

神奈川大学

工学研究所 所報

SCIENCE REPORTS OF
RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY

NO.28

NOV. 2005

工 学 研 究 所 所 報 第 28 号 目 次

巻 頭 言

工学研究所の過去・現在・未来	岩田 衛	1
----------------------	------	---

総 説

Walking Pattern and Compensatory Body Motion of Biped Humanoid Robot	Hun-ok Lim	2
映像が生体に与える影響の防止方法	椿郁子、齊藤隆弘、森田寿哉	10
鉱物ペーマイト ($[AlO(OH)]_n$) と有機配位子の直接反応によるアルミニウム配位化合物の合成	小出芳弘	17
DNA のバイオナノエンジニアリング	小野 晶	24
情報システム設計のためのセキュリティ要素	森田 光	32
日本における地震防災水道運用管理システム	瀬古沢照治	40

共同研究

宇宙環境におけるシンチファイバー検出器の実証化研究	田村忠久、鳥居祥二、常 進、高柳昌弘、Maurice Haguenauer	49
平面形状の大きな免震建物の地震時の振れ振動を伴う挙動に関する研究	島崎和司、荏本孝久、大熊武司	59
外部磁界の2次元走査法による超伝導量子干渉計の接合形状および接合配置の最適化	中山明芳、穴田哲夫、阿部 晋	69

年次報告		78
------------	--	----

編集後記		80
------------	--	----

工学研究所規程		81
---------------	--	----

C O N T E N T S

Preface

The past/the present/the future of Research Institute for Engineering	Mamoru IWATA ... 1
--	--------------------

Review

Walking Pattern and Compensatory Body Motion of Biped Humanoid Robot	Hun-ok LIM ... 2
Prevention methods for health effects caused by viewing video images	Ikuko TSUBAKI, Takahiro SAITO, Toshiya MORITA ... 10
The First Example of the Synthesis of Six-coordinate Aluminum(III) Compounds via the Direct Reactions of the Mineral Boehmite ($[AlO(OH)]_n$)	Yoshihiro KOIDE ... 17
Bio-nano-engineering of DNA	Akira ONO ... 24
Information-Security Elements to Design Information Systems	Hikaru MORITA ... 32
Water Management and Control System at Disasters in Japan	Teruji SEKOZAWA ... 40

Joint Research

Study on the performance of a scintillating fiber detector for cosmic-ray observations in the space	Tadahisa TAMURA, Shoji TORII, Jin CHANG Masahiro TAKAYANAGI, Maurice HAGUENAUER ... 49
Torsional Response of a base isolated large building	Kazushi SHIMAZAKI, Takahisa ENOMOTO, Takeshi OHKUMA ... 59
Optimisation for shape and position of junctions in superconducting quantum interfering devices using two dimensional scanning method of external magnetic field	Akiyoshi NAKAYAMA, Tetsuo ANADA, Susumu ABE ... 69

Aunual Reports of the Institure	78
---------------------------------------	----

Letters From the Editors	80
--------------------------------	----

Manuscript Submission Instruction	81
---	----

巻 頭 言

工学研究所の過去・現在・未来

岩田 衛*

The past / the present / the future of Research Institute for Engineering

Mamoru IWATA*

工学研究所は、様々な工業分野や他の学問分野に跨がる広範囲な学際領域での研究および調査を目的として、1975年に設立されました。2004年度までに54件の共同研究テーマについて成果をあげており、本年度は新たに3テーマが進行中であります。また、X線回折装置、電子顕微鏡をはじめとした研究装置・設備の共同利用、及び、これらの維持・管理・運営等の研究支援、さらには産官学交流への協力、県・市の委託による公開講座など、多方面にわたる活動を行ってきております。

私は2002年度から今年（2005）度末までの4年間、研究所長の任を受けました。この間、新しい時代における工学研究所の役割について議論を重ね、2003年度からは、工学研究所共同研究の方針を、短期的な研究成果に留まらず研究終了後に学外の研究費を獲得し、さらに成果を飛躍的に発展させるように改めました。また、本学工学部の教員だけでなく、必要に応じて本学他学部、他大学の教員、他研究所、企業の研究者・技術者と共同で研究を行うことも可能としました。

2004年度には、工学研究所を工学部から独立させ、一定の責任と自治機能を持ち、フットワークを軽くすることを図りました。これにより、「教育」の工学部、「研究教育」の工学研究科とも別の第三の組織として、工学研究所に「研究専門」の役割分担を明確にさせることができました。もちろん、この重要な決議は工学研究所運営委員会、さらに別途組織された工学系研究体制検討委員会（成田清正委員長）の皆様の助力によりです。

このような改革にも拘わらず、それ以上の勢いで大学を取り巻く環境や工学研究が置かれている状況は激変しており、さらなる産学共同研究の促進、外部資金導入の支援など、積極的な役割が工学研究所にも求められてい

ます。これらに対応するために、2005年度現在、客員教授制度の検討を行い、将来的には、外部の力を導入しながら、工学研究の世界拠点の一つとして発展させることを考えております。他大学、企業の有能な研究者が本学の組織に属していただける客員教授制度は、今後の本学の産学連携にとって不可欠であり、また、客員教授になっていただける方にとっても名誉な称号であるかと考えられます。

産学連携は本学以上に国立大学法人から最近とみに叫ばれております。国からの大学運営交付金が毎年1%ずつ下げられることになっておりますが、これは89ある国立大学法人の1つが毎年消えていくことに相当し、危機感をつのらせているからです。足りない経費の一部を産学連携により産業界から受けることが、そもそもの最近の産学連携の始まりです。今までの大学は「知の創造と継承」が目的でしたが、これからは「知の創造と活用」つまり金儲けも考えなければならないということでしょう。しかし、大学が余り金儲けの研究に走るのは本来の在るべき姿ではなく、やはり全体の2/3ぐらいの努力は基礎研究に注ぐべきであるかと思います。行きすぎた産学連携は大学と産業界の両者にとってもよいことではないでしょう。

もう一つ、残されている課題として、工学研究所専属教員の人事制度があげられます。本学にとって学部と大学院教育は今後益々重要になり、とすると研究体制の整備は二の次になりがちです。世界に通用する研究者を確保するためにも、研究者を守る砦が必要であり、この役割に、専属教員を有する工学研究所は最適な組織です。この場合、専属教員を固定することなく、学部・大学院教員との定常的な人事交流が前提かとも思います。

以上、工学研究所の過去・現在・未来を概説させていただきました。

*所長

Director of the Institute



Walking Pattern and Compensatory Body Motion of Biped Humanoid Robot

Hun-ok Lim*

Abstract

This paper presents a walking pattern generation method for biped walking. There are three walking phases such as a double support, a swing and a contact phase. In the swing phase, a leg motion pattern is produced by using a six order polynomial, while a leg motion pattern is generated by using a quintic polynomial in the contact and double support phase. When a biped humanoid robot dynamically walks on the ground, moments are produced by the motion of the lower-limbs. So, a moment compensation method is also discussed in this paper. Based on the motion of the lower-limbs and ZMP (Zero Moment Point), the motion of the trunk and the waist is calculated to cancel the moments. Through simulation, the effectiveness of the moment compensation methods is verified.

1. Introduction

Biped or multi-legged robots will be more useful than caterpillar robots for moving over uneven terrain or through narrow spaces. Especially, biped humanoid robots will be able to adapt well to a human living and working environments, and give affinity to a human because they have the same shape as a human. So, I have studied biped-walking motion with the aims to apply the biped robots to industrial and non-industrial areas. One thrust has been toward realizing complete dynamic walking on not only even or uneven terrain but also hard or soft terrain. The other thrust has been toward exploring robot-environment interaction and robot application.

Recently, many biped-walking robots have been developed. Humanoid Robotics Institute of Wasea University has developed a human-like biped robot, WABIAN since 1996 [1]. It consists of a total of 35 DOF; two 3-DOF legs, two 10-DOF arms, a 2-DOF neck, two 2-DOF eyes and a torso with a 3-DOF waist (see Figure 1). Its height is 1.66 m and its weight is

107.4 kg. ASIMO developed by Honda Motor Corporation in 2000, which has 28 DOF such as 6 DOF in each leg, 5 DOF in each arm, 1 DOF in each hand and 2 DOF in the head [2]. Its height is 1.2 m and its weight is 52 kg (see Figure 2). Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan launched 5-year Humanoid Robotics Project (from 1998 to 2002) and developed HRP-2P that can lie down and get up on a floor in 2003 [3, 4]. It consists of 30 DOF such as 6 DOF in each leg, 6 DOF in each arm, 1 DOF in each hand, 2 DOF in the neck and 2 DOF in the waist. Its height is 1.58 m and its weight is 58 kg (see Figure 3). Sony developed a small size humanoid robot, SDR-4X II [5]. It height is 0.58 m and its weight is 7 kg. It consists of 38 DOF such as 6 DOF in each leg, 5 DOF in each arm, 5 DOF in each hand, 4 DOF in the head and 2 DOF in the waist (see Figure 4). A compact size humanoid robot, MK-5, was developed by Aoyama Gakuin University [6]. It has 24 DOF such as 6 DOF in each leg, 5 DOF in each arm and 2 DOF in the head. Its weight is 1.9 kg and its height is 3.56 m. H7 was developed by University of Tokyo in 2001 [7]. Its weight is 55 kg and its height is 1.47 m. It has 30 DOF such as 6 DOF in each leg, 6 DOF in each arm, 1 DOF in each hand, 1 DOF in each foot and 2 DOF in the head. However, biped robots with serial links have many problems such as rigidity and energy consumption problem and position errors. Thus, Humanoid Robotics Institute of Waseda University has developed biped-walking robots having a parallel mechanism, WL-16, in 2002 [8]. The robots consist of twelve 1-DOF active linear actuators, six 2-DOF and 3-DOF passive joints.

Other researchers have studied the analysis, design and control of biped robots. Vukobratovic and his co-workers modeled the walking biped robot that was balanced by manipulating the projected center of gravity and the support area provided by the feet [9]. A sequence control method and a program control method were presented for continuous dynamic biped walking [10, 11]. A hierarchical control strategy was proposed to realize dynamic walking [12]. A virtual model control method was developed to control a pla-

* Associate Professor, Department of Mechanical Engineering

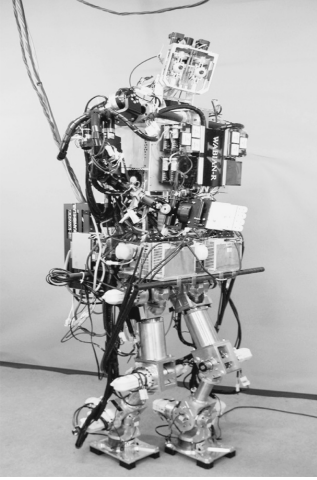


Figure 1: Photo of WABIAN-RI.



Figure 2: Photo of ASIMO.



Figure 3: Photo of HRP-2P.



Figure 4: Photo of SDR-4X II.

nar biped robot [13]. A control method to deal with sloped terrain was studied [14]. A linear inverted pendulum mode that is based on massless leg model was discussed to control a biped walking robot [15].

The adaptability of terrain can be regarded as one of the crucial abilities for biped walking robots to deal with rough terrain. In the case of a biped humanoid robot that consists of only lower-limbs, the lower-limbs have to perform two functions at the same time. One is a path control of the lower-limbs according to the surface of terrain. The other is a balance control not to fall down. In order to achieve the dynamic biped walking, the function for the stability should take priority over the function for the path control of the lower-limbs. Therefore, the terrain adaptability of this kind of biped robot is severely limited. If the biped robot has a trunk, the functions can be separated. Its trunk carries out the function for stability, while its lower-limbs work out the function for the path control.

In this paper, a pattern generation for biped locomotion is described. In a swing phase, a leg motion pattern is produced by using a six order polynomial, while a leg motion pattern is generated by using a quintic polynomial in a contact and double support phase. Also, a moment compensation method capable of canceling moments generated by the leg motion is discussed. In this moment compensation method, the motion of the trunk and the waist is employed.

This paper is organized as follows. Section 2 describes how to obtain a walking pattern of the lower-limbs. Section 3 illustrates a moment compensation method. Section 4 describes simulation of compensatory motion of the trunk. Finally, conclusion is discussed in Section 5.

2. Pattern Generation

In order to set a walking pattern of the lower-limbs of a biped humanoid robot, three walking phases are considered, which consists of a double support, a swing and a contact phase. During the swing phase, one foot is not constrained from the ground while the other foot is on the ground. As soon as the heel of the swing leg reaches the ground, the swing phase is changed to the contact phase. If both toe and heel of the swing leg contact on the ground, the phase becomes the double support phase. Figure. 5 shows three walking phases. In the contact and double support phase, a foot motion pattern on even or uneven terrain is made by using a quintic polynomial considering angle, angular velocity, angular acceleration. In the swing phase, a foot motion pattern $\mathbf{x}$ is generated by using the sixth order polynomial considering angle, angular velocity, angular acceleration, angle at a half point of the swing phase.

In making a smooth motion of the foot in the swing phase, at least seven constraints on $\mathbf{x}$ are evident. Three constraints on the function's value come from the selection of initial, intermediate and final values:

$$\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}(t_m) = \mathbf{x}_m, \quad \mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}_f. \quad (1)$$

An additional four constrains are the zero initial and final velocity and acceleration:

$$\dot{\mathbf{x}}(t_0) = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{x}}(t_f) = \mathbf{0}, \quad \ddot{\mathbf{x}}(t_0) = \mathbf{0}, \quad \ddot{\mathbf{x}}(t_f) = \mathbf{0}. \quad (2)$$

These seven constrains can be satisfied by a polynomial of at least sixth degree. Since the sixth order polynomial has seven coefficients, it can be made to satisfy the seven constraints given by Equation (1) and (2). These constraints uniquely specify the following equation:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 t + \mathbf{a}_2 t^2 + \mathbf{a}_3 t^3 + \mathbf{a}_4 t^4 + \mathbf{a}_5 t^5 + \mathbf{a}_6 t^6. \quad (3)$$

Also, the velocity and acceleration along this trajectory are as follows:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{a}_1 + 2\mathbf{a}_2 t + 3\mathbf{a}_3 t^2 + 4\mathbf{a}_4 t^3 + 5\mathbf{a}_5 t^4 + 6\mathbf{a}_6 t^5, \\ \ddot{\mathbf{x}}(t) &= 2\mathbf{a}_2 + 6\mathbf{a}_3 t + 12\mathbf{a}_4 t^2 + 20\mathbf{a}_5 t^3 + 30\mathbf{a}_6 t^4. \end{aligned} \quad (4)$$

Combining Equation (3) and (4) with the seven constraints, the seven coefficients can be obtained. Then, substituting these coefficients for Equation (3), the foot pattern will be obtained. Also, a waist pattern will be produced by a quintic polynomial, considering the movable range of the legs. Considering the foot and the waist pattern and DOF of the leg, a preset complete walking pattern of the leg can be set by using inverse kinematics.

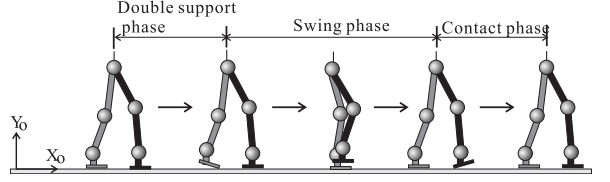


Figure 5: Three walking phases.

3. Moment Compensation

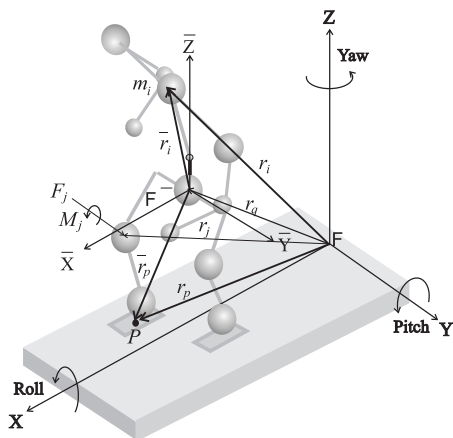
In this study, ZMP (Zero Moment Point) is employed as a stability criterion, which can indicate the gait balance during dynamic walking and provide a quantitative measure for reaction forces on the supporting foot. ZMP is a certain point around which the sum of all moments is equal to zero. For a biped humanoid robot to walk stably, the gravity and the inertial force of the robot must act to the direction of the ground, and the resultant force must act on a point in support polygon formed by the support foot.

Consider a 43 DOF biped humanoid model with rotational joints. The biped humanoid robot consists of two 6 DOF legs, two 7 DOF arms, two 3 DOF hands, a 4 DOF neck, two 2 DOF eyes and a torso with a 3 DOF waist. In modeling the humanoid robot, five assumptions are defined as follows: (a) the humanoid robot consists of a set of particles, (b) the foothold of the humanoid robot is rigid and not moved by any force and moment, (c) the contact region between the foot and the ground surface is a set of contact points, (d) the coefficients of friction for rotation around the X-, Y- and Z-axes are nearly zero at the contact point between the foot and the ground, and (e) the foot of the humanoid robot does not slide on the contact surface. To define mathematical quantities, a world coordinate frame $\mathcal{F}$ is fixed on the ground where a biped humanoid robot can walk and a moving coordinate frame $\bar{\mathcal{F}}$ is attached on the center of the waist to consider the relative motion of each particle as shown in Figure 6.

The moment balance around a contact point p relative to the world coordinate frame $\mathcal{F}$ can be obtained as:

$$\begin{aligned} &\sum_{i=1}^n m_i (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_p) \times (\ddot{\mathbf{r}}_i + \mathbf{G}) + \mathbf{T} \\ &- \sum_{j=1}^n ((\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_p) \times \mathbf{F}_j + \mathbf{M}_j) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5)$$

where $\mathbf{r}_p$ is the position vector of point p from the



origin of $\mathcal{F}$. m_i is the mass of particle i . $\mathbf{r}_i$ and $\ddot{\mathbf{r}}_i$ denote the position and acceleration vectors of particle i with respect to the world coordinate frame $\mathcal{F}$, respectively. $\mathbf{G}$ is the gravitational acceleration vector. $\mathbf{T}$ is the moment vector acting on the contact point p . $\mathbf{r}_j$ denotes the position vector of particle j with respect to the world coordinate frame $\mathcal{F}$. $\mathbf{F}_j$ and $\mathbf{M}_j$ denote the force and the moment vectors acting on particle j relative to the frame $\mathcal{F}$, respectively. Let us consider ZMP on the point p . The moment $\mathbf{T}$ will be a zero vector by the ZMP concept. Equation (5) can be rewritten with respect to the moving frame $\bar{\mathcal{F}}$ as follows:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n m_i (\bar{\mathbf{r}}_i - \bar{\mathbf{r}}_{zmp}) \times (\ddot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \ddot{\bar{\mathbf{r}}}_q + \mathbf{G} \\ & + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_i + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_i + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_i)) \\ & - \sum_{j=1}^n ((\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_{zmp}) \times \bar{\mathbf{F}}_j + \bar{\mathbf{M}}_j) = \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (6)$$

where $\bar{\mathbf{r}}_{zmp}$ is the position vector of ZMP with respect to the moving frame $\bar{\mathcal{F}}$. $\mathbf{r}_q$ is the position vector of the origin of the moving frame $\bar{\mathcal{F}}$ from the origin of the world coordinate frame $\mathcal{F}$. $\bar{\boldsymbol{\omega}}$ and $\bar{\dot{\boldsymbol{\omega}}}$ denote the angular velocity and acceleration vectors, respectively.

as a four-mass model as shown in Figure 7, (3) the moving frame does not rotate, and (d) the trunk and waist does not move vertically. Considering four-mass model of the upper body, Equation (6) can be rewritten as:

$$\begin{aligned}
& m_s \bar{\mathbf{r}}_s \times (\ddot{\mathbf{r}}_s + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_s + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_s + \bar{\boldsymbol{\omega}} \\
& \quad \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_s)) + m_t (\bar{\mathbf{r}}_t - \bar{\mathbf{r}}_{zmp}) \times (\ddot{\mathbf{r}}_t \\
& \quad + \dot{\bar{\mathbf{r}}}_q + \mathbf{G} + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_t + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_t + \bar{\boldsymbol{\omega}} \\
& \quad \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_t)) + m_w (\bar{\mathbf{r}}_w - \bar{\mathbf{r}}_{zmp}) \times (\ddot{\mathbf{r}}_w \\
& \quad + \dot{\bar{\mathbf{r}}}_q + \mathbf{G} + \dot{\bar{\boldsymbol{\omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_w + 2\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_w \\
& \quad + \bar{\boldsymbol{\omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_w)) = -\mathbf{M}, \tag{7}
\end{aligned}$$

where $\mathbf{M} = [M_x \ M_y \ M_z]^T$ is the moment generated by the motion of lower-limbs. m_s denotes the mass of both shoulders including the mass of the arms. m_t is the mass of the torso including the head, shoulders and arms, and m_w is the mass of the waist. $\bar{\mathbf{r}}_t$ and $\bar{\mathbf{r}}_w$ are the position vectors of the neck and the waist with respect to $\bar{\mathcal{F}}$, respectively. $\bar{\mathbf{r}}_s$ is the shoulder position vector with respect to the neck frame.

In case that the moments are not generated by the fictitious forces, the moment $\mathbf{M}$ can be divided as three moment components such as pitch, roll and yaw moments as follows:

$$\begin{aligned}
& m_s(\bar{z}_s\ddot{x}_s - \bar{x}_s\ddot{z}_s) + m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})(\ddot{x}_t + \ddot{q}_x + g_x) \\
& - m_t(\bar{x}_t - \bar{x}_{zmp})(\ddot{z}_t + \ddot{q}_z + g_z) + m_w(\bar{z}_w \\
& - \bar{z}_{zmp})(\ddot{x}_w + \ddot{q}_x + g_x) - m_w(\bar{x}_w \\
& - \bar{x}_{zmp})(\ddot{z}_w + \ddot{q}_z + g_z) = -M_y(t), \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& m_s(\bar{y}_s \ddot{z}_s - \ddot{z}_s \bar{y}_s) + m_t(\bar{y}_t - \bar{y}_{zmp})(\ddot{z}_t + \ddot{z}_q + g_z) \\
& - m_t(\ddot{z}_t - \ddot{z}_{zmp})(\ddot{y}_t + \ddot{y}_q + g_y) + m_w(\bar{y}_w \\
& - \bar{y}_{zmp})(\ddot{z}_w + \ddot{z}_q + g_z) - m_w(\ddot{z}_w \\
& - \ddot{z}_{zmp})(\ddot{y}_w + \ddot{y}_q + g_y) = -M_x(t), \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
m_s(\ddot{x}_s \ddot{y}_s - \ddot{y}_s \ddot{x}_s + 2(\ddot{x}_s \dot{x}_s + \ddot{y}_s \dot{y}_s) \ddot{\omega}_z + (\dot{x}_s^2 + \dot{y}_s^2) \ddot{\omega}_z) \\
+ m_t(\ddot{x}_t - \ddot{x}_{zmp})(\ddot{y}_t + \ddot{y}_q + g_y) - m_t(\ddot{y}_t - \ddot{y}_{zmp})(\ddot{x}_t \\
+ \ddot{x}_q + g_x) + m_w(\ddot{x}_w - \ddot{x}_{zmp})(\ddot{y}_w + \ddot{y}_q + g_y) \\
- m_w(\ddot{y}_w - \ddot{y}_{zmp})(\ddot{x}_w + \ddot{x}_q + g_x) = -M_z(t). \quad (10)
\end{aligned}$$

Equation (8), (9) and (10) have the same vertical variables, $\bar{z}_w$ and $\bar{z}_t$. Also, the lower-limbs and the upper body of the humanoid robot are connected with rotational joints. So, these equations are interferential and non-linear. We assume that neither the waist nor the trunk particles move vertically, and the trunk arm rotates on the horizontal plane only as follows:

$$\begin{aligned}\ddot{\bar{z}}_t = 0, \quad \ddot{\bar{z}}_w = 0, \quad \ddot{\bar{z}}_q = 0, \quad \bar{z}_t - \bar{z}_{zmp} = const., \\ \bar{z}_w - \bar{z}_{zmp} = const.\end{aligned}\quad (11)$$

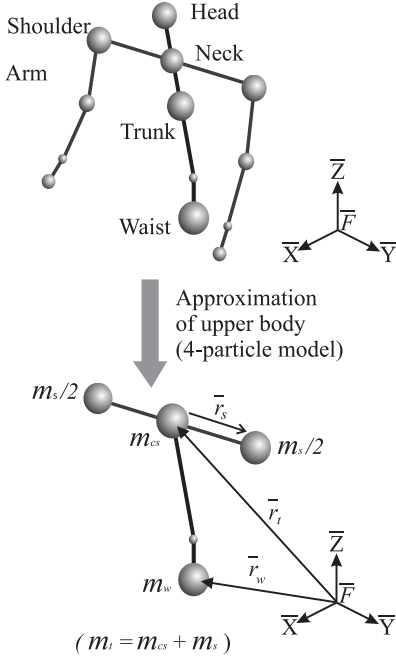


Figure 7: Approximate model of the upper body.

We put the terms relating to the motion of the upper-body on the left-hand side as unknown variables, and the terms relating to the moments generated by the lower-limbs particles on the right-hand side as known parameters. Equation (8), (9) and (10) can be decoupled and linearized as follows:

$$m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})(\ddot{x}_t + \ddot{x}_q) - m_t g_z(\bar{x}_t - \bar{x}_{zmp}) + m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})(\ddot{x}_w + \ddot{x}_q) - m_w g_z(\bar{x}_w - \bar{x}_{zmp}) = -M_y(t), \quad (12)$$

$$+m_t g_z(\bar{y}_t - \bar{y}_{zmp}) - m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})(\ddot{y}_t + \ddot{y}_q) + m_w g_z(\bar{y}_w - \bar{y}_{zmp}) - m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})(\ddot{y}_w + \ddot{y}_q) = -M_x(t), \quad (13)$$

$$m_t l^2(\ddot{\theta}_t + \ddot{\omega}_z) + m_t(\bar{x}_t - \bar{x}_{zmp})(\ddot{y}_t + \ddot{y}_q) - m_t(\bar{y}_t - \bar{y}_{zmp})(\ddot{x}_t + \ddot{x}_q) + m_w(\bar{x}_w - \bar{x}_{zmp})(\ddot{y}_w + \ddot{y}_q) + m_w(\bar{y}_w - \bar{y}_{zmp})(\ddot{x}_w + \ddot{x}_q) = -M_z(t), \quad (14)$$

where θ_t is the vertical angle of the trunk. l is the length between the neck and the shoulder. If all known variables of Equation (12), (13) and (14) move to the

right-hand side respectively, these equations can be written as follows:

$$m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{x}_t - m_t g_z \bar{x}_t + m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{x}_w - m_w g_z \bar{x}_w = \hat{M}_y(t), \quad (15)$$

$$-m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{y}_t + m_t g_z \bar{y}_t - m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{y}_w + m_w g_z \bar{y}_w = \hat{M}_x(t), \quad (16)$$

$$m_t l^2 \ddot{\theta}_t = \hat{M}_z(t), \quad (17)$$

where moment $\hat{\mathbf{M}} = [\hat{M}_x \ \hat{M}_y \ \hat{M}_z]^T$ consist of only known variables as follows:

$$\hat{M}_y(t) = -M_y - (m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{x}_q + m_t g_z \bar{x}_{zmp} + m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{x}_q + m_w g_z \bar{x}_{zmp}), \quad (18)$$

$$\hat{M}_x(t) = -M_x - (-m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{y}_q - m_t g_z \bar{y}_{zmp} - m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{y}_q - m_w g_z \bar{y}_{zmp}), \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{M}_z(t) = & -M_z - (m_t(\bar{x}_t - \bar{x}_{zmp})(\ddot{y}_t + \ddot{y}_q) \\ & - m_t(\bar{y}_t - \bar{y}_{zmp})(\ddot{x}_t + \ddot{x}_q) \\ & + m_w(\bar{x}_w - \bar{x}_{zmp})(\ddot{y}_w + \ddot{y}_q) \\ & - m_w(\bar{y}_w - \bar{y}_{zmp})(\ddot{x}_w + \ddot{x}_q)). \end{aligned} \quad (20)$$

To calculate four compensatory motions, $\bar{x}_t$, $\bar{y}_t$, $\bar{x}_w$ and $\bar{y}_w$, the moment components of Equation (15), (16) and (17) can be distributed to the waist and the trunk as:

$$m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{x}_t - m_t g_z \bar{x}_t = \hat{M}_{yTRUNK}, \quad (21)$$

$$m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{x}_w - m_w g_z \bar{x}_w = \hat{M}_{yWAIST}, \quad (22)$$

$$-m_t(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{y}_t + m_t g_z \bar{y}_t = \hat{M}_{xTRUNK}, \quad (23)$$

$$-m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{y}_w + m_w g_z \bar{y}_w = \hat{M}_{xWAIST}, \quad (24)$$

$$\hat{M}_{yTRUNK} + \hat{M}_{yWAIST} = \hat{M}_y(t), \quad (25)$$

$$\hat{M}_{xTRUNK} + \hat{M}_{xWAIST} = \hat{M}_x(t). \quad (26)$$

$\hat{M}_{xTRUNK}$, $\hat{M}_{yTRUNK}$, $\hat{M}_{xWAIST}$ and $\hat{M}_{yWAIST}$ become the known functions because they are calculated by the motion of the lower-limbs and the time trajectory of ZMP. In steady walking, they are periodic functions because each particle of the biped humanoid robot and ZMP move periodically with respect to the moving frame $\bar{\mathcal{F}}$. Also, the components on the left-hand side of Equation (25) and (26) are periodic

functions. So, the motion of the trunk and the waist can be easily computed by using Fourier transforms. Comparing the Fourier coefficients of both sides of each equation, Fourier coefficients are obtained. Moreover, the approximate periodic solutions of the pitch and roll trunk and the waist, $\bar{x}_t$, $\bar{y}_t$, $\bar{x}_w$ and $\bar{y}_w$, are obtained by inverse Fourier transforms. The vertical motion of the trunk, θ_t , is also obtained, comparing the Fourier coefficients of both sides of Equation (17).

In order to obtain the strict solutions of the trunk and the waist motion, a recursive method is used. First, the approximate periodic solutions of the linearized equation (17), (25) and (26) are calculated. Second, the approximate periodic solutions are substituted into the moment equation (6) of the strict biped model, and the errors of moments, generated by the trunk and the waist motion are calculated according to the planned ZMP. These errors are accumulated to the right-hand side of Equation (17), (25) and (26). The approximate solutions are computed again. Finally, these computations are repeated until the errors fall below a certain tolerance level.

4. Simulation of the Trunk Motion

The convergence of solutions of the trunk and the waist motion is numerically verified. Walking simulation is conducted using the recursive method. Then, the length of the trunk and the walking speed are considered as parameters. The errors of ZMP are dropped below 1.0 mm after 10 iteration times as shown in Figure 8 and Figure 9. So, the method is useful for the calculation of compensatory motion.

Consider the motion of the trunk capable of canceling moments generated by the motion of the head, the shoulders, the legs and the arms, when the waist is immovable. The moment components of the pitch and roll trunk of Equation (25) and (26) can be written as follows:

$$(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{\bar{x}}_t - g_z \bar{x}_t = -A(t), \quad (27)$$

$$(\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp})\ddot{\bar{y}}_t + g_z \bar{y}_t = B(t), \quad (28)$$

where

$$A(t) = \frac{M_y(t) + m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{\bar{x}}_w - m_w g_z \bar{x}_w}{m_t}, \quad (29)$$

$$B(t) = \frac{M_x(t) - m_w(\bar{z}_w - \bar{z}_{zmp})\ddot{\bar{y}}_w - m_w g_z \bar{y}_w}{m_t} \quad (30)$$

Consider only the motion of the pitch trunk to investigate how the trunk moves during dynamic walking. The transfer function, $\bar{y}_t(\omega)$, of Equation (28) in

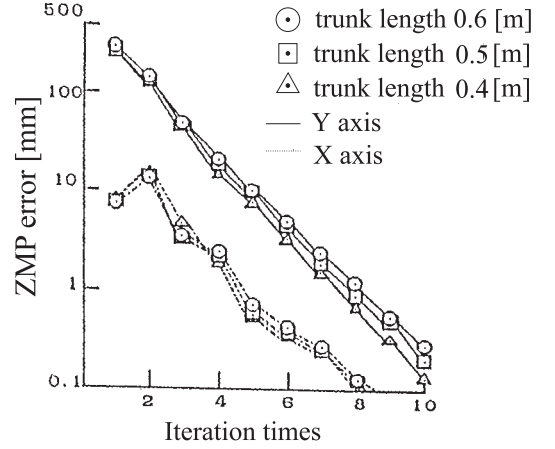


Figure 8: ZMP errors to three different parameters.

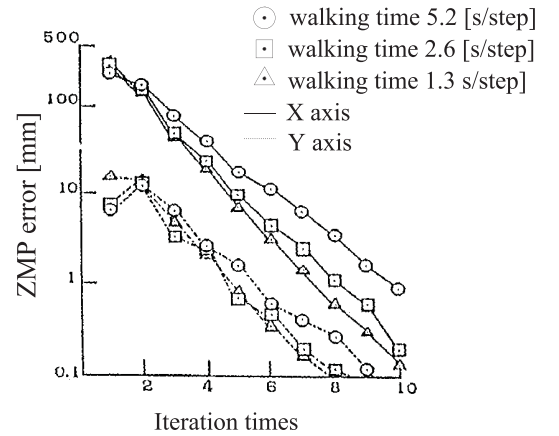


Figure 9: ZMP errors to three different parameters.

the frequency domain can be expressed as:

$$\bar{y}_t(\omega) = \frac{2p}{\omega^2 + p^2}q = \left(\frac{1}{p - j\omega} + \frac{1}{p + j\omega}\right)q, \quad (31)$$

where

$$p = \sqrt{\frac{g_z}{\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp}}}, \quad q = -\frac{1}{2g_z} \sqrt{\frac{g_z}{\bar{z}_t - \bar{z}_{zmp}}}. \quad (32)$$

According to the ZMP concept, $\bar{z}_{zmp}$ in Equation (32) is zero. Equation (31) is generally known as Lorentz function, and its primitive function is written as:

$$\bar{y}_t(t) = qe^{-p|t|}. \quad (33)$$

We can imagine from (33) that the casual law may not be applied anymore. If the walking speed of the biped robot is increased, it goes without saying that $\bar{y}_t(t)$ affects stability more badly. The trunk, therefore, should be in motion earlier than the shift of ZMP to cancel the produced moments.

5. Conclusion

For a biped humanoid robot to stably walk on the ground, its locomotion and stability should be considered at the same time. How to make a walking pattern for locomotion was proposed in this paper. Also, a compensation method was discussed, which can cancel moments generated by the motion of the head, the shoulders, the arms and the legs. Using Fourier transforms and a recursive method, the motion of the trunk and the waist is computed. This method is applicable to not only the steady walk but also the complete walk including transient walk. Through trunk motion simulations based on the walking pattern generated, the effectiveness of the proposed moment compensation method was verified.

References

- [1] H. O. Lim, I. Ishii, and A. Takanishi, "Emotion-based biped walking," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 22, no. 5, pp. 577–866, Sep. 2004.
- [2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent asimo: System overview and integration," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, Lausanne, Switzerland, Oct. 2002, pp. 2478–2483.
- [3] H. Inoue, S. Tachi, Y. Nakamura, K. Hirai, N. Ohyu, S. Hirai, K. Tanie, K. Yokoi, and H. Hirukawa, "Overview of humanoid robotics project of meti," in *In Proc. Int. Symp. on Robotics*, 2001, pp. 1478–1482.
- [4] K. Kaneko, S. Kajita, F. Kanehiro, K. Yokoi, K. Fujiwara, H. Hirukawa, K. Kawasaki, M. Hirata, and T. Isozumi, "Design of advanced leg module for humanoid robotics project of meti," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Washington DC, 2002, pp. 38–45.
- [5] T. Ishida, Y. Kuroki, K. Nagasaka, and J. Yamaguchi, "A small biped entertainment robot and its attractive applications," in *In Proc. IARP Int. Workshop on Humanoid and Human Friendly Robotics*, 2002, pp. 116–119.
- [6] T. Furuta, Y. Okumura, and K. Tomiyama, "Design and construction of a series of compact humanoid robots and development of biped walk control strategies," in *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots*, Boston, Mass, 2000, pp. Paper No. 84 in CD-ROM Proc.
- [7] S. Kagami, K. Nishiwaki, J. Kuffner, Y. Kuniyoshi, M. Inaba, and H. Inoue, "Design and implementation of software research platform for humanoid robotics," in *Proc. IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robots*, Tokyo, Japan, 2001, pp. 253–258.
- [8] Y. Sugahara, T. Endo, Hun ok Lim, and A. Takanishi, "Design of a battery-powered multi-purpose bipedal locomotor with parallel mechanism," in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, EPFL Lausanne, Switzerland, Oct. 2002, pp. 2658–2663.
- [9] M. Vukobratovic, A. A. Frank, and D. Juricic, "On the stability of biped locomotion," *IEEE Trans. of Biomedical Engineering*, vol. 17, no. 1, pp. 25–36, 1970.
- [10] A. Takanishi, M. Ishida, Y. Yamazaki, and I. Kato, "The realization of dynamic walking by the biped walking robot," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, St. Louis, MO, Mar. 1985, pp. 459–466.
- [11] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa T. Takebayashi, and I. Kato, "Realization of dynamic walking stabilized with trunk motion," in *Proc. CISM-IFTOMM Symp. Theory and Practice of*

- Robots and Manipulators*, Cracow, Poland, 1988, pp. 68–79.
- [12] J. Furusho and M. Masubuchi, “Control of a dynamical biped locomotion system for steady walking,” *ASME J. Dynamics Systems, Measurement, and Control*, vol. 108, pp. 111–118, Jun. 1986.
- [13] J. Pratt, P. Dilworth, and G. Pratt, “Virtual mode control of a bipedal walking robot,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, Apr. 1997, pp. 193–198.
- [14] Y. Zheng and J. Shen, “Gait synthesis for the sd-2 biped robot to climb sloping surface,” *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 6, no. 1, pp. 86–96, 1990.
- [15] S. Kajita and K. Tani, “Study of dynamic biped locomotion on rugged terrain: Theory and basic experiment,” in *Proc. Int. Conf. Advanced Robotics*, Sacramento, CA, Apr. 1991, pp. 741–746.



