

ISSN 0910-7851

# 伝熱研究

Journal of The Heat Transfer Society of Japan

1993  
April  
Vol. 32  
No. 125

日本伝熱学会30周年記念特集号II

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

Vol. 1  
No. 2

日 本 伝 熱 学 会  
The Heat Transfer Society of Japan

## 日本伝熱学会第31期（平成4年度）役員

会	長		藤 江 邦 男（新明和工）
副 会	長	（無任所） （事務担当）	伊 藤 猛 宏（九 大） 井 上 晃（東工大）
理	事	工 藤 一 彦（北 大） 望 月 貞 成（東京農工大） 滝 本 昭（金沢大） 加 藤 泰 生（山口大） 小 熊 正 人（石播重工） 池 崎 英 二（新日鐵） 吉 田 駿（九 大）（「伝熱研究」編集委員長） 前 田 昌 信（慶 大）（第30回日本伝熱シンポジウム準備委員長）	山 川 紀 夫（岩手大） 長 野 靖 尚（名工大） 坂 口 忠 司（神戸大） 本 田 博 司（九 大） 高 島 啓 行（住友金属）
監	事	二 階 勳（鹿島建設）	飯 田 嘉 宏（横国大）
評	議 員	窪 田 英 樹（室蘭工大） 菅 原 征 洋（秋田大） 三 浦 隆 利（東北大） 菱 田 公 一（慶 大） 吉 田 英 生（東工大） 山 下 博 史（名 大） 竹 内 正 紀（福井大） 片 岡 勲（京都大） 森 幸 治（阪 大） 鈴 木 洋（広島大）	馬 場 弘（北見工大） 円 山 重 直（東北大） 田 中 忠 良（電総研） 飛 原 英 治（東 大） 西 村 誠（岐阜大） 青 木 和 夫（長岡技科大） 東 恒 雄（大阪市立大） 千 田 衛（同志社大） 稲 葉 英 男（岡山大） 伊 藤 昭 彦（大分大）

---

「Thermal Science and Engineering」

チーフエディター

小 竹 進（東 大）

# 伝 熱 研 究

## 目 次

### 日本伝熱学会30周年記念特集号 II

#### 〈伝熱研究の進展 II〉

環境伝熱—都市の温暖化・大気汚染—	齋藤武雄(東北大)……1
環境調和型エネルギーシステムの構築にむけて	柏木孝夫(東農工大)……9
大気境界層と大気拡散	植田洋匡(九大)……16
生体におけるエネルギー輸送過程	谷下一夫(慶応大)……24
血液循環系における物質移動現象	佐藤正明・片岡則之(東北大)……32
新素材と熱物性	長島 昭(慶応大)……39
原子力工学における伝熱研究の進展	戸田三郎(東北大)……45
宇宙における伝熱	森岡幹雄(IHI)……53
電子機器の熱設計と熱解析	石塚 勝(東芝)……59
電磁ノイズと伝熱	仁田周一(東農工大)……65
化学工業における伝熱	澤崎俊昭・中村和仁・小畑一義(日揮)……72
食品加工における伝熱	高井陸雄(水産大)……79
施設農業と伝熱	高倉 直(東大)……86
空調用アイスオンコイル型氷蓄熱槽のモデル化	相楽典泰(鹿島)……92
製鉄所における伝熱	坂本雄二郎(神戸製鋼)……99

#### 〈片山功藏先生を偲んで〉

片山功藏先生を偲ぶ	斎藤彬夫(東工大)……105
片山功藏先生の思い出	棚澤一郎(東大)……107
片山功藏先生を偲んで	矢部 彰(機械技研)……109
片山功藏先生を偲んで	石塚 勝(東芝)……110

**<地方研究グループ活動報告>**

北海道地方グループ「熱工学セミナー」…………… 工藤一彦(北 大)… 111  
関西研究グループ活動報告…………… 坂口忠司(神 戸 大)… 113

**<お知らせ>**

「財政基盤強化のための募金事業」に対するご協力のお願い(再掲載)

…………… 会長 藤江邦男、実行委員会委員長 棚澤一郎… 119

日本伝熱学会第31期(平成4年度)総会開催案内…………… 125

第30回日本伝熱シンポジウム…………… 129

東北研究グループ企画 講演会のご案内…………… 147

北陸信越グループ講演・見学会の開催案内…………… 148

第10回混相流レクチャーシリーズ「機能性混相流体」…………… 149

第25回乱流シンポジウム論文募集…………… 152

第14回日本熱物性シンポジウム…………… 153

LDA国際フォーラム…………… 154

22nd International Thermal Conductivity Conference…………… 155

第20回国際会議のための準備セミナー…………… 157

事務局からの連絡…………… 159

入会申込み・変更届用紙

# Journal of The Heat Transfer Society of Japan

Vol.32, No.125, April, 1993

## CONTENTS

**Special Issue(Part II): The 30th Anniversary of The Heat Transfer Society of Japan**

### <Progress and Prospects in Heat Transfer Researches. Part II>

Environment Heat Transfer -Urban warning.air pollution-	
..... Takeo Saitoh(Tohoku Univ.) .....	1
Toward the Realization of Enviroment Fricndly Energy Systems	
..... Takao Kashiwagi(Tokyo Univ. of Agri.&Tech.) .....	9
Atmospheric Boundary Layer Diffusion	
..... Hiromasa Ueda(Kyushu Univ.) .....	16
Energy Transport Process in Biological System	
..... Kazuo Tanishita(Keio Univ.) .....	24
Mass Transport Phenomena in Cardiovascular System	
..... Masaaki Sato, Noriyuki Kataoka(Tohoku Univ.) .....	32
Thermophysical Properties for Development of New Materials	
..... Akira Nagashima(Keio Univ.) .....	39
Progress in Heat Transfer Research for Nuclear Engineering	
-Abvanced High Heat Flux Removal Technology for Fusion Power Reactors-	
..... Saburo Toda(Tohoku Univ.) .....	45
Heat Transfer in Space Technology	
..... Mikio Morioka(IHI) .....	53
Application of the Thermal Analysis to the Thermal Design of Elecfronic Equipment	
..... Masaru Ishizuka(Toshiba RDC) .....	59
Electromagnetic Noise and Heat Transfer	
..... Shuichi Nitta(Tokyo Univ. of Agri.&Tec.) .....	65
Heat Transfer in Chemical Industry	
..... Toshiaki Sawasaki, Kazuhito Nakamura, Kazuyoshi Obata(JGC) .....	72
Heat Transfer in Food Processing	
..... Rikuo Takai(Tokyo Univ. of Fisheries) .....	79
Protected Cultivation and Heat Transfer	
..... Tadashi Takakura(Univ. of Tokyo) .....	86
Modeling of an Ice-on-coil Type Ice Bank for Air-conditioning	
..... Noriyasu Sagara(Kashima Ltd.) .....	92
Heat Transfer Issues in Steel Making Plants	
..... Yujiro Sakamoto(Kobe Steel Ltd.) .....	99

**<In Memory of Prof. Kozo Katayama>**

In Memory of Professor Kozo Katayama	.....	Akio Saitoh(Tokyo Inst. of Tech.)	.....	105
In Memoriam - Professor Kozo Katayama	.....	Ichiro Tanasawa(Univ. of Tokyo)	.....	107
To the memory of Prof. Kozo Katayama	.....	Akira Yabe(MEL. AIST)	.....	109
In Memory of Professor Kozo Katayama		Masaru Ishizuka(Toshiba RDC)	.....	110

**<Reports of the Local Group Activities>** ..... 111

**<Announcements>** ..... 119

# 環境伝熱 —都市の温暖化・大気汚染—

齋藤 武雄 (東北大学工学部)

## 1 まえがき

これまでの伝熱あるいは伝熱学は、対象とする現象のスケールが実験室規模と小さいのが通例であったが、超高層ビルや橋梁、航空機など設計の対象が巨大化するに及び、そのスケールも桁違いに大きくなりつつある。

また、近年急速にその重要性が増した地球温暖化や都市温暖化の”現象”では、そのスケールが40 km から40,000 km に及ぶ。まさにグローバルスケールとなる。

このようなラージスケールの問題では、現象そのもののモデリングは勿論、乱流モデルでさえ、不明確な点が多く、スモールスケールの理論を単純に外挿するだけでは、妥当な結果がえられない。

本稿では、筆者が長年研究を行ってきた都市温暖化の問題を中心に、伝熱学的見地からのモデリングと数値解析上の問題点について述べる。

## 2 都市温暖化

まず、最初に都市温暖化 (Urban warming or Heat island) が発生するに至った原因・経緯などについて紹介しておく。

### 2.1 過密化する都市

近年、東京への一極集中がかまびすしく論議されている。

新幹線が開通すると、かえってその”ストローク効果”により東京への「人」「物」「金」「情報」などの流れが加速されるといわれている。<sup>(1)</sup> なぜ、都市への人口が流入し都市が形成されるかという理由への答えは、すでにムスリムの哲学者フェーラービ (870-950年頃) が、「人間が一人だけでは完全に到することができず協力集団としての人間社会の構成が必要となり、最高善とか真の幸福の求めることができる最小の単位が都市である」<sup>(2)</sup> といっているように社会としての利便性・効率性であろう。しかし、近年のように、あまり過度に一極集中化が起こった結果、もはや快適性・居住性および自然環境との共生などの点で人間そのものの存立の基盤が脅かされている。たとえば、人口密度などの8項目について東京と全国を比較(全国比)したのが表1である。とくに、人口密度は40倍、エネルギー消費量は22倍、車の保有率は46倍と桁違いに高いのが目につく。以上、東京に「人」「物」「金」「情報」などが過度に集中し、極端に都市化が進行してきたことを述べたが、ここでは、とくに利便性や効率性以外のマイナスの事象が顕在化してきた点に注意を喚起したい。もちろん、土地の高騰や物価の上昇などの側面も見逃せないが、これらは、いずれは、制御効果が働くとみられるが(バブル崩壊ですでに鎮静化しつつある)、これから述べるもう1つの側面は、致命的事態に立ち到る可能性を秘めている。その1つが、エネルギーの集中的消費や超高層ビルなどによる高密度化による都市の温暖化(ヒートアイランド)である。東京23区のエネルギー消費密度は、すでに平均で40W/m<sup>2</sup>のオーダーに達しており、局所的には、120W/m<sup>2</sup>を越えるところさえある状態である。1平方メートル毎に40Wの電球を1個灯けるのと同じエネルギーを常時消費していることになり、まさに現代の都市は「人上太陽」である。危機的であると懸念されるのは、今の東京の温暖化の状態ではなく、近い将来、たとえば40年後の2030年頃の東京の温暖化である。すなわち、エネルギー消費の伸びは、留まるところを知らず、現在でも年率4%台で延びており、このままで行けば、40年後には7倍近くに達する。問題はビルの高層化およびインテリジェント化によるエネルギー消費の増大だけではなく、ビルの高層化によるビル自身の太陽日射の蓄熱効果である。後に示すように、我々の計算では、蓄熱効果だけで、エネルギー消費に相当するという結果がでている。さら

に、地表面改変による緑の減少などがこれに重畳されるから、たとえば、2031年の東京の夏の夕方6時の都心の気温は、我々のごく最近の、スーパーコンピュータによるシミュレーションによると、43℃を越えることがありうることを示している。この事は、いかに都市が人間活動に弱いかを加害に物語るものである。

## 2.2 温暖化がすすむ東京

東京23区の面積は約6万ヘクタールで、仙台市の面積より2割も少ないにも拘らず、人口は仙台市の約10倍の900万人である。また車の台数も約460万台と、まさに超過密都市である。

### 2.2.1 人工エネルギー消費密度分布

筆者らの調査によると、過去20年間の東京都の気温上昇率は、5.6℃/世紀であり<sup>(3)(4)</sup>、この都市温暖化のスピードは、地球温暖化のスピードの約10倍である。都市温暖化の大きな原因には、大都市への機能の集中に伴う電気、ガス、ガソリンなどの莫大なエネルギー消費が直接関与しており、これらエネルギー消費の実態を明らかにすることは、現状を把握するとともに未来予測をする上で重要なことである。そこで筆者らは、東京23区について都市ガス、電力、ガソリン、石油類、および人体からの発熱などの人工熱消費量を調査し、現在の夏期における人工熱消費密度分布図を作成した。その結果、人工熱の消費量は、大手町付近が最も多く、その量は東京の冬の平均日射量の約120%以上とかなり大きい。すでに東京は、人工太陽と呼ぶに値するほどエネルギーを消費している。

### 2.2.2 都心と郊外の温度差は8℃-（東京のヒートアイランドの自動車による移動観測）-

図1に1992年3月14日の早朝(3:00~6:00a.m.)に筆者の研究室で行った移動観測の結果を示す<sup>(5)</sup>。観測車3台を用いて東京都内および近郊の温度分布を詳細に測定した。この日は昼夜ともに快晴であった。この結果から東京のヒートアイランドをかなりはっきりと認めることができる。特に大手町、新宿および品川では、12.5℃と高温であるのに比べ、国分寺および浦和では6℃、八王子では4.5℃と低い。都市部と郊外の気温差をヒートアイランド強さというが、今年3月の観測では、これが8.0℃にも達している。すなわち現在の東京は、都心の温度は周りより8℃も高くなっているのである。これを、16年前の同じ時期の観測結果と比較すると、都心と郊外の温度差は2倍に増えていることがわかる。このように、僅か16年の間に、都市の温暖化がかなり顕著に進行したことがわかる。先に述べたように将来の人工熱の消費の延びや、都市構造物の蓄熱効果により、将来、大都市の気候はさらに人間生活に不快なものとなることが予測される。

## 3 都市温暖化のモデリングと3次元シミュレーション

都市における熱対流は、都市でのエネルギー消費や地表面の性状および地形に大きく依存する。地表面付近の空気が暖められるという点では、伝熱モデルとしては、加熱平板上のサーマルブルームとよく似ている。しかし、実際のヒートアイランドでは、代表長さが30~150kmに及ぶため、その乱流構造は、通常の実験室規模の平板上の構造と大きく異なったものとなる。たとえば、 $k-\epsilon$  2方程式乱流モデルを単純に、この問題に適用しても、結果は実測値と合わない。また、パラメータ値も大きく変える必要がある。

### 3.1 疑似ヒートアイランド-安定温度成層中の加熱細線周りの自然対流-

ヒートアイランドの鉛直気温分布は、上空においては一定の気温減率で低下し、地表面近くで放射冷却による冷却が生じるため、接地逆転層が形成される。その高さは、たとえば、東京では約300~400mである。その接地境界層の内部では、上に行くほど、温度が上昇する、いわゆる安定温度成層が形成される。ヒートアイランドの上昇対流は、主にこの安定温度成層でおこる。従って、このメカニズムが、ヒートアイランドのサーマルブルームの構造を支配することになる。

ここで面白い実験を紹介しよう。

図2に、Noto<sup>(6)</sup>による安定温度成層中加熱細線周りの自然対流実験の写真を示す。細線は写真中央の気流の柱の真下におかれている。この実験から、細線により加熱されたブルームは、まっすぐに上昇するが、すぐ伝熱研究 Vol. 32, No. 125

ここに、 $Q_a$  は大気からの放射、 $Q_e$  は地表面からの赤外放射、 $HG$  は人工熱消費、 $S$  は土壌への熱伝導、 $H$  は大気と地表面との乱流熱交換を表す。なお、本解析では日射と潜熱輸送は無視した。

### 3.3 計算条件および数値解析手法

3次元シミュレーションは、東京を対象とし、夏期夕方と冬期深夜について行った。図3に計算領域、図4にメッシュ分割を示す。地表面温度分布は各タイムステップ毎に上空の大気状態、および人工熱量から決定しており、その非定常的な変化を考慮している。人工熱消費量は筆者らが調査した人工熱密度分布図に基づいて各メッシュ毎に与えた<sup>(7)</sup>。また一般風は無視した。水平方向のメッシュ分割において海岸線や、都市形状を自由に表現するため、重心に代表点を置く多角形要素法を用いて解析を行った<sup>(8)</sup>。

### 3.4 計算結果

図5に地表面温度分布、図6に $z=120$  mにおける水平温度分布、図7に $z=120$  mにおける水平速度ベクトル線図、図8に $x=21.9$  kmにおける鉛直断面速度ベクトル線図を示す。また図9に鉛直温度分布を示す。図5より大手町付近では30.5 Kと郊外より8℃も温度が高いことがわかる。図6、図7より上空120 mにおいても温度差約4℃のヒートアイランドが形成されており、都心部の高温域に周りから強い風が流れ込んできているのが分かる。また図9より都心部では対流不安定により上空約1 km位まで混合層が形成され、図8にみられるようにそこでの流れは、かなり乱れていることが分かる。図9より上空1 kmにおいてクロスオーバー現象が再現されている。また図10より郊外においては夜間の放射冷却現象により接地逆転層が形成されている。

## 4 2031年の東京

東京では、もはや人口は飽和状態にあると推測され、近年では減少の傾向がみられる。東京においては、人口の増減が人工エネルギー消費量に及ぼす影響は小さいと思われる。そこで、注目すべき点は、建物の床面積の伸び率と電気、ガスの消費量の伸び率が非常に似ている点である。このことから、東京では建物の床面積が増加することによって人工エネルギー消費量も増大していると思われ、将来的にもこの傾向で人工エネルギー消費量がさらに増大していくと推測される。そこで次のふたつのシナリオを想定し将来の東京の人工エネルギー消費の動向を予測した。シナリオAとして、建物の延べ床面積が現在のペースで増大し、それに伴って人工エネルギー消費量が増え、それにより温暖化が進み、さらに冷房負荷が大きくなる。それによって、また温暖化が進むといった具合に悪循環が起り人工エネルギー消費量が増えていくとした場合を考える。シナリオBとして現在のペースで床面積が増加していけば、おそらく将来的には一人あたりのスペースが十分に満たされるために床面積の増加率は減少すると考えられ、それを考慮した場合を考えた。その結果が図11である。シナリオA、Bともに2031年に人工熱消費量は現在の5倍になるという結果がでた。しかしながら、2060年にはシナリオAでは、現在の40倍にも達しているのに対し、シナリオBでは、現在の20倍程度になるという結果がでた。

### 4.1 スーパーコンピュータによる予測シミュレーション

これまでみてきたように、将来の東京のエネルギー消費は増大し、また、建物の高層化、インテリジェント化により、さらに、蓄熱効果などの付随的要因も重なり、都市大気へのエネルギー放出は、指数関数的上昇を招くことがわかった。

確かに、過去においても都市温暖化の影響は顕われている。たとえば、尾島の調査によると、東京都の夏期において夕涼みに適した日が50年前の半分以下になっている<sup>(9)</sup>。このように大都市においては、たとえば熱帯夜などに象徴されるように夏期の日没後の不快な気温の上昇が問題となっている。これらの原因にはやは

頭打ちとなり、その位置から水平方向に広がって両側に渦を形成する。これは、温度成層が生じているため上昇の浮力が減ずるためであると考えられる。

すなわち、これが実際の都市のヒートアイランドブルームに対応するものと考えてよい。

### 3.2 3次元シミュレーション

筆者らは、ヒートアイランドの3次元数値シミュレーションを長い間（およそ18年間）行ってきたが、数々の試行錯誤を重ねたのち、現在では、前述の安定成層中の自然対流熱伝達モデルに立脚して理論を構築している。用いている主な仮定は、(1) Boussinesq 近似が成立する、(2) ふく射の影響はない、(3) 静力学平衡の近似は使わず鉛直方向の運動方程式を解く、などである。

さらに、数値計算の安定性を増すため、速度-渦度ベクトルポテンシャル法を採用している。

基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \omega - (\omega \cdot \nabla) \mathbf{v} = [(\nabla K) \cdot \nabla + K \nabla^2] \omega + \left\{ -Bo \frac{\partial \theta}{\partial y}, Bo \frac{\partial \theta}{\partial x}, 0 \right\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \theta = [(\nabla K) \cdot \nabla + K \nabla^2] \theta \quad (2)$$

$$\nabla^2 \Gamma = -\omega \quad (3)$$

$$\mathbf{v} = \nabla \times \Gamma \quad (4)$$

ここに、 $\omega$ 、 $\Gamma$ 、および  $\mathbf{v}$  は、渦度ベクトル、ベクトルポテンシャル、および速度ベクトルで次式で定義する。

$$\omega = (\xi, \eta, \zeta), \quad \Gamma = (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z), \quad \mathbf{v} = (u, v, w). \quad (5)$$

オペレータ  $\nabla$ 、 $\nabla \cdot$ 、および  $\nabla^2$  は、次のように定義する。

$$\nabla = \nabla - \frac{\partial}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{k}, \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (6)$$

温位  $\theta$  と温度  $T$  の関係は、次式で与える。

$$\theta = \frac{T}{\pi}. \quad (7)$$

なお、上式はすでに次のように無次元化されている。

$$t^+ = \frac{a}{H^2} t, \quad (x^+, y^+, z^+) = \frac{1}{H} (x, y, z), \quad (\xi^+, \eta^+, \zeta^+) = \frac{H^2}{a} (\xi, \eta, \zeta),$$

$$(\Gamma_x^+, \Gamma_y^+, \Gamma_z^+) = \frac{1}{a} (\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z), \quad (u^+, v^+, w^+) = \frac{H}{a} (u, v, w), \quad \theta^+ = \frac{\theta_h - \theta}{\theta_h - \theta_c}.$$

上式に対する境界条件は次のようになる。

$$x = 0, L : \xi = 0, \quad \eta = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \zeta = -\frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0.$$

$$y = 0, L : \xi = -\frac{\partial v}{\partial z}, \quad \eta = 0, \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0. \quad (8)$$

$$z = 0, L : \xi = -\frac{\partial v}{\partial z}, \quad \eta = \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \zeta = 0$$

$$\theta = \text{transient} \quad (z = 0) \quad \theta = \text{const.} \quad (z = L)$$

本解析では、地表面における次の動的なバランスの式を解いている。

$$\rho_s C_s h_s \frac{\partial T}{\partial t} = Q_a + Q_e + \mathcal{H}G + S + \mathcal{H} \quad (9)$$

り人工エネルギーの消費が関与しており、人工エネルギー消費量の増大が予測される将来、大都市の気候はさらに人間生活に不快なものとなることが予測される。

そこで、筆者らは、人工エネルギー放出量（石油、電気などのエネルギーと建物の蓄熱効果を含む）が、現在の約5倍となる2031年の気温分布をスーパーコンピュータにより予測した。

都市大気境界層の3次元モデリングは、まだ完全ではないが、少なくとも、エネルギー密度や建物密度などの調査結果の精度のレベルでの正確さの範囲で予測結果は正しいものと考えられる。

まず、図12には、現在の東京の夏期（7月31日）夕刻6時の気温分布を示す。このシミュレーション結果では、最も気温の高い所は大手町付近で約32℃である。次に、人工エネルギー放出が5倍となる2031年の予測結果を図13に示す。この図から、大手町付近では、夏の夕方6時の気温は43℃を越えると予測されており、都市の気温がエネルギー消費の増大に極めて敏感に反応することがわかる。この43℃気温というのは、東京の場合は湿度も高いため、人間の忍耐の限度をはるかに越えている。

これらのスーパーコンピュータ予測が教えることは、まず、エネルギー消費を抑制することであり、次に、ビルなどの建造物や表面構成物の蓄熱量を小さくすることである。

## 5 海陸風

中規模の大気運動の例として海陸風を取り上げる。ここでは、荒川・手塚<sup>(10)</sup>の数値解析結果を紹介する。

仮定としては、(i) Boussinesq近似を採用し、(ii) 2次元とする。なお、この解析では静力学平衡の仮定はしていない。計算領域を図14に示す。2次方程式乱流モデルを用いた計算結果を図15、および図16に示す。計算格子は(327×42)である。また、陸地の温度は時間の正弦関数として与えている。

温度が上昇する陸上に不安定な温度成層に起因するベナールのセルが発生している。

海陸風のモデルは、ヒートアイランドに比べ、単純ではあるとはいえ、正確なシミュレーションには、乱流モデルの改善や3次元数値解析手法の工夫など、まだかなりの研究努力が必要とされる。

## 6 おわりに

本稿では、ヒートアイランド（都市温暖化）を中心に、都市スケールの伝熱と対流の現象に対する3次元シミュレーションの方法とそれによって明らかにされる現在と未来の都市の姿を示した。

18年間も、この研究を行ってきかたに1つの事象を明らかにすることが難しいかを思い知らされた感がある。現象のモデリングには、やはり、現象そのものの原点に立ち還って、基礎的メカニズムを調べあげることが大切である。また、ハードとしての計算機の性能の進歩を待つだけでは不十分で、非定常現象に対する数値解法そのものを抜本的に見直す努力が必要である。その極めてよい例が、最近、筆者の研究室で3次元問題用に開発したタイム・スペース法(Time-Space method)である。特にこの方法は、過去のどんな方法より高速で約100～500倍の高速計算が可能となった。今後、地球温暖化や都市温暖化などの広範な分野を含む計算に利用されることを望みたい。

表 1: 東京の過密度

項目	全国比(倍)
人口密度	40
エネルギー消費密度(単位面積あたり)	22
車の保有台数(単位面積あたり)	40
乗客数	3
都民総生産(1人あたり)	2
発信情報量(1人あたり)	2.3
商店販売額(1人あたり)	3
銀行預金残高(1人あたり)	3.6

データは、東京都地球環境保全計画(1992)などによる

## 参考文献

- (1) 河野稠果、世界の人口、東大出版会 (1986).
- (2) 池田修、学術日報、45-1 (1992)、p.35.
- (3) 齋藤武雄、地球温暖化の現状、機誌、94-869.
- (4) 齋藤武雄、地球と都市の温暖化、森北出版、(1992).
- (5) 星秀俊、東北大学卒業論文、(1992,3).
- (6) Noto, K. and Okamoto, H., "Thermal Plume from a Heat Source in Thermally Stable Stratified Air : Fundamental Characteristics of Heat Island Phenomenon", Urban Climate, Planning and Building, Elsevier Sequoia, vol.1 (1991), pp. 183-190.
- (7) 齋藤武雄、スーパーコンピューティングジャパン 92 (1992).
- (8) 齋藤武雄、数値伝熱学、養賢堂 (1986), pp. 126-146.
- (9) 尾島敏雄、東京大改造、筑摩書房 (1986).
- (10) 荒川、手塚、日本機械学会「都市温暖化とアーバンエネルギーシステム調査研究分科会」資料 (1993,2).

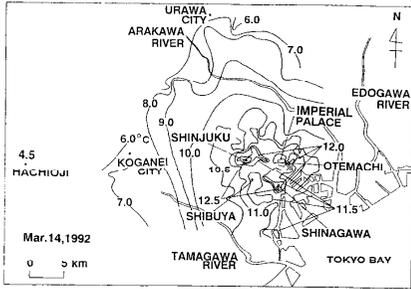


図1 観測結果

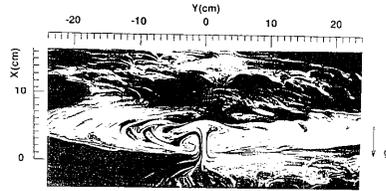


図2 安定温度成層場中の加熱細線周りの対流実験の例 (Noto による)

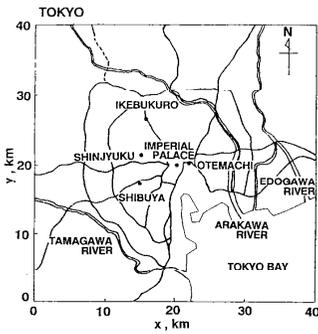


図3 計算領域

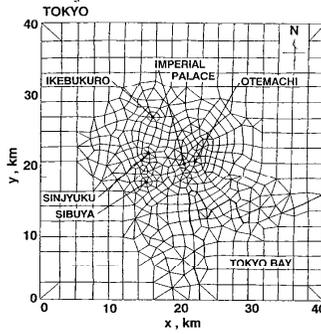


図4 計算領域とメッシュ分割

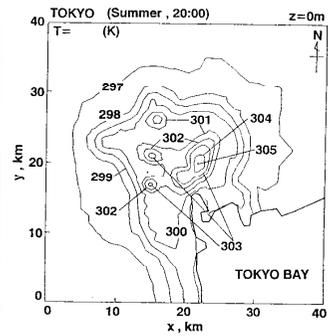


図5 地表面温度分布図 (夏期 20:00)

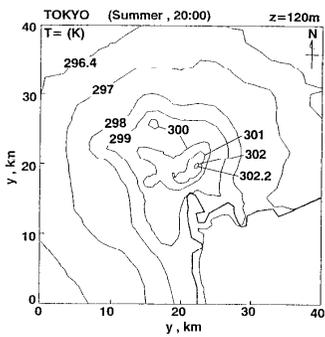


図6  $z=120\text{m}$  における等温線図 (夏期 20:00)

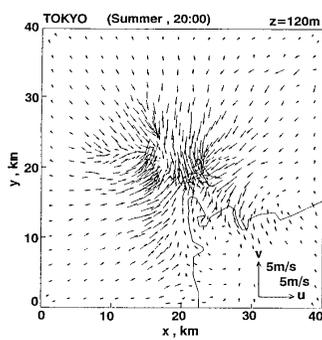


図7  $z=120\text{m}$  における水平速度ベクトル線図 (夏期 20:00)

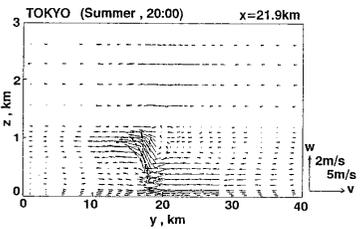


図8  $x=21.9\text{m}$  における鉛直速度ベクトル線図 (夏期 20:00)

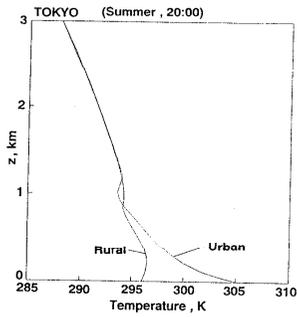


図9 鉛直温度プロファイル  
(夏期 20:00)

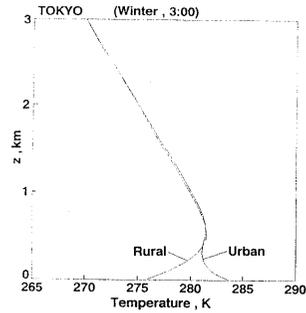


図10 鉛直温度プロファイル  
(冬期 3:00)

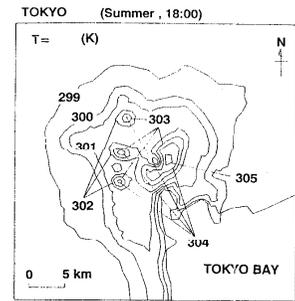


図12 現在の東京都の地表面温度分布  
(7月、午後6時)

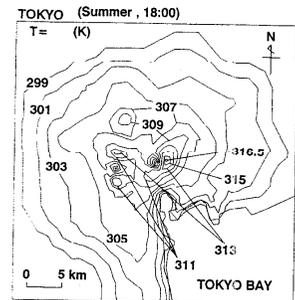


図13 人工熱消費量が現在の5倍になった場合の東京の地表面温度分布

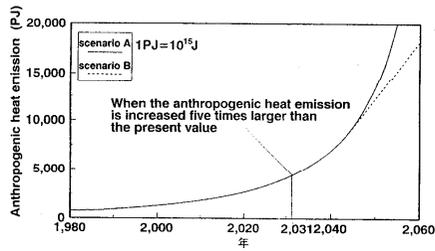


図11 東京都における人工エネルギー  
放出量の未来予測

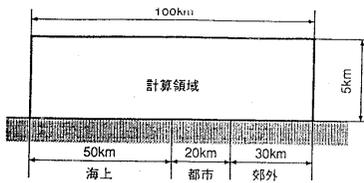


図14 計算領域

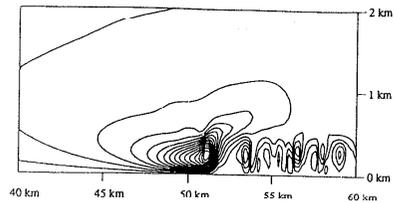


図15 流線

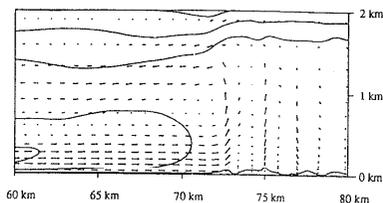


図16 速度ベクトルと等温位線

## 環境調和型エネルギーシステムの構築にむけて

柏木孝夫（東京農工大学）

エネルギーに対する視点は時代の歩みとともに変化してきた。石油危機以降の1970年代後半はセキュリティが重視され、このセキュリティを確保するための方策として省エネルギーが推進され、多大な成果をあげた。最近ではアメニティ志向の高揚に伴い、特に民生部門でのエネルギー消費が増大する傾向にある。

このような時代における省エネルギーはライフスタイルや社会ニーズに適合した運動へと変換しなければならないと考えられていた。そうした矢先に、温室効果ガスによる地球温暖化問題の国際的な討議が異例の速度で展開し、これからのエネルギーシステムはエコエネルギー的概念が必須条件となってきた。これら国際的諸情勢を踏まえると、今まさにわが国ではこれからのエネルギーシステムや合理的なエネルギー利用状況について原点から再考する必要性がでてきた。この原点とは、わが国におけるエネルギー消費ミナムを達成することにあるが、これまでのようにエネルギーコストを最小にするという単純な問題ではなく自然環境や地球環境への影響を考慮に入れなければならないことに加え環境コストの見積りなどこれまででない困難な課題が含まれている。そのためには、エネルギー供給、需要の両側面から合理的なエネルギーの利用体制や社会構造を再編成する必要がある。

### 1. 我国のエネルギー需給構造の改革

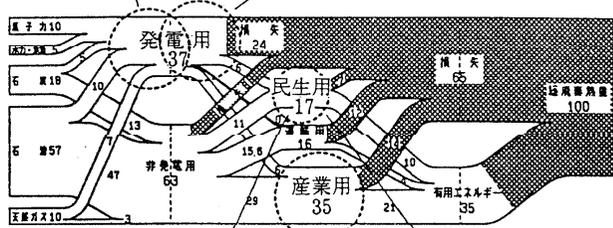
まず、我国の一次エネルギーの利用構造（総消費量は原油換算約5.0億K $\ell$ ）を見てみたい。図1の中心部の図は現在、日本のエネルギーフローとして整理されたものであり「発電用」37%、熱利用を主とする「非発電用」に63%が用いられている。ここで注目すべきことはこれらの内2/3は損失（排熱）となって大気中へ捨てられていることがあり、この有効に使われたエネルギー35%と損失（排熱）分65%の比率を1%変えるだけで年間になると原油換算1400万K $\ell$ のエネルギーが節約されることになる。

このことは、最終消費として必要となる電気・熱等の二次エネルギーを得るために、電気は大規模火力発電所、熱はボイラーというように別々に一次エネルギー投入がなされている現在のエネルギーシステムを反映した統計的結果であり、換言すれば「発電用」と「非発電用」を並列に置くエネルギー供給構造で整理されていたことに起因する。

総合エネルギー調査会の中間報告でも指摘されたとおり、これからは総合的かつ合理的なエネルギー利用対策の一環として「エネルギーの供給段階から最終消費段階に至るエネルギーシステム全体、さらには、社会システムにまで、その対象を拡げたエネルギー利用効率の向上に

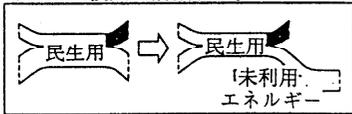
(イ) 高効率廃棄物発電等施設  
もともと燃焼されているながらエネルギー利用されていない廃棄物処理熱の利用等を促進し、石油・石炭等の消費を削減する。

(イ) 大規模コージェネレーション地域熱供給  
需要地近郊にコージェネレーションシステムを設置することにより発電後の廃熱の利用拡大を図る。



未利用エネルギー活用型地域熱供給施設  
河川水、海水等の温度差エネルギー、地下鉄等の都市排熱といった未利用エネルギーの活用により、新規エネルギー投入を削減する。

(ニ) 発電所、工場等余剰エネルギー供給施設  
産業用として利用不可能な廃熱を民生用として有効利用することにより新規エネルギー投入量を削減する。



(ロ) カスケード利用型工業団地  
熱の多段階利用を促進することにより、工場に投入されるエネルギー総量を削減する。

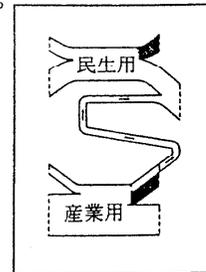
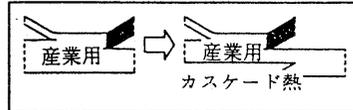


図1 日本のエネルギーフローとその改善法案

係わる対策を強化すること」が不可欠であるとしている。

これらの観点を踏まえると、廃熱その他の余剰エネルギーの最大限の活用を図ることが環境調和型エネルギーシステムの構築に向けて極めて重要となることは言うまでもなく、電気を得るときに発生する熱を最大限活用するとともに、熱利用するときには可能な限りその前に発電するシステムを構成することを積極的に推進しなければならない。また、熱利用だけの場合には高温熱利用から段階的に組み合わせる熱のカスケード利用システムの構築等を促進することも併せて重要となる。

図1には上記の点を勘案し「発電用」と「非発電用」で改善の余地が大きい部分に対し環境調和型の観点から、それらの有効利用の概念を示した。電気と熱のカスケード利用が我国におけるこれからのエネルギーフローの中で極めて大きなインパクトがあることを位置付けている。

## 2. 電力・熱のシステムインテグレーション

ここで、エネルギーのカスケード利用について述べたい。

エネルギーのカスケード利用の概念（エネルギーの質を考慮して小さな滝のように多段利用）は、熱力学的にみて極めて合理性に富んでおり、熱エネルギーを対象にすれば温度レベル順に多段利用すればよい。また、電気・熱の場合にはコージェネレーションとなり、電気エネルギーの場合にはコンバイインドサイクルやリパワリングがこの概念に属する。

この概念に立ち、産民複合型の合理的なエネルギーのカスケード利用システムの一例を電力・熱のシステムインテグレーションを含めて図2に示す。この図には炭酸ガス増大抑制に効果的なLNGの冷熱に対するカスケード利用も含めて示した。図の温度レベル別熱利用工程は単なる一例を示しただけであり、温度レベル幅は需要側の必要熱容量などを考慮にいれて決定しなければならない。このような熱のカスケード利用システムは、超省エネルギーシステムであることに異論はないと確信しているが、ひるがえって現実に戻れば、必ずしも一連の熱プロセスが対象地域内に存在しない場合の方が多い。

ここにコージェネレーションやヒートポンプ、各種蓄エネルギー技術を組み入れない限り、このシステムは効果的に機能しない。周知のように、遠方への熱搬送は極端に困難であるため必然的に自立分散型エネルギーシステムになりがちであるが、今後の電力需要の増大を考え合わせると、このシステムの中で電力融通のメリットがあらためて重要視されてくる。当然図1は、大規模集中型の発電所から送電されてくるベースロードとしての電力体系の上で成り立っていることはいうまでもないが、すでに述べたように発電所の膨大な量の廃熱を有効に利用する必要が出てきた現在、多少規模を小さくしてでも熱需要の大きな都市部周辺に中型発電所を立地させ、広義の意味で熱電併給のカスケード利用システムの概念を普及させる努力も必要となる。

一方、産業等からの多量の廃熱源が存在する場合には、ボトムリングサイクルコージェネレーションの開発も重要となる。これらヒートポンプ技術やコージェネレーションをうまくシステ

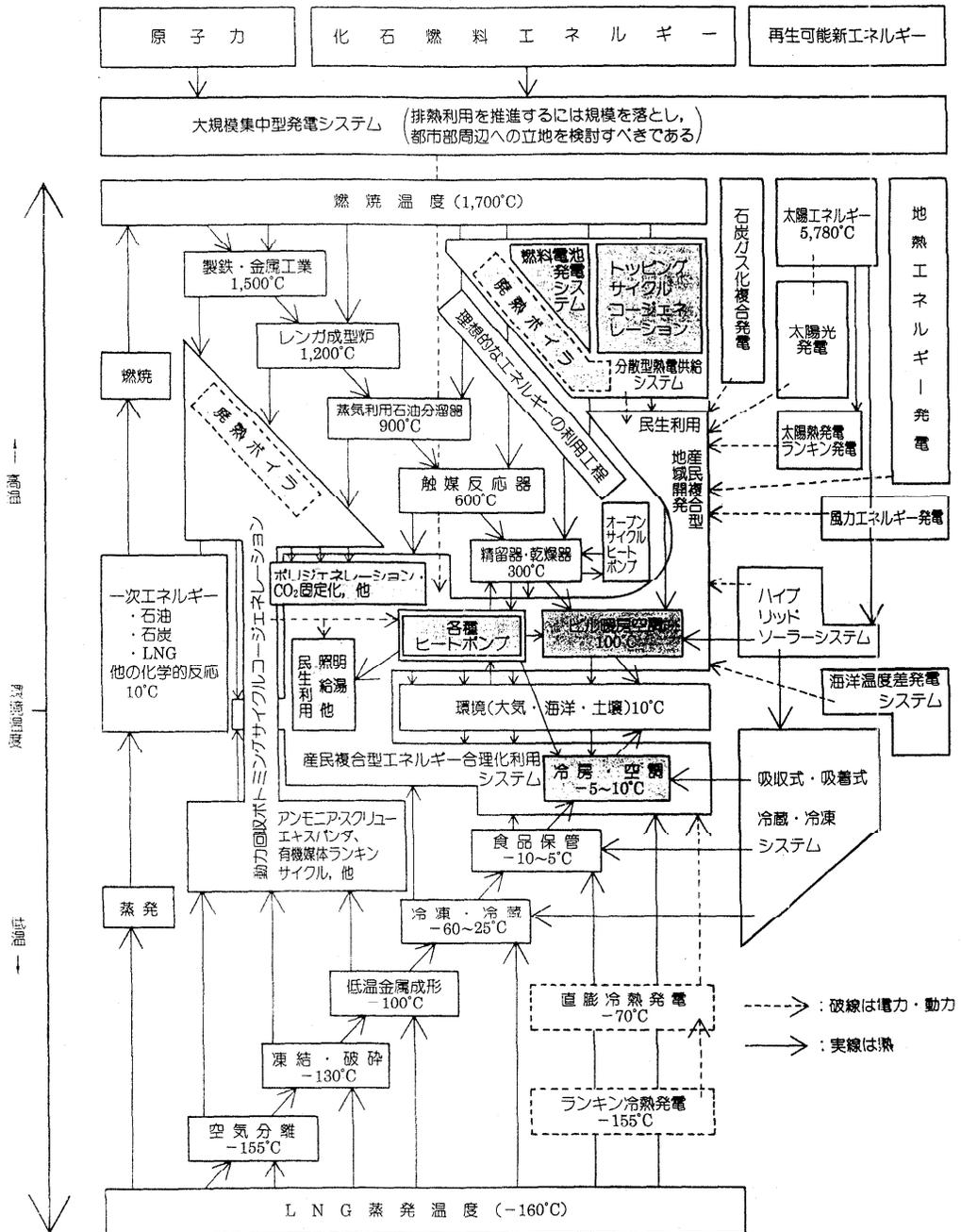


図2 産民複合型カスケードエネルギーシステムと電気・熱のシステムインテグレーション

ムとして組み込み、異業種や地区の間で自由なエネルギー交流を可能とする「産民複合型」の都市開発体制の確立が強く望まれる。

さて、ここでカスケード利用の概念を主軸とし広義の観点から電力と熱のシステムインテグレーションについて再度その原点に戻り考えてみたい。すでに述べたように日本の場合は、“発電用”と“非発電用”を並列に置くエネルギー供給構造として整理されていたが、ここで述べたようなエネルギーのカスケード利用が究極のエネルギー有効利用となると、この発想を根本から変える必要も生じてくる。ガスを燃焼させて、最初に発生する1800°C以上の高温の熱から常温まで、水の流れるように降りてくる熱を、高温から低温まで完全に使いつづのがカスケード利用の根本思想であるが、これを実現する1つの例が、高温の熱を熱機関で動力、さらには電力に変換し、その排熱を産業用プロセスの熱や、民生用の暖冷房・給湯に用いる「コージェネレーション」であることはいうまでもない。このシステムでは、電力もしくは動力と熱が同時に生成され、利用されるわけであるから、1次エネルギーは“発電”したあとで“非発電”用途に用いられることになり“発電”と“非発電”は従来のように“並列”ではなく“直列”に考えないかぎり効果的に機能しない。つまり、カスケード利用、あるいはコージェネレーションが普及すればするほど、熱と電気が同時に、同じ場所で生成されるケースが増えてくることになる。

換言すれば熱需要のある工場やホテルでは、これまでボイラを購入するのが常識であった。ところがエネルギーのカスケード利用がエネルギービジョンの一環を担う時代が到来すれば、ボイラの代わりにエンジンや燃料電池が導入されることが多くなり、熱を作るときには必ず電気も出てくることになる。このような時代を想定したエネルギー供給・融通体制のあり方について今後十分な検討が必要不可欠となる。

### 3. 環境調和型アーバンエネルギーシステム

さて、ここでアーバンエネルギーシステムに目を転じたい。最近所得水準の向上や高級化の進展が見込まれる中で、住宅関連設備の充実や住宅面積の拡大等居住水準の向上、快適な居住空間の形成を求める人々の要求が強まっている。

これら経済社会の発展と生活水準の向上に伴い、今後エネルギー需要は大幅に伸びていくことが予想され、2010年までに約30%の伸びが見込まれている。

その中でも民生用（業務用及び家庭用）の冷暖房・給湯といった熱需要は、快適な住環境や職場環境の追求等アメニティ指向の高まりに伴い、全体の伸びの倍近い急速なテンポで拡大する可能性があり、これは2010年までに、約64%の伸びにも相当する。エネルギー消費全体に占める比率に換算すると、1988年度に15%であったものが、2010年度には18%にも増大する。

こうしたエネルギー需要の伸びを放置した場合、2010年までに、民生用の熱需要だけで、原油換算約3,200万キロリットル（大型石油タンカー約140隻分）も需要が拡大し、第三のエネルギー危機を引き起こしかねないし、特に、左記に述べたように地球環境問題が深刻化する中で

、化石燃料消費の野放図な拡大は国際的にも許されない現状は周知の通りである。そこでこうした民生用熱需要の質を考えてみると、それらの大半は、100°C未満の比較的低温低湿な熱需要であるため、必ずしも高温の熱を製造する能力を有する質の高いエネルギーを投入する必要はなく、今まで捨てていたり見過ごしていた質の低いエネルギーで対応することが望ましい。

この観点から、熱需要が集中している都市部の周辺に目を向けると、海水、河川水、下水など、大気温度との温度差（夏は大気よりも冷たく、冬は大気よりも暖かい水）を有する熱源や、発電所、清掃工場等の「排熱」といった未利用エネルギーが、大量に存在し、例えば、表1、表2、に示すように東京23区の熱需要に匹敵する程膨大な量である。また、近年の各種ヒートポンプ技術等の進歩により、未利用エネルギーを活用して100°C以下の熱需要に対応することが可能となっている。

表1 東京都23区の熱需要  
(単位：Tcal/年)

	冷熱需要	暖房・給湯需要	合計
業務用	9,465	10,609	20,074
家庭用	1,324	22,993	24,317
民生用合計	10,789	33,602	44,391

表2 東京都23区の未利用エネルギー存在状況  
<高温排熱例> (単位：Tcal/年)

ごみ焼却場	約4,000
-------	--------

<低温排熱例> (単位：Tcal/年)

下水処理場	発電所・変電所・送電線	地下鉄	河川水	海水
約8,000	約2,000	約1,000	約28,000	無限

このため、適切な社会システムを作れば、「未利用エネルギー」を活用したエネルギー供給システムを経済的に相当程度導入できる可能性が出てきた。これらの背景を勘案すると、大量に存在する「未利用エネルギー」を活用するための適切な処置を講じることはアメニティ指向の高まりを妨げることなくエネルギー需給を緩和できることになり、CO<sub>2</sub>発生量を抑制することも可能となる。すなわち未利用エネルギーの活用は豊かな社会とエネルギーバランスの二者択一関係を解消できる数少ない手段の一つとして重要な課題として注目されはじめた。しかし、未利用エネルギーを本格的に活用するためには、熱源と熱需要との地理的不一致、温度の不一致、時間的不一致を解消しなければならず大規模なパイプライン網、ヒートポンプ、蓄熱槽等の設備が必要であるが、我国は、今のところ、こうした設備の整備については、極めて低い水準にあると言わざるを得ない。

この観点から、未利用エネルギー活用の熱供給体制を確立するために主要な条件として以下の事項があげられる。

- ① 前提条件として、ネットワークが有効となる程度に地域熱供給が一定地域内に普及していること、および各地域熱供給間で相当程度のネットワーク化が進んでいること
- ② 広域的な熱輸送パイプラインの敷設が社会資本の一部と位置付けられ、かつ熱の安定的・効率的供給が地方自治体の責務であると、とのコンセンサスが得られること

③ 個別冷暖房から未利用エネルギー活用システムへの切り替えに強制力を持たせることに  
対し、国民的コンセンサスが得られること

すでに通産省の依託事業としてNEDO内に未利用エネルギー活用負荷準化冷暖房技術開  
発プロジェクトが発足し積極的な開発が行われているが、ここでは技術的観点から筆者がま  
めた解決すべき技術開発課題について表3に示しておく。

表3 未利用エネルギー活用システムの技術的課題

主要技術項目	対応技術・要素	今後の開発課題	備 考
排熱回収技術	○小温度差熱交換技術 ・プレート型熱交換器 ・伝熱促進技術	○高性能プレートフィン型熱交換器 ○スチレンス、セフミック、ガラス製、又 は、耐腐食材のコーティング技術 ○メンテナンスフリー化クリーニング技術	○黒酸化による低コ スト化
	○耐腐食性材料		
蓄 熱 技 術	○温度レベル別最適蓄熱システム (主に顕熱蓄熱) ・冷水蓄熱 (5~10°C) ・未利用熱源水蓄熱 (10~45°C) ・温水蓄熱 (45~50°C)	○大規模蓄熱槽の開発 熱回収率40~90%以上	○地下水、岩石など 自然環境の利用も 可能
	○潜熱蓄熱 ・氷蓄熱 (0°C) ・各種 PCM 蓄熱 (10~80°C)	○低熱抵抗低減化の技術開発 ・直接接触型 (スラリー状の水形成) ・過冷却応用型 ・クラスレート型 (融解温度 7°C)	○蓄熱密度大 ○一定温度蓄熱可能
	○ケミカル蓄熱 ・高温蓄熱 (出力温度80~200°C) ・低温蓄熱 ( # 10°C以下)	○広い温度範囲で反応可能な媒体の選定 ・アンモニアの利用 ○高性能大規模反応器	○開発途上技術
ヒートポンプ・ 冷 凍 技 術	○圧縮式ヒートポンプ・冷凍機 ・圧縮機技術 ・新作動媒体 (非共沸混合冷媒)	○高効率化・高昇温化 ・COP 3~5以上 ○代替フロン冷媒開発	○小型化容易 ○メンテナンス容易 ○信頼性大
	○吸気式ヒートポンプ・冷凍機 ・アドバンスサイクル ・圧縮・吸気ハイブリッドサイク ル ・新作動媒体	○高効率化・高昇温化 ・COP 暖房2~3以上 冷房0.6~2以上 ○アドバンスサイクルの実証 ・GAX, デュアル, トリアル他 ○低温駆動化とアンモニア冷媒の再活用化	○未利用熱エネルギ ーの直接駆動可能 ○非フロン系として 最も優位
	○吸着式ヒートポンプ・冷凍機 ・高性能反応器 ・新吸着剤 ・新サイクル	○高効率化 ・COP: (冷房0.6~0.8以上) ・反応器内伝熱促進技術 ○連続式サイクルの開発	○吸気式に比べより 低温熱源の直接駆 動可能 ○小型化・軽量化が 課題
配管敷設技術	○新配管工事手法 ・シールド工法トンネル方式 ○耐腐食性配管材料 ・コンクリート製トンネル他	○配管敷設の低コスト化 ○蓄熱性の良好な耐腐食性配管材料	○都市部では数十万 ~数百万円/m

表3に示した技術課題は今後一層の開発を行わなければならないが、この他に標準化のため  
の基準設定や、個々の要素技術の開発だけでなくシステム全体としての高効率化についても実  
証試験により把握しなければならない。特に前者の標準化に関しては、広くネットワーク化を  
はかる際、採取熱、排出熱の温度を揃える必要があり、組み合わせ機器の標準化を行うことよ  
り、コストの低減につながり未利用エネルギー活用システムの普及促進に多大な貢献をするこ  
とになり、環境調和型エネルギーシステムを構築する上で極めて重要となる。

いずれにせよ、システムとして機能させる時期にさしかかったこれからの合理的なエネルギ  
ー利用では、再生可能な新エネルギーなどを最大限取り込むとともに高効率省エネルギー技術  
のシステムの開発が重要となる。そして一主体内に留まることなく、複数の産業利用や民生利  
用がアーバン地域内で相互利益を確保しつつ有機的に結合し、かつ産民複合型の新しい地域開  
発プロジェクトを積極的に推進する中で、環境性、社会性に優れた新地域でのエネルギー原単  
位ミニマムを明示してくれるものと確信している。そして、その結果として、環境調和型エネ  
ルギーシステムが実現できることになる。

## 大気境界層と大気拡散

植田洋匡（九大・応力研）

### 1. はじめに

地球の表面に接する大気層は乱流境界層を形成している。この気層は大気境界層あるいはプラネタリー境界層（厚さ：2000m内外）と呼ばれる。大気境界層を含め10~15kmまでの気層を対流圏と呼び、それより上空は成層圏（45kmまで）、中間層（80kmまで）、熱圏と続く。ここでは、人間活動に密接に関係する大気境界層と其中での物質拡散に限定して稿を進める。

大気境界層内の問題は、従来から気象学の主要研究課題の一つであり、都市気象、局地気象、山岳気象など個別の地域の気象を対象に研究が進められてきた。これの応用面の問題としては、大気汚染、ヒートアイランドなどの環境保全問題や、大型建築物の耐風設計などの防災上の問題、都市計画などの問題があり、最近工学的な関心も非常に高くなっている。このような問題では大気乱流の構造をはじめ、運動量、熱、物質の乱流輸送の詳細なメカニズムに関する知見をも要求するようになっている。

大気乱流の構造と乱流輸送機構についての成書としては、気象学的な立場から、Lumley and Panofsky<sup>1)</sup>、竹内・近藤<sup>2)</sup>のものがあり、流体力学の立場から、Monin and Yaglom<sup>3)</sup>、Turner<sup>4)</sup>、日野<sup>5)</sup>、などがある。

### 2. 大気境界層の特性

大気境界層の流れは、工業規模の流れと顕著な相異がある。その特徴は(1)高Re数性、(2)非定常性、(3)回転場に伴うコリオリカ効果、(4)重力場に伴う浮力効果であるといえる。

高Re数乱流の特徴として、乱流エネルギースペクトルの $-5/3$ 乗則の成立する慣性小領域が $3-4$ 桁にも及ぶ<sup>1)</sup>。壁面せん断流の乱流発生、維持機構とされるコヒーレントな構造が見出されて以来<sup>6, 7)</sup>、Re数の大きな環境中の流れにもコヒーレント構造が存在するかどうかの問題は多くの関心を集めている。また、環境中の流れは粗面に沿う流れでもあり、粗面上の乱流のコヒーレント構造も興味のあるところである。

コヒーレント構造の研究に着手された初期の頃に、砂床上の乱流境界層中でインジェクション構造が観察されているもの<sup>8)</sup>、完全粗面条件が満足された流れに対しての体系的な研究は実施されていないようである。河川流については、間欠的、局所的に水面が盛り上がるボイル現象が観察され、これをコヒーレント構造と結び付けて考えられている<sup>9)</sup>。一方、大気境界層流れの場合には、ほとんどの場合温度（密度）成層効果が支配的であるが、中立成層強風時の突

風現象がこれにあたると思われる。しかし、環境流中のこれらの現象を、平滑面上に形成される低速スリートク状の縦渦構造に続く一連の不安定現象、いわゆるバースティング現象と結び付けることには無理があるようである。実際、平滑面に沿う乱流のバースティング周期は、その検知法にもよるが、低Re数乱流では壁面パラメータで相関できる<sup>10, 11)</sup>。しかし、高Re数乱流では内層、外層の結合パラメータを用いなければ相関できなくなり<sup>12)</sup>、環境流中の上記のコヒーレント構造は外層パラメータによって良くスケールリングできる。しかも従来低Re数乱流に対して用いられてきた式で良く相関できる。これが、Roibnson<sup>13, 14)</sup>が分類しているコヒーレント構造のうち、大規模構造運動(δスケール運動)やボックスに対応するのかどうか、また壁面パラメータでスケールリングできる運動と外層パラメータで相関できる運動とがどのようにリンクしているのかは不明である。しかし、フローパターンについてみるとRe数がある程度以上であればRe数に依存せず相似性が保たれ(Townsendの相似則)、高Re数が流れに対して本質的な影響を及ぼすとは考えられない。

環境中の流れの第2の特徴としてあげられる非定常性についても、これが大気境界層流れに本質的な影響を及ぼしているとは考えられない。流れの加速(減速)時の乱流エネルギー生成の減衰(増大)、地表面条件の変化の上空、風下への伝播など、流れの非定常性の乱流構造や輸送機構に及ぼす影響は重要である。しかし、環境中の流れが定常状態に保たれることはないものの、普通その非定常性は乱流のタイムスケールよりは大きく流れのメカニズムに本質的な影響をおよぼすことは少ないようである。

環境中の流れの最も大きな特徴はコリオリカ効果と浮力効果である。コリオリカは地球の自転のために生じるもので、慣性系に対して一定の角速度 $\omega$ (回転軸方向の単位ベクトル $\mathbf{n}$ )で回転する地球上では、回転座標系から見て速度 $\mathbf{v}$ で運動する単位体積の流体には $2\rho\omega\mathbf{v}\cdot\mathbf{n}$ ( $\rho$ :密度)の力として働く。この力は大気や海洋中の大規模な運動に大きな影響を及ぼす。定常で一様な大気境界層流の場合でも、境界層より上の気層では気圧傾度とコリオリカとの釣合によって一定の風(地衡風)が吹く。また、境界層内部では、これにレイノルズ応力項が加わってバランスするため風向は鉛直方向に変化する。したがって、コリオリカは物質の移流方向に大きな影響を及ぼす。定義からもわかるように、コリオリカは運動方程式の中で線型的な効果として現れる。したがってレイノルズ応力方程式にもコリオリカ項が加わることになる。しかし、地球回転速度が小さいことから、この項は他の項に比べて小さく無視できることが多く、したがって、コリオリカは乱流拡散には二次的な効果しか持たないといえる。

環境中の流れに支配的な役割を果たすのは浮力効果である。特に、大気の運動は、直接的、間接的に温度差(密度差)によって誘起される。このため、必然的に鉛直方向に密度勾配を持った成層流になっている。このことは成層の度合(安定度)を表すパラメータ、例えばバルクリチャードソン数 $\langle Ri \rangle$ を考えてみれば容易に理解できる。 $\langle Ri \rangle$ 数は  $\langle Ri \rangle = -g \Delta \rho \cdot \delta / [\rho (\Delta u)^2]$  ( $\delta$ : 成層流体層厚さ、 $\Delta u$ ,  $\Delta \rho$ :  $\delta$ にわたっての風速差、密度差)と

