

# 伝熱研究

1992  
January  
Vol. 31  
No. 120

Journal of Heat Transfer Society of Japan

## 〈特集：中堅・若手層はかく考える〉

特集にあたって .....	第30期編集委員会
伝熱の研究と研究者 .....	小竹 進
伝熱研究の将来を占う .....	高田 保之
企業の研究者から見た伝熱研究の将来 .....	古藤 悟
伝熱学会および伝熱シンポジウムについて .....	宮良 明男
子供のころの夢 .....	円山 重直
伝熱研究雑感 .....	宗像 鉄男
伝熱研究と学会 .....	多田 幸生
伝熱研究の繁栄に今、何をすべきか .....	森 幸治
境界領域からの発展 .....	箕浦 忠行
伝熱研究についての現在の興味 .....	長崎 孝夫
将来の伝熱研究についての雑感 .....	平井秀一郎
21世紀に向けて .....	松島 均
研究の方向転換 .....	丸山 茂夫
研究の体験—交流・出会い・運・喜び— .....	岡崎 健
電子機器の熱設計と今後の展望 .....	石塚 勝
熱流動数値解析の将来展望に関する私見 .....	富山 明男
数値シミュレーションと伝熱研究 .....	河崎 照文
10年間の乱流伝熱研究から .....	田川 正人
伝熱研究について思うこと .....	山田 雅彦
原子炉の高高温圧管路系機器の二相流特性に関する研究 .....	奈良林 直
乾燥と伝熱研究 .....	板谷 義紀
宇宙における熱流体問題—微小重力実験を中心として— .....	桑原 啓一

## 〈国際会議報告〉

日米伝熱セミナー：伝熱科学における コンピュータの役割—21世紀への展望— .....	中山 恒
--	------

## 日本伝熱学会第30期（平成3年度）役員

会 長		小 竹 進 (東 大)
副 会 長	(無任所) (事務担当)	架 谷 昌 信 (名 大) 井 上 晃 (東工大)
地方連絡幹事	北 海 道 東 北 関 東 東 海 北陸信越 関 西 中国四国 九 州	花 岡 裕 (室蘭工大) 三 浦 隆 利 (東 北 大) 森 康 彦 (慶 応 大) 長 野 靖 尚 (名 工 大) 滝 本 昭 (金 沢 大) 坂 口 忠 司 (神 戸 大) 菊 地 義 弘 (広 島 大) 本 田 博 司 (九 大)
幹 事 (23名)	早 坂 洋 史 (北 大) 黒 川 政 秋 (東 大) 横 山 孝 男 (山 形 大) 五十嵐 保 (防 衛 大) 吉 田 英 生 (東 工 大) 西 村 誠 (岐 阜 大) 青 木 和 夫 (長岡技科大) 萩 原 良 道 (京 大) 千 田 衛 (同志社大) 森 岡 斎 (徳 島 大) 池 崎 英 二 (新日鐵(株)) 森 英 夫 (九 大)	馬 場 弘 (北見工大) 円 山 重 直 (東 北 大) 西 尾 茂 文 (東 大) 野 路 伸 治 (荏原総研) 中 山 顕 (静 岡 大) 木 村 照 夫 (福 井 大) 坂 本 雄 二 郎 (神 戸 製 鋼 株) 平 田 雄 志 (阪 大) 森 幸 治 (阪 大) 稲 葉 英 男 (岡 山 大) 宮 良 明 男 (佐 賀 大)
監 査 (2名)	河 村 洋 (東 理 大)	二 階 勳 (鹿島建設(株))
「伝熱研究」編集委員長		藤 田 秀 臣 (名 大)
第29回日本伝熱シンポジウム準備委員長		高 城 敏 美 (阪 大)

## 伝 熱 研 究 目 次

### <特集：中堅・若手層はかく考える>

特集にあたって .....	第30期編集委員会.....	1
伝熱の研究と研究者 .....	小竹 進(東 大)...	2
伝熱研究の将来を占う .....	高田保之(九 大)...	4
企業の研究者から見た伝熱研究の将来 .....	古藤 悟(三菱電機中研)...	7
伝熱学会および伝熱シンポジウムについて .....	宮良明男(佐 賀 大)...	10
子供のころの夢 .....	円山重直(東北大流体研)...	14
伝熱研究雑感 .....	宗像鉄男(機械技研)...	17
伝熱研究と学会 .....	多田幸生(金 沢 大)...	20
伝熱研究の繁栄に今、何をすべきか .....	森 幸治(大 阪 大)...	24
境界領域からの発展 .....	箕浦忠行(神戸製鋼機械研)...	28
伝熱研究についての現在の興味 .....	長崎孝夫(東 工 大)...	32
将来の伝熱研究についての雑感 .....	平井秀一郎(大 阪 大)...	36
21世紀に向けて .....	松島 均(日立機械研)...	40
研究の方向転換 .....	丸山茂夫(東 大)...	43
研究の体験—交流・出会い・運・喜び— .....	岡崎 健(豊橋技科大)...	47
電子機器の熱設計と今後の展望 .....	石塚 勝(東芝総研)...	51
熱流動数値解析の将来展望に関する私見 .....	富山明男(神 戸 大)...	55
数値シミュレーションと伝熱研究 .....	河崎照文(日立エネ研)...	58
10年間の乱流伝熱研究から .....	田川正人(名 工 大)...	62
伝熱研究について思うこと .....	山田雅彦(北 大)...	66
原子炉の高温高压管路系機器の二相流特性に関する研究 .....	奈良林直(東芝原子炉研)...	70
乾燥と伝熱研究 .....	板谷義紀(名 大)...	76
宇宙における熱流体問題—微小重力実験を中心として— .....	桑原啓一(石川島播磨技研)...	80

### <国際会議報告>

日米伝熱セミナー：伝熱科学におけるコンピュータの役割—21世紀への展望— .....	中山 恒(東 工 大)...	84
---	----------------	----

## 〈地方研究グループ活動報告〉

北海道地方研究グループ主催

平成3年度第1回北海道伝熱セミナー報告 .....	花岡 裕(室蘭工大)...	89
東海地方研究グループ主催 長良川畔伝熱セミナー		
「企業における伝熱の最前線」を終えて .....	西村 誠(岐阜大)...	91
北陸信越地方研究グループ「講演会と見学会の報告」 .....	滝本 昭(金沢大)...	93
九州地方研究グループ第3回セミナー		
「伝熱奮戦の世界(伝熱研究珍プレイ好プレイ)」報告 .....	本田博司(九大)...	95

## 〈お知らせ〉

北陸信越伝熱セミナー(福井) .....		97
関西研究グループ講演会 .....		98
第29回日本伝熱シンポジウム参加案内 .....		99
第29回日本伝熱シンポジウム宿泊案内 .....		100
事務局からの連絡 事務局について .....		101
学会案内と入会手続きについて .....		101
会員の方々へ .....		103
日本伝熱学会新規入会申込み・変更届用紙		

# Journal of Heat Transfer Society of Japan

Vol.31, No.120, January, 1992

## CONTENTS

### <Special Issue: What Prospects Do the Young Engineers See in the Future of Heat Transfer Research?>

Preface to the Special Issue .....	Editorial Board.....	1
Heat Transfer Studies and the Researchers .....	Susumu Kotake (Univ. of Tokyo) ...	2
Future of the Heat Transfer Research .....	Yasuyuki Takata (Kyushu Univ.) .....	4
Prospect of Heat Transfer Research from the Standpoint of an Industrial Research Engineer .....	Satoru Kotoh (Central Research Lab., Mitsubishi Electric Corp.) .....	7
On the Heat Transfer Society of Japan and the National Heat Transfer Symposium .....	Akio Miyara (Saga Univ.) .....	10
When I Was a Child .....	Shigenao Maruyama (Tohoku Univ.) .....	14
Miscellaneous Impressions for Heat Transfer Research .....	Tetsuo Munakata (Mech. Eng. Lab., AIST) .....	17
Impression of the Heat Transfer Research and the Society .....	Yukio Tada (Kanazawa Univ.) .....	20
What Should We Do Now for the Prosperity of Research on Heat Transfer ? .....	Kouji Mori (Osaka Univ.) .....	24
Development from Overlapped Areas .....	Tadayuki Minoura (Mech. Eng. Res. Lab., Kobe Steel, Ltd.) .....	28
Present Interests in Heat Transfer Research .....	Takao Nagasaki (Tokyo Inst. of Tech.) .....	32
A View of Heat Transfer Studies in Future .....	Shuichiro Hirai (Osaka Univ.) .....	36
Toward the 21st Century .....	Hitoshi Matsushima (Mech. Eng. Res. Lab., Hitachi, Ltd.).....	40
Changing Research Project .....	Shigeo Maruyama (Univ. of Tokyo) .....	43
Various Experiences and Impressions in My Research Progress .....	Ken Okazaki (Toyohashi Univ. of Tech.) .....	47

Thermal Design of Electronic Equipment and the Look of the Future ..... Masaru Ishizuka (Toshiba R & D Center) .....	51
Personal Prospect on Computational Fluid Dynamics ..... Akio Tomiyama (Kobe Univ.) .....	55
Numerical Simulation and Heat Transfer ..... Terufumi Kawasaki (Energy Res. Lab., Hitachi, Ltd.) .....	58
My Last Ten Years Devoted to Studies on Turbulent Heat Transfer ..... Masato Tagawa (Nagoya Inst. of Tech.) .....	62
What I Think of Concerning Heat Transfer Research ..... Masahiko Yamada .....	66
Study on Two Phase Flow Characteristics for High Temperature and High-Pressure Components for Nuclear Power Plants ..... Tadashi Narabayashi (Nuclear Eng. Lab., Toshiba Corp.) .....	70
Drying and Heat Transfer Research ..... Yoshinori Itaya (Nagoya Univ.) .....	76
Microgravity Experiments on Heat Transfer and Fluid Physics ..... Keiichi Kuwahara (Res. Inst., Ishikawajima-Harima Heavy Ind. Co., Ltd.) ...	80

**<Report on the International Conference>**

Japan-U.S. Heat Transfer Seminar: Computers in Heat Transfer Science-Outlook for the Role of Computers in the 21st Century ..... Wataru Nakayama (Tokyo Inst. of Tech.) .....	84
---	----

**<Report on the Local Group Activities>** ..... 89

**<Announcements>** ..... 97

〈特集：中堅・若手層はかく考える〉

## 特集にあたって

第30期編集委員会

昨年5月の総会において本会は「日本伝熱研究会」から「日本伝熱学会」へと改称された。そしてこれを契機に、本会の組織運営、学会誌、シンポジウム等の問題についての根本的検討が幹事会において開始された。このような“変貌”への模索が、これまで30年に及ぶ本会乃至は伝熱研究の漸進的発展がいろいろな面において既に限界にきている、という多くの会員諸氏の認識を受けたものであることは間違いのないところであろう。本特集はこの時機に、今後の伝熱研究を担っていかれるであろう中堅・若手の研究者が現状をどのようにとらえ、また伝熱研究の“新年”に対しどのような展望を持っておられるのかを探ろうとしたものである。

振り返ってみると、伝熱シンポジウムの隆盛(少なくとも表面上の)が続く一方で、伝熱研究の未来について灰色の展望が語られ始めてからかなりの時間が経過している。この間、各地のセミナーで“伝熱の夢”や“伝熱研究の新展開”が語られてきたことの根底には、灰色の未来に対する危機感や焦燥感があるようにも思われる。研究者としての余命の長い中堅・若手層はこのような問題に否応なく向き合わざるを得ない。もちろん実際の状況は伝熱研究の全範囲に渡って一様ではなく、危機感など抱きようもないほど現在→未来に充実した研究計画をお持ちの方々もおられることであろう。また本号に寄稿していただいた方々が現にそうであるように、各研究者の伝熱研究への係わりの度合いは一律ではなく、これによっても問題意識に差異が生ずるであろう。このような研究者ごとの背景の多様性も念頭に置かれて、本号の記事をお読みいただくとよいのではないかと考える。

執筆者の選定に当たっては、最近の研究内容や所属を参考に、できるだけ多様な意見が開陳されるよう意図したが、現在の仕事の性質上執筆が困難であった企業研究者の方々もおられ、結果的に大学勤務者の比率が非常に高くなっている。多忙の中、明確とは言い難い依頼内容に応じて御執筆いただいた方々に深く感謝申し上げたい。大半の原稿が集まった時点でそれらの原稿を小竹会長にお読みいただき、その感想も含めた記事をお寄せいただいた。これを本号の冒頭に載せさせていただいた。

会員諸兄が御自身の“伝熱新年”を考えていく上で、本特集が参考となるところがあれば幸いである。

## 伝熱の研究と研究者

小竹 進（東大）

「沈みかかった舟を救おうなどという努力はしたくない。海に飛込んで新しい舟に向けて泳いでいきたい」

数年前、ある中堅の研究者が若手研究者に伝熱研究の活性化の活動を頼んだときに、返ってきた返事である。その後、この若手研究者がどのような新しい舟に泳ぎついたのかは知らないが、なかなか迫力のある頼もしい気構えである。このような考えが「中堅・若手層はかく考える」の平均像であるかと思っていたら、沈みかかるような舟はもともと大きい舟であるから、このような舟にゆっくりと身をゆだねているのも快いものであるという考えも多いらしい。これは先代が我を忘れて築いた財産で次代息子がゆっくりと我が世を楽しむという当世の風潮をあらわしているのかもしれない。冷たい海に飛込むなどというのは、舟が沈むことを認識してから話であり、その認識そのものが問題である。

例外はあるが、一般に、研究者の人間的な個性とその研究対象のエネルギーレベルはかなり相関関係があると思われる。化学関係では  $eV \sim keV$  ( $1 \sim 10^3 eV$ )、物理関係では  $keV \sim MeV$  ( $10^3 \sim 10^6 eV$ ) のエネルギーレベルを取り扱うのに対して、伝熱関係では  $deV \sim meV$  ( $10^{-2} \sim 10^{-3} eV$ ) のレベルの熱エネルギーを扱う。このような分野の研究者との研究あるいは個人的な付き合いを総合すると、その個性の強さはほぼ取扱っているエネルギーの強さに比例する。伝熱を研究している人達は、高いエネルギーを扱っている化学・物理の研究者に較べるとはるかに静かで温和であり、人をかきわけて前にでて自分を宣伝しようなどという人ははるかに少ない（全然いないということではない）。学内で熱エネルギーレベルのシンポジウムを何回か開催したとき、化学や物理関係でも熱エネルギーレベルの研究をしている人達は、いつも講座や施設の増設・新設の申請の際に高いエネルギーの人達に利用されるがその逆なことはないといていた。この法則(?) はさらに伝熱の研究のなかでも当てはまるのではないかと思われる。対流屋さんより沸騰屋さんの方が鼻息が荒い。自然対流より強制対流の方が元気が良い。ここまでくると、大分例外が多くなりそうではあるが。

さて、古典熱力学の第2法則「エントロピー増大」によると、もともと熱あるいは熱エネルギーは、エントロピーが極大に達して熱平衡に近い状態のエネルギー形態であり、あらゆるエネルギーの終焉に近い状態をあらわす。そこは、起伏のない様な静かな世界である。伝熱問題がエネルギーの移動輸送であるといっても、このような終焉に近い静かなエネルギーの流れを扱っていることになる。すべての分野のエネルギーの最後を見取っているのではあるが、伝熱問題が主役になれなかった本質がここにある。したがって、そ

れを扱う人も、脇役で甘んじる静かな温和(?)な個性の持主が多くなる。あるいは、伝熱問題はそのような人が好む現象であるとも言える。このような伝熱の現象あるいは問題の研究において、その研究を活性化せよ、新しい分野を開拓せよ、その将来を明るくせよといったも無理な話である。もともと、このような研究は、本質において静かな地味な研究であるからである。

しかし、最近、このような論理を飛躍的に変化しなければならない大きな2つの問題が起っている。1つは「エントロピー増大」の終駅、熱エネルギー流れの出口の問題と、他は第2法則そのものの問題である。

いままで、エネルギーの流れの出口は主として流れの効率(熱効率)に目を向けて考慮されてきたが、環境問題が注目されるにつれて、その出口でのエネルギー、熱エネルギーの種類・形態が問題になってきた。「エントロピー増大」の過程そのものが問題になってきたのである。これは、いままでエネルギーの流れが高速(超音速流)であり、出口の条件を考えなくてもよかったものが、流れが遅く(亜音速流に)なり出口の境界条件が絶対不可欠になったとも解釈できる。あらゆるエネルギーの流れは出口の条件を問題にしなければならなくなった。エネルギーの高い激しい人達も静かな温和な人達に出口の条件を丁寧に問わなければならなくなったのである。これは、環境問題ばかりでなく、熱エネルギー流れを微妙に制御しようという問題はすべてこのような状態となり、そこにおいては、熱エネルギー・伝熱は脇役に甘んじているわけにはいかず主役を演じなければならなくなったのである。

もう1つの大きな問題は、熱エネルギーそのものがエントロピー増大の結果を表わすかということである。原子分子レベルの力学過程においてはその運動は可逆的であるが、その集りである分子集団の状態運動は非可逆的である。この非可逆性は分子集団の状態運動が平衡に達するまで進行し、その極限が無秩序な熱平衡状態であると理解されてきた。この無秩序の増大としてのエントロピー増加あるいはエントロピー生成は、本質的には組織秩序や構造組織の破壊を意味している。しかし、宇宙や生物の進化あるいは身近な例では乱流構造の秩序組織に見られるように、こうしたエントロピーの増大は必ずしも無秩序の増大あるいは秩序の破壊に向っているとは言えない。マイクロレベルの可逆性が如何にしてマクロレベルの非可逆性になるのか。多くの議論のあるところであるが、マイクロレベルの不規則性がマクロレベルの非可逆性を支配するとすると、マクロレベルの規則性を支配するものは何か。新しい現代の熱力学は、マイクロなレベルにおいて自己組織化の能力を認めようとしている。そこにおいては、非平衡な状態は必ずしも不安定な状態とは限らず一定な組織秩序や構造組織をもつことができる。しかし、マイクロなレベルでは現象的な秩序組織は考えられないから、マクロへの過程でいつどのようにこうした秩序が生れるのかという本質的な問題が生じる。これは、マイクロな過程が解明された後のつぎの新しい魅力のある大きな伝熱研究の課題であり、静かな問題であるが宇宙生成や進化にも絡む激しい問題であり、次世代の伝熱研究者が耐えられ得る(楽しめる)問題であるか心配である。

## 伝熱研究の将来を占う

高田 保之 (九大工)

### 1. はじめに

伝熱研究(伝熱学会)の将来が薔薇色であるか灰色であるか、すなわち今の様な繁栄を続けることができるのか、ということを考えるのは少し怖い気がする。しかし、ある程度のことは今のうちから考えて、将来の研究活動に備えておく必要があるのではないだろうか。そのような意味で、各方面からのお叱りを覚悟で独断と偏見(?)に基いた私見を述べさせていただく。根が不真面目なので、文中カンに触る記述があるかもしれませんが、何卒ご勘弁ください。

### 2. 伝熱研究の現状

先ず伝熱研究の将来がどうなるかということを考える前に、現状はどうなっているかを把握しておく必要がある。量的には伝熱シンポジウムの論文数、参加者数が、内容的には論文数に占める各テーマの割合が少なくとも我が国の研究動向を代表していると思われる。この詳細については小竹先生による膨大な資料<sup>(1)</sup>があるが、それを参考にすると伝熱シンポジウムの年毎の論文数は図1のように、おおむね増加傾向にあることがわかる。

一方、図2は文献(2)より抜粋した「成長曲線」というものである。著者である上原先生(佐賀大)によると「人間をはじめ、国、県、企業や製品、科学、技術のように成長過程をたどるもの(成長体または成長物)は、図2に示すようなパターンを取って成長し衰退していく。」のだそうである。この本にはエジプト文明やギリシャ文明なども図2のような成長曲線を描いて衰退したことなどが示されている。図1と図2を比べると、伝熱シンポジウムの論文数は「成長期」にあるか、あるいは「安定期」に入りかけているようにもみえる。上原先生の「成長の原理」が伝熱研究にも当てはまるとすると、やがて「衰退期」がやって来ることになる。我々にとって、図1の論文数の増加傾向が成長期にあり、以後ますます成長するのであれば大変結構なことである。しかし、成長期の終わりの段階もしくは安定期の始めにあるとすれば、安穩としてはいられない。

1950年代からの原子力開発、1970年代のオイルショックによる省エネルギー技術の推進において、伝熱学は主役として大いに活躍してきたと思う。それは研究の量的な面だけでなく、質的な面でもすばらしい発展をしてきたと思われる。つまり応用面でも成果を上げながら、純粋な学問すなわち「サイエンスとしての伝熱学」としても発展を遂げ、体系化されてきた。

しかるに最近の伝熱シンポジウムや各種の講演会を見ると、オーガナイズドセッションの比

重が増している。具体的には環境，電子機器の冷却，半導体製造（CVDなど），バイオ，宇宙機器など，応用面の研究に関するセッションが盛んに行われている。一方，サイエンスとしての伝熱学として目新しいものと言えば，分子伝熱学くらいで，残りの熱伝導，強制対流，自然対流，沸騰，凝縮などは昔から存在する分類に当てはまる。もちろん旧来の分類の枠においてもサイエンスとしての伝熱学は，発展しつつあると思われるが，意地悪な見方をすると，主役としての伝熱学は衰退気味で，脇役としての活躍の場が増えたようにも思える。むかし主役として，そして現在は脇役としての登場が多くなった三船敏郎のようであり，私は最近同僚や先輩に「伝熱学＝三船敏郎説」を唱えているところである。そういえば三船敏郎が活躍したのも1960～70年代であった。

逆に好意的な見方をすると，伝熱学が他の分野へ積極的に進出を開始したということもできる。主役ではないが，芝居には欠かせない重要な脇役としていろんな役をこなせるようになった。つまり芸の巾を広げたとさえ言えないこともない。私は今後も応用面での伝熱研究は発展し，新たな分野へ進出していこうと考えている。

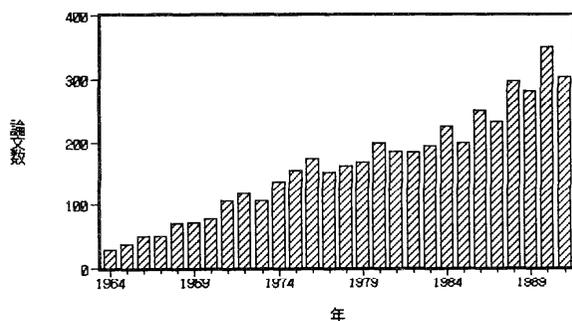


図1 伝熱シンポジウムの論文数の推移

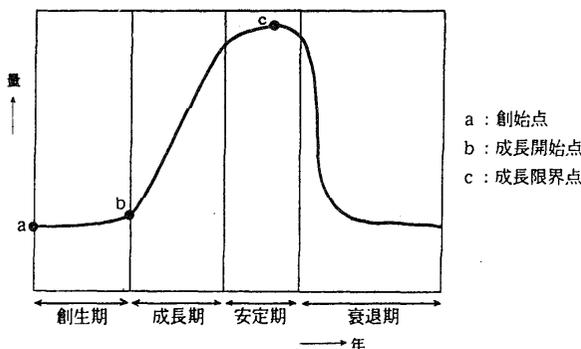


図2 成長曲線<sup>(1)</sup>

### 3. 伝熱研究の将来

伝熱シンポジウムの論文数は今後も年毎に増えていくであろうか。答えは否である。実は第28回(福岡)の会場は5室しかとれず、3日間の会期で収容できる限界の303件だったのである。第27回(名古屋)は6室で約350件であった。すなわち、大学以外を会場として使う場合せいぜい6室が限度であるから、これ以上の発展(論文数の増加を発展とみなすならば)を望むならば会期を4日間にするしかない。4日間にしたとしても500件程度が限度で、会場や会期をどんどん増やす訳にはいかないので、論文数が図2でいう安定期に入るのは時間の問題である。したがって量的な発展を望むならば、伝熱シンポジウムとは別に研究発表の場を増やしていかなければならない。

では研究内容として、これからはどういうものが重要となるかという点であるが、私の恩師に問うと「環境問題」という答が返ってきた。なるほど地球の温暖化やフロン問題など環境を意識した伝熱研究はこれから重要度を増していくだろう。これらの問題に関連して、最近代替フロンの熱物性やヒートポンプの研究者の鼻息が荒いようだ。そのうち、ゴルフなんぞに興じるような研究者は環境問題を論ずる資格はない、というようなモラルの問題まで起きてくるかもしれない。

さらにバイオ伝熱など、一昔前なら意外に思われるような種々の分野で、伝熱研究のテーマが増えてくるだろう。もちろんいろいろな伝熱の問題の理論解析には数値計算が活躍するであろうから、数値伝熱学もコンピュータの性能向上とともに発展すると思われる。

### 4. おわりに

以上のように考えると、伝熱研究の将来は決して薔薇色ではない。かといって伝熱以外の研究分野へデューダするには、私はもう頭が堅くなってしまった。応用に関連した研究は今後その裾野を広げていくであろうから、恐らく10年後も伝熱で飯を喰って(喰わせてもらって)いることだろう。その頃までには、現在行っている研究に加えて、何か新しい、そしてやりがいのあるテーマをいくつか見つけたいものだと思っている。

先日、テレビで三船敏郎とチャールズ・ブロンソンが共演した古い映画を見たが、そういえばチャールズ・ブロンソンは今でも主役で活躍している。伝熱研究も彼にあやかりたいものである。

### 参考文献

- (1) 小竹 准, "伝熱研究の動向に関する調査について", 伝熱研究, Vol. 29, No. 115, 1990.  
pp. 8-190
- (2) 上原 春男, 成長の原理, 日刊工業新聞社, 1989  
伝熱研究 Vol.31, No.120

## 企業の研究者から見た伝熱研究の将来

古 藤 悟 (三菱電機㈱中央研究所)

私は一企業の伝熱・流体研究者であり、伝熱研究の全てを極めたわけでもなく、伝熱研究の守備範囲も定義も知らない。したがって、私にはとても伝熱研究の未来について語る資格など無いと思われるので、ここでは企業において伝熱・流体の研究開発を担う部門に所属する研究者の将来について述べたい。

私の会社は大規模ではなく、すなわち大企業に特有な担当領域の細分化がなく、全社内の伝熱・流体関連技術全般を担当する課が存在する。総合電機会社は実に様々な製品分野を手掛ており、この課に所属する研究者は広範囲の技術分野と接触することができる。こうした中で研究者は自分の研究・技術レベルを一流に磨き上げる努力を積み重ねながら、これらの広範囲の技術分野において発生した伝熱・流体上の問題を解決しなければならない。ところが総合電機会社においては、伝熱・流体技術が一次機能を果たす製品分野は、冷熱分野（冷房・暖房・換気等の空気調和装置、冷凍・冷蔵装置と冷却装置）などを除けば極めて少なく、ハイテク・先端技術分野においては皆無に近い。言うまでもなく、伝熱・流体技術が一次機能を果たす製品以外の分野においては、研究者は研究開発のリーダーシップを取ることができず、単なるアシスト役にしか成り得ない。すなわち、製品開発・設計の初期段階からの参画はなく、製品に伝熱・流体上の問題が生じたときに始めてお呼びが掛かるのである。

このような研究環境において、私は伝熱分野のブレイクスルーを求め、伝熱・流体技術が一次機能を果たす要素機器、すなわち従来の熱交換器、ヒートパイプなどのキーパーツを探索し続けてきたが、残念ながら未だ活路を見出だすには至っていない。以下においては、私が伝熱・流体技術が一次機能となる要素機器を探ってきたプロセスについて述べる。

研究者は自分の専門分野、領域に閉じこもってはいけぬ。勇気を持って他の領域へ出掛けていくべきである。私は最初に燃焼の熱流体数値解析を通じて伝熱研究との関わりを持ったため、単なる熱と流体の関係に加えて反応を伴う現象に対するためらいは無く、数値解析の予測精度検証手段として新しい計測技術に挑戦して利用することもいとわぬ。このような経歴を持つ私がテーマ発掘のために採った手段は、新しい領域に踏み込み新たな課題を見付けることであった。

半導体関連の伝熱研究が機械学会誌などで散見され始めた当時、私の熱流体数値解析のテーマの一つとの比較的軽い気持ちで参入した分野であったが、とくに半導体製造プロセスにおいては伝熱・流体の新たな研究テーマの宝庫であることが分かってきた。もちろん、当初は学会

誌等にでている単結晶製造プロセス（現在でも、チョクラルスキー法によるシリコン単結晶製造プロセスは自然対流研究の絶好の研究テーマとなっている）とCVD（化学蒸着）法による薄膜製造プロセスくらいのものであった。伝熱・流体分野に適した研究テーマを探索する過程において、半導体関連の研究所や工場の担当者と通訳抜きで討論できるように関連した記事や文献を勉強し、さらに製造プロセスを知るために製造現場に入り込んで問題の発掘を繰り返した。実際、このようなプロセスをスキップして設定した研究方向（研究目標）には研究者の自己満足的要素が強く、現実を無視した研究成果となって、全く役に立たない“研究のための研究”に終わることが多い。この点において、企業の研究者は多くの研究以外の業務を強いられる半面、工学（すなわち物を作る学問）にそくした豊富な未解決のテーマを享受できる強みを持つ。

さて、半導体メモリの集積度が高まり、各製造メーカ毎に独自のプロセス技術（装置化技術）を保有し半導体製造装置も市販の購入品では対処できない、すなわち完全に各社自前のプロセス技術・装置化技術が要求される時代が近づきつつ在る。その中で、CVD（化学蒸着による薄膜形成）、RIE（反応性イオンエッチング）、スパッター（金属薄膜形成技術）などのDRAM製造の基本的なプロセスにおける反応現象の解明と真空反応容器内のガス流れおよび容器内圧力操作に伴う微小粒子の挙動解明、さらにはWet洗浄やWetエッチングなどの湿式処理工程における異物の付着力と洗浄のメカニズムの関係、表面反応と液流の関係などは、半導体の製造歩留まりを左右する重要な研究課題となるに至った。しかし、伝熱・流体分野のキープーツはその中から見出だせてはいない。

これ以外にも、前述した総合電機会社において伝熱・流体技術が一次機能を果たす製品分野においても研究活動のウエイト付けを行っているのと言うまでもない。しかし、メーカの研究者である以上、ハイテク・先端分野の研究・開発にも重点を移していかざるを得ない。伝熱研究の内容自体においては、前述の伝熱・流体技術が一次機能を果たす在来技術分野もハイテク・先端技術分野もほとんど変わらないにもかかわらず、ただ分野が新しいと言うだけである（実は伝熱・流体技術自体において、ハイテク・先端と言えるターゲットが出てこないことのほうが真に問題なのだが）。このような理由から、私もハイテク・先端技術分野の一つであるTFT（薄膜トランジスタ）液晶表示デバイスの製造プロセスにも進出を開始している。いずれにせよ、私は新しい分野に臆せず進出して、様々な進化の方向を探っている。

最後に伝熱学会および伝熱シンポジウムに対して企業の一研究者として少し意見を述べさせていただきたい。純粋の伝熱単独の研究テーマが少なくなっているせいか、研究テーマ自体のバリエーションが少なく、全体が一つあるいは数種の流行を追いかけているような気がする。本来研究とは各個人毎に異なった発想の下に行われるので、多種多様な目標、ターゲットがあってもよいのだが、例えば強制対流伝熱における乱流数値解析のブームなど、それ自体は華々しいテーマであるかもしれないが、同じ方法を何人もの人が後追い検証するのはいかがなものか。伝熱研究 Vol.31, No.120

か。議論は深まるが、発散的な要素は少なくなる。したがって、余り研究者が取り上げない研究発表が成されると、途端に議論が成立しなくなる。私自身も土木・建築関係、空調・衛生関係、半導体製造プロセス関係など伝熱本流からはずれた分野の研究発表を試みたが、本質を突く討論には至らなかった。企業の研究者は、本来伝熱本流に当てはまる研究テーマを持っている人が少なく（ただし企業の研究者は、そのテーマの中から本来の伝熱本流の領域を探りだし、掘り下げる努力をすべきであると思うが）、このような状況の下でオーガナイズドセッションを組んで新しい方向を探ろうとしても、企業の研究者に満足感が得られない以上、このような試みを契機に新しい研究方向が芽生えるとは言えないのである。

私が伝熱学会の会員の方々に提案したいのは、様々なオーガナイズドセッションを企画される際には予めそのテーマ分野に対する予備的な知識・情報収集を実施していただき、さらに議論が噛み合うように事前に指名した討論者（もちろんオーガナイザーと同様の基礎知識を用意いただく）を用意していただきたい（ただし、非常にベクトルの合った発表が集まった場合を除く）。特に、直接の製造現場とのコミュニケーションの手段（情報ルート）を持たない大学研究者の方には、こうした場での討論を通じて物を作る工学に即した情報を収集することが大切である。このような活動が、企業の少なくとも伝熱研究に直接当てはまらないような新しい研究者の学会参加や研究発表を促し、さらに伝熱学会会員の研究領域や守備範囲の拡大につながるのである。

以上、非常に偏った見方かもしれないが、企業の研究者から見た伝熱研究の将来方向とその探索活動について述べさせていただいた。この文章が伝熱学会の今後の発展の一助となれば幸いである。

## 伝熱学会および伝熱シンポジウムについて

宮良 明男 (佐大)

本号編集委員の森康彦先生、坂口忠司先生から「中堅・若手層はかく考える」というテーマで執筆を依頼したいとの手紙が舞い込んで来ましたが8月上旬でした。それからどのような内容について書こうかと考えておりましたが、なかなか考えがまとまらず締切日の直前までできてしまいました。最初は、現在の研究テーマである管内凝縮・蒸発の伝熱促進、鉛直面上の膜状凝縮などについて現状や展望を書いてみようと考えて、最近の伝熱研究や機械学会誌、およびその他の論文集などを読みあさってみました。しかし、それらの研究テーマは従来からの研究の延長線上にあり真新しいものでもないで、私がここであらためて書くまでもなく、著名な先生方の解説や展望が多くあります。最近始めた研究テーマである「乱れを伴う凝縮液膜の数値解析」は、まだまだ解説記事を書くような段階まで達しておりません。また、興味のある他の研究分野に関しての展望は、日本学術会議熱工学研究連絡委員会でもまとめられた「熱工学の研究動向と熱技術の進展（日本学術協力財団発行）」の中に詳しく解説されております。そこで、偉そうな解説記事を書くことはあきらめ、伝熱学会や伝熱シンポジウムについて最近感じていることを書いてみたいと思います。

