

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 16 卷



AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2018

愛知工科大学紀要 第16巻

目次

研究論文

- 自動車風洞の説明と愛知工科大学に新設した自動車空力計測装置の紹介
..... 石原裕二 1
- Analysis of Two-Dimensional Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Orthotropic Strip
..... Manabu Ohmichi 7
- 惑星探査ローバの機体設計及び ARLISS2017における動作ログの詳細分析
..... 斎藤卓也, 秋山実穂 17
- 自動車運転中の“ながらスマホ”の影響の計測
..... 尾林史章, 荒川俊也, 小塚一宏 27
- 駅ホーム上歩行中におけるスマートフォン使用時の視線特性
..... 尾林史章, 荒川俊也, 小塚一宏 35
- 単一マイクロホン入力音声からの Deep Belief Network による発話者までの距離推定
..... 實廣貴敏, 宮嶋 博, 布目貴大, 武田一哉 39
- 文法型圧縮法による英語・日本語・中国語文書の圧縮
..... 吉田 茂, 芦田勝猛 45
- 自動ブレーキを搭載したソーラー付電動シニアカーの開発
..... 鈴木宏和, 中島 守, 永田英雄, 岩瀬正幸, 甲村一貴, 小野秀文 53

研究ノート

数理統計学における確率変数の確率密度関数の新導出法

..... 高橋義則 59

工学における実務統計解析の基礎

..... 荒川俊也 75

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 (2018.1-2018.12)

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

自動車風洞の説明と愛知工科大学に新設した 自動車空力計測装置の紹介

石原裕二*

(2018年9月30日 受理)

Explanation of Automobile Wind Tunnel and Introduction of Newly Established Automobile Aerodynamics Measurement Equipment

Yuji Ishihara*

(Received September 30, 2018)

Abstract

In this paper, we introduce representative examples of the ground simulation method which is a feature of the wind tunnel for automobiles. Next, we introduce the newly established aerodynamic measurement device for the wind tunnel of the Aichi University of Technology. Then wind tunnel experiment and aerodynamic calculation results of simple car models carried out in a graduation research will be introduced.

キーワード：風洞，自動車風洞，空力，グラウンドシミュレーション，CFD

Keywords: Wind tunnel, Automobile Wind tunnel, Aerodynamics, Ground Simulation, CFD

1. はじめに

近年、自動車の高速化や環境問題の高まりにともない、最高速度や燃料消費に影響する空気抵抗の低減技術も進んできている。一方、レーシングカーの空力開発においては、高いダウンフォース（負の揚力）が発生するように床下構造を工夫している。一般的に、ダウンフォースがあまり重要でない乗用車の空力開発においては固定地面風洞を、ダウンフォースが重要であるレース車両の空力開発においてはムービングベルト付き風洞を利用してきている。最近、乗用車においても空気抵抗および揚力の低減を目的に床下構造を設計する車両が増えてきている^[1]。

本研究論文では初めに、自動車用風洞の特徴であるグラウンドシミュレーション（地面境界の相似）手法の代表的例を紹介する^[2]。次に、本学に新しく設置した模型自動車用空力計測装置の紹介および卒業研究で行った簡易自動車モデルの風洞実験と計算結果を紹介する。

2. 自動車風洞グラウンドシミュレーション

上述のように、乗用車の空力実験を風洞を用いて行う場合、通常、乗用車モデルは固定地面上に設置される。この場合、モデルと地面の間に相対速度がなく、実際の流れを模擬していない。この不具合を避けるため、いろいろなグラウンドシミュレーション手法が考案されている。代表的なグラウンドシミュレーション手法の模式図をFig.1に示した^[2]。これらの手法の特徴を簡単に述べる。

・ベーシックサククション (Fig.1a)

風洞内で発達した境界層を風洞ノズルの下流側付近で

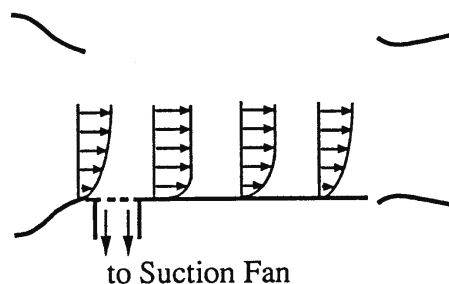


Fig.1a ベーシックサククション

* 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, Aichi 443-0047 Japan

吸い取る最も一般的な方法であり、多くの風洞で用いられている。但し、境界層を吸い込んだ後は、境界層は再び発達する。

・ディストリビューテッドサクシオン (Fig.1b)

測定部の床一面に境界層吸込孔を設け、ベーシックサクシオンでは防ぐことのできない境界層の発達を抑える方法である。この方法の欠点は、床面上の吸込分布や吸込量を定める合理的な基準が無く、吸込量が計測結果、特に揚力に影響を与える。

・タンジェンシャルブローイング (Fig.1c)

上述の境界層吸込法とは反対に、発達した境界層内に床面の接線方向に噴流を吹き込むことによって境界層の発達を防ぐ方法である。この方法も噴流の強さを定める合理的な基準はなく、噴流の強さが計測結果に大きく影響を与える。

・ムービングベルト (Fig.1d)

前後に設置したローラーで駆動されるベルトを風洞地面部に配置し、風洞から噴き出す一様流と同じ速度でベルトを移動させる方法である。ベルト前方で上述のベーシックサクシオンにより風洞内で発達した境界層を吸い込む。実走行の地面境界層を最もうまく模擬できる手法である。欠点としては、実車や実寸法の模型風洞実験を行う場合、実車や模型の支持方法の困難さと装置が大がかりになる点である。

実車風洞の場合、この欠点を避けるためファイブベルト式と呼ばれるムービングベルト方法が主流になっている。この方法は風洞地面部いっぱいの幅にベルトを設置するのではなく車体中央部に細長い一本のベルト、車輪の下にそれぞれ1本の小さなベルト4本を配し、下から4本のストラットで車体のサイドシル部を支持するものである。Fig.2, Fig.3は2013年に稼働したトヨタ自動車風洞建屋およびファイブベルト式実車風洞の写真である。ファン出力8,000kW、ノズル幅7mおよび高さ4.5m、最高速度250km/hである^{[3],[4]}。

3. AUT 風洞実験装置

2000年3月に(株)西日本流体技研製の小型風洞が夢トピア1階流体実験室に設置されたが、この風洞自体は、空気抵抗などを計測するテストセクションがない流れの可視化風洞として使用されていた。そこで、この風洞を改修して自動車の空力値が計測できるテストセクションを2017年1月に構築したので、風洞およびテストセクションを含む計測装置の紹介を以下に述べる。

風洞はエッフェル型で噴出し口ノズル面積は300mm x

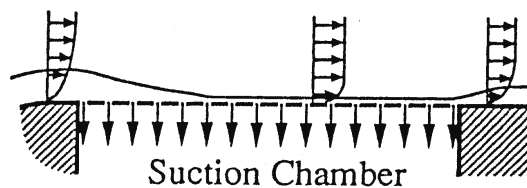


Fig.1b ディストリビューテッドサクシオン

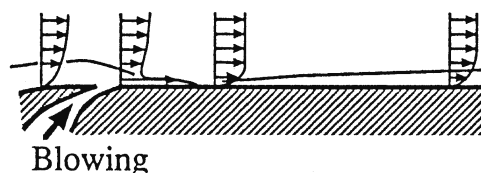


Fig.1c タンジェンシャルブローイング

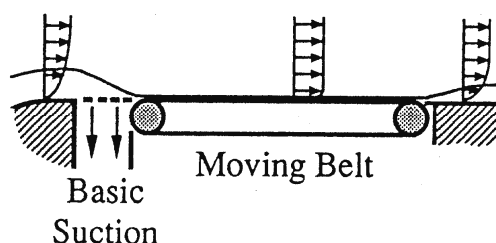


Fig.1d ムービングベルト

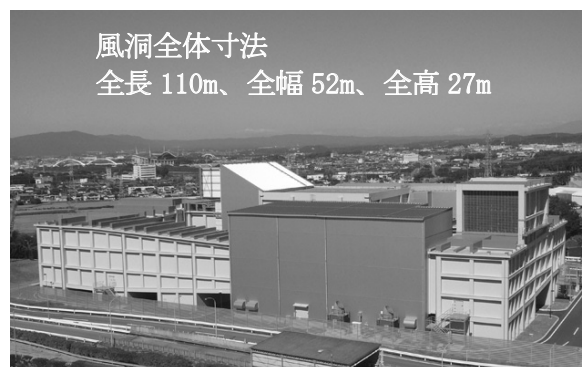


Fig.2 トヨタ風洞建屋



Fig.3 トヨタ5ベルト式ムービングベルト

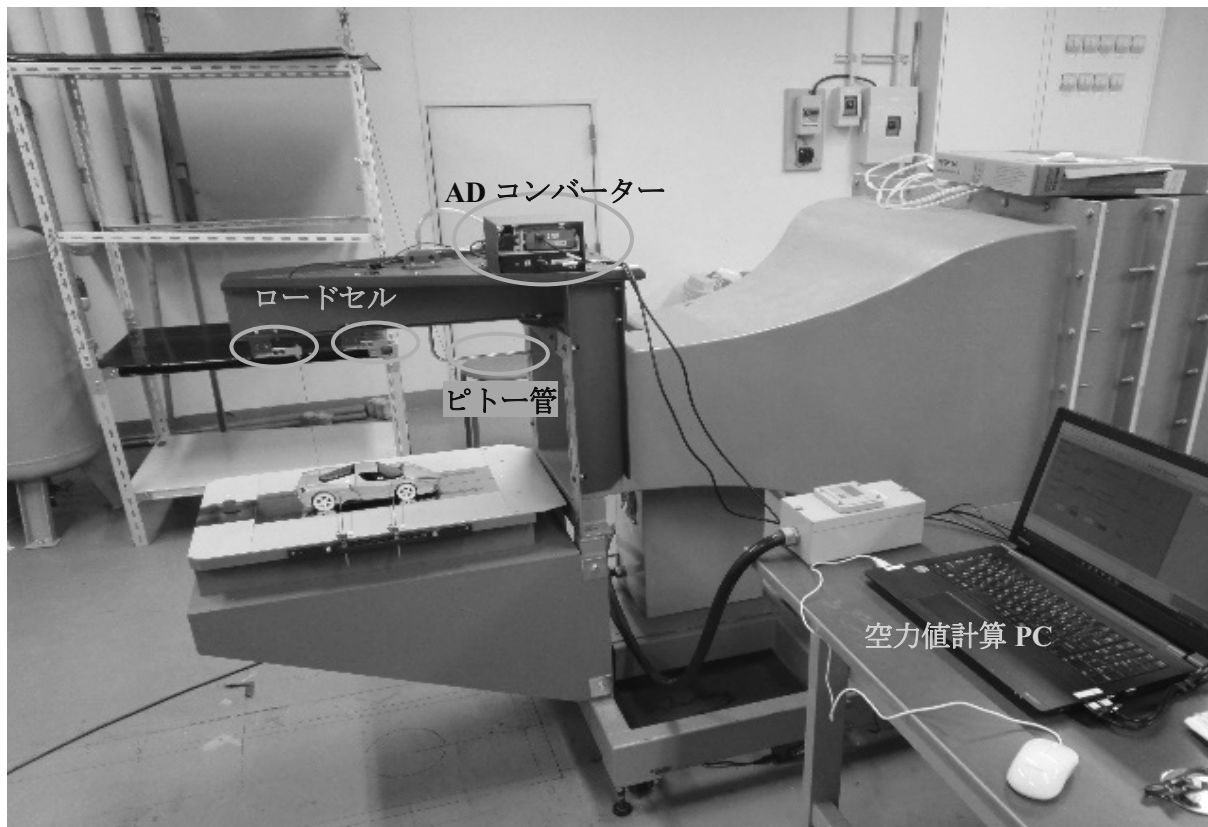


Fig.4 AUT 風洞実験装置

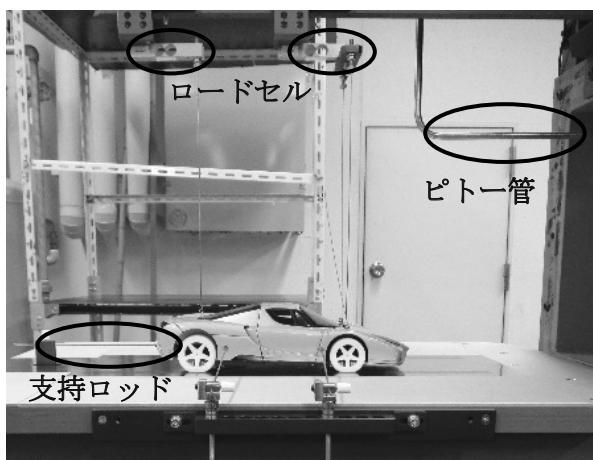


Fig.5 AUT 風洞テストセクション

300mm であり、テストセクションの長さは 665mm、幅は 395mm である。モータ出力は 2.2kW で、噴出しノズルにおける最高流速は 25m/s である。Fig.4 に風洞、Fig.5 にテストセクションの写真を示した。今回の改修では上述したベーシックサクションやムービングベルトなどのグランドシミュレーション装置はなく固定地面板のみである。Fig.4、Fig.5 に示すようにモデルは前輪車軸上に 2 か所、車両中央で後輪車軸上に 1 か所で金属ロッドにより吊り下げられ、さらにモデルは後部面 1 か

所で金属ロッドにより支持されている。前輪部を吊り下げている 2 本の金属ロッドと後輪を吊り下げている 1 本の金属ロッドはそれぞれ風洞テストセクション上部に取り付けられた主流方向前後 2 か所のロードセルに取り付けられている。この 2 つのロードセルにより前輪部揚力および後輪部揚力を計測している。一方、モデル後部面の金属ロッドは風洞後部に設置されたロードセルに取り付けられており、このロードセルにより抗力を計測している。流速は風洞噴出し口に設置したピトー管で計測している。計測した力と流速のアナログ信号は AD コンバーターを介してノートパソコンに取り込まれ、パソコンにインストールした空力計測アプリにて時間平均した抗力係数および揚力係数を演算し表示する。

4. 風洞実験例および計算結果

AUT 風洞を使用した実験例を以下に述べる。実験に用いた簡易自動車実験モデルを Fig.6(a) から (d) に示した。これらのモデルは車両後部の傾斜角のみに違いがあるが、傾斜角以外の形状は全く同じである。Fig.6(a) から (d) の傾斜角度はそれぞれ、90°、45°、30°、15°であり、この角度は実際の車両のワンボックスカー (90°)、ハッチバックカー (45°)、スポーツカー (30°、15) のパッ

クドア傾斜角に対応している。

Fig.7からFig.9に計測結果を示した。Fig.7は空気抵抗係数 C_D である。

$$C_D = D / ((1/2) \rho V^2 A)$$

ここで, D は抗力, ρ は空気密度, V は風洞噴出し流速, A はモデル前面投影面積である。一般的な感覚からすると傾斜角 90° , 45° , 30° , 15° の順番で C_D が小さくなるように思えるが, グラフから分かるように C_D が一番大きいのは傾斜角 30° で, 一番小さいのは 15° である。車両後方から流れ方向に軸を持つ左右一対の縦渦が形成されるが(後述 Fig.10), この渦が車両空気抵抗の一因となる。この渦の強度が 30 度で最大となるため傾斜角 30° の車両の空気抵抗係数 C_D が最大となる。この渦による抵抗を誘導抵抗と呼ぶ。この渦は飛行機の翼端から形成される翼端渦と同様のメカニズムで発生している。傾斜角 90° , 45° では, 車両ルーフ上の流れは車両後部で剥離し, 誘導抵抗を発生させる渦は存在しないため, 結果として車両全体の C_D は 30° より小さくなる。一方 15° ではこの渦は存在するが, 渦の強度が弱まると共に後部形状が流線形状に近づくため C_D は小さなっている。

前輪および後輪車軸上揚力係数である C_{LF} , C_{LR} を Fig.8 と Fig.9 に示した。

$$C_{LF} = L_F / ((1/2) \rho V^2 A)$$

$$C_{LR} = L_R / ((1/2) \rho V^2 A)$$

ここで, L_F , L_R はそれぞれ前輪および後輪揚力であり, L_F , L_R の正值は鉛直下向きの力(ダウンフォース)を負値は鉛直上向きの力(揚力)を表す。

傾斜角 30° での後輪車軸揚力係数 C_{LR} は他の傾斜角に比べ大きく負の値(大きな揚力)となっており, この原因は以下のとおりである。上述の左右一対の渦で加速された後部傾斜面に沿った流速の速いダウンウォッシュと呼ばれる下降流が発生する。この流速の速いダウンウォッシュにより車両後部上面が負圧になり車両後部に大きな揚力が働いている。一方, 傾斜角 30° での前輪車軸揚力係数 C_{LF} は正值(ダウンフォース)となっているが, これは車両後部の強い揚力のためモデルに頭下げ(車両前端部下げ)のピッチングモーメントが加わっていることが主な原因である。

Fig.10 は Fig.6(a) に示した後面傾斜角が 30° の場合のモデルの計算結果である^[5]。この図は主流方向と直行する面でのモデル後流速度ベクトル図で, このベクトル図の位置はモデル後面からモデル全長の $1/2$ の距離後方である。上述の車両後面から発生した左右一対の渦は車両後方まで消滅せずに伸びている。

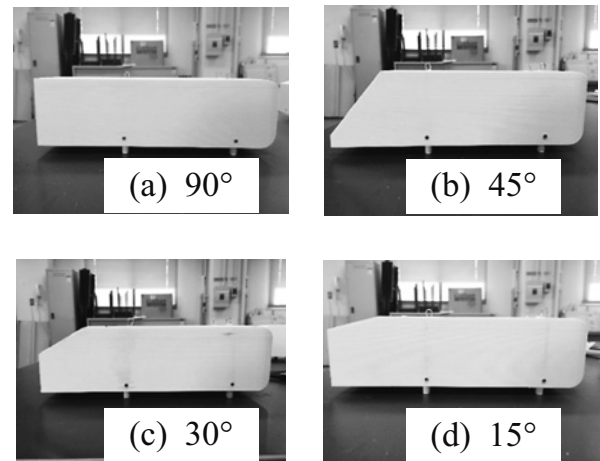


Fig.6 自動車簡易モデル背面傾斜角

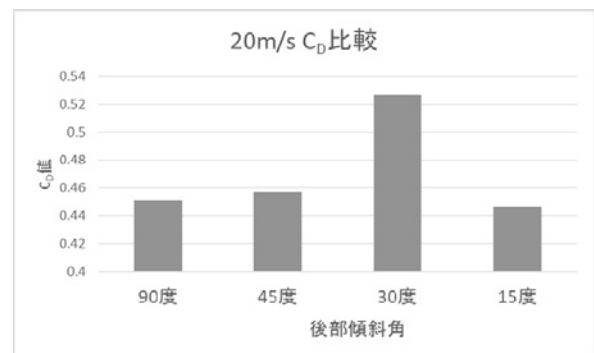


Fig.7 空気抵抗係数 C_D

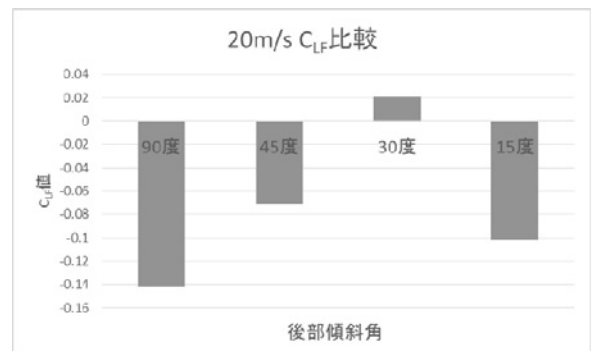


Fig.8 前輪車軸上揚力係数 C_{LF}

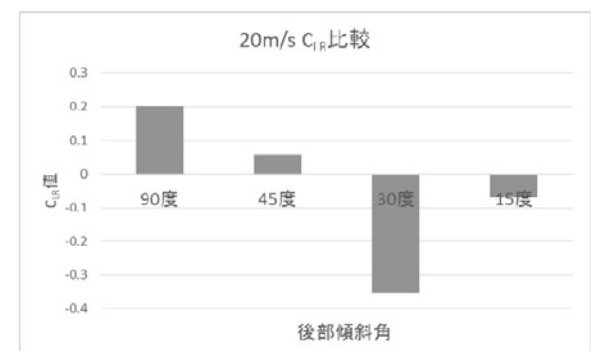


Fig.9 後輪車軸上揚力係数 C_{LR}

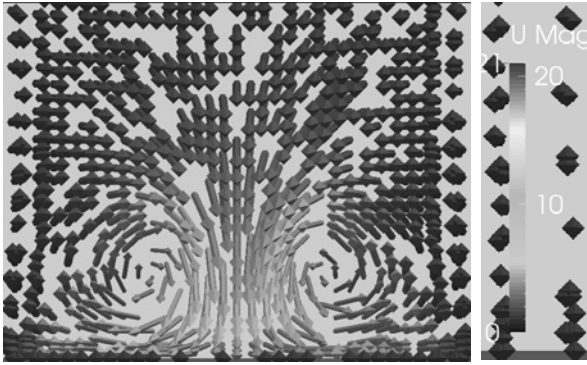


Fig.10 車両後流断面速度ベクトル

5. まとめ

本論文では、自動車の風洞実験をより正確に行う場合に必要となる地面境界を実走行に近づけるグランドシミュレーションの説明を行った。理想的な方法は風洞の流速と同じ速度で地面板が移動するムービングベルト法である。続いて、本学に使用されていた小型風洞を改修し、新たに設置した自動車縮尺モデル用の計測装置の紹介を

行った。今回の改修ではグランドシミュレーション装置ではなく固定地面板のままであるが、自動車空力に不可欠な抵抗係数、前輪および後輪車軸上揚力係数が計測可能である。最後に、本風洞を用いた卒業研究での実験および計算例を紹介した。自動車前方部の形状が同一でも後部傾斜角の違いによって空力値に大きな違いがあることを示した。

参考文献

- [1] 流体技術部門委員会編, 「自動車の空力技術」, 6.1 節, 6.5 節, 6.6 節, 公益財団法人自動車技術会 発行, (2017.9.8)
- [2] 石原裕二, “ムービングベルト風洞を用いた乗用車の空力開発” 自動車技術会誌、文献番号: 20034158, Vol.57, No.4, 2003 年 4 月
- [3] トヨタ自動車ホームページ, “トヨタ自動車、「パワートレーン共同開発棟」と「風洞実験棟」を竣工”, 2013 年 3 月 27 日 .
- [4] AUTO PROVE ホームページ, “【トヨタ】本社敷地内に新設備「パワートレーン共同開発棟」、「新型風洞」が稼働開始” .
- [5] 埜村優太, 山本勝紀, 石原裕二, “簡易自動車モデルの形状変化による空気抵抗値への影響”, 日本機械学会東海支部第 49 回学生会卒業研究発表講演会, 2018 年 3 月 .

Analysis of Two-Dimensional Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Orthotropic Strip

Manabu Ohmichi*

(Received September 30, 2018)

Abstract

This research is concerned with the transient plane thermoelastic problems in functionally graded orthotropic materials. The material properties such as the specific heat c , the density ρ , the thermal conductivities λ_x and λ_y , the coefficients of linear thermal expansion α_x and α_y , the Young's moduli E_x and E_y in x and y directions, respectively, are assumed to be functions of position (x). Laplace transform and separation of variables are used to analyze the temperature field in functionally graded orthotropic strip. The stress function is used for the plane thermoelastic problem in the functionally graded orthotropic materials. As a specific example, functionally graded orthotropic strip was analyzed. Numerical results show that orthotropy has a major impact on temperature and thermal stresses in functionally graded orthotropic strip. The proposed analytical method is useful in the design of structures exposed to severe temperature environment.

Keywords : Thermoelastic problems, Functionally graded orthotropic materials, Two-dimensional problems, Stress function method

1. Introduction

In severe temperature environment such as the cosmic space, thermal power station and internal combustion engines, it is necessary to protect the structural materials from wear, corrosion and delamination. The composite materials such as multi-layered plates were used for thermal barrier coatings, but sometimes, thermal destruction occurred at the bonded surface between the layers¹⁾ because of difference of thermal expansion. To reduce the thermal stresses and residual stresses, the functionally graded materials (FGMs) have been developed. By changing the material properties continuously, FGM can avoid the destruction. The concept of FGMs has been introduced by researchers^{2) 3)}. Noda and Tsuji⁴⁾ investigated steady thermal stresses in a functionally graded plate (FGP), and Noda and Tsuji⁵⁾ studied steady thermal stresses in FGP with temperature-dependent material properties. Obata and Noda⁶⁾

presented steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of FGMs. Noda⁷⁾ took a general view of thermal stress problems in FGMs. Hetnarski⁸⁾ edited the Encyclopedia of Thermal Stresses. Many topics on thermal stress problems in FGMs had been shown in it.

However, the analytical treatments of heat conduction and thermal stress problems in the functionally graded orthotropic materials (FGOMs) are not so many.

For the investigation of FGOM thermal stresses, Ootao et al.⁹⁾ treated the transient thermal stresses involving an functionally graded orthotropic thick strip.

Huang et al.¹⁰⁾ investigated the bending problems of a functionally graded anisotropic cantilever beam. Jabbari et al.¹¹⁾ presented the transient solution of asymmetric mechanical and thermal stresses for hollow cylinders made of FGM. Kansal et al.¹²⁾ dealt with the

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

stress analysis on orthotropic graded rotating annular discs. Takabi¹³ studied the transient plane quasi-static thermal stress of an orthotropic hollow cylinder. Ohmichi et al.¹⁴ investigated the analytical method for plane heat conduction problems in the FGOM.

Concerning the research of thermal stresses by use of the stress function in FGOM, Ohmichi and Noda¹⁵ presented the conditions of single-valuedness of rotation and displacements in the multiply-connected region for non-homogeneous materials.

As a further development, an analytical method of thermal stresses by use of the stress function in FGOM is discussed. The governing equation of thermal stresses expressed by the stress function is derived. As a specific example, we analyzed the thermal stresses in the functionally graded orthotropic strip (FGOS). The material properties are assumed as exponential functions of a variable x . The numerical calculations for FGOS are carried out under the transient temperature field. The effects of orthotropy of the material properties on thermal stresses are clarified.

1. Transient heat conduction in functionally graded orthotropic strip (FGOS)

When the material properties in FGOM are functions of variables x and y , the two-dimensional transient heat conduction equation in FGOM is given by

$$c(x, y)\rho(x, y)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_x(x, y)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_y(x, y)\frac{\partial T}{\partial y}\right] + W(x, y) \quad (1)$$

where $c(x, y)$ denotes the specific heat, $\rho(x, y)$ is the density, $\lambda_x(x, y)$ and $\lambda_y(x, y)$ are the thermal conductivities along x and y directions, respectively. $W(x, y)$ denotes the internal heat generation per unit time and unit area. For the steady state without internal heat generation, Eq. (1) reduces to

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_x(x, y)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda_y(x, y)\frac{\partial T}{\partial y}\right] = 0 \quad (2)$$

When the material properties are arbitrary functions of

x only, that is

$$c = c(x), \rho = \rho(x), \lambda_x = \lambda_x(x), \lambda_y = \lambda_y(x) \quad (3)$$

Eq. (1) reduces to the following equation for the transient state without internal heat generation.

$$c(x)\rho(x)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda_x(x)\frac{\partial T}{\partial x}\right] + \lambda_y(x)\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

When the material properties are expressed by exponential functions of x ,

$$c(x)\rho(x) = c_0\rho_0e^{\lambda x}, \lambda_x(x) = \lambda_{x0}e^{\lambda x} = \lambda_{10}e^{\lambda x}, \\ \lambda_y(x) = \lambda_{y0}e^{\lambda x} = \lambda_{20}e^{\lambda x} \quad (5)$$

where $c_0, \rho_0, \lambda, \lambda_{x0}, \lambda_{10}, \lambda_{y0}$ and λ_{20} are constants, Eq. (4) becomes

$$\frac{1}{\kappa_0}\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda(x)\frac{\partial T}{\partial x} + q^2\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (6)$$

where q and κ_0 are given by

$$q = \sqrt{\lambda_{y0}/\lambda_{x0}}, \quad \kappa_0 = \lambda_{x0}/(c_0, \rho_0) \quad (7)$$

We consider the FGOS shown in **Fig.1**. The initial condition is given by

$$T = T_i \text{ (constant) at } t = 0 \quad (8)$$

The boundary conditions are considered as

$$T = T_i + T_a g_a(y) \\ = T_i + T_a \int_0^\infty \bar{g}_a(s)\cos(sy)ds \text{ at } x = 0 \quad (9)$$

$$T = T_i + T_b g_b(y) \\ = T_i + T_b \int_0^\infty \bar{g}_b(s)\cos(sy)ds \text{ at } x = h \quad (10)$$

where

$$\bar{g}_a(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty g_a(y)\cos(sy)dy, \\ \bar{g}_b(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty g_b(y)\cos(sy)dy \quad (11)$$

By use of the Laplace transform

$$f^*(p) = \int_0^\infty f(t)e^{-pt}dt \quad (12)$$

Eq. (6) can be transformed into

$$\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^2} + \lambda\frac{\partial T^*}{\partial x} + q^2\frac{\partial^2 T^*}{\partial y^2} - \frac{p}{\kappa_0}T^* = -\frac{1}{\kappa_0}T_i \quad (13)$$

By use of the separation of variables, we obtain the general solution of Eq. (13) in the Laplace domain as

$$T^*(p, x, y) = \frac{T_i}{p} + \int_0^\infty (A_1 e^{r_1 x} + A_2 e^{r_2 x}) \\ \times [B_1 \cos(sy) + B_2 \sin(sy)]ds \quad (14)$$

where A_1, A_2, B_1 and B_2 are constants which are determined by boundary conditions for the temperature, s denotes separation constant and r_1 and r_2 are given by

$$\begin{aligned} r_1 &= -\lambda/2 + \sqrt{\lambda^2/4 + s^2q^2}, \\ r_2 &= -\lambda/2 - \sqrt{\lambda^2/4 + s^2q^2} \end{aligned} \quad (15)$$

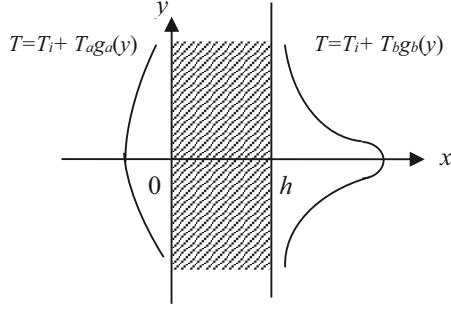


Fig.1 The boundary conditions of FGOS

The Laplace transformations of boundary conditions (9) and (10) give

$$T^*(p, 0, y) = \frac{1}{p} T_i + \frac{T_a}{p} \int_0^\infty \bar{g}_a(s) \cos(sy) ds \quad (16)$$

$$T^*(p, h, y) = \frac{1}{p} T_i + \frac{T_b}{p} \int_0^\infty \bar{g}_b(s) \cos(sy) ds \quad (17)$$

Then the solution which satisfies the boundary conditions becomes

$$\begin{aligned} T^* &= T_i/p + \int_0^\infty \frac{1}{p \cdot \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + p/\kappa_0 + q^2s^2}h)} \\ &\times \{T_a \bar{g}_a(s) e^{-\frac{\lambda x}{2}} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + p/\kappa_0 + q^2s^2}(h-x)] \\ &+ T_b \bar{g}_b(s) e^{\frac{\lambda(h-x)}{2}} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + p/\kappa_0 + q^2s^2}x]\} \\ &\times \cos(sy) ds \end{aligned} \quad (18)$$

Performing the inverse Laplace transformation of Eq. (18), the temperature is obtained as

$$\begin{aligned} T(t, x, y) &= T_i \\ &+ \int_0^\infty C_s \{T_a \bar{g}_a(s) e^{-\frac{\lambda}{2}x} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2s^2}(h-x)] \\ &+ T_b \bar{g}_b(s) e^{\frac{\lambda}{2}(h-x)} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2s^2}x]\} \cos(sy) ds \\ &+ \sum_{n=1}^\infty \int_0^\infty e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2s^2 + n^2\pi^2/h^2)t} D_{sn} \\ &\times \{T_a \bar{g}_a(s) e^{-\frac{\lambda x}{2}} [\sin(1-x/h) n\pi] + \\ &T_b \bar{g}_b(s) e^{\lambda(h-x)/2} \sin(xn\pi/h)\} \cos(sy) ds \end{aligned} \quad (19)$$

where

$$\begin{aligned} C_s &= 1/\sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2s^2}h), \\ D_{sn} &= 2n\pi(-1)^n / [(\lambda^2/4 + q^2s^2)h^2 + n^2\pi^2] \end{aligned} \quad (20)$$

2. Two-dimensional transient thermal stresses in the functionally graded orthotropic materials

The equilibrium equations for plane thermo-elasticity are

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

where σ_{ij} ($i, j=x, y$) denote stress components. Strain components are given by

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \quad (22)$$

where ε_{ij} ($i, j=x, y$) denote strain components and u_i ($i=x, y$) are displacement components.

The constitutional equations for the plane problems in the FGOMs are

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= a_{11}\sigma_{xx} + a_{12}\sigma_{yy} + \alpha_1\tau, \\ \varepsilon_{yy} &= a_{21}\sigma_{xx} + a_{22}\sigma_{yy} + \alpha_2\tau, \quad \varepsilon_{xy} = a_{66}\sigma_{xy}, \\ \sigma_{xx} &= b_{11}\varepsilon_{xx} + b_{12}\varepsilon_{yy} + \beta_1\tau, \\ \sigma_{yy} &= b_{21}\varepsilon_{xx} + b_{22}\varepsilon_{yy} + \beta_2\tau, \quad \sigma_{xy} = b_{66}\varepsilon_{xy} \end{aligned} \quad (23)$$

where a_{ij}, b_{ij} ($i, j=1, 2, 6$) and β_i ($i=1, 2$) denote the material properties which are dependent on the positions x and y , α_i ($i=1, 2$) mean the coefficients of linear thermal expansion along the x and y directions, respectively, and τ denotes the temperature change from the constant initial temperature T_i .

$$\tau(t, x, y) = T(t, x, y) - T_i \quad (24)$$

The following relationships are formed among a_{ij}, b_{ij}, α_i and β_i ($i=1, 2$).

$$\begin{aligned} a_{21} &= a_{12}, \quad b_{21} = b_{12}, \quad b_{11} = \frac{a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \\ b_{12} &= -\frac{a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad b_{21} = -\frac{a_{21}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \\ b_{22} &= \frac{a_{11}}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad b_{66} = \frac{1}{a_{66}}, \\ \beta_1 &= -\frac{a_{22}\alpha_1 - a_{12}\alpha_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}}, \quad \beta_2 = \frac{a_{21}\alpha_1 - a_{11}\alpha_2}{a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21}} \end{aligned} \quad (25)$$

The compatibility equation is given by

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (26)$$

Here, we use the stress function method which was discussed for the thermal stresses in FGOMs¹⁵.

The thermal stresses are expressed by use of the stress function χ .

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

Substitutions of Eq. (27) into Eqs. (23) and (26) yield the governing equation of the stress function χ .

$$\begin{aligned} & a_{22} \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} + (a_{12} + a_{21} + 2a_{66}) \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} \\ & + 2 \frac{\partial a_{22}}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi}{\partial x^3} + \left(\frac{\partial^2 a_{22}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 a_{12}}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^3 \chi}{\partial x^2} \\ & + 2 \frac{\partial(a_{12}+a_{66})}{\partial y} \frac{\partial^3 \chi}{\partial x^2 \partial y} + 2 \frac{\partial^2 a_{66}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} + 2 \frac{\partial a_{11}}{\partial y} \frac{\partial^3 \chi}{\partial y^3} \\ & + \left(\frac{\partial^2 a_{11}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 a_{21}}{\partial x^2} \right) \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial(a_{12}+a_{66})}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi}{\partial x \partial y^2} \\ & = -\alpha_2 \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} - \alpha_1 \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \alpha_1}{\partial y^2} \right) \tau - 2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} \frac{\partial \tau}{\partial x} \\ & - 2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \frac{\partial \tau}{\partial y} \end{aligned} \quad (28)$$

When the material properties are the functions of a variable x , Eq. (28) becomes

$$\begin{aligned} & a_{22} \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^4} + (a_{12} + a_{21} + 2a_{66}) \frac{\partial^4 \chi}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 \chi}{\partial y^4} \\ & + 2 \frac{\partial a_{22}}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 a_{22}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial(a_{21}+a_{66})}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi}{\partial x \partial y^2} \\ & + \frac{\partial^2 a_{21}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} = -\alpha_2 \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} - \alpha_1 \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial x^2} \tau - 2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} \frac{\partial \tau}{\partial x} \end{aligned} \quad (29)$$

When material properties are expressed in terms of the exponential functions of x , they are denoted as

$$\begin{aligned} a_{11}(x) &= a_{110} e^{\zeta x}, \quad a_{12}(x) = a_{120} e^{\zeta x}, \\ a_{21}(x) &= a_{210} e^{\zeta x}, \quad a_{22}(x) = a_{220} e^{\zeta x}, \\ a_{66}(x) &= a_{660} e^{\zeta x}, \quad \alpha_1(x) = \alpha_{10} e^{\alpha x}, \\ \alpha_2(x) &= \alpha_{20} e^{\alpha x} \end{aligned} \quad (30)$$

where a_{110} , a_{120} , a_{210} , a_{220} , a_{660} , α_{10} and α_{20} are material constants.

We consider the thermal stresses in FGOS shown in **Fig. 1**. Mechanical boundary conditions assumed are

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xy} = 0 \quad \text{at } x = 0$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xy} = 0 \quad \text{at } x = h \quad (31)$$

The general solution of Eq. (29) consists of the homogeneous solution χ^c and the particular solution χ^p .

$$\chi = \chi^c + \chi^p \quad (32)$$

The homogeneous equation is given by

$$\begin{aligned} & a_{22} \frac{\partial^4 \chi^c}{\partial x^4} + (a_{12} + a_{21} + 2a_{66}) \frac{\partial^4 \chi^c}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 \chi^c}{\partial y^4} \\ & + 2 \frac{\partial a_{22}}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi^c}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 a_{22}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi^c}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial(a_{21}+a_{66})}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi^c}{\partial x \partial y^2} \\ & + \frac{\partial^2 a_{21}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi^c}{\partial y^2} = 0 \end{aligned} \quad (33)$$

The homogeneous solution for FGOS is expressed in the form

$$\chi^c(x, y) = e^{\xi x} [C \cos(sy) + D \sin(sy)] \quad (34)$$

where ξ , C and D are constants.