定義され、重力場のなかでのポテンシャルエネルギー（浮力による仕事）と運動エネルギーとの比である。環境中の流れでは、 $\Delta u$ ,  $\Delta \rho$  は工業規模の流れと同オーダーでも、長さのスケール  $\delta$  が大きくなるため、 $\langle Ri \rangle$ 、したがって浮力効果が大きくなる。

### 3. 成層流中の乱流構造と乱流拡散

#### 3. 1 壁面領域での浮力効果

密度成層にもなって生じる浮力は、乱流の生成機構を変化させる。また、乱流渦運動に作用して乱流構造を変化させ、この変化を通して運動量、熱、物質の乱流輸送を変化させる。

大気拡散に関する本格的な研究は第二次大戦中の毒ガス拡散の野外実験にはじまり、その後米国でのプレーリーグラス、テネシーバリー、ブルックリンでの大規模野外実験を通して拡散予測手法の原形を固めた。

これらのモデルは、流れ場、拡散場の一様性を仮定したフィックの拡散方程式の解を用い、その中に含まれる「拡散係数」を野外実験に基づいて決定しようとするものである。実用的な目的からは、拡散係数よりは煙の拡散幅（主軸濃度の  $e^{-1/2}$  になる煙幅）の実測値を風下方向距離の関数として与えている。この関数は成層状態によって大きく変化するが、拡散場を通じて一様と仮定して大気安定度を定義し、比較的測定の容易な気象要素あるいはその組み合わせで相関する試みがなされてきた。Pasquill<sup>15)</sup>, Turner<sup>16)</sup> のものは大気安定度を風速と日射量（日中）、風速と雲量（夜間）を用いて決定するもので、年間あるいは月間の平均濃度予測に対してはその有効性は確認されており、工場立地選択や大気汚染の事前評価、総量規制などに広く用いられている<sup>17)</sup>。大気安定度として、そのほかに風向、風速の変動、鉛直温度勾配およびそれらの組み合わせが用いられている。

運動量、熱（あるいは物質）の輸送機構に及ぼす成層効果を統一的に説明しようとする試みは、1950年代にソ連の気象学者 Monin と Obukhov<sup>18)</sup> によって口火が切られ、乱流輸送理論や測定技術の発展と相俟って華々しい展開を見せている。Monin と Obukhov は壁面領域についての次元解析から相似理論を構築した。壁面領域では乱流せん断応力、乱流熱流束が一定とみなせ、流速、温度、各種統計量の鉛直分布は壁面パラメータによって一意的に決定される。壁面パラメータとして、粗度（あるいは粘性長さ）、摩擦速度、摩擦温度があげられるが、成層乱流ではせん断応力と浮力が同時に働くためこれらの力の比としてモニン・オブロフ長さ  $L$  が新しい長さスケールとして加わる。これら4つのパラメータを用いて壁面領域の各種統計量の分布を普遍関数で表現できるとしたのが彼らの相似理論である。このとき流速勾配、温度勾配の無次元関数は  $z/L$  ( $z$ : 壁面からの距離) のみの関数になるが、彼らはこれを一次式で近似し比例定数を野外観測結果から決定している。

この理論は成層状態が比較的弱い場合に適用されるものであり、熱対流が卓越する強不安定成層状態では摩擦速度をスケールに用いることは無意味になる。強不安定の場合をも包含

する相関式として、いわゆるKEYPS式が提出されている<sup>1)</sup>。これは強不安定時の相似式とMonin-Obukhov式とを内挿する形のものであるが、乱流エネルギー式の近似からも導かれる。この式にも観測から決定すべきモデル定数が含まれているが、その値も研究者によって大きく異なっている。これについては、Yaglom<sup>19)</sup>が種々の結果を総括して、Busingerらの観測結果<sup>20)</sup>を支持している。しかし、Busingerらの観測ではカルマン定数として0.35という小さい値を与え、これが高Re数乱流特有のものであるという主張が気象学では強かったが、現在のところ測定に問題があったということで決着をみている。

このように野外観測の結果は大きなバラツキを残したままになっている。この野外観測結果を補足する研究として、壁面領域の変動に着目した室内実験がFukuiら<sup>21)</sup>によって行われ、Busingerらの観測結果に支持を与えている。

乱流境界層内では壁面領域（内層）と外部領域（外層）とでは乱流構造、輸送機構は本質的に異なる。壁面領域は乱流エネルギーの生成を支配しているのに対して、外部領域は自由乱流に近い性質を持っており、壁面領域から拡散してきた乱流渦の風速、温度シャーによる変形が起こる。したがって、乱流構造や輸送機構に及ぼす浮力効果も壁面領域と外部領域とでは本質的な違いがあると考えるのが妥当である。観測結果の大きなバラツキは外部領域の結果が混在しているためと考えられる。実際、従来の観測の多くは、数mから数10mの高度までで行われているが、夜間に形成される接地安定成層では、壁面領域厚さは1 m前後の場合も多い。後述するように外部領域との比較において特に注目されるのは、乱流プラントル数の挙動で、壁面領域では安定成層状態ではほぼ一定であり、不安定成層状態でもせいぜい30%程度減少するだけであるのに対して<sup>20, 21)</sup>、外部領域では1桁以上変化する<sup>22, 23)</sup>。

### 3. 2 境界層外部領域および自由せん断流中の浮力効果

乱流輸送は風のシャーと浮力の両方の影響を受ける。風のシャーは壁面からの距離とともに急減するのに対して、浮力の減衰は小さく、その結果、外部領域では乱流輸送が浮力だけに支配されることが多い<sup>24)</sup>。また、気流の乱れは弱く、乱れが局所的に平衡状態にある自由せん断流と類似の挙動を示す。外部領域あるいは自由せん断流中での乱流輸送に及ぼす密度成層効果に着目した研究として、Webster<sup>25)</sup>、Young<sup>26)</sup>、van Atta<sup>27, 28)</sup>らが一様成層の格子乱流についての実験を、Ellison & Turner<sup>29)</sup>、Schiller and Sayre<sup>30)</sup>、Mizushimaら<sup>31)</sup>、Komori<sup>22, 32)</sup>らが水路を用いた実験を行っている。このような場合、乱流構造や輸送過程に及ぼす浮力効果は局所の密度（温度）勾配と速度勾配から決まるグラディエント・リチャードソン数Riによって相関できると考えるのが合理的であり<sup>22)</sup>、種々の相関式が提出されている。これらの結果から、安定成層状態ではランダム運動に近い乱流運動が浮力によって組織化されて種々の波数の内部重力波に移行し、そのため運動量、熱、物質の乱流拡散は著しく抑制される。乱流拡散が抑制される結果、強い安定成層状態では、局所的に強いシャー（流速、密度の鉛直勾配）が

発生し、Kelvin-Helmholtz不安定によって波状運動の破碎（巻き波）が起こって、そこに新たな乱流エネルギー生成が起きる。このメカニズムは晴天乱流の成因とも関連してかなり調べられている<sup>33)</sup>。これに対して、乱流運動がどのように波状運動に移行するのか、そのエネルギーの伝達の仕組みについては未解明である。

強い安定成層では、運動量と熱（あるいは物質）の拡散の相違は顕著になる。これは、運動量の鉛直輸送は波状運動中でも起こるのに対して、熱や物質の輸送は破波の瞬間にだけ間欠的に起こるためであると解釈されている。更に強い安定成層では、カウンターグラディエント拡散が起こることがある<sup>21)</sup>。即ち、速度、温度、濃度の勾配に逆らった方向への運動量、物質、熱輸送が行われる。これは安定成層の形成過程の時間的、空間的な履歴を反映したもので、例えば、上流で高温、低温の乱流渦が分散している流れ場が成層が強くなった後破碎によって乱流渦を解放するときなどに現れることが予想されている<sup>22, 34)</sup>。このように安定成層状態では乱流運動から波状運動への移行、更に波状運動の破波とそれによる新たな乱流エネルギーの生成が起こる。この過程で、例えば乱流の二次モーメントの輸送方程式中の圧力- ストレイン項が重要な役割を果たすことは予測され、これを線型理論<sup>22)</sup>、クロージャーモデル<sup>35, 36)</sup>、直接数値シミュレーションDNS<sup>34)</sup>で解釈しようとする試みが行われている。

不安定成層状態の乱流構造にとって支配的なのは、熱い流体塊の上昇と冷たい流体塊の下降運動である。Gr数の極端に大きな環境中の流れの中に、大規模な渦構造が存在することは知られている。これは、静止流体の熱的不安定の発生時にみられるような、混合層厚さのスケールをもつもので、空間的、時間的に変動する。Deardorff<sup>36)</sup>はこれに直接数値シミュレーションDNSを初めて導入し高Gr数熱対流のシミュレーションに成功を納めた。この方法がこの10年乱流のコヒーレント構造の研究に応用され中心的な役割を果たしつつあることは衆知のことである。この構造は条件付きサンプリング法を用いた室内実験でも抽出され熱輸送で主要な役割を担うことが確認されている<sup>37, 38)</sup>。これらの研究によると、熱対流渦は乱流状態では少し扁平で、境界面がスリップ条件のベナール対流のアスペクト比に近いものになっていることが示されている。不安定度が增大しても、大規模渦構造はそのまま維持されるが、高波数の運動にまで浮力による上昇、下降運動が卓越するようになる<sup>32)</sup>。

密度成層に伴って生じる浮力は鉛直方向の変動速度を生み、これが圧力- ストレイン項を通してほかの方向の速度変動成分に再配分される。一方、せん断応力はまず、流れの方向の速度変動を生み、このエネルギーが他の方向成分の変動速度に再配分される。このことから、浮力効果は鉛直方向と流れ方向、スパン方向とは異なる。流れ方向、スパン方向の乱流拡散に及ぼす浮力効果については、自由乱流についてKomoriら<sup>39)</sup>、壁面乱流についてUedaら<sup>40)</sup>の測定があるのみで体系的な研究はまだなされていない。いずれの場合も、安定成層では鉛直方向の拡散の減衰が最も強く、次いでスパン方向、流れ方向の順に減衰が小さくなっている。不安定成層下では、3つの方向の乱流拡散はともに促進されるがそれらの増加率はほとんど同程度で伝熱研究 Vol. 32, No. 125

ある。しかし、強不安定状態になると乱流の鉛直方向の運動が卓越するようになり、それに伴って鉛直方向の乱流拡散だけが極端に大きくなることが示されている。

### 3. 3 成層乱流のモデリングと大気拡散の数値シミュレーション

乱流のクロージャモデルは1940年代から基礎が築かれ、1960年代後半から10年間で飛躍的な発展を遂げた。これはレイノルズ応力や乱流フラックスなど乱流の高次モーメントの輸送方程式系を基礎にしたもので、これについては多くのレビューがある<sup>41, 42)</sup>。運動量、熱、物質の輸送過程に及ぼす浮力効果が支配的になる成層乱流のモデリングもその中で発展してきた。種々の階層のモデルが調べられ<sup>43)</sup>、これの大気境界層への適用が試みられた<sup>44)</sup>。現在では、乱流の二次モーメントの輸送方程式に基づくモデルとして、 $k$ - $k_l$ モデル<sup>45)</sup>や $k$ - $\varepsilon$ モデル<sup>46)</sup>が大気境界層の挙動をほぼ説明できることが示され、流れの実用計算コードに組み込まれている。

Gibson and Launder<sup>35)</sup>は変動圧力場が固体壁の存在によって変形することを考慮に入れて圧力-ストレイン項をモデル化し、壁面乱流と自由せん断乱流に対する浮力効果の相違の説明に成功している。彼らはまた成層乱流のレイノルズ応力、熱流束の輸送方程式に局所平衡を仮定して運動量と熱（あるいは物質）の乱流拡散係数の安定度依存性や逆勾配拡散の存在を説明している。速度シヤーのない熱対流については、三次モーメント方程式に基づいた乱流輸送モデルが展開され、乱流エネルギーや熱フラックスなどの二次モーメント量の輸送過程も予測できるようになっている<sup>24)</sup>。実用的には代数応力モデルが構築され<sup>46, 47)</sup>、乱流構造および乱流拡散の非等方性も考慮に入れたモデリングが進展しており、強い成層状態でも精度の良い拡散予測が可能になりつつある。

### 4. おわりに

環境中の流れのように大きなスケールを持った乱流中では密度成層に伴う浮力効果が支配的な役割を果たす。ここでみてきたように、浮力が乱流の生成および渦構造を変化させ、その結果、運動量の乱流拡散を変化させて、フローパターンを変化させる。これとは別に、浮力は流れに直接作用して流れ場全体を変化させる。浮力が流体運動の力のバランスの一端を担っているから当然である。これが安定成層状態では物体まわりの流れのブロッキング効果を生み、また内部重力波を誘起して、種々の非線形現象を出現させ、その結果、フローパターンと其中での物質の輸送を大きく変化させることになる。このように、環境中の流れ場での物質の輸送、拡散には浮力の直接的、間接的影響は大きく、その数値予測は急速に発展しているもの、未解決の物理現象、特に非線形現象を多く含んでいる。

### 引用文献

- 1) J. L. Lumley & H. A. Panofsky: The Structure of Atmospheric Turbulence (Interscience Pub. 1964).

- 2) 竹内清秀・近藤純正：地表に近い大気，岸保勸三郎・浅井富雄編，大気科学講座，第1巻（東京大学出版会 1981）。
- 3) A.S. Monin & A.M. Yaglom: Statistical Fluid Mechanics : Mechanics of Turbulence, Vols. 1 and 2, (Nauk Press, 1965).
- 4) J.S. Turner: Buoyancy Effects in Fluids, (Cambridge Univ. Press, 1973).
- 5) 日野幹雄：成層流の乱流，谷一郎編 流体力学の進歩，乱流，177-219。（丸善 1979）。
- 6) S. J. Kline, W. C. Reynolds, F. A. Schraub & P. W. Runstadler: The structure of turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, 30(1967) 741-773.
- 7) E. R. Corino & R. S. Brodkey: A visual investigation of the wall region in turbulent flow. *J. Fluid Mech.*, 37(1969) 1-30.
- 8) A. J. Grass: Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *J. Fluid Mech.*, 50(1971) 233-255.
- 9) R. G. Jackson: Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows. *J. Fluid Mech.*, 77(1976) 531-560.
- 10) R. F. Blackwelder & J. H. Haritonidis: Scaling of the bursting frequency in turbulent boundary layers. *J. Fluid Mech.*, 132(1983) 87-103.
- 11) S. Komori, Y. Murakami & H. Ueda: The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow. *J. Fluid Mech.*, 203(1989) 103-123.
- 12) R. A. Antonia, S. Rajagopalan, C. S. Subramanian & A. J. Chambers: Reynolds number dependence of the structure of a turbulent boundary layer. 121(1982) 123-140.
- 13) S. K. Robinson: Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 23(1991) 601-639.
- 14) S. K. Robinson: The kinetics of turbulent boundary layer structure. NASA TM 103859.
- 15) F. Pasquill: The estimation of the dispersion of windborne material. *Meteor. Mag.*, 90(1961) 33-44.
- 16) D. B. Turner: Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates, U.S. Dept. of Health, Education and Welfare(1967).
- 17) 環境庁大気保全局大気規制課編：総量規制マニュアル(1956).
- 18) A. S. Monin & A. M. Obukhov : Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, *Tr. Akad. Nauk SSSR Geofiz. Inst. No. 24(151)*, (1954) 163-187.
- 19) A. M. Yaglom : Comments on wind and temperature flux profile relationship. *Boundary Layer Meteorol.*, 11(1977) 89-102.
- 20) J. A. Businger, J. C. Wyngaard, Y. Izumi & E. F. Bradley: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, 28(1971) 181-189.
- 21) K. Fukui, M. Nakajima & H. Ueda: A laboratory experiment on momentum and heat transfer in the stratified surface layer. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 109(1983) 661-676.
- 22) S. Komori, H. Ueda, F. Ogino & T. Mizushima: Turbulence structure in stably stratified open-channel flow. *J. Fluid Mech.*, 130(1983) 13-26.
- 23) H. Ueda, S. Mitsumoto & S. Komori: Buoyancy effects on the turbulent transport processes in the lower atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 107(1981) 561-578.
- 24) J. L. Lumley, O. Zeman & J. Siess: The influence of buoyancy on turbulent transport. *J. Fluid Mech.*, 84(1978) 581-597.
- 25) C. A. G. Webster: An experimental study of turbulence in a density stratified shear flow. *J. Fluid Mech.*, 19(1964) 221-245.
- 26) S. T. B. Young: Turbulence Measurements in a stratified turbulent shear flow. Queen Mary Coll. London Rep. QMC-EP 6018.
- 27) D. C. Stillinger, K. N. Helland & C. W. van Atta: Experiments on the transition of homogeneous turbulence to internal waves in a stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, 131(1983) 91-122.
- 28) E. C. Itsweire, K. N. Helland & C. W. van Atta: The evolution of grid-generated turbulence in a stably stratified fluid. *J. Fluid Mech.*, 162(1986) 299-338.

- 29) T.H. Ellison & J.S. Turner: Mixing of dense fluid in a turbulent pipe flow, *J. Fluid Mech.* 8(1960) 514-544.
- 30) E.J. Schiller & W.W. Sayer: Vertical temperature profiles in open-channel, *J. ASCE*, HY6, (1975) 749-751.
- 31) T. Mizushima, F. Ogino, H. Ueda & S. Komori: Buoyancy effect on eddy diffusivities in thermally stratified flow in an open channel. *Heat Transfer* 1978, 1(1978)91-96.
- 32) S. Komori, H. Ueda, F. Ogino & T. Mizushima: Turbulence structure in unstably stratified flow. *Phys. Fluids*, 25(1982) 1539-1547.
- 33) D.C. Fritts & T.J. Dunkerton: Fluxes of heat and constituents due to convectively unstable gravity waves. *J. Atmos. Sci.*, 42(1985) 549-556.
- 34) T. Gerz, U. Shchumann & S.E. Elghobashi: Direct numerical simulation of stratified homogeneous turbulent shear flows. 200(1989) 563-594.
- 35) M.M. Gibson & B.E. Launder: Ground effects on pressure fluctuation in the atmospheric boundary layer. *J. Fluid Mech.*, 86(1978) 491-511.
- 36) J.W. Deardorff: Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 29(1972) 91-115.
- 37) H. Ueda, S. Komori & K. Fukui: Large-scale vortical structure in the turbulent boundary layer flow under unstably-stratified conditions. *Transpot Phenomena in Turb. Flows*. Edt. by M. Hirata & N. Kasagi(1988) 325-333.
- 38) K. Fukui, M. Nakajima & H. Ueda: Coherent structure of turbulent longitudinal vortices in unstably stratified flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 34(1991) 2373-2385.
- 39) S. Komori, H. Ueda, F. Ogino & T. Mizushima: Lateral and longitudinal turbulent diffusion of scalar quantities in thermally stratified flow in an open channel. *Heat Transfer* 1982, 2(1982) 431-436.
- 40) H. Ueda, S. Komori and K. Fukui: A laboratory experiment on lateral diffusion of scalar quantities in the stratified surface layer. *Atmos. Environ.* 20(1986)757-762.
- 41) B.E. Launder & D.B. Spanding: *Mathematical Models of Turbulance* (Academic Press, London, 1972).
- 42) 谷一郎: 乱流研究の発達. 谷一郎編, 流体力学の進歩, 乱流 (丸善 1978) 1-46.
- 43) G.L. Mellor and T. Yamada: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, 31(1974) 1791-1806.
- 44) T. Yamada & G.L. Mellor: A simulation of the Wangara atmospheric boundary layer data. *J. Atmos. Sci.*, 32(1975) 2309-2329.
- 45) G.L. Mellor & T. Yamada: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20(1982) 851-875.
- 46) I. Uno, S. Wakamatsu, A. Nakamura & H. Ueda: Some contributions to the algebraic stress turbulence model for the application of stratified flows. *Refined Flow Modelling and Turb. Measurements*, Edt. by Y. Iwasa et al. (1988) 1-8.
- 47) W. Rodi: Calculation of stably stratified shear-layer flows with a buoyancy-Extended  $K-\epsilon$  turbulence model. *Turb. and Diff. in Stable Environ.* Edt. by J.C.R. Hunt. (Clarendon Press 1985) 111-140.

## 生体におけるエネルギー輸送過程

谷ト一天 (慶大理工)

### 1. はじめに

生体は色々な形のエネルギーを取り込み、輸送及び変換して消費すると同時にエネルギーを貯蔵する巧みなエネルギーシステムを有している。生体内エネルギーシステムの中で重要な役割を演じているのが、エネルギー輸送過程である。生体内エネルギー輸送過程は、伝熱学の立場から見ると極めて興味深い様々な面を持っている。そこで、本稿では生体におけるエネルギー輸送過程を、熱の移動とエネルギー代謝に関与する酸素及び炭酸ガスの輸送に限定して、それらの輸送プロセスに関して概観する。

### 2. 生体のエネルギーシステム

生物圏全体で見ると、エネルギーの源は太陽エネルギーである。緑色植物の色素即ちクロロフィルが太陽からの光を捕獲し、光合成によって化学的エネルギー（炭水化物）に変換する。さらに動物及び植物は、糖または他の食物を捕らえて、呼吸によって燃焼させて、エネルギーを放出させ、さらに別の化学的エネルギーの形で貯蔵する。即ち、食物中の炭水化物、脂肪、蛋白質

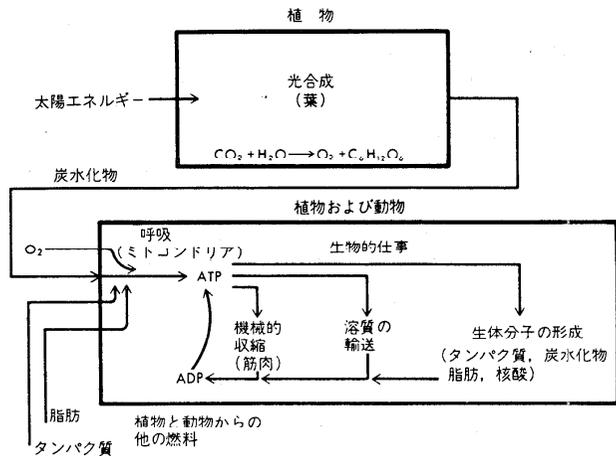


図1. 生物系における化学エネルギーの生成と利用

に含まれている化学エネルギーが放出されて、高エネルギー物質アデノシン三リン酸 (ATP) の形で貯蔵される。ATPは、そのエネルギーを筋肉の収縮による機械的工作、物質の輸送、生体分子の合成のために消費される (図1<sup>1)</sup>)。養分の分解で生ずるエネルギーの多くは、貯蔵役である高エネルギー磷酸化合物であるATPに変換出来ずに、熱エネルギーとなり仕事に利用されない。さらに仕事と共に生ずる熱量を含めると化学エネルギーの約80%は熱となり (図2<sup>2)</sup>)、恒温動物ではその熱によって体温を外界の温度より高く維持することが可能となっている。生体内の温度を、一定な温度に維持される時のみ、生理的機能を維持出来る。従って恒温動物の体温は熱の発生よりも熱の放散機能の巧みな調節によって一定に保たれており、生体内の熱移動

が重要な役割を果たしている。

### 3. 生体と熱環境

活動している動物の許容温度範囲は動物の種類によってかなり異なり<sup>3)</sup>、50℃以上の温度でも生育する動物も存在する。多くの生物は、比較的狭い温度範囲の中で活動している。生物にとって許容温度以上では生存出来なず、熱的損傷が以下のような原因で生ずると考えられている<sup>3)</sup>。①蛋白の変成、熱凝固（蛋白の変性は、多くの場合45～55°で生ずる）、②温度依存性の強い酵素の失活、③温度上昇に伴う酸素需要の増加に対する供給不足、④エネルギー代謝の温度依存性、⑤温度上昇による膜構造の変化（特に生体膜を構成している蛋白の構造変化）。逆に最近の医療技術には、これらの熱的な損傷を積極的に利用して、選択的に特定な組織や細胞を損傷させて治療を行うものもあり、良好な臨床成績の故に注目されている（ハイパーサーミアなど<sup>4)</sup>）。

一方において、生物は低温に対しても極めて敏感である。

例えば、グッピーは通常23℃の室温で生育しているが、温度が10℃になると呼吸中枢の機能が抑制されて酸素欠乏症となる<sup>5)</sup>。興味深いのは、凍結温度以下においても、生存出来る生物の機能であり、凍結温度以下で生命活動を維持する様子を把握することは、細胞や組織の凍結保存技術に重要な手がかりを与える。とくに特殊な機能を持つ細胞、卵や精子の凍結保存は、臨床医学や畜産の分野において大きな関心が持たれているが、低温下での熱現象には明確でない点が多く、伝熱工学的にも興味深い問題を多く含んでいる。生体組織は凍結温度以下でも過冷却の状態を保ち、凍結しない。この過冷却状態は、多くの動物の生存にとって必須であり、爬虫類や両生類は-8℃まで過冷却して凍結せずに生存している。凍結温度や過冷却温度を低下させる物質として知られているグリセリンが、越冬する昆虫内で高濃度で存在していることが発見されており、例えば-60℃というアラスカの冬で生存しているハエの体内には50%濃度のグリセリンが含まれている。極地の海の温度は-1.8℃であるが、南極で生育している魚(Trematomus)の血液には、凍結保護物質が存在し、そのため魚の組織の凍結温度は1～2℃低い。

一方、凍結保存のための基礎的研究も着手されている<sup>6) 7) 8)</sup>。棚沢ら<sup>7)</sup>は、ミジンコを凍結融解させて、ミジンコの心臓の鼓動が観察可能であることから、生存率を求めた。凍結防御剤であるグリセリンを15%濃度で与え、90%以上の高い生存率を得ている。氏平ら<sup>8)</sup>は、メダカの卵が球形で比較的大きいことから、メダカ卵を凍結過程の実験モデルとして選び、メダカの孵

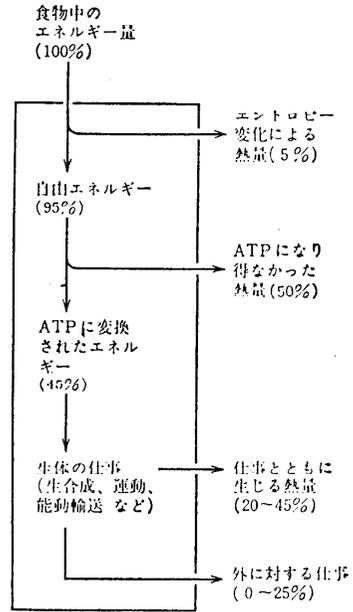


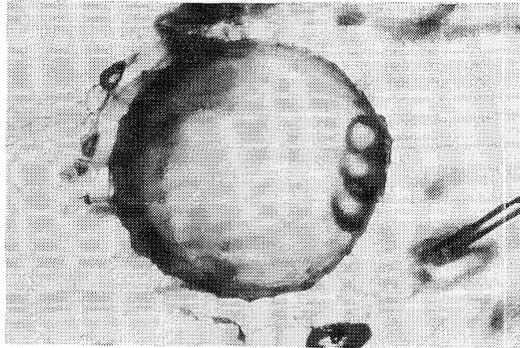
図2. 生体エネルギーの配分

化率から、卵の生存を判定した。細胞外凍結では、囲卵腔が脱水され、卵殻が収縮し卵黄と接触した。卵黄の脱水は認められなかったが、孵化率は低下した。細胞内凍結を起こした時は、例外無く生存しなかった。メダカ卵のような細胞を保存可能にするためには、細胞内の氷晶の成長を抑制させなくてはならない。そのためには、細胞外凍結により、卵黄膜内を損傷無しで出来る限り脱水し、氷晶が成長しやすい0～-30℃の温度範囲で細胞内の過冷却を保つ必要がある。氏平らはメダカ卵は水の透過率が低いので、凍結保護物質の脱水作用を利用して、比較的遅い冷却速度で凍結させるのが適当という結果を得ている(図3)。

#### 4. 生体組織内の熱とガスの輸送

##### 4. 1 生体組織内の伝熱

生体内の温度環境を最適な状態に保つために、熱媒体としての血液による熱移動が主要な役割を演じており、血液灌流量の各組織における分布の違いにより巧みな温熱制御が行なわれている。従って生体内の熱移動量を求めるためには、血液流による影響を明確にする必要がある<sup>4)</sup>。



血液循環系における熱移動は太い血管系よりも細い血管系において顕著であるが、微小血管系の幾何学的構築が複雑であり、取り扱いか難しい。そこでまず簡略化された血管床モデルにおいて熱伝達を見積る試みがある。組織内に真っ直ぐな血管が隣同志の血管と一定の距離を隔てて分布しているとして、Chen and Holmes<sup>9)</sup>は血液の温度変化が、周囲の組織との熱伝達のみによって決まるという仮定のもとに、循環系の各部位に対して簡単な計算を行なった。Chen & Holmes<sup>9)</sup>は、血液の温度が周囲の温度に十分近付く時の血管の長さを平衡長さ $X$ 。として定義し、実際の血管の長さ $L$ との比 $L/X$ 。の大小によって各部位の熱交換の度合を評価した。平衡長さ $X$ 。は、内径が1mm以上の太い動脈では、 $L$ に比べて非常に長いので熱交換量はわずかで、一方内径が $10\mu\text{m}$ 以下の細動脈や毛細血管では、 $L/X$ 。》1となり血液の温度はほとんど周囲組織の温度に等しい。従って、主な熱交換は、内径が0.2～0.5mm程度の細い血管床で生ずるといふ。これは従来熱交換は最も細い毛細血管レベルで行なわれると予想されていた見解と異なり興味深い結果である。

Weinbaumら<sup>10)</sup>は、組織内の熱移動を正確に把握するためには微小血管の大きさや形状を明確にする必要があるとしてウサギの腿の血管構築の測定を行い、その結果、組織は皮膚表面から三層の異なる構造に分かれていることが解り、三層モデルを提唱した。まず最も深い組織部位では内径 $300\mu\text{m}$ 程度の動脈と静脈が1cmほど離れてお互いに対向流となるように一対をなしている。その一対の動静脈の間で対向流熱交換が行なわれている。中間層では、内径 $50\mu\text{m}$

m以下の血管網が分布しており多孔質媒体内の流れと見なすことも出来る。中間層の血管網では血液と組織との間でほぼ完全な熱平衡に達していると考えられる。外側の層は表皮直下の血管網である。さらにWeinbaumら<sup>10)</sup>は、ウサギ腿組織内の温度分布を熱電対により測定した。Weinbaumら<sup>10) 11)</sup>は、主要な熱交換が毛細血管網ではなく、径が50  $\mu$ m以上の血管で生じているというChen and Holmes<sup>9)</sup>が主張している見解とこの測定結果がよく一致していることを強調している。とくにWeinbaumら<sup>10) 11)</sup>は、主要な熱交換は内径が50  $\mu$ m以上の対向流となっている血管の間で行なわれており、熱平衡には達していないと指摘し、そのような血管を熱交換の著しい血管(thermally significant vessel)と表現している。対向流熱交換は、生体組織内での独特な温熱調節機構として、多くの動物の血管系で発見されている。例えば、ミヤマカラスの足には、厚い壁を持つ動脈を中心にして、薄い壁を持つ複数の静脈が囲んでいる<sup>12)</sup>。鳥が水の中に立っている時は、動静脈の間での対向流熱交換により、足から放熱が抑えられている。カモメが水の中に立っている時、2時間経過しても、代謝熱のわずか1.5%しか周りの水に奪われない。腎臓では、対向流物質交換によって尿中の不要物質が濃縮されるプロセスはよく知られているが、魚の浮き袋においても対向流物質交換によって物質が濃縮されている<sup>13)</sup>。多くの魚は、浮力を発生させるために、浮き袋を有しているが、動静脈の対向流物質交換による濃縮機構があるために、水深の如何によらず、浮き袋にガスを供給している。

このように生体組織内で対向流によって巧みに熱及び物質輸送の調整が行われている事実は工学的にも極めて興味深く思われ、これらのメカニズムは生体模倣の観点からも工学的応用の可能性を多く秘めている。

#### 4. 2 生体組織における酸素及び炭酸ガスの輸送

エネルギー代謝に重要な役割を果たしている物質は、呼吸性ガス即ち酸素及び炭酸ガスである。呼吸性ガスの輸送は、エネルギー輸送過程で重要な役割を演じているが、きわめて特徴的な様相を示している<sup>14)</sup>。そこで、特にエネルギー輸送過程の一つとして、生体内での酸素及び炭酸ガスの輸送を眺めてみる。

##### ① 血液中の酸素輸送

血液に含まれる酸素の一部は物理的に溶存した形で、大部分は赤血球内のヘモグロビンと結合した形で存在する。さて毛細血管内から組織への酸素輸送の過程を図4<sup>15)</sup>に示す。赤血球内から吐き出された酸素は、血液中に溶存し対流によって毛細血管壁に到達し、組織へと運搬される。さらに細胞内のミトコンドリアにまで到達して、代謝に寄与する。全く逆のプロセスが肺で起きているわけであり、肺機能や人工肺のガス交換性能を求めるためには、血液中の酸素輸送を明らかにする必要がある<sup>16) 17) 18)</sup>。

##### ② 血液中の炭酸ガス輸送

血液に含まれる炭酸ガスの一部は物理的に溶存した形で、大部分は重炭酸イオン及びヘモグロビンと結合したカルバミノ化合物として存在する<sup>19)</sup>。血液中に溶けた炭酸ガスは、水と結

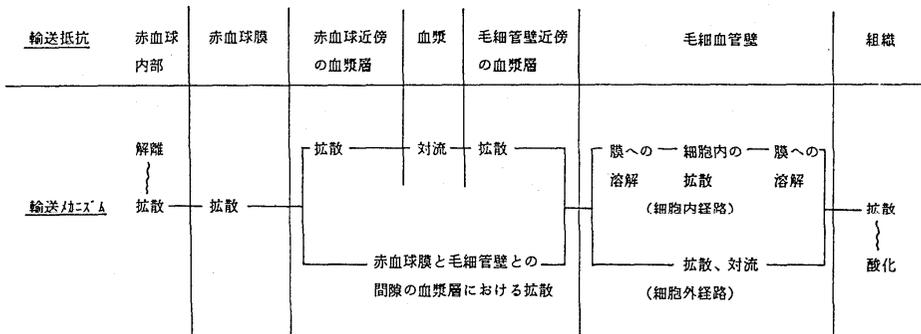


図4. 血液から組織への酸素輸送過程

合して炭酸( $H_2CO_3$ )になるが、この反応速度は極めて遅い。ところが赤血球中に存在する炭酸脱水酵素は、この反応を著しく加速するため、炭酸ガスは水と反応して直ちに炭酸になり、血液中のpH(～7.4)のもとでほとんどすべてが解離して、水素イオンと重炭酸イオンとなり、炭酸ガスの大部分は重炭酸イオンの形で運搬されることになる。平均炭酸ガス分圧が低くなると、炭酸ガス解離曲線の傾きが大きくなって、重炭酸イオンが輸送体として働く促進拡散の影響が著しく表れ、炭酸ガスの透過率が増加する。この傾向は、赤血球膜を破壊させた血液やヘモグロビン溶液で強く表れる<sup>20)</sup>。炭酸ガスの促進拡散は、緩衝溶液やアルブミンなどのタンパク水溶液にも表れ、アルブミンのような大きな分子が存在していると、拡散速度の違いによって拡散電位が表れるなど、色々な現象が見いだされ、活発な議論が展開されている<sup>21)</sup>。

#### ③生体組織における酸素輸送

毛細血管と組織との間の酸素輸送に関して、Kroghが1919年に有名な円柱モデル<sup>22)</sup>を提唱して以来、Kroghのモデルは組織内の酸素輸送の基本となっており、組織内の酸素分布を求める生理学的研究に広く適用されている。Kroghのモデルは、組織を毛細血管を中心とする円柱の集まりと考え、1本の円柱内で酸素は自由拡散によって毛細血管から周囲の組織へ輸送されるという仮定に基づいている。一定な代謝の項を含む拡散方程式の解を求め、とくに円柱の周縁に生ずる最小酸素分圧の位置から低酸素状態が発生するので、この位置を致死点と呼び、病態生理学的検討の対象となっている。さらに微小血管における酸素輸送に関して様々な観点からのモデルが提唱されている<sup>23)</sup>。生体組織の中でも筋肉においては、メカノケミカルエネルギー変換を行い、筋肉における酸素輸送は直接エネルギー消費と結びつくので、極めて重要なプロセスである。筋肉内には、酸素と可逆的に結合するミオグロビンが存在することが知られている。血管壁近傍で酸素輸送抵抗が高いが、ミオグロビンの存在のために筋肉内では、酸素分圧が低く保たれて、酸素輸送の駆動力となっていることがHonig et al.<sup>24)</sup>によって示された。これまでの生体組織内の酸素供給はこれまでのKroghのモデルとは合わないことが明かとなった(図5)。筋肉内のミオグロビンが酸素輸送を促進していることは以前から知られていたが、酸素の促進

拡散が筋肉内で効果的に働いている点で、ミオグロビンは筋肉内での酸素輸送に重要な役割を果たしている。

炭酸ガス輸送に関しては、Kawashiro et al.<sup>26)</sup>及び鈴木ら<sup>26)</sup>によって筋肉内で促進拡散が生じている事実が見いだされている。

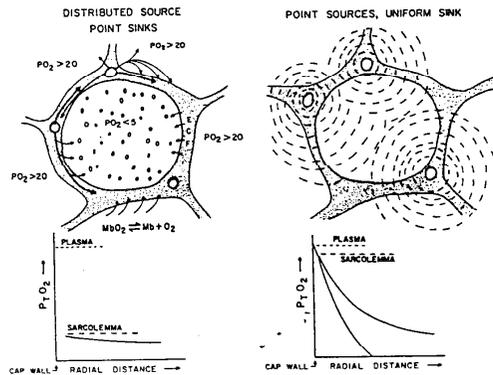


図5. Kroghによる筋肉内酸素輸送モデル(右)と、新しいモデル(左)

動脈壁内の酸素欠乏は動脈硬化の局在性と関連していることが知られており、動脈壁内の酸素輸送の重要性が増している<sup>27)</sup>。太い動脈壁に対して、酸素は外膜と中膜の外側に分布している脈管血管より供給される。内膜に対しては、血管内の血液から供給される。小動脈では、ほとんど血管内の血液から供給されている。片岡ら<sup>28)</sup>は動脈壁内の酸素輸送の様子を明らかにするため、培養した内皮細胞の酸素透過性を測定している。その他血流の流動性状による影響など、色々な観点からの研究が進展しており、動脈硬化病変の局在性が明確になるであろう。

##### 5. おわりに

生体のエネルギーシステムに関する研究は、エネルギー代謝に関する酵素反応を中心とする生化学的な知見をもとに生体エネルギー学、生体熱力学として発展している。熱工学の立場からも多くに興味深いテーマを含んでいるが、工学的観点からの研究はまだ少ない。応用の可能性が広い分野であるため、今後熱工学的立場からの研究の進展が望まれる。

##### [参考文献]

- 1) Peusner, L.: Concepts in Bioenergetics, Prentice-Hall, (寺本英、西崎友一郎共訳、培風館), (1974)
- 2) Brown, A. C.: Physiology and Biophysics (Ed. by Ruch and Patton), Saunder, (1965)
- 3) Schmidt-Nielsen, Knut: Animal Physiology: Adaptation and environment, p231, Cambridge, (1983)
- 4) 谷下一夫: バイオエナジクス概説, p. 97, オーム社, (1993)
- 5) Schmidt-Nielsen, Knut: Animal Physiology. Adaptation and environment, p233, Cambridge, (1983)
- 6) 林勇二郎: 細胞の凍結、第一回バイオエナジクス・アソシエーション・シンポジウム論文集、(1990)
- 7) 永田真一、棚沢一郎: 生体の凍結保存に関する基礎的研究、第27回伝熱シンポジウム講演論文集、(1990)

- 8) 氏平政伸、相沢直樹、谷下一夫：細胞の凍結保存に関する基礎的研究、医用電子と生体工学特別号、(1993)
- 9) Chen, M.M. and Holmes, K.R.: Microvascular Contributions in Tissue Heat Transfer, In Thermal Characteristics of Tumors, Proc. Conf. N.Y. Academy of Sci. and National Cancer Institute, 137, (1979)
- 10) Weinbaum, S., Jiji, L.M. and Lemons, D.E.: Theory and Experiments for the Effect of Vascular Microstructure on Surface Heat transfer Part I: Anatomical Foundation and Model Conceptualization, J. Biomech. Eng., 106, 321, (1984)
- 11) Jiji, L.M., Weinbaum, S. and Lemons, D.E.: Theory and experiment for the Effect of Vascular Microstructure on Surface Tissue Heat Transfer—Part II: Model Formulation and Solution. J. Biomech. Eng., 106, 331, (1984).
- 12) Schmidt-Nielsen, Knut: Animal Physiology: Adaptation and environment, p274, Cambridge, (1983)
- 13) Kobayashi, H., Pelster, B., and Scheid, P.: Solute Back-Diffusion Raises the Gas Concentrating Efficiency in Counter-Current Flow, Respir. Physiol., 78:59-71 (1989)
- 14) 齊藤幸一郎：血液によるガスの運搬，生理学大系，524，医学書院，(1968)
- 15) Friedman, M. H.: Principles and Models of Biological Transport, Springer-Verlag, (1986)
- 16) Tanishita, K.: Gas transport in artificial lungs: limitations and improvements, Ph.D. thesis, Brown Univ., (1976)
- 17) Tanishita, K., Richardson, P.D. and Gallotti, P.M.: Tightly wound coils of micro-porous tubing, Trans. ASAI0, 21, 216, (1975)
- 18) 堀重之，棚沢一郎，谷下一夫ほか：血液の酸素吸収に関する基礎的研究、日本機械学会論文 文集, 46B, 1854, (1980)
- 19) 谷下一夫，棚沢一郎，山口隆美，菅原基晃：血液における炭酸ガスの拡散係数 の測定、日 本機械学会論文 文集, 50B, 1945, (1984)
- 20) Tanishita, K., Tanasawa, I., Yamaguchi, T. and Sugawara, M.: Facilitated diffusion of carbon dioxide in whole blood and hemoglobin solutions, Pflugers Archiv, 405: 83, (1985)
- 21) Meldon, J.H., Stroeve, P. and Gregorie, C.E.: Facilitated transport of carbon dioxide: a review, Chem. Eng. Commun. 16, 263, (1982)
- 22) Krogh, A.: The number and distribution of capillaries in muscles with calculations of the oxygen pressure head necessary for supplying the tissue, J. Physiol.

- (London), 52, 409, (1919)
- 23) Popel, A.S.: Theory of oxygen transport to tissue, *Critical Review in Biomedical Eng.*, 17, 257, (1989)
- 24) Honig, C.R., Gayeski, T.E.J., Federspiel, W., Clark Jr., A. and Clark, P.: Muscle O<sub>2</sub> Gradients from Hemoglobin to Cytochrome: New Concepts, New Complexities, *Adv. Exp. Med. Biol.*, Vol. 169, (1984)
- 25) Kawashiro, T. and Scheid, P.: Measurement of Krogh's diffusion constant of CO<sub>2</sub> in respiring muscle at various CO<sub>2</sub> levels: evidence for facilitated diffusion, *Pflugers Arch.* 359, 231, (1976)
- 26) 鈴木秀雄、中山雅彦、尾谷知哉、片岡則之、谷下一夫：筋肉組織の炭酸ガス拡散係数と熱伝導率の測定、*日本機械学会論文集*、57B: 1077, (1991)
- 27) Goldstick, T.K. and Dobrin, P.B.: Arterial wall oxygen transport and its relationship to atherogenesis. In *Handbook of Bioengineering*, Skalak, R. and Chien, S. (Eds.), McGraw-Hill, (1987)
- 28) 片岡則之、永山和弘、工藤奨、田中俊也、谷下一夫：培養内皮細胞における酸素透過抵抗の測定、*日本機械学会論文集*、(掲載予定) (1993)

## 血液循環系における物質移動現象

佐藤正明、片岡則之（東北大工）

### 1. はじめに

生体は種々の物質の移動あるいは輸送現象によって生命を維持している、といっても過言ではない。ミクロなレベルでは、細胞膜を通過するカルシウムやナトリウムなどのイオンや、細胞内で産生されるホルモンや蛋白の移動が頻繁に行われている [1, 2]。マクロには、血液の流れによって移動する赤血球などの血球成分および血漿中の栄養分や老廃物、あるいは熱などがある [1, 2]。このほか、肺におけるガスの移動、腎臓における老廃物のろ過など、枚挙にいとまがないほどである。このような中で、本総説では、著者らが日頃関心をもっている血液循環系における物質の移動現象を取り上げ、研究の背景および問題点について概説する。

### 2. 血管壁における物質の移動

血管壁での物質透過現象は、脂質などの血管壁への蓄積に関連し、動脈硬化の発生において支配的な要因であると考えられている [3]。さらに、動脈硬化の初期病変は血管の曲り部や分岐部に好発することが知られ、これらの部位での特異的な血液の流れが物質透過性に深く関与しているという観点から研究が行われている [4-6]。

正常な状態でも血管壁の部位によって物質透過性に差異がみられることが報告されている。Barakat ら [7] はウサギの大動脈を用いて HRP (horseradish peroxidase、分子量約 4 万ダルトン) の壁内面における透過性の分布を調べた。図 1 は、心臓をでた直後から腹部までの大動脈において HRP が透過した部位の分布を示す。右側のグラフは血管軸に沿った分布密度の変化を示している。これより、心臓をでた直後の血管の曲り部において透過性が最も高く、その後透過性は下がり、大きな血管分岐が存在する腹大動脈で再び透過性が高くなることわかる。この HRP の分布はコレステロール食を与えたウサギの脂質沈着部位と類似しており、動脈硬化の発生に物質透過性が深く関与していることを示している。

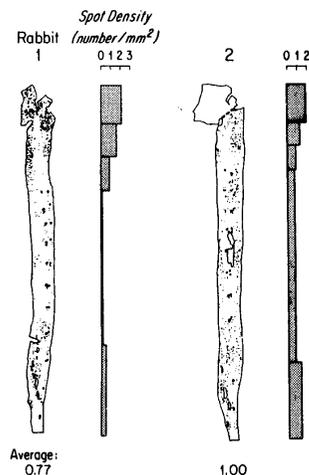


図 1 ウサギ大動脈内への HRP の透過性の分布 [7]。

Garrity ら [8]もブタの大動脈を用いて、血漿蛋白であるアルブミン（分子量約7万ダルトン）と結合したエバンブルーの透過性と血管壁内面に存在する内皮細胞の形態を詳細に調べた。その結果、心臓をでた直後の曲り部において透過性が高く、その部位では内皮細胞が比較的丸い形状をしていたのに対し、透過性が低い部位では内皮細胞は細長い形状をしていた。これは、血管の部位による物質透過性の変化に内皮細胞が深く関与していることを示す結果であるといえる。

高血圧が動脈硬化発生の要因の一つであることから、血圧、すなわち血管内圧が物質透過性に及ぼす影響についても研究が行われている。Curmi ら [9] はウサギの大動脈を用いて  $^{131}\text{I}$ -LDL (low density lipoprotein, 分子量約 200 万ダルトン) と  $^{125}\text{I}$ -アルブミンの透過性に対する血管内圧の影響を調べた。彼らは 70 mmHg の内圧を負荷したときと比較し、160 mmHg の内圧を負荷したときの物質透過性が亢進することを示している。透過性亢進の度合はアルブミンの方が大きく、さらに血管内での濃度分布がアルブミンと LDL と大きく異なるという結果を示している。アルブミンと比較し、LDL は約 3 倍の分子の直径をもち透過性は分子量にほぼ依存した結果が得られ物理的にはごく自然な結果であるといえるが、血管壁内での濃度分布は図 2 に示すようにアルブミンの比較的平坦な濃度分布に比べ、LDL は血管内膜近傍に多く分布し、血管壁内部では急激に減少している。彼らは内皮細胞を剥離し 70 mmHg の内圧を負荷した実験も行っている。このときには、内膜近傍の LDL の濃度は、内皮細胞が存在し 160 mmHg の内圧を負荷

したときと比較し 1/6 程度であったが、血管内部では約 3 倍の濃度となり、透過量が増加しているうえ LDL の動脈内での分布は平坦なものとなった。同時にアルブミンの透過量も増大するという興味ある結果を得ている。

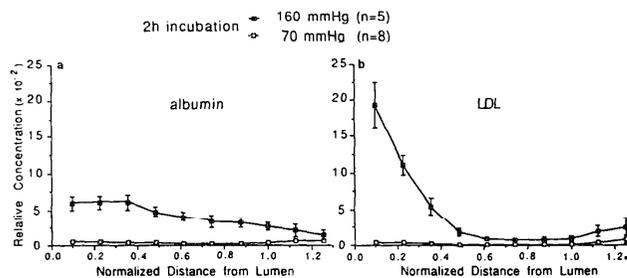


図 2 ウサギ大動脈内でのアルブミンおよび LDL の濃度分布 [9]。

動脈硬化の発生は血管内膜に脂質が沈着することから始まることと照らし合わせると、動脈硬化の発生において血管壁での物質透過現象が重要な要因であることは数多くの研究からも明らかである。また、血管壁組織内への物質移動に対する障壁として内皮細胞が重要な役割を担っていることも事実である。しかし、後述するように、現在のところ脂質や蛋白などがどのように内皮細胞を透過していくか諸説さまざまであり、その機序は明らかになっていない。動脈

硬化の発生を的確につかむためには、内皮細胞における物質の透過経路や、血圧、血液の流れなどの力学的刺激が内皮細胞にどのような影響を及ぼしているかを詳細に研究する必要がある。

### 3. 培養内皮細胞を通過する物質の移動

動脈硬化発生の問題を考えるとき、前章で触れたように血液中に増加した脂質は血管壁との界面に存在する内皮細胞を通過して壁内に蓄積する。そこで、どのような機序によって脂質などの高分子物質が内皮細胞を通るかが問題となり、最近単離した培養系の内皮細胞を使った研究が注目を集めるようになってきた。

透過性を有する膜の上に内皮細胞を培養して、アルブミン、LDL、デキストランなどの高分子量の物質をトレーサとして用いた研究が行われている。細胞を静的に培養した場合の結果が Hashida ら[10]、Casnocha ら[11]、Shasby ら[12]によって報告されている。Hashida ら[10]によれば、分子量の異なるデキストラン（4千～15万ダルトン）を用いた場合、分子量依存性に分子量が大きくなるほど透過性が低下した。また、温度を変えても透過性に変化はみられず、内皮細胞を通過するデキストランの移動は濃度勾配に依存した受動的な拡散であろうと考えられた。これに対して LDL の場合には、温度を低下させた実験では LDL の移動現象は観察されず、彼らは LDL が細胞内の小胞 (vesicle) に取り込まれて能動的に移動する vesicular transport であろうと推察している。また、Shasby ら[12]もアルブミンが濃度勾配に逆らって移動する現象を観察し、アルブミンの培養内皮細胞を通過する透過は能動的であり、デキストランは受動的な透過であると報告している。

生体内では、血管の内腔を覆う内皮細胞に対して絶えず血液の流れによるせん断応力が作用している。培養内皮細胞に対してせん断応力を負荷すると細胞の形態や機能が変換することが報告されており[13-16]、物質透過に関する研究についてもせん断応力の影響を検討しておくことが必要である。このような観点から著者の一人である佐藤ら[17]は、せん断応力を負荷した培養内皮細胞の透過性について検討した。透過性を有するポリエチレンテレフタレート膜（孔径 0.45  $\mu\text{m}$ ）の上でブタ大動脈由来の内皮細胞を培養し、この膜ユニットをフローチャンバにセットして 20  $\text{dyn}/\text{cm}^2$  のせん断応力を 24 時間にわたって負荷した。せん断応力負荷実験終了後、膜ユニットをはずし細胞培養用ウェル内にてアルブミンおよびデキストラン（分子量 7 万ダルトン）の透過性を調べた。得られた透過性の変化の一例を図 3 に示す。アルブミンの場合には、

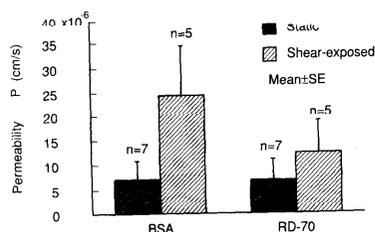


図 3 ブタ大動脈由来の内皮細胞を静的に培養した場合と、20  $\text{dyn}/\text{cm}^2$  のせん断応力を 24 時間負荷した場合のアルブミン (BSA) とデキストラン (RD-70) の透過性[17]。

せん断応力負荷によって約3倍程度透過性が亢進しており、この増加は統計学的にも有意であった。一方、アルブミンとほぼ同じ7万の分子量を有するデキストランの場合には、約1.4倍程度の増加がみられたが統計学的には有意の変化ではなかった。Joら[18]は、ウシ大動脈由来の内皮細胞を用い、巧妙な実験装置を作製してせん断応力の負荷条件のもとでアルブミン透過量の計測を行った。その結果を図4に示す。比較的低いせん断応力にもかかわらず、せん断応力負荷によって透過性が6~10倍亢進している。

同様の観点から内皮細胞内の物質の輸送(endocytosis)に対するせん断応力の影響が調べられ、せん断応力の負荷によってHRP[19]やLDL[20]の細胞内への取り込みが増加していることが報告されている。

#### 4. 微小循環系における物質の移動

微小循環とは、顕微鏡レベルで観察される血管系、リンパ管系および組織内の循環をさす。この循環系は、血液によって運ばれてきた酸素や栄養物が組織との間で二酸化炭素や老廃物と交換される場であり、生命現象を営む究極の場であるともいえる[21]。物質の移動が盛んに行われ、多くの研究者が関心を抱いている領域であるが、高分子物質がどの経路を通して移動しているのか未だに不明であり、盛んに論争が行われている。すなわち、前述の内皮細胞を通過しての物質移動のところで触れたように、蛋白などの高分子物質の移動が受動的か能動的か、またその経路は細胞間隙を通るのか細胞内の小胞に包まれて移動するのか、といった問題に議論が集中しているわけである。ここでは、このような研究の基礎となる佐藤らの微小循環系における物質移動現象に関する実験の内容を紹介する。

ラットの腸間膜の微小血管床を生体顕微鏡を用いて観察すると、微小血管に並行して微小リンパ管が走っている。頸静脈にチューブを挿入して、蛍光色素であるフルオレセインナトリウム(分子量370ダルトン)を注入し、毛細血管、その近傍の組織、リンパ管へと色素が移動していく過程をそれぞれの部位の濃度変化として計測した結果が図5である[22]。図中にはリンパ管の収縮運動を表す内径の変化も合わせて示している。ここで使用しているトレーサのように比較的分子量の小さい場合は、毛細血管から速やかに色素が漏れて組織中に拡散していく。その後、色素の拡散過程とともにリンパ管の能動的な収縮運動によって色素は末梢側のリンパ

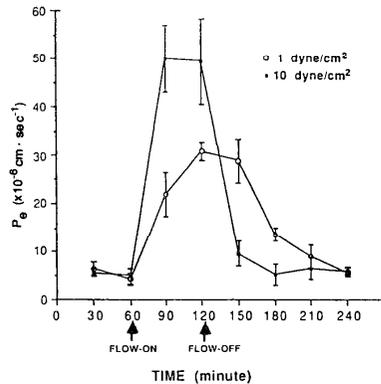


図4 ウシ大動脈由来の培養内皮細胞にせん断応力を負荷した場合のアルブミンの透過性の変化[18]。

管内に急速に吸い込まれ、中枢側へと輸送される。この過程は血液中の他の分子についても基本的には同様であって、微小血管床における物質交換過程の典型的な例を示している。

正常な腸間膜の微小血管床においては、低分子物質は前述のように比較的容易に毛細血管あるいは細静脈から漏れていくが、アルブミンのような高分子の物質は容易に漏れることはない。

(肝臓や脾臓のように高分子物質でも簡単に毛細血管を通過する臓器や、逆に脳のように低分子物質さえ通過させないような臓器もある。)ところが、なんらかの原因で白血球が活性化すると白血球から産生される物質が内皮細胞の機能を障害し物質透過性が亢進する現象が観察される。ラット腸間膜の微小血管床を対象に、白血球活性化因子を作用させると、細静脈を中心に内皮細胞に白血球が粘着してくる現象が観察される[23, 24]。このような状態の

ときに蛍光色素でラベルされたアルブミンを投与すると、図6にみられるように白血球の粘着した部位から局所的にアルブミンが漏れて、透過性が亢進しているのを観察することができる[23, 24]。生体内でのこのような現象が疾患の発生へとつながっていくわけであるが、生体内に

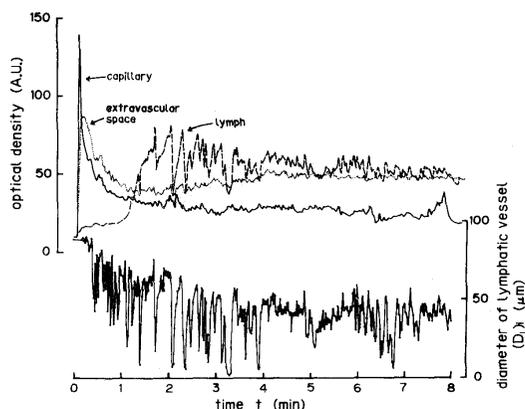


図5 毛細血管からリンパ管への蛍光色素の移動過程。各組織における蛍光色素濃度の時間変化およびリンパ管径の変化を表す[22]。

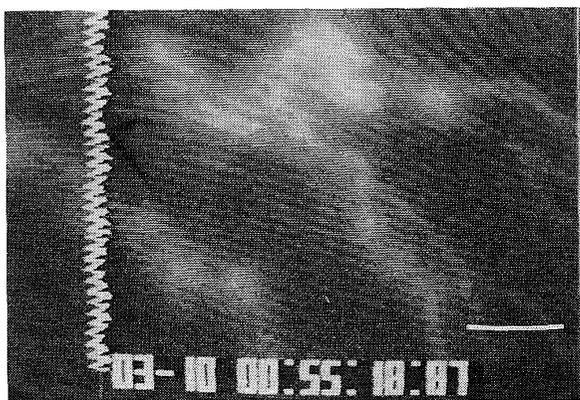


図6 白血球を活性化した場合にみられるラット腸間膜における局所的なアルブミンの漏れの様子[23, 24]。バーは100 μm

おける物質透過性の機序と物質移動の動的な過程に関しては今後益々研究が行われる必要がある。

## 5. おわりに

本総説では、著者らが日頃関心をもっている血液循環系の中での物質移動現象について述べた。ガス、低分子物質、高分子物質あるいは生体内の臓器、器官の種類によっても物質移動の機序に違いはあるが、生体においては生命活動の一環として物質の移動が日常茶飯事のこととして起こっている。ところが、本文中にも述べたように、このような現象については不明な点も多く、かつわが国においては研究者の数も少ないというのが実情である。いかに生体内とはいえ、起こっている現象は物理化学的であり、物質移動現象の動的過程の解析などについては工学者の寄与できるところが大である。本拙文によって、一人でも多くの方が物質移動を含む生体工学の領域の研究に関心をもっていただければ幸いである。

## 謝辞

ここで紹介した研究成果の一部は、文部省科学研究費 一般研究 (C) (課題番号 04670513) および重点領域研究「バイオメカニクス」によるものである。

## 参考文献

- [1] Cooney, D.O. 著 (権藤晋一郎訳) : 医工学、アイピーシー、東京、1984.
- [2] 鈴木泰三、星猛編 : 臨床生理学 (上・下巻)、南山堂、東京、1976.
- [3] Schwartz, C.J., Valente, A.J., Sprague, E.A., Kelley, J.L. and Nerem, R.M.: Clin. Cardiol. 14, 1-1-16, 1991.
- [4] Nerem, R.M.: J. Biomech. Eng. 114, 274-282, 1992.
- [5] 佐藤正明、大島宣雄 : 現代医療 23, 1557-1562, 1991.
- [6] 佐藤正明、大島宣雄 : 日本ME学会雑誌BME 6, 19-26, 1992.
- [7] Barakat, A.I., Uthhoff, P.A.F. and Colton, K.C.: J. Biomech. Eng. 114, 283-292, 1992.
- [8] Gerrity, R.G., Richardson, M., Somer, B.S., Bell, F.P. and Schwartz, C.J.: Am. J. Pathol. 89, 313-334, 1977.
- [9] Curmi, P.A., Juan, L. and Tedgui, A.: Circ. Res. 66, 1692-1702, 1990.
- [10] Hashida, R., Anamizu, C., Yagyu-Mizuno, Y., Ohkuma, S. and Takano, T: Cell Struc. Funct. 11, 343-349, 1986.
- [11] Casnocha, S.A., Eskin, S.G., Hall, E.R. and McIntire, L.V.: J. Appl. Physiol. 67, 1997-2005, 1989.
- [12] Shasby, D.M. and Shasby, S.S.: Circ. Res. 57, 903-908, 1985.

