

# 伝熱研究

1988

July

Vol. 27

No. 106

Journal of Heat Transfer Society of Japan

## 〜特集：第25回日本伝熱シンポジウム〜

第25回日本伝熱シンポジウムを終えて 林 勇二郎

第25回日本伝熱シンポジウムにおける各分野のレビュー

- |                                   |       |                                         |       |
|-----------------------------------|-------|-----------------------------------------|-------|
| (1) 二相流セッションの概要と感想                | 波江 貞弘 | (11) ユーザーによる「熱物性」セッション感想記               | 秋野 詔夫 |
| (2) 熱交換器：熱交換器セッションに出席して           | 藤井 雅雄 | (12) 「測定法」セッションについて                     | 宇高 義郎 |
| (3) 蒸発                            | 岡崎 健  | (13) 凝縮：凝縮についての研究<br>(オーガナイズドセッション)     | 棚谷 吉郎 |
| (4) 自然対流のセッションにおいて                | 中山 顕  | (14) 直接接触熱交換                            | 棚沢 一郎 |
| (5) 沸騰：永遠のテーマ                     | 成合 英樹 | (15) 宇宙環境利用の伝熱                          | 塩治震太郎 |
| (6) 流動層：流動層セッションの感想               | 工藤 一彦 | (16) 「半導体製造装置における伝熱」のセッションを<br>オーガナイズして | 中山 恒  |
| (7) 放射伝熱のセッションを聴講して               | 山田 幸生 | (17) 特別セッション「レシプロエンジンにおける伝熱」<br>について    | 藤掛 賢司 |
| (8) 「環境伝熱」に関するレビュー                | 鳥越 邦和 | (18) 数値計算と境界条件                          | 小竹 進  |
| (9) 熱伝導：熱伝導セッション                  | 青木 和夫 |                                         |       |
| (10) 伝熱シンポジウムにおける「燃焼」セッション<br>の役割 | 新井 紀男 |                                         |       |

### 〈国際会議報告〉

ベレストロイカと第一回 Minsk International Heat and Mass Transfer Forum

越後 亮三

### 〈研究トピックス〉

滴・膜共存の特殊凝縮伝熱面の熱伝達  
温度依存性温度伝導率の簡易測定法

熊谷 哲

佐野 雄二, 薄井 洋基, 山本 修一, 岡崎 浩英

### 〈解説〉

管群の熱伝達 (円管間隔が狭い場合)  
熱交換器の汚れ

相場 眞也

太田 照和

密度不均質を伴う乱流場での輸送現象 高城 敏美, 平井秀一郎

## 日本伝熱研究会第27期（昭和63年度）役員

<p>会 長</p> <p>副 会 長 (無任所) (事務担当)</p> <p>地方連絡幹事</p> <p style="margin-left: 2em;">北 海 道 東 北 関 東 東 海 北 陸 信 越 関 西 中 国 四 国 九 州</p> <p>幹 事 (23名)</p> <p style="margin-left: 2em;">斎 藤 函 (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) 鳥 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)</p> <p>監 査 (2名) 香 川 達 雄 (東 芝)</p> <p>「伝熱研究」編集委員長</p> <p>第26回日本伝熱シンポジウム準備委員長</p>	<p>平 田 賢 (東 大)</p> <p>藤 掛 賢 司 (豊 田 中 研)</p> <p>越 後 亮 三 (東 工 大)</p> <p>金 山 公 夫 (北 見 工 大)</p> <p>太 田 照 和 (東 北 大)</p> <p>笠 木 伸 英 (東 大)</p> <p>新 井 紀 男 (名 大)</p> <p>玉 木 恕 乎 (信 州 大)</p> <p>高 城 敏 美 (阪 大)</p> <p>須 藤 浩 三 (広 島 大)</p> <p>藤 井 丕 夫 (九 大)</p> <p>杉 山 憲 一 郎 (北 大)</p> <p>宍 戸 郁 郎 (宮 工 技)</p> <p>有 富 正 憲 (東 工 大)</p> <p>上 松 公 彦 (慶 應 大)</p> <p>加 藤 征 三 (三 重 大)</p> <p>滝 本 昭 (金 沢 大)</p> <p>石 原 勲 (関 西 大)</p> <p>藤 井 照 重 (神 戸 大)</p> <p>矢 田 順 三 (京 都 工 繊 大)</p> <p>水 上 紘 一 (愛 媛 大)</p> <p>上 宇 都 幸 一 (大 分 大)</p> <p>波 江 貞 弘 (船 研)</p> <p>宮 本 政 英 (山 口 大)</p> <p>永 井 伸 樹 (東 北 大)</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

## 伝 熱 研 究

## 目 次

第27期会長就任にあたって .....	第27期会長 .....	平田 賢 (東 大) ...	1
会長退任の挨拶 .....	第26期会長 .....	大谷 茂盛 (東 北 大) ...	4
〈特集：第25回日本伝熱シンポジウム〉			
第25回日本伝熱シンポジウムを終えて			
.....	準備委員長 .....	林 勇二郎 (金 沢 大) ...	5
伝熱シンポにオーガナイズド方式を .....		平田 哲夫 (信 州 大) ...	7
第25回日本伝熱シンポジウムに参加して .....		馬場 弘 (北見工大) ...	8
伝熱シンポジウム雑感 .....		加藤 泰生 (山 口 大) ...	9
第25回日本伝熱シンポジウムに参加して .....		平井秀一郎 (阪 大) ...	10
第25回日本伝熱シンポジウムにおける各分野のレビュー			
.....	編集委員会 .....		11
(1) 二相流セッションの概要と感想 .....		波江 貞弘 (船 舶 技 研) ...	12
(2) 熱交換器：熱交換器セッションに出席して .....		藤井 雅雄 (三 菱 電 機) ...	14
(3) 蒸発 .....		岡崎 健 (豊橋技科大) ...	16
(4) 自然対流のセッションにおいて .....		中山 顕 (静 岡 大) ...	17
(5) 沸騰：永遠のテーマ .....		成合 英樹 (筑 波 大) ...	19
(6) 流動層：流動層セッションの感想 .....		工藤 一彦 (北 大) ...	21
(7) 放射伝熱のセッションを聴講して .....		山田 幸生 (機 械 技 研) ...	23
(8) 「環境伝熱」に関するレビュー .....		鳥越 邦和 (ダイキン工業) ...	25
(9) 熱伝導：熱伝導セッション .....		青木 和夫 (長岡技科大) ...	27
(10) 伝熱シンポジウムにおける「燃焼」セッションの役割			
.....		新井 紀男 (名 大) ...	29
(11) ユーザーによる「熱物性」セッション感想記 .....		秋野 詔夫 (原 研) ...	30
(12) 「測定法」セッションについて .....		宇高 義郎 (東 工 大) ...	32
(13) 凝縮：凝縮についての研究 .....		棚谷 吉郎 (金 沢 工 大) ...	34
(オーガナイズドセッション)			
(14) 直接接触熱交換 .....		棚沢 一郎 (東 大) ...	36
(15) 宇宙環境利用の伝熱 .....		塩冶震太郎 (石 播) ...	39

(16) 「半導体製造装置における伝熱」のセッションをオーガナイズして .....	中山 恒 (日 立) ...	43
(17) 特別セッション「レシプロエンジンにおける伝熱」について .....	藤掛 賢司 (豊田中研) ...	45
(18) 数値計算と境界条件 .....	小竹 進 (東 大) ...	47
<国際会議報告>		
ペレストロイカと第一回 Minsk International Heat and Mass Transfer Forum .....	越後 亮三 (東 工 大) ...	50
<研究トピックス>		
滴・膜共存の特殊凝縮伝熱面の熱伝達 .....	熊谷 哲 (東 北 大) ...	53
温度依存性温度伝導率の簡易測定法 ..... 佐野 雄二, 薄井 洋基, 山本 修一, 岡崎 浩英 (山 口 大) ...		60
<解説>		
管群の熱伝達 (円管間隔が狭い場合) .....	相場 眞也 (秋田高専) ...	70
熱交換器の汚れ .....	太田 照和 (東 北 大) ...	89
密度不均質を伴う乱流場での輸送現象 .....	高城 敏美, 平井秀一郎 (阪 大) ...	101
<地方研究グループ活動報告>		
東海研究グループ講演見学会 .....	新井 紀男 (名 大) ...	108
関西研究グループ講演見学会 .....	高城 敏美 (大 阪 大) ...	109
中国・四国研究グループ講演会 .....	須藤 浩三 (広 島 大) ...	111
<編集後記>		
第106号編集後記 .....	第27期編集委員長 .....	宮本 政英 (山 口 大) ... 113
<お知らせ>		
(1) Program at a Glance-First World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics .....		115
(2) First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference (日本機械学会熱工学講演会) .....		117
(3) 第12回人間-熱環境系シンポジウム開催要綱 .....		119
(4) 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS FOR THERMAL PROBLEMS .....		120
(5) TURBULENT SHEAR FLOWS .....		122

# Journal of Heat Transfer Society of Japan

Vol. 27, No. 106, July, 1988

## CONTENTS

New President's Address .....	Masaru HIRATA (Univ. of Tokyo) .....	1
Thanks to Members .....	Shigemori OHTANI (Tohoku Univ.) .....	4
< Special Issue : The 25th National Heat Transfer Symposium of Japan >		
Looking Back upon the 25th National Heat Transfer Symposium of Japan .....	Yujiro HAYASHI (Kanazawa Univ.) .....	5
A Proposal of Taking Organized Sessions in the Heat Transfer Symposium .....	Tetsuo HIRATA (Shinshu Univ.) .....	7
Impressions at the 25th National Heat Transfer Symposium of Japan .....	Hiromu BABA (Kitami Inst. of Technology) .....	8
Thinking of the National Heat Transfer Symposium '88 .....	Yasuo KATOH (Yamaguchi Univ.) .....	9
Impressions of the 25th National Heat Transfer Symposium in Kanazawa .....	Shuichiro HIRAI (Osaka Univ.) .....	10
Introduction of Review on Technical and Special Sessions .....	Editorial Committee .....	11
(1) The Resume of Two-Phase Flow Session .....	Sadahiro NAMIF (Ship Research Inst.) .....	12
(2) Heat Exchanger .....	Masao FUJII (Mitsubishi Electric Corp.) .....	14
(3) Evaporation .....	Ken OKAZAKI (Toyohashi Univ. of Technology) .....	16
(4) Through the Technical Sessions on Free Convection .....	Akira NAKAYAMA (Shizuoka Univ.) .....	17
(5) Boiling : Eternal Theme .....	Hideki NARIAI (Univ. of Tsukuba) .....	19
(6) Impressions of Fluidised Bed Session .....	Kazuhiko KUDO (Hokkaido Univ.) .....	21
(7) Attending the Sessions on Radiation .....	Yukio YAMADA (Mechanical Engineering Lab.) .....	23
(8) A Review on Environmental Heat Transfer .....	Kunikazu TORIKOSHI (Daikin Industries, Ltd.) .....	25

(9) Heat Conduction Sessions	
..... Kazuo AOKI (Nagaoka Univ. of Technology) .....	27
(10) Contribution of Combustion Session to Heat Transfer Symposium	
..... Norio ARAI (Nagoya Univ.) .....	29
(11) Personal Impression on the Session of Thermal Properties	
..... Norio AKINO (Japan Atomic Energy Research Inst.) .....	30
(12) On the Session of "Method of Measurement"	
..... Yoshio UTAKA (Tokyo Inst. of Technology) .....	32
(13) Review of Condensation Studies	
..... Yoshiro TOCHITANI (Kanazawa Inst. of Technology) .....	34
 (Organized Sessions)	
(14) Direct Contact Heat Transfer	
..... Ichiro TANASAWA (Univ. of Tokyo) .....	36
(15) Heat Transfer on Space Experiments and Space Systems	
..... Sintaro ENYA (Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd.) .....	39
(16) Comments from the Organizer of the Session "Heat Transfer in Semiconductor Processing"	
..... Wataru NAKAYAMA (Hitachi, Ltd.) .....	43
(17) The Review of Organized Session 「Heat Transfer in Reciprocating Engines」	
..... Kenji FUJIKAKE (Toyota CRD.) .....	45
(18) Numerical Calculation and Their Boundary Conditions of Heat and Mass Transfer	
..... Susumu KOTAKE (Univ. of Tokyo) .....	47
 < Report on the International Forum >	
Perestrojka and First Minsk International Heat and Mass Transfer Forum	
..... Ryozo ECHIGO (Tokyo Inst. of Technology) .....	50
 < Topics >	
Heat Transfer on a Surface of Dropwise-Filmwise Coexisting Condensation	
..... Satoshi KUMAGAYA (Tohoku Univ.) .....	53
Simple Measuring Method to Temperature Dependent Thermal Diffusivity	
..... Yuji SANO, Hiromoto USUI, Syuichi YAMAMOTO and Hirohide OKAZAKI (Yamaguchi Univ.) .....	60
 < Engineering Contributions >	
Heat Transfer of Closely-Spaced Tube Bank	
..... Shinya AIBA (Akita Technical Coll.) .....	70

A Note on Fouling of Heat Transfer Equipment	
..... Terukazu OTA (Tohoku Univ.) .....	89
Transport Phenomena in Variable-Density Turbulent Flows	
..... Toshimi TAKAGI and Shuichiro HIRAI (Osaka Univ.).....	101
< Report on the Local Group Activities > .....	108
< Postscript by the Editor > .....	113
< Announcement > .....	115

## 第27期 会長就任にあたって

平田 賢 (東大)

栄光の歴史を刻みつつある日本伝熱研究会の第27期会長に御推挙を頂き、無上の光栄であると同時に、責任の重大さに身の引き締まる思いである。幸いにも、副会長の藤掛賢司氏は、(株)豊田中央研究所での御研究業績を通じ、かねて尊敬申し上げていた方で、企業の立場から日本伝熱研究会に対する貴重な御意見を頂けるものと期待している。また会の運営に関しては、有能なる越後亮三副会長をはじめ、多数の地方連絡幹事、幹事の方々の御協力が得られるので、あとは会の前進に向けて最善の努力を重ねるのみである。

昭和63年2月、甲藤好郎先生を委員長とする委員会から、「伝熱研究会将来問題に関する答申」が提出された(伝熱研究 Vol.27, No.105, p1-5)。答申書の骨子は既に着手されたものを除いて、

- 1) 地方活動の活発化とそのための財政措置
- 2) シンポジウムと講習会、展示会などの併設、論文分類の工夫、組織委の簡素化
- 3) 伝熱セミナーの地方活動への組み込み、複数化
- 4) 小規模国際会議の企画奨励
- 5) 維持会員の増強
- 6) 幹事会旅費の節減、幹事構成の再検討

などに要約されようが、今期のうちに具体化できるものはしておきたい。

ところで、図1は東大の例で恐縮であるが、機械系学生(大学院を含め)の就職先の変遷である。ソフト化が顕著に認められる。この様な状況に対する対応は意見の分か



れるところであろうが、この様な時代にこそ、不動の信念を以て、基礎研究に打ち込むべきであると私は考えている。

辞書によれば、「熱」の字は、灬(火)が意符、執(ゲイ転じてゼツ)が音符で、藝、勢という字もあるようにわざ、はたらき、いきおいを表わすとある。これを合わせた熱の字は、つまり“火のいきおい”を意味することとなる。また、温度の温は、サンズイの水が意符、皿が音符で、皿の上に煮たものを盛ることから、あたたかい意に用いるとある。温故知新などとも用いられるように、もとをただす意味を含み、水の流れと同じように、熱の流れのポテンシャルを意味したものと解すれば、中国の昔の人々は、熱と温度の本質を既に理解していたといえよう。

日本人はよく熱と温度をごっちゃにする。小さい頃から体温の高いことを、「熱がある」と教えられてきたことに起因しようが、「動力の発生を伴わない、熱素のつりあいの回復(熱の高温熱源から低温熱源への移動)は、正味の損失と見なさなければならぬ(広重徹訳)」と唱えたカルノーの主張(1824)を、もう一度じっくりとかみしめながら、原理・原則に忠実に基礎研究を推進して行くのではないか。

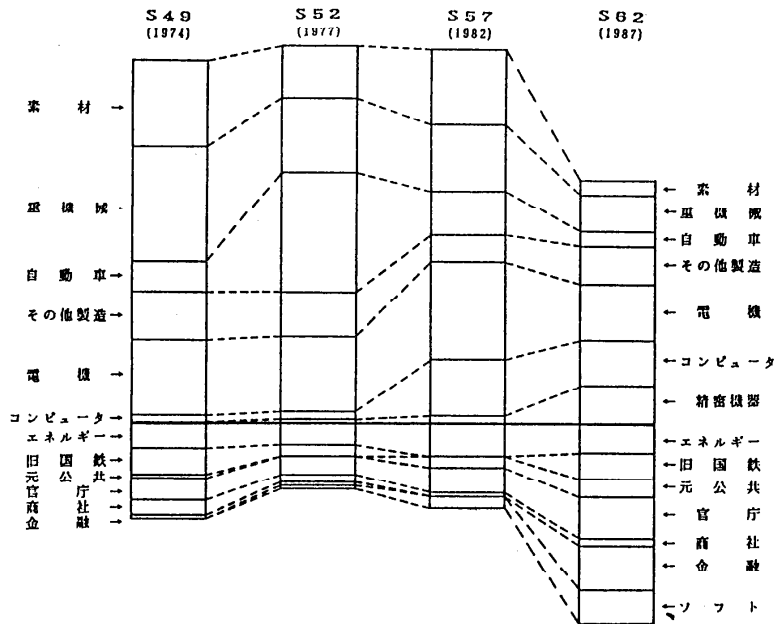


図1 東大機械系二学科学生の就職先変化(昭49-昭62)

## 会長退任の挨拶

大谷 茂盛

第26期の会長をおおせつかって一年がたち、今、その任期を終えて、ご協力をいただいた会員各位に感謝の念で一杯です。とくに石黒副会長、越後事務担当副会長をはじめ、地方連絡幹事、幹事および各委員長の方々のご助力に対しまして心からお礼を申し上げます。

同じ伝熱工学の研究を志す士の集まりとして、わが国最大且つ最高の集団である日本伝熱研究会は発足して四半世紀が過ぎました。発足当時は高度成長期の真ただ中であり、その後二度にわたるオイルショックの試練を経て、今や21世紀に向けて新たな展開が求められております。

このときに当り、本会は甲藤先生を委員長とする将来問題検討委員会において、本会の今後のあり方について種々ご検討され、ここに答申をいただくことが出来ました。本年2月の第4回幹事会には、甲藤先生、幹事役の小竹先生にご出席をいただき、委員会発足の主旨と運営方針ならびに答申の要点について説明をうけました。

答申の内容につきましては、本誌「伝熱研究」Vol.27, No.105に掲載されておりますので、ご覧いただきたく存じますが、その中の一つに、伝熱研究の地方活動の活性化があげられております。具体案の一例としてはセミナーは地方単位で行うのがよく、あるいはいくつかの地域が合同主催することもすすめられております。したがって、従来規模の年1回開催のセミナーは、九大の伊藤先生を準備委員長とする第22回の夏季セミナーをもって幕を閉じるということになります。その他にいくつかの提案がありますが、次期幹事会ではこの答申の主旨に沿って着実に運営されて行かれることを期待いたしております。ここにあらためてこの一年間の将来問題検討委員会の方々のご尽力に厚くお礼を申し上げます。

さて、次期会長には、本会の事情に精通され智勇兼備の実力者・東大の平田先生をお迎えすることが出来ました。私は安心して後事をたくして去ることが出来ます。なお副会長以下の役員に、これまたすばらしき方々をお迎えすることが出来ました。会員の皆様にも倍旧のご協力をお願い申し上げます。退任のご挨拶といたします。

