

# 伝熱研究

1988  
October  
Vol. 27  
No. 107

Journal of Heat Transfer Society of Japan

〈特集：第22回伝熱セミナー〉

伊藤 猛宏 高田 保之 吉田 敬介 田中 哲 林 謙年 明石 透  
池 公司郎 小森 悟 宮武 修 深野 徹 清水昭比古 増岡 隆士

〈伝熱セミナーの果たした役割〉

〈故・田中宏明先生を偲んで〉

片山 功蔵 棚沢 一郎 成合 英樹 平田 賢 Warren H. Gied 丸山 茂夫

〈国際会議報告〉

International Seminar on Near-Wall Turbulence  
第4回 International Symposium on Applications of Laser Anemometry  
to Fluid Mechanics / Lisbon に参加して  
1988年度 ISHTEEC 会議に出席して  
The Second International Symposium on Heat Transfer (北京) に出席して

鈴木健二郎

前田 昌信

藤井 石根

藤田 秀臣

〈研究トピックス〉

PMMA 表面上の火炎伝ば 伊藤 昭彦 膜沸騰における固液接触問題 菊地 義弘  
衣の伝熱 竹内 政顕 加熱円柱まわりの流動と熱伝達に及ぼす音波の影響 岡本 覚

〈解 説〉

海洋温度差発電の開発の動向 上原 春男  
新素材と熱物性 — 熱物性研究に対する先端技術のインパクト — 長島 昭  
局所湿度測定法について 田中 宏史  
はく離流の熱伝達について 五十嵐 保  
波状流路内に生じる2次流れ 西村 龍夫, 河村 祐治, 矢野 浩司

## 日本伝熱研究会第27期（昭和63年度）役員

会 長		平 田 賢（東 大）
副 会 長	（無任所） （事務担当）	藤 掛 賢 司（豊田中研） 越 後 亮 三（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	金 山 公 夫（北見工大） 太 田 照 和（東北大） 笠 木 伸 英（東 大） 新 井 紀 男（名 大） 玉 木 恕 乎（信州大） 高 城 敏 美（阪 大） 須 藤 浩 三（広島大） 藤 井 丕 夫（九 大）
幹 事 （23名）	齋 藤 凵（室工大） 稲 村 隆 夫（東北大） 藤 田 尚 毅（岩手大） 一 宮 浩 市（山梨大） 平 澤 茂 樹（日立） 北 村 健 三（豊橋技大） 竹 内 正 紀（福井大） 烏 越 邦 和（ダイキン） 牧 野 俊 郎（京 大） 佐 古 光 雄（広島大） 太 田 治 彦（九 大） 曾 田 正 浩（三菱重工）	杉 山 憲一郎（北 大） 宍 戸 郁 郎（宮工技） 有 富 正 憲（東工大） 上 松 公 彦（慶應大） 加 藤 征 三（三重大） 滝 本 昭（金沢大） 石 原 勲（関西大） 藤 井 照 重（神戸大） 矢 田 順 三（京都工繊大） 水 上 紘 一（愛媛大） 上 宇 都 幸 一（大分大）
監 査（2名）	香 川 達 雄（香川栄養学園）	波 江 貞 弘（船 研）
「伝熱研究」編集委員長		宮 本 政 英（山口大）
第26回日本伝熱シンポジウム準備委員長		永 井 伸 樹（東北大）

## 伝 熱 研 究 目 次

### <特集：第22回伝熱セミナー>

第22回夏期伝熱セミナーを終えて … 準備委員長 …	伊藤 猛宏 (九 大) ……	1
伝熱セミナーに参加して ……	高田 保之 (九 大) ……	3
第22回伝熱セミナー開催準備を手伝って ……	吉田 敬介 (九 大) ……	4
第22回伝熱セミナーに参加して ……	田中 哲 (東 北 大) ……	5
伝熱セミナーに参加して ……	林 謙年 (東 大) ……	6
第22回伝熱セミナーに参加して ……	明石 透 (九 大) ……	7
第22回伝熱セミナーに参加した感想 ……	池 公司郎 (山 口 大) ……	8

### (各セッションのレビュー)

1. 環境における熱と物質の輸送のセッションの司会をして ……	小森 悟 (九 大) ……	9
2. セッション「混相流伝熱Ⅰ」について ……	宮武 修 (九 大) ……	10
3. 伝熱セミナー「混相流伝熱Ⅱ」を企画・司会して ……	深野 徹 (九 大) ……	14
4. 伝熱放映会顛末記 ……	清水昭比古 (九 大) ……	16
5. セッション「工業製品における熱工学的課題」 ……	増岡 隆士 (九 工 大) ……	18

### <伝熱セミナーの果たした役割>

伝熱セミナーの歴史 ……	編集委員会 ……	21
伝熱セミナーの歴史を閉じるに当たっての感想 — 絶滅ではない。発展を期待 — ……	片山 功蔵 (芝浦工大) ……	25
伝熱セミナーの閉幕について ……	棚沢 一郎 (東 大) ……	28
伝熱セミナースタートの頃 ……	成合 英樹 (筑 波 大) ……	30

### <故・田中宏明先生を偲んで>

田中宏明先生の早逝を悼む ……	平田 賢 (東 大) ……	34
In Memory of Professor Hiroaki Tanaka ……	Warren H. Giedt (Univ. of California) ……	36

田中宏明先生の思い出 .....	丸山 茂夫 (東 大) .....	38
<国際会議報告>		
International Seminar on Near-Wall Turbuence ...	鈴木健二郎 (京 大) .....	40
第4回 International Symposium on Applications of Laser Anemometry		
to Fluid Mechanics/Lisbon に参加して .....	前田 昌信 (慶 大) .....	43
1988年度 ISHTEEC 会議に出席して .....	藤井 石根 (明 大) .....	46
The Second International Symposium on Heat Transfer (北京)		
に出席して .....	藤田 秀臣 (名 大) .....	50
<研究トピックス>		
PMMA 表面上の火炎伝ば .....	伊藤 昭彦 (大分大) .....	53
膜沸騰における固液接触問題 .....	菊地 義弘 (広島大) .....	63
衣の伝熱 .....	竹内 政顕 (桐蔭横浜大) ...	75
加熱円柱まわりの流動と熱伝達に及ぼす音波の影響 .....	岡本 覚 (新居浜高専) ...	84
<解説>		
海洋温度差発電の開発の動向 .....	上原 春男 (佐賀大) .....	98
新素材と熱物性 — 熱物性研究に対する先端技術のインパクト— .....	長島 昭 (慶 大) .....	111
局所湿度測定法について .....	田中 宏史 (福岡工大) .....	119
はく離流の熱伝達について .....	五十嵐 保 (防衛大) .....	129
波状流路内に生じる2次流れ .....	西村 龍夫 (富山大), 河村 祐治, 矢野 浩司 (広島大) .....	149
<地方研究グループ活動報告>		
関西研究グループ講演会 .....	高城 敏美 (大阪大) .....	161
九州研究グループ特別講演会 .....	藤井 丕夫 (九大) .....	165
<お知らせ>		
事務局から受賞のお知らせ .....		169
第26回伝熱シンポジウム講演募集 .....		170
第12回 人間—熱環境系シンポジウム .....		171
第2回 固気二相流の数値シミュレーション .....		172
最新の名種熱交換器の合理的設計手法 .....		173
「パソコン(実習付)で学ぶ熱流体解析の基礎」 .....		174



# Journal of Heat Transfer Society of Japan

Vol. 27, No. 107, 1988

## CONTENTS

### <Special Issue : The 22nd Heat Transfer Seminar>

Impressions of the 22nd Heat Transfer Seminar ..... Takehiro ITO (Kyushu Univ.) .....	1
Impressions of the 22th Heat Transfer Seminar ..... Yasuyuki TAKATA (Kyushu Univ.).....	3
Impressions of Taking Part in Preparation for the 22nd Heat Transfer Seminar ..... Keisuke YOSHIDA (Kyushu Univ.).....	4
Memories of the 22nd Summer Seminar ..... Satoru TANAKA (Tohoku Univ.) .....	5
Impressions around the Heat Transfer Seminar ..... Kanetoshi HAYASHI (Univ. of Tokyo) .....	6
Impressions of the 22nd Heat Transfer Seminar ..... Toru AKASHI (Kyushu Univ.).....	7
Impressions of the 22nd Heat Transfer Seminar ..... Koshiro IKE (Yamaguchi Univ.) .....	8

### (Reviews on the Technical Sessions)

1. Chaired Memorandum on the Session of Heat and Mass Transfer in the Environment ..... Satoru KOMORI (Kyushu Univ.) .....	9
2. On the Session of "Multiphase Flow and Heat Transfer I" ..... Osamu MIYATAKE (Kyushu Univ.).....	10
3. Impression of 「Heat Transfer in Multiphase Flow II」 from a View Point of the Organizer and Chairman ..... Tohru FUKANO (Kyushu Univ.).....	14
4. Impression of the Film Session ..... Akihiko SHIMIZU (Kyushu Univ.) .....	16
5. On the Session "Thermal Problems from Industrial Point of View" ..... Takashi MASUOKA (Kyushu Inst. of Tech.) .....	18

### <For Further Development of the Heat Transfer Seminar>

History of the Heat Transfer Seminar ..... Editorial Committee.....	21
--	----

Heat Transfer Seminar of HTSJ 1988 —not an Extermination but will Evolute from the Next Year— ..... Kozo KATAYAMA (Shibaura Inst. of Tech.) .....	25
Regretting that the Heat Transfer Seminar has come to a close ..... Ichiro TANASAWA (Univ. of Tokyo).....	28
Days toward the Start of Heat Transfer Seminar ..... Hideki NARIAI (Univ. of Tsukuba) .....	30
<b>&lt;In Memory of Professor Hiroaki Tanaka&gt;</b>	
In Memory of Professor Hiroaki Tanaka ..... Masaru HIRATA (Univ. of Tokyo) .....	34
In Memory of Professor Hiroaki Tanaka ..... Warren H. GIEDT (Univ. of California) .....	36
A Personal Remembrance of Professor Hiroaki Tanaka ..... Shigeo MARUYAMA (Univ. of Tokyo) .....	38
<b>&lt;Reports on the International Conferences&gt;</b>	
International Seminar on Near-wall Turbulence ..... Kenjiro SUZUKI (Kyoto Univ.) .....	40
Short Report on “4th International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, Lisbon Portugal 1988” ..... Masanobu MAEDA (Keio Univ.) .....	43
Attending the ISHTEEC '88 ..... Iwane FUJII (Meiji Univ.) .....	46
The Second International Symposium on Heat Transfer, Beijing ..... Hideomi FUJITA (Nagoya Univ.) .....	50
<b>&lt;Topics&gt;</b>	
Flame Spread over PMMA ..... Akihiko ITO (Oita Univ.) .....	53
Liquid-Solid Contact Probleme in Film Boiling ..... Yoshihiro KIKUCHI (Hiroshima Univ.) .....	63
Heat Transfer on and around Clothing ..... Masaaki TAKEUCHI (Toin Univ. of Yokohama) .....	75
The Effect of Sound on Flow and Heat Transfer around a Heated Circular Cylinder ..... Satoru OKAMOTO (Nihama Tech. Coll.) .....	84
<b>&lt;Engineering Contributions&gt;</b>	
The Development and Future of OTEC ..... Haruo UEHARA (Saga Univ.) .....	98

New Materials and Their Thermophysical Properties    Impact of Advanced Technology on Thermophysical Properties Research— ..... Akira NAGASHIMA (Keio Univ.) .....	111
Measurement of Local Humidity ..... Hiroshi TANAKA (Fukuoka Inst. of Tech.) .....	119
Some Views on Heat Transfer in Separated Flows ..... Tamotsu IGARASHI (National Defense Academy) .....	129
Secondary Flow Induced in Wavy Channels ..... Tatsuo NISHIMURA (Toyama Univ.) Yuji KAWAMURA and Koji YANO (Hiroshima Univ.).....	149
<b>&lt;Report on the Local Group Activities&gt;</b> .....	161
<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	169

## 第22回夏期伝熱セミナーを終えて

伊藤 猛宏 (九大工)

電子手帳のメモを読みながら、題記の執筆のご依頼を思い出した頃はすでに秋も立ち、蒸せかえる緑と暑気の中をはるばる豊後の国は国東までドライブして来たのは、遙かな昔のように思はれ、いまさら「セミナーを終えて」とはなにごとぞの思いではありますが、約束は約束、乏しい記憶を手繰りよせ、かつは準備委員会作成の資料・印刷物を判読しつつ、必死に枱好をつけることにあいました。

今回は7月20日から22日まで、言うも愚かの暑さ(調べてみれば7月22日が大暑に当たっておりました)のなか大分県の国東半島において、九州研究グループの諸兄のお世話で設営いたしましたところ、102名(有料)のご参加を得ました。そのうち24名が九州・山口の外からのご参加で、さらにそのうちで15名の方が話題提供等のお勤めのない篤学の士でありました。この行事も過去21回の開催経験により、採算点に達するまでの参加者を募ることが最大の問題であるという理解がすっかり定着しておりますことからかどうか、格別の募集努力もしなかった(と理解しております)にも拘らず、採算上からも会場の受入可能数からもともに絶妙のお申込をいただきました。ご理解・ご高配の程を厚くお礼申し上げます。実にこのような暖かいご支援が、我が日本伝熱研究会の今日までの発展の原動力であったかと愚考するわけであります。

さて問題は今回のセミナーが、本誌26巻103号に書かせていただきましたように、「参加者、伝熱研究会および準備関係者の金銭および時間の負担にふさわしいだけのもの」を提供したか、であります。これで最重要問題は正しく設定されていることに疑う余地はありませんが、この種の教育活動の評価は俄かには定まらないのが常で、今回のセミナーがご参加各位の日頃のご精励に何分のエネルギーを注入することになり、大きな成果として結実することを切に信じるのみであります。

このように書けばなにやらひと事のように聞こえますので、自分の方の感想・反省を述べさせていただきますと、1)準備委員会の皆さんに設営および運営のなにもかもお願いして申し訳なかったこと、2)猛暑の中のドライブでは、人体からの冷房放熱と窓越しの放射による受熱で、平均の体温はしかるべく保持されるとしても、それと快適さとは別の次元の問題であろう。この種の快適工学はどうなっているか、と自問したこと、3)挨拶の話題に事欠いて「城下カレイ」の話などして、バカみたいであったこと、4)平田

教授の仏教美術のお話については、内容もさることながら、「現代日本語もかくも美しく語れるものであるか」と感嘆したこと、5) 懇親会の続きを蚊を追いながら屋上でやりました。蚊は一定の高さ以上には昇ってこないものと理解しておりましたが、これはどうしたことから、と考え込んだこと、6) 22日に東京で用件があり、会場隣の大分空港から往復することになり、この間のいわゆる時間距離がたいへんに短いことを知りました。これと同じことが日本中の方々に起こっているわけで、これでは世の中が均質化するはずで、これはなかなか功過あいなかばすることではあると、一時の感慨を催したこと、7) その週末は湯布院温泉というところでテニス合宿となっていたわけではありますが、あいにくの天候で専ら温泉で過ごすことになりましたが、これがなかなかの休養となりました。かつは世上の温泉ブームの由来を病める社会との関連でしばし考察することにもなりました。とまあこんな程度のことしか頭には浮かんできませんで、読む方にも書く方にも無益ですので、止めておきますが、この下りの結論は、自分自身にとっては伝熱セミナーにインスパイアされる世代は遙かな昔に過ぎ去ったということになりましょうか。

実は今回のセミナーが、従来形式のセミナーとしては最終回ということになっており、22回の掉尾を飾るにふさわしいイベントがないものかと、多少とも考えましたが、結局はなにもしないことになりました。今後の新しい企画にいままでの良き伝統を引き継がれ、それが我が伝熱研究会および伝熱工学の発展に重要な寄与をすることを期待します。

ありがとうございました。

## 伝熱セミナーに参加して

高田 保之 (九大工)

今回のセミナーには総務として参加いたしました。本来ならばお世話をした側からの感想を述べるべきですが、開催直前の準備で一番忙しい時期に2週間程逐電しておりましたので、苦労話などえらそうなことは何一つ言える立場にありません。誰先生が苦労したという話ならある程度はできますが……。そういうわけで、一参加者としての感想を述べさせていただきます。

伝熱セミナーに参加したのは9年前の志賀島(福岡)に次いでこれが二度めです。当時、私はまだM1でしたので、講師の先生がおっしゃることが何一つ解らずショックを受けたことを憶えています。今回のセミナーで一番印象に残ったセッションは、平田先生(九大文学部)の特別講演I『くにさきの仏教美術』です。国東の仏教文化がいかんにして形成され衰退したかを、スライドを使って非常にわかりやすく説明してくださいました。この講演の後、国東半島観光ツアーの参加申し込みが50%以上増えたと聞いております。私もこのツアーに参加すればよかったと後悔しました。もっとも現地出身で土地感があるということでツアーコンダクターをされた藤井丕夫先生(九大機能研)は大変だったようですが……。

さて、つぎに面白かったのは伝熱放映会です。流れ場・温度場の可視化実験、コンピュータによるアニメーションなど非常に興味深いビデオやフィルムを拝見させていただきました。なかでも小林敏雄先生(東大生研)による流れの数値計算結果の鳴物入りのアニメーションは非常に教育的効果の高い作品だったと思います。また、気象に関連した地球規模の流れを小さな装置で模擬された木村竜治先生(東大海洋研)の実験的センスの良さにも感心いたしました。このような企画は学会の講演会等で過去にも何度か行なわれていますが、夕食後少しお酒が入ってくつろいだ雰囲気での鑑賞会はフィルム提供者の先生方には失礼かもしれませんが、見る方にとってはなかなか気分がよいものです。いままでの例では二日めの夜は放談会が恒例となっていたようですが、放談会ですと有名な先生方ばかりが発言なさり、若手とくに学生は萎縮してしまうのではないかと(9年前がそうでした)ということで、何かべつのことをやろうことになりこの企画に至ったのですが、質問も活発でなかなか盛況だったようです。

期間中天候には恵まれませんでした。全体的に有意義なセミナーであったと(参加者の一人として)思っております。従来形式の伝熱セミナーが今回で終了というのは残念なことではありますが、今後は各地方グループの活動として形態を変えながらもセミナーの精神(?)は引継がれていくものと思います。最後に興味深い講義をしてくださった講師の先生方、特に苦労をされた準備委員の先生方に厚くお礼申し上げます。



## 第22回伝熱セミナー開催準備を手伝って

吉田敬介（九大工）

伝熱セミナーに一度は参加してみたいと思いながら、今日まで参加せずにいたら、なんと全国的規模で行う最後のセミナーが初参加ということになってしまった。そのような私が今回開催のお手伝いまで経験できたとは、ある意味では幸運だったと言うべきかも知れない。

さて、私は会場係の一人として、会場設営ならびにセミナー当日の雑用全般を担当させて頂いた。本来ならば私は、会場係責任者である吉岡啓介先生の指示の下に兵隊として働く程度で良いはずであったが、今回の会場「いこいの村国東」との連絡係をその選定段階から私が担当していた経緯上、会場との交渉においては実質的責任者として働かなければならなかった。さらにそれに付随して、食事内容の交渉や参加者の部屋割のような、若手にとっては結構厄介な仕事までも私が担当したために、何かと手落ちが多かったのではないかと心配している。

「いこいの村国東」は大分空港から近く、九州以外からは比較的アクセスしやすい場所にあるが、意外にも九州各地からの交通の便が悪く（例えば車で福岡市から4時間半、大分市からでも1時間半はかかる）、会場との交渉や設営準備には終始苦勞が付きまとった。とくに、今回初めて行われたビデオ放映会用のVTRと3台のディスプレイの調達は、レンタル業者が開催日直前まで見つからず、我々を慌てさせた。また、講演室の下見時間が充分取れなかったことから様々な不手際を招き、参加者の方々に御迷惑をおかけしてしまった。例えば、講演室の広さに余裕がなく机と椅子をほぼ参加者数分しか用意しなかったために、開演当初、前は空席、後ろは席不足の状態（伝熱シンポジウムではよくあるが…）が出現してしまった。途中から聴講者を前へ誘導させてもらうことでこれに対処したが、机はともかく椅子はもっと置いても良かったと、今になって反省している。その他にも至らない点が数多くあったと思うが、与えられた条件下で可能な限りを尽したつもりであり、その点をどうか御理解頂きたいと思う。

ところで、初めて参加した伝熱セミナーであったが、肝心の講演の方は部屋を出たり入ったりで、あまり聞くことができず残念であった。しかし九大文学部 平田寛先生、東大海洋研 木村竜治先生の御講演など、日頃はなかなか聞くことが出来ない講演の数々にセミナー独特の雰囲気を感じ取ることができた。また、懇親会終了後に屋上で開かれた（すなわち二次会！）ピヤガーデンでは予想以上に多数の参加者があり、伝熱研究会員の酒好きを再認識させられた。ともあれ、会場係としての仕事も含め、国東半島での有意義な3日間を過ごさせて頂いた。

最後になりましたが、会場係責任者として御指導頂いた大分大学工学部 吉岡啓介先生、セミナー当日さまざまな御援助を頂いた会場係の諸先生、ならびに我々を暖かくもてなして頂いた「いこいの村国東」従業員の方々に、心から感謝いたします。

## 第21回伝熱セミナーに参加して

田中 哲（東北大院）

大分県国東での伝熱セミナーに、今回初めて参加させていただきました。私にとってはこの伝熱セミナーに限らず、伝熱関係の全国規模の集まりに参加するのはこの度が初めてでした。まだ、伝熱に関しては初心者私にしてみれば、セミナーの講演内容は半分も分かれば良い方であり、それよりも、むしろ「場の雰囲気」を十分に味わうことができれば・・・という軽い気持ちで参加の申し込みをしました。しかも、セミナーの直前には鬱陶しい梅雨の仙台から少しでも逃げだしたい気持ちも加わって、参加は大変楽しみなものでした。

このような不純な動機からの参加だった私にとっては、セミナーは“昼の部”よりも、“夜の部”の方が有意義なものでありました。あの様にくださった雰囲気の中で、日頃は論文の中でしかお目に掛かることのできない様な多くの方々に接する場を提供していただいたことは、私にとっての最大の収穫でした。著名な先生方と、宴席で御一緒させて頂けるのは、日頃の堅苦しいイメージの研究の舞台裏（と言うよりは、楽屋部屋でしょうか・・・？）を垣間見ているようで、大変楽しいものでした。中でも一番印象に残っているのは、某N先生の「ふーけーばーとぶよーな……」ではないでしょうか。とにかく、宴の間中、“!!!”と“???”の感動の連続でした。

このようなさまざまな驚きと感動があった伝熱セミナーですが、全国規模の大会は今回が最後と聞き、大変残念に思います。確かに、今回の参加者名簿を見ても8割程を九州・中国地区の方が占めていて、全国大会とは有名無実になっている感じもします。しかし、今後も地区大会のうちの一つでも、“全国大会”という名目で残せないものなのでしょうか。我々学生には何処となく堅苦しいイメージのある伝熱シンポジウムだけでなく、少しくだけた感じのセミナーがこのまま存在しても良いのではないのでしょうか。シンポジウムが伝熱の“祭典”ならば、少しくだけたセミナーが、“祭り”として、学生が気軽に参加のでき、著名な先生方の生きざまを垣間見ることのできるチャンスを残しては貰えないものかと思えます。

ともあれ、不純な天候のため、楽しみにしていた海水浴はできなかったものの、3日間大変有意義に、かつ楽しく過ごすことができました事を、準備委員の先生方、並びに、同室の方々に感謝致します。

## 伝熱セミナーに参加して

林 謙年 (東大院)

1988年8月20日～22日、私は伝熱セミナーなるものに初めて参加しました。全国規模でのセミナーは今年で最後ということなので最初で最後の機会と思い申し込みました。私にとっては学会に類するものも初めてであり少々身構えて参りましたが、予想に反し非常に自由な雰囲気、意表を衝かれた思いがします。私は去年まで流体系の研究室にいたため(さらに勉強不足も手伝って)伝熱に関する知識はほとんどなく、せっかく参加しても話の内容を全く理解できないのではないかと心配しておりました。しかし私にも理解できるお話が結構あり、興味深く聞かせていただきました。

部屋割も学生は学生同士となっていたため、同じ世代の伝熱を研究している人と知合いになることができました。こんな機会は滅多にないのでとても有意義でした。といっても別に伝熱のことについて議論を交わすなんてことはもちろん無かったのですが、ちなみに初日の晩に明け方までうるさく騒いでいたのは私たちです。まわりの部屋の方、どうも済みませんでした。

そして何より私を喜ばせたのは、懇親会の料理やお酒でした。合宿のようなものだから、食事はおいしくないだろうしお酒は出るはずもないとふんでいた私にとってこれは嬉しい誤算でした。ただ、城下ピラメと焼酎がなかったことが唯一の心残りです。この伝熱セミナーの本当の目的は、お酒を含めた懇親会にあったように思いました。同じ伝熱の研究に従事していながら普段は余り顔を合わせる機会がないものどうしがこういった打ち解けた雰囲気の中で互いの親睦を深める、いってみれば会社の慰安旅行のようなものであると一人で納得して東京に帰ってきました。

全国規模での伝熱セミナーが今年で終わってしまうのは非常に残念です。今回のセミナーの参加者のほとんどが九州地区の人であったことからわかるように実質上全国規模となっておらずまた全国から集まることの困難さもわかりますが、せっかくのこのようない機会をなくしてしまうのはもったいないので名称を変えて(例:伝熱懇親旅行)存続させることを提案して筆をおきたいと思います。

## 第22回伝熱セミナーに参加して

明石 透 (九大院)

私が伝熱セミナーに参加するのは今回が初めてであり数多く参加されておられる諸先生、諸先輩方を差し置いて感想を書く事におきましては、誠に恐縮しております。今回のセミナーは、東九州に位置し、私の里として知られる国東で開催され、私たちの研究室からは4名の学生が、参加させていただきました。国東は、私の生まれ育った故郷であり、そのむかし、国東の学者三浦梅園先生の所に日本全国から人々が先生の教えを仰う為に集まったが如く、このゆかりの地で伝熱学の最先端の講演を聞けることは幸せであると感じた次第であります。あいにくまだ梅雨があけておらずぐずついた天候の中で開催された今回のセミナーではありましたが、恩師、学友と一緒にセミナーに参加できた事は、よき思い出となりました。

1日目に行われた「環境における熱と物質の輸送」という講演は、気象学における熱や物質がどの様に輸送されるのかというとても興味深いものでした。その内容は、地球サイズという非常にスケールの大きな話で伝熱の研究が多岐に渡っていることを感じました。また、「くにさきの仏教美術」について平田先生の特別講演が、ありました。国東の文化の歴史を色々な観点からお話頂きあらためて自分の故郷の認識不足を感じました。その後、懇親会でたくさんの著名な先生方のお話を聞くことができたことは、私たちにとって、とても貴重な体験でした。

2日目の夜は、伝熱放映会が行われ、夕食の後だったので先生方も私たち学生もお酒でほんのり顔をあからめてほろ酔い気分の中、終始和やかな放映会となりました。とても貴重な映像資料だけに映像に見入ってしまい時のたつのも忘れて予定の時間を過ぎましたが、今回のセミナーを集約した時間だったような気がします。

3日目は、「工業製品における伝熱的課題」についての講演がありました。基礎研究を主体としている学生にとって日頃慣れ親しんでいる製品と応用された伝熱学が、これからどういう方向で利用されるのか、来春卒業し社会に出て技術者を目指す私には、あたかも企業研修のようにも感じました。

最後になりましたが、有意義な機会を作って頂きました準備委員会の方々に感謝の意を表したいと思います。

## 第22回伝熱セミナーに参加した感想

池 公司郎（山口大工院）

六月の伝熱シンポジウムに行ったときに伝熱研究会に入会したので、伝熱セミナーに参加するのは、今回が初めてでした。勉強をするという気持ちよりも、名前しか知らない方々の顔を拝見しようという気持ちで、セミナーに参加しました。そしてシンポジウムとは違ったくつろいだ雰囲気での講演や懇親会で、先生方の人となりを少しですが感じる事ができました。また懇親会では、企業の方と話しをして、現在やっておられる仕事について、色々とううことができ楽しいものでした。

講演の中には、私のような勉強不足のものには分かり辛い内容のものもありましたが、伝熱現象過程を映像で見せようという伝熱放映会のセッションはなかなか面白いものでした。研究の目標は現象の解析であり、現象の可視化は手段であって目的ではないが、目では見ることのできない現象を可視化することによって得られた情報は、頭の中の想像図を凌ぐものでした。特に数値計算の結果をアニメーションに表わすと、現象の理解を大いに助けると思います。私自身、数値計算に関する修士論文に取り組んでいるため、計算結果のアニメーション化は、興味を持って聞かせて頂きました。アニメーションにすると、なにより見映えがすることも確かです。もっともアニメーションを実際の現象に近付けようとすればする程、費用が多くかかることとなります。この点でアニメーションはまだまだ一般的ではなく、高価なものであると改めて思いました。

また気象現象についての講演があった〔環境における熱と物質の輸送〕のセッションは、取り扱っている現象の大きさから、自然科学のロマンを感じさせてくれました。地球規模の現象を机上で表現しようとするのだから、たまたま魅力的なことです。最もこうしたスケールの大きな現象を扱う時の難しさは、現象に影響を与えるファクターが多過ぎることで、私などそれを思うだけで朦朧となってしまいます。しかし講演として聴く分には、楽しいものでした。

始めに書いたように私は今回が初めての参加でしたので、セミナーとはいったいどのような事がなされるのか、まったく見当が付きませんでした。セミナーの意味の一つである〔演習〕のように、もしかしたら普通とは逆に講演者から質問などがあるのではないかと、最初はビクビクしていたのです。でもそのような事はなく、有意義な三日間でした。

最後に、伝熱セミナー実施に当たられた関係者の皆様に感謝致します。

## 環境における熱と物質の輸送のセッションの司会をして

小森悟（九州大・工）

公害問題が大きな社会問題としてクローズアップされてから10年以上の歳月が経過し、総量的な規制政策の下で汚染物の排出量削減に関してはかなりの改善がなされてきた。しかし環境汚染問題の本質的な部分は全くと言ってよいほど解決されておらず、その上、最近では酸性雨、放射能拡散、成層圏オゾンの破壊、地球の温暖化など多国間や地球的規模で起りうる環境問題が表面化してきている。また世界的にもこの種の地球的規模での研究が重要視され、かなりの研究予算がつく傾向にある。そこで、このような複雑な環境問題に伝熱研究会の輸送現象を専門とする研究者がどのように取り組むことができるかを探るため『環境における熱と物質の輸送』というテーマでセミナーの一セッションをセミナー企画委員長の宮武教授からの依頼を受けて企画した。このセッションの講師の先生方と講演題目は下記の通りであった。

- 1) 植田洋匡（国立公害研） 熱的な局地風による大気汚染物質の長距離輸送
- 2) 木村竜治（東大海洋研） 伝熱装置としての大気・海洋循環
- 3) 北田敏廣（豊橋技科大） 酸性雨に関する輸送現象

国立公害研の植田洋匡博士は100km程度スケールで起こる局地風の挙動とその中で汚染物質の輸送を熱的安定・不安定の効果をふまえて研究した一連の成果を報告された。特に、大スケールの流れを実験室スケールでの基礎研究の結果を基にして解析されるなど、複雑な環境中の流れからいかにして基礎的（科学的）な研究対象を取り出すかを非常に分かりやすく説明された。東大海洋研の木村竜治助教授は伝熱セミナーを意識され、ご自分の御専門である海洋気象的な問題の一つである大気海洋間での熱の移動を地球物理的な立場から地球を伝熱装置としてとらえることにより、分かりやすく説明された。豊橋技科大学の北田敏廣助教授は酸性雨の生成機構の複雑なモデル化について輸送現象論的な立場から説明をなされた。とくに、雲物理過程の酸性雨モデルへの取入れ方について詳細な説明をおこなわれた。

環境問題を研究テーマとしないセミナー参加者にとっては本セッションの講演の問題のイメージが湧かず理解しがたい点もあったように思う。また、環境中での流れには色々の効果が重なりあい、これらの効果をすべて考慮しようとすると問題が複雑化しすぎる点にも議論があった。いずれにしても環境問題を研究として扱う場合には、複雑な現象からなる、逆に言えば研究テーマの宝庫でもある環境流れの中からいかにして価値のある研究対象を選び出し、それを科学的に追求することが重要であるかが上記の講演から明らかになったと思われる。オーソドックスなタイプの伝熱研究のみでは、大きな科学的発展が望めそうにないと思われる今日、環境中など自然界に現れる輸送現象的（伝熱的）な問題にも積極的に目を向けたいものである。



## セッション「混相流伝熱Ⅰ」について

九州大学工学部 宮武 修

大分県国東（くにさき）町で開催された今回の夏期伝熱セミナーの2日目、7月21日の9:00～10:30の時間帯に、「混相流伝熱Ⅰ」として、ヒートポンプシステムとその伝熱に関するセッションを組みました。主にシステムについては片山功蔵教授、凝縮については藤井哲教授、蒸発については吉田駿教授の御講演がありました。お飲みになった翌朝が最近とみに苦手に（アルコール分解時間が長く）なられた片山教授を2番目に、時間調整役も兼ねてセミナー準備委員の吉田教授を最後に据えさせていただくと、講演順序は白と定まります。講演題目と要旨集に記載されている講演項目を次に列挙します。それぞれ短い割当て時間ですので、必ずしも総ての項目が御講演で網羅されたわけではありません。

- I. 二成分混合媒体の管内凝縮 九州大学機能物質科学研究所 藤井 哲教授
- 1) なぜ混合冷媒を採用するか。 a) 熱変成機の高性能化(COPの向上)、 b) 空調システムあるいは産業用システムの高性能化に適した冷媒の選択、 c) 代替フロンの選択の一つの候補として。
  - 2) ロレンツサイクルによるCOPの向上。 a) 理想サイクル(伝熱抵抗無し)と実際のサイクルの比較、 b) 伝熱促進の重要性(凝縮液側、気相側、外部単相対流…フィン付管、接触抵抗…加工技術)。
  - 3) 管内凝縮の特徴。 a) 流れ(フローパターン、二相流マップ)、 b) 熱伝達(純冷媒…平滑管・内面加工管、混合冷媒…平滑管・内面加工管)。
  - 4) 二成分混合冷媒の熱伝達はなぜ低下するか。 a) 純冷媒と混合冷媒の凝縮現象の違い、 b) 層流理論による強制対流凝縮と自由対流凝縮の比較。
  - 5) 将来の研究として特に必要なもの。 a) システムとしてのサイクル論(圧縮式と吸収式の比較)、 b) 熱物性の研究、 c) 気相側熱伝達促進、 d) 凝縮器の設計に一般的に用いることができる式の確定。
- II. 大切なエネルギーを何倍にも使えないだろうか
- スーパー・ヒートポンプ開発計画を中心に — 芝浦工業大学 片山功蔵教授
- 1) スーパー・ヒートポンプ・エネルギー集積システム研究開発計画の概要
  - 2) 高性能化の手段。 2-1) ヒートポンプの高温化の問題点。 a) 耐熱温度の高い材料の開発(冷・熱媒の開発、高温化による耐蝕性材料の検討…機器用・電気絶縁用・ライニ

ングなど、高温用潤滑油の開発)、 b) 圧縮機の改善 (ボリトロープ指数を断熱圧縮より下げるために液噴射の採用、多段圧縮・エコノマイザー、フラッシャー、蒸気過給機の開発)。 2-2) 高効率化。 a) 熱力学的ヒートポンプ・サイクルの改善 (単一成分気液二相サイクルのロレンツサイクル化…非共沸混合媒体の採用、一定温度差・向流熱交換の採用、 2段エコノマイザーサイクル、単段フラッシュ蒸気過給機付サイクルなど)、 b) 熱交換器の伝熱工学的改善。

### Ⅲ. 水平蒸発管内熱伝達の問題点

九州大学工学部 吉田 駿教授

#### 1) 分離流の伝熱、 2) 層状化と伝熱促進、 3) 層状化と油混入の影響

I. の御講演では、まず、非共沸混合冷媒の採用とロレンツサイクル化によってCOPの向上がもたらされる原理を、混合冷媒の相図、熱源水と冷媒の管軸方向温度分布、ヒートポンプのT-s線図、COPと質量分率の関係、COPとFK値(伝熱面積×熱通過係数の値)の関係を示して説明された。

ついで、実験結果に基づく管内凝縮の特徴について、凝縮時における純冷媒の流動様式の管軸方向の変化を示す写真及び二相流マップ、純冷媒と混合冷媒の平滑管と内面加工管を用いた場合の局所ヌセルト数の比較、純冷媒と混合冷媒の平滑管を用いた場合の平均ヌセルト数と二相レイノルズ数の関係を示して述べられた。内面加工管を用いると平滑管に比べて、純冷媒(R22)では局所ヌセルト数が50~70%増大するのに対し、混合冷媒(50mol% R22 + 50mol% R114)では純冷媒の平滑管基準(混合冷媒の平滑管基準ではない)で最大30%程度の増大にとどまるばかりか、かえって減少する場合もあり、内面加工管の効果があまり現れないこと、混合比を変えた混合冷媒(R22 + R114)の平均ヌセルト数も純冷媒のそれより小さくなることを示す実験結果が示されている。この分野の系統的な実験結果が少ないことから極めて興味深い。

最後に混合冷媒の熱伝達はなぜ低下するかについて、水-エタノール混合蒸気の水平平滑管外面の凝縮の写真、層流理論を用いて解いた混合冷媒蒸気(R114 + R11)の周囲蒸気中の濃度に対する強制対流凝縮及び自由対流凝縮熱伝達の変化を示して言及された。水-アルコール混合蒸気の凝縮ではリング状、滴縞状、滴状の凝縮が現れる場合に液膜の熱伝達は促進されるが、気相側の伝熱促進効果は現れない。混合冷媒の凝縮熱伝達の特徴は、管外と管内、媒体の種類、蒸気流速によって異なり、今後究明していかなければならない多くの未知の事柄があることを示唆されたものと理解しました。

II. の御講演では、「セミナーに参加された方々の顔ぶれから判断すると、列挙した項目の順序とは全く逆の順序で講演する方が相応しい」という意味のことを前置きされて、

最後の項目“熱交換器の伝熱工学的改善”から始められた。まず、高性能ヒートポンプの開発は熱交換器の高性能化と直接結びついているので、基礎的研究が重要であることを強調された。非共沸混合媒体の多管型蒸発器の伝達促進法として、核沸騰領域に対応して第1蒸発器には垂直形を、伝熱促進面加工の施し易い管外面を利用するために第2蒸発器には胴側に熱媒体を流す水平形を、噴霧流域に入った媒体のドライアウトを減少させるために第3蒸発器には管内側に熱媒体を流す水平形を用い、媒体が経過する二相流の全てのフロパターンに対応することを提唱された。

また、凝縮器については、SUSのろう付プレートフィン型熱交換器が開発されており、EHD凝縮器の研究開発が行われているとの紹介があり、拡大伝熱面プレート式、旋回流式、インナーフィン付二重管式に対する混合媒体(99mol% R22 + 8mol% R114)の凝縮伝熱量の比較実験結果が示され、拡大伝熱面プレート式が最も優れていることが述べられた。

現在、片山教授は通商産業省工業技術院のスーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム分科会会長を務められており、その立場から、非共沸混合媒体多段圧縮凝縮(R113 + R114、温熱専用)非共沸混合媒体二段エコノマイザー(R22 + R114、冷温兼用)、直接接触中間熱交換器付二段圧縮(フッ素ノール85、高温出力・低温熱源)、単段フラッシュ蒸気過給機付(水、高温出力・高温熱源)の各サイクルのT-s線図とそれぞれの開発目標COP = 8, 6, 3, 3を示された。また要素技術として超高性能圧縮式ヒートポンプとケミカル蓄熱技術の目標値とともに、圧縮式ヒートポンプについて熱源温度と供給可能温度の実績例を示され、目標値の達成はかなり困難であるような含みのあることが述べられた。

Ⅲ. の御講演では、まず、重力による水平蒸発管内の冷媒気液の分離が熱伝達に及ぼす影響について、フロン系純冷媒の実験結果に基づいて述べられた。クオリティが約0.7で分離流から環状流へ遷移し、分離流では液でぬらされている部分と、いない部分で大きな局所熱伝達係数の差があることを、局所熱伝達係数のクオリティに対する変化と管周方向の変化の実測値(R22)によって示された。さらに、ぬれ境界角度とクオリティ、周平均熱伝達係数とぬれ境界角度の関係が示され、管内の熱伝達係数が周方向に著しく変化することから、加熱方式、管寸法及び管材質が熱伝達係数に大きく影響することが強調された。

ついで、螺旋溝付管について、平滑管に対する周平均熱伝達係数との比(R22、R12)、局所熱伝達係数のクオリティに対する変化(R22)の実測値から、螺旋溝付管のほうが管頂部の伝熱が顕著に改善されて熱伝達係数は大きくなることを示された。周方向の局所的な特性に相違が生ずることの原因については、分離流では溝による毛管現象及び溝内の気液界面に働くせん断力によって液が管頂部まで供給され、溝内の液は溝側面上にメニスカス液膜を形成すること、環状流に近づくと溝深さよりも厚い液膜が管周の大部分を占めて伝熱は幾分低下し、完全に環状流になると螺旋溝付管と平滑管の熱伝達係数に大きな差異が

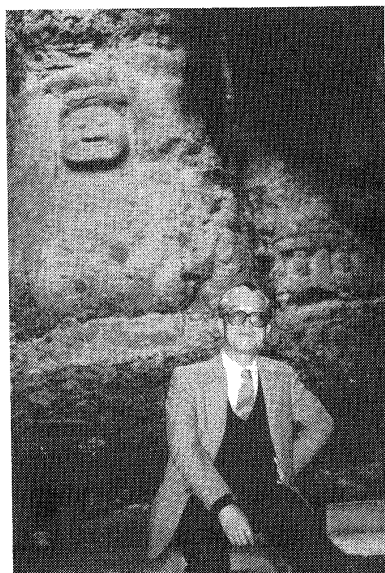
無くなることを理由づけられた。

最後に周平均熱伝達係数に及ぼす油質量分率の影響の実測値 (R22 + 冷凍油スニソ 3GS) が示され、低クオリティの場合にはフォーミング現象で熱伝達が向上すること、クオリティが増加するにつれて環状液膜内の油濃度の管周方向分布が生じ、管頂部側ほど油濃度が高くなって伝熱が阻害されることを示された。

討論は一括して行うことにしていましたが、各御講演とも含蓄のある熱弁をふるわれたため、3件の御講演が終った時には、予定時間が過ぎてしまっていました。そこで、20分間延長して討論を行いました。「どのように最適な媒体を定めるか」、「推測を行い見当をつけて熱物性を検討する必要があるのではないか」、「混合媒体を用いるとシステムとして本当に良くなるのか」など、根本的な事柄についての質疑が主としてありましたが、まだまだ未解明な部分が多く、今後の課題を集約したような結果になりました。

以上、本セッションの紹介を簡単に行いましたが、講師の方々の主張されたいことから外れているかもしれません。私は48時間後に50日間の訪米の途につきますので、推敲する時間的余裕もありませんのでお許し下さい。本伝熱セミナーの要旨集は準備委員会側にも若干残っていますので、御興味のある方はそれを御覧下さい。

宮本編集委員長から仰せつかった規定頁数は4頁ですので、まだ少し余白があります。そこで、別の事柄を書かせていただきます。本会の会長も歴任され、熱工学の分野に多大の貢献をされた京都大学名誉教授 水科篤郎先生が今年2月24日に御逝去されましたことは、伝熱研究、27巻、105号 (1988) の多くの方々への惜別の情のこもった追悼文で御存知のことと思いますが、亡くなられる86日前の昨年11月30日に、先生が九州においでになり、大分空港から帰途につかれる途中、今回のセミナーが開催された仏の里“国東”を訪れられ、熊野磨崖仏、真木大堂、富貴寺、安国寺など巡られました。セミナーの参加者の殆どの方々を訪れられた熊野磨崖仏の前で撮りましたお元気でいらした折の御写真を載せさせていただき、改めて深甚の謝意を表すとともに御冥福をお祈り申し上げます。



在りし日の水科篤郎先生  
国東、熊野磨崖仏前にて  
(昭和62年11月30日撮影)

深野 徹（九大工）

学部の卒業研究として気液二相流というものに始めて接して以来、細々ながらこれに関する問題に携わってきたので、随分長く関係したことになる。しかしこの間この分野にどれだけのものを残すことができたかを考えると、全く身が細る思いがする。エレクトロニクスの発達に伴って、従来に比して格段に秀れた計測法が採用できるようになり、二相流の物理についての情報も多くなった現在、今まで公表されているデータや整理式の見直しが必要なのではないかと痛切に感じられる。さらには日本における気液二相流に関する過去の研究が、主としてボイラがらみにおいて成されてきた経過があるため、例えば直円管のような比較的単純な流路形状に関するものが多い。しかし実際には二相流が関与している装置は多岐にわたり、このような単純な系で得られた知識の有用性については、結局は再度調査する必要がある。また、物理現象が十分に解明されていない場合などには、特にその整理式の適用範囲が明確にされている必要があるが、それも十分でないものが多い。

このような現状から、個々の特殊な条件下の二相流動現象に対する個別的な取扱いの必要性を認めつつも、普遍性のある見解で過去の成果を統一化させる独力に欠けていたのではないかと、このためには単に気・液のみならず広く異相物体の混合体の流動に対する考え方、対処のし方に breakthrough が必要で、今その時期に来ているのではないかと痛切に感じられる。

このような雑念に常日頃悩まされていたことにより、今回のセミナーでも「混相流に関する伝熱現象」が一つの話題として考えられるのではないかと発言したことが採用されて、本セッションのお世話をとおせつかったわけである。しかしこの発言が上記の雑念を必ずしも具体的に考慮した上でのものではなく、考慮しても簡単な問題ではないこと、企画が決定するまで委員会で紆余曲折があったこと、などのため結局焦点のぼけた企画になってしまった。それでも石川島播磨重工の渡辺健次氏の「高温流動層内の伝熱について」ならびに日本原子力研究所の村尾良夫氏の「原子炉事故時の二相流動解析の問題点」はいずれも興味のある、準備の行き届いた精力的なお話しであったため、企画者の意図をはるかに越えるものが参加者の皆様に伝わったものと確信している。

内容を簡単に紹介すると、渡辺氏のお話しでは、流動層の圧力損失は固定層状態では気体の空塔速度とともに増加するが、流動化が始まると一定となること、流動化が始まる空塔速度は粒子径とガスの粘度に強く依存するが、理論的に精度の良い予測が可能なこと、流動層内に設置された管への伝熱は対流とふく射によっているが、対流伝熱は層内の流動様相、特に粒子の衝突による管との接触が重要であり、管が水平か垂直かの姿勢による顕著な差はないこと、一方高温流動層ではふく射伝熱による熱伝達が増加するのに加え、作動ガスの物性値の変化も重

要な因子となっていること、ふく射伝達性能を表すふく射率が気ほう率に強く依存していること、などが述べられた。このお話しの中には固気二相流と気液二相流の類似性が数多く見られること、固気二相流で何故に大気ほうが形成されるかなど興味ある点が多かった。

村尾氏の講演では、加圧水型原子炉、PWRの一次冷却材喪失事故、LOCAを例として、原子炉の安全評価のために必要な流動解析に関連して、系全体を分割していくつかの要素にわけた要素モデルとして、(1)蒸気発生機ライザー部と水平配管部にみられるCCFL（気液対向流による水流の制限）、(2)ホットレグ配管でのCCFL、(3)破断口付近での流動状態と流出量、(4)下部プレナムのポイディング、(5)タイプレートCCFL、(6)炉心内蓄水、および(7)ECCバイパスなどを挙げ、これらの気液二相流の挙動を解析する際に必要とされる未解決の問題を具体的にお話しいただいた。用意された資料は一日かかっても十分には説明しつくせないだろうと思われるほどの膨大なものであった。これらの例では複雑な流路内での気液二相流の問題が多く、これらは必ずしも原子炉だけに関連するものではないので、この方面に興味を持っておられる方々にとっては参考になる点の多い話しであったことと思う。

以上のように両講演は内容の多いものであったので、講演時間が予定よりさらに短縮されたこともあり、討論の時間がほとんどとれなかった。この点は企画者・司会者として深く反省しているしだいである。最後になりましたが、お忙しい中講演を快く引き受けていただいた渡辺氏と村尾氏に心より感謝の意を表します。



## 伝熱放映会顛末記

清水昭比古（九大・総理工）

はて、伝熱放映会とは何だ、と訝る向きも多かろう。ご存じのように、伝熱セミナー二日目の日没後は従来伝熱放談会に当てられており、ビールの助けを借りて世代と専門分野の垣根を除きつつ、伝熱学を通じて天下国家を論ずることになっていた。当初の計画では今年もこれを踏襲することになって、小生を含む数名が、企画委員長の宮武教授から「産学官の研究協力を就いて」という仮テーマを頂戴してこれに当たることとなった。併し、その数名が集っていざ相談をする段になって異論が相次いだ。曰く、「産学官の研究協力などといっても、抑も官からの参加者など無いではないか。一方の参加者がいないところで何を言っても所詮は悪口でなければ愚痴になるだけだ」、「放談会は全くマンネリに陥っているから止めて了え」、「これまでのようなセミナーは今回で終りだそうだ。ということはなにをやっても良かろう」、「では、ジョッキ片手に映画を見るというのはどうだ」・・・云々。そこで、これらの過激な意見を携えて恐る恐る企画委員長にお伺いをたてたところ「若いもの思う通りにやってよろしい」とのお墨付きを頂戴したので、敢て前例を無視することにした。結局、伝熱放談会は遂にその最後を全うすることができずに前回で終ることになり、夏の夜の涼みがてらに伝熱に係わる面白い映画・ビデオを見て過ごそうということになった次第である。奇しくも伝熱放談会とは一字違いである。始めは「伝熱放映会・・・伝熱を見る！見せる！」と副題をつけておいたのだが、これは場末のストリップ小屋の宣伝文句のようで品位に欠ける、という理由で準備委員会で却下された。また、それぞれの方の永年の苦心の成果である映像を拝見するのにジョッキ片手では礼を失することであるから、ビールは予め夕食時に飲んで頂くことにした。

行き掛かり上小生がその司会を引き受けることとなってフィルム捜しが始まった。何しろ筆者はビデオデッキに手を触れたこともなく、VHSとかSVHSとかいう言葉も始めて耳にしたような始末で始めはどうなることかと思っただが、幸い、会場系の吉田敬介助教授の奮闘よろしきを得て必要な機材を取り揃えることができた。

各方面から情報を頂戴して、結局次の五件のフィルム・ビデオを集めた。

### 1) ホログラフィー干渉法による液面火炎伝播時の液相内温度分布・・・伊藤昭彦（大分大）

地元からは伊藤先生にご登場頂いた。可燃性液体の火災、或はタンカー・航空機などの事故の際に流出する液体燃料への引火、延焼などの基礎研究として、燃料の液面上を伝播する火炎下の液相内でマランゴニー対流によって生ずる温度場と流れ場を、ホログラフィー干渉法を用いて可視化したビデオが紹介された。

2) コンピューターが作る流れ・・・・・・・・・・・・・・・・小林敏雄（東大）

近年目覚ましい発達を見せている数値流体力学も、その成果を人間の視覚に訴えるノウハウがなければ膨大な数字の山に辟易するのは目に見えている。小林先生には、自動車の周りの三次元流れを例にとり、このための技術を丁寧に解説して頂いた。

3) 融液成長法による単結晶育成時の流れ場・温度場の振動現象・・・・・・・・宗像鉄雄（機械研）

チョクラスキー法を用いて単結晶を作る際にストラティエーションとよばれる不純物濃度の不均一が生ずる。その原因は温度の不均一な融液中に生ずる熱流動的な振動現象にあるのではないかと、との洞察のもとに行なわれた実験と数値シミュレーションの結果を機械研の宗像氏に披露して頂いた。感温液晶によって可視化された温度場と流れ場のビデオが、富士通のソフトCGMSによってアニメ化された数値シミュレーション結果と比較して示された。

4) 液晶による伝熱現象の可視化・・・・・・・・・・・・・・・・秋野詔夫（原研）

原研の秋野氏には、高温ガス炉炉心の伝熱流動研究の一環として、感温液晶の膜を張り付けて突起のある伝熱面の温度を可視化する技術、液晶を流体中に懸濁させて自由対流の温度場と速度場の双方を可視化する方法、パール顔料による流れの可視化などを紹介して頂いた。

5) 回転流体内でのローカルクーリングによる冷却過程・・・・・・・・・・・・・・・・木村竜治（東大）

木村先生には、一日目のセッションで「伝熱装置としての大気・海洋現象」と題する講演をお願いしたが、放映会にも引き続きご登場頂いた。紹介されたフィルムは、地球の遠心力・コリオリ力の場でシベリア寒気団が日本付近に南下して来る様子を巧に再現した興味深いものであった。

最後に、少々古いものであるが、昭和シェル石油株式会社フィルムライブラリーのなかからこの場に相応しい「肉眼の世界を越えて」という15分ほどの16ミリフィルムを上映した。

会場からは、フィルム製作上の苦労話や現象の解釈などに関する質問・コメントが相次ぎ、予定を一時間半もオーバーして十時三十分を終了した。実は、会場隣の大広間は夏期林間学校と思いき小学生の団体の宿泊室になっていたのだが、子供たち、さぞ喧しくて寝られぬことであつたらう。

若手数名で勝手に企画した伝熱放映会ではあったが、終ってみれば、参加者の多数を占めた映像・視覚世代（漫画世代？ 失礼！）の大学院生諸君には特に面白い企画ではなかったか、と密かに自賛している。まずまず盛会裡に終了できたことは多くの方々のご協力に負うところが大きい。貴重な時間を割いてはるばる筑紫の果てまでお越し頂き、フィルム・ビデオをご提供下さった先生方には深甚なる謝意を表します。

## セッション「工業製品における熱工学的課題」

増岡 隆士 (九工大)

本セッションでは、豊田中研 藤掛賢司氏、九工大 田中修氏(前三菱中研)、新日鐵第三技研 三塚正志氏の三人の講師の先生より自動車、電子機器、製鉄プロセスにおける熱的課題について解説・展望を頂いた。

最初に「自動車用エンジン、エアコンにおける伝熱工学的課題」と題し、藤掛氏に講演頂いた。研究開発として、快適な走り、心地よい音、振動、快適な温熱環境を作り出す技術が要求され、エンジンは大馬力化、エアコンは高性能化の傾向を辿っている。したがって、エンジンやエアコンの伝熱工学的課題が改めてクローズアップされてきているとして、とくに最近重要になっているいくつかの課題が紹介された。そしてこの場合、研究開発の方向を決める根底に、快適なとか、心地よいといった人間の感性が関わっているという御指摘に、これまでもそうであったには違いないものの、人間と技術の関わり方の問題として興味を覚えた。

エンジン筒内の燃焼と伝熱に関連する課題の一つとして、急速燃焼による燃費の向上について述べられた。急速燃焼技術としての旋回流、乱れの付与が熱伝達を促進し、熱損失も増加させて燃費改善につながり難い面があること、したがって、熱損失が少なく燃焼期間が短い燃焼室形状を実験的に探すことになり、実験工数の節約のため、筒内の流速、乱れ、温度、濃度、燃焼室壁面の局所熱伝達率、熱負荷などの分布を三次元的に瞬時に計測し、その時間変化を測定する技術の開発が、現状では大きな問題であるとされた。さらに、ガソリンエンジンでは、高圧縮比による熱効率向上、燃費改善に関連してノッキング時衝撃波の発生を伴う伝熱現象が今後解明されなければならない重要な課題とされ、一方、ディーゼルエンジンでは、ピストンキャビティ内のスワールあるいは噴流等によるピストン頂部の高熱負荷の問題など、筒内伝熱現象の計測と解明がエンジン開発上の大きな課題とされた。

車のエアコンに関連しても、温熱的に快適とは何かが問題となり、オートエアコンの設定目標値自体が、乗員の着衣、性別、年齢、人種などで個人差があり、制御精度の向上の問題としてでなく、人間の伝熱と感覚に関する問題が基本的に重要な課題になっていると指摘された。冷房時の熱問題については、例えば、小型車の40km/h走行時の冷房全熱負荷 約3500Wのうち窓ガラスからの日射によるものが1400Wと40%を占める。そこで窓ガラスに薄膜をコーティングし、視認性を損なわないように可視光域での透過率は1に近く、赤外域では反射率が1に近くすることにより日射による熱負荷を半減させる波長選択の技術の実用化が考えられている。一方、空気冷却熱交換器に関しては、空気側伝熱面に空気中の水分あるいは水滴

となって付着し、伝熱抵抗、通風抵抗に影響する。暖房時の重要な課題としては、ウォームアップと室内湿度が問題とされた。エンジン始動後の熱源としての冷却水温度の立ち上がり時間の短縮は、窓ガラス外側に付着した霜の除去、乗員の呼気中の水分の窓ガラス内面への結露と関連し、安全運転上からも問題となる。このため、定常走行中の冷却水あるいは排気の熱量を蓄熱し、冷始動時の水温加熱に利用することが検討されているが、現在の蓄熱材の性能では重量、容積の点から実用的でなく、数倍の能力の蓄熱材の開発と、短時間に蓄熱量を冷却水に移動させる技術が必要であり、具体的にどのような蓄熱材があり得るのかの検討も含めて、これが伝熱的に難しい問題となっていると解説頂いた。また、人体に適した相対湿度の設定の問題も、窓ガラスへの結露と関連し、熱と物質の同時移動を伴う問題として重要な課題とされた。

次いで、田中氏からは、「熱サイフォンを利用した電子機器の冷却」と題して、とくに電子機器冷却に対する二相密閉形熱サイフォンの応用の問題について解説頂いた。電子機器の部品は処理能力の増大・高速度化や小型軽量化のため実装密度が高くなる傾向にあり、各種回路部品温度を許容温度以下に抑えるため、その発熱処理、冷却が必須の課題となっている。この場合、従来のように外気を電子機器のキャビネットの中に取り入れる自然通風冷却ないし強制通風冷却による方法は、回路部品が直接外気にさらされるため、じんあい、油、水分、塩分、腐食性ガスなどを含む厳しい環境下では、機器あるいは部品の信頼性、寿命に問題を生じる。ここに密閉形熱サイフォンによる電子機器冷却が熱工学的に重要な課題となると指摘され、二相密閉ループ形熱サイフォン式熱交換器と、フィンつきヒートパイプ式熱交換器の開発と電子制御盤の冷却への応用について紹介された。

またサイリスタ素子など大容量半導体素子では電極面から発生する単位面積当りの熱流束が過負荷（非定常）状態では  $150,000\text{W}/\text{m}^2$  にも達し、従来の空冷、油冷ではフィン面積が大きくなり過ぎる、あるいはファン動力が大きき、騒音も大きくなるなど問題を生じ、これを克服するためプール沸騰冷却方式の採用に至ったこと（プールの熱容量も過負荷への安定性に寄与）、この場合、開発の過程では凝縮器の側も問題となり、フィンチューブを用いたサーモサイフォンが期待通りの性能を発揮しない場合があったこと、種々の検討を経て、自然循環方式に帰着したこと、あるいは、東北上越新幹線用の整流器には発熱素子を沸騰冷却フィンの外部に圧接し、冷媒を外に置いた非浸漬形が開発され、凝縮器の能力は  $33\text{K}$  温度上昇で  $7.5\text{KW}$  に達することなど講演頂いた。将来的には、ますます小形化、軽量化が進み、定常あるいは非定常（過負荷）の高熱流束への対応、蒸発器・凝縮器の伝熱促進、蒸発器・凝縮器の位置関係を固定しないためにもやはりヒートパイプ利用冷却方式の性能改善、フロン規制に伴う冷媒の問題、高信頼性の維持などが一般的な課題となるようであり、応用に関する多数のスライドを織り混ぜてのお話は興味深いものがあった。このような開発、実用化に大変な苦心の積み重ねがあることを想像するとともに、沸騰熱伝達、バーンアウト熱流束、熱

サイフォン、フィンの伝熱等の基礎研究・基礎データが大きな役割を果たしていることにも思いを新たにすることがあった。

三塚氏からは、「製鉄プロセスの動向と伝熱工学的課題」と題して、将来のプロセスまで含めて展望講演を頂いた。将来、普通鋼材の低価格化のため設備の単純化（工程の簡省略化、連続化など）、各工程における省力化（コンピュータ管理化、人工知能の導入など）などが求められ、また特定鋼材の高品質化・多機能化のために、各工程の生産技術力の向上と総合化（最適化）を要し、これには鉄鋼の本質（物性）にせまる研究開発と生産技術の細部にわたる研究開発が必要と指摘され、製鉄プロセスの熱的課題について講演を頂いた。

