～20倍である。全体の周波数特性利用より、局所の変数に対する周波数特性を用いる場合、品質のよい高効率の情報圧縮となる。つぎのウェーブレット変換はその手法である。1次元の場合は、

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{jk} \psi_{jk}(t), \quad (10)$$

$$a_{jk} = \int \psi_{jk}^*(t) f(t) dt. \quad (11)$$

ここに、 $\psi_{jk}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^j t - k)$ である。

従来の画像IP配信を活用したライブストリーミングはいくつかの問題を抱えている。

動画画像は、1秒間に約30フレームの静止画を送信する。720×480ドットの解像度では、データ量は100GB/60分を超える。動画圧縮処理のMPEG-2ではSDTVと同等品質の画質を約30分の1の容量にしか圧縮できず、大容量でありIP配信時には問題が生ずる。これは、MPEGのDCT（ディスクリートコサイン変換）による圧縮では、低ビットレートでは破綻しやすく映像圧縮に時間がかかるため、リアルタイムでの伝送ができないためである。

MPEG動画形式ではナローバンド環境ではブロックノイズやモスキートノイズのため映像の画質が不十分である。

伝送遅延については、従来のIP配信では、分単位での遅延が生じるライブストリーミングであるが、検討し

たXVD (eXtended-play Video Disc) 型の動画圧縮方式¹²⁾では1.5～2秒前後の遅延にまで短縮することができ、低ビットレートでも高画質であり、通信速度の遅いユーザにも伸張ソフトウェアをパソコンにインストールすれば、Windows Media Playerなどで容易に視聴が可能である。

ネットワークを伝送された被測定映像(評価映像)については、評価用基準映像と比べ、ネットワークを経由したパケットは数秒の遅延が発生し、映像再生のタイミングも基準映像に比べ、若干遅くなるがAVともに遅延するため画質の劣化なく高品質の視聴ができる。

デジタル方式では、ほとんどの画像で劣化が認められないが、特定の絵柄の画像でのみ劣化することが多い。平均評点だけでシステム性能を表すのは不十分であり、劣化の生じる頻度や最悪画像の評点を考慮し、システム性能を正しく表すことが重要である。

本研究では、IPv4ネットワーク環境において、XVDフォーマットを用いた動画配信実験を検討している。IPv4における動画配信は同時二重刺激法で比較した。他のコーデックと比べ画質は、DVD画質をキープしており、音声については1・2秒の遅延は生ずるもののフレームスキップ等の遅れもなく良好である。

具体的には、3板式CCDカメラを使用して画像を取り込みXVDエンコーダで配信し、PCで画像評価した(Fig.13-17)。白黒画像はデータ量が少ないため通信応答速度が速いが、カラーデータの場合は通信速度が遅くなる。色の再現性はあまり問題ないが、画質の面で難が見られる。しかし、低価格システムでしかもリアルタイムでの使用を考えると十分に実用できる。

5. まとめ

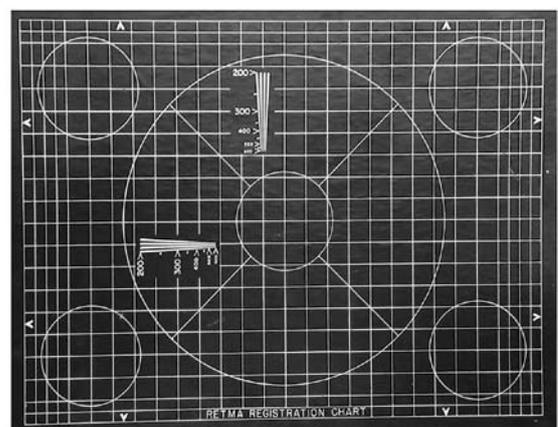


Fig. 13 Regist Chart 元画像

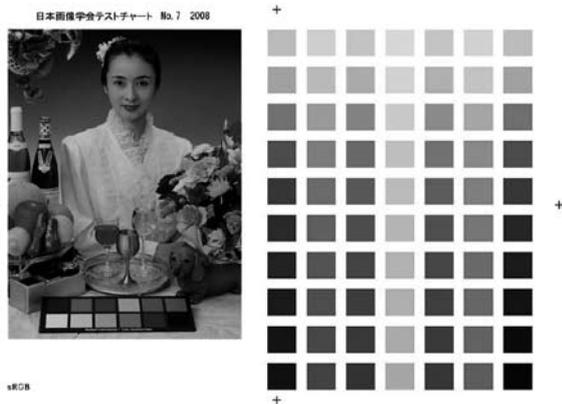


Fig.14 日本画像学会美人画 テストチャート元画像

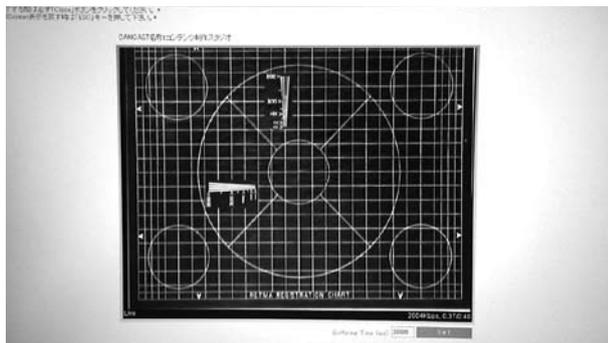


Fig.15 PC 評価画像 (通信速度 2004Kbps)

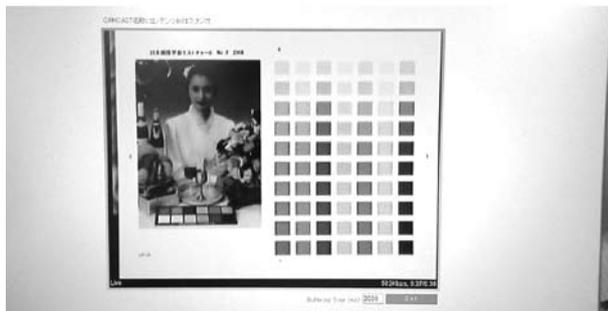


Fig.16 PC 評価画像 (通信速度 528Kbps)



Fig.17 PC 評価画像 (通信速度 835Kbps)

医療福祉ネットワークは、医療情報をマルチメディアコンテンツとしてクライアント・サーバ方式により利用するため、急速に発達し必要性が高まっている。

一方、医療福祉における視聴覚システムとしての AV 機器の多くは、アナログ系として用いられており、LAN、インターネットのブロードバンド化により画像処理・伝送が発展してきているにも拘らず、デジタル AV - LAN 系としての検討は不十分であり効率も悪く経済的でない。

LAN のブロードバンド化、AV デジタル機器を利用したデジタル AV - LAN での利用をコンピュータネットワークと一体化し伝送線路の有効利用する手法を示した。

都市、地方において高度な医学診断、治療が推進維持され、医師の過労を防ぎ医師不足を補う手段として、さらに、高齢化、地方の過疎化に対する医療対応に対してもデジタル AV システムを用いた遠隔医療福祉ネットワークは、今後さらに期待される。

文 献

- [1] 宮崎, デジタル AV・コンピュータネットワークを用いた地域医療福祉ネットワークの構築, 第 22 回日本レーザー医学会東海地方会プログラム・抄録集, p.12 (2008).
- [2] 宮崎, デジタル AV・コンピュータネットワークを用いた地域医療福祉ネットワークの推進, 平成 20 年度日本生体医工学会東海支部大会, 10, p.21 (2008).
- [3] 宮崎, 体表面心臓電位図の臨床応用に関する基礎研究 心臓内電気現象逆問題の等角写像による解法, 心電図, Vol.5, No.3, 448 (1985).
- [4] 宮崎, 心筋組織の電気興奮, 日本 ME 学会誌, 第 23 巻 7 号, p.20 (1985).
- [5] Y. Miyazaki, Spatial Filtering of Optical Scattered Waves in Bio-Medical Media By Inhomogeneous Waveguide Grids For Optical CT, Proc. of APMC2007, Bangkok, pp.527-530 (2007).
- [6] 宮崎, デジタル AV・コンピュータネットワークを用いた視聴覚教育マルチメディアシステム, 信学技報 ET2008-8, pp.15-20 (2008).
- [7] 宮崎, 大学におけるキャンパスネットワークの現状と将来の課題, 信学技報 IN94-54, pp.37-44 (1994).
- [8] 宮崎, キャンパスネットワークにおけるマルチメディアの課題, 信学技報 IN95-17, pp.33-39 (1995).
- [9] 宮崎, 光ファイバの伝送特性, 電気学会雑誌, 97 巻 11 号, pp.956-962 (1977).
- [10] S. Li and Y. Miyazaki, A Fair and Waste-less Channel Assignment Protocol for Optical Dual Bus Networks, IEICE Trans. Commun., Vol.E78-B, No. 4, pp.539-545 (1995).
- [11] 宮崎, 野村, 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, 信学技報, IN2008-116, pp. 45-50 (2009).
- [12] 宮崎, 野村, 水谷, 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, 電気関係学会東海支部連合大会, O-358 (2009).
- [13] Andrey Morosov, Ilya Asnis, XDV Technology Wite Paper Version 1.3, XVD Corporation (2004).

研究論文

圧縮 XML 文書のデータ処理用 API ソフトウェアの検討

吉田 茂*, 井谷宣子**

(2009年9月30日受理)

Study on API Software for Data-Processing Compacted XML-Documents

Shigeru Yoshida* and Noriko Itani**

(Received September 30, 2009)

Abstract

This paper presents library software which makes our formerly proposed XML-document compaction method easy to use. The compaction method is format transformation of XML to XML, in which plural non-key elements are compacted by using CSV (Comma Separated Values) format in order to lighten burden of XML data-processing. It is applied to the target XML- documents before data-processing is performed, such as data retrieval and sorting. However, the problem was that users needed to modify slightly their application software when treating compacted XML-documents instead of the original ones. Therefore, the API (Application Program Interface) software, with which users can treat compacted XML-documents as if they were the non-compacted ones, was studied. We implemented the API software of trial purpose, and confirmed the software function. In this paper, we clarify mechanism of realizing the function, and report the performance evaluation of the software.

キーワード：XML データ処理, データ圧縮, XML 圧縮, CSV, XSLT

Keywords : XML data processing, data compaction, XML compression, CSV, XSLT

1. はじめに

XML (Extensible Markup Language) は, 柔軟で拡張性の高い電子データ表現形式である反面, データ処理ではメモリを大量に消費し, 負荷が重いという課題がある. XML 標準 API (Application Program Interface) である DOM (Document Object Model)¹⁾ のソフトウェアを用いると, XML ファイルの容量の 4 ~ 10 倍の主記憶を要する. 本稿筆者らは, この課題を解決するために, 先に「XML CSV 圧縮」と名付けた方法を提案した^{2),3)}. この方法は, XML データ処理するとき, メモリ消費を抑える形に, 事前に, XML 文書の形式を変換しておくものである. 伝票や名簿のように, レコード構成を取るデータ系 XML 文書に対して, Fig.1 に示すように, 個々に

アクセスされるキーになる要素をそのまま残し, 一括してアクセスされる要素を CSV (Comma Separated Values) 形式でまとめて 1 個の要素に圧縮する. メモリ展開時のメモリ使用量は XML 文書内の要素数に, ほぼ比例する. そのため, 要素数をまとめることによって, メモリ消費を数分の一にできる.

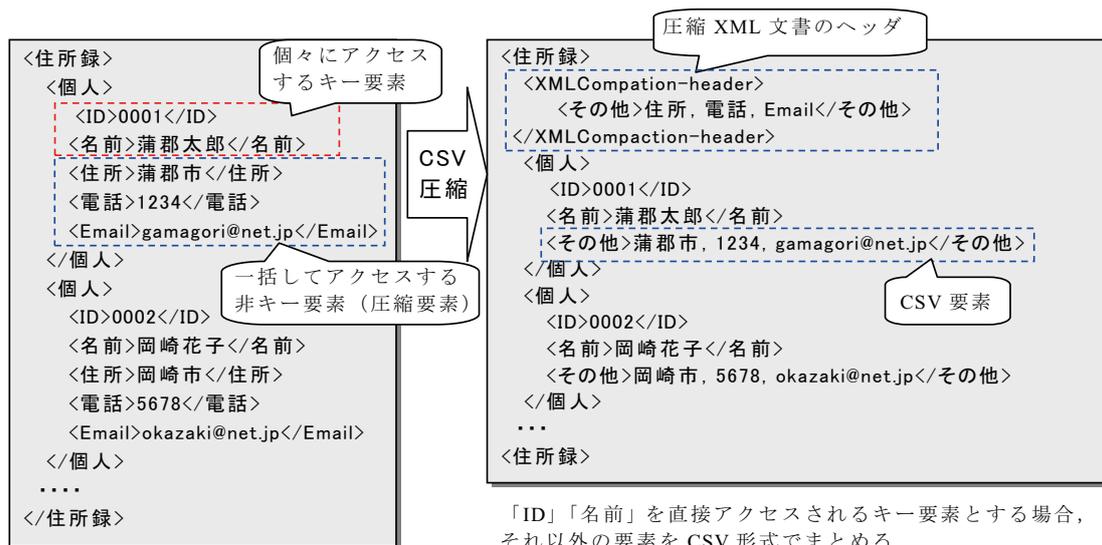
前報によって, 圧縮変換を行う基本的な仕掛けはできたが, この方法をユーザが広く使えようにするには, 残された課題があった. 圧縮文書中の圧縮した要素は, 種々のプログラム言語でサポートしている CSV 形式を扱う標準関数 “split” と “join” を用いて, ユーザのプログラムの中で, 分離と結合を行えば良いとしていた. しかし, ユーザが, 圧縮文書を使うときにアプリケーション・プログラムを変更せず, 圧縮を意識せずに使える圧縮文書

* 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

** (株)富士通研究所 ITS 研究センター, 〒211-8585 川崎市中原区上小田中 4-1-1

ITS Research Center, Fujitsu Laboratories Ltd, 4-1-1 Kami-odanaka, Nakaharaku, Kawasaki 211-8585 Japan



「ID」「名前」を直接アクセスされるキー要素とする場合、それ以外の要素を CSV 形式でまとめる。文書の冒頭に CSV 要素を識別するヘッダを付ける。

Fig.1 XML CSV 圧縮の働き

```
<Table>
  <Record>
    <ID>1</ID>
    <Phone>555-5555</Phone>
  </Record>
</Table>
```

(a) 入力 XML ファイル test.xml

```
use XML::RAX;
my $R = new XML::RAX();
# open XML from file
$R->openfile( 'test.xml' );
$R->setRecord('Record');
# iterate through recordset
my $rec = $R->readRecord();
while ( $rec ) {
  print "Phone = ".$rec->getField('Phone')."¥n";
  $rec = $R->readRecord();
}
```

(b) RAX を用いる Perl プログラム例
test.xml を入力して要素 Phone の内容を表示

Fig.2 レコード構成の XML 文書操作用の API ソフトウェア Perl 版 RAX

用 API ソフトウェアが提供されることが、本来はベストである。そこで、この課題の解決を試み、圧縮文書を非圧縮文書のように透過的に使わせる API ソフトウェア（以下、単に「圧縮 API ソフト」と呼ぶ）について、その仕組みを検討し、XML CSV 圧縮のライブラリ・ソフトとして試作・評価した。本報では、圧縮透過機能と評価結果について報告する。

2. 圧縮 API ソフトでの実現機能

API ソフトウェアは、圧縮 XML 文書を圧縮を意識せず使えと同時に、使い勝手を考え、次のような機能を備えることを目標にした。

- a) 従来、レコード構成の XML 文書を扱う API ソフトウェアとしては RAX (Record oriented API for XML)⁴⁾ がある。RAX のようにユーザが簡単に XML 文書を扱えること。
- b) 非圧縮の XML 文書と圧縮 XML 文書を、圧縮 API

ソフトウェア自身が検出して、圧縮・復元操作の有無を自動的に切り替えること。

ここでの XML CSV 圧縮の使い方は、オリジナルの蓄積してある XML 文書より、一時的に圧縮文書を作ってから、諸々のデータ処理後、復元して更新文書として再格納するケースを想定している。これと別な使い方は、圧縮文書を蓄積し、データ処理後も、処理済み圧縮文書を、更新文書をして蓄積するケースである。前者は、キーとなる要素が処理ごとに変わる場合にも対応できる。ただし、圧縮・復元の処理時間がオーバーヘッドになる。後者は、適用すべき応用ソフトウェアが予め決められており、キーとなる要素が固定している場合に使うことができる。

3. 圧縮 API ソフトの検討

3.1 圧縮 API ソフトの仕様化

レコード構成の XML 文書を扱う API ソフトウェア

Table 1 圧縮 API ソフトのメソッドの仕様

機能	メソッド名・引数, 返却値
① 圧縮文書操作オブジェクトの作成 (初期化)	XMLcompactionAPI() 返却値: 圧縮文書操作オブジェクト
② 圧縮文書のオープン	openFile(“ファイル名”, “レコード要素名”) 返却値: なし
③ 圧縮文書のクローズ	closeFile([“ファイル名”]) []は別名による書込み 返却値: なし
④ XML 文書のレコード数の通知	recordLength() 返却値: レコード数
⑤ レコード内の要素数の通知	ElementLength() 返却値: 要素数
⑥ レコード内の圧縮前の要素数の通知	ElementLength2() 返却値: 圧縮前要素数
⑦ レコード要素名の通知	getRecordName() 返却値: レコード要素名
⑧ レコード内の i 個目の要素名の通知	getElementName(i) 返却値: 要素名
⑨ 第 k レコードの要素名による要素内容の読出し	getElement(k, “要素名”) 返却値: 要素内容
⑩ 第 k レコードの要素名による要素内容の書込み	putElement(k, “要素名”) 返却値: なし
⑪ 現在位置へのレコードの追加	insertRecord() 返却値: なし
⑫ 現在位置のレコードの削除	deleteRecord() 返却値: なし

である RAX は Perl 版, PHP 版, Python 版などの言語で作られている。Perl 版 RAX³⁾ の使い方を Fig.2 に示す。XML 標準 API である DOM や SAX (Simple API for XML) と異なり、ファイルオープン後、レコード読出し、フィールド (要素) 読出しだけの簡単な記述で行えるようになっている。RAX は、SAX と同様に XML 文書を時系列的に走査し、XML 文書をメモリには展開しない。このため XML 文書の更新操作はできない。

圧縮 API ソフトでは、圧縮 XML 文書をメモリに展開する。筆者らは、RAX にならって、圧縮ソフト API のメソッドのセットを、Table 1 に示すように設計した。このセットによって、①で初期化し、②でレコード名を指定して XML 文書をメモリ展開後、④⑤⑥でレコード数とレコード内要素数を取得し、⑧で要素名を取得、⑨でレコード番号と要素名で要素内容をランダムにアクセスすることができる。また、⑩で要素内容の簡単な書換え、⑪⑫でレコードの挿入、削除ができるようにする。③で XML 文書クローズ時に、更新があった場合にその文書を書き出せるようにする。

3.2 圧縮 XML 文書を透過にする仕組み⁶⁾

(1) 初期化, ファイルオープン時の操作

Table 1 ①の初期化メソッドにより、Fig.3 に示す各種の制御情報を持つ圧縮文書操作オブジェクトを作成する。この圧縮文書操作オブジェクトは連想配列であり、Table 1 ②のファイルオープンで入力された XML 文書を SAX で逐次読取り、レコード数、レコード内の要素数、要素名などの必要な情報を格納する。

(2) XML 文書データの格納

XML 文書内のデータの格納には、Fig.4 に示すように 2 つの 2 次元配列を用いる。ここで第 1 の配列は、圧縮

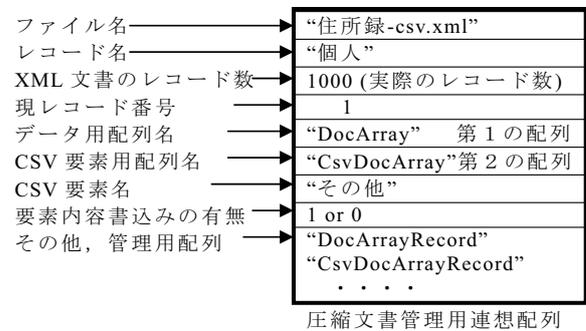


Fig.3 圧縮 API ソフトの圧縮 XML 文書管理用オブジェクト

XML 文書の内容をそのままレコードごとに格納する。第 2 の配列は、特定のレコードがアクセスされた際に、そのレコードの CSV 要素を標準関数 “split” を用いて分離して格納する。さらに、Fig.5(a) に示すように、全レコードについて第 2 の配列の格納位置を記憶する配列を持つ。これにより、2 度目以降のレコードアクセス時には分離展開操作を省略する。この構成により、圧縮 XML 文書は、圧縮された形式でメモリに展開されるが、実際にアクセスされたレコードのみ圧縮要素がメモリに展開され、分離展開のオーバーヘッドも最小に抑えることができる。

(3) 要素名による要素のアクセスと非圧縮要素の識別

Fig.4 の第 1 の配列は、1 次元目の添字がレコード番号、2 次元目の添字が要素番号としてアクセスされる。非圧縮要素と圧縮要素の要素名は、圧縮 XML 文書をオープンして読み取ったときに、Fig.6 に示すように、非圧縮要素と圧縮要素の要素名と、要素番号とを対応付ける連想配列を作って管理する。非圧縮要素と圧縮要素は、要素番号の境界を記憶しておいて識別する。

XML 文書の要素を 2 次元配列に格納し、レコード番号と要素番号でアクセスするようにして、要素番号を要

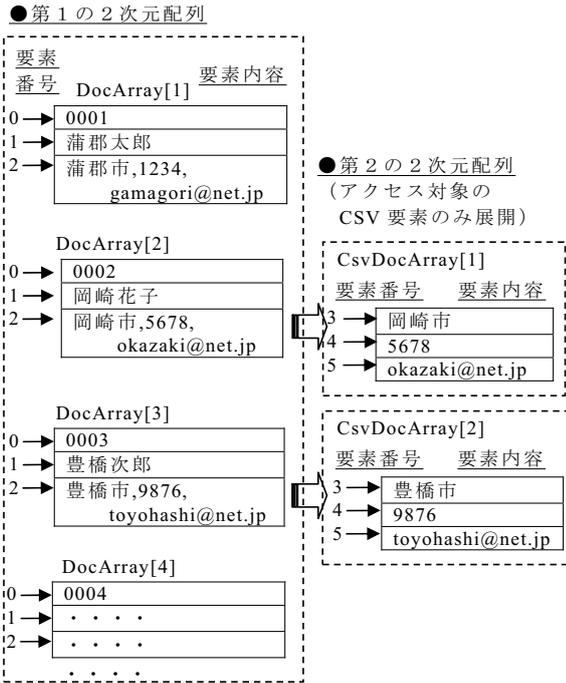


Fig.4 圧縮 API ソフトにおける要素の格納形式

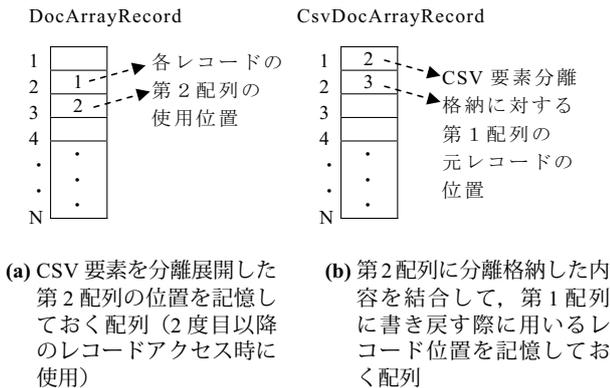


Fig.5 第1の配列と第2の配列との対応付け

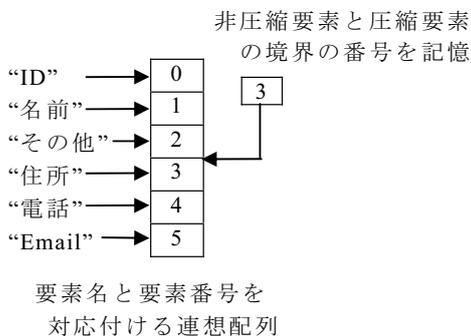


Fig.6 非圧縮要素名と圧縮要素名の管理

素名で引く連想配列から得る。連想配列は通常の配列よりメモリを多く消費する。Fig.6 と Fig.4 に示す2段階のアクセス構造を採ることにより、実装面からみて、大容量の連想配列を直接アクセスするのを避け、連想配列の