- [13] 佐藤正明、大川敬子、Nerem, R.M.、大島宣雄：脈管学 30, 1153-1156, 1990.
- [14] 佐藤正明、大島宣雄：日本バイオレオロジー学会誌 4, 56-68, 1990.
- [15] Dell, R.O., Tarbell, J.M. and Davies, P.F.: J. Vasc. Res. 29, 410-419, 1992.
- [16] Nollert, M.V., Diamond, S.L. and McIntire, L.V.: Biotech. Bioeng. 38, 588-602, 1991.
- [17] Sato, M., Ookawa, K. and Ohshima, N.: Abstracts of Tokyo International Symposium on Vascular Endothelial Cell Functions and Biomechanics, 5-6, 1992.
- [18] Jo, N., Dull, R.O., Hollis, T.M. and Tarbell, J.M.: Am. J. Physiol. 26, H1992-H1996, 1991.
- [19] Davies, P.F., Dewey, C.F., Jr., Bussolari, S.R., Gordon, F.J. and Gimbrone, M.A., Jr.: J. Clin. Invest. 73, 1121-1129, 1984.
- [20] Sprague, E.A., Steinbach, B.L., Nerem, R.M. and Schwartz, C.J.: Circulation 76, 648-656, 1987.
- [21] 東健彦、神谷暲編：微小循環—医学と理工学の接点。コロナ社、東京、1983.
- [22] Ohshima, N. and Sato, M.: Microvasc. Res. 34, 250-255, 1987.
- [23] 佐藤正明、大川敬子、大島宣雄：慈恵医大シンポジウム論文集 ”血液レオロジー最近の進歩” , 36-44, 1990.
- [24] Ookawa, K., Sato, M. and Ohshima, N.: in vivo 5, 349-354, 1991.

## 新素材と熱物性

長島 昭 慶大・理工

### 1. 技術創生と新素材

新しい技術の発展は、新しい材料の開発によるところが大きい。いわゆる新素材は、従来使われてきた材料のグレードアップを図るというよりも、全く新しい観点の素材の登場でもって、新しい技術の創生を促す面が強調される。エネルギー工学的な例でも、耐熱鋼のグレードアップで徐々にサイクル温度の上昇を達成しつつあったガスタービンが、セラミックスの利用で一挙に高温化を可能にして、蒸気タービンとの組み合わせ技術を有用なものとした。

技術創生という点で、新素材にとって熱物性値情報は極めて重要である。この点は30年前、すなわち伝熱シンポジウム発足の頃には、少なくとも熱工学研究者の間ではあまり意識されていなかったように見える。例えば、伝熱シンポジウムの初期の前刷集（講演論文集と呼ぶのは第4回から）などを見ても、素材創生にかかわる視点の研究は見あたらない。それまでは新しい材料は国外から伝えられるのが通例であったから、当たり前かも知れない。

さて話を現在へ戻そう。熱物性の関わりは、新素材の開発・製造、その利用、そして熱物性設計という3段階を考える。まず第一に、新素材を開発し製造するための熱物性データの必要性が挙げられる。多くの材料は固相のままでは製造することは出来ず、いったん熔融して、液相（場合によっては気相も使って）で精製や成形を行う。金属材料はもちろん、半導体単結晶の製造などはその典型である。凝固速度と熱条件の関係にとどまらず、融液の対流しやすさなども、完成した結晶の品質に影響を与える。

第二には、新素材の利用時における熱物性の重要性である。未知の利用条件で性能予測を行うには、シミュレーション計算が欠かせない。シミュレーションのソフトにはだれでも経費と労力を惜しまないが、データはなおざりにされてきた。正確なデータを伴わない計算は浪費か気休めに過ぎない。また、新しいプラントや機器の運転制御もコンピューターによることが多いが、データが正確でないと許容度を不必要に大きく設定しなくてはならない。さらには、事故時の対応を考えると、使われている新素材が何らかの予測外の条件に遭遇した場合に、監視にも対策設定にも熱物性情報が重要になるであろう。その意味で、正規の使用条件を超えた状態の熱物性を調べておくことは大切である。

さて第三の観点は今後の課題にかかわる。新素材はこれまでは、まず材料が先に生み出されて、それから応用を考えだすという順序が多かった。これがセラミックスなど、高度な材料が作られながらも、収益には十分結びつかなかった理由かと思われる。その意味では、まず応用

の必要条件を設定して、それに最適の熱物性をもつ材料を作り出す、いわゆる熱物性設計の時代に入ってきたといえよう。分子レベルの製造・加工技術が地平線に姿を現しつつある今、それを目指した研究開発が興味深い。

新素材は新技術を生み、新技術は次の世代の新素材を創り出す。この共振・増幅効果に熱物性情報は寄与している。

## 2. 新素材の種類と”新物性”

新素材と一口に言っても、非常に多様な種類があり、それらの材料への熱物性の関わり方に違いがある。

まず、物質そのものが新しいという新素材がある。これにはファインセラミックスとかカーボンなどのほか、傾斜機能材料とか形状記憶合金といった機能的にみた新材料もある。また、応用との関係で期待が先行した高温超伝導材料は最近のひとつの典型といえるであろう。

次に、物質そのものは新しくなくて、その形状が新しいという意味で、新素材と同様に扱われるものがある。最近話題の多い薄膜、超微粒子、極細ファイバーなどがそれである。これらの材料は、ある限界を越えて厚みや直径が小さくなると、その表面成形成層の厚さが相対的に大きな比率を占めるために、バルク材料の熱物性とは異なる性質を持つようになる。

物性の種類についても、これまでは全く考える必要のなかった新しい物性が問題となる、新物性型の新素材がある。その性質のひとつが熱的異方性、すなわち方向によって異なる熱物性を示すことである。例えば高分子材料中に何らかの原因で分子配向が生じると、強度だけでなく熱的にも異方性が表れる。熱伝導率がたて方向と横方向で異なる大きさを示すが、その差は予想以上に大きい。また、材料によっては、急激な変形などを受けると、そのあとゆっくりと熱伝導率が変化していく熱的な緩和現象を示したり、あるいは過剰に対応する”オーバーシュート”を熱的に観察することができる。

以上に述べてきた材料、あるいは性質は、最近になって話題になってきたものなので、熱物性値はおろか、その測定方法さえ確立されていないものが多い。ここで最近の例を紹介しながら、今後の研究課題を考えてみたい。

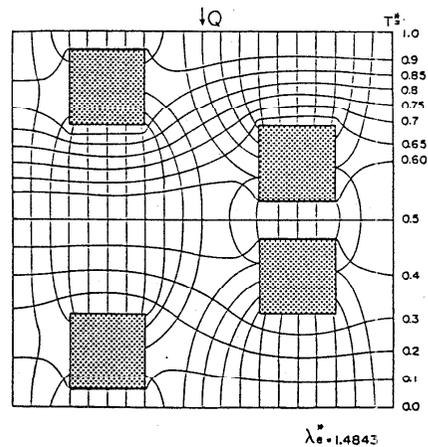


図1 非均質材料の等温線と熱流線モデル  
(山田ら[1])

### 3. 傾斜機能材料とヘテロ材料

新素材のうちで、非均質材料（ヘテロ材料）は、測定法が定まらないだけでなく、熱物性値の定義さえ定め難いことがある。例えば、図1のように、大きい連続媒体Aの中に別の物質Bの小片が分散しているような場合に[1]、AとBの熱伝導率が等しくないとすると、熱流は局所的にはA内とB内で方向が（実は伝導速度が）異なる。ということは小片の形、大きさ、分散形態などによって系全体の巨視的な熱伝導率が変わってくる。熱伝導率は、本来は物質と温度（圧力）条件だけ指定すれば一義的に定まるはずのものであるから、非均質材料では厳密には熱伝導率と呼んではいけないことになる。しかし工業的には、全体を平均化した仮空の均質材料に置き換えて、熱伝導率と等価なものと考えるのが便利であり、その要求も強い。この問題は実は古くからある問題であるが、最近、高温用複合材料の発展などで重要な問題となっている。

別の話題に傾斜機能材料がある。宇宙往還機の熱遮蔽材料などとして注目されているが、図2のように内部に熱物性値の分布を持つために、熱物性値の定義にまでたかえって測定原理を考える必要がある。この興味深い問題について荒木ら[2]は、図3のような多層試料における温度応答の解析方法を提案した。また、澤尻ら[3]は、薄膜に対する光音響法の解法を多層系に拡張して測定する方法を提案した。

固体の熱伝導率の測定法として圧倒的な普及を誇るレーザーフラッシュ法は、表面に照射したレーザーパルスの温度応答を裏面でとらえて熱伝導率を求める方法で、傾斜機能材料への応用は普通は難しい。馬場[4]は最近、インパルス応答関数として解析する方法を提案していて興味深い。

### 4. 薄膜、マイクロ材料

材料の寸法がある限度以上に小さくなっていくと、前にも触れたように物質表面の特異性が相対的に強く表れ

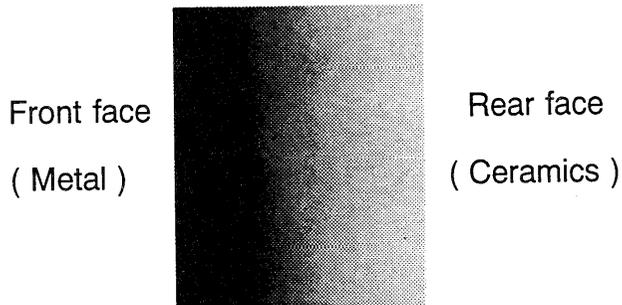


図2 傾斜機能材料の概念

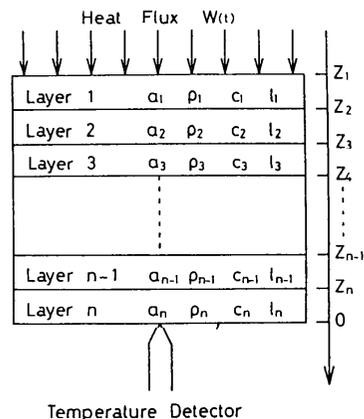


図3 多層試料のモデル

て、バルク材料と異なった性質が期待されるようになる。これが薄膜や超微粒了などに興味もたれる理由のひとつである。形状や大きさが変わるだけでも新材料が生まれる一例と考えてよいであろう。微粒子になると比熱や熱伝導率が変化するほか、融点が非常に低くなるなどの話もあるが、実験的な検証がきわめて難しい。熱伝導率などは、大きな試料でも、信頼できる測定は難しいのに、薄膜などでは測定法さえ明かでなかった。

このような困難に対してさまざまな挑戦が発表されている。八田ら[5]は、周期的な光照射による温度波の伝播を巧妙に使って、薄膜の面方向の温度伝導率を測定している。面方向（一部は厚さ方向の研究を含む）についてはレーザーフラッシュ法による太田ら[6]、あるいはスポットフラッシュ法による三橋ら[7]の測定とか、ふく射放熱量と伝導量のバランスに着目した小野ら[8]の方法など、伝熱学的にも面白い方法が戦国時代ともいえる状況である。薄膜の厚さ方向の熱伝導率はまだ確立された方法は無いといったほうがよいが、澤尻ら[3]の光音響法は原理的に厚さ方向の測定に適した方法である。これは基本的には図4のような層別の非定常温度波の伝播を解く考え方である。

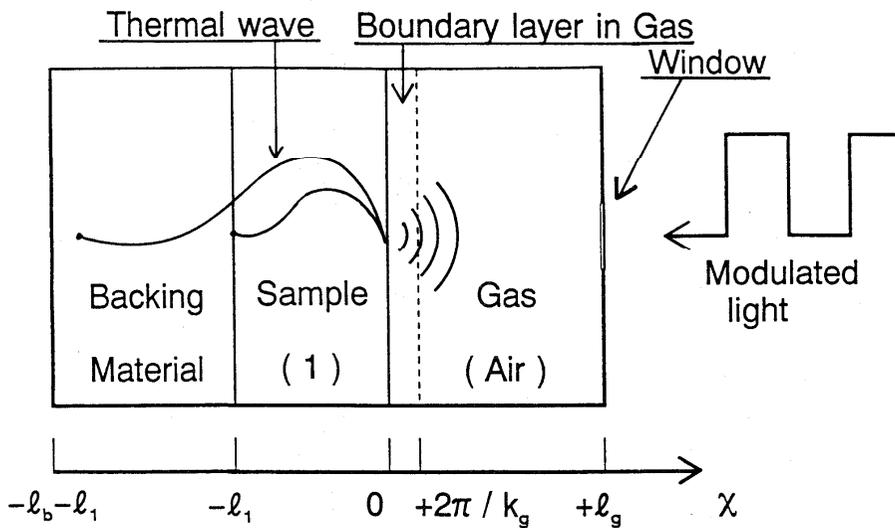


図4 光音響法モデル

多くの新手法の提案はあっても、実際の測定結果はまだまだ不一致が大きい。例えばチタン薄膜の例で見ると、図5のようにいろいろな方法による値の差は5倍近くもある。

薄膜以外は、新測定法の提案もまだ十分でなく、したがって新材料の物性挙動もわかっていない。最近、著者らは、数十マイクロオーダーの微小系の温度伝導率を、光学的に絶対測定する方法（強制レイリー散乱法）を発表した[9]。しかし、今後この種の研究が発展していくと、

微小物体だけでなく、材料内のキレツ進展や疲労の微視的研究にも役立つものと期待される。

### 5. 熱的異方性

高分子材料の高度利用には、分子配向の影響が問題になる。成形加工時に長い分子鎖が一定の方向にそろえられて、その結果、強度や熱膨張率が方向によって異なる現象である。この異方性は熱伝導率などにも生じる可能性がある。高分子材料を光学レンズや精密部品に応用するには、凝固プロセスの正確なコントロールとともに、使用時の熱変形の予測が必要である。

熱伝導率の絶対値のみならず、その異方性を定量的に知りたいという新しい要求に対し、従来の測定技術では不可能であった。前節で触れた強制レイリ-散乱法は、特定方向だけの熱伝導を選択的に検出できる希な方法である[10]。2光束のレーザー光の干渉による直線的な温度の周期的分布を利用するので、熱伝導は1方向だけに生じる。それを光学的に検出する方法であるが、とりあえずは透明材料に限られる。例えば図6のように、高分子ファイバーの軸方向と、それに垂直な方向に温度波を形成させれば、別々に温度伝導率を測定することができる。ナイロンファイバーの例では、軸方向の温度伝導率は、それに垂直な方向の値の2倍もあり、加工時の影響で分子配向が起こっている状態を反映している。

異方性は、従来はあまり考える必要のなかった新しい物性の一例として挙げてみた。この他にも興味深い性質が幾つもある。極低温において、電気的な超伝導現象が大変な注目を集めたが、熱伝導にも特異性が現れる。さらに、極低温では、あたかも粘

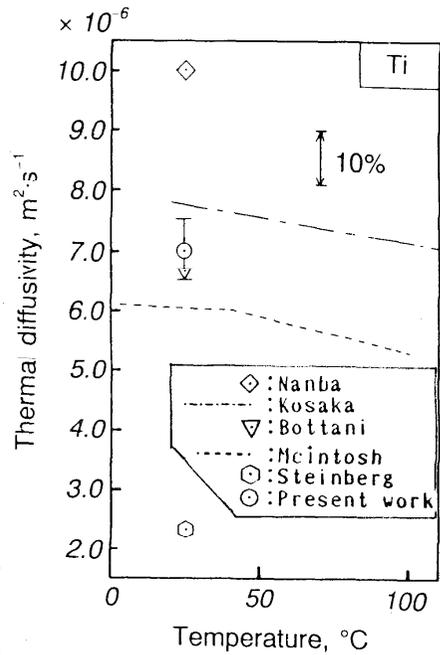
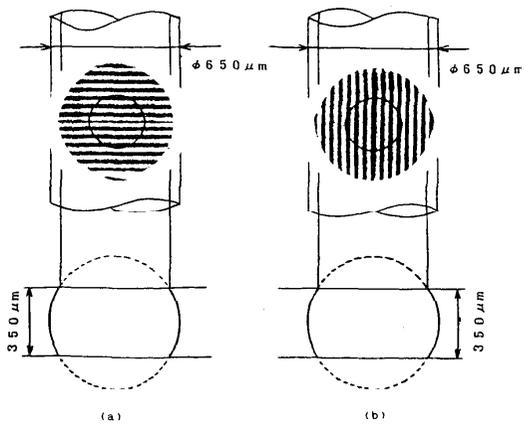


図5 Tiの測定結果



(a)軸方向温度伝導率の測定

(b)半径方向温度伝導率の測定

図6 測定時のナイロン66ファイバー

性がなくなったかのような超流動現象も知られている。また、必ずしも熱物性とは呼べないが、熱物性と切り離して考えられないものに、固液界面のぬれ性がある。これらのいろいろな物性や現象は、いずれも新素材の生産や応用において、大きな障害ともなり、同時に新しい可能性を開くものともいえよう。いずれにしても、理論的な予測手段も、実験的な測定手段もまだ十分にはわかっていない。これからの課題として注目される。

## 6. 30年後の新素材

伝熱学会30周年で、さらに30年後を考えると、新素材も思いがけないものが登場するであろう。想像できる範囲では、ひとつは、特定の機能に特徴のある材料、あるいはまた、生体系の材料であろうか。これらは熱的条件が現在以上に厳しく設定されることになり、したがって熱物性の詳しいデータが必要であろう。しかし、その測定方法も新たに考え出さねばならないことが予想され、熱工学の研究者に期待される場所は大きい。

## 参考文献

- [1] 山田悦郎、高橋カネ子、小川雄一、山崎之彦、冷凍、57-653(1982), 239, ほか。
- [2] 石黒達男、牧野敦、野田直剛、荒木信行、機械学会論文集、58B-556(1992-12), 3690.
- [3] 澤尻修成、慶大修士論文(1992). 澤尻修成、曾根来、長坂雄次、第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集、(1992), 392.
- [4] 馬場哲也、熱物性、7-1(1993), 14.
- [5] 八田一郎、安積忠彦、島田賢次、加藤良二、前園明一、第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集、(1992), 122.
- [6] 太田弘道、柴田浩幸、早稲田嘉夫、第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集、(1992), 22.
- [7] 二橋武文、貝塚健志、菱田俊一、羽田肇、山本良一、第13回日本熱物性シンポジウム講演論文集、(1992), 18.
- [8] A. Ono, T. Baba, T. Matsumoto, H. Funamoto, A. Nishikawa, K. Takahashi, Proc. 2nd Asian Thermophys. Prop. Conf., (1989), 473.
- [9] 島田雅文、長島昭、機械学会論文集、57B-541(1991-9), 3300.
- [10] N. Tanaka, A. Nagashima, Thermal Sci. & Eng., 1-1(1993), 11.

## 原子力工学における伝熱研究の進展 —核融合炉の高熱流束伝熱技術—

戸田 三朗 (東北大 工)

### 1. はじめに

近年の原子力工学における伝熱研究の進展についてまとめるには、その対象となる機器装置が多岐にわたり、強制対流、自然対流、沸騰から電磁流体、その他あらゆる伝熱技術を応用してはじめて成立する工学分野である。これら個々の分野の詳細は本特集号のシリーズの中でレビューされており、また第29回伝熱シンポジウムのオーガナイズセッション“原子力発電プラント”があったので、このレビューは特に厳しい環境下の伝熱技術が要求される核融合炉の高熱流束機器の問題について、近年の進展について述べることにする。

核融合炉としてここでは磁気閉じ込め核融合炉を前提に話を進めることにするが、他の方式の炉においても同じ技術を必要としている。さて、ご承知のように国際熱核融合炉ITERが昨年その実現に向かって踏みだした。その実現のためには言うまでもなく、さらに21世紀のその先には原型炉、動力炉へとますます過酷な技術が要求されると考えられ、研究の積み上げとともにパラダイムの発想によるブレークスルー技術が必要となるであろう。核融合炉の炉心プラズマ周辺には第一壁、ダイバーターあるいはリミターなどの高熱流束の負荷を受ける構造物、機器があり、ますます過酷な環境で使用され、特に熱除去の問題は重要である。そこで、この分野の研究の状況をレビューする。

### 2. 従来技術による高熱流束伝熱技術の進展

第一壁をはじめとする高熱流束負荷を受ける壁の熱構造設計では、考慮を要する多くの問題を総合的に検討して設計の最適値を見出すことになるが、環境条件の厳しさのため必ずしも結論に至れない場合に遭遇する。この限界をもたらす原因は除熱限界や過大な圧力損失にある。そこで、従来技術であるガス、水、および液体金属による冷却について熱伝達率の促進によってその限界を高め、あるいはその要因の軽減、回避をする技術について近年の進展をレビューする。

#### 2.1 ガス冷却

ガス冷却の熱伝達は高温ガス冷却原子炉の研究によって良くわかっており、細かな点での差異はあるとしても、一般に熱伝達率が低いために $1 \text{ MW/m}^2$  オーダーの熱流束に対して境膜温度差が数 $100 \text{ K}$ と非常に大きく、したがってガス温度が高くなり過ぎ、耐高温材料が必要になる。そのため壁材の温度制限を満たすためにはガス温度を下げる、すなわち熱流束を下げて $1 \text{ MW/m}^2$ 以下の低い熱負荷となるよう設計せざるを得ない。一方、流速(または流量)を大きくして熱伝達率を上げ、境膜温度を低くする試みは、ガス・ブローの循環駆動力が異常に過大となり一般に実現困難である。これは、一方で高熱流束の除熱をになう高熱伝達率を期待すれば、他方でブローの循環駆動力が過大になるという相反する問題の1例である。

ガス冷却は以上述べたように高熱流束熱除去には及ばないが、中程度の熱流束では安全性その他の優れた特性を生かした設計が可能である。そのような場合を想定して、第一壁のプラズマに直接対向する冷却面、すなわちそれを構成する冷却管として円、矩形、“SIN”形の断面流路を考え、その一方の側からのみ熱負荷を受けるいわゆる不均一熱流束条件の場合について、ガス冷却の管内熱

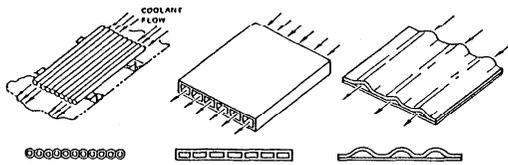


図1 ガス冷却流路形状のモデル

伝達が黒崎、佐藤<sup>(1-6)</sup>により明らかにされている。図1は各流路のモデルである。流路内では不均一熱負荷によって、浮力による2次流れ、流路壁内を熱伝導によって拡散する熱、および非対称温度分布による高、低温壁間の輻射熱によって複雑な熱伝達となっている。壁内熱伝導については加熱部と非加熱部をそれぞれ組替えて冷却フィンを構成するモデルにより、また高、低温の壁間の輻射については加熱部と非加熱部を分離した2平板間の輻射熱に置換し、壁内熱伝導と輻射伝熱の混合する場合も含めて、図2にモデルによる簡易計算法が提案されている。

## 2.2 水冷却

水冷却についてまず一般的な特性について説明しておこう。水は大変優れた冷却材で、軽水冷却型動力原子炉(PWR, BWR)の開発による豊富な知見を基に、核融合実験装置の機器の冷却などにはすでに適用されて実用に供されており、核融合動力炉の概念設計<sup>(7)</sup>にもPWR条件の水冷却が高熱流束除去の手段として採用されている。水冷却は磁場の影響も受けず、熱伝達率も高く、また熱輸送能力にも優れていることから、PWR条件の制約から第一壁の熱流束を $1 \text{ MW/m}^2$ 程度に抑える必要があるが、設計に使われている。この水冷却は正しくはサブクール温度差の大きな冷水のサブクール沸騰熱伝達による冷却方式であるが、核融合動力炉によって核融合エネルギーを熱エネルギーとして利用する立場からは、この水冷却は次の大きなマイナス要因を持っている。

- (a) 熱効率を高めるためにはPWR以上の高温高圧水にすることが必要であるが、図3に示すように高圧域ではバーンアウト熱流束は低圧域よりも逆に低下する傾向にあり、高熱流束除去への熱条件は厳しくなる。
- (b) 逆に、低圧にすることによりバーンアウト熱流束は高く、またサブクール温度差が大きいほど高くなり、いわゆるサブクール効果が期待できるが、冷却材温度すなわち冷却水温は低くなって、流路の最終出口水温は非常に低いものとなる。

このように低圧ではこのサブクール効果により、バーンアウト熱流束が高圧域におけるよりも大きな $\text{数 MW/m}^2$ 以上の高熱流束の熱除去が可能となる。しかし、この低圧の冷水による冷却は、高効率のエネルギー取り出し、輸送、変換を一貫するシステムが要求される核融合動力炉へ適用する場合、システムの出口水温を高められないという致命的要因により、その適用が困難と結論づけられる。

しかし、核融合実験装置をはじめ核融合動力炉においてもエネルギー回収に関わらない特殊構造物や機器の冷却に対しては、これから紹介する研究成果に示されているように、 $\text{数 } 10 \text{ MW/m}^2$ に達する高熱流束除去の最も優れた冷却方式の一つである。この低圧冷水冷却を特殊機器、構造物の冷却に使用する例としては核融合実験装置の高熱流束受熱機器の中性粒子入射装置(NBI)のビーム・ダンプ、水冷ジャケット、カロリメーターなどがある<sup>(9)</sup>。これらの応用例では、高熱流束を受ける壁面流路の構造、形状の工夫に加えて、流路内にスワール・テープを挿入するなどの伝熱促進

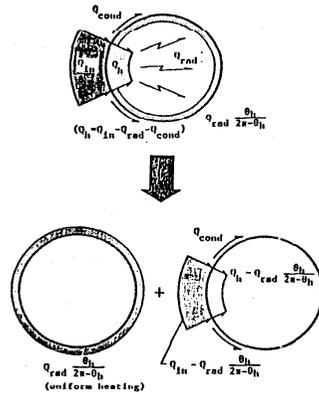


図2 非均一熱流束を受ける流路の簡易計算モデル

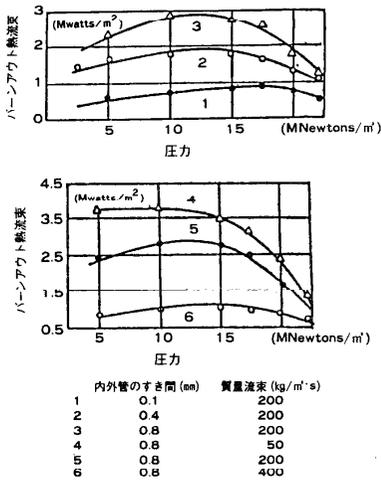


図3 サブクール沸騰への圧力と質量速度の影響

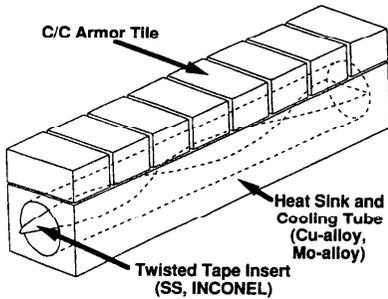


図5 スワール管（アーマ材を接合）

が図られており、最高75 MW/m<sup>2</sup>に至る超高熱流束除去が実証されている。

ここで、ITERのプラズマ対向機器<sup>(17)</sup>、特に日本原子力研究所において開発が進められている物理フェーズにおける設計とそれに適用される高サブクール水冷却について述べる。ITERダイバータ板の設計例を図4に示す。プラズマに面した部分はアーマタイル（CFC材が有力）によって覆われており、その下の冷却管（銅合金、モリブデンなど）により冷却される。アーマ材と冷却管の間は口付けされ接触熱抵抗を低減させている。ダイバータ板の開発課題は（1）アーマ材と冷却管の接合技術、（2）高熱流束を除去するための冷却管構造、（3）ダイバータ板の支持構造（熱膨張等の変形を吸収）であり、いずれも熱技術の課題となっている。ITERではダイバータ板の熱流束は15～30 MW/m<sup>2</sup>に達するため、高い限界熱流束を望めるスワール管（図5に示す）が適用されている。図6はそのようなスワール管の片面加熱（イオンビームによる核融合条件模擬）によるサブクール水の限界熱流束の実験値であり、平滑管の約2倍の40 MW/m<sup>2</sup>にも及んでいる。まだこれらの実験値を予測できる相関式は

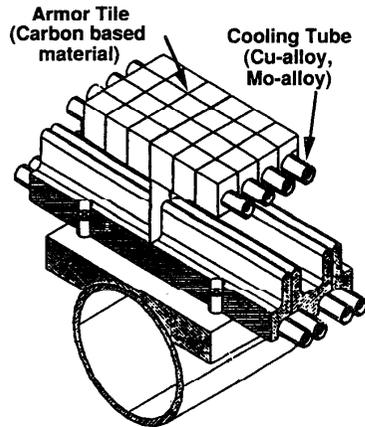


図4 ITERダイバータ板の設計例

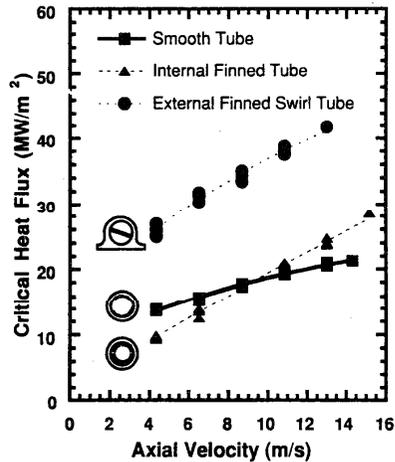


図6 片面加熱スワール管内サブクール水の限界熱流束

出されていないため、Araki<sup>(19)</sup>らは種々の断面形状のダイバータ冷却構造体の実験を行って、片面加熱下のスワール管の熱伝達特性を調べているのもでその結果が待たれる。

低圧冷水のサブクール沸騰冷却について、成合、稲坂ら<sup>(10-15)</sup>が細管を用いて一連の実験を行い、限界熱流束のサブクール温度差、細管寸法の効果、およびサブクール沸騰二相流動の圧力損失について実験を行い、図7に示すように、今までに提案されているGriffel式、Knoebel式、甲藤式、Tong式、Gunther式と比較され、また実験値の妥当性検証のためBerglesらのD、L/Dの影響の実験データとの比較もおこなっている。限界熱流束の相関式の内、気泡境界層の剥離モデルに立脚するTong式<sup>(16)</sup>より実験値はかなり下回るものの、傾向はほぼ同じであることを明らかにし、修正Tong式を±15%の誤差範囲で一致する相関式として提案している。

水冷却においてさらに記すべきものとして、軽水冷却型原子炉のBWR条件に対応する沸騰水冷却があるので簡単に触れる<sup>(7)</sup>。NUWMAK 核融合炉がその設計例であるが、沸騰伝熱は、低い壁面過熱度で高い熱流束の熱除去が可能であるが、熱流束のレベルが先のサブクール沸騰冷却にはるかに及ばないため冷水冷却の補完的冷却方式といえ、数MW/m<sup>2</sup>以上の高熱流束の除去には難がある。いずれにせよ、応用する場合には顕熱に加えて潜熱による高効率の熱輸送があることを最大限に利用し、流路でのドライアウトの発生素因となる沸騰2流相の不安定流動特性への注意が必要である。

### 2.3 液体金属冷却

液体金属冷却を第一壁の冷却に適用する場合に重要な基礎的特徴について簡単に述べる。液体金属(核融合炉ではトリチウムの増殖との関連からリチウムLiが代表的である)は極めて優れた熱的特性、性質を持ち、液体LiはD-T核融合炉ではトリチウム増殖材を兼ねることができ、ブランケット構造を単純化できるため、第一壁の高熱流束除去にも同一冷却材の使用の観点から概念設計に採用されている<sup>(20)</sup>。しかし、高磁場における磁気圧力損失(MHD)と漏洩時の火災がマイナス要因となっている。

液体金属(Li)冷却は、高速増殖炉(FBR)の開発における液体金属(Na)技術のデータベースがあり、一般の磁場のない環境下での熱伝達特性、流動がよく予測できるのに対して、核融合炉の厳しい複合環境下では未解決の問題が少なからず存在する。液体金属の熱的性質を比較すると、一般に熱伝導率は水の10<sup>2</sup>倍あり、高い熱伝達率が得られるのに加え、液体Liは熱輸送の面からも $\rho_c C_p c$ (熱容量)が水と同じオーダーであり、優れた性質を持っている。また、D-T核融合炉では液体Li冷却材中に内部加熱(核加熱)があり、熱除去・輸送・変換のシステムの構造が、金属壁を通して熱のやり取りをするガス、水の冷却方式と比較して構造は簡略化される。また、液体金属の沸点は1000℃の前後にあり、低圧(ほぼ大気圧に近い)で高温であるにもかかわらずサブクール温度差を大きくとれる単相流冷却であり、数MW/m<sup>2</sup>の第一壁の高熱流束負荷に充分対応できる能力がある。熱構造的見地からは高熱流束負荷への冷却能力は充分であり、熱応力、構造材寿命などの制限についての検討が重要になる。また、動力プラントとしての発電効率上も、液体金属の高温という利点があり、液体金属蒸気および水蒸気のタービンサイクル(2重サイクル)など、サイクルの

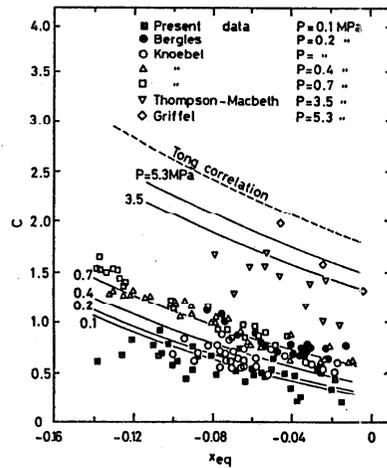


図7 限界熱流束のTong式及び修正Tong式と実験値の比較

上限温度の上昇によって高い効率が期待される。

液体金属の大きなマイナス要因は、磁場下の磁気圧力損失 (MHD) が大きく、ポンプの循環駆動力の大部分がMHD損失に費やされてしまうことになる。MHD圧力損失の軽減対策の研究が強く要望される理由である。従って、液体Li冷却を第一壁冷却、ブランケット冷却に適用する場合には、第一壁では高熱負荷冷却に対応して磁場と平行に冷却材の液体Liを高速で流さざるをえない (したがってMHD圧力損失は大きい) が、ブランケット部分では低流速にすることでMHD圧力損失をある程度以下に抑え込む工夫がなされる。

一様磁場中の電磁力の支配的な流れでは、流れ方向に起電力は発生しない。けれども、磁場の強さが変化したり、導伝性壁の厚さが変わるなどの原因で、流れ方向に電位差が発生すると、その方向に電流が流れる。この電流は流体を壁から引き離す、あるいは壁に押しやる作用をし、流速分布に複雑な影響を与える。例えば、Kim-Abdou<sup>(21)</sup>

の図8の解析が示すように、流路の向かい合う2面が非導電性で、他の2面が導電性の壁で構成される矩形流路で、流れ方向に磁場が変化する領域を流体が通過する時、図に示すようなM型の流速分布が出現する。このM形の速度分布の流れでは、非導電性面に沿って生ずるサイド・フローによって、熱伝達率は図のように数倍高い値となる。

磁気圧力損失を軽減するためには、流路壁を非導電性材料で製作するのが有効であるが、最近、宮崎ら<sup>(22)</sup>は導電性の金属管 (SUS) の内面を非導電性材でコーティングする方法も有効でほぼ完全絶縁管に近い結果が得られることを報告している。MHD圧力損失を大幅に軽減する研究を強力に進める必要があろう。

### 3. 先駆的高熱負荷冷却法

いままで、在来のガス、水、液体金属による冷却方式の進展について述べ、核融合動力炉への応用にかなり高い障壁があることを示した。そこで、ガス冷却、液体金属冷却の良い特性を残しながら、熱伝達特性を大幅に改善しようとする革新的方法の研究が、現在進められている。以下に、その原理と冷却方式の概念について、典型的な事例を掲げて紹介する。

#### 3.1 固気混相衝突噴流冷却

固気2相媒体を用いたブランケットの概念が、長谷川ら<sup>(23-26)</sup>により提案されている。これは、単層ヘリウムガス流の低い伝熱特性を補い、さらにD-T核融合炉のブランケットにおいて粉体としてLi<sub>2</sub>Oを用いることによって、冷却材とトリチウム増殖材をかねさせる概念で Sze<sup>(27)</sup>らが提案したものを発展させたものである。図9に示すように固気2相媒体をノズルから噴出させて第一壁の冷却を行う。清水らは固気2相衝突噴流伝熱の実験を行い、その詳細な伝熱特性を調べているが、図10はその1例で、噴流衝突部の熱伝達率が大幅に増加し、伝熱促進の有効な方法であることを示している。図でΓは粉体粒子のローディング比である。固気2相流の熱伝達は、固体粒子の存在

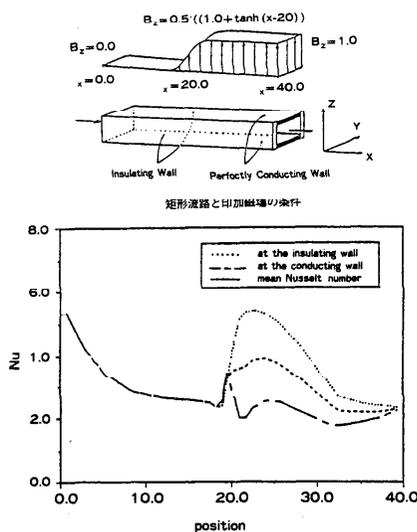


図8 磁場下の矩形流路内液体金属流のサイドフローと伝熱促進

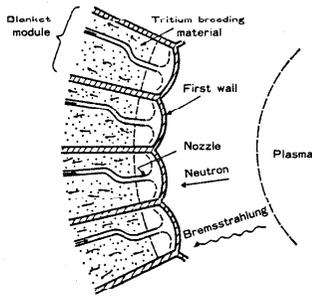


図9 固気混相衝突噴流による第一壁モデル

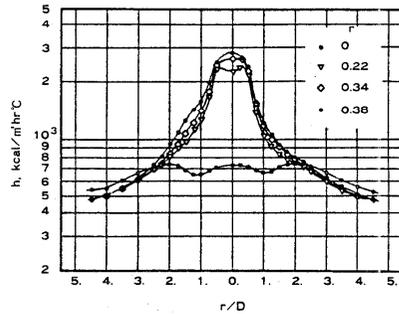


図10 固気混相衝突噴流の伝熱特性

による熱容量の増加、衝突部近傍の粘性底層

(壁近傍の粘性による静止層)の攪拌、乱流変化、高温域における熱輻射などを積極的に利用するもので、高い熱伝達率が得られている。また、熱輸送媒体としてもガス単相流よりも優れている。ただし、噴流衝突部の冷却壁の粒子によるエロージョンについては注意が必要である<sup>(26)</sup>。

### 3.2 液体金属ミスト衝突噴流冷却による超高熱負荷除去

核融合動力炉のコンパクト化、高出力密度化によって第一壁、ダイバーター、リミターの高熱流束受熱面では、最高数 $10\text{MW}/\text{m}^2$ にも達する超高熱流束負荷が予想されるが、現在この熱負荷に対応でき、かつ高効率の熱エネルギーの取り出し、輸送、変換のシステムを構成できる冷却方法は確立されていない。この様な超高熱流束の熱除去に限れば、先に述べた低圧、高サブクールの水冷却が対応できる。しかし、低温水であるため上記の熱エネルギーのシステムに冷却方式として組み込む

ことができない。また超高熱流束の水冷却は短い細管で実現できるのであって、核融合動力炉の冷却方法としては小伝熱面、高い圧力損失ゆえに冷却だけからの選択によって適用することは困難である。そこで、先に述べた液体金属冷却の優れた伝熱特性に注目し、その欠点を補う革新的冷却方式として、戸田ら<sup>(28-29)</sup>により提案されている液体金属ミスト冷却による超高熱負荷除去技術がある。この冷却方式は液体金属の高熱負荷除去特性をそのままに、ミスト流のボイド率が少なくとも80%以上であることから、高磁場においてもMHD圧力損失を殆ど受けることなく適応できる。液体金属としてLiを想定するが、液体Liの温度

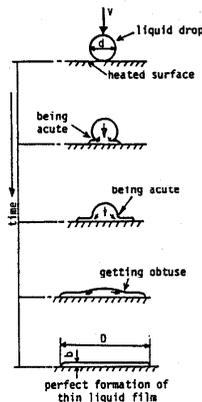


図11 液体金属ミスト冷却の液滴のダイナミクス

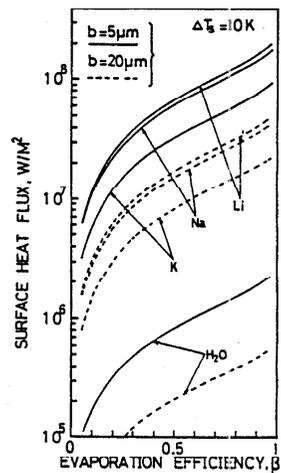


図12 液体金属ミスト冷却の超高熱流束熱除去特性

伝導率と熱容量はともに大きく、したがって強制対流熱伝達率は非常に高い。液体金属ミスト噴流の吐出圧は0.01 MPa程度であり、また系圧力は0.1MPaと低圧で、熱応力以外のフープ応力が軽減されて構造設計が容易になる。対象の高温面の温度範囲も、数100～千数100℃と広範囲に対応できる。

液体金属ミスト衝突噴流冷却の基本構造は、固気混相の場合と類似し、液体金属滴(Li)をノズルからの噴霧によってキャリア・ガス(He)中に浮遊させ、液体金属滴・ガスの混相流として高熱負荷面に噴流衝突させて高熱流束の熱除去を行う冷却法である。図1-1に示すように数 $\mu\text{m}$ ～mmの微細液体金属滴は、高温面上で衝突圧により円形膜上に変形し、伝熱接触面積の拡大と液体金属の大きな温度伝導率のため、液滴の変形時間内に高温面から熱を吸収しつくした状態で(水のミスト冷却では、低い温度伝導率のため液滴の変形後の長時間を経ても、熱を十分に吸収できない。)高温面より離脱する。この過程が衝突液滴群と広範囲の高温面の間で進行し、高熱負荷除去が行われる。衝突液滴による液膜を高温面上に如何に隙間なく配置できるかという幾何学的噴霧技術に依存するとしても、液膜表面からの蒸発律則まで自由蒸発できると考えると、除去できる熱負荷は超高熱負荷の領域まで上昇可能である。図1-2はこの条件を仮定して解析された液体金属ミスト衝突噴流冷却の熱負荷特性である。横軸の $\beta$ は液滴の蒸発時間率(液滴が完全に蒸発するのに要する時間を1とする)で、蒸発割合の目安を与えるもので、彼らの実験では、 $\beta$ は約0.3である。

液体金属ミスト衝突噴流冷却は、熱伝達の素過程に立脚して超高熱負荷除去の可能性が展望できるので、実用化<sup>(31)</sup>への基礎研究の進展が望まれる。特に、局所の超高熱負荷除去に優れた特性をもっているため、ダイバーターやリミターなどの比較的小さな高熱流束受熱面の冷却に応用されるのも近いかも知れない。

### 3.3 液体金属2相流冷却

液体金属2相流の実効伝導度は流動様式とボイド率により変わる。ある値までのボイド率までは、実効伝導度はおおそボイド率に比例して減少するが、それ以上のボイド率では液体は気体中に分散して存在するようになり、この液体の不連続が電気抵抗の急激な増加をもたらす、渦電流経路が遮断される結果、MHD圧力損失は著しく減少する。この遷移点のボイド率はほぼ0.75前後にある。液体金属2相流による高熱流束熱除去は、液体金属の沸騰、蒸発を積極的に生じさせることで得られると推定されるが、液体金属の沸騰は大変不安定であることから、むしろ熱流束としては中レベル(1 MW/m<sup>2</sup> オーダー)の比較的緩やかな蒸発に依存する二相強制対流領域の熱伝達による冷却が適切であると考えられる。

本冷却方式は、(1)蒸発潜熱による高密度エネルギー輸送、(2)MHD圧力損失の低下、(3)2相混合による流路内温度分布の平坦化が期待されるので、3.2に述べた液体金属ミスト冷却による高熱負荷除去と2相流による熱エネルギー輸送・変換の組合せによって、核融合動力炉の熱除去・輸送・変換の液体金属一貫システムが構築できることも夢ではない。

## 4. おわりに

核融合動力炉を目標に、第一壁、ダイバーター、リミターなどの高熱流束受熱機器の冷却について、ガス冷却、水冷却、液体金属冷却という既存の冷却方式の進展を先ず展望した。核融合動力炉の第一壁の熱負荷は、ダイバーター一部で熱エネルギーの何割を受け持つかの設計思想によって変わる要素をもっているが、いずれの機器の受熱壁も、既存の冷却方式では対応困難な高熱流束に曝されると予想される。したがって、そのような超高熱流束の熱除去を可能とする新しい冷却方式の開

発が望まれている。近年の核融合動力炉の概念設計は保守的な水冷却に依存したものとなっている。これからの核融合動力炉の設計では、コンパクト化と高出力密度化が図られ、高熱負荷機器の熱除去が動力炉の実現の可否を決めるキーポイントとなることは必須である。本レビューでは、従来の冷却方式のより高熱流束への進展の状況とともに、日本で現在精力的に研究が行われている先駆的な冷却方式、すなわち固気2相衝突流冷却、液体金属ミスト衝突噴流冷却、液体金属2相流冷却の研究の進展について解説した。いうまでもなく、これらの研究は既存の冷却方式の改善研究と表裏一体の関係にあり、この面の研究がさらに進むことを望む次第である。

## 文 献

1. 佐藤、黒崎、日本機械学会論文集 (B編)、51, 464 (1985), 1342-1348.
2. 黒崎、佐藤、日本機械学会論文集 (B編)、52, 474 (1986), 841-849.  
または、Int. J. Heat Mass Transfer, 30, 6 (1987), 1201-1208.
3. 佐藤、黒崎、日本機械学会論文集 (B編)、52, 474 (1986), 850.
4. 佐藤、黒崎、日本機械学会論文集 (B編)、52, 476 (1986), 1741.
5. 佐藤、黒崎、日本機械学会論文集 (B編)、53, 494 (1987), 3076.
6. 佐藤、黒崎、日本機械学会論文集 (B編)、53, 499 (1987), 661.
7. 秋山、核融合研究、56, (1986), 26.
8. Tolulinskiy, V. I., et al., Heat Transfer Soviet Research, 2, (1970), 192.
9. 宮、他2名、日本原子力学会誌、29, (1987), 855.
10. 稲坂、他2名、日本機械学会論文集 (B編)、53, 494 (1987), 3093.
11. 成合、他2名、日本機械学会論文集 (B編)、54, 502 (1988), 1406.
12. 稲坂、他2名、日本機械学会論文集 (B編)、52, 476 (1986), 1817.
13. Inasaka, F. and Nariai H., JSME Journal, 30, 268 (1987), 1595.
14. Inasaka, F. and Nariai H., Proc. 4th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, 1, (1989), 115.
15. Nariai, H. and Inasaka, F., Fusion Engineering and Design, 9, (1989), 245.
16. Tong, L. S., Int. J. Heat Mass Transfer, 11, (1968), 1208.
17. Kuroda, T. and Vieder, G., ITER Documentation Series, No. 30, IAEA, 1991.
18. 秋場真人、荒木政則、日本機械学会第70期全国大会資料集 (Vol. F)、(1992), 29.
19. Araki M., et al., Fusion Engineering and Design, 19, (1989), 231.
20. Smith, D. L., et al., ANL/FPP-83-1, (1983).
21. Kim, C. N. and Abdou, M. A., Fusion Technology, 15, (1988), 1163.
22. Miyazaki, K., et al., 9th topical Meeting on Technology of Fusion Energy, ANS, Oak Book, 3, (1990).
23. 清水、他2名、日本機械学会論文集、46, 409 (1975), 1760.
24. Shimizu, A., et al., Symposium Volume of the 18th National Heat Transfer Conf., San Diego, (1979), 155.
25. 清水、他2名、日本機械学会論文集、51, 464 (1985), 1349.
26. Hasegawa, S., et al., Handbook of Heat and Mass Transfer, (1986), 523.
27. 清水、ほか3名、九州大学総合理工学研究科報告、12, 1 (1987), 31.
28. Kurokawa, M., et al., ICLASS-'88, Proc. 4th Int. Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Sendai, (1988), 221.
29. Toda, S. and Kurokawa, M., LIMET'88, Proc. 4th Int. Conference on Liquid Metal Engineering and Technology, Avignon, (1988), 434-1.
30. 戸田、伝熱工学の進展、3, (1974), 211.
31. 戸田、沸騰熱伝達と冷却、日本機械学会、(1989), 216.
32. Kurokawa, M. and Toda, S., ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Reno, (1991), to be published.
33. Toda, S., et al., Fusion Technology 1986, Proc 14th symposium on Fusion Technology, Avignon, (1986), 505.
34. Toda, S., et al., Fusion Engineering and Design, 9, (1989) 251.

