ISSN 1349-8800

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12卷



AICHI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

2014

愛知工科大学紀要 第12巻 目 次

研究論文

Steady Thermal Stresses in a Functionally Graded Cylinder with an Eccentric Hole Manabu Ohmichi ······· 1 多孔体金属表面に置かれた氷の融解現象 CSV ファイルと連携して簡便に XML データ処理を行うライブラリ・ソフトウェアの検討(その3) - 階層付 XML 文書の単階層 XML 文書への変換------- 吉田 茂 ----- 17 カプセル内視鏡ロボットの駆動システムの開発 研究ノート 愛知工科大学におけるユニバーサルデザイン推進プロジェクト - 案内表示板のユニバーサルデザイン化に向けて -宇宙エレベーターのケーブルの力学的考察 どうして5次方程式は解けないのか? -ガロア理論と3次方程式が解けるからくり--------石川雄二郎 ----- 47 商店街活性化へのデジタルコンテンツの活用 学内風力エネルギーの一測定

------ 橋本孝明, 長谷川康和 ----- 65

エッセイ

家康と蒲郡の関わり

------ 橋本孝明 ----- 69

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 (2014.1-2014.12)

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

Steady Thermal Stresses in a Functionally Graded Cylinder with an Eccentric Hole

Manabu Ohmichi*

(Received September 30, 2014)

Abstract

Steady thermal stresses in a functionally graded cylinder with an eccentric hole are investigated by using the stress function. Two cylindrical coordinates (R, ϕ) and (r, θ) are used to formulate the basic equations in terms of a stress function. The thermal conductivity k, the Young's modulus E, and the coefficient of linear thermal expansion α are expressed by the power law of the radius of the outer circle. The unknown coefficients in the stress function are determined by using both the boundary conditions and the conditions of single-valuedness of rotation and displacements for non-homogeneous materials. The outer boundary conditions are satisfied strictly, whereas the boundary conditions of the eccentric hole are satisfied numerically using the point-matching method. The numerical calculations were performed for $ZrO_2/Ti-6Al-4V$ functionally graded materials.

Keywords : Conditions of single-valuedness, Non-homogeneous materials, Functionally graded materials (FGMs), Stress function method, Steady thermal stresses

1. Introduction

Functionally graded materials (FGMs) have the remarkable characteristics of thermal insulation and mechanical toughness at high-temperature. They are realized by varying the composites from metal to ceramics continuously. Many kinds of thermal stresses problems for FGMs have been studied by many investigators. Noda¹⁾ presented the first overview of FGMs taking into consideration the effects of temperature dependency of the material properties on thermal stresses and clarified the crack patterns of the edge crack and parallel crack in a semi-infinite body. Encyclopedia of thermal stresses edited by Hetnarski²⁾ contains many entries in the recent works for FGMs. In order to investigate the direction of maximum stress around the inclusions or arbitrary shaped holes, it is necessary to treat the models with oblique boundaries to the functional graduation. Ohmichi and Noda³⁾ analyzed two-dimensional heat conduction problem in a functionally graded material plate (FGMP) and presented the effects of oblique angles of thermal stresses in FGMs using Fourier series. After the research of temperature, Ohmichi

and Noda⁴⁾ investigated thermal stresses in the semi-infinite body by using stress function and clarified the effects of oblique angles in semi-infinite body. Ohmichi and Noda⁵⁾ also reported the effects of oblique angles for the plate subjected to thermal load by using stress function. Batra and Nie⁶⁾ analyzed the deformations of functionally graded eccentric and non-axisymmetrically loaded circular cylinders subjected to mechanical pressure. Batra and Nie⁷⁾ also investigated the stresses in a functionally graded hollow circular cylinder with elliptic inner surface subjected to mechanical load. Nie and Batra⁸⁾ employed the Airy stress function to derive analytical solutions for plane strain static deformations of a functionally graded hollow circular cylinder assuming the Young's modulus *E* and the Poison's ratio *v* are the functions of radius *r*.

When thermal stress problems in the multi-connected body of FGMs are discussed, the conditions of single-valuedness of rotation and displacements should be considered. Ohmichi and Noda⁹⁾ have discussed the conditions of single-valuedness of rotation and displacements for thermal stress problems in the multi-connected body of FGMs.

 ^{*} Department of Mechanical Systems Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan

In this contribution, the steady thermal stresses in a hollow cylinder with an eccentric hole using stress function are analyzed. The effects of the offset e^* , the thermal conductivity k, the coefficient of linear thermal expansion α , the Young's modulus E, and the inner radius a^* on thermal stresses were clarified.

2. Steady temperature for non-homogeneous materials

Consider a functionally graded cylinder with an eccentric hole shown in **Fig.1**. Two polar coordinate systems (R, ϕ) and (r, θ) are used to express the outer and eccentric inner circles. The corresponding origins are *O* and *O*', radii of them are *b* and *a*, respectively and the offset of two circles is *e*.



Fig.1 A functionally graded cylinder with an eccentric hole

The equation of two-dimensional transient heat conduction for non-homogeneous materials in the coordinate system (R, ϕ) is

$$c(R,\phi)\rho(R,\phi)\frac{\partial T}{\partial t} = k(R,\phi)\nabla^2 T + \frac{\partial k(R,\phi)}{\partial R}\frac{\partial T}{\partial R} + \frac{1}{R^2}\frac{\partial k(R,\phi)}{\partial \phi}\frac{\partial T}{\partial \phi} + W$$
(1)

where *T* is the temperature at time *t*, ρ is the density, *c* is the specific heat, and *k* is thermal conductivity and *W* is the rate of internal heat generation per unit time per unit volume. These material properties depend on the position (*R*, ϕ), and the Laplacian is given by

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R} + \frac{1}{R^2}\frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$$
(2)

When the thermal conductivity k in Eq. (1) is solely a function

of R under steady-state conditions without internal heat generation, Eq. (1) reduces to

$$\nabla^2 T + \frac{1}{k} \frac{dk(R)}{dR} \frac{\partial T}{\partial R} = 0$$
(3)

Here, assume that the thermal conductivity is expressed by the equation

$$k(R) = k_0 R^m \tag{4}$$

where *m* is the constant determined as follows. As shown in **Fig.1**, the thermal conductivity at R = b on the outer boundary is that of ceramics and the thermal conductivity at r = a and $\theta = 0^{\circ}$ on the inner boundary is that of metal:

$$k = k_m = k_0 (a - e)^m \quad (for \quad metal \),$$

$$k = k_c = k_0 b^m \quad (for \quad ceramics \) \quad (5)$$

Here, the condition e + a < b must be satisfied.

The constant m is obtained by eliminating k_0 in Eqs. (5),

$$m = \frac{\ln(k_m/k_c)}{\ln[(a-e)/b]} \tag{6}$$

Differentiating Eq. (4) with respect to R yields

$$\frac{1}{k}\frac{dk}{dR} = \frac{k_0 m R^{m-1}}{k_0 R^m} = \frac{m}{R}$$
(7)

Then, Eq. (3) becomes

$$\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{m+1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = 0$$
(8)

The general solutions of Eq. (8) are

$$T^{*}(R^{*},\phi) = A_{0} + B_{0} \ln R^{*} + \sum_{n=1}^{\infty} [(A_{n}R^{*n} + B_{n}R^{*-n})\cos n\phi + (A_{n}'R^{*n} + B_{n}'R^{*-n})\sin n\phi] \quad (for \ m = 0)$$
$$T^{*}(R^{*},\phi) = C_{m0}R^{*-m} + D_{m0} + \sum_{n=1}^{\infty} [(C_{mn}R^{*\lambda_{1mn}} + D_{mn}R^{*\lambda_{2mn}})\cos n\phi + (C_{mn}'R^{*\lambda_{1mn}} + D_{mn}'R^{*\lambda_{2mn}})\sin n\phi] \quad (for \ m \neq 0)$$
(9)

where A_0 , B_0 , A_n , B_n , A'_n , B'_n , C_{m0} , D_{m0} , C_{mn} , D_{mn} , C'_{mn} , and D'_{mn} are unknown constants, n is an integer, m is given by Eq. (6), and λ_{1mn} and λ_{2mn} are characteristic roots expressed as follows

$$\lambda_{1mn} = -\frac{m}{2} + \sqrt{\frac{m^2}{4} + n^2}, \ \lambda_{2mn} = -\frac{m}{2} - \sqrt{\frac{m^2}{4} + n^2}$$
(10)

Furthermore, R^* and T^* are the non-dimensional radius and non-dimensional temperature change, respectively:

$$R^* = \frac{R}{b}, \ T^* = \frac{T}{T_0}$$
(11)

where T_0 is the reference temperature.

The boundary conditions for the non-dimensional temperatures on the outer and inner surface are given as follows.

$$T^*(R^*,\phi) = 1 \quad on \quad R^* = 1$$
 (12)

$$T^*(r^*, \theta) = 0 \text{ on } r^* = a^*$$
 (13)

where

$$r^* = \frac{r}{b}, \ a^* = \frac{a}{b}$$
 (14)

Substituting Eqs. (9) in (12) yields:

$$A_{0} + \sum_{n=1}^{\infty} [(A_{n} + B_{n})\cos n\phi + (A'_{n} + B'_{n})\sin n\phi] = 1 \quad (for \ m = 0)$$
$$C_{m0} + D_{m0} + \sum_{n=1}^{\infty} [(C_{mn} + D_{mn})\cos n\phi + (C'_{mn} + D'_{mn})\sin n\phi] = 1 \quad (for \ m \neq 0) \quad (15)$$

which results in

$$A_{0} = 1, \quad B_{n} = -A_{n}, \quad B'_{n} = -A'_{n} \qquad (for \quad m = 0)$$
$$D_{m0} = 1 - C_{m0}, \quad D_{mn} = -C_{mn}, \quad D'_{mn} = -C'_{mn} \qquad (for \quad m \neq 0) \qquad (16)$$

Then, the temperature distributions given by Eqs. (9) reduce to

$$T^{*}(R^{*},\phi) = 1 + B_{0} \ln R^{*} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_{n}(R^{*n} - R^{*-n}) \cos n\phi + A_{n}'(R^{*n} - R^{*-n}) \sin n\phi] \quad (for \ m = 0)$$

$$T^{*}(R^{*},\phi) = 1 + C_{m0}(R^{*-m} - 1) + \sum_{n=1}^{\infty} [C_{mn}(R^{*\lambda_{1mn}} - R^{*\lambda_{2mn}}) \cos n\phi + C_{mn}'(R^{*\lambda_{1mn}} - R^{*\lambda_{2mn}}) \sin n\phi] \quad (for \ m \neq 0) \quad (17)$$

From the inner boundary condition Eq. (13) and Eqs. (17), we obtain

$$T^{*}(\rho^{*},\phi) = 1 + B_{0} \ln \rho^{*} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_{n}(\rho^{*n} - \rho^{*-n}) \cos n\phi + A_{n}'(\rho^{*n} - \rho^{*-n}) \sin n\phi] = 0 \quad (for \ m = 0)$$
$$T^{*}(\rho^{*},\phi) = 1 + C_{m0}(\rho^{*-m} - 1) + \sum_{n=1}^{\infty} [C_{mn}(\rho^{*\lambda_{mn}} - \rho^{*\lambda_{2mn}}) \cos n\phi + C_{mn}'(\rho^{*\lambda_{mn}} - \rho^{*\lambda_{2mn}}) \sin n\phi] = 0 \quad (for \ m \neq 0) \quad (18)$$

where

$$\rho^* = \sqrt{a^{*2} + e^{*2} - 2a^* e^* \cos\theta}$$
(19)

The remaining unknown coefficients, B_0 , A_n , A'_n , C_{m0} , C_{mn} , and C'_{mn} are determined numerically from the inner boundary condition Eq. (13) using the point matching method.

3. Thermal stresses for non-homogeneous materials

The equilibrium equations for plane problems without the

body force in the polar coordinate (R, ϕ) are given by

$$\frac{\partial \sigma_{RR}}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial \sigma_{\phi R}}{d\phi} + \frac{\sigma_{RR} - \sigma_{\phi \phi}}{R} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{R\phi}}{\partial R} + \frac{1}{R} \frac{\partial \sigma_{\phi \phi}}{d\phi} + 2 \frac{\sigma_{R\phi}}{R} = 0$$
(20)

The strains are related to the displacements by

$$\varepsilon_{RR} = \frac{\partial u_R}{\partial R}, \quad \varepsilon_{\phi\phi} = \frac{u_R}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_{\phi}}{\partial \phi}, \quad \varepsilon_{R\phi} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} \frac{\partial u_R}{\partial \phi} + \frac{\partial u_{\phi}}{\partial R} - \frac{u_{\phi}}{R} \right) \quad (21)$$

where u_R and u_{ϕ} denote the components of displacement. The compatibility equation in terms of strain components is

$$2\frac{\partial^2 (R\varepsilon_{R\phi})}{\partial R \partial \phi} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{RR}}{\partial \phi^2} + R\frac{\partial^2 (R\varepsilon_{\phi\phi})}{\partial R^2} - \frac{1}{R}\frac{\partial \varepsilon_{RR}}{\partial R}$$
(22)

The constitutive relations are

$$\varepsilon_{RR} = \frac{1}{E} (\sigma_{RR} - v\sigma_{\phi\phi}) + \alpha T, \ \varepsilon_{\phi\phi} = \frac{1}{E} (\sigma_{\phi\phi} - v\sigma_{RR}) + \alpha T, \ \varepsilon_{R\phi} = \frac{1 + v}{E} \sigma_{R\phi}$$
(23)

where *T* is the temperature change, *E* is the Young's modulus, α is the coefficient of linear thermal expansion, and *v* is the Poisson's ratio. The material properties (*E*, α , *v*) depend on the position (*R*, ϕ).

Furthermore, we introduce the stress function χ , which automatically satisfies the equilibrium equations (20)

$$\sigma_{RR} = \frac{1}{R} \frac{\partial \chi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \phi^2}, \ \sigma_{\phi\phi} = \frac{\partial^2 \chi}{\partial R^2}, \ \sigma_{R\phi} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial \chi}{\partial \phi} - \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \chi}{\partial R \partial \phi}$$
(24)

Substituting Eqs. (24) in Eqs. (23) yields components of strains expressed by the stress function.

$$\varepsilon_{RR} = \frac{1}{E} \left(-v \frac{\partial^2 \chi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \chi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \phi^2} \right) + \alpha T$$

$$\varepsilon_{\phi\phi} = \frac{1}{E} \left(\frac{\partial^2 \chi}{\partial R^2} - \frac{v}{R} \frac{\partial \chi}{\partial R} - \frac{v}{R^2} \frac{\partial^2 \chi}{\partial \phi^2} \right) + \alpha T$$

$$\varepsilon_{R\phi} = \frac{1+v}{E} \left(-\frac{1}{R} \frac{\partial^2 \chi}{\partial R \partial \phi} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial \chi}{\partial \phi} \right)$$
(25)

Substituting Eqs. (25) in Eq. (22) leads to the governing equation that must be satisfied by the stress function χ for non-homogeneous materials.

$$\frac{\partial^{4}\chi}{\partial R^{4}} + \frac{2}{R}\frac{\partial^{3}\chi}{\partial R^{3}} - \frac{1}{R^{2}}\frac{\partial^{2}\chi}{\partial R^{2}} + \frac{2}{R^{2}}\frac{\partial^{4}\chi}{\partial R^{2}} - \frac{2}{R^{3}}\frac{\partial^{3}\chi}{\partial R\partial \phi^{2}} + \frac{1}{R^{3}}\frac{\partial\chi}{\partial R} + \frac{1}{R^{4}}\frac{\partial^{4}\chi}{\partial \phi^{4}} + \frac{4}{R^{4}}\frac{\partial^{2}\chi}{\partial \phi^{2}}$$
$$-\frac{2}{E}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial^{3}\chi}{\partial R^{3}} - \frac{2}{ER^{2}}\frac{\partial E}{\partial \phi}\frac{\partial^{3}\chi}{\partial R^{2}\partial \phi} - \frac{2}{ER^{2}}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial^{3}\chi}{\partial R\partial \phi^{2}} + \left[-\frac{1}{E}\frac{\partial^{2}E}{\partial R^{2}} + \frac{\nu-2}{ER}\frac{\partial E}{\partial R} + \frac{2}{E^{2}}\left(\frac{\partial E}{\partial R}\right)^{2}\right]$$
$$-\frac{1}{R}\frac{\partial\nu}{\partial R} + \frac{\nu}{ER^{2}}\frac{\partial^{2}E}{\partial \phi^{2}} - \frac{2\nu}{E^{2}R^{2}}\left(\frac{\partial E}{\partial \phi}\right)^{2} + \frac{2}{ER^{2}}\frac{\partial E}{\partial \phi}\frac{\partial\nu}{\partial \phi} - \frac{1}{R^{2}}\frac{\partial^{2}\nu}{\partial \phi^{2}}\right]\frac{\partial^{2}\chi}{\partial R^{2}}$$
$$+ \left[\frac{4(1+\nu)}{E^{2}R^{2}}\frac{\partial E}{\partial R\partial \phi} - \frac{2(1+\nu)}{ER^{2}}\frac{\partial^{2}E}{\partial R\partial \phi} - \frac{2}{ER^{2}}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial\nu}{\partial \phi} + \frac{2\nu}{ER^{3}}\frac{\partial E}{\partial \phi}\frac{\partial\nu}{\partial \phi} - \frac{2}{R^{3}}\frac{\partial^{2}\nu}{\partial \phi}\frac{2}{R^{3}}\frac{\partial^{2}\chi}{\partial R\partial \phi}\right]\frac{\partial^{2}\chi}{\partial R\partial \phi}$$

$$+\left(\frac{v}{ER}\frac{\partial^{2}E}{\partial R^{2}}+\frac{2}{ER}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial v}{\partial R}+\frac{1}{ER^{2}}\frac{\partial E}{\partial R}-\frac{2v}{E^{2}R}\left(\frac{\partial E}{\partial R}\right)^{2}-\frac{1}{ER^{2}}\frac{\partial^{2}E}{\partial \phi^{2}}+\frac{2}{E^{2}R^{2}}\left(\frac{\partial E}{\partial \phi}\right)^{2}-\frac{1}{R}\frac{\partial^{2}V}{\partial R^{2}}\frac{\partial \chi}{\partial R}-\frac{2}{ER^{4}}\frac{\partial E}{\partial \phi}\frac{\partial \chi}{\partial \phi^{3}}$$

$$+\left[\frac{v}{ER^{2}}\frac{\partial^{2}E}{\partial R^{2}}-\frac{2v}{E^{2}R^{2}}\left(\frac{\partial E}{\partial R}\right)^{2}+\frac{3}{ER^{3}}\frac{\partial E}{\partial R}+\frac{2}{ER^{2}}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial v}{\partial R}-\frac{1}{ER^{4}}\frac{\partial^{2}E}{\partial \phi^{2}}+\frac{2}{E^{2}R^{4}}\left(\frac{\partial E}{\partial \phi}\right)^{2}-\frac{1}{R^{2}}\frac{\partial^{2}V}{\partial R^{2}}\frac{\partial^{2}V}{\partial \phi^{2}}$$

$$+2\left[\frac{1}{ER^{3}}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial v}{\partial \phi}-\frac{2(1+v)}{E^{2}R^{3}}\frac{\partial E}{\partial R}\frac{\partial E}{\partial \phi}+\frac{1+v}{ER^{3}}\frac{\partial^{2}E}{\partial R\partial \phi}+\frac{1}{ER^{3}}\frac{\partial E}{\partial \phi}\frac{1}{\partial R}-\frac{1+v}{ER^{4}}\frac{\partial E}{\partial \phi}-\frac{1}{R^{3}}\frac{\partial^{2}V}{\partial R\partial \phi}+\frac{1}{R^{4}}\frac{\partial v}{\partial \phi}\frac{\partial \chi}{\partial \phi}\right]$$

$$+\alpha E\left(\frac{\partial^{2}T}{\partial R^{2}}+\frac{1}{R^{2}}\frac{\partial T}{\partial \phi}+\frac{1}{R^{2}}\frac{\partial^{2}T}{\partial \phi^{2}}\right)+2E\frac{\partial \alpha}{\partial R}\frac{\partial T}{\partial R}+\frac{2E}{R^{2}}\frac{\partial \alpha}{\partial \phi}\frac{\partial T}{\partial \phi}+E\left(\frac{\partial^{3}\alpha}{\partial R^{2}}+\frac{1}{R}\frac{\partial \alpha}{\partial R}+\frac{1}{R^{2}}\frac{\partial^{2}\alpha}{\partial \phi^{2}}\right)T=0$$
(26)

The conditions of single-valuedness of rotation and displacements for non-homogeneous materials⁹⁾ are given by the followings.

$$\begin{split} & \Delta \omega_{xy} = \oint_{L} d\omega_{xy} \\ &= \oint_{L} \left[\frac{\partial^{3} \chi}{\partial R^{3}} + \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial R} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R^{2}} + \left(-\frac{1}{R^{2}} - \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R} \frac{\partial E}{\partial R} \right) \frac{\partial \chi}{\partial R} + \left(-\frac{2}{R^{3}} - \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial q} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial q^{2}} \\ &+ \left(\frac{1+v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial q} - \frac{1}{R^{3}} \frac{\partial v}{\partial q} \right) \frac{\partial \chi}{\partial q} + \left(-\frac{1+v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial q} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial v}{\partial q} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{3} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{3} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + E \frac{\partial}{\partial R} (\alpha T) \right] d\phi = 0 \quad (27) \\ & \Delta u_{x} = \oint_{L} du_{x} \\ &= \oint_{L} \left\{ \sin \phi \left[\frac{\partial^{3} \chi}{\partial R^{3}} - \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial R} \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{3} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + E \frac{\partial}{\partial R} (\alpha T) - \frac{\alpha ET}{R} \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{v-1}{R^{2}} - \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R} \frac{\partial E}{\partial R} \right) \frac{\partial \chi}{\partial R} + \left(\frac{1+v}{E} \frac{1}{R^{3}} \frac{\partial E}{\partial q} - \frac{1}{R^{3}} \frac{\partial v}{\partial q} \right) \frac{\partial \chi}{\partial q} + \left(\frac{v-2}{R^{2}} - \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial R} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial q^{2}} \\ &\quad + \left(-\frac{1+v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial q} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial v}{\partial q} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R \partial q} \right] + (1+v) \cos \left(\frac{1}{R^{3}} \frac{\partial \chi}{\partial q} - \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R \partial q} \right) \right] d\phi = 0 \quad (28) \\ & \Delta u_{y} = \oint_{L} du_{y} \\ &= \oint_{L} \left\{ \cos \phi \left[\frac{\partial^{3} \chi}{\partial R^{3}} - \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial R} \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{3} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + E \frac{\partial}{\partial R} (\alpha T) - \frac{\alpha ET}{R} \right) \\ &\quad + \left(\frac{v-1}{R^{2}} - \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial Q} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{3} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + E \frac{\partial}{\partial R} (\alpha T) - \frac{\alpha ET}{R} \right) \\ &\quad + \left(\frac{v-1}{R^{2}} - \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial R} \right) \frac{\partial^{2} \chi}{\partial R^{2}} + \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial^{3} \chi}{\partial R \partial q^{2}} + E \frac{\partial}{\partial R} (\alpha T) - \frac{\alpha ET}{R} \right) \\ &\quad + \left(\frac{v-1}{R^{2}} - \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial R} + \frac{v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial R} \right) \frac{\partial \chi}{\partial R^{2}} + \left(\frac{1+v}{E} \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial E}{\partial Q} - \frac{1}{R^{2}} \frac{\partial v}{\partial Q} \right) \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} \right) \\ &\quad + \left(-\frac{v-1}{R^{2}} - \frac{1}{R} \frac{\partial v}{\partial R}$$

where L is an arbitrary closed curve and ω is the component of rotation given by,

$$\omega_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} - \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$
(30)

 u_x and u_y are the components of displacements in the x and y directions, respectively.

We assume that the Young's modulus E, the coefficient of linear thermal expansion α , and the Poisson's ratio v are expressed by:

$$E = E_0 R^{\gamma}, \alpha = \alpha_0 R^{\delta}, \nu = \text{const.}$$
(31)

where E_0 , α_0 , γ , and δ are material constants. Similar to Eq. (6), γ and δ are given by

$$\gamma = \frac{\ln(E_m/E_c)}{\ln[(a-e)/b]}, \quad \delta = \frac{\ln(\alpha_m/\alpha_c)}{\ln[(a-e)/b]},$$
(32)

where E_m and E_c are the Young's moduli and α_m and α_c are the coefficients of linear thermal expansion of metal and ceramics, respectively. Substitution of Eq. (31) into Eq. (26) gives the governing equation expressed by the stress function χ^* :

$$\frac{\partial^{4}\chi^{*}}{\partial R^{*4}} + \frac{2(1-\gamma)}{R^{*}}\frac{\partial^{2}\chi^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{\gamma(\gamma+\nu-1)-1}{R^{*2}}\frac{\partial^{2}\chi^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{2}{R^{*2}}\frac{\partial^{4}\chi^{*}}{\partial R^{*2}\partial \phi^{2}} - \frac{2(\gamma+1)}{R^{*3}}\frac{\partial^{2}\chi^{*}}{\partial R^{*}\partial \phi^{2}} + \frac{(1-\nu\gamma)(\gamma+1)}{R^{*3}}\frac{\partial\chi^{*}}{\partial R^{*}} + \frac{3\gamma+4-\nu\gamma(\gamma+1)}{R^{*4}}\frac{\partial^{2}\chi^{*}}{\partial \phi^{2}} + \frac{1}{R^{*4}}\frac{\partial^{4}\chi^{*}}{\partial \phi^{4}} = -R^{*\gamma+\delta}(\frac{\partial^{2}T^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{2\delta+1}{R^{*}}\frac{\partial T^{*}}{\partial R^{*}} + \frac{1}{R^{*2}}\frac{\partial^{2}T^{*}}{\partial \phi^{2}} + \frac{\delta^{2}}{R^{*2}}T^{*})$$
(33)

where χ^* is the non-dimensional stress function defined as

$$\chi^* = \frac{\chi}{\alpha_0 E_0 b^{\gamma + \delta + 2} T_0}$$
(34)

The general solution of Eq. (33) is expressed as the sum of the complementary solution χ^*_{c} and the particular solution χ^*_{p}

$$\chi^* = \chi_c^* + \chi_p^* \tag{35}$$

The general form of χ^*_{c} is assumed to be

$$\chi_c^* = \sum_{n=0}^{\infty} g_n(R^*) (A_n \cos n\phi + B_n \sin n\phi)$$
(36)

Substituting Eq. (36) in the left-hand side of Eq. (33) yields

$$\frac{d^{4}g_{n}}{dR^{*4}} + \frac{2(1-\gamma)}{R^{*}}\frac{d^{3}g_{n}}{dR^{*3}} + \frac{\gamma(\gamma+\nu-1)-1-2n^{2}}{R^{*2}}\frac{d^{2}g_{n}}{dR^{*2}} + \frac{(\gamma+1)(1-\nu\gamma+2n^{2})}{R^{*3}}\frac{dg_{n}}{dR^{*}} + \frac{[(\nu\gamma-3)(\gamma+1)-1+n^{2}]n^{2}}{R^{*4}}g_{n} = 0 \quad (37)$$

Here, assume that g_n is expressed in the form :

$$g_n(R^*) = R^{p_n} \tag{38}$$

Substituting Eq. (38) in Eq. (37) yields the characteristic equation, expressed as follows:

$$p_n^4 - 2(\gamma + 2)p_n^3 + [\gamma^2 + (\nu + 5)\gamma + 4 - 2n^2]p_n^2 - [(1 + \nu)\gamma^2 + 2(1 + \nu - n^2)\gamma - 4n^2]p_n + n^4 + [\nu\gamma (\gamma + 1) - 3\gamma - 4]n^2 = 0$$
(39)

Accordingly, the solution takes the form

$$g_n(R^*) = \sum_{k=1}^4 H_n^k R^{*p_n^k}$$
(40)

where H_n^k (k = 1- 4) is an unknown coefficients, and p_n^k (k = 1- 4) denotes the characteristic root of Eq. (39). The complementary solution χ_c can be written as

$$\chi_{c}^{*} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{4} H_{n}^{k} R^{*p_{n}^{k}} (A_{n} \cos n\phi + B_{n} \sin n\phi)$$
(41)

Next, consider the particular solution χ_p^* of Eq. (33).