高炉プロセスは大量生産に対しては将来とも優位性を持ち続けるであろうものの、200～400万トン/年以下の小規模では、溶融還元プロセスが設備費およびランニングコストの点から有利となり、俊者が日本の開発の主流となっているとされ、この溶融還元プロセスで発生するCOガスやH<sub>2</sub>ガスの炉内燃焼とその熱の溶融スラグと溶融メタルへの伝熱促進、あるいは可燃性高温含塵ガスからの効率的熱回収を課題とされた。連続圧延プロセスではコストミニマムの観点から鑄片の小断面化と鑄造の高速化が求められ、このため薄手スラブ連続鑄に対しては凝固初期における鑄片を幅方向に均一に冷却すること、また連続と圧延の熱的連結のために鑄片からの放熱を防止すること、圧延直前に端部を局部的に急速加熱をすることなど、が課題となる。圧延-熱処理プロセスにおいては、圧延工程で結晶粒度を制御しておき、引き続き冷却工程で結晶粒度、結晶組織、析出物などを制御・調整する必要があり、このため冷却速度・冷却能力の制御、軸方向・長手方向の均一冷却、さらには高温域（ $\gamma$ 域、約800°C以上から[600～300°C]）を可能な限り急冷し、中温域（600～300°C）で保定（冷却の急停止）・等温変態させる冷却の「急冷-保定パターン」（制御冷却）の実現などが重要な熱的課題となること、この場合従来のように高温鋼材を単調に常温まで急速冷却するには冷媒として水が最適であったが、制御冷却においては上記中温域で冷却能力が不安定となり、鋼材内温度分布の大きな変動をもたらす、従って熱処理温度範囲で沸騰しない溶融塩を冷媒とする制御冷却の検討が課題となっていることなど、を解説頂いた。

このセミナーでは、初日の大気循環という地球規模のスケールからこの結晶粒規模までのスケールまで、それぞれの現象を支配する代表寸法があり、その特徴的寸法の維持に対応しているようなパターンが生じること、そのうちどのパターンが選択されるかが熱環境に大きく影響されること、そして実際、自然界あるいは工業プロセスにおいて様々なパターンが現われることが指摘されたように思われ、大変興味を覚えた。本セッションの工業製品における熱的課題も、そのような現象の生起、実現の仕方、自然の法則に関する洞察と、個々の状況、周囲環境の中でその工業製品、広くは自然界と人間の関わり方に関する洞察の中に見いだされているということでしょうか。

昭和42年に東京八王子で第1回が開催されて以来、20年以上の長きにわたって続けられた伝熱セミナーは本年7月大分県国東で行われた第22回をもって最終回とすることになりました。伝熱セミナーの意義がなくなったというわけではなく、会員数の増加した現在、むしろそのような活動をより積極的かつ効果的にに行い得るように、発展的に解消したものといえます。本号がセミナー特集号でもあり、また今後の地方活動の一層の活発化が期待される折から、伝熱セミナー創設以来深く関わられた先生がたのうちお三人のかたからセミナーの歴史を振り返るとともに今後の伝熱研究会の活動の展望についてご寄稿いただきました。伝熱セミナーがわが国の伝熱研究の進展に果たした役割の大きさを知るとともに、今後の研究会の発展に向けて貴重な指針が得られることと確信いたします。

なお、この機会に「伝熱研究」および総会資料をもとに伝熱セミナー22年の歴史の概要をまとめました。図は参加者（総数と学生内数）および開催費用の変遷を示したものです。表には各回の主なテーマ、セッションあるいは講演題目を示します。何らかの参考になれば幸いです。最後に、ご多忙の折り御執筆いただきました先生がたおよび資料の収集にご協力いただいた事務局の先生がたに深く感謝いたします。（文責：藤井丕夫）

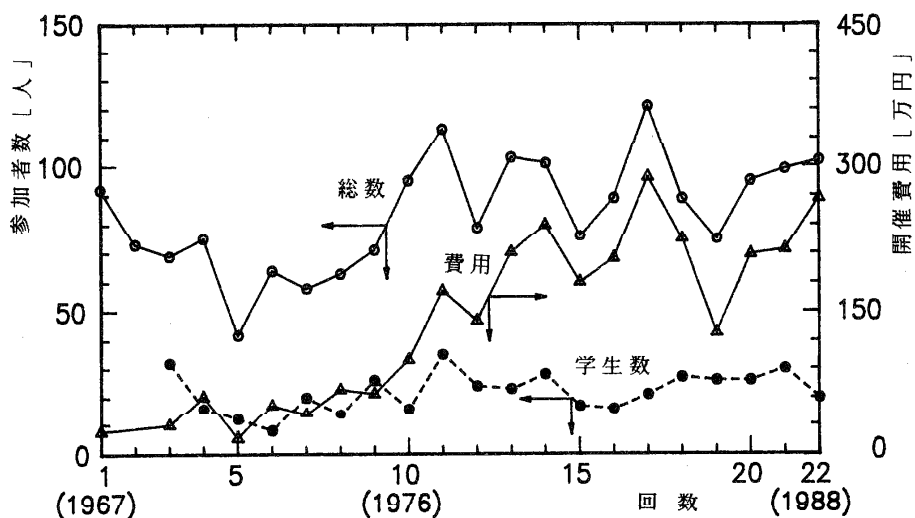


図 参加者および開催費用



伝熱セミナーの歴史

表

回数	場所 会場	開催年月日	準備委員長	参加者数	主なテーマ
1	八王子 セミナーハウス	67/07/29-30	平田 賢 (京大)	92	伝熱の基本的事項：自由対流、強制対流、物質移動を伴う熱伝達、ふく射、沸騰、二相流
2	野井沢 グリーンホテル	68/07/26-28	一色尚次 (東工大)	73	現在興味あるもの、これから研究が盛んになるもの：熱伝導（測定法）、超臨界圧流体、凝縮（滴状、核生成、不凝縮ガス）、熱交換器（高温用蓄熱式等）
3	八王子 セミナーハウス	69/08/8-10	小茂島和生 (慶大)	83	相変化を伴う伝熱、物性値とその測定、極限状態下の伝熱（プラズマ、極低温、スーパーインシレーション）、化学反応を伴う伝熱、非平衡熱力学と伝熱、液体金属の伝熱、伝熱未来学（放談会）
4	鶴岡龍山寺 遠鉄ホテル	70/07/28-30	杉山幸雄 (名大)	75	輝炎およびガスふく射、回転場の熱伝達、コンパクト熱交換器、乾燥、石油化学における伝熱、製鉄および冶金工学における伝熱
5	東海村 原子カククラブ	71/08/11-13	山崎弥三朗 (原研)	42	原子力における伝熱問題：原子炉と伝熱問題の展望、相変化を伴う気液二相流の伝熱・流動、高温ガスの熱伝達、原研、動燃の見学
6	神戸 六甲行雲荘	72/07/24-26	赤川浩爾 (神戸大)	64	新しい分野の伝熱：研究テーマの開拓と方法論、生体工学における伝熱・流動問題、特殊温度測定法（超音波、赤外線）、環境と値値観の変遷（特別講演）、LNGにおける伝熱技術の諸問題、大阪酸素（株）尼崎工場見学
7	群馬 赤城天望荘	73/7/23-25	青木成文 (東工大)	58	動力プラントの安全性と伝熱、熱公害と伝熱、伝熱問題への計算機の利用、伝熱研究会の未来は？（放談会）

8	札幌定山溪 青樹荘	75/1/8-10	斉藤 武 (北大)	63	エネルギーシステム(省エネルギー, 排熱利用), 複合伝熱(結霜, ふく射・対流), 国際伝熱会議の話題.
9	長野 妻科山荘	75/8/31→/2	小茂島和生 (慶大)	71	燃焼と伝熱, 気液二相の動的諸問題, 伝熱現象のフィルム映写, 熱物性値(データの評価と推算), 自由討論(伝熱失敗集)
10	金沢 郵便貯金会館	76/7/28-30	泉 亮太郎 (名大)	95	霜の生成問題について, 対流伝熱における伝熱促進法, 伝熱トビックス(ヒートパイプ, ヒートポンプ, プラズマ伝熱, 熱エネルギー問題), 火炎伝熱について, 自由討論
11	宮城 川渡共同センター	77/8/4-6	弓削達雄 (東北大)	113	熱と流れの測定技術, 省エネルギー技術と伝熱工学, 境界領域における熱工学的諸問題, 熱工学放談会
12	京都 農林年金会館	78/9/22-24	岐美 格 (京大)	79	エネルギー有効利用と環境問題: 直接接触伝熱, 伝熱トビックス(ソラポイント等), 環流伝熱(大気環境, 海洋, 都市・建築), 蓄熱(熱物性, 太陽熱利用関係), 国際伝熱会議報告
13	福岡 志賀島国民休暇村	79/7/10-12	藤井 哲 (九大)	103	エネルギー問題: クリティカルレビュー(強制対流等), 未来エネルギー(低温度差等), フィルムセクション(省エネルギーと伝熱) 研究座談会, 放談会
14	徳島 鳴門ハイッ	80/8/16-18	浦川和馬 (徳島大)	101	伝熱学における測定法, エネルギーシステム(省エネルギー技術等) 伝熱研究の展望, 伝熱トビックス(触媒燃焼, ガスタービン翼の冷却等), 自由討論(熱伝導等)
15	千歳 支笏湖休暇村	81/7/22-24	水野忠治 (室蘭工大)	76	資源エネルギー利用と寒冷地の伝熱: 資源エネルギーの開発と伝熱(石炭, 地熱, 高速増速炉等), 寒冷地における伝熱問題, 80年代の伝熱研究に望むこと

16	茨城 筑波研修センター	82/7/14-16	安達 勤 (筑波大)	89	新・省エネルギーに関する伝熱問題, 筑波学園都市の見学
17	和歌山 高野山公民館	83/7/15-17	勝田勝太郎 (関西大)	121	これまでどこからの伝熱, 流動伝熱問題のモデリング, 流動伝熱の数値解析, 伝熱トビックス (鉄鋼業における流動解析等), フィルムセクション (乱流)
18	長野 御岳休暇村	84/7/16-18	菱田 幹夫 (名工大)	89	伝熱研究の展望と解説, 伝熱促進と熱交換器, 乱流伝熱の機構, 伝熱トビックス (エレクトロニクスと伝熱等), 座談会 (研究と技術の接点, 乱流伝熱)
19	鳥取 大山共同研修所	85/7/28-30	千葉徳男 (広島大)	75	伝熱研究と赤外線利用, 乱流とはどのような流れか, 相変化と核生成, 先端技術と伝熱工学 (セラミックス, 工工学と物質伝達等), 座談会 (乱流)
20	小諸 年金保養センター	86/7/16-18	久我 修 (信州大)	79	境界領域における伝熱研究の進展 (無重力下, 半導体製造, 原子炉等), ハネル討論! 企業は大学における伝熱研究に何を望むか)
21	宮城 川渡共同センター	87/8/5-7	相原利雄 (東北大)	99	熱工学で新材料開発はどこまで可能か, 数値解析で伝熱のどこまでわかるか, 伝熱工学で極限環境下の安全性はどこまで確保できるか, 21世紀の伝熱 (放談会)
22	大分 いこいの村国東	88/7/20-22	伊藤益宏 (九大)	102	環境における熱と物質の輸送, 混相流伝熱, 工業製品における伝熱工学的課題, フィルムセクション (コンピュータグラフィックス, 液晶等)

伝熱セミナーの歴史を閉じるに当たっての感想

—絶滅ではない、発展を期待—

片山功蔵（芝浦工大）

地質時代の中世代、ジュラ紀・白亜紀1億5000万年間は「恐竜の時代」といわれ、多種に分化・進化した大小の恐竜族がこの地球上の動物の王者であった。その王者恐竜は突然地上から姿を消してしまったのである。6300万年も昔のことなので、恐竜絶滅の原因は、科学者からSF作家まで多くの人びとの想像の好対象となって来た。

動物学者玉手英夫先生が判り易く脚色して挙げられている絶滅原因説の一部を「クマに会ったらどうするか」（岩波新書昭62年）から拝借させて戴くと

恐竜絶滅の原因——

気候が暑くなりすぎて熱射病で死んだ

気候が寒くなりすぎて凍え死んだ

気候が乾きすぎてミイラになった

気候が湿りすぎてリュウマチで死んだ

.....

シダの葉の油が多すぎて下痢をした

ダニと回虫にしてやられた

脳が小さすぎて考えが足りなくて死んだ

卵泥棒のほ乳類に食い逃げされた

種族の定年で退職した

.....

彗星の衝突で一貫の終わり

ノアの箱船の座席指定券を買い損ねた

空飛ぶ円盤に乗ってきた緑色の宇宙人にさらわれた.....

大絶滅などない.....

最近、わが国でも恐竜ブーム。おもちゃ業界、出版業界では新種・新刊書が毎月見られる位で、これらの本では必ず絶滅について触れられているから、恐竜絶滅の原因説は数え上げる気がしないそうである。

目新しい説としては、2600万年間隔で起こるといふ円に近い安定した軌道を描いて太陽をめぐる未知の連星が太陽系に降りそそぎ、地球との衝突？による地球上の環境の激変に、王

者恐竜は体温の調節が困難になったので”生物適応の論理的帰結による犠牲者”となったという説がある。

この説はシカゴ大学の生物学者が海生生物の化石を検討して約2620万年の周期で生物の絶滅が2億4800万年間に9回起こったことを1983年に発表し、この説を天文学者・物理学者が連星衝突の可能性を計算して裏付け1984年に発表したものであるが、説の当否は今後の問題として、もしその環境の”激変”がそれより遅れて起こっていたならば、恐竜のあるものは人間に劣らない知能をもつ直立歩行型の動物として進化し地球を支配していたかも知れない・・・という推理が興味ある。

「伝熱セミナーの歴史を閉じるに当たって」が与えられた題目であるが、その絶滅の原因は？を書くことが本文趣旨ではない。それも適応の原則に従う進化であると思うからである。

恐竜絶滅の原因を推理する現代の科学者の手段の特徴は、生物学者の推計→天文学者の宇宙の知識→物理学者の計算によるエネルギーの定量化という一連の知的サイクルの連携であろう。

熱環境の問題として身近に起こったフロン規制もその例であろう。CFCの対流圏内での対流拡散と光化学反応での分解、成層圏内でのClとO<sub>3</sub>の反応、太陽からの放射の吸収と透過、そして地球上での紫外線の人体への影響の疫学的問題、これらが定量的に連携した結論がフロン規制の根拠となったのである。

恐竜絶滅・地球的規模でのフロン規制、それらは大変時間軸の永い複雑な現象が背後に含まれているが、専門の異なる研究者の方法論の違いを乗り越えた連携が現象を切り拓いている。

さて、伝熱セミナーは22回行われた。その全貌とわが国の伝熱研究に及ぼした大きなインパクトと波及効果について省みる立場に私があるとは考えられない。幾度が参加した記憶に基づいて印象を述べるに止まることをお許願したい。

伝熱研究は30年以前は、<sup>●●●</sup>機械工学・化学工学・建築・原子力などにまたがる学際的領域と云われた。そのための研究者が醸成されるように、研究の進歩の情報が交流されるように、との趣旨でセミナーが”手弁当の合宿”方式で始められたようである。

この趣旨は22回を通して続けられ、今年も100名を越す熱心な参加者を得て有意義かつ盛会な最終のセミナーを見ることが出来たのである。

伝熱学の発展と共に、研究者の研究分野が専門化し、より深くより狭くなっている事は、例えば伝熱シンポジウムの発表を見て判る通りである。現代の学問研究のひとつの動向には、恐竜絶滅の原因は？で書いたように、専門化・細分化した分野の異なる研究者が、連携し、知的サイクルを構成して未知の問題にチャレンジする手法であろう。時に”盲人象をなでる”と云われる状態になるおそれもあるが、視野の異なる人々が良き協力することによって問題の解決に画期的進歩が期待できる。このような手法の第一歩には、異なる専門の人同志のめぐり合いが必要なのである。

伝熱シンポジウムを初めとして、毎年研究発表の機会が多いが、研究を始めた動機、研究方  
伝熱研究 Vol. 27, No. 107

法、特に”実は・・・”で始まる失敗の例はなかなか伺う機会はないのが実状である。

三日間合宿によるセミナー22回の積み重ね、国際的にも重みを増した伝熱の分野で活躍されている30～50代の日本の伝熱研究者には、大学・研究所・企業を問わず、セミナーで会いた方々が極めて多い。省みてこのセミナーの影響する成果の大きさに感銘を受ける。

全国各地でこのような合宿が続けられたことは、手弁当方式で困難な楽屋裏で企画・準備をして下さった全国の準備委員の皆様方の御努力を深くそして楽しく思いだして、心から御礼申し上げる者である。

昨年は宮城県鳴子温泉郷近くの東北大学付属農場にある川渡共同セミナーセンター、今年は大分県の歴史と緑と海の光るいこいの村くにさきで盛会裡に開催された。どちらの場合も開催地域の特色のテーマと最近の進歩に関する話題を調和させた立派な企画で、恒例懇談会・・・と共に楽しく勉強させて戴いた。参加された方は、やはり、開催地域近隣の方が多かったようである。交通機関が整備されたといっても、南北に長い日本列島、時間的・旅費的制約が現れている。

「将来問題検討委員会」答申を受けて、伝統ある伝熱セミナーも22回をもって打止めとし、地域活動への組み込み、複数化に変更されることになった。たしかに、8地方年次巡回方式では、それぞれの地域の方にとっては、進歩する研究のトピックスに対応するには時間があきすぎるのが現状であろう。

今回の変更は現状にあった合理的なものであると思う。と同時に、22回の良き伝統も受け継がれて来た、開催地域の特色と、伝熱学の最近の研究の国際的進展とエネルギー開発への寄与についての興味ある話題を調和された企画を考えて下さって、この変更が伝熱研究の一層の発展をもたらすことを期待したい。

それと共に、地域間の相互乗り入れ参加と、”手弁当的”奉仕を御了承の上話題提供者の遠距離参加の美風とを伝熱研究会員の皆様が続けて下さって、ますます開催数も参加者も大きくなることをお願いする者である。

北海道から九州まで何度か参加させて戴いた伝熱セミナーの良き楽しい思い出が頭に浮かぶが、伝統的含困気によって深夜まで付き会って戴いた同宿の方々に御迷惑をおかけした事も思い出され、その節は・・・と、この機会にまとめておわびする次第です。

伝熱セミナーが来年度から全国の会員にとってより身近い行事として、一層の発展することを期待致します。

## 伝熱セミナーの閉幕について

東京大学生産技術研究所 棚沢 一郎

セミナーという言葉は、現在では大学での小規模な授業や演習や、専門家による会議や、短期間の集中コースなどの呼び名になっているが、元々は種子とか種子をまくという言葉から出てきたものだという話を誰かから聞いた記憶がある。この文章を書くに当たって英語の辞書を引き、seminarとその前後の seminal, seminary, semiferous などの単語を眺めてみると、なるほどセミナーと種子まきとは密接な関連があるのだなあということが理解できる。

さて20年以上も続いた伝熱セミナーが、今年限りで開催されなくなるという話を聞いて大変淋しい気持でいる。変化の激しい現代にあって20年というのはかなりの期間ではあろうが、それでも人間のひと世代よりは短い時間であり、続けていけばさらに成熟の道を進んだかも知れない日本伝熱研究会の看板の企画の一つをあっさり無くしてしまうのは決断が性急すぎるのではないかとの気もする。

いろいろな都合があって、僕は今年の国東半島での伝熱セミナーには出席できなかった。僕の伝熱セミナーへの参加率はかなりよい方で、これまでに全部で22回開かれたはずのセミナーのうち、僕が参加しなかったのは、第1回目（八王子）、第3回目（八王子）、何回目かははっきりしないが館山寺と東海村、そして今年の第22回目（国東半島）の5回だけである。神戸の六甲山でのセミナーから昨年（川渡セミナーハウス）までは連続して参加している。参加率約80%というのは伝熱研究会の会員中でもトップの方かと思う。

なぜこんなにせっせと伝熱セミナーに出席するのかという質問を、これまでに何度か受けたことがある。そのたびにどう答えたかはほとんど覚えていないが、尋ねられてちょっと気恥かしい思いをしたことがあるのは、質問の裏によく毎年それだけの時間的余裕が作れますねという皮肉を質問者の意図とは無関係に僕の方で感じたからである。実際、僕が伝熱セミナーによく出席した理由の一つは、自分では勉強することを怠っている新しい分野の話をじっくり聞くことができるからであった。とくに、いわば合宿形式で2日なり3日なりを過ごすことになれば、ふだんではなかなか伺えないような研究の裏話も聞け、またさらにその裏にある個々の研究者の人生観のようなものまで何となく感じとれるような得がたい機会にも恵まれる。これに加えて、伝熱セミナーは毎年違った地域で、しかも多くの場合、豊かな自然にめぐまれたよい環境の会場を確保して企画されるので、これに参加しさえすれば、全国を順ぐりに旅行することにもなり、自分から進んで旅行を計画するのがおっくうな僕のような者にはとても有難い催

しであった。ちなみに、僕が出席した17回のセミナーの開催地までの東京からの往復距離の総計を概算すると約 18000km というかなりの数字になる。セミナーなしにこれだけの国内旅行をすることは僕にはとてもできないような気がする。

ところで、伝熱研究会の幹事会でこれまでのような形での伝熱セミナーを今後は行わないということを決定するに至るまでにはいろいろの議論があったことと思う。その辺りの事情については、「伝熱研究」102号(1987年7月)に掲載されたアンケート集計報告と、同じく105号(1988年4月)の『「将来問題検討委員会」からの答申をうけて』の二つの記事から若干の推測ができる。元々若い年齢層のための勉強会として出発したセミナーであるのに、現在のセミナーは若い年齢層には不人気であること、遠隔地の会員の経済的負担が大きいく、研究・技術の進展や多様化に対し年1回の開催では追いつかないことなどが問題点とされたようである。そして、今後は地方ごとに多数回の類似の企画を考えてはどうかという提案がなされている。

これらの理由はそれぞれ首肯できるものではあるが、必ずしも決定的なものではない。要するに、判断のもとになるのは、これまで続いてきた伝熱セミナーの重要性あるいは成果をどの程度に評価するかであろう。提案されているような、地方ごとの小規模セミナーによって、従来のセミナーについての問題点のいくつかは解消されるように思えるし、僕としては是非とも各地方で積極的な企画をしていただきたいと望んでいる。ただしその際には、地方だけでまってしまうような企画ではなく、話題提供者や参加者に、できるだけ多く遠方からの人々を加えうるように、いわばセミ全国版に近い形になるようにしてもらいたいと思う。

伝熱セミナーの閉幕が、伝熱研究会の活動にどのような影響を与えるかを判断するには、これから数年の経過を見る必要があるが、将来のために種子を播きつづける努力を怠ってはならないと思う。



## 伝熱セミナスタートの頃

成合英樹（筑波大）

### 1. 「伝熱研究会に入ってどんなメリットがあるのですか」

筆者が東大機械工学科の内田秀雄教授の研究室で学部を卒業し、そのまま大学院へ進学したのは昭和37年4月のことであった。当時昭和35年の安保後の高度経済成長政策の下で、大学工学部の倍増計画が進み、また、学生の大学院への進学もようやく活発になりつつあった。

熱関係のその頃の事情をみると、丁度、前年の昭和36年11月に伝熱研究会が発足し、今から考えるとわが国における伝熱研究が本格化する時であった。そして昭和38年5月には第1回の伝熱シンポジウムが京都で開催された。学生として周りを見てみると、西脇仁一、橘藤雄先生、そして地方には山県清、抜山四郎先生等もおられたが、内田秀雄、甲藤好郎、植田辰洋、森康夫、青木成文、一色尚次、水科篤郎、佐藤俊、西川兼康等々のその後の伝熱研究を推進された当時の中堅の先生方が丁度30代後半から40代前半であって、各研究室は活発な研究をすすめていた。筆者の周りを見ても、平田賢、棚沢一郎、斉藤孝基らの先生方が丁度大学院を終るか終わったかでおられ秋山守先生が原研から戻られ、1年上に、西脇研の鳥居薫（現横国大）、加藤洋治（現東大）、越後亮三（現東工大）、同年に、橘研の塩冶震太郎（現IHI）、1年後輩に西脇研の田中宏明（東大本年逝去）、大中逸雄（現阪大）、内田研戸田三朗（現東北大）等々の諸先生が学生としておられ、又各大学にも同年代の現在丁度40代後半から50代前半になられている方々が沢山いた。

ところで筆者は大学院時代、沸騰関係の研究に興味を持ったが、内田先生からは、一色尚次先生主査の機械学会の沸騰熱伝達調査研究分科会、橘藤雄先生主査のバーンアウト分科会、原子力関係でSAFE Project 小委員会に実際の研究をすすめている関係もあり、代理として出席することが多かった。これらの会合での諸先生の議論は大変勉強になったし、他大学の大学院あるいは助手クラスの諸先生ともそこで知り合えた。例えば、東北大学の飯田嘉宏先生（現横国大）などはその頃からの友人であり、その他沢山の友人が出来た。当時基礎的な沸騰研究は、主として米国等の先行した研究を勉強しながら自分達の研究を進めるもので、一色先生の情熱には感銘を受けた。

ところで伝熱研究会の創成の話は本誌100号記念号に甲藤好郎先生が書いておられるが、30代半ばで機械学会の熱部門委員会委員長として前記中堅の先生方と共に伝熱研究者の全国組織化へ努力しておられた様子がよくわかる。この伝熱研究会は、2年間橘先生が副会長（当時は1人で事務担当のみ）を努められた後には内田先生が副会長として事務を担当しておられ、研究室のメンバーとして若干お手伝いをしたように記憶している。そんなわけで内田先生からは伝熱研究会に入るようすすめられた。伝熱研究会の研究交流と発展に果たす役割について諸先生のご苦勞にもかかわらず当時あまりわかっていず、（機械学会へは専攻へ進学した3年に無条件で入会したのに）薄い

「伝熱研究」の為に会費を払うということで「どんなメリットがあるのですか」と先生に不躰な質問をしたりした。そして、筆者のおぼろげな、しかし強烈な記憶として長い間残っていたことではあるが、ある立派な会場で若手の意見を聞かれたとき、「シンポジウムだけでなく、もっと若手にも役立つ何かをやってくれ」というようなことを発言し、壇上で森康夫先生が、確かに若手にとってシンポジウムだけだとメリットが少ないかもしれないと同意して下さったようなことがあった。今回の執筆にあたり伝熱研究を調べていて驚いたのは、この会場は、昭和41年4月の国立教育会館での第4期総会の時で、それも、出席者が、内田秀雄、武山斌郎、一色尚次、甲藤好郎、森康夫、国井大蔵、斉藤良平（日立）、小笠原光信、平田賢、千葉徳男のそうそうたる先生方と、事務担当の内田先生のカバン持ちとして出席した大学院博士3年になったばかりの筆者の11名であったということである。そして、学生であっても会員だからということでの様な大それた発言が許された雰囲気であったことである。

## 2. 同じ釜の飯

昭和41年9月の「伝熱研究」NO. 19に、始めて「寄書」の覧が設けられ、武山斌郎先生が担当された。そして、最初に指名を受けたのが、4月の総会で生意気なことを喋った筆者であった。その時書いたのが、「同じ釜の飯」であって、今回読み返してみても、大学院の学生が何ということをと若干恥しくなる。内容的に当時の心境がはっきりしない面もあるがこれらの背景には、筆者の沸騰分科会等での経験の影響が強く出ているようである。

第1の論点は、「我国では開発研究が少なく、目的がはっきりしていないので末梢的な研究となり易いこと」、第2に「研究者の層が薄いこと」、第3に研究者の層の薄さと関連するが、「同テーマの研究者が身近にいないので討論が不足し、一人よがりになり易いこと」などをあげ、若手を中心とした1週間程のサマースクールをやり徹底的討論を行い「同じ釜の飯」と「同じ趣味」を通し親しくなることが一番の早道であるとしている。欧米における開発指向と研究者層の厚さに対抗することを念願おている。当時としては、我国が米国に自動車、鉄鋼を含め何でもよいから追いつくなど夢のことにように考えられていた時代であるし、又、昭和39年に東京、大阪間に新幹線が走ったが、全国的にみると大変遅く、かつ金がかかり今はど容易に交流もできない時代であった。当時の中堅の先生方もその辺を考えて伝熱シンポジウムを企画されたのであろうが、学生としてはもう一寸深い交流が必要と感じたようである。

「伝熱研究」の翌号（昭和41年12月）に鳥居薫氏（当時東大）が第3回国際伝熱会議の内容を書き、欧米の研究者層の厚さに感心し、最後に、筆者の「同じ釜の飯」の提案に大賛成で、八王子に大学セミナーハウスもありますよということで締めくくられた。

平田賢先生（当時の関東研究グループ連絡幹事）には私ども近くでいろいろお世話になっていた関係もあり、これらのことを平田先生と話し合っているうち、活動家の先生のことで面白そうだと乗って下さり、幹事会に提案され、関東研究グループ担当の1回だけの試行、独立採算ということで第1回の伝熱セミナーが昭和42年7月29、30日に開催された。

## 3. 第1回八王子セミナー

平田先生を中心とした第1回セミナーはこのようなわけでわずかな準備期間で開催された。話題としては各分野で研究がすすめられている「比較的本質的な事項」ということで、強制対流でeddy diffusivity, 自然対流で層流、乱流遷移、物質移動で境界層の構造、ふく射で輝炎、沸騰で気泡の初生、二相流で流動様式とその遷移が選ばれた。そして話題提供は、20代後半から30代前半で研究を実際にすすめている人を中心に（独断と偏見）でお願いし、司会者は、中堅の先生方をお願いする方法がとられた。この第1回セミナーについては本誌NO. 25（昭和43年3月）に平田先生が総括しておられる。当時36～7才の平田先生が”若手グループ”とか”若手を中心にした自由な討論の場”ということばを使っておられるし、中堅の先生方もしばしば”若手”ということばを使われている。この当時の若手とは、大学院から30代前半を指していることがうかがい知れる。第1回セミナーでは宿泊施設のセミナーハウスは安かったが、東京から近いため（当時は山の中だったが現在は住宅開発が進んで近くまで住宅街となっている）東京から通う人が沢山いたり夜の懇親が不便であったりした。しかし、92名の参加者という大成功ですぐ第2回セミナーの開催が認められたようである。

#### 4. 第2回軽井沢セミナー（昭和43年7月26日～28日）

第2回セミナーは、一色尚次先生（当時船研）を準備委員長とし、関東連絡幹事の平田先生、それに、鳥居先生と大学院を出て船研へ行った筆者等がお手伝いして、軽井沢のグリーンホテルで行われた。議題は第1回と異なるものということで熱伝導、超臨界圧流体、凝縮、熱交換器がえられた。ここでは、若手に混じって何人かの中堅の先生方が話題提供者として入っておられる。このセミナーでの思い出としては、会場を前もって下見する余裕がなくパンフレットを頼りに企画を進めたこと、3日目のハイキング等の予定が雨の為、朝解散となり一色先生も帰られ、ホテルに払う金が足りず、一人でねばって負けてもらったこと、トータルで若干赤字になったが、後で一色先生が、こんなに立派なセミナーが出来たのだからそれ位伝熱研究会が負担するよと言っておられたこと、などである。

#### 5. 第3回八王子セミナー（昭和44年8月8日～10日）

第3回は慶応大の小茂鳥和生先生を準備委員長とし、再び八王子のセミナーハウスに戻って行われた。第1回の反省をふまえ、原則として全員宿泊するものとして費用の一本化をはかったこと、伝熱未来学という放談会が公式に夜のプログラムに入れられ一色、小茂鳥先生が司会をなさったこと、などである。今回の準備は小茂鳥先生以下慶大の先生方が中心になってやられたが、これまでの経験ということで、平田先生と筆者も若干お手伝いさせて頂いた。話題は相変化、物性値などのほか、当時高速炉開発に関連し関心が持たれていた「液体金属」や、「極限状態」「化学反応を伴う伝熱、非平衡熱力学」など新しい話題も取り入れられた。今回も86名という出席者で大学院学生の参加が31名と多かった。（この点は大学紛争が何等かの影響をしていたかもしれない。）

#### 6. その後のセミナーの思い出

筆者は第3回セミナーの1ヶ月後、1年間米国へ留学したため、隔年ごとに地方開催ということで行われた第4回の館山寺セミナーには出席できなかった。それ以後第5、7、9、回の関東研究グループ伝熱研究 Vol. 27, No. 107

一主催セミナーでは運営も若干お手伝いすることがあったと思うが、特に10回以後、各地区持ちまわりとなってからは、出席するたびに各地区の準備委員会の企画を楽しませて頂くのみであった。ただ関東地区にまわってきた第16回セミナー(昭和57年)は、安達勤先生を準備委員長として筑波研究学園都市の見学を中心に行ったので、この時は久しぶりに企画運営を実際に行った。

## 7. 終わりに

さて、22回続いた伝熱セミナーは何だったのであろうか。この間我国は、産業の各分野で世界第一となり、国内はもとより国際交流も容易に行えるようになった。伝熱でも、世界の中で最先端をいく分野がいくつかあらわれ、「米国はまだまだ底力がある」という評論を行う程に余裕が出てきたようである。筆者が20数年前書いた「同じ釜の飯」と「同じ趣味」のうち、前者はいろいろな機会がふえ、又後者は、(テニスだけであるが)セミナー、シンポ、学会などの折り、毎回有志から案内がくる程一般化するようになった。そんなわけで、あるいは(少なくとも当初の)セミナーの目的は十分果たし終えたと考える方がよいのかもしれない。

伝熱シンポジウムが、20数年前中堅で現在60代の先生方の伝熱研究に対する1つのシンボルであるとする、伝熱セミナーは、(伝熱シンポジウムと共に)現在40から50代前半の人達の伝熱研究の1つのシンボルであったかもしれない。そして、我国の伝熱は発展してきた。伝熱研究会員は40代が1つの山をなし、60代に一寸した山がある。後者はこれまで伝熱研究を進めてこられた先生方であり、前者は、筆者を含む弟子達である。だが、20代後半から30代前半の伝熱研究会員が少ないのが問題になっており、かつ、彼等のシンボリックなものは何なのだろう。

我国では、今後、いろいろな面で国際的視野で物を考え、かつ、研究も独自性、主体性を持ってすすめることが要求されるようになる。このような時、伝熱シンポジウムは相変わらず重要な役割を果たすと考えるが、これだけでよいのかどうか今後の伝熱研究の発展の課題と考える。国際会議の開催、国際ジャーナルへの寄与、そして国内でのシンポジウム、これだけで十分なのかもしれない。若干問題があるとすると研究開発における産官学の共同研究のあり方かもしれない。そしてこれらを今後すすめるのに期待されているのはどの年齢層なのだろうか。現在60代の先生方が30代後半から40代に使われた若い人とは20代後半から30代前半を指していたように思う。最近も先生方の文章に若い人という言葉がよくあるが、それは、我々40代後半から50代前半も含めてのことであろうか。それとも我々を大きく飛び越して20代から30代の人達であろうか。今後、国際化等難しい課題をかかえ各年代層の役割をどう分担し、30代の人々に新しい未来を切り開くよう努力してもらうにはどうしたらよいか、を考えていかねばならないし、又、これらの人達からの何等かの動きがあつてよいのかもしれない。

「学会や伝熱研究会に入ってどんなメリットがあるのですか」、最近、研究室の学生に学会加入を勧めるとこう聞かれる。20数年前自分が先生に言った言葉だから機械学会の「学生を入会させる手引」をもとに説明しても迫りに欠ける。新設であり日本人の博士課程の学生をまだ出していないということも原因ではあるが、こんなわけで、筆者の研究室からはまだ伝熱研究会への入会者はゼロである。

## 田中宏明先生の早逝を悼む

平田 賢（東京大学）

昭和63年2月19日、東京大学教授田中宏明先生が癌のため急逝された。日が経つにつれて先生が欠けたあとの空洞の大きさがひしひしと身に沁みてくる。東京大学も、伝熱学界も、真に学者らしい学者を失った。

田中先生の修士論文は、反応性気流の中に触媒のペレットを吊し、その温度を測るだけで、熱伝達と物質伝達の相似から、触媒の反応速度を正確に求めることが出来るというもので、AIChE Journalに発表され反響を呼んだ。これだけでも博士論文級の仕事であったが、先生の博士論文は、超臨界圧流体の管内乱流伝熱に関するもので、当時、壁温が擬臨界温度をとる近傍で熱伝達率が極大値を示す現象を“沸騰もどき”現象で説明しようとする立場が存在したのに対し、境界層内に擬臨界温度が存在するときに、流体の比熱のピークが乱流伝熱の増大に寄与することが主原因であることを、加熱・冷却の両方の実験を行って説明したもので、これも画期的な論文であった。大学院在学中に、独創的な仕事を2つもまとめてしまったのである。

東京大学の教官になられてからのお仕事もめざましかった。滴状凝縮では、液滴が伝熱面上で成長合体して行く過程の積分微分方程式を解いて、液滴径分布曲線にコブが出来ることを予測し、実験結果と見事な一致を見せたとし、乱流境界層では高下駄の歯のようなもので外層をかきおとしても、内層の準秩序的構造が強固にその特性を失わないことを示して世界の乱流研究者を驚かせた。得意の数学を駆使した理論解析と、透徹した洞察力に裏打ちされた無駄のない実験は、説得力に富み、「漫然と研究をする」ことに対する反省を強いられることが常であった。

かって研究室で編集した文集に大学院時代の先生が書かれた文章を抜粋しよう。

「近ごろ少々学問、広く言えば文化に対する畏敬の念が薄れて来たのではないかと思う。我々は環境に恵まれ、立派な先生方から指導を受け、本も手近に揃っていて、さして苦勞もせずに学問できる状態にある。普通にやっておればさしたる困難もなく、うまくやって行けるというような安易な気分が陥らぬでもない。

思うに現在の我々の生活は、近代科学の上に築かれたものであり、広く言えば、実に有史5000年を越えた先人の努力、文化文明の所産である。我々は、この文化を一部も欠けることなく、より一層充実させて未来に継承する責任があるし、過去に対してその義務を負っている。これを思うと、我々は学問するとき非常に畏敬の念を感じ、また研究するとき大きな使命感を覚えずにはいられまい。

私が子供のころは新聞をまたいだものならひどく叱られたし、本を読む姿勢が悪いとよく小言を言われた。私は物事に形から入るということは大変意味があることだと思っている。勉強する態度も例外ではない。」

まことに痛恨の一語に尽きる。田中宏明先生、安らかにやすみ下さい。

昭和63年9月15日

## IN MEMORY OF PROFESSOR HIROAKI TANAKA

My arrival in Japan to begin a Fulbright Professorship at the University of Tokyo in 1963 coincided with graduation ceremonies. Among the many people I met at that time were a number of graduates who were entering the master's degree program to study heat transfer. One of these graduates was Hiroaki Tanaka.

Although my initial contact was only an introduction, I became well acquainted with Hiroaki Tanaka in the following years. He began to distinguish himself as a graduate student under Professor Niichi Nishiwaki's guidance. As a teacher I can well appreciate Professor Nishiwaki's statement that he was fortunate in having had such competent graduate students as Hiroaki Tanaka.

Dr. Tanaka was very dedicated to his chosen field of heat transfer, and I was not surprised to learn of his appointment to the faculty of the University of Tokyo under Professor Tatsuhiro Ueda. He became a very valuable member of that Laboratory. He dedicated his life to teaching and research. His quiet manner along with his competence and efficiency quickly earned him the respect of his colleagues and the admiration of students. He was particularly effective in the guidance of graduate students because of his friendly and understanding attitude and sincere interest in their progress.

In 1979 Dr. Tanaka was awarded a grant to study abroad. I was personally honored when he wrote to me of his desire to be a visiting professor in the Department of Mechanical Engineering at the University of California at Davis. It was a pleasure to arrange for his appointment. I was proud to introduce him to my colleagues in the department and to friends in other universities. He was an outstanding representative of the Japanese Heat Transfer Community. At the time he was in Davis he had just completed a basic and comprehensive study of dropwise condensation. It was stimulating to talk with him about this and to work with him on related droplet distribution research.

Dr. Tanaka's ready and willing assumption of responsibility and his demonstrated record for independent research led to his selection to succeed Professor Ueda when he retired. The confidence of his colleagues was indicated by his early election as Department Chairman.

As we observe Hiroaki Tanaka's passing there is a tendency to speak of a promising career cut short. However, I see a life of activity -- one that was filled with enthusiasm and enjoyment and with accomplishments. He will be missed, but he has left a record of contributions and achievements which will keep our memory of him alive.

Warren H. Giedt, Professor Emeritus  
Department of Mechanical Engineering  
University of California, Davis.



## 田中宏明先生の思い出

丸山 茂夫 (東大工)

去る2月19日に田中宏明先生が亡くなってから早くも半年が過ぎたが、時が経つにつれ精神的な面でも研究の面でも失ったものが余りに大きいことをますます強く感じている今日この頃である。以下、先生の思い出を極めて私観的に述べさせて頂くことをお許し願いたい。

一昨年夏頃から先生にしては珍しく疲れ気味であるとか食べ物の好みが変わったとかと漏らしておられたが、その頃はおそらく学科主任の仕事等でお疲れなのだろうと軽く考えていた。昨年に入って検査を受けられたところ、肝臓が肥大しているとのことで2月末に急遽入院された。入院の前日には研究室のことを心配され、学年末ということもありおよそ一ヶ月分の予定を事細かに指示された。その後のおよそ一年間に渡る入院生活の間も、研究室のこと、当時博士課程3年であった私の学位論文のことや就職等についても種々気を配って頂いており、まさか学位記と辞令をお見せすることができなくなるとは思ってもよらなかった。

先生のご研究は、博士論文以来の乱流伝熱と壁面乱流の構造、滴径分布に関する理論に続く滴状凝縮熱伝達、先任の植田辰洋先生の流れを汲む沸騰伝熱などに渡る。これらの研究自身が先生の人柄を最もよく語っているように思うが、研究に関しては論文を参照して頂くとして、ここでは私から見た余り知られていない先生の側面を紹介したい。

私と田中先生との最初の出会いは、学部3年生の時の蒸気タービンの講義である。この講義は決して学生に人気のあるものではなかったようで、私自身もそのときにはほとんど冗談も言わない気難しそうな先生だなと漠然と感じたものであった。だいぶ後になってから、先生にこの印象を申し上げたところ、講義というのは学生と先生のいじめ合いまたは我慢比べであり、短時間に効率よく勉強しようと思ったら、講義を受ける方もする方もある程度の我慢が必要なのは当たり前であるとのことであった。先生の人に対する気配りの程と寛容さを知ると、講義中の気難しさは学問に対する謙虚さと真摯さの現れに他ならないことが分かる。実際、大学院の講義ともなると毎回半日以上時間をかけて準備をされていた先生の学問に対する姿勢と講義の有難みが学生の方にもよく伝わっていたように思う。大学院の講義で乱流の教科書 "A First Course in Turbulence" に沿って話されたときなどは、半年の講義枠内で半分しか終わらず、希望者に対してその後半年に渡って残り半分の講義を続けられたものである。

さて、私はおよそ5年間大学院生として先生の御指導を仰いだ訳であるが、指導者としての先生はまさに理想的であったように思う。先生の研究室での様子を思い付くままに並べてみたい。系の圧力を大気圧から50気圧まで変える強制・自然複合対流の実験装置を設計

しているときに、作動流体の窒素を循環させる方法について検討したことがある。2日間に渡る議論の最中に、研究室にあった新品の掃除機を先生自ら床に座り込んで分解しファンを調べられた。結局、大きめの掃除機用のファンが圧力容器内に封じ込められた。私の修士論文の追込みの頃、壁乱流のいわゆる対数領域に対して走行干渉板列先端による擾乱を与えてその影響を調べていたが、いくら実験条件を変えても乱流構造が極端に変化しているような測定結果は得られなかった。結果の慎重な検討と度重なる議論の末、干渉板列端を緩和領域から粘性底層まで近づけてみて、それでも壁乱流が維持されるなら、逆に構造の強固さについて検討しようと思案転換を示唆されたのである。結局、壁面乱流の強固さを浮かび上がらせる論文ができた。昨年夏頃、壁乱流の実験をしている時に先生が入院先の東大病院から車椅子で実験室にいらっしやう。その頃は特に体の調子が悪かったはずであるが、短時間だけとの約束で周囲の強い反対を押し切ってしまったのである。

研究以外の面において先生は自称「ぐうたら」であって、面倒くさがりであった。例えば、極端に出不精であり、海外に出かけたのは生涯2回のみ、国内でも東京を離れたのは年に3回の行事、伝熱シンポジウム、夏の研究室合宿と夏のご家族での旅行、を除くとほとんど皆無であった。これをもって先生は、Kantの時代と現代の環境の変化を考慮すれば、Kantと同程度であろうと自慢なさっていた。そして、今時、何もあちこち出歩かなくても研究に必要な情報は論文さえ読んでいれば十分に収集できるとおっしゃっていた。先生が時折、自分は何もしないでごろごろしているのが一番好きであるとおっしゃっていたが、実際にはごろごろするというのはどうもゆっくりと研究のことを考えることのようにであった。

ついでながら、先生は通勤や外出の時に荷物を持つのを嫌われ、実際ほとんど持たれなかった。通勤の場合は、本を一冊持つか手ぶらかのどちらかであり、3泊4日で伝熱シンポジウムに出かけるときも大きめのセカンドバッグ程度で済ませていた。もともと非常に慎重で準備がよかったので、この程度の「ぐうたら」をしても困ることは無かったようである。

ご趣味は季節の移り変わりを観察することとのことであり、明治神宮のあやめを毎年欠かさずご覧になっていた。また、研究室一同で千鳥ヶ淵の桜、根津神社のつつじ、不忍池の蓮などをよく見に出かけたものであった。花見といっても、先生はほとんどお酒を飲まれなかったもので、純粹に花と自然を観察し、昼食をとって帰るのがもっぱらであった。普段は季節がよくなると休みの度に庭の草むしりに追われていると冗談をおっしゃっていた。

先生が時々、「過去において決定したことや未来においても不可避なことについてよくよく考えたり心配したりすることは避け、その分、十分に反省し的確に将来に備えるべく計画すべきである」とおっしゃっていた。今、残された我々にできることは、先生の強い意志のいくらかでも引き継ぎ、真摯に学問と研究に取り組むことであると決意を新たにしているものである。

田中宏明先生のご冥福をお祈り致します。

International Seminar on Near-Wall Turbulence

京都大学工学部  
鈴木 健二郎

5月16日(月曜日)から5月20日(金曜日)までの5日間にわたって、ユーゴスラビアのズブロブニックで、International Seminar on Near-Wall Turbulence が開かれた。約50編の論文が9セッションに分かれて発表、ディスカッションされた。各セッションは、1編の特別講演と、コーヒープレーク後の5、6編の一般講演からなっていて、9セッションのそれぞれの内容は

1. LARGE EDDY AND FULL SIMULATION
2. EFFECTS OF EXTRA STRAINS AND FORCE FIELDS
3. COHERENT STRUCTURES
4. PRESSURE FLUCTUATIONS AND RELATED NEAR-WALL EFFECTS
5. INFORMATION DERIVABLE FROM CORRELATION MEASUREMENTS
6. INFORMATION DERIVABLE FROM HEAT TRANSFER DATA
7. ANALYTICAL THEORIES OF TURBULENCE
8. PRACTICAL PREDICTIONS BY TWO-EQUATION MODELS AND OTHER FAST METHODS
9. INSTRUMENTATION METHODS IN WALL TURBULENCE

であった。

発表論文はいずれも指名によったものであったので、この意味ではクローズされたセミナーであったが、参加はオープンであったので、ヨーロッパ各国、アメリカ、カナダ等からの一般参加があり、総計約100名あまりの参加者になった。日本からは、5編の論文発表があり、私の他に北海道工大の小橋先生、中部工大の菱田先生、名古屋工大の長野先生、京都大学の宇民先生と東京大学大学院生の黒田君、ならびにエルランゲン工科大学で博士学位取得のための研究をしている小尾君、あわせて7人が参加した。東京大学の笠木先生も出席予定であったが、所用で急に参加出来なくなったため、長野先生が代って発表をされた。

発表内容は、オリジナルなもの、またレビュー的なもの、いずれでもよい事になっていたため、全体的にややバラツキがあった。中には新鮮味が全く無いものや、国内の通常の講演会の要旨講演に近い内容のもの等も混じっていたりしたが、全体的にはかなり活発な論議が有った有意義なセミナーであったと思う。簡単な取りまとめをするのは困難であるが、私の受けた印象は次のようである。

初日のセッションでスタンフォード大学の P. Moin や NASA - Ames の S.K. Robinson が映写フィルムを見せ、多くの参加者の強い関心を買った。これは、直接数値シミュレーション (DNS) から得たデータベースの分析結果を、3次元的にグラフィック化して映写フィルムにまとめたものである。特に、グラフィックス手法が巧妙であったこともあって、最初は実際の中味以上の強い印象を与えたように思う。しかし、セッションが進み、乱れ構造と乱流の計算法について種々の議論が行われる間に、この映写フィルムに対するバイアスした受け取りかたはむしろ鎮静化した。たとえば、DNSと精力的に取り組んでいる J.H. Kimらによって、以前から“コヒーレント構造の主体は壁近傍のヘヤーピンボルテックスである”との指摘がなされている。この指摘は、これまでの実験的研究を主体としたコヒーレント構造に関する認識に、変革を迫るほどの大きな影響を与えているものである。しかし、この会議でも指摘されていたが、その一方ではヘヤーピンボルテックス自体が実験的にまだ十分に観察出来ていない事実がある。たとえば、このことなども、DNSの結果が興味深いものであるとしても、それを単純に過信することは避けるべきであるとする考えの根拠の一つとなっている。

現在の測定技術では、“壁乱れ3次元構造の時間変化挙動”を実験的に追求することは不可能である。唯一可能性を持つその検討手段として、私は直接数値シミュレーションに多大の関心を抱いている。しかし、それは応用計算には向いていないと言うのが私の年来の考えである。この会議でも、Kim自身が直接数値シミュレーションに対する初期の期待が過大過ぎたとする意見を表明し、またコヒーレント構造について特別講演をしたスタンフォード大学の Prof. Klein が、実際の応用にはモデルを用いた数値計算法が必要であることを強調していた。そもそも、モデルを用いた数値計算法について見ると、Bradshawらの論文から数えて約20年の歳月がたっている。今回、壁近傍乱れとは必ずしも直結しない面があるに拘らず、モデルを用いた数値計算のセッションが組まれたのも、かかる歴史的な背景があつてのことである。モデルを用いた数値計算法に対する見方が、1970年代初頭の熱気あふれた過大な期待から、10年を経ずして現実を直視した見方へ変わったように、直接数値シミュレーションに対する見方が、このセミナーを機会に過大なものから現実的なものへと変遷し始めたとすれば、それはこのセミナーの一つの大きな成果であったと思う。

このセミナーは、3年前に亡くなった Professor Zaric の追悼セミナーでもあったので、セミナーの合間を利用して簡単な追悼式が行われた。今回のセミナーに関連するものとして、1980年に今回と同じズプロブニックの Hotel Libertas で開催された Symposium on Heat and Mass Transfer and the Structure of Turbulence がある。その際の主宰者だった Professor Zaric から、前回に引き続くシンポジウムを計画中なので是非来るようにと誘われていた。残念なことに、彼は故人になってしまったが、この計画を引き継ぐことになった今回のセミナーに出席できて、個人的には大変感慨深いものがあった。

前回は、他の学会の続きで来たので、会議の後は日本に直行した。そのときは、南回りで帰国したら、近くを飛行機が飛んでいる真っ最中に、イラン-イラク戦争が勃発していたことを後で知って肝を冷やした。その故と言う訳ではなかったが、今回はセミナー後にサラエボ大学とベオグラードの Boris Kidric Institut を訪問し、北回りで帰国した。サラエボ大学では、車で送って呉れた Prof. Hanjalic はセミナーの翌日から海外出張してしまったが、久しぶりに Prof. Ganic を訪ねて旧交を温め、研究室を見学した。また以前からある大学間協定の関係で、それぞれ短時間であったが数人の方とも御会いし、大変有意義であった。ベオグラードでは、Prof. Afgan は Minsk の会議に出席していて、やはり不在であった。Prof. Afgan からは訪問日時には不在だからと、ズプロブニックですでに御好意を受けた後であったのに、京都大学の学生であったサーシャ君をはじめ多数の方々に、かゆいところに手の届く扱いを受け、大変恐縮した。残念と言えば、朝の散歩以外には一人で出歩くこともままならなかったことぐらいである。

ユーゴスラビアでは、昼食をご馳走になると、大抵時刻が午後3時を回っており、しかもアルコールの量が比較的多いのに驚いた。聞くところによると、職場によって人々は朝の7時に仕事を始め、仕事が一段落した9時か10時頃に朝食を取り、午後3時には仕事を終わって帰路に着くそうである。まだ日の高い帰宅後の時間は、家族でショッピング等を楽しんだり、果樹園などでの仕事に精を出すそうである。これがあけっぴろげで、ひとなつこく、陽気で、親切なユーゴスラビア人の性格の源であるのか、あるいはその結果なのか私には判らないが、あくせくとした日本の生活とは、ひと味もふた味も違う生活習慣に、やや複雑な思いにかられながら帰国した。

第4回 International Symposium on Applications of Laser Anemometry to  
Fluid Mechanics/ Lisbonに参加して

前田 昌信 慶応義塾大学・理工学部

Laser Anemometry/Lisbonのシンポジウムは1982年に始まり、2年毎に84、86、88年と第4回の国際シンポジウムを迎えた。Laser AnemometryとしたのはLDF法、スペックル法などDoppler法以外のレーザを用いた計測法の発展が期待される事を含んでの期待があったからである。Lisbonでシンポジウムをおこなうようになる以前の流れとしてはDISA(現在のDANTEC、Kopenhagen)の支援で1975年にコペンハーゲン、そして1978年にマルセイユとボルチモアでLDA Symposiumが催され、そのProceedingsはLDVの貴重な手引書として役立つ。複数の計測器の企業の参加も考慮されたのであろう、インペリアルカレッジのWhitelawとその弟子といつかその仲間、Durst、Duraó、AdrianそしてMishinaらが音頭とりとなってDuraóの本拠Lisbonで開催される事になった。ポルトガル式といつかラテン系の特徴と言おうか、至極のんびりしたもので、始るまでどうなるか分からない有様で日本の諸先生がたを、また、ドイツの若いDrの連中をやきもきさせた。日本を指してFar eastと言うならば、Lisbonは我々に取ってFar westである。時間は掛るが行ってしまうとなかなかのんびりしてよい。ヨーロッパの研究者にとっても日差しの明るいポルトガルは我々にとっての沖繩あたりの距離と位置関係に相当するのだろうか、集りやすいようである。米国、カナダ東海岸からもそこそこの時間で飛んで来られるので彼等も抵抗なく毎回現れる。主催者は東洋、日本からの参加に気を配ってくれる。ヨーロッパ遠いのに、また、ひと飛で大変なのによく来たと労ってくれた。始めて見ればそれなりの成果が出るから不思議なものである。まあ、頼りなさそうなだけ皆が協力しなくてはと思うのだろうかクレームもなく、和気あいあいとしている。彼の地はヨーロッパニックスと言われる様に経済の発展に力を入れているとかそのためインフレであると聞いたが外貨を持つ者にとっては相変わらず幸せになれる処のようである。また、かつての栄光を取戻そうとするかの様に市がアカデミックなシンポジウムを支援しているようで、比較的低廉な参加費で目一杯楽しむことができる。外国からの支援ではCommission of the European CommunitiesそしてEuropean Research Office; United States Army Navy and Air Force Departmentsと言うところがおこなっている。最近、国策で異常に高額な参加費でシンポジウムを開催し、外貨を稼ごうとする手あいが見られるようになってきた今日、非常に良心的な会議の一つにあげられる。(シンポジウムは採択がきまってからあとで参加費用の提示が来てあっと驚くことがある。)

初回から100編以上の発表を集め、成功裏に終わった事から自米二年毎にLisbonで開く事になった。一回、二回の後ではまた二年後もLisbonで開きますというアナウンスメントがあったがそれ以降は特に広告はなく、参加者も当然の様に、ではまた二年後、と言って別れて行くようになった。第四回を迎えた1988年は、発表申込が180件余に上り、それを120件に絞った程である。後に出版する

ハードバンドの単行本"Application of Laser Anemometry to Fluid Mechanics"はその中から30ないし40編を選んで編集したものである。もちろん、単行本に採択されなかった論文もなかなかのアイデアで、これからの仕事へのヒントを与えてくれる論文があり、むしろ、Proceedings が我々にとって座右の書になっている。

セッションは2室平行に行なわれる。そのテーマ名を挙げると

FREE FLOWS	WHOLE FIELD VELOCIMETRY I, II
SEPARATED FLOWS	TWO-PHASE FLOW I, II, III
BOUNDARY LAYERS I, II	TWO PHASE FLOW INSTRUMENTATION I, II
COMBUSTION I, II	FLOW VISUALIZATION
ROTATING MACHINERY I, II	OPTICAL SYSTEMS I, II,
CONFINED FLOWS I, II	SIGNAL PROCESSING I, II
AERODYNAMICS	OPEN FORUM
NEW DEVELOPMENTS IN COMMERCIAL LASER ANEMOMETRY SYSTEMS & EXHIBITION	

である。会議の性格上技術的な対象に興味が集まる傾向は否めないが、それだけにかえて広い範囲の応用の分野で非接触測定法でなんとかデータを得たいとする研究者達が集って来ているので討論は活発におこなわれ、伝熱シンポジウム海外版と言った雰囲気がある。セッションの合間にはすべて飲みほうだいのコーヒブレイクがあり、セッションの余韻を満喫する。ノウハウの交換、探り合いなどごちらの言葉の不自由さを理由に逃回ってはいられない。というのは、ここまでなくても・・・と思うぐらい毎日晚御飯がでるので、またまた夜もつかまるという次第だからである。まずはその時は同伴の奥様がたと親しくお話しすることになっているので難しい話は翌日の休み時間にしてもらおう。ほとんど全員が最後の日まで会場にうろうろしているという会議なので、逆に当方もこれからの方向やテクニックを確かめるには同じ話をあちこちでしながら考え方を整理して行ける便利さがある。3回も、4回も同じ処ですと大部分の人は観光にはあまり興味がなくなるので会議に集中できるのかもしれない。流体の会議や伝熱の会議では恐らく別のセッションになりお近付きになれなかったような人々と、また、物理、電気、エンジンなどの専門家とも、計測器メーカーのスタッフとも流体の話題を中に知り合え、その後の付き合いの幅が広がる楽しさがある。

1回から2回にかけては光ファイバの利用についてかなり、しのぎをけずるという光景が見られたが、今回コンパクト化に関しては半導体レーザとアバランシェダイオードの組合せによるLDAシステムを組む方法の先陣争いの芽を見てとった。なかには電池で動くポケットに入るLDAというRoyal Lader EstablishmentのDr. Brawnが持出したものもあった。ファイバもそうだったが、ダイオード類も日本製を使っているのを見て、内心頼もしく思うと同時に日本のメーカーさん頑張ってくださいとってしまった。

ここ数年TWO-PHASE FLOWについての感心が高まっている。散乱強度による粒径弁別法はそれな

りに確立された感があるが、粒子濃度の高いディーゼルや塗装の噴霧流、窒素雰囲気中で熔銑を噴霧して板を作る方法の基礎研究や乱流せん断層における粒子の挙動など物理的な興味に対して答えるべく Doppler-Phase Shifting による粒径、速度の同時測定が今回のシンポジウムの最大のトピックスの一つであった。受光系には角度をつけた二個の光電素子を付けなければならないが、光学系は LDA そのものをつかえ、簡単である。今回の話題の中心は phase のずれを測る処理の方法であった。従来のカウンター法によるもの、改良高速化したトランジェントメモリ法 (FFT 使用) さらに精度は劣るもの的高速、簡便を唄ったコバリアンス法等の話に花が咲いた。きちんとしたデータを提示した発表はまだ二、三件であったが、二年後の会議には測定結果、ならびにその内容についての論議がなされることになるだろう。

レーザによる流速測定がメインテーマであることから、流れ場は腕が見せられる複雑な流れ場を取扱った例が多く、燃焼を伴う流れ、往復エンジン、ロータリエンジン内の流れ、二相流、回転機内の流れ、はく離再循環流を伴う流れが取上げられている。乱流に関しては高次の項を取扱うに未だ細心の詰めを行なう必要があることを知っており一部を除いて自信のあるデータを出して来ない。関心がないわけではないが、まだ、頭をまわす余裕が無いといったところだろうか、乱流シンポジウムのようなのではない。むしろ、LDA の測定で弱かった時系列処理の解決に力が注がれており、それからと言うことのようにである。従来のいずれの処理器もデータのドロップが多く、気を付けないとあなた任せのデータ処理になっていた場合があり、まず、信号が劣化していても確実な処理をし、そして次第に処理速度を上げてゆくと言うアプローチで開発が進んでいる。それが、DANTEC の BSA になって現れた。しかし、まだ、高価なこと、扱いをもっと簡単にできないかという模索が続いている。そのような訳で、かなりの部分をパーソナルコンピュータにまかせて急ぎの処理は高速専用コンピュータチップを用いた DSP ボードを動かす手法が簡便で、低廉であり、注目された。一方、カウンタタイプの処理器を改良してデータレートを上げることへの見直しの動きがあるのはおもしろい。信号を検知する数居値が問題になるように様になったのも径の異なる粒子からの信号を意識し始めたからに他ならない。Durst がセンサーはアバランシェダイオードに限るといって自分の関連する会社の製品を宣伝するので、ホトマルの使い方の悪い奴が言う事だなど反論を受けていたが、これも大きな粒子からの散乱光でも受けられるダイナミックレンジを頭に置いた発言であった。

日本国からの参加者は阪大：中谷、京大：鈴木、関大：大場、東海大：浅沼、円能寺、群大：小保方の諸先生、名工試：竹尾氏、若手では本塾菱田講師、大学院：安藤君、ガッツの神戸大：池田君であった。会場での討論もさりながら、昼食には出遅れてすいたところに入ったはいいが、現地語しか通じないレストランで、食事を取るのに奮戦をした楽しい思い出も残した。ポルトガルが日本に影響を与えたのかその逆かは分らないが、食べ物是我々に抵抗なく美味しいと言える。