使用を最小限に留めることができる。

(4) CSV 要素を多数使用時のメモリ使用量抑制

CSV 要素を分離格納する第2の配列は、容量に上限を設ける。アクセスした多数の CSV 要素が格納されて、容量の上限を越えた場合は、以前に分離格納された CSV 要素を、古い順に削除して、新たな CSV 要素を分離格納する。ただし、古い CSV 要素の内容に更新があった場合は、分離格納した要素を標準関数 “join” を用いて CSV 形式に結合して、第1の配列の該当部分を書き戻す。このため、Fig.5(b) に示すように、第2の配列から第1の配列の該当箇所を配列に記憶しておく。書き戻した後、第2の配列の分離格納要素を削除する。

(5) ファイルクローズ時の操作

Table 1 ③の圧縮文書クローズ・メソッドでは、オープンした XML 文書に更新操作が行われていない場合は、そのまま終了する。XML 文書に更新操作が行われている場合は、第2の連想配列の内容を CSV 形式に結合して、第1の連想配列の該当部分を書き戻した後、第1の連想配列の内容をファイルに書き出して終了する。

3.3 圧縮文書と非圧縮文書の自動識別

圧縮文書には Fig.1 右図に示すように、文書の冒頭にヘッダを付ける。圧縮 API ソフトは、このヘッダの有無によって圧縮文書か非圧縮文書かを判別するようにする。また、ヘッダ中に CSV 要素に含まれる元要素の要素名が CSV 形式で置く。以降の圧縮文書では、圧縮要素は CSV 要素に取り込まれて、要素名が省かれてしまうが、このヘッダを読み取ることによって圧縮要素名を取得する。これを用いて、前述の Fig.6 に示した非圧縮要素と圧縮要素の要素名の連想配列を作るとともに、非圧縮要素と圧縮要素の境界となる要素番号を記憶する。ヘッダでの圧縮要素名の結合順と CSV 要素での圧縮要素内容の結合順を同じにすることによって、CSV 要素の内容を分離したときに圧縮要素名と圧縮要素の内容を並び順で対応付けることができる。

4. ソフトウェア試作と機能評価

4.1 圧縮 API ソフトの試作

Table 1 に挙げた圧縮 API ソフトの仕様について、Perl で試作ソフトを実装した。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 のライブラリも豊富に揃っている。RAX も元々は Perl 版であった。

圧縮 API ソフト内で使うパーサーには、Active Perl

5.10 に標準装備されている SAX ライクな XML::Parser を用いた。今回は、原理試作を目的とし、次のような機能制限を付け、ソフト開発期間を短期した。①レコード内 1 階層の XML 文書を対象にする、②要素のみを対象にし、属性は外す、③読取り機能を重点に実装し、書込み機能は別途実装する。

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 2 各 API ソフトのプログラム規模

プログラム名	ソース行数
(a) RAX (従来 API ソフト)	267 行 (コメント行を除く)
(b) XMLCompactionAPI (本試作ソフト)	415 行
(c) XMLHandlingAPI (試作ソフトの圧縮なし版)	161 行

XMLHandlingAPI は、参考までに XMLcompactionAPI の圧縮文書を扱う部分を外した、通常 XML 文書のみを扱う API ソフトである。圧縮文書进行操作する部分が全体の 6 割程を占めることが分かる。

4.2 機能評価

(1) 評価環境

Table 3 に試作ソフトの機能・性能の評価環境を示す。

Table 3 評価環境

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 5.10
処理時間測定	CPAN ライブラリ Time::HiRes ⁸⁾ を使用
メモリ使用量測定	CPAN ライブラリ Devel::Size ⁹⁾ を使用

評価試料として、①圧縮評価用標準 XML 文書⁷⁾の中から周期律表 elts.xml (117KB, 112 レコード, 要素 14 ~ 19 個 / レコード) から要素のみ取出し、12 回繰返して 1MB の XML 文書 (1,344 レコード) を作成して使用した。また、②圧縮 XML 文書として、レコード当たり 4 個の要素 (元素名, 原子番号, 原子量, 元素記号) を残して圧縮したものを同様に 12 回繰返した文書を作成して使用した。データ圧縮率は 31%, 要素の圧縮率は平均 5 個 / レコードとして 33% である。

(2) 圧縮 XML 文書のメモリ展開の性能

評価試料の圧縮 XML 文書について、Table 1 のメソッドのセットを用いて、実際に圧縮を意識せず、透過的

Table 4 測定結果

項目	非圧縮 XML 文書	圧縮 XML 文書
ファイル容量	1,076 KB	331 KB
[1] メモリ展開 (初期化とオープンファイル)		
処理時間	1.12 秒	0.37 秒
作業用メモリ量	1,126 KB	543 KB
[2] レコード検索 (最良値)		
検索時間	0.027 秒	0.028 秒
作業用メモリ量	1,126 KB	562 KB
[3] レコード検索 (最悪値)		
検索時間	0.027 秒	0.119 秒
作業用メモリ量	1,126 KB	712 KB (128) 660 KB (64) 633 KB (32)

に使えることを確かめた。処理性能の測定結果は Table 4 のようになった。

メモリへの展開時間は、圧縮 XML 文書を用いたとき、要素の圧縮率にほぼ比例する形で短縮される。表中の作業用メモリ量は、第 1 の配列、第 2 の配列と諸々の制御用変数の容量の合計である。レコード構成に特化させてメモリ格納を行ったため、ファイル容量と同等のメモリ使用量で済んでいる。圧縮 XML 文書のメモリ使用量は、元文書の 48% になった。これは透過機能の実現に諸々のパラメータを覚えておくため、要素圧縮率よりは多めになるのである。ただし、CSV 要素内にもっと圧縮すれば作業用メモリ量は小さくなる。

(3) 圧縮文書の要素内容による検索性能

圧縮 API ソフトを用いた評価に用いた検索処理の Perl のプログラムを Fig.7 に示す。Table 4 [2] の検索は、Fig.7 のようにキー要素により検索して、ヒットしたレコードの要素を表示する。また、使用した圧縮 XML 文書と表示結果のイメージを Fig.8 に示す。ヒットしたレコードの CSV 要素 (12 個) のみメモリに分離格納する。これは最良値の性能を与えるものとなる。圧縮文書の検索時間は非圧縮文書と同様になった。分離する CSV 要素の個数が少ないので、キー要素による検索ではほとんど差が出ない。

Table 4 [3] の検索は、CSV 要素内の圧縮要素により検索して、ヒットしたレコード要素を表示する。これは全レコードの CSV 要素を分離格納するため、最悪値の性能を与えるものとなる。全 CSV 要素 (1,344 個) を分離展開するので、[2] より処理時間が約 4 倍かかっている。メモリ使用量については、前述のように予め第 2 の配列に展開する CSV 要素に最大数を設けて、制限する。圧縮文書の検索時間の括弧内に記したものが、その最大数である。メモリ展開時点からメモリ使用量が増加するものの、メモリ使用の全体量は非圧縮文書の 1/2 程度

に抑えられることが分かる。今回は、読み出しのみで、CSV 要素更新の書き戻しが発生しないので、処理時間は CSV 要素の最大数には影響されない。

5. まとめ

圧縮 API ソフトの仕組みを検討して、ソフトを試作し、予想通りの機能、性能が得られることが分かった。XML 文書は、電子商取引や大規模データベースなど、大掛かりな定型業務の用途で、現在普及している。コン

ピュータの処理負荷やメモリ消費が程々で、XML の初心者にも使い易い API ソフトができれば、今後、小規模なデータを扱う事務処理や非定型業務の用途へも XML が広がっていくものと考える。

今回は原理試作のレベルであったので、今後は、もっと実際の複雑さの XML 文書が扱えるようにすることや、機能を実用的にするための拡張を行う。また、様々なアプリケーションで試して、使い勝手についても磨きをかけたい。

```

use XMLCompactionAPI;
# 初期化
$doc = XMLCompactionAPI->new();
# 圧縮 XML ファイル・オープン
$doc->openFile("elts12-csv.xml", "ATOM");
# レコード数、要素数/レコードの取得
$rlen = $doc->recordLength();
$selen = $doc->elementLength2();
# レコード名の取得
$record_name = $doc->getRecordName();
# 全レコードを走査
for($i = 0; $i < $rlen; $i++) {
    # 要素名 NAME (原子名) が「Zirconium」を探す
    if($doc->getElement($i, "NAME") eq "Zirconium") {
        # 以降、ヒットしたレコード番号と全要素名、
        # 要素内容を表示する
        print "$record_name $i %n";
        # 全要素番号(要素名)を走査
        for($j = 0; $j < $selen; $j++) {
            $selement_name = $doc->getElementName($j);
            if($selement_name ne "Information") {
                # CSV 要素名「Information」は除外する
                $selement_value
                = $doc->getElement($i,$selement_name);
                print " $selement_name= $selement_value%Nn";
            }
        }
        print "%Nn";
    }
}
# 圧縮 XML ファイル・クローズ
$doc->closeFile();

```

Fig.7 圧縮 API ソフトを用いた Perl プログラム例

参考文献

- 1) W3C Document Object Model (DOM) <http://www.w3.org/DOM/>
- 2) 吉田, 中島, 小田切, 伊藤「データ処理性能を改善する XML 文書のコンパクト化法の開発」, 電子情報通信学会論文誌, J89-D 巻, 4 号, pp.767-777, 2006 年 4 月
- 3) S.Yoshida, S.Nakashima, J.Odagiri, S.Itoh, "Development of an XML-Document Compaction Method to Improve Data-Processing Performance", Systems and Computers in Japan, Vol.38, No.5, pp.1-13, April 2007
- 4) S.McGrath, "RAX: An XML Database API" <http://www.xml.com/pub/a/2000/04/26/rax/index.html>
- 5) Perl 版 RAX の提供サイト CPAN(Comprehensive Perl Archive Network) XML::RAX <http://search.cpan.org/~rhanson/xml-rax-0.01/RAX/RAX.pm>
- 6) 吉田「構造化文書のデータ処理方法, データ処理プログラム, およびデータ処理装置」, 特許出願番号 2005-304968 (H17.10.19)
- 7) XMLPPM : XML-Conscious PPM Compression. <http://xmlppm.sourceforge.net/> サイトの xml-corpus-1.0.tra.gz
- 8) CPAN Time::HiRes <http://search.cpan.org/~jhi/Time-HiRes-1.9719/HiRes.pm>
- 9) CPAN Devel::Size <http://search.cpan.org/~tels/Devel-Size-0.71/lib/Devel/Size.pm>

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<PERIODIC_TABLE>
  <XMLCompaction-header>
    <Information>OXIDATION_STATES,BOILING_POINT,
    MELTING_POINT,DENSITY,ELECTRON_CONFIGURATION,
    COVALENT_RADIUS,ELECTRONEGATIVITY,ATOMIC_RA
    DIUS,HEAT_OF_VAPORIZATION,ATOMIC_VOLUME,HEAT
    OF_FUSION,IONIZATION_POTENTIAL,SPECIFIC_HEAT_
    CAPACITY,THERMAL_CONDUCTIVITY</Information>
  </XMLCompaction-header>

  <ATOM>
    <NAME>Actinium</NAME>
    <ATOMIC_WEIGHT>227</ATOMIC_WEIGHT>
    <ATOMIC_NUMBER>89</ATOMIC_NUMBER>
    <SYMBOL>Ac</SYMBOL>
    <Information>3,3470,,10.07,[Rn] 6d1 7s2 ,,1.1.1.88,,
    22.5,,5.17,0.12,12</Information>
  </ATOM>
  <ATOM>
    <NAME>Aluminum</NAME>
    . . . .

```

(a) 圧縮 XML 文書 (elts12-csv.xml)

```

ATOM 111
NAME= Zirconium
ATOMIC_WEIGHT= 91.224
ATOMIC_NUMBER= 40
SYMBOL= Zr
OXIDATION_STATES= 4
BOILING_POINT 4682
MELTING_POINT= 2128
DENSITY= 6.51
ELECTRON_CONFIGURATION= [Kr] 4d2 5s
COVALENT_RADIUS= 1.45
ELECTRONEGATIVITY= 1.33
ATOMIC_RADIUS= 1.6
HEAT_OF_VAPORIZATION= 590.5
ATOMIC_VOLUME 14.1
HEAT_OF_FUSION= 21
IONIZATION_POTENTIAL= 6.84
SPECIFIC_HEAT_CAPACITY= 0.278
THERMAL_CONDUCTIVITY= 22.7