Substituting Eq. (9) (for $m \neq 0$) in the right-hand side of Eq. (33) yields

$$\frac{\partial^{4}\chi_{p}^{*}}{\partial R^{*4}} + \frac{2(1-\gamma)}{R^{*}}\frac{\partial^{3}\chi_{p}^{*}}{\partial R^{*3}} + \frac{\gamma(\gamma+\nu-1)-1}{R^{*2}}\frac{\partial^{2}\chi_{p}^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{2}{R^{*2}}\frac{\partial^{4}\chi_{p}^{*}}{\partial R^{*2}\partial \phi^{2}} - \frac{2(\gamma+1)}{R^{*3}}\frac{\partial^{3}\chi_{p}^{*}}{\partial R^{*}\partial \phi^{2}} + \frac{(1-\nu\gamma)(\gamma+1)}{R^{*3}}\frac{\partial^{2}\chi_{p}}{\partial R^{*}} + \frac{3\gamma+4-\nu\gamma(\gamma+1)}{R^{*4}}\frac{\partial^{2}\chi_{p}^{*}}{\partial \phi^{2}} + \frac{1}{R^{*4}}\frac{\partial^{4}\chi_{p}^{*}}{\partial \phi^{4}} = -R^{*\gamma+\delta-2}\{(m-\delta)^{2}C_{m0}R^{*-m} + \delta^{2}D_{m0} + \sum_{m=1}^{\infty}R^{*\frac{m}{2}}[(\delta-\frac{m}{2}+n+\sqrt{\frac{m^{2}}{4}+n^{2}})(\delta-\frac{m}{2}-n+\sqrt{\frac{m^{2}}{4}+n^{2}})R^{*\sqrt{\frac{m^{2}}{4}+n^{2}}}(C_{mn}\cos n\phi+C_{mn}'\sin n\phi) + (\delta-\frac{m}{2}+n-\sqrt{\frac{m^{2}}{4}+n^{2}})(\delta-\frac{m}{2}-n-\sqrt{\frac{m^{2}}{4}+n^{2}})R^{*\sqrt{\frac{m^{2}}{4}+n^{2}}}(D_{mn}\cos n\phi+D_{mn}'\sin n\phi)]\}$$
(42)

The particular solution χ_p^* of Eq. (42) is of the form:

$$\chi_{p}^{*} = \sum_{n=0}^{\infty} \left[(E_{1n} R^{*\xi + \eta_{n}} + E_{2n} R^{*\xi - \eta_{n}}) \cos n\phi + (E_{1n}' R^{*\xi + \eta_{n}} + E_{2n}' R^{*\xi - \eta_{n}}) \sin n\phi \right]$$
(43)

where ξ , η_n , E_{1n} , E_{2n} , E'_{1n} , and E'_{2n} are given as follows:

$$\begin{split} \xi &= \gamma + \delta - \frac{m}{2} + 2, \ \eta_n = \sqrt{\frac{m^2}{4} + n^2} \\ E_{10} &= -\frac{\delta D_{m0}}{(\gamma + \delta + 2)[(\gamma + \delta + 2)\delta + (1 + \nu)\gamma]}, \\ E_{20} &= -\frac{(\delta - m)C_{m0}}{(\gamma + \delta - m + 2)[(\gamma + \delta - m + 2)(\delta - m) + (1 + \nu)\gamma]}, \\ E_{1n} &= -\frac{(Z_n - \gamma + n)(Z_n - \gamma - n)D_{mn}}{Z_{n2}(Z_{n2} - \gamma - 2)[Z_{n2}(Z_{n2} - \gamma - 2) + (1 + \nu)\gamma - 2n^2] + [(\nu\gamma - 3)(\gamma + 1) - 1]n^2 + n^4}, \\ E_{2n} &= -\frac{(\overline{Z}_n - \gamma + n)(\overline{Z}_n - \gamma - n)C_{mn}}{(\overline{Z}_{n2}(\overline{Z}_{n2} - \gamma - 2)[\overline{Z}_{n2}(\overline{Z}_{n2} - \gamma - 2) + (1 + \nu)\gamma - 2n^2] + [(\nu\gamma - 3)(\gamma + 1) - 1]n^2 + n^4}, \\ E_{1n} &= -\frac{(Z_n - \gamma + n)(Z_n - \gamma - n)C_{mn}}{(\overline{Z}_{n2}(\overline{Z}_{n2} - \gamma - 2)[\overline{Z}_{n2}(\overline{Z}_{n2} - \gamma - 2) + (1 + \nu)\gamma - 2n^2] + [(\nu\gamma - 3)(\gamma + 1) - 1]n^2 + n^4}, \\ E_{1n}' &= -\frac{(\overline{Z}_n - \gamma + n)(\overline{Z}_n - \gamma - n)C_{mn}}{(\overline{Z}_n - \gamma - 2)[\overline{Z}_{n2}(\overline{Z}_{n2} - \gamma - 2) + (1 + \nu)\gamma - 2n^2] + [(\nu\gamma - 3)(\gamma + 1) - 1]n^2 + n^4}, \end{split}$$

and $Z_n, Z_{n2}, \overline{Z}_n, \overline{Z}_{n2}$ are given by

$$Z_{n} = \gamma + \delta - \frac{m}{2} - \sqrt{\frac{m^{2}}{4} + n^{2}} ,$$

$$Z_{n2} = \gamma + \delta - \frac{m}{2} + 2 - \sqrt{\frac{m^{2}}{4} + n^{2}} ,$$

$$\overline{Z}_{n} = \gamma + \delta - \frac{m}{2} + \sqrt{\frac{m^{2}}{4} + n^{2}} ,$$

$$\overline{Z}_{n2} = \gamma + \delta - \frac{m}{2} + 2 + \sqrt{\frac{m^{2}}{4} + n^{2}}$$
(44)

The stress function given by Eq. (35) finally becomes

$$\chi^* = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=1}^{4} H_n^k R^{*p_n^k} A_n + E_{1n} R^{*Z_{n2}} + E_{2n} R^{*\overline{Z}_{n2}} \right) \cos n\phi$$

$$+\sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=1}^{4} H_n^k R^{*p_n^k} B_n + E_{1n} R^{*Z_{n2}} + E_{2n} R^{*\overline{Z}_{n2}}\right) \sin n\phi$$
(45)

Then, stress components are obtained from Eqs. (24).

$$\sigma_{RR}^{*} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{4} H_{n}^{k} (p_{n}^{k} - n^{2}) R^{*p_{n}^{k}-2} (A_{n} \cos n\phi + B_{n} \sin n\phi) + \sum_{n=0}^{\infty} \{ [(Z_{n2} - n^{2}) E_{1n} R^{*Z_{n}} + (\overline{Z}_{n2} - n^{2}) E_{2n} R^{*\overline{Z}_{n}}] \cos n\phi + [(Z_{n2} - n^{2}) E_{1n}^{'} R^{*Z_{n}} + (\overline{Z}_{n2} - n^{2}) E_{2n}^{'} R^{*\overline{Z}_{n}}] \sin n\phi \}$$
(46)

$$\sigma^{*}_{\phi\phi} = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{n} H_{n}^{k} p_{n}^{k} (p_{n}^{k} - 1) R^{*p_{n}^{k}-2} (A_{n} \cos n\phi + B_{n} \sin n\phi)$$

+
$$\sum_{n=0}^{\infty} [(Z_{n2} Z_{n1} E_{1n} R^{*Z_{n}} + \overline{Z}_{n2} \overline{Z}_{n1} E_{2n} R^{*\overline{Z}_{n}}) \cos n\phi$$

+ $(Z_{n2} Z_{n1} E_{1n}^{'} R^{*Z_{n}} + \overline{Z}_{n2} \overline{Z}_{n1} E_{2n}^{'} R^{*\overline{Z}_{n}}) \sin n\phi]$ (47)

$$\sigma^{*}_{R\phi} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{4} H_{n}^{k} n(p_{n}^{k} - 1) R^{*p_{n}^{k} - 2} (A_{n} \sin n\phi - B_{n} \cos n\phi)$$

+
$$\sum_{n=1}^{\infty} n \left[(Z_{n1} E_{1n} R^{*Z_{n}} + \overline{Z}_{n1} E_{2n} R^{*\overline{Z}_{n}}) \sin n\phi - (Z_{n1} E_{1n}^{'} R^{*Z_{n}} + \overline{Z}_{n1} E_{2n}^{'} R^{*\overline{Z}_{n}}) \cos n\phi \right]$$
(48)

When the thermo-mechanical properties are given by Eq. (31), the conditions of single-valuedness for rotation and displacements given by Eqs. (27), (28), and (29) become

$$\begin{split} \oint_{L} \left[\frac{\partial^{3} \chi^{*}}{\partial R^{*3}} + \frac{1-\gamma}{R^{*}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{\nu\gamma - 1}{R^{*2}} \frac{\partial \chi^{*}}{\partial R^{*}} + \frac{1}{R^{*2}} \frac{\partial^{3} \chi^{*}}{\partial R^{*} \partial \phi^{2}} \\ &+ \frac{\nu\gamma - 2}{R^{*3}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial \phi^{2}} + R^{*\gamma + \delta - 1} (\delta T^{*} + R^{*} \frac{\partial T^{*}}{\partial R^{*}}) \right] d\phi = 0 \quad (49) \\ \oint_{L} \left(\sin \phi \{ \frac{\partial^{3} \chi^{*}}{\partial R^{*3}} - \frac{\gamma}{R^{*}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{1}{R^{*2}} \frac{\partial^{3} \chi^{*}}{\partial R^{*} \partial \phi^{2}} + \frac{\nu\gamma + \nu - 1}{R^{*2}} \frac{\partial \chi^{*}}{\partial R^{*}} \\ &+ \frac{\nu\gamma + \nu - 2}{R^{*3}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial \phi^{2}} + R^{*\gamma + \delta - 1} [R^{*} \frac{\partial T^{*}}{\partial R^{*}} + (\delta - 1)T^{*})] \} \\ &+ (1 + \nu) \cos \phi (\frac{1}{R^{*3}} \frac{\partial \chi^{*}}{\partial \phi} - \frac{1}{R^{*2}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial R^{*} \partial \phi}) \bigg] d\phi = 0 \quad (50) \end{split}$$

$$\begin{split} \oint_{L} & \left(\cos\phi \{ \frac{\partial^{3} \chi^{*}}{\partial R^{*3}} - \frac{\gamma}{R^{*}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial R^{*2}} + \frac{1}{R^{*2}} \frac{\partial^{3} \chi^{*}}{\partial R^{*} \partial \phi^{2}} + \frac{\nu \gamma + \nu - 1}{R^{*2}} \frac{\partial \chi^{*}}{\partial R^{*}} \} \right. \\ & \left. + \frac{\nu \gamma + \nu - 2}{R^{*3}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial \phi^{2}} + R^{*\gamma + \delta - 1} [R^{*} \frac{\partial T^{*}}{\partial R^{*}} + (\delta - 1)T^{*})] \right. \\ & \left. - (1 + \nu) \sin\phi (\frac{1}{R^{*3}} \frac{\partial \chi^{*}}{\partial \phi} - \frac{1}{R^{*2}} \frac{\partial^{2} \chi^{*}}{\partial R^{*} \partial \phi}) \right] d\phi = 0 \end{split}$$
(51)

Substituting stress function given by Eq. (45) and temperature given by Eq. (9) (for $m \neq 0$) in Eqs. (49), (50) and (51) yields

$$H_0^1 A_0 = 0, H_1^1 B_1 = 0, H_1^1 A_1 = 0$$
(52)

The outer and inner surfaces of the cylinder are assumed to be

traction-free. Accordingly, the boundary conditions of stresses are expressed as

$$\sigma_{RR}^{*}(R^{*},\phi) = \sigma_{R\phi}^{*}(R^{*},\phi) = 0 \quad on \quad R^{*} = 1$$
(53)

$$\sigma_{rr}^{*}(r^{*},\theta) = \sigma_{r\theta}^{*}(r^{*},\theta) = 0 \quad on \quad r^{*} = a^{*}$$
(54)

where

$$\sigma_{rr}^{*} = \sigma_{RR}^{*} \cos^{2}(\phi - \theta) + \sigma_{\phi\phi}^{*} \sin^{2}(\phi - \theta) - \sigma_{R\phi}^{*} \sin 2(\phi - \theta)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{*} = \sigma_{RR}^{*} \sin^{2}(\phi - \theta) + \sigma_{\phi\phi}^{*} \cos^{2}(\phi - \theta) + \sigma_{R\phi}^{*} \sin 2(\phi - \theta)$$

$$\sigma_{r\theta}^{*} = \frac{1}{2} (\sigma_{RR}^{*} - \sigma_{\phi\phi}^{*}) \sin 2(\phi - \theta) + \sigma_{R\phi}^{*} \cos 2(\phi - \theta)$$
(55)

The unknown coefficients $H_0^3 A_0, H_1^3 A_1, H_1^3 B_1, H_n^3 A_n, H_n^3 B_n, H_n^4 A_n$, and $H_n^4 B_n$ can be determined by the boundary conditions (53), theoretically, and (54), numerically, using the point matching method.

4. Results and discussions

The numerical calculations were performed for FGM made of ZrO₂ and Ti-6Al-4V. The thermo-mechanical properties of ZrO₂ and Ti-6Al-4V are summarized in **Table 1.**, and the Poisson's ratio v was set as 1/3. In **Fig.1**, the material properties on R = b are ZrO₂ (k_c , α_c and E_c) and those at r = a, $\theta = 0^\circ$ are Ti-6Al-4V (k_m , α_m and E_m).

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

Here, the non-dimensional outer radius $R^* = 1$, inner radius $a^* = 0.5$, and offset $e^* = 0.12$ are used. The non-dimensional temperature T^* on the outer surface ($R^* = 1$) is one and that on the inner surface ($r^* = 0.5$) is zero. From Eqs. (6) and (32), the coefficients m, γ , and δ are determined as -2.258, 0.525 and -0.383, respectively.

Now let us discuss the effect of offset e^* on the temperature and thermal stresses.

Fig.2 shows the variation of temperature at $\phi = 0^{\circ}$ as a

function of offset e^* ranging from 0 to 0.12. The smaller the size of e^* , the steeper are the lines.

Fig.3 shows the variation of radial stress σ_{RR}^* at $\phi = 0^\circ$ as a function of offset e^* . The maximum tensile radial stress increases with increasing offset e^* and is 0.0772 at $R^* = 0.660$ and $e^* = 0.12$.

Fig.4 shows the variation of hoop stress $\sigma_{\phi\phi}^*$ as a function of offset e^* . The gradients of the maximum compressive hoop stresses at outer boundary $R^* = 1.0$, which are within the range from - 0.479 to - 0.489, become steeper with increasing e^* .



Fig.2 Variation of temperature T^* as a function of offset $e^*(\phi=0^\circ)$



Fig.3 Variation of radial stress σ^*_{RR} as a function of offset e^* ($\phi=0^\circ$)





Fig.5 shows the variation of shear stress $\sigma^*_{R\phi}$ as a function of offset e^* . The maximum tensile shear stress is 0.0864 at $R^* = 0.485$, $\phi = 90^\circ$ and $e^* = 0.12$.

Next, let us discuss the effects of variation of the coefficients m, γ , and δ of material properties on the temperature and thermal stresses.

Fig.6 shows the variation of temperature as a function of *m* when the thermal conductivity *k* is expressed as $k = k_0 R^{*m}$. The temperature profile decreases with decreasing *m*.

Fig.7 shows the variation of radial stress as a function of *m* for $\phi = 0^{\circ}$. The maximum radial stress is 0.0795 at $r^* = a^*$ and m = -4.0. The extract stress peaks progressively moves outward as the thermal conductivity becomes small.

Fig.8 shows the variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ as a function of *m* at $\phi = 180^\circ$. The maximum compressive hoop stress increases with decreasing *m* and is - 0.5545 at $R^* = 1.0$, $\phi = 180^\circ$ and m = -4.0. On the other hand, the maximum tensile hoop stress decreases with decreasing *m* and is 0.4022 at $\phi = 180^\circ$, $r^* = a^*$ and m = -2.0.



Fig.5 Variation of shear stress $\sigma^*_{R\phi}$ as a function of offset $e^*(\phi=90^\circ)$



Fig.6 Variation of temperature T^* as a function of $m \ (\phi=0^\circ)$

Fig.9 shows the variation of hoop stress $\sigma_{\phi\phi}^*$ at $\phi=180^\circ$ as a function of δ . The maximum compressive hoop stress is - 0.5596 at $R^* = 1.0$ and $\delta = 0.0$. The maximum tensile hoop stress is 0.4089 at $r^* = a^*$ and $\delta = -1.4$. The maximum compressive hoop stress is stronger than maximum tensile hoop stress.



Fig.7 Variation of radial stress σ_{RR}^* as a function of $m (\phi=0^\circ)$



Fig.8 Variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ as a function of $m \ (\phi=180^\circ)$



Fig.9 Variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ as a function of δ (ϕ =180°)

Fig.10 shows the variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ at $\phi = 180^\circ$ as a function of γ . The maximum compressive hoop stress - 0.5481 at $R^* = 1.0$ and $\gamma = 0.1$ is greater than tensile hoop stress 0.4072 at $r^* = a^*$ and $\gamma = 0.1$.

Finally, let us investigate the effects of variation of inner radius a^* on the temperature and the thermal stresses.

Fig.11 shows the variation of temperature T^* as a function of inner radius a^* ($\phi = 0^\circ$). The temperature profile decreases



Fig.10 Variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ as a function of γ (ϕ =180°)



Fig.11 Variation of temperature T^* as a function of inner radius a^* $(\phi=0^\circ)$



Fig.12 Variation of radial stress σ^*_{RR} as a function of inner radius a^* $(\phi=0^\circ)$

with increasing a^* .

Fig.12 shows the variation of radial stress σ_{RR}^* as a function of inner radius a^* ($\phi = 0^\circ$). The maximum radius stress is 0.0798 at $R^* = 0.6855$ and $a^* = 0.5$. The maximum radius stresses decrease with increasing a^* .

Fig.13 shows the variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ as a function of inner radius a^* ($\phi = 180^\circ$). The curve becomes steeper as the inner radius a^* increases.



Fig.13 Variation of hoop stress $\sigma^*_{\phi\phi}$ as a function of inner radius a^* (ϕ =180°)

5. Conclusions

The method to analyze the steady thermal stresses in the FGM cylinder with an eccentric hole using stress function technique taking into consideration of the conditions of single-valuedness of rotation and displacements was presented. The effects of varying offset e^* , thermal conductivity k, the coefficient of linear thermal expansion α , the Young's modulus E, and inner radius a^* on thermal stresses are clarified. The conclusions are as follows:

- 1. A semi-numerical method to solve the plane thermoelastic problem by stress function for a functionally graded cylinder with an eccentric hole was shown.
- 2. The hoop stress is much stronger than the radial stresses and the shear stresses.
- 3. The compressive hoop stress acts at the outer boundary, while tensile hoop stress acts at the inner boundary when the outside boundary is heated. The outer compressive stresses are stronger than the inner tensile stresses.
- 4. The curves of hoop stresses at $\phi = 180^{\circ}$ become steeper as the offset e^* increases.

References

- N. Noda, Thermal Stresses in Functionally Graded Materials, Journal of Thermal Stresses, Vol. 22, Nos. 4&5, 1999, pp. 477-512.
- Encyclopedia of Thermal Stresses, edited by Hetnarski, 11 volumes, 2014, 6643p.
- M. Ohmichi, and N. Noda, Two-dimensional heat conduction problem in a functionally graded plate with a slanting boundary to the functional gradation, Journal of Thermal Stresses, 30-7, 2007, pp.715-730.
- 4) M. Ohmichi, and N. Noda, Thermal stresses in the semiinfinite body with an oblique boundary to the functionally graded direction, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 1-10, 2007, pp.1238-1250.
- M. Ohmichi, and N. Noda, Plane thermoelastic problem in a functionally graded plate with an oblique boundary to the functional graded direction, Journal of Thermal Stresses, 30-8, 2007, pp.779-799.

- R. C. Batra. and G. J. Nie., Analytical solutions for functionally graded incompressible eccentric and non-axisymmetrically loaded circular cylinders, Composite Structures, Elsevier, 2010, pp. 1229-1245.
- R. C. Batra. and G. J. Nie., Static deformations of functionally graded polar-orthotropic cylinders with elliptical inner and circular outer surfaces, Composite Science and Technology, Vol. 70, Issue 3, 2010, pp. 450-457.
- G. J. Nie. and R. C. Batra., Exact solutions and material tailoring for functionally graded hollow circular cylinders, Journal of Elasticity, Vol.99, Issue 2, 2010, pp. 179-201.
- M. Ohmichi, and N. Noda, The conditions of single-valudeness of rotation and displacements for non-homogeneous materials in plane thermoelasticity, Journal of Thermal Stresses, in submitted.

研究論文

多孔体金属表面に置かれた氷の融解現象

椎名 保顕*1,山下 鉄矢*2,荻巣 大地*2,亀山 信弘*2

(2014年9月30日受理)

Close Contact Melting of Ice on Metal Foam Plates

Yasuaki Shiina^{*1}, Tetsuya Yamashita^{*2}, Daichi Ogisu^{*2} Nobuhiro Kameyama^{*2}

(Received September 30, 2014)

Abstruct

Close contact melting of ice on foamed metals was experimentally studied. Melted liquid will be exhausted vertically through porous regions of the foamed metal. Thickness of the liquid layer between the ice and the metal fibers will be very small compared with the case of the close contact melting on smooth horizontal surfaces and melting heat transfer may be increased by the thin liquid layer.

Foamed nickel and foamed copper plates of porosity near 0.94 was used in the present experiment. Experimental results were compared with the results of smooth copper plate.

Results showed that the melting times of foamed metals were higher than the case of the smooth copper plate. As the reason, the authors consider that contact area between the ice and the metal foams was considerably small. Whereas, estimated effective heat transfer coefficient, which is defined by the unit contact area and the unit temperature difference on the contact surface of the foamed metal was about several to ten times higher than that of the smooth surface.

Keywords : Close contact melting, Metal foam, Melting, Phase change, Heat transfer Porous layer

1. まえがき

産業界および日常生活においては,莫大な量の熱が 生産され,消費されているが,それらのうち,仕事と して利用されているのは一部であり,約70%程度の熱 が使用されずに環境中に廃棄されている.これらの熱 の多くは温度の低い低品位エネルギーであるが,それ らを廃棄せずに貯蔵する,すなわち,蓄熱することが できれば,地域暖房に利用する等,温度に応じた利用 により,エネルギー有効利用を図ることができ,資源 の節約にも繋がる.この点から,近年,蓄熱技術が注 目されている.

蓄熱方式には種々あるが,固液相変化潜熱を利用す る潜熱蓄熱技術は,固液相変化潜熱が大きいことから, 高密度の蓄熱が可能である点で有望である.しかし, 潜熱蓄熱技術は,固液相変化時の伝熱特性が低く,凝 固,融解に時間がかかるという欠点を持つ.したがって, 潜熱蓄熱技術の実用化には,特に固液相変化寺の伝熱 特性の向上が非常に重要であると思われる.

伝熱特性向上のため様々な研究が行われているが, 接触融解は融解時の1つの有望な伝熱促進法であると 考えられる.固相と伝熱面の間に非常に薄い液層を介 して行われる接触融解熱伝達は,高い熱伝達特性を示 すことが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾.接触融解における伝熱 機構は,薄い液層を介した熱伝導と,融解した液相の 流れによる熱伝達であると考えられ,この考えの基に 解析等が行われている⁽³⁾⁻⁽⁸⁾.この場合,液層厚さが非 常に薄くなるため熱伝導による伝熱機構が支配的とな

^{*1} 愛知工科大学工学部機械システム工学科,愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, gamagori, 443-0047 Japan *2 愛知工科大学工学部機械システム工学科, 愛知県蒲郡市西追町馬乗 50-2

^{*2} 変対工科入学工学部機械システム工学科,変対原油部市四担可馬来 50-2 Graduate, Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, gamagori, 443-0047 Japan

る.融解した液相は固相自重による圧力で固相と伝熱 面の間を流れ,伝熱面端から外部に排出される.滑ら かな伝熱面上の接触融解では,液相は左右に押し出さ れるが,排出される距離が長いため,液相の厚さは比 較的大きくなる.伝導伝熱における伝熱量は液相厚さ に逆比例するため,伝熱特性を高くするには液相厚さ をさらに小さくする必要がある.このような観点から, 斉藤ら⁽⁹⁾は伝熱面に放射状に小さな溝を掘り,伝熱面 を分割するとともに,融解液が溝を流れて排出できる ようにして接触融解特性を測定し,2倍程度の伝熱促 進効果を得ている.

一方, 伝熱面としてスポンジ状の多孔体面を用いる と, 多孔体表面で生じた融解液は, 直ちに空隙部を通 って下部に流出するため, 液相厚さを非常に薄くする ことができると考えられ, 大きな伝熱促進効果が期待 できる. 本研究では, そのような考えに基づいて, 伝 熱面として多孔体金属を用い, 接触融解伝熱特性を測 定した. 実験では多孔体金属として市販の発泡ニッケ ル, 発泡鋼を用い, 滑らかな伝熱面による接触融解と の比較を行ったので報告する.

2.実験装置と方法

2.1 実験装置

実験装置のフローシート及び試験部概略を Fig.1 に示 す. Fig.1(a) は装置フローシートである.装置は恒温循 環水槽,低温恒温循環水槽,試験部,レーザ変位センサ, データロガー,定電圧電源,デジタルボルトメーター, PC 等で構成されている.試験部概略図を Fig.1(b) に示 す.試験部は銅製伝熱面,接触熱抵抗軽減シリコンゴ ム,伝熱面などで構成されている.銅製伝熱面は銅製 中空円筒容器に外径 100 φ厚さ 5mm の銅板を銀ロウ付



(a) Flowsheet of the systems





Table 1 Properties of metal foams and a copper plate

Test piece	Hole diameter [mm]	Width [mm]	Porosity [%]	Thermal conductivity [W/m• K]
Nia	3.50	10.0	94.5	90.9
Ni#2	0.95	10.0	95.2	90.9
Ni#6	0.28	5.00	94.9	90.9
Ni#7	0.25	3.00	94.3	90.9
Cu#1	1.60	10.0	96.5	401
Cu#2	0.95	10.0	93.9	401
Cui	0.00	5.00	0.00	401

けしたものであり,容器中に温水を循環させ,銅板を 加熱するために用いる.実験は銅製伝熱面の上に,発 泡ニッケル等の伝熱面を設置して行った.実験で使用 した伝熱面は外径 100 φの銅板,発泡ニッケル板,発 泡銅板である.銅製伝熱面と伝熱面の接触抵抗を減ら すために,熱抵抗低減シリコンゴム(市販品名サーコ ン)を間に挟み,伝熱面を銅板に強く圧迫して使用し た.銅板伝熱面温度は銅板中央及び端部に,φ0.1mm のK型熱電対素線を取り付けて測定した.発泡金属伝 熱面温度は,発泡金属板中央の金属骨材に熱電対を接 着材で固定して測定した.恒温循環水槽から銅製中空 円筒容器に設定した水温の温水を供給することにより 伝熱面を加熱し,氷の融解実験を行った.

2.2 実験方法及び実験条件

実験は伝熱面上に円筒状氷を置き,接触融解による 氷高さの変化を測定することにより行った.円筒状氷 は,円筒容器に水を入れ,低温恒温循環水槽内で氷ら せた後,冷蔵庫の冷凍室に保存する.実験前には氷を 内部温度約5℃の冷蔵庫内に2時間以上放置して,氷 温度を0℃にした後,実験で使用した.実験手順は以 下の通りである.

伝熱面上に氷を置き,氷から約20cm上部に置いた レーザー変位センサーのレーザー光を発振させるとと もに,PCによるデータ集録を開始する.氷頂部にはレ ーザー光反射用に薄い発泡スチロール板を置いた.レ ーザー変位センサーは,発振したレーザー光と氷頂部 からの反射光をキャッチして距離の変化を測定し,デ ータをPC送る.氷が全て融解した時点で実験は終了 となる.

実験に使用した発泡金属の気孔率(体積気孔率)は,

発泡金属材の密度,発泡金属材の体積,及び発泡金属 重量から計算して求めた.また,発泡金属の表面(平面) 気孔率を,ゴム板に発泡金属を押しつけることにより 金属骨材面積を求めて測定した.実験では銅製中空円 筒に流す温水温度(T₁)を 56℃及び 80℃に設定した.

実験で使用した伝熱面の気孔率等の特性及び本稿に おける呼称を Table 1 に示す.表の気孔率は体積気孔 率を示す.表で Ni(a, #2, #6, #7), Cu(#1,#2) はそれぞれ 発泡ニッケル板及び発泡銅板である.気孔率はいずれ も 93.9% ~ 96.5% と 1 に近いが,それぞれ,発泡金属 骨材径と気孔径が異なっている.また,発泡金属板の 厚さもそれぞれ異なっている.表に示した発泡金属に おいて,同じ金属では,表の上の発泡金属の気孔が粗く, 下が細かい.表の最下部にある Cui は滑らかな銅板で ある.表面気孔率と体積気孔率の比較を Table 2 に示す. 誤差はたかだか 2% 以内であり,両者は一致すると考 えてよい.

3. 実験結果

Fig.2 に伝熱面として Nia, Ni#2, Cui を用いた場合の 伝熱面温度及び氷厚さの時間変化の一例を示す. 実験 における温水温度は 80℃である. Fig.2a は実験におけ る伝熱面温度の時間変化である.氷を置いた直後,伝 熱面温度は低下するが、その後、しばらくの間、伝熱 面温度は変動しつつもほぼ一定に保たれ、融解最終盤 になると温度が急上昇するのが観察される. 融解最終 盤の温度上昇直前に、氷の融解は終了しており、温度 上昇は伝熱面表面に融解液が付着した状態で生じてい ると考えられる.これらから、氷が融解している間, 伝熱面温度はほぼ一定値を保っていると考えられる. また、供給する温水温度が80℃と一定であっても、実 験条件により伝熱面温度が異なることが示される. Fig. 2b は氷の厚みの時間変化を示したものである. 図から, なめらかな銅板 (Cui) の場合が最も融解時間が短く、粗 い発泡ニッケル (Nia) の場合が最も長いことがわかる. 伝熱面温度 T_w と氷融点 T_c の差 T_w - T_c は,Niaの場合の 方が Ni#2 の場合と比較して約 2 倍以上大きい. Table 1に示すように、NiaとNi#2の気孔率はほぼ等しいこ とから、伝熱面温度が等しい場合には、NiaとNi#2の 融解時間の差はさらに大きくなると思われる

Fig.3 及び **Fig.4** に **Fig.2** の実験結果から求めた融解 速度(氷の高さの減少速度)と時間の関係を示す. こ の場合の伝熱面温度は **Fig.2b** に示されている. **Fig.3** は なめらかな銅板 (Cui) の場合の融解速度を示す. 図から

Table 2 Comparison of volumetric porosity woth surface porosity

Test piece	Surface Porosity (%)	Volumetric Porosity (%)	error
Nia	94.05	94.46	-0.43
Ni#2	96.08	95.23	0.89
Ni#6	93.12	94.86	-1.83
Ni#7	93.28	94.25	-1.03
Cu#1	95.35	96.46	-1.15
Cu#2	94.66	93.90	0.81









Fig.3 Melting velocity of ice on Cui ($T_1=80^{\circ}C$)



Fig.4 Melting velocity of ice on Nickel foams $(T_1=80^{\circ}C)$

分かるように滑らかな伝熱面上での接触融解の場合,融 解初期の速度は大きく,時間が経過するにしたがって融 解速度が低下することが示されている.滑らかな伝熱面 上での接触融解では,固相と伝熱面の間に形成される液 層は,固相による圧力により排出されるが,その際,流 出する液層内圧力と固相による圧力が釣り合うように液 相厚さが定まる.融解初期は固相重量が大きいため,そ れと釣り合うように液層厚さは薄くなり,融解速度は大 きい.一方,融解後半では、固相重量は小さくなるため, 液層厚さが大きくなり,融解速度は小さくなる⁽¹⁾⁽²⁾.本 実験結果も定性的にその傾向を示している.

Fig.4 に発泡金属 Nia 及び Ni#2 の場合の融解速度を示 す. 発泡金属を用いた場合の融解速度は融解終盤までは ほぼ一定値を示すが、融解終盤に速度が上昇する傾向を 示している.特に、Niaの場合には融解終盤に融解初期 の約4倍にまで融解速度が増加しているのが観察される. また、Ni#2の発泡金属の場合は、融解後半における融解 速度は,変動幅が大きくなり,融解初期の速度の約2倍 程度までの増加が見られる.融解終盤における融解速度 の増加の理由として以下の点が考えられる.融解初期に は、 固相は発泡金属表面の骨材のみとの接触で融解する が、融解後半になると、気孔部の固相は融解されずに気 孔内部に沈み込み,やがて,内部の金属骨材に接触して 融解する.特に、Niaの場合には、骨材間の間隔が大き いため、かなりの量の固相が気孔部内に入り込み、発泡 金属内部の骨材との接触融解が生じて融解する. そのた め、固相が空隙部内部に入り込む後半に融解速度が大き く増加するものと考えられる. Ni#2の場合には、空隙部 寸法が Nia の 1/4 程度のため融解後半の融解速度の上昇 度合いは小さくなる.