————— 本研究会の輝かしき発展を祈りつつ —————

## 第25回日本伝熱シンポジウムを終えて

準備委員長 林 男二郎（金沢大学）

6月1日から3日間にわたり、第25回日本伝熱シンポジウムが金沢で開催されました。あいにくの梅雨空でしたが、盛会裡に終了いたしましたこと、関係者一同厚くお礼申し上げます。

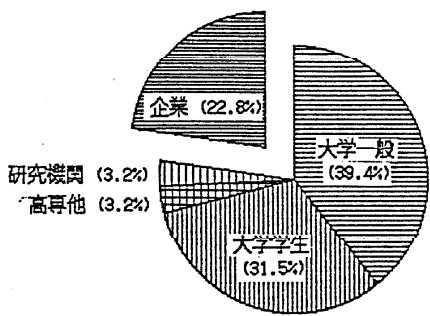
講演総数（展望・レビューを含む）296件、参加登録者745名、懇親会出席者277名の集計を得ていますが、これらの数字は当初の予想をはるかに上回るものです。また、次頁に構成内訳を示しましたが、企業からと学生の参加が大幅に増えたこと、事前申込の制度が徹底したこと、OHPの利用が意外と多かったことなどが目立った特徴のようです。詳細はさらに分析中ですが、今回の結果をもって伝熱シンポジウムの流れが変わったとみるべきか、単なる一過性の現象と捉えるかは難しいところです。ただ、講演テーマの内容や参加者層の内訳を見る限り、伝熱研究に関連する技術が多様化・高度化してきていること、そして大学・研究機関・企業にあつては様々なmotive (driving) forceのもとで、新しい伝熱研究が進められ、一方では従来の研究が見直されているようであり、そういった意味では4半世紀の歴史を持つ伝熱シンポジウムも一つの転換期にあると言えそうです。

ご存知のように、今回のシンポジウムではこれまでのやり方を少し変えております。オーガナイズド方式の特別セッション、パネルディスカッション、OHP方式、複数座長制、目次における各室プログラムの並列化、前刷集の分冊化などですが、これらは最近の学協会講演会の趨勢に合わせたもの、あるいは過渡処置として従来方式と併用したのですが、企画・立案にあたっては伝熱シンポジウムの継続性と伝熱研究会の行政的連続性を基本としていることは言うまでもありません。OHP方式につられてスライドに関する一連の作業を講演者任せとし、講演会進行の円滑化のために複数座長制を採る格好となりましたが、会員のボランティアによる積極的な参加と研究会運営の合理化を基本思想としている本研究会としては、まさに原点に立ち帰るものかも知れません。また、特別セッションでは、宇宙、レシプロエンジン、半導体など“技術”や“物”に絡んだ企業先行型のテーマを組みました。これは大学中心になりがちなシンポジウム、学問分類型の従来のセッションだけでは固定的になりがちな伝熱研究、そういったものからの脱皮を意図したもので、伝熱研究会の将来検討委員会の答申に沿うものです。

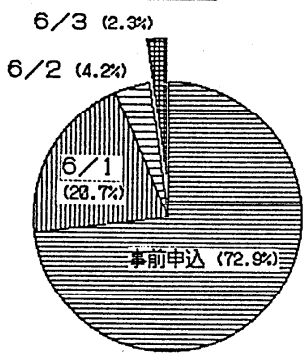
間口を広げてしっかりと張られた学問分類型のセッションを縦系に、先端的・先導的な技術に関わるセッションの緯系を織り込むとき、さらなる伝熱研究の発展があらうし、確たる伝熱工学の布地が出来上がるような気がいたします。伝熱シンポジウムがそのような産学共同の場となることを期待し、次期、仙台での盛会を祈り上げます。最後に、助言をいただいた愛媛大学の二神先生、水上先生、お世話いただいた伝熱研究会事務局の皆さんに御礼申し上げます。

参加申込状況

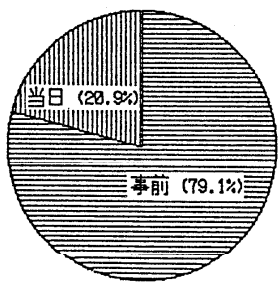
講演会参加（大学・企業別）



講演会参加申込（計 745）

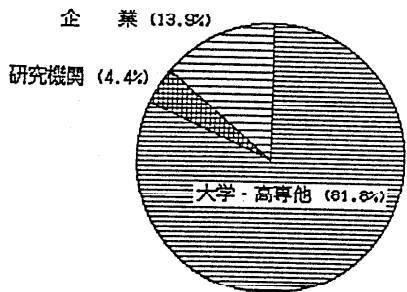


懇親会参加申込（計 277）

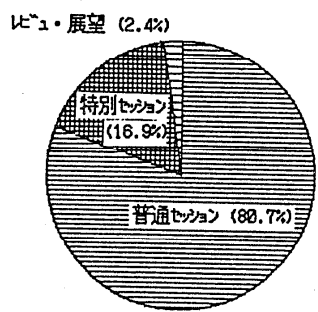


講演発表（計 296 件）

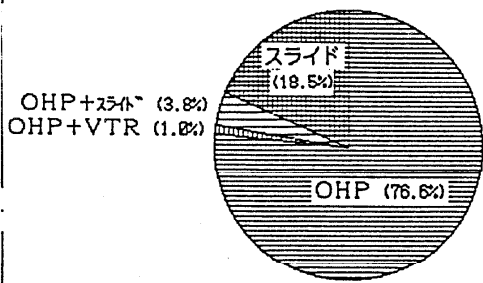
大学・企業別



セッション別



発表方式別



## 伝熱シンポにオーガナイズド方式を

平田 哲夫（信州大）

編集委員長より「強制対流」に関してのレビューを書くように依頼されたが、私、「強制対流」とは研究分野がいささか異なるため、特集号担当の玉木先生にお許しを得て伝熱シンポ雑感を書かせて戴くこととした。

今回の伝熱シンポは従来より改善された点がいくつかあった。講演論文集は二冊に分割され、また、目次が見やすくなった。講演発表ではOHP主体の発表形式が取り入れられ、煩わしいスライドの作成から開放されたことは大変喜ばしいことで、これらのことは今後ぜひ引き継いで戴きたいと思う。この伝熱シンポの目玉は何といてもやはり、オーガナイズド方式のB室の特別セッションであったと思う。テーマがいずれも先端技術に関わる将来の伝熱問題であったことから、企業の方々の参加も多くB室はつねに満席の状態であった。林勇二郎準備委員長の懇親会での「明日（最終日）は市内観光でもされたら……」というサジェッションも全く効果無く、朝少し出遅れた私はB室より締め出されてしまった。

私は今後の伝熱シンポにオーガナイズド方式の要素をもっと取り入れるべきだと思う。現行では、普通セッションに申し込まれた論文は、準備委員会がその内容を判断して、強制対流など13種類のセッションに分類しプログラムを作成している。論文内容によっては複数のセッションにまたがるものもあるので、ややもすると著者が希望するセッションとは別のセッションに組み込まれることもあり、準備委員会が苦勞する点でもあると思う。ちなみに、今回私に「強制対流」のレビュー依頼が来たのもこのような訳であると考えている。これらのことは、オーガナイズド方式と同様にどのセッションでの発表を希望するかを、講演募集時に予め申告して戴くことにより改善されるのではなかろうか。同時にプログラム編成もかなり楽になると思うし、オーガナイズドセッションのテーマを選定することにより準備委員会としての特色を出すこともできる。

話は変わるが今回の伝熱シンポの盛会と熱心さには正直言って驚いた。昨年の松山は所用により欠席したので、一昨年の札幌での印象が残っている……私の発表は最終日であったこともあり会場には僅か数人しか居ないような状態であった。それに比べ金沢では最終日の午後でも各室とも50名以上の参加者がいた。恐らく若い年代層の台頭がこの伝熱シンポをさらなる隆盛の方向へ転換させているものと憶測している。

## 第25回日本伝熱シンポジウムに参加して

馬場 弘 (北見工大)

私が伝熱シンポジウムに参加(見学?)したのは、昭和44年第6回大会が札幌市で開催された時で、あれから早くも20年が経過したことになる。当時は大学を卒業したばかりで何もわからず、いずれの発表にも厳しい質問のやりとりがあり、半ば恐怖心に近い強い印象を受けたことを記憶している。その後仙台、名古屋、福岡など全国の主要都市で開催される度に各地の珍しい風土とその歴史に触れることが出来たのは伝熱シンポジウムに参加することの大きな余録と感謝している。同時に全国の一線で活躍されている諸先生方とお会い出来ることは大きなよこびである。

金沢は私にとって初めて訪れた地で兼六公園から続く緑したたる素晴らしい環境に建つ厚生年金会館は広く、設備も整っており実に立派な会場であった。第1日目の午後会場に着きE室のセッションを聴講した。いつものことながら伝熱シンポジウム特有の活発な質疑応答は実に多くのことを気付かせてくれる。それだけに終了後には一種の快い疲労感が残る。セッション終了後、会場を抜け出し兼六公園を見物した。会場を出るときから少し雨が降っていたが、園内で雨足が強まり傘を買うはめになってしまった。雨の水辺に咲くカキツバタの紫色と周囲の木々の新緑に心をなごませ加賀百万石の歴史を偲ぶ。

2日目のパネルディスカッション「次世代技術と伝達研究」では企業側のニーズと大学側の研究テーマが話題となったが、大学の研究者も何らかの形で企業の生産現場に生じる問題を体験したり、かかわりを持つようにした方が良いのではないかと考えている。

3日目は放射のセッションで8時30分から発表が始まるので時間に余裕をもって宿を出た心算が、折悪しくの雨で乗り合わせにタクシーは渋滞で停止している方が長い。私の様に北辺の地に生活している者にとって考えられないことだ。何気なく運転手に「混みますね。」と言ったら雨の日は混むとのこと。「8時20分につきたい。」と言うとこのままでは無理とのこと、目の前が真っ暗になり平静を保つよう努めてきた精神の安定は瞬時にして失われた。その後、彼の勇敢なハンドル裁きで渋滞道路を避け、やっとの思いで会場にたどり着いた。講演発表、質疑応答もどうやら終わり、ホットする間もなく、次のセッションの副座長をK先生のもとで手伝わせていただいた。初めての経験で非常に緊張したが、K先生を始め会場にお集まりの諸先生方の活発な御討論のお陰で大過なく勤めを終えることが出来たことに感謝している。放射散乱問題ではサイズパラメータが大きく、濃度が高くなった場合の問題など貴重な討論を興味深く聴かせていただいた。今回のシンポジウムは座長という新しい体験をして大きな満足感を抱いて帰北した。

最後に第25回伝熱シンポジウム開催にご尽力下さった準備委員の諸先生方に心からお礼を申し上げます。

## 伝熱シンポジウム雑感

加藤 泰生 (山口大工)

今年もまた新緑薫る伝熱シンポの季節がきた。会場には毎回、活気が溢れアカデミックな雰囲気漂う。これがたまらない。私自身、例年この伝熱シンポには期待と不安を抱きながら参加させていただいている。また旧知の人たちと会えるのもこの機会がもつとも都合の良いものである。今回は、私にとって二回目の金沢の地、早いもので前の金沢駅横のホリデイインでのシンポから8年が経つ。その時は、まだ学生の身でありまた学会講演という緊張の中にいたせいかシンポジウムの印象はまったくと言っていい程なくそのあとの立山・黒部アルペンルートを廻って帰福したことのほうがいまだに強烈な印象を残している。

さて、今回のシンポで2、3印象に残ったことを書いてみると・・・・・・・・

1日目午後のオーガナイズド形式の“宇宙環境利用の伝熱”は私にとって未知の課題であり、見知らぬ恋人と会うような淡い期待を抱いていた。したがって時間に少々遅れて会場が満員にもかかわらず強引に潜り込み、後方で1クールほどは、立つて拝聴した。昨年の“熱交換器”のセッション以来であった。その後は席を見つけて最後まで頑張った。かなりの熱気が感じられ期待は裏切られなかった。内容にもオーガナイザーの工夫が凝らされ耳新しい感じがしてとても exciting であった。今回のものが“宇宙 即 ロマン”とは必ずしもいいがたいが工学的興味の尽きないテーマを拝聴できて元がとれた(?)のような得した気分であった。

3日目のやはりオーガナイズド形式の“数値計算と境界条件”。この場合はいわゆる数値計算における境界条件の与え方について計算のオウソリティの立場から種々の例を示され興味深く拝聴した。ただ惜しむらくは、オーガナイザーの意図(討論は境界条件に限るという)が拘束力となり時として討論が空回りだったのは残念だった。最後の森先生と土方先生の物理的意味を持つ境界条件の与え方に関するやり取りは面白く聞いた。

私のような浅学の徒には細かい話しより充分な討論、苦勞談、失敗談の方が大いに役立つ。その点では活発な討論程楽しくなる。またこれがシンポの真骨頂であろうかと思う。この3年程は大変まじめに、というよりも研究意欲をかき立てるにすばらしい伝熱シンポから少しでもその雰囲気を取り込みたいという欲張りの精神から最終日の講演まで聞く癖(?)がついてしまった。そして、さまって帰途の徒れづれに“さあ!頑張るぞ”と思うのである。

最後に、今回の伝熱シンポ開催のため多大の時間と労力を注ぎ素晴らしい会場と運営を企られた準備委員会の諸先生方に心より感謝致します。



## 第25回日本伝熱シンポジウムに参加して

平井秀一郎（阪大工）

講演用OHPを直前に用意して金沢行き特急雷鳥に飛び乗り会場の厚生年金ホールの裏手にある宿舎に到着したのは前日の夜8時ごろでした。準備不足のために、いささか不安な夜を過ごしましたが第1日目の強制対流、午後のセッションでの自分の講演、討論をなんとか無事に乗り切りました。伝熱シンポジウムに参加するのはまだ私が大学院M2のとき第20回の福岡で行われたときから通算6回目です。毎年講演を行ってまいりましたが、のんびりやで直前にならないと講演の用意をしないための準備不足と著名な先生方に自分の講演を来ていただくときのピーンと張り詰めた空気に緊張いたします。しかしこの空気を体感することが来年へ向けての気力と活力を生む要素の1つになっている気がします。

また、これも毎回思うことですが、講演時間10分の間に、この1年間の成果を手際よくまとめて迫力あるように喋るには、私自身事前にもっと時間をさいて準備する必要があると反省いたします。講演の上手な先生のを聞いていますと、人を魅きつけるものがあります。私自身もっと努力しなければと感じます。

さて今回の伝熱シンポではオーガナイズセッションが多数設けられました。私が聞かせて頂いたものの一つに、2日目B室の”半導体製造における伝熱”がありました。日頃余り話を聞く機会を持たない分野のために、私自身分りにくい面が少しあったのですが、先端技術の半導体の分野で伝熱がどの様に問題になるかについてオーガナイザの進行で数多くの講演を集中して聞かせて頂き大変よい勉強をさせて頂きました。今後こういった分野の研究者にも参加を呼びかけて幅広い視野にたった伝熱問題についてオーガナイズセッション等を積極的に進めれば、その講演者にとっても有益でしょうし、また伝熱シンポそのものも益々発展すると思います。

終わりにになりましたが、本シンポジウムの準備と運営にあたられました諸先生ならびに関係者の方々に心から感謝申し上げます。

## 第25回日本伝熱シンポジウムにおける各分野のレビュー

編集委員会

昭和63年6月1日～3日に第25回日本伝熱シンポジウムが金沢市の石川厚生年金会館で開催され、盛会の中に終了した。この盛会は、準備委員長金沢大学林勇二郎先生を始めとするシンポジウム事務局の先生方によるご尽力の賜物であり、特に今回は、オーガナイズド方式の特別セッションとパネルディスカッションが企画の中に加わったことも参加者が多かった要素といえよう。恒例のことながら、日本伝熱シンポジウムは日本伝熱研究会の年間最大行事であるとともに、わが国における伝熱研究の動向を見定める重要な学術研究発表の場である。今回のシンポジウム参加者数は、林先生の記事にあるように、745名に達した。この数は、昭和63年3月現在の学生員を含めた個人会員数1,100名と対比すると、参加者全員が会員でないことを割引いても、他の学会には見られない高い割合を示し、この会議の特徴を表している。とは言え、都合で参加できなかった方や、会場が5室となって望んでいた講演を聴講できなかった方々がおられるので、会誌で普通講演と特別セッションをレビューとしてまとめ、それに加えシンポジウムの雰囲気をお届けすることを考えた。

前年度からの方針として、各分野のレビューをその方面の専門の方々に原稿執筆をお願いした。普通講演のレビューについては、執筆者として、林準備委員長のご示唆もあって、座長を務められた若手の研究者をお願いした。各講演の内容は講演論文集に記載されているので、発表の紹介は簡単に済ませ、それよりも本シンポジウムの特色である討論とその雰囲気の記事を主にさせていただいている。この点が前年と多少異なる、と感じられよう。執筆者は、若手とはいえそれぞれ第一線で活躍され、これからの日本伝熱研究会を担われる方々であり、その辺の識見がレビューと感想に含まれていることを記述から読み取られたい。特別セッションのレビューについては、オーガナイザを務められた5名の先生に紹介をご依頼した。このセッションは、未来技術を伝熱工学の分野からアプローチした論議であり、その開発には学術面と実用面とを結びつける必要性を有し、講演論文集に記載されていない講演もあって、記事にはそれらをも含めていただいた。各テーマ共、会場は聴講者で入りきれない程の盛況であり、入室できなかった方でも、この記事でご理解いただければ幸である。

例年のことながら、6月始めに開催されたシンポジウムを7月に発行する会誌に記事を掲載するという制約から、原稿締切までの期間が短く、その上、編集委員の交替時期とも重なるという条件にもかかわらず、各執筆者からはご快諾を得るとともに、大変なご協力をいただいたことを報告する。紙上を借りてお礼申し上げる。

## 二相流セッションの概要と感想

波江 貞弘(船舶技研)

二相流セッション に関してコメントを書くようにとの編集委員会からの依頼があった。レビューではなく感想でよいとのことでしたので概要の説明と若干感じたことを記して責任を果たしたい。

二相流分野に関しては、混相流学会主催のシンポジウムが本年二回実施あるいは予定されていることから、発表論文数への影響があらうと予想されたが、結果的には23編と一昨年(20編)、昨年(21編)とほぼ同数の発表がなされた。内容的には極めて多様であるが、全体の傾向を見るために、あえて分類すれば、

- |                       |     |               |      |
|-----------------------|-----|---------------|------|
| (1) ボイド率、様式遷移及び相分布    | 6件、 | (2) 圧力損失      | 1件、  |
| (3) 液膜流のゲイミックス及び液膜流伝熱 | 5件、 | (4) 逆環状流      | 1件、  |
| (5) 二相乱流、固気二相流及び粒子計測  | 5件、 | (6) 二相不安定、動特性 | 2件、  |
| (7) ノズル内及び臨界二相流       | 3件  |               | となる。 |

この分類に従ってそれぞれの内容を概説するとつぎの通りである。

(1) ボイド率に関しては、気泡流の入口混合条件や界面活性剤の有無によって、気泡径や分布が変化することから、その乱流特性や二次流れを計測した研究(A232)や、原子炉に関連してロッドバンドル内のボイド率の平均値や分布をX線スクリーンで計測し、特にスラッシュ直下での影響を調べた研究(A233)、また、冷却材喪失事故に関連して大口径水平管内の液相分布を求めた研究があり、層状流からスラグ流への遷移条件についてもふれている(A333)。さらに、非定常ボイド率を扱ったものとして、緊急炉心冷却時のサブクール液中への蒸気の凝縮現象を画像処理法で取り扱った研究(A236)があった。

