



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## 室蘭工業大学研究報告. 理工編 第40号 全1冊

メタデータ	言語: eng 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/2780">http://hdl.handle.net/10258/2780</a>

(ISSN 0580 - 2415)  
(CODEN : MKDKBC)

室 蘭 工 業 大 学  
研 究 報 告

理 工 編

第 40 号  
平成 2 年 11 月

---

MEMOIRS

OF

THE MURORAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Science and Engineering

---

---

NO.40

Nov.,1990

---

---

MURORAN HOKKAIDO

JAPAN

## Editing Committee

T. Arakawa	Prof.	<i>Chief Librarian</i>
K. Saito	Prof.	<i>Civil Engineering and Architecture</i>
H. Hanaoka	Prof.	<i>Mechanical System Engineering</i>
A. Nishitsuzi	Prof.	<i>Computer Science and Systems Engineering</i>
J. Nanjo	Asst. Prof.	<i>Electrical and Electronic Engineering</i>
S. Nagata	Asst. Prof.	<i>Materials Science and Engineering</i>
T. Kenjo	Prof.	<i>Applied Chemistry</i>
Y. Baba	Asst. Prof.	<i>Literature</i>
K. Yokota	Prof.	<i>Science</i>

---

All communications regarding the memoirs should be addressed to the chairman of the committee.

These publications are issued at irregular intervals. They consist of two parts, Science and Engineering and Cultural Science.

理 工 編

目 次

Statistical Analyses on the Collisions with Roadside Obstacles and Development of Roadside Hazard Model .....	齐 藤 和 夫 柁 谷 有 三 石 井 憲 一	1
地下の熱環境の利用に関する研究の開発 (主に貯雪氷施設と関連して) .....	媚 山 政 良 齐 藤 紘 凶 岸 浪 亮 機 横 田 亮 泰 則 渡 辺 泰 文	15
反射シートによる太陽光の集熱、採取に関する研究.....	媚 山 政 良 松 本 尚 雄 谷 藤 耕 二 山 本 司 諸 橋 聡	35
密閉管内水の凍結圧力と表面熱伝達の関係.....	齐 藤 凶	47
非定常細線加熱法による混合物質の熱伝導率測定.....	戸 倉 郁 夫 齐 藤 紘 凶 岸 浪 亮 機 竹 川 佳 樹	63
ねじ締結体における内力係数の簡単な求め方.....	田 中 稔 北 郷 薫	75
強磁性非晶質合金の結晶化過程における $\alpha$ -Fe の析出量を磁気 モーメントの変化量から求める試み：Fe <sub>78</sub> B <sub>13</sub> Si <sub>9</sub> の場合.....	永 田 正 一 藤 田 英 司 戎 修 二 谷 口 哲	85
メカニカルアロイング法による Fe - Ti 混合粉末の合金化挙動 .....	平 井 伸 治 小 澤 正 義 桃 野 正 博 片 山	95
学術研究発表集録 (平 1. 4. 1~平 2. 3. 31) .....		105

# Statistical Analyses on the Collisions with Roadside Obstacles and Development of Roadside Hazard Model

Kazuo SAITO \*, Yuzo MASUYA \*\* and Kennichi ISHII \*\*\*

## Abstract

Single-vehicle accidents, especially collisions with roadside hazards are a major highway safety problem in many countries. Accident statistics indicate that the probability of occupant fatality in these accidents is significantly higher than most other accident types. However, this problem has been paid little attention in the highway safety research in Japan.

In this paper, therefore, some attempts are made to identify the magnitude and nature of the problem by reviewing the findings of recent studies in many countries, to perform some statistical analyses on the collisions with roadside objects in Hokkaido, and to develop a simple roadside hazard model for estimating the hazard for particular roadside object.

A limit study on the roadside accidents in Hokkaido reveals that nearly two-third of the fatalities are caused by a striking a utility pole and a longitudinal guardrail. The effects of alignment on roadside accidents and departure location are defined. In discriminant analysis, it is found that the most important factor contributed to the fatal accident potential is an impact speed, and the second contributor is the kind of vehicle. Based on the results, logit model is developed for estimating the probability of fatal accident in roadside impacts.

The simple roadside hazard model is developed for the conditions that vehicles will encroach to the left-side and collide with particular object on a tangent section of two-lane highway. This model consists of accident model, encroachment model and fatal probability model. This model is applied for the simulation in case of electric pole and the results suggest that an estimated accident rate is almost similar to an actual one in National highway system in Hokkaido.

## 1. Introduction

Single-vehicle accidents, especially collisions with roadside hazards involving "man-made" objects, are a major highway safety problem in many countries. The typical roadside contains many features that are potentially hazardous to encroaching vehicles and their occupants. The problem increases with growing traffic volumes and increasing man-made or planted objects such as fences, lighting standards, utility poles, bridge abutments and trees.

---

\* Professor, Department of Civil Engineering & Architecture, Muroran Institute of Technology, Muroran, Hokkaido, Japan 050

\*\* Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tomakomai National College of Technology, Tomakomai, Hokkaido, Japan 059-12

\*\*\* Graduate Student of Doctoral Course, Muroran Institute of Technology, Muroran, Hokkaido, Japan 050

Highways, however, cannot expect to exist in a vacuum. They are an integral part of any highways and many roadside objects are needed for the control, management and aesthetic enhancement of the highway and its traffic. On the other hand, it is desirable to provide a roadside clear zone for stopping of encroached vehicle. The run-off-the-road type accident resulting in a collision with a fixed object is an expression of the conflict of problem which results from this conflicting requirements.

Accidents involving fixed roadside objects, as compared with other types of traffic accidents, involve not only the responsibility of the driver, but also that of the highway and traffic engineer. Despite the importance of the problem, this type of accidents has been paid little attention in the highway safety research and has not been studied on their highway-related aspects in Japan. The lack of the study is probably attributable in part of traditional beliefs that single-vehicle are the fault of the driver rather than the roadway. As a consequence, engineers have remained complacent with respect to their responsibilities for this type of accident, and have justified their inaction on the assumption that appropriate remedial action is beyond their control.

In this study, therefore, it was attempted to make a comprehensive study on the collisions with roadside objects in Hokkaido Prefecture, Japan. Based on the findings of the study, it was also attempted to develop a simple roadside hazard model for evaluating the risk of roadside objects.

## 2. An Overview of The Problems

The fact that collisions with fixed roadside hazards are more severe than most other accident types has been a well-established finding of accident research and investigation in many countries. For example, a report of OECD Road Research Group in 1975 showed an accident statistics of OECD Member countries that approximately 10–20 percent of all persons killed in traffic accidents are victims of roadside obstacles, and synthesized the research on roadside obstacles [1]. A "Fixed Roadside Hazards Symposium" was held in 1977 in Australia to emphasize the problems and suggest possible means of overcoming the increasing trend in the number and severity of run-off-the-road type accidents [2]. More recently, Mc Carthy [3] indicated the importance of the problem by examination of the traffic fatality distribution in the United States for 1984 by most harmful event that on all highways, over 36 percent of the fatalities were caused by striking roadside objects such as trees, poles, and embankments. Similarly, a roadside object was judged to be most harmful event in 47 percent of the fatalities on the Interstate System. Similar problem in Japan is illustrated in Fig. 1, which shows the distributions of all personal-injury accidents and fatal accidents in 1985 [4]. The serious consequences of single-vehicle accidents is shown in this figure

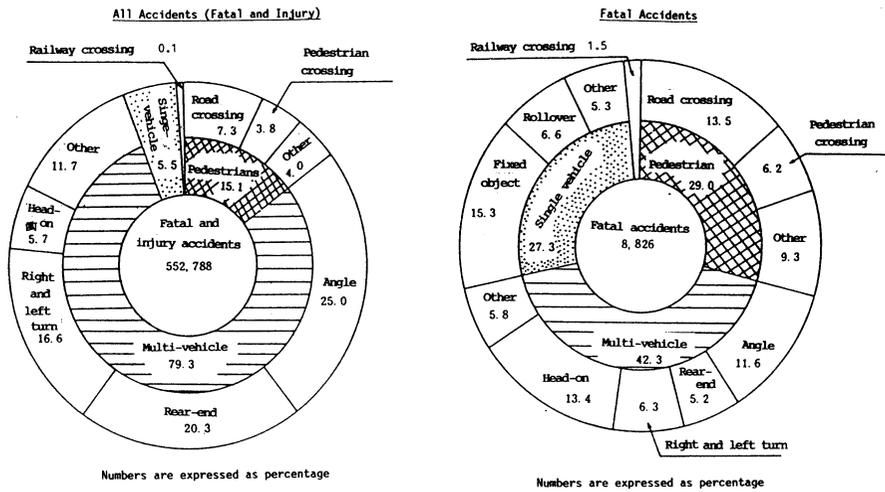


Fig. 1 Percentage Distribution of Accidents by Type

that over 27 percent of fatal accidents were caused by single vehicle accidents which were only in 5.5 percent of all personal-injury accidents. Furthermore, an examination of fatal single-vehicle accident reveals that 56 percent were caused by collisions with fixed objects and 24 percent were caused by vehicle rollover. Clearly, single-vehicle accidents represent a major highway safety problem with massive social costs.

A number of studies have sought to investigate the characteristics of roadside accident. Pioneering studies of roadside encroachments and accidents were conducted by General Motors [5]. A study conducted by Wright and Robertson [6, 7] analyzed more than 300 fatal accidents in Georgia which involved roadside objects to determine correlating conditions within 528 feet of the collision site. It was found that over one-half of the collisions with roadside objects occurred at or near horizontal curves greater than six degrees. Hall et al. [8] also studied the nature of single-vehicle accidents involving fixed objects along the roadside and found that these accidents occurred most frequently during darkness and / or on horizontal curves. Hutchinson and Kennedy [9] studied the problem of roadway departures; they investigated vehicle encroachment into median areas and developed distributions for angular departure from the roadway. Perchonok et al. [10] reviewed accidents on divided and undivided roadways according to many aspects of alignment. They found there was a pronounced tendency for vehicles to depart the right side of the road. A reasonable explanation is that if a vehicle leaves the travel lane to the left, the adjacent lane often provides room for recovery. Many findings of these and another studies are summarized by Tignor et al. [11].

The most desirable roadside is one that is relatively flat and free of obstacles. If ample recovery room is provided, the errant vehicle driver may be able to return to the travelway or stop safely. Therefore, eliminating all roadside hazards is the most desirable alternative. If it is impossible to eliminate, next would be to move objects further from travelway. If it is unable to be removed or relocated, then it may be necessary to make objects breakway or to shield them [12]. Ideally, every alternative engineering solution to every fixed roadside hazard should be evaluated in order to determine the best solution. Glennon [13] suggested an evaluation procedure based on a detailed inventory of every roadside hazard along a particular route and evaluation of a number of engineering solutions relating to that hazard. Koike [14] reported the development and application of the Roadside Hazard Simulation Model (RHMS) which was developed in Canada for comparing roadside designs and obstacles.

Cost-effective treatment for roadside hazards require warranting criteria based upon accident and/or encroachment models and an effectiveness estimate of the planned countermeasure. That is, to quantify the expected benefits of a safety improvement, estimates are needed as to the expected number and type of vehicle impacts with the roadside object. To develop warrants for the roadside object, the encroachment or run-off-the-road accident rate and type must be defined as a function of highway geometry and traffic distribution. As a minimum, these data should include vehicle speed, vehicle departure angle, and the lateral distance traveled from the edge of the roadway [3].

Based on an overview of the problems described here, it is emphasized that there has been an intensive effort to make the roadside of highways more safely, but much is still to be done both in design concepts and implementations. It is also emphasized that more information on the road user, vehicular and highway environmental factors contributed to roadside accidents would be internationally provided. Another emphasized is a need for development of roadside hazard model to evaluate the risk of roadside objects and to estimate an expected benefit of a safety improvement.

### 3. Analysis of The Characteristics of Roadside Accidents

In order to determine characteristics of personal-injury roadside accidents, the study was designed to compare fixed object accident and rollover accident in Hokkaido for 1983 and 1985. A number of accidents analyzed and their severity are illustrated in

**Table 1** A Number of Accidents Analyzed and Their Severity

<u>Severity</u>	<u>Fixed Object Accident</u>		<u>Rollover Accident</u>	
	<u>Accidents</u>	<u>Persons</u>	<u>Accidents</u>	<u>Persons</u>
Fatal	182	202	133	139
Serious	263	367	249	350
Light	472	918	452	977
Total	917	1487	834	1359

Table 1. The percentage of fatal accident is 19.8 for fixed object accidents and 15.9 for rollover accidents. Table 2 shows distribution of accidents killed persons by type of objects. It reveals that nearly one-third of the fatalities were caused by a vehicle striking a utility pole and another one-third were caused by a vehicle striking a longitudinal gurdrail.

The effect of alignment on accident occurrence was also studied. The result is illustrated in Table 3, which shows higher percentage of right curve accidents than left curve accidents and also shows higher percentage of downgrade accidents than upgrade accidents. Because it can be assumed that right and left curves experience equal vehicular travel, this implies 43 percent higher accident rates for right curves than for left curves.

Similarly, because upgrades should have as much vehicular travel as downgrades, the accidents rate for downgrades is almost 100 percent higher than for upgrades. Fig. 2 shows the departure locations by horizontal alignment. It can be found in this figure a pronounced tendency for vehicles to depart the left side of the road (vehicle travels left side in Japan).

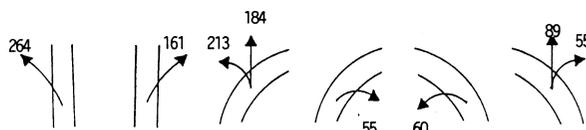
An impact speed would be a major factor for determining the severity of an accident. Therefore, it is attempted to compare an estimated impact speed and fatality rate which is defined as a number of killed persons per 100-accident. Table 4

**Table 2** The Distribution of Accident and Persons Killed by Type of Fixed Objects

Type of Object	Accidents	Persons Killed
Electric Pole	318	63
Guard Rail	225	63
Bridge/Bridge Rail	97	22
Wall/House	62	6
Sign Pole	32	5
Median/Safety Island	24	7
Other	159	36
Total	917	202

**Table 3** Accident Frequencies for Vertical and Horizontal Alignment

Vertical Alignment	Horizontal Alignment	Fixed Object Accident		Rollover Accidents	
		Accidents	Percent	Accidents	Percent
Upgrade	Right Curve	18	2.0	30	3.6
	Left Curve	13	1.4	15	1.8
	Tangent	29	3.2	18	2.2
Downgrade	Right Curve	57	6.2	61	7.3
	Left Curve	32	3.5	39	4.7
	Tangent	32	3.5	31	3.7
Level	Right Curve	165	18.0	165	19.8
	Left Curve	112	12.2	135	16.2
	Tangent	475	49.8	341	40.8
Other		2	0.2		
Total		917	100.0	834	100.0



**Fig. 2** Departure Location and Accident Frequencies by Horizontal Alignment

shows a distribution of fatality rate by two types of accident, fixed object accidents and rollover accidents. It can be seen from this table that the fatality rate increases rapidly as an impact speed increases and tendency pronounces for fixed object accidents, especially for guardrail and median impacts.

**Table 4** The Distribution of Fatality Rate by Type of Accidents and Impact Speed

Estimated Impact Speed	Fatality Rate (Persons Killed/100-Accident)	
	Fixed Object Accident	Pollover Accident
Under 40 km/h	6.7	11.8
40 - 60 km/h	9.6	8.0
60 - 80 km/h	23.6	16.1
80 - 100 km/h	53.5	28.9
Over 100 km/h	87.2	54.3

#### 4. Development of Model for Estimating The Probability of Fatal Accident

The purpose of the analysis in this section is to develop a model for estimating of the probability of driver fatality as a function of contributing factors in fixed object accidents. For this purpose, two kind of analyses were attempted, one was a discriminant analysis and the other was logistic regression analysis.

##### 4.1 Discriminant Analysis of Roadside Accidents

A discriminant analysis is a statistical procedure and is used when statistically distinguishing among two or more populations which are (1) defined as being different in some manner; and (2) described by a multitude of independent variables. In concept, a road safety researcher applying discriminant analysis wants to know what it is that makes the accident-related populations different [15, 16].

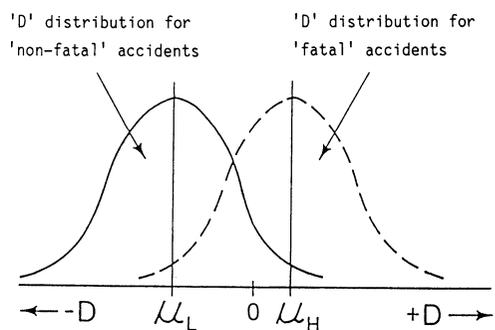
Discriminant function used in this analysis was a quantification theory type II which was developed for use of categorized data (qualitative data) in the factor analysis as following:

$$D = b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

where; D = a non-dimensional "discriminant score"

b<sub>i</sub>'s = weighting constant (category score) for each category of a given variable

x<sub>i</sub>'s = categorized values (to be assign 1



$\mu_L$  and  $\mu_H$  are the mean 'D' scores for the distributions of non-fatal and fatal accidents

**Fig. 3** Conceptual Discriminant Score Relationship for Non-Fatal and Fatal Accident Populations

or 0 for each category) of the variables selected in the analysis

Two populations, fatal injury accidents and non-fatal injury accidents, were used to know which of the many driver-related, vehicular, geometric and environmental variables best described propensity to be a fatal injury accident or non-fatal injury accident. Fig. 3 shows, in concept, D scores for fatal injury accidents would be similar, and significantly different from the D scores for the non-fatal injury accidents. In the analysis, the weighting coefficients of discriminant function are statistically determined as such a manner that the discrimination of two populations would be maximized. The results of an analysis are illustrated in Table 5 which summarizes the absolute values of partial correlation coefficient for each variable. Evaluation of the results shows that estimated impact speed is the most important factor to be contributed to the fatal accident potential in fixed object crashes. The second contributor to the fatal accident potential is kind of vehicle which may relate to vehicle weight, the third contributor is driver's age.

**Table 5** The Absolute Values of Partial Correlation Coefficient for Each Variable

<u>Variable</u>	<u>Partial Correlation Coeff.</u>
Month of Year	0.050
Time of the Day	0.136
Weather	0.028
Type of Road	0.076
Age of Driver	0.176
Road Surface Conditions	0.005
Geographical Features	0.073
Alignment	0.071
Width of Travelway	0.066
Kind of Vehicle	0.288
Type of Accident	0.058
Estimated Impact Speed	0.437
Driving Experience	0.143
Departure Location	0.117

#### 4.2 Logistic Model of the Probability of Fatal Accident

Based on the results of this analysis, it was attempted to develop a model to estimate the probability of fatal accident as a function of impact speed and vehicle weight (more precisely, exhaust capacity of engine as an alternative of vehicle weight). In this analysis, the driver injury was treated as a discrete, binary variable; fatal injury (=1) and non-fatal injury (=0). Impact speed and exhaust capacity were treated as a continuous variable. In order to obtain the probability of driver fatality as a function of impact speed and exhaust capacity, standard logistic regression procedures were used [17]. Equations of the following form were then generated:

$$P = \exp(a + b_1 x_1 + b_2 x_2) / [1 + \exp(a + b_1 x_1 + b_2 x_2)]$$

where : P = probability of driver fatality

$x_1$  = impact speed

$x_2$  = exhaust capacity of vehicle engine

a and b's = regression coefficients

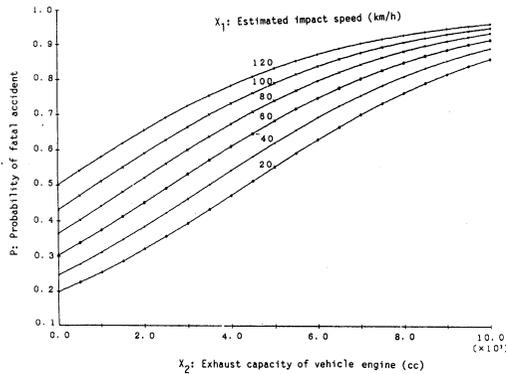
Maximum likelihood estimates of a,  $b_1$  and  $b_2$  were obtained for rollover accidents and three

types of roadside objects; electrical poles, guard rails, and bridges rails, as shown in Table 6. Except the case of bridges and bridge rails,  $b_1$  and  $b_2$  are positive and this imply that the probability of driver fatality becomes higher as the impact speed and exhaust capacity of vehicle engine increase, as shown in Fig.

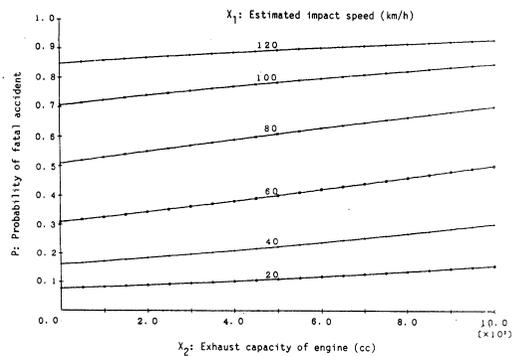
**Table 6** The coefficients of Logit Model Determined

Type of Accident	Coefficients of Logit Model		
	a	$b_1$	$b_2$
Fixed Object			
Electric Pole	-3.32535	0.04157	0.00008
Gurd Rail	-4.84979	0.05419	0.00025
Bridge	-1.65547	0.03014	-0.00018
Rollover	-1.67348	0.01404	0.00032

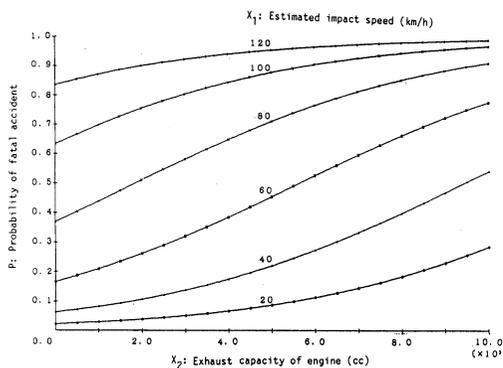
4 for rollover accidents, in Fig.5 for electrical poles, and in Fig. 6 for guard rails. In case of bridge and bridge rails, however, the coefficient of  $b_2$  is negative and then the curve of probability



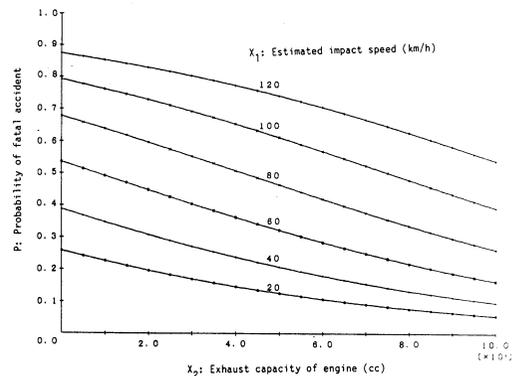
**Fig. 4** Probability of Fatal Accident in Rollover Accidents



**Fig. 5** Probability of Fatal Accident in Collisions with Electric Poles



**Fig. 6** Probability of Fatal Accident in Collisions with Gurd Rails



**Fig. 7** Probability of Fatal Accident in Collisions with Bridge / Bridge rails

of driver fatality have negative slope as shown in Fig. 7. Since this depends partially on the small sample size of this accident type, it seems that much work is required to better define the model for this type of accidents.

## 5. Development of Roadside Hazard Model

The cost-effectiveness model developed by Glennon [13] provides a basic analysis for comparison of roadside improvements. The model depends on the concept that an injury-producing roadside impact is a result of a sequence of four conditional events. First, the vehicle must be within the discrete increment of roadway associated with a potential collisions with the roadside objects. Then, roadside encroachment must occur. Next, the lateral displacement of the vehicle must be great enough for collision with the roadside object. And finally, the collision must be of sufficient magnitude to produce an injury.

This sequence of events suggests a conceptual approach for evaluating the degree of hazard for roadside objects. Although the model is conceptually attractive and presents the most advanced analysis technology, it is somewhat complex to use, especially for practicing engineers. In this study, therefore, it was attempted to develop a more simple roadside hazard model for tangent section of two-lane highway.

### 5.1 Roadside Hazard Modeling

The modeling approach considers the conditions which vehicles will encroach to the left-side and collide with certain object on a one-kilometer length of tangent section of two-lane highway. Fig. 8 is a schimatic illustration of unit highway length associated with a particular roadside object. The degree of hazard for roadside object is evaluated a number of fatal accidents per 100 millions of vehicle-kilometer traveled.

The first step of modeling is to construct accident model by which the single-vehicle accident rate and then vehicular-encroachment rate can be estimated. An accident model used in this study was derived empirically from the data based on 585 sections of two-lane highway in Hokkaido, as following;

$$Y = 625.6 x^{-0.62} \quad (r = 0.702) \quad (3)$$

where ; Y = single-vehicle accident rate (accidents / 100 millions of vehicle kilometers traveled)

x = traffic volumes (vehicles / 12 hours)

After the estimation of single-vehicle accident rate by using above model, the vehicular-encroachment accident rate to the left can simply be estimated by multiplying the percentage of left side run-off-the-road accidents to the estimated single-vehicle accident rate.

The next step of modeling is to construct an encroachment model by which the probability of an encroaching vehicle colliding with a roadside hazard can be estimated. This model includes the expected distribution of encroachment angles and the expected distribution of lateral displacements of encroaching vehicles. As shown in Fig. 8, the range of encroachment for a given roadside hazard at a given point can be computed as follows:

$$\tan \theta_1 = a / (L_o + x)$$

$$\tan \theta_2 = (a + W_o + W_e \cos \theta_2) / (x - W_e \sin \theta_2)$$

where;  $x$  = longitudinal distance from furthest downstream encroachment point (m)

$a$  = lateral placement of roadside hazard (m)

$\theta$  = angle of encroachment

$L_o$  = longitudinal length of roadside hazard (m)

$W_o$  = lateral length of roadside hazard (m)

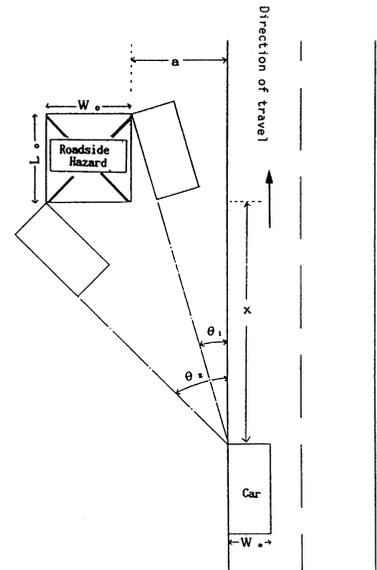
$W_e$  = width of vehicle (m)

If the expected distribution of encroachment angles and the expected distribution of lateral displacements of encroaching vehicles are known, the probability of impact of an encroaching vehicle can be computed. Then, the vehicular-encroachment accident rate multiplied by this probability of impact gives the fixed object accident rate.

The third step modeling is to estimate the severity level of impact. In this modeling approach, the probability model of a fatal accident developed in this study is incorporated for a particular roadside object. If the impact speed and the exhaust capacity of an encroaching vehicle are given, the probability of a fatal accident can easily be estimated by using the developed probability model. Finally, the fixed object accident rate, which is estimated in the second step, multiplied by the estimated probability of a fatal accident gives the fatal accident rate for a particular object.

## 5.2 Example of the Model Simulation

An attempt was made to estimate the accident rate in case of collisions with an electric pole in Hokkaido by using the simulation model developed in this study and the estimated accident rate were compared with an actual one for the validation of the simulation model. It was assumed for simulation that the spacing of each electric pole was 50 meters, the size of pole was 0.5 meter and the width of vehicle was 1.7 meter as shown in Fig. 9. Since the expected distributions of



**Fig.8** Schematic Illustration of Roadside Object and Its Relationship to an Encroaching Vehicle

encroachment angles and lateral placement of encroaching vehicles have never been developed in Japan, the relationships developed by Hutchinson and Kennedy [9] and Glennon and Walton [17] were adapted respectively in this case study. The simulation was performed for two variables, traffic volume and lateral placement of pole. The results of simulation are shown in Fig. 10 for accident rate. It can be seen from this figure that the accident rate decreases as traffic volume and lateral placement of pole increase. It should be noted that the accident rate sharply decreases as a lateral placement of pole increases until 3.0 meters. This suggests that locating or relocating of the electric pole beyond 3.0 meters may significantly contribute to decrease the accident rate of pole impact.

For the validation of simulation model, it was attempted to compare the simulation results for the average conditions of national highway system in Hokkaido with actual accident rate of electric pole. The result shows that an accident rate is almost similar to an actual average accident rate of pole impact for 1983 to 1985.

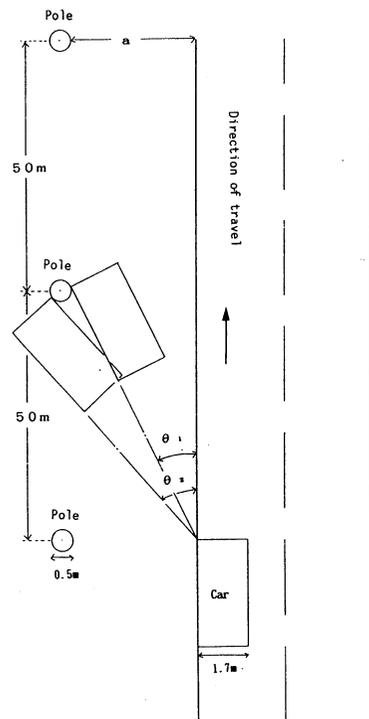


Fig. 9 Schematic Illustration of Electric Pole and Its Relationship to an Encroaching Vehicle

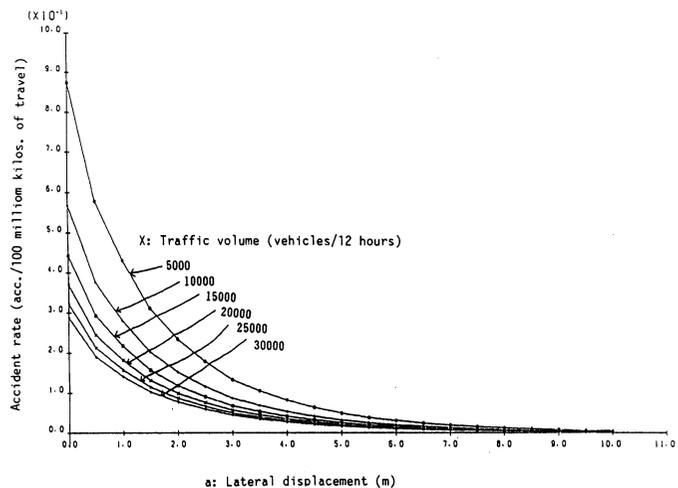


Fig. 10 Relationship Between Accident Rate, Traffic Volume and Lateral Displacement in Case of Collisions with Electric Poles

## 6. Summary

In this study, some attempts were made to define the magnitude and nature of the problems focused on the run-off-the-road type accident by reviewing the findings of recent studies in many countries, to conduct a comprehensive study on the collisions with roadside hazards, and to develop a roadside hazard model for estimating the accident rate of roadside objects.

In an overview of the problems, it is emphasized that there has been an intensive effort to make the roadside of highways more safely but much is still to be done both in design concepts and implementation by highway and traffic engineers. Another emphasized is that there is a need for development of roadside hazard model to evaluate the degree of hazard of roadside objects and to estimate an expected benefits of a safety improvement.

A limit study on the roadside accidents in Hokkaido reveals that nearly one-third of the fatalities were caused by a striking a utility pole and another one-third were caused by a vehicle striking a longitudinal guardrail. The effect of alignment on roadside accident and the departure location by horizontal alignment were defined in this study. It is found by discriminant analysis that the most important factor to be contributed to the fatal accident potential in fixed object crashes is an estimated impact speed, the second contributor is the kind of vehicle which may relate to vehicle weight, and the third contributor is driver' age. Based on these results, logistic type model for estimating the probability of fatal accident is developed as a function of an impact speed and an exhaust capacity of vehicle engine which is an alternative of vehicle weight.

The simple roadside hazard model (simulation model) is developed for the conditions that vehicles will encroach to the left-side and collide with certain object on a tangent section of two-lane highway. This simulation model consists of accident model, encroachment model and fatal probability model. This model is applied for the simulation in case of electric pole. Except the distributions of encroachment angles and lateral displacement of encroaching vehicles, input relationships used for simulation are developed in this study. The results of simulation suggest that the accident rate of pole impact decreases as traffic volume and lateral placement of pole increase, and locating of the pole beyond 3.0 meters may contribute to decrease the accident rate of pole impact. For the validation of the model, simulation is performed for an average conditions of national highway system in Hokkaido and the result shows that an estimated accident rate is almost similar to an actual one.

## References

- [1] Road Research; Roadside Obstacles: Their Effects on the Frequency and Severity of Accidents, OECD Road Research Group, 1975.
- [2] Australian Road Research Board; "Fixed Roadside Hazards Symposium", 1977.
- [3] Mc Carcy, L.; "Roadside Safety-A National Perspective", Public Road, March 1987.
- [4] "Accident Statistics, 1986 Edition", Japan Traffic Safety Association.
- [5] Stonex, K.A. and Noble, C.M.; "Curve Design of Vehicle Paths on the Pennsylvania Turnpike, Proceedings, Vol. 39, Highway Research Board, 1960.
- [6] Wright, P.H. and Robertson, L.S.; "Priorities for Roadside Hazard Modification: A Study of 300 Fatal Roadside Object Crashes," Georgia Institute of Technology, 1976.
- [7] Wright, P.H. and Robertson, L.S.; "Priorities for Roadside Hazard Modification", Traffic Engineering, August 1976.
- [8] Hall, J. W., Burton, C. J., Copdage, D. E. and Dickinson, L. V.; "Road-side Hazards on Non-Freeway Facilities", Transportation Research Record 610, Transportation Research Board, 1976.
- [9] Hutchison, J. W and Kennedy, T. W.; "Safety Considerations in Median Design", Highway Research Record 162, Transportation Research Board, 1966.
- [10] Perchonok, K., Ranney, T. A. Baum, S., Morris, D. F. and Epich, J. D.; "Hazardous Effects of Highway Features and Roadside Objects, Volume 2: Findings", Report No. FHWA-RD-78-202, Federal Highway Administration, 1978.
- [11] Tignor, S. C., Brinkman, C. P., Mason, J. M. and Mounce, J. M.; "Roadside Features (Chapter 3), Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements, Volume 1", Federal Highway Administration, 1982.
- [12] Rinde, E. A. and Smith, R. N.; "Conventional Road Safety", ITE Journal, October 1981.
- [13] Glennon, J. C.; "Roadside Safety Improvement Programs on Freeways: A Cost-Effectiveness Priority Approach", NCHRP Report No. 148, 1974.
- [14] Koike, H.; "Roadside Hazard Simulation-Its Development and Application," Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No. 359 / IV-3 (Infrastructure Planning and Management) 1985.
- [15] Saito, K. and Kaku, T.; "A study on the Identification of Locations Having Hazardous Characteristics by Statistical Methods," Transaction of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 11, 1979.
- [16] Neuman, T. R.; "Discriminant Analysis as a Tool for Investigating Highway Safety Relationships, "ITE Journal, October 1984.
- [17] Griffin, III, L. I.; "Probability of Driver Injury in Single Vehicle Collisions with Roadway Appurtenances as a Function of Passenger Car Curb Weight," Texas Transportation Institute, Texas A & M University, 1981.

# 地下の熱環境の利用に関する研究 (主に貯雪氷施設と関連して)

媚山政良, 斉藤 図, 岸浪紘機, 横田亮則, 渡辺泰文

## Thermal Utilization of underground Environments (On Storage of Cold Energy)

Masayoshi KOBIYAMA, Hakaru SAITO, kohki KISHINAMI, Akinori YOKOTA \*<sup>1</sup>  
and Hirofumi WATANABE \*<sup>2</sup>

### Abstract

The outer part of the earth crust on which we live has been producing many kinds of natural resources and it maintains moderate temperatures on the earth by acting as a thermal storage with global scale. In order to save the energy consumption, it is necessary to develop new technologies for utilization of the underground environments.

The authors have been developing underground facilities for utilization of the so-called cold energies obtained by strong ice or snow of winter season, and have found that these systems are very effective in performance.

The thermal characteristics of the underground storage systems have been analyzed in this paper and are compared with those of some ground storage systems. A simple method has been proposed to predict the thermal performance of different types of thermal storage system. Finally a model, in which accumulation of snow on the ground was taken into account, was introduced to clarify the insulating effects of snow layer upon the total thermal performance of storage system.

## 1. 緒 言

われわれの生活している地表は地殻の一番外側に位置しており, この地殻は熱的に見ると遮熱性, 蓄熱性および恒温性に優れた材料として種々の利用法が考えられ, その開発利用は今後に残された重要な研究課題である。これまで著者らは冬期間の冷熱を雪あるいは氷の形で長期間貯蔵し農産物の長期貯蔵などの冷熱源とする貯雪氷施設を提案し, 貯雪氷能力の理論予測および実証実験を行いその有用性を明かとした。また, 数千トンから数万トンの雪氷を長期間保存する簡便で大規模な貯雪氷施設を地下に設置することを想定し, それら貯蔵施設の貯雪氷能力の理論的な予測および実証実験を行って来た。<sup>1,2)</sup>しかし, 地上に施設を設置した場合との熱的な差異, あるいは, 地下に設置することを想定した場合の固有の熱解析手法の開発などさらに検討を進めてお

---

\*<sup>1</sup> 大学院工学研究科 (産業機械工学専攻)    \*<sup>2</sup> 北海製缶株式会社

かなければならないいくつかの課題が残されていた。したがって、本研究においては、地上に施設を設置した場合との熱的な差異を検討し、地下に埋設した場合の熱的な優位性について明かとし、地下埋設型貯雪氷施設の複雑で計算時間の多くかかる理論的な熱解析をより簡便な方法によって行うため、3次元の角形施設を2次元の円柱形で近似する方法を導入し、その妥当性と近似の有効な範囲、近似の程度を明かとした。さらに、冬期間の積雪による地面の保温効果をも考慮し地中温度の過渡変化についての検討も行った。

## 記号

A	: 面積 $m^2$	$V_0$	: 貯蔵庫有効容積 $m^3$
$A_A$	: 施設構造物の全表面積 $m^2$	$W_0$	: 氷の重量 ton
$A_S$	: 施設構造物の影の面積 $m^2$	x	: 水平方向距離 m
a	: 温度伝導率 $m^2/h$	$x_0$	: 角柱施設の幅 m
$d_0$	: 円柱施設の直径 m	y	: 水平方向距離 m
$d_w$	: 側壁面積に関する直径 m	$\alpha$	: 縦横比 -
$h_{atm}$	: 大気熱伝達率 $W/m^2K$	$\phi$	: 近似誤差 -
$i_p$	: 水平直達 (全天) 日射量 $W/m^2$	$\epsilon$	: 放射率 -
i	: 日射量 $W/m^2$	$\eta$	: 重量割合 (残存率) ton/ton
K	: 熱通過率 $W/m^2K$	$\eta_v$	: 氷の容積割合 (雪氷充填率) $m^3/m^3$
L	: 施設の代表長さ m	$\theta$	: 温度 K
Lh	: 潜熱 $W \cdot h/kg$	$\theta_{sol}$	: 日射温度 K
$l_0$	: 地表面からの距離 m	$\lambda$	: 熱伝導率 $W/mK$
$y_0$	: 角柱施設の奥行き m	$\rho_{ice}$	: 氷の密度 ton/ $m^3$
z	: 鉛直方向距離 m	$\tau$	: 時間 h
$z_0$	: 施設の高さ m	$\tau_0$	: 通年時間 h
n	: 施設壁面に対する垂直方向距離 m		
Q	: 全冷凍熱量 $W \cdot h$		
q	: 冷凍熱量 W	添字	
$q_s$	: 日射による熱量 W	e	: 土壌
r	: 半径方向距離 m	b	: 施設構造物
$t_0$	: 大気温度 K		
$t_h$	: 毎日最高気温の月平均の最高月の値 K		
$t_l$	: 毎日最低気温の月平均の最低月の値 K		

## 2. 地下埋設型貯雪氷施設と地上設置型施設との熱的特性の比較検討

### 2.1 大規模貯雪氷施設および解析モデル

解析の対象とする地下埋設型の貯雪氷施設を図2-1-Aに、また、地上設置型の貯雪氷施設を同図Bに示す。いずれの施設も直径 $d_0$  [m]、高さが $Z_0$  [m]の円柱形のものとする。地下埋設型の施設は地表面から $l_0$  [m]の地下に設置する。なお、地下埋設型の施設は貯蔵施設の熱的特性の限界を明かとするため施設構造物に断熱材を用いず、土を素掘りした構造とする。したがって、本章での解析は実際より安全側に見積っていることとなる。

なお、実際の施設は角形の方が望ましいように思われるが、この点についての検討は第3章において行う。

### 2.2 基礎方程式

天然氷あるいは雪氷変換機による氷（雪）の貯蔵を考慮するための氷の密度 $\rho_{ice}$  [ton/m<sup>3</sup>]をパラメータとする。また、貯蔵庫有効容積 $V_0$  [m<sup>3</sup>]に占める氷の容積割合（雪氷充填率）を $\eta_v$  [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]とすると初期に貯蔵される氷の重量 $W_0$  [ton]は次式により計算される。

$$W_0 = \rho_{ice} \cdot \eta_v \cdot V_0 \quad (2.1)$$

経時変化を考慮するため非定問題とする。土壌と施設構造物（コンクリート、断熱材）の熱物性値（温度伝導率、熱伝導率）は、それぞれの値を用い、境界関数を利用して、各物質中においては一定物性問題とする。また、熱物性値は、地域による差異あるいは工法、材質による差異が大きいため、ここでは、熱物性値を土壌、構造物ともに代表的な値を用いる。以上の解析方法および伝熱系の設定条件により次の2次元円柱座標系の非定常熱伝導方程式を得る。

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

ここで、 $r$  [m]、 $z$  [m]はおのおのの半径および鉛直方向距離であり、 $\theta$  [K]、 $\tau$  [h]、 $a$  [m<sup>2</sup>/h]は、温

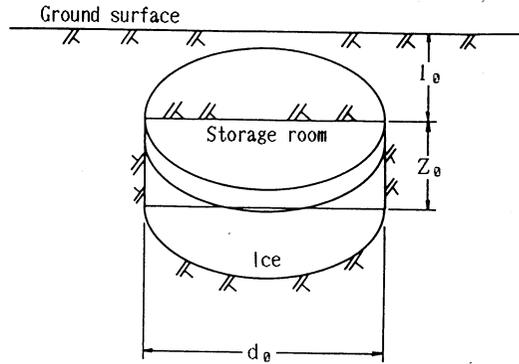


図2-1-A 地下埋設型貯雪氷施設モデル

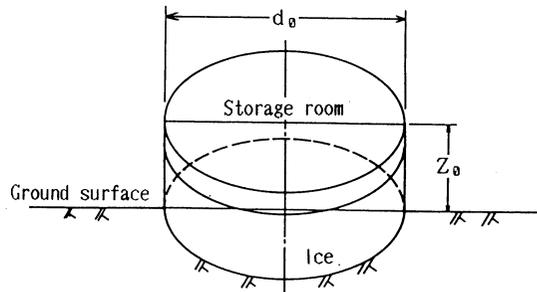


図2-1-B 地上設置型貯雪氷施設モデル

度、時間、温度伝導率（土壌、断熱材、コンクリート）である。なお、施設内の温度は平衡温度を用いることもできるが、その温度は断熱構造、施設の運用にもかわるため、ここでは安全側に見積り氷の融解温度である  $0^{\circ}\text{C}$  とする。このとき、初期条件および境界条件を次のように与える。

地下埋設型に対し

$$\begin{aligned}
 \tau = 0 & & : \theta = t_e(Z) \\
 r = 0 & & : \partial \theta / \partial r = 0 \\
 z = 0 & & : \theta = \theta_{\text{sol,e}} \\
 r = r_0, \quad l_0 \leq z \leq z_0 & & : \theta = 0 \\
 z = l_0, \quad l_0 + z_0 \leq r \leq r_0 & & : \theta = 0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

地上設置型に対し

$$\begin{aligned}
 \tau = 0 & & : \theta = t_e(Z) \\
 r = 0 & & : \partial \theta / \partial r = 0 \\
 z = 0, \quad 0 \leq r \leq r_0 & & : \theta = 0 \\
 & & r_0 < r & : \theta = \theta_{\text{sol,e}} \\
 \text{施設外壁} & & & : \theta = \theta_{\text{sol,b}}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

ここで、 $z$  は庫内壁内面あるいは地表面からの最短距離を示している。

地表面温度は、太陽からの日射を考慮した日射温度、 $\theta_{\text{sol}}(t_o(M, D), i_p(M, D))$  を大気温度  $t_0$  [K] とは別に推定しておく。ここで、 $i_p$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] は水平面直達日射量であり、 $M, D, H$  は、月、日、時である。日射温度は、太陽からのふく射熱および建物周囲からのふく射熱が屋根に入射した場合、その一部は反射されるが、残りは吸収される。吸収された熱量の一部は二次ふく射として放出されるが、残りは壁面を伝熱で伝わり氷室内に侵入する。このように、太陽および周囲環境殻のふく射による熱取得計算方法はいろいろあるが、ここでは比較的良近似として全天日射量を日射量  $i_p$  とし、地表面の日射温度  $\theta_{\text{sol,e}}$  を現在広く用いられ、結果の取扱いも容易な相当温度差法を用いて求め、これを地表面温度とする。 $\epsilon_e$  [-],  $h_{\text{atm}}$  [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ] はおのおの地表面の放射率、大気の熱伝達率を示す。

$$\theta_{\text{sol,e}} = t_0 + \epsilon_e \cdot i_p / h_{\text{atm}} \tag{2.5}$$

施設外部からの侵入熱、すなわち、冷凍熱量  $q(M, D, H)$  [W] は次式よりもとめられる。

$$q = \sum \lambda_e \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{n=0} \cdot \Delta A \cdot 3.6 \tag{2.6}$$

ここで、 $\lambda_e$  [ $\text{W}/\text{mK}$ ] は土壌の熱伝導率、 $n$  [m] は施設の壁面に対し土壌側に向けた垂直方向を示し、 $\Delta A$  [ $\text{m}^2$ ] は壁面上の制御要素の面積を示す。以上より地下埋設型の全冷凍熱量  $Q$  [ $\text{W} \cdot \text{h}$ ]

は次式より算出される。

$$Q = \sum_{M=Ms}^{Me} \sum_{D=1}^{30} \sum_{H=1}^{24} q(M, D, H) \quad (2.7)$$

ここで、 $M_s$ ,  $M_e$  は貯蔵開始月，終了月を示す。

なお，地上設置型では施設構造物に対しても，太陽からの日射を考慮した日射温度， $\theta_{sol,b}$  を推定しておく。ここで，施設が日射を受ける部分を施設の影の面積で近似し，施設の全表面積でその日射を受けたと仮定したときの日射量  $i_b$  [ $W/m^2$ ] を次式より求める。

$$i_b = q_s / A_A \quad (2.8)$$

また，

$$q_s = A_s \cdot i_p \quad (2.9)$$

ここで， $q_s$  [ $W$ ] は日射を受けた部分の熱量， $A_s$  [ $m^2$ ] は月，日，時間による太陽高度による変化を考慮した施設構造物の影の面積， $A_A$  [ $m^2$ ] は施設構造物の全表面積を示す。よって，相当温度法により施設構造物の表面温度は次式より求められる。

$$\theta_{sol,b} = t_0 + \varepsilon_b \cdot i_b / h_{atm} \quad (2.10)$$

ここで， $\varepsilon_b$  [-] は施設構造物表面の放射率を示す。したがって，この施設の冷凍熱量  $q_b$  ( $M, D, H$ ) [ $W$ ] は次式よりもとめられる。

$$q_b = K \cdot (\theta_{sol,b} - \theta) \cdot A_A \quad (2.11)$$

ここで， $K$  [ $W/m^2K$ ] は施設の熱通過率を示す。施設の地面と接する面での冷凍負荷  $q$  を式(2.6)により計算するものとする，地上設置型の全冷凍熱量  $Q$  [ $W$ ] は次式より算出される。

$$Q = \sum_{M=Ms}^{Me} \sum_{D=1}^{30} \sum_{H=1}^{24} (q + q_b) \quad (2.12)$$

また，雪水の持つ冷熱のうち潜熱  $L_h$  [ $W \cdot h/kg$ ] のみを冷凍熱量に用いるとし，初期に貯蔵した雪水  $W_0$  の残存する重量割合（残存率） $\eta$  [ $ton/ton$ ] を次式により定義する。

$$\eta = (W_0 - Q / L_h \cdot 10^{-3}) / W_0 \quad (2.13)$$

### 2.3 数値解析

微分方程式 (2.2) を図 2-2 に示す差分格子を用いて差分近似する。変物性を考慮して時間差分，格子差分を十分小さく取り，また，演習時間の短縮を図るため，陽差分形式を用い時間に対して連続的な微分方程式(2.2)式の代わりに，時間を有限の  $\Delta \tau$  の間隔に分解した次の差分方程式を得ることができる。

$$\frac{1}{a} \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} = \frac{1}{r} \frac{\Delta}{\Delta r} \left( r \frac{\Delta \theta}{\Delta r} \right) + \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta z^2} \quad (2.14)$$