映像が生体に与える影響の防止方法

椿 郁子* 齊藤 隆弘** 森田 寿哉***

Prevention methods for health effects caused by viewing video images

Ikuko TSUBAKI* Takahiro SAITO** Toshiya MORITA***

1. はじめに

生体に与える影響というと漠然とした表現ではあるが、人が映像から受ける影響は多岐にわたる。例えば、高精細な大画面映像から感じる臨場感や迫力、心地よい映像から感じるリラクセスの効果などがある。しかし、映像は好ましくない影響を与える場合もある。例えば、長時間の視聴は眼精疲労を起こしやすい。また、子供の凶悪犯罪が起きますと、暴力的コンテンツなどが子供の人格の成長へ与える影響がしばしば問われる。表1に、映像が生体を与える好ましくない影響の例を示す。

映像酔いとは、動きの激しい映像によって引き起こされる吐き気やめまいなどの症状である。症状は乗り物酔いと似ているが、体の揺れではなく、運動する視覚刺激が原因となって生じる。代表的な事例として、2002年カンヌ国際映画祭の招待作品であるフランス映画「アレックス (原題: Irreversible)」は、各上映館において、多数の観客が気分を悪くして途中退出したことが話題となった[1]。この作品は、観客の心理的動揺を誘発するために、画面の大きな揺れや回転を意図的に加える映像演出が多用されていた。

光感受性発作とは、点滅などの光刺激によって、光感受性を持つ人に誘発される痙攣などの症状である。1993年4月、英国で放送されたテレビコマーシャルによって、3人の視聴者に発作が生じた^[1]。そのコマーシャルには、点滅する縞模様パターンが画面の背景に使用されていた。国内では、その後も、映像酔いや光感受性発作が多数

映像酔い、光感受性発作	短期的
眼精疲労	↑
生産性の低下	↕
視機能の低下	↓
人格の成長への影響	長期的

に生じる事件が起きている。映像酔いについては、2003年7月、島根県の中学校で、授業中に講堂でビデオを上映した際、多数の生徒が気分を悪くし、その内36人が病院に搬送された^[1]。この授業では、手持ちカメラで撮影された不規則な揺れが続く映像が、プロジェクタを用いて大型スクリーン上へ映写されていた。

光感受性発作については、1997年12月、テレビのアニメ番組「ポケットモンスター」の放送で、家庭で視聴していた多くの子供たちが発作を起こし、全国で約700人が医療機関で受診した^[2]。主症状は痙攣、意識障害などの光感受性発作によるものと、不快気分、頭痛などの自律神経症状であり、病院に運ばれた子供たちの大半は軽い症状であった。しかし、うち2例は1週間後も入院中と報道された。また、痙攣を起こした人の半分近くは、過去に痙攣を経験したことがなかった^[3]。この番組は、赤と青の点滅が画面の大半を占めるシーンが約4秒間含まれ、このシーンが原因とされた。点滅の時間周波数は、[青色 (1/30秒) + 赤色 (1/20秒) = 1/12秒] の繰り返しからなる約12 Hzであった。

これらの事件によって、映像酔いと光感受性発作に対する関心が高まり、同様の事件の再発を防ぐための研究が国内で活発に行われてきた。2004年12月には、日本工業標準調査会と(独)産業技術総合研究所の主催により、ISO「映像の生体安全性国際ワークショップ」が開催された。また、筆者らは、総務省の「ネットワーク・ヒューマン・インターフェースの総合的な研究開発 (II-2 映

* ポスト・ドクター 電気電子情報工学科 ハイテク・リサーチ・センター

** 教授 電気電子情報工学科
Professor, Dept. of Electrical, Electronics and Information Engineering

*** (財) NHK エンジニアリングサービス
NHK Engineering Services, Inc.

像が生体を与える悪影響を防止する技術)」の研究委託を受け、光感受性発作と映像酔いの防止方法について研究を行っている。本稿では、筆者らの取り組みを交えながら、映像酔いと光感受性発作の防止方法に関する研究動向を紹介、解説する。

2. 映像酔い

2.1 映像酔いの要因

車酔い、船酔い、飛行機酔いなどの乗物酔いは動揺病と呼ばれ、主に前庭器が受ける刺激によって生じる。前庭器は、耳の奥にある平衡感覚を司る器官であり、三半規管と耳石器から成る。三半規管は体の動く方向、回転などを感知し、耳石器は体の傾きや重力、加速度などを感知する。しかし、視覚も動揺病に影響し、例えば、船酔いは水平線を見ていると酔いにくいと言われている。視覚情報によって酔いが軽減される場合もあるが、身体の動揺と視覚情報の不一致によって酔いが強くなる場合もある。

一方、映像酔いは、視覚刺激のみによって生じる動揺病である。VR (Virtual Reality) 酔い、VE (Virtual Environment) 酔い、シミュレータ酔いなども映像酔いに含まれる。VR などでは、振動する椅子に座って映像を見るような状況も考えられるが、ここでは、身体の運動を伴わず、前庭器への刺激が存在しない状況において生じる動揺病だけを映像酔いとして扱う。

動揺病の要因については諸説が提議されている^[4]。感覚配置変え学説では、視覚と前庭器への入力、あるいは前庭器内でも三半規管と耳石器の入力が互いに矛盾すると、感覚の混乱が起こるとしている。感覚の混乱が起こるのは、その入力パターンが記憶として貯えられていないためであり、脳内で感覚の配置変えが起こるまで、自虐的な不快症状が起こると説明される。また、外界空間の誤った知覚が平衡維持を脅かし、警報として不快症状が誘発されるという説もある。これらの説は、乗物酔いだけでなく映像酔いも考慮されている。

2.2 映像酔いの評価方法

2.2.1 映像酔いの主観評価手法

実験として映像酔いの程度を調べる場合は、SSQ (Simulator Sickness Questionnaire)^[5]を用いた主観評価が一般的である。主観評価実験では、被験者が、映像を視聴後に酔いの程度に関する質問に答える。SSQはシミュレータ酔いの評価のために作成された質問紙とその評価方法であり、被験者は16の質問項目について、0 (いいえ) から3 (はい) の4段階で答える。それらに1

表2. SSQ 質問項目と加重値^[5]

質問項目	加重値		
	気持ち悪さ	目の疲れ	ふらつき感
全体的に気分がよくない	1	1	0
疲れた	0	1	0
頭痛がする	0	1	0
目が疲れた	0	1	0
目の焦点を合わせにくい	0	1	1
つばがよく出る	1	0	0
汗をかいている	1	0	0
吐き気がする	1	0	1
集中するのが難しい	1	1	0
頭がぼうつとする	0	0	1
ぼやけて見える	0	1	1
目を開けているとふらふらした感じがする	0	0	1
目を閉じているとふらふらした感じがする	0	0	1
ぐるぐるとしためまいがする	0	0	1
胃に違和感がある	1	0	0
げっぷが出る	1	0	0
加重和	a	b	c

か0の加重を掛けて加重和をとると、Nausea (気持ち悪さ)、Oculomotor (目の疲れ)、Disorientation (ふらつき感)を示す評価値が求まる。さらに、これらを集計すると、酔いの総合的な指標である Total sickness score (総合点) が得られる。日本語に訳した SSQ 質問項目と加重値を表2に示す。各評価値は次式で求められる。

$$\begin{cases} \text{気持ち悪さ (Nausea)} & = a \times 9.54 \\ \text{目の疲れ (Oculomotor)} & = b \times 7.58 \\ \text{ふらつき感 (Disorientation)} & = c \times 13.92 \\ \text{総合点 (Total sickness score)} & = (a + b + c) \times 3.74 \end{cases} \quad (1)$$

目の疲れに関する項目が含まれている点、一般の動揺病の評価とは異なっている。

2.2.2 映像酔いの客観評価手法

主観評価だけではなく、映像酔いの客観的評価方法の確立を目指した研究も進められている。酔いの諸症状は自律神経に関するものが多いため、自律神経系の測定から得られる生理指標が用いられている。

文献^[6]では、心電図、呼吸、胃電図、重心動揺などを測定、解析した結果、心拍変動の0.1 Hz 付近の成分と呼吸周波数に、映像酔いの影響が出る可能性が示唆された。心拍変動のこの周波数帯域は、Mayer Wave の大きさを反映しやすいとされている。Mayer Wave とは、動脈血圧が示す約10秒周期の変動成分であり、交感神経活動によって生じる^[7]。

その後、Mayer Wave 帯域に注目した研究が進み、心電図、血圧、呼吸の0.3Hz 前後と0.1Hz 前後の振幅成分が映像酔いの指標とされた^[8]。映像酔いが現れると交感神経系活動が優位となり、0.1Hz 帯域成分の増大と0.3 Hz 帯域成分の減少が起これと考えられている。0.3Hz 帯域は、副交感神経活動を反映し、安静状態で顕著に現れる成分であると考えられている。

生理指標による評価は、個人差が大きく再現性を得ることが難しいため、複数の生理的パラメータの相互関係の解析によって、個人差の低減と再現性の向上が試みられた^[9]。その結果、Mayer Wave 成分に限定した血圧変動から心拍数変動までの相互相関係数の最大値も、映像酔いの指標として着目されている。

2.3 映像酔いを起こしやすい映像の特徴

映像酔いを起こしやすい運動の特徴に関して、酔いにくいVRやシミュレータの設計指針を与えることなどを目的とし、人間工学やVRの分野で広く研究が行われている。運動方向の違い、振動の有無、振動の周波数などが異なる映像を用いて、酔いの程度を比較した実験結果が多く報告されている。運動に関するパラメータの他にも、近年、ベクションや予測性と映像酔いの起こしやすさとの関連についても報告されている。

2.3.1 運動方向

映像の運動方向については、上下、左右、回転の3方向について、酔いやすさが比較されている。上下方向の運動は重力感覚の影響で酔いやすいと思われるが、都市の中を進んでいくVR映像に単調な振動を加え、ヘッドマウントディスプレイで視聴した実験の結果、3つの方向の振動は酔いやすさがほぼ同等であるとされた^[10]。

しかし、振動ではなく一方向の運動の場合は性質が異なる。スクリーンに映したVR映像を用いた実験では、

3方向にそれぞれ一定の周期で振動する映像と、それぞれの方向に等速運動し続ける映像の6通りの条件を比較した結果、等速で回転し続ける映像の場合に、最も強い酔いが生じやすいとされた^[11]。

2.3.2 振動周波数

乗物酔いでは、最も酔いを起こしやすい身体の上下運動の周波数は、およそ0.2Hzであるとされている^[12]。しかし、最近の研究では、映像酔いを起こしやすい映像の振動周波数は、乗物酔いを起こしやすい周波数とは異なると考えられている。液晶ディスプレイに表示した上下方向に振動する映像を用いた実験では、0.2Hzと1.0Hzの振動を比較すると、1.0Hzの方が不快感が大きいと報告された^[13]。また、スクリーンに文章を表示し、上下方向に振動させた文章を読む実験では、0.25, 0.5, 1, 2, 4Hzの5通りの周波数を比較した結果、0.5Hzで最も強い酔いが生じた^[14]。

2.3.3 ベクション

強いベクション（視覚誘導自己運動感覚）を感じる映像は、映像酔いを起こしやすいと考えられている。運動する視覚刺激を観察していると、自分の体が傾いたり移動したりする感覚をもつことがある。この感覚のことをベクションという。

映像酔いとベクションの相関を調べるために、回転ドラムを用いた実験が行われた^[15]。被験者は、内壁に白黒の縞模様を描いたドラム内に座る。ドラムを回転させると、ドラムではなく被験者自身が回転しているような感覚をもつことがある。これは回転ベクションと呼ばれるが、縞の細かさを変えた実験の結果、回転ベクションを強く感じる条件では、強い酔いが生じやすいことが示された。また、上下、左右、回転方向に等速運動する映像を用いた実験でも、ベクションを最も強く感じた条件で、酔いが最も強く生じたと報告された^[11]。これらのことから、ベクションは映像酔いの要因と関連があると考えられている。

一方、ベクションを感じなくても映像酔いを生じる場合がある。例えば、手ぶれのような細かい振動だけを運動成分として含む映像は、ベクションを感じさせない。この場合に生じる映像酔いは、ベクションと関連がないと考えられる。

2.3.4 予測性、受動性

乗物酔いの場合、運転手は酔いにくいと言われる。同様に、VR環境で乗り物を操縦するシミュレータの場合

も、自分で操縦する方が酔いが弱いと報告された^[16]。これらの理由として、自分で運転する場合には、自分の動きと視覚世界の動きが同期して受動感覚を感じないこと、また、視覚世界の動きを予測しやすいことなどが考えられる。

映像酔いについても似たような例として、ビデオ撮影をしながらファインダーや液晶画面を見る場合には映像酔いを起こさないが、撮影した映像を後に再生して見る場合には酔いを起こすことがある。これらは、見ている映像は同じであるが、撮影時にはビデオカメラを自分で持っているために映像の動きを予測できるのに対して、再生中には映像の動きを予測できないという違いがある。このような動きの予測性と映像酔いの関係を確認するために、被験者が自らビデオカメラを動かしながら映像を観察するアクティブ条件と、自分自身がアクティブ条件で撮影した映像を観察するだけのパッシブ条件との間で、映像酔いの程度を比較する実験が行われた^[17]。どちらの条件も、ヘッドマウントディスプレイで映像を観察し、両条件で観察した映像は同じであるが、パッシブ条件の方が酔いやすいという結果が得られた。アクティブ条件では動きが予測できたため、酔いが生じにくかったと考えられる。

2.4 映像酔いの軽減手法

映像酔いの軽減手法は、映像酔いを引き起こしやすい映像であっても、強く酔わずに視聴することを可能にするために検討されている。前節に示したような、酔いやすい映像の特徴に関する知見の全てが、映像酔いの軽減に役立つと考えられる。

手ぶれのような細かい振動を多く含む映像は、手ぶれ補正処理を施すことで映像酔いを軽減できる。しかし、一方向に運動し続ける映像など、直接的な補正が困難な運動パラメータをもつ映像もある。このため、映像に含まれる運動の補正を行わずに、酔いを軽減する手法も検討されている。

2.4.1 手ぶれ補正

手ぶれ補正機能は多くのビデオカメラに搭載され、この機能を用いると、細かい振動が少ない映像を撮影することができる。しかし、意図的に手ぶれを残して撮影し、不安感を表現するための映像効果として手ぶれを用いる場合もある。また、一般的な映像処理ソフトウェアにも、手ぶれ補正処理機能が含まれていることが多い。

手ぶれ補正では、まず、映像のグローバルモーションを検出し、それを用いて補正用パラメータを導出する。

グローバルモーションは、前のフレームと比較したアフィン変換パラメータによって表すことができる。手ぶれ補正には、4自由度に制限したアフィン変換が多く用いられる。

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} = r_t \begin{pmatrix} \cos \theta_t & -\sin \theta_t \\ \sin \theta_t & \cos \theta_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{t-1} \\ y_{t-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p_t \\ q_t \end{pmatrix}, \quad (t \geq 1) \quad (2)$$

$(x_t, y_t)^T$ は、時刻 t の画像上の座標を示し、4つのパラメータは、それぞれ時刻 t における横方向、縦方向の平行移動 (p, q)、回転 (θ)、拡大縮小 (r) を表す。各フレームで得られたグローバルモーションパラメータを累積すると、開始フレームを基準とした変位に相当する変位パラメータ (P_t, Q_t, Θ_t, R_t) が求まる。

$$\begin{cases} R_t = R_{t-1} * r_t \\ \Theta_t = \Theta_{t-1} + \theta_t \\ P_t = r_t (P_{t-1} \cos \theta_t - Q_{t-1} \sin \theta_t) + p_t \\ Q_t = r_t (P_{t-1} \sin \theta_t + Q_{t-1} \cos \theta_t) + q_t \end{cases}, \quad (t \geq 2) \quad (3)$$

変位に対して時間方向にローパスフィルタをかけ、それを変位の目標値とし、各フレームに対して補正を行う。映像酔いの防止を目的とした手ぶれ補正は、酔いを生じさせる揺れだけを効率的に取り除き、元の映像の印象をなるべく変えない手法が望ましい。このため、手ぶれ以外の映像の動きを劣化させない手法として、選択的な手ぶれ補正が検討されている^[18]。これは、酔いやすい区間だけを選択して補正し、残りの区間は補正を行わない。また、ローパスフィルタの特性の調節によって、酔いやすい振動成分だけを選択的に除去する。実験では、映像を10秒間の区間に分割して振動回数の多い区間だけを選択し、主に0.5Hz以上の振動を除去するローパスフィルタが用いられた。実験の結果、映像酔いを軽減する効果が得られたと報告された。

2.4.2 付加的背景刺激

静止している背景画像を映像と同時に提示すると、酔いが軽減すると考えられている。これは、動いているのは映像ではなく自分自身であると間違えて知覚することで、映像酔いが生じるという想定に基づいている^[19]。静止している背景の提示は、自身が静止していることを示すためであり、ヘッドマウントディスプレイを用いた実験では、透過モードにして外界の映像が見えるようにすると酔いが軽減された。

この性質を利用し、映像酔いの軽減のために、コントラストが低い模様を付加的背景刺激として映像に重畳す

る手法が検討された[20]。重畳する付加的背景刺激は、視聴の際になるべく違和感を感じない模様が好ましく、



(a) No overlay.



(b) Emboss.

図1 付加的背景刺激

チェッカーボード、グリッド、エンボスの3種類について実験された。図1に実験映像の例を示す。(a)は付加的背景刺激を重畳していない原画像であり、(b)はエンボス模様を重畳した画像である。模様の重畳によって若干の印象の変化はあるが、強い違和感を感じる映像ではないと思われる。実験の結果、3種類の背景刺激とも、重畳していない原画像より酔いにくく、付加的背景刺激によって映像酔いを軽減する効果が得られた。この手法は、直接的な運動パラメータの補正が困難な映像を含め、あらゆる種類の映像に適用できると考えられる。

3. 光感受性発作

3.1 要因となる光刺激

光感受性発作の発症に関わる光刺激の基本的要因として、点滅、色、規則的なパターン模様の3つが挙げられている。要因となる光刺激の種類は人によって異なるが、文献[2]によると、点滅については時間周波数が10~30Hzの場合に刺激性が強い。色については波長が620~710nmの深赤色が刺激性が強く、それに点滅が加わると刺激性は著しく増大する。縞模様などのコントラストが強い規則的なパターン模様に対して感受性の強い人もいる

が、パターン模様については空間周波数が1~4[cycle/deg]の場合に刺激性が強い。

また、点滅の周波数については特に詳しく調べられている。1~65(回/秒)のフラッシュ光で比較した結果、16(回/秒)の点滅に対して、光感受性を持つ人が最も多いと報告された^[21]。

3.2 テレビ放送におけるガイドラインの策定

1993年の英国での事件の後、英国の民間テレビ放送を規制・ライセンスするITC (Independent Television Commission, 独立テレビ委員会) は、放送映像での点滅とパターンの使用を制限するガイダンスを1994年に導入した^{[22],[23]}。ITCガイダンスでは、テレビはもともと明滅する媒体であるため、視聴者が発作を起こすリスクを完全に除去することはできないが、不要なリスクを軽減する措置を講じることは可能であると記された。そのうえで、1秒間に3回を超える速度の光の点滅や急速変化・明滅画像と、画面の大部分をきわだった一定のパターンの画像が占めることなどは避けるべきであると定めている。

国内では、1998年に、日本放送協会と(社)日本民間放送連盟によって、各テレビ放送局の共通ガイドラインとして「アニメーション等の映像手法に関するガイドライン」が導入された^[24]。これは、ITCガイダンスに大まかに類似したものであったが、鮮やかな赤色の点滅を問題にしている点と、輝度変化を20%以下と規定している点が異なっていた^[25]。

ITCガイダンスは、その後、数回の修正が行われ、赤色の明滅に関する記載が加えられた^[22]。また、避けるべき点滅の輝度変化量、回数、面積などと、規則的パターン模様の細かさ、面積、輝度差などが記された。規則的パターンの方向変化、振動、点滅、反転があると、静止している場合より有害であることも記された。

最近では、国際的なガイダンスとして、2005年2月、ITU-R (International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector, 国際電気通信連合無線通信部門) によって、ITU-R 勧告 BT.1702 が定められた^[26]。これは、テレビによって引き起こされる光感受性発作の低減を目的とし、内容はITCガイダンスと類似している。主に、避けるべき点滅の種類について述べられ、規則的パターン模様はあまり触れられていない。また、付録には、避けるべき点滅の検出方法の例と、低減方法についても示されている。

3.3 避けるべき映像の検出方法

映像がガイドラインに適合していることを確認する作業は容易ではない。英国の Cambridge Research Systems 社は、映像が ITC ガイドラインに適合していることを確認するための測定器を市販している^[27]。この装置は、映像をキャプチャボードで PC に取り込み、解析する。輝度点滅、赤点滅、空間パターン、長時間の基準値以下点滅の4項目について解析結果が出力される^[1]。

国内でも、NHK・民放連のガイドラインに適合していることを確認するための測定器が、テレビ放送各局によって早くから開発された。NHK で開発された参考計測器は、映像中にガイドラインの規定を超過するフリッカや規則的なパターン模様が含まれていると、リアルタイムでガイドライン超過項目を表示し、その箇所をタイムコードとともに記録する^[25]。フリッカの検出は、空間解像度を落とした映像の輝度信号と色差信号について行われる。画素ごとに k フィールド ($k = 1 \sim 13$) 遅延した値との差の相互相関を求め、相関値が負の大きな値のときにフリッカであると検出される。規則的なパターンの検出は、画像をブロック分割して2次元 DFT によって行われ、エネルギーが集中する空間周波数が存在すると、そのブロックに周期性があると判断される。縮小によって3種類の解像度の画像を用意し、各解像度において、周期性のあるブロック数の割合によって規則的なパターンの存在が判定される。

テレビ東京で開発された映像フリッカ解析装置アニメチェッカーは、避けるべきフリッカが含まれていると、リアルタイムでアラームを出力し、その発生時刻、フリッカ周波数、継続時間などを出力する^[28]。RGB の各色成分について高速フーリエ変換を行い、その周波数分布からフリッカが検出される。

このように、避けるべき映像の検出方法は、測定器によって異なる。ITU-R 勧告 BT.1702 では、国際的にテレビ番組が交換されることを考慮すると検出方法が統一されることが望ましいと、付録中に記述されている^[26]。例として示されているフリッカ検出方法では、映像中に含まれる動きによる誤検出を防ぐために、動き補償が取り入れられている。

3.4 光感受性発作の防止方法

ガイドラインの策定によって、テレビ映像による光感受性発作の初発症例数が減少したと報告された^[29]。しかし、ガイドラインによって完全に防ぐことは難しく、また、テレビ放送以外にも映像の種類は多様である。家庭で視聴できるものだけでも、ゲーム、DVD での映画鑑

賞、Web で閲覧できる動画などがあるが、これらのコンテンツにはガイドラインが定められていない。そこで、光感受性をもつ人が、個人で行う光感受性発作の防止方法が検討されている。防止方法は2つに大別される。

一つは、避けるべき映像に補正を行う映像変換装置をテレビに取り付ける方法である。点滅する映像に対して時間的ローパスフィルタをかける方法について、有効性が確かめられた^[30]。この手法は、点滅の周波数、面積などから危険度を求め、危険度に応じてローパスフィルタの強さが調節される。また、危険度が低い映像には補正を行わないため、不要な映像の劣化が少ないと考えられる。

もう一つは、眼鏡のように、眼とディスプレイの間に光学フィルタを配置する方法である。減光フィルタと長波長赤色光遮断フィルタを複合して用いる方法について、有効性が確かめられた^[31]。2つのフィルタは、それぞれ単独でも有効な場合もあるが、複合することで抑制効果が著しく高くなると報告された。

4. おわりに

映像酔いと光感受性発作について、軽減、防止のための研究動向を紹介した。光感受性発作が光感受性をもつ人にだけ生じるのと比べ、映像酔いを引き起こす人は多い。一方で、映像酔いの症状はあまり重篤でない。これらの防止方法には、防止効果の有効性だけでなく、映像の不要な劣化が少ないことも望まれる。そのため、防止効果と劣化の程度とのバランスがとれた手法が望まれる。

映像酔い、光感受性発作ともに、生じやすさや、生じやすい映像の種類には個人差がある。また、視聴距離、ディスプレイサイズなどの視聴環境も影響する。これらの考慮によって、さらに安全で快適に視聴できる防止方法への改善が期待される。

謝辞

本研究は、総務省の「ネットワーク・ヒューマン・インターフェースの総合的な研究開発 (II-2 映像が生体を与える悪影響を防止する技術)」の助成を受けて行われた。謝意を表する。

参考文献

- [1] 総務省, “コンテンツの生体への影響に関する調査・研究報告書”, 2004.
http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040318_1.html
- [2] 高橋剛夫, “テレビ映像と光感受性発作—その脳波診断と防止策—”, 新興医学出版社, 1999.

- [3] 山内俊雄ほか, “平成9年度厚生科学特別研究報告書 光感受性発作に関する臨床研究”, 1998.
- [4] 高橋正紘, “動揺病”, めまい・平衡障害(野村恭也, 小松崎篤, 本庄巖編), pp. 497-503, 中山書店, 1999.
- [5] R.S.Kennedy, N.E.Lane, K.S.Berbaum and M.G. Lilienthal, “Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness”, The International Journal of Aviation Psychology, vol.3, no.3, pp.203-220, 1993.
- [6] 中川千鶴, 大須賀美恵子, 竹田仰, “VE酔い評価手法の開発に向けての基礎的検討”, 人間工学, vol.36, no.3, pp.131-138, 2000.
- [7] 早野順一郎, 山田眞己, 藤浪隆夫, 横山清子, 渡辺興作, 高田和之, “心拍変動と自律神経機能”, 生物物理, vol.28, no.4, pp.198-202, 1988.
- [8] 木竜徹, 南保洋子, 野村恵里, 坂東武彦, 小林直樹, “自己運動感を伴う映像の動きベクトルによる生体影響評価法”, パーチャルリアリティ学会論文誌, vol.9, no.4, pp.361-368, 2004.
- [9] 杉田典大, 吉澤誠, 田中明, 阿部健一, 山家智之, 仁田新一, “血圧-心拍数間の最大相互相関係数を用いた映像刺激の生体影響評価”, ヒューマンインタフェース学会論文誌, vol.4, no.4, pp.227-234, 2002.
- [10] W.T.Lo and R.H.Y.So, “Cybersickness in the presence of scene rotational movements along different axes”, Applied Ergonomics, vol.32, no.1, pp.1-14, 2001.
- [11] 氏家弘裕, 鶴飼一彦, 斎田真也, “映像酔いに対する運動ボタンと映像コンテンツの影響”, パーチャルリアリティ学会論文誌, vol.9, no.4, pp.377-385, 2004.
- [12] J.F.O'Hanlon and M.E.McCauley, “Motion sickness incidence as a function of the frequency and acceleration of vertical sinusoidal motion”, Aerospace Medicine, vol.45, pp.366-369, 1974.
- [13] 太田啓路, 河合隆史, 海老根吉満, 山口理恵, “TVゲームによって引き起こされる3D酔いの評価”, パーチャルリアリティ学会論文誌, vol.9, no.4, pp.343-351, 2004.
- [14] 原澤賢充, 椿郁子, 繁樹博昭, 松崎直幸, 森田寿哉, 伊藤崇之, 齊藤隆弘, 佐藤隆夫, 相澤清晴, “縦揺れ映像による酔い-背景の揺れと注視対象の揺れ-”, 第1回デジタルコンテンツシンポジウム, 1-8, 2005.
- [15] S.Hu, M.S.Davis, A.H.Klose, E.M.Zabinsky, S.P.Meux, H.A.Jacobsen, J.M.Westfall, M.B.Gruber, “Effects of spatial frequency of a vertically striped rotating drum on vection-induced motion sickness”, Aviation, Space and Environmental Medicine, vol.68, no.4, pp.306-311, 1997.
- [16] A.Rolnik and R.E.Lubow, “Why is the driver rarely motion sick? The role of controllability in motion sickness”, Ergonomics, vol.34, no.7, pp.867-879, 1991.
- [17] 松崎直幸, 椿郁子, 原澤賢充, 繁樹博昭, 川島尊之, 森田寿哉, 伊藤崇之, 齊藤隆弘, 佐藤隆夫, 相澤清晴, “動きの予測しやすさによる映像酔いに関する映像の評価”, 電子情報通信学会総合大会, DS-1-2, 2005.
- [18] I.Tsubaki, T.Morita, T.Saito and K.Aizawa, “An adaptive video stabilization method for reducing visually induced motion sickness”, IEEE Intl. Conf. image processing, 2005.
- [19] J.D.Prothero, M.H.Draper, T.A.Furness, D.A.Parker and M.J.Wells, “The use of an independent visual background to reduce simulator side-effects”, Aviation, Space and Environmental Medicine, vol.70, no.3, pp.277-283, 1999.
- [20] 繁樹博昭, 原澤賢充, 松崎直幸, 椿郁子, 川島尊之, 森田寿哉, 伊藤崇之, 齊藤隆弘, 佐藤隆夫, 相澤清晴, “映像酔いを低減する付加的背景刺激の効果の検討”, 映像情報メディア学会冬季大会, 11-1, 2004.
- [21] G.F.A.Harding and P.F.Harding, “Televised material and photosensitive epilepsy”, Epilepsia, vol.40, suppl.4, pp.65-69, 1999.
- [22] Independent Television Commission, “ITC guidance note for licensees on flashing images and regular patterns in television”, 1994 (revised and re-issued 1999, 2001).
http://www.ofcom.org.uk/tv/ifi/guidance/legacy/vrs_code_notes/flsh_imgs/gn_flash.pdf
- [23] 郵政省, “放送と視聴覚機能に関する検討会報告書”, 1998.
http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/housou/980626j701_2.html
- [24] 日本放送協会, (社)民間放送連盟, “アニメーション等の映像手法に関するガイドライン”, 1998. <http://www.nab.or.jp/htm/aud/anime.html>
- [25] 江本正喜, 大塚吉道, 山賀睦夫, 上原年博, 井口和久, 伊藤崇之, 藤井真人, “アニメ番組等ガイドライン対応「参考計測器」の開発”, 映像情報メディア学会技術報告, vol.22, no.40, pp.1-6, Aug. 1998.
- [26] ITU-R Recommendation BT.1702, “Guidance for the reduction of photosensitive epileptic seizures caused by television”, 2005.
- [27] Cambridge Research Systems Ltd.
<http://www.hardingfpa.co.uk/>
- [28] 稲村俊雄, 山本修, “[映像フリッカ解析装置] アニメチェッカーの開発”, 放送技術, vol.51, no.9, pp.960-962, 1998.
- [29] Y.Takahashi and T.Fujiwara, “Effectiveness of broadcasting guidelines for photosensitive seizure prevention”, Neurology, vol.62, pp. 990-993, 2004.
- [30] M.Nomura, T.Takahashi, K.Kamijo, and T.Yamazaki, “A new adaptive temporal filter: application to photosensitive seizure patients”, Psychiatry and Clinical Neurosciences, vol.54, pp.685-690, 2000.
- [31] Y.Takahashi, T.Sato, K.Goto, M.Fujino, T.Fujiwara, M.Yamaga, H. Isono and N.Kondo, “Optical filters inhibiting television-induced photosensitive seizures”, Neurology, vol. 57, pp. 1767-1773, 2001.



鉱物ベーマイト ($[\text{AlO}(\text{OH})]_n$) と有機配位子の直接反応による アルミニウム配位化合物の合成

小出 芳弘*

The First Example of the Synthesis of Six-coordinate Aluminum(III) Compounds via the Direct Reactions of the Mineral Boehmite ($[\text{AlO}(\text{OH})]_n$) with Ligands

Yoshihiro KOIDE*

内容概要

ベーマイトはボーキサイト中に含まれる天然鉱物で、Al, O, H の三種類の元素からなる無色の粉末として廉価で市販されている。ベーマイトは規則的な構造を有し、アルミニウム原子ひとつに対して6つの酸素原子が配位しているため、焼成によりアルミナを作る原料としてもさかんに用いられている。ベーマイト中のアルミニウムは Al^{3+} イオンとして存在していると考えられるため、定量的な Al^{3+} 供給源と見做す事ができる。本稿では新しい合成方法としてベーマイトを使った有機アルミニウム化合物の直接合成する方法を初めて紹介する。酸素や窒素が配位したアルミニウム化合物であるアルミニウム(III)アセチルアセトン, aluminum (III) acetylacetonate ($\text{Al}(\text{acac})_3$), やトリスヒドロキノリンアルミニウム, tris(8-quinolinato) aluminum (III) (Alq_3) は従来アルミニウムの硫酸塩や硝酸塩を出発物質として合成されてきた。また、塩化アルミニウムを原料とした合成にはクロロホルムなどの有機溶媒を用いる必要があった。今回我々が開発した方法は、ベーマイトとアセチルアセトンあるいは8-ヒドロキノリノールなどの有機化合物を水中に懸濁したまま直接反応させることにより、1段階で高効率に合成する方法である。さらに本反応副生成物として水分子を放出するだけであり精製が非常に容易である点、また従来法のように酸や有機溶媒を用いない環境にやさしい手法である点で優れている。様々な錯体合成の出発物質となり得るアセチルアセトン錯体を簡便かつ高収率で合成できる本方法は実用的に価値の高いものと期待される。また、 Alq_3 は近年注目される有機ELの発光層に用いられる物質で、ユニークな発光特性を示すことで知られる。今後その重要性が産業界を中心にさらに高まるであろう Alq_3 を大量かつ安価に高純度合成する方法としては本報告が最初の例である点は注目に値する。

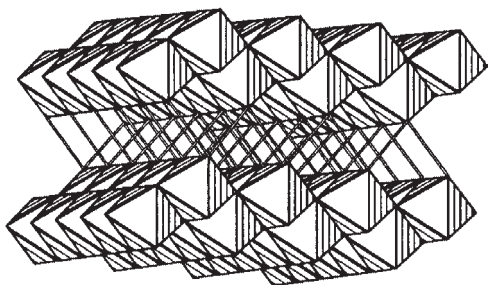
本稿では上記ふたつの合成反応を中心に、それぞれの合成方法と生成物のキャラクタリゼーション(核磁気共鳴、質量分析、熱分析、粉体X線結晶構造、元素分析、蛍光スペクトル)ならびに反応機構について詳細を述べた。今後、この手法を発展させさらに多様かつ複雑な構造を有する有機アルミニウム化合物の簡便な合成法を見出して行きたい。

*教授、応用化学科

Professor, Department of Applied Chemistry

1. Introduction

Boehmite is a naturally occurring mineral with the structure consists of double chains of edge-shared AlO_6 octahedra, in which the Al atom is surrounded by five oxide and one hydroxide anions². (Scheme. 1)



Scheme 1. Schematic representation of the layer structure of a mineral boehmite (top) and a picture of the commercial boehmite powder (bottom).

These chains share a further two edges to form puckered sheets (**Figure 1**). These sheets are bound to each other through

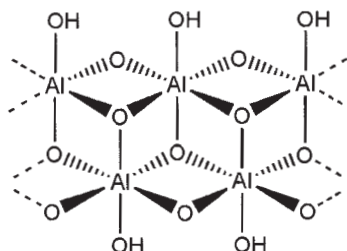
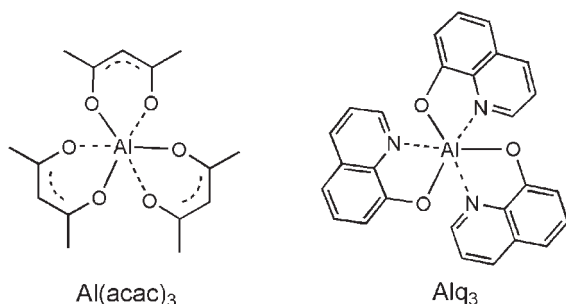


Figure 1. Structure of a part of boehmite showing an array of edge-shared AlO_6 octahedra in a sheet of $[\text{AlO}(\text{OH})]_n$.

hydrogen bonds forming a particle of several tens of micrometer in size. Boehmite is hydrophobic and its reactions include, for example, dehydration to form γ -alumina, and the surface derivatization with carboxylic acids.³ In addition to these reactions, boehmite can be regarded as a rich source of the aluminum atoms in the form of a cluster of six-coordinate oxides poised to be employed in the synthesis of six-coordinate aluminum compounds. We were intrigued if the water dispersed boehmite would react with organic reagents to yield water insoluble metal chelates in situ. In this study, we employed acetylacetone (Hacac) and 8-hydroxyquinoline (8-Hq) as the ligands. Hacac is slightly water soluble and exists in the keto and enol forms. If Hacac is able to extract the metal in boehmite, the reaction would provide $\text{Al}(\text{acac})_3$. Typically, $\text{Al}(\text{acac})_3$ is prepared in the reaction of Hacac with $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 17\text{H}_2\text{O}$ or $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ in water in the presence of ammonia.^{4,5} AlCl_3 is employed when the reaction was accomplished in chloroform.⁶ $\text{Al}(\text{acac})_3$ has been widely used as catalyst in, for example, olefin polymerization,⁷ epoxy curing,⁸ and silane polymerization.⁹ Recently, $\text{Al}(\text{acac})_3$ is used for the preparation of superhydrophobic surface.¹⁰ On the other hand, 8-hydroxyquinoline (8-Hq) has been known as achelate forming reagent, which precipitates many metals. For instance, 8-Hq readily forms a precipitate of tris(8-hydroxyquinolinato) aluminum(III) (Alq_3) with the Al^{3+} ion.¹¹ Given these conditions, we were intrigued by conducting the direct reaction between boehmite and 8-Hq that was anticipated to give Alq_3 in a single step under environmentally friendly conditions. Since the first application as the emission layer in the organic light emitting diodes (OLEDs) by Tang and Van Slyke, Alq_3 continues to attract attention and remains as one of the most widely studied Al coordination compounds.¹² Generally Alq_3 is prepared in the reaction between the Al^{3+} ion source, such as $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, and 8-Hq in water.¹³ A few solid state synthesis methods has been investigated, such as the reaction of aluminium isopropoxide with 8-Hq in an oven,¹⁴

and intercalation of 8-Hq in the interlayers of Al-smectites.¹⁵ However, these procedures are either accompanied by the environmentally harmful byproducts or unfit for quantitative formation of chemically pure Alq₃. Meanwhile, boehmite has been chemically functionalized by carboxylic acids¹⁶ to prepare the inorganic-organic hybrid materials.¹⁷ Despite interesting property of the resulting carboxylatoalumoxanes, the coordination mode of the carboxylate group to boehmite are not fully understood. Our research may contribute to understand the new aspects of the coordination chemistry of boehmite.



2. Reaction of boehmite with acetylacetone

2.1 Experiments Acetone (Wako Chemical) was distilled prior to use. Boehmite (Wako Chemical) and Hacac (Tokyo Kasei) were used as received. Mass spectra analysis was obtained on a Hitachi M-2000 mass spectrometer with an electron beam energy of 70 eV for EI mass spectra. TG/DTA analyses were obtained on a Rigaku G 8120 instrument using air as a carrier gas. An XRD sample is prepared by mounting grounded powders on glass slides prior to analysis. Data were collected on a Rigaku Multiflex diffractometer.

A dried powder of boehmite (1.00 g, 16.7 mmol) was added by four equiv of Hacac (6.67 g, 66.7 mmol). Here we added an excess amount of Hacac from the following reason. Although the molar number of boehmite was determined using AlO(OH) (= 60 g·mol⁻¹) as a unit, since the commercial boehmite is hydrated by unidentified number of

water (AlO(OH)·*n*H₂O). In order to ensure the complete consumption of boehmite an excess amount of Hacac was added. Boehmite turned pale orange yellow upon contact with neat Hacac. Then, the mixture was covered by 30 mL of deionized water and boiled under vigorous stir. Initial pale orange color of the reaction solution gradually intensified as the reaction proceeds for the next few hours until no visible change was recognized. In order to ensure the completion of the reaction, the solution mixture was left to reflux overnight and the reaction was discontinued after 12 hours. The contents were filtered using a glass filter and the products were rinsed with 5 mL of cold water for three times prior to dry under vacuum. The products had crystalline glare with granular appearance (<1 mm in diameter), which was obviously different from a fine powder of boehmite. These crude crystals were dissolved and recrystallized from hot acetone prior to analyses. Its mass spectroscopic and TG/DTA data agrees well with those of Al(acac)₃.¹⁸ The reaction yield was 69.5 % (3.75 g) based on boehmite. A photographic image of the recrystallized product (Al(acac)₃) is shown in **Figure 2**.



Figure 2. Photographic image of the recrystallized Al(acac)₃. ¹H NMR of CDCl₃ solution exhibits two singlets at δ = 1.99 (6 H, s, C(O)CH₃), and 5.48 (1H, s, C(O)CHC(O)) that are consistent with the chelating acetylacetonato ligands.

2.2 Results and Discussion The XRD spectrum of the resulting solid was compared with that of boehmite (**Figure 3**). A characteristic sharp diffraction pattern was indicative of the product to consist of only crystalline components. The XRD pattern of the product was compared with that of a commercially available $\text{Al}(\text{acac})_3$ (**Figure 4**). Two XRD patterns are essentially identical and confirmed our conclusion. It is noteworthy that when the reaction was conducted for 24 hours, the pale yellow crystalline grain grew larger in size ranging from 2 to 4 mm.

Mechanistically, we propose that the enol form of Hacac protonates the hydroxy group on the Al atom and consequently the acac⁻ coordinates concurrent with the water dissociation (Scheme 2).

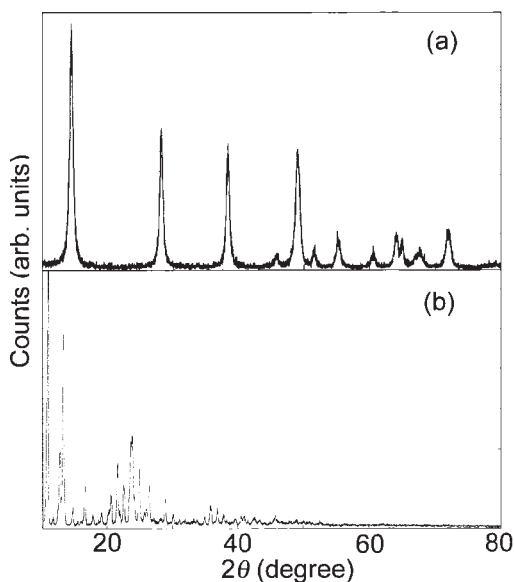


Figure 3. XRD patterns (CuK α radiation, $\lambda = 1.54056$) of boehmite (a) and the reaction product (b), showing the crystalline component.

Because the spontaneous development of the pale orange yellow color indicates the presence of the chelating ligand, the first chelation is considered to happen instantaneously subsequent to the cleavage of the oxo-ligands. Then the second Hacac will protonate the oxo-ligand to a new hydroxy group and, by this point, essentially the alumoxane framework should decompose. The third Hacac will

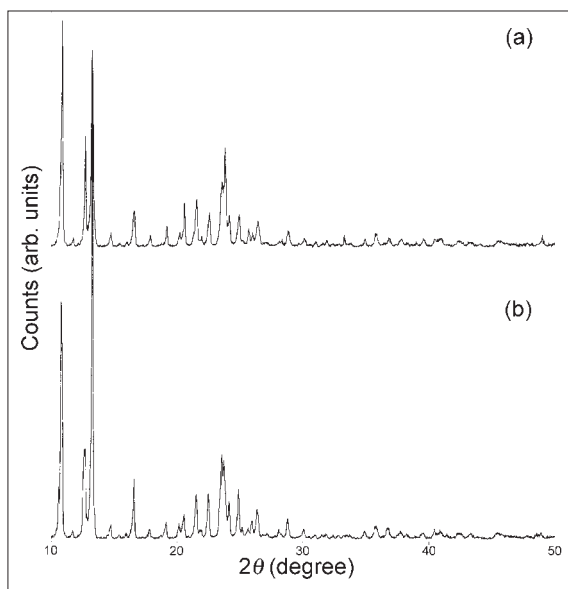


Figure 4. XRD patterns if a standard sample of $\text{Al}(\text{acac})_3$ (a) and the product (b).

substitute the hydroxy group similarly to the first Hacac substitution.

Carboxylic acids also react with boehmite to yield carboxylatoalumoxanes.³ Spectroscopic studies indicate that the carboxylate group binds to the adjacent two Al atoms in the bridging mode. In addition, crystallographic evidence of the bridging coordination is obtained in the model reaction between the single isomer of alumoxane, $[(^t\text{Bu})\text{Al}(\mu_3\text{-O})_6]$, and benzoic acid, although the Al atoms in the resulting complex, $[\text{Al}_5(^t\text{Bu})_5(\mu_3\text{-O})_2(\mu_3\text{-OH})_2(\mu\text{-OH})_2(\mu\text{-O}_2\text{CPh})_2]$, were five-coordinate unlike boehmite.²¹ In carboxylatoalumoxane, unlike the outcome of Hacac substitution, the alumoxane framework is preserved in the product.³ This sharp contrast in the reactivities of boehmite must be attributed to the geometric difference between the two ligands. For the carboxylate group, in order to avoid the large ring strain, it prefers the bridging mode, while Hacac can readily form a six-membered ring. Thus, as long as the substitution replaces only the surface hydroxy groups, the alumoxane framework remains intact. On the other hand, the oxo-ligand cleavage must be induced only

when the chelate is formed on the Al atom as we proposed above. In order to study those phenomena, we are currently preparing computational works of the electronic structure of the ligands and boehmite.