ATOM 223
NAME= Zirconium
. . . .

```

(b) 結果表示
(CSV 要素を分離して表示)

Fig.8 圧縮 XML 文書と検索結果表示

研究論文

携帯電話による通信状態と電磁放射雑音に関する研究

杉浦伸明*, 山我拓也*

(2009年9月30日受理)

Study on Electromagnetic Noises from Mobile Phones Related with the Communication Modes

Nobuaki Sugiura*, Takuya Yamaga*

(Received September 30, 2009)

Abstract

This paper presents the measured results of electromagnetic noises from the mobile phones under the different communication modes, such as data communication and voice communication. The results show that the emission noises of the data communication mode are larger than those of voice communication ones. We found that the noises of mutual affection under communication modes can be evaluated with the root-mean-square-sum.

キーワード：携帯電話，電磁放射雑音，通信モード，雑音評価

key words: Mobile Phone, Electromagnetic noise, Communication mode, noise evaluation

1. まえがき

ユビキタス社会の到来により，情報通信環境のモバイル化，つまり，いつでも，どこでも，好きなときに，誰とでも通信できる，という環境に変わりつつある。このような通信環境において，常時携帯に向け，通信端末の小型化，モバイル化が進んできている。この流れの中で代表的な通信端末は，携帯電話端末である。携帯電話端末における通信に対しては，人体への影響ということでこれまでも色々と議論がなされ，実験や研究報告などがされてきている¹⁾が，未だ人体への影響の有無については，明確な結論を得るに至っていない。このような中で，携帯電話からの電磁放射雑音量に対する指針としては SAR* が示されている。一方，電磁放射雑音に関して警鐘を鳴らす出版物^{2),3)}もいくつか出ている。いずれにしても，目に見えない電磁放射雑音に対して，実態がつかめないとするのが実際のところである。

このような状況下において，携帯電話による通信状態で実際に発生している電磁放射雑音を計測評価すること

を進めた。通信状態の違いで電磁放射雑音が変化するかどうか，通信状態相互の相互干渉性を評価することを目的とした。

* SAR (Specific Absorption Rate)⁴⁾とは，単位質量の組織に単位時間に吸収されるエネルギー量のことである。人体がある電波を発する機器から，一定時間にどのくらいのエネルギーを受けたのかわかる指標の量。平成9年に人体に許容される電磁波の基準として「全身平均 SAR」と「局所 SAR」のふたつの基準値が定められた。単位は W/kg でキログラム (kg) あたり何ワット (W) の熱エネルギーを吸収するかという単位であらわす。値が大きいほど人体への影響が大きいということになる。携帯電話等，人体頭部のそばで使用する無線機器から送出される電磁波については局所 SAR を用いる。この局所 SAR とは，人体が電磁波にさらされることによって，任意の 10g 当たりの組織に 6 分間に吸収されるエネルギー量の平均値をいい，この値は携帯電話の機種により違う。また，国によっても規制値は Table 1 に示すように違っている。

* 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

Table 1 SAR の国別の規制値
(頭部・胴体の局所最大値)

国	許容値	測定単位
日本	2.0W/kg	10g あたり
米国	1.6W/kg	1g あたり
スウェーデン	0.8W/kg	10g あたり
中国	1.0W/kg	10g あたり
ドイツ	0.6W/kg	10g あたり
フランス	2.0W/kg	10g あたり
英国	10.0W/kg	10g あたり
オーストラリア	2.0W/kg	10g あたり
ニュージーランド	2.0W/kg	10g あたり
韓国	1.6W/kg	1g あたり

Table 2 ESV-3000 の主な仕様

項目	仕様
測定方式	XY ステージによる電磁界 プローブ操作方式
周波数範囲	150Hz ~ 3GHz
測定エリア	最大 350mm × 300mm
最小走査 / ステップ	1mm 以上 / 0.1mm ステップ
寸法	W601 × H980 × D662mm
質量	約 37kg

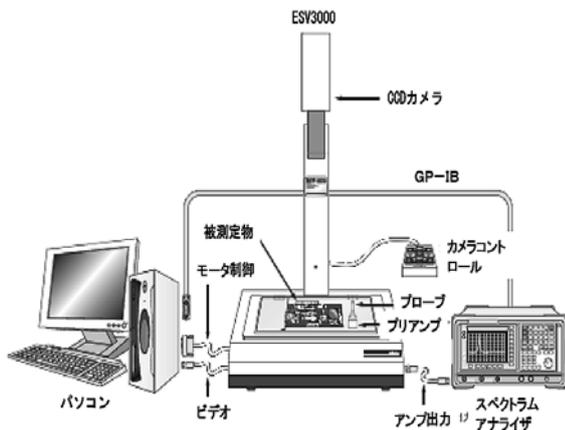


Fig.1 ESV - 3000 システム構成概観

2. 電磁放射雑音測定系の構成

測定には、株式会社ノイズ研究所の ESV - 3000 システムを用いた。この電磁雑音測定系構成図を Fig.1 に示す。このシステムの主な諸元を Table 2 に示す。また使用したプローブは磁界プローブで Fig.2 に示すように、対象物から発生される垂直方向の磁界を検出する。シス

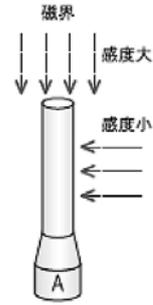


Fig.2 使用したプローブ

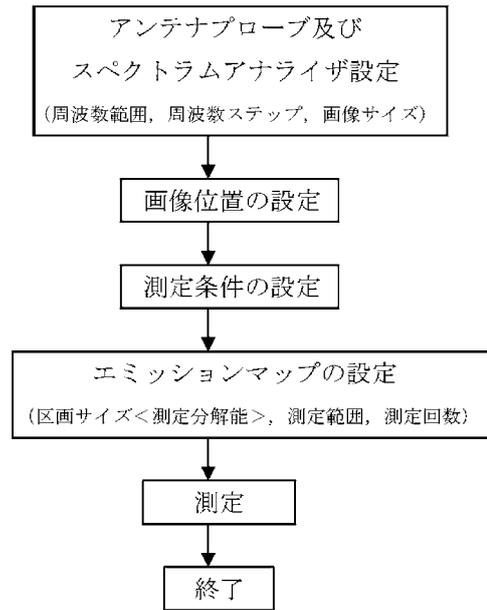


Fig.3 測定の手順

テムとしては、検出雑音結果は電圧値として $\text{dB}\mu\text{V}$ で表示される。

プローブの周波数特性は 30MHz ~ 3GHz でコイルのループ径は約 3mm である。

3. 電磁雑音測定方法

測定手順は Fig.3 に示す流れで行った。

測定にあたり、測定範囲は 200mm × 300mm (端末単体), 200mm × 350mm (隣接配置), 区画数 925 (端末単体時), 1254 (隣接配置) で行った。測定周波数範囲は 200MHz ~ 3GHz とした。

4. 測定対象とした端末 (メーカー, 事業者)

測定対象とした端末は、W-CDMA 方式の NTT ドコモとソフトバンクモバイルで使用されているものを対象にした。

(1) ドコモ FOMA N906i

日本電気製 折りたたみ式

折りたたみとき寸法：109(H)×49(W)×19.6(T) mm

局所 SAR：0.310W/kg

発売時期：2008年6月

(2) ソフトバンク 904SH

シャープ製 折りたたみ式

折りたたみ時寸法：104(H)×50(W)×28(T) mm

局所 SAR：0.29W/kg

発売時期：2006年4月

5. 携帯電話からの電磁放射雑音評価の構成

各端末に対して、以下の7種類の異なる端末条件で測定を行った。

- ①電源 OFF 時
- ②電源 ON で省電力モード OFF 時
- ③電源 ON で省電力モード ON 時
- ④充電時
- ⑤通話中で省電力モード OFF 時

Table 3 相互比較で評価する項目

比較条件	比較からえられる電磁放射雑音の差
①と②	電源 ON,OFF における差
②と③	省電力モード ON,OFF による差
②と④	電源 ON 時と充電時の差
②と⑤	通話と無通話との差
⑤と⑥	通話における省電力モード on, off の差
⑤と⑦	通話中とデータ通信の差

⑥通話中で省電力モード ON 時

⑦データ通信中

これらの条件で相互に比較し、端末状態の違いによる差を見た。これらの結果を相互に比較することで得られる特性を Table 3 に示す。

また、2つの端末を近づけた状態での相互の干渉を比較するため、端末相互をセンチ間約 60mm の距離に離して以下の条件で放射雑音の計測を行った。

- ⑧2つとも電源 ON, 省電力モード OFF で隣接配置
- ⑨2つとも通話時状態で隣接配置
- ⑩2つともデータ通信状態で隣接配置
- ⑪1つが電源 ON で他方が通話中



Fig.4 観測結果の一例 (単体時)

6. 測定結果と考察

測定結果は測定領域を 925 区画 (端末単体時), 1254 区画 (隣接端末時) に区分したセル単位に色分けで表示される。その表示例を Fig.4 に示す。評価は、このセルごとのデータについて、最大値, 最小値, 平均値を求めて評価した。

6.1 端末間差

各端末に対する①～⑦の条件での観測結果を Table 4 に示す。

①と②の比較より、電源 ON, OFF の差は両端末には見られない。

②と③の結果より、省電力モードの設定で平均値の低減となり、省電力モードは放射雑音の低減に効果があるといえる。

②と④の結果より、充電時は電源 ON 時とほぼ同じ状態といえる。

②と⑤の結果より、通話中になると放射雑音の平均値が約 10dB μ V ~ 20dB μ V 増加することがわかる。

Table 4 2つの端末の特性比較

単位 dB μ V

	906i			904SH		
	Max	Min	Ave.	Max	Min	Ave.
①	60.69	57.14	58.13	60.81	57.47	58.48
②	60.39	57.56	58.3	61.08	57.5	58.5
③	60.6	57.36	58.26	59.57	57.61	58.48
④	60.31	57.58	58.42	60.08	57.6	58.52
⑤	71.79	57.61	60.24	92.56	58.14	75.91
⑥	72.18	57.5	59.81	94.14	57.92	74.84
⑦	82.47	57.42	66.44	92.67	57.97	75.94

⑤と⑥の結果より、②と③の結果同様、平均値としてみると、省電力モードは低減に効果があるといえる。

⑤と⑦の結果より、データ通信時は通話時よりも放射雑音が高いことがわかる。

⑤～⑦について、906iの方が904SHに比べて雑音は小さい。これは端末製造会社の回路設計技術や実装技術の違いや、端末製造期間の2年間の差における技術革新の違い、が反映されていると考える。ほぼ同時期に発売されたものでの評価をすれば、これほどの違いは出ないものと考えられる。

常時通信状態にある通話に対し、データ通信はパケット通信であることから、データ通信の方が放射雑音は小さいかと思っただが、結果は逆であった。データパケットを送信・着信する際に電力密度が高くなるためと考える。携帯電話端末の使用状態を考えると、通話は直接端末を身体に接触させて使うことになる。人体への電磁波雑音の影響という面からは端末と観測アンテナ間の距離依存ということの評価することが望まれる。この点について、今後検討を加えていきたい。

6.2 端末相互干渉

端末を隣接配置し、双方の端末の通信状態を相互干渉させた5項に示す⑧～⑩の結果をTable 5に示す。

この結果から、隣接した状態では相互に干渉し、電磁放射雑音の大きさが影響を受けることがわかる。

観測された電磁放射雑音について、各端末単独で観測されたTable 4に示す結果の値を用い、相互干渉における雑音値を評価した。雑音については、両端末が同じ通信状態にあるとき(⑧～⑩)と、相互に異なる状態の組み合わせ(⑪)に大別できる。そこで、同じ状態にあるときには、電力の相互加算性を考慮し各端末の各状態での雑音値の2乗和加算平均を、相互に異なる状態については、電圧の重畳を考慮し、次に示す評価式で算出した。

$$2 \text{ 乗和加算平均} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n V_x^2}{n}}$$

$$\text{加算} = \sum_{x=1}^n V_x$$

ここで、 V_x は端末単独での測定結果による雑音値(dB μ V)から換算した雑音電圧を示す。

実測結果と雑音値から換算した雑音の計算結果をTable 6に示す。

Table 5 端末相互干渉の結果 dB μ V

	Max	Min	Ave.
⑧	60.33	57.61	58.54
⑨	89.28	58.22	71.88
⑩	93.33	58.11	73.2
⑪	79.64	57.94	66.21

Table 6 相互干渉の雑音の実測値と計算値の比較 dB μ V

	Max		Ave.	
	測定	計算	測定	平均
⑧	60.33	60.75	58.54	58.4
⑨	89.28	89.59	71.88	73.02
⑩	93.33	90.06	73.20	73.39
⑪	79.64	74.01	66.21	65.43

実測結果と計算結果はほぼ近い値を示し、雑音評価の妥当性を得た。差分については、単体と隣接配置における観測エリア領域の違いによるセル数が違うこと、通信状態で端末が実際に送受信するデータ量や内容が異なること、が考えられる。端末相互間の距離に対する放射雑音の依存性は今後評価を図りたい。

7. まとめ

携帯電話からの放射雑音について、2種類の端末(通信方式、製造年異なる)を用いて測定を行った。その結果、電磁放射雑音はデータ通信モードの方が通話モードよりも大きいことが分かった。また、2つの端末からの電磁放射雑音の相互干渉による雑音量は2乗平均で算出評価できることが分かった。

参考文献

1. Electromagnetic fields and public health: mobile telephones and their base stations, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs193/en/>
2. 小山寿, 電磁波の正体と恐怖, 河出書房新社, 1996年
3. 船瀬俊介, あぶない電磁波, 三一書房, 1996年
4. <http://ktai-denjiha.boo.jp/sar/index.html>

研究ノート

PIP (Person In Presentation) を用いた本学への交通アクセス動画の制作

加藤高明*, 三宅 透**

(2009年9月30日受理)

Making of a Traffic Access Movie for Our University Using PIP(Person In Presentation)

Komei Kato* Toru Miyake**

(Received September 30, 2009)

Abstract

Nowadays, Web site is one of the main information-sending tools. Various and attractive contents in Web site are indispensable to invite so many people. Especially, PIP(Person In Presentation) is expected as a new method which attracts many people. PIP is Flash-contents in which a person appears and gives some explanation. As the person explains products and service in Web site, anyone can utilize the Web site without feeling any stress. However, PIP-making procedure has not been standardized yet. This paper describes an effective procedure with making a traffic access movie for our university using PIP.

キーワード: PIP, Flash

Keywords: PIP, Flash.

1. はじめに

インターネットが広く社会に普及し、情報発信ツールとしてのWebサイトは、ますます重要性を増してきている。Webサイトが、集客率やリピート訪問率を高めるには、各種コンテンツの充実や魅力ある仕組みが不可欠であるが、その中でも新しい動画手法であるPIP(Person In Presentation)が注目を集めている。

PIPとは、人物動画とアニメーションなどのデジタルコンテンツが一体となり、Web上で人物が分かりやすくプレゼンテーションすることで閲覧者に驚きや感動、楽しさを与えるという高い表現力を持った手法である。Webリテラシーの低い高齢者などをターゲットとする場合にも有効と考えられ、誰でもストレスなくWebサイトを利用するためのコンテンツとして、その活用が期待されている。

しかしながらこのPIPは、新しい手法であることや制

作コスト上の問題^(注1)があることから、現時点ではまだ多くのWebサイトで導入されているわけではなく、その制作方法については、標準的な手順が確立されているという状況までは至っていない。

そこで本稿では、この新しい表現技法であるPIPについて、高品質かつ効率的な制作方法について、試作品の制作過程をもとに説明する。

2. PIPとは

PIPとはPerson In Presentationの略で、プレゼンテーションの中に人がいるFlashコンテンツのことである。Flashの機能^(注2)と人物動画を組み合わせた表現力の高い手法で、Flashのインタラクティブ性を利用して、入力に応じた画面切り替えやガイダンス表示を行うなど、

* 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 〒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

一方向的な映像提供ではない側面も備えている。

企業の導入例を見ると、その活用方法は大きく以下の4つに分類される(注3)。

(1) ブランディング

人物の登場は、企業や商品のイメージ形成促進に優位である。

(2) ナビゲーション

ユーザーをより積極的に誘導することができる。入力フォームをPIP化して、人物が入力方法を説明することでスムーズな操作完了が期待できる。

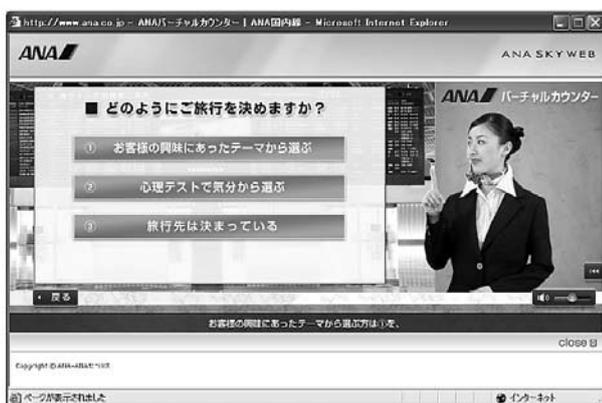
(3) プロモーション

タレントなどを登場させることで訴求力が高まり、ユーザーをより引きつけられる。商品やサービスの良さ、ベネフィットを効果的に伝え、ユーザーの興味・関心を喚起することができる。

(4) 商品説明

複雑だったり、予備知識を要する難解な商品であったりしても、それを人物が説明することで、ユーザーは短期間で理解を深められる。

Fig.1 は、ANA (全日空) のPIPを利用したバーチャルカウンターの例である。質問項目や入力項目を動画でナビゲートしたり、結果の部分を実演映像を用いて展開することで、具体的に旅行先を決めていないユーザーともインタラクティブなやりとりをもとにして、具体的な旅行先を提案するようになっている。



(出所: http://www.ana.co.jp/dom/travel_design/index.html)

Fig.1 ANA バーチャルカウンター

PIPはFlashで構成されているため、Flash Playerをインストールするだけで視聴することができる。2006年11月の段階でFlash Playerの普及率は98.49%(注4)であり、オペレーティングシステムやWebブラウザなどのパソコンの環境に左右されずに再生することができるため、より多くのユーザーが手軽に視聴できるリッチコンテンツである。

3. 試作品のテーマ

今回試作品を制作するに当たり、テーマを「本学への交通アクセスの説明」とした。その理由は、特に名古屋市内の高等学校で本学のPRを行った場合、高等学校の先生方から、本学の所在地である「蒲郡」が、名古屋市内からはイメージ的に「遠い」という声がよく聞かれるからである。口頭で、名古屋駅からJRの乗車約37分と無料スクールバス利用約12分で到着できる旨を説明すると、大抵の場合は思っていた以上の「近さ」を納得してもらえるため、これを題材に本学への交通アクセスを説明するPIP制作を試みることにした。

4. 制作の手順と使用ソフトウェア

4.1 制作の手順

制作方法としては、人物動画に背景となる画像・アニメーションを合成することが基本となるが、その手順は

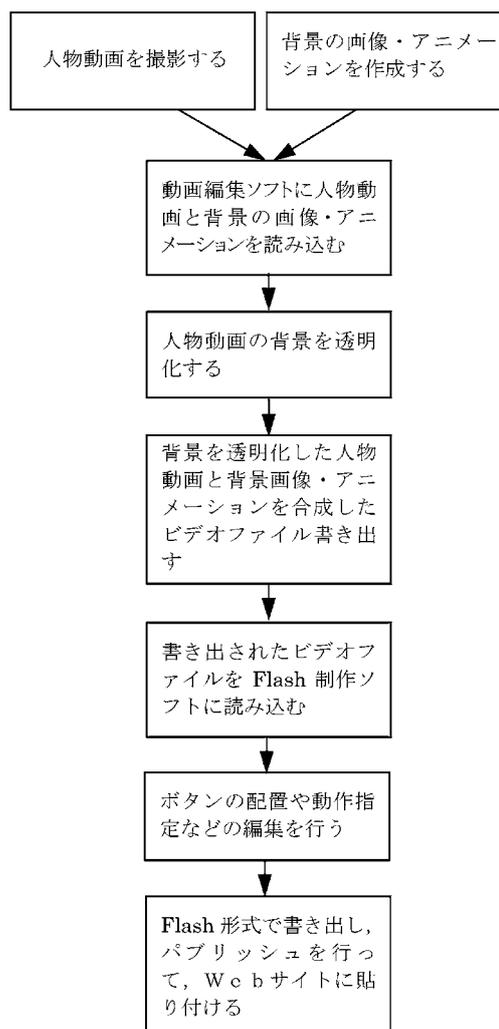


Fig.2 PIP制作の手順

Fig.2の通りである。

これまでFlashには動画を扱える機能はあったものの、ビデオにアルファチャンネル（画像の透明部分を表したデータを保存する領域）のサポートはされていなかった。Flash 8 Professional版からそれがサポートされたためFlash制作ソフトでリアルタイムに人物と背景の合成が可能となったが、これはPIPの制作に好都合である。

4.2 使用ソフトウェア

制作にあたり今回使用したソフトウェアは次の通りである。

(1) 背景の画像・アニメーションの作成

Adobe Flash CS4 Professional 版（描画ツール部分）

(2) 動画編集

Adobe After Effects CS3

(3)Flash 制作

Adobe Flash CS4 Professional 版

前述したように、ビデオにアルファチャンネルがサポートされたのはFlash 8 Professional版であるが、今回使用したFlash CS4 Professional版はその次バージョンであり、ビデオでのアルファチャンネルはサポートされている。

5. 制作における設定値と工夫点

5.1 人物動画撮影

人物動画の撮影にあたり、動画に関する設定値は次のように指定した。

設定項目	設定値
画面サイズ	640×480ピクセル
フレームレート	30fps
画像品質	SHQ（高画質）

画像サイズについては、本学への各種アクセス方法のフリップを表示する必要があるため、文字の読みやすさを考慮して640×480ピクセルとした。またフレームレートは、15fps^(注5)ではスムーズさに欠ける動きとなるため、アナログテレビ放送と同様の30fpsとした。

画像品質は、品質を下げすぎると人物動画の背景を透明化する際にその精度が下がり、人物の輪郭がぼけてしまったり、背景の透明化が正しく行われな箇所が発生する。そのため極力高画質での撮影が推奨される。

人物動画の撮影は、本学コンテンツ制作スタジオを利

用して行ったが、背景がブルースクリーンであるため、人物の衣服の色は同系色のブルーを避ける必要がある。撮影した主体だけを抜き出す（背景を透明化する）ためには、背景との同系色の衣服ではその境目の判断があいまいになるためである。

また、背景となる画像・アニメーションと合成する時に人物との適正な位置関係を保持するため、人物動画の撮影はモニターを使用して撮影し、モニター画面に人物の位置をマーキングすることで常に位置の確認をしながら撮影を実施した。

5.2 人物動画背景の透明化

After Effects CS3を使用して透明化する色をキーカラーに指定して透明化を行うが、その「許容量」や境界線の「エッジをぼかす」などを調整しても十分な背景の透明化を行うことができない。解決策としてイギリスThe Foundry社のクロマキー合成を目的としたキーヤー・プラグインであるKeylight1.2を使用することで透明化の精度は向上したが、よりシャープに人物を抜き出すには、撮影方法も含めた検討は必要である。

5.3 Flashによる動作指定

人物動画撮影での画面サイズおよびフレームレートと同様の値を、Flash CS4 Professional（以下Flash CS4）に設定した。

設定項目	設定値
画面サイズ	640×480ピクセル
フレームレート	30fps

After Effects CS3により書き出されたビデオファイルは、Flash CS4には埋め込みの形で読み込ませる。背景画像の切り替えのタイミングやエフェクトなど、各動作の詳細を順次設定を行う。なおボタンを配置してイベント起動を行う場合は、スクリプト言語であるAction Scriptを使用してプログラミングする必要がある。

今回は以下のように画面を構成し、それぞれにFlashムービーファイルを分割して、順番に再生できるようにした。

再生順	画面の内容
1	オープニング
2	名古屋駅からの乗車案内
3	乗車途中の主要停車駅案内
4	蒲郡駅でのスクールバス乗車案内
5	スクールバスの紹介と各種アクセス方法表示

Flash ムービーファイルを分割することの利点は、内容の修正や変更時に該当ムービーファイルのみを更新すれば良く、作業が効率的となるためである。

6. 各画面の説明内容

ここでは、各画面の説明内容をナビゲーターの台詞を示しながら示す。

(1) オープニング

名古屋市から愛知工科大学への行き方説明の開始を示す画面である。



Fig.3 オープニング画面

「愛知工科大学がどこにあるか知っていますか。愛知県の蒲郡市にあります。名古屋市からでも近いですよ。それではご案内しましょう。」

(2) 名古屋駅からの乗車案内

名古屋駅からは JR を利用することを説明する画面である。

「名古屋から大学がある蒲郡に行くには JR を使います。名古屋駅から特別快速に乗ると約 37 分で蒲郡まで着き



Fig.4 名古屋駅からの乗車案内の説明画面

ます。37 分ってそんなに遠くないですよ。」

(3) 乗車途中の主要停車駅案内

乗車中に停車する主要駅を案内する画面である。乗り換え等の案内も行っている。



Fig.5 乗車途中の主要停車駅案内の画面

「金山駅では名鉄や地下鉄の乗り換えもできます。愛知環状鉄道利用者は岡崎駅で乗り換えができます。もう蒲郡に到着です。」

(4) 蒲郡駅でのスクールバス乗車案内

蒲郡駅本学スクールバスの乗り場を案内する画面である。電車および女の子のキャラクターは、アニメーション効果により移動する。

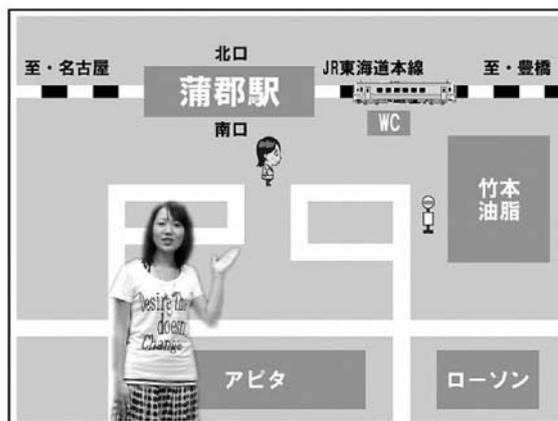


Fig.6 蒲郡駅でのスクールバス乗車案内の説明画面

「改札を出て左手の南口へ向かいます。南口に出て左へ約 30 秒行くと 6 番のバス乗り場があります。ここから無料のスクールバスを利用します。」

(5) スクールバスの紹介と各種アクセス方法表示

乗車するスクールバスを紹介 (Fig.7) した後、画面

を本学の正門に切り替えて到着までの所要時間の案内を行う (Fig.8). その後, 他の交通アクセス方法を含めたフリップを表示 (Fig.9) して説明を終了する.



Fig.7 乗車するスクールバスの紹介画面

「観光バスなので広くて乗り心地がいいですよ. 乗車時間は約 12 分です。」



Fig.8 本学正門を表示し, 到着を示す画面

「さあ愛知工科大学に到着です. 名古屋からの所要時間は約 1 時間です. 意外と近いでしょ. これなら名古屋からも十分通学できますね。」

7. まとめ

新しい表現手法である PIP において, その制作手順を試行錯誤しながら模索し, 試作品を完成させることができた. 専門業者へ制作依頼をすることなく, PIP を今後学内で制作できる見通しを得たことは, コスト面も含めその意義は大きい. 人物が語りかけての説明は, ややもすると無機質的になりがちなパソコンと人間とのイン

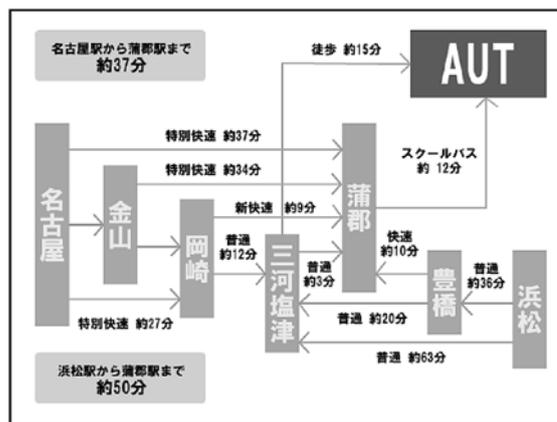


Fig.9 他の交通アクセス方法を含めたフリップを表示する画面

ターフェース部分にコミュニケーション的要素を取り入れる方法として, 有効性が感じられた.

しかし今回は, 制作手順の確立を第一の目的とした試作品制作のため, 説明が名古屋方面からのアクセスに限定されていたり, 各画面におけるデザイン性について不十分なところがあったりと改良すべき点は残っている. 活用シーンに合わせた PIP のデザインやナビゲーション方法などを検討し, Web サイトへの集客率を高めるコンテンツのひとつとして完成度を高めていきたい.

謝辞

本研究における本学への交通アクセス動画の制作にあたり, 本学電子情報工学科 4 年生 川瀬愛さんには, ナビゲーター役を快く引き受けていただきました. この場を借りて深く感謝の意を表します.

注

- (注 1) PIP を制作するある専門業者の Web サイトには, 1 分間の PIP の制作で 30 万円~, 3 分間で 100 万円~と料金が示されている.
- (注 2) Flash とは, Macromedia 社 (現 Adobe 社) が開発した, 音声やベクターグラフィックスのアニメーションを組み合わせる Web コンテンツを作成するソフトウェア, またはそれによって作成されたコンテンツのこと. マウスやキーボードの入力により双方向性を持たせる機能もある.
- (注 3) 参考文献¹⁾199 ~ 204 ページでは, 具体例を紹介しながら PIP の活用方法を詳しく説明している.
- (注 4) 「ブラウザ, 映像アプリケーションのプラグイン調査」J ストリーム調べ.
- (注 5) Frame Per Second の略. 動画のなめらかさを表す指標で 1 秒間に何枚の画像を表示しているかを示す.

参考文献

- 1) 織田浩一、須藤慎一、橋本雄一「リッチコンテンツ・マーケティングの時代」2007年 日経 BP 社
- 2) デジタルハリウッド「Web デザイン FLASH」2008 年技術評論社
- 3) 外間かおり「FLASH CS3 Professional スーパーリファレンス」2008 年 ソーテック社

コラム・エッセイ

“五井山”は“ごいさん”ではなくて、“ごいやま”だ。

橋本孝明*

(平成21年9月30日受理)

The Exact Name of the Mountain is not “GOISAN”, but “GOIYAMA”.

Takaaki Hashimoto*

(Received September 30, 2009)

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。高校卒業の昭和39年4月に名古屋市に転居し、昭和51年9月に豊田市に転居したが、平成12年4月に故郷蒲郡市に戻って現在に至っている。この間、平成1年4月から現在の愛知工科大学自動車短期大学と愛知工科大学の前身である愛知技術短期大学に勤務しているので、自分自身では故郷を離れてから実質的には25年ぶりに戻ったと考えている。

愛知技術短期大学に勤務して鮮明に覚えていることがある。それは、先に着任していた山登りの好きな教員が、「ごいさん」に登った。」と発したことばである。その時、「五井山」は“ごいさん”ではなくて、“ごいやま”だ。」とむきになって訂正したかどうかは覚えていないが、不快感を覚えたことをはっきりと覚えている。

“五井山”は“ごいさん”ではなくて、断じて“ごいやま”を力説し、筆者の蒲郡に対する想いを書いてみたい。

者である藤原俊成が荘園として開拓したこと」「紆余曲折の後、熊野権現の荘園になったこと」「以後熊野権現の被官鶴殿氏が上ノ郷城に拠って勢威を奮ったこと」を紹介することも可能である。

筆者の子供の頃の記憶のある少し以前のことを交えるならば、「白砂青松の海岸と海水浴場」「がちゃまん」景気の織布業と買い継ぎ問屋の町」であったことなども入れることができる。

自然好きの人には、国の天然記念物である「清田の大楠」は一見の価値があり、「大島付近には“なめくじょうお”が棲息していたことも興味があるものと思われる。

このように、蒲郡の紹介をする場合、具体的内容となると「海」に関連したことが多くなるが、三方を山に囲まれているのであって、筆者のように山麓で生まれ育った人間にはやや残念であり、ましてや、“五井山”をしたたり顔で“ごいさん”などと発音されると腹立たしささえ覚えてくるのである。

2. 蒲郡の紹介のしかた

「蒲郡市は愛知県東部三河地方に位置し、三方を山に囲まれ、南に三河湾を抱く、気候温暖な地である。」のように紹介するのが、まず一般的であろう。これに続いて、「竹島、大島、小島の海の眺望や、三谷、蒲郡、形原、西浦の温泉を楽しむことのできる観光地」であることや、「温室みかん、えびせんべいなどの産物」「三河湾の新鮮な魚介類を使った料理」「マリンスポーツ、ラグーナなど海の魅力」などを追加していくことになると思う。

さらに、歴史好きの人には、「勅撰和歌集千載集の撰

3. 蒲郡の山の呼び方

先に蒲郡は「三方山に囲まれ」と述べたが、北には雄峰五井山(ごいやま)が454メートルの堂々たる雄姿で聳え、西には遠望峰山(とぼねやま)が柔らかな山並みを従え、東には“三河富士”とも別称される砥神山(とがみやま)が秀麗な姿で目を引いている。

すでにお気づきのように、蒲郡の“山”の呼び方は“やま”であって、“さん”ではない。この他に思いつくままに、著者が聞き知っているいくつかの蒲郡の山の名前を記すと、御堂山(みどうやま)、聖山(ひじりやま)、陣ノ山(じ