### 《伝熱学会》

研究分野が多様化、細分化したことによって、最近では日本混相流学会や可視化情報学会などのような新しい学会が多く設立されています。そのほかにも伝熱に関連した学会や協会は、私が入会しているものだけでも日本機械学会、日本冷凍協会、化学工学会などがあり、伝熱シンポジウムの主催学会リストには15程度の学会や協会が挙げられております。このような状況は伝熱の分野だけでなく他の研究分野においてもほぼ同様であろうと思われます。そして、学会が増えたことによって学会誌や論文集の数も当然増えてきておりますし、講演会の数も急激に増加しているように見受けられます。また、海外の情報にそれほど精通しているわけではないので正確なことは分かりませんが、ジャーナルや国際会議が増えてきたことからすると、このことは日本国内だけでなく海外においても同様ではないでしょうか。そうした中で伝熱学会が伝熱に関連した他の分野からみても魅力的な学会となり、他分野からの入会を増やして伝熱研究および伝熱学会を活性化していくことは、それほど簡単なことではないように思います。良い研究成果ができれば、研究活動の中心にしている学会（もちろん私の場合には伝熱学会）で発表をし、論文を掲載したいと考えるのは当然のことです。それでは悪い研究成果(?)やほぼ同じ成果を関連学会の講演会や論文集に・・・、というわけにもいかないので、関連学会に対しては学会誌や論文集から情報を得るのみで、講演会への参加や論文投稿からは自然に足が遠のいてしまいます。もちろん掃いて捨てるほどの研究成果がで

れば別ですが、通常、特に若手研究者の場合には、数的にそれほど多くの成果はでないように思います。伝熱研究に関連した学会を中心に活動しておられる研究者の方々も状況はそれほど変わらないと思いますので、伝熱学会が他の学会と同様な活動をしていくならば、関連分野の研究者に対しては伝熱研究の情報源として学会誌を提供するということが伝熱学会の役割の中心になってしまうのではないのでしょうか。もちろん情報提供も学会の重要な役割ではありますが、他分野から伝熱学会や講演会に参加していただき、伝熱研究の新展開や活性化を行うという面ではそれだけでは不十分のように思います。伝熱学会や伝熱シンポジウムを外に開いたものにするためには、他分野の研究者に参加を呼びかけるだけでなく、伝熱学会を中心に活動している研究者も他分野の学会や講演会に参加して行く必要があるという意見を耳にしますが、これには私も大賛成で、今後機会があれば他分野へ積極的に参加して行きたいと考えています。しかし、ここでは他分野から伝熱学会や伝熱シンポジウムへの参加を促進させるということについて考えてみたいと思います。

今回、本稿を書くにあたって色々な解説記事を読みながら感じたことは、伝熱研究はその性格上、一部の分野を除き、種々産業分野の問題解明を行ったり、新技術の開発を支えたりするという立場にあるということです。もちろん他の研究分野に関してもそのような性質は、多かれ少なかれ持っていると思います。そして多くの研究、特に新技術の開発に関連したような研究では、多分野にまたがった境界領域的な研究が行われています。ある意味で、伝熱研究は産業・工業界のサービス的な役割を担っているわけです。また、境界領域においては、他分野の研究者も産業・工業界に同様なサービスを行っております。大学の一部の研究者は一般企業から研究費の援助を受け共同研究を行っておりますが、研究者単独か研究室単位程度で研究が行われることが多く、いくつかの分野にまたがった研究を行うことは困難なように思います。また、私のような力のない地方大学の若手研究者では共同研究の糸口をつかむことさえ難しいのが現状です。伝熱学会がある大きな研究テーマに関して企業（単独でも複数でも構わないと思います）から研究費をもらい、伝熱学会のみでなく広く研究者を公募するという形はとれないものではないでしょうか。また、その研究成果の報告会を伝熱シンポジウムで行えば、伝熱シンポジウムの活性化にもつながると思います。大学の研究費の少なさにはほとんどの人が頭を痛めており、多くの研究者、特に若手研究者は、他分野の研究を行いたいと考えていても研究費の少なさからそれを断念してしまうことが多いので、伝熱学会会員のみでなく、他分野からも多くの応募が期待できると思います。そして、1つの大きな研究テーマを種々分野の研究者と一緒に研究することで、各分野間の言語や常識の壁を乗り越えた研究者同士の密接な交流が行われ、研究活動が活性化し、その中から新しい研究テーマが生まれてくることも期待できるのではないのでしょうか。また、私のような超若手の研究者からするとそのような共同研究活動の中で、まとめ役となって下さる著名な先生や諸先輩方の知識や考え方を学ぶことができるというのは大きな魅力です。私に懇意にして下さっているある先生は、「大学の研究を活性化するには研究者が5年程度の周期で色々な大学をまわるようなシステムがあったほうが良い。」と言われます。それは確かにその通りだと思いますが、せっかく作った実験装置がそう簡単には移動できないことや家族、その他のことを考えると、実現はかなり難しそうです。しかし、前述の共同研究を実施す

る際に、数カ月から半年程度は他大学に詰めて研究を行うことができるのではないのでしょうか。また、それは大学の研究室に限らず、企業の研究所であっても良いと思います。大学の研究者は企業の研究の状況や現場での問題を目の当たりに見て経験できるし、企業側も大学の研究者から何らかの知識や情報を得ることができると思います。海外留学から帰ってきた方からは、その研究者と密接な関係を得ることができたとか、研究の手法などについての知識を得ることができたとかいう話を聞きます。海の向こうの研究者と交流を持つことも大事ですが、隣人との交流ももっと必要であると思います。

伝熱学会にはそういった機能も期待しています。

#### 《伝熱シンポジウム》

伝熱研究29-115でまとめられているように伝熱シンポジウムの講演論文数は、第1回の29件から第26回の280件までほぼ直線的に増加しております。全体の発表件数に対する学生の発表件数の割合についてはそこで示されておきませんが、伝熱シンポジウムに関する回想録などを読むとその割合は増えてきているように思います。伝熱シンポジウムでの学生の講演に関しては賛否が分かれますが、最近、私が感じていることを述べさせていただきたいと思います。「熱工学の研究動向と熱技術の進展」の中に熱に関する講演会が開催された初期の頃の状況について、「・・・先生などの熱の大家が前方に陣取って出席され、厳しい質問がなされるので、若手研究者は熱の講演会で発表するとなると、非常に緊張し、自力を精一杯ふりしぼって発表するという雰囲気であった。」との記述があります。その講演者の良い意味での緊張感が当時の若手研究者を育てることになり、そこでなされる厳しい討論が研究内容そのものを向上させてきたのではないのでしょうか。その結果として、現在第一線で活躍されている先生方が育っていき、数々の研究成果を生み出したものと思います。しかし、学生の講演の増えた現在のシンポジウムでは、回想録にあるような雰囲気を持った講演会にはなっていないように感じます。十分な討論能力のない講演者による発表・討論は、どうしてもシンポジウムのレベルを下げてしまいます。学生が講演して、いざ討論の時間となると学生が答えられずに、共同研究者の〇〇ですが、・・・、と講演者そっちのけで聴衆席の中で議論が行われるということがしばしばです。それであれば、〇〇先生に最初から講演を行っていただき、質問にも答えていただくというほうが聴衆も理解しやすいし、限られた討論時間の節約にもなるのではないのでしょうか。聴衆は参加費を払って講演を聴いているのですから、発表や討論はベストな状態で行ったほうがよいと思います。高名な先生方の中には自ら講演し、討論される方もおられます。その隣で学生が質問に答えられずにおどおどしているのは、いかにも不自然で、その先生には失礼であろうし、学生はかわいそうです。中には学生とは思えないほどに発表能力、討論能力を備えた学生がいるのは確かですが、平均的には学生の発表・討論能力は十分でないように思います。もちろん、学生の伝熱シンポジウムでの講演に賛成される方の意見に聞かれるように、若年研究者の育成というも伝熱学会の大きな役割ではあります。しかし、修士レベルの学生を若年研究者の中にも含むべきでしょうか。博士課程の学生のレベル以上から若年研究者の中にも含むべきだと思います。

博士課程の学生を除けば、伝熱シンポジウムで発表した学生の大部分は卒業後研究者になっていないのではないのでしょうか。修士学生の教育は、本来学生の指導教官を中心に当該専攻で責任をもって行われるべきもので、他大学の教官に伝熱シンポジウムの場で学生の指導をお願いするのはどうかと思います。発表能力や討論能力は研究室の中で十分指導できるはずで、教育的な意味だけで学会講演を経験させる必要があるというならば、機会学会で行っているような学生講演会を別に開催すべきではないのでしょうか。学会講演会、特に伝熱シンポジウムのように専門分野の研究者のみが一堂に会して行われるような講演会では、討論に重点を置き、研究レベルの向上を図ることが重要であると思います。また、学生の講演に賛成される先生方の中には、総会講演会的なものとして討論に重点を置いたシンポジウムの複数の学術講演会を設置することを提案される方もおられます。しかし、前述したように伝熱研究に関連した講演会は多数あります。伝熱学会のみで学会活動を行うという研究者であれば、その両方の講演会に参加することが可能でしょうが、ほとんどの研究者は他の学会でも活動しております。また、前述したように研究を活性化するためには、他分野からの参加を呼びかけたり、こちらから他分野の講演会に参加したりすることが、今後ますます重要になってきます。伝熱シンポジウムでは、一年に一度全国各地から伝熱に関連した研究者が一堂に会することが大きな魅力の一となっており、それであるので忙しいときでも講演の有無にかかわらず伝熱シンポジウムには必ず参加するという先生もおられるのだと思います。私も、伝熱シンポジウムでの著名な先生方の討論を拝聴するのを楽しみにしており、その中で教えられることが多くあります。性格の異なる複数の講演会を設置するというのは、非常に良いアイデアだと思いますが、各研究者の体は一つしかなく、皆さん多忙な毎日を送っていることを考えると、複数の講演会全てに参加するということは、特に地方の研究者にとって、物理的に不可能ではないでしょうか。そして参加者が分散されるということは講演会の質の低下をまねくことになると思います。これからは学会の数や、参加者数、論文件数などの数量的なものを増やそうとするより、質的な向上を目指すべきではないでしょうか。そうでなければ、若手研究者は質の良い研究を行うことよりも、論文を数多く出し、学生を大量に使って学会での発表件数を増やすということを強いられ続けることになりかねません。

伝熱学会が、熱力学の第一法則的な数量的評価・考え方だけでなく、熱力学の第二法則的な質的評価・考え方を行ってほしいと希望しております。

追伸：大学教官になって三年の間に学生に発表をお願いしたことがあります。発表前の指導や準備には時間を取られますが、講演会では質問が直接来ないので実に気楽なものです。学生が答えられないときには、格好良く「共同研究者の宮良ですが、・・・」と質問に答え、自分もわからないときは黙っておれば良いのですから。元来怠け者の私にとっては、そちらのほうが非常に楽が良いのですが、これを続けるとそのうち若年寄りになってしまいそうです。なお、研究の質を問われると、私はまだ自信がないので、今回自分自身のことは棚上げておきます。ご了承下さい。

## 子供の頃の夢

円山重直（東北大・流体研）

### 1. 子供の頃の夢

私事で恐縮であるが、私の娘が通っている幼稚園で、「将来君達は何になりたい？」と聞かれると、女の子ではケーキ屋さん、男の子ではおもちゃ屋さんと答えるのだそうである。これら将来の希望が年齢と共に変化する。理工学の分野に限定して私の記憶を振り返ると、プラモデルに熱中している時は、いつか本物の飛行機や船を作ってみたいと考え、立派な建築物を見ると建築家や土木技師になってみたいと思う。最近のテレビやマンガからは、レーシングカーのメカニックやロケットエンジニアになりたいと思う子や、ロボットに憧れる子供。コンピュータゲームに熱中している時はプログラマーを夢みる子供もいるだろう。キュリー夫人やアインシュタインの伝記を読んで、物理学者を志した人も多いことだろう。

しかし、私の記憶をたどってみても、「私は伝熱屋になりたい」と夢みたことはなかったように思う。とはいえ、上述の何れの分野も伝熱とは深い関わり合いをもっている。レーシングカーでは、オーバーヒートは致命的である。実験物理の世界では、伝熱制御がその実験結果を左右する場合が多い。コンピュータ製造過程やその安定な作動を支配する要因の一つは伝熱である。ケーキ屋さんでさえも伝熱の知識は（経験的ではあるが）必要不可欠なものである。

こんな例え話が伝熱の現状を象徴しているように思われる。つまり、「伝熱は多くの分野に必要な不可欠であるが、表に出ることは少なく、常に縁の下の力持ちである」ということである。以下、私の独断と偏見で伝熱の現状と将来を考えてみる。諸兄にとって多少腹立たしい記述もあろうが、若気のいたりとしてお許し願いたい。

### 2. お手伝いとしての伝熱

実に多くの分野で伝熱が必要不可欠の場合にぶつかる。特に、新しい技術分野や電子工学、応用物理では、伝熱の制御がそのプロジェクトの成否を決める場合が多く、大抵は伝熱の素人がそれらの問題に対して四苦八苦している。このような時、伝熱屋は実に貴重な助っ人である。熱の問題で困っている実験装置や製造機械で、伝熱の専門家がアドバイスするだけでかなりな問題が解決されそうな実例が多く見受けられる。また、それらの現

象の中に新しい伝熱のテーマが存在する場合も非常に多いことも事実である。

しかし、これらの分野では、伝熱はいつも裏方である。新材料製造過程では熱は重要な因子であるが、伝熱を考えなくともその物質はともかく出来る。流体力学は旅客機設計には不可欠であるが、熱の問題は機体を作ってから考えても良い。熱の問題は、多くの場合トラブルに起因するネガティブな作用をすることが多いので、トラブルシュータ的な要素が強く、それが伝熱を日陰者とする要因と考えられる。

しかし、伝熱シンポの数的隆盛で象徴されるように、産業界での伝熱のニーズは膨大で、その工業上の重要性は多岐の分野にわたって益々増大すると思われる。しかし、伝熱を専門とする研究者がそのニーズの中でお手伝いとしての伝熱自体を目的として、安穩と従来の伝熱の殻に閉じ込めて良いのだろうかという疑問が出て来る。

### 3. 伝熱工学と流体工学

伝熱工学は、流体工学と比較される場合が多い。事実、両者とも支配方程式や対象とする現象が類似している。しかし、流体工学と伝熱工学を詳細に比較すると、性格やアプローチが根本的に異なる場合も多い。よく流体屋が、「伝熱は人の名前の付いた無次元数がやたら多い」とか、「何でも対数表示して実験式を作りたがる」等と言うのを耳にする。諸兄は勿論これに対する反論をお持ちとは思う。

例外も多いが、伝熱は熱というパラメータが流体に比べて1つ多く存在し、その輸送形式が一通りでないために現象が複雑になっているからであろう。また、このために種々の経験パラメータが入り込む余地があり、流体力学や弾性学に比べて美しい学問体系が出来にくい一因となっているとも考えられる。つまり、伝熱は流体に比べてカードを1枚余計に持っているために多くのバリエーションが可能であり、それが研究テーマの多様性の一因でもある。

大型水力タービンでは、しばしば1%の効率の大小が問題となる場合がある。旅客機の開発で、巡航時の抵抗が5%見積りより大きくなったら大変である。しかし、伝熱のある分野では、熱伝達率が1%向上しても伝熱の研究者は「たったの1%か」と思う人もいるだろう。伝熱では、応用物理や電子工学のように、桁の世界が存在しうる。つまり、対象によっては何倍良くなるという世界を伝熱の研究者は知っているために、1%の大小を議論しなくともよい場合が多いのかもしれない。

### 4. 伝熱研究の取り組み方

私自身も本号の他の著者と同様に、伝熱研究の未来に不安を抱いている一人である。よく日本の若手研究者の間で、伝熱研究のこれからの方向について議論となる。多くの場合

これらの議論は結論が出ずに終わってしまい、なんとなく暗い気分になってしまう。私のごく限られた経験によると、同様の質問を米国の研究者にぶつけてみると、意外と伝熱研究に対する危惧は少なく、現状を進展させれば良いという返事が返ってくる。これは、米国と日本の研究体制の違いもあるのかもしれない。

米国では、大学院の研究が会社や公立機関からの研究費で行われることが多いので、研究テーマが即物的で短期で達成されるものとなりやすい。一方、日本の大学では研究費は少ないが、十年間同じ研究テーマをこつこつとやることも不可能ではない。また、最近の日本企業における研究機関の研究蓄積は、目を見張るものがある。多くは最先端技術の開発段階で生み出されたものであろう。

これら日本の研究環境を考えると、考える時間を少しは持っている大学と、資金とテーマで豊富な民間企業や公共研究機関が協力することによって、伝熱の新しい研究分野を日本で発展させることも、あながち夢ではない気がしてくる。しかし、伝熱の先輩たちが築いてきたお釈迦様の手のひらからはみ出すことは、一筋縄では行かないのは承知の通りである。

## 5. 伝熱の将来

伝熱研究を進展させるには、現在の表面上の伝熱研究の隆盛に満足せず、上述のお手伝いの伝熱研究を通じてより新しい研究分野を積極的に取り込むことが、まず必要となるだろう。それらの中から、従来の伝熱の殻を破った新しい伝熱を模索するのが私たち若手（でもないが）研究者の務めではないだろうか。それが「伝熱学」という言葉を持つ必要性は、必ずしもないかもしれない。

このような伝熱研究の将来を夢みて、お手伝いから脱却し自ら中心となる研究テーマを発見し、それを血湧き肉躍り魅力のある研究となるよう努力することは必要であろう。

このような新しい研究分野が発展し、将来「ケーキ屋さん」から何十番目かに「伝熱屋」もしくはこれと等価な研究に対する夢を子供たちから聞くことが出来るのは、夢の又夢なのかもしれない。

## 伝熱研究雑感

宗像鉄雄（工技院 機械研）

工業技術院にサンシャイン計画が発足したのが昭和48年、またムーンライト計画が発足したのは昭和53年である。これらは、それぞれ第1次および第2次石油ショックの時期と一致する。私は昭和56年に大学に進学したが、学科名もエネルギー工学課程という名称であり、当時、新エネルギーや省エネルギー等のエネルギー関連研究が学生に人気があり、伝熱の研究が盛んであったと記憶している。なお、学部4年次の卒業研究では、このような伝熱の研究とは異なる制御システムについて研究を行なった。伝熱に関する研究を本格的に始めたのは大学院修士課程からであるが、大学院卒業後も現在の職場で（幸運にも？）引き続き伝熱の研究を行なわせていただいている。したがって、伝熱の研究は始めてからまだ8年半程しか経過していない。しかし、この分野の研究の歴史は古く、日本伝熱学会の前身である日本伝熱研究会が発足したのが昭和36年であり、すでに30年が経過している。これは、私が生まれたのも昭和36年であるから、私のこれまでの人生の全てに相当する。したがって、8年半程の研究歴では研究者としてはまだ若手で、伝熱研究雑感とはいっても種々の分野の研究に対する認識が浅いため、諸先生方からお叱りを被るかもしれないが、私なりに感じたことを述べたい。なお、私はこの間、主として半導体製造過程における伝熱、着霜過程における電場の効果等について研究を行ってきたため、これらの研究や伝熱シンポジウム等の研究集会を通して感じたことを中心に述べたい。

周知のように、伝熱現象は熱伝導、対流熱伝達、輻射の3分野に分類でき、これらは既に支配方程式が確立されている。したがって、このような研究を行なっても新しい物理法則は生まれてこない。現在行なっている研究は重箱の隅をつついていっているようなものであり、将来的にはこの研究が生き残れるかどうか不安であり、未来を展望すると灰色の見通ししか持てない。これが、現在伝熱の研究で言われている「灰色の未来」であると認識している。たしかに、伝熱シンポジウム等をみると重箱の隅をつついていっているような研究と言われてもしかたのないような研究も存在するが、まだまだ重要となっている研究も少なくないと思われる。工学部的研究では支配方程式が確立しているかどうかは問題ではなく、産業界でどのようなことが問題となっているか、どのようにすればそのような問題を解決できるかが主たる研究の動機になっていると思うからである。

学生が卒業研究等で選択する指導教官で、伝熱の先生の人気が落ちてきていることは確かなようであるが、これは、伝熱に限らず、機械工学全体に言えることであると感じる。工学部で

は、電気・電子・情報系の人気が高いが、これらについても既に支配方程式が確立されている。例えば、電子物性では量子力学が、また、電磁気学ではマクスウェルの方程式が支配方程式である。情報に至っては、現時点で最高のソフトウェアを開発しても、将来的にそのソフトウェアが通用するとは限らない。コンピュータの構成そのものが変わる可能性があるからである。しかし、依然として学生には人気がある。これは、身近にこの分野を代表する製品があり、これらの製品が時代と共に変化しているからだと思う。ステレオやパソコンの普及がこれである。ステレオでは、レコードからコンパクトディスクに、またオープンリール式テープレコーダーからカセットテープさらにはPCMレコーダーと変化している。また、この10年間では、これまで信じられなかったほど高性能のパーソナルコンピュータが出回っている。

残念ながら伝熱が主体となって製品化した身近な物（家庭用冷蔵庫やエアコン等）は、外観が昔からほとんど変化しておらず、また、学生の趣味の対象ともなり得ないような物である。車やバイクといった学生に人気があってもよいような製品も存在するが、現在の高校の教育や家庭内の教育では、これらの乗り物は危険が伴うため、また、暴走族に代表されるように不良のイメージがつきまとうため、若い時に許可されるという例が少なく、学生の趣味となる製品とはなりえない。したがって、学生が趣味として家庭で使用できるような製品を開発すれば、伝熱の人気も上がってくるものと思われる。また、このような製品とは別に、社会的な関心のテーマも学生の人気につながっている。例えば、昭和50年代のオイルショックに代表されるエネルギー問題や、ロボットの普及である。この当時、機械工学に対する学生の人気は高かったと思う。したがって、炭酸ガス問題に代表されるように現在叫ばれている地球環境の危機が、伝熱工学が主体となって解決しなければならない問題であると社会的に認められれば、学生の人気も上昇し、将来の伝熱研究に対する危機も少しは和らぐと思われる。

いずれにせよ、現時点で伝熱の研究が研究の中心となっているテーマは、やはり新エネルギーや省エネルギー等のエネルギー関連分野であると思う。特に、地球的規模の環境問題が重要になってきている現時点では、これらのエネルギー関連研究はますます重要になってくるものと思われる。しかし、個人的にはこれらの研究に対する疑問も残る。それは、現状を見ると、車に対しては、3,000ccクラスの大型車が良く売れるという事実や、エアコンでは都市の温暖化が問題になるほど売れているという事実を考えると必要悪の研究をしているような気がするからである。すなわち、省エネルギーの研究を精力的に行なっても、より多くのエネルギーを消費するエンジンやエアコンが出回ると、結局省エネルギーではなくエネルギーの消費拡大につながってしまうという研究の宿命があるからである。このようなことは、たぶん最近になって日本の経済が豊かになってきてから出てきたことであると思われるが、一般大衆への省エネルギーについての意識の高揚やメーカーの販売自粛、あるいは何らかの国の政策により解決しなければならない問題であると感じる。例えば、家庭用エアコンの販売に対して「消費電力XXXX

『以下の商品だけを許可する』などという制令が定まれば、その範囲内で最高の性能を有する

エアコンを作ろうという研究意欲が湧いてくるものと考えられる。

また、材料製造過程の伝熱や電子機器の冷却、生体関連伝熱研究といった最近の伝熱研究の話題の中心は、伝熱工学自体が主体となる学問分野ではないが、異分野の研究者と意見を交換しその分野を発展させようとする活気に満ちているような気がする。すなわち、例えば材料製造過程の伝熱問題では、如何に高品質の材料を作るか、どのような材料が目的を達成するのに適切かといった材料の専門家の研究が中心とはなるが、そのためには材料の専門家は伝熱の知識を必要とし、また、その分野の研究を始めた伝熱の専門家は材料学の知識を必要とするからであり、いわゆる境界領域の研究となっているからである。また、このような分野における伝熱の研究は、まだ始まってわずしか経過していないため、まだ現象的に明らかにされていない点が多く、少しの工夫で大きな成果が得られる可能性も有しているからである。

特に、材料製造や生体の凍結等、凝固に関連した伝熱問題では、伝熱研究の先号に書かれているようにマクロな熱流とマイクロな結晶構造の因果関係のモデル確立が重要になると共に、このような材料の熱物性値の測定も精力的に進めなければならないと思われる。さらには、これらの研究を通して、最適な材料製造方法や凍結方法を提案できれば最高であると思われる。なお、マクロ・マイクロの連成問題では、分子動力学により将来正確に計算できる可能性はあるが、まだ1モルの分子数の計算もできないコンピュータの能力を考えると、まだまだ先のような気がする。したがって、現在のコンピュータの能力で比較的簡単にマイクロな構造を予測できるモデルを作る必要がある。また、熱物性値の測定では、現在使用しているデータが正確かどうか判断しにくいこと、また、電子機器の発展に伴って種々の新しい物質が使用されるようになってきていること等のため、現象をモデル化するためには、より正確な物性値が必要であり、より多くのデータの蓄積が望まれる。さらに、簡便に正確に物性値を測定する手法の開発およびこれまで不可能とされていた現象の可視化方法の開発も、各種伝熱現象の解明では重要になってくるとと思われる。

また、伝熱それ自体に重力場や電磁場の影響を考慮にいたした研究も重要になってくるものと思われる。これは、特にこれから21世紀にかけて、宇宙ステーションが実用化されつつあること、電磁場を用いて種々の伝熱量を制御し、高品質の結晶や高性能の熱交換器が実用化されつつあること等による。これらの特殊環境下では、まだまだ未知の現象が潜んでいる可能性が少しは残されていると思われるからである。

以上述べたようなテーマは現在も精力的に行なわれているものであり、新しい分野ではないが、将来的に取り扱う分野をさらに広げていけば、伝熱研究の未来はまだあると信じている。そのためには、他の分野の研究も見つめながら、伝熱が関与するテーマを積極的に行なっていかなければならない。私の年齢が30才であり、これから30年以上伝熱を武器として研究を行なっていかなければならないため、将来は灰色であると言っただけで何もしないわけにはいかないからである。

## 伝熱研究と学会

多田 幸生 (金沢大工)

「中堅・若手層はかく考える」という標題のもとに、記事の依頼を受けました。経験や知識に裏付けられたことは言えませんが、伝熱研究や伝熱学会について日頃感じていることを自由に述べさせていただきます。

### これからの伝熱研究

これからの伝熱研究は？という問題を考えるに際し、まずこれまでの歩みを振り返ってみたいと思います。最近、私の所属する機械システム工学科、熱移動研究室は創立20周年を迎え、これを機会にOB会が開催されました。図1は、20年間の卒論と修論のテーマをもとに滝本先生が作成された当研究室の研究史ですが、これより時代の流れと研究テーマの変遷を見て取ることができます。これについて林先生は20年史の中で「研究分野は、”熱と物質の移動現象”であり、熱力学的に不安定な場の緩和を如何に速度論に組み込むかが課題である。そして、これが研究のストラテジーにもなっている。着霜伝熱や対流場のミスト生成の研究に始まり、エネルギー有効利用につながる熱交換器の伝熱と促進、生体細胞や食品の凍結に代表されるバイオ伝熱、さらには材料製造における高レベルの伝熱と制御の問題へと発展している。これらの研究のあるものは、今は支流にあるが、やがて浩々蕩々たる潮流となるかも知れない。高度・多様化していく科学技術の世界にあって、工学研究のあり方はいよいよ難しくなっているが、質、効率、機能が个体技術のプレステージであり、个体に関わる全てを含む地球システムの恒久的維持が究極であろう。伝熱工学は、このようなソフトテクノロジーを構築するうえで、一層重要になるはずである。……」と書かれている。やはりこれからの伝熱研究を考えると、エネルギー変換技術に関わる伝熱を中心に、研究の対象を徐々に他の分野へも拡げ、研究の多様化を図る時期にあるように思います。そして、このことが伝熱研究の今後の発展につながるとともに、伝熱研究者に課せられた使命でもあると思います。

図2は、「伝熱促進」と「熱制御」を伝熱研究におけるキーワードとして、今後の課題を分類してみたものです。「環境」はキーワードではありませんが、「伝熱促進」と「熱制御」がアクティブな技術であるのに対してマイナス側の影響であり、これらをケアする総合技術の必要性からあえて加えたものです。「伝熱促進」の分野においては熱の移動速度が問題であり、最終的には効率の迫究が課題となります。地球温暖化につながる二酸化炭素の排出を抑制するための対策の一つが、省エネルギーの推進であることは周知の事実

であり、したがってエネルギーの有効利用だけでなく地球環境の保護の観点からも、この分野の研究は一層重要になると考えられます。そのためには、従来技術の限界を打破すべく、熱交換技術の複合化や高度化が環境保全に留意しながら追進されなければなりません。

次に、「熱制御」の分野にあつては、バイオ伝熱や材料の製造・加工プロセスにおける伝熱などが研究課題としてあげられます。前者においては、生体や食品を構成する組織細胞の凍結、過冷現象の解明と応用、生体内の熱・物質移動、医療技術などがテーマであり、また後者においては、単結晶育成法、CVD、急冷凝固（アモルファス）、一方向凝固における熱的操作条件と製造の高速化、超微粒子の製造における粒径制御など様々な工業操作がテーマになりつつあります。いずれも相変化(態)のあり方が問われる問題であり、したがって対象とする物や工業操作をよく知る必要があります。そのためには、今迄以上に関連学会の情報は重要であり、関連学会との交流を図ることが要望されます。また、この分野では現象のマイクロ化は避けられず、実験が益々困難なものになることが予想されます。このため、計測法の進歩だけでなく、マイクロ挙動と操作パラメータであるマクロ量の連成の解明が、研究進展のための鍵を握っているように思われます。

「環境」の分野においては、二酸化炭素の温室効果による地球温暖化対策が緊急かつ長期にわたる課題であるといえます。二酸化炭素の回収技術が確立されていない現状にあつて、まず環境に負担をかけないエネルギー供給を確保するためには、エネルギー利用の高効率化と廃熱利用などによる省エネルギーの推進と、それと並行して計画的に進められる自然エネルギーの開発が不可欠であると考えます。そのためには、前述したように熱交換技術の進展が必須であり、伝熱研究者に課せられた責任は重いと思います。また、これらの対策を講じて、ある程度の経済成長を維持するにせよエネルギー需要の伸びを抑えさせるのは難しいとされていることから、二酸化炭素の固定化、さらにはその廃棄または有効利用など、環境を積極的に改善する方向からの研究も求められています。これについては、植物の炭酸同化作用に学んだ二酸化炭素の固定化など様々な角度から研究が開始されつつあり、将来ぜひ取り組んでみたいテーマの一つと考えています。以上のような種々の対策を組み合わせつつ、その時点で可能な技術レベルで対処しながらより有効な技術開発を進めていくことが、地球システムの恒久的維持を図るための第一歩であると思います。

### 伝熱学会に希望すること

近年の伝熱研究では、各種の伝熱モードにおける基本的な現象を解明する段階を経て、より複雑な問題を精巧な測定法や解析法を用いて取り扱うことが多くなったように思います。しかし、これから求められている課題は、二酸化炭素の固定化や再利用、大幅な省エネルギーを実現するための熱交換技術の高効率化など、従来技術の延長や改善では解決が困難なものが多いように感じます。このような事を考えていたときに、可視化情報学会に入っている友人から、この学会では毎年、シンポジウムの際に可視化写真のコンクールを

行い、技術賞、芸術賞、努力賞などのユニークな賞を送っているという話を聞き、大変うれやましく思いました。学会の規模が異なることはもちろんありますが、伝熱学会もこのようなゆとりのある学会でありたいものだと思います。研究面においては、従来にない新しい試みの研究を積極的に受け入れ、評価する環境を作ると同時に、遊び心のある研究テーマがもう少し増えてもよいのではないかと思います。規模に相応しい幅広く高い研究レベルと研究会のような遊び心を併せ持つ姿が、伝熱学会の理想のように思えます。

次に、伝熱シンポジウムについて感じていることを述べることにします。年1回各地区持ち回りで開催される伝熱シンポジウムは、最新の研究動向を知ったり、会員相互の情報交換、親睦の場としての役割を期待されています。このような参加者の期待と、発表件数の増加によるプログラムの過密化、それに伴う情報交換の場としての役割の低下、研究内容の多様化による討論の希薄化などをいかに調整するかが今後の課題であると思います。また、オーガナイズドセッションについては今後もその充実が望まれますが、テーマによっては他学会の専門家の講演の機会を増やすことにより多方面から議論を展開でき、成果が上がるのではないかと感じています。また、プログラムの過密化に対する対策としては、ポスターセッションを一部導入してはどうかと考えますが、いかがでしょうか。

最後に本学会の今後の発展を祈念致します。

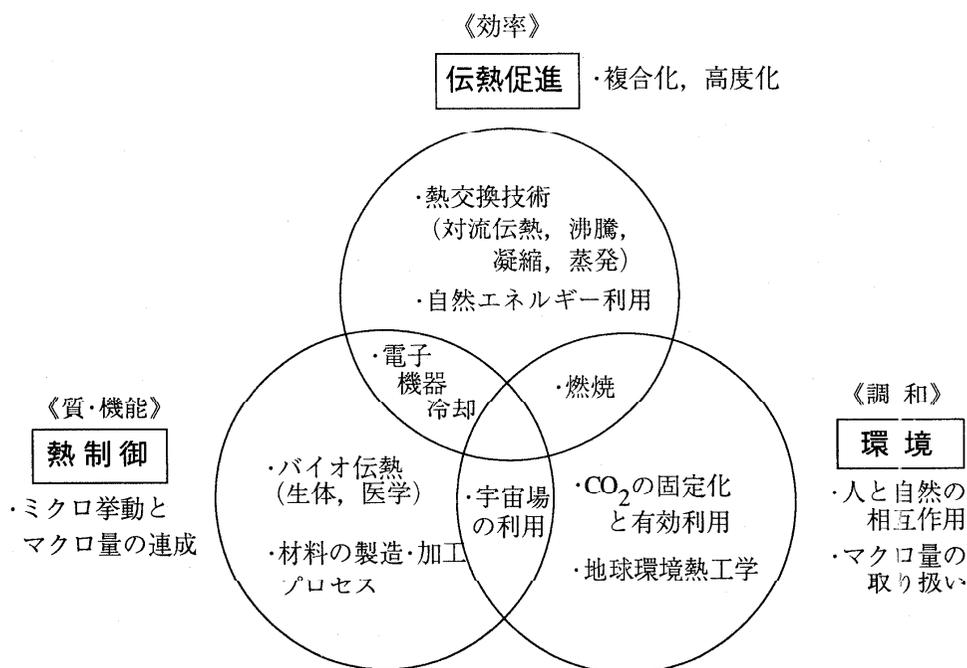


図2 伝熱技術



森 幸治（阪大工）

## 1. はじめに

最近、伝熱研究に関して灰色の展望がささやかれているようである。灰色という展望の背景にはいろいろなことが考えられるが、私なりの理解の範囲で考えると工業的にみて有用性が高い、あるいは学問的に斬新であるといったテーマが少なくなってきたということであろう。