It is worth noting that when the water to reactants ratio was increased by ten fold, exceeding amount of water retarded the reaction severely. We are currently investigating this phenomenon in association with the reaction mechanism.

3 Reaction of boehmite with 8-hydroxyquinoline

3.1 Experiments A dried boehmite powder (0.10 g, 1.7 mmol) was added by four equiv of 8-Hq (0.97 g, 6.7 mmol). The reaction mixture was covered by 30 mL of deionized water and this pale yellow suspension was boiled under vigorous stir. In the next few hours, the colour intensified gradually to greenish yellow and the reaction was discontinued after 24 h. The contents were filtered using a glass flit and the filtrates were rinsed with 5 mL of cold acetone for three times prior to dry under vacuum. The resulting greenish yellow solid 1, which readily dissolves in chloroform to provide yellow solution, was subject to analysis without further purification. The aromatic region of ¹H NMR spectrum of complex 1 coincides with that of a standard sample of Alq₃ (Figure 5).

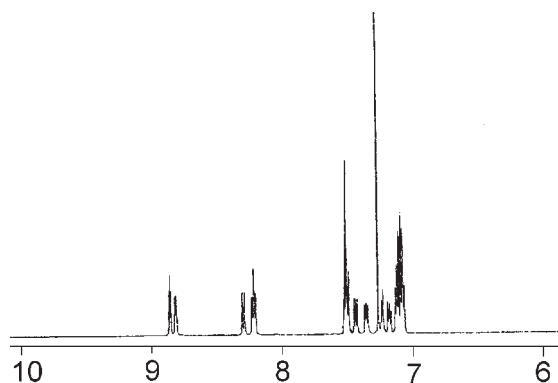
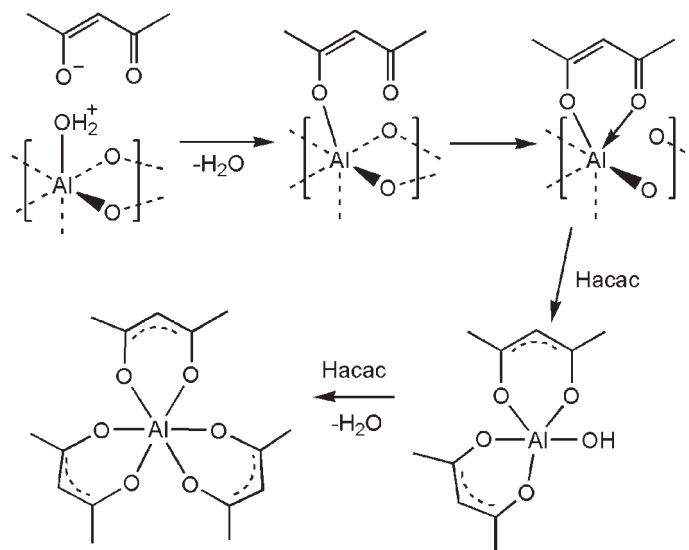


Figure 5. Aromatic regions of a ¹H NMR spectrum of 1. NMR spectrum is observed in CDCl₃. Chemical shifts are reported with respect to TMS.

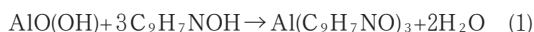
Electron ionization (EI) mass spectrum data of 1 shows a molecular ion peak at *m/z* value of 459 and a fragment peak at 315, corresponding to the Alq₃ with acquired H and (Alq₃⁺ - C₉H₆NO), respectively. The reaction yield was 96.4 % (0.739 g, 1.61 mmol) based on boehmite.¹⁹

3.2 Results and discussion In order to study stoichiometry of the reaction, boehmite was reacted with one and two equiv each of 8-Hq to obtain Alq₃ as the principal product with the production yields of 30 % and 58 %, respectively, based on boehmite. Therefore, it was postulated



Scheme 2

that 8-Hq precipitates the Al^{3+} ion quantitatively from boehmite. Overall reaction can be written as shown in eqn. (1).



Fluorescence spectrum of 1 was also observed as a chloroform solution. When the solution was excited at 450 nm, a broad fluorescence, characteristic to Alq_3 was recorded (Figure 6).

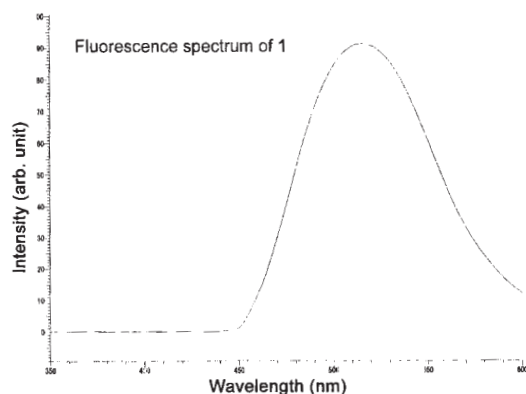
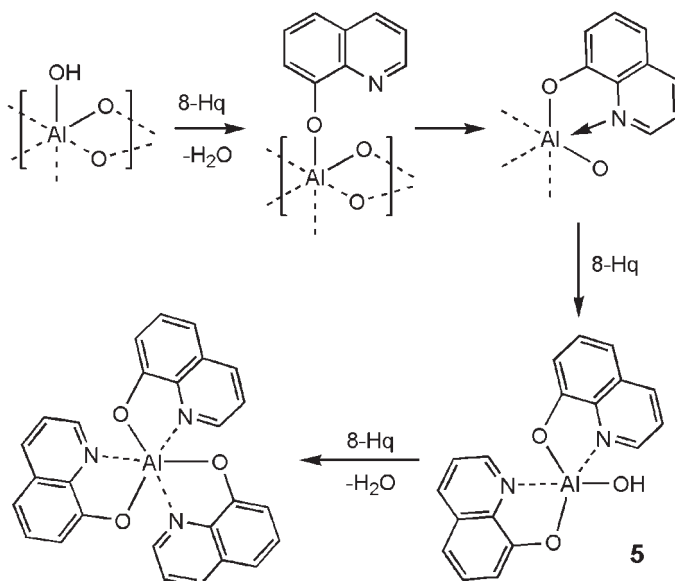


Figure 6. Fluorescence spectrum of 1 in CHCl_3 .

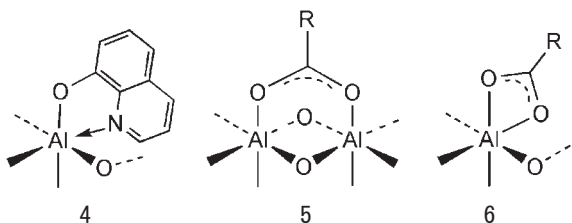
Mechanistically, due to Lewis acidity of the Al atom in boehmite, the surface hydroxy group is considered to undergo protonation by the entering 8-Hq and lose a water molecule concomitant with

the ligand substitution (Scheme 3).²⁰ Then, perhaps the second 8-Hq in the vicinity of the intermediate 2 protonates an oxo-ligand to generate a new hydroxy group (3), which would eventually be substituted by yet another 8-Hq to form Alq_3 .

It is worth noting that the analogous reaction observed between carboxylic acid and boehmite is also proposed to proceed via the substitution of surface hydroxy groups and protonation of an oxo-ligand.¹⁶ However, unlike 8-Hq, carboxylic acid is suggested to coordinate mostly in bridging fashion across two adjacent Al atoms. The carboxylic acids substitute only the surface hydroxy groups and the alumoxane core structure is kept intact, hence the resulting carboxylatealumoxane maintains the particle-like appearance with 50-100 nm in diameter.^{16,21} This is in sharp contrast with the result obtained in 8-Hq coordination, which apparently coordinates to the Al atom in boehmite as a chelate ligand and completely disassembles the core structure until the ligand is consumed. Geometrically, it is speculated that 8-Hq is conveniently arranged to form the five-membered ring (4) with the Al atom, while the carboxylate group is more suitable for the six-membered ring with the oxo-bridged Al atoms (5) and the ring strain is too large for chelate formation (6).²¹



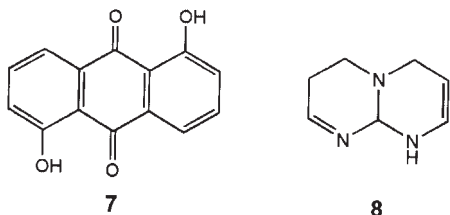
Scheme 3



4. Conclusion

This report described a novel use of boehmite as a solid-state, quantitative source of the Al^{3+} ions for the preparation of six-coordinate aluminum compounds.

This research demonstrated an innovative use of boehmite as a source of the Al atoms in the synthesis of a six-coordinate mononuclear alumoxane compound, $\text{Al}(\text{acac})_3$ and Alq_3 in a heterogeneous aqueous mixtures. The method enables a large scale preparation of the Al^{3+} coordination compounds under “green” conditions. Syntheses using various oxygen- and nitrogen-donor bidentate ligands (7 and 8) are in progress as well as computational studies of the electronic structure of the ligands and boehmite.²²



5. Acknowledgment

Author is grateful to Kanagawa University, the Department of Applied Chemistry of Kanagawa University and the Research Institute for Engineering of Kanagawa University for financial and instrumental support. The authors thank Mr. Yoshiyuki Mochida for mass spectroscopic measurement. We also thanks Drs. Katsuyoshi Kakinuma and Noriko Chikaraishi Kasuga for XRD diffraction analysis and data acquisition.

6. References and Notes

- Boehmite is also known as $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$. Boehmite dehydrates to $\gamma\text{-alumina}$ ($> 450^\circ\text{C}$).
- A. W. Apblett, in "Encyclopedia of Inorganic Chemistry Vol.1" ed. by R.B. King, Wiley, Chichester, 1994, pp 108-110.
- C. C. Landry, N. Papp?, M. R. Mason, A. W. Apblett, A. N. Tyler, A. N. MacInnes and A. R. Barron, *J. Mater. Chem.*, 1995, 5, 331.
- (a) R. C. Young and J. P. McReynolds, *Inorg. Synth.*, 1946, 2, 25. (b) C. J. Nicholls and D. S. Urch, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, 1974, 901.
- K. Utsunomiya, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 1971, 44, 2688.
- A. E. Finn, G. C. Hampson and L. E. Sutton, *J. Chem. Soc.*, 1938, 1254.
- (a) A. Debuigne, J. -R. Caille and R. Jerome, *Macromolecules* 2005, 38, 6310. (b) S. Hayase, T. Ito, S. Suzuki and M. Wada, *J. Poly. Sci., Poly. Chem. Ed.* 1981, 19, 2185.
- T. Iijima, S. Sekine and H. Kakiuchi, *Netsu Kokase Jushi*, 1987, 8, 73.
- Z. Zhang and Y. Tanigami, *Langmuir*, 1997, 13, 473.
- A. Nakajima, A. Fujishima, K. Hashimoto and T. Watanabe, *Adv. Mater.*, 1999, 11, 1365.
- E. Lydersen, B. Salbu and A. B. S. Poleo, *Analyst*, 1992, 117, 613; R. A. Chalmers and M. A. Basit, *Analyst*, 1967, 92, 680.
- (a) Tang, C. W.; Van Slyke, S. A. *J. Appl. Phys.*, 1987, 51, 913. (b) Tang, C. W.; Van Slyke, S. A.; Chen, C. H. *J. Appl. Phys.* 1989, 65, 3610. (c) Kido, J.; Kimura, M.; Nagai, K. *Science*, 1995, 267, 1332. (d) Sheats, J. R.; Antoniadis, H.; Hueschen, M.; Leonard, W.; Miller, J.; Moon, R.; Roitman, D.; Stocking, A. *Science*, 1996, 273, 884.
- H. Li, F. Zhang, Y. Wang and D. Zheng, *Mater. Sci. Eng., B*, 2003, 100, 40; R. C. Chirnside, C. F. Pritchard and H. P. Rooksby, *Analyst*, 1941, 66, 399.
- A. K. Saxena, *Synth. React. Inorg. Met. -Org. Chem.*, 1999, 29, 1747.
- N. Khaorapapong, K. Kuroda and M. Ogawa, *Clays Clay Miner.*, 2002, 50, 428.
- (a) Y. Kimura, S. Sugiyama, T. Ichimura and I. Taniguchi, *Macromolecules*, 1987, 20, 2329. (b) C. C. Landry, N. Papp?, M. R. Mason, A. W. Apblett, A. N. Tyler, A. N. MacInnes and A. R. Barron, *J. Mater. Chem.*, 1995, 5, 331. (c) Y. Koide and A. R. Barron, *Organometallics*, 1995, 14, 4026.
- C. T. Vogelson, Y. Koide, L. B. Alemany and A. R. Barron, *Chem. Mater.*, 2000, 12, 795.
- MS (EI, %) m/z 324 (M^+ , 100), 225 ($M^+ - \text{CH}_3\text{COCHCOCH}_3$, 88), 126 [$M^+ - (\text{CH}_3\text{COCHCOCH}_3)_2$, 80]. Mass loss of 99.6 % occurs between 180 and 250°C with DTA peak at 196.2°C . Elemental analysis: Found (Calcd. for $\text{C}_{15}\text{H}_{21}\text{O}_6\text{Al}$); C 54.99 (55.54), H 6.48 (6.54).
- Elemental analysis: Found (Calcd. for $\text{C}_{27}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{O}_3\text{Al}$); C 69.37 (70.59), H 3.94 (3.95), N 8.98 (9.15).
- R. C. Mehrotra, R. Bohra, "Metal Carboxylates," Academic Press, London, 1983.
- Y. Koide and A. R. Barron, *Organometallics*, 1995, 14, 4026.
- H. Mizoguchi and P. M. Woodward, *Chem. Mater.*, 2004, 16, 523.



DNA のバイオナノエンジニアリング

—生命と物質の融合をめざして—

小野 晶*

Bio-nano-engineering of DNA

Akira ONO*

1. はじめに

文部科学省のホームページによると、ナノテクノロジーとは「原子や分子の配列をナノスケール(10^{-9} m)で自在に制御することにより、望みの性質を持つ材料、望みの機能を発現するデバイスを実現し、産業に活かす技術」と、やや宣伝口調で、定義されている¹⁾。もう少し科学的に考察すると、ナノテクノロジー研究において開発されるべき技術は、「原子・分子の配列と配置を制御する技術」と「ナノスケールの物質の構造と機能を制御する技術」に分けると議論しやすい²⁾。分かり易さから「ナノテクノロジー」＝「ナノスケールの物質の構造と機能を制御する技術」と一般に理解されているところもあるが、将来的に大きなブレークスルーに結びつくのは「原子・分子の配列と配置を制御する技術」であるとする研究者も少なくない。

ナノスケールの構造を有する物質（以下ナノ物質と呼ぶ）を調製する手法は、トップダウン法とボトムアップ法に大別される。トップダウン法とは物質の塊をナノスケールまで微細化する方法で、例えば基盤上にパターンを書き込む集積回路の製造法はトップダウン法に分類される。ボトムアップ法は、原子・分子を組み上げてナノスケールの物質を得る方法である。上で触れたように、将来的にはボトムアップ法の発展が大きなブレークスルーに結びつくことが期待されている。

バイオナノテクノロジーは、字面を追えば「バイオに関するナノテクノロジー」であるが、研究内容は以下、(1)「上記のナノテクノロジーの成果を生命科学や医療に応用する」、(2)「生体物質（蛋白質、生体膜、DNA/RNA

など）がボトムアップを駆使した精巧な自己組織化構造を有し、それらの構造が機能に関連していることに学び、生体物質を模倣、または利用して新規ナノ物質を開発する」、に分類して考察される³⁾。

本論文の研究は上記（2）に関連し、DNA が精巧な自己組織化構造を有し、その構造が機能に関連していることに学び、DNA を模倣、または利用して新規ナノ物質を開発することを目的とする。

2. DNA の構造と自己組織化

DNA（デオキシリボ核酸）は遺伝子の本体であり、生命科学研究の主役の一つである。一方、化学的視点からその構造と物性に着目すれば、DNA は機能性分子開発の基盤構造として有用である^{4,5)}。例えば、現在、DNA の導電性とその利用が注目されている⁵⁾。では、どのような DNA の構造的特徴が導電性に結びつくのだろうか。

2.1 DNA の構造

DNA は直径約 2 nm の糸状の分子であり、天然のナノワイヤーと呼ぶに相応しい構造を有する。2 本の DNA 鎖が水素結合を介して結合し、二本鎖構造（duplex 構造）を形成している（図 1 左）。内側に塩基対が積層し、その周囲に糖—リン酸バックボーンが巻きついた螺旋階段様の構造である。上下の核酸塩基間の距離は平均 3.4 Å と密に充填され、そのため核酸塩基（芳香環）間にはアロマトミックスタッキングが存在し、 π 電子の相互作用が導電性に結びついているのである。二本の DNA 鎖は、核酸塩基間の水素結合を介して結合するが、その際、アデニン塩基（A）とチミン塩基（T）、グアニン塩基（G）とシトシン塩基（C）が特異的に結合しワトソン—クリック型の塩基対（A-T 塩基対と G-C 塩基対）を形成するのであって、通常は、A-G、C-A などの組み合わせ

*教授、応用化学科

Professor, Department of Applied Chemistry

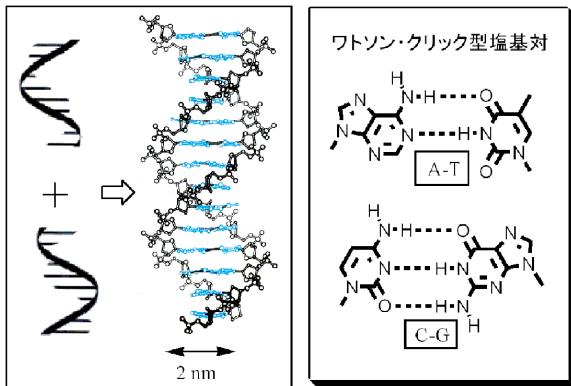


図1 二本鎖DNA構造 (duplex structure)

せは出来ない。この特異的にワトソン・クリック型塩基対が形成されるという特徴が、DNA の規則正しい自己組織化構造の基盤となっている。

2.2 DNA の自己組織化

DNA には4種の塩基が含まれているが、塩基がデオキシリボースと結合したものをデオキシヌクレオシドと呼ぶ(図2)。DNA 鎖は、4種類のデオキシヌクレオシドがリン酸ジエステル結合を介して結合したものである。DNA 鎖中では、ヌクレオシドの3'水酸基と別のヌクレオシドの5'水酸基が順次結合している。その結果、DNA 鎖には方向性が生じ、5'末端と3'末端が出来る。DNA 鎖は、相補的配列(ワトソン-クリック型塩基対を介して二本鎖構造を形成する相手方)を探して、自己組織化的に二本鎖構造を形成する。二本鎖DNA 構造中の各ストランドは、一方が5'→3'であれば、もう一方は3'→5'となる関係にあり、この関係を二本のDNA は逆平行であると言う⁴⁾。

計画的にデザインされた塩基配列を持つDNA 鎖を調製しさえすれば、適当な緩衝液中に溶解することで、DNA は期待する高次構造を形成する。図3に例をあげて説明する。図3aは最も単純な二本鎖構造の形成であり、あるDNA が相補的配列を有するもう一本のDNA と結合する。図3bは、自己相補的配列を有するDNA が自ら二本鎖構造を形成する例である。相補的配列を有する2本のDNA をリンカーで結合したものはヘアピン様の構造を形成する(c)。3本のDNA 鎖を組み合わせた構造(d)、4本のDNA 鎖を組み合わせた構造(e)、さらに複雑な格子状構造を構築することも可能である^{4,6)}。

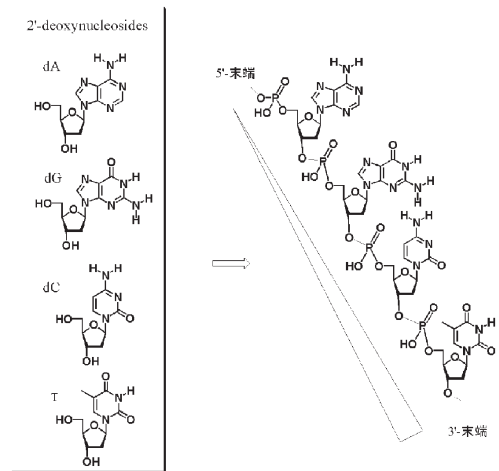


図2 DNA の自己組織化構造

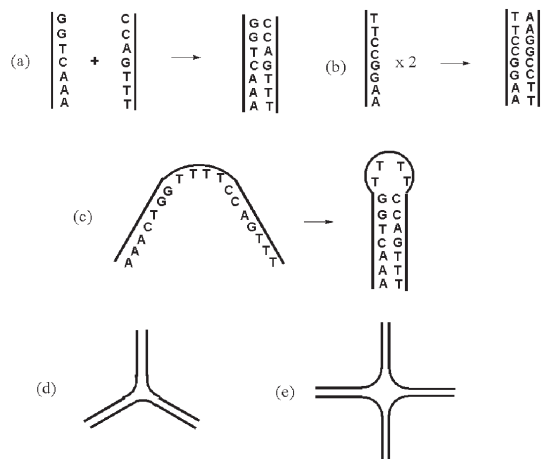


図3 DNA の高次構造の例

2.3 DNA 構造の特徴

さて、DNA 構造の特徴の一つに、簡単な構造単位（塩基部、糖部、リン酸ジエステル）が螺旋軸に沿って繰り返すことがある（図4右）。DNA が本来持っている構造単位を機能化することにより、機能性単位が規則正しく配列されたワイヤー状分子を合成することが可能となるであろう⁷⁾。この配列制御は、DNA 合成技術を利用すると、比較的簡単に実現される。

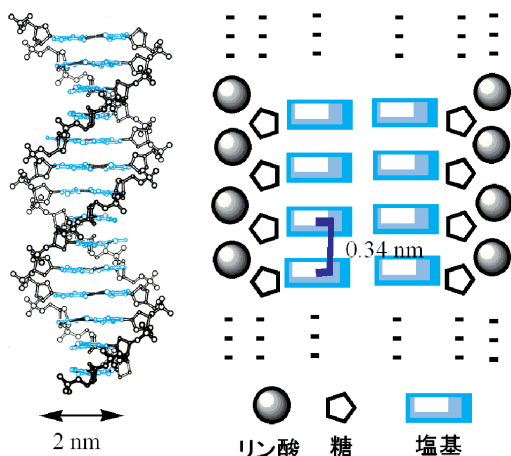


図4 DNA 構造の特徴

2.4 DNA 合成機の活用

図5にDNA自動合成機の仕組みを模式的に示した⁸⁾。DNAの構成成分である4種のヌクレオシドを、DNA自動合成用のモノマーユニットへと誘導する。モノマーユニットを任意の順に固相担体に結合することが出来るので、任意の塩基配列のDNAが得られる。さらに、人工ヌクレオシド(X)を組み込むことも可能である。

DNAを合成するためにはモノマーユニットをホスホジエステル結合で連結するのだが、モノマーユニットの構造や縮合試薬を工夫することで、オリゴエステルやオリゴアミドの合成に利用することも可能であろう。

3. 金属含有 DNA ナノワイヤー

3.1 DNA 構造に沿って金属イオンを規則正しく配列させる

先に述べた様にDNA二本鎖構造においては核酸塩基対（ワトソン・クリック型塩基対、W-C型）が積層している（図6左）。W-C型塩基対を、金属を介した塩基対に変換することにより、DNA螺旋構造を鋳型に、金属イオンが一次元に規則正しく配列された分子が得られる（図6右）。

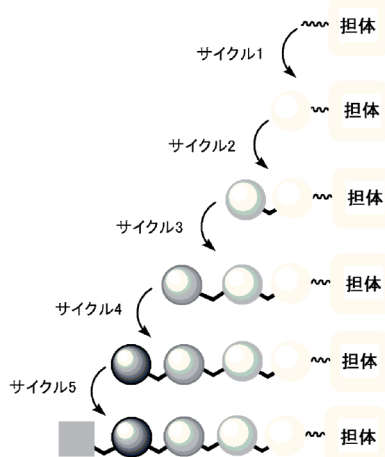
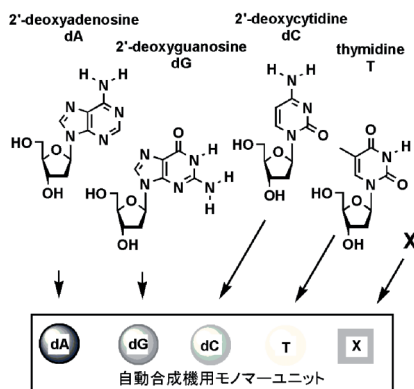
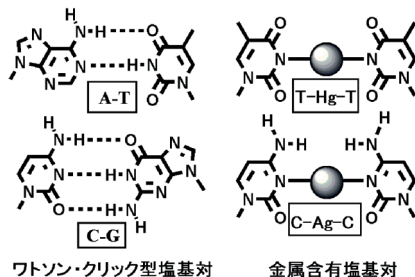
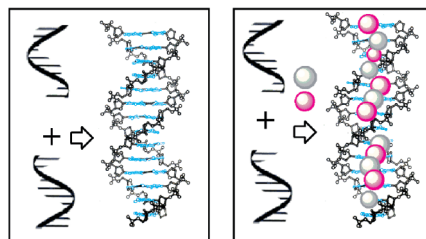


図5 DNA自動合成機の模式的表現

DNA:天然のナノワイヤー 金属含有DNAナノワイヤー



ワトソン・クリック型塩基対 金属含有塩基対

図6 天然型DNAと金属含有DNA

筆者は、DNA 合成技術を利用して、天然にはほとんど存在しないチミン-チミン塩基対 (T-T ペア)、あるいはシトシン-シトシン塩基対 (C-C ペア) を含む DNA を合成し、各種金属イオンとの相互作用を検討した結果、T-T ペアに水銀(II)イオンが、C-C ペアに銀(I)イオンが高選択的に結合し、金属イオンを介した塩基対が形成されることを見出した (図 6 右)⁹⁾。天然型の DNA が容易に金属含有ワイヤーに変換されるという現象は、盲点を突いた発見である。結晶化に依存することなく規則正しい構造が形成され、溶液中でも維持されるという優れた特性を有する。配位子である核酸塩基を任意の順で結合した DNA (即ち配位子が規則正しく配列された配位子集合体) を用いると、任意の金属を任意の順で配列させることが可能となる。この配列制御は DNA 合成技術を利用することにより実現される。

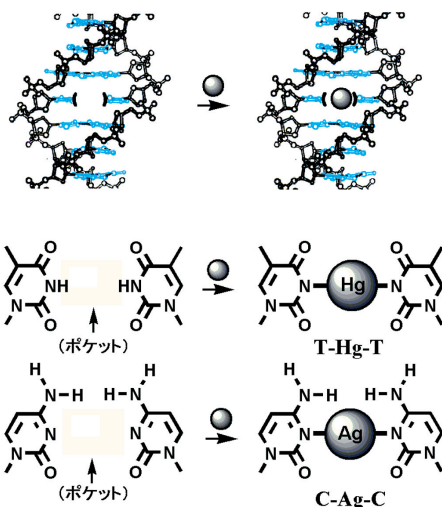


図7 DNA二本鎖への金属の結合—ホストゲスト化学—

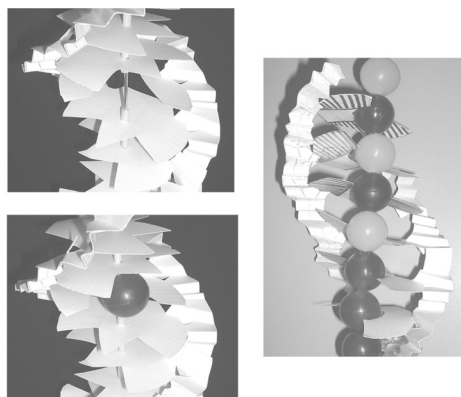


図8 5-置換ウラシルと金属イオンの結合

3.2 金属含有 DNA ナノワイヤーの構造と安定性

ここでは DNA と金属イオンの結合様式を「ホスト-ゲスト化学」と「超分子構造の形成」に大別して議論する。DNA 二本鎖中のチミン (T) 塩基の間に Hg(II) が、シトシン (C) 塩基の間に Ag(I) が高選択的に取り込まれる現象は、「ホスト-ゲスト化学」として説明しようであろう (図 7)。W-C 型塩基対で形成された DNA 二本鎖構造中に、金属イオン結合部位が一つ存在する。二本鎖構造の軸を挟んで向き合ったチミン (又はシトシン) 残基間の空孔に Hg (又は Ag) が選択的に結合するのである。上図の結合を立体紙模型で表した (図 8)。向き合った T 残基と上下の塩基対からなるポケットが形成され (図 8 左上)、金属イオンが具合良く収まる (図 8 左下)。TT ペアと CC ペアの化学構造に注目すると、単純に適当な大きさのポケットに金属イオンが入るのではなく、各金属イオンがポケットの配位環境を厳密に選択していることは明らかである。この機構の解明は、今後の課題の一つである。

二本の DNA 鎖と金属イオンから、金属イオンが連続して配列された分子 (図 6 右、図 8 右) を構築することも可能である。これは「超分子構造形成」と分類される。紙模型では串団子のような構造になる (図 8 右)¹⁰⁾。NMR や結晶解析法による金属配位部位の構造解析研究、遺伝子の一塩基多型 (SNAP)⁵⁾ 検出手法の開発を目指した基礎的熱力学的特性の解析研究が進行中である¹¹⁾。

3.3 種々の金属イオンを取り込む試み

これまでは天然型 DNA から成る金属含有 DNA ワイヤーに関して述べてきたが、最近、人工的配位子を組み込んだ DNA を利用して金属イオンを結合する研究も報告されている¹²⁾。ここでは筆者等の発見した興味深い現象を記す。即ち、配位子の pKa を変化させることにより、錯体の立体構造を大きく変えることなく、金属イオン選択性を変化させた例を紹介する¹³⁾。

先に述べたように DNA 二本鎖中の T-T ペアに Hg(II) イオンが選択的に結合する。チミン 5 位のメチル基を電子吸引性の置換基に変換すると、ピリミジン環 N 3 位の pKa が小さくなる (図 9)¹⁴⁾。一連の 5 位置換ウラシル (チミンは 5-メチルウラシルである) を組み込んだ

DNA 二本鎖を合成し、金属イオンとの相互作用を検討したところ、溶液の pH によって金属イオン選択性が変化することを発見した。

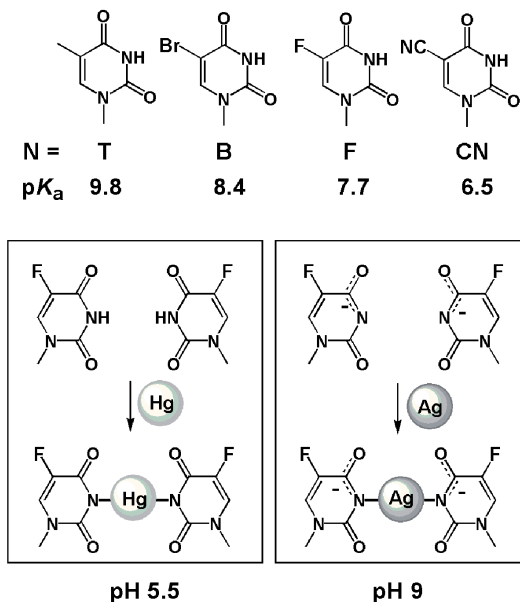


図 9

5-フルオロウラシル(F)を例に概説する。本実験に用いた全ての pH (pH 4.4~pH 10) で F-Hg-F ペアが形成されたが、F-Ag-F ペアは塩基性領域でのみ形成された。塩基対の安定性は pH により変化し、pH 5.5では F-Hg-F ペアが安定であるが、pH 9では F-Hg-F ペアよりも F-Ag-F ペアがより安定になる (図 9)。即ち、ウラシル類の pK_a を境にして、より小さな pH では Hg(II)イオン、より大きな pH では Ag(I)イオンがより強く結合する。単に金属イオンとリガンドの結合の強弱のみならず、溶媒や塩の関与した静電的相互作用が、各ペアの安定性に関与しているのであろう。

ウラシル 5 位は金属イオン結合部位から離れている。また、5 位置換基は DNA 二本鎖構造に大きな影響を与えない。錯体の立体構造を大きく変えることなく、溶液の pH を変化させることにより金属イオン選択性を変化させることに成功した、興味深い例である。

筆者らは、天然型塩基及び人工塩基を利用して Hg(II)、Ag(I)、Cu(II)、Ni(II)を選択的に DNA 二本鎖に取り込むことに成功している¹³⁾。この技術を利用すると異種金属イオンを任意の順に配列させることが出来る (図10)。

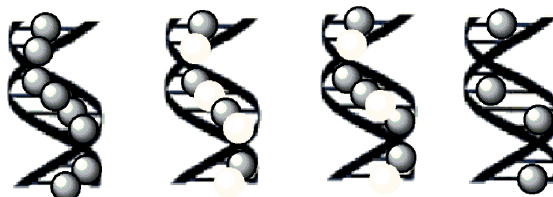


図10 DNA 鎖に沿って配列された金属イオンの模式的表現

3.4 応用に向けて

金属含有 DNA は導電性ワイヤーや分子磁石開発の基盤構造として利用可能であると期待されるが、ここでは別の可能性を議論したい。

金属イオンセンサーの開発：DNA 二本鎖中の T-T ペアに Hg(II)が高選択的に結合することを利用して溶液中の水銀イオンを検出するセンサーの開発研究を行った¹⁵⁾。センサーは DNA の両端に蛍光残基と消光残基を有しており、DNA は水銀結合部位とリンカー部位に大別される (図11)。水銀イオン非存在下では蛍光発光が観測される。水銀イオンの添加により T-Hg-T 塩基対が形成されると、DNA 部位がリンカー部位を蝶番として折れ曲がりヘアピン様の構造をとる。蛍光残基と消光残基の距離が近づくことで、両残基間に Fluorescence Resonance Energy Transfer (FRET) が進行し、蛍光強度が減少する。図11中のグラフは520 nm の蛍光強度と水銀イオン濃度のプロットである。水銀イオン濃度と蛍光強度により相関が見られる。同様の機構を redox-sensor として利用することも可能である¹⁶⁾。将来的には、様々な金属イオンを結合する手法と組み合わせることにより、多様な金属イオンを検出するセンサー群を開発することが可能であると期待される。

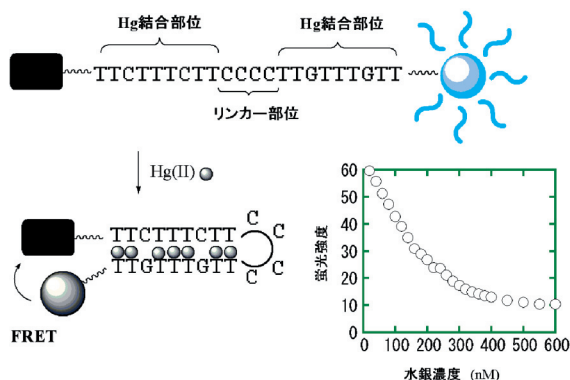


図11 センサーの水銀イオン検出機構

さて、DNA を基盤構造とするセンサーの利点の一つは、チップ技術と組み合わせることにあると考えている。即ち、センサー群をガラス基板に規則正しく結合し、金属イオンを網羅的に検出する簡易手法の開発に利用出来るのではないかと期待している。例えば「ガラス基板上の4列2行目のセンサーはPb(II)に反応する」ということが予め分かっているので、サンプルにPb(II)が存在することが分かる、という仕組みである(図12)。

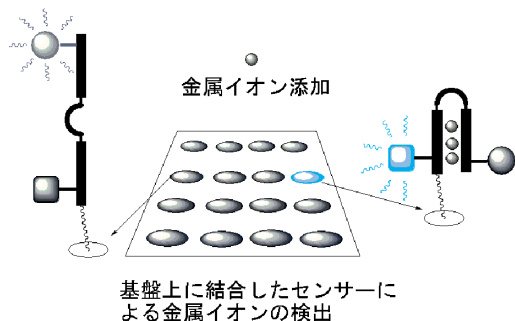


図12 金属イオン検出用チップの模式図

4 ナノ分子温度計の開発

冒頭で記した様に、二本鎖 DNA 構造は、内側に塩基対が積層し、その周囲に糖-リン酸バックボーンが巻きついた螺旋階段様の構造(図13左)であるが、一本鎖 DNA もまた、螺旋状の構造を形成すると期待される。図13 b は二本鎖 DNA 中の一本の DNA 鎖を抜き出したものであるが、一本鎖でも螺旋状構造をとっていることが分かる。実際には、溶液中の一本鎖 DNA が、二本鎖 DNA 構造中の DNA 鎖と、全く同じ構造をとっているわけではなく、より自由に運動していると考えられるが、平均的には螺旋状構造であると考えられる。

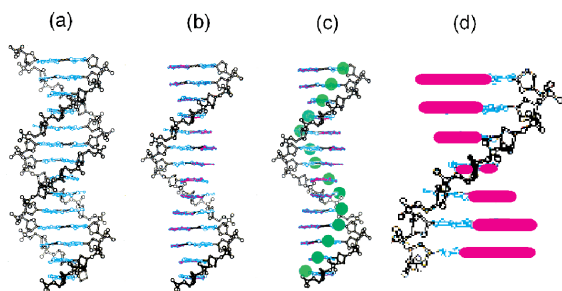


図13 一本鎖 DNA の形成する螺旋状構造の模式図

さて、DNA 構造の特徴の一つは、簡単な構造単位(塩基部、糖部、リン酸ジエステル)が螺旋軸に沿って繰り返すことであると、図4で説明した。一本鎖 DNA 構造においても構造単位が連続しており、螺旋状に配置される。そこで、構造単位に機能性を結合すると、機能性は DNA 鎖に沿って螺旋状に配列されるであろう(図13 c)。機能性基として芳香環を用いると、芳香環が DNA 鎖に沿って積層すると期待される(図13 d)。言うまでも無いことではあるが、すべての生体高分子は溶液中で(往々にして結晶中でも)構造を変化させており(分子内で運動しており)、分子の構造はあくまでも平均構造で議論される。ゆえに、以下に記す修飾 DNA の分光学的データは、その分子の平均構造を反映している。

4.1 DNA 鎖に沿って配列されたピレンクラスターの調製

ピレンは蛍光性の芳香族炭化水素であり、化学的に安定であることから、生体分子の蛍光標識に利用されて来た。ピレンはモノマー分子に由来するモノマー蛍光と、励起されたピレン分子と基底状態にあるピレン分子からなる複合体に由来するエキシマー蛍光¹⁷⁾が知られている(図14)。DNA 構造に沿ってピレン基を規則正しく配列することにより、ピレン基が複合体を形成し易くなり、強いエキシマー蛍光が観測されると期待した。

A dimer which is associated in an electronic excited state and which is dissociative in its ground state

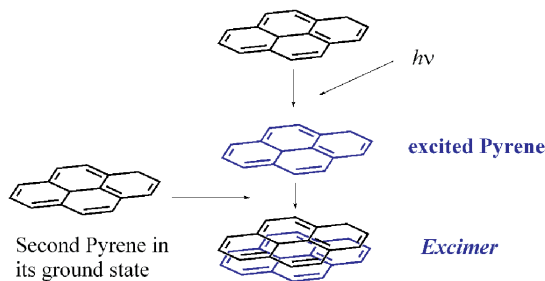


図14 ピレンのエキシマー発光

図15にピレン結合型 DNA の化学合成ルートを模式的に示した。市販のチミジン、及びピレン酢酸から出発して、チミジン-ピレン複合体(1)を合成し、さらに DNA 化学合成用モノマーユニットへと変換した。市販の DNA 合成機を用いて天然型 DNA の5'末端にチミジン-ピレン複合体が1~5残基結合した短鎖 DNA を合成した。

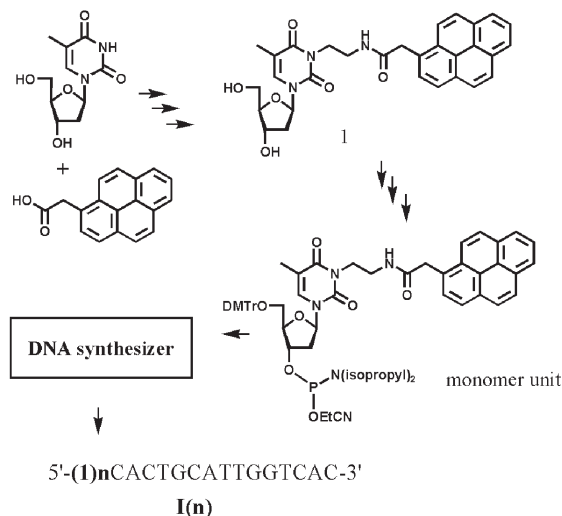
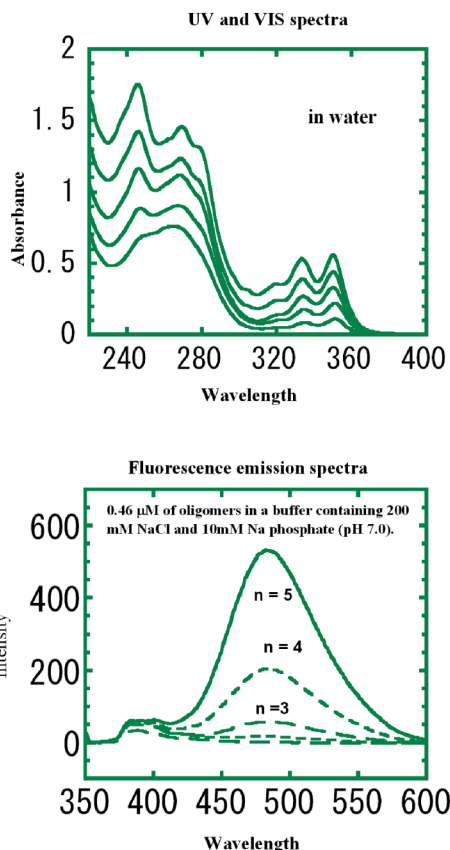