会議の内容では伝熱そのものに直接関係する演題は少ないと思うが、対流関連で面白いものがある。諸兄も一度参加されてはいかかかとお誘いする次第である。



## 1. ISHTEEC会議とは

ISHTEECはInternational Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation の略称で去る8月2日から5日までの3日間に渡り中国広州の華南工科学院 (South China University of Technology)<sup>(主)</sup>で開催された。

この会議の名称を中国語で記述すると「国際強化傳熱興節技術會議」ということであって  
a) 伝熱促進の為の種々の方策、例えば单相流に限らず多相流に対するこの目的の為の伝熱面  
の問題、電場や磁場の働きを利用した伝熱促進、吸い込みもしくは吹き出しの付加といった種  
々の方法について。

-----  
今回、会場となった華南工科学院は広州市の郊外に位置し、中国の技術系大学を代表する大学の一つである。敷地面積は200ヘクタール、建物の延べ面積は470,000㎡は下らないと言われ、キャンパス内には池や丘を配して、いかにも中国風の雰囲気を持たせている大学である。学生数13,000人、その内学部学生は9,000人、修士・博士課程に学ぶ学生は1,000人と言われ、香港やマカオなどを含め、中国各地から多くの学生を集めている。



会議場に通じる建物の正面玄関付近

もう一つは

b) ヒートポンプや冷凍機、それに高性能キルン、加えて排熱の有効利用、蓄エネルギー、熱交換機の腐食やフォーリング問題などエネルギーをより有効に利用するための直接的、間接的種々の問題について。

このような2つの分野についての非常に広い範囲の問題を技術的かつ理論的な面からの意見交換、情報交換の場を提供する会議である。今回は約110名の中国人、日本人も含めたそれ以外の国からの出席約36名の出席をみている。

## 2. 会議の運営・構成

会議の初日、ここでも型通りと言おうか8時半より開会式を皮切りに会議が始められた。会議運営委員長の挨拶の後、組織委員会から簡単なコメントがあった。引き続き次の3氏による特別講演

a) Energy Problems in the Chemical and its Allied Industries in China and Corresponding Research Work in South China

Songjiu Deng (South China Univ. of Tech. China)

b) The Impact of Heat Transfer Enhancement on Energy Conservation

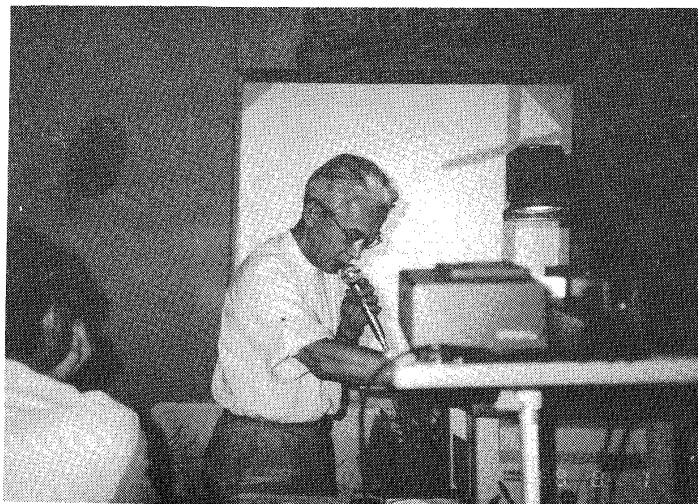
A.E. Bergles (Rensselaer Polytechnic Institute, U.S.A)

c) Condensation of NARB's inside a Horizontal Tube

Tetsu Fujii (Kyusyu University, Japan)

があり何れもエネルギー問題ならびに伝熱の問題についての大変有益なものであった。

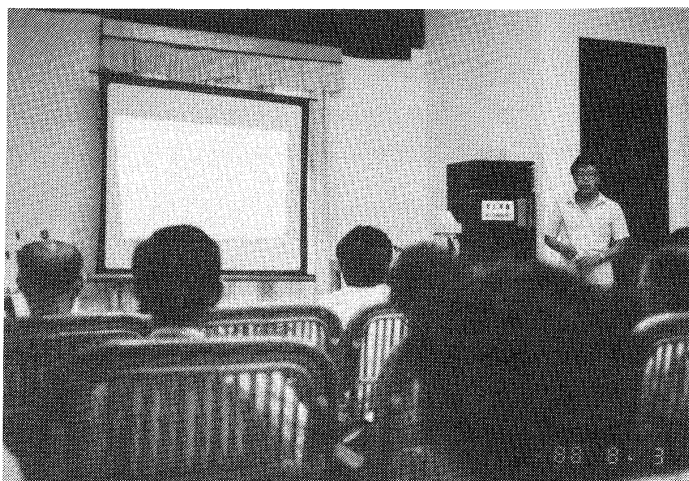
その後、若干の休憩時間をはさんで会場を3会場に移し、それぞれのテーマによる研究発表が行われた。



特別講演の一場面

- ▲ セッション1は主として、单相流ならびに伝熱促進技術にまつわるテーマを扱ったセッションで最初の日は13論文、2日目は21論文、3日目は11論文の計45論文の発表が行われた。
- ▲ セッション2では二相流ならびに伝熱促進技術を主題とし、大会1日目は14論文、2日目は22論文、3日目は13論文の計49論文の発表が為されている。
- ▲ セッション3での主題は省エネルギー技術、エネルギー利用解析評価などで3日間で43の論文が発表された。1日目は14論文、2日目は21論文、3日目は8論文であった。

さて、筆者の発表はセッション3であったこともあって、主としてこの会を中心に出席した。そこで、ここで受けた印象を中心にその一端を述べたいと思うが、各論文発表に与えられた時間は討議も含めて20分間であった。しかし、中には与えられた時間を大幅に超過する発表があり、



論文発表の一角 (Session 2 会場)

また、会場の空調、扇風機、それにOHPやスライドプロジェクターの使用で過負荷による一時的な停電などで少なからず気をませる一幕もあった。しかし、中には発表をキャンセルした論文もあって全体としてはほぼ時間通りに発表が終了するという如何にも中国らしい会の運び方であった。

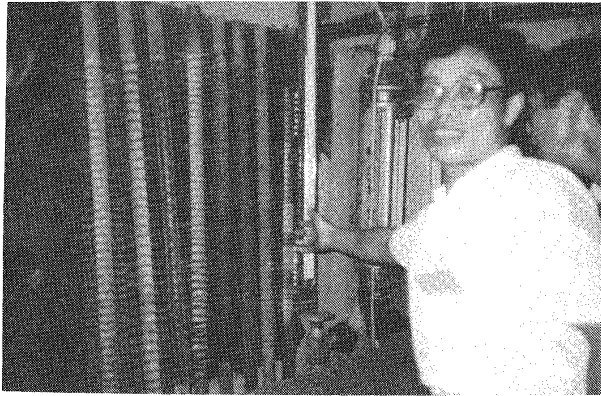
このセッションではヒートポンプに関係した論文発表が一番多くて12~13件位はあったものと記憶している。我が国でもエネルギーの有効利用を考えると、この分野への関心はなお高いものがあるが、この傾向はここでも見ることができる。次に直接的もしくは間接的にしろ熱交換器に関係した研究発表、それに蓄熱も含めた蓄エネルギーに関係したものも少なからず見受けられた。発表もその内容をよく整理し、要領よく話す発表者も少なからず見られた。とは言え、中にはProceedingの原稿をそのままOHPに写してそれを棒読みする発表者もあって、文字も小さく見にくいこと、それに予稿集といったものも手元のない事とも合いまって非常に理解しにくいものも見られた。しかし、何れプロシーディングも発行される予定と聞いておりますのでそのへんはある程度カバーできるものと期待される。

何れにしろ、こうした面で今後、ある程度は改善を図らねばならない問題も見られたが

おおよそ4年前、中国上海市で行われた第2回国際スターリングエンジン会議の状況から比べれば会の運営は良くなってきているものと感ぜられ、こうした会議が更に重ねられる事で益々良くなって行くものと期待される。しかし中国人スタッフの方々の我々外国人に対する種々な面での気の配りようは何時の場合も大変なもので本当に頭の下がる思いがする。この思いは私のみでは多分ないと思われるがこの紙面を借りて改めて感謝の意を表したいと思う。

論文発表を終えた8月4日の午後には同大学敷地内にある化学工程研究所の見学が催された。そこでは熱交換器用伝熱管にまつわる研究や管内流れを乱すエレメントの研究、フロンガスの凝縮に関する研究などを見ることができた。総じて研究のやり方などを含めて我が国でのそれらと比較するとき大雑把な印象を受け、用いている測定器なども必ずしも充分とはいえない難いものであったが、説明者からは一生懸命に研究をしている感じを受け止めることができた。

その日の夜は会場を広州でも有数のレストランとおぼしき広州酒家 ( GUANGZHOU RES-



TAURANT ) に移して、なごやかなうちにも盛大に Dinner Party が催された。知人同志が一つのテーブルを囲むことがない様、各テーブルには外国人も交えて中国の研究者らと話ができるよう席があらかじめ決められたので、より広くいろいろな国の人達と親睦を深めることができた。

次々と運ばれてくる中国料理も、中国に足を踏み入れてから4日目ともなれば、若干飽きてくる頃であるが、それでも酒を酌み交わしつつ話はずんでくると、自然と食も進んで、終わってみるとよくもこれだけ食物を腹に詰め込んだものだ改めて変なところで感心させられるものであった。

何れにしろ、こうした会議に参加することができたことは筆者のよい思い出の一つになることは間違いないさそうである。



The Second International Symposium on Heat Transfer (北京) に出席して

藤 田 秀 臣 (名大工)

今年の夏、中国で開催された伝熱関係の二つの国際シンポジウムに出席した。一つは8月の第1週に広州で開かれた International Symposium on Heat Transfer Enhancement and Energy Conservation であり、いま一つは、翌週の8月9日から11日まで北京で開かれた The Second International Symposium on Heat Transfer である。出発を間近にひかえた頃、編集委員長の宮本政英先生より、北京で開かれるシンポジウムの参加報告を書くようにとのご依頼を受けた。このところ中国では数多くの学会が開催されており、すでに多くの方が出席されているので、私などがいまさらの感もなくはないが、プログラムにしたがって会の概要を報告し、若干の感想を述べて責めをはたさせて頂くことにする。

北京のシンポジウムは、上述のように今回が第2回である。First Announcement and Call for Paper によれば、第1回は3年前の1985年に同じ清華大学において開催され、成功裡に終わったその閉会式の席上、今回の開催が決定されたとある。出席された先生方のお話では、気候の良い秋の開催であったそうであるが、今回は夏の真っ盛りで、しかも今年の北京は異常気象とかで、亜熱帯に属する広州に勝るとも劣らない程の蒸し暑さのなかでの開催となった。

Final Program によれば、今回のシンポジウムの International Committee は、清華大学の Bu-Xuan Wang 教授を Chairman として、他に5カ国 (CHINA, FRG, JAPAN, USA, USSR) 12名のメンバーで構成されており、我国からは故水科篤郎先生と棚沢一郎先生が名を連ねておられる。水科先生は去る2月に開催を待たずに他界されたが、開会式において Chairman の Wang 教授が、またレセプションの席では荻野文丸先生が、それぞれ哀悼の意を表された。慎んでご冥福をお祈り申し上げます。

第1日の開会式のあと、第2、3日の朝の約1時間半、それぞれ2件ずつ、表1のような招待講演が行われた。棚沢先生は、チョクラルスキー法による単結晶成長時に現れる周期的対流現象について、可視化実験の結果と画像処理された数値解析の結果を表した美しいカラームービーを交えて講演された。中国では、講演会場を暗くすることを好まないのか、あるいは不鮮明な映像も気にならないのか、これは広州でもそうであったが、いずれにせよ室が十分暗くないため、折角の映像が鮮明に映写されず残念に思った。

一般の講演論文は118件あり、著者の所属は14カ国に及んでいる。近年の国際交流の活

発さを反映して、著者が複数国にわたっている論文も多く13件を数えた。留学生の場合には、プログラム上の所属は留学先になっているので、実質的にその数はさらに多いといえる。このような趨勢のもとでは、国別の発表論文数を掲げることはあまり意味がないかもしれないが、第1著者の所属によって数えた結果を表2に示す。日本の研究者が関与している論文は表のほかに3件あり、合計20件であった。

これらの論文は、招待講演のあと夕刻まで、4室に分かれて3日間にわたって発表された。講演時間は1件につき討論も含めて20分と定められていたが、時間についてはかなり鷹揚であった。しかし、大抵ほぼ定刻には終わっていたようである。これは欠席者が少なからずあるということによる。その際、順次繰り上げて進行するため、まだ予定時刻になっていない講演者が来室していないことも起り得るわけで、最後の日のセッションでは、前日の予定者が張出しの形で講演することもあった。このあたりの運営の仕方については、シンポジウムの目的自体にも関係することであり、改善が望まれる。

投稿論文の分野は、伝熱工学のほとんど全領域にわたっているが、強制対流が約1/3と最も多く、二相流、沸騰、自然対流の順に続く。中国からの論文も、強制対流に関するものが同じく約1/3と目立つほかは各分野に万遍なく投稿されている。

本シンポジウムの Proceedings は、第1回同様、米国の Hemisphere から出版されるこのことであるが、それとは別に同じ原稿を複写合本した2分冊からなる Preprints が参

表1 招待講演

1. "ADVANCES IN THERMOCAPILLARY-DRIVEN TRANSPORT PHENOMENA IN LIQUIDS WITH SOLIDIFICATION", W. J. Yang and Y. J. Su, Univ. of Michigan, Michigan (USA)
2. "HEAT AND FLUID FLOW DURING CRYSTAL GROWTH FROM MELT", I. Tanasawa, Univ. of Tokyo, Tokyo (JAPAN)
3. "HEAT AND MASS TRANSFER IN UNSATURATED WET POROUS MEDIA", B. X. Wang, Z. H. Fang and W. P. Yu, Tsinghua Univ., Beijing (CHINA)
4. "INVESTIGATION OF INNER HEAT AND MASS EXCHANGE PROCESSES UNDER SPRAY DRYING" A. A. Dolinsky, Institute of Eng. Thermophysics, Kiev (USSR)
5. "ADVANCES IN OPTICAL INTERFEROMETRY FOR COMBINED HEAT AND MASS TRANSFER AND FOR TWO-PHASE FLOW", F. Mayinger, Tech. Univ. of Munich, Munich (FRG)
6. "THE ROLE OF NUCLEATION IN BOILING ON TUBE BUNDLES", K. Cornwell, Heriot Watt Univ., Edinburgh (UK)

表2 一般講演論文の国別件数(第1著者による)

国名	論文数	国名	論文数	国名	論文数
AUSTRALIA	1	INDIA	4	UK	1
CANADA	4	ITALY	3	USA	9
CHINA	55	JAPAN	17	USSR	8
FRANCE	3	KOREA	3	YUGOSLAVIA	-
FRG	0	POLAND	1		

加者に配布された。熱伝導、自然対流、・・・のタイトルのもとに関連論文がまとめられているのだが、その順番はプログラムの順序と一致しておらず、索引もなく、目次も第1分冊にあるだけで、目指す論文を見付けるのに大変骨が折れ、少なくとも会場での利用には非常に不便であった。折角の労作だけに、いまして工夫をしていただければと残念に思った。ただ、Preprints が手元にあると講演中にそれを読むことになり、講演を直接耳で聴き、理解しようとしなくなる、とのご意見の方もあり、なるほどとも思った。しかし、hearing の苦手な私には、Preprints をながめることも有益ではあった。

会場は清華大学の Main Building の2階にあり、開会式や招待講演が行われた第4室は間口の広い立派な室で、他の3室は40~50人用の小じんまりした室であった。開会式、招待講演、閉会式はいずれも大勢の出席があり盛会であったが、4室に分かれて行われた一般の講演については、常に盛会とはいかなかったようである。私は主として強制対流や二相流のセッションに出席していたが、多いときには30人程度と賑やかであったが、3日めの午後などは10人程度に減って、途中で室を出るのが気がひけて最後まで出席したような有様であった。質問は各講演に対し平均2件ぐらいあり、中国の研究者が他国の研究に対してとくに熱心に質問する傾向がみられた。なかには言葉のもどかしさから、"May I ask him in Chinese?" と座長にことわり、笑いを誘う一幕もあったが、単純には笑えないような心境でもあった。

レセプションでのスピーチで、英国の K. Cornwell 教授が「20世紀は米国の世紀であったが、21世紀は中国の世紀となるであろう」と述べておられたが、それはともかくとしても、シンポジウムを運営している人達はもちろん、参加している人達も含めて中国の若い研究者の非常に熱心で積極的な姿勢には、気持ちの良い緊張感のようなものが感じられた。この、国をあげての積極姿勢をみるにつけ、中国の今後の進展は疑うべくもなく、我々にとっても脅威的存在となるであろう。

前にも述べたように本シンポジウムは清華大学で開催されたが、出席者は学内の Guest House と近く(?)の Jade Palace Hotel に分かれて宿泊した。いずれも都心までは遠く、タクシー以外には手軽に利用できる交通機関もなさそうで、個人で気軽に町にでるといわけにはいかない。主催者もそのあたりを配慮されたのか、2日目の夜は都心の劇場へ雑技の見物、シンポジウムが終ったあとのバンケットは頤和園内のレストランで宮廷料理と趣向が凝らされていた。

閉会式はバンケットに先立って11日の午後に行われたが、ミシガン大学の W. J. Yang 教授による本シンポジウムのレビュー、C. L. Tien 教授の大演説などののち、Chairman の Wang 教授が閉会の辞を述べられ、次回、第3回シンポジウムを4年後の1992年に開催する旨宣言された。

## 1. まえがき

室内火災の初期においては、床や壁などの内装材や家具などの可燃物（その大部分は高分子固体）への燃え広がりが、火災の成長速度を決める重要な要素となっている。この燃え広がりいわゆる固体表面上の火炎伝ばの現象は、雰囲気酸素濃度や火災回りの流速によってもその機構は異なるようであるが<sup>(1)・(2)</sup>、通常の空気中での火災の伝ば速度（燃え広がり速度）は火災から未燃料部への伝熱速度に支配されている<sup>(3)</sup>。未燃料部への伝熱経路は、もちろん固体の大きさや燃え広がる方向によっても異なる<sup>(4)</sup>。例えば、薄い固体の下方燃え広がりでは火災からの放射よりも気相での対流が支配的な伝熱経路であり、これについては研究者の間で異論はない。しかし下方燃え広がりでも、熱的に厚い固体では未燃料部への伝熱がおもに固相内熱伝導によると、Fernandez-Pelloら<sup>(5)</sup>により報告された。当初この結論については柘植のコメント<sup>(5)</sup>にあるように少なからず疑問が残ったが、彼らがPMMA（ポリメチルメタクリレート）の内部に細い熱電対を多数埋め込み、温度測定の結果から導いた結論であったことや、その後もこれを支持する報告<sup>(6)</sup>がなされたこともあり、この問題はあいまいさを含んだまま、定着しつつあるかに見えた。

熱電対による温度測定の空間的分解能は、埋め込まれた熱電対の数で決まるから、それ程高くはなく進行する火炎近傍の燃料表面近くの薄い温度境界層内を熱電対で精度よく測定するのは非常に難しい。最近、著者はPMMAのような透明な固体内の温度分布測定にホログラフィ干渉法を応用している<sup>(7)</sup>。この方法の特徴は温度分布を高い空間分解能で測定できること、試料の光学的質を必要としないこと、にある。本稿では、まず厚いPMMAの垂直下方燃え広がり時の固相内温度と熱流束の分布の結果<sup>(8)</sup>から、これまで疑問が残っていた未燃料部への伝熱経路を再検討する。さらに燃え広がり方向を垂直下方から垂直上方まで変化させたときの伝熱経路の結果<sup>(9)</sup>も踏まえて、厚い固体の火炎伝ばの機構について述べる。

## 2. ホログラフィ干渉法による固相内温度分布測定

プラスチックなどの固体が加熱されると、温度変化に伴う屈折率の変化に加え、熱膨張によっても光学的長さが変化する。これらによる加熱前と加熱後の光学的長さの差が、干渉縞となって現れる。干渉縞の縞次数 $N$ と温度の関係は次式で表せる〔詳細は文献(7)〕。



$$B \int_{T_0}^T (dn_p/dT) dT + \alpha B (T - T_0) \left[ \int_{T_0}^T (dn_p/dT) dT + n_{p\infty} - n_{a\infty} \right] - \lambda(2N - 1)/2 \quad (1)$$

ここで、Bは試料の幅、 $dn_p/dT$ は屈折率の温度係数、 $\alpha$ は熱膨張係数、 $n_p$ は試料の屈折率、 $n_a$ は空気の屈折率、 $\lambda$ は光源の波長である。また、上式の左辺第1項は屈折率の変化に伴う光学的長さの変化を、左辺第2項は熱膨張に伴う光学的長さの変化を表している。左辺第2項で、 $\int_{T_0}^T (dn_p/dT) dT$ は $(n_{p\infty} - n_{a\infty})$ に比べて十分小さい。また $dn_p/dT$ と $\alpha$ が温度に依存しない場合は(1)式は次のように簡略化される。

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{\lambda(2N - 1)}{2B \left\{ \frac{dn_p}{dT} + \alpha(n_{p\infty} - n_{a\infty}) \right\}} \quad (2)$$

PMMAの屈折率の温度係数と熱膨張係数のデータについては、これまでもいくつか報告されている<sup>(10)・(11)</sup>。しかしPMMAのような高分子では、ガラス転移(glass transition PMMAでは約105°C)がありそれ以上の温度に対する正確なデータは現時点では見あたらない。そこで、PMMA試料の表面に取り付けた線径25 $\mu$ mのCA熱電対による測定温度をガラス転移温度以上の干渉縞の参照温度とした。なお、熱電対は通電して加熱し、PMMAの表面に圧着して取り付けている。

PMMAの温度変化に対する屈折率の変化は気体のそれに比べてずっと大きく、わずかな温度差で干渉縞が現れる。温度勾配の急な場での測定ではたくさんの干渉縞が現れるから、解像を容易にするのに(2)式からもわかるように光路長さ(試料のレーザー通過方向の幅)を小さくすることが望まれる。一方で、本測定が試料の幅方向に沿っての屈折率変化の積分値に基づいているから、伝ばする火炎を幅方向に二次元に保つのに、ある程度幅を広くする必要がある。この相反する条件をクリアするのに、図1で示すように、装置を工夫した。PMMA試料の両側にわずかなすき間を介して薄いクオーツ板が設けられている。試料とクオーツ板とのすき間を消炎距離(0.15~0.17cm)に保ち、火炎の側面への回り込みをおさえて二次元的な火炎を実現した。なお、クオーツ板は屈折率の温度係数と熱膨張係数がPMMAのそれに比べてけた違いに小さいこと、板厚が薄いこと、のため干渉縞に与える影響は十分小さい。

図2に、ホログラフィ干渉計の光学系を示す。光源は5mWのHe-Neガスレーザーで、ビームスプリッターにはハーフミラーを使用している。ホログラムの記録は、定常の火炎伝ばに対して二重露光法で、垂直上方への非定常な火炎伝ばに対しては実時間法で行った【詳細は文献(8)】。一連の実験に使用したPMMA試料は、Lucite L(du Pont社製)で、幅0.32, 0.47, 1.0, 2.5cm, 厚さ2.5cm, 長さ15, 30cmである。垂直下方への火炎の伝ば速度は、それぞれ幅0.32cmに対して $5.8 \times 10^{-3}$ cm/s, 0.47cmに対して $5.5 \times 10^{-3}$ cm/s, 1cm以上では $5.0 \times 10^{-3}$ cm/sであり、これらの値は十分幅の広い試料のそれに近い値<sup>(12)</sup>である。また、火炎の先端も幅方向にほぼ一様となり、図1で示した装置で二次元性が保たれたものと言える。

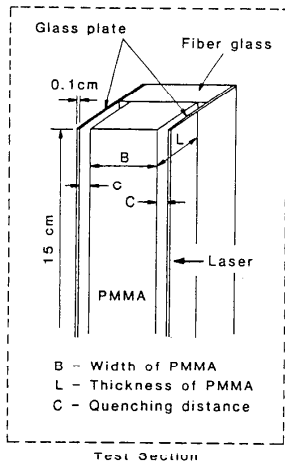


図1. PMMA試験部

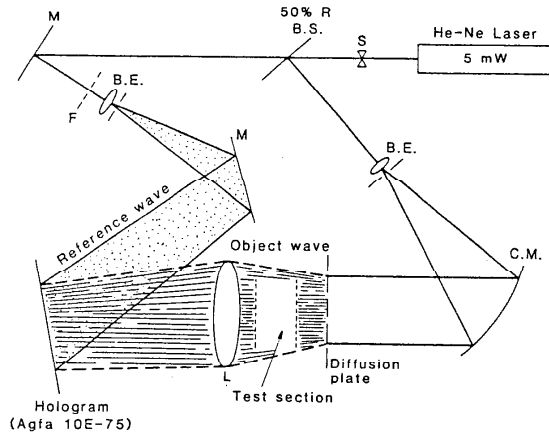


図2. ホログラフィー干渉計の光学系

### 3. 未燃料部への伝熱経路

#### 3.1 垂直下方燃え広がりの場合

垂直下方燃え広がり時の全体的な干渉縞と模式図を図3に示す。プラスチックのような固体の燃焼では、まず可燃性気体を生成する必要があるから、ここでは蒸発開始点を基準とし $x=0$ としている。また $y=0$ はPMMAの表面を表す。干渉縞の写真で、ガラス転移領域で縞が逆転しているのに気づく。これは次の理由によるものと考えられる。PMMAの屈折率の温度係数 $dn_p/dt$ は、温度の上昇とともに減少(負の値)するのに対し、熱膨張係数 $\alpha$ は増加(正の値)する。そして、ガラス転移温度近傍で両者の値が近づき、(2)式の分母がゼロに暫定する、いわゆる特異点となるためと考えられる。このガラス転移領域(105°C)を除いて干渉縞から温度を算出した。

伝ばする火炎先端近傍のPMMA固相内を拡大した干渉縞と等温線の様子を図4に示す。等温線図中に記入された矢印はそれぞれ表面に垂直方向( $y$ 方向)と平行方向( $x$ 方向)の熱流束 $q_y$ と $q_x$ より求めた熱流の大きさや方向を示すベクトルである。この図より、火炎から未燃料部への熱の流入は、火炎先端のごく近傍( $x > -0.15\text{cm}, 0 > y > -0.1\text{cm}$ )に集中していることがわかる。そして、この領域での等温線は表面に対して45°よりも小さいこと、すなわち $|\partial T/\partial y| > |\partial T/\partial x|$ であり未燃料部への伝熱の経路が固相内の熱伝導(表面に平行方向)が支配的としたFernandez-pelloらの結果<sup>(5)</sup>とは明らかに異なる。両者の相違は、次のことに起因していると考えられる。彼らの熱電対による測定での深さ方向の空間分解能が最大でも150 $\mu\text{m}$ であるのに対して、本研究でのそれは約30 $\mu\text{m}$ (干渉縞約30本/mm)であり、この差が温度勾配から熱流束を求める際に両者の相違として表れたものと思われる。

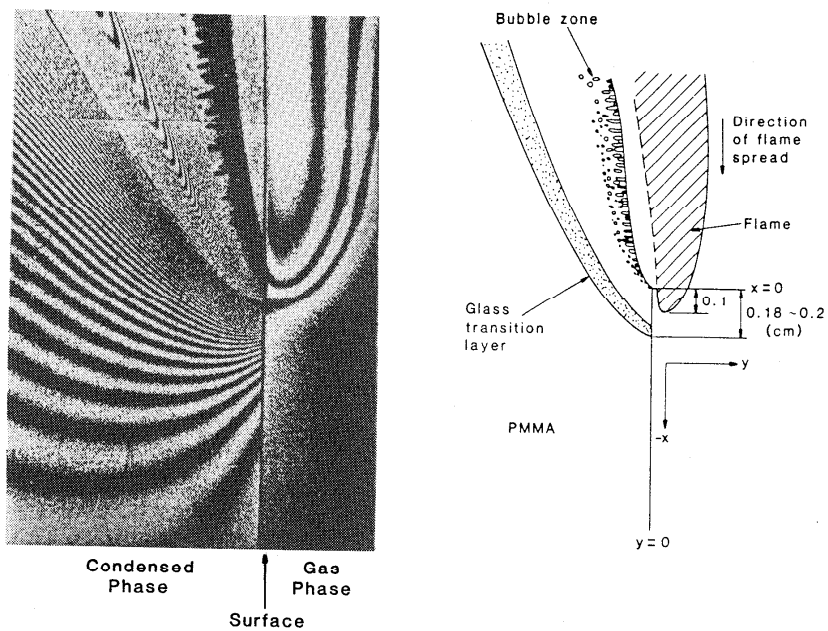


図3. PMMAの垂直下方燃え広がり時の干渉縞（拡散光使用）と模式図

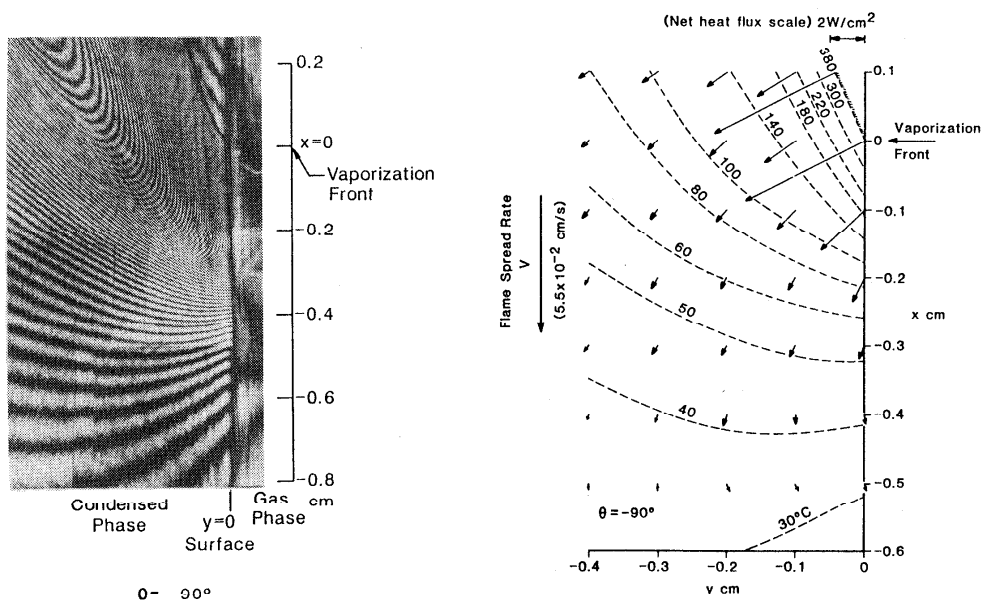


図4. 火炎先端近傍の干渉縞の拡大図（直接光使用）と等温線図

### 3.2 試料の傾斜角の影響

試料の傾斜角を $-90^\circ$  から $+90^\circ$  まで変化させて、重力に対する火炎伝ばの方向を変えたときの燃え広がり速度を図5に示す。燃え広がり速度は、傾き角が $\theta > 30^\circ$  で急激に増加する。なお $\theta > 0^\circ$  では火炎の幅方向の中央部が浮き上がった形となり、現象が幅方向に一様とはいえない。また垂直上方燃え広がり ( $\theta = +90^\circ$ ) では、本実験での試料の長さ30 cmでは定常速度に達していない。これらのことを考慮してデータを讀む必要がある。

図6～9に傾斜角に対する火炎伝ば時のPMMA内の干渉縞と代表的な傾斜角 $\theta = 0$  と $\theta = +90^\circ$  に対する等温線と熱流のベクトルを示す。表面に垂直方向の熱流束 $q_y$ は固相内温度分布より、その勾配を取って計算される。

図6.  $\theta = -30^\circ$  の干渉縞

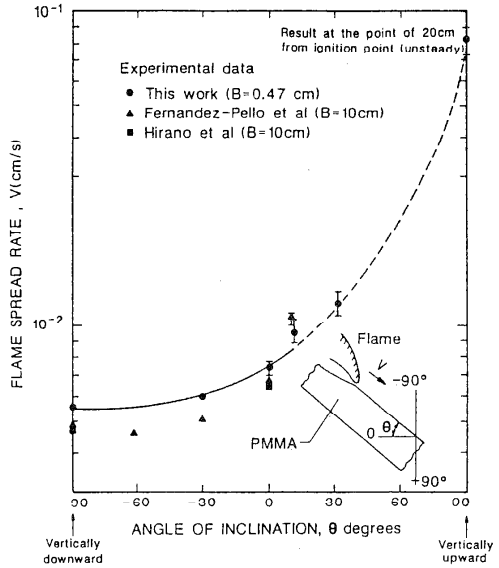


図5. 燃え広がり速度と傾斜角の関係

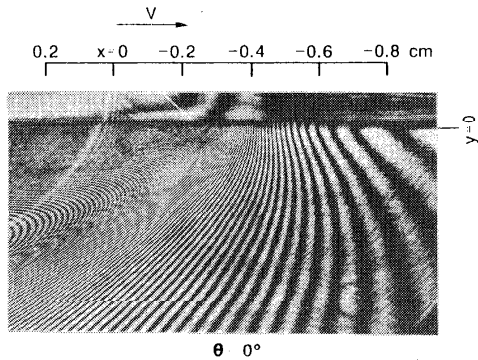
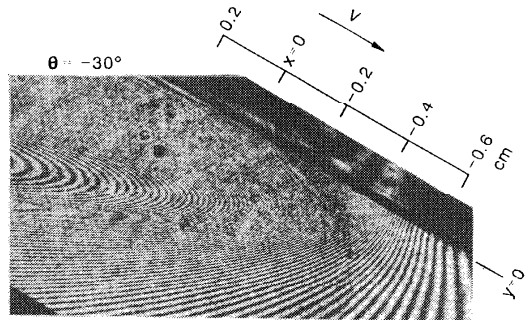


図7.  $\theta = 0^\circ$  の干渉縞と等温線図

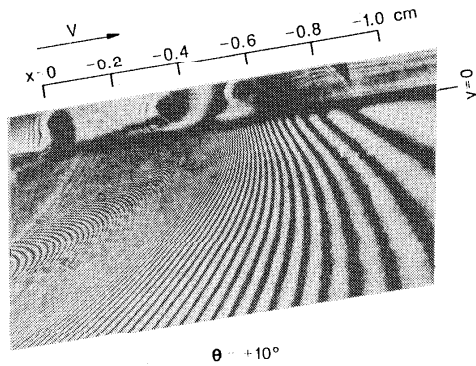


図8.  $\theta = +10^\circ$  の干渉縞

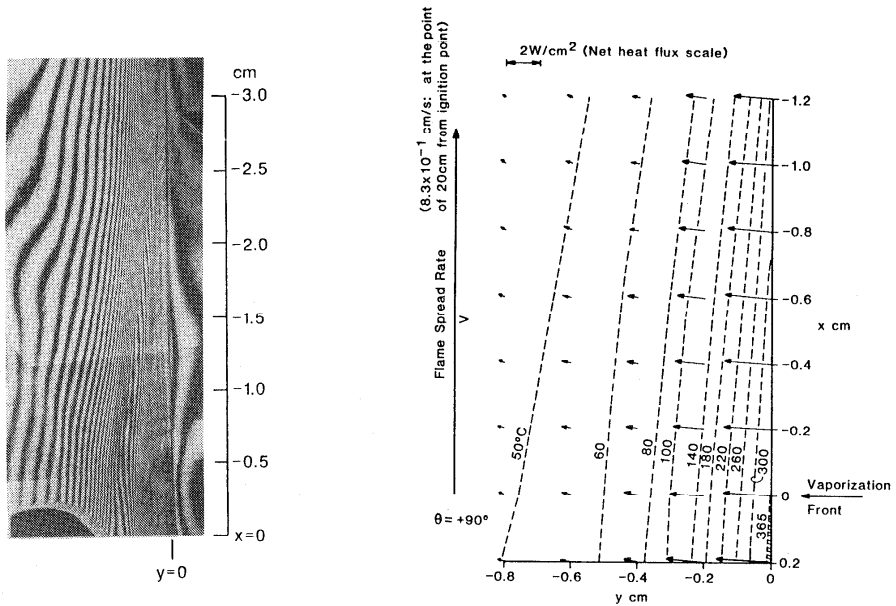


図9.  $\theta = +90^\circ$  (垂直上方燃え広がり) の干渉縞と等温線図

それらのうち、PMMA表面での熱流束 $q_{y0}$ が図10に示されている。 $q_{y0}$ は表面でのエネルギーバランスから次式のように表せる。

$$q_{y0} = \lambda_s \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} - \lambda_g \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} + q_{rf} - \epsilon_s \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad \text{at } y = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\lambda_s$ と $\lambda_g$ はそれぞれ試料と気体の熱伝導率、 $q_{rf}$ は火炎からの放射熱流束、 $\epsilon$ は試料の放射率、 $\sigma$ はStefan-Boltzman 常数、 $T_s$ は試料の表面温度、 $T_\infty$ は雰囲気温度である。

(3) 式の右辺第1項は気相からの試料への対流/熱伝導による熱流束を、右辺第2項は火炎からの放射熱流束を、また右辺第3項は試料表面から周囲への放射熱流束を表す。したがって  $q_{yo}$  は気相から未燃料部への流入する正味の熱流束である。

図10より、 $\theta = -90^\circ$  での  $q_{yo}$  は燃料の蒸発開始点 ( $x=0$ ) から約0.34cmの間で0から約7w/cm<sup>2</sup>まで急激に増加する。下方燃え広がり ( $\theta < 0^\circ$ ) では、 $\theta$ が増加すると  $q_{yo}$  が少し遠方まで及ぶことを除けば、 $\theta = -90^\circ$  の場合大きな違いは見られない。しかし、上方燃え広がり ( $\theta > 0^\circ$ ) では、 $\theta$ の増加とともに蒸発開始点での  $q_{yo}$  は小さくなる。特に  $\theta = +90^\circ$  (垂直上方燃え広がり) では  $q_{yo}$  は蒸発開始点前方約5cm位から増加し、 $x=0$  で約2.8w/cm<sup>2</sup>に達する。 $\theta = +90^\circ$  の2.8w/cm<sup>2</sup>と  $\theta = -90^\circ$  の7w/cm<sup>2</sup>の違いのおもな理由は、上方燃え広がりでの火炎が試料の表面からより離れるため、対流/熱伝導による熱流束が下方燃え広がりよりも小さくなるためと考えられる。そのかわり火炎の先端が未燃部の遠方まで届くため、熱を受ける範囲が広くなり単位時間内に受ける熱量はずっと多くなる。

試料表面に平行方向の熱流束  $q_x$  も  $q_y$  も同様に温度分布から計算される。それらのうち蒸発開始点  $x=0$  の位置における値  $q_{xo}$  を図11に示す。 $q_{xo}$  は固相内の熱伝導によって未燃料部へ流入する熱流束である。 $q_{xo}$  は傾斜角が増加する程、例えば  $\theta = -90^\circ$  で 3.2w/cm<sup>2</sup> から  $\theta = +90^\circ$  で 0.1w/cm<sup>2</sup>まで減少する。つまり、 $\theta$ が増加して火炎の伝ば速度が速くなる程、未燃料部への伝熱量のうち固相内熱伝導による伝熱の寄与は小さくなる。これについては、火炎の伝ば機構を踏まえてさらに次節で議論する。

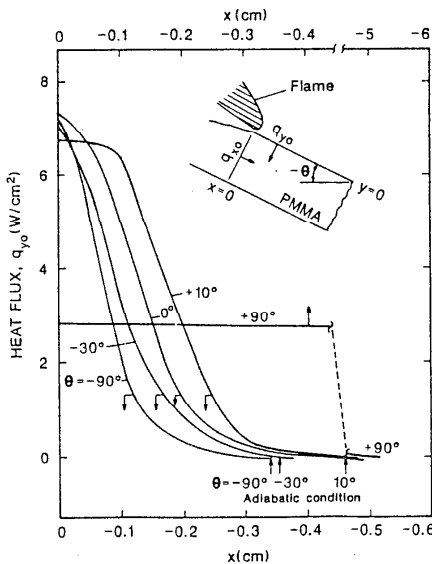


図10. PMMA表面における熱流束分布 (表面に垂直方向)

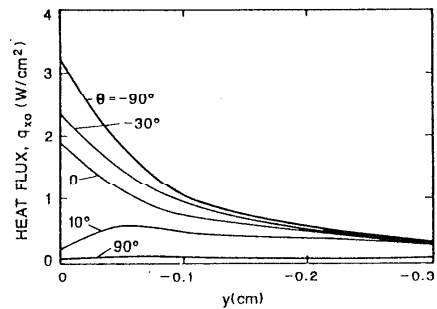


図11. 蒸発開始点 ( $x=0$ ) における熱流束分布 (表面に平行方向)

#### 4. 火炎伝ばの機構

これまでに得られたPMMA固相内の温度分布と熱流束分布の結果を基に未燃料部におけるエネルギー釣合を調べる。検査空間は $x=0$ から $-\infty$ 、 $y=0$ から $-L$ ( $L$ は試料の厚さ)である。気相から未燃料部への流入する正味の伝熱速度(単位時間当りの熱量)は、

$$Q_g = \int_{-\infty}^0 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} dx = \int_{-\infty}^0 q_{y0} dx, \quad (4)$$

$x=0$  から表面に平行方向に固相内を熱伝導で流入する熱量は、

$$Q_c = \int_{-L}^0 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} dy = \int_{-L}^0 q_{x0} dy. \quad (5)$$

試料の裏面からの熱損失量は、

$$Q_L = \int_{-\infty}^0 \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=-L} dx. \quad (6)$$

検査空間に蓄積される正味の熱量は

$$Q_T = Q_g + Q_c - Q_L \quad (7)$$

である。これは、火炎の伝ばに必要な正味のエンタルピに等しくなければならない。

$$Q = \int_{-L}^0 \rho_s v \left[ \int_{T_\infty}^T c_s dT \right]_{x=0} dy \quad (8)$$

以上の積分計算に次の物性値を用いた。 $\lambda_s = 2.1 \times 10^{-3} \text{ J/cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>(13)</sup>,  $\rho_s = 1.19 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_s$ は文献(14)を参照した。それぞれの傾斜角に対する $Q_g, Q_c, Q_t$ および $Q$ の計算値を表1に示す。気相から未燃料部に入る正味の伝熱速度 $Q_g$ は傾斜角の増加とともに増加する、一方、固相内の熱伝導による伝熱速度 $Q_c$ は、傾斜角とともに減少する。正味の全伝熱速度 $Q_t$ のうち $Q_g$ の占める割合は、 $\theta = -90^\circ$ で56%、 $\theta = -30^\circ$ で70%、 $\theta = 0^\circ$ で78%、 $\theta = +10^\circ$ で87%、そして $\theta = +90^\circ$ で99%となる。こららの結果から、厚いPMMAのどの傾斜角における火炎伝ばでも、気相から燃料表面に入る伝熱経路が支配的と言える。しかしながら、固相内での表面に平行方向の熱伝導も、特に $\theta < 0$ の下方燃え広がりでは無視できない。

$\theta$	$V$ (cm/s)	$Q_g$ (W/cm)	$Q_c$ (W/cm)	$Q_T$ (W/cm)	$Q$ (W/cm)
-90°	$5.5 \times 10^{-3}$	0.52	0.42	0.93	0.89
-30°	$6.0 \times 10^{-3}$	0.71	0.33	1.02	0.94
0°	$7.4 \times 10^{-3}$	1.01	0.29	1.29	1.22
+10°	$9.5 \times 10^{-3}$	1.29	0.22	1.49	1.45
+90°	$8.3 \times 10^{-2}$	(8.23)	(0.13)	(8.32)	

( ) means not the steady state value.

表1. 正味の伝熱速度とエンタルピー

ところで図4、7や9の等温線図が示すように、固相内で高温となる領域は火炎の近傍に限られており、このx方向の長さ $l$ 、y方向の深さ $\delta$ で囲まれた領域を”Critical Zone”と定義する。代表長さ $l$ は、蒸発開始( $x=0$ )から表面で熱流入のない断熱点までの距離で定義され、熱流束分布 $q_{y0}$  (図10)から決定される。それゆえ火炎伝ばの速度を $V$ とすると、未燃料部が気相からの熱にさらされる時間は、

$$\tau = l / V$$

で表せる。一方、その時間内で熱が表面から内部へ浸透する距離 $\delta$ は、およそ次式で表せる。

$$\delta \approx \sqrt{a\tau}$$

ここで、 $a$ は試料の温度伝導率である。これら $l$ 、 $\tau$ および $\delta$ の値を表2に示す。当然のことながら $l$ が傾斜角 $\theta$ によって変化するものの、 $\tau$ と $\delta$ は $\theta$ にはほとんどよらない。つまり、固相内の熱の進行速度 $\delta/\tau$ は傾斜角に存在しない。そして、この速度にたいして火炎伝ば速度 $V$ が大きくなる程、固相内の熱伝導は火炎の伝ばに影響しなくなる。

$\theta$	$V$ (cm/s)	$l$ (cm)	$\tau$ (s)	$\delta$ (cm) at $x=0$	$\delta/\tau$ (cm/s)
-90°	$5.5 \times 10^{-3}$	0.34	61.8	0.24	$3.9 \times 10^{-3}$
-30°	$6.0 \times 10^{-3}$	0.36	60.0	0.23	$3.8 \times 10^{-3}$
0°	$7.4 \times 10^{-3}$	0.44	59.5	0.23	$3.9 \times 10^{-3}$
+10°	$9.5 \times 10^{-3}$	0.48	51.0	0.21	$4.1 \times 10^{-3}$
+90°	$8.3 \times 10^{-2}$	5.0	60.2	0.22	$3.7 \times 10^{-3}$

表2. 火炎伝ば現象の代表長さとして代表時間



## 5. あとがき

燃焼研究において、従来おもに気相の温度測定に利用されてきたホログラフィ干渉法の技術を、透明なPMMAの火炎伝ば時の固体内温度分布測定に応用した。その結果、これまで疑問が残っていた厚い可燃性固体の火炎伝ばの伝熱過程が明らかとなった。本研究を通じて、新しい測定技術あるいは従来利用されている技術の別の観点からの利用が、暗しように乗り上げた問題のブレークスルーの鍵となりうることを改めて痛感した。

終りに、本研究はおもに米国商務省標準局 (NBS) 火災研究センター (CFR) において、Dr. Takashi Kashiwagi氏とともに行ったものである。研究の機会を与えて頂いた同氏とDr. J. Snell氏に、並びに、留学の機会を与えて頂いた東京工業大学工学部黒崎晏夫教授に深く感謝いたします。

## 文献

- (1) Magee, R.S., and McAlvay III, R.F., *J. Fire and Flammability* 2, (1971), 217.
- (2) Ray, S.R., and Glassman, I., *Combust. Sci. Tech.* 32, (1983), 33.
- (3) Williams, F.A., *Sixteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, 1281 (1977).
- (4) Ito, A., "Flame Spread Over Thin Combustible Solid". Ph.D Thesis, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan (1979).
- (5) Fernandez-Pello, A.C., and Williams, F.A., *Fifteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute*, 217 (1975).
- (6) Hirano, T., Koshida, T., and Akita, K., *Bullet. Japan Assoc. Fire Sci. Eng.* 27-2, (1977), 33.
- (7) Ito, A., and Kashiwagi, T., *Applied Optics* 26-5, (1987), 954.
- (8) Ito, A. and Kashiwagi T., "Temperature Measurements in PMMA During Downward Flame Spread in Air Using Holographic Interferometry", *Twenty First Symposium (International) on Combustion*, (in press).
- (9) Ito, A., and Kashiwagi T., *Combustion and Flame* 71-2, (1988), 189.
- (10) Waxler, R.M., Horowitz, D., and Feldman, A., *Applied Optics* 18-1 (1979), 101.
- (11) Cariou, J.M., Dugas, J., Martin, L., and Michel, P. *Applied Optics* 25-3 (1986), 334.
- (12) Kashiwagi, T., Inada, A., and Brown, J.E., *Fire Safety Science-Proceedings of the First International Symposium*, 483 (1986).
- (13) Hand, S.D., and Horsfall, F., *J. Physics E. Scientific Instruments* 8 (1975), 687.
- (14) Bares, V., and Wunderlich, B., *J. Polymer Sci.* 11 (1973), 861.

## 1. はじめに

高温物体を沸騰液中で急冷する技術は金属加工、低温機器のクールダウン、原子炉の緊急炉心冷却など、工業分野で広く利用されているが、このような急冷過程を制御するにあたって、膜沸騰下限界の把握が重要な問題となる。限界値（最小膜沸騰温度、極小熱流束）は、多数の因子、例えば、伝熱面の形状、寸法、表面状態、熱伝導性、液体の物性値、圧力、サブクール度、流速、熱負荷の時間依存などによって影響される<sup>(1)</sup>。ここでは、最近、着目され出した固液接触の影響について考えることにする。

膜沸騰状態は、通常、伝熱面が蒸気によって覆われ、液体から分離されているため、液体が直接、伝熱面に接触することがないと考えられてきた。そして、例え、気液界面の脈動などによって固液接触が生じて、それは、間欠的且つ局所的であるため、その影響が無視できるとする考え方が主流を占めてきた。従って、膜沸騰における固液接触問題を取り扱った研究は非常に少ない<sup>(20-25)</sup>。

ところで、筆者らは、高温物体を沸騰液中で急冷する場合、物体表面に薄い熱抵抗層を被覆することによって急冷が促進される現象<sup>(4-10)</sup>を説明するため、膜沸騰状態でも液体が間欠的に伝熱面の一部に接触するとの作業仮説を提案した。この作業仮説に基づく間欠性固液接触モデルによって標定される膜沸騰下限界温度が液体窒素<sup>(11)</sup>や水<sup>(12)</sup>を用いた飽和沸騰の実験結果とよく一致することを報告した。そして、最近、膜沸騰状態における間欠性固液接触の存在を実験的に確認するとともに、固液接触頻度、接触面積などを測定することにより、膜沸騰下限界の発生機構を明らかにしようとする研究を開始した<sup>(26)</sup>。以下では、それらについて概説することにする。

## 2. 間欠性固液接触モデル

図1は膜沸騰状態を模式的に描いたものである。通常、膜沸騰は、(a)乾燥期間のように、伝熱面が蒸気によって覆われ、液体から分離されているものと考えられる。しかし、気液界面の脈動によって、間欠的ではあるが、液体が伝熱面の一部に接触する可能性がある。もし、液体が伝熱面の一部に接触すると、(b)の状態の後すぐに、(c)のように接触面上の薄い液層が急激に蒸発する。そこで、膜沸騰状態の固液接触現象を、(a)乾燥期間、(b)伝導期間、(c)蒸発期間の二つの素過程からなるとする。以下では、円柱体系について述べるが、平板体系についても同様に取り扱える。

## 2. 1 乾燥期間 ( $t < 0$ )

伝熱面の大部分は常時乾燥状態にあり、膜沸騰熱伝達係数  $h_{fb}$  で冷却される。後で固液接触する部分も、乾燥期間中は  $h_{fb}$  で冷却される。図2に示す座標系を用いると、被覆層と金属の両方におけるエネルギー平衡は次の1次元熱伝導方程式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( ar \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

ただし、 $a$  : 熱拡散率。

境界条件は次のようになる。

$$r=0 : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

$$r=R : -k_o \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\text{metal}} = -k_w \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\text{coating}} = h_g (T_{\text{metal}} - T_{\text{coating}}) \quad (3)$$

$$r=R+\delta : -k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_{fb} (T - T_{\text{sat}}) \quad (4)$$

ただし、 $k$  : 熱伝導率、 $h_g$  : 被覆層と金属の間のギャップコンダクタンス。添え字の  $w$  と  $0$  は、それぞれ、被覆層と金属を意味する。

試算によると、物体を沸騰液中に浸漬した瞬間の極短時間をのぞいて、乾燥期間中の温度変化は穏やかであって、準定常状態が保たれている。被覆層が薄いため、その温度分布は線形となる。一方、金属は高熱伝導率を有するため、ほとんど一様温度分布となる。金属温度  $T_o$  を一様とすると、被覆層内の温度分布は次式でよく近似できる。

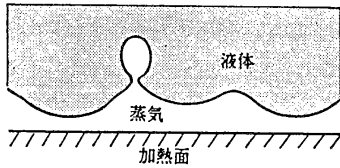
$$T - T_{\text{sat}} = \frac{(T_o - T_{\text{sat}}) [1 + h_{fb} (R + \delta - r) / k_w]}{1 + h_{fo} / h_g + h_{fb} \delta / k_w}, \quad R \leq r \leq R + \delta \quad (5)$$

## 2. 2 伝導期間 ( $0 \leq t < \tau_c$ )

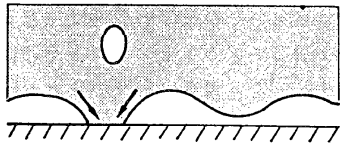
一様温度  $T_{\text{sat}}$  の液体が被覆された金属円柱表面の局部に接触したとすると、はじめの極く短い間、液体領域でも、熱伝導が支配的となる伝導期間が存在する。接触部が局在していても、被覆層が薄く、また、その熱伝導率が非常に低いため、伝熱表面方向の2次元伝導効果が無視できるので、被覆層内のエネルギー式は簡単化でき、式(1)と同じ1次元の形になる。

境界条件は、

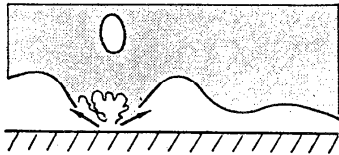
$$r=R : -k_w \frac{\partial T}{\partial r} = h_g (T_o - T) \quad (6)$$



(a) 乾燥期間



(b) 伝導期間



(c) 蒸発期間

図1 間欠性固液接触モデル

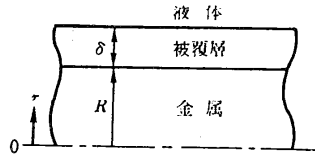
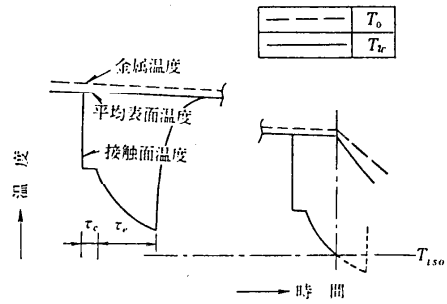


図2 座標系



(a) 乾燥状態へ復帰 (b) 遷移沸騰へ移行

図3 固液接触時の温度変化

$$r=R+\delta: T-T_{\text{sat}} = \frac{T_0-T_{\text{sat}}}{\left(1+\frac{h_{fb}}{h_g}+\frac{h_{fb}\delta}{k_w}\right)[1+\sqrt{\rho_l c_l k_l/(\rho_w c_w k_w)}}] \quad (7)$$

で表される。ただし、 $\rho$  : 密度、 $c$  : 比熱。添字  $l$  は液体を意味する。

### 2.3 蒸発期間 ( $\tau_c \leq t \leq \tau_c + \tau_e$ )

前の伝熱期間中、接触面上の薄い液層は高温の固体面からの熱伝導により過熱される。次の蒸発期間では、この過熱液層が蒸発するため、さらに、伝熱面が局所的に冷却される。簡単のため、蒸発期間中の熱流束を時間平均値  $q_e$  で代表する<sup>(15)</sup>。エネルギー式及び  $r=R$  における境界条件は、それぞれ、式(1) 及び式(6) と同じになる。もう1つの境界条件は次式で与えられる。

$$r=R+\delta: -k_m \frac{\partial T}{\partial r} = q_e \quad (8)$$

### 2.4 計算方法

上述の各期間における境界条件下で1次元非定常熱伝導問題を数値的に解くのであるが、固液接触が局所的且つ間欠的に生じるため、接触部での除熱量は、全伝熱面におけるそれに比べて僅かであり、被冷却物体全体の冷却(膜沸騰熱伝達係数  $h_{fb}$ ) に寄与しないとする。

図3に固液接触時の温度変化の計算例を拡大して示す。金属温度や平均伝熱面温度は充分高く、固液接触時でも殆ど変化しないが、接触面では、金属からの熱流入が被覆層によって妨げられるため、局所的に急激な温度降下が見られる。(a)のように、局所温度降下が不充分で、限界値  $T_{i,0}$  に達しなければ、蒸気膜が再び伝熱面上に形成され、乾燥期間に復帰する。しかし、(b)のように、固液接触により局所表面温度が限界値以下になると、蒸気生成量が膜沸騰を維持するのに不充分となり、遷移沸騰が開始する。そして、被冷却物体全体における熱伝達が促進されることになる。

### 3. 最小膜沸騰温度に及ぼす表面熱抵抗層の影響

今回の実験に用いられた試験体を表1に示す。金属温度  $T_0$  を測定するための熱電対は、平板試験体の場合、断熱された裏面の溝に、また、円柱試験体の場合、その中心軸の穴に埋め込まれた。試験体は大気圧下の飽和温度  $T_{\text{sat}}$  に保たれたプール液中に鉛直に浸漬された。浸漬後、金属の温度履歴がペンレコーダに記録された。

<sup>\*)</sup>  $T_{i,0}$  は、固液接触時での温度降下が生じない、理想的な等温伝熱面における最小膜沸騰温度である。本論文では、裸の金属について測定された値に等しいと仮定した。

裸の金属の場合、膜沸騰ヒオ数が非常に小さい ( $1 \sim 7 \times 10^{-3}$  程度) ので、 $T_0$  の履歴曲線から膜沸騰熱伝達係数  $h_{fb}$  が求められる。金属体を集中定数系 (等温系) 近似すると、熱伝達係数は次式により算出される。

$$q = h_{fb} \Delta T_0 = \rho_0 c_0 \frac{V_0}{S_0} \left| \frac{dT_0}{dt} \right| \quad (9)$$

ただし、 $V_0$  : 金属の体積、 $S_0$  : 金属の有効伝熱面積、 $\Delta T_0$  : 過熱度 ( $= T_0 - T_{sat}$ )。

一方、被覆された金属の場合は、表面温度  $T_s$  と金属温度  $T_0$  の差が大きくなるため、被覆と金属の二層体系について非正常熱伝導方程式を解く必要がある。

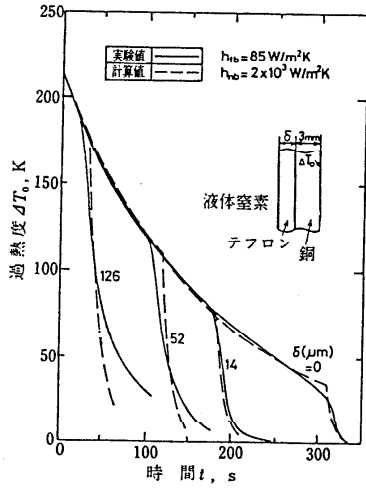
最小膜沸騰温度  $T_{min,0}$  は、いずれの試験体についても、温度履歴曲線で温度降下割合が急に増加する点とした。

表1 試験体

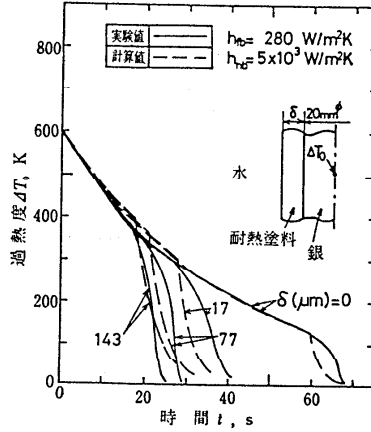
金属の種類	銅	銀
形状及び寸法	平板：1辺 40mm の正方形 厚さ 3mm 円柱：直径 20mm 長さ 70mm	円柱：直径 20mm 長さ 70mm
被覆材の種類及び厚さ	テフロン 4~144 $\mu\text{m}$	耐熱塗料 5~156 $\mu\text{m}$
冷却液	液体窒素	水

図4は、(a) 液体窒素と (b) 水で浸漬冷却した場合に得られた温度履歴曲線の代表例である。横軸が経過時間であって、秒の単位である。縦軸の温度は飽和温度との差、すなわち、過熱度  $\Delta T_0 (= T_0 - T_{sat})$  で示されている。パラメータが被覆層の厚さ  $\delta$  である。被覆した場合、いずれも裸の場合 ( $\delta = 0$ ) にくらべて、膜沸騰から遷移沸騰への移行が早まる。そして、この早期移行現象は被覆層が厚いほど顕著であり、最小膜沸騰温度が上昇して、急冷が促進されることがわかる。

図には、比較のため、間欠性固液接触モデルを用いて求めた計算結果 (破線) も示されているが、実験結果 (実線) とほぼよく一致する。なお、計算にあたっては、表2に示す数値を用いた。ただし、 $h_{nb}$  : 遷移沸騰熱伝達係数、 $\Delta T_{i,0}$  : 等温伝熱面に対する最小膜沸騰過熱度 ( $= T_{i,0} - T_{sat}$ )。