確かに工業的な有用性は研究の必要性という意味で重要なことである。企業における研究開発はまさにこうあるべきである。しかし大学における研究の本質は、将来的に有用である成果を広く世の中に提供することとともに学問のレベルを向上させることであると考え、これによって世の中へ巣立つ学生の知識レベルも向上し、世の中に貢献できる。従って工業的な有用性あるいは斬新さとともに学問レベルの向上を考えた基礎研究にも力を入れる必要があると考える。いろいろなことを知るために専門書あるいは文献をよく調べるが、いまだ学問的に明らかにされていないことがかなり多く、研究対象はいくらでもあるという気がする。少なくとも私には伝熱研究の将来に関して灰色のイメージはあまりない。

ところで灰色の展望ということを考えて、研究テーマ以外にも重要な問題がある。それは将来の伝熱研究を支える若手研究者の確保が難しくなってきたことである。近年、大学院を卒業して大学で研究を志す人が少なくなっているようである。これは企業に較べて大学での研究は魅力がなくなっていることを意味していると考え、この問題こそ灰色の展望ではないだろうか。

本稿では、私が研究を進めるうえで重要であると考えることについて簡単に述べるとともに、5年間企業に在籍し企業の研究を見てきた者として、若者が大学での研究に魅力を感じるための条件についても少しふれてみたいと思う。

## 2. 研究を進めるうえで重要なこと

私の専門分野は気液二相流である。気液二相流においても幾度か灰色の展望を聞いたことがある。

かつて、企業に在籍したとき、「気液二相流」という言葉を口に出すと、それはいったいどのような流れか？とよく尋ねられたものであった。たしかに機械工学便覧を調べても流体工学の章の最後に数ページにわたって記述があるのみであり、また、気液二相流に関する書物も非常に少ない。ではなぜこうなのかと考えてみると、気液二相流の分野はまだ十分に学問として体系化されていないために、流体・伝熱工学の一部であるとしか認識されていないと考える。この背景としては、現象が複雑であり流動機構が十分に分っていないこと及び理論的なアプローチが他の学問と比較して少ないことが挙げられるであろう。気液二相流の研究はもともとボー

ラ、化学装置の設計に必要なものとして始められたと聞いている。従って工業的な要求からこの研究がスタートしているようであり、このため学問的な側面が少し薄いのかも知れない。しかし将来この研究がさらに発展し工業的に種々の分野において活用されていくために、また将来の研究者を発掘するためにも学問的に体系化しておく必要があると思うのである。

ではそのためには今後どのようなことを研究すればよいかである。これについては研究者によって意見が異なるであろうが、ここでは私の考えを二点に絞って簡単に述べさせていただくこととする。

まず最も重要なことは現象の正確な把握であると考ええる。しかし現象を的確に測定する手法が無ければ、現象の正確な把握は容易ではないであろう。従って計測技術を確立するための研究開発を積極的に推進する必要がある。例えば管内を流れる二相流の速度、圧力等の空間分布が非接触で測定できれば、二相流のみならず伝熱のあらゆる分野において現象の把握、機構の解明に役立つであろう。最近、工学の分野における計測法の多くはレーザーを用いたものであるが、工学以外の分野に目を向けると種々の計測法が見出せる。特に計測法に力をいれていると思われる分野は医学である。人体の断層画像が把握できるCTスキャン、微小電圧を正確に測定する脳波の測定、人体の内部観察用のマイクロSCOPEなど人体内で起っている現象を詳細に調べる計測法が多く存在する。伝熱の分野においてもより詳細に現象を計測する手法の研究開発を進めることによって、今まで困難とされていた現象の把握が可能になり、研究分野が拡大されていくであろう。

次に重要であると考ええることは、測定したデータから現象の解明に必要な情報を抽出するための分析手法の確立であろう。例えば液膜厚さの時間変動が分ったとした場合、そこからどのようにして変動の支配機構を抽出するかである。従来はパワースペクトルなどを用いて変動の統計的分析が行われてきた。しかしこれは時間平均的な結果を与えるのみであり、時系列的な特徴をうまく抽出できない。従ってこの時系列的な特徴を抽出するための分析法を確立する必要がある。最近、私はこの問題に対する一つの試みとして、カオス、フラクタルという考え方を利用して液膜厚さの変動分析を行ってみた<sup>(1)</sup>。これは、カオス、フラクタルが目新しいということではなく、この分析手法によって変動を支配する機構及びその数が予測できる可能性があるからである。この手法は現段階においてはまだまだ多くの難しい課題が残されているが、今後も進めていきたいと考えている。一般に新しい分析手法はその応用が容易でない場合が多い。しかし、現象の機構を解明するための有力手段となりうる可能性がある限り、これらの確立も今後進めていくべきテーマであると考ええる。

### 3. 若者に魅力のある大学の研究環境構築のために

ここでは、若者にとって魅力ある大学の研究環境とはどのようなものであるかを企業における研究環境と比較しながら考えてみたい。

まず、魅力を持たせるための基本的要件として主なものと考えられる項目を以下に示す。

- ①十分な研究予算
- ②研究を補助する職員，施設の充実
- ③海外研修制度の充実と海外出張の助成
- ④給与の向上

これらのなかで，給与については多くのところで議論されているのでここでは取上げないこととし，①～③について述べたい。

まず研究予算であるが，世に言う大企業に較べるとはるかに少ない。特に，高額の物品を購入したいと思ってもなかなか買うことができないのである。熊谷前阪大総長がある書物<sup>(2)</sup>において研究予算の少なさを訴えられ，「大学は今や世紀末の窮状である」と述べられている。またこの評論において，アメリカの大学教授は日本で最も施設，設備面で優れているといわれている大学を見て，「アメリカの三流大学にも劣る」と述べたそうである。

次に研究を効率的に進めるための研究を補助する職員，施設の充実が必要である。企業の研究開発は大学のそれに比較してはるかに短期間で実行する。この理由の主たるところは，企業においてある物を製作する場合，これを専門に行なう人が存在する。このため一人が全てのことをする必要はなく，重要なことだけに専念できる。しかし入学では技術的な仕事をしてくれる人が非常に少ない。また自分でやるとしても設備が十分に整っていないのである。

研究予算と研究を補助する職員，施設の充実がなければ効率的に良い研究を進めることはできない。国としてぜひ対処していただきたいところである。

さらに企業と比較して大学が劣るところは，海外に出るチャンスの少なさであろう。今や企業では，海外留学制度が当たり前である。それどころか海外に行かせるために会社負担で語学研修を行なっているところが多い。しかし大学ではこのような制度は正式には無く，行くとしても個人の負担が比較的大きい。留学制度とまではいなくても，海外出張の助成制度を確立して欲しいものである。

以上，企業に在籍していた者として，魅力ある大学の研究環境構築のための要件を述べた。今の大学の状況を考えると，大学に魅力無し 教官数が増加しない 仕事の負担が大きい という悪いパターンによって，教官の研究時間が十分に確保されなくなっているように感じる。私達の研究を進めるためにも，一日でも早く若者に魅力ある大学の研究環境を構築し，人材の充実を行なう必要があると考える。

#### 4. おわりに

伝熱研究の将来は灰色であるという展望に対して一般論ではあるが私の考えを述べさせていただいた。このなかにはかなり偏見に満ちたところがあると思うがお許しいただきたい。最後に伝熱研究に関する新たな研究分野の発掘に関して少し書き添えて本稿を終えたい。気液二相流を含む伝熱研究の対象としては一般的に工業的な分野を中心に考えられているように感じられる。しかし伝熱の問題はもっと身近なところにもある。例えば人間の体がそれである。人体伝熱研究 Vol.31, No.120

はいたるところで伝熱，二相流現象が存在する格好の研究対象である。またこの研究は人間が世の中に存在する限り終りのない研究になるであろう。もっと広い視野で研究対象を発掘することも必要であるとする。

#### 文献

- (1) 森ほか3名，第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集，C143(1991)，193-195.
- (2) 熊谷信昭，生産と技術，1990年1月号 巻頭言.

## 境界領域からの発展

神戸製鋼所 機械研究所 箕浦 忠行

### 1.はじめに

伝熱は、主に機械工学あるいは化学工学に関係する非常に広い工学分野にわたり取り扱われている学問体系である。さらに実際の伝熱問題は熱伝導および熱放射といった形態の異なる熱の移動に、流体流れや相変化などが複雑に重なることが多く、伝熱の統一的な取り扱いは困難である。特に流体流れや相変化が関係する場合は、一般に純理論的な取扱いには限度があり、基礎理論をベースにした実験的整理がその実験の適用範囲ごとに行われるため、結果は非常に多岐にわたっている。しかしながら、長年にわたる研究者の努力から機械工学や化学工学の分野においては、すでに膨大な知見が集積されている。

この様に、伝熱に関する研究は一見成熟しているかのように見えるが、少し目を外にむければ伝熱の研究を必要とする分野は数多くあると思われる。私は所属する企業の性格から種々の分野の伝熱の研究に関係したが、中でも製鉄の分野における伝熱の研究に関係することがしばしばあった。製鉄の分野で私の感じたことは、ここには伝熱に関する研究を必要とする問題がまだまだ数多く隠されていることである。しかしその多くは研究対象としての純粋な伝熱問題ではなく、種々の工学要素の複合した問題である。

私自身はこの様な複合問題に取り組んで行くことが、将来の伝熱研究発展のための一つの道ではないかと思う。そこで私の経験から私の身近に知る範囲で、製鉄の分野において例えば伝熱を含んだどの様な問題があり研究対象があるのか紹介し、さらに一企業の研究員として将来に向けた伝熱研究の方向に関する私見を述べてみたい。

### 2.製鉄の分野にて思うこと

現在の鉄鋼業は、巨大なエネルギー利用産業といえる。日本における規模は、粗鋼生産量で年間約1億1200万t(平成2年度)でありエネルギー消費量は石炭換算で年間約7000万tといわれている。巨大な熱エネルギーを取り扱う産業であるため、伝熱に関する改善あるいは新しいプロセスの導入は計り知れないインパクトを与える。それだけに伝熱に関係する研究は非常に重要である。ここでは製鉄の分野における私の身近に知る伝熱関連問題の一部と、将来望まれる研究およびその成果への期待を記してみた。

#### \* 温度測定の高難しさ

製鉄製鋼工程では、鉄は熔融状態(ここでは以下溶鉄と呼ぶ)で処理されその温度は低くても1300-1400°Cである。また溶鉄内の各種反応に伴い種々のガスが発生する。このガス温度

伝熱研究 Vol.31, No.120

は溶鉄温度に近い場合によっては発生後の反応により溶鉄温度よりも高くなる。プロセスの熱収支を正確に把握するためには、このガス排出温度を正確に連続して測定する必要があるにもかかわらず、一見実際の生産現場では当り前のように思える高温ガス温度の連続測定は現実には非常に難しい。問題点としては、一般にガスに含まれる溶融体（溶銑あるいは溶鋼、スラグ等）の温度センサー保護管の寿命に与える影響や、周囲固体壁などからの放射伝熱による影響を挙げることができる。さらに溶鉄温度の連続測定さえも、現在のところ非常に難しい課題なのである。

温度測定環境は非常に厳しいが、このような高温ガス温度や溶鉄温度が正確にかつ連続して測定できるようになれば、現状のプロセスの理解はもとより、伝熱研究一般において研究の基盤が固められることになる。

高温ガス温度や溶鉄温度連続測定技術の確立のためには、保護管材質も含めた従来技術の研究の他に、伝熱とは分野を異にするかも知れないが、新しい温度測定方法の確立が望まれる。

#### \* 燃焼反応・放射

溶銑溶鋼処理炉内（例えば転炉）上部空間では、発生ガスの燃焼により燃焼火炎から溶銑溶鋼あるいは耐火物壁に熱が移動する。しかしこのような高温の領域では、熱は主に放射により移動すると考えられ、熱の移動特性の評価は非常に難しいのが現状である。問題点としては、噴流や旋回流も含めた高温特殊状況下での燃焼火炎特性（理論的、実験的）把握の困難さと、炉形状や境界条件を考慮した放射伝熱の定量的評価の困難さを挙げることができる。

炉内の燃焼反応、放射特性の評価が精度良くできるようになれば、現状のプロセスの理解が飛躍的に進み、その改善に大きな寄与が出来ると共に、新しいプロセスの開発にも貴重な技術となる。

燃焼反応・放射の定量的評価技術の確立のためには、燃焼、放射および流体力学を考慮した理論的実験的研究が望まれる。

#### \* 気液二相流伝熱

溶銑溶鋼処理炉内上部空間では、条件によっては上吹きジェットにより気液界面から巻き上げられた溶融体（溶鋼、溶銑、スラグ等）が、上部空間内での伝熱および反応に大きな寄与をしている。さらに炉体の底からガスを吹込み、積極的に溶融体を上部空間に吹き上げることも試みられている。製鉄プロセスにおいては、このような溶融体とガス間の伝熱問題が数多く有るが、気液二相混相状態にある溶融体の伝熱挙動となると、それを把握する研究がまさに始められたというのが現状である。問題点としては、放射伝熱の影響が強く二相流の挙動が非常に複雑で把握が困難なことである。

このような高温気液二相流伝熱評価技術確立のためには、放射、流体力学、混相流、反応等を考慮した理論的実験的研究が望まれる。

#### \* 溶融体流れ伝熱

特に鉄鋼製品の品質の確保のために、溶鋼温度の管理は年々重要となりその精度も厳しくなっている。溶鋼中にガスを吹き込み、ガスのもつ運動エネルギーあるいは浮力によるエネルギーを利用して溶鋼を均一に混合攪拌させる技術あるいは電磁攪拌技術は、すでに多く用いられている。プラズマ加熱はじめ種々の溶鋼温度制御技術が実用化され、その成果が報告される一方では、基礎となる溶鋼流内温度解析技術の必要性が高まっている。

共通技術的性格が強く、多くのプロセスに適用可能なことから、流体力学を中心とした溶融体流れ伝熱解析技術の研究が望まれる。

#### \* 固気二相流伝熱

最近原料の新しい処理技術の研究も盛んに行われるようになった。例えば気泡タイプの流動層や循環流動層などを用いた鉄鉱石の予備還元技術である。特に循環流動層による鉄鉱石の予備還元技術は最近多くの研究が行われている。ところが固気流と伝熱壁あるいは伝熱管との間の熱伝達、ガスと粒子流との混合特性等今後の研究を要するものも多い。

固気反応炉への応用も含めて、流体力学、混相流、放射、反応等を用いた理論的実験的研究が望まれる。

以上製鉄分野において今後伝熱の研究が必要となるいくつかの例をあげたが、純粋に伝熱だけの問題が残されているわけではない。これらのほとんどは、流体力学、燃焼工学、金属工学、化学などと強くむすびついているのである。

### 3. 将来に向けて

企業人からみて、何が役に立つ研究かを考えた場合、事業に貢献できるものが第一優先である。企業において、研究成果は生産効率の向上、製品品質の向上、環境の改善、新技術の開発などに役立たなければならない。研究は現象の理解にとどまらず、目的を達成するための定量的指針を与えるものであることが強く望まれる。研究のための研究ではなく、研究者一人一人が研究の最終目標が何であるのか、何を求められているのかを良く理解した上で研究に取り組む必要がある。

ある工業プロセスの開発にあたって、基礎研究が開発部署とは全く別のグループで行われたことがあった。相互のコミュニケーションがうまく働かなかったために、各研究者は研究の最終目的を自分なりに解釈し進めることとなり、得られた研究結果はこのプロセス開発が本当に要求するものからは、かけ離れた物になってしまっていた。こうなっては困るのである。

さてこの様に具体的な目標を持った企業の研究として、伝熱の専門分野を生かした将来の研究の方向についての私の意見をまとめてみた。

#### (1) 境界領域への移行

前述の様に、製鉄の分野には伝熱関連の課題が数多く残されており、研究の成果が十分に伝熱研究 Vol.31, No.120

生かされる可能性が多いにある。ただしここで問題に踏み込まずに、伝熱のみの問題に固執すればその研究は主役になれずほんのわき役で終わってしまうであろう。本当の主役になるためには、問題に踏み込み伝熱の枠を抜け出すことにあると思われる。つまり研究対象が関係している製鉄プロセスの本質を理解し、その研究に要求されているものを的確につかみ、かつ金属工学、化学等の十分な知識を身につける必要がある。

この考えのもとに私自身は、製鉄分野の中の境界領域に身を置き、境界領域にある研究を進めることが今後の方向と私自身位置づけている。ここであえて境界領域と呼ぶのは、伝熱にも関係し他の工学領域にも同等に関係しているからである。

製鉄の分野に限らず、伝熱の方法論が適用でき企業としての視点からみて、成果の上がる研究対象であれば、何も伝熱のみに固執する必要はないと考える。むしろ従来の研究分野以外に、研究対象を積極的に探索する努力が必要と思う。特に伝熱以外の分野にどの程度踏み込むかが重要な点ではなかろうか。

## (2) 新しい技術の開発

今までの伝熱研究は、現象の理解という点に力点が置かれ、技術の開発という要素が少なかったように感じる。世の中の新しい技術の多くは、全く他に例をみないアイデアの創出といった物は少なく、すでにある技術の新しい組合せであろう。色々議論があり、一概には言えないが日本人は解析技術には優れている一方、新しい技術の創造は苦手な様に感じる。

製鉄の分野でも同様なことが言えるのではなかろうか。私自身も製鉄分野の研究に関係して、問題に出会う度にもっと効率のよい異なった発想のプロセスはないか、伝熱方法がないか等検討し、今までのような解析的研究だけではなく、異なった角度からの解決方法を見いだす努力をしており、これが今後の研究のアプローチの一つであると思っている。

製鉄以外の分野においても同様に、更に異なる分野を知ることで、新しい分野の技術と伝熱技術との組合せによる新しい技術を創造するというアプローチも、今後益々重要になると思う。

## (3) 長期的ビジョンのある基礎研究

伝熱の基礎研究は研究成果そのものが、直接工学的に役立つということは少ないが、広く考えやアイデアの基盤となる。伝熱の基礎研究を目指す人々への要望も含めて述べれば、基礎研究は単発的なものではなく、長期的な視野に立った広く工学的に利用度の高いものであって欲しい。

機械工学や化学工学の分野では、基礎研究の成果が体系立てられているものの、製鉄分野を含め他の分野では今後の成果に期待するところが大きいと思う。

以上述べたように、伝熱に関する今後の研究は、今までの枠を越えたところに新しい展望が開けるものと思っている。現在製鉄分野に関係している私自身も、もっと広く廻りを眺めてみようと思っている。

## 伝熱研究についての現在の興味

長崎 孝夫（東工大）

はじめに

一頃盛んであった”伝熱研究に将来はあるか”との議論も最近耳にしなくなったように思う。これは新分野への展開、また部門性移行、学会設立などに伴う活性化と多忙化によるものであろうが、研究の新しい方向性を打ち出していくのはなかなか難しい問題である。今回、若手研究者はかく考えるということで紙面をいただいたので、筆者が日頃考えていることを書かせていただく。

### 1. 伝熱研究の過去と将来

筆者がこの道に入った十余年前はエネルギー危機の時代で、伝熱促進、省エネ、新エネルギーなど研究テーマについて明確な方向性があり、challenge & break through, target orientated などの言葉が素直に受け入れられた。その次はおそらくハイテク時代で、電子機器、材料製造など先端技術にかかわる熱問題が取り上げられ、多様な分野に研究のターゲットが向けられるようになったが、同時に伝熱研究が、解決すべき問題の第一線から後方支援的な役割に変化した部分もあるかもしれない。このあたりが研究分野の将来性についての危惧のもとであろう。

もちろん産業界において熱が関係する現象についての研究が必要なくなると思えないし、学問的興味から観ても扱う現象は多岐にわたり奥は深く、また大学工学部において熱関係の教育が必要なくなると思えない。工学の基礎分野の一つとして、その重要性、研究の必要性は今後も変わらないと思う。しかし単に従来の研究の継続で将来の発展があるとは思えないし、また社会的ニーズが即、新しい研究の駆動力を与えてくれる状況でもなかろう。抽象論ではあるが、その時々において社会的重要性が高い現象、あるいは重要になるであろう現象に注目して熱にかかわる問題点を抽出し最新の手法を駆使して解決していく、同時に現象を基礎的な立場から探求し、できれば既存の学問体系、技術体系の枠から飛躍した新しい概念を打ち出す、そのような姿勢が必要だと思う。

伝熱シンポジウムは毎年盛況に開催され、現在のところ研究者の層の厚さ、世代の継続など学会のポテンシャル、アクティビティは高い。また伝熱学会の守備範囲は広く、それぞれの先生がより専門的なソサイエティないしは研究グループで活動されており、これまでそれらが研究会としてうまくまとまってきたと思う。今後学会化に伴い、より広い分野に範囲を拡大していくことが伝熱学の新しい展開に必要であろうが、同時に柱を明確にし伝熱研究 Vol.31, No.120

て求心力を保つことも必要であろう。

## 2. 現在の興味

伝熱においてどの研究分野が将来的に重要であるか確信はないが、応用分野としては電子機器, material processing, 生体伝熱, 宇宙関連, また熱工学の源流であるエネルギー問題として地球環境の観点から見たエネルギーシステム, 熱・物質輸送などが研究テーマとして当面重要のように思う。以下では筆者が現在関心を持っている事柄について述べさせていただく。なお筆者が現在専門に行っていないことにも言及する点をお許しいただきたい。

### ◎ 計算熱流体力学

計算機の性能向上は目ざましく、スーパーコンピュータ, ワークステーションなど各クラスの機器で計算可能な範囲が確実に拡大を続けており、数値シミュレーションに対する関心, 期待は大きく、その時点の最高性能の計算機を駆使した計算、ピーク性能を引き出す計算技術を追及することは数値計算の到達点を知るために重要であると考えている。これに伴い数値計算が単なる手段ではなく、計算力学という言葉が示すようにひとつの技術・学問体系として定着している。以下、熱流体の数値計算の今後のあり方について考えるところを述べる。

#### ・ 計算結果の信頼性について

以前は理論解析といえれば現象をモデル化するところから始め、解析的あるいはわずかな計算労力で解を求めたものであり、仮定した理論モデルの検証のために実験結果との比較が最後に必ず行われた。一方現在、なんらのモデル化を行わずに基礎方程式の解を数値的に求めたとういうことで、計算結果の不確かさについて十分検討されないことが多いように思われる。現在、単なる单相の流れに関してはかなり複雑な境界形状についても3次元計算が可能であり、特に最近進展が著しいコンピュータグラフィックスにより、結果をたいへんリアルに表現できるようになっている。ではそれがどのように役に立つかを考えてみると、航空機の風洞実験のように実験コストが著しく高価な場合には数値予測の持つ意味は大きいと思われるが、多くの場合、数値シミュレーションは流れのだいたいの感じをつかむ程度のもので、正確なデータは従来どおり実験に頼らざるを得ないのが現状のように思う。これまで単純な系についてはベンチマーク問題として詳細な精度の検討が行われているが、工学的応用の面から考えると今後、実際に現れる複雑な問題についても、計算結果の信頼性の評価方法、およびその評価結果に基づき計算の修正を行う系統的方法を確立する必要があると思う。これに関連して複雑形状に対し精度よく解を求めるための格子生成手法も重要な課題と考えられる。

#### ・ 乱流のシミュレーション

单相流に限れば、数値計算上残された主な問題は乱流の取り扱いにあらう。以前、”数値計算で何が分かるか” という議論があった。たしかに数値実験により新たな現象が発見

される可能性は少ないと思うが、基礎式の直接シミュレーションにより実験的に計測不可能な乱流の微細構造を明らかにしていくのは興味があり重要なことだと思う。関係の諸先生の御研究には敬意を表する。これら Science 的取組と同時に、実用計算に適用しうる統計平均モデルについても、非等方性が強い場への適用、乱流熱流束のモデル化、複雑形状問題に適用した場合の結果の信頼性など、従来のではあっても探求すべき課題は多いと思う。

これら単相単成分の場合に加え、多成分系で反応を伴う場合、また気液、固気など多相系の場合の乱流挙動は不明な点が多々多く、数値計算においても計算機の性能向上に対応して今後なしていくことは多いと思われる。ちなみに筆者は現在、表面波を伴う自由界面における物質輸送（ただし今のところ層流）について研究を行っているが、自由表面における乱流挙動についてもいろいろ言われているわりには決定打がない。多相の乱流流れで直接シミュレーションに近い計算が当面可能とすれば、開水路の自由表面流れ、希薄な微粒子分散系のような限られた場合であろうが、直接計算によりこれらの流れの構造が明らかになれば現象の理解およびモデル化に資するところは大きいと考えている。

#### ・ 伝熱数値計算技術の体系化

最近あるセミナーで "CFD から CHT (Computational Heat Transfer) へ" という言葉を目にした。たしかに対流伝熱の計算においては流れ場の計算が中心になるが、例えば相平衡を含む多成分系の熱・物質移動、ふく射を含む問題、融解凝固を伴う問題、広範囲の Pr 数、Sc 数に対する乱流輸送など熱に固有の現象は多い。これまで個々の現象ごとに多くの数値計算が行われているが、そのわりには対象が多岐にわたるためか CFD のような研究レベルでの体系的なまとまりに欠ける感がある。ハードウェアの進歩に合わせ、伝熱現象そのものに力点を置いた数値計算手法を発展させていくことは分野のアクティビティの一つとして今後も重要であり、同時にそれらを伝熱工学における数値計算技術として体系化していくことも必要と思う。

#### ◎ 可視化研究について

最近、ビデオ機器の進歩およびデータ処理の高速化にともない従来の点測定から 2 次元および 3 次元の測定が進展しつつあり、粒子追跡、LIF などの可視化測定、時系列画像データの処理方法は今後ますます重要になると思う。また数値計算においても 3 次元の計算結果をいかに分かりやすく可視化するかは重要であり、ボリュームレンダリング、CG アニメーションなどの普及が望まれる。それらグラフィック手法は単にプレゼンテーションとして見せるためだけでなく、計算結果の検討、また格子生成における対話処理の能率化において重要な要素である。また教育の立場においては学生の興味を喚起し人材の育成に勤めることも重要であるが、この時、可視化のスライドやムービーはたいへん効果がある。これらの可視化結果を OHP やビデオの形で教育用に市販すると有用と思う。

### ◎ 分子レベルの熱流体现象

最近、減圧CVDにおける希薄気体流れ、分子数で数えられるオーダーの薄膜の物性など連続体の仮定が成立しない現象が実用の問題に現れている。筆者は現在、薄膜生成に関連して低圧下での金属蒸気の断熱膨張によるクラスター粒子の生成に関する研究を始めているが、このような核生成の問題についても従来の巨視的な熱力学による扱いでなく、計算機に支援された分子力学的手法により新たな展開があるのではないかと考えている。いわゆるナノテクノロジーの進展に伴い、分子レベルの熱流体现象も重要になると考えられ、実験に加えて、分子シミュレーション、DSMC等を用いた現象解明の試みは重要と考えている。

### 3. おわりに

以上、思いつくままに現在の興味を書かせていただいたが、独創性に乏しい点、内容が片寄った点をお詫びする。本文は私個人のごく狭い興味分野を述べたもので、伝熱学において興味深く重要な研究対象は多く、年齢の上下を問わず諸先生の御活動には触発されることが多い。また伝熱研究にかかわる研究者が一同に集まる伝熱シンポジウムは交流の場として、また日本国内における最新の研究を完成度にとらわれずにまとめる上で重要である。研究を停滞させず視野を広く持てば、伝熱研究の活力は今後も衰えないと考えている。

## 将来の伝熱研究についての雑感

平井秀一郎 (阪大工)

「伝熱研究の未来」について学会の懇親会等で時々話題として登ることがふえているようである。「伝熱研究の未来はまだ十分に明るい」と聞いたこともあるし、逆に「伝熱研究の未来は必ずしも明るいものではないのではないか」という声を聞いたこともある。後者の声を私がはじめて聞いたのは、5～6年前の伝熱シンポジウム懇親会後の2次会だったように記憶している。また、最近の伝熱セミナーのタイトルに、「夢伝熱・・・」とか「New Phaseに挑む・・・」という名がつき、伝熱研究の新しい展開が語られ始めているのは、やはり従来から行ってきた研究をそのまま延長して行ってもいいのか？という意識が芽生えつつある面もあるからであろう。

伝熱に関する研究は、かなり前から行われている。その目的は、伝熱の現象の理解であり、伝熱促進や伝熱制御であろう。その目的達成のためのレーザ等を用いた計測機器は著しい発展を見せ、また、伝熱現象を数値解析するためのハードウェアや計算スキーム、数値モデルも目をみはる進展をしてきている。機構が明確でない伝熱現象の理解や、数値予測の精度が十分でないための数値モデルの開発とか伝熱研究としてやることはまだまだたくさん残っているようである。しかもそれらの研究は、伝熱に関連する技術の発展のために昨今も変わりなく重要であり必要であることは異論のないところであろう。

それにもかかわらず、伝熱研究の「未来」とか「夢」について話題に登るのは、伝熱研究として現在行われていることが、いわゆる”最先端の研究”として注目されている、たとえば「遺伝子」、「半導体」、「核融合」とかの分野に比べて地味でどちらかというと古くさいイメージを与えていることが原因の1つとして考えられると思うし、また、伝熱の研究は範囲が広く一概には言えないが、たとえばエネルギーとか環境とか現在世の中で重大な関心もたれていることに対して、基礎研究であれ応用研究であれ、有用で重要な寄与が研究が完成したときになしうるかどうかということも原因の1つとしてあると思われる。

今、”最先端”と言われる「遺伝子」、「半導体」、「核融合」等の研究は、分子・原子オーダーレベルで分子・原子のもつ性質を解明し、能動的に制御し、利用しようとする分野の研究である。このような分野が”最先端”と言われるのは、マクロな状態量で考えていたのでは不可能であったことが分子・原子オーダーで考えることにより可能になり、

画期的なことができる可能性を含んでいるためであると考えられる。このような原子・分子のもつ固有の性質を伝熱の研究にとりいれていく、または原子・分子レベルで伝熱を直接制御するという事が始められているし、これからもおもしろいのではないかと思う。ここ数年、各地で開かれた伝熱セミナーもこのようなことの話提供が多かったように思う。

ただ、そのようなことを従来の機械工学を専攻した者がやろうとした場合に問題として生じるのは、量子物理、量子化学等の基本的な知識の欠如であり、意味不明の業界用語に対する戸惑いであろう。私自身物理や化学に関する文献を読む機会が最近多いが、意味不明の略語や言い回しに驚き、「読む」はずのものが「図を見る」程度のことで終わってしまう場合もある。しかし、分子・原子レベルでの伝熱または分子・原子の性質を利用する伝熱は、物理・化学・生物の人が大切だと思うことと機械工学・伝熱工学の人が大切だと思うことが違う場合が多いと考えられ、機械工学を専攻したものが機械工学の目を見た場合と他の学問を専攻した人とは視点が異なるため、いろいろとおもしろいテーマが多いのではないかと思う。

ここでマクロな量を計測するのにバルクの性質だけに注目しているとできなかったことが、原子・分子のもつ固有の性質に着目するとできるようになることを、私共が行ってきた「圧力を計測する」ということを例にとって以下の(1)～(3)に述べてみたい。

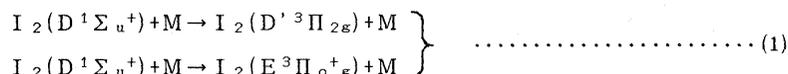
#### (1) 気体分子の蛍光を用いた圧力の非接触測定について

従来の圧力計測は、ほとんどの場合、器壁で圧力を計測することが行われてきた。空間的に不均質な圧力分布を有する場合や、それらが時間的に変動する場合には計測が困難であることが多かった。私共は現在、気体分子の吸収帯にレーザー光の波長を同調させたときに生じる蛍光という光を利用して、非接触でガス圧力情報を引き出す研究を行っている。気体分子のエネルギー準位間の遷移により生じる蛍光の強度が圧力により変化することに注目し、それを検出することにより、従来の計測技術では不可能であった空間内局所圧力の非接触計測が可能になり、高空間／高時間分解能の計測ができるようになる。

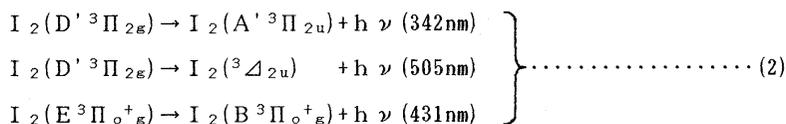
#### (2) 蛍光による圧力計測の圧力測定範囲について

(2-a) 蛍光は一般に圧力が高くなると消光（励起状態にある原子・分子が他の原子・分子と衝突することによりエネルギーを失い、光を放射せずに基底状態に戻ること）の影響により蛍光強度が減少する。このため、蛍光はたとえば大気圧以上の圧力は計測に適さない場合が多い。ヨウ素分子をアルゴンイオンレーザーの514.5nmの光で励起するとこの現象が観察される。

(2-b) ところが、同じヨウ素分子 ( $I_2$ ) に193nmのArFエキシマレーザー光を照射すると、ヨウ素分子は、 $D^1\Sigma_u^+$ の電子準位に励起され、この電子準位は他分子（バッファーガス分子： $M$ ）との衝突で消光よりも顕著に、式(1)で表される他の電子準位 $D'^3\Pi_{2g}$ および $E^3\Pi_{o^+g}$ へ遷移する現象が生じ、



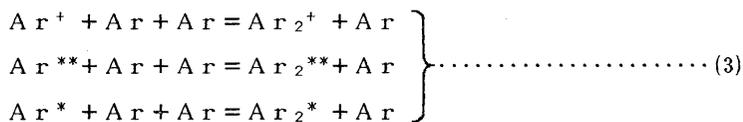
$D'^3\Pi_{2g}$ および $E^3\Pi_{o^+g}$ から下位の準位に落ちるときに式(2)の括弧内の波長域に蛍光放射が起きる。



式(1)で表される電子準位間の遷移はバッファーガスの圧力が高くなるに従って起きる頻度が増加するため、遷移した後の電子準位から下位の電子準位に落ちるときに式(2)で表される蛍光の強度は、圧力の増加とともに増大する特性を持っている。(2-a)と(2-b)では、入射する光の波長が異なるため、励起される電子準位が異なるだけであるが、蛍光強度の圧力依存性がお互いに逆になり、(2-b)の手法により大気圧付近またはそれ以上での圧力計測が可能となる。このように分子固有の性質に注目する事により、いままで計測が困難であった圧力範囲を計測できるようになる。