* 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

んのやま), 弘法山 (こうぼうやま), 乃木山 (のぎやま), 桑谷山 (くわがいやま), 王子山 (おうじやま), 名取山 (なとりやま) などがある。とんざり山 (やま) という名の山もある。見事なまでに“山”は“やま”である。“さん”と呼ばれる例があるかも知れないがちょっと思いつかない。

ついでに触れるが、持統女帝の紅葉話で有名な宮路山は“みやじさん”であるが、音羽か御津 (現在は豊川市) であり、蒲郡ではない。形原温泉と関係の深い三ヶ根山は“さんがねさん”であるが、幡豆であって蒲郡ではない。

4. 山の呼び方と蒲郡との考察

山の名を“やま”と呼ぶか“さん”と呼ぶかについて、基準のようなものがあるのかないのかを知らない。しかし、“やま”と呼ぶと“優しい”響きがあり、“さん”と呼ぶと“重厚”な響きがある (のは著者だけか)。“やま”は低い山、“さん”は高い山というイメージもしないでもない (が、必ずしもそうでもないようだ)。

“やま”と呼ぶか“さん”と呼ぶかについて、山と人々との関わり方が大きいと考えてみたい。結論をいえば、“やま”は人々が常に山と親しみ、山が人々の日常生活と密着していた呼び方と考えたい。山は古代から信仰の対象であったことはよく知られており、“さん”は人々が山に畏敬の念を抱き、一歩下がって接していた呼び方と考えたい。ただ、非常に古くからの信仰対象の三輪山が“みわやま”と呼ばれているのは、華麗な姿であるが、あまり高い山でなく、人々が親しみ易かった名残ではないかと著者は考えている。

このように、山を“やま”と呼ぶこととすると、蒲郡

に生まれ育った著者には合点がいくことがある。蒲郡は三河地方の一角にあるが、岡崎を代表とする西三河とはもちろんのこと、豊橋を代表とする東三河とも違っていている。特に感じられるのが、人々の他地域との移動交流が極めて少ないことである。このことは、蒲郡の地が生活しやすい地である一面を物語っているのではないだろうか。温暖な気候に恵まれ、古代から人々が山の数々の恩恵にあずかってきたことが、親しみを込めて“やま”と呼んだのではないだろうかと考えたい。

5. おわりに

蒲郡の山は、“やま”であって“さん”ではないことを著者は力説したい。山の呼び方ひとつにしても、地域の人々の独自の文化の薫がするからである。“五井山”は“ごいやま”であって、断じて“ごいさん”であってはならない。

Fig.1 に“ごいやま”の雄姿を示す。



Fig.1 Grand Figure of GOIYAMA

微分形式によるマクスウェル方程式の4次元定式化

石川雄二郎¹

(2009年9月30日受理)

Differential Form Maxwell Equations in Minkowski Space

Yujiro Ishikawa¹

(Received September 30, 2009)

Abstract

This paper shows how briefly Maxwell equations in ordinary 3-dimensional space are summarized in 4-dimensional Minkowski space. From the fact that exterior derivatives for zero-form, one-form, and two-form correspond to grad, rot (curl), and div operation respectively, we can expect differential forms and its exterior derivatives represent Maxwell equations concisely. And we actually show that Maxwell equations can be written in two very simple differential form equations in 4-dimensional Minkowski space.

キーワード：マクスウェル方程式，ミンコフスキー空間，4次元定式化，微分形式

Keywords：Maxwell equations, Minkowski space, 4-dimensional formulization, Differential form

1 はじめに

「結局は経験から独立した思考の産物である数学が，どうしてこんなに見事に事物に適合するのであろうか」⁽¹⁾とは，物理学者アインシュタインが自分の研究生生活をふりかえって記した言葉だそうである．本文のマクスウェル方程式の4次元定式化は，「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」⁽²⁾より推察されるように，アインシュタインの言葉が実感できる事物である．すなわち，電磁気現象の3次元定式化には数学の「ベクトル解析」が適合したように，マクスウェル方程式の4次元定式化には数学の「微分形式と外微分」が見事に適合する．ベクトル解析の種々の公式が微分形式の外微分演算により簡潔に表現できる⁽³⁾ことから推察できるように，マクスウェル方程式の4次元定式化にあたり微分形式と外微分は重要な役割を演ずる．

また，電磁気現象を表すのに，未知数を電場 E ，磁場 B とベクトル（電磁）ポテンシャル A のどちらとすることがより本質的であるか？ との間の答は，アハロノフ・ボームの効果⁽⁴⁾により，現代ではベクトルポテンシャルであると考えられている．本文もこのベクトルポテンシャル（4次元版）を導入したマクスウェル方程式の4次元定式化について解説する．

2 マクスウェル方程式の4次元定式化の結果

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．

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad \nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{j} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0. \quad (2)$$

結論を最初に述べると，上の計4式（マクスウェル方程式）の4次元（ミンコフスキー）空間における定式化は，1-形式

$$A_0 dx^0 + A_1 dx^1 + A_2 dx^2 + A_3 dx^3 = A_\mu dx^\mu \quad (3)$$

を外微分し

$$\omega \equiv d(A_\mu dx^\mu) \quad (4)$$

* 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, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047

とおくと (1) の 2 式と (2) の 2 式はどちらも ω に関する 1 つの式に集約され) それぞれ

$$d * \omega = \mu_0 * j \quad (5)$$

$$d\omega = 0 \quad (6)$$

となる. (5) と (6) については以下詳細に解説する.

3 3次元および4次元のマクスウェル方程式

3.1 3次元のマクスウェル方程式

(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 式はアンペールの電流の磁気作用の法則であり, (2) の第 1 式は磁化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. \mathbf{D} と \mathbf{B} は電束密度と磁束密度であり, \mathbf{E} と \mathbf{B} は電場と磁場である. また, ρ は荷電密度, \mathbf{j} は電流密度である. \mathbf{D} と \mathbf{B} , \mathbf{E} と \mathbf{H} は真空中では, 構成方程式

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E}, \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (7)$$

で結ばれる. ε_0 は真空の誘電率, μ_0 は透磁率とよばれる定数で, $\mu_0 \varepsilon_0 = c^{-2}$ である. さらに電荷-電流密度は連続の方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0 \quad (8)$$

をみたし, この式は電荷の保存則を表す.

3.2 4次元のマクスウェル方程式

次に, (5), (6) につて補足する. 本文では 4 次元のミンコフスキー空間 (x^0, x^1, x^2, x^3) を考える. ただし, $x^0 \equiv ct$ は時間成分を表し, x^1, x^2, x^3 は空間成分を表す. 時間成分を含む 4 次元空間成分の添字にはギリシャ文字

$$\lambda, \mu, \nu, \rho, \dots = 0, 1, 2, 3$$

を使用し, (時間成分を含まない) 3 次元空間の添字にはアルファベット

$$i, j, k, \dots = 1, 2, 3$$

を用いる. また和に関しては, アインシュタインの規約を適用する ((3) 参照).

(5) において, $*$ はホッジの星印作用素であり, また \mathbf{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の電流密度である. すなわち, 以下 4.1 に示すように, 相対論のローレンツ変換の要請をみたとすように x^0 成分が追加され, 4 次元ベクトル化されている. (4)~(6) の d は外微分演算子である.

4 マクスウェル方程式の 4 次元定式化⁽²⁾

4.1 マクスウェル方程式と 4 次元電流

(時間成分を含まない) 3 次元空間の電流密度を (j^1, j^2, j^3) で表す. このとき c を光速として, 4 次元ベクトル $(c\rho \equiv j^0, j^1, j^2, j^3)$ はミンコフスキー空間の (電流密度) ベクトルであることを最初に示す. 3 次元空間の体積要素 $dV = dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3$ に含まれる電荷と, その電荷に基づく電流は

$$\text{電荷} : \rho dV, \quad \text{電流} : \mathbf{j} dV = \rho \mathbf{u} dV \quad (9)$$

と表すことができる. ここで \mathbf{u} は電荷の速度である. ここで, 静止系における電気量を $\rho_0 dV_0$ とし, 電気量は運動速度により変化しない, すなわち, どの慣性系においても不変であるとする

$$\rho dV = \rho_0 dV_0$$

である。このとき、運動方向のローレンツ短縮により体積要素に関して

$$dV = \lambda(\beta)^{-1} dV_0$$

であり、上2式より $\rho = \rho_0 \lambda(\beta)$ が得られるので

$$(j^0, j^1, j^2, j^3) = (c\rho, j^1, j^2, j^3) = \rho_0 (c\lambda(\beta), \mathbf{u}\lambda(\beta)) \quad (10)$$

を得る。つまり、 (j^0, j^1, j^2, j^3) はミンコフスキー空間の（電流密度）ベクトルである。ただし、光速を c 、慣性系の運動速度を v として

$$\lambda(\beta) \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

である。

このとき、連続の方程式 (8) は

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial (c\rho)}{\partial (ct)} = \frac{\partial j^0}{\partial x^0}$$

であることに注意すれば

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial j^1}{\partial x^1} + \frac{\partial j^2}{\partial x^2} + \frac{\partial j^3}{\partial x^3} = \frac{\partial j^\mu}{\partial x^\mu} = 0 \quad (11)$$

と書けることが分かる。上式より、(10) の4次元電流ベクトル \mathbf{j} はミンコフスキー空間のローレンツ不変式である。(11) よりまた、 $\frac{\partial}{\partial x^\mu}$ は共変ベクトルであるから、 \mathbf{j} はミンコフスキー空間の反変ベクトルであることも分かる。

4.2 ベクトルポテンシャルの導入

さて、 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ならば、あるベクトル $\mathbf{A} = (A_1, A_2, A_3)$ (ベクトルポテンシャル) が存在して $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ と表すことができる。これより、1-形式 $A_i dx^i$ と2-形式 ω を以下のように導入する。磁束密度を $\mathbf{B} = (B^1, B^2, B^3)$ とすると

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \frac{\partial B^k}{\partial x^k} = 0 \quad (12)$$

は微分形式を用いると3-形式により

$$dB^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + dB^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + dB^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 = 0$$

と表すことができる。実際

$$\begin{aligned} & dB^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + dB^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + dB^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \\ &= \frac{\partial B^1}{\partial x^i} dx^i \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial B^2}{\partial x^i} dx^i \wedge dx^3 \wedge dx^1 + \frac{\partial B^3}{\partial x^i} dx^i \wedge dx^1 \wedge dx^2 \\ &= \frac{\partial B^1}{\partial x^1} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial B^2}{\partial x^2} dx^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + \frac{\partial B^3}{\partial x^3} dx^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \\ &= \frac{\partial B^i}{\partial x^i} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

より

$$\frac{\partial B^i}{\partial x^i} = 0$$

を得るからである。

また、(13) より

$$\begin{aligned} & d(B^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + B^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + B^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2) \\ &= dB^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + dB^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + dB^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 = 0 \end{aligned}$$

を得るので,

$$\omega = B^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + B^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + B^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \quad (14)$$

おけば

$$d\omega = 0 \quad (15)$$

を得る. すなわち, ω は閉形式であるので, ポアンカレの補題より, 局所的に 1-形式 $A_i dx^i$ が存在して

$$\omega = d(A_i dx^i)$$

と書くことができる. このとき, (14), (15) より $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ が成立している.

さて, 上式を 4次元に拡張して

$$\omega \equiv d(A_\mu dx^\mu) = d(A_0 dx^0 + A_1 dx^1 + A_2 dx^2 + A_3 dx^3) \quad (16)$$

と定義する. ここで, 添字がアルファベット i からギリシャ文字 μ に変更されたのは, 添字の範囲が 1, 2, 3 から 0, 1, 2, 3 となったからである.

4.3 マクスウェル方程式の 4次元定式化

4次元定式化にあたり電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B} も, ベクトルポテンシャルと同様に, 4次元に拡張する. 4次元の電場 \mathbf{E} と磁場 \mathbf{B}

$$\mathbf{E} = (E_0, E_1, E_2, E_3), \quad \mathbf{B} = (B^0, B^1, B^2, B^3)$$

とおく.

4.3.1 マクスウェル方程式の第 2 式の微分形式による表現

(16) の外微分を実行し, 空間成分と時間成分を分けて書くと

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} dx^\mu \wedge dx^\nu \\ &= \frac{\partial A_j}{\partial x^i} dx^i \wedge dx^j + \frac{\partial A_0}{\partial x^i} dx^i \wedge dx^0 + \frac{\partial A_i}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^i \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial A_j}{\partial x^i} - \frac{\partial A_i}{\partial x^j} \right) dx^i \wedge dx^j + \left(\frac{\partial A_i}{\partial x^0} - \frac{\partial A_0}{\partial x^i} \right) dx^0 \wedge dx^i. \end{aligned} \quad (17)$$

式を簡単にするために

$$F_{\mu\nu} \equiv -F_{\nu\mu} = \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} - \frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu} \quad (18)$$

とおく. このとき (17) は

$$\omega = \frac{1}{2} F_{ij} dx^i \wedge dx^j + F_{0i} dx^0 \wedge dx^i \quad (19)$$

と書ける. (16) より ω は閉形式 ($d\omega = 0$) であるので

$$\begin{aligned} d\omega &= \frac{1}{2} dF_{ij} \wedge dx^i \wedge dx^j + dF_{0i} \wedge dx^0 \wedge dx^i \\ &= \frac{1}{2} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^k} dx^k \wedge dx^i \wedge dx^j + \frac{1}{2} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^i \wedge dx^j + \frac{\partial F_{0i}}{\partial x^j} dx^j \wedge dx^0 \wedge dx^i \equiv 0. \end{aligned} \quad (20)$$

ここで, dx^μ 同士の反可換性

$$dx^\mu \wedge dx^\nu = \begin{cases} -dx^\nu \wedge dx^\mu & \mu \neq \nu \\ 0 & \mu = \nu \end{cases}$$

を用いて (20) を整理すると

$$d\omega = \frac{1}{2} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^k} dx^i \wedge dx^j \wedge dx^k + \left(\frac{1}{2} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{0i}}{\partial x^j} \right) dx^0 \wedge dx^i \wedge dx^j = 0. \quad (21)$$

ここで, (i, j, k) は $(1, 2, 3)$ から偶置換により得られるものを表す.

実は, 上式 (21) は, マクスウェル方程式 (2) の 2 つの式の微分形式による 4 次元定式化に他ならないことを示す. (21) は恒等的に 0 であり, $dx^i \wedge dx^j \wedge dx^k$ と $dx^0 \wedge dx^i \wedge dx^j$ は線形独立であるので, 上式の第 1 項と第 2 項はともに 0 でなければならない.

$$\frac{\partial F_{ij}}{\partial x^k} dx^i \wedge dx^j \wedge dx^k = 0, \quad (22)$$

$$\left(\frac{1}{2} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{0i}}{\partial x^j} \right) dx^0 \wedge dx^i \wedge dx^j = 0. \quad (23)$$

また, 3 次元マクスウェル方程式 (2) の第 1 式より

$$B^i = \frac{\partial A_k}{\partial x^j} - \frac{\partial A_j}{\partial x^k} = F_{jk} \quad (24)$$

である.

このとき, (22) はマクスウェル方程式 (2) の第 1 式である. 実際, 3-形式の i, j, k はすべて異なり $1, 2, 3$ のいずれかであり, しかも 3-形式は完全に反対称であるから, 上式と $F_{\mu\nu}$ の定義式 (18) より

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^k} dx^i \wedge dx^j \wedge dx^k \\ &= \frac{\partial F_{12}}{\partial x^3} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{13}}{\partial x^2} dx^1 \wedge dx^3 \wedge dx^2 \\ &+ \frac{\partial F_{21}}{\partial x^3} dx^2 \wedge dx^1 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{23}}{\partial x^1} dx^2 \wedge dx^3 \wedge dx^1 \\ &+ \frac{\partial F_{31}}{\partial x^2} dx^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \frac{\partial F_{32}}{\partial x^1} dx^3 \wedge dx^2 \wedge dx^1 \\ &= 2 \frac{\partial B^i}{\partial x^i} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 = 0 \end{aligned}$$

すなわち

$$\frac{\partial B^i}{\partial x^i} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (25)$$

を得るからである.

次に, (23) はマクスウェル方程式 (2) の第 2 式に対応することを示す. (23) の第 1 項は ($x^0 \equiv ct$ であったことに注意)

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^i \wedge dx^j \\ &= \frac{\partial F_{12}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \frac{\partial F_{23}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{31}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^3 \wedge dx^1 \\ &= \frac{1}{c} \left(\frac{\partial B^3}{\partial t} dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \frac{\partial B^1}{\partial t} dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial B^2}{\partial t} dx^0 \wedge dx^3 \wedge dx^1 \right). \end{aligned} \quad (26)$$

(23) の第 2 項は

$$E_i \equiv cF_{i0} = -cF_{0i} \quad (27)$$

とおくと ((39) 参照)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F_{0i}}{\partial x^j} dx^0 \wedge dx^i \wedge dx^j \\ &= \frac{\partial F_{01}}{\partial x^2} dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 + \frac{\partial F_{02}}{\partial x^1} dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^1 \\ &+ \frac{\partial F_{02}}{\partial x^3} dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{03}}{\partial x^2} dx^0 \wedge dx^3 \wedge dx^2 \\ &+ \frac{\partial F_{03}}{\partial x^1} dx^0 \wedge dx^3 \wedge dx^1 + \frac{\partial F_{01}}{\partial x^3} dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 \\ &= \frac{1}{c} \left(\frac{\partial E_2}{\partial x^1} - \frac{E_1}{\partial x^2} \right) dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^1 + \frac{1}{c} \left(\frac{E_3}{\partial x^2} - \frac{\partial E_2}{\partial x^3} \right) dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &+ \frac{1}{c} \left(\frac{\partial E_1}{\partial x^3} - \frac{\partial E_3}{\partial x^1} \right) dx^0 \wedge dx^3 \wedge dx^1. \end{aligned} \quad (28)$$

よって、(26) と (28) より

$$\left(\frac{E_k}{\partial x^j} - \frac{\partial E_j}{\partial x^k} \right) + \frac{\partial B^i}{\partial t} = 0, \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (29)$$

となり、確かにマクスウェル方程式 (2) の第 2 式を得る。

以上のように、(21) よりマクスウェル方程式 (2) の 2 つの式 (25), (29) が得られたので、微分形式 ω を用いてマクスウェル方程式 (2) の 2 つの式は 4 次元定式化され (21), すなわち (6) で表すことができることが示された。

4.3.2 マクスウェル方程式の第 1 式の微分形式による表現

マクスウェル方程式 (1) の 2 つの式が 1 つの式にまとめられ (5) のように 4 次元定式化できることを示せば、本文のマクスウェルの方程式の 4 次元定式化は完了する。これを次の 2 段階に分けて示す。

第 1 段階：マクスウェル方程式 (1) は以下のように (34) と書ける。

マクスウェル方程式 (1) の第 1 式の $\nabla \cdot \mathbf{D}$ の第 i 成分は、(27) より

$$(\nabla \cdot \mathbf{D})^i = \varepsilon_0 \frac{\partial E_i}{\partial x^i} = -c\varepsilon_0 \frac{\partial F_{0i}}{\partial x^i} = \rho = \frac{1}{c} j^0 \quad (i \text{ について和をとらない})$$

と書ける。 $c\varepsilon_0$ で割ると、 $\mu_0\varepsilon_0 = c^{-2}$ であったので

$$\therefore -\frac{\partial F_{0i}}{\partial x^i} = \mu_0 j^0 \quad (30)$$

を得る。

続いて、マクスウェル方程式 (1) の第 2 式について考える。(18) より