## 宇宙における伝熱

森岡 幹雄 (IHI)

### 1. はじめに

日本における宇宙開発は、1955年（昭和30年）のペンシルロケットの発射によって開始された。日本伝熱研究会の設立総会は1961年（昭和36年）であるから、両者はほぼ同じような歳月を過ごしたことになる。そこで本稿では年表の形式で宇宙開発の歩みをまとめ、関連する熱工学の事項を併記することにより、各年代で『宇宙における伝熱』にどのような特徴があるのかを概観する事にしたい。また、外国と日本の年表を別々に作成し、開発フェーズのずれを見ながら今後の宇宙開発における伝熱の動向について考察してみたい。ただし、関係する熱工学の分野は多岐にわたっていて年表に採録した事項は偏っており、しかも抜けが多いため、筆者の狭い視野では限られた範囲にしか検討が及んでいないことをあらかじめお断りしておく。

### 2. 宇宙開発の年表と熱工学

宇宙開発における熱工学の年表を作成するにあたり、宇宙開発の項目を3項目に分類した。すなわち、宇宙へ物体を輸送し、軌道を変更したり姿勢を変えたりする『推進系』、軌道上で実験機器や観測装置を搭載し、熱的な環境を制御し、また電力を供給して機器と地上との通信を行う『利用系バス』、宇宙空間での利点を利用して実験を行う『宇宙実験ミッション』の3項目である。さらに、これに熱力学、伝熱、燃焼を含む『熱工学』を加え、4項目を年表の項目とした。

一方、時間軸のほうは1950年から1999年までの50年間とし、伝熱研究会とともに歩んだ30年を中心にし、それまでの開発の動きと今後の予定を加えてみた。また、遅れて出発した日本の宇宙開発が世界の宇宙開発の中でどのような位置にあるのかを把握するために、外国と日本の2つの年表を作成し比較できるようにした。作成した年表の外国の部を表1に、日本の部を表2に示す。

### 3. 外国の宇宙開発における熱工学

1942年にドイツのV-2号が開発されて人類は宇宙へ飛び出す手段を手に入れることになる。1957年にソ連のスプートニク1号が打ち上げられ人類初の人工衛星となった。1959年には、ルナ1号、およびパイオニア4号により早くも月に到達している。熱工学として

は1959年には微小重力下のプール沸騰の研究が開始され、重力加速度の極大熱流束に与える影響などが判明した。1950年代は従って宇宙開発の夜明けといえよう。

1960年代に入ると、人類初の有人飛行が成功し、1969年にはアポロ11号により人類が月着陸に成功する。この間、大型のロケット、サターン5型が開発されアポロ計画に使用された。また、宇宙用原子炉を搭載したSNAP-10AやCOSMOS-198が米ソにより相次いで打ち上げられた。1960年代は、一口でいえば有人飛行開始の時代といえよう。

この時期、熱工学においても目覚ましい研究の進展がみられた。ロケットの推進剤として低温液体燃料（液体水素、液体酸素）が使用されたため、低温液体の貯蔵に関して自然対流や成層化の問題、低温液体のプール沸騰、低温液体の輸送に関して低温液体の強制対流沸騰などが研究された。また、将来を見越して二相流の研究も開始され、航空機による実験が行われた。燃焼の分野では、日本からだいぶ遅れたがろうそくの燃焼の研究も行われている。宇宙用に開発され、地上機器にも応用された代表的な機器であるヒートパイプが発明されたのもこの時期である。

1970年代には宇宙滞在の時間が増大し、ソ連のミニ宇宙ステーション、サリュートが打ち上げられた。また、惑星間飛行体として1973年に木星に向けパイオニア10号が、太陽系探査機として1977年にボイジャー1号が打ち上げられた。1970年代は宇宙実験の花盛りの時期でもある。1971年からのアポロ計画、1974年からのスカイラブ計画、小型ロケットを使用した1975年からのSPAR計画、1977年からのTEXUS計画などにより、種々の実験が行われた。1970年代はこれらのことから惑星間飛行と宇宙実験の時代といえよう。

1970年代の熱工学では、次の時代に打ち上げられるスペースシャトルに関する熱的な問題が取り扱われた。稀薄流体の伝熱、フラッシュ蒸発冷却、液体の移送、気液分離、耐熱タイルの開発などである。また、二相流の圧力損失の研究が航空機を利用して行われている。

1980年代に入ると、1981年にスペースシャトルが打ち上げられ、宇宙機の再使用と人工衛星の回収技術が確立されたことが特筆される。1986年のチャレンジャー事故は低温によるシールゴムの硬化が原因であり、伝熱との関係が大きい（1988年に再開された）。また、ソ連の宇宙ステーション、ミールは1986年から運用が開始された。大型ロケットとして、1987年にはエネルギー、1989年にはタイタンIVが開発された。宇宙実験の分野ではスペースシャトルに搭載したスペースラブとして、1983年にSL-1、1985年にD-1、SL-3、SL-2が打ち上げられた。また、長期間宇宙に各種材料を曝露して、放射線、太陽光、原子状酸素、太陽風による性能劣化を評価する実験施設LDEFが1984年に打ち上げられ、1990年に回収された。以上のことから1980年代はスペースシャトルとミールの時代といえる。

1980年代の熱工学は様々な展開を見せた。赤外線望遠鏡の冷却のために超流動ヘリウムを利用したり、マランゴニ対流の実験がロケットやスペースラブを利用して行われた。ま

た、臨界点近傍の熱物性値の測定その他、液柱の安定性試験や液滴の音波浮遊の実験も行われた。

1990年代は、日米欧加の国際協力により1997年から運用される、宇宙ステーションの開発が行われている。また、回収型の人工衛星、フリーフライヤEURECAが1992年に打ち上げられた。その他、ハッブル望遠鏡が打ち上げられたり、国際協力によりスペースラブにおける微小重力実験室（IML）での各種実験が行われている。1990年代は国際協力の年代といえよう。

熱工学に関する項目としては結晶成長の実験とか、ゾレー効果を見る実験や、臨界現象に関する実験などがますます増えている。

#### 4. 日本の宇宙開発における熱工学

次に、日本の宇宙開発における熱工学について、外国との時間遅れがどのぐらいあるのかを見ながら各時代の特徴を概観したい。

1950年代には東京大学のペンシルロケットやラムダロケットが打ち上げられた。この時期に熊谷による液滴の無重力下での燃焼の研究が、小型落下塔を使用して世界に先駆けて実施されていることは、特筆されるべきことである。この時の液滴は細線に固定されていたが、1971年には熊谷らはさらに自由液滴の無重力下での燃焼研究をを種々の困難と戦いながら実施している。

1960年代にはロケットの開発が進められており、カップロケットやラムダロケットが打ち上げられているが、まだ人工衛星を打ち上げる能力を持たず、世界から10年以上も遅れていた。この時期にはまだ熱工学として見るべき研究は見当たらない。

1970年代に入ると日本の宇宙開発も本格化してくる。1970年の日本発の人工衛星『おおすみ』が誕生した。この後、続々と日本初の各種の人工衛星が打ち上げられ、科学衛星、静止衛星、気象衛星、通信衛星、放送衛星として実用化されている。また、これと並行して日本独自のロケット N-Iが開発された。この時期には低温液体貯蔵に関して容器内の流体の成層化の研究が外国に比べて10年遅れて実施されている。

1980年代は、ロケットとしては、N-II、H-Iが開発され、実用衛星も2号機以降が次々に打ち上げられた。この他、惑星軌道の『さきがけ』や海洋観測衛星が打ち上げられた。宇宙実験に関しては、小型ロケット実験が5年遅れで始まり、航空機実験も20年遅れで開始された。熱工学の分野では、軌道上でのヒートパイプ実験が行われ、また地上でも小型落下塔を利用して二相流の実験や、気泡の挙動、気液分離の実験が開始された。さらに、日本初の材料実験（FMPT）のために各種の基礎実験が開始され、接触熱抵抗の実験や、宇宙ステーションで使われる各種の伝熱機器（ポンプ、ラジエータ、熱交換器など）の基礎研究が開始されている。これらは外国に比べて10年程度の遅れである。その他、マランゴ

ニ対流の研究や微小重力下のプール沸騰実験も開始されている。1980年代はFMPTや宇宙ステーションの熱制御系などははっきりとした目標が示されたため、伝熱に関する研究者の数、研究の質量ともに急速に充実してきた。

1990年代になると、ロケットもさらに大型化し、1994年にはH-IIロケットも打ち上げられる予定であり、宇宙往還機であるHOPEの開発も本格化する。人工衛星のほうも、月スイングバイをする『ひてん』や地球資源衛星が打ち上げられた。1995年にはフリーフライヤである SFUがEURECAに遅れること 3年で運用される予定である。その後、月面観測のルナー Aが打ち上げられ、1998年には宇宙ステーションに日本モジュール ( JEM) が結合される。宇宙実験に関して見れば、地上施設においては、1991年から大型落下塔 (落下時間10秒) が利用できるようになり、手軽に微小重力下での実験ができるようになった。また、小型ロケット実験としては、TR-1Aを利用して、数分間の実験ができる。さらに、1992年には毛利さんが乗り組んだ『ふわっと'92』 (FMPT) で34の実験が行われた。スペースラブを使うこれらの実験は、外国に比較すると 9年遅れて実施された。1992年には、JEMで実施する実験の公募が開始されている。

1990年代は、熱工学的にも進んだ研究も行われ、ふわっと'92 ではマランゴニ対流の実験や、気泡液滴の挙動の実験も行われた。今後の予定を見ると、外国から12年遅れで超流動ヘリウム冷却の赤外線望遠鏡の観測も実施される予定であり、その他に、大型超伝導磁石による望遠鏡や太陽熱発電の実験も検討されている。

この様に、日本の熱工学は、燃焼に関する先駆的な研究があったものの、その他の研究に関しては10年ぐらいの遅れで始まり、一時は20年ぐらい遅れた分野も出てきたが、最近はその差は 5年ぐらいに縮まってきているようである。今後は、外国との格差はますます縮まり、いずれ日本がリードする分野も出てくるものと考えられる。現在、問題になっている日米間の貿易摩擦はますます激しくなるだろうから、宇宙開発の分野でも特別扱いはされず実力で勝負せざるを得なくなってくる。そのため、技術の差別化、自主技術の開発はますます必要になり、熱工学の果たす役割は大きくなっていくものと思われる。

## 5. おわりに

宇宙開発における熱工学の年表の作成を試み、宇宙における伝熱の進展について考察してみた。大雑把な把握ではあるが宇宙における伝熱の進展についてのご理解が得られたかと思う。これを契機に同様な (あるいは別の観点で) 検討をしていただき、宇宙開発における伝熱の特徴とトレンドについて考察いただける方がおられれば有難い。また、本稿を読んで宇宙における伝熱に興味を抱く方が一人でも増えたらこれに勝る喜びはない。

表1 宇宙開発における熱工学 年表 (外国)

外 国			
推 進 系	利用系バス	宇宙実験ミッション	熱 工 学
(1942 V-2号) 1958 デルタ MB-3	1957 スプートニク1号 (有人飛行) 1959 ルナ1、2、3号 1959 パイオニア4号(月)		1959 微小重力下のプール 沸騰
1960 サターン1B H-1 1966 サターンV J-2 1966 エンジェララムジェット計画	1961 ウォストーク1号 (有人飛行) 1965 宇宙用原子炉 SNAP-10A 1967 宇宙用原子炉 COSMOS198 1969 アポロ11号 (有人月着陸)		1962 強制対流沸騰 1963 液体水素の沸騰 1963 ヒートパイプ発明 1963 二相流航空機実験 1964 自然対流の検討 1964 ろうそくの燃焼 1965 低温液体貯蔵の検討 1968 低温強制対流伝熱
1976 スクラムジェットの 開発研究 1979 アリアン1	1971~84 サリュート計画 1973 パイオニア10号 (木星) 1977 ボイジャー1号 (太陽系探査機)	1971~73 アポロ計画-14、16、17号 1973~74 スカイラブ計画-II III IV 1975~81 SPAR計画 (小型ロケット実験) 1977~ TEXUS計画	1973 希薄流体伝熱 1975 航空機による二相流 圧力損失 1979 スペースシャトル フッシュ蒸発冷却
1981 コロンビア (スペースシャトル) 1984 HOTOL計画 1985 ATRエンジン試作 1986 チャレンジャー事故 1987 エネルギア 1987 HERMES計画 1988 SANGER計画 1989 タイタンIV	1981~スペースラブ 1986~ミール(宇宙ステーション)	1983 SL-1 1984 LDEF打上 1985 D-1(スペースラブ) 1985 SL-3, SL-2  1989 マゼラン	1981 マランゴニ対流 (ロケット実験) 1983 超流動ヘリウム冷却 赤外望遠鏡 1985 臨界点での物性値 測定 1985 液柱安定性実験 1985 マランゴニ対流 1988 液滴の音波浮遊
1990 X30/NASP着手 1992 スクラム飛行試験	1992 FIRECA-1  1997 フリーダム (宇宙ステーション)	1990 ハッブル望遠鏡 1990 LDEF回収 1991 SLS-1 1992 IML-1 1992 USMK-1 1993 D-2 1994 IML-2 2001 SIRTE	1992 たん白質結晶成長 1992 SEPAC 1992 臨界現象実験 1992 溶液結晶成長 1992 プレー効果

表2 宇宙開発における熱工学 年表(日本)

日 本			
推 進 系	利用系バス	宇宙実験ミッション	熱 工 学
1955 ペンシルロケット			1956 液滴の無重力下燃焼
1961 カップ9型ロケット (三段式) 1963 L3-A型ロケット (液体燃料) 1964 ラムダロケット			
1970 ミューロケット 1975 N-Iロケット 1978 ヤマト(HOPEの 前身)検討開始	1970 おおすみ 1971 しんせい(科学衛星) 1977 きく2号(静止衛星) 1977 ひまわり(気象衛星) 1978 さくら(通信衛星) 1978 ゆり(放送衛星)		1971 自由液滴の無重力下 燃焼 1975 低温液体貯蔵
1981 N-IIロケット 1982 HIMES 構想 1986 H-Iロケット 1988 ATRエンジン試作	1985 さきがけ(惑星軌道) 1987 もも1号(海洋観測)	1980~83 TT-500A (小型ロケット実験) 1986~航空機実験	1983 ヒートパイプ実験 1986 真空中の接触熱伝達 1986 落下塔二相流実験 1986 マラングニ対流 1988 二相コールドプレート 1989 ATR熱交換器 1989 HOPE7/7蒸発器 1989 熱伝導率測定 1989 プール沸騰実験
1994 H-IIロケット 1994 HOPE着手 1994 衛星用二液式 アポジエンジン 1999 ATR飛行試験	1990 ひてん(月 Swingby) 1992 ふよう1号(地球資 源) 1995 SFU(7/7-フライ) 1995 ルナー-A 1998 JEM (宇宙ステーション日本モジュール)	1991~大型落下塔微小重力 実験 1991~ TR-1A 1992 FMPT (ふわっと'92) 1992~JEM AO	1991 液移送実験 1991 HOPE関係基礎研究 1992 マラングニ対流 気泡・液滴挙動 1992 電気泳動 1993 ATR水素加熱器 1995 赤外線望遠鏡の超流 動ヘリウムによる冷却 1996 ASTRO MAG 1998 太陽熱発電

## 1. まえがき

電子機器の熱設計は極めて重要な局面を迎えている。従来のように、単に半導体などの熱に弱いデバイス部品の温度上昇を押さえることから、部品温度の精密な制御や熱設計の効率化が重要な要素になってきた<sup>(1, 2)</sup>。そこで電子機器の熱設計に計算機による流熱の数値解析を用いることができれば望ましいが、実際の電子機器の熱設計への応用となるとかなり難しい。例えば、熱の流れを求めるために、市販の汎用流熱数値計算用コードを用いることも行われているが、複雑な境界条件を取り入れるだけでもかなりのやっかいな仕事となっている。またコードによっては、境界条件が線形のみとか熱伝導のみとかの制限を設けており、電子デバイスやパッケージのまわりは、複雑な形状が多く一般的に解くのは難しい状況である。そこで、熱解析のために、いろいろなモデル化が図られている<sup>(3, 4, 5)</sup>。ここではその中で電気回路と全く同じような考え方をした熱回路網によるモデル化を用いて解く方法が良く行われているので、熱回路網法を実際の応用例に基づいて紹介する<sup>(6, 7)</sup>。

## 2. 熱回路網法

### 2. 1 熱抵抗

熱抵抗はその概念が電気の抵抗と同じでわかりやすいので、良く使われる。熱回路網法を理解するためにまず熱抵抗から述べることにする。

いま、温度差  $\Delta T$  の間を熱流  $Q$  が流れているとすると、次式で定義される  $R$  を熱抵抗という。

$$R = \Delta T / Q \quad (1)$$

ここで、各伝熱形態について熱抵抗を求めてみる。熱抵抗は以下のものがあるが、具体的には後節で述べる。

- (1) 熱伝導による熱抵抗
- (2) 対流熱伝達による熱抵抗
- (3) 熱放射による熱抵抗

### 2. 3 熱回路網法の定式化

熱回路網法は対象にしている領域を有限な大きさの網の目に分割し、その代表点に節点を設け、各節点を熱抵抗で結び各節点について電気のキルヒホッフの式とオームの式を適用するも

のである。その方法は、図1で説明する。いま中心の温度点を $T_0$ とし、 $T_1$ 点から熱流 $Q_1$ が $T_0$ 点に流込み、そして $T_0$ 点から $T_2$ 点と $T_3$ 点にそれぞれ熱流 $Q_2$ と $Q_3$ が流れ去っている。定常の場合、 $T_0$ 点でのキルヒホッフの式は次式となる。

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (2)$$

となる。そしてオームの式は、熱流 $Q_1$ 、 $Q_2$ と $Q_3$ が流れている熱抵抗をそれぞれ $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ とすれば

$$\begin{aligned} T_1 - T_0 &= Q_1 R_1 \\ T_0 - T_2 &= Q_2 R_2 \\ T_0 - T_3 &= Q_3 R_3 \end{aligned} \quad (3)$$

が得られる。

この方程式を分割した温度点（節点）と熱抵抗の数だけ連立させれば良い。

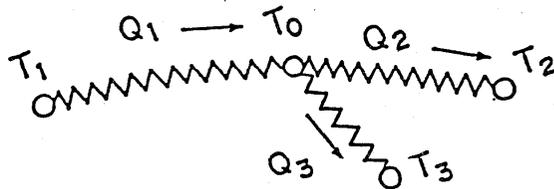


図1 熱回路要素

### 3. 電球形蛍光ランプの熱設計への応用例

点灯回路を発光管と一体化して、電源ケースに収容した電球形蛍光ランプが開発されている。これらのランプは白熱電球に比べて、高効率、長寿命という特徴を有するためにその代替光源として広く普及しつつあるが、その用途の拡大に伴い、より小形で高出力のものが要求される

ようになってきた。そのため単位放熱面積当りの発熱量はますます高くなる傾向にあり、ランプの開発に際しては熱設計が重要な要素となることは必至である。そこで、電子機器として電球形蛍光ランプの熱設計に熱回路網法を用いた例を紹介する<sup>(7)</sup>。

### 3. 1 電球形蛍光ランプの伝熱モデル

今回モデル化した電球形蛍光ランプの全体構造を図2に示す。

同図において、口金と一体化された電源ケース内には電子点灯回路が収容されており、発光管はこの発光管から電源ケースへの熱流を遮断するための断熱基板を介して取り付けられている。次にこれらのランプにおいて考えられる伝熱形態を図3に示す。点灯方向は口金上向きと仮定した。

図3に示すようにそれぞれ伝熱形態は

- (1) 熱伝導 (2) 熱放射 (3) 自然対流である。

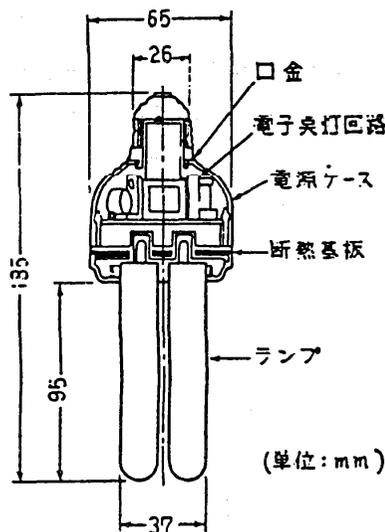


図2 電球形蛍光ランプの全体構造

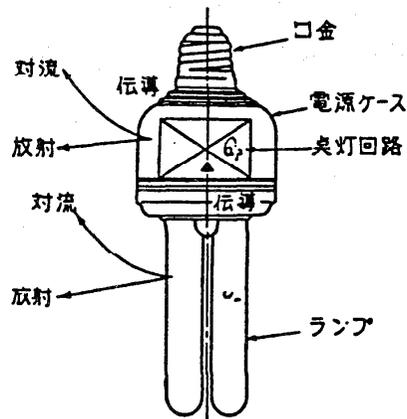


図3 伝熱形態

図3の伝熱形態に対応する熱回路網モデルを図4に示す。同図において、各節点はある分割された領域の代表温度点を示す。温度点が熱抵抗で結ばれ、熱回路網が構成されている。

### 3. 2 熱抵抗の定式化

熱抵抗の定式化は以下に示す各伝熱要素を考慮して行った。

#### (1) 自然対流伝熱要素

例えば、 $R_{2s}$ は電源ケース表面から自然対流によって生ずる熱流路の抵抗を示している。

$$R_{2s} = 1 / (\alpha (\Delta T / L)^{0.25} \cdot A) \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$  = 実験定数、 $\Delta T$  = 節点間の温度差 (°C)、 $L$  = 対流方向の長さ (m)、 $A$  = 表面積 (m<sup>2</sup>) である。

#### (2) 垂直方向熱伝導要素

例えば、 $R_{1o}$ は電源ケースの円筒部側面の垂直方向の熱伝導による熱流路の抵抗を表わしており、熱抵抗 $R_{1o}$ は次式で与えられる。

$$R_{1o} = L / \lambda \cdot A \quad (5)$$

ここで、 $\lambda$ は材質の熱伝導率 (W/m°C)、 $A$ は断面積 (m<sup>2</sup>)、 $L$ は伝導方向の長さ (m) である。

#### (3) 水平方向熱伝導要素

例えば、 $R_{1s}$ は断熱基板面の熱伝導による熱流路の抵抗であり、径方向に熱流がある場合の熱抵抗である。基板の厚みを $d$  (m)、内径 $r_1$  (m) 外径 $r_2$  (m)、熱伝導率 $\lambda$  (w/m°C)、基板の中心部温度を $T_1$  (°C)、外周部温度を $T_2$  (°C) とすると、熱抵抗 $R_{1s}$ は

$$R_{1s} = \ln (r_2 / r_1) / (2 \pi d \lambda) \quad (6)$$

で与えられる。

#### (4) 放射伝熱要素

$R_{31}$ は発光管から外部へ放射伝熱される際の熱流路の抵抗を示しており、これは放射のみであるから、放射熱抵抗 $R_{31}$ は、

$$R_{31} = 1 / (\epsilon \sigma A (T_{1s}^2 + T_{\infty}^2) (T_{1s} + T_{\infty})) \quad (7)$$

となる。

#### (5) 熱抵抗を直接与える要素

例えば、発光管や発光管下部からの自然対流が電源ケース周囲の温度を上昇させているため、電源ケースの周囲温度は大気温度に比べて高くなる。この現象は各空間節点と大気との間に上記のような熱抵抗を設けた簡易モデルで表現することが出来る。ただしこれらの熱抵抗は実験的に求める必要がある。

### 3. 3 計算方法

図4のモデルから連立方程式を書き出すのだが、この中で未知数として熱流 $Q$ と温度 $T$ として解くことになるが、式(9)からも分かる通り、連立方程式の定数にあたる熱抵抗 $R$ は温度

の関数となっている。つまり、この連立方程式系は非線形となっている。よって、これらの方程式系を解くには、繰返計算を必要とする<sup>(5)</sup>。

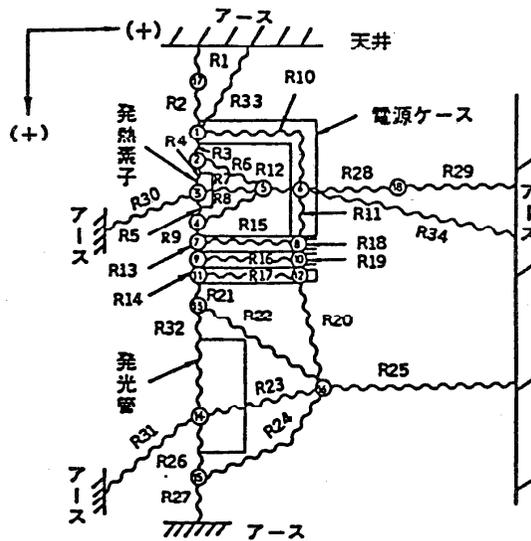


図4 熱回路網モデル

### 3. 4 熱シミュレーションの応用例

#### 3. 4. 1 熱流方向の予測

図4において、ランプと電源部との熱流方向を知ることは熱設計において重要である。もし、ランプから電源部に熱流が入りこんでいれば、電源部の温度上昇を抑えるために、熱を遮断する方法をとり、その逆であれば、熱を通り易くする方法を取ることになる。ここでは、図5に示すように、ランプから電源部に熱流が入りこんでいるので、熱を遮断する方法をとる。つぎに、その具体的な方法を述べる。

#### 3. 4. 2 空気断熱層の効果

図5において、ランプから電源部に入る熱流を遮断するために、両者の間に断熱層を設けることにした。そしてその断熱層をつ空気で構成した場合、すなわち空気断熱層とした場合について、その厚みと熱の遮断効果の関係をシミュレーションした結果を図6に示す。熱設計上の最も重要となるケース内部の温度に着目すると、空気断熱層は厚みを増すことで効果が増大し温度は低下していくが、厚みが3mmに達するとその効果が飽和する。従ってこの場合空気断熱層の厚みは3mmが妥当であることが予測できる。

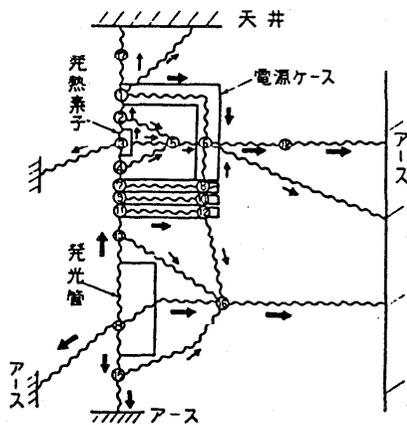


図5 蛍光灯まわりの熱の流れ

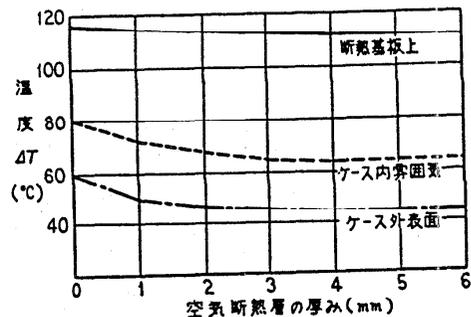


図6 熱遮断のシミュレーション結果

#### 4. あとがき

熱回路網法による電球形蛍光灯の熱設計の例を示した。一般に電子機器の形状は複雑で、大形計算機による熱解析もかなり大変である。熱回路網モデルにおいては各パラメータ変化に伴う温度の予測だけでなく、熱流の変化の様子が予測できる。従って熱回路網モデルは電子機器の熱設計において、構造設計の最適化が迅速かつ容易に行なえるなどきわめて有用である。また実際の熱の挙動を把握しながら、モデルを作り上げていくため、熱回路網法による解析手法は熱技術者にとって有用な武器となろう。

#### 5. 参考文献

- (1) 中山、関西支部第249回講演論文集、(1990-11)、pp. 16-23.
- (2) Ishizuka, M., Proc. of ISTP-4, Sydney(1991-7), pp. 1067-1088.
- (3) 小林ほか4名、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1992-5)、pp. 493-494.
- (4) 岩崎ほか3名、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1992-5)、pp. 475-476.
- (5) 石塚・佐々木、第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1992-5)、pp. 471-472.
- (6) 石塚、機械の研究、Vol. 44, No. 11(1992)、pp. 1154-1159.
- (7) 本田、弓削、伊藤、石塚、佐々木、照明学会誌、73. 2. (1989)、pp. 46-51

1. はじめに

半導体技術の進歩は、集積回路（Integrated Circuit;以下ICと略）を実現し、大規模集積回路（Very Large Scale Integration; 以下VLSIと略）へと発展している。これによりチップの高機能化、高速化がはかられエレクトロニクスシステムのコスト・パフォーマンスが高くなったことが今日の高度情報化社会の実現をもたらしている。

集積度が増す、すなわち高密度実装は、単位体積当りの機能を高くし、電子装置の小型化を実現する一方で、電力消費量／体積を大きくし、チップ表面の電力密度の増大を招いている。また、デジタル回路の高速化への要求は、飽和論理回路で必然的に表われる、トランジスタの蓄積時間が高速動作の限界をもたらしていることから、トランジスタを活性領域で動作させる不飽和論理回路の実現をもたらし、やはり電力消費量／体積を大きくし、チップ表面の電力密度の増大を招いている。

この電力は熱として消費され、IC/VLSIパッケージの温度を上昇させる。パッケージの温度を下げ、安定した性能の回路を実現するためのもっとも簡単な方法として、図1に示すように、ICパッケージに、低熱抵抗接続となるアルミや金属でできたヒートシンクを付着している。

一方、パッケージ内の電力密度の増大とデジタル回路の高速化（パルスの立上り／立下り時間が短い）が空間へ不要電磁波（放射電磁波）を発生させ、ICやVLSIに接続されている配線に

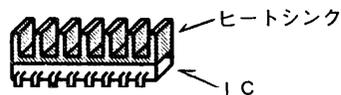


図1 ヒートシンクとICパッケージ

不要なパルス状の電圧や電流を放出している。これが、いわゆる電磁ノイズであり、パソコンの近くにあるテレビの画面が歪んだり、ラジオや電話の受信障害が起こっている。

また、高密度実装は、一つ一つの機能を発揮するためのエネルギーを小さくし、外部からの不要な電磁気エネルギーに敏感に応答する回路、いわゆるノイズに弱いシステムを作り出している。ノイズによるロボットの暴走事故は、その一例である。

すなわち、ICの高密度実装は、ノイズを出し、且つノイズに弱いシステムを出現させている。このような、電氣的ノイズを扱う分野は、生体への電磁波の影響をも含め、EMC（Electro-magnetic Compatibility: 環境電磁工学）と呼ばれている。

さて、このような、高周波の電磁エネルギー源であり、外部の電磁エネルギー源に

するIC/VLSIパッケージの近傍に、ヒートシンクのような電気伝導体を置いた場合、不要電磁波の発生パターンを変え、また、回路のノイズに対する応答 (Noise Immunity: 以下、イミュニティと呼ぶ) 特性を変えるであろうことは、当然予想されることである。

この場合、ヒートシンクは、ノイズの空間への伝搬を防止し、また、到来するノイズを弱めるシールドの効果を示すとも考えられるし、逆に発生ノイズを強め、また、パッケージ内部へ大きなノイズを侵入させるアンテナになるとも考えられる。

ヒートシンクのパッケージ冷却効果に関する研究は多く歴史も古い(1)(2)(3)、ヒートシンクのEMCに関する研究は極めて少なく、緒についたばかりである。

これはEMC測定用の微小ダイポールアンテナの研究が一部にあるもののパッケージの近傍のような小さな空間の電磁界の測定が、困難であることによっている。

ここでは、もっとも簡単なヒートシンクである平板ヒートシンクの放射電磁界への影響に関するシュミレーションの結果(4)と、ヒートシンクの形状と放射電磁界の関係についてのシュミレーション結果(5)を紹介し、最後に今後の課題について述べる。

## 2. 平板ヒートシンクと放射電磁界 (ノイズ)

本章では、図2に示すようにプリント基板上のパッケージの上に1枚の平板ヒートシンクをのせた場合の放射電磁界がヒートシンクの有無によりどのように変化するかを時間領域差分法(6) (FD-TD法)

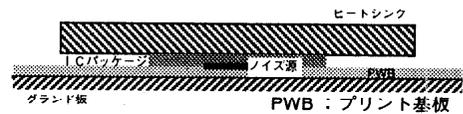


図2 パッケージ/ヒートシンクの簡略化モデルの断面図

を使ってシュミレーションした結果を紹介する。FD-TD法は、式(1)に示すマクスウエルの方程式の微分形に見られる空間/時間微分の差分近似を使い、対象とする空間を長方形に格子に分割し、格子上の電界と磁界を考えていくことによって、電磁界分布を導き出して行く方法である。

$$\text{rot } \mathbf{H} = \sigma_e \mathbf{E} + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \dots (1)$$

$\mathbf{H}$  : 磁界の強さ、 $\mathbf{E}$  : 電界

$\epsilon_0$  ,  $\mu_0$  : それぞれ自由空間の誘電率 (8.854 x 10<sup>-12</sup> F/m) と透磁率 (4π x 10<sup>-7</sup> H/m)

$\epsilon_r$  ,  $\mu_r$  : それぞれ媒体の比誘電率と比透磁率

$\sigma_e$  : 導電率

図2におけるノイズ源が、電力を消費するICチップであり、これを図3に示すように、微小ダイポールアンテナとして扱う。チップ内で電気双極子とは、多層板の層間接続に使われるバイアス (vias) やピンであり、垂直電気双極子 (Vertical Electric Dipole; 以下VEDと略す) である。

磁気双極子は、信号とそのリターン回路で構成される電流ループであり、水平磁気双極子 (Horizontal Magnetic Dipole; 以下HMDと略す) である。

ここで、ヒートシンクは完全導体とし、その接線方向の電界は零、異なった材料の境界面で電界・磁界は連続であるとする。

詳細な計算過程は、文献(4)にゆずるとし、得られた結果を以下に示す。ここで、ヒートシンクは、4.8cmX4.8cm、厚み2.5mmの完全導体でありグラウンド板から、7.5mmの所に、グラウンド板と平行に置かれている。

(1) ヒートシンクが電氣的に浮いている場合

図4は、HMD源からの放射電力をヒートシンクがない場合を0dBとした場合の正規化放射電力の周波数特性をヒートシンクの有無について比較したものである。

2.3GHzと5.5GHz近辺に共振のような現象が見られる。特に、2.3GHz近辺では、ヒートシンクのない場合に比較して、放射が極めて大きい。図5は、ステップ電流で励起されたHMD源に対する、ヒートシンクの右端 (・点) での垂直電界 $E_x$ の時間応答波形を示す。この周波数 $f_R$ は2.3GHzで図4の放射電力の最大値を示す周波数に一致しており、図4の現象が共振現象であることを示している。

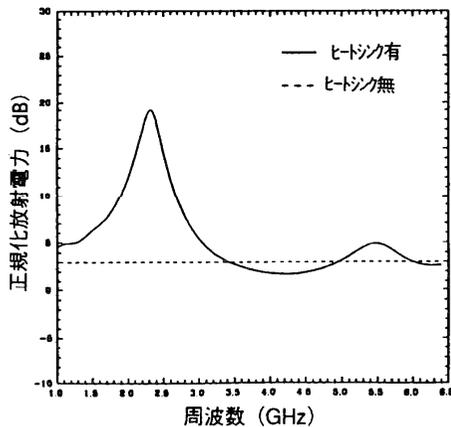


図4 ヒートシンクの有無に対する  
正規化放射電力の比較 (HMD源)

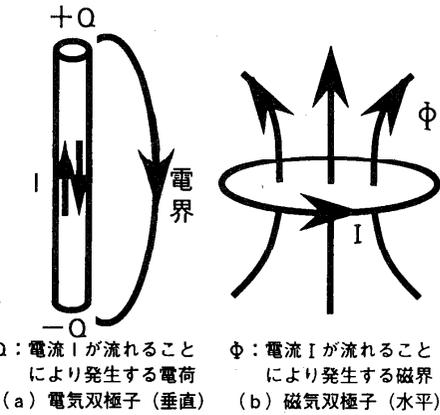


図3 微小双極子 (ダイポール)

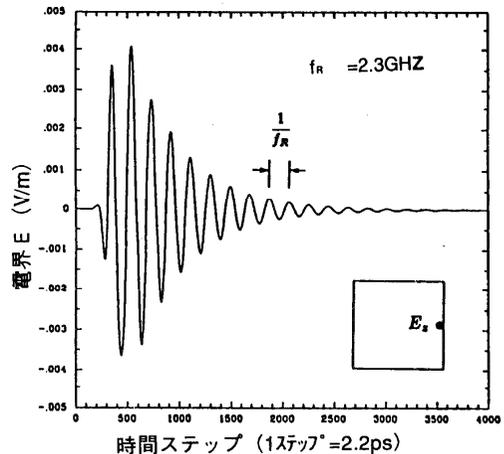


図5 ヒートシンクとグラウンド板の境界 (・印)  
での垂直電界成分の時間応答 (HMD源)

共振周波数とそこでのQ (共振の鋭さを表わす数) は、構造物の電氣的寸法や、そこで

の界の減衰率によって決まる。

図6は、VED源からの放射電力をヒートシンクがない場合を0dBとした場合の正規化放射電力の周波数特性をヒートシンクの有無について比較したものである。4.8GHzと7GHzでの放射電力が大きい。

HMD源の場合とVED源の場合で共振周波数が異なっているのは、それぞれの双極子により作られる界の対称性と非対称性が異なるためと思われる。

(2) ヒートシンクをポストで固定した場合

図7に示すように、ヒートシンクは通常、支持ポストで固定されている。ポストが導体であり、これがグランド板に接続されている場合の放射電力を、ポストが4個と8個、それぞれ等しく分配された場合について示したのが図8である。

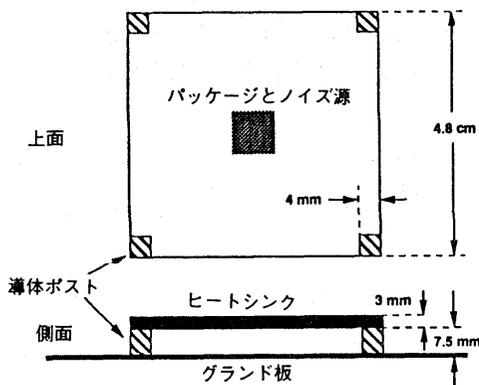


図7 グランド板に電気的に接続された4個のポストをもつヒートシンク

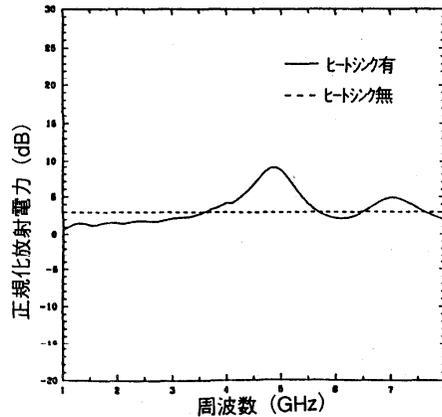


図6 ヒートシンクの有無に対する正規化放射電力の比較 (VED源)

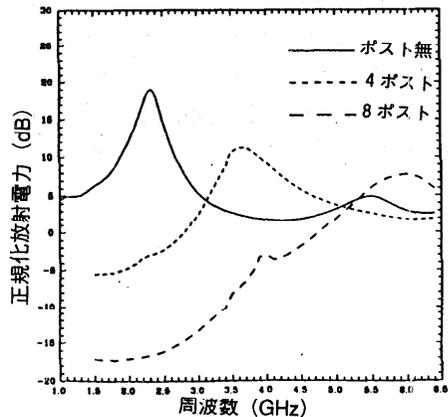


図8 ポストの数が0.4,8の場合の正規化放射電力の比較 (HMD値)

図8に示すように、ポストを増やすと、放射電力のピーク値が小さくなり、共振周波数が高い方へ移行している。共振周波数の高GHzへの移行が放射電力により妨害を受けるほかの装置やシステムの限界応答周波数（動作周波数ではなく、回路が応答できる最高周波数）より高い所へのものであればEMCの観点から価値のあることである。

ポストの存在は、界の通過できるギャップが小さくなり、ギャップを通じて洩れる界の

波長が小さくなるということである。また、ポスト数が多くなると、ギャップの数も多くなり、ギャップ間の干渉によって、界の洩れが小さくなる。その結果、放射電力のピーク値が小さくなり、共振周波数が高い所へ移行するものと考えられる。

### (3) 導電性ガスケットで側面のギャップを埋めた場合

図9に示すように、導電性ガスケットで、側面のギャップを埋め、これをグラウンド板に接続しその上にヒートシンクをのせ、ノイズ源を囲んだ場合の正規化放射電力の周波数特性を示したのが図10である。

図から、放射電力のピーク値が低くなるが、共振点も低い方にも移行していることが判る。

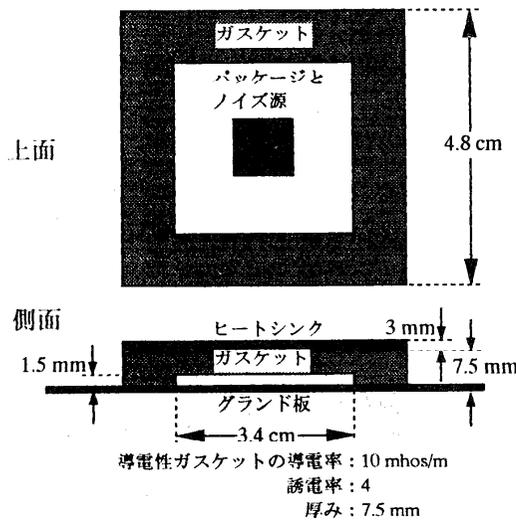


図9 導電性ガスケット付ヒートシンク

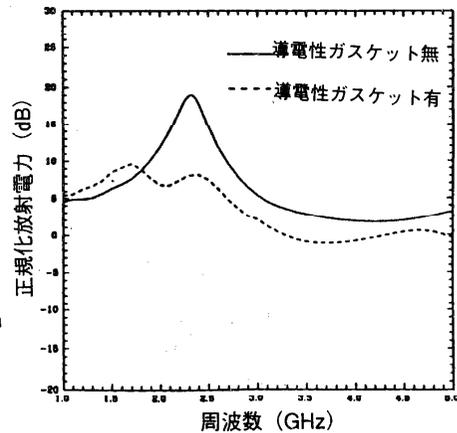


図10 誘導性ガスケットの有無に対する正規化放射電力の比較 (HMD源)

導電性ガスケットが、高い透電率（ここでは、4）を持つことが、共振周波数をわずかに低くし、またガスケット内でエネルギーが散乱することと消費されることによってQが小さくなり、放射ノイズのピーク値が下がるものと考えられる。なお、ガスケットの装着による冷却効果の変化について別途、検討が必要である。

以上、平板ヒートシンクの装置により、ICチップから放出される電力が大きくなるが、ポストや導電性ガスケットの使用により、ある程度放射電力を小さくすることを述べた。これまで述べてきたことから、ヒートシンクはシールドよりもアンテナとして機能しているように見える。

### 3. ヒートシンクの形状と放射電磁界 (ノイズ)

本章では、図11に示すようなヒートシンクの形の違いによる放射電磁界（この例で

は2章に比較して低周波(100MHz)の磁界)への影響を紹介する。通常IC/VLSIパッケージは長方形であるが、シュミレーションを簡単にするために、Z軸回りに対称の円筒であり、プリント基板(絶縁層)とグラント板は半径方向に無限に広がっているものと仮定し、ノイズ源のチップは、パッケージの中心にあるものとする。

放射界の境界条件を含んで磁界を求めるための方程式は式(2)で与えられ、また、ノイズ源から十分に離れた面上で、式(3)が成立すると仮定する。

$$-\frac{\partial}{\partial r}\left(Y \frac{\partial(r H_{\Phi})}{\partial r}\right) - \frac{\partial}{\partial z}\left(Y \frac{\partial(r H_{\Phi})}{\partial z}\right) + \frac{Z}{r}(r H_{\Phi}) = 0 \quad \dots\dots (2)$$

$$E_{\tan} = -\frac{\eta}{r}(r H_{\Phi}) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 $Y = 1/(\sigma + j\omega\epsilon)$   
 $Z = j\omega\mu$

$$\eta = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}}$$

- $\sigma$  : 媒体の導電率
- $\epsilon$  : 媒体の誘電率
- $\mu$  : 媒体の透磁率
- $\omega$  : ノイズ源の角周波数
- $r$  : z軸からの距離
- $H_{\Phi}$  : r方向の磁界の強さ
- $E_{\tan}$  : 半径rの円の接線方向の電界

ノイズ源が100MHz, 1ボルトで励起された場合について有限要素法を使って式(2)、(3)から、太い円筒状の周囲の等磁界線を導出し、これからZ軸から300mm(=r)離れた場所での磁界をZ軸との角度 $\theta$ との関係で表わしたのが図12である。図12は、ピン形ヒートシンク(図11(c))を使用した場合の放射磁界がもっとも小さいことを示している。以上のことから、少なくとも低周波領域ではパッケージ周辺のノイズを減少させるヒートシンク、すなわちシールド効果を持つヒートシンク

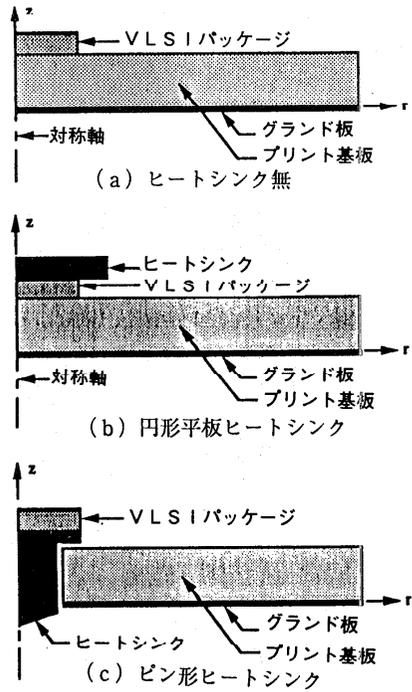


図11 パッケージとヒートシンクの構造

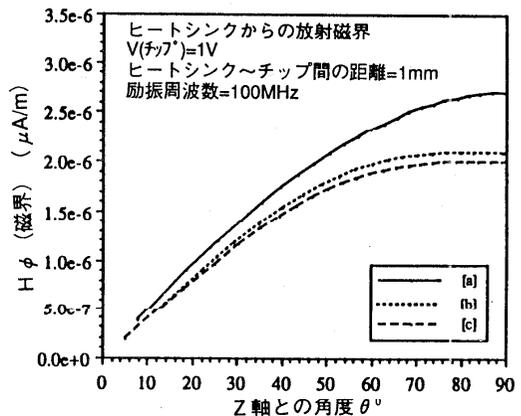


図12 Z軸から300mm離れた場所の磁界分布(100MHz)

の設計が可能であることが判る。

#### 4. おわりに

以上、集積回路パッケージ冷却用ヒートシンクの放射ノイズに対する影響のシュミレーション結果を紹介した。ヒートシンクはパッケージから発生するノイズに対してシールド効果を示すこともあるし、アンテナとして機能することもありそうである。

しかし、ヒートシンクの電磁ノイズに対する影響は、まだ緒についたばかりであり、例えば、実用的にはもっともよく使用されているフィン付のヒートシンクに関する EMC の研究は進んでいない。また次々に開発・研究されている新しいヒートシンクの EMC 側からの研究も見られない。 筆者は、かねてからヒートシンクのノイズ感受性（イミュニティ）に興味を持ち、測定と実験を行いつつあるが、どうやらアンテナとしての働きが、シールド効果よりも勝っているような結果が得られそうである。

今后、DRAM (Dynamic Random-Access Memory) の集積度の甚だしい向上に見られるように、集積度が益々高くなり、また高速化が進むと、冷却方法も、これに追随して進歩し、新しい EMC 問題が止まることなく発生するものと思われる。

しかし、設計指針や勧告を出す前にシステム性能と信頼性を実現するのに適した熱を散らすための色々な形のヒートシンクを、EMC の立場から測定、評価し、データを積み上げていく地道な努力が必要であろう。そのために、伝熱研究者の EMC 屋への一層の御協力をお願いし、拙稿を終わることにしたい。

#### 参考文献

- (1) R. W. Knight et'al : "Heatsink Optimization with Application to Microchannels." IEEE Trans. on Components, Hybrids of Manufacturing Technology. Vol.15, No.5, Oct.'92
- (2) J. S. Gooding et'al : "Optimal Thermal Design of Air Cooled Forced Convection Finned Heatsinks -Experimental Verification-" Ditto, Vol. 15, No.5, Oct. '92
- (3) Y. C. Lee et'al : "Internal Thermal Resistance of a Multi-Chip Packaging Design for VLSI Based Systems" , Ditto, Vol. 12, No.2, June '89
- (4) C. F. Lee et'al : "Electromagnetic Radiation from a VLSI Package and Heatsink Configuration." Proc. of Int'l Symp. on EMC, Aug.'91, Cherry Hill, N. J.
- (5) D. N. Ladd et'al : Finite Element Analysis of the Electromagnetic Radiation from a VLSI Package Heatsink. Proc. of Int'l Symp. on EMC, Aug.'92, Anaheim, C. A.
- (6) M. Fusco : "FDTD Algorithm in curvilinear coordinates" ,IEEE Trans. on Antenna Propagat, AP-38, Jan.'90

## 1. はじめに

化学工業における伝熱技術は、原料の加熱、製品からの熱回収および冷却などの単位操作として広く利用され、その代表的な単位操作機器は熱交換器である。一般に化学反応や拡散操作は温度に強い依存性を示すので、多くの化学プロセスではいたる所に熱交換器が設けられている。したがって、化学工業に特色ある伝熱技術としては熱交換器が主な対象と言えよう。そこで、本稿では化学工業によく使用されている熱交換器に関する技術の動向と最近のトピックスについて述べることにする。

## 2. 熱交換器技術の動向

化学工業において現在最も多く用いられている熱交換器はシェル・アンド・チューブ式熱交換器(多管式熱交換器)である。これは、化学工業における熱交換器がプロセス工業の特性上比較的大容量であり、耐圧性、信頼性、保守の容易さ、価格などの面でシェル・アンド・チューブ式熱交換器が秀でてしているためである。

シェル・アンド・チューブ式熱交換器の設計法は熱交換器設計のバイブルといわれる古典的なKernの“Process Heat Transfer”に始まる。しかし本法による伝熱設計の推算精度は場合によっては±100%を越すこともあり、現在ではシェル内の流れを圧力バランスに基づき、より厳密にシミュレートして伝熱係数を補正するストリーム・アナリシスが主流となっている。推算精度も以下に挙げる主な設計概念をふくめた多くの進展によって、一般的に±20～30%となっている。

- ・ シェル側漏れ流れの割合の考慮
- ・ 伝熱に関与しないシェル側漏れ流れの温度差への補正
- ・ 層流の低レイノルズ域の考慮
- ・ 多成分凝縮における軽質成分の影響
- ・ 計算上、熱交換器を複数の区間に分割して設計する区間分割法
- ・ チューブ振動解析、など

一方、省エネルギーおよび省スペースの観点から、通常のシェル・アンド・チューブ式熱交換器の構造を改良した、あるいはシェル・アンド・チューブ式熱交換器とは異なった構造を持つ、高性能な熱交換器が開発され採用されるようになってきており、これまでの

シェル・アンド・チューブ式熱交換器の万能的使われ方にかわって、各々の特色を生かした適用が計られるようになってきた。

又、熱交換器の性能向上にむけての研究努力と同時に、熱交換器網の最適化や用役システムを含んだプロセス全体としての熱の流れの最適化に関する技術も研究されている。この種の技術として近年、注目されているピンチ・テクノロジーなども、広い意味での熱交換技術であると言える。これは、熱交換器をプロセスの中の独立した単位操作としてあつかうのではなく、エネルギーの観点からシステム的にとらえて最も熱効率のよいプロセスを探ろうとするものである。今後、このようなマクロ的アプローチもますます要請されてくるのは確実であろう。

### 3. 熱交換器に関する最近のトピックス

#### 3.1 設計手法

実用的な熱交換器設計手法の改良に関する研究・開発を専門に行なう機関としては、特にHTFS (Heat Transfer and Fluid Flow Services, UK) と HTRI (Heat Transfer Reserch, Inc., USA) が有名である。この両機関において発表された、最近の研究・開発論文テーマを大雑把に纏めると下記の様になる。

論文テーマ	内 容
Shellside flow	Baffle、Tube Bundle の形状や流体種別による影響等、Shell and Tube式熱交換器のShell側Heat TransferとPressure Dropに関する研究。
Condensation	Shell側およびTube側における多成分凝縮の伝熱性能に対する影響に関する研究。
Boiling	Pool Boiling、Flow Boiling等の形態別、In-tube Boiling、多成分沸騰、等の伝熱性能に対する影響に関する研究。
Extended surface	Low-fin Tube、Stud-finned Tube等の採用によるShell側Heat Transfer、Pressure Dropへの影響に関する研究。 Air-cooled熱交換器のHeat Transferに関する研究。
Plate	PlateおよびPlate-fin熱交換器におけるHeat Transfer、Pressure Drop、Condensation、Boiling等に関する研究。
Vibration	Tube BundleにおけるFlow-induced Vibration、Fluidelastic Instability等に関する研究。
Fouling	Shell側およびTube側汚れのメカニズムと防止に関する研究。

論文テーマ別の過去4年間の発表論文数の推移を図1に示すが、これからシェル・アンド・チューブ式熱交換器の設計手法に関する研究とともに、伝熱面の構造や形式の改良に関する研究や、新しい熱交換器に関する研究が増加している傾向がうかがわれる。

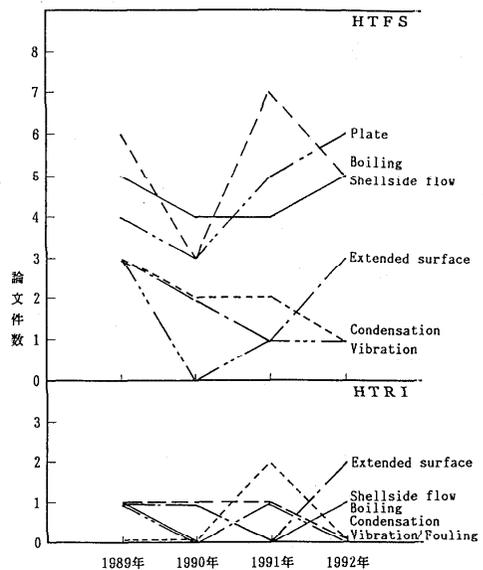


図1 論文数の年代別推移

### 3.2 構造

近年、実際のプラントで採用されているシェル・アンド・チューブ式熱交換器の改良型およびそれ以外のタイプの熱交換器には下記の様なものがある。

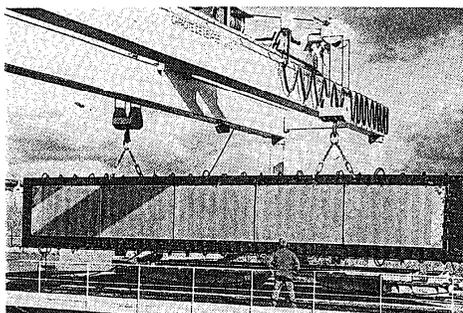
シェル・アンド・チューブ式熱交換器の改良型：

- ・ ローフィン・チューブの採用
- ・ 焼結処理を施したチューブの沸騰サービスへの適用
- ・ チューブ・インサージョンの採用
- ・ ロッド・バッフルの採用
- ・ ヘリカル・バッフルの採用

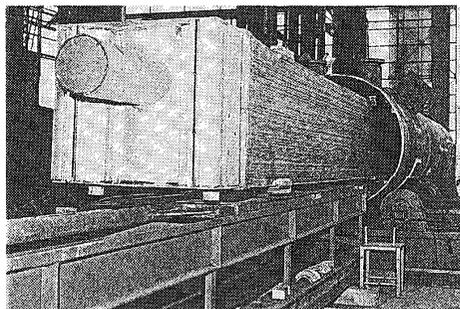
シェル・アンド・チューブ式以外の熱交換器：

- ・ プレート熱交換器
- ・ スパイラル熱交換器
- ・ プレート・フィン熱交換器、等

ここで、現在、主にナフサ接触改質装置に採用され、良好な性能を発揮している溶接型プレート熱交換器(商標名 **PACKINOX**)を紹介する。



Explosion formed corrugated plate



Bundle and pressure vessel integration

図2 PACKINOX 熱交換器

このプレート熱交換器は、改質ナフサの熱を回収して原料ナフサに与える、**Feed Effluent**と呼ばれる熱交換器として使用されている。この熱交換器における回収熱量は下流の加熱炉熱量の約5倍にもおよぶので、その性能の良否はプロセス全体におよぼす影響が大きい。

以下に一例として、概略の運転条件を示す。

		高温側流体	低温側流体
・ 温度	入口	520°C前後	90°C前後
	出口	100°C前後	490°C前後
・ 蒸気重量分率	入口	1.0	0.3~0.4
	出口	0.8~0.9	1.0
・ 運転圧力		3 kg/cm <sup>2</sup> ・G前後	6 kg/cm <sup>2</sup> ・G前後
・ 熱交換量		50 MMkcal/hr前後	

このプレート熱交換器は、従来のプレート熱交換器と異なる以下の2点の主な製作・構造上の特徴を持っている。

- (1) ウォーターハンマーを利用した爆発成形によってプレートの成形加工を行なっているので、プレートの波形を自由に設計でき、大きなプレートを扱うことができる。
- (2) 溶接タイプなので、ガスケットタイプでは適用できない高温サービスにも使用できる。

プレート熱交換器は従来、主に液サービスに用いられてきたが、(1)の特徴によって、この熱交換器では、圧力損失および伝熱係数の両面を考慮した最適なプレートの波形を、サービスごとに決定できるので、容易に種々のサービスへ適用できる。また、上記の一例に示すサービスでは、大容量化によって熱交換器単体コストが多管式熱交換器に比べて下

がっている。さらに、従来のプレート熱交換器と同様に、バイパス流れがなく、小さな圧力損失で比較的高い伝熱係数が得られ、高温流体と低温流体の最小接近温度を小さくすることが可能であり、熱交換量をアップできる。上記の一例では熱交換量が概略5%アップしているので、その分は加熱炉での燃料節約となり、年間約3千万円程度の省エネルギーとなっている。

ファウリングの観点からすると、(2)の特徴によって、適用サービスが開放洗浄を必要としないものに限られるが、デッドな部分がなく、プレート間流れのメカニズムが自浄作用を伴うものなので、スケールはつきにくいとされている。

今後、適用範囲は徐々に広がっていくものと期待される。

#### 4. マクロ的アプローチ

マクロ的アプローチの代表的なものとして、加熱される側と冷却される側の組合せや、プロセスへの用役の適用条件を熱力学的方法を用いて最適化する手法であるピンチ・テクノロジーがある。

プロセスにおける熱交換器網の設計では、従来は数々の案に基づき実際に熱交換器網の設計を行なった上で、個々にそれを評価し、結果を比較する方法が採られてきた。そのためには多大な労力を要し、かつ得られた結果が、用役所要削減の立場から絶対に最適だと言う保証はなかった。

ピンチ・テクノロジーは、プロセスの物質収支・熱収支を基にいくつかの図表を作成し、熱力学的手法により最適あるいはそれに近い設計への指針を得るための手段である。これにより、設計に着手する以前の段階で、最適設計への指針を得ることができる。設計に際しては、得られた指針を目標として、後述するルールに従って実際のプロセスの組合せを捜し、熱交換器網を構築していく。以下に、ピンチ・テクノロジーの概要を述べる。

##### (1) コンポジット・カーブ

熱交換に関与する全てのプロセス流体を、加熱される側と冷却される側の2つのグループに分ける。コンポジット・カーブは、グループに属する全てのプロセス流体のT-H線図(温度とエンタルピー変化の関係を表す図表)を合成し、それらを同一のT-H線図上に表したものである(図3)。2本のカーブが最も接近する点をピンチ・ポイントと

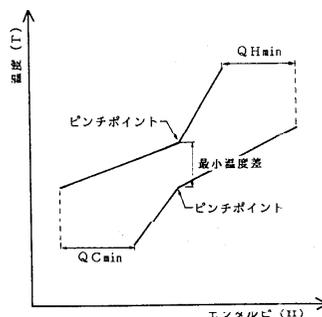


図3 コンポジット・カーブ

いい、この点における両者の温度差を最小温度差という。図3の $QH_{min}$ および $QC_{min}$ は、理想的な熱交換器網において、用役を用いて加熱、冷却する最小必要熱量を表わす。最小温度差は、経済性評価から決定される。

## (2) 熱交換器網の設計上のルール

熱交換器網の設計は、設定された最小温度差の下で、実際の用役所要量を $QH_{min}$ 及び $QC_{min}$ とすることを目標としてなされる。その為には、以下の3つのルールに沿って、プロセス流体の組合せを見つける。これらのルールは、プロセスでピンチ・ポイントより温度が高い部位と、低い部位では、各々独立して熱バランスが取れていることから導き出される。

1. ピンチ・ポイントを挟んで、温度が高い部位から低い部位に熱を与えない。
2. ピンチ・ポイントより温度が高い部位を、用役により冷却しない。
3. ピンチ・ポイントより温度が低い部位を、用役により加熱しない。

## (3) グランド・コンポジット・カーブ

グランド・コンポジット・カーブは、各温度レベルでの熱の過不足の状態を表わした図である(図4)。

グランド・コンポジット・カーブが、温度軸方向に重なっている部位である斜線部は、プロセス流体同士で熱交換すべき部位である。それ以外は、用役により加熱・冷却すべき部位である。グランド・コンポジット・カーブによって、プロセスのどの箇所に、どの温度レベルの用役を、どれだけ用いるべきかを知ることができる。

実際の熱交換器網の設計に際しては、上記により得られた熱交換器網を、運転の容易性や熱交換器のプロット上の位置等の因子を考慮して、手直しする作業が加わる。

この他、ピンチ・テクノロジーは、異なるユニット間にまたがる熱回収システムの設計や、工場全体から見た最適な用役設備の設計の際にも、設計者の助けとなる。また、ピンチ・テクノロジーは、連続プロセスのみならずバッチプロセスに対しても、新設既設を問わず適用が可能である。

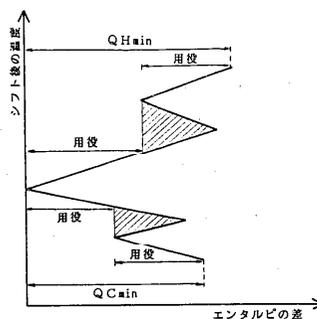


図4 グランド・コンポジット・カーブ

## 5. おわりに

広く化学工業において、製品を生み出すために消費されるエネルギー管理は重大な関心事のひとつである。又、近年地球温暖化の原因の一つとされているCO<sub>2</sub>排出抑制という面からも一段の省エネルギーへの取り組みが求められている。省エネルギーの心臓ともいべき伝熱および熱交換器技術によせられる期待はますます大きくならざるをえないであろう。

前述したマクロ的アプローチと、熱移動というミクロ的アプローチの双方からのバランスの良い研究が必要となろう。こうした研究の進展は又、同時に新たな課題を提起するものと思われる。

## 参考文献

- (1) P. Minton, Process Heat Transfer, Heat Transfer 1990, Plenary and Keynote Papers Vol. 1 P - 355 ~ 363
- (2) J. W. Palen, Design of Process Heat Exchangers by Computers - A Short History Heat Transfer 1986, Plenary and Keynote Papers Vol. 1 P - 239 ~ 248
- (3) HTRI, Index of Publication 1992
- (4) HTFS, Reserch Symposium 1989, 1990, 1991, 1992
- (5) R. E. Lowe, Plate - and - fin Heat Exchangers, Chem. Eng. Aug. 17, 1987 P - 131 ~ 135
- (6) J. R. Lines, A Symmetric Plate Heat Exchangers, Chem. Eng. Prog. July, 1987 P - 27 ~ 30
- (7) E. Gregory, Plate and Fin Heat Exchanger, Chem. Engineer Sept., 1987 P - 33 ~ 39
- (8) R. Vidil et al, Thermal Hydraulic Performance of Plate and Frame Heat Exchangers - The CEPAJ software, Design and Operation of Heat Exchangers, Springer - Verlag P - 233 ~ 244
- (9) B. Linnhoff, R. Smith, The Pinch Principle, Mech. Eng. Feb., 1988 P - 70 ~ 73

## 食品加工における伝熱

高井陸雄 (東京水産大学)

食品の大部分のものは、素材に熱的な処理を加え、可食化したものである。米はそのままで硬い米粒にしかすぎないが、水を適量加え、加熱すると、主成分のデンプンは糊化し、おいしいご飯となる。凍り豆腐は豆腐を凍結し氷結晶を作り、低温状態でタンパク質を硬いタンパク質に変え、解凍後乾燥したものである。

食品製造の過程では、温熱操作や冷熱操作を施し、炭水化物やタンパク質の消化と吸収性を高めたり、高温による殺菌や、低温での冷却、凍結によって貯蔵性を高めている。食品の加工と貯蔵の過程には石油化学工業のような定常的な熱操作もあるが、大部分が非定常な熱的操作であり、しかも、相変化と物質の移動をとともなう。

食品の加工、貯蔵の利用温度は、せいぜい $-200^{\circ}\text{C}$ ~ $300^{\circ}\text{C}$ であり $500^{\circ}\text{C}$ 程度の幅でしかない。しかし、この温度域には水の凝固点温度； $0^{\circ}\text{C}$ 、沸騰点温度； $100^{\circ}\text{C}$ 、デンプン糊化温度； $60$ から $80^{\circ}\text{C}$ 、タンパク変性温度 $80\sim 90^{\circ}\text{C}$ 、脂質の融解温度約 $40^{\circ}\text{C}$ 等の、食品加工上重要な温度を含んでいる。

ここでは、食品加工の伝熱に関する一般的な取扱い方法について述べ、食品加工の伝熱に関するいくつかの事例について紹介する。

### 1. 食品の伝熱基礎式

食品の熱操作の定量化の難しさの第一は、食品が不均一な混合物から構成された不均一な組織を形作っている点、第二は食品に含まれる主成分は水であり、相変化にともない密度、比熱、熱伝導率が大きく変化する点、第三は形状が一定しない点である。

冷却操作であろうと加熱操作であろうと、食品内部の熱伝導の基礎式は一般の熱伝導方程式と全く変わらず、次式で与えられる<sup>(1)、(2)</sup>。

$$\rho C (\partial T / \partial t) = \nabla (k \nabla T) + A \quad (1)$$

ここで、 $C$  = 比熱 [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]、 $\rho$  = 密度 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]、 $t$  = 時間 [ $\text{s}$ ]、 $k$  = 熱伝導率 [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]、 $A$  = 内部発熱の速度 [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ] である。

式(1)を種々の境界条件と内部発熱条件とで解析する事により、食品加工操作における食品内部の温度変化や最終温度到達時間等を推定する事が可能となる。

食品の熱的操作の代表的な境界条件は、(a) 表面温度が一定；熱い鉄板で焼く操作がこれに当たる。(b) 境界面での熱の流入量が一定；電熱器による加熱やジュール加熱がこれに当たる。(c) 境界面での熱抵抗が一定；自然対流、強制対流中における伝熱操作に対応しており、高温液

体中での煮熟操作、てんぷらの様なフライ操作、冷気、あるいは低温液体中での冷却、凍結操作がこれに当たる。この条件による加熱、冷却操作はきわめて多く、対流熱伝達による冷却、加熱問題をできるだけ簡便に解くため、食品でもGurney-Lurie線図あるいは、Heisler線図が利用されている。

## 2. 熱物性値の推算

$\rho$ 、 $C$ 、 $k$ は温度、場所、食品の種類によって異なっており、式(1)を解くにはこれらの物性値を定量的に記述しなければならない。食品の組織構造、組成は不均一であるが、平均的には均一な組織であり、『見かけの - 』あるいは、『有効 - 』を冠した物性値として取り扱う。