(3) 蛍光による圧力計測手法の高感度化について

(2-b)の機構が式(1)で示される気体分子間の2体衝突を用いているのに対して、気体分子間の3体衝突を蛍光発生機構の途中に用いると、電子準位間の遷移確率が分子数密度の2乗に比例するため、このことを用いて高感度の圧力計測が可能となる。ArFエキシマレーザー(193nm)は、1光子あたり6.4eVのエネルギーをもち、レーザー光をレンズで集光しエネルギー密度の高い状態を作り出せば、アルゴン(Ar)は3光子吸収を起こしてイオン化( $Ar^+$ )し、Arのプラズマ状態が生成される。Arのプラズマ状態は式(3)で表される3体衝突を誘起するため、



この機構を蛍光放射過程に含んだ蛍光強度は、圧力に対して高感度に変化する。このように、気体分子間の微視的な反応機構に注目する事により、計測感度を向上させることができる。

圧力は伝熱と密接に関連する流動現象の重要な物理量の1つである。(1)~(3)のように、圧力というマクロな量を計測することでも、気体分子が放射する蛍光という光を理解し利用すれば、ガス圧力を非接触でかつ高時間・高空間分解能で計測し、また高压での計測や高感度計測が可能となる。

各地の伝熱セミナーでとりあげられた伝熱を原子・分子レベルから考えることは、伝熱研究の重要な方向の1つを指しているように思う。しかし、先ほど述べたように、連続体の力学に慣れ親しんできたものが、量子的な力学へ脱皮するには戸惑いもあろうし、また、先端領域で伝熱がどのようにかかわってくるかその様子を理解するのが難しいこともある。そのためには、基礎・応用研究および技術開発のいたるところで見られる物理現象である“伝熱”について発表し議論する場である“伝熱シンポジウム”が、今まで多くの場合“純粋な伝熱屋”の講演・ディスカッションの場であったことから脱皮し、“伝熱”の範囲を広げ、物理・化学・生物等の分野の人や、熱の要素を含む先端の開発に取り組んでいる企業の人にシンポジウムへの参加を促し、たとえばマクロな伝熱屋とミクロな物理・化学者の間で有機的で活発なディスカッションをする機会を設けることが必要になるだろう。また、今後も伝熱セミナー等で、幅の広い「伝熱」を考えていく必要があるように思う。

## 21世紀に向けて

松島 均（日立機械研）

### 1. はじめに

最近よく経験することとして、物事を気軽に引き受けると後でひどいめに合うというのがある。今回の伝熱研究の原稿の執筆依頼を引き受けてしまったのも例外ではなさそうである。迷いながらもなぜ引き受ける気になったかという、今回の原稿の執筆が自分自身を問直してみる良い機会であると思ったからである。今後21世紀に向けてどのような研究をやって行くべきかについては、考えようとは思いつつ日常業務に追われてそのままにして来てしまっているのが現実である。もし、これを機会に常に考える習慣が出きれば将来有益なことは言うまでもない。

但し、与えられた「中堅・若手層はかく考える」のテーマの大きさを考えると十分な答を出すのは容易なことではない。このため、現在私が関係している伝熱問題の数値解析に関する研究の紹介とその主なる興味や感想という話題に限らせていただくことにする。

### 2. 伝熱問題の数値解析

半導体素子の高性能化を背景とするコンピュータの進歩の早さには改めて感心させられるものがある。私がか会社に入社した10年前にはまだ流れの数値計算などは極く少数の方々がやられていたように記憶しているし、かつその取り扱える対象も大変限られていたように思う。それが1980年代に特に顕著であったスーパーコンピュータの出現とその普及により状況が一変した感があり、大規模な系に対する流れ解析がかなり一般化して来たように思われる。先日1991 ASME/AIChE National Heat Transfer Conferenceに論文発表ができる機会があり、電子機器の冷却のセッションを中心に聴講したが、実に17件中の12件が数値解析に関する発表であった。（この際に、私が数年前に留学していたおりに大変御世話になったProf. ViskantaをはじめPurdue大学の諸先生と再会することができたのは大変良い思い出であった。）

熱流動の数値解析をやる者としては非常にマイナーなことであると思われるが、我々の所では有限要素法を用いた解析を行っている<sup>1)</sup>。一般的に有限要素法が差分法に比べて優利なのは非構造系のメッシュが扱えるために複雑形状の取り扱いが容易なことであり、また熱応力解析等の構造解析プログラムとのマッチングも非常に良い。一方、有限要素法が不利な点は各要素の形状マトリクスを記憶しておく必要があるために多くのメモリを要すること、移流項の取り扱いが多少面倒で工夫が必要であること、及びコントロールボリューム法のように要素におけ

る熱バランスや質量バランスを“完全”にとることが難しいことなどである。

我々が目差しているのは熱伝達、熱伝導、輻射あるいは相変化とした伝熱現象が混在する複合伝熱現象に対する汎用的な数値シミュレーション技術の確立である。対流、熱伝導、輻射、相変化あるいは化学反応といった伝熱現象は世の中のハイテク化とともに製品の製造プロセスにおいて必ずといって良い程顔を出して来るものとなっている。また、機器の自然対流冷却に対するニーズも相変わらず根強いが、この場合には対流のみならず輻射が重要な因子となっている。さらに、空調室内の快適性については空調機による対流、まわりの壁からの輻射、あるいはこれに温度や湿度の分布といったものが複雑にからみ合ったものになっている。これらのものを汎用的に取り扱えれば製品開発に対して強力な武器になることが期待できる。

このような仕事には、複雑な物理現象を適当にモデル化しながら組み合わせて扱える面白さがある。例えば実際の真空機器における熱問題（輻射と熱伝導）を扱った際には、こんなに複雑な形状の構造物内での伝熱をうまく解けるものかとひやひやしたり、なんとか解けた時には感激したものである。

しかし、現在のコンピュータのメモリサイズや計算時間を考えると上記のものはあくまでも研究開発用のツールであり、工場の設計の人がパラメータサーベイ的に手軽に扱えるものとは言い難い。私見ではあるが、この状況は他のソフトを使った場合においてもそう著しく変わるものではないと思われる。

ただし、超並列のスーパーコンピュータなどが登場してくるであろう21世紀初頭においては、全ての予測を数値シミュレーションでやるということもあながち夢ではないと考えられる。そうなるとかなり多くの事がコンピュータによる計算によって決定されるようになるであろう。

### 3. 物理的直感の重要性

この場合、あまりに数値計算に頼ることは若干の危険性が伴うような気がしてならない。すなわち、数値解析に頼りすぎると物理的な直感が薄れ、式に表われてこないような本質的な事を見のがすのではないかという事である。筆者の勤める会社には系列会社を含めた社内の中事業所を対象にした研修所があり<sup>2)</sup>、その中の一つとして電子機器の冷却に関する講座が行われている。筆者もその研修の社内講師をここ数年担当しており、職場の実際の熱問題に対するグループ討議などを行っているが、最近仕事上で数値解析に対するウエイトが高くなって来たためか“物”に対する感覚が若干薄められて来た感じがあり、適切なコメントをするのに苦労した覚えがある。実際の物を対象にした場合に、放熱経路を的確に把握し、熱抵抗のオーダーを評価し、有効な対策を与えられる能力、つまりモデリングの能力が大変重要であり、常にそれをみがくように心掛けなければならないというのが最近の反省である。

このことは実験とのほど良いバランスが数値シミュレーションの発展に対し不可欠であるというふうに言い換えることができる。すなわち、数値解析は単なる“数値計算”ではなく、その

使用の背後に物理的なバックボーンを持ったものであることが望まれる。

#### 4. おわりに

この他としては、21世紀にはエネルギー問題がまた脚光を浴びる時代が来るものと考えている。例えば、核融合の関連では超高温での断熱や熱制御など新しい伝熱問題が山積していると思う。

さらに、最近注目を集めているミクロンオーダーの領域での伝熱現象なども大変面白い内容を含んでいると思う。この場合には現象の統計的な取り扱いが必要になり従来の伝熱工学を一步進めた取り組みが必要になって来る可能性がある。

以上の考えは一企業に勤める一研究者の狭い視点からのものであり、かなり独断的なものであること、及び内容がかなり散漫になってしまったことを御容謝願いたい。

#### 参考文献

- (1) 守田, 池川, 鹿野, 松島; 機械工学におけるスーパーコンピュータの高度利用, 機械の研究, 第43巻, 第1号, (1991), p8.
- (2) 志田; 21世紀に向けての技術教育, 日本機械学会誌, Vol. 94, No. 875, (1991-10), p889.

## 1. はじめに

伝熱研究の将来に対する不安が語られているということであるが、私は非常に楽観的に考えている。不安というのは自分の現在の研究と盛況な伝熱シンポジウムを固守しようとするから生まれてくるのであって、研究の方向と自分自身も常に変わるべきものであると考えれば心配すべき問題はない。当然ながら、伝熱研究自身は今後質的に変化していくであろうし、研究者もこの変化の中で自分の新しい方向を模索し常に変わっていかなければいけないであろうと思う。いままでとまったく同じ手法で同じ対象を研究していたらいつか面白いテーマがなくなってくるのは当然である。すでに、伝熱シンポジウムの中でも新しい手法や対象が現れ始めていると思う。私の身近な例では、可視光以外の波長の光を用いた計測や単一波長のレーザーによって励起することによるけい光、りん光、吸収、散乱に着目した計測、乱流のダイレクトシミュレーションのように実験とも計算ともいえないような手法、分子動力学のように分子レベルでものをとらえる手法などがすでに報告されるようになった。このような手法が進歩することによって、研究の対象も今までは扱えなかった領域まで広がるとともに深みを増す。

あたかも自分は伝熱研究の不安など超越していると言わんばかりに書いてきたがこれは自分自身を納得させるためのような気がする。私は博士課程を修了してからまだ4年に満たないものすでに研究の方向を大きく転換し、さらにまた新しい方向を模索しているところである。最初の大きな転換は、米国への出張を機会に乱流熱伝達に関する研究から原子クラスターの研究への唐突なものである。ところが帰国してみても、従来型の伝熱研究とは縁を切ったつもりで客観的に沸騰熱伝達の研究をみていて以外に面白い点はまだまだあるように思い、最近遷移沸騰のモデル計算に手を染め、従来の研究の延長線上であろうとまったく新しいものであろうと始めてみれば面白いものであるように思う。結局、自分の研究の展望はかなり不透明であるが先のことはあまり心配せずにとりあえず今興味ある研究をしていくことにしている。

本稿においては、私の場合の方向転換の顛末と伝熱の分野では目新しい原子クラスターの研究の概要について紹介したい。

## 2. 乱流伝熱から原子クラスターへ

私は大学院において故田中宏明先生のもとで壁面乱流の秩序構造に関する研究を行っていたが、博士課程を修了して1年後に研究のテーマを大きく変えることとなった。平成元年より約2年間は、米国ヒューストンのライス大学化学科・量子力学研究所のR. E. Smalley教授のもと

に出張して、半導体材料、金属、炭素などの原子が数個から数百個集まった原子クラスターの状態での化学的あるいは光学的な性質を調べる研究を行った。原子クラスターの状態では、原子が単独の場合とも固体の場合ともまったく異なる性質を持つとともに、原子1個大きさが違うだけで化学反応率が2桁も異なるなどの興味深い特性を持つ場合もある。一方、図1に示したC<sub>60</sub>のように特別に安定なクラスターが大気中で単離されて新しい材料として手のひらに載せられることもある。

さて私は、化学の素養があるとも思えないし量子力学や物理化学の勉強もほとんどしたことがなかったのではあるが、とにかく米国に出かけて行った。最初の半年はほとんどわけも分からずに周りを見回していたように思う。それまでもっぱら乱流熱伝達の研究を行っていた私が米国で新しい研究を始めるに当たっての壁は、量子力学、レーザー、物理化学（分光学）、真空技術、電磁気学、コンピューターなど数多かった。最初は、研究室での議論がさっぱり分からない理由はこれらの基礎知識の欠如の為なのか単純に英語の問題なのかさえ分からなかった。博士課程の大学院生を頼りにこれらの勉強をしながら、とにかく新しいクラスターの生成装置の設計を始めた。

最初は気分的にも余裕があった。とりあえず何も知らないところに来たのだし、住むところや生活環境を整えるのにだってある程度時間がかかるし、ヒューストンの夏は暑すぎるし、と自分を納得させるいろいろな口実があったから。それでも季節が変わって涼しくなってくると段々と自分の進歩の遅さにいらだってきた。玩具のように小さなクラスター生成装置ができあがったのが冬であった。この装置を図2に示す。原理は簡単でありクラスターを生成するために、固体材料のディスクをレーザーによって蒸発させ、ほぼ同時にヘリウムガスの超音速膨張を用いて冷却を行う。装置全体は、6インチの6方向クロスに納められ、ヘリウムガスのパルス弁、レーザー光取り入れ窓、ターボポンプ、ディスク位置コントロール機構部、観察窓、ス

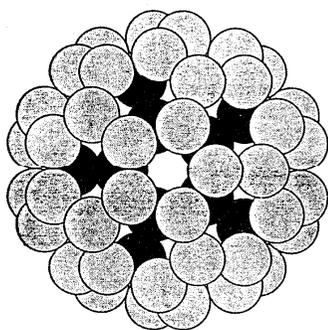


図1 バックミンスターフラーレン(C<sub>60</sub>) [文献(1)より]。炭素原子が60個集まったクラスターC<sub>60</sub>は炭素原子が作る5角形と6角形が丁度サッカーボールの縫い目の模様を作る中空の幾何学構造となる。

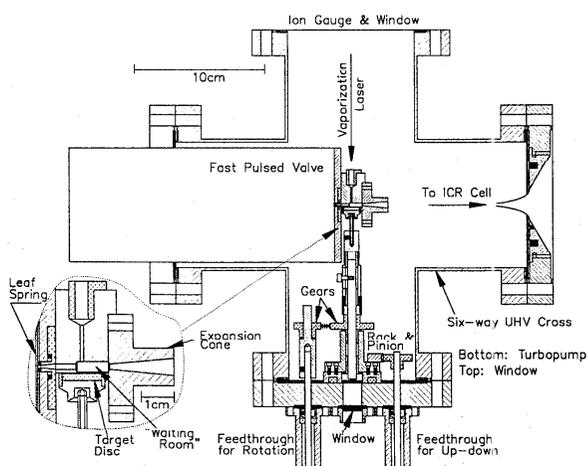


図2 クラスターソースの概要 [文献(2)より]

キマーとゲートバルブが取り付けられている。装置全体が小型であることとキャリアガスを短いパルス(およそ $30\mu\text{s}$ )とすることによって $170\ell/\text{s}$ のターボポンプ1台で十分な真空性能が得られる。さらに、ディスクの回転と並進運動を2つのステッピングモータによりコンピューター制御してより信頼性の高いかつ取扱いの容易なシステムとなっている。

これを試験しようにも、博士論文の締切を間近にひかえた学生が占有しているFT-ICR装置(Fourier transform ion cyclotron resonance)(図3)を相当に改良して割り込まなければならぬ。ついこの間まで、この大きいお釜は何(Diffusion pumpのこと)、とか $10^{-9}\text{Torr}$ って結構高真空なんだなんて頷いていた日本人が設計した装置でクラスタービームが出来ると思ってくれる大学院生はいなかった。とにかくある週末の夜にFT-ICR装置に新しいソースを取り付けてしまった。このときは、シリコンの原子がみられたものの、とうとうダイマーも観察されずステッピングモーターが故障した時点で敢えなく放り出されてしまった。

図3のFT-ICR装置の中心部は6テスラの超伝導磁石であり、この磁場の中心軸上に計測用のICRセルがある。装置全体は、2台のターボポンプと1台のクライオポンプで $10^{-9}\text{Torr}$ 程度の真空に保たれる。磁場内に閉じこめられたイオンのサイクロトロン運動を励起してその周波数を求めることによってクラスターイオンの質量が計算できる。外部からイオンを照射する場合には強磁場によるイオンの反射現象が生じるので従来は4極管やレンズ電極等を用いて調整していたが、高真空性能のクラスター生成部を磁場中心と至近距離に配置することによって直接にクラスターイオンビームを導入できるとの計算結果を得た。さらに、クラスターイオンはおよそヘリウムの超音速度( $1900\text{m/s}$ )で磁場内に導入され、その並進エネルギーはイオンの質量に比例することに着目した入射クラスターの質量選択方法を考え、ようやくクラスター生成部とFT-ICRの結合ができた。

実験を始めてみるとこの小さなクラスターソースとイオンビーム直接照射法によって従来には考えられなかった安定な結果が得られた。それまでのFT-ICR実験での問題点は、いかに所定のクラスターイオンを準備するかにかかっていたので、FT-ICRの実験は大変に進んだ。

実験の一例として図4に巨大な炭素クラスターのレーザー励起による分裂の様子を示す。図

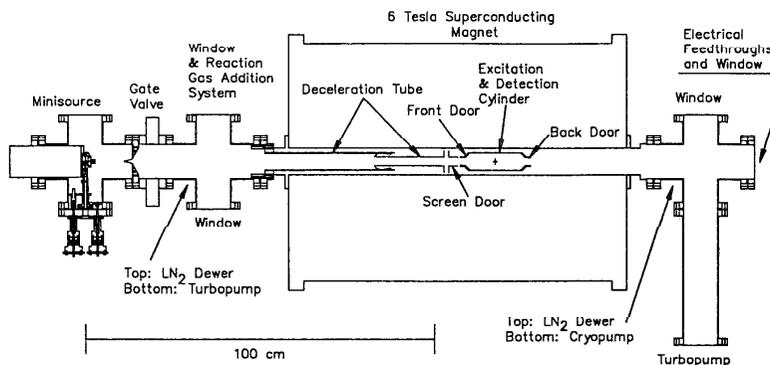


図3 FT-ICR装置の概要 [文献(2)より]

4 (a)はおよそ $C_{150}$ 程度のクラスターイオンを選択的に入射した場合に観察された質量分布である。炭素クラスター独特のおもしろい性質で奇数個の原子よりなるクラスターが存在しない。このことは図1に示した $C_{60}$ と同様に5角形と6角形でできる多面体状に炭素原子が配置していると考えたと説明できるのである。さて図4 (b)は一部の質量のクラスターのみをFT-ICRのSWIFTと呼ばれる技術で選択した結果である。これを強力なエキシマレーザーで励起すると偶数個の炭素原子が失われて順にひとまわり小さなフラーレンとなり、安定な $C_{70}$ と $C_{60}$ を経て、 $C_{52}$ まで縮んだところでバラバラになってしまう[図4 (c, d)]

### 3. 原子クラスターから・・・

実は原子クラスターの研究のどこが伝熱なのかと聞かれると答えようがない。帰国してからは自分自身の実験装置を模索するとともに、より伝熱の問題に近い分子動力学や分子クラスターの研究を小竹進先生のグループに参加して行っている。ちなみに、分子クラスターの研究と原子クラスターの研究とは、およそ沸騰熱伝達と強制対流熱伝達ほどの違いがある。

さて、私の所属する講座は庄司正弘先生のところであるので、当然沸騰関連の研究会や議論に加わる機会が多い。沸騰熱伝達のことを知らないと研究室での会話に支障をきたすので、僅かながらの知識を仕入れて、高熱流束核沸騰から遷移沸騰域においてみられるマクロ液膜下の伝熱に関する簡単なシミュレーションを試みている。私にはこれが非常におもしろく感じられるとともにまだまだ未知の興味深い問題が未解決であることを痛感する。

最後に、個人的なことを取り留めも無く書いてしまったことをお詫びしたい。

### 文 献

- (1) 丸山茂夫(1992), "C<sub>60</sub>とは?", NEW DIAMOND, vol. 24 掲載予定.
- (2) Maruyama, S., Anderson, L. R. and Smalley, R. E. (1990), "Direct Injection Supersonic Cluster Beam Source for FT ICR Studies of Clusters," Rev. Sci. Instrum., vol. 61, no. 12, pp. 3686-3693.

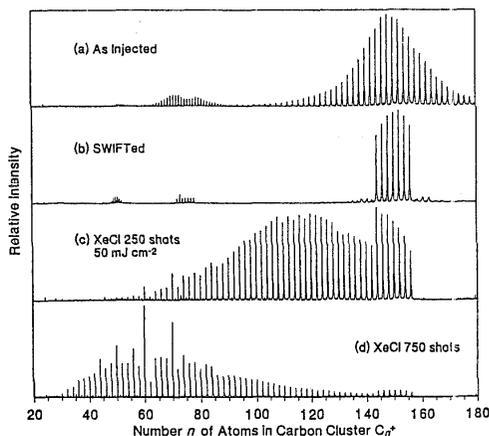


図4 巨大フラーレンの分裂

岡崎 健（豊橋技科大）

最近、伝熱学とは何か、ということ自体が広義に解釈すると自分でもよくわからなくなってきた点もあるが、少なくとも、筆者は伝熱の中では分野的にマイノリティーであり、伝熱プロパーの研究者ではないと思っている。確かに生まれて初めて学会発表したのも伝熱シンポジウムだし、それ以降も、応募セッションがなく困ることもよくあるが、エネルギー授受や熱的現象が関与する研究は伝熱シンポジウムで発表することになっている。したがって、学会へと発展した伝熱学会が、従来の殻に閉じ込められず、今後ますます発展することを願ってやまない。しかし、どちらかと言うとアウトサイダー的にながめていると、気になる点もないわけではない。ここでは、ちょうどよい機会でもあるので、これまでの自分自身の学会活動や研究内容の変遷を振り返りつつ、そこでの種々の体験や印象をつづりながら研究のありかたについて考えてみたい。

昨年の第27回伝熱シンポジウム（名古屋）において、特別セッション「CVDプロセスにおける伝熱」をオーガナイズした折、伝熱以外の分野の方々にも発表をして頂いた関係で、いくつかの興味深い体験をすることができた。その中でも特に印象に残っているのが、ドライエッチング時のシリコン基板温度の低温均一化制御に関する日立中研からの発表についてである。伝熱サイドから見れば比較的易しいと思われる熱伝導問題が、このシンポジウムの数週間後に試作成功の新聞発表があった64メガDRAM製造での、サイドエッチング防止のためのキーテクノロジーの一つだったのである。なぜ、伝熱プロパーの研究者が、いわゆる先端産業におけるこのようなきわめて具体的で重要な問題をテーマとして取り上げていなかったのか。さらに象徴的なことには、その発表者の方々は伝熱研究会（当時）の存在さえ、発表勧誘を行うまで知らなかったのである。伝熱に限らず、異なる学問分野の横のつながりの希薄さを感じるとともに、電子機器の冷却やシリコン融液の対流制御といった直接的に伝熱学と結び付く内容以外の最先端技術のブレークスルーにおいても、まだまだマクロ伝熱学が高度熱制御の上で果たす役割の大きいことを知らされた。

伝熱ではないが、これと似た経験をもう1つ。無機材研の瀬高氏（現所長）らのグループによって広められたダイヤモンドの低圧気相合成、化学的気相成長法（CVD）による手法についてである。熱フィラメント法によりメタンから容易に合成することに成功したのが1981年、たかが10年前のことである。その後、非平衡プラズマ（DC, RF）やプラズマジェットの利用により膜質や成長速度に大幅な向上が見られ、現在では、バイトのハードコーティングなどに実用化されるとともに、成長メカニズムの解明やダイヤモンド半導体開発へ向けての研究が精力的に進められている。この過程の中で、たった3年前の1988年、日本工大の広瀬助教授は、アセチレン・純酸素の燃料過濃高温火炎を用いてダイヤモンド合成に成功した。ほおっておけばすずになって

しまうものを、内炎での基板によるクウェンチにより、ダイヤモンドのきれいな単結晶粒子や薄膜に変えたのである。大気圧下であるため、成長速度も従来値よりはるかに大きいものであった。もちろん、材料製造や処理における還元炎の燃焼化学的な利用の研究はそれまでにもあったが、これほどドラスティックな例はきわめてまれである。筆者の研究室でも遊び心でこの手法を試みたが、条件を適切に設定しさえすれば、10~20分程度で自形面のみからなるきれいな約100 $\mu\text{m}$ 程度の単結晶粒子を簡単に作る事ができた。炭化水素火炎の構造や反応素過程、あるいはすすの生成機構についての研究は、燃焼学の分野で長期にわたって相当詳細に行われてきたのに、なぜ、燃焼プロパーの研究者によってこのような研究が開拓されなかったのか。広瀬氏の専門は電気・電子工学で、ブンゼンバーナについては高校の教科書で勉強したという。その後、広瀬氏の講演を含んで、材料製造における火炎の新しい利用技術に関する講演会が燃焼研究会（当時）によって開催されたが、参加者は、講演者やオーガナイザーを含めて10名以下であった。新しい方向を探りながらも、これに無関心な笑状が露呈された。

以上の2つの例は、筆者の関係する伝熱や燃焼の分野において、“狭く深く”ではなく、一見直接関係のないような他の分野に目を向けることにより、例えば分子動力学といった新しい研究手法を導入しなくとも、研究の新しい方向が開ける可能性があることを示唆している。ただし、周囲に無関心ではそのチャンスが失われるのは当然である。

自分自身の研究においても、ここ数年来いろいろな体験をした。筆者は長年、MHD発電に関連して、燃焼ガスプラズマに接する電極近傍での非平衡現象や放電の熱不安定による局所電流集中（アーク）の発生機構を研究してきた。当初は理論的な研究が主であったが、13年前に豊橋に赴任してから、その理論を確認する多くの実験データを得た。しかし、アークには、電極表面の温度境界層底部に発生する微細アークと、境界層全体を破壊する巨大アークの2種類があるのに、その現象論的差異さえ明確につかめていなかった。特に、実際上はより重要な巨大アーク発生のメカニズムについての研究は皆無に近かった。4年前、この実験のデータ処理系に、放熱線計測に用いられるMCA（マルチチャンネルアナライザ）を組み込んだところ、アーク電流パルスの波高値の頻度分布に完全に分離した2つのピークが現れた。もちろん、立ち上がりの遅い電流パルスもMCAの方でパルスとしてカウントしてくれるような種々の回路上の工夫は要したが、微細アークと巨大アークが初めて実験的に明確に分離されたのである。このことが、微細アークから巨大アークへの放電モード遷移を支配するメカニズムと限界条件を明らかにする研究へと進展し、今年その成果がほぼまとまり、実験的研究については機論（統報も現在準備中）に、その理論については、*J. of Thermophysics and Heat Transfer*(AIAA)に掲載されることになった。この研究上でのブレークスルーは、やってみれば当然で単純なことではあるが、MCAを組み込んだ点にあり、これは、筆者が米国（医学部）に1年間滞在中に、環境の粒子計測にMCAを用いていたことがきっかけとなった。他分野での経験が、自分の分野にうまくフィードバックされた一例と考えている。

豊橋に移ってから始めた研究の柱の1つに、石炭の燃焼、特に微粉炭燃焼がある。当時は石炭燃焼の基礎研究など、大学でやっているところはほとんどなかった。その後、脱石油の方向とマッチして資金的にも恵まれ、研究は当初の予想以上に軌道にのり、燃焼機構、燃焼粒子分散媒質中でのふく射伝熱、 $\text{NO}_x$ の生成機構などについての多数の論文をまとめることができた。特に、昨年末に機論に掲載された論文は、フュエル $\text{NO}_x$ が支配的である微粉炭燃焼場では今まで問題にされたことのなかったプロンプト $\text{NO}_x$ の重要性を、膨大な実験データと反応動力学計算により、初めて示すことに成功したものと自負している。これら一連の研究は、世の中の要請という好運にも恵まれて進展した研究の一例であろう。

プラズマと固体（電極）界面での放電と燃焼反応という上記2つの経験をドッキングすることにより、プラズマ応用技術の1つであるプラズマCVDの研究へと発展した。研究をスタートさせた3年前当時、アモルファスシリコンをはじめとする各種の機能性薄膜がプラズマCVDにより作製され実用に供されていたが、成膜制御に関しては、バルクのパラメータの変化による試行錯誤的なものがほとんどであった。応物や電子工学の人たちと膜づくりでの競争はしたくない。何か熱工学サイドの立場から、ラジカルの生成消滅と対応させて能動的でしかもダイレクトな制御法はないものか。既製のCVD装置を利用するのでは新しいことはできっこない。このような考えから、従来のDC、RF、MWなどとは全く異なるプラズマ発生手法を採用することとし、筆者とは親友でもあり高電圧や静電気の専門家である本学の水野助教授と共同で研究を進めることにした。結局、比較的低真空（高圧）下でも空間的均一性のきわめて高いプラズマが実現できること、非常に高パワーの入力が可能であること、ラジカルに対する制御性が高いと考えられること、などの理由により、高電圧・極短パルスプラズマを採用することになった。CVDプロセスに適用するためには、まず、この新しいプラズマそのものを知らなくてはならない。プラズマ構造や放電維持機構に関する研究から始めた。

パルス幅数十～数百nsという極短パルスの入力電圧に対応して、電流やラジカル発光分布の経時変化などの測定が行われた。この過程で、今まで見たこともないプラズマが出現した。普通、DCグロー放電では陰極近傍に輝部ができるのに、極短パルス放電では高パワー入力下において陽極発光が現れたのである。これなら陽極デポさせることにより、イオンとラジカルの寄与分離もできるのではないか。”発見”に多少の興奮を覚えながらも、その発生メカニズムはしばらくは不明のままだった。この時、本学で非常勤講師をいただいている三菱化成の山口氏は、別途、プラズマ構造の理論的研究を行っていた。陰極での二次電子放出係数（ $\gamma$ 係数）に既報値を用いれば、当然ながら既知のプラズマ構造が現れるが、試しに $\gamma$ 係数を3桁程度高い値にしたところ、上述の筆者らの実験に対応したプラズマ構造を得ていた。しかし彼自身も、はじめはこんなことが実現象として存在するとは思っていなかった。山口氏も筆者の親しい飲み友達で、真面目な議論（もちろんサイエンティフィックな）を夜中まですることもしばしばである。昨年のある時、彼が私の実験データやプラズマ写真を見て逆に興奮した。彼が計算機上で試しに行った結果が現

伝熱研究 Vol.31, No.120

象として実現しているのではないかと。もちろん3桁も大きい $\gamma$ 値などあり得ないが、実効的にそれに近い効果が現象として存在すると考えている。このようなハブニングを経て、高電圧・極短パルスプラズマの構造やCVD反応制御への適用性についての知見が集積されていった。この研究は現在、具体的なCVD実験に入ったところである。さらに、これまでの研究で明かとなったこのプラズマの特異な特徴を生かして、CVD以外においても、既存の方法では困難だった新しい化学反応による物質合成や表面処理などに関する研究を一部開始している。

このプラズマCVDに関する研究のスタートアップ時において得られた貴重な体験は、全く異なる他分野の研究者の有機的な協力が新しいアプローチを生み研究を非常に効率的に進歩させること、人との出会いが時には大きなブレイクスルーのきっかけにもなり得ること、そして、新しい現象を発見する快感と喜びであった。このような体験に基づく事実は、今後の自分の研究の新しい方向を考えたり研究を遂行したりする上で、大きな影響やエネルギーを与えてくれるものと信じている。また、上で述べた新しいプラズマ構造出現の本質的なメカニズムを解明したり、本プラズマを各種の反応プロセス制御に活用したりする上で、気相および表面における分子・原子のミクロなレベルでの理解が必要となってきた。研究の進展上の必然的な要請かも知れぬが、日々、このような分子熱工学的アプローチを本研究に取り入れることにしている。

以上、伝熱に限らず熱工学やエネルギーに関連する研究活動を中心に、自分自身の体験や印象をまとめてみた。ここで述べられてきたように、筆者は、伝熱そのものとの関わりはそれほど密なわけではなく、伝熱の将来に対する強い意見を述べる立場でもない。ただ、上述したような自分のこれまでの研究活動での経験から考えると、伝熱学が今後夢を抱かせるような新しい方向に展開して行くためには、もちろん伝熱本流の高度な研究の発展が非常に重要であることは言うまでもないが、その枠を越えて、他分野（例えば電気、電子、化学、物理など）との有機的な交流を積極的に推進することが最も重要であると思われる。これは、耳学問で他分野の知識を振りかざしたり、他分野の研究を外からかじることでは決してない。他分野での最先端の進歩に常に目を向け、新しい実験手法や測定技術あるいは新しいアプローチを導入したり、場合によっては双方の境界領域での共同研究を行ったりすることである。これにより、未知の新しい現象の発見や、従来不可能であったことを可能とするブレイクスルーが生まれる可能性が格段に拡がる。さらに、それまで不明であった現象の本質の解明にもつながってこよう。このような場面が身近に感じられるほど、学会全体として夢のある生き生きとした雰囲気が出来てくるような気がする。そういう意味で、今度の伝熱シンポジウムの発表募集の分類に、いくつかの新たな項目が加えられたことは喜ばしいことであると考えている。私自身、今述べたような方向を指向する傾向が強すぎるくらいも多少あるが、最近、物質の熱および化学的な非平衡状態の制御やその積極的利用への電磁気の応用に強い関心を持っている。勉強時間も足りず解らないことだらけで悶々とする毎日であるが、少なくとも夢は持ちつつ孤軍奮闘している。

1 はじめに

ここ10年、「電子機器の冷却」というテーマに関わってきました。そして、最近特に、電子機器の熱設計が大変重要になってきているわけですが<sup>(1,2)</sup>、その熱設計に、迅速化、省力化を目的として、計算機による数値解析を利用しようとする試みがなされるようになりました<sup>(3)</sup>。しかし、内蔵する様々な部品のため、極めて複雑な境界条件のもとでの流熱解析を必要とし、また三次元的に内蔵する基板上的電子部品一つ一つを表現するような格子分割を行うのは現実的でない等の数多くの困難な問題があります。そこで、現在、電子機器の熱設計に応用するための簡易計算手法を開発しています。ここでは、開発中の簡易計算手法の紹介と今後の展望について述べさせて戴きます。

2. 簡易計算法

2. 1 流体節点法

図1に示す電子機器内部の流れ場が流れの可視化技術によって大雑把に分かったとし、流路を分割して、図2のような節点場を考えます。圧力場を表す節点を数点選び、その点どうしを流路抵抗で連結します。節点は圧力場を表しており、節点と節点を結ぶ線はある流体抵抗を有する流路です。図3で、節点間の圧力差を $\Delta P$ 、流路内を流れる空気の流速を $u$ 、流体抵抗係