Substitution of Eq. (34) into Eq. (33) yields

$$\begin{aligned} & a_{220} \xi^4 + 2a_{220} \zeta \xi^3 \\ & + [a_{220} \zeta^2 - (a_{120} + a_{210} + 2a_{660}) s^2] \xi^2 \\ & - 2(a_{210} + a_{660}) \zeta s^2 \xi + a_{110} s^4 - a_{210} \zeta^2 s^2 = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Using the roots of Eq. (35), we obtain the homogeneous solution.

$$\chi^c(x, y) = \sum_{i=1}^4 e^{\xi_i x} [C_{si}^c \cos(sy) + D_{si}^c \sin(sy)] \quad (36)$$

The governing equation for particular solution is

$$\begin{aligned} & a_{22} \frac{\partial^4 \chi^p}{\partial x^4} + (a_{12} + a_{21} + 2a_{66}) \frac{\partial^4 \chi^p}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 \chi^p}{\partial y^4} \\ & + 2 \frac{\partial a_{22}}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi^p}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 a_{22}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi^p}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial(a_{21}+a_{66})}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi^p}{\partial x \partial y^2} \\ & + \frac{\partial^2 a_{21}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi^p}{\partial y^2} = -\alpha_2 \frac{\partial^2 \tau}{\partial x^2} - \alpha_1 \frac{\partial^2 \tau}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \alpha_2}{\partial x^2} \tau \\ & - 2 \frac{\partial \alpha_2}{\partial x} \frac{\partial \tau}{\partial x} \end{aligned} \quad (37)$$

Substitution of Eqs. (19) and (24) into the right-hand side of Eq. (37) yields

$$\begin{aligned} & a_{22} \frac{\partial^4 \chi^p}{\partial x^4} + (a_{12} + a_{21} + 2a_{66}) \frac{\partial^4 \chi^p}{\partial x^2 \partial y^2} + a_{11} \frac{\partial^4 \chi^p}{\partial y^4} \\ & + 2 \frac{\partial a_{22}}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi^p}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 a_{22}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi^p}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial(a_{21}+a_{66})}{\partial x} \frac{\partial^3 \chi^p}{\partial x \partial y^2} \\ & + \frac{\partial^2 a_{21}}{\partial x^2} \frac{\partial^2 \chi^p}{\partial y^2} = e^{(\alpha-\lambda/2)x} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \int_0^\infty \left[D_{s1} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \right. \\
& + D_{s2} \cosh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\
& + D_{s3} \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\
& + D_{s4} \cosh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\
& + \sum_{n=1}^\infty e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2/h^2)t} \\
& \times \{ D_{sn1} \sin[(1-x/h)n\pi] + D_{sn2} \cos[(1-x/h)n\pi] \\
& + D_{sn3} \sin(xn\pi/h) + D_{sn4} \sin(xn\pi/h) \} \cos(sy) ds \\
& \quad \quad \quad (38)
\end{aligned}$$

where D_{s1} , D_{s2} , D_{s3} , D_{s4} , D_{sn1} , D_{sn2} , D_{sn3} and D_{sn4} are given by

$$\begin{aligned}
D_{s1} &= T_a \bar{g}_a(s) C_s [\alpha_{20}(\alpha\lambda - \lambda^2/2 - q^2 s^2 - \alpha^2) \\
& \quad + \alpha_{10} s^2] \\
D_{s2} &= T_a \bar{g}_a(s) C_s \alpha_{20} (2\alpha - \lambda) \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
D_{s3} &= T_b \bar{g}_b(s) C_s e^{\lambda h/2} \\
& \quad \times [\alpha_{20}(\alpha\lambda - \lambda^2/2 - q^2 s^2 - \alpha^2) + \alpha_{10} s^2] \\
D_{s4} &= T_b \bar{g}_b(s) C_s e^{\lambda h/2} \alpha_{20} (\lambda - 2\alpha) \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
D_{sn1} &= T_a \bar{g}_a(s) D_{sn} \\
& \quad \times [\alpha_{20}(\alpha\lambda - \lambda^2/4 + n^2 \pi^2/h^2 - \alpha^2) + \alpha_{10} s^2] \\
D_{sn2} &= T_a \bar{g}_a(s) D_{sn} \alpha_{20} (2\alpha - \lambda) n\pi/h \\
D_{sn3} &= T_b \bar{g}_b(s) D_{sn} e^{\lambda h/2} \\
& \quad \times [\alpha_{20}(\alpha\lambda - \lambda^2/4 + n^2 \pi^2/h^2 - \alpha^2) + \alpha_{10} s^2] \\
D_{sn4} &= T_b \bar{g}_b(s) D_{sn} e^{\lambda h/2} \alpha_{20} (\lambda - 2\alpha) n\pi/h \quad (39)
\end{aligned}$$

The particular solution is expressed in the form

$$\begin{aligned}
\chi^p(x, y) &= e^{\eta x} \int_0^\infty \left[E_{s1} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \right. \\
& + E_{s2} \cosh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\
& + E_{s3} \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\
& + E_{s4} \cosh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\
& + \sum_{n=1}^\infty e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2/h^2)t} \\
& \times \{ E_{sn1} \sin[(1-x/h)n\pi] \\
& + E_{sn2} \cos[(1-x/h)n\pi] + E_{sn3} \sin(xn\pi/h) \\
& + E_{sn4} \cos(xn\pi/h) \} \cos(sy) ds \\
& \quad \quad \quad (40)
\end{aligned}$$

Substitution of Eq. (40) into Eq. (38) yields

$$\begin{aligned}
\eta &= \alpha - \zeta - \lambda/2 \\
E_{s1} &= \frac{D_{s1} K_{1s} - D_{s2} K_{2s}}{K_{1s}^2 - K_{2s}^2}, \quad E_{s2} = \frac{-D_{s1} K_{2s} + D_{s2} K_{1s}}{K_{1s}^2 - K_{2s}^2} \\
E_{s3} &= \frac{D_{s3} K_{1s} + D_{s4} K_{2s}}{K_{1s}^2 - K_{2s}^2}, \quad E_{s4} = \frac{D_{s3} K_{2s} + D_{s4} K_{1s}}{K_{1s}^2 - K_{2s}^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_{sn1} &= \frac{D_{sn1} K_{3s} - D_{sn2} K_{4s}}{K_{3s}^2 + K_{4s}^2}, \quad E_{sn2} = \frac{D_{sn1} K_{4s} + D_{sn2} K_{3s}}{K_{3s}^2 + K_{4s}^2} \\
E_{sn3} &= \frac{D_{sn3} K_{3s} + D_{sn4} K_{4s}}{K_{3s}^2 + K_{4s}^2}, \quad E_{sn4} = \frac{-D_{sn3} K_{4s} + D_{sn4} K_{3s}}{K_{3s}^2 + K_{4s}^2} \quad (41)
\end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned}
K_{1s} &= a_{220} [\eta^4 + 6(\lambda^2/4 + q^2 s^2) \eta^2 \\
& \quad + (\lambda^2/4 + q^2 s^2)^2] - 2(a_{210} + a_{660}) \\
& \quad \times (\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) s^2 + a_{110} s^4 \\
& \quad + 2a_{220} \zeta \eta [\eta^2 + 3(\lambda^2/4 + q^2 s^2)] \\
& \quad + a_{220} \zeta^2 (\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) \\
& \quad - a_{210} \zeta^2 s^2 - 2(a_{210} + a_{660}) \zeta \eta s^2 \\
K_{2s} &= -4a_{220} \eta (\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
& \quad + 4(a_{210} + a_{660}) \eta s^2 \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
& \quad - 2a_{220} \zeta (3\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
& \quad - 2a_{220} \zeta^2 \eta \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
& \quad + 2(a_{210} + a_{660}) \zeta s^2 \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} \\
K_{3s} &= a_{220} (\eta^4 - 6n^2 \pi^2 \eta^2 + n^4 \pi^4/h^4) \\
& \quad - 2(a_{210} + a_{660}) (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) s^2 + a_{110} s^4 \\
& \quad + 2a_{220} \zeta \eta (\eta^2 - 3n^2 \pi^2 \eta^2) \\
& \quad + a_{220} \zeta^2 (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \\
& \quad - a_{210} \zeta^2 s^2 - 2(a_{210} + a_{660}) \zeta \eta s^2 \\
K_{4s} &= 4a_{220} (n\pi/h) \eta (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \\
& \quad - 4(a_{210} + a_{660}) (n\pi/h) \eta s^2 \\
& \quad + 2a_{220} (n\pi/h) \zeta (3\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \\
& \quad + 2a_{220} (n\pi/h) \zeta^2 \eta \\
& \quad - 2(a_{210} + a_{660}) (n\pi/h) \zeta s^2 \quad (42)
\end{aligned}$$

Thus, the stress function is given by

$$\begin{aligned}
\chi &= \chi^c + \chi^p \\
&= \int_0^\infty \sum_{i=1}^4 e^{\xi_i x} C_{si}^c \cos(sy) ds + e^{(\alpha - \zeta - \lambda/2)x} \\
& \times \int_0^\infty \left[E_{s1} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \right. \\
& + E_{s2} \cosh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\
& + E_{s3} \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\
& + E_{s4} \cosh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\
& + e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2/h^2)t} \\
& \times \sum_{n=1}^\infty \{ E_{sn1} \sin[(1-x/h)n\pi] \\
& + E_{sn2} \cos[(1-x/h)n\pi] + E_{sn3} \sin(xn\pi/h) \\
& + E_{sn4} \cos(xn\pi/h) \} \cos(sy) ds \\
& \quad \quad \quad (43)
\end{aligned}$$

Then substituting Eq. (43) into Eq. (27), we obtain the thermal stresses

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} = & - \int_0^\infty \sum_{i=1}^4 C_{si}^c e^{\xi_i x} s^2 \cos(sy) ds \\ & - e^{(\alpha-\zeta-\frac{\lambda}{2})x} \int_0^\infty s^2 \left[E_{s1} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \right. \\ & + E_{s2} \cosh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\ & + E_{s3} \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\ & + E_{s4} \cosh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\ & + \sum_{n=1}^\infty e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2/h^2)t} \\ & \times \{ E_{sn1} \sin[(1-x/h)n\pi] \\ & + E_{sn2} \cos[(1-x/h)n\pi] + E_{sn3} \sin(xn\pi/h) \\ & + E_{sn4} \cos(xn\pi/h) \} \cos(sy) ds \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} = & \int_0^\infty \sum_{i=1}^4 C_{si}^c e^{\xi_i x} \xi_i^2 \cos(sy) ds \\ & + e^{(\alpha-\zeta-\lambda/2)x} \int_0^\infty \{ (\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) E_{s1} \\ & - 2\eta \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s2} \} \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\ & + [-2\eta \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s1} + (\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) E_{s2}] \\ & \times \cosh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\ & + [(\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) E_{s3} + 2\eta \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s4}] \\ & \times \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\ & + [2\eta \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s3} + (\eta^2 + \lambda^2/4 + q^2 s^2) E_{s4}] \\ & \times \cosh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\ & + \sum_{n=1}^\infty e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2/h^2)t} \\ & \times \{ (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \sin[(1-x/h)n\pi] \\ & - (2n\pi\eta/h) \cos[(1-x/h)n\pi] \} E_{sn1} \\ & + \{ (2n\pi\eta/h) \sin[(1-x/h)n\pi] \\ & + (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \cos[(1-x/h)n\pi] \} E_{sn2} \\ & + \{ (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \sin(xn\pi/h) \\ & + (2n\pi\eta/h) \cos(xn\pi/h) \} E_{sn3} \\ & + \{ -(2n\pi\eta/h) \sin(xn\pi/h) \\ & + (\eta^2 - n^2 \pi^2/h^2) \cos(xn\pi/h) \} E_{sn4} \} \cos(sy) ds \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xy} = - \frac{\partial^2 \chi}{\partial x \partial y} = & \int_0^\infty \sum_{i=1}^4 C_{si}^c e^{\xi_i x} s \xi_i \sin(sy) ds \\ & + e^{(\alpha-\zeta-\lambda/2)x} \int_0^\infty s \left\{ (\eta E_{s1} - \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s2}) \right. \\ & \times \sinh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\ & + (-\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s1} + \eta E_{s2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \cosh[\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2}(h-x)] \\ & + (\eta E_{s3} + \sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s4}) \\ & \times \sinh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\ & + (\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} E_{s3} + \eta E_{s4}) \\ & \times \cosh(\sqrt{\lambda^2/4 + q^2 s^2} x) \\ & + \sum_{n=1}^\infty e^{-\kappa_0(\lambda^2/4 + q^2 s^2 + n^2 \pi^2/h^2)t} \\ & \times \{ \{ \eta \sin[(1-x/h)n\pi] \\ & - (n\pi\eta/h) \cos[(1-x/h)n\pi] \} E_{sn1} \\ & + \{ (n\pi\eta/h) \sin[(1-x/h)n\pi] \\ & + \eta \cos[(1-x/h)n\pi] \} E_{sn2} \\ & + [\eta \sin(xn\pi/h) + (n\pi/h) \cos(xn\pi/h)] E_{sn3} \\ & + [-(n\pi/h) \sin(xn\pi/h) + \eta \cos(xn\pi/h)] E_{sn4} \} \\ & \times \sin(sy) ds \end{aligned} \quad (46)$$

Unknown coefficients C_{si}^c ($i=1, 2, 3, 4$) can be determined by boundary conditions Eq. (31) for stresses.

3. Results and discussions

For the numerical calculations, we consider the case where the Young's moduli E_x and E_y , and the coefficients of linear thermal expansion α_x and α_y are expressed by the exponential functions of x . For this case, they are denoted by

$$\begin{aligned} E_x(x) &= E_{x0} e^{\gamma x} = E_{10} e^{\gamma x}, E_y(x) = E_{y0} e^{\gamma x} \\ &= E_{20} e^{\gamma x}, \alpha_x(x) = \alpha_{x0} e^{\alpha x} = \alpha_{10} e^{\alpha x}, \alpha_y(x) \\ &= \alpha_{y0} e^{\alpha x} = \alpha_{20} e^{\alpha x} \end{aligned} \quad (47)$$

For the plane stress problem, the material properties (30) can be expressed as follows

$$\begin{aligned} a_{11}(x) &= a_{110} e^{\zeta x} = 1/E_x = e^{-\gamma x}/E_{10}, \\ a_{110} &= 1/E_{10}, \zeta = -\gamma, \\ a_{22}(x) &= a_{220} e^{\zeta x} = 1/E_y = e^{-\gamma x}/E_{20}, \\ a_{220} &= 1/E_{20}, \\ a_{12}(x) &= a_{120} e^{\zeta x} = -\nu_{12}/E_2 = -\nu_{12} e^{-\gamma x}/E_{20}, \\ a_{120} &= -\nu_{12}/E_{20}, \\ a_{21}(x) &= a_{210} e^{\zeta x} = -\nu_{21}/E_1 = -\nu_{21} e^{-\gamma x}/E_{10}, \\ a_{210} &= -\nu_{21}/E_{10}, a_{660} = (1 + \nu_{12})/E_{10} \end{aligned} \quad (48)$$

where ν_{ij} ($i, j=1, 2$) denote Poisson's ratios.

We introduce the following non-dimensional constants and variables.

$$\begin{aligned}
x^* &= x/h, y^* = y/h, \xi_i^* = \xi_i h, \gamma^* = \gamma h, \\
t^* &= \kappa_0 t/h^2, \lambda^* = \lambda h, s^* = sh, a^* = ah, \\
a^* &= ah^2, \eta^* = \eta h, \zeta^* = \zeta h, \alpha_{20}^* = \alpha_{20}/\alpha_{10}, \\
\bar{g}_a^*(s^*) &= \bar{g}_a(s)/h, \bar{g}_b^*(s^*) = \bar{g}_b(s)/h, \\
D_{s1}^* &= D_{s1}h/(T_b\alpha_{10}), D_{s2}^* = D_{s2}h/(T_b\alpha_{10}), \\
D_{s3}^* &= D_{s3}h/(T_b\alpha_{10}), D_{s4}^* = D_{s4}h/(T_b\alpha_{10}), \\
E_{s1}^* &= a_{110}E_{s1}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{s2}^* &= a_{110}E_{s2}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{s3}^* &= a_{110}E_{s3}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{s4}^* &= a_{110}E_{s4}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{sn1}^* &= a_{110}E_{sn1}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{sn2}^* &= a_{110}E_{sn2}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{sn3}^* &= a_{110}E_{sn3}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
E_{sn4}^* &= a_{110}E_{sn4}/(T_b\alpha_{10}h^3), \\
\sigma_{xx}^* &= a_{110}\sigma_{xx}/(T_b\alpha_{10}) = \sigma_{xx}/(T_b\alpha_{10}E_{10}), \\
\sigma_{yy}^* &= a_{110}\sigma_{yy}/(T_b\alpha_{10}) = \sigma_{yy}/(T_b\alpha_{10}E_{10}), \\
\sigma_{xy}^* &= a_{110}\sigma_{xy}/(T_b\alpha_{10}) = \sigma_{xy}/(T_b\alpha_{10}E_{10}), \\
C_{si}^{c*} &= C_{si}^c/(T_b\alpha_{10}h^3) \\
\tau^*(x^*, y^*) &= [\tau(x, y) - \tau_a]/(\tau_b - \tau_a) \\
&= [T(x, y) - T_a]/(T_b - T_a) \\
&= [T(x, y)/T_b - T_a/T_b]/(1 - T_a/T_b) \\
&= [T^*(x, y) - T_a^*]/(1 - T_a^*), \\
\tau_a &= T_a - T_0, \tau_b = T_b - T_0, \\
T^*(x, y) &= T(x, y)/T_b, T_a^* = T_a/T_b \quad (49)
\end{aligned}$$

The material properties of the FGOM considered in this paper are shown in **Table 1**.

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

Material	Thermal conductivity [W/(mK)]	Coefficient of linear thermal expansion [$\times 10^{-6}$ K]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
ZrO ₂	2.036	7.11	110	0.333
Ti-6Al-4V	18.1	10.3	66.2	0.321

Eqs. (5) and (49) give

$$\lambda^* = -2.1849, \gamma^* = 0.5078, \alpha^* = -0.3706 \quad (50)$$

In numerical calculations, the ratios of orthotropy of material properties of the FGOS are assumed as

$$\begin{aligned}
\lambda_{y0}/\lambda_{x0} &= 1.2, E_{y0}/E_{x0} = 1.2, \alpha_{y0}/\alpha_{x0} = 1.2, \\
a_{660}/E_{x0} &= 0.9467 \quad (51)
\end{aligned}$$

The Poisson's ratio is taken as $\nu_{xy}=0.321$. We put $T_a^* = 0.0$ for temperature boundary condition Eq. (9) and $a^*=1.0$ in Eq. (49).

Fig.2 shows the variation of temperature τ^* at $y^*=0.0$ from $t^*=0.01$ to $t^*=\infty$ in the FGOS. The figure shows that the temperature rises with time. The temperatures at $x^*=0.5$ and $t^*=0.1$ are 0.124. It is 61.9 % of steady state ($t^*=\infty$).

Fig.3 shows the variation of thermal stress σ_{yy}^* at $y^*=0.0$ from $t^*=0.01$ to $t^*=\infty$ in the FGOS. The thermal stress decreases with time. The compressive stresses work on both the low temperature side ($x^*=0.0$) and the high temperature side ($x^*=1.0$). The maximum compressive stress at $x^*=1.0$ and $t^*=0.01$ is 0.935. It is 3.58 times of steady state (0.261 at $t^*=\infty$). On the other hand, the tensile stress works at the middle part across the thickness. The maximum tensile stresses at $x^*=0.75$ and $t^*=0.01$ is 0.255. It is 27.3 % of maximum compressive stress at $x^*=1.0$ and $t^*=0.01$.

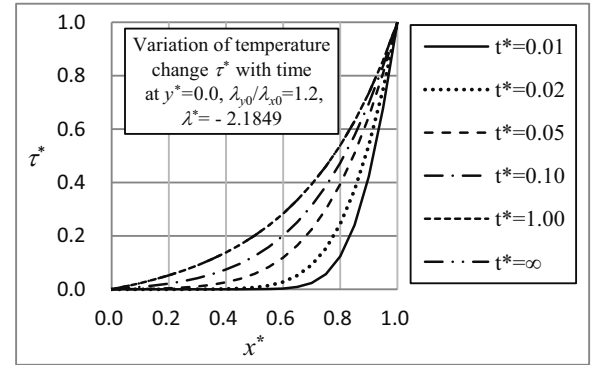


Fig.2 The variation of temperature change τ^* in the FGOS

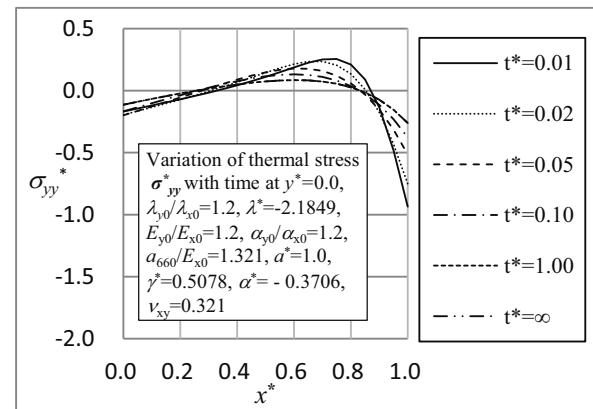


Fig.3 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with time t^* at $y^*=0.0$

Fig.4 shows the variation of thermal stress σ_{yy}^* with γ^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ in the FGOS. When the inhomogeneous parameter of the Young's modulus γ^* increases, the compressive stress increases.

Fig.5 shows the variation of thermal stress σ_{yy}^* with α^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ in the FGOS. When the inhomogeneous parameter of the coefficient of linear thermal expansion α^* increases, the compressive stress increases.

Fig.6 shows the variation of thermal stress σ_{yy}^* with λ^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ in the FGOS. When the inhomogeneous parameter of the heat conductivity λ^* decreases, the compressive stress increases.

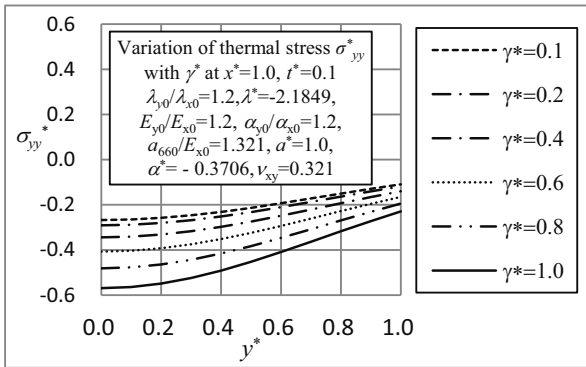


Fig.4 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with the inhomogeneous parameter of the Young's modulus γ^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$

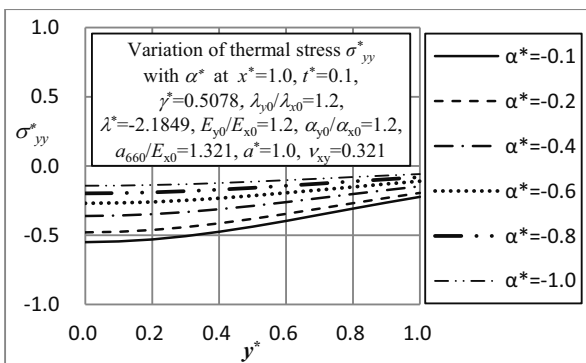


Fig.5 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with the inhomogeneous parameter of the coefficient of linear thermal expansion α^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$

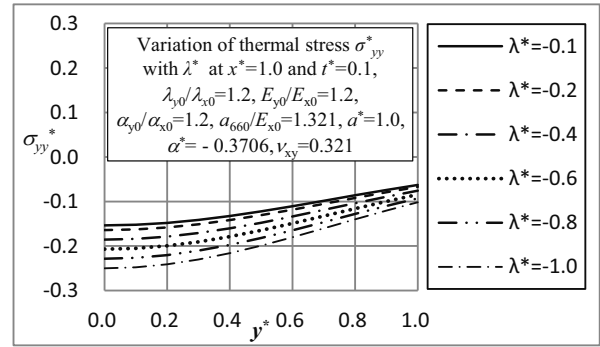


Fig.6 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with the inhomogeneous parameter of the thermal conductivity λ^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$

Fig.7 shows the effect of thermal conductivity ratio ($\lambda_{y0}/\lambda_{x0}$) on thermal stress σ_{yy}^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ in the FGOS. Increases of thermal conductivity ratio ($\lambda_{y0}/\lambda_{x0}$) causes the increase of compressive stress σ_{yy}^* .

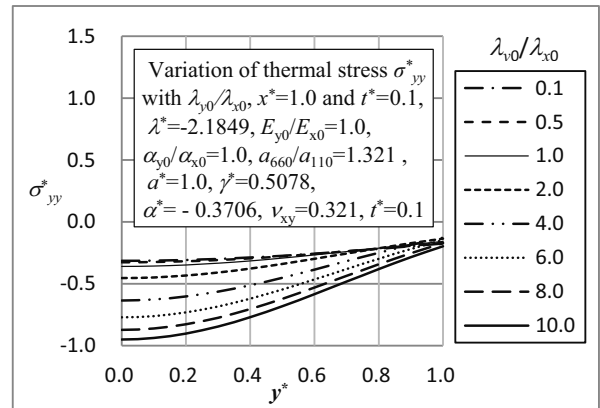


Fig.7 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with thermal conductivity ratio ($\lambda_{y0}/\lambda_{x0}$) at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$

Fig.8 shows the effect of Young's modulus ratio (E_{y0}/E_{x0}) on thermal stress σ_{yy}^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ in the FGOS. As Young's modulus ratio (E_{y0}/E_{x0}) increases, the maximum compressive stress increases. The maximum compressive stress for (E_{y0}/E_{x0})=10.0 is 7.82 times of the maximum tensile stress for (E_{y0}/E_{x0})=1.0.

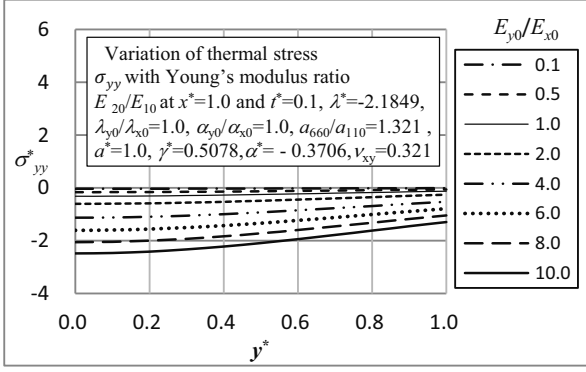


Fig.8 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with Young's modulus ratio (E_{y0}/E_{x0}) at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$

Fig.9 shows the effect of the coefficient of linear thermal expansion ratio (α_{y0}/α_{x0}) on thermal stress σ_{yy}^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ in the FGOS. When the coefficient of linear thermal expansion ratio (α_{y0}/α_{x0}) increases, the maximum compressive stress increases. The maximum compressive stress σ_{yy}^* at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$ for (α_{y0}/α_{x0}) =10.0 is 10.9 times of the maximum tensile stress for (α_{y0}/α_{x0}) =1.0.

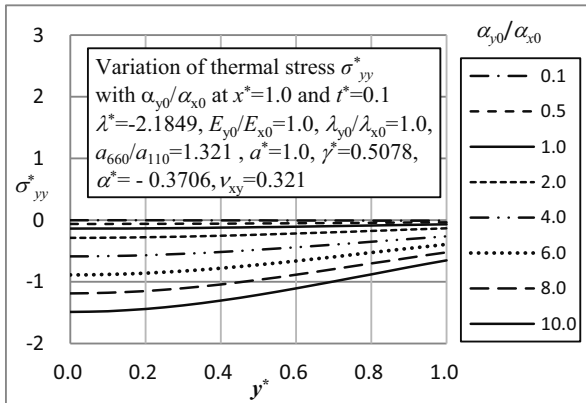


Fig.9 Variation of thermal stress σ_{yy}^* with coefficient of linear thermal expansion ratio (α_{y0}/α_{x0}) at $x^*=1.0$ and $t^*=0.1$

According to these results, the orthotropy of the material property gives significant effects on thermal stresses in the FGOS.

6 Conclusions

This paper discusses the transient thermal stresses in the functionally graded orthotropic strip by use of stress function for FGOMs. The conclusions are

- (1) The stress function is very useful for the analysis of thermal stresses for FGOMs.
- (2) The transient thermal stresses in FGOS can be analyzed by use of the stress function method.
- (3) The inhomogeneity and orthotropy of material properties give significant effects on thermal stresses in FGOS as follows.

- ① Decrease of inhomogeneous parameter of the thermal conductivity λ^* results in the increase of compressive stress σ_{yy}^* .
- ② Increase of inhomogeneous parameter of the coefficient of linear thermal expansion α^* results in the increase of compressive stress σ_{yy}^* .
- ③ Increase of inhomogeneous parameter of Young's modulus γ^* in Eqs. (47) and (49) results in the increase of compressive stress σ_{yy}^* .
- ④ Increases of thermal conductivity ratio ($\lambda_{y0}/\lambda_{x0}$) and linear thermal expansion ratio (α_{y0}/α_{x0}) cause the increase of compressive stress σ_{yy}^* .
- ⑤ Increase of Young's modulus ratio (E_{y0}/E_{x0}) causes the increase of compressive stress σ_{yy}^* .

REFERENCES

- 1) A. Carpinteri, N. Pugno, Thermal loading in multi-layered and/or functionally graded materials: Residual stress field, delamination, fatigue and related size effects, *Solid and Structures*, pp. 828-841, 2006.
- 2) M. Yamanouchi, M. Koizumi, T. Hirai, I. Shiota, Proceedings of the first international symposium on functionally gradient materials, Sendai, Japan, Functionally gradient materials forum, p. 379, 1990.
- 3) M. Koizumi, The concept of FGM, J.B. Holt, M. Koizumi, T. Hirai, A. Munir, (eds.), *Ceramic Trans. 24, Functionally gradient materials*, The American Ceramic Society, Vol. 3-9, p. 469, 1993.
- 4) N. Noda, T. Tsuji, Steady thermal stresses in a plate of functionally gradient material, *Japan Society of Mechanical Engineering, Series A*, Vol. 57, No. 533, pp. 98-103, 1991.
- 5) N. Noda, T. Tsuji, Steady thermal stresses in a plate of functionally gradient material with temperature-dependent properties, *Japan Society of Mechanical Engineering, Series A*, Vol. 57, No. 535, pp. 625-631, 1991.
- 6) Y. Obata, N. Noda, Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of a functionally gradient material, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 17, No. 3, pp. 471-487, 1994.
- 7) N. Noda, Thermal stresses in functionally graded materials, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 22, Issue. 4-5, pp. 477-512, 1999.
- 8) R. B. Hetnarski, *Encyclopedia of Thermal Stresses*, Springer, 2013.
- 9) Y. Ootao, Y. Tanigawa, Transient thermal stresses of orthotropic functionally graded thick strip due to nonuniform heat supply, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 20, Issue 5, pp. 559-573, 2005.
- 10) D. Huang, H. Ding, W. Chen, Analytical solution for functionally graded anisotropic cantilever beam subjected to linearly distributed load, *Applied Mathematics and Mechanics*, Vol. 28, Issue 7, pp. 855-860, 2007.
- 11) M. Jabbari, A. R. Vaghari, Bahtui, A. M. R. Eslami, Exact solution for asymmetric transient thermal and mechanical stresses in FGM hollow cylinders with heat source, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 29, Issue 5, pp. 551-565, 2008.
- 12) G. Kansal, M. Parvez, Thermal stress analysis of orthotropic graded rotating discs, *International Journal of Modern Engineering Research*, Vol. 2, Issue. 5, pp. 3881-3885, 2012.
- 13) B. Takabi, Thermomechanical transient analysis of a thick-hollow FGM cylinder, *Engineering Solid Mechanics*, Vol. 4, Issue 1, pp. 25-32, 2016.
- 14) M. Ohmichi, N. Noda, N. Sumi, Plane heat conduction problems in functionally graded orthotropic materials, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 40, No. 6, pp. 747-764, 2017.
- 15) M. Ohmichi and N. Noda, Conditions of single-valuedness of rotation and displacements for non-homogeneous materials in plane thermo-elasticity, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 38, No. 6, pp. 610-629, 2015.

研究論文

惑星探査ローバの機体設計及び ARLISS2017における 動作ログの詳細分析

齋藤卓也* 秋山実穂**

(2018年9月30日受理)

Analysis of Planet Exploration Rover's Design and Operation Log in ARLISS 2017

Takuya Saito* and Miho Akiyama**

(Received September 30, 2018)

Abstract

In this paper, we describe detailed analysis results of various sensor data acquired at ARLISS 2017. In recent years, many contests targeting CanSat have been conducted. We participated in ARLISS 2017 for our own planet exploration rover evaluation experiment. As a result of the competition, we got third place in the comeback competition category. In addition, since our rover has many sensors besides GPS positioning sensors, various sensor information can be acquired. The sensors equipped in our rover are two 3-axis acceleration sensors, 3 axis gyro sensor, barometric pressure sensor, temperature sensor, humidity sensor, light sensor and battery voltage sensor. Our rover acquires sensor data at 1/100 s, so we can obtain very detailed flight data.

キーワード: ARLISS, 缶サット, カムバックコンペティション, GPS, Raspberry Pi, 画像認識, ログデータ
Keyword: ARLISS, CanSat, Comeback Competition, GPS, Raspberry Pi, Image Recognition, Log Data

1. 緒言

近年、自作惑星探査ローバを対象とする様々なコンテストが多数開催されている。毎年3月に種子島ロケットコンテスト^[1]が鹿児島県南種子町で行われており、また7月には能代宇宙イベント^[2]が秋田県能代市で行われている。世界大会としてはARLISS^[3]がアメリカネバダ州ブラックロック砂漠にて行われている。惑星探査ローバのコンテストは、ロケットや気球により惑星探査ローバを上空から投下し、パラシュート等の減速装置を用いて地面に着地させる。そしてその場所から事前に指定されている目的地まで、自律制御によって走行し、目的地にどれだけ近くまで行くことができるか、を目標に競技が行われている。ARLISSはアメリカのアマチュア・

ロケット愛好家団体であるAeroPac^[4]により提供されているロケットのペイロードに惑星探査ローバを搭載し、上空約4,000 mまで上昇させ、その地点で惑星探査ローバはロケットから放出される、最も本物の宇宙開発に近い実験を行えるコンテストである。ロケットから放出後、惑星探査ローバはパラシュート等の減速機構を用いて地上に落下し、そこから目的地まで自律制御により走行して行く。このようなことから、我々は開発した惑星探査ローバの実証実験としてARLISS 2017にSuperNOVAチームとして初めて参加し、様々なデータを取得した。また、競技の結果、Comeback Competition部門Accuracy Awardにおいて、自律走行によりゴールまで2,234 mまで近づき、3位の結果を得た^{[5][6]}。我々の惑星探査ロー

* 愛知工科大学工学部電子制御・ロボット工学科, 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Department of Electronic Control and Robot Engineering, Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihassama-cho, gamagori, 443-0047, Japan

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

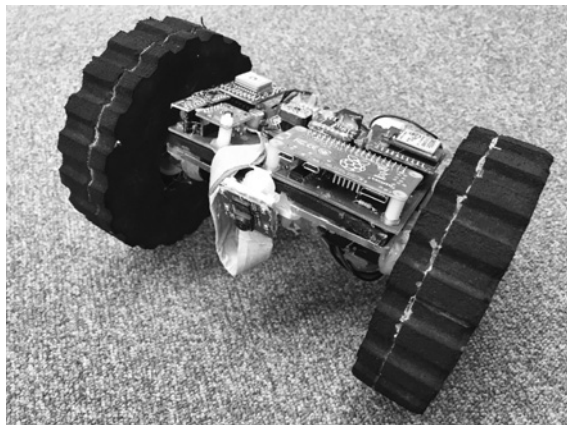


Fig.1 Front View of the Rover

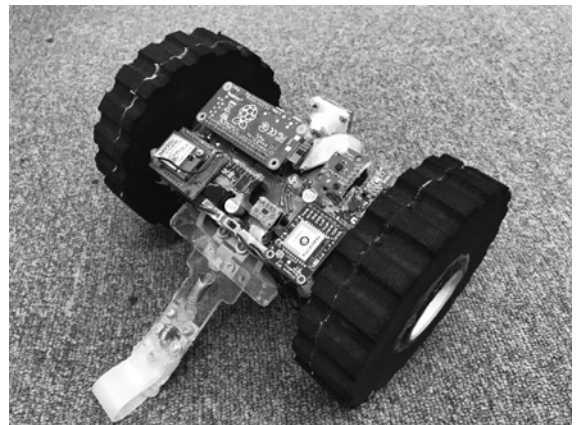


Fig.2 Rear View of the Rover

バは GPS 測位センサの他に、2つの3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、気圧センサ、温度センサ、湿度センサ、光センサ及びバッテリー電圧センサを搭載しており、データ取得周期 1/100 秒でこれらのデータを取得している。これにより従来は不明であったロケットによる上昇時、ロケットからの放出時及びパラシュートによる着地時等の加速度データ等、非常に貴重なデータを取得することができた。本稿では SuperNOVA チームのローバの構造及び ARLISS2017 において惑星探査ローバが取得したログデータを詳細に分析した結果について述べる。

2. ローバの構造

2.1 制御回路の構造

我々は ARLISS 2016 にも参加し、その時得られたログデータを分析している^[7]が、それは愛知工科大学宇宙技術研究部 STELA チームとして開発されていたものであり、我々は主にソフトウェア部と回路部分について開発に参加していた。ARLISS 2017 からは愛知工科大学斎藤研究室の SuperNOVA チームとして惑星探査ローバをパラシュートから機構部分、回路及びプログラムをはじめとして全てを開発した。このため、ARLISS 2016 用惑星探査ローバと ARLISS 2017 用惑星探査ローバは全く異なる物となっている。開発した惑星探査ローバの外観を Fig.1 及び Fig.2 に、回路基板を Fig.3 に、内部回路のブロックダイアグラムを Fig.4 に示す。

2.2 制御用コンピュータ

ローバの制御用コンピュータには Raspberry Pi Zero W^[8]を用いた。ARLISS 2016 用ローバでは Arduino Uno^[9]を用いていたが、プログラムメモリサイズが既に

限界であり、これ以上プログラムが組めなくなっている問題があったこと、また、我々の研究結果^[10]により浮動小数点数演算が float のみしか対応しておらず、double 精度で計算することができないため、GPS 測位情報から位置情報を計算すると経度方向で float 精度の限界により約 1.5 m 間隔の精度しか計算できないことが判明したこと、及び今回からカメラによるゴール認識機能を追加したが、Arduino では対応できないことから、Raspberry Pi Zero W に変更した。

2.3 センサ

センサ類は ARLISS 2016 用ローバでは GPS、光センサ（フォト IC ダイオード）及びバッテリー電圧センサしか搭載していなかったが、ARLISS 2017 用ローバでは GPS、3軸加速度センサ 2つ（測定レンジ ± 16 G 及び ± 200 G）、3軸ジャイロセンサ、気圧センサ、温度センサ、湿度センサ、光センサ（フォト IC ダイオード）、バッテリー電圧センサを搭載している。

GPS には Adafruit Ultimate GPS^[11]を用いている。加速度センサは測定レンジの異なる 2つの 3軸加速度センサを搭載している。落下時等大きな衝撃を取得するために、測定レンジが ± 200 G の 3軸加速度センサ ADXL377 を使用している。ADXL377 はアナログ出力なので、積層セラミックコンデンサを用いた Anti-aliasing Filter を通した後、MCP3208 を用いた 12bit A/D コンバータでデータを取得している。この A/D コンバータはフォト IC ダイオードによる光センサの測定と、バッテリー電圧測定にも使用している。ADXL377 は測定レンジが ± 200 G と大きいと、最小測定可能加速度が 0.5 G 程度と解像度が低いため、通常の細かい加速度変化が測定できないため、測定レンジ ± 16 G の 3軸加速度センサ及び 3軸ジャイロセンサ LSM9DS1 を搭載している。気圧センサ

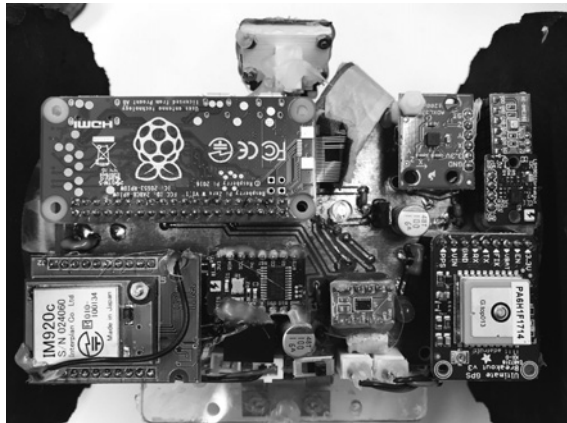


Fig.3 Electrical Circuit Board of the Rover

には BOSCH 製の BME280 を用いている。このセンサは気圧センサ、温度センサ及び湿度センサを内蔵している。LSM9DS1 と BME280 は I2C 接続により Raspberry Pi Zero W と接続している。画像取得用のカメラには Raspberry Pi Camera Module V2 を使用した。このカメラは Raspberry Pi Zero W のカメラ専用端子に接続することが可能なため、通常の USB 接続の Web カメラよりも高速データ転送が可能である。

2.4 無線通信

PC へローバの位置情報や制御情報を送るための無線通信装置として、ARLISS 2016 で使用していた XBee PRO ZB S2B から interplan 社製 IM920^[12] に変更した。XBee PRO ZB S2B は Zig Bee 規格の 2.4 GHz 帯無線であり、約 15 kbps 程度の高速通信が可能だが、通信可能距離が数百 m 程度と短距離にしか対応していない。PC への無線通信装置はローバのロスト対策用にも使用するものであるため、長距離通信が要求される。そのため 920MHz 帯で通信速度が 50 kbps と低速であるが、メーカーのデータシートでは見通しで約 7 km の長距離通信が可能な IM920 に変更した。IM920 は通常のシリアル通信により通信データをコンピュータとやり取りするが Raspberry Pi Zero W にはシリアル通信は 1 ch しか用意されておらず、これは GPS との通信に使用しているため、SC16IS750 I2C to UART IC を用いて I2C をシリアル通信に変換してシリアル通信を増設し、Raspberry Pi Zero W と IM920 との通信を行っている。

2.5 モータ駆動回路

モータドライバは DRV8835 を 1 個のみで 2 つのモータをドライブしている。ARLISS 2016 用ローバでは TA7291P を 2 個使用していたが、DRV8835 に変更する

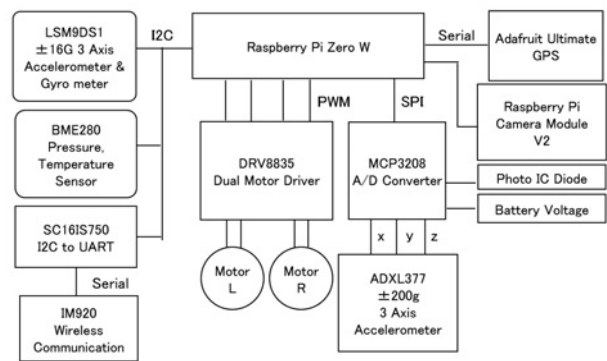


Fig.4 Block Diagram of Electronic Circuit

ことにより、大幅に小型軽量化を実現した。ローバを駆動するためのモータにはダイセン電子工業社製ギヤモータ（ギヤ比 60:1）を用いた。本モータは落下テスト等で耐衝撃性能に問題がないこと、安価で入手性が良いことから採用している。

2.6 電源

バッテリーは Hyperion 社製 G7 HV Si-Graphene Li-Po バッテリー（2S / 7.6V 2,800 mAh）を使用した。バッテリー電圧を Raspberry Pi Zero W が必要とする 5V 電源に変換するために、CUI Inc 社製 V78-1000 スイッチングレギュレータ^[9]を用いることにより、約 90% の高い変換効率を小型軽量で実現している。電源ラインの平滑コンデンサにはサン電子工業社製の導電性高分子ハイブリッドタイプアルミ電解コンデンサを使用することにより、高周波領域における超低 ESR 化と大容量を実現している。

2.7 パラシュート分離機構

パラシュート分離機構には 15 Ω のカーボン抵抗 2 本を並列接続したものをを用いている。ローバの保護カバーを結束バンドで固定し、その結束バンドを抵抗 2 本の間に通し、抵抗にバッテリー電圧をかけることにより、結束バンドを焼き切って保護カバーを開く仕組みを採用している。ARLISS 2016 用ローバでは抵抗への通電にリレーを用いていたが、スペース、重量及び信頼性の向上のため 2SK2232 FET に変更した。パラシュート本体は ARLISS 2016 で用いた市販品ではなく、自作したものをを用いている。これは市販品では対応し切れないローバが走り出した後のパラシュート絡まり対策や視認性の確保等のためである。パラシュートの素材として軽くて頑丈なリップストップナイロンを使用した。また色は上空で



Fig.5 IM920 Receiver

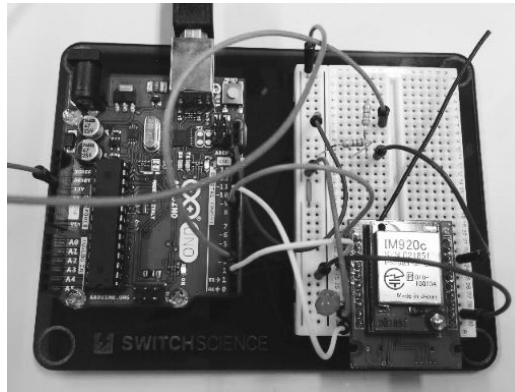


Fig.6 IM920 Transmitter using Arduino BBM



Fig.7 Transmitter Location



Fig.8 Map of Transmission and Reception Location at communication distance 1 km by Google Map