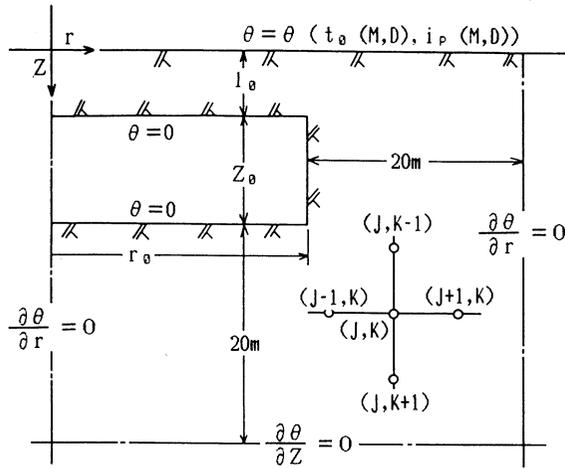


図 2-2-A 地下埋設型貯雪氷施設解析モデル座標系

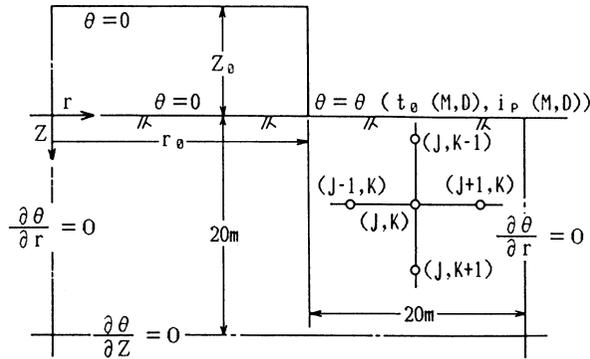


図 2-2-B 地上設地型貯雪氷施設解析モデル座標系

したがって、 $\Delta \tau$ だけ経過した後の任意の点の温度を  $\theta'$  とし、従属変数  $\theta_{j,k}$  について整理すると、

$$\begin{aligned} \theta'_{j,k} = & (1 - \sum_{i=1}^4 A_i) \theta_{i,k} + A_1 \theta_{j+1,k} \\ & + A_2 \theta_{j-1,k} + A_3 \theta_{j,k+1} + A_4 \theta_{j,k-1} \end{aligned} \quad (2.15)$$

となる。この方程式は、全ての要素  $j, k$  に対して成立するため境界以外の全制御要素数と同数導かれる。したがって、これらを一つの連立方程式とみなし、境界条件と初期条件を与えて解くと各時間での温度分布が導かれる。

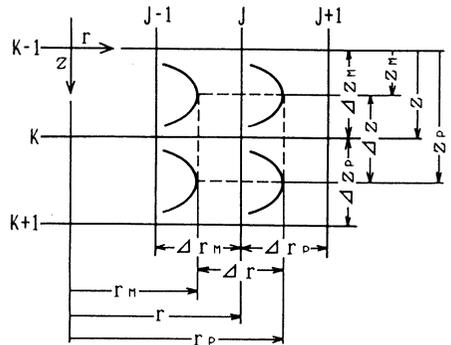


図 2-3 制御要素

ただし、

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{a \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot \frac{r_p}{r} \\
 A_2 &= \frac{a \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot \frac{r_M}{r} \\
 A_3 &= \frac{a \Delta \tau}{\Delta z^2} \\
 A_4 &= A_3
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

なお、初期条件である地中温度  $t_e$  [K] は経時変化を考慮し、施設運用開始時の温度分布として次式により与える。<sup>3)</sup>

$$t_e = \frac{t_h + t_l}{2} + \frac{t_h - t_l}{2} \exp\left(\frac{z}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{\pi}{\tau_0}}\right) \cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_0} - \frac{z}{\sqrt{a}} \sqrt{\frac{\pi}{\tau}}\right) + 0.03z
 \tag{2.17}$$

ここで、 $t_h$  [K] は毎日最高気温の月平均の最高月の値、 $t_l$  [K] は毎日最低気温の月平均の最低月の値、 $\tau_0$  [h] は通年時間、 $\tau$  [h] は経過時間、 $z$  [m] は地表面下の深さ、 $a$  [m<sup>2</sup>/h] は土壌の温度伝導率を示している。

## 2.4 解析結果

計算に用いた主な条件、値を表 1 に示す。

表 1 計算条件<sup>3,4)</sup>

[気象条件]	
大気温度、日射量（札幌）は図 2-4 に併記。	
大気の熱伝達率： $h_{a,t,m} = 23.26 \text{ W/m}^2\text{K}$	
[土壌]	温度伝達率： $a_e = 0.0015 \text{ m}^2/\text{h}$
	熱伝導率： $\lambda_e = 0.62802 \text{ W/mK}$
	表面の放射率： $\varepsilon_e = 0.8$
[貯蔵施設]	
高さ	: $z_0 = 5 \text{ m}$
直径	: $d_0 = 50 \text{ m}$ (2章)
代表長さ	: $L = 10\text{m}, 20\text{m}, 30\text{m}, 50\text{m}$ (3章)
埋設深さ	: $l_0 = 2 \text{ m}$ (地下埋設型)
氷の充填率	: $\eta_v = 0.8$
[氷の密度]	$\rho_{i,c,e} = 0.8 \text{ ton/m}^3$
[氷の初期貯蔵量]	$w = 6280 \text{ ton}$

地下埋設型貯雪氷施設と地上設置型貯雪氷施設を比較した場合、地下埋設型のほうが地上設置型よりも簡単な構造でかなり良い性能を得られる。

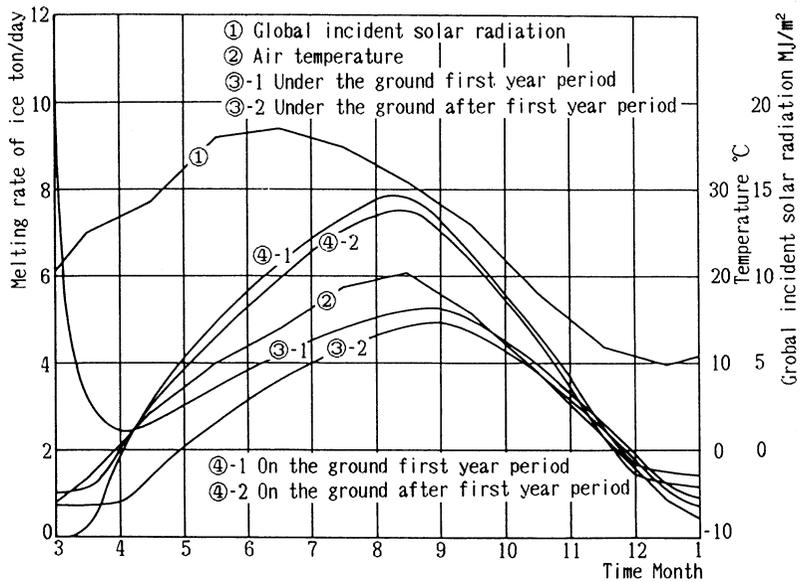


図 2-4 大気温度、日射量および雪氷融解量

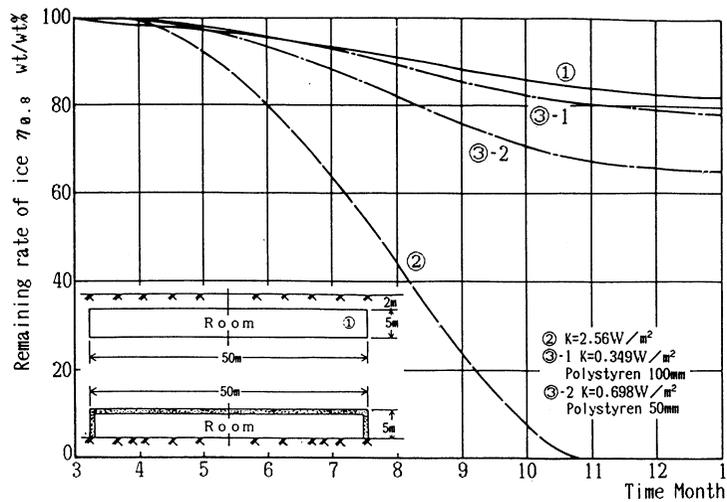


図 2-5 地下、地上施設の残存率比較

図 2-4 における 1 日当りの融解量は、地下埋設型も地上設置型も初年度（施設運用開始年度）はどちらも地中温度が安定していないため高い値を示しているが、次年度以降からは地中温度も安定し低い値となっている。しかし、地上設置型は施設構造物に直接大気温度、日射の影響を受

けて地下埋設型よりも融解量が多く、11月中旬から3月中旬までの外気の影響を受けて地下埋設型よりも少なくなっている。

雪氷の残存率についてしてみると、地下埋設型は地面に穴をあけた素堀の状態で12月末日で82%の雪氷を残している。一方、地上設置型はコンクリート200mmの壁だけでは全ての雪氷が10月末に融けてしまう。そのため、断熱材としてスタイロホーム断熱を50mm施すと、12月末で65%、100mmで78%の雪氷が残る。よって、地上設置の場合には十分な断熱を施さなければ地下埋設の

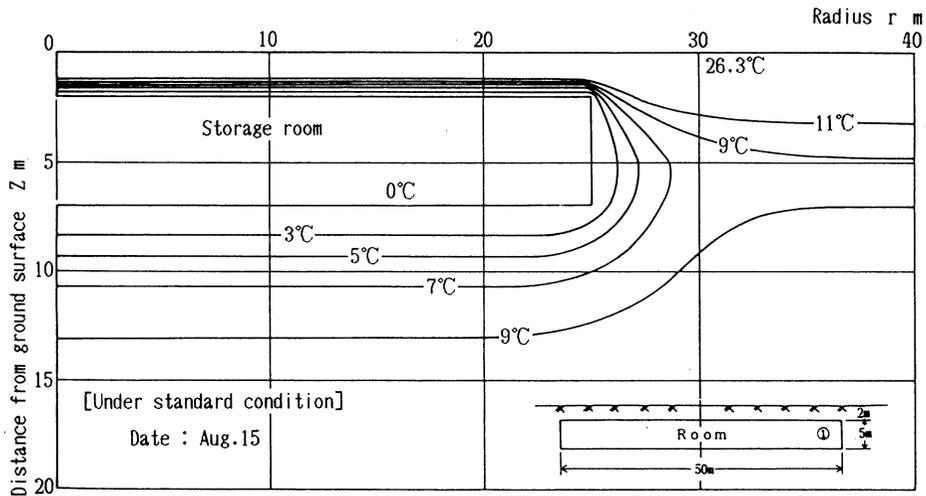


図 2-6-A 地下施設の1年目8月15日の地中温度分布

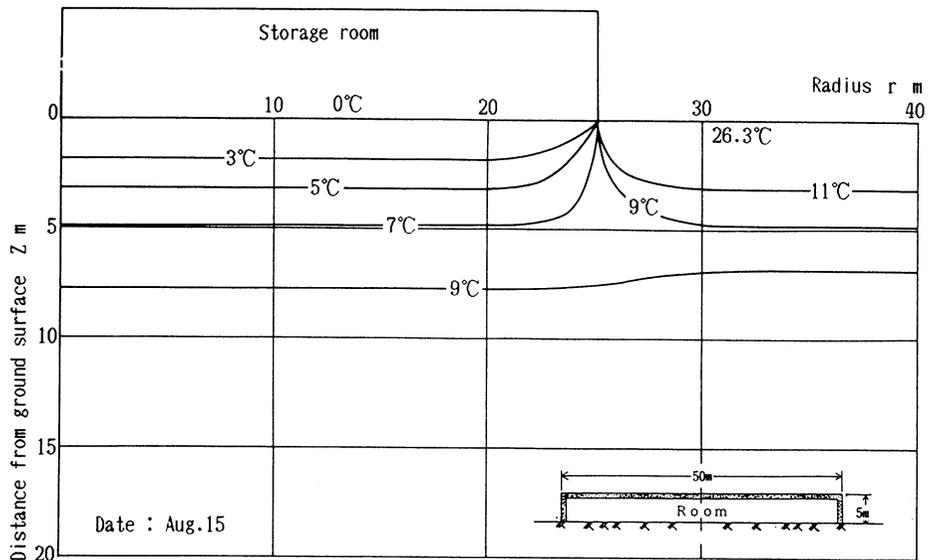


図 2-6-B 地上施設の1年目8月15日の地中温度分布

場合と同等の性能を得ることはできない。

地中温度の初年度は、地下埋設型と地上設置型のいずれも貯雪氷施設から10m程度離れた地点での地中温度は貯雪氷施設の熱影響をあまり受けていないが、3年後の地中温度はどちらの場合も冷熱の影響を受けて各等温線が初年度よりも施設の外側に移動している。しかし、地上設置型の方は地表面より受ける日射温度が徐々に施設下部に影響を与えつつある。

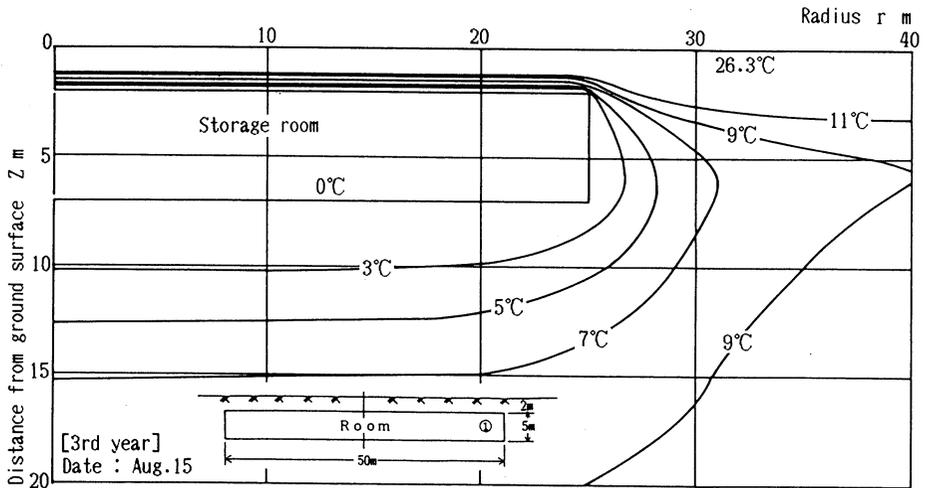


図2-7-A 地下施設の3年目8月15日の地中温度分布

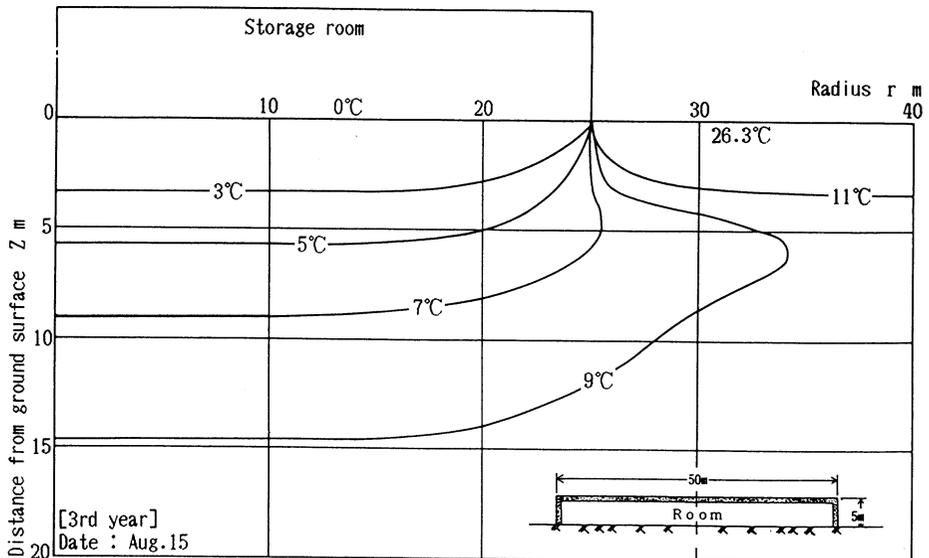


図2-7-B 地上施設の3年目の8月15日の地中温度分布

以上より、地下埋設型は断熱施工をしなくても十分な貯雪氷能力を得られるが、地上設置型は十分な断熱施工をしなければ地下埋設型と同じくらいの貯雪氷能力を得ることはできなく、コスト的にも地下埋設型のほうが有利であることが確認できた。

### 3. 地下埋設型大規模貯雪氷施設の熱解析の方法に関する検討

#### 3.1 大規模貯雪氷施設の解析モデル

前章において解析の対象とした貯雪氷施設は図2-1に示したように円柱形のものであった。なお、実際の施設は施工上角柱形の方が望ましいように思われるが、数値解析を行う観点に立つと、2次元で立体を表すことのできる円柱座標系を用いた数値計算は直交座標系を用いた数値計算に比較すると使用する記憶領域および計算時間の著しい減少化が可能となる優れた性質を有している。したがって、もし、角柱形の解析モデルを円柱形のモデルで置き換え近似できるならば工学的に多くの利得を得ることができる。本章においては地下埋設型の貯雪氷施設に関するこのような座標系間の近似についての検討を行う。

円柱形の施設と熱的な差異を検討する角柱形の施設を図3-1に示す。同施設は幅が  $X_0$  [m]、奥行  $Y_0$  [m]、高さが  $Z_0$  [m] の角柱で、地表から  $l_0$  [m] の地下に埋設してある。ここで、底面の縦横比を  $\alpha$  [-] とし、次式により定義する。

$$\alpha = Y_0 / X_0$$

比較のため、この角形の貯蔵施設を上下壁（天井および床）の面積が等しく、また、施設の高さ、側壁の面積および体積の等しい円柱形状を有する施設で近似する。すなわち、体積および上下壁の面積からみると体積および上下壁の面積が等しいことから、体積および上下壁の面積に関する直径  $d_0$  [m] は次式より求められる。

$$d_0^2 / 4 \pi \times Z_0 = X_0 \times Y_0 \times Z_0 \quad (3.2)$$

以後、記述の簡便さから、この  $d_0$  [m] を対象とする施設の代表長さ  $L$  [m] とする。また、

側壁の面積は等しいことから側壁の面積に関する直径  $d_w$  [m] は次式より求められる。

$$\pi \times d_w = 2 Z_0 (X_0 + Y_0) \quad (3.3)$$

なお、解析例においては、施設の高さ  $Z_0$  [m] を一定とし、施設の大きさを代表寸法  $L (= d_0)$  [m] で与え、角形での縦横比  $\alpha$  をパラメータとする。

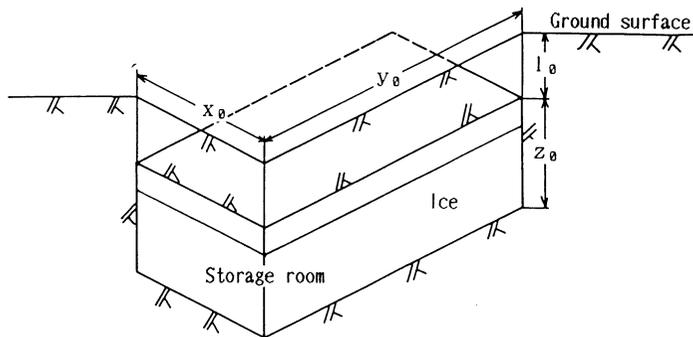


図3-1 大規模貯雪氷施設モデル

### 3.2 基礎方程式

第2章での伝熱系の設定条件をここでも踏襲すると、次の直交座標系の非定常熱伝導方程式を得る。

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (3.4)$$

ここで、 $x$  [m]、 $y$  [m]、 $z$  [m] はおのおの水平  $x$ 、 $y$  方向および鉛直方向  $z$  の距離である。また、 $\theta$  [K]、 $\tau$  [h]、 $a$  [m<sup>2</sup>/h] は温度、時間、温度伝導率である。

初期条件、境界条件を次とする。

$$\begin{aligned} \tau = 0 & & : \theta = t_e(Z) \\ x = 0 & & : \partial \theta / \partial x = 0 \\ y = 0 & & : \partial \theta / \partial y = 0 \\ z = 0 & & : \theta = \theta_{sol} \\ z = z_0 + 1_{inf} & & : \partial \theta / \partial Z = 0 \\ x = x_0 / 2 & & : \theta = 0 \\ y = y_0 / 2 & & : \theta = 0 \\ z = l_0, l_0 + z_0 \quad 0 \leq x \leq x_0 / 2 & & \\ & & 0 \leq y \leq y_0 / 2 \quad : \theta = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで、 $1_{inf}$  は施設の熱的な影響をほとんど受けない十分な長さを示す距離である。なお、円柱に置き換えた場合の2次元円柱座標系の非定常熱伝導方程式は第2章の式(2.2)～(2.3)で表される。ただし、式(2.3)の施設の半径  $r_0$  の値については後述する。

また、冷凍負荷、すなわち、貯蔵雪氷の自然融解量の算出などは第2章におけると同様である。

### 3.3 数値解析

微分方程式(3.4)を図3-2に示す差分格子を用いて陽差分近似を施すと次式を得る。

$$\frac{1}{a} \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} = \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta y^2} + \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta z^2} \quad (3.6)$$

よって  $\Delta \tau$  だけ経過した後の任意の断面の温度を  $\theta'$  とし、この差分方程式を従属変数  $\theta_{ijk}$  について整理すると、

$$\theta' = C_0 + C_1 \theta_{i+1} + C_2 \theta_{i-1} + C_3 \theta_{j+1} + C_4 \theta_{j-1} + C_5 \theta_{k+1} + C_6 \theta_{k-1} \quad (3.7)$$

となる。この方程式は全ての要素  $i$ 、 $j$ 、 $k$  に対して成立するため、境界以外の全制御要素数と同数導かれる。したがって、これらを一つの連立方程式とみなし、境界条件と初期条件を与えて解くと各時間での温度分布が導かれる。

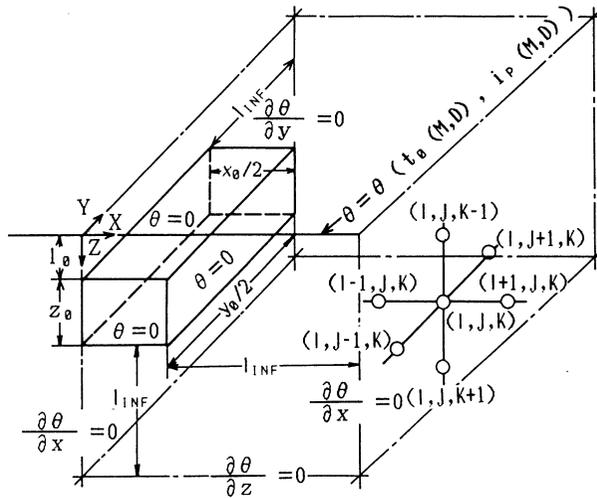


図3-2 大規模貯雪氷施設解析モデル

ただし、

$$\begin{aligned}
 C_0 &= 1 - 2 \left( \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} + \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} + \frac{a \Delta \tau}{\Delta z^2} \right) \\
 C_1 &= \frac{a \Delta \tau}{\Delta x^2} \\
 C_3 &= \frac{a \Delta \tau}{\Delta y^2} \\
 C_5 &= \frac{a \Delta \tau}{\Delta z^2}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

また、円柱に置き換えたときの2次元円柱座標系の熱伝導方程式の差分式は、第2章式(2.14)～(2.16)と同様である。また、初期条件の与え方についても第2章におけると同様である。

円柱座標系を用い、角形断面を有する貯蔵庫の熱解析を行うにあたり、貯蔵庫内側壁の水平方向の温度は、初期、境界条件が同一であれば、貯蔵庫中心からの距離により決まる。また、床の温度分布も同様である。したがって、熱伝導距離を重視し、式(2.3)での  $r_0$  および半径方向の座標に關与する諸量を定める。直交座標系の水平方向の中心からの距離の平均値は、図3-3における関係を利用して次の積分により与えられる。

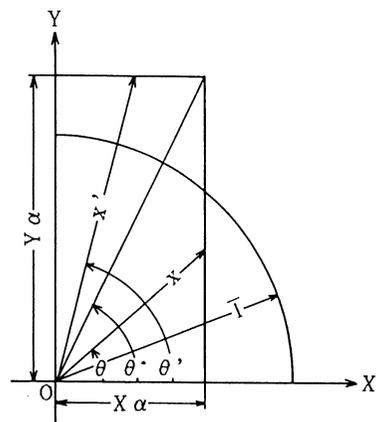


図3-3 直交座標と円柱座標の関係

$$\begin{aligned} \bar{1} &= \frac{\int_0^{\theta'} x d\theta + \int_{\theta'}^{\frac{\pi}{2}} x' d\theta'}{d\theta} \\ &= \frac{\int_0^{\tan^{-1}\alpha} \frac{x_\alpha}{\cos\theta} d\theta + \int_{\tan^{-1}\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\alpha x_\alpha}{\cos(\frac{\pi}{2}-\theta')} d\theta'}{\frac{\pi}{2}} \\ &= \frac{2}{\pi} \left\{ \log \left[ \tan \left( \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \tan^{-1} \alpha \right) \right] + \alpha \log \left[ \tan \left( \frac{2}{\pi} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \alpha \right) \right] \right\} x_\alpha \end{aligned} \tag{3.9}$$

この $\bar{1}$ を(3.4)式での $r_0$ とし、また、制御要素の半径方向微小距離にも同様の補正を施す。なお、伝熱面積は直交座標系での値、すなわち、実面積を採る。

以上の方法による、直交座標系に対する円柱座標系の近似度を、12月末日における雪氷の残存率 $\eta$ [-]を用いた次式の近似誤差 $\phi$ により表す。

$$\phi = (\eta_{KAC} - \eta_{EN}) / \eta_{KAC} \tag{3.10}$$

ここで、 $\eta_{KAC}$ は角形での残存率、 $\eta_{EN}$ は円柱系に近似した場合の残存率を示す。

### 3.4 解析結果

計算に用いたおもな条件、値を表1に示す。

それぞれの代表長さ $L$ における $\alpha$ の変化にともなう角柱と円柱の近似誤差を図3-4に示す。代表長さ $L=10m$ の場合では、 $\alpha$ が大きくなるにつれて誤差が急激に、大きくなるが、代表長さ $L$ が大きくなるにつれて $\alpha$ にともなう誤差が小さくなっていくのがわかる。小規模施設では、 $\alpha$ が大きくなるとかなり細長い施設となり中心から $XZ$ 平面までの伝熱距離が極端に短くなり、 $YZ$ 平面の伝熱面積が大きくなるために $YZ$ 平面からの侵入熱の量が $XZ$ 平面からのものよりかなり多くなるため $YZ$ 平面が支配的となり氷の消費率が多くなる。この角柱を円柱に置き換えたとき伝熱距離が $XZ$ 、 $YZ$ 方向の平均の伝熱距離となるため、平均円柱の近似誤差が大きくなる。しかし、大規模になるにつれて小規模なものほど極端に細長くはならないため、

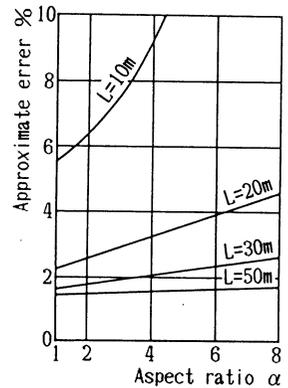


図3-4 縦横比 $\alpha$ による近似誤差

近似度がよくなる。 $\alpha = 1, 4, 8$ における代表長さ $L$ にともなう近似度を図3-5に示した。代表長さ $L$ が15m以上のものに対しては、3%以下の誤差を示している。このことから、大規模なものに対して角柱を円柱で近似する本章での計算方法は有効な解析方法と言える。

角柱、円柱の代表長さ $L=10m$ のときの $\alpha = 1, 4$ の場合の地中温度を図3-6に示す。同図

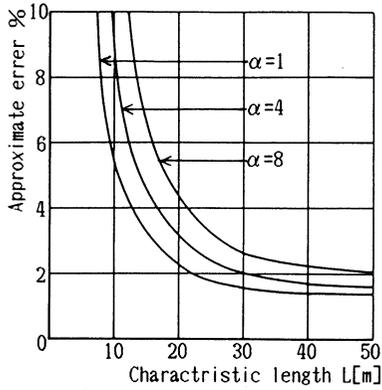


図 3-5 代表長さ L による近似誤差

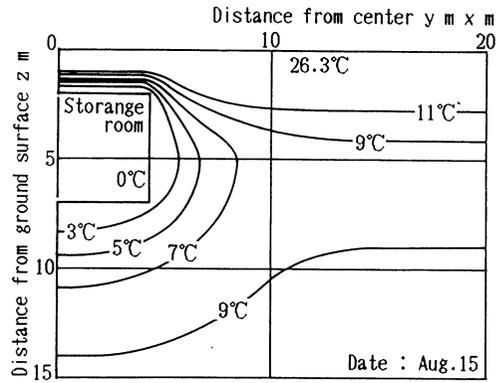


図 3-6-A 角柱施設 ( $L=10\text{m}$ ,  $\alpha=1$ ) の X Z 断面の地中温度分布

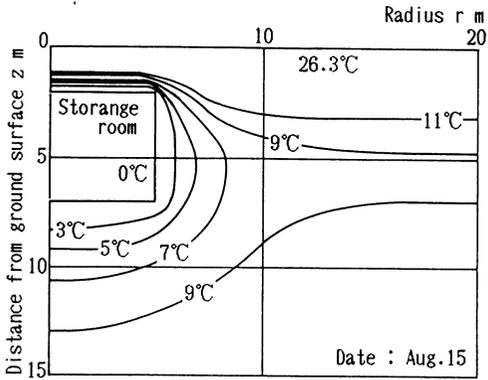


図 3-6-B 円柱施設 ( $L=10\text{m}$ ,  $\alpha=1$ ) の地中温度分布

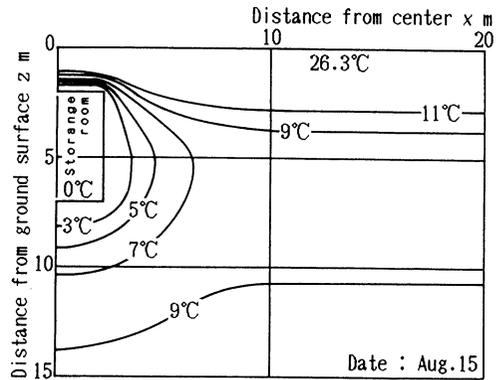


図 3-7-A 角柱施設 ( $L=10\text{m}$ ,  $\alpha=4$ ) の X Z 断面の地中温度分布

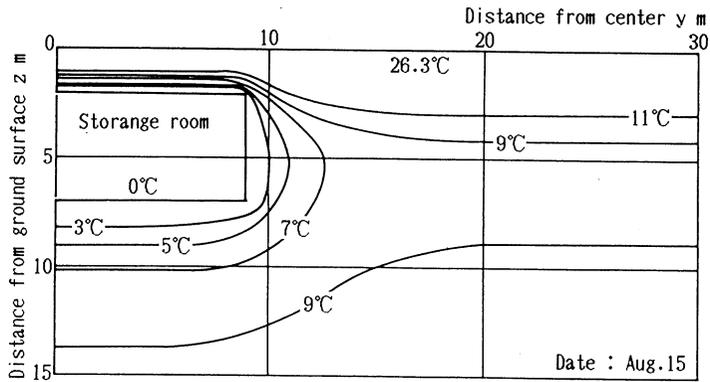


図 3-7-B 角柱施設 ( $L=10\text{m}$ ,  $\alpha=4$ ) の Y Z 断面の地中温度分布

Aは、 $\alpha = 1$ のときの角柱のXZ, YZ断面で、同図Bは、 $\alpha = 1$ のときの円柱の断面を示している。これを比べると角柱の各等温線よりも側壁からわずかに外側に位置している。また図3-7-A, Bは、それぞれ角柱のXZ, YZ断面で、同図Cは円柱の断面を示している。これにより、伝熱距離の短いxz断面での各等温線は、円柱断面の各等温線よりも側壁側が外側に位置しているが、YZ断面とではほとんど変化はない。これは、円柱よりも角柱のXZ方向からの侵入が多いことを表している。

これらの結果から角形を円柱形に置き換えて解析を行う際、大規模なものに対してはかなり有効ではあるが、小規模のものにはあまり適してはいないと考えられる。

また、演習時間は角柱の場合と比較すると1/30までに短縮することができ、角柱モデルでは3次元解析のため計算機のメモリーが10MB以上になるのに対し円柱モデルでは4MB程度の少量で済むことも明かとなった。

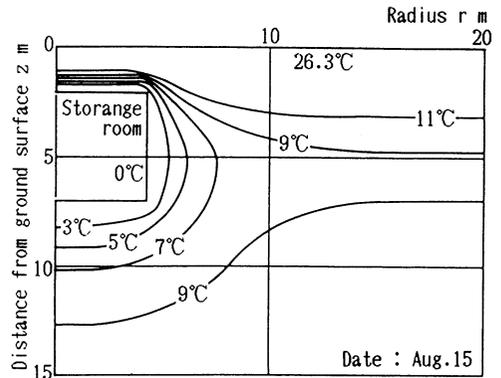


図3-7-C 円柱施設 (L=10m,  $\alpha = 4$ ) の地中温度分布

## 4. 地中温度の理論的解析 (雪の保温効果を考慮した)

### 4.1 解析モデルおよび基礎方程式

前章までの解析では、大気温度とは別に太陽および周囲環境のふく射による熱の取得の計算方法として、水平面直達日射量の比較的良好な近似として全天日射量を用いた相当温度差法を用いて求めたものを地表面温度としていた。しかし、地域によっては積雪期間では雪による地表面の保温効果も無視できない程度にあることが数年来継続し測定を行ってきた地中温度の結果より明らかとなってきた。したがって、本章では12月～翌年3月までを積雪期間と見なし、非常に広い地表面が冬期間積雪により覆われており、また、その厚さが十分あり地表面では外気温の周期的な影響を受けず0℃に保たれている伝熱モデルを想定し解析を行う。このモデルを記述する経時変化を考慮した地表面に垂直下向きの非定常1次元熱伝導方程式は次のように表すことができる。

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad (4.1)$$

ここで、 $z$  [m]は鉛直方向距離である。また、 $\theta$  [K]、 $\tau$  [h]、 $a$  [ $\text{m}^2/\text{h}$ ]は温度、時間、温度伝導率である。初期条件、境界条件を次とする。

$$\tau = 0 \quad ; \quad \theta = t_e(Z)$$

$$\begin{aligned}
 z = 0 & \quad : \text{without snow covered} & : \theta = \theta_{\text{sol}, e} \\
 & \quad : \text{with snow covered} & : \theta = 0
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

積雪のない期間の地表面温度は、太陽からの日射を考慮した日射温度  $\theta_{\text{sol}}$  は前述の式 (2.5) により表される。

## 4.2 数値解析

微分方程式 (4.1) を図 4-1 で示す差分格子を用いて次のように陽差分近似する。

$$\frac{1}{a} \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} = \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta z^2}
 \tag{4.3}$$

よって  $\Delta \tau$  だけ経過した後の任意の断面の温度を  $\theta'$  とし、従属変数  $\theta_K$  について整理すると、

$$\theta_{K'} = \frac{(A_1 - A_2 - A_3) \theta_K + A_2 \theta_{K+1} + A_3 \theta_{K-1}}{A_1}
 \tag{4.4}$$

この方程式は全ての要素  $k$  に対して成立するため、境界以外の全制御要素数と同数導かれる。したがって、これらを一つの連立方程式とみなし、境界条件と初期条件を与えて解くと各時間での温度分布を導くことが出来る。

ただし、

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{1}{a \Delta \tau} \\
 A_2 &= \frac{1}{Z_P - Z_M} \frac{1}{\Delta Z_P} = \frac{1}{\Delta Z^2} \\
 A_3 &= \frac{1}{Z_P - Z_M} \frac{1}{\Delta Z_P} = \frac{1}{\Delta Z^2}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

初期条件の地中温度  $t_e$  は式 (2.19) により与える。

## 4.3 解析結果

計算に用いたおもな条件、値を表 1 に示す。

12月から2月中旬または3月中旬までは、これまでの日射温度の代わりに雪と地表面の界面を  $0^\circ\text{C}$  として計算を行った。

図 4-2-A は従来どおりに冬期間も日射温度を使った場合で、図 4-2-B は冬期間だけ日射温度の代わりに雪と地表面の界面を  $0^\circ\text{C}$  とした場合の3年間の温度変化である。

地表面から50cmの地点での地中温度変化は、12月から4月までは雪による保温効果が見られるが、5月から11月にかけてはさほど変化がない。図 4-3 は地表面から100cmの地点のものであるが、雪の保温効果が徐々に現れてきている。また、保温効果を考慮した場合としなかった場合および初期条件での周期関数での温度変化の2年目について比較したものであるが、保温効果を

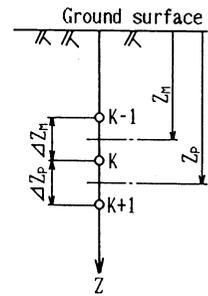


図 4-1 解析モデルの座標系

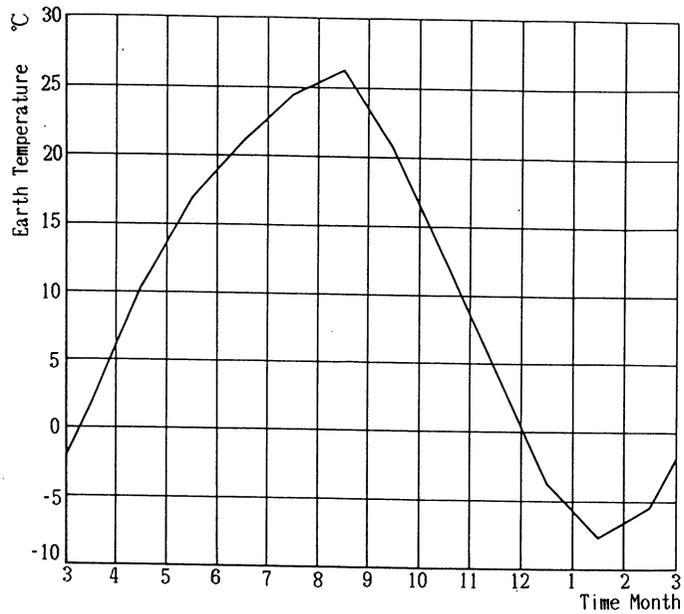


図4-2-A 地表面温度 (Without snow cover model)

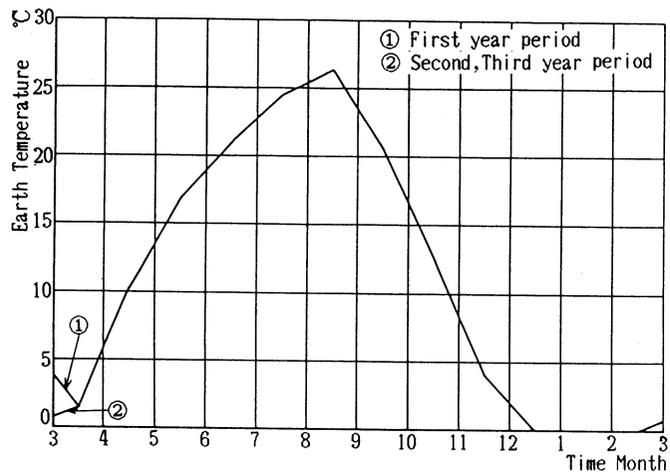


図4-2-B 地表面温度 (With snow cover model)

考慮したものは冬期間は他のものに比べて4℃ぐらい高くなっている。地表面より50cmの地点になると土壌の勢伝導の時間遅れにより地中温度の周期性が現れてきているが、保温効果はよりはっきりしてくる。

このように、積雪は空気の割合が多いため極めて熱伝導の悪い物質である。そのため冬の気温が低いときでも、積雪深さが50cmを越えると外気温の影響が積雪面下まで及ばず、界面は常に

地温によって加熱されている。したがって、積雪による保温効果によって地中温度が極端に下がらないことが明かとされる。<sup>6)</sup>

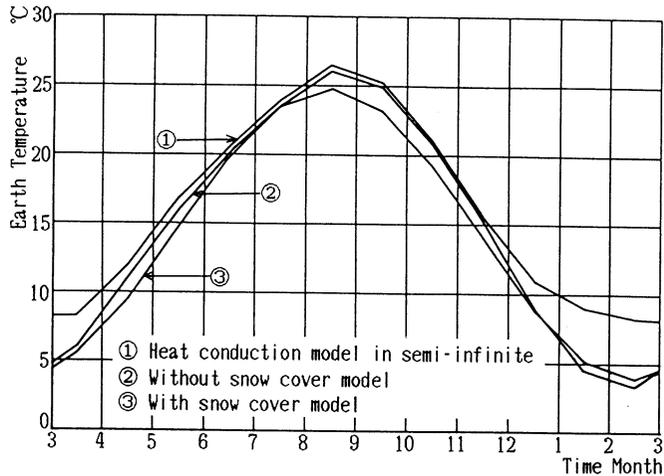


図 4-3 地中深さ 1 m での地中温度の比較

## 5. 結 言

本研究では冬期間の冷熱を雪あるいは氷の形で長期間、大規模に貯蔵する地下埋設型施設の熱解析を行った。

- (1) 地下埋設型大規模貯雪氷施設については、特別な断熱構造を用いず、安全側に見積り解析を行ったにもかかわらず、十分な断熱構造を持つ地上設置型のものと比較すると雪氷が12月末日で5%以上も多く融解せずに残り、通年保存するために十分利用可能であることが明かとなり、地下の優れた断熱性を確認することができた。
- (2) 大規模貯雪氷施設の熱解析における演算時間の短縮を目的とした、角柱モデルを円柱モデルに置き換え近似し解析する方法は、大規模な施設あるいは小規模の縦横比の小さなものに対しては誤差も少なく、よい解析方法であることが明かとなり、貯雪氷施設の熱設計に十分に利用に値するものである。
- (3) 積雪による地面の保温効果は、これまでの地中温度の解析方法では実際の地中温度よりも低い値であったが、冬期間の積雪による地面の保温効果を考慮した場合の解析方法でかなり実際の地中温度に近い値を得た。

冬期間の雪氷など冷熱を長期間、大規模に貯蔵する施設を地下に埋設することを想定し、熱設計の実際において重要な問題の検討を行い、あらためて本施設の有用性を示した。本研究結果が積雪寒冷地での生活の向上に役立つものであれば幸いである。

媚山政良・斉藤 函・岸浪 機・横田亮則・渡辺泰文

なお、本研究は「氷室計画」の一環として行われたものであり、産学官の多くの方々のご支援、ご教示を賜った。付記し謝意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) 媚山・ほか4名：機論(B), 55-517 (1989-9), 2886.
- 2) 媚山・ほか4名：機論(B), 55-518 (1989-10), 3178.
- 3) 西川兼康, 藤田添伸：理工学社, 伝熱学 (昭和60-12), 66.
- 4) 日本機械学会：伝熱工学資料, (昭和43-10), 31, 258, 259.
- 5) 日本気象協会北海道支部：北海道の気候, (昭和58-7), 24, 36.
- 6) 木下誠一：技報堂出版, 雪と氷のはなし, (昭和63-1), 96.

# 反射シートによる太陽光の集熱，採取に関する研究

媚山政良，松本尚雄，谷藤耕二，山本 司，諸橋 聡

## The Condensation and Collection of Solar Energy by a Reflection Sheet

Masayoshi KOBAYAMA, Hisao MATUMOTO<sup>\*1</sup>, Kohji TANIFUJI<sup>\*2</sup>,  
Tukasa YAMAMOTO<sup>\*3</sup> and Satoshi MOROHASHI<sup>\*4</sup>

### Abstract

The utility of natural energy, such as solar energy, has been looked over again to secure the energy resources and to keep environment clean. As the solar energy has a defect of the energy density being low, in this paper, the authors tried to improve this defect by the application of reflection sheet with free configuration.

Two systems with simple constructions for actual use are discussed here, that is, in the one system, the solar energy is reflected and condensed by the sheet installed on the side wall of building which should be insulated from solar radiation, in the other system, a reflection sheet is set in a green house and the solar radiation in the early spring is reflected by this sheet and absorbed by the soil in this green house.

The characteristics of solar energy of both systems are investigated by the theoretical analysis and is resumed by experimental test in the case of latter system. It is cleared that those systems are useful.