$$F_{ij} = -F_{ji} = \frac{\partial A_j}{\partial x^i} - \frac{\partial A_i}{\partial x^j} = B^k$$

であるので、左辺の第 1 項 $\nabla \times \mathbf{H}$ の第 i 成分は、

$$\begin{aligned} (\nabla \times \mathbf{H})^i &= \frac{\partial H^k}{\partial x^j} - \frac{\partial H^j}{\partial x^k} = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial B^k}{\partial x^j} - \frac{\partial B^j}{\partial x^k} \right) \\ &= \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} - \frac{\partial F_{ki}}{\partial x^k} \right) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} + \frac{\partial F_{ik}}{\partial x^k} \right) \quad (j, k \text{ について和をとらない}) \end{aligned}$$

となる。ところが、定義より

$$F_{ii} = 0$$

であるので、 $\nabla \times \mathbf{H}$ の第 i 成分は

$$\begin{aligned} (\nabla \times \mathbf{H})^i &= \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\partial F_{ii}}{\partial x^i} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} + \frac{\partial F_{ik}}{\partial x^k} \right) \quad (i, j, k \text{ について和をとらない}) \\ &= \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} \left(= \frac{1}{\mu_0} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} \right) \end{aligned} \quad (31)$$

と表すことができる。

また、マクスウェル方程式 (1) の第 2 式左辺第 2 項 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ の第 i 成分は、(27) より

$$\left(\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right)^i = c\varepsilon_0 \frac{\partial E_i}{\partial x^0} = c^2\varepsilon_0 \frac{\partial F_{i0}}{\partial x^0} \quad (32)$$

となる。

よって (31), (32) より、マクスウェル方程式 (1) の第 2 式 (第 i 成分) に関しては次式が成立する。

$$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} - c^2\varepsilon_0 \frac{\partial F_{i0}}{\partial x^0} = j^i$$

上式に μ_0 を乗ずると, $\mu_0 \varepsilon_0 = c^{-2}$ であるから

$$\therefore -\frac{\partial F_{i0}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} = \mu_0 j^i \quad (33)$$

を得る.

(30), (33) をまとめると, マクスウェル方程式 (1) は

$$-\frac{\partial F_{0i}}{\partial x^i} = \mu_0 j^0, \quad -\frac{\partial F_{i0}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j} = \mu_0 j^i \quad (34)$$

と書ける (実は, これらの2式は1つの式で表すことができる (5の(40)参照)).

第2段階: さらに (34) は (5) と書ける.

(19) より

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{2} \sum_{ij} F_{ij} dx^i \wedge dx^j + \sum_i F_{0i} dx^0 \wedge dx^i = \sum_{i < j} F_{ij} dx^i \wedge dx^j + \sum_i F_{0i} dx^0 \wedge dx^i \\ &= F_{12} dx^1 \wedge dx^2 + F_{23} dx^2 \wedge dx^3 + F_{13} dx^1 \wedge dx^3 \\ &\quad + F_{01} dx^0 \wedge dx^1 + F_{02} dx^0 \wedge dx^2 + F_{03} dx^0 \wedge dx^3 \end{aligned}$$

となるので, 両辺にホッジの星印作用素 $*$ を施すと (2),(5)

$$\begin{aligned} *\omega &= *(F_{12} dx^1 \wedge dx^2) + *(F_{23} dx^2 \wedge dx^3) + *(F_{31} dx^3 \wedge dx^1) \\ &\quad + *(F_{01} dx^0 \wedge dx^1) + *(F_{02} dx^0 \wedge dx^2) + *(F_{03} dx^0 \wedge dx^3) \\ &= F^{12} dx^0 \wedge dx^3 + F^{23} dx^0 \wedge dx^1 + F^{31} dx^0 \wedge dx^2 \\ &\quad + F^{01} dx^2 \wedge dx^3 - F^{02} dx^1 \wedge dx^3 + F^{03} dx^1 \wedge dx^2 \\ &= F_{12} dx^0 \wedge dx^3 + F_{23} dx^0 \wedge dx^1 + F_{31} dx^0 \wedge dx^2 \\ &\quad - F_{01} dx^2 \wedge dx^3 + F_{02} dx^1 \wedge dx^3 - F_{03} dx^1 \wedge dx^2 \end{aligned} \quad (35)$$

となる ((39)参照). さらに, 上式に外微分を施すと

$$\begin{aligned} d*\omega &= dF_{12} dx^0 \wedge dx^3 + dF_{23} dx^0 \wedge dx^1 + dF_{31} dx^0 \wedge dx^2 \\ &\quad - dF_{01} dx^2 \wedge dx^3 + dF_{02} dx^1 \wedge dx^3 - dF_{03} dx^1 \wedge dx^2 \\ &= \frac{\partial F_{12}}{\partial x^1} dx^1 \wedge dx^0 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{12}}{\partial x^2} dx^2 \wedge dx^0 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{23}}{\partial x^2} dx^2 \wedge dx^0 \wedge dx^1 + \frac{\partial F_{23}}{\partial x^3} dx^3 \wedge dx^0 \wedge dx^1 \\ &\quad + \frac{\partial F_{31}}{\partial x^3} dx^3 \wedge dx^0 \wedge dx^2 + \frac{\partial F_{31}}{\partial x^1} dx^1 \wedge dx^0 \wedge dx^2 - \frac{\partial F_{01}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 - \frac{\partial F_{01}}{\partial x^1} dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &\quad + \frac{\partial F_{02}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 + \frac{\partial F_{02}}{\partial x^2} dx^2 \wedge dx^1 \wedge dx^3 - \frac{\partial F_{03}}{\partial x^0} dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 - \frac{\partial F_{03}}{\partial x^3} dx^3 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \\ &= - \left(\frac{\partial F_{01}}{\partial x^1} + \frac{\partial F_{02}}{\partial x^2} + \frac{\partial F_{03}}{\partial x^3} \right) dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 - \left(-\frac{\partial F_{10}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{12}}{\partial x^2} + \frac{\partial F_{13}}{\partial x^3} \right) dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 \\ &\quad + \left(-\frac{\partial F_{20}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{21}}{\partial x^1} + \frac{\partial F_{23}}{\partial x^3} \right) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 - \left(-\frac{\partial F_{30}}{\partial x^0} + \frac{\partial F_{31}}{\partial x^1} + \frac{\partial F_{32}}{\partial x^2} \right) dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \end{aligned} \quad (36)$$

また

$$\begin{aligned} \mu_0 *j &= \mu_0 j^0 dx^1 \wedge dx^2 \wedge dx^3 - \mu_0 j^1 dx^0 \wedge dx^2 \wedge dx^3 + \mu_0 j^2 dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^3 - \mu_0 j^3 dx^0 \wedge dx^1 \wedge dx^2 \end{aligned} \quad (37)$$

である. ここで (34), (18) より

$$\mu_0 j^0 = -\frac{\partial F_{0i}}{\partial x^i}, \quad \mu_0 j^i = -\frac{\partial F_{i0}}{\partial x^i} + \frac{\partial F_{ij}}{\partial x^j}, \quad F_{ii} = 0$$

であったことに注意すれば, (36), (37) より

$$d * \omega = \mu_0 * \boldsymbol{j}$$

を得る.

以上により, マクスウェル方程式 (1) の 2 つの式は微分形式 ω を用いて (5) により表すことができることが示された.

5 ミンコフスキー空間の計量, ベクトル, テンソル

マクスウェル方程式 (1) と (2) の 4 次元定式化はそれぞれ (5), (6) となることは示されたが, A_μ は共変ベクトル, $F_{\mu\nu}$ は 2 階の共変テンソル, $F^{\mu\nu}$ は 2 階の反変テンソルであることはまだ示されていないので, これを以下に示す.

ベクトルとテンソルの添字については, 反変成分に関しては上添字を, また共変成分に対しては下添字を (慣例にしたがい) 用いた. またミンコフスキー空間の計量テンソルは

$$\eta_{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$$

としたので, 時間成分の添字の上げ下げは符号が変わらず, 空間成分のみ添字の上げ下げで符号が変わる.

$$j_\mu = \eta_{\mu\lambda} j^\lambda, \quad F_{\mu\nu} = \eta_{\mu\lambda} \eta_{\nu\rho} F^{\lambda\rho}. \quad (38)$$

例えば

$$F_{i0} = -F^{i0}, \quad F_{ij} = F^{ij} \quad (39)$$

等が成り立つ.

以上より, (34) は (39) により上添字の $F^{\mu\nu}$ を用いて書き直すと

$$\frac{\partial F^{0i}}{\partial x^i} = \mu_0 j^0, \quad \frac{\partial F^{i0}}{\partial x^0} + \frac{\partial F^{ij}}{\partial x^j} = \mu_0 j^i$$

となるが, 上式はまとめて 1 つの式

$$\frac{\partial F^{\lambda\mu}}{\partial x^\mu} = \mu_0 j^\lambda \quad (40)$$

で書くことができる. 結局, (34) の 2 つの式は (40) に集約できる.

ところが, 4.1 で示したように, 方程式 (40) の右辺

$$\boldsymbol{j} = (j^0, j^1, j^2, j^3)$$

ミンコフスキー空間の 4 次元電流で, 反変ベクトルであるから, 方程式の共変性から (40) の左辺も 4 次元反変ベクトルでなければならない. よって, $F^{\mu\nu}$ は 2 階の反変テンソルであることが分かり, また $F_{\mu\nu}$ は (38) より 2 階の共変テンソルであることも得られる. さらに (18) より A_μ は 4 次元共変ベクトルであることも分かる.

6 おわりに

本文では, マクスウェルの方程式の 4 次元定式化 (2) を (テンソルの) 添字の順序とその符号 (± 1) を表す記号

$$\varepsilon_{ijk} = \begin{cases} +1 & (ijk) \text{ が } (123) \text{ の偶置換の場合} \\ -1 & (ijk) \text{ が } (123) \text{ の奇置換の場合} \\ 0 & (ijk) \text{ に同じものがある場合} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{ijk} = -\varepsilon^{ijk}, \quad \varepsilon_{123} = -\varepsilon^{123} = 1$$

および添字の上げ下げを導入せず解説したものである. ε_{ijk} 等を導入しなかった理由は, 考察する空間は 4 次元であり, 具体的に成分を計算してもそれほど煩雑にならないからである. 符号を決定する ε_{ijk} を用

いた巧妙簡潔な式表現より，具体的，明示的に示された結果の方が明らかに理解しやすいからである．また，ベクトルとテンソルの型を 5 までは固定し，基本的に添字の上げ下げをしなかったのも同様の理由による．そのため微分形式の変形，特に $dx^\mu \wedge dx^\nu \wedge \dots$ 等の展開と順序交換に関する記述は詳細に示した．

参考文献

- (1) 和達三樹：理工系の基礎数学 10 「微分・位相幾何」 岩波書店，(2005)
- (2) 菅野礼司：「微分形式による特殊相対論」 丸善，(1996)
- (3) 石川雄二郎，杉山儀：「微分形式による数値電磁界解析」 愛知工科大学紀要 第 4 巻，(2007)
- (4) 守末利弥：「数値電磁気学のためのゲージ理論」 森北出版，(1996)
- (5) フランダース：「微分形式の理論」 岩波書店，(2003)

単一正弦波の交流理論 再考

石川雄二郎¹

(2009年9月30日受理)

Reconsideration on Sinusoidal AC-circuit Theory Derived from Maxwell Equations

Yujiro Ishikawa¹

(Received September 30, 2009)

Abstract

This paper reconsiders sinusoidal AC-circuit theory, especially the basic principles of its computation methods. The lecture of sinusoidal AC-circuit theory usually precedes using complex number calculation in Gaussian complex plane. These computation methods are very simple and clear. So, many students could master how to solve various kinds of sinusoidal AC-circuit problems. But, where those calculation principles are derived from might not deeply lectured. So, this paper tries to derive AC-circuit theory from Maxwell equations.

キーワード：正弦波，交流理論，マクスウェル方程式

Keywords：Sinusoidal wave, AC-circuit theory, Maxwell equations

1 はじめに

本文では電気回路の一部として講義される単一（周波数）正弦波の交流理論を，以下では，単に交流理論とよぶ．この交流理論の計算手順は極めて明快であるが，何故そのように計算可能なかは十分講義されないことも多い．特に，複素数値で表されるインピーダンス，電流，電圧が表現している内容は何か？また，複素数（ガウス平面）で表現・計算する利便性の根拠はどこにあるのか？等は一度は精査しなければならない事項と思われるので本文にて考察する．

2 単一正弦波の交流理論

抵抗値 R [Ω] の抵抗（器），インダクタンス L [H] のコイル，キャパシタンス C [F] のコンデンサが直列に接続された $R-L-C$ 直列（接続）回路を考える．この回路の両端電圧 v [V] は，4 にてマクスウェル方程式から導出される (34) より

$$v = v_R + v_L + v_C = Ri + \frac{d}{dt}(Li) + \int \left(\frac{1}{C}i\right) dt \quad (1)$$

で計算することができる．ここで， v_R [V] は抵抗の両端電圧， v_L [V] はコイルの両端電圧， v_C [V] はコンデンサの両端電圧である．この方程式の電流 i は，微分・積分可能であれば，任意の信号波形でよい．

そして，(1) において電流 i [A] を一般波形ではなく単一正弦波に制限して論議するのが交流理論である．考察する交流回路に流れる電流 i [A] の（交流）周波数を f [Hz] とする．

このとき，よく知られたオーム法則

$$v_R = Ri$$

は交流理論においても成立する．コイルの（複素）インピーダンスを Z_L [Ω] すれば

$$Z_L = j\omega L, \quad v_L = Z_L i = j\omega Li \quad (\omega = 2\pi f)$$

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, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047

また、コンデンサの（複素）インピーダンスを $Z_C [\Omega]$ とすれば

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}, \quad v_C = Z_C i = \frac{1}{j\omega C} i \quad (\omega = 2\pi f)$$

が成立するとして、諸元を計算するのが交流理論である。例えば、 $R-L-C$ 直列（接続）回路の両端に発生する電圧 v [V] は公式

$$v = v_R + v_L + v_C = Ri + j\omega Li + \frac{1}{j\omega C} i \quad (2)$$

により計算する。(2) は交流理論の基本公式であり、この公式さえ認めてしまえば、以降の大半の交流理論は単なる複素数の計算により処理できる。(2) は複素数を用いて、微分・積分演算の煩雑な計算を、代数計算に置き換える巧妙な表現であることを最初に示す。

まず、時不変・線形な $R-L-C$ 直列回路の場合は、**4** にて導出する (33), (29) は

$$v_L = \frac{d}{dt}(Li) = L \frac{d}{dt} i, \quad v_C = \int \left(\frac{1}{C} i \right) dt = \frac{1}{C} \int i dt$$

と簡単になり

$$v = v_R + v_L + v_C = Ri + L \frac{d}{dt} i + \frac{1}{C} \int i dt \quad (3)$$

となることに注意する。

さて、交流理論で扱う電流あるいは電圧は、すべて単一（周波数）正弦波である。このとき、電流 i が単一正弦波であれば (3) により計算される電圧 v も、振幅と位相は変化するが、同一周波数の正弦波であることは保たれる。すなわち、単一正弦波の微分量あるいは積分量も依然として同一周波数の正弦波である。この性質に着目して、 $\sin\omega t, \cos\omega t$ の代わりに $e^{j\omega t}$ を利用すれば、複雑な微分・積分演算は以下のように簡単な代数演算になり、 v の計算が容易に実行できるようになる。

$e^{j\omega t}$ の次の性質 (4)~(6) が重要である。複素数の実部と虚部を取り出す関数をそれぞれ Re と Im とするとき、単一正弦波は一般性を失うことなく

$$\cos\omega t = \text{Re}[e^{j\omega t}], \quad \sin\omega t = \text{Im}[e^{j\omega t}] \quad (4)$$

と書け、しかもその微分・積分演算と Re と Im の順序は交換可能である。すなわち

$$\text{Re}\left[\frac{d}{dt} e^{j\omega t}\right] = \frac{d}{dt} \text{Re}[e^{j\omega t}], \quad \text{Im}\left[\frac{d}{dt} e^{j\omega t}\right] = \frac{d}{dt} \text{Im}[e^{j\omega t}] \quad (5)$$

$$\text{Re}\left[\int e^{j\omega t} dt\right] = \int \text{Re}[e^{j\omega t}] dt, \quad \text{Im}\left[\int e^{j\omega t} dt\right] = \int \text{Im}[e^{j\omega t}] dt \quad (6)$$

が成立する。実際

$$\begin{aligned} \text{Re}\left[\frac{d}{dt} e^{j\omega t}\right] &= \text{Re}[j\omega e^{j\omega t}] = \text{Re}[j\omega (\cos\omega t + j\sin\omega t)] = -\omega \sin\omega t = \frac{d}{dt} \cos\omega t \\ &= \frac{d}{dt} \text{Re}[e^{j\omega t}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Re}\left[\int e^{j\omega t} dt\right] &= \text{Re}\left[\frac{1}{j\omega} e^{j\omega t}\right] = \text{Re}\left[\frac{1}{j\omega} (\cos\omega t + j\sin\omega t)\right] = \frac{1}{\omega} \sin\omega t = \int \cos\omega t dt \\ &= \int \text{Re}[e^{j\omega t}] dt \end{aligned}$$

等が成立する。

性質 (4)~(6) により、単一正弦波（時不変・線形回路を考察しているのだから、単一正弦波の振幅は 1、位相は 0 としても一般性は失われない）に対する (2) の計算は

- (a) 電流 $i = e^{j\omega t}$ とおく
- (b) 微分・積分演算は $e^{j\omega t}$ の関して実行する。

$$\frac{d}{dt}i = \frac{d}{dt}e^{j\omega t} = j\omega e^{j\omega t}, \quad \int idt = \int e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega} e^{j\omega t}$$

(c) 電圧 v は計算結果の Re あるいは Im をとる.

の手順により簡潔にできる. すなわち, 微分演算は $j\omega$ を掛け, 積分演算は $\frac{1}{j\omega}$ を掛ける代数演算で (簡単に) 代用し, すべての演算が終了した結果の Re あるいは Im のどちらかを取り出す計算法でよい. ここで, Re あるいは Im のどちらを作用させるかは, (4) において $i = \cos\omega t$ あるいは $i = \sin\omega t$ と設定しているかにより, それぞれ Re あるいは Im とすればよい.

この指針に基づき $i = \cos\omega t$ の場合に, (3) により $R-L-C$ 直列回路の両端電圧 v を実際に計算する.

$$\begin{aligned} v &= Ri + L\frac{d}{dt}i + \frac{1}{C}\int idt = Re^{j\omega t} + L\frac{d}{dt}e^{j\omega t} + \frac{1}{C}\int e^{j\omega t} dt \\ &= Re^{j\omega t} + j\omega Le^{j\omega t} + \frac{1}{j\omega C}e^{j\omega t} = Re^{j\omega t} + e^{j\pi/2}\omega Le^{j\omega t} + e^{-j\pi/2}\frac{1}{\omega C}e^{j\omega t} \\ &= Re^{j\omega t} + \omega Le^{j(\omega t + \pi/2)} + \frac{1}{\omega C}e^{j(\omega t - \pi/2)} \end{aligned}$$

となる. いま, $\cos\omega t = \text{Re}[e^{j\omega t}]$ としているので, 計算結果の Re を取り出し

$$\begin{aligned} v &= \text{Re} \left[Re^{j\omega t} + \omega Le^{j(\omega t + \pi/2)} + \frac{1}{\omega C}e^{j(\omega t - \pi/2)} \right] \\ &= R\cos\omega t + \omega L\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{\omega C}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

とすればよい. そして, この (7) が (2) の示す内容であり, 両式の比較より $i = \cos\omega t$ の場合

$$Ri \leftrightarrow R\cos\omega t, \quad j\omega Li \leftrightarrow \omega L\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad \frac{1}{j\omega C}i \leftrightarrow \frac{1}{\omega C}\cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (8)$$

であることが分かる.

例えば $R-L$ 直列回路の場合, $i = \cos\omega t$ に対し

$$v = Ri + j\omega Li \quad (9)$$

は (8) より

$$v = R\cos\omega t + \omega L\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

を意味するので, 三角関数の合成公式より

$$\begin{aligned} v &= R\cos\omega t + \omega L\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = R\cos\omega t - \omega L\sin\omega t \\ &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}\cos(\omega t + \phi), \quad \tan\phi = \frac{\omega L}{R} \end{aligned} \quad (10)$$

となる. これは (9) より図 1(a) のようにベクトル図を作成する根拠である.

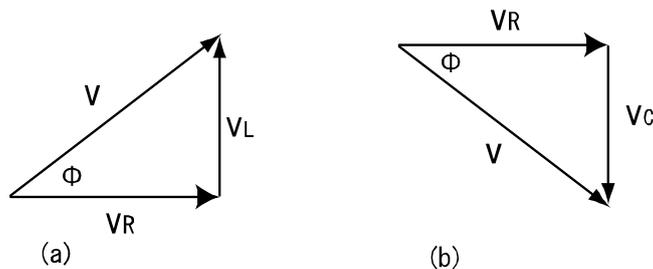


図 1: (a) $R-L$ 直列回路のベクトル図, (b) $R-C$ 直列回路のベクトル図

同様に $R - C$ 直列回路の場合, $i = \cos \omega t$ に対し

$$v = Ri + \frac{1}{\omega C} i \quad (11)$$

は (8) より

$$v = R \cos \omega t + \frac{1}{\omega C} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

を意味するので, 三角関数の合成公式より

$$\begin{aligned} v &= R \cos \omega t + \frac{1}{\omega C} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = R \cos \omega t + \frac{1}{\omega C} \sin \omega t \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2} \cos(\omega t - \phi), \quad \tan \phi = \frac{1}{\omega C R} \end{aligned} \quad (12)$$