図15 ピレン結合型 DNA の化学合成ルート

4.2 DNA 鎖に沿って配列されたピレンクラスターの分光学的特性

ピレン残基の結合した DNA の水中での可視・紫外吸収スペクトルを図16aに示した。ピレン残基由来の吸収が300~400 nm 領域に観測されるが、DNA に結合したピレン残基の数に比例して、ピレン由来の吸収が増大した。

図16 b は蛍光発光スペクトルである。400 nm 付近にピレンモノマー由来の発光スペクトルが、また500 nm 付近にエキシマー由来の発光スペクトルが観測された。特筆すべきは、ピレン残基数の増加に対応して、エキシマー発光強度が指数関数的に増大したことである。これは、DNA に結合したピレン残基が、ピレン残基同士が会合してエキシマーを形成するのに適当な配置で、規則正しく配列されていることを示すものである^{7a)}。

図16 ピレン結合 DNA ($n=1\sim5$) の分光

- a) 可視・紫外スペクトル。DNA に結合したピレン基が増加するとともに、300~360nm 付近のピレン由来の吸収強度が増加した。
b) 蛍光発光スペクトル (励起光342nm)。ピレン基が増加するとエキシマー由来の発光スペクトル強度が指数関数的に増加した。

図17に溶液温度を変化させて蛍光発光を観測した実験結果を示した。発光スペクトルの形は変化しなかったが、その強度には温度依存性が見られ、液温が上昇するに従って発光強度が減少し、逆に液温が低下するに従って発光強度が増加した (図17 a)。これは、液温が高くなると分子の運動が大きくなり、ピレン残基同士が複合体を形成する効率が低下するためであると考えられる。溶液温度と発光強度には良好な相関が見られた (図17 b)。これは、蛍光スペクトルから溶液温を推定することが可能であることを示すものである。即ち、ピレン残基を結合した DNA は、温度変化を蛍光発光強度の変化として検出するセンサー、ナノ分子温度計、として作用する。

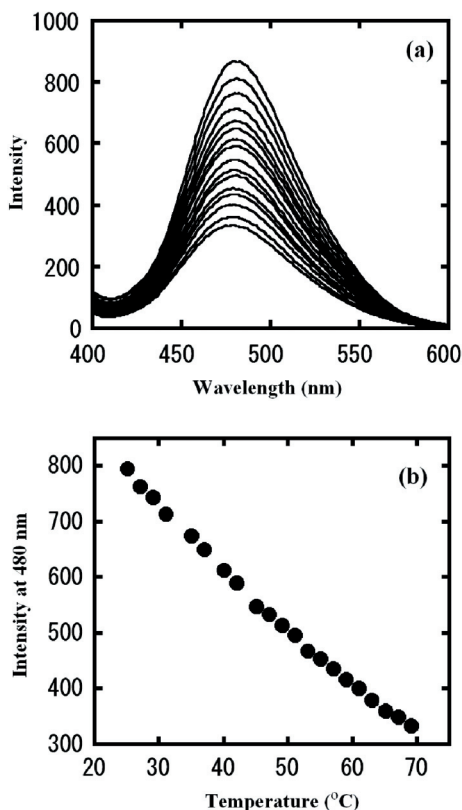


図17 ビレン結合 DNA ($n=5$) の蛍光スペクトル

- a) 発光より高温でより強く、より低温側でより弱くなった (21, 23, 27, 31, 35, 37, 40, 42, 45, 49, 51, 55, 57, 61, 65, 69 °C)。0.46 μM の DNA を 10 mM Na phosphate, 100 mM NaCl (pH 7.0) の緩衝液に溶解した。
- b) 液温と 480 nm における発光強度のプロット。

5. おわりに

バイオナノサイエンスという研究分野は、その語感とは異なり、漠然としたバイオの概念を捨てて、生体物質を化学的視点から再吟味し物質化学に利用することに、その主眼があると思われる。核酸 (DNA、RNA、ヌクレオチド、ヌクレオシド) の化学は、その黎明期から生命科学への応用を目的として発展し、膨大な反応及び構造化学的知識が蓄積されている。今回、あえて生命科学を離れ、物質化学への応用を試みたところ、金属含有 DNA という新規ナノワイヤーや蛍光性ナノ分子センサーを見出すに至った。DNA と金属イオンの化学は、センサーの開発研究や遺伝子の一塩基多型 (SNP) 検出手法の開発研究へと展開され、現在筆者の構想の中で、再び生命科学に貢献する可能性を見せている。核酸化学は

生命科学に止まらず様々な分野に発展するポテンシャルを持っており、その一層の発展に貢献したいと願っている。

ご指導ご助言を頂きました東京都立大学理学研究科化学専攻、神奈川大学工学部応用化学科の諸先生、及び共に実験を行っていただいた学生諸氏に感謝いたします。種々の御援助を頂きました東京都、文部科学技術省、日本学術振興会、三菱財団に感謝いたします。

参考文献

- 1) <http://www.nanonet.go.jp/japanese/nano/>
- 2) 五島綾子、中垣正幸 (共著) “ナノの世界が開かれるまで” 海鳴社 (2004)
- 3) 堀池靖浩、片岡一則 (共著) “バイオナノテクノロジー” オーム社 (2003)
- 4) W. Sanger Ed., “Principles of Nucleic Acid Structure” Springer-Verlag, New York (1984).
- 5) 関根光雄、斎藤烈 (編) “ゲノムケミストリー” 講談社サイエンティフィク (2003). 小野晶 “DNA 高次構造を利用した機能性分子の開発—金属含有 DNA ワイヤ—” 化学と工業、58巻4月号、469–472ページ (2005).
- 6) N. C. Seeman, Methods in Molecular Biology, 303, 143-166. (2005)
- 7) (a) M. Kosuge, et al., Tetrahedron Lett., 45, 3945 (2004). (b) M. Kubota, A. Ono Tetrahedron Lett., 45, 5755 (2004).
- 8) 丹羽峰雄 (著) “DNA の化学合成法” (廣川 化学と生物 実験ライン22) 廣川書店(1992).
- 9) (a) Ono, A., Miyake, Y. Nucleic Acids Res. Supplement, No. 3, 227 (2003). (b) Y. Miyake, et al., Submitted.
- 10) あたかも金属と金属が接触しているかの様なモデルであるが、実際には金属間に隙間がある可能性がある。
- 11) (a) H. Yamaguchi, et al., Nucleic Acids Symposium Series No. 48, 113 (2004). (b) H. Torigoe, et al., ibid., No. 48, 101 (2004). (c) H. Torigoe, et al., ibid., No. 48, 275 (2004). H. Torigoe, et al., Nucleosides, Nucleotides & Nucleic Acids, in press.
- 12) (a) N. Zimmermann, et al., Bioorganic Chemistry, 32, 12 (2004). (b) K. Tanaka, et al., Science, 299, 1212 (2003). (c) N. Zimmermann, et al., J. Am. Chem. Soc., 124, 13684 (2002). (d) K. Tanaka, et al., J. Am. Chem. Soc., 124, 8802 (2002). (e) K. Tanaka, et al., J. Am. Chem. Soc., 124, 12494 (2002). (f) S. Atwell, et al., J. Am. Chem. Soc., 123, 12364 (2001). (g) H. Weizman, & Y. Tor, J. Am. Chem. Soc., 123, 3375 (2001). (h) E. Meggers, et al., J. Am. Chem. Soc., 122, 10714 (2000).
- 13) Y. Watanabe, et al., Nucleic Acids Symposium Series No. 48, 85 (2004).
- 14) R. Ishikawa, et al., J. Mag. Res. in Chem., 39, S 159 (2001).
- 15) A. Ono & H. Togashi, Angew. Chem. Int. Ed., 43, 4300 (2004)
- 16) Y. Miyake & A. Ono, Tetrahedron Lett., 46, 2441-2446 (2005).
- 17) F. M. Winnik, Chem. Rev., 93, 587-614 (1993)



情報システム設計のためのセキュリティ要素

— 一方向関数とビット・コミットメント —

森田 光*

Information-Security Elements to Design Information Systems

— One-Way Function and Bit Commitment —

Hikaru MORITA*

1. はじめに

1.1 情報システムとセキュリティの課題

あらゆる組織において、業務効率化のためにIT (Information Technology, 情報技術) を使ったシステム化が大変な勢いで進められている。ITでは、ソフトウェアが計算機の上で動き、計算機は互いにネットワークを経由してデータを授受し、全体として有機的な機能を果たす。これを情報システムと呼ぶ。情報システムは仕事を迅速化し低コスト化する。時には、業務を電子化するばかりでなく、社会的インパクトを与える。後述する横須賀市の電子入札システムが良い例である¹⁾。

ITの特徴はネットワークにある。同じネットワークでも、現実世界の関係をベースにする電話などを使ったシステムとは異なる。データをやり取りする通信の主体(エンティティと呼ぶ)は必ずしも人間である必要はなく、計算機が人間の相手をする必要があれば、計算機同士が自発的(自動的)にデータのやりとりをすることもできる。これでサイバー世界が形成される。

サイバー世界では、空間的に離れている計算機同士が、互いにデータのやりとりだけで何でも実行しようとする。第一の問題は、相手の確認である。例えば、電子オークションでは、取引の約束をサーバー世界でやり、金を振込ませて品物を送らない詐欺事件が頻発している。サイバー世界と現実世界との連動がうまくいっていないのである。第2の問題は、データ漏えいの深刻化である。銀行システムでは4桁の暗証番号が昔から問題になっている²⁾。それがITの導入で、さらに深刻化する恐れがある。

1.2 情報セキュリティの進展と暗号技術

情報セキュリティは、1980年頃より急速に深さと広がりを増しつつ進展してきた。暗号が、通信相手の確認や書類に付す印鑑の様な認証機能を実現する技術にまで高められたからである。古来より暗号は、盗聴、情報漏えいの切り札とされてきたが、一つ機能が加わったのである。また、一風変わった応用である電子マネーや電子入札では、暗号が技術基盤を与えた。

情報セキュリティの発展の契機は、1976年にディフィーとヘルマンによる公開鍵暗号の概念発明と、IBMによる商用可能なDES暗号の発明であった(経緯は[3]が詳しい。また、技術の概要は[4]参照)。公開鍵暗号は、「秘密とは何であるか」という問いについて強く考えさせ、一方向関数やゼロ知識証明などの学問発展を促した。ユーザが利用している暗号では、携帯電話とインターネットWEBブラウザが代表的である。携帯では、持ち歩く電話機(子機)が本物であることを、暗号を使って確認する。また、インターネットのショッピングでは、クレジット番号を秘密にするために、複数の暗号方式を組合せたSSL(またはTLS)技術を使う。この様に、情報セキュリティは普及例があるものの、その例は多くはない。

1.3 情報システムに対するセキュリティ・デザイン

情報セキュリティも、やっとデザインをする時代になったと思う。従来は、数学を基礎に置き、暗号技術を調べ効率的に作る方法などが検討されてきた。しかし、今は、情報システム設計時に、多者間でどの様に秘密を持ち合い、業務に適用させたらよいかを検討される。

他の工学分野でも、安全、コスト、性能をトレードオフ関係と見て設計している。情報セキュリティでは、暗号の絶対的な安全性を前提に研究されてきた。暗号は有

*教授、経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

4. まとめ

ここでは、一方向関数を紹介し、ビット・コミットメントの性質を使うだけで、ジャンケン、認証に留まらず、電子入札や電子マネーなどへの応用も可能であることを示した。また、この様な暗号プロトコルは、必ずしも一つで完全という技術ではなく、適用する情報システムや、業務に合わせて変形を考えるべきことについて言及した。これからは、情報セキュリティの技術を、どの様にシステムに利用するかというデザインのセンスが問われる時代になると思う。

参考文献

- 1) 横須賀市、“入札の広場”、WEB ページにて参照可能
<http://www.city.yokosuka.kanagawa.jp/keiyaku/index.html>。
- 2) 森田光、“安全対策を軽視する情報システムと安全を支える情報セキュリティ技術”、経営情報学会誌、14-2 (2005-9) pp. 96-101。
- 3) スティーブン・レビー、“暗号化”、紀伊國屋書店 (2002)。
- 4) 太田和夫、國廣昇、“ほんとうに安全？ 現代の暗号”、岩波書店 (2005)。
- 5) 太田和夫、今井謙、森田光、“電子オークションプロトコルの技術動向—第一価格秘密入札プロトコルについて—”、電気通信大学紀要、16-1 (2003-7) pp. 15-21。
- 6) V. Krishna, “Auction Theory,” Academic Press (2002)。
- 7) H. Kikuchi, M. Karkavy, J.D. Tygar, “Multi-round anonymous auction protocols,” Proc. First IEEE Workshop on Dependable and Real-Time E-Commerce Systems (1998) pp. 62-69。
- 8) K. Kobayashi, H. Morita, K. Suzuki, M. Hakuta, “Efficient Sealed-bid Auction by Using One-way Functions,” IEICE Trans. Fundamentals, E 84-A-1 (2001-1) pp. 289-294。
- 9) K. Chida, K. Kobayashi, H. Morita, “An Auction Protocol Preserving Privacy of Losing Bids with A Secure Value Comparison Scheme,” IEICE Trans. Fundamentals, E 87-A-1 (2004-1) pp. 173-181。
- 10) アグス・ファナル・シュクリ、森田光、太田敏澄、齊藤泰一、“ハッシュ関数を用いた公平な電子抽選方法の提案”、日本社会情報学会論文誌、16-2 (2004-9) pp.21-29。
- 11) K. Kobayashi, H. Morita, M. Hakuta, T. Nakanowatari “An Electronic Soccer Lottery System that Uses Bit Commitment,” IEICE Trans. Inf. & Syst., E 83-D-5 (2000-5) pp. 980-987。
- 12) S. Matsuo, H. Morita, “Secure Protocol to Construct Electronic Trading,” IEICE Trans. Fundamentals, E 84-A-1 (2001-1) pp. 281-288。
- 13) 太田和夫、渡辺治、黒沢馨、“情報セキュリティの科学—マジック・プロトコルへの招待”、講談社 (1995)。



日本における地震防災水道運用管理システム

瀬古沢 照治*

Water Management and Control System at Disasters in Japan

Teruji SEKOZAWA*

1. はじめに

水道は日常生活を支える社会基盤システムとして不可欠である。日本において、水を作り配るという水運用管理技術は、1970年代後半以降のさまざまな社会ニーズを反映し、計算機制御技術と数値技術の発展に伴って世界最先端を誇るに至っている。特に平常時における水道管理運用制御技術および水道システムはほぼ確立されたと言える。しかし、阪神・淡路大震災以降、都市におけるライフラインの確保が重要視され、災害時におけるさまざまなシステムの見直しや対策・検討が進められている。水道システムについても、震災などの災害時には、飲料水のみならず消火用や機器冷却水の供給等、生命保全・維持に関わる重要な役割を担うライフラインであることが、阪神大震災の経験からも改めて認識された¹⁾。たとえ大震災時であっても、被害やその影響波及を最小限に食い止め、最大限のサービスを継続するには、的確な状況把握に基づく迅速かつ臨機応変な意思決定が、事業者に要求される。

水道土木関連のハードウェア面では、特に埋設管路などの広域的水道施設の耐震化基準見直しが進められ、災害推定の見直しも進んでいる²⁾。しかし、従来の地震土木学的手法の範疇では、従来の研究スタイルの継承として、一次情報である地震情報を遠隔監視し、地表面の強震情報把握や、推定式による被害把握(被害箇所抽出)のレベルに留まっていた。被害があっても機能的に生きている部分システムの把握を試み、生き残っているシステムに基づいて運用するといった、いわば機能被害状況把握のシステムが少ない。制御的な見方をすれば、従来システムの被災解析、被災防止システムは、オープンループ系に留まっているようである。

一方、技術進歩の著しいサーバ、モバイル端末などに代表される情報技術は、従来の被災推定方式の形態や災害時の水運用システムをも変革する要素を含んでいる。刻々変化する災害関連情報をリアルタイムで取り込めるこれらの情報技術を利用し、さらに水運用の解析技術や支援システムを駆使してこそ、生命にも影響を与える緊急で重大な災害時の意思決定が可能になる。

このような背景、経緯を受け、本報告では、水道運用システムに焦点をあて、著者が長年実務的に研究開発してきた経験に基づき、広い視点から新社会基盤システムの今後の方向性を明らかにする。具体的には、次の5つの視点から水道運用における今後の地震防災水道システムのあり方や技術展望、取り組み方向を総説する。

まず、水道システムの特徴を他のライフラインとの比較において明らかにする。地震災害時でも、機能的に生き残ったサブシステムによる継続的な水供給の使命について示す。網構造の分析を行い、網の冗長性、網構造の扱い方や、筆者が考えるリアルタイム災害水運用について示す³⁾。その基本的な考え方として、プロセス情報を利用する断水予測の機能についての課題と解決方法を整理する。

次に、上記の考え方に基づき、筆者等が開発した災害時における広域水運用・制御システムを2つ示す。一つは、事例ベースと多層ネット最適化による緊急時水運用管理システム^{4) 5)}であり、他はリアルタイムで漏水量や需要量(断水量)を推定する配水制御システム⁶⁾である。

3つ目は、上水道事業と取り巻く社会環境について整理する。学術的な面からの検討だけでなく、国際レベル、官公庁レベル、自治体レベルの視点から水環境事業を概観し、その現状の課題認識を行ない、水事業経営の方向性を探る。さらに、飛躍的に進歩した情報技術に対応した高度情報化の考え方を整理する。

4つ目の視点として、水事業の効率経営の課題を念頭に、機器の効率利用と使い勝手の向上を目的とした管路

*教授、経営工学科

Professor, Dept. of Industrial Engineering and Management

把握システムについて概要を示す。平常時でも緊急時でも使用できるデュアルユースコンセプトに基づいた配水管路網のリアルタイム被害推定システムを示す。実管路網データに基づいたシミュレーション実験例によりその効果も示す。これらは著者がNEDO「知的社会基盤工学技術」研究において提言したコンセプト⁷⁾でもある。最後に、水環境事業の効率経営に沿って、情報通信先端技術を利用したシステムが今後の最重要な方向性を担っていることを示す。先端情報通信技術であるインター・イントラネットを応用して、地震発生時の危機管理、市民の苦情対応・相談、運用効率化、環境対策など事業応用への期待ができる。ここでは、「水環境Web」システムの取り組み状況について述べ、今後のセキュリティの課題と展開方法について述べる。

2. 水道ライフラインの特徴

近年の地震対策では、供給系ライフラインにおいての共通点として発災後の緊急措置をいかに行うか、という重要部分が課題となり、迅速な初動や復旧ができるためには、的確かつ臨機応変な意思決定が求められている。この判断に最も必要となるのが被害状況の把握である。

水道システムは、電力システム、交通システム、ガスシステム等のライフラインと同様、日常生活を支える基盤システムとして必要不可欠である。さらに、水道システムの使命として他システムに無い特徴は、地震発生後に、消防のための消火用水や生命維持のための応急給水、病院など自家発電機器等への冷却水供給の使命も担っていることである。災害時に水道ライフラインに被害があったとしても機能しているサブシステムで、例えば、多少の破断管路による漏水を伴っても、出来る限りの水供給を継続的に行わなければならない。

水道システムは、水を作る浄水場やその周辺の導水システム、浄水場から配水池への送水系、および、配水池から末端需要者に至る配水系に分かれる。被災は基幹施設である浄水場、配水池、導送水系に起こるが、大部分の被害は埋設した管路網に生じる。埋設されているゆえに直接管路破断が確認できないところに被害把握の難しさがある。

2.1 他システムとの比較

鉄道システムのユレダスは、即時遮断を基本としたものであり、2次災害を防止する観点から危険回避を最優先にするシステムと考えられる。この意味で、水道システムと比べ、その使命と考え方が少し異なる。もちろん、水道システムにおいても、配水池に感震式の緊急遮断弁を設置し

ているところもあり、これによって、無駄な漏水を無くし、応急給水のための水確保を行えるようになっている。

電力システムの場合には、電力貯蔵の困難性や系統同一周波数の制約のため、他のライフラインに比べ被害波及性が極めて高い。それを防止するため、線路の接触事故などを局所化する保護リレーシステムが自動的に操作する。これは、全系に波及することを防止し、不具合個所を選択的に分離することができる。これに比べ、水道システムでは、浄水場で作った水は、配水池にある程度貯蓄される。ただし、一般的な配水池は、浄水場からの水供給が無い場合、4時間～12時間ですべて消費される程度の貯蓄量である。被災時には、貯蓄した水を確保し、系全体から機能的に生きているサブシステムを見つけ出し、生き残ったシステムを使って、限られた水をどのように運用するかが重要になる。水道システムでは、緊急時において、どのように水を運用するかという意思決定が大きな課題となっている。

一方、空間的な設備状況を考えると、ライフラインの中でも、ガスシステムは2次元的に広がる埋設管路を持つという点で水道システムと類似している。被害予測システム SIGNAL⁸⁾は、分布的に配置した地震計群から得たデータおよび、過去の被害統計から分析した地震強度と管路被害率の相関式を用いて、発災直後に管路被害分布を算出する。しかし、ガスシステムの主たる目的が、緊急遮断の意思決定支援にあるため、刻々と変化する状況を把握するという機能は備わっていない。

可燃物であるガス供給が、安全確保のための緊急遮断を最重要とするのに対し、水道では供給の継続性がより重視される。従って、水道システムでは、地震直後だけでなく、復旧過程での被害状況も随時把握できることが必要である。さらに、単に物理的な被害だけではなく、機能的な被害である断水状況が把握できるということも、応急的な給水を継続させるには重要である。

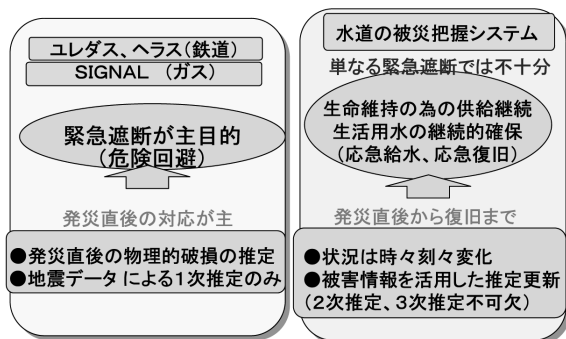


図1 水道被災把握システムの使命と対応

2.2 網構造の特徴とプロセス情報利用断水予測

上記の各ライフラインの特徴的要請や課題から、ネットワーク構造を概観すると、電力システムの配線ネットワークやガスシステムの管路ネットワークが木構造に近いのに比べ、水道管路網は、輪の形状が多く網構造が濃くなっている。言い替えれば、電力・ガスシステム網は、緩いネットワークであるのに比べ、水道管路網は、災害が発生しても水を継続的に供給するために、より網の目状の形状構造をしている。この網構造が複雑化した大都市水道システムでは、水運用の管理を非常に難しくしている。最近では、複雑化した管路網を地域・空間的なブロックに分割して水の流れを管理することが進められている。

水道システムの場合、神戸市防災指針をベースにした応急給水策定指針が、多くの水事業体の震災対策計画で採用されている。指針では、震災発生時から3日までは、第一次段階（混乱期）と定義される。この期間の水供給が最も重要視され、水の供給量は、3リットル/人・日である。これは、生命維持のために最小限必要な水量とされる。給水方法としては、浄水場、配水池などで確保した水を、生き残った管網を使った拠点給水や、運搬給水（給水車による給水など）で対処しなければならない。従って、リアルタイム地震防災水道システムにおいて、時間的に最重要期間として、特に、この混乱期がターゲットになる。また、第2次段階は、4日～10日の期間で、20リットル/人・日、調理、洗面、トイレ等の生活に最低必要な水量を設定している。第3次段階以降で、復旧までに必要水量は増加し、その用途も浴用、洗濯など平常時の生活用水になる。

水道システムで応急給水をするための重要な機能として、断水推定・予測機能がある。それに基づいて断水人口を割り出す必要がある。断水推定を行うためには、管網を単なる構造物ではなくネットワークとして扱う必要がある。即ち管網解析を施さねばならないが、このためには被害箇所や漏水量の詳細な情報が必要であり、地震時にこれらの情報を正確に得るのは非常に困難である。そこで、我々は、事例ベース推論と管路網解析手法を融合した水運用方式や、流量、圧力といったプロセス情報や平常時などからの変化を積極的に利用した断水予測方法およびシステムを開発・提案している⁹⁾。

阪神・淡路大震災の時でも概ねテレメータは機能し、かつ有効な判断材料となったと報告されている。プロセス情報を利用するという考え方は、この事実に基づくものである。

3. 広域水運用・制御システム

3.1 事例ベースと多層ネット最適化による緊急時水運用管理システム

水運用とは、水の取水場から浄水場に至る導水系および浄水場から配水池に至る送水系を対象にする。水運用計画策定作業を計算機で支援することで、迅速に且つより最適な運用計画の立案が可能な緊急時水運用支援システムの概要を図2に示す。

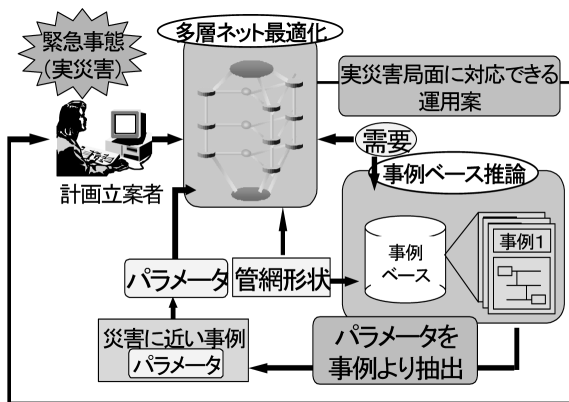


図2 「事例ベース推論+多層ネット最適化」による緊急時水運用管理システム

このシステムは、事例ベース推論により運用案を検索し、実災害に合致させるために最適化手法により運用案を修正して最終運用案を作成するものである。平素の準備として、想定した事故事例や実際に発生した事例と、それらに対応する運用計画値を対話的に作成し事例データベースとして格納しておく。緊急時には、実際に発生した事故の状況（需要、施設、水系、配水池等の状況）を検索キーとして事例データベースより、最も類似した事例を抽出し運用原案を作成する。しかし、「類似例として抽出された事例と現況の事故との隔たり」の問題を埋めるには、何らかの最適化計算が必要になる。これを解決するために、多層ネットワークモデルを用いる。多層ネットは、複数時間にわたる動的な運用計画を静的な最小費用流問題として解くものである。つまりこれは「事例ベース推論」で問題となる「抽出類似例と実現例の事故とのギャップ」を埋める手法である⁴⁾。

これにより、実際の緊急時の状況に対応できる運用計画案が創出でき、迅速で臨機応変な水運用が可能になる。

3.2 緊急時配水制御システム

配水制御は、配水池から需要家の管網内の配水系を対

象にする。平常時においては、日々の需要パターンが季節、曜日などの変動はあるものの比較的同傾向にあるため、圧力定値化は従来の手法で可能である。しかし、管路破断、渇水といった緊急時には、管路網内の分布的な需要パターンが通常とは異なり、更に破断・給水制限対応のための弁操作や加圧ポンプ操作停止などにより管路の接続状態も異なってくる。さらに、管網の状況や需要量を緊急時には事前に把握できない。

この問題を解決するために、漏水および需要分布をオンラインで推定する手法を開発し、これらを図3の様に組み合わせて、緊急時にも対応可能な配水制御システムを構成した。解析計算によって得られる圧力、流量の値と計測によって得られる圧力、流量の値との二乗誤差が最小になるよう需要を推定するものである。

図3における需要分布推定部分は、管路内の複数の計測点（流量計、圧力計）データに基づき、漏水量分布を含めた需要分布を推定できるものである。従来の管網解析手法が、需要量を境界条件として入力し、流量、圧力分布が得られるのに対して、本手法は、限られた点数の流量、圧力計測情報から需要分布を推定する手法である。言い替えれば、逆管網解析とも言える。

これらにより、リアルタイムで漏水や需要量を考慮した配水制御が可能になる。

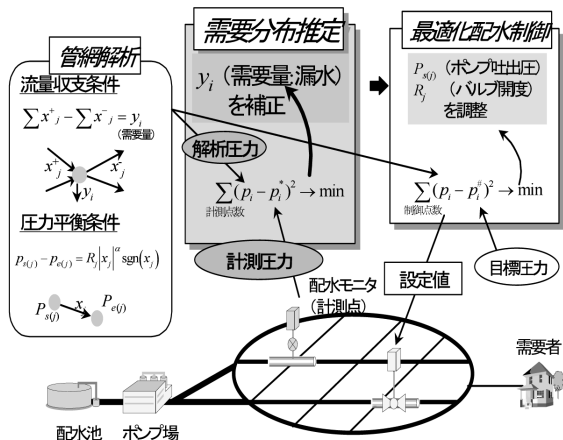


図3 緊急時配水制御システム

4. 上水道事業を取り巻く社会環境

上記のようにリアルタイム地震防災システムを技術面から他インフラシステムと比較して、防災水道システムを特徴付けた。ここでは、より大局的立場から、水道事業全体が抱えている課題と高度情報化への対応などを

まざまな社会ニーズを分析し、今後の進むべき技術の方向性を検討する。

水環境事業は国、地方を問わず重要な公共整備事業として位置付けられ、国の公共投資計画に基づいて、真の豊かさを実感できる国民生活の実現に向けて、着実に進められている。従来、厚生省はフレッシュ水道10ヶ年計画、建設省は下水道第8次7ヶ年計画など、基本目標を掲げ事業を推進する一方、自治省では、地方公営企業の経営基盤強化に関する通知により、経営効率化を促進してきた¹⁰⁾。これらは、現在の責任監督官庁である厚生労働省、国土交通省、総務省に引き継がれ、新たな水環境事業を進展させている。水環境事業では、上記のような各種施策を基本目標に推進することが前提であるが、一方、水環境を取り巻く社会環境が大きく変化していることを認識していくべきである。

さらに、従来、各地方自治体に属してきた水運用事業体を民営化していくことも検討が必要である。日本には世界に類を見ない先端技術を持つ水運用システムがあり、アジアを中心に、世界的な水運用ニーズに合致したシステムを構築できる。これらの有効な技術が国内に留まらないよう世界に視野を向けた改革が必要な時期になっている。

4.1 地球環境保全、国際化

地球温暖化防止京都会議でも、盛り上がりを見せたように地球環境防止のため二酸化炭素削減対策が要求されてきた。官公庁は率先して地球環境問題に取り組み環境関連の世界標準規格 ISO 14000の取得に向けて努力すると共に、認証取得企業への優遇措置や省エネルギー税制などの環境保護に関した動きが大きくなっている。さらに、企業ばかりでなく自治体自体にも環境認証取得をするところが増加している。

国際的に魅力ある事業環境の創出として、WTOの協定による一般競争入札、ISO 9000シリーズ、ISO 14000シリーズ、労働安全衛生、国際標準化規格の公共工事への適用が導入されている。また、IEC（国際電気標準会議）規格との整合を考慮したJIS（日本工業規格）の見直しが進み、システム設計も常にこれら国際標準化動向を念頭において進める必要がある。

欧米でのサービス事業の隆盛に見られるように、わが国でも、従来のハードウェア提供型から、オペレーションノウハウを核とした都市インフラ管理という「サービス提供型事業」が台頭してくるものと考えられる。わが国の水環境にかかわる技術は、需要者の高品質要請に対して、きわめて高いレベルにある。土木、建築、水処理、電機・情報制御技術などは、維持管理、保守などのオペ

レーションノウハウに至るまで高水準にある。従って、近い将来、単なる施設・機器供給者だけでは、生き残れず、サービス事業の一翼を担うことが出来る情報技術とサービスビジネスノウハウが必要となっている。

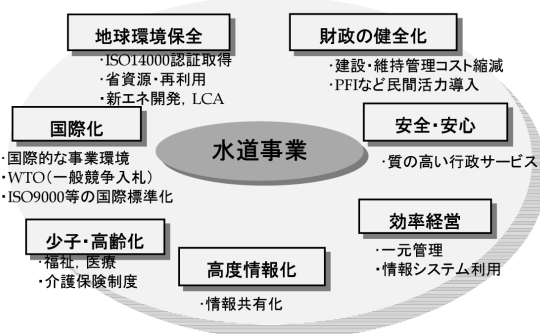


図4 水道事業を取り巻く社会環境

4.2 民間活力導入と高度情報化に向けた効率経営

水環境事業者の厳しい財政状況の中で、社会基盤整備では、建設工事コスト縮減、社会基盤維持管理のための運営コスト縮減など、トータルとしての事業経営の効率化を目指す必要がある。一方、単なる建設費・効率化だけでなく、その社会基盤のライフサイクルを見据えた地球環境にも優しい基盤整備の推進も求められている。最近、社会基盤整備に民間資本・民間活力を導入するPFI(Private Finance Initiative)が進められている。欧米での導入経緯や実績を調査し、官民ともに、適用する事業がPFI事業として成立するものかどうかを、その収益性だけでなく、社会的な責任も考慮して推進されようとしている。

電子技術の急速な発展により、情報制御・通信技術は大幅に進歩し、我々が扱える情報量を飛躍的に増加した。このような高度情報化に対応した水環境事業の情報装備化が急務になってきている。事業投資にみあう事業計画の立案、高品質市民サービス、アカウンタビリティ(説明責任)の必要性などと併に、効率化という点での一元管理、広域施設の水環境管理や運用システムの導入、情報化投資の促進が進められている。

このような電機・情報関連のソフトウェア面での重要性が認識されて来たにもかかわらず、従来のコンピュータ利用による水管理・運用は、平常時のみを対象にしたものが殆どであった。経営効率化の観点からも、災害時における情報システムについては、平常時でも使用できるデュアルユースのコンセプトに基づいたシステムが必須になっている。デュアルユースコンセプトは、パフォー

マンス向上に加え、普段から機器を使い慣れていなければ、災害時にも上手く使えないという課題にも一つの解を与えるものである。

5. 管路状況管理システム

平常時でも緊急時でも使用出来るデュアルユースコンセプトに基づいた、被災時の配水管網のリアルタイム被害推定システムと平常時における保守作業支援システムについて簡単に示す。震災時には、即時に管路網被災状況を把握し、平常時には、管路保守支援を行えるものである。図5に管路網状態把握のデュアルユースのプロトタイプシステムを示す。システムは、拠点のサーバと現場のモバイル端末とによるクライアントサーバ構成である。広域通信としては電話回線で構成している。クライアント機は、携帯端末から無線でアクセスをするためPenPCと携帯電話をセットとしている。管路情報、地図情報は、給水人口数十万人規模のある都市情報が記録され利用できる。

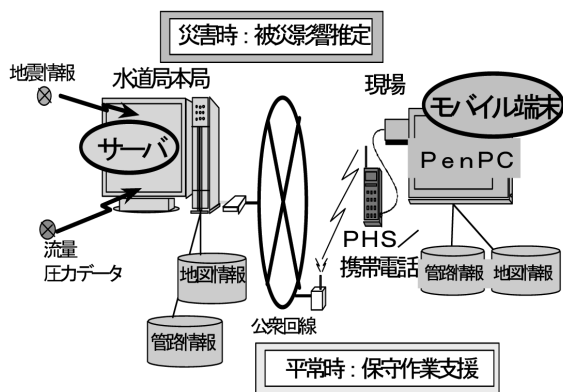


図5 管路把握のデュアルユースシステム

5.1 被災影響推定

従来の被災予測方法は、すべて地震データを基本情報として扱うものであった。したがって、地震情報に基づいたオープンループの1次推定のみを実施していた。ここで示す方式は、水道における埋設管路の被害を、発災時の情報に乏しい状況下で、水道のプロセスデータである圧力や流量を有効にリアルタイムに取り入れ、緊急時における被災影響推定をするものである。その機能の処理内容を図6に示す。サーバ側では管路被害推定と断水領域推定を行い、モバイル側では被害情報収集を行う。通常の被害推定は、地震データに基づいてメッシュ毎の破断箇所数を出力するもので、オープンループ系の1次推定であり、従来手法はこの部分で留まっていた。我々

が開発したシステムの特徴は、オンラインデータや現場情報を反映させ、リアルタイムで、被害推定などが行えるところにある。漏水量と断水地域、さらには断水人口をも推定することができる。

モバイル端末側の被害の確定情報は、無線通信可能な携帯端末を利用し、管路被害の3次推定に使う。このように、オンラインデータと現場情報を用いて、破断箇所の再推定を行うことで、被災推定精度を大幅に向上させることができる。この研究では、できるだけ災害想定をせずとも、地震発生後に集まってくる被害や復旧に関する情報を随時取り入れることにより、常に更新できるような被害予測を行えるようにしている。

水量と水圧というリアルタイムのプロセス情報を利用することによって、把握が困難な漏水を見積もり、断水予測を可能にしている。

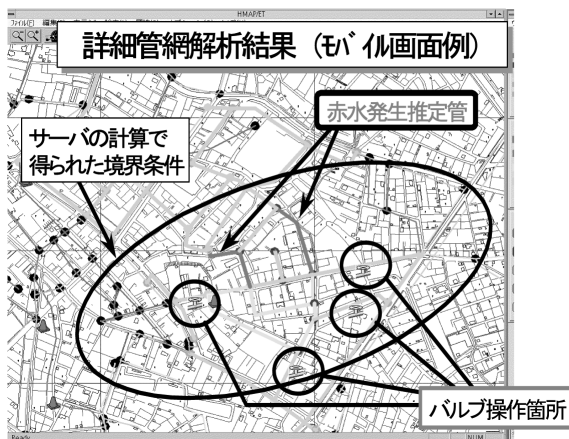


図7 平常時における保守作業支援の事例

情報を統合したことにより、維持管理業務の正確さ向上と効率向上が可能である。サーバ側で求めた隣接主要接点を境界条件とし、モバイル端末側では、詳細な管路網の圧力、流量を計算し、赤水発生の予測が事前にできる。つまり、容易にかつ即座に赤水発生箇所を予測でき、周辺住民にリアルタイムで広報できる。

6. 水環境Webシステム

水環境事業の効率経営に沿って、情報通信先端技術を利用したシステムが今後の最重要な方向性を担っている。特にグローバルオープンな情報利用が可能となるインターネット・イントラネット技術を応用したシステムは、利便性、拡張性、情報共有化、緊急対応などに優れた機能をもたらす。つまり、設備管理・環境管理・危機管理など様々な目的での利用（マルチユース）が可能になる。ここでは、インター・イントラネット技術を応用した水環境監視制御システム、特にWebプラント監視と関連する応用システムを示す。また、今後の展開として、基幹制御系に対するセキュリティ対策などについても示す。

6.1 広域Webサービスシステムとしての利点

Webサーバ（またはWWWサーバ）が提供するサービス内容は、WWWブラウザをもつ端末（日常使っているパソコンなど）で受けることができる。サービス内容が変更されても、端末側の改造は不要である。以下の様なサービスはWebシステム導入に向いている。

- (1) サービスの内容が頻繁に変更されるもの
- (2) 多数の人が利用できる（利用したい）もの
- (3) 必要だが、利用頻度の少ないもの

プラント監視の場合、設備・計測器などの増設に伴う

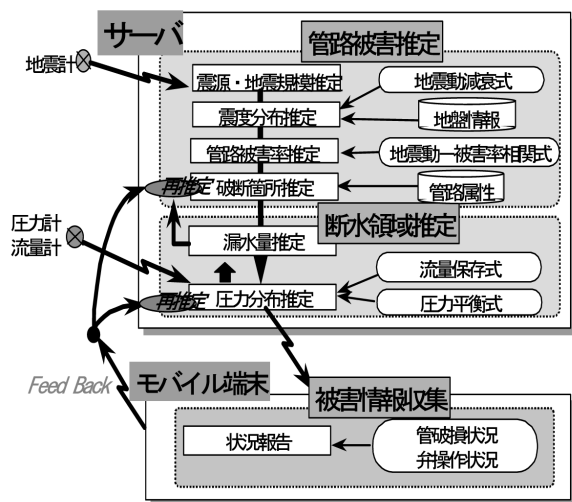


図6 プロセス情報利用の緊急時被災影響推定手法

5.2 保守・工事作業支援

平常時における保守・工事作業支援を考える。保守作業で、例えば減圧による節水や管路工事などのためにバルブ操作を施す必要がある。このバルブ操作は管路内の流れの状態を変化させ、周囲の流量・圧力分布に敏感に影響を及ぼす。ここでは、図5のサーバとモバイル端末の装置構成をそのまま利用し、保守作業を支援する。保守作業には、小径管網をも考慮した流量・圧力分布を把握が必須であり、これを本システムでは実現できる。

また、保守あるいは工事作業において、サーバとモバイル端末の相互協力によるシミュレーションにより、バルブ操作の影響がどのようになるかを事前に把握できる。さらに、作業の報告なども容易に行え、地図情報と管路