そのほか、相速度や相分布に関して、蒸気発生装置の高乾き度域におけるエンテインメントの抑制を目的とするリフ付管内の環状噴霧流の研究(A332)ならびに垂直管内の静止水中における気泡群の上昇速度の研究(A231)などが報告された。

(2) 圧力損失を扱ったものとしては、ヒートポンプ、冷凍機を対象とする非共沸混合媒体の凝縮ならびに沸騰時の圧力損失をマルチパラメータで整理した研究(A325)が報告された。

ボイド率や様式遷移、相速度、相分布ならびに圧力損失に関する研究は二相流研究の中でも古くから実施され、基本的なデータの収集あるいは解析は一応整理された状況にあると思われる。従って、上記の研究の全体的な傾向としては、新たな計測手法を取り入れることによって従来得られなかったデータの収集、データの精密化や流れの微細構造の検討あるいはロッドバンドル、スラッシュ部、大口径管、非定常凝縮時、混合冷媒、特定目的といった特殊形状、特殊条件下を対象とする研究や現実の問題に近い状況での研究が多くなっていると言えよう。

(3) 液膜流のゲイミックスに関しては、自由表面の境界条件を精度良く与える方法を取り入れた数値シ

レーションによる表面形状の解析(A322)ならびにシャドウグラフとレーザ干渉法による流下液膜の表面形状の計測(A321)について報告がなされた。これらのテーマはここ数年研究が比較的盛んに行われており、討論も活発であったが、その討論にもあったように、解析手法間や実測結果との間の比較検討あるいは実機との対応が今後に残された課題と思われる。

一方、液膜流伝熱に関しては、狭い流路内を気泡が通過する際、気泡に取り残される液膜を介した伝熱に関する研究(A234, A235)があり、顕熱輸送効果による寄与分に注目した実験と解析が報告された。また、磁場下におけるNaK-窒素系の環状流、環状噴霧流域における熱伝達特性の実験的研究(A336)が報告された。前者は、薄液膜内の非定常熱伝導が支配する現象である。後者は、液膜流に一定方向に磁場を掛けた際の作用力が問題となり、伝熱の非対称現象を含め興味深く感じられた。(4) 逆環状流に関しては、ナノスケール強制対流膜沸騰に及ぼす流路径の影響の研究(A304)が報告された。気液界面の流動と伝熱のモデル化に必要なデータとして管径を変化させた場合の壁面熱伝達率、摩擦損失、蒸気膜厚さを整理しており、管径が細くなった場合の主流の液相の状況がどのようなものか興味を持たれた。

(5) 二相乱流に関しては、粒子が相互作用する気相の速度を確率的に与えて分散相の運動軌跡を求める手法(ストカスティックモデル)と壁面反発を組み合わせたモデルによる管内固気二相流の熱伝達、圧力損失の解析(A313)ならびに分散相による気流乱れの抑制効果に注目し、せん断流内での乱れ計測を行った研究(A314)が報告された。また、平板上の噴霧二相乱流境界層の流動と伝熱の研究(A316)では液滴蒸発による伝熱促進量から壁面への液滴付着量の傾向を求めているが、従来環状噴霧流で得られている液滴伝達の傾向と類似の結果が報告され興味深いものであった。

固気あるいは噴霧二相流は現象が極めて複雑な上、計測手法が確立されているとは言えない。この点から、ドップラ位相法による速度と粒子径の同時測定に関する研究(A311)は意義あるものと思われる。対象が光透過性の粒子に限られるが、信号劣化や雑音(観察窓の汚れ、壁面付近、高濃度)に強いとのことであり、各分野への応用が期待される。最後に、衝突噴流における粒子-壁面接触時の非定常熱伝導による伝熱促進への寄与の評価研究(A315)が報告された。粒子の物性や粒径を考慮した非定常熱伝導の解析は、流動層熱交換器における伝熱などの実用面からも必要であろう。

(6) 二相不安定、動特性に関しては、液体窒素蒸発器における核沸騰及び膜沸騰の二つの伝熱形態での密度波振動形不安定を対象とした線形安定解析(A323)及びコージェネ用排ガスボイラを想定した自然循環ボイラの水位と液滴飛沫高さの蒸気流量弁ステップ変化時などに対する応答特性の研究(A324)が報告された。

(7) ノズル及び微細流路内二相流に関しては、各種機器での漏れの予測を対象とした細隙内の臨界二相流の研究(A335)と熱水タービン用ノズル内の液滴速度の研究(A312)が報告された。前者では、平滑矩形流路とラビリンス流路について臨界流量の実験と解析がなされた。後者では、ラビリンス内の気液相対速度がノズル効率に大きく影響することから、その計測と解析がなされている。後者は、バルブ水車との組合せによるトータルシステムを想定した研究であり、このバルブ水車を含めた二相流エネルギー変換性能の研究(A326)が報告された。

藤井雅雄（三菱電機）

何らかの伝熱現象が行なわれている系を包み込む器が熱交換器であると考え、全ての伝熱に関連する実験系は熱交換器といえる。研究者の視点によって、熱交換器は他のセッションにも振り分けられるが、私のように企業にいて様々の伝熱形態を物として具体化する立場にあると、伝熱シンポジウムで発表される内容は全て熱交換器あるいは、その一部にみえてくる。

シンポジウムの全内容を熱交換器の視点からレビューすることは、紙数の都合でできないことから、ここでは私の興味のままに熱交換器セッションでの講演内容について概観してみたい。

#### (1) 空気熱交換器

小形・高性能化を目的として、主に前縁効果を利用したルーバーフィン、メッシュフィン、針状フィンなどのフィンパターンの研究が行なわれている。フィンパターンは益々微細化され代表寸法を小さくしてその熱伝達率を増加させようという傾向にあり、製造方法とあわせてメーカーサイドでコンパクト化の追求が積極的に行なわれている様子がうかがえる。フィンパターンの幾何形状の伝熱特性への影響が数値解析でかなりの程度まで予測されるようになってきたが、斜めフィンでは現実には熱交換器コア壁に衝突することなどが考えられ、今後更に実用に則した研究が望まれる。

波状流路内に生じる2次流れの詳細な実験結果の報告は、それを応用した熱交換器の設計において有用で、伝熱促進との関連が今後明らかにされることが望まれる。

環状2平板間放射状流れ、多孔台形フィンなど従来の伝熱メカニズムとは異なる伝熱促進法の報告もあり、非定常伝熱特性迅速測定システムなどその評価法の開発とあわせて、今後とも新しい伝熱促進法の提案を期待したい。

空気中に微少液滴を混入させた噴霧気流冷却についても報告があった。薄い液膜を如何に伝熱面上に形成するか注力されるとともに、その伝熱性能の簡易予測法と最適設計法の確立がめざされ、実用性をめざした研究として評価できる。

他に、セラミック多孔筒を挿入し、熱効率を向上させたエコノマイザの報告もあった。

#### (2) ヒートパイプ

宇宙用、地上用として、その応用範囲は極めて広くなりつつある。実用性の高い金網ウィックヒートパイプについてその最大熱輸送量に及ぼすメッシュ数、蒸発部長さ、有効細孔半径が検討され、設計精度の向上がはかられている。また、実用性をめざして、1本のヒートパイプ上に存在する複数の熱源の配置と最大熱輸送量の関係が研究されている。

新しいヒートパイプとして、 $\text{SO}_2/\text{SO}_3$ 系可逆反応を用いたもの、流体振動を用いたもの  
伝熱研究 Vol. 27, No. 106

が報告された。前者は熱輸送経路からの熱損失を抑える方法として有望で今後の展開が期待される。後者はドリームパイプといわれるもので、その簡易特性評価式が提案された。

### (3) 蓄熱

蓄熱効果の増大を目的として、氷蓄熱槽での複数製水管周りの伝熱特性と対流パターンとの関係が、またソーラーエアーヒータの潜熱蓄熱材の光学的特性をグラファイト微粒子で変化させる方法が報告された。

蓄熱性能の予測については、PCMの潜熱蓄熱について解析が、複数連結水槽について半経験式が、クロズドサイクルMHD発電における蓄熱形熱交換器の非定常伝熱解析が報告された。今後とも高性能化と精度の良い熱設計法の確立が望まれる。

### (4) 相変化

海洋温度差発電に用いられるプレート式の凝縮器と蒸発器の伝熱・流動損失特性がプレートの大きさの影響を中心に調べられた。また、海水淡水化もかねられるフラッシュ蒸発器の基礎実験結果が報告された。何れも実用性に重点をおいたもので、その高性能化が地道に進められていることがうかがえる。

積雪融雪について、水分浸透を考慮した準定常モデルによる簡易解析手法が示された。

### (5) ヒートポンプ

様々なヒートポンプの研究・開発がなされている。蒸気圧縮式ヒートポンプの作動流体に非共沸混合冷媒を用いた場合の沸騰・凝縮熱伝達の簡易式が提案され、各伝熱特性がサイクルの成績係数に大きく影響することが示された。また、簡単な解析により空気・水熱源における蒸発器、凝縮器の伝熱面積の最適割合が計算された。

$\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ 系の化学ヒートポンプの性能向上のために、固体反応層内に銅フィンを挿入する方法が提案され、その有効性が実証された。

シリカゲル/水蒸気系の吸着ヒートポンプの発・吸熱特性が調べられ、低温域での冷凍サイクルへの適用可能性が示された。

熱利用、水素利用の考えられる金属水素化物用インナーフィン付熱交換器の性能がフィン諸元を変えて報告された。

### (6) 腐食・汚れ

吸収復水式ランキンサイクルシステムを高性能化するには、LiBrの防食技術の開発が必要であることが報告された。また、湿式電気集塵機を用い、廃ガスの浄化と熱回収が同時に行なえるシステムが報告され、凝集剤の集塵効果が確かめられた。

熱交換器で生じるファウリング現象について $\text{CaCO}_3$ を用い結晶核の生成と成長過程について詳細な実験結果が報告された。また、管内面の汚れ係数の実用的な測定法が提案された。

腐食・汚れの問題は、実機では避けられない現象であるにもかかわらず、その機構が複雑で未だ普遍的な結論および有効な対策が十分にだされていない。高性能伝熱管の性能を十分に発揮させるためにも今後とも地道でかつ精力的な研究が望まれる。

## 蒸 発

岡 崎 健 (豊橋技科大)

「蒸発」では、1セッション、6件の研究発表が行われた。オーガナイズドセッション「直接接触熱交換」の中に蒸発の項目が設けられていたこともあって、本セッションでの発表件数は例年より少ない。6件の発表内容は、非常にハイレヴェーに富んでおり、最終日の最終のセッションのわりには活発な討論が行われた。以下、順に発表内容の紹介と寸評を述べてレビューとしたい。

B331は、含水砂層における蒸発伝熱に関する実験的研究で、静止空気中における含水砂層表面からの自然蒸発、および、含水砂層の通風蒸発実験結果について報告された。題目にあるような伝熱促進法については、今後の課題であろう。

B332は、一様流中におかれた円柱の抗力係数に及ぼす物質移動の影響に関する数値解析である。円柱表面より一様吹き出しのある場合について、円柱まわりの速度分布、圧力分布を計算し、摩擦抗力係数、圧力抗力係数を求め、これらに及ぼす吹き出し速度やレイノルズ数の影響を検討している。この問題は、蒸発中の燃料滴の周囲空気との混合過程とも関連する重要な問題であるとする。

B333は、折れ曲がり部を有する鉛直円柱の外壁を流下する液膜の、壁面からのはく離や再付着現象のメカニズムを、エネルギーの観点から統一的に解明しようとしており、非常に興味深い内容である。液膜のはく離は、速度エネルギーが壁面を乾かすのに必要なエネルギー値より大きくなった時に生じ、再付着は、速度エネルギーが壁面を濡らすのに必要なエネルギーより小さくなった時に生ずるとしてモデル化し、後退接触角、前進接触角を用いてうまく説明している。

B334は、傾斜平行平板式濡れ壁塔における、気流と液流との間の熱物質移動の解析である。気流内に循環流が現れない場での同著者らの既報の研究の発展として、今回は、循環流の影響の検討に重点を置いている。気流断面内の速度分布について、解析結果は測定結果を十分な精度で予測するには至っていないようで、今後の進展が望まれる。

B335は、金属表面に薄いセラミックス被覆層を設けると、これのない場合に比べて、はるかに広い範囲にわたって液粒の蒸発時間が短くなるという現象に関する興味深い研究で、現象論的には、膜沸騰伝熱における低熱伝導性被覆層の効果と良く似ている。いずれも、蒸気膜による熱抵抗層を破って、いかに固液の局所的な直接接触を保つかという点がポイントであろう。本研究では、特に、セラミックス被覆層表面の粗さの影響についての詳細な実験結果が報告された。

B336は、きわめて明確な応用目的をもった企業からの研究発表で、水のトランスピレーション冷却による防災ロボットの熱防御に関する研究である。800°C程度の外部雰囲気中でもロボット内部は60°C以下に保つという要請を、多孔質材や焼結繊維の非常に薄い層でのトランスピレーション冷却によりクリアできることを実験的に示すとともに、適正給水量についても整理している。このような応用目的の明確な、企業からの内容のある研究発表の増加が、伝熱シンポジウムの活性化にもつながるものと考えている。

## 自然対流のセッションにおいて

中山 顕 (静岡大工)

自然対流のセッションに於いては23件の講演があった。新企画である特別セッション中に自然対流関連のものが数件含まれてはいたが、例年30余りの自然対流に関する研究発表が行なわれることからして今年は若干少なめだった。発表も昨年丸二日がかりだったものが二日目の午後から一日半に短縮され(そのおかげと言ってはなんであるが)強制対流と自然対流が並行せずにプログラムが組まれており情報収集に都合が良かった。以下各セッションについて概略をご紹介したい。

第1セッションではまず下方加熱の立方体中の高プラントル数Newton流体の対流進化過程に関する興味深い数値実験結果(C231)また核消滅炉を想定したビーム加熱下の円筒容器内自然対流に関する解析及びパール粉と感温液晶カプセルスラリーを用いた流れと温度場の可視化実験(C232)が報告された。続く3件は多孔質体内流に関するもので多孔質体内の加熱角柱の実験と解析(C233)純流体層と多孔質層の界面条件に関する新提案とその検証並びに壁面間隙層が断熱性へ及ぼす効果の定量的評価(C234)そして多孔質層内の凍結に関する実験及び理論的研究(C235)が報告された。(尚、最近の英文論文誌に見る動向からして多孔質体内流に関する講演件数の増加を予期していたが、予想に反し今年の5件よりさらに2件少ない件数となった。)特にC235の発表に関連し連続体近似の妥当性が活発に議論された。数値計算より得られた界面形状はピーズ径がかなり大きいものにあっても実験とほぼ対応しておりこの種の近似が予想以上に有効であるという感を強くした。

翌日第2セッション冒頭の講演(C311)で報告された自然対流乱流境界層の多点温度測定及び二点速度温度測定データは特に注目に値する。組織的ストリーク構造の有無についてはさらなる議論を要するにしても乱流自然対流の構造が乱流強制対流のそれと極めて様相を異にすることは明らかな様である。統報に期待したい。続くC312の講演ではフィン列が溝に置かれた場合またC314の講演ではフィン上方に障害物が置かれた場合の放熱特性に関する継続的研究が紹介され新たに実用的成果が報告された。興味深い数値計算結果も種々報告され、有限鉛直平板間の自然対流では出口圧力が周囲流体のそれと等しくなるよう流路入口境界値を更新する新たな手法(C313)また移動界面を巧みに扱い対流をも考慮にいれたフィンチューブ回りの相変材の融解に関する解析(C316)も紹介された。さらにC315の講演においてはアイドリング時のエンジンをモデル化したフィン付き円筒の伝導・自然対流連成問題が取り扱われセラミック等の低熱伝導率を有する材質にあっては局所的に流体側からフィン側への熱移動(負の局所又セ



ルト数)が生じることが示された。

第3セッションでは流れ及び温度場の可視化の手法を駆使し得られた貴重なデータが公表され活発な討論、意見交換が行なわれた。C321及びC322の講演はいずれも下方加熱の自然対流に関するもので乱流自然対流のブルームの特性を感温液晶カプセルによる可視化像により広いプラントル数に亘り検討した結果(C321)また磁場下の液体金属の自然対流について水銀との相違を明かにすべく NaKを用いて行なった平行磁場下の水平平板自然対流熱伝達の測定結果(C322)が報告された。続くC323の研究においてもやはり液晶カプセルが用いられたが、カプセルを浮遊されることで温度と速度場の同時測定を可能にする手法が提案され水平環状流体層内自然対流に関し得られたデータと数値計算結果との比較がなされた。この種の手法では温度場が液晶の発色で可視化されるが、スライドで見せていただいた温度場のカラー写真が印象的であった。さらに水平正方形管路内の合成対流の研究(C324)では温度場の可視化法としてホログラフィ干渉法が採用され温度助走区間の測定に極めて有効であることが示された。C326の講演も合成対流場に関するもので加熱または冷却された楕円柱後方のカルマン渦列の崩壊を扱っている。複雑な非定常現象のシュミレーションを通し数値解析の威力を見せつけている。マランゴニ対流に関する講演も一件(C325)あり実験の細部に亘り活発な意見交換が行なわれた。回転場に於けるマランゴニ対流についてアルミ粉による流れの可視化及び液温変動の測定を行ない非軸対称流の発生限界条件を実験的に検討している。

三日目の最終セッションとあって若干参加者は少なめではあったが、第4セッションにおいても終始活発な議論が交わされた。C331の講演では高プラントル数流体を想定した開放形熱サイホンに関する数値解析結果が報告され干渉流から境界層流に至る寸法効果が議論された。続くC332からC335の4件の講演はいずれも自然循環流に関する研究である。C332では垂直円環型自然循環ループ内の水流についての実験データが紹介され既存の二次元理論と比較・検討した結果が示された。ある領域において数10分周期で流れが二種の状態を繰り返すといった長周期現象も報告され議論された。またC333は継続的研究であるが、船舶用PWRを想定した自然循環のモデル実験および解析コードによる計算結果が報告され、非一様に発熱する加熱チャネル内部の流動が新たに明かとなった。また高温ガス炉の一次冷却系配管破断事故時の初期段階に生ずると考えられる二成分気体の自然循環に着目した理論及び実験が2件報告された。まず基本的モデルとして逆U字管を想定し行なった一次元非定常解析結果と実験との良好な一致が示された(C334)。続報(C335)では炉心部を模擬した実験装置により調べた拡散支配下から自然循環流発生に至る空気侵入挙動が明らかにされた。セッション最後の講演(C336)では密閉形円管熱サイホン内の非定常三次元流動及び熱伝達に関する一連の数値実験結果が報告された。高レイリ数下において非定常的渦流が出現し流れが三次元性を呈する過程が巧みにシュミュレートされており、類似条件下における既存の実験結果との関連において活発に意見が交換された。実験的検証を期待したい。

2日目のパネルディスカッションで、日立の中山恒氏が企業の立場からみたシンポジウムにおける大学等の研究の特徴とシンポジウムへの期待について大よそ次のように述べられた。「ある問題（電子機器を例にあげられたが）を考えた時、大学等の研究は境界条件を仮定して解がどうなるかを出すものが多い。一方、企業の立場からすると、実際の問題の境界条件がどうなっているか、又は、ある境界条件を実現したりするのにどうしたらよいか、という点で常に苦労していて、大学側と問題意識にギャップがあり、その意味で直接役に立つ研究が少ない。企業側のシンポジウムへの努力も足りなかったが、大学側からもこの点を考えてほしい」というようなことであったと思う。