Fig.5 に,温水温度が 80℃及び 56℃で,発泡銅 Cu#2 を 伝熱面として用いた場合の融解速度の時間変化を示す. 温水温度 80℃及び 56℃の場合とも,融解終盤以外は融解 速度はほぼ一定値を示すことがわかる.このように,実 験で用いた発泡金属による接触融解速度は,Fig.4 及び Fig.5 で示したようにほぼ一定値を示した.発泡金属にお いても,一本の金属骨材と氷の間の接触融解機構は,滑 らかな伝熱面上の接触融解機構と本質的な差は無いはず である.したがって,一本の骨材と氷の接触融解の場合 には,融解速度は,滑らかな伝熱面の場合と同様に,時 間的に低下するはずである.しかし,本実験で観察した ように,融解速度が,時間的に一定値を示すのは,以下 のような理由によると考えられる.第1に,融解の進行 とともに,発泡金属骨材と氷の接触面積が時間的に増加 することにより,融解速度は低下しないこと.第2に, 骨材と氷の接触箇所が多数であるため、また,時間的に 新たな接触点が生じるため,融解速度は律速値に規定さ れること等の理由が考えられる.

Fig.6 に温水温度 80℃及び 56℃の実験から得られた平 均融解速度をそれぞれの伝熱面に対して示す. この場合, 温水温度は一定であるが, Fig.2a に示したように伝熱面 温度は実験条件によりそれぞれ異なっているが, 図では, それらは無視して示した. 図より, 滑らかな銅面 (Cui)を



Fig.5 Melting velocity of ice on a copper foam Cu#2



Fig.6 Average melting velocity

用いた場合の融解速度が最も大きく,空隙間隔の最も大 きい Nia の融解速度が最も遅いことがわかる.また,こ れは予想されることであるが,温水温度が 80℃の場合の 方が 56℃の場合より融解速度は大きくなっている. Fig.6 は伝熱面温度,氷と発泡金属の接触面積が異なる場合の 結果である.そこで,単位接触面積当たり,単位温度差 当たりの伝熱量を以下に評価し,伝熱特性を考察する.

4. 考察

実験の結果,融解時間だけをとると滑らかな銅板の場 合が最も短く,空隙寸法の最も大きい発泡ニッケル(Nia) が最も長いという結果が得られた.しかし,前章で,そ れぞれの実験における伝熱面温度が異なることを示した ように,これらの結果を単純に比較することはできない. そこで,伝熱面温度及び気孔率を含めて,接触面積当た りの平均熱伝達率を評価する.固相と発泡金属の接触面 積は,融解の進行とともに変化する可能性について前章 において言及したが,ここでは,接触面を発泡金属表面 だけに限定して考える.

実験で用いた0℃の円柱氷の底面積及び高さをそれぞれ S, H とすると,氷の質量 W 及び氷を融解するのに必要な融解熱は Q_s は以下のように表される.

$$W = \rho_s \cdot S \cdot H ,$$

$$Q_s = \rho_s \cdot S \cdot H \cdot L$$
(1)

ここで ρ_s , *L* は氷の密度及び単位質量あたりの融解潜 熱である. 伝熱面から氷への伝熱機構は液相を介しての 熱伝導,及び融解液相の流れによる熱伝達である. 単位 時間における熱伝導による平均的な伝熱量 \dot{Q}_{cd} 及び熱伝 達による平均的な伝熱量 \dot{Q}_{cd} は以下のように表される.

$$\dot{Q}_{cd} = S_p \lambda_w \frac{T_w - T_f}{\delta} = S_p A_{cd} \left(T_w - T_f \right)$$
⁽²⁾

$$\dot{Q}_{cv} = S_p A_{cv} \left(T_w - T_f \right) \tag{3}$$

ここで、 S_p は氷と伝熱面の接触面積、 λ_w は水の熱伝 導率、 δ は液層の厚さ、 A_{cd} 、 A_{cv} はそれぞれ熱伝導におけ る熱伝達系数及び液相流れによる熱伝達率を表す.

結局,単位時間における伝熱面から固相への入熱量 \dot{Q} は, \dot{Q}_{a} と \dot{Q}_{a} の和であるから,

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{cd} + \dot{Q}_{cv} = S_p \left(A_{cd} + A_{cv} \right) \left(T_w - T_f \right)$$

= $S_p \cdot A \cdot \Delta T_{wf}$ (4)

と表すことができる. ここで,

$$A = A_{cd} + A_{cv}$$

$$\Delta T_{wf} = T_w - T_f$$
(5)

である.(4)式で, *A*は伝熱面から固相への熱伝導及び 対流熱伝達をあわせた平均実効熱伝達率と考えられる.

融解完了時間を t_m とすると、融解完了までに氷が得た総熱量は $t_m \cdot \dot{Q}$ であり、これは氷の融解熱 Q_s に等しい.したがって、

$$t_m \dot{Q} = t_m A \cdot S_p \cdot \Delta T_{wf} = \rho_s \cdot S \cdot H \cdot L \tag{6}$$

が成立する. これから平均実効熱伝達率 *A* として次式 を得る.

$$A = \frac{\rho_s S \cdot H \cdot L}{t_m \cdot S_p \cdot \Delta T_{wf}} \tag{7}$$

ここで、次式で与えられる気孔率 ε および平均融解速 度 u_m を用いる.

$$\varepsilon = 1 - \frac{S_p}{S} , \qquad u_m = \frac{H}{t_m}$$
(8)

気孔率に関しては体積気孔率と平面気孔率は等しいという関係を用いた. これから, (7)式は以下のように表される.

$$A = \frac{\rho_s \cdot L \cdot u_m}{(1 - \varepsilon) \cdot \Delta T_{wf}} \tag{9}$$

実験における Δ*T_{wf}* および平均融解速度 *u_m* の結果を用い て平均実効熱伝達率 A を求め,滑らかな銅面の熱伝達率 の値で規格化し,無次元平均実効熱伝達率 *Ā* を求めた. すなわち,

$$\overline{A} = \frac{A}{\left(A\right)_{Cui}} \tag{10}$$

ここで, $(A)_{Cui}$ は、滑らかな銅面の平均実効熱伝達率である.

実験で求めた無次元平均実効熱伝達率 *ā* を Fig. 7 に示 す.図に示されるように,単位接触面積当たりの平均実 効熱伝達率は,発泡金属の方が滑らかな銅面よりも大き く,特に,発泡金属の骨材の隙間寸法が小さい場合には 10 倍以上も大きくなることがわかる.実験において発泡 金属の融解速度が小さくなるのは,主として固相と発泡 金属の接触面積が小さいことが理由である.したがって,



Fig.7 Effective heat transfer coefficient of metals

空隙寸法が小さく,気孔率のもっと小さい発泡金属が 開発されれば,融解速度をかなり高くできる可能性が あると考えられる.

図から,発泡金属の場合でも,Nia,とNi#2,Cu#2は, 平均実効熱伝達率はかなり異なることがわかる.これ らの発泡金属の空隙率はほぼ等しく,異なるのは空隙 の寸法及び骨材の熱伝導率だけのように思われる.こ れらの発泡金属の平均実効熱伝達率の違いが大きくな る理由は明確ではなく,今後の研究課題である.

5. 結 論

発泡金属を伝熱面に用いた接触融解実験を行い,滑 らかな銅面の実験結果と比較することにより以下の結 論を得た.

- 滑らかな銅面上の接触融解では融解速度は時間経 過とともに小さくなる.
- 2. 発泡金属上の融解速度は時間的にほぼ一定である が,融解終盤には融解速度が上昇する.
- 3. 融解速度は滑らかな銅面を用いた場合が最も大き い.
- 4. しかし,接触面積,温度差を等しい条件で比較した平均実効熱伝達率は,発泡金属が滑らかな銅板より10倍以上大きくなる.空隙寸法が小さい場合に平均実効熱伝達率が大きくなる傾向がある.

参考文献

- (1) 斉藤彬夫,宇高義郎,秋吉正寛,片山功蔵,溶融を伴う接触 伝熱の研究(第1報,実験的検討),機械学会論文集,B編, 50巻,458号,pp2393-2400(1984)
- (2) Bahrami, P.A. and Wang, T.G., Analysis of Gravity and Conduction-Driven Melting in a Sphere, Trans. ASME., C, pp.806-809(1987)
- (3) 斉藤彬夫,宇高義郎,秋吉正寛,片山功蔵,溶融を伴う接触 伝熱の研究(第2報,解析的検討),機械学会論文集,B編, 50巻,460号,pp2977-2984(1984)
- (4) Prasad, A. and Sengupta, S., Numerical Investigation of Melting Inside a Horizontal Cylinder Including the Effects of Natural Convection, Trans ASME. C, Vol.109, pp.803-806 (1987)
- (5) Roy, S.K. and Sengupta, S., The Melting Process Within Spherical Enclosures, Trans ASME. C, Vol.109, pp.460-462(1987)
- (6) Moallemi, M.K., Webb, B.W. and Viskanta, R., An Experimental and Analytical Study of Close-Contact Melting, Trans ASME. C, Vol.108, pp894-899(1986)
- (7) Bareeiss, M. and Beer, H., An Analytical Solution of the Heat Transfer Process During Melting of an Unfixed Solid Phase Change Material Inside a Horizontal Tube, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.27, pp.739-746 (1984)
- (8) Wilchinsky, AV., Fomin,S.A. and Hashida, T, Contact Melting Inside an Elastic Capsule, Int. J. .Heat Mass Transfer, Vol.45, pp4097-4106 (2002)
- (9) 斉藤彬夫, 洪熙基, 広兼修, 接触溶融過程の伝熱促進, 機械 学会論文集, B編, 57巻, 541号, pp3141-3148 (1991)

研究論文

CSV ファイルと連携して簡便に XML データ処理を行う ライブラリ・ソフトウェアの検討(その3) 一 階層付 XML 文書の単階層 XML 文書への変換-

吉田 茂 *

(2014年9月30日受理)

A Study on Library Software That Makes XML Data-Processing Easy in Cooperation with CSV Files (Part 3) — Conversion of XML Documents with a Hierarchy Form to a Flat Form —

Shigeru Yoshida *

(Received September 30, 2014)

Abstract

This paper describes how to handle an hierarchical XML document by the previously created software library which made the XML document with a CSV file and which carried out data processing. XML is the internationally standardized language for expressing electronic data. But handling XML documents has high hurdle and is so difficult for beginners that we created the software library. However, in order to treat XML documents intuitively, this software library could handle only the single hierarchical XML document which has several child elements as one hierarchy under a record element. In this research, in order to handle a multi-hierarchical XML document, the software which can convert a multi-hierarchical XML document to the single-hierarchical XML document, was created. The software was evaluated in an application with a multi-hierarchical XML document. It was shown that the converted XML documents were operated well together with the software library.

キーワード:XML データ処理, 階層付き XML 文書, 文書形式の変換 Keywords: XML Data Processing, hierarchical XML document, conversion of document hierarchy

1. はじめに

XML(eXtensible Markup Language) は、国際標準の電子 データ表現用の言語であり、柔軟性、拡張性が高く、幅 広く使用されている^{1),2)}. XML 文書を分類すると、大き く 2 種類に分けられ、データ系の XML 文書と、文書系 の XML 文書があるといわれる³⁾. データ系 XML 文書 は、レコード形式で、一般に短い内容の項目内容を持つ ものであり、一方、文書系の XML 文書は、文章のよう な長い内容の項目内容を持つものである. ここでは、デ ータ系 XML 文書を対象にする. XML は便利であるが、 データの作成に手間がかかるのが難点である. 階層がレ コードの下,1階層の XML 文書(以下,「単階層 XML」 と呼ぶ)だと,表形式になって,CSV(Comma Separated Values)形式から XML 文書へ変換することで,比較的容 易に作ることができる^{4),5)}.しかしながら,2階層以上 のもの(以下,「階層付 XML」と呼ぶ)だと,XML エ ディタを使って,そのまま階層を付けて XML 文書の形 で作ることになる.

筆者らは、先の研究では、XML文書を表形式のデー タに限定することによって、CSVファイルと連携させ、 XML文書を容易に扱えるソフトウェア・ライブラリに ついて報告した(以下、このツールを「CSV連携 XML 処理ライブラリ」と呼ぶ)⁶. このツールは、行数を分

* 愛知工科大学工学部情報メディア学科, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Department of Media Informatics, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan けることで,長い項目内容も,入力できるようにした⁷.

本研究では、CSV 連携 XML ライブラリで、 階層付 きの XML 文書が扱えることを課題とした. CSV 連携 XML ライブラリは、単階層 XML だけが扱えようにな っている. ここでは階層付 XML を単階層 XML に変換 してから、ライブラリでデータ処理し、再度、階層付 XML に変換することを考える. ここで、用いる XML 文書は、属性なしで、要素名、要素内容のみの基本的な ものであることを断っておく. 原理が分かれば、属性や 名前空間などは、後で加えられるからである.

本報の構成は、2章で前報で作成した CSV 連携 XML ライブラリの機能の概略について述べる.3章で,階層 付 XML 文書を単階層に変換するソフトウェア,及び, 単階層から階層付 XML 文書に逆変換するソフトウェア について述べる.4章でこの変換ソフトウェアを実装・ 評価した例を述べ,最後にまとめとする.

2. 従来技術と前報告の技術

XML 文書を作る方法は大きく2つのタイプがある.

- (ア)CSV 形式から XML 文書を作る.表形式から作ため、単階層の XML 文書だけになる⁹.
- (イ)XML エディタなどのツールによって,XML 文 書の形式を用いて,そのまま,階層付きで,要 素内容を入力する形式として作る.
 ここでは,前報で作成した CSV 連携 XML ライブ ラリの変換機能および API (Application Program Interface) について簡単に説明しておく^{の,7)}.この ソフトウェアは Perl で実装されており,愛知工 科大学の吉田研究室の Web サイトから公開して いる⁸⁾.
- (1) CSV 連携 XML ライブラリについて

CSV ファイルから XML 文書へ変換するためのフォー マットを Table 1 に示す。CSV 形式の 1 列目にキーワー

-	and the first state of the first		and the second						<pre><!--!</th--></pre>
	eroton te	xcel addre			0.000	hand the second			
2	JP1/WD2	WEAR P. Sec.	UT 14VA 437	W 2-140	1.27	NW 9421	20 <u>0</u> / 0/	5 ×	〈よみがな〉がまごおり たろう〈/よみが
	D1		5.					and shares	<(任 所)浦 郡 巾 任 所)</p
	A	B	C	D	E	F	G	-	<pre><email>gamagori@net.ip</email></pre>
	root	住所録			1				(/友人)
2	re cord	友人	and a state of the	contra de las	The second				〈友人〉
3	element	名前	よみがな	住所	電話	Email			〈名前〉岡崎花子〈/名前〉
4	value	蒲都太郎	がまごおり たろう	蒲都市	1234	gamagori@	net.jp		くよみがな>おかざき はなこ よみがな</p
5	value	岡崎花子	おかざぎ はなこ	岡崎市	6789	okazaki@ne	et jo		<住所>岡崎市 住所
6	text	anaramanananan	**						〈電話>6789 電話
7	record	親戚							<email>okazaki@net.jp</email>
8	element	名前	よみがな	住所	電話	Email	統柄		友人
9	value	愛知次郎	あいち じろう	名古屋市	2468	iro@net.jp	叔父		<text>******</text>
10	value	雲知京子	あいち きょうこ	岐阜市	1357	kyouko@ne	叔母		〈親戚〉
11	value	愛知一即	あいち いちろう	静岡市	9753	ichirou@ne	祖父		〈名前〉愛知次郎〈/名前〉
12	Contraction of the							~	くよみがな>あいち じろう よみがな
4 4	+ H \addi	ress-book/		<				2	< (住所)名古屋市 住所

 Fig.1
 CSV 連携 XML 処理ライブラリにおける変換

 (a) 指定書式の CSV ファイルと, (b) 変換後の XML 文書例

1 列目の キーワード	2 桁目以降に記述する XML 文書の対応する内容	客 [使用する列]
① root	ルート要素名	[第2列]
2 record	レコード要素名	[第2列]
③ element	レコード内の要素名	[第2列以降]
(4) value	レコード内の要素の要素内容	[第2列以降]
(5) text	空白行, コメントを入れる	[第2列]
6 elementN	レコード内の要素名.Nは整数	[第2列以降]
⑦ valueN	elementN に対応する要素内容	[第2列以降]

Table 1 CSV ファイルの書式での XML 文書の要素指定

ドを書き、2列目以降に項目や項目内容を書く. ①②で ルート要素名とレコード要素名を定義する. ③④で表形 式で要素名と要素内容を定義する. ⑤はコメント行を定 義するものである.

⑥⑦は、長い要素内容を定義するときに、1 要素を1
 行分使って表すものであった.この表現の例を Fig.1 および Fig.2 に示す.

XML 文書から,長い要素内容をもつ CSV ファイル を逆変換する際には,行単位にまとめた要素が,XML 文書上で,まとまりが分かるように,特殊なタグ <delimiter/>を,第1レコードのみ挿入するようにした. 1列目にキーワードを置くようにしたのは,1個の CSV ファイルから表形式のデータを1個だけでなく, 複数個の表形式のデータを1度に XML 文書に変換でき るようにするためである.

このような仕組みを作ることによって、CSV ファイ ルと XML 文書との相互変換が違和感なく行えるように なった.しかし、これは単階層の XML 文書に限られる.

(2) ライブラリの XML API について

直感的に操作できるようにするため、単階層の表形式の XML データのみ扱うようになっている.



(a) Table 1 の書式を用いた CSV ファイル

(b) (a) b) CSV / / / / / ZZ KO/C AME ZE

Fig.2	長い項目内容に対応した書式の(a)CSV ファイルと,	(b) 変換 XML 文書の例
-------	-----------------------------	-----------------

機能	メソッド名 (引数), [返却値]
① XML 文書操作オブジェクトの作成(初期化)	XMLHandlingAPI3 () [データ格納・操作用オブジェクト]
②入力文書をオープン	openFile("ファイル名") [なし]
③レコード名を指定して入力文書をオープン	openFileR("ファイル名", "レコード要素名 ") [なし]
④文書のクローズ	closeFile() [なし]
⑤ XML 文書のレコード数の取得	recordLength() [レコード数]
⑥レコード内の要素数の取得	ElementLength() [レコード内要素数]
⑦ルート要素の取得	getRootName() [ルート要素名]
⑧レコード要素名の取得	getRecordName() [レコード要素名]
⑨レコード内のi番目の要素名の取得	getElementName(i) [レコード内要素名]
⑩第 k レコードの要素名による要素内容の読出し	getElement(k, "要素名") [要素内容]
⑪第 k レコードの要素名による要素内容の書込み	putElement(k, "要素名", "要素内容") [なし]
⑫出力文書のオープン	openOutputFile("ファイル名","ルート要素名") [なし]
⑬メモリに展開したレコードへの書出し	saveRecords() [なし]
⑭出力文書のクローズ	closeOutputFile() [なし]

 Table 2
 改訂した XML API ソフトウェアの XMLHandlingAPI3 メソッドの仕様

前報ⁿから幾つかの部分を改訂している. このソフト ウェア XMLHandlingAPI3 のメソッド群を **Table 2** に示 す. **Table 2** において, ①は新たな入力用 XML 文書の インスタンスを生成するメソッド, ②はファイル名を指 定してオープンするメソッドと, ③はファイル名とレコ ード要素名を指定してオープンするメソッドである. ② はデフォルトの場合で, ルート要素の下に, レコード要 素があるとして, パースする. ③は, 1個のファイルに レコード要素が何種類かある場合であり, レコード要素 を指定してオープンする.

④は、開いた XML ファイルをクローズするメソッド
 である。⑤、⑥はそれぞれ XML 文書のレコード数と、
 レコード内の要素数を知らせるメソッドである。

⑦,⑧はルート要素名とレコード要素名を知らせるメソッドである。
 ⑨はレコード内のi番目の要素名を知らせ、
 ⑩で第kレコードの要素内容を要素名を指定して読みだすことができる。
 ⑪は第kレコードの要素内容を更新に

用いるメソッドである.

⑫以降は出力 XML 文書に関するものになっている。
 ⑫は出力文書のオープン, ⑬は全レコードの書き出し,
 ⑭は出力文書をクローズするメソッドとなっている。

メソッドの個数を極力抑え, 直感的に扱える名称にした.

3. 階層付 XML と単階層 XML の相互変換

(1) 階層付 XML から単階層 XML への変換

前述したように CSV 連携 XML ライブラリの変換機 能は、CSV ファイルと単階層 XML を相互変換する機構 である. このため、新たに階層付 XML を単階層 XML に変換するソフトウェアを作った. 階層変換の様子を、 Microsoft 社の「標準データレコード XML 構造」⁵⁾のサ ンプルを用いて Fig.3 に示す. 図中 (b1)(c1) では、レコ ード内のレコードに、識別できるように番号を付した.



Fig.3 階層付 XML 文書から単階層 XML 文書への変換

タグ内で,レコード内レコードを結合するにはピリオ ド"."を用いた.タグの中で使える特殊記号は,ピリオ ド,アンダースコア,コロンの3種類である.一番使 われる可能性が少ない文字としてピリオドを選んだ.

単階層に変換をするのには、レコード内のレコード に異なる要素名を付ける必要がある.レコード内レ コードに、同じ要素名を1個だけ使う場合は問題ない が、複数個使うと、どこから違うレコードかを判別で きなくなる難点がある.この点は、レコードの区切り を識別する特殊な空タグを追加することで防ぐことが できる.しかし、レコード内レコードの要素名は、大 抵の場合、異なるものを使うであろうから問題になら ないと考える.

(2) 単階層 XML から階層付 XML への変換

単階層 XML 文書に直してデータ処理をした結果は, 再度,多階層 XML 文書に逆変換できるようにする.

このツールは CSV ファイルで単階層の XML 文書を 作り,そこから階層付文書を作成するのにも使える. CSV 連携 XML ライブラリを使えば,CSV 形式でタグ が出てくるのは1回だけなので,容易に変換ができる.

4. ソフトウェアの実装と評価

(1) 階層変換ソフトウェアの実装と変換

多階層 XML 文書と単階層 XML 文書の相互変換ソ フトウェアを, Perl で実装した. XML ソフトは Java で実装されることが多いが, Perl も早くから XML に 取り組んでおり,文字列処理機能が強力なので,プロ グラムを簡潔に作ることができる.測定環境を Table 3 に示す.実装したソフトウェアの概略を Table 4 に, そのフローチャートを Fig.4 に示す.フローは簡単に するため,インデントを付ける部分は省略した.評価 用データを Table 6 を示し,その変換の様子を Fig.5, Fig.6 に示す. これらのサンプルは,1 レコード分になっ ている.

変換時間の目安を得るため, Fig.3 (c1)の3階層フォー マットを繰り返し10,000 レコード分繋いだデータで, 変換及び逆変換の処理時間を測った.結果を Table 6 に示す.処理時間はディスクアクセス時間も含む.

(2) CSV 連携 XML ソフトウェアとの協調動作

単階層変換した XML 文書を用い, CSV 連携 XML ソフトウェアで,検索とコピーのアプリケーションを 作って,正常に動作することを確かめた.

Table 3 測定環境

項目	内容
コンピュータ	ノート PC Dell VOSTRO 1720
OS	Windows 7 Professional SP1
CPU	Intel core2 Duo P860 2.40GHz
メモリ RAM	3.0 GB
Perl インタープリタ	Active Perl 5.16.3 ¹⁰⁾

Table 4 作成したソフトウェア

機能 "プログラム名"	ソース行数
多階層⇒単階層	60 行
"h2ftrans"	
(Hierarchy to Flat)	Parser.pm を SAX モート C 引用
単階層⇒多階層	公告
"f2htrans"	02 1」 VMI Handling A DI2 and お引田
(Flat to Hierarchy)	AMLHandlingAP13.pm を51用

Table 5 評価用データの内訳

評価データ	1 レコード の要素数, 容量	単階層変換後の 1レコード要素数, 容量
①住基台帳の	158 個	140 個
データ 11)	6.2KB	9.0KB
2 travel XML	163 個	151 個
のデータ ¹²⁾	8.5KB	16.7KB

Table 6 処理時間の目安

対象ファイル	処理時間
多階層 ⇒ 単階層	変換 2.20 秒
2.91MB	1.32 MB/s
単階層 ⇒ 多階層	逆変換 3.75 秒
3.09MB	0.82MB/s

①上記の単階層ファイル (10,000 レコード, 3.09MB) に ついて, CSV 連携 XML ライブラリの API を用いて, レコード内要素名と,要素内容の部分を指定して検 索するプログラムを作った.特定の要素内容のレコー ドを探す所要時間は, 1.55 秒であった.検索速度は 1.99MB/s である.

② CSV 連携 XML ライブラリの API を用いて,同じく 単階層 XML 文書 (10,000 レコード, 3.09MB) をコピー するプログラムを作った.これで,XML 文書の read 側と write 側の双方が使われる.このプログラムも正 常に動作した.このコピーの所要時間は 7 ~ 8 秒であ り、1 秒程のばらつきがあった.

(3)考察

- ・多階層から単階層に変換すると、要素数は減るが、 データ量が増える。要素名が長いと、単階層化した ときに、結合した要素名が非常に長くなってしまう。 また、多階層で階層が深いと、単階層化で要素名が長 くなる。
- ・データ処理を行う場合は、単階層の方が扱いやすい と思われる.しかし、要素数が増えてくると階層を付 けた方が、まとまりが付き、分かりやすい.
- ・検索をする場合,多階層より単階層の XML 文書の方 が,データをアクセスしやすい.

単階層にすると、データ量が増え、アクセスの仕方 も変わるものの、フォーマットそのものを変えるので なければ、その扱いには特段、不都合な点はない.

5. まとめ

今回, 階層付の XML 文書について, 単階層に直し てから扱う方法を提案し, 実際に, そのソフトウェア を作った. 変則的な方法ではあるが, エンドユーザー が簡単に扱うのには単階層の方が考えやすいし, プロ グラムも作りやすいだろう.

また,単階層から多階層への逆変換ソフトウェアも 作った. これは CSV 形式から単階層 XML 文書を作 り,そこから,さらに本ソフトウェアで変換して多階 層 XML 文書にするのに使える. CSV 形式では,要素 名の記述は1回だけなので,階層が深くても問題はな い. この手続きで多階層文書が簡単に作れるようにな る.

現状は,XML 文書において属性が扱えないので,使 える範囲は限られる.属性付きの文書も扱えるように するのは,今後の課題だと考える.

参考文献

- 中山幹敏・浅井康弘・日本ユニテック:改訂版標準 XML 完全解説 < 上>,技術評論社 (2001.4).
- 中山幹敏・浅井康弘・日本ユニテック:改訂版標準 XML 完全解説 <下>,技術評論社 (2004.3).
- Document- Versus Data-Centric XML, http://82.157.70.109/ mirrorbooks/buildingwebserviceswithjava/0672321815_ch02lev1sec2.html.
- (a) 富士ソフトABC株式会社 技術センター: 階層構造の 深さによるメリット・デメリット, http://www.atmarkit. co.jp/fxml/askxmlexpert/030depth/030depth.html (2001.10).
- 5) Microsoft Developer Network:標準データレコード XML 構造, http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/ms915020.aspx.
- 吉田 茂: CSV ファイルと連携して簡便に XML データ 処理を行うライブラリ・ソフトウェアの検討,愛知工科 大学紀要 第8巻(2010年度), pp.57 - 66 (2011.3).http:// www.aut.ac.jp/library/kiyoudata/kiyou8.pdf
- 7) 吉田 茂,安東 伸明:CSV ファイルと連携して簡便に XML データ処理を行うライブラリ・ソフトウェアの検討 (その2) - 長い項目内容を持つCSV ファイルのXML文 書への変換-,愛知工科大学紀要 第9巻(2011年度), pp.21 - 30 (2012.3).http://www.aut.ac.jp/univ/library/kiyo/ images/pdf/kiyo09.pdf.
- 8) 愛知工科大学・吉田研究室の「ダウンロード」http:// www-in.aut.ac.jp/~yoshida-lab/.
- 9) たのしい XML: CSV ファイルを XML に変換ツール (MS Excel を試用した変換), http://www6.airnet.ne.jp/ manyo/xml/office/step3.html.
- 10) ActiveState 社の Active Perl のサイト

http://www.activestate.com/activeperl.

- 総務省 自治体クラウドポータルサイト・中間標準レ イアウト仕様 http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/jichi_ gyousei/c-gyousei/lg-cloud/02kiban07_03000024.html.
- 12) XML consortium TravelXML ドキュメント http://xmlconsortium.org/wg/TravelXML/download2.html (2006.06).





(b)単階層 XML 文書から多階層階層 XML 文書への逆変換(f2htrans)のフローチャート

Fig.4 多階層 XML 文書と単階層 XML 文書の相互変換のフロー



(a) 2階層フォーマットの元の XML 文書

Fig.5 住基台帳のデータ¹¹⁾



(a) 2階層フォーマットの元の XML 文書

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<AllotmentBookingRepo

<TransactionType.DataFrom>FromTravelAgency</TransactionType.DataFrom>

 $<\!\! {\sf TransactionType.DataClassification} \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf TransactionType.DataClassification} \\ > \\ {\sf NewBookReport} \\ <\!\!/ {\sf Transaction$

 ${\small <} TransactionType.DataID{\small >} MAP004E5606{<}/TransactionType.DataID{\small >} transactionType.DataID{\small >} transac$

<AccommodationInformation.AccommodationArea>伊豆長岡<//>
</AccommodationInformation.AccommodationArea>

<AccommodationInformation.AccommodationName><つろぎの宿満足荘</AccommodationInformation.AccommodationName>

 $<\!\!AccommodationInformation.AccommodationCode>\!001-56387<\!/AccommodationInformation.AccommodationCode>\!$

<AccommodationInformation.ChainName>くつろぎりループ</AccommodationInformation.ChainName>

<SalesOfficeInformation.SalesOfficeCompanyName>マップトラベル(株)</SalesOfficeInformation.SalesOfficeCompanyName>

<SalesOfficeInformation.SalesOfficeName>マップトラベル横須賀営業所</SalesOfficeInformation.SalesOfficeName> <SalesOfficeInformation.SalesOfficeCode>456</SalesOfficeInformation.SalesOfficeCode>

SalesOfficeInformation.SalesOfficeOfficePersonInCharge>舟木

 $\langle SalesOfficeInformation.SalesOfficeEmail \rangle s_sato@jata-net.or.jp \langle / SalesOfficeInformation.SalesOfficeEmail \rangle$

<SalesOfficeInformation.SalesOfficePhoneNumber>0423-23-2323/SalesOfficeInformation.SalesOfficePhoneNumber>

<SalesOfficeInformation.SalesOfficeStateProvidence>神奈川県/SalesOfficeInformation.SalesOfficeStateProvidence>

SalesOfficeInformation.SalesOfficeCityName>横須賀市

SalesOfficeInformation.SalesOfficeAddressLine>海軍通り

 $\langle SalesOfficeInformation.SalesOfficeStreetNumber \rangle 1 - 1 - 1 \langle / SalesOfficeInformation.SalesOfficeStreetNumber \rangle$

 $\langle SalesOfficeInformation.SalesOfficePostalCode > 100-0001 \langle /SalesOfficeInformation.SalesOfficePostalCode > 100-0001 \langle /SalesOfficePostalCode > 100-$

<SalesOfficeInformation.SalesOfficeRegisteredCategory>1 種</SalesOfficeInformation.SalesOfficeRegisteredCategory>

•••

(b) 変換した単階層 XML 文書

Fig.6 旅行業者用フォーマット travelXML のデータ¹²⁾

研究論文

カプセル内視鏡ロボットの駆動システムの開発

永野佳孝*,柴田賢**,渡辺勇也**,藤田知志**

(2014年9月30日受理)

Development of Drive System of Capsule Endoscope Robot

Yoshitaka Nagano^{*}, Ken Shibata^{**}, Yuya Watanabe^{**}, Satoshi Fujita^{**}

(Received September 30, 2014)

Abstract

Capsule endoscope was developed to examine stomach, small intestine, and large intestine. The movement of the capsule endoscope is solely dependent on peristaltic motion. To examine into the details of the affected area, it is expected that development of self propelling capsule endoscope. That is capsule endoscope robot. This paper reports an outline and characteristics of the drive system of capsule endoscope robot that we have developed. The robot consists of a wireless pinhole camera built in battery, and permanent magnet. It is driven by current control of electromagnetics.