2.1 密度・比熱 食品の密度あるいは比熱には加成性<sup>(4)</sup>があり、水、氷、タンパク質、炭水化物、脂質等の基本成分の密度、比熱に各々の重量分率の重みを付け、有効密度と、比熱を次式で推算することが可能である。

$$\rho_{eff} = \sum_{i=1}^n \rho_i W_i \quad (2) \quad C_{eff} = \sum_{i=1}^n C_i W_i \quad (3)$$

$$1 = \sum_{i=1}^n W_i \quad (4)$$

ここで $\rho_i$ 、 $C_i$ 、 $W_i$ はそれぞれ組成*i*の密度、比熱、重量分率である。密度、比熱の温度関数は文献<sup>(4)</sup>、<sup>(5)</sup>に詳しい。

2.2 熱伝導率 食品の熱伝導率の実測と推算は重要な研究テーマでもある<sup>(4)</sup>~<sup>(7)</sup>。溶液系の食品の熱伝導率は体積分率について加成性を示すが<sup>(5)</sup>、固体食品内部の熱移動は食品の組織構造と熱流の方向とに依存している。従って、有効熱伝導率を定義するのが適切である。固体食品の熱伝導率は加成性を持たないので、矢野は、食品の熱伝導率を組織構造を基に、以下の4つのモデルで表わすことを試み、実験的にも検証した<sup>(6)</sup>、<sup>(7)</sup>。

直列モデル

$$1/k_{eff} = \sum_{i=1}^n X_i/k_i \quad (5)$$

並列モデル

$$k_{eff} = \sum_{i=1}^n X_i k_i \quad (6)$$

Maxwell-Euckenの希薄分散モデル

$$k_{eff} = k_c (1 - 2BX_d) / (1 + BX_d), \quad (7)$$

$$\text{但し } B = (k_c - k_d) / (2k_c + k_d)$$

国井-Smithの多孔物質モデル

$$k_{eff} = k_c (\phi + (1 - \phi) / (\eta + (2/3)(k_c/k_d))) \quad (8)$$

ここで  $k_{eff}$  = 有効熱伝導率、 $X_i$ は組成*i*の体積分率、 $\phi$ は分散相の体積分率である。添え字、 $d$ は分散質を、 $c$ は連続相を示す。

以上の関係式より、相変化を受けない温度範囲で、食品の平均的な有効物性値を決めることが可能となり、式(1)を種々の方法で解くことが出来る。

### 3. 対流加熱操作

この方法による加熱操作は、一般産業活動においても極めてよく利用される。その一般的な実用式は多くの便覧類で詳述されている。ハイスラークチャートは過渡的な温度変化を求める簡易な手法として食品においても有力な手段である。

食品の分野では、対流加熱を含む系として、缶詰内部の温度の変化の予測に関心がもたれている。殺菌操作との関連でこの分野の研究は重要であり、缶詰内部の、昇温が最も遅れる点、冷点の挙動を明らかにする事により、完全な殺菌条件と最適加熱時間が予測可能となるので、生産工程管理上重要である。

Rao<sup>(6)</sup>の総説では、缶詰内部の流体挙動と熱変化、殺菌進行度に焦点を当て、この分野の到達点を示しており、現状を把握するのに有用である。Kumar<sup>(9)</sup>は缶詰内部の非ニュートン粘性流体の流動を考慮し缶内の温度分布を数値解析法によって求めた。この結果、冷点は温度の上昇とともに缶底部に移動し、トラス状に安定することを示した。黄<sup>(10)</sup>は従来の缶詰よりも高真空にした缶詰内部の熱移動がヒートパイプと同じ凝縮過程であることに着目し、数値解析を行い、缶詰内のモデル食品の温度分布を求めた。三堀ら<sup>(11)</sup>は、缶詰内部の熱伝導と加熱殺菌過程を系統的に考察し、加熱物体の温度上昇履歴より、系の熱伝導の逆問題を考え、未知数である物体のビーオ数、測定位置を昇温曲線にベストフィットするパラメータとして決定した後、このパラメータをもとに、食品の昇温、殺菌度合をリアルタイムで予測した。さらに、この情報をもとに最適な冷却開始時間と最終的な殺菌状態を求めることに成功した。

### 4. 物質の輸送を伴う伝熱操作

食品加工操作においては、質量の輸送をともなう伝熱操作は比較的多い。その代表は乾燥操作である。乾燥過程は通常、(1)予熱期間；食品がある所定の温度に達するまでの時間、(2)恒率乾燥期間；水の蒸発速度が一定の期間、(3)減律乾燥期間；食品内部の水分が表面へ拡散する期間に分けられる。物質の外界への移動は表面のみであり、水の移動は食品表面の蒸気圧と外部の飽和蒸気圧との差で決まる。したがって、蒸発潜熱の算出が食品の温度分布を支配するようになる。この分野における非定常状態での研究は、食品内部の拡散と温度変化との定量化、食品を構成する物質内の水の拡散定数の推算等まだまだ研究すべき点が多い<sup>(12)・(13)</sup>。

### 5. 相変化をともなう食品加工の伝熱操作

相変化を含む主な食品加工操作は凍結と解凍のプロセスである。他の相変化をともなう食品加工操作として、炊飯過程における米デンプンの糊化があげられる。水が米つぶ内部に拡散し、やがて対流熱伝達で昇温し糊化するが、この物質拡散、熱伝導、糊化反応の3種の変化を含む系を総合的に考察した研究はない。脂質は温度の上昇にともない液状化するが、ここでは考えないものとする。水の蒸発、凝縮過程を含む食品内部の伝熱に関しては、今後多孔質体内での現象を検討することに成るであろう。ここでは凍結による相変化についてのみ考えることとする。

5. 1 凍結濃縮 天然果汁の濃縮には凍結濃縮法が使用されており、高品質を保つために低温処理が必要である。凍結濃縮過程は冷却とともに、固液曲線に沿って進行するが、高濃度状態では理想状態からずれるので実測が必要となる。共晶物を作る系においては共晶点で溶媒と溶質とは結晶として析出するが、糖溶液では共晶点以下の温度でも結晶が成長しない過冷却状態がある。この状態を過ぎて冷却を進めるとガラス状態へと達する。結晶成長が起きないので細胞膜が壊れることもない。生体の貯蔵にはこの領域が最適であり、凍結乾燥の原理や新しい乾燥プロセスを示唆してくれる領域である。食品、あるいは生体内部の低温での氷と水の挙動に関してはFrankasの成書<sup>(14)</sup>、あるいは村勢等<sup>(15)</sup>に詳しい。結晶成長に対する配慮を施した解析がやがて必要になる物と思われる。

氷結晶の凍結濃縮過程では、水が大量にある場合は水の融液凝固の問題として考え、氷結晶生成にともなう溶質排除の過程が効率よく進行する条件を選ぶ必要がある。いわゆるマッシイ状態にある系で、氷結晶近傍における水分子の拡散と凝固にともなう潜熱の除去とを最適化することにより、溶質を抱き込まない状態で結晶を成長させることが出来る。希薄溶液について、一定の過冷却度を条件として氷結晶の成長状態が顕微鏡下で観察されているが、伝熱の問題としては十分に検討されていない<sup>(16)・(17)</sup>。

5. 2 凍結時間の予測式 相変化をともなう伝熱は、移動境界問題として、Stefan-Neumannにより1860年以降、数学的、物理学的な興味をもとに取り組まれた<sup>(1)</sup>。食品の凍結時間の予測には、食品を凍結開始温度に保持した状態から、所定の温度にまで冷却し凍結するPlankの方法<sup>(18)</sup>が用いられる。この方法では、凍結面で取り除くべき凍結潜熱の外部への移動を考え、次式を与えた。

$$t = (\rho' L_f) / (T_f - T_a) (P d / h + R d^2 / k') \quad (9)$$

ここで、 $\rho'$  = 凍結状態の密度、 $L_f$  = 凍結潜熱、 $h$  = 食品表面での熱伝達率、 $k'$  = 総括熱伝導率、 $T_f$ 、 $T_a$ はそれぞれ凍結開始温度と外界の温度とを示す、 $d$  = 平板では厚さの1/2、円柱、球では直径、 $P$ 、 $R$ は平板で1/2、1/8、円柱で1/4、1/16、球で1/6、1/24である。

上式に、形状による修正や、常温から凍結開始温度までの顕熱を凍結潜熱に含める等の改良式が提案されている。

5. 3 凍結現象の数値解析 Ashraeハンドブック<sup>(19)</sup>やHayakawaraのレビュー<sup>(20)</sup>はこの分野の数値計算に必要な境界条件、初期条件、物性値の取扱いの概要を知る上で有用である。Clelandによる成書<sup>(21)</sup>は、食品凍結の数値解析の基礎と、凍結時間の近似予測式を理解する上で良い。Hayakawara<sup>(22)</sup>は数値計算により、2次元モデルの凍結時間予測を行なった。Sheenら<sup>(23)・(24)</sup>は複雑な形状をした食品について、凍結による体積変化を考慮した数値解析法をもとに食品内部の温度変化を明らかにした。三堀ら<sup>(25)</sup>は、式(1)の左辺の $\rho$ 、 $C$ を固液相の割合をもとに求めた。その際、固液平衡図より凍結率を温度の関数として記述した。また、相変化にともなう潜熱は凍結率をもとに、見かけの比熱の式として

$$C_{a,p} = C_{f,l} + (\rho_{i,c} L) (d(1-s) / dT) \quad (10)$$

で与えた。ここで $C_{f,l}$ は凍結率を考慮した混合系での比熱、 $s$ は水の体積分率である。

また、式(1)の右辺第一項の熱伝導率 $k$ は、2でも述べたように、食品内部の組織構造に依存し伝熱研究 Vol. 32, No. 125

ており、凍結率、すなわち温度に依存する。したがって、右辺第一項は

$$\nabla(k \nabla T) = \partial k / \partial T (\nabla T)^2 + k \nabla^2 T \quad (11)$$

となり、式(1)は非線形方程式となる。寒天+NaCl溶液の試料に関し実測値と数値計算の結果は良く一致した。また、熱伝導率のモデルとして、並列モデルが最適である事も示した。

林らは<sup>(26)・(27)</sup>生体細胞の凍結を模擬し、細胞の内外で氷結晶の成長とともに起こる濃縮過程や細胞膜の透過、細胞膜上での不均一核生成を考慮したセルモデルを提案した。これにより、細胞内部に生成する氷結晶の成長界面、凍結率、核生成速度を明らかにすることが出来た。熱物性値の取扱方に未だ不十分な点があるもののこの方法による解析は、今後生体系の凍結シミュレーションにおいて、前述したガラス転移点近傍での濃縮過程を含む凍結を解明するうえで有力な手法となろう。

4.3 残された問題点 急速凍結がどのような効果を食品の内部に与えているのか、現状のシミュレーションでは答えられない。その原因はいくつかあるが、細胞内部の濃縮過程の速度論的な取扱いが十分ではない、過冷却状態の解消と核生成のメカニズムを定量的に表示できない、急速に凍結した結果、発生した溶質の結晶内部への残留をどの程度に見積もるのが十分に把握できない等々である。糖溶液では共晶点近傍の温度でガラス化現象が起きる事を考えると、組織内部に点々と残留している高濃度の溶液の多数の島ではガラス化現象が起きると予測される。ガラス化状態は基本的には液体状態であり、極めてゆっくりと変形している。貯蔵期間と関連づけ、温度変動を受けた場合に起きる食品品質の変化を熱と物質の移動から解明する必要があるだろう。

ここでは解凍の問題に関しては触れなかった。解凍過程は熱移動の問題から考えれば凍結過程の裏返しとも考えられるが、解凍にともなう熱伝導率の減少と密度と比熱の増加が起こるため、複雑な様相を示す。実験においても、凍結した試料を使うため凍結の履歴を反映することになり一層複雑なファクターが入り込むことになる。

## 5. おわりに

食品加工における伝熱操作は多岐に亘っており、その一部を示したに過ぎない。食品加工においては、今後、伝熱操作による食品の加工を考える場合、熱と物質の移動とを同時に考えて解析すること、濃縮過程を含む加工操作では相平衡図の上で物質の状態を検討する事が必要である。

## 文献

- (1)H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: Conduction of heat in solids, Oxford Science Publications, 2nd ed. 1959
- (2)岡崎守男: 食品工学基礎講座5 "加熱と冷却"、伝熱基礎論、(1991)、光琳(東京)
- (3)矢野俊正: 食品工学基礎講座1 "食品工学の基礎" 食品の物性、(1992)、光琳(東京)
- (4)ASHRAE HANDBOOK: Thermal properties of foods, 1985 FUNDAMENTALS, 31.1  
31.28 American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers INC,
- (5)E. G. Murakami and M. R. Okos: Measurement and Prediction of thermal properties of foods,

- in Food properties and computer-aided engineering of food processing system,  
ed. by R. P. Sigle et al pp3-48, Kluwer Academic Publishers(1989)
- (6) T. Yano, J. Kong, O. Miyawaki and K. Nakamura : The "intrinsic" thermal conductivity of wet soy protein and its use in predicting the effective thermal conductivity of soy-bean curd, J. Food Scie. 46, 1357-1361(1981)
- (7) K. Haykawa, C. Nonino and J. Succar: Two dimensional heat conduction in food undergoing freezing: Predicting freezing time of rectangular or finitely cylindrical food, J. Food Science, Vol. 48, 1841-1848(1983)
- (8) M. A. Rao: Convective heat transfer to fluid foods in cans, Advances in food research, Vol. 32, 39-84, Academic Press, Inc., (1988)
- (9) A. Kumar and M. Bhattaachrya: Transient temperature and velocity profiles in a canned non Newtonian liquid food during sterilization in still-cook retort, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 34, 1083-1096(1991)
- (10) 黄 相軍: 缶詰食品の加熱殺菌工程における熱移動の移動現象論的研究、東京水産大学博士論文 (1991)
- (11) T. Mihori, H. Watanabe and S. Kaneko: A control system for achieving correct heat sterilization processes: a one-dimensional approach to packaged conduction heating of food, J Food Processing and Preservation, Vol. 15, 135-155
- (12) E. Rotstein: Drying of foods, in Biotechnology and food process engineering, ed. by H. G. Schwartzberg et al, pp213-245, Marcel Dekker(1990)
- (13) B. Hallstrom, C. Skjoldebrand and C. Tragardh: Heat transfer and food products, Elsevier Applied Science 1988 (London)
- (14) F. Franks: Biophysics and biochemistry at low temperatures, Cambridge University Press, Cambridge(1985)
- (15) 村勢則郎、権田金治: 生体系における氷晶形成 - 不均一系としてみた生体系の凍結 - 日本冷凍協会論文集 Vol. 3, 13-26 (1986)
- (16) U. Hartmann, B. Nunner, Ch. Korber and G. Rau: When should the cooling rate be determined in an extended freezing sample, Cryobiology 28, 115-130(1991)
- (17) M. Kochs, Ch. Korber, B. Nunner and I. Heschel: The influence of the freezing process on vapour transport during sublimation in vacuum-freeze-drying, Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 34, 2395-2408(1991)
- (18) International Institute of Refrigeration: Recommendations for the processing and handling of frozen foods. 3rd edition(1982)
- (19) ASHRAE HANDBOOK: Freezing and defrosting time of food, 1985 Fundamentals Handbook, 30.1-30.16, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning

Engineers INC ,

- (20)K.Hayakawa K.R.Scott and J.Succar: Theoretical and semitheoretical methods for estimating freezing of thawing time, ASHRAE Transaction Vol.91,Part2, pp371-384(1986)
- (21)A.C.Cleland: Food refrigeration processes, analysis,design and simulation, Elsevier applied science, (1990) London
- (22)K.Haykawa, C.Nonino, J.Succar, G.Comini and S.Del Giudice: Two dimensional heat conduction in food undergoing freezing: Development of computerized model, J. Food Science, Vol. 48, 1849-1853(1983)
- (23)S.Sheen and K.Hayakawa:Parametric analysis for the freezing of spheroidal of finitely cylindrical objects with volumetric changes, J Food Science, Vol. 56(2) 543-549 (1991)
- (24)S.Sheen and K.Hayakawa: Finite difference simulation for heat conduction with phase change in an irregular food domain with volumetric change, Int.J.Heat Mass Transfer, Vol. 34(6)1337-1346(1991)
- (25)T.Mihori and H.Watanabe: A rapid experiment to assess the effect of temperature/position-variable thermal conductivity on freezing time estimation, Nippon Suisan Gakkaishi 58(1) 29-38 (1992)
- (26)林 勇二郎、加藤信治、服部 賢：食品凍結の基礎研究（、第1報、自由水の凍結挙動）、日本機械学会論文集（B編）47（414）361-368（1981）
- (27)林 勇二郎；生物体の凍結、伝熱研究,Vol. 30（119）35-40（1991）

## 施設農業と伝熱

高倉 直（東京大学農学部）

### 1. はじめに

伝熱学は工学の基礎学の一つであり、農業においてもいろいろな場面で関係がある。しかし、その中で、特に関係の深い分野として食品工学と施設環境工学をあげることができるだろう。食品に関しては、別の章でふれてあるので、ここでは、施設農業に関して述べることにする。

農業生産は大別して、土地利用型と施設型農業に分類される。施設型農業とは、いわゆる温室や畜舎を用いて、作物や家畜を生産する農業である。わが国の農業において最も専業率が高く、コンピュータの利用など技術化が最も普及している分野でもある。その中でまた特に施設園芸と称される温室を利用した作物生産の分野の工業化は著しい。

現在の施設園芸面積は約58,540haで、世界一の規模を誇っているが、わが国の耕地面積の約10%である。しかし、土地生産性が高く、生産量でみると、イチゴの全生産量の93%、スイカ83%、ピーマン68%、トマト68%、キュウリ62%が温室で生産されたものであり、今やわが国の農業生産には、なくてはならない主要な部分といえる（農林水産省食品流通局野菜振興課,1992）。

この農業における重要な分野の弱点はなんといっても、それがエネルギー消費型の生産であることである。もちろん、わが国の土地利用型農業も欧米のそれに比較すると多量のエネルギーを消費している。逆に、わが国の施設園芸は欧米のそれより省エネルギー的であるといえるが、しかし多量のエネルギーを消費していることにはまちがいない。そこで、伝熱が大きく関わってくる。

ここでは施設農業においてわが国で最も進んでおりかつ、その伝熱構造が複雑な温室について述べることにする。

### 2. 農業施設特に温室の解析

温室の伝熱学的な解析の歴史は古い。そのことをよく現しているのが、いわゆる「温室効果 (Greenhouse Effect)」という言葉であろう。ねずみとりの理論ともいわる。太陽エネルギーは比較的波長の短い放射からなっており、ガラスなどの温室被覆物をかなり良く透過する。いったん温室内で吸収されたエネルギーは再放射されるけれども、それは長波放射でありあり、温室被覆物を透過できない。この原理で温室内が外より暖かくなるということが説  
伝熱研究 Vol. 32, No. 125

明されてきた。地球のまわりの大気中に含まれる水蒸気や炭酸ガスなどがこのガラスの役目をしているので、地球の温暖化が温室効果として説明されてきた。地球の温暖化に関しては事実であるが、本来の温室に関しては、そうでないことが英国の物理学者 Wood(1909)によって実験的に明らかにされた。普通のガラスと長波放射も透過する石英で作った模型温室で測定したところ、大きな差がなかったことから、それまでの解釈がまちがっていることを指摘した。その後気象学者 Businger(1966) によって計算でも証明された。その計算結果によれば、通常の条件下では、温室効果による温度上昇は全体の20%程度で、残りはすべて温室の換気が十分でないこと、すなわち外気との空気交換が制限されていることによる。もしかりに、温室の換気率が無限大にできれば、内外気温差が無くなることが証明されている。したがって、彼は地球温暖化の場合は、大気効果

(Atmospheric Effect)と呼ぶべきであると主張しているが、温室効果があまりにも有名になりすぎて、もはやこのまちがった用語の修正は不可能のようである。彼はそれまでオランダにおいて温室の研究も行っており、彼がまとめた温室に関する章はすべて定常状態の解析ではあったが、温室の伝熱学的研究の最初のものといえる。もちろん、それまでも、英国の農業工学研究所などを中心にしてかなりの論文が発表されていたが、すべて部分的なものであった(J. Agric. Engng. Res., 1950-1970参照のこと)。

これと前後して、わが国でもいくつかの温室伝熱に関する定常モデルが発表されている(学会誌「農業気象」参照のこと)。しかし、外より暖かいはずの温

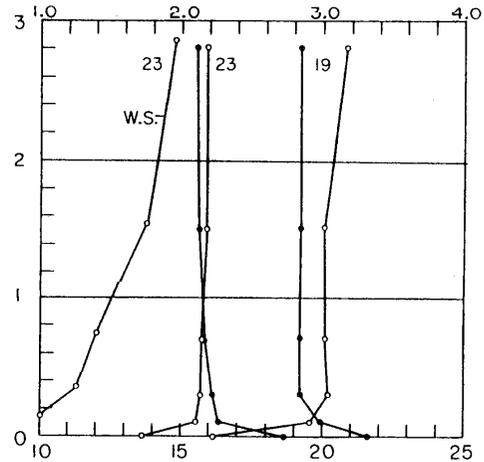


図1. 温室内外気温の逆転現象(Takakura, 1967)

WS, 風速(上横軸m/s); 図内の数字時刻  
横軸温度(C); 縦軸, 地面からの距離(m)

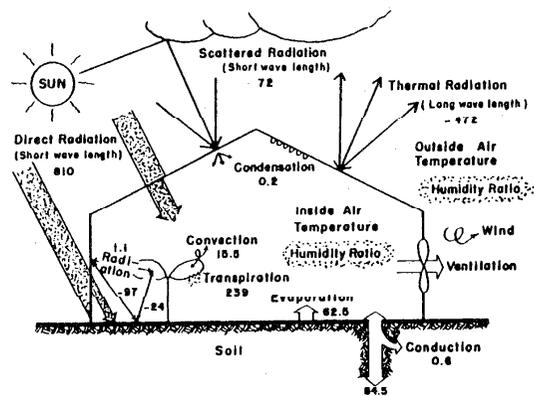


図2. 非定常非線形モデル(Takakura, et al., 1971)

室内の気温が地表面を除き、外より低くなることが発見され (Takakura, T., 1967), 定常モデルの限界から、非定常モデルが開発された (Takakura, T., 1967 and 1968). しかし、線形であったために、温室内の植物や壁体間の温度放射交換, 温室内土壌表面からの蒸発, 温室被覆内表面への水蒸気の凝結などを取り扱えず, 十分に温室内の現象を明らかにできなかったといえる。

最初の非線形非定常モデルは Takakura(1971) らによって発表された。その後与えた影響は大きく、世界的にみて100以上の同様なモデルが発表されてきたともいえる。コンピュータのハードウェアとソフトウェアのめざましい発展によって、このようなモデルもパーソナルコンピュータにより容易に行えるようになった。

特に、地球資源が有限であること、汚染が拡大することを組み込んだ地球モデルで有名な「成長の限界」は MIT の Forrester 教授が開発したシミュレーション言語を用いている。その後、IBM 社によって、より一般的な言語 CSMP (Continuous Systems Modeling Program) として、各方面で非線形非定常モデル開発に用いられてきた。最近、温室の非線形非定常モデル作りを解説したものが出版された (Takakura, T., 1993)。

### 3. 再生可能エネルギーの利用

省エネルギーは重要なテーマであり、オイルショック以後勢力的に研究された。試験的な物は数多くある。風力利用, ソーラコレクタ利用なども世界的にかなりの研究費を投入して研究されたが、発電でなく、発熱あるいは集熱システムであるため、中間の管路での熱損失が大きく、機構的かつ経済的に適切でないとの結論がでている。

ソーラポンドも研究されたが、やはりわが国より気象条件のよいイスラエルなどで実用化されている。堆肥発酵熱利用なども検討されているが、わが国では大規模には利用しにくいようである (関と小森, 1985a, b)。温室の被覆材を2層にして、その間に夜間のみ発泡スチロ

- Insulation types
  - Greenhouse with movable thermal screen
  - Double-clad plastic greenhouse
  - Twin-wall panel greenhouse
  - Double-plastic greenhouse with a polystyrene-pellet screen
  - Fluid-roof solar greenhouse
  - Water curtain greenhouse
- Storage types
  - Solar greenhouse with porous concrete floor
  - Greenhouse with underground heat storage units
  - Greenhouse with latent heat storage units
  - Greenhouse with solar pond
- Passive cooling
  - Greenhouse with evaporative cooling units
- Structural innovation
  - Cable-supported air-inflated greenhouse
  - Sloping greenhouse
  - Tower greenhouse
- New type
  - Plant factory

図3. 温室の分類 (Takakura, 1985)

ールのペレットを封入して、保温性を高める方式が開発され、商品化された。比較的中小型で2層による光の減少が問題にならない場合に適している。

#### 太陽エネルギーの土壤蓄熱

最も普及したのが地中熱交換方式と呼ばれるもので、温室内の空気を地中に埋設したダクト内に循環させて、昼間は太陽エネルギーを温室の地中に蓄熱し、夜間は逆に地中から熱をもらい温室をある温度以上に保つ方式である。各地での試作と実験が先行し、日射量などの気象条件や土壌水分などの条件と地中に埋設するダクトの深さやピッチと保温性の関係は明らかにされず、モデルの開発が待たれた。2次元モデル (Takakura, T. et al., 1982), さらに3次元モデルが開発され、さらに四季を通じての長期蓄熱の効果についても解析された (Kurata, K. and Takakura, T., 1991a, b)。一応の結論がでていっているものの、最近も引き続き研究が発表されている (学会誌「太陽エネルギー」参照のこと)。

#### 潜熱蓄熱

土壤蓄熱にかわって登場したのが潜熱蓄熱である。土壤に蓄熱する場合は、いわゆる土壤の温度上昇を利用するので、顕熱蓄熱と呼ばれる。一方、各種の物質が層変化するに伴って蓄放熱する事が知られている。ポリエチレングリコール、パラフィンなどが温度変化と共に液体から固体へ変化することは周知のことであろう。しかし、これらの有機物はいずれも化石燃料を原料としており、間接的に石油を使用していることになるばかりでなく、酸化による劣化も大きい。現在温室用として開発されて

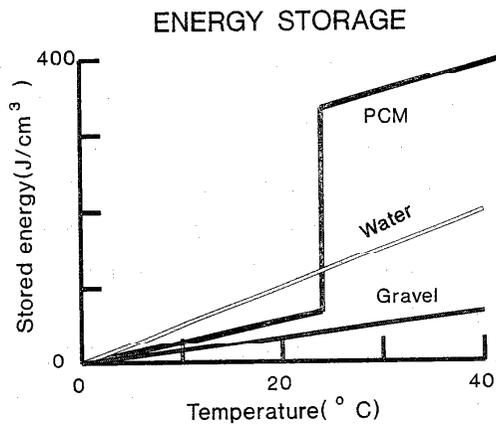


図4. 潜熱蓄熱材の特徴

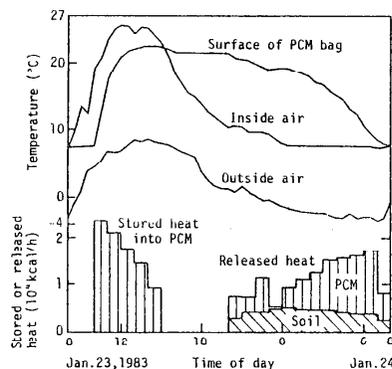


図5. 実用規模温室の測定例 (仁科・高倉, 1985a, b, c)

いるものは、過冷却や劣化防止の工夫を凝らした塩化カルシウム6水塩と硫酸ナトリウム10水塩を基材としてもので、他の塩類を混ぜて融点を15度程度に下げたものである。

これらの物質を容器に詰めて温室空気との熱交換を行わせるための熱交換器を作る必要がある。理論的には直径3cm程度の球形の容器が最適であるという計算結果があるが、このような容器にかなり粘性の高い液体を注入することは容易ではないので、アルミをナミネートしたプラスチックフィルムの2層間に注入し、5cmおき程度に縦にシールした板状のものを縦に数cmおきに並べた間に空気を流す式のものを用いられている。この熱交換器に関しては、風洞実験なども行われ、実用に向けての基礎実験から、商品化された（仁科と高倉, 1985a, b, c）。

#### 4. おわりに

農業施設特に温室における伝熱現象で、一般の建築物のそれと大きく異なる点は太陽エネルギーを室内まで大きく取り込むこと、相変化すなわち土壌表面や植物葉面での蒸発散現象、ガラスなどの被覆物内表面での水蒸気の凝結ともなう熱移動、室内でのガラス面、植物表面、土壌表面間の放射交換などが無視できないことである。また、土壌の熱容量が大きいのと層が厚いので、2次元あるいは3次元熱伝導として解析する必要があること、また土壌内では水分の移動もありこれに伴う熱移動も考慮する必要があるなど、ある面では一般の建築物以上に複雑であるといえよう。

最近、エコシティ構想にみられるように農業施設と一般建築物の境界が無くなってきつつあるようである。一般建築物の外壁緑化のモデルなどが報告されてるが、独自に植物を扱う面で若干の戸惑いがあるように見える。むしろこれまでの温室伝熱の研究成果を十分応用することが早道かもしれない。

農業施設の場合、試作実験が多ので、伝熱学的な解析がなされているものを主に紹介した。

#### 参考文献

- Businger, J. A., 1966: The Glasshouse (Greenhouse) Climate. in *Physics of Plant Environment*. (Ed. by W. R. van Wijk), 277-318, North-Holland Publ. Co.
- Kurata, K. and Takakura, T., 1991a: Underground storage of solar energy for greenhouse heating. I. Analysis of seasonal storage system by scale and numerical models. *Trans. ASAE*, 34, 563-569.
- Kurata, K. and Takakura, T., 1991b: Underground storage of solar energy for greenhouse heating. II. Comparison of seasonal and daily storage systems. *Trans. ASAE*, 34, 2181-2186.
- 仁科弘重, 高倉 直, 1985a: 潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室に関する研究. (1) 潜熱伝熱研究 Vol. 32, No. 125

- 蓄熱材の特性と小型温室における暖房実験. 農業気象, 39, 201-211.
- 仁科弘重, 高倉 直, 1985b: 潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室に関する研究. (2) 空気集熱方式による模型温室の暖房実験. 農業気象, 39, 311-314.
- 仁科弘重, 高倉 直, 1985c: 潜熱蓄熱方式による太陽熱暖房温室に関する研究. (3) 実用規模温室での暖房実験. 農業気象, 40, 313-321.
- 農林水産省食品流通局野菜振興課, 1992: 園芸用温室・ガラス室等の設置状況, 257pp.
- 関 平和, 小森友明, 1985a: 堆肥発酵熱の抽出・蓄熱に関する研究. 第1報 循環通水方式による熱抽出蓄熱・実験. 農業気象, 41, 257-264.
- 関 平和, 小森友明, 1985b: 埋設管内通水方式による堆肥発酵熱抽出の試み. 第2報 近似解法と操作条件の検討. 農業気象, 41, 57-61.
- Takakura, T., 1967: Temperature gradients in the greenhouse. *J. Appl. Met.* 6, 956-957
- Takakura, T., 1967: Predicting air temperature in the glasshouse (I). *J. Meteor. Soc. Japan*, 45, 40-52.
- Takakura, T., 1968: Predicting air temperature in the glasshouse (II). *Ibid.*, 46, 36-44.
- Takakura, T., Jordan, K.A. and Boyd, L.L., 1971: Dynamic simulation of plant growth and environment. *Trans. ASAE*, 15, 964-971.
- Takakura, T., Nishina, H. and Kurata, K., 1982: A simulation analysis of solar greenhouse with underground heat storage units. in *Energy Conservation and Use of Renewable Energies in the Bio-Industries*. 2, 634-639.
- Takakura, T., 1985: Physical models and the greenhouse climate. *Acta Horticulturae*, 174, 97-104.
- Takakura, T., 1993: *Climate Under Cover - Digital Dynamic Simulation in Plant Bio-Engineering* -. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. 155pp.

## 1. はじめに

近年とみに顕著になる電力負荷の昼夜間隔差を是正し、平準化することをめくろむ蓄熱用夜間電力料金の導入により、安価な夜間の電力を利用する水蓄熱空調システムが見直される機運にある。しかし水蓄熱システムの最大の欠点である大きな蓄熱槽容積が、建築計画に重大な影響を及ぼすこともあり、延いてはそのために水蓄熱システムの採用が見送られる場合も少なからず存在していた。これらの状況を踏まえ、昨今水に替わる蓄熱槽容積を縮小できる蓄熱システムの研究・開発が活発であり、建物のインテリジェント化などに起因する冷房用エネルギーが増加する傾向にあることから、取り分け冷房用蓄熱技術が待望されている。そこで筆者らは、氷に着目し、現在最も実現性の高いアイスオンコイル型氷蓄熱槽について、実用化に際しての基本的な熱特性実験を行った。製氷、解氷に関して、主に外表面の熱伝達率に着目した多くの既往の研究はあるものの、製氷、解氷に伴う蓄熱槽内の移流、熱拡散現象を扱う研究は少ない。氷蓄熱槽のモデル化の研究は、一般に蓄熱槽を完全混合槽として扱うものがほとんどである<sup>[1], [2]</sup>。蓄熱槽の出口水温は空調機など二次側機器の設計と密接に関わるために、その再現性はモデル化に際して重要である。筆者らは製氷、解氷実験の結果を整理し、各種パラメータを推定すると共に氷蓄熱槽のモデル化を試みた。

## 2. 氷蓄熱槽の数学モデル

### 2.1 対象システム

モデル化の対象となるアイスオンコイル型蓄熱槽を有する空調システムを図-1に示す。製氷熱交換器は写真-1に示す二重らせん形(架橋ポリエチレン製、外径27mm、内径23mm、外ループ550mm、内ループ350mm、長さ約50mm)であり、図-2に示す実験用蓄熱槽(5m×2.5m×3m(h))内に設置されている<sup>[3]</sup>。

### 2.2 氷蓄熱槽内の熱的挙動の分類<sup>[4]</sup>

実験から氷蓄熱槽は、複雑な熱的挙動を示すことがわかった。それらを以下の2種の過程に分けて記述する。

1) 蓄冷過程 二次側システムを停止した状態で冷却が進み、槽内水温が4℃程度に達すると、水の密度の特異性から槽内水が激しく混合し、それまで存在していた槽内の上下の水温分布は急激に解消した(図-3)。その後槽上部の水温が底部よりやや低くなるものの、槽内水温はほぼ均一となった。氷は槽上部の製氷熱交換器から下部に向い順に生成され始めるが、氷充填率が10~25%の範囲では実用上問題となるほどの偏在はなかった。

2) 放冷過程 放冷過程には、その初期段階において「初期完全混合状態」と称する槽内が一様に混合する状態が現れる。これは蓄熱槽への入力水と氷が存在する槽内の水との混合によってより密度の大きい4℃の水が生成され、槽下部へ移行することによるものと推察される。この間槽内水温

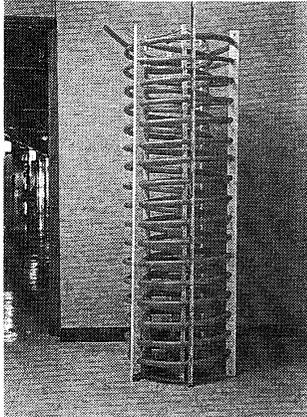


写真-1 二重螺旋型製氷熱交換器

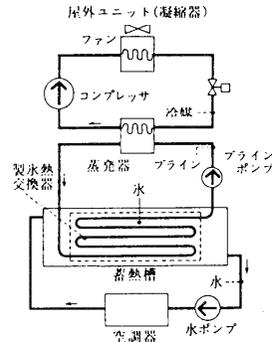


図-1 アイソコイル型氷蓄熱空調システム系統図

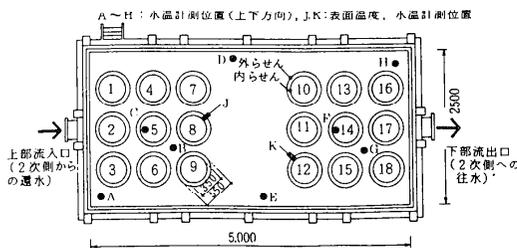


図-2 蓄熱槽内の製氷熱交換器および温度計測点の配置図

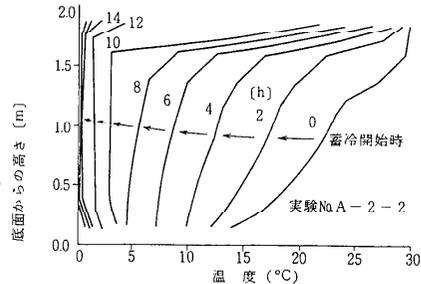


図-3 蓄冷過程の蓄熱槽内水温の一例

は一樣に上昇し 4°C 付近になるとこの状態は終了し、槽上部より温度成層と称する水温が急激に上昇する領域が形成され槽内を下降する状態（「温度成層状態」）に推移する。これは、槽内水温が 4°C 程度になると槽内水の混合機構が、水の密度差よりも吹出口のフルード数に影響されるものと推察される。この温度成層は吹出口のフルード数が小さい場合に顕著に現れた。

### 2. 3 放冷過程のモデル化<sup>[5]</sup>

氷蓄熱槽の熱的挙動の把握から、蓄冷過程は完全混合モデルとし、放冷過程は初期完全混合状態と温度成層状態に分類しそれぞれに対応した、以下に示す数学モデルを作成した。

1) 初期完全混合モデル 実験の初期完全混合状態に対応する槽内の各部水温が一樣となる「初期完全混合モデル」を作成した。槽内水に関する熱平衡式を式(1)に示し、その他を式(3~11)に示す。

2) 境界移動モデル 初期完全混合状態は、槽内水温が初期完全混合終了時の蓄熱槽水温  $\theta_c$  に達すると終了し温度成層状態に推移する。この状態を表現する「境界移動モデル」は蓄熱槽内に形成された温度成層面の上部を表現する「一次元移流拡散域モデル」と、温度成層面の下部を表現する「下層部完全混合域モデル」から構成される(図-4, 図-5 参照)。

(a) 一次元移流拡散域モデル 実験結果から吹出口フルード数  $Fr$  が 10 程度以下では、温度成層

初期完全混合モデル

$$\frac{\theta_w^{n+1} - \theta_w^n}{\Delta t} = \frac{F_w^n}{V_w} (\theta_{wi}^n - \theta_w^n) - \frac{\sum_{j=1}^N (Q_{d,1,j}^n + Q_{u,1,j}^n - Q_{L,j}^n)}{C_w \cdot \gamma_w \cdot V_w} \quad (1)$$

一次元移流拡散域モデル

$$\frac{\theta_{w,j}^{n+1} - \theta_{w,j}^n}{\Delta t} = -\frac{U^n}{\Delta x} (\theta_{w,j}^n - \theta_{w,j-1}^n) + \frac{E_x^n - E_N^n}{(\Delta x)^2} \{ (\theta_{w,j+1}^n - \theta_{w,j}^n) - (\theta_{w,j}^n - \theta_{w,j-1}^n) \} - \frac{Q_{d,1,j}^n + Q_{u,1,j}^n - Q_{L,j}^n}{C_w \cdot \gamma_w \cdot V_w} \quad (2)$$

$$Q_{d,1,j}^n = \alpha_o \cdot S_{s,j} (\theta_{w,j}^n - \theta_{s,j}^n) \quad (3)$$

$$Q_{L,j}^n = K_w \cdot \Delta S_w (\theta_o^n - \theta_{w,j}^n) \quad (4)$$

$$L_i \cdot \gamma_i \frac{V_{s,i,j}^{n+1} - V_{s,i,j}^n}{\Delta t} = Q_{s,2,j}^n - Q_{s,1,j}^n \quad (5)$$

$$V_{s,i,j}^n = \pi \cdot \Delta L_p \{ (r_{s,i,j}^n)^2 - r_p^2 \} \quad (6)$$

$$S_{s,j}^n = 2\pi \cdot r_{s,i,j}^n \cdot \Delta L_p \quad (7)$$

$$Q_{s,2,j}^n = C_b \cdot \gamma_b \cdot F_b (\theta_{s,bo,j}^n - \theta_{s,bi,j}^n) \quad (8)$$

$$Q_{s,2,j}^n = K_{s,j}^n \cdot \Delta L_p (\theta_{s,s,j}^n - \theta_{s,bo,j}^n) \quad (9)$$

$$K_{s,j}^n = 2\pi \left\{ \frac{1}{\alpha_i \cdot r_{in}} + \frac{1}{\lambda_p} \cdot \ln \left( \frac{r_p}{r_{in}} \right) + \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \left( \frac{r_{s,i,j}^n}{r_p} \right) \right\}^{-1} \quad (10)$$

$$E_N^n = \frac{\Delta x}{2} U^n - \frac{\Delta t}{2} (U^n)^2 \quad (11)$$

下層部完全混合域モデル

$$\frac{\theta_{wc}^{n+1} - \theta_{wc}^n}{\Delta t} = -\frac{U^n}{(N-LM)\Delta x} (\theta_{wc}^n - \theta_{w,LM}^n) + \frac{E_x^n - E_N^n}{(N-LM)(\Delta x)^2} (\theta_{w,LM}^n - \theta_{wc}^n) - \frac{\sum_{j=LM+1}^N (Q_{d,1,j}^n + Q_{u,1,j}^n - Q_{L,j}^n)}{C_w \cdot \gamma_w \cdot \sum_{j=LM+1}^N V_{w,j}} \quad (12)$$

主な記号： $\theta_{w,j}^n$ ； $n$ 時刻の $j$ 層の水溫、 $\theta_w^n$ ；初期完全混合状態の槽内水溫、 $\theta_{s,j}^n$ ；非着氷時の製氷熱交換器の外表面溫度または着氷時の氷の外表面溫度、 $\theta_{s,bo,j}^n$ ；層の製氷熱交換器の出口ブライン溫度、 $\theta_{s,bi,j}^n$ ；層の製氷熱交換器の入口ブライン溫度、 $\theta_o^n$ ；雰囲気溫度、 $\theta_{wc}^n$ ；下層完全混合域の水溫、 $U^n$ ；槽内平均水速、 $E_x^n$ ；熱拡散係数、 $Q_{d,1,j}^n$ ；非着氷時の製氷熱交換器の外表面または着氷時の氷の外表面での熱流、 $Q_{s,2,j}^n$ ；非着氷時の製氷熱交換器の外表面または着氷時の氷の外表面からブラインまでの熱流、 $V_{s,i,j}^n$ ；水量、 $V_w$ ；蓄熱槽総水量、 $\Delta L_p$ ；層の製氷熱交換器の長さ、 $F_w^n$ ；槽内通過水量、 $F_b$ ；ブライン流量  
添字： $j$ ；蓄熱槽内位置、 $n$ ；時刻、 $i$ ；氷、 $N$ ；蓄熱槽内分割数、 $LM$ ；一次元移流拡散域の最下層位置、\*；ブラインの流れの向きを示す。下方は $d$ を上方は $u$ を示す。

吹出口フルード数  $F_r = U_d / \sqrt{D_e \cdot g \cdot \Delta \rho_w / \rho_w}$ 、 $U_d$ ；吹出口水速、 $D_e$ ；吹出口等価直径、グラスホッフ数

$G_r = (2r_p)^3 \cdot g \cdot \Delta \rho_w / \rho_w / v_w^2$ 、レイノルズ数  $R_e = 2r_{in} \cdot U_b / v_b$ 、ヌセルト数  $N_u = \alpha_o \cdot (2r_p) / \lambda_w$

が比較的顯著に形成され、しかもその後の溫度成層面が乱れることなく下降すること、また、水平面方向に槽内水溫勾配が小さいことから、本領域での水溫分布は一次元移流拡散方程式で記述できるものとする。用いる水の熱拡散係数 $D_x^n$ は、時変するものの、空間的には変化しないものとする。式(2)～(11)に示す。

(b) 下層部完全混合域モデル 形成された溫度成層の下層部は未だ氷が融け残り、その水溫は $\theta_c$ に関連しつつ、4℃以下に保たれる。そのため、この領域では、放冷過程の初期完全混合状態が継続されるとしてモデル化を試みた。一次元移流拡散域モデルの最下層部のセルを( $j=LM$ )とする

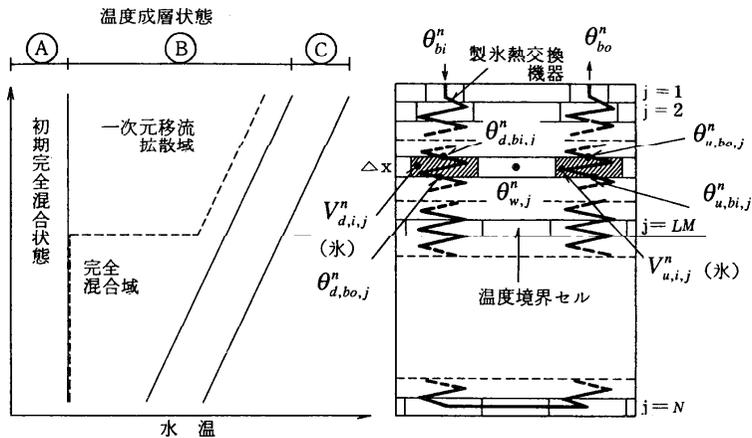


図-4 放冷過程の蓄熱槽内の熱的現象の分類 図-5 境界移動モデルの概念

と、 $LM+1 \leq j \leq N$  を下層完全混合域モデルで表現する。槽内水温に関する熱平衡式を式(12)に示すその他を式(3~11)に示す。

次に、下層完全混合域と接する一次元移流拡散域の最下層部のセル( $j=LM$ )が移動するアルゴリズムを示す。 $n$ 時点で初期完全混合モデルにて槽内水温が $\theta_c$ に達すると $n+1$ 時点では水面近傍の第1セルを仮に一次元移流拡散域として扱い、境界移動モデルを適用し水温を計算する。水温が式(13~15)の条件を満足する場合には、第1セルをそのまま一次元移流拡散域として扱い、満足しない場合は、第1セルを $n$ 時点の状態に戻し水温を再計算する。 $n+2$ 時点以降、上記の過程を踏み水温の計算を続けることにより温度境界面( $j=LM$ と $LM+1$ との境界面)が下降する。式(13~15)は、図-5に示すように $j=LM+1$ と $j=LM$ のそれぞれのセルの水の密度の大小関係を水温で示した場合に、 $j=LM$ の水の密度が $j=LM+1$ の水の密度よりも小さい条件を示す。ここで水の密度は、水温が $0 \sim 10^\circ\text{C}$ の範囲では、 $4.075^\circ\text{C}$ を最大値とする二次曲線で表現できるものとする。この条件では $j=LM$ と $LM+1$ のセル間では密度差による水の混合が進まないとして、一次元拡散域を $j=LM$ から $LM+1$ まで拡大する。この条件を満足しない場合は $j=LM$ の水の密度が $j=LM+1$ の水の密度よりも大きいため、セル間で水の混合が進むとして、一次元拡散域は $j=LM$ の状態を保持する。

$$0 \leq \theta_{w,LM}^n \leq 4.075, \text{ and, } \theta_{w,LM}^n \leq \theta_{w,LM+1}^n \leq 8.15 - \theta_{w,LM}^n \quad (13)$$

$$4.075 \leq \theta_{w,LM}^n \leq 8.15, \text{ and, } 8.15 - \theta_{w,LM}^n \leq \theta_{w,LM+1}^n \leq \theta_{w,LM}^n \quad (14)$$

$$8.15 \leq \theta_{w,LM}^n, \text{ and, } \theta_{w,LM+1}^n \leq \theta_{w,LM}^n \quad (15)$$

### 3. 各種パラメータの推定

先に示す氷蓄熱槽のモデルの中で用いる4種のパラメータを推定した。

#### 3.1 製氷熱交換器の管内表面熱伝達率 $\alpha_j$

円管内の熱伝達率に関しては、各種文献があるものの、製氷熱交換器は二重らせん状をなしており、またブライン流速から判断し、流れの状態が層流域から遷移域と予想されることから製氷熱交換器の管内表面熱伝達率 $\alpha_j$ を推定した。対象となる製氷熱交換器は図-2のNo.8とNo.12とした。プ

ライン流量はすべて一定である。推定した放冷過程の $\alpha_i$ と管内レイノルズ数 $Re$ との関係を図-7にまたその回帰式を式(16)に示す。

$$\alpha_i = 0.129 (Re - 2000) + 241 \quad (16)$$

ただし  $1700 \leq Re \leq 4500$

### 3. 2 非着氷時の製氷熱交換器の管外表面熱伝達率 $\alpha_0$

放冷過程において製氷熱交換器まわりの流れが冷水の吹出口からの噴流の影響を受け、複雑になることが予想されることから、製氷熱交換器の管外表面熱伝達率 $\alpha_0$ を推定し、無次元化し図-7にヌセルト数とグラスホフ数・プラントル数との関係を示す。式(17)で示す水平円管の自然対流場での既往の文献式も併記した [6], [7], [8]。

$$Nu = 0.53 (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (17)$$

$$\alpha_0 = (\lambda_w / 2r_p) Nu$$

ただし  $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$

### 3. 3 放冷過程初期完全混合終了時の蓄熱槽内水温 $\theta_c$

蓄熱槽内流量が定流量で変温度入力となる場合と、変流量、変温度入力となる場合の実験について、蓄熱槽内水温分布から $\theta_c$ を読み取った。 $\theta_c$ は放冷過程初期における槽内水の混合の程度を示す指標でもあることから、蓄熱槽内水が $\theta_c$ に達した時点での吹出口フルード数 $F_r$ と $\theta_c$ の関係調べ、図-8に示す。 $F_r$ が増大するにつれ $\theta_c$ も上昇することがわかった。これらの関係を

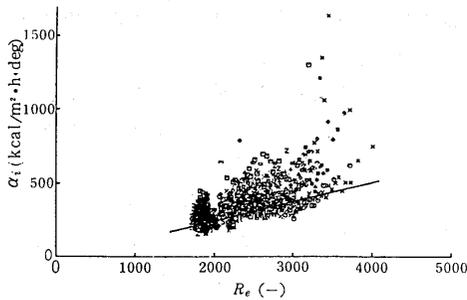


図-6 蓄冷過程の製氷熱交換器内 $Re$ と $\alpha_i$ の関係

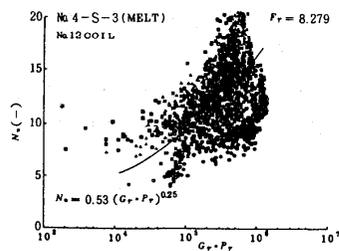


図-7 放冷過程の $Gr \cdot Pr$ と $Nu$ との関係

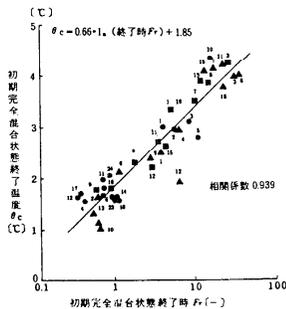


図-8 放冷過程の初期完全混合終了時の

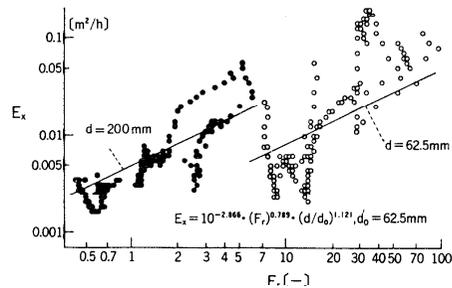


図-9 吹出口フルード数 $F_r$ と熱拡散係数 $E_x$ との関係

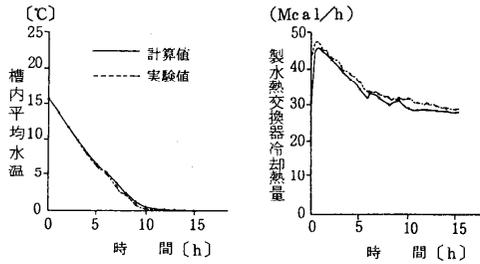
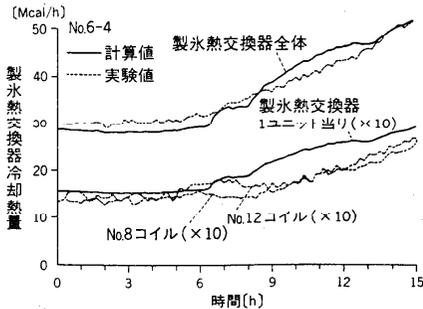
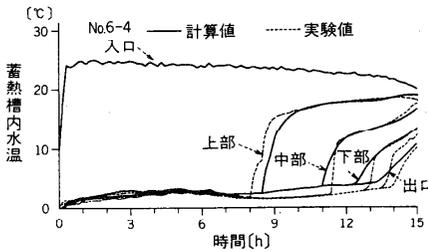


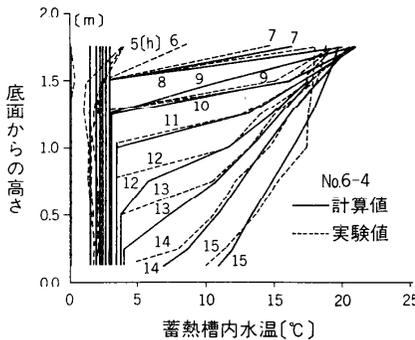
図-10 蓄冷過程の槽内平均水温と製氷熱交換器の冷却熱量



(a) 製氷熱交換器冷却熱量



(b) 蓄熱槽内水温の時系列変動



(c) 蓄熱槽内水温分布

図-11 放冷過程の製氷熱交換器冷却熱量と槽内水温分布 (冷凍機: 運転、槽内混合: 小)

示す回帰式を式(18)に示す。

$$\theta_c = 0.66 \cdot \ln(F_r) + 1.85 \quad (18)$$

ただし  $0.35 \leq F_r \leq 77$

### 3. 4 蓄熱槽内水の熱拡散係数 $Ex^n$

$Ex^n$  は先に示したように、空間的には固定であるが時変するものとして推定した。

$Ex^n$  を推定するに当り、モデルが有する未知のパラメータ  $\alpha_i$ ,  $\theta_c$  は、式(16)、(18)を用い、製氷熱交換器の管外表面熱伝達率は式(17)で示す非着氷時の  $\alpha_0$  を放冷過程の着氷時にまで拡大して用いることとした。これらの3種のパラメータとある時間区間 (= 10分間) 毎に  $Ex^n$  を思考錯誤的に選定し、その時間区間のシミュレーションの水温の計算値と実測値を比較し、その誤差の二乗和が最も小さい熱拡散係数  $Ex^n$  を推定した。 $F_r$  との関係を図-9に示す。また次式に示す回帰モデルを作り、係数 A, B, C を推定した。

$$Ex^n = 10^A \cdot (F_r)^B \cdot (D_e / D_0)^C \quad (19)$$

$$0.5 \leq F_r \leq 100, 62.5\text{mm} \leq D_e \leq 200\text{mm}$$

( $D_0 = 62.5\text{mm}$ ) の範囲で

$$A = -2.866, B = 0.789, C = 1.121$$

このとき  $Ex^n$  は  $0.004 \leq Ex^n \leq 0.1$  の範囲となった。

### 4. モデルの検証

以上に示した4種のパラメータの回帰式を用いて放冷過程の本モデルの再現性を一連の実験値を用いて検討した。蓄冷過程のシミュレーションに用いる初期条件は蓄熱槽水温とし、境界条件は製氷熱交換器の入口ライン温度とした。放冷過程の初期条件は、放冷実験開始時の氷充填率及び槽内水温分布とし、境界条件は各時刻毎の製氷熱交換器入口ライン温度及び流量 (冷凍機が運転するとき)、蓄熱槽入口水温と流量の実験値とした。その結果の代表例を図-10と図-11に示す。図-

11は冷凍機が同時に運転されている状態で、比較的槽内混合が抑えられているケースである（実験開始直後 $F_r = 5.3$ ）。一連のシミュレーションの結果から、氷充填率が25%以下の状態での蓄冷過程においては槽内平均水温および製氷熱交換器の交換熱量の本モデルの再現性は良好であった。また放冷過程においても実験開始直後の吹出口フルード数 $F_r$ が $0.64 \leq F_r \leq 6$ の範囲では、製氷熱交換器の交換熱量および槽内水温の計算値と実験値の整合性が良いことがわかった。

## 5. あとがき

アイスオンコイル型氷蓄熱槽の槽内水温の変化の考察から、放冷過程に関して「境界移動モデル」と称するモデルを提案すると共に、各種のパラメータを推定した。それをを用いた計算結果と変流量、変温度入力の実験値との比較から、氷充填率が25%以下での本モデルの実用性を確認した。尚、本研究は東京電力（株）より鹿島が受託し実施したものである。

### 参考文献

- [1] Silver, S. C., et al: CBS/ICE A Computer Program for Simulation of Ice Storage Systems, ASHRAE Technical Bulletin, Vol. 5, No. 4
- [2] Silver, S. C., et al: Component Models for Computer Simulation of Ice Storage Systems, ASHRAE Technical Bulletin, Vol. 5, No. 4
- [3] 相楽典泰ほか5名：氷蓄熱空調システムに関する研究（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，計画系，pp503～504，昭和59年10月
- [4] 相楽典泰ほか5名：空調用氷蓄熱槽の蓄冷及び放冷過程の熱的性能把握実験，日本建築学会計画系論文報告集，第390号，昭和63年8月
- [5] 相楽典泰ほか5名：空調用氷蓄熱槽の放冷過程のモデル化と各種パラメータの推定，日本建築学会計画系論文報告集，第397号・1989年3月
- [6] 日本機械学会，伝熱工学資料，改訂第4版，1986
- [7] 尾花英明：熱交換器設計ハンドブック，pp602～603，工学図書
- [8] 甲藤好郎：伝熱概論，pp161，養賢堂，1971

## 1. まえがき

日本伝熱学会の守備範囲を講演応募要領の〔大分類〕に沿って眺めてみると

(a)強制対流 (b)自然対流 (c)沸騰 (d)凝縮 (e)蒸発 (f)二相流 (g)熱放射 (h)燃焼 (i)熱伝導  
(j)熱交換器 (k)流動層 (l)熱物性 (m)測定法 (n)分子動力学 (o)反応 (p)その他

ということになっている。伝熱と流れは(a)～(f)を見ても分かるように有機的に連成していることが多い。他の項目も含めて眺めてみると日本流体力学会、日本混相流学会、日本燃焼学会、日本化学工学会など多くの他の学会の守備範囲とオーバーラップしており、お互いに守備範囲を侵し合っているようで可笑しい。(n)や(o)などは最近追加されたものらしくもっと他の学会の守備範囲を侵す構えを見せており、最後にピッタリの番号(p)で一発かましてるのが傑作である。今や“ボーダレス”は時代を最もよく象徴する言葉の一つになっており、いろいろな分野でめまぐるしくその展開が報道・議論されるようになってきている。学問の分野もその例外ではなく時代の趨勢に乗った動きといえるであろう。問題は“ぼけた境界”の真っ只中であって“主役を演じる”か“脇役に徹する”かをいかに適切に判断していけるかという所にあると思われる。この判断は学界と産業界で異なると思われる、どちらかと言えば学会では後者寄りの動きを、産業界では少し前者寄りの動きを指向する傾向があると感じている。

製鉄所はエネルギー多消費産業の代表と言われているだけに、伝熱に関連するプロセスが非常に多い。そのうちいくつかの例を単に紹介するのでは象の一部をみせるような感じがするので、ここでは何らかの形で伝熱技術の分類・分析を日本伝熱学会の守備範囲を念頭に置いて試行してみた。その分類に沿っていくつかの具体例を簡略に示すことにより製鉄所の伝熱技術の特徴を感じてもらえたらと考えている。

## 2. 血液型別熱技術

まえがきで示した日本伝熱学会の守備範囲の各項目を見ると、ほとんどの項目が謂る要素技術を表現しているのに対して(j)項のみが機器を表現しているのが興味深い。ほとんど全ての機器というより“物”に共通する共通基盤技術の一つとして伝熱という基本要素技術があるという認識があり、地球物理、土木工学、応用物理・化学、医学といった分野でも伝熱屋の活躍できる場があると考えて伝熱学会が独立していると思われるから、ほんとうは“物”の中でただ一つ熱交換器というのがあるのはおかしいようにも見えるが、物の性能を支配するキーとなる

要素技術が伝熱になっている機器と言えは熱交換器以外には考えにくいので、これで良いのであろう。逆に言えば、熱交換器以外の“物”に伝熱技術が適用される場合、他のキーとなる要素技術を支援する形で適用されることになる。この場合伝熱技術が独立して適用されることは比較的少なく、多くの場合他の要素技術と複雑に連成している。後者のタイプの伝熱技術をA型、前者のタイプの伝熱技術をB型とすれば、上述の熱交換器の範疇に入る伝熱技術がO型になりそうである。企業の中で熱交換器の範疇に入る主力製品を保有していると、その企業内の伝熱技術者は比較的大きな顔をして仕事に携わることができ、伝熱技術者の中に親分肌の技術者が存在し得る。ボイラーメーカーなどは非常に良い例であろう。一方、複合的な経営をしている企業では、機器毎に千差万別の種々の伝熱問題が存在し、学界で得られている知見がそのまま適用できる場合が少なく、比較的短期決戦が多いため、周囲に振り回されながらセコセコと仕事をする事になり器用貧乏的存在になり易い（A型）。社内に保有している製品の種類の数がある程度以下に少ない専門メーカー的な企業では、この器用貧乏的存在さえ存在し得ないほど仕事量が減少するため、謂る熱技術者が社内に存在し難い。折りに触れ比較的大きな伝熱問題が出てくる度に社外の専門家の援助を仰ぐようなことになる（B型）。また機器の性能を支配するキーとなる要素技術は伝熱でないのに、比較的独立して伝熱技術が適用されるB型の伝熱技術もあり得る。

### 3. 製鉄所における伝熱

図1に製鉄プロセスと熱技術の全体概略展望図を示している。これに沿って、各工程でどのような伝熱技術が存在し、どういう特徴を持っているかを概説する。

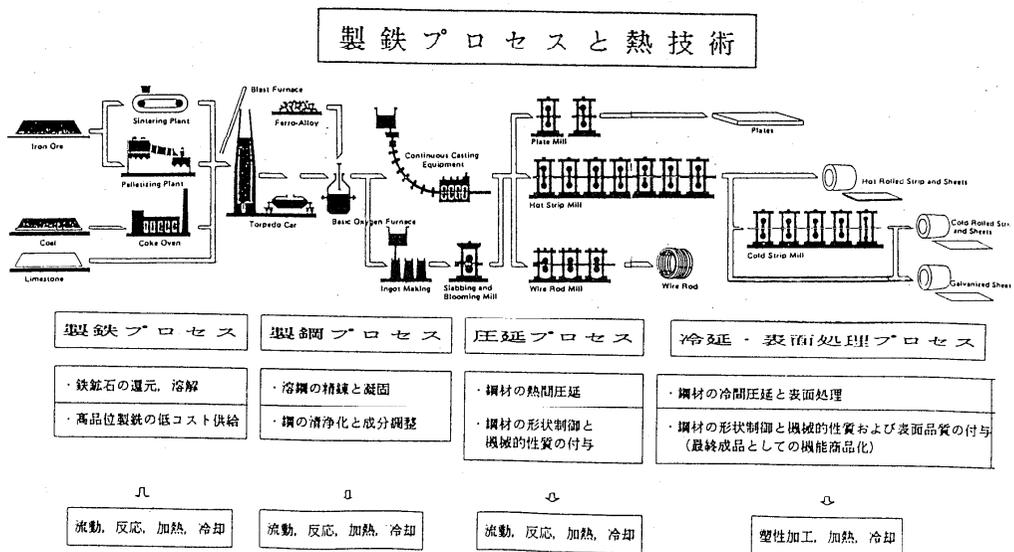


図1. 共通要素技術としての加熱、冷却技術

製鉄プロセスには製鉄所のシンボルとも言われている高炉があり、この内部挙動の解明は冶金屋さんの独壇場になっている。伝熱の問題も種々あるが胸を張って物が言える部分がほとんどない。ところが意外に高炉にB型の伝熱問題が存在するのでその例を紹介しておく。高炉の炉底に溶銑が溜まっているが、この部分の耐火物の侵食状況を操業しながら把握してゆく必要がある。これを何点かの耐火物内の温度計測データを使用して、選点法により熱伝導の逆問題を解き、溶銑の温度に等しい等温線で耐火物の溶損状況を推定する手法が開発されている。

図2 にその概要を示している。O型の伝熱問題としては移動グレート式焼結鉱冷却機や蓄熱体空気加熱器の伝熱シミュレーションが実施されている。ペレタイジングプラントやコークス炉にも多く伝熱問題があるが、より多くの要素技術が連成しており、(固体燃焼、反応、熱放射、流れ、熱伝導、固気二相流……) 非常に広い意味では一種の熱交換装置であるからタイプとしてはA-o型位になりそうである。

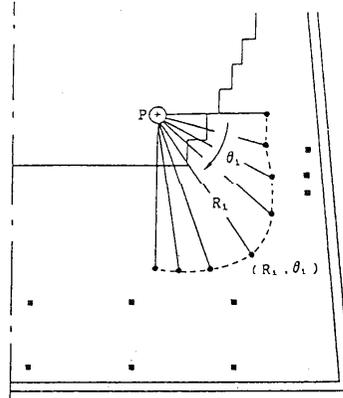


図2. Representation of the profile of lining erosion at the hearth of the blast furnace.