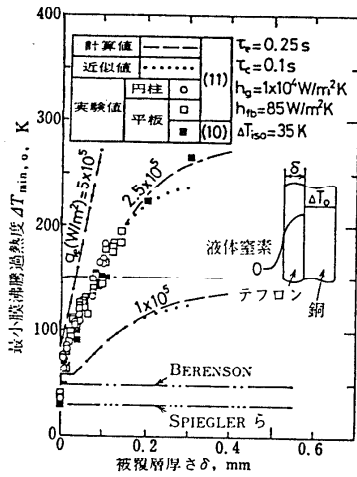


(a) 液体窒素

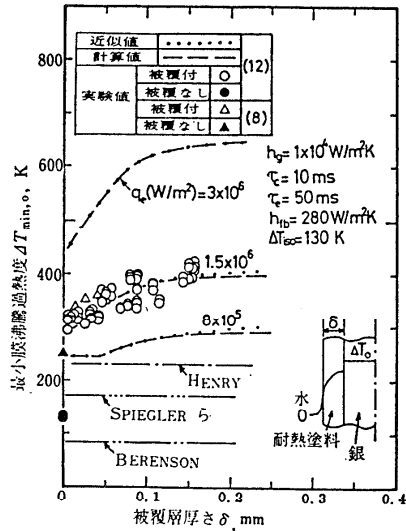


(b) 水

図4 急冷時の温度履歴曲線



(a) 液体窒素



(b) 水

図5 最小膜沸騰温度に及ぼす蒸発熱流束の影響

表2 各種パラメータ

試験体	テフロン被覆の銅	耐熱塗料被覆の銀
冷却液	液体窒素	水
$h_{fb}$ , $W/m^2 K$	80	280
$h_{nb}$ , $W/m^2 K$	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$
$\Delta T_{iso}$ , K	35	130
$q_e$ , $W/m^2$	$2.5 \times 10^5$	$1.5 \times 10^6$
$\tau_e$ , s	0.25	$5 \times 10^{-2}$
$\tau_c$ , s	0.1	$1 \times 10^{-2}$
$h_g$ , $W/m^2 K$	$1 \times 10^4$	

次に、パラメータ  $q_e$ ,  $\tau_e$ ,  $\tau_c$ ,  $h_g$  の決め方について述べる。急冷促進の指標として、膜沸騰から遷移沸騰に移行する点、すなわち、最小膜沸騰温度を採用することにする。図5は実験により得られた最小膜沸騰温度  $\Delta T_{min,0}$  を被覆層の厚さ  $\delta$  に対してプロットしたものである。図中には、我々の実験結果以外に奈良崎ら<sup>(8)</sup> や Nishio<sup>(10)</sup> のそれも示されているが、いずれも、被覆層が厚くなるにしたがって最小膜沸騰温度が低くなる傾向を示している。

図中の破線は間欠性固液接触モデルに基づく計算結果である。パラメータとして蒸発熱流束  $q_e$  がとってあるが、蒸発熱流束が高いほど、被覆による最小膜沸騰温度の上昇効果が顕著になる。液体窒素の場合、 $q_e = 2.5 \times 10^5 W/m^2$  とすれば実験結果とよく一致するが、水に対しては、 $q_e = 1.5 \times 10^6 W/m^2$  とすればよいことがわかる。液体窒素にくらべて水の方が1桁ほど高い蒸発熱流束となっているが、いずれも、各々の液体の核沸騰における限界熱流束、例えば、Kutatelaze<sup>(16)</sup> の相関式から求められる値とほぼ同じか、少し高い程度である。

ところで、2点鎖線と3点鎖線は、それぞれ、Berenson<sup>(2)</sup> の水力学的安定限界温度と Spi-eglerら<sup>(3)</sup> の熱力学的過熱限界温度であるが、いずれも実験値よりずっと低い。この大きな差が被覆層内で生じる平均温度降下 ( $=T_0 - T_w$ ) によると説明することは不可能である。なぜなら、膜沸騰下限界付近において、厚さ0.1mmの被覆層内の平均温度降下は、液体窒素冷却のテフロンの場合、僅か6Kであり、また、水冷却の耐熱塗料の場合、高々18K程度である。一方、固液接触を考慮したHenry<sup>(17)</sup> の実験式から予想される値(1点鎖線)は実験値に近くなるが、被覆層が厚くなるほど、最小膜沸騰温度が高くなるという実験事実を満足に説明できるまでに至らない。

図6は最小膜沸騰温度に及ぼす蒸発時間の影響を示す。被覆層の厚い領域で、蒸発時間が長



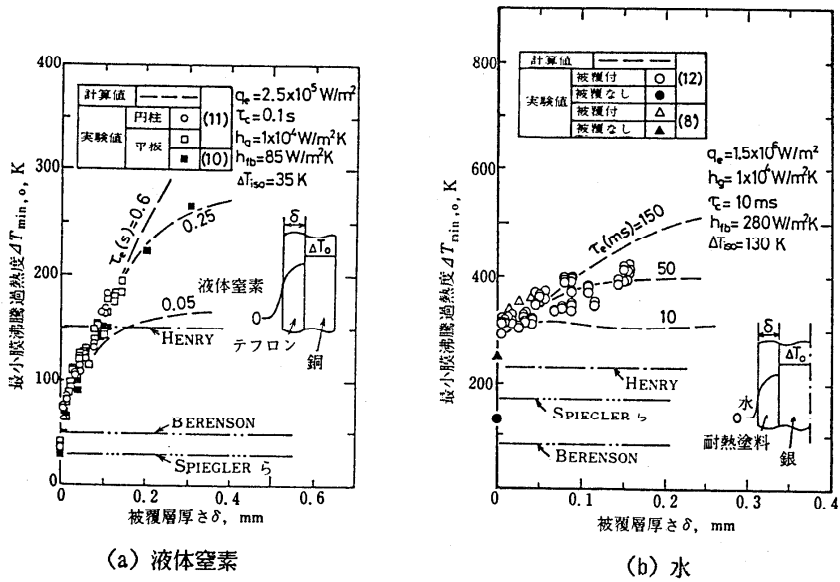


図6 最小膜沸騰温度に及ぼす蒸発時間の影響

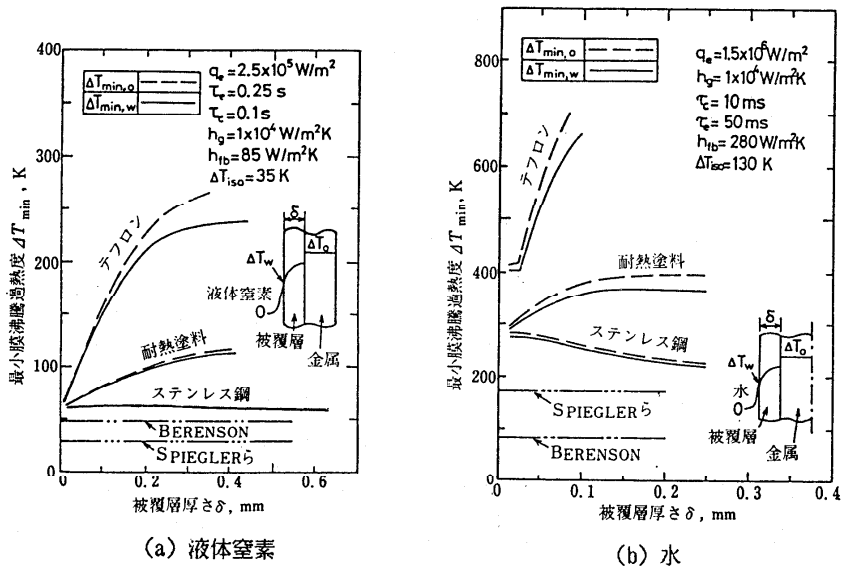


図7 最小膜沸騰温度に及ぼす被覆材質の影響

くなるにしたがって最小膜沸騰温度が高くなる。これは、蒸発時間が長いほど、固液接触に伴う局所温度降下がより大きくなるためである。液体窒素の場合、 $\tau_e = 0.25\text{s}$ とすれば実験結果とよく一致するが、水に対しては $\tau_e = 5 \times 10^{-2}\text{s}$ とすればよいことがわかる。この $\tau_e$ の値は、ブール沸騰実験<sup>(14)</sup>や液滴蒸発実験<sup>(18)</sup>において、膜沸騰下限界またはライデンフロスト点付近で測定されている接触時間とほぼ同じ大きさである。液体窒素の蒸発時間が水のそれよりずっと長いのは、液体窒素の濡れ性が良好なためである<sup>(19)</sup>と考えられる。

同様にして、他のパラメータ $\tau_e, h_g$ も定数として決めることができる<sup>(11), (12)</sup>。このことより、始めに提示した仮定や定式化の妥当性が立証され、間欠性固液接触モデルが表面熱抵抗層を有する金属の冷却過程における最小膜沸騰温度を予測するのに強力な手段であることが明らかになった。

そこで、間欠性固液接触モデルを用いて、いろいろな被覆材質について求めた最小膜沸騰温度( $\Delta T_{\text{min},g}$ と $\Delta T_{\text{min},w}$ の両方)の計算結果を図7に示す。テフロンや耐熱塗料など、熱伝導率の低い材質の場合、被覆層が厚くなるに従って最小膜沸騰温度が高くなり、この上昇傾向は熱伝導率の低い材質ほど顕著である。しかし、被覆層の厚い領域では、最小膜沸騰温度の上昇傾向が低下し、伝熱面における最小膜沸騰温度 $\Delta T_{\text{min},w}$ がある値に近づく。これは、固液接触に伴う冷却の影響が、短い接触時間内では、伝熱表面付近に限られ、被覆層内部まで浸透しないためである。

一方、ステンレス鋼の場合、被覆層が厚くなるに従って最小膜沸騰温度が減少する傾向にある。これは、前述したように、固液接触の影響が伝熱表面に限られるため、ステンレス鋼のように比較的熱伝導率の高い材質では、被覆層が厚くなるに従って、固液接触による影響の浸透深さに相当する熱抵抗が被覆層と金属の間の接触熱抵抗に比べて低下するためである。このような良導体被覆による最小膜沸騰温度の減少傾向は、今回の1次元計算では過小評価されるので、今後、伝熱面に平行な方向の熱伝導も考慮した2次元モデル<sup>(20)</sup>による定量的評価を必要とする。

#### 4. 膜沸騰における固液接触の測定

被冷却物体としては、図8に示すように、純銀製の球(直径30 mm)と二種類の鉛直円柱(直径20 mm、長さ60 mm)を用いた。各々の物体表面を電気的に絶縁するため、シリコン系耐熱塗料によって被覆した。

固液接触信号は、表面を薄い電気絶縁物で被覆した金属と液体間のインピーダンスを測定することにより求めている。ここでは、金属、電気絶縁物、水からなる実験体系が図9に示す電気回路と等価であると考えられる。RC並列部が金属・液体間の絶縁物(水蒸気と耐熱塗料)に相当し、 $R_w$ が液体の抵抗である。沸騰中に、液体と金属の間に交流電圧を印加すれば、固液接触に応じた電流が流れる。即ち、固液接触が起こった場合、絶縁物が金属と液体を両極とす

る薄い平板状コンデンサとして働くため、電流が流れるが、非接触時には、伝熱面が蒸気膜に覆われて極板間距離が大きくなり、そこでの電気抵抗が極度に大きくなるため、電流が殆ど流れない。これによって、固液接触の有無をとらえることができる。さらに、回路のインピーダンス $Z(\omega) [=R_w + 1/(1/R + j\omega C)]$ が固液接触面積の関数であることを利用して、本実験では、回路中におかれた抵抗 $R_s$ にかかる電圧を測定することによって接触面積を求めた。

図10(a)は銀球を飽和沸騰水に浸漬した場合に測定された温度履歴曲線と固液接触信号(L-S contact signal)変化の代表例である。図中には浅い浸漬と深い浸漬の両方が示されているが、いずれの場合も、銀球温度が時間の経過とともに徐々に低下して行く。一方、固液接触信号には、膜沸騰期間中でも間欠的な固液接触に同期したスパイク状の変化がみられる。このことは、写真からわかるように、膜沸騰状態でも、気液界面が大きく波打っており、これに伴って固液接触が生じると仮定した間欠性固液接触モデルの妥当性を実証している。右の縦軸には、予め校正実験により求められた固液接触面積割合を示すが、膜沸騰期間中に生じる固液接触は局所的であって、その面積割合は、浅い浸漬の場合、0.1% (2.8 mm<sup>2</sup>の面積に相当する)未満が殆どである。深い浸漬の方が接触の頻度、面積とも大きくなっているが、1%以下の面積割合に過ぎない。そして、いずれの浸漬の場合でも遷移沸騰に近づくにつれて固液接触の頻度だけでなく、接触面積も大きくなって行くのがわかる。

図10(b)は銀球をサブクール度40 Kの水中に浸漬した場合に測定された温度履歴曲線と固液接触信号変化を示す。浅い浸漬の場合、膜沸騰状態では固液接触が殆どみられない。これは、蒸気膜の脈動が極端に小さく、固液接触の生じる確率が非常に低いためである。そして、蒸気膜が低温まで安定に維持された後、殆ど瞬時に全面崩壊(整合崩壊)する。このように固液接触頻度が極度に低いことが、先に裸の銀球を用いたサブクール沸騰実験の場合<sup>(21)</sup>、膜沸騰下限界温度に大きなバラつきを生じる原因となり、飽和沸騰より低い膜沸騰下限界温度となる場合もあったと考えられる。一方、深く浸漬した場合は、比較的早い時期に固液接触が生じていることがわかる。これが原因で局所的なコールドスポットが生じ、支持棒とのつなぎ目付近で蒸気膜が部分的に崩壊(不整合崩壊)し、それが全面に伝播して行ったと考えられる。

## 5. おわりに

膜沸騰における間欠性固液接触を実験的に確認することにより、高温物体を液体中で浸漬冷却する場合、物体表面に熱抵抗層を被覆することによって生じる急冷促進現象を説明するために提案した間欠性固液接触モデルの妥当性が証明されたと考える。今後、膜沸騰における間欠性固液接触現象を定量的に把握するため、接触頻度、接触面積、接触時間等を測定するとともに、理論モデルを2次元化することにより、急冷過程の制御技術を確立するための指針を得る予定である。

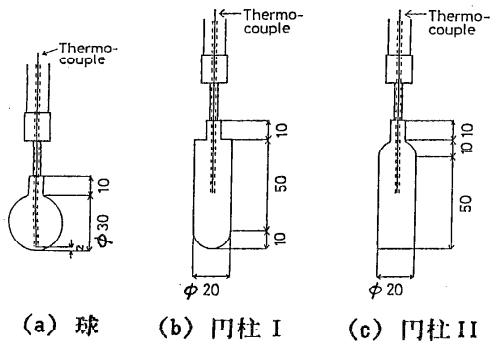


図8 被冷却物体

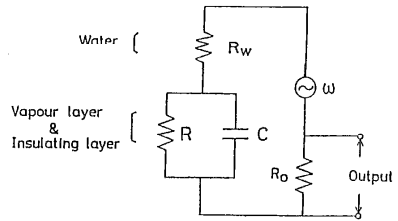


図9 回路図

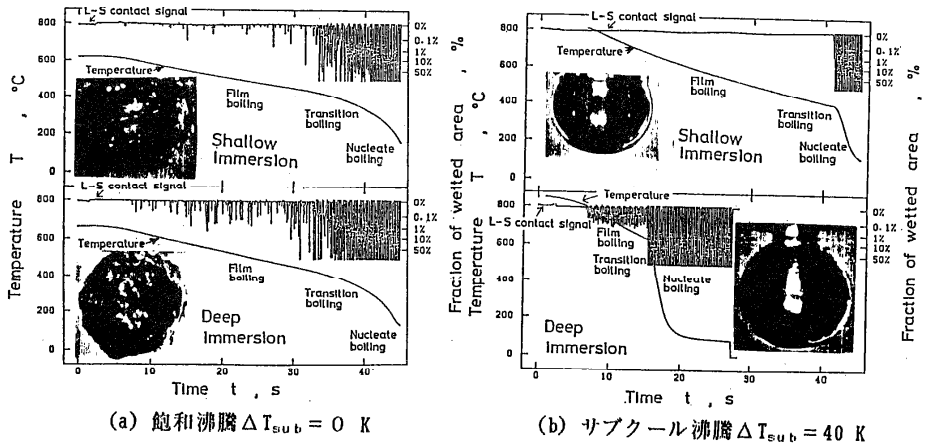


図10 温度履歴曲線と固液接触信号 (球)

## 文 献

- (1) J.J. Carbajo: Nucl. Eng. Design, 84 (1985) 21.
- (2) P.J. Berenson: J.Heat Transfer, 83 (1961) 351.
- (3) P. Spiegler, J. Hopenfeld, M. Silberberg, C.F. Bumpus, Jr. & A. Norman: Int. J. Heat Mass Transfer, 6 (1963) 987.
- (4) 佐藤清吉: 金属の研究, 10 (1933) 63.
- (5) C.W. Cowley, W.J. Timson & J.A. Sawdye: Adv. Cryogenic Eng., 7 (1962) 385.
- (6) A.P. Butler, G.B. James, B.J. Maddock & W.T. Norris: Int. J. Heat Mass Transfer, 13 (1970) 105.
- (7) F. Moreaux, J.C. Chevrier & G. Beck: Int. J. Multiphase Flow, 2 (1975) 183.
- (8) 奈良崎道治・淵沢定克・慶野作・武田信男: 第18回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1981) 421.
- (9) Y. Kikuchi, T. Hori & I. Michiyoshi: Proc. 9th Int. Cryogenic Eng. Conf., (1982) 77.
- (10) S. Nishio: Proc. ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf., 1 (1983) 103.
- (11) Y. Kikuchi, T. Hori & I. Michiyoshi: J. Heat Mass Transfer, 28 (1985) 1105.
- (12) Y. Kikuchi, T. Hori, H. Yanagawa & I. Michiyoshi: Trans. ISIJ, 26 (1986) 576.
- (13) 菊地義弘・柳川治之・岐美格: 第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1985) 61.
- (14) 菊地義弘・永瀬陸・岐美格: 第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1987) 356.
- (15) 菊地義弘・堀徹・岐美格: 昭和58年日本原子力学会年会要旨集, 1 (1983) 21.
- (16) S.S. Kutateladze: AEC-tr-3770 (1959).
- (17) R.E. Henry: Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 70 (1974) 81.
- (18) K. Makino & I. Michiyoshi: Int. J. Heat Mass Transfer, 27 (1984) 781.
- (19) L. Manson: J. Heat Transfer, 89 (1967) 111.
- (20) W.S. Bradfield: I & EC Fundamentals, 5 (1966) 200.
- (21) S.C. Yao & R.E. Henry: J. Heat Transfer, 100 (1978) 260.
- (22) D.J. Benton & E.G. Keshock: Proc. 7th Heat Transfer Conf., 4 (1982) 125.
- (23) D.S. Dhuga & R.H.S. Winterton: Int. J. Heat Mass Transfer, 28 (1985) 1869.
- (24) T.R. Fodemski: 8th Int. Heat Transfer Conf., 5 (1986) 2143.
- (25) 庄可正弘・横谷定雄・大島正道: 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988) 274.
- (26) 菊地義弘・蛭子毅・岐美格: 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988) 277.

## 衣の伝熱

竹内正顯（桐蔭横浜大学）

### 1. おかれている環境

関係する産業の分類では繊維部門になるが、本邦の繊維業界は苦しい状況にあり多くの企業は繊維以外の部門を揃える事で経営の健全化を図っている。四半世紀前の活況を極めた繊維産業は舞台を韓国や台湾に移し、国内においては脱繊維が常識的なシナリオになっている。したがって産業界へのインパクトという工学の目的尺度からすれば衣の伝熱を対象とする研究を今手掛けるのは些かならず不健全だと言える。

工学（繊維工学も勿論）は作る技術に力点をおいている。衣の伝熱は、それに対し、使う技術に力点がある。繊維製品消費科学という用語を与えられ認知されているが、その経済的な強さは作るための学問には遠く及ばない。このことは殆どそのまま、二つの学問間の水準の差になっている（あるいは、発言権の差になっている）ように感じられる。

このように、衣の伝熱は二重苦を負った境遇にある。しかし主観的にはそれにもめげぬ利点がある。その利点とは、本人に興味があるなら何の媒介もなしに問題に直接触れられる事が多いと言うことである。取り立てて言うほどの事ではないと思う人が多いかも知れない、それはそれで結構なことである。しかし、指導者や、組織、費用、人脈、人手などに欠けてアクセス出来ない対象は筆者にとっては少なくない。観念で研究をするほどの才能がないとなれば、アマチュアサイエンスの余地を残したこの分野は、金は埋もれてなくても貴重なフロンティアである。

だから先端技術に活躍している諸氏にとってはアナクロニズムな記事であろう。志はあるがまだ研究上の地歩の確保が出来ない人が、この落ち穂拾いに等しい記事を参考に生き延びるチャンスをつかむことがあるかもしれない。それを期待して書くことにする。

### 2. 伝導

最も重要なモードが熱伝導であることは確かなのだが、これがなかなか一筋縄では行かない。その原因の一つは伝熱学がそれほど普及してないところであって、往々にして熱伝導率と熱伝達率の用語法を取り違えたり、或は熱伝達率や熱通過率が物質（物体）の特性を示すものとして記されている報文が現れ、その実験結果の真意がつかみ難いと言うような傾向に見られる。この人為に於ける混乱は実は対象が物理的に複雑で変幻極まりないことに大半の理由がある。

衣の素材の熱伝導率は律義な人ならばいちいち「見掛けの」とか「有効」とかの冠を付

けないでは居られない類のものである。また冠を付けたからと言って素材が完全に固定出来る訳ではなく、熱伝導率を測ったとき、伝熱実験を行ったとき、着用したときでみな素材の状態は異なる。それほど変化しやすいもので、しっぽも頭もつかまえにくい。素材を熱伝導の場として見れば、場のパラメータにほとんど必然的に周囲（広い意味で境界条件）の影が入っている。だから素材を物質だなんて思う人は少なく、熱伝導率を物性値と思わないという習慣が仮にあったとしても好意的に接すべき根拠はある。

だからといってこれで良しとしている訳ではないことは、JISのふとんの保溫性試験機候補の試験結果の公表<sup>(1)</sup>に際しての当該業界の反応をみても明らかである。同じ試験機、素材的には同じ布団で、得られる結果は測定者毎に大きく異なって来る場合がある（図1参照）。業者としては得心の行かない不利益（ときには思わぬ利益）に直結することがあるし、測定担当者はいつも疑心暗鬼の気分になる。まだ熱伝導率が話題となっている現状ではないが、客観性を備えた数値への希望は高まりつつある。

問題を絞って、少しシリアスな例を一つ。布帛の熱伝導率は一枚の場合と複数重ねた場合で異なって来る<sup>(2)</sup>；これは繊維工学や家政学に所属する人達からよくもらうコメントである、また関連報文（なかには意味の取れないものもあるが）は少なくない。定性的には異なる可能性はある、だから違わないと言うには蛮勇が要る、そしてすべての影響因子をコントロールして実測値を示すのは著しい困難（研究費と、時間と、技術と、気力で）が伴う。筆者は何ともしがたいフラストレーションを感じている。

熱伝導率がこのように揺らいでいるのだから、伝熱の研究はやり易いとは言えない。しかし伝熱学の本流だって物性値がわかってから進んだのではない、歴史はむしろ逆である。衣の伝熱もまず熱伝導論、次に対流、拡散、輻射との複合現象として解析され、解析の有効さが信じられるに連れ物性値の認識と数値が普及するのだと思う。とりあえずは熱伝導率の値そのものには深入りしないで、複合現象の解析に重点を置くほうが良さそうだ。

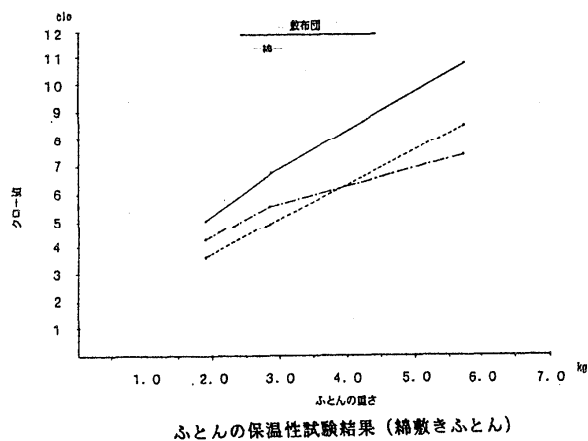


図1. ふとんの保溫性試験器の試験結果例<sup>(1)</sup>、3本の線は独立な3社の測定を表す。  
 伝熱研究 Vol. 27, No. 107

### 3. ふく射

もうひとつの伝熱のモードのふく射に関しては二つの難点がある。一つは方程式が伝導よりも複雑で親しみにくいこと。もう一つは他の形態の伝熱経路があるとふく射は二義的だと見なされる、これは慣習と言ってもよい判断基準となっている。したがってふく射を正面から取り上げた研究は少なく、系統的なのは野飼の業績<sup>(14)</sup>くらいであろうか。普通の意味で研究の余地のある分野である、また伝熱とは違った面でこれからの課題が多いような気がする。

ロスアンゼルス・オリンピックのときにサラザールらUSAの選手がマラソンを走った際のタンクトップをみられたらどうか。アルミ蒸着した布帛を使い太陽光を反射しようという意図で、後にふれるNASAの男が設計にかんじていたらしい。USA選手の成績がよくなかったから話題にならなかった、優勝でもしていたら衣服素材のふく射がブームになったかもしれない。この布帛と同じものを利用した詰物(わた)でエアロフィル<sup>(15)</sup>という商品がある。アルミ蒸着の効果はあるようで、こたつ布団として使うと具合がよいという話を聞いたことがある。

頭を悩ませることが多いのは遠赤外線で、今のところ何とも言い兼ねる。これから一体何が出て来るのだろうか。伝熱学という枠を越えて活躍するためには良い対象かも知れない。

### 4. 対流

どんな解析をしても現状では精度はそう良くない、その理由は上述のとおりである。だから解析の価値は高精度の記述よりはむしろ現象を解きほぐして説明するほうに有る。色々な機能要素、例えば熱伝導率、通気性、厚さなどが伝熱とどうからむかという説明は数理的な解析によって始めてはっきりして来る。特に筆者は自分自身に説明する場合にそれを強く感じる。言葉で推論がうまく行ったためしが無い。この説明が多少うまく行った経験<sup>(16)</sup>からその骨子を次に記させてもらう。

極地防寒服でも作ると思って一枚の布帛の保温性能を考える。風が有って布帛には風が浸透する。このとき素材の粗密(その効果としての熱伝導率と通気性は背反的になる)、厚さはどう選べば良いのか。Fourtらの書<sup>(2)</sup>によると今後の組織的な研究が必要でほとんど何も分かってないと記してある。

考察すべき要素の効果が現れるという条件で最も単純な方程式を挙げれば、多孔体を均質視したエネルギー式とダルシーの式である。著者は何のためらいもなくこれらの式を選んだが、これは怖い者知らずであつたらしい。通気性を調べれば通過流量と差圧の非線形な関係ばかり目に付くのだから。

風が当たる側の境界条件はほぼ明らかである。普通の物体周りの熱伝達率と、やはり物体周りに風によって生じる圧力分布を充てれば良い。もっともこれも「風当たり」の強い



仮定であった。著者の不精な性格だけが、自明だと信じたがっているようである。現在これに関し農工大グループが丹念な実験を開始している<sup>(17)</sup>。

裏がわの境界条件は、エネルギー式については1種か2種で実験装置に応じて選べば良い。ダルシー式の境界条件に関しては予想は全く外れ、実験結果を元に考案しなければならなかった。ここをクリアしてみると、今まで公表された実験結果から明確な結論が導けなかった理由も分かった。影響の大きい裏がわの条件が全くコントロールされないで実験されていたのだから、有意差よりもバラツキの方が大きかったのだ。

以上の簡単な数理模型を扱うだけで熱伝導率、通気性、厚さの絡み合いははっきりする。他の形の問題を考えるとときも同様で、実際に合う最も簡単な方程式と境界条件を模索することが課題になり、定説のある基礎方程式を解くという伝熱学本流とちょっと異なる。見方によっては初学者向きの課題と言えるのではなからうか。

風の浸透を一言で言うと、風当たりで生じた圧力分布が着衣のなかで緩和される現象である。だから着衣内部に高圧部と低圧部を結ぶ流路が有れば、空気が流れて圧力が緩和されることになる。このことを積極的に生かして、外側に意識的に流路を確保してここで圧力緩和を済ませ、それより内部では一様圧力にして浸透を防ごうというアイデアを古く Fonseca<sup>(4)</sup>が公表している(図2)。彼は数字も式も使わずにこのアイデアに到達している。彼の思考力に羨ましさを感じるとともに、筆者のような凡人は初歩的な数理モデルで考えるしか道はないと言う諦観は固まって来た。

現在、伝熱にかんするデータの客観性を増すために取られている方法は、実験装置の仕様の統一であるようだ。前述のふとんの保温性試験機<sup>(1)</sup>がそうだし、Thermo Labという装置もよく名が出てくる<sup>(7)</sup>、これらの指定によって一般に再現性を確保しようとしている。この方針は肯ぜられるが、上述の裏側の境界と同様、装置と試料の間のなじみ具合は相変わらず問題となる。特に意識的に隙間を持たせているケースも多いから、隙間に絡ん

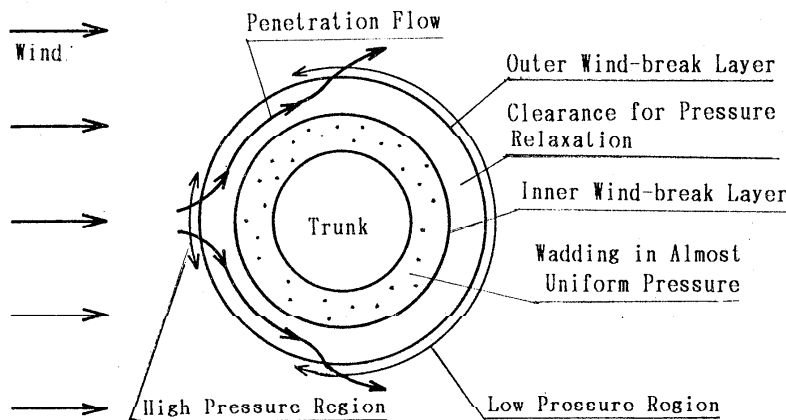


図2. 風の浸透とFonsecaのダブルウインドブレーカーの概念

だ対流が生じているだろう。ここら辺りはむしろ理論的に整理されなければならない箇所である。伝熱学の出番が多いのではないかと思う。

##### 5. 物質拡散（透湿と吸湿）

操作量がひとつで目標値に制御しようとするれば、平衡は一点でしか成り立たない。顕熱だけで体温を制御する場合はこれで、環境を鋭く硬いものを感じるだろう。潜熱による制御を加えれば、相変化する物質が補給されて相変化が滞らぬ限り、この範囲で平衡が成り立つ。この場合環境をかなり温和なものを感じる。生理的な快適感をすこし物理的に言い換えればこのように言えるのではないか。

商品の質を求める時勢に応じて、被服科学における実験研究の多くが潜熱に関係する透湿・吸湿を扱い快適性を論ずるようになった。しかし説明科学としての水準はCrank<sup>(5)</sup>の時代とかわらないか、あるいは学理普及の程度はむしろ悪くなっているのではなからうか。これは膝元イギリスにおいても変わらないようである。

そんななかで多田<sup>(6)</sup>の寝床にかんする一連の研究は出色だと思われる。定性的な結果で終わっているが、拡散方程式で考察出来る対象だという意識は確かであるし、湿度センサーを自作して測定を続けた熱意には感服する。

多田の論文を読むと、実験中に透湿と吸湿が同時に起きているから量的にすっきりしないのではないかという予想が立って来る。拡散係数を求めようとするると吸湿が邪魔をするし、吸湿速度を求めようとするると拡散が邪魔になる。その結果、拡散係数の値が極端に小さく見積もられたりする。多田の真価は、このような背景まで推測を可能にする記述の確かさと、模型ではなく実際の着用実験を説明的な論文に仕上げている点にある。このような論文ばかりならば、伝熱学で育った人がアプローチするのも楽である。

多田以降の学理上の発展ははかばかしくないが、実験の多様さ<sup>(7)</sup>、新製品の開発<sup>(12)</sup>という面は活発である。後者では、透湿・防水性素材、吸水・吸汗性素材の商品発表が花盛りである。その移ろいの激しさから臨床的な着用試験に追われ（たとえば紙おむつが乳児、老人、病人に良いのか悪いのかと言った今日的な問題に直接アプローチすることが重要で）、とても学問的な整理などという悠長な事は出来ない情勢のようだ。

湿度の測定は温度ほど簡便には行えない。また市販のセンサーは精度、信頼性ともまだ満足出来ないところがある。この方面で田中<sup>(15)</sup>が新しい方式を試み、透湿性の測定に応用しているのは心強い。

拡散方程式を扱おうとすると、拡散のフラックスは次項で述べるように面倒は少なく、吸湿項をどう表すかという点に問題が帰着する。最近この問題は半分目処がついた<sup>(16)</sup>。拡散・吸脱湿・伝導というリンクもちかじか解析出来ると思う。そうすれば実用性をもっと主張出来る立場になるであろう。

## 6. 着用実験

被服科学の専門家の間には、物理実験ではだめなんだという信念が時折見られる。そしてなるべく多数の着用実験を行い、測定が物理量ならば多変量解析、被験者の快適感申告 (vote) ならば度数分布で結果を論ずることが多い。これは多分、商品化するにあたって設計の目標値を決めなければならないという必要から来ているのだろう。伝熱学にもっと近い建築系の空気調和の分野にもこのような傾向は、例えば至適温度という尺度と評価において見られる。

この信念は理解出来る部分もある。しかしアマチュアの見方から残念だと思うのは、着用時の現象を物理的な因果として説明する意図が薄いことで、前述の多田の論文はこの点で貴重な例外である。いったい着用実験とはどんなものだろうという実感を得たくて、筆者も一度試みてみた。

寝床の実験を、しかも多田の研究によって絞られた問題点があったから、ポリエステルだけのわたを使って吸湿をなくし、自分で寝て行ってみた。結果は金沢で報告<sup>(8)</sup>したが、要するに布団は熱伝導と拡散の方程式で扱え、その水分拡散の係数はかなり大きいという取り立てて公表するのは恥ずかしいような当たり前の結論である。

この着用実験を経験して言えることが幾つかある。着用実験と言えどももっと解析されるべき対象で、解析すれば色々な疑問があらわになる、例えば敷布団の吸湿性は何故要求されるのか<sup>(9)</sup>。解析しないといつまでも漠然としており、極端に言うと人間は生き物だからというつまらない掛け合いになることがままある。次に、多数データを処理しても説明能力のある理が姿を現すことはまずない、それよりもシステム工学の初歩に沿って過渡応答や周波数応答を見るのがよい。システムの機能を把握するつもりならば当然なのだが、上述のようになぜか多人数の被験者のデータを集めることに走り易い。第三に、結果を得たときの充実感とその説得力は物理実験に遥かにまさる。データも問題点も本物で、日ごろ偽物ばかり相手にせざるを得ない恵まれない大学人としては感激に値する。

## 7. サーマルマネキン

平板や円柱の発熱体ではいけないような気がして人間の形をした発熱体を作った。これがサーマルマネキンである。現在では、「某国には手足の動くマネキンができた、某々国では発汗するマネキンができた、それにひきかえ我国は・・・」といった国威にかかわる話題にもなる。かなり大掛かりな装置であるから筆者はもとより興味をもつことはなかった。それが偶然からこれと格闘せざるを得ないはめになった。

総てのマネキンがそうだとはいえないが、概ねこんなものだ；人体の各部（頭、胸、腹、脚、腕くらの区分）の形をしたアルミニウムの塊毎にヒータを埋め込み、発熱量とアルミニウムの温度（同一の塊では一様に近い）を計測できる。したがって各部位毎の重み、例えば部位毎の熱伝達率は分かる、しかしそれ以上のことは全く分からない。ちょっとし

た実験を計画しても表面のヒートフラックスと温度をもすこし局所的に知る計装が必要なのだが、既製品の欠点で手を入れるのが難しい。苦闘は総てここから来ている。

平板や円柱の実験では被服のことは総合できない。だからマネキンを作るという信念があったと思う。しかしながらマネキンも所詮は物理実験で、それが分析的でない大味なものに終わると存在意義は少なくなる。これからは健全なMockupが生まれてくることを祈りたい。

### 8. 人工微気候

とある機会にNASAで宇宙服を設計した男にあった。設計の第一は服の中の温度を均一にすることで、このために服の中にチューブを引き回し水を流す<sup>(10)</sup>。次は放熱で、輻射で粗調整、氷の昇華で微調整という段取りになった<sup>(11)</sup>。そうである(図3)。人体そのものと余り変わらない構成なのはおもしろい。それよりも道具だてに変哲もないのがもっとおもしろい。宇宙というフロンティアがなければ話題にもならない技術であろう。フロンティ

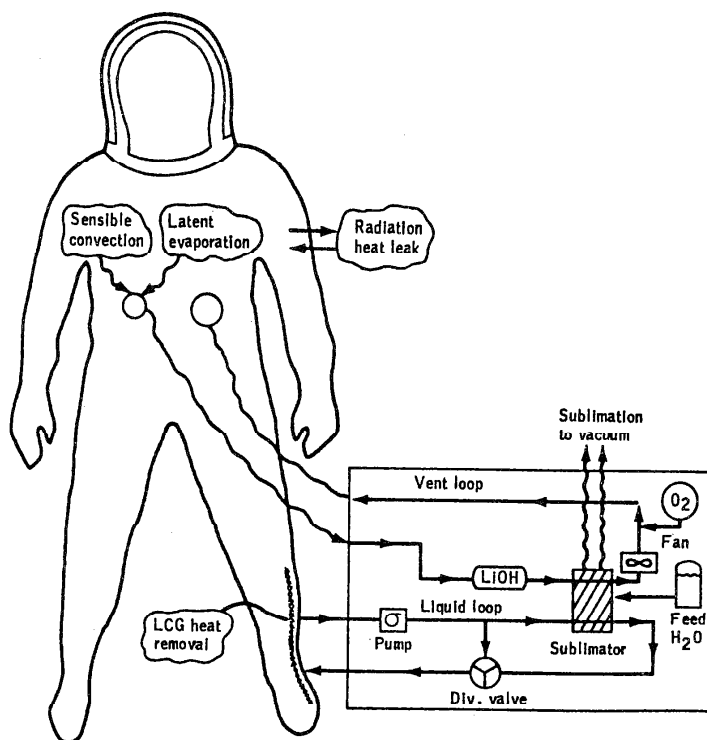


図3. 宇宙服の伝熱に関する概念<sup>(11)</sup>

アのある社会とない社会ではある技術に関する評価に天国と地獄の違いがでてくるというのも分かるような気がする。

日本に住んでいる限り人工的な環境は余り必要ないというのが筆者の態度だったが、歳を感じて来ると補助的な人工環境に理解が出て来る。そんなときにある会で次のような問題があるということをお教えされた。外科手術を行うときに患者の体温が下がり過ぎないように手術台に保温マットを敷いて患者を横たえる。保温マットには37℃の温水を流す。この温度は入浴するときの風呂の温度よりはずっと低い。それなのに極めて希だがやけどのような症状が現れることがある。

筆者の見方はこうである；平均的には安静にして快適と感じているとき皮膚温は33℃、深部体温は37℃と言われる。言い換えると代謝量が大きくなってもこれを放熱するために体内に4℃の温度差が必要ということになる。だから皮膚温を強制的に37℃に設定してやれば深部体温は41℃になる。血液の循環が弱まれば深部の体温はもっと上昇する。蛋白質の変質する温度が42℃だから、極めて危ない温度領域に達する。これがときにやけどのようになる原因であろう。

このアイディアは医学部の人も含めた共同研究の場で検討されるであろうと思う。見方の良しあしはその結果を待たねばならない。だが人工気候、特に身の回りに密着した衣服内気候のようなものの制御に関し、次の二点は発言しても間違いないと思われる。ひとつは、基本は放熱であって決して加熱ではないということ、しゃれて言えば生体はエントロピーを排出し続けなければならない。ふたつめは、顕熱だけで制御すると狭い危ういバランスになるから潜熱の経路を確保すること、これが生体の防御反応を最後に活かす道にもなる。

## 9. むすび

衣の伝熱を手懸けて不自由に感じている面がある。物質と生体を扱うのが不得手だと言うことである。機械工学科の出身者はだいたい同類で、分野の異なる研究をしても同様の不自由を感じているのではなかろうか。この不自由を感じる事が研究（たとえ卒業研究でも）の教育効果だと筆者は思っているが、手軽に教育効果を上げるテーマの一つが衣の伝熱だという感慨がある。

最後に、個人的にアクセスできる分野とはいえ学界や業界の方々多数にお世話になっている。これらの好意はすべて研究を進める際の宝で、心から感謝している。関係諸氏に不公正な記述のないことを祈って筆をおく。

## 文献

- (1)古田土ら、ふとんの保温性試験、第4回睡眠環境シンポジウム（睡眠環境研究会）、(1988)、pp33-43

- (2)例えば L. Fourt and N. Hollies, Clothing, (1970), p. 35, Marcel Dekker.
- (3)竹内ら、被覆された円柱の伝熱 (第3報)、機論、49-443, (昭58) p. 1493.
- (4)Fonseca, G. F. and Breckenridge, J. R., Tex. Res. J., 35-2, (1965), p. 95
- (5)Crank, J., the Mathematics of Diffusion, (1975), Oxford.
- (6)多田、透湿過程よりみた寝具の衛生学的研究、日本公衆衛生誌、7-11, (昭35) p. 1095.
- (7)例えば第17回繊維工学研究討論会 (繊維機械学会)、(1988)
- (8)竹内、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(1988)、p. 307.
- (9)竹内、藤野、第4回睡眠環境シンポジウム (睡眠環境研究会)、(1988)、p. 24.
- (10)Kuznetz, L. H., J. Biomechanical Engineering, 102-2, (1980), p. 155
- (11)Kuznetz, L. H., PhD Thesis, Univ. California, Berkeley, 1975.
- (12)例えば繊維学会誌 被服材料における最近の進歩特集 42-8, (1986)
- (13)前川、眠りとベディング、(昭63) p. 99, 日本工業新聞社.
- (14)野飼、繊維学会誌、36-, (1980), T-389.
- (15)田中ら、第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集、(1988), p. 433.
- (16)竹内、山田、第8回日本熱物性シンポジウム、(1987), p. 69.
- (17)Kamata, Y., et al., SEN-i GAKKAISHI, 44-2, (1988), T-78.

## 1. はじめに

熱交換器の管群に見られるように、工学的な対象となる物体は強い乱れを伴う流れの中に存在することが多い。伝熱機器に対する熱エネルギーの有効利用とも関連して、近年乱流中にある鈍い物体の流体力学的特性ならびに熱伝達特性を明らかにすることを目的とする研究が行われている<sup>1)</sup>。この方面の研究では気体の流れの中に乱流格子によりほぼ等方性の乱れを与えて実験されたものが多い。これらは主流部乱れの影響を乱れの強さ $\sqrt{u^2}/U_\infty$ と乱れのスケール $L_x/d$ の二つのパラメータによって規定しようとするものであるが、その熱伝達機構は必ずしも解明されてはおらず、特に、主流部乱れが背面熱伝達に及ぼす影響の機構には不明な点が多い。一般に、格子乱流は三次元のかなり広い周波数スペクトル幅を持つ流れであるが、この乱れとある意味で関連性あるいは同様な効果を示すものとして流体や物体に音波や振動を与えるやり方が考えられる<sup>1)</sup>。この方法では上記の二つの乱流特性量の他に、特定周期を持つ一次元的な粒子運動のかく乱に限定着目できるために、現象を微視的に解析する上での利点がある<sup>2)</sup>。

以上の観点から、本研究では、流れに直交した加熱円柱表面から気流中への熱伝達、とりわけ背面熱伝達率に及ぼす主流部乱れの影響のメカニズムを解明する目的で、円柱まわりの流れに音波を照射して実験的解析を行った<sup>3)~6)</sup>。円柱前方層流境界層領域については、その流動ならびに熱伝達も理論的解析によって良い結果が得られている。しかしながら、本研究が主に対象としたはく離領域の流れと熱伝達は、現在のところ理論的解析が困難な領域であって、実験的解析を行う意義が大きい。本報告では、亜臨界域における加熱円柱まわりの流れに円柱軸に直角方向および円柱軸方向の音響的かく乱を加えた場合に、近傍後流の一般的な流体力学的特性を踏まえて主に背面の熱伝達特性を調べた。さらに、近傍後流の変動する速度と温度を直接同時に測定することにより、加熱の影響ならびに音響的かく乱の効果を実験的に解析した。これらの結果に基づいて、加熱円柱からのうず流出過程とはく離域の熱伝達特性との関連について検討を加えた。

## 記 号

$C_d$  : 円柱の形状抵抗係数

$C_p$  : 円柱表面圧力係数 =  $(p - p_\infty) / \{(1/2) \cdot \rho U_\infty^2\}$

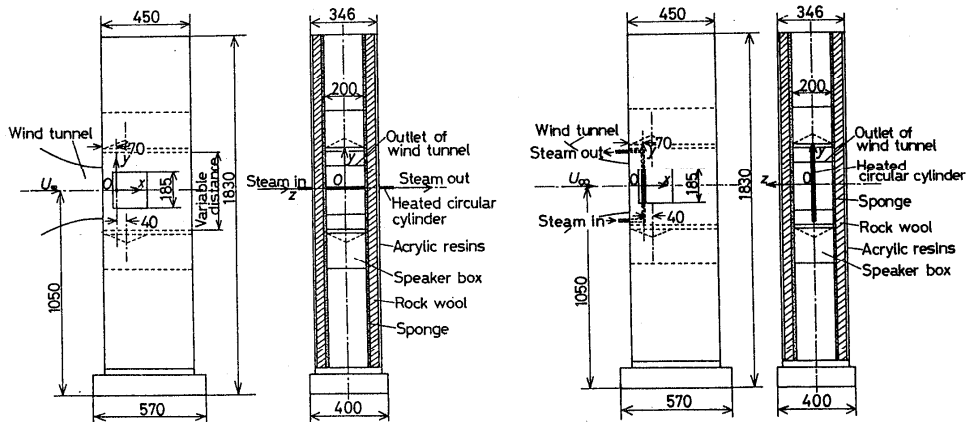
- $C_{pb}$  :  $\theta = 180^\circ$  で定義した背圧係数  
 $C_{pbo}$  : 音響的かく乱を加えない時の  $C_{pb}$   
 $C_{pbv}$  : 音響的かく乱を加えた時の  $C_{pb}$   
 $d$  : 円柱直径  
 $E$  : 乱れエネルギー  
 $f$  : 周波数  
 $f_a$  : 音波の周波数  
 $f_s$  : うず流出周波数  
 $f_t$  : 遷移波の周波数  
 $K$  : うず度の輸送量  
 $L_x$  :  $x$  方向の積分特性距離  
 $Nu$  : 局所ヌセルト数  $= \alpha \cdot d / \lambda$   
 $\overline{Nu}$  : 平均ヌセルト数  
 $P$  : 進行波音場  
 $p$  : 円柱表面静圧  
 $p_\infty$  : 主流静圧  
 $Pr$  : プラントル数  
 $Re$  : レイノルズ数  $= U_\infty \cdot d / \nu$   
 $S$  : 定在波音場  
 $S(\Gamma)$  : 速度変動のパワースペクトル密度  
 $SPL$  : 音圧レベル  
 $St$  : ストローハル数  $= f_s \cdot d / U_\infty$   
 $\overline{T}$  : 時間平均温度  
 $\overline{T_f}$  : 膜温度  $= (\overline{T_w} + T_\infty) / 2$   
 $\overline{T_w}$  : 加熱円柱壁温  
 $T_\infty$  : 主流温度  
 $\Delta T$  : 加熱円柱壁温と主流温度の差  $= \overline{T_w} - T_\infty$   
 $t$  : 変動温度  
 $\overline{U}$  : 時間平均速度  
 $U_\infty$  : 主流速度  
 $u, v, w$  :  $x, y, z$  方向の気流の変動速度, すなわち乱れ  
 $v_a$  : 音響を付加した時の  $y$  方向の変動速度  
 $u_{fa}, v_{fa}, w_{fa}$  : 周波数  $f_a$  の音波を付加した時の気流乱れの 3 成分  
 $x, y, z$  : 図1 に示す座標系



- $\alpha$  : 熱伝達率
- $\theta$  : 円柱前方岐点から測った角度
- $\lambda$  : 熱伝導率
- $\nu$  : 膜温度  $T_f$  における動粘性係数
- $\rho$  : 密度
- 添 字
- 1 : せん断層内縁における値
- 2 : せん断層外縁における値
- a : 音響的かく乱を付加した時の値
- f : 周波数  $f s$  を有した値
- 2f : 周波数  $2 f s$  を有した値
- max : 最大値を表す

## 2. 実験装置および方法

実験装置は、図1に示すように加熱円柱まわりの流れの場に円柱軸に直角方向および円柱軸方向の音場を重ね合わせた結果として生ずる熱伝達率と近傍後流の変化を測定するために風洞出口に測定部ダクトを取りつける。風洞出口より70mm下流に加熱円柱を水平ならびに鉛直に設置した。円柱位置での主流速度の一様性、二次元性は十分確保されており、主流乱れ強さはほぼ0.1～0.4%である。流れの場を与える音響は、測定部ダクト上下の10Wコーン形スピーカ（直径180mm）によって与えられ、流れに直角方向の粒子速度を持つ白色雑音場ならびに単一周波数の進行波音場と定在波音場をダクト内に発生させた。測



(a) 円柱軸に直角方向に音波を照射する場合 (b) 円柱軸方向に音波を照射する場合

図1 実験装置

定部内に発生した音場の音圧レベル SPL はダクト内にコンデンサマイクを挿入して精密音圧計によって測定された。また、流れに音波を付加した時に生じる気流乱れ  $u_{fa}$ ,  $v_{fa}$ ,  $w_{fa}$  は X 形熱線プローブによって測定された。

加熱円柱は直径 18mm の局所熱伝達率測定用と直径 10mm の近傍後流測定用の 2 種類が用いられ、ともに厚さが 1mm の銅管で大気圧蒸気の貫流により管壁温度は一様 (ほぼ 100 °C) になっている。局所熱伝達率測定用円柱は、図 2 に示すごとく、円管表面の溝に電気加熱のできる長方形銅棒を設置し、銅棒を円管内壁面でベークライト平板により固定し支持して内部の蒸気から断熱する。また銅棒壁と円管表面との間の裂け目にエポキシ系接着剤を詰めて、両者間の熱移動を阻止して十分な断熱状態を作り、外形が完全な円周になるように旋盤仕上げした後表面を紙やすりで磨いてある。銅棒内部に  $\phi 0.5\text{mm}$  の加熱用カントル線を 1 本通し、また表面温度を測定するために素線径 0.1mm の銅・コンスタンタン熱電対を長手方向に 10mm 間隔で 3 箇所埋め込んだ。その際熱電対の接合部が銅棒表面上にくるように取付けには十分注意した。円管表面温度測定用の熱電対は円柱中央断面内の周上 (120° 間隔で 3 箇所) に埋め込まれ、接合部と円管壁面が同一面内にあるように内部から接着剤で固定した。また、円管の一端には全周分度盤 (1/10° の角度変化まで読取り可能) を取付てあり、円柱の回転角がわかる。局所熱伝達率の測定は、図 2 に示す円柱を回転させ表面温度一定のもとで測定された。

加熱円柱近傍後流の変動する速度と温度の同時測定には、定温度形熱線流速計と定電流形抵抗線温度計とを組み合わせ、両者の出力を相互に電気的に補償して速度と温度の変動を分離する方法を用いた<sup>7)</sup>。二線式プローブの配置を図 3 に示す。熱線および抵抗線はともに円柱軸に平行で、それぞれ直径が 5 $\mu\text{m}$  と 1 $\mu\text{m}$  で長さが 1.25mm と 0.4mm のプラチナめっきタンゲステン線である。検定の結果、速度信号は温度の影響を受けずにきれいにまとまり、速度と温

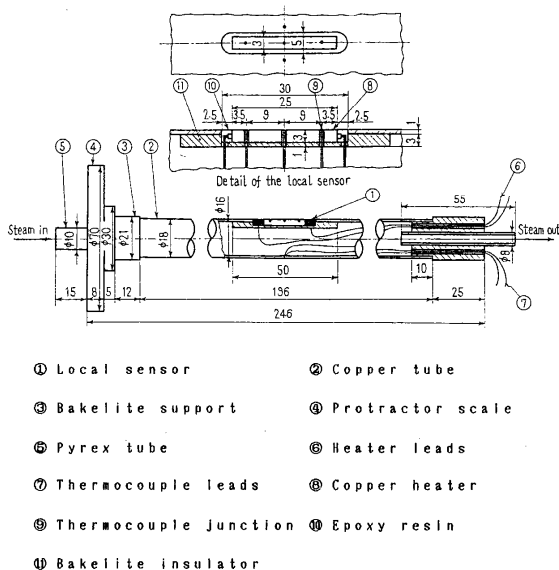


図 2 熱伝達率測定用円柱

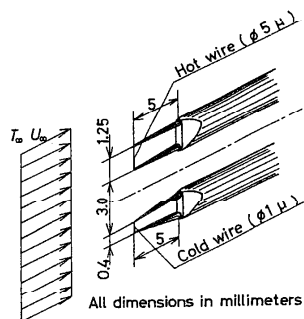


図 3 二線式プローブ

度の変動を分離測定できることを確認した。速度分布と温度分布は、流速計と温度計の出力をそれぞれ自動プローブトラバース装置の出力と連動させてXYレコーダに記録し、同時に実時間相関器とフーリエ変換器によって変動の周波数パワースペクトルを求めた。また、円柱軸方向

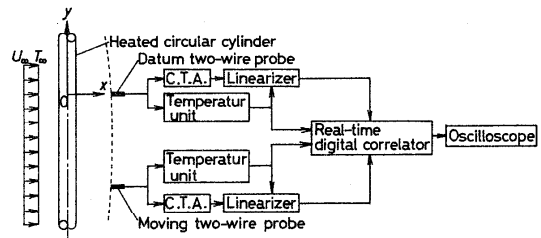


図4 相互相関測定

向における時空相互相関の測定は図4に示す様に、最大乱れ ( $\sqrt{u^2}$ )<sub>max</sub> の位置に基準用の二線式プローブを固定し、移動用の二線式プローブを特定の円柱軸方向の位置でx方向に移動させて速度変動相互相関と温度変動相互相関を測定し、それぞれの周期的変動の位相が一致した点を求めた。

測定は温度差  $\Delta T$  が約80℃のもとで、音響周波数  $f_a$  とその強さ  $\sqrt{v a^2} / U_\infty$  および音場の形態を種々変化させて行われた。実験条件をまとめて表1と表2に示すが、3.3節と3.4節の結果は  $U_\infty = 3.9$  m/s で、3.1節の図8(a)に示された音場を付加して得られた。ただし、表中の  $f_a$  の値は後述の式(1)から求められた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 音響周波数の決定とその整理

音響による干渉によって円柱背後のカルマンうずの強さが増大し発生位置も円柱に接近するために、近傍後流の変動速度が増加して背圧を低下させる。一例として、非加熱円柱で  $Re = 2500$  の場合に  $f_a = 300$  Hz の音響を円柱軸方向に付加した時の、円柱まわりの圧力分布を図5に示す。同図においては、 $C_p$  は2種類の  $\sqrt{v a^2} / U_\infty$  をパラメータにとって示されている。図5から  $C_p$  は音響の付加に

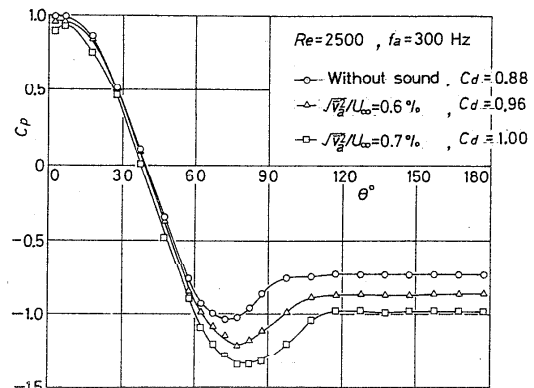


図5 等温円柱まわりの圧力分布 ( $Re=2500$ )

表1 実験条件 (熱伝達率測定)

$Re = \frac{U_\infty d}{\nu}$	$U_\infty$ m/s	$f_a$ Hz	SPL dB	Sound field	$\sqrt{v a^2} / U_\infty$ %
5000	5.24	Without sound			0.18
		290	118.7	P	0.68
11000	11.52	Without sound			0.14
		976	117.3	S	0.57
15000	15.71	Without sound			0.12
		1552	117.9	S	0.55
20000	20.94	Without sound			0.09
		2418	118.6	S	0.52

表2 実験条件 (近傍後流測定)

$Re = \frac{U_\infty d}{\nu}$	$U_\infty$ m/s	$f_a$ Hz	SPL dB	Sound field	$\sqrt{v a^2} / U_\infty$ %
2069 (Heated)	3.9	Without sound			0.28
		270	122.2	P&S	0.80
2500 (Isothermal)	3.9	Without sound			0.28
		300	122.2	P&S	0.80
3607 (Heated)	6.8	Without sound			0.17
		690	121.5	P&S	0.71
4500 (Isothermal)	6.8	Without sound			0.17
		800	121.5	P&S	0.71

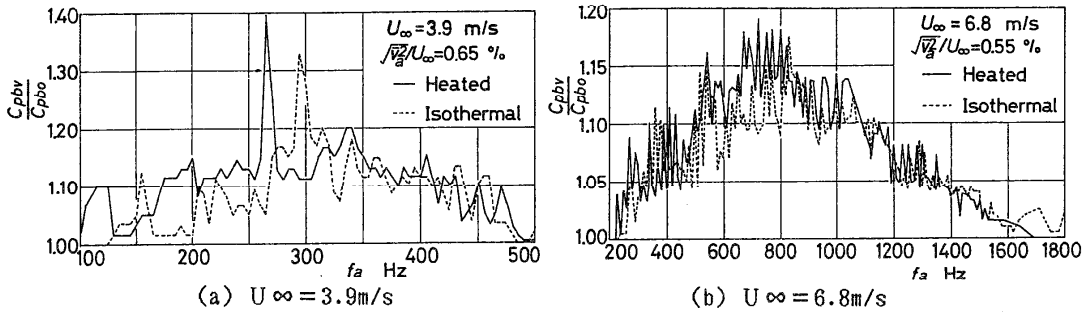


図 6 背圧係数に及ぼす音響周波数の影響

よって影響を受け円柱背部の圧力は音響を加えない場合よりも低くなっており、これから円柱に作用する形状抵抗が増加することがわかる。また、明らかに音響の付加により円柱表面からの流れのはがれが遅れ、ちょうど乱流格子により乱れを与えた場合のような現象が生じている。音響周波数  $f_a$  の決定に際して円柱加熱の影響を調べるために、背圧係数  $C_{pb}$  を近傍後流の変化に対する尺度として用いる。ここでは、白色雑音場と単一周波数の進行波音場による  $C_{pbv} / C_{pbo}$  への影響を調べその結果を図6に示す。ここで添字  $v$  は音響的かく乱を加えない場合を  $v$  は加えたことを意味し、そして実線は加熱の場合で破線は非加熱の場合の結果である。同図は、円柱軸方向に音波を照射した場合の結果であるが、円柱軸に直角方向の音波を加えた場合にも同様の結果が得られた。また、2種類の主流速において  $f_a$  に対する  $C_{pbv} / C_{pbo}$  への影響は加熱と非加熱の場合で類似的であるが、 $(C_{pbv} / C_{pbo})_{max}$  を与える  $f_a$  は加熱の影響により低周波数側へずれる。その  $f_a$  は、 $U_{\infty} = 3.9\text{m/s}$  において加熱で約270Hz、等温で300Hzであり、また  $U_{\infty} = 6.8\text{m/s}$  において加熱で約690Hz、等温で800Hzである。周波数分析によって加熱の場合にも等温と同様にはく離直後のせん断層内で高周波数の正弦波状速度変動 ( $U_{\infty} = 3.9\text{m/s}$  で  $f_t = 160 \sim 330\text{Hz}$ 、 $U_{\infty} = 6.8\text{m/s}$  で  $f_t = 380 \sim 980\text{Hz}$ ) いわゆる層流から乱流への遷移波が観察される。これらは等主流速で観察された等温流の遷移波周波数 ( $U_{\infty} = 3.9\text{m/s}$  で  $f_t = 200 \sim 370\text{Hz}$ 、 $U_{\infty} = 6.8\text{m/s}$  で  $f_t = 480 \sim 1090\text{Hz}$ ) よりも低めの値を与える。したがって、加熱円柱からのうず流出過程に最も著しい影響を与え得る音響周波数は、等温の場合と同様に  $f_t$  に関係したものであることが類推され、音波の照射方向には関係しないために、これらの  $f_a$  をその時のうず流出周波数  $f_s$  で割って無次元化し、 $\nu$  を使った  $Re$  の関数として図7に示す。同図に