キーワード:カプセル内視鏡, 医療ロボット, 電磁力 **Keywords**: Capsule endoscope, Medical robot, Magnetic force

1. はじめに

カプセル内視鏡は, 胃, 小腸, 大腸等の消化管の内 壁を観察する目的で開発されたカプセル状の内視鏡で あり, 新たな低侵襲医療として臨床応用されている. カプセル内視鏡は, イスラエルのギブンイメージング 社で最初に開発された. 日本国内では, 2007年に薬事 認証され, 近頃では身近な医療として世間一般に認知 されつつある. 現在, 医療機関で使用されているカプ セル内視鏡は自走式ではなく, 消化管の蠕動運動によ り体内を移動するため, 位置や撮影方向を外部から制 御することができない¹⁾.

2011年,大阪医科大学の樋口らがカプセル内視鏡の 後部にヒレを付けてロボット化した自走式カプセル内 視鏡ロボットの臨床実験に成功した²⁰.カプセル内視 鏡の後部に小型磁石を取り付けた尾ひれを接続し,外 部磁場を加えることで磁石と共にヒレが振動し推進力 が発生する仕組みになっている³⁰.より先進的な研究 では、血管へのアプローチが行われている.血管の低 侵襲医療にはカテーテルを用いるのが一般的であり、 血管の分岐部では何度かカテーテルの先端の押し引き を繰り返して目的の方向へ進めている.この方法には、 血管を傷つける危険性や、患部への到達限界があるた め、これらの問題の解決に血管用カプセル内視鏡が期 待されている.具体的な研究事例として、オーストラ リアの物理学チームが、2009年に英物理学研究所の 機関誌に「プロメテウス」を発表した.映画「ミクロ の決死圏」にて人体の中から患部を治療する特殊潜水 艇名から命名されたプロメテウスは、圧電を利用した モータにより鞭毛のようなプロペラを回すことで推進 力を発生する.流れの緩やかな静脈程度であれば血流 に逆らって移動が可能であると報告されている⁴.

本研究ではカプセル外部からの電磁力を用いてカプ セル内視鏡ロボットを制御する方式の基礎検討を行っ た⁵⁾.検証する試作モデルは,カプセル内視鏡ロボット, 体内の管の代替えとなる塩化ビニル製のパイプ,パイ

^{*} 愛知工科大学工学部, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

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

Graduate, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihazama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

プに沿って電磁石を並べたロボット駆動部,およびその制御部で構成される.消化管だけでなく血管への適 用も考慮して,パイプには分岐制御を検証できるよう にY字の分岐構造を設けてある.本論文では,2章に おいて開発したシステムの全体構成と試験に用いたカ プセル内視鏡ロボットの構造を述べ,3章では駆動機 構を説明する.4章にて駆動機構の評価結果とY字分 岐構造を用いた駆動テストについて述べる.5章にて まとめを行い,本論文の結びとする.

2. システムおよびカプセルロボット

2.1 システムの全体構成

Fig.1 に本システムの構成を示す.後述するカプセルロボットを通す消化管に見たてた塩化ビニル製のパイプに水を流し,その中でロボットを移動させる構成とする.ロボットの駆動装置は,パイプに沿って並べたU字型の電磁石で構成されている.PCに搭載したI/ Oコントローラの信号によって電流駆動回路を制御して,これらの電磁石を順次通電する.カプセルロボットは,電磁石とロボット内のネオジウム磁石との間に繰り返し発生する吸引力と反発力によって,パイプ内を移動していく.ロボットには,ワイヤレスカメラとバッテリーが搭載されており,パイプ内部を撮影された映像は,無線信号でPCに送られる.その映像がPCの画面に表示される.

2.2 カプセル内視鏡ロボットの製作

Fig.2 に今回の駆動システム用に製作したカプセル 内視鏡ロボットを示す.円筒のポリカーボネートパイ プの端面にアクリル円板を接着してロボットの筐体を 製作した.ロボット内部にある発砲スチロールは,浮





力の維持とワイヤレスカメラと直径 12mm の 2 個のネ オジウム磁石を固定している. 筐体の裏蓋は, ワイヤ レスカメラに内蔵されているバッテリを充電するため に,取り外しできる構造とし, O リングにより防水さ れている. 今回使用したワイヤレスカメラは入手可能 な市販品の中で最も小型の RF SYSTEM 社の RF-12 (幅 18mm,高さ 15mm,奥行 35mm,質量 15g)を用いた. カプセルの直径は,ワイヤレスカメラを内蔵するため に 32mm となった. この直径は現行のカプセル内視鏡 に比べて約 2 倍である.

ロボットを水中で円滑に移動させるために,浮力の 検討を行った.カプセルロボットの筐体の中に磁石と 粘土を入れて自重を変化させて予備試験をした結果,約0.03Nの自重fが適していた.水中での自重は物体 の浮力と重量の合力で求められる.今回作成したカプ セルロボットの浮力は(1)式で求められる.

$$F_b = \rho V g \tag{1}$$

ここで, ρ は液体の密度, V はカプセルロボットの 体積である. ρ に水の密度 1000kg/m³, V に実測した 38.5×10⁶m³, g に重力加速度を代入し, 浮力 Fb を 0.377N と求めた. カプセルロボットの質量 m は 0.0408kg で あるため, 浮力との合力 F は (2) 式より下方向に 0.023N となる.

$$F = F_b - mg$$

= 0.377 - 0.0408 \cdot 9.8 = -0.023 (2)

合力Fは,事前検討した自重fとほぼ等しくなったので, カプセルロボットの浮力と重量を最初の設計から変更 せずにそのまま使用した.



(a) The photograph of the system



Electromagnetic coil (ϕ 0.5mm, 500turn) (b) The layout of the coils Fig.3 The developed system

3. 駆動機構の設計

3.1 駆動機構の構成

Fig.3(a) に開発したシステムを示す.本駆動装置はカ プセルロボットを移動させる水を満たした塩化ビニルパ イプと,それに沿って電磁石を並べた構成となっている. 塩化ビニルパイプは管内部のカプセルロボットを観察で きるように透明パイプを使用し,パイプの口径はカプセ ルロボットの直径を基準に 80mm とした.パイプの右端 は塩化ビニルパイプ用の水道用硬質塩化ビニル管継手で 塞ぎ,左端はカプセルロボットを管内に出し入れ可能と するために,ポリスチレン容器と接着した.パイプの全 長は 0.61m である. Fig. 3(b) に示すように、U字ボルト (M6, SS400) に 0.5mm エナメル線を 500 巻して電磁石 を製作した.各電磁石はパイプの下に 4mm の隙間を開 けて互い違いに配置されている.

3.2 カプセルロボットの駆動方法

Fig. 4 にカプセルロボットを外部磁界で駆動させる原 理を示す.カプセルロボットに内蔵した2つの永久磁石 は,底面がN極とS極となるよう配置してある.パイ プの下に所定の間隔で並べてあるU字型の電磁石の極 間をロボットに搭載した永久磁石の間隔と等しい30mm とし,さらに電磁石を互い違いに置くことで15mm間 隔に磁極を配置した.各電磁石は配置の制約からL1と L2,L3とL4のように2個ずつのペアとなっている.制 御用 PC に内蔵したI/O コントローラによって各電磁石 の磁極を(a)~(h)の順番で制御する.

一般的な3相駆動方式では,永久磁石の間に3個の磁 極を必要とするため,今回は2相駆動とし,コイルの数 を減らす工夫をした.さらに配置の制約から電磁石を2 個ずつペアで配置したために,ペア内とペア間では移動 制御方法を変える必要がある.(a)から(c)は電磁石のペ ア内での移動方法,(d)~(h)はペア間の移動方法を示し ている.

移動の開始となる (a) ではロボットを L1 上に吸引している. (b) では L1 の反発と L2 の吸引により L2 側へ





Fig.4 The principle of robot movement

の移動を行い,(c)にてL2上に吸引する.一方,(d)~ (h)ではロボットを隣の電磁石ペアへ移動させるため, L1とL2がロボットの左側の永久磁石を,L3とL4がロ ボットの右側の永久磁石を主に担当し,吸引と反発を繰 り返してロボットを右側に移動させていく.(h)に示す ようにL3とL4ペア側にロボットがほぼ移動後,L3と L4の制御をL1とL2に置き換えて(a)の制御に戻る.

この手順を繰り返すことによりロボットを右側に移動 させることができる.本手順のように磁石の反発と吸引 を逆に行えば、ロボットを左側に移動させることができ る.

3.3 電流駆動部

電磁石を制御するモータードライバはコイルに常時 約2Aと大きな電流を流すため、電流駆動部には、最 大3.5A、常時2Aでの通電が可能なDCモータ用フルブ リッジドライバICを使用した.ロボットの移動時には 最多で4個の電磁石を同時に起動する必要があるので、 8A以上の電源が必要となる.電磁石の電気抵抗が非常 に小さいためモータードライバにPWM 制御を施して電 流量を制御した.

4. 性能評価

本章では,開発したカプセルロボットの性能評価を行 った結果について述べる.

4.1 画像の撮影能力

Fig.5 にロボットの撮影した画像を示す.パイプの 中を水で満たし,ロボットと撮影対象物との距離 d を 135mm から 15mm まで近づけた.対象物に描かられて いた「あ」の文字が鮮明に撮影されていることを確認で きた.

4.2 移動速度の評価

ロボットの最高移動速度を確認するために,ロボット が移動できる電磁石の最小通電時間を測定した.その結 果を Table 1 に示す.電磁石の通電には,Fig.4 (a) に示 すようにロボットの永久磁石と吸引状態となるときと, Fig.4 (b) に示すように反発と吸引状態となるときの2つ がある.前者の通電時間をt1,後者をt2として,脱調 しない最小の時間を測定した.最初にt1とt2を同じ時 間として,移動限界の最小時間110msを求めた.次に, t1 またはt2を110msに固定し,片方の時間を短くして いった.その結果,t1が10ms,t2が110msのときに最



(a) d = 135 mm



(b) *d*=75mm



(c) d=15mm

Fig. 5 Endoscope images

Table 1 The minimum energization time

Time condition	<i>t1</i> [ms]	<i>t2</i> [ms]
t1=t2	110	110
t1 > t2 ($t1$ constant)	110	70
$t1 \le t2$ ($t2$ constant)	10	110

Table 2 The distance for movement

Distance <i>h</i> [mm]	<i>t1</i> ms]	<i>t2</i> [ms]	Movement
10	10	110	Stable
13	11	121	Stable
16	13	143	Stable
19	20	220	Stable
22	25	275	Instable
25	-	-	Unmovable

高速度となり、その値は 100mm/s であった.

t1 と t2 の関係から、ロボットの移動には、t2 における 反発状態が大きく寄与していることが推測できる. この ことは t2 が 70ms 未満ではロボットを駆動できなかった ことからもいえる.

最高速度の移動では,加速時に不安定さ見られたので 加速時のみに *t1* を 110ms とすることで,安定な移動を 実現できた.

4.3 パイプと電磁石との距離の評価

Fig. 3 (b) に示したパイプと電磁石との距離は人体の皮 膚表面からの深さに相当するので,この距離 h を広げ ていき,最大制御可能な距離を測定した.その結果を Table 2 に示す.距離の広がりに合わせて移動が不安定 となるため,安定移動となるまで通電時間を比例計算で 長くした.最終的に 22mm で不安移動となり,25mm で は移動させることが不可となった.

4.4 分岐移動の様子

Fig.6 に Y 字分岐構造を持ったパイプでの移動実験の 様子を示す.時間の経過とともにカプセルロボットは左



(a) 0.0s



(b) 2.7s







(c) 5.0s

Fig.6 Robot movement in Y-branch pipe

端から手前右端へ移動していく.カメラ画像は,内部の 分岐の様子を撮影しているのがよくわかり,迫力のある 映像となっている.

5. まとめと今後の予定

本研究ではカプセルロボットの磁気式駆動システムの 基礎検討と設計を行い,実際に分岐構造のあるパイプに おいて,パイプ内を撮影しながらカプセル内視鏡ロボッ トを移動させることに成功した.以下に得られた結果を まとめる.

- (1) ワイヤレスカメラを搭載したカプセルロボット を水で満たしたパイプの中に入れ、外部磁界を 用いて分岐を持つパイプの中を移動させること に成功した。
- (2) ワイヤレスカメラは、水中であっても撮影対象 物との距離 15mm から 135mm までを鮮明に撮 影できることを確認した。
- (3) カプセルロボットの最高移動速度は約 100mm/s であった.
- (4) 移動制御可能なパイプと電磁石との最大距離は約 20mm であった.

最初の試作としては十分な性能を持つカプセル内視鏡 ロボットを開発することができた.実際に体内に入れる ためには,カプセルの小型化が必須であり,ワイヤレス カメラの開発に加え,小型化に伴う永久磁石の磁力の低 下を補うための電磁石の磁力強化が必要となると考えら れる.特に体内での移動のためには,カプセルと電磁石 の距離を 100mm 程度まで伸ばす必要があり,今後の大 きな課題として,磁気回路の効率化があげられる.

謝辞 本研究は愛知工科大学グループ研究費「医療 分野向け展示機器の開発」の助成を受けたも のである.

参考文献

- 大塚尚武: "カプセル内視鏡の現状と課題",電子情報通信 学会誌, Vol.96, No.6, pp.422-428, 2013
- 樋口和秀,梅垣英次他:"未来型自走式カプセル内視鏡の開発およびヒトへの応用",大阪医科大学,http://www.osaka-med.ac.jp/official/public, 2011/6
- 3)大塚尚武,進藤康則,植杉健志郎,木下慎也,西原弘訓, 梅垣英次,樋口和秀:"磁場を利用した自走式カプセル内 視鏡と生体への適用",日本機械学会2011年度年次大会 講演論文集,No.11-1, pp.1-4, 2011/9

- B Watson, J Friend, L Yeo: "Piezoelectric ultrasonic resonant motor with stator diameter less than 250 μ m: the Proteus motor", Journal of Micromechanics and Microengineering 2009;19;022001
- 5) 柴田賢, 永野佳孝: "カプセル内視鏡ロボットの遠隔移動 に関する基礎研究(磁気式移動システムの開発)", 日本 機械学会東海学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, pp.176-177, 2014/3

研究ノート

愛知工科大学におけるユニバーサルデザイン推進プロジェクト — 案内表示板のユニバーサルデザイン化に向けて —

山田真史**,丹羽崇文**,柳田順輝*,沙龍*,荒川俊也*

(2014年9月30日受理)

Universal Design Promotion Project at Aichi University of Technology - Producing Universal Design of Direction Board on Campus -

Masashi Yamada^{*}, Takafumi Niwa^{*}, Junki Yanagida^{*}, Sha Long^{*}, Toshiya Arakawa^{*}

(Received September 30, 2014)

キーワード:ユニバーサルデザイン, 認識, 案内表示 **Keywords**: Universal design, Recognition, Annunciator

1. はじめに

愛知工科大学におけるユニバーサルデザインの取り 組みとして推進しているグループ研究「愛知工科大学 におけるユニバーサルデザイン推進プロジェクト」に ついて紹介する.

ユニバーサルデザインとは、「さまざまな人たちが、 いつでも、どこでも、わけへだてなく安心して使える 製品を生み出すこと、これが未来をめざす製品作りの 基本になる」という考え方である¹⁾²⁾.ユニバーサルデ ザインの概念は比較的新しいものであるが、近年はユ ニバーサルデザインの概念が様々な場面で導入されて いる.特に近年は家電製品にユニバーサルデザインを 適用して使い勝手を向上させる事例³⁾やわかりやすい 情報発信のために文書・印刷物にユニバーサルデザイ ンを導入する事例⁴⁾が見られるようになった.

ユニバーサルデザインはデザインに当たっての基本 的な姿勢や思想を意味するものであり、グラフィック デザインや環境デザイン、プロダクトデザインのよう な「狭義のデザイン」と、戦略のデザインや組織構造 のデザインのような「広義のデザイン」の双方におい て今後ますます重要となる概念である⁵⁰. 企業活動に おけるブランドも「狭義のデザイン」と「広義のデ ザイン」の双方を必要とするものであり⁵,企業のデ ザイン,ひいては売れるためのモノづくりという観点 で考えると,ユニバーサルデザインは必要不可欠な要 素であろう.様々なモノづくり活動に関わる本学に おいても,ユニバーサルデザインの意識を持ったモ ノづくりが必要不可欠であることは言うまでもない.

さて、学内におけるユニバーサルデザインにつ いて考えてみると、本学に入学したばかりの学生 や、着任したばかりの教員、更には本学に訪問す る外来者が、目的の場所に辿り着けず、困惑して いる光景がしばしば見られることに気付いた.本 学は比較的小規模なキャンパスであるにもかか わらず、何故目的の場所になかなか辿り着けな いのか、そもそも何故目的の場所への行き方が わからないのか、ということを考えるに至った.

その結果,本学の案内表示の設置場所が不適切であ り,本学に不慣れな人にとって不親切なものであるの ではないか,と考察した.以上の考察を踏まえ,本学 内の案内表示について調べた上で,実際に案内表示が 不親切・不適切である場合,どのような案内表示が望 ましいか,ユニバーサルデザインの観点から検討する こととした.

* 愛知工科大学工学部, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

equally contributed

Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori Nishihasama-Cho, Gamagori, Aichi 443-0047 Japan
2. フィールドワーク

本プロジェクトは筆者ら愛知工科大学の学生主体の プロジェクト(荒川准教授が指導)であるが、本学の カリキュラムにおいて、ユニバーサルデザインに関す る授業が 2013 年のプロジェクト開始時は存在していな かった.そのため、プロジェクトを立ち上げるにあた って、学生自身で、「ユニバーサルデザインとは何か」 について学ぶことから開始した.

まず,案内表示のあるべき姿を検討するにあたって, ユニバーサルデザインとはどのようなものであるかを 調べるとともに,実際に見聞および調査を通して体験 することとした.そこで,「浜松市ユニバーサルデザイ ン条例」を制定しており,ユニバーサルデザインを取 り入れた街づくりを推進している浜松市にて調査を行 った.訪問先は浜松市内のユニバーサルデザインを紹 介している web サイト[®]に基づいて選定した次の場所 である.

- ・JR 浜松駅
- ・浜松市民協働センター
- ・アクト通り
- ・浜松駅北口バスターミナル
- ・ザザシティ
- · 遠州鉄道 新浜松駅前
- ・アクトシティ

この調査によって,看板の高さや間隔,文字の大き さなどもユニバーサルデザインを考える上で重要な要 件となることや,ピクトグラム(絵文字)を用いた場 合の方が内容を即座に認識しやすいということ,案内 表示などの形を工夫することでより認識・理解しやす くなることを学んだ (Fig.1).

3. 2013 年度の取り組み事例紹介

3.1 学内の案内板設置場所に関する調査

浜松市内での調査の経験を元に,実際に学内におい て,案内表示が機能しているかを調べることにした. そのため,まず,学内の案内表示について調査を行った.

調査は学内の平面図に案内表示の存在箇所をマーキ ングする形式で行い,案内表示については次の4つの 観点について分類した.

・部屋の名称(研究室・実験室名など)

部屋番号

・部屋の場所を示す地図の有無

・利用者となる教員の顔写真の有無

上記の分類方法に加え,壁に固定されている常設の案 内表示であるか,イーゼル(画架)等に装着されている, いわば可動式の案内表示であるかも加味して分類した.

なお、常設の案内表示であるか、可動式の案内表示 であるか、ということも分類項目として加えた理由は、 部屋の用途や利用者が変更された場合に、案内表示も 変更可能な形式であるか否か、また、設置場所が不適 切である場合に案内表示を移動することが可能か否か、 を確認するためである.

上記の調査によって,学内の既設の案内表示につい て,案内表示の内容(情報)と設置場所について一覧 としてまとめることができた.この調査から,常設の 案内表示については,部屋の名称,部屋番号,部屋が あるフロアといった情報しか記載されていないことや, 研究室,講義室,実験室といった部屋の用途が異なる にもかかわらず,全て同じデザインであることがわか った.

また,可動式の案内表示については様々な種類のも のが存在しているが,学科によって書かれている情報



Fig.1 Universal design around JR Hamamatsu station. Various color, braille and pictogram are used in order to improve recognition and enable pedestrian to know where he/she is now easily.



Fig.2 The aerial photograph of Aichi University of Technology. It is a little hard to find direction board around bus stop. In addition that, the direction board cannot be found on the way to main building from the bus stop.

が異なり,場所によっては,本来は案内表示があって 然るべき場所に案内表示そのものが無いというように, 設置の基準が定められておらず,曖昧であることがわ かった.加えて,設置場所を平面図に記して確認した 上で,実際に設置されている様子を観察すると,見づ らい場所や見つけにくい場所に設置されていると思わ れる箇所が数箇所存在した.

上記に加えて,本学キャンパス全体の案内表示についても調査を行った.大抵の学生,教職員,外来者は バスに乗って本学に来る.特に外来者はバス停から降 りて案内表示を頼りに目的とする場所に向かう.しか し,バス停付近の目立つ場所に案内表示が存在しない ため,困惑することが考えられる.見つけられたとし ても,その後,目的地に向かう途中に案内表示が少な いため,正しく目的地に辿り着けているか,という不 安が生じることが想定される.従って,外来者が,バ ス停から降りて,目的地まで辿り着く間の行動を考慮 して,キャンパス内の最適な場所に,キャンパス全体 の案内表示を設置する必要があると判断した.

本学キャンパス全体の案内表示について, Google mapの航空写真を基にして設置場所を示した例を Fig.2に示す.バス停に最も近い案内表示はバス停 から数メートル離れた箇所,本学体育館の前に設置 されているが,バス停から離れているため,見つけ にくい.また,表示自体も非常に小さいため,遠く から見て把握することができない.初めて本学を訪 れる外来者に特化して考えると,まず総合案内とな る本学2号館に行くことになるため,Fig.2におい て,バス停と2号館を結ぶ矢印のように行動するこ ととなるが,バス停付近に案内表示が無い,うまく 2号館に向かう方向に行けたとしても,途中にキャ ンパス全体の案内表示が無いため,自分の位置を把 握することができず,目的地となる2号館になかな か辿り着けないということが生じると考えられる.

以上より,本学キャンパス全体の案内表示,学内の 案内表示共に改善の必要があることがわかった.

最適な案内表示の設置場所の検討にあたっては,ビ デオカメラなどを用いて,実際の行動を撮影すること による実験や,アンケート調査を行うことで,実際に 人がどこで,何の手掛かりを,どのように活用するこ とで目的地に辿り着こうとするかを検証して決めてい く.また,実際に案内板を設置する際の寸法などにつ いては,平均的な成人男性の目線の高さになるように, 人間の身体に関するデータベース等を活用して検討を 進めたい.

3.2 案内表示使用文字に関する調査と改善案検討

案内表示によっては使用しているフォントの種類や文 字の大きさ,文字色と背景色のコントラストに起因して, 非常に判読しづらいものもあった.

そこで、フォントの種類、文字色と背景色のコントラ ストを変えて案内表示のサンプルを開発した (Fig.3).例 えば高コントラストの例として、文字色を青、背景色を 黄(もしくはその逆)にしたものや、低コントラストの 例として、文字色を緑、背景色を赤(もしくはその逆) にしたものを開発した.文字については、太字にするこ とによって判読性が向上するか否かについても検証した. 更に案内表示を目立たせるために、案内表示全体を枠で 囲むなどの工夫も施した.

開発した案内表示についてはノート PC で表示し、様々



Fig.3 Examples of developing direction board and the evaluation experiment. Contrast of text and background are changed and put a frame around annunciator in order to judge which direction board is most viewable. In addition that, the direction board is displayed on laptop PC and evaluate visibility from various visual range.

な距離においても判読性が担保されていることを検証した (Fig.3).

4. 今後の展望

ユニバーサルデザインを検討するにあたって、本学の 案内表示を題材として検討した結果について簡単に報告 した.本学では馴染みの薄かったユニバーサルデザイン の考えや評価方法の検討について,筆者ら学生中心の, 学生だけの取り組みということで進めた内容である.し かし、いわば「駆け出し」のプロジェクトであるために、 まだ明確な成果が出ているとは言えず、本論も活動の紹 介に留まっている.実際,2013年度は,作成した看板を 用いた評価実験を行うまでは至っておらず、設置場所の 検討についても不十分であった.現在(2014年9月末時 点)は Fig.3 に示した文字表記や, Fig.4 に示したように, ピクトグラムや色を用いた、シンプルであるがわかりや すいデザインで統一し,かつ,人をスムーズに目的地ま で誘導することができる案内表示を検討している. これ らの検討結果や今後の案内表示の試作結果に対して、ア ンケート調査や行動撮影およびその解析などの各種実験 による評価を実施することで、具体的な設置場所や設置 寸法などを検討して行きたい.



Fig.4 Example of developing direction board. Ordinal direction board is text-based thus it isn't seemed to be easily visible. This developing direction board uses color and pictogram in order to improve visibility.

付 記

参考文献

本内容は学生教育の一環として実施したものでもある. ユニバーサルデザインは文理融合領域であると考えられ るため、本論で述べた内容は非常に初学的な内容である が、理数系科目が余り得意でない理系学生に対する意欲 喚起をもたらすことが可能であると考えられる.学生教 育の効果については追って報告したい.

謝 辞

本論の内容は 2013 年度愛知工科大学グループ研究「愛 知工科大学におけるユニバーサルデザイン推進プロジェ クト」の支援を受けて行われた.

- 1) ユニバーサルデザインとは、 http://www.kokuyo.co.jp/creative/ud/aboutud/ud.html
- Mace Ron: Universal Design: Barrier Free Environments for Everyone; Designers West, 33(1), pp.147-152 (1985).
- 3) 高間俊明:家電製品の使い勝手をより良くするユニバーサ ルデザイン;東芝レビュー, Vol.65, No.2, pp. 7-10 (2010)
- 4) 蒲郡市:ユニバーサルデザイン文書マニュアル~すべての 人にやさしいデザインを目指して~(2013).
- 5) 財団法人産業研究所: デザイン導入の効果測定等に関す る調査研究, http://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/ mono/human-design/downloadfiles/koukasokutei/no1.pdf (2006).
- 浜松市,まちなかのユニバーサルデザイン: http://www.city.hamamatsu.shizuoka.jp/ud/universal/machinaka_ ud/index.html (2014)

研究ノート

宇宙エレベーターのケーブルの力学的考察

高橋義則*,加賀翔大郎**

(2014年9月30日受理)

A Study on Statics of the Cable for a Cosmic Elevator

Yoshinori Takahashi^{*}, Shotaro Kaga^{**}

(Received September 30,2014)

Abstract

A study on statics of the cable, which spans from the equator to cosmic space through a stationary satellite, is carried out using the rotational coordinate system with the same angular velocity as the earth's rotation. Two kinds of cables, one which has a constant cross section, and another one which gradually becomes larger in order to support its own weight, are examined. In our model a counter–balancing cable with a weight on the end is stretched from the stationary satellite outward in the direction of the cosmic space. Theoretical consideration is given to the effective acceleration due to the resultant force of the universal gravitation of the earth and the centrifugal force applied to the cable. We found that the effective acceleration changes from attraction to repulsion at a height of 5.63 times the earth's radius. Technical realization of such a cable in the future is discussed following a parameter of allowable stress divided by the density of cable materials.

キーワード:宇宙エレベーター,ケーブル,有効重力定数,静止衛星 **Key Words:** Cosmic Elevator, Cable, Effective Acceleration, Stationary Satellite

1. 宇宙エレベーター

宇宙エレベーターは、地表と宇宙をエレベーターでつ なぐ宇宙空間への往復輸送機関のことである.これまで は、ロケットを用いてその役割を担ってきているが、も し宇宙エレベーターが実現すれば、飛躍的に宇宙開発の 安全性や効率の向上と、コスト削減に貢献できるものと 考えられる.ロケットではその質量の大部分は燃料であ り、輸送物資は微々たるものである.宇宙エレベーター は SF 小説や科学者の突飛な空想の産物と考えられてき たが、理論的には十分可能なものであり、炭素繊維やカ ーボンナノチューブと言った、さらなる高強度な新素材 開発によって、エレベーターの基幹であるケーブルの技 術的な困難も解決されることが期待される.宇宙エレベ ーターは、赤道地表から静止衛星を結節として宇宙空間 に張ったケーブルとケーブルに取り付けた昇降機から構成される.ここでは、ケーブルが宇宙空間に張られた状態の力学的特性について考察し、昇降機についての力学的考察は行わないものとする.メカニズムは極めてシンプルであり、理論的な解明も単純で、万有引力と遠心力(回転運動に関わる慣性力)の知識により静力学的に十分になされるものである.

本研究は、大学1,2年次を対象とする物理の Problem Based Learning(PBL)の課題探索として成された研究であ る. 高校までの力学と微分積分の知識を駆使して、少し レベルの高い話題性のある課題に取り組み、達成感のあ る学習となることを目指している.

^{*} 愛知工科大学総合教育センター, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

Comprehensive Education Center, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

^{**} 愛知工科大学 1 年, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Undergraduate, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047, Japan

2. 宇宙エレベーターの仕組み

地球を回る人工衛星は、地球による重力と遠心力が釣 り合った状態で高度を保ち周回を続けている.特に、赤 道上空の高度約3万6000㎞を周る人工衛星は、「静止衛 星」と呼ばれる.それは、周期が地球の自転と同じにな るため、地表に対して天の一点に静止している様に位置 するためである.