沸騰の場合、現象が複雑で関与するパラメータの数が多いので、境界条件というより実験条件と考えた方がよく、なるべく単純化した理想的条件での現象の解明（メカニズムの追求）を行おうとするのが大学側であり、実際に近い体系でのデータを得て設計等に使うのが企業側であると考えてよいだろう。伝熱研究におけるこの数年の沸騰のセッションのレビューの感想や意見もこの特徴を念頭に置いて行われたものが多い。昨年のレビューで京大の塩津氏はこれを基礎研究と応用研究という言葉で表現した。氏は伝熱シンポジウムでの発表論文の研究目的をはっきりさせる意味で、基礎研究が応用研究に徹することを提言している。しかし、中山氏のいうシンポジウムの活性化は、逆にこの中間を大学側と企業側とでうめる方向を示唆している。基礎研究側から応用へ向かおうとすると、どうしても条件が複雑になるのでパラメータの数が多くなり、現象を精度よく説明できにくくなる。さらに、論文という形式をとると、何を、どんな目的で行い何が得られたか、をストーリーとして書かなければならない。考察は問題点の羅列になり結論がぼけることになり易い。しかし、そこをのり越えて始めて沸騰もEngineering Scienceの1つとなり得るのだろう。

さて、沸騰セッションには36編の発表が行われた。大学を主とした研究が30件、企業・研究所を主とした研究が6件であって、まだまだ企業、研究所側の発表が少ないように思う。基礎研究と応用研究という立場から印象に残ったいくつかの発表について記してみよう。まず、大学と企業・研究所両者の発表があり、互いに議論が行われたものとして、膜沸騰の崩壊とリウエット現象に関するD132とD134がある。大学側はR-113を用いた銅ブロック内の円管流路であるのに対し、企業側の実験は沸騰水型原子炉の燃料棒と同じ寸法、同じ流動条件のものである。企業側から理解しがたい実験データの提示があり、大学側へコメントを求められた。いろいろな解釈ができると思われるが、この問題に関してはかなり基礎研究の蓄積が各大学の研究者にはあるはずであり、討論の時間内では無理としても何とかできるように感じた。もう一つ、原子炉の反応度事故に関するものがD221とD222で行われた。前者の大学側の研究は、この複雑な現象を何とかでき

るだけ単純な系に置きかえようとする努力がなされ、さらに論文としての形態を整えるべく解析モデルの提示が行われた。一方、研究所側は、実際の燃料を用い破損を生じさせる実験を行ったわけであるが、現象説明のため、実験条件や測定に工夫をこらしたものである。質疑の中にもあらわれたが、大学側としてはかなり実際を模擬する努力をしたにもかかわらず、まだ本質的な現象を十分模擬できていないと思われること、また研究所側の研究では、現象として定量的に十分には理解できない点が残されていること、などがあるように思えた。しかし、基礎と応用との間でのディスカッションは、聴衆にも有益なものであったと考える。

さて、企業側の研究は一般に、(厳しい討論が行われるという評判の)伝熱シンポジウムを意識してか、応用研究とはいえ、かなり、基礎的分野へふみ込んだ発表が多いように感じられた。まず、電子機器の冷却を想定したD213がある。微細なスリット構造伝熱面での発泡開始過熱度のオーバーシュート現象を調べようとしたもので大学の研究に近く、その分、実際とどう結び付くのか分かりにくかった。D215は、EHD効果を沸騰する熱交換器へ応用しようとするもので基本的メカニズムに入った検討が行われた。D126は、パルスジェットプリンタに関するものである。急激な過熱による気泡の発生、成長そして消滅を利用するこの方法が相当高い精度のものであることは、不規則度が大きいと考えていた大学側研究者には逆に驚きであるように思えた。

大学側で基礎から応用へ向かうことを目指す研究として、溶融金属と水との熱的相互作用を応用した急速凝固粒の作製(D226)がある。この熱的相互作用自体、まだ十分現象がわかっていないこともあり、中山氏のいう企業の通常行うtrial and errorで調べることに近い方法であった。発表者は基礎的現象についての経験がかなりあるので、大学側として十分期待できるのではないかと考える。集積回路のダイオードを発熱体として沸騰特性を調べたD216も、一步複雑な体系へふみ出したものと言える。

大学側では、応用から出発したD151から154の発表もあるが、多くは理想的条件又は、応用へ一步ふみ込んだ若干複雑な条件での現象の基本的メカニズムの研究であって、限界熱流束、遷移沸騰、膜沸騰、など相変わらずである。常連の西川兼康、一色尚次、そして最初のセッションを除いて甲藤好郎の各先生の顔が見られず、質問者も世代交代をした感じである。しかし、沸騰のメカニズムとなるとまだ完全とはいえず、もし上記先生方がおられたら、30年以上やってきた自分達の方がまだまだ現象をよく知っていると言われたことであろう。

ある企業の若手研究者から、「本当にフロンで相似則が成り立つと思いますか。上からは、いつまでも金のかかる実規模実験でやらないで、相似則を使って安くできないかと言われますけど」と話しかけられた。要求される精度と現象によると考えるが、上に記した基礎と応用のギャップの現状を考えると沸騰ではまだまだかなり限定されると思われる。一方、大学のある若手の先生からは「沸騰研究は終わったと思ったがまだまだ発表が多いですね」と言われた。その先生自身今回かなり新しい有力な論文を数編発表していた。どうも、沸騰現象は何人も研究者が一生かかっても解明できず数十年を費やしながら際限なく続いていく永遠のテーマのようだ。

## 流動層：流動層セッションの感想

工藤 一彦 (北大)

このセッションでは充填層および流動層の研究が5件あり、基礎から応用まで互いの関連が密でないままに広い範囲にわたっていて、沸騰研究の初期の頃のような感じがしたが、以下にまず1件毎の紹介と、独断の感想を述べさせていただき、そのあとで全体の傾向等について記したいと思う。

D 2 3 1の研究は、充填層内部の液流と粒子間の熱伝達率、内部にホールドアップされている液の量、および液体によって流れ方向に運ばれる熱と物質量を、インパルスの温度と濃度入力に対する系の応答から実験的に求め、液の充満時と非充満時でこれらが別の傾向を示すことを明かにしている。全体の熱伝達率というマクロ的な量を、いくつかのカテゴリに分割し、これらの間の割合を、モデル計算の結果と実験値の比較から決定しており、現象全体のイメージの把握に成功していると考えられる。ただし、実際の現象がそのとおりになっているかどうかは保証のかぎりではなく、今後粒子1個の回りの状態の検討を通じた物理的な考察が必要であろう。このような3相からなる複雑な問題は、マクロからミクロにわたるすべてのレベルでの抜けのない研究が、現象の理解と解明に不可欠で、以下のD 2 3 2以降の流動層の研究にこのような幅の広さが見られる。

D 2 3 2の研究は、流動層中に置かれた1本の伝熱管に対する流動層による伝熱促進効果のうち、粒子の非定常熱伝導効果を実験的に調べたものである。伝熱管回りの粒子の接触時間と頻度を光学的に測定し、これらから求められた熱伝達率と熱的な測定結果とを比較しており、流動層伝熱の物理的な現象解明の基礎として非常に興味深い研究である。粒子と伝熱管との接触時間及び頻度の測定に光学的な手段を用いているが、これは粒子の挙動の観察という面では有効であるが、定量的な測定という面ではサンプル数のせいか、若干ばらつきが大きく、今後より定量的なデータのとれる方法が望まれる。また、今後このような測定をもととし、伝熱管まわりの粒子の挙動のモデル化が進むことを期待したい。このためのモデルの作成のための手段としては、A 3 1 3, B 3 1 3のような、粒子の確率的な挙動解析法が有効であろうと考える。

D 2 3 3は、流動層のフリーボード域に置かれた管ピッチの異なる伝熱管群について、静止層高、空塔速度をパラメータとして、平均熱伝達率の実験式を求めている。D 2 3 2のような研究から導かれるであろうモデル化ができていない現状では、このような実験式も実用的な意味で有用であると思われるが、物理的イメージが明かでないこのような実験式は、実験データの範囲を越えて使用するには問題が出る可能性があり、その意味で、この式の一般性及び適用限界を今後明らかにしていく必要があると考える。

D 2 3 4は、浅層流動層における多列管群熱伝達率と圧損を、管配列形式、管列数、

ピッチ、静止層高をパラメータとして測定し、これらをポンプ動力と標準化した熱伝達率で整理している。この結果、熱伝達率に及ぼす各パラメータの定性的な影響を明かにしている。この研究では各パラメータを動かしたときの影響が、物理的な現象のイメージ（厳密に証明はしていないが）をもって考察されており、今後の浅層流動層の開発の際には、実験の回数を減少させるのに大いに役立つであろうと考える。

D 2 3 5 は、流動層型ごみ焼却炉の大型化にあたり、層高を一定にして径を大きくしたときの問題点を調べるために、層内の温度と酸素、ごみの分布を3次元でシミュレーションしたものである。流動層内の流動を鉛直方向の移動と水平方向の拡散で解いており、そのモデルの妥当性は今回の発表からだけでは不明であるが、1次元的な実験が多い中で、個々の現象のモデル化に少々大胆なところがあったとしても、3次元特性を解析的にモデル化することは大いに実用的価値があり、今後内蔵されている各モデルがリファインされていくことを期待する。

以上、今回の流動層のセッションでは、

(1) 各種形状の流動層全体の伝熱特性を調べ、これの定性的な傾向あるいは実験式化を進めるマクロ的実験的アプローチ、

(2) 流動層における伝熱現象をいくつかの素現象に分割し、それぞれの物理現象を観察し、これをモデル化するという基礎からのミクロ的実験的アプローチ、

(3) およびこれらをつなぎあわせて、全体の3次元モデルを作ろうとするマクロ的解析的アプローチ

の3つのアプローチが集まっており、流動層のような多相の複雑な現象の研究にたいするアプローチとしては、バランスのとれた状態ですすんでいると感じた。しかしながら、現状では全体として各アプローチが相互に重なり合うところまでは至っておらず、それぞれのアプローチにおける着実な進展を期待するものである。

## 放射伝熱のセッションを聴講して

工業技術院機械技術研究所

山田 幸生

放射に関しては三つのセッションが持たれ、計17の発表が行われた。最初のセッションは太陽熱利用や環境問題にかかわる放射伝熱が扱われ、2番目・3番目のセッションでは放射の物性値、放射伝熱を含んだ伝熱問題、および放射伝熱の解析法が扱われた。

太陽熱利用に関しては、太陽熱利用の有効性評価に際し、各地方における日射特性データが必要である。そのデータを取得し、さらに、実用機器としてのソーラーポンドの性能予測を行った「Birdの日射モデルに基づく波長帯別日射特性の検討」と「塩水の透過率および日射特性を考慮したソーラーポンドの性能解析」の一連の研究は評価されよう。ただ、日射データが晴天のみであり曇天も含んだソーラーポンドの結果をそれで予測できたのは気になることである。ソーラーポンドに関するもう一つの研究「ソーラーポンドの試作」については今後の長期的な試験に期待したい。

環境問題に関わる放射伝熱が3つの研究で扱われた。「フィールド測定による都市キャニオンにおける熱輸送の研究」は、都市で発生するヒートアイランドの微小要素についてその熱輸送特性を解明しており、これを多数の要素に積み上げるなどしてより広い領域への展開が期待される。「発電所などによる大規模排熱の放射冷却による宇宙放散の研究」は大規模排熱を直接宇宙空間に廃棄するという意味で環境問題解決への一つの提案と考えることができ、また、放射伝熱の面白い適用ではあるが、スカイラジエータの面積が大きいこと、そのふく射率が汚染等により劣化するなどが実用化の点で問題となろう。「植物群落内の熱水分収支のシミュレーションモデル」は都市空間内の植栽による熱環境調整について効果を予測しようとするものであるが、研究が始まったばかりであり、乱流モデルの適用などにも多少問題はあるが、研究テーマとしても面白く、今後の発展に期待したい。これらの研究は社会的問題として取り上げられる機運にある地球規模の環境汚染に対して、放射伝熱の研究者が今後、貢献できる分野であろう。

ふく射物性に関しては4編の研究が発表された。表面のふく射物性に関する「金属の実在表面におけるふく射の干渉と回折」は新しいモデル化の方法を提案している。モデルにはまだ不完全な点もあるが、結果はかなり実在表面の特性をシミュレートしており、一つの手法を示したものと評価される。古典的な問題であるCO<sub>2</sub>の全ふく射率を扱った「一般化最小自乗法を用いた二酸化炭素の全ふく射率の計算」はsum of gray gasモデルにより過去のデータを整理しており、実用的に有用かもしれない。「非均一な散乱・吸収媒体のみかけのふく射物性値」は、衣服等を対象としてふく射物性の見積り法を研究している。モンテカルロ法を用いて確率

的に計算しているが、他の解析法で近似的にでも計算できないであろうか。このような問題は確実に増加すると考えられるので今後の発展に期待したい。「充填層内の放射エネルギーの透過に及ぼす配列の規則性の影響」では、配列を2次元とすると正しい結果を与えないことが示されておりpositiveな成果ではなく、近々発表されるという3次元の結果に待ちたい。

ふく射を含む伝熱を扱った6編の研究の内、ただ一つの極低温に関する研究「極低温における熱ふく射II」では、表面のふく射率に関して以前の研究結果を実験的に再確認している。他の5編は高温でのふく射と対流の共存伝熱を対象としている。「任意のふく射率を持つ鉛直チャンネル内のふく射・自然対流共存伝熱」ではwide-band モデルを用いて非黒体面を含むふく射輸送を解析した点が評価できよう。また、「微粒子分散系の非灰色ふく射伝熱解析」は黒体と考えられる粒子と非灰色ガスが共存した解析であり、燃焼器中の現象解析の精密化に対し基礎を与えるかもしれない。多孔性固体ふく射変換体を用いた高温伝熱系の非定常伝熱を扱った二つの研究「多孔性固体輻射変換体を用いた水蒸気改質反応装置の非定常特性の解析」「ふく射と相変化が共存する多孔性媒体内における非定常伝熱」は、この方式の実用面での特性を明らかにしており、今後の実用化の進展が期待される。

「放射熱線法による円筒形ガス改質炉内の3次元放射伝熱解析」および「放射熱線法の応用に関する研究」は放射熱線法を用いた解析の火炉への応用及び解析法自体の検討をテーマとしている。放射熱線法についてはその手法の評価がまだ定まっていない段階にあると言えよう。そのため、毎回多くの議論を惹き起こしている。小生は興味を持って活発な議論を拝聴しているが、この手法の妥当性や特徴などについての基本的な記述が提供され、それに対する討論が活発に行われればその評価が確立されて行くものと考えられる。

さて、以上が放射のセッションで発表された研究の概要であるが、オーガナイズド・セッション「半導体製造における伝熱」において、特に、ウェハ処理工程での放射伝熱解析が重要であることが紹介された。これらの発表では固体壁間ふく射伝熱を扱っており、ふく射を専門とする研究者の関心が主にふく射性ガスやふく射散乱体にあるため、見逃されがちである。しかし、今後、高温での処理技術、宇宙における熱制御、熱機関の高温化等に伴い、固体ふく射伝熱も重要なテーマになる可能性がある。

また、高温のみでなく、常温付近でも繊維等を対象とした「非均一な散乱・吸収媒体のみかけのふく射物性値」の研究のように、大きな熱流束を伴わないふく射の散乱・吸収等の問題がクローズアップされる可能性も高いと考えられる。

ふく射伝熱の今後については昨年の伝熱シンポジウム後の黒崎教授（東工大）のレビューに詳しく述べられているが、上に述べたような分野も活発化してふく射の研究者が増えることを望む次第である。

（本稿の執筆には東工大の吉沢善男・宮内敏雄両助教授のご援助を頂いた。記して感謝の意を表します。）

筆者は「環境伝熱セッション」に進行係の一人として出席した。今回の環境伝熱のセッションでは4編の研究発表が行われたが、発表件数は他のセッションのそれと比較すると少ない部類に属し、かつ又従来からの推移をみても、発表件数における変化は見られない。

一方環境伝熱における研究対象を概観すると、従来太陽熱などの自然エネルギー利用、都市大気の熱環境及び汚染物質の大気流動、さらに室内における気流・温度分布などに関する問題が取り扱われてきた。それに対して今回のセッションでは、自然エネルギー（土壌蓄冷熱）利用、室内における温熱環境そして人体からの熱および物質移動に関する研究が取り上げられており、それらはいずれも従来発表された研究内容とは異なるものである。以下に個々の研究内容を概述する。

池浦らは自然エネルギー有効利用の観点から土壌蓄冷熱を利用した場合の夏場での涼房の可能性を解析的に検討した（E11）。彼らの設定した伝熱モデルは地中に管を水平に埋設し、管内を流動する空気と管外の土壌との熱交換のみを考慮したもので、従って得られた計算結果をもとに直ちに実用上の可能性を決定することは困難と思われる。今後実用上の観点から、会場の質問者から指摘されたように、管内での結露による水分移動を含め、実的な伝熱モデルの検討を行うと共に、実験による検証を進めてほしい。

室内温熱環境評価に関し、大森らは人体を含んだ室内の温熱環境を評価するためにふく射伝熱を考慮して人体の発熱をモデル化し（E12）、さらに居住空間内で床面に床暖房を施した場合の平均ふく射温度による快適性評価を行った（E13）。この種の問題は快適性を追及する空調分野の技術開発に関連して重要な研究テーマであり、現在多くの研究がなされているが、その主たる関心はむしろ気流による暖・冷房における快適性評価に向けられている。従って、その基礎的知見となる人体を想定した発熱モデルに関しても、これまで詳細に検討されており、今回の研究で用いられたモデルの妥当性に関し従来研究との対比がなされることが必要と思われる。また今後、床暖房のみならず温・冷風の場合の温熱環境の評価へと拡張していただきたい。

竹内は就寝中における人体から敷きぶとんへの熱および物質伝達を調べた（E14）。本研究は、体感的に快適な敷きぶとんを開発する上で、その基礎となる寝床の特性を明らかにしようとしたとのことであり、今回は限定された条件下で得られた温・湿度結果（但し、会場からの質問に見られるように特に湿度測定に十分配慮が必要と思われるが）をもとに熱および物質伝達にもとづいて定量化を行った。その結果、寝床の特性が輸送論にもとづいて説明されうることであるが、今後更に貴重なデータの集積が望まれる。



終りに、環境伝熱に関し私見を述べさせていただくと、環境工学委（機械学会）の提言に見られるように人間にとり快適な都市環境を積極的に創造する立場からアメニティーの追求が重要視されつつあり、その創出のためにエネルギー問題や都市生活環境問題に取り組むべき課題が残されているように思う。今後、本セッションにおいて特定の研究課題に関し、同種の研究発表が多くなされることを切望する次第である。

ここ最近の傾向ではあるが、熱伝導に関連するテーマは純粋熱伝導を取り扱った研究というより、種々の実用問題に密着した研究が多くなってきている。それだけに対象となる研究テーマは広範囲にわたっているが、反面、それぞれのテーマに対し突っ込んだ討論が乏しかったとの印象が残った。今回の熱伝導セッションに組み込まれた14編の論文を簡単に分類・整理することは困難であるが、ここでは一応、(1) 基礎的な取り扱い、(2) 潜熱蓄熱、(3) 高温壁の熱除去および熱応力、(4) 種々の熱伝導、(5) その他、に分けて各論文の内容を簡単に紹介し、若干の感想を述べることとする。