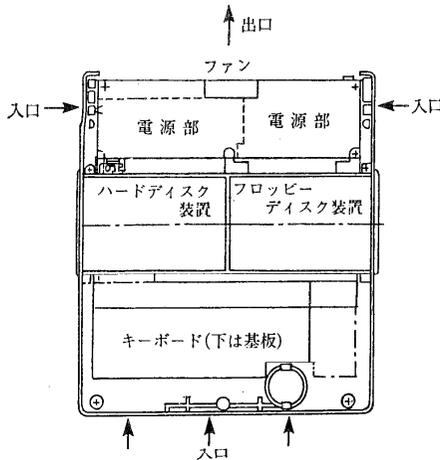


図1 ラップトップコンピュータ

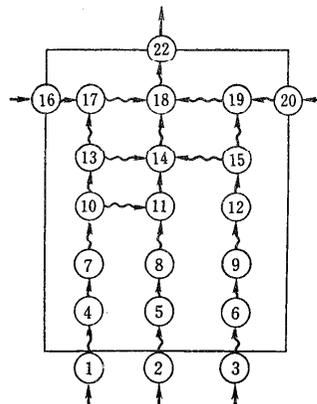


図2 節点場

数をKとすれば、

$$\Delta P = K \rho u^2 / 2$$

と表せ、各流路に成立します。また、 $P_2$  点での流量保存則から

$$V_1 = V_2 + V_3$$

が成立します。密度変化は無視しています。これらの式から圧力Pと流量Vを求めること

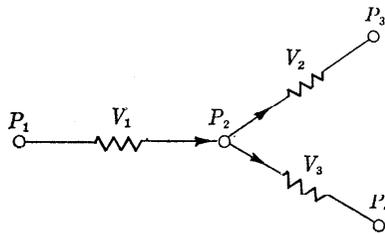


図3 圧力場

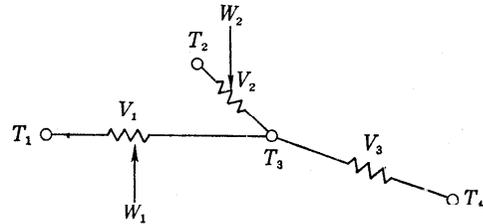


図4 温度場

により、各流路の流体抵抗に応じて、流量の配分が定まります。

$$V_1 = V_2 + V_3$$

が成立します。密度変化は無視しています。これらの式から圧力Pと流量Vを求めることにより、各流路の流体抵抗に応じて、流量の配分が定まります。

## 2. 2 温度節点

次に、冷却空気の温度場を考えます。図4に示すような温度場を考え、温度点 $T_3$ でのエンタルピーの出入量を考えると、以下の式が得られます。

$$\rho C_p (V_1 T_1 + V_2 T_2) + W_1 + W_2 = \rho C_p (V_1 + V_2) T_3$$

そして素子の表面温度は、ここで求めた値を境界条件として、熱回路方程式を立て、熱伝達率と表面積から熱抵抗を算出して、求めます。

## 2. 3 ラップトップ型コンピュータの熱設計への応用例

図5は、以上の方法を用いて、図1と図2のコンピュータの内部の温度が当初非均一であったのを温度データをシミュレーション（改良前）した後に、全体の発熱量は変えずに部品配置の変更による発熱体の配置（発熱分布）を変えて、内部の温度を均一にした例（改良後）です。この例では最高温度を押さえるために、温度分布の平均化対策に計算を用いたものですが、次のパターンの改良するのに役立ちます。

## 2. 4 低流速中での流体抵抗係数

前節で実験データを用いると述べましたが、電子機器内部の低流速中での圧力や流速の測定は難しく流体抵抗を知ることは容易ではありません。これについて、新たに流体抵抗係数Kを求める方法も開発されました<sup>(4,5)</sup>。例えば、金網では、

$$K = 28 (Re \beta^2 / (1 - \beta))^{-0.95}$$

のように求められています。ただし、 $Re = ud / \nu$  (dは金網の線径),  $\beta$  = 開口比。

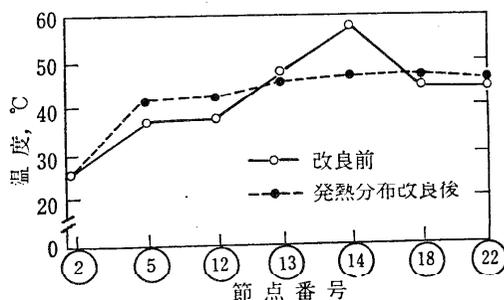


図5 シミュレーション例

### 3. 今後の展望

最近の、伝熱シンポジウムの研究発表を拝聴しますと、数値計算を利用した発表が大変目につきます。つくづく、スーパーコンピュータの進歩には感心させられます。例えば「平板上の角柱まわりの流れ」のように、剥離の熱伝達や渦の大小による熱伝達率の変化など、計算機の発達により、かなり詳しくその様子が解明されてきました。これは大変貴重なことと受け止めています。しかしながら、実際の電子機器を扱っているものにとっては、その工学的研究結果と当方が知りたい知識とに多少ギャップがあるのを認めざるを得ません。

そこで、数値計算の発達とは別の意味合いで、前述した基礎的な実験結果を有意義に利用できるような流熱解析方法を試んでいます。たしかに、精度とか工学的価値を話題にすると、目を覆いたくなる面もありますが、最近、このアプローチしかないという気がしてきました。そして、このアプローチこそ、計算機が発達した恩恵をもっとも受けています。上で簡易な方法と言いましたが、まれに50元以上の連立方程式を解くこともあり、それも圧力Pと速度uとは非線形の関係ですから、繰返計算を必要とします。今、これをラップトップコンピュータ上で、ほんの数分で計算できます。紹介した方法を開発した当初は計算には大形計算機を使っていましたから、「簡易だ」と口で言っても、現場の技術者にはそれほど馴染めないものでした。

また、実験データの活用にも、工業的に高い価値を見出だしています。例えば、紹介しまし

たように、空気の自然対流中の流体抵抗の測定などは、低レイノルズ数域の測定と言うことで、かなり興味のある、またかつ解明されていない領域の多い分野です。そして、この様なデータの集まりが、紹介した方法の計算精度を決めているのです。つまり、実験値と計算値とが完全に相互助け合いの関係にあります。

そこで、私どもは現存する実験データをできるかぎり利用したい。大学で得られた実験データ（数値解析データも含める）も、フル活用したいと思っています、つまり、大学側から出された基礎的なデータも産業界に生かせるように工夫したいと考えています。その一つが紹介した方法と思います。

また、数値計算にしても、発想を転換して、細かい計算をするのではなく、計算は大まかにという発想も一つの手ではないかと考えています。例えば、電子機器筐体内の流線の大まかな流れを予測するだけでも大変役に立ちます。なぜなら、いままで、流れの可視化実験を用いて求めていたのですから。自由流線が支配し、多孔質の物質（基板やパッケージ）が詰まっている電子機器の筐体の中は、境界条件の設定が難しく、計算が大変難しいのです。そこで、細かい領域の中を計算するというよりも、今こそ、全体のシステムを把握する計算、つまり、次の計算のための境界条件を設定するための数値計算を手掛けるのも実用的だと考えています。そして、圧力損失を求めるなどの複雑な計算は、当分実験結果で代用しても良からうと思います。要するに、実験と計算との融合を図り、その比重を計算に移していくことが今後の鍵になると考えています。

#### 4. おわりに

今回は電子機器の熱設計に関する研究の紹介とそれにかからめて、日頃感じていることを述べさせて戴きました。電子機器の熱設計というテーマは、最終的には、一人で解決できるようなテーマではなく、日本伝熱学会に限らず学会に、どのような形態にしろ、ご協力を戴かねばならないテーマです。したがって、直接にしろ、間接にしろ、今後の研究のテーマ候補として、電子機器の熱設計あるいは冷却に関する研究を頭の隅にでも入れてて戴くと誠に幸いに存じます。

#### 参考文献

- (1) 日本機械学会編, 電子機器の冷却技術, 技報堂出版(1987)
- (2) W. Nakayama, Appl Mech Rev vol 39, no12, Dec1986, 1847,
- (3) 石塚, 佐々木, 横野, 二戸, 第27回伝熱シンポジウム, (1989-5), 100
- (4) 石塚ほか2名, 日本機械学会論文集, 50, 460B(1984-5), 3193.
- (5) 石塚, 日本機械学会論文集, 52, 484B(1986-12), 3054

## 1. はじめに

筆者は、卒業研究のテーマとして流れの数値解析を与えられて以来、熱流動現象の数値解析という分野で研究を行なっている。当時は、現在のように複雑な熱流動数値解析はほとんど行なわれておらず、大学の4年生でも何とか研究とおぼしきものが行えた良き時代であった。しかし、あれからたった10年しか経過していないにもかかわらず、熱流動数値解析の高精度高効率化は急速に進んだ。まだかなり高価ではあるが市販のソフトウェアも多数販売されており、熱流動数値解析という学問もかなり成熟し、商業ベースにのりつつある分野といえよう。浅学非才の筆者が、このように成熟しつつある熱流動数値解析を対象として、今後の展開について語るにはかなり問題があるように思えるが、熱流動数値解析の現状と将来展望について私見を述べさせていただく。

## 2. 一般的な熱流動数値解析の現状

筆者が現在お世話になっている神戸大学生産機械工学科坂口忠司教授は、混相流現象を常に自分の目で確かめ、実験データが示す些細な傾向もみのがさずに、あるがままの混相流を把握しようとしている。坂口先生は常日頃「流れの完全な把握には、実験データを時間と3つの空間座標の4独立変数の関数として採取することが不可欠である。」と我々若手と学生に熱弁されている。また、筆者の大学時代の恩師の東京工業大学機械工学科高橋亮一教授も、先頃出版された本<sup>(1)</sup>において「現象を理解するとういうことは、任意の時刻、任意の空間点で注目している物理量をしること」と全く同じことを書かれている。至極当然なことではあるが、注目する熱流動現象に何の外乱も与えず時空間の関数として実験データを得るのは至難の技のように思える。一方、熱流動数値解析では、容易に時間と空間の関数として注目する物理量を得ることができる。しかし、モデル化誤差、離散化誤差、桁落ち、丸め誤差等、目に見えぬ外乱は数多く存在する。実際に得られる解は、計算に使用したモデル、解法、計算機に依存するものであり、実現象とは異なる場合が多い。乱流、混相流、複雑な幾何形状の熱流動現象等、現象の複雑さが増すほど、実現象と数値解の相違は大きい。このため、モデル、解法、計算機に関する改良が日進月歩で進められている。例えば、複雑な幾何形状に対応するために境界適合格子が、精度を向上させるために高次スキームやスペクトラル法が、計算速度を向上するために多重格子法や非線形反復法が開発されてきた。またスーパーコンピュータに加えて丸め誤差に強い計算機の

開発も行なわれていると聞く。しかし、何故か「ある問題の解決は他の問題の発生につながる」ことが多いようである。例えば、境界形状を模擬しようとする、熱や流れが生成した格子に沿うようになり、また、精度を向上させようとする、数値的不安定性や数値振動が発生しやすくなってしまふ。数値解析者が新たな問題を防ごうと努力すればするほど数値計算法は複雑化し、万人が追試できる解法からはほど遠くなっている現状である。このため、熱流動現象のモデルの開発・検証に最も適した人材であると考えられる実験研究者が、自分の対象としている現象を解析できる数値解法が書かれている論文から独力でプログラムを作成し、実験と計算の比較検討を試みるのは益々困難な状況となっているように思える。解法の開発者が自分の解法の利点を強調するのは当然であるが、その解法の真の意味での善し悪しを判断できるのは開発者自信であり、実験研究者が判断できるようになるまでには多くの時間がかかる。ようやく、実験研究者がプログラミングを終えモデルの正否を実験値を基に判断できるようになると、数値計算者は自分の解法の問題点を改良したより複雑な新解法を提案している。この実験研究者と数値解析研究者とのタイムラグが、複雑な熱流動現象に対する真の意味での予測手法の確立を妨げている現状の主な要因と考えているのは筆者のみではないと思える。

### 3. 混相流数値解析の現状

混相流は、比較的新しい学問であるため、実験に基づく現象のモデル化と数値計算がほぼ並行に進んでいる数少ない分野の一つといえよう。最近まで、主に混相流の実験データは、流れ場が空間に関して一次元的であると仮定して採取されてきた。このため、現状の数値計算も一次元解析が主流である。多次元混相流解析は、実験データの蓄積と並行して、いま着手されつつある段階であり、種々の方法が模索されている途上なのでここではふれないことにする。混相流では、相間あるいは流路壁と相間の質量・運動量・エネルギーの輸送によって熱流動現象が支配されるので、これらの輸送項の数値モデル、すなわち構成方程式を適切にモデル化することが不可欠となる。このため、種々の創意工夫をこらした実験装置・計測方法が考案され、貴重な実験データが蓄積され、構成方程式の高精度化が進められている。これらの構成式をもとに解析が行なわれ、実験との比較検討により構成式の改良がなされる。しかし、筆者は「数値解析に基づく構成方程式の検証と改良」という行為は、危険性を含んでいると考えている。何故なら、混相流解析ではまだモデル化が不十分なためモデル化に力点がおかれ、計算上の誤差にはほとんど注意が払われていないためである。仮に”ある質量輸送項のモデル”と”ある計算手法”を用いて実験解析を行なった結果、「質量輸送量を1.2倍にすれば全体的な実験と計算の傾向がよく一致する」等の知見が得られても、計算法を変更すれば1倍で良い結果が得られるかも知れない。したがって、数値計算に基づく構成方程式の改良は、十分に計算上の精度を把握した上で行

なうべきである。現状では、この種の行為は、常微分方程式の解法のみですむ定常流に限定すべきであろう。いずれにせよ、混相流の解析は次元解析であっても未だ十分ではないので、枚挙にいとまがないほど課題は多くあるといえよう。

#### 4. 将来展望

以上の現状分析に基づく将来展望を以下に述べる。まず、一般の熱流動解析に関してであるが、これは将来展望というより、むしろ現象のモデル化と解析手法の確立のために努力して行くべき方向といえるものかも知れないが、

①筆者も含めて数値解析者は、実験研究者でも容易にプログラム化ができ、かつ複雑な流れ場に対しても適用できる、できる限り単純なアルゴリズムの解法を開発していくように努力していく必要がある（現状の解法はかなり複雑である）。また、計算上の誤差についても明確にしていくべきであろう。知的所有権との関連で問題があるかも知れないが、できれば、解法に関する論文にはページ制限をつけずプログラムを添付するようにすると良いと考えている。

②実験研究者は、計算法、特に数値的な誤差について理解を含めて行くと同時に、境界条件、初期条件を十分制御した装置で実験データを取得していく必要がある。また、実験上の誤差を正確に数値解析者に伝えていく必要がある。

③一部現在も行なわれているが、上記2点をふまえて両者が連携して研究を推進していく。等が、今後の熱流動数値解析の飛躍的発展に不可欠ではないかと考えている。このような努力の末に、“近未来の設計開発のオフィスで、演算速度10GFLOPSの低価格高性能パソコン上で熱流動現象の過渡解析がリアルタイムで行なわれるのをお茶を飲みながら検討し、新しい機器開発が行なわれる”ことを夢みている。

次に、混相流解析に関してであるが、若手研究者には願ってもない研究の宝庫といえると思う。ただし、混相流に関しては、流れのモデル化が不十分なので、数値計算者といえども、流れを観察しモデル化することが要求される。実験、モデル化、計算、検証、モデルの改良の5つのプロセスを同時に進めていく必要がある。後10年もすれば、混相流においても未知の現象を予測するという真の意味での予測手法が出現すると思われるので、筆者もその手法の確立に多少とも寄与して行きたいと考えている次第である。

#### 5. おわりに

以上、私見に満ちかつ散漫な熱流動数値解析の現状分析と将来展望を述べたが、真の意味での予測手法は必ず確立できると信じて、今後の研究を進めて行きたいと考えている。

文献 (1)高橋、棚町,計算力学とCAEシリーズ3,差分法,培風刊,(1991).

## 1. はじめに

およそ10年前、大学の研究室で自然対流の伝熱特性の研究を始めたのが、わたしと伝熱研究の出会いです。その頃、わたしは水をためた容器におよそ20本の熱電対を取り付け、伝熱面と流体の温度を測定していました。当初、データの記録にはペンレコーダーを使用し、処理には電卓を使っていました。満足のいくデータひとつを取るにも多くの手間暇がかかったものでした。その後、マイコンを導入し、記録と処理を自動化したときには大幅に労力が減り、マイコンの威力に驚きの声を上げたものでした。また、会社に勤め始めた頃は、原子炉の冷却水の熱的挙動を評価するため、熱電対や差圧計を用いた基礎実験、及び、コンピュータを用いた熱流動解析に従事しました。基礎実験は大学で経験したことであり、さほど驚きはしませんでした。原子炉の炉心の熱流動挙動を計算で表すコンピュータ解析には大いに感心したものでした。それから10年、この間の技術の進歩には、以前感じた以上の変化があります。高速度ビデオカメラとその画像解析装置は可視化像から定量的データを得ることを容易にし、フェーズドップラ粒子計測装置は液滴や気泡の径と速度の同時計測を可能としました。また、スーパーコンピュータやエンジニアリングワークステーションはあたかも可視化装置で見ているかのように流体挙動を数値シミュレーションで示すことが出来ます。今日では実験及び解析のいずれにもハイテクの波が押し寄せていると感じます。そこで、このような状況での伝熱研究についてわたしの考えるところを簡単に述べたいと思います。

## 2. 数値シミュレーションと伝熱研究

メーカーに勤め始めてからの研究は、単に現象を解明するだけではなく、それをいかに開発設計手法に取り入れるかという応用研究でもありました。新たな製品を開発するためには多くの試作を要し、試作には時間とお金と人がかかります。そのため、開発設計を効率的に支援する手法は重要です。そこで、開発設計支援手法として、現在、コンピュータを使った数値シミュレーションが注目されています。この手法の開発は製図や構造解析の分野で進んできましたが、エンジニアリングワークステーションやスーパーコンピュータの出現によって多数の物理量を伴う現象の扱いが可能となり、現在、熱流動解析の分野にまで及び始めました。その結果、流体に関連する製品の開発設計支援手法として大いに期待

されています。例えば、最近わたしが興味をもっている自動車エンジンの燃料供給系に関して言えば、エアクリーナからエンジンシリンダまでの配管内を流れる空気やこの気流中に噴射された液滴状の燃料の過渡挙動をコンピュータでシミュレーションすることが可能となっています。一昔前は、燃料噴射装置の開発のために多くの試作及び実験を要していましたが、この手法を利用すれば、試作に入る前に実機に即した検討を行なうことが出来るので、試作による試行錯誤を大幅に低減することが出来ます。そのため、このようなシミュレーション技術のさらなる開発が期待されています。

しかし、コンピュータによる熱流動解析を進めていると、伝熱の問題で困ることが幾つかあります。上述の自動車エンジン燃料供給系シミュレーションの例でいえば、配管壁と気流との熱伝達率や噴霧された多数の液滴状燃料の蒸発量などに関していかなる評価式を用いるかということです。以下、それぞれについて少し具体的に説明します。

#### (1) 熱伝達率評価

熱伝達率に関する実験的研究はこれまでに多くなされており、管路の代表長さや流体の代表速度等から熱伝達係数を求める評価式が、伝熱工学資料やその他の成書で扱われています。したがって、数値解析ではそれらの中から対象に適する条件の評価式を引用する方法がよくとられています。これまでの設計開発において多くなされてきたように管路の流れ方向に沿う一次元の取り扱いをする場合はこれらの評価式を用いることに問題はありませぬ。しかし、現在の数値解析技術には三次元解析によるシミュレーションが求められています。三次元解析では、代表長さや代表速度という概念はさほど意味をなしません。まさに伝熱面に接する流体への熱伝達量が必要なわけです。また、これまでに得られている実験評価式の多くが幾何学的に単純な形状で定常的な状態に限られているのに対して、三次元解析で扱う対象は流路壁面が複雑な形状でしかも過渡状態を扱わなければならない場合が殆どです。そのため熱伝達率評価式の適用に困ってしまうのです。実際には、流れの状況を良く検討し代表長さや速度等を定めて、適切と思われる評価式を用いています。しかし、これは数値シミュレーション本来の姿ではありません。そこで、私は、常々、局所場・非定常状態における熱伝達係数の評価式はないものかと考えています。

乱流挙動に関する解析的研究では、直接シミュレーションやLES (Large Eddy Simulation) の数値解析手法により壁面近傍の流体挙動を解明し、熱伝達率を解析的に求めようとする試みがなされています。一方、本紙における計測技術の特集に掲載されているように薄膜測温素子を用いて “瞬時熱伝達率分布の時間変化” を測定する試みもなされています。これらの研究は私の思うところと合致するもので、大変興味深く思っています。これらの研究がさらに進められると、近い将来、数値シミュレーションに適する新たな熱伝達係数の評価式が得られるのではないかと期待しています。

## (2) 液滴群の蒸発

液滴の蒸発についても、これまでに多くの研究がなされており、液滴レイノルズ数や蒸気濃度を用いた評価式が得られています。しかし、それらは気流中の単一液滴に関するものです。一昔前の計算機は能力が低かったため、数値解析においても気流中に単一液滴を飛ばしてその軌跡を求めるといった計算をしていました。この場合にはこれらの評価式で問題はないのですが、今の数値シミュレーションでは個数密度の高い液滴群が数十 m/s の速さで移動する現象を扱いますので、本来、液滴群中での蒸発挙動に関する評価式が必要と考えます。しかし、そのような評価式を簡単に求めることが出来ないため、実際には、単一液滴に関する評価式を援用する方法がよく取られます。液滴群中では単一液滴の場合のように主流の蒸気濃度値を一意に定めることが出来ないため、蒸発量の評価に誤差は避けられません。気流中の液滴は蒸発により液滴径が小さくなり、これにより気流の抗力が変わり軌跡が変化します。したがって、液滴挙動を正確に表すためには蒸発量の評価が重要です。そこで、何か他によい方法はないだろうかと考えています。

本文冒頭でも述べましたが、最近、レーザー光を使った計測技術が進歩し、フェーズドツプラ粒子計測装置によると液滴径と速度が同時計測できます。また、レーリ散乱法を組合せれば濃度も測定できるようになりました。これらの測定手法は必ずしも完全なものではありませんが、液滴群の蒸発挙動を知るための良い道具ではないかと考えます。これらの装置を使って実験データを蓄積することにより、シミュレーション結果の詳細な検討が可能となります。また、蓄積されたデータから近い将来何らかの評価式を得ることが可能ではないかと考えています。

ここでは、私が興味を持っている噴霧挙動の数値シミュレーションに関して伝熱という観点から考えていることを述べました。数値シミュレーションには現在多くの研究者が従事されており、ここで述べた以外にもまだ解決すべき課題が残されていると思います。そして、その解決方法は現在の新たな技術により提供されつつあり、そこに新たな伝熱研究の一分野が広がっているのではないかと私は考えます。

## 3. おわりに

この10年間における技術の進歩には目をみはるものがあり、それに伴い、伝熱研究においても、大きな変化が起こっていると思います。私自身においても、熱電対とマイコンで始めた伝熱研究が、今はスーパーコンピュータを使った数値シミュレーションによる研究となっています。最近私が思うことは、熱流体研究におけるハイテク技術は自然観察における顕微鏡のようなものではないだろうかということです。子供の頃顕微鏡を通してみた花粉の美しさに驚いたように、こんどは、熱流体挙動の美しさに驚くことができるので

はないかと私は期待しています。さらに、顕微鏡で見える世界に適した記述法として数値シミュレーションというものを得ているのではないかと思います。ただ、技術がどのように進歩しようと忘れてはならないのは、現象の本質をつかむ努力です。これなくしては単なる耽美的傍観者です。後世に何も伝えることは出来ません。この点を良く考えながら研究を進めたいと思っています。

私が乱流を見てから10年が過ぎ去った。見たといっても現在のように最新の流れ場可視化技術あるいは直接数値シミュレーション（DNS）によって描き出される鮮明で立体的なものではなく、熱線風速計の出力がシンクロスコープ上を踊る様子を観察したのである。それまで、川の流れ、校庭を掃くように移動する砂塵など、非常に身近に乱流と接していたにもかかわらず、乱流を始めて意識したのは結局このブラウン管上の輝線に対してであった。乱流の波形を見たことが私の乱流伝熱研究の原点である。

私の現在の研究テーマは、乱流伝熱機構の実験的解明、熱流体の計測法、乱流輸送現象のモデリングとシミュレーションである。私の所属する研究室では、これらを互いに有機的に強く結びつけて研究を進めている。特に、実験とモデリングは相補的であり、二兎を追うものは一兎をも得ずという比喩は当てはまらず、単独で研究を進める場合に比べ、格段に深く乱流伝熱現象が理解できるものと私は確信している。以下では私が現在の研究テーマに携わるようになった経緯と将来への展望について述べたいと思う。ただし、たった10年間の乏しい経験から言えることは限られており、偏見、誤解の類も含まれているかも知れないので、若輩者の戯言とお許し願えれば幸いである。

私が研究生活をスタートした当時は、乱流中に組織構造（準秩序構造）があることが発見されてから約10年が経過していた。それまでの“乱流＝ランダムな流れ”という認識が崩壊し、やっと平静さを取り戻した時期であり、世界中の研究者が、組織構造の可視化、定量的評価、力学機構の解明など、非常に活発な研究活動を展開していた。このように乱流中の組織構造が多くの優れた研究者を強く引きつけたのは、乱流を維持する機構を解明する鍵がここにあり、組織構造の性質を理解することが即ち乱流の本質を知ることと等価であると考えられたからであろう。私が卒業研究のために配属された委田・長野研究室では、それまで困難であった変動する速度と温度の同時測定法の確立に成功し、それを用いて円管内乱流の伝熱機構を種々の角度から調べる実験が行われていた。特に、組織構造と関連させて熱輸送過程の詳細を探る方向で研究は展開しようとしていた。

当時、乱流、なかでも工学的に重要な壁乱流の組織構造と熱輸送の関連は、測定の困難さもあってほとんど手がつけられていない状態にあった。すなわち、組織構造が乱流の力学機構を支配している証拠はその間も着実に積み上げられてはいたが、熱伝達もこの影響を受けないはずはないとの確信はあっても、それを明示するために要求される測定法もデータ解析法も独自の開発を必要とするものばかりであった。例えば、我々が測定対象としていた直径45.68 mmの円管内乱流では、壁面から0.5 mm以内の非常に薄い層の内部で発生している現象を測定しないことには、乱流を維持する重要な機構を定量的に明らかにすることはできない。つまり壁乱流の熱輸送機構

伝熱研究 Vol.31, No.120

の本質を理解するためには、この薄い層内部の2方向変動速度（できれば3方向）と変動温度を同時に測定することが必須条件となるのである。

私が修士課程で取り組んだテーマが、これを正確に測定することであった。そのためには3～5  $\mu\text{m}$  のタングステン線3本（熱線2本，抵抗線1本）を組合せる際に、できる限り小さくかつ熱的・流力的に干渉しないとの相反する条件を最小限の妥協で満足させるという芸当がいる上に、熱線流速計の出力から温度変動の影響を分離するアナログコンピューター回路の定数設定に多大の時間を必要とした。熱の実験はとにかく厄介である。円管の加熱には、壁温一定の条件をつくるために蒸気を用いていた（壁温を浮力の影響の出ない範囲でできるだけ高く設定し、変動温度の信号SN比をできるだけ稼ぎたいとの目的もあった）が、夏の暑い時期は研究室内はまさに熱帯のジャングルである。測定は我慢大会の様相を呈するし、挙げ句の果てに1週間かかって作ったプローブが一瞬で吹き飛ぶことなど別に珍しくもなかった。集中力の低下が最大の敵である。そのためプローブの取扱いには細心の注意を払うことになり、おかげで慎重さを欠く性格がこの経験で一気に改善されるというとんでもない効用もあったのである。修士課程の2年間は毎日が電気回路の修理・調整，プローブの製作，実験という繰り返りで、乱流と伝熱に関する理論の勉強はおまけ程度であったが、逆に乱流とはいかなるものか、あるいは伝熱とはどういうことが身に染みて理解できたような気がする。自作したプローブで、速度と温度の変動波形が初めてシンクロスコープ上に描き出されたときの感激は今も忘れない。実験し、波形を見ることを毎日繰り返しているうちに、何となく真鍮製の円管内部が透けて見えるような気がした。この2年間で現在の研究の原点であり基礎となっている。

その後、測定に何とか成功し、乱流伝熱がいかに組織構造の影響を受けているかが、変動波形のパターン解析，速度と温度の乱れの確率構造の理論的・実験的解析などから次第に明らかになってきた。これらの一連の研究の中で私が最も気に入っている図は何かといえば、それは温度乱れ強さ  $\overline{t^2}$  の内部構造（重み付確率密度関数）を一目瞭然に示す図1である。図は、軸方向変動速度を  $u$ ，壁垂直方向変動速度を  $v$  としたとき、 $(u, v)$  平面上のどの流動が温度乱れ強さ  $\overline{t^2}$  の生成に寄与しているかを示している。第2象限 ( $u < 0, v > 0$ ) に属する流動は、平均流から見て壁から低速流体が外向きに放出されるもので、Q2運動と呼ぶ。一方、第4象限 ( $u > 0, v < 0$ ) に属する流動は、壁から高速流体が壁向きに進入するもので、Q4運動という。Q2，Q4運動は組織構造の素要素であるイジェクション，スイープにそれぞれ対応する。図1から温度乱れの強さの大部分は、このイジェクションとスイープにより生成されていることが分かる。しかし図1が示す最も重要な特徴は、Q2運動とQ4運動が  $\overline{t^2}$  に寄与の様相が、壁近傍 ( $y^+ = 7.6$ ) と外層 ( $y^+ = 377.6$ ) で一変することで、乱流伝熱が組織構造に支配されている事実を如

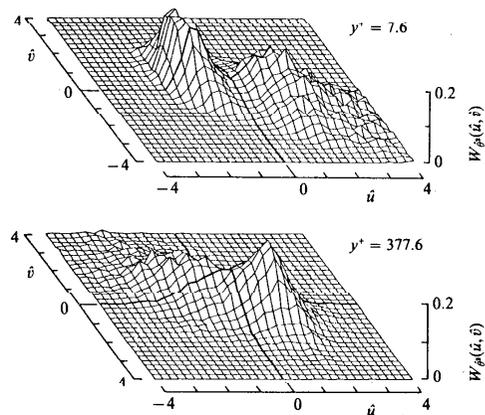


図1 温度乱れ強さの内部構造

実に物語る代表的な結果である。

私は実験屋としてスタートし、数年間は自分の時間の全てを実験とそのデータ解析に費やした。この間研究室では新たなテーマとして、乱流および乱流伝熱のモデリングの研究が平行して行われ出しており、その後次第に乱流輸送現象のモデリングにも足を踏み入れるようになった。最近私が関わった研究をまとめると、

- ・ 壁乱流における速度と温度の乱れの統計的性質<sup>(1)</sup>
- ・ 速度と温度の高次統計量の確率構造の実験的解明<sup>(2)</sup>とモデリング<sup>(8)</sup>
- ・ 熱線と抵抗線による速度と温度の乱れの測定誤差の解析<sup>(4)</sup><sup>(5)</sup>
- ・ 乱流およびその輸送現象のモデリング<sup>(6)</sup><sup>(7)</sup><sup>(8)</sup>とシミュレーション<sup>(9)</sup>

などである。前述したようにこれらは互いに密接に関わっており、実験屋としての直感がモデリングに役だったことも少なくない。例えば、文献(2)(3)は、実験データの徹底的な解析から、従来の勾配型拡散モデルの破綻が明らかとなり、それに代わる全く新しいモデルとして、三重相関構造モデルが導出された例である。私は、乱流のモデリングを、ある注目している現象にフィルタをかけ、それをデフォルメすることであると捉えており、その過程では乱流を何らかの形で見たり、触ったりした経験が非常に役に立つと考えている。

これまでの研究を通して、いろいろな人から多くのことを学びまた影響を受けてきた。Moin & Kim のチャンネル流のラージエディシミュレーション (LES)<sup>(10)</sup> は衝撃的であったし、水素気泡法と感温液晶により可視化された温度場のストリーク構造の写真<sup>(11)</sup> は美しかった。また格子点数 940 万、データ量 31 ギガバイトに及ぶ平板境界層の DNS<sup>(12)</sup> には圧倒されたし、その DNS データベースを基にして描かれた“乱流の解剖図”<sup>(13)</sup> は息をのむほどの迫力で、不気味ささえ漂っていた。ごく最近になって DNS の手法は伝熱の解析にも適用されており<sup>(14)</sup><sup>(15)</sup>、実験では手に入れることの不可能だった各種乱流諸量の特性が明らかにされてきている。これらの研究の発展は、これまで直感のみに頼っていた、あるいは検証が不可能だったために曖昧に済まされていた部分のモデリングに、今後革命的な変化をもたらす可能性が高い。一方、実験に目を向けると画像処理流速計による大規模三次元計測<sup>(16)</sup> は DNS に比肩する高精度データを提供して、実験のイメージを一新したが、さらに温度場の同時計測が可能となれば、DNS の手法が適用できない複雑乱流における伝熱機構の解明<sup>(17)</sup> に飛躍的な進歩がもたらされるであろう。

乱流伝熱研究の将来を展望することは私の手に余ることであるので、現在気になっている問題について述べてみたい。まず実験においては、壁面せん断応力(摩擦速度)および圧力変動の簡便で高精度な直接測定法の開発がある。これが実現すれば、現象の解明に必要な信頼できる基礎データが得られるだけでなく、普遍的な乱流モデル構築に大きな進歩をもたらすものと思う。また、3次元の“場”の測定技術の進歩は、現象の理解を容易にするだけでなく、1点完結モデルの限界が取りざたされている中で、2点完結モデル実用化の可能性を探る上でも今後重要となるであろう。さらに、基本的な流れ場の伝熱現象だけでなく、2次的効果(例えば、圧力勾配<sup>(18)</sup>、付加的歪み、壁面粗さ、主流乱れなど)やプラントル数が乱流伝熱に及ぼす影響の解明は、伝熱制御に直接関わるだけに重要である。また、制御理論の伝熱制御への応用の可能性<sup>(19)</sup>も検討してみる価値があるのではないだろうか。一方、計算においては、基本的な流れへの DNS 手法の伝熱研究 Vol.31, No.120

適用が大成功を収めていることから、得られたデータベースは乱流モデルの心臓部である乱流エネルギーと温度乱れの散逸率、圧力速度勾配相関項、圧力温度勾配相関項などのモデルを個別に根本的に見直し、より厳密なモデリングへの取り組みの契機を与えるものであろう。また、これを基にして、多相流、燃焼等の反応流、高速流あるいは自然対流などの熱駆動乱流<sup>(20)</sup><sup>(21)</sup>等のモデリングに飛躍的發展も期待できる。私としては、いずれの場合にも乱流構造に立脚した構造論的モデリングの可能性に大きな希望を抱いているが、それと同時に、測定法や既存のモデルについても、地道な改良の努力は必要不可欠であると思う。ある高名な物理学者は「物理の仕事は汚れた水で汚れた皿を洗うようなものだ。汚れた水しかないのものでそれで洗っていると、だんだんそれでも皿がきれいになってくる」と言ったそうだが、何となく今の自分の心境に近い。乱流伝熱の研究は幅広くかつ奥が深いので、私がこの分野にどれほど貢献できるのか甚だ心許ないが、身に染み着いた実験という武器を手放すことなく研究に取り組みたいと考えている。

伝熱研究に未来はあるか、夢があるかといったことが最近良く話題にのぼる。私自身はいつもこれを伝熱研究に全く未知のことが存在するのかという問いであると捉えている。乱流伝熱現象は通常ナビエ・ストークスの式とエネルギー式によって支配されるが、これらの構成方程式にも当然適用限界があって、一種のモデルであると考えられる。従って、乱流伝熱に限らず、ある現象を支配する方程式を新しく構築することは全く未知の問題に取り組むこと、すなわち未来があることである。さらに、非線形の簡単な連立偏微分方程式の解にカオスやバイファケーションが発見されたことから分かるように、支配方程式が存在し成立することと、全ての現象が既知でかつ理解できることは全く別であると思う。私は、物理学あるいは生物学などの啓蒙書を読むことが趣味であるが、科学者がある事象を説明できる普遍法則を追求する姿にいつも心惹かれる。応用よりは基礎、演繹よりは帰納に目が向く。従って私の夢はどんな分野であれ、普遍的な原則、知識を追い求めることのできるテーマであれば、胸踊るし、夢を抱くことができる。伝熱に夢があるかと問われれば、あると答えたい。できるかどうかは別にして、自分のこれまでのバックグラウンドと能力に照らし合わせて、空想ではない夢を追求したいと考えている。

文献 (1) Nagano, Y. and Tagawa, M., *J. Fluid Mech.* **196**, 157-185 (1988). (2) Nagano, Y. and Tagawa, M., *J. Fluid Mech.* **215**, 639-657 (1990). (3) Nagano, Y. and Tagawa, M., *Turbulent Shear Flows 7*, pp. 47-62, Springer, (1991). (4) Tagawa, M., Tsuji, T. and Nagano, Y., *Exp. Fluids*, (1992), to appear. (5) Tsuji, T., Nagano, Y. and Tagawa, M., *Exp. Fluids*, (1992), to appear. (6) Nagano, Y. and Tagawa, M., *ASME J. Fluids Eng.* **112**, 33-39 (1990). (7) Nagano, Y., Tagawa, M. and Tsuji, T., *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, Reno, Vol. 3, pp. 233-240 (1991). (8) Tagawa, M., Nagano, Y. and Tsuji, T., *Proc. 8th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Munich, pp. 29.3.1-29.3.6 (1991). (9) Youssef, M. S., Nagano, Y. and Tagawa, M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, (1992), to appear. (10) Moin, P. and Kim, J., *J. Fluid Mech.* **118**, 341-377 (1982). (11) Iritani, Y., Kasagi, N. and Hirata, M., *Turbulent Shear Flows 4*, pp. 223-234, Springer, (1985). (12) Spalart, P. R., *J. Fluid Mech.* **187**, 61-98 (1988). (13) Robinson, S. K., Kline, S. J. and Spalart, P. R., *Near-Wall Turbulence*, pp. 218-247, Hemisphere, (1990). (14) Kim, J. and Moin, P., *Turbulent Shear Flows 6*, pp. 85-96, Springer, (1989). (15) Kasagi, N., Tomita, Y. and Kuroda, A., *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, Reno, Vol. 3, pp. 175-182 (1991). (16) Nishino, K. and Kasagi, N., *Proc. 7th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Stanford, pp. 22.1.1-22.1.6 (1989). (17) Suzuki, K., Suzuki, H., Kikkawa, Y., Kigawa, H. and Kawaguchi, Y., *Turbulent Shear Flows 7*, pp. 119-135, Springer, (1991). (18) Nagano, Y., Tagawa, M. and Tsuji, T., *Turbulent Shear Flows 8*, Springer, to appear. (19) 田川・長野, 第28回伝熱シンポジウム論集, Vol. 3, pp. 7-9 (1991). (20) Tsuji, T., Nagano, Y. and Tagawa, M., *Proc. 8th Symp. on Turbulent Shear Flows*, Munich, pp. 24.3.1-24.3.6 (1991). (21) Yoshizawa, A., *Phys. Fluids* **A2**, 838 (1990).