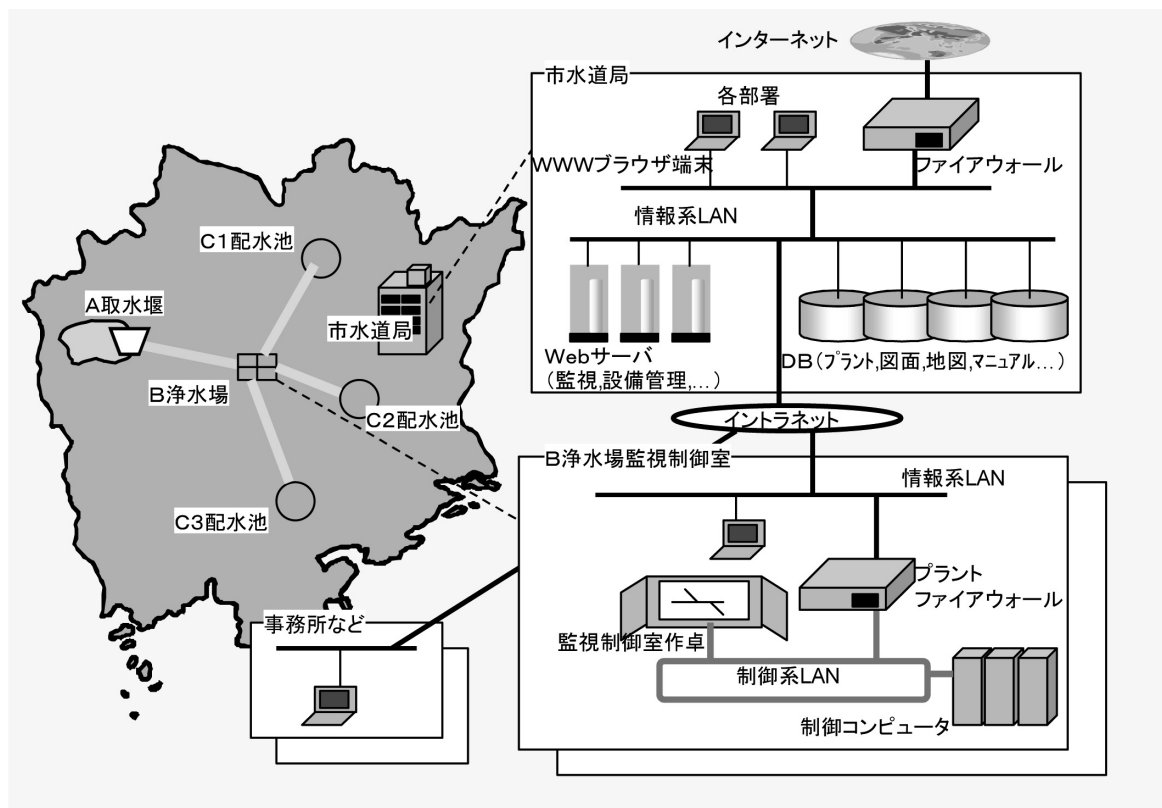


図8 インター・イントラネットを応用した水環境監視制御システム

監視画面・項目の変更が頻繁である。監視項目や日報・月報、警報などは、プラントの運転だけでなく、設備維持管理・予算提案・設計・環境管理・点検保守など、非常に多くの業務で活用でき、ほとんどの場合、必要な時、利用できれば良い。さらに、発生頻度が少ない緊急事態への備えとしても役にたつ。以上のことから、基幹制御系と情報系との連携によるプラント監視のWeb化は有効な手段となる。広域環境監視には「水環境Web」を利用すれば、効率よく環境管理を行うことができる。このWebシステムは、従来基幹制御系で活用されてきたプラントデータを情報系データと融合しながら、様々な業務・用途で有効活用することが主目的である。

ここでは「水環境Web」の応用システムについていくつか述べる。

(1) 気象情報との連携

渇水時の給水制限計画、豪雨時の人員配備計画など上下水事業において、気象情報との連携は欠かせない。気象会社が提供するWWW気象情報サービスをそのまま利用することもできる（ただし、アクセス集中する可能性

が高い）が、気象会社からデータ配信を受け、プラントデータなどと組み合わせて、気象情報表示に加え、独自の運用計画立案や警報発令もサポートできる。

(2) 地図との連携

上下水道管網の整備・工事状況、流量・圧力分布、降雨分布、地震被害状況などの把握のために、地図との合成表示ができる。ただし、大多数の利用者は、地図は位置関係を把握するための補助であり、地図はラスタの背景図とし、その上に管網などのベクトルデータを合成している。

(3) 点検保守

広域に分散した施設・設備（無人含む）の点検保守のために、巡回点検したその場でチェックリスト&報告書に記入し、DBに直接アップロードする方法をサポートしている。将来は、巡回せずにリモートで点検し、必要であれば保守に向かうことも可能になる。

(4) 水系解析

主に、設備計画や詳細状況把握を目的として、既開発の管網解析、需要予測、水運用計画、流量解析、地震被

害推定、水質汚濁などのシミュレーション解析サービスが提供できる。

(5) 市民とのコミュニケーション

災害連絡、通報、苦情や相談などコミュニケーション業務の円滑化を目的に、市民に理解しやすい形に加工して、WWWサービスで情報公開・受付を行うことができる。

6.2 セキュア水環境 Web

ネットワーク上には、データの盗聴・改ざん、他人へのなりすまし行為、ウィルス、トラフィック妨害など様々な脅威が存在する。そこで、脅威・保護対象など、セキュリティポリシーを明確化し、その対策をたてることが必要となる。ここでは、基幹制御系の保護に焦点をしばり、その対策について述べる¹¹⁾。

基本ポリシーは、「基幹制御系と情報系とを接続したとき、悪意、または、無意識（誤操作含む）による基幹制御系への不正介入、トラフィック妨害を防ぐ」ことである。この対策の核となるのが、基幹制御系と情報系との接続部分に設置する“プラントファイアウォール（PFW）”である。PFWは、インターネットとイントラネットとの接続部分に設置されるファイアウォール（FW）とは目的・要求仕様が異なる¹²⁾。

(1) プラントデータの大容量高速転送

制御系上のプラントデータを情報系上のDBに一方に大容量高速転送できる必要がある。

(2) アクティブコマンドフィルタ

運用モードの変更、目標値の変更、動作確認を伴う遠隔点検、監視カメラの操作などを許可する場合は、操作コマンドレベルのフィルタリング機能が必要である。

(3) 操作権認証／譲渡

コマンド送信を許可する場合、ユーザ認証と操作権認証を行う。ユーザ認証を通過できる利用者でも、コマンド送信アプレットを同時にダウンロードできる（操作権がある）のは1人までである。

(4) 操作コマンドの暗号化

偽のアプレットからの送信を見極めるために、マンドと操作権を暗号化する。少なくとも端末からPFWに入るまで（情報系ネットワーク上のすべてで）暗号化する。上記(1)～(4)に加え、PFWでおきていることはすべてログをとり、不正などを発見したときには、警報を発するなどアクセス監視も当然必要になる。

6. まとめ

本報告では、地震防災水道運用制御システムの方向性を

検討する上で、水道システムの特徴、水事業を取り巻く環境を整理把握した。水道システムにおけるリアルタイム防災の考え方を示すと共に、先端情報通信技術の応用によってどのような可能性があるかを検討した。その上で今後、進むべき有望技術を見極め、次のような課題と方向性を示した。

(1)水道システムは、地震発生後に、消防のための消火用水や生命維持のための応急給水、病院など自家発電機器等への冷却水供給の使命も担っている。たとえ、多少の破断管路による漏水、断水を伴っても、機能的にサブシステムが生きている限り、出来る限りの水供給を継続的に行わなければならない。その意味で緊急遮断を主とする電力システムやガスシステムと異なる。水を確保し、系全体の中から機能的に生きているサブシステムによって限られた水をどのように運用という意味決定が大きな課題となっている。ネットワーク構造を分析すると、水道システムは、災害が発生しても継続的な水供給するために管路の冗長性が高く、電力・ガス網に比べ、より網の目状の形状構造をしている。断水推定を行うためには、従来のような単なる構造物に被害が有るかどうかという観点では不十分で、ネットワークとして扱う必要があり、破断箇所を推定予測するには特殊な管網解析を施さねばならない。

(2)災害時には、緊急でかつ臨機応変な意思決定が不可欠である。平常時における最適計画問題を解くといった手法では、その境界条件の設定や解放に柔軟性が乏しく意思決定者のニーズが反映されていなかった。ここでは、事例ベース推論による類似検索と多層ネットによる最適化を融合した手法を開発した。これは「抽出類似例と現実とのギャップ」を埋める手法である。

配水系統においては、逆管網解析手法を開発し、漏水箇所やその量を推定できる配水制御システムを示した。これは、災害時の被災状況の程度や分布を把握する上で最も重要な部分である。配水制御だけでなく、給水車の配備・配置・配送などの応用にも不可欠となる。

(3) 環境関連の世界標準規格や、WTOの協定による一般競争入札、労働安全衛生、国際標準化規格の公共工事への適用が導入され、システムの研究・開発でも常にこれら国際標準化動向を念頭におく必要がある。

電子技術の急速な発展により、高度情報化に対応した水環境事業の情報装備化が急務である。事業投資に見合う事業計画の立案、高品質市民サービスなど効率経営、情報化投資の促進が進められている。経営効率化の観点からも、災害時における情報システムについ

ては、平常時でも使用できるデュアルユースのシステムが必須であると考えられる。

- (4) 平常時でも緊急時でも使用出来る情報システムを示した。被災時には配水管網のリアルタイム被害推定システムとして、平常時には保守作業支援システムとして利用できる。被災時において、特殊な管網解析を施さねばならないが、このためには被害箇所や漏水量の詳細な情報が必要であり、地震時にこれらの情報を正確に得るのは非常に困難である。そこで、流量、圧力といったプロセス情報や平常時などからの変化を積極的に利用し、断水予測方法を備えたリアルタイム地震防災上水道制御システムを示した。これは、阪神・淡路大震災の時でも概ね、プロセス情報が利用可能であるという事実に基づくものである。
- (5) 水環境事業の効率経営に沿って、情報通信先端技術を利用したシステムが今後の最重要な方向性を担っている。特にインター・イントラネット技術を応用したシステムは、利便性、拡張性、情報共有化、緊急対応などに優れた機能をもたらす。ここでは、Web 技術を応用した水環境監視制御システム（水環境Webシステム）について示した。セキュリティ対策は情報系での対策も含め、今後の重要課題の1つである。本報告では、「悪意、または、無意識（誤操作含む）による基幹制御系への不正介入、トラフィック妨害を防ぐ」ことを目的に、セキュリティ対策の核となる“プラントファイアウォール（PFW）”の機能一部を示した。今後、システムの脅威・保護対象など、セキュリティポリシーを明確化し、その対策が必要となる。

- 11) Furuya,M.,Fukumoto,T.and,Sekozawa,T.: WWW-Browser-Based Monitoring System for Industrial Plants", in Proc. IECON '99, Vol.3, pp.1146-1151, 1999.
- 12) 古谷雅年, 瀬古沢照治, 鈴木程久, 和田裕: 広域ネットワークの安全性を確保したセキュア水環境監視制御システム, 日立評論 Vo.81,No.4, pp.11-14, 1999.4.

参考文献

- 1) 神戸市水道局: 阪神・淡路大震災 水道復旧の記録, pp.121, 1996
- 2) 神戸市水道局: 神戸市水道施設耐震化基本計画, 1995
- 3) 瀬古沢照治: 情報通信技術と水路網解析技術を応用した災害時リアルタイム水運用制御システム, 第1回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, 土木学会地震工学委員会, リアルタイム地震防災小委員会, 1999.1
- 4) 加藤博光, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 館仁平: 動的コスト選択法による緊急時対応水運用計画, 電気学会論文誌C分冊, Vol.119-C, No.8/9, pp.1054-1059, 1999.
- 5) 加藤博光, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 館仁平: 事例ベース最適化による緊急時対応水道運用計画技法の開発, 計測自動制御学会論文集, Vol.33, No.1, pp.1-8, 1997
- 6) 福本恭, 栗栖宏充, 瀬古沢照治, 筒井和雄, 國井衛: 水需要特性を動的に考慮した管網解析方法, 電気学会論文誌, Vol.118-C, No.7/8, pp.1183-1189, 1997
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: 知的社会基盤工学技術の調査研究報告書, 平成9年度調査報告書, NEDO-PR-9711, 1998
- 8) 清水善久: 早期地震時被害推定システム-SIGNAL-, 計測自動制御学会誌, Vol.36, No.1, pp.41-44, 1997
- 9) 栗栖宏充, 本間弘一, 瀬古沢照治, 福原雅之, 福島学: プロセス情報を用いた地震時の断水予測法, 土木学会論文集 No.640/I-50, pp.61-69, 2000.1
- 10) 早稲田邦夫, 嶋内繁行, 依田幹雄: 高度情報化社会における水環境トータルシステム技術の動向, 日立評論 Vo.81,No.4, pp.2-6, 1999.4.

共同研究

宇宙環境におけるシンチファイバー検出器の実証化研究

田村 忠久* 鳥居 祥二** 常 進***
高柳 昌弘**** Maurice Haguenaue****

Study on the performance of a scintillating fiber detector for cosmic-ray observations in the space

Tadahisa TAMURA * Shoji TORII ** Jin CHANG ***
Masahiro TAKAYANAGI **** Maurice HAGUENAUER *****

1. はじめに

宇宙線は、超新星爆発やブラックホール、活動銀河核といった宇宙の中でも特異な高エネルギー現象(Fig.1)において加速される電子、陽子、原子核によって構成されている。従って、可視光や電波の観測では不可能な非熱的な宇宙像を、宇宙線の観測により明らかにすることができる。さらに、天文学における最大の謎である暗黒物質の正体や起源についても重要な手がかりを与えることができる。しかしながら、宇宙線は大気との相互作用により地上ではそのままの姿で観測することが不可能である。特に、宇宙線の種類やエネルギーを決めるためには大気の影響を受けない宇宙空間での人工衛星や宇宙ステーションにおける観測が不可欠である。さらに、宇宙線の強度はエネルギーのほぼ3乗に比例して減少するため(Fig.2)、高エネルギー領域での観測を行うためには、装置の面積を大きくする以外に方法がない。宇宙観測において面積の大きな装置を用いることは、必然的に重量の増大やデータ量の増加をもたらす。これまでの観測で

は10トンに近い観測装置がすでに用いられている。しかしながら、これ以上の装置を打ち上げることはロケットの打上げ能力や予算的な問題から現在では不可能な状況である。

我々はこのような状況にブレークスルーをもたらすために、シンチファイバーと呼ばれるシンチレータ（荷電粒子の通過によって蛍光を発する物質）の機能をもつ光ファイバーに注目して、宇宙線観測用の測定器を開発してきた。このファイバーの利用により、従来は不可能とされてきた、宇宙線の種類と到来方向、およびエネルギーを同時に測ることが可能な測定器の製作が可能である。このファイバーは断面が1mm角のサイズであり宇宙線が通過するときに出すシンチレーション光の測定が容易であるため、宇宙線が鉛などの物質で起こす反応を画像イメージとして検出することができる。可視化されたイメージの解析から宇宙線の種類と到来方向が分かり、光量からエネルギーが求まる。従来の測定器では、これらの測定を各々別の装置で行っているために大型化している。

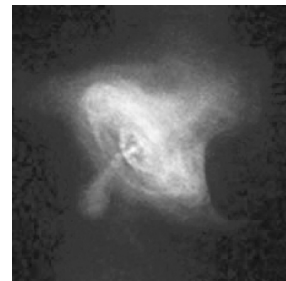


Fig.1 X-ray image of Crab pulsar obtained with CHANDRA X-ray observatory (satellite of USA). Super nova remnants are candidates of the most likely sources of cosmic rays.

* 助教授, 物理学教室
Associate Professor, Institute of Physics
** 教授, 早稲田大学理工学総合研究センター
Professor, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Waseda University
*** 教授, 中国科学院紫金山天文台
Professor, Purple Mountain Observatory
Chinese Academy of Sciences
**** 副主任研究員, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
Japan Aerospace Exploration Agency
***** 教授, エコールポリテクニク大
Professor, Ecole-Polytechnique, Paris

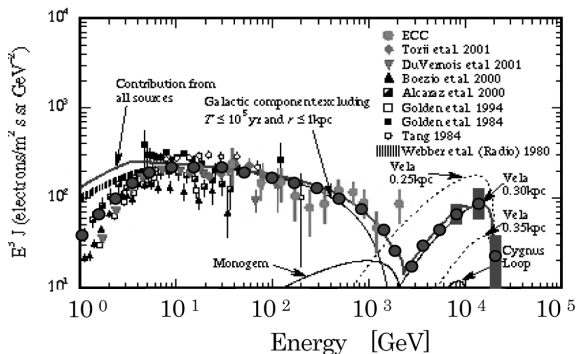


Fig.2 Spectrum of cosmic-ray electrons measured by several experiments. In vertical axis, electron flux is multiplied by the third power of electron energy. An expected spectrum to be obtained by CALET for 3 years is also indicated with large circles.

これまでの研究において、我々は気球搭載型のシンチファイバー検出器を世界に先駆けて開発し¹⁾、すでに10～100GeV領域での電子線観測²⁾、数GeV領域でのガンマ線観測に成功している³⁾。これらの結果は、宇宙における電子加速の研究や、大気中でのニュートリノ振動問題に関連して重要な成果となっている。特に、電子線観測の成果は高く評価され、国立極地研が実施する南極観測事業の一環として、南極大陸における長時間気球観測のテーマにも選択され、2004年1月に13日間におよぶ気球観測を実施した。さらに宇宙ステーション(Fig.3)に搭載する観測装置としても、有力な候補として開発研究を実施している^{4) 5)}。

この研究では、特に宇宙環境下でも利用が可能なシンチファイバー検出器の研究開発を行った。そのため、放射線医学総合研究所にある重粒子線加速器(HIMAC)や、欧州にある世界最大の加速器(CERN-SPS)によるビーム照射テストを実施して、SciFi検出器の性能を実証した。

2. ステーションでの宇宙線観測計画

現在、国際共同で建設が進んでいるスペースステーションには、日本が担当するJEM (Japanese Experiment Module) の居住区「きぼう」の船外に、宇宙空間での様々な実験を行うための複数のモジュールを搭載することができるEF (Exposed Facility) が用意されることになっている (Fig.3)。JEM / EFの標準の実験モジュールの重量は500kgに制限されるが、この他に最大2.5トン

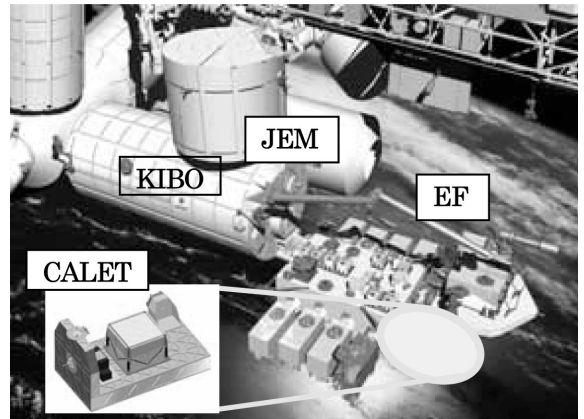


Fig. 3 We have been developing a cosmic-ray detector CALET to make observations of high energy electrons, gamma rays, and heavy nuclei at the JEM/EF on the International Space Station.

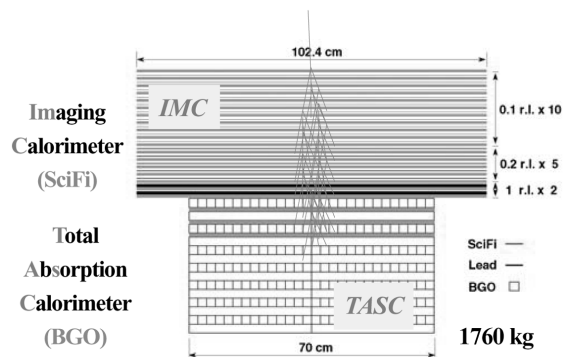


Fig. 4 Schematic drawing of CALET detector composed of the imaging calorimeter assembled with SciFi's and lead plates and the total absorption calorimeter of BGO.

のモジュールの取り付けが可能なアタッチポイントが2箇所準備される。前述したように、高エネルギーの宇宙線観測装置は大面積化が必須であるが、JEM/EFの許す2.5トンの観測装置重量と長期間の観測時間によって、強度が微弱となる高エネルギーの電子やガンマ線の観測が可能となる。特に Fig.2 のように1 TeV以上の宇宙線電子のスペクトルは、近傍の超新星残骸の影響を反映して、様相が大きく変わることが予想されている⁶⁾にもかかわらず、観測データがほとんど無く、スペースでの長時間観測のみが、その窓を開く鍵となり得る。

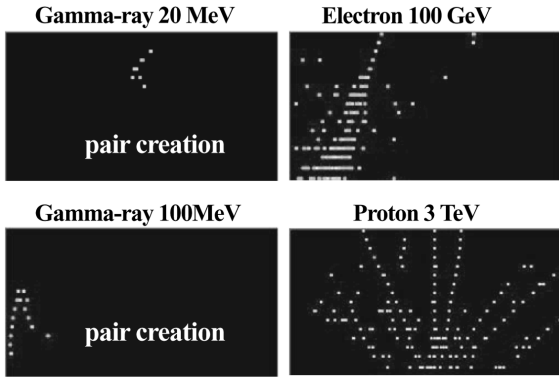


Fig. 5 Examples of simulated shower images of gamma rays, electron, and proton to be taken with the imaging calorimeter of CALET.

我々が提案している宇宙線観測装置 CALET (CALorimetric Electron Telescope) は、Fig.4に示すように約 1 m^2 の面積を持ち、上部と下部の検出器からなる。上部は 1 mm 角のシンチファイバー (SciFi: Scintillating Fiber) からなるベルトと鉛板を交互に積層したイメージングカロリメータとなっている。入射してきた高エネルギーの宇宙線は、合計 $4\text{ radiation length (r.l.)}$ の鉛中で雪崩的に相互作用を繰り返し、多数の粒子を生成するカスケードシャワーと呼ばれる現象を引き起こす。シンチファイバーではカスケードシャワー中の荷電粒子 (主に電子と陽電子) によってシンチレーション光が発光するので、それを検出することによって、カスケードシャワーをイメージとして捉えることができる。直交する二方向に向けて積層されるシンチファイバーベルトによって、カスケードシャワーを X、Y 方向へ投影したイメージが得られる。Fig.5 はイメージングカロリメータによって検出されるカスケードシャワー画像の例で、ガンマ線、電子、陽子が入射した場合についてシミュレーションを行った結果である。このイメージ情報によって、入射粒子の種類の選別、入射方向の決定、シャワー発達開始点の決定などを行うことができる。

CALET の下部は BGO シンチレータの角柱で取り組んだ全吸収型のカロリメータとなっている。BGO はほぼ鉄と同様な密度の結晶物質であるため、高エネルギー粒子の阻止能が高い。しかも荷電粒子によってシンチレーション光を発するので、それ自身が検出器となるため、入射してきたカスケードシャワーの全エネルギーを測定することができる。BGO の厚みの合計は 32 r.l. であるため 10 TeV の高エネルギー電子に対しても充分な阻止能を有し、 TeV 領域の電子に対して 1% を切る高いエネルギー分解

能を持つ。また、この厚い吸収層によって、電子観測のバックグラウンドとなる陽子を 100 万分の1 のレベルにまで除去することも可能となる。イメージングカロリメータと全吸収型カロリメータで用いる物質を合計した検出器重量は 1760 kg となる。CALET によって 3 年間の観測を行った場合に得られる 1 GeV から 20 TeV の宇宙線電子スペクトルを、Fig.2 に大きい丸印で示してある。高エネルギー側以外の誤差棒は表しきれないほど小さい。

3. シンチファイバー検出器

3.1 シンチファイバーの PMT 読出し

荷電粒子が 1 mm 角のシンチファイバーを通過すると電離損失によっておよそ 200 keV のエネルギーを損失し、そのエネルギーに比例したシンチレーション光が発生する。シンチレーション光はシンチファイバー中で等方的に発光し、そのうちシンチファイバー中を伝播できる角度に出たものがファイバー端面に到達するが、そこでの光子数は 30 個弱である。この微弱光を検出するために光電子増倍管 (PMT: Photo Multiplier Tube) を用いる。PMT の光電効率は約 20% なので、PMT のカソードで発生する光電子は約 5 個である。この光電子は PMT の数段のダイノードで段階的に増幅され、電気パルス (電荷) として最終段のアノードから出力される。

CALET における SciFi は数万本に及ぶため、PMT はコンパクトで多チャンネルのものが必要である。そこで我々は浜松ホトニクス社の H7546 (Fig.6) というアノードを 64 チャンネル持つマルチアノード PMT (MAPMT: Multi-Anode PMT) を使用することにした。この MAPMT は Fig.6 のようにカソードに続くダイノードが 8×8 のマトリックス状に区分されており、それがその上に位置するカソード上の 2.1 mm 角の受光面に対応する。この各

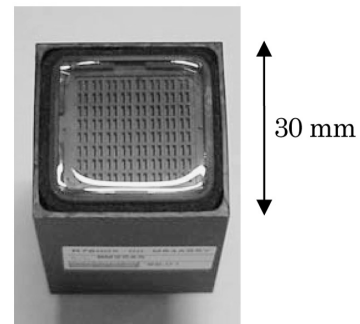


Fig. 6 64 channels Multi-Anode PMT (Hamamatsu H7546). Viewed from the photo-cathode surface.

受光面に1 mm 角の SciFi を接続することで、SciFi からのシンチレーション光を1本ごとにMAPMTのアノードからの電気信号として読み出すことができる。

MAPMT からの信号の読出しは後述するVLSI チップによって行う。MAPMT の出力電荷を、VLSI チップの入力レンジに合わせるためには、MAPMT による光電子の増幅率を5000~10000程度に設定する必要がある。これに対して、市販されている H7546 の増幅率は、標準印加電圧800V のときに 3×10^5 となり、数10倍高い。印加電圧を下げれば増幅率も下がるが、印加電圧を低くしすぎるとダイノード間の電位差が不足して、ダイノード後段での空間電荷飽和によるリニアリティの低下を招いてしまう。そこで、印加電圧を下げる代わりにダイノードの段数を12段から8段に減らすことで、ダイノード間の電位差を保ったまま増幅率を下げることにした。ダイノードの段数を減らしたことによって、目標の増幅率を得るための印加電圧は600 V 前後となる。

CALET について10 TeV の電子によるカスケードシャワーのシミュレーションを行った結果、1本の SciFi に入射する粒子数の最大は約3000である。シンチレーション光の量は通過粒子数に比例するため、SciFi によって1粒子から3000粒子までを検出するためには、MAPMT およびその読出し回路に要求されるダイナミックレンジは3000となる。Fig.7 はダイノードの段数を8段にした MAPMT について、増幅率を5000と15000に設定した場合についてのダイナミックレンジをLEDを光源としてその光量をフィルタで調節しながら測定した

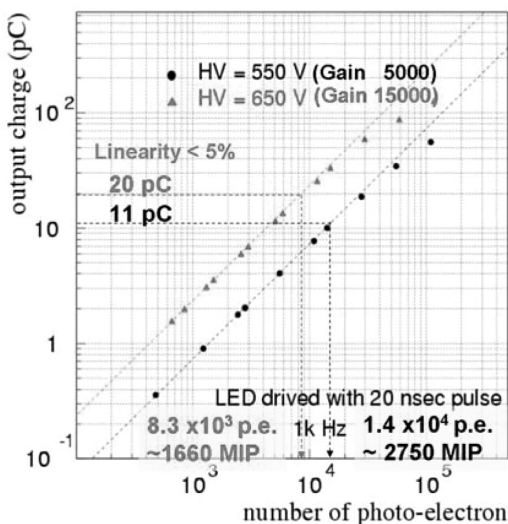


Fig. 7 Dynamic range of MAPMT calibrated with LED.

結果である。図の横軸は MAPMT のカソードでの光電子数であり、光電子約 5 個が 1 粒子 (1MIP : 1 Minimum Ionizing Particle) に対応する。それに対して縦軸は MAPMT の出力電荷になっている。図中の測定点上に引いた点線は、入射光量の少ない測定点にフィッティングした直線である。図のように入射光量の増大とともにこのリニアリティを示す直線からはずれてくるが、5%までのずれを許容した場合、5000の増幅率に対しては出力電荷11 pC まで、15000の増幅率に対しては20 pC までリニアリティが保たれた。それぞれの出力電荷を光電子数に戻し、さらに粒子数に換算すると、増幅率5000のほうがダイナミックレンジが広く、2750粒子まで5%のリニアリティが確保されることがわかった。またリニアリティの許容範囲を10%にすればダイナミックレンジはさらに2倍になる。

3.2 MAPMT の読出し回路 (フロントエンド回路)

CALET における数万チャンネルの MAPMT 読み出しには、コンパクトかつ低消費電力の回路が必要となる。ケーブルの使用もノイズ面と重量制限の両側面から極力避けなければならない。このような理由から、読出し回路の VLSI 化が必須となる。しかし、一般にその開発には多額の費用と多くの時間がかかることが予想される。そこで MAPMT の読み出し回路として、シリコンストリップ検出器の読み出しのために開発された Viking チップと呼ばれる IDEAS 社 (ノルウェー) が開発したアナログ ASIC (Application Specific Integrated Circuit) の利用を試みた。市販されていた Viking チップのうち最もダイナミックレンジの広い VA32HDR2 というチップを用いて MAPMT の読み出しを行った。VA32HDR2 は電荷有感型前置増幅器と波形整形増幅器とサンプルホールド回路の組を32チャンネル分内蔵している。Fig.8 に

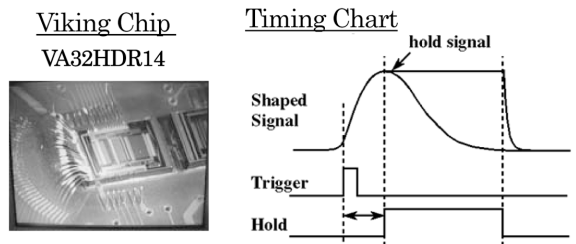


Fig. 8 Viking Chip VA32HDR14 containing 32 sets of a pre-amplifier, a shaping amplifier, and a sample hold circuit and one multiplexer. Peak voltages of uni-polar outputs of the shaping amplifiers are held with an external hold signal.

示すタイミングチャートのように、外部からの1.85 μ 秒遅れた Hold 信号によって各チャンネルの波形整形増幅器の波高値が保持される。各波高値はマルチプレクサによって順次読み出すことができる。試験ではまず MAPMT の数 ns という出力パルスを読み出せることを確認した。さらに MAPMT に印加電圧を供給する電源に低ノイズのものをを使うことで、このチップのダイナミックレンジである230という値が、MAPMT の読み出しでもほぼ実現されることを確認した。

この結果をもとにして、IDEAS 社にチップの改良を依頼し、さらにダイナミックレンジを広げた VA32HDR14を開発した (Fig.8)。このチップの設計では、入力電荷の最大値を VA32HDR2の0.8 pC から15 pC にまで増大させながらも、ノイズレベルを VA32HDR2の4倍の0.8 fC に抑えることで、数1000のダイナミックレンジの実現を目指した。ダイナミックレンジを拡大するために、チップの電源電圧を ± 2.0 V から ± 2.5 V へ上げた結果、消費電力が1.5 mW/ch から3.4 mW/ch へと増加することになったが、仮に4万チャンネルとすると136Wであり、CALET に許される総電力600Wの範囲で十分にまかなうことができる。

3.3 プロトタイプ検出器の性能テスト

CALET のフロントエンド回路に用いる VA32HDR14 からマルチプレクサによって読み出される波高値を順次 AD 変換するためには、Viking チップを搭載するフロントエンド基板 (FEC : Front End Card)、マルチプレクサ読出しを制御するシーケンサ、そして ADC 回路が必要である。いずれも最終的にはコンパクト化、低ノイズ化、省電力化が必要であるが、まずは既存の Viking チップ用 FEC、および市販品の VME 規格のシーケンサボードと ADC ボードを組み合わせた読み出しシステムを構築してテストを行った。その後、Viking チップ

の読み出しシーケンサと ADC までを搭載した新たな FEC の設計製作へと開発を続けた。

3.3.1 既存のフロントエンド回路によるテスト

Viking チップの VA32 シリーズ用の既存 FEC は、1枚の基板に4チップをボンディングすることができ、128チャンネル読み出しの FEC として VA32HDR14にも適用できた。この FEC は Viking チップのマルチプレクサ読み出し用シーケンサと ADC を外部に用意しなければならない。シーケンサとしては Viking チップをはじめとするアナログ ASIC 一般の読み出しをコントロールできる VME 規格の汎用シーケンサボード (CAEN V551B) を使い、ADC としては V551B と組み合わせることで多チャンネルを順次 AD 変換することが可能な VME 規格の ADC ボード (CAEN V550) を用いた。FEC 外の ADC までアナログ信号を取り出すため、この読み出しシステムのノイズレベルは12fC とかなり高めであったが、低ノイズ化は次期段階で行う新 FEC の開発において検討する方針とした。

この読み出しシステムのテストを行うために、Fig.9 のようなプロトタイプのシンチファイバー検出器を製作した。この検出器は、1 mm 角のシンチファイバー (クラレ SCSF-38) を一列に32本および64本並べて製作した二種類のベルトの間に、鉛板を挿入して積層したサンプリングカロリメータとなっている。検出器の粒子入射口に近い方 (Fig.9 の左側) から32mm 幅のシンチファイバーベルトを4層、その後方に0.5 r.l. (2.8 mm 厚) の鉛板とシンチファイバーベルトを交互にして、32 mm 幅シンチファイバーベルトを4層、64 mm 幅シンチファイバーベルト4層を順に並べてある。鉛板の厚みは合計4 r.l. (22.4 mm)、シンチファイバーは合計512本である。各シン

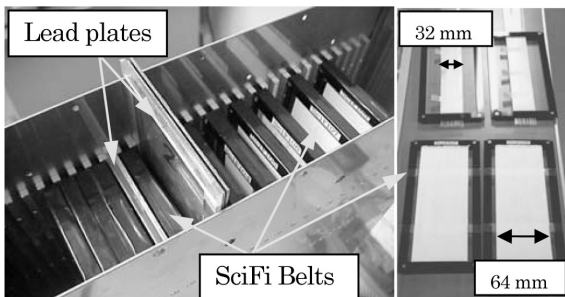


Fig. 9 Prototype SciFi detector to carry out beam test

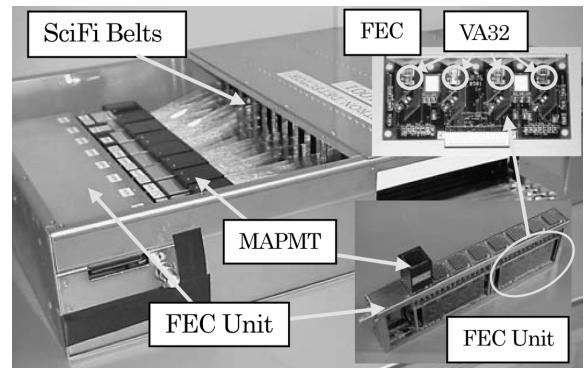


Fig.10 Prototype SciFi detector with an FEC unit.
SciFi Belts FEC UnitFEC FEC Unit VA32MAPMT

チファイバーベルトは Fig.9 に見えている端面の反対側で 8×8 のマトリックス状に束ねられ、Fig.10 のように64チャンネルの MAPMT に取り付けられている。MAPMT は8本が一列に並び、512チャンネル分の FEC を内蔵する FEC ユニットに接続されている。FEC ユニット内には VA32HDR14 を4チップ搭載した FEC が4枚入っており、合計 16 チップ分のマルチプレクサ読み出しが順次行われるようになっている。

FEC ユニットは VME 規格のシーケンサボード V551B に接続されており、このシーケンサによってマルチプレクサ読み出しの制御が行われ、FEC ユニットに保持されている波高値が順次取り出さる。V551B によって取り出された波高値は V550 に送られ AD 変換が行われる。V550 の AD 変換のシーケンスも V551B によって、マルチプレクサ読み出しに同期するように制御されている。

このプロトタイプ検出器の読み出しテストは、欧州共同原子核研究所 (CERN) において、SPS (Super Proton Synchrotron) 加速器の T 4-H 6 ビームラインの電子ビーム、陽子ビーム、ミューオンビームを用いて行われた (Fig.11)。検出器に照射したビームのエネルギーは、電子は 50 GeV と 100 GeV、陽子は 150 GeV、ミューオンは 120 GeV であった。取得したデータは合計約 50 万イベントである。Fig.11 のようにシンチファイバーのプロトタイプ検出器の下流に、プロトタイプの BGO 検出器も設置して、CALET に近い検出器構成にしてテストを行った。

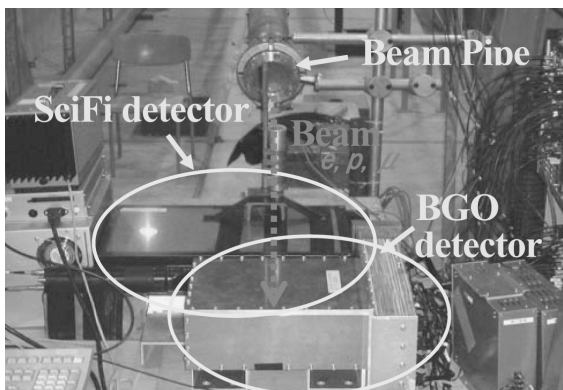


Fig.11 Beam test of a prototype detector of CALET carried out at CERN-SPS.

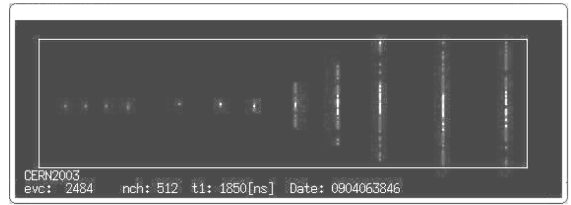


Fig.12 An example of shower image obtained with prototype SciFi detector at CERN-SPS. Electron with beam energy 100 GeV from left side generated the shower.

Fig.12 は SciFi 検出器によって取得した 100 GeV の電子ビームを照射したときのカスケードシャワーのイメージである。電子ビームは図の左から入射し、はじめの鉛板のないシンチファイバーベルト4層によって入射電子のトラックが捉えられている。さらにその後方では、シンチファイバーベルトの間に置かれた鉛板を通過するごとに相互作用を起こしてカスケードシャワーが発達していく様子が捉えられている。このようにして得られたシャワーイメージに直線をフィットすることによってシャワー軸を求めることができる。Fig.13 は検出器に 50 GeV の電子ビームを垂直入射した場合のシャワー軸の決定精度を示している。フィットで求めたシャワー軸つまり入射角度の分布に、ガウス分布をフィットした結果、角度分解能として 0.25° の標準偏差を得た。

電子が起こす電磁相互作用によるカスケードシャワーは、ほとんどが Fig.12 に示した例のように、シャワー軸中心にエネルギーが集中する対称なシャワー形状となる。それに対して陽子が起こす核相互作用によるカスケードシャワーは、形状が様々になるだけでなく、シャワー軸に直交する横方向に広がる傾向がある。このように入

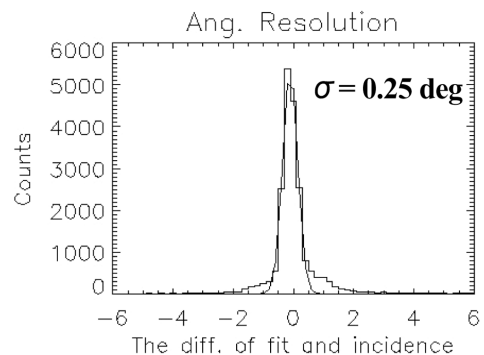


Fig.13 Angular resolution obtained by shower axes fitting was 0.25 degrees for electron showers with beam energy 50 GeV.

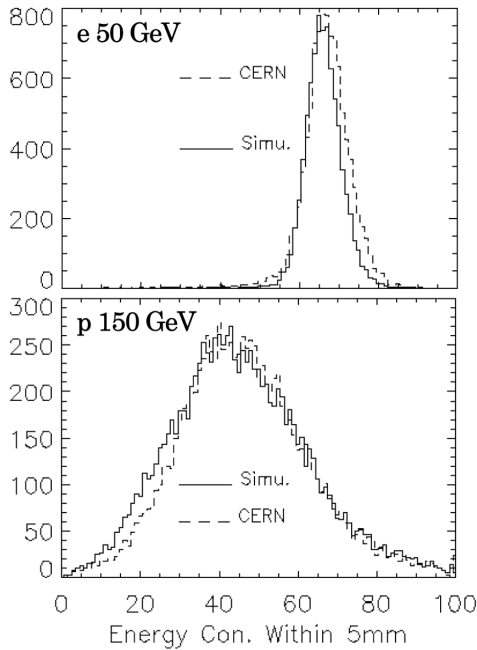


Fig.14 Percentage of energy concentrated within 5 mm from shower axes for electron showers of 50 GeV in the upper histogram and that for proton showers of 150 GeV in the lower histogram. Distributions obtained by simulations and beam experiments at CERN-SPS were indicated by solid and dashed lines respectively.