Fig.1 に示す様に,この静止衛星から地表へ向けてケ ーブルを垂らすと,吊り下げた分,衛星の地球に向いて いる側の方がやや重くなり,このままでは徐々に地球の 重力に引かれて落下してしまうことになる.そこで,反 対の宇宙側にもケーブルを伸ばしてバランスをとれば, 衛星は静止軌道の高度を維持して回り続けることができ る.次に,下向きのケーブルをさらに伸ばす.すると, また重さが偏るので再び反対側も伸ばす.これを繰り返 していくと,下へ伸ばしたケーブルはやがて地表に到達 し,地表と宇宙を結ぶ長大な1本の紐になる.このケー ブルに昇降機を取り付け,人や物資を輸送できる様にし たものが宇宙エレベーターであり,原理はとてもシンプ ルなものである.

3. 回転座標系でのケーブルの静力学

赤道上空を周回する静止衛星の運動は, Fig.2 に示す 様に,地球中心を原点として地軸回りを地球の自転と同 じ角速度で回転する回転座標系で見ると,万有引力と慣 性力としての遠心力を考慮するだけの静力学で解析でき る.

地球中心から距離 r の宇宙空間で, 質量mの衛星に働 く重力 F は

$$F = G\frac{Mm}{r^2} - mr\omega_0^2 = m\left(\left(\frac{R}{r}\right)^2 g - r\omega_0^2\right) = mg_{\text{eff}}(r) \quad (1)$$

となり,右辺第1項は万有引力,第2項は遠心力である. ただし,Gは万有引力定数,Mは地球の質量である. ここで,

$$g = G \frac{M}{R^2} \approx 9.8 \,\mathrm{m} \,/\,\mathrm{s}^2 \tag{2}$$

は地表での重力加速度,



 $R = 6.37 \times 10^{6} m$ は地球半径, $\omega_{0} = 2\pi / (24 \times 60 \times 60) = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad / s }$ は地球自転の角速度.

$$g_{\rm eff}(r) = \left(\frac{R}{r}\right)^2 g - r\omega_0^2 \tag{3}$$

は地球中心から距離 r の宇宙空間での実効的な重力加速 度である.尚、 $g_{\text{eff}}(R) = g - 0.034$ となるので、赤道地 表では重力加速度に対する遠心力効果はほとんど無視で きる程度である.

実効的な重力加速度 $s_{\text{eff}}(r)$ を用いて静止軌道の高度 を求めることができる.衛星は、地球による重力と遠心 力が釣り合った状態で高度を保ち周回を続けているの で、地球自転の角速度 ω_0 と同じ角速度で赤道上空を周 回する静止衛星の高度は、

$$g_{\rm eff}(r) = 0 \tag{4}$$

によって求められ,式(4)の解 $r = r_0$ は,

$$\frac{r_0}{R} = \left(\frac{g}{R\omega_0^2}\right)^{1/3}$$
(5)

で与えられる.数値的には,

$$\frac{r_0}{R} = \left(\frac{9.8}{6.37 \times 10^6 \times (7.29 \times 10^{-5})^2}\right)^{1/3} \approx 6.63$$
(6)

したがって,

$$\frac{r_0 - R}{R} \approx 5.63 \tag{7}$$

つまり,赤道上空の高度 r₀ – R = 5.63×6.37×10⁶ = 35,800 km が衛星の静止軌道である.

式(5)を用いると、式(3)は

$$g_{\rm eff}(r) = \left(\left(\frac{R}{r}\right)^2 - \frac{r}{R} \left(\frac{R}{r_0}\right)^3 \right) g \tag{8}$$

となる. $g_{\text{eff}}(r)/g$ と r/Rの関係を **Fig.3** に示す.

4. 一様な断面の超長大ケーブル

静止衛星から地表に向けてケーブルを垂らすと,ケー ブルの重量に対するカウンターバランスとして宇宙側に もケーブルを延伸する必要がある.その計算のため,先 ず,地球中心から測って A から B までのケーブルの重 量*W*(*A*,*B*)を求めておくと便利である.先ず,ケーブルは, 材質が密度 ρ [kg/m³]で一様な断面積 *A*₀を持つとする. このとき,





r/R < 6.63のとき万有引力が遠心力に勝って地球とは引力, r/R > 6.63のとき遠心力が万有引力に勝って地球とは斥力, r/R = 6.63のとき両者が釣りあって無重力となる.

$$W(A,B) = \int_{A}^{B} \rho A_0 dx g_{\text{eff}}(x) = \int_{A}^{B} \rho A_0 dx \left(\left(\frac{R}{x} \right)^2 - x \frac{R^2}{r_0^3} \right) g$$

= $\rho A_0 (B - A) g \left(\frac{R^2}{AB} - \frac{1}{2} (B + A) \frac{R^2}{r_0^3} \right).$ (9)

特に、地表RからX(地表からの高度はX - R)まで の重量は

$$W(R,X) = \rho A_0 \left(X - R \right) g \left(\frac{R}{X} - \frac{1}{2} \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \left(\frac{R}{r_0} \right)^3 \right)$$

$$= \rho A_0 R g \left(\frac{X}{R} - 1 \right) \left(\frac{R}{X} - \frac{1}{2} \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \left(\frac{R}{r_0} \right)^3 \right)$$
(10)

である. 地球半径相当長のケーブルの重量 $\rho A_0 Rg$ で規 格化した $W(R,X) / \rho A_0 Rg$ とX / Rの関係を Fig.4 に示 す.

式(10)から,地表から静止軌道までのケーブルの重 量は

$$W(R, r_0) = \rho A_0(r_0 - R)g\left(\frac{R}{r_0} - \frac{1}{2}\left(\frac{R}{r_0}\right)^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{R}{r_0}\right)^3\right) \quad (11)$$

で与えられ,

$$\frac{R}{r_0} - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{r_0}\right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{R}{r_0}\right)^3 = 0.138$$
(12)

となるので、実効的なケーブルの重量は、地表での重量 $\rho A_0 (r_0 - R) g$ の約14%となることが分かる.したがって、 静止衛星から地表へ向けてケーブルを垂らすと、吊り下



Fig.4 地表RからX (地表からの高度X - R)までのケーブ ル重量とX/Rとの関係.

X/R<6.63 の高度までは万有引力が遠心力に勝って地球と は引力となっているので、ケーブルの重量は増加し続ける が、X/R>6.63 の高度になると遠心力が万有引力に勝って地 球とは斥力になるので、減少に転じる. X/R = 6.63 のとき ケーブルの重量は最大値となる.また、X/R = 23.6 のとき W(R,X) = 0、つまり、ケーブルの全長は無重量となる.

げた分,衛星の地球に向いている側の方がやや重くなり, このままでは徐々に地球の重力に引かれて落下してしま うことになる.次に,カウンターバランスとして宇宙側 に延伸するケーブル長を求める.ケーブル全長が無重量 となる条件は,式(10)から

$$\frac{R}{X} - \frac{1}{2} \left(\frac{X}{R} + 1 \right) \left(\frac{R}{r_0} \right)^3 = 0 .$$
 (13)

式 (13) を *X* / *R* について解くと

$$\frac{X}{R} = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2\left(\frac{r_0}{R}\right)^3} \approx 23.6 .$$
 (14)

また、恒等式

$$\frac{X}{R} = \frac{X - r_0 r_0 - R}{r_0 - R R} + \frac{r_0}{R}$$
(15)

によって,

$$\frac{X - r_0}{r_0 - R} = \frac{-\frac{r_0}{R} - \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + 2\left(\frac{r_0}{R}\right)^3}}{\frac{r_0}{R} - 1} \approx 3.02$$
(16)

を得る. こで、 $(X-r_0)/(r_0-R)$ は、静止軌道から錘ま での距離と地表から静止軌道までの距離の比を表す.静 止衛星から宇宙側に延ばしたカウンターバランスのケー ブル長は、 $X-r_0=3.02\times3.58\times10^7=108,000$ km と超長 大なものとなる.

そこで, Fig.5 に示す様に,反対の宇宙側にもカウン ターバランスとしてケーブル先端に錘を付けてバランス をとれば,短いケーブルと錘によって衛星は静止軌道の 高度を維持して周回を続けることができる.

Fig.5 に示す様に,先端に質量*M c* の錘を付けたケー ブルを静止衛星から宇宙側に X > r₀ の位置まで延ばせ ば,力の釣り合いは

$$W(R,X) + M_c g_{\text{eff}}(X) = 0$$
(17)

で与えられる.したがって,

$$M_{\rm c} = -\frac{W(R,X)}{g_{\rm eff}(X)} = \frac{\rho A_0 \left(X - R\right) g \left(\frac{R}{X} - \frac{1}{2} \left(\frac{X}{R} + 1\right) \left(\frac{R}{r_0}\right)^3\right)}{\left(\frac{X}{R} \left(\frac{R}{r_0}\right)^3 - \left(\frac{R}{X}\right)^2\right) g}.$$
 (18)

ここで、 $g_{eff}(X)$ として式(8)を用いた.さらに、錘の 質量Mcと地球半径相当長のケーブルの質量 $\rho A_0 R$ との比は

$$\frac{M_{\rm c}}{\rho A_0 R} = \frac{\left(\frac{X}{R} - 1\right) \left(\frac{R}{X} - \frac{1}{2} \left(\frac{X}{R} + 1\right) \left(\frac{R}{r_0}\right)^3\right)}{\frac{X}{R} \left(\frac{R}{r_0}\right)^3 - \left(\frac{R}{X}\right)^2}$$
(19)



Fig.5 カウンターバランスの錘

で与えられる. $Mc/pA_0R \ge X/R$ の関係は, Fig.6 に示される.

特に, *M c*=0 とすると,式(18)により *X*/*R*=23.6 と なることが分かる.また,*X*/*R*=6.63の無重力ポイン トでは,*M c*は発散する.これは,無重力ポイントでは, 錘に対する遠心力効果が効かないことを意味する.

5. 自重に耐えうる超長大ケーブル

今までの計算では、一様な断面積のケーブルを仮定し ていたが、現実的ではない. 超長大なケーブルを垂らす には、自重に耐えうるケーブル、つまり、ケーブルの任 意位置での引っ張り応力が許容値以下でなければならな い. 今、宇宙エレベーターの昇降機と積載荷重の和を W_{el} 、ケーブルの材質を密度 ρ [kg/m³]、任意位置x での 断面積をA(x)とすると、引っ張り応力が一定の値 σ_0 をとるケーブル断面積を決める方程式は

$$\sigma_0 = \frac{W_{\rm el} + \int_R^x \rho A(\xi) \mathrm{d}\xi g_{\rm eff}(\xi)}{A(x)}$$
(20)

という積分方程式になるが、式変形により

$$\sigma_0 \frac{\mathrm{d}A(x)}{\mathrm{d}x} = \rho A(x) g_{\mathrm{eff}}(x) .$$
⁽²¹⁾

つまり,

$$\frac{\mathrm{d}A(x)}{A(x)} = \frac{\rho}{\sigma_0} g_{\mathrm{eff}}(x) \mathrm{d}x = \frac{\rho}{\sigma_0} \left(\left(\frac{R}{x}\right)^2 - \frac{x}{R} \left(\frac{R}{r_0}\right)^3 \right) \mathrm{gd}x \quad (22)$$

という微分方程式になる.両辺を*x*に関して*R*から*X* まで,また,*A*(*x*)に関して*A*(*R*)から*A*(*X*)まで積分して,



$$A(X) = A_0 \exp\left(\frac{W(R,X)}{A_0\sigma_0}\right)$$
(23)

を得る.ただし、 $A(R) = A_0$ とした.ここで、W(R,X)は、 式 (10) で与えられる.また、式 (20) から $A_0\sigma_0 = W_{el}$ であ ることは自明である.引っ張り応力が一定の値 σ_0 をと る様にケーブルの断面が式 (23) によって定められたと き、地表 R から X (地表からの高度は X - R)までの ケーブルの重量を $W_A(R,X)$ とすると、付録に示す様に

$$W_{A}(R,X) = \int_{R}^{X} \rho A(x) dx g_{eff}(x)$$

$$= A_{0} \sigma_{0} \left(exp \left(\frac{W(R,X)}{A_{0} \sigma_{0}} \right) - 1 \right)$$
(24)

によって与えられる.また,式(24)は、 $\phi_0 \to \infty$ の場 合を考えると、ケーブルの重量 $W_A(R,X)$ は、断面積が A_0 の一様なケーブルに対する式(10)、W(R,X)と一致 することが分かる.









(a) $\rho Rg / \sigma_0 = 5$, (b) $\rho Rg / \sigma_0 = 10$, (c) $\rho Rg / \sigma_0 = 20$ r/R<6.63の高度までは万有引力が遠心力に勝って地球とは引力となっているので、ケーブルの断面積と重量は増加し続けるが、r/R>6.63の高度になると遠心力が万有引力に勝って地球とは斥力になるので、減少に転じ、r/R=6.63のときケーブルの断面積と重量は最大値となる.また、X/R=23.6のときW(R,X)=0,つまり、ケーブルの全長は無重量となる.

Fig.7 に $A(X)/A_0$ および $W_A(R,X)/A_0\sigma_0$ と X/R の 関係 を, (a) $\rho Rg/\sigma_0 = 5$, (b) $\rho Rg/\sigma_0 = 10$ および (c) $\rho Rg/\sigma_0 = 20$ の場合にそれぞれ示す. ただし, **Fig.7**(b), (c) では, $A(X)/A_0$ および $W_A(R,X)/A_0\sigma_0$ との差異は, この縦軸スケールにおいてほとんど見出されないので 1 つの曲線で表した.

Fig.7から分かる様に,この場合にも静止衛星から宇 宙側に延ばしたカウンターバランスのケーブル長は, *X*-*r*₀=3.02×3.58×10⁷=108,000 kmと超長大なものと なる.一様な断面積を持つケーブルと同様に考えて,反 対の宇宙側にもカウンターバランスとしてケーブル先端 に錘を付けてバランスをとれば,短いケーブルと錘によ って衛星は静止軌道の高度を維持して周回を続けること ができる.

先端に質量*Mc*の錘を付けたケーブルを静止衛星から 宇宙側に X > r₀の位置まで延ばせば,力の釣り合いは

$$W_{\rm A}(R,X) + M_{\rm c}g_{\rm eff}(X) = 0$$
⁽²⁵⁾

で与えられる.したがって,

$$M_{\rm c} = -\frac{W_{\rm A}(R,X)}{g_{\rm eff}(X)} = \frac{A_0 \sigma_0 \left(\exp\left(\frac{W(R,X)}{A_0 \sigma_0}\right) - 1 \right)}{\left(\frac{X}{R} \left(\frac{R}{r_0}\right)^3 - \left(\frac{R}{X}\right)^2\right) g}$$
(26)

ここで、 $g_{\rm eff}(X)$ として式 (8)を用いた. さらに、錘の 質量 Mc と、 $A_0\sigma_0/g = W_{\rm el}/g$ つまり昇降機と積載荷重 の和 $W_{\rm el}$ の質量との比は





X / R = 6.63の無重力ポイントでは、一様断面のケーブルの場 合と同じく M c は発散する. **Fig.8** に $M_c/(A_0\sigma_0/g)$ とX/Rの関係を, (a) $\rho Rg/\sigma_0 = 5$, (b) $\rho Rg/\sigma_0 = 10$ および (c) $\rho Rg/\sigma_0 = 20$ の場合にそれぞ れ示す.

6. 結論と議論

地球自転と同じ角速度の回転座標系で,先ず,一様な 断面積を持つケーブルを地表から静止衛星を結節として 宇宙空間に張るときの力学的特性を解明し,次に,超長 大なケーブルを張るには自重に耐えうるケーブル,つま り,ケーブルの任意位置での引っ張り応力が許容値以下 となる様に断面積が増大するケーブルを宇宙空間に張る ときの力学的考察を行った.

理論の基礎となる物理量として,式(3)または(8)で 実効的な重力加速度を定義した.これは,静止衛星を結 節としてケーブルを張るので,宇宙空間でのケーブルに は万有引力と遠心力の合力が重力加速度として作用する ことを表している.実効的な重力加速度は,Fig.3に示 す様に,地球半径で規格化して地表から5.63(地球中心 から6.63),つまり,静止軌道の高度を境界にして引力 から斥力に変わる.

ー様な断面積を持つケーブルに関しては,地表から静 止軌道までの実効的なケーブルの重量は,地表での重量 の約14%となることが分かった.また,静止衛星から カウンターバランスとして宇宙側に延ばすケーブル長 は,地表と静止軌道までの距離の3.02倍という超長大 なものとなることも分かった.

一方,自重に耐えうる現実的なケーブルに関しては, ケーブルの任意位置での断面積を決める積分方程式を解 くことにより,式(23)に与えられる断面積の長さ依存 性を求めた.また,断面積の解を用いて宇宙空間に張っ た実効的なケーブルの重量の長さ依存性を求め,式(24) に与えた.さらに,一様な断面積を持つケーブルの場合 と同様に,ケーブル先端の錘の質量とケーブル長の関係 が,式(27)に示された.

断面積,重量およびカウンターバランスの錘を表す式 に共通に現れる重要パラメータは、ケーブルの材料特 性を表す比強度 $\rho Rg/\sigma_0$ である.ポリアクリロニトリ ル (PAN)系炭素繊維が開発され、鉄に比べ比強度は 飛躍的に伸びた.現在、PAN系炭素繊維の引っ張り強 度の最高特性値と密度は製造法にもよるが、それぞれ、 6.5GPa および 2.0g/cm³ であることが報告されている.¹⁾ これらの値を用いて、パラメータ $\rho Rg/\sigma_0$ の値が計算で き、 $\rho Rg/\sigma_0 = 2.0 \times 10^3 \times 6370 \times 10^3 \times 9.8/6.5 \times 10^9 = 19.2 と$ 見積もられる. この場合, **Fig.7(c)**から $A(X)/A_0$ および $W(R,X)/A_0\sigma_0$, **Fig.8(c)**から $M_o/(A_0\sigma_0/g)$ の大きさが 評価できるが, いずれも桁違いに大きな値になり, 自重 に耐えうる超長大なケーブルを宇宙空間に張る実現性は 乏しいと推測される. 将来, PAN 系炭素繊維の引っ張 り強度と密度の物性改善, カーボンナノチューブといっ たさらなる新素材開発, および, 繊維からケーブルへの 作製技術の進歩から、宇宙空間へのケーブルの張り方の 工夫によって実現性が見えてくると思われる. 工夫とし て,総延長を1本のケーブルで張るのではなく, 例えば, 1段を 5,000km 間隔として,1段目は1本,2段目は2本, 3段目は4本のケーブル, というように多段式の構造に して無重力ポイントまで, さらにその先のカウンターバ ランスも同様の構造にしてケーブルを張ることも考えら れる.

ケーブルを昇降する昇降機の運動には、万有引力と遠 心力の合力という実効的な重力と、コリオリの力が影響 することになる.実効的な重力の作用下、昇降機がケー ブルを伝って昇降する動力は、太陽エネルギーに依拠す ることは合理的である.また、コリオリの力は、例える ならば、宇宙空間で昇降機が強い横風を受けるようなも ので、その対策は重要な技術課題となろう.実際、質量 1,000 kgのエレベーターの籠が 1,000 km /h の速度で鉛直 に降下する場合、東方向に 40.4N の力を受け続けること になる。ケーブルについては、本研究では宇宙空間に既 に張った状態で考察してきたが、実際には張るプロセス においてもコリオリの力が作用するので、これも同様に 重要な技術課題となろう.

付 録

引っ張り応力が一定の値 σ_0 をとる様にケーブルの 断面が式 (23) によって定められたとき,地表 R から X (地表からの高度はX - R) までのケーブルの重量 $W_A(R,X)$ を求める.先ず,

$$\int_{R}^{x} g_{\text{eff}}(\xi) d\xi \equiv G(x) - G(R)$$
(A1)

とする. このとき, 式(22)から

$$A(x) = A_0 \exp\left(\frac{\rho}{\sigma_0} (G(x) - G(R))\right).$$
(A2)

したがって,

$$W_{A}(R,X) = \int_{R}^{X} \rho A(x) dx g_{eff}(x)$$

= $A_{0} \rho \int_{R}^{X} exp\left(\frac{\rho}{\sigma_{0}}(G(x) - G(R))\right) g_{eff}(x) dx$
= $A_{0} \rho \int_{R}^{X} \frac{\sigma_{0}}{\rho} \frac{d}{dx} exp\left(\frac{\rho}{\sigma_{0}}(G(x) - G(R))\right) dx$ (A3)
= $A_{0} \sigma_{0} \left(exp\left(\frac{W(R,X)}{A_{0}\sigma_{0}}\right) - 1\right).$

今, $\sigma_0 \rightarrow \infty$ の場合を考えると、ケーブルの重量 $W_{\rm A}(R,X)$ は

$$W_{A}(R,X) \approx A_{0}\sigma_{0}\left(1 + \frac{W(R,X)}{A_{0}\sigma_{0}} - 1\right)$$

= $W(R,X)$ (A4)
= $\rho A_{0}Rg\left(\frac{X}{R} - 1\right)\left(\frac{R}{X} - \frac{1}{2}\left(\frac{X}{R} + 1\right)\left(\frac{R}{r_{0}}\right)^{3}\right)$

と成り, 断面が *A*₀ の一様なケーブルの重量と同じ式が 導かれる.ここで,係数 *ρA*₀*Rg* は断面積が *A*₀ の地球半 径相当長のケーブル重量を表す.

参考文献

 炭素繊維強化プラスチック,三菱化学株式会社, http://www.m-kagaku.co.jp 研究ノート

どうして5次方程式は解けないのか? - ガロア理論と3次方程式が解けるからくり-

石川雄二郎1

(2014年9月30日受理)

Solvability of Polynomial Equations

Yujiro Ishikawa¹

(Received September 30, 2014)

Abstract

This paper deals the solvability of polynomial equations, especially of 3rd and 5th order. Most parts of this paper consider the mechanism of solution formulas of 3rd order equations. We first study solution formulas of 3rd order equations that had found several hundreds years ago. Then we prepare fundamental concepts necessary to Galois theory. Through reconstructing the formulas by applying Galois' ideas, we understand why mathematicians could find the solution formulas of 3rd order equations.

キーワード:3 次, 5 次式, 解の公式, 可解性, ガロア理論 **Keywords:** Polynomial equations of 3rd and 5th order, Solution formulas, Solvability, Galois theory

1 はじめに

5次方程式は,特別な場合を除いて,一般的には解けない(解の公式はない)ことはよく知られている. 本文では「5次方程式には解の公式がない」からくりを,逆に解の公式の得られている3次方程式の詳細 な考察を通して理解する.この解けるからくりは5次方程式では構成できないので,一般的な5次方程式 には解の公式もないことを理解する.

歴史的には、16世紀半ばにカルダーノとフェラリによりそれぞれ3次、4次方程式の解の公式は発見された.しかし「5次方程式の解の公式」問題は、その完全な解決までに世界中の数学者の挑戦を300年近く退けた世紀の難問であった.この難問は22歳のアーベルにより「一般的な5次方程式には解の公式はない」という結果で解決された.さらに、「5次方程式の解の公式が存在するための必要十分条件」についても、19歳のガロアによって完全に解決された.これらの偉業は、2人の天才数学者の数奇な人生

アーベルはベルリン大学教授への招聘状が届く数日前に亡くなった.

決闘で倒れる前夜のガロアの走り書きが,後にガロア理論と賞賛される論文であった. と共に数学史上に燦然と輝くものとなっている.

2 2次, 3次方程式の解の公式

本文で考察する未知数 *x* の *n* 次方程式の係数は有理数, *xⁿ* の係数は 1, しかも既約(重解をもたない)とする.

2.1 1 の*n* 乗根

1のn 乗根(の1つ)を $\omega_n^1((\omega_n^1)^n = \omega_n^n = 1, (\omega_n^1)^m = \omega_n^m)$ で表す.例えば,

愛知工科大学 工学部 情報メディア学科, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西追町馬乗 50-2 Faculty of Engineering, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori 443-0047

$$\omega_2^{1} = -1, \quad \omega_3^{1} = \frac{-1 + \sqrt[2]{-3}}{2}, \quad \omega_4^{1} = \sqrt{-1}, \cdots$$

である.

2.2 2 次方程式の解の公式

3次方程式 (5) の補助方程式として現れる次の 2 次方程式 (1) の解 x1, x2 を求める.

$$x^{2} + bx - \left(\frac{a}{3}\right)^{3} = 0 \tag{1}$$

周知の解の公式より

$$x_1 = -\frac{b}{2} + \sqrt[2]{D}, \quad x_2 = -\frac{b}{2} - \sqrt[2]{D} \qquad \left(D = \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{a}{3}\right)^3\right)$$
 (2)

となる.

例題1 *a* = 6, *b* = 20 の場合の2次方程式(1)

$$x^2 + 20x - 8 = 0 \tag{3}$$

を解く. 解の公式 (2) より解 x1, x2 は

$$x_1 = -10 + 6\sqrt[2]{3}, \qquad x_2 = -10 - 6\sqrt[2]{3}$$
 (4)

である.

2.3 3次方程式の解の公式

x³の係数が1である有理係数の3次方程式

$$x^3 + px^2 + qx + r = 0$$

を考察する. この方程式は x = X - p/3 とおいて未知数 X の方程式に変換すると、 X^2 の項のない 3 次方 程式

$$X^{3} + aX + b = 0$$
 $\left(a = q - \frac{1}{3}p^{2}, b = r - \frac{1}{3}pq + \frac{2}{27}p^{3}\right)$

に変換できる. そこで, 改めて X を x と置き直し, x² 項のない 3 次方程式

$$x^3 + ax + b = 0 \tag{5}$$

の解 x₁, x₂, x₃ を求める解の公式を導く.

3次方程式(5)を解くために(カルダーノのひらめき!)

$$x = u + v \tag{6}$$

とおくと、(5)は

$$(u+v)^{3} + a(u+v) + b = u^{3} + v^{3} + (3uv+a)(u+v) + b = 0$$

となる.したがって,

$$u^3 + v^3 + b = 0, \quad 3uv + a = 0 \tag{7}$$

を満たす u, v を見出せば, (6) により解 x が求まる. (7) より, u³, v³ の和と積についての関係式

$$u^3 + v^3 = -b, \qquad u^3 v^3 = -\left(\frac{a}{3}\right)^3$$

が得られるので、 u³, v³は2次方程式の解と係数の関係より

$$x^2 + bx - \left(\frac{a}{3}\right)^3 = 0\tag{8}$$

の解であることが分かる. この2次方程式を解くと

$$x_1 = u^3 = -\frac{b}{2} + \sqrt[2]{D}, \qquad x_2 = v^3 = -\frac{b}{2} - \sqrt[2]{D}$$

が得られる (Dは(2)による).いま, 簡単のため

$$A = u^{3} = -\frac{b}{2} + \sqrt[2]{D}, \qquad B = v^{3} = -\frac{b}{2} - \sqrt[2]{D}$$
(9)

とおくと、求める $u = \sqrt[3]{A}, v = \sqrt[3]{B}$ は

$$u = \sqrt[3]{A}, \quad \sqrt[3]{A}\,\omega_3^{\ 1}, \quad \sqrt[3]{A}\,\omega_3^{\ 2}; \qquad v = \sqrt[3]{B}, \quad \sqrt[3]{B}\,\omega_3^{\ 1}, \quad \sqrt[3]{B}\,\omega_3^{\ 2} \tag{10}$$

となる.ここで、 ω_3^1 は1の3乗根

$$\omega_3^{\ 1} = \frac{-1 + \sqrt[2]{-3}}{2} \qquad \left(\omega_3^{\ 3} = 1\right)$$

である.

ただし, *u*,*v*は (7)の第2式を満たさなければならないので,解(10)の可能な3×3通りの組合せの中でこの条件を満たすものを計算により求めると,次の3組が求める方程式(5)の解

$$x_1 = \sqrt[3]{A} + \sqrt[3]{B}, \qquad x_2 = \sqrt[3]{A}\omega_3^{1} + \sqrt[3]{B}\omega_3^{2}, \qquad x_3 = \sqrt[3]{A}\omega_3^{2} + \sqrt[3]{B}\omega_3^{1}$$
(11)

であることが分かる (カルダーノ公式).

具体的に 3 次方程式 (5) の解 x1 を方程式 (5) の係数 a, b により陽に表すと

$$x_{1} = \sqrt[3]{-\frac{b}{2} + \sqrt[2]{\left(\frac{b}{2}\right)^{2} + \left(\frac{a}{3}\right)^{3}}} + \sqrt[3]{-\frac{b}{2} - \sqrt[2]{\left(\frac{b}{2}\right)^{2} + \left(\frac{a}{3}\right)^{3}}}$$
(12)

となる.

続いて,解の公式(10)により次の3次方程式の数値解を求める.

例題 2 次の 3 次方程式 (13) の解 x₁, x₂, x₃ を求める.

$$x^3 + 6x + 20 = 0 \tag{13}$$

a = 6, b = 20の場合であるので、補助方程式(8)は2次方程式

$$x^{2} + 20x - \left(\frac{6}{3}\right)^{3} = x^{2} + 20x - 8 = 0$$
(14)

となる. この方程式の解 x1, x2 は例題 1 で解いたように (4)

$$x_1 = -10 + 6\sqrt[2]{3}, \qquad x_2 = -10 - 6\sqrt[2]{3}$$

である. ここで

$$\left(-1+\sqrt[2]{3}\right)^3 = -10+6\sqrt[2]{3}, \qquad \left(-1-\sqrt[2]{3}\right)^3 = -10-6\sqrt[2]{3}$$

となることに注意すると,

$$u = \sqrt[3]{A} = \sqrt[3]{-10 + 6\sqrt[2]{3}} = -1 + \sqrt[2]{3}, \qquad v = \sqrt[3]{B} = \sqrt[3]{-10 - 6\sqrt[2]{3}} = -1 - \sqrt[2]{3}$$
(15)

を得る. このとき

$$uv = \left(-1 + \sqrt[2]{3}\right)\left(-1 - \sqrt[2]{3}\right) = -2 = -\frac{a}{3}$$

となり, (15) の *u*, *v* は確かに (7) の第 2 式を満たしているので

$$x_1 = u + v = \sqrt[3]{-10 + 6\sqrt[2]{3}} + \sqrt[3]{-10 - 6\sqrt[2]{3}} = \left(-1 + \sqrt[2]{3}\right) + \left(-1 - \sqrt[2]{3}\right) = -2 \tag{16}$$

は方程式 (13) の解である.残りの解 x2, x3 も,解の公式 (11) の第2式,第3式より

$$\begin{cases} x_2 = \left(-1 + \sqrt[2]{3}\right) \left(\frac{-1 + \sqrt[2]{-3}}{2}\right) + \left(-1 - \sqrt[2]{3}\right) \left(\frac{-1 - \sqrt[2]{-3}}{2}\right)^2 = -1 + \sqrt[2]{-3} \\ x_3 = \left(-1 + \sqrt[2]{3}\right) \left(\frac{-1 + \sqrt[2]{-3}}{2}\right)^2 + \left(-1 - \sqrt{3}\right) \left(\frac{-1 - \sqrt[2]{-3}}{2}\right) = -1 - \sqrt[2]{-3} \end{cases}$$
(17)

と求まる.