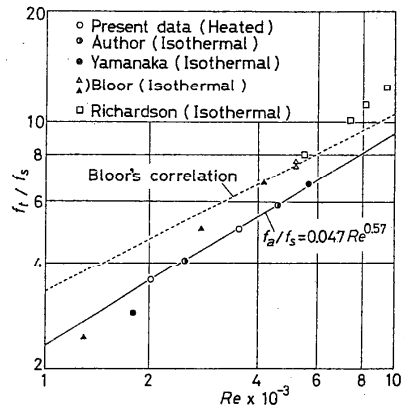


図7 音響周波数および遷移波周波数

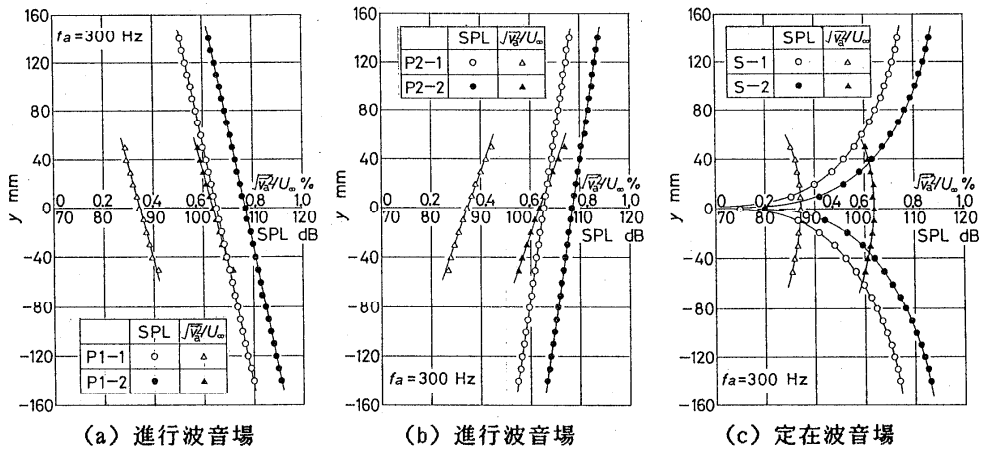


図 8 測定部に生じた音場 ( $U_{\infty} = 3.9 \text{ m/s}$ )

は、等温の場合に得られた山中ら<sup>8)</sup>の結果ならびに Bloor<sup>9)</sup> や Richardsonら<sup>10)</sup>により得られた  $f t$  の結果も示されている。加熱の場合において円柱軸に直角方向ならびに円柱軸方向に音波を照射して得られた結果は、同じく等温流の結果とともに  $Re$  に対して、

$$f a / f s = 0.047 Re^{0.57} \quad (1)$$

で整理できてこれを実線で示す。また、Bloor の関係式<sup>9)</sup>は、

$$f t / f s = 0.1 Re^{0.5} \quad (2)$$

で表される。

測定部に作った音場の一例を図8に示す。同図は円柱位置における SPL とその時の気流の  $y$  方向乱れの相対的強さ  $\sqrt{v'a^2}/U_{\infty}$  の  $y$  方向分布の測定結果であり、P1〔図8(a)〕およびP2〔図8(b)〕はそれぞれダクトの下方 ( $y = -290 \text{ mm}$ ) および上方 ( $y = +290 \text{ mm}$ ) のスピーカ 1 個のみを用いた進行波音場を表し、S〔図8(c)〕は上下のスピーカ 2 個を用いた定在波音場を表す。ここで、付加した音響周波数は  $f a = 300 \text{ Hz}$  である。

### 3・2 熱伝達率の一般的特性

円柱軸方向の音響を付加した場合としない場合とについて円柱表面の局所熱伝達率分布を測定し、局所熱伝達率  $\alpha$  をヌセルト数  $Nu = \alpha \cdot d / \lambda$  の無次元形で表現し図9に示す。音響を付加しない場合に本実験の  $Re$  範囲では、円柱前方の層流境界層領域 ( $0^{\circ} \leq \theta \leq 80^{\circ}$ ) の  $Nu$  は前方岐点 ( $\theta = 0^{\circ}$ ) からはく離点近傍 ( $\theta = 80^{\circ}$ ) で最小値をとるまで単調に減少しており、また、はく離領域 ( $80^{\circ} \leq \theta \leq 180^{\circ}$ ) の  $Nu$  は  $\theta = 90^{\circ}$  あたりから再び増大し始めて  $\theta = 110^{\circ}$  あたりで一つの極大値をとり、その後円柱面に沿って比較的滑らかに増大して後方岐点 ( $\theta = 180^{\circ}$ ) で最大値を持つに至る。これらの  $Nu$  分布の一般的特性は音響を付加しても類似的であるが、しかし、はく離域  $Nu$  は著しく増大し特

に後方岐点  $Nu$  と  $\theta = 110^\circ$  の極大値の増加が顕著である。一方、前方域では音響の影響はほとんどなく、 $Nu$  はわずかに増加するだけである。

円柱軸に直角方向の乱れの効果と円柱軸方向の乱れの効果とを比較検討し、両方向の音波の照射による熱伝達の増加量を厳密に定量的に把握しておくことは重要である。各領域における  $Nu$  分布を数値積分して平均値を求め、これらを図10に示す。前方域  $Nu$  は  $Re$  のほぼ1/2 乗に比例し、はく離域  $Nu$  は  $Re$  の 2/3乗に依存する。音響の付加によって前方域  $Nu$  は  $Re$  によらずわずかに増加するだけであるが、はく離域  $Nu$  は著しく増加し  $Re = 5000$  のときに最も大きく70%もの増加が得られる。はく離域  $Nu$  の増加により全域 ( $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ )  $Nu$  も増加し、本実験の  $Re$  範囲で14~28%の増加が得られたが  $Re$  が増大するにつれて  $Nu$  の増加率は低下する。以上述べた  $Nu$  分布に及ぼす音響の影響は、円柱軸に直角方向の音波を照射して得られた結果とその一般的傾向がほぼ一致する。これは本実験条件の範囲に限定すれば、結果的に見た場合に実験精度の範囲内で一致しており、照射方向により本質的には伝熱機構にほぼ差は無いと考えられる。また、音場の形態(進行波と定在波)による本質的な差異は何等認められず、音響的かく乱の強さ(音圧)の影響により円柱軸に直角方向に音波を照射して得られた結果と同程度の変化が生じた。

一般に、主流部乱れの影響ははく離域よりも前方層流域でより著しく現れ、乱れ強さを増大させることにより前方域で50%もの熱伝達率の増加が得られている<sup>1)</sup>。しかし、はく離域に及ぼす影響については、後方岐点での  $Nu$  の増加は見られるものの一般にその傾向は研究者らにより一致していない。また、流体力学的には主流部乱れの増加により背圧係数の低下ならびにはく離点の後退などが報告されており、音響の付加によっても類似の現象が見られた。熱伝達の上からは1%以下の主流乱れ強さであれば乱れそのものによる影響は無視できるといわれているが、しかし本実験のように  $\sqrt{v'a^2}/U_\infty = 0.52 \sim 0.80\%$  の音響的かく乱に対してもはく離域  $Nu$  は著しく増加する。したがって、乱れの大きさのみ

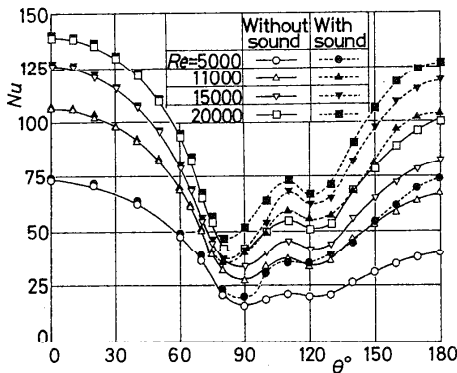


図9 局所熱伝達率分布

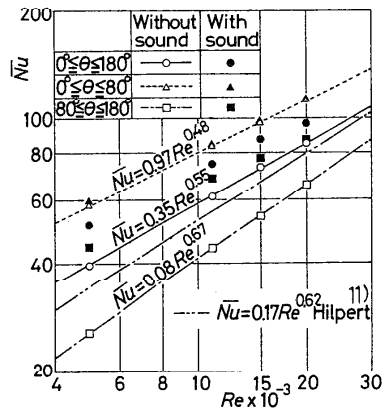
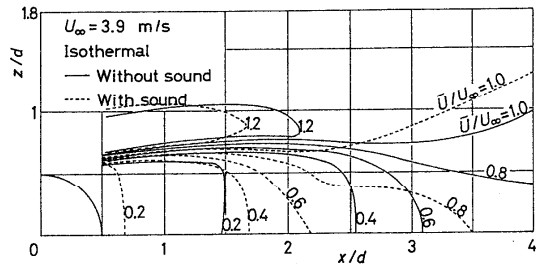


図10 平均熱伝達率

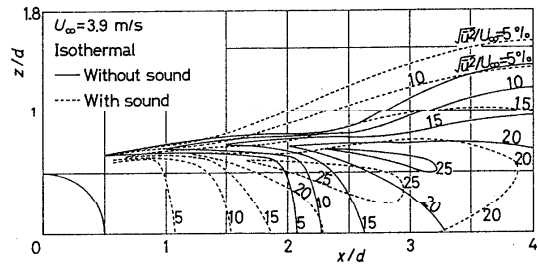
からは背面熱伝達の増加機構の理解は得られず，音波が加熱円柱近傍後流の形成過程に及ぼす乱れの役割ならびにそのメカニズムを細かく議論しなければならぬと思われる。

### 3.3 せん断層の拡散

非加熱の円柱近傍後流を図3の二線式プローブを用いて測定した等平均速度  $\bar{U}/U_\infty$  線図と等変動速度  $\sqrt{\bar{u}^2}/U_\infty$  線図を図11の実線で示す。これらは単一のI形熱線プローブで測定した結果とほぼ一致する。次に，円柱加熱の場合の速度線図を図12に，また等平均温度  $(\bar{T} - T_\infty) / (\bar{T}_w - T_\infty)$  線図と等変動温度  $\sqrt{\bar{t}^2} / (\bar{T}_w - T_\infty)$  線図を図13の実線でそれぞれ示す。加熱と等温の流れでは，一般にその流れのパターンは類似的であるが，しかし円柱加熱におけるせん断層内の乱れ  $u$  は等温流に比べてその発達が遅れ，等  $\bar{U}/U_\infty$  線図からもわかるように円柱背部の死水域の大きさもわずかに大きくなる。一方，加熱と等温の流れに対してそれぞれの  $Re$  における中心周波数の音響を円柱軸方向に付加した結果を図11～13の破線によって表す。加熱の場合には，等温の場合と同様に音響による流れへの干渉の有無にかかわらず流れの一般的様子に変化は無いが，しかし音響の付加によりはく離せん断層の巻き込みがより円柱近くで起こり，かつせん断層の拡散が早められることがわかる。

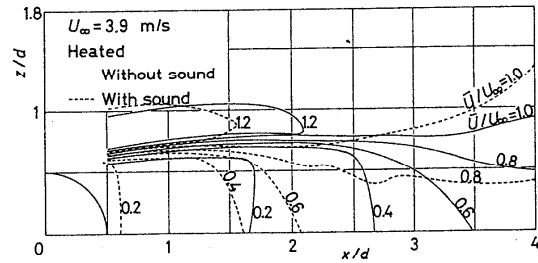


(a) 等平均速度  $\bar{U}/U_\infty$  線図

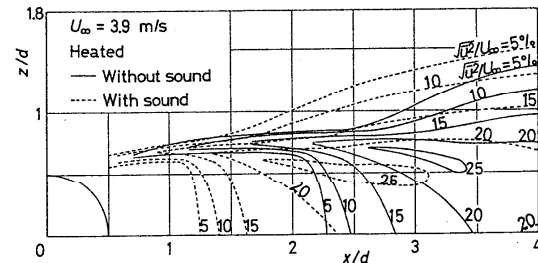


(b) 等変動速度  $\sqrt{\bar{u}^2}/U_\infty$  線図

図11 せん断層の拡散 (等温)



(a) 等平均速度  $\bar{U}/U_\infty$  線図



(b) 等変動速度  $\sqrt{\bar{u}^2}/U_\infty$  線図

図12 せん断層の拡散 (加熱)

単位時間当たりの流れに直角な断面を通過するせん断層のうず度の輸送量  $K$  と乱れエネルギー  $E$  を

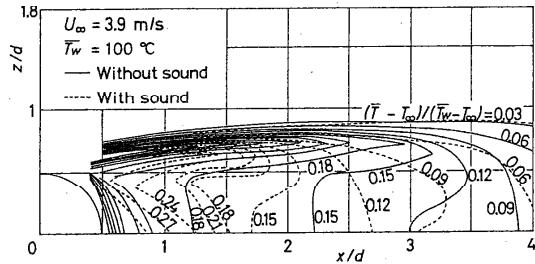
$$K = \int_1^2 (\bar{U}/U_\infty) \{d(\bar{U}/U_\infty)/dz\} dz$$

$$= (\bar{U}_2^2 - \bar{U}_1^2) / 2U_\infty^2 \quad (3)$$

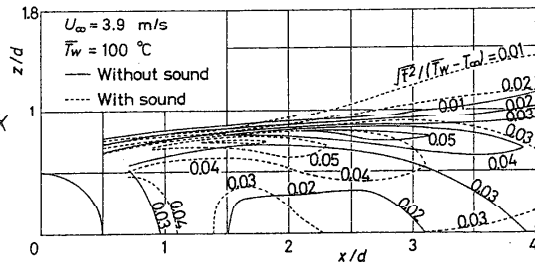
$$E = \int_0^\infty \bar{u}^2 / U_\infty^2 d(z/d) \quad (4)$$

と定義しこれらの結果を図14に示す。音響を付加しない場合には、加熱の影響により  $E_{max}$  の位置ならびに  $K$  の急減する位置 (図中矢印) と  $E$  の急増する位置 (図中矢印) とが円柱から遠ざかるが、その  $E_{max}$  の値は等温の  $E_{max}$  とほぼ等しい。これらの位置はともに音響の干渉によってより円柱に接近し  $E_{max}$  の値もより増大されるが、この音響による効果は等温よりも加熱の方が顕著に現れる。以上のごとく、円柱軸方向の音波の照射により非加熱よりも加熱の流れの方がわずかに大きな影響を受けていることから、加熱状態での流動と音響振動とのカップリングの結果生じた流れは、後述する熱音響流と類似な現象と考えることができ、この効果により音響の熱伝達促進効果が考察できるものと思われる。円柱軸に直角方向の音波の照射によっても上述と同様の現象が観察された。

近傍後流内の速度変動の周波数分析の結果から、速度変動  $u$  のうちで  $fs$  成分の  $uf$  と  $2fs$  成分の  $u2f$  が支配的であったが、温度変動  $t$  の周波数分析の結果からも、 $t$  は死水域における比較的低い周波数変動を除いて大半を  $fs$  成分の  $tf$  と  $2fs$  成分の  $t2f$  によって占められていることがわかる。また、オシロスコープの波形観察から  $uf$  と  $tf$  の周期はほぼ  $180^\circ$  位相がずれており相互に強く関連していることがわかる。図12と図13および周波数分析の結果から、はく離せん断層が下流に進むにつれてその拡散が促進され、 $uf$  と  $tf$  の値も急増しそれらの分布も後流軸上にまで広がる。この時には後流軸上の  $u2f$



(a) 等平均温度  $(\bar{T} - T_\infty)/(T_w - T_\infty)$  線図



(b) 等変動温度  $\sqrt{u^2}/(T_w - T_\infty)$  線図

図13 せん断層の熱拡散

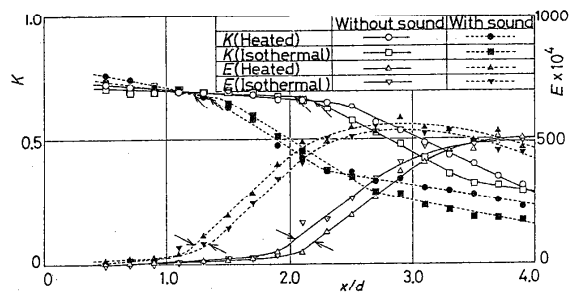


図14 うず度の輸送量  $K$  と乱れエネルギー  $E$

( $U_\infty = 3.9 \text{ m/s}$ )



と  $t2f$  も急増し、円柱上下肩から流出するうずの作用によって後流軸上のある点を中心とした  $u2f$  と  $t2f$  の分布が出現する。音響を付加するとせん断層内の  $uf$  と  $tf$  は増加し、したがって、後流軸まわりの  $u2f$  と  $t2f$  の分布もより円柱近くで顕著に現れるようになる。

以上の結果により、音響的かく乱の効果は、(1) 前方層流境界層のはく離の遅れ、(2) はく離せん断層内の流れの層流から乱流への遷移位置の前進、(3) 乱流はく離せん断層を厚くする効果、(4) 乱流はく離せん断層の円柱壁面への接近、(5) うず形成領域長さの減少、(6) せん断層内の流れのうず度輸送効果による乱れエネルギーの増大（後流うずへのエネルギー供給）である。したがって、これら一連の近傍後流の形成過程に及ばず音響的かく乱の役割、すなわち前項(1)～(4)の結果、 $\theta = 110^\circ$  付近の円柱壁面と乱流せん断層内の流れとの間の熱交換が活発となり、また、(5)と(6)の結果、円柱背面近くの流れが大きくなって温度境界層厚さが薄くなり、後方岐点  $Nu$  が増大したものと考えられる。

### 3.4 近傍後流の三次元特性

本節では、加熱円柱からのうず流出過程における三次元的特性に及ぼす円柱軸方向音響的かく乱の効果を明らかにする。軸方向に配列された二線式プローブによって測定された最大乱れ位置におけるうず糸の形状を図15に、また、その位置での速度変動の周波数パワースペクトルを図16に示す。等温流のうず糸形状は、2本のI形熱線プローブによって測定されたうず糸形状とほぼ一致する。音響を付加しない場合には、円柱の加熱によって等温流よりもうず糸形状の三次元的変形が助長されるが、音響の付加によりうず糸の円柱への接近とともに、その三次元的変形から二次元的形状へと変化する傾向が見られる。これらの現象は、3.3節で考察した後流うずへのエネルギー供給の促進効果という二次元的現象の三次元的側面であると解釈できるため、うず糸の三次元的形状から二次元的形状への変化は背面の熱伝達率増加に寄与するものと考えられる。主流に乱れが含まれる場合にはうず糸の三次元的変形がさらに助長され、乱れの大きなものほどうずに基づく軸方向の速度変動の相関長さが減少することが報告されている<sup>[2]</sup>。これは、主流中に含まれる乱れのように不均一で三次元的なかく乱が存在すると、二次元的うず糸がこの三次元的なかく乱による摂動によってうず糸自身の誘導作用により次第に変形が起こり、粘性と混合の作用によるうずエネルギーの散逸の結果、うず自身を減衰させるように働くためと考えられる。しかし、円柱をそのうず流出周波数の近傍の周期で並進振動させる時にも、

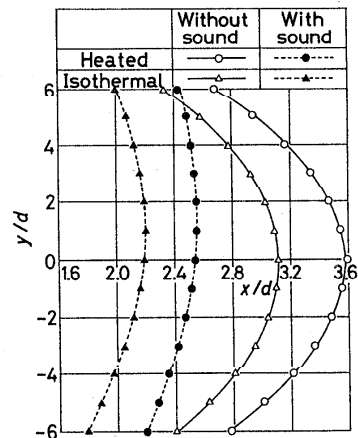


図15 最大乱れ位置( $x/d$ )<sub>m</sub>におけるうず糸形状( $U_\infty=3.9\text{m/s}$ )

本実験結果と類似の現象が見られる<sup>13)</sup>ことから、音響ならびに振動の効果はせん断層内の流れのうず度輸送効果による乱れエネルギーの増大、すなわち後流うずへのエネルギー供給を促進させるように働くと考えられる。したがって、結果的には近傍後流の三次元的特性に及ぼす音響ならびに振動の効果と主流乱れの効果とで、それらの現象に顕著な差異が見られる。また、速度乱れ最大位置での温度変動の信号は、その位置での速度変動の周期と  $180^\circ$  位相がずれたものとして検出されるが、二つの温度変動の相互相関測定によって同位相の位置を円柱軸方向に連ねた曲線は、加熱円柱のうず糸形状とほぼ一致した。

次に、 $f_s$  の三次元特性について考察する。図16から、音響を加えない場合には加熱の影響によって  $f_s$  は等温の場合より約 2Hz減少し、パワーのピークの高さも減少してその分散が広がる傾向が見られる。三次元的には、等温ならびに加熱の場合においてスパン中央で  $f_s$  のピークが最大となり、両端部で最小になる傾向が見られるが、その中心周波数のスパン方向の一様性ならびに対称性は加熱よりも等温の場合で良好である。次に音響を加えると、 $f_s$  は加熱で約 2Hz、等温で約 4Hz増大し、中心周波数のスパン方向の一様性と対称性はかなり改善される。これは、音響による干渉の結果後流うずのエネルギーが増大したためであり、熱伝達促進の効果に間接的な影響があるとはいえ、中心周波数のスパン

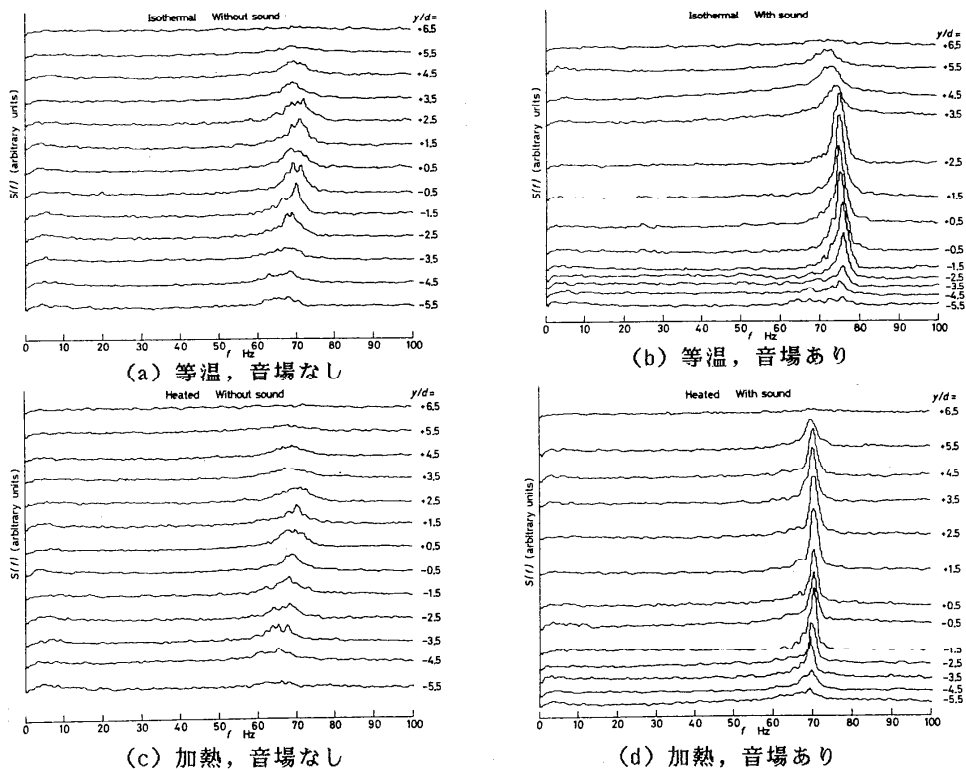


図16 最大乱れ位置( $x/d$ )mにおける速度変動の周波数パワースペクトル ( $U_\infty = 3.9\text{m/s}$ )

方向の一様性と対称性それ自体直接的な効果はないと考えられる。音響的かく乱の付加による  $f_s$  の増加は、音圧レベルの振幅依存性、すなわち非線形効果に基づくもので、この現象は主流の影響の比較的弱い低  $Re$  領域で顕著に現れた。類似の現象は Fand<sup>2)</sup> によって最初自然対流の場で見い出されたもので、thermoacoustic streaming (熱音響流) として知られているが、彼らはこの流れが低  $Re$  範囲の強制対流の場でも生ずることを指摘した。しかるに、本実験の比較的低い  $Re$  範囲の強制対流の場においても thermoacoustic streaming と類似の現象が見られ、そしてうず流出周波数の増加によって熱量輸送が促進されると考えられる。以上述べた現象は、円柱軸に直角方向の音響的かく乱の付加によっても生じた。

#### 4.まとめ

亜臨界域の流れに直交する加熱円柱まわりの流動と熱伝達に及ぼす円柱軸に直角方向ならびに軸方向の音響的かく乱の効果に関する実験的解析から、次の点が明らかになった。

- (1) 加熱円柱まわりの流動と熱伝達に及ぼす軸に直角方向の音響的かく乱の効果と軸方向の音響的かく乱の効果はほぼ一致する。
- (2) 1%以下の乱れ強さの音響的かく乱は円柱背面熱伝達率を著しく増加させるが、前面熱伝達率にはほとんど影響を与えない。
- (3) 加熱円柱からのうず流出過程に最も著しい影響を与える音響周波数は、はく離せん断層内に現れる遷移波の周波数に関係したものであり、 $\nu$  を使った  $Re$  に対して整理すれば、等温の場合とほぼ同様になる。
- (4) 加熱円柱近傍後流の形成過程とその三次元的特性に及ぼす音響的かく乱の効果は、乱流はく離せん断層を厚くする効果とその円柱壁面への接近、およびうず形成領域長さの減少ならびに後流うずへのエネルギー供給の促進とそれに伴ううず糸の二次元的形状への変化であり、これらは円柱背面の熱伝達率増加の機構に重要な役割を果たす。
- (5) 円柱加熱によってはく離せん断層内の速度変動の発達が遅れて、うず流出周波数は数 Hz 程度減少する。また、周期的な温度変動は主に加熱円柱からのうず流出に基づくものであり、周期的な速度変動と強い関連がある。
- (6) 本実験の比較的低い  $Re$  範囲の強制対流の場では、音響的かく乱の付加によって thermoacoustic streaming と類似の現象が生ずる。

#### 参考文献

- 1) Kestin, J., *Advances in Heat Transfer*, Vol. 3 (1966), 1, Academic Press.
- 2) Fand, R. M. and Cheng, P., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 6-7 (1963), 571.
- 3) 安達・ほか 2名, 機論, 45-390, B (昭54), 241.

- 4) 岡本・ほか 2名, 機論, 46-405, B (昭55), 813.
- 5) 岡本・ほか 2名, 機論, 47-422, B (昭56), 1986.
- 6) 岡本, 航空宇宙学会誌投稿中.
- 7) Chevray, R. and Tutu, N.K., Rev. Sci. Instrum, 43-10(1972), 1417.
- 8) 山中・安達, 音響学会誌, 27-5 (昭46), 246.
- 9) Bloor, S., J. Fluid Mech., 19-2(1964), 290.
- 10) Peterka, J.A. and Richardson, P.D., J. Fluid Mech., 37-2(1969), 265.
- 11) Hilpert, R., Forsch. Ingenieurwes., 4-5(1933), 215.
- 12) 有江・ほか 3名, 機講論, No.780-11 (昭53-8), 37.
- 13) Toebes, G.H., Trans. ASME, Ser. D, 91-9(1969), 493.

## 1. 緒言

海洋温度差発電は、海洋の17~30℃の表層海水(温海水)を高熱源に、表面から700~1000mの所1~7℃の深層海水(冷海水)を冷熱源にして、発電サイクルを構成し電気エネルギーを取り出すシステムである。

この海洋温度差発電は、英語ではOTEC (Ocean Thermal Energy Conversion, オテック) と呼ばれている。

このOTECの原理は、1881年にフランスのJ. D'Arsonvalによって最初に提案されたものである。この発電方式の原理そのものは、新しいものでは通常の火力発電や原子力発電とほぼ同じものである。

OTECの実用化のための本格的研究が行われ出したのは、1973年以降である。それから、アメリカと日本でかなり積極的に行われた。

最近、石油事情の好転にもかかわらず世界のあちこちで海洋温度差発電を実用化しようという動きが起きている。我が国でも日本のビッグカンパニー29社によって、「海洋温度差発電研究会」が設立され、OTECを実用化しようと活発な研究が行われている。

本報では、OTECの開発の歴史をたどるとともに、熱交換器の性能とシステムの最適化について重点をおいて最近の動向を述べる。

## 2. 海洋温度差発電の開発の小史<sup>1)</sup>

海洋温度差発電の歴史は古く、今から107年前の1881年にフランスのダルソンバル (J. D'Arsonval) の研究に始まる。その後、やはりフランスのクロード (G. Claude) が1926年から実用化に向けて研究を開始している。しかし、クロードの試みが失敗に終わってからは、しばらくの間研究は中止されていたが、1964年にアンダーソンが研究を開始してからは急激に発展した。その後の主な歴史を次に示す。

1881年	ダルソンバル (フランス)、海洋温度差発電を考案
1926年	クロード (フランス)、実用化に向けて研究を開始
1933年	クロード1200kWの発電船を建造 (失敗)
1964年	アンダーソン、海中発電所を提案 (特許)
1970年	新発電方式調査会 (日本)、海洋温度差発電の調査

1973年	佐賀大学で海洋温度差発電の実験に着手
1974年	サンシャイン計画（日本）で海洋温度差発電の研究開始
1974年	ERDA計画（アメリカ）で研究開始
1974年	第1回OTEC会議（アメリカ）
1977年	佐賀大学で1kWの発電に成功
1979年	Mini-OTEC（アメリカ）50kWの発電に成功
1980年	佐賀大学、島根県沖で海上実験を行う
1981年	東電、東電設計、ナウル共和国で120kWの発電に成功
1982年	九電、徳之島で50kWの発電に成功
1985年	佐賀大学に75kWの発電プラント完成

### 3. 海洋温度差発電の設置可能海域

海洋は、太陽からのエネルギーをたえず受け、これを熱エネルギーの形で蓄えている。このエネルギーを太陽から地球の入射エネルギーから計算すると約 $55.1 \times 10^{12}$  kWになる。この量は、2000年に必要な世界の電気エネルギー量  $3 \times 10^{10}$  kWの1000倍になる。このエネルギーのうち、2%を利用できるとすると約  $1.1 \times 10^{12}$  kWとなり、これでも約70倍になる。

アメリカのZener は、赤道をはさむ南北20度の範囲内にある海洋からの発電量を計算している。それによると、赤道をはさむ南北20度以内で、600億kWの電力が得られると推定している。

Wolff<sup>2)</sup>らは、世界各地の海水の温度分布を調査し、表層海水と1000mの深層海水との等温度差線を発表している。図1は、その分布を示したものである。図から明らかなように、海水の上下の温度差が16℃以上とれる海域は、北緯40度から南緯40度以内に含まれる。海洋温度差発電が経済的に成り立つ下限の温度差は、15～16℃である。したがって、北緯40度から南緯40度以内に含まれる国や島には、海洋温度差発電所を建設することができる可能性がある。すなわち、これらの国は、海中に膨大なエネルギーを保有しているといえる。

表1は、これらの国のうち、海洋温度差発電が建設しうる可能性のある国を列挙したものである。

我が国の経済水域（海岸200カイリ、360km）内で、海洋温度差発電によって得られるエネルギー量については、梶川<sup>3)</sup>が詳細な計算を行っている。その結果によると、我が国の経済水域内では、年間 $1000 \times 10^{11}$  kWhのエネルギーが得られる。この量は、昭和63年度の我が国のエネルギーの総需要量（約4.2億kl）の約20倍に相当する。このエネルギーの1%を利用することができるとしても、約1億klの石油に相当するエネルギーが取り出せることになる。我が国での海洋温度差発電によるエネルギー量を正確に見積るためには、今後、海象条件や気象条件について詳細な調査をする必要がある。

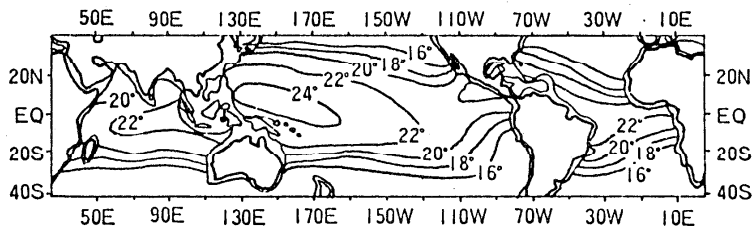


図-1 等温度差線（表層と1000m 水深）

表1 OTEC 可能国

アジア	モーリシャス	ツルグアイ東方共和国
インド	モーリタニア回教共和国	エクアドル共和国
インドネシア共和国	モロッコ王国	ガイアナ
スリランカ共和国	北アメリカ州	グレナダ
タイ王国	アメリカ合衆国	コロンビア共和国
中華人民共和国	エルサルバドル共和国	スリナム共和国
日本	キューバ共和国	チリ共和国
フィリピン共和国	グアテマラ共和国	ブラジル連邦共和国
マレーシア	コスタリカ共和国	ベネズエラ共和国
モルジブ共和国	ジャマイカ	ペルー共和国
アフリカ	ドミニカ共和国	ボリビア共和国
アンゴラ人民共和国	トリニダードトバコ共和国	オセアニア州
ガーナ共和国	ニカラグア共和国	オーストラリア
カーボベルデ共和国	ハイチ共和国	トンガ王国
ギニア・ビサオ共和国	パナマ共和国	ナウル共和国
コートジボアール共和国	バハマ連邦	西サモア
スワジランド王国	バルバドス	ニューゼーランド
ソマリア共和国	ホンジュラス共和国	バプア・ニューギニア
マダガスカル共和国	メキシコ合衆国	フィジー
南アフリカ共和国	南アメリカ州	ペラウ共和国
モザンビーク共和国	アルゼンチン共和国	

## 4. 海洋温度差発電の開発

### 4.1 作動流体

海洋温度差発電の実用化のための課題については、これまで、各方面で指摘されている。その中で作動流体の選択は、最も重要な課題である。作動流体の選択の如何によって、発電サイクル、熱交換器の形状や大きさ、熱交換器の材質、タービンの形状や大きさ、ポンプの形状や大きさ等が決定される。これらの決定によって、発電所の形態や規模も決定されるし、環境問題も論じられる。また逆に、これらの機器の製作に際しての技術的制約を明らかにしたり、発電コストの算出を行うことによって、作動流体は決定される。

作動流体に関する研究は、これまでに多く行われている。これらのうち、アンモニア、フロン22、水が有力な候補として上げられている。

アンモニアとフロン22を作動流体とした発電サイクルは、クローズサイクル（図2）として利用され、水を作動流体としたものは、オープンサイクルとして利用される。オープンサイクルについては、種々の概念的研究は多く行われているが、発電システムを用いた実験的研究はほとんど行われていない。本報では、クローズサイクルについてのみ報告する。

クローズサイクルについては、アンモニアとフロン22が適当な作動流体であるということは、多くの研究者の意見がほぼ一致している。しかし、いずれが最適であるかという結論はまだ出ていない。

著者らのこれまでの研究によっても、熱力学的及び伝熱工学的立場からすると、アンモニアの方がフロン22より優れている。しかし、アンモニアの場合には銅系統の材質が利用できないために、コスト面からは必ずしも絶対的に優位とはいえない。また毒性からするとフロン22の方が優位になる。これらのことを考え合わせると、作動流体の選択は、設置場所や発電規模等によって、適当に選ぶ必要があるようである。

### 4.2 ランキンサイクル効率

図3 にアンモニアのランキンサイクル効率を示す。タービン入口温度22℃、出口温度12℃とすると、アンモニアの場合には、サイクル効率は 3.32%になる。サイクル効率については、フロン22とアンモニアはほぼ同じで、上述の条件の場合では 3.29%になる。実際の発電所の効率は、これらにタービン効率や発電機効率をかける必要があるので、約 2.7% になる。

### 4.3 蒸発器と凝縮器の開発

海洋温度差発電用の蒸発器と凝縮器に関する研究は、1973年以降、数多くなされている。また最近では、種々の伝熱形態についての基礎的研究が我が国で積極的に行われているが、ここでは、基礎的研究については紙面の都合で割愛し、熱交換器の性能についての研究成果について述べる。

#### 4.3.1 蒸発器

図4 に蒸発器の分類を示す。



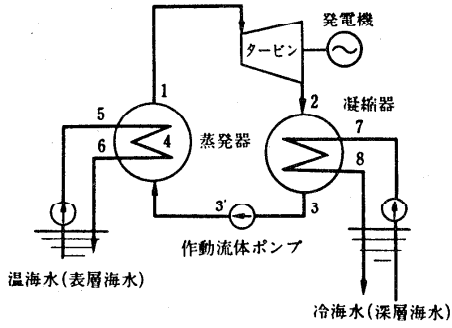


図-2 クローズサイクル

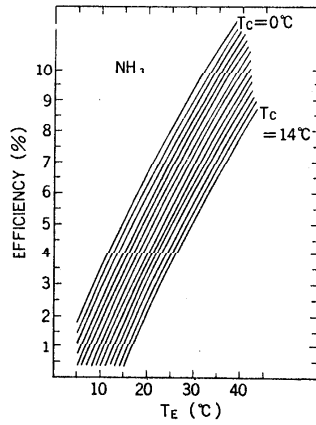


図-3 アンモニアのランキン効率

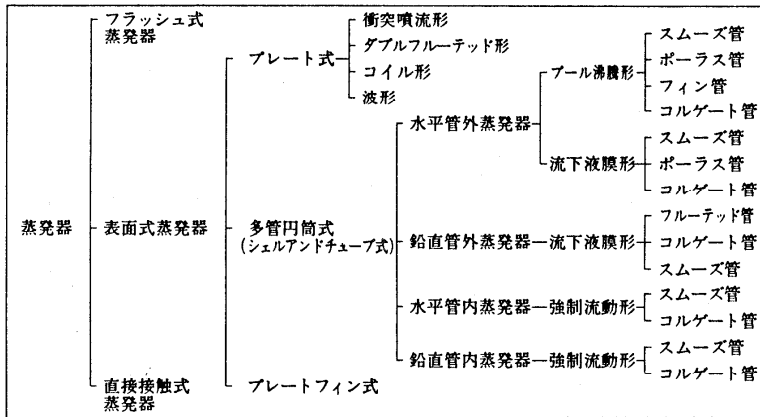


図-4 蒸発器の分類

海洋温度差発電では、利用できる高温と低温の温度差が高々20~25℃であるので、蒸発器で利用できる温度差は、高々5℃くらいである。発電システムの効率を高めるためには、温海水の出口温度と作動流体の出口温度（蒸発温度）との差すなわち終端温度差は、2℃以下である必要がある。できることなら1℃以下が望ましい。

これらのことを考慮すると、図4に示した蒸発器のうち、かなりのものが海洋温度差発電用としては適していないことが分る。特に、スムーズな面を用いると沸騰開始点が大きくなるので、作動流体の蒸発を起こさないことがある。

(a) 粗い面を用いたプール沸騰形水平円管外蒸発器

粗い面を有するプール沸騰形水平円管外蒸発器に関する基礎的研究は数多くなされている<sup>4)</sup>。このタイプの蒸発器は、適当な温度差で適当な大きさの場合には、極めて高い性能を示す<sup>5)</sup>。しかし、大容量のOTECの場合には、使用する作動流体の量が多くなり、伝熱面積が小さくなる。このために液深が深くなり、液の水圧のために下部の方では沸点上昇が起こり、沸騰をしない部分が発生する。このためにこのタイプのものは、OTECには必ずしも適していると言えない場合がある。

(b) 水平管外流下液膜形蒸発器

水平円管外に上方からアンモニア液をたらして、管表面に薄膜を形成して蒸発させる形式の蒸発器についての研究はかなり多い<sup>6)</sup>。

Hillis<sup>7)</sup>らは、実用規模の熱交換器を用いて、アンモニアについて実験を行っている。その結果、2840~5140 W/m<sup>2</sup> kの熱通過係数を得ている。

(c) 液膜流下鉛直フルート管形蒸発器

この場合についても、基礎的研究は多く行われている<sup>8)</sup>。

Lorenz<sup>9)</sup>は、鉛直ダブルフルート管群について実験を行っている。伝熱管直径は30.9mm、長さ4369mmである。伝熱管は240本、伝熱管材料はアルミニウムで、総伝熱面積は102m<sup>2</sup>で、作動流体にはアンモニアが使用されている。熱通過係数は、3460~5370 W/m<sup>2</sup> kが得られている。

(d) プレート式蒸発器<sup>10)</sup>

プレート式蒸発器は、著者らと日阪製作所の共同で開発されたものである。

図5に蒸発器のプレートの写真を示す。蒸発側の面はポーラス面になるようにアルミ粉末が溶射されている。このために、小さい温度差でも激しい沸騰が起こる。一方、冷却側も乱流が促進されるように工夫されていて、高い熱伝達係数が得られる。

図6に作動流体がフロン22の場合の熱通過係数の例を示す。冷却水流速が1m/sの時でも約4000 W/m<sup>2</sup> kの熱通過係数が得られている。作動流体がアンモニアの場合も同程度の値である。

図7に温水側の摩擦係数の値を示す。スムーズ面と比較すると約10倍大きい。このために、プレート式蒸発器の設計の際には、温海水流速を大きくすることはできない。

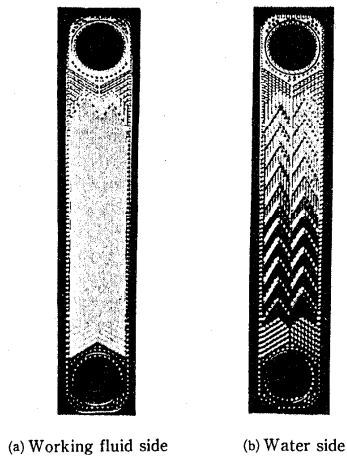


図-5 プレート式蒸発器のプレート

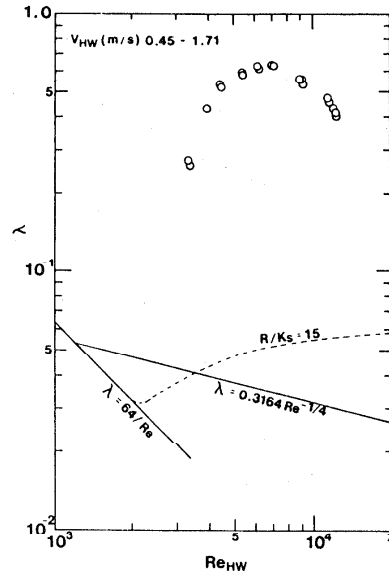


図-7 摩擦係数

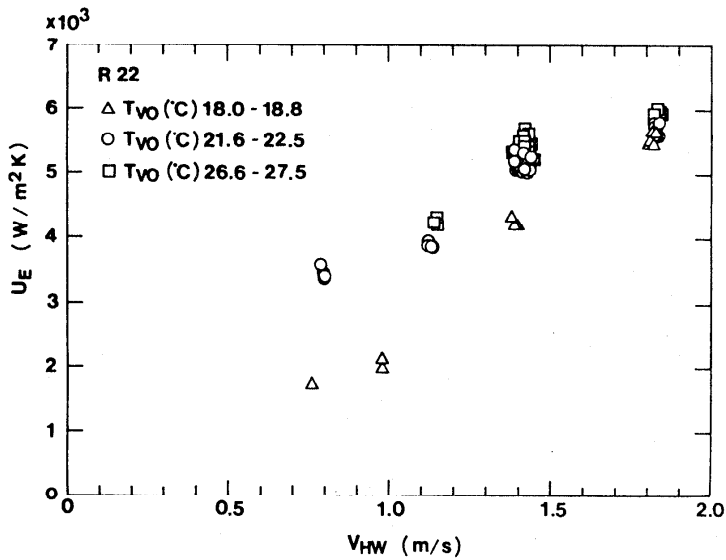


図-6 プレート式蒸発器の熱通過係数

#### 4.3.2 凝縮器

凝縮器についても数多くの研究が行われている。これらのすべてについて述べる紙面の余地がないので、主な成果のみを示す。

##### (a) 水平多管円管式凝縮器

Yungら<sup>11)</sup>は、円管の外面にワイヤーを巻きつけ、水側にはフィンをつけて伝熱の促進を計っている。総伝熱面積  $69\text{m}^2$ 、作動流体にアンモニアを用いて実験を行っている。その結果、 $3100\sim 5760\text{ W/m}^2\text{ k}$  の熱通過係数を得ている。また、水側の圧力損失も小さく  $4140\sim 26900\text{ Pa}$  である。これらの結果をみるとOTECに適しているようであるが、終端温度差をみると  $2.5^\circ\text{C}$  で、まだ一層の工夫を要する。

##### (b) 鉛直フルート管形凝縮器

フルートを凝縮側につけた鉛直フルート管についての基礎的研究は多い<sup>12)</sup>。

またフルートつき管群を用いた実験も行われている。

Lewisら<sup>13)</sup>は、総伝熱面積  $102\text{m}^2$  のフルート管群について、作動流体にアンモニアを用いて実験を行って  $3098\text{ W/m}^2\text{ k}$  の熱通過係数を得ている。

##### (c) プレート式凝縮器<sup>14)</sup>

プレート式凝縮器のエレメントを図8に示す。図9にプレート式凝縮器の熱通過係数を示す。アンモニアの場合には、冷却水流速が  $1\text{m/s}$  の時、 $4000\sim 4500\text{ W/m}^2\text{ k}$  である。

### 5. パイロットプラント

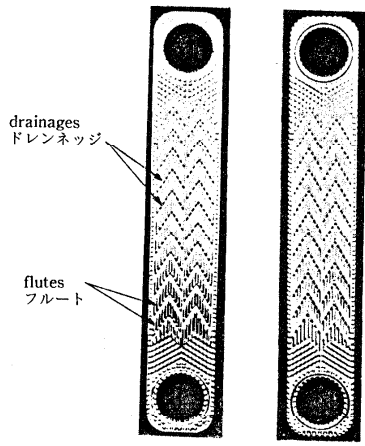
海洋温度差発電の実用化のためのパイロットプラントとしては、表2に示す四つのプラントがある。これらのプラントについて詳細はそれぞれの文献を参照していただきたい。<sup>15)-20)</sup> これらのプラントの外観図を図10から図13に示す。

### 6. 海洋温度差発電の最適設計法<sup>21)</sup>

海洋温度差発電で利用できる温度差は高々  $20^\circ\text{C}$  であるので、前述のように、構成機器である蒸発器や凝縮器やタービンの性能を高めることは当然であるが、これと同時に、発電システム全体の最適化も重要である。

著者らは、発電所全体の最適化を行うためのプログラムを開発し、種々の場合について比較を行っている。

表3にその結果の一例を示す。プレート式を用いた場合には、アンモニアとフロン22の場合で、蒸発器と凝縮器の面積がかなりの差異があることが分る。作動流体にアンモニアを用いた場合について、プレート式とダブルフルート管式について比較すると、温海水と冷海水の量に差異があることが分る。



(a) Working fluid side (b) Water side

図-8 プレート式凝縮器のプレート

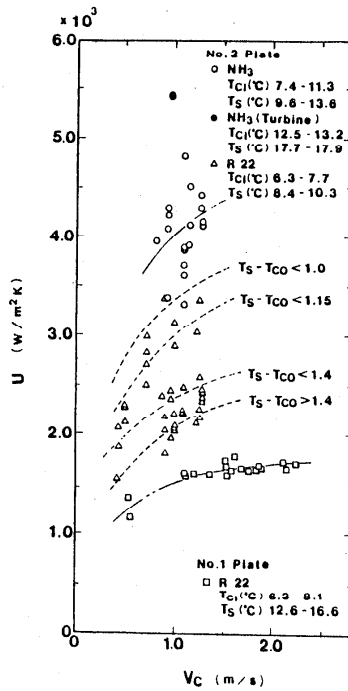


図-9 プレート式凝縮器の熱通過係数

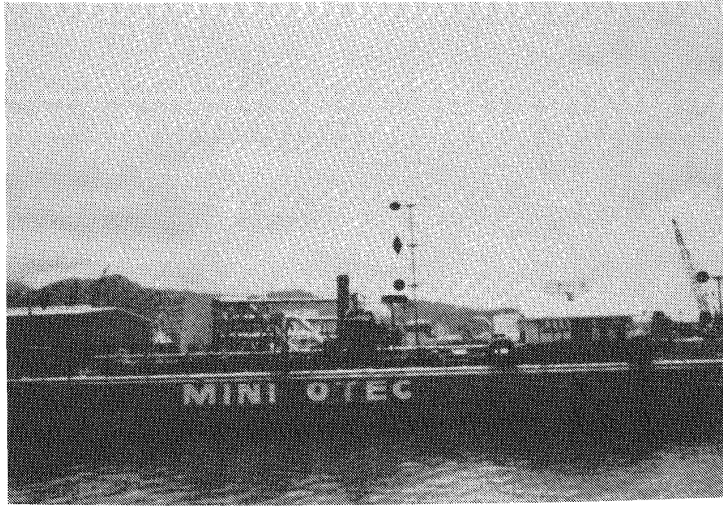


図-10 Mini-OILC

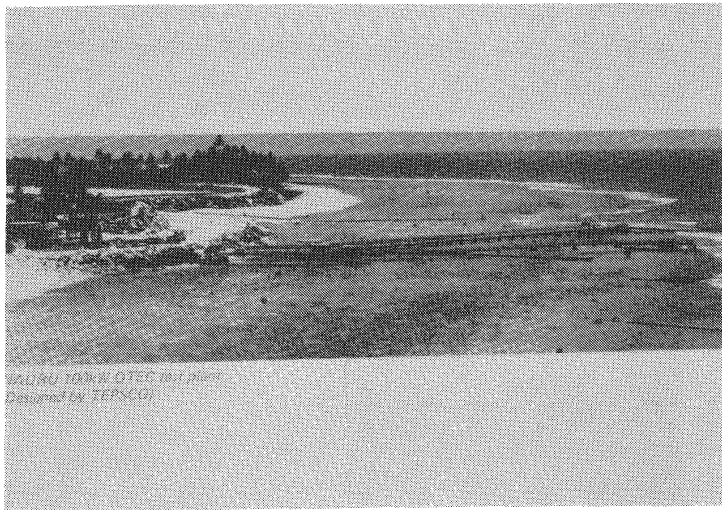


図-11 ナウルプラント

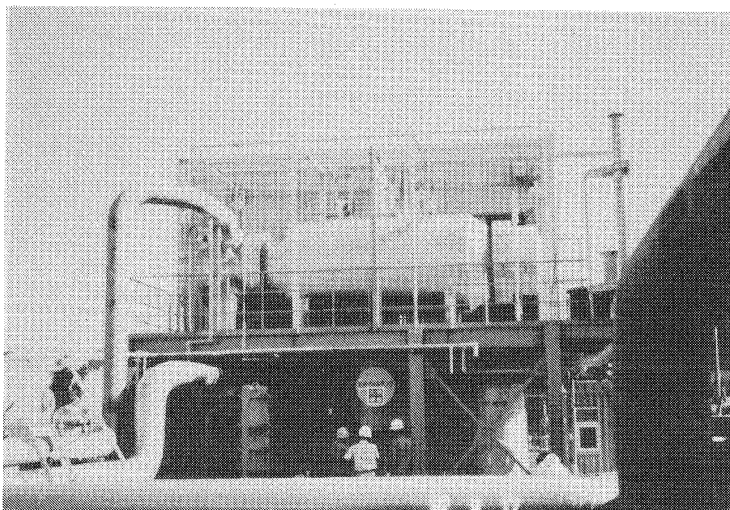


図-12 徳之島プラント

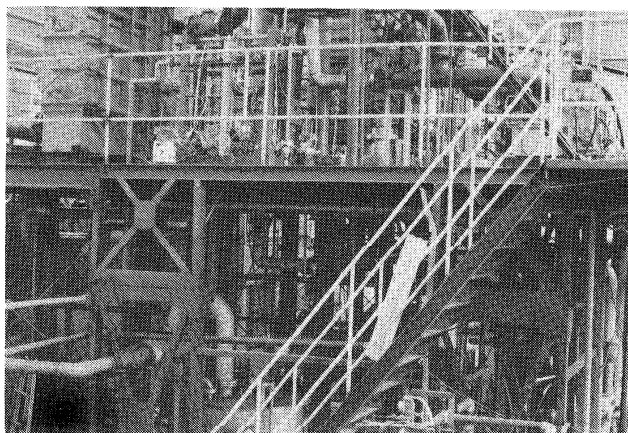


図-13 佐賀大学プラント

表2 OTECプラトンの特徴

Plant	Mini OTEC	Nauru	Tokunoshima	Saga University
Country	USA	Japan	Japan	Japan
Year	1978-1979	1982-1984	1982-1984	1985-present
Site	Hawaii	Nauru	Tokunoshima	Imari
Size [kW]	50	100	50	75
Type	floating	onshore	onshore	onshore
Cycle	closed	closed	closed	closed
Sponsors	Lockheed/ Hawaii	TEPCO/ TEPCO	KEPCO	Saga University
Warm water inlet temperature [°C]	26.1	29.8	28.0	28.0
Cold water inlet temperature [°C]	5.6	7.8	13.6	7.0
Working fluid	Ammonia	R-22	Ammonia	Ammonia
Evaporator type	plate	tube	plate	plate
Condenser type	plate	tube	tube	plate
Cold water pipe length [m]	645	950	2350	
diameter [m]	0.61	0.7	0.5	0.4
Net power [kW]	18	15	14	35

表-3 発電システムの比較 (100MW発電端出力)

	プレート式熱交換器を用いた場合		ダブルフルード管式を用いた場合
	アンモニア	フロン22	アンモニア
作動流体	アンモニア	フロン22	アンモニア
温海水入口温度 (°C)	28	28	28
冷海水入口温度 (°C)	7	7	7
ランキン効率 (-)	3.27	3.12	3.30
蒸発器伝熱面積 × 10 <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	2.41	3.07	3.03
凝縮器伝熱面積 × 10 <sup>2</sup> (m <sup>2</sup> )	3.01	4.02	3.05
送電端出力 (MW)	70.1	66.8	69.7
温海水ポンプ動力 (MW)	11.0	10.5	10.2
冷海水ポンプ動力 (MW)	15.8	15.8	17.7
作動流体ポンプ動力 (MW)	2.3	6.9	2.4
温海水流量 (t/s)	259.0	285.0	403.9
冷海水流量 (t/s)	266.7	317.0	323.0
作動流体流量 (t/s)	3.0	19.1	3.0
蒸発器側圧力損失合計 (kpa)	36.4	29.4	20.1
凝縮器側圧力損失合計 (kpa)	47.5	39.8	43.7
蒸発器熱通過係数 (W/m <sup>2</sup> K)	3,992	2,762	3,073
凝縮器熱通過係数 (W/m <sup>2</sup> K)	3,577	2,475	2,933
最適温海水流速 (m/s)	0.72	0.63	2.1
最適冷海水流速 (m/s)	0.64	0.55	2.0
正味発電当りの総伝熱面積 (m <sup>2</sup> /kW)	7.74	10.62	8.73
伝熱面材質 (-)	チタン	チタン	チタン



## 7. おわりに

海洋温度差発電の開発と現状について概略を述べた。海洋温度差発電に多くの人々が興味を示され、さらに効率のよいシステムの開発が行われることを希望する。

## 8. 文献

- 1) 上原春男：海洋温度差発電読本，オーム社，(1982)
- 2) Wolff, W.A. et al.: OTEC World Thermal Resource, Proc. 6th OTEC Conf. II, (1979)
- 3) 本間啄也，黒木敏郎，梶川武信：海洋エネルギー読本，オーム社，(1980)
- 4) 伊藤猛宏他：機械の研究，31-1 (昭54)，77-87
- 5) Kajikawa, T. et al.: Proc. 6th OTEC Conf. (1979)，11.5-1
- 6) Owens, W.L.: Proc. 5th OTEC Conf. (1978)，VI-36
- 7) Hillis, D.L. et al.: Argonne National Laboratory, ANL/OTEC-PS-3, (1979)
- 8) Rothfus, R.R. and Newman, C.P.: Proc. 4th OTEC Conf. (1977)，VI-55
- 9) Lorenz, J.J. et al.: ANL/OTEC-PS-5, (1979)
- 10) Nakaoka, T. and Uehara, H.: Experimental Thermal and Fluid Science, 1-3, (1988),  
283-291
- 11) Yung, D.T. et al.: ANL/OTEC-PS-2, (1979)
- 12) Uehara, H. et al.: Int. J. Refrigeration, 8-1, (1985), 22-28
- 13) Lewis, L.G. and Sather, N.F.: ANL/OTEC-PS-4, (1979)
- 14) Nakaoka, T. and Uehara, H.: Experimental Thermal and Fluid Science, 1-3, (1988),  
275-281
- 15) Owens, W.L. and Trimble, L.C.: J. Solar Energy Engineering, 103, (1981), 233-240
- 16) 伊藤文夫他：日機誌，85-764 (昭57)，728-733
- 17) Mochida, Y. et al.: Proc. ASME-JSME Thermal Engineering Joint. Conf. 2, (1983),  
241-245
- 18) Kawano, S. et al.: ibid, (1983), 247-252
- 19) 九州電力パンフレット (1982)
- 20) 佐賀大学「OTEC」(1987)
- 21) 上原春男，中岡勉：日機論，50-456, (昭59)，1955-1962

## 新素材と熱物性

### — 熱物性研究に対する先端技術のインパクト —

長島 昭 (慶大理工)

#### 1. 新素材とは何か

最近新しい材料が次々と登場し、また一方では新しい材料への期待が過熱気味である。これらを使いこなすにはその性質が予めよくわかっていなくてはならないのに、登場のペースが早すぎて物性研究が追いつかない<sup>(1)</sup>。

新素材と呼ばれる物質は常に存在するが、それに該当する物質はどんどん入れ替わっている。歴史的には青銅や水蒸気も一時は新素材であった。それでは現在の、そしてまたこれからの新素材とは何であろうか？ 新素材という言葉は非常に広い意味があるが、ここでは伝熱工学に関係のある新材料、新作動流体という程度に限定して、その例を表1に挙げる。

表1 新素材の例

分類	新素材（固体および流体）の例
①新登場型	超伝導材料，セラミクス，高分子材料，人工血液，トリチウム，フロン代替物
②組合わせ型	複合材料，混相流体，薄膜，合成食品，人工臓器材料
③範囲拡大型	ヒートポンプ媒体，海水，溶融塩
④その他	液晶，形状記憶合金，プルトニウム化合物

この分類は、あくまでも熱物性研究の対応の違いを意識したときの分類である。まず①の新登場型は、超伝導材料や新セラミクスのように、現在どんどん新しい物質が探究、開発されつつあるもの、トリチウムのように核融合に結びついて研究され始めるもの、人工血液やフロン代替物のように在来物質の中から手探りで摸索したり、合成されつつあるもの、などである。ここでは、新元素のように全く新しく発見される物質を挙げるのではなく、あくまでも応用と結

びついて新登場する物質を考える。②の組合わせ型とは、カーボンファイバーとセラミクスによる高温用複合材料や、微小粒子の分散する混相液体のように、特定形状で複合したことにより新しい性質を持つ系、基盤上の薄膜のように両物質間の微視的相互作用が問題となる系、各種合成食品や人工臓器材料のように、構造が複雑で、応用や製法と物性の関係がまだよくわからない系などを指す。③の範囲拡大型は、低温用に開発されていた冷媒をヒートポンプに使うため高温データが必要となる例、海洋研究用の30℃以下のデータは充実していても、淡水化のための高温あるいは高（低）濃度のデータがない海水、あるいはまた燃料電池や高温蓄熱で、応用範囲が高温化していく溶融塩、などがある。④のその他の例としては、熱物性値の異方性や応答性が問題となる感熱性液晶や形状記憶合金、研究はされていても核拡散防止の観点からか、一部の高温データが完全には公開されないプルトニウム化合物、などが挙げられる。

## 2. 新技術が先か 熱物性研究が先か

これらの材料や流体は、物質も応用も実に多様であり、時々刻々と興味が移り変わっているのが特色である。先端技術の開発には、これらの新素材の性質、例えば熱伝導率データを知りたい、しかも、他社や他の研究者に先んじて即座に知りたいという要求がある。しかしながら、現状は、特にこれら新しい材料については難しい状況にある。ただし、この課題は解決し尽くされることはなくて、技術開発がある限り、永久にチャレンジを続けなければならない問題である。

熱物性研究は、とすれば他の技術や科学へのサービス研究と見られがちである。基礎データを提供するサービス研究としての重要性は当然であるが、それだけでは先端技術は育たない。新素材が登場したから頼まれて測る、必要だから計算するのではなくて、新しい技術開発の先を見越して、基礎データを充実しておく必要がある。これは、東京から大阪へ行く必要を感じてから道路を建設するのでは遅いと同様である。しかし、大阪までの土地全平面を道路にしておくのは無駄で、最もニーズが高い経路を予測して、幾つかの可能性を含めて何本かの道路を作っておくことが必要である。また、道路があっても地図がなければ役に立たない。新素材開発や熱物性研究、データベース作りは、道路作りや地図作りに相当し、そこを新技術というスポーツカーがつつ走り、後には基幹産業というトラックが進んでいく。

熱物性研究も、サービス研究のみでなく、科学技術予測をしっかりたてて先導研究を行わなくてはならない。これは容易ではないが、今すぐ着手できることも幾つかある。そのひとつは、どのような新材料が登場してもすぐ測れるような、新測定法の開発であり、また、ひとつは物性理論に基づいた予測法あるいは物性シミュレーションの研究である。

## 3. 測れないものへのチャレンジ

熱物性研究で、伝熱研究者の寄与が特に待たれているのは、新測定技術の開発である。熱

物性値の測定技術に対する要求としては、第1に、これまで測れないと思われていた材料や物性値を測定したいという要求、第2に、高温や高压など範囲拡大の要求、第3に、多種物性値の同時測定や非接触測定などの要求、とさまざまな要求がある。これらの要求に対して飛躍的な進歩がみられたのは最近のことである。これを可能にしたのは、主としてセンサー、コンピューター、レーザーの進歩によっている。

まず第一はセンサーの進歩である。温度、圧力、微小変位、振動、光などに対する各種のセンサーが、その高精度化、高速化、小型化によって、従来考えられなかった測定を可能にした。例えば、小型で高速の温度センサーができると、熱伝導率、熱拡散率（温度伝導率）の非定常測定法が進歩した。また、被測定量のデジタル化がなされて、測定のオンライン処理、リアルタイム処理が可能となった。