- Location of isothermal line
- Collocation point

製鋼プロセスには連続铸造設備があり、熱・流動解析に加えて凝固解析が重要な技術になっている。鑄型の溶鋼自由表面には酸化防止と放熱軽減のためフラックスという粉体が層状にのせられており、自由表面近傍の溶鋼流動によるフラックスの巻き込み特性(一つの非金属介在物の源となる)や初期凝固部の特性については未解明な部分が多い。鑄型の上流にある一種の溶鋼鍋であるタンディッシュでは、1600℃前後の溶鋼の温度制御にプラズマヒータが導入されており、溶鋼の加熱・流動の非正常特性の把握は非金属介在物の浮上除去・温度制御の面から非常に重要な課題になっている。プラズマヒータによる局所的な過熱防止や非金属介在物除去促進のために底部からArガスのパブリングも実施されており、全体の状況を非正常(湯面レベルも変動する)で把握するのは至難の技である。ダンディッシュから鑄型に湯を導いていく部分に浸漬ノズルがあり、装置の都合でダンディッシュ底部レベルから鑄型の自由表面レベルまでの高低差は2m前後あるため、ノズル内に比較的大きな負圧が発生し、ノズル内の流れも異常になり易い傾向を持っている。ノズル内に2次メナスカスと称せられる自由表面が出現する可能性も高く、ノズル下部の噴出孔から鑄型内への噴流特性の把握でさえ容易でない。鑄型内溶鋼流動を制御するために電磁攪拌技術が導入されており、電磁力による溶鋼攪拌特性の把握も重要である。近年アルミ業界で先行している電磁界铸造技術(自由表面近傍で高周波の電磁場を発生させ、表皮効果を利用し

て自由表面に張力を発生させ凝固開始部の制御をしようとするもの)を製鉄の連続 casting 設備に導入していく動きも出てきており、熱・電磁場・流動・凝固関連の連成問題を解いていく技術が切望されている。タンディッシュも鋳型も伝熱屋さんがかかなり活躍できる A-o 型の熱技術と考えられる。

鋳型を出た鋼材は内部に未凝固域を持っており、凝固を完結させるため水を用いたスプレー冷却で冷却され数多くのロールで方向を変えて引き抜かれていく。スプレー冷却技術は熱間圧延でも使用されている数少ない B 型熱技術である。但し熱間圧延の場合は鋼材が水を表面にのせたまま前後に非定常に動くので普通のスプレー冷却とは異なるし、鋼材表面にスケールが発生したりして、表面性状が変化するため B-a 型熱技術と言った方が良くかもしれない。鋳型を出た鋼材の内部の未凝固域は液状であるため、鋳型の自由表面とつながっており、かなり大きな静水圧がこの部分に発生し鋼材がふくらもうとするバルジングと称せられる現象が発生する(ガイドのロールとロールの間の拘束されていない所でふくらむ)。このため未凝固域の液の境界形状が変化し、これが凝固末期に中心偏析と言われる欠陥発生の原因になると考えられており、凝固末期近傍のロールを単なるガイドでなく圧延のように少し圧下させる技術が開発されている。この微妙な未凝固域の境界の変形が内部の液の動き・凝固特性に比較的大きな影響力を持っており、種々の考察が実行されているが、この未凝固域の境界の変形が凝固末期にどのようなメカニズムで中心偏析を発生させるかは厳密には未だ未解明の非常に興味深い問題である。この場合図 3 に示されるような系に対して、バルジングを考慮した 圧下時の三次元変形解析が必要であり、その結果を

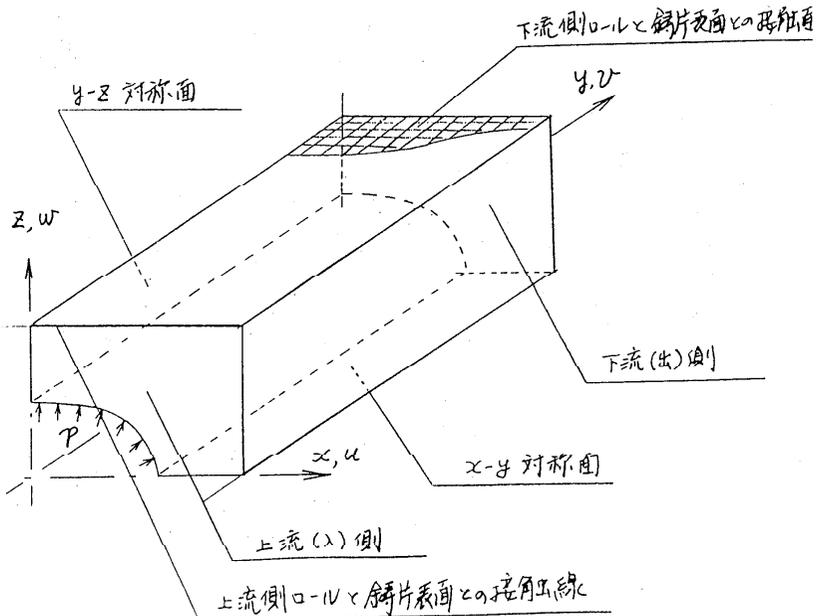


図 3. バルジングを考慮した 圧下時の三次元変形解析

を受けて内部溶鋼の挙動と凝固特性の考察を実行することになる。したがって伝熱屋が一人では充分活躍できないA型の熱技術ということになる。

圧延プロセスでは熱応力関連、ロールと鋼材の接触熱抵抗関連の熱技術などがあるが、伝熱屋はほんのサブの位置づけとなるA型の技術が多い。加熱炉という巨大な熱交換装置があるが、理路整然と現象を解析してゆける部分が少なく経験則に頼る部分が多い。高温雰囲気ということと放射伝熱は重要な要素技術になっているが空間のガス物性、鋼材表面や耐火物表面の放射率といった物性の評価が難しく、形状も複雑であるため通常の熱放射解析技術の適用が困難で製鉄業界では $\phi_{cc}$ 法と呼ばれている総括熱吸収率による評価で処理されることが多い。局所的に見ると(オープン)ラジアントチューブにおける燃焼・伝熱技術や、高温鋼材を炉内で搬送する時スキッドボタンと呼ばれる部品で持ち上げるのであるが、この時発生する鋼材の局所的な温度低下領域がスキッドマークと呼ばれこれを軽減する技術といった伝熱技術が数多く存在するが、各種熱処理炉も含めて総じているような技術が錯綜している一種の熱交換装置ということで、伝熱屋が比較的重要な位置を占めるO-A型熱技術ということになるであろう。少し変わった加熱技術としては薄板連続焼鈍炉でラジアントチューブや還元性高温ガスの噴流で加熱するのではなく、直火還元加熱といわれている燃焼ガスによる直接加熱技術も開発されている。表面処理プロセスになると伝熱技術があまり関係しなくなるような感じがするが、筆者はここにこそ将来伝熱屋が活躍できる場があると考えている。例えば電気めっきラインの場合、分野としては電気化学の分野であるが、液中のイオンの移動特性を液の動きとともにシミュレーションで評価するといった試行がほとんどなされた例がなく、電気分解で発生する気泡が電気めっき特性におよぼす影響とか、生産性を上げるために電流密度を上げた時の発熱の問題をどう評価するかといった課題が多く存在する。めっき液の流速の絶対値や流速分布がめっき特性に影響することは分かっているがどのようなメカニズムで影響するかを理路整然と考察した例がほとんど無い。アルミ業界における置換めっきラインでも同じような問題がある。蒸着めっきでは高真空中で熔融金属の表面を電子ビームで加熱し、蒸発した金属を板にくっつけるといった現象が問題になり、この場合は蒸発した金属分子の動きは稀薄ガスとしての取扱いが必要となり、ナビエ-ストークス方程式でなくボルツマン方程式を解くことが要求される。日本伝熱学会の守備範囲に(m)項として分子動力学が追加されていることから、この種の研究は伝熱研究者が実行してなら不思議は無い。もちろん電気化学屋さんや冶金屋さんがシミュレーションを実行するのが自然なのであるが、コンピューターの発達とともに急速に発達した各種数値解析技術がこれに慣れ親しんでいない研究者にとって意外に大きな障壁になっている可能性があり、

伝熱屋さんが電気化学屋さんや冶金屋さんに相談しながらアプローチした方が実現性が高いと感じている。もちろんこの時、数値解析技術を得意とする伝熱屋さんである必要がある。この種の伝熱技術はA型に属するものであるが、A型の中でちょっと考えたら伝熱屋がたく活躍できそうにない異分野の技術を多く含んでいる領域(医学における伝熱などはよい例で、人間

の体温はどのようにして一定に保たれるか、などというのは熱の問題のようで熱の専門家には手のつけようがない)の中で伝熱屋が割り込んでいった方が効率的と考えられる課題を積極的に攻めるのが日本伝熱学会の方針に合うかどうか興味深いポイントである。

おわりに

雑然とした記述の上に、変な分類を混ぜたのでピンときにくい文章になっているが、少なくとも製鉄所にはいろんな技術が豊富に存在し、理路整然とはちょっと処理できにくい技術が多いことを感じてもらえたらと念じている。製鉄所はKKD(勘と経験と度胸)で発達してきたと言われるのも尤もというかんじがする。しかし時と共に発達する技術を積極的に取り入れ、これまでできなかった部分の技術の向上は不可欠と考えている。また製鉄所で得られている貴重な勘と経験を他分野で活用していくことも指向したいと考えている。

<故片山功蔵先生を偲んで>

片山功蔵先生を偲ぶ

斎藤彬夫（東京工業大学）

2月23日の深夜、眠りに入った直後の電話で起こされた。時ならぬ電話に、悪い出来事を予感しながら半分眠った頭で対応すると、電話のむこうには片山功蔵先生のご長男の徒有さんが居り、先生が急逝されたことを知らされた。ほんの1週間前には大学の私の部屋を元気に訪ねて来られ、大岡山の”あたりや”で、いつものように一緒にビールを飲んだばかりであり、突然の訃報はとても信じられない思いであった。後で聞いた話によると、池袋で気の合った方々と好きなお酒を楽しまれ、帰宅後お風呂に入られ、心不全を起こされたという。特に苦しまれたご様子でもなかったと伺ったのが、せめてもの慰めであった。

私が片山先生の下で卒業研究を始めたのは昭和39年4月である。最初のうちは先生の性格や指導方針がよく理解できず、1年目は大変苦労した憶えがある。先生に決めて頂いた卒業研究のテーマは『熱伝導に関する研究』という途方もないもので、もう少し具体的な内容を教えて頂こうと頻りに足をはこんだ。ところが、お話を何度伺っても要領を得ない。ついに卒論の中間発表の前日となり、決死の覚悟で質問に向いたところ、『具体的に何をやるかは、明日の貴方の話を聞いてから決めましょう。貴方が何を研究したいのか、明日は私によく解るように説明して下さい。』と軽くかわされ、攻守とところを換えた感じとなり、煙に巻かれて追い返された。その後、“片山流”が見えるように成るまでには随分と時間がかかった。片山先生がしばしばおっしゃっていたのは、『研究を料理に例えると、生きの良い魚を、まな板の上に置くまでが指導教官の仕事である。魚のどの部分を使ってどう調理するかは、学生に任せる。細かい点の指示などはしない。自ら学べ。教えない。』というものであった。つまり先生は、卒業研究で片山門下生になったばかりの私の前に“熱伝導”という、とてつもない大魚を置かれたわけである。『一生かかって料理しろ』とおっしゃりたかったのかも知れない。

卒業研究のことを、しつこく聞きに伺っていた頃、片山先生から、『貴方、Carslawの本(Conduction of Heat in Solids)を1冊読んじゃうといいですよ』と、こともなげに言われたことがある。当時は、片山先生の師匠の川下研介先生が講座の教授をされており、何かの折りに、その話をしたところ、『あれは、良い。読むと賢くなる。しかし、川下の熱伝導論は、もっと良い本だ。こちらは、枕にしているだけで賢くなる。』と、おっしゃられた。卒業研究をする学生の目からは、熱伝導の神様とも見えるお二人の意見は誠に重く、夏休みにCarslawの本と格闘をした。今でも、その時の勉強が大変役に立っており、

感謝している。片山先生も若い頃に同じ苦勞をされたらしく、その経験を踏まえての指導であったことを後日聞かされた。

片山先生が生前、大変な情熱を傾けたお仕事の一つに熱物性学会（最初は熱物性研究会）の創設準備が挙げられる。北海道大学の関信弘先生や慶応大学の長島昭先生と、教授室で遅くまで相談をしておられたお姿は、まるで昨日のここのようである。昭和55年11月に東京青山会館で第1回熱物性シンポジウムが開催された頃は、先生の東京工業大学における最も充実した時期ではなかったかと思う。事務処理が大の苦手であった先生は、『貴方、ついでに・・・も、やっちゃおうか』の口癖を周囲に連発して、生き生きと輝いておられた。生前のお話によると、その後の熱物性シンポジウムにも（とりわけ懇親会には）、欠かさず出席されたとのことである。気の合った仲間との会合が大好きでいらした先生は、『熱物性の仲間は、暖かみがあって、楽しいんだな〜』というお言葉を、何度も口にしておられた。熱物性学会が今後、益々大きく発展してゆくことには、先生の魂がこもっているように感ぜられる。

泰雲院春岳賢功居士。先生のお人柄が、この戒名によく盛り込まれている。“泰雲”は、荒々しい暗雲や入道雲ではなく、青空に悠々とぼっかり浮かぶ白い雲を、また、“春岳”は、春の日差しを浴びた暖かみのある山並を連想させる。最後に、誠に失礼なことを書くが、先生はしばしば遅刻をされた。ところが希に、『皆より早めに行って、ビールでも飲みながら待ってましょう。』と提案されることがあり、そんな時には、皆が必ず通る見通しの良い場所を選んで網を張られ、グラスを片手に陣取っておられた。68才の若さで亡くなられた今、誰もが必ず通る蓮の池のほとりで、水面に咲いた花でも眺めながらグラスを傾けておられるのではないかと、そんな情景が思い浮かんでならない。

恩師、片山功蔵先生のご冥福を心からお祈りし、筆を置く。

## 片山先生の思い出

棚沢一郎（東大生研）

片山功蔵先生とは20数年にわたり親しくお付き合いをさせていただいた。先生についてはいろいろな思い出が残っているが、多くはたそがれ時以後の酒談の記憶である。

先生に初めてお目にかかったのは、軽井沢のグリーンホテルで開かれた夏季伝熱セミナーの折であった。先生はたぶん熱伝導率の測定法の話をされたと思うが、むしろ今でも印象に残っているのは、夜ホテル内の一室に集まったの閑談での独特の喋り口であった。「この辺では、ジンの炭酸割りをハイボールと言うんですね。」と何度も繰り返しておられた。このセミナーでは、勝田勝太郎先生（関西大）や、若くして亡くなられた河田治男先生（東工大）にも初めてお目にかかった。

第5回国際伝熱会議が1974年に東京で開催されることになり。僕は片山先生のお手伝いをして設営や懇親会の企画などを担当した。昼間の準備委員会が終ると、いつも片山先生の研究室や大岡山の飲み屋で楽しい歓談の一時を過ごした。

夏に国際伝熱会議があった関係で、1974年の伝熱セミナーは翌年の1月に持ち越され、札幌市郊外の定山溪温泉で開かれた。このセミナーに僕は当時大学院生だった宇高義郎君（現防衛大助教授）と一緒にスキーをかついで参加したのだが、上野発の夜行列車で片山研究室の御一行と同じ車両となり、夕方早くから翌朝まで延々と飲み続けたのを覚えている。十数時間の夜汽車の旅があったという間に過ぎた。

また定山溪では、夜の懇談で酒が不足気味となったとき、片山先生と北大の谷口先生とが二人で、厳寒の雪道をものともせず、ゆかたに下駄ばきで酒の買い出しに出られ、それぞれに一升瓶をぶらさげて帰ってこられた姿が鮮明な記憶として残っている。

このセミナーが縁となってか、宇高君は学位取得後片山先生の下でしばらく助手として勤めることになった。また、やはりセミナーに参加していた当時片山研究室所属の神坂光男君（その後三菱重工、しかし残念ながら昨年故人となられた）は、東大・東工大単位交換制度発足後の最初の学生として、東大大学院での僕の講義を聴きに來ていた。さらに、片山研究室で卒業論文を書いた桑原啓一君（現IHI）は、大学院の修士課程では東大に入学して僕の研究室に配属され、片山研究室と僕らの研究室の交流の推進役となった。

1978年にカナダのトロントで開かれた第6回国際伝熱会議の時には、僕は片山研究室グループと終始行動を共にした。山梨大の下村龍助先生、当時山梨大におられた斎藤彬夫先生（現東工大教授）、岡田昌志先生（青学大）なども一緒だった。東京にいる時と同じように、サンフランシスコでもトロントでも、夜の酒席は賑やかであった。

このような記憶は辿り出せば際限がない。その後も「伝熱工学資料（改訂第4版）」の出版分科会、日本熱物性研究会に関連するいくつかの集まり、日本機械学会の省エネルギー・新エネルギー関連の研究分科会、国内・国外のシンポジウムやセミナー、ヒートポンプに関連する委員会などで僕はしょっちゅう片山先生にお会いし、お会いする度に飲んでいただいていたような気がする。僕も相当な呑兵衛だと思っているが片山先生のは底無しというか飲み出せば止まるところを知らず、夕方に始まった酒宴は深更に及ぶことがほとんど常であった。また、僕もかなり食い意地の張った方だと白認しているが、片山先生は年期の入ったグルメであり、日本全国各地の旨いものについての事情によく通じておられた。各地方で学会などが催されるとき、片山先生とご一緒することは、必ずや良い酒、旨い食べ物に遭遇できるということでもあり、僕は極力そのような機会を逃さぬよう努めてきた。

僕が片山先生のお供をしておの盛大な飲み食いに参加した最後は、昨秋北九州市で開かれた第2回日韓熱工学会議の時であった。先生はどこからかの情報により『来ればわかる』という奇妙な名前の小料理店を捜してこられ案内して下さった。伊藤先生（九大）や斎藤先生（東工大）たちも同行された。

今年に入ってから、僕は片山先生にお目にかかる機会を得ないままに過ごした。そして2月24日北海道の上砂川にある地下無重力実験センターでの実験に立会い中に先生の訃報に接した。IHIの桑原君も一緒だった。そのときに突然感じたことは、もう先生とご一緒にどこやらの呑み屋で良い酒を飲みつつ至福の一夜をすごすことも、先生の当意即妙の語り口に接することも二度となくなったのだなという淋しい思いであった。

僕が属しているいわゆる熱屋のサークルには沢山の尊敬すべき先生方がおられるが、一緒に居る人々をととても気楽なムードに導いて下さる稀有な才能をお持ちだという点で片山先生は貴重な存在であったと思う。先生は、他人を攻撃したり、中傷したりすることの全くない方であった。それが先生の天性なのか、あるいは長年のご経験に基づくご自身の人生哲学によるものなのか僕はずっと不思議に思い続けて来た。しかし、先生は唐突に不帰の人となられ、僕は答えを得られずに戸惑っている。

僕は、自分が生きる上で快適さをもっとも価値あるものと考えている。だから快適な人生を送るために僕に快適さを頒けてくれる何人かの人々との交流を大切にしたいと思っている。片山先生はそのもっともかけがえのない一人であった。僕が愛読する池波正太郎の小説に出てくる老剣士の口癖のように「人は生れてより、死ぬる日に向かって歩みはじめる」のが本当だとしても、全く思いもよらない余りにも早いお別れを僕は心から残念に思っている。

（1993. 3記）

## 片山功蔵先生を偲んで

矢部 彰（機械技術研究所）

昨年は、片山先生とご一緒に幾度か長崎の地を訪れる機会がありました。それは、片山先生の優秀なお弟子さんの一人であり、私と大学の同期で、学科や研究室は異なっても親しい友人であった神坂光男さん（当時、三菱重工業㈱長崎研究所勤務）をお見舞いするためでした。伝熱学会でも活躍されていた神坂さんが苦しい闘病生活をされているのを、少しでも元気づけ、なんとか良くなって欲しいという願いを込めてのお見舞いでしたが、その願いもかなわず、片山先生とご一緒に人生のはかなさを嘆きながらお葬式にも参りました。その時の片山先生の落胆ぶりは大きく、弟子を失ったときの先生の悲しさ、寂しさを痛いほど感じさせられました。それでも、なるべく明るく振る舞いながら、長崎総合科学大学に來られていた御縁ですべてを知り尽くし、また、食べ物も人々も雰囲気もとても愛しておられた長崎の町を案内していただきました。片山先生は、この一年ほどすっかり健康を回復され元気一杯でいらしたので、まさかその数カ月後に、先生ご自身が亡くなられるとは思っても及ばないことでした。いまだに信じられない思いで一杯です。

また、私はこの一年ほど霞が関の通商産業省工業技術院に併任していた関係で、片山先生とお会いする機会も多く、いろいろと先生に通産省関係のお仕事をしていただいていたことを知りました。先生は20年近く前から蓄熱の研究をされていた関係で、サンシャイン計画の太陽エネルギー技術研究開発に関与され、平成4年度まで新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「産業用等ソーラーシステム実用化技術開発委員会」の委員長をなさっておられました。なくなられた当日も、NEDOでこの委員会の昨年度の最終会合があり、その後の懇親会で楽しそうにお酒を飲んでおられたようです。「悔いが残るのは、懇親会をいつもより早く終えてしまったために、先生が帰宅された後お風呂に入ろうとされてしまったことです」と、当日出席していた何人かの方が残念がっておられました。また、太陽エネルギーに関与されていた関係かと存じますが、通産大臣の諮問機関である産業技術審議会の「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム分科会」の分科会長もされておられました。マスコミや電力関係の委員を前に、スーパーヒートポンプの技術的優秀さを、そして、日本の代替フロンに対する研究が世界に先駆けて行われていることを力説されていたお姿が日に浮かびます。また、スーパーヒートポンプのプロジェクトでは、「性能の極限を追求するレーシングカーが出来上がったので、これから高性能大衆車を作って是非とも国のプロジェクトの成果を普及するように」という先生のお言葉を肝に銘じておきたいと思えます。

片山功蔵先生の御冥福をお祈りいたしますと共に、ご遺族の方々に対し心よりお悔やみ申し上げます。

## 片山功蔵先生を偲んで

石 塚 勝 （東芝研究開発センター）

去る2月24日の次回伝熱シンポジウムの準備委員会の終了後に防衛大の五十嵐先生から片山功蔵先生のご逝去を逸早く知らされました。その場では信じられませんでした、翌日の新聞記事で残念ながら確かめるはめになりました。なにしろ、先生とは昨年10月に北九州市で開催された第2回日韓合同熱会議（先生はこの会議中に、東大の平田前教授、ミシガン大のYang教授とともに、機械学会熱工学部門の功績賞を受賞されました）からの帰京時に、飛行機の座席が隣り合わせになり、お元気に話をされていましたから、とてもご逝去が信じられません。私が先生とお近づきになれた時は、既に先生は東京工業大学を退職されていました。そして、委員会などで一緒させて戴いたこともなく、専門分野も違っていたのですが、なぜか学会の夜の席で一緒になることが多く（もっとも、これは片山先生だけに限らないのですが）、とても温かく可愛がってくださったのを懐かしくありがたく思っています。多くの思い出があります。そういえば、1988年に韓国で開催された第1回日韓合同熱会議で、慶応大学の長坂先生、拓殖大学の松永先生と4人で夜のソウルの町で飲み屋を見つけるのに、先生の酔っているのか正気なのかわからない言葉に迷わされて、1時間以上も彷徨い歩いたことは、懐かしい思い出の一つです。また、その翌年の伝熱シンポジウムの懇親会で、その年の6月に川崎で開催された機械学会熱工学部門主催の第2回熱工学シンポジウム（委員長：東工大土方教授）に、幹事として参加のお願いをしたところ、実に気軽に「よろしいですよ」と承諾していただき、当日の懇親会でも乾杯の音頭をとっていただいたことが誠に有難く忘れられない思い出です。その後も、伝熱シンポジウムなどの懇親会のあとの二次会で何度か一緒しましたが、いつも息子に教え諭すようにお話をしてくださいました。先生との会話は、研究の思い出、旅行先で出来事、人との出会いなど話題が抱負で楽しいものでした。また実に話術が巧みで、つい引き込まれてしまい、ついでに酒の量も増え、私のほうが二日酔いになってしまったこともありましたが、翌日、お会いすると、こちらが頭がふらふらでも、先生の方は「やあやあ昨日はどうも」と何事もなかったように挨拶されたのには参りました。先生は、「企業にいる研究者者にとっての学会活動はどうあるべきか？」などの問いかけにも誠実に相談に乗っていただき、どれほど励まされたか知れません。最近では、前述した北九州からの帰りの飛行機の中でも、とてもお元気な様子でしたが、その会話の中で「石塚さん、いまの仕事は続けられたらいいですよ」と言って下さったのが今となっては遺言になってしまいました。先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

<地方グループ活動報告>

## 北海道地方グループ

### 『熱工学セミナー』

日 時：平成5年4月3日（土）～4月4日（日）

場 所：大滝セミナーハウス（北海道有珠郡大滝村）

参加者：41名（大学・高専15名、企業7名、学生19名）

内 容：

（1）DOS-Vの世界（これからのパソコン環境について）

日本IBM(株) パーソナルシステム事業部 萩原茂樹  
キャノン販売(株) システム管研事業部 佃 昭宏

（2）サイエンティフィックビジュアルゼーションの世界

北海道大学工学部機械工学科 黒田明慈

（3）凍結・凍上・霜の世界

（A）水溶液の凍結について 北海道大学工学部機械工学第2学科 山田雅彦

（B）凍上について 東京ガス(株) 生産技術センター 宮田嘉明

（C）霜について 室蘭工業大学工学部機械システム工学科 戸倉郁夫

<講演概要>

- （1）日本のパソコン界に大きな変革をもたらす可能性のあるDOS/Vパソコンについて、そのソフトとハードのサプライアである、IBMとキャノンの方に来ていただいて、実物のデモをしていただきながら、その特徴をはなしていただいた。パソコン搭載のCPUパワーとメモリーの急速な増加がソフトによる文字表示を可能とし、これにともない、米国のOSに日本語表示用のデバイスドライバ（ソフト）を付加するだけで、IBM-PC/ATで日本語の入・出力・表示が可能となった。これがDOS/Vと呼ばれるOSであり、日本語系と英語系のソフトが同じOS上で実行可能となった。またIBM-PC/ATは、ハード自体がモジュール構造になっており、すべてのモジュールがボードの形で交換可能なため、好きなようにカスタマイズが可能であるとともに、機器の進歩にともなって、アップグレードが可能である。最後には日頃のパソコンに関する疑問点の質疑応答に花が咲いた。
- （2）2平板間の流れにおける乱流の組織構造の時間的な変化を調べるため、スペクトル法による直接シミュレーション法を用いた解析を行い、その結果を動画として可視化した。このためには、（1）各瞬間における系の中の各種の特徴を有する領域の境界面の位置を3次元空間で求め、（2）これを2次元平面に投影し、（3）このデータを光磁気ディスクに記録し、（4）このデータを用いて各瞬間の2次元画像をこま撮りビデオで撮影して動画にした。もとの解析で取り扱っている数値データと3次元での面データはいずれも膨大で、既存の記録

装置には記録できず、また他の計算機に送って処理するにしても通信時間が膨大となるので、(1)(2)の2次元画像にするまでの処理は、流れ解析をおこなうスーパーコンピュータ上で行った。このようにして作成した動画を再生しながら、乱流の各種組織構造の時間変化と相互作用についての講演があった。

(3)

(A)水の凍結と溶液（エチレングリコールのようなものが溶けた水）の凍結の違いについて、基礎的な講演があった。氷のなかに溶質が溶け込まないエチレングリコールのような溶液の場合には、冷却壁面近傍の溶液中に過冷却領域が現れ、これによる急速な凍結がデンドライトとよばれる針状の結晶を生成することが興味深く説明され、現在の問題点として、相平衡図が完全でないこと、有限速度の凍結の場合の平衡状態からのずれがはっきりしないこと、凍結層の物性とその構造がからんで複雑なことがあげられた。またそのあと、伝導・拡散支配、自然対流下、また強制対流下での凍結現象の特徴が話された。

(B)液化天然ガス（LNG）地下タンク周辺の土壌の凍上からみ、土壌中での水分、熱の移動とその駆動力のバランスについてのモデルについての講演があった。土壌の表面から冷却されると、表面に近い層から凍結していくが、その際下方の未凍結土壌から水分を吸い上げて、地中に氷の集積が生じる。これをアイスレンズとよび、水分の吸い上げがない場合に比べて凍上の度合いははるかに大きくなる。この現象をマクロ的な力学エネルギーの平衡に着目したモデルを用いて解析すると、凍上率が実験と良く合うことが述べられた。土壌中のミクロ的な現象を取り扱わないでも、マクロ的な議論で現象を表すことができるところに、熱力学の有用性を再認識させられた。

(C)冷却壁面への着霜現象の経過と着霜厚さの時間変化の定式化についての講演があった。最初に霜層配列構造が、空気中水蒸気濃度と冷却面温度によるまとめられた、林等の配列構造マップの話があった。次に、着霜の初期における顕微鏡観察により、着霜はまず多数の過冷却水の微小液滴が冷却面上に生成され、それが凍って微小氷核となり、その上に柱状の霜が壁面に垂直方向に成長することが述べられた。この時期には霜層厚さは時間に比例して成長するが、しばらくするとこの柱状の霜の側面方向にも成長がはじまり、霜層厚さは時間の平方根に比例するようになること、およびこの成長速度が1つの実験式にまとめられることが述べられた。

コンピュータのハード、ソフト、可視化、の話してから、凍結、凍上、霜の話まで幅広い講演が密度濃くおこなわれたが、いずれも物理現象の説明を主として講演していただいたので、イメージはつかめたのではないかと思います。まだ雪の残る大滝村のセミナーハウスでの合宿形式のセミナーでしたが、ほかに宿泊客はおらず我々だけでセミナーハウスを独占できましたので、1日目の講演のあとの入浴もゆったりと温泉につかり、夕食後の懇親会では大いに懇親の実をあげることができたようでした。

（北海道グループ理事 工藤一彦）

関西研究グループ活動報告

関西地区においては、下記の活動が各委員会の企画によって実施された。

(理事 坂口 忠司)

(1) 関西研究グループ講演会

第1回講演会

日時：平成4年12月10日(木)

場所：大阪大学基礎工学部、シグマホール1階 セミナー室I

講演：

- (1) ガスタービンにおける2、3の伝熱問題  
浜辺謙二(川崎重工業㈱・明石技術研究所)
- (2)  $\text{CaCl}_2/\text{CH}_3\text{NH}_2$ 系ケミカルヒートポンプ粒子充填層の反応・伝熱特性解析  
平田雄志、藤岡恵子、岡崎多佳志(大阪大学・基工・化学工学)
- (3) DNS データベースを用いた混合層における輸送現象の解析  
平井秀一郎(大阪大学・工・産業機械工学)
- (4) 気流制御による空調のゾーニングの研究  
古藤 悟(三菱電機㈱・中央研究所)
- (5) 室内熱・気流環境の数値予測  
大西潤治(大阪大学・工・環境工学)
- (6) フィン・チューブ熱交換器内のフローパターンと熱伝達特性  
小澤 守(関西大学・工・機械システム工学)

なお、講演会終了後に、講演者を交えて軽食での懇親会を開催した。

第2回講演会

日時：平成5年4月16日(金)

場所：姫路工業大学教養部，5号館1階 視聴覚教室

講演：

- (1) 高速X線CTによる気液二相流の可視化の試み  
川西康平、堀慶一(三菱重工業㈱・高砂研究所)
- (2) テイラー渦流の乱れの分岐現象  
大村直人(神戸大学・工・応用化学)
- (3) 熱不良導層と電場による浸漬冷却制御  
竹中信幸、藤井照重(神戸大学・工・機械工学)
- (4) 低レイノルズ数型応力モデルによる密度成層乱流の数値解析  
福井啓介(姫路工業大学・工・産業機械工学)

伝熱研究 Vol. 32, No. 125

(5) ピンフィン熱交換器の流れの数値解析

園井英一 (㈱神戸製鋼所・機械研究所)

なお、講演会終了後に、講演者を交えて軽食での懇親会を開催した。

(企画小委員会委員長 木本 日出夫)

(2) 伝熱技術フォーラム

第1回例会

日 時：平成4年5月14日(木)

場 所：神戸大学工学部104号教室(視聴覚教室)

話題提供：

(1) 代替フロン技術について

ダイキン工業(㈱)機械技術研究所副所長 鳥越 邦和 氏

(2) レーザ流速計の開発と応用

神戸大学工学部機械工学科教授 中島 健 氏

見学会：神戸大学工学部機械工学科中島研究室

<講演概要>

話題提供1) オゾン層破壊につながるフロンの世界的な規制の動向と代替フロンに切り替えた場合の技術の問題点と将来について主としてユーザー側の立場で話をしていただいた。まず、フロンの性質(不爆, 低毒性, 安定, 低溶解性)と用途(日本の用途別使用量: 洗浄(51%), エアゾール(8%), 発泡剤(25%), 冷媒(15%))について述べられた後、代替フロンの開発・製造をする側として、HCF<sub>2</sub>CやHF<sub>2</sub>CのようにHが入って易分解性にし、かつ塩素(Cl)を含まないようにしていること、Hを入れると分子の極性が出るため、物性が変わってくるため代替フロンに対する技術的問題では冷媒と溶剤に対する対策が一番難しいことなどを詳しく説明された。ODP(オゾン層破壊係数), GWP(地球温暖化係数)のどちらも低い地球に優しい空調冷媒の開発が望まれるが、いろいろと材料や蒸発・凝縮伝熱性能への影響が大きいことをご自身の研究所での実験データで示されて話を閉じられた。

話題提供2) 開発の観点からレーザ流速計の基本構成を説明された後、光学系のレーザ光の散乱による流れの計測の原理(ミー散乱)について述べられ、光ファイバーへレーザ光を入れる(光学系)技術とSN比に影響する因子と問題点について説明された。その応用例として(1)ガスタービンの水流模擬実験の複雑な流れの流速測定結果と数値計算結果の比較、(2)実炉に近い大きなスケールの燃焼炉内のガス流動の速度変動をLDVで初めて測定した波形を示された。次に(信号系)の話に入り、自己相関を使った処理法の開発において回路ミスで三角波が出てしまったが、かえってこの波形を工夫した方がノイズの多い信号の処理にもよいことがわかったこと、測定例として(3)ラムエンジンの燃焼器(大きな速度差があるきびしい条件)でも有効であることなどを話された。散乱粒子の話では、球形中空粒子のマイクロ・スフェリカルフェザー(成分伝熱研究 Vol.32, No.125

SiO<sub>2</sub>) が非凝集で比重が軽くて適していることを CO<sub>2</sub> の遅い流れと N<sub>2</sub> の速い流れが平行に合流するせん断層流で検証された。水にローダミンをいれ、アルゴンレーザを当てると蛍光が出るので水の速度と温度の同時測定が可能であることを管群中の流体の速度と温度の同時測定例をもとに説明されて話を閉じられた。

例会には56名の参加があり、その後の見学会を含め、活発な質問と討論が行われ盛会であった。例会終了後、神戸大学 LANS BOX で特別懇談会を持ち、24名が出席された。

## 第2回例会

日 時：平成4年10月29日(木)

場 所：龍谷大学理工学部1号館619号室

話題提供：

### (1) 家庭用ルームエアコンの進展と課題

松下電器産業(株)エアコン本部空調研究所所長 伊藤 信久 氏

### (2) 気液二相流路系の流動安定のよもやま話

龍谷大学理工学部機械システム工学科教授 赤川 浩爾 氏

見学会：龍谷大学理工学部機械システム工学科他

### <講演概要>

話題提供1) (1) 市場背景、(2) 技術の歴史、(3) 開発技術紹介、(4) 今後の課題の順に以下のような内容の話をされた。世界のエアコン総需要にトップを占める日本において需要構造構成比と普及率の間に変化が出て来ており、要素技術の開発のターゲットとして、低入力、低騒音、暖房感、インテリア性、快適性、空気清浄化、操作性などを挙げられた。具体的開発事例として、「ちいサイズ室外機」の技術的改良点を述べられた後、部屋の快適性を制御して自動運転するための赤外線画像センサシステムの開発についても触れられ、最後に今後の課題(更なる省エネ、快適空間追求、フロン代替冷媒、エネルギーの有効利用)を指摘して話を閉じられた。

話題提供2) 「管内直径、長さが等しい円管を並列にして流体を流し、管内で沸騰蒸発をさせると不安定になり、偏流が起きるのは何故か?」と質問されて、二相流ループの流路系設計に関して重要な蒸発管列の流動の不安定現象について話された。3本の円管の入口-出口間の圧力差が同じでも、各管の落ち着く流動状態の組み合わせは9組みもあり、どれに落ち着くかは予測困難なこと、その原因は、各管の流量-圧損図には極大点と極小点の間に負の圧力勾配を持つ部分ができ、各管毎に3種の流動状態の出現が可能なためであることを説明された。一般に、不安定流動は負性圧損、伝熱形態の遷移、流動形態の遷移に分類されが、上記の現象は蒸発管のフローパターンの遷移、すなわち、圧損の正勾配のキャピラリー-気泡流から負勾配のキャピラリー-スラグ流への遷移にあることをつきとめられたことで話を閉じられた。

例会には39名の参加があり、その後の見学会を含め、活発な質問と討論が行われた。例会終了後、ホテル ニューサイチ アネックス で特別懇談会を持ち、16名が出席された。

### 第3回例会

日 時：平成5年2月22日（月）

場 所：神戸大学瀧川記念学術交流会館 大会議室

話題提供：

#### (1) 熱機器の開発に従事して

日立造船(株)技術本部技術研究所 研究主幹 古川 哲郎 氏

#### (2) 宇宙における排熱技術に関する研究

神戸大学工学部機械工学科教授 藤井 照重 氏

見学会：神戸大学工学部機械工学科藤井研究室

<講演概要>

話題提供1) 熱関連プラント、機器の開発体験を踏まえて「技術開発がうまく行った要因、うまく行かなかった要因」について具体例を挙げながら分析し、以下のような内容のお話をされた。(1) 吸収式ヒートポンプ(第2種)による蒸留塔の省エネルギーシステムの開発において原油価格が予想ほど上がらなかった問題、ユーザー側の使用流体の腐食の問題などがあったこと、(2) ヒートポンプ(第1種)を用いた地域暖房水加熱システムの開発においてスケールアップで冷媒供給管で予想しない現象が起きたこと、(3) 車のエンジンジャケット水を利用したカーエアコンの開発が車の軽量化指向と対立したことなど、ご自身の技術開発の思想を交えながら話された。

話題提供2) 平成4年の伝熱シンポジウムの「航空・宇宙における伝熱」のオーガナイザを担当された関係で、宇宙ステーションの開発のための日米カ欧の協力について説明された後、その中のHOPE開発の目的と伝熱工学的問題、宇宙環境(例：無重力)における理工学実験について説明された。具体例として、ステーションの排熱のための(1) スペースラジエータ、電子機器冷却用コールドプレート、ラジエータ、アキュムレータを組んだシステムの(2) キャピラリーポンプ、(3) 無重力場での接触伝熱抵抗などの実験と見学する関連実験装置を紹介された。

例会には47名の参加があり、その後の見学会を含め、活発な質問と討論が行われ盛会であった。例会終了後、神戸大学瀧川記念学術交流会館の食堂で特別懇談会を持ち、27名が出席された。

(伝熱技術フォーラム委員長 片岡 邦夫)

#### (3) 若手の会

伝熱研究 Vol. 32, No. 125

「若手の会」は、関西地区において、伝熱工学・伝熱関連工業界に所属する若手研究者（30±5才前後）の横のつながりを作り、伝熱学会の活性化を図り、伝熱工学のより一層の発展を願って設立された会である。

第1回会合

- 1) 日 時：平成4年9月18日（金）
- 2) 場 所：三菱電機㈱ 中央研究所 203応接室

第2回会合

- 1) 日 時：平成4年11月13日（金）
- 2) 場 所：ダイキン工業㈱ 本社 201会議室

第3回会合

- 1) 日 時：平成5年1月29日（金）
- 2) 場 所：川崎重工業㈱ 健康保険組合 2階ミーティング室

以上3回の会合において、本会の対象とする具体的なテーマ、運営方法等について審議し、『地球にやさしい伝熱研究』を掲げて、地球環境問題への各企業の対応策等を中心に情報交換・検討を行う会とすることとした。

第4回会合

- 1) 日 時：平成5年4月16日（金）
- 2) 場 所：㈱神戸製鋼所 神戸本社 20応接室
- 3) 講演題目と発表者名

「水蓄熱システム」 若本 慎一 氏（三菱電機㈱）

「チェーンイコロジー・エネルギーシステム」 井上 健司 氏（川崎重工㈱）

「代替冷媒対応空調用熱交換器の課題と取り組み」

蛭子 毅 氏（ダイキン工業㈱）

（企画小委員会委員長 木本 日出夫、世話役 隅田 嘉裕）

以上



<お知らせ>

日本伝熱学会  
「財政基盤強化のための募金事業」  
に対するご協力のお願い（再掲載）

募金事業発起人代表  
日本伝熱学会第31期会長  
藤江邦男  
募金事業実行委員会委員長  
棚沢一郎

日本伝熱学会は昭和36年11月に日本伝熱研究会として発足し、平成4年で30周年を迎えました。その間、工業の基盤的科学技術である伝熱学・熱工学を統括する本学会が、我が国の経済発展に果たしてきた役割は顕著なものであります。特に、一度に渡る石油危機など、エネルギー問題に対する本学会の成果は記憶に新しい所であり、さらに現在問題となっている地球環境問題等についても、今後、本学会が担うべき役割は国内的にも、国際的にも極めて重要なものになると考えられます。

このような状況のもと、本学会・組織検討委員会（30期、委員長・藤井哲九大教授）は21世紀にむけて、本学会の将来構想について検討を行って参りました。その結果、本学会の法人化が示唆され、法人化をにらんだ学会会則の改訂が行われたことは総会及び会誌「伝熱研究」等で御承知おきのことと存じます。「社団法人化」は、一定の目的のもとに集まった「人の集まり」に一つの法的人格を付与するものであります。これまで本学会が果してきた社会的貢献と学会規模を考えますと、本学会の「法人化」は必然的な過程であります。またこのような法的・社会的基盤を確立することは本学会をより活性化し、産学官の協力、国際交流の拡大及び国際協力等がより円滑、且つ強力に果たせることになり、本学会会員および産業界にとって有益なことであります。

当初、法人化達成には数年を要することが予想されていましたが、組織委員会諸氏の努力により幸いにも短期間で達成される見通しが出て参りました。また同時に、学会法人化を実現するためには、学会として最低二千万円の資産を持つことが必要条件であることも判明致しました。従いまして、本学会と致しましては、この際是非とも学会の財政基盤を強化して法人化を達成すると共に学会運用資金の充実をはかる必要があります。

本件については、理事会に於いて鋭意審議致しました。その結果、財政基盤強化のために、学会会員諸氏からの募金と関連企業のお力添えをいただきたいとの結論に達しました。また、本募金事業については多数の方々~~の~~が趣旨に賛同され、発起人（「伝熱研究」、32巻、124号（1993）に掲載）となって下さいました。

つきましては、諸事御多端の折りとは存じますが、何卒この趣旨を御汲み取りいただきまして、別記要領にて、募金にご協力下さいますようお願い申し上げます。

なお、本募金事業におきましては本学会会員に募金をお願いすると共に、別途関連企業各位にも御協力をお願いする予定であります。

平成4年12月19日

## 記

平成5年1月1日より開始致しました日本伝熱学会「財政基盤強化のための募金事業」に關しましては絶大なる御理解と御協力を賜り、誠に有難うございます。

つきましては、現在までの募金申込状況を報告し、募金をいただいた会員諸氏に謝意を表すると共に、未だ申込をいただいていない方々には本事業に対するより一層の御理解を賜り、御協力下さいますよう、改めてお願い申し上げる次第でございます。

### 個人会員募金要項

1. 募金目標額 最低2000万円
2. 募金申込額 1口 5,000円  
(ご参考までに個人募金額の目安を末尾に記しました。)
3. 申込期間 平成5年1月1日 ~ 平成5年12月31日
4. 申込方法 「伝熱研究」1月号(32巻、133号(1993))に折込の用紙、日本伝熱学会「財政基盤強化のための募金申込書」にて御申込下さい。
5. 送金期間 平成5年1月1日 ~ 平成5年12月31日
6. 送金方法 綴じ込みの「郵便振替用紙」を御使用下さい。  
<郵便振替口座>  
口座番号: 東京3-711551  
名 称: 日本伝熱学会募金事業委員会  
代 表 者: 棚沢一郎  
住 所: 〒113 東京都文京区本郷5-25-18
7. その他 関連企業各位には、別途御協力をお願いすることになっております。又、募金事業に関する免税措置申請につきましては残念ながら不許可となりました。ここに、お詫びすると共に、御報告申し上げます。
8. 問い合わせ先  
飯田 嘉宏(横浜国立大学工学部物質工学科)  
TEL. 045-335-1451(EXT.2874)、FAX. 045-331-1704  
坂口 忠司(神戸大学工学部機械工学科)  
TEL. 078-881-1212(EXT.5152)、FAX. 078-881-0036  
山川 紀夫(岩手大学工学部応用分子化学科)  
TEL. 0196-23-5171(EXT.2852)、FAX. 0196-52-7144

なお、「財政基盤強化のための募金事業」発起人及び実行委員会名簿につきましては、「伝熱研究」、32巻、124号(1993)をご覧下さい。

＜個人募金額の目安（1口 5000円）＞

昭和30年代卒業	6口	昭和40年代卒業	5口
昭和50年代卒業	4口	昭和60年以降卒業	3口
学生会員	1口		

※日本伝熱学会役員ご経験者および昭和30年以前に御卒業された方は、上記の金額に上乘せしてお考え下されば幸いです。

募金申込者及び送金者御芳名（平成5年1月14日～平成5年4月5日お申込分）

藤江邦男殿（新明和工業） （以上 40口）	梅宮弘道殿（山形大学）	数土幸夫殿（日本原子力研）
小竹 進殿（東京大学） （以上 20口）	梅村晃由殿（長岡技科大学）	田中 収殿（三浦研究所）
飯田嘉宏殿（横浜国立大学）	大岡五三実殿（大阪ガス）	千葉陽一殿（一関工業高専）
伊藤猛宏殿（九州大学）	大中逸雄殿（大阪大学）	西尾茂文殿（東京大学）
井上 晃殿（東京工業大学）	小口幸成殿（神奈川工科大）	藤田尚毅殿（岩手大学）
棚澤一郎殿（東京大学）	尾崎 脩殿（東芝）	三田地紘史殿（豊橋技科大）
河村 洋殿（東京理科大学）	勝田勝太郎殿（元・関西大学）	山本春樹殿（旭川工業高専） （以上 5口）
児山 仁殿（静岡大学）	加藤康生殿（山口大学）	池上康之殿（佐賀大学）
斎藤 武殿	金山公夫殿（北見工業大学）	石崎 勝殿（東芝）
坂口忠司殿（神戸大学）	木枝茂和殿（日立製作所）	石塚 勝殿（東芝）
高城敏美殿（大阪大学）	菊池義弘殿（広島大学）	奥山邦人殿（横浜国立大学）
仲田哲朗殿（石川島播磨）	玉利賢一殿（鹿児島大学）	神永文人殿（茨城大学）
二階 勲殿（鹿島技研）	千葉徳男殿	加茂信行殿（大阪府立大学）
藤掛賢司殿（豊田中央研）	栩谷吉郎殿（金沢工業大学）	小泉博義殿（電機通信大学）
宮武 修殿（九州大学）	長田孝志殿（琉球大学）	佐田富道雄殿（熊本大学）
矢部 彰殿（工技院・機技研）	中原崇文殿（中菱エンジニアリング）	素谷順二殿（古河電気工業）
山家讓二殿	中山 顕殿（静岡大学）	田島 収殿
吉川進三殿（同志社大学） （以上 10口）	波江貞弘殿（船舶技術研）	花村克悟殿（岐阜大学）
塩治震太郎殿（石川島播磨）	馬場 弘殿（北見工業大学）	姫野修廣殿（信州大学）
加治増夫殿（大阪大学）	早坂洋史殿（北海道大学）	深井 潤殿（九州大学）
高島啓行殿（住金マネジメント）	藤井雅雄殿（三菱電機）	本田知宏殿（福岡大学） （以上 4口）
田子 真殿（北海道大学）	円山重直殿（東北大学）	一法師茂俊殿（熊本大学）
谷口 博殿（北海道大学）	森 康彦殿（慶應義塾大学）	岩本光生殿（九州大学）
宮内敏雄殿（東京工業大学）	山下宏幸殿（福岡大学）	河合一徳殿（京都大学）
山川紀夫殿（岩手大学） （以上 8口）	山田悦郎殿（秋田大学）	坂口勝次殿（福山大学）
井村英昭殿（熊本大学）	吉田英生殿（東京工業大学）	南川久人殿（神戸大学） （以上 3口）
牧野俊郎殿（京都大学）	渡辺健次殿（東京電力） （以上 6口）	大野常美殿（荒木設計）
水上紘一殿（愛媛大学） （以上 7口）	稲坂富士夫殿（船舶技術研）	宝詰幸男殿
相場眞也殿（秋田工業高専）	稲葉英男殿（岡山大学）	前野一夫殿（千葉大学） （以上 2口）
稲田茂昭殿（群馬大学）	大隈止人殿（三洋電機）	高田保之殿（九州大学） （以上 1口）
	落合政昭殿（日本原子力研）	
	海野紘治殿（豊田工業大学）	
	小泉安郎殿（工学院大学）	
	鈴木 洋殿（広島大学）	



切取り線

○

○

日本伝熱学会

「財政基盤強化のための募金事業」

個人会員用募金申込書

「募金申込書」

送り先住所

〒113

切取り線

東京都文京区本郷 5 - 25 - 18

日本伝熱学会事務局

募金事業実行委員会宛

切取り線

御芳名	勤務先	口 ( 円)
募金予定口数		
御送金予定月日	申込と同時に、平成5年 月頃 (○で囲んで下さい)	
御連絡先住所		
御卒業年次	昭和・平成 年	会員の種類 正・学生
通信文		



## 日本伝熱学会 第31期（平成4年度）総会開催案内

下記により第30回日本伝熱シンポジウム会期中に総会を開催いたします。  
総会が成立するためには、正会員の10分の1以上の出席（書面による意思表示  
および委任状を含む）が必要です。

つきまして、会員各位は議題をご検討の上、ご出席下さいますようお願いいた  
します。ご欠席の場合は、「委任状」により、出席される会員に表決を委任して  
下さい。

記

### 第31期総会

日 時：平成5年5月27日（木）13：20－14：20

場 所：横浜市開港記念会館A室（伝熱シンポジウムA会場）  
横浜市中区本町1－6

議 題

1. 第31期事業報告
2. 第31期会務報告
3. 平成4年度会計報告
4. 平成5年度事業計画および収支予算案
5. 日本伝熱学会学術賞・技術賞授賞
6. 第32期役員選出
7. 旧・新会長挨拶



## 委任状

私は、日本伝熱学会会員

被委任者  
氏 名

を代理人と認め、下記の権限を委任します。

平成5年 月 日

会員番号

氏 名 印

住所（または勤務先）

### 記

平成5年5月27日開催の日本伝熱学会第31期総会における  
下記の議題の表決権行使に関する一切の件。

### 議 題

1. 第31期事業報告
2. 第31期会務報告
3. 平成4年度会計報告
4. 平成5年度事業計画および収支予算案
5. 第32期役員選出



# 第30回日本伝熱シンポジウム

開催 5月26日～5月28日

主催 日本伝熱学会  
共催 日本学術会議熱工学研究連絡委員会  
日本機械学会、化学工学会ほか

開催日 平成5年5月26日(水)～28日(金)

講演会場 横浜市開港記念会館 [A・E室;受付]  
〒231 横浜市中区本町1-6  
J R京浜東北線 関内駅球場側出口より徒歩15分  
横浜市港湾労働会館 [F室]  
〒231 横浜市中区海岸通1-1  
開港記念会館より徒歩5分

注意: いずれの会場も午前9時以前は入館できません

シンポジウム参加費 一般(1名) 事前申込:7,000円  
当日申込:8,000円  
学生・院生(1名) 事前申込:3,000円  
当日申込:4,000円  
(いずれも講演論文集代を含みません)

講演論文集代 1セット8,000円(消費税含む)  
ただし、郵送の場合は1セット8,600円(送料含む)  
(日本伝熱学会会員には1セット無料進呈)

懇親会 日時 5月27日(木) 18:30～20:30  
会場 重慶飯店新館(ホテル・ホリデイ・イン横浜内)  
会費 事前申込:7,000円  
当日申込:8,000円  
ただし、同伴夫人は無料です。

参加申込要領 郵便振替払込用紙を1人につき1枚ご使用になり、  
通信欄に[(1)氏名(ふりがな)、(2)勤務先または学校名、(3)参加費(一般・学生を明記)、(4)懇親会費(夫人同伴の方はその旨を明記)(5)講演論文集冊数および金額(進呈分以外)、(6)合計金額、(7)伝熱シンポジウム30周年記念行事参加の有無]をご記入の上、当該費用をご送金下さい。参加証は当日受付にてお渡しいたします。なお、事務の簡素化と経費節減のため原則として領収書の発行を省略させていただきますので、郵便局で受け取られる郵便振替払込金額取書を保存して下さい。