を得る. これが (11) より図 1(b) のようにベクトル図を作成できる根拠である.

このように, (2) を認めれば交流理論の大半は複素数の計算で処理できることが分かる. 以上は (1) を基本に $R - L - C$ 回路の交流理論を展開したので, “すべての電磁気現象の基本方程式であるマクスウェル方程式“ より (1) を導出すれば, 交流理論の基礎が確立されたことになる.

3 マクスウェル方程式 (微分形から積分形へ)

マクスウェル方程式 (微分形) は電磁気学の教科書によれば次の 4 式である.

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (15)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (16)$$

第 1 式はファラデーの電磁誘導の法則, 第 2 式は電流の磁気作用アンペールの法則, 第 3 式はクーロンの法則, 第 4 式は磁化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ている. ここで, \mathbf{E} は電場, \mathbf{H} は磁場, \mathbf{B} は磁束密度, \mathbf{D} は電束密度, \mathbf{J} は電流密度, ρ は電荷密度である.

これらの微分形のマクスウェル方程式を
ガウスの定理

$$\int_V \nabla \cdot \mathbf{A} dV = \int_S \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS$$

ストークスの定理

$$\int_S \nabla \times \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

を用いて積分形に書き直すと次の 4 式となる.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (17)$$

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} - \int_S \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (18)$$

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS - \int_V \rho dV = 0 \quad (19)$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = 0. \quad (20)$$

ここで, これら積分形の方程式において, V, S, C はそれぞれ考察している領域の体積, 面積, 周囲を, \mathbf{n} は面の単位法線を, $dV, dS, d\mathbf{l}$ はそれぞれ体積要素, 面積要素, 線要素接ベクトルを表す.

ほかに, 物質の基本的性質を表現する構成方程式があり, 上の諸量の間関係を表す. すなわち導体内において

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (21)$$

誘電体内において

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (22)$$

磁性体内において

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (23)$$

が成り立つ。ここで、 σ は導電率、 ϵ は誘電率、 μ は透磁率を表す。

4 マクスウェル方程式（積分形）から $R-L-C$ 直列回路の基本方程式の導出

本節ではマクスウェル方程式の積分形から $R-L-C$ 直列回路の基本方程式 (1) を導出する。電圧、電流を定義し、抵抗、キャパシタンス、インダクタンス、それぞれの両端電圧の計算式を求める。

4.1 電圧

曲線 C に沿った 2 端点間の電圧（電位差） v_C は

$$v_C \equiv \int_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (24)$$

で定義される。

4.2 電流

（断）面 S を流れる電流 i は

$$i \equiv \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \quad (25)$$

で定義される。

4.3 抵抗

抵抗の場合、基本的な性質は (21) である。実際、 \mathbf{J} が断面 S 、長さ l の円筒形抵抗素子内に一様に分布しているとすれば

$$i = JS \quad (J = |\mathbf{J}|) \quad (26)$$

となるので、(24) より

$$E = \frac{v_R}{l} \quad (E = |\mathbf{E}|)$$

を得る。このとき上式より、(21) は

$$J = \sigma E = \sigma \frac{v_R}{l} \quad (27)$$

となるので、(26) は

$$i = JS = \frac{\sigma S}{l} v_R$$

すなわち（オームの法則）

$$v_R = Ri, \quad R \equiv \frac{l}{\sigma S} \quad (28)$$

を表す。こうして集中定数回路の抵抗モデルが導かれる。

4.4 キャパシタンス

キャパシタンスの場合、基本的な性質は (22) である。実際、面積 S 、平行極板間距離 l の平行板コンデンサを考えると、アンペアの法則 (18)（磁気効果は無視する）より

$$i = \int \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS = -\frac{d}{dt} (\epsilon \int \mathbf{E} \cdot \mathbf{n} dS) = \frac{d}{dt} \left(\epsilon \frac{v_C}{l} S \right)$$

となるので

$$v_C = \int \left(\frac{1}{C} i \right) dt, \quad C \equiv \frac{\epsilon S}{l} \quad (29)$$

を得る。こうして集中定数回路のキャパシタンスのモデルが導かれる。

4.5 インダクタンス

インダクタンスの場合、基本的な関係は (23) である。実際、面積 S 、周囲 $C = \partial S$ の 1 巻きコイルの場合、ファラデーの電磁誘導の法則 (17)

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$

および電圧の定義

$$v_L = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$$

より

$$v_L = -\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = \frac{d}{dt} \Phi \quad (30)$$

となる。ここで

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$

は 1 巻きコイルを貫く総磁束数である。いま、アンペアの法則 (18) (変位電流は無視する)

$$i = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS = \oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$$

より

$$L \equiv \frac{\Phi}{i} = \frac{\int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS}{\oint \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}} \quad (31)$$

と定義すれば、(30), (31) より

$$v_L = \frac{d}{dt} (Li) \quad (32)$$

を得る。

一般に、インダクタンスの値 L は形状、透磁率、電流の複雑な関数となる。この場合も、磁束

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS$$

と電流 i より

$$L \equiv \frac{\Phi}{i}$$

と定義する。これらの式から、1 巻きコイルの場合と同様

$$v_L = \frac{d}{dt} (Li) \quad (33)$$

が得られる。このとき、電流 i は (閉じていない) 曲面 S の周囲を流れる正味の電流である。こうして集中定数回路のインダクタンスのモデルが導かれる。

4.6 $R-L-C$ 直列回路の両端電圧

以上まとめると、 $R-L-C$ 直列回路の両端電圧 v は、(28), (33), (29) より

$$v = v = v_R + v_L + v_C = Ri + \frac{d}{dt} (Li) + \int \left(\frac{1}{C} i \right) dt \quad (34)$$

により計算できる。

5 おわりに

交流理論の講義は (2) の根拠をどこまで掘り下げるかが、その理解の重要なポイントとなる。例えば、(2) を公式として採用してしまえば、以降の交流理論の講義内容の大半は抽象的な複素数計算が主となる。し

かし，その計算法の正当性に対して深く考察することは省いて，計算手順オリエンテッドな講義内容となることが一般的である．もちろん，限られた時間内で決められた範囲の講義を終了するには，どこまで掘り下げるべきかは，電気回路に限らずほとんど教員が悩む問題である．交流理論に関しても同様で，どこまで掘り下げるべきかは問題であるが，本文では“全ての（古典的）電磁気現象はマクスウェル方程式により記述できる“事実よりマクスウェル方程式を出発点とした交流理論を展開した．

参考文献

- (1) Ronald A. Roher：「回路理論－状態変数解析入門－」学献社，(1973)
- (2) 安居院猛，吉村和昭，倉持内武：「エッセンシャル電気回路」オーム社，(2006)

報告

新エネルギー利用による温室用エネルギー削減の研究

橋本孝明*, 井上久弘**, 山本照美**, 永田英雄*, 鈴木宏和*
竹内嗣昇*, 尾崎 勝**, 浅野由久**, 坂田栄太郎**

(2009年9月30日受理)

An Investigation on Reducing Energies for Green Houses by Using New Energies

Takaaki Hashimoto*, Hisahiro Inoue**, Terumi Yamamoto**, Hideo Nagata*, Hirokazu Suzuki*,
Akinori Takeuchi*, Masaru Ozaki**, Yoshihisa Asano**, Eitaro Sakata**

(Received September 30, 2009)

Abstract

It is very important to reduce the consumption of energies for green houses from the viewpoints of the environmental and economical problems. Utilizing new energies is supposed to be one of the practical and important ways to do so.

There are many kinds of local new energies which could be used for green houses in this farming district. In this report both wind energy and solar energy were preliminarily discussed. These two energies would be useful within the limited range.

キーワード : 温室, エネルギー削減, 新エネルギー

Keywords : Green House, Energy Reduction, New Energy

1. まえがき

蒲郡市の主要産業のひとつは、温室を利用した施設農業である。作物はみかん、いちご、菊などが主であるが、最近ではデコポン（柑橘の一種）やトマト、イチジクなどへの作物転換もあると聞いている。温室作物は、露地作物に比べて一般的に付加価値は高いが、温室暖房に重油を燃やすことに伴うCO²排出による環境への悪影響や重油価格高騰による経営の圧迫、照明用電球点灯、換気用や導風用ファン駆動のための商用電力消費といった経費負担など、負の側面もある。このような温室用エネルギーに風力、ソーラー、バイオなどの新エネルギーを利用して、従来エネルギー使用量を削減することが可能になれば、前述の負の側面の緩和になると考えられる。

そこで、「新エネルギー利用による温室用エネルギー削減の研究」と題して、平成20年度愛知工科大学グループ研究費を申請したところ認められたので、研究に取りかかることができた。本報告は、平成21年4月16日日本学AUTホールで実施された「平成20年度グループ研究報告会」において報告した内容をまとめ直したものである。

2. グループ研究の概要と共同研究者の役割

Table 1 にグループ研究の概要を示す。

Table 2 に共同研究者（研究代表者、グループ研究者）の研究課題における主な役割分担を示す。

* 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 Nishihiasama-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 Nishihiasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

Table 1 グループ研究の概要

グループ名	愛知工科大学・愛知工科大学自動車短期大学自然エネルギー研究会		
研究期間	平成 20 年 4 月 ～ 平成 21 年 3 月 まで		
研究課題名	新エネルギー利用による温室用エネルギー削減の研究		
研究代表者	橋本孝明	研究費総額	許可額 1,000 千円
研究グループ 構成員名	井上久弘（ロボットシステム工学科教授），山本照美（機械システム工学科教授），永田英雄（自動車工業学科准教授），鈴木宏和（自動車工業学科准教授），竹内嗣昇（自動車工業学科講師），尾崎勝（自己開発室室長），浅野由久（会計課施設主任），坂田栄太郎（ものづくり工作センター員）		

Table 2 研究代表者とグループ研究者の主な役割

氏名	位置づけ	主な役割
橋本孝明	研究代表者	研究全般の方向付け，とりまとめ
井上久弘	グループ研究者	新エネルギー全般の検討，調査，実験
山本照美	グループ研究者	新エネルギー全般の検討，調査，実験
永田英雄	グループ研究者	風車，ソーラー発電システム検討，機器調査，実験
鈴木宏和	グループ研究者	風車，ソーラー発電最適システム，制御系検討，実験
竹内嗣昇	グループ研究者	温室用エネルギーの現状調査，課題の調査と検討
尾崎勝	グループ研究者	新エネルギー調査，電気系の調査，検討
浅野由久	グループ研究者	新エネルギー調査，装置全般の設置，検討
坂田栄太郎	グループ研究者	装置試作，検討

なお，グループ研究者の中に教員職でない3氏が含まれているのは，このプロジェクト推進にあたり，研究代表者が必要不可欠な人材と判断して特にお願ひして加わって頂いたものである。

3. 当初研究計画と結果の概要

本研究は類似の平成19年度のグループ研究から発展したものであり，研究内容に重複部分もあるが，以下に，本年度当初計画の具体的項目を列記する。

【1】みかん，いちご，食用菊ごとに温室の現状として，以下の項目について調査する。

- 1 温室の規模と材質（JA 蒲郡市，栽培農家，蒲郡市，愛知県などの協力を仰ぐ）
- 2 温室内温度（JA 蒲郡市，栽培農家などから年間を通じた代表例を把握する）
- 3 外気温度（公開されている気象データを活用し，研究グループによる測定を実施する）
- 4 温室用エネルギー機器（JA 蒲郡市，栽培農家の協

力を得て，消費動力を評価する）

【2】現在使用の温室用エネルギー機器で，効率面で改善余地がないかどうか検討する。

- 5 暖房機器，送風機，照明器具（種類と大きさ，使用方法などを現地調査）
- 6 温室のプラスチック膜（材質，厚さ，張り方など検討）

【3】蒲郡市賦存新エネルギーの温室用エネルギーへの実用的な利用性を精査する。

- 7 風力エネルギー（風力測定データの分析と実用性を検討する）
- 8 ソーラーエネルギー（可能発電量と実用性を検討する）
- 9 バイオマスエネルギー（枝葉，食物残渣，みかん皮，魚あらの具体的利用法を検討し，蒲郡市ごみ処理場と浄水場などからのエネルギー源を検討する）
10. その他の新エネルギー（蒲郡市関係者，産業界関係者などとの積極的な意見交換を行う）

【4】小型温室模型で，当面小型風力発電機とソーラーパネルとで，温室用エネルギー削減のための基礎実験を

行う。

11. 風車とソーラーパネルによるエネルギー採集量を測定
 12. 小型温室内外の温度測定
- 【5】以上の研究を通じて、現在消費されている温室用エネルギーの削減がどの程度可能か検討する。

これらの項目のうち、今年度進展したのは、主に 7., 8., 10., 11. (ただし、ソーラーパネルのみ), 12. である。1., 2., 5., 6., については昨年度に調査を行い、概略がわかりつつあるが、詳細についても JA 蒲郡市などの協力を仰ぎたいと考えている。3., 4., 9. の項目についてもできることから進めている段階である。

なお、平成 20 年 12 月にがまごおり産学官ネットワーク会議のプロジェクト部会「温室用エネルギー部会」が立ち上がったので、10. はもちろんのこと、1.～6. および 9. についても今後の進展が期待できると考えている。

4. ひとつの研究結果

ここでは、研究成果のひとつとして、現在の温室エネルギー状況についての調査のまとめを紹介するにとどめるが、すでに発表したものについては、平成 19 年度グループ研究費に基づく研究成果と平成 20 年度グループ研究費に基づく研究成果（関連研究も含む）として資料最後にリストを掲げさせて頂く。関心のある各位に笑覧して頂ければ幸いである。また、未発表のもの、進行中のものについても、まとまり次第機会を得て発表していくつもりである。なお、報告会当日には、局所風力エネルギー、ソーラー発電、温室内温度などの測定データのいくつかをスライドで紹介した。

4.1 温室栽培の作物と使用エネルギーの種類および使用エネルギー機器の種類と出力

Table 3, Table 4, Table 5 に結果をまとめる。

Table 3 温室作物とエネルギーの種類

温室作物	使用エネルギー
みかん	重油（冬期暖房用）、商用電源（換気用）、商用電源（導風用）
いちご	重油（冬期暖房用）、商用電源（換気用）、商用電源（導風用）商用電源（照明用）
菊	商用電源（照明用）

Table 4 エネルギー機器

エネルギーの種類	使用エネルギー機器
重油	重油焚き暖房機
商用電源	換気用ファン、導風用ファン、照明用電球

Table 5 エネルギー機器の種類と出力

エネルギー機器の種類	出力
重油焚き暖房機	200[kW]
換気用ファン	750[W], 650[W] (200[V]3 相交流)
導風用ファン	450[W] (200[V]3 相交流), 100[W] (100[V] 単相交流)
照明用電球	60[W] (100[V] 単相交流)

4.2 消費エネルギーレベル

暖房機出力

JA 蒲郡市の関係者から提供された資料では、温室床面積 990[m²], 同表面積 1570[m²], プラスチック膜の放熱係数 4.13[W/(m²・K)] として、温室設定温度 24[°C] で、年間暖房熱量は 387[MWh] と記述されている。なお、これに基づいて重油焚き暖房機の出力を求めると、205.9[kW] となるので、Table 5 に 200[kW] と記した。

ファン動力

現在使用されている換気用ファンは、前述規模の温室一棟当たり 3 個から 4 個である。導風用ファン温室一棟当たり 4 個から 5 個使用されている。通常、換気用と導風用を併用する。ファン動力としては、換気用と導風用を合わせて、温室 1 棟あたり合計で約 5[kW] である。

電球動力

夜間照明用電球は、10[m³] 当たり 1 個程度使用されている。この割合で前述の床面積 990[m²] の温室 1 棟当たりを計算すると、99 個となり、1 棟 9.9 [kW] 程度の電力ということになるが、レベルとしては 10[kW] ということになる。

ただし、実際に温室を見たり、関係者の話では、同規模の温室で 20 個程度のものであり、そうであれば 1 棟当たり 2[kW] 程度の電力規模といえる。この辺りは正確に把握する必要がある。

4.3 風力エネルギーとソーラーエネルギーによる代替または補完の可能性

温室暖房用重油

前述の 200[kW] すべて、風力エネルギーとソーラーエネルギーとで代替することは、現状では極めて難しいので、この値の 1 割～2 割を補うシステムを構築することを考えるのが現実的と捕らえている。そこで、計算の都合上、24[kW] を設定する。

風力発電機 1 基で 24[kW] を賄うとすると、直径 18[m] の風車が必要である。ソーラーパネルのみで 24[kW] を賄う場合、1[m²] で 100[W]=0.1[kW] の出力が期待できるとして、24[kW]/0.1[kW]=240[m²] の面積が必要となる。

風車直径が 18[m] 規模ということは、温室高さを勘案すると、風車回転中心の高さは地面から 30[m] 程度は必要ということになる。設置場所、付帯工事、風車強度などの課題も生じてくることになる。また、1 基だけでなく、多数の設置となれば、場所の確保も課題になる。また、ソーラーパネルの場合、温室付近に 240[m²] だけの面積を確保できるかどうかが問題である。風車とソーラーパネルの併用としても、初期設備費と設置場所の確保が問題点として上がることになる

う。

換気用ファンと導風用ファンの動力

現在使用されている換気用ファンと導風用ファンのファン動力の合計は、温室 1 棟あたり合計で約 5[kW] である。このエネルギー規模であれば、風力エネルギーとソーラーエネルギーとの併用で代替も可能であろうと考えられる。

たとえば、著者らの現有の風車発電機 2.5[kW] は、プロペラ直径 3.6[m] である。したがって、計算上 2 基で賄えることになる。ただし、定格出力を得るには、風速 12[m/s] が必要である。

また、日射が充分あれば、ソーラーパネルは 1[m²] で 100[W] の出力がある。仮に、ソーラーパネルのみで 5[kW] を賄うとした場合、必要なパネル面積は 50[m²] である。温室の建てられている付近にこれだけのスペースすべてを確保するのは無理としても、数割の補完スペースの確保は可能であろう。

したがって、風車とソーラーパネルの併用であれば十分代替も可能と判断できる。初期設備費等が実用化に際して問題となる。

夜間照明用電力

照明用電球の電力が 1 棟当たり 2[kW] 程度の電力であれば、この夜間照明用電力の代替は、風力エネルギーとソーラーエネルギーとで十分に可能であると考えている。

10[kW] 規模となると、風力エネルギーだけで賄うとすると、著者らの現有の風車発電機 2.5[kW] が 2 基必要であり、ソーラーパネルだけで賄うとすると、パネル面積は 100[m²] 必要である。場所、スペースの関係で、単独でも併用でも、代替はやや無理の感を否めない。ただし、50% 程度までの補完であれば十分に可能と考えられる。

5. むすび

平成 20 年度のグループ研究の報告をさせて頂いた。

研究代表者の研究姿勢としては、「地域エネルギーの地域利用」であり、「わずかでもできることから着実に」というものである。今後も、新エネルギー利用による温室用エネルギー削減ということで研究を推進したいと考えている。

平成 20 年度グループ研究費に基づく研究成果 (関連研究も含む)

- (1) 橋本孝明：局所自然エネルギーによる温室用エネルギーの補完, 流体熱工学研究, 第 42 巻第 2 号 (平成 20 年 6 月), pp.21-22
- (2) 橋本孝明, 永田英雄, 鈴木宏和, 浅野由久：太陽光パネルによる地域交通用小型電気自動車運行の実用性, (社)日本設計工学会中国支部論文論文集,

- pp.23-26, 平成 20 (2008) 年 6 月
- (3) 橋本孝明, 鈴木宏和, 永田英雄, 井上久弘: 風車発電装置における回転数の自動計測システムの設計, (社)日本設計工学会北陸支部平成 20 年度研究発表会論文集, pp.19-22, 平成 20 (2008) 年 6 月
 - (4) 橋本孝明, 井上久弘, 浅野由久, 竹内嗣昇: 温室への局所自然エネルギー利用についての考察, 環境工学総合シンポジウム, pp.417-420, 平成 20(2008) 年 7 月
 - (5) 橋本孝明: 新エネルギー利用による温室暖房用重油削減の研究, 愛知工科大学平成 19 年度グループ研究報告会, 平成 20(2008) 年 7 月
 - (6) 橋本孝明, 井上久弘, 浅野由久, 竹内嗣昇, 長谷川康和: 温室用エネルギー削減の研究 (小型温室を使った温度測定からの提案), (社)日本設計工学会関西支部論文集, pp.-, 平成 20(2008) 年 11 月
 - (7) 橋本孝明: 温室用エネルギー対策の考え方, 流体熱工学研究, 第 43 巻第 1 号 (平成 21 年 2 月), pp.25-26
 - (8) 橋本孝明, 井上久弘, 山本照美, 永田英雄, 鈴木宏和, 尾崎勝, 浅野由久, 坂田栄太郎: 新エネルギー利用による温室暖房用重油削減の研究, 愛知工科大学紀要 第 6 巻, pp.71-75, 平成 21 年 3 月

平成 19 年度グループ研究費に基づく研究成果

- 1) 橋本孝明, 井上久弘, 永田英雄, 鈴木宏和, 尾崎勝, 浅野由久: 新エネルギーによる温室重油の削減について, 第 24 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文要旨集, 平成 20(2008) 年 1 月, p.13
- 2) 橋本孝明, 竹内嗣昇, 井上久弘, 浅野由久: 温室

エネルギーを自然エネルギーで補う試み, 日本機械学会北陸信越支部第 45 期総会・講演会講演論文集, 平成 20(2008) 年 3 月, pp.365-366

- 3) 橋本孝明: 地域貢献をめざした局所エネルギー研究, 流体熱工学研究, 第 42 巻第 1 号 (平成 19 年 10 月), pp.10-11
- 4) 橋本孝明, 井上久弘, 浅野由久: 温室温度こう配実験, 平成 19(2007) 年 5 月 7 日 (月), 温室実験報告会, 愛知県農業試験場 (蒲郡市神ノ郷町)
- 5) 橋本孝明, 井上久弘, 浅野由久: 地中を通じて温室外部へ逃げる熱に関する一考察, 愛知工科大学紀要 第 5 巻, pp.39-42, 平成 20 年 3 月
- 6) 新エネルギー座談会 (愛知県, 蒲郡市, JA 蒲郡市, 農家などの関係者が集まった温室に関するエネルギー問題に関する意見交換会で研究代表者はアドバイザーとして出席), 平成 20 年 3 月 11 日 (火), 蒲郡市役所第 3 委員会室
- 7) 井上久弘, 橋本孝明, 山本照美, 永田英雄: 局所風力エネルギーの賦存量調査, 風のシンポジウム要旨集, p.20, 平成 19 (2007) 年 6 月
- 8) 橋本孝明, 井上久弘, 浅野由久, 坂田栄太郎: セイルウイング型風車の性能に関する研究—セイルの留め綱のガバナ効果—, 第 17 回環境工学シンポジウム 2007 講演論文集, pp.370-371, 平成 19 (2007) 年 7 月
- 9) 橋本孝明, 井上久弘, 浅野由久: セイルウイング型風車の特性に関する研究—セイル面積と電流・電圧の一考察—, 日本機械学会東海支部第 57 期総会講演会講演論文集, 平成 20(2008) 年 3 月, pp.91-92
- 10) 井上久弘, 橋本孝明, 浅野由久: セイルウイング型風車の特性に関する研究—性能特性に及ぼす諸特性の検討—, 日本機械学会関西支部第 83 期定時総会講演会講演論文集, 平成 20(2008) 年 3 月, p.8-6

報告

自動車整備士試験問題検索システムの開発

高田浩充*, 大場正人*, 小野淳一*

(2009年9月30日受理)

Development of Retrieval System of Problems for Auto Mechanic Examinations

Hiromichi Takada*, Masahito Oba*, Junichi Ono*

(Received September 30, 2009)

Abstract

Past problems for auto mechanic examinations are necessary to educate the students in our college. The authors think that it is very important to develop the convenient retrieval system for the problems which were used in the past examinations. The system developed by using RDBMS(Microsoft Office Access) was indicated in this paper.

キーワード: 自動車整備士試験, リレーショナルデータベース管理システム, 検索
Key Words: Auto mechanic examination, RDBMS, search

1. 開発目的

我々自動車工業学科の教員は、二級自動車整備士試験合格率100%を目指し、学生の教育にあたっている。そのため、①「過去に出題された二級自動車整備士試験問題を授業などに活用する」②「新たに自動車整備士試験で出題された問題を過去問題と比較し分析する」必要性がある。①②を行うためには、最低でも過去5年分の問題データが必要であると考えられる。

二級自動車整備士試験(二級ガソリン・二級ジーゼル)は、年に2回実施され、1種目につき40問出題される。つまり5年間の問題数は「2種目×年2回×40問×5年分=800問」と膨大になる。さらに、10年間ともなれば1600問となってしまふ。この問題データを各教員がWord・Excelに分類し管理するのは大変労力が掛り、管理が煩雑になりかねない。しかし、合格率の向上を図るためにも目的に合った過去問題をスムーズに検索し、それを活用しなければならない。

上記の問題を解決するために、我々はデータベース技術を使用し「国家試験検索システム(自動車整備士試験問題検索システム)」(以下、検索システム)を開発した。

2. 概要

Microsoft office Access¹⁾を用いて検索システムの開発を行った。Microsoft office Accessは最も簡単にシステムを作成できるリレーショナルデータベース管理システム(RDBMS)ソフトウェアであることや、ほぼ全員の教員PCにインストールされている、などの利便性がある。

さらに、この検索システムをイントラネットに置くことにより教員同士でデータ共有することができる。

また問題データだけでなく問題解説・問題分析などもこの検索システムより閲覧することが可能である。

検索システムの概要についてはTable 1にまとめた。

Table 1 検索システム概要(2009年9月1日現在)

RDBMS	Microsoft office Access
保存場所	イントラネット - 自動車工業学科 - 資格取得委員会 - 国家試験データベース
パス	\\pc01t\資格委員会 DB\リンク \国家試験データベース
問題データ	平成10年3月 ~ 平成21年3月
解説データ	平成16年3月 ~ 平成21年3月
分析データ	平成15年10月 ~ 平成21年3月

* 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 Nishihassama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