## 1. 緒 言

エネルギー資源の確保あるいは環境の保全から化石あるいは核燃料の消費を極力抑制せざるを得ない情勢にある。このような背景のもと，改めてエネルギー源の多用化が図られ，また，自然エネルギーの利用が見直されている。

一般に自然エネルギーはエネルギー密度が低いなどの欠点があり，本研究で取り上げる太陽光に関しても例外ではない。したがって，自然エネルギーの利用では，他の目的との併用によりエネルギーの採取コストを下げる，あるいは，簡便な方法によりエネルギー密度の増加を図るといった方策を施す必要があり，その各々の目的に対し形状に自在性のある反射シートによる反射系を用い対処する方法を考案し，検討を行ったので報告する。

まず，前者に関しては，冷凍倉庫のように太陽光を嫌う施設の外壁に反射シートを張り付け，入射した太陽光を反射させ施設への侵入熱の低減を図るとともに，地上に設置したソーラー・コ

---

<sup>\*1</sup> 南北海道ディーゼル工業    <sup>\*2</sup> 谷藤工業    <sup>\*3</sup> 日鉄ライフ    <sup>\*4</sup> 大学院工学研究科（産業機械工学専攻）

レクターへの入射光を増加させる太陽光反射除去採取系を提案し、その性能予測を行った。また、後者に関しては太陽高度の低い早春期、ビニールハウスを横断する太陽光をハウス内に設置した反射シートにより反射後、ハウス内土壌に入射、吸収させ、ハウス内でより多くの太陽光を採取する装置を提案し、その性能予測と実用上の問題点の検討を行った。

## 2. 低温施設の太陽光遮蔽と反射太陽光の採取

冷凍倉庫など太陽光を嫌う低温施設の断熱構造を考えると、大気と接する外壁表面の反射率を上げ太陽光による冷凍負荷を減ずることは重要である。また、低温施設の断熱という観点からすると、体積に比較し表面積の小さな大型の施設が望ましく、大型倉庫の広い側壁は太陽光に対する集熱面あるいは反射面として利用できる。

このような外壁を集熱面あるいは反射面として利用する場合には、外壁に集光パネルあるいは反射材を固定する上での強度も十分にもたせることができ、さらに、集熱面あるいは反射面の設置による日影を生ずる問題もなく、広い面積を確保することができる。しかし、本来、壁は固定し移動を考えないため、集熱面とするならば太陽の移動を追跡することはできず必ずしも望ましい利用形態ではなかった。このため、ここでは太陽光の採取を行う集熱面（ソーラー・パネル）を壁とは離れた位置に置き、壁には形状の自在性を持つ合成樹脂をベースとした反射シート膜を立て掛け、このシートにより太陽光を反射、集光させ集熱面への入射光の増加を図ることとする。

### 2.1 反射集光モデルおよび太陽熱の反射系の計算式

低温施設など建屋の外壁に太陽光反射シートを使用し、太陽光の遮光とともに太陽光の反射、集光を行う。この場合、反射シートのもっとも簡便で基本的な設置方法は図1に示す垂れ幕型に引き立てた自然な曲率を反射面とするものである。また、集熱面をこの反射シートの南側に置く。このように、低温施設の外壁にある程度柔軟性のある幅  $z_0$  [m] の太陽光反射シートを取り付け、低温施設の遮光を行う事を想定する。シートの上部（位置  $y_0$ ）は図1に示すように、低温施設の外壁に固定し、地上の下部は水平方向（ $x$ ）に移動できる構造とし、四季など大きな時間単位でシートの作る面を変化させる自由度を持たせておく。ここでは反射面の曲面を次式により表すものとする。

$$y = a \cdot (x - x_0)^2 \quad (1)$$

ここで、 $x_0$  は  $y_0$  をもとに次式により計算し、シートの形状は(1)の係数  $a$  を変化させることにより決める。

$$x_0 = (y_0/a)^{0.5} \quad (2)$$

また、外壁から南方向  $x^*$  の位置に高さ  $y^*$ 、長さが遮光シートと同じ  $z_0$  の集熱器を設置する。なお、この集熱器は北側（内側）および南側（外側）集熱面の両方を利用するものとし、集熱器は鉛直に立っているものとする。また、集熱器とシートの間地上にも反射シートを敷く。この

受光，受熱集熱器は用途により種々の要素を取り付けることも，また，種々の形状を採ることも可能であり，その各々については別途検討を行うこととし，ここでは，このような太陽熱採取系の能力，特性の限界を知るため，全てのシートの反射を鏡面反射と考え，また，ソーラー・パネルの入射面を黒体とし，さらに，太陽光は直達成分を考える。

太陽光の集熱器表面への直接到達量および反射到達量は太陽の日時による軌道の変化を考慮し，また，全天日射量を日の出から日の入りまで正弦関数により分配し，複数の放射熱流束に離散化した後，各放射熱流束の軌跡を追跡し算出する。

## 2.2 計算例とその検討

計算の対象とする装置の寸法を図1に示す。シートへ入射し反射した後，集熱器へ到達する太陽光の量はシートの作る面により決まる（ここでは，式(1)の係数  $a$  により決まる）。太陽高度の低い冬期間においては，シートの形状は垂直に近い（ $a$  の値が大）ものが反射による内側集熱面への伝達量が多く，これに対し，夏期においての  $a$  値が小さい方が伝達量が多い。シートおよび集熱器の寸法，シートと集熱器の位置関係，あるいは，設置する場所の緯度，さらに，どのような熱利用を行うかなどから最も適切な  $a$  の値，すなわち，シートの形状は決定される。

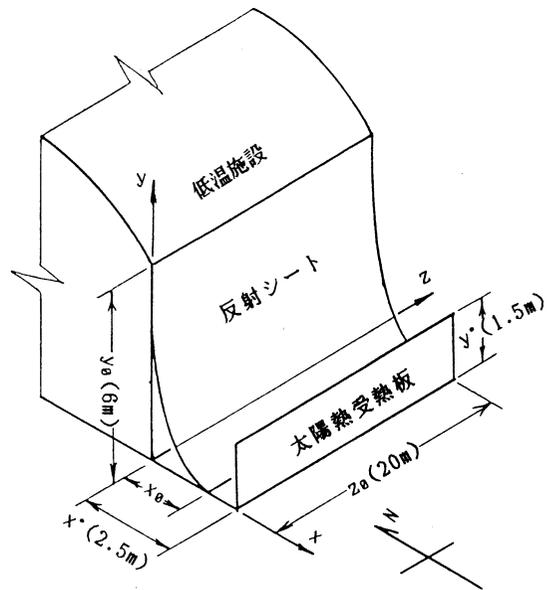


図1 低温施設南側外壁に取り付けた反射シートおよび太陽熱受熱板の配置

なお，屋根のひさしを用いシートの上端をせり出し特に冬期間あるいは早朝など太陽高度の低い場合での集熱効率を高めること，あるいは，シートの自在性を利用し東西方向（ $z$ -方向）に適当な曲率を持たせることも可能である。

午前10時に入射した太陽光の軌跡を図2に示す。いずれも右側の図は左図最上部に入射した太陽光の  $x-z$  面上での軌跡（与えられた集熱器に対し限界を示す）を示している。

月別入射太陽光とその成分を図3に示す。太陽高度の高すぎる6～7月での全入射熱量は減少しているが，集熱器の外側面（南側）に傾斜を持たせることにより熱量の増加を図ることもできるが，傾斜角の選定などは利用者の判断を待つところである。

シートおよび集熱器に入射した太陽光のうち集熱器（内側面（北側）および外側面（南側））に到達した太陽光の割合を図4に示す。6月での早い時刻での値は他の月よりも小さいが，これ

は、太陽の方位角が小さく、南を向いたシートおよび集熱器に太陽光の入射が少ないためである。

6月1日を例にとり、集熱器に到達した太陽光のうち、内側の集熱面により集熱された量と外側での量を分離して図5に示す。また、内側受熱面への到達量を外側での到達量を外側での到達量で除した値（内外到達比と呼ぶ）を図6に示してある。太陽高度の低い早朝では外側集熱面での太陽光の到達量が多く、昼に近くなるにつれ減少している。内側集熱面では逆の傾向を示し、このような時刻に対し相反する性質の集熱面を併用することは受熱量を増加させるとともに若干ながら平坦化にも役立っている。

受熱器への到達熱量および内外到達比は反射シートの高さ  $y_0$ 、受熱板の高さ  $y^*$ 、両者の間隔  $x^*$  および太陽高度、すなわち、設置地域の違いにより影響を受け、本装置の実用時にはその最適化に関する検討を行う必要がある。なお、一枚のソーラーパネルの前後を集熱板として利用できる特徴を実用上役立つこともできる。

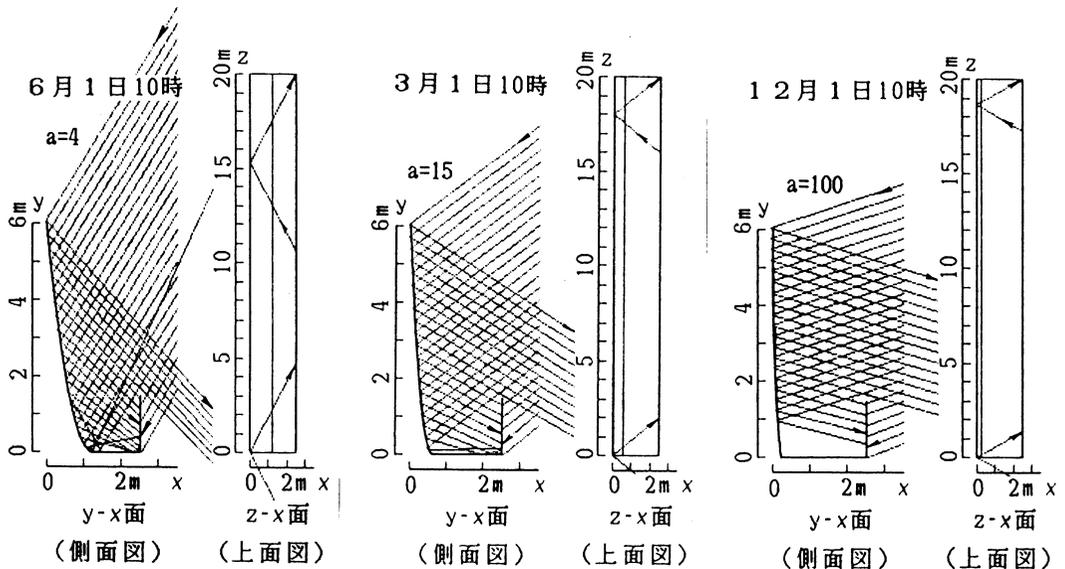


図2 入射太陽光の軌跡

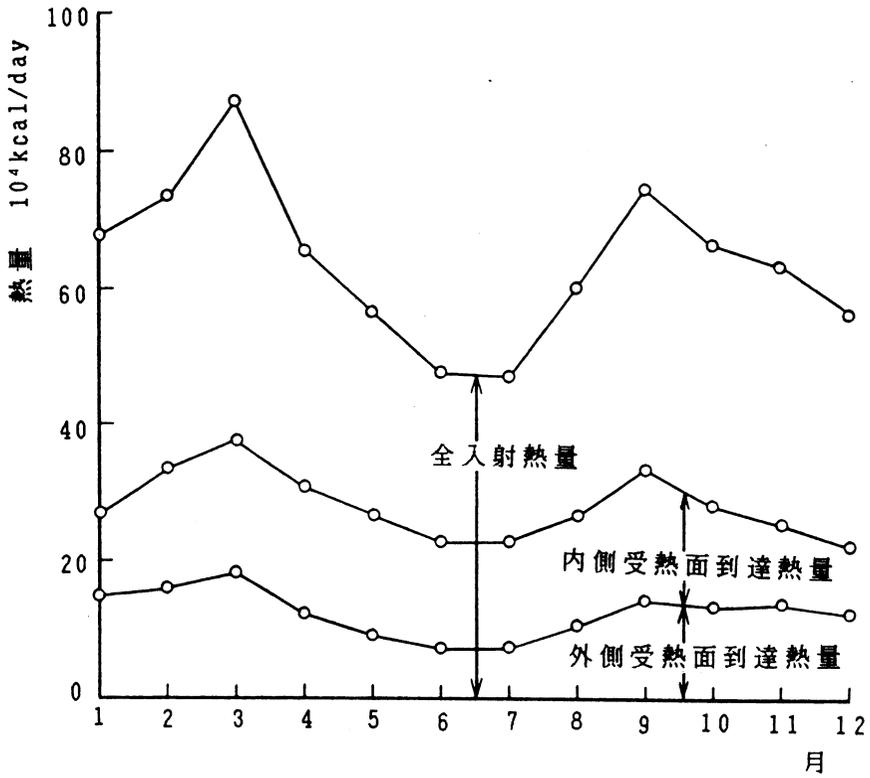


図3 月別入射太陽光とその成分

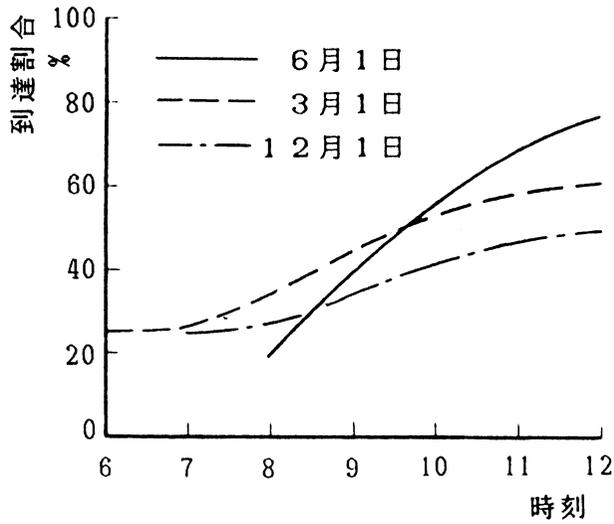


図4 入射太陽光のうち受熱板へ到達する割合

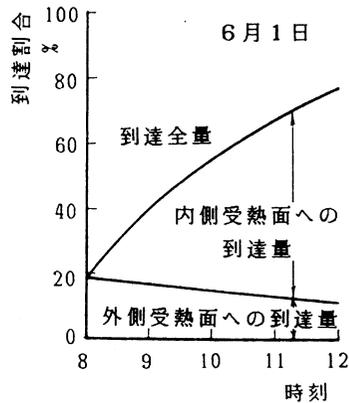


図5 受熱板到達太陽光の成分

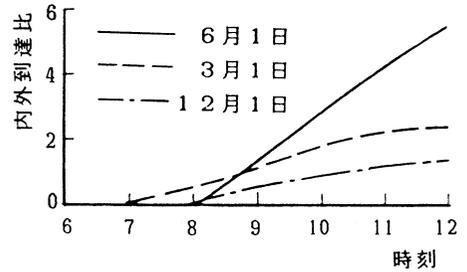


図6 内外到達比  
[=(内側面到達量)/(外側面到達量)]

### 3. 早春期における反射シートによるビニール・ハウス内への採光

早春期、寒冷地域においてもビニール・ハウスによる温室を利用したい要求が多くある。しかし、この時期、太陽高度が低いため日射量は少なく、また、とくに夜間の大気温度の低下は厳しく、ハウス内温度の維持のため容量の大きな暖房設備を設置せざるを得ない状況にある。このような背景のもと、温室内に反射シートを設置し、太陽光の反射採光を積極的に行うとともに、太陽熱を地中に蓄熱し、さらに、夜間の放熱を反射シートを利用し防ぎ温室の暖房熱負荷を軽減する簡便な装置の開発を試みた。また、本装置の実用時での問題点などを明かするため厳寒期に実際のハウスを設置し実験を行った。

従来の温室では太陽光の取得のほとんどを直接床に到達する日射に頼っており、図7に示すような壁を通して温室内を通過していく日射は利用していなかった。本温室装置では、温室内を通過していく日射を温室内に採光するため、図8 aに示すように、温室北側に反射シートを設置する。また、夜間の温度の低下を防ぐため、図8 bに示すように地表面側を反射シートとした保温カバーを設ける。なお、反射系を利用する観点からすると、温室の南側地表面に反射シートを設置しシートから反射する太陽光、あ

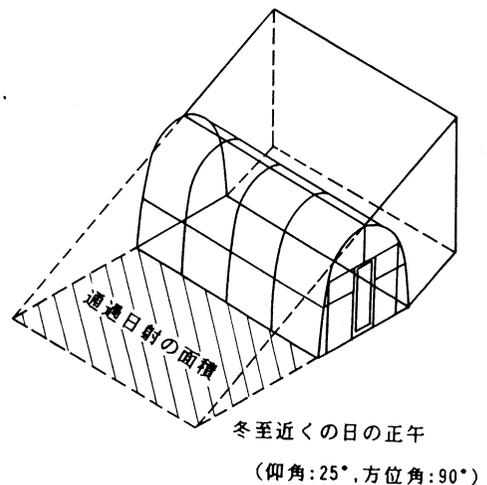


図7 ビニール・ハウスを通過する太陽光

るいは雪面を反射する太陽光の採光もできる。

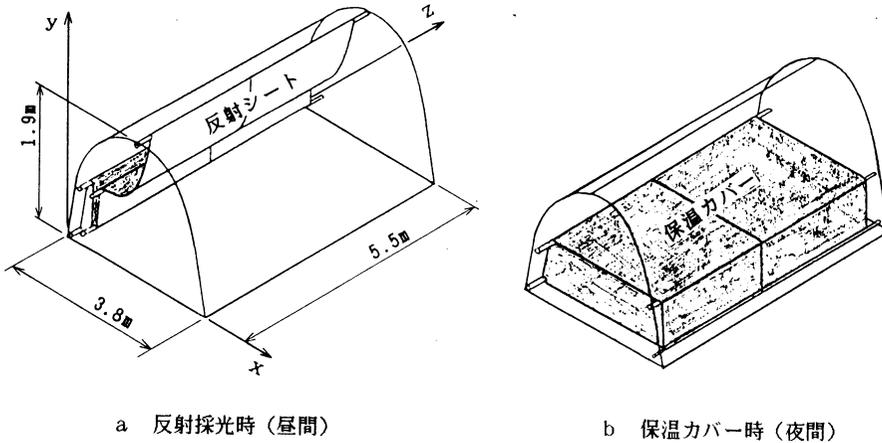


図8 太陽光取得反射シートと夜間保温カバー取付け時の形状

### 3.1 採光量の推定計算式

上部反射シート面の形状を図9に示し，また，次式により近似する。

$$y = b(x - x_E)^n + y_B \quad (3)$$

なお，形状を変えるためには $n$ を変化させる。ここで，図9に示す幾何学形状から $b$ の値は次式で与えられる。

$$b = \frac{Y_A - Y_B}{(X_A - X_E)^n} \quad (4)$$

下部反射面は直線として， $X$ 軸との傾きを変えることによって変えるものとする。

なお，太陽光の温室地表面への直接到達量および反射到達量は第2章での計算と同様の方法により算出する。また，計算の簡素化と本装置の能力の限界を把握するためビニールの透過率および反射シートの反射率をとともに1する。

### 3.2 計算結果とその検討

計算に用いた装置の寸法を図8に示す。また，2月1日10時での太陽光の軸跡を図10aに，また，その時の地面での到達点の分布を同図bに示す。なお，上部反射面の形状は $n = 5$ の曲面，下部反射面の形状は

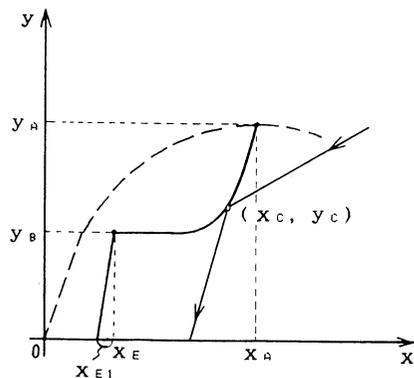


図9 反射シートの座標

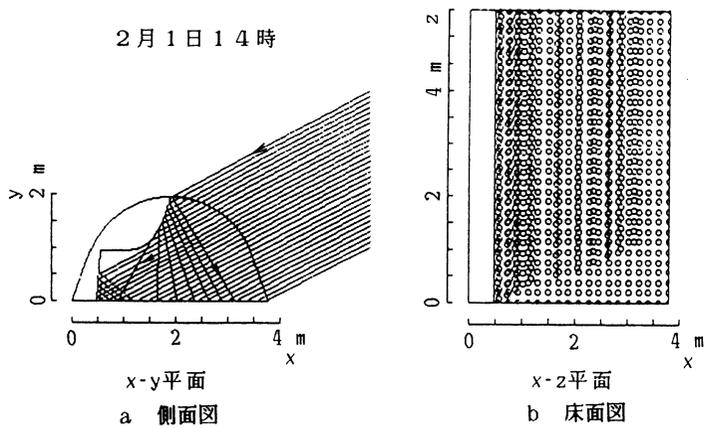


図10 太陽光の入・反射軌跡 (計算値)

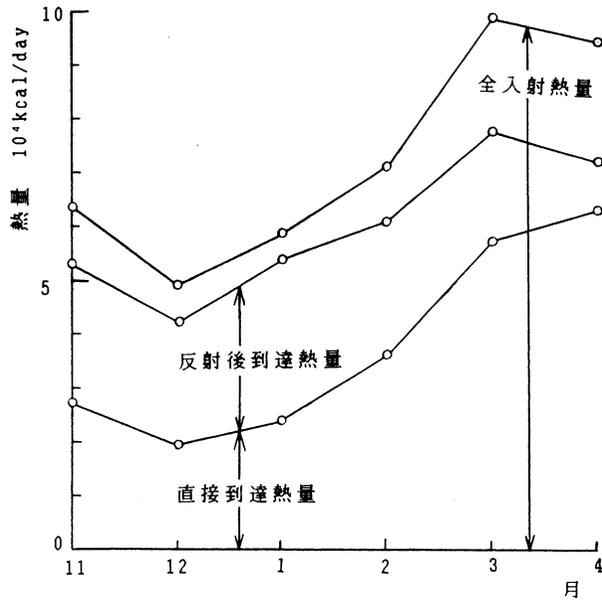


図11 月別入射太陽光とその成分 (計算値)

軸との角度が $85^\circ$ の平面である。

月別の全入射太陽光の熱量および温室内に到達した直接到達熱量と反射後到達熱量を図11に示す。反射後の到達熱量は1月において最大であり、直接到達熱量と同程度である。また、太陽高度の低い3月までは反射シートにより太陽光の採取量はかなり増加している。この自然太陽光の増加はハウスの昇温のみならず植物の光合成の促進にも大きな寄与を与えることは注目しておく

べき点である。なお、冬期間実際にハウスを利用している農業家に聞く所によると、冬期間のハウス内の温度維持よりも太陽光の増加策の開発の方が重要な課題となっている由であり、本装置の有用性がわかる。

### 3.3 実験および実験結果とその検討

本実験では比較検討を行うため室蘭工業大学のグラウンドに二棟のハウスを設置し、厳冬期に実験を行った。東側に市販のものをそのまま設置したハウス（温室A）と、西側に温室Aと規模は同じで内側に図9に示すような垂れ幕型の自然な曲率の反射シートと下部に適当な角度をもった反射シートを反射面を南側に向けて設置してあるハウス（温室B）である。温室Bの反射シートは、夜間、図8bに示すように保温カバー（午後3:30～午前9:00）に変形できる構造としてある。

温室A、B内中央の地上50cmでの温室内温度および外気温を図12に示す。同図に示す12日間の試験期間中1月30日は終日晴天であったが、22、23、24、29、31日は降雪あるいは曇天であり、他は晴れ時々曇りであった。なお、1月25日には終日保温カバーを設置した。図13には晴天であった1月30日の測定諸量を示す。また、温室A、B内の中央の地中10cmの地温とハウス間中央の地中10cmの地温を図14に示す。

たとえば、本装置の効果が顕著に表れている晴天であった1月30日の結果を見ると、反射シートの設置に伴うハウス内空気の温度上昇は土壌の温度上昇の半分程度である。この結果から、太陽光は直接あるいは反射シートにより反射されたのち地中に吸収され、地表面温度の上昇によりハウス内空気を加熱する機構が推測される。図13に示す晴天日での温室B内の気温は、雪面からの反射光の採光もあったが、温室A内よりも正午近くで約5℃高く、また、外気温よりも、約15℃高い結果を得ており、冬期間日射量の多い地方で反射シート取り付けによる高い集光の効果を期待できることがわかる。また、夜間の保温カバーによる保温の効果はハウス内の空気温度に表れている。しかし、深夜の地温の低下防止は保温カバーによるだけでは不十分であり断熱材の地下埋設、あるいは、雪による断熱などによる保温機構を装置に組み込む必要がある。

なお、実験では保温カバーあるいは外壁ビニールシート上での結露、結氷が認められ、太陽光の透過、反射の阻害要素となっており、外壁ビニールシートの多層化なども実用上必要である。

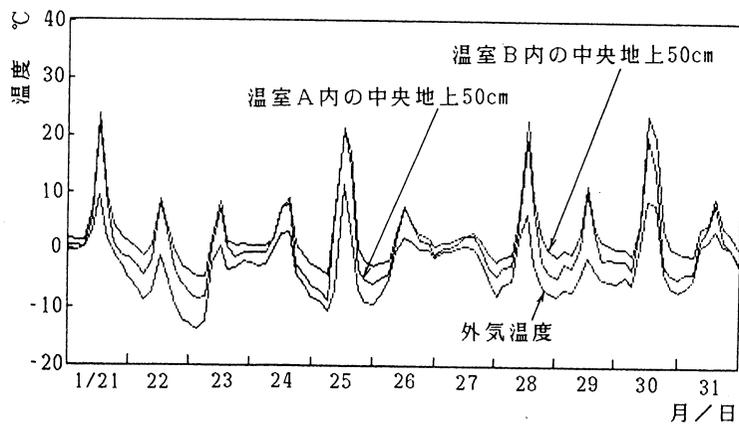


図12 ハウス内温度および外気温

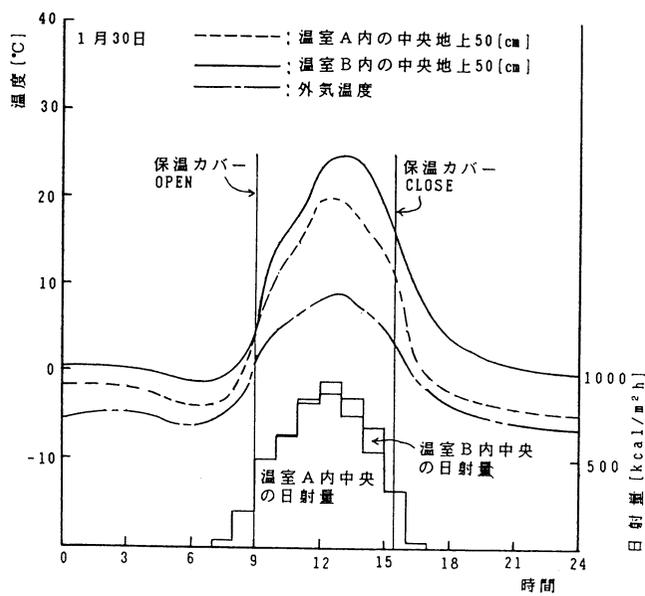


図13 晴天であった1月30日の温度、日射量

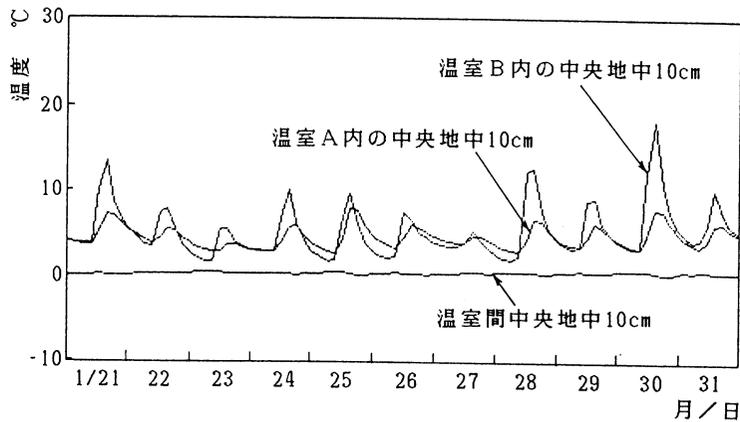


図14 ハウス内中央およびハウス間中央の地温

#### 4. 結 言

エネルギー資源の確保あるいは環境の保全から自然エネルギーの利用が見直されている。一般に太陽エネルギーはエネルギー密度が低いことなどの欠点があるが，本研究では自在性のある反射シートによる反射系を用いこの欠点を克服することを試み，代表的な例として低温施設などの太陽光遮蔽と同時に反射太陽光の採取を併せ行う方法，および，反射シートによりビニール・ハウス内への採光を増加させる方法の二通りについて検討を行った。

反射シートを保冷と太陽光採取の両目的に利用することにより装置全体の経済性の向上に役立つとともに，低温施設，ソーラ施設の占有面積の減少にも役立つ。また，反射シートによるビニール・ハウス内への採光を増加させる方法はとくに太陽高度の低い冬期間に有用である。なお，両方法とも簡便で安価な装置であり，とくに，本装置が寒冷，積雪に苦しんで来た雪国の人達に役立つものであれば幸いである。

本研究は「氷室計画」の一環としてなされたものであり室蘭ヒートパイプ研究会の研究者をはじめとした多くの関係諸兄のご協力，ご援助を賜った。なお，反射シートの製作には(株)三晃化学殿のご協力を得た。付記し謝意を表す次第である。

# 密閉管内水の凍結圧力と表面熱伝達の関係

齊藤 図

## Relation between Pressure Rise due to Freezing of Water Filled in a Circular Tube and Heat Transfer Conditions on the Surface

Hakaru SAITO

### Abstract

Pressure rise due to freezing of water enclosed in a circular tube has been studied in this paper. A theoretical model is established by considering the heat transfer conditions on the outer surface of the tubes, elastic deformations of the tube walls, and change in the freezing temperature of water due to the increase in pressure. Numerical calculations were performed to integrate the theoretical equations. The calculated results showed a good agreement with the experimental results.

The new dimensionless parameters have been introduced, by combining the results thus obtained for various different conditions, to correlate the pressure in tubes to heat transfer conditions on the surface and physical properties and the dimensions of tubes.

### 使用記号

$a$	: 温度拡散率	$R_t$	: $R_o - R_b$ : 管の肉厚
$C$	: 比熱	$\Delta R_i$	: 氷層の厚さ
$E$	: 縦弾性係数	$F^*_{crit}$	: 無次元凍結破壊時間
$h$	: 管表面における熱伝達率	$\Delta R_i$	: $\Delta \tau$ 内に成長する氷層厚さ
$m$	: ポアソン数	$\Delta R_w$	: 氷層 $\Delta R_i$ が凍結前に占めていた 水の層の厚さ
$P$	: 管内の圧力	$T$	: 管内における水の温度
$P_{crit}$	: 限界応力 $\sigma_{crit}$ をもたらず管内圧力	$T_f$	: 管内水初期温度
		$T_o$	: 外気温度
無次元数;		$\Delta T_f$	: $\Delta R_i$ の氷層成長に伴う圧力上昇 による氷点降下
$Bi$	: ビオー数 = $(hR_o/\lambda_s)$	$T_f - T_o$	: 管内水初期温度と外気温度の差
$\Delta Q$	: 圧力上昇に伴う管の変位量	$\Delta W = \Delta R_i - \Delta R_w$	: 凍結による体積増加
$R_o$	: 管の外半径		
$R_b$	: 管の内半径		

$B^*$	: 修正ビオー数 = $Bi / \ln(1 + R_o/R_b)$ = $(hR_o / \lambda_s) / \ln(1 + R_o/R_b)$	ギリシャ文字 ;
$Fo$	: フーリエ数 = $a_i \tau / R_b^2$	$\rho$ : 密度
$F^*$	: 修正フーリエ数 (無次元時間) = $Fo \times Ste$	$\lambda_s$ : 管材料の熱伝導率
$P^*$	: 無次元圧力	$\sigma$ : 応力
$Ste$	: ステファン数 = $C_i (T_f - T_o) / L$	$\sigma_{crit}$ : 限界応力
		$\Delta \tau$ : 時間刻み
		添字 ;
		i : 氷を表わす
		w : 水を表わす

## 1. 緒 言

冬季間、水道配管内の水が凍結し体積膨張によって水道管が破壊することがよくある。この現象は、本質的には水の凍結にともなう体積膨張にその原因があることはいうまでもない。管内水の一部が凍結しその体積膨張によって残りの水を排除するとき、水が逃げ場を失うことによるのである。

管内の水層の進行は、外からの冷却、凍結の進行に伴う潜熱の放出、管内水からの供給熱などのバランスによって決定される伝熱現象であり、一方、管の破壊は管内水の圧力上昇による管壁内応力が破壊限界を越えることによるものである。従って、凍結破壊の問題は相変化を伴う複合伝熱問題と材料力学との連成問題としてとらえなければならない。

管内の凍結問題は、古くからいわゆる Stefan 問題として扱われてきており、現象がきわめて身近のものであることならびに問題の数学的興味とも相まって、多くの報告がある<sup>(1)-(3)</sup>。それらの研究とここに報告する管内凍結破壊問題との間には本質的な違いがある。これまでの研究においては凍結が水の3重点において起こり、凍結境界面の温度が凍結の進行によって変わらない、としている。これに対し、本研究の対象とする問題では、氷層厚さの増加によって管内圧力の上昇の大きさは常圧から管の破壊圧力にいたる広い範囲であって、その結果、凍結温度は水の3重点とは著しく異なったものになる。<sup>(4)-(5)</sup>。従って、このような凍結問題は、単純な Stefan 問題として扱うことはできない。

本研究は、種々の管径における凍結破壊過程と管外表面における熱伝達条件との間の関係を明らかにするため、いくつかの条件下における破壊実験を行った実測例を示すとともに、これまで著者らが提案してきている物理的モデルによる数値実験結果を示し、管内圧力と管外表面温度及び熱伝達率、ならびに管の強度など材料力学的性質を含めたパラメーターの相互関係を提案す

るものである。

## 2. 凍結破壊に関する理論的考察

### 2.1 理論モデルの概要

図1は、密閉管内における水の凍結に関する理論モデルの概要を示したものである。すなわち、外径  $R_o$ 、内径  $R_b$ 、壁の厚さ  $R_t = R_o - R_b$  の円筒管内に温度  $T_f$  の水が密封されていて、管表面からの冷却によって管内表面に厚さ  $R_b - R_i$  の氷層が成長している。外気の温度  $T_o$  を一定、 $\Delta \tau$  時間内に成長する氷層厚さを  $\Delta R_i$ 、それに伴う圧力上昇による氷点降下を  $\Delta T_f$  とする。

氷層形成のための潜熱および管内水の氷点降下に相当する顕熱が管表面から除去されるものとする、氷層内表面におけるエネルギーバランスは次のように表される。ただし、氷層内における顕熱変化は無視し、管内水の温度は一様と仮定している。

$$L \rho_i \frac{dR_i}{d\tau} = \lambda_i \frac{dT}{dr} - \frac{1}{2} \rho_w C_w R_i \frac{dT_f}{d\tau} \quad (1)$$

ここに、 $L$ ：凝固の潜熱、 $\rho$ ：密度、 $\lambda$ ：熱伝導率、 $C$ ：比熱であり、添字  $w$  および  $i$  はそれぞれ水及び氷に対する値であることを示す。

氷層  $\Delta R_i$  が凍結前に  $\Delta R_w$  を占めていたとすると、凍結によって  $\Delta W = \Delta R_i - \Delta R_w$  だけ体積が増したことになる、管が密閉されていれば圧力の上昇をもたらす。この圧力上昇によ

って氷面が外側へ向かって変位するが、この変位を  $\Delta Q$  とし、管内水の体積変化を  $\Delta V$  とすれば、

$$\Delta V = \Delta W - \Delta Q \quad (2)$$

$\Delta V$  は圧力上昇による水の体積変化であるから、圧縮率  $\alpha$  を用いて表わせばつぎのようになる<sup>(4)</sup>。

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = -\frac{1}{2} \alpha R_i \quad (3)$$

$\Delta Q$  は、内圧  $\Delta P$  を受ける厚肉円筒の変形量と同じであるから、 $\bar{R}_o = R_o/R_b$ 、 $\bar{R}_b = R_b/R_i$  とおくことにより、

$$\Delta Q = \left( \frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} + \frac{1}{m_i} \right) \frac{\Delta P}{E_i} R_i - \frac{2\bar{R}_b^2}{\bar{R}_b^2 - 1} \cdot \frac{\Delta P_b}{E_i} R_i \quad (4)$$

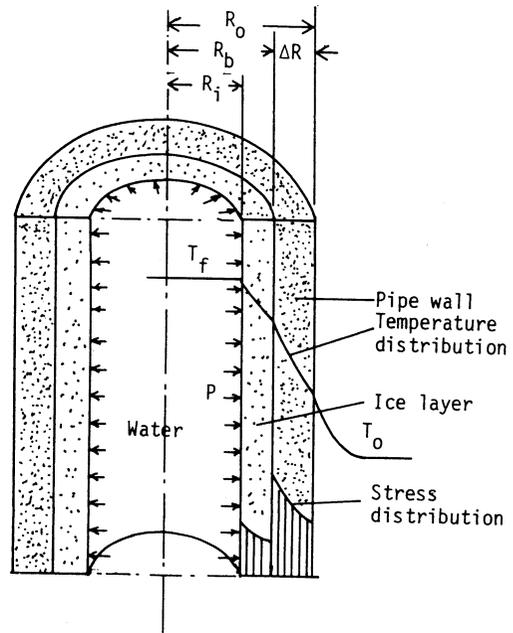


図-1 理論モデル

式(4)中、 $\Delta P_b$  は氷層と管内表面の境界における圧力の増分で、次式より得られる。

$$\Delta P_b = \frac{2 \Delta P / \{E_i (\bar{R}_b^2 - 1)\}}{\frac{1}{E_s} \left( \frac{\bar{R}_o^2 + 1}{\bar{R}_o^2 - 1} + \frac{1}{m_s} \right) + \frac{1}{E_i} \left( \frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} - \frac{1}{m_i} \right)} \quad (5)$$

ただし、 $E$ ：縦弾性係数、 $m$ ：ポアソン数、添字  $s$  および  $i$  は管材料及び氷に対する値であることを示す。このとき管内表面に生じている周方向応力  $\sigma$  は、

$$\sigma = \frac{\bar{R}_o^2 + 1}{\bar{R}_o^2 - 1} P_b \quad (6)$$

$\Delta \tau$  時間内における圧力変化  $\Delta P$  による密度変化を  $\Delta \rho$  とすれば、圧縮率  $\alpha$  は定義より、 $\alpha = (\Delta \rho / \Delta P) / \rho$  なる関係がある。また、凍結前の厚さ  $\Delta R_w$  の水が凍結によって厚さ  $\Delta R_i$  の氷になったとすると、凍結前後の質量保存から、 $\rho_i \Delta R_i = \rho_w \Delta R_w$  でなければならない。これらの関係及び前掲の諸式より、 $\Delta P$  について解くことができる。すなわち、

$$\Delta P = \frac{(1 - \rho_i / \rho_w) \Delta R_i}{\frac{1}{2} \alpha R_i + \frac{R_i}{E_i} (A - B)} \quad (7)$$

式(7)中の  $A$  及び  $B$  は次の関係から求められる。

$$A = \frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} + \frac{1}{m_i}, \quad B = \frac{4\bar{R}_b^2 / (\bar{R}_b^2 - 1)^2}{\frac{E_i}{E_s} \left( \frac{\bar{R}_o^2 + 1}{\bar{R}_o^2 - 1} + \frac{1}{m_s} \right) + \left( \frac{\bar{R}_b^2 + 1}{\bar{R}_b^2 - 1} - \frac{1}{m_i} \right)}$$

これらにの関係より微小時間  $\Delta \tau$  に生じた圧力上昇  $\Delta P$  を求めることができる。

また、圧力上昇に伴う氷点温度  $T_f$  の変化は Clapeyron - Clausius の式、

$$\frac{dT_f}{dP} = \frac{T_f (v_w - v_i)}{L} \quad (8)$$

より求められる。ただし、 $v$  は比体積である。

## 2.2 数値計算過程の概要

- [1] 式(1)において、 $dT_f/d\tau = 0$  において初期氷層厚さを求める。
- [2] 氷層内および管壁内の温度分布を準定常仮定に基づいて計算する。
- [3] ついで、式(6)より  $\Delta P$  の第1近似値を求める。
- [4] この結果に基づいて式(7)より氷点降下  $\Delta T_f$  を計算する。
- [5] これらの結果から、初期に仮定した  $dT_f/d\tau$  を補正し、式(1)により新たな氷層厚さを計算する。[2]～[4]と同様の過程を  $\Delta P$  が所定の精度で収束するまで繰り返す。
- [6] 時間刻みを  $\Delta \tau$  進め、[1]以下の過程を繰り返す。

この計算では、温度分布  $T$ 、凍結温度  $T_f$ 、氷層径  $R_i$  および圧力  $P$  などの変数についてことごと

とく収束させねばならないが、実際に計算を行なってみると、圧力  $P$  の収束がもっとも遅いので、計算途中における収束の判定には  $P$  の収束状況を監視すれば十分である。本計算では、繰り返し前後の  $P$  の差と最後にえられた  $P$  の比が  $10^{-5}$  になったときをもって繰り返しを打ち切った。また、式(1)の氷層成長に関する数値解を求めるには、ルンゲ・クッタ・ギル法を用いた。なお、管内水の初期温度は  $0^\circ\text{C}$  と仮定した。

### 2.3 無次元数の導入

非定常熱伝導問題においては、無次元時間として Fourier 数  $Fo$  を用いるが、半径  $R_b$  の円管内の熱伝導現象に適用すれば、

$$Fo = \frac{a_i \tau}{R_b^2}$$

である。ここに、 $a_i$ ：氷の温度拡散率  $= \lambda_i / (C_i \rho_i)$ 、 $C_i$ ：氷の比熱、 $\rho_i$ ：氷の密度である。

凍結現象などの相変化と熱伝導の共存系においては、無次元時間  $F^*$  は、Fourier 数  $Fo$  を修正してつぎのように定義すると便利である。

$$F^* = Fo \times Ste$$

無次元数  $Ste$  は、Stefan 数で次のように定義される。

$$Ste = \frac{C_i(T_f - T_o)}{L}$$

ここに、 $C_i$ ：氷の比熱、 $T_f - T_o$ ：管内水初期温度と外気温度、 $L$ ：水の凝固の潜熱である。管表面の熱伝達条件に関わる無次元数は、管表面における対流抵抗の大きさと管壁を通じての伝導抵抗の比の形、すなわち Biot 数、で表わされるが、この研究の対象とする現象においては、管を通じての伝導抵抗が管の半径によって異なり、また、氷層の成長につれて時間的に変化することを考慮し、修正 Biot 数の第 1 近似として次の無次元量  $B^*$  を導入する。

$$B^* = \frac{Bi}{\ln(1 + R_t/R_b)} = \frac{hR_o/\lambda_s}{\ln(1 + R_t/R_b)}$$

ここに、 $h$ ：管表面における熱伝達率、 $\lambda_s$ ：管材料の熱伝導率である。

管が破壊にいたる限界応力  $\sigma_{crit}$  を生じさせる管内圧力  $P_{crit}$  とすると、これら両者の関係は、式(7)において  $P_b = P_{crit}$  とおくことにより求めることができる。すなわち、限界応力  $\sigma_{crit}$  は、内半径  $R_b$ 、肉厚  $R_o - R_b$  の円管内に厚さ  $R_b - R_i$  の氷層があり、その氷層内面に圧力  $P_{crit}$  が作用したときに管壁内に生ずる応力である。従って、無次元圧力  $P^*$  を、実際に生じている圧力  $P$  と  $P_{crit}$  との比として定義すれば、無次元圧力  $P^*$  は実際の応力  $\sigma$  と限界応力  $\sigma_{crit}$  の比を表わすことになる。いいかえると、無次元圧力  $P^*$  は、管の凍結破壊現象を整理するのに有効な指標であるといえる。

### 3. 結果と考察

#### 3.1 実験の概要

##### 3.1.1 圧力測定実験

本実験は、円管内に密封された水が管外面から熱伝達により冷却され、管の内表面に氷層が成長する際の管内圧力の上昇、円管の変形、管内水の温度などを時間ごとに測定し、計算結果の妥当性を検証するものである。

実験は長さ300mm、外径34mm、内径27.6mmの炭素鋼管の内部に十分脱気した水を封入し、これをあらかじめ所定の温度まで冷却してあるブライン槽内に投入することにより行った。管内部の圧力上昇は直接測定することが困難であったので、鋼管の外表面に歪ゲージを貼付し、管の周方向歪の測定値と材料の縦弾性係数より、内部圧力を計算した。また、管外表面温度は、管両端および管長手方向中央部に熱電対を取り付けて測定した。

##### 3.1.2 氷層成長可視化実験

可視化実験には、透明アクリル管にメチレンブルーにて着色した水を入れ、管周囲にブライン液を循環させ、外部より観察、写真撮影した。アクリル管は、長さ550mmで、外直径44mmのものと外直径24mm、内直径20mmのもの2種類を使用した。

#### 3.2 実験結果の例

##### 3.2.1 可視化実験による氷層厚さ並びに各部温度変化の測定例

図2は、可視化実験から得られた氷層厚さの時間的変化を各部の温度変化とともに示したものである。氷層厚さは、管底方向から写真より読み取ったものである。この図によると、氷層の成長は冷却開始約6分経過してはじめて認められるようになる。この時間遅れは、管と管内部の水の

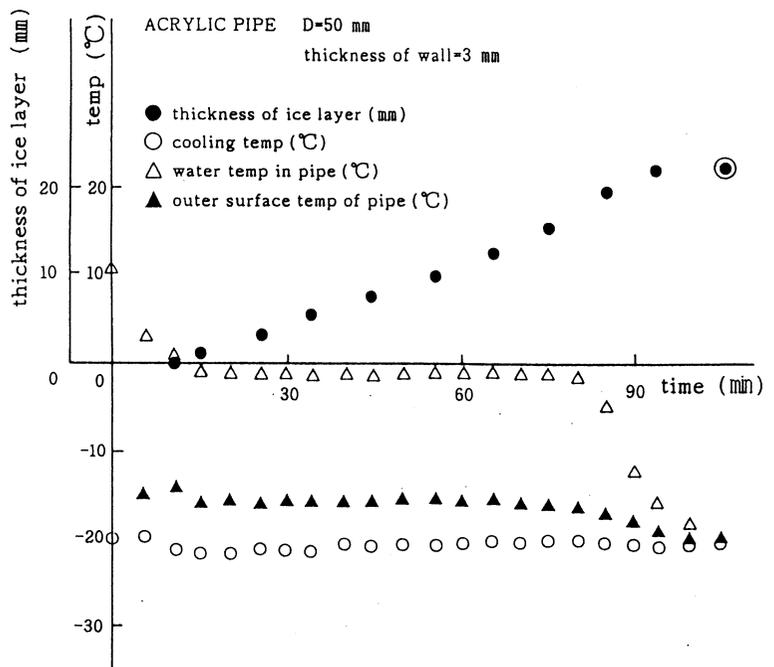


図2 氷層厚さ並びに各部温度変化

熱容量によるものである。これは、管内水温の時間的変化 ( $\Delta$ 印) をみると、冷却初期にはおよそ14℃で、それ以降急激に温度降下して約7分にて0℃に達していることから明らかである。氷層は、いったん成長を始めると時間とともにはじめは直線的に成長し、やがて成長速度を早める傾向がある。これは、未凍結水部分全体に樹枝状結晶が分布しており、その部分の水は過冷却状態になるためと考えられる。なお、図中の◎印は、凍結完了点である。この例では冷却開始後およそ100分であった。管の外表面温度は、実験開始時約-17℃であるが、管内水の温度低下につれて約-18~-19℃になり、凍結の進行によって著しい変化は認められない。しかし、氷層成長の速度が増し、管内水の温度が低下する時点からは、やや下降し、凍結終了時には-25℃で、ブライン温度と等しくなっている。

### 3.2.2 管内圧力実測例

Fig.3 は、水を密封した鋼管を温度-20℃のブライン槽内に投入した場合の圧力の時間的上昇を示した例である。この図によると、投入後約5分から管内部圧力の上昇が認められ、時間に関してほぼ直線的に増加する。投入後13分以降は、それまでの圧力上昇に比べてきわめて急速に上昇する。その後、投入後約20分を経過した頃から、管内圧力の上昇傾向が弱まり、次第に一定値に近づく傾向を示している。このような管内圧力の時間的変化は、管外側の冷却条件、管の寸法、材質、ならびに水の初期温度などに関わらず、つねに観察される一般的傾向である。この圧力上昇は、さきにも述べたよう

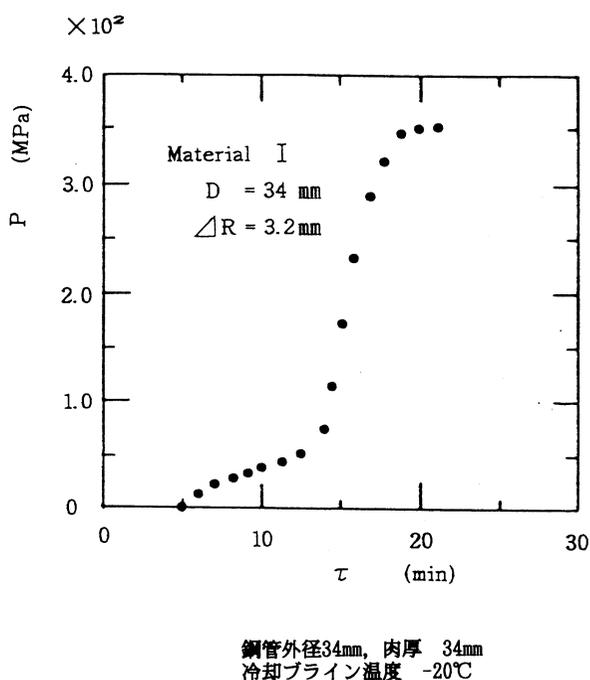


図3 管内圧力実測例

に、管の変形が材料の弾性限内にあるとの仮定によるものであるから、この図の後半部分に見られる圧力の急上昇については、圧力の絶対値は必ずしも正確ではなく、定性的傾向を示すものである。また、実験終了後の検討によれば、ここに示した例では、管内に容積率で約2%の空気を含んでおり、初期における圧力上昇開始時間の遅れはおもにこれによるものと考えられる。密閉管内の水の凍結による圧力上昇は、管材料の力学的性質ならびに熱物性、管表面の冷却に関わる伝熱学的条件、冷却温度並びに管内水の初期温度など、種々の要因に影響されるが、管内に氷層が生ずる限りどのような条件のもとにおいてもきわめて短時間に生ずるものである。

### 3.3 計算結果と実測値との比較

#### 3.3.1 計算結果の吟味 — 実験結果との比較 —

本節では、先に述べた理論に基づく数値計算結果と実測値の比較を述べる。

図4中、(a)は、前野ら<sup>(6)</sup>による小径、肉厚管（直径：5mm，肉厚：12.5mm）に対する例である。実測は、内直径5mmの銅管に水を入れ温度 $-10.6^{\circ}\text{C}$ にて冷却凍結した際の圧力変化である。冷却開始後