Fig.9 IM920 Radio Reception Situation at 1 km

落下中の視認性を向上させるため、青空の補色関係にあるオレンジ色を用いている。パラシュートの形状は六角形タイプを使用し、風に流される影響を低減するために中央部に穴を開けている。パラシュートの大きさは、ローバが約 5 m/s の速度で落下するように実験により決定した。

3. 長距離通信実験

惑星探査ローバに搭載している無線通信モジュールには 2 つの役割がある。1 つ目の役割はロケットからローバが放出後、ローバの GPS 位置情報を受信することにより、落下地点を求めてローバのロストを防ぎ、早く発見するためである。2 つ目はローバの動作状態を PC で確認できるようにすることである。ロスト対策に関しては、ロケットで上空に約 4,000 m まで打ち上げられ、さらに風の弱い時でも打ち上げ地点から 1 ~ 3 km 程度離れた地点に落下するため、4 km 程度の通信距離があることが求められる。ARLISS 2016 用ローバに搭載してい

た XBee PRO ZB S2B モジュールでは数百 m しか電波が届かなかったため、ロスト対策には余役に立たなかった。

IM920 はメーカーの実験^[13]では通信速度 50 kbps の長距離通信モードでは、見通しで約 7 km 通信可能と記載されている。しかし実際にはローバ本体や地面や建物等通信可能距離を縮める様々な要因が存在するため、実際に通信可能距離を測定する必要がある。そのため、IM920 の長距離通信実験を行った。

3.1 距離 1 km 及び 2 km の通信実験

通信実験は BBM モデルを使用し、送信モジュールを固定して最初に 1km と 2km 離れた地点で受信を行った。IM920 受信機の外観を Fig.5 に、送信に使用した Arduino Uno を用いた IM920 送信 BBM モジュールの外観を Fig.6 に、及び通信距離 1 km 及び 2 km 測定時の送信機設置状況を Fig.7 に示す。その結果 2 km の距離でも問題なく送信データを受信することができた。実験場所には愛知県蒲郡市西浦町の海岸地上約 1 m の地点に

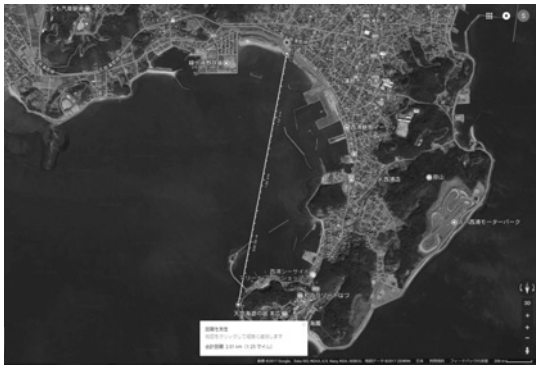


Fig.10 Map of Transmission and Reception Location at communication distance 2 km by Google Map



Fig.11 IM920 Radio Reception Situation at 2 km

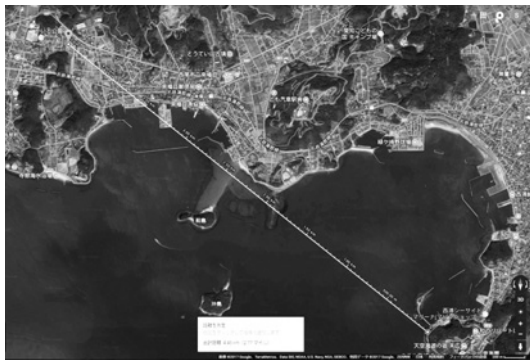


Fig.12 Map of Transmission and Reception Location at communication distance 4 km by Google Map



Fig.13 IM920 Radio Reception Situation at 4 km

送信モジュールを Fig.7 のように設置し、1 km 地点では Fig.8^[14] の位置関係の場所で Fig.9 に示す状況により海岸付近で受信した。距離 2 km では西浦温泉地方の高台で受信した。

2 km 通信時の地図の位置関係を Fig.10^[14] に、また受信場所を Fig.11 に示す。距離が 1 km 及び 2 km での通信結果の RSSI から求めた入力電力とその標準偏差を Table 1 及び Table 2 に示す。距離が 2 km の方が入力電力は高く、さらに標準偏差も小さいため、受信状況は良いことが分かる。これは距離が 1 km では受信位置が海岸近くの界面から 2 ~ 3 m 程度の高さで受信しているの

に対し、距離が 2 km では受信位置が Fig.10 のように高台になっているため、フレネルゾーンをより多く確保できているため、通信状況は距離が 1 km の時よりも良好であると考えられる。

3.2 距離 4km の通信実験

1 km 及び 2 km の通信が実験により問題なく行えたため、さらに長距離での通信について調べるために、4 km での通信実験を行った。ARLISS でロスト対策として通信を行うには、ローバが上空から落下中の受信可能距離を調べる必要がある。送信機及び受信機の高度が低いとフレネルゾーンが確保できず、通信が不利になってしまうためである。そのため、送信モジュールを高台に置き、4 km 離れた高台に受信機を設置して実験を行った。距

Table 1. Input Power at distance 1 km

Average of Input Power	-108.8 [dBm]
Standard Deviation	3.26

Table 2. Input Power at distance 2 km

Average of Input Power	-103.4 [dBm]
Standard Deviation	1.12

Table 3. Input Power at distance 4 km

Average of Input Power	-98.5 [dBm]
Standard Deviation	1.56

離が 4 km 時の送信機及び受信地点の地図上の地点を Fig.12^[4] に、受信地点の様子を Fig.13 に示す。

距離が 4 km での通信結果を Table 3 に示す。送信機と受信機が 4 km 離れていても、問題なく受信可能であり、入力電力は距離が 1 km 及び 2 km の結果よりも大きい。これは送信機の海拔高さが高いため、フレネルゾーンが 1 km 及び 2 km の時よりも多く確保できているためであると考えられる。実際の ARLISS のロスト対策では、送信位置はロケットにより打ち上げられて放出された高度約 4,000 m 地点からパラシュートで落下中の数十 m まで GPS 位置情報を受信できれば良い。また、落下地点は打ち上げ地点から通常は 4 km 以内に落下するため、4 km の距離で受信可能であれば問題ないと考えられる。以上より IM920 を用いた通信装置は十分な通信可能距離を確保可能であり、ARLISS のロスト対策に十分な性能を持っていることを確認した。

4. ローバ制御手法

4.1 走行制御手法

ローバがゴールへ向かって走行する制御手法は落下地点からゴール近辺（ゴールまで数 m 程度）までは GPS 測位情報を用いてローバを制御している。GPS 測位情報が 1 Hz で送られてくるため、ローバの制御周期は 1 Hz である。GPS 測位情報のみではローバの進行方向が分からないため、最初の 1 秒間は直進動作を行い、それ以降は 1 秒前の位置と現在の位置とからローバの進行方向を求めている。この進行方向がゴールの方向を向くようにローバを制御している。進行方向を変えるには左右のモータの PWM Duty 比を変化させることにより、左右にローバの進行方向を制御している。PWM 周波数は 2 kHz に設定している。

4.2 カメラ画像によるゴールポスト誘導制御手法

ARLISS 2016 では GPS のみを使用してゴール地点へとローバを誘導制御していた。しかし GPS のみでは数 m の測位誤差が生じてしまうため、ARLISS 2016 のように 1 位～3 位までが 2 m 程度で決まってしまうようなシビアな競技では、優勝が GPS 測位誤差任せの運次第になってしまう。そのため ARLISS 2017 用ローバからは確実にゴールに限りなく近づき 0 m でのゴールを可能とするためカメラ画像によるゴールポスト認識機能を追加した。カメラ画像によるゴールポスト認識の様子を Fig.14 に示す。これは ARLISS 2017 競技前にゴール位置の測定等調整を行う時に、実際のゴールポストを認識さ

せたローバ本体のカメラで撮影した画像である。画像の解像度は 160 × 120 ピクセルである。

ゴールポストの認識は色を用いて行っている。カメラで取得した RGB 画像データを YCrCb 形式に変換し、ゴールポストの赤色の範囲を Y, Cr, Cb の値の範囲を指定することにより 2 値画像を生成している。

求められた 2 値画像のピクセル数が一定値より少ないときにはカメラにはゴールポストが写っていないと判断し、その場で左旋回動作を行う。これを数回繰り返しても見つからない時には、ゴールまで十分に近づいていないと判断し 40 秒間 GPS による通常走行を行う。そして停止後、再びローバに回転動作を繰り返しながらゴールポストをカメラで探す。

2 値画像のピクセル数が一定値を超えているときにはカメラでゴールを認識していると判断し、その場合はステアリングを重心座標の x 軸の方向へと向けることにより、ゴールへ誘導している。最終的にピクセル数がゴール判定の値以上になったとき、十分にゴールポストに近づいたと判断し、ゴール判定してローバは停止する。

5. ARLISS 2017 Competiton

5.1 Comeback Competition 結果の概要

ARLISS ではローバを AeroPac 提供のロケットのペイロードに搭載し、上空へ約 4,000 m へと打ち上げる。ロケットによる打ち上げは 2 回行うことが可能で、競技結果は打ち上げ 2 回のうち良い方の結果を採用する。1 回目のロケット打ち上げの様子を Fig.15 に示す。ローバはロケットで上空に打ち上げられた後、ロケットから放出され、パラシュートにより地上へと落下する。1 回目打ち上げ時の距離データ Table 4 に示す。ロケット発射地点はゴールから 1,498 m 離れた地点に設置されていた。ロケット発射後、ローバは発射地点から 4,768 m 離れた



Fig.14 Goal Post Recognition by Raspberry Pi Camera V2



Fig.15 Rocket Launch of First Flight

地点に落下した。このように落下地点が発射地点から約 5 km も離れているのは風が強く落下時に流されたためである。このローバが落下した地点はゴールから 5,702 m も離れた地点であった。昨年度の ARLISS 2016 では約 3 km であったため、ARLISS 2017 ではゴールまでほぼ倍の距離に落下した。この地点からローバは走行を開始したが、打ち上げ時間が午後の遅い時間であったため、最終撤収時間午後 5 時を超えてもローバは走行中であった。そのためローバをそのまま走行させたまま我々はブラックロック砂漠から撤収してホテルへと戻った。翌日ローバを捜索した結果、ゴールから距離が 2,230 m の地点でローバが止まっているのを発見した。その後ログデータを調べると、その地点でスタックして走行不能となり、電池が切れるまでずっとスタック脱出動作を繰り返して行っていた。また電源投入から約 5 時間スタック動作を繰り返してローバは稼働していた。

以上より、ARLISS 2017 ロケット打ち上げ 1 回目の結果は Table 5 に示す通り、ゴールからの距離が 2,234 m で 3 位となった。ゴールまでの距離が Table 4 では 2,230 m となっており、Table 5 とは距離が 4 m 異なっているが、Table 4 はローバ本体の GPS 測位情報で計算し

Table 4 Distance Data of First Flight

発射地点からゴールまでの距離	1,498 m
発射地点から落下地点までの距離	4,768 m
落下地点からゴールまでの距離	5,702 m
ローバ停止地点からゴールまでの距離	2,230 m
ローバの走行距離 (直線距離)	3,517 m

Table 5 First Flight Comeback Competition Result

順位	チーム名	ゴールまでの距離
1	東京大学 THE-O	0 m
2	東京大学 Iwata Seisaku-syo	999 m
3	愛知工科大学 SuperNOVA	2,234 m

た距離であり、Table 5 は運営の GPS 測位情報により計算した距離である。

打ち上げ 2 回目は、ロケットトラブルにより、ロケットを打ち上げ後、ペイロードを分離することができず、ロケットごと地面に自由落下した。これによりロケットは我々のローバを搭載したまま地面に深く突き刺さり、回収不能になった。このため競技結果は残らずログデータの回収も行えなかった。

5.2 ロケット打ち上げ時高度変化

開発した惑星探査ローバには気圧センサが取り付けられている。このデータを用いてロケット打ち上げ時の気圧変化を取得し、そのデータから正確な高度変化を求めた。データの取得周期は 1/100 [s] である。気圧変化から式 (1) を用いて高度を求めた。ここで p_0 [hPa] は高度 0 m の気圧、 p [hPa] はローバの気圧、 T [°C] は温度である。

$$\text{Altitude} = \frac{\left\{ \left(\frac{p_0}{p} \right)^{5.257} - 1 \right\} \times (T + 273.15)}{0.0065} \quad (1)$$

実際に取得したロケット打ち上げ時の気圧変化を Fig.16 に、また気圧変化から計算により求めた高度変化を Fig.17 に示す。Fig.17 より、ロケットにより打ち上げ後ローバは一気に高度約 4,000 m 上空に達しており、そこからほぼ一定速度でパラシュートにより地上へと落下していることが確認できる。Fig.17 では最高高度付近で

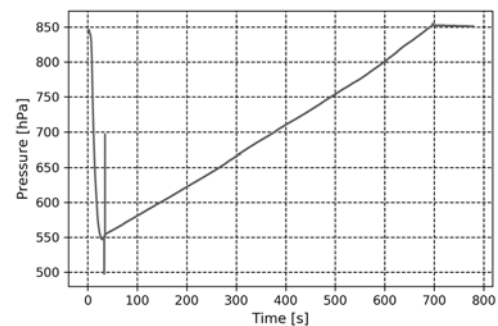


Fig.16 Pressure

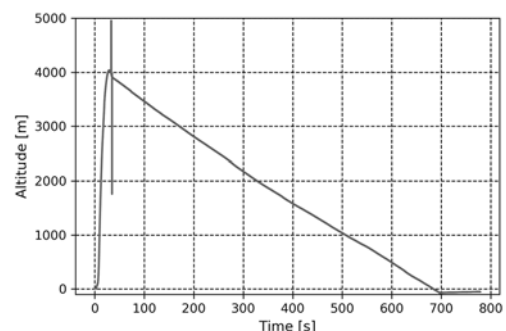


Fig.17 Altitude Calculated from Atmospheric Pressure

上下に大きなヒゲが確認できるが、これはロケットから放出時の急激な気圧変化によるものであると考えられる。Fig.17よりパラシュートによるローバの降下速度を求めた結果 5.7 m/s であった。パラシュートは設計上の降下速度は 5.0 m/s に設定してあったので、実際の降下速度はほぼ設計通りであることが確認できる。

打ち上げ後最高高度に達するまでの高度変化部分のみを拡大したものを Fig.18 に示す。これより打ち上げ後約 25 秒後には最高高度である約 4,000 m に達していることが確認できる。また、Fig.18 の高度変化からロケットの上昇速度を求めたものを Fig.19 に示す。Fig.19 より、ロケット打ち上げ後、数秒間で上昇速度が 1500 km/h に達していることが確認できる。ここまでがロケットエンジンにより加速しており、それ以降は徐々に上昇速度は減少し、約 30 秒後に上昇速度は 0 km/h になっている。

5.3 ロケット打ち上げ時及び落下時加速度変化

ロケットを打ち上げてからローバがパラシュートで地上に落下するまでの加速度変化を Fig.20 に示す。加速度値 A は式 (2) により求めた。ただし x, y, z 軸の加速度をそれぞれ a_x, a_y, a_z とする。

$$= \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (2)$$

ローバには測定レンジ±200 G の 3 軸加速度センサと ±16 G の 3 軸加速度センサの 2 種類を搭載しているが、ここでは±200 G の 3 軸加速度センサのデータを示す。データの取得周期は 1/100 s である。Fig.20 では 0 秒付近に 10 G 弱、30 秒付近に約 30 G、そして 700 秒付近に 100 G 弱の 3 つの大きな加速度が観測されている。

まず Fig.20 の 0 秒付近の加速度であるが、これはロケット打ち上げ時の加速度である。0 秒から 16 秒までの加速度変化を抜粋したものを Fig.21 に示す。2.3 秒から 7.5 秒辺りに大きな加速度の山が観測されているが、これがロケットの打ち上げ加速度である。Fig.21 によると約 8 G の加速度が約 5 秒間かかっている。

次に Fig.20 の 30 秒付近の加速度変化であるが、これはロケットからローバが放出された時の加速度である。Fig.20 の 30 秒付近の加速度変化を抜粋したものを Fig.22 に示す。これよりロケットからローバが放出され

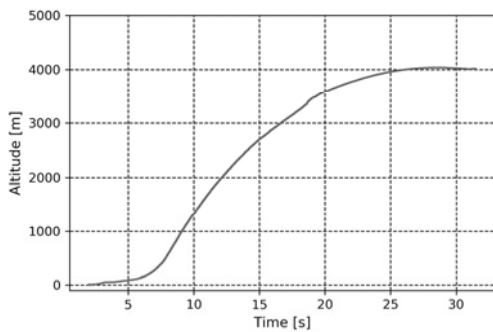


Fig.18 Rocket Altitude at Launch

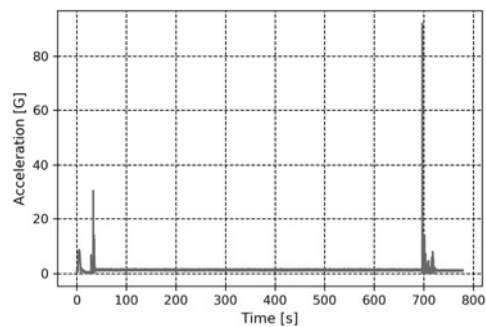


Fig.20 Acceleration in All Times

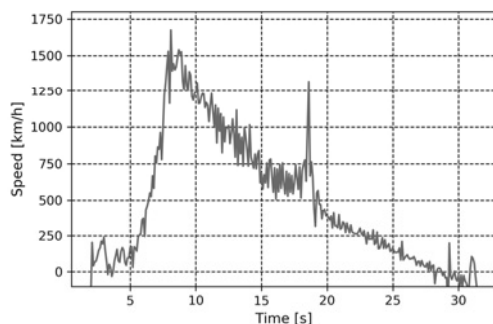


Fig.19 Rocket Speed at Launch

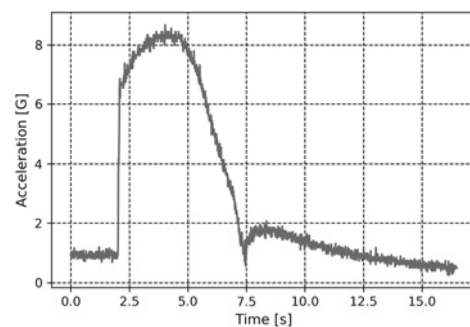


Fig.21 Acceleration at Launch

る時には 30 G を超える加速度がかかっていることがわかる。この大きな加速度によりパラシュートとローバ保護カバーとの接合部分が壊れることにより、上空からローバが自由落下してしまうことがある。この故障を防ぐために試験を行うが、実際にどれくらいの加速度がかかっているのかは不明であった。25 G を目標としているチームが多いため、それを目標に実験を行っていたが、実際にはより高い 30 G の加速度がかかることが判明した。

最後に Fig.20 の 700 秒付近の加速度はローバがパラシュートで地面に落下した時の衝撃による加速度である。Fig.20 の 700 秒付近の加速度変化を抜粋したものを Fig.23 に示す。これにより地上に落下時には 100 G 弱もの非常に大きな加速度がかかっていることが確認できる。地上に落下時にはモータのシャフトやギア等が破損することがある。今回これも実際の加速度を取得できたため、今後 100 G を目標として故障が生じないように設計及びテストを行う必要があることが分かった。

5.4 バッテリー電圧

バッテリー電圧変化を Fig.24 に示す。電源投入後プ

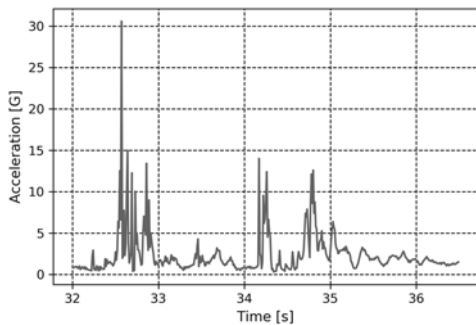


Fig.22 Acceleration at Release from Rocket

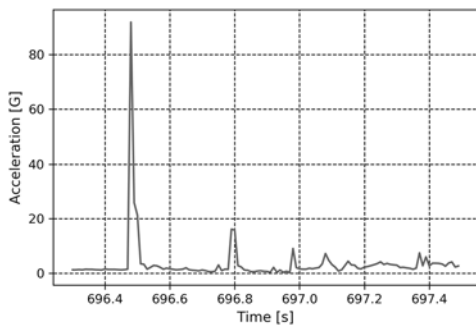


Fig.23 Acceleration at Falling to the Ground

ログラムを開始してからバッテリー電圧が低下してログデータが保存されなくなるまでの全てのデータをプロットした。約 2,600 秒後から走行を開始し、10,000 秒を過ぎたところまで電圧変化が大きいので多くプロットされている。これは実際にローバが走行することにより、モータの負荷が変化するためにバッテリー内部抵抗により電圧が変化しているためである。10,000 秒を過ぎた辺りから Fig.24 の線が細くなっているのは、この時点でローバがスタックしてタイヤが空転し、モータ負荷が減少することにより電圧変化が少なくなったためと考えられる。

以上より、ローバはゴールに向かって約 2,500 秒から約 10,000 秒までの約 7,500 秒間（約 2 時間）ほど通常走行を行い、それ以降はスタック脱出動作を 20,000 秒弱まで約 10,000 秒間（約 2 時間半）行い、バッテリー電圧低下によりコンピュータが停止して動作を止めた。

5.5 走行軌跡

Fig.25 にローバの走行軌跡を示す。ローバはゴール地点から距離が 5,702m の地点に落下し、そこから走行を開始した。ARLISS 2017 開催数日前にブラックロック砂

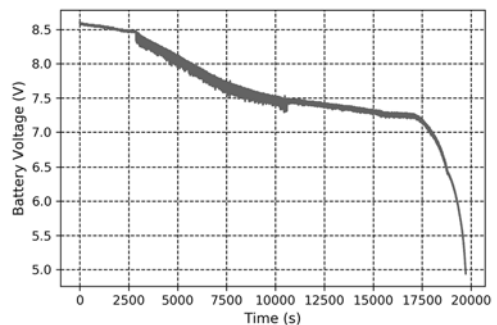


Fig.24 Battery Voltage

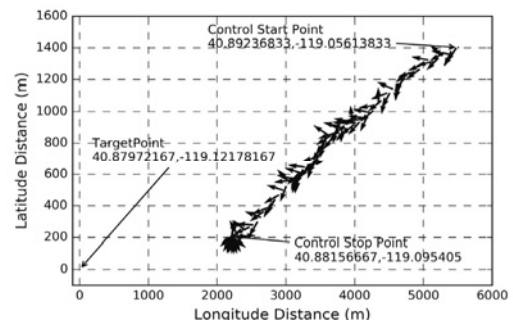


Fig.25 Traveling Locus of Rover

漠にて大雨が降ったため、地面の割れが昨年よりも非常にひどくなっていたため走行が難しくなっていた。そのためローバはゴールに向かってまっすぐ走ることが難しく、左右にジグザグに走行しながら走って行った。その後ゴール地点から距離が2,230mの地点でスタックにより停止したが、走行開始地点から停止地点まで、直線距離で3,517mを走行した。この走行に約2時間を要した。これはARLISS 2016のローバと比較して同じ距離を走行するのに約倍の時間を要しているが、それだけローバは左右にジグザグ走行したことになる。ローバの走行距離はARLISS 2016の2,786mよりも多くの距離を走行し、時間もほぼ倍走行したが、記録は3位であった。

6. 結言

我々はARLISS 2017に参加し様々なセンサの動作ログの詳細な分析結果について述べた。センサデータは1/100 s周期で取得しているため、非常に時間分解能の高いデータを取得することができた。従来はロケットにより打ち上げられる高度もGPSの精度の低いデータしかなかったが、気圧センサを用いることにより非常に正確な高度変化を取得することができた。これにより、実際に地上から約4,000 m上空まで打ち上げから約30秒で到達することが分かった。

さらに測定レンジ ± 200 Gの3軸加速度センサを搭載したことにより、従来不明であったロケット打ち上げ時、ローバ放出時及び地上落下時等の実際の大きな加速度変化を取得することができた。特にローバ放出時に30 Gもの加速度がかかり、また落下時には100 Gもの大きな加速度がかかることが判明した。これは将来のローバ開発の試験目標用値として大変有用なデータである。バッテリーはLi-Po 2S 7.6V 2,800 mAhを用いたが、この容量で約5時間駆動可能であることが分かった。今回は強風によりゴールから約5.7 kmも離れた地点まで飛ばされてしまい、さらにブラックロック砂漠は雨により例年にならぬひどい地割れ状態であったため、ゴールから約2.2 kmの地点でスタックし、記録は3位であった。しかし、昨年よりもより長距離を走破し、また約倍の時間走行を行うなど、内容としては昨年よりも長距離長時間走行の

実績を得ることができた。スタックによりゴール付近に到達できなかったため、カメラによる0 mゴール機能は実際に試せなかったが、テストでは問題なく動作するため、将来はいつか0 mゴールを達成できるものと期待される。

参考文献

- [1] 種子島ロケットコンテスト実行委員会, "種子島ロケットコンテスト", <http://jaxa-rocket-contest.jp/> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [2] 一般社団法人あきた宇宙コンソーシアム, "能代宇宙イベント", <http://www.noshiro-space-event.org/> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [3] UNISEC 大学宇宙コンソーシアム, "ARLISS", <http://unisec.jp/activities/arliss.html> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [4] AeroPac Network, "AeroPac", <http://www.aeropac.org/> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [5] 斎藤卓也, 秋山実穂, "小型自律移動ロボットの設計とARLISS2017による実証評価", ロボティクス・メカトロニクス講演会'18 講演論文集, 2A2-C07, 北九州国際コンベンションゾーン, Jun. 2018
- [6] 秋山実穂, 斎藤卓也, "惑星探査ローバのARLISS2017における動作ログの分析", 電子情報通信学会総合大会 2018, B-2-19, 東京電機大学, Mar. 2018.
- [7] 斎藤卓也, 秋山実穂: 惑星探査ローバのARLISS2016における動作ログの詳細分析, 愛知工科大学紀要第15巻, pp.19-25, Mar. 2018.
- [8] Raspberry Pi, "Raspberry Pi – Tech, Learn, and Make with Raspberry Pi", <https://www.raspberrypi.org/> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [9] Arduino, "Arduino – Home", <https://www.arduino.cc/> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [10] 斎藤卓也, 秋山実穂: 惑星探査ローバにおけるXBeeのGPS測位精度影響の研究, 情報処理学会 組込みシステムシンポジウム 2017, pp.114-115, Aug. 2017.
- [11] Adafruit Industries, "Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits", <https://www.adafruit.com/> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [12] interplan, "920MHz 無線モジュール IM920 - 無線ソリューション", <https://www.interplan.co.jp/solution/wireless/im920.php> (最終アクセス日: 2018年10月30日)
- [13] インタープラン株式会社, "IM920 見通し通信実験レポート", 無線モジュール・テストレポート, TR-01, Rev. 1.0, pp.1-6, 2015.10.15
- [14] Google, "Google Map", <https://www.google.co.jp/maps> (最終アクセス日: 2018年10月30日)

研究論文

自動車運転中の“ながらスマホ”の影響の計測

尾林 史章* 荒川 俊也** 小塚 一宏*

(2018年9月30日受理)

Experimental Verification of Influences and Risks of “Texting While Driving”

Fumiaki Obayashi*, Toshiya Arakawa**, and Kazuhiro Kozuka*

(Received September 30, 2018)

Abstract

As smartphone become popular, a lot of accidents due to operation smartphone while driving happen and this gets to be a social problem. We measured the driver's behavior and his/her eye movement in order to verify the risk of operating smartphone while driving at a course of a driving school. The following tendency about drivers looking SNS, playing game and using hands-free communication while driving was found: late for starting car and signaling, unstable steering operation, late for noticing rushing objects, and missing a red light. Thus, it was found that it is dangerous to operate smartphone while driving.

キーワード: 自動車、スマートフォン、視線、視線計測、運転挙動

Key words: Vehicle, Smartphone, Eye direction, Gaze measurement, Driving behavior

1. はじめに

本論では、スマートフォン（以下、スマホ）を用い、SNSの操作、ゲーム、通話をそれぞれ自動車運転中にいう実験を通じ、運転行動と視線特性について評価した結果を述べる。

近年のスマホの普及に伴い、自動車や自転車の運転中、あるいは歩行中にスマホ等を操作する、いわゆる“ながらスマホ”で事故やトラブルとなる例が発生しており、社会問題となっている^[1-3]。警察庁の統計において、自動車運転中の、通話あるいは画像標示装置への目視による検挙件数が、年間で100万件を超える値で推移している^[4]。ながらスマホ対策として規制対象に加えた道路交通法のこの改正は、携帯電話が普及した1999年に公布されたが、20年経過し罰則が強化された現在でも未だに多く生じている。

自動車運転中に運転外の行動を伴うことによる影響を調べる研究は過去にも行われている^[5,6]。これらの先行

研究では、携帯電話の使用により、視線の左右の動作が減り注視範囲が狭くなること、光刺激等に対し注視する反応が遅れるなどの結果が示されている。

筆者らも過去に同様の実験を実施している。私有地内で実車を用いて実施した実験^[7]と、ドライビングシミュレータで実施した実験^[8]である。これらの研究では、携帯電話使用を伴うことによる影響として、視線が進行方向と携帯電話の往復になること、周囲の様子の確認が行われにくく、目視できないと視線が正面に集中しやすい一方で、目視できた場合には動作が遅れる結果となった。

本論では、実際の道路環境において運転操作を行いながら、スマホを用い、SNSアプリの使用、ゲームアプリの使用、ハンズフリー装置を介した通話を伴う場合の影響を計測する実験を実施した。その際のドライバの目視の様子や運転行動を計測し、普通に運転する場合と比較して生じた変化を分析した。実際の道路での実施例は希

* 愛知工科大学 ITS 研究所 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
ITS Laboratory, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-Cho, Gamagori, Aichi 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, Nishihasama-Cho, Gamagori, Aichi 443-0047, Japan

少であるが、公道でのながらスマホは道路交通法に触れるため⁹⁾、同等の道路環境ができる自動車教習所の設備を用い、道路を走行中に生じる飛び出しや信号の点灯状態の変化などの突発的事象に遭遇した際の目の動きや運転行動を調べた。これらの実験の結果とともに、前述のスマホの利用を副タスクとして伴った場合の、運転行動と視線特性について述べる。

2. 実験方法

運転中の視線の動きを計測するため、視線計測装置としてアイマークレコーダ EMR-9（株式会社ナックイメージテクノロジー製）を用いた。グラス型ヘッドユニットを装着して眼球を近赤外光で撮影し、映像中の瞳孔の位置から目の向いている方向を数値化し記録する装置で、視線方向データが算出され視野映像とともに SD カードに記録される。実験協力者にこれを装着してもらい、運転中の視線の方向を計測できるようにした。記録データは、専用ソフトを使いオフラインで分析し、目の動静などを数値として得られる。

実験協力者（運転者）は **Table 1** に示す男女 5 名で、いずれも運転免許証を所持しており、かつスマホを使用

Table 1 運転者

運転者	年齢	性別
A	26	男性
B	41	男性
C	53	男性
D	46	女性
E	21	男性

したことがある。

実験協力者には、運転操作に加えて課す副タスクとして、スマホ操作を変えて各 1 回ずつ、副タスクのない 1 回を含め計 4 回走行してもらった。副タスクは、以下の 3 種類である。

- ・スマホで SNS アプリ（LINE®）を使用
- ・スマホでゲームアプリ（ポケモン GO®）を使用
- ・ハンズフリー装置を介し通話

副タスクのない場合を通常運転、上記副タスクを、それぞれ、SNS タスク、ゲームタスク、通話タスクと表記する。図表中においては通常、SNS、ゲーム、通話と省略する。課した順番は順序効果を考慮し実験協力者により異なるようにした。SNS タスクと通話タスクについては、対話の相手を設け、相手からの質問に実験協力者

Table 2 スマホタスクでの質問内容

SNS（15 問）	通話（20 問）
あなたのお名前は？	今日は、どんなお天気か具体的に教えてください。
今日は何時に起きましたか？	今日はこれまで来るのに、電車を何回乗り換えましたか？何時間くらいかかりましたか？
朝は何を食べましたか？	昨日の夕食は、どこで食べましたか？なにを食べましたか？
よく観る TV 番組はなんですか？	好きな食べ物を教えてください。それはなぜですか？
よく使う LINE スタンプを送ってください	好きなコンビニを名前は言わず色で教えてください。それはなぜですか？
よく使う絵文字を送ってください	父、母、兄、妹を英語で教えてください
カッコイイと思う俳優を教えてください	1 日でスマホを使っている時間が長いのはいつですか？どんな風に使っていますか？
素敵だなと思う女優を教えてください	スマホは何年くらい使っていますか？次はいつ頃買いますか？
今日は何色の靴を履いていますか？	1 日ドライブをするなら、どのように過ごしたいか具体的に教えてください
今年行った場所で、一番遠かった場所はどこですか	クルマを買うなら何色のクルマですか？どんなタイプのクルマが欲しいですか？
西暦で何年生まれですか？	1 ヶ月休みがあるなら、どこへ行きたいですか？何をしたいですか？
干支はなんですか？	よく買い物に行く場所の地名を 3 つ挙げてください
出身はどこですか？	子どもの頃になりたかった職業は何ですか？それはなぜですか？
好きなスポーツはなんですか？	カレーに入っている具材を 5 つ教えてください
嫌いな食べ物はなんですか？	カレーのイメージを具体的に教えてください
	車の免許は、何県でとりましたか？何歳の時ですか？
	国内で好きな場所はどこですか？それはなぜですか？
	虹の色を 7 つ全て言ってみてください。
	信号の色と、その意味を教えてください
	運転しながら話すのは、ただ話している時と比べどう違いますか？



Fig.1 実験中車両（右から順に、先行車，実験車両，後続車）

が答える方法で行った。質問内容を Table 2 に示す。ゲームタスクは操作の継続のみの指示で操作内容は指定しなかった。また、スマホ操作を伴うこと、先行車（後述）を追って走行すること以外は、普段通りの運転をしてもらうこととした。走行速度、車間距離などは、実験の進行に支障がない限り実験協力者の判断で行った。

実験に使用する車両には教習車を使用し、助手席で補助ブレーキを操作するための担当者を同乗させ、安全面に配慮した。経路など実験の進行に必要な質問などに対応はするが、運転中の運転者への自発的な干渉は非常時のみとした。また運転中の様子を記録するため、運転席の撮影のためダッシュボード上部左端に、実験車両前方の撮影のため運転席左後方と車体上部中央に、それぞれカメラを設置した。実験協力者が運転するこの実験車両の他、経路の案内と実験車両の撮影を兼ねた先行車と、実験車両を撮影する後続車を一緒に走行させた (Fig.1)。先行車と後続車は基本的な交通規則に沿う走行とした。ただし先行車は、実験車両が信号待ちで経路を見失わないよう、実験車両の停車中は右左折箇所前で待つものとした。

公道で自動車運転中に“ながらスマホ”を行うことは道路交通法に違反することになるため^[9]、実験は私道である千葉県柏市の柏南自動車教習所で実施した。教習所

実施していない休所日にその教習コースを利用し、信号や駐車車両脇を複数回通過し周回する実験経路を設定した。Fig.2 に実験経路を図中の記号①～⑦で示す。

各実験協力者の1回目の計測は、スタート (①) 後、外周 (②→①) を慣熟走行として1周以上走行するものとした。慣熟走行はスマホを使用しない通常の運転とした。②から戻った後の①から副タスクを開始し、経路は③へ移行した。左回りで③～⑥を走行、最後は⑦に従いスタート位置に戻る。副タスクを変えた2回目以降は、慣熟走行を省略して①から副タスクを開始し③へ進むものとした。③以降は同じ経路となる。これらの経路の路側には、歩行者として数名の協力者（運転者となる者を含まない）に、計測中に通行してもらった。経路の途中で、実験車両が通過する際に信号を黄、赤へ順に変更する、飛び出しに見立て駐車車両脇等の陰からボールを実験車両前に投げ込む、停止車両のドアが開く、の各イベント（それぞれ以下、信号イベント (A, A')、ボールイベント (B)、ドアイベント (C)) を発生させる箇所を複数設けた。信号タスクは2か所を1回ずつ、ボールイベントとドアイベントは経路上のいずれか1回とした。なお、路側に歩行者や自転車走行者も配置した。

これらの条件で運転操作を実施し、視線と運転操作の様子を記録した。そして、視線の移動の様子と、信号イベント、ボールイベント、ドアイベントに対する目視と、その際の減速等の運転操作を調べた。これを踏まえて、普通の運転と“ながらスマホ”での運転で、各イベントに対する目視の有無と動作の遅れなどの発生を比較した。

3. 視線分析の範囲と対象

視線計測データの分析の範囲は、場所により複数の範囲に分割し、それぞれ分析を行った。

まず、信号等のイベントを開始する前の、Fig.1の経路図中、右上から左下の外周部半周にあたる約160mの、副タスク開始後からの区間（以下、副タスク開始区間）を分析範囲に定め、視線の移動の様子を分析した。別途得られる数値データから、視線移動の範囲や速さなど以下の値を視線特性として抽出した。

- ① 停留時間平均：発生した停留の時間の平均。目視時間の目安となる指標であり、個々の目視に要する時間を比較する。
- ② 停留点間速度：停留位置から次の停留位置まで視線の移動速度の平均。眼球の角速度で表す。特定対象に向ける視線移動の速さを比較する。



Fig.2 実験経路

- ③ 停留点標準偏差(S.D.):停留点の座標値の標準偏差. 視線が移動し視認する範囲の広さの目安となる指標であり, 水平と垂直の方向別で得られる. 目が向けられる範囲を比較する.
- ④ 単位時間停留回数: 単位時間当たりの停留回数. 分析対象とした時間とその間に発生した停留の総回数で算出する. 目視の頻度の目安となる指標であり, 目視行動の発生を比較する.
- ⑤ 停留中視線速度: 停留中の視線移動の平均速度. 停留中も微細な視線移動が生じている. 停留の発生している時間とその間の視線移動から, 1回の停留における平均速度が算出される. 本論においては, 分析範囲の全停留の停留中速度の平均値を示す. 特定方向の目視の継続にあたり, 影響が現れ方を見る.
- ⑥ 停留時間比率: 分析対象とした計測時間中の停留時間の割合. 視線の動静の目安となる指標であり, 目視時間全体の変化を比較する.

上記項目に含まれる“停留”は視線の停留のことで, 目がほぼ同じ方向に向き続けることをいう. 本論では, 0.1秒(視野映像上で3フレーム)以上向き続けた場合と定義した. これは, 目が極短時間でもその方向に向けられたことを示し, 頭部の位置と向きを基準として目が向けられた方向となる.

信号イベント, ボールイベント, ドアイベントと, その間の運転操作の様子から, 発生したイベントに対して実験協力者が目視及び減速等の対応した運転操作が行われるかを調べた. 対象は以下の6項目の状況の有無とした.

- (a) 発進の遅れ, 速度低下
- (b) 対向車線にはみ出す, ハンドル操作の不安定
- (c) ウインカーの遅れまたは出し忘れ
- (d) 飛び出してきたボールへの衝突
- (e) 信号見落とし, 停止の遅れ
- (f) 一時停止無視, 停止位置の誤り

また, 各イベントの発生に対し, それを見る行動までの時間を計測した. ただし, 信号の黄色への切り替わり,

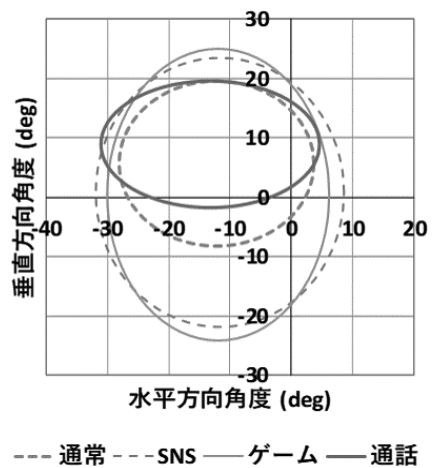


Fig.3 実験協力者5人の停留発生範囲(2S.D.)

ボールの飛び出し発生, ドア開放の開始の各瞬間と, それらに対し見る行動をする様子の両方を視野映像上で捉えることができた例に限定し, その時間差を調べた. 目の動きだけでなく, 頭部の動作も併せて行われる場合が見られたため, その影響が現れる視野映像の上下左右移動も目視のための動きの判断材料とした.

4. 結果

4.1 視線移動・停留の範囲と時間

副タスク開始区間における視線計測結果から, 実験協力者5人の各副タスクでの停留発生の範囲を Fig.3 に示す. 検出された停留位置の全座標値から, 垂直水平方向別に平均と標準偏差を算出し, 平均を中心に標準偏差の2倍を径とする楕円で図示した. なお, 両目で実際に見る方向の計測値を得られなかったため, 一般に利き目とする人が多いとされる右目の計測値を基にした.