3 ベキ根による体の拡大

3.1 四則演算で閉じた数の世界

すべての整数の集合を ℤ, すべての有理数の集合を ℚ で表す. つまり

$$\mathbb{Z} = \{\cdots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \cdots\}$$
$$\mathbb{Q} = \{ \, 有理数の集合 \, \} = \left\{ \left. \frac{p}{q} \right| p, q \in \mathbb{Z}, q \neq 0 \right\}.$$

このとき,集合 Q の任意の 2 個の有理数の四則演算(0 による除算は除く)の結果は,また集合 Q の数の中に見出される.このような四則演算が自由に行える閉じた数の集合は体とよばれる.

3.2 ベキ根による体の拡大

2次方程式 (2) の解は,解が有理数となる特別な場合を除き,一般的には解を Q の中に見出すことはできない. このような場合は体 Q に新しい数を追加(付加)して数の世界(体)を拡大しなければ 体 の中 に方程式の解を見出すことはできない.

例題 1 の場合に \mathbb{Q} に付加する数は、2 次方程式 $x^2 - 3 = 0$ のベキ根 $\sqrt[3]{3}$, $\sqrt[3]{3}\omega_2^1 = -\sqrt[3]{3}$, であり、元々 \mathbb{Q} に含まれる数 -10,6 との四則演算により、次のように解 x_1, x_2 を表すことができる.

$$\begin{cases} -10, 6, \sqrt[3]{3} \longrightarrow 6 \times \sqrt[3]{3} \longrightarrow -10 + 6 \times \sqrt[3]{3} = x_1, \\ -10, 6, -\sqrt[3]{3} \longrightarrow 6 \times (-\sqrt[3]{3}) \longrightarrow -10 - 6 \times \sqrt[3]{3} = x_2. \end{cases}$$

このように集合 \mathbb{Q} に 2 次方程式 $x^2 - a = 0$ ($a \in \mathbb{Q}$) ベキ根 $\sqrt[2]{a}, \sqrt[2]{a}\omega_2^1$ を付加して体を拡大することを 2 次の**巡回拡大**という.また得られた体を \mathbb{Q} の**ベキ根拡大体**とよび

$$\mathbb{Q}\left(\sqrt[2]{a}, \sqrt[2]{a}\omega_2^{-1}\right) = \mathbb{Q}\left(\sqrt[2]{a}, -\sqrt[2]{a}\right) = \mathbb{Q}\left(\sqrt[2]{a}\right)$$

等で表す. ℚ(∛a) は体であるので四則演算について閉じているので上式が成立する. 拡大体 ℚ(∛a) の実態は

$$\mathbb{Q}\left(\sqrt[2]{a}\right) = \left\{ x + y\sqrt[2]{a} \, \middle| \, x, y \in \mathbb{Q} \right\} \tag{18}$$

で表される数の集合であり、単に ℚに ∛a を単に加えた集合ではないことに注意する.

例えば、 $a = 3, \alpha = 2 + \sqrt[2]{3}, \beta = -1 + 2\sqrt[2]{3}$ のとすれば

$$\alpha + \beta = 1 + 3\sqrt[2]{3}, \quad \alpha - \beta = 3 - \sqrt[2]{3}, \quad \alpha\beta = 4 + 3\sqrt[2]{3}, \quad \beta \div \alpha = -8 + 5\sqrt[2]{3}$$

となり, 演算結果はすべて $x + y \sqrt[2]{3} (x, y \in \mathbb{Q})$ の形に収まっている.

一般に、体 Q に付加する数が方程式 $x^m - a = 0$ ($a \in Q$) ベキ根である場合は、*m* 次の巡回拡大という. このとき、Q が 1 の *m* 乗根をすべて含んでいれば、 $x^m - a = 0$ の解 x_1, x_2, \dots, x_m について

$$\mathbb{Q}(x_1, x_2, \cdots, x_m) = \mathbb{Q}(x_1, x_1 \omega_n^{-1}, \cdots, x_1 \omega_n^{-m-1}) = \mathbb{Q}(x_1) \qquad (x_1 = \sqrt[m]{a})$$

が成り立つ.

n 次方程式に解の公式があるとは、体 ^①からの有限回のベキ根の付加による m_i 次の巡回拡大のくり返し

$$\mathbb{F} \stackrel{\scriptstyle m_{\sqrt{2}}}{\Longrightarrow} \mathbb{K}_1 \stackrel{\scriptstyle m_{2}}{\Longrightarrow} \mathbb{K}_2 \stackrel{\scriptstyle m_{3}}{\Longrightarrow} \cdots \mathbb{K}$$
(19)

により、すべての解 x₁, x₂, …, x_n を含む拡大体 K に到達できることを意味する(後述).

4 ガロア理論と解の公式

解の公式があるための条件を定めるガロアの理論では、方程式のすべて解を含む体 K の特別な写像(自 己同型写像)の成す群の構造が決定的な役割を演ずる.自己同型写像は慣用的に**自己同型**で多用される.

4.1 自己同型

体 \mathbb{K} の自己同型 f とは、 \mathbb{K} から \mathbb{K} への 1 対 1、かつ四則演算(任意の $x, y, z \in \mathbb{K}$ に対して)

$$\begin{aligned} x+y &= z \Longrightarrow f\left(x\right) + f\left(y\right) = f\left(z\right), & x-y = z \Longrightarrow f\left(x\right) - f\left(y\right) = f\left(z\right), \\ x\times y &= z \Longrightarrow f\left(x\right) \times f\left(y\right) = f\left(z\right), & x \div y = z \Longrightarrow f\left(x\right) \div f\left(y\right) = f\left(z\right) \end{aligned}$$

を保存する写像である.

体 K は体 F に n 次方程式のすべての解 x_1, x_2, \dots, x_n を付加して得られる拡大体とし、K の自己同型の 成す群(群については 4.2 節参照)を G とする. このとき G のすべての元がが F の数を不変に保つとき, G は F 上の K の自己同型という. すなわち、「F 上の」とは「F の数は不変とする」という意味である.

基本事項1 (証明なしで使用)

4.2 自己同型の成す群

最初に 3 次方程式 (5) のすべての解 x_1, x_2, x_3 を F に付加して得られるベキ根拡大体を K とし、K の F 上 の自己同型の成す群 G を考察する.基本事項 1 より、K の自己同型は解 x_1, x_2, x_3 の写像先のみ定めれば K のすべての数の写像先も一意に決まる.したがって K の自己同型の数は全部で 3! = 6 個 $e, f_1, f_2, g_1, g_2, g_3$ ある.このとき解 x_1, x_2, x_3 可能な写像先は表 1 (x_1, x_2, x_3 の順列) となる.

自己同型	e	f_1	f_2	g_1	g_2	g_3
<i>x</i> ₁ の写像先	x_1	x_3	x_2	x_2	x_1	x_3
x ₂ の写像先	x_2	x_1	x_3	x_1	x_3	x_2
x ₃ の写像先	x_3	x_2	x_1	x_3	x_2	x_1

表1 6個の写像先

上の表 1 において, e は恒等写像, f_1, f_2 は $\{x_1, x_2, x_3\}$ を巡回的に写す写像である. また, g_1, g_2, g_3 は $\{x_1, x_2, x_3\}$ のある 2 数を交換する写像である.

これら写像から任意に選んだ2個の写像をつなぐ操作を ○ で表せば, {*e*, *f*₁, *f*₂, *g*₁, *g*₂, *g*₃} の乗積表は表 2となる.

この表1から、演算法則 $f_2 \bigcirc g_1 = g_3$ 等が成り立つことが分かる.

$$\begin{cases} f_2 \bigcirc g_1(x_1, x_2, x_3) = f_2 \bigcirc (x_2, x_1, x_3) = (x_3, x_2, x_1), \\ g_3(x_1, x_2, x_3) = (x_3, x_2, x_1), \end{cases} \therefore f_2 \bigcirc g_1 = g_3 \end{cases}$$

また,表2の6個の自己同型 {*e*, *f*₁, *f*₂, *g*₁, *g*₂, *g*₃} から任意に2元*m*, *n* 選ぶと

$$n \bigcirc m = ?, \qquad n \bigcirc ? = m \tag{20}$$

の解?は表2の乗積表から一意に定まる. このような場合,自己同型 {*e*, *f*₁, *f*₂, *g*₁, *g*₂, *g*₃} は「つなぐ」演 算 ○ について**群**を成すという. 群の元の個数を群の**位数**という.

0	e	f_1	f_2	g_1	g_2	g_3
e	e	f_1	f_2	g_1	g_2	g_3
f_1	f_1	f_2	e	g_2	g_3	g_1
f_2	f_2	e	f_1	g_3	g_1	g_2
g_1	g_1	g_3	g_2	e	f_2	f_1
g_2	g_2	g_1	g_3	f_1	e	f_2
g_3	g_3	g_2	g_1	f_2	f_1	e

表2 自己同型 G の乗積表

4.3 部分群

表 2 の $e, f_1, f_2 = f_1^2$ に関係する部分のみ切り出すと表 3 の乗積表が得られる

衣3 即万件 61 の未慎衣					
\bigcirc	e	f_1	f_2		
e	e	f_1	f_2		
f_1	f_1	f_2	e		
f_2	f_2	e	f_1		

表3 部分群 G1 の乗積表

表3の乗積表を満たす自己同型の成す $G_1 = \{e, f_1, f_2\}$ について, G_1 から任意に2元m, n選ぶと,(20)を満たす解?は表3の演算表から一意に定まる.このような場合,群 $G_1 = \{e, f_1, f_2\}$ はGの部分群を成すという.

4.4 巡回群

さらに表3から

$$f_1 \bigcirc f_1 = f_2, \quad f_1 \bigcirc f_1 \bigcirc f_1 = e$$

が成り立つので、表3の群 $G_1 = \{e, f_1, f_2\}$ の乗積表は表4のように書くこともできる.

\bigcirc	e	f_1	f_2
e	e	f_1	$f_1{}^2$
f_1	f_1	$f_1{}^2$	e
f_2	$f_1{}^2$	e	f_1

表4 巡回群 *G*₁の乗積表

このような群はただ1つの元 f_1 で生成され $f_1^3 = e$ を満たすので(位数3の)**巡回群**という. 同様に $f^2 = e$ を満たす元 f で生成される位数 2 の巡回群 $\{e, f\}$ の乗積表を表 5 に示す.

以上で、ガロア理論による3次方程式解法のからくりを理解するための基本概念が準備できた.

5 3次方程式が解けるからくり

5.1 解けるからくりの要

次の基本事項2を示す.

基本事項2

体 E は与えられた n 次方程式の有理係数と必要な 1 のベキ根をすべて含むとする. 方程式のすべての解 y_1, y_2, \dots, y_n を E に付加して得られる拡大体を E₁ とする. このとき体 E₁ の E 上の自己同型の成す群が巡 回群 H ならば E₁ は E の n 次のベキ根拡大体でなければならない. このとき y_1, y_2, \dots, y_n を求める解の

民 百日同主 02 07 代码					
0	e	f			
e	e	f			
f	f	e			

表5 自己同型 G2 の乗積表

基本事項2は一般のn(素数)に対して成立するが,簡単のためn = 5の場合について示す. 解 y_1, y_2, \dots, y_5 をすべて含む体 \mathbb{E}_1 の \mathbb{E} 上の自己同型 H は巡回群であるとする:

$$H = \left\{ f, f^2, \cdots, f^5 = e \right\}, \qquad f: y_1 \longrightarrow y_2, \quad y_2 \longrightarrow y_3, \cdots, y_5 \longrightarrow y_1. \tag{22}$$

このとき,以下で示すように

$$p_1 = y_1 + f(y_1)\omega_5^1 + f^2(y_1)\omega_5^2 + f^3(y_1)\omega_5^3 + f^4(y_1)\omega_5^4$$
(23)

とおくと、 $p_1^5 = \theta_1$ は E の数となる. この事実は解の公式存在の要である. つまり群 H が巡回群であれ ば、(23) 右辺の y_1, y_2, \dots, y_5 の線形和の 5 乗は、 y_1, y_2, \dots, y_5 は E₁ の数であるにも関わらず、E の数と なる事実である. (23) の右辺は未知数 (解) y_1, y_2, \dots, y_5 の定数係数の 1 次式であり、(23) の左辺は E の数 $\theta_1 = p_1^5$ の 5 乗根 $\sqrt[5]{\theta}$ である. これはベキ根 $\sqrt[5]{\theta_1}$ の付加により体を拡大することにより、解の公式を見出 すための道が(後述のように)開けたことを意味する.

実際に $\theta_1 = p_1^5$ は \mathbb{E} の数であることを示す. 巡回群 Hの元 fは $f^5 = e$, 1の5 乗根 ω_5 は $\omega_5^5 = 1, \omega_5^6 = \omega_5^1, \omega_5^7 = \omega_5^2, \cdots$ をそれぞれ満たすので

$$f(p_1) = f(y_1) + f^2(y_1) \omega_5^1 + f^3(y_1) \omega_5^2 + f^4(y_1) \omega_5^3 + f^5(y_1) \omega_5^4$$

= { $y_1 + f(y_1) \omega_5^1 + f^2(y_1) \omega_5^2 + f^3(y_1) \omega_5^3 + f^4(y_1) \omega_5^4$ } ω_5^4
 $\therefore f(p_1) = p_1 \omega_5^4.$ (24)

が成り立つ. f は自己同型であり乗算 × を保つので

$$f(p_{1}^{5}) = f(p_{1} \times p_{1} \times p_{1} \times p_{1} \times p_{1}) = f(p_{1}) \times f(p_{1}) \times f(p_{1}) \times f(p_{1}) \times f(p_{1}) = f(p_{1})^{5}.$$

$$\therefore f(p_{1}^{5}) = f(p_{1})^{5} = (\omega_{5}^{4} p_{1})^{5} = (\omega_{5}^{5})^{4} p_{1}^{5} = p_{1}^{5} \qquad ((24) \ \text{SR})$$

$$\therefore f^{2}(p_{1}^{5}) = f \bigcirc f(p_{1}^{5}) = f(p_{1}^{5}) = p_{1}^{5},$$

$$\cdots,$$

$$\therefore f^{4}(p_{1}^{5}) = f \bigcirc f^{3}(p_{1}^{5}) = f(p_{1}^{5}) = p_{1}^{5},$$

$$\therefore f^{5}(p_{1}^{5}) = e(p^{5}) = p_{1}^{5}$$

上式より p_1^5 は巡回群 H のすべての元 f, f^2, f^3, f^4, f^5 について不変な数であり、 $p_1^5 = \theta_1$ は E の数となる (後述の基本事項3参照).

$$y_1 + f(y_1)\omega_5^1 + f^2(y_1)\omega_5^2 + f^3(y_1)\omega_5^3 + f^4(y_1)\omega_5^4 = \sqrt[5]{\theta_1}, \qquad \theta_1 \in \mathbb{E}$$
(26)

また (24) より次式が成り立つ.

$$\begin{aligned}
f(p_1) &= p_1 \,\omega_5^4 = \sqrt[5]{\theta_1} \,\omega_5^4, \\
f^2(p_1) &= f \bigcirc f(p_1) = f(p_1 \,\omega_5^4) = p_1 \,\omega_5^4 \,\omega_5^4 = p_1 \,\omega_5^3 = \sqrt[5]{\theta_1} \,\omega_5^3, \\
f^3(p_1) &= f \bigcirc f^2(p_1) = f(p_1 \,\omega_5^3) = p_1 \,\omega_5^4 \,\omega_5^3 = p_1 \,\omega_5^2 = \sqrt[5]{\theta_1} \,\omega_5^2, \\
f^4(p_1) &= f \bigcirc f^3(p_1) = f(p_1 \,\omega_5^2) = p_1 \,\omega_5^4 \,\omega_5^2 = p_1 \,\omega_5^{12} = \sqrt[5]{\theta_1} \,\omega_5^1, \\
f^5(p_1) &= ef(p_1) = f(p_1) = p_1 = \sqrt[5]{\theta_1}.
\end{aligned}$$
(27)

となって、E1 は E の数 θ のベキ根 ∛ θ1 の付加による巡回群により得られるベキ根拡大体

$$\mathbb{E}_1 = \mathbb{E}\left(y_1 y_2, \cdots, y_5\right) = \mathbb{E}\left(\sqrt[5]{\theta_1}\right) \tag{28}$$

であることが以下のように分かる.

(23) と類似な

$$\begin{cases} p_{2} = y_{1} + f(y_{1}) \omega_{5}^{2} + f^{2}(y_{1}) \omega_{5}^{4} + f^{3}(y_{1}) \omega_{5}^{6} + f^{4}(y_{1}) \omega_{5}^{8} \\ = y_{1} + f(y_{1}) \omega_{5}^{2} + f^{2}(y_{1}) \omega_{5}^{4} + f^{3}(y_{1}) \omega_{5}^{1} + f^{4}(y_{1}) \omega_{5}^{3} \\ p_{3} = y_{1} + f(y_{1}) \omega_{5}^{3} + f^{2}(y_{1}) \omega_{5}^{6} + f^{3}(y_{1}) \omega_{5}^{9} + f^{4}(y_{1}) \omega_{5}^{12} \\ = y_{1} + f(y_{1}) \omega_{5}^{3} + f^{2}(y_{1}) \omega_{5}^{1} + f^{3}(y_{1}) \omega_{5}^{4} + f^{4}(y_{1}) \omega_{5}^{2} \\ p_{4} = y_{1} + f(y_{1}) \omega_{5}^{4} + f^{2}(y_{1}) \omega_{5}^{8} + f^{3}(y_{1}) \omega_{5}^{12} + f^{4}(y_{1}) \omega_{5}^{16} \\ = y_{1} + f(y_{1}) \omega_{5}^{4} + f^{2}(y_{1}) \omega_{5}^{3} + f^{3}(y_{1}) \omega_{5}^{2} + f^{4}(y_{1}) \omega_{5}^{1} \end{cases}$$
(29)

を導入し整理すると

$$f(p_2) = p_2 \omega_5^3, \quad f(p_3) = p_3 \omega_5^2, \quad (p_4) = p_4 \omega_5^3$$
が成り立ち, (25) と同様にして次の関係式が得られる.

$$p_2^5 = \theta_2 \in \mathbb{E}, \qquad p_3^5 = \theta_3 \in \mathbb{E}, \qquad p_4^5 = \theta_4 \in \mathbb{E}$$
 (30)

また解と係数の関係から

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 = \theta \qquad (\theta \in \mathbb{E})$$

が成り立つ. さらに関係式 (22)

$$f(y_1) = y_2, \quad f^2(y_1) = y_3, \quad f^3(y_1) = y_4, \quad f^4(y_1) = y_5, \quad f^5(y_1) = y_1$$

を (29) に適用して、以上を整理すると、

$$\begin{cases} y_1 + \omega_3^{-1} y_2 + \omega_3^{-2} y_3 + \omega_3^{-3} y_4 + \omega_3^{-4} y_5 = \sqrt[5]{\theta_1} & (\theta_1 \in \mathbb{E}) \\ y_1 + \omega_3^{-2} y_2 + \omega_3^{-4} y_3 + \omega_3^{-1} y_4 + \omega_3^{-3} y_5 = \sqrt[5]{\theta_2} & (\theta_2 \in \mathbb{E}) \\ y_1 + \omega_3^{-3} y_2 + \omega_3^{-1} y_3 + \omega_3^{-4} y_4 + \omega_3^{-2} y_5 = \sqrt[5]{\theta_3} & (\theta_3 \in \mathbb{E}) \\ y_1 + \omega_3^{-4} y_2 + \omega_3^{-3} y_3 + \omega_3^{-2} y_4 + \omega_3^{-1} y_5 = \sqrt[5]{\theta_4} & (\theta_4 \in \mathbb{E}) \\ y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 = \theta & (\theta \in \mathbb{F}) \end{cases}$$
(31)

を得る.

このとき,連立1次方程式方程式 (31) の係数行列式は非ゼロ (-25∛5) なので,方程式 (31) を解けば 解 *y*₁, *y*₂, …, *y*₅ を求めることができる.すなわち,「解の公式が存在する」ことも示された.

以上の議論は5乗根 $\sqrt[5]{}$ の付加により体を拡大する場合に特化して展開されたが、一般の素数 nの場合にも適用できる.

5.2 3次方程式の解の公式の構成

本節では 3 次方程式 (5) の解の公式 (11) を具体的に構成する. F には後で必要となる 1 の 2 乗根 $\omega_2^1 \ge 3$ 乗根 ω_3^1 は, はじめから含まれている F = Q (ω_2^1, ω_3^1) とする. $\omega_2^1 = -1 \in \mathbb{Q}$ より, 実際は F = Q (ω_3^1) から体の拡大を開始するとしてもよい: F = Q (ω_3^1).

3次方程式(5)の解x1,x2,x3は(11)より

$$\sqrt[3]{\sqrt{\sqrt{2}}}$$

の項の線形和であるので、体 ℙからベキ根の付加による巡回拡大を2回くり返し拡大体 K を作る.

$$\mathbb{F} \stackrel{\stackrel{?}{\longrightarrow}}{\longrightarrow} \mathbb{K}_1 \stackrel{\stackrel{?}{\longrightarrow}}{\longrightarrow} \mathbb{K}$$
(32)

(1) 第1ステップ: 体 F から2次方程式(1)の解 x1, x2 を含む体 K1 へ拡大であり、付加するベキ根は

$$x^{2} - D = 0$$
 $\left(D = \left(\frac{b}{2}\right)^{2} + \left(\frac{a}{3}\right)^{3}\right)$

の解 $\left\{\sqrt[2]{D},\sqrt[3]{D}\omega_2^1\right\}$ である. 拡大体 \mathbb{K}_1 では四則演算が自由に行えるので

$$\mathbb{K}_1 = \mathbb{F}\left(\sqrt[2]{D}, \sqrt[2]{D} \omega_2^{-1}\right) = \mathbb{F}\left(\sqrt[2]{D}, -\sqrt[2]{D}\right) = \mathbb{F}\left(\sqrt[2]{D}\right)$$
(33)

が成り立つ.

付加するベキ根は $\sqrt[2]{D}$, $-\sqrt[2]{D}$ であり、基本事項1より \mathbb{K}_1 の \mathbb{F} 上の自己同型の成す群は

$$e: \left\{ \begin{array}{cc} \sqrt[2]{D} \longrightarrow \sqrt[2]{D} \\ -\sqrt[2]{D} \longrightarrow -\sqrt[2]{D} \end{array} \right. \qquad f: \left\{ \begin{array}{cc} \sqrt[2]{D} \longrightarrow -\sqrt[2]{D} \\ -\sqrt[2]{D} \longrightarrow \sqrt[2]{D} \end{array} \right. \right.$$

の2写像であり、 $f^2 = e$ となるので、 G_2 の乗積表は表5となり G_2 は巡回群である.

$$\theta = -b, \qquad \theta_1 = \sqrt[2]{D}$$

とすれば、n = 2 に対応する (31) より

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = \theta = -b \\ x_1 + \omega_2^{-1} x_2 = x_1 - x_2 = 2\sqrt[2]{D} \quad (D \in \mathbb{F}) \end{cases}$$
(34)

が得られる. この連立方程式を解くと

$$x_1 = -\frac{b}{2} + \sqrt[2]{D}, \qquad x_2 = -\frac{b}{2} - \sqrt[2]{D}$$
 (35)

が得られ、体 ℙから体 账1 へのベキ根拡大に対応する解の公式 (2) が得られた.

(35) は a = 6, b = 20 とすれば 2 次方程式 (3) の解を表し、実際に計算すると

$$x_1 = -\frac{20}{2} + \sqrt[2]{20^2 + 2^3} = -10 + 6\sqrt[2]{3}, \qquad x_2 = -10 - 6\sqrt[2]{3}$$

となり解(4)を与えている.

(2) 第2ステップ: 体 K₁から3次方程式 (5)の解 x₁, x₂, x₃を含む体 K への拡大であり、付加する ベキ根は

$$x^3 - A = 0$$

より $\left\{\sqrt[3]{A}, \sqrt[3]{A}\omega_3, \sqrt[3]{A}\omega_3^2\right\}$ である. ここで (計算により)

$$\omega_3^{\ 1}\sqrt[3]{A} + \omega_3^{\ 2}\sqrt[3]{A} = \sqrt[3]{B} \qquad \left(A = -\frac{b}{2} + \sqrt[2]{D}, \qquad B = -\frac{b}{2} - \sqrt[2]{D}\right)$$

が成り立つこと、および拡大体 K では四則演算が自由に行えることより

$$\mathbb{K} = \mathbb{K}_1\left(\sqrt[3]{A}\right) = \mathbb{K}_1\left(\omega_3\sqrt[3]{A}, \omega_3^2\sqrt[3]{A}, \omega_3^3\sqrt[3]{A}\right) = \mathbb{K}_1\left(\sqrt[3]{A}, \sqrt[3]{B}\right)$$

が成り立つ.

このとき $f_1: \sqrt[3]{A} \longrightarrow \sqrt[3]{A} \omega_3^1, G_1 = \{e, f_1, f_1^2\}$ (乗積表は表 4) と定義すると, 群 G_1 は体 K の K₁ 上 の自己同型の成す群であることが計算により確認できる(また 5.3 節参照). G_1 は巡回群であるので, こ の体の拡大について (31) を適用して解の公式を構成することができる. 実際,

$$\theta = 0, \qquad \theta_1 = p_2{}^3 = B, \qquad \theta_2 = p_1{}^3 = A$$

とすれば、(31)より

$$\begin{cases} x_1 + x_2 + x_3 = 0 & (0 \in \mathbb{F} \subset \mathbb{K}_1) \\ x_1 + \omega_3^{-1} x_2 + \omega_3^{-2} x_3 = 3\sqrt[3]{B} & (B \in \mathbb{K}_1) \\ x_1 + \omega_3^{-2} x_2 + \omega_3^{-1} x_3 = 3\sqrt[3]{A} & (A \in \mathbb{K}_1) \end{cases}$$
(36)

となる. この連立方程式を解くと

$$x_1 = \sqrt[3]{A} + \sqrt[3]{B}, \qquad x_2 = \sqrt[3]{A}\omega_3^{1} + \sqrt[3]{B}\omega_3^{2}, \qquad x_3 = \sqrt[3]{A}\omega_3^{2} + \sqrt[3]{B}\omega_3^{1} \qquad (A, B \in \mathbb{K}_1)$$
(37)

が得られ、体 𝑘 から体 𝔅 へのベキ根の付加による巡回拡大の系列に対応する解の公式 (11) が再度得られる. (37) は *a* = 6, *b* = 20 とすれば 3 次方程式 (13) の解を表し、実際に *x*₁ 計算すると

$$x_1 = \sqrt[3]{-10 + 6\sqrt[2]{3} + \sqrt[3]{-10 - 6\sqrt[2]{3}}}$$

となり解 x₁ を与えている((16)参照).

以上の議論でにおいて,解の公式が得られることを強調するために,(34),(36)の右辺の数値を意図的 に明示した.これは解の公式が分かっているから逆算してなせる技であることに注意する.しかし,(34), (36)の数値が具体的に示すことはできなくても,とにかく拡大する前の体の数の四則演算とベキ根演算で 表すことができる数であることは保証されている.「解の公式が存在する」ことを主張するにはこの保証だ けで十分である.

5.3 体のベキ根の付加による巡回拡大と群Gの部分群

次表のベキ根の付加による体の巡回拡大の系列 $\mathbb{F}, \mathbb{K}_1, \mathbb{K}$ に対し $G_2, \{e\}$ は対応する G の正規部分群の系列として導入される.すなわち, G_2 の固定する \mathbb{K} の数は \mathbb{K}_1 , $\{e\}$ の固定する \mathbb{K} の数は \mathbb{K} として定義される.このとき

部分群 *G*₁ は部分群 {*e*} を正規部分群としてもち, *G*₁ の {*e*} による右剰余類の成す群 *G*₁ は巡回群である.

群 *G* は部分群 *G*₁ を正規部分群としてもち, *G* の *G*₁ による右剰余類の成す群 *G*₂ は巡回群である. が成立する.

そしてこの事実が基本事項2成立の根拠となっている.

6 5 次方程式の解の公式

基本事項2から次のことがいえる.

(1) 3次方程式の場合,体 F のベキ根の付加による巡回拡大列 (31) と対応する群 G の(正規)部分群の降鎖列は

であり、実際に解の公式(37)が構成できた.拡大次数は順次2次,3次である.

(2) ところが、5次方程式の場合、体 F のベキ根の付加による巡回拡大列 (31) と対応する群 G の(正規) 部分群の降鎖列は

となるが, A₅ は位数 60 の交代群とよばれる非可換群であり巡回群(正確には群 A₅ の部分群 {e} に対す る右剰余類の成す群が巡回群)ではないことが分かっている.これは体 K の体 K₁ 上の自己同型の成す群 が巡回群でないことを示し,基本事項2により一般的な5次方程式に対しては解の公式を構成することは 不可能であることが分かる.

基本事項3 (証明なしで使用)

系列 (38) の途中に表れる部分群 G₁ のすべての元で不変となる体 K₁ の数は (G₁ に対応する) K₁ の数 のみである. これより, ある数が K₁ の数であることを示すには G₁ のすべての元で不変であることを示せ ばよい. □

7. 終わりに

本文では、3次方程式には解の公式が構成可能であるからくりを、ガロアの理論に基づき詳細に考察した.そして、方程式が解けるからくりを理解し、逆に5次方程式はこのからくりがないので方程式は解けない(解の公式はない)ことの概略を示した.

ガロア理論の数学専門書では (38) のような体の拡大系列と対応する自己同型の成す群の降鎖系列の1対 1対応 (ハッセ図)を基本にして展開される.そして本文の5.4節の内容が厳密に証明されガロア理論の基礎となる.しかし本文では「解の公式の構成」を前面に出すことを主題としたので,数学的な厳密性は後退しているが,方程式の解けるからくりは伝えられたのではと期待している.

最後に数学専門家でなくとも理解できるようなガロア理論の啓蒙書を出版される志賀浩二先生,小島寛 之先生に感謝いたします.

参考文献

(1) 石川雄二郎:「3次,4次方程式の解の公式と判別式」愛知工科大学紀要第10巻,研究ノート, pp.-(2013.3)

- (2) 小島寛之:「天才ガロアの発想力」 技術評論社, (2010)
- (3) 矢ヶ部巌:数 方式「ガロアの理論」現代数学社, (1984)
- (4) リリアン・リーバ-「ガロアと群論」みすず書房, (1984)
- (5) 志賀浩二:数学が育っていく物語「方程式」 岩波書店, (1994)

研究ノート

商店街活性化へのデジタルコンテンツの活用

加藤高明*, 伊藤亮佑**

(2014年10月15日受理)

Revitalization of Shopping Streets Using Digital Contents

Komei Kato^{*}, Ryosuke Ito^{**}

(Received October 15, 2014)

Abstract

Fukujuinari Goriyaku-Ichi is the commercial event on Gamagori Shopping Streets. We supported the 10th anniversary of Fukujuinari Goriyaku-Ichi using digital contents. This paper describes how to make Projection Mapping and Smartphone Game, and reports the reaction to the demonstration. To conclude, we consider the improvement points for the next Fukujuinari Goriyaku-Ichi.