#### (1) 基礎的な取り扱い

熱伝導の基礎を取り扱った論文として、E133、E141、E142が挙げられる。E133は従来から多くのモデルのもとで推算式が提案されている混合物の平均熱伝導率に対し、より一般的にランダム混合に対応するため、自動要素分割による有限要素解析でその熱伝導率を計算しようとするもので、実際の混合状態に対応した混合物の熱伝導率を精度良く見積り興味あるものである。さらに三次元への拡張が期待される。E141は二次元熱伝導の逆問題としての解を基礎として、任意形状の非定常二次元熱伝導問題の解を得るものである。解を得ることが複雑であり計算時間を要することを考えると、ダイレクトに数値計算を行なう方が実用的ではないかとの意見が出された。E142は著者らが精力的に進めている相変化をともなう熱伝導の数値解法の一環として、要素分割を必要としない新しい解法を示したもので、内部領域に乱数を用いて計算点を発生させ、その周りの隣接点を単位円に置き換え温度場、凍結界面位置を決定する手法である。モンテカルロ法とも対をなす大変興味ある解法であり、単位円への置き換え時における熱流の評価と解の精度に対する評価をも考慮した今後の発展が期待される。

#### (2) 潜熱蓄熱

以前は熱伝導セッションで活発に議論されていた潜熱蓄熱であるが、今回はある程度テーマが成熟したせいか必ずしも活発なものではなかった。潜熱蓄熱の研究のいくつかは熱交換器や強制・自然対流のセッションに組み込まれており、本セッションではE143、E146の2件であった。E143は凝固過程に生じる過冷却度に及ぼす影響因子を論じたもので、実験結果の統計的解析から種々の伝熱面および冷却速度に対する過冷却解消確率を示している。本来、取り扱いが難しい過冷却の問題を量的に表現するものとして評価される。E146は平板カプセル潜熱蓄熱システムにおける特性解析を示したもので、以前の球カプセル方式との性能比較も論じている。潜熱蓄熱に対してこれまで種々の方式に対し多くの研究が

なされているが、そろそろ各方式に対する正当な評価の比較について整理した研究もあっていいのではないかと思う。

### (3) 高温壁の熱除去および熱応力

今回の特徴として、熱伝導セッションに高温壁の熱除去および熱応力に関連した研究が多く発表された。E122はプラズマディスラプション時の核融合炉第一壁の熔融・蒸発挙動を取り扱ったもので、熔融層厚さが熱流束に対してピーク値をもつことを実験および解析結果から示した。また、第一壁の構造設計と関連して、E123はアーマ材と構造物の接触熱伝達を踏まえて熱応力解析を行ない、構造物の温度を抑えるためにアーマ材との接触の方法、冷却の方法について検討している。そして、冷却方法として加圧水に比べて低圧で使用できる液体金属ミストによる冷却の有効性を示し、E124でその伝熱特性を論じている。いずれも安全性と密接に関係するテーマであるだけに、さらに詳細な検討が必要である。E145はコークスの製造に関連して、乾留過程におけるコークスの亀裂成長機構を熱応力問題として検討したもので、比較的簡単なモデルで初期亀裂の発生を予想している。

### (4) 種々の熱伝導

E121は超流動ヘリウムにおいて、伝熱面とヘリウム間の熱伝達およびヘリウム中の熱伝導を取り扱ったもので、前者に対してカピッツァコンダクタンス、後者に対して相互摩擦力を考慮した二流体方程式に基く熱伝導方程式で表わされることを非定常実験から示している。E134はパンの熱処理過程の解析に対する手始めとして、単純な三次元熱伝導問題としてパン内の温度分布の比較を示したもので、今後さらに詳細な発酵、焼成時に生じる化学的、物理的变化を含む取り扱いが期待される。E144は熔融プラスチックの流動および固化時に生じる複屈折について取り扱い、その発生要因を流動中のプラスチックのせん断応力によるものと、固化過程での熱応力によるものに分けられることを示しており興味深い。それぞれの残留複屈折が支配的な条件は射出条件と関係づけて領域的に表わされ、その低減のための射出条件を明らかにしている。

### (5) その他

E131、E132は熱伝導が関与する研究ではない。E131は多孔質体内の透過係数に及ぼす温度、圧力の影響を示すとともに、細孔構造により透過係数の違いが大きいことを示している。このことは逆に、透過係数測定から多孔質体の細孔構造の定量的な評価が可能であることを示唆しており、従来不明確な構造評価に対する発展が期待される。E132は比較的粒子径が大きな球状粒子層でのふく射輸送を解析するために、Debye 近似にもとづき位相関数を回折散乱項と表面散乱項に分離し、前者をデルタ関数で近似することにより表面散乱項のみとなり、取り扱いが簡単となるふく射輸送方程式を導いたもので、大変興味あるものである。充填層内のふく射輸送の解析結果の妥当性を評価するためにより詳細な実験が望まれる。

## 伝熱シンポジウムにおける『燃焼』セッションの役割

新井 紀男（名大工）

今年の伝熱シンポジウムにおける『燃焼』のセッションは、E151～153 の3件で例年通りの件数であり、微粉炭燃焼、産業用マトリックスバーナならびに予混合火炎の燃焼計算の各講演発表と討論が行われた。以下に、各講演の概要をまとめる。

E151は、豊橋科学技術大学の岡崎先生らの研究で、微粉炭燃焼における着火性の向上に超微粉を添加し、その効果を実験的、数値解析的に検討した研究であった。数値計算的には超微粉添加効果が現れたものの実験結果では1次元炉の実験であるせいか顕著な着火性の向上は認められなかった。質疑では、数値計算による粒子温度とガス温度との差についての議論がなされた。

E152は、松下電器の中本氏の講演で、対向火炎型のマトリックスバーナの開発研究であった。本研究は、使用されたマトリックスバーナの燃焼安定領域と火炎の写真が発表され、火炎内の温度分布、燃焼効率などのデータはみられなかった。今後、この対向流型マトリックスバーナの利用法（火炎輻射を利用するのか、燃焼熱を利用するのか）をある程度明確にさせて研究を方向づける必要があると思われる。

最後の九州大学尾添先生らのE153の講演は、予混合燃焼火炎の安定点の解析についての研究であった。質疑において、着火後の温度分布を壁温ではなくガス温度を用いて解析を行う方が良いというアドバイスがあった。実験結果と計算結果を対比しつつ考察していった方がより理解が深まるように思う。

以上、今回の伝熱シンポジウムにおける『燃焼』のセッションの各講演の概要をまとめたが、内容としてはあまり共通性がなく各講演間の討論はなかった。一般に、燃焼は伝熱現象は勿論のこと、そのほかに物質移動現象ならびに化学反応が相互に絡み合い、その結果として燃焼が生じるのであるから複雑至極である。逆に言えば、燃焼現象の解明において、伝熱シンポジウムの果たす役割は重大であり、燃焼における伝熱現象の解明とともに、伝熱パラメータの変化に伴う燃焼状態の変化について、本シンポジウムでさらに議論する必要があると考える。今後伝熱シンポジウムの『燃焼』セッションで数多くの講演がなされることを期待する。

秋野詔夫 (原研)

次の「測定法」セッションで講演したためか、「熱物性」セッションの副座長を依頼されました。「熱物性」は全くの門外漢です。しかし、副座長は経費節減のため会場運営のボランティアとの主旨なので断わってはいけなと考えお引受しました。しかし、講演会場は小さめで討論者の声もマクなしでよく通り、座長役は全て荒木先生(静大)にお願いしたので、私はベルを鳴らすために十度指を曲げただけでした。興味を引く講演内容が多くついつい聞く方に身が入ってしまい時計を見るのを忘れ、ハツとしたことが一再ならずありました。ところが、さらにこの「熱物性」セッションの感想記を依頼されました。当初はお断りするつもりでいたのですが、専門外の者の新鮮な感想がむしろ望ましいとの玉木先生(信大)の上手なお言葉のせいか、つい引き受けてしまいました。「熱物性」セッションと11の講演数は、10件でした。

非正常細線法による溶融塩の熱伝導率測定の講演では、心臓部のプローブの製作法に関するベテランの質問に、若い講演者が手書きのスケッチで具体的手法と困難な点を説明しておりました。その説明を聞いてなるほど、難しいのはそこか、乗り越えるコツはそこか、いわゆるノウハウを知り得ました。これらは、論文を読んでも分からないだろうし、しかし知らなければ先人の苦勞を 通り味わわなければならないと言うべき貴重な知識でありました。ソボゾムならではのやり取りとして、印象に残っています。

ステップ加熱法による断熱材の熱伝導率の測定法を検討した講演では、試料の微細構造に関する討論が印象に残りました。多くの物質は、マクロには均質でも、ミクロに見ると結晶や粒子から構成されており不均質であり、ミクロ構造の代表寸法と熱浸透深さの間に関連が有ることを非正常計測法では考慮する必要があるのではないか。熱物性は、温度変化の特定数やミクロ・マクロの代表寸法に影響されることになり、物性値とはいいいにくい気がする。素人の私には熱物性とはなにか？という問いが生じてきます。

レーザ干渉光による不均一加熱の緩和を光の回折の時間変化より求め温度伝導率を得る強制レイリー散乱法の講演が2件、また、基板上に蒸着した薄膜を光によって急速加熱し接する気体の膨張によって発生する音波の位相から温度伝導率を求める光音響法の講演がありました。これらは、非接触で極めてミクロな計測が可能なところに特徴があり、先端技術と熱物性の交差点を見たような気がしました。成分分析ばかりではなく、応力・歪・疲労・温度など解明すべき未来の技術対象はミクロ化するのだろうか？

またここでも、ミクロ構造と熱物性値の関連に関する討論が有りました。あまりミクロな測定を行うと物質のマクロな特性を見逃すのではないか？どこまでを物性として取り扱うべきなのでしょう？物性としていじくりまわしても苦勞が多く、複合した現象と見て複数の法則から演繹したほうが容易で良い見通しが得られるのか？と言った議論にまつ問題なのでしょう？

またこの延長とも言うべき討論のあった講演として、液体表面上の異種液滴の広がり測定した発熱研究 Vol. 27, No. 106

表がありました。定常状態までに極めて長時間を要するばかりではなく平衡に到達しない場合もあるのであれば、表面張力のみで決定される現象とは考えにくく、あくまで物性値として追求すると無理が生じ、むしろなんらかの物理化学的プロセスとして捉え直すべきではないかという議論であります。

多孔質中を流れる流体中の熱分散に関する講演がありました。ゲル数値を物性値としてきたのだから、輸送にかんする物性値と言ってよいのかもしれないが、しかし流速依存になるということも主張するのであれば、物性(物のみで定まる特性)として扱うべきではないと主張していることになるのではないか。また、充填層で知られた問題の新しい切断面を示したとも考えられると思いますが、分野を縦断した議論がソボロフの眼目の一つだと思いますがこの点ではいま一つという感じもしました。

他に、状態方程式の一般化、流体の比熱測定法、コルゲート断熱板の熱伝導率に関する講演がありました。

最後に、熱物性を利用するユーザーがもっと積極的に参加するべきではないかと感じました。研究にもメーカーとユーザーという立場があると思います。熱物性は伝熱の基礎データですから、他の分野の研究者はユーザーであり、関心を持ち積極的にメーカーに要求を突きつける必要があるのではないのでしょうか？例えば、熱や流動の数値計算は設計現場で日常的ツールとして使われつつありますが、必ず物性値を必要とします。せっかく精密に計算しても、出発点の物性値があやふやでは、元も子もありません。また、実験上の必要からも、日常的ではない特殊な流体を選択したり、場合によってはそれらを混合して、もっとも都合な条件で実験をしたいことがあります。その時、やっかいな問題の一つは物性値の調達であります。化学工学の分野では熱力学的データはかなり整備されているようですが、伝熱工学に必要ないわゆる輸送的データはそれほど整備されておりません。ハンドブックやデータ集にでていなければ、この検索・調査が一仕事であります。データがどこにあるか、精度・信頼性はどの程度か？多くの場合、信頼性を増そうとして、データや文献を当たれば当たるほどデータはハラキを増します。古いデータやおかしと感じるデータを切ろうとしても、客観的基準がなく恣意的選択を避ける大義の前にそれができません。このへんから、泥沼化が始まります。いっそのこと、自分で測ろうかと思うけど、容易ではありません。固体の場合はお金さえあれば市販の装置も有るようですが、流体となると装置から作らなければなりません。かなりの月数を費やす決心ができなければ、計画は断念しなければなりません。

そこでふと思うのですが、このセッションの講演のような高度で先端的な研究がどんどん進んでいるのに、どうしてもつと易しい測定法が誰にでも一定の精度で簡単に出来るようにならないのでしょうか？より難しい測定対象にチャレンジし新しい方法を創造するのが重要なことはよく分かりますが、完了した研究の成果が実用化・商品化されなければ最終的に世の中の役に立っていないのではないのでしょうか？などと他人に責任を転嫁したい気持ちが生じてきます。

熱物性分野は、物理などの基礎的学問との接点であり、それらと地続きであるからハルも可能性があるのでないのでしょうか？元氣な若者に独創的研究を目指してがんばってほしいと思います。なお蛇足ながら、研究における若者の定義は、スイスのミュー先生が実証したように昨年度より60才以上に改定延長されました。つまり、年齢制限は事実上撤廃されたわけです。

笑われないことを祈りつつ、ワゴロのスイッチを切ります。

## 『測定法』セッションについて

宇高 義郎 (東工大)

「測定法」は1セッションだけで構成され、昨年度の第24回シンポジウムから新たに企画された。このセッションは「熱物性値測定」のカテゴリーにあてはまらない測定法が集められており、内容は多岐に渡った新しいものが多い。そのためか、全般的に、測定方法の提示が中心となっており、まだその有効性について厳密に論じる段階に達しているものは少ないように感じた。しかしそれだけに、チャレンジ精神の旺盛な、また実用的あるいは将来有望な測定法となる萌芽をもっていると思われ、興味深かった。

さて、本セッションでは、測定法の対象は温度分布、熱伝達率、透湿度と異なっているが、いずれの講演も非接触あるいは遠隔測定という点で共通している。周知のように、温度測定の多くは熱電対等による接触測定を中心としている。種々の測定対象のうちでは、影響の大小はあるものの、センサーを取り付けることによって、温度分布あるいは熱流束分布等は必ずそれの無い本来の場合と異なるものとなってしまいうなど、望ましくない現象を付加してしまうことが多くある。このような観点から、高精度、高応答、高分解能かつ簡便な、あるいは空間的な分布に適用できるような、非接触の様々な測定手段を開発することは非常に有用であり意味深いものと思われる。講演数は、昨年度3件から5件とやや増えており、さらに多くの測定法の提案あるいは測定の確度の向上等に関する研究の発展を希望する。

5室で並行して行われた伝熱シンポジウムでは非常に限られた部分にしか参加できず、多くの方々は実際に聞かれていないはずである。本セッションの各講演の内容および会場での主な討論を簡単に紹介することも意味のあるものと思われ、以下に私の感想を加えて簡単に述べる。

E231: 発表者らの開発した「液晶サーモカメラ」を適用し、対流場において測定者の意図した熱的境界条件と実際に起こっているそれとの相違について論じている。突起物の置かれた箱ヒーターに一樣発熱を与える場を対象に選び、ヒーター基板等の存在に起因する熱流束の不均一を明らかにするとともに、熱伝導補正法について検討している。会場からは、照明の条件、不確かさの評価等について討論された。なお、実験系には多くの種類があるため難しいとは思われるが、実際の実験装置等の設計に役立つような一般性のある指針を示していただけると有難い。

E232: 先に発表者らの提案した伝熱面をレーザー光によってステップ的に局所加熱し、温度上昇特性から局所熱伝達率を遠隔測定する方法の適用限界について検討している。温度伝

導率の大きな材質には適用しにくいなど制限はあるが、熱流束を固体側から求める必要がなく遠隔測定が可能であるから実用的に便利な方法であろう。ただ、加熱量、赤外線温度測定とも伝熱面の放射率に依存するため、その値を正確に知っておく必要がある。また、局所加熱による温度分布の変化に対応した熱伝達率の変化についての考慮は不必要か。会場からは、短時間測定あるいは連続測定の可能性について討論された。時間の短い範囲では非常に精度の高い温度測定が要求され今のところ難しいとのことであった。

E 2 3 3： 伝熱面に塗布した感温液晶による温度測定を対象とし、人間の色彩感覚による定性的な温度変換から分光特性・色彩特性と温度との関係を定量的に求める方法への進展について検討している。特に、色彩計によるデータについて詳細に測定しており、色相と温度との関係が単純かつまとまりが良い上、液晶膜厚の影響を除けることを示している。会場からは、照明の種類の影響など、また著者らの既発表の色成分からもとめる方法を含めてベストは何かとの質問があった。照明については一種類に固定して行っただけであり、また、方法についてはまだ結論に達していないが、色相を用いるのがシンプルではないかとのことであった。

E 2 3 4： 水中での超音波伝播速度の温度依存性を利用して、超音波伝播速度分布を測定し、フーリエ変換を使って温度分布を再生する方法について検討している。発信・受信素子間の距離の決定法、空間分解能、近くの壁からの反射の影響について質問があった。位置精度にはまだ問題があり、測定箇所も増やす必要があるとのことであった。取付の自由度を増し、測定（位置）精度を高めるには素子の小型化が必要と思われる。しかし、空間的な温度分布の非接触測定について検討されることは価値があり、発展を期待する。なお、最後に示された熱電対による温度分布との比較結果（図6）は講演中訂正された。

E 2 3 5： 水蒸気濃度の非接触・実時間での測定可能な講演者らのこれまで開発してきた光ファイバー局所湿度計を利用して、透湿を材料内の見かけの拡散係数として評価する方法の提案と具体的測定例の報告が行われた。会場からは、測定における条件の設定、相互拡散の考慮、試料内の通気の影響について質問があり、また、分解能の向上が必要との議論があった。通気に対しては、試料厚さを変えても計算値が同じことで確認した。測定方法の適否のため他のデータとの比較が必要であり、また、空間分解能、湿度換算への分解能が問題となるとの回答がなされた。

最後に、全般を通してのコメントとして、測定法の種類を多く持つことは非常に有意義ではあるが、不確かさが不明なままでその結果を利用するのは危険である。必ず不確かさの評価を付けてほしい（E 2 3 2には記述されている）、との主旨の意見が述べられた。昨年度の伝熱研究の測定法レビューにも、不確かさに関しての記述がなされており、測定に関する研究においては特に不可避な問題であろう。



## 凝縮：凝縮についての研究

栩谷 吉郎（金沢工大）

今回のシンポジウムで凝縮セッションの副座長をさせていただいたことから、凝縮分野の動向や感想について執筆の依頼を受けた。都合で全ての発表を聴講することができなかったので、一部は講演論文集をたよりに書かせていただくことをお許し願いたい。

発表論文数は凝縮セッションで16編、また二相流セッションおよび特別セッション（直接接触熱交換）でそれぞれ2編ずつであった。しかし、凝縮セッションの中に昇華に関する論文が1編含まれていたため、凝縮関連の発表は19編となる。数のうえでは昨年の18編とほぼ同じであるが、総論文数に対する比では7.7%から6.2%へ減少している。これは特別セッション分野の論文数の増大によるものであろう。

凝縮セッションが行われたE室には約70の席があったが、一部の発表を除けばほぼ満席であり、凝縮II（二成分蒸気の凝縮）のセッションでは入室できないほどであった。

発表された論文を分類すると次のようになる。

(1) 膜状凝縮	12編
(2) 滴状凝縮	1編
(3) 凝縮二相流	1編
(4) 直接接触凝縮	2編
(5) 核凝縮	2編
(6) その他	1編

### (1) 膜状凝縮

膜状凝縮においては凝縮液膜自体が伝熱に対し抵抗となるため、これを種々の方法で取り除いた場合の特性が報告されている。E311、E312はスクレーバを用いており、抄紙工程の乾燥機の性能向上を目的としたものである。E314は下向き凝縮面に多孔質排液板を取りつけた研究であり、その優れた効果を確認している。E315は鉛直伝熱管のまわりに設置した螺旋電極により凝縮液をEHD的に排除するものであり、管下部での伝熱特性の低下を小さくする目的をもつ。特性の簡易な整理法が試みられているが、物理的根拠や纏まり方が不十分であり、伝熱性能の向上とともに今後の研究の進展に期待したい。E313は環状フィン、3次元フィンをもつ管群の伝熱性能に対するフィン形状等の影響を明らかにすることを目的とした研究である。管Bが管Aよりも良い特性を示した点について考察がほしい。最適形状の予測などへの発展を期待したい。