Fig.3 に示すように, スマホの画面を伴う SNS タスクとゲームタスクの場合, 目視する範囲が垂直方向, 特に下方に大きくなっていることが見て取れる. 実験中のスマホの持ち方について指示はしていないが, 視野映像から, 多くの実験協力者で低い位置で持ってスマホを持って目視や操作をしていた様子が見られ, その影響による

Table 3 スマホ使用時の視線特性(右目)

	通常	SNS	ゲーム	通話
停留時間平均(sec)	0.38	0.31	0.33	0.32
停留点間速度(deg/sec)	135.9	106.9	100.0	116.3
停留点標準偏差 水平(deg)	7.37	8.30	8.38	7.55
停留点標準偏差 垂直(deg)	4.70	7.74	9.43	3.08
単位時間停留回数(回)	2.37	2.34	2.30	2.84
停留中視線速度(deg/sec)	15.0	22.2	21.4 *	16.4
停留時間比率(%)	88.9	72.8	72.6 **	85.1

※ 各副タスクにおいて通常走行との間での t 検定, **: p<0.01, *: p<0.05

Table 4 テストで確認された運転行動と実験協力者の数

運転行動	通常	SNS	ゲーム	通話
(a) 発進の遅れ, 速度低下	0	3	3	2
(b) 対向車線にはみ出す, ハンドル操作の不備	0	3	2	1
(c) ウィンカーの遅れまたは出し忘れ	0	2	2	4
(d) ボールへの衝突	0	3	4	1
(e) 信号見落とし, 停止の遅れ	1	3	2	3
(f) 一時停止無視, 停止位置の誤り	0	2	1	2

変化とみられる。

次に、5人の各視線特性値をもとに、各副タスクと通常運転との間でt検定を実施した。また、通常運転と各副タスクでの5人の平均値を求めた。これらの視線特性の値と、通常運転と各副タスクとのt検定の結果を、Table 3に示す。

これらの条件のうち、ゲームタスクにおいては、「停留中視線速度」と「停留時間比率」で、通常運転との間で有意差が見られた。特に、停留時間比率の減少は、停留先の対象を区別しておらず、スマホを見る時間と安全確認等の前方や左右を見る時間を合わせたものとなるが、通常運転に比べゲームタスクの場合に減少した。目視する先が増えた一方で目視時間が減少しているため、安全確認等の時間はその分減少していると考えられる。停留中視線速度は、ゲームタスクで増加する様子が見られた。一括の算出で、前方の目視とスマホの目視の区別がないため、どちらの目視に影響したか、あるいは両方かの判断ができないが、視線の停留の際に目の移動が大きく見られることが分かった。

SNSタスクではいずれの視線特性項目でも有意差は見られなかった。しかし、通常運転と比較した平均値の変化は、通常運転とゲームタスクの間と同様の傾向となることが示唆される。両者に共通して見られる変化の傾向は、スマホを目視し操作する行為に起因するものと考えられる。

通話タスクの場合、他の2タスクに比べ、通常時と比較した視線特性の変化が小さくなった項目が多いが、単位時間停留回数は増加となった。視線特性項目が多く、ほとんどである。また有意差のある項目は見られなかった。しかし、値の大小はあるが、視線速度の増加などでSNSタスク、ゲームタスクと共通する変化となった要素も見られた。

4.2 運転行動の不備や操作遅れ

走行中及び各副タスクが発生した際の運転操作の様子

で、前章で示した(a)～(f)の6項目について実験協力者5人のうち何人で発生したかをTable 4に示す。人数のため、1回の計測中に同内容の運転行動の不備が複数回あっても、1人において発生となる。

通常運転では、信号の見落としが1人のみで、他の運転操作の不備は発生しなかった。スマホの使用を伴うと、6項目全てで不備が多数見られるようになった。

スマホの操作を伴うSNSタスクやゲームタスクでは、ボールの飛び出し、発進の遅れ、速度低下が多く協力者で見られるようになった。信号の変化や飛び出しなど、運転に必要な周囲の情報、特に突発的な変化が得られにくくなることが見られたことから、危険性を生じることが明らかになった。

通話タスクの場合は、6項目全てで不備が見られ、危険性があることはSNSタスク、ゲームタスクと同様である。しかし影響の現れ方が他の副タスクと異なり、対向車線にはみ出し、ハンドル操作不備、ボールへの衝突の発生が少数になった。一方で、ウィンカーの遅れまたは出し忘れが多くなる結果となった。

4.3 目視時間

信号イベント、ボールイベント、ドアイベントの発生から目視までにかかる時間をTable 5, Table 6, Table 7に示す。実験協力者5人の結果を示すが、空欄の箇所は各イベントの発生を視線計測装置で撮影された視野映像から得られなかった例、もしくは実験協力者がイベントの対象に向く行動をしなかった例である。また、平均値

Table 5 信号イベントから目視までの時間(秒)

実験協力者	通常	SNS	ゲーム	通話
A	0.47	1.93	1.40	0.73
B			0.33	0.13
C	0.33	0.97	0.20	0.17
D	2.70	0.47	3.80	
E	0.27	1.80	0.83	1.03
平均	0.94	1.29	1.31	0.52

Table 6 ボールイベントから目視までの時間 (秒)

実験協力者	通常	SNS	ゲーム	通話
A	0.97	1.17	0.37	0.53
B	0.37	2.23	0.63	0.37
C	0.40	0.60	0.70	0.73
D	0.47	0.63	0.43	0.47
E	0.50	1.37		1.03
平均	0.54	1.20	0.53	0.63

Table 7 ドアイベントから目視までの時間 (秒)

実験協力者	通常	SNS	ゲーム	通話
A	0.83	0.57	0.70	0.63
B	0.53	1.00	1.63	0.20
C	0.27	0.63		0.26
D	0.57	1.10	0.37	0.43
E	0.20	1.00		0.37
平均	0.48	0.86	0.90	0.38

は目視までの時間を得られなかった例を除いて算出した。なお、信号タスクは映像から信号の点灯状態の判別ができない例が複数あったことから、点灯状態を得ることができた仮設信号に限定し分析した。

どのイベントにおいても個人差が大きな結果であるが、平均値で見ると、SNS タスクやゲームタスクの場合、通常運転以上の目視時間になった。SNS タスクは多くの実験協力者で通常運転より目視時間が長くなっており、目視されなかった例を除いて t 検定を実施したところ、特にドアイベントにおいて通常運転と SNS タスクの間で有意な差が見られた ($p=0.041$)。また、ボールタスクでは、通常運転と SNS タスクの間で有意な傾向が見られた。その他、スマホの操作を伴う SNS タスク、ゲームタスクの際に時間がかかる例が多く見られるが、通話タスクの場合、通常運転より目視時間が短くなる例も見られた。

スマホ操作を伴っていてイベント対象を見落とし、特に信号では赤信号で通過する例などが見られたが、通常運転でも信号を目視しない例が見られた。しかしこの際は交差点の停止線で停車しており、目を向けずに信号を認識できていたことが分かった。

5. 考察

視線特性について、副タスク開始区間の停留発生範囲を見ると、垂直方向は通常運転からの変化が大きく表れた。スマホを手で持って操作を行う SNS タスクとゲームタスクにおいて拡大しており、特に下方向に広く、範

囲を表す楕円の中心も通常運転に比べ下方に変化した。通話タスクの場合は垂直方向の移動範囲は通常運転に比べ狭くなっており、楕円の中心はやや上方となった。

一方で、水平方向の範囲は通常運転と大きな差がなく、副タスク条件 4 通りですべて左寄りとなり、楕円の左右方向の平均位置も近い値となった。左に寄った要因として、左カーブを含む区間であり、その箇所を通行する前から進行方向である左方を向いていたこと、自動車教習所内のコースで路側を歩行者が通行していた一方で、対向車がなかったため、左右だけで見ると目を右より左の方へ向ける機会が多く存在していたことが考えられる。

SNS タスクとゲームタスクでは、“前方と左右方向の目視”と“手元のスマホの目視”に大別できると考えられる。そのうち、“前方と左右方向の目視”は向きで考えると運転に必要な確認すべき方向に相当し、これに限定した部分と通常運転の場合で停留発生および視線特性の比較をする方法も考えられる。

また、実験で使用した視線計測装置は、装着した者の目が向けられている方向を検出するものであり、頭部の位置および向きを基準とする値が得られる。本論では飛び出しなどの突発的事象に対しての行動として目の動きのみから判断したが、頭部動作を含む目視行動を計測することで、前方及び周囲の確認行動の判断ができると考える。

運転行動の不備や操作遅れについて、SNS タスク、ゲームタスクでは、対向車線はみ出し、ハンドル操作不備、ボールへの衝突の発生が多くなった。スマホを手で持つ SNS タスクやゲームタスクは、前方を目視なくなる時間を生じることから、完全に見落とす例と、前方を見た際にイベントが発生し、目視できる例が生じていたと思われる。一方、通話タスクでは、ウインカーの遅れまたは出し忘れが多くなる結果となった。ハンズフリー装置によりスマホを持たないことでハンドル操作の不備が減少し、また視線がスマホを見ることなく継続して前方及び周囲を見られる状態にあることで、ボールの飛び出しに対応し衝突が減少していたものと考えられる。それでも不備を生じる様子が見られること、合図や操作の遅れが見られることから、安全確認が十分ではないと見ることが出来る。

なお、違反行為であっても電話機を持って通話する様子がまだ見られる。公道では実験できないが、電話機を直接持って通話すること影響を見ることで、その危険性が明確にできるものと思われる。

目視時間について、Table 5 の実験協力者 B の通常運転でも信号への目視行動がなかったことについて、この

例では、信号の点灯状態の変化に対応して停車することができていた。そのため、信号に目を向けないまま信号の変化を認識することができ、運転操作をできていたことになる。視野のうち、中心視野から外れた範囲でも信号の認識が可能な場合、目視行動がないままになることが考えられ、本論の方法では目視にかかる時間を求められない。運転操作までの応答時間と組み合わせるなど、目視にかかる時間を求める方法を検討する必要がある。

同様のことが他の副タスク、他のイベントでも生じている可能性も考えられ、イベント対象を認識する時間を運転操作と併せて調べる必要がある。それにより、目視、認識の遅れと運転操作の遅れとどちらの影響が大きいか、その個人差やタスクの負荷の大小による影響の違いも判断できると思われる。

6. おわりに

本実験では、自動車運転中の“ながらスマホ”により生じるドライバへの影響を調べる実験を実施し、視線計測により、目視の動作などからその遅れや見落とし、安全確認動作の変化などを見ることができた。

運転中のスマホ利用により、信号や飛び出しの見落としなど、突発的に生じる危険な場面への対応が困難になり、また走行中のハンドル操作や発進、停止操作なども不安定になったり遅れたりすることが判った。自動車運転中の“ながらスマホ”に危険性があることが明らかになった。

道路交通法上認められているハンズフリー装置を介した通話の場合も、信号認識の遅れや方向指示の遅れ、出し忘れなどが見られ、自動車運転中の通話は危険性があることが分かった。

ドライバの意識、注目がスマホに向けられることで周囲の状況の認識を妨げる他、運転操作が疎かになりやすくなる。このことから、自動車運転中の“ながらスマホ”が危険な行為であるといえる。

補 足

本実験は、日本自動車連盟の機関誌『JAF Mate』の企画として、2016年10月に実施し、その結果は誌面に記載された他、動画投稿サイトでも映像として公開されている^{[10][11]}。

参考文献

- [1] 『『ポケモンGO』で死亡事故 愛知県西尾市で「ぼうけんノート」見ながら運転か』、ハフポスト日本版、2018年4月16日、https://www.huffingtonpost.jp/2018/04/15/pokemon-go-car-accident_a_23411870/、(2018年8月28日掲載確認)
- [2] “死亡事故の女子学生を書類送検 神奈川県警”、毎日新聞、2018年2月15日、<https://mainichi.jp/articles/20180215/k00/00e/040/334000c>、(2018年8月28日掲載確認)
- [3] “小学生がホームから転落、あわや事故 JR四ツ谷駅”、日本経済新聞、2013年5月28日、https://www.nikkei.com/article/DGXNASDG27056_X20C13A5CC1000/、(2018年8月28日掲載確認)
- [4] 本田正英，“携帯電話会話時における運転者の注意状態評価について”、国際交通安全学会誌 Vol.130, No.3, 2015、https://www.itarda.or.jp/ws/pdf/h27/18_02keitai.pdf (2018年8月28日確認)
- [5] 内田信行、浅野陽一、植田俊彦、飯星明，“携帯電話等の使用が要因となる事故の分析”、第18回交通事故・調査分析研究発表会、pp.57-65, 2015、<http://www.iatss.or.jp/common/pdf/publication/iatss-review/30-3-11.pdf> (2018年8月28日確認)
- [6] 川上満幸、福井英俊、松本修一、大久保発夫，“自動車運転中の携帯電話使用が視覚情報処理に与える影響”、照明学会誌第84巻第2号、pp.117-123, 2000 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiej1980/84/2/84_2_117/_pdf/-char/ja (2018年8月28日確認)
- [7] 小塚一宏、飯田智之、小林一信，“アイマークレコーダによる運転中のドライバの視線計測”、第6回ITSシンポジウム2007 proceedings, pp.495-499, 2007
- [8] 尾林史章、小澤慎治、小塚一宏 “ドライバの挙動計測による携帯電話使用の影響評価”、動的画像処理実用化ワークショップ (DIA) 2012 講演論文集, Mar. 2012
- [9] 道路交通法第七十一条五項の五、道路交通法の一部を改正する法律、平成11年5月10日公布
- [10] “運転中の“ながらスマホ”実車で危険性をテスト”、JAF Mate, 第55巻, 第1号, pp.36-37, 2017
- [11] JAF Channel, 運転中の「ながらスマホ」の危険性、日本自動車連盟, 2016, <https://www.youtube.com/watch?v=fudrcGaR5bo> (2018年8月28日確認)

研究論文

駅ホーム上歩行中におけるスマートフォン使用時の視線特性

尾林史章*, 荒川俊也**, 小塚一宏*

(2018年9月30日受理)

Gaze Characteristics of a Pedestrian Texting while Walking on the Platform

Fumiaki Obayashi *, Toshiya Arakawa ** and Kazuhiro Kozuka *

(Received September 30, 2018)

Abstract

Nowadays, there are many reports that people walking with operating smartphone collides other walking people or he/she dropped into the railroad track. In order to verify whether people walking with operating smartphone pay attention around his/her, we measured his/her eye movement and verified the effect about walking with operating smartphone. We analyzed subject's eye movement on walking on the platform at "Seibu Shinjuku Station" with operating following four tasks: (1) walking without any task, (2) walking with reading a brochure, (3) walking with looking Twitter® and (4) walking with playing smartphone game. As a result, it has been found that the horizontal looking area of the subject gets to be narrow significantly on SNS task and gaming task, and it gets to be difficult to look surroundings while operating smartphone.

キーワード: スマートフォン、歩行者、視線、プラットホーム

Keywords: Smartphone, Pedestrian, Eye direction, Platform

1. はじめに

最近ではスマホが急速に普及し、駅や道路など様々な場所や状況で、歩きスマホをする光景が見られる。それに伴い、特に歩行者が込み合う状況での衝突や転倒などの事故が見られるようになり、それらが社会的に問題視されるようになってきた。国土交通省の調べでは、駅のホーム上で携帯端末を使用しながら歩行して線路へ転落するなどの事故が、平成25年に45件、平成26年に32件、それぞれ発生している^[1]。

歩行中にスマホなどを使用することの影響や危険性に関する先行研究には、視線特性に関する研究^[2,3]、歩行特性に関する研究^[4]がある。中でも視線特性の研究では、スマホなどを使用する場合に、室内の障害物の回避行動や狭い空間等の通過に障害が出ること^[2]、階段を昇る場合に視線の向きが2段目よりも1段目を主に見て視野が

狭くなること^[3]などが報告されている。これらの先行研究は、列車など構造物の再現はあっても、周囲の歩行者が一切存在しない環境で実施されている。従って、現実の環境下で検証することは、これまで以上に現実の環境に即した評価結果が得られ、歩きスマホの危険性を検証する意味では、極めて有意義であると考えている。

本報告では、現実の環境の中で、「駅のホームを歩く」という状況に特化し、普通に歩行する場合と歩きスマホをする場合それぞれの目視行動を計測し比較した実験および結果について述べる。普通に歩行する場合とスマホを使用しながら歩行する場合で周囲の安全確認ができていいのか、視線の様子を計測する実験を行った。駅のホーム上で、パンフレットを読む、スマホでTwitter®をする、スマホでゲームをする、各タスクを伴う歩行と、普通の歩行で、歩行時の視線挙動について解析した。そ

* 愛知工科大学 ITS 研究所 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
ITS Laboratory, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-Cho, Gamagori, Aichi 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, Nishihasama-Cho, Gamagori, Aichi 443-0047, Japan

の結果、SNS タスク、ゲームタスクにおいて、水平方向に見る範囲が狭まること、および、スマホ操作時は周囲の目視確認が困難になっていることが判明した。第2章で実験方法、第3章で視線特性について実験結果と影響を考察する。第4章で本報告をまとめる。

2. 実験方法

2.1 計測の方法と条件

実験は、2011年7月22日に西武新宿駅の2・3番ホーム上で、13時から16時に行った。実験協力者は、後述の実験内容に関する説明を行い、インフォームド・コンセントが得られた22歳の女子学生1名である。なお、1名の実験協力者は、実験協力者数として極めて不十分であり、本報告の実験結果は一般的な傾向でない可能性がある。

実験においては、普通に歩行する場合（No Task: NT）と、駅設置のA3サイズの観光パンフレットを読みながら（Brochure Task: BT）、スマホでTwitter®での任意のツイートの読み取りと入力を行いながら（Twitter Task: TT）、スマホを傾けキャラクタを操作するゲームをしながら（Game Task: GT）、歩いた場合の視線の様子を計測した。なお、BTは、現地で歩きながら行われると思われる行動の一例として用いた。また、スマホでの用途を事前に学生に質問した際、Twitter®とゲームの2種が挙げられた。そのため、本実験では、Twitter®の操作とゲームの操作を、それぞれ、スマホ操作時のタスクとした。

実験協力者は、視線計測装置（2.2節で述べる）を装着した状態で、駅のホーム上を線路に沿う方向に往復して歩行した。安全性の確保のため、列車の到着時をできるだけ避けた列車待機中か列車不在の際に歩行開始とした。歩行位置は、ホーム中央とホーム端を示す黄色線（点字パネル）の間とした。ただし、他の歩行者の回避のためこの範囲の外を歩行する場合も見られた。各タスクで最低1回計測し、視線計測装置のデータの欠損などに起因して、往路・復路共に解析に足るデータが得られない場合には再度実験協力者を歩行させ、計測した。場所の慣らしを考慮してNTを最初に行い、折り返すタイミングは、実験協力者自身の任意とした。そのため、視線計測装置のデータ記録時間は計測の度に異なっている。また、折り返しを除き可能な限り歩行中にタスクの動作を継続してもらうようにした。タスクの動作は、BTでは掲載されている図や説明を見ること、TTでは特定の相手とのやり取りではなく、任意のツイートの閲覧と自身の文章の入力およびツイート、GTではプレー中の操作

とした。なお、歩行中危険を感じた場合に任意で中断可能とした。

なお、実験協力者1名であることから、課すタスク順を変更し順序効果を考慮した分析ができない。最初に計測したNTについて、人、物問わず周囲への目の向け方が異なるなどの影響が想定される。

2.2 使用機器

視線計測には視線計測装置（EMR-8B、株式会社ナックイメージテクノロジー製）を使用した。眼球を近赤外光で撮影し、映像中の瞳孔の位置から視線方向を得て、視野映像に重畳し、サンプリング周波数29.97Hzで出力される。計測中には、記録装置（miniDVレコーダ、ソニー株式会社製）を含む装置一式をリュックに収納し実験協力者が背負うものとした。

2.3 分析の項目と対象

各タスクで、解析対象となった計測における実験協力者の歩行時間と、このときに解析対象の範囲にホームに存在した人数をTable 1に示す。なお、「解析映像内人数」は、歩行時に記録された映像を手がかりに、ホーム上に存在した人数を目視で数えた値である。

なお、無タスクの場合において、データ欠損などがなく連続してデータを計測・取得できた時間が復路における約1分間であった。このことを考慮し、タスク毎の解析時間の整合を図るために、他の3つのタスクにおける解析対象も復路1分間とした。視線計測装置から得られた視線方向のデータを基に、以下の項目について無タスクに対する比率の分析を行った。

- (1) 停留時間平均：発生した停留の時間の平均。目が大きく移動せず留まることを停留とする。目視時間の目安となる指標であり、個々の目視に要する時間を比較する。
- (2) 停留点の標準偏差（S.D.）：停留点の座標値の標準偏差。視線が移動し視認する範囲の広さの目安となる指標であり、水平と垂直の方向別で得られる。目が向けられる範囲を比較する。

Table 1 タスク別映像記録時間及び人数

タスク	映像記録時間	解析映像内人数
NT	2:05	39
BT	3:12	28
TT	5:47	19
GT	3:50	80

(3) 単位時間停留回数：単位時間当たりの停留回数。分析対象とした時間とその間に発生した停留の総回数で算出する。目視の頻度の目安となる指標であり、目視行動の発生を比較する。

(4) 停留時間比率：分析対象とした計測時間中の停留時間の割合。視線の動静の目安となる指標であり、目視時間全体の変化を比較する。

なお、ここで述べる停留とは、目が頭の向きに対し同一方向を向き続けることであり、その座標は眼球の回転角度値で表す。さらに、停留の発生位置の比較のため、座標値の平均を、水平および垂直方向について算出した。また、注視項目分析として、記録された視野映像中で、視線が向けられた対象物を映像のフレーム毎に抽出し、0.1秒（3フレーム）以上連続した場合にその対象物を見たものと定義した。注視の対象は次のように分類し、折り返しを除く連続した視線計測データにおいて、注視の発生した回数と時間を分析した。

- 負荷タスク対象：パンフレット、スマホ画面。
- 人：利用客、駅員、乗務員等の人物。
- 列車：列車車両。
- その他視認：上記以外、及び対象判断不可。

3. 実験結果

3.1 視線移動への影響

Table 2 に、各タスクにおける各分析項目の値を、Fig.1 に、NT に対する、他のタスクの各分析項目の比率を示す。

Table 2 タスク別視線特性値

タスク	NT	BT	TT	GT
停留時間平均 (sec)	0.15	0.15	0.20	0.23
停留点分散 水平 (deg)	11.1	8.1	2.9	2.1
停留点分散 垂直 (deg)	4.5	11.3	4.8	4.9
単位時間停留回数	1.50	2.02	2.34	3.20
停留時間比率 (%)	21.8	31.3	46.5	74.9

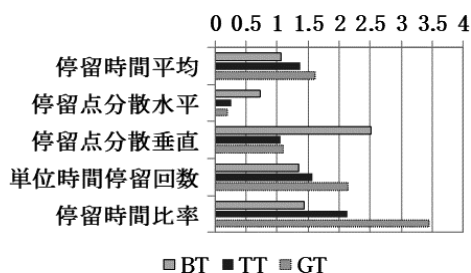


Fig.1 NT に対する各視線特性値の比率

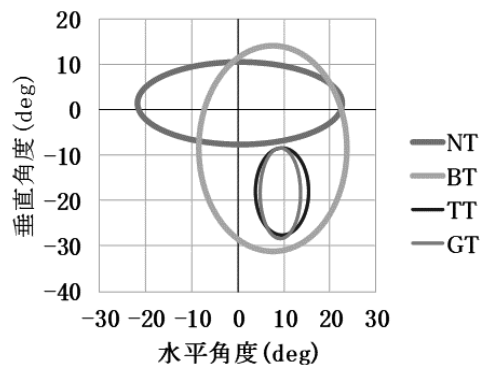


Fig.2 停留発生範囲

負荷タスクを伴う場合の特徴として、停留点の S.D. の水平方向の値は減少し、停留の回数や時間は大きく増加した。目の動きはあるが、水平方向に狭い範囲を長く見ている様子が見られた。停留の発生範囲について、発生位置の平均値を中心、停留点の水平、垂直それぞれの 2S.D. を径として表した楕円を Fig.2 に示す。

NT における水平方向の分散と、各タスクの水平方向の分散について F 検定を行ったところ、全てのタスクで、他のタスクに比べ、NT の分散が有意に大きかった (NT-BT: $F(88,109)=1.9017$, NT-TT: $F(88,139)=14.609$, NT-GT: $F(88,192)=26.867$, 全て $p<0.01$)。

さて、Fig.2 において水平方向および垂直方向の楕円の長さを見ると、NT ではそれぞれ 22.2(deg) と 9.0(deg) であり、水平方向に広く見ているが、BT では 16.1(deg) と 22.7(deg) と垂直方向に広く見ている。一方、TT では 5.8(deg) と 9.5(deg)、GT では 4.3(deg) と 9.9(deg) となっている。F 検定の結果も踏まえると、TT、GT ともに、NT と比べ水平方向を見る範囲が有意に狭まっている。特に、TT では水平成分の分散が NT の約 1/4、GT では約 1/5 となっている。このことから、スマホ画面の狭い範囲に集中し周囲に目が向けられなくなったと示唆される。

また、停留点の平均角度（水平角度、垂直角度）は、Fig.2 より、NT が (0.44, 1.51)、BT が (7.60, -8.46)、TT が (9.66, -17.99)、GT が (9.26, -18.42) であり、タスクを伴う場合、特にスマホを使用する場合は垂直方向に小さく、視線が下方に向けられていることがわかる。

3.2 注視項目への影響

歩行中に発生した注視動作をタスク別、対象別に分類し、経過時間に対する注視時間の割合を求めた。Table 3 に示す。スマホ操作を伴う TT、GT では、人や列車な

ど周囲に目をほとんど向けず、スマホの注視割合が多いことが示唆される。3.1節の結果も踏まえると、スマホ使用時は見る対象がスマホに集中し範囲は狭く下方になり、周囲の目視確認が難しくなると考えられる。

Table 3 タスク別各注視対象への注視割合 (%)

タスク	対象	人	列車	その他視認
NT	0.0	41.6	43.3	15.1
BT	69.5	11.2	16.7	2.6
TT	99.0	1.0	0.0	0.0
GT	99.1	0.9	0.0	0.0

3.3 実験協力者へのアンケート

後日、実験協力者に実験に対する意見や感想を聞いた際、視線方向が記録された映像を見て、パンフレットなど実際に見ていた要素を覚えている例と、周囲の状況など覚えていない例が見られた。特に、すぐ横を通り過ぎる客に対して目を向けておらず、実験協力者からも気づかなかつたとの回答が聞かれた。このことより、アンケートの回答は実験結果を追認していると考えられる。

4. まとめ

駅のホーム上において“歩きスマホ”をすることによる影響を検証するための実験を実施した。視線計測の結果に基づくと、“歩きスマホ”をする場合には視線の向

けられる範囲が減少し、かつ下方に向けられ、周囲の目視が困難になっていることが明らかとなった。歩行者が行き交う場所であれば、本報告と同様の影響を生じる可能性が示唆される。

謝 辞

本実験の実施に当たり、ご協力いただいたNHKディレクター（当時）山田礼子氏、また、運行時間中のホーム上の使用を承諾していただいた西武鉄道株式会社に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 国土交通省 報道発表資料：“「プラットホーム事故0(ゼロ)運動」について”，http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo08_hh_000073.html, 参考（統計資料），“ホームからの転落に関する情報”，<http://www.mlit.go.jp/common/001111902.pdf>, pp.6, (Nov. 30, 2015), 2018年4月25日掲載確認
- [2] 樋口貴広, Aftab E Patla：“狭い空間を通り抜ける際の知覚運動制御—通過口に対する回避動作の分析から—”，日本心理学会第70回大会発表論文集, 1AM072, (2006)
- [3] B. D. Lester, R. Hashish, R. Kim, H. Moorman, E. Hildebrand, J. Schwark, R. Rauschenberger, D. Young：“Mobile Device Usage Influences Gaze Patterns To Obstacles During Locomotion”，Proc. the 2016 Industrial and Systems Engineering Research Conference, (2016).
- [4] E. M. Lamberg and L. M. Muratori：“Cell Phones Change the Way We Walk”，Gait and Posture, vol.35, no.4, pp.688--690, (2012).

研究論文

単一マイクロホン入力音声からの Deep Belief Network による 発話者までの距離推定

實廣 貴敏*, 宮嶋 博*, 布目 貴大*, 武田 一哉**

(2018年9月30日 受理)

Estimation of the Distance to Speaker by Deep Belief Network from Input Speech of Single Microphone

Takatoshi Jitsuhiro*, Hiroshi Miyajima*, Takahiro Nunome*, Kazuya Takeda**

(Received September 30, 2018)

Abstract

We propose a new method using Deep Belief Network to estimate the distance to a speaker at the front of a speech dialog system with a single microphone. Two methods are proposed: the method (a) using accumulated scores, and (b) using a majority decision. In the experiments, we evaluated the performance to discriminate between near speech and far speech. Experimental results show that the method (b) obtained 85.92% F-measure, which is better than the method (a)'s performance, 83.46%.

キーワード：距離推定, 単一マイクロホン, Deep Belief Network

Keywords: distance estimation, single microphone, Deep Belief Network

1. はじめに

近年, パソコンやスマートフォン, カーナビに搭載されるなど, 音声対話システムの応用が盛んである. この30年間に積み込まれた研究が実用品として実りつつあり, 音声対話システムは, 新しいマンマシンインターフェースとして世間的にも注目を集めている. これらの応用では, 音声認識精度が重要である. しかし, 実際に音声対話システムを使用する場合, 周囲の雑音など音声対話に関係しない音声から影響を受けてしまう. 基本的に入力される音声は全ての音声を認識対象であると想定しており, 認識対象ではない音声が入力されてしまうと適切な対応ができない.

そこで, 観測される音声から発話者までの距離を推定できれば, 認識すべき対象ととるかどうかが判断でき, より適切な対応ができる. 具体的に, 発話者の位置がマイ

クから近ければ, その音声は認識対象であるとし, 発話者の位置がマイクから遠ければ, その音声は認識対象ではないと判断することができる.

距離の情報を含む音源位置推定は音源定位とも呼ばれる. これまでに様々な手法が提案されているが, その多くはマイクロホンアレイを用いた手法である. マイクロホンアレイを複数設置し, それぞれ推定された音源の到来方向 (Direction of Arrival: DOA) を結合して三角測量を行う方法^{[1][2]}, 音源から到来する波が球面波であると仮定し, 各マイクロホンの位相パターンから, 球面波源を特定する方法^[3]がある. これらの方法で距離を推定する場合, マイクロホンアレイの大きさに問題が生じる. このようなマイクロホンアレイによる音源位置推定では, 良好な性能が期待されるが, 簡易な音声対話システムでは, 単一マイクロホンを用いた場合が多く, 従来法の利用が困難である. 単一マイクロホンで音源

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

** 名古屋大学大学院情報学研究科
Graduate School of Informatics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ward, Nagoya-City, 464-8601 Japan

定位する手法の例として、音素 HMM (Hidden Markov Model) を用いて音源方向を推定する手法が提案されている^[4]。この手法では、ある位置から発話された音声からその音響伝達特性を推定し、それを識別することで音源の方向を推定するものである。あくまで方向の推定であった。

我々の研究グループでは、文献^[5]において、単一マイクロホンにおいて、比較的容易な方法としてベクトル量子化 (vector quantization, VQ) コードブックを利用して、話者までのおよその距離を推定する手法を提案した。しかし、このとき使用した評価データは、音響伝達特性をインパルス応答から推定、その特性を評価データに積み込んだものであった。音源方向推定の研究では、評価データ作成の簡便性や、実環境では周囲雑音の影響を回避しにくいなどの問題から、このような音響伝達特性のみを得て、シミュレートによる評価データを用いることが多い。

本論文では、より現実的な手法を検討するために、実環境において収録した音声データを使用するとともに、近年、パターン認識で成功を収めている Deep Neural Network (DNN) の技術を利用することにより、より精度高く、発話者までの距離推定を行う。本報告では、DNN 発展の元となった Deep Belief Network (DBN)^[6]を用いる。評価データは、比較的静かな部屋において収録したものをを用い、近距離 0.2 m と遠距離 5 m の 2 種類に絞って、識別実験を行う。推定距離の決定には 2 通り、累積スコアを用いるものと距離ラベルの多数決によるものを検討する。

本論文の構成を示す。2 節では、DBN による発話者距離推定方法 2 種類について述べる。3 節にて、それら 2 種類の評価実験および結果について述べ、4 節にて、本論文をまとめる。

2. DBN による発話者距離推定手法

2.1 DBN による距離推定

本研究では、移動しながら発話する状況は考慮せず、1 つの発話は必ず同じ場所で発声されていると仮定する。音声対話システムに何か質問する場合を考えれば、妥当な仮定である。Fig.1 に発話距離推定に用いる DBN の構成を示す。入力層 (図中 Input layer) には音声特徴量 (Feature parameters) を入力し、複数の隠れ層を経た後、出力層 (Output layer) にて距離に応じたラベルとそのスコアを出力する。先に出力について考える。距離識別の対象として、今回は近距離 0.2 m と遠距離 5 m の 2 種類とする。将来的にはより複数に拡張することも考えられ

る。入力される音声には、発話者の音声が含まれない区間 (無音区間) が存在する。そのため、DBN での識別クラスとしては、近距離、遠距離、無音区間の 3 種類としておく必要がある。出力としては、3 種類のスコアと対応するラベルになる。

次に DBN の入力について考える。研究の目的としては、1 発話に含まれる情報全てから、1 つの距離を推定することになる。しかし、音声は発話内容や発話速度により、その継続時間は異なる。一般に、音声分析は、音声波形を短時間のフレームに分け、フレームごとに特徴抽出される。これに対し、DBN を含むニューラルネットワークでは、特徴量の入力になる入力層のユニット数を固定して用いる。画像のパターン認識では、画像の大きさを固定すれば、入力する画素数が固定され、その数を入力層のユニット層とすればよい。したがって、音声処理の場合にはニューラルネットワークを用いる場合、

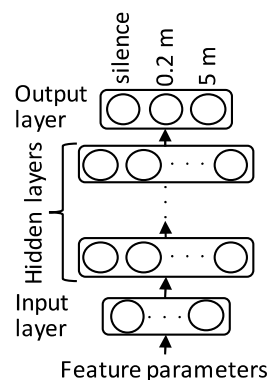


Fig.1 発話者距離推定のための DBN 構造

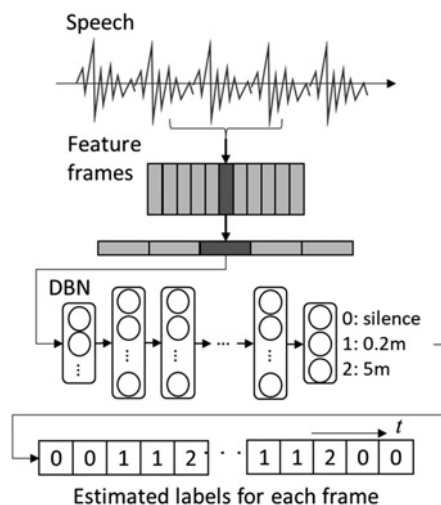


Fig.2 DBN による各フレームに対する発話者距離推定

工夫が必要になる。本研究では、DBN への入力は 1 フレーム単位とする。ただし、1 フレームのみの音声特徴量から距離推定に利用する音響伝達特性を得ることは難しい。それらの特徴が表れる数百 ms 程度の長さの音声が必要である。そこで、実際には、複数のフレームを接続して 1 つのベクトルとしたものを入力とする。Fig.2 に分析フレーム単位での DBN による発話距離推定の流れを示す。図に示すように対象フレームの前後数フレームからの音声特徴量ベクトルを接続し、1 つの長いベクトルとする。これにより DBN への入力次元数は固定できる。具体的な音声特徴量としては、音声認識でよく利用される MFCC 係数などによる 12 次元ベクトルを使い、前後 5 フレーム、合計 11 フレームを一つの 275 次元ベクトルとして入力する。

各フレームを DBN で認識処理を行い、その結果を発話全体で集計する必要がある。今回は 2 通りの手法を検討する。すなわち、

手法 (a) 各フレームでの DBN によるスコアを加算していく累積スコアを用い、発話終端で累積スコアが高い方を推定された距離とする。

手法 (b) 各フレームでの DBN による推定距離ラベルをカウントしていき、発話終端でラベル出現頻度の多数決により推定距離を決定する。

の 2 種類とする。

全体の距離推定アルゴリズムを以下にまとめる。

[DBN による発話者までの距離推定方法]

Step. 1 入力音声を音声分析し、音声特徴量ベクトルを得る。このとき、発話単位で各特徴量次元に対し、標準化変換しておく。各フレームに対して、前後フレームの音声特徴量ベクトルを接続し、一つのベクトルとする。

Step. 2 各フレームに対して DBN の出力を得る。このとき、2 種類の手法に対し、下記の処理を行う。

手法 (a) DBN が出力する各距離ラベルに対するスコアを加算し、それぞれの累積スコアを保持する。

手法 (b) DBN が推定した距離ラベルの頻度を保持する。

Step. 3 発話終端にて、それぞれの手法で下記のように最終的な推定距離を得る。

手法 (a) 累積スコアの高い方を推定された距離とする。

手法 (b) 距離ラベルの多数決、すなわち頻度が高い方を推定された距離とする。

3. 実験

3.1 音声データ収録

評価データに用いた音声収録について述べる。音声認識研究用の音声データベース、日本音響学会新聞記事読み上げ音声コーパス (JNAS) の一部を用いた。その音声データを次に説明する環境、条件で再生し、それを録音することで、その環境下での距離別の発話を得た。収録時の環境を Fig.3 に示す。場所は愛知工科大学の 1 つの教室で、周囲雑音あまり大きくない日時を選んで収録を行った。音声を再生しないときの騒音レベルはほぼ 40 dB 台であった。また、床から天井までの高さは 2.75 m であった。スピーカに YAMAHA 製 MSP7 STUDIO、マイクロホンに SONY 製 C-357 を用い、Roland 製 R-44 で録音を行った。このスピーカとマイクロホンの高さを 1.3 m とした。

音声データベース JNAS から、学習データ 73 発話 (話者 16 名を含んだ発話)、検証データ 25 発話 (6 名を含む)、

評価データ 102 発話 (24 名を含む) を用いた。サンプリング周波数は 16 kHz、量子化ビット数は 16 ビットで評価データ 102 発話 (24 名を含む) を用いた。サンプリングした。距離を 0.2 m と 5 m に変えて再生録音を行った。このとき音量の依存性を無視できるように、振幅をほぼ同じに合わせた。

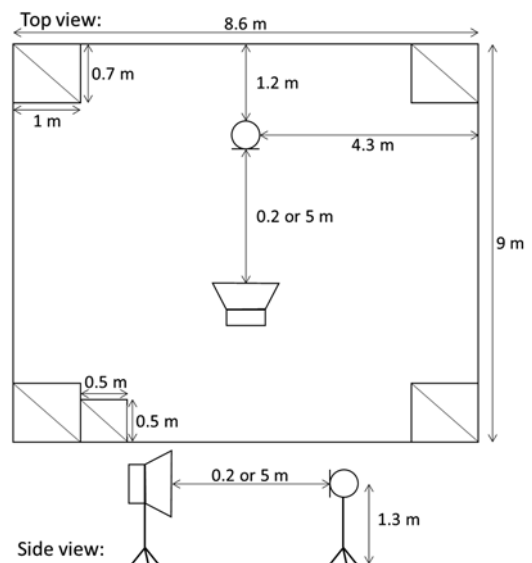


Fig.3 音声データの収録環境

3.2 実験条件

音声分析ではフレーム長 25 ms, フレーム周期 10 ms とした. 音声特徴量として 1 フレームにつき 12 次元 MFCC, 12 次元 Δ MFCC, Δ 対数パワーを用いた. 前後 5 フレーム計 11 フレームで得られる 275 次元ベクトルを特徴量とし, DBN への入力とした. DBN は Theano [7] を使用した Deep Learning Tutorials [8] のツールを用いた. DBN の構成は様々な組み合わせを試し, 実験的に精度が高くなるものを調査した. 学習データで DBN を学習した後, 検証データでの評価を行い, そのときのフレームあたりの精度の変化が十分小さくなるまで繰り返し学習を行った. 活性化関数はシグモイド関数を用い, ミニバッチサイズは 100 とした.

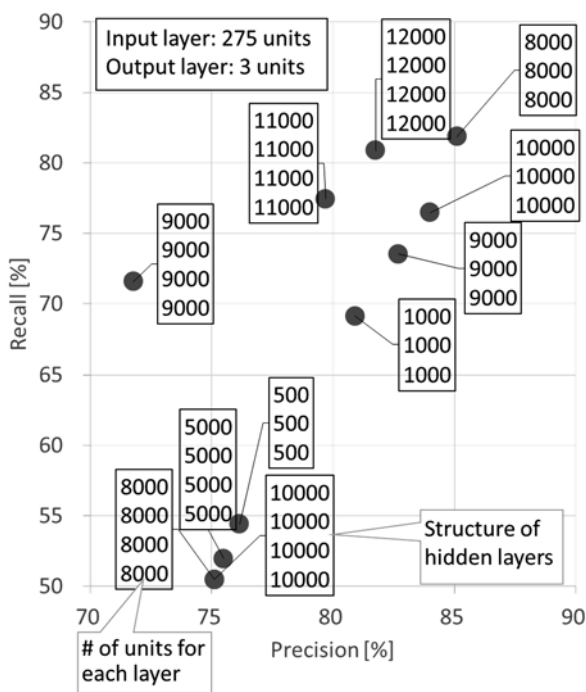
3.3 実験結果: 適合率と再現率

Fig.4 に方法 (a) 累積スコアによる決定方法, 方法 (b) 多数決による決定方法による適合率 (Precision) 対再現率 (Recall) のグラフをそれぞれ示す. 各モデルの入力層, 出力層のユニット数は同じであり, 入力層は音声特徴量次元数と同じ数の 275 ユニットの, 出力層は 3 ユニットの

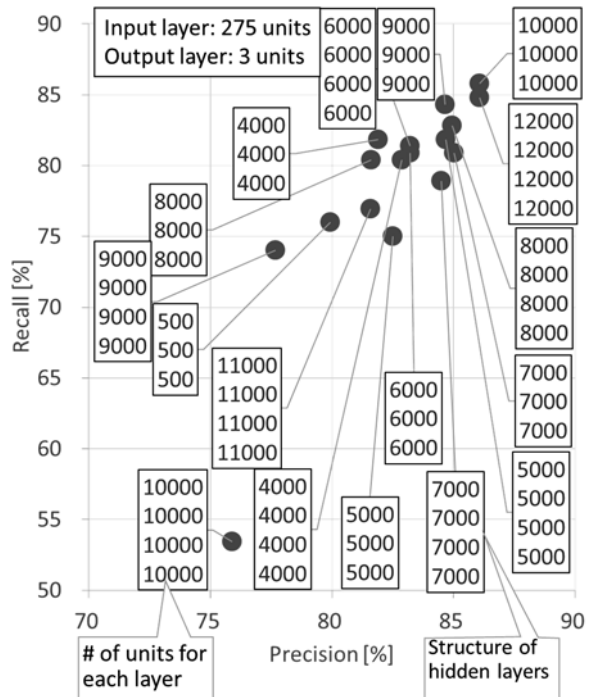
を示す. 右上にあるものほど, 性能が良いことになる. その各点から線で結ばれている四角内の数値は隠れ層の構造を表している. 数値の行数が階層数を表し, 各行の数値は各層でのユニット数を示す. 例えば, 方法 (a) における最も良い性能を示した右上の四角内にある, 「8000」が縦に並んでいるものは, 隠れ層が 3 階層, その各階層は 8,000 ユニットの構成となっており, 入力層から出力層までで 5 階層の DBN であることを示している.