キーワード:蒲郡商店街, 福寿稲荷ごりやく市, プロジェクションマッピング, スマートフォンゲーム **Keywords**: Gamagori Shopping Streets, Fukujuinari Goriyaku-Ichi, Projection Mapping, SmartphoneGame

1. はじめに

本学が立地する愛知県蒲郡市には,JR・名鉄蒲郡 駅を中心に点在する中央通り発展会をはじめとした,7 つの発展会で形成される蒲郡商店街がある.店主の高 齢化や後継者不足により,店舗数は全盛期の半数ほど に減少しているが,その現状を打破し,かつての賑わ いを取り戻すべく「福寿稲荷ごりやく市(以下ごりや く市)」が開催されるようになって,平成26年9月に 10周年を迎えた.10周年という節目に商店街の魅力を 新しい方法で伝え盛り上げようと,本学情報メディア 学科加藤研究室が,プロジェクションマッピングとス マートフォンゲーム(以下スマホゲーム)を制作して 出展した.

本稿では、その制作方法や出展時の状況について示 し、次回に向けた改良点等について述べる.

2. 福寿稲荷ごりやく市

ごりやく市は, 毎年6回3, 4, 5, 9, 10, 11月の第

4 日曜日に, JR・名鉄蒲郡駅北の中央通りで開催される. 中央通りの400m が歩行者天国となり,市内・外から の一般公募による出店者と地元商店街からの出店者で カラフルなテントが並ぶほか,落語や大道芸,ちんど ん屋,和太鼓演奏,ダンスなど多岐にわたるイベント が用意される.



Fig.1 ごりやく市のようす

* 愛知工科大学工学部 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2

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

Graduate School of Engineerring, Aichi University of Technology, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori, 443-0047, Japan

ごりやく市のマスコットキャラクター「こんきち」は, 近年のご当地ゆるキャラブームもあり認知度を高め, また「第3回全国ご当地うどんサミット in 東近江」で グランプリに輝いた,アサリの出汁が効いた「ガマゴ リうどん」も大変好評で,毎回 5,000 人ほどが訪れる.

3. デジタルコンテンツの制作

制作出展するデジタルコンテンツについては,研究 室内で卒業研究メンバーおよび大学院生で議論し,プ ロジェクションマッピングによるごりやく市 PR 動画 と商店街を舞台としたスマホゲームの制作を提案する こととした. どんなものかがイメージできるよう,商 店街役員に対し,デモによる説明会を実施した.

3.1 プロジェクションマッピングによるごりやく市 PR 動画の制作

商店街のマスコットキャラクター「こんきち」がご りやく市を楽しく紹介するストーリーで,そのこんき ちが住んでいると言われる中央通り商店街北西に位置 する薬證寺のほこらをイメージした背景スクリーンと, 鳥居をイメージした前面スクリーンに投影するもので ある.

①スクリーンの配置とプロジェクターの設置

ほこら型スクリーンは発泡スチロールで製作し,斜 めに配置することで側面および正面の2面の投影面を 確保する.鳥居型スクリーンは,ポップスタンドを使 用し発泡スチロールで装飾してほこら型スクリーンの 前に設置する.投影面が半透明となるようにし,そこ に映る映像が手前に浮かびあがるように見える効果を 取り入れた.鳥居型の半透明スクリーンは,透明のア クリル板に網戸の張替えネット2枚をはさみ込んで製 作した.これにより映像が投影されながらも半透明の ため,ほこら型スクリーンの映像も透けて見えるよう になる.

プロジェクターは短焦点型を1台のみ使用して,床から天井に向けて角度をつけて投影することで,鳥居型スクリーンの映像がほこら型スクリーンに映り込まないようにしている.

Fig.2 はスクリーンの配置とプロジェクターの設置を示したものである.

Fig.3に,実際のスクリーン等の設置状態を示す.プ ロジェクターは浄財箱の中に隠れるように設置し,き つねや石の表札なども製作した.



Fig.2 スクリーンの配置とプロジェクターの設置



Fig.3 実際のスクリーン等の設置状態

②ストーリーの内容

「こんきち」がごりやく市を楽しく紹介するストーリ ーで,次の内容による 3 分 50 秒の動画である.

- ・商店街の紹介
- ・ごりやく市の説明
- ・ガマゴリうどんの紹介
- ・ごりやく市認定商品(福寿餅,カレーパン,なご みだんご,福寿弁当)の紹介
- ・こんきち飴の紹介
- ・蒲郡観光大使しがせいこさんの紹介

Fig.4 に,ごりやく市認定商品の紹介映像を示す. ③使用機材およびソフトウェア 使用機材は次の通りである.

- ・映像投影用プロジェクター 三洋電機 短焦点型 LP-XL40
- ・動画再生用タブレット PC Apple iPad2 Wi-Fi 32GB
- またソフトウェアは次のものを使用した.
- ・プロジェクションマッピング用ソフトウェア
 PRSPCTV
- ・動画編集用ソフトウェア Adobe AfterEffects CS5. 5

3.2 商店街を舞台としたスマホゲームの開発

こんきちが商店街をめぐり,各店舗に入店するとそ れぞれ固有のクイズが出題され,正解に応じてポイン トが獲得できるスマートフォンを利用したゲームであ る.ポイントはごりやく市本部にて景品と交換ができ る.

①ゲームの内容

ごりやく市に関わる商店街の店舗のうち,28の個店 を配置して,こんきちを入店させることでクイズが出 題される。正解するとポイントが加算されるが,制限 時間は5分である.Fig.5にこんきちが商店街をめぐる 画面を示す.

各個店前には人がいて,近づいて話しかける操作を することにより,個店の写真やイラストと共に紹介文 が表示される.この紹介文には、クイズのヒントが隠 されていることもある. Fig.6 に,個店の紹介画面を示 す.

各個店から出題されるクイズは、人気商品を答える ものなど、実際の店頭で確認しないと答えられないも のもある.答えは4択で、正解を指でタップする.

②開発環境と動作可能スマートフォン ゲームの開発環境は次の通りである.

・開発環境

HTML5+JavaScript $\vec{n} - \vec{\lambda} \circ \vec{n} \rightarrow \vec{n} \rightarrow \vec{n}$ enchant. js

iOS, Android いずれのスマートフォンでもアプリ をダウンロードすることなく, Web へのアクセスによ り動作させることができる.

4. ごりやく市での反応

4.1 出展会場と実施回数

9月28日(日)のごりやく市当日は、商店街内遊技

Fig.4 ごりやく市認定商品の紹介映像



Fig.5 こんきちが商店街をめぐるゲーム画面



Fig.6 個店の紹介画面

業組合の1階駐車スペースを会場として、プロジェク ションマッピングの上映とスマホゲームの遊び方の説



Fig.7 会場(遊技業組合1階)



Fig.8 ごりやく市チラシ

明を行った. Fig.7 に会場(遊技業組合1階)を示す. 次に示される時間帯に合計3回,上映とスマホゲームの遊び方の説明を実施した.

- 12時
- ・13時
- 14時15分

Fig.8 にごりやく市のチラシを示す. 該当部分のデザ インも,加藤研究室にて制作した.

4.2 プロジェクションマッピングの反応

3回の上映を通して,約100名の来場があった. 毎回上映後に投影の仕組みや制作方法に関して質問 があるなど,興味・関心を持って観覧された.

また,上映後に内容に関するクイズが出題されるこ とを事前に告知し,注意深く観てもらえるようにした. クイズ正解者には、ごりやく市で本学のサークルが出店 するゲームコーナーの1回無料券を配布することで、よ り盛り上げることができた. Fig.9は、クイズ出題のよう す示したものである.

プロジェクションマッピングは,東京駅や大手テーマ パークなどでの上映が相次ぎ,認知度もあり関心度も高 い.一般の方からの反応は,専門業者ではなく,学生の 作品としての完成度の高さが十分評価されたという印象 であった.

4.3 スマホゲームの反応

プロジェクションマッピング上映の後,続いてスマホ ゲームの説明を行った. Fig.10の参加券を配布して操作 方法などの説明後,各自ゲームを開始した.

ゲーム参加人数は3回の合計で10数名であり,プロジェクションマッピング来場者の1割強に留まった.これは,幼稚園児や小学校低学年の子供とその親といった来場者が多数を占めたため,スマートフォンを所有していない,または子供が小さくスマホゲームをじっくり操作



Fig.9 上映後のクイズ出題のようす



Fig.10 スマホゲーム参加券

している余裕がないなどの理由が考えられよう.男子 中学生の4人組は、より多くのポイントを獲得しよう と手分けしてクイズの正解を求めて各店舗を訪れるな ど、大変楽しんでいるようすがうかがえた.日常的に スマートフォンを使用している中学生、高校生には非 常に参加しやすいゲームであると考えられる.

5. まとめ

ごりやく市10周年記念を盛り上げようと,プロジェ クションマッピングとスマホゲームを出展した.プロ ジェクションマッピングは,上映中に歓声があがった り,上映後には仕組みに関する質問がされるなど,ど の年齢層の方からも関心が高く大変好評であった.ス マホゲームは,来場者の年齢層にはスマートフォンの 利用があまりマッチせず,期待ほどの参加者がなかっ たのは残念ではあったが,スマートフォン活用世代に は,実店舗へ誘導できる「OtoO(Online to Offline)」の 可能性を感じることができた.オープンキャンパスで 利用できる,キャンパス内を楽しく巡る高校生向けス マホゲーム開発への応用を検討したい.

新聞社4社^(注1-4)の取材もあり,また蒲郡市ホーム ページでの告知,ごりやく市チラシへの掲載など各方 面から積極的なバックアップをいただいた.商店街か らは継続的な出展をとの要請もあり,11月28日のご りやく市ではプロジェクターを1台追加し,こんきち 自身へのマッピングやほこら型,鳥居型スクリーンと の連動など,高度化した第2弾の出展を計画したい.

謝辞

プロジェクションマッピングの制作に関しては加藤研 究室4年生江見和城君と加藤大貴君が担当したが、ナレ ーションの録音やほこら型および鳥居型スクリーンの製 作に関しては多くの情報メディア学科4年生諸君の協力 を得た.また出展にあたり商店街振興組合との仲介をし ていただいた蒲郡市役所観光商工課の水野竜一氏や、快 く出展場所を提供いただいたり、事前のデモに参加いた だいた商店街振興組合小田裕己理事長をはじめとする役 員の方々には、この場を借りて感謝の意を表したい.

注

- [1] 東愛知新聞 2014 年 9 月 13 日 1 面
 「PR 映像スクリーンに投影 蒲郡ごりやく市を『こんきち』
 案内 愛知工科大生が制作」
- [2] 読売新聞 2014 年 9 月 16 日朝刊名古屋版「蒲郡『ごりやく市』を PR 愛知工科大が映像制作」
- [3] 朝日新聞2014年9月17日朝刊三河版
 「映像作品で商店街応援 蒲郡,地元の愛知工科大生が魅力PR」
- [4] 中日新聞 2014 年 9 月 17 日朝刊東三河版「蒲郡のホコ天『ごりやく市』工科大生が目玉動画」

参考文献

- [1] 蒲生睦男「はじめて学ぶ enchant. js ゲーム開発」C&R 研究所 2013 年
- [2] 布留川英一 / 伏見遼平 / 田中諒「ゼロからはじめる enchant. js 入門」アスキーメディアワークス 2012 年
- [3] phi「enchant. js 開発のレシピ」秀和システム 2012 年
- [4] phi「enchant. js スマートフォンゲーム開発講座」 翔泳社 2012 年

研究ノート

学内風力エネルギーの一測定

橋本孝明*,長谷川康和*

(2014年9月30日受理)

A Measurement of Wind Energy on the Campus of Aichi University of Technology

Takaaki Hashimoto^{*} and Yasukazu Hasegawa^{*}

(Received September 30, 2014)

Abstract

As the renewable and dispersive energy, the importance of wind energy will become greater and greater. A measurement of the wind energy on the campus was recently carried. It became clarified that the useful wind energies existed on the campus in winter and early spring seasons, that is, in December, January, February, and March.

Keywords : Wind Energy on the Campus, Measurement

1 まえがき

化石燃料や原子力エネルギーなどによる大規模,一 極集中型の発電所に対して,再生可能,分散型エネル ギーとしての風力発電やソーラーパネルの重要度は, 大規模,中規模,小規模いずれの規模においても増し ており,今後さらに増していくであろうと考えられる.

風力発電,ソーラーパネルそれぞれに長所,短所が 指摘できるが,長所を生かし,短所を抑えることにより, さらなる普及が望まれる段階であろう.

この小文は,著者等によって最近学内で測定した風 カエネルギーのデータを紹介し,若干の考察を加えた ものである.小規模局所風力エネルギー活用の一助に なれば幸いである.

2 過去の学内風力エネルギー測定結果の概要

2.1 その1

学内風力エネルギーの最も古い測定は,著者のひと り橋本らによって実施されたことがあり,「年間の平均 風速が 3.5[m/s] 以上で,かつ 4[m/s] 以上の風速が 2000[時間]以上吹く条件」¹⁾を目安にして,有用性が検討され,「学内には,冬期に有用な局所風力エネルギーが存在する.」という結論を導いたことがある²⁾.当時の結果のうち,風力エネルギーの季節的特徴を述べると以下のようであった.

- (1) 冬期(12月,1月,2月)に風力エネルギーが 最も大きく、冬期3ヶ月間で年間風力エネルギー の約47%を占めており、平均風速は4.4[m/s]で あった。
- (2)春期(3月,4月,5月)は、冬期に次いで風力 エネルギーが大きく、春期3ヶ月間で年間風力 エネルギーの約26%を占めており、平均風速は 3.4[m/s]であった。
- (3)秋期(9月,10月,11月)は、春期につぐ風力 エネルギーがあるが、秋期3ヶ月間の風力エネル ギーは年間風力エネルギーの約18%で、平均風 速は3.0[m/s]であった。
- (4) 夏期(6月,7月,8月)は、風力エネルギーが 最も小さく、夏期3ヶ月間の風力エネルギーは 年間風力エネルギーの約10%で、平均風速は2.4[m/s]

^{*} 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

であった.

2.2 その2

前述その1の測定当時とは、学内の建築物等がかな り変化したため、当時とほぼ同じ場所で、平成23年3 月から7月まで風力エネルギーを予備的に測定して、 冬期の風力エネルギーとして3月、夏期の風力エネル ギーとして6月を取り上げ、紀要第9号に報告してい る³⁾.要点は以下のようである.

- (1) 冬期には,約 5[m/s] の平均風速が連続 10 時間吹 くことがある.
- (2) 夏期の平均風速は、2[m/s] 以下であり、風力エネルギーは非常に小さい.

あらためて,学内には冬期に有用な局所風力エ ネルギーが存在していると判断できることが判 明した.

3 今回の風力エネルギー測定の経緯と 測定場所および測定装置

前述その2の測定当時とは,仮自動車実習棟解体工 事が終了し,2階建ての鉄骨製学生駐車場が撤去され, 周辺の状況が一変したので,あらためて風力エネルギ ーを本格的に測定することとしたものである.

風速測定場所は前述その2の場合と同じ³⁾で,「テク ノ夢とぴあ」の建物東端から南に約6.5 [m]離れた場所 で,地上高1.8[m]の位置に球杯型風向風速計を設置し て自動測定した.測定データは,風向風速計に付属の 専用コンピュータ Weather Station に蓄えられた後,専 用ソフト Weather Link で,RS232Cによって汎用パソ コンに取り込んで処理するのも前述その2の場合と同 じ³⁾である.風向風速計の位置は以前と同じ³⁾である が,西方 80m 程度は更地の駐車場で,風を遮るような 高い建物はなく,風の障害物は(駐車中の車以外には) ない状況へと変化している.

4 風速測定結果

エネルギーレベルが高いものとして,平成 25(2013) 年12月,平成 26年(2014)年1月,平成 26(2014)年2月, 平成 26年(2014)年3月,平成 26年(2014)年4月のデ ータ,エネルギーレベルが低いものとして,平成 26年 (2014)年6月,平成 26年(2014)年8月のデータから, いずれも,その月の特徴的な風速状況を示す連続 24時 間程度,つまり丸1日間のデータを10分間隔で示して 考察する.なお,風速測定システムの最小処理時間が 1分のため,平均風速,最大風速はこの時間での処理 値である.

4.1 平成 25(2013) 年 12 月の風速データ

Fig.1 に,平成 25(2013) 年 12 月 27 日から 28 日にかけての,10 分間隔で 24 時間程度測定した結果を示す.

(1) 17 時 40 分から 20 時 40 分の時間帯で,約 5[m/
 s] 以上の平均風速が 3 時間程度連続して吹いたことが認められる.

この時期,一応利用可能なレベルの風力エネル ギーが存在すると判断してもよいのではないか.

4.2 平成 26(2014) 年1月の風速データ

Fig.2 に,平成 26(2014) 年 1 月 9 日の 10 分間隔で 24 時間程度測定した結果を示す.

 (1) 5 時から 20 時の時間帯で,約 5[m/s] 以上の平均 風速が連続して吹いており,10 時から 16 時の約
 6 時間には 7[m/s] 以上の平均風速が吹いていたことが認められる.

他にも同様な風力の日があり,この時期,利用 可能なかなり高レベルの風力エネルギーが存在



Fig.1 風速測定結果(平成 25 年 12 月 27 日から 28 日)



Fig.2 風速測定結果(平成 26 年 1 月 19 日)

すると判断できる.

4.3 平成 26(2014) 年 2 月の風速データ

Fig.3 に, 平成 26(2014) 年 2 月 15 日から 16 日の 10 分間隔で 24 時間程度測定した結果を示す.

(1) 24 時間すべてで,約 5[m/s] 以上の平均風速が連続して吹いたことが認められる.

十分利用可能な風力エネルギーが存在すると判 断できる.

4.4 平成 26(2014) 年 3 月の風速データ

Fig.4 に, 平成 26(2014) 年 3 月 5 日から 6 日の 10 分間隔で 24 時間程度測定した結果を示す.

(1) 24 時間すべてで,約 5[m/s] 以上の平均風速が連続して吹いたことが認められる.

十分利用可能な風力エネルギーが存在すると判 断できる.

4.5 平成 26(2014) 年 4 月の風速データ

Fig.5に,平成26(2014)年4月4日から5日の10分間隔で24時間程度測定した結果を示す.

(1) 15時30分から23時30分の約8時間で、約



Fig.3 風速測定結果(平成 26 年 2 月 15 日から 16 日)



Fig.4 風速測定結果(平成 26 年 3 月 5 日から 6 日)

5[m/s] 以上の平均風速が連続して吹いたことが認められる.

この時期,利用可能な風力エネルギーが存在す ると判断してもよいのではないか.

4.6 平成 26(2014) 年 6 月の風速データ

Fig.6 に, 平成 26(2014) 年 6 月 13 日から 14 日の 10 分間隔で 24 時間程度測定した結果を示す.

(1)約5[m/s]以上の平均風速が連続して吹いたのは、
 16時から18時の約2時間である。
 他の日も似たような傾向の風の日が多く、この
 時期、利用可能な風力エネルギーは余り期待で

4.7 平成 26(2014) 年8月の風速データ

きない.

Fig.7 に,平成 26(2014) 年 8 月 1 日の 10 分間隔で 24 時間程度測定した結果を示す.

- (1) 24 時間にわたり, 平均風速は 1[m/s] 以下であり, ほぼ無風状態である.
 - この時期,利用可能な風力エネルギーはほとん ど期待できない.



Fig.5 風速測定結果(平成26年4月4日から5日)



Fig.6 風速測定結果(平成 26 年 6 月 13 日から 14 日)



Fig.7 風速測定結果(平成26年8月1日)

4.8 まとめ

平均風速 5[m/s] 程度以上を利用可能な風力エネルギー レベルの目安¹¹として,今回の風速測定結果と過去の風 速測定結果(その1及びその2)とから,以下のように 判断できる.

- (1) 冬期から春先の12月、1月、2月、3月には、本
 学キャンパス内には、十分利用可能な風力エネルギ
 ーが存在する.
- (2) 夏期, 6月, 7月, 8月, 特に8月には,本学キャンパス内には,利用可能な風力エネルギーはほとんど期待できない.

本学キャンパス内には利用可能な風力エネルギーが存 在すると判断できるので,風力エネルギーの実用的利用 が進むことを願っている.

なお、今回報告の風速データは著者等が本学キャンパ ス内で測定したものである.蒲郡市内や近郊においても、 本学キャンパス内と同様の風力エネルギーレベルを示す 場所があるものと思われるので、本報告が広範囲の風速 エネルギー調査につながっていくことを期待している.

また,本報告に使用した風速データは収集したものの ごく一部である.関心のある方に活用して頂くことを願 っている.

参考文献

- 1) 牛山泉, 三野正洋:小型風車ハンドブック, パワー社, 1981年
- Takaaki HASHIMOTO, Shoushi INOUE, Yutaka KONISHI and Kouki YAMAJI: An Investigation on Local Wind Energy Resources, Joint IEW/JSER International Conference on Energy, Economy, and Environment, June 25 1996, Osaka Japan
- 3) 橋本孝明,井上久弘,長谷川康和:学内風力エネルギーと セイルウイング型風力発電機の活用,愛知工科大学紀要第 9号,2012年3月,pp.37-42

エッセイ

家康と蒲郡の関わり

橋本孝明*

(2014年9月30日受理)

Relationship between IEYASU and GAMAGORI

Takaaki Hashimoto*

(Received September 30, 2014)

1. まえがき

徳川家康は 1542 年岡崎に産まれ,1616 年駿府にお いて死亡しているので,75 年の生涯を生き,2016 年が 400 回忌に当たる.死亡後 400 年ということで,家康 に関係の深い,岡崎,浜松,静岡などで,記念行事が いろいろと企画され,準備されていることが伝えられ る.

蒲郡は家康の生誕地岡崎に近いこともあってか,あ まり有名でないながらも,家康と関わりのある場所, 事柄,人物などがいくつかある.このうち,家康の運 命に大きく影響したと筆者が考えている,蒲郡に関わ りのあることを2つ述べてみたい.

2. その1 竹千代 (家康) の危機

桶狭間の合戦で今川義元が織田信長に討取られてか ら、家康は今川氏従属の状態から脱し、西三河の一土 豪としての地位を確立して、戦国武将として頭角を現 わしてくるのであるが、今川氏から独立してからの彼 には、次のような大きな3つの危機があったとされる. 年代順に(1)三河一向一揆、(2)三方ヶ原の戦い(3) 本能寺の変である.

しかし、もっと深刻な危機は幼少時の人質時代にこ そあったのではないだろうか.家康は、1542 年松平 8 代広忠の嫡男として岡崎に生まれている.当時、父広 忠は尾張織田氏と駿河今川氏の2大強国に挟まれ、今 川氏に従う道を選んだ.このため、家康(幼名竹千代) は人質として今川義元の本拠駿府に赴くことになる. 6,7 歳頃のことであろうか.この時,竹千代の身に一大 事件が降りかかってくるのである.

2.1 竹千代の通った西ノ郡

人質として竹千代が岡崎から駿府に向かう道中に蒲 郡(当時西ノ郡)が含まれていた.岡崎城から東海道 筋を東に進み,山中郷から道を西ノ郡道に入る.桑谷 山の峠(Fig.1)から南を望むと眼下に三河湾が光輝い て見える.竹千代一行は勝善寺脇の山道を下り,坂本 部落を南下して行ったのであろう.落合川に沿って平 野部に出ると上ノ郷城が視野に入って来る.

西ノ郡上ノ郷城は、今川連枝の鵜殿長持の居城であ り、近郷近在では最も堂々とした構えの城であったろ う.当時の今川家中における鵜殿氏と松平氏の立場か ら考えて、竹千代一行は上ノ郷城に立ち寄って挨拶し て犬飼湊(Fig.2)に向かったのではないかと想像され る.犬飼湊は律令時代から開けた港であり、東の御津 湊や西の平坂湊などと並ぶ代表的な三河港のひとつで あった.

この犬飼湊から対岸の田原大津湊(現在は豊橋市の 老津辺りか)に向かったのである.

2.2 尾張織田氏の人質

当時田原を抑えていたのは戸田康光である.戸田氏 は平安貴族の流れを汲む戦国大名で,田原を中心とし て渥美半島から知多半島を領有していた豪族である. 今川氏下に入ることを潔よしとせず,勢力拡大の機を 虎視眈々と狙っていた.竹千代が犬飼湊から大津湊に

* 愛知工科大学自動車短期大学, 〒 443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2 Aichi University of Technology Automotive Junior College, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori, Aichi 443-0047, Japan


Fig.1 桑谷山の峠(山向こうは山中郷)



Fig.2 犬飼湊(名取山も見える)

到着したことを好機として,戸田康光は竹千代を駿府 に送らずに,捕縛して尾張織田信秀に売り渡してしま った.

織田信秀は竹千代を人質にしたことで松平広忠を支 配下に置くことを目論んだが、松平広忠はこれを拒否 して今川氏に属することを貫くのである.そのため、 当然人質の竹千代の命は風前の灯となったわけである が、命を落とすことなく、後に松平氏家臣団の奮闘も あって、織田氏との人質交換によってひとまず松平家 に戻ることになるのである.

尾張人質時代に,竹千代は織田信長と交流があり, 離合集散常であった戦国の世にあって,信長と家康の 生涯変わらなかった固い同盟はこの時期が影響してい るとも語られている.

なお,今川氏の強い怒りを買った戸田康光は攻めら れ,田原に根を張った戸田氏は衰退していくことにな るのである.

3. その2 家康の独立

桶狭間合戦後の家康は、今川家を継いだ氏真につか

ず離れず,織田信長とも完全に敵対するわけでもなく, 完全な独立の機会を窺っていたように感じられる.三 河北部の尾張織田方の城を攻めたり,西三河南部の平 定に努めたりと,松平勢力増強を心がけたようである.

やがて機が熟したと見るや、当時の今川方勢力最西部の鵜殿氏の本拠上ノ郷城(Fig.3)の攻略に取り掛かるのである.著者は、家康が戦国大名のひとりとして完全な独立を果たしたのは、この上ノ郷城攻略に成功した時と考えている.

3.1 上ノ郷城鵜殿氏

西ノ郡上ノ郷城鵜殿氏は,熊野権現につながる名門 である.熊野権現の荘園である蒲形,竹谷の現地荘官 として赴き,勢力を拡大して西ノ郡一帯に長く君臨し た戦国大名であると考えられる.

最盛期の鵜殿長持の時代には、今川義元と姻戚関係 を結び、今川氏家中で押しも押されもしない地位を占 めることになる.

長持の跡を継いだ長照の時代にも,尾張織田氏勢力 圏といえる位置に孤立したように存在した今川氏方大 高城の守備をまかされたほど,鵜殿長照に対する今川 義元の信頼は厚かった.

当時,今川氏下の一武将であった家康は大高城の鵜 殿長照のために,今川義元の命に従い,鷲津砦と丸根 砦の織田氏勢の妨害を退け,兵糧の運び入れに成功し ているのである.家康と長照は,今川氏家中の将の立 場とはいえ,互いの力量を認め合ったのではないかと 推察されるのである.

3.2 上ノ郷城攻略

祖父清康時代の松平家復興を目指したのか,今川氏 真を見限ったのか,家康は鵜殿長照の居城上ノ郷城攻



Fig.3 上ノ郷城遠景(中央森左端が本丸)



Fig.4 竹谷城遠景(森全体が城跡)

略に動くことになる.

当時西ノ郡には,竹谷松平氏(Fig.4),形原松平氏, 五井松平氏という松平氏勢力があった.勢力の中心は 竹谷松平氏で当主は清善である.鵜殿長照の実母は上 ノ郷城で長照を産んでから,故あって竹谷松平氏に嫁 して清善を産んでおり,長照と清善は異父兄弟である.

その縁で,松平清善は,時流を見て自分の宗家当主 家康への与力を,長照に勧めたのであるが,長照は頑 として受け付けなかったのである.長照に時流を見る 眼がなかったのか,あるいは,落ち目になりつつとは いえ今川氏にあくまで忠節を尽くす長照であったのか, はっきりしないが,城外東方の地(後世鵜殿坂と名付 けられた)で討ち死にするのである.著者としては, 上ノ郷城落城後の人質交換(捕虜となった長照の義母, 2人の息子氏長,氏次と駿府に人質となっていた家康 の正室,嫡男信康,長女亀姫の交換)のことを考えると, 長照は戦国の世には類稀な義将であったと考えたい.

松平清善を中心とする西ノ郡松平氏勢力と上ノ郷城 鵜殿の戦端が切られ,一進一退の戦いが続いていく. 戦況の芳しくないことに業を煮やした清善は家康に出 馬を要請する.それに応じた家康は上ノ郷城北西の名 取山に陣を敷き,総攻撃をかけ,漸く上ノ郷城攻略に 成功する.

この上ノ郷城攻略こそ,家康が戦国大名のひとりと して完全な独立を果たした時と考えられるのである. 上ノ郷城鵜殿氏は,桶狭間合戦以後,今川氏勢力最西 部の姻戚で繋がる最も信頼できる大名であったからで ある.討ち死にした長照の子ども等と,家康の正室等 との人質交換に今川氏真が応じているのはその証拠の ひとつといえるのではないだろうか.

ともかく,この事件によって家康は完全に今川氏と 手を切って独立独歩の道を歩むことになったものと考 えたい.

4. むすび

家康 400 回忌を前に,家康と蒲郡に関わりのあるこ とを 2 つのことを,家康の危機と家康の独立という視 点で述べてみた.

歴史を調べるのに、2つの側面があるように筆者は 感じている.ひとつは失敗を学ぶこと、もうひとつは 勇気を得ることである.当地蒲郡にも興味深い歴史が 非常に多いが家康と蒲郡に関わりは特に興味深いもの のひとつではないだろうか.

あとがき

小学生の頃,父親の書棚にあった蒲郡町史を読んで, 蒲郡の歴史に興味をもったことを思い出す.この小文 は,蒲郡町史,三州上郷城物語と三州上ノ郷城戦記(両 著とも郷土史家 小林林之助氏の力作),蒲郡市史,徳 川家康(山岡荘八著)などの記憶をたどりながら書い たものである.

できるだけ正確を期したつもりであるが,記述の誤 りは老いの身のことゆえご容赦願いたい.なお,2.1と 3.2には蒲郡の具体的な地名を書いておいた.現地を訪 れて,兵(つわもの)どもの夢の跡を偲ぶのも一興か と思う.郷土の歴史を考えるのに,著者は現地1000回 という精神を持ち続けたいと考えている.