5分経過すると、圧力は約4MPaに達し、およそ10分後までは上昇の程度は減少しつつも約7MPaになり、それ以降は顕著な圧力上昇は認められない。

一方、計算値は実測値のおよそ1/2の上昇速度で約17分で7MPaに達している。計算値と実測値は、初期の上昇過程においてはやや開きがある。これは、さきも述べたように、実測値は歪みが材料の弾性限度内にあるとの仮定を前提としているが、供試円管が銅製であって弾性係数がかならずしもはっきりしないこと、および理論式が歪一応力の直線関係に基づいていること、変化がこの種の熱現象としては比較的早く、装置全体の熱容量の問題があることなどを考え合わせると、この程度の差異はやむをえぬところであろう。

一方、図4中の(b)は内径27.6mm，肉厚3.2mm，冷却温度 $-20^{\circ}\text{C}$ の場合に対するものである。実測値圧力は冷却開始よりただちに上昇しはじめ、10分後頃からやや上昇の程度を下げつつ、およそ15分後には16MPaに到達している。計算値は、これに対し、約10分頃まで実測値によく追従しているが、それ以降は少々実測値よりも高めの値を示している。この原因もさきに述べたように、本研究における理論の弾性仮説によるものである。従って、これらの結果を総合すれば、前章にて提示した諸式によって与えられる結果は、材料が弾性限度内にある限り妥当なものであることがわかる。

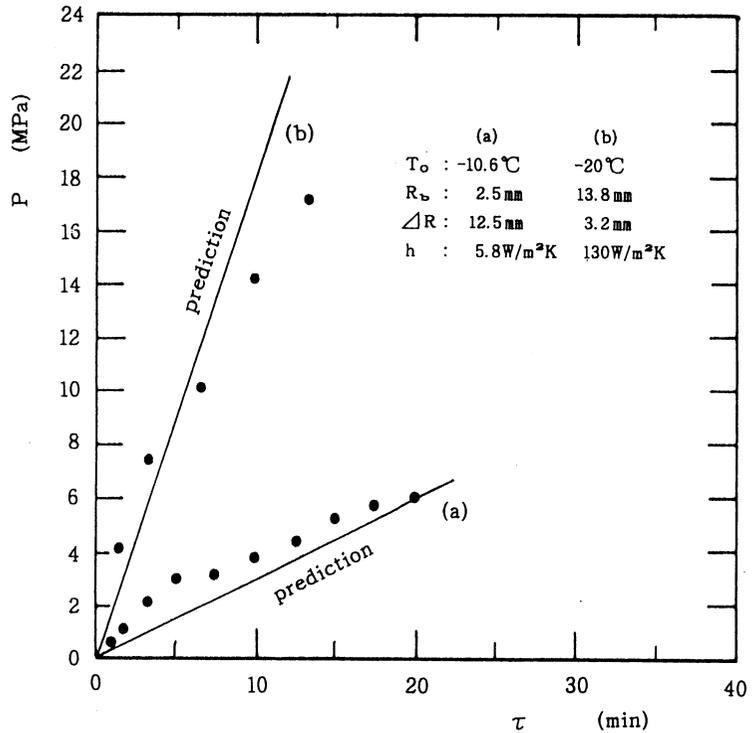


図4 計算結果と実測値の比較

### 3.3.2 計算条件

本研では表1に示した材料からなる管を想定し、数値実験を行った。また、後述の伝熱条件に関する無次元数の値ならびに水の物性値は、それぞれ、表2および表3のごとくである。

表1 管材料の物性値

材 料 名	縦弾性係数 GPa	ポアソン数 —	限界応力 GPa	熱伝導率 W/(mK)
I	206	3.45	0,445	46.5

表2 水の物性値 (−5℃)<sup>(9)</sup>

縦弾性係数 GPa	ポアソン数 —	圧縮率 m <sup>3</sup> /N	熱伝導率 W/(mK)
9.8	2.94	$4.5 \times 10^{-10}$	2.2

表3 計算条件

T <sub>0</sub>	B*	F*	T
−30~−5℃	0.01~10	0.01~10	0.0001~5 h

### 3.4 管内圧力の時間的变化

図5は肉圧3mmで内半径5mmないし75mmの管の凍結に関する計算結果をまとめたものである。すなわち、縦軸にはそれぞれの管内水の圧力を、横軸には凍結開始後の経過時間をとってある。その際、管の周囲空気の温度  $T_0 = -10^\circ\text{C}$  とし、管表面における対流条件は、熱伝達率  $h = 5.8 \text{ W/m}^2\text{K}$  (一定) としている。この図を見ると、密閉管内に封入された水が、管外表面からの冷却によって凍結し、管の内表面に氷層として成長する場合、凍結による水の比体積の増加によって生ずる管内圧力の上昇に関する一般的傾向を読み取ることができる。管内の圧力  $P$  は、氷層形成初期には伝熱条件や管径によらず、きわめて急速に上昇し、時間の経過とともに次第に上昇の速度が遅くなる。しかし、これらの結果を諸条件によって詳細に検討すると、つぎのようなことがわかる。すなわち、周囲温度  $T_0$ 、管表面における熱伝達率などの条件が同じであれば、管内半径  $R_b$  が小さいほど管内圧力の上昇が著しい。たとえば、管内径  $R_b = 5 \text{ mm}$  で、周囲温度  $T_0 = -10^\circ\text{C}$  の場合では、 $\tau = 1$  時間後の管内圧力は約 60MPa に達している。これは、管の内表面に成長した氷層が同じであれば、半径の小さい場合ほど、全容積に占める氷の割合が相対的に大

きくなることによるものである。また、図には示していないが、管径が同じであれば、周囲温度  $T_0$  が低いほど管内部の氷成長が早くなるので、結果的に管外圧力の上昇も早いことはいうまでもない。管内圧力の上昇は、時間の経過によって徐々にその上昇速度が緩やかになることはすでに述べたが、管内圧力上昇鈍化の程度は、管の内半径が小さい場合ほど顕著に現れる。この原因も上に述べたのと同じように、管内容積に対する氷層の占める容積割合の差異によるものである。きわめて細い管たとえば半径  $R_b = 5\text{ mm}$  程度の管においては、長時間経過すると圧力上昇が停止する。これは、管内圧力の上昇による水の凍結温度の低下によるもので、ここに示した例では、 $\tau = 4.5$  時間後には、管内水の凍結温度は周囲空気の温度と同じになる。いかえると、この時点で水の成長が停止し、それ以降、管内の水は凍結することがない（不凍結管）。

### 3.5 圧力変化の無次元表次

種々の管径および伝熱条件について、管内圧力の時間的変化を計算し、前節にて示した無次元数で整理した結果を図6に示す。なお、この図は、材料Iを想定した結果で、 $B^* = 0.01, 0.1$  および  $1.0$  の場合について示しても、無次元圧力  $P^*$  は無次元時間  $F^*$  の増加とともにおおむね直線的に上昇し、 $F^*$  が大きくなるにつれて  $P^*$  の上昇が鈍化する傾向が認められる。その場合、比  $\Delta R/R_b$

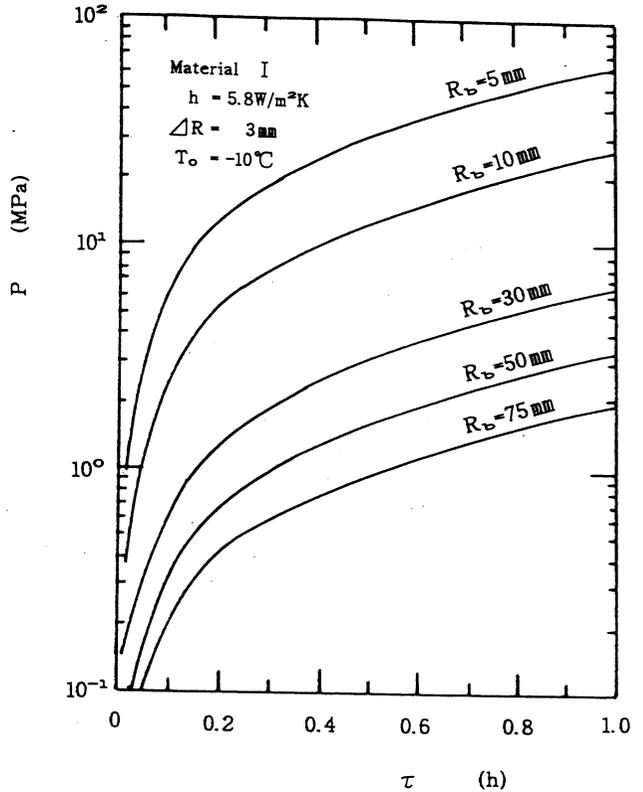


図5 管内圧力の時間的变化

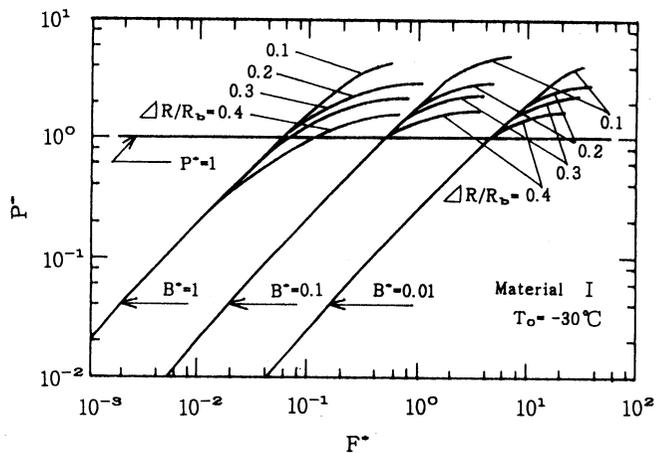


図6 圧力変化の無次元表示

の差異による無次元圧力  $P^*$  への影響も現れ、この比の大きいほど無次元圧力が高くなる傾向がある。これは、比  $\Delta R/R_b$  が大きい場合には、管径が小さくかつ肉厚の厚いことを意味するが、そのような管においては圧力上昇がきわめて急速であることに対応する。また、パラメータ  $B^*$  が大きいほど、小さな無次元時間  $F^*$  で高い

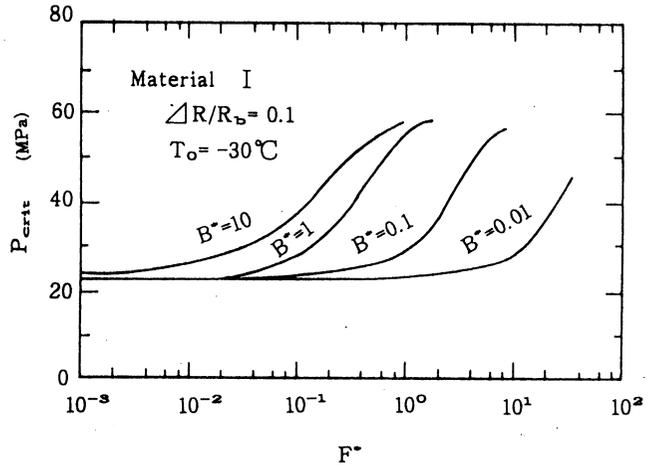


図7 限界圧力の  $F^*$  による変化

$B^*$  が大なる場合は管からの熱伝達が良好であることを意味する。従って、無次元圧力  $P^*$  のことといえる。

から、図において  $P^* = 1$  なる点は、管内の圧

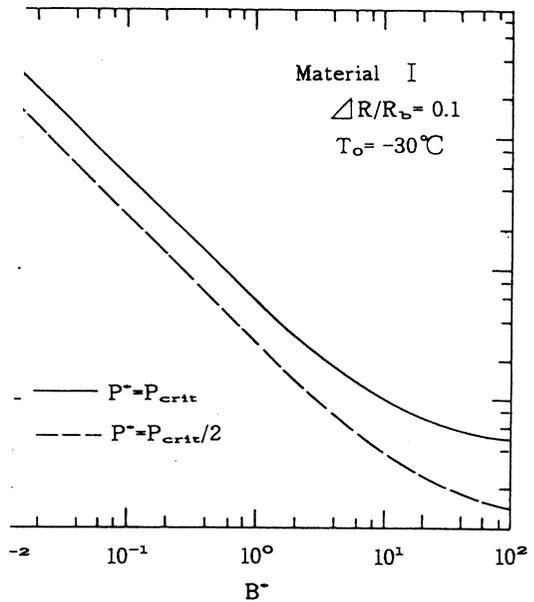


図8 無次元凍結限界時間と修正ビオー数の関係

示したものである。ここで、限界

無次元時間  $F^*_{crit}$  は図 6 において、 $P^* = 1$  となるときの  $F^*$  の値である。なお、図中には  $P^* = 0.5$  の場合も併記してある。この結果によると、限界無次元時間  $F^*_{crit}$  は修正ピオー数  $B^*$  減少に伴って急速に増加している。これは修正ピオー数  $B^*$  が小さい場合には、たとえ管内に凍結が生じて管破壊にいたるまでの時間がきわめて長いことを意味している。また、限界無次元時間  $F^*_{crit}$  の修正ピオー数  $B^*$  による減少のし方は  $B^* < 1$  ではおおむね直線的である。直線式で近似すれば、図 8 に示した例では、

$$F^*_{crit} = 0.083 \times B^{*-0.9} \quad P^* = P_{crit}, \quad B^* < 1 \quad (8)$$

$$F^*_{crit} = 0.026 \times B^{*-1.0} \quad P^* = P_{crit}/2, \quad B^* < 1 \quad (9)$$

と表される。

#### 4. あとがき

寒冷地における水道配管の凍結破壊問題について実験的理論的に研究し、この現象を支配する無次元因子を示し、これら因子を用いることにより、管凍結時の圧力上昇および管凍結破壊時間と伝熱条件がどのような関係にあるかを明らかにした。本研究を遂行するに当たって、圧力上昇計算など数値計算については秋田大学菅原征洋助教授に多大のご教授を頂いた。また、結果の検討について北海道大学工学部福迫尚一郎教授、旭川工業高等専門学校山本春樹教授にご援助賜わった。また、まとめに際しては室蘭工業大学戸倉郁夫助手(当時)、当時大学院学生鈴木 淳君に多大のご協力を頂いた。付記して謝意を表わす。

#### 参考文献

- (1) London, A. L., Seban, R. A. : Rate of Ice Formation, Trans. Trans. ASME. 771(1943).
- (2) Gilpin, R. R. : The Effect of Dendritic Ice Formation in Water Pipes, Int. J. of Ht. & M. Transf. Vol. 18, No. 11(1975).
- (3) Sparrow, E. M. et al., Freezing in a Vertical Tube, Trans. ASME. J. Ht. Vol. 105, (1983).
- (4) Sugawara, M. et al., Freezing of Water in A Closed Circular Tube, Trans. JSME. Vol. 49, No. 439, (1983).
- (5) Sugawara, M., Seki, N. : Freezing of Water in A Closed Circular Tube, Warme u. Stoffubertagung, 17, (1983).
- (6) 堀内, 前野: 水の凍結に伴う圧力上昇に関する研究, 日本雪氷学会講演予稿集, 66(1980-10).
- (7) 追分, 齊藤, 稲葉, 戸倉: 管の凍結破壊に関する研究, 凍結協会論文集 Vol.2, NO2. (1985).
- (8) Saito, H., Sugawara, M., Tokura, I., Kishinami, K., Seki, K., Seki, N. : Freezing Fracture of Water pipes in Low Temperature, Proc. 1987 Int. Symp. Cold Regions Ht. Transf. Edmonton, Alta., Canada (1987)
- (9) Fletcher, N. H., (前野紀一訳) 氷の化学物理 第1版 共立出版 1974

密閉管内水の凍結圧力と表面熱伝達の関係

計算プログラム：

```

10 REM *** Ice Formation Analysis -- 1989/4/17 ***
20 DEF FNDRT(A, B, C, D, E)=.454545*LOG(B/A)+LOG(C/B)/D+1/C/E
30 CLOSE
40 READ G$ '(*ファイル名の読み込み*)
50 PRINT "ファイル名ハ";G$;"デス。"
60 LPRINT "ファイル名ハ";G$;"デス。"
80 OPEN G$ FOR OUTPUT AS #1 '(*出力ファイルのオープン*)
90 READ SMT$, RM, RTH, TCS, PNS, ES '(*管半径、管材料の物性値読み込み*)
100 PRINT #1, SMT$,"";RM$,"";RTH$,"";TCS$,"";PNS$,"";ES
110 R3=(RM+RTH)/1000!:R30=R3
120 READ VART, HTC, TIF, EPS, HS, MN '(*空隙率、熱伝達率などの読み込み*)
130 DT3=-TIF
140 PRINT #1, VART,"";HTC$,"";TIF$,"";EPS$,"";HS$,"";MN
150 PRINT USING "Tube ハ & & デス。 r1=####.## mm δ=##.## mm Es=#####^";SMT$
, RM, RTH, ES
160 LPRINT USING "Tube ハ & & デス。 r1=####.## mm δ=##.## mm Es=#####^";SMT$
, RM, RTH, ES
170 PRINT USING " hc=####.## W/m2°C Tam=####.## °C δ=##.#### H=##.####";HTC, TIF
, EPS, HS
180 PRINT USING " Va=##.### ";VART
190 LPRINT USING " hc=####.## W/m2°C Tam=####.## °C δ=##.#### H=##.####";HTC, TIF
, EPS, HS
200 LPRINT USING " Va=##.### ";VART
210 PRINT
220 PRINT "Time[h] δi[mm] P[MPa] Ti[°C] Do[mm] εo×10**6"
230 'LPRINT "Time[h] δi[mm] P[MPa] Ti[°C] Do[mm] εo×10**6"
240 C1=.292893:C2=1.70711:C3=.5349 '(*Runge-Kutta法の係数*)
250 RM=RM/1000!:RTH=RTH/1000! '(*メートルをミリメートルに変換*)
260 IF VART=0 THEN 280
270 SCRIT=RM*SQR(1-12.5*VART):SND=SCRIT/RM
272 '(*諸定数の設定*)
280 EI=9.8E+09:TCI=2.2:PNI=2.94:SVI=.001087:SVW=.001:CPRW=4.5E-10
290 HL=334800!:TIF=TIF+273.15:T1=273.15:HLH=93.02:C8W=1.172
292 '
300 IF VART=0 THEN SCRIT=RM:TIMS=0:GOTO 360
310 BI=R3*HTC/TCS '(*ビオー数の計算*)
320 TND=SND^2*LOG(SND)/2+(1-SND^2)*((LOG(R3/RM)+1/BI)*TCI/TCS+.5)/2'(*Fo×Ste数)
330 TIMS=HLH*RM^2*TND/SVI/DT3/TCI '(*加圧開始時間の計算*)
340 PRINT USING " Fo*Ste=##.####^ Bi=##.####^ Rcrit=##.####^ TIMEc=##.##
###^";TND, BI, SND, TIMS
342 LPRINT USING " Fo*Ste=##.####^ Bi=##.####^ Rcrit=##.####^ TIMEc=##.
###^";TND, BI, SND, TIMS
350 PRINT #1, USING "##.####^, ##.####^, ##.####^, ##.####^";TND, BI, SCRIT,
TIMS
360 S=SCRIT:PR1=0!:PR10=PR1:M=0:MP=MN:LB=1
370 DT1=0! '(*温度勾配の初期値*)
380 N=0:LA=1
390 A3D=R3/RM:A3=A3D^2
400 C6=(1+A3D)*(A3D-1!)
410 A5=((1+A3)/C6+1!/PNS)*EI/ES
420 ON LB GOTO 430, 650
430 DRTC=FNDRT(S, RM, R3, TCS, HTC)
440 AA1=SVI*(TIF-T1)/S/DRTC
450 REM ***** Runge ***** '(*Runge-Kutta法による氷層位置の計算*)
460 AA2=C8W*SVI*DT1/(2!*SVW*HS)
470 AA3=HLH+(SVI*C8W/SVW-C3)*DT1/2!
480 X1=HS*(AA1-AA2*S)/AA3
490 Y1=X1/2!

```

```

500 Z1=S+Y1
510 Q1=3!*Y1-X1/2!
520 X2=HS*(AA1-AA2*Z1)/AA3
530 Y2=C1*(X2-Q1)
540 Z2=Z1+Y2
550 Q2=Q1+3!*Y2-C1*X2
560 X3=HS*(AA1-AA2*Z2)/AA3
570 Y3=C2*(X3-Q2)
580 Z3=Z2+Y3
590 Q3=Q2+3!*Y3-C2*X3
600 X4=HS*(AA1-AA2*Z3)/AA3
610 Y4=(X4-2!*Q3)/6!
620 Z4=Z3+Y4
630 ON LA GOTO 640,650
640 SOLD=Z4
650 A2D=Z4/RM:A2=A2D^2
660 C4=(1!+A2D)*(1!-A2D)
670 A4=2!*A2/C4
680 A6=(1!+A2)/C4-1!/PNI
690 ON LB GOTO 700,990
700 B1=((1!+A2)/C4+1!/PNI)*Z4/EI
710 B2=2!*Z4/EI/C4
712 '(*圧力増加の計算*)
720 DP1=(1!-SVW/SVI)*(1!-Z4/S)/(CPRW/2!+(B1-B2*A4/(A5+A6))/S)
722 '
730 P1=DP1+PR1 '(*圧力の新しい値*)
740 ON LA GOTO 750,760
750 DP10=DP1
760 PRM=A4*DP1/(A5+A6)
770 DU=DP1*B1-PRM*B2
780 DUM=A5*PRM*RM/EI
790 DU3=2!*R3*PRM/ES/C6
800 DT1=T1*DP1*(SVW-SVI)/HL '(*氷点降下の計算*)
810 ON LA GOTO 820,830
820 DU30=DU3:LA=2:GOTO 450
830 ERA1=ABS((Z4-SOLD)/S)
840 ERA2=ABS((DT1-DT10)/DT3)
850 IF ERA1>ERA2 THEN ERA=ERA1 ELSE ERA=ERA2
860 ERA3=ABS((DP1-DP10)/P1)
870 IF ERA<ERA3 THEN ERA=ERA3
880 IF ERA<EPS THEN 930 '(*収束判定*)
890 N=N+1
900 IF N<20 THEN 920
910 LA=1:GOTO 980
920 SOLD=Z4:DT10=DT1:DP10=DP1:GOTO 450
930 M=M+1:TIME=M*HS+TIMS '(*時間ステップの増加*)
940 SVW=SVW*(1!-CPRW*DP1) '(*水の比体積の計算*)
950 S=Z4+DU:PR1=P1:T1=T1+DT1:RM=RM+DUM:R3=R3+DU3'(*水層位置、水温の計算)
960 IF ABS(S)<.0005 THEN LA=3:GOTO 980 '(*凍結完了か否かの判定*)
970 IF MP>M THEN 370 '(*プリントするか否かの判定*)
980 Z4=S:LB=2:GOTO 390
990 SL=RM-S '(*水層厚さの計算*)
1000 PM=PR1*A4/(A5+A6):LB=1
1010 SF=PM*(1!+A3)/C6 '(*最大応力の計算*)
1020 STR=(R3-R30)/R30 '(*歪の計算*)
1030 PRINT USING "##.##,##.#####^",##.#####^,##.#####^,##.#####^,##.#####^
^,##.#####^,##.#####^";TIME,SL,PR1,PM,T1,R3,STR,SF
1040 PRINT #1, USING "##.##,##.#####^",##.#####^,##.#####^,##.#####^,##.#####^,##.##
###^,##.#####^,##.#####^";TIME,SL,PR1,PM,T1,R3,STR,SF

```



# 非定常細線加熱法による混合物質の熱伝導率測定

戸倉郁夫・齊藤 図・岸浪紘機・竹川佳樹\*

## Application of the Transient Hot-Wire Method on Thermal Conductivity Measurement of Solid-Liquid Mixtures

Ikuo TOKURA, Hakaru SAITO, Koki KISHINAMI and Yoshiki TAKEKAWA\*

### Abstract

The applicability of the transient hot-wire method to solid-liquid mixtures has been tested by experiments and by numerical analyses. The thermal conductivities were measured for mixtures of glass beads and ethyl alcohol. The measured thermal conductivities were compared with the data obtained by the standard steady flat-plate method. The thermal conductivity of the mixture obtained by the hot-wire method was found to deviate from those obtained by the steady flat-plate method with the increase in diameter of solid particles. A simple two-dimensional model of the mixtures has also been numerically analyzed in order to explain the measured results. In the numerical calculations of the wire temperature, the thermal conductivity is found to depend greatly on the void ratio of the mixture within the thermal penetration depth. In the mixture of large particle size, the local void ratio near the wire is different from that of the entire mixture. Accordingly, the use of the hot-wire method should be limited to solid-liquid mixtures of small particle size.

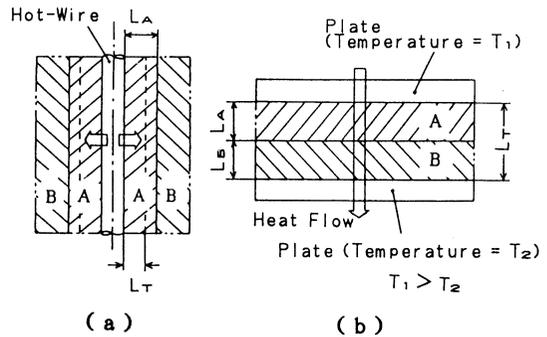
### 1. はじめに

近年、種々の物質の熱伝導率測定に、レーザーフラッシュ法あるいは細線加熱法等の非定常法が多く使用されるようになってきた。なかでも、非定常細線加熱法は簡便で精度がよい方法として、液体の熱伝導率の測定に広く用いられている<sup>1-4)</sup>。この方法の利点には、1) 試験部の構造が簡単である、2) 測定時間が短い、3) 自然対流の発生を検知できる、4) 放射熱伝達の影響を少なくできる、等が挙げられる。

細線加熱法による熱伝導率測定は、純粋液体あるいは一相の混合液体について理論的<sup>5)</sup>、実験的<sup>6)</sup>に検討されており、すでに確立された方法であるといえる。したがって、この方法を一相の物質だけでなく多相の混合物質の熱伝導率測定に適用できれば、その工学的意義は極めて大であると思われる。しかしながら、多相混合物質の熱伝導率を非定常法で測定する場合には、検討しなければならない問題点がある。図1は、2種の物質AおよびBから構成される試料の熱伝導

\* 日本電気ソフトウェア株式会社 (前産業機械工学専攻)

率を、細線加熱法（非定常法）と平板比較法（定常法）によって測定する状態を示したものである。細線加熱法では熱浸透厚さ  $L_T$  内部に存在する物質の熱伝導率を測定するために、もし  $L_T < L_A$  であれば、物質 B には無関係に物質 A の熱伝導率が測定される（図 1(a)）。これに対して、平板比較法では熱浸透距離が試料の厚さ ( $L_A + L_B$ ) に等しく（図 1(b)）、物質 A と B の影響が含まれた熱伝導率が測定されることになる。つまり、この極端な例からわかるように、混合物質を構成する各成分の分布の仕方によっては、非定常法と定常法による熱伝導率の測定結果が一致しない事態が生じる。したがって、細線加熱法を混合物質に適用するためには、成分物質の空間分布が熱伝導率の測定値におよぼす影響を明らかにしなければならない。



図—1 多成分物質の熱伝導率測定：  
(a)非定常細線加熱法、  
(b)定常平板比較法

本研究では、非定常細線加熱法を多相混合物質に適用することを目的として、種々の粒子直径を有する固・液混合物質の熱伝導率を測定し、固体粒子径による測定値の変化を実験的に明らかにするとともに、その原因について解析的な検討を行なった。また、同じ試料について、定常平板比較法による熱伝導測定実験も行ない、両者の測定値を比較することにより、細線加熱法の混合物質にたいする適用限界を明らかにしようとするものである。

## 2. 非定常細線加熱法の理論

無限の広がりをもつ均質な流体中に、半径  $r_0$  で無限に長い線熱源がある場合を考える。この細線は単位長さ当たりの発熱量を  $q$  W/m（一定）とする。また、流体の温度変化はわずかであり、物性値はその温度変化内で一定であると仮定する。Healy ら<sup>5)</sup>の理論によると、細線の温度上昇  $\Delta T$  は、次式によって与えられる。

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha\tau}{r_0^2} \right) - \gamma + \frac{r_0^2}{2\alpha\tau} - \frac{k-1}{k} \frac{r_0^2}{2\alpha\tau} \left\{ \ln \left( \frac{4\alpha\tau}{r_0^2} \right) - \gamma \right\} \dots \right] \quad (1)$$

ここで、 $k$  は流体と細線の熱容量比、 $r$  は半径方向の距離、 $\alpha$  は流体の温度伝導率、 $\lambda$  は流体の熱伝導率、 $\tau$  は時間、 $\gamma$  はオイラー数である。この式より、もし  $r_0^2/(4\alpha\tau) \ll 1$  が成立すれば、流体の熱伝導率を表わす式として、次式が導出される。

$$\lambda = \frac{q}{4\pi} \bigg/ \frac{d\Delta T}{d(\ln\tau)} \quad (2)$$

この式より、熱伝導率  $\lambda$  は、細線の発熱量  $q$  と細線の温度上昇速度  $d \Delta T / d(\ln \tau)$  によって決定されることがわかる。すなわち、細線加熱法による熱伝導率の測定値は、 $q$  が一定の場合は、温度変化割合  $d \Delta T / d(\ln \tau)$  に反比例することがわかる。

### 3. 固・液混合物質の熱伝導率測定実験

細線加熱法が混合物質に適用できるかを調べるために、約40～850  $\mu\text{m}$  の大きさを持つガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率を測定した。混合物質のモデルとして球状粒子の充填物を選んだのは、粒子の形状が単純であり、測定結果を解析的に検討しやすいと考えたからである。用いたガラス玉の直径は、表1に示してある。実験では、一つの試料につき4回測定を繰り返し、結果の再現性を確認した。また、測定は、二つの方法、非定常細線加熱法および定常平板比較法を用いて行なった。

表-1 ガラス玉の直径

Sample No.	$D_p$ mm
1	0.701～0.990
2	0.495～0.700
3	0.200～0.295
4	0.150～0.190
5	0.043～0.060
6	～0.042

#### 3.1 非定常細線加熱法による測定

図2は、細線加熱法に使用した測定部（セル）を示したものであり、円筒容器の中心部に細線を設置した構造となっている。細線には、7.5  $\mu\text{m}$  のポリエステルを被覆した直径40  $\mu\text{m}$  の白金線をを使用した。白金線の両端は、シリコンゴムを塗布した直径5 mmの銅電極棒に接続されている。容器は外形42.7mm、内径36.7mm、長さ250mmのステンレス管であり、この中に試料（混合物質）が充填される。試料の熱伝導率は、白金線を通電加熱した際の白金線の発熱量と温度変化を測定することにより、式(2)を用いて算出される。白金線の両端部分は、熱容量の大きい銅電極に接続されているために、この部分の温度上昇が中央部分に比べて少なくなる。この効果を除去するために、2個のセルを使用し、それぞれには長さの異なる白金線（94および196mm）を設置した。実験装置の構成は、参考文献7)に示したものと同一であり、詳細は省略する。この実験の測定精度は $\pm 2.3\%$ と推算される。

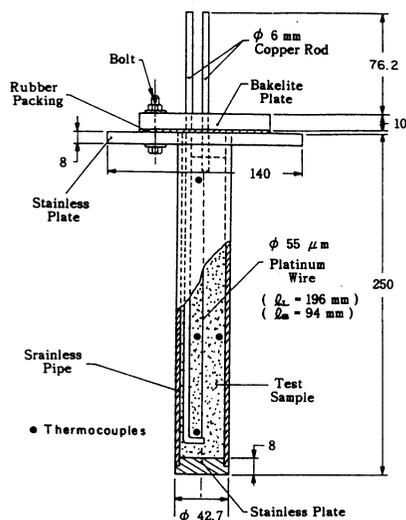


図-2 細線加熱法の試験部（セル）

図3は、細線加熱法によって得られた、混合物質（ガラス玉+エチルアルコール）の熱伝導率とガラス玉直径の関係を示したものである。この実験では、混合物質の空隙率  $\epsilon$  はどの試料（No.1～No.6）についてもほぼ一定であり、 $\epsilon \approx 0.35$ であった。この図より、測定値は、試料の空隙率および固体、液体の熱伝導率比が同じであっても、粒子の直径のとともに増加する傾向を示して

いる。したがって、細線加熱法による混合物質の熱伝導率の値は、固体粒子径によって変化することがわかる。これは、以下で考察するように、細線加熱法では細線の極く近傍の試料の空隙率が、細線の温度変化に大きな影響をおよぼすからである。

### 3.2 定常平板比較法による測定

図4は、平板比較法による熱伝導率測定の実験部を示したものである。試料は、大きさが130×130mmの2枚の水平に置かれた平行平板間に充填される。上の平板は、試料を通過する熱量を求めるための標準板であり、厚さが3mm、熱伝導率が0.263 W/(mK)のベークライト板である。下の平板は、厚さ5mmの銅板である。試料中に自然対流が発生しないように、上方加熱、下部冷却を行っており、試料の上下面の温度は、上部のヒータおよび試験部下部を流れる冷却液によって一定に保たれる。上部のヒータで発生した熱は、標準板および試料を通過し、冷却液によって運び去られる。また、測定部からの熱損失を最小にするために、試料の平均温度は室温と一致するように調節した。なお、標準試料としてエチルアルコールおよび蒸留水を用い、熱損失を見積もった。この装置による試料の熱伝導率 $\lambda_m$ は、次式によって算出される。

$$\lambda_m \frac{\theta_2 - \theta_3}{l_m} = \lambda_B \frac{\theta_1 - \theta_2}{l_B} \quad (3)$$

ここで、 $l_B$ ：ベークライト板の厚さ (= 3 mm),  $\lambda_B$ ：ベークライト板の熱伝導率  
 $l_m$ ：試料の厚さ (= 6 mm),  $\lambda_m$ ：試料の熱伝導率  
 $\theta_i$ ：試料および標準板の温度 (図4参照)

図5は、平板比較法によって得られた固・液混合物質の熱伝導率を示している。試料の空隙率が0.35から0.43まで分布しているため、測定値に若干のバラツキが見られる。しかしながら、熱伝導率の値は、試料を構成する固体粒子の直径に依存せず、ほぼ一定となっていることがわかる。この結果は、前掲の細線加熱法による測定値の傾向と異なり、固体粒子直径の大きさによって両者の測定法で得られた熱伝導率の値が異なることを示している。なお、図5には、比較のた

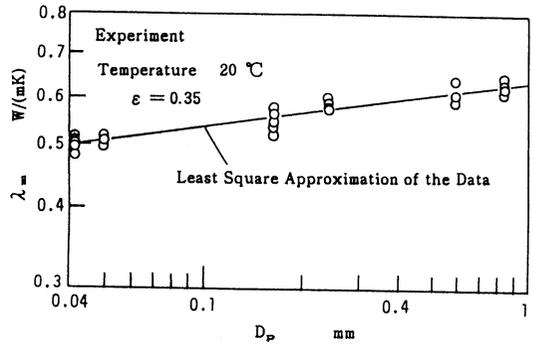


図-3 ガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率 (非定常細線加熱法)

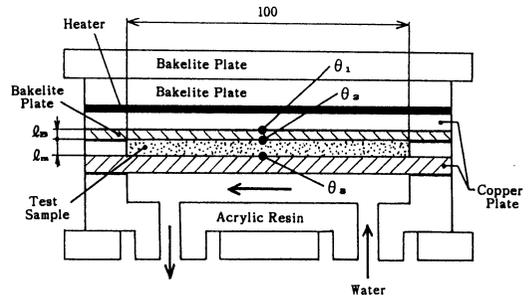


図-4 平板比較法の試験部

めに、混合物質の推算式の一つである Bruggeman の式<sup>8)</sup>より計算された熱伝導率の値を斜線の領域で示している。本実測値と Bruggeman の式による計算値はおよそ一致していることがわかる。

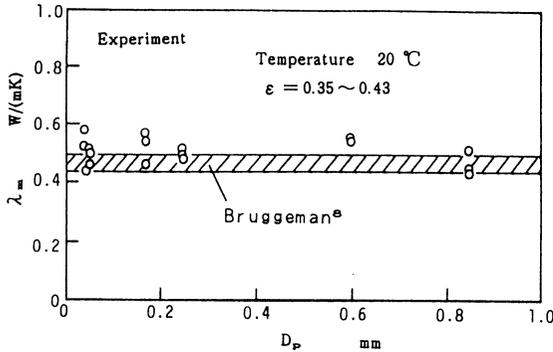


図-5 ガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率 (定常平板比較法)

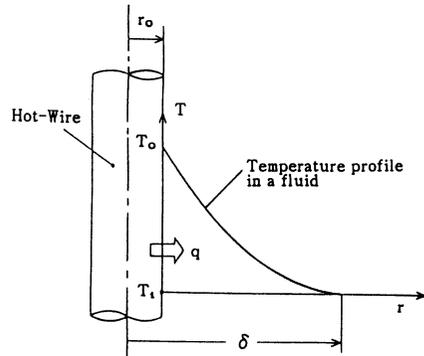


図-6 細線加熱法の物理モデル

#### 4. 実験結果の検討

細線加熱法と平板比較法による混合物質の熱伝導率の違いを説明するために、以下の考察を行なう。

##### 4.1 細線まわりの熱浸透厚さ

細線加熱法における試料中の熱浸透距離  $\delta$  を、図6に示される物理モデルを用い、積分法によって計算する。細線 (半径  $r_0$ ) および試料の初期温度  $T_i$  である。時間  $\tau$  がゼロの瞬間から、細線が一定の熱量  $q$  を発生するものとする。簡単のため、試料の物性値は一定と仮定する。試料の温度は、 $r > \delta$  の領域では初期温度  $T_i$  のままであり、 $r_0 < r < \delta$  の部分では半径距離  $r$  の二次式で表わされると仮定する。この温度分布は、次の境界条件を満足しなければならない。

$$r = r_0, \quad \text{all } z: \quad q = -2\pi r_0 \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (4)$$

$$r = \delta, \quad \text{all } z: \quad T = T_i, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

この条件を満足するように係数を決定すると、温度分布はつぎのようになる。

$$T - T_i = \frac{q}{4\pi r_0 \lambda} (\delta - r)^2 \quad (6)$$

ここで、熱浸透距離  $\delta$  は、時間のみの関数である。試料の内部エネルギーの増加は、細線の表面

から試料に伝達された熱量に等しくなければならない。

$$\frac{d}{d\tau} \left[ \int_{r_0}^{\delta} \rho c T r dr \right] = -r_0 \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} \quad (7)$$

温度分布式(7)を上式に代入し、初期条件： $\tau = 0$  で  $\delta = r_0$ 、を用いて積分すると次式が得られる。

$$(\delta - r_0)^2 [(\delta - r_0) + 4r_0] = 24 \alpha r_0 \tau \quad (8)$$

ここで、 $\alpha$  は試料の温度伝導率である。 $(\delta - r_0) \gg 4r_0$  の条件が成立する場合には、式(8)は次のようになる。

$$\delta \doteq (24 \alpha r_0 \tau)^{1/3} + r_0 \quad (9)$$

図7は、三種類の物質について、熱浸厚さ  $(\delta - r_0)$  を式(8)より計算した結果を示したものである。ここで、 $\alpha = 2.56 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  は、ガラス玉とエチルアルコール混合物の温度伝導率の近似値である。この図より、熱浸透厚さは、細線の加熱開始から5秒経過した時点で、1mm以下であることがわかる。この距離は、試料の大きさに比較してかなり小さなものである。したがって、細線加熱法では、この小さな距離の中にある物質の物性が、細線の温度上昇、さらには熱伝導率の値を決定することになる。

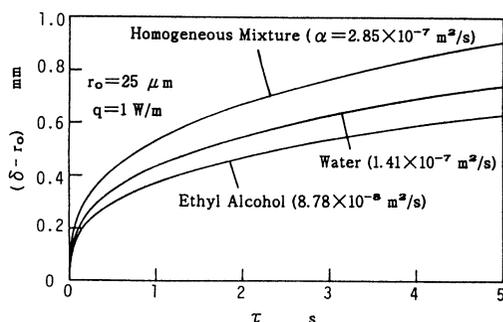


図-7 細線加熱法における試料中の熱浸透厚さ

#### 4.2 細線加熱法における混合物質の不均一さの影響

混合物質の熱伝導率測定に細線加熱法を適用するためには、熱浸透厚さ内にある混合物質の不均一さが、熱伝導率の測定値に与える影響を明らかにしなければならない。この不均一さの影響は、混合物質を構成する固体粒子の直径が大きくなるほど、また、固体と液体の熱伝導率の値が異なるほど、顕著になるものと予測される。

以下では、固体粒子の大きさが熱伝導率に与える影響を検討するために、図8に示される解析モデルを用いて細線の温度変化を計算する。解析を簡単にするために、混合物質をリング状（断面が直径  $D_p$  の円形）の固体が立方格子配列したものと液体から成る系と考え、二次元的に取り扱う。この系では、温度は円周方向に一定である。さらに、熱移動は熱伝導のみによるとし、細線の単位体積当たりの発熱量は一定で

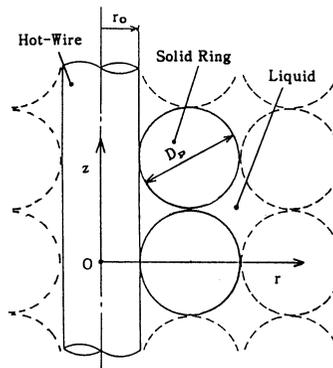


図-8 混合物質の解析モデル

あり、細線内部では半径および周方向に温度が一樣であると仮定する。細線の温度変化は、次の

方程式で表わされる。

$$c_o \rho_o \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_o \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{2}{r_o} \left( \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial r} \right)_{r=r_o} + q^* \quad (10)$$

ここで、 $c_o, \rho_o, r_o$  は細線の比熱、密度、半径であり、 $\lambda_o$  は細線の熱伝導率、 $q^*$  は細線の単位体積当たりの発熱量である。

$$\text{初期条件： } \tau < 0 : \quad T = T_i \quad (11)$$

$$\text{境界条件： } z = 0, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$z = D_p/2, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

混合物質の温度変化  $T_m$  は、以下の方程式で記述される。

$$c_m \rho_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_m r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right) \quad (14)$$

ここで、添字 m は混合物質の値を表わす。

$$\text{初期条件： } \tau < 0 : \quad T_m = T_i \quad (15)$$

$$\text{境界条件： } z = 0, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T_m}{\partial z} = 0 \quad (16)$$

$$z = D_p/2, \quad \text{all } r : \quad \frac{\partial T_m}{\partial z} = 0 \quad (17)$$

$$r = r_o, \quad \text{all } z : \quad q = -2\pi r_o \lambda_m \left( \frac{\partial T_m}{\partial r} \right)_{r=r_o} \quad (18)$$

これらの方程式は、通常の陽的な差分法を用いた数値計算によって解くことができる。半径および軸方向のきざみ幅を  $\Delta r = \Delta z = 20 \mu\text{m}$  とした場合には、計算の安定条件を満たすために時間のきざみ幅として  $\Delta \tau = 5 \times 10^{-6} \text{s}$  以下の値が必要であった。各格子点における熱伝導率の値は、局所的な空隙率を用いて Bruggeman の推算式<sup>8)</sup>より算出した。図9に、熱伝導率が  $0.54 \text{ W/(mK)}$ 、 $c \rho = 1.9 \times 10^6 \text{ J/(m}^3\text{K)}$  の均質な物質にたいする解析解と数値解の比較を示してある。この図より、両者は極めて良く一致しており、本数値計算法が妥当なものであることがわかる。

ガラスリングとエチルアルコール混合物質にたいする、細線（白金線）温度変化の計算結果を、図10に示してある。この場合、ガラス（固体）の熱伝導率（ $0.75 \text{ W/mK}$ ）が、液体の値（ $0.168 \text{ W/mK}$ ）よりも大きい。図中の破線は、空隙率一定（ $\epsilon = 0.2146$ ）の均質な物質にたいする細線の温度変化を示している。この空隙率は、図8に示した混合物質全体の空隙率に等しい。式(3)より、もしも他の条件が一定であれば、混合物質の熱伝導率の値は温度上昇速度  $d \Delta T / d(\ln \tau)$  によって決定される。図10より、時間が  $0.2$  から  $2 \text{ s}$  の期間内で  $d \Delta T / d(\ln \tau)$  の値を算出すると、表2のようになる。この結果より、固体リングの直径  $D_p$  が増加すると、 $d \Delta T / d(\ln \tau)$  の値は減

少することがわかる。これは、式(3)より、混合物質の熱伝導率が固体の直径とともに増加することを意味しており、前掲の実験結果(図3)と一致する傾向である。細線加熱法において、混合物質の熱伝導率が固体の直径  $D_p$  とともに増加する理由は、つぎのように説明される。

図11は、細線表面からの距離  $(r-r_0)$  とその距離内の空隙率  $\epsilon$  の関係を示したものである。空隙率は、 $(r-r_0)$  の増加とともに急激に減少し、増減を繰り返しながら一定値0.2146に漸近することがわかる。細線加熱法は、熱浸透厚さ内部に位置する物体の熱伝導率を測定する非定常測定法である。熱浸透厚さは図7に示したごとく、時間の経過とともに増加する。したがって、図7および11より、細線加熱法においては、測定に関与する物体の厚さは時間とともに増大し、それとともに、測定に関与する物体の空隙率も時間的に変化することになる。

図10の  $D_p = 800 \mu\text{m}$  の場合の細線の温度変化を、図12に誇張して示してある。熱浸透厚さ、すなわち  $(r-r_0)$  は、時間の経過とともに増加する。加熱開始初期では、熱浸透厚さ  $(r-r_0)$  内の混合物質の空隙率は、図11の領域Aで表されるように、混合物質全体の空隙率

表-2  $d\Delta T/d(\ln \tau)$  の計算値

$D_p$ $\mu\text{m}$	$d\Delta T/d(\ln \tau)$
$\epsilon = \text{const.}(0.2146)$	0.146
120	0.139
400	0.138
800	0.128

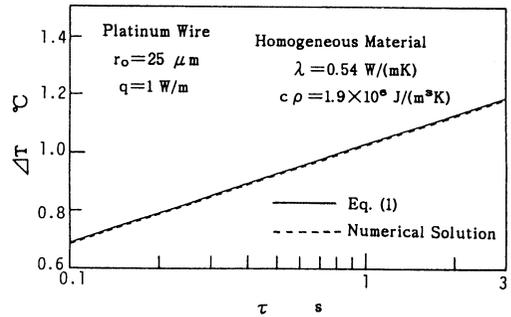


図-9 細線の温度変化(解析解と数値解の比較)

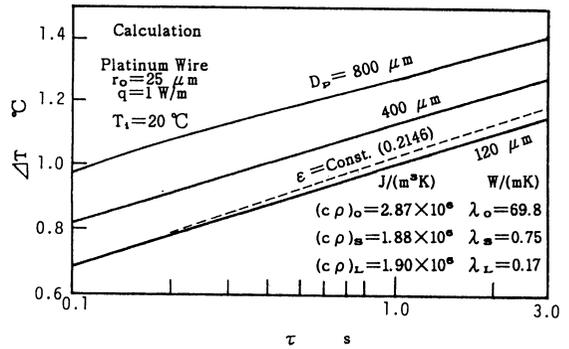


図-10 細線温度変化の計算結果  
(ガラスリングとエチルアルコール混合物質)

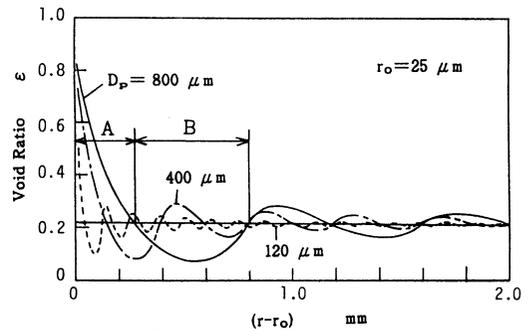


図-11 熱浸透厚さ  $(r-r_0)$  内部の試料の空隙率

( $\epsilon = 0.2146$ ) に比較してかなり大きな値を示す。一般に、固体の熱伝導率 ( $\lambda_s$ ) が液体の値 ( $\lambda_L$ ) よりも大きい場合には、混合物質の熱伝導率は空隙率が大きい程、小さな値になる。それゆえ、加熱開始初期の細線の温度