最も良いモデルでの性能をまとめる. 方法 (a) では, 隠れ層 3, 各層 8,000 ユニットのときで, 適合率 85.11%, 再現率 81.86% であった. 方法 (b) では, 隠れ層 3, 各層 10,000 ユニットのときで, 適合率 86.07%, 再現率 85.78% であった. 方法 (b) 多数決による推定方法の方が, より精度が高いことがわかった.

ただし, どちらの手法も隠れ層の数やユニット数により, 精度はまちまちで, 特に傾向もみられないことから, 適切なモデルを見つけることが難しい. モデルとしては, 各層のユニット数を変えたものも作成可能であるが, 実験を行うには時間もかかるため, すべてを網羅することは困難である. より適切なニューラルネットワークが存在する可能性はある.



方法 (a) 累積スコアによる決定方法



方法 (b) 多数決による決定方法

Fig.4 方法 (a) および (b) における適合率 (Precision) 対再現率 (Recall)

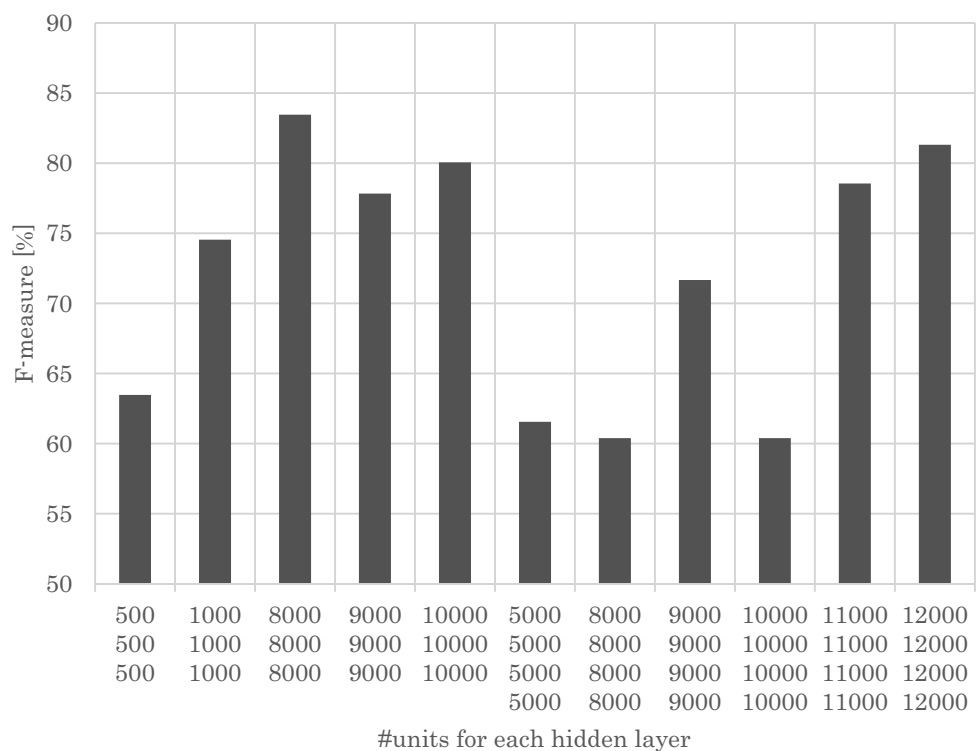


Fig.5 方法 (a) における F 値

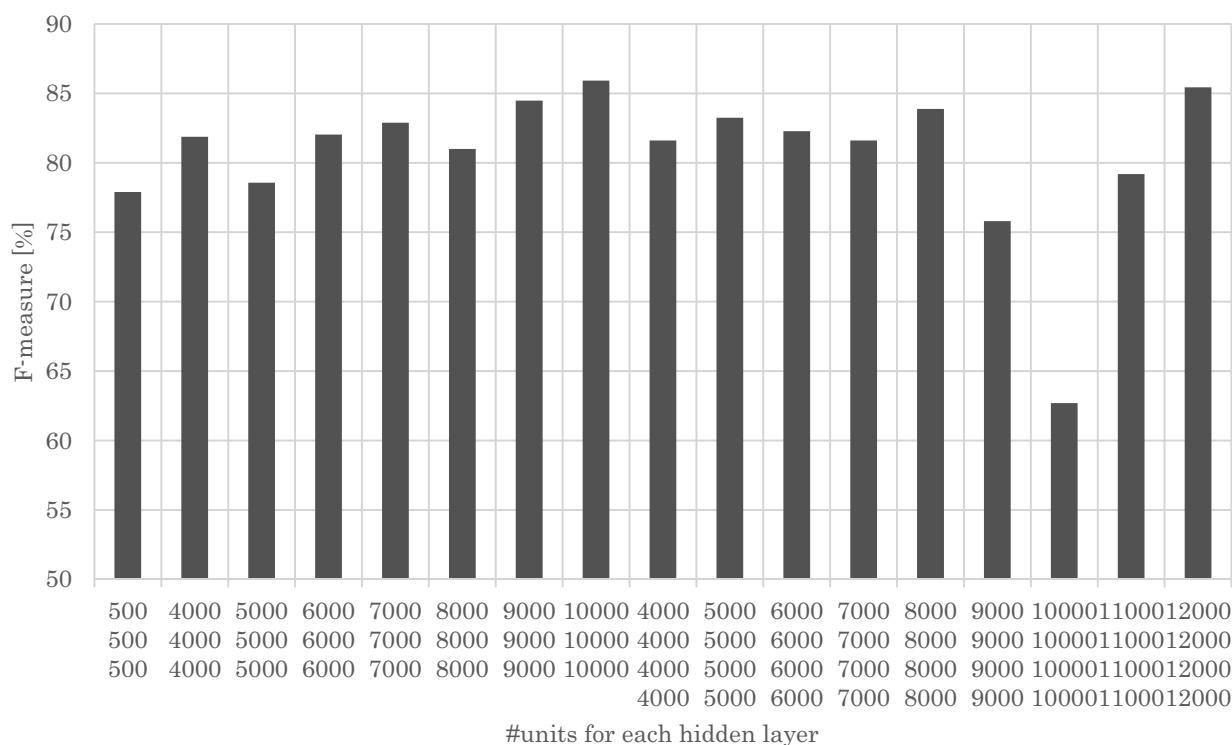


Fig.6 方法 (b) における F 値

3.4 実験結果：F 値

Fig.5 に方法 (a) による F 値, Fig.6 に方法 (b) による F 値を示す. Fig.4 に示した各点に対して F 値を計算したものである. 適合率対再現率で最良であったモデルは

F 値においても最良のモデルになっている. 方法 (a) による最良の F 値は 83.46% であり, 方法 (b) では 85.92% であった. それ以外のモデルについては, 方法 (a) に比べ, 方法 (b) は他のパラメータセットであっても数%程

度、精度が低い程度のもが多いが、(a)の方は適切なセットからずれると極端に精度が下がる場合が多い。方法(b)の方が、パラメータ数の変動による精度の変動が少なく、適切なモデルのパラメータ数を設定しやすいといえる。

今回用いた DBN では、無音区間の各フレームでの識別誤りが多く、遠距離 5 m に推定されることが多かった。累積スコアによる方法 (a) では、その誤った推定でのスコアを遠距離のスコアとして累積してしまう。そのため、近距離より遠距離のスコアが高くなる傾向があり、距離推定誤りが方法 (b) より多くなると考えられる。

4. まとめ

本研究では、音声対話システムを仮定した上で、単一マイクロホンでの発話者までの距離推定において、DBN を用いる手法を提案し、近距離と遠距離の 2 種のみ推定実験を行った。DBN により各分析フレームの距離を推定し、そこで得られる各距離のスコアを累積して判定する方法 (a) と推定された距離ラベルの多数決による方法 (b) を比較した。方法 (a) より方法 (b) の方が、比較的精度が良いことがわかった。

今回の課題として、近距離 0.2 m と遠距離 5 m の 2 種類のみを対象としたが、より多くの距離を含め、詳細な距離の識別実験がある。また、一つの部屋での実験であったが、他の大きさ、タイプの部屋や、異なる環境下での評価が課題としてあげられる。

謝 辞

本研究では JSPS 科研費 26330211 の助成を受けた。本研究で使用した音声の収録および予備的実験を行ってくれた 2014 年度実廣研卒業生（松井氏、新屋氏、井上氏、吉田氏、早瀬氏）に感謝する。

参考文献

- [1] M. S. Brandstein, H. F. Silverman, "A practical methodology for speech source localization with microphone arrays," *Computer Speech & Language*, Vol. 11, No.2, pp.91-126,1997.
- [2] P. Bergamo, S. Asgari, H. Wang, D. Maniezzo, L. Yip, R. E. Hudson, K. Yao, D. Estrin, "Collaborative sensor networking towards real-time acoustical beam-forming in free-space and limited reverberance," *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol. 3, Issue 3, 2004.
- [3] F. Asano, H. Asoh, T. Matsui, "Sound source localization and separation in nearfield," *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. 83, No.11, pp.2286-2294, 2000.
- [4] R. Takashima, T. Takiguchi, and Y. Arika, "HMM-based separation of acoustic transfer function for single-channel sound source localization," *ICASSP 2010*, pp.2830-2833, Dallas, Texas, USA, 2010.
- [5] 李津, 實廣貴敏, 武田一哉, "単一マイクロホン入力音声から音響モデルを用いた発話者との距離推定," *愛知工科大学紀要*, 第 14 巻, pp. 1-7, 2017.
- [6] G. E. Hinton, R. R. Salakhutdinov, "Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks," *Science*, vol. 313. no. 5786, pp. 504 - 507, 2006.
- [7] Theano 1.0.0 documentation, <http://deeplearning.net/software/theano/>, アクセス：2018 年 9 月 29 日
- [8] Deep Learning Tutorial, <http://deeplearning.net/tutorial/>, アクセス：2018 年 9 月 29 日

研究論文

文法型圧縮法による英語・日本語・中国語文書の圧縮

吉田 茂*, 芦田勝猛*

(2018年9月30日受理)

Text Compression for English, Japanese and Chinese by Grammar Based Compression

Shigeru Yoshida*, Katsutake Ashida*

(Received September 30, 2018)

Abstract

With the spread of the Internet in recent years, the number of electronic documents which can be obtained free of charge has increased. In this paper, we examined the characteristics of grammar based compression methods in multilingual documents by using documents that are available free of charge. As a method, we took Re-Pair and picked up three languages of English, Japanese, Chinese as multilingual. Re-Pair is a method of storing the entire input data temporarily in the memory at the time of compression, obtaining the most frequent two-character pair, replacing it with a new one character, and repeating this process. The compressed data becomes a character pair table and a replacement character string. Decompression retrieves the replacement character string one character at a time and restores it by looking at the character pair table. During compression, the load on the CPU is heavy, but it is a very lightweight method when restoring. In the previous report, we improved the compression rate by sorting Re-Pair's character pair table and encoding it. In this report, since Japanese characters and Chinese characters can express one character by 2 bytes in the UTF-16 code, first we tried a method to increase the processing speed by registering 2 bytes of one character in the character pair table. As a result, processing speed in Japanese and Chinese documents could be greatly improved without affecting the compression ratio almost.

キーワード：ロスレス・データ圧縮, 文法型圧縮, BPE, Re-Pair

Keywords : lossless data compression, grammar based compression, BPE, Re-Pair

1. はじめに

近年, インターネットの普及によって, 無償で入手できる電子文書が増えてきた. 本稿では, 無償で入手できる文書を用いて, 多言語文書における文法型の圧縮特性を調べた. 方式としては RePair^[1] を取り, 多言語として, 英語, 日本語, 中国語の3カ国語を取り上げた. データ圧縮ソフトとしては GZIP^[2] がポピュラーであるが, GZIP は様々な複雑な工夫をこらして, 圧縮率を稼いでいる. ここでは, 組込み用途での利用を考え, シンプルな手法で, 高圧縮を得ることを考える. そのため, 文法型圧縮法の RePair を用いている.

RePair は, 圧縮時に, 入力データ全体をメモリに一旦

格納してから, 最頻出する2文字ペアを求め, それを新たな一文字に置き換え, この過程を繰り返す方法である. 圧縮データは, 文字ペア表と置換文字列になる. 復元は, 置換文字列を1文字ずつ取り出して, 文字ペア表を見て復元する. 圧縮時は, CPU への負荷が重い, 復元時は非常に軽量な方法である. 前報^[3] では, RePair の文字ペア表をソートしてから符号化することで圧縮率を改善した. UTF-16 コードにおいては, 日本語と中国語は2バイトで一文字を表すので, 本報^[4] では, まず2バイト一文字を文字ペア表に登録して, 処理速度を上げる方法を試した. これにより, 圧縮率にほとんど影響を与えずに, 日本語, 中国語文書での処理速度を, 大幅に改善

* 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, Gamagori 443-0047, Japan

することができた。検討結果を報告する。

2. 本研究の目的

データ圧縮では GZIP が、Windows や Linux で、さまざまな用途に使われてポピュラーになっている高圧縮のソフトウェアである。GZIP は、LZ77 型の手法であり、最近出現した文字列と同じ文字列が出現している箇所を一致位置と一致長で表して符号化する「コピー型」の手法である。復元は、圧縮と逆に、過去に出現した文字列をコピーして、芋ヅル式に復元する。これ以外に、GZIP は、最長一致を得るための遅延評価や、静的ハフマン符号で再計算を減らすための中間符号語の選択など、多くの複雑な処理を行っている。

本研究では、組込み向け用途向けに、複雑な方法を探らずに、シンプルな方法で高圧縮を得ることを検討する。このため、文法型圧縮の RePair を採用している。この方法の圧縮データは、文字ペア表と置換文字列になる。RePair 圧縮時は、CPU への負荷が重いが、復元時は非常に軽い方法である。本報では、多言語の電子文書に対して、圧縮の高速化を図る。

GZIP はスライド辞書型の方法であり、過去に出現した文字列をコピーして表す。これに対して、RePair は、文字ペア表として辞書を、組織的に、静的に作った後、文字列を文字ペア番号として表す。文字ペア表は、符号割り当てに無駄のない形となり、静的であるため、しっかりした分析が行える。

3. フリーの電子文書の入手

多言語の文書では、著作権フリーのものが、英語なら、ゲーテンベルク・プロジェクト^[5]、日本語ならば青空文庫^[6]から入手できる。しかし、中国語については、無償の文書の入手先があまりない。本稿では、無償で入手できる文書を用いて、多言語文書における圧縮特性を調べる。

表 1 形態的類型論による各言語の分類と特徴

言語	類型	記述形式	特徴
英語	屈折語	表音文字	名詞、動詞などの語尾が変化する
日本語	膠着語	表意文字と表音文字	助詞を用いて、主語・動詞などを接合する
中国語	孤立語	表意文字	主語、動詞が無変化。語順で意味を把握

多言語として、英語、日本語、中国語の 3 カ国語を取り上げた。これらの言語は形態的類型論からみると、表 1 に示すように、それぞれが屈折語、膠着語、孤立語の代表的な存在になっており、独特な特徴を持つ。

多言語文書の圧縮特性を調べるためには、同一の内容を異なる言語に翻訳した文書が必要になる。ここでは、英語、日本語、中国語（簡体字）の 3 つの言語を取り上げる。しかし、同一の内容を 3 カ国で翻訳している文書を見つけるのは難しい。多言語の文書間の圧縮特性は、言語間の翻訳の質に影響されるが、これは小さいものとして、今回は無視することにする。

先に述べたように、英語と日本語は、著作権フリーな著作が多数登録されているため、これから対応する著作を選べば良い。しかし、中国語に関しては、著作権フリーな文書が網羅的に用意されているサイトが見つからなかった。そこで、①多言語で掲載している Web サイトから同一文書を選択する方法と、②個々の文書を掲載している Web サイトから拾ってきて 3 言語の文書を揃える方法、とを取った。

①は、グリム童話を 19 カ国語で表している Web サイトが見つかった^[8]。グリム童話は、世界的に有名なので、複数言語に翻訳されている。これらを一文字 16 ビットを基本とする UTF-16 コードで表して、圧縮することにした。

4. 従来技術について

多言語のデータ圧縮には、ポピュラーに使われる方式 GZIP の他にも種々の方法が研究されている。Unicode (UTF-8, UTF-16) の圧縮法として、標準的な方法 USUC (Unicode Standard compression for Unicode)^[9]が規格化されている。この方法は数百バイト以下の小数バイトを対象にした方法であるので、対象外とする。ここでは、比較のため、GZIP のライブラリ版である ZLIB^[10]と圧縮率を比べることにする。

5. RePair 方式の改良

文法型圧縮法 RePair について、前報では、RePair に対して、文字ペア表をソートしてから符号化することで、圧縮率を改善した。これを「RePairT (sort-Table)」と呼ぶことにする。さらに、この RePairT に対して、圧縮時の高速化を検討した。この方法を「RePairTC」と C (combining to one Character) を末尾に追加して表す。

RePair はバイト単位の圧縮法であり、日本語と中国語

は多バイト言語であるため、これらの文字をまとめてから、圧縮するようにした。文字コードは UTF-16 を用い、各国語の文書を UTF-16 に変換後、圧縮を行った。英語も、UTF-16 では 2 バイトで、上位バイトがゼロになる。これも同様に 2 バイトを一文字にまとめて、圧縮した。用いた方式のフローチャートを Fig.1 に示す。Fig.1 の図中、2 重線で囲ったステップが 2 バイトを一文字にまとめる処理である。太線で示したステップが、文字ペア表をソートしてから、その差分を符号化する前報で記した部分である。

今回の 2 バイトを一文字にまとめてから RePair を掛

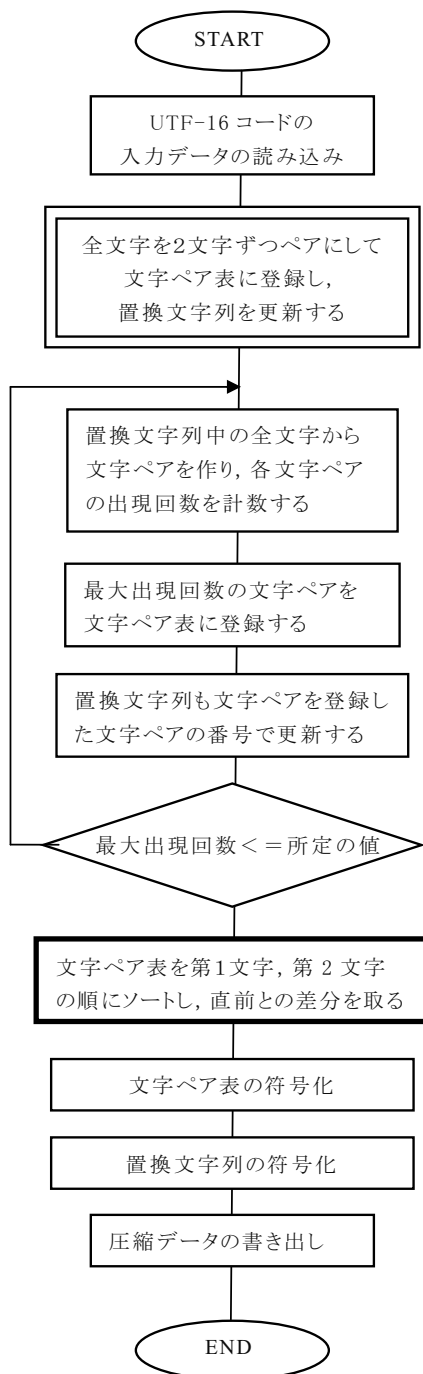


Fig.1 RePairTC 圧縮のフローチャート

Table 1 評価用データ

評価用データ	英文データ長 (バイト)	略 称
(ア)シンデレラ	28,146	シンデレラ
(イ)ブレーメンの音楽隊	12,980	ブレーメン
(ウ)ヘンゼルとグレーテル	29,896	ヘンゼル
(エ)白雪姫	32,066	白雪姫
(ア)~(エ)の結合文書	103,088	結合文
阿Q正伝	171,826	阿Q

Table 2 実験環境

項目	内容
コンピュータ	ノート PC MousePro
OS	Windows10 Pro version 1803
CPU	Intel Core i7-6500 2.5GHz
メモリ RAM	8.00 GB
C 言語	GCC version 3.4.5

Table 3 デフォルトの UP 符号表

a) 1 文字目の符号表

ステップ数	符号語	符号の範囲
1	0	0
2	10 *	1 - 2
3	110 *	3 - 4
4	1110 **	5 - 8
5	11110 **	9 - 12
6	111110 *	13 - 14
7	1111110 *	15 - 16
8	1111111 CBT 符号	残り

* は 0 または 1 を表す

b) 2 文字目の符号表

ステップ数	符号語	符号の範囲
1	0 *****	0 - 127
2	10 *****	128 - 319
3	110 *****	318 - 448
4	111 CBT 符号	残り

* は 0 または 1 を表す

ける方法は、同じ文字ペア表に登録するため、復元には関係せず、同じ復元プログラムが使うことができる。

これによって、1バイトずつの処理を、2バイトまとめてから RePair 処理を行うので、高速化が期待できる。

6. 実装と評価

(1) 評価用データ

Table 1 にデータとして選んだサンプルを示す。ここに示すデータは、テキスト・ファイルにして、UTF-16 コードに変換して用いた。グリム童話の一話一話は、英文で数十 KB と短いので、比較的長い文書として、① Table 1 (ア)～(エ)を繋いだ結合した文書と、②阿 Q 正伝^{[9][10][11]}、の2編を、英文 100KB 以上の文書として用意した。以降、これらのデータを右列に記した「略称」で参照する。

(2) 圧縮ソフトウェアの実装

実験環境を Table 2 に示す。RePair, RePairT のプログラム、及び、今回の試作は C 言語で実装した。圧縮率が最適になるように、文字ペア表への登録は、最大出現回数が3回以上出現する場合に限定した。RePair 等において、文字ペア表、置換データの符号化には CBT

(Complete Binary Tree) 符号を用いた。

CBT 符号は、全体個数が2のべき乗個数にならないとき、ビット数を補償することができる。RePairT において、文字ペア表の符号化には UP (Unary Prefix) 符号を用いている。UP 符号表は Table 3 のように、前報の符号表を踏襲した。

(3) データの一覧

UTF-16 に直した評価用データの英語、日本語、中国語のデータ長を Table 4 に示す。

各方式の圧縮速度を Table 5 に示す。圧縮時間は、入力データ読み込み、圧縮データの書き出しを除いたメモリ上の圧縮時間である。表中、RePairC は2バイトを一文字にまとめる方法であり、RePairTC は前報の方法で2バイトを一文字にまとめる方法である。表の圧縮速度は、C 言語で^[11]の方法により、windows.h の GetTickCount 関数を用いて、ミリ秒まで求め、元データ長をこの値で除算した。復元速度は1ミリ秒未満と高速であり、求まらなかった。つまり、1MB/s 以上で復元できるということである。時間計測は測定のためごとにバラツキが大きいので、圧縮速度として信頼できる数値は1桁程度と見る。

GZIP は、ライブラリ版である ZLIB を用いて、処理

Table 4 各文書の UTF-16 のデータ長 (バイト)

言語	シンデレラ	ブレーメン	ヘンゼル	白雪	結合文	阿 Q
英語	28,146	12,980	29,896	32,066	103,088	171,826
日本語	11,990	5,726	13,436	13,978	45,228	70,102
中国語	9,012	4,374	13,962	10,108	37,494	46,364

Table 5 各方式の圧縮速度 (KB/s)

方式	言語	シンデレラ	ブレーメン	ヘンゼル	白雪	結合文	阿 Q	改善度
RePair	英語	41	38	48	30	48	46	--
	日本語	23	23	25	25	25	23	--
	中国語	19	19	21	20	21	22	--
RePairC	英語	45	36	28	47	51	50	7%
	日本語	35	31	41	23	34	34	42%
	中国語	32	47	45	38	37	40	79%
RePairT	英語	40	23	47	45	56	45	--
	日本語	19	22	22	14	25	22	--
	中国語	15	17	18	19	21	22	--
RePairTC	英語	43	39	50	33	49	48	-4%
	日本語	28	41	37	34	32	32	36%
	中国語	32	40	41	36	34	36	63%

(注) RePairC : UTF-16 の2バイトを一文字にまとめる方法

RePairT : 前報の文字ペア表をソート圧縮する方法

RePairTC : 前報の方法において、UTF-16 の2バイトを一文字にまとめる方法

Table 6 各方式の圧縮率

方式	言語	シンデレラ	ブレーメン	ヘンゼル	白雪	結合文	阿Q	改善度
ZLIB -9	英語	0.198	0.262	0.223	0.209	0.197	0.215	--
	日本語	0.395	0.508	0.433	0.407	0.383	0.465	--
	中国語	0.567	0.722	0.592	0.585	0.551	0.576	--
RePair	英語	0.234	0.285	0.224	0.218	0.207	0.211	--
	日本語	0.456	0.542	0.461	0.442	0.425	0.474	--
	中国語	0.587	0.71	0.578	0.594	0.559	0.568	--
RePairC	英語	0.224	0.273	0.233	0.216	0.200	0.205	2.9 %
	日本語	0.476	0.614	0.482	0.470	0.427	0.497	-2.7 %
	中国語	0.649	0.832	0.649	0.663	0.590	0.603	-5.9 %
RePairT	英語	0.208	0.257	0.204	0.194	0.187	0.192	--
	日本語	0.423	0.493	0.434	0.413	0.384	0.446	--
	中国語	0.536	0.654	0.540	0.546	0.510	0.521	--
RePairTC	英語	0.199	0.245	0.209	0.192	0.180	0.186	3.4 %
	日本語	0.403	0.485	0.411	0.395	0.366	0.430	4.1 %
	中国語	0.529	0.661	0.536	0.536	0.501	0.516	1.4 %

Table 7 各方式の文字ペア表の登録個数

方式	言語	シンデレラ	ブレーメン	ヘンゼル	白雪	結合文	阿Q
(a) RePair 文字ペア表 登録個数	英語	573	312	512	650	1,454	2,168
	日本語	458	220	435	478	1,243	1,770
	中国語	385	180	515	421	1,188	1,328
(b) RePairC 文字ペア表 登録個数	英語	766	397	730	820	1,929	2,820
	日本語	804	538	831	909	2,028	2,587
	中国語	870	600	1,138	972	2,242	3,194
(c) 文字ペア 表登録個数の 拡大割合	英語	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3
	日本語	1.8	2.4	1.9	1.9	1.6	1.5
	中国語	2.3	3.3	2.2	2.3	1.9	2.4
(d) RePairC 初期登録 個数	英語	54	50	56	55	61	74
	日本語	429	375	454	486	834	1,556
	中国語	597	523	796	698	1,284	1,620
(e) RePairT 文字ペア表 符号 (バイト)	英語	1,316	647	1,214	1,406	3,573	5,500
	日本語	1,046	485	1,033	1,148	3,005	4,476
	中国語	908	380	1,195	962	2,806	3,039
(f) RePairTC 文字ペア表 符号 (バイト)	英語	1,197	524	1,094	1,286	3,256	5,234
	日本語	1,135	619	1,143	1,299	3,006	4,500
	中国語	1,169	747	1,479	1,283	3,058	3,358

速度、圧縮率を測定した。ZLIB は、圧縮、復元速度とも、これらの評価用データのサイズでは 1 ミリ秒未満の高速処理が行えた。表の最右列の「改善度」は、結合文書と阿 Q 正伝の圧縮速度の平均に対して、2 バイト一文字にまとめたことによる改善の比率を示す。

文字ペア表への文字ペア登録個数を、Table 7 に示す。RePairT、RePairTC の文字ペア登録個数 (a),(b) は、RePair にソートをかけて圧縮するだけなので、RePair、RePairC と同じ値になる。

各方式の圧縮率を Table 6 に示す。ZLIB の圧縮率は、最高の圧縮率が得られるようにオプションを -9 に設定した。

圧縮後の圧縮データ量の割合を Table 8 に示す。

この割合は、日本語の圧縮データ量を 1.00 とした場合の値である。圧縮データ量は、言語が異なっても、ほぼ同じになると言われることから採ってみた。

7. 考察

(1) 圧縮速度について

Table 5 において、RePair から RePairC では、予想通り、英語の改善はわずかだが、日本語は約 40%、中国語は約 80% の大幅な改善が得られている。RePairT から RePairTC では、全般的に速度が低下している。英語ではかえって速度が低下し、日本語、中国語では先の改善が 20% 程度低下する。

(2) 圧縮率について

Table 6 より、RePair から RePairC にすることで、圧縮率は、英語がわずかに改善されるものの、日本語、中国語は数%悪化する。しかし、RePairT は、RePairTC にすることで、各言語とも、圧縮率が数%改善がされている。RePairTC の値は、ZLIB の最適圧縮値に対して、ほぼ全データについて優位な値となった。次に、これを Table 7 の文字ペア表の登録から考えてみる。

RePairC で圧縮率が悪化するの、初期登録で、2 バイト一文字を初期登録したので、文字ペア表が拡大したからである。文字ペア登録個数の拡大割合は Table 7(c) に示すように、英語、日本語、中国語で、それぞれ約 1.3 倍、1.6 倍、2 倍程度となっている。2 バイト一文字の初期登録は、英語ではそのままだが、日本語、中国語では隣り合う下位バイトと上位バイトとの頻出関係が文字ペアとして登録されなくなる。この影響は小さいと考える。

RePairT から RePairTC で圧縮率が改善されるのは、2

バイト一文字の初期登録によって、文字ペア表をソートしたとき、前後の差分が小さくなり、圧縮し易くなるためである。Table 7(e)(d) は、文字ペア表の符号サイズを示している。RePairT に対して RePairTC の符号サイズは、結合文書と阿 Q 正伝で、同等か少し増えているが、Table (c) の拡大割合からすれば、符号量では確実に減っていることになる。かくして、圧縮率の改善は、文字ペア表への登録が増えたことにより、置換文字列が圧縮し易くなったためと分かる。

(3) 各言語の圧縮データ量について

Table 8 が、圧縮後の圧縮データ量の割合を示すものである。各文書で日本語のデータを 1.00 にとり、英語と中国語のデータの比率を求めた。右端の列は全体の平均値と標準偏差である。自然言語は、言語が違ってても同一文書を圧縮した場合、エッセンスは同じような圧縮データ量になると言われる。これは翻訳の上手、下手にもよるし、また、ある言語にあって、他の言語にない概念が使われている場合は、違ってくる。ここで用いた、グリム童話、阿 Q 正伝は、翻訳の質も良く、概念的な違いもないものとする。そうして比べてみると、元データが日本語に対して、英語 2.3 倍、中国語 0.75 倍であったものが、いずれの圧縮データも、確かに 1.00 に近づいている。RePairTC では、元データの大小関係を反映して、日本語に対して、英語は約 10% 大きく、中国語は約 10% 小さい値となっている。

8. まとめ

著作権フリーで無償で入手できる電子文書を用いて、英語、日本語、中国語（簡体字）の文法型圧縮法 RePair の圧縮特性を調べた。一文字を 2 バイトで表す UTF-16 コードに変換して、入力データとした。最初に一文字 2 バイトを文字ペアとして文字ペア表に登録して、圧縮処理の高速化を図った。その結果、圧縮速度は、英語ではあまり変化しないものの、日本語では 40%、中国語では 80% の改善できることが分かった。さらに、文字ペア表をソート圧縮する前報の方法と組み合わせると、圧縮速度は多少遅くなるが、圧縮率が数%改善できた。文字ペア表への登録個数は英語で 1.3 倍、日本語で 1.6、中国語で 2 倍に増加している。前報の方法は文字ペア表をソートして符号化しており、圧縮率の改善は、文字ペア表が圧縮し易くなるため、引き起こされることが分かった。圧縮データ量は、どの言語でも、ほぼ 1.00 に近づき、最大圧縮したとき、日本語に対して、英語が約 10% 増し、

中国語が 10% 減になった。

今回はデータ量が数十 KB と、比較的小さかったので、今後、さらに数百バイトのデータで確かめたい。また、他の言語での有効性なども試してみたい。

参考文献

- [1] N.J. Larsson, A.Moffat: Off-Line Dictionary Based Compression, Proc. of The IEEE, Vol.88, No.11 (2000.10).
- [2] GZIP Home Page, <http://www.gzip.org/>.
- [3] 吉田茂：文法型圧縮における文字ペア表の圧縮, pp.1-7, 愛知工科大学紀要 第 11 巻 (2014.3).
- [4] 芦田勝猛：文法型圧縮に関する研究 - 多言語 2 バイト文字対応高速化の検討 -, 平成 29 年度愛知工科大学卒業研究予稿集, 情報メディア学科 (2018.2).
- [5] Free ebooks - Project Gutenberg <https://www.gutenberg.org/>
- [6] 青空文庫, インターネットの電子図書 <https://www.aozora.gr.jp/>.
- [7] 日本語能力検定試験まとめ, 言語類型論 (タイポロジー) まとめ <https://nihongokyoiku-shiken.com/language-typology-typology-summary/>.
- [8] グリム童話 英語, 日本語, 中国語版 <https://www.grimmstories.com/>
- [9] Unicode Technical Standard #6, A Standard Compression Scheme for Unicode <https://www.unicode.org/reports/tr6/>.
- [10] zlib, A Massively Spiffy Yet Delicately Unobtrusive Compression Library <https://zlib.net/>.
- [11] Lu Xun : The True Story of Ah-Q <https://www.marxists.org/archive/lu-xun/1921/12/ah-q/index.htm>.
- [12] 阿 Q 正伝 魯迅 井上紅梅訳 https://www.aozora.gr.jp/cards/001124/files/42934_16419.html.
- [13] 阿 Q 正伝 (魯迅小説代表作) <https://baike.baidu.com/view/91976.htm>.
- [14] ⑫「効率化のための手なおしの前に測定しよう」, p.10, 日経ソフトウェア (2011.3).

Table 8 英語の圧縮データ量を 1.00 としたときのデータ量の割合

方式	言語	シンデレラ	ブレーメン	ヘンゼル	白雪	結合文	阿 Q	平均	標準偏差
元データ	英語	2.35	2.27	2.23	2.29	2.28	2.45	2.37	0.08
	日本語	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
	中国語	0.75	0.76	1.04	0.72	0.83	0.66	0.75	0.13
RePair	英語	0.96	1.2	1.07	1.11	1.11	1.06	1.09	0.07
	日本語	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
	中国語	0.96	1	1.3	0.96	1.1	0.76	1.01	0.16
RePairC	英語	1.11	1.01	1.08	1.06	1.07	1.01	1.06	0.04
	日本語	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
	中国語	0.93	1.03	1.3	0.97	1.07	0.79	1.02	0.16
RePairT	英語	1.11	1.01	1.08	1.06	1.07	1.01	1.06	0.04
	日本語	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
	中国語	0.82	0.86	1.24	0.89	0.99	0.95	0.96	0.14
RePairTC	英語	1.16	1.15	1.13	1.12	1.12	1.06	1.12	0.03
	日本語	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00
	中国語	0.85	0.91	1.2	0.88	1.01	0.75	0.93	0.14

研究論文

自動ブレーキを搭載したソーラー付電動シニアカーの開発

鈴木宏和*, 中島守*, 永田英雄*, 岩瀬正幸*, 甲村一貴*, 小野秀文*

(2018年9月30日 受理)

Development of Solar Senior Car with Automatic Brake

Hirokazu Suzuki*, Mamoru Nakashima*, Hideo Nagata*, Masayuki Iwase*, Kazuki Koumura*, Hidehumi Ono*

(Received September 30, 2018)

Abstract

Authors participate in many solar car races up to now. The race experiences are utilized for senior car making. In this study, the solar panel was installed in the senior car and the charge effect was inspected. And also, automatic braking system was added as the stop help function. As a result, automatic braking system operated well. And it was proved to be able to serve the power consumption of the senior car by the hours of sunshine of 4.6 hours from 3.4 hours a day.