1.著書

大西清,大西正敏,王 建義:JIS にもとづく機械設 計製図便覧(中国語版),第十一版改定作業,理工学社, 全華 (2014.1)

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26年度版) [第1版], (2014.3),学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期 大学

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 26 年度版,(2014.3), 学校法人電波学園 愛知工科大学自動車短期大学 中島 守, 掛布知仁, 高田浩充, 森 勝行, 吉田昌央: 基礎数学 平成 26 年度版, (2014.3), 学校法人電波学 園 愛知工科大学自動車短期大学

中島 守,川合宏之,鈴木貴晃:自動車 車検・整備ハンドブック(改訂版),(2014.4),(株)精文館

桜井 進, 大橋製作所, 杉森順子, 川崎ろまん:美し すぎる数学「数楽アート」を生んだ日本の底力, pp. 34-41, 中央公論新社, (2014.9)

2. 論文・国際会議

永野佳孝,清水英之,榑松弘城: 圧覚提示デバイスの開 発と触診トレーニングシステムへの適用,愛知工科大学 紀要,第11巻,pp.37-41(2014.3)

永野佳孝,鈴木佑典,高山慎吾:力覚提示デバイスと GPUを用いた医療向けシミュレータの基礎検討,愛知工 科大学紀要,第11巻,pp.59-69(2014.3)

Takuya Saito and Kenichi Mase: Actual Flight Movements of Electric Helicopters for Making a Disaster Area Monitoring System, IAES, International Journal of Robotics and Automation, Vol. 3, No.2, pp.75-83 (2014.6)

磯貝正弘,山路康貴:国際マイクロロボットメイズコン テストに向けたマイクロロボットの研究と教育,日本 産業技術教育学会・技術化教育の研究論文集, Vol.19, pp.65-71(2014.6).

Masakazu Nishi, Yoshifumi Ohbuchi, Hidetoshi Sakamoto and Hisahiro Inoue : Development of Evaluation Equipment of Electric Vehicle for Student Project Team, ICEER2014, Mo.5-4, CANADA (2014,8)

Takeshi Tateyama, Toshitake Tateno and Seiichi Kawata: A Scheduling Support System for Large-scale Facilities Using Reinforcement Learning in Consideration of Skill Educations and Working Conditions, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing (JAMDSM), Vol. 8, No. 5, p. JAMDSM0069 (2014.10)

森 雅和,五島敬史郎,津田紀生,名和靖彦,山田 諄: 半導体レーザの自己結合効果を利用した微小変位シス テム,電気学会論文C, Vol. 134, No. 11, pp.1684-1689 (2014.11).

Masahiro Isogai, Yasuhiko Nawa, Toru Iijima : Navigation Control for Exploration Rover with Microwave Doppler Sensors (Fabrication of Third Prototype Rover and Experiments), Proceedings of the 25th Annual Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS), pp.16-20 (2014.11)

磯貝正弘,松本将大,名和靖彦,坂口鋼一,花井雅昭, 飯島 徹:マイクロ波ドップラーセンサを用いたローバ 誘導に関する研究(試作3号機の製作と実験),計測自 動制御学会中部支部教育工学研究委員会・教育工学論文 集,Vol.37, pp.17-19, (2014.12).

磯貝正弘,福浦淳人,飯島 徹:振動駆動型マイクロロ ボットのワイヤレスリモートコントロールに関する研究 (1cm³サイズのマイクロロボットの3号機の試作と直線・ 旋回走行実験),計測自動制御学会中部支部教育工学研 究委員会・教育工学論文集, Vol.37, pp.20-22(2014.12).

磯貝正弘,名和靖彦,飯島 徹:惑星探査ローバの誘導 に関する研究と教育(試作3号機による実験とアンケー ト調査),計測自動制御学会中部支部教育工学研究委員 会・教育工学論文集,Vol.37, pp.45-47(2014.12).

T. Arakawa, H. Sato: Trial Development the Evaluation Method of Quantification the Feeling of Preventing Visibility by Front A Pillar, World Academy of Science, Engineering and Technology (WASET) Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 211-213(2014.3).

荒川俊也, 土谷 隆: 電力需給に関する観察と考察, 研 究集会「最適化:モデリングとアルゴリズム 26」統計 数理研究所共同研究リポート (2014.3)

Manabu Ohmichi: Thermal Stresses in an Eccentric Hollow Cylinder, Bulletin of AUT, pp.49-57, Vol.11(2014,3)

椎名保顕,菱田 誠:円柱細線を挿入した異方性多孔 質層内の自然対流熱伝達,愛知工科大学紀要第11巻. pp15-21,(2014,3)

阿部巳和, 梶谷満信:スライディングモード制御適用に よる DC モータ位置制御の性能向上,愛知工科大学紀要 第11巻. Pp29-36,(2014,3)

西田理恵子,安達理恵,カレイラ松崎順子:小学校外国 語活動における動機づけと情意要因に関する研究と実践 一実証研究の蓄積と今後の展望,外国語教育メディア学 会関西支部 メソドロジー研究部会報告論集,第4号査 読無,pp.63-74 (2014.3).

酒井志延,相澤一美,安達理恵:小学校外国語活動指導 者意識調査結果,JACET 問題教育研究会 2013 年度報告 書「英語教師のためのポートフォリオの普及と英語で 授業を行う能力規準に関する実証的研究」,査読無,pp. 25-41 (2014.3).

Toshihito Ohtake : In Situ ATR-FTIR Observation about Surfactant/Hydrogen-TerminatedSi(111) Interface in Solution, J. Sur. Eng. Mat & Adv. Tech., Vol. 4, No. 2, pp.47-52 (2014.4)

Toshiya Arakawa, Akira Tanabe, Shiho Ikeuchi, Aki Takahashi, Satoshi Kakihara, Shingo Kimura, Hiroki Sugimoto, Nobuhiko Asada, Toshihiko Shiroishi, Kazuya Tomihara, Takashi Tsuchiya, Tsuyoshi Koide: A male-specific QTL for social interaction behavior in mice mapped with automated pattern detection by a hidden Markov model incorporated into newly developed freeware, Journal of Neuroscience Methods, Vol. 234, pp. 127-134(2014.8).

Masayasu Tanaka, Fumiaki Obayashi, Toshiya Arakawa, Shinji Kondo, Kazuhiro Kozuka: Trial Estimation of Drivers' State Based on Blood Pressure, ICMEME 2014 : International Conference on Mechatronics, Electrical and Mechanical Engineering 2014, Kuala Lumpur, Malaysia(2014.8).

荒川俊也:出会い頭衝突防止立体音響警報の認知判断 に基づく効果検証,産業応用工学会論文誌, Vol. 2, No. 2, pp. 32-38 (2014.9).

Masayasu Tanaka, Fumiaki Obayashi, Toshiya Arakawa, Shinji Kondo, Kazuhiro Kozuka: Detection of Driver' s Surprised State Based on Blood Pressure and Consideration about Sensitivity of Surprised State, ICISIP2014: The 2nd International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2014, Kitakyushu, Japan(2014.9).

Manabu Ohmichi, Naotake Noda : Steady thermal stresses in the functionally graded circular cylinder with an eccentric outer boundary, Asian Conference on Mechanics and Structures 2014, pp.33-36, Nara. (2014.10) **杉浦伸明**:情報化の進展による電力消費への影響に関す る検討 -PC 普及に伴うインターネット利用やデータセ ンタ拡大による電力消費一,愛知工科大学紀要 第11 巻, p.43-47 (2014.3).

吉田 茂: 文法型圧縮法における文字ペア表の圧縮, 愛 知工科大学紀要 第11巻, p.1-7(2014.3).

加藤高明:授業中の発言を促すスタンプカードの試行導入,愛知工科大学紀要第11巻,pp.81-85 (2014.3).

Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, T. Nakagawa : Replacement Last Policies for Random Intervals with Working Time, 20th ISSAT International Conference Reliability and Quality in Design, Seattle, Washington, U.S.A., pp. 203-207 (2014.8).

Satoshi Mizutani, Xufeng Zhao, T. Nakagawa : Overtime Replacement Policies for Finite Running Intervals, 6th Asia-Paccific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenability Modeling (APARM2014), Sapporo, Japan, pp. 341-348 (2014.8).

Tomoki Itamiya : Evacuation Navigation System and Personal GPS Tracking System, Multinational Communications Interoperability Program in Japan (2014.4) .

杉浦伸明:「IEC 国際規格と SC48D の役割と活動紹介」 および「IT からスマートグリッドに至る社会動向」, IECSC48D「電子機器の機械的構造標準化」規格の現状 とマーケットでの適用セミナー,一般社団法人電子情報 技術産業協会, (2014.8)

Rie Adachi : A case study of Japanese college students' attitudes toward studying abroad and learning English - In order to adapt to a globalized world (Oral presentation), The 2014 AILA Congress, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Brisbane, Australia (2014.8).

Rie Adachi: The difference of sex and age on motivation and communicative attitudes among Japanese EFL pupils (Poster presentation), The 2014 AILA Congress, Brisbane Convention & Exhibition Centre, Brisbane, Australia (2014.8).

Nobuaki Sugiura: (国際規格) IEC 60297-3-108 Edition 1: Mechanical structures for electronic equipment –Dimensions of mechanical structures of the 482.6 mm(19 in) series – part 3 – 108: Dimensions of R-Type subracks and plug-in units, (2014.9).

杉浦伸明: IEC 国際規格と SC48D の役割と活動紹介 及び IT からスマートグリッドに至る社会動向, IEC SC48D「電子機器の機械的構造標準化」技術セミナー, 一般社団法人電子情報技術産業協会, (2014.12)

杉森順子:トヨタ産業技術記念館 20 周年特別展プロジェ クションマッピング「未来に続く夢」製作・総合演出, トヨタ産業技術記念館,名古屋市(2014.12)

Rie Adachi, Shien Sakai, and Kazumi Aizawa: A study on Japanese Elementary School Teachers' Perceptions of Foreign

Language Activities, JACET SIG-ELE Journal JACET 教育問題研究会会誌 言語教師教育 (Languages Teacher Education) Vol.1, No.2, pp.50-69 (2014). http://www.waseda.jp/assoc-jacetenedu/VOL1NO2.pdf

Tomoki ItamiyaToshinori Iwai Kaneko T: Super Lightweight and Precise 3D file Format for Clinical use, ADT Advanced Digital Technology in head & neck reconstruction 5th international conference, pp63-64 (2014).

加藤 寛, 中島 守, 鵜飼達也, 甲村一貴: 自動車整備 におけるタブレット端末の有用性について, 自動車整備 技術に関する研究報告誌 第43号, pp. 5-8 (2014.8) **鈴木宏和,中島 守,永田英雄,掛布知仁,岩瀬正幸,小野秀文,甲村一貴**:ソーラーカーの設計製作,愛知工 科大学紀要第 11 巻, pp.9-14(2014.3)

吉田昌央,中島公平,村上好生,高橋雅幸:二輪車空冷 エンジンのシリンダ冷却に対する設置角度の影響,設計 工学, Vol.49, No.8, pp.44-50, (2014.8)

Masao Yoshida, Masayuki Takahashi, Kohei Nakashima, Yoshio Murakami : Influence of Cylinder Mounting Tilt Angle on Cylinder Cooling in an Air-Cooled Engine, SAE 2014 World Congress, 14PFL-097, (2014.4)

3.特許

Hideo Fujimoto, Akihito Sano, and Yoshitaka Nagano: Device for measuring compressive force of flexible linear body, United States Patent 8,631,713, January 21, 2014

西尾幸宏,永野佳孝:遠隔操作型アクチュエータ,特許 5495862(登録日 2014 年 3 月 14 日)

西尾幸宏,永野佳孝:遠隔操作型アクチュエータの工具 先端位置検出装置,特許 5517526(登録日 2014 年 4 月 11 日)

Hideo Fujimoto, Akihito Sano, and Yoshitaka Nagano: Linear body drive device, United States Patent 8,715,271, May 6, 2014

磯部 浩, 西尾幸宏, 永野佳孝:遠隔操作型アクチュエータ, 特許 5538795 (登録日 2014 年 5 月 9 日)

Yoshitaka Nagano, Yukihiro Nishio, and Takayoshi Ozaki : Load detection device and load detection method, United States Patent 8,725,233, May 13, 2014

Hiroshi Isobe, Yoshitaka Nagano, and Yukihiro Nishio : Remote-controlled actuator, United States Patent 8,739,643, June 3, 2014

Hideo Fujimoto, Shigeru Miyachi, Tomotaka Ohshima, and Yoshitaka Nagano : Insertion device, United States Patent 8,764,766, July 1, 2014

中谷一郎:車輪型移動車,特許 特開 2014-168971, (2014 年 9 月 18 日公開)

宇野新太郎:アイチシステム(株):交差点車両衝突防止装置,特願 2014-151628.

4. 解説・総説

中谷一郎:月面探査ローバ LUBOT 一愛知工科大学の チャレンジー,日本ロボット学会誌, Vol.32, No.5, pp417 ~ 420, 2014

大竹才人:エネルギー問題の解決に向けた再生可能エネ ルギー, MIKAWANAVI, Vol. 62, pp.14-15, (2014.4)

安達理恵:「グローバル化に対応した英語教育改革実施 計画」の何が問題なのか, ATELAS Newsletter 56 号 寄稿文 (2014.2).

石川雄二郎: 3 次, 4 次方程式の解の公式と判別式 – 4 次方程式の解の検証と数値解一, 愛知工科大学紀要 第 11 巻, pp.65-76 (2014.3). 安達理恵:児童の英語に対する動機づけと異文化に関する態度特性から考察する小学校外国語活動 科学研究費 助成基盤研究(C)研究成果報告書(2014.6)

板宮朋基: 医用 3D モデルの可視化・可触化を日常的に 行うためには〜理論と実践〜,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,pp5-6(2014.11).

板宮朋基:大規模災害発生時の車避難~問題点と最新技術活用の可能性~,第359回東三河産学官交流サロン(2014.9).

安達理恵(2014)小学校外国語活動:外国語学習の初 めに学習者をどのように動機づけるか一外国語活動の 課題, 語学教育エキスポ 2014 予稿集, 査読無, p. 6. (北野ゆき・犬塚章夫・牧野眞貴と共同シンポジウム) (2014.3). 安達理恵:小学校外国語活動における児童の英語に対す る動機づけと異文化に関する態度特性に関する実証的調 査研究の総括,語学教育エキスポ 2014 予稿集,査読無, pp. 68-69 (2014.6).

5. 口頭発表

八木拓人,大西正敏:自律型案内ロボットの設計製作に 関する研究,日本設計工学会東海支部平成25年度研究 発表講演会論文集,p39-40(2014.3)

馬淵元司,伊奈哲弥,大西正敏:小型自律移動型2輪ローバの設計と特性評価の研究,日本設計工学会東海支部 平成25年度研究発表講演会論文集,p41-42(2014.3)

八木拓人,大西正敏:誘導制御を適用した学内ロボット に関する研究,日本機械学会東海支部第45学生員卒業 研究発表講演会,pp.216-217 (2014.3)

真野竜行,大西正敏:飛行船を用いた赤外線誘導型探査 ロボットの研究,日本機械学会東海支部第45学生員卒 業研究発表講演会,pp.220-221 (2014.3)

伊那哲弥,馬淵元司,大西正敏:小型自律移動型2輪ローバの制御回路と特性評価の研究,日本機械学会東海支部第45学生員卒業研究発表講演会,pp.224-225 (2014.3)

馬淵元司,伊那哲弥,大西正敏:小型自律移動型2輪ローバの構造設計と特性評価の研究,日本機械学会東海支部 第45学生員卒業研究発表講演会,pp.222-223 (2014.3)

鈴木佑典,永野佳孝:GPGPUを用いた皮膚モデルの設計と触診シミュレータへの応用,日本設計工学会東海支部平成25年度研究発表講演会,pp.9-11(2014.3)

寺田健人,永野佳孝:2台の力覚デバイスを用いた微細 作業支援システムの研究開発,日本設計工学会東海支部 平成25年度研究発表講演会,pp.13-14(2014.3)

寺田健人,永野佳孝:顕微鏡下手術支援システムの開発 研究,日本機械学会東海学生会第45回学生員卒業研究 発表講演会,pp.156-157(2014.3)

清水英之,永野佳孝:硬度と温度を用いた圧覚デバイスの開発研究(触診トレーニングマシンへの応用),日本 機械学会東海学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, pp.166-167(2014.3)

柴田 賢,永野佳孝:カプセル内視鏡ロボットの遠隔移 動に関する基礎研究(磁気式移動システムの開発),日 本機械学会東海学生会第45回学生員卒業研究発表講演 会,pp.176-177(2014.3)

鈴木佑典,永野佳孝:GPGPUを用いた皮膚モデルの 構築と触診シミュレータへの開発研究,日本機械学会 東海学生会第45回学生員卒業研究発表講演会, pp.206-207(2014.3)

磯貝正弘,松本将大,名和靖彦,坂口鋼一,花井雅昭, 飯島 徹:マイクロ波ドップラーセンサを用いたローバ 誘導に関する研究(試作3号機の製作と実験),計測自 動制御学会中部支部教育工学研究会講演会講演要旨集, pp.6, (2014.3).

機貝正弘,福浦淳人,飯島 徹:振動駆動型マイクロロ ボットのワイヤレスリモートコントロールに関する研究 (1cm³サイズのマイクロロボットの3号機の試作と直線・ 旋回走行実験),計測自動制御学会中部支部教育工学研 究会講演会講演要旨集, pp.7, (2014.3).

磯貝正弘, 名和靖彦, 飯島 徹: Navigation Control for Exploration Rover with Microwave Doppler Sensors (Fabrication of Third Prototype Rover and Experiments), Proceedings of the 25th Annual Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS), pp.16-20 (2014.11)

舘山武史, 舘野寿丈, 川田誠一:技能教育を考慮する強 化学習を用いた大規模施設作業スケジューリング支援シ ステム,計測自動制御学会システム・情報部門学術講演 会 2014(SICE SSI2014), CD-ROM 収録 (2014.11)

舘山武史:場面遷移ネットと機械学習を用いた離散・連 続混合システムのシミュレーションと最適化,平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会,CD-ROM 収録(2014.9)

大林紀章, 藁科翔吾,大竹才人:Au 微粒子による表面 プラズモン共鳴を利用した色素増感太陽電池の高効率 化,日本機械学会東海支部第45回学生員卒業研究発表 講演会,講演要旨集 No. 833,(2014.3)

菊池将史,三澤昂広,大竹才人:色素増感太陽電池作製 に向けた電気泳動法による TiO₂ 製膜,日本機械学会東 海支部第 45 回学生員卒業研究発表講演会,講演要旨集 No. 843,(2014.3)

佐藤拓也,天野広大,村上新:磁気浮上回転体用増速 装置の試作,日本機械学会東海学生会第45回学生員卒 業研究発表講演会講演前刷集,pp.192-193 (2014.3) 伊福輝,森山覚,椎名保顕:円管伝熱面上における 氷野融解実験,日本機械学会東海学生会第45回学生員 卒業研究発表講演会講演前刷集,pp.120-121 (2014.3) 町田圭祐, 梶谷満信:低コスト汎用エンジンコントロー ラーの試作,日本機械学会東海学生会第45回学生員卒 業研究発表講演会講演前刷集,pp.136-137 (2014.3)

井澤一成,石川隼大,河合弘貴,山本照美:円形プラス チックパイプの圧縮座屈特性について,日本機械学会東 海学生会第45回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, pp.40-41 (2014.3)

杉江亮輔, 荒川俊也, 小塚一宏:心拍による長距離運転 時の疲労評価と推定の可能性, 日本機械学会東海支部第 46回学生会卒業研究発表講演会 (2015.3).

荒川俊也, 鳩野敦生: 電池劣化予測における統計科学的 手法, 自動車技術会 2014 年度春季学術講演会 (2014.5.21).

田中雅康, 尾林史章, 荒川俊也, 近藤針次, 小塚一宏: 血圧を用いたヒヤリハットの推定と感受性に関する評 価,第12回 ITS シンポジウム 2014(2014.12.5).

荒川俊也:出会い頭衝突防止システムに向けたメロディ 調立体音響警報の試作と評価,ヒューマンインタフェー スシンポジウム 2014(2014.9.10).

荒川俊也:メロディ調立体音響警報の試作と評価:ITS 技術への展開に向けて,計測自動制御学会システム・情 報部門学術講演会 2014(2014.11.21).

荒川俊也, 土谷 隆:最大電力需給量の統計的解析と節 電の検証,計測自動制御学会システム・情報部門学術講 演会 2014(2014.11.23).

荒川俊也:ドライバ状態推定による安全運転支援,第3回愛知工科大学 ITS シンポジウム (2014.11.28).

荒川俊也:ITS 技術への活用に向けた立体音響警報の開 発と評価 , 第 12 回 ITS シンポジウム 2014(2014.12.5).

水谷聡志, 趙 旭峰, 中川覃夫: Inspection Overtime モ デルと他の点検モデルとの比較, 日本 OR 学会 2014 年 度春季研究発表会アブストラクト集, p.44-45 (2014.3).

三田直輝, 岡島健治:自律記憶型顔認識システム, 電子 情報通信学会 2014 年総合大会, D-12-24 (2014.3).

小塚一宏:"歩きスマホ"の危険性について,豊橋ロー タリークラブでの講演,豊橋市(2014.3) 水谷聡志,中川覃夫:ランダムな作業時間を考慮した Replacement Last 方策,電子情報通信学会技術研究報告, 信頼性研究会 R2014-5, pp. 23-27 (2014.5).

磯部和幸, 菱田 修, 宮脇英次, 小塚一宏:トヨタ自動 車(株)歩行災害防止活動についてーその1.5つの活 動指標を用いた歩行災害防止活動一,日本人間工学会, 設立50周年記念大会講演会,松山市(2014.6).

尾林史章,磯部和幸,吉田龍矢,菱田 修,宮脇英次, 小塚一宏:"トヨタ自動車(株)歩行災害防止活動についてーその2."ながら歩行"時および階段昇降時における視線・動作解析による効果検証一",日本人間工学会, 設立 50 周年記念大会講演会, 2014.6

安達理恵,酒井志延:グローバル化時代の英語・コミュ ニケーション教育-大学教員と企業の聞き取り調査か ら,中部地区英語教育学会 第 35 回研究大会,山梨大 学 (2014.6)

犬塚章夫,安達理恵,加藤拓由:問題別討論会:小学校 英語,どんな教科化にすべきか?「教科化の前に考えるー 目的と関心,指導者,内容」,中部地区英語教育学会第 35 回研究大会,山梨大学(2014.6)

宇野新太郎:近距離無線を用いた交差点安全支援―課題 と解決手法―,電子情報通信学会技術報告,MoNA2014-16, pp.1-6 (2014-7)

酒井志延,相澤一美,安達理恵:英語の教科化に向けて 今後の課題-外国語活動の指導者への意識調査結果から 読み取れること,小学校英語教育学会 第14回研究大 会,関東学院大学(2014.7)

Rie Adachi: A case study of Japanese college students' attitudes toward Foreign residents in Japan and Learning English -What is a global mindset?, 外国語教育メディア学会(LET) 第 54 回全国研究大会,福岡大学 (2014.8)

齋藤理一郎,安達理恵,酒井志延:外国籍生徒と共生す る教室での異文化交流授業実践,関東甲信越英語教育学 会 第 38 回千葉研究大会,明海大学 (2014.8)

田中雅康, 尾林史章, 荒川俊也, 近藤針次, 小塚一宏: 血圧に基づくヒヤリハットの検出と感受性に関する検 討, 産業応用工学会全国大会 2014, 北九州市(2014.9).

宇野新太郎:近距離無線を用いた交差点安全支援,平成 26年度第3回愛知県自動車安全技術開発研究会 (2014-11)

田中雅康, 尾林史章, 荒川俊也, 近藤針次, 小塚一宏: ヒヤリハット発生時を対象とした血圧の観点からのド ライバ状態検出と感受性に関する研究, 計測自動制御 学会 システム・情報部門 学術講演会 2014, 岡山市 (2014.11).

小塚一宏:歩行者・自転車運転者による"ながらスマホ" の危険性の実験検証,第3回愛知工科大学 ITS シンポジ ウム,蒲郡市(2014.11).

三村泰広,尾林史章,小野剛史,中谷周平,安藤良輔, 小塚一宏,小沢慎治: Intelligent Speed Adaptation が高 齢運転者の走行挙動と心的負荷に与える影響,第12回 ITS シンポジウム, 2-2B-01,仙台市(2014.12).

田中雅康, 尾林史章, 川 俊也, 近藤針次, 小塚一宏: 血圧によるヒヤリハット発生時のドライバ状態の検出に 関する研究, 第12回 ITS シンポジウム, 2-2B-05, 仙台 市(2014.12).

杉森順子,小沢愼治:変形させた円柱へのプロジェク ションマッピングのためのマスク作成,映像表現芸術科 学フォーラム,映像情報メディア学会技術報告 Vol.38, No. 16, pp. 9-10 (2014.3).

杉森順子,小沢愼治:数学をアート映像化する手法とその実践,芸術科学会 NICOGRAPH 2014 論文集, pp. 125-126 (2014.11.3).

板宮朋基,岩井俊憲:立体視可能なメガネ型シースルー ディスプレイを用いた Augmented Reality,日本シミュ レーション外科学会会誌, Vol22, No.1, pp74-75 (2014.11).

板宮朋基:大型ドライビングシミュレーターにおける津

波発生・道路冠水時運転体験システムの開発,平成26 年度第3回自動車安全技術開発研究会(2014.11).

森勝行,石原昭,各務敏彦:資格取得指導と学習意 欲の向上と学習効果,(公社)日本工学教育協会平成 26年度工学教育講演会講演論文集,pp.310-311

高橋雅幸,吉田昌央,中島公平,村上好生:様々なフィンの枚数とピッチを持つ空冷エンジンの冷却に対する設置角度の影響,日本設計工学会 2014 年度秋季研究発表 講演会講演論文集, pp.87-90, (2014.10)

愛知工科大学紀要規程

- 第1条 愛知工科大学および愛知工科大学自動車短期大学(以下本学という。)における学術研究の進歩と発展に貢献し、 その成果を内外に公表することを目的として紀要を発行する。
- 第2条 紀要の名称は、「愛知工科大学紀要」とする。
- 第3条 愛知工科大学紀要の編集,発行等についてはこの規程の定めるところによる。
- 第4条 愛知工科大学紀要は、原則として、毎年3月に発行するものとする。
- 第5条 愛知工科大学紀要に投稿できる者は、本学専任教員、職員、その他本学教授会で認められた者とする。
- 第6条 投稿者は,別に定める愛知工科大学紀要投稿細則に従い愛知工科大学紀要編集委員会(以下編集委員会という。) に原稿を提出するものとする。
- 第7条 編集委員会は、投稿原稿を審査し、その採否を決定する。

2. 研究論文等については,前項の審査をするに当たり,学内外の学識経験者に査読を依頼するものとする。

- 第8条 愛知工科大学紀要の発行部数と送付先については、編集委員会が決定する。
- 第9条 この規程の改廃は、編集委員会の議を経て、本学教授会が行う。

附則 この規程は、平成15年4月1日から施行する.

附 則 この規程は、平成19年4月1日から施行する.

愛知工科大学紀要投稿細則

- I. 愛知工科大学紀要の体裁, A4版, 左開きとし, 原則として横2段組みとする。
- II. 投稿原稿
 - 1. 投稿原稿は原則として未発表の論文・研究ノート・報告・翻訳・書評・資料・随筆等とする。ただし、既に発 表したものでも、その旨明記し、また未発表の事項を含む場合は審査の対象となり得る。
 - 2. 原稿の長さの上限は原則として刷上がり 10 頁以内とする。
 - 3. 研究論文の投稿は1人につき1編を原則とする。ただし,共同研究者として主研究者以外に名前を連ねることは, その限りではない。
- III. 投稿原稿の体裁
 - 1. 原稿は日本語または英語を原則とする。
 - 2. 数字はアラビア数字を用い、数量の単位は原則として国際単位系による。
 - 3. 図,表は、コンピュータでプリントアウトするかトレースしたもの、また、写真はそのまま掲載できるように したものを用いる。これらの図、表、写真には必要に応じて縮尺または縦、横の寸法を入れるものとする。
 - 4. 原稿に図,表,写真を入れる位置を指定し,明示する。
 - 5. 日本語原稿の場合は英語表題と英語氏名をつけるものとする。
 - 6.引用文献等は原則として最後に一括し,順に番号をつけて列記する。本文中では引用箇所に1),2)等の上つ き番号を記入する。引用文献の表記は原則として,編著者名,書名(または雑誌名,巻数),発行年,発行所, ページの順とする。
 - 7. 論文には英語のアブストラクトおよび日本語と英語でキーワードをつけるものとする。
 - 8. 執筆に関する詳細は紀要委員会の指示によるものとする。
- IV. 投稿原稿の受付
 - 1. 投稿原稿は、紀要編集委員会に提出すること。
 - 2. 投稿原稿の締切日は、編集委員会が決めるものとする。
 - 3. 投稿原稿受理年月日は編集委員会が投稿原稿を受けた日とする。

A Measurement of Wind Energy on the Campus of Aichi University of Technology Takaaki Hashimoto and Yasukazu Hasegawa 65

Essay

List of Publications during 2014.1 - 2014.12

編集委員会 発行者 委員長 椎名正顕 学校法人電波学園 愛知工科大学 委員 井上久弘 橋本孝明 〒443-0047 吉田 茂 愛知里蓮郡市西泊町里垂 50-2	愛知工科大学紀要	第 12 卷 平成 27 年 3 月 25 日
(五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音順) (五十音) (五寸) (五寸) (五寸) (五寸) (五寸) (五寸) (五寸) (五寸	編集委員会 委員長 椎名正顕 委員 井上久弘 橋本孝明 吉田 茂 (五十音順)	発行者 学校法人電波学園 愛知工科大学 愛知工科大学自動車短期大学 〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗50-2 TEL:0533-68-1135 FAX:0533-68-0352

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.12, 2014

CONTENTS

Papers

Steady Thermal Stresses in a Functionally Graded Cylinder with an Eccentric Hole	
Manabu Ohmichi	1
Close Contact Melting of Ice on Metal Foam Plates	
Yasuaki Shiina, Tetsuya Yamashita, Daichi Ogisu and Nobuhiro Kameyama	11
A Study on Library Software That Makes XML Data-Processing Easy, in Cooperation with CSV Files (Part 3)	
- Conversion of XMI Documents with a Hierarchy Form to a Flat Form -	
Shigeru Yoshida	17
Development of Drive System of Capsule Endoscope Robot	
Yoshitaka Nagano, Ken Shibata, Yuya Watanabe and Satoshi Fujita	27
Note	
Universal Design Promotion Project at Aichi University of Technology	
- Producing Universal Design of Direction Board on Campus -	
	33
A Study on Statics of the Cable for a Cosmic Elevator	
Yoshinori Takahashi and Shotaro Kaga	39
Solvability of Polynomial Equations	
	47
Revitalization of Shopping Streets Using Digital Contents	
	59

(continued)

Published by Aichi University of Technology 50-2 Manori Nishihasama-cho Gamagori Aichi 443-0047, JAPAN