## 伝熱研究について思うこと

山田雅彦 (北大工)

### 1. はじめに

正直に申し上げて、日頃、『伝熱研究』や『機械学会誌』などにまじめに目を通すことが少ない(申し訳ありません)私にとりまして、伝熱研究の将来や伝熱学会・シンポジウムの役割などという高邁なことに思いをはせることなど皆無に等しい状態でした。私にとりましては、伝熱工学にはまだまだわからないことや興味深いことが山積みになって在るように思えます。そのような意味では将来に対する不安というものは無いと考えております。それでは全く何も考えていないのかと思われるのもまた少々困りますので、ここでは、現在行っております研究と、将来の研究のことなどについて日頃考えている事を述べさせていただきますと思います。

### 2. 現在の研究内容

**【目的・関連分野】** 私は現在、主として水溶液の凝固・融解問題と取り組んでいます。この問題は、一つには、近年のエネルギー有効利用の一環として研究がすすめられている潜熱蓄熱システムにおいて、蓄冷材の一つとして用いられるリキッドアイスの生成法に関連しております。リキッドアイスは、氷粒子と液体がある割合で混合したシャーベット状のもので、従来の氷と異なり流動性を有することから、配管による輸送が可能であること、採冷熱時の熱伝達の促進・制御が可能であるなどの利点があります。リキッドアイスを生成するには、水溶液をある条件下で凍結させ、氷粒子と液体が共存する状態で回収する方法が考えられており、その際、水溶液の凍結制御が問題となります。また、食品・生体などの凍結保存問題などにおいても、水溶液の凍結がそれらの基本現象であり、いかにこれを制御するかが重要な問題になると考えられます。

最終的には、さまざまな方法を用いてこれらの水溶液の凍結現象を制御する事を目的としていますが、そのためにはその挙動を詳細に把握する必要があると考え、さまざまな条件下における水溶液の凍結に関するデータの蓄積を行っています。

**【従来の研究】** 水溶液の凝固問題自体は新しいテーマではなく、すでに先達らのいくつかの成果があり、また、現在も研究が続けられております。それらの研究においては、塩化ナトリウムや塩化アンモニウム水溶液など、それらの相平衡図が比較的良く知られているものを用いて、凝固・融解速度(量)、温度および濃度挙動などに関して実験的および解析的検討がなされております。

水溶液の凝固層は、一般に固(氷)・液(水溶液)共存の不均質層となり凍結層の性状は冷

却条件によって異なることが知られております。これは、冷却条件によって、氷と液の割合（固相率）が異なるばかりでなく、一般に針状に成長する氷結晶の形状やそれらの結合の状態、さらに厳密には氷結晶中に含まれる溶質の割合によって氷結晶の性状も影響を受け、これらすべての要素が影響して、従来の氷に無い凍結層の性状というパラメータがでてきます。これはリキッドアイスを製造する際には重要な因子となりますし、また、生体や食品の凍結問題においても深い関わりを持つと考えられます。

従来の解析的取扱いでは、凝固層の固・液の組成割合を算定することは可能ですが、現在のところ上記のような凍結層の性状を解析的に予見することは困難であると思います。また、固液の局所平衡を仮定していることから、相平衡図は必要不可欠ですが、一般に知られていますように、相平衡図における液相線あるいは固相線は、凝固速度（この場合、冷却条件で規定されます）に依存して変動します。もう一つの問題は、水溶液の相平衡のデータが十分ではないことです。例えば二次冷媒として現在最も多用されているエチレングリコール水溶液の相平衡図にしても図1に示す程度しかわかっておらず、図の他の部分は不明なままです。

【明らかになったことなど】　そこで、まず、さまざまな条件下で水溶液を凍結させて、その凍結挙動と凍結層の性状を把握することを第一段階の目的として研究を行っております。また、解析のため必要となる固・液共存層の熱物性の測定も併せて行っております。その結果、いくつかの条件下での水溶液凍結層の性状を冷却条件によって予測することができるようなデータが得られています。その一例として、水平上向き冷却面上におけるエチレングリコール水溶液の凍結挙動を整理した結果を図2に示します。図の縦軸は水溶液の初期温度を、また横軸は冷却面温度を、それぞれ水溶液の平衡凍結温度を用いて無次元化したものを示しています。従って、凍結初期においては、図の横軸に近い条件ほど相対的に急冷となり、縦軸に近い条件ほど徐冷となります。

様々な初期温度、初期濃度、および冷却温度において、凍結挙動や凍結層性状を調べた結果から、図に示すように、その挙動をほぼ3つの領域に分けて示すことができました。図の中央の領域Bでは、凍結層は冷却面に垂直な針状の凍結層となります。リキッドアイスを製造する場合、この様な凍結層を冷却面上に生成し、剥離して水溶液と混合する方法が考えられます。先に述べました、従来の解析手法を適用して凍結量や温度分布などの計算を行った場合、実験結果と比較的良好一致が得られるのもこの領域内の条件で、これより急冷あるいは徐冷では良好な結果が得られ

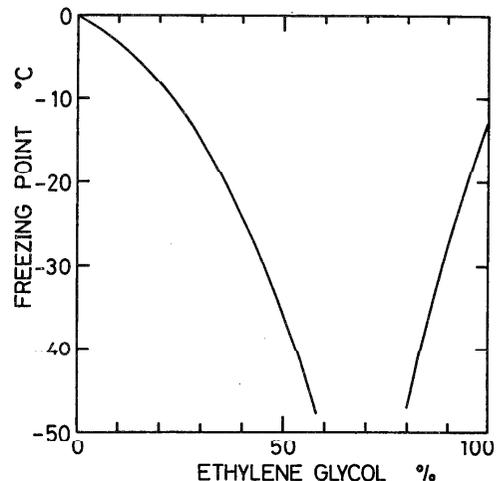


図1 エチレングリコール水溶液相平衡図

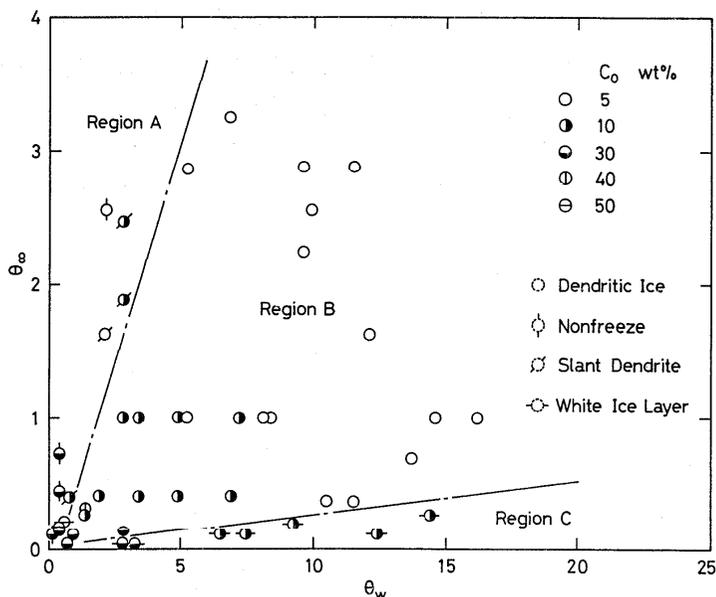


図2 凍結層性状

では凍結層の針状氷結晶が冷却面に対して斜め方向に成長するばかりでなく、冷却面と氷結晶の結合が弱く、氷の浮力などの外力によって凍結層が冷却面より剥離する現象が観察されました。また、水溶液濃度が40~50%と比較的高い場合、冷却面近傍に濃度分布が形成されるため冷却面から離れた水溶液中で氷結晶が形成される場合もあります。

この領域Aにおいて観察された現象は、サイエンスとしても非常に興味深いものがありますが、これらの現象を積極的に利用することで、冷却面からの凍結層の剥離の制御やさらには冷却面を介さない凍結層の生成など、水溶液の凍結挙動の能動的制御に応用することが考えられます。

以上に、対流を伴わない場合の水溶液の凍結に関する結果の一例を紹介させていただきましたが、この他、自然対流や強制対流による流れ場を伴う場合についても検討を行っております。

【問題点とこれからの課題】 これまで明らかになったことはいわば経験的データでありませんが、このような現象の発生するメカニズム、特に各因子の効果をさらに解明することにより、能動的凍結制御が可能になるのではないかと考えております。

### 3. 将来の研究の展望

最近、伝熱現象を従来の温度制御のみでなく、磁場、電場などや外力、その他様々な方法で能動的に制御する試みがなされております。将来は、現在取り組んでいる水溶液の凝固を制御することを目指してゆきたいと考えております。先ずは何らかの方法で温度・濃度場を制御することによって、さらには磁場などのように非接触で伝熱現象を制御し、さらに温度を制御す

ません。

図の領域Cの条件では、凍結層は白色不透明の密な凍結層となり、固・液共存層とはなりません。この凍結層は、塩化ナトリウム水溶液などの共晶凝固層に非常に良く似ておりますが、図1に示しましたように、現在のところ良くわかっておりません。一方、図の領域Aは比較的徐冷となる条件で、凍結量は少なくなりますが、この領域の条件

ることが理想です。

上に述べましたような水溶液の凍結に限らず、凝固の研究を行う際に最も興味の対象となるのは凝固界面の温度・濃度であります。これを、系の状態を損なうことなく、正確に測定することができれば．．．ということで、一つには温度や濃度などの非接触測定法に非常に興味を持っております。また、熱・流体問題の数値解析によるシミュレーションは、一般に膨大な計算時間を要しますが、私の現在の興味の対象である水溶液の凝固の計算においても、流れ場の計算を含めるとスーパーコンピュータを用いても十数時間～数日という状態であります。将来のハードウェアの発達（と値下がり）に期待するのも一つの道ではありますが、数値解析の手法自体を見直すことができないか、これまでのデジタルから視点を変えてアナログコンピュータを用いてはどうか、また、凝固計算専用のプロセッサをつくることはできないかなどということも考えたりしています。

#### 4. おわりに

最近、工学における要求が高度になってきているのに加えて、サイエンスの分野に研究の触手をのばさざるを得なくなっていることから、従来の研究方法や測定手段などでは追いつけない状態になってきており、研究が、いわゆる転換期においてその方向を模索しているという状態に近い将来にあるかもしれません。また、そのような状態では、論文発表やシンポジウムなどにおける講演が減少するなどの表面的な衰退が見られるかもしれませんが、それは決して伝熱工学全体としてのアクティビティの低下ではないと考えます。熱工学、とりわけ伝熱工学は機械工学の中ではサイエンスの色が濃い分野であると思っておりますが、それは、他の分野へ触手をのばし易いことを意味しており、あえて伝熱工学の領域を限定するようなことをしなければ、はじめに申し上げましたように、興味の対象はいくらでもあるように思えます。ただし、伝熱工学はあくまでエンジニアリングですから、サイエンスに留まってしまわずに、工学に反映することを常に考えなければならぬと考えております。

最後に、せっかくこのような機会を頂きながら、とりとめのない事しか申し上げられませんが、この執筆の機会を与えて下さいました編修委員の森、坂口両先生に感謝の意を表します。

## 1. はじめに

原子力発電プラントには、压力容器内に収納された炉心へ安定して冷却材を送るために、また、発生した蒸気をタービンへ送るために、それらの補助系を含め、膨大な高压管路系がある。原子炉のより一層の安全性確保や安定な運転維持のためには、平常時のみならず、異常時や冷却材喪失事故時といった特殊条件下に於ける高压管路系機器の挙動評価が必要である。これらの特殊条件下に於いては、平常運転時に単相流が流れる機器内に二相流が流れる状態が発生することも多い。

従来、高压管路系機器の二相流挙動評価については、平常運転範囲外の挙動解析となるため、解析に使用できる高温高压二相流のデータが少なかった。筆者は、企業の研究所で入社以来13年余り、この分野の研究に従事してきたが、二相流を含む伝熱流動研究の奥行きは深く、新たなテーマは尽きることが無い。今回、「中堅・若手層」として若輩を顧みず、研究の概要を紹介する。

## 2. X線ボイド率計の開発

高温高压管路系機器の二相流特性を調べるには、正確な断面平均ボイド率とともに、ボイド率分布を十分な分解能でしかも高速で繰り返し測定し、流動様式を知る必要がある。

従来の高压蒸気・水二相流の流動様式線図は少数の目視観察や電極プローブ法、X線写真などにより作成されたものであるが、判別基準や測定方法の違いにより差を生じており、過渡時の測定に至っては十分な測定手順がなかった<sup>(1)-(4)</sup>。そこで、本研究は先ず、高温高压蒸気・水二相流のボイド率の測定手段の開発から開始した。各種の測定法の中から、高温高压下で流れを乱さずに非接触で高速高精度にボイド率を測定できる手段としてX線ボイド率計を選択した。最初に開発したのはX線ビームを上下にスキャン(走査)する方式である<sup>(5)</sup>。X線ボイド率計では、X線のビーム位置 $z$ に於ける線ボイド率(X線ビームが通過する線分上の気相の長さ割合)は次式で表される<sup>(5)-(7)</sup>。

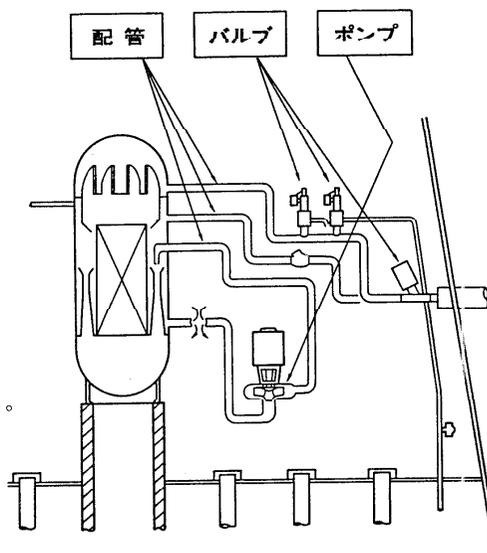


図1 原子炉の高压管路系機器の概念図

$$\alpha(z) = F(P) \frac{\ln [I_X(z)/I_W(z)]}{\ln [I_A(z)/I_W(z)]} - G(P) \quad (1)$$

ここで、 $I_X$ は測定時のX線強度で、 $I_A$ と $I_W$ は空気と常温水のときの較正值である。また、 $F(P)$ 、 $G(P)$ は密度の関数であり、蒸気表を用いて容易に計算できる。

上下スキャンの機構では、スキャン周期は1秒程度が限界である。そこで、スキャン速度を上げるために、ディスク（回転円盤）スキャン形X線ボイド率計を開発した<sup>(8)-(10)</sup>。さらに測定ビームを2ビーム（デュアルビーム）にして、2つの断面のボイド率を同時に測定するように改良した<sup>(11)-(12)</sup>。

図2に概略図に示す。ターゲットから発射されたX線はコリメータにより2つの扇形ビームを形成し、測定部の断面1、2をそれぞれ通過した後、高速回転円盤上の小孔スリットにより、2本の細いビームとなってX線検出器1、2に各々入射する。2点間の距離 $\Delta L$ と断面平均ボイド率 $\alpha$ の相互相関位相差 $\tau$ から、気相の平均流速 $u_g$ が次式で求められる。

$$u_g = \Delta L / \tau \quad (2)$$

気相の平均流速 $u_g$ が測定できれば、クオリティ $x$ が次式から計算できる。すなわち、

$$x = \rho_g u_g \alpha^2 / G \quad (3)$$

クオリティ $x$ が求めれば質量速度 $G$ は一般に測定が容易であるので、1次元二相流モデルの主要パラメータを押えることができる。

### 3. 管内二相流の流動様式

原子炉では、様々な流動現象が現われる。炉心、炉内構造物、高圧管路系機器である配管、

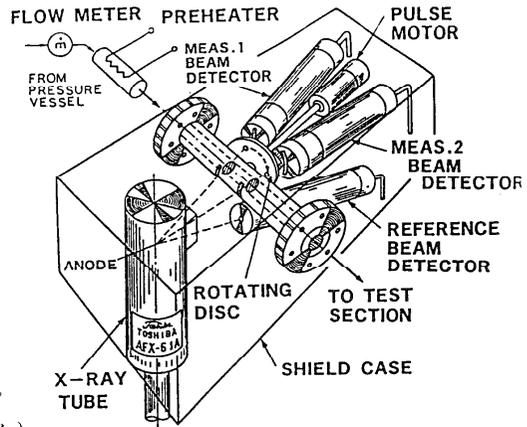
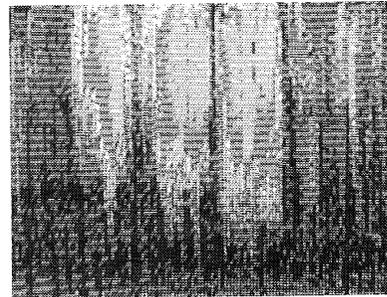
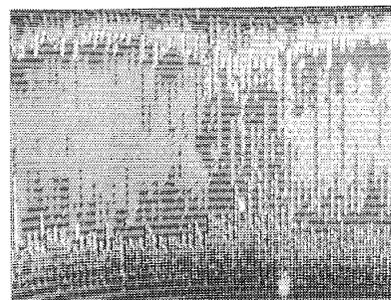


図2 ディスクスキャン型X線ボイド率計  
(デュアルビームスキャン方式)



(a) 栓状流



(b) 環状噴霧流



図3 フローパターンの測定結果の代表例

ポンプ、バルブなどの設計をする際に、流動現象をいくつかの流動様式 (flow pattern) に分類して現象を把握し、解析モデルを作成することが重要である。すなわち、与えられた設計条件下で、二相流動現象がどの流動様式に属するかをあらかじめ判定し、それに対応した圧力損失や熱伝達率の実験式や解析モデルを用意する必要がある。また、この手法によりプラントにとって好ましくない運転条件を回避することも可能となる。特に、層状流やスラグ流などの気・液の分離が著しい場合に管壁がドライアウトしたり、繰り返して熱応力を受ける。また、閉じ込められた気体スラグ (プラグ) が凝縮するとウォータハンマを生じる可能性がある。従来の流動様式線図は、可視化が容易な気圧近傍の実験が多いが、水平管内の高温高压蒸気水二相流については、本研究以外に公表された研究は極めて少なかった<sup>(1)-(4)</sup>。

本研究の場合、X線ボイド率計が使えるので、流動様式線図の横軸をクォリティ $\alpha$ ではなく、断面平均ボイド率 $\alpha$ とした方がデータの整理がしやすい。図4に測定結果を示す。図中の実線は、過渡時原子炉解析コード (TRAC=Transient Reactor Analysis Code)<sup>(13)-(15)</sup> で用いられている流動様式線図である。この図から、測定結果はTRACコードで用いられている流動様式線図と概ね良く一致していることがわかる。ただし、細部を子細に比較すると以下の相違点がある。まず、内挿領域①であるが、測定結果ではTRACコードでは分類していない栓状流に該当している。下端境界は図中に記入した一点鎖線まで下げた方が良いと考えられる。栓状流と気泡流の境界は図中の二点鎖線の通り、ボイド率 $\alpha=15\%$ の付近に存在する。この領域は、従来は気泡流に分類されている。内部の合体気泡はX線スキャン法によりその存在が確認されたもので、目視観察ではおそらく判別できないと思われる。次に内挿領域②には、流動様式がスラグ流からチェーン流へと変化する境界が含まれている。この領域の右側は環状噴霧流の領域である。この領域もTRACと測定結果は一致している。なお、TRACコードの流動様式線図は垂直管のもので、水平管に適用する場合は層状流や波状流の境界は気液界面の不安定判別式で判断しており、流動様式線図上では図中の3点鎖線の様に質量流速 $G=500\text{kg/m}^2\text{s}$ の付近に存在すが、X線による測定結果でも、ほぼ、これと一致する結果が得られた。以上に述べた通り、本研究により従来極めて少なかった高温・高圧の水平管内蒸気・水二相流の流動様式線図が得られた。この流動様式線図は0.5~7MPaの広範囲の圧力

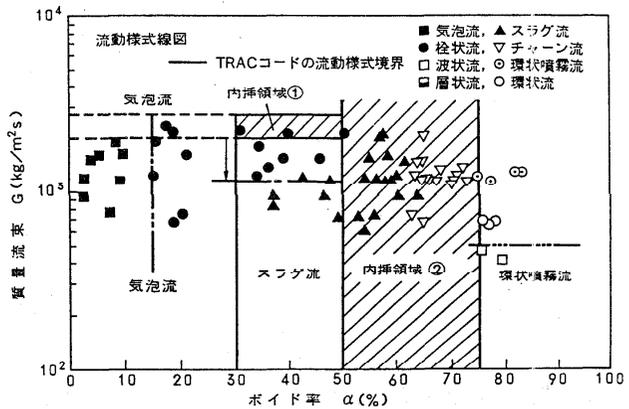


図4 X線ボイド率計により作成した高温・高圧 水平管内二相流 流動様式線図 (圧力0.5~7MPa)

データを含むが、流動様式の境界は比較的明確で、実用上便利である<sup>(16)</sup>。

#### 4. バルブやポンプの二相流特性

ポンプやバルブなどの高圧管路系機器は、一般に水や蒸気の单相流で使用されることが多く、二相流が通流した場合の挙動解析は、高温高压下の二相流データが少ないため困難であった。そこで、本研究では、逃がし安全弁（SR弁）と遠心ポンプの二相流特性を測定するため、それぞれ、縮尺の異なる供試体を用いて二相流挙動実験を実施した。バルブやポンプの入口には、ディスクスキャン形X線ポイド率計を据え付け、ポイド率を測定した。

SR弁については、図5の様に弁内の圧力分布と、ステム（弁棒）を介してディスクにかかる流体反力を測定し、その結果を基にバルブの流動特性モデルを構築した。弁内の圧力分布や流体反力の測定結果は、本モデルの解析結果と比較し良く一致することから、本モデルは広範囲の圧力・ポイド率で適用可能である<sup>(17)</sup>。

一方、遠心ポンプについては、二相流通流時のヘッド、トルクの詳細データを取得した。これらのポンプアークは、異常過渡時やLOCA時においてポンプ内を二相流が流れたり、逆流する高速二相流により、ポンプがタービンのように逆転・逆流領域で作動する特殊な条件下に於いてもポンプの挙動を解析評価可能とするものである。極座標ホモログス曲線法を提唱し、その手法を用いて測定データを整理し（図6）、広範囲の圧力、ポイド率、比速度に適用可能であることを示した。また、得られたホモログス曲線をTRACコードに組み込んで二相流通流時（過渡時）のポンプ挙動解析を行い、実験結果をよく説明できることを示した<sup>(18)-(20)</sup>。

#### 5. 次世代炉機器の二相流特性

現行のプラントでは充分に実績を積んでいるとしても、新型あるいは次世代の

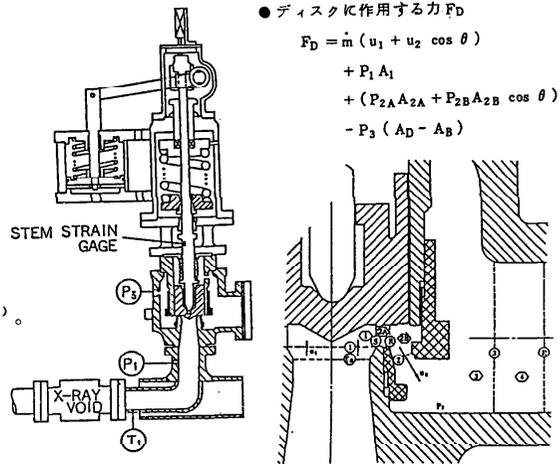


図5 逃がし安全弁の流体特性モデル

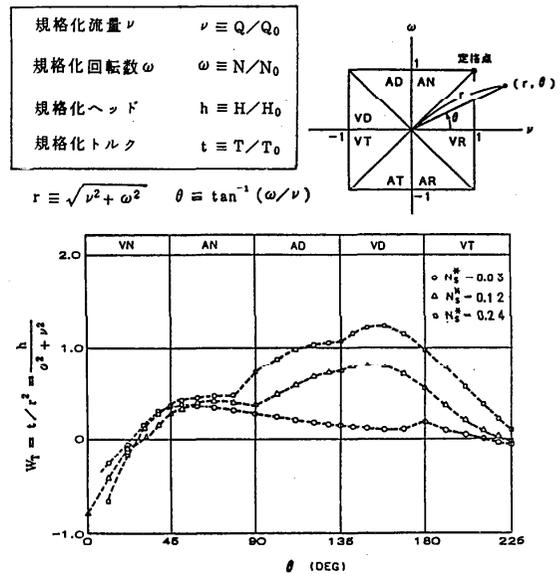


図6 ポンプの二相流特性（極座標ホモログス曲線）

プラントで設計変更が必要になる場合もある。現在のプラントの管路系機器の設計は膨大な試験結果とそれを実施した人たちの高度なノウハウに依って支えられていると言っても過言ではない。

次世代炉機器として当社が開発に取り組んでいる機器として

は、静的格納容器冷却系に用いるアイソレーションコンデンサ（隔離時復水器）<sup>(21)</sup>や、静的炉心注水システムに用いるスチームインジェクタ<sup>(22)</sup>がある。図7にスチームインジェクタの作動原理を示す。この機器も、先人により開発されたものであるが、運転中の原子炉に注水するために、大容量・高吐出圧の性能が要求される。この仕様を満足するためには、蒸気の超音速流や水噴流表面への凝縮などの伝熱流動現象の基礎に立ち帰り、さらに、先人の到達した領域を超えるための努力が要求される。幸い、このスチームインジェクタは8MPaを超える世界最高の吐出圧を達成し、大容量化へのステップを踏み始めている<sup>(23)</sup>。

## 5. おわりに

配管・バルブ・ポンプなどの高圧管路系機器は、原子力のみならず、広くエネルギープラントに共通な機器であると考えられる。21世紀を目前にした今、我々の使命は次世代の人々が豊かに、気持ち良く生活していく基盤となるエネルギーを安定して供給できるプラントを開発し続けていくことであろう。これはエネルギーシステム機器や伝熱流動を研究する人々の弛まぬ努力を必要とする。現在のプラントの管路系機器の設計は膨大な試験結果とそれを実施した人たちの高度なノウハウに依って支えられている。先人の貴重な遺産を生かし、これを超越するためには、これらの貴重な知見とノウハウを整理し、不足するものは実験や理論解析により補いつつ、これを次世代の人々に引き渡していくことが必要である。「伝熱研究」等に掲載された膨大な数の論文を見ると、これを分類・体系化して伝熱流動機器設計支援（CAE）システムのようなを人類の財産として、21世紀に活用できるシステムをそろそろ整備する時期にさしかかっているのではないだろうか。

浅字を省みず、生意気なことを書いてしまいました。このような機会が与えられたのも、大学の先生、諸先輩方、会社の上司や電力会社の方々の長年にわたるご指導ご鞭撻と、同僚や友人の暖かい応援があったからだと思います。ここに、深謝して筆を置きます。

## 参考文献

- (1) 赤川、「気液二相流」P12～33、コロナ社（昭49）
- (2) 植田、「気液二相流－流れと熱伝達－」、養賢堂（昭56）

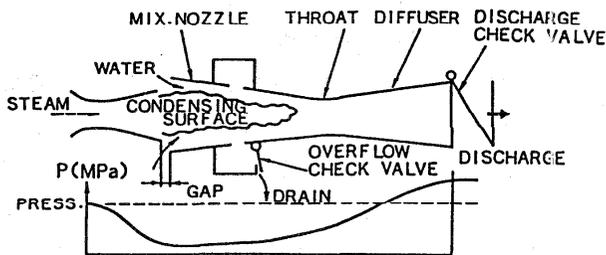


図7 スチームインジェクタの作動原理

- (3) 赤川ら、「管路系および容器内の気液二相流の流動現象に関する総合的研究」科学研究費総合研究(8)研究成果報告書(昭59年)。
- (4) 日本機械学会編、「気液二相流技術ハンドブック」、コロナ社(1989)。
- (5) 香川, 奈良林, 石塚, 徳山, "Measurement of Void Distribution in a Horizontal Pipe during Blowdown by X-Ray Beam Scanning Method", ANS/ASME/NRC Int. Topical Mtg. on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, NUREG/CP-0014, Vol.2, pp.874~889 (1980).
- (6) 奈良林, 徳山, 香川, 石塚, 「ブローダウン時の二相流管内ボイド率分布の測定」, 第19回日本伝熱シンポジウム, D104, (1982年 5月)。
- (7) 奈良林, 飛松, 長坂, 香川, 「X線ビームスキャン法による過渡時管内ボイド率分布の測定」日本機械学会論文集 50巻 450号 B (1984)。
- (8) 奈良林, 飛松, 長坂, 香川, "Measurement of Transient Flow Pattern by High Speed Scanning X-Ray Void Fraction Meter", IUTAM Symposium on Measuring Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flows, Springer, pp.259~280, (1983)。
- (9) 奈良林, 飛松, 馬渡, 「X線ビームスキャン法による高温高压気液二相管内流の可視化」, 流れの可視化, Vol.4, No.14, (1984-7)。
- (10) 平田, 奈良林, 石塚, 寺坂, 香川, "Void Fraction Distribution Measurement by X-Ray Beam through Image Reconstruction Technique and Analytical Simulation for Liquid Film Behavior", JAPAN-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, B.4, (1987)。
- (11) 奈良林, 石山, 「高速スキャン型X線ボイド計によるボイド率流速の同時測定」第6回混相流シンポジウム 1-1 (1988)。
- (12) 師岡, 奈良林, 石塚, 香川, 星出, 石山, "Measurement of Phase Distribution Phenomena in High Pressure Steam Water Two-Phase Flow", The Japan-U.S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, B4, (1988)。
- (13) Los Alamos National Lab., "An Advanced Best-Estimate Computer Program for Pressurized Water Reactor Analysis", NUREG/CR-3567, (1984-2)。
- (14) 村尾, 「軽水炉安全性に関する伝熱数値シミュレーション」, 伝熱研究, 26-101, (1987) 101-119。
- (15) 秋本, 「TRAC-PF1/MOD1 コードの構成方程式」, 第37回 日本機械学会関西支部二相流懇話会資料(1987-12)。
- (16) 奈良林, 石山, 宮野, 根井, "Measurement of Void Distribution in High Pressure Steam-Water Two-Phase Flow using High-Speed X-Ray Scanner", Proc. of The Int. Conf. on Multiphase Flows (ICMPF)'91-Tsukuba, pp.241~245, (1991)。
- (17) 奈良林, 長坂, 庭野, 大槻, "Safety Relief Valve Performance for Two-Phase Flow", J. Nucl. Sci. Technol., (日本原子力学会欧文誌) 23[3], pp.197~213, (1986)。
- (18) 奈良林, 新井, 窪小谷, 天野, 五明, "Centrifugal Pump Behavior in Steady and Transient Two-Phase Flow", J. Nucl. Sci. Technol., 23[2], pp.136~150, (1986)。
- (19) 湊, 山内, 奈良林, "Estimation of Centrifugal Pump Head in Steam Water Two-Phase Flow", J. Nucl. Sci. Technol., 22[5], pp.379~386, (1985)。
- (20) 加藤, 新井, 奈良林, 天野, "Study on Two Phase Flow Phenomena in Broken Recirculation Line of BWR", J. Nucl. Sci. Technol., 23[12], pp.1094~1103 (1986)。
- (21) 長坂, 山田, 加藤, 横堀, "Heat Removal Tests of Isolation Condenser Applied as A Passive Containment Cooling System", 1st ASME/JSME Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-1), Vol.1 b-1, pp.257-263, (1991)。
- (22) 奈良林, 石山, 宮野, 根井, 塩入, 「蒸気インジェクタの次世代軽水炉への適用化研究」, 機械学会, 67期 通常総会講演論文集B, 1109, (1990-3)。
- (23) 奈良林, 石山, 宮野, 根井, 塩入, "Feasibility and Application on Steam Injector for Next-Generation Reactor", 1st ASME/JSME Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-1), Vol.1 a-4, pp.23-28, (1991)。