は、図12の領域 A で示されるように変化し、この部分の  $d\Delta T/d(\ln \tau)$  の値は大きな値を示す。時間が経過するとともに、熱浸透厚さ内の混合物質の空隙率は減少し、図11の領域 B で表わされる値をとる。この領域では、空隙率が混合物質全体の値 (0.2146) よりも小さいために熱伝導率の値も大きくなり、 $d\Delta T/d(\ln \tau)$  の値は図12の領域 B で示されるように、 $\epsilon=0.2146$  の場合よりは小さくなることわかる。したがって、固体の直径が大きい場合には、この領域の小さな  $d\Delta T/d(\ln \tau)$  の値を測定する可能性がある。この理由により、ガラス玉とエチルアルコール混合物質の場合、細線加熱法による熱伝導率の測定値は、固体の直径が大きいほど、熱伝導率の値を大きく見積もることになる。

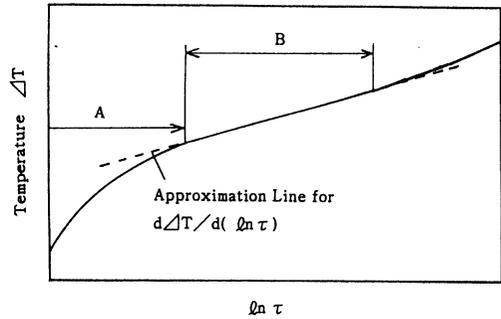


図-12 細線温度変化の説明図  
(図10の  $D_p = 800 \mu\text{m}$  の場合)

以上の考察は、混合物質中の固体の熱伝導率の値 ( $\lambda_s$ ) が液体の値 ( $\lambda_L$ ) よりも大きな場合についてであった。図13は、ポリカーボネート ( $\lambda_s = 0.193 \text{ W/(mK)}$ ) と水 ( $\lambda_L = 0.6 \text{ W/(mK)}$ ) の混合物質にたいする細線の温度変化の計算値を示したものである。この場合には、 $\lambda_s < \lambda_L$  である。この図より、ポリカーボネートの直径  $D_p$  が増加するとともに、 $d\Delta T/d(\ln \tau)$  の値は増加することがわかる。このことは、 $D_p$  の増加とともに、熱伝導率の値は減少することを意味している。したがって、細線の温度変化の数値計算結果より、固体の直径が熱伝導率の測定値に与える影響は、 $\lambda_s < \lambda_L$  であるか  $\lambda_s > \lambda_L$  であるかによって反対となることわかった。

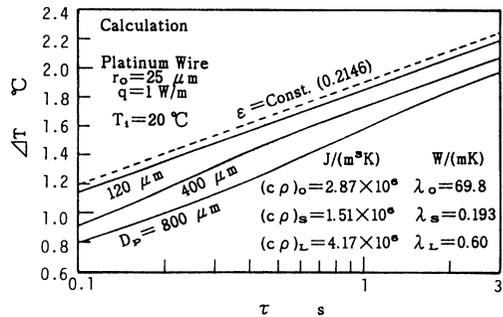


図-13 細線温度変化の計算結果  
(水とポリカーボネートリング混合物質)

上述の数値解析の定量的な結果を、そのまま実際の固体・液体、あるいは固体・気体混合物質に適用することはできない。なぜなら、実際の混合物質中の固体粒子の形状、および配列のしかたは、図8で仮定した解析モデルとは異なると考えられるからである。しかしながら、細線加熱法は熱浸透厚さ内部の試料の熱伝導率の値を測定する方法である。固体粒子は、細線内部に浸入することができないために、細線表面近傍では内部と異なる配列を持つ。したがって、そこでの空隙率は、図11の領域 A および B で表わされる分布に近いものになるであろう。それゆえ、以

上の考察結果は、実際の混合物質にたいしても、定性的に適用できると考える。

### 4.3 細線加熱法の適用限界

混合物質（ガラス玉+エチルアルコール）の熱伝導率の測定結果を、図14に示してある。図中の△印の値は、非定常細線加熱法による測定値であり、○印は定常平板比較法による値である。

また、2本の一点鎖線は、平板比較法によって得られた測定値の上限と下限を示している。両者の測定法による結果は、ガラス玉の直径が250  $\mu\text{m}$  程度までは、ほぼ一致していると見なすことができるが、それ以上直径が大きくなると、細線加熱法による測定値が、平板比較法の上

限値よりも大きくなるのがわかる。したがって、固体と液体の熱伝導率比が約4程度の場合、細線加熱法は、固体粒子の直径が約250  $\mu\text{m}$  程度の大きさまでの固・液混合物質に適用可能であるといえる。

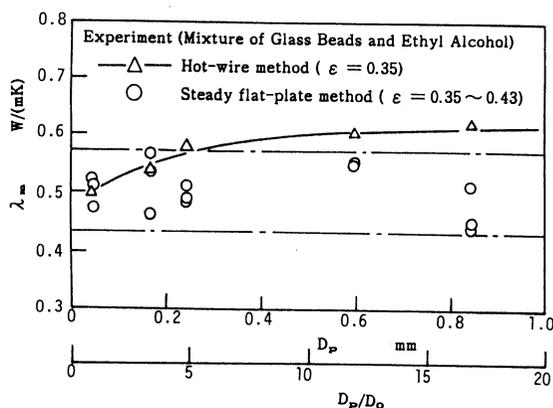


図-14 ガラス玉とエチルアルコール混合物質の熱伝導率（細線加熱法と平板比較法の比較）

## 5. おわりに

非定常細線加熱法を、固・液混合物質の熱伝導率測定に適用できるか否かについて、実験的、解析的に検討を行なった。本研究で得られた結果は、以下のように要約できる。

- (1) 細線加熱法による固・液混合物質の熱伝導率の測定値は、試料全体の空隙率が同一であっても、固体粒子の大きさによって異なる値を示す。これは、測定に関与する混合物質の空隙率が、熱浸透厚さの増加とともに異なる値に変化するに起因する。この測定結果は、熱伝導率の値が固体粒子の直径に依らず一定値を示す平板比較法の場合とは一致しない。
- (2) 細線加熱法では、固体の熱伝導率 ( $\lambda_s$ ) が液体の値 ( $\lambda_L$ ) よりも大きい場合、混合物質の熱伝導率は、粒子の直径の増加とともに高めの値に測定される。反対に、 $\lambda_s < \lambda_L$  の場合には、粒子直径の増加とともに低めの値に測定される。
- (3) 平板比較法による測定値と比較した結果、細線加熱法は、固体粒子の直径が小さな固・液混合物質に適用可能であることがわかった。

最後に、本研究を遂行するに当たり、実験に協力いただいた、当時本学学生の林健次郎、増井

利嗣の両氏にたいし、深く感謝の意を表します。

**参考文献**

- 1) Sugawara, M. : Proc. 1st Asian Thermophysical Properties Conference, Beijing, China, April 21–24, 409(1986)
- 2) de Castro, C. A. N., Calad, J. C. G., Wakeham, W. A. and Dix, M. : J. Phys. E. Sci. Instrum. 9 1073(1976)
- 3) Kestin, J. and Wakeham, W. A. : Physica 92A 102(1978)
- 4) Nagasaka, Y. and Nagashima, A. : Rev. Sci. Instrum. 52 229(1981)
- 5) Healy, J. J., de Groot, J. J. and Kestin, J. : Physica 75 392(1976)
- 6) 長坂雄次, 長島 昭 : 日本機会学会論文集 (B編) 47 1323(1981)
- 7) Tokura, I., Saito, K., Altenkirch, R. A., and Evans, D. D. : Proc. The Combustion Institute, Illinois, Argonne, USA., May 11–12, 249(1987)
- 8) Power, A. E. : Knolls Atomic power Report KAPL 2145, General Electric Company, (1961)
- 9) Saito, H., Kishinami, K., Tokura, I. and Takekawa, Y. : Proc. 2nd Asian Thermophysical Properties Conference, Sapporo, Japan, September 20–22, 81(1989)

# ねじ締結体における内力係数の簡単な求め方

田中 稔 ・ 北郷 薫 (工業院大学)

## A Simple Calculation Method of the Force Ratio of a Bolted Joint

Minoru TANAKA and Kaoru HONGO

### Abstract

A simple and handy calculation method of the force ratio of a bolted joint is proposed. This method is applicable not only to symmetrical but also unsymmetrical bolted joints. The process of this method is as follows: First, the clamped plate of a bolted joint subjected to an external force is divided into two parts; in one part, the clamping force is increased by the applied external force, whereas in the other part, the clamping force is decreased. Next, the above two parts are respectively replaced by two springs of which spring constants are equivalent to those of the two parts. Third, the bolt is replaced by a spring of which spring constant is equivalent to that of the bolt. Finally, the bolted joint is modeled as a structure which is constructed with all spring elements. The expression of force ratio is derived from the equilibrium of the forces acting on the above model and the condition of compatibility of deformation of the model. From the viewpoint of the design calculation of bolted joints, the results of the calculation according to the above method agree satisfactorily with the solution from the three-dimensional theory of elasticity and the experimental results.

### 1. はじめに

ねじ締結体に外力が作用した場合にボルトに追加される軸力の増加分を知ることは設計上重要なことである。外力に対するボルト追加軸力の比を内外力比または内力係数と呼び、強度設計の目安となることからねじ締結体の設計によく使われており、これを小さくすることはねじ締結体の強度設計上の一つのポイントとなる<sup>1)</sup>。内力係数 $\Phi$ はボルトのばね定数 $k_b$ と被締結体のばね定数 $k_p$ を求め、各々の軸方向変位が等しいという条件よりボルトに追加される軸力を求める方法で、内力係数は $\Phi = k_b / (k_b + k_p)$ で計算され、この式はThumの式と呼ばれている、ボルトのばね定数は比較的簡単に求まるが<sup>2)</sup>、被締結体のばね定数の計算は難しく、これまででも多くの理論的研究が行われている<sup>3)、4)</sup>が、多くの場合被締結体の解析モデルが接合面を無視した一体形となっている。また、上式は外力の作用点がボルト軸線上のボルト及びナットの座面直下にある場合の内力係数の計算式である。しかし、実際の場合に外力の作用点はボルト及びナットの座面直下に来ることはなく、ボルト軸線から遠く離れたボルト・ナット座面と接合面の間にある。

このような場合の内力係数は非常に小さくなることから上式を修正するための修正係数の解析法が提案されている<sup>5)~7)</sup>。

内力係数を求めるためには、ボルトのばね定数と被締結体のばね定数を知る必要がある。しかし、上述の様にボルトのばね定数は比較的簡単に計算できるが、被締結体のばね定数を計算することが難しいこと、さらに、外力が作用したとき、被締結体には圧縮される部分と圧縮が解放される部分があるため、被締結体の圧縮ばね定数を正確に求めることが出来たととしても内力係数を正確に求めることはできないことを意味している。

そこで、本研究ではねじ締結体の基本モデルである単一ボルト締結体について、被締結体のばね定数に着目し、外力がねじ締結体の接合面を引離す方向に作用したとき、初期締付け力により被締結体に生じた圧縮力が更に増加する部分と圧縮力が解放される部分に分け、各々を等価な円筒にモデル化してばね定数を求め、接合面に関して対称なねじ締結体だけでなく、研究例の少ないねじ込みボルトや各々異なった厚さの被締結体を締付ける場合の様に接合面に関して非対称となる締結体についても簡単に内力係数を求めることが出来る計算方法を提案する。さらに、本方法の適用性を調べるために文献(5)~(7)の解析結果及び実験結果と比較検討する。

## 2. 内力係数の求め方

図1(a)は2個の中空円筒を初期締付け力  $F_v$  で締付け、円筒の接合面を引き離す方向に外力  $W$  が作用している状態を示す。(b)はこの状態の中空円筒について、外力の着力点よりボルト、ナット座面側の圧縮変形がさらに増加する部分(ばね定数:  $k_{c1}$ 、 $k_{c2}$ )と、外力の着力点より接合面側の初期締付け力による圧縮変形が減少する部分(ばね定数:  $k_{t1}$ 、 $k_{t2}$ )に分け、ボルトを伸び変形が増加する部分(ばね定数:  $k_b$ )と考えて、各々をばね要素にモデル化したものを示す。

ここで、ボルトに追加される軸力を  $dF_b$ 、接合面の圧縮力減少分を  $dF_t$  として力の釣合を考えると次式の関係が得られる。

$$W = (F_v + dF_b) - (F_v - dF_t) \quad (1)$$

また、ボルトの伸びを  $\delta_b$ 、中空円筒の着力点より接合面側の伸びを各々  $\delta_{t1}$ 、 $\delta_{t2}$ 、中空円筒の着力点よりボルト・ナット座面側の縮みを各々  $\delta_{c1}$ 、 $\delta_{c2}$  とすると、ボルト・ナット系の伸び

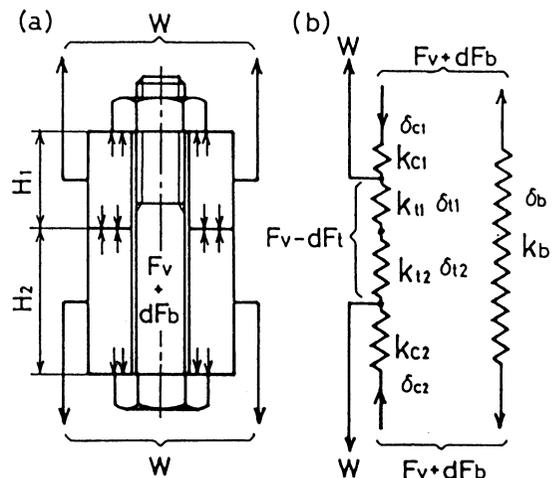


Fig.1 Bolted joint and spring elements model

と中空円筒の伸びは等しいことから、次式の関係が得られる。

$$\delta_b = (\delta_{t1} + \delta_{t2}) - (\delta_{c1} + \delta_{c2}) \quad (2)$$

さらに、ボルトの追加軸力  $dF_b$  及び中空円筒の接合面の圧縮力減少分  $dF_t$  は次式の様に表される。

$$\left. \begin{aligned} dF_b &= k_b \delta_b = k_{c1} \delta_{c1} = k_{c2} \delta_{c2} \\ dF_t &= K_t \delta_t \\ \text{ただし、} \delta_t &= \delta_{t1} + \delta_{t2} \\ K_t &= k_{t1} k_{t2} / (k_{t1} + k_{t2}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2)、(3)より

$$\delta_t = \frac{\{k_{c1} k_{c2} + (k_{c1} + k_{c2}) k_b\} \delta_b}{k_{c1} k_{c2}} \quad (4)$$

式(1)、(3)、(4)より、内力係数  $\Phi$  は次式で表される。

$$\begin{aligned} \Phi &= dF_b / W \\ &= \frac{k_b k_{c1} k_{c2}}{k_b k_{c1} k_{c2} + K_t \{k_{c1} k_{c2} + (k_{c1} + k_{c2}) k_b\}} \quad (5) \end{aligned}$$

### 3. 中空円筒のばね定数

#### 3.1 通しボルト締結体の場合

図2は2個の中空円筒を1本のボルトで締付けたときボルト頭部から接合面に直線的に拡大する圧縮力の分布領域を示す。実際にはこのように圧縮力が直線的に分布することはないが、簡単に考えるためにはこの様な方法が妥当であると考えられる。2個の中空円筒をボルトで締付けた時、中空円筒の接合面

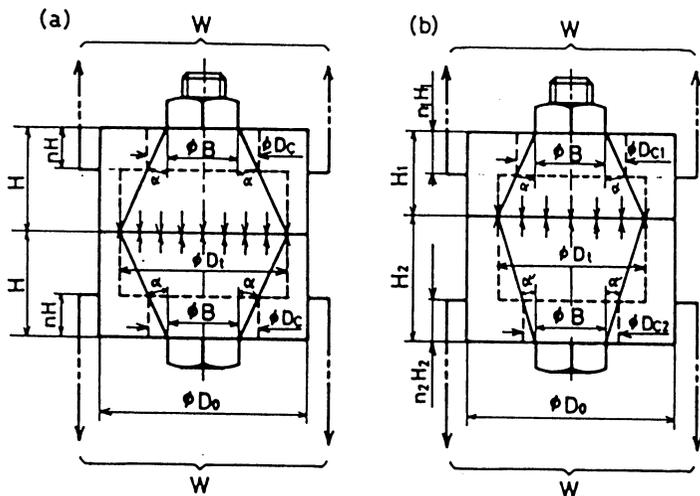


Fig.2 Cylinder models for compression area on clamped plates

に圧縮力が分布している範囲を圧縮領域と定義する。

圧縮領域は Röttscher の影響円錐の方法によりボルトの二面幅  $B$  を直径とする頂面を持ち、半頂角  $\alpha$  の円錐台と仮定する。Wächter ら<sup>8)</sup>の考えを参考に圧縮領域をばね要素にモデル化するために、中空円筒を外力が作用する平面でボルト及びナット座面側と接合面側に分け、図中の破線で示すような円筒に置き換える。2個の中空円筒の厚さが各々等しい場合には、締付け力による中空円筒の変形は各々等しく、圧縮領域は(a)に示すように接合面に関して対称なそろ盤珠状となる。しかし、中空円筒の厚さが各々異なる場合には、締付け力による中空円筒の変形は接合面に関して対称とはならない。この場合、締付け力による変形は中空円筒の厚さが薄い方が大きく厚い方が小さい。従って、圧縮領域は厚さの薄い方の被締結体に支配されると仮定すると(b)に示すようになる。各中空円筒の  $n_1H_1$ 、 $n_2H_2$  の位置に外力が作用したとき、ボルト・ナット座面側及び接合面側の各等価円筒の直径を次式のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} D_{c1} &= 2 n_1 H_1 \tan \alpha + B \\ D_{c2} &= n_2 (D_t - B) + B \\ (D_{c1}, D_{c2} < D_o \text{ のとき } D_{c1}, D_{c2} &= D_o) \\ D_t &= 2 H_1 \tan \alpha + B \\ (D_t < D_o \text{ のとき } D_t &= D_o) \\ (n_1, n_2 < 1) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

座面側及び接合面側等価円筒の縦弾性係数を  $E_p$ 、ボルトの穴径を  $D_i$  とするとばね定数は各々次式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} k_{c1} &= \frac{\pi E_p (D_{c1}^2 - D_i^2)}{4 n_2 H_1} \\ k_{c2} &= \frac{\pi E_p (D_{c2}^2 - D_i^2)}{4 n_2 H_2} \\ k_{t1} &= \frac{\pi E_p (D_t^2 - D_i^2)}{4 (1 - n_1) H_1} \\ k_{t2} &= \frac{\pi E_p (D_t^2 - D_i^2)}{4 (1 - n_2) H_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

中空円筒の厚さが各々等しく ( $H_1 = H_2$ )、外力の着力点が  $n_1 = n_2$  の位置にある場合には座面側及び接合面側等価円筒のばね定数は各々  $k_{c1} = k_{c2}$ 、 $k_{t1} = k_{t2}$  となるので式(5)から内力係数が求められる。

### 3.2 植込みボルトの場合

図3(a)は植込みボルト締結体を示す。この場合、雌ねじの切っである本体側の変形を考慮すると圧縮領域は通しボルトの場合とは若干異なると考えられる。しかし、雌ねじの切っであるベース側を剛体と仮定することにより圧縮領域は通しボルトの場合と同様に考えられ、被締結体のみ

を考えれば良いことになる。従って中空円筒における圧縮領域の座面側及び接合面側等価円筒の直径及び各等価円筒のばね定数は各々次式で表される。

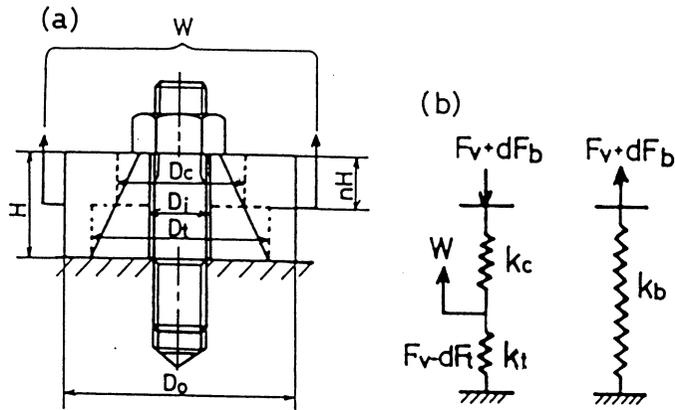


Fig.3 Stud bolted joint and spring elements model

$$\left. \begin{aligned} D_c &= 2nH \tan \alpha + B \\ (D_c < D_o \text{ のときは } D_c &= D_o) \\ D_t &= 2H \tan \alpha + B \\ (D_t < D_o \text{ のときは } D_t &= D_o) \\ (n < 1) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} k_c &= \frac{\pi E_p (D_c^2 - D_i^2)}{4nH} \\ k_t &= \frac{\pi E_p (D_t^2 - D_i^2)}{4(1-n)H} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

図3(b)のばねモデルについて内力係数を求めると次式の様になる。

$$\Phi = \frac{k_b \cdot k_c}{k_b \cdot k_c + k_t (k_b + k_c)} \quad (10)$$

#### 4. 被締結体の圧縮領域

被締結体のばね定数を求めるために接合面に圧縮力が分布する範囲、即ち、圧縮領域を求める。図4はねじ締結体をモデル化したもので、2個の中空円筒に締付け力に相当する環状の等分布荷重が作用している状態を示す。これを軸対称モデルとして有限要素法により接合面の圧力分布を

求める。有限要素解析においては圧縮力による被締結体外縁のそり上がりによる接合面の分離を考慮した。

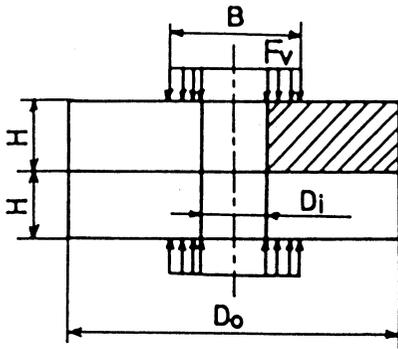


Fig. 4 Analytical model of compression area on clamped plates

図5は中空円筒の高さHを変化させた場合の接合面の圧力分布を示す。接合面の圧縮力はボルト穴縁で高く外側に向かって低くなっている。また中空円筒の高さが高くなるとボルト穴縁での圧縮力は低くなるが圧縮領域は広がることわかる。この図から、中空円筒の外径が圧縮領域より大きければ中空円筒の外縁では圧縮力が作用せず、逆に小さければ中空円筒の全面に圧縮力が分布することがわかる。

図6は圧縮力を変化させた場合の接合面の圧力分布を示す。荷重が大きくなるとボルト穴縁における圧縮力は高くなるが圧縮領域は圧縮力の大きさによって変化しないことがわかる。これは圧縮力の分布する領域は異なるが超音波を用いた伊東ら<sup>9)</sup>の実験結果とも符合する。解析結果より圧縮領域を Rötischer の影響円錐の方法で円錐台の半頂角を求めると25度前後の値となる。

### 5. 計算結果の比較及び検討

図7は文献(5)の実験に用いられたねじ締結体を示す。文献(5)及び(7)と比較するため、計算では

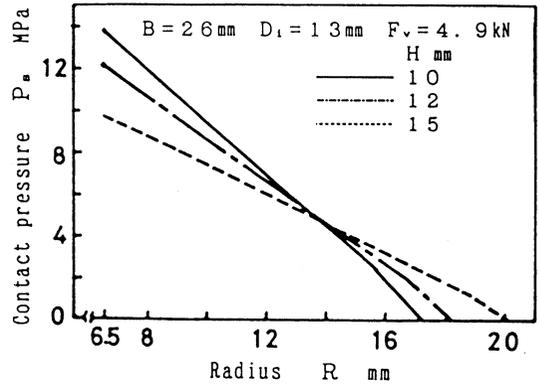


Fig. 5 Relation between contact pressure and radius against clamped plate thickness

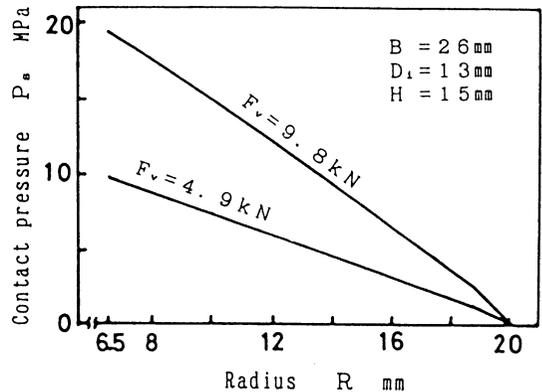


Fig. 6 Relation between contact pressure radius against preload

外力の着力点を(a)の場合は  $n=0.8$ 、(b)の場合は  $n=0.2$  とし、ボルトのばね定数は  $k_b=1000 \text{ kN}/\mu\text{m}$  とした。また、影響円錐の半頂角は圧縮領域の計算結果より25度とした。

図8に文献(5)、(7)の実験結果及び計算結果と図7の条件で本方法により計算した結果を比較したものを示す。本方法による結果は文献(7)の結果に良く一致しており、文献(5)による三次元弾性論の計算結果とほぼ一致している。

図9に文献(6)の解析に用いられたねじ締結体を示す。文献(6)では三次元弾性論による計算より内力係数  $\Phi=0.0127$  を得ている。文献(6)よりボルトのばね定数を  $200 \text{ N}/\mu\text{m}$ 、外力の着力点を  $n=0.615$ 、座面直径を  $B=17.6 \text{ mm}$  として式(10)より内力係数を求めた結果  $\Phi=0.0121$  を得た。本方法による計算結果は三次元弾性論による計算結果と良く近似している。

本方法では被締付け円筒の外径が圧縮領域よりも大きくなると内力係数が一定となるという弱点

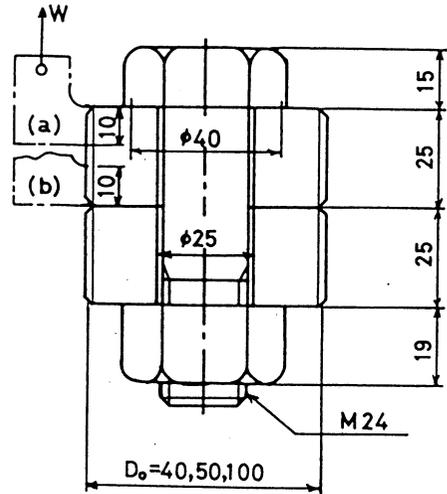


Fig. 7 Forms and dimension of bolted joint used experiments by ref. [5]

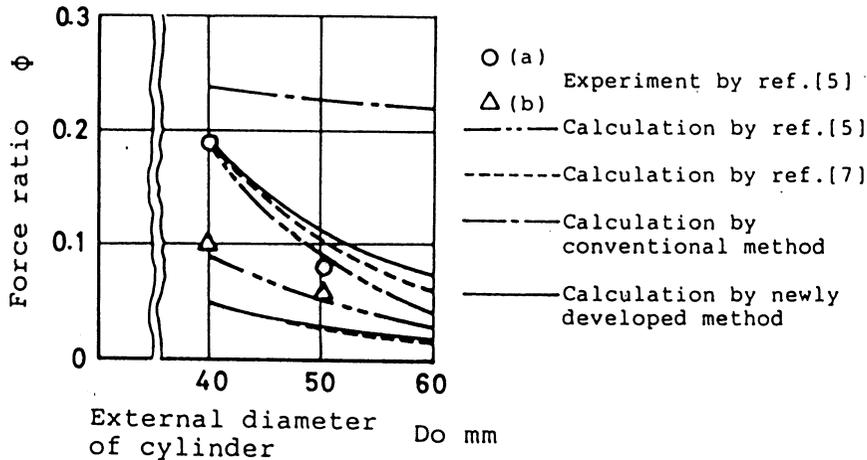
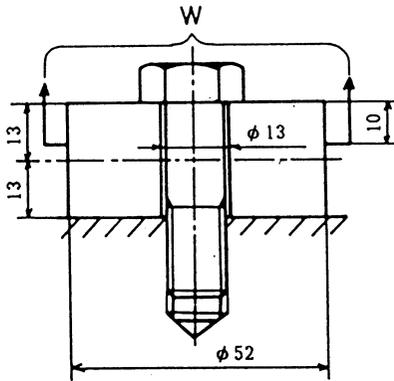


Fig. 8 Relation between force ratio and external diameter of cylinder

がある。しかし、図8の結果から中空円筒の直径が大きくなるといずれの計算法においても内力係数は着力点の影響を受けにくくなる傾向がある。また、VDI 2230<sup>10)</sup>によれば、このよ

うな場合に  $n=1/2$  と仮定して計算するとなっていることを考慮すると、この点はあまり問題にならないと考えられる。更に、本方法では三次元弾性論による様な複雑な計算がなく、モデルが



内力係数	$\Phi$
実験値 <sup>6)</sup>	0.0125
三次元弾性論 <sup>6)</sup>	0.0127
本研究計算結果	0.0121

Fig. 9 Forms and dimension of stud bolted joint used experiments by ref. [6]

直感的で考えやすく計算も簡単であるという長所がある。

本方法はねじ締結体に外力が負荷されたとき接合面が分離しないという条件のときに適用できる。外力が作用するねじ締結体において、外力を徐々に増加してゆくと、ある点で接合面が分離し始める。接合面が分離し始めると内力係数は一定値をとらず、内力係数は増加する。接合面の分離を全面的に許さない設計は過剰設計となる場合があり、接合面の分離を考慮する場合には著者が提案しているばね-はりモデルによる解析法<sup>11)</sup>が有効と考えられる。

## 6. 結 論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 中空円筒を初期締め付け力により生じた圧縮力が更に増加する部分と圧縮力が解放される部分に分けてそれぞれを等価円筒に置き換える方法を提案した。
- (2) 各等価円筒とボルトをそれぞればねにモデル化し、簡単に内力係数を計算する方法を提案した。
- (3) 本方法による計算結果と文献(5)、(6)の実験ならびに三次元弾性論による解析結果を比較したところ両者はほぼ一致した。更に、文献(7)の簡易計算法による解析結果とは非常に良く一致した。
- (4) 本方法による計算法は接合面に関して対称なねじ締結体だけでなく、ねじ込みボルトや各々異なった厚さの被締結体を締め付ける場合の様に接合面に関して非対称となる締結体についても適用できる。

### 参考文献

- 1) 山本晃、ねじ締結の理論と計算、53、養賢堂、(昭45)
  - 2) 文献1)、58
  - 3) 光永公一：ねじ継手の被締付材の応力分布-とくにばね定数について-、日本機械学会論文集第3部、31-231、1750、(昭40)
  - 4) 柴原正雄、尾田十八：ボルト結合体における被締付け材のばね定数について、日本機械学会誌、72-611、1611、(昭44)
  - 5) 吉本勇、丸山一男、沢俊之、西口信幸：ねじ締結体の内力係数-被締結体が中空円筒の場合-、日本機械学会論文集第3部、42-359、2174、(昭51)
  - 6) 沢俊之、丸山一男、枝本和彦：ねじ込みボルトによるねじ締結体の特性について、日本機械学会論文集C編、47-415、337、(昭56)
  - 7) 萩原正弥：ねじ締結体の内力係数の簡易計算法-被締付け部材が軸対称引張り外力を受ける円筒の場合-、日本機械学会論文集C編、48-428、622、(昭58)
  - 8) K.Wächter, R.Beer, D.Jannasch：Berechnung der elastischen Flanschgiebigkeit von Schraubenverbindungen, Maschinenbautechnik, 26, 2, 61、(1977)
  - 9) 伊東諄、永田周三：ボルト結合体の締付圧力分布に関する研究、日本機械学会講演論文集、760-17、186、(昭51)
  - 10) VDI 2230、(丸山訳)、高強度ねじ結合の体系的計算法、日本ねじ研究協会誌、12-9、211、(1981)
  - 11) 例えば、田中稔：ばね・はりモデルによるねじ締結体の応力解析-単一ボルト締結体の場合-、精密機械、51-12、2265、(昭60)
- [日本機械学会北海道支部第30期総講演会にて発表]

# 強磁性非晶質合金の結晶化過程における $\alpha$ -Fe の 析出量を磁気モーメントの 変化量から求める試み： $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ の場合

永田正一・藤田英司・戎 修二・谷口 哲

## Quantitative Evaluation of the Amount of $\alpha$ -Fe phase in Successive Heat Treatment for $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$

Shoichi NAGATA, Eiji FUJITA, Shuji EBISU and Satoshi TANIGUCHI

### Abstract

An amorphous metallic alloy  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  has a Curie temperature of  $440^\circ\text{C}$  (713 K) and a crystallization temperature of about  $505^\circ\text{C}$  (778 K). When the samples are annealed at well below the crystallization temperature, a stable  $\alpha$ -Fe phase appears gradually with a further increase of an annealing time. Electron diffraction and X-ray study can identify the precipitated material in the amorphous matrix, however, it is quite difficult to give an accurate quantitative amount of this material. A new attempt to evaluate a quantitative atomic percentage of the precipitated material after successive heat treatments will be performed. As an example we report the result for a systematic study of an evaluation of the amount of  $\alpha$ -Fe phase in the amorphous Fe-B-Si matrix at a  $450^\circ\text{C}$  annealing. Using the changes of the mean magnetic moment, the quantitative determination of  $\alpha$ -Fe can be made. The magnetization of  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  has been measured in the temperature range of  $4.2 < T < 310$  K at a constant magnetic field of 5.4 kOe using a homemade vibrating sample magnetometer. In order to get the value of magnetic moment at 0 K from the relevant extrapolation of the magnetization curve to  $T = 0$  K, we present an exact analysis of spin-wave excitations in a presence of an applied magnetic field.

## 1. 緒 言

固体の非晶質状態は熱力学的に準安定状態にある。この非晶質状態の熱力学的安定性、および物性と構造との関連を明らかにすることは重要課題である。その一つの手段として結晶化がどのように進行するかを詳細に追求し、特に、初期過程を考察することが重要と考えられる。X-線や電子線回折では、焼鈍により、どのような結晶相が析出するかを検出できる。<sup>1)-3)</sup>しかしながら、その結晶相の析出量を精度を上げて定量的に測定することは難しい。そこで、我々はX-線による析出物質の確認と共に、極低温での磁化測定から得られる磁気モーメントの値の変化に基づいて析出物質の量を定量的に算出することを考えた。このように、X-線による析出物質の確認と磁性の両者を対応させて析出量を定量的に求めることが可能と思われる。

本研究では、具体例として非晶質合金  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  の低温時効 (450°C) による構造の変化に伴い、試料の平均の磁気モーメントがどのように変るかを系統的に調べた。その結果として、各熱処理時間での  $\alpha$ -Fe の析出量を実験的に求めることができた。すなわち、低温時効による  $\alpha$ -Fe の析出量を磁気モーメントを測定する立場から定量的に算出する一つの試みである。非晶質合金  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  は、キュリー点が440°Cで結晶化温度が505°Cである。450°Cで時効すると24時間以内では、非晶質相の中に  $\alpha$ -Fe 結晶相のみが徐々に析出する。<sup>1),4)</sup> 図-1 に結晶化の様子を模式的に示す。

磁化の温度変化を自作の振動試料型磁力計を用いて、4.2 K から310 K の範囲で測定した。磁化の温度依存性にスピン波理論を適用し、磁化の絶対0度への外挿値から Fe 原子一個当りの磁気モーメントを求めた。なお、この場合外部磁場の存在する下でのスピン波理論を厳密に適用して外挿値を求めた。<sup>5),6)</sup> 実験結果から、本試料について、次のことが判明した。試料を450°Cでアニールすると、未処理の試料より磁気モーメントが大きくなることが判った。この平均の磁気モーメントの増加は  $\alpha$ -Fe が析出し、その量が徐々に増大することを示している。3, 6, 9, 24時間の時効で、試料全体の Fe 原子当り、 $\alpha$ -Fe の析出量はそれぞれ、15, 19, 31, 32%であることが実験的に判った。このように、X-線による析出物質の確認と磁性の両者を対応させて、時効時間の各段階での  $\alpha$ -Fe の析出量を定量的に求めることが可能である。

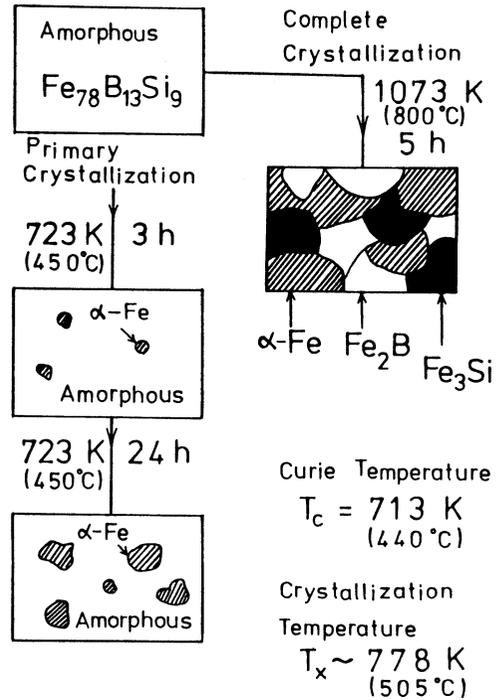


図-1 Schematic diagram of crystallization reactions in  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ . The Curie temperature is found to be 713 K and the crystallization temperature is about 778 K.

## 2. 磁場中でのスピン波動起

試料内の Fe 原子一個当りの磁気モーメントを実験的に求めるには、絶対0度での磁化の値が判明すれば良い。ここでは、外部磁場の存在する下でのスピン波理論を厳密に適用して、磁化の温度変化を絶対0度へ外挿する方法を簡単に述べる。詳細はすでに発表しているので、ここでは省略し結果だけを述べる。<sup>7),8)</sup> 非晶質合金の強磁性体が結晶状態の強磁性体と同じようにスピン波理論が適用でき、実験事実をよく表現できることが解っている。<sup>9),10)</sup> 非晶質合金の場合には、

交換相互作用の大きさが空間的に異なるので、集団励起をしたとき相隣り合うスピンの向きの間の相対的な角度が、交換相互作用の大きさに応じて空間的に一様ではなくなる。しかし、平均の原子間隔をはるかに越えた長波長のスピン波に対しては、空間のどの部分もスピンはほぼ平行になる。したがって、長波長のスピン波に対しては、原子配列の詳細や周期性等はあまり重要ではなくなり、交換相互作用が存在するかぎり、スピン波近似で記述されるものと思われる。このスピン波理論によれば、長波長近似として強磁性のスピン波の分散関係は次のように表される。<sup>11)</sup>

$$\epsilon_k = Dk^2 + Ek^4. \quad (1)$$

ここで、 $k$  は波数で  $D, E$  は定数である。このとき、磁化の温度依存性は次のようになる。

$$\frac{\Delta M(T)}{M(0)} = \frac{M(0) - M(T)}{M(0)} = BT^{3/2} + CT^{5/2}. \quad (2)$$

$B, C$  は定数で第 1 項は Bloch の  $T^{3/2}$  則を示し、第 2 項は(1)式において高次の  $k^4$  項が存在することから由来する。

さて、次に磁場の存在する場合を考える。有効磁場  $H_{\text{eff}}$  が存在すると、(1)式には次式のごとく分散関係にエネルギーギャップが生ずる。

$$\epsilon_k = g \mu_B H_{\text{eff}} + Dk^2 + Ek^4, \quad (3)$$

$$H_{\text{eff}} = H_0 - 4\pi NM(T) + H_A. \quad (4)$$

ここで、 $H_0$  は外部磁場、 $N$  は反磁場係数、 $H_A$  は異方性磁場である。次に、Argyle and Pugh にならない、ギャップ温度  $T_g$  を定義する。<sup>5), 6)</sup> すなわち、

$$T_g = \mu_B H_{\text{eff}} / k_B. \quad (5)$$

と定義する。磁場によるエネルギーギャップが存在するので、(2)式は下記のように変更される。

$$\frac{\Delta M(T)}{M(0)} = BZ(3/2, T_g/T) T^{3/2} + CZ(5/2, T_g/T) T^{5/2}. \quad (6)$$

ここで、 $Z(3/2, T_g/T)$ 、および  $Z(5/2, T_g/T)$  はやや複雑な次式で与えられる。

$$Z(3/2, T_g/T) = \frac{1}{\zeta(3/2)} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-3/2} \exp[(-n)T_g/T], \quad (7)$$

$$Z(5/2, T_g/T) = \frac{1}{\zeta(5/2)} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-5/2} \exp[(-n)T_g/T]. \quad (8)$$

また、 $\zeta(3/2) = 2.612$ 、 $\zeta(5/2) = 1.341$  は Riemann の  $\zeta$  関数である。これらの  $Z$  関数の値は  $T_g$  を 0 にすると 1 になる。そこで磁場をゼロにすると、(6)式は(2)式に一致することが解る。

結局、磁場の影響により磁化の温度依存性は単純な Bloch の  $T^{3/2}$  則が修正され、(6)式で示されるように温度と磁場の大きさに依存する因子  $Z(3/2, T_g/T)$  が掛けられる。高次の  $T^{5/2}$  項に関しても、同様に  $Z(5/2, T_g/T)$  が因子として掛けられる。この  $Z$  関数は温度と有効磁場  $H_{\text{eff}}$  が与

えられると厳密に計算できる。

結局、われわれは(6)式に基づき、磁化の温度依存性を整理することができ、絶対0度への磁化の外挿から、試料内のFe原子一個当りの磁気モーメントを求めることが可能となる。

### 3. 実験方法

試料は非晶質合金  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  である。厚さ30~40  $\mu\text{m}$ 、幅64mmのリボン状のものから、より均一性の良いと思われる中央部分を切り出した。試料サイズは  $7 \times 8 \text{ mm}^2$  の薄片である。単ロール法による液体急冷法で作製されたもので、日立金属(株)から提供して戴いた。試料の熱処理は約  $1.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  の真空中で行った。

各熱処理段階でのX線の実験は、透過ラウエ法によるX線写真法およびX線ディフракトメーターの両方を用いた。磁化測定は振動試料型磁力計で4.2Kから310Kの温度範囲において行った。<sup>12)-14)</sup>一定温度の下で5Kおきに磁化曲線を描かせた。また、 $H_0 = 5.4 \text{ kOe}$  の一定磁場中で温度変化させて磁化の測定を行った。磁化の絶対値は、純度99.9%のNi試料で較正した。Fe原子一個当りの磁気モーメントは2章で述べた解析に基づき、磁化の温度変化曲線を絶対0度へ外挿することから求めた。

### 4. 実験結果と考察

図-2は  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  の磁化曲線の温度依存性を示す。磁場の向きは薄板状試料の面に平行にかけた。一般に、自発磁化の大きさを実験的に求めるには、飽和漸近則に基づく外挿法で求める場合が多い。<sup>15)</sup>しかし、この外挿法ではせっかくの測定精度を犠牲にする。一方、一定の外部磁場の下で磁化の温度変化を測定すると、各温度で磁化曲線を描く必要がないので、測定精度を上げることができる。そこで、磁化曲線の上で十分

飽和領域に達している外部磁場  $H_0$  を考える。すなわち、外部磁場  $H_0$  がワイスの分子磁場に加

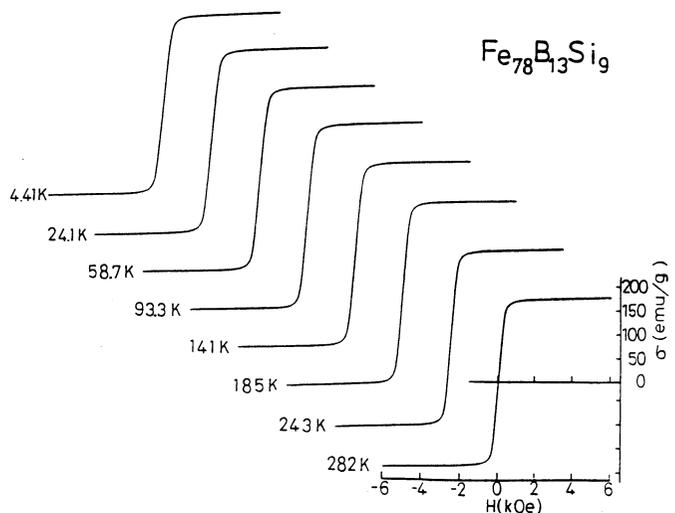


図-2 Magnetization curves of  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  at various temperatures for the as-quenched sample. The hysteresis curves are overlapped and not seen clearly since the scale of magnetic field is too large in this figure.

わって自発磁化の値自身が大きくなる(forced ferro)領域をさす。図-2に示すように、試料の非晶質合金  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  は磁化し易く、5 kOe以上の磁場では十分に飽和領域に達している。<sup>15)</sup>そこで、2章で述べた解析に基づき、磁化の温度変化曲線を絶対0度へ外挿することから磁気モーメントを求めることができる。また、(4)式において、 $H_{\text{eff}}$  は反磁場の効果および磁気異方性を考慮して取り扱うべきである。試料の形状が厚さ30~40  $\mu\text{m}$ の薄片で、外部磁場が薄片に平行であるので反磁場係数  $N$  は非常に小さい。

また、Fe-半金属非晶質合金は、保磁力が0.1 Oeの程度で、いわゆる軟磁性の範ちゅうに属する。しかしながら、飽和領域まで磁化するには保磁力の1000倍にも達するので非晶質合金は、必ずしも理想的に均質等方ではなく磁気異方性、 $H_A$ があると思われる。たとえ小さな磁気異方性が存在しても、われわれの用いた外部磁場5.4 kOeと比較すると非常に小さい。<sup>16),17)</sup>したがって、(4)式において有効磁場  $H_{\text{eff}}$  を外部磁場  $H_0$  に等しいと近似して話を進める。

図-3に、 $H_0 = 5.4$  kOeの一定の外部磁場下における磁化の温度依存性を示す。これは代表例であり、450°C (723 K)で24時間のアニールを行った試料の結果である。磁化の温度変化は僅かで、300Kになっても4.2Kの値の10%弱の減少に留まる。つぎに、測定された各温度において  $H_{\text{eff}} = 5.4$  kOeでの関数  $Z(3/2, T_g/T)$  の値を(7)式に基づき計算機により計算したので、図-4に結果を示す。この図-4の結果を利用して、各温度に対し  $\sigma(T)$  対  $Z(3/2, T_g/T)$

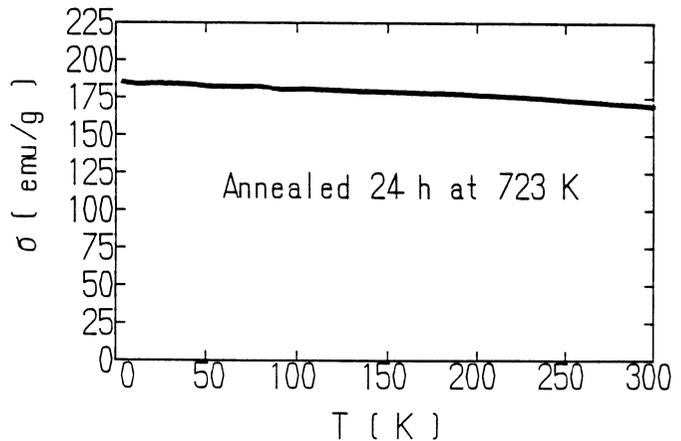


図-3 The magnetization of  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  at a constant magnetic field of  $H_0 = 5.40$  kOe as a function of temperature for the sample annealed 24 hours at 723 K.

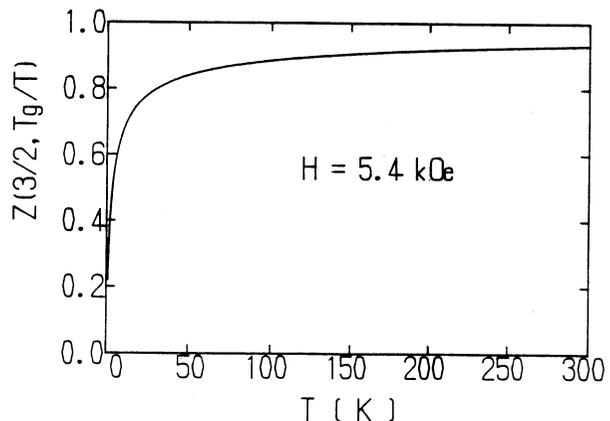


図-4 The temperature variation of  $Z(3/2, T_g/T)$  at the magnetic fields of  $H_{\text{eff}} = 5.40$  kOe (computer calculation).  $T_g$  is defined by eq.(5).