1988年6月米国における熱物性会議で Subsecond Thermophysics というセッションが設けられ、その呼びもののひとつに Cezairliyan 他による超高温物性測定があった<sup>(2)</sup>。これら一連の研究では、例えば高融点材料を直接通電で約1秒間の短時間に約400Kの高温まで加熱し、多種類の物性値を同時測定しようというものである。高速の光電式ふく射計を用いて、例えば図1の円柱状試料の表面温度をスキャンして融解破断までの短時間にくり返し測定する。温度測定から融点を、通電量から融解潜熱を、温度分布の時間的変化から熱拡散率を求め、さらに熱膨張率、融解時の表面張力、電気的性質、ふく射率等々を同時に、広い温度域にわたり、しかも1秒以内に測定することが理論的には可能である。超高温材料の開発が急務とされるだけに、この種の新測定法の開発が期待される。測定器やセンサーの高感度化は、もっと単純なセンサーにも及んでいる。例えば、図2は、高温ガスの熱伝導率を衝撃波管を用いて測定した例であるが、白金薄膜温度センサーを、数多く容易に作れるようになったことにも援けられている<sup>(3)</sup>。ガスタービンの高温化やMHDなどに高温ガスの測定が必要となっているので、このような方法の重要性は大きい。

第二はコンピューターの利用である。熱物性値のうちで、輸送性質は非平衡状態の測定であるから、一般に測定の理論式が複雑で、多くの場合はその解が複雑な級数で表されている。しかもその解の適用限界などの確認も一般には容易ではない。その為、従来は極端に簡略化された近似式か、相対測定が行われてきた。しかし、最近まではコンピューターの利用によって複雑な理論解を50項でも100項でも簡単に計算できるようになった。また、適用限界の確認計算やリアルタイム計算、関連状態量の計算、実験式の作成、誤

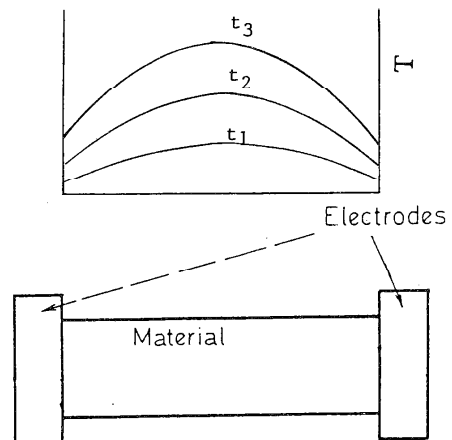


図1 高速通電加熱される円柱状試料

差の計算などが非常に早くかつ容易に行なえるようになった。

リチウムは核融合研究に重要な物質であるが、高温の溶融リチウムの粘性率のデータは、

図3に示すように過去のデータに相互の不一致が大きかった。

最近その原因が究明され、従来の研究者が用いた振動粘度計の近似式が、コンピューター利用による厳密解と大差のあることがわかった<sup>(4)</sup>。コンピューター利用による、最近の測定法の大変優れた改良の例は、高橋ら<sup>(3)</sup>によるレーザーフラッシュ法の計算法の新解析法の提案がある。レーザーフラッシュ法は、固体材料の温度伝導率(熱拡散率)の測定法としては、最も広く用いられている方法である。その代表的な解析法は、図4に示すように、温度 $\theta$ と時間 $t$ の関係において、最高温度の2分の1に達するまでの時間を用いて、解析を行っていた。高橋らの新提案は、ラプラス変換による一次元熱拡散方程式と曲線全体の対応を用いるもので、コンピューターの活用がなければ難しかったであろう。

最近の測定技術の進歩に大きく貢献しつつあるものとして、

第三にレーザーの利用に代表される光学的方法の進歩がある。

光学的方法の

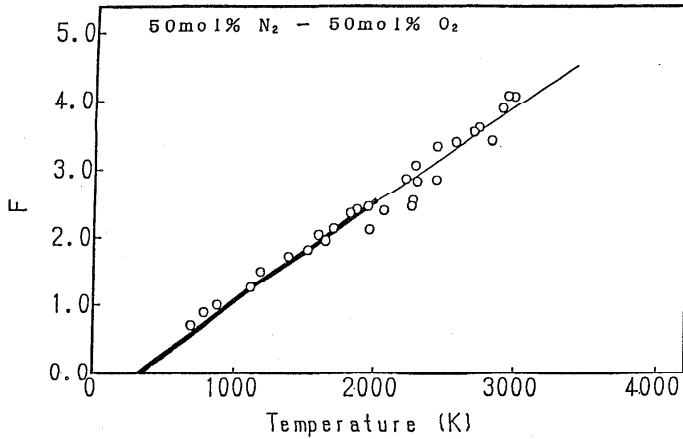


図2 広い温度域にわたる混合ガスの熱伝導率測定  
(Fは熱伝導率を表す関数)

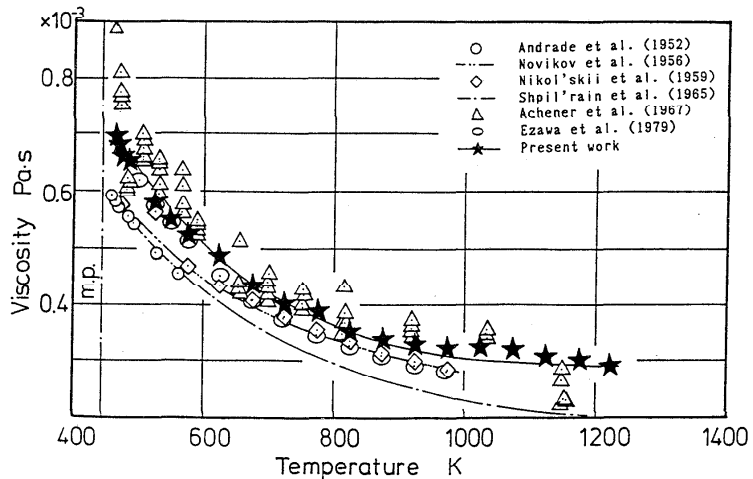
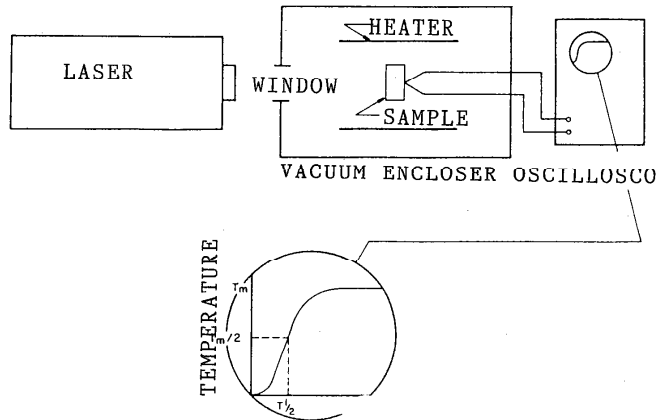


図3 溶融リチウムの粘性率

最大の利点は、何といっても非接触測定が可能になることである。特に輸送性質の測定は、被測定物質の温度場、濃度場、速度場の乱れが結果に大きな影響を及ぼすので、プローブで場を乱すことを避けて、非接触で測定を行なえることは大きなメリットである。

またセンサーの電気的絶縁が難しい電解質溶液や高温の流体なども非接触測定法が有利である。レーザー光による方法はスキャンニ



TEMPERATURE RISE ON REAR FACE

図4 レーザーフラッシュ法における温度の検出  
(R. E. Taylorら)

ングにより、濃度分布や温度分布のパターンの高速測定なども可能にした。ここでは、一例として、液晶、高温の熔融塩や分子配向を生じさせた高分子材料など、特殊な材料の温度伝導率（熱拡散率）の測定用に開発された光学的方法の例を挙げる<sup>(6)-(10)</sup>。高分子膜に張力をかけて延伸すると、鎖状の分子の配向が生じ、その結果、いろいろな物理的性質に、方向による差、すなわち異方性が生じる。これは応用上、重要な現象であるが、たとえば温度伝導率の異方性などは、従来は測定したくても方法がなかった。いま、この材料上に、2本の同じ光源からのレーザー光を、ある角度をもって照射すると、この角度と波長によって決まる微細な干渉縞が形成される。加熱をごく短時間だけ行なうと、この縞は温度の高低の縞になっているので、照射打ち切り後、縞に垂直な方向へ熱伝導が生じて、ごく短時間に均温化していく。

均温化の時定数が測定できれば、温度伝導率（熱拡散率）が求められる。この時定数を、別の波長のレーザー光の回折を利用して測定する方法で、高分子膜の温度伝導率を、延伸度  $l/l_0$  ( $l_0$ は元の長さ)

の関数として測定した例を 図5 に示す<sup>(11)</sup>。

測定法については、まだまだ思いがけない新しい方法が現れる可能性がある。固体材料の熱物性値測定法の進歩については、先年、よい解説書が出版されたが<sup>(12)</sup>、流体の特に輸送物性については最近の本がなかったので、現在、企画が進行中である<sup>(13)</sup>。また、日本機械学会の分科会<sup>(14)</sup>でも最近の熱物性測定技術の調査を行なっており、いずれ報告をまとめる予定になっている。

#### 4. 熱物性と数値シミュレーション

数値シミュレーションはいろいろな分野で盛り上がっているが、熱物性においては2つの点で関係が深い。

その第一は、伝熱や流体力学の数値シミュレーション、材料挙動の数値シミュレーションなどとの関係である。図6は、閉じた空間に流体を満たし、左壁を高温、右壁を低温にした場合の流線のシミュレーション結果として、いろいろな機会に眼にする図である。しかし、よく見るとこの図は対称でよいのだろうかとの疑問がわいてくる。流体が液体であると、密度 $\rho$ などの温度変化は僅かだが、粘性率 $\eta$ は温度に対して指数関数的に大きく減少する。つまり高温側はサラサラで、低温側は粘い。しかし、もしも流体が気体であると、 $\eta$ は温度に対して液体とは逆に、ゆるやかに上昇し、 $\rho$ は温度に反比例して減少する(圧力一定

を仮定)。宇宙実験室など、微小重力空間での新材料開発が話題となるが、熔融状態での対流は出来上がった単結晶等の質に影響する。微小重力下で問題となるマランゴニ対流をシミュレートするには、表面張力の温度依存性を知る必要がある。図7は、Kolesnikovaによるゲルマニウムの表面張力の測定例であるが、静滴法で測定する時に、グラファイト上で測ると温度勾配はaのように正となり、石英上ではbのように負となったという<sup>(15)</sup>。これらの例のように、伝熱や流動の数値シミュレーションを信頼性のあるものとするには、多くの新しい流体や、高温の融体などの熱物性値の詳しい挙動を知ることが前提となる。

さて、第二の問題は、熱物性値そのものの数値シミュレーションである。昔から熱物性値の研究で、推算(estimation)とか予知(prediction)の方法の研究は盛んであった。実際的な有用性は認められ、化学工学などを中心として実用されながらも、その理論的裏付けが必ずしも十分でないのが難点であった。理論が未発達であるのに、とにかくデータが欲しいという要求が強かったために、やむを得ない状況であった。しかし、ごく最近、呼び方も数値シミュレーションとして、非常に活気のある分野が登場している。これは、表1で例を挙げ

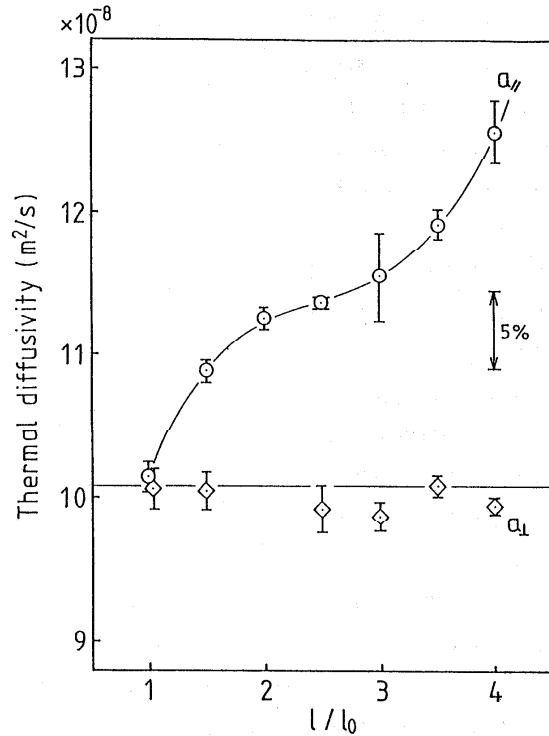


図5 強制レイリー散乱法による高分子膜の熱的異方性の測定

た多様な新材料の登場に対して、測定技術の開発だけでは対応しきれないこと、コンピューターによる多変数系的高速シミュレーション計算が可能になったことなどが原因している。あるいは、米国で実験には十分な研究費が出にくいことも一因になっているかもしれない。いずれにしても、特に今後の新素材開発などの重要な武器になっていく可能性が強い。

熱物性の数値シミュレーションは、これから特に重要なものは次の4つの場合であろう。

(1) 分子間ポテンシャルに基づく熱物性計算

以前は低密度気体以外は、定量的計算は無理であったが、分子ビーム実験などと組んで、コンピューターでポテンシャル場を計算する精度が上がり、対象も高密度域、多元子分子、臨界点付近の熱物性、混合物の熱物性、解離効果などへ、どんどん拡大しつつある。

同一物質における多種物性値相互間のコンシステンシーなども面白い課題である。

(2) 結晶構造などに基づく熱物性計算

従来からある研究に加えて、材料の熱物性値に対する微量不純物の効果、材料欠陥の効果などのシミュレーションは重要になる。

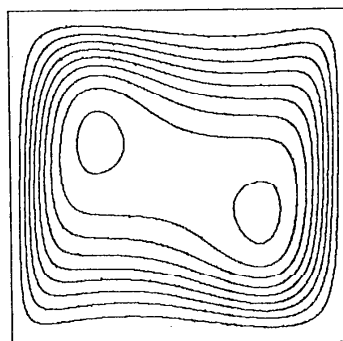
(3) 非均質材料、分散媒体の熱物性計算

複合材料が多様な形で次々と登場し、固液2相媒体や磁性流体などが開発されると、熱物性測定が追いつかなかったり、測定法がなかったりする。配置や構造を仮定して進めるコンピューターシミュレーションの活躍の余地が大きい。

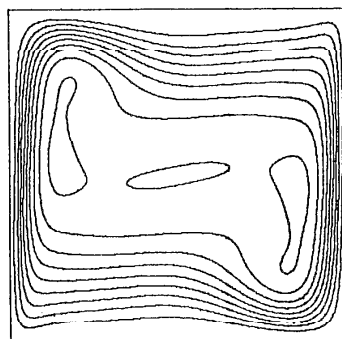
(4) 相変化のシミュレーション

これは熱物性の研究には分類されないが、融解、凝固、蒸発などは、熱物性のシミュレーションと密接に関係する。ここでは、熱伝導論の一部としての移動境界問題を指すのではなく、分子間力モデルに基いて、熱物性と相変化を同時に扱うような研究を指す。

1970年代以降、分子間力による気液界面のシミュレーション研究が流行した。しかし、新素材の製造に関連して考えると、界面の成長に関するダイナミックな取り扱い、過飽和現象の影響、核生成など、興味深いと同時に製造技術側から解決を迫られている課題がある。



(a)



(b)

図6 閉じた空間での対流の数値シミュレーション

( I. P. Jones )



5. おわりに

新素材と熱物性という難題を頂いて、最近の動向の解説としては足りないが、これからの研究課題を探るという観点で書いてみた。熱物性研究でも、先端技術からのインパクトを日々感じさせられるが、新素材登場に追随した研究だけでなく、しっかりした技術予測による先行研究が重要であることは当然である。

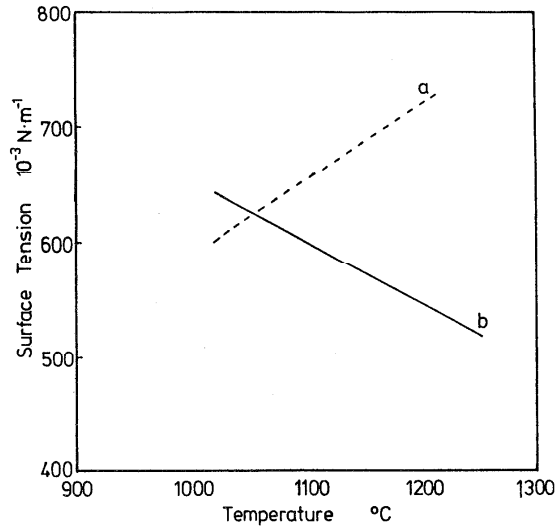


図7 溶融ゲルマニウムの表面張力の温度依存性

(Kolesnikova, 静滴法)

文献

- (1) Nagashima, A., *Appl. Mech. Rev.*, **41**-3, (1988), 113.
- (2) Cazairliyan, A. et al., *Papers to 10th Symp. Thermophys. Prop.*, Gaithersburg, (1988), (to be published in *Int. J. Thermophysics*).
- (3) Mito, K. et al., *JSME Int. J.*, **30**-268, (1987), 1601.
- (4) Ito, T. et al., *Paper to 10th Symp. Thermophys. Prop.* Gaithersburg, (1988).
- (5) 高橋, 山本, 大里, *熱測定*, **15**-3, (1988), 103.
- (6) 畠山, ほか 4名, *機論*, **53B**-489, (昭62), 1590.
- (7) Hatakeyama, T. et al., *Proc. 2nd ASME-JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, (1987), Honolulu, 311.
- (8) Hatakeyama, T. et al., *Rev. Sci. Instr.*, (in Press).
- (9) Nagasaka, Y. et al., *Rev. Sci. Instr.*, (in Press).
- (10) 長坂, ほか 2名, *機論*, **53B**-492, (昭62), 2545.
- (11) Okuda, M. and Nagashima, A., *Paper to 11th Europ. Conf.*, Umea, (1988), to be published in *High Temp. - High Pres.*
- (12) Maglic, K. D., Cezairliyan, A. and Peletsky V. E. (ed.), *Compendium of Thermophysical Property Measurement Method*, Vol. 1, Plenum, 1984.
- (13) Nagashima, A., Sengers, J. V. and Wakeham, W. A. (ed.), *ITIPAC Volume on Measurement of Transport Properties of Fluids*, (Blackwell) (to be published).
- (14) 日本機械学会, P-SC122 熱物性値の新測定技術に関する調査研究分科会 (1986-1989, 主査 長島 昭).
- (15) Kolesnikova, T. P., *Izv. VUZ, Chern. Metal.*, **9**, (1960), 14.

## 局所湿度測定法について

田中宏史(福岡工大)

### 1. はじめに

われわれは今日、伝熱工学分野の実験的研究においても、様々な測定法を利用している。その中でとくに温度や流速などの測定はかなりの精度で、かつ手軽に行うことができる。さらに、大がかりで高価となるが、乱流境界層内の温度や速度の乱流変動成分の分布まで詳細に測定することも可能となっている。このことに比べ、濃度とくに湿度測定では簡便な湿度計でも精度以前に、実験的研究に向かない場合があり、詳細な湿度の変動まで測定できるものは見あたらない。この状況については文献[1]にも述べられているが、ひとつのモメントとしては研究上あるいは工業技術上の必要性が強くなかったこともその因と考える。近年、湿度センサの開発が盛んであるがこれは湿度制御の必要性があるからである。

著者らは1982年以来、光ファイバを利用した局所湿度測定法の開発研究を行い、いくつかの試作とその利用を試みてきた<sup>2,3,4,5)</sup>。ここでは一般の濃度測定のみならず特殊である湿度測定法に関して現状を概括し、光ファイバ局所湿度計の現状と将来を考えてみたい。

### 2. 湿度測定法の種類と用途

JISの湿度測定法<sup>6)</sup>によると測定法としてはI；毛髪湿度計による方法、II；乾湿球湿度計による方法、III；露点計による方法、IV；電気抵抗式湿度計による方法の4種に分類されている。この分類にないものをV；その他、として実際の湿度計の種類と用途・特徴を表1に示す。同様のものの10年前のものと比較するとIVの電気抵抗式湿度計の項が増えている。なお、測定方式は必ずしも電気抵抗式ではなく、電気容量方式であったり、導電率測定方式であったりしているがこの分類とした。これは前述の湿度センサの開発が進んだ結果であり、この項のみの別の詳細な分類表が必要でもある(文献[7]参照)。最近、これらを総合調査し、性能評価の統一を進めるために日本機械学会-湿度・水分センサ調査研究分科会などの活動も始められている。

湿度の測定やその制御が利用される分野は多方面にわたっており、今後、ますます広がるであろう。例えばビル空調では20～30℃の温度の制御のみならず50～80%RHの湿度の制御も行われる場合が多い。このような傾向は今では一般家庭の冷暖房機にも普及しはじめている。かびや結露を防ぐためには、さらに細かい湿度制御が要求される場合もある。また電子部品・精密機械部品の工場、食品や製紙などの工場でも品質管理の上からも湿度制御が重要と

表1 温度測定法の種類と概要

分類	名称	原理	応答性	主な用途や特長
I	毛髪湿度計	毛髪や有機フィルムのも機械的伸縮変化	15~40分	一般湿度計測, 最近ではナイロンリボンを使用
II	乾湿球湿度計	湿潤ガーゼの蒸発による冷却(温度低下)の程度	2~10分	一般湿度計測
II	アスマン通風乾湿球湿度計	乾湿球に2.5m/s程度の通風を与えたもの	2分	精密湿度計, 抵抗式湿度計で電子式としたものは湿度制御用
III	冷和式露点計	鏡面を冷却して露の付着を判別し, 露点とする	10秒	露点計測, 肉眼で判定するものとミラーで光学的に計測するもの
III	塩化リチウム露点計	塩の存在で水蒸気圧が下がる	2~4分	露点計測, 塗り換えと加熱が必要
III	$\alpha$ 線露点計	加熱により周囲と平衡 $\alpha$ 線の露の吸収, 数cmで減衰	-	露点計測
IV	セラミック湿度センサー	水蒸気の物理吸着による抵抗あるいは電気容量変化	10秒	各種空調や家電品の温度制御, 加熱クリーニングが必要, 種類が多い
IV	高分子湿度センサー	水蒸気の吸着による導電性変化	1分	湿度計測および湿度制御
IV	電解質センサー	LiClの吸湿とイオン電導変化	2~5分	湿度計測
V	サーミスタ湿度計	乾燥空気と水蒸気の熱伝導率の差を測定	12~13秒	湿度計測
V	マイクロ波湿度計	湿度によるマイクロ波共振器のQ値の変化	瞬時	湿度計測
V	赤外線湿度計	水蒸気の赤外吸収を利用	瞬時	湿度計測(古くから研究されている)
V	超音波湿度計	超音波の伝達速度が温度と湿度の関数, 温度は抵抗温度計で測定	瞬時	湿度計測(実験段階)
V	水晶振動子湿度計	水晶振動子表面の吸湿量の変化で共振周波数の変化	約20秒	湿度計測

注: 分類はI; 毛髪湿度計による方法, II; 乾湿球湿度計による方法, III; 露点計による方法, IV; 電気抵抗式湿度計による方法, V; その他

なっている。鋼板の防錆には20%RH以下になるように調整される。このように各工業で最適な温度と湿度にコントロールされている。それにともない、湿度計の使用領域も種々である。これらの制御にはIVの方式のものが適しており、いわゆる湿度センサの活発な開発研究が行われている理由と言える。

分類Vは比較的特異なものでアイデアや研究段階のものが多い。したがって一般には普及しているものは少ない。

### 3. 局所湿度の測定法

分類I～IVの湿度計全体の特徴は、測定空気を感湿部に強制的に送るものが多い。応答性も比較的遅い。速いもので10秒程度、遅いものでは40分程度である。したがって、これらの湿度計は比較的広い空間の平均的湿度の測定用であり、蒸発や結露などの近傍の局所湿度やその変動の測定には向かない。熱と物質の同時移動を伴う対流現象の境界層内の水蒸気の濃度分布の詳細な計測となるとなおさらである。感湿部が比較的大きく、かつ場を乱すからである。

微少な容積内の局所の湿度を実時間で測定するには非常に感度のよい微細な湿度センサが必要であるが、現時点では開発されていない。例えば、20 $\mu$ m径のセラミック線センサが機能するようになると熱電対プローブや熱線プローブと同様に局所湿度の測定が可能となるであろう。

従来、この様な目的には光干渉法が用いられている。空気の屈折率は1に非常に近く、その変化は温度変化に比し、水蒸気濃度の変化による割合は小さい。とくに室温付近の空気中の水蒸気濃度は薄く(例えば、30℃の飽和湿り空気ではその4%)、温度分布がある場合にこれを分離して濃度分布を算出するのはかえって難しい。しかし溶液などの液体ではこの方法で局所の濃度変化を測定し、拡散係数などの測定法<sup>8)</sup>に利用されている。

一方、表1のVの赤外線湿度計は古くから開発は行われてきた。光路長が長いものはリモートセンシングの手法として利用されている。光路長の短いもの(つまり赤外線湿度計)の主な研究例を表2に示す。このようにながりの開発研究がされてきたが、現在、一般湿度計として使われていない。これは、一般に空気中の水蒸気濃度は薄く、赤外線吸収量を検知するためには測定光路長を比較的長くとる必要があり、気象観測用以外の計測器としては大型となるからである。また、光学計測器を含み高価でもある。しかし、赤外吸収を利用したガス濃度測定器は種々実用化されている。

### 4. 光ファイバ局所湿度計及び利用例

著者らは光ファイバを用い、敢えてこの赤外線湿度計を発展させ、局所湿度が実時間で測定できる装置の開発を行ってきた。光ファイバは数 $\mu$ m～100 $\mu$ mと細く、マイクロレンズを用いても1.8mm径のビームとなり、湿度場を乱すことなく測定できる。このビームを移動

表 2. 赤外線湿度計に関するこれまでの研究

著者	発表年	使用波長( $\mu\text{m}$ )	分光装置	光路長 (m)	光検知器	文献
Folwle	1912	A 1.13 R 1.17	回折格子	128.8	ホロメータ	(9)
L. W. Foskett et al.	1943	A 1.38 R 1.25	回折格子	1.5~52	熱電対	(10)
L. W. Foskett et al.	1953	A 1.37 R 1.40	NBPF	1.0	Pb·S	(11)
R. C. Wood	1958	A 2.6 R 2.45	NBPF	0.5	Pb·S	(12)
R. C. Wood	1959	A 2.6 R 2.45	NBPF	0.5	Pb·S	(13)
P. Hyson and B. B. Hichs	1975	A 6.30 A 2.70	NBPF	0.2 0.4	フォトダイオード L. D. R.	(14)
木村茂行、 市村 勉	1977	A 1.86 R 1.6 A 5.5~6.2 R 3.5~4.0	NBPF	0.7 1.4~9.8	Pb·S	(15)
L. C. Manoharan et al.	1980	A 2.7 R 2.4	NBPF	-	Pb·S	(16)

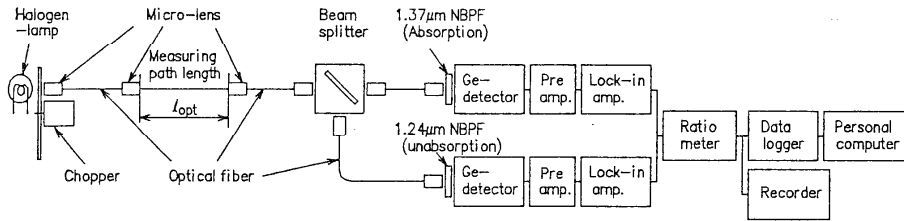


図1. 光ファイバ局所湿度計の系統図

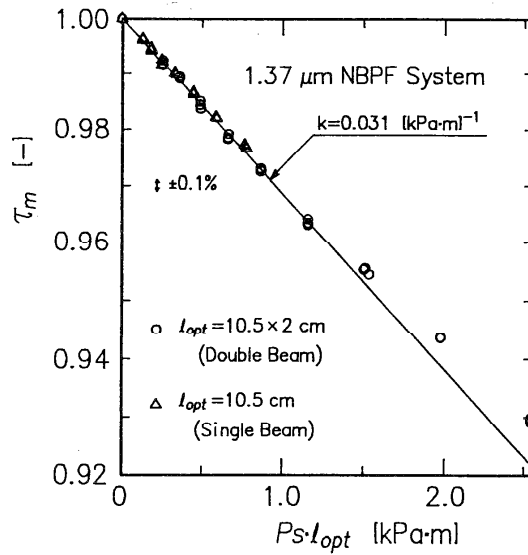


図2. 露点の知られた空気による検定結果

すれば湿度分布も測定可能となる。図1には改良された光ファイバ局所湿度計の系統図を示す。光源はハロゲンランプを用い、チョップを介し光ファイバに導く。測定光路長に相当する部分を切断し、それぞれ対向させ、再び光ファイバに導く。ビームスプリッタで2つのビームに分割し、それぞれ1.37 $\mu\text{m}$  (赤外線吸収がある場合)と1.24 $\mu\text{m}$  (赤外線吸収がない場合)の狭帯域バンドパスフィルタ(NBPF)で分光し、それぞれGe赤外検知器で測定する。同時にそれらの比を求め、光の変動分や温度分布によるビームの偏りを同時補正できるようになっている。図2にはその検定結果を示す。ミラーを用い光路長を倍化した場合もともに図の実線のようにBeerの法則より見かけの吸収係数はほぼ $0.031(\text{kPa}\cdot\text{m})^{-1}$ となる。ビーム上の水蒸気濃度あるいは水蒸気分圧 $P_s$ は次式のBeerの法則より逆算し求めることができる。

$$\tau_m = \exp(-k \cdot P_s \cdot l_{opt}) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_m$ ; 測定光路での透過率(-),  $k$ ; 見かけの吸収係数( $\text{kPa}\cdot\text{m})^{-1}$ ,  $P_s$ ; 水蒸気分圧( $\text{kPa}$ ),  $l_{opt}$ ; 光路長(m)である。

次に上記の光ファイバ局所湿度計をもちいて、実際に図3の実験装置で平行平板間で自由対流熱伝達と水蒸気の拡散の同時移動がある場合の上端部の境界層内の水蒸気濃度分布の測定例を図4に示す。温度分布が存在しても分離して局所湿度で測定できることを示している。また、分布も数値解析結果とほぼ一致している。(詳細は文献[5]参照)

図5には紙などの繊維質の材料の透湿度の測定装置を示す。そして図6には試料の下方3cmでの温度の変動を測定結果を示す。実線は1次元の1方向の拡散の数値解析結果である。両者の対応から見かけの拡散係数として試料の透湿度を算出した。(詳細は文献[17]参照)この方法の有効性は別の機会に検討するとして、図4及び図6の測定例は著者らの開発した光ファイバ局所湿度計で境界層などの狭い空間で水蒸気の濃度分布や変動が実時間で場を乱すことなく測定可能であることが示している。

光ファイバ局所湿度計で用いている光学機器や計測機器は最高性能のものではない。例えば、NBPFは透過率と半値幅について最適とは言えない。図2の検定結果より求めた見かけの吸収係数は $0.031(\text{kPa}\cdot\text{m})^{-1}$ に対し、文献[18]などに見られる分光計による測定ではこのバンドでの吸収係数の最大値は約 $0.06(\text{kPa}\cdot\text{m})^{-1}$ である。NBPFの中心波長や半値幅などの特性と水蒸気の赤外吸収の特性を詳細に検討し、NBPFを製作すれば見かけの吸収係数をもっと大きくすることができる。また、もっと強い赤外吸収のある別のバンドを用いても同様に測定精度を向上させることができる。

次に、2次元の測定分解能について検討する。測定光路ではロッド型のマイクロレンズは減衰が大きく、その結果として測定ビーム内の光強度は図7のように測定光路の初期では点に近い針状となり(中心ほど光強度は強い)、ロッド径1.8mmの平行光線の場合よりは分解能

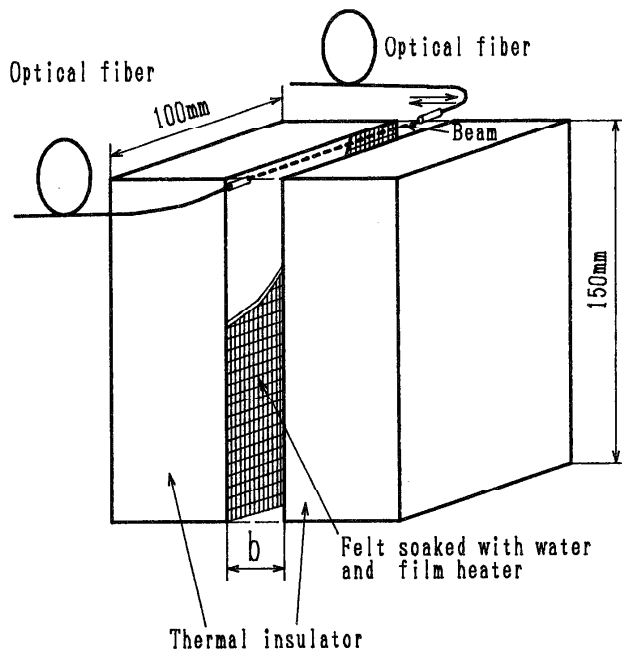


図3. 温度と水蒸気濃度の境界層が共存する鉛直平行平板間の自由対流の実験装置の略図

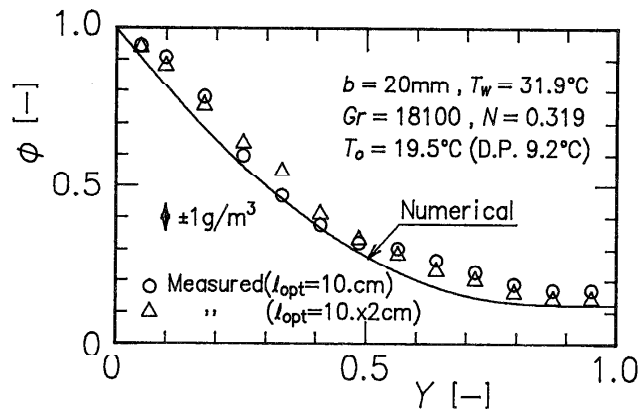


図4. 平板間距離  $b = 20\text{ mm}$  の場合の測定例



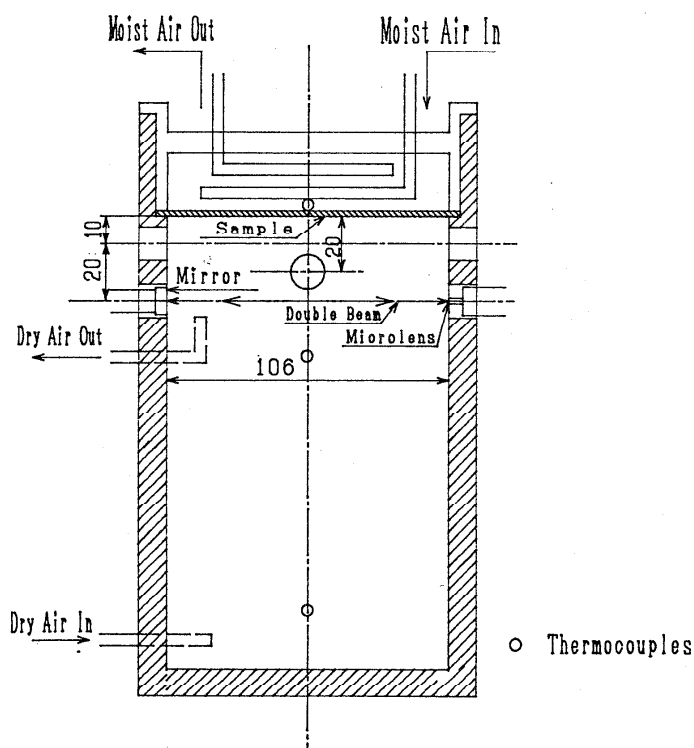


図5. 透湿度の測定装置

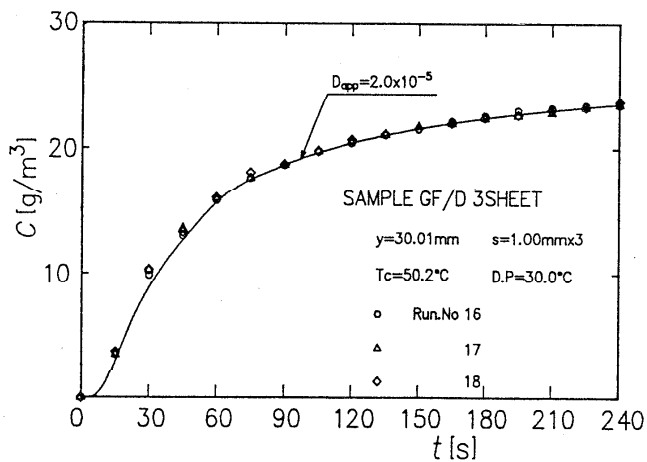


図6. 水蒸気濃度の変動の測定例 (試料下方3 cm)

は高い。また、実際には1mm径以下のロッド型のマイクロレンズも製作可能であり、空間的な分解能は向上できる。赤外検知器の感度さえよければ、現在のものでも細いスリットにすれば、1次元の局所変動の測定には十分利用できる。

#### 5. まとめ

局所湿度の測定法は前述のように室温付近の空気中の水蒸気を中心に考えたが、水蒸気濃度が濃い高温域での測定では必然的に測定精度は高くなり、逆に低温・低湿度では測定精度は低い。また、飽和点付近や高濃度では散乱の影響も考えられるなど光ファイバ局所湿度計も今後さらに改良を重ね、実用化の検討が必要と思われる。

以上、局所湿度の測定法として光ファイバ局所湿度計の位置づけを考察してきたが、著者らはどちらかといえば、ユーザであり、開発のプロではない。その必要性が見いだされれば、わが国の技術は確実に高精度で簡便なものを出現させ得ると確信する。また、これとは別の方法の局所湿度の測定法が開発されるかもしれない。

結論として強調したいことは、これからの実験的研究（伝熱の範疇を越えるかもしれないが）を考える上で、局所の湿度あるいは濃度を手軽に測定する方法の開発が重要であるということである。

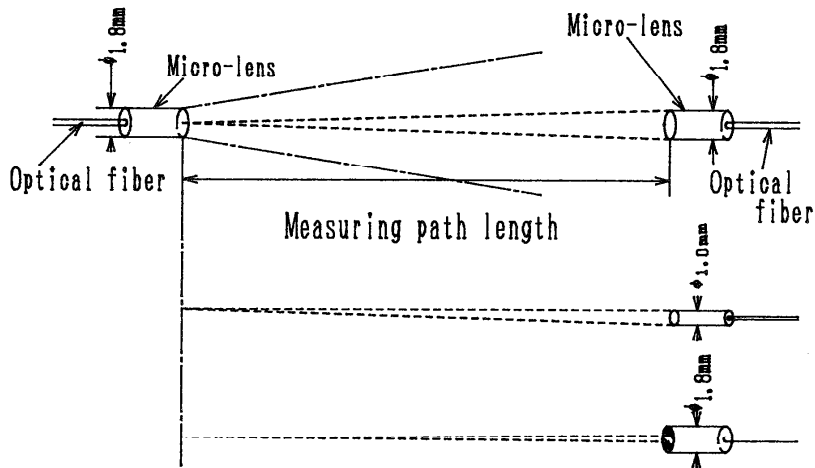


図7. ビームの空間分解能

参考文献

- 1) 稲松照子, 湿度の測定精度と標準, 機械学会誌, 第86巻, 780号(1983), 1296
- 2) 田中, 他3名, 光ファイバを用いた局所湿度測定法, 計測自動制御学会論文集, 第22巻, 4号(1985.4), 423
- 3) 田中, 江頭, 光ファイバー局所湿度測定装置に関する研究(第1報:NBPFシステム及び検定結果), 日本機械学会論文集(B編), 第53巻, 第485号(1987.1), 250
- 4) 田中, 江頭, 光ファイバー局所湿度測定装置に関する研究(第2報:局所湿度変動の実測およびダブルビーム・システムの検討), 日本機械学会論文集(B編), 第53巻, 第494号(1987.10), 3114
- 5) 田中, 他2名, 光ファイバー局所湿度測定装置に関する研究(第3報:熱・物質の同時移動を伴う境界層内の水蒸気濃度分布測定), 日本機械学会論文集(B編), 第54巻, 第502号(1988.6), 1482
- 6) J I S Z 8806-1981, 湿度測定方法
- 7) 清山哲郎監修, 化学センサ实用便覧, 棚フジテクノシステム, 1986, 45
- 8) 日本化学会編, 実験化学講座(続巻I), 丸善, 1966, 381
- 9) F. E. Fowle, The Spectroscopic Determination of Aqueous Vapor, *Astrophys. J.*, No. 35 (1912), 149
- 10) L. W. Foskett and N. B. Foster, A Spectroscopic Hygrometer, *Bull. Amer. Soc.*, No. 24, (1943), 46
- 11) L. W. Foskett et al., Infrared Absorption Hygrometer, *Mon. Wea. Rev.*, No. 81 (1953), 267
- 12) R. C. Wood, Improved Infrared Absorption Spectra Hygrometer, *Rev. Sci. Instr.*, No. 29 (1958), 36
- 13) R. C. Wood, The Infrared Hygrometer as Potential Meteorological Aid., *Bull. Amer. Soc.*, No. 40 (1959), 280
- 14) P. Hyson and B. B. Hicks, A Single-beam Infrared Hygrometer for Evaporation Measurement, *J. Appl. Met.*, No. 14 (1975), 301
- 15) 木村茂行, 市村勉, 赤外線湿度計, 計装技術, No. 5 (1977), 42
- 16) L. C. Manoharan and S. Nagabhushana, Infrared Hygrometer, *Mausam*, No. 31 (1980), 169
- 17) 田中, 他2名, 透湿度測定法に関する研究, 第25日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II (1988), 433
- 18) C. B. Ludwig, Measurement of the Curves-of-Growth of Hot Water Vapor, *Applied Optics*, Vol. 10, No. 5 (1971), 1057

## 1. はじめに

編集委員より、「はく離流と熱伝達」に関し何か書くようにとの依頼を受け、これも20年以上も会員になっている者の義務と受け取りお引受けした。内容は解説か研究トピックスを望まれたものと思うが、テーマが余りにも大きく、体系づけた解説など私には不可能である。しかし表題は私の学位論文(東京大学 1970-12)の題目と同じであり、改めて学位論文をめぐってみると、当時考えていたことからほとんど進歩していないことに愕然とした次第である。今回は私の乏しい経験を中心にはく離流との関わりから、そのときどきの研究の目的・意図、得られた結果を述べ、さらに今後の研究の方向などについて、独断と偏見に満ちた私見を述べて責任を果したい。

## 2. はく離流れの分類

ここでは、“はく離流れ”を2次元物体のはく離に限定させていただいた。筆者ははく離流れを次の3つのタイプに分類している。

- (I) 完全はく離型
- (II) はく離・再付着型
- (III) 複数物体の干渉流れ

タイプIは、円柱や平板に代表される物体からのはく離せん断層が再付着せず発達してカルマン渦列を生ずる流れである。

タイプIIは、物体表面からいったんはく離した流れが、表面に再付着し、その間にはく離泡を形成する流れである。例えば平板上の突起、フェンス、後向きステップ、あるいは一様流中の平板などがある。いずれの場合も再付着領域において高熱伝達率が得られる。以前、太田<sup>(1)</sup>が、本誌にはく離・再付着流れについての研究トピックスを書かれたが、最近種々のはく離・再付着流れに対する多くの報告をまとめ、再付着領域の極大熱伝達率の相関式を与えている<sup>(2)</sup>。この再付着領域の高熱伝達率を伝熱促進に利用する試みがある。すなわち平板上に乱れ促進体として突起物を設置し、突起物上端ではく離した流れの再付着により伝熱促進をはかる方法である。これについて棚沢<sup>(3)</sup>がレビューしているので参考にされたい。また、佐々木ら<sup>(4)</sup>による一連のはく離・再付着流れに関する研究により、再付着領域の非定常性および大規模渦の三次元構造が明らかにされている。また森ら<sup>(5)</sup>や河村ら<sup>(6)</sup>による後方ステップ再付着領域の時

空間的非定常特性の研究が行われている。いづれも非定常熱流束計を用いて、瞬時熱伝達率を測定し、その非定常伝熱特性につき詳細な検討を加えている。なお最近、土方・三松はホログラフィー干渉法による定量的圧力場の可視化法<sup>(7)</sup>を開発し、圧力場と速度場の関係<sup>(8)</sup>や後方ステップ再付着領域の圧力場と物質伝達率の可視化<sup>(9)</sup>に成功している。今後の発展が期待される。

タイプⅢは熱交換器に関連した管群の熱伝達が主で基盤目形配列や千鳥形配列の平均熱伝達特性について、古くから多くの研究が行われているが、最近その要素を取り上げた1行管群や1列管群の流動と熱伝達に関する局所熱伝達特性が明らかになりつつある。円管間隔が狭い場合の管群の伝熱特性について相場<sup>(10)</sup>が本誌に解説している。そこで以下は、主にタイプⅠの完全はく離型について述べる。

### 3. はく離流との出会い

私に「はく離流の熱伝達」の研究を勧めたのは、私の指導教育であった西脇仁一先生（東大名誉教授）と平田賢先生（東大）である。若い会員には西脇先生をご存じないと思うが、西脇先生は日本の伝熱研究を国際的なレベルに引き上げた貢献により1979年に Max Jakob 賞を受けている。これについては本誌Vol.19, No.72 (1980)に平田先生が紹介している。

19年前、私はDrコースの3年目、また定年退官を6カ月後にした西脇先生よりテーマの変更を示唆され、2つの方向が示された。そのうちの1つが西脇先生が永年温めてきたテーマの“はく離流の熱伝達”であった。当時の日本でははく離流の熱伝達をテーマとした研究はほとんど見られず、わずかに泉の平板<sup>(11)</sup>についての報告があり、その結果が実験と一致しないという藤掛氏の報告<sup>(12)</sup>が知られる程度であった。その時、西脇先生は今後はく離流は重要なテーマとなるであろう、伝熱だけでなく流体力学的にも十年は研究できるテーマである。近いうちにビル風害が社会的ニュースになるだろうとも言われた。私は一晩考えて、西脇先生の指示に従うことに決心した。以上のような経過で私に与えられたテーマは“一様流中に置かれた平板まわりの熱伝達”であった。なぜ“円柱”でなく“平板”であったのかというと、円柱については多くの研究報告があり教科書にも載っているが、平板についての報告や記述が全く無かったので、私に“やる気”が起きると読まれたものと思う。

研究に先立ち、西脇・平田両先生より次の点を注意された。①文献を読まない。②まずやってみよ、現象を見よ。③60点の論文を目指す。これは西脇先生が日頃言っていたことだが、要は独創的研究を行え、他人のまねをするな、現象を支配するファースト・タームを追い、他人のやった60点の論文を80点にするよりも、誰もやってない研究をゼロから出発して60点にせよ、文献調査は論文骨子が出来てから十分に行えという意味である。また仮に、同じ研究が発表されるかも知れないが、独自でやったのであれば評価するとも言われ、これには大変勇気づけられた。この西脇先生の教えは先の本誌に平田先生が詳しく書かれている。

### 3. 1 研究の目的

当時、研究目的として次の5項をあげた。

- (1) 一様流中に傾斜しておかれた平板背面の局所・平均熱伝達率の測定  
およびはく離流れの観察と測定
- (2) 円柱のはく離領域の熱伝達の考察
- (3) はく離流のモデル化についての検討
- (4) はく離流の熱伝達に関する一般式の確立
- (5) はく離流の熱伝達機構の解明

(1)項については、前面と背面に分離した信頼すべきデータを得ること。次に流体力学的考察から、はく離流の熱伝達を支配する諸因子を明らかにする。(2)項については、従来の円柱の実験結果を検討することにより、平板の結果との間に成り立つ一般的特性を見いだす。(3)項では従来提案されているはく離流れのモデルの検討と実験結果との比較、(4)項では以上の結果をふまえて任意物体のはく離域の熱伝達に適用できる流力的に重要な無次元数よりなる一般式を求める。(5)項では、(4)項で求められた一般関係式から熱伝達を支配する主因子を取り出し、その因子を変化させることにより、熱伝達現象がどのような影響を受けるかを明らかにする。すなわち、はく離域の熱伝達現象を流れの制御からとらえ、熱伝達機構の解明に役立てる。

それで、目的が達成されたかと言われれば、はなはだ心もとないが、西脇先生の言われた60点は取れたものと思っている。しかし、その後18年今だに(2)項から(5)項にこだわって数編の論文を書いたが、それで何点まで高めたかというとおそらく70点がよいところであろう。特に(3)~(5)項については不十分である。日暮れて、道遠しの感があるが、もうそろそろはく離域の熱伝達について一つの結論を出さねばと思っている。そこで過去を振り返り、その道程を明らかにして、はく離流の熱伝達機構の解明に若い研究者の参加と挑戦を期待したい。

### 3. 2 伝熱実験模型の製作と測定精度チェックについて

まず流体として水か空気かを検討したが実験が容易な空気を選んだ。空気は温度変化に対しプラントル数がほぼ一定でプラントル数の影響を考慮しなくてよい点もあった。後日このプラントル数の影響を調べる計画を立てていたが今だに実行していない。平板の伝熱実験模型<sup>(13)</sup>の製作に当たって、まず等温壁か、等熱流束で行うかの選択が必要になったが、装置が簡単な等熱流束を選んだ。今でこそステンレス箔を通电加熱して伝熱面とするのが常識のようになっているが、恐らく当時西脇研におられた鳥居先生(横国大)が開発した手法<sup>(14)</sup>が広まったものと思う。測定精度チェックをどう行うかが重要な問題であるが、信頼できる過去のデータが全く無いので、流れに平行な平板の層流熱伝達の理論解と比較することにした。そのため、当初計画した長方形断面の平板が、先端を30°に切った台形断面になってしまった。実際に実験

してみると補助ヒーターによって完全に断熱しているにもかかわらず理論解の2倍ほどの熱伝達率が得られ、結局迎え角  $-5^\circ$  にして解決した。このとき自分の目で現象を確認しようと、東大航空工学科の中口研究室の煙風洞で可視化を行った。結果の1例を図1に、また平行平板の層流熱伝達の実験結果を図2に示す。注意していた先端で流れがはく離し、層流でなく乱流境界層への遷移が起っていたのだった。また予想していたことだが、中口先生や流体の先生方からはこの平板は台形平板<sup>(15)</sup>といわれ、図3に示すように流れに対する設置が逆であるとの指摘をうけた。このとき、伝熱よりも流体のほうが厳密だと実感したものである。筆者としては、その点は承知の上で、背面は平面にする必要があるからで、背面の熱伝達に前面形状の影響は少ないと考えた。逆に台形平板より更に異なる形状として半円柱でも実験を行った。もっともその後、このような台形平板にしくとも、長方形断面の平板で実験を行うことが出来ることがわかった。それは、直交平板の圧力分布を測定し境界層外縁速度  $U_\infty$  を求めて頂角  $180^\circ$  のくさびの先端近傍の層流の理論解の式の中の境界層外縁速度  $U_\infty$  に代入すればよいからである。実際このときも、図3(b)のように設置した前面の熱伝達率は理論通り一定であった。しかし当時はブロッケージ比効果を考えて、平行平板にこだわっていた。このような実験模型の精度チェックは以後の実験で必ず行っている。

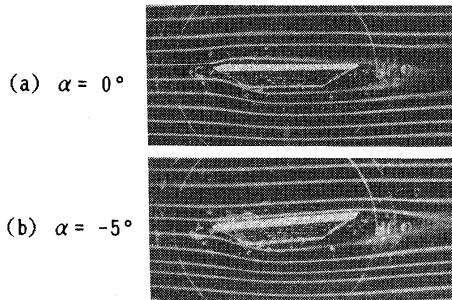


図1 流れに平行な平板まわりの流れ

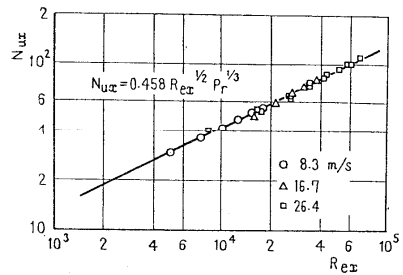
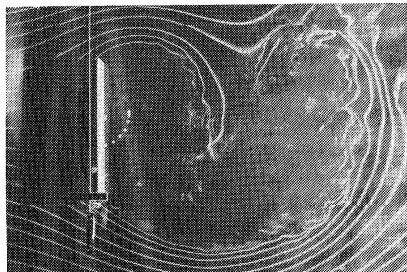
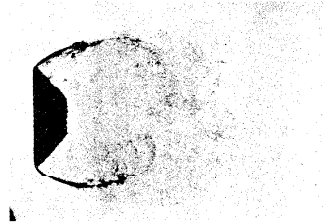


図2 流れに平行な平板強制対流層流熱伝達



(a) 台形平板



(b) 平板

図3 一様流中の平板まわりの流れ

4. はく離領域の熱伝達

4. 1 傾斜平板背面の熱伝達<sup>(13)</sup>

まず最初に得られた重要な特性は、図4に示す次の相関式であった。

$$h_x \propto U_0^{2/3}$$

すなわち、 $Nu \propto Re^{2/3}$  (1)

背面の局所熱伝達率分布の一例を図5に示す。局所熱伝達率は傾斜角 $\alpha \geq 45^\circ$ に対し、レイノルズ数 $10^4 \leq Re_d \leq 10^5$ の範囲で、次式で与えられる。

$$Nu_x = 0.170 Re^{2/3} \tag{2}$$

ここで、 $Nu_x = h_x \bar{x} / \lambda$ 、 $Re_d = U_0 d / \nu = U_0 \bar{x} \sin \alpha / \nu$

$$Re_x = Re_d F(x/\bar{x}, \alpha)$$

$$F(x/\bar{x}, \alpha) = 1 + 6(1 - \sin \alpha)(x/\bar{x} - 1/2)$$

また平均熱伝達率は $\alpha \geq 10^\circ$ に対し、図6に示すように次式で与えられる。

$$\bar{Nu} = 0.170 Re_d^{2/3} \tag{3}$$

流れの可視化や背面の時間平均および変動圧力の測定、後流内の時間平均圧力分布等の測定から、はく離流の熱伝達率を支配する最も重要な因子は後流内に形成されるはく離渦の強さであり、その一つの表現が背圧係数であるという知見を得ている。この背圧係数は後流の大きさに比例し、背圧の変動量と時間平均の背圧係数に比例することがわかった。これが後の研究において、はく離域の流れ場を表現する新しい因子として変動圧力導入の伏線となったのである。

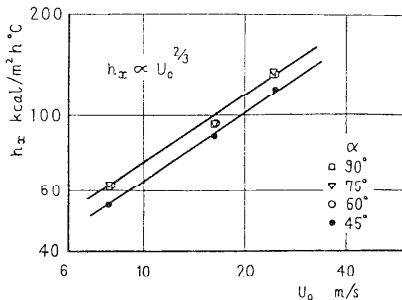


図4 傾斜平板背面中央点の熱伝達率  $h_x - U_0$  の関係

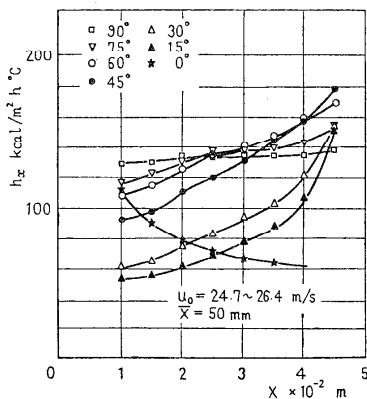


図5 平板背面の局所熱伝達率

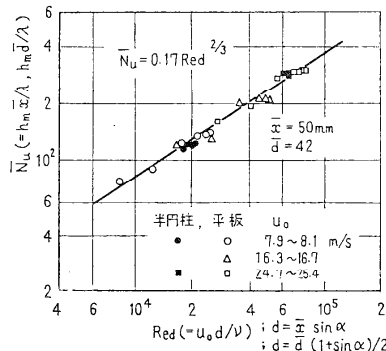


図6 平板背面の平均ヌセルト数



#### 4.2 流れのモデル化<sup>(16)</sup>

平板の実験結果は従来のSogin<sup>(17)</sup>の結果とも定性的に一致し、また従来の円柱背面の熱伝達の実験データを検討し、一般にははく離流れは  $Nu \propto Re^{2/3}$  の関係を満足していることを確信した。そこではく離流れのモデル化を試みた。まずRanz<sup>(18)</sup>の「断続的熱浸透モデル」を検討し、このモデルが非定常熱伝導モデルであることから、伝熱面上には層流の速度境界層が形成され、温度境界層は断続的にカルマン渦の周期で更新されるという「断続的層流熱伝達モデル」について解析を行った。高レイノルズ数ほど実験値との差異が大きく、適当なモデルとは言い難かった。

そこで熱伝達機構として全く新しいモデルを提案した。すなわち、物体背面の熱伝達は伝熱面に沿う流れだけではなく、伝熱面に垂直に働く体積力（流体力）、換言すれば垂直方向の圧力勾配に基づく流れによって熱が輸送されると考えた。

物体の背後には図7(a)に示すはく離渦が生成する。半径  $a$ 、周速度  $U_\theta$  で回転している渦の外側は物体のはく離線と一致し、この周速度ははく離直後の自由流線上の速度  $U_s$  に等しいと仮定した。平板背面の背圧係数を  $C_{pb}$  とすると、次の関係式が得られる。

$$U_\theta = U_s = U_o \sqrt{1 - C_{pb}} \quad \text{————— (4)}$$

また渦の半径と物体の代表長さ（流れに直角方向の長さ） $d$  との関係を表式で与える。

$$m = d/a \quad (m = 2 \sim 4) \quad \text{————— (5)}$$

物体背面のはく離域の熱伝達機構と物体と流体の運動を相対的に置き換えた水平回転円柱からの熱伝達（乱流状態）機構との間に相似性が成立すると考えた。空気中の水平回転円柱に対するAndersonら<sup>(19)</sup>の実験式

$$Nu_d = 0.10 Re_d^{2/3} \quad \text{————— (6)}$$

に、図7(b)に示したように両者の求心力と遠心力が等しいとおいて整理し、次式を得た。

$$Nu_d = 0.10 \left[ \frac{m}{2} \sqrt{1 - C_{pb}} \right]^{1/3} Re_d^{2/3} \quad \text{————— (7)}$$

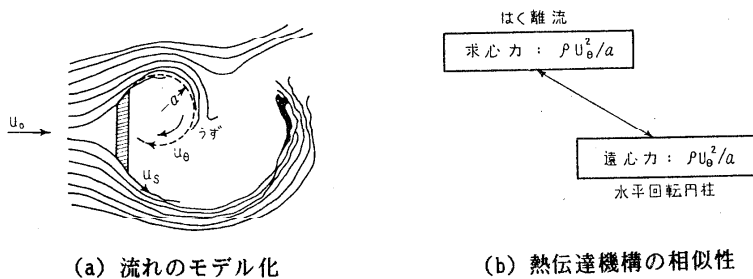


図7 流れのモデル化

式(7)と平板および円柱の実験値とを比較したのが図8、9ある。式(7)において、平板に対し  $m = 3$ 、円柱の後方岐点に対し  $m = 4$  とすると実験結果と良く一致した。なお円柱全表面の平均熱伝達率を前面と背面に分離し、 $\overline{Nu} = (\overline{Nuf} + \overline{Nub})/2$  として、局所熱伝達率分布を積分して前表面の平均熱伝達率を次式で与えた。

$$\overline{Nu} = 0.373Re_d^{1/2} + 0.057Re_d^{2/3} \quad \text{————— (8)}$$

上式とMcAdams<sup>(20)</sup>の整理式との一致は極めて良い。

また筆者らは次報<sup>(21)</sup>で、① 式(7)は背圧係数が著しく変化する傾斜角45°以上の傾斜平板に適用できること、また従来の論文を調べて ② 主流乱れの影響ははく離域の熱伝達に対しほとんど影響がないこと、③ 後流内にスプリッタプレート<sup>(22)</sup>を設置したり、円柱前面にボルテックス・ジェネレータ<sup>(23)</sup>を取付けても、式(1)の  $Nu \propto Re^{2/3}$  の関係が常に維持されることを見出した。

#### 4.3 正三角柱の場合：ブロッケージ比効果<sup>(24)</sup>

まず式(7)をさらに一般化することを考えた。はく離線上の速度  $U_s$  と主流の近寄り速度  $U_0$  との比を背圧パラメータ  $K$  で表示すると、次の関係が得られる。

$$K = U_s/U_0 = (1 - C_{pb})^{1/2} \quad \text{————— (9)}$$

また平板および円柱まわりの流れの可視化から、後流幅  $d_w$  と渦の半径  $a$  の間には、次の近似が成り立つ。

$$m = d/a = 4(d_w/d) \quad \text{————— (10)}$$

この式(9)、(10)を式(7)に代入すると次式が得られる。

$$\overline{Nu} = 0.10 [2/(d_w/d)]^{1/3} [KR_0]^{2/3} = 0.10 [2/(d_w/d)]^{1/3} (Re^*)^{2/3} \quad \text{————— (11)}$$