## 1. はじめに

乾燥という操作は、おそらく人類の“エネルギープロセス”の中でも最も古い技術のひとつではないかと思われる。しかし、そのような長い歴史にもかかわらず、他の熱プロセスに比べ学術的研究が比較的少なく、工業的には経験に依るところの多い操作でもあるといえる。これは、被加熱物の種類が多様であるうえに乾燥後の製品の品質に直接係わってくるなどの理由から、現実的にはケースごとに対応せざるを得ないためと考えられる。

これまで、「伝熱研究」の分野の中で乾燥はあまり馴染みがなく、かなりminorな研究のような感がある。実際、乾燥は、化学工学の分野でも以前は一操作として位置づけられていたが、最近では乾燥に関する研究は著しく少なくなってきている。しかし、乾燥は、物質移動と相変化が同時に伴う伝熱現象であり、ミクロ的には複雑な物理現象を多く含んでおり、また、マクロ的にも乾燥促進による省エネルギー化および被乾燥物の高品質化のためのコントロールなど、伝熱研究の分野にも興味ある問題がいくつか存在するものと思われる。そこで本稿では、最近、著者が乾燥に関して興味を有している研究についてその概略を紹介したい。

## 2. 乾燥における伝熱学的諸問題

熱・物質移動機構の大略は、図1に示すように一見簡単そうに見受けられるが、種々のタイプの乾燥装置内での種々の被乾燥物表面の熱・水分伝達速度や被乾燥物内での熱・物質移動速度などを推算し得るデータはほとんど得られていない。すなわち、前者の表面熱・水分伝達速度に関しては、表面の局所分布により品質に大きな影響を与えるのみならず、相変化が共存する場合の熱・物質伝達の相互作用またはアナロジー則についての詳細な検討はほとんど見受けられない。また、後者についても試料粒子間または空隙に保有されている水の移動は、蒸発・凝縮の伴う微小空間の蒸気拡散、毛管吸引力、オスモティック・サクシオン力、場合によっては細孔内表面拡散などが共存し、その挙動は伝熱特性とも大きく関係しているがその機構についての十分な知見は得られていない。さらに、被乾燥物によっては乾燥収縮を起こすものがあり、これが、セラミックスや食品などの乾燥では割れやデフォーメーションを引き起こし、大きなトラブルの原因となるとともに乾燥時間短縮を図る上での問題点となっている。そこで、このような試料を連続体と仮定すれば、熱膨張を伴う熱応力解析と同様の手法が適用し得ると考えられるが、これに物質移動方程式も同時に解く必要があり、また乾燥収縮機構が未だ十分

伝熱研究 Vol.31, No.120

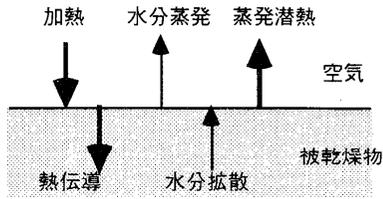


図1 乾燥の熱・水分移動機構

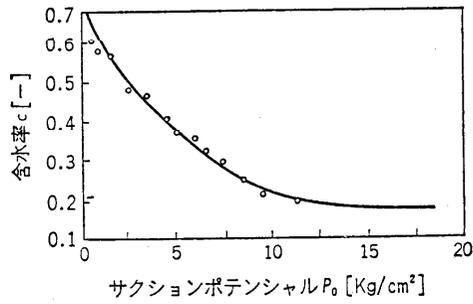


図2 含水率とサクションポテンシャルの関係

に明らかにされていないため、若干の試みが見受けられる程度<sup>1,2)</sup>で、十分な成果は得られていないようである。

このように、乾燥研究において伝熱に関連する研究課題は数多く残されている。以下では、乾燥収縮についての著者らの研究の一部を概説する。

### 3. 収縮の伴う乾燥特性

乾燥収縮は、粘土のように微小粒子の集合体内にオスモティック・サクション力により水が保有されている場合、脱水に伴い粒子間の水がオスモティック・サクション力で粒子同士を引き寄せるために生じると一般に考えられている。若林ら<sup>3)</sup>は、図2のように粘土のオスモティック・サクション力と含水率の実測し、含水率の減少に伴いサクションポテンシャルが増大する傾向を明らかにしている。このポテンシャルが粒子間を引き寄せる力となるとともに、その勾配が水分移動のdriving forceとなっている。一方、含水率と比容積は、ある含水率までは脱水体積に等しい試料体積収縮が生じ、直線的に変化し、以後は収縮はなくなることが報告されている<sup>3)</sup>。しかし、実際の乾燥では、均一な含水率分布を実現することは不可能であり、また収縮に伴い粒子間のせん断力も作用し、脱水体積に等しい試料体積収縮の仮定は厳密には妥当とは言えないと考えられる。

図3および4<sup>4)</sup>は、球形に成形した粘土の熱風加熱による特性曲線(含水率x vs. 乾燥速度J)と乾燥に伴う体積収縮率変化の一例を示したものである。図中、温度Tは熱風温度、Dは試料径を示し、熱風の流速はいずれも6.5 m/sの結果である。また、体積収縮率は、初期体積に対する収縮した体積で定義されている。これらの結果より、乾燥速度の増加に伴い収縮率が増大し、その変化も平均含水率に対して直線的にはならないことが認められた。このような傾向のひとつの原因として、乾燥時に含水率勾配が試料内部に生じることにより応力が発生し、この応力が粒子間の相対位置関係を変化させるため、乾燥収縮にも影響を与えることが考えられる。

そこで、熱風温度を極力低くすることにより、試料内部の含水率分布を小さくして測定した含水率と収縮率の関係を用いて、熱・水分移動と応力の同時解析を試み、体積収縮に与える応力の影響を検討した。試料内熱・水分移動は、Dufour効果を無視し、次式のような熱伝導およ

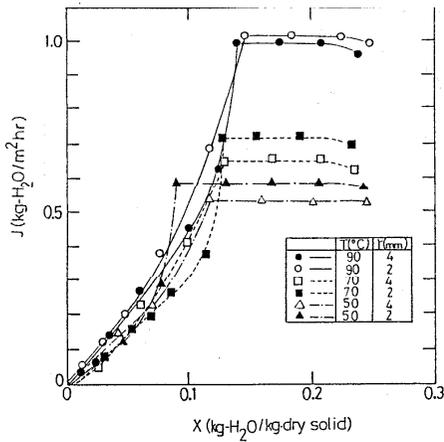


図3 乾燥特性曲線

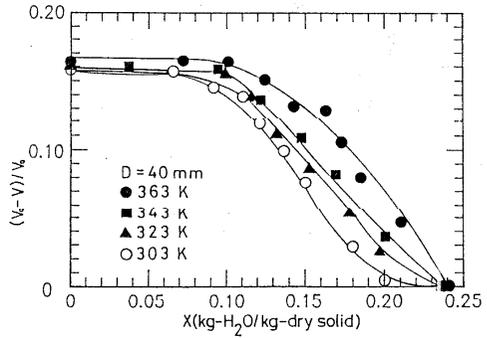


図4 含水率と体積収縮率の関係

び含水率勾配をdriving forceとする総合的な水分拡散により与え、水分の蒸発は試料表面でのみ生じるとした簡単なモデルを仮定した。

熱・物質移動:  $c_p \rho \partial T / \partial t = -\text{div}(\mathbf{J}_h)$ ,  $\partial c / \partial t = -\text{div}(\mathbf{J}_m)$

$$\mathbf{J}_h = -k_s \text{grad}(T), \mathbf{J}_m = -D_w \text{grad}(c), c = \rho_0 V_0 W / V$$

初期および境界条件:  $t = 0; c = c_0, T = T_0$

$$t > 0; h(T_s - T_g) + \sigma_s \phi (T_s^4 - T_g^4) - k \Delta H (P_s - P_g) = \mathbf{J}_h \cdot \mathbf{n}$$

$$k(P_s - P_g) = \mathbf{J}_m \cdot \mathbf{n}$$

ここで、 $c_p$ : 比熱、 $\rho$ : 密度、 $t$ : 時間、 $c$ : 水分濃度、 $k_s$ : 熱伝導度、 $D_w$ : 拡散係数、 $W$ : 含水率、 $V$ : 体積、 $h$ : 熱伝達係数、 $\sigma_s$ : ステファン・ボルツマン定数、 $k$ : 物質移動係数、 $\Delta H$ : 蒸発潜熱、 $P_s$ : 飽和蒸気圧、 $P_g$ : 空気中の蒸気圧

また、応力解析には、線形粘弾性応力を仮定した。これらの基礎方程式の解法としては、収縮による形状変化が伴うため、Galerkin有限要素法への定式化によって行った。

図5は、60x60x10mmの平板状に成形した粘土を343Kの熱風で乾燥させた場合の実験結果と計算結果の比較を示したもので、良好な一致が得られた。図6は、体積変化に与える熱風温度の影響を示したもので、熱風温度の上昇すなわち乾燥速度の増大に伴い体積変化も大きくなる傾向が本理論解析からも得られた。

#### 4. おわりに

本稿では、乾燥研究における伝熱の観点からの問題点および著者らの最近の研究の一端を紹介した。特に、乾燥収縮問題は、未だ不明な点も多く、ここで紹介した理論解析はあくまで試料の連続体性を想定し、試料内部の熱・物質移動も極めて単純化したものであり、試料粒子間

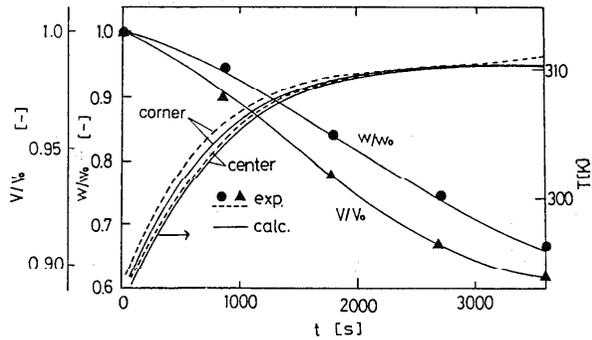


図5 実験結果と計算結果との比較

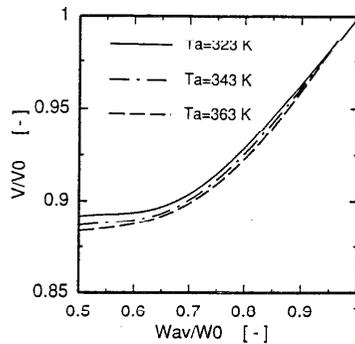


図6 体積収縮と含水率の関係

の相互作用やそれに与える熱・物質移動の影響など、収縮の伴う乾燥の精密設計を図る上で、今後検討すべき課題は山積しているものと考えられる。本稿が、伝熱研究者にとって、少しでも興味の対象となれば幸いである。

#### 文献

- 1) Haghghi, K. and L. J. Sergerlind, Failure of biomaterials subjected to temperature and moisture gradients using the finite element method, Thermohydro viscoelasticity, Trans. ASAE, 31, 930 (1988)
- 2) Haghghi, K. and L. J. Sergerlind, Failure of biomaterials subjected to temperature and moisture gradients using the finite element method, Stress analysis of an isotropic sphere during drying, Trans. ASAE, 31, 938 (1988)
- 3) 若林, 山口, 松本, 三田, 乾燥過程における微粒子層内液状水分移動, 化学工学論文集, 3, 189 (1977)
- 4) 室家, 板谷, 架谷, 3次元成形セラミックスの乾燥収縮および応力割れに関する研究, 第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集, p.619 (1991)

## 1. はじめに

宇宙は、スペースシャトルの運用が開始され輸送手段が確保されてから、従来からの観測の場としての利用に加えて環境利用の場として注目されるようになった。ここでいう環境とは、微小重力、高真空、高太陽エネルギーなどを指している。

これらの環境のなかで、特に「微小重力」を利用して「すぐに地上では得られない高品質の物質が出来るようになる」というバラ色の夢が当初あり、材料製造実験などの歌い文句となっていた。しかし、研究が進むにつれてそういった宇宙の商業的利用はまだ先のこと、現在は科学的利用（環境を利用して物理現象を解明する）、宇宙機器の開発と成果の地上機器への適用という面が中心となっている。そのなかで、熱流体現象は宇宙機器の開発と微小重力実験において大きな課題となっている。

本稿では、著者の関連している微小重力実験を中心として現在の研究課題、研究内容について簡単に紹介する。

## 2. 宇宙における熱流体問題

宇宙利用は、静止軌道（高度36000km）の人工衛星と低軌道上（高度300～500 km）の宇宙構造物により行なわれる。宇宙機およびそこで使用する装置類とそれらを輸送するための手段（ロケット、宇宙往還機、宇宙推進機など）に熱流体問題が深く関わっている。

表1 宇宙において熱流体現象が関連する例

分野	対象	注目される課題	熱・流体現象
宇宙熱制御	宇宙ステーション	省エネ形排熱の熱制御	二相伝熱現象（沸騰、凝縮） 接触熱抵抗
宇宙推進系	宇宙往還機 宇宙プラズマ推進機	高温熱交換 高温部断熱と放熱系	高温流体の熱伝達（熱解離） 断熱法と放射冷却
宇宙エネルギー	太陽熱発電	太陽熱集光系 発電サイクル	集光鏡の冷却 キャピラリーポンプ
流体マネジメント	推進薬タンク 流体循環系	液体保持 気泡除去	表面張力による液保持、移送 遠心力による気泡移動
宇宙実験	材料創製実験 流体物理実験	結晶成長 基礎現象の解明 物性値の測定	マウンテン対流 結晶成長機構（過冷却、物質移動等） 拡散係数等の物性値測定

宇宙における熱流体問題の例を表1に示す。研究課題が広い範囲にわたっていることがわかりいただけるであろう。特徴をあげるとすれば、微小重力下での流体挙動からくる伝熱形態、

性能の変化と高温熱交換、高温断熱の2つが挙げられる。なお表1には示していないが、宇宙観測用赤外望遠鏡の開発では、極低温、超伝導がこれからの大きな課題となると予想される。

微小重力実験は実験内容そのものに加え、実験装置の設計、実験技術、実験運用が他の分野の研究を微小重力で行なう場合にすべて関わっており、重要な要素となっている。

### 3. 微小重力実験

微小重力実験手段は、表2に示すように多岐にわたっておりそれぞれ実験時間、加速度レベルが異なり実験目的によって選択する。これまでは、実験手段が整備されておらず実験機会が限られていた。しかし、表2のスケジュールに示す通り、落下塔と航空機が定常運用を開始したのでいつでも実験が可能となり、ロケット以上の実験もここに示す以外のものも計画されようとしている。

表2 微小重力実験手段と実験予定

微小重力実験手段 (時間、加速度レベル)	FY90	91	92	93	94	95
落下塔 (JAMIC, MGLAB他) (1~10秒、 $10^{-4}$ G)		定常運用				
航空機 (MU-300他) (5~20秒、 $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$ G)		定常運用				
小型ロケット (TR-1A他) (400秒、 $10^{-4}$ G)	MASER TEXUS	TR-1A #1	MASER TEXUS #2	#3		
スペースシャトル (有人) (7日程度、 $10^{-4}$ G)		IML-1	PMPT D-2		IML-2	
フリーフライヤー (SPU, 無人) (180日、 $10^{-4}$ G)				SPU #1		
回収型カプセル (無人) (数日、 $10^{-4}$ G)				EXPRESS		
宇宙ステーション以降 (開発中) (180日以上、 $10^{-4}$ G)						

ここで微小重力実験の問題点を私なりに考えてみると以下のようなになる。

- (1) 実験費用が高い。
- (2) 参加研究者の数が少ない。
- (3) 装置の開発に大部分の勢力がそがれる。
- (4) まとまったデータが取得できない。
- (5) 提案から実験までの時間がかかり過ぎる。

(1)、(5)については、やや改善の兆しは見えてきている。また、(3)、(4)についてはこれまでの蓄積を生かせばなんとかかなると思われる。私がもっとも心配しているのは、(2)である。人数が少ないことは、カバー出来る分野が少なくなるとともに研究に対する深い突っ込みも不足することになる。微小重力実験への研究者の参加が増えることを希望して止まない。

#### 4. マランゴニ対流に関する微小重力実験

現在までに日本においてもかなりの微小重力実験の成果が得られている。(1) ここでは、著者の研究内容について紹介する。(2)

気液界面の存在する融液結晶成長法では宇宙においても表面張力差による対流（マランゴニ対流）が発生して本質的に無対流は保証されない。そのため、著者らは融液結晶成長法の一つであるブリッジマン法を対象とした温度差によるマランゴニ対流実験をFMPTで計画しており、その予備研究を進めてきた。

##### (1) FMPTマランゴニ対流実験計画

図1に実験装置の概略図を示す。ブリッジマン法の融液状態を模擬しており、冷却壁が結晶、ガラスカバーがアンプルに対応しており、冷却壁とガラスカバーの間に形成される自由液面に温度差によるマランゴニ対流を発生させる。透明な試験液（パラフィンの一種であるn-エイコサン）にアルミ微片を混入して、その動きを2方向からファイバースコープを通して観察する。

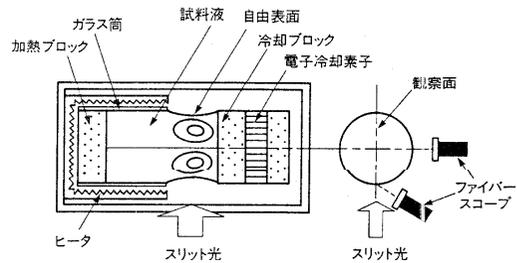


図1 FMPTマランゴニ対流実験装置概要

##### (2) 航空機による微小重力実験

FMPTの予備実験として液柱内の非定常流動の可視化実験を行なった。この実験は液柱形成、マランゴニ対流の確認といった基本現象の確認や可視化技術の習得を目的としたが、非定常流れについても知見が得られた。

実験装置はFMPTと同じものを用いた。図2(a)に、自由液面形成後1～6秒までのアルミ微片の動きをビデオ画像から撮影したものを示す。自由液面近くに流れが発生して渦状に動き始めていることがわかる。これは、2次元モデルを差分化して行なった計算（図2(b)）と一致している。さらに検討の結果、マランゴニ効果以外の駆動力は影響が少なく発生した流れはマランゴニ対流と推定された。

現在 これらの成果を用いて、実際の結晶成長時の融液内のマランゴニ対流を評価する

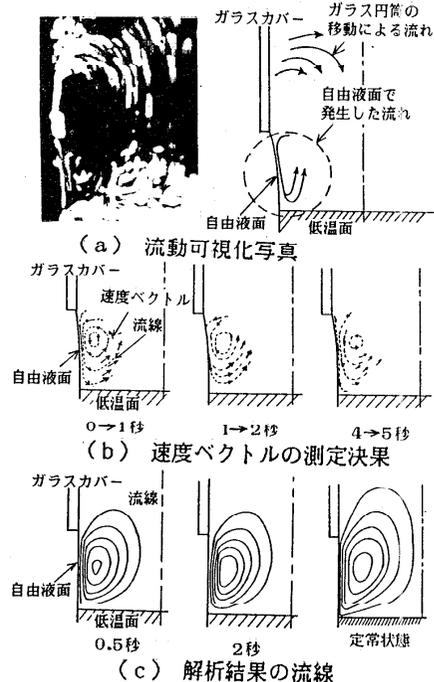


図2 航空機実験結果（微小重力場における非定常流動）

(図3参照)とともに半導体などで問題となる濃度差によるマランゴニ対流の研究も行なっている。

### 5. おわりに

宇宙における熱流体問題を紹介するとともに微小重力実験について著者の研究を交えて概説した。宇宙という分野はまだ創世記に近い状態であり「なぜ宇宙なのか」という議論も今後もつとめなされなければならない。そういった意味でも新しい研究者の参加が望まれる。

### 参考文献

- (1) H. Azuma and T. Nishinaga, IAF-91-374, Montreal, 1991
- (2) K. Kuwahara, S. Enya, R. Akiyoshi, J. Ochiai and H. Uchida, Proc. 17th ISTS, Tokyo 1990, 2171-2178

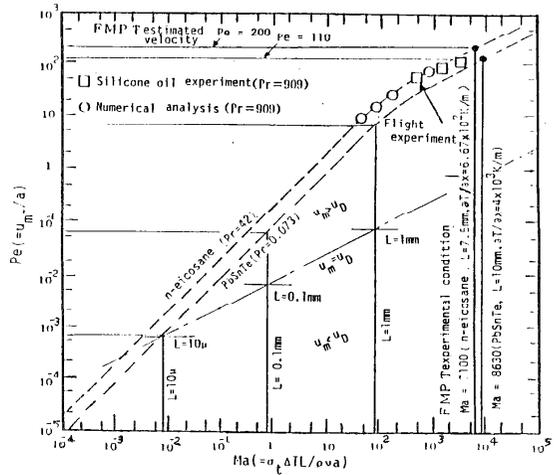


図3 融液内のマランゴニ対流の推定 (マランゴニ数とペクレ数 (液面流速) の関係から自由液面長さによる液面流速をを算出して融液成分の拡散速度と比較した)

## <国際会議報告>

日米伝熱セミナー：伝熱科学におけるコンピュータの役割 - 21世紀への展望

COMPUTERS IN HEAT TRANSFER SCIENCE - Outlook for the Role of Computers  
in the 21st Century

中山 恒 (東工大)

1991年10月20 - 25 日にかけて表記のテーマに関する日米セミナーが開かれた。開催場所は神奈川県大磯町で、相模湾に面した大磯プリンスホテルに日米双方の参加者が一週間文字通り缶詰めになって活発な討論を行なった。本稿では(1) 開催に至る経緯、(2) 会議の報告、(3) セミナーの将来に関する考察、を記す。

### (1) 開催に至る経緯

日米伝熱セミナーの開催は今度で 4回めになる。これまでのセミナーのリストは下記の通りである。

<u>年・月</u>	<u>場所</u>	<u>オーガナイザー</u>	<u>テーマ</u>
1980・10	東京	水科 篤郎先生 (故人) W. J. Yang先生	エネルギー問題と伝熱
1985・9	SanDiego	W. J. Yang先生 森 康夫先生	先端技術とパワーエンジニアリングにおける伝熱
1990・10	苫小牧	棚澤 一郎先生 N. Lior 先生	新材料の製造とプロセスにおける伝熱

これらのセミナーの主後援団体は第 1, 2回が日本学術振興会 (学振) と米国科学財団 (NSF)、第 3回が藤原科学財団であった。今回のセミナーの企画は第 2回セミナーのオーガナイザーを勤められた森 康夫先生が、日米セミナーの継続の重要性を説かれたときから始まった。米国側は Notre Dame大学の K. T. Yang教授、日本側は私がオーガナイザーを勤めることになり、テーマの設定、参加者との交渉、学振と NSFへの後援申請など一連の手続きを、関連する先生方と相談しながら進めた。今回のセミナーには学振と NSFに加え、神奈川科学技術アカデミーの後援も頂いた。

セミナーのテーマは双方のオーガナイザーの研究領域がカバー出来る範囲にある主題で、しかも多くの方に参加頂けるものでなければならない。K. T. Yang教授は自由対流の数値解析を主研究領域としてこれ、私はコンピュータの熱環境制御問題に最近注意を向けてきた。そこで、表記のテ

ーマとしたわけである。申すまでもなく、コンピュータは伝熱研究の全ての面で大きなインパクトを与えつつある。また、コンピュータの進歩自体、これからの伝熱研究に負うところが極めて大きい。21世紀にあと10年足らずという今日の時点で、識者が集まって本テーマについて討論するのは意義深いことであると、大方のご賛同を頂いた。

学振と NSFの後援によるセミナーには参加人数に枠があること、また諸先生のご都合などから、多少の経緯ののち、下記の先生方にご参加頂いた。(アルファベット順、敬称略)

Baum(NIST), Bushnell(NASA), Chu(IBM), Gaugler(NASA), Hickox, Jr. (Sandia), 土方(東工大), 細川(電通大), Howell(U. Texas, Austin), Humphrey(U. California, Berkeley)石塚(東芝), Jacobs(Penn State), 笠木(東大), Kelleher(Naval Postgraduate), 小竹(東大), 工藤(北大), 黒崎(東工大), 前田(慶大), 牧野(京大), Mikic(MIT), 森(東工大 名誉教授), 長野(名工大), 中山(東工大), 大串(三菱電機), 尾添(九大), Pepper(APRI), 佐野(東海大), 鈴木(京大), Shiralkar(GE), singhal(CFD Research), Sirignano(U. California, Irvine), 高木(阪大), 棚澤(東大), 渡里(NEC), 矢部(通産省機械技研), 山本(富士通), Yang(U. Notre Dame)。この他聴講参加者として、企業と大学の若手研究者と技術者30名弱の参加を頂いた。

## (2) 会議の報告

セミナーは、講演22件、パネル討論 6セッション、招待講演 2件(日本側 森 康夫先生、米国側 Hickox博士)でもって構成した。参加された先生方には講演、パネル討論のグループリーダー、講演セッションの司会、を分担または兼担して頂いた。講演には一時間の枠を設けた(たっぷりととった積もりであったが、しばしば不足気味であった)。パネルセッションは日米各一名のグループリーダーのもとに、4-8名のパネリストで構成し(以下括弧内はグループリーダー)、数値解析(尾添, Mikic)、理論および実験研究におけるコンピュータの役割(鈴木, Humphrey)、ハードウェアとソフトウェアの進展(中山, Chu)、実験研究とコンピュータ(土方, Jacobs)、物理プロセスの数値モデル化(佐野, Sirignano)、伝熱研究の進歩とコンピュータ(黒崎, Yang)の各テーマを集中的に討議した。

講演とパネル討論から得られた成果は次の三項目に分類出来る。

- A. 複雑な伝熱現象の理論的解明に果たしているコンピュータの役割の現状と、将来の展望
  - B. 実験研究の重要性の確認と、実験研究におけるコンピュータの役割に関する展望
  - C. 伝熱研究を支えるコンピュータのハードウェア、ソフトウェアに関する展望
- 以下、各項目ごとに少し詳しく述べる(括弧内の個人名は関連テーマの講演者)。

### A. 複雑な伝熱現象の理論的解明に果たしているコンピュータの役割の現状と、将来の展望

多くの現象の理論的解明を困難にしている要因は、一言でいえば、複数の伝熱モードが絡み合っているために基礎方程式体系の非線形性が極度に強いことにある。理論研究の領域で物理過程の非

線形性がもたらす特徴的な問題には、同一境界条件のもとで複数の解が存在しうる解のバイファケーション、さらに時空間領域で多数のプロセスの相互干渉として生ずるカオス、がある。伝熱を伴わない流動現象のみでも層流から乱流への遷移および乱流そのものの理解は、未だにチャレンジな研究課題である。非線形物理過程の理解には、コンピュータによる数値シミュレーションが欠かせないことは明らかで、問題の非線形性が強くなるほど数値シミュレーションに必要なコンピュータのリソースは指数関数的に増大する。

更に重要なことに、多くの伝熱現象には広い範囲に分散する長さや時間のスケールが含まれている。このことはコンピュータの性能と容量に大きな要求を課している。即ち、マイクロな基本スケールのみを用いて現象をシミュレートしようとする、膨大なコンピュータリソースが必要となる。限られたコンピュータリソースしかない状況のもとでは、マイクロ機構のモデル化の必要がある。

以上は講演とパネル討論を通じて示された、研究ツールとしてのコンピュータとコンピュータを用いる研究の方法論に関する見解であった。講演の題材は、自由対流(尾添)、カオス(細川)、剥離流(Mikic、森)、振動流(森)、乱流モデル(長野)、乱流熱伝達のダイレクトシミュレーション(笠木)、衝撃波(Pepper)、分子レベルの伝熱機構(小竹、森)、燃焼(Baum、高城)、輻射伝熱(Howell、T藤)、多相流(Jacobs、Sirignano)、マグマ流(Hickox)など多岐にわたった。

将来への展望は講演者及びパネリストから述べられた。展望のなかで共通していたことは、コンピュータの役割に関する楽観的な期待である。期待は次の三点に要約できる。まず、計測が困難な微細機構に関する理解の促進である。即ち、分子レベルの微細伝熱機構、カオス発生の根源、乱流、反応流、多相流の微細機構、などである。招待講演で森 康夫先生は微細物理機構の理解への飽くなき挑戦を強調された。次に、計算結果の画像処理から得られる新しい知見に対する期待である。今日まで用いられてきた線図などの二次元表示に代わり、多次元パラメータの影響の画像による一括表示は概念上のブレイクスルーをもたらす可能性を秘めている。更に、乱流の $k-\epsilon$ モデルに代表される基礎機構モデルが相変わらず重要な役割を担い続ける見通しがある。こうしたモデルの効用及びモデルの改良の必要性は工学応用の面で特に高い。

## B. 実験研究の重要性の確認と、実験研究におけるコンピュータの役割に関する展望

伝熱研究に関しては、コンピュータが実験の必要性を全く無くしてしまうことはありえないというのが共通した見方であった。強い非線形性から生ずるコンピュータリソースに対する要求とコンピュータ技術の間には、21世紀に入っても大きいギャップが存在し続けるであろう。実験は計算結果のベンチマークテストとして重要な役割を担い続ける(Yang、棚澤、矢部)。更に実験測定とコンピュータによるデータ処理、および実験と平行して行う数値解析との結合による新しい研究手法が展開されつつある(Humphrey、牧野)。

ベンチマークテストとしての実験を考えると、重点を置くべき課題の一つに、計算で想定する

境界条件と実験での境界条件との精度良い適合を図る問題がある。むしろ、厳密な適合を得ることは極めて難しいと考えるのが実際である。この問題に関してはむしろ見方を変えたアプローチが必要であろう。即ち、計算と実験とを相対して比較する慣習から脱して、計算と実験とを融合した一体の研究ツールとして見る必要性が高まってきたといえる。このようなツールとして実験室のコンピュータを見ると、性能に対する要求と実際の性能との間には未だギャップがある。即ち、実験のリアルタイム制御、予測制御の要求により良く応えられるコンピュータ技術の展開が望まれる。

### C. 伝熱研究を支えるコンピュータのハードウェア、ソフトウェアに関する展望

コンピュータのハードウェアの発展は今日までは目覚ましい勢いであったが、幾つかの技術バリアが発展速度を緩めつつある。技術バリアの一つが発熱と冷却の問題で、このバリアを越えるためには伝熱学の支えが必要である。コンピュータと伝熱学の相互補完関係は、熱設計ツールとしてのコンピュータ（石塚、Chu）、大型高速システムにおけるデータフローの経路と冷却流路のアコモデーション（中山）、コンピュータメーカーからの技術見通し（渡里、山本）、の各方面からレビューされた。更に、パーソナルコンピュータとワークステーションの性能と容量が増大するに従い、かなりの数の伝熱問題がこれら中小形機で扱えるようになり、これらを研究ツールとして効果的に用いる教育の必要性が指摘された。

超並列計算（Bushnell）は極めて強力なインパクトを与えつつある。但し、現在は流体力学解析の方に重点が置かれていること、および汎用性のあるソフトウェアの構築が課題であることは一般に指摘されている通りである。ソフトの汎用性といえば、超並列計算でなくても伝熱研究に用いられているソフトには研究者固有のものが多いと指摘があった。研究効率の向上を図るために、各種の解析および実験用プログラムの公開を行う場の必要性が論じられた。革新的なツールであるコンピュータを科学の進歩に役立てるための一層の組織的な工夫を必要としている。森先生は、解析プログラムの公開とプログラムそのものを多くの研究者の批判的評価の俎上に乗せることを学会が推進する必要があると指摘されている。

### (3) セミナーの将来に関する考察

学振とNSF に対するセミナー後援の申請件数は年と共に増えていると伺っている。また、これら機関での審査の際、研究発表のみの集会よりも、特定の分野での科学技術の発展方向を討論する集会に重点を置いているようである。今回のセミナーの申請では発展方向の討論を強調したのが良かったとYang先生がNSF 側の話として述懐しておられた。

ところでセミナーの現場では日米双方の思考様態の差が出て、それ自体、公式セッション外での興味ある議論のテーマとなった。即ち、セミナーの性格と目的に関しては勿論双方とも十分に理解していたのであるが、思考の表現様態に差があった。日本側の参加者は計算結果あるいは実験結果の詳細を土台にして議論を進めることにどちらかという力点を置いていた。これに対し、米国側

の参加者は一般的概念のプレゼンテーションを前面に出し、計算結果あるいは実験結果はどちらかというプレゼンテーションの中で補足的位置を与えられていた。分かりやすく言うと、日本側参加者にとっては米国側のプレゼンテーションに周知のことが多く含まれ過ぎているように思え、米国側参加者にとっては日本側のプレゼンテーションが他の学会でも聞くことが出来る研究発表と映る、といった具合である。双方の意図に基本的な食い違いは無いことを確認するディプロマシーが必要となり、Yang先生と深夜まで語り合った。双方の参加者の互いに近付こうとする努力のおかげで、セミナーが終りを迎える頃には充実感あふれた雰囲気になった。