射粒子によってシャワー形状に差があるので、シャワー軸から 5 mm 以内へのエネルギーの集中度を比べることによって電子と陽子を見分けることができる。**Fig.14** はエネルギー集中度の分布を、50 GeV の電子シャワーと 150 GeV の陽子シャワーに対して、シミュレーション（実線）と CERN-SPS でのビーム実験（点線）から得た結果である。電子の場合、エネルギー集中度が高い 55 % から 80 % の間に分布が集中していることがわかる。ここでエネルギーが電子の 3 倍である陽子を扱う理由は、陽子の起こす核相互作用によるカスケードシャワー中の電子・陽電子成分が、電子の起こす電磁相互作用によるカスケードシャワーの場合のおよそ 3 分の 1 となるためである。図から陽子については、エネルギー集中度が低い 40 % をピークとして広く分布することがわかる。分布が広がるのは陽子のシャワー形状がイベントごとにばらつくことを反映している。ここで、エネルギー集中度が 55 % 以下のイベントを取り除くことによって、SciFi 検

出器のみでも、かなりの陽子イベントを除去できることがわかる。

このテストでは、シンチファイバーからの微弱光を MAPMT で検出し、Viking チップを用いた FEC で読み出すという方式で、SciFi 検出器が期待通りの性能を発揮することを確認できた。しかし、既存の FEC を外部のシーケンサボードと ADC ボードで読み出すシステムでは、FEC 全体のノイズが Viking チップ自身のノイズの 15 倍にもなり、1 MIP の信号レベルがノイズに埋もれないように MAPMT の印加電圧を 800 V に上げて増幅率を稼いだため、ダイナミックレンジが犠牲になった。これは概ね予想されていたことではあるが、次の段階の新しい FEC の設計開発では、コンパクト化や省電力化の他に、ノイズ対策が最も重要な課題であることが明確になった。

3.3.2 新フロントエンド回路の開発

新たな FEC の設計では、まず MAPMT 一本単位に対応する独立した FEC を検討した。そして、MAPMT の出力信号から VA32HDR14、ADC へと至るアナログ部分を最短距離で結び、デジタル部分から極力分離するように努めた。MAPMT 間の隙間は 2 mm しかないので、FEC は MAPMT の後方（アノード出力側）の $30 \times 30 \text{ mm}^2$ のスペースに収めなければならない。

そこで **Fig.15** のように FEC を 4 枚の基板に分割して MAPMT の後方に取り付ける方法を取った。MAPMT に取り付けたときに外側の 2 枚となる基板は同じもので、それぞれの基板に VA32HDR14 が 1 チップずつボンディングされ、最小 AD 変換時間 4 μ 秒の 16 ビット ADC が同じ基板上に 1 チップ配置されているため、アナログ部分の配線がかなり短くなった。実際の ADC の動作速度は AD 変換時間 10 μ 秒に設定しており、32 チャンネルの Viking チップの読出しにかかる時間は 320 μ 秒であ

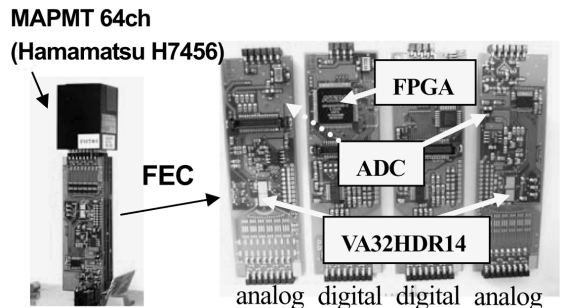


Fig.15 A newly designed and developed FEC for the readout of MAPMT with VA32HDR14.

る。これは他の Viking チップの AD 変換とは独立している。MAPMT の本数にかかわらず、全チャンネルの AD 変換が $320\ \mu\text{s}$ の間に並行して行われる。その結果、全体の読み出し時間が大幅に短縮され、計算機へデータを吸い上げる時間を含めても、512チャンネルの場合は1ミリ秒で充分である。これに対し、前述のシステム(3.3.1)では4ミリ秒以上かかっていた。

デジタル部分は中央の2枚の基板に収められている。VA32HDR14のマルチプレクサと ADC を制御するためのシーケンサは、デジタル基板上の FPGA (Field Programmable Gate Array) が担う。この FPGA は AD 変換されたデータを計算機に吸い上げる際の通信制御も行う。

この FEC を用いて MAPMT 8 本分の FEC を内蔵した FEC ユニットを製作し、このユニットに対応する VME 規格のインターフェイスボードを製作して、VME 計算機によってデータを収集するシステムを構築した。このシステムを用いて、まずノイズを測定したところ、VA32HDR14への入力信号がない状態のノイズレベルは $1.3\ \text{fC}$ (r.m.s) であった。VA32HDR14のチップノイズが $0.8\ \text{fC}$ であるため、FEC の VA32HDR14 チップ以外のノイズは $1.0\ \text{fC}$ となる。Fig.16 の上図に示すように VA32HDR14 への入力電荷 (テストパルス) に応じてノイズは増加していくが、逆に入力電荷の大きさに対するノイズの割合は Fig.16 の下図のように下がっていくため、全く問題のないノイズレベルである。同様にテストパルスによる VA32HDR14 のダイナミックレンジを測定した結果、Fig.17 に示すような入力電荷に対するリニ

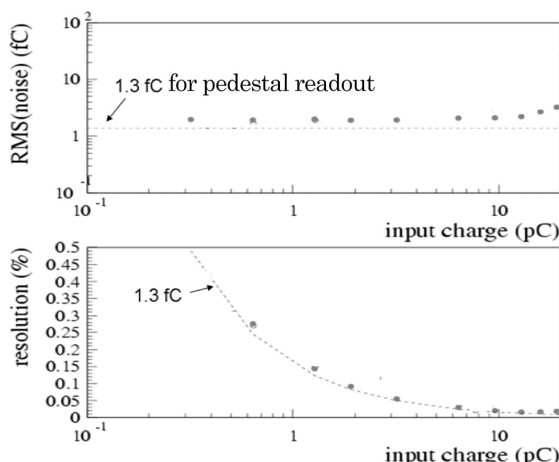


Fig.16 Noise level measurements of the new FEC with test pulses (input charges).

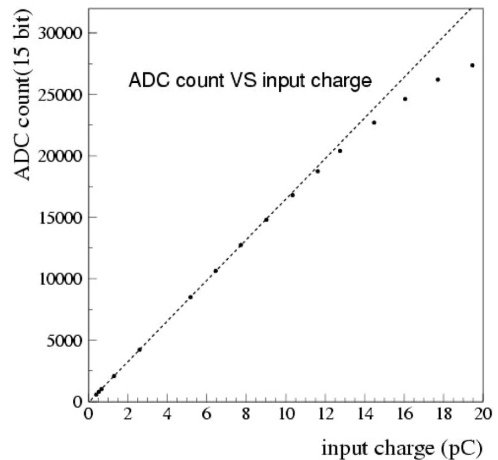


Fig.17 Measurements of the dynamic range of the new FEC with test pulses (input charges).

アリティが得られ、入力電荷 $15\ \text{pC}$ でのリニアリティからのずれは 10% であった。以上のように、ノイズ、ダイナミックレンジともに VA 32 HDR 14 の設計値を満足する結果が得られた。

3.3.3 新フロントエンド回路による実証化テスト

新しく開発した FEC ユニットを用いた SciFi 検出器の性能テストを2004年7～8月に CERN-SPS の T2-H4 ビームラインにて行うことができた。このテストで用いた検出器は、タングステンとプラスチックシンチレータを積層したサンプリングカロリメータのタワーで、タングステンの厚みが $6\ \text{r.l.}$, $10\ \text{r.l.}$, $34\ \text{r.l.}$ となる各位置に X と Y の二方向に重ねた SciFi ベルトを挿入したものである。二本のタワーの断面積はそれぞれ $2 \times 2\ \text{cm}^2$ と $4 \times 4\ \text{cm}^2$ である (Fig.18左)。SciFi 検出器はタワーで発達するシャワーを各深さにおいてイメージとして捉え、シャワーの横広がりやシャワー軸の検出を行う。SciFi ベルトは $1\ \text{mm}$ 角のシンチファイバー (クラレ SCSF-38) を横一列に並べて組んだ。Fig.18 右上のように $2\ \text{cm}$ タワー用の幅 $2\ \text{cm}$ の SciFi ベルトは、20本の SciFi からなる。Fig.18 右下の SciFi ベルトはライトガイドとして用いるクリアファイバーに接続される。クリアファイバーは MAPMT までのライトガイドとしての柔軟性を考慮して $1\ \text{mm}$ 径の丸ファイバーを用いた。

ビーム実験では、検出器に $50 \sim 250\ \text{GeV}$ の電子、 $150 \sim 350\ \text{GeV}$ の陽子、 $150\ \text{GeV}$ のミューオンを入射した。Fig.19は $200\ \text{GeV}$ の電子を $4\ \text{cm}$ タワーに入射したとき

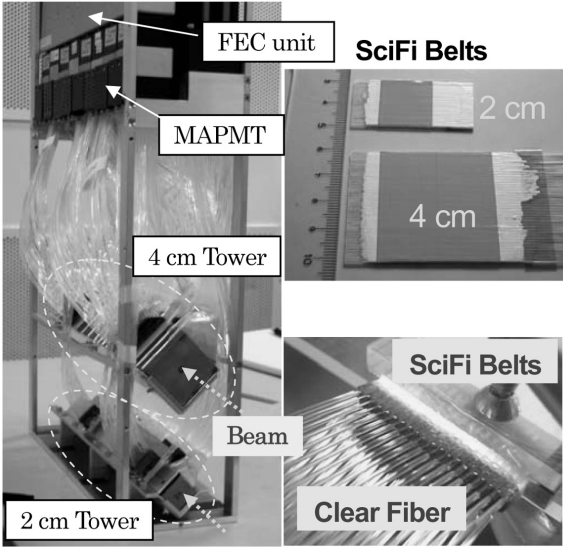


Fig.18 Sampling calorimeter towers of 2cm and 4cm square in cross section composed of tungsten plates, plastic scintillators, and SciFi belts (Left). SciFi belts of 2 cm and 4 cm wide in assembling (Right upper). SciFi belts were connected to clear fibers for light guide (Right lower).

に SciFi 検出器で得られたシャワー画像である。MAPMT の印加電圧は600 V にセットしてあり、6 r.l. と10 r.l.でのシャワーの中心とその両側への拡がり、X と Y の二方向で捉えられている。電子によるシャワーは200 GeV のエネルギーでは34 r.l.には到達しない。

電子の起こすシャワーは前述したようにシャワー軸に対称で、イベントごとのばらつきも少ない。**Fig.20**は200 GeV の電子を4 cm タワーに入射したときの10 r.l.におけるシャワーの横広がり分布を、全イベントについて重ね合わせた結果である。シミュレーションの結果とも

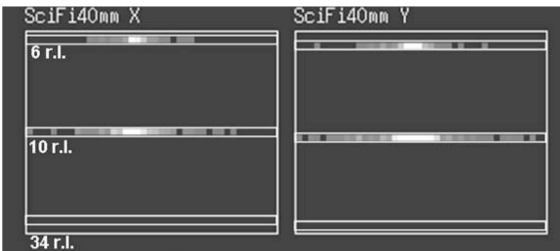


Fig.19 An example of Shower image of electron with beam energy of 200GeV taken with the 4cm tower.

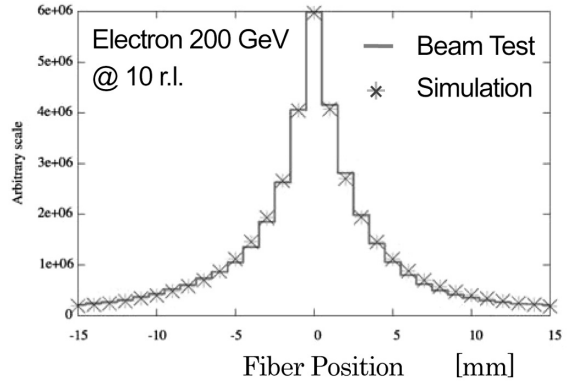


Fig.20 Lateral distribution of electron showers with beam energy 200GeV at 10 r.l. A Simulated result was also superimposed.

良く一致している。さらに6 r.l.におけるシャワーの横広がり分布の中心をイベントごとに求めて、シャワー軸を決定した結果を**Fig.21**に示す。この分布にガウス分布をフィットしたところ、X、Y の二方向についてそれぞれ $\sigma_x = 0.171 \pm 0.006$ mm、 $\sigma_y = 0.127 \pm 0.004$ mm という標準偏差を得た。この値はシャワー軸の決定精度を表し、シミュレーションで予想される0.2 mm 以下の決定精度が得られた。

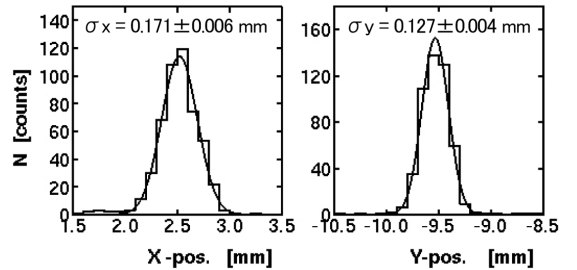


Fig.21 Position resolutions of electron shower axes determined with the SciFi belts in X direction (left) and Y direction (right) at 6 r.l. Electron beams of 200 GeV were irradiated to the 4 cm tower.

新たに開発した FEC ユニットを用いた SciFi 検出器の読み出しでは、250 GeV の電子に対して、各 SciFi の信号がダイナミックレンジの5分の1に収まることも確認できた。これは CALET による TeV 領域の観測にも対応できることを意味する。この FEC ユニットはその

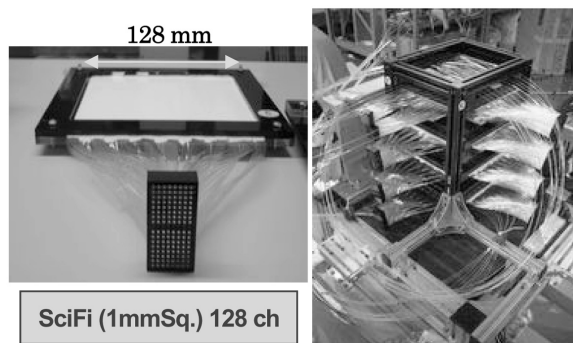


Fig.22 SciFi detector to carry out a balloon-borne observation of electrons and gamma-rays.

まま容易に複数化することができ、最終的なデータ取り込みレートは、計算機側のインターフェイスにまで吸い上げられたデータを処理する CPU の能力によるが、1 kHz は実現可能である。また FEC ユニットの消費電力については1チャンネル当たりの実測値が 4.7 mW なので、CALET における4万チャンネルの SciFi 検出器を190W で実現できる。

4. 気球実験による実証化試験

SciFi 検出器の宇宙線観測性能を実証するために、宇宙環境とほぼ等しい上空37 km における宇宙線電子、ガンマ線の大気球による観測を行う準備を進めた。FEC ユニットの2台用いて、1024本の SciFi からなる検出器を製作した。**Fig.22**左は128本の1 mm 角の SciFi を並べて製作したベルトで、2本の MAPMT によって読み出す。このベルトを計8枚製作し、タングステン板と合わせて **Fig.22**右のような SciFi 検出器を組上げた。読み出し用の MAPMT は計16本である。

この SciFi 検出器の下に24本の BGO で組上げた検出器を組み込み、エレクトロニクスの各システムを取り付けた **Fig.23**のような観測装置を完成した。地上における調整において、宇宙線ミュオンのトラックイメージなどが確認できた。気球の打ち上げは2005年8月に JAXA の三陸大気球観測所において実施されたが、放球作業の失敗によって観測装置は浮上せず、残念ながら次年度の観測へと持ち越されることとなった。それまでの間、地上におけるキャリブレーションを行って基礎データを取得する予定である。

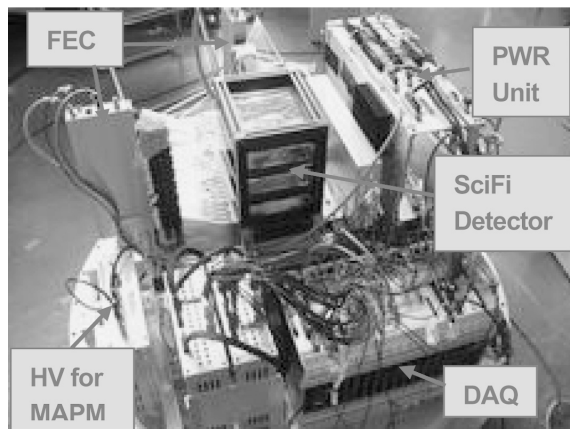


Fig.23 SciFi detector assembled into the payload together with electronics systems.

5. まとめ

SciFi 検出器について気球実験でイメージインテンシファイアと CCD でイメージを取得していた経験をもとに、MAPMT による SciFi 一本ごとのより高速な読み出しへと改良することができた。MAPMT の採用を可能にしたことで、故障等の危険の分散という意味において宇宙環境での検出器としての実用性が高まった。

SciFi 検出器のための FEC はほぼ完成の域に達した。現在は、更なる低ノイズ化と高速化を目指した改良を行っている。また宇宙環境でのエレクトロニクスの耐放射線性能の向上は今後の課題である。

装置全体の实証化に向けて、今後数年間の間に段階的に CALET のスケールモデル(1/16、1/4)による気球実験を重ね、CALET 実現への足固めを行う予定である。

参考文献

- 1) S. Torii *et al.*; *NIM A*, **452**, 81 (2000).
- 2) S.Torii *et al.*; *ApJ*, **559**, 973 (2001).
- 3) K.Kasahara *et al.*; *Phys. Rev. D*, **66**, 052004 (2002).
- 4) S. Torii *et al.*, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)*, **134**, 23-30 (2004).
- 5) 鳥居祥二、槇野文命; *日本物理学会誌* 1月号, 8 (2001).
- 6) T.Kobayashi, Y.Komori, K.Yoshida, and J.Nishimura, *ApJ*, **601**, 340-351 (2004).

共同研究

平面形状の大きな免震建物の地震時の 捩れ振動を伴う挙動に関する研究

島崎 和司* 荏本 孝久** 大熊 武司**

Torsional Response of a base isolated large building

Kazushi SHIMAZAKI*, Takahisa ENOMOTO**, Takeshi OHKUMA**

1. 序

免震建物の地震時の挙動については、設計との対応を目的とし、全体的な挙動、高さ方向の挙動を把握するため多くの地震観測が行われており、その結果の評価も進んでいる。免震建物で平面的にも100m 近い長大構造物である本学23号館は、文部科学省学術フロンティア・横浜産官学共同研究総合プロジェクト「地震・台風災害の制御・低減に関する研究 (TEDCOM)」(研究代表者：大熊武司建築学科教授)により地震時の挙動観測が行われ、これまでに中小地震に対する多くのデータが蓄積されてきており、免震建物の地震時の高さ方向の挙動評価に有益なデータを得ている^{1)~6)}。

免震構造物は、その耐震性能に加え、基礎の拘束度が小さいため乾燥収縮による内部応力の発生が少なく、クラックが入り難い構造であることもあり、一般の建物と比べて長大な構造物が建造されている。これらの建物では、基礎梁の乾燥収縮や温度変化により、免震装置に変形が発生する。この変形量が無視できない量である事が現場で認められており、その報告がなされている⁷⁾⁸⁾。

これらの変形により、捩れ応答が生じて耐震性能に影響を与える可能性があることが解析的に示され、維持管理上、これらの変形量を把握する必要のあることも示されている⁹⁾。また、長大な建物においては、地震動の伝搬速度により、建物の両端部に入力する地震動に位相差が生じ、その影響が建物の平面的な応答に影響を及ぼすと考えられる¹⁰⁾。

これらの影響が実際の建物においてどのようなものであるかを計測した例は少ない。免震装置の変形については、建設会社で建設中の建物の経次変化を計測した例はあるが、長期の観測例はほとんどない。また、地震時の平面的な挙動観測例も報告は少ない。

本研究は、TEDCOM プロジェクトでの高さ方向での観測に加え、免震層の平面的な挙動を観測し、解析シミュレーションと合わせて、長大な免震構造物の地震時挙動の評価を行おうとするものである。また、観測されたデータのうち、代表的なデータを公表することにより、今後の長大免震構造物の設計・評価手法に関する研究の礎になるものと考えられる。

2. 地震動観測

2.1 23号館概要

23号館は、地下2階・地上8階・塔屋2階の工学部研究室、実験室、講義室及び図書館書庫からなる建物である。軒高は30.05m、最高部高さは39.25mで、階高は地上階3.7m、地下1階実験室は5.0m、地下2階書庫は6.0mである。構造種別は鉄筋コンクリート造で、地下2階と地下1階床の間に免震部材を設置した免震建物となっている。免震部材には、アイソレータとして天然ゴム系積層ゴム、エネルギー吸収部材として鉛ダンパー及び鋼棒ダンパーを用い、上部構造の重心と免震部材の剛心が一致するように配置されている。上部構造の架構形式は、X方向(長手方向)、Y方向(短手方向)共に純ラーメン構造とし、下部構造(地下2階部)は、上部構造の基礎部として十分な剛性、耐力を持つ剛構造としている。基礎は、鉄筋コンクリート造べた基礎とし、GL-14m 付近より現れるN値50以上の相模層群砂礫層に直接支持させている¹¹⁾¹²⁾。

*建築学科 助教授

**Associate Professor, Department of Architecture

**建築学科 教授

**Professor, Department of Architecture

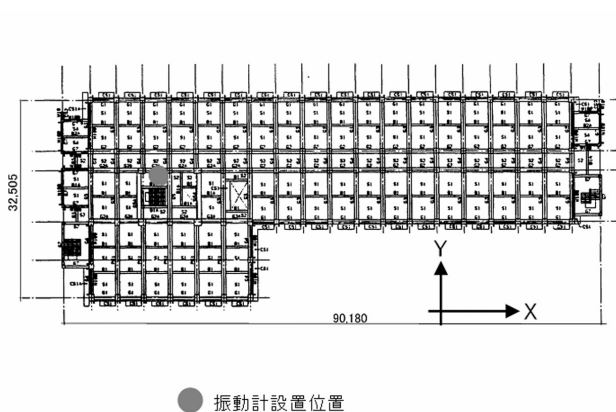


図1 高さ方向の地震観測位置

2.2 地震観測概要

1) 地中観測

地中および地表での振動計測はボーリング坑を利用して、工学的基盤レベル (GL-21.8m) と地表レベル (GL-1.5m) において各々3成分の振動計測を行っている。工学的基盤が浅い地盤は主にローム層で構成され、N値10以下の軟弱層がGL-21.8mまで堆積している。

2) 高さ方向観測

設置した地震計はサーボ型加速度計 (一部サーボ型速度計を併置) で8階、6階、3階、B1階、B2階の5箇所に、各設置階共にほぼ同位置に設置してある。設置位置および観測成分 (X, Y, Z方向) は図1に示した。

3) 平面方向観測

免震層の平面的な挙動の観測のため、図2に示すように、長手方向の両端 (X1-Y3, X20-Y3) に、XY2方向の免震層の相対変形が計測できるように変位計を設置した。この変位計では、熱電対による温度計測とあわせて1日8回3時間毎に長期変動も計測する。また、同一位置の免震層下部に3方向地震計を設置し、それぞれの位置での入力地震動を計測している。

3. 観測記録

3.1 高さ方向観測

2005年7月末までに記録されたデータのうち、23号館B2階の水平最大加速度値が5gal以上を記録したデータの一覧を表1に示す。これらの地震動記録に対する解析を行い、免震建物の地震時挙動に関する検討結果が報告されている^{1)~6)}。

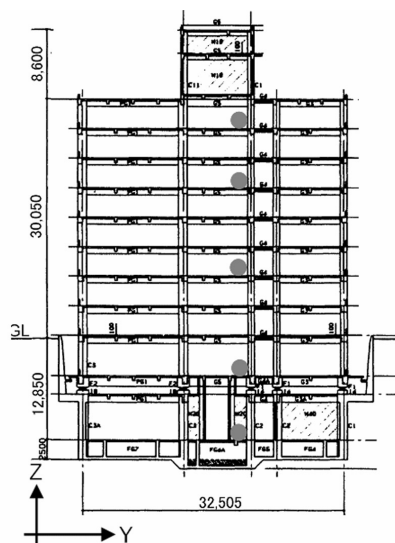


図2 免震層の平面方向の地震観測位置

表1 記録された地震動記録

No.	発生日	震源時	震央地名	緯度	経度	深さ km	規模 Mj	震度 震度
1	2001/4/10	10:04	千葉県南部	35° 18.4'	140° 20.8'	99	4.6	3
2	2001/11/17	1:32	千葉県北西部	35° 37.1'	140° 4.7'	73	4.6	3
3	2002/5/19	5:00	千葉県北西部	35° 38.7'	140° 12.7'	72	4.6	3
4	2002/6/14	11:43	茨城県南部	36° 12.9'	139° 58.6'	57	5.1	3
5	2003/5/10	11:46	千葉県北西部	35° 48.7'	140° 6.5'	70	4.6	3
6	2003/5/12	0:57	茨城県南部	35° 52.1'	140° 5.1'	47	5.3	3
7	2003/5/26	18:26	宮城県沖	38° 49.2'	141° 39.0'	72	7.1	2
8	2003/8/18	19:00	千葉県北西部	35° 48.2'	140° 6.5'	69	4.8	3
9	2003/9/20	12:55	千葉県南部	35° 13.1'	140° 18.0'	70	5.8	4
10	2004/7/17	15:10	房総半島南東沖	34° 50.2'	140° 21.3'	69	5.5	3
11	2004/8/6	3:23	千葉県北西部	35° 36.9'	140° 3.3'	75	4.6	3
12	2004/8/25	1:49	東京湾	35° 32.5'	139° 53.6'	51	4.4	2
13	2004/10/6	23:40	茨城県南部	35° 59.3'	140° 5.3'	66	5.7	4
14	2004/10/23	17:56	新潟県中越地方	37° 17.5'	138° 52.0'	13	6.8	2
15	2004/10/23	18:34	新潟県中越地方	37° 21.2'	138° 59.0'	9	6.3	2
16	2005/2/16	4:46	茨城県南部	36° 2.3'	139° 53.3'	46	5.3	4
17	2005/4/11	7:22	千葉県北東部	35° 43.6'	140° 37.2'	52	6.1	3
18	2005/4/11	15:34	千葉県北西部	35° 34.1'	140° 11.0'	73	4.4	3
19	2005/6/1	20:44	東京湾	35° 33.0'	139° 48.9'	28	4.3	2
20	2005/7/23	16:34	千葉県北西部	35° 34.9'	140° 8.3'	73	6.0	5弱
21	2005/7/23	16:37	千葉県北西部	35° 36.4'	140° 7.9'	68	4.5	2
22	2005/7/28	19:15	茨城県南部	36° 7.5'	139° 50.7'	51	5.0	3

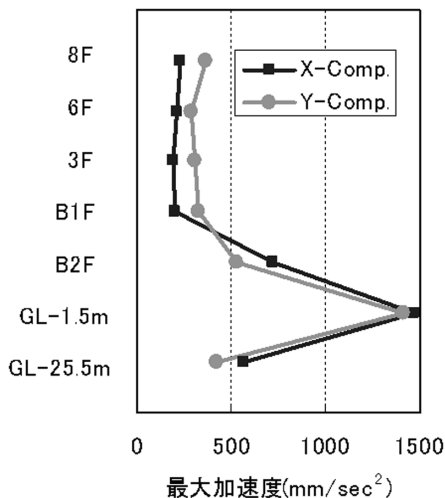


図3 2005年7月23日千葉県北西部地震の
最大加速度の高さ方向の分布

図3は、これらの記録のうちで最も震度が大きかった2005年7月23日千葉県北西部地震の記録の最大加速度を高さ方向にプロットしたものである。工学的基盤であるGL-25.5mで、500mm/sec²程度であった最大加速度は、地表面近くで3倍に増幅されているが、建物への入力はおおよそ1/2～1/3となり、工学的基盤とほぼ同じ値となっている。免震層でそれが約1/2に低減され、建物上層部ではほとんど増幅されておらず、免震効果が確認できる。また、上部構造の加速度分布はほぼ一定であり、剛体的に振動しているといえる。

図4は、工学的基盤中とB2Fで記録された地震動の主要60秒間のフーリエ振幅スペクトルを示したものである。X方向で0.4秒付近、Y方向で0.2秒付近にやや違いがみられるが、全体的に大きな違いは見られない。本建物は直接基礎で工学的基盤に支持されており、建物の入力地震動として、基盤の地動を用いて良いと思われる。

3.2 平面方向観測

1) 長期変動

図2に示した変位計測位置においては、竣工後1年を経過した後、免震装置の変形を、下げ振りをを用いた手動による計測方法により、季節ごとに行っている。図5はこの手動計測を含めたX1-Y3の積層ゴムと(図2の左側)とX20-Y3の積層ゴム(右側)の変位量の経過をコンクリートの表面温度とともに示している。自動計測のデータには、設置時に手動で計測した値を初期値として加算してある。自動計測を行っている変位計の最小分解能は1mmであ

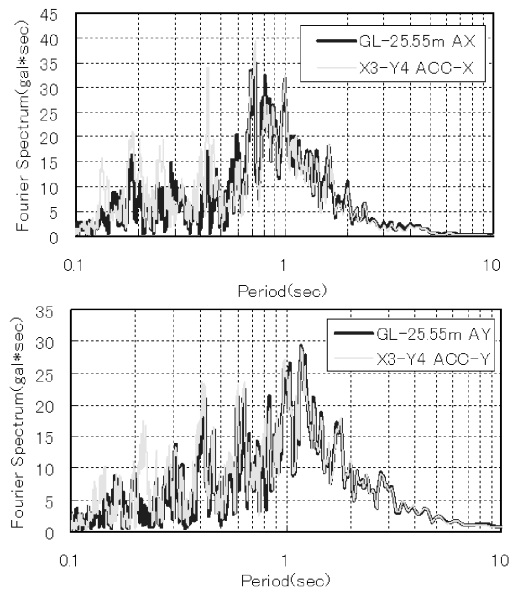


図4 地中とB2Fで記録された地震動のフーリエ振幅スペクトル

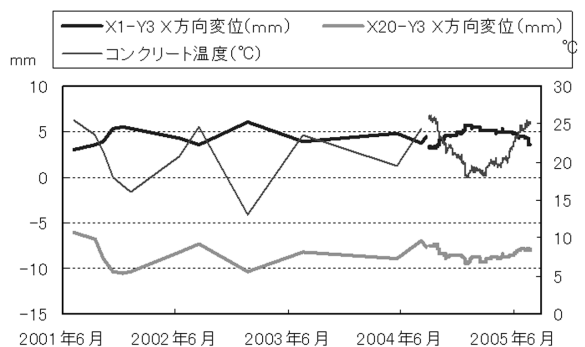


図5 建物のX(長辺)方向変形の経緯

り、精度的には誤差が含まれることになるが、傾向をつかむことが出来る。符号は、図2に示したXY両方向の矢印の方向を正としている。

未計測期間である竣工後1年までの間で、コンクリートの乾燥収縮により全体的に内側に変位し、その後コンクリート温度の上下とともに、収縮量が変動している。最近温度変化に伴う基礎梁の変動が大きい。

図6は両方向の変位について自動計測期間のおおよそ1年間のデータを示したものである。同図中には、地震や強風などのイベントも示したが、イベント時に変位していることから、地震や強風により上部構造が残留変形を残していると考えられる。強風時にY方向が大きく変位しているのは、Y方向の風に対して壁面の見付け面積が大きいためと考えられる。図7に両端のY方向変位の

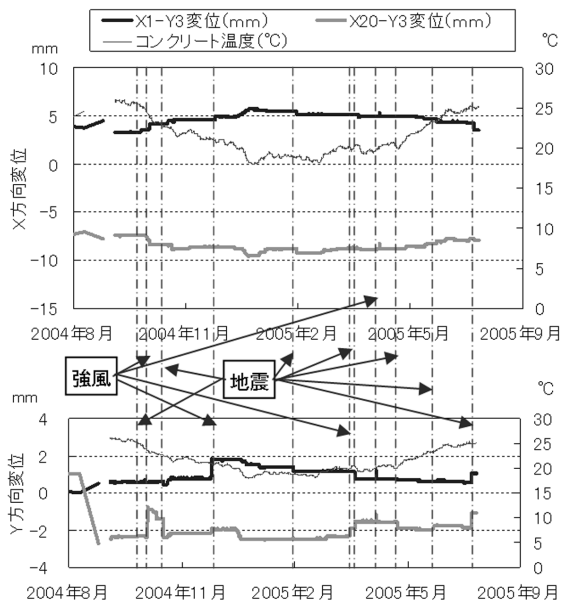


図6 建物のY(短辺)方向変形の経緯

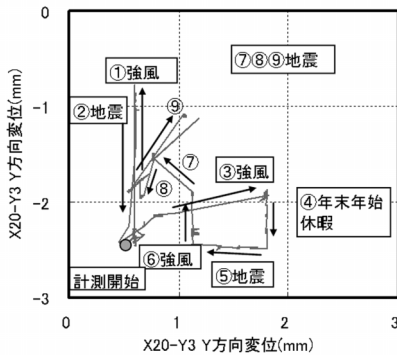


図7 建物のY(短辺)方向変形の相関

相関を示す。イベントにより、振れが大きくなったり解消されたりしており、地震、強風としての特徴はないようである。

2) 地震加速度記録

水平方向の地震観測開始後最大の地震である、2005年7月23日千葉県北西部を震源とする地震で、免震層で20 mm 近い変位が記録されたので、このデータについて検討を行う。

この建物では、免震装置を支持しているB2Fで、高さ方向の計測点とあわせて3箇所で加速度記録を計測している。図8は、この3箇所計測されたXY両方向の主要60秒間のフーリエ振幅スペクトルを示したものである。X方向ではほとんど違いがない。Y方向では、0.3

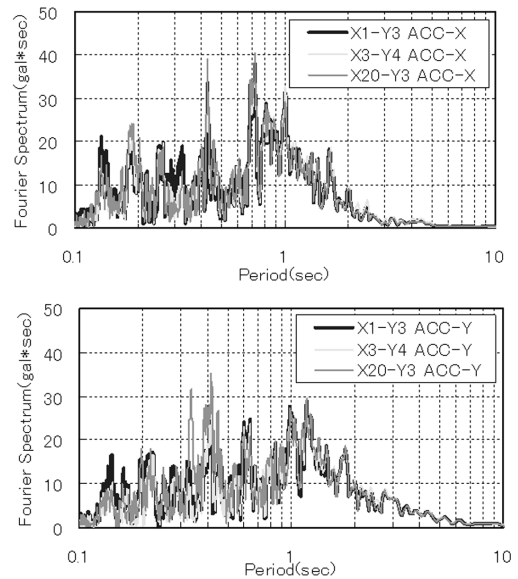


図8 B2Fで記録された地震動のフーリエ振幅スペクトル

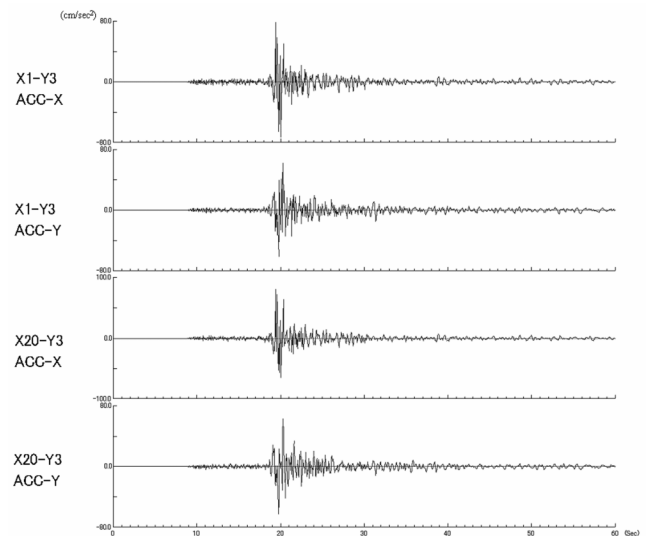


図9 建物の両端で記録された加速度記録の時刻歴

～0.4秒付近でX20通りの記録に違いが見られ、0.34秒付近のピークは、X20通りにしか現れていない。

図9は、建物の両端のX1、20通りで記録された加速度記録の時刻歴を、図10はそのオービットと相関を示したものである。図10(a)に示した両端のオービットの形状はかなり異なったものとなっている。図10(b)は、両端のそれぞれの方向の記録をXとY軸に取り、その相関を示したものである。図中には45°方向に線を入れた

が、記録されたデータがこの線上にあれば両端でのデータが同じで、これから外れるに従い、両端での記録に違いがあることになる。X 方向に比べ Y 方向の相違がやや大きいようである。

これらの相違は、X 20通り側にのみ隣接建物が存在する事、敷地が段差状になっている事の影響や、地震計の設置場所等の影響が考えられるが、詳細は今後の検討課題である。

3) 地震時変位記録

図11は、図2に示した建物の両端で記録された免震層の変位時刻歴を示したものの、図12はそのフーリエ振幅スペクトルを示したものである。フーリエ振幅スペクトルは、X 方向は、変位計が直線状に配置されており、ほぼ同一となっている。Y 方向では1.3秒付近のピーク値に差が見られ、また5秒以上の長周期に違いがみられる。

図13は、建物の両端の免震装置の変位記録を X と Y 軸に取り、その相関を示したものである。X 方向は、45°線を推移し、同一変形を示しているのに対し、Y 方向では、45°の線から外れ、振れを伴う振動をしている。また、図13には、両端の Y 方向変位から求めた振れ角の時刻歴も示したが、大振幅の後も同じ大きさの振れ振動が続いている。今回の地震は、大振幅が1回しかない地震であったが、繰返し起こるような地震の場合に、この振れがより励起されるかどうか検討が必要である。

4) 免震層の復元力特性

図1に示した高さ方向の加速度観測位置に、その上下層の質量を集中させて掛け合わせたものを足し合わせることで、免震層に作用するせん断力を推定できる²⁾。図14は、こうして推定した免震層の層せん断力と、計測された変形から求めた復元力特性を X,Y 両方向と、両方向の変形とせん断力の2乗和平均平方根 (RMS) で示したものである。微小変形時の剛性は、設計

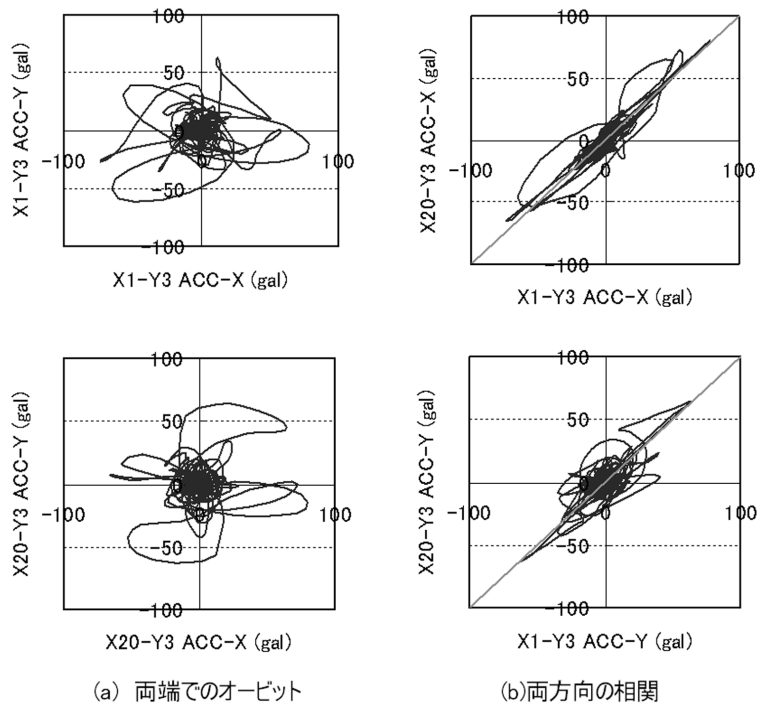


図10 建物の両端で記録された加速度記録のオービットと相関

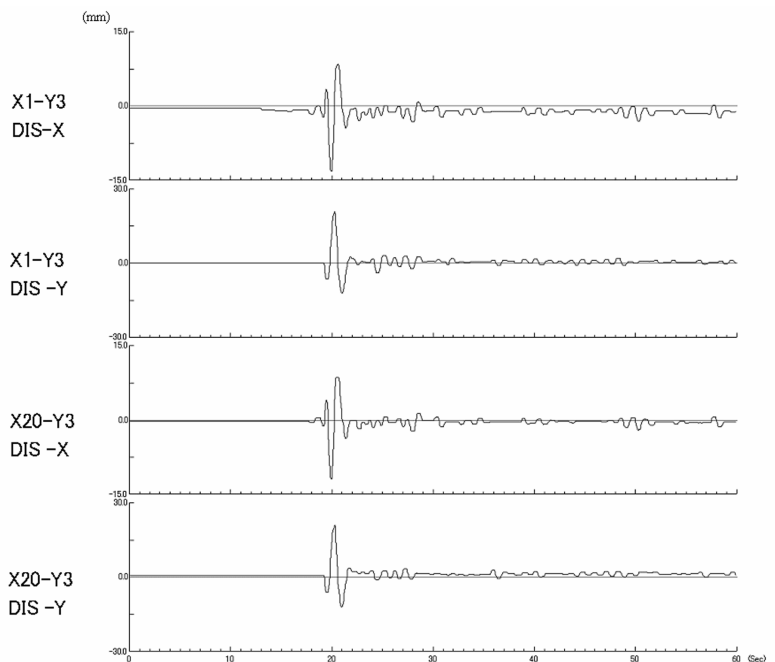


図11 免震層の両端免震装置の変位記録の時刻歴

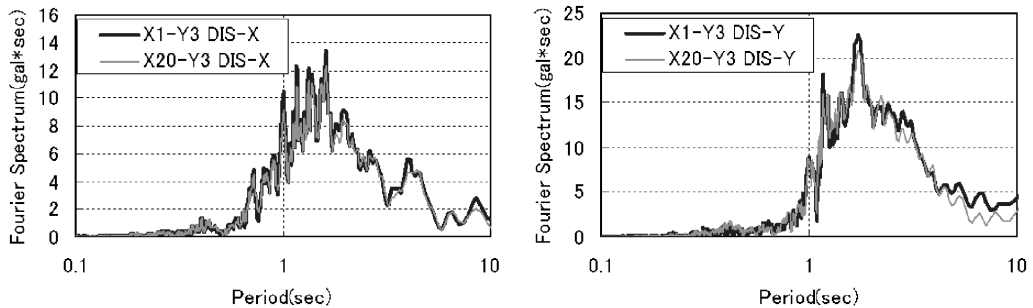


図12 免震層の変位記録のフーリエスペクトル

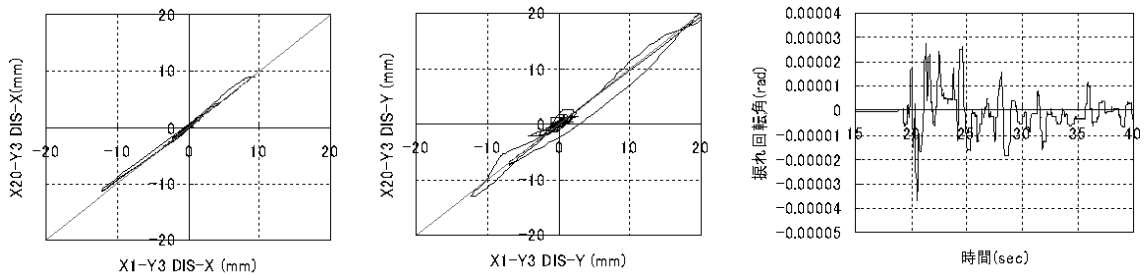


図13 建物の両端で記録された変位記録の相関と振れ角の時刻歴

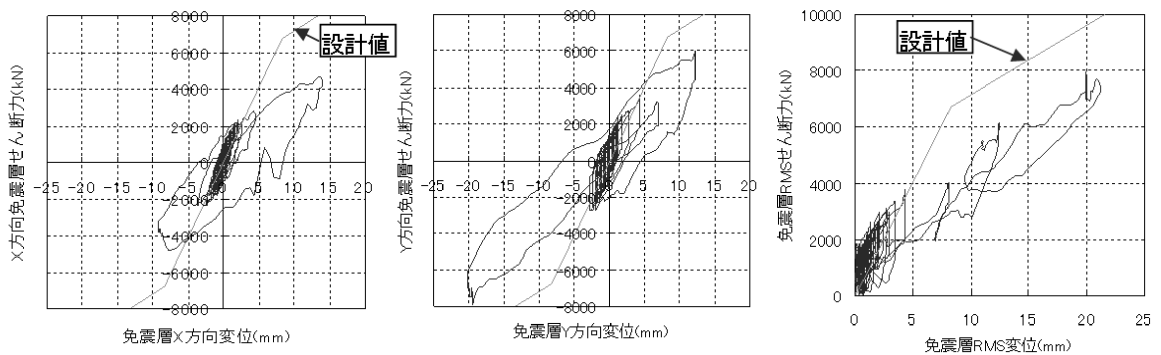


図14 推定した免震層の復元力特性

時より高いが、第1折れ点耐力は、設計値より小さな値となっている。これは、設計では、大変形時の安全性を考慮することを目標として、図15に示したように、鉛ダンパーの大変形時の繰返し挙動¹³⁾から復元力を定めているのに対し、今回の地震レベルでは、図中に破線で示した復元力を取るためだと考えられる。