キーワード：シニアカー，太陽電池，自動ブレーキ，IoT

Key Words : Senior Car, Solar Cell, Automatic Brake, IoT

1. はじめに

現代社会が直面する，超高齢化，人口減少，環境問題といった問題に対処するためには，高速道路・新幹線・飛行機などの「大きい交通」だけでなく，電動カートなどの「小さい交通」が必要である¹⁾。

その「小さい交通」の一つとして，近年，高齢者の行動範囲を広げてくれる「シニアカー」と呼ばれる「ハンドル型電動車いす」が，介護保険制度の福祉用具貸与種目の対象でもあることから急速に普及している。しかし，普及に伴い，高齢者が使用中のシニアカーが関係した交通事故や他の交通とのトラブルも増加傾向にあり，利用に際して搭乗者の死亡・怪我，シニアカーの車両の破損，相手に対する賠償（対人・対物）などのリスクが考えられる^{2) 3)}。また，「充電しても短時間で止まる，航続距離が短い」などのバッテリーに関する事例も報告されている。

我々は，これらのトラブルを解決するために，市販されているシニアカーの前方および後方にセンサを取り付けて，歩行者や障害物に接近した時に警報を鳴らし，停止することができる自動ブレーキを搭載した。また，航続距離を伸ばすことはもちろん，充電器に接続する手間

を減らすことができるように，ソーラーシステムによる充電装置を取り付けて常時充電できるようにした。本報では，ソーラーシステムによる充電の効果および搭載した自動ブレーキの特性について述べる。

2. ソーラーシステム

ソーラーパネルは，サンパワー社製の太陽電池モジュールを4枚直列接続（合計136W）したものを，カーボン製のサンドイッチパネルに張り付けた。その外観を **Fig.1** に，使用した太陽電池モジュールの仕様を **Table1** に示す。

ソーラーパネルの出力は，（有）浪越エレクトロニクス社製の降圧型MPPT（最大電力点追尾装置）により出力電圧を29Vに設定して，バッテリーおよびモータに接続した。ソーラーシステムの構成図を **Fig.2** に示す。

また，パネルの取り付け台は，鉄パイプにプラスチックをコーティングした直径28mmのパイプを使用し，専用のジョイントを使用して補強材を入れることで剛性を持たせた。取り付けたときの外観を **Fig.3** に示す。

* 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, Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047, Japan

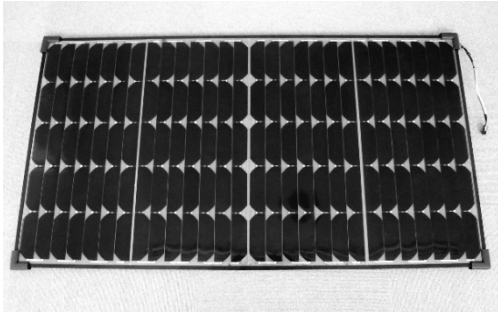


Fig.1 ソーラーパネルの外観

Table1 太陽電池モジュールの仕様

型式	SC35-A
公称出力 (最適電圧, 電流)	34W 18.7V, 1.81A
大きさ	648mm × 304mm
重量	420 g
平均モジュール効率	17.3%

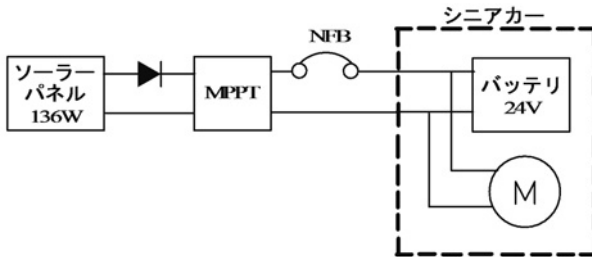


Fig.2 ソーラーシステムの構成図



Fig.3 ソーラーシステムを取り付けたシニアカーの外観

3. 自動ブレーキ

3.1 ハードウェア

作製した自動ブレーキの制御回路の外観を Fig.4 に示す。また、構成図を Fig.5 に示す。マイコンは、10ビット8チャンネルのA/Dコンバータを内蔵したCPU: PIC18F2580を搭載し、プログラム書き込み用ISP端子を備えているマイクロアプリケーションラボラトリー社製のPIC CAN 機能ユニットを採用した。

今回使用したシニアカーのブレーキ機構は、操作レバーを離した時に作動するタイプであり、自動ブレーキは、この操作レバーからの信号をリレーで遮断することで制動を行った。このため、自動ブレーキが作動して停止した場合、シニアカーの電源を入れ直さないと走行できない。

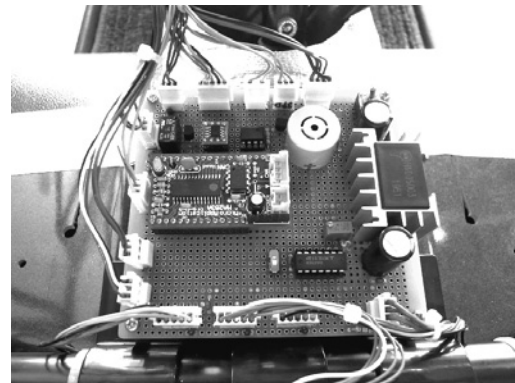


Fig.4 作製した自動ブレーキの制御回路の外観

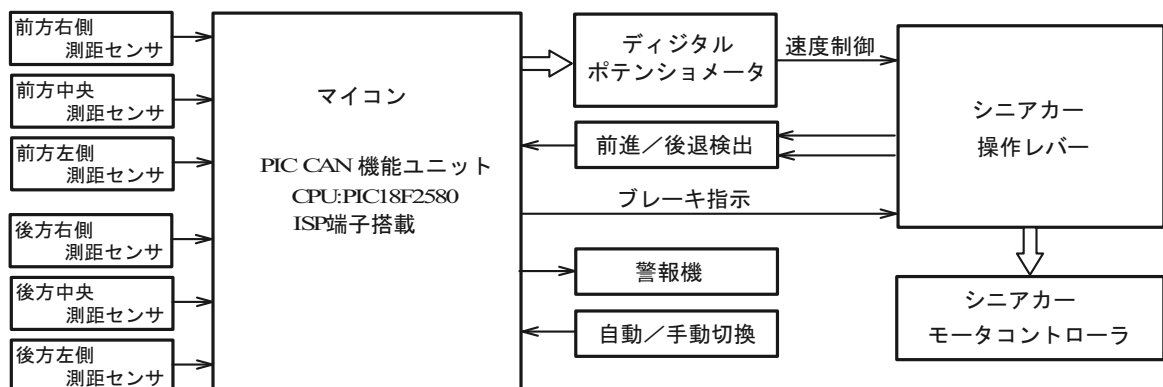


Fig.5 作製した自動ブレーキの制御回路の構成図

3.2 センサ

前方および後方のセンサには、シャープ社製の測距センサモジュールを使用した。このセンサは、赤外LEDとPSDを組み合わせて三角測量の原理で距離を計測するもので、外乱光の影響を除去するために約1kHzで変調がかけられている。

また、人体検出用にも適しており、反射率18%~90%の物体に対して距離-出力電圧特性はほとんど変化しない(データシート¹⁰⁾より)。

なお、使用したシャープ社製の測距センサモジュールは指向性が高く、センサの取り付け高さに満たない障害物や中心から外れた障害物は検出できないので、両端および中央の3箇所に測距センサモジュールを取り付けて、いずれかのセンサが反応すれば減速および停止できるようにした。センサを取り付けたときの外観をFig.6に示す。後方センサも同様3箇所とし、その取り付け状況をFig.7に示す。

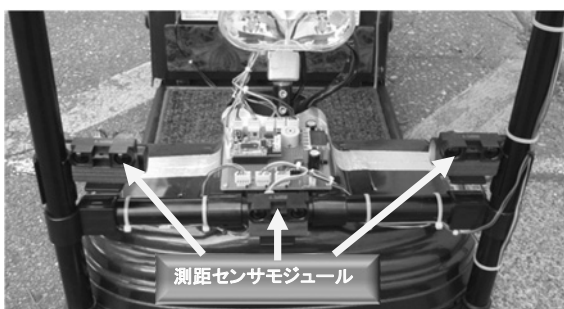


Fig.6 前方センサを取り付けたときの外観

3.3 ソフトウェア

製作した自動ブレーキの概略フローチャートをFig.8に示す。ソフトウェアの開発には、統合開発環境であるMPLAB IDE v8.63を、書込器はターゲットを接続したままプログラミングができるマイクロチップ社製のPICKit3を採用した。開発言語はC言語、コンパイラは無償で提供されるMPLAB C18コンパイラを、それぞれメーカーのホームページよりダウンロードして使用した。

また、加減速ルーチンのフローチャートをFig.9に示す。自動/手動の切換スイッチは、障害物が接近したときに自動で減速するか、警報を鳴らすかの切換スイッチである。切換スイッチを自動にすることにより、ドライバがアクセル全開状態でも人や障害物までの距離が近くなると減速し、人や障害物が離れると加速する。



Fig.7 後方センサの取り付け状況

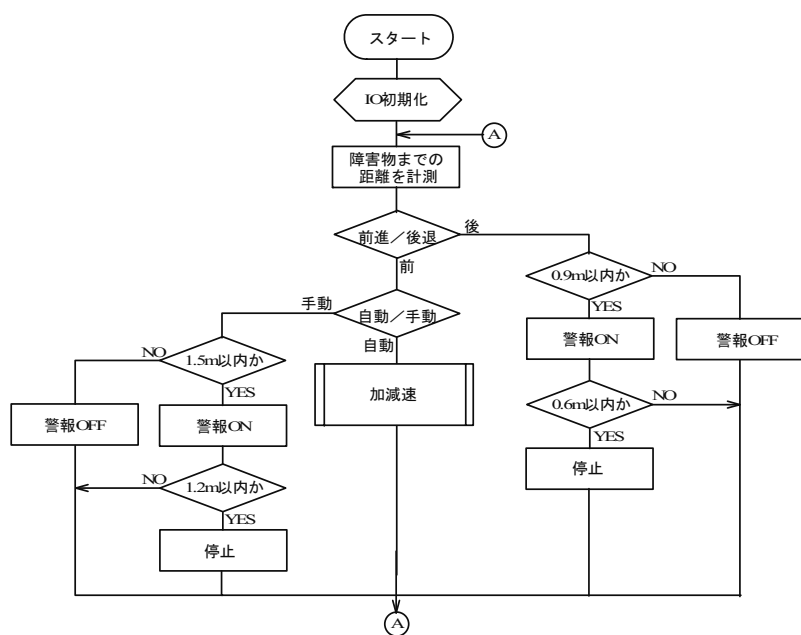


Fig.8 自動ブレーキの概略フローチャート

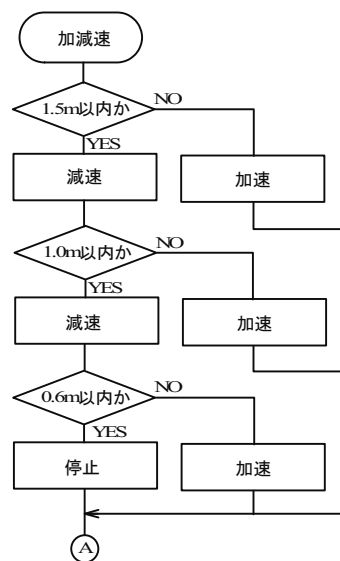


Fig.9 加減速ルーチンのフローチャート

4. ソーラーシステムの発電量の計測

GARPHTEC 社製データロガー GL200A とのインターフェースの回路構成図を Fig.10 に、作製した回路の外観を Fig.11 に示す。測定したデータは、バッテリー電圧、車速、消費電流、発電電流の4項目である。

消費電流の測定には、ネクサス社製の開閉式電流センサ TCT06-A1 を使用した。また、発電電流の測定には、Allegro MicroSystems 社製の ACS712 を使用した。

なお、センサなどのインターフェース回路およびデータロガーの電源は、駆動用バッテリーから DC/DC コンバータを使用して 12V に降圧して使用した。

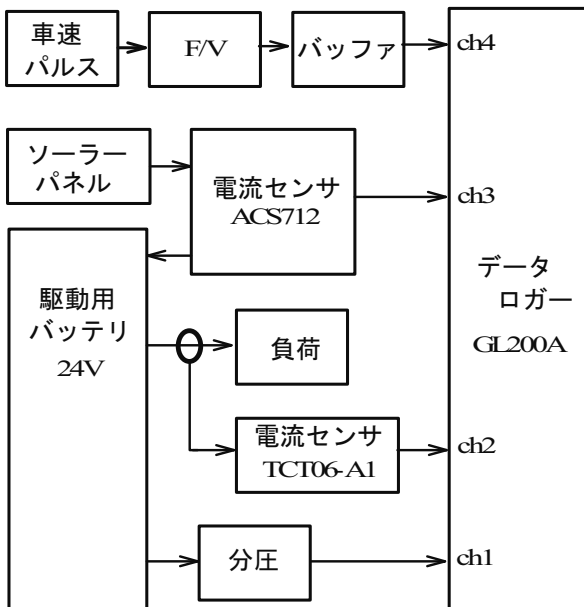


Fig.10 インターフェースの回路構成図

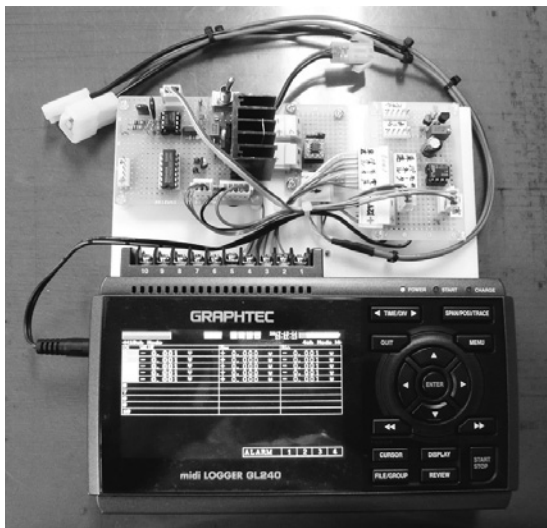


Fig.11 GL200A とインターフェース回路の外観

車速測定用に使用した回転速度検出用ロータとその取り付け状況を Fig.12 に示す。

検出用ロータはボルトを4本用いて駆動輪に取り付けた。回転速度検出用ロータの歯数は10枚であるが、Fig.13 に示すようにフォト・マイクロセンサを2個用いてエッジを検出し、2つの信号の排他的論理和をとることで、1回転で20パルス出力するようにした。タイヤの直径は260mmであるので、F/V変換器の入力周波数と出力電圧の関係を Table2 のように設定した。このF/V出力電圧をデータロガーに取り込み、車速データとした。

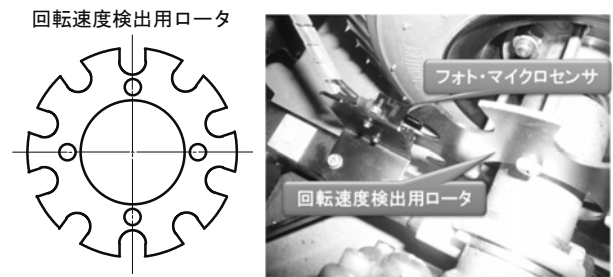


Fig.12 回転速度検出用ロータとその取り付け状況

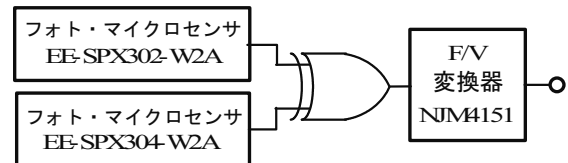


Fig.13 エッジ検出とF/V変換器

Table 2 車速と周波数の関係

車速 [km/h]	F/V 入力周波数 [Hz]	F/V 出力電圧 [V]
1.0	6.8	0.21
2.0	13.6	0.43
3.0	20.4	0.63
4.0	27.2	0.83
5.0	34.0	1.04
6.0	40.8	1.24
7.0	47.7	1.45

5. 走行実験および実験結果

5.1 ソーラーシステムによる充電の効果

実験は、実験① 2017年5月22日 11:19 ~ 12:19 の60分間および実験② 2017年5月29日 13:30 ~ 14:00 の30分間の二度行った。実験①の走行実験のデータを Fig.14 に、そのときの車速の変化を Fig.15 に示す。なお、実験①、②ともにサンプリング間隔は1秒とした。

停止状態で消費電流が流れているのは、データロガーなどに電源を供給していることによるものである。

データロガーでロギングした走行実験のデータは、CSV形式で得られるので、これを表計算ソフト Excel に取り込んで、消費電力量、発電電力量などを算出した。その結果を **Table3** に示す。電力量の算出方法については文献¹²⁾と同様の方法で行った。走行距離は、

$$\text{走行距離 [km]} = \text{平均速度 [km/h]} \times \text{時間 [h]}$$

で求めた。

実験①のような走行（平均速度 2.6km/h、停止割合 42.9%）をした場合は、1kmあたりの消費電力量は 34.8W・h であり、消費電力量の約 88% をソーラーシステムで賄えることがわかった。

また、実験②のような走行（平均速度 4.4km/h、停止割合 12.9%）をした場合は、1kmあたりの消費電力量は 43.5W・h であり、消費電力量の約 46% をソーラーシステムで賄えることがわかった。

シニアカーは主に買い物、通院等で利用する人が多く一度の走行距離は平均約 3～4 キロ圏内の移動が主流となっているので、1日の移動距離を 8km と仮定すると、消費電力量は 280W・h～350W・h となる。

一方、今回の実験より、1時間当たりの発電量は、76～84W・h であるので、1日の消費電力量（280W・h～350W・h）を補うためには、1日あたり 3.4時間～4.6時間の日照時間が必要となるが、気象庁調査¹¹⁾によると 1984年～2013年までの30年間の日照時間の全国平均は 1908.6時間/年であるので、1日に換算すると 5.3時間となり、ソーラーエネルギーのみで消費する電力量を賄えることになる。

このことは、著者らが行った公道走行用ソーラーカーの走行実験¹²⁾とほぼ同じ結果となった。

Table 3 消費電力量などの算出結果

算出した項目	実験①	実験②
消費電力量 [W・h]	95.6	82.8
発電電力量 [W・h]	84.1	38.1
停止割合 [%]	42.9	12.9
平均速度 [km/h]	2.6	4.4
走行時平均速度 [km/h]	4.8	5.1
走行距離 [km]	2.7	1.9
1kmあたりの消費電力量 [W・h/km]	34.8	43.5

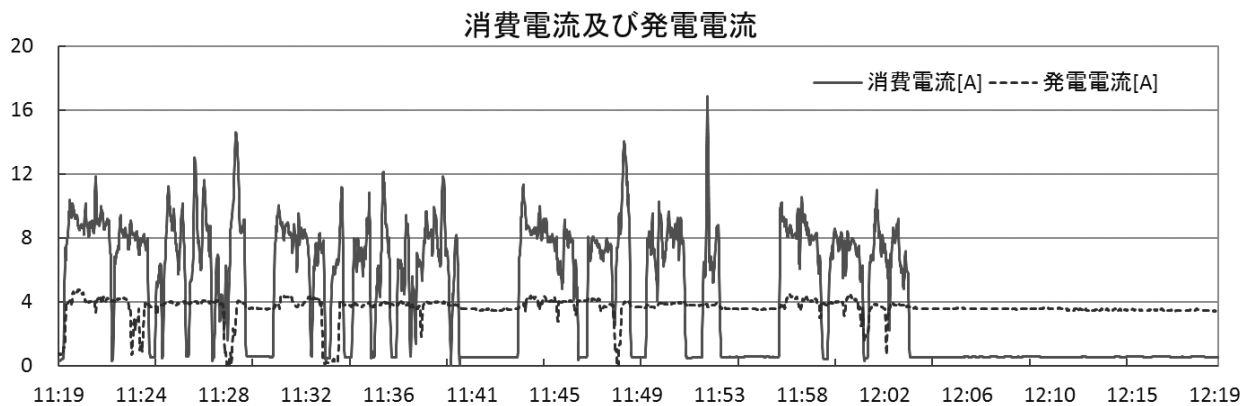


Fig.14 実験①の消費電流および発電電流

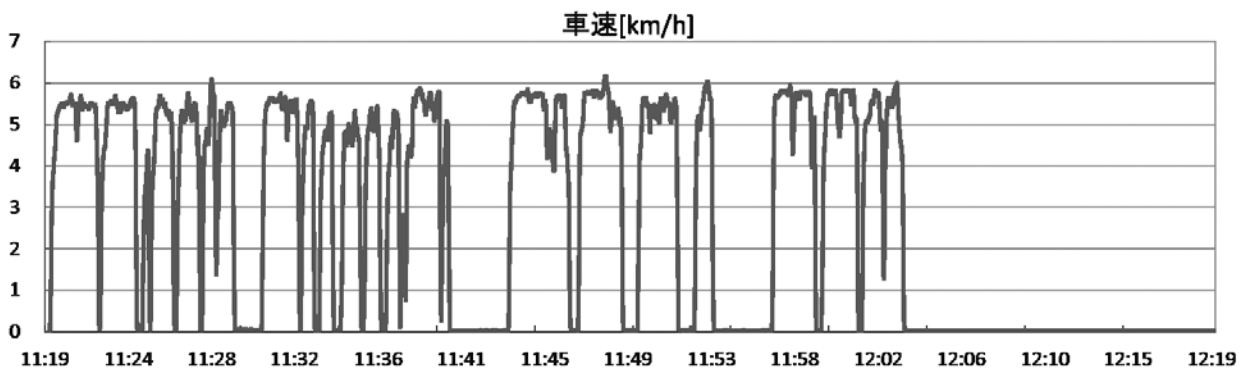


Fig.15 実験①の車速の変化

5.2 自動ブレーキの特性

自動/手動の切換スイッチを手動にした状態で、車速を変更して自動ブレーキの性能を測定した。障害物検出距離を 1.2 m に設定したときの速度目盛と停止距離および車速との関係を Table 4 に示す。障害物は、Fig. 16 に示す木製椅子およびパイロンとした。椅子とパイロンの障害物の違いによる停止距離に大差はなかったが、車速の大小により大きく異なった。

一方、自動/手動の切換スイッチが自動の場合は、最初の車速が変化しても障害物までの距離により減速を行うので、障害物までの停止距離に大差は出なかった。

また、後退については車速が遅いので検出距離の設定は 0.6m と小さいが、障害物までの停止距離に差は見られなかった。

以上のことより、障害物を検出したときの自動ブレーキについては概ね良好に作動した。

なお、人混みなどの混雑した場所を走行する場合は、センサが反応して走行できなくなる可能性が考えられるので、自動ブレーキの電源を OFF にすることで対応できるようにした。

Table 4 速度目盛と停止距離および車速との関係

速度目盛	停止距離 [cm] 障害物 (椅子)	車速 [km/h]	
		前進	後退
7	90.9	3.0	1.0
8	81.0	3.4	1.3
9	60.1	4.6	1.7
10	20.0	5.9	2.2

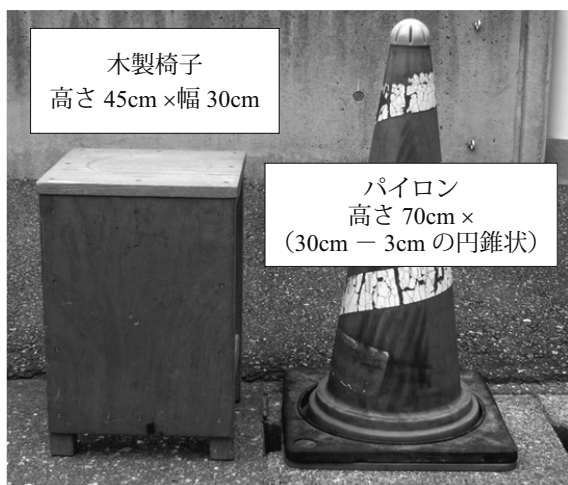


Fig.16 実験で使用した障害物

6. おわりに

今回開発したソーラーシニアカーの自動ブレーキは概ね良好に作動し、ソーラーシステムによる充電の効果も十分に得られることがわかった。さらに、ソーラーパネルにより雨や直射日光を防ぐことができ、熱中症対策にも効果が期待できることがわかった。

なお、今回使用したバッテリーは、電菱社製の密閉型デュープサイクルバッテリー (JC36-12) で、5 時間率容量は 30.6 A・h であるので、これをもとに電力量を算出すると約 730W・h となる。したがって、雨の日など発電量がほぼゼロの日に 2 日間連続使用した場合、バッテリー残容量はゼロとなり、外部充電をしなければ走行できなくなる。

今後は、IoTなどを活用して、いつ、どのようなタイミングで外部充電を行ったら良いかを、天気予報やバッテリー残容量をもとに予測して、携帯電話やスマートフォンへのメール通知などで、使用者に知らせるようにしていきたい。

参考文献

- 1) 大野秀敏, 佐藤和貴子, 齊藤せつな: <小さい交通> が都市を変える - マルチ・モビリティ・シティをめざして, 2015.9
- 2) 福祉用具産業市場動向調査報告【2014 年度版】, 日本福祉用具・生活支援用具協会, 2016.7
- 3) 電動 3・4 輪車の安全性, 国民生活センター, 2007.4
- 4) シニアカーの走行テスト, 国民生活センター, 2000.7
- 5) 電動カートを活用した高齢者モビリティ拡大実証事業について, 熊本県商工観光労働部新産業振興局 産業支援課
- 6) 奥羽孝文他: 電動カートを活用した高齢者モビリティ拡大実証事業報告書, 日本赤十字社健康管理センター, 2014.3
- 7) 電動車いす安全普及協会: <http://www.denankyo.org/society/transition.html>
- 8) 大沼八重子: 普及するシニアカーと増加する事故, 共済総研レポート, 2014.8
- 9) 国土交通省: 国内のハンドル形電動車椅子の利用に関する調査結果
- 10) GP2Y0A710K0F datasheet: SHARP, 2006.11
- 11) 気象庁: <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/tenkou/alltable/sun00.html>
- 12) 鈴木宏和, 中島守, 永田英雄, 岩瀬正幸, 小野秀文, 甲村一貴: 公道走行用ソーラーカーの開発, 愛知工科大学紀要第 14 巻, pp.25-30 (2017.3)

数理統計学における確率変数の確率密度関数の新導出法

高橋義則*

(2018年9月30日受理)

A New Method of Calculation of Probability Density Function for Random Variable in Mathematical Statistics

Yoshinori Takahashi*

(Received September 30, 2018)

Abstract

By using basic properties of Dirac's δ function and the method of integration by substitution, we show a new method of calculations of probability density functions for some kinds of random variables. The definition and properties of δ function are explained briefly, and the role of δ function in calculations is demonstrated clearly. The normal distribution, χ^2 and χ -distributions, t-distribution, F-distribution and sample correlation coefficient distribution, which are necessarily used in the test and estimate of mathematical statistics, are calculated from the new method of calculations. We obtain probability density functions for various statistic with assuming a normal population throughout the calculations. The normal population appears specially in many kinds of objects as a population distribution. Since two different representations for a sample correlation coefficient distribution, an infinite series and an integral, which are very complex forms, were given already, we show an equality between them afresh.

キーワード：数理統計学，確率変数，確率密度関数，ディラックの δ 関数，検定，推定

Keywords : Mathematical statistics, Random variable, Probability density function, Dirac's δ function, Test, Estimate

1. はじめに

統計学は大別すると、記述統計と数理統計（推測統計と同義語）の二つに分かれる、記述統計は、大量のデータから平均値、分散、標準偏差、相関係数などといった極少数の整理された数値によってデータの持つ性質を把握したりすることや、棒グラフや円グラフなどの図で可視的にデータの特徴を表すものである。しかし、統計学の本来の目標から言うと、大量のデータを少数の整理された数値で単に記述するだけでは現状の整理・把握を行っただけに過ぎず、必ずしも有意義なこととは言えない。一方、数理統計は、母集団とその部分空間である標本という考えに立って、標本から得たデータを使って、その背後にある母集団を特徴づけるパラメータ（母数という）を検定 (test) したり、推定 (estimate) したりするものである。このとき、確率変数に対しては、正規分布、 χ^2 -分布、 χ -分布、t-分布、F-分布、標本相関係数の分布などといった確率密度関数を利用する。

* 愛知工科大学名誉教授，〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2
Professor emeritus, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

数理統計は、自然、社会、人文の各分野でその応用が盛んになり、成果を収めてきている。また、企業においては管理者や技術者などにとって、判断や行動の客観性のためにも数理統計的な手法を修得することは必須となっている。今日では、コンピューターを使って標本データから簡単に統計的検定と推定ができるようになっている。しかし、単なる標本データの処理の方法としてコンピューターソフトを利用するだけでなく、如何なる理論的根拠に基づくものかの理解は大切である。

今回、数理統計学とは異分野の量子力学で多用するディラックのデルタ関数 $\delta(x)$ (Dirac's δ function) の基本的性質を利用することによって、数理統計の検定と推定で必要となる確率密度関数の導出を試みた。従前の変数変換によるもの比べて、 δ 関数の性質と置換積分の手法だけで確率密度関数の計算ができることが特徴である。標本データから検定や推定を行うとき、使われる統計量は確率変数として扱うので、それが問題の対象となる母集団の性質によってどのような確率密度関数になるのかが決まる。したがってまず、母集団に対してその分布の型を仮定しておくことが重要である。品物の寸法の分布なら正規分布、単位時間の来客数の分布ならポアソン分布する母集団を仮定する、といった具合である。ここでは、多くの課題の中に現れてくる正規分布をもつ母集団（正規母集団）を仮定し、各種統計量の確率密度関数を計算する。標本相関係数の確率密度関数に関しては、同等な表現であるが今までに二種類の複雑な数式が示されているので、改めてその同等性を示した。

δ 関数は、元々は量子力学理論の中でディラック (P. A. M. Dirac, 1902~1984, 英) によって導入され、次の性質をもつ $\delta(x)$ を仮定し、 δ 関数と呼んだ。

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1, \quad x \neq 0 \text{ では } \delta(x) = 0.$$

数学的には $\delta(x)$ を関数とすると、この二つの性質は相矛盾し、両者を同時に満足する関数や積分法は存在しないが、積分記号の中で他の関数とともに使う限りにおいて関数のようにして使っても正しい結果を与えることが分かっている。つまり、 $\delta(x)$ は関数に非ざる関数の位置づけで、このことが超関数 (generalized function) と呼ばれる所以である。 δ 関数を解析学的に表現する方法は幾つか提唱されているが、 $\delta(x)$ を直感的に思い浮かべるために比較的簡単な表現を

$$\delta(x) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0_+} \left\{ \frac{1}{2\epsilon}; |x| \leq \epsilon \right\} \cup \{0; |x| > \epsilon\}$$

によって与える。 $\delta(x)$ は幾つかの重要な性質をもつが、本研究においては

$$\int_a^b \delta(x - c) dx = 1 \quad (a < c < b), \tag{1}$$

$$\int_a^b \delta(x - c) f(x) dx = f(c) \quad (a < c < b) \tag{2}$$

の性質と置換積分の手法のみを使う。

2. 多様な確率変数に対する確率密度関数

1). 正規分布

連続な確率変数 X の確率密度関数 $f(x)$ が,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty, \quad \mu, \sigma: \text{実数}; \sigma > 0, \quad (3)$$

で与えられるとき, X は正規分布に従うといい, 正規分布を $N(\mu, \sigma^2)$ と書く.

X が正規分布に従うとき, $\frac{X-\mu}{\sigma}$ が従う確率密度関数 $g(t)$ は,

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \frac{X-\mu}{\sigma}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} dX. \quad (4)$$

最初の簡単な事例として, 式(4)の意味を説明する. 先ず, 確率変数 X があって, その変数の実現値 X が $N(\mu, \sigma^2)$ の確率に従っているとしたとき, 確率変数としての統計量 $\frac{X-\mu}{\sigma}$ の実現値が, 指定された変数 t に丁度一致するような確率を求める計算式である. δ 関数を用いることによって, そのような束縛条件を簡単に課すことができる. ここで, $u = \frac{X-\mu}{\sigma}$ と置くと $\sigma du = dX$. したがって,

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-u) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{u^2}{2}} \sigma du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} = N(0, 1^2). \quad -\infty < t < \infty \quad (5)$$

$N(0, 1^2)$ を基準正規分布という.

2). χ^2 (カイ2乗)分布: 標本分散の分布

X が正規分布にしたがうとき, $\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2$ が従う確率密度関数 $g(t)$ は

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(t - \left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma^2}} dX, \quad (6)$$

ここで, $u = \left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2$ と置くと $\sigma du = 2\sqrt{u}dX$. したがって,

$$g(t) = 2 \int_0^{\infty} \delta(t-u) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{u}{2}} \frac{\sigma}{2\sqrt{u}} du = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{\sqrt{y}} e^{-\frac{t}{2}} = \frac{1}{2^{1/2}\Gamma\left(\frac{1}{2}\right)} t^{-1/2} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty \quad (7)$$

式(7)で, 変数 s の関数 $\Gamma(s)$ は,

$$\Gamma(s) \equiv \int_0^{\infty} e^{-t} t^{s-1} dt \quad (8)$$

で与えられ、ガンマ関数と呼ばれる。

X_i ($i = 1, 2, \dots, n$) が正規分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ に従うとき、 $\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2$ が従う確率密度関数 $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^{\infty} \delta\left(t - \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2\right) \prod_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}\right)^2} dX_i, \quad (9)$$

ここで、

$$u_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$r^2 = u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2$$

と置くと、 r は n 次元空間の球体の半径を表し、 $du_1 du_2 \dots du_n$ はその球体の半径 r と $r+dr$ の間

の球殻の体積要素を表す。半径 r の n 次元空間の球体の体積 $V(r)$ 、および、表面積 $S(r)$ は、

$$V(r) = \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} r^n, \quad S(r) = \frac{dV(r)}{dr} = \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} nr^{n-1}$$

で与えられるので、球殻の体積要素は、 $S(r)dr = \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} nr^{n-1} dr$ である。式(9)は、

$$g(t) = \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \delta(t - (u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2)) \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} e^{-\frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2)} du_1 du_2 \dots du_n$$

$$= \int_0^{\infty} \delta(t - r^2) \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} e^{-\frac{1}{2}r^2} \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} nr^{n-1} dr. \quad (10)$$

と書かれる。ここで、 $\xi = r^2$ と置くと $d\xi = 2rdr$ 。したがって、

$$g(t) = \int_0^{\infty} \delta(t - \xi) \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^n} e^{-\frac{1}{2}\xi} \frac{\pi^{\frac{n}{2}}}{\Gamma(\frac{n}{2}+1)} n \xi^{\frac{n-2}{2}} \frac{d\xi}{2} = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} t^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}. \quad 0 < t < \infty \quad (11)$$

これを自由度 n の χ^2 (カイ 2 乗) 分布という。この定義に従って、式(7)は自由度 1 の χ^2 分布であることが分かる。

確率変数 X, Y が独立で、それぞれ自由度 m, n の χ^2 分布に従うとき、その和 $X+Y$ が従う確率密度関数 $g(t)$ は

$$\begin{aligned}
g(t) &= \int_0^\infty dX \int_0^\infty dY \delta(t - (X + Y)) \frac{1}{2^{\frac{m}{2}} \Gamma(\frac{m}{2})} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}} \\
&= \int_0^t dX \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma(\frac{m}{2}) \Gamma(\frac{n}{2})} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} (t-X)^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{t-X}{2}}.
\end{aligned} \tag{12}$$

ここで、 $X = t\xi$ と変数変換すると、

$$\begin{aligned}
g(t) &= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma(\frac{m}{2}) \Gamma(\frac{n}{2})} t^{\frac{m+n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} \int_0^1 d\xi \xi^{\frac{m}{2}-1} (1-\xi)^{\frac{n}{2}-1} \\
&= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma(\frac{m}{2}) \Gamma(\frac{n}{2})} t^{\frac{m+n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}} B\left(\frac{m}{2}, \frac{n}{2}\right) \\
&= \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right)} t^{\frac{m+n}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}, \quad 0 < t < \infty
\end{aligned} \tag{13}$$

と成り、自由度 $m+n$ の χ^2 -分布に従うことが分かる。これを χ^2 -分布の加法性という。ここで、2変数 p, q の関数 $B(p, q)$ は、

$$B(p, q) \equiv \int_0^1 d\xi \xi^{p-1} (1-\xi)^{q-1} = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} \tag{14}$$

で与えられ、ベータ関数と呼ばれる。 χ^2 -分布の加法性と式(7)が自由度1の χ^2 -分布であることから、式(9)が自由度 n の χ^2 -分布になることは明白なことである。ただし、式(11)では計算によってこれを示した。

3). χ (カイ)-分布: 標本標準偏差の分布

確率変数 X が χ^2 -分布に従うとき、 \sqrt{X} が従う確率密度関数 $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^\infty \delta(t - \sqrt{X}) \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} dX. \tag{15}$$

ここで、 $u = \sqrt{X}$ と置くと $du = \frac{1}{2u} dX$ 。したがって、

$$g(t) = \int_0^\infty \delta(t - u) \frac{1}{2^{\frac{n}{2}-1} \Gamma(\frac{n}{2})} u^{n-1} e^{-\frac{u^2}{2}} du = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}-1} \Gamma(\frac{n}{2})} t^{n-1} e^{-\frac{t^2}{2}}. \quad 0 < t < \infty \tag{16}$$

これを自由度 n の χ (カイ) -分布という。

4). t-分布:母平均の分布

確率変数 u および X が互いに独立で、それぞれ $N(0, 1^2)$ および自由度 n の χ^2 -分布に従うとき、 $\frac{u}{\sqrt{X/n}}$ が従う確率密度関数 $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^\infty dX \int_{-\infty}^\infty du \delta\left(t - \frac{u}{\sqrt{X/n}}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}}. \quad (17)$$

式(17)で $v = \frac{u}{\sqrt{X/n}}$ と置けば、 $v\sqrt{X/n} = u$, $dv\sqrt{X/n} = du$. したがって、

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dX \int_{-\infty}^\infty dv \sqrt{X/n} \delta(t - v) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2 X}{2n}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \\ &= \int_0^\infty dX \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{X/n} e^{-\frac{t^2 X}{2n}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} = \int_0^\infty dX \frac{1}{\sqrt{2\pi n}} \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} X^{\frac{n-1}{2}} e^{-\left(\frac{t^2}{n} + 1\right)\frac{X}{2}}. \end{aligned}$$

変数変換 $\xi = \frac{1}{2}\left(\frac{t^2}{n} + 1\right)X$ によって X の積分が実行できて

$$g(t) = \frac{\Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)}{\sqrt{\pi n} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n}\right)^{\frac{n+1}{2}}}. \quad -\infty < t < \infty \quad (18)$$

これを自由度 n の t-分布という. 自由度 n の t-分布は、式(18)でガンマ関数にスターリングの漸近公式¹⁾を用いれば、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} = N(0, 1^2),$$

が成り立つ. 右辺は基準正規分布である.

式(18)の応用について考察する. 確率変数 u_i ($i = 1, 2, \dots, n$) が互いに独立で、すべて同一の正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$ に従うとき、 $\bar{u} = \sum_{i=1}^n u_i/n$ とすれば、 $X = (\bar{u} - \mu)/(\sigma/\sqrt{n})$ および $Y = \sum_{i=1}^n ((u_i - \bar{u})/\sigma)^2$ は、それぞれ $N(0, 1^2)$ および自由度 $n-1$ の χ^2 -分布に従うので

$$t = \frac{X}{\sqrt{Y/(n-1)}} = \frac{\sqrt{n(n-1)}(\bar{u} - \mu)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}}$$

は、自由度 $n-1$ の t-分布に従う. 上式は母分散 σ^2 を含まず、 σ^2 が未知の母平均 μ の検定と推定に適用できることが分かる.

5). F-分布:二組の標本分散の比の分布

確率変数 X, Y が独立で、それぞれ、自由度 m, n の χ^2 -分布に従うとき、 $\frac{X/m}{Y/n}$ が従う確率密度関数 $g(t)$ は

$$g(t) = \int_0^\infty dY \int_0^\infty dX \delta\left(t - \frac{X/m}{Y/n}\right) \frac{1}{2^{m/2} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} X^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{X}{2}} \frac{1}{2^{n/2} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}}. \quad (19)$$

式(19)で $u = \frac{X/m}{Y/n}$ と置けば、 $X = \frac{m}{n}Yu$, $dX = \frac{m}{n}Ydu$. したがって、

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_0^\infty dY \int_0^\infty \frac{m}{n}Ydu \delta(t-u) \frac{1}{2^{m/2} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}Yu\right)^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{1}{2}\frac{m}{n}Yu} \frac{1}{2^{n/2} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} Y^{\frac{n}{2}-1} e^{-\frac{Y}{2}} \\ &= \int_0^\infty dY \frac{1}{2^{\frac{m+n}{2}} \Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} t^{\frac{m}{2}-1} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{m}{n}t+1\right)Y} Y^{\frac{m+n}{2}} dY. \end{aligned} \quad (20)$$

変数変換 $\eta = \frac{1}{2}\left(\frac{m}{n}t+1\right)Y$ によって Y の積分が実行できて

$$\begin{aligned} g(t) &= \frac{1}{\Gamma\left(\frac{m}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} t^{\frac{m}{2}-1} \frac{1}{\left(1 + \frac{m}{n}t\right)^{\frac{m+n}{2}}} \Gamma\left(\frac{m+n}{2}\right) \\ &= \frac{1}{B\left(\frac{m}{2}, \frac{n}{2}\right)} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} t^{\frac{m}{2}-1} \left(1 + \frac{m}{n}t\right)^{-\frac{m+n}{2}}. \quad 0 < t < \infty \end{aligned} \quad (21)$$

これを自由度 (m, n) の F-分布という.

6). 標本相関係数の分布

二変数 X_i, Y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) があって、一対の数 $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ は互いに独立で、各対 (X_i, Y_i) が二変数正規分布に従うとする. 二変数正規分布は、その確率密度関数が

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left(\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)^2 - 2\rho\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\frac{y-\mu_y}{\sigma_y} + \left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right)\right), \\ &-1 < \rho < 1, \quad \sigma_x > 0, \quad \sigma_y > 0, \end{aligned} \quad (22)$$

によって与えられる, ここで, $\mu_x, \mu_y; \sigma_x^2, \sigma_y^2; \rho$ は, それぞれ, 確率変数 X, Y の母平均と母分散, および, 母相関係数を表す. 二変数 X_i, Y_i のそれぞれの標本平均 \bar{X}, \bar{Y} は

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (23)$$

で与えられ, 標本分散 S_x^2, S_y^2 と標本共分散 S_{xy} は

$$S_x^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad S_y^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2, \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}), \quad (24)$$

で与えられる. このとき, 標本相関係数の統計量は

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}, \quad (25)$$

である. S_x^2, S_y^2, S_{xy} の同時分布の密度関数 $F(S_x^2, S_y^2, S_{xy})$ は, ウィシャート (J. Wishart) ²⁾ の分布で $k=2$ と取ると,

$$F(S_x^2, S_y^2, S_{xy}) = \frac{1}{2^{n-1} \sqrt{\pi}} \frac{(S_x^2 S_y^2 - S_{xy}^2)^{\frac{n-4}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{S_x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho \frac{S_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{S_y^2}{\sigma_y^2}\right)\right)}{(\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1-\rho^2))^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)}, \quad (26)$$

である. 参考のため, ウィシャートの分布の一般式を付録2に示した. したがって, 標本相関係数の確率密度関数 $g(r)$ は

$$g(r) = \int_0^\infty d(S_x^2) \int_0^\infty d(S_y^2) \int_{-\infty}^\infty d(S_{xy}) \delta\left(r - \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}\right) F(S_x^2, S_y^2, S_{xy}). \quad (27)$$

最後の事例として, 式(27)の意味を説明する. 先ず, 一対の数 $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$ があって, それらは互いに独立で, 各対 (X_i, Y_i) が式(22)の二変数正規分布に従っているとしたとき, 確率変数としての統計量 $\frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}$ の実現値が丁度 r に成るような確率を求める計算式である. δ 関

数を用いることによって, そのような複雑な束縛条件を簡単に課することができる. この場合, S_x^2, S_y^2, S_{xy} は, 二変数 X_i, Y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) によって式(23)と式(24)によって定義される統計

量であって、それらの同時分布の確率密度が式(26)で与えられているということである。

ここで、3重積分の内、先ず S_{xy} に関して積分する。 $\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}$ を定数として、 $u = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}$ と

置くと $du \sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2} = d(S_{xy})$ 、また、付録1に示すように $-1 \leq u \leq 1$ である。式(27)は、置換積分によって

$$g(r) = \int_0^\infty d(S_x^2) \int_0^\infty d(S_y^2) \sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2} \int_{-1}^1 du \delta(r-u) F\left(S_x^2, S_y^2, \sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2} u\right). \quad (28)$$

更に δ 関数を含む積分が実行できて、

$|r| > 1$ のとき、 $f(r) = 0$.