$\times T^{3/2}$ のグラフを描くと図-5のようになる。この図-5は測定温度範囲にわたって直線によ

く。すなわち、磁化の低温領域での温度変化は、スピン波励起の理論によってよく記述できる。各熱処理段階での磁化の温度依存性を測定して、図-5のような直線を絶対0度へ外挿して、その磁化の値から試料全体の磁気モーメントを求めた。<sup>18)</sup>

$\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  は 1 mole が 4749.38(g) であり、 $1 \mu_B$  が  $9.274 \times 10^{-21}$  (emu) であるので、1 (g) 中の Fe の原子数は、次のように求められる。

$$1 \text{ (g) 中の Fe の原子数} = \{(6.022 \times 10^{23}) \times 78\} / 4749.38 \text{ (個/g)}. \quad (9)$$

例として、実験で得られた試料 1 (g) の磁気モーメントを 174.8 (emu/g) とすると、

$$\begin{aligned} \text{Fe 一原子当りの磁気モーメント} \\ = [174.8 \times 4749.38] / \{[(6.022 \times 10^{23}) \times 78] \times (9.274 \times 10^{-21})\} \\ = 1.91 (\mu_B / \text{Fe atom}). \quad (10) \end{aligned}$$

となる。このようにして、局在磁気モーメントの立場から、試料を 450°C (723 K) でアニールしたときの時効時間による Fe 原子当りに換算した平均の磁気モーメントの変化を、図-6 および表-1 に示す。

これらの結果より、試料を 450°C でアニールすると、末処理の試料より磁気モーメントが大きくなることが読み取れる。非晶質状態で熱処理を施さない試料について、Fe 原子一個当りの磁気モーメントは  $1.91 \mu_B$

である。一方、結晶相の  $\alpha$ -Fe の磁気モーメントは  $2.22 \mu_B$  であることがよく判っている。また、X-線の実験結果から、表-1 に示す熱処理では、非晶質試料中に  $\alpha$ -Fe が析出し、その量が徐々に増大することが判明している。<sup>4)</sup>したがって、この熱処理による平均の磁気モーメントの増加は非晶質試料中に  $\alpha$ -Fe が析出し、その量が徐々に増大することを示している。<sup>19)</sup>

次に、非晶質 Fe-B-Si の matrix の中に析出した  $\alpha$ -Fe の量を算出する。ここで、析出した  $\alpha$ -Fe を除いた部分は非晶質状態で、依然として未処理の試料と同じ磁気モーメントを持っていると仮定する。 $\alpha$ -Fe が徐々に析出してくると、非晶質 matrix の部分の組成が変化してしまうので、上記の仮定は必ずしも正しくないと思われる。したがって、以下の議論はあくまでこの仮定に基づいた近似的な取り扱いであることに注意されたい。

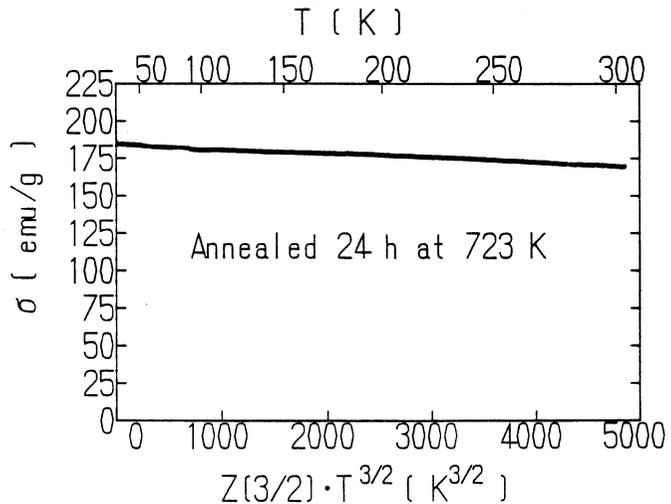


図-5  $\sigma(T)$  vs  $Z^{3/2} \cdot T^{3/2}$  at  $H_{\text{eff}} = 5.40$  kOe for the sample specified in Fig. 3.

次の関係式から試料中の Fe 原子当りの  $\alpha$ -Fe の析出量,  $x(\text{at } \%)$ , を求めることができる。すなわち,

$$\begin{aligned} \text{試料全体の平均の磁気モーメント (実験値)} &= \{ [2.22 \mu_B \times x(\%)] + [1.91 \mu_B \\ &\times (100 - x(\%))] \} / 100. \end{aligned} \quad (11)$$

の関係より  $\alpha$ -Fe の析出量を求める。表-1 に示す各熱処理段階での平均の磁気モーメントの実験値より,  $\alpha$ -Fe の析出量を上の関係式を用いて求めた。結果を表-2 に示す。このように, X-線による析出物質の確認と磁性の両者を対応させて, 析出量を定量的に求めることが可能である。

以上, (6)式に基づき, 磁化の温度依存性の直線を絶対0度へ外挿して試料の磁気モーメントを求めたのであるが, ここで, (6)式における係数  $B$  について簡単にコメントする。残念ながら, われわれの実験において, 係数  $B$  の値は試料依存性が大きく確定的なことは言えない段階である。すなわち, 熱処理を施さない as-quenched のそれぞれの試料が  $1.5 \times 10^{-5} [\text{K}^{-3/2}]$  から  $1.9 \times 10^{-5} [\text{K}^{-3/2}]$  の間の値を示す。また, 低温時効した試料は, as-quenched の試料よりもやや小さな  $B$  の値を示す傾向があるように思える。本稿では  $B$  に関してこれ以上議論をしないことにする。

最後に, 熱処理温度を上昇させて,  $800^\circ\text{C}$  で5時間のアニールを行った試料について考えてみる。このように高温にすると非晶質合金  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  は  $\alpha$ -Fe,  $\text{Fe}_2\text{B}$ , および  $\text{Fe}_3\text{Si}$  に完全に分離して結晶化してしまうことが X-線回折の実験から判明している。<sup>1), 4)</sup> 過去にすでに研究されている実験結果によれば,  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\text{Fe}_3\text{Si}$  の磁気モーメントは, それぞれ,  $1.9 \mu_B$  および  $1.67 \mu_B$  であることが報告されている。<sup>20), 21)</sup> 完全結晶化であるから Fe 原子に対する原子数の比は,  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$  に対して,

$$\alpha\text{-Fe} : \text{Fe}_2\text{B} : \text{Fe}_3\text{Si} = 25 : 26 : 27 \quad (12)$$

となる。したがって, 実験的に得られる磁気モーメントの値としては次のような値が期待される。すなわち,

試料全体の磁気モーメント (計算値)

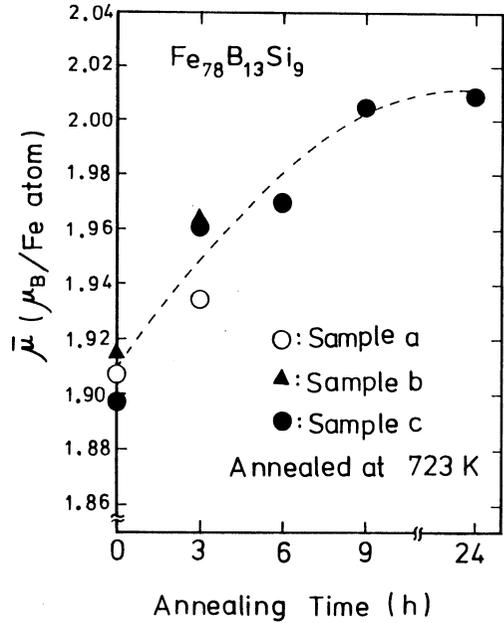


図-6 The average magnetic moment  $\mu$  per Fe-atom as a function of annealing time at 723 K ( $450^\circ\text{C}$ ). The dashed line indicates a tendency of an increasing of the average magnetic moment.

永田正一・藤田英司・戎修二・谷口哲

$$= \{ (2.22 \mu_B \times 25) + (1.9 \mu_B \times 26) + (1.67 \mu_B \times 27) \} / 78 = 1.92 \mu_B. \quad (13)$$

表一1 Spontaneous magnetization per gram,  $\sigma(0)$ , at  $T = 0$  K and mean moment per Fe-atom,  $\bar{\mu}$ . Experimental results are summarized on an annealing sequence for three batches of samples of  $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$ .

Annealing Time (h) at 723 K	Sample a		Sample b		Sample c	
	$\sigma(0)$ (emu/g)	$\bar{\mu}$ ( $\mu_B/\text{Fe-atom}$ )	$\sigma(0)$ (emu/g)	$\bar{\mu}$ ( $\mu_B/\text{Fe-atom}$ )	$\sigma(0)$ (emu/g)	$\bar{\mu}$ ( $\mu_B/\text{Fe-atom}$ )
0.0	175	1.91	176	1.91	174	1.90
3.0	177	1.93	180	1.96	180	1.96
6.0					181	1.97
9.0					184	2.00
24.0					184	2.01

表一2 Mean values of moment,  $\bar{\mu}$ , per Fe-atom (the average of three samples specified in Table 1) and the percentage (%) of the Fe-atom in the  $\alpha$ -Fe phase.

The percentage of Fe-atom in  $\alpha$ -Fe phase is evaluated by the value of magnetic moment (see text). In primary crystallization process, the stable  $\alpha$ -Fe phase, precipitates in the amorphous Fe-B-Si matrix.

Annealing Time (h) at 723 K	Average Value $\bar{\mu}$ ( $\mu_B/\text{Fe-atom}$ )	Percentage(%) of the Fe-atoms of the precipitated $\alpha$ -Fe phase in $\text{Fe}_{78}\text{B}_{13}\text{Si}_9$
0.0	1.91	0
3.0	1.95	$15 \pm 2$
6.0	1.97	$19 \pm 1$
9.0	2.00	$31 \pm 1$
24.0	2.01	$32 \pm 1$

強磁性非晶質合金の結晶化過程における $\alpha$ -Feの析出量を磁気モーメントの変化量から求める試み: Fe<sub>78</sub>B<sub>13</sub>Si<sub>9</sub>の場合

実験値は、 $1.92\mu_B$ であることが予想される。実際に測定された値は $1.95\mu_B$ である。残念ながら、Fe<sub>2</sub>Bの磁気モーメントの値が $1.9\mu_B$ と有効数字2桁でしか与えられていないために、これ以上比較はできないが、われわれの実験精度の範囲では十分の一致が得られたものと判断している。<sup>20)</sup>

## 5. 結 言

非晶質合金 Fe<sub>78</sub>B<sub>13</sub>Si<sub>9</sub>において、低温での焼鈍による(450°C)初期の段階では、時効時間の増加に伴って $\alpha$ -Feが析出し、その量が増加する。X線の実験では $\alpha$ -Feの増加による強度の変化は分かるが、その絶対値を精確に求めることは難しい。各熱処理段階での試料の磁気モーメントの変化を測定して、磁氣的立場から $\alpha$ -Feの析出量を算出した。熱処理を行わない試料はFe原子当り $1.91\mu_B$ の磁気モーメントをもつが、450°C24時間のアニールで $2.10\mu_B$ に増加する。これは、試料中のFe原子の32%が $\alpha$ -Feとして析出していることに対応する。このように、X線による析出物質の確認と磁性の両者の実験事実を対応させて析出量を定量的に求めることができる。

## 謝 辞

実験に用いた試料を提供して下さった日立金属(株)に感謝する。X線の実験をして下さった吉川信様、また、低温実験に関する助力に対し、横山将昭様、岡藤克己様に感謝する。

## [文 献]

- [1] 増本健, 井上明久, 木村久道: 金属学会誌, 41, 730(1977).
- [2] M. Takahashi, M. Koshimura and T. Abuzuka: Jpn. J. Appl. Phys. 20, 1821(1981).
- [3] U. Herold and U. Koster: Rapidly Quenched Metals III, Vol. 1, p. 281(Ed. by B. Cantor, The Metals Society, London, 1978).
- [4] M. Yoshikawa: 未発表.
- [5] B. E. Argyle, S. H. Charap and E. W. Pugh: Phys. Rev. 132, 2051(1963).
- [6] B. W. Pugh and B. E. Argyle: J. Appl. Phys. Suppl. 33, 1178(1962).
- [7] S. Nagata, M. Miyazaki, E. Fujita, S. Ebisu, H. Yamamura and S. Taniguchi: 室工大研報 38, 37(1988).
- [8] S. Nagata, S. Ebisu and S. Taniguchi: Physica (Utrecht) B150, 423(1988).
- [9] For an example, see S. N. Kaul: Phys. Rev. B27, 5761(1983).
- [10] I. Nakai, O. Yamada, M. Mimura, S. Ishio, and M. Takahashi: J. Phys. Soc. Jpn. 56, 4056(1987).
- [11] F. Keffer: *Handbuch der physik*, Vol. 18/2, p.1 (Springer-Verlag, Ed. by H. P. J. Wijn, New-York, 1966).
- [12] 永田正一, 宮崎雅年, 藤田英司, 谷口哲: 低温工学 21, 295(1986).
- [13] S. Nagata, E. Fujita, S. Ebisu and S. Taniguchi: Jpn. J. Appl. Phys., 26, 92(1987).
- [14] 永田正一, 谷口哲: 固体物理 21, 877(1986).
- [15] S. Chikazumi: *Physics of Magnetism*, p274 (Robert E. Krieger Pub., Huntington, New York, 1978).

- [16] 高橋実, 宮崎照宣, 小野文久, 高倉敬一: 金属学会誌, 40, 1192 (1976).
- [17] 増本健: アモルファス金属の基礎 オーム社(1982) p.111.
- [18] S. Nagata, S. Ebisu, E. Fujita, M. Miyazaki, and S. Taniguchi : Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 26-3, 825(1987).
- [19] 谷口哲: 金属学会誌, 19, 420(1980).
- [20] 渡辺浩, 篠原 猛: 金属学会誌, 7, 433(1968).
- [21] T. Shinjo, Y. Nakamura and N. Shikazono : J. Phys. Soc. Jpn. 18, 797(1963).

# メカニカルアロイング法による Fe-Ti 混合粉末の合金化挙動

平井伸治・小澤正義・桃野 正・片山 博

## Mechanically Alloying Behavior of Fe-Ti Mixture.

Shinji Hirai, Masayoshi Ozawa, Tadashi Momono and Hiroshi G. Katayama

### Abstract

The mixture of mole ratio 1 : 1 of Fe and Ti powders was subjected to mechanical alloying in an Ar atmosphere using a forced-stirring ball mill. The morphology of powder particles varied with milling time from cakes to flakes, and then to fine grains with equiaxed shape. Analysis by EPMA revealed that the initial cake-like particles consisted of Fe layer and Ti layer. However, milling over long periods of time resulted in the disappearance of layer structure. It was demonstrated that the milling of more than 360 ks produced an "X-ray amorphous". Electron diffraction indicated that has only a trace amount of microcrystals existed in such amorphous phase. When the milling time reached 180ks or more, the powder was markedly contaminated by abrasive wear of the vessel and ball of the mill. After 1440ks, crystalline (Cr, Fe)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> phase began to form.

### 1. 緒 言

メカニカルアロイング（以下 MA）法は、高エネルギーボールミル等を用い、金属混合粉末に機械的エネルギーを加えることによって合金化させる方法で、金属母相中にセラミックス粒子を均一に分散させた分散強化型合金用粉末の製造法として、1970年に Benjamin ら<sup>(1)</sup>によって開発された。MA による合金化は、金属粉末粒子が粉砕用ボールとの衝突による衝撃圧縮により鍛造変形、圧接、粉砕を繰り返し受け、最終的に合金化が達成されるものと推定されている<sup>(2)</sup>。

最近では、MA 法により非固溶体系においても均質相の生成が可能であることや、融点、沸点、比重等の差が大きな系でも合金化や均質分散化が可能なることから、非晶質材料<sup>(3)</sup>、超伝導材料<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>、磁性材料<sup>(5)</sup>、水素吸蔵合金<sup>(6)</sup>の製造法にも応用されている。中でも MA による非晶質化は液体急冷法では非晶質化が困難な合金系や二相分離傾向を持つ合金系においても非晶質化が可能なること等から研究され、非晶質化の熱力学、物性の変化、非晶質合金の構造解析を中心とした多くの研究報告がある。

本研究では、Fe, Ti 混合粉末の MA 処理を行い、その合金化挙動およびミリング特性を粉末粒子の形状観察、X線回折等により検討した。また、MA 法は多くの場合、目的物質の生成までに長時間を要し、その間、粉砕用ボールや粉砕容器等の摩耗による汚染が問題となることから、こ

これらの汚染の影響についても検討した。ところで、液体急冷法による非晶質化の条件として、混合エンタルピー ( $\Delta H_m$ ) が負で、しかも原子半径比が0.85以下であることが必要とされているが<sup>(7)</sup>、Fe-Ti系は $\Delta H_m$ は負であるが、その絶対値は小さく<sup>(8)</sup>、また原子半径比も0.855であることから、液体急冷法では非晶質化が困難であるとされている<sup>(9)</sup>。しかし、MAによれば粉碎によって導入された欠陥が非晶質形成能を拡大するため<sup>10)</sup>、従来の液体急冷法では非晶質化しない合金系においても、完全非晶質相あるいは超微細結晶が混在した非晶質相の生成が報告されている。そこで、本研究ではFe-Ti系においてもMAによれば非晶質化が期待されることから、この非晶質化挙動についても検討を加えた。

## 2. 実験方法

原料粉末は、市販の電解鉄粉 (平均粒径:  $65 \mu\text{m}$ ) と Ti 粉末 (平均粒径:  $70.5 \mu\text{m}$ ) であり、いずれも  $150 \mu\text{m}$  の篩を通過させた後に用いた。これらの化学組成を Table. 1

に示す。Fe 粉末と Ti 粉末はモル比が1:1、総質量が90gとなるように秤量し、原料粉末とした。

MA 実験には、強制攪拌型ボールミル (乾式アトライター) を用いた。その概略図を Fig. 1 に示す。MA による粉末試料の過熱を防止するため、粉碎槽の周囲に冷却水が流れる構造となっている。粉碎槽はステンレス鋼 (SUS304)、粉碎用ボールは高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2)、アジテーターム部は焼入れ鋼からなる。また、粉碎用ボールの大きさは $\phi 6.35\text{mm}$ で、粉碎用ボールと原料粉末の質量比は20:1とした。なお、この装置全体はグローブボックス内に設置し、不活性ガス雰囲気中での試料採取を可能にした。

MA 操作の手順は次のとおりである。最初に粉碎槽内を0.5h以上 Ar ガスで置換し、その後、

Table 1 Chemical composition of Fe and Ti powders(wt%).

Element	C	P	S	Si	Cu	Mn	Fe
Fe	0.007	0.003	0.009	0.001	0.001	0.0006	Bal.
Element	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C	Fe	Cl	Ti	
Ti	0.11	0.01	0.01	0.01	0.15	Bal.	

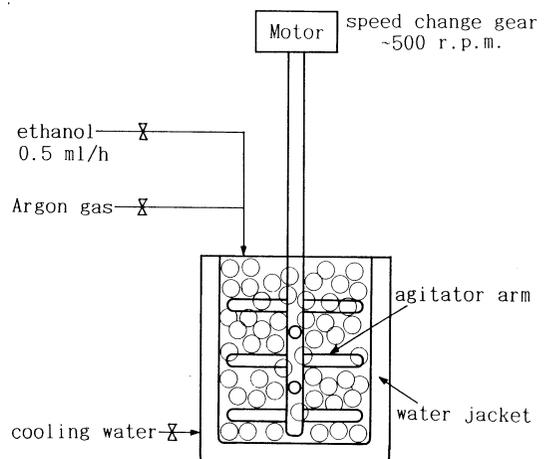


Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for mechanical alloying.

アジテータアームを低速で回転させながら原料粉末を投入した。また、この時から粉碎助剤としてエタノールを滴下 (0.5ml/h) し始めた。次に、回転数を 500r.p.m まで徐々に増加し、500r.p.m に達した時間を、MA 開始時間とした。所定時間 MA 後は、Ar 雰囲気グローブボックス内に数時間保持し不活性化させた後、粉末試料を採取した。

ところで、粉碎助剤は MA 中に粉末粒子相互の凝集および試料粉末の粉碎槽器壁への付着を防ぐために添加するもので、その滴下量は経験的に求めた。なお、一般に過剰量の粉碎助剤の添加は、粉碎効率および粉碎速度を低下させる<sup>(1)</sup>。

MAによる合金化に伴う粉末の形状組織および生成相の変化は、X線回折分析 (XRD)、走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察、EPMA による分析により調査した。EPMA 分析用試料は、粉末試料を常温重合樹脂に埋め込み、研磨によって粉末粒子断面まで研削し、その断面を分析した。また、粉末試料の平均粒径をグリセリン水溶液 (70vol%) を分散剤に用いた遠心沈降方式の粒度分布測定装置により測定した。さらに、非晶質化の判定に際しては、XRD試験の他、電子線回折を行うと共に、He 雰囲気中における示差走査型熱分析 (DSC) により結晶化温度を測定した。なお、DSC の昇温速度は0.167°C/sとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 1. 粒子形状の MA 時間による変化

MA 処理時間による粉末試料の平均粒径変化を Fig. 2 に示す。なお、5 h 以降の試料についてはストークス径を測定し、5 h 未満の試料は SEM 観察からクルムバウム径 (定方向最大径) を測定した。粉末試料の粒径は 25h まで MA 時間と共に減少するが、25h から100h まではほとんど変化せず、100h 以降は増加した。この増加は、300h 処理後の粉末試料を SEM によって観察した結果、サブミクロン以下の微細粒子が多数観察されたことから、粒子が微細化され過ぎて相互付着力が増加し、グリセリン水溶液によって分散されない 2 次粒子が形成されたためと考えられる。

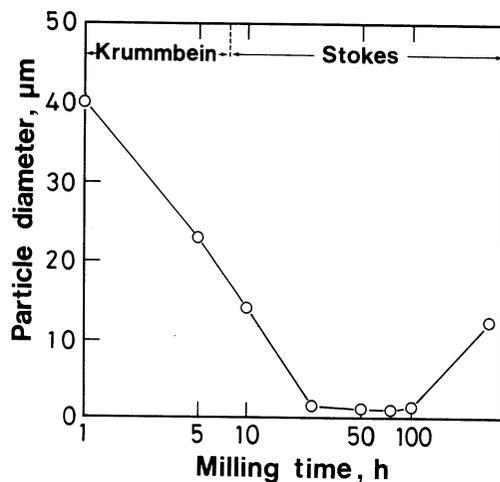


Fig. 2 Effect of the milling time on the particle diameter.

次に、MA 処理時間による粉末粒子の形状変化を SEM によって観察した。その結果を Fig. 3 に示す。1 h の短時間処理において、すでに粉末粒子の形状は両原料粉末のそれとは大きく変化

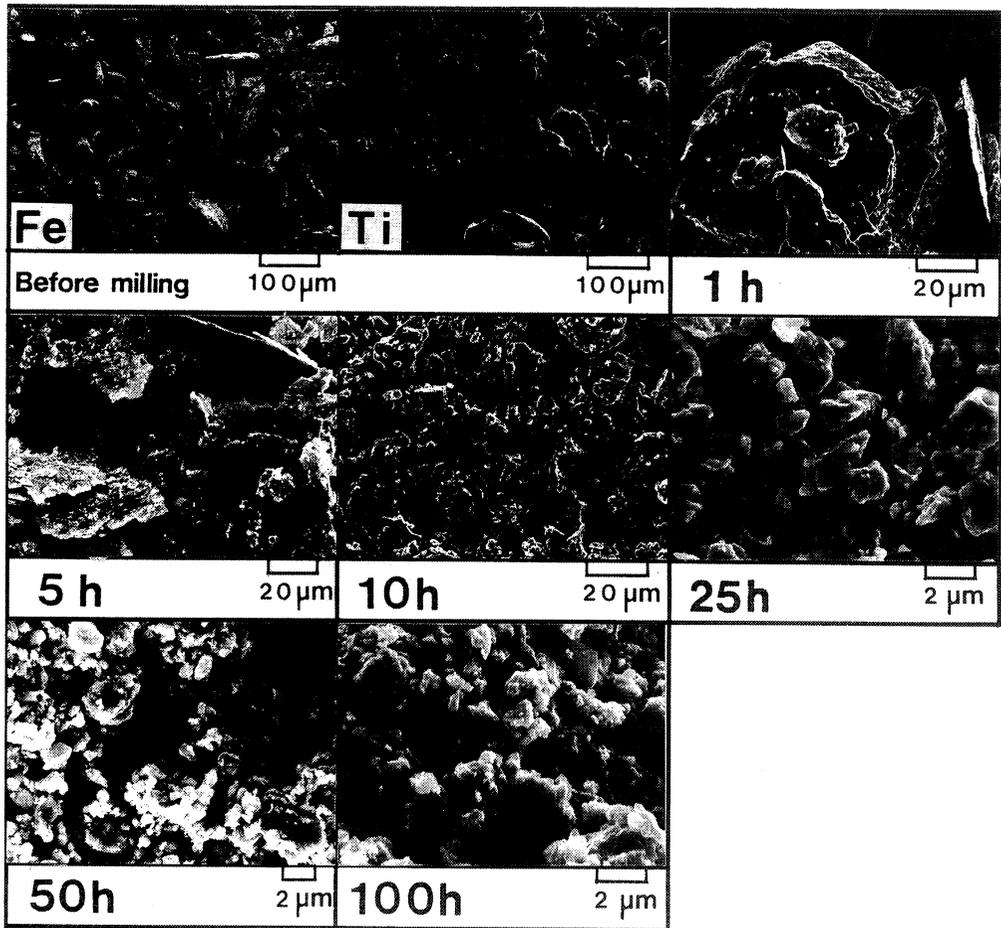


Fig. 3 SEM photographs showing morphological change of the particles with milling time.

し、薄片が重なり合った状態となっている。そして、5 h後の粉末は粒径はあまり減少しないが、薄片化が極度に進行している。この段階までは、Fe粒子とTi粒子がそれぞれ圧延され、交互に重なり合って圧接され、さらに圧延されるという過程を繰り返していると考えられる。10h後の粉末は粒径がかなり減少し、同時にいく分丸みを帯びた粒子となっている。これは圧延されて薄片化した後に分割されて、細粒になった状態である。また、25 h以降ではさらに細粒化と共に丸みを帯びていき、一般に等軸形状<sup>(2)</sup>と称される形状となっていく。ところで、MA処理後、粉砕槽から試料を採取する際、MA時間が50 h以下では5 h後の試料が最も不活性化し難く、空気に曝された時の酸化に伴う火花の発生が激しかった。この原因として、MA後の粉末試料の表面は、一般にエタノールの吸着により、ある程度保護されているが、5 h後の試料は急速な薄片化の進行のために新生金属面の形成が著しく、一時的にエタノールの不足を招いたものと

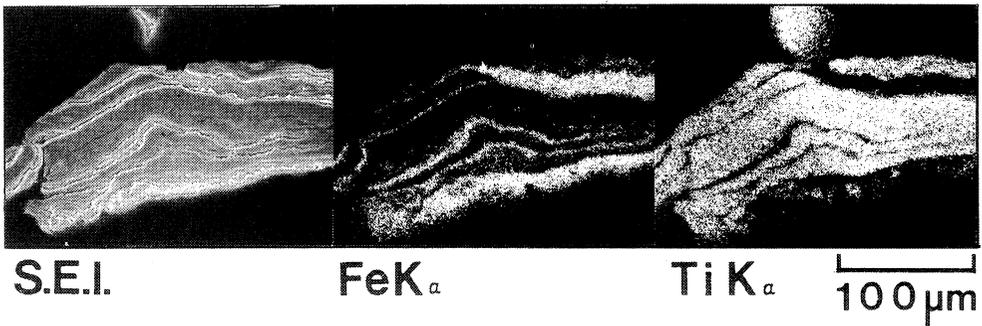


Fig. 4 SEM photograph and characteristic X - ray images of cross section of the powder particles.

考えられる。

次に、1 h の短時間 MA 処理後の粉末粒子について、その断面組織の SEM 観察ならびに EPMA による Fe, Ti の面分析を行った。その結果は Fig. 4 に示すようであり、Fe 層と Ti 層が交互に重なり合った層状組織（ラメラ組織）であることが観察された。これは、MA の初期段階

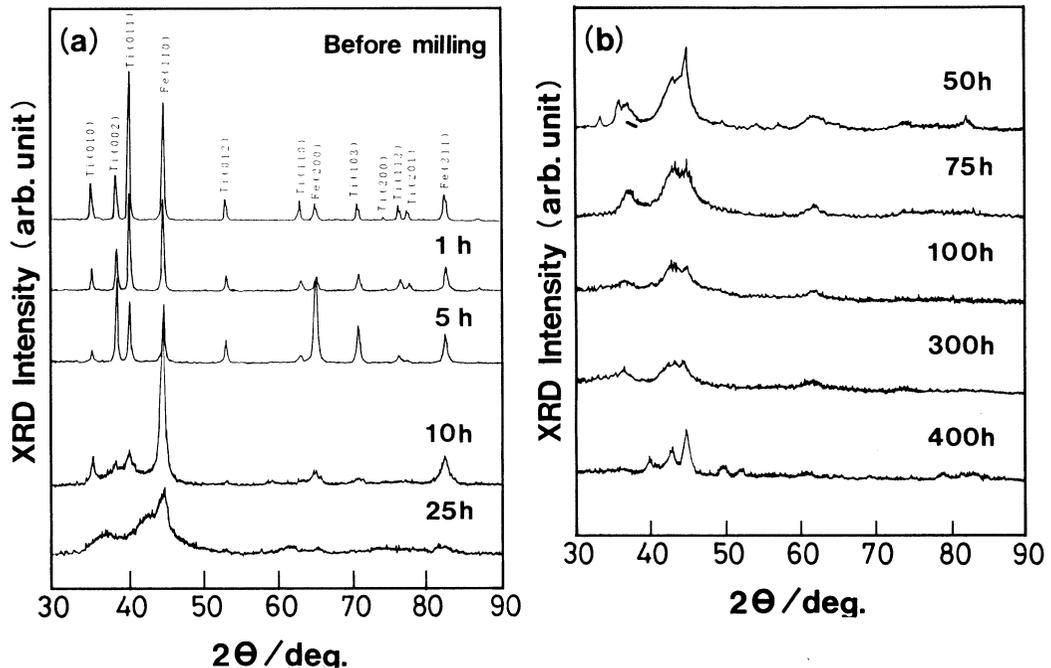


Fig. 5-(a)(b) X - ray diffraction patterns (Cu K  $\alpha$  radiation) of the powders milled for various times.

では冷間圧接が支配的であることを示すものである。最初に、粉末粒子が粉碎用ボールとの衝突による衝撃圧縮により鍛造変形を受け加工硬化し、粉碎されて薄片化する。この時、凝着し易い清浄な新生金属面も形成され、新生面相互の冷間圧接により層状組織が形成されると説明されている<sup>(2) (12)</sup>。この層状組織は25hまでは観察されるが、50hのMAではFeとTiがほぼ均一に交じり合い層状組織は消滅した。

## 2. X線回折結果

種々の時間、MA処理をした粉末のX線回折パターンをFig. 5(a)(b)に示す。1hまでの試料ではX線回折パターンに特別な変化は見られず、また歪みの蓄積によるピーク位置のずれも認められなかった。しかし、5h処理後の試料は、 $\alpha$ -Feの(200)面と $\alpha$ -Tiの(002)面の回折強度が相対的に高くなった。これは前述のように粉末粒子が薄片化したため、試料の試料ホルダーへの装着時に、結晶が選択的に配向したためと考えられる。10hでは結晶相の回折ピークが崩れ始め、歪みの蓄積や結晶子の微細化が進んだことを示している。そして、25hでは、純Tiに相当する回折ピークは消失し、 $\alpha$ -Feに近似する回折ピークのブロード化が始まり、100hから300hの間では最もブロード化した。しかし、400hに達すると $(\text{Cr, Fe})_7\text{C}_3$ に相当する回折ピークが現れた。この複炭化物を生成するのに必要なクロムや炭素は、粉碎用ボールの摩耗と粉碎助剤のエタノールにより供給されたものと考えられる。エタノールからの炭素の供給機構として、粉末粒子の表面がMAによって導入された欠陥や新生金属面の生成、エキソ電子放射<sup>(13)</sup>等により化学的に活性となるためにエタノールを分解するものと考えられる。ところで、本実験では何れのMA段階においてもFe-Ti金属間化合物の生成は見られなかった。

## 3. 非晶質化過程

Fig. 5 (b)において100hおよび300h MA処理した試料のX線回折パターンには、ブロード化した回折ピークのみしか認められない。これは、“X-ray amorphous”<sup>(14)</sup>の状態になったことを示すものと考えられる。そこで、Feの(002)面の回折ピークからScherrerの式<sup>(15)</sup>を用いて見掛けの結晶子の大きさを算出し、その結果をFig. 6に示した。Scherrerの式は結晶子の歪みの影響を無視しているため、MAによる結晶子への歪みの導入の影響は避けられないので、本式による算出値は見掛けの結晶子の大きさには

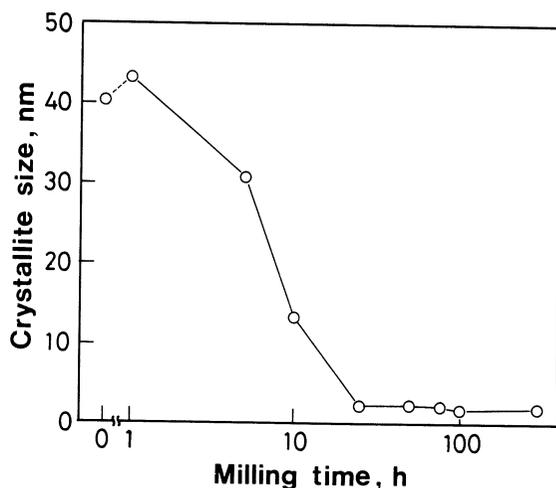


Fig. 6 Particle size calculated by the use of the Scherrer equation.

かならないが、結晶子の大きさは25hまでは減少し、その後は $10^{-9}\text{m}$ オーダーのほぼ一定値を示した。

ところで、100h および300h 後の粉末試料が非晶質であるとする、熱分析により結晶化に伴う発熱が観察されるはずである。Fig. 7は MA 処理前、100 h および300 h MA 後の試料の DSC 曲線を示したものである。MA 処理をした試料では昇温時450~550℃付近に、未処理の試料の DSC 曲線には見られない発熱ピークが認められる。この発熱ピークは冷却時においては認められないため、非晶質相の結晶化によるものと推定され、結晶化温度は発熱ピークの位置から472℃付近であると見なされる。

次に、300 hMA 処理後の粉末粒子について TEM による観察と電子線回折を行った。その結果を Fig. 8 に示す。同図(a)において粒子の表面側に大きさが15 nm 程度の超微細結晶あるいは非晶質粒子の二次凝集粒子と思われる微細粒部が観察された。この微細粒部について電子線回折を行ったところ、Fig. 8 (b)に示されるように非晶質特有のハローパターンに混じって非常に微

細ながら結晶を示す回折スポットが観察された。したがって、前述した、“X-ray amorphous” 相は非晶質相と超微結晶の混在状態であるものと見なされた。また、電子線回折によって  $\alpha$ -Fe、Fe-C 系合金および  $\gamma$ - $\text{Ti}_2\text{O}_3$  等が極く稀に同定される場合もあった。これらの多くは、MA 処理時における粉砕槽、粉砕用ボールおよびアジテーターアームの摩耗、あるいはエタノールの分解による汚染によるものと考えられる。何れの MA 時間においても、Fe-Ti 系の金属間化合物が生成しなかった原因として、MA 処理により粉末に多くの歪みが導入された結果、非晶質あるいは非晶質と超微結晶の混在状態となったため、金属間化合物の生成に必要な原子の再配列が困難に

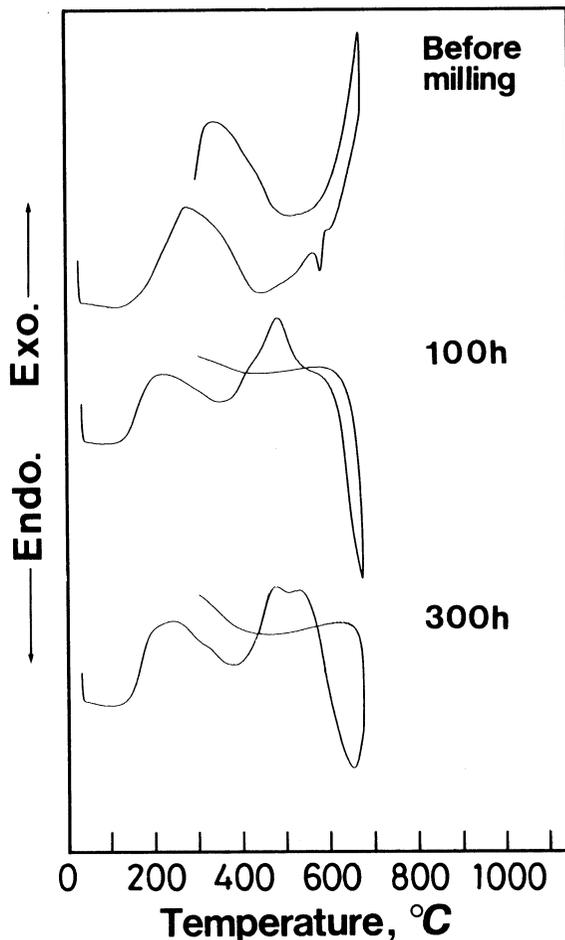


Fig. 7 DSC curves.

なったことが考えられる。このことは逆に言えば、MA 処理後に結晶化温度以上に加熱する等、

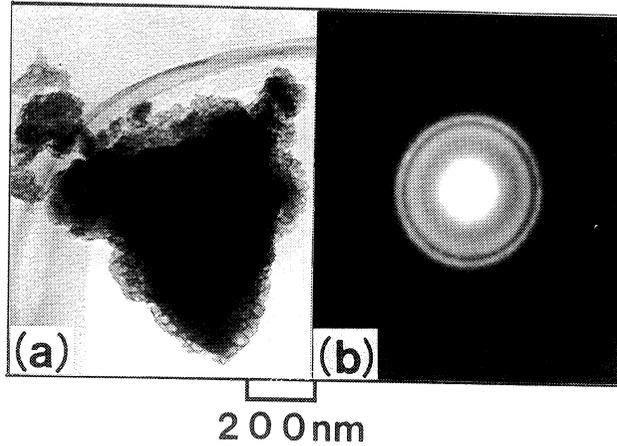


Fig. 8 TEM photograph(a) and electron diffraction pattern(b) of the powder particle milled for 300h.

原子の再配列に必要なエネルギーを供給すれば金属間化合物の生成も可能であることを示唆するものである。

#### 4. 原料粉末組成の MA 時間による変化

MA 容器等の汚染による粉末試料の組成の変化を調べるために、Ti および Cr を定量した。その結果を Fig. 9 に示す。MA 時間が10h までの粉末試料は Cr を含まず、ほとんど汚染されていないが、その後は Cr 濃度が急激に増加し、300 h の MA 後には 5 mass % 以上に達した。一方、試料の Ti 濃度は10h 付近から著しく減少し、初期組成の46mass% Ti から300h 後には約15mass% Ti まで減少した。このような組成変化は主に粉砕槽と粉砕用ボールの摩耗による Cr および Fe の混入に起因するものと考えられる。

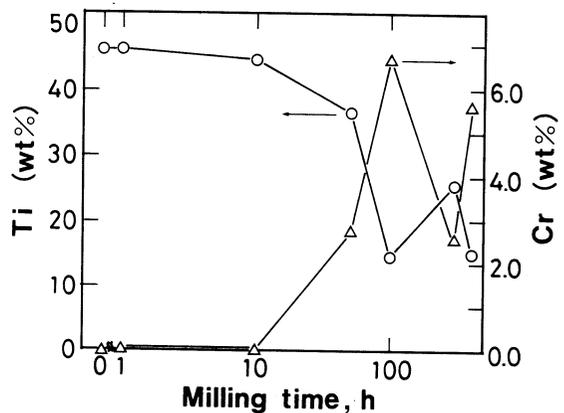


Fig. 9 Ti and Cr contents of the powders milled for various periods of time.

ところで、このような汚染によって最終生成物質の組成は、目的の組成とは大きくずれることになる。そこで、原料粉末中のTiの組成を45~82.5at% (41.2~80.2wt%) の範囲で変化させて100h まで MA 処理を行い、得られた粉末の X 線回折パターンを Fig. 10 に示した。その結果、

いずれの配合比においても“X-ray amorphous”の生成が確認されたが、Tiの配合比が高い場合ほど、X線回折ピークがブロード化する傾向が見られた。これは、Tiの配合比があまり高くない場合は、MA処理後のTi濃度は40wt%よりはるかに低下し、非晶質化し難い組成になっているが、Tiの配合比を高くした場合は、MA処理後のTi濃度が結果的に50wt%前後におさまり、非晶質化し易かったものと考えられる。

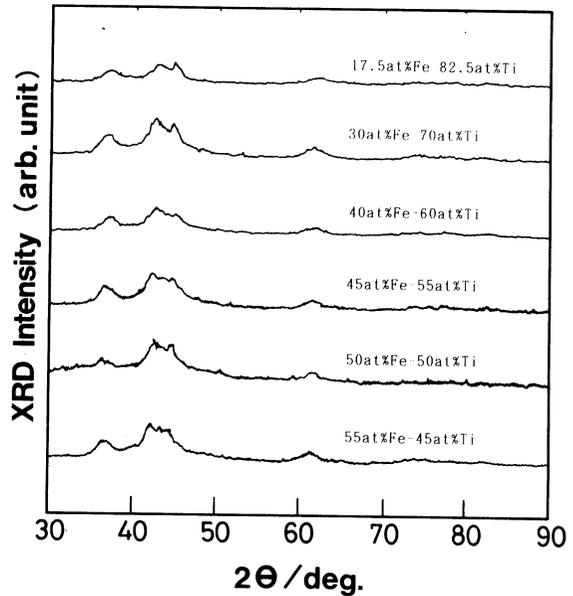


Fig. 10 X-ray diffraction patterns (Cu  $K\alpha$  radiation) of various proportions of powder milled for 100h.

#### 4. 結 言

FeとTiとの粉末をモル比(1:1)に配合した後、強制攪拌型ボールミルを用いてAr雰囲気中にてMAを行い、合金化挙動およびミリング特性を、粉末形状の観察およびX線回折等により検討した。その結果を以下に要約する。

- (1) 粉末粒子の形状は、5 hまでは薄片化が進行するが、10 hでは薄片が分割され、重なり合い塊状となり、25 h以降ではさらに細くなると共に、次第に丸みを帯びて等軸形状へと変化した。
- (2) 比較的短時間のMA処理後の粉末粒子は、Fe層とTi層が交互に重なり合った層状組織を示した。しかし、この層状組織は50 h以後は消滅した。
- (3) MA時間が25 hに達すると、生成物のX線回折パターンはブロード化し始めた。そして、100 hから300 hにかけて最もブロード化し、“X-ray amorphous”の状態が認められた。しかし、400 hに達すると(Cr,Fe) $_7$ C $_3$ 結晶相の回折ピークが現れた。
- (4) 示差熱分析により非晶質相の結晶化温度は472°C付近であることが明らかになった。
- (5) 本実験で得られた“X-ray amorphous”の状態は、非晶質相中に極く少量の超微結晶が

混在した状態であることが電子線回折により確認された。

- (6) 10 h までの生成物は Cr をほとんど含まず汚染されていないが、その後は Cr 濃度が急激に増加し、300 h 後には 5 wt % 以上に達した。反対に Ti 濃度は 10 h 付近から大きく減少し、MA 前の 46 wt % Ti から 300 h 後には約 15 wt % Ti まで減少した。

終りに、Fe 粉末を提供された東邦亜鉛(株)に謝意を表す。なお、本研究は昭和 63 年度實吉奨学会の研究助成金により行われたもので、ここに特記して感謝の意を表すものである。

### 参考文献

- (1) J. S. Benjamin : Met. Trans., 1 (1970), 2943.
- (2) 渡辺龍三 : 日本金属学会報, 27 (1988), 799.
- (3) たとえば, A. W. Weeber and H. Bakker : Physica B 153(1988), 93.
- (4) C. Politis : Physica B 135(1985), 286.
- (5) 増本 健, 井上明久 : 日本金属学会報, 27(1988), 816.
- (6) E. Ivanov, I. Konstanchok, A. Stepanov and V. Boldyrev : J. Less - Common Met., 131(1987), 25
- (7) 水谷宇一郎 : 金属, [ 3 ] (1989), 29.
- (8) R. Boom, F. R. DeBore, A. K. Niessen and A. R. Miedema : Physica B 115(1983), 285.
- (9) 水谷宇一郎, 星野喜樹, 山田 裕 : アモルファス合金作成の手引き, アグネ技術センター, (1986) .
- (10) F. Petzoldt, B. Scholz and H. D. Kunze : Mate. Lett., 5(1987), 280.
- (11) 多田吉宏, 佐藤悌介 : 塑性と加工, 30 (1989), 292.
- (12) J. S. Benjamin and J. E. Volin : Met Trans., 5(1974), 1929.
- (13) 森 誠之 : 日本金属学会報, 24 (1985), 639.
- (14) 作花濟夫 : ガラス非晶質の科学, 内田老鶴圃, (1989), 3 .
- (15) 荒井康夫 : 粉体の材料科学, 培風館, (1987), 188.