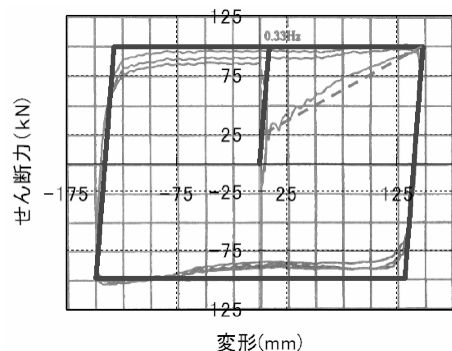


図15 設計で想定した鉛ダンパーの復元力

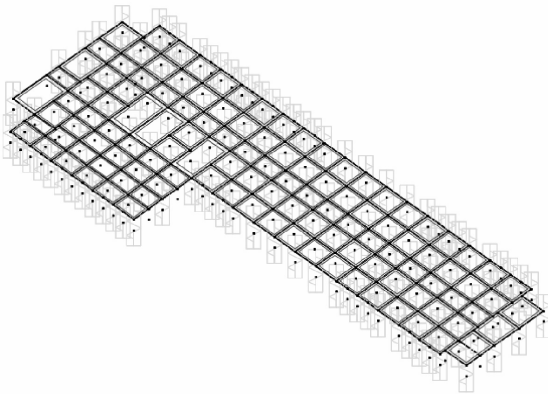


図16 解析モデル

4. 地震応答解析

計測された記録をシミュレーションするために立体弾塑性解析プログラム (RESP-T)¹⁴⁾ により動的解析を行った。解析モデルは平面的な振れ応答を検討するため、図16に示すように上部構造は剛体振動するとして、全層の重量を基礎梁フレームの各節点に集中させた。スラブの面内剛性を考慮するため、スラブ厚200mmのシアパネル要素を組み込んだ。

免震装置は4本のバネに置換したMSSモデルとした。積層ゴム600φ82基、800φ12基、鉛ダンパー24基、鋼棒ダンパー20基を図2に示した本建物の配置に準じて配置した。2基1組となっている鉛ダンパーは、2倍の剛性と耐力を持つ1基の鉛ダンパーとして設置した。免震装置の復元力特性は、設計値を参考にして表2に示す値を設定した。鉛ダンパーの復元力特性は、図15の破線となるよう設定した。

応答変位の最大値は約20mmで、鉛ダンパーは降伏し、鋼棒ダンパーは弾性であった。図17は積層ゴムD132、D4のX,Y方向の変位応答時刻歴を、図18はそのオービットを、解析値と計測値で比較したものである。

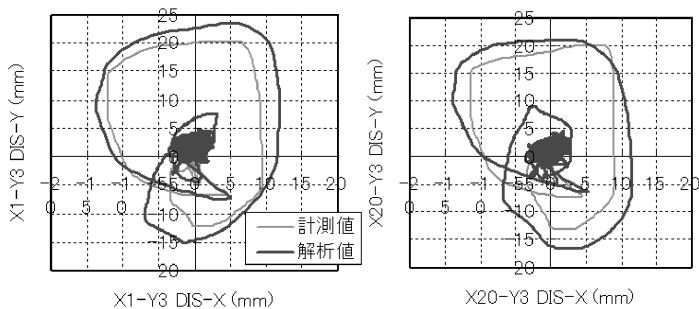


図18 解析と実測の応答変位のオービットの比較

表2 免震装置の基本特性

免震装置	外径 (mm)	初期 剛性 (kN/mm)	二次 剛性 (kN/mm)	降伏せ ん断力 (kN)	降伏 変位 (mm)
天然ゴム系	600φ	0.92	—	—	—
積層ゴム	800φ	1.23	—	—	—
鉛ダンパー		11.76	0.62	24.5	8.3
鋼棒ダンパー		7.84	0.25	254.8	32.5

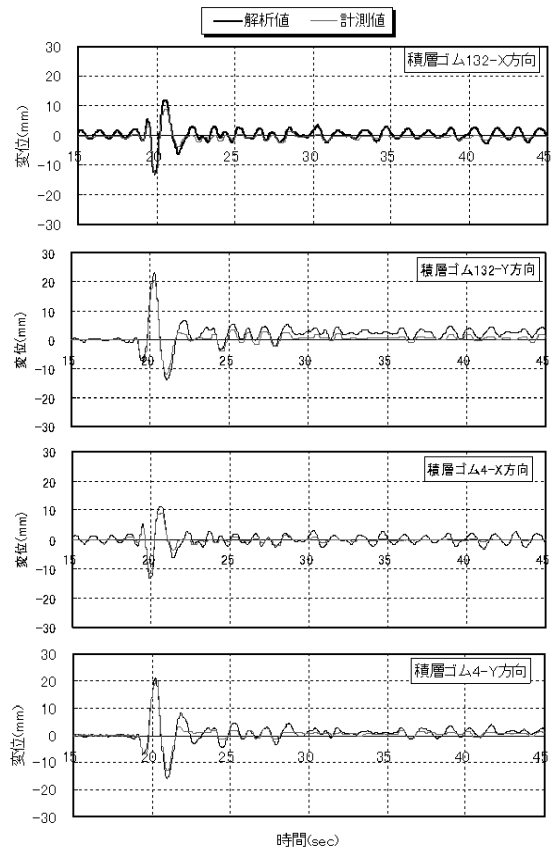


図17 解析と実測の応答変位の比較

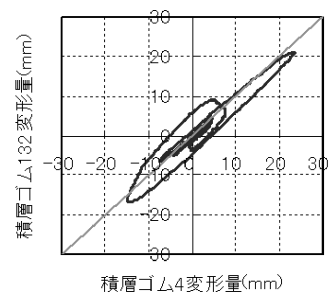


図19 解析による両端のY方向変位の相関

解析値は、最大応答変形時だけでなく、その後の小振幅時を含めて実測値とほぼ整合している。図19は両端のY方向変位をXY軸にとり、その相関を示したものである。図13に示した計測結果に比べやや太く、振れを大きく評価しているが、おおむね対応しているといえる。図20は、X 20通り側の鉛ダンパーの復元力を示したものである。せん断力は2基分の値となっている。Y方向の復元力はおおむねバイリニアの形状であるが、X方向は、XYのインターアクションによりややいびつな形状となっている。これは、図14に示した免震層の推定復元力の図にも表れている。

これらの結果より、ここで用いたモデルにより免震層の地震時挙動がシミュレーションでできることがわかったので、今後は建物両端での入力地震動の相違による影響(位相差入力)や、建物の乾燥収縮や温度変化に伴う免震装置の初期変形の影響が、建物の振れ振動にどのように影響し、耐震性能の評価にどのように関わってくるかを検討する予定である。

5. データの公開

5.1 サーバー概要

阪神淡路大震災以降、強震時の構造物の挙動や、耐震性の評価には地震動の記録が必要で、そのための十分なデータが必要であることが広く認識されるようになった。防災科学技術研究所を初めとして多くの機関で地震観測が行われるようになり、そのデータも公開されるようになってきた^{15)~17)}。これらは、基盤や地表面の観測データであり、地盤の振動と建物で記録されたデータを同時に公開している例は名古屋大学¹⁸⁾¹⁹⁾など少数しかない。今後の耐震設計の向上のためには、こうしたデータの公開が重要である。そこで、名古屋大学強震観測Webを参考に、名古屋大学大学院都市環境学専攻福和研究室よりソースの提供を受け、データ公開用サーバーを立ち上げた。サーバーには、以下のアドレスよりアクセス可能である。

<http://www.arch.kanagawa-u.ac.jp/TEDCOM/>

上記アドレスよりサーバーにアクセスすると、図21のようなページが現れ、建物データ、地盤データ、地震動記録、観測機器情報などを得ることが出来る。

4.2 内容

サーバーには、地震観測を行っている建物概要、構造概要、ボーリングデータ、構造図面、常時微動計測・起振機実験結果、強震観測概要、建物の写真など各建物の詳細なデータが示してある。以下にコンテンツのリスト

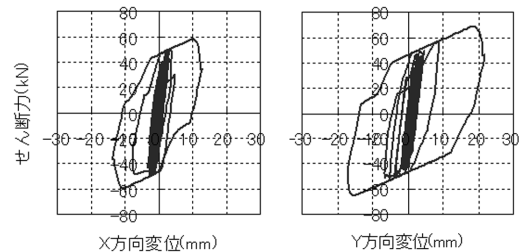


図20 鉛ダンパーのせん断力-変形関係



はじめに

兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)以降、高い耐震性能を満足させ、大震災後も引き続き使用可能な建築物の構築として地震・免震デバイスを導入した構造形式が注目されています。神奈川大学建築学科では、2000年4月より2005年3月まで「文部科学省学術プロジェクト推進拠点としてのプロジェクト「地震・台風災害の制御・低減を目的とした建物・免震デバイスの開発ならびに損傷制御設計に関する研究」と「横浜市区画共同研究センター」を研究拠点とした産官学共同研究プロジェクト「建築物における地震・台風防災に関する研究-制振・免震装置の評価-開発-」の一環として、地震や台風災害を制御・低減するプロジェクトでTEDCOMプロジェクトを結成し、研究開発を進めてきました。このなかで、制振・免震デバイスや対地震・台風シミュレーション等の幅広い分野に関する知識の結集を助として以下の4つの研究テーマを構築し、相互に連携を促しつつ、総合的成果として、損傷制御型設計法の確立を行いました。

- 研究テーマ1: 制振・免震デバイスの性能確認実験・開発
- 研究テーマ2: 実建築物の挙動観測
- 研究テーマ3: 地震・台風応答シミュレーション
- 研究テーマ4: 損傷制御型設計法

神奈川大学強震観測Webは、上記研究テーマ2において神奈川大学横浜キャンパス内で行っている、1号館と2号館の強震観測所より、神奈川大学工学研究所共同研究「平面形状の大きな免震建築物の地震時の振れ挙動に伴う挙動に関する研究」における強震観測結果を公開するものです。なお、同時に観測されている強震観測データについては、データ利用ページを御覧いただき先にご覧ください。

謝 辞
Webは 名古屋大学大学院 都市環境学専攻 福和研究室で開設されている名古屋大学強震観測Webを参考に構築した点にこの場を御礼申し上げます。

本ページはMicrosoft Internet Explorer 6.0SP2で検証しています。 update 2005/07/25

図21 地震観測公開サーバーのホームページ

No.	発生日	観測時刻	震央地名	震度	経度	緯度	深さ	規模	震源	震害	震害範囲	地震動記録	コメント
001	2005/07/23	16:25	千葉県北西部	35°34'9"	140°9'3"	73	6.0	5.0	最大震	津波	津波	-	-
015	2004/10/23	16:34	群馬県中部地方	37°21'2"	139°59'0"	9	6.3	2	観測データ	-	-	-	-
014	2004/10/23	11:56	群馬県中部地方	37°17'8"	139°52'0"	13	6.0	2	観測データ	-	-	-	-
013	2004/10/25	22:40	千葉県西部	35°59'3"	140°5'3"	66	5.7	4	観測データ	-	-	-	-
012	2004/09/25	01:49	東京都	35°32'5"	139°53'6"	51	4.4	2	観測データ	-	-	-	-
011	2004/09/06	03:23	千葉県北西部	35°35'9"	140°3'3"	75	4.6	3	観測データ	-	-	-	-
010	2004/07/17	15:10	東京都島根県	34°53'2"	140°21'3"	69	5.5	3	観測データ	-	-	-	-
009	2003/09/20	12:55	千葉県西部	35°13'1"	140°18'0"	70	5.0	4	観測データ	-	-	-	-
008	2003/09/19	15:00	千葉県北西部	35°49'2"	140°6'5"	69	4.0	3	観測データ	-	-	-	-
007	2003/05/26	16:26	宮城県北部	38°49'2"	141°39'0"	72	7.1	2	観測データ	-	-	-	-
006	2003/05/12	00:57	千葉県西部	35°52'1"	140°5'1"	47	5.3	3	観測データ	-	-	-	-
005	2003/05/10	11:46	千葉県北西部	35°49'7"	140°6'8"	70	4.6	3	観測データ	-	-	-	-
004	2002/08/14	11:43	千葉県西部	35°12'6"	139°58'6"	57	5.1	3	観測データ	-	-	-	-
003	2002/05/19	05:00	千葉県北西部	35°38'7"	140°12'7"	72	4.6	3	観測データ	-	-	-	-
002	2001/11/17	01:32	千葉県北西部	35°37'1"	140°4'7"	73	4.6	3	観測データ	-	-	-	-
001	2001/04/10	10:04	千葉県西部	35°18'4"	140°26'8"	99	4.6	3	観測データ	-	-	-	-

(※: FFTにより高周波成分を行っているだけで、データの改ざんはなされていません)

神奈川大学工学部建築学科・工学研究科建築学専攻

図22 公開中のデータ一覧

を示す。

■ホーム

☐はじめに、☐サイトマップ、☐更新履歴

■建物データ

☐はじめに、☐マップ、☐建物リスト、☐各建物データ、☐構造概要、☐写真集

■地盤データ

☐はじめに、☐敷地地盤概要、☐地質調査概要

■地震記録

☐はじめに、☐記録データ、☐ダウンロード方法

■観測機器

☐はじめに、☐Etna

■参考文献

■データ利用

☐はじめに、☐ユーザー登録、☐注意事項、☐問い合わせ

■TEDCOM

☐はじめに、☐研究概要、☐研究総括、☐発表論文

4.3 公開地震動記録

これまでに観測されたデータのうち、23号館B2階の水平最大加速度値が5 gal以上を記録したデータで、観測後およそ1年を経過したものを公開している。2005年度は、2001年度～2004年度のデータで、図22に示した15記録（2001年度：2記録・2002年度：2記録・2003年度：5記録・2004年度：6記録）を公開している。公開データは、それぞれの地震動の震源と、図23に示した波形図、図24に示したデジタルデータである。また、2005年7月23日の千葉県北西部を震源とする地震のように震度が5を超えるような地震の場合には、計測値の最大値と波形図を速報として掲載している。

6. まとめ

免震構造物はその高い耐震性と、温度と乾燥収縮によるコンクリートの変形を拘束しないという特性により、長大な構造物に適用されてきている。一方、免震構造物は、免震層において地震時の建物変形と振動エネルギーを吸収する、いわゆる静定構造に近い構造形式である。そのため、免震層の設計には細心の注意が必要である。中小規模の免震構造物については、多くの設計例や地震観測により、設計において考えなければならないこと、あまり考慮しなくてもいいことの区分が進み、設計法も一般化してきている。ところが、長大構造物においては、その実施例も少なく、設計時においても、設計者が適宜判断して安全性を確保するように努力しているが、長大

構造物であるからこそ想定しなければいけない事項については、まだ全てが設計に織り込まれているとはいえない。特に、ねじれをとまなうような振動性状については、その影響が耐震性能にどの程度の影響があるのかの評価が確立していない

このような中、実際の長大構造物である本学23号館において、平面的な挙動の長期の計測や地震時の振れ振動を含めた挙動を計測しその検討をすることと、そのデータ公表することは今後計画の進む免震長大構造物や免震人工地盤の実現性に対して貴重であるといえる。今後観測を続け、大地震時の挙動について検討、データの公開を行うことが必要である。

謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア・横浜市産官学共同研究総合プロジェクト「地震・台風災害の制御・低減に関する研究（TEDCOM）」（研究代表者：大熊武司建築学科教授）の成果を取り入れています。平面方向観測のデータ処理と解析は2004年度島崎研卒論生の加藤咲さん（現：富士ハウス）の労に負う所が大きい。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 荻本孝久、山本俊雄、栗山利男：1号館・23号館の地震時実挙動観測、地震・台風災害の制御・低減に関するシンポジウム－制振・免震構造と実挙動観測－、神奈川大学 TEDCOM プロジェクト pp.53-62, 2002.3
- 2) 栗山利男、荻本孝久：23号館の地震時実挙動観測に基づくシミュレーション－制振・免震構造と実挙動観測－、神奈川大学 TEDCOM プロジェクト pp.63-68, 2002.3
- 3) 栗山利男、山本俊雄、荻本孝久、RC造免震構造物の地震観測結果に基づく動的挙動の検討、第一回日本地震工学研究発表・討論会概要集、p.136、2001年11月
- 4) 荻本孝久、山本俊雄、栗山利男、神奈川大学23号館（免震棟）の地震時挙動 その1.地震観測システムおよび観測結果の概要、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、p.567、2002
- 5) 内山正次、安達直人、引田智樹、大熊武司、神奈川大学23号館（免震棟）の地震時挙動 その2.免震層の地震時復元力特性、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、p.5679、2002
- 6) 栗山利男、山本俊雄、荻本孝久、神奈川大学23号館（免震棟）の地震時挙動 その3.地震観測記録による動的解析結果、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、p.571、2002
- 7) 能森雅己：長大な免震建物の自己歪を拘束する免震装置の変形性状に関するクリープ解析、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、pp.757-758、2000.9
- 8) 松浦恒久、若本武三、島崎和司他：大型免震構造物における乾燥収縮の計測、「コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形」シンポジウム論文集、日本コンクリート工学協会、2001.7
- 9) 島崎和司：乾燥収縮により初期変形を受けた免震建物(LRB)の耐震性能の評価、日本建築学会構造系論文集、pp.45-51、2002.4
- 10) 中西龍二、山村一繁、西川孝夫：位相差入力考慮した構造物の動的挙動に関する研究 基礎の剛性が及ぼす影響、日本建築学会学術講演梗概集、B-2分冊、p.345 2003.9
- 11) 常木康弘、大熊武司、吉田和彦、23号館（免震校舎）の構造設計、地震・台風災害の制御・低減に関するシンポジウム－制振・免震構造と実挙動観測－、神奈川大学 TEDCOM プロジェクト pp.43-46、2002.3

- 12) 荏本孝久、神奈川大学23号館の免震構造概要、神奈川大学工学部報告、pp. 5-6、2002.3
- 13) 日本建築構造技術者協会編、応答制御構造設計法、p 317、彰国社、2000年12月
- 14) 構造計画研究所、RESP-T（3次元立体構造物の静的・動的非線形解析プログラム）
- 15) K-net、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/> 独立行政法人・防災科学技術研究所
- 16) KiK-net、<http://www.hinet.bosai.go.jp/> 独立行政法人・防災科学技術研究所
- 17) 港湾地域強震観測システム、<http://www.eq.ysk.nilim.go.jp/> 独立行政法人港湾空港技術研究所
- 18) 名古屋大学強震観測 Web、<http://sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/~smsr/higashi/> 名古屋大学大学院 都市環境学専攻 福和研究室
- 19) 小島宏章、福和伸夫、飛田潤、中野優：建物強震観測 DB 公開用 web システムの構築、建築学会技術報告集、第17号、P.553、2003年6月

共同研究

外部磁界の2次元走査法による超伝導量子干渉計の接合形状 および接合配置の最適化

中山 明芳* 穴田 哲夫** 阿部 晋***

Optimisation for shape and position of junctions in superconducting quantum interfering devices using two dimensional scanning method of external magnetic field

Akiyoshi NAKAYAMA* Tetsuo ANADA** Susumu ABE***

1. はじめに

超伝導には(i)「マイスナー効果(超伝導体内の磁束密度が零)」(ii)「直流抵抗の消滅」という著しい特徴(図1)があり、その出現は超伝導中の電子がクーパー対の状態にあるとされる。この電子の秩序状態は、オーダーパラメータと呼ばれる材料の各点各点で複素数に値をもつスカラー分布により表される状態である。(iii)「超伝導電子(クーパー対)のトンネル効果」1962年ジョセフソンは2枚の超伝導体で薄い酸化膜を挟んだサンドイッチ構造(図2)で電流が流れても電位差が生じないことを理論的に予想し、電流が流れた場合、電位差の代わりに2枚の超伝導体間にはオーダーパラメータの複素数の位相に差が生まれる。以来この構造はジョセフソン接合と呼ばれる。この現象は翌年実験的に観測されている(図3)。(iv)「超伝導量子干渉計」前項の効果は、さらに超伝導体でつながれた接合間の干渉効果となり、応用上、超伝導量子干渉計というかたちで利用される。図4に示す超伝導量子干渉計を流れる電流の和は、図5に示すようにまん中の穴に鎖交する磁束により変調される。

ジョセフソン接合は基本的に二端子の素子であり、超

伝導体/バリア/超伝導体の構造である。このジョセフソン接合を中心的な構成素子として使い、超伝導デバイ

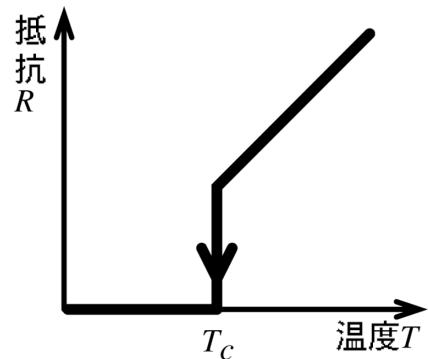


図1 超伝導体の抵抗値の温度特性

超伝導に転移する温度 T_c で、四端子法で測定した超伝導体の抵抗値は零となる。ある材料が超伝導状態になるかならないかの検証は、この直流抵抗零の現象と超伝導中で磁束密度零の「マイスナー効果」によりおこなわれる。

ス及び超伝導集積回路は、回路的に工夫することでこれまで製作されてきている。超伝導をより素子数が少なく電子回路等に応用するには、超伝導を使った新しい構造の素子が望まれる。本共同研究では、この新しい構造の超伝導エレクトロニクスを目標にした理論数値解析と実験の面からの基礎研究である。

超伝導体自体や超伝導デバイスの数値解析については、超伝導体中のオーダーパラメータ Ψ の振る舞いをギンツブルグ-ランダウ方程式により解析するのがほとんどであった¹⁾。しかし、この方法ではジョセフソン接合のトンネ

*教授，電気電子情報工学科

*Professor, Department of Electrical, Electronic and Information Engineering

**教授，電気電子情報工学科

Professor, Department of Electrical, Electronic and Information Engineering

***専任講師，電気電子情報工学科

Lecturer, Department of Electrical, Electronic and Information Engineering

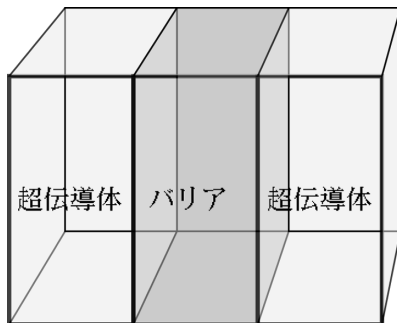


図2 超伝導体/バリア/超伝導体構造

本構造はジョセフソン接合とも呼ばれる。電流が流れてもふたつの超伝導体間に電位差は生じず、その代わりに超伝導体間のオーダパラメータの位相の差が現れる。

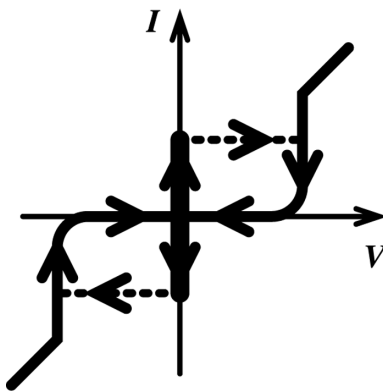


図3 超伝導体/バリア/超伝導体接合の電流電圧特性

電流 I が流れてもふたつの超伝導体間には電位差は生じず、この電流電圧特性のリサーチ図形において、 I 軸にかさなる垂直なグラフとなる。このとき超伝導体間の位相の差 ϕ と電流には、 $I = I_c \sin \phi$ の関係がある。位相の差が $\pi/2$ を越えると電位差が始めて生じ、点線で示した転移がおこる。電位差零で流しうる超伝導電流の最大値は外から加えた磁界により変えることができる。

ルバリアでの電子のトンネル効果をうまく取り込むことができない等の問題点があり、ジョセフソン接合の中で、特にトンネル型ジョセフソン接合自体の解析はあまりおこなわれてこなかった。本共同研究では、場の量子論の方法により超伝導接合およびより複雑な構造の超伝導構造の解析手法の検討をする。

実験的にも、実際にニオブウムを超伝導体電極とし、アルミニウムの酸化膜をトンネルバリアとして、超伝導デバイスを製作している。ニオブウムを使った超伝導薄膜堆積、アルミニウムの堆積とその自然酸化プロセスの最適化、及びフォトグラフィーと陽極酸化方法を使った

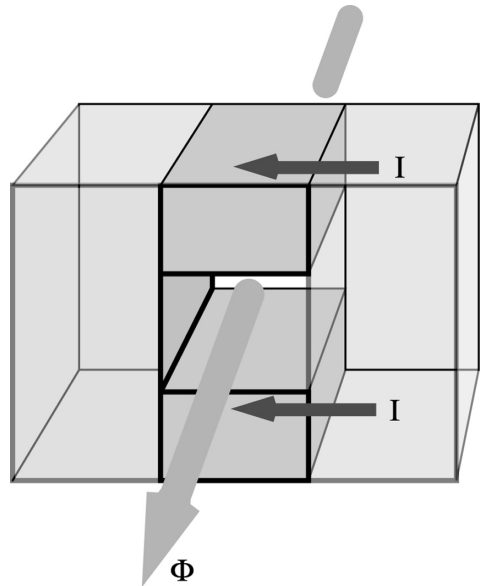


図4 超伝導量子干渉計

図2の超伝導体/バリア/超伝導体構造を超伝導体で並列に繋いだ構造である。

接合部決定プロセスの改善により、実際に超伝導素子を製作し、その基本特性を測定する。特にその中でも外部から加える磁界に対する超伝導接合の電流電圧特性と超伝導電流の特性を測定する新しい方法を開発した。この方法を使い、超伝導電流の磁界特性、特に履歴現象を観察している。また、超伝導状態を、偏光解析等の磁気光学的手法で測定できないか基本的実験をおこなっている。ここでは、神奈川大学工学研究所平成16年度共同研究のまとめとして、研究成果を以下報告する。

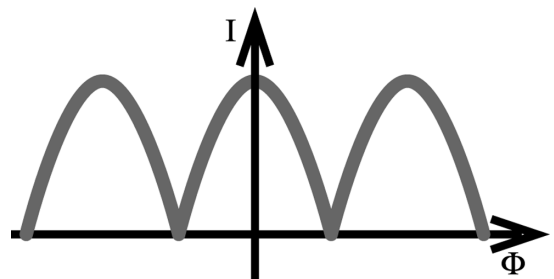


図5 超伝導量子干渉計の磁界特性

超伝導量子干渉計に流れうる最大の超伝導電流の値は干渉計の穴に鎖交する磁束に対して周期的な特性をもつ。

2. 磁束の量子化の数学的側面

超伝導デバイスの解析は、超伝導体中のオーダパラメータ Ψ の振る舞いをギンツブルグ-ランダウ方程式により解析するのがほとんどであった。この点は、拙著「超伝導エレクトロニクス入門」に詳しい。ギンツブルグ-ランダウ方程式による解析は、穴のあいていない固まりの超伝導体のエネルギー的取り扱いを得意とする。基本的には、この方法では超伝導接合の特にバリア領域での電子のトンネル効果をうまく取り込むことができない。また、穴のあいた超伝導体の磁束捕獲や量子化などの大域的な振る舞いは別途数学的に考慮する必要がある。図6, 7に示す超伝導接合での束縛状態の具体的な形はボゴリュボブデュジャンス方程式を数値解析することにより得られた。また、基本となる輪の形の超伝導体での磁束の量子化を数学的に考察した。実際の輪の超伝導体の形(S^1)に対して、複素平面上でオーダパラメータの値がとり得る空間も複素数平面で円(S^1)としてよい。これらの直積空間は、浮き袋の形である。層の考え方をを使うと、完全列として、0から整数 z の定数、実数全体 $\mathbf{R}$ 、大きさ1の複素数 S^1 を考慮すると、完全列として、写像 2π による像の定数関数 $2\pi z$ は次の写像 expi で $\text{expi } 0$ に写され、実数全体 $\mathbf{R}$ からの写像 expi は全射である。

$$0 \rightarrow \mathbf{Z} \xrightarrow{2\pi} \mathbf{R} \xrightarrow{\text{expi}} S^1 \rightarrow 0$$

すなわち、それぞれ写像について、写像の像はすぐ右の写像で0に対応する。次に、 $\mathbf{R}$ に値をとる連続関数のなす層 $C(\mathbf{R})$ 、 S^1 に値をとる連続関数のなす層 $C(S^1)$ を考慮する。 S^1 から $C(\mathbf{R})$ への連続関数のなす群を $\Gamma(S^1, C(\mathbf{R}))$ 、 S^1 から $C(S^1)$ への連続関数のなす群を $\Gamma(S^1, C(S^1))$ と表す。このとき、 expi による射 $\Gamma(S^1, C(\mathbf{R})) \rightarrow \Gamma(S^1, C(S^1))$ は全射ではなくなる。「 S^1 から $C(S^1)$ への連続関数」に対応する「 S^1 から $C(\mathbf{R})$ への関数で $2\pi z$ だけ増加する関数」があり、この増加値を 2π で割った z を対応させる関数自体を deg で定める。完全列は以下のように表される。

$$0 \rightarrow \mathbf{Z} \longrightarrow \Gamma(S^1, C(\mathbf{R})) \xrightarrow{\text{expi}} \Gamma(S^1, C(S^1)) \xrightarrow{\text{deg}} \mathbf{Z} \rightarrow 0$$

浮き袋の形の直積空間でオーダパラメータの軌跡は、このビニールの表面の閉じた軌跡となり、浮き袋の人の入る穴の周りをちょうど一周する。輪の超伝導体に n 本

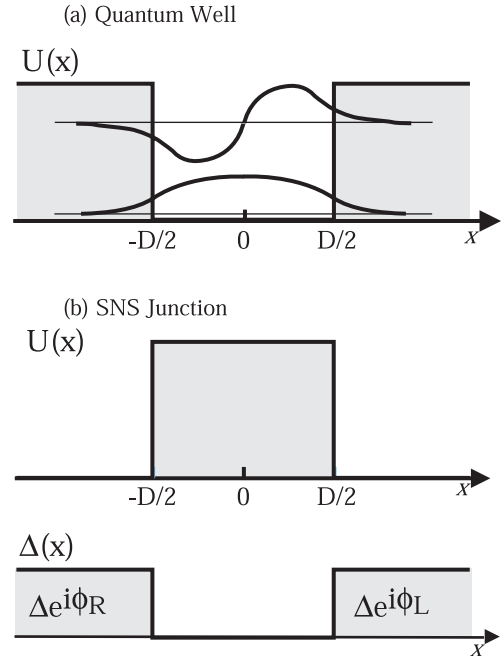
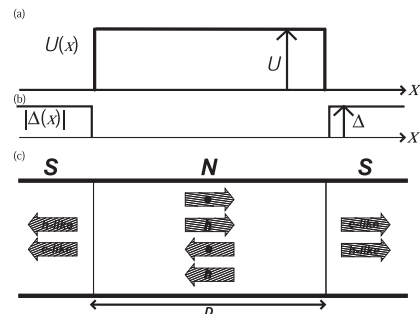


図6 超伝導体/常伝導体/超伝導体構造のハトリポテンシャル $U(x)$ とペアポテンシャル $\Delta(x)$
 $U(x)$ は山形であるが、 $\Delta(x)$ が井戸構造をもち、束縛状態が存在し得る。

磁束量子が鎖交する場合は、人の入る穴の周りを軌跡が一周する間に、同じ軌跡は空気の入る閉じた空洞の周りをちょうど n 回だけ回ることになる。 deg で定まる整数値はこの n の値に等しい。超伝導体中への磁束の取込みについては別途数学的な考察を必要とする。



ボゴリュボブ-デュジャンス方程式

$$\begin{pmatrix} H_0 & \Delta(x) \\ \Delta^*(x) & -H_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} u(x) \\ v(x) \end{pmatrix}$$

ここで、 H_0 は一電子ハミルトニアン: $H_0 = -(\hbar^2/8\pi^2m)d^2/dx^2 - \mu + U(x)$
 $\Delta(x)$: ペアポテンシャル、オーダパラメータ
 $U(x)$: ハトリポテンシャル

図7 接合の束縛状態

次の課題としては、この新しい構造特にトラス形(浮袋)についての研究である。前記した数学の完全列では量子化しか扱えない。物理的側面からは、各々の磁束量子化の状態間の遷移についての特にエネルギー的な扱い、言い換えると「なんらかのポテンシャルバリア」を越えての各々の磁束量子化状態である安定状態間の遷移が興味深い。理論的には、トラス形(浮袋)構造についてのエネルギー状態は、第一次近似では、浮き袋の閉じ込められた空気のある空間(閉じたループ状の穴)についての rf-SQUID の構造と浮き袋の中心の穴についての rf-SQUID の構造である。実験的には、現在予備実験をおこなっている真空トンネルで結ばれた集束イオンビーム装置と堆積装置により連続的に形成可能である。このトラス構造の下半分を堆積装置で形成後、集束イオンビーム装置でトラス構造の閉じた穴空間を形成、再び堆積装置に戻して、トラス構造の上半分を形成する方法がある。外部磁界を加え、また、独立にトラス構造の上半分から下半分へ電流を注入することで、実験的にこのトラスの振る舞いを検証できる。閉じた磁束の振る舞いを実験し、特に各々の独立な磁束量子化状態のエネルギーおよび磁束量子化状態間の遷移を確かめるのは、新しい課題である。

3. 素子製作と特性

超伝導接合製作のための堆積装置の構成を図8に示す。堆積用スパッタリング装置チェンバー(写真右側)と集束イオンビーム(FIB)加工装置(ベーキング用パネルの裏側に位置し、写真では見えない)は真空トンネル(写真左側で左下から右上へと斜に走るパイプ)で結ばれる。シリコンウェハーを載せた試料台は真空トンネル内ではトロッキに載せて、また、トンネルから、ニオブウムやアルミニウムの堆積用チェンバーや集束イオンビーム加工装置へはトランスファーロッドにより搬送される。この複合形装置の構成を(1)真空容器(2)試料搬送(3)試料交換入れ(4)焼き出し作業(ベーキング)(5)FIB との結合の順に述べる。

(1)真空容器：堆積装置のステンレス容器は銅ガスケツトを使用するコンフラットフランジで、150度ベーキング可能

(2)試料搬送[図の(a)参照]

真空トンネル⇄集束イオンビームエッチング室

↑↓

真空トンネル⇄アルミニウムスパッタリング室

↑↓

真空トンネル⇄予備(電子ビーム蒸着室の予定)

↑↓

真空トンネル⇄ニオブウムスパッタリング室

↑↓

ロードロック室(ターボ排気)

↑↓

外部(大気圧)

(⇄は磁気結合トランスファーロッドによる移動

↑↓は真空中トロッキによる移動)

(3)試料交換：約10リットルのロードロック室チェンバーのみ大気圧にすることにより試料交換

(4)焼き出し(ベーキング)作業：150度ベーキング

(i)高真空を得るためには、ベーキング作業が欠かせない。通常真空容器にヒーターを巻き付ける方式をとるが、本堆積装置では、全体を断熱材パネルで被うこととした。断熱材パネルの形状全体は、ひとつの大きな直方体と2つの小さな直方体の形の組み合わせと単純にしてある。堆積装置本体の耐熱温度は150度以上とする。例外は、FIB 装置、ターボポンプ、荒引きのスクロールポンプである。(ii)ターボポンプ上半分はターボポンプ専用のベーキングヒーターによる。ターボポンプ直上のアングルバルブは炉の外部にはみ出し、やむを得ずシースヒーターを使った。(iii)炉の柱を立て、炉壁の断熱パネルは柱から取り外さず、蝶番を付けた扉の構造とした。通常の薄膜堆積や酸化、加工の作業の時は扉を開けるだけである。(iv)ベーキングは、基本的に断熱パネルを閉め、150度の耐熱性のない(FIB 用磁気結合トランスファーロッドの)ロッドセンサー、把手及びベルト、トロッキ用大気側磁石等を外せば開始できる。通常の試料製作の作業からベーキング準備及びベーキング開始まで20分以下となり、ベーキングをすぐおこなえるよう基本設計した。(v)今後、ベーキング時に温度が比較的低温となる空間をできる限り少なくすることが課題である。具体的には、FIB と堆積装置間の溶接ペローズとゲートバルブ、ターボポンプ、コンビネーションポンプのチタンサブリーションのコネクタ取り出しフランジ付近である。特に、これらはメンテナンス作業でのみいじり、通常薄膜プロセス自体では触れるところではないので、アルミニウム箔等で被うことも可能である。最初に設計製作したロードロック堆積装置では、ベーキング時にパネル下部からの空気流入と上部からの熱漏れが問題となったが、この反省のもとで今回設計製作した第2世代の堆積加工装置のベーキングシステムでは結果的にこの「煙突現象」はほとんど現れなかった。(vi)ベーキングヒーターは炉の底面に置かれる。このヒーターに合計200 V 3相60 A 電力投入時も、部屋の温度上昇は10度以下であった。

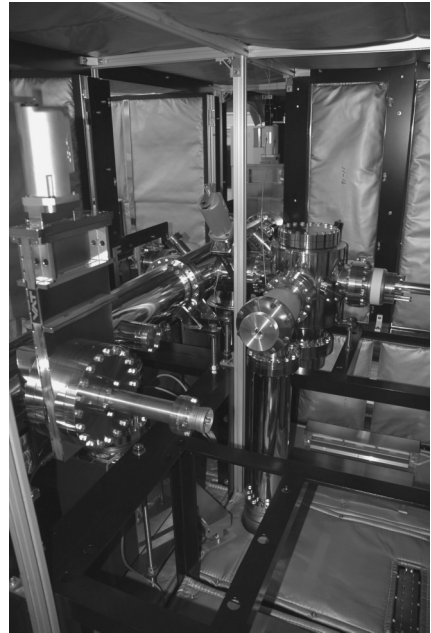
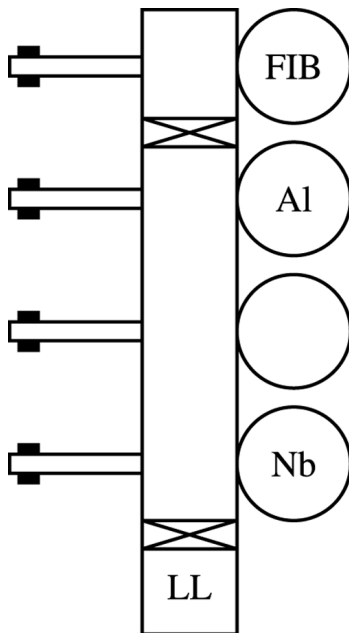


図8 真空トンネルで結ばれた堆積装置と集束イオンビーム(FIB)加工装置 (左上の構成図)試料台は真空トンネル内はトロッキで移動し、真空トンネルからアルミニウムとニオブウムのスパッタリングチェンバーや FIB 装置へはトランスファーロードにより移動。その特徴は以下である。
 (i)スパッタリングによる堆積と FIB 装置による加工、堆積、観察が連続しておこなえる。
 (ii)真空トンネルでの結合により、各堆積層間に入り込む不純物ができる限り少なくできる。
 (iii)ロードロック方式により、短時間で試料交換が可能であり、全体の高真空をやぶる必要がない。
 (iv)FIB 装置において2次元電子像観察が可能で、途中でのプロセスの検証も可能

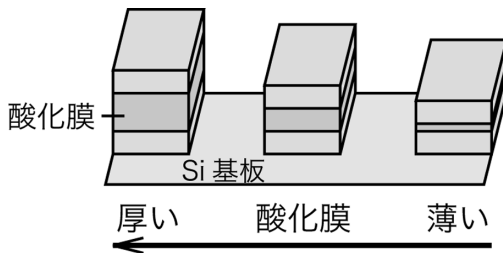


図9 多数個の素子の Si 基板上への同時製作
 このとき、素子製作の一つのパラメータの値(上の図では酸化膜の厚さ)のみを変えている。同時に多数個の素子を作ることで、変化させたパラメータ以外の製作条件をできる限り同じにできる。シャッター操作等で選んだ一つのパラメータの値を変えることができる。