二成分蒸気については、非共沸二成分蒸気が5編（E322 - E325、A325）、共沸不溶性二成分蒸気が2編（E321、E326）発表された。E323では、二成分蒸気の管内凝

縮で流入蒸気が全て凝縮できない限界温度差の存在が考察とともに明瞭に示されており興味深い。R113 - R114 系の管内凝縮 (E323 - E325) では、成分割合、管の姿勢によらず、二成分の場合の熱伝達率が単成分の場合のそれを下回っている。水平円管の場合の流れ方向の熱伝達率低下傾向はE324、E325に、成分割合による違いはE324に示されている。また、E325、A325では実用上重要な凝縮管内の摩擦損失が測定されている。

E321ではLiBr溶液膜面上における水蒸気(主冷媒)の吸収過程およびn-オクチルアルコール(補助冷媒)の凝縮過程がダブルパルスレーザーによるホログラフィ干渉法で可視化され、この補助冷媒の凝縮が主冷媒の吸収促進に大きく貢献していることが示されている。E326は四塩化炭素-水系の凝縮を扱っており、四塩化炭素の膜状凝縮および水の滴状凝縮の様子とそれらの詳しい挙動が熱伝達率とともに報告されている。

以上はいずれも高性能ランキンサイクル、ヒートポンプの作動媒体として二成分混合媒体を利用する目的の実用的価値の高い研究であるが、現象や基礎的特性の把握が不十分な現状であり、今後の発展が期待される。

## (2) 滴状凝縮

E334は狭さく熱抵抗を扱ったものであり、十分な精度をもつ実験を行って昨年のシンポジウムで発表された理論と比較している。その結果、狭さく熱抵抗の影響は熱伝達率が小さいガラスのような伝熱面の場合に強く現れることを明らかにしている。今後、熱伝達率の大きさと影響の程度についての知見が望まれる。

## (3) 凝縮二相流 (A236)

## (4) 直接接触凝縮 (B115、B116)

いずれも他のセッションでの講演発表であり、凝縮関連の研究として挙げるにとどめる。

## (5) 核凝縮

E322は水分子の凝縮の初期過程であるクラスタの生成に関する研究であり、水分子の挙動などが示されている。E333は熱励起による生成薄膜の構造変化を調べた研究である。どちらも筆者には十分理解できない部分を含んでいるが、E322については、水が他の液体に比べてきわめて特異な物性をもち、その原因のひとつが異常に大きい結合エネルギーにあるといわれていることから、このような研究によってその機構などが明らかになるのではないかと考える。

## (6) その他

E331は水蒸気が低温面で凝縮、凍結する現象を扱っている。このような現象は食品工業などでも重要と考えられ、十分な現象の把握が望まれる。

凝縮Iのセッションで、フロン規制によりいずれ使えなくなる試料を用いて実験が行われていることに対し、講演者の見解を問う質問があった。便利に使っている試料もそろそろ検討が必要な時期かも知れない、と感じた次第である。

## 直接接触熱交換

棚 沢 一 郎（東京大学生産技術研究所）

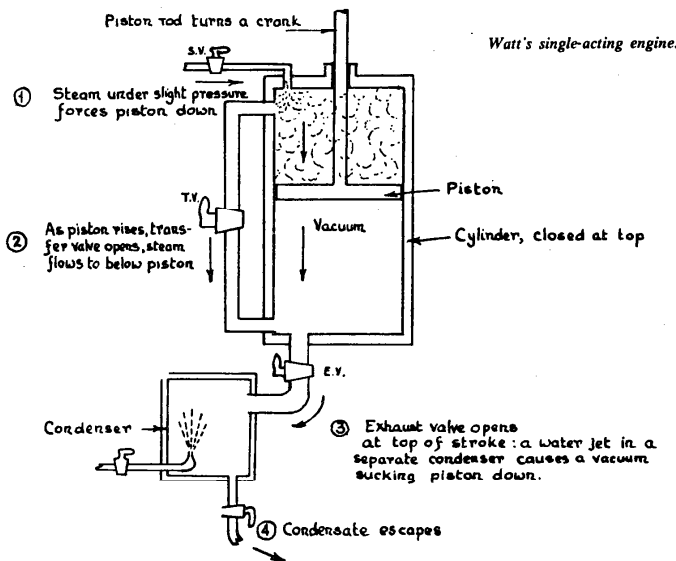
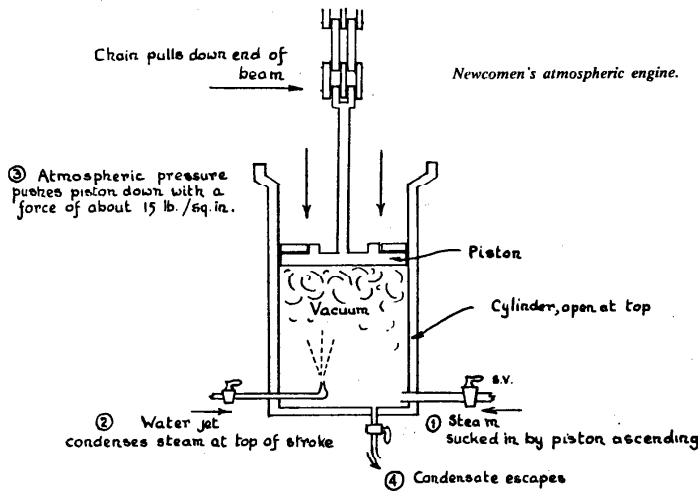
### 1. 古くて新しい分野

直接接触熱交換の技術は古い歴史をもつ。ここに示した図<sup>(1)</sup>の上半分はニューコメンの蒸気機関と呼ばれるものの作動原理を示すもので、このエンジンは今から二百数十年前頃にイギリスで盛んに使われていた。この蒸気機関は、大気圧と冷却水の飽和温度に対応する低圧との間で作動するいわゆる大気圧機関で、低圧を作り出すために蒸気中に冷却水を噴出させる方式をとった。ジェットコンデンサによる直接接触凝縮である。ニューコメン機関の致命的欠陥は、主シリンダを凝縮器と兼用した点にあり、ジェームズ・ワットは図の下半分に示されているように、凝縮器を分離するというアイデアによって蒸気機関の効率を飛躍的に増大させた。産業革命を推進させた改新的技術の一つとして有名な話である。ワットによる分離凝縮器もやはり直接接触凝縮器であった。ワット自身はこれとは別の形式の、表面凝縮器をも発明している。その特許は 1769 年に出されているが、当時の製作技術のレベルの低さから、実用化には至らなかったようである。この間の事情は、1969年にグラスゴーで開かれた、ジェームズ・ワット特許200年記念シンポジウムでの Silver教授や Simpson教授の講演で詳しく紹介されている<sup>(2)</sup>。ともかく、いろいろな事情から直接接触熱交換は熱交換方式の主流からはずれ、余り注目を惹かない時期が続いた。しかし、最近再び直接接触方式が関心を持たれるようになりつつあるのは、それが、伝熱促進あるいは小温度差熱交換を達成する上で原理的に優れているからである。

### 2. 技術先行ということ

直接接触熱交換についてのこのような技術史的な事実からんで、筆者が常々考えるもう一つのことがある。それは、伝熱工学（あるいは工学全般）における技術先行の傾向についてである。伝記などを読めばわかるように、ジェームズ・ワットは決して伝熱工学の知識に基づいて分離型の凝縮器を作ったのではなかった。技術者としての経験と直感によって改良をなしたのである。このことは、少なくともこれまでの技術と工学との関係をきわめて象徴的に示しているように筆者には感じられる。筆者はこれまでの技術の進展のすべてを熟知する者ではないが、非常に多くの場合に技術が先行し、工学がこれを追うという形が見られたように思う。もちろん、先端的な技術にあっては、まったく学問の裏付けなしに新しいものが生み出されるということもあり得ないであろう。しかし、工学が新しい現象や原理を予知し、それが新

技術を生み出した事例は、（とくに伝熱の分野では）皆無に近かったのではないかと思う。この辺の事情を分析することが、今後の伝熱工学の発展のために必要なのではないかと筆者は考えている。



「直接接触熱交換」(9:00-12:20)	
オーガナイザ・座長 棚澤 一郎 (東大)	
<b>蒸発</b>	
B111	液-液直接接触伝熱による液滴列の蒸発 直列2滴の場合の運動と伝熱特性 ..... 85 機正・化工正 棚谷 吉郎 (金沢工大)
B112	直接接触式蒸発器の伝熱過程に関する研究 (第7報, B110液が水膜上で蒸発する場合の温度場の測定) ..... 88 機正・平澤 国男 (九大) 機学 長野 敏幸 (九大院) 機正 藤田 恭伸 (九大)
B113	スプレーフラッシュ蒸発効率の簡易表示式 - 液温度及び気泡核供給の影響 - ..... 91 化工正・機正 宮武 修 (九大) 化工学 谷口 秀弘 (九大院) 化工学・大東 慶久 (九大院)
B114	高温液体面上でのライデンフロスト現象 ..... 94 機正・化工正・飯田 嘉宏 (横国大) 機正 高島 武雄 (横国大)
<b>凝縮</b>	
B115	水平管内気液層状流の凝縮熱伝達 ..... 97 機学・木村田 章 (東大院) 機正 飛原 英治 (東大) 機正 斎藤 孝基 (東大)
B116	冷水と蒸気の直接接触時の熱伝達率の評価 ..... 100 機正・原正・成合 英樹 (筑波大) 機正・原正 綾 威雄 (船研)
<b>蓄熱</b>	
B117	水平円管潜熱カプセルの直接接触熱伝達を伴う融解の数値シミュレーション ..... 103 機正・齋藤 武雄 (東北大) 松尾 茂 (東北大院)
B118	直接接触熱交換を利用した水蓄熱空調システムについて ..... 106 機正・木田 伸夫 (三井造船) 山崎 隆尉 (三井造船) 藤田 尊志 (関西電力)
B119	直接接触蓄冷過程における気体水合物の生成挙動 ..... 106 化工学・森 達志 (慶大院) 機正・化工正 森 康彦 (慶大)
まとめ 機正 棚澤 一郎 (東大)	

### 3. セッションの内容について

図の隣はプログラムのコピーで、今回のシンポジウムの直接接触熱交換のセッションで発表された 9 編の論文の題名と著者名が記載されている。ただしここでは個々の内容についての紹介は省略して、全般的な印象を記すにとどめる。

イスラエルの Sideman 教授ら<sup>(3)(4)</sup>によるモノグラム、あるいは Kreith 教授ら<sup>(5)</sup>の編著にも書かれているように、直接接触式熱交換器の最大の長所は、伝熱面が不要なために構造が簡単でコストが低廉になるという点にある。コストが安いということは、熱交換器の設計・製作においてもっとも歓迎されるべき点であるが、それにしては世の中での直接接触式熱交換器の使われ方は少な過ぎるように思われる。その原因の一つは、どうやら伝熱のメカニズムに不明の部分が多いことにあるらしく、今回の特別セッションで発表された 9 件の論文のうち 8 件が大学からのもので、いずれも基礎的な研究に関するものであった。

伝熱のような自然現象を工学的立場から研究する場合、(1) 現象の発見、(2) 現象の観察と理解、(3) 科学的言語による記述と法則化、(4) 応用 という発展段階を経ることが多いが、直接接触伝熱に関する研究は、今回のセッションでの発表論文を含めて、(2) から(3) の段階にあるものが多い。その意味では、まだ揺籃期にあると言え、木稿の最初のタイトルに書いたように古くて新しい分野という言葉がぴったりと当てはまる。

### 4. 文献

- (1) Crowley, T.E.: Beam Engines, Shire Album 15, Shire Publications Ltd.(1976),10.
- (2) Donaldson, R.(ed.): Bicentenary of the James Watt Patent, University of Glasgow(1969).
- (3) Sideman, S.: Advances in Chemical Engineering, Vol.6, Academic Press(1966), 207.
- (4) Sideman, S. and Moalem-Maron, D.: Advances in Heat Transfer, Vol.15, Academic Press(1982), 227.
- (5) Kreith, F. and Boehm, R.F.(ed.): Direct Contact Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corp.(1988).

## 1 はじめに

セッション立案の段階で最も心配したのは、必要な論文数が集まるだろうか、と言う点であった。そこで、範囲を制限せず宇宙全般にわたって伝熱関連の課題を集め、伝熱研究会の方々に問題の所在を認識して貰うことに主眼をおいた。宇宙環境の特徴は、微小重力、高真空、放射（太陽熱、太陽風、その他粒子）などで、関連の伝熱現象は全て対象となる。今回のセッションでは、便宜上、宇宙環境での共通の伝熱現象と実験装置や宇宙ステーションの開発に直結した伝熱とに分類した。結果的には、前者はマランゴニ効果による対流と気液二相の伝熱、後者はヒートパイプ、コールドプレート（冷却熱交換器）の対流および接触伝熱、二相冷却ループ、熱発電ループ、ヒートポンプ・ラジエータ蓄熱を含む熱制御システムの特徴などとなり、専門分類からは種々の伝熱が混在することになった。今後、これらの中から、共通の伝熱課題が幾つか抽出されていくと考えられる。

## 2 宇宙環境の伝熱

伝熱現象に関わる環境条件として地上と異なる特徴は、微小重力、高真空、各種放射である。熱放射については、従来から多方面で採り上げられているが、他の二者については国内では、あまり触れられなかった。

そこで、表面張力と熱流動について、東京大学の庄司先生に、接触熱抵抗について、横浜国立大学の鳥居先生にレビューをお願いした。

微小重力では重力の効果が減少し、静圧、浮力、密度差による成層や沈降などに関する現象は起こり難くなる。その代わり、表面張力や界面張力、濡れなど分子間力、膨張収縮や相変化など体積変化、電磁力、ソレ効果などの熱塩効果などが現象を支配する様になる。表面張力と濡れの基本的性質、微小重力下での熱流動との関連について、要点をまとめて頂いた。接触熱抵抗は、原子炉の燃料棒クラディングに関連して研究が行なわれて以後、国内では、忘れられているが、宇宙では高真空下での接触部の伝熱特性が重要となる。例えば、実験装置とその冷却板（コールドプレート）との接触は排熱特性に重要な影響をあたえる。とくに、高真空のため締付け圧力が小さく、着脱が繰り返され、間に軟らかい粘着板が挿入されたりする過去の研究との相違点などポイントを解説して頂いた。

論文発表は、4件で、微小重力での結晶成長に関連するマランゴニ対流2件と相変化（沸騰、回液二相）・気液二相各1件で、前者は数値解析と航空機の弾道飛行による予備実験で、基本特性の把握を目標とする1ステップの成果が報告された。

後者は微小重力下で表面張力や濡れが顕著に影響する気液相変化の伝熱現象解明を旨とした実験で落下塔による気液二相流の70-パターンとスペースシャトルによる沸騰(計画)で今後この分野での中心的テーマの一つとなると期待される。

表面張力の効果について、重力との比、ボンド数は $G$ (加速度)・ $L^2$ (代表長)に比例し、マイクロとマイクロLとが対応している点興味深い。

### 3 宇宙用システム・機器の熱制御

宇宙実験、宇宙ステーションにおける熱制御や機器の伝熱は対象範囲が広く、個々の対象別に問題が採り上げられ、実用的観点からデータの収集が始まった段階で、専門的観点からの共通問題の抽出が未だ行なわれていない。しかし、今回の発表を一覧頂ければ、問題点の所在、システム内での伝熱、熱工学の役割を認識することが出来よう。

航空宇宙学会で熱制御と呼称されているこの分野は、人工衛星、ロケットなどの比較的パッシブなものから流体を強制的に流して冷却したり、ループやラジエータなどで熱放射を制御するアクティブなものへ、さらに、太陽熱-動力変換-有効利用-排熱まで考えた熱管理システムへと発展しつつある。そこで、この様な将来の大型宇宙船の熱管理のコンセプトを筑波大学の小林先生に展望して頂いた。

発表論文は多様で現在開発中の宇宙ステーションやフリーフライ 関連の機器の伝熱および熱制御システムに関する研究が8件報告され、技術の現状の大略を把握することができた。

熱制御の要素機器の代表はヒートパイプで、従来の小型衛星用から大容量のステーション、フリーフライ用に改良し、高性能化するための工夫やコンダクタンス可変のヒートパイプ開発の成果が報告された。

近い将来における実用の点から液体の輸送に補助的なポンプを使用し、ドライアウトを防止した二相冷却ループの報告は注目される。今後、関連の微小重力の二相70-パターン、キャピラリにおける蒸発、凝縮などの伝熱の研究が課題となろう。

実験装置では主に電気ヒートパイプが熱ヒートパイプに変換される。排熱はヒートパイプやコールドプレートを紹介して、輸送され宇宙空間へ放熱される。従って装置と冷却面との接触が重要で、熱抵抗を減らすため、真空の隙間に粘着性のフィラー材を挿入する方法などが開発されている。将来は、熱負荷の時間変動を吸収する蓄熱材との組み合わせなども考えられる。また、内部の熱伝達向上も軽量、小型化のため、地上以上に重要である。

太陽電池は、その変換効率が未だ10%に満たないため、受熱面積が大きく大気のドラッグが大となり、視野も狭くなる。より効率の良い発電方式も検討され始めており熱機発電もその一つである。要素機器には、受熱レシーバ、熱機関、排熱ラジエータ、蓄熱器などがある。今回、レシーバ、蓄熱を含むヒートポンプ、気液二相ループシステム、ヒートパイプラジエータなどの研究開発の現状が報告された。熱工学と密接に結び付いた伝熱工学の役割の重要なことが認識された。今回、熱放射の関連報告は行なわれなかったが、宇宙の放射環境と対応した選択膜の開発、放射率の劣化など周辺技術として大切である。

#### 4 まとめ

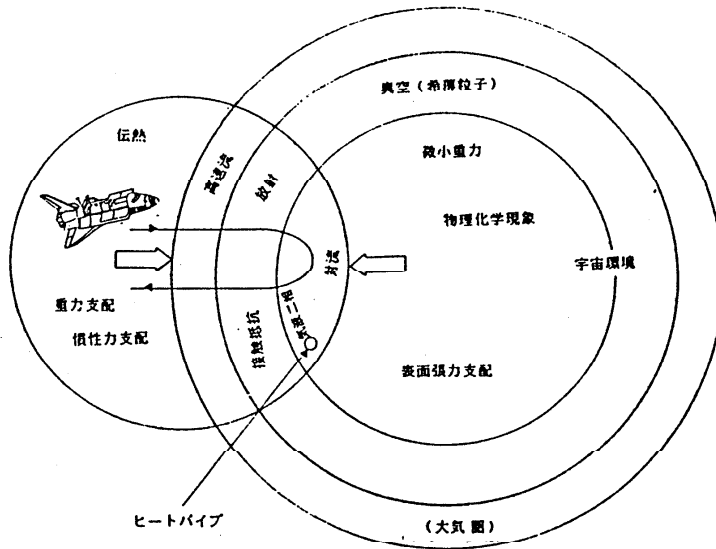
さて、今後の展開であるが、宇宙の産業としての利用は未だ遠い将来と考えられ、当分の間は宇宙実験によるスタッフとそれを支えるステーションプラットフォームなどの開発が中心となる。ただし、宇宙往還機などのロケット技術の延長についてはここでは触れない。宇宙利用の科学実験としては、我国初のスペースシャトルによる材料製造とライフサイエンスの実験が先行している。伝熱の課題は結晶成長や医薬品精製などに関連した微小重力での対流の基本特性（流れの発生、安定性など）の調査が最重要と思われるが、今回報告されたマシニング対流の他に、残留微小重力の変動（G-jitter）による対流、温度場・濃度場干渉による二重拡散、微小スケールの対流や拡散など、また、超音波や電磁場により空間に浮遊させた液滴の挙動、液内の微小気泡の運動、気相の対流拡散、電気泳動などと伝熱の関り等々発展が予想される。また、天体や地球観測の実験では、極低温冷却の赤外線センサーが、また、高エネルギー粒子の測定には超電導磁石が用いられ、極低温流体の貯蔵や冷却特性などの研究も必要視される。