$|r| \leq 1$ のとき、

$$\begin{aligned} g(r) &= \int_0^\infty d(S_x^2) \int_0^\infty d(S_y^2) \sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2} F\left(S_x^2, S_y^2, \sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2} r\right) \\ &= \int_0^\infty d(S_x^2) \int_0^\infty d(S_y^2) \sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2} \frac{1}{2^{n-1} \sqrt{\pi}} \frac{\left(S_x^2 S_y^2 (1-r^2)\right)^{\frac{n-4}{2}} \exp\left(-Q(S_x^2, S_y^2, S_{xy})\right)}{\left(\sigma_x^2 \sigma_y^2 (1-\rho^2)\right)^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)}, \end{aligned}$$

ただし、

$$Q(S_x^2, S_y^2, S_{xy}) = \frac{1}{2(1-\rho^2)} \left(\frac{S_x^2}{\sigma_x^2} - 2\rho r \frac{\sqrt{S_x^2} \sqrt{S_y^2}}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{S_y^2}{\sigma_y^2} \right).$$

ここで、 $X = \frac{S_x^2}{2(1-\rho^2)\sigma_x^2}$ 、 $Y = \frac{S_y^2}{2(1-\rho^2)\sigma_y^2}$ と変数変換すると、

$$dX 2(1-\rho^2)\sigma_x^2 = d(S_x^2), \quad dY 2(1-\rho^2)\sigma_y^2 = d(S_y^2).$$

したがって、

$$\begin{aligned} g(r) &= \frac{(1-\rho^2)^{\frac{n-1}{2}} (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)} \int_0^\infty dX \int_0^\infty dY (XY)^{\frac{n-3}{2}} e^{-(X-2\rho r\sqrt{X}\sqrt{Y}+Y)} \\ &= \frac{(1-\rho^2)^{\frac{n-1}{2}} (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)} \sum_{v=0}^\infty \frac{(2\rho r)^v}{v!} \Gamma\left(\frac{n-1+v}{2}\right)^2. \end{aligned} \quad (29)$$

ここで、 $e^{2\rho r\sqrt{X}\sqrt{Y}} = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(2\rho r\sqrt{X}\sqrt{Y})^v}{v!}$ の無限級数展開を利用して X, Y に関する積分を行った。式(29)は、ウィルクス (S.S.Wilks) ²⁾ の計算結果と一致するが、無限級数で表される極めて複雑な式である。一方、フィッシャー (R.A.Fisher) ²⁾ は別解法で

$$g(r) = \frac{n-2}{\pi} (1-\rho^2)^{\frac{n-1}{2}} (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}} \int_0^1 \frac{x^{n-2}}{(1-\rho r x)^{n-1} \sqrt{1-x^2}} dx \quad (30)$$

$$= \frac{n-2}{\pi} (1-\rho^2)^{\frac{n-1}{2}} (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}} \int_0^{\infty} \frac{dz}{(\cosh z - \rho r)^{n-1}}, \quad (31)$$

を計算した。ここで、式(30)において変数変換 $x = 1/\cosh z$ を行うことによって容易に式(31)を導出することができる。ウィルクスの式(29)とフィッシャーの式(30)との同等性の証明を付録3に示す。

母相関係数 $\rho = 0$ という帰無仮説の検定方法を説明する。 $\rho = 0$ のとき、式(29)の級数は $v = 0$ のみを考慮すればよいので、

$$g(r) = \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)}.$$

まず、式(25)で定義される R を用いて、統計量

$$\frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}}$$

の確率密度関数 $f(t)$ を求める。

$$f(t) = \int_{-1}^1 \delta\left(t - \frac{r\sqrt{n-1}}{\sqrt{1-r^2}}\right) g(r) dr = \int_{-1}^1 \delta\left(t - \frac{r\sqrt{n-1}}{\sqrt{1-r^2}}\right) \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) (1-r^2)^{\frac{n-4}{2}}}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)} dr.$$

ここで、 $u = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$ と変数変換すると、

$$du = (1-r^2)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{n-2} dr, \quad 1-r^2 = \frac{1}{1 + \frac{u^2}{n-2}}$$

したがって、

$$f(t) = \int_{-1}^1 \delta(t-u) \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right) \left(1 + \frac{u^2}{n-2}\right)^{\frac{n-1}{2}} \sqrt{n-2}} du = \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\sqrt{\pi(n-2)} \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right) \left(1 + \frac{t^2}{n-2}\right)^{\frac{n-1}{2}}}.$$

これは、式(18)から分かるように自由度 $n-2$ の t -分布であり、この事実によって、母相関係数 $\rho = 0$ という帰無仮説は、自由度 $n-2$ の t -分布によって検定を行うことができる。

次に、帰無仮説が棄却された場合、 ρ の区間推定が必要となるのでその方法について説明する。 $\rho \neq 0$ の場合、標本相関係数の確率密度関数は、式(29)または式(31)、(32)で示されるように複雑だが、フィッシャーの z 変換

$$z = \tanh^{-1}r = \frac{1}{2} \log \frac{1+r}{1-r},$$

を施せば、 n が十分に大きいとき（ほぼ 10 以上）、 z の確率密度関数は正規分布 $N\left(\zeta, \left(\sqrt{1/(n-3)}\right)^2\right)$ で近似されることがフィッシャーによって示されている。ここで、 ζ は

$$\zeta = \tanh^{-1}\rho = \frac{1}{2} \log \frac{1+\rho}{1-\rho}$$

で表され、 ρ は母相関係数である。このとき、統計量

$$\frac{z - \zeta}{1/\sqrt{n-3}}$$

の確率密度関数は基準正規分布 $N(0, 1^2)$ に従うことになり、この事実によって、 ρ の区間推定を行うことができる。

3. 結論と議論

ディラックの δ 関数を用いて、確率変数としての各種統計量の確率密度関数を計算する新しい方法を示した。従前の変数変換によるものに比べて、 δ 関数の性質と置換積分の手法だけで確率密度関数の計算ができることを例示した。 δ 関数の役割は、或る統計量 X の実現値 x が指定された変数 t に一致するときだけ確率密度関数への積分に寄与させるという制限を課すことである。

母集団に対してその分布の型を仮定しておくことが重要である。ここでは、多くの課題の中に現れてくる正規分布をもつ母集団（正規母集団）を仮定し、各種統計量の確率密度関数、具体的には、 χ^2 -分布、 χ -分布、 t -分布、 F -分布、標本相関係数の分布などといった確率密度関数を新規の計算方法で導出した。標本相関係数の分布の確率密度関数に関しては、ウィルクスの無限級数による表式とフィッシャーの積分による表式の同等性を示した。

数理統計は、母集団とその部分空間である標本という考えに立って、標本から得たデータを使って、その背後にある母集団を特徴づける母数を統計的に検定 (test) したり、推定 (estimate) したりするものである。このとき、問題の対象となる母集団のどのような統計量の検定や推定を

行うかによって適切な確率密度関数を使うことになる。本研究では、その確率密度関数に対して新導出法を適用し、既知の関数を再現することによってその有用性を示すことに止めた。今後、従前の方法では計算困難であろう他の統計量の確率密度関数の導出を試みることで、実際に標本データを用いて種々な検定と推定を行うことになる。

付録1

$-1 \leq u \leq 1$ の証明.

任意の実数 t に対して

$$\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})t + (Y_i - \bar{Y}))^2 \geq 0.$$

即ち,

$$\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2 t^2 + 2(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})t + (Y_i - \bar{Y})^2) \geq 0$$

が成り立つ。ここで、 S_x^2 , S_y^2 , S_{xy} の定義式によって上式は,

$$S_x^2 t^2 + 2S_{xy}t + S_y^2 \geq 0.$$

任意の実数 t に関する 2 次式が常に 0 以上であるためには、判別式 $S_{xy}^2 - S_x^2 S_y^2 \leq 0$, つまり

$$u^2 = \frac{S_{xy}^2}{S_x^2 S_y^2} \leq 1$$

である。したがって、 $-1 \leq u \leq 1$ が証明された。

付録2

ウィシャートの分布の一般式 (k 変数, 大きさ n の標本) ²⁾

$$F(a_{ij}) = \frac{|A_{ij}|^{\frac{n-1}{2}} |a_{ij}|^{\frac{n-k-2}{2}} e^{-\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k A_{ij} a_{ij}}}{2^{\frac{(n-1)k}{2}} \pi^{\frac{k(k-1)}{4}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right) \Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right) \dots \Gamma\left(\frac{n-k}{2}\right)},$$

ここで,

$$a_{ij} = \sum_{\alpha=1}^n (x_{i\alpha} - \bar{x}_i)(x_{j\alpha} - \bar{x}_j), \quad \bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n x_{i\alpha}$$

は、それぞれ、 i, j 変数, 大きさ n の標本分散 ($i = j$) と標本共分散 ($i \neq j$), i 変数の標本平均を表す。 A_{ij} は多変数正規母集団の k 変数正規分布の係数行列要素である。

$k=1$, 即ち, 1 変数, 大きさ n の標本に対して, 具体的に例示する。

$$A_{11} = \frac{1}{\sigma_x^2}, \quad a_{11} = S_x^2,$$

$$F(S_x^2) = \frac{\left(\frac{1}{\sigma_x^2}\right)^{\frac{n-1}{2}}}{2^{\frac{n-1}{2}}} (S_x^2)^{\frac{n-3}{2}} \frac{e^{-\frac{1S_x^2}{2\sigma_x^2}}}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}.$$

したがって、

$$g(t) = \int_0^\infty d(S_x^2) \delta\left(t - \frac{S_x^2}{\sigma_x^2}\right) F(S_x^2),$$

ここで、 $u = \frac{S_x^2}{\sigma_x^2}$ と置くと、 $du \sigma_x^2 = d(S_x^2)$

$$g(t) = \int_0^\infty du \sigma_x^2 \delta(t - u) F(\sigma_x^2 u) = \sigma_x^2 F(\sigma_x^2 t)$$

$$= \sigma_x^2 \frac{\left(\frac{1}{\sigma_x^2}\right)^{\frac{n-1}{2}}}{2^{\frac{n-1}{2}}} (\sigma_x^2 t)^{\frac{n-3}{2}} \frac{e^{-\frac{t}{2}}}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}$$

$$= \frac{1}{2^{\frac{n-1}{2}} \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} t^{\frac{n-1}{2}-1} e^{-\frac{t}{2}}.$$

上式から、 S_x^2/σ_x^2 は自由度 $n-1$ の χ^2 分布に従うことが分かる。これは数理統計学において重要な結果である。

多変数正規母集団の標本データに関して、統計的検定と推定の基礎となる基本的分布関数が二つある。その一つは上記のウィシャートの分布であり、他の一つは以下に示す標本平均値の分布²⁾である。

$$\frac{\frac{k}{n^2} \sqrt{A_{1j}}}{(2\pi)^{\frac{k}{2}}} \exp\left(-\frac{n}{2} \sum_{i,j=1}^k A_{ij} (\bar{x}_i - a_i) (\bar{x}_j - a_j)\right) d\bar{x}_1 d\bar{x}_2 \cdots d\bar{x}_k,$$

ここで、 a_i は多変数正規母集団の変数 i に関わる母平均である。

付録3

ウィルクスの式とフィッシャーの式との同等性の証明.

ラゲール (Laguerre) の母関数展開¹⁾

$$\frac{e^{-xt/1-t}}{(1-t)^{\alpha+1}} = \sum_{v=0}^{\infty} L_v^{(\alpha)}(x)t^v, \quad |t| < 1,$$

$$L_v^{(\alpha)}(x) = \frac{e^x x^{-\alpha}}{v!} \frac{d^v}{dx^v} (e^{-x} x^{v+\alpha}) = \sum_{r=0}^v (-1)^r \binom{v+\alpha}{v-r} \frac{x^r}{r!},$$

を用いて

$$\frac{1}{(1-t)^{\alpha+1}} = \sum_{v=0}^{\infty} L_v^{(\alpha)}(0)t^v, \quad |t| < 1,$$

$$L_v^{(\alpha)}(0) = \binom{v+\alpha}{v}.$$

したがって,

$$\frac{1}{(1-\rho r x)^{n-1}} = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(v+n-2)!}{(n-2)!v!} (\rho r x)^v = \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(v+n-2)! (2\rho r)^v}{(n-2)!} \frac{1}{v!} \frac{1}{2^v} x^v,$$

の関係式を用いて

$$\begin{aligned} \int_0^1 \frac{x^{n-2}}{(1-\rho r x)^{n-1} \sqrt{1-x^2}} dx &= \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(v+n-2)! (2\rho r)^v}{(n-2)!} \frac{1}{v!} \frac{1}{2^v} \int_0^1 \frac{x^{v+n-2}}{\sqrt{1-x^2}} dx \\ &= \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(v+n-2)! (2\rho r)^v}{(n-2)!} \frac{1}{v!} \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{v+n-1}{2}\right)}{2^v \Gamma\left(\frac{v+n}{2}\right)}, \end{aligned}$$

を得る. ここで, 積分公式³⁾

$$\int_0^1 \frac{x^m}{\sqrt{1-x^2}} dx = \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{m+1}{2}\right)}{2 \Gamma\left(\frac{m+2}{2}\right)}$$

を用いた. 更に

$$\sqrt{\pi} \frac{(v+n-2)!}{2^v} = \Gamma\left(\frac{v+n}{2}\right) \Gamma\left(\frac{v+n-1}{2}\right) 2^{n-2},$$

および

$$\frac{2^{n-2}}{(n-2)!} = \frac{\sqrt{\pi}}{n-2} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)},$$

の関係式を用いると,

$$\int_0^1 \frac{x^{n-2}}{(1-\rho r x)^{n-1} \sqrt{1-x^2}} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{n-2} \frac{1}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{n-2}{2}\right)} \sum_{v=0}^{\infty} \frac{(2\rho r)^v}{v!} \Gamma\left(\frac{v+n-1}{2}\right)^2$$

と成り, 式 (29) と式 (30) の両式は一致することが証明された.

因みに, ここに現れたラゲールの関数 $L_v^{(\alpha)}(x)$ は, 量子力学では水素原子の電子波動関数の動径分布を表す特殊関数である.

参考文献

- 1) 森口繁一, 宇田川銈久, 一松 信, 数学公式Ⅲ, 1995, 岩波書店, 5, 96-97.
- 2) ウィルクス (訳), 数理統計学, 1952, 春日出版社, 147, 179-180.
- 3) 森口繁一, 宇田川銈久, 一松 信, 数学公式 I, 1995, 岩波書店, 221.

研究ノート

工学における実務統計解析の基礎

荒川俊也*

(2018年9月30日受理)

Basic of Practical Statistical Analysis on Engineering

Toshiya Arakawa*

(Received September 30, 2018)

Abstract

In this manuscript, we show the basic approach for statistical analysis on engineering. We show three basic methods of statistical analysis on engineering: (1) understanding the tendency of data, (2) consideration of the difference between groups and conditions, and (3) consideration of the relation between groups and conditions. Actually, the methods shown in this manuscript are relatively basic and easy method, however young engineers tend to mistake how to use. Thus, the methods shown in this manuscript should be useful for these engineers.

1. はじめに

企業における実践的な研究開発を進めていく上、人間に関わるデータを取得することは多くの場面で存在するであろう。多くのデータを取得し、解析する必要がある。しかし、データを取ることはできたとしても、人間を扱うという特徴に起因し、実験の段階で統制が不十分であったり、個人差や個人内差の影響が現れる。このようなことを踏まえて得られた結果の検証のために、基本的な統計科学の知見、統計的な解析手法が必要となる。確かに近年はRやSPSSを中心とした統計ソフトウェアが隆盛しており、Excelでも簡単ではあるが取得データを統計解析することは可能である。しかし、不十分な理解や誤解をしたままの状態での解析をすることで、正しい解釈が得られないということも起こり得る。

本論では、主に統計初学者を対象として、実践的な観点での統計解析の基礎について、間違いやすい点に特化して述べる。但し、一言で「統計解析」と言っても範囲が広い。そのため、本論では、使用頻度が多く、また、勘違いしやすい・間違いやすい、以下の項目に絞る。

- (1) データの傾向と把握 (データの特徴の記述方法、ばらつきの見方など、平均と標準偏差の考え方など)

- (2) 群・条件間の違いの検討 (分析方法の選定について、帰無仮説、統計的仮説検定)

- (3) 群・条件間の関係の検討 (予測と制御、相関、回帰)

筆者はこれまで技術セミナーなどで、初学者向け統計講座を多く実施してきた。技術者のバックグラウンドにも多少は起因するが、意外なことに、基礎的な統計を理解していない方が多く見受けられる (ただし、かく言う著者も若手技術者の当時は、よく理解していなかった)。本論は、この「基礎的な統計を理解していない」方に、大体共通している「理解できていないポイント」をまとめたものであることを付け加えておく。本論は簡易的な解説をポイントとしているため、数学的な厳密さについては、やや欠けていたり、中途半端な書き方になっていることをご了承願いたい。なお、本論で述べる一部内容の更なる理解を深めるため、本紀要に掲載されている高橋論文⁽¹⁾も参照されることをお勧めする。

2. データの傾向と把握

2.1 データの特徴の記述方法

我々が扱うデータは大きく2種類に分けられる。「質的データ (qualitative data)」と「量的データ (quantitative

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

Table 1 Difference between qualitative data and quantitative data

	尺度の種類	特徴	統計処理上の特徴
質的データ	名義尺度	区別するために用いられている尺度, 血液型 (A, B, O, AB) など.	○ 度数, 最頻値 × 平均値, 分散, 標準偏差
	順序尺度	大小関係にのみ意味がある尺度. 好きなスポーツの順位 (1位 サッカー, 2位 野球…) など.	○ 度数, 最頻値, 中央値 × 平均値, 分散, 標準偏差
量的データ	間隔尺度	目盛りが等間隔になっている (と仮定される) もの. 顧客満足度 (1: 非常に不満—3: 普通—5: 非常に満足) など.	和差に意味があるが比率に意味は無い
	比例尺度	原点 (0) の決め方が決まっています, 間隔にも比率にも意味があるもの. 身長, 体重, 金額など.	和差積商の計算が自由にできる

data)」である。質的データとは、単に分類や種類を区別するためだけのもので、例えば、好きなスポーツ、血液型、運動会の順位などが例として挙げられる。それに対し、量的データとは、数字の大小に意味があり、例えば、枚数、身長、金額など、数値で推し測ることができる。

そして、質的データも量的データも、さらに2つに分類されている。まず、質的データは、「名義尺度」と「順序尺度」に分類される。名義尺度とは、他と区別し分類するための名称のようなものであり、「好きなスポーツ」「血液型」などが例として挙げられる。順序尺度とは、順序や大小に意味はあるものの、間隔に意味が無いものである。言い換えれば、「足し算ができない」ということが大きな特徴と言えよう。例えば運動会の順位が例として挙げられる。運動会の順位の場合、1位は2位や3位よりも良い成績であるが、「1位+2位=3位」とはならない。一方で、量的データは、「間隔尺度」と「比例尺度」に分類される。間隔尺度とは、目盛りが等間隔になっているもので、その間隔(数値の差)に意味があるものである。例えば気温や成績が例として挙げられる。気温の場合、19 [°C] から 1 [°C] 上昇すると 20 [°C] になったとは言えるが、10 [°C] から 20 [°C] になった場合、気温が2倍になったとは言えない。比例尺度とは、0が原点であり、間隔(数値の差)と比率に意味があるもので、例えば身長や速度が挙げられる。身長の場合、身長が150 [cm] から 30 [cm] 伸びると 180 [cm] になったとも言える(間隔に意味がある)し、1.5倍伸びたとも言える(比率に意味がある)。

以上より、質的データと量的データ、およびそれぞれにデータに対応する尺度の関係は **Table 1** のように表される。何はともあれ、まずは、得られたデータが、どのようなデータ、どのような尺度に分類されるかを確認し、特徴を把握しておく必要がある。なお、「間隔尺度と比例尺度の見分け方がわからない」という方が多い印象だが、「0に意味があるか否か」が見分け方のコツである。

例えば、間隔尺度のように、温度や西暦は、「0には意味がある(存在は否定されない)」ものであり、比例尺度のように、身長や速度は「0は本当に『無い』(存在が否定される)」ものであると解釈すると良い。

2.2 ばらつきの見方

計測には、実験時の統制の不十分さや、意図しない個人差等に起因する「ばらつき」がつきものである。このことを十分に頭に入れておく必要がある。対象が同じデータであり、仮に平均値が同じであっても、状況によって、データが平均値周辺に集中している場合もあれば、平均値から離れた値にもそれなりに存在している場合もある (**Fig.1**)。

従って、データの集まり方を山のなだらかさで表現するとすれば、**Fig.1** における、「山の裾野の広がり方」(つまり「ばらつき」)を考慮しなければならない。例えば平均値 (**Fig.1** における μ) が同じであっても、2つは全く同じ山と見なして良いのだろうか、ということ意識しなければならない。

さて、N個のデータ x_1, x_2, \dots, x_N が得られたとき、このN個のデータの平均値は次の式(1)で表される。

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \dots (1)$$

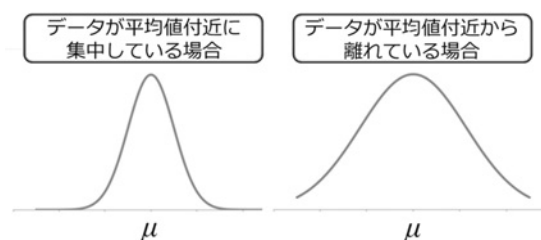


Fig.1 Difference of distribution of the data.

では、データのばらつきはどう表現すべきか。一般的には、「データと平均値の差の二乗の総和を、データ数で割ったもの」である式(2)で表される。式(2)で表される値を分散 (variance) と呼ぶ。

$$Var = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2 \quad \dots (2)$$

しかし、式(2)を眺めると、分散の単位は、「元のデータの二乗」になっており、元のデータとのオーダーにズレが生じる。こうなると、数値上の比較が些か難しくなるため、分散の平方根を取ったものを標準偏差 (standard deviation) として定義する。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2} = \sqrt{Var} \quad \dots (3)$$

従って、データを取得した場合、単に平均値を求めるだけでなく、ばらつきを考慮し、分散・標準偏差も求めた上で評価することが基本となることはここまでの話で理解できよう。

2.3 ヒストグラム

次に、どのようなデータであっても、取得したからには、いかなる時でも、まずはヒストグラムを書いてみる。データの分布を「見える化」することによって、データの性質を把握することができると共に、モデリングの観点から、データがどのようなモデルで近似できるか、ということ把握することにも繋がる。データの山が一つである単峰性 (unimodal) を有しているか、それとも複数である多峰性 (multimodal) を有しているかを確認することも重要である。特に多峰性を有したデータである場合、データを十把一絡げにして平均値と分散・標準偏差を求めることは適切ではない。このような場合、集団を性質によって分割して検討する工夫が必要である。

3. 群・条件間の違いの検討

3.1 記述統計と推測統計

得られたデータの基礎的な扱い方についてはこれまでに述べた通りであるが、「得られたデータは、あくまでデータのごく一部であり、得られたデータを元にして、一般的な性質を把握すること」を強く意識しなければならない。例えば、車室内の騒音を10回計測して得られたデータの傾向が、次に10回計測した場合にも同じことが言えなければ、先に得られた傾向は、当時の状況で



Fig.2 Descriptive statistics and inferential statistics

しか当てはまらない、特異な傾向ということになってしまう。つまり、我々は、実験を通じて得られた、眼前の有限個のデータを手がかりにした上で、仮にこの後何度も何度も（無限回！）実験をしてデータを得たとしても、同じ傾向が当てはまることを示さなければならない。

以上を踏まえて、統計には、「記述統計」と「推測統計」の2種類があることを理解する必要がある。記述統計とは、眼前のデータの代表値や散布図などの求め方やデータの様々な図示方法を扱うものであり、推測統計とは、直接観測可能なデータはその背後にある観測不可能な母集団から抽出されたものであるという考え方である。そして、我々が扱う統計は推測統計であることを強く意識しなければならない。例えば、100人の参加者を集めてダイエット効果を検証する場合、「眼前の100人を対象とする検証（それ以外の人についてはどうでも良い）」は記述統計であり、「一般的（100人以外）にも拡張した検証」は推測統計である (Fig.2)。

3.2 正規分布

2.3節でヒストグラムについて述べたが、ヒストグラムで表されるような形状を簡便にモデリングすることはできないだろうか。様々なモデルがあるが、一番基本的かつよく使われるモデルとして、正規分布（ガウス分布：Gaussian distribution）がある。平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布は式(4)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} := N(\mu, \sigma^2) \quad \dots (4)$$

正規分布は、自然科学のあらゆる領域において非常によく用いられる、基本的なモデルである。特に平均0、分散1の正規分布は標準正規分布といい、式(5)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{x^2}{2}\right\} := N(0,1) \quad \dots (5)$$

標準正規分布は、「平均0, 分散1」と決まっていることもあり, $P(a \leq z \leq b)$ を, 標準正規分布において, 区間 $[a, b]$ の面積を表すとすれば, 常に, $P(-1 \leq z \leq 1) = 0.6826$, $P(-1.96 \leq z \leq 1.96) = 0.95$ となるという性質がある (Excel など Simpson 法などによる積分計算などで確認できる). さて, 全ての正規分布は「標準正規分布を操作することで表現できる」と考えると, 実は, 平均 μ , 分散 σ の正規分布は, 「標準正規分布を左右に σ 倍し, μ だけ正の方向にずらす」ことで作ることができる. 従って, 例えば, $P(-1 \leq z \leq 1) = P(-\sigma \leq z\sigma \leq \sigma) = P(\mu - \sigma \leq z\sigma + \mu \leq \mu + \sigma) = 0.68$ となり, $z\sigma + \mu = x$ と置くと, $z = (x - \mu) / \sigma$ となるので, 標準正規分布におけるデータ z と, 一般的な正規分布におけるデータ x の相互変換も理解できよう. そして, これより, 正規分布では, $\mu - \sigma$ から $\mu + \sigma$ の間に全体の 68% が収まることとなる (Fig.3). 「 $\pm\sigma$ (1 S.D.) の間に全体の 68% が収まる」というのはこの考え方に基づく. 同様に, $\mu - 1.96\sigma$ から $\mu + 1.96\sigma$ の間に全体の 95% が収まることも同じ考えから導出でき, 「 $\pm 1.96\sigma$ (1.96 S.D.) の間に全体の 95% が収まる」ことも説明できる.

3.3 母集団の性質

さて, 3.1 節で述べたように, 我々が扱う統計は推測統計である. したがって, 我々の問題意識としては, 「与えられたデータを元にして, 母集団の性質を推定する」ということが必要となる. では, どのように推定するのだろうか. まずは簡単のために, 得られている N 個の

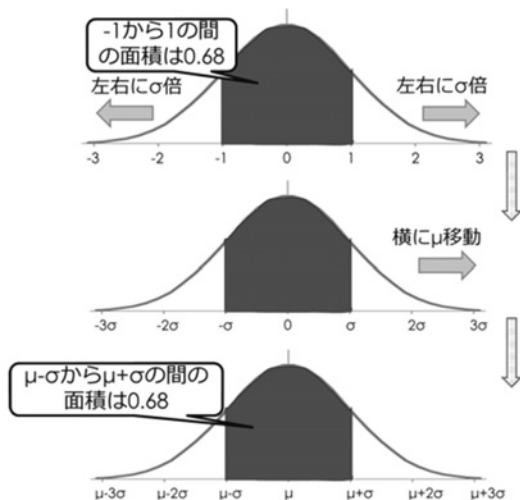


Fig.3 Area between $\mu - \sigma$ and $\mu + \sigma$.

データ (標本) が, 母集団という得体の知れないものから, 無作為抽出 (ランダムサンプリング: random sampling) されたものだと考えよう. そして, この N 個のデータは, 正規分布していると考えよう.

ここまでの情報から, 母集団というものがどんな性質かを推定する必要がある. この, 母集団の性質を推測することを点推定と呼ぶ. まず, 母集団の平均はいくらであろうか. かなり大雑把であるが, 眼前の N 個のデータの平均値が, そのまま母集団の平均値 (μ) であると見なしてしまう.

では, 母分散についてはどうだろうか. N 個のデータから得られる分散をそのまま使えば良いかという, それがそのまま分散になると考えるのはやや厳しいだろう. 直感的には, サンプル数が増えれば増えるほど, 分散は大きくなると考えられるので, 母分散は, 眼前の N 個のデータの分散より大きくなるであろう, と考えるのが自然であろう. これを不偏分散と呼び, 式 (6) で表す.

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2 \quad \dots (6)$$

式 (6) の平方根を標準偏差と呼び, 式 (7) で表す.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad \dots (7)$$

これらを踏まえて, 標準誤差という概念について述べる. 標準誤差 (SE: standard error) とは推定量の標準偏差であり, 標本から得られる推定量そのもののバラつき (= 精度) を表すものである. 標準誤差は, 一般的に「標本平均の標準誤差 (SEM: standard error of mean)」を意味する. 標準誤差の計算には中心極限定理「平均 μ , 分散 σ^2 に従う母集団からサンプルサイズ N の標本を抽出するとき, その平均値の分布は N が大きくなるにつれて $N \sim (\mu, \sigma^2)$ に従う」を使う.

つまり, 標本平均の標準偏差は $\sqrt{\sigma^2/N} = \sigma/\sqrt{N}$ に近づくことになる. しかし, 標本の分散は, σ^2 ではなく s^2 を用いることから (得られている標本から推定される母分散は s^2 であり, 中心極限定理の説明では便宜上母分散を σ^2 しているだけなので), 標本平均の標準偏差 (つまり標準誤差) は式 (8) で表される.

$$SE = \frac{s}{\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2}}{\sqrt{N}} \quad \dots (8)$$

標準誤差は, 母集団から抽出された標本から標本平均

を求める場合、標本平均の値が母平均に対してどの程度ばらついているかを示すものであり、式(8)より、サンプルサイズが大きくなると標準誤差は小さくなる。母集団から限りなく多くのサンプルを抽出すれば、ほぼ母集団と近い状態であるから、ズレが少ないということは直感的に理解できるであろう。

3.4 区間推定

区間推定とは、母集団の従う分布が正規分布であると仮定できるときに、標本から得られた値を使ってある区間でもって母平均などを推定する手法である。このときの区間を信頼区間という。このとき、「母分散がわかっている（既知の場合）」と「母分散がわかっていない（未知の場合）」で、区間推定の方法は異なる。

①母分散が既知で、 σ^2 である場合

母分散 σ^2 を用い、標準正規分布より信頼区間を算出する

②母分散が未知である場合

不偏分散 s^2 の値を用い、t分布を用いて信頼区間を算出する。

現実問題としては②の場合がほとんどであるが、説明の便宜上のため、①の説明を踏まえて②の説明を行う。

まず、「①母分散が既知で、 σ^2 である場合」について説明する。この場合は、「母集団からサンプルサイズ N の標本を抽出したときに生成されるべき正規分布に対して、抽出された N 個の標本の平均値が入る」ことを考える。この考えに基づいて、次の方法で計算する。

- (1) N 個の標本の平均（標本平均） \bar{x} を求める。
- (2) 生成されるべき正規分布に対して、標準正規分布を考えるために、標準化を行う（式(9)）。

$$\frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{N}}} \quad \dots (9)$$

- (3) (2)で標準化した式より、「 N 個の標本の平均値が、生成されるべき正規分布に95%の確率で含まれるには、平均値はどの範囲にあればよいか？」と考える。つまり、

$$-1.96 \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{N}}} \leq 1.96 \quad \dots (10)$$

を考える。未知の変数は μ であるので、この式から、

$$\bar{x} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{x} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \dots (11)$$

となるため、「正規分布する母集団で、分散が σ^2 ということがわかっている母集団から、 N 個の標本を抽出したと仮定する。一方、その結果として得られた眼前の N 個の標本の平均値が \bar{x} であるとき、このような標本が95%の確率で得られるとき、 μ はどの範囲にあるか？」という問題を解くと考えるとわかりやすい。

なお、今は95%として計算しているが、他の値（例えば90%など）の場合は、1.96の値（標準正規分布において、全体の面積の95%となる閾値！）を、3.2節の考え方に基づいて変更すれば良い。これを踏まえて、②母分散が未知である場合について考える。当然ながら、母平均が分かっているのに、母分散が分かっているという状況は現実的ではない。母分散が未知なので、①のように母分散は使えない。そこで、3.3節で説明した不偏分散を用いる。単に式(11)において σ を s に置き換えれば良い。

しかし、もう一つ注意しなければならない。 s^2 を使って母平均の区間推定を行う場合は、標準正規分布ではなくt分布というものを使うということである。t分布は標準正規分布に似ているものの、抽出した標本数 N によってその形状が変わる分布である。なお、 $N-1$ を自由度といい、式(12)に示す統計量 t の値は、自由度 $N-1$ のt分布に従うという。

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{N}}} \quad \dots (12)$$

s^2 を用いる場合は標準正規分布ではなく、自由度 $N-1$ のt分布に従うということから、式(11)の1.96の値も使えない。なぜなら、この値は標準正規分布を基本として得られた値だからである。そのため、このように母集団が未知である場合は、1.96の値は、分布がt分布に従い、ゆえに標本数にも依存するため、状況に応じて変えなくてはならない（具体的な計算方法については紙数の都合で記載しない）。ここで、自由度 $N-1$ のt分布において、全体の面積の $\alpha\%$ となる際の閾値となる点を $t_{\alpha/2(N-1)}$ と表すと、 N 個の標本の平均値が、生成されるべきt分布に $\alpha\%$ の確率で含まれるには、平均値 μ はどの範囲にあればよいか？」という問題は、

$$-t_{(1-\alpha)/2(N-1)} \leq \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{N}}} \leq t_{(1-\alpha)/2(N-1)} \quad \dots (13)$$

と表すことができ、この式を変形すれば、

$$\bar{x} - t_{(1-\alpha)/2(N-1)} \frac{s}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{(1-\alpha)/2(N-1)} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad \dots (14)$$

となる。基本的な考え方は①の場合と同じであるが、 σ^2 ではなく s^2 であり、1.96ではなくt分布と自由度に依存した値である、という違いがあることに留意されたい(というより、基本的な考え方は3.3節や①と同じであるという程度の認識で差し支えない)。

3.5 母平均の差の信頼区間

以上を踏まえると、実はt検定の考え方は難しくない。ここでは「対応のあるデータ」(データがペアになっているもの、例えば5人の、薬品を投与される前後の体重のデータなど)について扱う。この場合、Table 2のような一对のデータがあるとし、それぞれのデータの差を考えれば良い。

Table 2 一对のデータの例

番号	状況 A	状況 B	差
1	x_1	x_1'	$x_1 - x_1'$
2	x_2	x_2'	$x_2 - x_2'$
3	x_3	x_3'	$x_3 - x_3'$
...			
N	x_N	x_N'	$x_N - x_N'$

このとき、差の平均値 \bar{x}_d と、差の不偏分散 σ_d^2 を用いると、例えば母平均の差 μ_d の95%信頼区間も、

$$\bar{x}_d - t_{0.025(N-1)} \frac{S_d}{\sqrt{N}} \leq \mu_d \leq \bar{x}_d + t_{0.025(N-1)} \frac{S_d}{\sqrt{N}} \quad \dots (15)$$

として得られる。

3.6 t検定

3.5節では母平均の差について考えた訳であるが、例えば「(母集団から任意に抽出した N 個の、対応のある)データ1の方がデータ2より大きい」ということを示したい。しかし、統計学の観点からは、直接、差があることを示すことは極めて困難である。そのため、データ1とデータ2に差がないことを仮定し、その確率が統計学的に、ある確率以下であれば、仮定が間違えているため、差があると見なす、というプロセスで証明する。このように、確率をもとに結論を導く方法を、統計的仮説検定、もしくは単に検定という。検定を行う際のプロセスにおいて、最初に立てる仮説のことを「帰無仮説」といい、 H_0 と書く。一方、本来証明したい仮説であり、帰無仮説に対立する仮説のことを、「対立仮説」といい、 H_1 と書く。

さて、「(母集団から任意に抽出した N 個の、対応のある)データ1の方がデータ2より大きい」ことを示すには、

帰無仮説 H_0 :

データ1とデータ2に違いは無い

対立仮説 H_1 :

データ1の方がデータ2より大きい

とし、帰無仮説が成り立つ確率が、基準となる確率(有意水準、一般的に0.05(=5%)とする)以下となることを示す(Fig.4)。

これまでの考え方を活用すると、結局、データ1とデータ2の差分を考え、これらを新たな標本として考える。そしてこの標本が、正体不明の母集団から得られたものとする。母集団の平均値が0であると仮定した場合、 $\mu=0$ として、

$$t = \frac{\bar{x} - 0}{\frac{s}{\sqrt{N}}} \quad \dots (16)$$

と表すことができる。例えば95%信頼区間で考えるならば、この値が、自由度 $N-1$ 、 $\alpha=0.05$ となるt値(つまり、t分布において、面積が全体の95%となる際の境界値)より小さければ、帰無仮説 H_0 を採用し、もし大きければ、帰無仮説 H_0 を棄却し、対立仮説 H_1 を採用すると考える(Fig 5)。

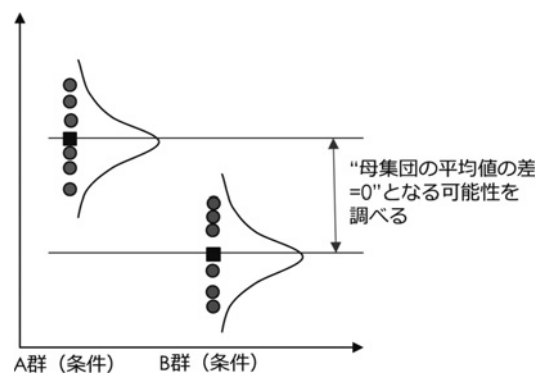


Fig.4 Concept of t-test.

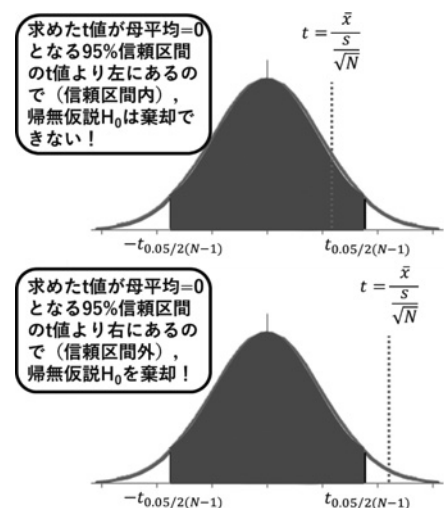


Fig.5 Concept of acceptance and rejection to null hypothesis.

4. 群・条件間の関係の検討

4.1 相関係数

相関係数 (correlation coefficient, r で表す) とは、「身長と体重」など、2種類の変数の関係の強さを表す指標である。一般的には $r > 0.6$ が満たされれば「相関がある」とする。「右肩上がり」であれば $r = 1$ に近く、「右肩下がり」であれば $r = -1$ に近い傾向にあるが、注意しなければならない点がある。それは「外れ値の影響」と「見かけの相関」である。

Fig.6のような状況の場合、両方とも、点全体をまとめて見るならば、右肩上がり、相関があるように見える。しかし、(a)の場合は、外れ値の影響で、相関係数が高い値に引っ張られている可能性がある。この外れ値は、正しい値かも知れないし、測定ミスに起因するものかも知れない。仮にこの2つの点を除外すると、途端に相関係数が低くなるが、外れ値が仮に測定ミスに起因するものであれば、実際の相関係数は決して高いものでなく、2変数は「ボヤツとした関係」であると言えよう。(b)の場合は、群A(例えば男性高齢者)と群B(例えば女性若年者)という全く性質の異なるデータを一括りにしてしまったために、見かけ上、相関があるように見えてしまっている。実際は、それぞれの群毎に検討すれば、相関は見られないかも知れない。このように、**単に相関係数が大きくなったからと言って、手放しで「相関がある！」と早合点せず、データの扱いの妥当性も吟味して結論する必要がある。**

4.2 (重) 回帰分析

2つの変数間に関係性が見られ、何らかの式でモデリングができれば便利であろう。例えば、とある試験を対

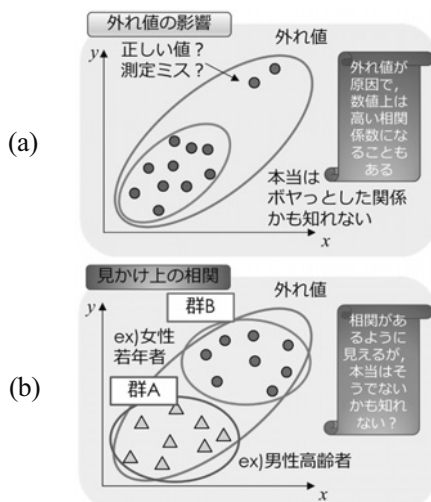


Fig.6 Affection by outliers and pretense correlation

象として、訓練時間が、テストの点数に影響を及ぼすでしょう。何らかの定式化ができれば、どの程度訓練時間を増やせば、テストの点数がどの程度増加するか、という目安になるだろう。このときに用いるのが回帰分析である。

では、どのような式が、2変数の関係を最もよく表しているのだろうか。直線をエイヤツと引っ張り、点と直線の距離(要はばらつき)の総和を求めて、その総和が最小になれば、点をよく表している最適な直線と言えるのではないかと考えて算出する。このようにして得られた直線が、例えば、 a と b を変数として、

$$\text{テストの点数} = a \times \text{訓練時間} + b \quad \dots(17)$$

と表されたとする。このとき、説明したい変数(注目すべき変数、ここでは「テストの点数」)を従属変数(目的変数)、従属変数を説明するための変数(ここでは「訓練時間」)を独立変数(説明変数)という。そして、**独立変数(説明変数)と従属変数(目的変数)の関係を最もよく説明できる式を求める手法を回帰分析という。**

回帰分析の用途としては、因果関係が想像される2変数間の関係を調べることで、そしてこの関係を基にした相互の変数間の「予測と制御」にある。しかし、独立変数(説明変数)は1変数だけではない。例えば、テストの点数に影響を及ぼすのは、訓練時間以外に、別のテストの点数など、他の因子も影響を及ぼす可能性があり、

$$\begin{aligned} \text{テストの点数} = \\ a \times \text{訓練時間} + b \times \text{別のテストの点数} + c \end{aligned} \quad \dots(18)$$

と表現することもできよう。この場合のように、独立変数(説明変数)が2変数以上となる場合の回帰分析を、重回帰分析という。注意すべきことは、(重)回帰分析で説明できるとは言え、必ずしも因果関係を示すことにはならないということである。また、身長と体重の関係のように、 x 軸と y 軸を入れ替えても回帰分析でき、相関係数は変わらないが、体重→身長の説明ができないように、独立変数(説明変数)と従属変数(目的変数)が適切であるか、ということも注意しなければならない。とりわけ注意すべきは次の3点である。

- ①測定値 < 説明変数だと、 R^2 (決定係数)は大きくなる。
- ②説明変数に関連する測定値の尺度が互いに違いすぎると、説明変数の影響を公平に比較できない。このような場合、標準化することでスケールを揃えるなど工夫する。
- ③Excelなどで(重)回帰分析を行うと、自動的に切片が入る。しかし、車速から緊張感を予測する場合、車速 $0 =$ 緊張感 0 と定義でき、切片を入れ

ること自体が無意味となる。この場合、車速0のときに緊張を感じるという状況は、まず、あり得ないためである。解析する対象や状況を吟味して、切片を入れる妥当性も考えなくてはならない。

5. まとめ

本論の内容は非常に基礎的な項目であるが、見落としやすい項目でもあり、特に実務者といえども、初学者にとって鬼門となる項目と言える。本論で説明した内容を踏まえて解析を行えば、「それなり」には対応できると考えられる。「それなり」以上の解析には、更に発展的な知識が必要だが、発展的な知識を獲得するに際しても、本論で述べた内容が基礎となっているものと思われる。

付 記

本論中の図の一部は参考文献⁽²⁾から引用している。また、本論の内容は過去に著者が実施した講演⁽³⁾の一部を修正したものである。

参考文献

- (1) 高橋義則: 数理統計学における確率変数の確率密度関数の新導出法, 愛知工科大学紀要, Vol.16 (2019)
- (2) 自動車技術ハンドブック3 人間工学編, 公益社団法人自動車技術会, 東京 (2016)
- (3) 荒川俊也: 自動車人間工学における統計解析の基礎, 公益社団法人自動車技術会講習会 自動車開発における人間工学の理論と実践ードライバーの特性を考えた車づくりー 予稿集 (2018)

1. 著 書

Arakawa, T.: Application of Hidden Markov Models for Estimating the Estrus and Nonestrus Behaviors of Goats, in “Advances in Mathematics Research, vol.25 (Ed. Albert R. Baserll)”, Nova Science Publishing (2018).

荒川 俊也: 車載 HMI、次世代コックピットの開発動向と自動運転への応用 第 3 章 第 2 節「自動運転システムへの依存とシステム破綻後のドライバ状態」, 株式会社技術情報協会 (2018).

大西 正敏, 平野 重雄, 王 建義, 張 晏誠: JIS にもとづく機械設計製図便覧, 第十二版中国版, 台湾・全華書籍/オーム社 (2018.1)

加藤 高明: 佐々木 利広編著 地域協働のマネジメント 第 10 章「大学と地域、行政、NPO との連携」, 中央経済社, pp.197-213(2018.6)

田川 和義: 最先端医療機器の病院への普及展望と今後の製品開発 第 4 章 第 7 節「手術訓練システムへの VR の応用開発」, 株式会社技術情報協会 (2018.5).