事前申込締切 平成5年5月7日(金) (消印有効)

申込先 郵便振替口座:横浜4-8491  
第30回日本伝熱シンポジウム準備委員会

現地受付 25日(火)午後3時～6時、および  
26日(水)午前9時より開港記念館にて行ないます。

参加・講演についての問合せ 〒223 横浜市港北区日吉3-14-1  
慶應義塾大学理工学部機械工学科内  
TEL045-563-1141内3130 (菱田公一)  
FAX045-563-5943

- 1) ※印は講演者、一般講演は10分、討論はそれぞれの講演群のうちで適宜まとめて行ないます。ラポーター方式セッションではラポーターの指示に従ってください。
- 2) 連名者で所属(勤務先、通学先)が省略されている方は、前者と同じです。

第1日 5月26日(水)

<<< A室 >>>

- [噴流(I)] 9:30～10:50  
座長 木本 日出夫(阪大工)、中川 勝文(豊橋技科大)
- A111 円形衝突噴流の乱流組織構造の非定常性  
※片岡 邦夫(神戸大工)、大村 直入、  
小松 義昌(神戸大院)、長田 達治
- A112 軸対称自由噴流における乱流応力の収束  
※二宮 尚(宇都宮大工)、笠木 伸英(東大工)
- A113 二次元噴流の非定常挙動に与える密度の効果(マッハ  
ツェンダー干渉計による実験)  
※櫛田玄一郎(名大工)、山下 博史、  
児玉 明広(名大院)、竹野 忠夫(名大工)
- A114 よどみ域近傍の乱流伝熱機構(P I VとL I Fによる速度  
と温度の面的時系列計測)  
※榊原 潤(慶大院)、菱田 公一(慶大理工)、  
前田 昌信

- [噴流(II)] 11:00～12:20  
座長 片岡 邦夫(神戸大工)、山下 博史(名大工)
- A121 軸対称噴流の高輪挙動と衝突熱伝達  
栗間 諄二(山口大工)、宮本 政英、平田 賢(芝浦工大)
- A122 衝突噴流冷却に関する一研究  
※浜辺 謙二(川崎重工)、木本 日出夫(阪大)、  
深津 英司、井上 英克
- A123 多孔質平板上における二次元空気衝突噴流を伴う熱伝達  
吉川 進三(同志社大工)、※呉服 栄太(同志社大院)、  
千田 衛(同志社大工)
- A124 円柱への二次元衝突噴流に関する研究(第3報、円柱熱  
伝達に及ぼす近接平板対頂角の影響)  
※羽田 喜昭(長野高専)、土屋 良明(信州大)、  
倉澤 英夫(長野高専)、鈴木健二郎(京都大)

- ラポーター方式セッション
- [乱流伝熱の素過程(構造と輸送機構)] 13:15～14:40  
ラポーター 長野 靖尚(名工大)  
笠木 伸英(東大工)
- A131 DNSデータベースを用いた乱流構造の動画像  
黒田 明慈(北大工)、谷口 博、上藤 一彦、  
坂井 嘉彦(北大大計)、山本 強、  
※木下 知重(北大院)、田中 健、酒井 健三(北大)
- A132 乱流温度境界層の外層の関与構造  
※佐藤 英明(名工大)、三長 崇、長野 靖尚

- A133 バーストの時間・空間スケールを考慮した外的摂動による乱流の増幅  
吉田 英生(東工大), ※ 浦川 和士(東大院), 小林 健 (東工大), 川上 英明(キャンソ), 越後 亮 (東工大), 加藤 祐造(東工大)
- A134 二重管管内乱流における細い内管まわりの流れ場と温度場のLESによる可視化  
※河村 洋(東理大), 中村 啓 (東理大院), 佐竹 信 (東大院)
- A135 シアーの働く風波気液界面を通しての熱移動機構  
※小森 悟(九大), 井上 芳夫, 下迫 俊介, 村上 泰弘
- [乱流伝熱の兼過程(シミュレーションとモデリング)] 14:50~16:30
- A141 一様乱流スカラー輸送への非等方性効果  
※松本 徳志(名工大), 中村 明, 辻 俊博, 長野 靖尚
- A142 不安定温度成層下のチャンネル乱流の直接数値シミュレーション  
※飯田 雄章(東大院), 笠木 伸英(東工大)
- A143 吹き出し・吸い込みを伴うチャネル乱流の輸送機構  
※住谷 安史(東大院), 笠木 伸英(東工大)
- A144 液相および気相の二次の化学反応を伴う乱流場の三次元直接数値計算  
小森 悟(九大), ※黒瀬 良一, 永翁 龍一, 柴戸 雅博, 村上 泰弘
- A145 DNSに基づくk-εモデルの評価と再構築  
※M. S. Yousefi(名工大), 鳥田 昌也, 長野 靖尚
- A146 乱流スカラーフラックス輸送方程式モデルに関する基礎的研究  
※鹿園 直毅(東大院), 笠木 伸英(東工大)

- ラポーター方式セッション
- [対流伝熱の数値計算(強制対流)] 16:40~19:00  
ラポーター 河村 洋(東理大)  
平井秀一郎(阪工大)
- A151 壁乱流と自由乱流への適用を考慮した多重スケール乱流モデル  
※近藤 真英(名工大), 長野 靖尚
- A152 旋回乱流における運動量輸送と圧力歪相関モデル  
※平井秀一郎(阪工大), 高城 敏美, 高田 正彦(阪大)
- A153 強い逆圧力勾配を伴う乱流の数値解析のための境界関数の検討  
※小尾晋之介(慶大理工), 田中 謙介(慶大理工)  
益田 重明(慶大理工)
- A154 超臨界水鉛直管内熱伝達のk-εモデルによる数値解析  
※高野 直樹(東大工原院), 越塚 誠 (東大工原院), 岡 芳明
- A155 粗面壁を有する正方形断面管内乱流の数値解析  
杉山 均(宇都宮大), 秋山 光庸, ※松本 将師, 平田 賢(芝浦工業大), 三宮 尚(宇都宮大)
- A156 鈍頭平板まわりの剥離と再付着を伴う流れおよび熱伝達の数値解析  
太田 照和(東北大), ※柳岡 英樹(東北大)
- A157 後向きステップ流れにおける非定常熱伝達の数値解析  
※高浦 仁史(京大院), 鈴木 洋(工大), 鈴木健二郎(京大)
- A158 Vガッタから放出される渦の数値解析  
※細川 茂雄(神戸大), 池田 裕二, 中島 健

- [二相流(流動特性)] 9:30~10:50  
座長 有富 正憲(東工大), 佐藤 泰生(熊本大)
- B111 垂直下降気液二相流におけるスラグ流の流動パラメータに関する研究  
森 幸治(阪大), 加治 増大,  
※坂根 学(阪大院), 草野 利之, 世古口 清彦(阪大)
- B112 垂直管内対向気液二相流における流下抑制の研究  
※片山 一郎(室蘭工大), 佐藤 森, 高橋 洋志
- B113 二相流合流損失の実験的検討(第2報)  
※大橋 幸夫(東芝), 橋詰 健一
- B114 R-113を用いた垂直管内気液混合物液面上昇に関する研究  
小泉 安郎(工学院大), ※八木 純二, 植田 辰洋, 宮下 徹, 大竹 浩晴, 熊丸 博滋(原研)
- [二相流(流動機構)] 11:00~12:20  
座長 日向 滋(信州大), 御岡 慎一(東芝)
- B121 気液二相流の乱流スペクトルの解析  
※片岡 勲(京大), D.C. Besnard(フランス原子力庁), 芹沢 昭示(京大)
- B122 圧縮空気エネルギー貯蔵システムにおける二相流過渡流動現象の解析  
※後藤 正治(東大院), 大橋 弘忠(東大), 秋山 守
- B123 水平長方形管内層状流における界面せん断応力の評価  
※川路 正裕(トロント大), Carlos Lorencez, 逢坂 昭治(徳島大), 村尾 良夫(原研)
- B124 周期的擾乱による流下液膜の波の誘起  
※仲間 栄元(都電), 金城 真由美(沖繩ユニバーシティー), 野底 武浩(琉球大), 長田 孝志
- [二相流(沸騰)] 13:15~14:35  
座長 波江 直弘(船研), 河合 洋明(北海道工大)
- B131 沸騰二相流の自然循環過渡特性(ポンプコストダウン過程の流動特性)  
※江 俊賢(東工大), 有富 正憲(東工大)  
森 治嗣(東京電力)
- B132 沸騰二相流の熱的非平衡状態の緩和現象  
※A. Sudi(東工大), 有富 正憲, 村瀬 昭(東芝), 岩城 那祐(積水化学)
- B133 沸騰流の伝熱特性(サブコールド領域から沸騰抑制領域まで)  
※加治 増大(阪大), 浜田 幸一(阪大院), 西住 健治, 古川 雅裕(三洋電機), 森 幸治(阪大), 世古口 清彦
- B134 温水逃し弁における二相臨界流(第2報:熱的非平衡の検討)  
※刑部 真弘(東京商船大), 郭 向宇(東京商船大院)  
磯野 正彦, 久保 利介(東京商船大)
- [二相流(可視化計測)] 14:45~16:05  
座長 芹澤 昭示(京都大), 小泉 安郎(工学院大)
- B141 BWR燃料集合体内ボイド率に関する研究  
井上 晃(東工大), 黒須 達男(原子力機構), 八木 誠, ※師岡 慎一(東芝), 星出 明彦, 石塚 隆雄, 吉村 邦弘
- B142 Throughflowを有するガス粒子吹き込みによるかくはん容器内の混合時間  
※島居 修 (鹿大), Wen-Jei Yang(ミシガン大学)

- B143 四成分・三速度場モデルによる蒸気凝発の数値解析  
 ※岡野 豊明(動燃大洗)、菅原 悟
- B144 180度シャープターンをもつ偏平流路内の気液二相流  
 (流路姿勢の影響)  
 藤田 秀臣(名古屋大工)、※大原 敏夫(日本電装)  
 廣田 真史(名古屋大工)、小久保章博

[充填層・流動層] 16:15~17:15  
 座長 佐藤 勲(東工大)、中原 崇文(三菱重工)

- B151 流動層による微細粒子の急速伝熱機構  
 福迫尚一郎(北大工)、山田 雅彦、※大道 隼(JR西日本)
- B152 固気二相流動の安定化と粒子の局所循環増進による管内伝熱促進  
 熊田 雅弥(岐大工)、三松 順治、※杉田 正樹(岐大院)
- B153 均質充填層における熱分散  
 横山 孝男(山形大工)、※佐藤 義一(山形大院)、  
 東浦 将夫(防災科学研)、桂木 公平(日本地下水開発)、  
 吉田 順男(東北電力)、川合 正之(ジャスコ)

[物質改質プロセス] 17:25~18:25  
 座長 深井 潤(九大工)、出井 安正(宇部興産)

- B161 塩化カルシウム/メチルアミン系ケミカルヒートポン  
 プ駆動反応に及ぼす粒子充填反応層の熱伝導性の影響  
 ※平田 雄志(阪大基工)、藤岡 恵子
- B162 熱交換器型水蒸気改質器の性能解析  
 ※羽田 一彦(原研)、野田 秀史(九大院)、  
 工藤 和彦(九大工)、数土 幸夫(原研)、藤本 望
- B163 水蒸気改質器の熱過渡挙動解析  
 ※野田 秀史(九大工院)、羽田 一彦(原研)、  
 工藤 和彦(九大工)、数土 幸夫(原研)、藤本 望

<<< じ室 >>>

[水平面からの自然対流] 9:30~10:50

- 座長 浅古 豊(都立大工)、富山 明男(神戸大工)
- C111 低グラスホプ数域における床面上有限垂直平板の自然  
 対流熱伝達  
 ※斉藤 朗(富山商船高専)、山崎 郭滋(高知工業高専)
- C112 正方形板からの三次元自然対流の伝熱  
 ※能登 勝久(神戸大工)、山本 和順、中島 健
- C113 格子による水平加熱平板上自然対流の伝熱促進  
 北村 健三(豊橋技科大工)、  
 ※長江 直行(豊橋技科大院)、木村 文彦
- C114 水平加熱平板上に生じる自然対流の流動および熱伝達  
 (高レイリー数域の伝熱特性)  
 ※木村 文彦(豊橋技科大院)、北村 健三(豊橋技科大工)

ラポーター方式セッション

[対流伝熱の数値計算(自然対流)] 11:00~12:25

- ラポーター 尾添 紘之(九大機能研)  
 齋藤 武雄(東北大工)
- C121 タイムスベース法を用いた高速数値解法一性能評価一  
 ※五味 達彦(東北大院)、齋藤 武雄(東北工)
- C122 球周りの自然対流熱伝達問題の数値解析  
 ※高橋ひとみ(東北大工)、齋藤 武雄(東北大工)
- C123 浮力駆動流の支配方程式と解の特性  
 ※H. Mlaouah(名工大)、服部 康男、辻 俊博、  
 長野 靖尚
- C124 ガスふく射を伴う密閉空間内自然対流に関する数値解析  
 秋山 光広(宇都宮大工)、※黄 凱、杉山 均  
 三宮 尚

- C125 低プラントル数流体のベナール対流の実験と解析  
 茶場 寛(九大総理工)、※尾添 紘之(九大機能研)

[容器内の自然対流(I)] 13:15~14:55

- 座長 小澤 守(関西大工)、古藤 悟(三菱電機)
- C131 蒸発・凝縮を伴うマランゴニ対流の可視化  
 ※橋本 克巳(東工大)、土方 邦夫、長崎 孝夫
- C132 傾斜密閉容器内の熱振動現象に関する研究  
 ※山田 貴延(北見工大)、福田 武幸、浅野日 裕
- C133 磁性流体の立方体容器内自然対流におよぼす磁場効果  
 (第1報 温度分布の可視化と測定)  
 ※木倉 宏成(慶大理工)、福田 得郎(慶大学)、  
 澤田 達男(慶大理工)、棚橋 隆彦
- C134 磁性流体の立方体容器内自然対流におよぼす磁場効果  
 (第2報 G S M A C 有限要素法による数値解析)  
 ※岡周 博夫(東海大理工)、  
 木倉 宏成(慶大理工)、澤田 達男、棚橋 隆彦
- C135 冷却面上に置かれた液滴の凍結挙動  
 ※堀部 明彦(北大工)、福迫尚 一郎、山田 雅彦

[容器内の自然対流(II)] 15:05~16:45

- 座長 藤井 不夫(九大機能研)、小森 悟(九大工)
- C141 矩形容器内二成分成層流体中の自然対流  
 ※松本 義文(関大院)、小澤 守(関大工)、梅川 尚嗣
- C142 二重拡散自然対流における成層現象への初期濃度分布の影響  
 ※鎌倉 勝善(富山高専)、尾添 紘之(九大機能研)
- C143 密閉容器内における成層流体の自然対流熱伝達(仕切  
 板の位置・流体の組合わせが熱伝達に及ぼす影響)  
 ※木村 照夫(福井大工)、竹内 正紀、宮川 貴一(福井大院)
- C144 高レイリー数域における密度逆転を伴う水の  
 自然対流伝熱  
 ※西村 龍夫(山口大)、和氣 亜紀夫(清水建設)、  
 福本 栄次(豊田自動織機)
- C145 レイノルズ数による成層流の乱れのエネルギーバック  
 トルへの影響  
 ※野口 高史(筑波大構工)、文字 秀明、松井 剛一

[物体周りの自然対流(I)] 16:55~18:15

- 座長 畑 幸一(京大原研)、服部 直三(東理大)
- C151 鉛直平板上自由対流境界層の遷移域近傍の特性  
 ※宮本 政英(山口大工)、加藤 泰生、栗間 諄二  
 田口 義之(山口大院)
- C152 臨界点近傍の二酸化炭素の急速非定常熱伝達  
 ※丹波 純(東北大院)、小原 拓(東北大流体研)  
 相原 利雄
- C153 天井近くに置かれた水平加熱円筒周りの自然対流のカオスの挙動  
 ※小泉 博義(電通大)、細川 歳、三好 弘孝(電通大院)
- C154 剥離・再付着を伴うステップ後方乱流自然対流の流動と熱伝達  
 ※稲垣 美(茨城大)、小森 夫(豊田工業高専)

[物体周りの自然対流(II)] 18:25~19:25

- 座長 相原 利雄(東北大流体研)、加藤 泰生(山口大工)
- C161 水平円柱群の自然対流熱伝達  
 服部 直三(東理大)、※片岡 健(東理大院)
- C162 塩水中に置かれた水平氷円柱の融解熱伝達  
 福迫尚 一郎(北大工)、山田 雅彦、※渡辺 力(北大院)
- C163 種々の流体中における水平円柱からの自然対流熱伝達  
 一般的表示式  
 ※竹内 石人(京大原研)、畑 幸一、塩津 正博、  
 櫻井 彰

<<< D室 >>>

[計測技術] 9:50~10:50

座長 神永 文人(茨城大)、大串 哲朗(三菱電機)

- D111 ヘリウムII液面計の開発  
伊藤 猛宏(九大工)、※等尾 大作、  
山口 朝彦(九大院)、坂本 亮
- D112 成長過程にある錯層のミクロ構造の光学的測定に関する研究  
吉田 篤正(岡山大工)、※拜田 健(岡山大院)、  
松本 英治(岡山大工)、鶴尾 誠
- D113 流体の混合平均温度の測定(精度が比較的大きい場合)  
清水 洋(琉球大教育)、藤井 哲(九大機能研)  
※山田 政由(琉球大院)

[3次元イメージング] 11:00~12:20

座長 三松 順治(岐大工)、西野 耕(横浜国大工)

- D121 超音波CTによる純水中の温度分布測定  
※縄田 豊(八代高専)
- D122 熱メチ法による物体内部不均質空間の可視化  
※岡本 芳三(茨城大工)、石橋 英人、神永 文人、  
稲垣 照美、沼津 達弥、福沢 公夫
- D123 超音波トモグラフィによる三次元環境場の計測  
加藤 征三(三重大)、※朱 寧、丸山 直樹
- D124 地球温暖化の3次元数値シミュレーション  
※久田 哲弘(東北大院)、齋藤 武雄(東北大工)

[ふく射伝熱(I)] 13:15~14:55

座長 牧野 俊郎(京大工)、金山 公夫(北見工大)

- D131 石炭MHD燃焼ガスからの放射スペクトルの灰粒子による散乱効果の推定  
※恩田 和夫(電総研)
- D132 複数枚の仕切壁を有するボイラ炉内の放射熱伝達の数値解析  
※早坂 洋史(北大工)、松村 憲秀(四国電力)
- D133 充てん層内強制対流-ふく射熱伝達  
※上宇都幸一(大分大工)、斉藤 晋一(大分大院)
- D134 多層断熱材の熱侵入特性に関する研究  
※天野 俊之(三菱電機)
- D135 コークス乾留時における主亀裂内輻射伝熱モデルの検討  
※上田 有孝(東北大工)、上野 明則、  
青木 秀之、三浦 隆利

[ふく射伝熱(II)] 15:05~16:45

座長 恩田 和夫(電総研)、上宇都 幸一(大分大工)

- D141  $P_n$ 近似に基づく3次元ふく射伝熱場の数値解析手法  
※片岡 浩人(大林組)
- D142 任意形状系における放射・対流共存伝熱解析手法の開発  
工藤 一彦(北大工)、谷口 博、黒田 明慈、  
※Anr Eid(北大院)
- D143 任意形状・任意加熱条件の放射・吸収・散乱性媒体の放射伝熱(基礎理論と解析精度)  
※山田 重直(東北大流体研)
- D144 高温非灰色ガス噴流の放射特性解析  
工藤 一彦(北大工)、谷口 博、黒田 明慈、  
※大高 円(北大院)、小幡 正(石播)
- D145 厚さ方向に物性値分布のある非灰色ガス層の放射特性解析  
谷口 博(北大工)、工藤 一彦、黒田 明慈  
※Markus Sumarson(北大院)、金田博志(北大学)、  
福地健(バブコック日立)、牛島哲洋、戸谷剛(北大工)

[ミストの流動・伝熱] 16:55~17:55

座長 伊藤 猛宏(九大工)、中川 勝文

- D151 ミスト冷却に関する研究(第6報)  
※金 榮煥(東大院)、大久保英敏(東大生研)、西尾 茂文

D152 ミストを含む水平管内流熱伝達に関する研究

※北川 哲也(横大院)、鳥居 薫(横国大工)、  
西野 耕、磯部悦四郎

D153 管内高速ミスト噴流の混合性能に関する研究

中川 勝文(豊橋技科大)、※松見 敏行(豊橋技科大院)、  
末田 隆史、武内 裕嗣(日本電装)、小久保 尚躬

[蒸発] 18:05~19:25

座長 藤田 恭伸(九大工)、中山 昭男(九産大)

- D161 スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化に関する研究  
(ノズル流出液温度の影響について)  
上原 春男(佐賀大工)、池田 康之、  
※廣田 稔治(佐賀大院)、北島 信行
- D162 気泡核供給によるスチームアキュミュレータの蒸発促進に関する基礎研究  
宮武 修(九大工)、※児玉 勝洋、橋本 享幸、  
安藤 佳正
- D163 ふく射と対流によって加熱された平板の水によるしみ出し冷却  
吉川 進三(同大工)、※吉村 紀之(同大院)、千田 衛(同大工)
- D164 非共沸二成分混合媒体の蒸発熱伝達に関する数値解析(混合媒体の非理想性の影響)  
※柴田 豊(京大院)、手塚 宏明(京大工)、  
萩原 良道、鈴木健二郎

<<< E室 >>>

[凝縮のメカニズム(I)] 9:50~10:50

座長 本田 博司(九大機能研)、長崎 孝夫(東工大)

- E111 水・エタノール2成分蒸気の凝縮における滴発生機構の不安定解析  
土方 邦夫(東工大工)、中別府 修、  
※深作 善郎(東工大院)
- E112 滴・膜遷移領域測定の伝熱面構造に関する考察  
※宇高 義郎(防衛大)
- E113 液滴の凝縮速度に及ぼすクヌッセン数の影響  
鶴田 隆治(九工大)、※加藤 裕二(九工大院)、  
増岡 隆士(九工大)

[凝縮のメカニズム(II)] 11:00~12:20

座長 土方 邦夫(東工大)、関根 郁平(苫小牧高専)

- E121 鉛直面上の乱流膜状凝縮の理論解析  
上原 春男(佐賀大理工)、木下 英二(佐賀大院)、  
※松田 真一
- E122 鉛直面上の二成分蒸気の乱流膜状凝縮  
※木下 英二(佐賀大院)、松田 真一、上原 春男(佐賀大工)
- E123 鉛直面上の体積力対流乱流凝縮熱伝達  
※上原 春男(佐賀大理工)、木下 英二(佐賀大院)
- E124 2成分混合蒸気の自由対流凝縮(凝縮液表面形状の分類)  
※長 伸朗(九大院)、小山 繁(九大機能研)、藤井 哲

[凝縮のメカニズム(III)] 13:15~14:55

座長 姫野 修廣(津州大工)、鶴田 隆治(九工大)

- E131 金属蒸気の凝縮核生成に関する研究  
※池田 大祐(東工大)、長崎 孝夫(東工大工)、  
土方 邦夫
- E132 熱レーザ励起による薄膜結晶構造の制御(平行照射の場合)  
※井上 剛良(九大機能研)、橋村 真治(九大院)、  
尾添 敏之(九大機能研)
- E133 分子線TOF法による金属薄膜凝縮の研究  
※小林 伸和(東大工)、青木 功、小竹 進

- E134 Intermolecular Potential of Weakly-Polarized Molecule Dimers  
※T.N.Zolotoukhina(東大I),小竹 進
- E135 相変化過程の分子振動エネルギーの研究  
※橋本 博文(東大院),小竹 進(東大I)
- [凝縮伝熱(I)] 15:05~16:25  
座長 石原 勲(関西大I),長田 孝志(琉球大I)
- E141 水平管内におけるHFC系冷媒の蒸発及び凝縮熱伝達特性  
鳥越 邦和(ダイキン工業),山下 浩幸,  
※蛸子 毅
- E142 HFC系非共沸混合冷媒の水平溝付管内局所凝縮熱伝達率  
※内田 麻里(日立機械研),伊藤 正昭,工藤 光夫
- E143 水平フィン付き管の基盤日管群におけるHCFC-123の  
凝縮(フィン形状の影響)  
本田 博司(九大機能研),高松 洋,  
※金 圭熙(九大総理工),石川 泰夫,  
高田 信夫(九大機能物質科学研)
- E144 冷媒HFC134a,HCFC123,HCFC22の水平平滑管内および  
水平内面螺旋溝付管内の凝縮熱伝達  
※原口 英輝(九大院),小山 繁(九大機能研),  
江崎 潤一(九大院),藤井 哲(九大機能研)
- [凝縮伝熱(II)] 16:35~18:15  
座長 山川 紀夫(岩手大),築取美智雄(日立機械研)
- E151 準臨界領域における炭酸ガスの鉛直面上の自然対流  
凝縮熱伝達について  
石原 勲(関西大I),※前小屋 哲(関西大院)
- E152 二成分不溶性混合冷媒の凝縮熱伝達(水平日管群におけ  
るインテンデーション効果)  
※寺西 恒宣(富山高専),滝本 昭(金沢大I),  
林 勇二郎
- E153 蒸気流速を考慮した水平フィン付き管上の膜状凝縮のモデル  
※本田 博司(九大機能研),金 圭熙(九大総理工),  
真玉橋朝和
- E154 不均一電場を利用した膜状凝縮熱伝達の促進に関する研究  
※児玉 勇司(東洋大院),田中 満,  
前川 透(東洋大I),棚沢 一郎(東大生研)
- E155 水平伝熱管上を流下する液膜への水蒸気吸収特性の研究  
※久島 大資(日立機械研),西口 章,大内 富久
- [蓄冷・蓄熱(I)] 9:30~10:50  
座長 稲葉 英男(岡山大I),笹口 健吾(熊本大I)
- F111 一様流中に置かれた潜熱蓄熱カプセルの熱特性  
※石川 正昭(信州大I),平田 哲夫,玉木 恕乎
- F112 高温蓄熱球カプセルにおける複合融解の実験的研究  
※星 朗(一関高専),齋藤 武雄(東北大I)
- F113 円筒カプセル内の自然対流/接触複合融解の数値解析  
※加藤 秀樹(東北大I),丸原 克治(東北大院)  
齋藤 武雄(東北大I)
- F114 球カプセル内の自然対流/接触複合融解の数値解析  
※丸原 克治(東北大院),齋藤 武雄(東北大I)
- [蓄冷・蓄熱(II)] 11:00~12:20  
座長 玉木 恕乎(信州大I),山田 悦郎(秋田大I)
- F121 氷蓄熱球カプセル群の凝固・融解特性  
稲葉 英男(岡山大I),※森ノ内伸晃(岡山大院),  
野津 滋(岡山大I),尾崎 公一
- F122 高融点潜熱物質充填球カプセル群の蓄・放熱特性  
稲葉 英男(岡山大I),※湯浅 雅司(岡山大院),  
野津 滋(岡山大I),尾崎 公一
- F123 ト部加熱面を有する矩形容器内リキッドアイスの融解熱伝達  
福田尚一郎(北大I),山田 雅彦,※金 明

- F124 マイクロカプセル化相変化物質スラリー熱媒体(I)試作と熱物性  
※秋野 詔夫(原研),高瀬 和之,長島 昭(慶大理工),  
鷹谷昭 二郎(日本コセラ),中西 真行
- [蓄冷・蓄熱(III)] 13:15~14:35  
座長 横山 孝男(山形大I),野津 滋(岡山大I)
- F131 フィン付き伝熱面回りの氷の融解に関する研究  
※笹口 健吾(熊本大I),隅川 隆行(熊本大I)
- F132 球カプセルの接触融解の実験的研究  
※文 鐘勲(東北大I),齋藤 武雄
- F133 有限の幅の加熱された水平板による相変化物質の定常溶融について  
※遠藤 哲也(慶大院),長谷川英治(慶大理工)
- F134 密度差を考慮した非定常状態の接触融解の解析  
※洪 熙基(東工大I),齋藤 彬夫
- [蓄冷・蓄熱(IV)] 14:45~16:05  
座長 平田 哲夫(信州大I),秋野 詔夫(原研)
- F141 フィン付管周りの水の凝固・融解に関する研究  
※平澤 良男(富山大I),竹越 榮俊,小坂 暁夫,  
紺矢 浩史
- F142 多数の分割ノイン付き伝熱面による溶融特性  
齋藤 彬夫(東工大I),洪 熙基,※山下 和也
- F143 低温潜熱エマルジョン水溶液の蓄冷特性  
稲葉 英男(岡山大I),※森田 慎一(岡山大院),  
野津 滋(岡山大I)
- F144 環状フィン付潜熱蓄熱器の融解過程における相似曲線  
海野 紘治(豊田大I),※高橋 尚士(崎大総業)
- [蓄冷・蓄熱(V)] 16:15~17:35  
座長 山下 勝也(東芝),松本 浩二(青学大理工)
- F151 円管内流動水溶液の限界過冷却に関する研究  
稲葉 英男(岡山大I),※武谷 健吾(岡山大院),  
野津 滋(岡山大I)
- F152 過冷却微小液滴の能動的凍結制御に関する研究  
一交流電場加振による影響一  
黒崎 晏夫(東工大),佐藤 勲,※大平 昭義(東工大)
- F153 フラジルアイス形成の実験的研究  
※渡辺 裕(東芝),山下 勝也,野間 毅,八文字孝幸
- F154 浮力を受ける低温潜熱液滴の凝固現象  
稲葉 英男(岡山大I),※佐藤 憲二(岡山大I),  
野津 滋(岡山大I),尾崎 公一
- [蓄冷・蓄熱(VI)] 17:45~19:05  
座長 海野 紘治(豊田大I),渡辺 裕(東芝)
- F161 吸水性高分子ゲルを用いた小規模氷蓄熱システムの性能  
※須田不二夫(東海大I),羽鳥 祐一,鈴木美奈子
- F162 垂直平板に沿って流下する水膜の凍結  
※平田 哲夫(信州大I),井上 良一(信州大院),  
中村 周至(信州大I),石川 正昭(信州大I)
- F163 放射熱吸収物質を利用した雪層融解  
稲葉 英男(岡山大I),※大竹 秀雄(サンデン),  
野津 滋(岡山大I)
- F164 氷-水混相流の水平管内対流熱伝達  
※村井 正夫(長岡技科大I),須藤 博昭,服部 賢,  
青木 和夫(長岡技科大),小川 康夫(佐原総研)

第2日 5月27日(木)

<<< A室 >>>

- [プール・噴流沸騰系の限界熱流束] 9:30~11:10  
座長 瑞津 正博(京大原研),原村 彦彦(神奈川大I)
- A211 二次元衝突噴流による高熱負荷面の限界熱流束の研究  
※古谷 正裕(東工大I),井上 晃(東工大原研)

- A212 衝突噴流沸騰系の限界熱流束(サブクールの影響について)  
※門出 政則(佐賀大理工)、北島健 郎、原 信
- A213 片側加熱垂直平板のブル沸騰限界熱流束  
※坂下 弘人(北大工)、熊田 俊明
- A214 水平細線のバーンアウト熱流束  
※清水 聡(東大院)、星伸 英司(東大工)、  
庄司 正弘(東大工)
- A215 ステンレスチューブによるブル沸騰伝熱  
※亀井 秀也(東大工)

[冷媒・混合液の沸騰] 11:20~12:20

- 座長 大田 治彦(九大)、阿部 宜之(電総研)
- A221 混合液の核沸騰熱伝達(熱伝達整理式の評価)  
藤田 恭伸(九大工)、※筒井 正幸、渡辺 敦好(九大院)
- A222 リチウム塩水溶液の高熱流束ブル沸騰  
※富山 靖司(芝浦工大)、鴨志田隼司(芝浦工大工)、  
一色 尚次(日大工)、佐藤 運男(芝浦工大工)、片山 功蔵
- A223 冷媒の水平蒸発管におけるドライアウト点に関する実験  
吉田 駿(九大工)、※大石 克己、森 英夫、  
山之内達也(九大院)

ラポーター方式セッション  
[遷移沸騰のメカニズムとモデル] 14:30~16:40

- ラポーター 庄司 正弘(東大工)  
西尾 茂文(東大生研)
- A231 制御された非定常遷移沸騰における伝熱特性  
※原村 嘉彦(神奈川大工)
- A232 遷移沸騰熱伝達のモデルと解析  
黄 子諒(東大院)、田中 敏隆(東大工)、※庄司 正弘
- A233 固液接触を限定する熱流体的機構に関する研究  
(液滴衝突過程におけるWe数と表面性状の影響)  
※永井 二郎(東大院)、西尾 茂文(東大生研)
- A234 気泡微細化沸騰による伝熱面の壊食  
※久保 良(東芝研究開発セ)、梅原 徳次(東北大工)、  
熊谷 哲
- A235 遷移沸騰領域における液膜厚さ  
坂下 弘人(北大工)、※熊田 俊明、安田 広志(北大院)
- A236 高熱流束における液膜厚さとその相関式  
熊田 俊明(北大工)、坂下 弘人、※小谷 拓也(北大院)
- A237 微小細線の沸騰特性(加熱面温度の変動特性)  
※豊島 慎一(東大院)、前田 淳(東大工)、  
河野 太治(東大院)、庄司 正弘(東大工)
- A238 遷移沸騰における気泡挙動  
※黄 子諒(東大院)、谷中 壮弘(東大工)、  
庄司 正弘(東大工)

[管内沸騰流の限界熱流束] 16:50~18:10

- 座長 門出 政則(佐賀大理工)、井上 満(東大工)
- A241 管内強制流動沸騰における上流限界熱流束  
※横谷 定雄(東大工)、渡辺 誠、村田 真司、庄司 正弘
- A242 下端閉垂直管内沸騰CHFとフラディング現象  
※甲藤 好郎(日大理工)
- A243 ねじりテープによる垂直管内旋回流の沸騰限界熱流束  
※李 相烈(東工大院)、井上 見(東工大原研)、高橋 実
- A244 非均 加熱によるねじりテープ挿入管サブケル  
沸騰限界熱流束—実験結果とメカニズムの検討—  
成合 英樹(筑波大)、稲坂 富士男(船研)、  
※石川 厚史(筑波大院)、木下 秀孝(筑波大)

[複合対流(D)] 9:30~10:50

- 座長 北村 健三(豊橋技科大)、親川 兼勇(琉球大工)
- B211 垂直円管内の自然・強制複合対流における逆流現象  
※王 煤(名工大)、内藤 悦郎(滋賀県立短大)、  
辻 俊博(名工大)、長野 靖尚
- B212 浮力が作用する管内層流の流れと熱伝達の発達特性  
石垣 博(航技研)、※望月 宗和
- B213 等熱流束加熱された鉛直平板間における自然・強制  
共存上昇流の流動形態と伝熱特性  
※鈴木 孝司(豊橋技科大)、西村 基、  
三田地敏史、高橋 勇二
- B214 流路内におかれたキャピティからの層流複合対流  
(伝熱面境界条件の影響)  
※布施木 徹(東京ガス)

[複合対流(II)] 11:00~12:20

- 座長 石垣 博(航技研)、辻 俊博(名工大)
- B221 比較的狭い空間における環状衝突噴流熱伝達の数値予測  
一宮 浩市(山梨大工)、※松本 弘(山梨大院)
- B222 熱源を有するモデル室内における移動現象の解析  
※後藤 和也(東北大工)、青木 秀之、三浦 隆利
- B223 密充填円柱群間隙軸方向流内の共存対流熱伝達  
宮武 修(九大工)、※大森 広美、栗城 雄治
- B224 水平円柱まわりの強制・自然共存対流の熱伝達(直交流の場合)  
※北村 健三(豊橋技科大工)、梅田 秀樹(豊橋技科大院)

[管内乱流] 14:30~16:10

- 座長 鈴木 健二郎(京大工)、多田 幸生(金沢大工)
- B231 周方向に非均一な発熱分布のある円管内乱流熱伝達  
※小川 矩弘(東大工)、秋山 守
- B232 曲円管内乱流の壁近傍における速度分布  
※青山 善行(愛媛大工)、森崎 秀行(愛媛大院)、  
二神 浩三(愛媛大工)
- B233 正方形流路内の乱流熱伝達  
※廣田 真史(名大工)、藤田 秀臣、横沢 肇、中井 浩之
- B234 楕円断面管路内の三次元乱流実験解析  
杉山 均(宇都宮大工)、秋山 光庸、  
※八畷 喜規、二宮 尚
- B235 二次流れをとまなう管内乱流のアナロジー  
※石垣 博(航技研)

[層流伝熱] 16:20~17:40

- 座長 板谷 義紀(名大工)、二宮 尚(宇都宮大工)
- B241 角柱を挿入した3次元ダクト内流れの熱伝達特性  
※瀧下 俊行(京大院)、鈴木健二郎(京大工)
- B242 低Pe数域における液体金属Naの強制対流熱伝達  
※塩津 正博(京大原研)、畑 幸一、  
竹内 石人、櫻井 彰
- B243 平板層流境界層内に発生させた縦渦の構造と熱伝達  
※中山 謙(横国大院)、鳥居 薫(横国入工)、  
西野 耕一、大野 敬史
- B244 有限管厚さを考慮した内部フィン付き管の層流温度  
助走区間の数値解析(壁温一定の場合)  
※金丸 邦康(長崎大工)、茂地 徹、山田 (長崎大学)、  
川江 信治(久留米工業大)

<<< C室 >>>

[混相流伝熱] 9:30~10:50

- 座長 山田 重直(東北大流体研)、高松 洋(九大機能研)
- C211 電場を利用した気液混相流の制御と伝熱促進  
—伝熱促進機構について—  
※多田 幸生(金沢大工)、滝本 昭、  
高橋 幸志(金沢大院)、林 勇二郎(金沢大工)

- C212 磁壁性粒子層を含む気体を用いた局所熱伝達の増進と制御(第3報)  
※岸沢 浩(慶大院)、菱田 公(慶大理工)、前田 昌信
- C213 ふく射が支配的な場における固気混相衝突噴流の熱伝達  
清水昭比古(九大総理工)、※岡崎 輝幸、  
江里幸一郎、横峯 健彦
- C214 垂直管内固気液三相スラグ流のスラグ特性(粒子径の影響)  
坂口 忠司(神戸大工)、※南川 久人、  
富山 明男、牛尾 雅之(大阪ガス)

[限定空間内の自然対流] 11:00~12:20

- 座長 秋山 光庸(宇都宮大工)、能登 勝久(神戸大)
- C221 内部に六角形ハニカムコアを持つ傾斜空室室内の非定常  
自由対流熱伝達  
浅古 豊(都立大工)、山口 義幸、※山中 毅(都立大院)
- C222 横型コンクリートサイロ貯蔵施設の伝熱特性の研究(第1報)  
-ふく射伝熱を伴う密閉容器内自然対流試験-  
※高橋 伸行(川崎重工)、柴崎 博晶、  
土井 禎浩、南 了悟
- C223 スペーサを有する密閉矩形容器内の自然対流  
※塩見 洋一(龍谷大理工)、忽那 泰幸、  
小澤 守(関西大工)、赤川 浩爾(龍谷大理工)
- C224 飽和地盤内に設置されたトンネル内の自然対流  
※藤井 善久(鹿島技研)、太田 勝矢

[多孔質層内の伝熱(I)] 14:30~16:10

- 座長 青木 和夫(長岡技科大)、杉山 均(宇都宮大工)
- C231 飽和多孔質層内に設置された鉛直平板からの連成熱伝達  
※Michael Vynnycky(東北工試)、木村 繁男
- C232 側壁等流束境界条件下での多孔質体内二重拡散対流の  
振動現象  
※増田 善雄(東北工試)、Farid Alavyoen、木村 繁男
- C233 下面加熱および上面冷却境界を有する単段球状粒子層  
の対流熱伝達  
稲葉 英男(岡山大工)、※尾崎 公一、野津 滋
- C234 透過壁に沿う鉛直自然対流  
※高津 康幸(九工大)、増岡 隆士(九工大)、  
鶴田 隆治
- C235 ヒートパイプを封入した多孔質断熱層内自然対流  
増岡 隆士(九工大)、※伊崎 弘(九工大)、  
谷川 洋文(九工大)、鶴田 隆治

[多孔質層内の伝熱(II)] 16:20~18:00

- 座長 増岡 隆士(九工大)、浜口 八郎(神戸大)
- C241 非ニュートン流体で充ちた多孔質体中の集中熱源からの  
非ダルシ-自然、強制および混合対流に関する統一的解析手法  
中山 顕(静大工)、※芦沢 貴弘(静大院)、  
桑原 不二朗(静大工)、児山 仁
- C242 多孔質体内の熱流動の微視的数値シミュレーション  
※桑原不二朗(静大工)、中山 顕、  
河村 恭博(静大院)、児山 仁(静大工)
- C243 原子炉配管断熱材中の漏洩蒸気流に関する実験的基礎研究  
-第二報(蒸気による基礎実験)-  
※許 文勝(東北大工)、堀 豊、橋爪 秀利、戸田 三朗
- C244 凍結粒子層の融解熱伝達  
※佐々木 章(秋田工高専)、池田 寛(秋田大鉱山)、  
菅原 典史(新菱冷熱)
- C245 水溶液で満たされた多孔質体内におかれた水平円管まわりの凍結  
※岡田 昌志(青学大工)、藪下 雄一(青学大院)、  
松本 浩二(青学大工)

<<<< D室 >>>>

[自由表面流と熱物質移動] 9:30~11:10

- 座長 飛原 英治(東大工)、萩原 良道(京大工)
- D211 EHD流下液膜蒸発器の蒸発熱伝達 第2報  
※山下 勝也(東芝)、熊谷 幹夫、渡辺 裕、  
矢部 彰(機械技研)
- D212 垂直下降気液二相流のリップル領域における界面性状に関する研究  
世古口 信彦(阪大工)、森 幸治、  
※草野 利之(阪大院)、坂根 学、加治 増夫(阪大工)
- D213 鉛直面流下液膜の熱移動と流れの積分法解析  
※方 明(琉球大工)、野底 武浩、長田 孝志
- D214 液滴内過渡表面張力対流の解析  
上藤 彦(北大工)、谷口 博、黒田 明慈、  
※田中 健、Wen-Jei Yang(ミシガン大)、  
安野 正功(北大学)
- D215 流下水中からの溶存酸素の脱気特性に関する研究:第3報  
※根本 晃(東芝)、河野 俊二、筒井 政司

[ヒートポンプ(I)] 11:20~12:20

- 座長 中西 重康(都路工大)、野底 武浩(琉球大工)
- D221 臭化リチウム水溶液膜への水蒸気の吸収に関する整理式  
※森岡 斎(徳島大工)、清田 正徳、岸下 和義(徳島大院)
- D222 リチウム塩水溶液による噴流蒸気の吸収・凝縮  
※堀田 圭一(芝浦工大院)、鴨志田隼司(芝浦工大工)、  
一色 尚次(日大工)、佐藤 運男(芝浦工大工)、片山 功藏
- D223 結晶の成長を伴う臭化リチウム水溶液の伝熱特性  
※江崎 秀司(鹿児島高専)

[ヒートポンプ(II)] 14:30~15:30

- 座長 鳥越 邦和(ダイキン)、鴨志田隼司(芝浦工大工)
- D231 溝付管形状の吸収性能に及ぼす影響について  
※清田 正徳(徳島大工)、森岡 斎
- D232 プレート式熱交換器を凝縮器および蒸発器として備えた  
混合冷媒ヒートポンプの実験  
※波邊 激雄(中部電力)、志村 欣一
- D233 潜熱蓄熱槽を介したソーラーヒートポンプ住宅の性能  
※金山 公夫(北見工大)、馬場 弘、遠藤 登、  
樋口 修二(新菱冷熱)

[高性能熱交換器] 15:40~17:00

- 座長 太田 照和(東北大工)、藤井 雅雄(三菱電機)
- D241 三流体からなる熱交換器の特性解析  
※石川 信幸(宮城高専)、青木 和夫(長岡技科大)、服部 賢
- D242 プレートフィン蒸発器および凝縮器の伝熱特性  
※屋良 朝康(九大機能研)、三淵 哲寛(九大院)、  
小山 繁(九大機能研)、藤井 哲
- D243 ピンフィン群の伝熱特性(局所加熱による熱伝達率測定)  
※水上 浩(東芝)、望月 貞成(東京農工大)、  
村田 章、八木 良尚(東京職訓短大)
- D244 低融点合金と水との直接接触式熱交換器の伝熱特性  
※木下 泉(電中研)、西 義久

[冷凍・空調機器] 17:10~18:10

- 座長 小山 繁(九大機能研)、大原 敏夫(日本電装)
- D251 ラジエータの放熱性能に関する研究  
※小川 直也(東芝)、橋詰 健一
- D252 枝管内における熱成層現象  
中森 信夫(三菱重工)、※鈴田 忠彦、上野 隆司、  
笠原 二郎、半沢 克巳
- D253 超音速流中に置かれた物体周りの対流熱伝達:第2報  
迎え角の影響  
鳥越 邦和(ダイキン工業)、川添 政宣、  
※毛馬 大成、谷本 啓介

<<< E室 >>>

[熱物性(I)] 9:30~10:50

- 座長 荒木 信幸(静岡大工)、山田 雅彦(北大工)
- E211 非定常加熱による熱物性値の簡易測定  
(第2報、表面温度測定法の検討)  
※姫野 修廣(信州大工)、日向 益、梁取美智雄(日立機械研)
- E212 ダイボンド用のAg<sub>2</sub>Oボキシン接着剤の熱伝導率の評価  
※中居 司(住友金属鉱山工)、木村 直
- E213 HCFC-141bおよびHFC-125の熱伝導率  
(液相域における測定)  
※山田 敏彦(慶大院)、矢口 岳彦(慶大工)、  
長坂 雄次(慶大理工)、長島 昭
- E214 地球温暖化ガスの拡散係数の測定  
(第一報 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-空気系およびC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>系の測定)  
※松永 直樹(拓殖大工)、堀 守雄、長島 昭(慶大理工)

[熱物性(II)] 11:00~12:20

- 座長 斎藤 彬夫(東工大)、松永 直樹(拓殖大工)
- F221 レーザ・フラッシュ法による低熱伝導性試料の熱拡散率測定  
※濱田 幸弘(名古屋市工研)、熊田 雅弥(岐大工)
- E222 傾斜機能材料の熱伝導率-モデルと有効値の評価-  
※山田 悦郎(秋田大鉱山工)、高橋 泰之(秋田大学)
- E223 光音響法による傾斜機能材料の熱物性値評価の研究  
(第二報、2層材料における実験および検討)  
※澤尻 修成(慶大院)、曾根 来(慶大工)、  
長坂 雄次(慶大理工)
- E224 傾斜機能材料のステップ状加熱における温度応答  
※荒木 信幸(静岡大工)、牧野 敦、青木 正和(静大工)

[分子動力学・熱物性(I)] 14:30~16:10

- 座長 丸山 茂夫(東工大)、東 之弘(いわき明星大工)
- E231 布の透過率測定法に関する研究  
斎藤 彬夫(東工大工)、※大河 誠司、劉 清標(台湾松下)
- E232 流動する溶融高分子の温度伝導率異方性の過渡的特性  
※宮本 博文(慶大理工)、殿下 恭宏(慶大院)、  
村木 一博(慶大工)、長島 昭(慶大理工)
- E233 ジュール・トムソン効果の反転機構  
※杉山 智之(東工大)、越後 亮三(東工大工)、  
吉田 英生、多田 茂
- E234 分子動力学法による流体の輸送性質の研究(第一報、  
平衡MDおよび非平衡MDによるA<sub>r</sub>の熱伝導率)  
※鳥谷 太介(慶大院)、長坂 雄次(慶大理工)
- E235 分子動力学法による荷電粒子挙動解析  
加藤 征三(三重大工)、※山本 昌弘

[分子動力学・熱物性(II)] 16:20~18:00

- 座長 井上 剛良(九大機能研)、平澤 良男(富山大工)
- E241 熱伝導機構の分子動力学的研究  
※渡辺 章弘(東大院)、小竹 進(東大工)
- E242 壁面温度分布に起因する減圧容器内の流れ  
※杉山憲一郎(北大工)、宮田 学(北大院)、  
石黒 亮二(北大工)、榎戸 武揚
- E243 分子動力学法による液滴の表面張力の研究  
※萩田 章博(東大工)、松本 社平(東大院)、  
丸山 茂夫(東大工)、庄司 正弘
- E244 固液接触角の履歴現象に関する研究  
※加藤 健司(阪大工)、東 恒雄
- E245 固体界面における熱起電力  
※伊藤 衡平(東大工)、中別府 修、土方 邦夫、  
鳥越 邦和(ダイキン)、P. E. Phelan(ハワイ大)

<<< F室 >>>

[電子機器の伝熱(I)] 9:30~10:50

- 座長 竹内 正紀(福井大工)、柿本 浩一(NEC基礎研)
- F211 積層平行平板流路内のICパッケージまわりの熱流動  
見山 仁(静大工)、桑原不二朗、  
※細馬 万裕(静大院)、中山 顕(静大工)
- F212 ICパッケージと流体との熱連成場解析(強制対流熱連成場について)  
※危ヶ谷 博(玉川大工)
- F213 マルチチップモジュールの冷却設計  
※久野 勝美(東芝)、佐々木富也、岩崎 秀夫
- F214 半導体レーザを熱源とする染料転写プリンタの印画特性  
※森本 泰正(東京農工大)、江頭 典孝、  
望月 貞成、村田 章

[電子機器の伝熱(II)] 11:00~12:20

- 座長 見山 仁(静大工)、伊藤 正昭(日立機械研)
- F221 基板の熱拡散による空冷モジュールからの伝熱促進:  
モジュール/基板間熱抵抗の影響  
※村 商照(東工大工)、中山 恒
- F222 単相フロリナートの平板状衝突噴流による箔発熱面の冷却  
※三嶋 浩明(東工大工)、中山 恒、  
孫 華(Masud Behnia Univ. of N.S.W.)
- F223 電子素子の浸漬沸騰冷却に関する研究  
(衝突気流による沸騰開始点の制御)  
西尾 茂文(東大生研)、※及川 和喜
- F224 超電導体クエンチ時における非定常熱場・電磁場解析  
※来栖 努(東北大院)、橋爪 秀利(東北大工)、戸田 三朗

[生産・加工プロセス(I)] 14:30~15:50

- 座長 岡田 昌志(青学大理工)、日比谷孟俊(NEC基礎研)
- F231 ラミナ冷却におけるむら発生の観察  
※原口 洋一(住友金属)、播木 道春
- F232 表面流動現象を含む半導体成膜形状解析  
※平沢 茂樹(日立機械研)、前田 洋子、白井 建人
- F233 高電圧極短パルスプラズマの構造形成過程制御と  
そのCVDへの応用  
岡崎 健(東工大炭素循環セ)、※安田 真一(豊橋技科大院)、  
松田 裕輔(豊橋技科大)、水野 彰
- F234 メタン解離過程のトラジェクトリー法による検討  
※石丸 和博(岐阜工高専)、岡崎 健(東工大炭素セ)

[生産・加工プロセス(II)] 16:00~17:20

- 座長 今石 宣之(九大機能研)、岡崎 健(東工大炭素循環セ)
- F241 レビテーションによる金属材料の溶融と凝固  
※稲田 茂昭(群馬大工)、梶原 国博、  
Wen-Jei Yang(ミシガン大)
- F242 Si融液対流の対流モードと熱輸送との相関  
※渡辺 匡人(NEC基礎研)、柿本 浩一、  
江口 実、日比谷 孟俊
- F243 水平磁場下におけるC<sub>2</sub>F<sub>4</sub>融液内の濃度分布計算  
※若本 光生(九大機能研)、藤 敬司(九大総理工)、  
尾添 紘之(九大機能研)
- F244 微小穴を有する金属のレーザー照射による融解と凝固  
(表面張力を考慮した解析)  
岡田 昌志(青学大理工)、大槻 潤(青学大院)、  
※松本 浩二(青学大理工)

<<< A室 >>>

- [対流伝熱の促進(I)] 9:30~10:50  
 座長 矢野 歳和(石播)、澤田 達男(慶大理工)  
 A311 超音波場における伝熱促進の機構に関する研究  
 飯田 嘉宏(横国大工)、※内田 洋(横国大工)、  
 筒井健太郎(東京工専)  
 A312 水槽内で超音波が印加される伝熱面上の  
 キャピテーション強度と音圧  
 ※野村 信福(豊橋技科大院)、中川 勝文(豊橋技科大)、  
 高柳 雅司(豊橋技科大院)  
 A313 マイクロ波照射場の加熱構造  
 越後 亮三(東工大工)、多田 茂、  
 ※久野 泰志(東工大院)、吉田 英生(東工大工)  
 A314 MHD発電機内でのローレンツ力の作用による伝熱促進  
 ※吉川 邦夫(東工大工)、木下 智雄、木包 哲也  
 [対流伝熱の促進(II)] 11:00~12:20  
 座長 荻野 文丸(京大工)、藤田 秀臣(名大工)  
 A321 一樣流中の正方形柱の伝熱促進と抵抗軽減  
 ※五十嵐 保(防衛大)  
 A322 脈動流による伝熱促進  
 ※菊池 義弘(広大工)、大野 良貴(広大院)、  
 高橋 雅樹(広大工)  
 A323 円管内の同心円錐面上への微粒子沈着と円錐面加熱効果  
 ※平野 博之(九大総理工)、尾添 紘之(九大機能研)  
 A324 環状ノズルによる乱流衝突噴流熱伝達特性  
 ※一宮 浩市(山梨大工)、松本 弘(山梨大工)  
 [対流伝熱の促進(III)] 13:15~14:35  
 座長 一宮 浩市(山梨大工)、黒田 明彦(北大工)  
 A331 L E B U板に付設した渦発生体による乱流熱伝達の促進  
 (速度変動量の測定)  
 ※鈴木 一之(京大院)、稲岡 恭二(京大工)、  
 萩原 良道、鈴木健二郎  
 A332 吸込みによる後ろ向きステップ下流の再付着領域の  
 熱伝達特性の制御に関する研究  
 ※親川 兼勇(琉球大工)、平良 哲治、斉藤 武史、  
 山里 栄昭  
 A333 タービュレンスプロモータによる円柱まわりの  
 流れへの影響と熱伝達特性  
 ※幡山健二郎(阪府大工)、吉村 志司(ダイキン)、  
 井藤 俊之(阪立大)、加茂 信行  
 A334 角柱を有する平行平板間流れの可視化と熱伝達  
 ※矢尾 匡永(奈良高専)、中谷 洵、妹尾 年浩、  
 鈴木健二郎(京大工)  
 [剥離流の伝熱] 14:45~16:05  
 座長 五十嵐 保(防衛大)、鈴木 洋(広大工)  
 A341 剥離機構を有する冷却平板上の凍結および流動挙動  
 福迫尚一郎(北大工)、山田 雅彦、田子 真、  
 ※斉藤 徹(日本電装)、栗田 雅規(北大院)  
 A342 傾斜後向きステップまわりの乱流熱伝達  
 太田 照和(東北大工)、※菅原 善宏(東北電力)  
 A343 ブラフボディのある軸対称管内噴流の熱伝達  
 (レイノルズ数およびリングの形状の影響について)  
 ※丹野 淳司(同大工)、千田 衛、吉川 進三  
 A344 環状円錐管路における流れの周期的剥離現象  
 ※Karel Balatka(東京農工大)、望月 貞成、  
 村田 章、齋藤 弘順

- [限定空間・微小伝熱面上の沸騰] 9:30~10:50  
 座長 菊池 義弘(広大工)、熊谷 哲(東北大工)  
 B311 狭間隙内の気泡成長  
 ※森山 清史(東工大院)、井上 晃(東工大原研)  
 B312 沸騰空間制限による伝熱促進  
 藤田 恭伸(九大工)、※内田 悟、佐藤 裕幸(九大院)  
 B313 微小発熱面からの沸騰伝熱  
 ※長崎 孝夫(東工大工)、土方 邦夫、斉藤 正、  
 伏信 一慶  
 B314 飽和プール沸騰のEHDの研究—小さな伝熱面におけ  
 る核沸騰促進と沸騰限界熱流束—  
 矢部 彰(機械技研)、※高橋 克行(東京理大)、  
 牧 博司(東京理大)  
 [膜沸騰・蒸気爆発] 11:00~12:20  
 座長 村尾 良夫(原研)、高田 保之(九大工)  
 B321 プール沸騰冷却超電導体の動的安全性  
 伊藤 猛宏(九大工)、※ 久保田裕巳、榎木 隆(九大院)  
 B322 水平円柱膜沸騰における表面温度、表面熱流束分布  
 ※Osama Montasser(東大院)、上野 一郎(東大工)、  
 井上 満(東大工)、庄司 正弘  
 B323 急減圧下での液体窒素のフラッシング現象に関する研究  
 ※渡辺 敏見(室蘭工大)、花岡 裕(室蘭工大)、  
 戸倉 郁夫、横山 真吾(室蘭工大)  
 B324 圧力波によって生ずる液滴規模の蒸発爆発の  
 機構に関する研究  
 ※高島 武雄(横国大工)、飯田 嘉宏  
 [特殊条件下の沸騰] 13:15~14:35  
 座長 加治 増夫(阪大工)、横谷 定雄(東大工)  
 B331 沸騰熱伝達に及ぼす超音波の影響(II)  
 芹澤 昭示(京大工)、※向井 正勝(京大院)、  
 三島 嘉一郎(京大工)、高橋 修、河原 全作  
 B332 電場における気泡と沸騰伝熱  
 伊藤 猛宏(九大工)、高田 保之、※田中 克典、入  
 江 康寛  
 B333 微小重力場のプール沸騰実験装置の検討  
 (HCFC123による地上での予備実験)  
 ※大田 治彦(九大工)、井上 浩一(九大院)、  
 吉田 駿(九大工)  
 B334 微小重力下における非共沸2成分系混合液体の  
 プール沸騰  
 ※岡 利春(慶大院)、阿部 宜之(電総研)、  
 岩下 剛二(慶大工)、森 康彦(慶大理工)、長島 昭  
 [沸騰における流体挙動] 14:45~16:05  
 座長 花岡 裕(室蘭工大)、熊田 俊明(北大工)  
 B341 プール沸騰における気泡成長の数値シミュレーション  
 ※幡宮 重雄(日立エネ研)、室田 知也  
 B342 気泡干渉域飽和プール核沸騰の液体流動  
 ※中山 男(九大工)  
 B343 気液界面の温度ジャンプにもとづく気泡生長の検討  
 (不均一場核沸騰への蒸発係数の適用)  
 ※関根 郁平(苫小牧高専)  
 B344 過熱液中の気泡成長に及ぼす気泡核サイズの影響  
 宮武 修(九大工)、※橋本 享幸、安藤 佳正

[融解・凝固] 9:30~10:50

座長 竹越 榮俊(富山大工)、大河 誠司(東工大工)

C311 複合対流場における固液相変化を伴う熱移動の研究  
※石黒 達男(三菱重工)、谷口 雅巳、  
平尾 康彦、渡部 正治

C312 狭い隙間における低融点ハンダの流れと凝固:  
毛細管流れの観察実験  
※村山 成(東工大工)、中田 恒

C313 単一液滴の凝固  
※勝村 幸博(東北工大工)、橋爪 秀利、戸田 三朗

C314 過冷融液の凝固(2次元結晶成長モデル)  
※國峰 寛司(明石高専)、林 勇二郎(金沢工大工)、  
高森 淳(金沢大院)