次に、宇宙実験のステーションの開発には、熱制御、熱管理の技術は不可欠であり、微小重力での伝熱流動、熱放射、高真空の条件下の伝熱がすべて応用される。その中では、軽量かつ信頼性の高い気液二相の要素機器、即ち、ヒートパイプの改良、キャピラリーポンプ、蒸発器、凝縮器の開発が注目される。さらに、ヒートポンプ、蓄熱器、将来は太陽熱機関発電、原子炉などへ発展していくものと思われる。これらの基礎実験は理工学実験として計画されつつある。

ところで、宇宙実験は、非常に高価で経費がかかる。事前の地上予備実験が重要で、落下塔、航空機、ロケット、気球などで十分な検討を経る必要があることを最後に付け加えたい。宇宙環境利用の実験では現象解明の科学実験が重要視されてきており、伝熱の分野では、新しい現象の発見は難かしいとしても、微小スケール、分子原子あるいは励起粒子レベルの問題や無重力状態を利用した現象解明、または、新方式のエネルギー変換など、研究者の方々の積極的提案がむしろ求められている。今回の発表は企業からの報告が多く、技術先行の感が強いが、研究、理工学先行に逆転出来る可能性のあること、企業も初期の段階から官学との協力の円滑化を望んでいることを強調したい。

発表して頂いた方々、レビュー展望をお願いした先生方、遅くまで参加頂いた皆様に感謝致します。なお、発表者相互では、宇宙ミッションの企画が今後も継続されること、レビュー、展望の内容が文章化公表されること、研究者間の交流あるいは学会での系統的検討を望むことなど要望が出された。この分野の研究が定着し、質の向上に繋がる様、精進、協力を期待する次第である。





宇宙環境と伝熱

### 宇宙環境利用の伝熱

人工衛星	(小型) 観測、商業 (大型) 技術試験	パッシブ熱制御 アクティブ熱制御
スペースシャトル (IML-2, FMPT, D-2)	材料製造、生命科学	熱制御系 (物理、化学現象)
宇宙ステーション (JEM, フライヤSFU...)	科学実験-理工学実験	熱管理 (I <sup>2</sup> R <sup>2</sup> -変換など)
地上予備実験 (落下塔、航空機、ロケット)		

#### 科学実験(ミッション)の伝熱(物理、化学、生命科学)

- (1) 微小重力下の伝熱      微小gと他の力(表面張力など)
- (2) 接触熱抵抗            高真空、低締め付け圧、着脱
- (3) 熱放射                 太陽光、反射光、放熱
- (4) 拡散、反応に伴う伝熱      二重拡散、燃焼
- (5) フライヤの伝熱

#### バス機器、システムの熱制御(工学的)

- (1) 機器と要素      コントラクト、ヒートパイプ
- (2) 宇宙船の熱管理      動力-利用-排熱のシステム
- (3) 有人環境制御の中での熱管理

## 『半導体製造における伝熱』のセッションをオーガナイズして

中山 恒 (日立機械研)

伝熱シンポジウム第二日目の午前中に、上記題目の特別セッションを開催した。今回、この特別セッションをオーガナイズするにあたっては、従来応用物理学会や結晶成長学会等を研究発表の場として御活躍の方々にも参加をよびかけて、発表をお願いした。その結果、単結晶の成長関係で5件、ウェハ処理工程で5件、パッケージング関係で2件の計12件の研究発表を行なうことができた。

単結晶の成長に関する発表は、いずれもチョクラルスキー法を対象としたもので、数値シミュレーション、対流制御実験、可視実験と様々な角度から融液内の対流の問題をとらえて研究が進められている。結晶の欠陥密度を減らすためには融液の対流の研究が最も重要な課題である。スーパーコンピューターを用いかなり大規模な数値シミュレーションが行なえるようになったこと、及び、実験の面でも従来見られなかった新しい手法が試みられていること、などが強く印象に残った。

ウェハ処理工程に関する発表では、加熱炉内のふく射伝熱の問題、反応ガスの自然対流を制御する方法、塵の付着の問題、がとりあげられた。ウェハ処理工程での熱流動制御が目指すところは、炉内に並べられた多数のウェハ表面で反応を均一に進めることにある。更にウェハ表面を清浄に保つことも極めて重要な課題である。これらの技術課題に関する研究が揃って発表されたことは意義深い。

数多くのプロセスを経て出来上がった集積回路のチップを封止する工程、及び、封止モジュールをプリント基板等に搭載する工程、を総称してパッケージングと呼んでいる。パッケージングでは熱応力の管理が重要な課題で、これには用いられる金型及びモジュールの温度分布を詳細に予測する必要がある。パッケージングに関する発表は、いずれも実際技術を開発する過程で行われた研究の報告であった。

終始、活発な討論が行われ、このセッション全体から得られた討論のポイントと私の感想を記すと次のようである。

(1) 実際の装置に見られる現象は多数の因子の影響を含んでいる。研究では複雑な現象

のある面に注目するために、当然モデル化が必要である。数値シミュレーションで設定する境界条件、及び実験装置の設計はモデル化の結果で、研究と実際技術とを結ぶ重要な部分である。多くの質問がこの部分に対しなされたが、問題の大きさと時間の制約から討論を深めるには至らなかった。将来のセッションでは『境界条件をどのように設定すべきか?』といった主題に的を絞るのもよろしいかと考える。

- (2) 企業の研究者は現在稼働している装置に関し解析や実験を行うのが、どうしても当面の仕事になってしまう。大学の先生方からは積極的に良い熱環境を作り出す工夫についての発表と討論があった。現在の状況を見ると新しい装置を開発して現場にあるものと置換える、あるいは現場の装置に改良を施す、といった提案は、効果対コスト比が余程高い場合でないと実現が難しい。しかし、電子回路のこれ以上の高集積化にはかなり思い切ったプロセス技術の革新が求められており、産学協同作業の機は熟していると思う。

多くの方々、とくに伝熱シンポジウムに初めて発表に来られた方々から『良い経験だった』とのコメントを頂き嬉しかった。また、このような機会を創り与えて下さった伝熱研究会、伝熱シンポジウム事務局の先生方に心から御礼を申し上げます。

## 特別セッション「レシプロエンジンにおける伝熱」について

豊田中央研究所

藤掛賢司

昨年9月、特別講義のため金沢大を訪れたとき、シンポジウム準備委員長の林先生から特別セッションの新企画の話があり、どういうわけかオーガナイザーを引き受けることになってしまった。テーマは適当に決めて欲しいとのことであったが、正直のところ困った。一週間猶予をいただいて標記の題名にした。その理由を少し述べさせていただくことにする。まず、今までの伝熱シンポジウムは企業側からは何となく遠いところに存在していた。と言うのは多数の研究成果が発表されるのだが、企業側からは身近に感じるような発表が非常に少ないということである。学際的事実であることは結構だが、企業の人々には技術面からのニーズに基づいた研究、あるいは技術にすぐ結びつく研究等の発表でないと身近に感じられない面がある。つまり、自分の毎日の仕事に関係しているか、自分の仕事に利用できるか、あるいは新製品開発の手掛かりになるようなものを含んでいる発表に関心がある。学界でも自分が興味をもって研究している分野、あるいは自分と同じようなテーマの発表に関心を持って討論に参加するのと同じである。

自動車関連企業では自動車技術会会員が非常に多い。そして、春と秋にそれぞれ2～3日開催される講演会に数多く発表する。これは大部分が技術寄りのもので、企業からの発表、参加者が大多数である。一方、学界でもエンジンに関する流動、燃焼、伝熱などの研究をしておられるが、機械学会に論文投稿するためか大部分は機械学会の講演会で発表される。これは多分、自動車技術会論文集に掲載された論文は学界では論文として認められないためではないかと思う。ところが、昭和54年から1年半毎に機械学会と自動車技術会共催の内燃機関合同シンポジウムが開催されるようになった。そこでは、自動車技術会での技術寄りの内容に現象的な考察を加えたものが企業側から、計測、解析、現象等の学際的なものが学界から発表され、学界と企業の人々がそれぞれの立場で討論されている。つまり技術側と学問側と一緒に討論でき、企業側のニーズも知ってもらえる非常に良い場所になっている。そのため年々発表件数も多くなり討論も活発で、懇親会も産学のコミュニケーションを良くするのに役立っている。前述のように伝熱シンポジウムは、今まであまりにも学界寄りの発表、討論の場であったために企業

からの発表、参加者が少なかった。企業からの参加者を増加させる道は、まず企業側から身近に感じるような物に結びついた発表を多くすることである。これが特別セッションの伝熱シンポジウムに果せられた役割ではなかろうか。そのためには伝熱研究会の会員でなくても前述の自動車技術会、合同シンポで物に結びついた伝熱に関連した研究を発表しておられる方と、学界で企業のニーズを踏まえた伝熱を研究し、伝熱シンポには発表されていない方を勧誘する必要があると気付いた。

そこで熱交換器、自動車用エンジン、エアコンディショナー、人間-熱環境、生産技術における伝熱など自分の研究分野から選ぶことにした。なかでもエンジンの伝熱は、昨年International Center for Heat and Mass Transfer主催のHeat and Mass Transfer in Gasoline and Diesel Engines (August 24-28, 1987, Dubrovnik, Yugoslavia) に発表のため出席し、国際的にも大きな問題としてクローズアップされてきたことを痛感したので、今回は「レシプロエンジンにおける伝熱」とさせてもらった。

自動車用エンジンは排気対策技術、低燃費化技術が一応確立したので、ユーザニーズから出力を大きくする方向に進んでいる。そのため、エンジンおよびエンジンルームでの伝熱、熱制御、熱応力などの熱問題が増々クローズアップされ、今までのような技術力だけでは対処できなくなりつつある。しっかりとした現象把握と自然現象の新しい応用、先端科学・技術の導入が今後積極的に求められていくものと思われる。特別セッション「レシプロエンジンの伝熱」ではレシプロエンジンでどんな伝熱的課題があり、どんな研究がなされているかを会員の皆様に知って欲しかった。しかし、時間的制約もあり今回は燃焼ガスから燃焼室壁へ、さらに冷却水、潤滑油までの伝熱問題に限定し、企業側から3件、学界から2件お願いした。講演者ならびに共同研究者の方々には紙面を借りて厚く御礼申し上げます。”御協力誠に有難うございました。”

その他の4つの特別セッションも企業からの発表が多かったこともあって大変盛会であった。この特別セッションが、今回のシンポジウムにおける発表数、参加者数などに記録的な数字を残すことに大きく寄与したように思う。もちろん会場の良さ、準備の良さ等もその成功に大きく貢献したことは申し上げるまでもない。準備された方々に心から敬意を表すとともに、今回のような特別セッションが企業からの発表数、参加者数を増加させるのに非常に有効であり、今後とも継続実施されることを希望します。

## 数値計算と境界条件

小竹 進 (東大)

特別セッション「数値計算と境界条件」の企画目的は、最近伝熱シンポジウムにおいても数値計算が急激に増加し、数値計算手法そのものにも問題があるがその境界条件にはそれ以上の多くの重要な問題があるので、それらを一度総合的に討論してみようということにあった。結果的にいうと、対象を広げ過ぎて十分な時間を取れなかったことと企画の意図が十分に理解して貰えず当を得た討論が十分にできなかったために、とても及第点にまではいかなかったのではないかと思う。しかし、伝熱問題の数値計算で遭遇する種々な境界条件の問題の難しさについて、多くの経験と業績をもとに解説、論議していただいた諸先生のお話は改めて「伝熱研究」特集号としてまとめても良い以上の価値のあるものであった。

当日のプログラムに沿って述べると、最初の3件は伝熱シンポジウム一般講演申込みの中からの本セッションへの参加であるが他の7件は内容を指定して特別にお願いしたものである。内容としては、各種の問題の数値計算における境界条件の考え方、設定の方法、問題点、注意点など間違いや失敗の経験をも豊富に披露して論説していただきたいとお願いした。公の場で自分の間違いや失敗例をあげて討論課題にすることは、相当な経験と実績がないかぎり難しいことであるが、お願いした先生はいずれもその資格十分であり無理を言って登壇いただいた。したがって、お話の内容も講演寸前までどうするか考えていただくことにして、講演論文集の論文要旨の執筆は各自自由にしていただいた。論文要旨のない伝熱シンポジウム講演は特別講演を除くと例がないとお叱りをいただいたが、以上のような企画であることをご理解いただきご容赦願いたい。むしろ、シンポジウムであるかぎり、このような企画が今回のシンポジウムのように数多くなるべきではないかと思う。この点、シンポジウム準備委員長の林先生のこうした企画に対する積極的な態度とその功労は大きく評価されるべきである。

シンポジウムは参加することに意義があるということであれこれ後でいうことではないと思うが、今後のこのような企画の参考の意味もあるので当日の講演討論内容、特に特別にお願いしたつぎの8件についての私見を羅列してみたい。

- (1)  $k-\varepsilon$  乱流モデル (長野靖尚)
- (2) LES 乱流モデル (小林敏雄)
- (3) 物体まわりの流れ (岡島 厚)
- (4) 管内ステップ流れ (山下博史)
- (5) 自然対流の問題 (尾添紘之)
- (6) 溶融・凝固問題 (斎藤武雄)

(7) 火炎伝播・燃焼問題 (佐野妙子)

(8) 対向凝縮流問題 (土方邦男)

プログラムでは11件を予定していたが、米国からの2件が欠席になったために、(8)とともにさらにもう1件(乱流問題、河村洋)をお願いしてあったが時間的に無理で残念であり、河村先生にはご迷惑をおかけした。

強制対流では乱流モデル自体どうするかということが大きな問題であり、その境界条件だけに話を絞って討論せよということに初めから無理があるが、乱流モデルそのものも境界条件を抜きにしては展開できないものである。これだけでも多くの時間をかけて議論すべき問題であるが、ここではできるだけ境界条件そのものに焦点を合せて論議していただいた。 $k-\varepsilon$ モデルは、なんとなく論理があるような顔をしていて簡単なために人気があり、本来持っている能力以上に働かされている例が多いが、さらにこれを伝熱問題に利用するとき温度場の乱流拡散 $k-\varepsilon$ はどうするのかという問題がある。(1)においては、速度場と同様な論理のもとに温度場の $k-\varepsilon$ モデルを構築し、乱流プラントル数などという概念の導入なしに乱流速度・温度場を数値計算できることをしめし、そのときの境界条件の問題を論じていただいた。 $k-\varepsilon$ モデルは簡単なところに意義があり、したがってそれが適用できる問題、境界条件にも自ずから限界がある。これらの制限を取除くためにいたずらにモデルの内容を複雑にすべきではなく、その適用限界の討論が今後さらに必要であると思われる。(2)はさらに、物理的内容を簡単にした Large Eddy Simulation モデルであるが、Large Eddies、Small Eddies ともに境界条件の問題は難しくなる。流れの入口、出口の条件も問題であるが、ここでは固体壁での条件を論議している。この種の計算は今後急速に多くなり、これらの問題も大きな議論となることとおもわれるが、伝熱問題としては少し立後れている感じがする。

開放空間での物体まわりの流れの境界条件の問題、特に流れの無限後方での条件の問題は、流体力学の分野では歴史が古くかなり検討されている。伝熱問題としては閉空間の問題が多いためかあまり議論になった例をしらないが、(3)の管内流れにおいてもメモリを節約した計算では無限後方の条件はかなり厳しく、さらに多くの経験例を貯蓄して論議する必要がある。

3次元問題においても、流(線)面あるいは速度ベクトルポテンシャル法を用いて圧力項を消去した齋次な運動方程式を解くことが、精度的にも安定性上も有利である。しかし、基礎式の微分が1階上ってしまうために、境界条件の問題を慎重に検討しなければならない。(4)においては自然対流の問題でこの問題の難しさを種々議論していただいたが、まだこの問題の経験者が少ないためか討論までには至らなかった。

境界面の移動は相変化の問題には必然的であるが、さらに界面の移動が相変化を支配するときは界面の移動を精度よく計算することは重要な問題である。(5)では、溶融・凝固の問題において、このような境界条件の処理の仕方およびその利点欠点について議論していただいた。沸騰・凝縮問題を含めてこの種の問題はさらにこれからますます複

雑なものに応用できるものが必要となってくるものと思われる。

燃焼問題では、化学種の反応拡散問題が追加されるが、1次元問題で適当な未燃混合気の速度のときに現象が定常になるといういわゆる燃焼速度の計算において、多成分反応のとき本当に一意的な解が存在するのだろうかという問題と共に、その境界条件が結果にどのように効くのだろうかという問題がある。(7)ではこの問題の経験をまとめて議論していただいたが、これだけの非線形性の強い問題になると、一般的な議論をすること自体が難しいように思われる。

最後の問題は、対向流、とくに境界層的な、流れ方向に1階微分の流れの対向流、(8)では下向きに凝縮流、上向きに主気流が流れる場合の上下の境界条件の問題である。この種の問題は、物理的現象をよく理解した上でないと単に数値計算上の境界条件としては処理できない問題である。

以上は、プログラム1(加熱円柱群の層流熱伝達、宮武修他)を含めて、数値計算において、その境界条件が結果にどのように影響するか、したがって、どのような境界条件を課すべきであるかという問題であるが、逆に、数値計算を行って境界条件がどうなっているかということを知る問題がある。これは、数値計算の新しい威力であり、それにやや近い問題がプログラム3(ダイレクトシミュレーションモンテカルロ法による温度場の解析、杉山憲一郎他)である。モンテカルロ法でなく正確な分子運動方程式を解けば凝縮界面で温度、密度がどうなっているかということの数値計算で知ることができる。これは数値計算というより数値実験であり、これから計算機の進歩とともにますます盛んになる新しい魅力ある数値計算分野の一つである。

数値計算における境界条件の問題は、如何に計算機の容量が大きくなって、有限の時間空間領域の計算である限り、必然的につきまとう問題である。多くの伝熱問題において、基礎式は数個の全く同じものであるのに、ただ境界条件の違いからあれだけ様々な現象が生じていることを考えると、境界条件を如何に設定するかということが律速であり、数値計算は境界条件に始まり境界条件に終わるといっても過言でない。しかし多くの数値計算では、NS方程式などの非線形方程式を如何に精度・安定性よく解くかということに主眼をおき、境界条件の重要性の認識が十分でない場合が多い。それはできるだけ境界条件に疑問を残さずに方程式の解法に力点をおくためであろうが、実際の伝熱現象の数値計算においては境界条件は致命的であり、十分に現象を理解した上でその境界条件を検討し設定する必要がある。このような意味で、伝熱数値計算とその境界条件については、今回のような総花的なことではなく、もっと内容を限定した詳細な議論と経験の交換の場がさらに多く企画されることが望まれる。



ペレストロイカと第1回 Minsk International Heat and Mass Transfer Forum

越後 高三 (東京工大)