3. 検索機能

3.1 検索方法(概要)

問題データは、3つの方法で検索することが可能である。Fig.1に検索システムTOP画面を示す。

検索①分類の階層による検索

検索②試験年月による検索

検索③キーワード入力による検索

3.2 分類の階層による検索

分類の階層による検索(ディレクトリ検索)ができるよう問題の分類を3階層で構成した。大分類を「分類1」、中分類を「分類2」、小分類を「分類3」とした。

四択問題は、選択肢ごとに異なる分類に属していることがあるため、各問題に対し「分類2」は2つ、「分類3」は4つまで属するとした。

分類のイメージ図をFig.2、分類検索画面をFig.3に示す。

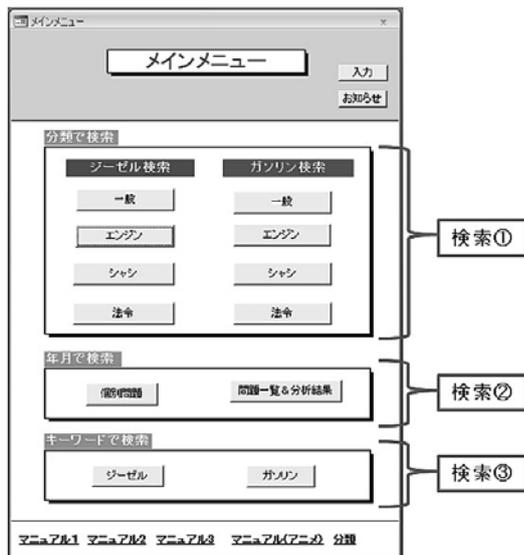


Fig.1 TOP画面

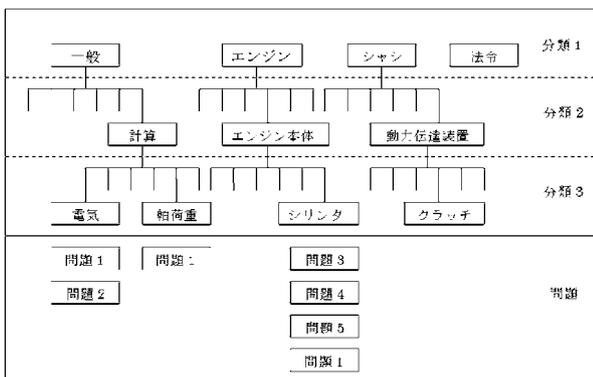


Fig.2 分類イメージ

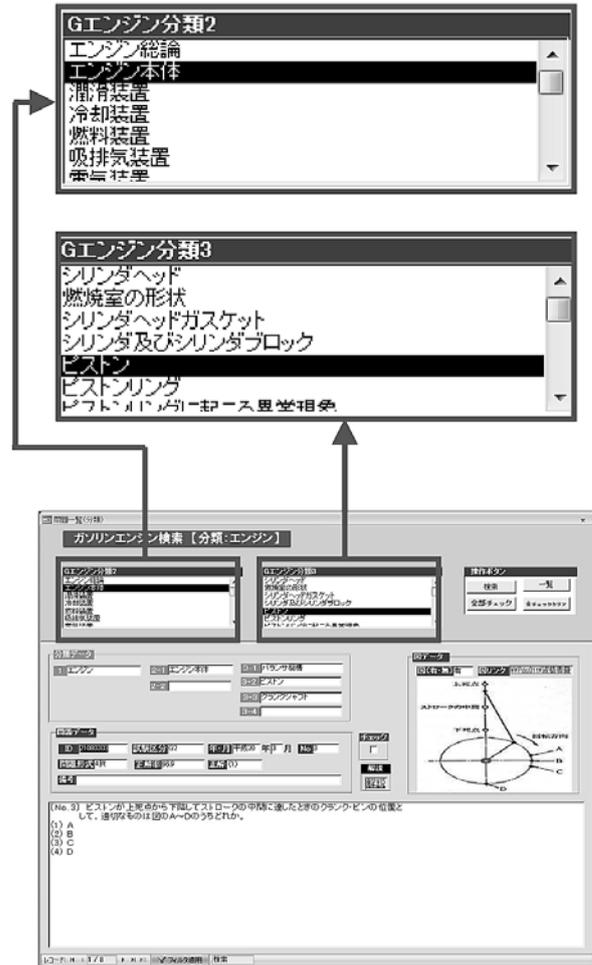


Fig.3 分類の階層による検索画面

検索方法は、TOP画面より「分類1」を選ぶとFig.3に示す分類検索画面が表示される。さらに「分類2」「分類3」を選択し、検索ボタンをクリックすることにより該当する問題データが表示される。

3.3 試験年月による検索

検索方法は、TOP画面より「年間で検索」-「個別問題」を選ぶとFig.4に示す年月検索画面が表示され、「試験区分」「年」「月」を選択し検索ボタンをクリックすることにより、該当する問題データが表示される。

3.4 キーワード入力による検索

検索方法は、TOP画面より「キーワード検索「ジーゼル」または「ガソリン」」を選ぶとFig.5に示すキーワード検索画面が表示され、「キーワード」を入力し検索ボタンをクリックすることにより、キーワードが問題文中にある問題データが表示される。



Fig.4 試験年月による検索画面



Fig.5 キーワード入力による検索画面

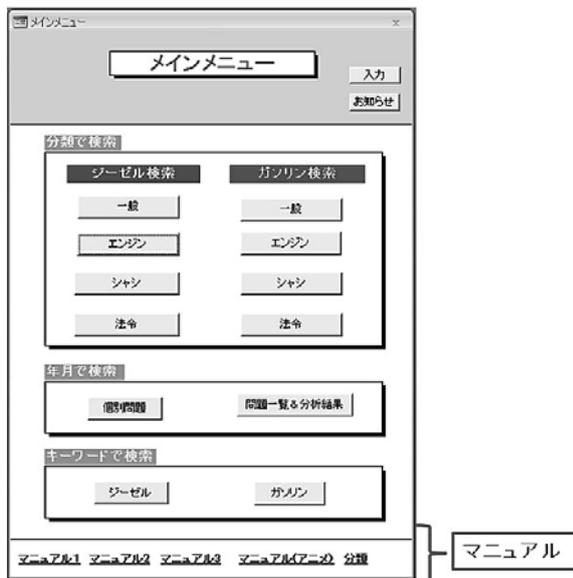


Fig.6 試験年月による検索画面

4. その他の機能概要

その他の機能については、

- ・ 検索した問題データを Word にする
- ・ 問題文をコピーする
- ・ 図をコピーする
- ・ 問題分析データを閲覧する
- ・ 問題解説を閲覧する
- ・ 試験での選択率（正解率）を調べる

などがある。

詳細については、Fig.6 に示すマニュアルを用意した。

5. おわりに

多くの教職員に検索システムを活用して頂きたい。さらにその上で意見を取り入れ今後より良いシステムに発展していきたい。

検索システムを作成する上で、ご助言頂いた資格取得指導委員会の先生方をはじめ自動車工業学科の先生方に感謝いたします。

6. 参考文献

- 1) エクスメディア：超図解 ACCESS2003 総合編，エクスメディア，2006.4

報 告

人力飛行機第2号機の試験飛行

橋本孝明*

(2009年11月30日受理)

Test Flight of the Second Man- Powered Aircraft

Takaaki Hashimoto*

(Received November 30, 2009)

Abstract

Test flight of the second man- powered aircraft was carried out on November 9th in 2009. This aircraft was made by the members that belong to Club of Aeronautical Engineering at Aichi University of Technology. It was regrettable that perfect taking off could not be confirmed. But all the participants surely could get a lot of experiences from this test flight. This report briefly indicates some aspects on the test flight.

キーワード：人力飛行機，試験飛行

Keywords : Man- Powered Aircraft, Test Flight

1. まえがき

本学における人力飛行機の研究や製作は、平成13年4月に遡る。前年平成12年4月は、自動車工業学科と電子工学科という2学科のうち、電子工学科を募集停止し、愛知技術短期大学を改組転換して、愛知工科大学短期大学部と愛知工科大学が設立された年である。

愛知工科大学第2期入学生の中に、人力飛行機製作に非常に関心の深い学生がおり、彼の要望に応える形で「人力飛行機同好会」が立ち上げられたのである。その後、同好会から部に昇格して、「蒲郡人力飛行部隊」さらに今年4月から「航空研究会」と名称変更をして現在に至っている。

本年、機械システム工学科4年生部員を中心とする部員諸君の4年間にわたる努力によって、念願の人力飛行機第2号機が完成し、日本晴れの平成21年11月9日(月)静岡県富士川緑地公園滑空場において試験飛行を実施することができた。本報告は試験飛行に関わる速報である。

2. 第2号機製作までの経緯

第2号機の製作に取り掛かることができたのは、現在の4年生部員が本学に入学してからである。熱心な部員諸君の1年生時から4年間にわたる航空工学基礎理論、とりわけ翼理論、プロペラ理論に対する学習、製作技術の調査と実践が実を結んだ成果が試験飛行であった。

第1号機の製作は全くの手探りであったが、第2号機製作はこの時の経験が少なからず生きたと思っている。特筆すべきは、愛知工科大学設立時から着任し、副顧問をお願いした井上久弘教授の力量である。軽量化のための材料選択、強度と剛性を考慮した構造設計に対するアドバイスや示唆は当を得たものであり、部員諸君の大いに役に立ったものであった。機械システム工学科の生きた題材として、井上研究室の卒業研究テーマのひとつとして採用して頂けたことも部員諸君に幸いであった。また、井上研究室でプロペラを研究した卒業生岡田崇秀君の優れた設計法が存在していたのも幸いであった。

* 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



Fig.1 試験飛行のひとつコマ

人力飛行機は、軽量の上に強度と剛性が十分でなくてはならず、揚力、抵抗、人の動力とのバランスもなくてはならないという、システムとして高度な機械である。部員諸君のこの辺りに関する理論的、実験的研究結果は卒業論文などで公開されるはずである。

3. 試験飛行の状況

平成 21 年 11 月 9 日（月）は早朝から大学に集合し、先に機体を送り出した後、バスで試験飛行の実施会場である静岡県富士川緑地公園滑空場に向かった。天候は極めて良く、試験飛行の成功が期待できるようでもあった。

富士川緑地公園滑空場は富士川河口の河原に作られたもので、富士山を背景にして、850 メートルの滑走路を持つものである。複葉の人力飛行機が滑走する姿（Fig.1 に示す）は一幅の絵であった。微風の中、数度にわたるチャレンジで、主翼が揚力を発生し、機体を持ち上げようとしている姿、わずかに地上を離れた（？）かの微妙な状況など、収穫の多い試験飛行の 1 日であった。試験飛行の状況は、情報メディア学科野村良雄講師、入試広報課河合武明氏、長野広樹氏、間瀬啓城氏の手によって、ビデオ、写真等に記録されており、今後有効に活用したいと考えている。

なお、富士川緑地公園滑空場の使用にあたっては、（社）静岡県航空協会から特別な配慮を頂き、当日には副会長鈴木茂夫氏から貴重なアドバイスを受けた。

4. あとがき

第 2 号機は、入学当初から現在までじっくりと航空工学を勉強し、設計と製作に努力した諸君の力作で、頭の下がる思いである。これまでの成果は卒業論文などにまとめられるはずであり、本報告では割愛した。折を得て紹介したいと考えている。また、人力飛行機の設計、製作を卒業研究のテーマに採りあげて、終始懇切な指導をされた井上久弘教授の努力の賜物でもある。

第 2 号機の成果を生かして、第 3 号機では地上から力強く浮かぶ姿を眼にしっかりと捉えたい、必ず実現できると確信している。

最後になったが、Table 1 に、試験飛行の参加者の名を記す。参加者の中には、航空研究会非会員や井上研究室卒研生でない学生諸君も含まれるが、人力飛行機に関心を持ち、試験飛行に協力してくれた諸君である。

また、多忙の中、録画、撮影に向いて頂いた情報メディア学科野村良雄講師、入試広報課河合武明氏、長野広樹氏、間瀬啓城氏および飛行場に駆けつけて応援して頂いた学生諸君の保護者と友人の方々に深謝する次第である。さらに、今回の試験飛行に関して、愛知工科大学課外活動援助費の交付を受けたこと、愛知工科大学校友会からは援助金を頂いたことを明記し、感謝の意を表したい。

Table 1 試験飛行参加者

名前	所属
岩品大介	機械システム工学科 4 年
大村直己	機械システム工学科 4 年 (航空研究会主将)
小尾恭平	機械システム工学科 4 年 (航空研究会主務)
片岡拓矢	機械システム工学科 4 年 (航空研究会副主将)
木庭壯惇	機械システム工学科 4 年
武内和也	機械システム工学科 4 年
立松宏一郎	機械システム工学科 4 年 (航空研究会会計)
中澤宏次朗	機械システム工学科 4 年
花岡亮祐	機械システム工学科 4 年
浜田有基	機械システム工学科 4 年
松井弘毅	機械システム工学科 4 年
渡辺賢	機械システム工学科 4 年
井手健之	機械システム工学科 4 年
中村優介	機械システム工学科 4 年
畑田晃秀	機械システム工学科 4 年
井上久弘	航空研究会副顧問, 愛知工科大学ロボットシステム工学科教授, 平成 21 年度機械システム工学科卒業研究指導担当
橋本孝明	航空研究会顧問, 愛知工科大学自動車短期大学教授

1. 著 書

大西 清, 大西正敏: JISにもとづく機械設計製図便覧第11版(全章の図表改定作業, 18章CAD製図の改定作業), 理工学社(2009.11)

大西 清, 大西正敏: JISにもとづく標準製図法第12全訂版(全章の図表改定作業), 理工学社(2009.1)

佐々木利廣, 加藤高明, 東 俊之, 澤田好宏: 組織間コラボレーション「第2章 Webによる消費者参加型製品開発」pp.18-49, 「第8章 共創をめざす地域と大学のコラボレーション」pp.175-194, ナカニシヤ出版(2009.11)

S. Mizutani and T. Nakagawa: Optimal policy for a two-unit system with two types of inspections, Recent Advances In Stochastic Operations Research II, (Eds. by T. Dohi, S. Osaki and K. Sawaki), World Scientific, pp. 171--182 (2009).

S. Mizutani: Extended inspection models, Stochastic Reliability Modeling, Optimization and Applications (Eds. by S. Nakamura and T. Nakagawa), World Scientific, pp. 65--90 (2009).

生駒正文, 平井 卓, 高田富男: アクセス法学第2版第8章企業と法 pp.166-190, 嵯峨野書院(2009.12).

2. 論文・国際会議

Shinji Tamano, Motoyuki Itoh, Takefumi Inoue, Katsuo Kato, and Kazuhiko Yokota: Turbulence statistics and structures of drag-reducing turbulent boundary layer in homogeneous aqueous surfactant solutions, Physics of Fluids, Vol. 21, No. 045101, pp.1-19 (2009. 4)

Shinji Tamano, Motoyuki Itoh, Shintaro Hotta, Kazuhiko Yokota, and Yohei Morinishi: Effect of rheological properties on drag reduction in turbulent boundary layer flow, Physics of Fluids, Vol. 21, No. 055101, pp.1-12 (2009. 5)

玉野真司, 伊藤基之, 堀田慎太郎, 横田和彦: 粘弾性流体の乱流境界層抵抗低減効果に及ぼすレオロジー特性の影響, 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第750号, pp.227-234 (2009. 2)

横田和彦, 田口稔邦, 平井啓太, 佐藤光太郎, 玉野真司, 伊藤基之: ネジ型粘性マイクロポンプの特性に関する実験的, 数値的, 理論的研究, 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第754号, pp.1238-1246 (2009.6)

玉野真司, 伊藤基之, 加藤克雄, 横田和彦: 非イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減効果, 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第756号, pp.1598-1607 (2009. 8)

玉野真司, 伊藤基之, 松田知也, 横田和彦: スパン方向進行波動を伴う柔軟シート上乱流境界層の摩擦抵抗低減, 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第757号, pp.1798-1806 (2009. 9)

玉野真司, 伊藤基之, 笹川 哲, 横田和彦: 高分子水溶液の多段屈曲流路流れにおける流体混合の可視化観察, 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第759号, pp.

2115-2121 (2009. 11)

玉野真司, 伊藤基之, 笹川 哲, 横田和彦: 高分子水溶液の屈曲流路流れにおける二次流れのPIV計測, 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第759号, pp. 2122-2127 (2009. 11)

玉野真司, 伊藤基之, 竹内俊介, 横田和彦: 界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層における乱れ構造(抵抗低減率の異なる流れ場の比較), 日本機械学会論文集, B編, 第75巻, 第760号, pp.2352-2360 (2009. 12)

吉川高正, 稲葉忠司, 徳田正孝: ZrCuAlNiバルク金属ガラスの常温強度特性に及ぼす熱塑性変形条件の影響, 材料 第58巻, 第6号, pp.435-492 (2009.6)

M. Ohmichi, N. Noda: The effect of Oblique Functional Gradation to Transient Thermal Stresses in the Functionally Graded Infinite Strip, Acta Mechanica, ACME-D-09-00192 (in press).

金田さやか, 中西弘明, 榎木哲夫, 吉光徹雄, 中谷一郎: 電波の伝播遅延時間測定による小天体探査ローバの位置同定法, 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.9, pp1007-1015, 2009

磯貝正弘, 福田敏男: マイクロロボットの移動機構と制御に関する研究(巡回走行の制御の実験), 愛知工科大学紀要, 6, pp.53-57 (2009.3)

坂口綱一, 畑中義式, 嶋川晃一: 酸化チタン薄膜の光伝導と交流伝導, 愛知工科大学紀要, 6, pp.43-48(2009.3)

K.Sakaguchi, K.Shimakawa, Y.Hatanaka: Electronic Transport under Potential Fluctuation in Titanium Oxide Films prepared by RF Magnetron Sputtering Method, *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, pp071601 1-3(2009)

名和靖彦, 相木国男: 超音波を用いたレーザ原理の実験, *愛知工科大学紀要*, 6, pp.49-52 (2009.3).

名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: 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, *The Review of Laser Engineering*, Vol. 37, No.8, pp.619-623 (2009.8).

名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: 自己結合効果を用いた微小振動の自動測定, *電気学会論文誌 C*, Vol. 129, No. 12, pp.2115-2120 (2009.12).

後藤信夫, 宮崎保光: 音響光学素子を用いた階層化光符号の識別 — フォトニックルータのための光ラベル高速識別回路への応用 —, *超音波 TECHNO*, 21, 2, pp.86-89 (2009.3-4)

宮崎保光: デジタル AV・コンピュータネットワークを用いた視聴覚コンテンツのマルチメディアシステム構築, *名古屋造形芸術大学紀要*, 15, pp.73-81 (2009.3)

宮崎保光, 河野鉦平, 高橋港一: 光 CT 画像に関する生体組織におけるレーザ光散乱透過特性の FDTD 解析, *愛知工科大学紀要*, 6, pp.35-42 (2009.3)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Recognition of Wavelength-Multiplexed Hierarchical Label with Acousto-optic Waveguide Circuit, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48, 07GE06, 7, pp.07GE06-1-07GE06-6 (2009.7)

Yasumitsu Miyazaki and Kouhei Kouno: FDTD Analysis of Spatial Filtering of Scattered Waves for Optical CT of Medical Diagnosis, *電気学会論文誌 A*, 129, 10, pp.693-698 (2009.10)

Yasumitsu Miyazaki: Electromagnetic Scattering Theory of Car Body Imaging Using Scanning Millimeter Wave Radar, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, pp.1377-1382 (2009.3)

Yasumitsu Miyazaki, Tadahiro Hashimoto and Koichi Takahashi: FDTD Analysis of Electromagnetic Wave Propagation for Out-door Active RFID System, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, pp. 1383-1387 (2009.3)

Yasumitsu Miyazaki and Kouhei Kouno: FDTD Analysis of Spatial Filtering of Scattered Waves for Optical CT of Medical Diagnosis, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, pp.1524-1529 (2009.3)

Yasumitsu Miyazaki and Tatsutoshi Ikeda: FDTD Analysis of Microwave Propagation and Scattering Characteristics over Forests for WiMAX Wireless Communication, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS*

2009), Beijing, China, pp.1530-1535 (2009.3)

Yasumitsu Miyazaki, Koichi Takahashi and Nobuo Goto: FDTD Simulation for Statistical Properties of Microwave Scattering and Attenuation Due to Randomly Distributed Rainfalls, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, pp. 1556-1561 (2009.3)

Chuzo Ninagawa and Yasumitsu Miyazaki: Analysis of Collided Signal Waveform on the Long Transmission Line of UART-CSMA/CD Control Network, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, pp. 1358-1363 (2009.3)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Recognition of Wavelength-multiplexed Labels with Acousto-optic Waveguide Circuit for Hierarchical Photonic Routing, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, pp. 1364-1368 (2009.3)

Kazunari Taki and Yasumitsu Miyazaki: Input Impedances and Bandwidths of Meander Line Antennas with Planar Coupled Parasitic Meander Elements for Compact RFID Tags, *Abstracts of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Beijing, China, p.686 (2009.3)

Yasumitsu Miyazaki, Takuya Takada and Koichi Takahashi: Attenuation and Scattering Characteristics of Microwaves over Forests for WiMAX Wireless Communications, *Proceedings of 2009 International Symposium on EMC, Kyoto (EMC' 09 Kyoto)*, 21P4-4, pp.225-228 (2009.7)

Yasumitsu Miyazaki: Reflection and Scattering of Electromagnetic Waves in Spatial Grids Consisting of Multiple Lossy Waveguides, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Moscow, Russia, pp.816-821 (2009.8)

Yasumitsu Miyazaki, Tadahiro Hashimoto and Koichi Takahashi: Electromagnetic Analysis of Propagation and Scattering Fields in Dielectric Elliptic Cylinder on Planar Ground, *Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2009)*, Moscow, Russia, pp.822-827 (2009.8)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Recognition of Optical Layered BPSK Labels Using Collinear Double-Stage Acousto-optic Processor for Hierarchical Photonic Routing, *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium (IUS 2009)*, Rome, Italy, P3-M-03, pp. 759-760 (2009.9)

Nobuo Goto and Yasumitsu Miyazaki: Recognition of Optical Layered BPSK Labels Using Acousto-optic Processor for Hierarchical Photonic Routing, *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2009)*, Kyoto, Vol.30, 3P1-5, pp.431-432 (2009.11)

Koichi Takahashi, Yasumitsu Miyazaki and Nobuo Goto: Statistical Scattering and Attenuation Characteristics of

Microwaves by Randomly Distributed Rainfalls, Proceedings of 2009 International Symposium on EMC, Kyoto (EMC' 09 Kyoto), 21P4-3, pp.221-224 (2009.7)

杉浦伸明, 宮本淳史, 小林 正: IEC 規定に基づくキャビネットシールド性能測定に関する研究—イミュニティとエミッション—, 愛知工科大学紀要, 第6巻, pp7-14(2009.3)

T. Nakagawa and S. Mizutani: Optimum problems in backward times of reliability models, IIE Transactions, 41, 1, pp. 65--71 (2009).

M. Chen, S. Mizutani and T. Nakagawa: Random and age replacement policies, 15th ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, San Francisco, USA (2009.8).

S. Mizutani, T. Nakagawa and M. Chen: Extended maintenance and inspection models for a parallel system, The IEEE international Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Hong Kong, pp. 248-251 (2009.12)

杉森順子: R+R+R, 映像インスタレーション企画展「場と記憶展」招待作品, ギャラリー CAVE (静岡県浜松市), 2009.10

杉森順子: 影の夢はどんな夢? Dream of the Shadow II, 第11回遠州横須賀ちっちゃな文化展招待作品 (静岡県掛川市), 2009.10

杉森順子: 静岡市治水交流資料館「かわなび」館内展示 映像制作プロデューサー (静岡県静岡市), 2009.5

Kohei Nakashima, Masayuki Fujiyoshi, Soichi Ishihara, Yoshio Murakami, Masago Yamamoto and Masao Yoshida: Cooling Effects of Air-Cooled Finned Cylinder Utilizing Contracted Flow, SAE Technical Paper Series SAE 2009-01-0176(2009.4).

安 善姓, 小沢慎治: 線形筋と括約筋を用いた筋肉パラメーターに基づく表情顔画像の合成, 電気学会論文誌 Vol.129-C.No.4.2009, pp.696--702.

手島知昭, 斎藤英雄, 小澤慎治, 山本恵一, 伊原 徹: 単眼カメラを用いた車両の実時間蛇行検出手法, 電気学会論文誌, Vol.129-C, No.9, pp.1714—1723.

辛 貞殷, 小沢慎治: 動画画像処理によるスポーツ運動解析の研究—鉄棒競技の自動採点システムに向けて—, 精密工学会論文誌 2009. NO.5, pp.669—673.

Jeongeun Shin, Shinji Ozawa: A Study on Motion Analysis of an Artistic Gymnastics by using Dynamic Image Processing- for a Development of Automatic Scoring System of Horizontal Bar —, Korea and Japan Joint Work shop (FCV(frontier of Computer Vision)2009), Feb.2009.

Shintaro Arai, Yoshifumi Nishio, Takaya Yamazato and Shinji Ozawa: M-ary Modulation Scheme Using Separation of Chaotic Dynamics for Noncoherent Chaos-Based Communications, Proceedings of International Symposium on Non-linear Theory and its Applications (NOLTA'09), pp.312-315, Oct. 2009.

加藤 寛, 橋本孝明, 渡部吉規, 鶴飼達也: 官学連携によるバイオ・ディーゼル燃料の実用化の研究, 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第38号, pp.37-40(2009.11)

鈴木宏和, 斎藤 健, 岩瀬正幸, 亀井幹雄: 自動車整備士に対するエレクトロニクス教育のための教材研究, 自動車整備技術に関する研究報告誌, 第38号, pp.53-57(2009.11)

Yusuke Kobayashi, Takeharu Sakai, Kei-ichi. Okuyama, Toshiyuki Suzuki Kazuhisa Fujita and Sumio Kato: An experimental Study on Thermal Response of Low Density Carbon- Phenolic Ablators, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, U.S.A., AIAA-2009-1587 (2009.1)

Shun-suke Onishi, Kei-ichi. Okuyama,: Structural Design of UNITEC-1, International Symposium on Space Technology and Science, Tsukuba, Japan, ISTS2009-c-26 (2009.7)