板宮 朋基: VR/AR 技術の開発動向と最新応用事例, 第 14 章第 5・6 節, 技術情報協会 (2018.2) .

中島 守, 吉田 昌央, 小野 秀文, 高田 富男, 平野 博敏, 川村 貴裕: 安全のこころえ (平成 30 年度版) 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2018.3).

中島 守, 河合 末利, 森 勝行, 永田 英雄, 服部 幸廣, 高田 浩充: 新編 工学基礎 (平成 30 年度版) 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2018.3).

中島 守, 掛布 知仁, 高田 浩充, 森 勝行, 吉田 昌央: 基礎数学 (平成 30 年度版) 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 (2018.3).

2. 論 文 / 国際会議

Noda, N., Sumi, N., Ohmichi, M.: Analysis of transient plane thermal stresses in functionally graded orthotropic strip, Journal of Thermal Stresses, (in press) (2018).

Toshiya Arakawa, Ryosuke Hibi and Taka-aki Fujishiro: Psychophysical assessment of a driver’s mental state in autonomous vehicles, Transportation Research Part A: Policy and Practice (in press) (2018).

婦木 日向, 荒川 俊也: 筋電位センサを用いた低コスト軽量ロボットアームの設計と評価, 産業応用工学学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.79-87 (2018) DOI: 10.12792/jjiiae.6.2.79.

Toshiya Arakawa: Recent Research and Developing Trends of Wearable Sensors for Detecting Blood Pressure, Sensors, Vol.18, No.9, 2772 (2018) DOI: 10.3390/s18092772.

阿部 己和: 電動パワーステアリングにおける振動抑制制御の単純化と操舵力推定の高精度化に関する研究, 群馬大学学位論文 (2018.9).

Toshiya Arakawa, Noriaki Sakakibara and Shinji Kondo: Development of non-invasive steering-type blood pressure sensor for driver state detection, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.14, No.4, pp.1301-1310 (2018) DOI: 10.24507/ijicic.14.04.1301.

Kento Yasui, Toshiya Arakawa: Trial Development of Immersive Virtual Reality Supporting Content for Training En-

gineers Using Oculus Rift and Leap Motion, ICISIP2018: The 6th International Conference of Intelligent Systems and Image Processing 2018, Matsue, Japan (2018.9.12).

荒川 俊也, 井藤 良温: 技術職への就職を見据えた学生教育のフレームワーク, 工学教育, Vol.66, No.4, pp.67-70 (2018) DOI: 10.4307/jsee.66.1_108.

朱 甲男, 林 寛幸, 山本 照美: Influence of an embedded condition on stress distribution on an infinite plate under tension containing elastic elliptic plate —Mixed boundary-value problem in consideration of partial contact region—, 材料(日本材料学会誌), Vol.67, No.6, pp.639-645, (2018.6) .

阿部 己和, 橋本 誠司, 梶谷 満信: 1 入力 2 出力 SMC 適用による EPS 制御の高性能化, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), 138 巻 (2018)4 号, pp.346-351 (2018).

Toshiya Arakawa: Trial Verification of Human Reliance on Autonomous Vehicles from the Viewpoint of Human Factors, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol.14, No.2, pp.491-501 (2018) DOI: 10.24507/ijicic.14.02.491.

荒川 俊也, 杉森 順子: アート作品を用いたデザイン思考型モノづくり教育の実践, 設計工学, Vol.53, No.3, pp.237-250 (2018) DOI: 10.14953/jjsde.2017.2746.

荒川 俊也: 技術者を対象としたコンパクトな基礎統計教

育の実践と評価, 工学教育, Vol.66, No.1, pp.108-112 (2018)
DOI: 10.4307/jsee.66.1_108.

加賀 翔太郎, 荒川 俊也, 大西 正敏: 鼻部皮膚温度測定によるストレス検知システムの開発, 「不確実状況下での動的状態推定と知能情報科学の融合」統計数理研究所共同研究リポート, 406, pp.7-16 (2018).

Ohmichi. M.: Analysis of Two-Dimensional Steady Thermal Stresses in Functionally Graded Orthotropic Materials by the Stress Function Method, Bulletin of Aichi University of Technology, Vol.15, pp. 9-17, (2018).

荒川 俊也, 井藤 良温: 「修学形成 1・2」におけるエンジニアリング基礎教育の取り組み, 愛知工科大学紀要, 第15巻, pp.33-40 (2018).

Shinya Nawata, Ryo Takahashi, Takashi Hikiyara: Design Possibility for Covert Power Packet Transfer Using Asynchronous Sampling, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE, vol. E9-N, no. 3, pp. 374 – 381 (2018.7).

Hiroyasu Ando, Ryo Takahashi, Shun-ichi Azuma, Mikio Hasegawa, Tomoki Yokoyama, Takashi Hikiyara: A Resource Sharing Model in a Power Packet Distribution Network, Proc. 2018 International Power Electronics Conference (IPEC) – ECCE Asia -, pp. 3665 – 3669, Japan (2018.5).

Ryo Takahashi, Yanzi Zhou, Naomitsu Yoshida, Shinya Nawata, Naoaki Fujii, Takashi Hikiyara: A Study on Physical Behavior of Power Packet Congestion in Power Packet Router, Proc. 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2018), p. 79, Spain (2018.9).

斎藤 卓也, 秋山 実穂: 惑星探査ローバの ARLISS2016 における動作ログの詳細分析, 愛知工科大学紀要第15巻, pp.19-25 (2018.3).

Masahiro Isogai, Masashi Suzuki and Kazuto Miyawaki: Analysis of Nanba Walking, Proceedings of the 29th International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS), pp.40-45 (2018.12).

磯貝 正弘, 飯島 徹: 電磁式マイクロ移動ロボットの走行の周波数応答実験用システムの開発 (ハードウェアシステムの構築), 計測自動制御学会教育工学論文集, Vol.41, pp.7-9 (2018.12).

磯貝 正弘, 飯島 徹: 電磁式マイクロ移動ロボットの走行の周波数応答実験用システムの開発 (ソフトウェアの開発と巡回走行の実験), 計測自動制御学会教育工学論文集, Vol.41, pp.51-53 (2018.12).

大西 正敏, 藁谷 明史, 田宮 直: 自動走行機能を搭載した SLAM 型案内ロボットの実践的モノづくり教育, 愛知工科大学紀要, 第15巻, pp.41-46 (2018.3)

Naoshi Tamiya, Masatoshi Onishi: Engineering Design using Autonomous Robot for Student Education, 愛知工科大学

紀要, 第15巻, pp.47-52 (2018.3)

館山 武史: 講義・実験融合型授業による実践的技術者教育の取り組み, 愛知工科大学紀要, 第15巻, pp.53-58 (2018.3).

S. Fukushima, Y. Kora, M. Nishio: Atmospheric Vapor Distribution Observation by Using a Ku-Band Beacon from a LEO Satellite, Proceedings of 2018 APMC, TH-IF-35 (2018.11).

小塚 一宏: 自動車運転中の“ながらスマホ”時の視線特性と危険性の考察, 日本工業出版, 画像ラボ, Vol.29, No.9, pp.59-65 (2018.09)

Shintaro Uno: Minimization and Field Trials of Assistive Devices for Safe Driving at a Crossing with No Traffic Lights Using 920MHz band, The 16th ITS Asia-Pacific Forum, TS02-9 (2018.05)

實廣 貴敏, 伊藤 俊樹, 早瀬 友博: スマートフォンの加速度センサを用いたぬいぐるみに与えた動作の認識, 愛知工科大学紀要, 第15巻, pp.27-32, (2018.3).

加藤 高明: 大学と地域, 行政, NPO との協働に関する考察 愛知工科大学紀要, 第15巻 pp.59-64 (2018.3)

吉田 茂, 杉山 将平: Excel データから XML 文書への半自動変換, 愛知工科大学紀要, 第15巻, pp.27-32, (2018.3).

板宮 朋基, 村上 智一, 小笠原 敏記, 川崎 浩司, 下川 信也: スマートフォン用ヘッドマウントディスプレイを用いた高潮想定没入体験システムの開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 2018年74巻2号, pp.I_773-I_778 (2018.9).

板宮 朋基, 吉村 達之: 複合現実による災害想定没入体験アプリ Disaster Scope の開発と避難訓練における活用, 日本災害情報学会論文誌 災害情報, No.16-2, pp.191-198, (2018.7).

H.Tohara, T.Itamiya: The immersive disaster experience AR smartphone-application “Disaster Scope”, The 16th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI2018), pp.62 (2018.12).

M.Yoneda, S.Obata, M. Niwa, N. Hirata and M. Motohashi: Simulation of Exchange Bias by Two-Phase Ferrimagnetic Model Using Antiferromagnetic Interlayer Coupling for the Fe3O4 Thin Film: Materials Transactions, Vol.60 No.01, pp.55-60 (2018)

Akiko Eguchi, Masatoshi Sugiura: L2 processing demand and morphological errors of third person singular -s: An exploratory study using a keystroke logging system. Language Education & Technology, 55, pp.1-22 (2018).

江口 朗子, 田村 祐: タスク性の高いコミュニケーション活動における発話の流暢さの発達—大学初級レベルの英語学習者を対象とした実践研究—, 中部地区英語教育学

会紀要, 第 47 号, pp.119-126 (2018).

江口 朗子, 田村 祐: 大学基礎英語におけるタスク性の高いコミュニケーション活動 - 英語スピーキングに対する抵抗感の分析からの示唆, LET 中部支部研究紀要, 第 29 号, pp.1-10 (2018).

Akiko Eguchi: The relationship between L2 developmental stages and three dimensions of linguistic complexity in young foreign language learners. 18th International Symposium of Processability Approaches to Language Acquisition (PALA2018). Sydney, Australia (2018.9).

Akiko Eguchi: Long-term effects of early exposure to English as a foreign language on syntactic and lexical development in L2 oral production. The European Second Language Association (EuroSLA28). Münster, Germany (2018.9).

Ryoichiro Kobayashi: Feature Inheritance and the Syntax of Lexical VV-compounds, Proceedings of ConSOLE XXV, pp.250-267. (2018.1)

Ryoichiro Kobayashi, Ryan Walter Smith: Conjunctive or Disjunctive? On the Syntax/Semantics of -toka and -tari in Japanese, Proceedings of ConSOLE XXV, pp.91-108. (2018.1)

Ryoichiro Kobayashi: Eliminating the Discourse-based Parameter, JELS 35, pp.252-258. (2018.3)

Ryoichiro Kobayashi: On Two Types of From-To PPs in English and the Parallelism in Syntax, JELS 35, pp.76-82. (2018.3)

Ryan Walter Smith Ryoichiro Kobayashi: Alternating Conj/Disjunctions: The Case of Japanese -toka and -tari, Proceedings of Sinn und Bedeutung 22 (SuB22), Vol.2, pp.393-406. (2018.9)

Ryoichiro Kobayashi: Parametrizing the Timing of Transfer in Japanese and English and its Consequences, Proceedings of the 13th edition of the Workshop on Altaic Formal Linguistics, pp.371-379. (2018.10)

Kohei Nakashima, Yuto Mori, Hiroshi Yamada, Masao Yoshida: Improved Cooling of an Air-Cooled Cylinder Equipped with Fins with Slits under Forced Convection, SAE 2018 World Congress, 18PFL-0381 (2018. 4).

小野 秀文, 鈴木 規文, 吉田 昌央: 自動車整備におけるダイヤルゲージの測定技術教育, (社) 日本工学教育協会, 工学教育 Vol.66, No.2, pp.58-63 (2018.3).

3. 口頭発表

長井 優典, 荒川 俊也: 画像処理技術を応用した誤射防止装置の開発, 計測自動制御学会中部支部 2018 年度若手研究発表会 (2018.11.29).

川合 隆太, 荒川 俊也: 簡易操作が可能な遠隔介助ロボットの研究開発, 計測自動制御学会中部支部 2018 年度若手研究発表会 (2018.11.29).

長井 優典, 荒川 俊也: 猟銃の誤射防止装置の開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018 (2018.11.27).

荒川 俊也: 自動運転システムに対する依存とシステム破綻時のドライバ状態に関する考察, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018 (2018.11.26).

川合 隆太, 荒川 俊也: 複雑な環境に柔軟に適應できる福祉ロボットの開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018 (2018.11.25).

吉川 朋希, 荒川 俊也: 香りインタフェースの車載警報適用の可能性, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018 (2018.11.25).

村瀧 竜也, 荒川 俊也: プレゼンテーション時における緊張緩和装置の開発, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018 (2018.11.25).

石原 裕二, 三宅 裕也, 森田 義浩: Ahmed モデル後面の

形状変化による空気抵抗値への影響, 自動車技術会 2018 年秋季大会学術講演会予稿集, 20186091 (2018.10.17).

山本 照美, 林 寛幸: 内圧を受ける組合厚肉円筒および組合厚肉球殻の最大応力に与える締め代の影響, 日本設計工学会 2018 年度秋季大会研究発表講演会, 講演論文集, pp.1-4(2018.9).

山本 照美, 林 寛幸: 圧入近似四角形剛体板を含む無限板の二軸荷重による弾性応力解析, 日本機械学会年次大会, 講演論文集, No.18-1, G0300302(5 頁)(2018.9).

加賀 翔太郎, 荒川 俊也, 大西 正敏: 鼻部皮膚温度測定によるストレス検知システムの研究, 第 34 回ファジィシステムシンポジウム (2018.9.4).

笠置 誠佑, 荒川 俊也: 機械学習を用いた生体データの可視化, 第 34 回ファジィシステムシンポジウム (2018.9.4).

荒川 俊也, 山崎 俊弥: ハンバーガーの「見た目」と「美味しさ」の関係: ベイジアンネットワークの観点から, パーティクルフィルタ研究会 2018 年 6 月度研究会 (2018.6.22).

荒川 俊也, 日比 亮輔: 自動運転継続期間がドライバの運転行動に及ぼす影響の基礎的考察, 自動車技術会 2018 年春季大会学術講演会 (2018.5.23).

林 寛幸, 山本 照美: 圧入弾性円環を含む無限板の二軸

荷重による応力変化（すきま領域のない場合）、日本設計工学会 2018 年度春季大会研究発表講演会、講演論文集、pp.227-228(2018.5).

安井 健人, 荒川 俊也: Oculus Rift と Leap Motion を用いた技術者育成支援のための没入型 VR コンテンツの開発、第 13 回日本感性工学会春季大会 (2018.3.27).

荒川 俊也, 杉本 淳, 井川 博, 土谷 隆: 地理情報システムと最短路問題を活用した橋梁システムの評価—愛知県豊田市とみよし市を例として—, 研究集会「最適化: モデリングとアルゴリズム 31」(2018.3.29).

荒川 俊也, 杉本 淳, 井川 博, 土谷 隆: 地方自治体の長期的公共インフラ管理政策立案と OR 的手法による評価—愛知県の橋梁管理を例として—, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018 年春季研究発表会 (2018.3.16).

陳 嘉懿, 梶谷 満信, 阿部 己和: IoT を見据えた事故低減のための車椅子開発, 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2018 (TEC18) 第 49 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, No.611 (2018.3).

埜村 優太, 山本 勝紀, 石原 裕二: 簡易自動車モデルの形状変化による空気抵抗値への影響, 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2018 (TEC18) 第 49 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, No.434 (2018.3).

佐々木 謙佑, 村上新: 吊り下げ搬送システムの高速制振位置決め制御: 日本機械学会東海学生会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2018 (TEC18) 第 49 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, No.821(2018.3).

加賀 翔太郎, 荒川 俊也, 大西 正敏: 鼻部皮膚温度測定によるストレス検知システムの開発, パーティクルフィルタ研究会 2018 年 3 月度研究会 (2018.3.1).

荒川 俊也, 川合 隆太, 大橋 健太, 小沢 昌弘, 酒井 悠介, 吉川 朋希: FAB 四駆のデザイン要件, 日本デザイン学会第 3 支部 H29 年度研究発表会 (2018.2.25).

柳田 順輝, 長井 優典, 荒川 俊也: 議論活性化フレームワークのデザイン, 日本デザイン学会第 3 支部 H29 年度研究発表会 (2018.2.25).

高橋 亮: 電力パケット化装置開発, 京都大学 学際融合教育研究推進センター スマートエネルギーマネジメント研究ユニット第 2 回 スマートエネルギーマネジメントシンポジウム, 京都大学時計台記念館 (2018. 3).

館山 武史, 成田 浩久, 永野 佳孝, 高橋 諒士, 山磨 誠治, 藤本 英雄: 深層学習による画像認識を用いた自動製品検査システム, 電気学会研究会資料, ST 2018(9-14・16-18), pp.45-48 (2018.3).

館山 武史, 鈴木 星斗: 探索エージェントを導入した経験共有マルチエージェント強化学習の大規模環境への適用可能性の検討, 計測自動制御学会第 45 回知能システムシンポジウム資料, CD-ROM (2018.3).

館山 武史: 実社会システムの高度な AI 化を目指した機械学習技術の応用に関する研究 (第 2 報), 電気学会研究会資料, ST 2018(19-28), pp.1-4 (2018.6).

館山武史: 探索の役割分担の概念を導入した経験共有マルチエージェント強化学習システム, 平成 30 年電気学会電子・情報・システム部門大会, CD-ROM (2018.9).

館山 武史, 成田 浩久, 永野 佳孝, 高橋 諒士, 藤本 英雄: 深層学習による画像認識を用いた自動製品検査システム (第 2 報), システム研究会 インテリジェント・システム (FAN2018) 電気学会研究会資料, ST 2018(85-102・104-118), pp.47-51 (2018.9).

館山 武史: 学習経験共有型マルチエージェント強化学習の探索戦略に関する一提案, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2018(SSI2018) 講演論文集, 電子ファイル配布 (2018.11).

館山 武史: 役割分担を考慮して組織学習を行う経験共有マルチエージェント強化学習システム, ST 2018(151-155), CT 2018(116-120), in-printing (2018.12).

広中 孝英, 永野 佳孝, 宮地 茂, 川口 礼雄, 松尾 直樹: 脳血管内治療用ロボットに求められるシステムデザインとプロトタイプの開発. 日本デザイン学会第 3 支部研究発表会, N-1 (2018.3)

A. Hashizume, Y. Hijikata, S. Yamada, T. Inagaki, D. Ito, Y. Nagano, H. Fujimoto, M. Katsuno: Quantitative analysis of ataxia using a novel evaluation device in the patients with SCD, 第 59 回日本神経学会学術集会, Pe-007-2 (2018.3).

永野 佳孝, 杉森 順子: 映像制作者のためのプロジェクトマッピングシステムの開発, 日本デザイン学会第 65 回春季研究発表大会, B2-04, pp.60-61 (2018.6)

永野 佳孝, 杉森 順子: プロジェクトマッピングのためのマスクと曲面形状の簡便な計測および FPGA によるリアルタイム補正, 2018 年映像情報メディア学会年次大会, 32E-1 (2018.8)

永野 佳孝, 藤本 英雄: 提示デバイスを用いた人から人への情報伝達手法の提案, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会 (2018.9)

永野 佳孝, 藤本 英雄, 橋詰 淳, 勝野 雅史: レゴブロックと力覚デバイスを用いた小脳失調症患者の失調測定システムの開発, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 2P1-17 (2018.9)

広中 孝英, 永野 佳孝, 宮地 茂, 川口 礼雄, 松尾 直樹: 脳血管内治療用遠隔操作ロボットの開発 (第 3 報), 日本コンピュータ外科学会誌 (第 27 回日本コンピュータ外科学会大会特集号), Vol.20, No.4, pp.235 (2018.11)

永野 佳孝, 藤本 英雄: アクチュエータを用いた提示デバイスによる人から人への情報伝達手法の提案, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演

会, 2A3-10 (2018.12)

永野 佳孝, 渡邊 卓磨, 宮地 茂, 泉 孝嗣: 実像模範を用いるカテーテルシェイピング手法の提案, 第 19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3D4-14 (2018.12)

秋山 実穂, 斎藤 卓也: 種子島ロケットコンテスト 2018 でゼロメートルゴールを達成した CanSat のログデータの分析, 情報処理学会第 48 回組込みシステム研究発表会, 論文番号 8, 東海大学 (2018.6).

斎藤 卓也, 秋山 実穂: 小型自律移動ロボットの設計と ARLISS2017 による実証評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会' 18 講演論文集, 2A2-C07, 北九州国際コンベンションゾーン (2018.6).

秋山 実穂, 斎藤 卓也: 惑星探査ローバの ARLISS2017 における動作ログの分析, 電子情報通信学会総合大会 2018, B-2-19 (2018.3).

山川 啓介, 斎藤 卓也: 躓き防止手法に関する研究, 日本デザイン学会第 3 支部平成 29 年度研究発表会概要集, P-13 (2018.2).

福地 湧生, 斎藤 卓也: 人とコミュニケーション可能なドール型ロボットの研究, 日本デザイン学会第 3 支部平成 29 年度研究発表会概要集, P-12 (2018.2).

田中 敬也, 斎藤 卓也: 視覚障がい者向け対人回避デバイスの研究開発, 日本デザイン学会第 3 支部平成 29 年度研究発表会概要集, P-11 (2018.2).

中神 真人, 斎藤 卓也: 高い音が聞こえない老人向けの会話聞き取り向上手法に関する研究, 日本デザイン学会第 3 支部平成 29 年度研究発表会概要集, P-10 (2018.2).

山川 啓介, 斎藤 卓也: 躓き防止手法に関する研究, 日本デザイン学会第 3 支部平成 29 年度研究発表会概要集(口頭発表), S-6 (2018.2).

秋山 実穂, 斎藤 卓也: チーム SuperNOVA ローバ技術紹介, 種子島ロケットコンテスト技術発表会, 鹿児島県南種子町 (2018.3).

Miho Akiyama and Takuya Saito: Technical Introduction about Team SuperNOVA, ARLISS 2018 Technical Exchange Meeting, Nevada USA (2018.9.9).

Miho Akiyama and Takuya Saito: Result Report about Team SuperNOVA, ARLISS 2018 Breakfast Meeting, Nevada USA (2018.9.14).

山本 雅也, 平田 豊: 眼球運動を指標としたドライバ状態検知技術の実用化, 第 13 回 空間認知と運動制御研究会 学術集会 (旧 JAXA ワーキンググループ), 2018 年 03 月 02 日

名和 靖彦: 工学基礎実験 2 の取り組み, 第 65 回応用物

理学会春季学術講演会, 18a-P1-14 (2018.3).

大嶽 昌弘, 伊藤 翔平, 砂田 拓大, 大日方 五郎, 長谷 和徳, 裴 艶玲: 走り幅跳び用義足のシミュレーションを用いた統合的設計, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 愛知県春日井市, (2018.9).

圓藤 博明, 伊藤 寛之, 松本 航輔, 裴 艶玲, 大西 正敏, 大日方 五郎: リハビリテーションのための両側性転移に関する研究, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 愛知県春日井市, (2018) .

裴 艶玲, 水谷 将明, 大日方 五郎, イ・ジェリョン: 劣駆動ロボットハンド設計のための手の運動解析, 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 愛知県春日井市, (2018.9).

宮田 一広, 大西 正敏, 西尾 正則: 超小型衛星 AUTcube2 に搭載する光通信用 LED の設計と評価, 平成 30 年度日本設計工学会東海支部研究発表講演会論文集, pp.61-62 (2018.3)

加賀 翔太郎, 大西 正敏: 鼻部皮膚温度測定によるストレス検知システムの設計開発, 平成 30 年度日本設計工学会東海支部研究発表講演会論文集, pp.63-64 (2018.3)

遠藤 祐生, 大西 正敏: サイズ可変型小児用筋電位義手の設計開発, 平成 30 年度日本設計工学会東海支部研究発表講演会論文集, pp.74-76 (2018.3)

宇野 新太郎: 920MHz を用いた交差点安全支援システムの小型化並びに実証実験, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-15-1 (2018.9)

宮嶋 博, 布目 貴大, 實廣 貴敏, 武田 一哉: Deep Belief Network を用いた単一マイクロホンによる発話者までの距離推定, 日本音響学会 2018 年春季研究発表会講演論文集, 1-Q-1, pp. 61-62, (2018.3).

早川 元貴, 實廣 貴敏: 音声対話システムのための Kinect センサーによる人の接近検出, 第 17 回情報科学技術フォーラム FIT2018, 第 3 分冊, J-016, pp.249-250, (2018.9).

田川 和義: 遠隔協働型低侵襲手術訓練シミュレータの研究開発, 共同先端 ICT メディカル・ヘルスケア研究センター シンポジウム (2018.2.26).

米田 守重, 小畑 修二, 本橋 光也: 反強磁性層間結合を用いた 2 相フェリ磁性モデルによる交換バイアス効果のシミュレーション: 日本金属学会 2018 年春期 (第 162 回) 講演大会 (2018.3)

山本 怜央, 宮向井 剛, 田代 イサム, 那須田 陽平, 板宮 朋基: 低水位氾濫流の危険性を実感できる拡張現実スマートフォンアプリの開発, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 34D-4. (2018.9).

板宮 朋基, 片山 義英, 池田 直廉, 川端 信司, 梶本 宜永, 黒岩 敏彦: 仮想内視鏡視野をスマートグラスに表示でき

る神経内視鏡手術教育システムの開発, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, pp. 11E-1. (2018.9).

板宮 朋基, 吉村 達之: 浸水の危険性を「わがこと」として実感できる拡張現実スマートフォンアプリの開発と避難訓練における活用, 日本災害情報学会第20回学会大会, pp.68-69, (2018.10).

片山 義英, 池田 直廉, 川端 信司, 藤城 高広, 古瀬 元雅, 田村 陽史, 板宮 朋基, 黒岩敏彦: ヘッドマウントディスプレイを用いた三次元 augmented reality 型仮想神経内視鏡シミュレーションモデルの開発, 日本脳神経外科学会第77回学術総会, pp.478, (2018.11).

板宮 朋基: VR 仮想現実 /AR 拡張現実の顎顔面領域医療への応用, 神奈川歯科大学学会平成30年度第10回研究談話会, (2018.11).

板宮 朋基: AR/VR の最新の技術動向と臨床応用の Tips & Pitfalls, 第28回日本シミュレーション外科学会, 日本シミュレーション外科学会会誌, Vol.26, No.2, pp.102, (2018.11).

板宮 朋基: 防災・医療へのVR/AR 応用, 超教育協会第1回VRワーキンググループ, (2018.12).

H.Tohara, T.Itamiya: The immersive disaster experience AR smartphone-application “Disaster Scope”, The 16th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry (VRCAI2018), pp.62,

(2018.12).

板宮 朋基: スマートグラスの臨床応用における課題と今後の可能性, 第3回日本顎顔面再建先進デジタルテクノロジー学会学術講演会, 印刷中, (2018.12).

米田 守重, 小畑 修二: 逆位相境界欠陥による2相フェリ磁性体モデル: 日本物理学会 第73回年次大会(2018.3)

江口 朗子, 田村 祐: タスク達成度に焦点をあてた絵描写タスクのスピーキング評価の試み, 外国語教育メディア学会 第90回秋季中部支部研究大会 (2018.1).

江口 朗子: 英文多読における読書語数と英語力向上との関連性, 第48回中部地区英語教育学会静岡大会 (2018.6).

江口 朗子: 英語授業におけるタスク・ベースの活動と発話のわかりやすさ, 外国語教育メディア学会 第92回秋季中部支部研究大会 (2018.12).

森 唯人, 山田 展資, 中島 公平, 吉田 昌央: 強制対流下での切欠きフィン付き空冷シリンダの冷却改善, 日本設計工学会 東海支部平成29年度研究発表講演会講演論文集, pp.11-14 (2018.3).

小野 秀文, 吉田 昌央, 鈴木 規文, 平野 博敏: プレロード用教材を用いた学生の主体性を引き出す実習の試み, 全国自動車短期大学協会 自動車整備技術に関する研究報告誌 第47号, pp.17-20 (2018.12).

4. 特 許

阿部 己和, 梶谷 満信: EPS用制御装置, 特願2018-036899

山本 雅也, 平田 豊, 中村 祥悟, 鈴木 栄二: 撮像装置,

出願済み, 詳細情報は公開まで非公開の方針

山本 雅也, 平田 豊, 中村 祥悟: 撮像装置, 出願済み, 詳細情報は公開まで非公開の方針

5. 解説・総説

荒川 俊也: ビジネスモデル構築に向けて生体計測技術はどうあるべきか?, 研究開発リーダー, 2018年3月号, pp.35-38 (2018).

板宮 朋基: バーチャル・リアリティを活用した災害想定没入体験によるレジリエンス教育. 内閣官房 国土強靱化 民間の取組事例, 353, (2018.5).

板宮 朋基: AR 災害疑似体験アプリ, 日本災害情報学会論文誌 災害情報, No.16-2, pp.149-152, (2018.7).

板宮 朋基: スマートグラスを用いた複合現実感の手術ナビゲーションへの応用, 日本口腔外科学会雑誌, 第64巻, 第62回日本口腔外科学会学術大会総説論文 (印刷中).

6. その他

<招待講演>

荒川 俊也:動物行動推定に向けた機械学習の応用事例, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018 年秋季研究会シンポジウム「社会に浸透・拡大する AI と OR」(2018.9.5)

荒川 俊也:自動運転への依存とシステム破綻後に関する Human Factors - 光技術の一活用事例 -, 日本応用科学学会シンポジウム (2018.7.9)

<セミナー講師>

荒川 俊也:ドライバ状態モニタリング/センシング技術と統計処理・機械学習の活用, 株式会社トリケップス技術セミナー (2018.11.20)

荒川 俊也:ドライバ状態のモニタリング技術と自動運転レベル 3 に向けた課題, 株式会社技術情報協会技術セミナー (2018.10.30)

荒川 俊也:自動運転システムにおける依存とシステム破綻時のドライバ状態, 株式会社技術情報協会技術セミナー (2018.8.28)

荒川 俊也:検定手法の考え方と使い方【Excel 実習セミナー】, 株式会社情報機構技術セミナー (2018. 7.23)

荒川 俊也:主成分分析と因子分析の基本と実践的解析テクニック, 株式会社テックデザイン技術セミナー (2018. 7. 2)

梶谷 満信:モータ制御設計の基礎と「実践およびそのポイント」, 株式会社日本テクノセンター技術セミナー (2018.5.15)

荒川 俊也:“生体測定”の活用事例と長短所および測定・解析のポイント, 株式会社テックデザイン技術セミナー (2018. 2.20)

大西 正敏:機械製図講習会, 日本設計工学会東海支部主催講習会 (2018.6)

大西 正敏:幾何公差講習会, 日本設計工学会東海支部主催講習会 (2018.8)

小塚 一宏:NHKDVD 教材「スマホと健康—危険がいっぱい! 歩きスマホ」, NHK エンタープライズ制作 (2018.12)

小塚 一宏, 尾林 史章:交通安全教室: “ながらスマホ”の危険性に関する講演と視線計測体験, 名古屋市立桜台高等学校 (2018.5)

小塚 一宏:運転中および歩行中の“ながらスマホ”の危険性, 平成 30 年度名古屋市千種区交通安全区民総決起大会での講演 (2018.9)

小塚 一宏:運転中および歩行中の“ながらスマホ”の危険性, 平成 30 年度石川県交通安全県民大会での講演

(2018.10)

宇野 新太郎:静岡地域における交通安全支援システムの実証実験—920MHz を用いた交差点安全支援システム—, 東海総合通信局主催情報通信セミナー 2018 (2018.5)

田川 和義:バーチャルリアリティを応用した手術訓練システムの開発, がまごおり産学官ネットワーク会議 講演会 (2018.1.25).

栗木 諒, 田川 和義, 田中 弘美, 小森 優:電気学会 電子・情報・システム部門 技術委員会奨励賞 (力覚提示のためのマルチレート・オンラインリメッシュ型有限要素変形シミュレーション), 電気学会 電子・情報・システム部門 知覚情報技術委員会 (2018.2.2).

田川 和義:VR(Virtual Reality) の概要, 豊橋工業高等学校特別講座 (2018.3.8-9).

田川 和義:VR と IoT の医療応用: いつでもどこでも訓練が可能な手術シミュレータの開発, 東三河産学官交流サロン (2018.7.18).

橋本 孝明, 長谷川 康和:幸田町理科教室 (飛行機の飛ぶ原理), 幸田町立図書館 (2018.7.28).

< 報告会 >

山本 雅也:愛知県主催による「知の拠点愛知重点研究プロジェクト (II 期)」公開セミナーの次世代ロボット社会形成技術開発プロジェクト (プロジェクト R) において研究成果を報告 (2018.3.13)

山本 雅也:中部大学にて公開シンポジウム (眼球運動に関する研究会) の開催, 事務局と司会を担当, (2018.3.16)

< 作品出展など >

梶谷 満信:ベーン型ロータリエンジン出展, ものづくり博 2018 in 東三河

秋山 実穂, 斎藤 卓也: Team SuperNOVA (ゴール画像認識 Version), 種子島ロケットコンテスト 2018 CanSat 部門 Comeback Competition 出場, 優勝 (ゴールまでの距離 0m), 鹿児島県南種子町 (2018.3.10).

秋山 実穂, 斎藤 卓也: Team SuperNOVA (ディープラーニングゴール認識 Version), 能代宇宙イベント 2018 UN-ISEC 缶サット競技出場, 4 位, 秋田県能代市 (2018.8.15-20).

Miho Akiyama and Takuya Saito: Team SuperNOVA (Deep Learning Goal Recognition Version), ARLISS 2018 Comeback Competition, Retire, Nevada USA (2018.9.9-14).

山本 雅也:日本最大級の異業種交流展示会メッセナゴヤ 2018 名古屋へ研究成果を出展, 2018 年 11 月 07 日～

2018年11月10日

加藤 高明, 一井 陸人, 東恩納 格: プロジェクションマッピングで色覚体験「光が違くと風景はどう変わる?」, カラーバリアフリーイベント「色いろ FULL FULL」大阪市みのお市民活動センター (2018.3.25)

加藤 高明, 大倉 光貴: 笠寺街屋へビデオマッピング「こんなことしてます! 夏祭り」, 名古屋市笠寺観音商店街納涼夏祭り 名古屋南区 (2018.8.8-9)

加藤 高明, 一井 陸人: プロジェクションマッピングで色覚体験「けんちゃんが見る風景は?」, カラーバリアフリーイベント「色いろ IN TOKYO」東京すみだ産業会館 (2018.8.18)

加藤 高明: 映像を活用した NPO との連携実践紹介, サイエンスアゴラ 2018 大阪 NPO センターブース 東京テレコムセンター (2018.11.10)

板宮 朋基: VR 津波体験ドライビングシミュレーター (以下 VR), AR 災害疑似体験アプリ Disaster Scope (以下 AR)

- ・愛知県立蒲郡高校 AR (2018.1.11)
- ・蒲郡市防災講演会 AR (2018.1.27)
- ・掛川市立原野谷中学校 (2018.1.30)
- ・東京都三鷹市立第七小学校 AR (2018.2.20)
- ・東京都町田市立木曽境川小学校 AR (2018.3.2)
- ・東邦ガスエネルギー館 (東海市) AR (2018.3.11)
- ・神奈川県立川崎高校 (川崎市) AR (2018.3.13)
- ・でんきの科学館 (名古屋市) AR (2018.4.7)
- ・西尾市ハツ面ふれあいセンター AR (2018.4.8)

- ・摂南大学工学部 (寝屋川市) AR (2018.4.12)
- ・防災科学技術研究所一般公開(つくば市) VR (2018.4.22)
- ・トヨタ労働組合カバハウス (豊田市) AR/VR (2018.5.13)
- ・菊川市防災イベント AR (2018.5.20)
- ・茅ヶ崎市防災講演会 AR (2018.5.23)
- ・NTT グループ防災訓練 (弥富市) AR/VR (2018.6.9)
- ・豊橋市芦原校区防災訓練 AR (2018.6.10)
- ・ものづくり博 in 東三河 (豊橋市) AR (2018.6.15-16)
- ・土木学会海洋開発シンポジウム (金沢市) AR (2018.7.6)
- ・中部地方整備局防災フェア in 桑名 AR (2018.7.14 -15)
- ・名古屋市港防災センター AR (2018.7.22)
- ・千葉県立東金特別支援学校 AR (2018.7.28)
- ・トヨタ労働組合カバハウス (豊田市) AR (2018.7.29)
- ・幸田町教育委員会教員研究会 (幸田町) AR (2018.8.1)
- ・VR クリエイティブアワード 2018 (東京都) AR (2018.8.25)
- ・第 2 回防災・減災メッセ (淡路市) AR (2018.8.25)
- ・土浦市立真鍋小学校 AR (2018.9.7)
- ・蒲郡市立東部小学校 AR (2018.9.8)
- ・日本バーチャルリアリティ学会大会 (仙台市) AR (2018.9.19-21)
- ・蒲郡市立中部中学校 AR (2018.10.19)
- ・矢野建設まつり (名古屋市) AR/VR (2018.10.20-21)
- ・愛知県西三河県民事務所研修会 (蒲郡市) AR/VR (2018.10.31)
- ・JA あいち海部フェスタ (弥富市) AR (2018.11.3-4)
- ・千葉県立東金特別支援学校 AR (2018.11.6-8)
- ・東京大学大学院情報学環「災害情報論 II」AR (2018.11.12)
- ・千葉県立矢切特別支援学校 (松戸市) AR (2018.11.29)
- ・愛知県立名古屋西高校 (名古屋市) AR (2018.12.6)
- ・名古屋市天白消防署 (名古屋市) AR (2018.12.8)

愛知工科大学紀要規程

平成15年4月1日制定

(趣 旨)

第1条 この規程は、愛知工科大学、(以下「本学」という。)が発行する紀要に関し、必要な事項を定める。

(目 的)

第2条 愛知工科大学及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する。

(名称種類)

第3条 紀要の名称は、「愛知工科大学紀要」(Journal of the Aichi University of Technology)(以下「紀要」という。)とする。

(委員会)

第4条 紀要に関する事項を審議するため、紀要編集委員会(以下「委員会」という。)を置く。

2. 委員会について必要な事項は、別に定める。

(発 行)

第5条 紀要は、原則として、毎年3月に発行するものとする。

2. 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。

(区 分)

第6条 紀要は、論文・研究ノート、翻訳・書評・資料等とする。

(投稿資格)

第7条 紀要に投稿できる者は、次の各号に掲げる者とする。

- 一 専任教員
- 二 名誉教授
- 三 非常勤教員
- 四 その他本学教授会で認められた者

(投 稿)

第8条 投稿する原稿は、委員会に提出するものとする。

2. 投稿された原稿は、委員会で審査し、その選択及び採否を決定する。

3. 研究論文については、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。

4. 研究論文以外の投稿は、1項の審査をするに当たり、編集委員以外の研究者の意見等を聴くことができる。

5. 執筆及び投稿手続きに関する事項は、本学の紀要投稿細則で定める

(著作権)

第9条 紀要に掲載された論文等の著作権は、本学及び執筆者が有する。

(公 開)

第10条 紀要に掲載された論文等は、電子的に保存し、原則として学内外に公開するものとする。

(改 正)

第11条 この規程の改廃は、編集委員会の議を経て、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。

附 則 この規程は、平成23年4月1日から施行する。

愛知工科大学紀要投稿細則

平成15年4月1日制定

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・研究ノート翻訳・書評・資料等とする。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(L)10頁以内とする。
3. 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、横書きとする。日本籍の場合、現代かな遣いで、ひらがなと当用漢字による口語体を原則とする。ただし、固有名詞および専門用語の表記についてはこの限りではない。
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。数字とアルファベットは1マスに2字を入れる。句読点、引用符、その他の記号はすべて1マスに1つつ入れる。
3. 太文字(ゴシック体)は、赤の波形下線、イタリック体は赤の下線をつける。
4. 図は、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。表は原則としてコンピュータでプリントアウトしたものを用いる。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。
5. 原稿の右、左、上、下欄外に図、表、写真を入れる位置を指定し、明示する。
6. 和文原稿の場合は欧文表題が必要。ただし、欧文原稿の場合には和文表題は不要である。氏名にはローマ字書き(任意の表記法による)を添える。
7. 引用文献、註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末尾あるいは註を入れるべき場所に1)、2)等の番号を記入する。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。ただし、それぞれの学会等による表記を妨げないものとする。
8. 論文には英語のabstractをつけるものとする。
9. 愛知工科大学紀要執筆の葉を参考にして執筆するものとする。

IV. 投稿原稿の受付

1. 投稿原稿は、必要事項を記入した所定の申し込み用紙を添えて愛知工科大学紀要編集委員会(以下「編集委員会」という。)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。

Text Compression for English, Japanese and Chinese by Grammar Based Compression
..... Shigeru Yoshida and Katsutake Ashida 45

Development of Solar Senior Car with Automatic Brake
Hirokazu Suzuki, Mamoru Nakashima, Hideo Nagata, Masayuki Iwase, Kazuki Koumura and Hidehumi Ono 53

Note

A New Method of Calculation of Probability Density Function for Random Variable in Mathematical Statistics
..... Yoshinori Takahashi 59

Basic of Practical Statistical Analysis on Engineering
..... Toshiya Arakawa 75

List of Publications during 2018.1 - 2018.12

愛知工科大学紀要 第16巻 平成31年3月25日

編集委員会

委員長 吉田 茂
委員 荒川俊也 高橋 亮
服部幸廣

(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.16, 2018

CONTENTS

Papers

Explanation of Automobile Wind Tunnel and Introduction of Newly Established Automobile Aerodynamics Measurement Equipment	Yuji Ishihara 1
Analysis of Two-Dimensional Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Orthotropic Strip	Manabu Ohmichi 7
Analysis of Planet Exploration Rover's Design and Operation Log in ARLISS 2017	Takuya Saito and Miho Akiyama 17
Experimental Verification of Influences and Risks of "Texting While Driving"	Fumiaki Obayashi, Toshiya Arakawa and Kazuhiro Kozuka 27
Gaze Characteristics of a Pedestrian Texting while Walking on the Platform	Fumiaki Obayashi, Toshiya Arakawa and Kazuhiro Kozuka 35
Estimation of the Distance to Speaker by Deep Belief Network from Input Speech of Single Microphone	Takatoshi Jitsuhiro, Hiroshi Miyajima, Takahiro Nunome and Kazuya Takeda 39

(continued)

*Published by
Aichi University of Technology
50-2 Manori Nishihasama-cho Gamagori
Aichi 443-0047, JAPAN*