145度前後7時間のベーキング後に、4台のターボポンプと4台のスクロールポンプにより 3×10^{-7} Paの到達真空度を実現できた。ペローズと FIB ゲートバルブのベーキングが充分でなく、FIB 装置へのトランスファーチェンバーの真空度の数値がやや他の場所より大きい。一度真空壁より焼出されたガスは温度の低い方へ移動するので、温度の低い壁はポンプとなり、最悪の場合、外

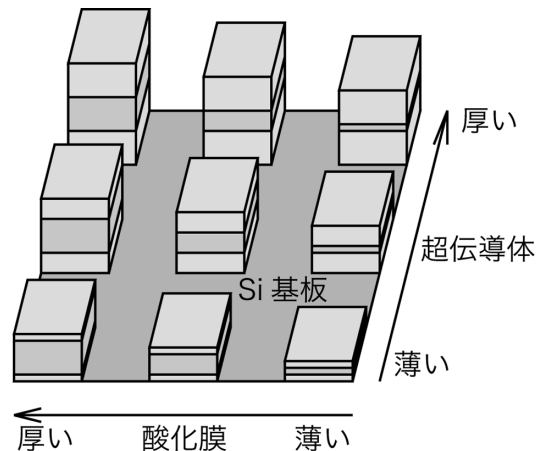


図10 多数個の素子の Si 基板上への同時製作
 素子製作プロセスの中の二つのパラメータ(上の図では酸化膜の厚さと超伝導体の厚さ)の値を縦および横方向に変えている。例えば、シャッター操作を横方向と縦方向におこなう方法等で二つのパラメータの値を変えることができる。

に排気されず炉内部での移動のみになる。ベーキング温

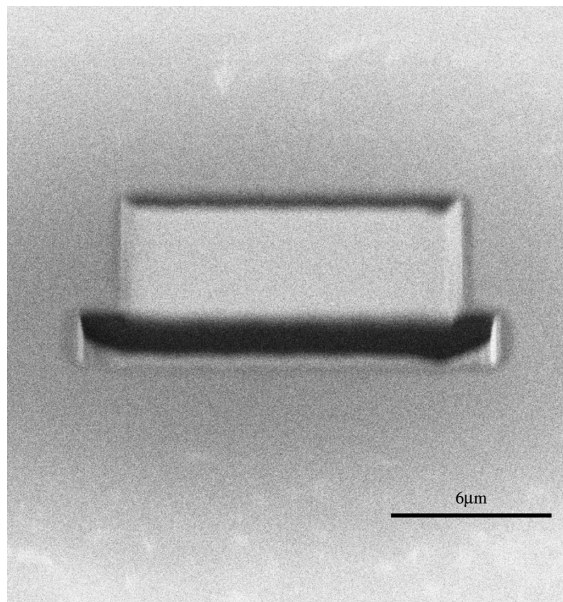


図11 集束イオンビーム(FIB)装置によるガリウムイオンでのエッチング
基板 Si, イオン電流1.2nA, 電流密度約10A/m²。手前の溝は、断面観察用にあけた窪みであり、この窪みに沿って、ほぼ0.5マイクロメートルの深さでエッチングされていることが解る。

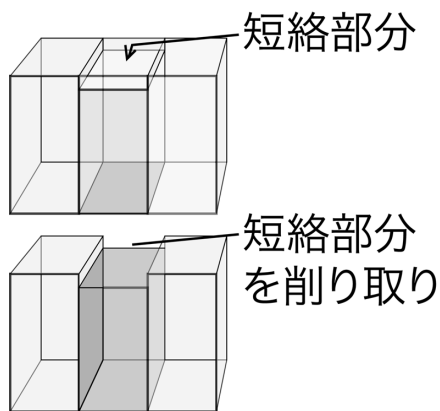


図12 超伝導構造の不良部分の除去

堆積装置と真空トンネルで結ばれた集束イオンビ(FIB)装置では加工、カーボン堆積、2次電子像観察ができる。半導体配線等で用いられる「不良部分を素子製作後修正」というプロセスも可能である。磁界特性で不良部の位置を特定し、その部分を除去し、良い特性をもつ素子を得る。

度の一様性向上の課題が残っている。

(5)堆積装置と FIB 装置との結合：磁気結合の移送ロード(1000 mm ストローク)による。試料交換で FIB 装置自体はリークせず、真空トンネルの一番奥に FIB を接

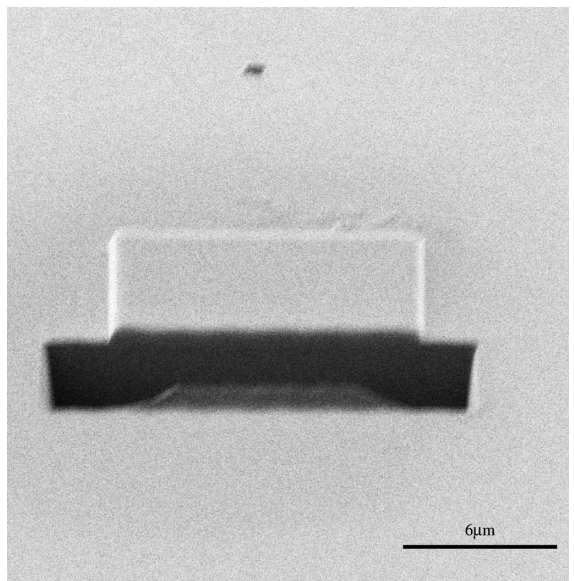


図13 FIB 装置によるカーボン薄膜の堆積

堆積条件 カーボン銃電流1.2nA 加速電圧30kV 面積縦10マイクロ横12マイクロ厚さ0.5マイクロメートル。断面観察のための手前の溝のエッチング条件電流1.2nA 面積縦4マイクロ横15マイクロ深さ3マイクロメートル、観察の条件イオン電流約30pAのGaイオン照射時の2次電子像 周辺部を含めてほぼ一様な厚さの堆積が確認できる。

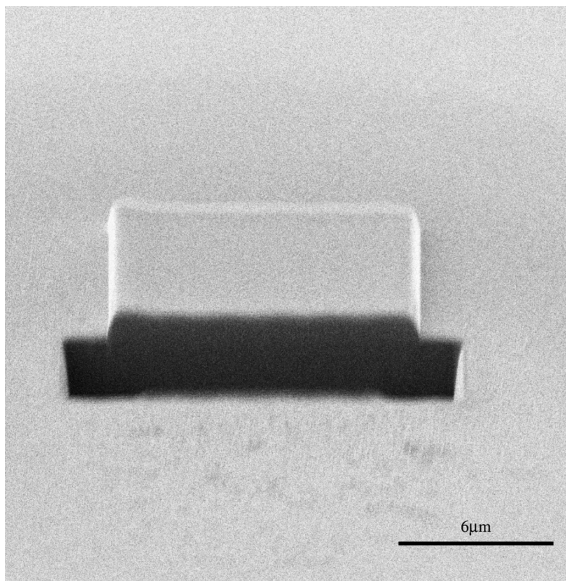


図14 FIB 装置によるカーボン薄膜の堆積

Ga イオン電流1.2nA、加速電圧30kV、カーボン薄膜の厚さ1.0マイクロメートル、面積縦10マイクロメートル横12マイクロメートル。断面観察のための手前の溝のエッチング条件 Ga イオン電流1.2nA 面積縦4マイクロメートル 横15マイクロメートル深さ3マイクロメートル。この厚さでもほぼ一様な堆積が確認できる。

続し、真空トンネルの一番手前にロードロック用の試料交換室をもつ。約10 min で 10^{-4} Pa 台に排気可能である。現在図9,10に示すように Si 基板上に多数個の素子と同時に作るプロセスを開発している。このとき、素子製作の一つのパラメータ(上の図では酸化膜の厚さ)の値のみを変えている。同時に多数個の素子を作ること、変化させたパラメータ以外の製作条件を同じにできる。シャッター操作等で一つのパラメータの値を変えることができる。

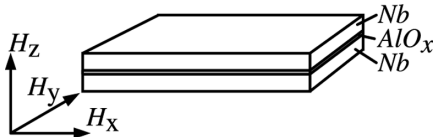


図15 Nb/AlOx/Nb ジョセフソン接合への磁界の印可
磁界 H_z は超伝導電極とバリア酸化膜に垂直方向

集束イオンビーム(FIB)装置を使った接合形成配置を検討した。図11に集束イオンビーム(FIB)装置によるガリウムイオンでのエッチング例を示す。集束イオンビーム(FIB)装置を使い、超伝導構造の不良部分を除去することで図12に示すように、半導体配線等で用いられる「不

良部分を素子製作後修正」というプロセスに応用できる。磁界特性で不良部の位置を特定し、その部分を除去し、良い特性をもつ素子を得る。図13,14には FIB 装置によるカーボン薄膜の堆積例を示す。0.5 [μ m] および 1.0 [μ m] の厚さのカーボン薄膜の様な堆積が確認でき、超伝導量子干渉計製作に応用できる。

さらに、三角形の接合を製作しその特徴的な磁界特性を図15,16に示すように実験的に確認した。磁界特性が通常正方形の形の接合の場合は、直交する二つの辺に平行な磁界に対して $\sin X/X$ のフラウンホーファーパターンである。原点の周りに90度ごとの対称性である。一般の形の接合の磁界特性は、(i)接合の上下の超伝導電極間の位相差は、加わる外部磁界の向きに対して垂直に空間変調される。(ii)空間変調の一周期の波長は、加えられた磁界の強さに反比例する。(iii) ある向きと大きさの外部磁界に対して、接合の中央の点での位相の値を一周期 2π 変えたときの最大の電流値が、その外部磁界でのジョセフソン電流の値である。

三角形の接合の磁界特性は原点の周りに60度ごとにサブピークの現れる対称性であることが数値計算の結果得られ、実験によってもこれを確認した。この特性は、通

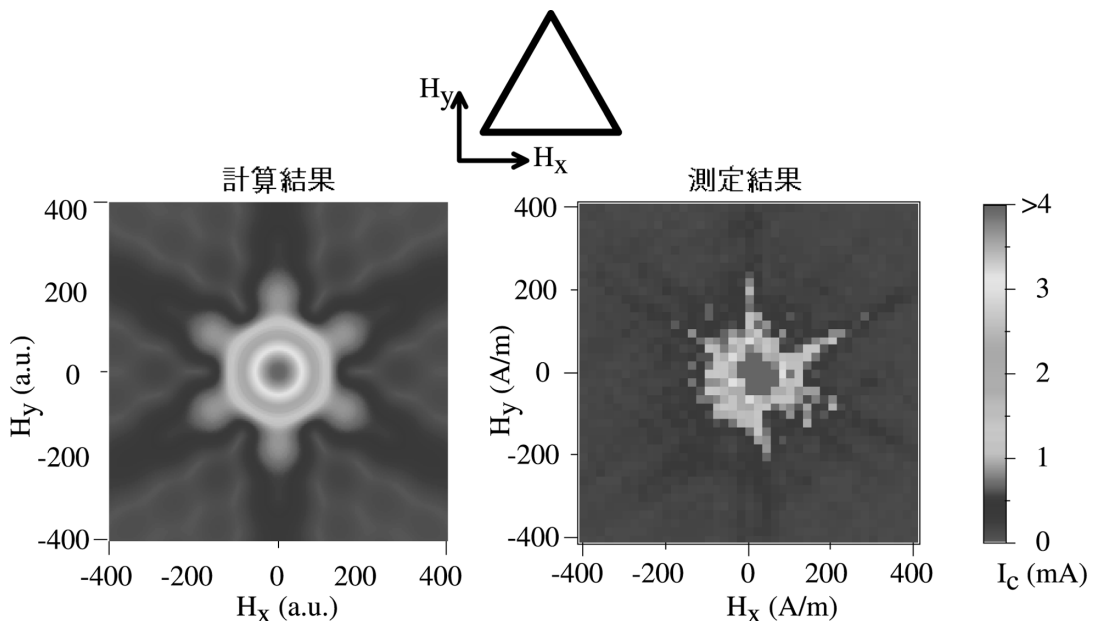


図16 三角形の接合形状をもつ超伝導接合を流れるジョセフソン電流の磁界特性酸化(膜平行磁界に対する磁界特性)左の超伝導接合の理論にもとづく数値解析の結果は、右の実験結果をほぼ説明している。サブピークは数値解析、実験とも横軸より30度及び90, 150, 210, 270度方向に現れ、数値解析結果は実験をうまく説明している。

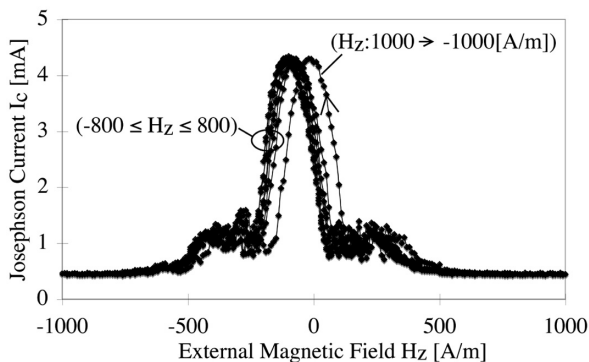


図17 超伝導接合を流れるジョセフソン電流の履歴現象
(膜垂直磁界に対する磁界特性)

接合の超伝導薄膜に対して垂直に磁界を加えた場合の特性は、一般に履歴現象を示し複雑である。垂直磁界の大きさを $\pm 800 \text{ A/m}$ 以下の範囲で変えた時には、履歴現象はほとんど観察されなかった。しかし、オフセット磁界を除いて、 $\pm 200 \text{ A/m}$ でジョセフソン電流の値は減少する。素子によりこの $\pm 200 \text{ A/m}$ の値はより大きなものになることもあり、この現象効果そのものもまだよく解っていない。外部垂直磁界を 1000 A/m から -1000 A/m に変えたとき、依存性の特性が右にずれた。接合部で 100 A/m に相当する磁界が捕獲されたと考えられる。さらに 1200 A/m 以上加えたとジョセフソン電流は零に近い値となり、復活しなかった。統一的な説明のためにはさらなる実験が必要である。

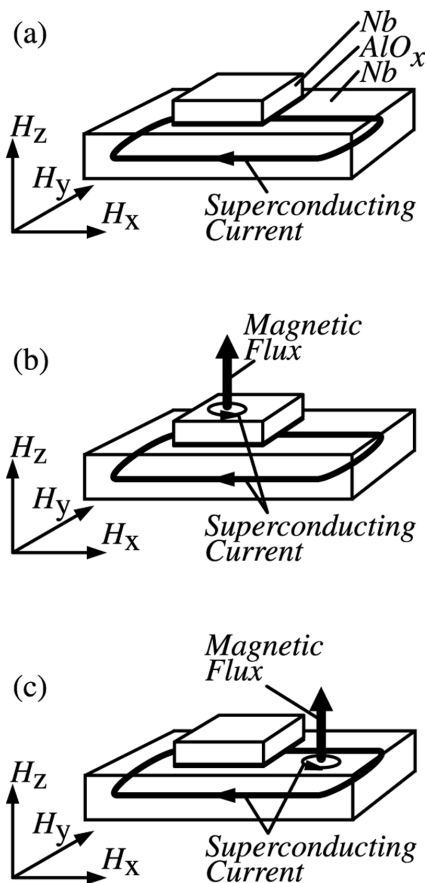


図18 超伝導接合の超伝導電極への磁束の捕獲と移動のモデル

- (a) 超伝導電極へ磁束の捕獲がない場合：薄膜の周辺部にマイスナー電流が流れ、電極の超伝導体内部の磁束密度を零にしている。
- (b) 測定している接合の超伝導電極への磁束の捕獲が生じた場合：接合そのものにおける磁束トラップは磁界特性を全く異なるものにする可能性がある。
- (c) 測定している接合から離れた場所に捕獲された磁束が移動した場合：外部磁界に対して捕獲された磁束はオフセット分を作る。

常の正方形の形の接合の場合とはまったく異なる新しい磁界特性であり、応用的にも期待できよう。

図17では、超伝導薄膜及び接合バリア酸化膜に垂直に磁界 H_z の範囲を徐々に変えた。 $\pm 200 \text{ A/m}$ から $\pm 400 \text{ A/m}$ 、 $\pm 600 \text{ A/m}$ 、 $\pm 800 \text{ A/m}$ の範囲では、ほぼジョセフソン電流の磁界依存のグラフは同じところを通る。この素子ではオフセット分を別けると、 $\pm 200 \text{ A/m}$ でジョセフソン電流が減少し、垂直磁界 H_z が $\pm 800 \text{ A/m}$ 以下の範囲でジョセフソン電流が減少し、 $\pm 800 \text{ A/m}$ の範囲の履歴が現れない範囲でもその依存性の形は $\sin X/X$ のフラウンホーファーパターンではない。この依存性はいまのところよくは解っていない。これらの現象の説明には、さらにパラメータを変えての実験が必要である。図からも解るように、磁界 H_z を 1000 A/m まで上げた後、徐々に H_z をさげる過程において依存性の曲線が $\pm 800 \text{ A/m}$ 以下の範囲の特性曲線と違うカーブを描いた。さらに H_z の大きさを 1200 A/m 以上とすると、ジョセフソン電流は $H_z=0$ の前後でも非常に小さな値となった。これらの現象は、履歴をとめない、記憶素子や論理回路素子に応用できる可能性がある。通常のジョセフソンによるジョセフソン電流の磁界による変調の記述はバリアの酸化膜に平行に磁界を加えた場合のものである。本実験ではバリアの酸化膜に垂直に磁界を加えている。ここで議論している垂直磁界依存性は、ジョセフソンの理論とは別の考察を必要とする。この垂直に磁界変調現象をまとめると、(i) ジョセフソン電流 I_c の変調はバリアの酸化膜に平行に磁界を加えた場合は $\sin X/X$ のフラウンホーファーパターンになる。(ii) ジョセフソン電流 I_c の変調は酸化膜に垂直に磁界を加えた場合は $\sin X/X$ のフラウンホーファーパターンとは特に磁界の大きい方で異なる。(ii) 酸化膜に垂直に磁界を加えた場合、特に磁界の大きい方で履歴現象を示す。電流 I_c の減少する H_z の値、および履歴現象が始まる H_z の値は

素子により若干異なるが後者は前者より大きな値となる。履歴現象が始まる H_z の値を越えるとまず、電流 I_c - H_z の特性のずれが始まり、次に I_c の減少し復活しない現象が観測される。(ii)の電流 I_c の減少するとき、図18(a)のように磁束が超伝導薄膜に捕獲されてはいないのか、図18(b),(c)のように超伝導の薄膜のどこかに磁束が捕獲されているのか検討していきたい。素子をさらに測定していくことでこの疑問は解決していくと思われる。

4. まとめ

工学研究所共同研究(平成16年度)についてのまとめの報告をおこなった。(1)超伝導デバイスの設計の基礎数値解析法を考えた。Bogoliubov-de Gennes (ボゴリューボフ・デュジャンヌ) 方程式に従う、2種類の準粒子を考え、超伝導体および常伝導体中の「2種類の準粒子の波動関数」を基に、計算機解析に適するように改良されたシミュレーション手法を検討した。(2)また、素子製作の実験と測定もおこなった。Nbを超伝導の薄膜とし、実際に単一およびダブルのバリアをもつ超伝導接合を製作し、同時に新しい加工堆積方法を研究した。超伝導デバイス製作に必要な、エッチング、超伝導層および絶縁層堆積が連続してできるようになり、その基本的なプロセス条件が得られた。素子製作測定においては、二対のヘルムホルツコイルを用い、接合に加える外部磁場を2次元的に走査し、新しい三角形接合のジョセフソン電流の二次元磁場特性を求めた。接合配置の課題は残ったが、新しい形状として、この三角形形状の素子は特異な特性を示し、新しいデバイスの可能性を示している。膜垂直磁界に対しては磁界特性は履歴現象を示し、この履歴現象も新しいデバイス応用の種となるが、現象は複雑であり、さらなる実験が求められる。以上により、共同研究の報告とする。ここにこの共同研究の機会を頂き、工学研究所および工学部に感謝する。

文献

- [1] A. Barone and G. Paterno, "Physics and Applications of the Josephson Effect," Wiley-Interscience, New York, 1982
- [2] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Tatsuyuki Morita, Makoto Iwata and Yusuke Yamamoto, "Modulation of Josephson Current of Nb Junctions by Two-Dimensional Scan of External Magnetic Field," IEEE Trans.Mag., Vol.36, No.5, pp.3511-3513, Sep., 2000
- [3] A.Nakayama, S.Abe, T.Shoji, R.Aoki, N.Watanabe, "Modulation of I-V curves of Nb single and double junctions by 2D scan of magnetic field," Physica B 329-333 2003
- [4] A.Nakayama, N.Watanabe, S.Abe, "Modulation of Current-Voltage Characteristics of Nb Single and Double Junctions by Two Dimensional Scan of the External Magnetic Field," EUCAS, 1-21, Sep. 2003

- [5] Norimichi Watanabe, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Kunimori Aizawa, "Magnetic field dependence of Josephson current by applying the external magnetic field perpendicular to the Josephson junction," MMM, HU-4 November 2004
- [6] Kunimori Aizawa, Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, "Influence of Film Thickness of Middle Nb Layer on the Superconducting Current in Double Josephson Junction," MMM HU - 5, November 2004
- [7] Norimichi WATANABE, Akiyoshi NAKAYAMA, Susumu ABE and Kunimori AIZAWA, J. Appl. Phys., Vol.97, No.10, pp.10 B 116 1-3 May 2005
- [8] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, "Magnetic field dependence of Josephson current by applying the external magnetic field perpendicular to the Josephson junction," International Superconducting Electronics Conference in Netherland, September 20 05(発表予定)
- [9] Akiyoshi Nakayama, Susumu Abe, Norimichi Watanabe, "Hexagonal Symmetry of Magnetic Field Dependence of Josephson Current Through Triangle Shape Superconducting Junctions," EUCAS in Wien, September 2005 (発表予定)

2004年度（平成16年度）工学研究所年次報告

1. 人事（運営委員）

所 長		岩田 衛	教 授
工 学 部 長		西久保忠臣	教 授
機械工学科	Δ	浦田 暎三	教 授
	*	細川 修二	専任講師
電 気 電 子	*	中山 明芳	教 授
情報工学科	Δ	山口 栄雄	助 教 授
応用化学科	*	岡本専太郎	助 教 授
	Δ	高山 俊夫	専任講師
経営工学科	*	上野 俊夫	教 授
	Δ	柏木 利介	専任講師
建 築 学 科	**	室伏 次郎	教 授
	Δ	富井 正憲	専任講師
物理学教室	Δ	立山 暢人	助 教 授
生物学教室	*	朝倉 史明	助 教 授

[注] : ** 所報27号編集委員長
 * 同編集委員
 Δ 自己点検・評価委員

2. 予 算

平成16年度の予算・決算額を表－1に示す。

表－1

(単位：千円)

業 務 項 目	予 算 額	決 算 額
本 部 運 営	2,242	1,349
大型共同設備管理運営	5,800	4,547
工学研究所共同研究*	12,495	12,320
合 計	20,537	18,216

*工学研究所共同研究内訳

共同研究代表者 予算額（千円）

中 山 教 授	5,000
島 崎 助教授	4,000
鳥 居 教 授	3,495
計	12,495

本研究所の職員 教務技術職員 萩原健司

3. 共同研究

平成16年度の工学研究所共同研究を表－2に示す。

表－2

建 築	助教授	島崎 和司	平面形状の大きな免震建物の地震時の振れ振動を伴う挙動に関する研究
建 築	教 授	荏本 孝久	
建 築	教 授	大熊 武司	
物 理	教 授	鳥居 祥二	宇宙環境におけるシンチファイバー検出器の実証化研究
物 理	助 手	田村 忠久	
学 外 者	3名		
電 気	教 授	中山 明芳	外部磁界の2次元走査法による超伝導量子干渉計の接合形状および接合配置の最適化
電 気	教 授	穴田 哲夫	
電 気	助 手	阿部 晋	

4. 講演会

『スマート建築構造』

講 師：緑川 光正 氏

独立行政法人 建築研究所 研究専門役

日 時：平成16年10月4日 16：20～17：50

場 所：16号館セレストホール

講演内容：

本講演では、スマート建築構造に関する日米共同研究を紹介する。

スマート建築構造とは、素材や構造形式などの新しい技術を積極的に応用し、建築構造自体が外部から受ける影響（荷重・外乱など）に適応して安全性や使用性などの構造性能を効果的に確保しようとするものである。

工学研究所所報 編集後記

本年もまた執筆者の皆様のご寄稿、ご協力によりまして、工学研究所所報28号を刊行することができました。編集委員を代表いたしまして、厚く御礼申し上げます。

工学研究所が工学部から独立いたしまして、初めて刊行されました所報でございます。しかしながら、最近の編集方針を踏襲し構成いたしておりまして、巻頭言、総説6編、そして共同研究の進展報告3編からなっております。是非、ご一読いただきまして、そして、活発な議論が展開されましたらば、編集に携わったものとして幸甚に存じます。

最後になりましたが、工学研究所運営委員の皆様並びに工学研究所職員の皆様のご尽力に感謝申し上げますとともに、読者の皆様ならびに所員皆様のご研究のより一層のご発展を祈念申し上げます。

(生物学教室 朝倉史明)

神奈川大学工学研究所所報執筆規程

1978年（昭和53年）2月5日
改定 1988年（昭和63年）4月13日
改定 1990年（平成2年）7月18日
改定 1991年（平成3年）5月29日
改定 1994年（平成6年）1月26日
改定 2005年（平成17年）1月27日

1. 投稿資格

投稿筆頭者は原則として神奈川大学工学部所属教職員とする。ただし原稿を編集委員が依頼する場合はこの限りではない。また連名者については制限しない。

2. 記事の種類

巻 頭 言

論 説 学問・技術・本研究所の事業・動向などに関する論説、意見。

総 合 論 文 専門の学協会などに発表された研究論文を骨子として、著者の一連の研究をまとめ、これにその分野における地位を明らかにするような解説を若干つけたもの。

共同研究報告 発足時点では [共同研究の紹介]、中間時点では [共同研究の現況]、研究終了または一段落の時点では [共同研究の成果要約] として、その現状が報告される。

総 説 総合論文と略同一性格の記事であるが、解説的色彩の強いもの。

ト ピ ッ ク ス その時々の特ピックスについての展望あるいは解説。

随 想 研究・開発などの思い出、意見、感想、経験談など。

国際交流研究 学外（国内・国外）における研究・講義・出張に関する経験談など。

特 集 その号の特集として特別記事を設けることがある。

3. 用語

用語は和文する。ただし総合論文に限り欧文でもよい。また、[英文目次] 作成のため、原稿には [英文題目] のほか [著者氏名] および [職名、所属の英語名をつける]

4. 提出期日

その年度により定める。

5. 頁数

以下の頁数はすべて [刷り上り] のものを示す。

総 合 論 文 原則として20頁以内。和文の場合は [欧文内容概要（1頁以内）]、欧文のときは [和文内容概要（1頁以内）] をつけることができる。

論 説 ・ 随 想 原則として4頁以内。

総説・トピックス・その他の記事 原則として8頁以内。

6. 原稿の書き方

原稿の書き方は、この [規定] ならびに [神奈川大学工学研究所 所報 執筆要領] による。

7. 原稿の責任と権利

掲載された論文などの内容についての責任は著者が負うものとする。またその著作権・編集出版権は [神奈川大学 工学研究所] に属する。

8. 採否

原稿の採否および分類は [神奈川大学 工学研究所 編集委員会] において行う。

9. 原稿の提出先

原稿の提出先は [神奈川大学 工学研究所 事務室] とする。そこで受領した日を原稿受付日とする。

10. その他

(1) 原稿の枚数が規定限度を超過する場合は委員会の承認を要するが、状況により超過分の実費を徴することがある。

(2) 図が印刷に不適当な場合は、専門家に依頼して書直すことがある。この場合の経費は著者負担とする。

神奈川大学工学研究所所報執筆要領

1978年（昭和53年）2月5日
改訂 1987年（昭和62年）1月13日
改訂 1990年（平成2年）7月18日
改訂 1991年（平成3年）5月29日
改訂 1994年（平成6年）1月26日

1. 原 稿

[1] 原稿の体裁

下記A, B, C, のいずれかの方法により刷り上がりを想定したレイアウトにもとづいて執筆し、2部を添えて提出する。

A, 原稿用紙[A4版白紙]ワープロ用（45行、25文字、2段）（1段も可）とする。

この用紙1枚が刷り上がり1ページに相当する。

B, 原稿用紙[B4版] ワープロ用, 手書両用（45行、25文字、2段）

この1枚が、刷り上がり1ページに相当する。

C. 原稿用紙[サイズ自由]手書き用

2200字がほぼ刷り上がり1ページに相当する。

[2] 執筆形式

[2-1] 和文の場合

(1) 文章は[口語体]とし、原則として[当用漢字][新かなづかい]を用い、用語はなるべく[文部省学術用語]による。

◇ ワープロ活用の場合

原稿用紙に直接打ち出すか、或は、別紙に打ち出したものを糊付けする。

原稿と共に、その[フロッピーデスク]を添えて提出する。

◎ 特別な指定が必要な場合には、別項[4.]の[活字の指定]を参照してこれを行う。

◇ 手書の場合

原稿用紙に[明瞭な自体]で清書する。

[手書き原稿]の場合には、必ず、原稿用紙にこの[活字の指定]を「朱書き」で行う（厳守）。

[2-2] 欧文の場合（手書きは不可）

[ダブルスペース]で、[A4版]の用紙に打ち出したものを提出する。

ワープロ活用の場合、原稿と共に、その[フロッピーデスク]を添えて提出する。

[注] 欧文の場合、次のように、活字によって各々の[文字幅]が異なっている。従って、出来上りの[体裁]は[概号]の所報の[欧文欄]を参照のこと。

大文字 [ABC]

小文字 [小幅: ijl]

[中幅: opq]

[大幅: mw]

[3] 図表の扱い

原稿用紙の図表の位置

文章中に図表を挿入する場合には、原稿用紙に相当する挿入位置を指定する。

[4] 図表の原図の体裁

縮小コピーすれば、そのまま[印刷原稿]となるように明瞭であることが条件である。

2. 記事（論説、随想、研究所年次報告をのぞく）の体裁

(1) 題目、著者名は和文、欧文併記する。

例： ベクトル値測度の積について
 山田太郎* 田中花子**
 Product of Vector Measures
 Taro YAMADA*, Hanako TANAKA**

(2) 第1頁脚注に、著者の職名、所属を和文、欧文で併記する。

例：*教授，建築学科 *Professor, Dept. of
 Architecture
 **助手，建築学科 **Research Associate,
 ditto

(3) UDC ナンバー 総合論文、共同研究報告など、他へ引用されるようなものには[UDC 番号]をつける。

(4) 図、表の見出し(Captions)はなるべく欧文とする。

(5) 参考文献 (References) はナンバー (かっこ) を付して文末に列記する。

(6) 文中の文献引用は、引用箇所文献ナンバーを[上付きかっこ]でつける。

(7) 脚注はなるべく避ける。

(8) 数式 数式はなるべく文章の[行の中]に入れない、やむを得ず挿入する場合には、次の例のような形にする。

例1〔分数式の例〕これは $(a+b) / (c+d^2)$ の形を取る。

例2〔指数式の例〕電流は $i = I \exp(-t/x)$ の形となる。

但し、文中でなく、式を別行にする場合に限り、次のように書いても良い。その結果、[上例の式]は次の形を取る。

例1〔分数式の場合〕

……その結果、これは次式の形を取る。

$$\frac{a+b}{c+d^2} \leftarrow (\text{注：原稿用紙上で3行})$$

例2〔指数式の場合〕

……その結果、電流は次式の形となる。

$$i = I e^{-(t/x)} \leftarrow (\text{注：原稿用紙上で2行})$$

(9) 特殊文字

印刷の都合上、一般に使用されていない文字や記号の使用は避ける。

また、[[添え字]の[添え字]]：例えば、[eの肩に付く文字]の[そのまたの添え字]は避ける。

例 $e^{-E_1/kT}$ は $\exp(-E_1/kT)$ などとする。

3. 引用文献の記載方法

引用文献は原則として表A、Bのように記載する。

A. 雑誌の場合

著者名	“標 題”	雑誌名	巻一 号	(発行年一 月)	p. ページ
			↓	↓	↓
			ゴチ	西暦	数字
					引用文献の 最初の頁
					余り略さず専門外でも判のように する。 (例) 日化→日本化学会誌 機論→日本機械学会論文集 Trans. ASM→Trans. Amer. Soc. Mech. Engr.
					欧文では冠詞、前置詞を除く品詞および頭字は 大文字とする。 (例) “Cavitation Bubble Collapse in a Ven- turi”
					○姓、名ともすべて記載する。また連名者もすべて記載し、 [ほか3名]などとはしない。 ○外人名は、名前は、頭文字だけとし、姓 (surname) の 前に書く。 (例) F.B. Brown, R.R.Crane and R.O. Blanchard, “……” 田部浩三, 竹下 誠, 中原幸夫, “……”

(例) 赤坂憲夫, 青山幸夫, 宮下俊夫, “広帯域増幅器の特性”, 電子通信学会誌, 52-192 (1977-8), p.1125。

E.W. Euler and R.F.Stoessel, “……”, Mech. Engg., 90-3 (1968-3), P.42.

B. 単行本の場合

著者名	“書 名”	発行所名	(発行年)	p. ページ
			↓	↓
			西暦	引用箇所のページ
				名前だけとし, [株式会社] とか [Inc.] などはつけない。
				→ (雑誌の場合と同じ)
				○原則として雑誌の場合に準じる。 ○章毎に著者が異なっているような書では, その書の引用箇所の著者名を書き, 書名の後に () を付して, その中に編集者名を ed. または編をつけて記入する。 ○ハンドブックなど編集者が多数の時は, 著者名, 編集者名も記載しない。

(例) 田部浩三, 竹下 誠, “塩酸基触媒”, 産業図書, (1976), p.1225。

[注1] 図の縮小の度合は, 上記のようにして出来上がった原稿を[所報の寸法 (B 5版)]に縮小コピーして[線の太さ, 字句の活字の大きさ等]を見れば, 直ちに判明する。

[注2] 図の原稿は, 鉛筆描きでなく, [墨入れ]が必要。

[墨入れ]を外注 (印刷所に依頼) する場合は, 所定の料金は本人負担となる。

図中の文字を[写真植字]などを利用して記入したい場合には, [相当文字]を[鉛筆]で記入しておく。

[注3] 図表原図の余白には, [下記の情報]を[鉛筆]で記入しておく。

[図表番号], [その原稿の表題 (略称でよい)],
[原稿の著者名]

[注4] 表を特に[写真製版]または[活版]で組む場合には, 別に[本文に準じた体裁]の原稿を用意する。その他は[注2]に準じる。

4. 活字の指定など

〔手書原稿〕の場合には, 必ず, 原稿用紙にこの〔活字の指定〕を〔朱書き〕で行う (厳守)。

(1) 〔文字の形態〕については, 次の指定を〔朱書〕で行う。

ゴチック → ゴチ

イタリック → イタ

立体 → 立 または タテ

但し, 次の点に注意する。

〔文中の文字〕は, 特に指定がなければ, 自動的に

[立体となる]。

従って, [ゴチ] [イタ] にしたいものだけを指定する。

〔式中の文字〕は, 特に指定がなければ自動的に [イタ] となる。

従って, [ゴチ] [立体] にしたいものだけを指定する。

(2) 〔ギリシャ文字〕は [ギ] と朱書して指定する。

例: ω ギ (オメガ)

(3) 〔添え字〕は [^ (下付き)], [V (上付き)] などの [記号 (朱書)] を用いて指定する。

例: a^{Δ} , b^{∇}

(4) 欧文で, 文字の大, 小の区別が付け難いもの (例えば, C, O, P, S, W, X など) は [大] [小] と [朱書] する。

大 小
/ /

例: C c

(5) 小数点は [.] を用い, カンマ [,] を用いない。

(6) 句読点は [,] [.] とし, [,] [.] は用いない。

(7) 諸記号の字体は次の通りとする。

(種 別)	(字 体)	(例)
数学的演算記号	立 体	$\sin, \sinh$
単位記号	立 体	cm, kg, MΩ
ベクトル量	イタゴチ	速度 V , 力 F
量 記 号	イ タ	周波数 f , 長さ l
化学記号	立 体	H ₂ O, BaTiO ₂

5. 著者校正

(1) 校正は著者に依頼するので, [校正刷り (通称: グラ刷り)] が到着後, なるべく速く (できれば2日以内) に校正を済ませて, [工学研究所 事務室] まで返送する。

(2) 校正に際しては, [原文を変更しないこと] を厳守する。

やむを得ず [変更する際には] その行内の変更にとどめ, 絶対に [行送り] をしないようにすること。
特に図面中の修正はほとんど不可能であるから, [仮原稿] の作成に当たっては十分な注意が必要である。

(3) 万一 [著者校正] 時において, 大きな [著者の責任による修正] が生じた場合には実費を徴収する。

6. 別 刷

掲載した報告に対しては, 別刷り50部を無料贈呈する。
50部を超える別刷りを希望する場合は超過分について実

費を徴する。

7. その他

〔参 考〕研究所所報の配布

刷上った所報は以下の各者に1部宛贈呈する。

- (1) 本学理事及び工学部所属教職員。
- (2) 理, 工学部を有する国内の大学またはそれに準ずる学校。
- (3) 官公庁の研究機関。
- (4) 主要の学協会。
- (5) 民間の主要研究機関。
- (6) その他委員会が認めたもの。

〔資 料〕英文用語一覧

Research Institute for Engineering	工学研究所
Science Reports Research	
Institute for Engineering	工学研究所所報
Faculty of Engineering	工学部
Department(Dept.) of:	学 科
Mechanical Engineering	機械工学
Electrical Engineering	電気工学
Applied Chemistry	応用化学
Industrial Engineering and Management	経営工学
Architectonics	建築学
Mathematics	数 学
Physics	物理学
Chemistry	化 学
Biology	生物学
Information Science	情 報
Professor	教 授
Professor Emeritus	名誉教授
Associate Professor	助教授
Lecturer	講 師
Research Associate	助 手
Technical Assistant	技術員
Graduate(M.C.)	大学院生 (博士前期課程)
Graduate(D.C.)	大学院生 (博士後期課程)
Research Student	研究生
Dean	学部長
Chairman of Dept.of……	学科主任
Abstract	概 要

注: 工学部, 助教授, 助手, 技術員, 研究生などについては種々の呼称があるが, 上記のように統一する。

印刷所に対する指定事項

1. 所報の形状

所報はB5版左綴じ、横書きとする。

2. 活字の大きさ、字数など

A. 本文が和文の場合

- (1) 本文刷り上がり1頁は、1行25字、横2段組、各段46行、計2,300字
- (2) 和文題目は14ポ、和文著者名は10ポ
- (3) 欧文題名は12ポ、欧文著者名（大文字）は9ポ。
- (4) 欧文梗概は9ポ
- (5) 本文活字は8ポ明朝体
- (6) 図、表の見出しは7ポ、ゴシック体。
- (7) 図の見出しは図の下に、表の見出しは表の上。
- (8) 参考文献及び脚注は7ポ。
- (9) 題目、著者名のため約600字分を考慮すること。
- (10) 特別記事では少し大きな活字を用いることもある。

B. 本文が欧文の場合

- (1) 本文刷り1頁は、1行約8～9語、横2段組、

各段45行、計750～800語。

- (2) 欧文題目は14ポ。欧文著者名（大文字）は10ポ。
- (3) 和文題目は12ポ。和文著者名は10ポ。
- (4) 和文梗概は8ポ
- (5) 本文活字は9ポ
- (6) 図、表の見出しの活字の大きさ、配置はAに同じ。
- (7) 脚注は7ポ
- (8) 題目、著者名のため約200語分を考慮する。

その他の共通事項

- (1) 本文の各節、小項目の見出しはゴシック体。
- (2) 本文中に引用する図番、表番などはゴシック体。
- (3) 第1頁を除く各頁上の柱は7ポ。
- (4) 左頁柱は、神奈川県大学工学研究所所報第 号、19 年 月とする。
- (5) 右頁柱は表題名（長い場合は略題名）とする。

活字の大きさ	所報の場合の使用例
14ポイント 9ポイント 8ポイント	和文題目 各章・節・小見出し（ゴシック） 本文（明朝体）

工学研究所 所報 (No.28)

工学研究所所長 岩田 衛

工学研究所 所報 編集委員会

委員長 朝倉 史明 (生物教室)
副委員長 浦田 瑛三 (機械工学科)
委員 中山 明芳 (電気電子情報工学科)
岡本専太郎 (応用化学科)
瀬古沢昭治 (経営工学科)
室伏 次郎 (建築学科)

SCIENCE REPORTS (No.28) of Research Institute for Engineering (KANAGAWA University)

Director of the Institute	Mamoru IWATA	
Chief Editor	Fumiaki ASAKURA	(Dept. of Biology)
Deputy Editor	Eeizo URATA	(Dept. of Mechanical)
Editor	Akiyoshi NAKAYAMA	(Dept. of Electrical Engineering)
	Sentaro OKAMOTO	(Dept. of Applied Chemistry)
	Teruji SEKOZAWA	(Dept. of Industrial Engineering and Management)
	Jiro MUROFUSHI	(Dept. of Architectonics)

神奈川大学工学研究所所報第28号

2005年11月 日 印 刷

2005年11月 日 発 行

編集兼発行者 神奈川大学工学研究所
〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3丁目27番

印刷者 長谷川 泰弘
〒210-0866 川崎市川崎区水江町5番5号

印刷所 JFEジーエス株式会社

RESEARCH INSTITUTE FOR ENGINEERING
KANAGAWA UNIVERSITY
3-27 Rokkakubashi, kanagawa-ku, Yokohama, 221-8686, Japan