[熱システム・過渡特性] 11:00~12:20

座長 成合 英樹(筑波大工)、小澤 山行(高砂熱学)

C321 溶融カーボン/コンクリートの熱伝達模擬実験  
勝村 幸博(東北工大工)、※川口 孝弘、橋爪 秀利、  
戸田 三朗

C322 周期的負荷変動に対する船舶炉の応答特性  
※石田 紀久(原研)

C323 内部発熱体を有する大空間空調システムに関する研究  
※浜口 八朗(神戸大発達科学)、富山 明男(神戸工大工)、  
川鍋 稔、松田 佳則、大城 匡豊(大気研)、  
坂口 忠司(神戸工大工)

C324 衝突噴流による空調空間のゾーニングの研究  
※古藤 悟(三菱電機)、橋本 裕美、吉田 孝行

[生体・食品の伝熱(I)] 13:15~14:35

座長 服部 賢(長岡技術科大)、山田 幸生(機械技研)

C331 オニオンセルの凍結実験  
※鶴田 隆治(九工大)、川水 努(九工大院)、  
増岡 隆士(九工大)

C332 微小半透膜セル列内の水溶液の凝固に関する研究  
姫野 修敏(信州大)、日向 滋、桜井 正幸、  
※青波 徹(信州大院)

C333 生体細胞を含む水溶液の凝固過程における水結晶と  
細胞の形態学的相互作用  
※石黒 博(筑波大)、Boris Rubinsky(カリフォルニア大)

C334 細胞凍結における凍害保護物質の効果  
林 勇二郎(金沢大工)、※百生 登(富山県立大工)、  
多田 幸生(金沢大工)、高橋 規彰(金沢大院)

[生体・食品の伝熱(II)] 14:45~16:25

座長 林 勇二郎(金沢大工)、石黒 博(筑波大)

C341 電場が解凍現象に及ぼす影響に関する研究  
万本 信三(前川製作所)、※高柳 哲郎、  
笠原 敬介、矢部 彰(機械技研)

C342 温熱快適性評価のための人体熱モデル開発  
※竹森 俊和(大阪ガス)、中島 健、庄司 祐介(神戸大)、  
白水 智子(大阪ガス)、西村 和久

C343 血液の酸素解離を考慮した生体内温度変化の解析  
山田 幸生(機械技研)、  
※菅原 理裕(東京理科大)、河村 洋

C344 生体内光伝播の解析  
※山田 幸生(機械技研)、長谷川裕夫

C345 強い散乱体内の光伝播に関する実験的研究  
※高橋ゆかり(機械技研)、山田 幸生、長谷川裕夫

[燃焼(I)] 9:30~10:50

座長 吉澤 善男(東工大原研)、新井 紀男(名大高温エネ)

D311 自己発熱反応過程の燃焼速度  
(理論および実験結果との比較)  
※牧野 敦(静大工)、荒木 信幸

D312 反応性流れにおける熱および成分の選択拡散  
※徐 (阪大院)、高城 敏美(阪大工)

D313 燃料液滴のマイクロ着火機構の数値解析  
※中田 悦朗(東北大院)、等々力 宏、  
齋藤 武雄(東北大工)

D314 高温燃焼ガスによるメタンの着火  
※佐野 妙子(東海大工)

[燃焼(II)] 11:00~12:20

座長 三浦 隆年(東北大工)、宮内 敏雄(東工大)

D321 メタンの高温高圧燃焼特性  
※岡岡 明博(名大工)、新井 紀男(名大高温エネ)、  
小林 敬幸、架谷 昌信(名大工)、田中 雅(中部電力)

D322 工業用ガス燃焼炉内3次元伝熱シミュレーション  
(第2報:台車式の場合)  
※松村 昌彦(大阪ガス)、伊藤 誠一、  
谷口 博(北大工)、藤 彦彦

D323 管状火炎の燃焼特性について  
※田村 守淑(東邦ガス)、竹野 忠夫(名大工)

D324 多孔質体による超薄燃焼内燃機関  
花村 克博(阪大工)、※宮内出紀夫(岐大院)、  
越後 亮三(東工大工)

[燃焼(III)] 13:15~14:35

座長 高城 敏美(阪大工)、牧野 敦(静大工)

D331 予混合平担火炎におけるすす濃度分布のC T計測  
奥山 正明(山形大工)、※鈴木 大介(東工大学)、  
小林 健 (東工大工)、吉田 英生、越後 亮三

D332 メタン/空気系燃焼を用いるCO<sub>2</sub>-ガスダイナミック  
レーザーの開発  
※小林 敬幸(名大高温エネ)、平野 智庸(名大工)、  
板谷 義紀、新井 紀男(名大高温エネ)、  
架谷 昌信(名大工)

D333 燃料電池改質器内の伝熱挙動  
宇佐美 優(東京電力)、福迫尚 一郎(北大工)、  
山田 雅彦、田子 真、※加藤 久宜(トヨタ)、  
信田 哲滋(北大院)

D334 燃料電池用プレートリフォーマの燃焼・伝熱数値計算  
※池田 英人(石播技研)、平田 哲也(石播)、  
宮内 敏雄(東工大)

[宇宙工学の伝熱] 14:45~16:05

座長 塩谷凌太郎(石播)、前川 透(東洋大工)

D341 複合チャンネルヒートパイプの微小重力下における  
熱伝達特性  
※大串 哲朗(三菱電機中研)、村上 政明、  
矢尾 彰(三菱電機鎌倉)、増本 博光、  
川路 正裕(トロント大)

D342 宇宙往還機の大気圏再突入時の熱解析  
板垣 春昭(宇宙開発事業団)、※奥山 圭一

D343 宇宙用コールドプレートの接触熱伝達のシリコンゴム  
フィルター材による促進

- ※秋吉 亮(石橋)、好 雄、堀 政義、  
鳥居 薫(横国大院)
- D344 接触熱抵抗に対する介在金属厚さの影響  
※大木 篤史(横国大院)、鳥居 薫(横国大院)、  
西野 耕一、望月 彰人

<<< E室 >>>

- [分子動力学] 9:30~10:50  
座長 加藤 征三(三重大院)、杉山憲一郎(北大)
- E311 水のクラスター構造の分子動力学的研究  
※小原 拓(東北大流体研)、相原 利雄
- E312 量子分子動力学法による金属の光吸収スペクトルに関する研究  
※芝原 正彦(東大院)、小竹 進(東大院)
- E313 水クラスターの遠赤外スペクトルに関する分子動力学的研究  
※松本 壮平(東大院)、丸山 茂夫(東大院)、  
庄司 正弘、小竹 進
- E314 炭素クラスター(フラーレンの生成)  
※丸山 茂夫(東大院)、井上 満、  
望月 敏雄(東大工学)、高木 敏男
- [ふく射物性] 11:00~12:20  
座長 黒崎 晏夫(東工大)、早坂 洋史(北大)
- C321 繊維状素材の指向透過率の測定  
馬場 弘(北見工大)、金山 公夫、遠藤 登、  
※藤井 誠一(北見工大)
- E322 食塩水溶液の分光透過率とポンド水深に対する透過率の減衰  
※馬場 弘(北見工大)、金山 公夫、遠藤 登、  
柳田 英二(ゼクセル)
- E323 等方性黒鉛材の高温輻射率  
※芳仲 敏成(宇宙開発事業団)、弓立 浩三
- E324 あらい表面をもつ薄板状粒子におけるふく射の散乱(その2)  
※牧野 俊郎(京大院)、蔵田 秀敏(京大院)

- [電場による熱・物質移動制御] 13:15~14:35  
座長 滝本 昭(金沢大院)、矢部 彰(機械研)
- E331 着霜現象に電場が及ぼす影響に関する実験的検討  
※楠本 寛(日立機械研)、静谷 光隆、伊藤 正昭
- E332 傾斜スプレッドによる液-液接触熱・物質移動操作の電気流体力学的促進 III. 平行平板電極間を通過する液滴への伝熱  
※望月 高昭(慶大院)、谷口 晶洋、星野 豊(慶大理工)、  
森 康彦、梶 信藤(慶大)
- E333 電場によって誘電性流体内に引き起こされる非線形EHD対流に関する研究  
※芳賀 正和(東洋大院)、前川 透(東洋大院)、  
棚沢 一郎(東大生研)
- E334 電場による微細伝熱面からの伝熱促進  
土方 邦夫(東工大)、※金子 博一、鈴木 祐二、  
小川 邦康(東大院)

- [回転場の伝熱] 14:45~16:25  
座長 望月 貞成(東京農工大)、植田 洋匡(九大応力研)
- E341 回転するUバンド内の流れと熱伝達に及ぼすコリオリ力の影響  
※田村 洋(航技研)、石垣 博
- E342 回転加速器上の流動に及ぼすコリオリ力の影響  
※李 京雨(NEC基礎研)、中村 新、日比谷 孟俊、柿本 浩一
- E343 回転するサーペンタイン流路の熱伝達  
浅古 豊(都立大院)、山田 義幸、※粟花 健一(都立大院)
- E344 タービンシュラウド面上の過渡時における熱・流動特性  
熊田 雅弥(岐大院)、※岩田 哲(岐大院)、  
小幡 正(石橋)

- E345 共軸の円板と円筒間の回転流における熱伝達  
萩野 文丸(京大院)、河合 穂、※ 齊藤 泰司

<<< F室 >>>

- [自然エネルギー利用] 9:30~10:50  
座長 吉田 篤正(岡山大)、赤井 誠(機械研)
- F311 地下帯水層蓄熱法の基礎研究  
(帯水層バイオフィルター作用の野外検証)  
※梅宮 弘道(山形大)、郡司 進(三井三池化工機)
- F312 地熱を利用した融雪路面での熱移動  
※白石 正夫(機械研)、山岸 泰文(竹村製作所)
- F313 太陽熱利用ヒートポンプシステムの研究  
(直膨式平板形集熱器を用いたシステムの性能)  
※伊藤 定祐(神工大)、三浦 直勝、王 錦麒
- F314 放射冷却を利用した冷却・冷房システムの研究  
※篠宮 純三(東北大院)、齋藤 武雄(東北大院)
- [都市・地球環境] 11:00~12:20  
座長 梅宮 弘道(山形大院)、白石 正夫(機械研)
- F321 都市域における建物外表面対流伝達率に関する風洞実験  
※成田 健一(広大院)、野々村 善民(フジタ)、  
小笠 顕(広大院)
- F322 二酸化炭素霜の成長における水蒸気の影響  
※青木 和夫(長岡技大)、服部 賢、古館 勤(長岡技大院)
- F323 太陽光に対する都市表面系の反射特性に関する研究  
吉田 篤正(岡山大)、沖中 宏幸、  
※中川 健司(岡山大)、鷺尾 誠一(岡山大)
- F324 都市温暖化と緑化による環境緩和効果に関する研究  
※星 秀俊(東北大院)、齋藤 武雄(東北大院)
- [ヒートパイプ] 13:15~14:35  
座長 深野 徹(九大)、橋詰 健一(東芝)
- F331 ヒートパイプの最大熱輸送量におよぼす蒸発部端熱流束の効果  
※吉岡 啓介(大分大院)
- F332 銅-水ヒートパイプの伝熱特性と地熱回収への応用(II)  
田中 修(九工大)、越野 英和、栗木 淳(九工大)、  
用松 義実、※宮崎 圭次
- F333 スーパーヒートパイプの基礎実験と応用(V)  
田中 修(九工大)、越野 英和、用松 義実(九工大)、  
中川 智文、※田中 弘之
- F334 SO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>/SO<sub>2</sub>反応系高温ケミカルヒートパイプの  
発熱反応部の熱交換特性  
※曾 維平(名大院)、松田 仁樹、架谷 昌信
- [熱サイフォン・熱輸送機器] 14:45~16:05  
座長 田中 修(九工大)、伊藤 定祐(神工大)
- F341 二相密閉型熱サイフォン内の熱伝達代替フロンを用いた実験  
※井村 英昭(熊大院)、法師 茂俊、倉橋 健一
- F342 二成分混合流体を用いた密閉型二相サーモサイフォンの  
作動限界に関する研究  
深野 徹(九大)、※角川 勝彦
- F343 振動制御型熱輸送管に関する研究(液体物性の影響)  
西尾 茂文(東大生研)、張 民(東大院)、  
※本間 満(日立機械研)
- F344 振動制御型熱輸送管に関する研究(最適条件)  
西尾 茂文(東大生研)、※張 民(東大院)

第1日 5月26日(水)

	A室	B室	C室
9:00			
10:00	9:30 噴流(I) A 111 \ A 114 10:50	9:30 二相流(流動特性) B 111 \ B 114 10:50	9:30 水平面からの自然対流 C 111 \ C 114 10:50
11:00	11:00 噴流(II) A 121 \ A 124 12:20	11:00 二相流(流動機構) B 121 \ B 124 12:20	[ラポータ方式セッション] 11:00 対流伝熱の数値計算 (自然対流) C 121 \ C 125 12:25
13:00	[ラポータ方式セッション] 13:15 乱流伝熱の素過程 (構造と輸送機構) A 131 \ A 135 14:40 ----- 14:50 乱流伝熱の素過程 (シミュレーションとモデリング*) A 141 \ A 146 16:30 16:40		
14:00		13:15 二相流(沸騰) B 131 \ B 134 14:35 14:45	13:15 容器内の自然対流(I) C 131 \ C 135 14:55
15:00		14:45 二相流(可視化計測) B 141 \ B 144 16:05 16:15	15:05 容器内の自然対流(II) C 141 \ C 145 16:45
16:00		16:15 充填層・流動層 B 151 \ B 153 17:15 17:25	16:55 物体まわりの自然対流(I) C 151 \ C 154 18:15 18:25
17:00	16:40 対流伝熱の数値計算 (強制対流) A 151 \ A 158 19:00	17:25 物質改質プロセス B 161 \ B 163 18:25	18:25 物体まわりの自然対流(II) C 161 \ C 163 19:25
18:00			
19:00			
20:00			

第1日 5月26日(水)

	D室	E室	F室
9:00			
10:00	9:50 計測技術 D 111 \ D 113 10:50	9:50 凝縮のメカニズム(I) E 111 \ E 113 10:50	9:30 蓄冷・蓄熱(I) F 111 \ F 114 10:50
11:00	11:00 3次元イメージング D 121 \ D 124 12:20	11:00 凝縮のメカニズム(II) E 121 \ E 124 12:20	11:00 蓄冷・蓄熱(II) F 121 \ F 124 12:20
13:00			
14:00	13:15 ふく射伝熱(I) D 131 \ D 135 14:55	13:15 凝縮のメカニズム(III) E 131 \ E 135 14:55	13:15 蓄冷・蓄熱(III) F 131 \ F 134 14:35
15:00	15:05 ふく射伝熱(II) D 141 \ D 145 16:45	15:05 凝縮伝熱(I) E 141 \ E 144 16:25	14:45 蓄冷・蓄熱(IV) F 141 \ F 144 16:05
16:00			
17:00	16:55 ミストの流動・伝熱 D 151 \ D 153 17:55	16:35 凝縮伝熱(II) E 151 \ E 155 18:15	16:15 蓄冷・蓄熱(V) F 151 \ F 154 17:35
18:00	18:05 蒸発 D 161 \ D 164 19:25		17:45 蓄冷・蓄熱(IV) F 161 \ F 164 19:05
19:00			
20:00			

第2日 5月27日(木)

	A室	B室	C室
9:00			
10:00	9:30 プール・噴流沸騰系の 限界熱流束 A 211 \ A 215	9:30 複合対流(I) B 211 \ B 214	9:30 混相流伝熱 C 211 \ C 214
11:00	11:10 11:20 冷媒混合液の沸騰 A 221 \ A 223 12:20	10:50 11:00 複合対流(II) B 221 \ B 224 12:20	10:50 11:00 限定室内内の自然対流 C 221 \ C 224 12:20
13:00	13:20 総会		
14:00	14:20 [ラポータ方式セッション] 14:30		
15:00	遷移沸騰のメカニズムと モデル A 231 \ A 238	14:30 管内乱流 B 231 \ B 235	14:30 多孔質層内の伝熱(I) C 231 \ C 235
16:00	16:40 16:50 管内沸騰流の限界熱流束 A 241 \ A 244 18:10	16:10 16:20 層流伝熱 B 241 \ B 244 17:40	16:10 16:20 多孔質層内の伝熱(II) C 241 \ C 245 18:00
17:00			
18:00	18:30 懇親会 20:30		

第2日 5月27日(木)

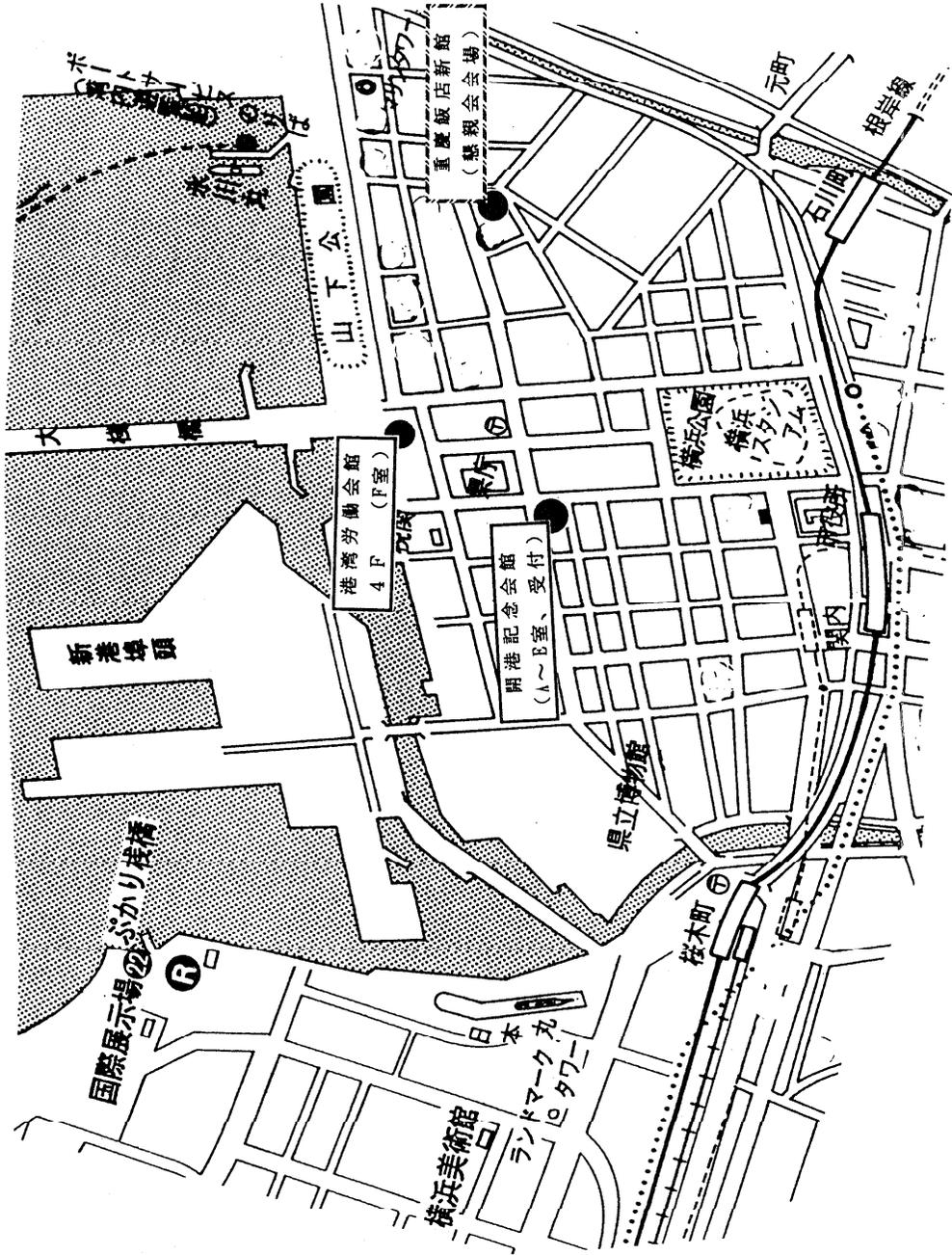
	D室	E室	F室
9:00			
10:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     9:30                      自由表面流と熱物質移動                      D 211                      \                      D 215                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     9:30                      熱物性(I)                      E 211                      \                      E 214                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     9:30                      電子機器の伝熱(I)                      F 211                      \                      F 214                 </div>
11:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     11:10                      11:20                      ヒートポンプ(I)                      D 221                      \                      D 223                      12:20                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     10:50                      11:00                      熱物性(II)                      E 221                      \                      E 224                      12:20                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     10:50                      11:00                      電子機器の伝熱(II)                      F 221                      \                      F 224                      12:20                 </div>
13:00			
14:00			
15:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     14:30                      ヒートポンプ(II)                      D 231                      \                      D 233                      15:30                      15:40                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     14:30                      分子動力学・熱物性(I)                      E 231                      \                      E 235                      16:10                      16:20                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     14:30                      生産・加工プロセス(I)                      F 231                      \                      F 234                      15:50                      16:00                 </div>
16:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     高性能熱交換器                      D 241                      \                      D 244                      17:00                      17:10                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     分子動力学・熱物性(II)                      E 241                      \                      E 245                      18:00                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     生産・加工プロセス(II)                      F 241                      \                      F 244                      17:20                 </div>
17:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     冷凍・空調機器                      D 251                      \                      D 253                      18:10                 </div>		
18:00			
	<div style="border: 1px solid black; padding: 10px;">                     18:30                      懇親会                      20:30                 </div>		

第3日 5月28日(金)

	A室	B室	C室
9:00			
10:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     9:30                      対流伝熱の促進(I)                      A 311                      \                      A 314                      10:50                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     9:30                      限定空間・微小伝熱面上                      の沸騰                      B 311                      \                      B 314                      10:50                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     9:30                      融解・凝固                      C 311                      \                      C 314                      10:50                 </div>
11:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     11:00                      対流伝熱の促進(II)                      A 321                      \                      A 324                      12:20                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     11:00                      膜沸騰・蒸気爆発                      B 321                      \                      B 324                      12:20                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     11:00                      熱システム・過渡特性                      C 321                      \                      C 324                      12:20                 </div>
13:00			
14:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     13:15                      対流伝熱の促進(III)                      A 331                      \                      A 334                      14:35                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     13:15                      特殊条件下の沸騰                      B 331                      \                      B 334                      14:35                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     13:15                      生体・食品の伝熱(I)                      C 331                      \                      C 334                      14:35                 </div>
15:00	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     14:45                      剥離流の伝熱                      A 341                      \                      A 344                      16:05                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     14:45                      沸騰における流体挙動                      B 341                      \                      B 344                      16:05                 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     14:45                      生体・食品の伝熱(II)                      C 341                      \                      C 345                      16:25                 </div>
16:00			
17:00			

第3日 5月28日(金)			
	D室	E室	F室
9:00			
10:00	9:30 燃烧(I) D 311 } D 314 10:50	9:30 分子動力学 E 311 } E 314 10:50	9:30 自然エネルギー利用 F 311 } F 314 10:50
11:00	11:00 燃烧(II) D 321 } D 324 12:20	11:00 ふく射物性 E 321 } E 324 12:20	11:00 都市・地球環境 F 321 } F 324 12:20
13:00			
14:00	13:15 燃烧(III) D 331 } D 334 14:35	13:15 電場による熱・物質 移動制御 E 331 } E 334 14:35	13:15 ヒートパイプ F 331 } F 334 14:35
15:00	14:45 宇宙工学の伝熱 D 341 } D 344 16:05	14:45 回転場の伝熱 E 341 } E 345 16:25	14:45 熱サイフォン等熱輸送機器 F 341 } F 344 16:05
16:00			
17:00			

# 第30回日本伝熱シンポジウム会場



< 東北研究グループ企画 >

## 講演会のご案内

主催 日本伝熱学会・東北研究グループ

東北グループの企画で講演会を下記のとおり開催致します。多数ご参加下さいますようお願い申し上げます。

### 記

月 日 : 平成5年5月22日(土)

場 所 : 東北大学 流体科学研究所

参加費 : 会員5000円、学生2000円、非会員10000円  
(懇親会費を含む。)

日 程 : ○受付 (12:00より)

○講演会 (13:00~17:20)

特別講演 エネルギー貯蔵と利用技術 梅宮 弘道 (山形大)

(I) 相変化を伴う伝熱の進展

相変化問題の研究とその応用 廣瀬 宏一 (岩手大)

金型内樹脂流動と伝熱 横山 考男 (山形大)

(II) コンピュータ伝熱の進展

石炭乾留時におけるコークス塊内熱応力解析

青木 秀之 (東北大)

乱流モデルの最近の進展

井小萩利明 (東北大)

○懇親会 (18:00~20:00)

申し込み方法: 参加希望者は5月14日(金)までに 岩手大学 泉あてFAXにてお申込み下さい。

[申込先] FAX 0196-52-7144

岩手大学 工学部 応用分子化学科 泉正明

[問合せ] TEL 022-222-1800 内線4668 (戸田)

内線4669 (橋爪)

TEL 0196-23-5171 内線2853 (泉)

## 北陸信越グループ講演・見学会の開催案内

日本伝熱学会北陸・信越グループの春季伝熱セミナー(講演会と見学会)を下記の通り開催致します。ご多忙中のことと存じますが、多数ご参加下さいますようお願い申し上げます。

### 記

- 日時 : 平成5年5月14日(金)～15日(土)  
場所 : YKK吉田工業(株) 黒部事業所  
富山県黒部市吉田200 (TEL 0765-57-1111)  
政府管掌健康保険保養所ホールサムインうなづき  
富山県下新川郡宇奈月町五千僧 (TEL 0765-62-1359)
- 内容 : ●見学会及び特別講演会 [5/14 (12:00～16:30); YKK吉田工業(株)]  
12:00～13:00 昼食(当方で用意致します)  
13:00～15:30 会社案内及び工場見学  
15:30～16:30 特別講演会  
講師 YKK研究開発本部 永安 孝志氏  
演題 「水平連続鑄造の熱応力解析」
- 懇親会 [5/14 (18:00～20:30); ホールサムインうなづき]  
●講演会 [5/15 (9:00～11:00); ホールサムイン会議室]  
(1) 粒子層内の不飽和水分の凍結  
青木 和夫, 赤堀 匡俊, ※谷 壮, 服部 賢(長岡技科大)  
(2) 円柱への二次元衝突噴流に関する研究  
(第3報, 円柱熱伝達に及ぼす近接平板対頂角の影響)  
※羽田 喜昭, 倉澤 英夫(長野高専), 土屋 良明(信州大工),  
鈴木健二郎(京大)  
(3) 非定常加熱による熱物性値の簡易測定法  
(表面温度測定法の検討)  
※姫野 修廣, 日向 滋(信州大織), 梁取 美智雄(日立)  
(4) 射出成形機加熱筒内の温度測定  
(成形過程中的のスクリュウ表面温度の変動と分布)  
木村 照夫, 竹内 正紀, ※橋本 憲(福井大)  
(5) 噴霧液滴による高熱流束除去  
※清水 幸進, 滝本 昭, 林 勇二郎(金沢大)  
(6) 融雪抑制用断熱泡の諸性質と融雪量の計算  
※藤田 賢寿, 東 信彦, 梅村 晃由(長岡技科大)  
(7) 非軸対称加熱円管内乱流熱伝達の解析  
※塚越 慶和, 前川 博, 小林 睦夫(新潟大)

参加費 : 一般 : 10,000円/学生 : 7,000円 (但し宿泊者のみ)

申込方法 : 準備の都合上, 参加ご希望の方は4月30日(金)までに, 下記連絡先宛へ葉書, 電話またはFAXにてご連絡下さいますようお願い致します。  
なお, 詳細等につきましては参加の方に改めてご案内申し上げます。

連絡先 〒030 富山市五福3100 富山大学工学部機械システム工学科 竹越 栄俊  
TEL 0764-41-1271 内線2800(竹越), 2801(平澤), 2802(小坂, 西村)  
FAX 0764-41-8432 (工学部共通)

第10回混相流レクチャーシリーズ  
「機能性混相流体」

近年、工業の様々な分野でインテリジェントマテリアル（知能化材料）の研究・開発が活発に進められています。この新材料は、材料自身がSensing, Processing, Actingというような一連のシステム機能を発揮する画期的なものですが、流体材料分野においてもレオロジー流体のようにすでに実用に供されているものも少なくありません。こうした用途に合った高度な機能を流体材料に付与する「機能化」は、各々異なった機能を持つ数種類の単一流体を様々に組み合わせる「複合化」、「混相化」によって達成される場合がほとんどですが、さらに複合素材としての混相流体を用いて、流体をさらに「知能化」、「情報化」することができれば、従来の機能性流体には見られない新しい概念に基づく、より一層高度な能動的、知的機能を有する流体素材の実現も可能になると考えられます。以上の観点から、今回の混相流レクチャーシリーズは機能性混相流体をテーマとして企画しました。様々な機能性流体の研究・開発の動向、流体の「知能化」、「情報化」の考え方を混相流分野に導入するために必要な概念、手法等について、第一線でご活躍中の講師の方々に、平易に解説していただく予定です。本分野に関心のある技術者・研究者全ての方々に有用な知識と情報を提供でき、将来の開発基盤づくりに貢献できるものと考えています。多数の方々の参加をお待ちしています。

主 催： 日本混相流学会  
協 賛： エネルギー・資源学会、応用物理学会、化学工学会、可視化情報学会、  
(予 定) 空気調和・衛生工学会、資源・素材学会、スラリ輸送研究会、土木学会、  
日本エアロゾル学会、日本機械学会、日本空気清浄協会、日本建築学会、  
日本原子力学会、日本航空宇宙学会、日本造船学会、日本鉄鋼協会、日  
本伝熱学会、日本船用機関、日本ボイラ協会、日本流体力学会、日本冷  
凍協会、粉体工学会  
日 時： 平成5年6月3日（木）10：00～17：00

演題と講師：

10：00～10：45 「混相流体の機能化・知能化」

芹澤昭示（京都大学工学部原子核工学教室）

流体を混相流化することによって、流体自身に高度な「能動的機能」や「知能」を与えることができる。このように、今や流体の概念が大きく変化しつつあり、それに関連した科学・工学の新たな展開が要請される。本講演ではこうした混相流体による「機能化」、「知能化」の一般的概念と将来の展望について述べる。

10:50~11:50 「エレクトロレオロジー流体」

小山清人(山形大学工学部物質工学科)

エレクトロレオロジー(ER)流体は印刷、マイクロマシン、自動車など多くの分野での応用の可能性があり、最近特に研究が活発になっている。本講演ではER効果の発現機構、ER材料、ER特性を理解するとともに、応用研究の例を紹介する。

13:00~14:00 「磁性流体」

神山新一(東北大学流体科学研究所)

磁場により流動特性を制御することが可能な流体として開発された磁性流体の基本特性に及ぼす磁場の影響を微粒子のミクロな振舞いと関連で説明する。ついで、最近の磁性流体の応用面の開発研究の動向について述べる。

14:05~15:05 「医薬用インアリジエントゲル -刺激応答性ハイドロゲルとその薬物放出をON-OFFするスイッチ機能-」

岡野光夫(東京女子医科大学医用工学研究施設)

外的環境変化に応答して構造を変化させる高分子ゲルは刺激応答材料としてライフサイエンス分野で新しい応用が期待されている。本講演は熱あるいはブドウ糖濃度の変化に応答して薬物放出・制御するハイドロゲルについて紹介する。

15:10~16:10 「機能性ゲル流体 -生体・食品高分子の混合系のゲル・ゾル転移-」

西成勝好(大阪市立大学生活科学部食品栄養科学科)

高分子系のゲル・ゾル転移について述べ、特に混合系(微生物多糖の一種ザンサンとコンニャク・グルコマンナン、メチルセルロースとゼラチン)の場合について概説する。また、ゾルとゲルの流動の計測法も述べる。

16:15~17:00 総合討論

司会と話題提供; 大場謙吉(関西大学機械システム工学科)

上記の講演で紹介されなかった機能性流体、例えば液晶分散流体、人工血液、チクソトロピー流体等の研究動向について簡潔に紹介すると共に、上記5人の講師の方々に加わって頂き、参加者との質疑応答も含めて、総合討論を行なう。

会 場: 大阪市立大学文化交流センター(大阪駅前第3ビル16階)  
(〒530 大阪市北区梅田1-1-3-1700 Tel.06-344-5425)

参 加 費: 会 員(協賛学協会会員を含む) 10,000円  
会 員 外 20,000円  
学 生 2,500円

申 込 方 法 : はがきまたは F A X にて「第10回混相流講習会申込み」と題記し、(1)氏名、加盟学協会名、(2)勤務先・所属部課名、(3)連絡先、を明記し、下記宛お申込み下さい。参加費は下記口座にお振込み下さい。

申 込 先 : 〒659 兵庫県芦屋市公光町9-7-202 (株)学術出版印刷内  
日本混相流学会 企画運営委員会  
TEL.(0797)38-3390 FAX.(0797)38-3351

申 込 締 切 : 5月31日(月)

参加費振込先 : 大和銀行大穴支店 普通預金口座 5388882  
「第10回混相流レクチャーシリーズ」  
または  
郵便振替口座 大阪6-326236  
「混相流学会企画運営委員会」

問 合 せ 先 : 〒564 吹田市山手町3-3-35  
関西大学工学部機械システム工学科 大場謙吉  
T E L (06)388-1121 E x . 5793 F A X (06)388-8785または330-3770

## 第25回乱流シンポジウム論文募集

下記のとおり第25回乱流シンポジウムを開催します。発表内容は広く乱流に関する理論、実験および数値解析等です。多数のご参加をお待ちしております。

### 記

1. 主催：日本流体力学会
2. 協賛（依頼中）：応用物理学会、化学工学協会、可視化情報学会、ターボ機械学会、東海流体熱工学会、土木学会、西日本乱流研究会、日本海洋学会、日本ガスタービン学会、日本風工学会、日本機械学会、日本気象学会、日本建築学会、日本原子力学会、日本航空宇宙学会、日本混相流学会、日本数値流体力学会、日本造船学会、日本伝熱学会、日本燃焼学会、日本農業気象学会、日本バイオレオロジー学会、日本物理学会  
(五十音順)
3. 開催日：1993年7月27日(火)、28日(水)、29日(木)
4. 会場：東北大学工学部青葉記念会館  
〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉 TEL 022-222-1800(内線 5138)
5. 発表形式：口頭発表によるセッション(OS)に加えて、ビジュアル・セッション(VS：ポスター、ビデオ、パソコン等)を設けます。
6. 申込方法：所定の申込票(はがき)と論文要旨用原稿用紙を用いて下さい。原稿はそのまま縮小してB5判の「論文要旨集」を作ります。発表責任者(登壇者)は日本流体力学会会員であることを要します。詳細は下記にお問い合わせ下さい。
7. 申込締切：1993年5月29日(土)必着
8. 参加登録費：シンポジウムに参加される方は当日会場で参加登録費：会員(協賛団体会員を含む) 3,000円、非会員 4,000円、学生会員2,000円、学生非会員 3,000円(論文要旨集の代金を含む)をお支払い下さい。
9. 講演論文集：上記「論文要旨集」とは別に、発表者にはシンポジウム終了後に発表した論文の原稿を提出していただき、「講演論文集」を発行します。予約ご希望の方は、予約代金 3,000円(送料を含む)を参加登録費とともにお支払い下さい。(郵送による予約も可)。予約受付の期限は7月29日です。それ以降は会員 3,500円、非会員 4,000円(送料別)となります。
10. 懇親会：7月28日(水)の講演会終了後、懇親会を予定しています。
11. 連絡先：講演申込および郵送による予約受付、申込用紙の請求、入会申込、その他本シンポジウムに関するお問い合わせは下記にお願いします。  
〒980 仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学流体科学研究所  
日本流体力学会乱流シンポジウム係  
TEL 022-214-6792(直話) または022-227-6200(内線 2639)  
FAX 022-214-6792

### 第25回乱流シンポジウム実行委員会

委員長 小濱泰昭(東北大流体研)

委員 井小萩利明(東北大流体研)、伊藤信毅(航技研)、井上 督(東北大流体研)  
笠木伸英(東大工)、小林陵二(東北大工)、澤本正樹(東北大工)、  
高木正平(航技研)、鳥羽良明(東北大理)、福西 祐(東北大工)、  
益田重明(慶応理工)、松信八十男(慶応物理)

# 第14回日本熱物性シンポジウム

第14回実行委員長 飯田嘉宏(横浜国立大学)

第14回日本熱物性シンポジウムを、下記の次第で開催致します。熱物性の研究者とユーザーの触れ合いの場ですから、ふるってご講演をお申込下さい。またお気軽にお誘い合わせの上ご参加下さいますようお願い致します。

通常のセッションのほかに、特別セッションとして (a)「分子シミュレーション」、(b)「新世代作動流体の熱物性」、(c)「熱物性値とその利用」、またワークショップとして「複合材料の熱物性値の評価」を企画しております。講演および参加申し込み要領は「熱物性」4月号に掲載されておりますが、講演申込書および郵便振替参加申込書をご希望の方は、FAX または葉書に①氏名(ふりがな)、②連絡先、③所属学協会名、④講演申込書および郵便振替用紙請求部数をご記入の上、下記宛先までお申し込み下さい。

## 記

開催期間：平成5年11月10日(水)～12日(金)

会場：横浜市 技能文化会館 (〒231 横浜市中区万代町 2-4-7)

J R関内駅(根岸線)から徒歩3分；地下鉄 伊勢佐木長者町駅から徒歩2分

講演申込締切：平成5年6月15日(火)

論文原稿締切：平成5年8月31日(火)

予約参加申込締切：平成5年9月30日(木)

参加費：日本熱物性学会会員、共催・協賛学協会会員 5,000円、学生 2,500円、  
非会員 6,000円(予約外は いずれも1000円加算)

講演論文集代：日本熱物性学会会員 3,000円(当日以降 4,000円)  
共催・協賛学協会会員および非会員 7,000円

懇親会：日時 11月11日(木)、会場 ホテル横浜ガーデン  
予約申込 一般 7,000円、学生 5,000円(当日 1000円加算)

予約申込要領：郵便振替申込書の通信欄に、①氏名(ふりがな)、②勤務先または学校名、  
③所属学協会名、④会員資格、⑤講演論文集予約部数、⑥懇親会出席をご記入の上、当該費用をご送金下さい。

問い合わせ、講演申込および参加申込先：

郵便振替口座：横浜 4-43684  
第14回日本熱物性シンポジウム実行委員会  
〒243-02 厚木市下荻野1030  
神奈川工科大学工学部機械工学科小口研究室気付  
Tel. (0462)41-1211 内線 3327 : FAX. (0462)42-8735

# L D A 国 際 フ ォ ー ラ ム

## Optical Methods for the Measurement of Velocity, Sizes, Concentrations and Flux of Particles or Droplets

主催 LDA国際フォーラム組織委員会, LDA国際フォーラム実行委員会, 流体フォーラム  
 共催、協賛 日本機械学会、日本伝熱学会、自動車技術会、日本ガスタービン学会、日本混相流学会、ターボ機械協会、可視化情報学会、日本流体力学会、計測自動制御学会

開催日 1993年 8月20日(金) 21日(土) 9:30 ~ 17:15  
 会場 東京、建築会館ホール(田町) 〒108 東京都港区芝5-26-20 TEL (03) 3456-2051 (代)  
 (JR 田町駅、地下鉄 三田駅下車徒歩3分)  
 参加費 一般 39,000 円、学生 10,000 円 (テキスト代含む)

詳細問い合わせ、申込先、申込方法

〒108 東京都港区芝浦3-9-14 LDA国際フォーラム事務局 芝浦工業大学機械工学科流体力学研究室内 TEL (03)5476-2409, FAX (03)5476-3077 銀行振込先 三菱銀行 田町東口支店 (店番049) 普通預金口座 0282610 口座名称 「LDA国際フォーラム」	申込方法 B5版用紙に「LDA国際フォーラム」申込と題記し、(1)住所 (2)勤務先の名称 (3)送付先 (4)氏名(ふりがな)を記入し、銀行振込み予定日を明記の上、郵便又はFAXなどでお送りください  申込締め切り 6月末日
--	---

### 趣旨

光を利用した計測技術は、安定した性能のレーザー光線の入手が比較的容易になったことにより、飛躍的に進歩致しました。流速計への応用は1964年に端を発し、70年代にはほぼ現在に近い形となりました。このレーザードップラー流速計(LDA)は従来にない多くの特長をもっていますので、ピトー管や熱線流速計では測定不可能であった分野にも盛んに利用されるようになりました。さらに、最近の流速計測におけるLDAの応用は目覚ましい発展をとりつつあり、その計測分野も内燃機関やタービンの高温の流れはもちろん、二相流、建物や構造物付近流、純流体素子流、高温融体流、原子炉内流、非ニュートン流体の流れなど多岐にわたっています。

そこで今回、流体工学におけるLDA計測の分野に於て世界的に著名な先生方を講師にお迎えして、LDAの原理から種々の応用までの広範囲にわたって最近の世界的動向、および国内の現状について概説していただける機会を持つことは大変有意義であると考えまして本フォーラムを開催する運びとなりました。

講師との質疑および専門分野ごとの個人的な対話などにも十分時間を配慮してございますのでこの分野の動向に興味をお持ちの方々が多数ご参加くださるようお待ちしております。

### 題目、講師

	日時	題目	講師
8月20日(金)	9:30 - 11:00	Introduction of activity for laser measurement	Prof. M. Maeda
	11:00 - 12:00	Principles and practice of laser velocimetry	Prof. J. H. Whitelaw
	13:00 - 14:00	Principles and practice of phase-Doppler velocimetry	Prof. F. Durst
	14:00 - 15:30	Principles and practice of particle-image velocimetry	Prof. R. J. Adrian
	15:45 - 17:15	2-D imaging of particles in spray and flame	Prof. T. Kamimoto
8月21日(土)	9:30 - 11:00	Application of particle-image velocimetry	Prof. R. J. Adrian
	11:00 - 12:00	Two-phase flows	Prof. F. Durst
	13:00 - 14:00	Separated flows	Prof. F. Durst
	14:00 - 15:00	Gas-turbine combustors	Prof. J. H. Whitelaw
	15:15 - 16:15	Internal-combustion engines	Prof. J. H. Whitelaw
	16:15 - 17:15	Discussion	

## Second Announcement and Call for Papers

# 22<sup>ND</sup> INTERNATIONAL THERMAL CONDUCTIVITY CONFERENCE

to be hosted by  
Department of Mechanical and Aerospace Engineering  
Arizona State University  
Tempe, Arizona

November 7 -10, 1993

Papers on all aspects of the theory or measurement of thermal conductivity and related thermophysical properties and thermal phenomena are being sought for the 22nd International Thermal Conductivity Conference. Tentatively scheduled session topics include:

**Micro- and Nano-Structures**  
**Composite Materials**  
**Thermal Insulations**

**Low Temperature Materials**  
**High Temperature Materials**  
**Polymers**

**Fluids**  
**Interfaces**  
**Experimental Techniques**

Additional sessions will be planned to accommodate the papers received from this announcement. Potential authors and conference attendees are encouraged to complete and return the attached information form as soon as possible.

**PLEASE NOTE THE FOLLOWING SCHEDULE. PUBLICATION IN THE PROCEEDINGS OF THE 22<sup>ND</sup> ITCC WILL BE LIMITED TO THOSE AUTHORS WHO HAVE SUBMITTED THEIR MANUSCRIPTS FOR REVIEW AT OR BEFORE THE MEETING.**

### SCHEDULE

The schedule for submission of materials for potential authors is as follows:

Title due:	March 1, 1993
One-page abstract due:	June 1, 1993
Manuscript due:	At or before the conference November 7-10 1993

Sahuaro Hall, Residence Life  
Arizona State University  
Tempe, AZ, 85287, USA  
Telephone: (602) 965-1531  
Telefax: (602) 965-1534  
Single/Double: \$12.60/\$16.00

### LOCATION

The 22nd ITCC will be held November 7-10, 1993 at Arizona State University, which is located in Tempe, part of the metropolitan area of Phoenix.

The university is approximately 5 miles (8 km) from Phoenix Sky Harbor International Airport, served with nonstop flights from all major U.S. cities by major carriers including American, America West, Continental, Delta, Northwest, TWA, United and U.S. Air. Courtesy transportation to and from the airport is provided by nearby hotels. Taxi service is also available at a very reasonable rate.

### LANGUAGE

The official language of the Conference will be English.

### LODGING

Blocks of rooms have been reserved in the following hotels and an ASU dormitory. The hotels provide courtesy transportation to and from the Phoenix airport, and are within a 10 minute walk from the meeting location. Please make reservations early to secure guaranteed rates from the hotels.

Mission Palms Hotel  
60 East 5th St  
Tempe, AZ 85281, USA  
Telephone: (602) 894-1400  
Telefax: (602) 968-7677  
Single/Double: \$80.00

Holiday Inn  
913 E. Apache Blvd  
Tempe, AZ 85281, USA  
Telephone: (602) 968-3451  
Telefax: (602) 968-6262  
Single/Double: \$69.00

### WEATHER

The weather in Phoenix during November is very pleasant. Temperatures typically range from 50°F - 80°F (10°C - 27°C).

### ASSOCIATED ACTIVITIES

The geographical diversity and natural beauty in Arizona is unparalleled. Unique and acclaimed points of interest within a few hours drive of ASU include the Grand Canyon, Sedona, the Painted Desert, Canyon de Chelly, the Saguaro National Monument and Tombstone. A 2-day sightseeing trip to Sedona and the Grand Canyon will be organized and will take place at the end of the conference. Please indicate your interest in joining the sightseeing trip in the Information Form.

### GUEST PROGRAM

The Phoenix/Tempe area provides many opportunities for sightseeing and shopping. Attractions include the Heard Museum, the Desert Botanical Gardens, and the Scottsdale area for shopping. A program for guests will be available.

### REGISTRATION FEE

The registration fee before September 1, 1993 will be approximately \$200. This fee will include the cost of the opening reception, lunches, coffee breaks, the conference banquet and a copy of the conference proceedings. Reduced fees for students will be available.

**Conference Chairman:**

T.W. Tong  
Arizona State University  
Mechanical and Aerospace Engineering  
Tempe, Arizona 85287-6106, USA  
telephone: (602) 965-1483  
telefax: (602) 965-1384  
e-mail: TONG@ASUVAX.EAS.ASU.EDU

**Conference Co-Chairman:**

A. Majumdar (USA)

**Scientific Committee:**

- R.U. Açton (USA)
- T. Ashworth (USA)
- M. Bomberg (Canada)
- C.J. Cremers (USA)
- G.R. Cunnington (USA)
- A. Degiovanni (France)
- R. Echigo (Japan)
- J. Fricke (Germany)
- R.S. Graves (USA)
- K. Hijikata (Japan)
- S. Klarsfeld (France)
- P.G. Klemens (USA)
- N.W.M. Ko (Hong Kong)
- M. Lamvik (Norway)
- G. Latini (Italy)
- J.D. Lin (Taiwan)
- K.D. Maglic (Yugoslavia)
- L. Marcussen (Denmark)
- C.A. Nieto de Castro (Portugal)
- D.L. McElroy (USA)
- N.S. Saxena (India)
- M.H. Schankula (Canada)
- H.E. Schmidt (Germany)
- E.T. Swartz (USA)
- P.S. Swathi (India)
- R. Taylor (UK)
- R.E. Taylor (USA)
- J.E.S. Venart (Canada)
- W.A. Wakeham (UK)
- B.X. Wang (China)
- C.Y. Wu (Taiwan)
- S.M. Yang (China)
- D.W. Yarbrough (USA)
- M.M. Yovanovich (Canada)

MAIL TO: Prof. Timothy W. Tong  
Dep. of Mechanical & Aerospace Engrg  
Arizona State University  
Tempe, Arizona 85287-6106

I plan to attend the 22nd ITCC.

I plan to present a paper entitled: \_\_\_\_\_

I am interested in joining the  
sightseeing trip to Sedona and the  
Grand Canyon.

**INFORMATION FORM**

November 7-10, 1993  
Arizona State University  
Tempe, Arizona

Name \_\_\_\_\_

Title \_\_\_\_\_

Organization \_\_\_\_\_

Address \_\_\_\_\_

City \_\_\_\_\_ State \_\_\_\_\_ Zip \_\_\_\_\_

Telephone \_\_\_\_\_ Telex or Telefax \_\_\_\_\_

社団法人日本工学会主催

## 第20回 国際会議のための 準備セミナー

—— 英語によるプレゼンテーションの実際 ——

国際社会の中で、日本人として講演、研究発表、新規プロジェクトの説明等、英語で発表する機会が増えてきております。

このセミナーでは、外国人を前にすぐれたプレゼンテーションを行うための効果的な説得の技術と方法を講義と実際のプレゼンテーションの体験を通して習得します。

1. 対象者
  - ・国際会議で発表する予定のある方
  - ・英語によるプレゼンテーション能力の向上を図りたい方
2. 日 時：1993年5月22日（土）9：00～20：00  
5月23日（日）9：00～17：00  
（集合：2月21日<金>18：00現地）
3. 講 師：・社団法人日本工学会 理事  
・㈱ヒューテック代表取締役 肥田良夫  
・その他（国際会議参加経験者からの話題）
4. 会 場：海外職業訓練センター研修施設  
千葉市美浜区ひび野1-1 Tel:043-276-0211
5. 交 通：JR京葉線 海浜幕張駅 徒歩5分
6. 参加費：80,000円（資料代、懇談会費等を含む）
7. 宿泊費：18,000円（2泊、食事付）
8. 定 員：18名
9. カリキュラム
  - （1）国際会議の概要 1）参加の目的 2）参加者の心掛け 3）日本人に多い問題点の整理
  - （2）国際会議参加の準備 1）オーラルペーパーの書き方 2）時間配分の心得 3）AVの用意と利用法
  - （3）プレゼンテーションの実際 1）話しかた（視線・発声・姿勢）  
2）マイク・AVの使い方 3）質疑応答の処理 4）表現
  - （4）プレゼンテーションの評価と練習法 1）自己評価 2）他者評価  
3）効果的練習法
10. 参加申込み方法
  - （1）参加申込みを希望される方は下記に詳細パンフレットをご請求下さい。
  - （2）申込締切は平成5年5月7日（金）日本工学会必着です。
11. パンフレット請求先：  
〒107 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル  
社団法人 日本工学会  
電話：03-3475-4621・5618 FAX：03-3403-1738



# 事務局からの連絡

## 1. 学会案内と入会手続きについて

### 【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

### 【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。（但し、「伝熱研究」の巻と表紙の色は1月号から10月号までの一年間同じです）

### 【会員の種別と会費】

会員種別	資 格	会 費（年 額）
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

### 【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

1) 「伝熱研究, THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の郵送が受けられる。

(本年度発行予定：本号, 7月号, 10月号, 1月号)

- ・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
- ・賛助会員に口数分の冊数送付

2) 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」の無料郵送が受けられる。

- ・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数送付  
(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

## 【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局（本郷）宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局（本郷）宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

### （注 意）

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJIS1-Dのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名（必要に応じてフリガナを付す）を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の手続きができず、会費未納のままとなります。
- ・学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明（署名・捺印）が必要です。

## 2. 会員の方々へ

### 【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A（3口）、B（2口）、C（1口）と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いいたします

### 【会費納入について】

会費納入状況は「伝熱研究」郵送ラベルの累積請求額でご確認下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金の手続きを行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

### 【変更届について】

#### （勤務先、住所、通信先等の変更）

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くこととなります。

#### （賛助会員の代表者変更）

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

#### （学生会員から正会員への変更）

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員（正会員）への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からもご指導をお願いします。

#### （変更届提出上の注意）

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず画面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします。

### 【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届（郵便振替用紙に記載可）を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消し、「退会処理通知」を送付します。

### 【第30回伝熱シンポジウム講演論文集について】

本年3月末日までに平成4年度までの会費を完納した会員に限り、伝熱シンポジウム準備委員会から講演論文集が事前送付されます。4月以降から伝熱シンポジウム開催日までに平成4年度会費を納めても論文集は事前送付されません。

#### （伝熱シンポジウム終了後の取扱い）

- ・住所変更等のため事前送付された講演論文集が未着の会員はご連絡下されば再配布します。
- ・論文集の申込みに対しては、準備委員会から残部が届き次第、1部8600円（送料込み）にて学会事務局が受け付けます。事前送付が受けられなかった会員で、伝熱シンポジウムの会期終了までに未納分（平成4、5年度分）を完納されない方も有料になります。

### 【第30回伝熱シンポジウムにおける事務局開設】

伝熱シンポジウム会場に事務局を開き、下記の優先順位で会員および新規入会者への窓口サービスを行います。開設時刻は会場に掲示されます。時間帯によっては相当の混雑が予想されますが、ご協力をお願いします。また、下記以外のご依頼には対応できないこともあります。ご了承下さるようお願いいたします。

#### ①未着の講演論文集（事前送付分）の受け取り

住所変更等のため事前送付された講演論文集が未着の会員に再配布します。本人であることを証明するものを提示してお受け取り下さい。

#### ②会費の納入

平成5年度分までの会費を納入できます。また、会費未納のため講演論文集の事前送付を受けなかった会員は、平成5年度分までの会費を納めれば講演論文集を受け取れます。

#### ③入会申し込み

新規入会申込用紙に会費を添えて入会を申し込むことができ、「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」1月号が受けられます。但し、残部が不足してお渡しできない場合にはご了承下さい。

#### ④変更届の提出

住所、勤務先等の変更届を提出できます。

### 【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、本号宛名ラベルの会費請求額をご確認の上、至急納入をお願いします。特に、平成2・3年度以降の会費未納の方には「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処置が理事会で協議されます。

### 3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

<b>事務局</b>
(業務内容)
i) 入会届、変更届、退会届の受付
ii) 会費納入の受付、会費徴収等
iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する対応、連絡等
iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、 新入会員への「伝熱研究・THERMAL SCIENCE AND ENGI- NEERING」発送、その他刊行物の発送
v) その他必要な業務
(所在地) 〒113 東京都文京区本郷5 25-18 日本伝熱学会 TEL, FAX: 03-5689-3401 (十日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時)

#### (注 意)

1. 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信覧やファックス等の書面にてお願いします。
2. 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。
3. 第30回日本伝熱シンポジウム関連の事務（発表・参加・論文集申込み、その他問い合わせ等）は扱っておりませんので、実行委員会に直接お願いします。

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 原子炉工学研究所 井上 晃 TEL: 03-3726-1111 (内線3077、3059) FAX: 03-3729-1875
---

日本伝熱学会 正会員・学生会員入会申込み・変更届用紙

- (右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書  
2. 変更届 (書面による届出のみ受付け)

0	申込年月日	H		年		月		日				
1	会員資格	正・学										
2	氏名											
3	ふりがな											
4	生年月日	M		T		S		年		月		日
5	* 勤務先・学校	名称										
6		〒	—									
7		所在地										
8		TEL										
9	学校	FAX										
10		共通・専用										
11	自宅	〒	—									
12		住所										
13		TEL										
14												
15	通信先**	勤務先・自宅										
16	学位											
17	最終出身校											
18	卒業年次	T		S		H		年				
19	専門分野											← (下記専門分野の番号)
20	学生会員の場合：指導教官名***											印
21												

(注 意)  
・楷書体で明瞭に記入  
・氏名にふりがなを付す  
・通信文は余白に記入  
・申込み時に郵便振替にて会費納入

専門分野

- 1: 自然対流 2: 強制対流 3: 熱伝導 4: 凝縮 5: 沸騰・蒸発 6: 混相流  
7: 物質移動 8: 反応・燃焼 9: 放射 10: 熱物性 11: 熱交換器 12: 流動層  
13: 蓄熱 14: 冷凍・空調 15: 内燃機関 16: ガスエンジン 17: 蒸気機関 18: 原子力  
19: 太陽熱 20: 環境 21: その他 ( )

例：電子機器の冷却、生体伝熱、分子動力学等

\*) 学生会員入会申込者は学校名、学部、学科、研究室名、学年 (M2, D3 など) を記す。

\*\*) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する。

\*\*\*) 学生会員入会申込者は、指導教官の署名・捺印を受ける。



### 複写をされる方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者から複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。

学協会著作権協議会内日本複写権センター支部  
〒107 東京都港区赤坂 9-6-42-704  
Phone 03-3475-4621/5618  
Fax 03-3403-1738

#### Notice about photocopying

In the U.S.A., authorization to photocopy items for internal or personal use, or the internal or personal use of specific clients, is granted by [copyright owner's name], provided that designated fees are paid directly to Copyright Clearance Center. For those organizations that have been granted a photocopy license by CCC a separate system of payment has been arranged.

Copyright Clearance Center 27 Congress St.  
Salem, MA 01970  
Phone (508)744-3350  
Fax (508)741-2318

**伝 熱 研 究**

ISSN 0910-7851

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol.32, No.125

1993年 4月発行

**THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING** ISSN 0918-9963

Vol. 1, No.2

April, 1993

発行所 **日 本 伝 熱 学 会**

〒113 東京都文京区本郷5-25-18

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 東京 6-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan

25-18, Hongo 5-chome, Bunkyo-ku,

Tokyo, Japan, Post No.113

Phone, Fax: +81-3-5689-3401

# 伝熱研究 Vol. 32, No. 125

日本伝熱学会30周年記念特集号 I

## 〈伝熱研究の進展 II〉

環境伝熱 都市の温暖化・大気汚染	齋藤武雄(東北大)
環境調和型エネルギーシステムの構築にむけて	柏木孝夫(東農工大)
大気境界層と大気拡散	植田洋匡(九大)
生体におけるエネルギー	谷下一夫(慶応大)
血液循環系における物質移動現象	佐藤正明・片岡剛之(東北大)
新素材と熱物性	長島 昭(慶応大)
原子力工学における伝熱研究の進展	戸田三朗(東北大)
宇宙における伝熱	森岡幹雄(IHI)
電子機器の熱設計と熱解析	石塚 勝(東芝)
電磁ノイズと伝熱	仁田周一(東農工大)
化学工業における伝熱	澤崎俊昭・中村和仁・小畑一義(日揮)
食品加工における伝熱	高井陸雄(水産大)
施設農業と伝熱	高倉 直(東大)
空調用アイスオンコイル型氷蓄槽のモデル化	相楽典泰(鹿島)
製鉄所における伝熱	坂本雄二郎(神戸製鋼)

## 〈片山功蔵先生を偲んで〉

片山功蔵先生を偲ぶ	齋藤彬夫(東工大)
片山功蔵先生の思い出	棚澤一郎(東大)
片山功蔵先生を偲んで	矢部 彰(機械技研)
片山功蔵先生を偲んで	石塚 勝(東芝)

## THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING Vol. 1, No. 2

1. Automatic Emissivity Compensation and Noise Reduction of  
Radiation Thermometry in Fabrication of LSI (in Japanese) ..... 1  
Watanabe T., Hirasawa S. and Uchino T.  
(*Radiation Thermometry, Emissivity, Noise, Semiconductor, Silicon*)
2. Formation of Prompt NO in Flat Flames of Methane ..... 7  
(in Japanese)  
Sano T.  
(*Methane Flame, Premixed Flame, Prompt NO Formation, Full Kinetics*)