今後、本セミナーと同じ性格の集会は増えると考えられる。それと共に上記の思考様態の差を体験する機会も多くなるであろう。私は差があっても良い、むしろ差を大切にすべきだと思っている。そのような差を認識しながら、研究の将来に関する概念構築の作業を協同して行なうところに、二国間セミナーの意義があると思う。

本セミナーの論文集は1992年に出版するべく編集作業を進めています。

## <地方研究グループ活動報告>

### 北海道地方研究グループ主催 平成3年度第1回北海道伝熱セミナー報告

北海道地方研究グループ企画による宿泊を伴う第1回の伝熱セミナーが、本年7月6日から7日にかけて札幌市内の手稲山研修センターで開催された。この研修センターは、札幌市を冬の季節風から防護する役割を果たす高さ約千米の山の中腹にあり、冬はスキー場（1972年、冬季オリンピック大回転競技の場所として有名）として賑わい、夏には市民の憩いの場として親しまれる研修所である。

セミナー開催までの具体的な作業は、北海道地区としては初経験であるため、テーマの選定、場所、時期等をどう決めれば良いのか、予算をどの程度の規模にすればよいか等、暗中模索の段階であったが、とりあえず昨年度と今年度の幹事が中心となり、実行委員会を結成して具体案の策定に取り掛かった。ともかく会員の意志や要望の聴取が先決と、早速会員のアンケート調査を実施し、場所、テーマの確定を急いだ。その結果、「地球環境と伝熱」、「宇宙と伝熱」等が多く出されたが、話題提供者の確保の関係から最終的に前者のテーマに決定した。さて、プログラムの構成がまた次の難問であったが、一応、初日を都市環境を含めた大気環境、二日目に海洋環境に設定する方針を固め、即刻、講師の依頼をお願いした。幸い、それぞれの分野で最先端の研究に携わっている先生方のご快諾を得ることが出来た。また、セミナー開催日が近づくにつれ、参加者数の心配が持ち上がったが、実際には予定をはるかに越える正会員21名、学生16名、外部からの講師4名、企業5名、合計46名が参加、活気に満ちたセミナーとなった。

第1日目は、金山先生（北見工大）に座長をお願いし、井上和彦先生（北大・原子）の「地球環境と原子力」から話題提供が始められた。講演は、現在のエネルギー事情から考えて原子力の普及が当面の課題であり、今後のエネルギー需要増大とCO<sub>2</sub>低減の対策から既存の軽水炉ではなく、核燃料に関し高転換比を持ち、かつ気体冷却方式を採用した固有安全炉としてのGHGR（黒鉛減速高温ガス冷却炉）の開発が急務である旨の話題が出された。二番目は若松伸司氏（国立環境研究所）による「都市大気汚染と地球環境問題」と題する話題提供がなされ、都市あるいは広域で発生する様々の大気汚染物質の変質過程のメカニズムやオゾン等の大気汚染の現状分析について関東地区を中心とした詳細なデータに基づいて説明がなされた。

第3番目には、「地球環境と都市温暖化」と題して齊藤武雄先生（東北大・機械）から講演して戴いた。話題は主として、研究室で行われた仙台市内の環境（気温）調査を中心に、計測装置を自家用車に搭載して測定した実測結果と数値シミュレーション結果の比較検討が紹介され、今後の都市温暖化の予想および温暖化防止対策の必要性が提示された。第1日目の最終講演として、本米、馬場先生（北見工大）をお願いした分を一部予定を変更して福迫尚一郎先生（北大・機械）に話題提供して戴いた。テーマは、「海水中における氷塊の融解現象」であり、

実験室レベルでブラインにより氷柱を融解させた場合の詳細な観察結果から、融解過程で見られる表面上の流れに沿った溝状あるいはえくぼ状の凹部形成の理由について氷柱表面上に形成される異なる温度および濃度（塩分）境界層発達相互干渉の結果である等の興味ある話題が出された。

第2日目は、杉山先生（北大・原子）による司会の下に、3件の話題が出された。最初の話題は青田昌秋先生（北大・流氷研究センター）による「地球環境と海氷のかかわり」と題するテーマであり、主としてオホーツク海で生ずる流氷の生成原因を探る調査活動や流氷の下に生息する微生物の観測結果など興味深い話をして戴いた。二番目は、馬場弘先生（北見工大）による「地上における放射熱バランスと気温」と題する話題であり、北見工大構内で測定されている全天日射計および天空放射計による同時測定から、天候の激変時における気温の特異変動と放射熱バランスとの関連性が提示され、会場の関心をさらった。最後に、媚山政良先生（室蘭工大）の「噴火湾内の流れ」と題する話題が提供された。噴火湾はホタテ養殖場として知られているが、数十km程度の比較的単純な形状を持つ親潮（寒流）と対馬暖流支流が攻めざあう特異な海域であり、水産資源その他の活用のため試みられた流体力学的立場からの湾内の流れ解析が紹介された。

第一日目の夜には、北海道ならではのジンギスカンパーティー形式の懇親会が馬場先生の司会進行の下に行われ、参加者全員が一言づつコメントを加えるなど遠来の講師の先生方をも交えて和やかな雰囲気の中で夜遅くまで話はずんだ。学生諸君にとっても普段、あまり他大学の先生方や学生相互の交流が少ないことから、十分な刺激剤になったのではないかと企画した立場として秘かに自負している次第である。

セミナー実行委員代表  
北海道地区連絡幹事  
花岡 裕

東海研究グループ主催  
長良川畔伝熱セミナー「企業における伝熱の最前線」を終えて

西村 誠 (岐阜大工)

東海研究グループ主催の伝熱セミナーが「企業における伝熱の最前線」というテーマで、平成3年11月1日～2日、1泊2日の日程で岐阜長良川畔の長良川ハイツで開催されました。本セミナーの開催にあたり、当番校を岐阜大でお引き受けして、熊田雅弥先生と私が中心となり、両研究室のスタッフも交じて企画・準備致しました。本年度は企業の伝熱研究者・技術者の方に最新の話題を提供していただき、併せて産学交流の場となるようにと考えました。さらに、特別講演として燃焼計測の権威であられる岐阜大の志水昭史先生を講師にお願いすることにしました。志水先生及び企業よりの7名の方にはお忙しいにもかかわらず講師をご快諾いただき、開催に至りました。参加者は講師の方々も含めて62名の多数になりました。内訳としましては、大学側は遠方より参加された新潟大の前川博先生、東海地区の各大学よりの参加者合わせて46名(学生27名)、企業側は9社より16名でありました。企業より多くの方々に参加していただき、当初の目的の1つである産学交流が果たせる、活気あるセミナーとなりました。以下、セミナーの内容を報告します。

11月1日

話題提供1：潜熱蓄熱技術の現状と応用 陶 昇 氏(三菱油化エンジニアリング(株))

話題提供2：電気温水器用の潜熱蓄熱材とその熱特性 平松 正義氏(中部電力(株))

話題提供3：空調器及び吸収冷凍機の熱交換器用材料における伝熱促進技術 野世溪 精氏  
(住友軽金属工業(株))

話題提供4：次世代空調用空冷熱交換器に求められるもの 川端 克宏氏・田中 順一郎氏  
(ダイキン工業(株))

11月2日

特別講演：光による気体状態量の測定 志水 昭史氏(岐阜大学・工学部)

話題提供5：産業用分野における都市ガス燃焼を利用した伝熱技術 中村 泰久氏(東邦ガス  
(株))

話題提供6：工業炉における伝熱問題の現状と将来 谷口 聡 氏(日本ガイシ(株))

話題提供1, 2は潜熱蓄熱に関するものでした。陶氏は、三菱油化エンジニアリング(株)がフランスのクリストピア社の技術をベースに開発されたSTL(STOCKAGE PAR CHALEUR LATENTE)蓄熱システムについて、その概要を述べられた。本システムは潜熱蓄熱材(-21-64℃の範囲で、12グレード、無機系)を封入した球カプセルを充填した蓄熱槽をメインとしたシステムです。蓄熱材特性、カプセルの伝熱・耐圧性能、蓄熱槽の伝熱特性などを説明され、いくつかの適用分野を上げられ、さらに深夜電力を利用して昼間の冷水高負荷に対処できた具体例(牛乳工場)を紹介さ

伝熱研究 Vol.31, No.120

れてシステムの有効性を示された。平松氏は、電気温水器の需要拡大の観点から、潜熱蓄熱による電気温水器のコンパクト化の可能性を検討された例を紹介された。潜熱蓄熱材（硝酸塩系溶融塩）を納めた蓄熱槽に熱交換器と電気ヒータを設置した、実容量の温水器を試作し、蓄熱特性、連続給湯・実パターン給湯の特性を調べた結果を示された。蓄熱材組成、給湯時の温水温度の制御などに改良すべき点があるが占有空間で1/4程度までコンパクト化できる見通しだと述べられた。

話題提供3, 4は空調用熱交換器に関するものでした。野世溪氏は、素材供給側の立場より、過去20年間に開発されてきた熱交換器用材料及び今後求められる機能と材料について解説された。プレコートアルミニウムフィン材における親水性、耐蝕性、除霜性などの付与特性と実用例、内面溝付銅管において溝形状、細径化と伝熱性能や圧力損失の関連を検討した結果、さらに吸収冷凍機用の伝熱促進管の現状など、豊富な資料に基づいて説明された。川端・田中両氏は、機器メーカーの立場より、熱交換器の高性能化・コンパクト化の歴史、及び各種効率の向上、フロン問題、ハイアモニティの追及から生ずる今後の技術課題について解説された。伝熱管の細径化を目指したメッシュフィン熱交換器についての検討結果、フィンパターンの改善による低騒音化例、フロン代替冷媒の伝熱性能試験結果など、展望を交じえて説明された。

特別講演をお願いしました志水先生は、まず、ノッキングと温度の関連などを例にとり温度や濃度の計測の意義、重要性、さらには困難さを述べられ、ついでご自身の研究に基づき、Rayleigh散乱法、赤外線吸収・発光法による温度、濃度分布の測定について、原理、測定結果、精度などを詳しく説明された。さらに、温度、濃度分布の同時測定法であるCT(Computed Tomography)法を紹介され、その有用性、課題などを述べられた。

話題提供5, 6は工業炉の伝熱に関するものでした。中村氏は、工業炉の需要実態や従来の伝熱解析例などを紹介され、自身が熱処理炉について理論解析の適用性の検討、炉設計の支援、炉内伝熱の理解を目的として伝熱解析を行われた2事例を説明された。炉壁、被加熱物内の3次元非定常熱伝導をいくつかの仮定のもとに解析された結果が実験結果とよく一致したことを示された。炉内のファンの周期的反転の伝熱効果（加熱時間の短縮）について検討された結果も示された。谷口氏は、三河地方の地場製品である瓦を焼成する台車型トンネルキルンについて伝熱上の改善例を紹介された。従来、炉内の500-600℃の温度域(SiO<sub>2</sub>の変態域)で瓦の上下に150-200℃の温度差があつて黒芯などの問題が生じがちであったが、バーナーの設置により対流伝熱の均一化をはかり、30-40℃の温度差に改善できたことを示された。バーナーガス流による対流伝熱促進、表面燃焼バーナーなどの迅速焼成技術、今後の課題などを述べられた。

11月1日の夜には懇親会が開かれ、熊田先生の巧みな司会の下で、前川先生による乾杯の後、産学間で、学生諸君も加わつて熱っぽい議論が交わされました。そこでの議論は宿泊の部屋での2次会へと発展し、深夜まで続きました。

最後に、講師の方々に改めてお礼を申し上げますとともに、当日の進行にあたり、司会の労をわずらわしました名大の藤田秀臣先生、名工大の長野靖尚先生、豊橋技大の三田地紘史先生に感謝申し上げます。

## 北陸信越地方グループ

### 『講演会と見学会の報告』

日 時：平成3年11月16日(土)

場 所：金沢工業大学 24号館 (石川県)

内 容：

#### ○特別講演

「工学基礎教育の理念と実情」 佐藤 豪 氏 (金沢工業大学学長)

#### ○見学会

①金沢工業大学工学基礎実技センター

②放送大学石川ビデオ学習センタ(91. 9開所)

#### ○グループ講演会

(1) 二酸化炭素の固化除去に関する研究

青木和夫(長岡技科大), 服部 賢(長岡技科大), \*小安 武(長岡技大院)

(2) 空気を含む水蒸気のイオン風による凝縮促進

\*水島英俊(金沢工大院), 栩谷吉郎 (金沢工大)

(3) 平板乱流境界層内ガソ方向熱拡散に関する実験的研究(乱流熱流束の収束)

\*坂本雅基(新潟大院), 前川 博(新潟大工), 河田剛毅(長岡工高専),  
小林陸夫(新潟大工)

(4) レーザーフラッシュ法による二元系酸化物 $\text{Pr}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ 及び $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ の熱定数測定

竹越栄俊(富山大工), \*平澤良男(富山大工), 井尻 良(シャープ),  
島崎利治(富山大工)

(5) 過冷融液の凝固 (組織の方向性制御)

林 勇二郎(金沢大), 國峰寛司(明石工高専), \*清水伸昭(金沢大院)

#### 講演要旨：

北陸信越地方グループの企画による1991年秋季「講演会と見学会」が、大学の教育改革である大綱化の動きの中，“工学基礎教育”をテーマに、金沢市の南西に位置する金沢工業大学において、大学・高専24名、学生9名の計33名の参加のもと開催された。

まず、特別講演会では、金沢工業大学の学長である佐藤 豪先生に、「21世紀の匠教育」を目指す当大学の実情と理想の大学像(大学院, 基礎教育, 設備, 教官, 国際化)について、さらに、工学の目的と体系化にもとづき今なぜ大学教育が問題なのか、また、これからのあり方などについて講演を戴いた。

その後、直ちに、工学教育のあり方をソフト、ハード面から実践している当大学の工学基礎実技センター、ならびに隣接する放送大学石川ビデオ学習センターの見学を行った。工学基礎実験室、製図室、計算機基礎演習室、その他講義・多目的室からなり、各室にはOHPやビデオプロジェクターなどの最新教育工学機器が備えられた工学基礎実技センター、また、AV教育の最先端である放送大学の実情を垣間みて、出席者一同が「これからの工学教育の将来がどう在るべきか」、を肌身に感じさせられた見学会であった。

<地方グループ活動報告>

グループ講演(1)では、地球環境の立場から、LNGの冷熱を利用した二酸化炭素の固化除去法の可能性の実験的検討、および冷却面上に生成・成長した二酸化炭素霜についての水蒸気霜の成長理論を適用した解析と実験との比較結果が報告され、二酸化炭素ガスへの水蒸気の混入、気流中でのミスト生成の影響などについての質疑討論があった。

グループ講演(2)では、湿り空気流中の水平冷却円管への凝縮熱伝達の促進を目的に、EHD現象の一つであるイオン風の効果について、主流温度・濃度ならびに印加電圧との関連づけのもとで検討された結果が報告され、極性の影響、電極位置などについての質疑討論があった。

グループ講演(3)では、二次元的な乱流温度境界層内におけるスパン方向熱拡散の影響について、乱流諸量の測定に基づく速度温度三重相関と圧力温度勾配相関による乱流モデルの検証結果が報告された。

グループ講演(4)では、新素材として注目されている希土類金属酸化物を含む二元系セラミックスの熱的性質（熱伝導率、温度伝導度、比熱）について、レーザーフラッシュ法による測定結果が報告され、試料の工学透過性や装置真空度の影響などについて質疑討論された。

グループ講演(5)では、複合合金製造の基礎としての比較的広範囲に過冷却状態が出現する融液の凝固の進行と組織の方向性制御について、塩化ナトリウム水溶液を試料とした検討結果について報告され、解析の対象、結果などについて質疑討論された。

その他、地方グループの次回の伝熱セミナー計画ならびに今後の企業会員の増強などについて議論された。

(北陸信越連絡幹事 滝本 昭)

九州地方研究グループ第3回セミナー

「伝熱奮戦の世界（伝熱研究珍プレイ好プレイ）」報告

日 時： 平成3年10月18日（金）～19日（土）

場 所： 佐賀厚生年金休暇センター

参加者： 大学24名、企業・公的研究機関3名、学生26名

講 演：

- |                        |             |
|------------------------|-------------|
| 1. 日本と世界のエネルギー事情       | 上原 春男（佐賀大）  |
| 2. 海洋温度差発電の実験について      | 中岡 勉（水産大）   |
| 3. 太陽エネルギー利用に関する二、三の話題 | 上宇都 幸一（大分大） |
| 4. 鉄鋼業における伝熱課題         | 池崎 英二（新日鉄）  |
| 5. 超伝導線の冷却安定に関する実験     | 高田 保之（九州大）  |
| 6. 沸騰現象における限界熱流束について   | 門出 政則（佐賀大）  |

見 学：

1. 佐賀大学海洋エネルギー変換実験施設
2. 九州電力玄海原子力発電所

〈講演概要〉

講演1： エネルギー問題は、最近また世間の注目をあびている。しかし、一般の人は、エネルギー問題の本質について十分に理解しているとは言えない。それで、エネルギー問題の本質を明らかにするために、近代科学の基礎とも言うべき「エネルギー学」の歴史をふり返りつつ、将来のエネルギー問題について話をした。その主なものを列挙する。1)エネルギーとは何か。2)エネルギーという言葉はいつ頃使われ出したか。3)エネルギーと経済・文化・生活。4)日本と世界のエネルギー事情。5)エネルギー開発の現状。

講演2： 佐賀大学における海洋温度差発電(OTEC)の研究について、最初の実験装置である不知火1号機（出力1W）から現在の伊万里3号機（出力75KW）までの変遷をふりかえりながら、実験装置の説明を行い、研究の推進状況、OTECの各構成機器の発展の状況について述べた。OTECの実験、なかでも実際の海水を利用した実験のむずかしさや問題点を指摘し、実験の失敗例を示した。そして、これらの経験を参考にして、新しい実験装置の開発やアイデア等が生まれたことを述べた。

講演3： 各種の対流型ソーラーポンドの原理について解説するとともに、可視域で透明赤外域で不透明な特性をもつ表面多層断熱層を設置した対流型ソーラーポンドの理論計算結果と実験結果について、少し詳しく述べた。さらに、この種の表面多層断熱層をソーラータンクに適用した場合の結果について紹介し、最後に透明断熱材（シ

リカエアロゲル)による性能改善の可能性について触れた。

講演4: 先ず、経営的視点(損益分岐点、変動費、固定費等)から見た企業内研究開発活動(新商品開発、歩留原単位改善、新規事業開発、無人化省力化省プロセス開発)の位置付けを明らかにした。次に、鉄鋼一貫製造プロセスを、自動車用鋼板を例にとり、製鉄原料処理から最終工程の表面処理までを概説するとともに、今後のプロセス変革の例として熔融還元とストリップキャストの技術に触れ、その伝熱上の課題を紹介した。一方、現状の製造プロセスに於ける伝熱上の問題点にも触れ、熱間圧延工程におけるROT(Run out table)を例にとり、鋼板冷却と鋼板の品質(機械的特性)との関係を紹介した。

講演5: 超伝導マグネットで問題となる冷却安定性と伝熱との関連について簡単な説明があり、具体的な例としてヘリウムIおよびIIで冷却された超伝導線の常電導伝播速度測定実験の測定原理、装置および測定結果の紹介があった。ヘリウムII冷却の場合でも超伝導線の被覆層の影響で冷却が悪くなること、裸線の場合には冷却が良すぎて常電導部分の伝播が起こらず、かえって断線の危険があることなどの知見が報告された。

講演6: 衝突噴流沸騰系の限界熱流束の研究を修士論文の研究テーマとして取り組み始めて丁度20年になる。この研究に接した頃の沸騰現象における限界熱流束の研究状況、問題点や研究の視点等についてまず簡単に解説した。それから、大学院での研究を始めるために初めて設計した実験装置について、設計のために必要な周辺知識や出来上がった実験装置の失敗と改良点などについて説明した。その後、20年間に経験したことを中心に、この研究(限界熱流束のメカニズムまで含む)の進展及び実験装置の変遷等について解説した。

本セミナーでは、大学院生および若手研究者を対象とした講演・討論会と見学会を企画した。このような主旨から、伝熱関連の諸分野にわたる6名の研究者に講師をお願いし、専門の研究・開発の内容をわかりやすく解説していただくとともに、学会・シンポジウムでは聞くことの出来ない研究を進める上での苦労話や、うまいアイデアで困難を克服した経験、さらには研究・開発のフィロソフィーを含めた示唆に富む話をしていただいた。講演に対する学生諸君の関心も高く、和やか雰囲気のもとで活発な討論が行われた。第2日目は見学会としたが、とくに佐賀大学海洋エネルギー変換実験施設については前日の講演で予備知識があったこともあり、参加者の関心が高かった。

最後に、本セミナーのお世話をいただいた佐賀大の先生方にお礼申し上げます。

(九州地方連絡幹事 本田 博司)

<お 知 ら せ>

## 北陸信越伝熱セミナー（福井）

北陸信越グループ企画の伝熱セミナー（動燃・高速増殖炉もんじゅ建設所の見学会とグループ研究会）  
を下記の様に催します。 奮って御参加下さいませよう御案内申し上げます。

日 時：平成4年5月15日（金）～ 16日（土）

場 所：民宿「坂本」

〒919-12 福井県敦賀市白木8-15

TEL 0770-39-1455

動力炉・核燃料開発事業団 高速増殖炉もんじゅ建設所

〒919-12 福井県敦賀市白木2-1

TEL 0770-39-1031

参加費：会員及び一般 12,000円， 学生 9,000円  
（宿泊、食事及び懇親会費を含む。）

定 員：30名（申し込み先着順により定員になり次第締切ります。）

申 込 先：〒910 福井市文京3丁目9-1 福井大学工学部機械工学科 木村 照夫  
TEL 0776-27-8535（直通） FAX 0776-27-8748

申込締切：平成4年4月24日（金）

日 程

	時 間		内 容	場 所
5 / 15 (金)	15:00-15:30	受付	北陸信越研究グループにおける最近の研究 (研究発表5～6件)	民 宿  坂 本
	15:40-17:40	グループ研究会		
	17:40-18:30	休憩		
	18:30-20:30	夕食と懇親会		
5 / 16 (土)	9:00- 9:05	移動	「高速増殖炉の開発」 講師：高橋忠男氏（もんじゅ建設所長）  高速増殖炉原型炉「もんじゅ」の見学	も ん じ ゅ 建 設 所
	9:05-10:00	特別講演		
	10:00-12:00	見学会		
	12:00-13:00	昼食と懇談		
	13:00	解散		

## 関西研究グループ講演会

日時：平成4年3月25日（水） 13:00～17:00

場所：京都大学工学部化学工学科（4階）第1講義室

### 講演題目：

- (1) 垂直流体層における内部発熱流体の自然対流  
河原全作（京大工）
- (2) 電磁波の照射を受ける原子層の融解と凝固  
\*若林英信（京大院） 島津裕輔（京大工）  
古田智寛（京大院） 牧野俊郎（京大工）
- (3) 電子機器冷却用プレートフィンの熱伝達に関する研究  
\*松原幸治（京大工） 鈴木健二郎（京大工）
- (4) 共軸の円板と円筒間の回転流における伝熱  
\*河合一穂（京大工） 荻野文丸（京大工）
- (5) プラフボディのある軸対称管内噴流の熱伝達  
\*千田 衛（同大工） 小田耕嗣（同大院）  
吉川進三（同大工）

問い合わせ先：〒606 京都市左京区吉田本町  
京都大学工学部 化学工学科  
荻野 文丸  
TEL: 075-753-5561  
FAX: 075-761-7695

## 第29回日本伝熱シンポジウム

開 催 口 平成4年5月27日(水)～29日(金)

講 演 会 場 大阪国際交流センター, 〒543 大阪市天王寺区上本町8-2-6  
TEL 06-772-5931, FAX 06-772-7600  
近鉄「上本町」駅または地下鉄「谷町九丁目」駅(谷町線,千日前線)③番または  
⑤番出入口から南へ徒歩10分

シンポジウム 一般(1名) 事前申込:6000円,当日申込:7000円  
参 加 費 学生・院生(1名)事前申込:3000円,当日申込:3500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8000円(消費税含む)  
ただし,郵送の場合は1セット8600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28日(木)18:00～20:00(予定)  
会場 なにわ会館(講演会場から徒歩5分)  
会費 事前申込:6000円,当日申込:7000円  
ただし,同伴夫人は無料です。

参加申込要領 本号に同封の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]をご記入の上,当該費用をご送金ください。参加証は当日受付にてお渡します。  
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領収書を保存して下さい。

事前申込締切 平成4年5月8日(金)(消印有効)

申 込 先 郵便振替口座:大阪 4-125215  
第29回日本伝熱シンポジウム準備委員会

参加・講演につ 〒565 吹田市山田丘2-1 大阪大学工学部産業機械工学科  
いての問合せ先 TEL 06-877-5111(5109)(平井 秀一郎), FAX 06-876-4975

当 日 受 付 第1日9時20分(予定)よりシンポジウム会場で行います。

## 第29回日本伝熱シンポジウム宿泊のご案内

### ●ご宿泊ホテル一覧

宿泊日：平成4年5月26日(火)、27日(水)、28日(木)、29日(金)

宿泊条件：お一人様一泊朝食付き、税別・サービス料込み

略号	ホテル名	部屋	料金	最寄り駅
1 S 1 T	ホテルくれべ梅田	シングル	8,200円	地下鉄谷町線南森町駅下車 徒歩2分
2 S	大阪イーストホテル	シングル	9,000円	地下鉄御堂筋線淀屋橋駅下車 徒歩6分
3 S	都ホテル大阪	シングル	18,000円	地下鉄谷町線谷町九丁目駅下車 徒歩5分
4 S 4 T	朝日プラザ千日前	シングル ツイン	9,800円 8,000円	地下鉄御堂筋線難波駅下車 徒歩5分
5 S 5 T	ホテルサンルート梅田	シングル ツイン	8,200円 8,200円	地下鉄御堂筋線中津駅下車 徒歩3分
6 S 6 T	梅田OSホテル	シングル ツイン	8,800円 6,500円	JR大阪駅下車 徒歩5分
7 S	大阪キャッスルホテル	シングル	9,700円	地下鉄谷町線天満橋駅下車 徒歩1分
8 S 8 T	ホテル京阪京橋	シングル ツイン	10,000円 9,500円	JR京橋駅下車 徒歩1分
9 S 9 T	東興ホテル	シングル ツイン	8,200円 7,700円	地下鉄谷町線南森町駅下車 徒歩1分
10 S	ホテルサンライフ	シングル	7,900円	地下鉄中央線阿波座駅下車 徒歩1分
11 S	大阪富士屋ホテル	シングル	9,700円	地下鉄御堂筋線心齋橋駅下車 徒歩10分

### ●お申込方法

申込書に必要事項をご記入の上、予約金10,000円を添えて、現金書留にて下記申込先へお送り下さい。

FAXでも受付いたします。尚、事務経費として別途お一人様500円いただきますのでご了承下さい。

後日、宿泊予約確認書を送付させていただきます。

お申込後、お客様のご都合で予約を変更または取り消される場合は取消料がかかることがあります。

お申込締切日 ..... 平成4年 4月30日(木) 必着

### ●申込先

〒541

大阪市中央区北浜2丁目6番26号

(大阪グリーンビル地下1階)

JTB 大阪北浜支店

「第29回日本伝熱シンポジウム」係

TEL 06-202-0888

FAX 06-228-0204

担当 樋口・佐宗・広瀬

※講演申込をされた方には、申込用紙ならびにホテル一覧をお送りいたします。

### ●振込先

富士銀行 大阪支店

普通預金口座 201838

JTB 大阪北浜支店

# 事務局からの連絡

## 1. 事務局について

昨年10月1日から次の業務を下記の事務局で行っております。お問い合わせ、お申し込み等は下記へお願いします。

(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FAX等の書面にてお願いします。
- 2) 日本伝熱シンポジウムに関する事務は現地の準備委員会が担当しており、当学会事務局では受付事務と取り次ぎの一切を行っておりません。参加申込書、参加費、懇親会費、論文集代等は準備委員会へ直接お送り下さい。

### 事務局

(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) 日本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」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5-25-18-501  
日 本 伝 熱 学 会  
TEL, FAX: 03-5689-3401  
(土日、祝祭日を除く、午前9時～午後5時)

上記を含む学会事務の全体統括と上記以外の事務は、事務担当副会長が下記にて担当しております。

〒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

## 2. 学会案内と入会手続きについて

### 【目的・活動】

本会は、伝熱に関する学理技術の振興を促進すると共に、会員相互および国際的な連絡を計ることを目的とし、研究会、講演会の開催、伝熱に関する連絡等の活動を行なっています。

### 【事業年度】

事業年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月末日までです。（但し、「伝熱研究」の巻と表紙の色は各年の1月号～10月号と同じです）

### 【会員、会費、特典】

本会の趣旨に賛成して入会した方を会員とします。会員には、次のように個人会員、学生会員、維持会員、特別会員の4種があります。

会員種別	資 格	会 費（年 額）	
		平成3年度まで	平成4年度以降
個人会員	学生会員、特別会員以外の個人	5,000円	8,000円
学生会員	高専、大学学部、大学院修士過程、博士過程に在学中の学生	3,500円	4,000円
維持会員	本会事業に賛成する団体で、1口につき1名以内を「特別会員」に指名	1口 30,000円	

会員には、本会の活動に参加できる他に、次の特典があります。

- 1) 「伝熱研究」の郵送が受けられます。
  - ・個人会員、学生会員に1冊送付
  - ・維持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ます。
  - ・個人会員、学生会員に1部送付  
(但し、前年度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)
  - ・維持会員に口数分の部数送付

### 【入会手続き】

個人会員または学生会員として入会ご希望の方は、巻末の新規入会申込用紙にご記入の上、下記の事務局（本郷）宛にお送り下さい。あわせて、郵便振替にて当該年度分の会費をお支払い下さい。

維持会員への入会申込み方法は、事務局（本郷）に直接書面（Fax）または電話でご連絡いただくか、お近くの個人会員を通じてご連絡下さい。事務局から本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明致します。維持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、入金の取扱いができず、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）を必要とします。

### 3. 会員の方々へ

#### 【会費納入について】

会費納入には「伝熱研究」折込みの郵便振替用紙をご利用願います。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額させていただきます。会費入金記録は、会員名をフリガナでデータベースから検索することによって行っていますので、会社名のみで会員名の記載がない場合には、未納扱いとなる恐れがあります。ご注意ください。

会費未納の方には、「伝熱研究」封筒のラベルにて会費請求額をお知らせしています。この金額は、入会以来の会費納入状況に基づく最新データです。

#### 【第29回日本伝熱シンポジウム講演論文集の事前送付について】

平成4年3月31日（消印有効）までに本年度までの全会費を納め、かつ来年度も会員である方に限り、第29回日本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。当学会事務局では事前送付者名を準備委員会へ連絡します。

日本伝熱シンポジウム会期終了後の論文集申込みに対しては、当学会事務局が受け付けます。事前送付を受けなかった会員で、伝熱シンポジウムの会期終了までに未納分（平成3、4年度）を完納されない方が、以降論文集を申し込まれる場合には有料ですのでご注意ください。

#### 【長期滞納者に対する対応について】

前年度（平成2年度）までの会費が昨年8月23日以降も未納の方には、長期滞納者として昨年10月号以降の「伝熱研究」の送付を停止しています。お近くに長期滞納者がおられましたら、会費納入をお勧め下さい。事務局では、1月中に長期滞納者宛に請求通知を発送し、その後も会費納入がない場合には退会手続きをとらせていただきます。

#### 【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になります。

##### （維持会員の代表者変更）

維持会員の場合には、必要に応じて代表者（特別会員）を変更できます。

##### （学生会員から個人会員への変更）

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個人会員（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、変更届は必ず書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。また、変更事由等の予告通知は受け付けておりません。

#### 【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。

日本伝熱学会 新規入会申込・変更届用紙

(右の該当に○を記入) 1. 個人会員(正・学)新規入会申込書  
2. 変更届書(書面による届出のみ受け)

0	申込年月日	H	年	月	日	(注 意) ・文字は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 ・入会申込み時に郵便振替にて会費を納入する。
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	名称				
6						
7		T	—			
8	* 所在地					
9						
10	* 学校	TEL				
11		FAX	共通・専用			

12	自宅	T	—			
13		住所				
14						
15		TEL				

○

16	通信先**	勤務先・自宅				
17	学位					
18	最終出身校					
19	卒業年次	T・S・H	年			
20	専門分野					← (下記専門分野の番号)

21	学生会員の場合：指導教官名***	印				
----	------------------	---	--	--	--	--

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: ガスタービン | 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ここに在学学校名、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必要なため、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。

日本伝熱学会 維持会員新規入会申込み届用紙

0	申込年月日	H	年	月	日
---	-------	---	---	---	---

※ご記入に際しての注意

日本伝熱学会からの郵送物は代表者に送ります。従いまして、代表者の所属に変更がありましたら、書面をもって事務局宛ご連絡の程、お願い申し上げます。

1	会員資格	維持会員
2	代表者氏名	
3	ふりがな	

4	代表者勤務先	名称(所属)	
5		〒	—
6		所在地	
7		TEL	
8		FAX	
9			共通・専用
10	口数	口	

日本伝熱学会入会のご案内

1. 本学会の会計年度は毎年4月1日に始まり、翌年3月末日に終わります。
2. 維持会員の会費は1口30,000円/年で、申し込みは何口でも結構です。
3. 会員になりますと「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお申し込み口数1口につき1部お送りします。  
この伝熱研究は通常、年4回(4、7、10、1月号)の発行を予定しております。  
但し、日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては、前年度の会費を年度末までに納入された方に限り当該年度のものをお送りします。  
尚、年度途中で御入会の方には残部の都合で一部お送りできない場合もありますので、あらかじめご承知おき下さい。
4. 当学会では、事務作業簡素化の為に会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてています。従いまして、簡単な書式の領収書はご用意できますが、それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願いいたします。

申込書送付先：〒113 東京都文京区本郷 5-25-18-501  
日本伝熱学会事務局  
TEL., FAX. 03-5689-3401

会費の払込先：

- (1) 郵便振替の場合――郵便振替口座 東京6-14749 日本伝熱学会
- (2) 銀行振込の場合――第一勧業銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941  
日本伝熱学会 代表 井上 晃
- (3) 現金書留の場合――上記の事務局宛に御送金下さい。

伝熱研究  
Vol.31, No.120

1992年1月発行

発行所 日本伝熱学会

〒113 東京都文京区本郷5-25-18-501

日本伝熱学会

電話 03(5689)3401

Fax 03(5689)3401

振替 東京 6-14749

(非売品)