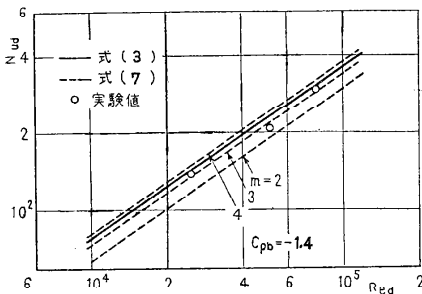


図8 流れに直交する平板背面の熱伝達率

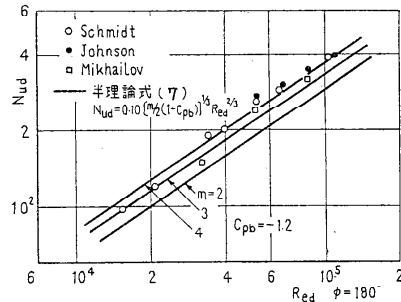


図9 円柱後方岐点の熱伝達率

$KR_e = (U_s/U_0)(U_0 d/\nu) = U_s d/\nu$  であるから  $U_s$  を代表速度とするレイノルズ数、 $U_s d/\nu$  を修正レイノルズ数  $Re^* = KR_e$  と定義する。前報<sup>(13)</sup>の傾斜平板はブロックージ比が大きく変化するため背圧係数および後流幅が著しく変化するが、式(11)を満たすことが確認された。そこで、

- (1) 一般的な議論から導かれた式(11)が、他の任意物体のはく離域の熱伝達に適用できるのか、
  - (2) はく離領域の流れの代表速度をどう定義するのが妥当か、
  - (3) 物体背面の局所熱伝達率は物体形状によりどのように変化するのか、
  - (4) はく離流の熱伝達でしばしば問題とされるブロックージ比効果をどう見積るのか、
- 以上の諸点を明らかにするため以下の実験をおこなった。

実験に用いる物体としては基本的な形状であるくさび物体、すなわち正三角柱を選び逆くさび( $\alpha=180^\circ$ )とくさび( $\alpha=0^\circ$ )の2つの配置を考えた。ブロックージ比効果の物理的意味を明らかにするため正三角柱の辺長  $x$  は3種類、また一様流の幅すなわち風胴幅  $L$  は2種類に対し、ブロックージ比  $X/L=0.075\sim 0.333$  の範囲で実験を行った。得られた結果の一例を図10、図11(a)、(b)に示す。明らかに式(11)はブロックージ比効果をも考慮した一般式ということが示された。また式(11)を分解すると、式中の代表長は両辺に形式的に含まれているだけで、消去されてしまう。したがってはく離域の熱伝達は物性値を除けば、はく離線上の速度  $U_s$  と後流幅  $d_w$  で与えられる。

$$h = h(U_s, d_w) \quad (12)$$

これはRoshko<sup>(25)</sup>が物体後流のストローハル数  $S^*$  を  $U_s$  と  $d_w$  で、 $S^* = f d_w/U_s$  と定義したのに対応する。

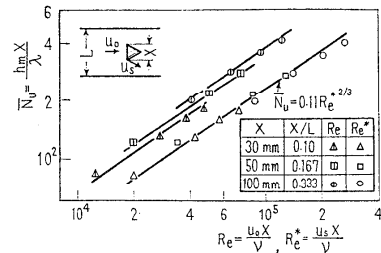
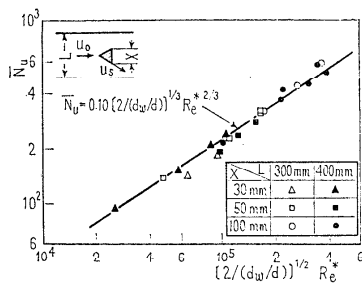
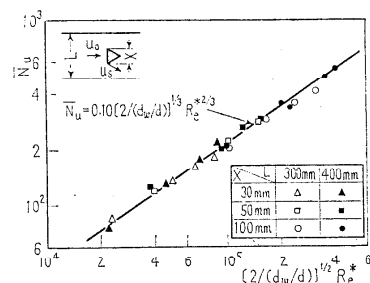


図10 熱伝達に及ぼすブロックージ比の影響



(a)  $\alpha = 0^\circ$



(b)  $\alpha = 180^\circ$

図11 正三角柱背面の平均熱伝達率

したがって、はく離領域の代表長は後流幅  $d_w$  で、流れの代表速度ははく離線上の速度  $U_\infty$  である。 $d_w/d$  の値は物体形状によって決まる一定値である。 $U_s$  はブロックージ比効果を包含した物理量である。その無次元表示が背圧パラメータ  $K$  である。修正近寄り速度  $U_0^*$  を導入することにより、背圧パラメータは次のように分解することができる。

$$K = \frac{U_s}{U_0} = \frac{U_s}{U_0^*} \cdot \frac{U_0^*}{U_0} \quad (13)$$

実際に  $U_0^*$  を測定すると、 $U_s/U_0^*$  は一定値  $K^*$  となる。したがって式(13)の右辺の2つの項 ( $U_s/U_0^*$ )、( $U_0^*/U_0$ ) は物理的意味をもつ。すなわち  $U_0^*/U_0$  は側壁の存在による物体の閉そく効果、 $U_s/U_0^*$  ははく離による後流の効果と考えることができる。 $K = U_s/U_0^*$  はブロックージ比効果のない背圧パラメータである。またこの修正近寄り速度  $U_0^*$  で定義した修正抗力係数  $C_D^*$  は一定値であることも示された。

$$C_D^* = C_D / (U_0^*/U_0)^2 \quad (14)$$

上述のブロックージ比効果に対する考え方の妥当性を検証するため傾斜平板に対しても同様の実験を行い、Abernathy<sup>(26)</sup> や Fage と Johansen<sup>(27)</sup> の実験結果と比較し、よい一致が得られた。以上の結果を総括したのが文献(28)である。図に示す種々の形状を有する二次元物体の熱伝達の式(7)に含まれる後流幅  $d_w/d$  および背圧パラメータ  $K$  の値を表1に示す。

## 5. 流れの制御と熱伝達

### 5.1 流れの制御

円柱まわりの流れを制御すると、その流れ場は著しく変化する。たとえば円柱の後流にスプリッタプレートを挿入するとストローハル数が低下し<sup>(29), (30)</sup>、非定常性が緩和され熱伝達率が著しく低下する<sup>(22)</sup>。この場合、前述の式(7)によって熱伝達率の低下の定量的見積は出来ない。しかし筆者は、スプリッタプレートによりウェーク制御された円柱背面の熱伝達率と変動圧力の rms 値との相関を見出した<sup>(31)</sup>。スプリッタプレートの場合は、はく離せん断層

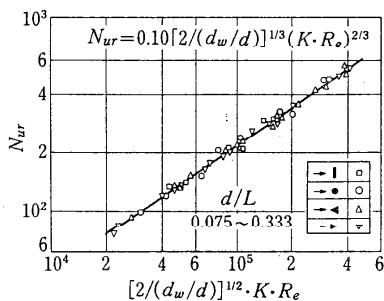
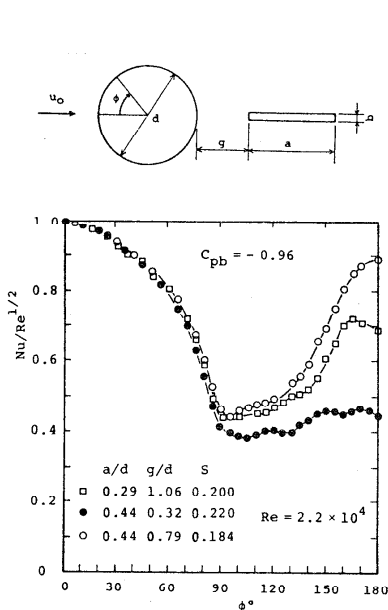


図12 鈍い物体のはく離領域の熱伝達

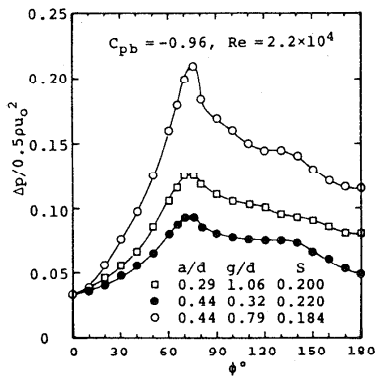
表1 鈍い物体の背圧パラメータと後流幅

鈍い物体	背圧パラメータ			後流幅 $d_w/d=c$
	$0.05 \leq d/L \leq 0.33$ $k=k_0(1-d/L)^{-m}$	$d/L \leq 0.05$ $k=k^*$		
断面形	$k_0$	$m$	$k^*$	$c$
→□	1.44	1.0	1.51	1.41
→□	1.43	1.0	1.51	1.41
→▷	1.44	1.0	1.51	1.5
→◁	1.43	0.8	1.49	1.1
→○	1.43	0.6	1.48	1.02

を伸張し、渦形成位置を下流側へ後退させる。ただし比較的短いプレートを円柱との隙間を適当に設置すると渦形成位置が前進し、熱伝達率が増加する場合もある。そこでこのはく離せん断層の揺動を直接的に制御する目的でせん断層の内側に2つの小円柱を設置した<sup>(32)</sup>。この場合もせん断層の揺動が制御される場合と増幅される場合がある。以上2つの方法によるはく離せん断層の制御に対し得られた結果の一例を図13、14に示す。

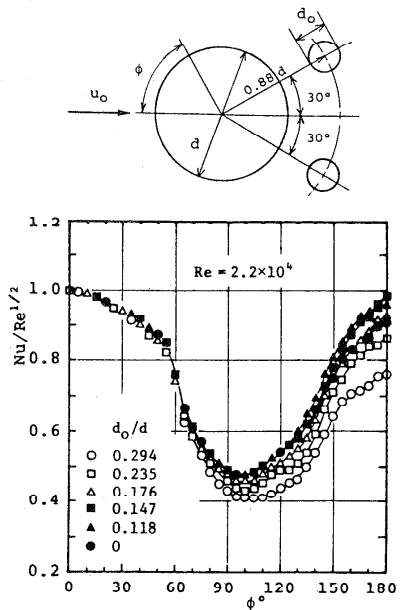


(a) 局所熱伝達率分布

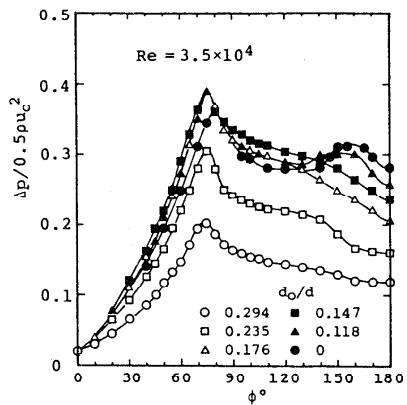


(b) 変動圧力の rms 値分布

図13 スプリッタープレートのある円柱 (渦形成位置を制御した場合)



(a) 局所熱伝達率分布



(b) 変動圧力の rms 値分布

図14 小円柱を設置した円柱 (はく離せん断層を制御した場合)

5. 2 熱伝達を支配する新しい因子 ———— 変動圧力のrms値

流れの非定常性(変動成分)を考慮した新しい因子として、変動圧力のrms値を導入し、定量的評価を行った<sup>(33)</sup>。小円柱によってせん断層を制御した場合の円柱のはく離点および後方岐点の変動圧力のrms値、 $\Delta P_s$ 、 $\Delta P_r$ 、と主流速度の間には図15に示す一定の関係が得られた。

$$\Delta P_s, \Delta P_r, \propto u_0^{2.2} \quad \text{————— (15)}$$

次に背面の平均熱伝達率および後方岐点の熱伝達率と変動圧力のrms値の関係を図16、17に示す。小円柱の場合は実験値は一本の線上によくまとまっているが、フローパターンが複雑に変化するスプリットプレートの場合<sup>(30)</sup>は、まとまりが悪い。しかし、いずれの場合も次の関係にある。

$$h_r \text{ (または } \bar{h}_b) \propto \Delta P_s^{0.31} \propto \Delta P_r^{0.31} \quad \text{————— (16)}$$

式(16)に式(15)を代入すると

$$h_r \propto (u_0^{2.2})^{0.31} = u_0^{0.68} \quad \text{————— (17)}$$

となり、先述の式(1)とほぼ一致する。以上の結果より圧力変動のrms値 $\Delta P$ ははく離域の熱伝達を支配する最も重要な因子の一つであることが分かった。

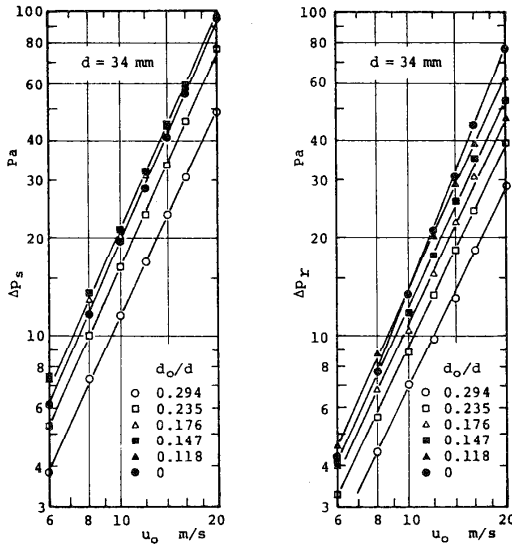


図15  $\Delta P_s$ ,  $\Delta P_r$  と  $u_0$  の関係 (小円柱の場合)

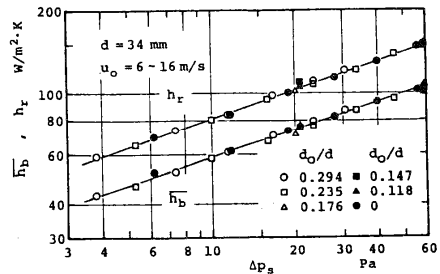


図16 変動圧力のrms値と熱伝達との関係 (小円柱の場合)

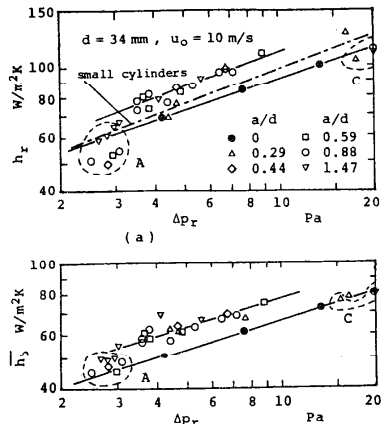


図17 変動圧力のrms値と熱伝達との関係 (スプリットプレートの場合)

### 5.3 圧力変動と速度変動の関係

熱伝達率と変動圧力とを結びつけたので、多くの先生方から理解し難いとの意見をいただいたが、これはあくまで“はく離領域”にのみ適用できるのであって、境界層流れには適用できない。このような点から円柱背面近傍の流れと圧力変動の対応を調べた。変動圧力の rms 値の無次元表示と熱伝達率との量的関係を議論するため、円柱直径  $d$  を変えて実験を行った<sup>(34)</sup>。壁面近傍  $\delta = 0.5\text{mm}$  における速度変動と圧力変動はかなりよい対応関係を示すことが図 18 からわかる。円柱後方岐点における時間平均速度  $\bar{u}_r$  および変動速度の rms 値  $\Delta u_r$  と変動圧力の rms 値  $\Delta P_r$  との関係を図 19 に示す。円柱直径  $d$  やレイノルズ数によらず両者は一定の関係にある。物理的にもはく離域の変動圧力が流れ場と対応した量であることがわかる。図 20 はブロックージ比効果を考慮した後方岐点の rms 値の無次元表示である。

$$\frac{\Delta P_r}{0.5 \rho \bar{u}_r^2} = 5.35 \times 10^{-4} \text{Re}_1^{0.6} \quad (18)$$

図 21 は後方岐点および背面の平均熱伝達率と圧力変動の rms 値との関係を示したもので、熱伝達率が円柱直径によらず変動圧力の rms 値で与えられることを示している。

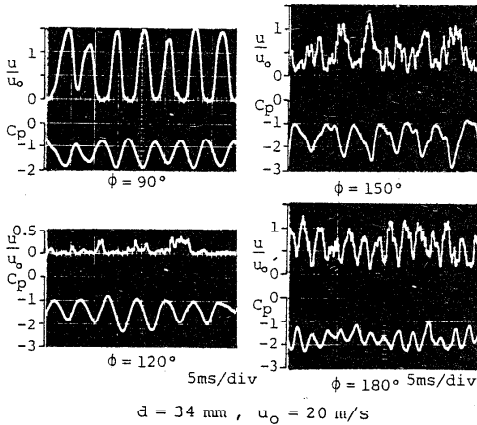


図 18 熱線の出波波形と圧力変動

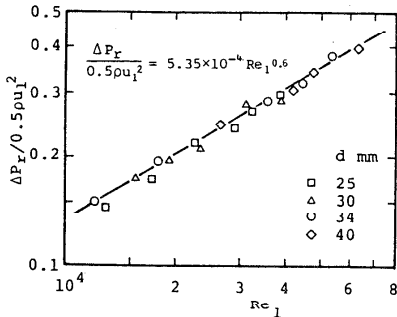


図 20 後方岐点の圧力変動の rms 値

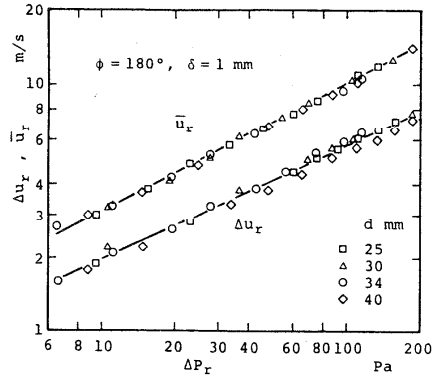


図 19 圧力変動の rms 値と速度の時間平均値および rms 値の関係

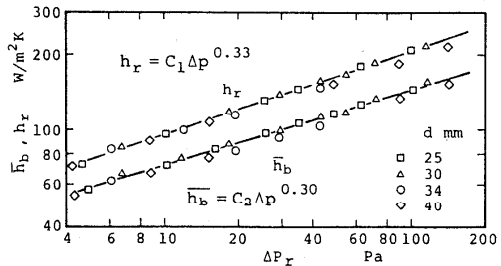


図 21 後方岐点および背面の平均熱伝達率と圧力変動の rms 値との関係

5.4 ボルテックス・ジェネレータのある円柱<sup>(36)</sup>,<sup>(36)</sup>

ボルテックス・ジェネレータにより円柱まわりの流れを制御すると、その取付位置(角度 $\beta$ )、高さ( $h_v$ )、主流速度( $U$ )またはレイノルズ数 $Re$ によりいくつかのフローパターンが現れる。ストローハル数 $S$ と抗力係数 $C_D$ の変化を図22(a),(b)に示す。両者の間には図23に示すような一定の関係がある。なお図中の破線は亀本<sup>(37)</sup>が種々の形状の二次元物体の実験結果を整理した関係式である。図中に示した記号Aはボルテックスジェネレータの影響のないパターン、Cは乱流に遷移したパターン、Bは遷移領域、Dはボルテックスジェネレータ位置ではく離するパターンである。図24は変動圧力のrms値分布だがフローパターンの差が明瞭にわかる。図25は主流速度 $U_0$ とrms値 $\Delta P$ との関係で、乱流遷移が起こると $U_0$ が増加しても $\Delta P$ が著しく減少するのがわかる。図26はフローパターンによる局所熱伝達率分布の変化を示している。乱流遷移すると再付着点から乱流境界層にかけて著しい熱伝達率の増加が得られるが、背面では熱伝達率が低下する。また完全はく離により、はく離域が増大し、変動圧力のrms値が増加するパターンDでははく離域に著しい熱伝達率の増加が得られる。図27は後方岐点

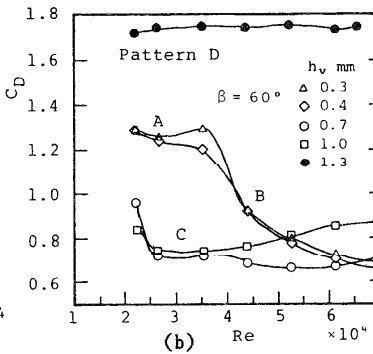
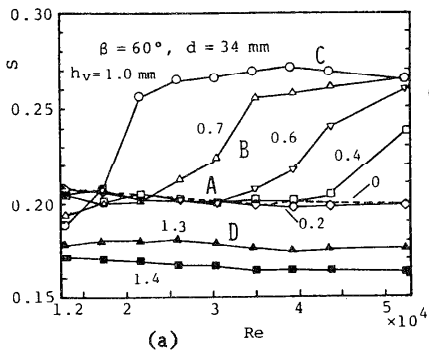


図22 ボルテックスジェネレータのある円柱のストローハル数と揚力係数

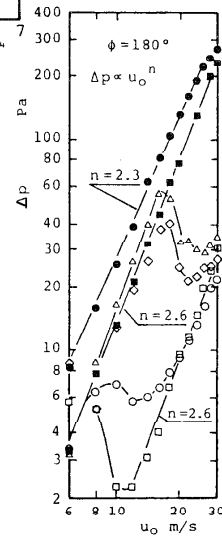
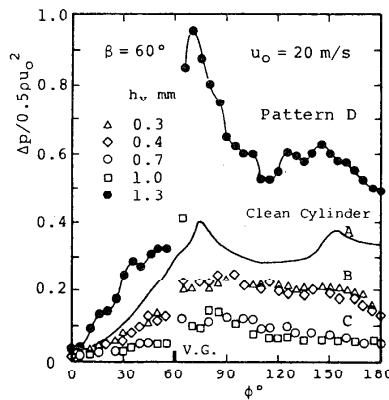
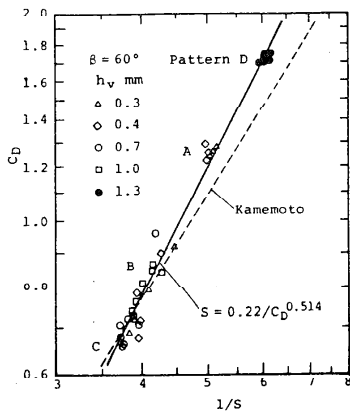


図23 ストローハル数と揚力係数の関係

図24 変動圧力のrms値分布

図25 変動圧力のrms値 $\Delta p$ と $U_0$ の関係



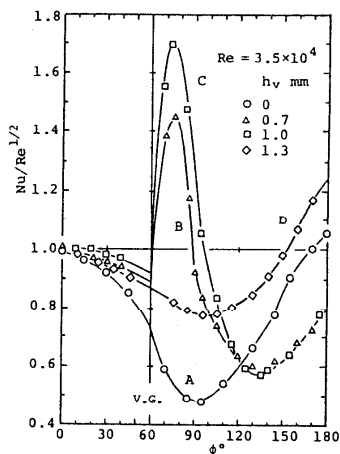


図 26 局所熱伝達率分布

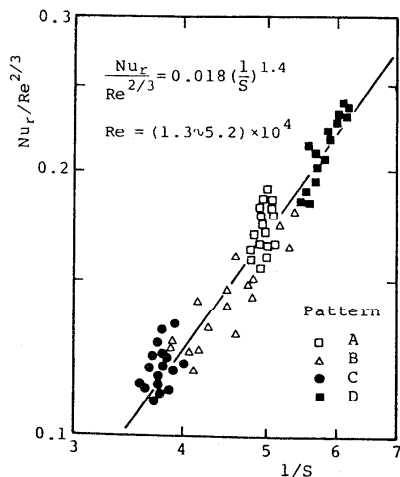


図 27 後方岐点の熱伝達率とストローハル数の関係

の熱伝達率とストローハル数の関係を示したもので、フローパターンによらず次の関係にある。

$$Nu_r/Re^{2/3} = 0.018(1/S)^{1.4} \quad (19)$$

図 28 は後方岐点の熱伝達率と変動圧力の rms 値  $\Delta P_r$  の関係を示しているが、乱流遷移のパターンにおいても、式(16)の関係を満足している。

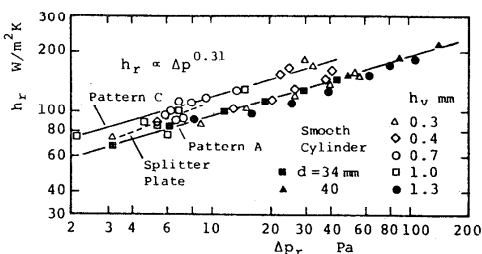


図 28 後方岐点の熱伝達率と変動圧力の rms 値  $\Delta P_r$  の関係

## 6. 角柱まわりの流れと熱伝達

### 6.1 正方形柱<sup>(38), (39)</sup>

正方形柱まわりの熱伝達についてはJakov<sup>(40)</sup>、Eckert<sup>(41)</sup>が引用したHilpert<sup>(42)</sup>の平均熱伝達がよく知られている。以前筆者が、傾斜平板<sup>(13)</sup>の結果から正方形柱の平均熱伝達率を予測するとデータが低すぎること気づいた。また正方形柱まわりの流れ<sup>(38), (43)</sup>は迎え角  $\alpha = 13 \sim 14^\circ$  を境に流れ特性が図 29 に示すように変化し、興味ある物体である。

特徴的なフローパターンを示す下面上の油膜模様を図 30 に示すが、次のように分類される。

(I) 完全はく離型:  $0^\circ \leq \alpha \leq 13^\circ$ 、(II) 再付着型:  $14^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ 、(III) くさび流れ型:  $35^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$  完全はく離型では巻込んだせん断層の逆流の再付着が見られる。図 31、32 は先述のモデルの精度チェックの一例で、前面に形成される境界層外縁の速度および層流熱伝達の実験値と理論との比較を示している。図 33 は  $\alpha = 0^\circ, 45^\circ$  の平均熱伝達率を Hilpert<sup>(42)</sup>の結果と比較している。Hilpert の値は真の値より 40% ほど低いことが明らかになった。

Hilpert, Jakovの場合の代表長は角柱と周の長さを等しくする円筒の直径である。最近の教科書<sup>(44), (45)</sup>では代表長さを流れと直角方向の投影長さとして誤解していることが判明したので、この点については文献[46, 47]で詳しく触れた。局所熱伝達率分布の一例を図34に示す。 $\alpha = 0^\circ$ では、前面および背面の局所熱伝達率は、それぞれほぼ一定で、レイノルズ数が大きくなると背面の方が高くなる。なお、それぞれの熱伝達率は直交平板の前面および背面の値と等しい。また、側面の熱伝達率も前面より高い。 $\alpha = 10^\circ$ では、側面CDと背面BCの熱伝達率は著しく低下している。再付着型の $\alpha = 20^\circ$ では、再付着面ABの熱伝達率が著しく増大し、

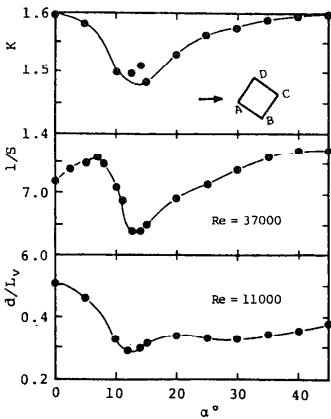


図29 背圧パラメータ、ストローハル数、うず形成位置の変化

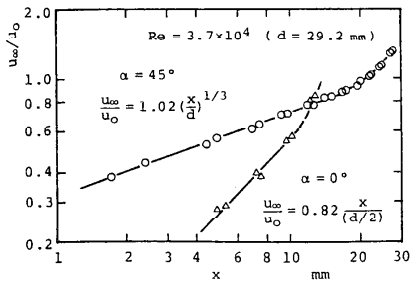


図31 前面の境界層外縁速度

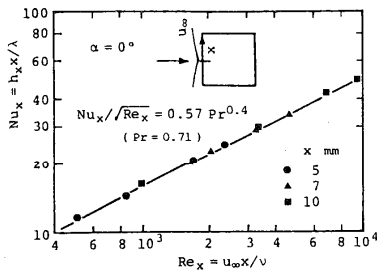


図32 前面の層流熱伝達 (熱流束一定)

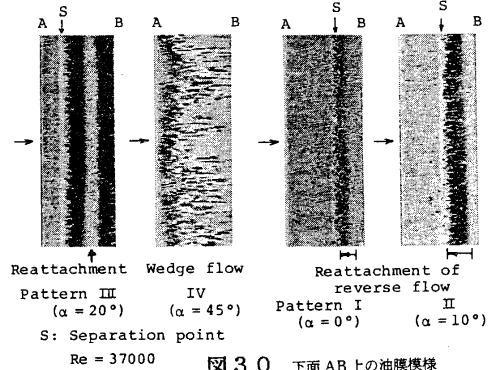


図30 下面AB上の油膜模様

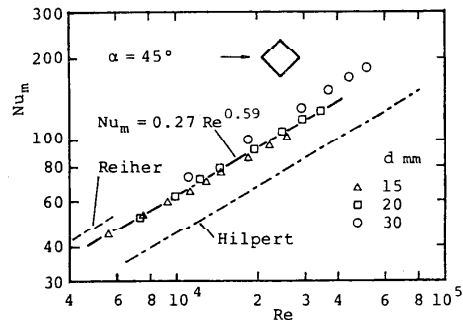
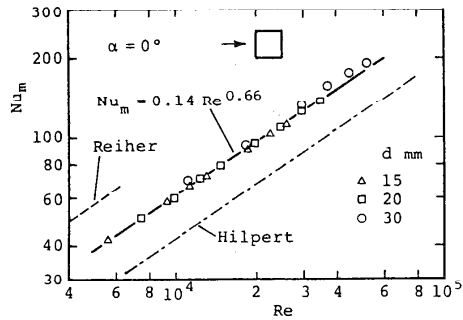


図33 平均熱伝達率 (等温壁)

BC, CD面も増加している。くさび流れ型になると、前面および背面のプロフィールは対称的になり、背面の熱伝達率は前面よりも高くなる。一般的に平均熱伝達率は次式で与えられる。

$$Nu_m = C_1 Re^n \quad (29)$$

迎え角  $\alpha$  に対応する式(29)の  $C_1$  と  $n$  の変化を図35に示した。

図36は背面BCの平均熱伝達率と変動圧力の関係を示す。円柱の場合の式(16)と同じ関係を満たしている。そこで式(16)を無次元量間の関係式として表示するため次元解析を行い、変動圧力係数  $C_p' = \Delta P / 0.5 \rho U^2$  を導入して次式を得た(48)。

$$Nu_b = C(\sqrt{C_p'} P_r)^n \quad (30)$$

図7を式(30)によって整理したのが図37である。

### 6.2 長方形柱(49)~(52)

長方形柱の辺長比  $c/d$  を系統的に変えていくと、その空力特性が  $c/d \approx 0.67$  および  $2.8$  で急変することが、中口ら(53)により報告された。図38~40に辺長比に対する流れ特性と各面の平均熱伝達特性(54)

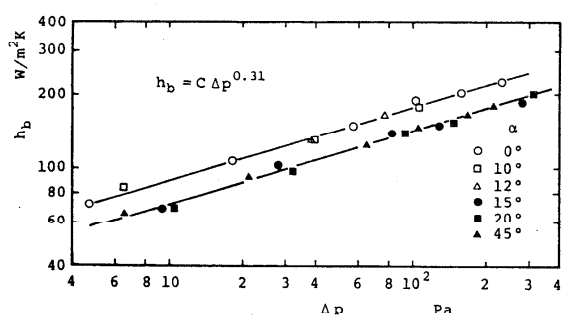


図36 変動圧力の rms 値と背面の平均熱伝達率との関係

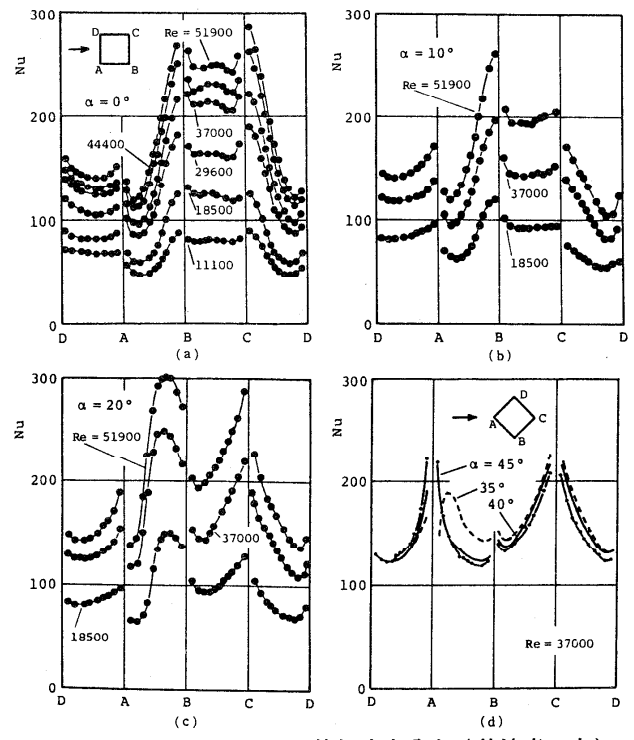


図34 局所熱伝達率分布(熱流束一定)

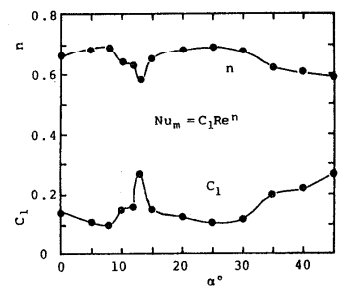


図35 式(29)の定数  $C_1$  と  $n$  の値

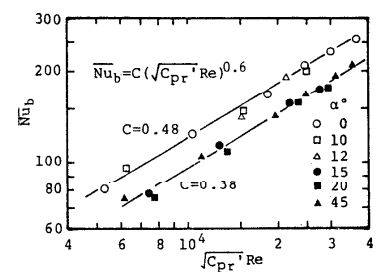


図37 平均熱伝達率と変動圧力係数の関係

の変化を示す。図40は式(11)と実験値との比較である。図42は背面の平均熱伝達率と変動圧力係数の関係で、図43は同様の関係を種々の鈍い物体に適用して整理した結果である。その他壁面近傍におかれた物体と壁面の干渉流れと熱伝達あるいは壁面上におかれた物体の熱伝達なども取上げる予定であったが割愛する。

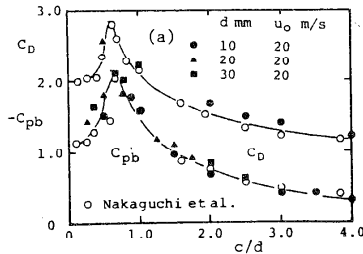


図38 長方形柱の背圧係数と抗力係数

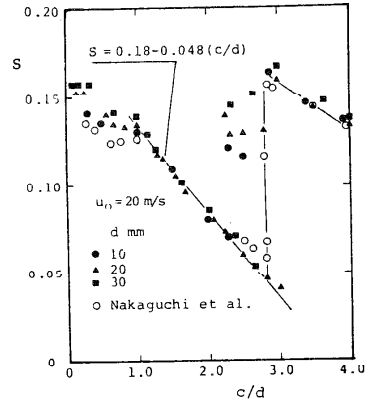


図39 長方形柱のストローハル数

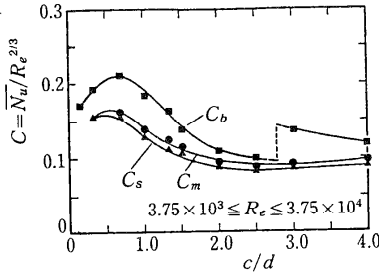


図40 各面の平均熱伝達率

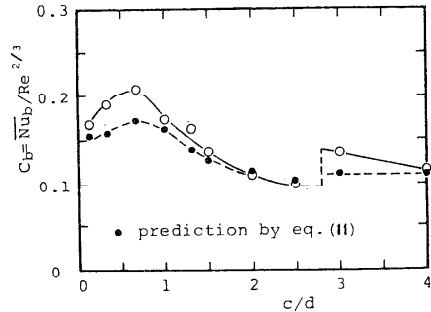


図41 背面の平均熱伝達率、式(11)との比較

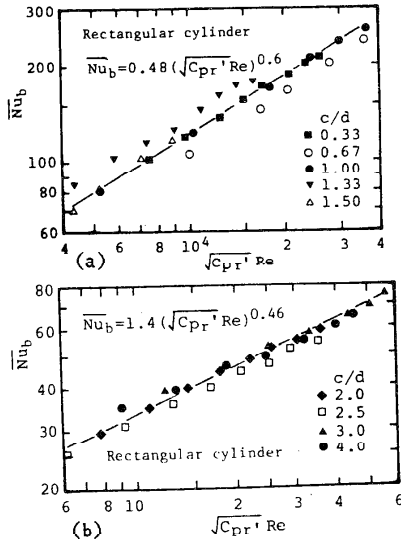


図42 長方形背面の平均熱伝達率と変動圧力係数の関係

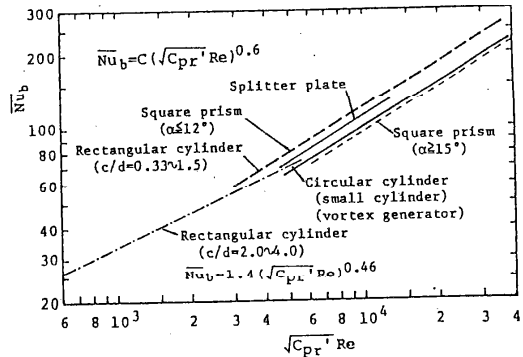


図43 鈍い物体背面の平均熱伝達率と変動圧力係数の関係

## 7. あとがき

以上思いつくままに述べてきたが、はく離流は一見複雑でどうしようもないように見えるが、そこには興味ある現象が多々あり、飽きることがない。また乱雑の中に自然の法則にかなった秩序が存在することも確かなようである。はく離領域の熱伝達に関してはまだ不明な点が多く、特に(I)  $Nu \propto Re^{2/3}$  の関係はいまだ解明されていない。その他、まだ試みていないのは(II) プラントル数の影響、(III) 等温壁、等熱流束の境界条件あるいは物質伝達のアナロジーから求められた熱伝達率の定量的差異も不明である。従来報告から円柱のはく離点直後の熱伝達率の極小位置と比較すると物質伝達から求めた熱伝達率は低めの値を与えるようである。ただし(II)、(III)については精度の良い実験を行えば、さして困難な問題ではないと思う。

最後に(I)項に関連したはく離流の熱伝達機構解明の手法について、私見を述べて本稿を閉じたい。最近の数値流体力学の発展はめざましく、たとえば稲室ら<sup>(55)</sup>による正方形柱まわりの流れの計算結果は実際の流れと良く一致している。しかし、熱伝達に必要な壁面近傍の流れは不明である。このような点からはく離流れのような非定常流れを外側から壁面まで数値計算で解くのではなく、外側および壁面の境界条件に実験値を用いて、その中間領域を数値計算で解く考えである。それには次の4つの条件が必須と思う。①時間的に変化する空間的速度場の測定、②壁面変動圧力の測定および③瞬時熱伝達率または瞬時熱流束の測定、④数値計算である。①～③は非定常測定であり、適切な実験モデルの設定と計測技術の修得は言うまでもない。①項は流れの可視化とコンピュータを用いた画像処理に頼らねばならないだろう。②項についても変動圧力の点測定から面測定への拡張が必要である。その点、土方ら<sup>(7)</sup>により開発された手法は注目に値する。③項については森<sup>(5)</sup> 河村<sup>(6)</sup>による瞬時熱流束の測定が行われているが、時定数や測定精度の面で改良が望まれる。以上①～③項を結び付けるのが④項の数値シミュレーションではないかと考えている。すなわち、①で物体から離れた領域の速度ベクトルを与え②で壁面の圧力を与え、③で瞬時熱流束を与えることにより、①～③を境界条件として壁面近傍の流れを数値計算によって解くことが可能と思う。以上の数値計算に身近なパソコンを上手に利用すれば、かなりの成果が期待できると思うがどうだろうか。最近パソコンによる数値シミュレーションについて亀本<sup>(56)</sup>が解説しているので参考にされたい。

なおもう一つ注意しなければならないのは、流れ場は2次元といっても、たとえば非定常性の弱いはく離・再付着流れにおけるはく離泡も佐々木<sup>(4)</sup>が指摘したように3次元構造を有し、現実の現象は3次元性が極めて強いという認識であろう。

おわりに、本稿をまとめるにあたり防衛大学校研究員の高崎博美君および研究科学生の中嶋裕朗君に多大な援助を頂いた。ここに謝意を表します。

## 文 献

- (1) 太田, 伝熱研究, 18-71(1979), 36.
- (2) Ota, T. and Nishiyama, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 30-6(1987), 1193.
- (3) 棚沢, 日本冷凍協会論文集, 5-1(1988), 1.
- (4) 佐々木・木谷, 機論, 51-461, B(昭60-1), 308.
- (5) 森・内田・酒井, 機論, 52-481, B(昭61-9), 3353.
- (6) 河村・田中・熊田・馬淵, 機論, 54-504, B(昭63-8), 2114.
- (7) 土方・三松, 第23回日本伝熱シンポジウム, (1986), 78.
- (8) 土方・三松, 機論, 53-487, B(昭62-3), 810.
- (9) 土方・三松, 第26回日本伝熱シンポジウム, Vol.1, (1988), 64.
- (10) 相場, 伝熱研究, 27-106(1988), 70.
- (11) 泉, 機論, 18-76, (昭27), 6.
- (12) 藤掛, 第3回日本伝熱シンポジウム, (昭41), 41.
- (13) 五十嵐・平田・西脇, 機論, 39-322, (昭48-6), 1881.
- (14) Nakatogawa, T., Nishiwaki, N., Hirata, M. and Torii, K.,  
Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf., Part II, F. C. 5-2 (1970)
- (15) 浅沼強 編, 流れの可視化ハンドブック, (1977), 朝倉書店.
- (16) 五十嵐・平田, 機論, 39-322, (昭48-6), 1890.
- (17) Sogin, H. H., ARL 62-361, (1962-6).
- (18) Ranz, W. E., 化学工学, 26 (昭37), 746.
- (19) Anderson, J. T. and Saunders, O. A., Proc. Roy. Soc. Lond.,  
Ser. A, 217 (1953), 555.
- (20) McAdams, W. H., Heat Transmission, 3rd ed. (1954), 259, McGraw-Hill.
- (21) 五十嵐・平田, 第8回日本伝熱シンポジウム, (1971), 361.
- (22) Seban, R. A. and Levy, A. M., WADC TR57-479, AD15576 (1957).
- (23) Johnson, T. R. and Joubert, P. N., Trans. ASME, Ser. C, 91-1 (1969), 91.
- (24) 五十嵐・平田, 機論, 41-348, (昭50-8), 2437.
- (25) Roshko, A., J. Aeron. Sci., 22 (1955), 124.
- (26) Abernathy, F. H., Trans. ASME, Ser. D, 84-3 (1962), 380.
- (27) Fage, A. and Jahansen, F. C., Proc. Roy. Soc., A116 (1927), 170.
- (28) Igarashi, T. and Hirata, M., 5th. Int. Heat Transfer Conf., Vol.2,  
F. C. 8-2, (1974), 300.
- (29) Roshko, A., NACA TN No. 3169 (1954).
- (30) 五十嵐, 機論, 47-420, B(昭56-8), 1475.

- (31) 五十嵐, 第17回日本伝熱シンポジウム, (1980), 10.
- (32) 五十嵐, 第18回日本伝熱シンポジウム, (1981-6), 175.
- (33) 五十嵐, 機論, 49-439, B(昭58-3), 656.
- (34) 五十嵐, 機論, 50-460, B(昭59-12), 3008.
- (35) 五十嵐, 機論, 50-454, B(昭59-6), 1531.
- (36) 五十嵐・飯田, 機論, 51-467, B(昭60-7), 2420.
- (37) 亀本, ターボ機械, 4-4 (1976), 1.
- (38) 五十嵐, 機論, 50-449, B(昭59-1), 210.
- (39) 五十嵐, 機論, 50-452, B(昭59-4), 1173.
- (40) Jakob, M., Heat Transfer, 1 (1949), 562.
- (41) Eckert, E. R. G. and Drake, R. M., Heat and Mass Transfer, (1959), 243, McGraw-Hill.
- (42) Hilpert, R., Forsh. Gebiete Ingenieurwes., No. 269 (1925).
- (43) Parkinson, G. V. and Brooks, N. P. H., Trans. ASME, Ser. E, 28-2 (1961), 252.
- (44) Knudsen, J. D. and Katz, D. L., Fluid Dynamics and Heat Transfer, (1958), 508, McGraw-Hill, New York.
- (45) Holman, J. P., Heat Transfer (3rd edn.) (1972), 248, McGraw-Hill, New York.
- (46) Igarashi, T., Int. J. Heat Mass Transf., 28-1 (1985), 175.
- (47) Igarashi, T., Int. J. Heat Mass Transf., 29-5 (1986), 777.
- (48) Igarashi, T., 8th. Int. Heat Transfer Conf., Vol.3 (1986), 1023.
- (49) 五十嵐, 機論, 50-460, B(昭59-12), 3185.
- (50) 五十嵐, 機論, 51-463, B(昭60-3), 965.
- (51) 五十嵐, 機論, 52-480, B(昭61-8), 3011.
- (52) Igarashi, T., Proc. Int. Symp. on Cooling Technology for Electric Equipment, (1987), 689.
- (53) 中口・橋本・武藤, 航字誌, 16-168 (昭43), 1.
- (54) 日本機械学会編, “電子機器の冷却技術”, 3章 強制対流 (1987), PP.110-137., 技報堂出版.
- (55) 稲室, ながれ, 7 (1988), 104.
- (56) 亀本, ターボ機械, 15-7 (1987), 47.

西村龍夫 (富山大工)

河村祐治 矢野浩司 (広島大工)

## 1 まえがき

波状流路は古くから熱交換器や拡散透過装置に用いられている。近年、省エネルギーという観点からこれら装置の正確な特性および高性能化が要求され、波状流路における伝熱研究が特に層流域を中心に、数値計算によって行なわれるようになってきた[1-7]。しかし研究の大半は数値計算を行なう際に用られた仮定が妥当であるかは検討されていない。波状流路を直接応用したプレート式熱交換器では  $Re$  数が数100程度になると流れが乱流へ遷移することは良く知られている。したがって数値計算において流れが層流であると仮定しても、実際には遷移または乱流になっている可能性があり、これによって伝熱特性も予想とは異なるものと思われる。波状流路内の流れの遷移を数値計算によって予想することは現在でも困難であり、遷移に関する情報は主として実験的研究によって与えられる。

従来の波状流路に関する実験的研究は主として乱流域が対象とされ[8-15]、層流や遷移域の研究は非常に少ない[16-19]。しかしスーパーコンピュータの出現によって、ますます数値計算に基づいて装置特性を把握していこうとする気運が高まっており、これら領域での実験的研究が数値計算の発展の上でも必要不可欠と思われる。本報では我々が低  $Re$  数域で見いだした2次流れを中心にして波状流路内の流れの遷移開始について説明する[18-21]。

## 2 実験装置および方法

実験装置は定位タンクから水をテストセクションへ流し、その後ポンプを介して定位タンクへ戻す循環系からなる[22]。図1にテストセクションの概要を示す。波状流路は上下2枚のアクリル製波状板で構成される。波状板は9波長の正弦波からなり、種々の流路について検討するため、振幅の異なった3つの波状板を用いた( $a=1.5, 3.5, 7$  mm)。ただし波長と幅は一定とした( $\lambda=28$  mm,  $W=200$  mm)。上下波状板の間隔  $H$  は  $2 - 13$  mm の範囲で変化させた。したがって断面アスペクト比  $W/H$  は  $15.4 - 100.0$  となり、本波状流路は側壁の影響がほぼ無視でき2次元流路とみなせるであろう。なお流路内の位置を規定するため、図に示されるように各波状壁の谷部に上流より番号を付けた( $N=1 - 9, 1' - 9'$ )。



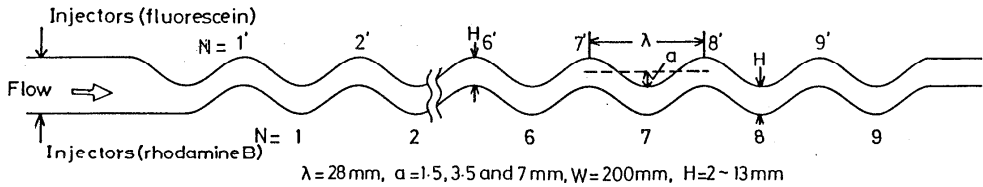


図1 波状流路

流れの遷移開始を明らかにするため可視化を行なった。流れの可視化には染料注入法を用い、上下波状壁面中央上のスパン方向に 4 mm 間隔に設けた 17 個の小孔（直径 0.5 mm）より染料を注入した。注入孔は流路の入口に設け、染料としてフルオレセイン（上部壁）とローダミン B（下部壁）を使用した。観察は流れの構造を把握するため流路上面、側面および断面について行なった。なお染料の注入にあたっては流れに攪乱を与えないようにするため注入速度はできる限り小さくし、染料が壁面に沿って流れるようにした。流体には水を使用し、温度一定の条件下で  $Re$  数 ( $=U_{av}H/\nu$ ) は数値計算で層流と仮定されてきた範囲 ( $Re < 500$ ) とした。

### 3 実験結果

#### 3-1 流れの遷移

波状流路内の流れの遷移パターンは 2 つあり、これは流路間隔  $H$  に依存する。図 2 に流れの遷移過程を示す。タイプ A は主流とくぼみ部に形成された循環渦とのはく離せん断層の不安定性によるものである。すなわちのはく離せん断層の不安定性によってスパン方向

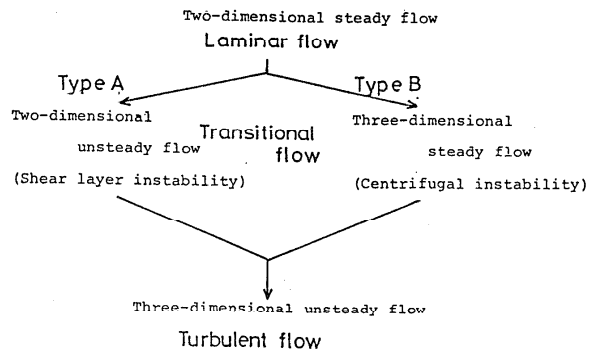


図2 流れの遷移パターン

に軸を持った横渦が形成される。この渦は 2次元性を有し、周期的に放出される。これに対してタイプ B は流路壁凹面での遠心力の不安定性によるものである。すなわち流れ方向に軸を持った縦渦（Taylor-Goertler 渦と呼ばれる）がスパン方向に規則正しく配列される。この流れは 3次元構造を有するが、定常的である。

これらのタイプの代表的な流れの写真 ( $a = 3.5 \text{ mm}$ ) を図 3 に示す。側面写真 ( $N = 6$ ) は上

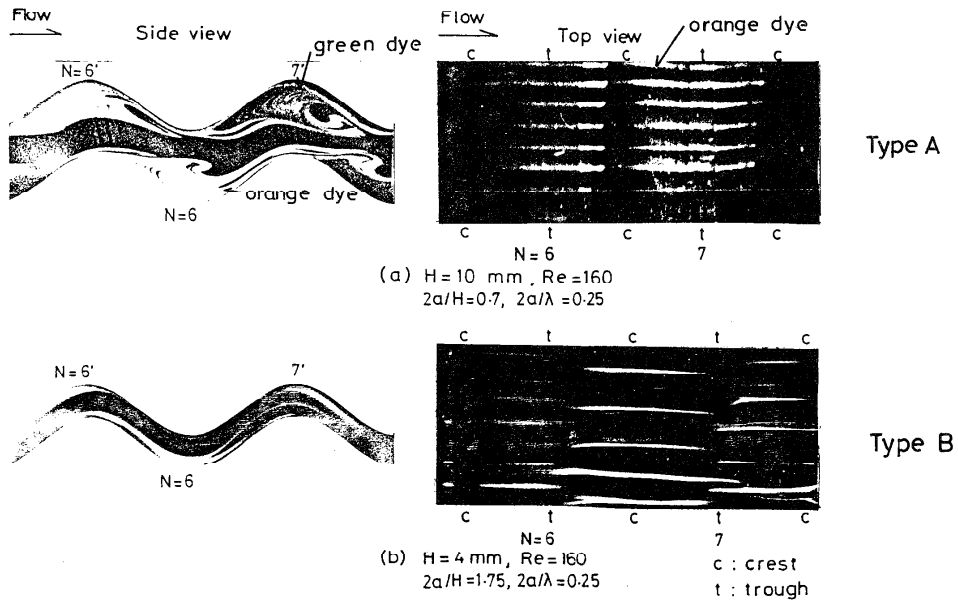


図3 可視化写真 (上面および側面)

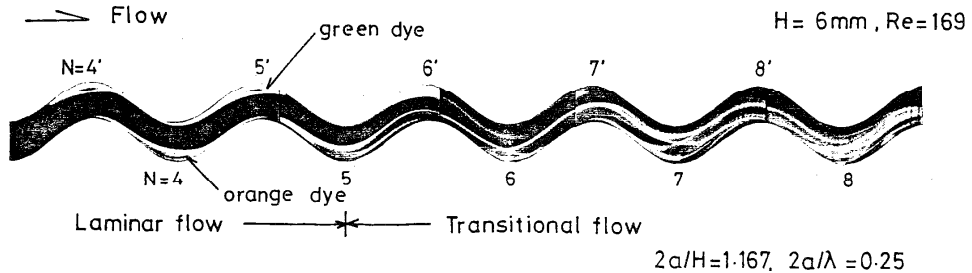


図4 可視化写真 (側面)

下壁から注入された緑と黄色の染料線の挙動を、上面写真(N=6, 7)は下部壁からの黄色の染料線の挙動をそれぞれ示す。タイプ A を表わす  $H=10 \text{ mm}$  では側面写真より、上下の染料線にうねりが見られ横渦が形成される。この横渦は上面写真よりほぼ 2次元性を有していることがわかる。これに対してタイプ B を表わす  $H=4 \text{ mm}$  では側面写真より、染料線の一部が上下壁の谷部付近から浮上している。浮上した染料線は上面写真より各谷部で再配列され、オフセットフィン群のような規則的な模様を形成する。なお個々の浮上した染料線は後で述べるように一対の Taylor-Goertler 渦の中心部に対応している。

これらの写真は波状流路内の特定の部分(N=6, 7)を見たもので、これが全体の流れを表わしているのではない。全体の流れの一例として  $H=6\text{ mm}$ ,  $Re=169$  における側面写真を図4に示す。N=5より下流では染料線の浮上、また N=7以降では上下染料線の相互干渉が見られる。これに対して N=5より上流では染料線の浮上は見られず、くぼみ部に小さな定常循環渦が形成される。

図5は各場所で流れが遷移する  $Re$  数を示す。実線より下の部分が2次元定常層流域を、上の部分は遷移、乱流域を表わす。 $Re=140$ 付近で流路最下流部(N=9)より流れはタイプBの遷移によって不安定となり、 $Re$ 数の増加によって流れが遷移する場所は上流へ移行する。しかしこの流路間隔の場合、 $Re=120$ 付近より流路谷部にはく離を生じ、 $N<3$ の流路部分では流れの遷移がタイプAに変わる。なお、 $Re < 140$ の完全層流域では流路入口付近( $N<2$ )を除いて、流れは周期的完全発達状態にある。

したがって下流から流れは不安定となり、 $Re$ 数が一定でも各場所によって層流と遷移流との異なった流れが共存することがわかる。このような遷移はフィン群の流れ[23]でも観察されており、周期的に繰り返される流路を持った種々の装置、たとえば熱交換器や反応器に用いられる円柱群、充填層の流れ、電子機器冷却の際に見られる集積回路素子群の流れにも現われるものと思われる。

以上のように波状流路の遷移は2つのタイプがあることがわかったが、ページの制限もあり、本報では今まで知られていなかった2次流れの一種である縦渦について詳しく述べる。

### 3-2 2次流れの発生条件

図6は波状板の振幅が最も大きい場合( $a=7\text{ mm}$ )における2次流れの発生過程を示した写真である。同図(a)は2次流れが発生しない $Re=84$ の場合である。側面写真より主流は蛇行して流れ、波状壁の各くぼみ部に定常循環渦が形成されている。また上面写真より注入された染料線はまっすぐに下流へ移動しており、2次元流であることを示している。同図(b)は2次流れが発生した場合( $Re=95$ )を示す。側面写真より流れはく離しているにもかかわらず、図3( $a=3.5\text{ mm}$ )と同様に染料線の浮上が見られる。上面から見るとこれらの染料線は特定の部分に集中化し、各谷部で再配列され、やはり規則正し

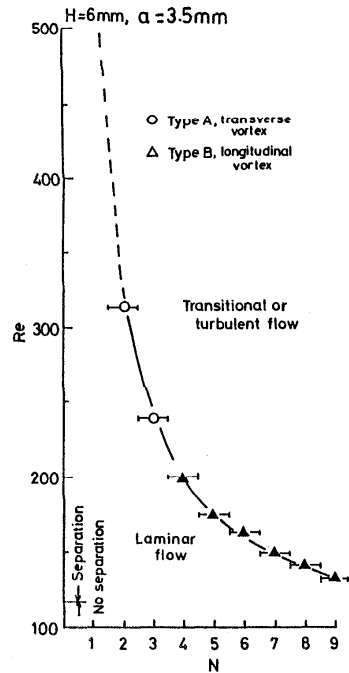


図5 遷移  $Re$  数

い 3次元構造を保つ。しかしこのように定常的に存在するパターンは同図(c) の上面写真に示されるように、わずかな Re 数の増加によって下流で崩壊され、流れは非定常となり乱流へ移行する。振幅の小さい場合 ( $a=1.5 \text{ mm}$ ) では流れははく離しにくくなるが、やはり同じように 2次流れが発生した。

図7は流路最下流部 ( $N=9$ )において流れが遷移する Re 数と流路間隔との関係を示したものである。遷移Re数は振幅 ( $2a/\lambda$ ) が大きくなるほど低下するが、流路間隔が振幅の2倍に近い場合 ( $2a/H=1$ ) 最小値をもつ傾向にある。縦渦の発生は  $2a/\lambda$  と  $2a/H$  とに依存する。 $2a/\lambda=0.107, 0.25, 0.5$  では、それぞれ  $2a/H > 0.75, 1.0, 1.25$  で縦渦の発生が見られる。なお縦渦が発生しない場合は、前述したようにはく離せん断層の不安定性によって横渦が発生する。したがって 2次流れである縦渦ははく離の生じない場合だけではなく、流路間隔が狭い場合 ( $2a/H > 1$ ) は必ず発生する。これが波状流路の流れの特長のひとつとみなせ、熱、物質移動の促進に少なからず影響を与えているものと思われる。

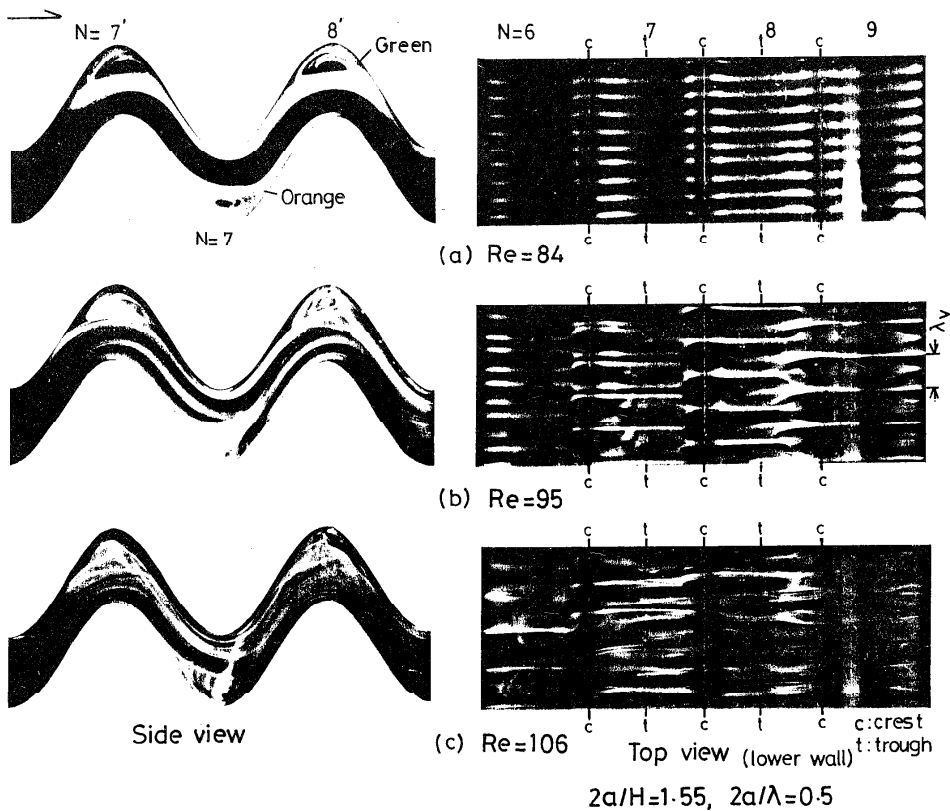


図6 可視化写真 (側面および上面)

図8は  $N=9$  で縦渦が発生する  $Re$  数と一對のTaylor-Goertler渦の幅に対応する規則的なパターンをなす染料線の間隔  $\lambda_v$  (図6参照) との関係を示したものである。本実験範囲では  $\lambda_v$  は流路間隔  $H$  を中心として変化する ( $\lambda_v/H=0.75 - 1.25$ )。図中の縦軸と横軸のパラメータ (Dean数と波数) は曲率一定の長方形曲がりダクトの安定性を表わす際に用いられるものと同一である。ただし、波状流路では曲率は一定ではなく変化するため、縦渦が波状壁の谷部付近から発生することを考慮して、最小曲率半径  $R_{min}$  を曲率として採用した。これらのパラメータを用いることによって  $2a/\lambda$ ,  $2a/H$  にかかわらず、実線で示されるような直線関係が得られる。実線より下の部分が流れが安定である領域、そして上の部分が縦渦が発生して流れが不安定となる領域である。