# 学術研究発表集録

理 工 編

(平成 1. 4. 1~平成 2. 3.31)

## 理 科 (物理・化学・工学)

- |                                     |  |                     |                              |
|-------------------------------------|--|---------------------|------------------------------|
| G. Dumpich<br>(Duisburg 大)          | Evidence for a High – Spin Fe State in fcc<br>Fe <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Thin Films in the Invar Region | J. Mag. Mag. Mater. | 74,<br>237-247<br>(1988)     |
| E. Becker<br>(Duisburg 大)           |  |                     |                              |
| K. Schletz<br>(Duisburg 大)          |  |                     |                              |
| W. Stamm<br>(Duisburg 大)            |  |                     |                              |
| W. Keune<br>(Duisburg 大)            |  |                     |                              |
| W. Kiauka<br>(Duisburg 大)           |  |                     |                              |
| S. Murayama                         |  |                     |                              |
| K. Hyomi<br>(北海道大)                  |  |                     |                              |
| H. Amitsuka<br>(北海道大)               |  |                     |                              |
| T. Nishioka<br>(北海道大)               |  |                     |                              |
| S. Murayama                         |  |                     |                              |
| Y. Miyako<br>(北海道大)                 | Muon Spin Rotation and Relaxation in CeAg<br>and CeAg <sub>0.97</sub> In <sub>0.03</sub>                       | J. Mag. Mag. Mater. | 76 & 77<br>462-464<br>(1988) |
| K. Nishiyama<br>(東京大)               |  |                     |                              |
| K. Nagamine<br>(東京大)                |  |                     |                              |
| T. Yamazaki<br>(東京大)                |  |                     |                              |
| P. Morin<br>(Louis Neel<br>Lab.)    |  |                     |                              |
| S. Murayama                         |  |                     |                              |
| D. Ikeda<br>(北海道大)                  |  |                     |                              |
| H. Takano<br>(東日本学園大)               |  |                     |                              |
| Y. Miyako<br>(北海道大)                 |  |                     |                              |
| K. Nishiyama<br>(東京大)               | $\mu$ SR Study of Fe <sub>1-x</sub> Ni <sub>x</sub> Invar Alloy  | J. Physique Colloq. | C8,49<br>313-312<br>(1988)   |
| K. Nagamine<br>(東京大)                |  |                     |                              |
| T. Yamazaki<br>(東京大)                |  |                     |                              |
| G. Dumpich<br>(Duisburg 大)          |  |                     |                              |
| E. F.<br>Wassermann<br>(Duisburg 大) |  |                     |                              |
| S. Murayama                         |  |                     |                              |
| Y. Miyako<br>(北海道大)                 | Critical Phenomena of Anisotropic Spin Glass<br>ZnMn   | J. Physique Colloq. | C8,49<br>1057-1058<br>(1988) |
| E. F.<br>Wassermann<br>(Duisburg 大) |  |                     |                              |

- 池田大助  
(北海道大)  
村山茂幸  
都福仁  
(北海道大)
- G. Dumpich  
(Duisburg 大)  
E. F.  
Wassermann  
(Duisburg 大)  
西山樟生  
(東京大)  
永嶺謙忠  
(東京大)  
山崎敏光  
(東京大)
- S. Murayama  
Y. Miyako  
(北海道大)  
E. F.  
Wassermann  
(Duisburg 大)
- S. Murayama  
D. Ikeda  
(北海道大)  
Y. Miyako  
(北海道大)  
K. Nishiyama  
(東京大)  
K. Nagamine  
(東京大)  
T. Yamazaki  
(東京大)  
G. Dumpich  
(Duisburg 大)  
E. F.  
Wassermann  
(Duisburg 大)
- S. Murayama  
D. Ikeda  
(北海道大)  
Y. Miyako  
(北海道大)  
K. Nishiyama  
(東京大)  
K. Nagamine  
(東京大)  
T. Yamazaki  
(東京大)  
W. Stamm  
(Duisburg 大)  
G. Dumpich  
(Duisburg 大)  
E. F.  
Wassermann  
(Duisburg 大)
- T. Satoh  
(北海道大)  
Y. Tazuke  
(北海道大)  
T. Miyadai  
(北海道大)  
K. Hoshi
- Fe – Ni インバー合金の  $\mu$ SR II
- Critical Behavior of Uniaxially Anisotropic Spin Glass ZnMn
- $\mu$ SR Study of fcc Fe<sub>100-x</sub>Ni<sub>x</sub> Invar and Non – Invar Alloys
- Zero – Field  $\mu$ SR Study of fcc Fe<sub>1-x</sub>Ni<sub>x</sub> Invar and Non – Invar Alloys
- Ferromagnetic and Reentrant Spin Glass Properties in an Ising Magnet Fe<sub>x</sub>TiS<sub>2</sub>
- 日本物理学会  
第44回年会  
(於東海大)
- Cooperative Dynamics in Complex Physical Systems (ed.) H. Takayama  
Springer – Verlag
- Physica B
- UT – MSL Newslett.
- J. Phys. Soc. Jpn.
- (1989.3)
- (1989)
- 161, 39-45  
(1989)
- No.8  
28-28  
(1989)
- 57,  
1743-1750  
(1988)

K. Hoshi	Pressure Effect on the Magnetic Properties of $Hf_{1-x}Ta_xFe_2$	J. Phys. Soc. Jpn.	57, 3112-3118 (1988)
K. Hoshi G. Oomi (熊本大)	X-RAY DIFFRACTION STUDY OF THE ELASTIC ANOMALY IN $Fe_{0.7}Ni_{0.3}$ INVAR ALLOY	J. Physique	Colloq. C8, 49 305-306 (1988)
Y. Tazuke (北海道大)			
T. Saitoh (北海道大)			
F. Matukura (北海道大)	PROPERTIES OF ISING MAGNETIC SYSTEM $Fe_xTiS_2$	J. Physique	Colloq. C8, 49 1507-1508 (1988)
T. Satoh (北海道大)			
T. Miyadai (北海道大)			
K. Hoshi			
巨海玄道 (熊本大)			
綾洋一郎 (熊本大)			
田中一夫 (熊本大)	静水圧発生装置の試作とその高圧下の電気抵抗測定への応用	熊本大学教養部紀要 自然科学編	第24号 (1989)
岩田誠二 (熊本大)			
早川淳一 (北海道大)			
保志賢介			
巨海玄道 (熊本大)			
早川淳一 (北海道大)	$Fe_{0.7}Ni_{0.3}$ 合金の弾性的性質とマルテンサイト変態温度に及ぼす圧力効果	熊本大学教養部紀要 自然科学編	第24号 (1989)
葛保志賢 明介			
稲村葉浩則 山茂幸 保志賢介	アモルファス $Hf_{1-x}Ta_xFe_2$ の磁性	第24回応用物理学会 北海道支部学術講演 会(於:北海道大)	1990.1
稲村葉浩則 山茂幸 保志賢介 小尾俣久 (東北大・金研)	$Hf_{1-x}Ta_xFe_2$ アモルファス合金の磁氣的性質	日本物理学会 第45年年会 (於:大阪大)	1990.3.30
山中厚良 山崎忠良 (北海道大)	蟻酸の陽極酸化に及ぼす水素の影響	電気化学協会 第56回大会 講演要旨集(9頁)	1989.4.7
小寺琢朗			
K. Fujikawa A. Hayashi H. Tanaka T. Kanazuka T. Kanno (Kitami Inst. Tech)	Catalytic Gasification of Carbon: Method for the Determination of the Activity of Alkali Metal Catalysts in the Gasification of Highly Pure Amorphous and Graphitic Carbons with Steam	Applied Catalysis,	第50巻3号 199頁 (1989)
T. Kodera			
K. Fujikawa K. Muraoka M. Ishiko	Electrochemical Oxidation of CO at Au and Pt - SPE Electrodes with and without Sn Modification	International Society of Electrochemistry, 40 th Meeting	1989.9.19

K. Fujikawa M. Ishiko A. Aramata (Hokkaido Univ.) H. Kita (Hokkaido Univ.)	Electrocatalytic Activity of Pt - Sn Binary Systems on An for Methanol Oxidation	The 1989 International Chemical Congress of Pasific Basin Society	1989.12.21
富士川 計 吉 子 超 基 荒 又 明 子 喜 (北海道大) 多 英 明 (北海道大)	Pt - Sn 錯体溶液中で処理した金属電極上でのメタノールの酸化	電気化学協会北海道支部第16回研究発表会	1990.1.18
富士川 計 吉 子 超 基 荒 又 明 子 喜 (北海道大) 多 英 明 (北海道大)	[Pt / Au / Pd] - Sn 系電極上のメタノールの酸化	日本化学会北海道支部1990年冬季研究発表会	1990. 2. 9
山 崎 忠 良 (北海道大) 大 西 隆 一 郎 (北海道大) 小 寺 琢 朗	三変数モデルによる電位振動の解析—H <sub>2</sub> + COの酸化	電気化学協会第56回大会要旨集	1A - 25 1989.4.7
Tadayoshi Yamazaki (Hokkaido Univ.) Takuro Kodera	Potential Oscillation during Anodic Oxidation of Hydrogen at a Platinum Electrode I. Experimental	Electrochim. Acta	34,969 (1989)
Akiko Aramata (Hokkaido Univ.) Makihiko Masuda (Hokkaido Univ.) Takuro Kodera	Determination of Possible Reaction Mechanisms of Methanol Electro - oxidation in Aqueous Acidic Solutions	J. Electrochem. Soc.	136,3288 (1989)
Tadayoshi Yamazaki (Hokkaido Univ.) Takuro Kodera Ryuichiro Ohnishi (Hokkaido Univ.) Makihiko Masuda (Hokkaido Univ.)	Potential Oscillation during Anodic Oxidation of Hydrogen at a Platinum Electrode II. Kinetic Analysis	Electrochim. Acta	35,431 (1990)
杉野 目 章 井 野 正 智 伊 藤 野 修 義 吉 野 修 司	鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみ解析とその適合性について	日本コンクリート工学協会年次論文報告集Vol. 11	1989.7
杉野 目 章 井 野 正 智 吉 野 修 司	たわみの検討を要しない鉄筋コンクリート曲げ部材の断面寸法について (その1 たわみ限度)	日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)	1989.10
吉 野 修 司 杉野 目 章 井 野 正 智	たわみの検討を要しない鉄筋コンクリート曲げ部材の断面寸法について (その2 床スラブ)	日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)	1989.10

井野智 杉野章 伊藤正 駒藤環	たわみの検討を要しない鉄筋コンクリート曲げ部材の断面寸法について (その3 小ぶり)	日本建築学会大会 学術講演梗概集 (九州)	1989.10
Akira Suginome Satoru Ino Masayoshi Ito Tamaki Komagome	Admissible Sectional Dimensions of R / C Floor Elements to be Designed without De- flexion Check – Part 1 : Transverse Beams	Memoirs of Muroran Institute of Technol- ogy No. 39 ; Separate Volume for Natural Science and Engi- neering	1989.11
Akira Suginome Satoru Ino Masayoshi Ito Shuji Yoshino	Admissible Sectional Dimensions of R / C Floor Elements to be Designed without De- flexion Check – Part 2 : Floor Slabs	Memoirs of Muroran Institute of Technol- ogy No. 39 ; Separate Volume for Natural Science and Engi- neering	1989.11
Akira Suginome Satoru Ino Masayoshi Ito Shuji Yoshino	A Modified System of Analysis for Long – time Deflections of Reinforced Concrete Floor Slabs and Its Application	Tansactions of Ja- pan Concrete Insti- tute,	Vol. 11. 3 1989.12
伊藤正 義 井野章 杉野目一 布川信	鉄筋コンクリート床スラブの施工精度とたわみに関する一考察	日本建築学会北海道 支部研究報告集構造 系No.63	1990.3
井野智 中江玲 伊藤正 杉野目一 和布俊 布遠信 佐藤尚	ある庁舎床スラブの積載荷重とたわみに関する調査 (その1 積載荷重の大きさ)	日本建築学会北海道 支部研究報告集構造 系No.63	1990.3
中江玲 子 井野正 義 伊藤正 章 杉野目一 良 和布俊 司 吉遠修 薫 佐藤尚	ある庁舎床スラブの積載荷重とたわみに関する調査 (その2 有効積載荷重とたわみ)	日本建築学会北海道 支部研究報告集構造 系No.63	1990.3
伊藤正 義 井野章 杉野目一 布川信	鉄筋コンクリート床スラブの構造調査結果と分析 (その1 健全床スラブの場合)	北海道工業大学 研究紀要第18号	1990.3

### 建設システム工学科

尾崎 詔 菅田 紀 下林 清 (日鐵セメント)	高炉スラグを用いたコンクリートの水中疲労	第43回セメント技術 大会講演集	1989.4
細川 潮 (専修大学 北海道短大) 尾崎 紀 菅田 詔	真空処理によるコンクリートの耐久性の改善	第43回セメント技術 大会講演集	1989.4

菅田紀之 尾崎川潮 (専修大学 北海道短大) D. M. Rosales	真空処理コンクリートの水中疲労強度	コンクリート工学年 次論文報告集	第11巻 第1号 1989.6
菅田紀之 尾崎川潮 (専修大学 北海道短大)	真空処理コンクリートの水中疲労強度	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第V部	1989.10
尾崎紀之 菅田一人 信太	高炉スラグ組成物を用いたコンクリートの水中疲労	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第V部	1989.10
細川潮 (専修大学 北海道短大) 尾崎紀之 菅田紀之	真空処理を施したコンクリートの耐硫酸塩性に関する研究	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第V部	1989.10
尾崎紀之 菅田一人 清林 (日鐵セメント)	高炉スラグを用いたコンクリートの水中疲労	セメント・コンク リート論文集	No.43. 1989.12
細川潮 (専修大学 北海道短大) 尾崎紀之 菅田紀之	真空処理によるコンクリートの耐久性の改善	セメント・コンク リート論文集	No.43. 1989.12
N. Sugata S. Ozaki U. Hosokawa (Senshu Univ.) D. M. Rosales	Fatigue of Vacuum – Processed Concrete under Submerged Condition	Transactions of the Japan Concrete In- stitute	Vol. 11 1989.12
細川潮 (専修大学 北海道短大) 尾崎紀之 菅田紀之 D. M. Rosales	コンクリートの耐硫酸塩性について	土木学会北海道支部 論文報告集	第46号 1990.2
信太一人 菅田紀之 尾崎	高炉スラグ組成物を利用したモルタルの水中疲労	土木学会北海道支部 論文報告集	第46号 1990.2
岸徳光 松岡健一 能町純雄 (日本大学) 和田忠幸 (北海道開発局)	大震度連続地中壁構造体の周波数応答解析	構造工学論文集	Vol. 36A 1990.3
岸徳光 後藤芳大 (名古屋工大) 松岡健一	半剛結合に関するデータベースを用いた半面骨組構造解析システムの開発	構造工学論文集	Vol. 36A 1990.3
Wai – Fah Chen (Purdue Univ.) N. Kishi	Moment – Rotation Relation of Top – and Seat – angle Connections	International Collo- quium in Moscow “ Bolted and Special Structural Joints ”	1989.5

能町純雄 (日本大学)	伊藤千浩 (電力中央研究所)	大沼博志 (電力中央研究所)	剛飛来物衝突による鉄筋コンクリート板の破壊について	第3回材料の衝撃問題シンポジウム	1989.12
松岸岡健徳 一光	岸松能 岡町純雄 (日本大学)	米田均	半剛結接合に関するデータベースを用いた三要素パワーモデルの形状指数評価	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
岸後藤芳光 (名古屋工大)	小松泉正樹 一健		半剛結接合平面骨組構造物の変形状について	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
松岸和 (北海道開発局)	岡田忠憲 一光幸司 (㈱メイセイエンジニアリング)		白鳥大橋主塔部地震時挙動	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
岸松三 (専修大学)	岡上徳敬 一司	能町純雄 (日本大学)	RC部材の衝撃応答性状に及ぼす荷荷時間の影響	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
松岸高 (北海学園大)	岡橋義雄 一光裕之	能町純雄 (日本大学)	衝撃荷重を受けるRC短形板の実験的研究	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
岸松中 (北海道開発局)	岡野徳健 一修雄	能町純雄 (日本大学)	落石衝撃に対するロックシェッドの形状効果について	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
菅松尾竹 (㈱シビテック)	岡崎しのぶ 一徹		境界層のある同心円柱を伝わる弾性波について	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2
三上敬司 (専修大学)	岡健徳 一光雄	松岸能町 (日本大学)	有限円板の衝撃応答解析	土木学会北海道支部論文報告集	No.46 1990.2

菅野三夫 (株)上田商会 中村幸治 (株)上田商会 引地陸史 (株)上田商会 松岡健一	FEM解析による台付管の断面力算定の係数評価	土木学会北海道支部 論文報告集	No.46 1990.2
能町焼彦 (株)ソーケン コンサルタント) 松岸岡健徳 能町浄彦 (室蘭市)	直積み大型異型ブロックの垂直荷重算定に関する一考察	土木学会北海道支部 論文報告集	No.46 1990.2
松岡健一 能町純雄 (日本大学) 和田忠幸 (北海道開発局) 岸田徳光 小針憲司 (株)メイセイ エンジニアリング)	人工築島を利用した大震度地中連続壁の周波数応答解析	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第1部	1989.10
岸松岡徳光 能岡健一 大沼博志 (電力中央 研究所)	重錘落下衝撃を受ける有限円板の応答解析	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第1部	1989.10
米田均 岸松岡徳光 能岡健一 高野博 (電力中央 研究所)	三要素パワーモデルを用いた鋼梁-柱接合部 M- $\theta$ $\gamma$ 評価式	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第1部	1989.10
三上敬司 (専修大学 北海道短大) 能町純雄 (日本大学) 松岡健一 金子孝吉 (専修大学 北海道短大) 伊藤千浩 (電力中央 研究所)	剛体形状の影響による平板の落下衝撃力	土木学会第44回年次 学術講演会講演概要 集第1部	1989.10
岸田了 土屋勉 大和夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物 の沈下過程解析 (上部構造層数の影響)	学会・大会・学術講 演梗概集	1988.10
土屋勉 大神道 大和夫	軟弱地盤に支持された有壁骨組構造物の沈下 過程実用算定法	学会・大会・学術講 演梗概集	1988.10
大築和夫 土屋勉	腰壁・垂壁付き柱の有限要素法解析 (その2. 片側壁付き柱の場合)	学会・大会・学術講 演梗概集	1988.10
梅津朋岳 土屋田圭 大和夫	圧密未了地盤に支持される建築構造物の沈下 過程解析	学会・道支部研究報 告集 構造系No. 62	1989.3

岸土大	田屋築和	了勉夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析 (その4. 柱・梁骨組の弾塑性性状を考慮した解析)	学会・道支部研究報告集 構造系No. 62	1989.3	
石土大	丸築屋井	修和義	二夫勉孝	壁板の応力性状に及ぼす境界条件の影響 (壁板の有限要素法解析)	学会・道支部研究報告集 構造系No. 62	1989.3
岸土大	田屋築和	了勉夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析 (柱・梁骨組の弾塑性性状を考慮した解析)	学会・大会・学術講演梗概集	1989.10	
梅土大	津屋築和	朋和	岳勉夫	圧密未了地盤に支持される建築構造物の沈下過程解析	学会・大会・学術講演梗概集	1989.10
石土大	丸築屋	修和	二夫	有限要素法解析による有開口壁のせん断剛性について	学会・道支部研究報告集 構造系No. 63	1990.3
大石	築丸	和修	夫二	2本杭及び4本杭支持独立フーチングの曲げ破壊実験	学会・道支部研究報告集 構造系No. 63	1990.3
岸土大	田屋築和	了勉夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析 (上部構造層数の影響)	学会・大会・学術講演梗概集	1988.10	
土神大	屋田築	道	勉宏夫	軟弱地盤に支持された有壁骨組構造物の沈下過程実用算定法	学会・大会・学術講演梗概集	1988.10
大土	築屋	和	夫勉	腰壁・垂壁付き柱の有限要素法解析 (その2. 片側壁付き柱の場合)	学会・大会・学術講演梗概集	1988.10
土荒	屋	真	勉一	軟弱地盤に支持される構造物の沈下過程実用計算法とその応用例	土質工学会北海道支部技術報告集第29号	1989.2
梅土大	津屋田築	朋圭和	岳勉司夫	圧密未了地盤に支持される建築構造物の沈下過程解析	学会・道支部研究報告集 構造系No. 62	1989.3
岸土大	田屋築和	了勉夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析 (その4. 柱・梁骨組の弾塑性性状を考慮した解析)	学会・道支部研究報告集 構造系No. 62	1989.3	
石土大	丸築屋井	修和義	二夫勉孝	壁板の応力性状に及ぼす境界条件の影響 (壁板の有限要素法解析)	学会・道支部研究報告集 構造系No. 62	1989.3
土荒	屋	真	勉一	高層部と低層部を有する建築構造物の沈下過程解析	第24回土質工学研究発表会	1989.6
岸土大	田屋築和	了勉夫	ネガティブフリクションを受ける建築構造物の沈下過程解析 (柱・梁骨組の弾塑性性状を考慮した解析)	学会・大会・学術講演梗概集	1989.10	
梅土大	津屋築和	朋和	岳勉夫	圧密未了地盤に支持される建築構造物の沈下過程解析	学会・大会・学術講演梗概集	1989.10
土梅	屋津	朋	勉岳	臨海埋立地における建築構造物の沈下過程解析	土質工学会北海道支部技術報告集第30号	1990.2
土谷佐々	屋川木	栄	勉治明	弾性地盤に支持される群杭基礎の挙動	学会・道支部・研究報告集 構造系No. 63	1990.3

荒土屋真一	勉	高層部と低層部を有する建築構造物の沈下過程解析 (その2. 高層部と低層部位置の影響)	学会・道支部・研究報告集 構造系 No. 63	1990. 3
荒川井口卓 溝吉田康幸 光男 稔		二軸曲げせん断力を受ける鉄筋コンクリート短柱のせん断抵抗性状	日本コンクリート工 学協会 コンクリー ト工学年次論文報告 集	Vol. 11 No. 2 p. 471-476 1989. 7
Takashi ARAKAWA Yasuyuki ARAI Mitsuo MIZOGUCHI Minoru YOSHIDA		Shear Resisting Behavior of Short Reinforced Concrete Columns under Biaxial Bending - Shear	Transaction of the Japan Concrete In- stitute	Vol. 11 p. 317-324 1989
荒川井口卓 溝吉田康幸 光男 稔		二軸曲げせん断力を受けるRC 短柱のせん断強度について (その1: 実験概要と破壊性状)	日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集	C構造Ⅱ p. 547-548 1989. 10
荒川井口卓 溝吉田康幸 光男 稔		二軸曲げせん断力を受けるRC 短柱のせん断強度について (その2: せん断強度)	日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集	C構造Ⅱ p. 549-550 1989. 10
荒川井口卓 溝吉田康幸 光男 稔		二方向水平力を受ける鉄筋コンクリート不等辺L型開断面耐震壁の曲げ破壊性状(その1: 破壊性状と荷重-変形曲線)	日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集	C構造Ⅱ p. 585-586 1989. 10
荒川井口卓 溝吉田康幸 光男 稔		二方向水平力を受ける鉄筋コンクリート不等辺L型開断面耐震壁の曲げ破壊性状(その2: 最大耐力)	日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集	C構造Ⅱ p. 587-588 1989. 10
溝荒川光男 荒川井口卓 溝吉田康幸 馬成俊	卓 幸男 稔 優 哉	耐力偏心の異なる鉄筋コンクリート造立体骨組のオンラインねじれ応答実験	日本建築学会大会 (九州) 学術講演梗概集	C構造Ⅱ p. 647-648 1989. 10
溝荒川光男 荒川井口卓 溝吉田康幸 馬成俊	卓 幸男 稔 優 哉	二軸曲げせん断力と変動軸力を受けるRC 短柱の曲げ破壊性状	日本建築学会 北海道支部研究報告 集	No. 63 p. 91-94 1990. 3
溝荒川光男 荒川井口卓 溝吉田康幸 馬成俊	卓 幸男 稔 優 哉	せん断破壊型の直交壁を持つ鉄筋コンクリートL型開断面耐震壁の弾塑性性状	日本建築学会 北海道支部研究報告 集	No. 63 p. 87-90 1990. 3
榎谷有 小牧和 三 専 夫		道路交通システムの機能性能に関する耐震評価法	交通工学	24, (3) 7-16 (1989)
榎谷有 小牧和 三 専 夫		ゾーン別集中発生交通量算定に対するLP 問題T-領域の適用	土木学会論文報告集	387, (IV-11) 147-150 (1980)

Kazuo SAITO	An Overview of the Problem and Some Statistical Analyses on the Collisions with Roadside Hazards	The 5th World Conference on Transport Research	1989.6
高 桑 英 司 齊 藤 和 夫	高速道路における運転者の視点挙動解析について	土木学会第44回年講	第4部, 422-423 (1989)
齊 藤 和 夫 榎 谷 有 三	路側構造物衝突事故の解析と危険度評価モデルに関する研究	土木計画学研究	(12), 721-728 (1989)
齊 藤 和 夫	積雪地域都市部の冬期交通に起因する環境要因の影響評価モデル	「都市圏における環境計画の体系化」平成元年度研究成果発表会	1990.1
浜 口 次 登 齊 藤 和 夫 (室蘭市)	室蘭地域における地域活性化の方策について	土木学会北海道支部論文報告集	(46) 463-468 (1990)
齊 藤 和 夫 石 井 憲 一 (日本工学院)	車両単独事故問題に関する2、3の考察	土木学会北海道支部論文報告集	(46) 521-526 (1990)
高 桑 英 司 齊 藤 和 夫	運転者の注視挙動に関する解析	土木学会北海道支部論文報告集	(46) 537-540 (1990)
篠 原 修 司 齊 藤 和 夫 榎 谷 有 三 (苫小牧高専)	走行時間関数を用いた配分交通量推定法の検討	土木学会北海道支部論文報告集	(46) 547-550 (1990)
齊 藤 和 夫	安全で快適な道路をどう設計するか	「話題源／保健・体育」東京法令出版社	C15 (1990)
齊 藤 和 夫 (分担執筆)	積雪地域における沿道環境の把握	「人間環境系」研究報告集都市圏環境計画の概念と手法	(G 039- N 30) 142-147 (1990)
泉 清 人	複合交通騒音の不快感の評価に関する研究—模擬居間実験と社会調査—	日本音響学会騒音研究会	N-89-39 1-10(1989)
泉 清 人 竹 下 弥 生 高 橋 弥 生	道路交通騒音の住民反応に関する社会調査—バス解析の試み—	日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学)	413-414 (1989)
Takashi Yano Asato Kobayashi, & Kiyoto Izumi	Noisiness of repeated impulsive sounds Effects of background - to - peak level and duration	Proceedings of International Conference on Noise Control Engineering	833-836 (1989)
湯 浅 信 悟 泉 清 人 平 井 剛	パーソナルコンピュータによるホール音場の再生	日本建築学会北海道支部研究報告集	No.63 205-208 (1990)
泉 清 人 高 橋 下 茂 竹 下 弥 生	自動車騒音と鉄道騒音の住民反応に関する社会調査—騒音の不快感の評価に関する研究(42)—	日本建築学会北海道支部研究報告集	No.63 209-212 (1990)
竹 下 清 人 泉 高 橋 弥 生	交通騒音の社会反応に関する方法論的考察—騒音の不快感の評価に関する研究(43)—	日本建築学会北海道支部研究報告集	No.63 213-216 (1990)

Hiroyuki SUGIMOTO Kazuto Yamamura (Nippom Steel Co.) Ryouti KANNO (Nippom Steel Co.) Masayuki OKIMOTO (Nippom Steel Co.)	Shape Optimization of Joints of Steel – Framed Diaphragm Wall	Proc. of the sessions related to computer utilization at Struc- tures Congress '89	1989.5
Kouhei FURUKAWA (Yamaguti Univ.) Hiroyuki SUGIMOTO Kohiti INIUE (Mitsubishi Heavy Ind.) Zeniti YAMADA (Kyoto Univ.)	Optimization of Cable Pre – stressed of Cable Stayed Bridges Based on Minimum Strain Energy Criterion	Proc. of the sessions related to computer utilization at Struc- tures Congress '89	1989.5
Kazuo Yamamura (Nippom Steel Co.) Hiroyuki SUGIMOTO Ryouti KANNO (Nippom Steel Co.) Yosiaki TAKEI (Nippom Steel Co.)	Practical Applications of Shape Optimization Techniques to Engineering Problems	First Int. Conf. on Computer Aided Op- timum Design of Structures	1989.6
杉本博之	近似モデルを用いるトラス構造物の最小重量 設計	第44回土木学会年次 学術講演会	1989.10
杉本博之 山村和人 (新日本製鐵)	対話形式による数値最適設計の前処理および 後処理について	システム最適化に関 するシンポジウム講 演論文集	1989.11
伊藤宏幸 (ダイキン工業) 康倫明 (ダイキン工業) 杉本博之	空調機開発における最適化問題	システム最適化に関 するシンポジウム講 演論文集	1989.11
杉本博之	双対法・新双対法と近似法について	土木学会北海道支部 論文報告集	第46号 1990.2
大塚敏正 杉本博之	近似法による立体トラス構造物の形状最適化 に関する基礎的研究	土木学会北海道支部 論文報告集	第46号 1990.2
杉本博之	制約条件の部分近似によるトラス構造物の最 適設計に関する研究	構造工学論文集	Vol. 36 A 1991.2
Hideo KONDO Kenji YANO (開発土研) Tomiji WATABE	Wave force and stability of Pendolor Power extractor	Proc. XXI Ird Con- gress, Technical Session C, Ottawa	C, 477-483 (1989)

近藤 俊郎	海面上昇による感潮狭口流積の変化	第8回日本自然災害学会学術講演会	1989.9.14
近藤 俊郎 玉手 聡	振り子式波浪エネルギー吸収装置の水室内波形	第44回土木学会年次学術講演会	1989.10.17
Hideo KONDO Tomiji WATABE Akira KAWAMORI (アルファ水工 コンサルタンツ)	Wave Power utilization toward the island community free from oil	Symposium on Energy Systes, Management and Economics, Tokyo, IFAC / IFORS / IAEE	1989.10.26
平田 佳嗣 近藤 俊郎	固定式および可動式潜水直方体に作用する波力の特性	海岸工学論文集	36,564-568 (1989)
Hideo KONDO Tomiji WATABE	Optimal Depth for nearshore wave power extractors of fixed type	International Conf. on Ocean Energy, Honolulu, ASCE	1989.11.30
玉手 聡 近藤 俊郎	振り子式波浪エネルギー吸収装置の水室設計要因	土木学会北海道支部論文報告集	46,205-210 (1990)
米津 仁司 近藤 俊郎	噴火湾の潮流並びにその他の流れ特性	土木学会北海道支部論文報告集	46,211-216 (1990)
浦島 三朗 (苫小牧高専) 近藤 俊郎	消波ブロックの安定及び消波特性について	土木学会北海道支部論文報告集	46,201-204 (1990)
川森 晃 (アルファ水工 コンサルタンツ) 近藤 俊郎 渡部 富治	離島における波浪エネルギーの利用計画	土木学会北海道支部論文報告集	46,767-772 (1990)
田中 良弘 (大成建設株) 近藤 俊郎	噴火湾におけるフローティング・ステーション構想	土木学会北海道支部論文報告集	46,773-778 (1990)
中田 朋樹 (水資源 開発公団) 藤間 聡 嵯峨 浩 (苫小牧高専)	室蘭流出試験地の流出特性について	土木学会 第44回年次学術講演会概要集	第II部 1989.10.16 p.108-109
谷口 直弘 (土木技術 コンサルタンツ) 藤間 聡	亀裂性岩盤内における分散特性について	土木学会北海道支部論文報告集	No.46, 1990.2.11 p.293-296
藤間 聡	都市河川の洪水流出解析	土木学会北海道支部論文報告集	No.46, 1990.2.10 p.375-378
中田 朋樹 藤間 聡 嵯峨 浩	小流出試験地の流出特性・流出解析(その2)	土木学会北海道支部論文報告集	No.46, 1990.2.10 p.333-336
中藤 朋樹 藤間 聡 嵯峨 浩	室蘭流出試験地における上層構造と不飽和透水係数	土木学会北海道支部論文報告集	No.46, 1990.2.10 p.337-340
藤間 聡	亀裂性岩盤内における熱・放射性核種輸送に関する研究	昭和63年度-平成元年度文部省科学研究費補助金(一般研究C)研究成果報告書	1990.3

## 機械システム工学科

齊藤 図	凍結破壊に関する伝熱学的研究	昭和63年度-平成元年度科学研究費補助金研究成果報告書	1990.3
Koki Kishinami Hakaru Saito Ikuo Tokura Koji Yamazaki Yoshiki Takekawa	A Basic Investigation on Laminar Natural Convection Heat Transfer from a Vertical Plate with Isolate Isothermal Sources	1989 International Symposium on Cold Regions Heat Transfer	1989.6.28-30 p.209-214
I. Tokura H. Saito K. Kishinami	Natural and Surface Tension Driven Convection in Open Cavities	1989 International Symposium on Cold Regions Heat Transfer	1989.6.28-30 p.215-220
H. Saito N. Kamada (建築) T. Kudo K. Kishinami	An Analytical Study on Moisture Transfer and Accumulation in Insulation Walls	1989 International Symposium on Cold Regions Heat Transfer	1989.6.28-30 p.239-244
Hakaru Saito Koki Kishinami Ikuo Tokura Yoshiki Takekawa	Measurement of Thermal Conductivity of Solid - Liquid Mixtures	The Second Asian Themophysical Properties Conference	1989.9.20-22 p.81-85
Ikuo Tokura Hakaru Saito Koki Kishinami Yoshiki Takekawa	Applicability of the Hot - Wire Method to Thermal Conductivity Measurement of Two Phase Mixtures	XXI International Conference on Thermal Conductivity	1989.10.15-18 p.Ⅲ.5
齊藤 図 戸倉 郁夫	霜層と着霜面の伝熱問題	伝熱研究	Vol. 28, No.108 1989 p.73-96
S. K. Elam (NASA) I. Tokura K. Saito (ケンタッキー大) R. A. Altenkirch (ケンタッキー大)	Thermal Conductivity of Crude Oils	Experimental Thermal and Fluid Science, Elsevier Publishing Co.	Vol. 2, 1989 p.1-6
齊藤 図 藤田 紀彦 岸浪 紘機 戸倉 郁夫 藤孝行 (サンデン株)	断熱壁内における熱及び水分移動と蓄積に関する研究(壁内空気層の水分凝縮抑止効果について)	第3回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集	1989.4 p.49-54
齊藤 図	水道配管の凍結破壊	第3回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集	1989.4 p.55-60
岸浪 紘機	寒地における熱の有効利用としての自然エネルギーの総合的な活用(3)	第3回寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集	1989.4.21 p.125-136

Koki Kishinami Hakaru Saito Ikuo Tokura Koji Yamazaki Yosiki Takekawa	A Basic Investigation on Laminar Natural Convection Heat Transfer from a Vertical Plate with Isolated Isothermal Sources	Proceedings of the 1989 International Symposium on Cold Region Heat Transfer, Sapporo, Japan	1989.6.28-30 p.209-214
Koki Kishinami Hakaru Saito Ikuo Tokura	Experimental Study on Natural Convective Heat Transfer from a Vertical Wavy Surface Heated of Convex / Concave Elements	Heat Transfer Japanese Research	1989, Vol. 18, No.1 p.15-31
草野 徳 治 (省エネルギー 温泉活用研究所) 岸 浪 紘 機 窪 田 英 樹	白老町温泉の有効利用について	空気調和・衛生工学会北海道支部第24回学術講演論文集	1990.3 p.99-102
Hiromu SUGIYAMA Hiroshige NAGUMO Takakage ARAI Hideaki YAMAGISHI	An Experimental Study on the Raising of Dust Particles by a Shock Wave - Induced Flow	Proceedings of International Conference on Mechanics of Two - Phase Flows, Taipei, Taiwan, ROC.	1989.6 pp.476-480
Hiromu SUGIYAMA Takakage ARAI Hiroshige NAGUMO Masahiko IZUMI (Tohoku Univ.) Hideyuki SUEKI Kazuyoshi TAKAYAMA (Tohoku Univ.)	An Experimental and Numerical Study on the Shock Wave - Induced Flow Past a Circular Cylinder in a Dusty - Gas Shock Tube	Proceedings of 17th International Symposium on Shock Waves and Shock Tubes, Bethlehem, U. S. A.	1989.7
Takakage ARAI Hiromu SUGIYAMA Hukuyasu ABE Tetsuo TAKAHASHI Osamu ONODERA (Tohoku Univ.)	Internal Structure of Pseudo - Shock Waves in a Square Duct	Proceedings of 17th International Symposium on Shock Waves and Shock Tubes, Bethlehem, U. S. A.	1989.7
Ryoji KOBAYASHI (Tohoku Univ.) Takakage ARAI	Spiral Vortices in Laminar - Turbulent Transition of Boundary Layer on Sphere Rotating in External Axial Flow	Proceedings of 4th Asian Congress of Fluid Mechanics, Hong Kong	1989.8 pp.A217 - A220

Ryoji KOBAYASHI (Tohoku Univ.) Takakage ARAI Yosuke MASUKI (Tohoku Univ.)	Water Jet Nozzle Geometry and Its Effects on Erosion Process of Metallic Materials	Proceedings of 5th American Water Jet Conference, Toronto	1989.8 pp.59-68
Ryoji KOBAYASHI (Tohoku Univ.) Takakage ARAI	Spiral Vortex Behavior in Transition Region and Separation of Three - Dimensional Boundary Layers on Spheres Rotating in Axial Flow	Proceedings of Third IUTAM Sym- posium on Laminar - Turbulent Tran- sition, Toulouse, France	1989.9
Ryoji Kobayashi (Tohoku Univ.) Takakage Arai	Jet Cutting Characteristics and Finishing Accuracy of Water Jet Nozzle	Proceedings of 2nd Pacihic Rim Interna- tional Conference on Water Jet Cutting, Singapore	1990.1
杉 山 弘	固体微粒子を含む高速気流	日本機械学会 極限流体工学に関す る調査研究分科会研 究成果報告書	1985.5 pp.73-80
杉 山 弘 新高 井 隆 景 橋 哲 雄	正方形管内の擬似衝撃波の内部構造	衝撃工学シンポジウ ム講演論文集	1989.9 pp.198-204
新 井 隆 景 杉 山 雲 弘 南 木 広 重 末 秀 幸 フェリーベ ローベス	微粒子を含む高速気流中におかれた円柱背後 の流れ	日本機械学会北海道 支部第30回講演会講 演論文集	1989.10 pp.97-98
杉 山 弘 新末 井 隆 景 木 秀 幸	衝撃波による微粒子の舞い上がり挙動の観察	第7回熱流体シンポ ジウム	1989.12
杉 山 弘 新高 井 隆 景 阿高 部 福 億 高 橋 哲 雄 山 和 喜 (東北大学)	正方形断面を有する直管内に発生するλ形擬 似衝撃波の流動機構	日本機械学会論文集 (B編)	1990.2 Vol. 56 No. 522 pp.330-335
杉 山 弘	衝撃波による微粒子の舞い上がり機構に関する 基礎的研究	平成元年度文部省科 学研究費補助金 (一般研究C) 実績報告書	1990.3
杉 山 弘 新末 井 隆 景 山 岸 英 明	衝撃波による微粒子の舞い上がり挙動に関する 光学的研究	日本熱流体工学会論 文集	1990.3 Vol. 5 pp.13-16
新 井 隆 景 杉 山 雲 弘 高 橋 哲 雄	管内超音速気流中へ噴射する気体および液体 の混合過程 (可視化による流動観察)	日本航空宇宙学会北 部支部1990年講演会 前刷集	1990.3 pp.25-28
杉 山 弘 新末 井 隆 景 木 秀 幸	衝撃波による微粒子の舞い上がり	日本航空宇宙学会北 部支部1990年講演会 前刷集	1990.3 pp.33-36

新 杉 高	井 山 橋	隆 哲	景 弘 雄	LDV による管路内圧縮性乱流境界層の測定	日本機械学会 第67期通常総会講演 会講演論文集 (Vol. B)	1990.3 No.900-14 pp.7-9
杉 新 南 末	山 井 雲 木	隆 宏 秀	弘 景 重 幸	ノズル内の超音速微粒子—気体流れ	日本機械学会 第67期通常総会講演 会講演論文集 (Vol. B)	1990.3 No.900-14 pp.206-208
新 杉 中	井 山 塚	隆 利	景 弘 幸	衝撃波による気泡群の崩壊に関する一実験	日本機械学会 第67期通常総会講演 会講演論文集 (Vol. B)	1990.3 No.900-14 pp.209-211
小 新	林 井	陵 隆	二 景	高速液体噴流の流動機構	日本機械学会 混相流動と損傷に関 する調査研究分科会 研究成果報告書	1989.6 pp.27-33
小 新	林 井	陵 隆	二 景	噴流壊食の応用	日本機械学会 混相流動と損傷に関 する調査研究分科会 研究成果報告書	1989.6 pp.198-204
小 新	林 井	陵 隆	二 景	加工特性に及ぼすノズル形状、製作精度およ びポリマーの効果について	日本ウォータージェ ット学会噴流加工技 術の基礎と応用	1989.7 pp.100-108
小 新 増	林 井 木	陵 隆 洋	二 景 介	好適なウォータージェットノズルの形状に関 する実験的研究	日本ウォータージェ ット学会第5回研究 発表講演会発表論文 集	1989.7 pp.34-41
小 新 山	林 井 田	陵 隆 泰	二 景 司	ウォータージェットの動的構造と壊食機構と の関係について	日本ウォータージェ ット学会噴流加工技 術の基礎と応用	1989.7 pp.25-32
小 新 佐 久 高	林 井 間 高 島	陵 隆 正	二 景 弦 巳	回転球境界層の乱流遷移におけるらせん渦の 特性とはく離	日本機械学会論文集 (B編)	1989.9 Vol. 55 No.517 pp.2590- 2596
小 新 丹	林 井 治	陵 隆 和	二 景 宏	ウォータージェットの局所構造と金属材料の 壊食機構	日本機械学会論文集 (B編)	1990.1 Vol. 56 No.521 pp.67-73
新	井	隆	景	超音速気液二相流動場における気液混合機構 に関する研究	平成元年度文部省 科学研究費補助金 (奨励研究(A)) 実績報告書	1990.3
新	井	隆	景 (分 担)	ジェットカッピング加工法の開発研究	平成元年度文部省 科学研究費補助金 (試験研究(2)) 研究成果報告書	1990.3

Hideaki YAMAGISHI Ryoji ISHIGURO Toshiaki KUMADA Yoichi MARUKO Hiromu SUGIYAMA	Flow Patterns and Heat Transfer Mechanism of Circular Closed thermosyphons	HEAT TRANSFER Japanese Research	1989 Vol. 18 No. 6 pp.95
高橋洋志 竹内隆男	直交流式型移動層における粒子流動 —フローパターンと応力分布—	化学工学論文集	15, (5) 1011 (1989)
Hiroshi TAKAHASHI Eiji OBATA Takao TAKEUCHI	Velocity Discontinuity of Particles Flowing Down through a Hopper, with Analysis of the Characteristic Curves	International Chemical Engineering	29, (3) 503 (1989)
高橋洋志 大野修 竹内隆男	有限要素法による固気直交流移動層の流動解析	化学工学論文集	16, (1) 116 (1990)
高橋洋志	移動層に関する粒子流動の研究の現状と課題	化学工学会第22回秋季大会講演要旨集	SL105 (1989)
Yutaka HANAOKA Hideki KUBOTA Kazuo MAENO (千葉大)	A Study of Energy Demand on Space Heating for Factories in Cold Climates	Procs. of 2nd Int. Symp. on Cold Regions Heat Transfer	1989 pp.153-158
Kazuo MAENO (千葉大) Shingo YOKOYAMA Yutaka HANAOKA	Study on Laser - Induced Cavitation Bubbles in Cryogenic Liquids	Procs. of 17th Int. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes	1989.7
Kazuo MAENO (千葉大) Shingo YOKOYAMA Yutaka HANAOKA	Experimental Study on Vapor Bubble Dynamics in Low Temperature Liquid	Procs. of 2nd Asian Thermophysical Properties Conference	1989 pp.431-436
Kazuo MAENO (千葉大) Naoto YAMAGUCHI (IHI 株) Yutaka HANAOKA	Supersonic CO <sub>2</sub> Mixing Laser with N <sub>2</sub> Glow Discharge in Coaxial Nozzles	レーザー研究	17, (6) pp.417-424 (1989)
花岡裕夫 前野一夫 (千葉大)	複数管を用いた貯水槽からの定常排水うずについて	第3回寒地環境工学シンポジウム講演論文集	1989. 4 pp. 9 - 16

前野一夫 (千葉大)	花岡裕樹 兜森俊樹 (日本製鋼所)	後藤敏満 (日本製鋼所)	脇坂裕一 (日本製鋼所)	大西敬三 (日本製鋼所)	50m級落下塔による微小重力環境の基礎実験 (第1報; 落下塔の開発)	第6回宇宙利用シン ポジウム	1989.7
前野一夫 (千葉大)	花岡裕樹 兜森俊樹 (日本製鋼所)	後藤敏満 (日本製鋼所)	脇坂裕一 (日本製鋼所)	大西敬三 (日本製鋼所)	大型落下塔による微小重力下の熱流体実験	第2回北海道地方伝 熱セミナー	1989.11
前野一夫 (千葉大)	横山真吾 花岡裕樹 深野隆 (日本酸素)	肥後盛長 (日本酸素)			レーザー照射による極低温流体中の生成気泡 挙動に関する実験	平成元年度衝撃工学 シンポジウム	1989.9
前野一夫 (千葉大)	花岡裕樹 後藤敏満 (日本製鋼所)	兜森俊樹 (日本製鋼所)	脇坂裕一 (日本製鋼所)	大西敬三 (日本製鋼所)	50m級落下塔を用いた微小重力下の流体実験	第33回宇宙科学技術 連合講演会	1989.10
前野一夫 (千葉大)	花清水盛生 (航空技研)	兜森俊樹 (日本製鋼所)	脇坂裕一 (日本製鋼所)	大西敬三 (日本製鋼所)	小型サイクロトロンを用いた中性子線CT画 像処理法の研究 (金属材料の非破壊検査)	第33回宇宙科学技術 連合講演会	1989.10
前野一夫 (千葉大)	花岡裕樹 横山真吾 深野隆 (日本酸素)	肥後盛長 (日本酸素)			極低温流体中のレーザー照射によるキャピ テーション気泡実験 (液体窒素に対する結果)	第21回流体力学講演 会	1989.11

Kazuo MAENO (千葉大)				
Kimiaki FURUKAWA Kōyū KIMURA Yutaka HANAOKA	A Study on the Characteristics of Supersonic CO <sub>2</sub> Mixing EDL	Japan Symp. on Gas - Flow and Chemi- cal Laser '89		1989.12
前野 一夫 (千葉大)	太陽光励起CO <sub>2</sub> レーザーの特性に関する解析	第9回宇宙エネル ギーシンポジウム		1990.2
古川 公昭 花岡 裕				
前野 一夫 (千葉大)	分子振動非平衡流の解析と混合問題の基礎研 究	スクラムジェットエ ンジン内の極超音速 反応流・ADTVの 気体力学・航空宇宙 における3次元の特 性に関する研究シン ポジウム		1990.2
古川 公昭 花岡 裕				
花岡 裕 安彦 哲一 柴田 一夫 前野 一夫 (千葉大)	複数排水管による容器からの排水うずに伴う 空気吸込み量と管内圧力損失との関係	第23回空気調和・衛 生工学会 北海道支部学術講演 会論文集		1990.3 pp.75-78
S. Kamota (道立工試)				
M. Sakai (道立工試)	Bonding of Steels with Thermal Spray Coat- ings	Materials Trans, JIM		30, No.6, 443-450
K. Tagashira M. Akanuma				
S. Kamota (道立工試)				
M. Sakai (道立工試)	Bonding of sintered alumina and mild steel using thermal spray coatings	J of Materials Scien- ce Letter		8, (1989), 553-554
K. Tagashira				
鴨田 秀一 (道立工試)				
酒井 昌安 (道立工試)	自溶合金溶射層の密着性	日本溶射協会誌		26, No.9 (1989), 1-10
田頭 孝介 宮腰 康樹				
田頭 孝介 鎌田 正巳 (巴組鉄工所)	低温環境下で溶接された鉄鋼溶接部のミク ロ組織に関する研究	北海道科学研究費研 究報告 (北海道企画振興部)		1989.11 115-116
小林 雅晴 (旭川高専)				
世利 修美 大谷 直道 田頭 孝介	アルミニウム合金5052の孔食発生モニタリ ング法	防食技術		38, (1989) 224-230
世利 修美 田頭 孝介	FeAl <sub>3</sub> 金属間化合物の選択除去によるアル ミニウム表面の高純度化	軽金属		39, (1989) 275-280
世利 修美 田頭 孝介	インヒビター-NaNO <sub>3</sub> を添加した食塩中のAl- 1%Fe合金の孔食挙動とその抑制	軽金属		39, (1989) 350-355
世古 利修 曾我 修美 我 昇	アルミニウムの腐食に及ぼす銅添加量の効果	軽金属		39, (1989) 724-729
世利 修美 田頭 孝介 今泉 美津徳	Al-Cu合金における食孔内塩素イオン濃度 推定式の検討	軽金属		39, (1989) 730-734

世利修美	カソード電流印加による電解コンデンサ用アルミニウム電極箔の食刻点の発生	表面技術	40, (1989) 1293-1296
O. Seri K. Tagashira	The Interpretation of Polarization Curves for Al - Fe Alloys in Deaerated NaCl Solution	Corrosion Science	30, (1990) 87-94
世利修美 田頭孝介	分極挙動からみた耐孔食アルミニウム合金設計に関する一考察	軽金属	40, (1990) 51-55
(口頭発表) 世利修美 古谷修一	Al - Cu合金の腐食挙動と自然電位の変化	第76回軽金属春期大会	1989.5
O. Seri K. Tagashira	Surface purification of aluminum containing iron by dynamic polarization in aqueous media	The 6th Asian - Pacific Corrosion Control Conference	1989.9
世利修美 田頭孝介	面積分極法による缶用アルミニウム合金5052の孔食発生と溶存酸素の関係	第36回腐食防食討論会	1989.10
世利修美	アルミニウムのガルバニック腐食へのiR分極法の適用	第77回軽金属秋季大会	1989.11
M. DAIMARUYA M. NAITO H. KOBAYASHI S. TANIMURA	A Sensing - plate Method for Measuring Force and Duration of Impact in Elastic Impact of Bodies	Experimental Mechanics	Vol. 29, No. 3 1989 p.268
小林秀敏 大久保浩志 臺丸谷政志	アルミニウム合金円管の偏平試験結果と引張試験結果の関係	軽金属	Vol. 39, No. 1 1989 p.8-14
H. KOBAYASHI B. DODD	A Numerical Analysis for the Formation of Adiabatic Shear Bands Including Void Nucleation and Growth	Int. J. Impact Engineering	Vol. 8, No.1 1989 p.1-13
H. KOBAYASHI M. DAIMARUYA	A Simple Method Using the Lateral Compression of Tubes to Estimate Tensile Characteristic Values	Proc. Plasticity '89	1989.8 p.155-158
小林秀敏 臺丸谷政志 浜田恒平	薄肉円管の横圧縮変形挙動	日本機械学会 北海道支部第30回講演会 講演概要集	1989.10 p.9-10
臺丸谷政志 小阿部秀敏 小田美紀男	応力波集中による衝撃破壊(平板の場合)	日本機械学会 北海道支部第30回講演会 講演概要集	1989.10 p.11-12
南克之 臺丸谷政志 小林秀敏	Al - Li合金の低温における機械的性質	日本機械学会 関西支部第65期定時総会 講演会講演概要集	1990.3 p.1-2
西田公至	点音源による多角柱周囲の音場の近似計算	日本音響学会誌	Vol. 45 No.5 pp.343-353 1989.5
西田公至 玉置隆二	音圧分布の測定におけるサンプリング間隔の評価法	日本機械学会論文集 (C編)	Vol. 55 No.514 pp.1406-1412 1989.6