Toshiyuki Suzuki, Kazuhisa Fujita, Takeharu Sakai, Kei-ichi Okuyama, Sumio Kato and Seiji Nishio: Prediction Accuracy of Thermal Response of Ablator Under Arcjet Flow Conditions, 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, U.S.A., AIAA-2010-1174 (2010.1)

野中 登, 峯村吉泰, 加野草子, 新木訓典: 数学素養試験結果の年度推移と習熟度別授業の導入効果, 愛知工科大学紀要, 第6巻, pp87-96 (2009.3)

3. 特 許

奥山圭一, 上田博之, 松島 守: 鉄道車両用制動材料及びブレーキパッド, 特願 2009-265953

谷川 民生, 大場 光太郎, 松浦 寛: カーボンナノチューブの付着方法および付着装置, 特許番号: 4332624 号

(2009年7月3日登録公開)

松浦 寛, 谷川 民生: プラズマ反応を利用した検体検査方法および装置, 特許番号: 4385125 号 (2009年10月9日登録公開)

4. 解説・総説

中谷一郎：宇宙ロボットの未来像，日本ロボット学会誌
Vo.27 No.5, pp.518-522, 2009

中谷一郎：宇宙開発の展望と電気工学，電気学会誌
Vol.129, pp728-730, November 2009

大西正敏：ロボワールド「入場者3万人を突破」，中日
新聞，pp.19(2009.8.18)

宮崎保光：曲面端面をもつ集束性導波路型レンズ素子に
おけるナノメートル電磁波の電磁界特性，ナノメートル
電磁波・X線電磁界技術調査専門委員会編，ナノメートル
電磁波・X線電磁界技術—電磁波工学の新たなフロン
ティア—，電気学会技術報告，第1153号，pp.37-39
(2009.4)

宮崎保光：原子群よりなるナノメートルフォトニック導
波路の電磁界特性，ナノメートル電磁波・X線電磁界技
術調査専門委員会編，ナノメートル電磁波・X線電磁界
技術—電磁波工学の新たなフロンティア—，電気学会
技術報告，第1153号，pp.40-50 (2009.4)

宮崎保光：画像診断に関する生体媒質におけるX線散
乱吸収特性，ナノメートル電磁波・X線電磁界技術調査
専門委員会編，ナノメートル電磁波・X線電磁界技術
—電磁波工学の新たなフロンティア—，電気学会技術報
告，第1153号，pp.51-62 (2009.4)

石川雄二郎：1次，2次微分形式のリー微分，愛知工科大
学紀要，第6巻，pp61-70(2009.3)

橋本孝明：温室用エネルギー対策の考え方，流体熱工学
研究，第43巻第1号，pp.25-26 (平成21年2月)

橋本孝明，井上久弘，山本照美，永田英雄，鈴木宏和，
尾崎 勝，浅野由久，坂田栄太郎：新エネルギー利用に
よる温室暖房用重油削減の研究，愛知工科大学紀要 第
6巻，pp.71-75，平成21年3月

竹内嗣昇，斎藤 健，亀井幹雄：コモンレールシステム・
ディーゼルエンジンの教材化，愛知工科大学紀要 第6
巻，pp.77-81，平成21年3月

蛭名武雄，米本浩一，奥山圭一：炭素繊維強化プラスチック
／粘土膜複合材料と水素タンクへの応用，工業材料，
Vol57, No.5, pp.31-35 (2009.5)

米本浩一，蛭名武雄，奥山圭一：高い水素ガスバリア性
能を有する粘土膜複合化CFRPと高圧ガスタンクへの応
用，Polyfaile, Vol.46, No.543, pp.58-62 (2009.5)

米本浩一，蛭名武雄，奥山圭一：水素ガスバリア性の高
い粘土膜炭素繊維強化プラスチックとその応用，ケミカ
ルエンジニアリング，Vol.54, No.8, pp.20-25 (2009.8)

5. 口頭発表

竹内俊介，玉野真司，伊藤基之，横田和彦：抵抗低減界
面活性剤水溶液の乱流境界層流れにおける乱れ構造に関
する実験的研究，日本機械学会東海支部第58期総会講
演会講演論文集，No.093-1, pp.329-330 (2009.3)

安田亮太，玉野真司，伊藤基之，横田和彦：複雑壁面
性状による乱流摩擦抵抗低減に関する研究，No.093-
1, pp.331-332 (2009.3)

日比野三郎，玉野真司，伊藤基之，横田和彦：複合リブ
レットによる乱流摩擦抵抗低減に関する風洞実験，日
本機械学会第87期流体工学部門講演会講演論文集，No.
09-8, pp. 175-176 (2009.11)

玉野真司，伊藤基之：リブレットおよび毛皮面による乱
流摩擦抵抗低減，日本機械学会第87期流体工学部門講
演会講演論文集，No. 09-8, pp. 611-614 (2009.11)

椎名保顕，小木浩通，稲垣昭美：表面熱伝達率分布が水
平円柱内固相の融解に及ぼす影響，日本機械学会東北支
部第44期講演会 (2009.3)

村上 新，池田 隆，上谷昌也：磁気浮上コマの安定
性解析（浮上磁石の大型化の検討），日本機械学会中
国四国支部第47期総会講演会講演論文集，No.095-1,
389-390, (2009)

池田 隆，村上 新，梅津正樹：斜め水平励振を受け
る矩形容器内液面の非線形応答（液位の影響），日本
機械学会中国四国支部第47期総会講演会講演論文集，
No.095-1, 397-398, (2009)

村上 新，池田 隆：磁気軸受で支持された鉛直回転軸
系の非線形振動特性（軸回転に伴う磁力の減少を考慮し
た場合），日本機械学会中国四国支部第47期総会講演
会講演論文集，No.095-1, 399-400, (2009)

池田 隆, 村上 新, 清井義幸: 二つの円筒液体容器で構成される同調液体ダンパーの制振特性, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会講演会講演論文集, No.095-1, 423-424, (2009)

村上 新, 池田 隆, 高浜泰之: ローカル速度フィードバックを用いた天井クレーンの制振制御, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会講演会講演論文集, No.095-1, 425-426,(2009)

村上 新, 池田 隆, 川本雅義: 旋回と起伏を考慮したジブクレーンの角加速度入力による制振位置決め制御, 日本機械学会中国四国支部第 47 期総会講演会講演論文集, No.095-1, 445-446, (2009)

池田 隆, 村上 新, 岩田惇信: 斜め水平励振を受ける構造物と矩形容器内液面の非線形連成振動, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009 講演論文集, #245 in CD-ROM (pp.1-6), (2009).

村上 新, 池田 隆: 永久磁石を利用した磁気浮上回転体に関する研究 (重心位置の安定回転数への影響), 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2009 講演論文集, #446 in CD-ROM (pp.1-6), (2009).

寺田享右, 山崎貴久, 清野俊明, 小南裕子, 中西洋一郎, 畑中義式, 原 和彦: レーザーアニールによる SrGa₂S₄: Eu < 2 + > 薄膜蛍光体作製プロセスの低温化, 映像情報メディア学会技術報告, 33(5), 25-28, (2009.1)

天野孝浩, 加藤丈尚, 茅根直樹: PC-OTDR を用いた光空間伝送における伝送路評価 (II), 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-14-12(2009.9)

茅根直樹: 半導体レーザ実用化技術の歴史と展望, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, エレクトロニクスソサイエティ・プレナリセッション, 特別講演 (2009.9)

中谷一郎: “LCGT におけるシステム工学” 日本物理学会第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 29 日

奥山圭一, 加藤純郎, 酒井武治, 鈴木俊之, 藤田和央: 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 53 回宇宙科学技術連合講演会, 2009 年 9 月 9 日~ 11 日, 京都大学吉田南キャンパス

坂口綱一, 深澤正樹, 畑中義式, 嶋川晃一: 酸化チタン薄膜における光電流減衰特性の温度依存, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 1a-P12-25(2009.3).

名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: 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, レーザー学会学術講演会第 29 回年次大会, E311p II 05 (2009.1.11).

名和靖彦, 藤本 裕, 相木国男: マイクロ波ドップラー速度計教材の製作, 第 56 回応用物理学関係連合講演会, 31a-P9-11 (2009.3).

名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: 自己結合型微小振動センサの誤差特性, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連

合大会講演論文集, O-128(2009.9).

山田浩之, 名和靖彦, 津田紀生, 山田 諄: 半導体レーザーを用いた自己結合効果による微小変位センサ, 第 9 回レーザー学会中部支部若手研究発表会, 17 (2009.11.27).

大西正敏, 田宮 直: 飛行船による赤外線カメラによる環境モニタリングの検討, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集 vol.7, pp.381-382(2009.9)

大西正敏, 田宮 直: 身体障害者向け床変え支援用電動パッドの検討, 第 27 回日本ロボット学会学術講演会, 2C1-01, pp183 (2009.9)

安井優介, 大木章暁, 大西正敏: 飛行船型ロボットによる上空からの環境モニタリングの検討, 日本機械学会第 40 回学生講演発表会, 706, 207-208(2009.3)

大西正敏, 柳沢峰子: 福祉支援装置へのロボット機構の適用検討, 日本設計工学会平成 21 年度秋季研究発表講演, B18, pp.72-75(2009.10)

宮崎保光, 野村良雄: 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, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会 IN2008-116, pp.45-50 (2009.1)

宮崎保光: 走査型ミリ波レーダセンサーによる物体形状画像認識に関するビーム波散乱理論, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-09-132, pp.51-56 (2009.11)

後藤信夫, 宮崎保光: 階層構造光 BPSK ラベルの音響光学素子によるコヒーレント光識別の検討, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-09-139, pp. 97-102 (2009.11)

宮崎保光, 橋本忠弘, 高橋港一: 平面大地上の誘電体円柱物体における電磁波伝搬・散乱解析, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-09-107, pp.31- 36 (2009.11)

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 FDTD 解析, 電気学会研究会資料, 電磁界理論研究会 EMT-09- 129, pp.33-38 (2009.11)

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, 電子情報通信学会技術研究報告, 環境電磁工学研究会 EMCJ2009-90, pp.31-36 (2009.12)

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, 電子情報通信学会技術研究報告, 環境電磁工学研究会 EMCJ2009-91, pp.37-42 (2009.12)

宮崎保光: 走査型ミリ波レーダによる自動車形状画像認識に関する反射・散乱特性, 2009 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-1-15, p.15

(2009.3)

宮崎保光, 河野鉦平: 生体組織内散乱光に対する光 CT 画像用グリッド型空間フィルタの FDTD 解析, 2009 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-1-17, p.17 (2009.3)

宮崎保光, 高田卓哉, 高橋港一: 森林における WiMAX 無線通信マイクロ波の減衰・散乱特性の FDTD 解析, 2009 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-1-6, p.6 (2009.3)

後藤信夫, 宮崎保光: (依頼講演) 光ラベル認識回路, 2009 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, CS-9-8, pp.S-94 - S-95 (2009.3)

宮崎保光, 野村良雄, 水谷聡志, 高橋港一: デジタル AV・WiMAX を用いた地域医療福祉ネットワークの構築, 第 23 回日本レーザー医学会東海地方会プログラム・抄録集, 10 (2009.8)

宮崎保光, 河野鉦平: グリッド型空間フィルタを用いたレーザー光 CT 画像診断の統計特性, 第 23 回日本レーザー医学会東海地方会プログラム・抄録集, 11 (2009.8)

宮崎保光: 走査型ミリ波レーダセンサーによる物体形状画像認識に関するビーム波散乱理論, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-363 (2009.9)

宮崎保光, 橋本忠弘, 高橋港一: 平面大地上の誘電体円柱における電磁波伝搬・散乱解析, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-362 (2009.9)

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, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-358 (2009.9)

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の FDTD 解析, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-368 (2009.9)

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, 平成 21 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, O-016 (2009.9)

宮崎保光: 走査型ミリ波レーダセンサーによる物体形状画像認識に関するビーム波散乱理論, 2009 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-1-6, p.6 (2009.9)

宮崎保光, 橋本忠弘, 高橋港一: 平面大地上の誘電体円柱における電磁波伝搬・散乱解析, 2009 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-1-17, p.17 (2009.9)

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の FDTD 解析, 2009 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-1-19, p.19 (2009.9)

高橋港一, 宮崎保光, 後藤信夫: 雨滴モデルによるマイクロ波散乱・偏波特性の FDTD 解析, 2009 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-1-8, p.8 (2009.3)

杉浦伸明: IEC SC48D「電子機器の機構構造標準化」規格の現状と活動報告セミナー, (社)電子情報技術産業協会 (2009.11)

岡島健治: 情報量最大化に基づく特徴選択における「ノイズ法」の効果, 日本神経回路学会 第 19 回全国大会講演論文集, O2-2 (2009.9)

加藤高明: Web2.0 を活用した消費者参加型商品開発, 商品開発・管理学会第 13 回全国大会講演論文集, pp.112-120 (2009.11)

石川雄二郎: 多様体上の差分法を応用した偏微分方程式の解法, 第 28 回日本シミュレーション学会大会発表論文集, 12-2, pp.401-404 (2008)

實廣貴敏, 小暮 潔: 装着型および環境設置型マイクロホンを用いた音声認識のための雑音抑圧手法, 日本音響学会 2009 年春季研究発表会講演論文集, pp. 151-152 (2009.3).

荻野恒太郎, 實廣貴敏, 宮島千代美, 武田一哉: 認知状態識別のための把持ヤコビ行列の特徴抽出, 電子情報通信学会 2009 基礎・境界ソサイエティ大会 A-4-4, p.67 (2009.9) .

水谷聡志, 中川暉夫: 故障時間にかかる費用を考慮した並列システムの点検方策, 日本 OR 学会 2009 年度春季研究発表会アブストラクト集, pp. 92-93 (2009).

中川暉夫, 水谷聡志: Modified random inspection policies, 日本 OR 学会 2009 年度秋季研究発表会アブストラクト集, pp. 187-188 (2009).

杉森順子: Light Eggs, 50 人写真展「たまご」招待作品, ギャラリー SENSENCHI(静岡県静岡市), 2009.3

小塚一宏, 尾林史章, 小沢慎治: 自動車および自転車を運転中の運転者の視線特性の計測と評価～特に携帯電話使用時の危険性について, 自動車技術会 2009 年春季大会フォーラム ヒューマトロニクス 1, 論文集 pp.7～12 (No.20094268)

荒井伸太郎, 山里敬也, 小沢慎治: 可視光通信を用いた交通信号における画像処理, 平成 21 年度 電気学会 電子・情報・システム部門大会, 講演論文集, no. TC7-3, pp. 164-169, Sep. 2009.

神藤善洋, 荒井伸太郎, 小沢慎治: ETC 料金所付近での車両の振る舞い, 平成 21 年度 電気学会 電子・情報・システム部門大会講演論文集, no. TC7-5, pp. 174-178, Sep. 2009.

荒井伸太郎, 井上 修, 小沢慎治: 特徴平面の移動に基づく車両前面検出, 第 11 回 DSPS 教育者会議 予稿集, pp. 55-58, Sep. 2009.

Shintaro Arai, Yoshifumi Nishio, Takaya Yamazato and Shinji Ozawa: [Invited paper] Error-Correcting Scheme Without Redundancy Code Using Chaotic Dynamics for Noncoherent Chaos Communications, Proceedings of IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks (NCN'09), pp. 14-16, Dec.2009.

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, 電気学会 ITS 研究会, Mar. 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, 電気学会 ITS 研究会, Mar. 2010.

中島 守, 平野博敏, 川村貴裕, 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 1 報 大学生の事故に対する意識調査—, (社) 日本工学教育協会 平成 21 年度 工学・工業教育研究講演会 講演論文集, pp.128-129 (2009.8)

橋本孝明, 長谷川康和, 尾崎 勝: 地域小学生への科学技術教室開催から得る工学教育へのヒント, (社) 日本設計工学会平成 21 年度春季研究発表講演会講演論文集, pp.65-66, 平成 21 (2009) 年 5 月

橋本孝明, 竹内嗣昇, 長谷川康和, 井上久弘: 風力エネルギーと太陽光エネルギーによる温室用エネルギー補完の研究, (社) 日本設計工学会中国支部講演論文集 NO.26, pp.7-9, 平成 21 (2009) 年 6 月

橋本孝明, 加藤 寛, 鶴飼達也, 渡部吉規, 河合武明: 学生食堂の使用済み食用油 (廃食油) を使ったバイオディーゼル燃料精製の実験プラントの設計と活用, (社)

日本設計工学会北陸支部平成 21 年度研究発表講演会論文集, pp.25-26, 平成 21(2009) 年 6 月

橋本孝明, 長谷川康和, 坂田栄太郎, 浅野由久: 環境教育とものづくり教育を兼ねた風力発電機の開発, (社) 日本設計工学会北陸支部平成 21 年度研究発表講演会論文集, pp.27-28, 平成 21(2009) 年 6 月

橋本孝明, 竹内嗣昇, 長谷川康和, 井上久弘: 自然エネルギーによる温室用エネルギー削減の研究, (社) 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集 Vol.5, pp.73-74, 2009 年 9 月 13 日~ 16 日

掛布知仁, 鈴木規文, 小野秀文, 中島 守: 自動車整備初学者が有する寸法認識能力と作業成績の関係, (社) 日本人間工学会 東海支部 2009 年研究大会 論文集, pp.52-53 (2009.10)

高田浩充, 平野博敏, 長谷川康和, 小野淳一, 岩瀬正幸, 大場正人: 自動車整備士試験教育における TIES の活用, NPO 法人 CCC-TIES2009 夏のシンポジウム in 愛知報告論文集, pp40-45(2009-9-8)

豆多弘規, 奥山圭一, 鳥家秀昭: 小型ロケットを用いた自律制御小型惑星探査実験機の開発, 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2009 年 11 月 27 日, 京都大学

佐藤翼, 奥山圭一, 樋口敏三: 宇宙往還機用耐熱材料の自動車制動材料への応用, 第 46 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2009 年 11 月 27 日, 京都大学

鈴木俊之, 藤田和央, 酒井武治, 奥山圭一, 加藤純朗, 西尾誠司: アブレーション熱防御システム評価解析手法の予測誤差定量化に向けたアブレータ加熱試験, 第 23 回数値流体力学シンポジウム, 2009 年 12 月 16 日~ 18 日, 仙台

6. その他

半田 毅: 業務に役立つ機械設計と機械製図, 岡崎ものづくり推進協議会主催蒲郡商工会議所後援, 機械設計製図講座 (2009.7.12,19)

井上久弘, 鶴殿 徹: 機械加工と計測について, 蒲郡技術科学振興会主催第 1 回機械加工技術講座(2009.10.29).

井上久弘, 鶴殿 徹: 切削工具について, 蒲郡技術科学振興会主催第 2 回機械加工技術講座 (2009.10.6).

井上久弘, 鶴殿 徹: 高エネルギー密度加工の現状について (その 1) ・ ・ 放電加工, 電解加工, 蒲郡技術科学振興会主催第 3 回機械加工技術講座 (2009.10.13).

井上久弘, 鶴殿 徹: 高エネルギー密度加工の現状について (その 2) ・ ・ レーザー加工, ウォータージェット加工, 蒲郡技術科学振興会主催第 4 回機械加工技術講座 (2009.10.20).

井上久弘, 鶴殿 徹: トヨタ生産方式について, 蒲郡技術科学振興会主催第 5 回機械加工技術講座 (2009.10.27)

大西正敏: ロボット分野動向について, 蒲郡鉄工青年部研修会 (愛知工科大学) (2009.2)

大西正敏: 福祉介護向けの支援ロボットの開発, 東三河・医工連携フォーラム (アークリッシュ豊橋) (2009.3)

大西正敏：ものづくりとロボット，蒲郡ライオンズクラブ（イルマーレ蒲郡出雲殿）（2009.4）

大西正敏：くらしとロボット，がまごおり好奇心大学・定例会（三谷東部市民センター）（2009.5）

大西正敏：現代のロボット技術と今後の展望について，平成21年度愛知県商工会議所青年部連合会（蒲郡商工会議所）（2009.7）

大西正敏：ロボットとは何だろう（からくりロボットから現代ロボットまで），日本学術振興協会ひらめき・ときめきサイエンス講演（愛知工科大学）（2009.8）

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・夏季大学講義（愛知工科大学）（2009.8）

橋本孝明：身のまわりから学ぶ流体力学，蒲郡商工会議所第11回公開講座講師，（2009.7.29）

橋本孝明，尾崎 勝，田宮 直：平成21年度家庭の日親子教室「昆虫ロボットづくり」講師，蒲郡市教育委員会青少年センター，（2009.5.17）

橋本孝明，尾崎 勝：休日参観親子体験学習，蒲郡市立西部小学校講師，（2009.6.20）

橋本孝明，尾崎 勝，田宮 直：親子でチャレンジ工作

教室「2チャンネル・リモコン ボクシングロボット」講師，蒲郡市教育委員会生涯学習課，（2009.8.2）

橋本孝明：鶴殿と松平による蒲郡の戦国時代，蒲郡マリンライオンズクラブ例会講師，（2009.10.23）

加藤 寛，橋本孝明，鶴飼達也，渡部吉規，河合武明，井戸田敦：バイオ・ディーゼル プロジェクト ―蒲郡市 循環型社会の形成― ，愛知工科大学平成20年度研究成果報告会（2009.4）

高田浩充：産経新聞，自動車用ブレーキのしくみ，産経eカレッジみんなde大学，<http://www.minnade-daigaku.com/>，（2009-8）

奥山圭一：津山高専による宇宙開発，計測自動制御学会中国支部，津山市，2009年2月7日

奥山圭一：地球重力圏を超えて，深宇宙空間へ，AUT文化講演会，愛知工科大学，2009年10月17日

野中 登：マイコンを用いたロボット制御，東三河高大連携協議会，夏季大学体験講義（愛知工科大学）（2009.8）

野中 登：東三河高大連携事業夏季大学体験講義，平成21年度東三河高大連携フォーラム（愛知県立時習館高等学校）（2010.2）

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を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。

General Remarks

Differential Form Maxwell Equations in Minkowski Space	Yujiro Ishikawa	75
Reconsideration on Sinusoidal AC-circuit Theory Derived from Maxwell Equations	Yujiro Ishikawa	85

Reports

An Investigation on Reducing Energies for Green Houses by Using New Energies Takaaki Hashimoto, Hisahiro Inoue, Terumi Yamamoto, Hideo Nagata, Hirokazu Suzuki Akinori Takeuchi, Masaru Ozaki, Yoshihisa Asano, Eitaro Sakata		93
Development of Retrieval System of Problems for Auto Mechanic Examinations Hiromichi Takada, Masahito Oba, Junichi Ono		99
Test Flight of the Second Man- Powered Aircraft	Takaaki Hashimoto	103

List of Publications during 2009.1 - 2009.12

愛知工科大学紀要 第7巻 平成22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.7, 2009

CONTENTS

Papers

Research on Rotation of a Rotor in Gari-Gari Dragonfly (1st Report, Experiments on Rotating Direction of a Rotor) Hiroshi Ota and Tsuyoshi Handa	1
Research on Rotation of a Rotor in Gari- Gari Dragonfly (2nd Report, Theoretical Consideration on Rotation of a Rotor) Hiroshi Ota, Tsuyoshi Handa and Tetsuya Kabeya	7
Unsteady Thermal Stresses in the Infinite Strip with Slanting Boundaries to the Functionally Graded Direction Manabu Ohmichi	15
Experiments of a Microwave Doppler Speedometer Make Use of an Automatic Door Sensor Yu Fujimoto, Yasuhiko Nawa, Kunio Aiki	25
Photo-conduction Characteristics of Titanium Oxide Films obtained by Rf Sputtering Method Masaki Fukazawa, Koichi Sakaguchi, Koichi Shimakawa and Yoshinori Hatanaka	31
Recombination Process of Photo-excited Carriers in TiO _x Films Prepared by Rf Sputtering Method Koichi Sakaguchi, Koichi Shimakawa, Yoshinori Hatanaka	35
Restoration of Bandainagon-emaki Based on Restoration Copy of Genjimonogatari-emaki and Data Bases Yasumitsu Miyazaki and Yoshihiko Imaizumi	39
Telemedical and Welfare Network Using Disigal AV System Yasumitsu Miyazaki, Yoshio Nomura and Satoshi Mizutani	49
Study on API Software for Data-Processing Compacted XML-Documents Shigeru Yoshida and Noriko Itani	57
Study on Electromagnetic Noises from Mobile Phones Related with the Communication Modes Nobuaki Sugiura, Takuya Yamaga	63

Note

Making of a Traffic Access Movie for Our University Using PIP(Person In Presentation) Komei Kato, Toru Miyake	67
--	----

Essay

The Exact Name of the Mountain is not “GOISAN”, but “GOIYAMA”. Takaaki Hashimoto	73
---	----

(continued)

Published by
Aichi University of Technology
50-2 Manori Nishihasama Gamagori
Aichi 443-0047, JAPAN