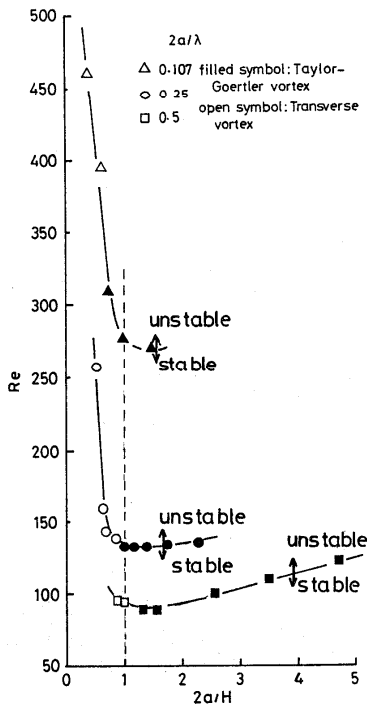


図7 遷移  $Re$  数 ( $N=9$ )

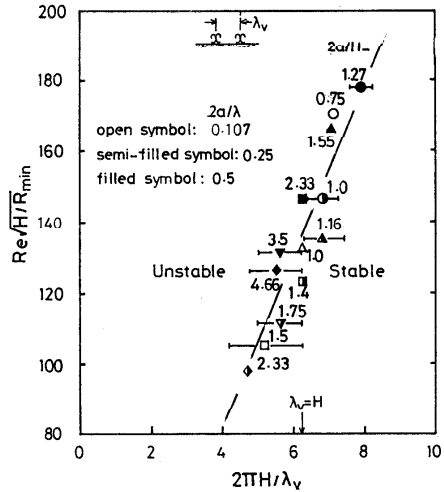


図8 遷移  $De$  数 対 波数

### 3-3 2次流れの構造

上述の結果より 2次流れとして発生する縦渦は、幾何形状パラメータ  $2a/\lambda$ ,  $2a/H$  にかかわらず、類似の構造を持つことがわかった。そこで特定の流路 ( $2a/\lambda=0.25$ ,  $2a/H=1.66$ ) を用いて 2次流れの構造を詳しく検討した。

図9は  $N=5$  と  $6$  との間の断面を光切断面法によって可視化したものである。 $Re=93$  では流れは 2次元的で、上下壁の染料線はいずれも染料注入間隔を保っている。 $Re$  数が

168 になると染料線の一部が特定の部分に集中し、壁面から浮上する。特に下部壁では、明確なきのこ状の渦が認められる。これらの渦は長方形曲がりダクト [24, 26] や凹面上の境界層 [25] において観察される Taylor

-Goertler 渦と同種である。したがって先に観察された側面写真からの染料線の浮上や上面写真で示されたオフセットフ

ィン状に配置された染料線は一对の渦によって形成された上昇流に対応することがわかる。しかしながらこの規則正しいパターンは  $Re=198$  の写真に示されるようにわずかな  $Re$  数の増加によって崩壊されてしまう。これは曲率一定の長方形曲がりダクトとは異なり、注目すべき点である。

このような渦の急速な崩壊の原因を探るため、図 10 に示されるようにある 2 つの流路断面を可視化した。数値計算で仮定されているように流路一波長毎に流れの周期性が成り立てば、A-A と B-B 断面とでは流れは逆転しているだけで本質的には変わらないはずである。しかし流れが遷移するこの周期的条件は満足されない。なぜならば先に述べたように流路下流より縦渦の再配列が上下波状壁面の谷部で起こるからである。

A-A 断面において側面写真より下部壁では  $N=5$  そして上部壁では  $N=5'$  より発生した渦が観察されると期待される。しかし結果はそうではなく、染料の集中点は上下で半

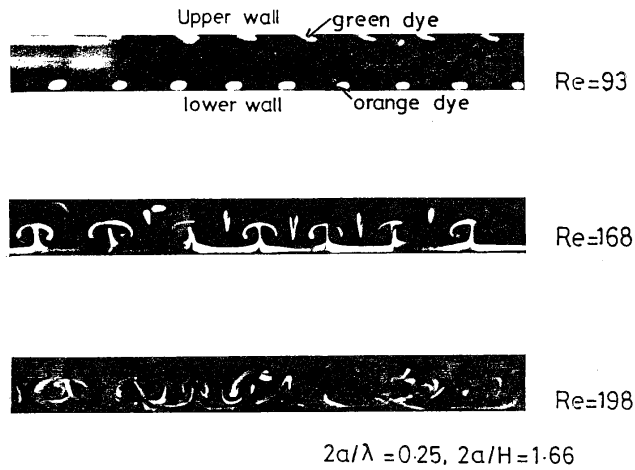


図 9 流路断面写真

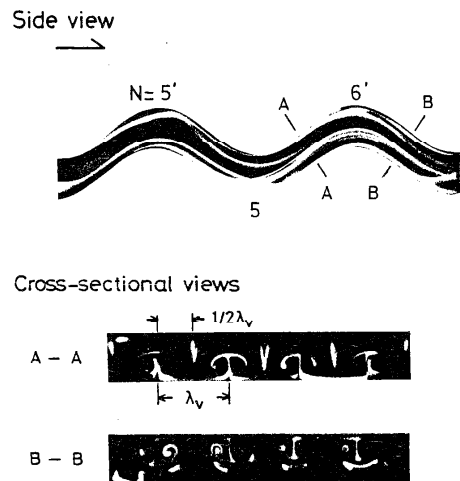


図 10 流路断面写真

ピッチずれており、上部壁では明確な渦は認められない。この理由は Taylor-Goertler 渦が遠心力の不安定性によって凹面の壁上から形成されることを考慮すれば次のようである。A-A 断面では渦の発生点が上下壁で半ピッチずれており、渦は同時に存在することはできず、どちらか一方が減衰することになる。A-A 断面に近い  $N=5$  において下部壁は凹面をなし、上部壁は凸面であることから上部壁で形成されていた渦は減衰することになるわけである。これに対して B-B 断面では渦の発生点は上下で一致しているため、渦は同時に存在することができる。しかし上部壁は凹面をなし、下部壁は凸面をなすため写真に示されるように上部壁の渦は下部壁の渦を押しつぶしたようなかっこうになっている。したがってこの断面は A-A 断面とは異なり、上下壁の渦の干渉が起こり不安定な渦配列をなす。このため曲率一定の長方形曲がりダクトとは相違し、渦の急速な崩壊が起こるものと考えられる。

一波長あたりの流路での 2 次流れの構造は明らかにできたので、次に全体の構造について検討する。上述したように縦渦はある  $Re$  数を超えると、流路全体で同時に起こるのではなく、まず流路の最下流部だけに発生する。その後  $Re$  数の増加にともなって渦の発生場所は上流へ移行すると同時に下流で形成されていた渦は崩壊される。

したがって図 1 1 には流路の後ろ半分における 2 次流れの模式図を示す。同図 (a) は流路上面からみたもので破線および実線はそれぞれ上部および下部壁に形成された渦によって生じた壁面からの上昇流線を表わす。また同図 (b), (c), (d) はそれぞれ同図 (a) の A-A, B-B, C-C 断面を示す。

渦はある  $Re$  数を超えると下流部より上流へ向かって上下壁間で交互に形成される ( $N=9 \rightarrow 9' \rightarrow 8 \rightarrow 8' \rightarrow 7 \rightarrow 7' \dots$ )。もし最初の渦が  $N=9$  で模式図 (a)

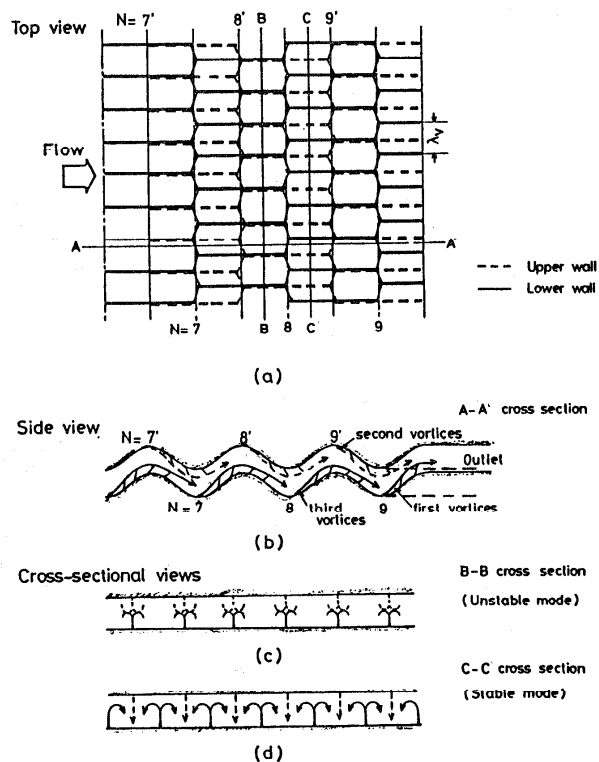


図 1 1 2 次流れの構造

の実線のように間隔  $\lambda_v$  でスパン方向に配列されたとすると、 $N=9'$  で形成される 2 番目の渦は最初の渦と干渉しないように配列されるであろう。すなわち破線で示されるように最初の渦とは半ピッチずれて渦が配置される。3 番目の渦は  $N=8$  で形成されるが、2 番目の渦とは位相が同じで、最初の渦とは半ピッチずれている。これは次のように説明される。同図 (a), (b) に示されるように、 $N=8$  で発生した 3 番目の渦によって壁面から上昇した流線は  $N=9$  の壁へ再付着し、流体の連続性を保持するため再付着点で 2 つに分岐して、最初の渦によって形成された上昇流線に接続するからである。同じようにして 4 番目以降の渦が配置され、同図 (a) に示されるように上下壁で細長い六角形状の模様形成される。したがって流路断面では 2 つの渦配列が存在する (同図 (c), (d) 参照)。ただし、前にも述べたようにこの構造が流路全体で保持されるのではなく、上流で形成されると同時に同図 (c) に示された渦の不安定なモードによって下流では崩壊されるのである。なお、流路の出口が破線で示される場合渦配列は上下壁で逆転する。

#### 4 他の流路との比較

波状流路内の 2 次流れについては、これまでほとんど問題とされていなかったが、注目すべきことに初期の波状流路の研究において Goldstein と Sparrow [16] は流路形状が三角波の場合について

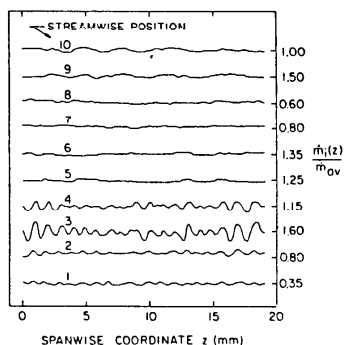
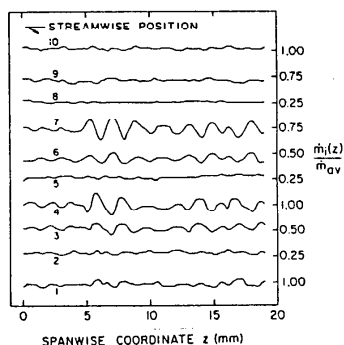
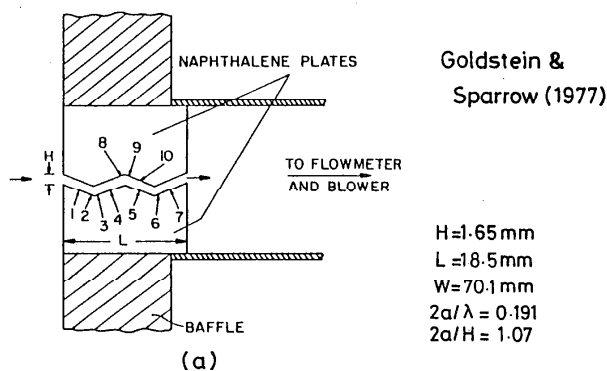


図 1 2 物質移動実験結果



ナフタリン昇華法による物質移動実験を行ない、遷移域ではスパン方向に物質移動速度が周期的に変化することから Taylor-Goertler 渦の存在を示唆した。そこで我々が得た 2 次流れの構造を基にして、彼らの実験結果を再検討してみた。図 1 2 に重要と思われる彼らの結果を示す。同図 (a) は実験に用いたテストセクションを示したもので、流路形状は三角波で流路長さは 2 波長である。同図 (b), (c) は  $Re=255$  と  $1540$  での流路内 10 箇所の点におけるスパン方向の物質移動速度を示す。なお測定箇所は同図 (a) に示されたとおりである。渦が最も発達する測定点は図 1 1 (b) の結果より 4, 7, 10 である。これらの測定点に着目して検討する。 $Re=255$  では測定点 4, 7 においては周期的な物質移動速度の変化が見られる。また注意してみると、両測定点では位相が  $180^\circ$  ずれている。これは先に述べた渦の再配列を示すものである。これに対して、測定点 10 でははっきりとした変化はみられない。この事は奇異に感じられるかもしれないが、以下のように説明できる。

測定点 10 と測定点 4, 7 の流路断面は図 1 1 の結果より上下壁間の渦の配列が異なる。すなわち測定点 10 では渦の配列は図 1 1 (d) に示されるような不安定モードである。これに対して測定点 4, 7 ではともに図 1 1 (c) に示されるような安定モードである。そのため測定点 10 では測定点 4, 7 に比べて渦の強さがかなり弱いことが予想され、これがスパン方向に変化があまり表われない理由と考えられる。 $Re=1540$  ではスパン方向の変化は上流の測定点 4 ではまだ観測されるが、下流の測定点 7 では観測されない。これは先に示したように流れが下流から不安定になっていくことを意味している。以上より流路形状や流路長さが全く異なるにもかかわらず、我々の得た 2 次流れの構造を基にして彼らの実験結果をうまく説明することができることがわかった。この事は 2 次流れが、流路形状にかかわらず、流路間隔が狭い場合 ( $2a/H > 1$ ) 波状流路の重要な特性の一つであることを確信させる。

また従来の数値計算結果 [1-7] と本実験結果 (図 7 参照) とを対比すれば、 $Re < 100$  では幾何形状パラメータにかかわらず 2 次元定常層流であるという仮定は妥当と思われる。しかし  $Re$  数が 100 を超えると幾何形状パラメータによっては流れが遷移するため、数値計算結果を全面的に信頼するわけにはいかない。

## 5 むすび

波状流路内の流れの遷移について、今まであまり知られていなかった 2 次流れを中心に説明を行なった。今後は、この 2 次流れが伝熱および物質移動促進にどのように寄与するかを明らかにしなければならない。またこのような流れの遷移を数値計算によって予想する方法を確立しなければならない。特に後者については、完全ではないが複雑な流路における遷移を数値計算によって検討した報告も最近になっていくつか見られ

伝熱研究 Vol. 27, No. 107

る[27-30]。

謝辞 本研究の研究費の一部は文部省科学研究費 (No. 62550701) の助成を受けました。  
また、富山大学教授 宮下 尚、山口信吉 両先生には有益な助言を頂きました。  
付記して、謝意を表します。

#### 文献

1. R.Izumi, H.Yamashita and K.Oyakawa, Trans JSME Ser.B,48, 2245 (1982).
2. R.S.Amano, J. Heat Transfer, 107, 564 (1985).
3. A.Nakayama and H.Koyama, Trans JSME Ser.B,51, 2720 (1985).
4. R.S.Amano, A.Bagheriee, R.J.Smith and T.G.Niess, J. Heat Transfer, 109, 62 (1987).
5. Y.Asako and M.Faghri, J.Heat Transfer, 109, 627 (1987).
6. M.R.Motamed Ektesabi, M.Sako and T.Chiba, Trans JSME Ser.B,53, 722 (1987).
7. Y.Asako, H.Nakamura and M.Faghri, Int.J.Heat Mass Transfer, 31, 1237 (1988).
8. J.E.O'Brien and E.M.Sparrow, J.Heat Transfer, 104, 410 (1982).
9. E.M.Sparrow and J.W.Comb, Int.J.Heat Mass Transfer, 26, 993 (1983).
10. E.M.Sparrow and L.M.Hossfeld, Int.J.Heat Mass Transfer, 27, 1715 (1984).
11. T.Nishimura, Y.Kajimoto and Y.Kawamura, J.Chem.Engng Japan,19,142 (1986).
12. M.Molki and C.M.Yuen, Int.J.Heat Mass Transfer, 29, 987 (1986).
13. M.Molki, Proc. 8th Int. Heat Conference, p.2879 (1986).
14. K.Oyakawa, T.Shinzato and I.Mabuchi, Trans JSME Ser.B, 54, 1400 (1988).
15. Y.Mori, Y.Uchida and H.Koizumi, Trans JSME Ser.B, 54, 1428 (1988).
16. L.Goldstein, Jr. and E.M.Sparrow, J.Heat Transfer, 99, 187 (1977).
17. W.W.Focke and P.G.Knibbe, J.Fluid Mech., 165, 73 (1986).
18. T.Nishimura, Y.Kajimoto, A.Tarumoto and Y.Kawamura, J.Chem.Engng Japan, 19, 449 (1986).
19. T.Nishimura, T.Yoshino and Y.Kawamura, J.Chem.Engng Japan, 20, 102 (1987).
20. T.Nishimura, T.Yoshino, K.Yano and Y.Kawamura, J.Flow Visual.Soc.Japan, 7, 187 (1987).
21. T.Nishimura, T.Yoshino, K.Yano and Y.Kawamura, Proc 25th National Heat Transfer Symp. Japan, pp.190 (1988).

22. T.Nishimura, Y.Ohori, Y.Kajimoto and Y.Kawamura, J.Chem.Engng Japan, 18, 550 (1985).
23. S.Mochizuki, Y.Yagi and W.J.Yang, Experimental Thermal and Fluid Science, 1, 51 (1988).
24. M.D.Kelleher, D.F.Flentie and R.J.McKee, J.Fluids Engng, 102, 93 (1980).
25. A.Ito, J.Japan Soc. Aero Space Sciences, 28, 327 (1980).
26. M.Akiyama, K.C.Cheng, I.Urai, M.Suzuki and I.Nishiwaki, J. Flow Visual. Soc. Japan, 2, 553 (1982).
27. A.M.Lahbabi and H.C.Chang, Chem. Engng Sci., 41, 2487 (1986).
28. N.K.Ghaddar, K.Z.Korczak, B.B.Mikic and A.T.Patera, J.Fluid Mech., 163, 99 (1986).
29. S.Ravi Sankar, K.Nandakumar and J.H.Masliyah, Phys.Fluids, 31, 1348 (1988).
30. G.E.Karniadakis, B.B.Mikic and A.T.Patera, J.Fluid Mech., 192, 365 (1988).

## 関西研究グループ講演会

日 時 昭和63年8月25日(木) 9:30-17:00

場 所 大阪大学工学部図書館吹田分館内視聴覚ホール

### 講演

#### I 熱交換器における伝熱促進

- (1)コンパクト型熱交換器設計における考え方  
・鈴木健二郎(京大工)
- (2)拡大縮小を伴う多孔平板群の流動・伝熱特性  
・藤井雅雄(三菱電機中研)
- (3)細管径フィンチューブ熱交換器の熱伝達率と圧力損失  
・田中博由(松下電産中研)
- (4)前縁効果の積極利用による空気熱交換器の伝熱促進  
・川端克宏, 鳥越邦和(ダイキン機研)

#### II 室内の対流・伝熱・環境

- (5)温風暖房時の室内温熱環境予測に関する研究  
・大西潤治, 内藤和夫(阪大工)
- (6)傾斜差分スキームによる室内空調気流解析の精度向上  
・古藤 悟(三菱電機中研)
- (7)エアコン設計における計算流体力学の応用  
・飯塚邦彦(シャープコンピュータシステム研)

#### III 計測・画像処理

- (8)レーザ誘起蛍光を用いた濃度・ガス分子速度の測定  
・高城敏美, 平井秀一郎(阪大工)
- (9)赤外スペクトル法による表面温度・性状の非接触計測について  
・牧野俊郎(京大工)
- (10)“Image Processing and Analysis Workshop”  
(sponsored by NSF,U.S.A.)におけるトピックス  
・平田雄志(阪大基礎工)

#### 〈講演概要〉

講演1) コンパクト型熱交換器には種々の形式のフィンが使用されているが、本講演ではフィン面を断続化(Interrupt)する数種のフィン形式を対象として、伝熱性能の向上を計るための基本的な考え方を述べた。すなわち、これらの数種のフィン形式の伝熱特性の間に比較的大きな差

異が存在することを指摘し、ついでこの差異の原因を局所ヌセルト数分布、速度および温度の分布などに基き明らかにし、フィン面の断続化により期待する基本的伝熱促進効果（境界層更新効果）を十分に生かすために、伝熱特性を不良にする効果（後流未回復効果ならびに境界層埋没効果）を最小限に抑えることが必要であり、そのためにはフィンの配列法が重要であることを指摘した。（鈴木）

講演2）空調用のプレートフィンチューブ熱交換器や電子機器の冷却用放熱器では常に小形・高性能化、低騒音化が要求され、その使用レイノルズ数範囲が低くなる傾向にある。本講演では、低レイノルズ数域での新しい伝熱促進法について述べた。すなわち円孔を多数あけた伝熱面をほぼ台形状に屈曲させ、隣り合う伝熱面の屈曲位相を判周期ずらすことにより流れ方向に拡大・縮小を伴う流路を構成し、隣接する流路間の流速差に基づく壁面圧力差により多孔壁を介して流体の吹き出し・吸込み現象（呼吸効果）を受動的に実現させたものである。伝熱・流動損失特性に及ぼす形態パラメータの影響と無次元整理式について説明し、その応用について紹介した。

（藤井）

講演3）フィンチューブ熱交換器の伝熱性能の向上のために直径4mm近傍の細管を用いたフィンの熱伝達率と圧力損失の研究を行った。

実験には4倍のプラスチック模型を用いて非定常法で熱伝達率を求めると共に、微差圧計により圧力損失を求め実際のフィンの値に変換した。その結果、気流に対して斜め脚部を持つ切り起こしを設け、管を変則千鳥配列とした細管径フィンが従来のルーバフィンの約1.8倍の熱伝達率を有していることが判った。

このような細管径フィンが高い熱伝達率を有している理由を考察するため、矩形流路を仮定した解析を行い、その結果得られた熱伝達率と圧力損失を実験値と比較した所、かなり良い一致が得られた。（田中）

講演4）空気熱交換器のコンパクト化を目的として、前縁効果を最大限に利用する伝熱促進法を検討した。供試熱交換器は細管（ $\phi 3\sim 4\text{mm}$ ）を複数枚のメッシュ（線幅0.2mm前後）でパネル状に挟み込んで作製したエレメントを空気の流れ方向に積層して構成されており、前半では基本的なパラメータである管ピッチ、メッシュ寸法・枚数などを変化させた場合の評価を行い、大幅なコンパクト化の可能性のあることを報告し、後半ではさらに伝熱促進を図るために、メッシュの重なりを考慮した場合の結果を温度場・流れ場の可視化観察と合わせて報告した。また、得られた結果をもとに性能評価を行い、伝熱・流動特性についての整理式を提案した。（川端、鳥越）

講演5）空気調和が行なわれている室内の温熱環境を予測するためには、熱的な境界条件を室外に設定した気流解析が必要であり、室周囲壁から室内空気への伝熱を正しく評価することが重要

となる。本研究では、壁体を計算領域に取り込み、固体と流体の境界における熱伝達率を、それぞれ熱伝達率の調和平均で与える計算法と、壁体内表面において熱収支式を解いて温度の境界条件とする方法とを適用し、両手法の比較を行った。また、壁面熱収支式を解く方法では、壁面相互ふく射を考慮した解析を行ない、ふく射伝熱の考慮の有無の影響を調べた。熱的快適性の評価指標には、PMV(Predicted Mean Vote)を使用した。壁面伝熱の定量的な検討が今後の課題である。(大西)

講演6) 空調気流の吹出し角度を変化させた際の室内温度分布を差分法により解析する場合、差分格子と吹出し方向は必ずしも一致せずむしろ大きな角度で交差する 경우가多く、かつ計算機の容量制約から格子間隔が粗くなりセルペクレ数が大きくなるため、偽拡散が生じて得られる温度分布が不正確になる。本講演では、傾斜流れに対して精度の良いRaithbyの傾斜差分スキーム(SUDS,SUWDS)を三次元に拡張して三次元傾斜差分スキームを導出して示し、数値実験による精度の検証および他の高精度差分スキームとの性能比較を行なった。更に、天井埋込みエアコンによる暖房時の室内空調における斜め吹出しに適用してその有効性を示すと共に、実験データによる検証も行なった。(古藤)

講演7) エアコン設計におけるコンピュータシミュレーションの応用として、以下の三つの解析を紹介した。

- 1) エアコン室内機におけるクロスフローファンの流れ解析。クロスフローファンをアクチュエータディスクとしてモデル化して、渦点法を用いて、流れを求めた。解析結果のアニメーションを作成した。
- 2) 空調時の室内気流解析。SIMPLE法を用いた3次元非定常解析により、室内の気流、温度分布、PMV指数を求めた。また解析結果の可視化プログラムを開発した。
- 3) エアコン構成部品内部の熱伝導解析。境界要素法を用いた汎用熱解析プログラムを開発し、これを利用してエアコン室内機の露付きの解析を行った。(飯塚)

講演8) 2流体ガス的一方にヨウ素蒸気を微量添加し、Arイオンレーザーにより蛍光を発生させるとき、蛍光強度はヨウ素蒸気の濃度と直線的な関係があること、流速によってその直線の勾配が変わることを示し、流速と蛍光強度を検出すれば、2流体の濃度と流速が同時に測定できることを示した。この方法を応用し、乱流噴流における濃度変動の間欠的挙動や流速と濃度の変動の相関から求められる乱流輸送流束の測定例を示した。また種々の異なる密度のガスの2流体における蛍光と濃度の関連を調べた結果も示した。

ヨウ素を含んだ流体の流れに対向する方向よりArレーザー(514.5nm)を入射すると、ヨウ素の感じるレーザーの周波数が流速の増加に伴うドップラ効果によりヨウ素の吸収率の高い方へ近づくとヨウ素分子の発するレーザー誘起蛍光強度が増加する。この原理にもとづいた気体分子速度の非

接触測定法について容器内噴流について測定を行い、また実験値をレート方程式モデルを用いたシミュレーションと比較、検討した。その結果、実験と計算がよく一致することが明らかになった。  
(高城, 平井)

講演9) 高速スペクトル計測装置を開発し、これを用いて高温大気酸化過程にある金属材料の反射性質の過渡挙動を調べたところ、成長する酸化被膜の結晶粒におけるふく射の干渉と回折で特徴づけられる規則的なスペクトル推移の現象が観測できることがわかった。この現象はよく再現され、また多くの金属・合金について一般的なものであった。そこで、この干渉的な電磁波の挙動を定式化し、実験のスペクトルを解析して工業装置の実環境下の表面の微視構造を知る計測法の開発をめざして、微視的なふく射性質モデルの可能性を検討している。また、並行して、ふく射と反射のスペクトルを同時に測定してふく射性質未知の表面の正確な温度をインプロセス計測する方法の開発研究を進めている。  
(牧野)

講演10) このワークショップは、R.S.BrodkeyとY.G.Guezennecを代表者として1987年10月16-18日オハイオ州立大学で開催された。定量計測に適した可視化法、膨大な画像データの処理法、流動特性の空間パターン認識法、流れ構造の抽出法など、画像処理技術を流体計測に適用するときの問題点がパネル形式で討論された。本講演会では、レーザ光を利用した可視化法(誘起発色反応、誘起蛍光反応、蛍光塗料トレーサ照射)と流れ場全体の瞬時測定(レーザ二重露光法による速度測定、レーザ誘起発色格子を用いた速度・渦度の同時測定、ホログラフィによるトレーサ粒子の3次元測定)を中心にワークショップのトピックスを紹介した。  
(平田)

(関西地方連絡幹事 高城敏美)

(関西地方幹事 鳥越邦和)

九州研究グループ特別講演会

I

日 時 : 昭和63年6月7日(火) 14時~16時

場 所 : 九州大学工学部 機械系大会議室

講 師 : Prof. Noam LIOR

Graduate Group Chairman, Mechanical Engineering and  
Applied Mechanics, University of Pennsylvania

講演題目 : Current Topics in Solar Engineering: A novel hybrid Rankine cycle  
for use with low-temperature energy resources.

講演要旨 低温度熱源(約100℃)で発生する蒸気を高温熱源(約600℃)で過熱蒸気にしてランキンサイクルに用いる新しいシステムが開発された。過熱により入力エネルギーは20%増えるが、サイクル効率は9%から18%へと2倍になる。したがって、同じ出力を得るために必要な太陽熱集熱器の面積を半分にできました。トータルのシステムコストを2/3にできる。

このシステムを顕熱蓄熱システムと併用し、低温度熱源として太陽熱集熱器、高温熱源としてガス燃焼過熱器を用いた場合について、空調用チラーの動力源としたときの性能評価を行った。二つの異なる場所、すなわちワシントンとフェニックスにおける冷房期間中の運転性能の試算により、このシステムが高い性能を持つことが確かめられた。またチラーやヒートポンプだけでなく他の動力源としても利用できる。現在このシステムについての実験的研究が進められている。

II

日 時 : 昭和63年6月13日(月) 15時~17時

場 所 : 九州大学工学部 機械系大会議室

講 師 : Prof. Jae Min HYUN

Department of Mechanical Engineering  
Korea Advanced Institute of Science and Technology

講演題目 : Transient Natural Convection in a Side-Heated Cavity.

(九州地方連絡幹事: 藤井丕夫)



## 「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い

「伝熱研究」編集委員会（伝熱研究会）

### 1. はじめに

日本伝熱研究会の会誌「伝熱研究」の原稿をワープロで打って提出して下さる方が、近年増加しており、現在では、かなりの割合に達しております。もし、ワープロ原稿をそのまま会誌にのせることができれば、「伝熱研究」の印刷費用は安くなりますし（活字組みから写真製版への移行による費用の減少）、活字組みの時に生じる文章中の誤字、脱字を減らすこともでき、また、ゲラ刷りの校正作業もずっと楽になるなど種々の利点が生じるものと思われまます。そこで、原稿をワープロで打っていただける方には、なるべくワープロの出力原稿を提出していただき、それをそのまま会誌にのせることにいたしました。印刷用原稿としては、各著者のプリンタ出力をそのまま使用しますので、印刷の仕上りは機種による字型の違いなどのために多少不揃いになると思われまますが、以下の標準書式に従ってプリンタ出力をし、原稿を御提出いただきますよう、ご協力のほど、どうぞよろしくお願い申し上げます。

### 2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式

#### 2. 1 標準出力フォーマット

★この用紙の書式を参考にして、A4の用紙に打出す。（切り貼りは自由。印刷時にB5に縮小します。なお、縮小された大ききでB5に打出しても構いません。）

★縦長、横書き。（プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。）

★全角文字を標準とする。（英語、数字は半角が望ましい。）

★一行に印字する文字数：42文字程度（40～44文字の間なら構いません。）

横 幅 ：160mm 程度（150mm～170mmの間なら構いません。）

（この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。）

★一頁の行数：34行程度（33～35行の間なら構いません。）

縦の長さ ：255mm 程度（245mm～265mmの間なら構いません。）

（この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。）

★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。

（以上よろしく願いいたします。）

1 ..... (一行目は表紙の頁のみ空白とする。二頁目以降は文章を書く。) ..... 40・42・44  
 ..... 10 ..... 20 ..... 30 .....  
 ..... 「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い .....  
 ..... (表題は三行目の中央に文章と同じ大きさの文字で書く。) .....  
 5 ..... 「伝熱研究」編集委員会・(伝熱研究会) .....  
 ..... (表紙の頁は一行空白) ..... (氏名、所属〔略称〕を右に詰めて書く。) .....  
 1. はじめに ..... (本文スタート↓) .....  
 ・日本伝熱研究会の会誌「伝熱研究」の原稿をワープロで打って提出して下さる方が、近年  
 増加しており、現在では、かなりの割合に達しております。もし、ワープロ原稿をそのまま会  
 誌にのせることができれば、.....  
 ..... ↑ .....  
 ..... ↑ .....  
 ..... | .....  
 ←----- 160mm -----+-----→ .....  
 15 ..... | .....  
 ..... 255mm | ..... ←→ .....  
 ..... ↓ ..... 10mm .....  
 ..... なお、..... ↓ .....  
 .....、事務局で対応できますので、お気軽にお申し付け下さい。 .....  
 20 ..... (一行空白) .....  
 2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式 .....  
 2. 1 標準出力フォーマット .....  
 ★この用紙の書式を参考にして、A4の用紙に打出す。(切り貼りは自由。印刷時にB5に  
 縮小します。なお、縮小された大ききでB5に打出しても構いません。) .....  
 25★縦長、横書き。(プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。) .....  
 ★全角文字を標準とする。(英語、数字は半角が望ましい。) .....  
 ★一行に印字する文字数：42文字程度(40～44文字の間なら構いません。) .....  
 ★横 幅：160mm程度(150mm～170mmの間なら構いません。) .....  
 (この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。) .....  
 30★一頁の行数：34行程度(33～35行の間なら構いません。) .....  
 ★縦の長さ：255mm程度(245mm～265mmの間なら構いません。) .....  
 (この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。) .....  
 ★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。 .....  
 ..... (以上よろしく願います。)



## 事務局から受賞のお知らせ

森康夫先生、Luikov賞、Max Jakob賞 受賞

本年3月3～4日 International Centre for Heat and Mass Transfer の理事会 (Executive Committee Meeting) がローマにて開催され、小生も役員の一として出席した。出席者は委員長 M. Combarous (仏)、副委員長 J. T. Rogers (カナダ) のほか A. E. Bergles (米)、B. Berkovsky (ソ)、M. Cumo (伊)、R. Echigo (日)、R. J. Goldstein (米)、K. Hanjalic (ユーゴ)、G. F. Hewitt (英)、E. M. Khabakhpasheva (ソ)、F. Mayinger (独)、S. M. Yang (中国)、N. H. Afgan (ユーゴ、事務局長) で、S. Sideman (イスラエル)、D. B. Spalding (英) の2名は欠席であった。議題は盛沢山あったが、主なものは8月に開催される本センターの創立20周年記念祝賀会の企画、検討と表題のLuikov Medal 受賞者の決定であった。

事前に Sub-Committee の Chairperson である Khabakhpasheva 女史に投票用紙が郵送されており、同女史が開封しながら読みあげるといふふうに慎重な開封作業が進められた。その結果満票というめずらしい内容で森康夫先生の受賞が決定した。過去の受賞者は E. R. G. Eckert (1979)、J. P. Hartnett (1980)、U. Grigull (1982)、D. A. de Vries (1983)、D. B. Spalding (1986)、Z. Zaric (1986) に継ぐ7人目の受賞で、創立20周年の記念祝賀会にて Medal が授与されることが決められた。

一方、8月早々に米国から Max Jakob Memorial Award 受賞のお知らせが森康夫先生に届いた。拝読した文面によると受賞は "a handsome plaque, a certificate, and an honorarium of \$1000." を授与するとある。本賞については説明は要しないと思うが、1961年 E. R. G. Eckert 以来1987年 S. G. Bankoff まで27人、日本人としては東北大学名誉教授故抜山四郎 (1968)、東京大学名誉教授四脇仁一 (1978) 両先生につぎ3人目の快挙である。正式には1988年の受賞で、賞の授与は1989年8月6～9日開催の26th National Heat Transfer Conference (Philadelphia) でとり行われる予定である。

(文責：越後亮三)

## 第26回伝熱シンポジウム講演募集

- ・開催日 昭和64年5月31日(水)～6月2日(金)
- ・会場 宮城第一ホテル(〒980 仙台市榴岡1-2-45)
- ・講演申込締切 昭和64年1月21日(土) ……特定テーマセッション  
昭和64年1月28日(土) ……普通セッション
- ・原稿締切 昭和64年3月15日(水)必着
- ・講演申込先 〒980 仙台市荒巻字青葉  
東北大学工学部機械工学科内  
第26回日本伝熱シンポジウム準備委員会  
TEL 022-222-1800(内)4105, FAX 022-268-3695  
郵便振替 仙台8-5670

### ・講演申込方法

1. 本シンポジウムでは、従来の普通セッションの他に新しく特定テーマセッションを企画いたします。それぞれの内容は次のように分類されますが、特定テーマセッションについては準備委員会にお問合せ下さい。

#### 【普通セッション】

- a. 強制対流, b. 自然対流, c. 沸騰, d. 二相流, e. 凝縮, f. 蒸発, g. ふく射,
- h. 燃焼, i. 熱伝導, j. 熱交換器, k. 流動層, l. 熱物性, m. その他

#### 【特定テーマセッション】

- ①次世代エネルギーシステムにおける伝熱：核融合・地熱など
- ②大規模および環境伝熱学：宇宙・気象・居住空間など
- ③熱物性測定の新技术：簡易・原位置測定など
- ④マイクロ伝熱学：小スケール・分子など
- ⑤バイオ伝熱学：食品・生体など

2. 伝熱研究本号の最終ページに添付されている申込用紙(またはコピー)あるいはB5用紙に「第26回日本伝熱シンポジウム研究発表申込」と標記し、(1)題目、(2)日本伝熱研究会会員非会員の別・所属学協会ならびに会員資格・氏名(ふりがな、連名の場合は講演者に\*印)・所属(勤務先)、(3)普通セッションと特定テーマセッションの別、それぞれの内容を示す記号(a, b, ……あるいは①, ②, ……)、(4)普通セッションについては5～10のキーワード、特定テーマセッションについては800字程度の概要(図表可、A4版1枚)を添付、さらに(5)連絡先を記入し、整理費1,000円を上記準備委員会宛郵便振替にて送金とともに申し込んで下さい。
3. 講演は1名1題に限り、講演時間、討論時間はそれぞれ10分の予定です。
4. 講演の採否は、準備委員会にご一任願います。
5. 前刷原稿：前刷集はオフセット印刷、原稿執筆枚数は、1,927字(41行X47字)詰原稿用紙3枚以内、原稿用紙は準備委員会より講演申込者(講演者)宛送付します。
6. 特定テーマセッションの講演時間と討論時間については特別に配慮する予定です。

### ・ご注意

1. 講演申込後の取消しは準備と運営に支障をきたしますのご遠慮下さい。十分検討の上、お申込下さい。
2. 申込書と前刷原稿の題目や講演者に不一致が生じないように申込書の控えをお残し下さい。
3. 特定テーマセッションは場合によっては一部取りやめになることがありますので、ご承知おき下さい。
4. 機械学会会員で将来機械学会論文集等に投稿希望の方は、本申込書の写し2部を機械学会事業課宛送付して下さい。

# 第12回 人間-熱環境系シンポジウム

大会長：東京工業大学 森田矢次郎 期日：昭和63年12月9日(金)、10日(土) 場所：東京工業大学国際交流会館 (〒145 東京都大田区石川町1-1-18) TEL 726-1111

## 第1日 12月9日(金)

9:00	開会の辞	準備委員会代表 後藤 滋
9:05	研究発表 オフィス熱環境の調査と評価法に関する研究	山武ハネウェル 田中 隆 山武計装 伊藤辰則 横浜国大 川島美勝、後藤 滋
9:20	研究発表 オフィス熱環境の調査と評価法に関する研究	山武ハネウェル 神村一幸 山武計装 石川良光 横浜国大 大平逸彦、増田順子
9:35	研究発表 オフィス熱環境の調査と評価法に関する研究	山武計装 伊藤辰則 山武ハネウェル 田中 隆 横浜国大 川島美勝、後藤 滋
9:50	研究発表 温熱環境因子分析システムによる外断熱ブロック造住宅の評価	山武ハネウェル 神村一幸 山武計装 石川良光
10:05	中高年齢作業者の体温調節系の特性の観察	横浜国大 田中毅弘、木村千博、後藤 滋、川島美勝
10:20	高齢者の暑熱馴化について	山武ハネウェル 田中 隆、神村一幸 山武計装 伊藤辰則、石川良光
10:35	皮膚表面温度の計測に関する研究	東工大 森田矢次郎 富士写真フィルム 吉田 太 東工大 眞下祐輔
11:00	大会長講演 人間-熱環境系における計測	東工大 森田 矢次郎
13:00	特別講演 高齢化時代の住まいづくり	筑波技術短大 吉田 あこ
14:15	パネルディスカッション 高齢者の生活と熱環境	司会 川島 美勝、原 新 裕
	高齢者の生活	十文字学園女子短大 古 松 弥 生
	高齢者の衣服	東海学園女子短大 辻 啓 子
	高齢者と環境	横浜国大 原 隆 久
	高齢者と栄養	東京都老人研 崎 俊 久
	高齢者の生理	国立公衆衛生院 原 新 裕
	老人性低体温症	福島県立医大 田 中 正 敏
	高齢者の医療	山梨医大 入 正 躬
18:00	懇 親 会 (東工大百年記念席)	

## 第2日 12月10日(土)

9:00	研究発表 Gagge, 西らの2層モデルによる発汗障害、血管調節障害の試算と検討	司会 松 原 清 樹
9:15	研究発表 平均皮膚温に対するぬれ面積率の変化に関する基礎実験	日大 吉田 燦、角館政英
9:30	研究発表 気温・湿度の組合せによる等温感線の表現方法に関する研究	北大 持田 徹 工技院 神田哲也 名工大 堀越哲美
9:45	研究発表 シャワーの湯量、湯温による人体反応、その2	福島県立医大 田中正敏、国立公衆衛生院 大中忠勝、慶研 坂垣和明
10:00	研究発表 常温環境におけるジョギング時の至適気流について	武蔵工大 市川憲良 東大 鎌田元康、石渡 博、洪王珠 東京ガス 青藤忠司
10:25	演 講 ファジ理論の基礎と人間熱環境系への応用	横浜国大 大 里 有 生
11:15	招待発表 How to measure mean radiant temperature, operative temperature and equivalent temperature correctly	司会 田 辺 新一
		Technical Univ. (Denmark) Bjarne W. Olesen
13:00	演 講 The effect of cold gas inhalation during work in hot humid conditions	司会 田 村 照 子
		Simon Fraser Univ. (Canada) Eric Banister
13:50	演 講 生体内部温度の無侵襲計測	司会 棚 沢 一 郎
		電総研 宮 川 道 夫
14:30	演 講 ISO/TC159/SC5/WG1 (熱環境ワーキンググループ)の現況とわが国のとり組みについて	司会 小 林 陽 太郎
		国内委員会熱環境WG 主査 吉 田 肇
15:20	研究発表 乗用車における局所空調と温度分布に関する考察	司会 佐 藤 忠
15:35	研究発表 暖房の快適性に関する実験研究	横浜国大 稲葉茂夫、佐藤 忠、川島美勝、山本一彦
15:50	研究発表 新しい空調制御法の検討	早大 田 辺 新一
16:05	研究発表 環境温度変化と皮膚表面温度	三菱電機 香 原 作 雄、原 正 規
16:20	研究発表 体温自動調節器に関する研究、その2	司会 堀 越 哲 美
16:35	研究発表 サーマルマネキンの特性を考慮に入れた着衣の評価	近大 堀 井 宏 修
16:50	研究発表 風土と適応	三洋電機 大 隅 正 人
17:05	研究発表 着衣の乾性、湿性熱抵抗の予測	近大 肝 付 邦 憲
17:20	閉会の辞	文化女子大 田村照子 Kansas State Univ. (USA) R. A. McCallough, R. W. Jones
		横浜国大 川 島 美 勝

共 催：空気調和・衛生工学会(幹事学会)、人類熱感学会、日本伝熱研究会、日本生気象学会、計測自動制御学会、生理人類学会  
 協 賛：日本産業衛生学会、日本生理学会、日本M E学会、日本サーモグラフィ学会、日本人間工学会、日本家政学会、織機学会、日本建築学会、日本建築衛生学会、日本労働衛生学会、電気学会、日本冷凍協会、日本生物物理学会、日本栄養・食糧学会、日本区科器械学会、日本繊維製法消費科学会、日本保安用品協会、日本火災学会、日本住宅設備システム協会、日本繊維機械学会、日本病院設備協会、日本熱物性研究会、全国ビルメンテナンス協会、日本温泉気候物理医学会  
 後 援：日本学術会議

参加費：5,000円(報名料を含む) 懇親会：12月9日 18:00~20:00 会費4,000円  
 参加申込：往復ハガキに (1)氏名(ふりがな) (2)勤務先 (3)連絡先 (4)所属学協会 (5)懇親会出席の有無 を記入して下記あてに御申込下さい。  
 定員300名で締切らせていただきます。  
 連絡先：〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156 横浜国立大学工学部生産工学科内  
 TEL 045-335-1451 内線2666(川島)

第12回 人間-熱環境系シンポジウム準備委員会

日本混相流学会

混相流レクチャーシリーズ  
「基礎から最前線まで」

第2回 - 固気二相流の数値シミュレーション

協賛 (予定) 日本機械学会、化学工学協会、土木学会、粉体工学会、スラリ輸送研究会、流  
れの可視化学会、日本原子力学会、日本航空宇宙学会、資源・素材学会、日本  
造船学会、日本伝熱研究会、日本流体力学会、日本ボイラ協会、日本鉄鋼協会

日時: 昭和63年12月12日(月) 13時~17時  
12月13日(火) 9時~17時

場所: 京大会館二階211号室  
京都市左京区吉田河原町15-9 (Tel. 075-751-8311)

申し込み締切: 11月30日

講演題目及び講師:

(基礎編)

カプセル空気輸送のシミュレーション 富田伸嗣  
九州工業大学設計生産工学科

エアロゾルのシミュレーション 金岡千嘉男  
金沢大学工学部物質化学工学科

流動層のシミュレーション 堀尾正朝  
東京農工大学工学部資源応用工学科

気体衝撃波を伴う固気二相流のシミュレーション 三浦宏之  
近畿大学理工学部機械工学科

(応用編)

貯炭場での炭塵飛散のシミュレーション 市川陽一  
電力中央研究所発電部環境研究室

ボイラにおける微粉炭の炉内流動および燃焼のシミュレーション 広川雅俊  
川崎重工株式会社技術研究所熱技術研究室

分級シミュレーション 山田幸良  
日清製粉株式会社生産技術研究所粉体研究室

流動層ボイラの設計とシミュレーション 大木勝彦  
パブコック日立株式会社、呉工場火力設計部

流動層ごみ焼却炉のシミュレーション 箕浦忠行  
株式会社神戸製鋼所要素技術センター

参加費: (参加者にはテキストを一冊無料贈呈致します)

会員 12,000円(協賛学協会会員)、非会員 18,000円

学生、院生 4,000円

定員: 100名

申し込み方法:

業書大用紙(郵便振替の場合は振替用紙通信欄)に「混相流講習会申し込み」と  
題記し、氏名、勤務先、連絡先、会員資格を明記し、参加費を添えて(現金書留、  
郵便振替または銀行振込)本会事務局までお送りください。なお、テキストのみ  
ご希望の方は4,000円(会員)、6,000円(非会員)を添えて「混相流  
講習会テキスト希望」と題記してお申し込みください。

申し込み先:

〒554 大阪市此花区春日出中2-14-9 近藤印刷(株)内  
日本混相流学会 (Tel. 06-466-1588 Fax 06-463-2522)

銀行口座 住友銀行六甲支店 普通預金 159825 日本混相流学会企画運営  
部会

郵便口座 神戸 1-38899 日本混相流学会企画運営部会

問い合わせ先:

日本混相流学会企画運営部会 (〒657 神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学  
工学部機械工学科 藤井照重 TEL 078-881-1212 内線5139)

# 日本機械学会関西支部 第163回講習会 最新の各種熱交換器の合理的設計手法

〔協賛予定：日本伝熱研究会、化学工学協会関西支部、自動車技術会関西支部、  
空気調和・衛生工学会近畿支部〕

日 時 昭和63年12月14日(水)、15日(木) 9:30～17:00

会 場 建設交流館6階 会議室603

大阪市西区立売堀2-1-2 電話 (06)543-2551  
地下鉄 四ツ橋線「本町」駅下車南側出口より中央大通を西へ300m、  
なにも筋交差点を南へ50m、西側黒い8階建ビル

趣 旨 熱交換器の種類は多く、歴史は古いが内部の現象が複雑なため、膨大な研究成果があるにもかかわらず基礎工学の発展に伴ない、徐々に進展し続けています。産業界では非常に広い分野で日常茶飯事のごとく各種熱交換器が設計・製造されていますが、合理的設計手法という観点から見ると不完全な面が多くあり、細かく見ると根の深い技術が要求されるものであります。システム全体の中で占める熱交換器の役割を合理的に定めるのも意外に難しい。  
各種熱交換器の設計に当って、少しでも設計者の迷いを軽減できるのではと考えて、題記講習会を企画しました。多数の研究者・設計者のご参加を期待しています。

**題目・内容・講師**

日 時	題 目	内 容	講 師
9.30～10.30	熱交換器フィンの最適形状決定の方法	熱伝導方程式を制約条件とする最小化問題を、フィン形状に関して数値的に解くことにより、最適形状を求める方法を示す。	神戸大学医療技術短期大学部 塚 本 康 夫
10.35～11.35	コンパクト型熱交換器の最適設計	コンパクト型熱交換器の最適設計を行うための基礎的考え方を講述し、種々の幾何形状パラメータの影響につき具体的に解説する。	京都大学 工学部 鈴 木 健二郎
11.40～12.40	ヒートパイプにおける伝熱の特性	毛管刀利用のヒートパイプについて、設計の指針となる基本的な特性を解説し、流路の形態や封入流量による熱輸送能力向上例を示す。	九州大学 工学部 吉 岡 啓 介
13.45～14.45	スターリングエンジン再生器の最適設計	高温と低温の往復流動ガスに対し高応答性の蓄熱伝熱性能・低圧損・空隙容積低減が要求される再生器の設計手法について述べる。	明治大学 工学部 宮 部 英 也
14.50～15.50	レトロポンプシステムにおける熱交換器面積配分の最適化	レトロポンプシステムにおける各熱交換器の最適サイズおよび流量に関し、解析的に集約・体系化を行なった結果について解説する。	北海道大学 工学部 近 久 武 美
15.55～16.55	熱交換器、特に復水器における管側汚れについて	腐食・生物・微粒子等により発生する復水器管の汚れについて概説し、管材質の影響・汚れ係数・汚損対策に言及する。	住友軽金属株式会社 技術研究所 野 世 溪 精
9.30～10.30	移動層熱交換器設計のための解析例	粒子を熱媒体とするもの、粒子と流体の直接々熱交換を行うものについて、移動層内偏流・熱交換性能の計算手法について述べる。	神戸製鋼所 要素技術センター 箕 浦 忠 行
10.35～11.35	着霜を伴う熱交換器の特性と設計の基礎	着霜現象の基礎を踏まえて、主にフィンチューブ熱交換器の特性評価を示すとともに設計に対する指針を与える。	長岡技術科学大学 機械系 青 木 和 大
11.40～12.40	高性能伝熱面と熱交換器—基礎研究から実用化まで—	高性能伝熱面の着想から基礎研究による評価、更に実際の熱交換器への適用に至る開発過程でのポイントについて解説する。	日立製作所 機械研究所 中 山 恒
13.45～14.45	ミスト冷却熱交換器の特性と最適設計	単管と管群熱交換器に対するミスト冷却の特性、それをもとに展開される表面構造を含む機器形状と運転条件の最適化について述べる。	金沢大学 工学部 林 勇二郎
14.50～15.50	自動車用熱交換器の改良動向	自動車には種々の熱交換器が使われている、その性格上小型化・軽量化の要望が強い、2～3の代表例でその改良の動向を紹介する。	日本電装株式会社 ラジエータ事業部 梶 野 幹 夫
15.55～16.55	空調用熱交換器における最適設計と経済性	熱交換器を構成する要素の全体の特性に与える影響について言及し最適設計のポイント及び経済性について解説する。	ダイキン工業株式会社 汎用空調設計部 中 田 春 男

聴 講 12月9日(金)  
申 込 員 120名

..... き り と り 線 .....

## 関西支部 第163回講習会 聴講教材 申込書

昭和 年 月 日

金 額		所属学協会名・資格	氏 名
聴 講 料 (教材代金含む)	正・准員 25,000円 大学・官公庁 12,500円 院生・学生員 6,000円 会 員 外 40,000円	動 務 先 (所属部 課名)	
	教 材 の み		会 員 4,000円 会 員 外 6,000円
送 金 方 法	現 金 書 留 銀 行 振 込	通 信 先	〒
入 金	年 月 日	(目 宅) (勤務先)	(電話 )

申込先 〒550 大阪市西区靫本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 日本機械学会関西支部 電話 (06) 443-2073  
銀行振込口座 住友銀行中之島支店 普通預金口座 No.110415 できるだけ現金書留をご利用ください。



日本機械学会熱工学会部門・関西支部第2回＝講習会  
「パソコン（実習付）で学ぶ熱流体解析の基礎」

協 賛 化学工学協会関西支部、空気調和・衛生工学会近畿支部、低温工学協会、日本原子力学会関西支部、  
(予定) 日本伝熱研究会、日本燃焼研究会、日本ボイラ協会  
日 時 昭和64年1月31日(火)、2月1日(水) 9:00～17:00  
会 場 大阪電気通信大学情報処理教育センター  
大阪府寝屋川市初町18-8、電話(0720)24-1131  
大阪電鉄寝屋川市駅下車東へ徒歩約10分  
趣 旨 近年大型電子計算機の性能向上はめざましく、熱流体の現象解析、シミュレーションにおいて欠くべからざるものとなつている。いわゆるパソコンにおいても計算速度が向上し、記憶容量も増加してきたため、実用規模での熱流体解析を行うことが出来るようになってきており、プログラムの変更の容易さ、グラフィック表示の簡易さなどから、今後更にその使用の範囲は増大すると考えられる。  
このような観点から本講習会では熱伝導から、層流、乱流、燃焼までの広い範囲の熱流体現象をBASICプログラムを実際に行きませ、差分法、計算の安定性、グラフィック処理等の問題を含め、理解させることを目的としている。受講者はパソコンで簡単な代数計算を行ったことがあり、熱と流体力学の初歩を知っていることが望ましい。実習ではNECの98シリーズのパソコンが使用され(1人あたり1台)、講習後プログラムはフロッピーディスクとして配布(無料、ただしコピー不可)される。  
講 師 小竹 進(東京大学教授)、上方邦夫(東京工業大学教授)が分担して担当する。  
次 第

題 目	内 容
(1) 矩形領域内の非定常熱伝導	差分法により矩形領域に対し、任意の加熱条件、境界条件、初期条件の元での非定常熱伝導の計算を行う。結果の温度分布は現象の理解を深めるために多色で表示される。
(2) 発達した矩形管路内の流れ	(1)と同一のプログラムを用い、任意の縦横比を持つ、加熱矩形管路内の流れと熱伝達の計算を行い、分布形状、抵抗係数、ヌセルト数が求められる。
(3) 有限要素法によるフィン熱伝導計算	三角形フィンを代表例として、有限要素法による熱伝導計算法について説明する。ここでは特に3種類の境界条件(壁温一定、熱流束一定、熱伝達一定)がすべて取り上げられている。
(4) 管内層流の助走区間並びに発達区間の流れと熱伝達	壁面が熱流束一定、又は壁温一定で加熱される平行平板間、又は円管内の2次元流の助走区間を含む流れを、温度・流関数を用いて解析する。流れ方向の熱伝導についても検討することが出来る。
(5) 複合対流境界層の熱伝達	鉛直の加熱平板にそって、平行な強制流がある場合の速度・温度境界層が計算される。強制流は一様流のみならず加速流でもよい。また加熱開始点は平板の先端である必要はない。境界層厚さ、熱伝達率変化が表示される。
(6) 一様流中または管内におかれた物体まわりの流れ	管路内の対称な位置に物体をおいた場合にも、Re 数がある程度大きいと物体の後方で非対称な渦放出が行われ、熱伝達率も時間的に変化する。任意の寸法と縦横比を持つ矩形物体まわりの流れを取り扱う。
(7) ステップ流れと熱伝達	2次元的な管路において断面積がステップ的に増加、または減少する場合、ステップの前方、及び後方で流れがはく離する。この時熱伝達率も流れの再付着点近傍で大きく変化する。ステップ高さによりこの流れと熱伝達の様子がどのように変化するかを計算する。
(8) 閉じた空間の流れ	2次元の矩形領域で壁面の一部が加熱、冷却されると自然対流により閉じた空間内に一定の渦運動が生じる。このような流れ場、温度場の計算を行う。空間の 部が解放され、それに沿って強制流があるキャビティ流れについても取り扱う。
(9) 2次元流れを伴う円管内流れ	管内流に遠心力や浮力等の外力が働くと管内に流れ方向と直角方向の速度成分を持つ2次元流れが生じる。2次元流れにより速度分布、温度分布も大幅に変化し、熱伝達率も変化する。この様な流れの発達域で様子計算する。
(10) 発達した管内乱流	現状の乱流の計算では流れのモデル化が不可欠である。ここでは発達した平行平板間流れを対象とし、混合距離モデル、 $k\epsilon$ 高レイノルズ数モデル、低レイノルズ数モデルを用い、これらのモデルの特色を把握する。
(11) 低レイノルズ数 $k\epsilon$ モデルによる円管内流れと熱伝達	レイノルズ数がある程度大きくても、管路の入口部分では流れは層流的な挙動をするが、ある程度境界層が発達すると乱流に遷移する。このような層流から乱流への遷移を含む流れを計算する。
(12) 燃焼を伴う流れ	燃焼には予め燃料が酸化剤と混合して燃焼する予混合燃焼と、燃焼面が初めと混合する拡散燃焼とがある。簡単な反応を仮定して、この代表的な2つの燃焼現象を取り扱う。

なお、講演内容(提供するプログラム内容)が多すぎるため、一部説明を割愛する場合があります。

定 員 78名、申込先着順により満員になり次第締切ます。(パソコンの台数がきざられているため、申込前に必ず電話で余裕の有無をご確認ください。)

参 加 費 会員35000円、学生員20000円、会員外50000円。ただし、教材「パソコンで解く熱と流れ」小竹・土方著(九折)代(9000円)を含む。教材持参の場合は上記金額より9000円引き。

申込方法 B6判用紙(学会誌半裁)に「部門・関西支部第2回講習会申込み」と題し、(1)氏名・会員資格、(2)勤務先・所属部課名・住所、(3)通信先、(4)所属学協会名、(5)送金内訳および送金額を記入のうえ、下記申込先宛お申し込み下さい。参加費は現金書留で申込先に送付するか、または下記銀行口座宛ご送金下さい。

申込先 大阪市此花郵便局私書箱20号 日本機械学会関西支部担当 天野宛  
振込口座 住友銀行 四貫島支店 普通口座1151698 日本機械学会関西支部名義

問い合わせ先 〒554 大阪市此花区春日出中2-14-9 近藤印刷(株)内 日本機械学会関西支部担当 天野宛  
電話(06)466-1588 FAX(06)463-2522

ご注意 (1)開催日の10日前までに聴講料が着金した方は参加者にあらかじめ聴講券をお送りいたします。(以降は当日受付となる場合があります)。  
(2)聴講券発行後は取消しのお申し出が有りましたがも聴講料は返金いたしませんのでご注意ください。  
(3)会社、工場などを通信先にご指定の場合は部課名まで詳細にご記入ください。  
(4)領収書は原則として発行いたしませんので必要な場合はその旨お申し出ください。



## 日本伝熱研究会への入会手続きについて

### (1) 個人会員および学生会員

下記の当該申込み用紙に所要事項御記入の上、事務局宛御送付下さい。同時に郵便振替にて当該年度分の会費（個人会費は5,000円/年、学生会員は3,500円/年）をお支払い下さい。

会員には「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお送りしています。

なお、「日本伝熱シンポジウム講演論文集」については、前年度の会費を納入された方に限り、当該年度のもの1冊をお送りしております。

本会の事業年度は毎年4月1日に始まり、翌3月末日に終わります。

申込書送付先： 〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1

東京工業大学工学部機械工学科気付

電話 03(726)1111(代) 内線 2169, 2179

日本伝熱研究会

郵便振替口座：東京6-14749 日本伝熱研究会

### (2) 維持会員

維持会員に入会申込みの場合は、上記事務局に直接書面または電話で御連絡いただくか、あるいはお近くの個人会員に御連絡下さい。事務局から研究会の内容、会則、入会手続きなどについてご説明いたします。

維持会員の会費は1口30,000円/年で、申込は何口でも結構です。会員には「伝熱研究」及び「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等を申込1口につき1部ずつお送りしています。

日本伝熱研究会個人会員申込書・変更届書

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

1	会員資格	正・学						
2	氏名							
3	ふりがな							
4	生年月日	M・T・S		年		月		日

5	* 勤 務 先	名称	
6			
7		〒	—
8		所在地	
9			
10		TEL	

11	自 宅	〒	—
12		住所	
13			
14		TEL	

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

20	学生会員の場合：指導教官名	
----	---------------	--

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（   |         |         |          | ）       |

\*) 学生の場合は在学学校名、学年（M2、D3など）を記す。

伝 熱 研 究  
Vol. 27 No. 107

1988年10月発行

発行所 **日本伝熱研究会**

〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1  
東京工業大学工学部機械工学科気付

**日本伝熱研究会**

電話 03(726)1111(代) 内線2169, 2179

Fax 03(729)0563

振替 東京 6-14749

(非売品)