鈴木 浩平 (都立大学) 西丸 田山 公晃 (道工大) 渡 辺 (山梨大学)	機械工学のための振動・音響学	サイエンス社	1989
西小 田熊 公義 至智	境界要素による膨張型消音器内音場の解析の収束性と境界条件の設定について	日本機械学会 北海道支部第30回講演会講演概要集	No. 892-2 1989.10
西島 田瀬 公 至浩	地表面の振動物体放射音の境界要素解析における考慮すべき地面の影響範囲	日本機械学会 北海道支部第30回講演会講演概要集	No. 892-2 p. 9-10 1989.10
向平 紳 一 斉 当 建 一	プラスチックボルトの強度特性 ——動荷重下のクリープ試験——	1989年度精密工学会 北海道支部学術講演会講演論文集	1989.9
斉 当 建 一 飯 坂 孝 仁	プラスチックねじの締付け方法について ——トルク法と回転角法の適用——	精密工学会誌	Vol. 55, No. 11 p.2057 (1989)
斉 当 建 一 星 野 建 一 悟	プラスチックねじ締結体のエネルギー吸収能	精密工学会誌	Vol. 56, No. 1 p.109 (1990)
斉 当 建 一	プラスチックねじの疲労強度	1990年度精密工学会 春季大会学術講演会講演論文集	1990.3
Y. Tanaka H. Kamide T. Hiraoka H. Kage	Effect of the Graphite Nodule Count on Mechanical Properties of Austempered Spheroidal Graphite Cast Iron	The Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of cast iron	(1989)
田 中 雄 一 阿 部 康 晴	オーステンバ球状黒鉛鑄鉄の引張特性に及ぼす黒鉛粒数の影響	日本鑄物協会第115回全国講演大会	1989.5.8
田 中 雄 一 沢 崎 義 久	テルミット反応を利用した遠心鑄造法により製造したセラミックスライニング鑄鉄管の特性	日本鑄物協会北海道支部大会	1989.6.3
田 中 雄 一	熱分析による鑄鉄溶湯の性状判定	「鑄物工場の高効率生産システムの開発」技術講習会	1989.8.19
上 出 英 彦 一 橋 中 雄 彦 誠 一	オーステンバ球状黒鉛鑄鉄のJ <sub>10</sub> に及ぼす黒鉛粒数の影響	日本鑄物協会第116回全国講演大会	1989.10.7
石 井 裕 士 上 田 中 雄 彦 一	オーステンバ球状黒鉛鑄鉄の疲れ特性に及ぼす黒鉛粒数の影響	日本鑄物協会第116回全国講演大会	1989.10.7
田 中 雄 一	鑄鉄の局部再溶融による表面硬化	日本鑄物協会シンポジウム「鑄物の表面改質・複合化技術」	1989.10.8
中上 川 博 勝 菅 原 中 英 彦 夫 一	アルミ拡散被覆したNi <sub>3</sub> AlおよびNi <sub>3</sub> Si金属間化合物の高温腐食挙動	日本金属学会 春期大会	1989.4.5
上 出 英 彦 田 菅 原 中 雄 彦 夫 一	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - NaCl 溶液中における304鋼の応力腐食割れに及ぼすMn, SiおよびBの影響	日本金属学会 春期大会	1989. 4. 6

上栗田	出原中	英達雄	彦也一	Crメッキした304鋼のH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - NaCl溶液中における応力腐食割れ感受性	日本金属学会 春期大会	1989.4.6
新正山	谷田下	雅弘光	史光久讓	デジタルフィードバックコントローラの一設計法	計測自動制御学会 第6回デジタル信号処理と数値解析シンポジウム	1989.9.16
穴足山	沢田下	弘光	正光久讓	非線形系に対する繰返し制御	計測自動制御学会 第6回デジタル信号処理と数値解析シンポジウム	1989.9.16
正山久保田	田下	弘光	光久讓	モデル追従形繰返し制御	日本機械学会論文集 (C編)	第55巻 519号 (1989-11)
H. HIKITA S. KYOUTOKU				A Repetitive Control System of a Model Following Type	28th IEEE Conf. on Decision and Control	1989.12.13
新正山	谷田下	雅弘光	史光久讓	出力時変型デジタル制御による等価的狀態フィードバック制御	第22回計測自動制御学会北海道支部學術講演会	1980.2.4
山下久保田	田下	久弘光	光久讓	数式処理システムを用いた制御系のCAD	計測自動制御学会第 6回デジタル信号処理と数値解析シンポジウム	1989.9.17

### 情報工学科

Kazuhiko SATO Kenichi ITAKURA				The occurrence and mechanism of outbursts in sandstone	Rock at Great Depth, Balkema.	1989 p.635-641
Kazuhiko SATO Kenichi ITAKURA				Structural analysis of powered supports for determination of external loadings and for evaluation of global stiffness	Today's Technology for the Mining and Metallurgical Industry, MMIJ & IMM	1989 p.237-244
奥山徳男	(赤平ボーリング)	サービス)	中山幸弘	リングカッタ・RB工法におけるビット位置検出システムの開発—画像処理によるビット位置検出ソフトウェア(第一報)—	開発技報	32, p.21-25 1990
坂下雅和	(赤平ボーリング)	サービス)	田崎拓雄			
佐藤賢一	(赤平ボーリング)	サービス)	板倉賢一			

奥山徳男 (赤平ボーリング サービス)			
中山幸弘 (赤平ボーリング サービス)			
坂下雅和 (赤平ボーリング サービス)	リングカッタ・RB工法におけるビット位置 検出システムの開発—基礎試験とシステムの 適用限界(第二報)—	開発技報	32,p.27-30 1990
田崎拓雄 (赤平ボーリング サービス)			
佐藤一彦 板倉賢一			
板倉賢一 佐藤一彦 見内伸彰 小笠原	AEおよび弾性波トモグラフィによるフラク チュアリングの追跡	平成2年度資源・素 材学会春季大会研 究・業績発表講演会	1990.3.30
森放鳴彦 佐藤一彦 板倉賢一	ディスクカッタの切削機構に関する基礎実験	平成2年度資源・素 材学会春季大会研 究・業績発表講演会	1990.3.31

### 電気電子工学科

伊達隆三	インバータ駆動誘導電動機の最適制御の一方 法と特性	電気関係学会北海道 支部連合大会講演論 文集41	1989.9.30
H. Tazawa T. Hiraguchi T. Narita	Noninvasive determination of the embryo heart rate: the chicken and the quail during development	Kjell Johansen Com- memorative Sympo- sium. (Copenhagen, Denmark)	1989.7.6-8
H. Tazawa T. Narita T. Hiraguchi Y. Hashimoto	Ballistocardiography in avian egg	XXXI International Congress of Phy- siological Sciences (Helsinki, Finland)	1989.7. 9-14
H. Tazawa C. Matsunaga Y. Kuroda H. Ishiguri M. Nakaya M. Takami	Comparative thermogenesis in avian embryos	International Con- ference at The Uni- versity of Manches- ter (Manchester, En- gland)	1989.9. 6-8
H. Tazawa T. Hiraguchi T. Takura S. Yamaguchi M. Yamada Y. Yufu	Cardiogenic ballistograms of embryos — Noninvasive determination of the heart rate	22nd Poultry Scien- ce Symposium (Ayr, Scotland)	1989.9. 12-15
H. Tazawa A. Okuda S. Nakazawa G. C. Whittow (ハワイ大学)	Metabolic responses of chicken embryos to graded, prolonged alterations in ambient temperature	Comparative Bioche- mistry and Physiolo- gy	92 A, 613-617 1989
H. Tazawa G. C. Whittow (ハワイ大学)			
J. S. Turner (ケープ タウン大学)	Metabolic responses to gradual cooling of chicken eggs treated with thiourea and ox- ygen	Comparative Bioche- mistry and Physiolo- gy	92 A, 619-622 1989
C. V. Paganelli (ニューヨーク 州立大学)			

C. Matsunaga M. Mathiu (ケニア大学) G. C. Whittow (ハワイ大学) H. Tazawa	Oxygen consumption of Brown Noddy embryos in a quasiequilibrium state of lowered ambient temperatures	Comparative Biochemistry and Physiology	93 A, 707-710 1989
Y. Suzuki H. Musashi H. Tazawa	Noninvasive heart rate monitoring system for avian embryos based on ballistocardiogram	Medical & Biological Engineering & Computing	27, 399-404 1989
H. Tazawa Y. Suzuki H. Musashi	Simultaneous acquisition of ECG, BCG and blood pressure from chick embryos in the egg	Journal of Applied Physiology	67, 478-483 1989
H. Tazawa T. Hiraguchi T. Asakura (北海道大学) H. Fujii (北海道大学) G. C. Whittow	Noncontact measurements of avian embryo heart rate by means of the laser speckle : Comparison with contact measurements	Medical & Biological Engineering & Computing	27, 580-586 1989
Iwata SAKAGAMI Kozo HATORI	On the Responses of a Coupled - Line Digital Frequency Doubler Considering Phase Characteristics	電子情報通信学会論文誌(E)	Vol. E72, No. 4 pp.287-289 (1989.4)
坂上岩太 黒川 澄	デジタル周波数増倍器における余弦半波入力に関する基本的検討	電子情報通信学会論文誌(C)	Vol. 372- C-II No. 6 pp.772-724 (1989. 6)
坂上岩太	余弦半波入力に対する分布結合デジタル周波数増倍器の出力応答	電子情報通信学会技術研究報告	MW89-51, pp.15-22 (1989.8)
Iwata SAKAGAMI	On the Distributed - Line Digital Frequency Multipliers - Part I : the Frequency Domain Behaviour	室蘭工業大学研究報告(理工編)	第39号 37-53 (1989)
倉棚 龍一郎 香 沢 幸成	室工大式CAI (HOSCL / G) の数式評価システムの改良	第14回CAI学会研究発表大会論文集	1989.8
倉棚 龍一郎 香 沢 幸成	HOSCL / G における電気回路の過度現象への応用	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1989.9
野村 滋三子 石北 真直淳 村部 洋	シリコン陽極酸化膜の界面構造と電気的性質	電気化学および工業物理化学	57, (1), 47-54 (1989)
野村 滋三子 石北 洋 吉野 真直淳 北村 樹子	低温プロセスによるシリコン酸化膜の形成とそのデバイスへの応用	電子情報通信学会論文誌 C-II	J 72-C-II (9) 862-870 (1989)
藤川 明人 南山 條淳智 山野 人 山田 美 (苫小牧高専)	イオン化蒸着法によるI <sub>n</sub> P薄膜の作製	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	193(1989)

木南川野引堀	村條岸村間内	俊淳 正嘉	憲二 滋人明	温度勾配凝固法によるI <sub>n</sub> P結晶成長とその評価	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	194 (1989)
馬南加野吉遠	場條藤村野藤	秀淳健 正敏	光二 滋樹明	n型TiO <sub>2</sub> 電極の界面単位と水素発生機構の解明	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	196 (1989)
北河南野	村原條村	直淳	子善 滋	シリコン陽極酸化機構に関する一考察	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	197 (1989)
北南坂野三高	村條田村好松	直淳 浩繁	子二 学滋司吉	XPS法によるSi陽極酸化膜の組成解析	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	198 (1989)
北南沼野小河	村條田村井原	直淳映 昭	子二 機滋彦善	電気化学的方法による陽極酸化SiO <sub>2</sub> /Si界面の改善について	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	199 (1989)
北南石野印清	村條部村牧水	直淳真 洋浩	子二三 滋一	陽極酸化膜をゲートに用いたISFETの試作	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	200 (1989)
山南野藤山野	田小(苦)高専	直淳 明智	進二 滋人美	TDA・LB膜の表面圧評価	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	203 (1989)
馬南加野吉遠	場條藤村野藤	秀淳健 正敏	光二 滋樹明	n - TiO <sub>2</sub> 電極の界面単位と水素発生	第16回電気化学北海道支部研究会講演要旨集	18 (1990)
中南吉野遠	山條野村藤	雅淳正 敏	文二 樹滋明	PS膜の陽極酸化	第16回電気化学北海道支部研究会講演要旨集	19 (1990)
北南吉野河遠	村條野村原藤	直淳正 敏	子二 樹滋善明	シリコン陽極反応機構	第16回電気化学北海道支部研究会講演要旨集	20 (1990)

北南河野清	村條原村水	直淳 浩	子二善滋一	XPS法によるSi陽極酸化膜の組成解析	第16回電気化学北海道支部研究会講演要旨集	21 (1990)
木南川野吉遠	村條岸村野藤	俊淳 正敏	憲二亨滋樹明	温度勾配凝固法によるInP結晶の作製と評価	第25回応用物理学会北海道支部講演会講演予稿集	A-6 (1990)
馬加南野	場藤條村	秀健淳	光一二滋	半導体電極の界面準位と水素発生機構の解明	第25回応用物理学会北海道支部講演会講演予稿集	A-36 (1990)
北南河野吉遠	村條原村野藤	直淳 正敏	子二善滋樹明	XPS法による陽極酸化SiO <sub>2</sub> の組成解析	第25回応用物理学会北海道支部講演会講演予稿集	A-37 (1990)
北南河野吉遠	村條原村野藤	直淳 正敏	子二善滋樹明	シリコン陽極酸化反応機構	第25回応用物理学会北海道支部講演会講演予稿集	A-40 (1990)
木野引堀南	村村間内條	俊 正嘉淳	憲滋人明二	スプレー蒸着法によるCdSの作製とn-CdS / InPヘテロ接合太陽電池の試作	第25回応用物理学会北海道支部講演会講演予稿集	A-41 (1990)
中南野	山條村	雅淳	文二滋	陽極酸化POS膜の作製	第25回応用物理学会北海道支部講演会講演予稿集	A-42 (1990)
I. NISHIDA	(九大)					
H. IDE	(九大)					
Y. TAKASHIMA	(九大)					
T. YAGI	(九大)			Structural Study of Semiconducting and Superionic Conducting Silver Vanadate Glasses	J. Mater. Sci.	24, 1687-1692 (1989)
S. TOMARIGUCHI	(九大)					
T. ISHIZUKA	(九大)					
A. SAKAI						
T. YAGI	(九大)			Raman Scattering Spectra of Internal Modes of Ferroelectric Deuterated Dicalcium Strontium Propionate Ca <sub>2</sub> Sr (C <sub>2</sub> D <sub>5</sub> CO <sub>2</sub> ) <sub>6</sub>	Ferroelectrics	89, 61-68 (1989)
A. SAKAI						

I. NISHIDA (九大)			
H. IDE (九大)			
Y. TAKASHIMA (九大)			
T. YAGI (九大)	Structure and Electrical Conductivity of Semiconducting and Superionic Conducting Silver Vanadate Glasses	J. Non - Cryst. Solids	112, 314-317 (1989)
S. TOMARIGUCHI (九大)			
T. ISHIZUKA (九大)			
A. SAKAI			

### 材料物性工学科

中 川 一 夫 藤 原 裕 文	有機色素膜を用いた位相共役光学	第36回応用物理学関 係連合講演会	1989.4
宮 永 滋 己 藤 原 裕 文	色素含有高分子薄膜光導波路による位相共役 波の発生(II)	第36回応用物理学関 係連合講演会	1989.4
藤 原 裕 文 中 原 一 夫	位相共役光計測	第36回応用物理学関 係連合講演会	1989.4
江 上 力 中 川 一 夫 藤 原 裕 文	メチルオレンジ含有PVA 膜による位相共役 波の発生	第49回応用物理学 学会 学術講演会	1989.9
塩 原 耕 史 藤 原 裕 文	可飽和色素による2光波結合 1	第49回応用物理学 学会 学術講演会	1989.9
鈴 木 孝 佳 藤 中 原 川 一 夫	メチルオレンジ含有PVA 膜位相共役鏡によ る動画像抽出	第49回応用物理学 学会 学術講演会	1989.9
鈴 木 孝 佳 江 藤 上 力 藤 中 原 川 一 夫	メチルオレンジ含有PVA 膜位相共役鏡によ る画像和、差演算	第49回応用物理学 学会 学術講演会	1989.9
S. MIYANAGA H. FUJIWARA	Phase Conjugation by Degenerate Four - Wave Mixing in Saturable - Dye - Doped Planar Waveguides	International Con- ference on LASER '89, New Orleans	1989.12
伊 藤 寛 宮 藤 永 滋 己 藤 原 裕 文	エオシン含有高分子薄膜光導波路における位 相共役波の発生	第25回応用物理学 会 北海道支部学術講演 会	1990.1
宮 永 滋 己 藤 原 裕 文	光導波路を用いた縮退4光波混合による位相 共役波の発生	第25回応用物理学 会 北海道支部学術講演 会	1990.1
藤 原 裕 文	非線形光学と光情報処理—4光波混合と2光 波混合を中心として—	平成元年度日本光学 会北海道講演会	1990.1
T. SUZUKI C. EGAMI K. NAKAGAWA H. FUJIWARA	Real - Time Image Subtraction by Phase Con- jugation Using an Erythrosin - B - Doped - PVA Film	OE LASE '90, Los Angeles	1990.1
Riki Kawashima Mituru Satou	Frequency Dependence of AC Conductivities near the Phase Transition Points of KNO3 Crystal	J. Phys. Soc. Jpn.,	59, (1990) 389
R. Kawashima T. Matsuda	Observation of Nonlinear and Nonequilibrium Phenomena in Samarium Nitrate Crystal	J. Phys. Soc. Jpn.,	58, (1989) 3435
R. Kawashima	AC Conductivities near the Structural Phase Transition Point of Cesium Nitrate Crystal	J. Phy. Soc. Jpn.,	58 (1989) 3236

R. Kawashima	Temperature and Frequency Dependence of AC Conductivities in a Neodymium Nitrate Crystal	Solid State Commun	10, (1989) 393
川 島 利 器	硝酸希土類化合物結晶における非平衡非線形的な現象(II)	京大基礎物理学研究所長期研究会 「カオスとその周辺」	1989.12.8
磯田 広史 川島 利器 福田 明憲	硝酸カドリニウム <sup>2+</sup> の電気的性質	平成2年度応用物理学学会北海道支部(北大)	1990.1.29
服部 昌憲 川島 利器 福田 明憲	硝酸ネオヂュウム <sup>3+</sup> の結晶育成と電気的測定	平成2年度応用物理学学会北海道支部(北大)	1990.1.29
川 島 利 器 佐 藤 利 器 充	硝酸カリウム結晶の相転移領域における電気的性質	平成2年度春の日本物理学会	1990.3.31
近 澤 進 白根 紀 長谷川 輝 尾藤 明 谷藤 進 口藤 哲	AuFe 合金における内部構造と磁性に関する研究	日本物理学会1989年秋の分科会(鹿児島大学)	1989.10.5
長谷川 紀 大場 明 近澤 進 谷藤 哲	非晶質合金の結晶化過程と微粒子の磁性	第25回応用物理学学会北海道支部学術講演会(北海道大学)	1990.1.30
尾藤 輝 菊地 夫 近澤 進 谷藤 哲	AuFe 合金の磁化率	第25回応用物理学学会北海道支部学術講演会(北海道大学)	1990.1.30
S. Nagata T. Ishikawa S. Taniguchi	Pb-In 系の超伝導	日本物理学会1989年秋の分科会(於：鹿児島大学)	1989.10.6
S. Nagata S. Ebisu T. Aochi S. Taniguchi	TaSe <sub>3</sub> のマイスナー効果II	日本物理学会1989年秋の分科会(於：鹿児島大学)	1989.10.6
T. Ikeda M. Nakajima S. Nagata S. Taniguchi	Y <sub>1-x</sub> Bi <sub>x</sub> Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-8</sub> 系の超伝導	第25回応用物理学学会北海道支部学術講演会(於：北海道大学)	1990.1.30
T. Aochi S. Nagata S. Taniguchi	1 接点SQUID 特性の数値計算	第25回応用物理学学会北海道支部学術講演会(於：北海道大学)	1990.1.30
S. Nagata T. Aochi S. Taniguchi	1 接点SQUID のエネルギー解析	日本物理学会第45回年会(於：大阪大学豊中キャンパス)	1990.3.31
S. Nagata E. Fujita S. Taniguchi	Quantitative Evaluation of the Amount of $\alpha$ -Fe Phase in Progressive Annealing Stage for Amorphous Alloy Fe <sub>78</sub> B <sub>13</sub> Si <sub>9</sub>	J. Phy. Soc. Jpn.	58 (1989) p.1003
S. Nagata H. Kutsuzawa S. Ebisu S. Taniguchi	Superconductivity in the Quasi - one - dimensional Conductor TaSe <sub>3</sub>	J. Phy. Chem. Solids	50 (1989) p.703
嶋 影 和 宜 遠 藤 一 彦 佐 藤 忠 夫	金属LaによるSm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> およびTm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の環元反応	資源・素材学会平成元年度春季講演会	1989.4.1

嶋遠島佐	影藤尾藤	和一良忠	宜彦介夫	真空雰囲気下におけるEu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> およびYb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> と金属Laの反応	日本金属学会平成元年度春期大会	1989.4.5
佐宮西嶋	藤川野影	忠俊宇和	夫二雄宜	CVD法による(Ti-Zr)B <sub>2</sub> 被膜の作成	電気化学協会第56回大会	1989.4.9
佐初嶋	藤野影	忠圭和	夫郎宜	LiF-BaF <sub>2</sub> 系熔融塩中へのLa <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の溶解	電気化学協会第56回大会	1989.4.10
佐菊戸嶋	藤地田影	忠達茂和	夫夫雄宜	イオンプレーティング法によるホウ化ジルコニウム被膜の作成	日本鉄鋼協会, 日本金属学会北海道支部合同平成元年度春季講演会	1989.6.18
嶋遠佐戸	影藤藤田	和一忠茂	宜彦夫雄	ランタンによるレア・アース酸化物(Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> およびYb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )の金属熱還元	資源・素材学会北海道支部春季講演会	1989.6.21
西岩佐嶋	野見藤影	宇真忠和	夫太孝宜	アークプラズマCVD法によるタンタル粉末の製造	日本金属学会平成元年度秋期大会	1989.9.29
佐結嶋	藤城影	忠和	夫満宜	TiB <sub>2</sub> -Al複合金粉末の製造	日本金属学会平成元年度秋期大会	1989.9.29
古杉戸嶋	川浦田影	寿茂和	純春雄宜	長繊維SiC強化Al合金複合材料の機械的性質および摩耗特性	日本金属学会平成元年度秋期大会	1989.9.30
佐菊戸嶋	藤地田影	忠達茂和	夫也雄宜	イオンプレーティング法によるZrB <sub>2</sub> 薄膜の生成	日本金属学会平成元年度秋期大会	1989.10.1
嶋咲佐	影間藤	和光忠	宜廣夫	β-アルミナ固体電解質を隔膜に用いたNa/S(VI)熔融塩電池の特性	日本金属学会平成元年度秋期大会	1989.10.1
嶋	影和	宜		レア・アース酸化物(Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> およびYb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )の金属熱還元機構	資源・素材学秋季分科研究会報告書K-9	1989.10.3
佐戸嶋	藤田影	忠茂和	夫雄宜	ホウフッ化物浴からのPb-Sn-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 系複合めっき	'89電気化学秋季大会	1989.10.21
西岩佐嶋	野見藤影	宇真忠和	夫太孝宜	アークプラズマCVD法によるタンタル粉末の製造	日本鉄鋼協会, 日本金属学会北海道支部合同平成元年度秋季講演会	1989.11.17
古杉戸佐嶋	川浦田藤影	寿茂和	純春雄夫宜	長繊維SiC強化Al合金複合材料の機械的性質および摩耗特性	日本鉄鋼協会, 日本金属学会北海道支部合同平成元年度秋季講演会	1989.11.17
嶋咲戸佐	影間田藤	和光茂忠	宜廣雄夫	β-アルミナ固体電解質を隔膜に用いたNa/S(IV)熔融塩電池の特性	室蘭工業大学研究報告理工編	第39巻 1989.11 p.1-16

嶋 影 和 宜 佐 藤 田 忠 夫 戸 茂 雄	偏析現象を利用したアルミニウム中の不純物 元素の除去	軽金属学会誌	第39巻 12号 1989 p.899-896
嶋 影 和 宜 遠 藤 田 忠 夫 戸 茂 雄	金属ランタンによるレア・アースメタル酸化 物(Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> およびYb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )の還 元機構	日本金属学会誌	第54巻 1号 1990 p.17-24
嶋 影 和 宜	直接還元法によるレア・アースメタル (Sm, Eu, Tm, Yb) の創製	昭和63年-平成元年 度科学研究費 特定研究成果報告書 (分担研究)	1990.3
Tadao Sato Tatsuo Ishikawa (北海道大学) Rinzo Midorikawa (北海道大学)	Transport Number of Ions in AlCl <sub>3</sub> - NaCl Melt	Denki Kagaku	Vol. 58, 266-268 (1990)
嶋 影 和 宜 西 野 宇 太 佐 藤 忠 夫	プラズマアークCVD法によるタンタル微粉 末の製造	資源・素材学会平成 2年度春季講演会	1990.3.30
片 山 博 佐 藤 雅 博 徳 田 昌 則 (東北大選研)	溶融スラグ中におけるクロム鉱石の溶解およ び還元挙動	鉄と鋼	75(1989), p.1883- 1890
宮 内 克 行 出 倉 直 樹 平 井 野 山 正 博 桃 山 治 正 博	予備還元クロム鉱石の溶融還元挙動	日本鉄鋼協会 第117回講演大会	1989.4.6
片 山 博 井 鈴木 清 博 桃 野 元 泰 野 正 貴 正	溶融Fe - Cr合金とCaO - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> 系ス ラグ間のクロム分配	日本鉄鋼協会 第118回講演大会	1989.9.30
宮 内 克 行 片 野 山 正 博 桃 井 伸 治	クロム鉱石の溶融還元に及ぼす各種添加剤の 影響	日本金属学会, 日本 鉄鋼協会両北海道支 部合同講演大会	1989.11.17
平 井 伸 治 三 輪 治 也 岩 田 正 義 小 澤 山 博	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> のN <sub>2</sub> 気流中炭素熱還元によるAINの生 成反応	日本金属学会誌	第53巻 10号 p.1035- 1040 (1989)
平 井 伸 治 三 輪 治 也 岩 田 正 義 片 輪 山 博	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の還元窒化によるAIN合成の促進法の 検討	日本金属学会誌	第54巻 2号 p.181-185 (1990)
平 井 伸 治 岩 田 治 也 三 輪 山 博	N <sub>2</sub> 雰囲気中炭素熱還元法によるAINの合成に おける反応促進法の検討	日本金属学会 第104回講演大会	1989.4.5
平 井 伸 治 岩 田 治 也 三 輪 山 博	N <sub>2</sub> 雰囲気中炭素熱還元法によるAINの合成に おける各種添加物の効果	日本金属学会 北海道支部春期講演 会	1989.6.15

平 井 仲 治 明 史 吉 博 工 藤 英 浩 隆 鎌 田 山	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 合成のほう酸塩添加による反応促進効果	日本金属学会 第105回講演大会	1989.9.30
平 井 伸 治 博 片 山	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -N <sub>2</sub> 雰囲気中炭素熱還元によるAlNの生成機構	日本金属学会 第105回講演大会	1989.9.30
平 井 仲 治 昭 博 土 屋 美 智	TiO <sub>2</sub> -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 混合物のMg熱還元によるTiB <sub>2</sub> の生成反応	日本金属学会 北海道支部秋期講演会	1989.11.17
齊 藤 琢 磨 小 野 時 桃 野 山 井 (栗本鉄工) 片 尾 (栗本鉄工) 松	片状黒鉛鑄鉄と鑄鋼の拡散接合	日本鑄物協会 第115回全国講演大会	1989.5.8
桃 野 正	チタン／鉄鋼複合材料における接合界面反応の制御と強度特性	溶接学会 第16回界面接合研究委員会	1989.5.12 資料 No. 1 J - 16-6-89
馬 場 寛 桃 野 井 伸 平 山	Ti-6Al-4V合金と鋼の拡散接合	日本鉄鋼協会・日本 金属学会両北海道支 部合同春季講演大会	1989.6.16
Tadashi MOMONO Toshio ENJO (Osaka Univ.) Kenji IKEUCHI (Osaka Univ.)	Effects of Carbon Content on the Diffusion Bonding of Iron and Steel to Titanium	国際溶接会議(IIW) 第42回年次大会 (Helsinki)	1989.9.6 I I W D O C, No. I X-1560- 89
桃 野 正 修 博 小 林 山 井 (栗本鉄工) 片 尾 (栗本鉄工) 松	鑄鉄の大気拡散接合性に及ぼすC, Siの影響	日本鑄物協会 第116回全国講演大会	1989.10.7
桃 野 正	最近の表面改質と複合化技術	日本鑄物協会 第116回全国講演大会・シンポジウム	1989.10.8
桃 野 正 馬 場 伸 寬 治 博 平 山	鋼とTi-6Al-4V合金の拡散接合	日本鉄鋼協会 第118回秋季講演大会 材料とプロセス	1989.9.30 2, (5)1337, (1989)
桃 野 正 井 川 克 (石巻専修大学 理工学部)	鑄塊のひけ欠陥に及ぼす結晶組織形態の影響	鑄物	61, (12) 895-900, (1989)
桃 野 正 井 川 克 (石巻専修大学 理工学部)	鑄塊のひけ欠陥に及ぼす結晶組織形態の影響	日本學術振興会 製鋼第19委員会 凝固現象協議会, 第68回資料	1990.131 資料No.19 委-11090, 凝固-480
後 藤 龍 彦 藤 井 義 干 藤 藤 浩 佐 明 城 昭	石炭に対する地圧とガス圧の相互作用に関する実験的研究	資源・素材学会平成 元年度春季全国大会	1989.4 9-10

藤後佐	井藤義龍	明彦城	コア破断法による次元地山応力測定に関する数値的考察	資源・素材学会平成元年度春季全国大会	1989.4 p.267-268
神藤後佐	山井藤義龍	淳明彦城	ロゼットジャッキによる保安炭柱の地圧変化計測	開発技術研究会	1989.9
佐後藤佐	藤藤浩龍	昭彦明城	封圧下における石炭の間隙ガス圧試験	資源・素材学会北海道支部 平成元年度春季大会	1989.6
江藤後佐	口井藤義龍	幸明彦城	長壁式採炭切羽における山はねの室内シミュレーション	資源・素材学会北海道支部 平成元年度春季大会	1989.6
後佐藤石	藤藤龍干	彦城明二	炭層ボーリングの穿孔挙動に関する室内試験	資源・素材学会誌	Vol.105, No.8, 609-614 1989
後藤	藤龍	彦	ガス圧を考慮した石炭の三軸試験	ガス突出・山はね防止対策研究委員会	1989.8
神藤後佐	山井藤義龍	淳明彦城	古洞が地圧変化におよぼす影響について	北海道応用地学合同研究会	1990.2
後藤佐	藤藤龍干	彦明城	引立面付近の炭層状況と破壊に関する2、3の考察	北海道応用地学合同研究会論文集	No.1, 94-100, 1990
三奈向大	沢井良田西	俊平久二三 (日鋼)	一方向凝固LaNi <sub>5</sub> -Ni水素吸蔵合金の $\alpha$ および $\alpha + \beta$ 域における水素化触媒特性	日本金属学会 第104回春期大会	1989.4.6
澤奥泉三	井野(新嘉新) 沢博俊	巖雄之平 (新日鉄)	鋼板の接着剪断強度に及ぼす硬化条件および湿潤環境の影響 (高炭素鋼の接合法の研究-3)	日本鉄鋼協会 第117回春季講演大会	1989.4.5
澤奥鈴三	井野(新嘉新) 木沢俊賢	巖雄之平 (新日鉄)	高炭素鋼の引張接着強度に及ぼす接着剤硬化条件の影響	鉄と鋼	75, No.5, pp.806-811 (1989)
澤奥三	井野(新嘉新) 沢俊平	巖雄之平 (新日鉄)	高炭素鋼のはく離接着強度に及ぼす接着剤硬化条件および試験温度の影響	鉄と鋼	75, No.5, pp.812-816 (1989)
泉金三菅澤	谷沢博俊	之茂平夫 (新日鉄)	高炭素鋼の引張、せん断、剝離接着強度に及ぼす硬化条件および試験温度の影響	日本金属学会・ 日本鉄鋼協会 北海道支部合同春季講演大会	1989.6.16

内澤 田 尚 志 奥 井 野 嘉 巖 三 沢 俊 平 (新日鉄)	残留オーステナイトを含む鋼板の機械的性質 の温度依存性	日本鉄鋼協会 第118回秋季講演大 会	1989.9.29
澤 井 嘉 巖 奥 野 嘉 巖 泉 三 沢 俊 平 (新日鉄)	鋼板の引張、せん断、はく離接着強度の相関 と接着剤の力学的特性 (高炭素鋼の接合法の研究-4)	日本鉄鋼協会 第118回秋季講演大 会	1989.9.29
三永 沢 俊 平 濱 口 坂 正 由 一 石 坂 淳 二 (日鋼)	小型パンチ試験による鉄鋼の極低温破壊靱性 評価	日本鉄鋼協会 第118回秋季講演大 会	1989.9.30
三永 沢 俊 平 濱 口 坂 正 由 一 石 坂 淳 二 (日鋼)	小型パンチ試験法による靱性鋼の極限環境下 の破壊靱性推定	日本金属学会 第105回秋期大会	1989.9.30
三濱 沢 俊 平 口 由 和	第一壁構造材料の強度特性評価のための小型 パンチ試験	プラズマ・核融合学 会 第6回秋季講演 会	1989.10.3
相向 馬 岳 三大 井 田 健 一 天 沢 俊 平 西 敬 三 (日鋼)	一方凝固LaNi <sub>5</sub> -Ni水素吸蔵合金の水素化 触媒特性と組織の関係	日本金属学会・日本 鉄鋼協会両同北海道 支部合同秋季講演大 会	1989.11.17
三 沢 俊 平	公開講座ライフサポートテクノロジー —さびとの戦い—	室蘭工大公開講座	1989.10.27
T. Misawa S. Nagata N. Aoki J. Ishizaka Y. Hamaguchi	Fracture Toughness Evaluation of Fusion Reactor Structural Steels at Low Tempera- tures by Small Punch Tests	Journal of Nuclear Materials	169, No.12 pp.225-232 (1989)
T. Misawa K. Suzuki M. Saito Y. Hamaguchi	Determination of a Minimum Quantity of Irradiated Ferritic Steel Specimens for Small Punch DBTT Testing	Fourth Int. Conf. on Fusion Reactor Materials	1989.12.6
T. Misawa T. Ohtsuka M. Seo M. Saito	Comparison of Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Austenitic and Ferritic Stainless Steels in Small Punch Testing	ibid.	1989.12.6
M. Suzuki (原研) T. Misawa et al.	Evaluation of Toughness Degradation by Small Punch Tests for Neutron Irradiated 2- 1 / 4Cr - 1Mo Steel	ibid.	1989.12.6
三 沢 俊 平	公開講座「海と人間」 —材料の腐食—	室蘭工大公開講座	1990.3.13
<b>応用化学科</b>			
Y. Uemichi T. Sakai T. Kanazuka	Dehydrogenation of Cyclohexanol to Cyc- lohexanone on Supported Nickel Catalysts	Chem. Lett.	1989, (5) ,777-780
Y. Uemichi Y. Makino T. Kanazuka	Degradation of Polypropylene to Aromatic Hydrocarbons over Pt - and Fe - containing Activated Carbon Catalysts	J. Anal. Appl. Pyrolysis	16, (3), 229-238 (1989)

上中 高杉 金	道川 橋岡 塚	芳 宏正 高	夫 功成 敏次	活性炭触媒によるヘキサンの脱水素環化および1-ブテンの異性化反応におけるアルカリ金属の活性促進効果	日本化学会誌	1989, (11), 1960-1962
上 大篠 金	道 野崎 塚	芳 俊健 高	夫 一介 次	ポリ塩化ビニルの接触脱塩化水素反応	日本化学会第58春季 年会	1989.4.2
上 境 金	道 塚	芳 武高	夫 志次	担持ニッケル触媒によるシクロヘキサノールのシクロヘキサノンへの脱水素反応	日本化学会北海道支 部1989夏季研究発表 会	1989.7.21
上 境 東 金	道 林 塚	芳 武高	夫 志潔 次	活性炭担持ニッケル触媒によるシクロヘキサノールの脱水素反応	第19回石油化学討論 会	1989.11.8
上 田 金	道 熊 塚	芳 一高	夫 彦次	ポリ塩化ビニルの脱塩化水素反応 - BiCl <sub>3</sub> , FeCl <sub>3</sub> , ZnCl <sub>2</sub> の触媒作用	1989年度高分子の崩 壊と安定化討論会	1989.11.30
高 武 竹	野 田 野	信 新	弘 一昇	パン酵母を利用するNAD <sup>+</sup> の電解還元反応	日本化学会 第58春季年会 (京都)	2 I I G 28 1989.4
高 吉 武 竹	野 田 野	信 隆新	弘 光一 昇	N-置換-3-カルバモイル-1, 4-ジヒドロキノリン類の電解酸化反応	日本化学会 第58春季年会 (京都)	3 I I I E 30 1989.4
高 山 武 竹	野 口 田 野	信 晴新	弘 久一 昇	光学活性ポリピロール膜電極における不斉電解反応	電気化学協会 第56大会 (横浜)	1B24 1989.4
高 佐 武 竹	野 藤 田 野	信 新	弘 剛一 昇	パン酵母を利用するNADHの電解再生反応	第4回生体機能関連 化学シンポジウム (桐生)	A 105 1989.6
高 鈴 武 竹	野 木 田 野	信 康新	弘 正一 昇	光学活性機能をもつ導電性高分子膜電極におけるスルフィド類の不斉酸化反応	日本化学会北海道支 部夏季大会 (室蘭)	2D14 1989.7
高 鈴 武 竹	野 木 田 野	信 康新	弘 正一 昇	導電性高分子を利用するスルフィド類の不斉電解酸化反応	電気化学協会 秋季大会 (東京)	2B08 1989.10
高 佐 武 竹	野 藤 田 野	信 新	弘 剛一 昇	Electrochemical Regeneration of NADH Using Baker's Yeast	環太平洋国際化学会 議 (USA, Honolulu)	8P-541 1989.12
高 吉 武 竹	野 田 野	信 隆新	弘 光一 昇	キノリン型NAD <sup>+</sup> モデル化合物の電解反応	日本化学会北海道支 部冬季大会 (札幌)	2B16 1990.2
高 中 武 竹	野 田 野	信 智新	弘 之一 昇	ピオローゲン置換導電性高分子を利用する電解反応	日本化学会北海道支 部冬季大会 (札幌)	2B17 1990.2

岡村一永 安居光國 竹居隆男 菊池慎太郎	ホタテガイからのメタロチオネイン様蛋白質の分離とその性質	日本農芸化学会北海道支部学術講演会要旨集	1989.10.14 pp.13 (於：帯広畜大)
菊池慎太郎 P. Kolattukudy (オハイオ州大)	抗酸菌の脂肪酸合成酵素の固定化	日本農芸化学会北海道支部学術講演会要旨集	1989.10.14 pp.14 (於：帯広畜大)
菊池慎太郎	アミノ酸分解に対する硝酸還元の影響 (分担執筆)	石本 真編 「嫌気呼吸と硫黄代謝」(北海道大学)	1989 pp.95-99
菊池慎太郎	ホタテガイの金属結合性蛋白質を利用する生物工学的重金属除去技術	「北海道科学研究費による研究報告集」(北海道企画振興部)	1989.11 pp.57-58
菊池慎太郎	結核菌脂肪酸合成酵素遺伝子のクローニング	秋山記念生命科学論文集	1989.6 Vol.2, pp.78-89
Shintaro KIKUCHI	A New Microbial Method for Detection of Marine Toxins	Chonnam National Univ. (Korea, Republic of)	1989.8.1
Shintaro KIKUCHI	Cloning of Mycobacterial Gene and Its Expression in E. coli.	Ohio State University Ohio Biotechnology Center	1989.8.5
Shintaro KIKUCHI Takao TAKEUCHI Mitsukuni YASUI Takeshi KUSAKA (Kawasaki Med. School) P. KOLATTUKUDY (Ohio State Univ.)	A Very Long - Chain Fatty Acid Elongation System in Mycobacterium avium and a Possible Mode of Action of Isoniazid on the System	Agricultural Biological Chemistry	Vol. 53, pp.1689-1698 (1989)
Shintaro KIKUCHI P. KOLATTUKUDY (Ohio State Univ.)	Facets of Barley Genome	Vortrag Pflanzenzucht	Vol. 16, pp.107-124 (1989)
Shintaro KIKUCHI P. KOLATTUKUDY (Ohio State Univ.)	Immobilization of Fatty Acid Synthetase from Mycobacterium smegmatis by Radiation Induced Polymerization	Agricultural Biological Chemistry	Vol. 54, pp.1461-1469 (1990)
佐々木直樹 福田明治	コラーゲン・アパタイト系における結晶の選択配向と骨の力学的性質	第36回コラーゲン研究会	1989.6.16. 17
佐々木直樹 吉川信治 福田明治	ゼラチン・アパタイト系の力学的性質と骨の力学的異方性	第38回高分子討論会	1989.10.2 ~4
佐々木直樹 E. D. T. Atkins (Bristol大)	伸長流場でのDNA分子の挙動	第27回生物物理学会年会	1989.10.6 ~8

佐々木直樹 福嶋明範 松 範男 (札幌大)	骨ハイドロキシ・アパタイトの配向と骨の力学的異方性	日本機械学会 バイオエンジニアリング部門 第5回「計測と力学-生体への応用」研究会	1989.12.2
Naoki Sasaki Yoshio Oono	Small Angle X-Ray Scattering from Frozen Collagen Fiber	Reports on Progress in Polymer Physics in Japan	32,567 (1989)
Naoki Sasaki Mitsuhiko Haraya	Biomneralization Promoted by Gelatin	Reports on Progress in Polymer Physics in Japan	32,569 (1989)
小田嶋信吾 佐々木直樹 福 田明 治	外力によるコラーゲンの構造変化	第25回応用物理学会北海道支部会	1990.1.29
Nayland STANLEYWOOD Eiji OBATA Hiroshi TAKAHASHI Koji ANDO	Liquid Fluidisation Curves	Powder Technology	60,61-70 (1990)
安藤公二 高橋精洋 秋吉亮二 小幡英二	二重管型懸濁気泡塔における気泡上昇速度	化学工学会一関大会 研究発表講演要旨集	1989.7.24
小鉢英二 秋吉亮二 安藤公二	固液系流動層内の粒径分布	化学工学会一関大会 研究発表講演要旨集	1989.7.24
小幡英二 高橋吉洋 秋吉亮二	乱流域の流動化( $\Delta P$ vs $U_f$ )曲線と粒径分布曲線	化学工学会 第22回秋季大会	1989.10.4

**情報処理教育センター**

山田攻 石田純一 野口正一 (東北大)	動的な制御集合をもつ文法について	情報処理学会論文誌	第31巻2号 194-200 (1990)
------------------------------	------------------	-----------	-----------------------------

**地域共同研究開発センター**

Gerardo Ayala Ichirou Sugioka	KNOWLEDGE REPRESENTATION IN A RULE-BASED PROGRAMMING TUTOR:—A Genetic Graph approach—	電子情報通信学会 技術研究報告	1989.4.22 E T 89-15 A I 89-15 p.101-108
杉岡一郎 黒島利一	マイクロ波工学教育用電子ミス図表システム	第14回CAI学会 研究発表大会論文集	1989.8.8 p.215-218
Gerardo Ayala Ichirou Sugioka	SOME CONSIDERATIONS IN THE DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT TUTORING SYSTEM FOR RULE BASED PROGRAMMING	第14回CAI学会 研究発表大会論文集	1989.8.8 p.171-174
伊藤寿勝 黒島利一 杉本 肇	LISP教育用ICAIシステムの開発	第14回CAI学会 研究発表大会論文集	1989.8.8 p.179-182

渡黒杉	部島岡	謙利一	介一郎	SS通信用同期補捉・保持回路の試作	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1989.10.1 p.20
一黒杉	柳島岡	和利一	弘一郎	コヒーレント搬送波方式を用いたSS通信方式によるパソコン間データ通信システムの試作	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1989.10.1 p.21
伊黒杉	藤島岡	寿利一	勝一郎	知識工学的手法を用いた教育システムに関する研究	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1989.10.1 p.340
馬黒杉	場島岡	啓利一	好一郎	多重ウィンドウによるProlog 学習支援システムの構成	電気関係学会北海道支部連合大会講演論文集	1989.10.1 p.341
伊島黒杉	藤本島岡	寿利一	勝肇一郎	LISP教育用ICAIシステムの開発	室蘭工業大学研究報告(理工編)第39号	1989.11 p.17-26
Hiroyoshi	BABA	Toshikazu	KUROSHIMA	The design of logic programming learning system with Prolog	室蘭工業大学研究報告(理工編)第39号	1989.11 p.27-35
Ichiro	SUGIOKA					
杉岡	一郎			マイクロ波工学教育用電子スミス図表システム	CAI学会誌	1990.3 Vol. 7, No.1 p.27-32

# CONTENTS

Science and Engineering

Nov., 1990

Whole No. 40

Statistical Analyses on the Collisions with Roadside Obstacles and Development of Roadside Hazard Model .....	Kazuo Saito, Yuzo Masuya, Kenichi Ishii	1
Thermal Utilization of underground Environments (On Storage of Cold Energy) ..... Masayoshi Kobiyama, Hakaru Saito, Kohki Kishinami, Akinori Yokota, Hirofumi Watanabe		15
The Condensation and Collection of Solar Energy by a Reflection Sheet ..... Masayoshi Kobiyama, Hisao Matumoto, Kohji Tanifuzi, Tukasa Yamamoto, Satoshi Morohashi		35
Relation between Pressure Rise due to Freezing of Water Filled in Circular Tubes and Heat Transfer Conditions on the Surface.....	Hakaru Saito	47
Application of the Transient Hot – Wire Method on Thermal Conductivity Measurement of Solid – Liquid Mixture .....	Ikuo Tokura, Hakaru Saito, Koki Kishinami, Yoshiki Takekawa	63
A Simple Calculation Method of the Force Ratio of a Bolted Joint .....	Minoru Tanaka, Kaoru Hongo	75
Quantitative Evaluation of the Amount of $\alpha$ – Fe Phase in Successive Heat Treatment for Fe <sub>78</sub> B <sub>13</sub> Si <sub>9</sub> .....	Shoichi Nagata, Eiji Fujita, Shuji Ebusu, Satoshi Taniguchi	85
Mechanically Alloying Behavior of Fe – Ti Mixture .....	Shinji Hirai, Masayoshi Ozawa, Tadashi Momono, Hiroshi Katayama	95
Other Achievements Studies for 1989 by Professor in this Institute .....		105

平成2年11月10日 印刷  
平成2年11月10日 発行 (非売品)

編集 室蘭工業大学  
発行

印刷 (株)不二プリント印刷所  
室蘭市輪西町2丁目1番11号  
TEL (代) 44-5301