今年の2月、A.V.Luikov Heat and Mass Transfer InstituteのO.G.Martynenko教授 (1987年8月から故 Soloukhin 所長のあとをうけ、新所長に就任) から表記フォーラムへの招待と International Scientific Advisory Board への招請を受けた。本フォーラムは 1961 年以来 4年毎に開催されてきたソビエト連邦の All-Union Heat and Mass Transfer Conference を改組し、5月24日～27日、Minskにて開催すると記してあった。数年前にも同氏からAll-Union Conferenceへ招待されたが、断ったことがあった。日程の都合もあまり良くなかったことと、ソ連への旅行経験者の話では、うんざりさせられるようなものにばかりであったこともあるが、何よりもソ連の研究レベルが論文とか国際会議の発表を見るかぎりあまり高くなく、時々ま目を見張るような革新的な内容に触れることはあるが信頼性をもてるようなものがほとんどないのが大きな理由であった。

ペレストロイカの掛け声と歩調を合わせて、また米ソ首脳会談直前でレーガン大統領一行の訪ソを控え、モスクワセルニチゴ空港は張りつめた緊張感のなかにも生気のようなものが何となく感じられた。荷物の引渡しのできる場所に他の便の荷物がでて手間どったりなどの手違いはあったが、最近のニューヨークとか成田空港などよりはむしろよかった。国内便乗り換え場所で Minskの LHMTI から人が派遣されており、Minsk空港へ出迎えの人への電話連絡をとり、深夜ではあったが無事ホテルに入った。多くのロシア人から、またいろいろな場所でゴルバチョフ政権のペレストロイカ路線を支持する話が度々聞かれた。

フォーラムの前日組織委員会が Martynenko 所長の司会で開かれ、米国の J.P.Hartnett, T.F.Irvine両教授はじめなつかしい人々の間に普段会うことのない朝鮮民主主義人民共和国、キューバ、ベトナムからの代表者とも同席した。フォーラムの経緯説明、Opening Ceremony の進め方、次回以降のフォーラムの在り方等が諮られた。印象に残っているものとしては、まず投稿論文数 1300 編余り、受理したもの 708 編、その中約 1 割を Chairman の推薦に基づき、Proceedingとして出版するなど我々の度胆を抜くに十分な規模の大きな話とか、最近の物故者の名前、会期中の講演会の進め方、次回以降もこのMinskの地で4年毎に開催し、Int.J.Heat and Mass Transfer, Heat Transfer-Soviet Research にアナウンスを出し、周知をはかるようにすること等を挙げるができる。Opening Ceremony は市内目抜き通り Lenin Ave. に面する Cinema House で開かれ、われわれ Int'l Scientific Advisory Board のメンバーはステージに席が設けられ、2階までほぼ満席で、1500 名ぐらいと聞いた。実際はこれより

多いのか少ないのか判からないが、まさに壮観というほかない。開会宣言に続き、当分野で功績のあった物故者に、しばし黙祷を捧げ、冥福を祈った。読み上げられた中には前日の組織委で確認したとおり、故佐藤 俊先生、故水科 篤郎先生のお名前もあった。祝辞の中でHartnett教授が、Heat and Mass TransferのCommunityではペレストロイカは1961年の第1回のAll-Union Conferenceの時から始まっていると、政治家たちの立遅れた今更ながらのペレストロイカをユーモアを混じえて批判した時には満場が拍手にわいた。引続きL.M. Biberman教授、A. A. Zhukauskas教授等の著名なソ連学者の特別講演が始まって、愕然とした。同時通訳の英語が殆ど理解できないのである。休憩時にロビーで会った英国のDr. D. Wilkie(UKAEA)はDo you understand English?と小生に相槌を求めてきた。言葉の問題は今後のForum運営上の大きな課題である。各セッションに別れてからは同時通訳はなく、外国人にはman-to-man(実はwomanが多い)の通訳が付き、外国人の発表は通訳がロシア語で説明する。小生の発表も意図した重要なポイントが首尾よく翻訳されていないことが、不思議にもロシア語が全く判らない自分自身の肌身を感じた。セッション分類は日本と似ていて2つのPlenary Session以外は11セッションで構成されている。( / )内数字は(発表論文数/申込み数)

- 0 Plenary Session (10/?)
- 1 Convective Heat and Mass Transfer (106/?)
- 2 Radiative and Combined Heat Transfer (60/150)
- 3 Heat and Mass Transfer in Chemically Reactive Systems (54/100)
- 4 Heat and Mass Transfer in Two-Phase Systems (84/250)
- 5 Heat and Mass Transfer in Dispersed Systems (54/90)
- 6 Heat and Mass Transfer in Rheological Systems (60/95)
- 7 Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies Involving Drying  
(67/93)
- 8 Heat Conduction (47/140)
- 9 Computerized Experiment in Heat and Mass Transfer Problems (57/120)
- 10 Heat and Mass Transfer in Power Plants (58/164)
- 11 Heat and Mass Transfer in Chemical-Technologicak Apparatus (49/86)

会場が分散していて不便であったが、それぞれの会場には出席者も結構多く、討論もかなりの時間を割いて活発に行われていたが、内容については残念ながら全く判らなかつた。

全会期中、公私にわたり面倒を見てくれたSergi A. Zhdanok氏を紹介させていただく。同氏の名刺にはCand. Sci. (Phys. and Math.) Head of the Laboratory for Thermoaerodynamics, Luikov Heat and Mass Transfer Instituteとあり、35才、物理学を専攻し、室長に就任した

ばかりの気鋭の研究者で、30 余名のスタッフを含め 50 名位の研究室の責任者で、日本の猛烈研究者も驚かされるような仕事一途の努力家で、恐らく将来本研究所を背負って立つ人となることは間違いない。まだ 35 才の年齢にしてはプロの musician、シベリアでのブルーカラー労働者としての労役等多彩な経験を積み、現在の部下（年齢的には同輩、年長の人）からの敬愛も集まっているようであった。繁忙を極める日課の中を親身になって小生の面倒をみてくれ、Minsk 空港で別れた後、機中に入るときに振りかえったら、最後まで見送ってくれたのに胸が熱くなった。

Heat and Mass Transfer Institute の研究は大変活発で、計装設備、データ処理装置も日本の平均的な大学の研究室よりむしろ優れていて、idea の裏付けも想像とは逆に堅実なものであった。なぜ論文が、あるいは発表があのように貧弱で、信頼性に乏しいのか疑問に思えたが、議論の中で “発表にはいままでコントロールがあった” との説明を受け疑念がかなりの部分氷解したように思った。

最後に、夕方から夜の過ごし方はポリショイバレーとかクラシック音楽鑑賞等、企画の中にはなかったがサーカスも毎夜催されて安価で市民が楽しめる物が多いが、高級なレストランで静かに奏でる室内楽を楽しみながらおいしいロシア料理を一度味わうことが出発前からの楽しみであったが、このようなブルジョアの発想による楽しみは全くできないことを知ったのは一週間滞在して終り頃になってからであった。ホテルのレストランでさえ、安い定食 2、3 種しがなく、ドル・バーでビールを飲むのが最高の楽しみであった。

1. 序 沸騰と凝縮は正反対で全く類似の現象か

滴状凝縮はその外観の美しさ、面白さで見るものを魅了する。その魅力にとりつかれた者は数多く、彼らの努力によって伝熱の機構もかなり分かってきたといえるだろう<sup>(1,2)</sup>。凝縮は沸騰と反対向きの相変化現象であり、事実図1に示すTakeyama-Shimizuの凝縮曲線<sup>(3)</sup>も、沸騰における核沸騰から膜沸騰への遷移が滴状凝縮でも起るに違いないとの連想から生まれたものである。液滴の生成から膜状凝縮熱伝達まで沸騰との類似点は多く、対比により機構の考察が深まることも多い。では、沸騰と凝縮は正反対だが全く類似の現象として取り扱えるだろうか。

成る程、例えば蒸気の過熱の影響は、沸騰におけるサブクール度の影響と同様、凝縮曲線において大きな差をもたらすものではない。しかしその理由は、核沸騰では伝熱面の極く近傍の気液の自律的な運動に支配されるためと考えられるのに対し、凝縮では蒸気の頭熱が凝縮潜熱に比し極めて小さいためと考えられ、両者を対比して扱うことは

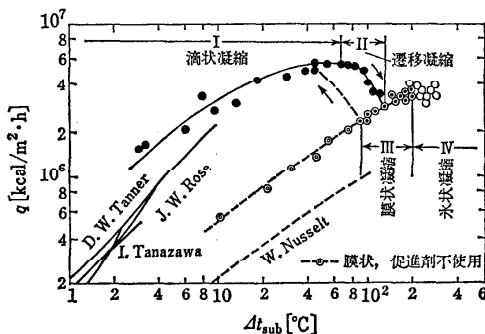


図1 Takeyama-Shimizu<sup>(3)</sup>の凝縮曲線

できない。これは、伝熱面上で液滴あるいは気泡と接触している部分の面積比の違いにも大きく左右され、極大熱流束点への過冷・過熱の影響の大きな差となって現れる。すなわち、核沸騰では伝熱面は大部分液体で濡れた状態にあり、極大点近傍でもそれは維持される。しかし、高熱流束域では伝熱面上空に大きな蒸気塊が形成され、これが伝熱面上への液体の供給を阻害するためドライアウトが生じ、遷移沸騰へ移行することは、周知の通りである。液体がサブクールされていると、この蒸気塊の形成、ひろがりやが抑制されるため極大熱流束は大きく増大する。一方凝縮では、伝熱面上に形成される液滴が熱流束の増加とともに多量になり、伝熱面から十分落下排除できなくなったところで遷移が生じると考えられる。伝熱面はその大きな部分が熱抵抗となる大きな滴に覆われて、液滴底部と接触している。蒸気が過熱されていてもこの大きな滴を蒸発収縮させる程の力はなく、まして液滴排除の効果もなく、極大熱流束を増大させる効果は小さい。

流速の影響はどうであろうか。沸騰ではサブクールの影響と同じ理由で、核沸騰領域への影

響は小さいが、極大熱流束は流速とともに増大する。一方、凝縮では液滴の離脱排除が促進されるため熱抵抗となる大きな滴が減少し、また、排除に要する時間も短縮されるため、滴状凝縮の熱流束は増大する<sup>(4)</sup>。しかし、宇高ら<sup>(4)</sup>によると極大熱流束への影響は少ないようである。

すなわち、沸騰と凝縮の根本的な違いは、沸騰では発生気泡が伝熱面を離れて移動するのに対し、凝縮では液滴が伝熱面上を接触しながら移動することにある。

## 2. 滴状・膜状共存面の凝縮熱伝達

沸騰に関しては、低液位、狭い空間、噴流、強サブクールや特殊形状伝熱面など、特殊系に対する研究が盛んに行われて来た。凝縮についてはそのようなものが少ないようである。強いて挙げれば遠心力場<sup>(5)</sup>や粗面上<sup>(6)</sup>での滴状凝縮などであろうか。この場合も液滴を伝熱面上を移動するものとしてとらえ、その運動への働き掛けという形を取る場合が多いものと思われる。

そのようなものの一つとして、滴状・膜状共存凝縮面を挙げることができよう。これは同一伝熱面上に滴状凝縮を行う低表面エネルギー撥水性面と、膜状凝縮を起こさせる親水性面とを人工的に混在させるもので、液滴の排除に関する両部分の相互干渉を利用しようというものである。ここでは、そのような伝熱面のうち、幾つかのパターンにおける熱伝達特性と、相互干渉の機構について述べてみる。

### 2. 1 滴・膜共存の凝縮の様相

伝熱面として直径15 mm、銅製の鉛直円形平面、および一辺が7 mmの矩形平面を用い、

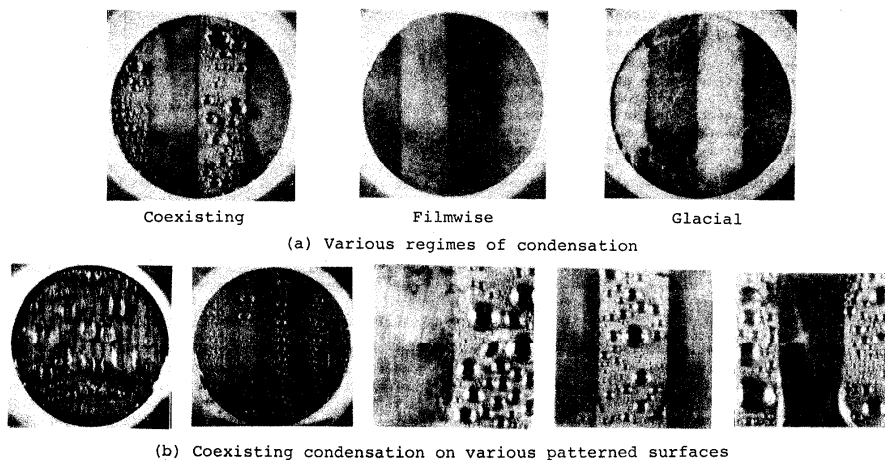


図2 共存凝縮の様相

適当な前処理後、金を真空蒸着することで撥水性部分を形成させた。この方法により、滴状凝縮部分と膜状凝縮部分を細かく分けた、種々の分割パターンが可能である。

図2は滴・膜共存凝縮面上での凝縮の様相を示した写真で、上の段は縦4分割における共存凝縮（金蒸着面で滴状、銅面で膜状）、膜状凝縮（金蒸着面でも膜状）および氷状凝縮を捕らえたものであり、下の段は幾つかの分割パターンにおける共存凝縮の様相である。各パターンともに良好な滴状および膜状凝縮面が共存し、その境界も明瞭に現れている。滴状部分に着目すれば、その液滴径は膜状部分に挟まれた滴状凝縮部分の幅に関係があり、境界線付近には小さな液滴が並び、比較的大きな液滴は膜状部分の流れに引き込まれていく。滴状凝縮部分の平均滴径が小さいことは、この部分の熱伝達が全面で滴状を行う場合の熱伝達よりも良好で、しかも分割が細かいほど高熱伝達率を示す可能性のあることを示唆している。

## 2. 2 混在面の平均熱流束

図3は混在面の凝縮曲線である。滴状部分と膜状部分を同じ幅で交互に鉛直にならべたもので、面積比は50%であり、2分割から30分割（幅0.5mm）まで4種を、全面滴状凝縮と比較したものである。混在凝縮面の熱流束は分割が多くなるほど高くなるが、縦分割のこの

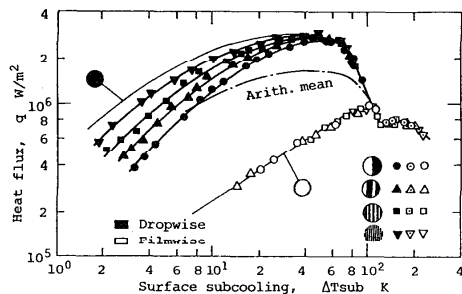


図3 縦分割共存面の凝縮曲線

実験では全面滴状凝縮面の熱流束を越えることはできなかった。図中の一点鎖線は、全面滴状凝縮と全面膜状凝縮の熱流束の算術平均値であるが、面積比が50%であるにもかかわらず、大部分の場合混在伝熱面の熱流束は、この曲線より高い値となる。このことは、混在面における滴状、膜状の、少なくとも一方はかなり熱伝達が促進されていることを意味する。

混在パターンによる熱流束の差は、低熱流束域で大きく、熱流束の増加とともに減少して、最大熱流束点から遷移・膜・氷状凝縮ではほとんど一本の線で表わされる。遷移領域は、そもそも滴状と膜状が共存する領域であり、伝熱特性に大きな差が見られないことは予測できたことであるが、遷移の開始に対し、隣接する膜状部分が大きな影響を及ぼさないことは注目すべきである。

## 2. 3 混在面のそれぞれの部分における熱伝達

ここで、滴・膜それぞれの部分にどの程度の伝熱促進、あるいは劣化があるかを検討してみる。そのために、図4に示す2種類のテストピースを用意した。タイプBは滴状部分と膜状部分の境界位置に、伝熱面のすぐ下まで幅0.2mmの溝を1本入れたもので、各部分への伝熱

量を別々に測定することができる。タイプAは溝をもたないもので、基本的には前節のものと同じである。

図5は、タイプBの伝熱面を用い、垂直2分割の混在凝縮をおこなわせたときの、それぞれの部分の伝熱特性を凝縮曲線の形にまとめたものである。一点鎖線はタイプAの伝熱面を用いて得られた全面滴状凝縮と、全面膜状凝縮の熱流束を示している。黒丸で示されている滴状部分の熱流束が、全面が滴状の場合よりも低い熱流束となることは注目に値する。これは、2.1節における推測と相反するものである。

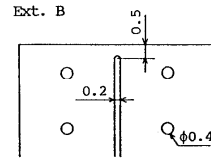
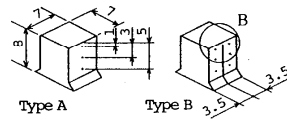


図4 テストピース

一方膜状凝縮部分の熱流束は、全面膜状凝縮の場合よりもかなり高い値となり、熱伝達が大きく促進されているのがわかる。たとえば、過冷度30 Kと比較すると、滴状凝縮部は20%熱流束が低下しており、膜状部分は80%増加している。これがまさに、隣接共存による干渉の影響である。

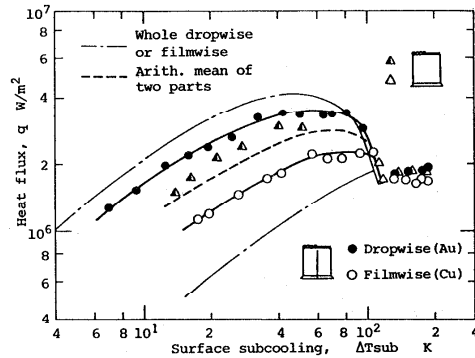


図5 共存時の滴・膜各部の熱流束

## 2.4 液滴および液膜の挙動と伝熱促進、劣化の機構

共存凝縮面の伝熱特性は、滴状部分における滴の離脱機構とその排除作用、および、膜状部分における流下液膜の乱れの強さに強く左右される。二つの部分の境界近傍には大きい滴は存在せず、全面滴状凝縮面における離脱滴径よりも小さい径で、膜状部分に引き込まれる。離脱滴径が小さく抑えられるということは、熱伝達の促進につながるはずである。しかし、滴が膜

状部分へ取り込まれることはその下の滴が掃除作用を受ける機会が減少することを意味する。

図6はこのことをよく表した写真である。この一連の写真は、境界近くを落下している大きな液滴が、膜状部分にまさに引き込まれようとしているところであり、掃除されるはずであったその下の中小滴が、掃除されずに残ってしまったことを表している。したがって、この部分では熱伝達が劣化したと考えられる。滴状部分

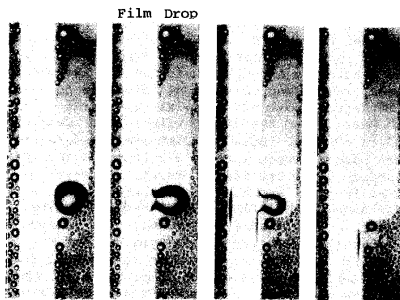


図6 滴状部の液滴の挙動

の熱伝達は、これら相反する効果の結果であり、ここで得られた結果は、後者が前者を上まわったことを意味する。

一方、膜状凝縮部分の熱伝達促進は、滴状部分から突入する液滴が引き起こす、凝縮液膜内の強い乱れによるものである。図7 (a) (b)は、ドラムカメラを用いてとらえた、適と液膜の挙動である。(a)では、滴状部分に大きな滴は見られず、滴は液膜と接触すると、ただちに引き込まれる。突入する多数の滴により、液膜が強く乱されているのがわかる。図(b)は滴が液膜へ突入する瞬間をとらえたものであり、液膜内に大きな波動が生じるのが観察される。

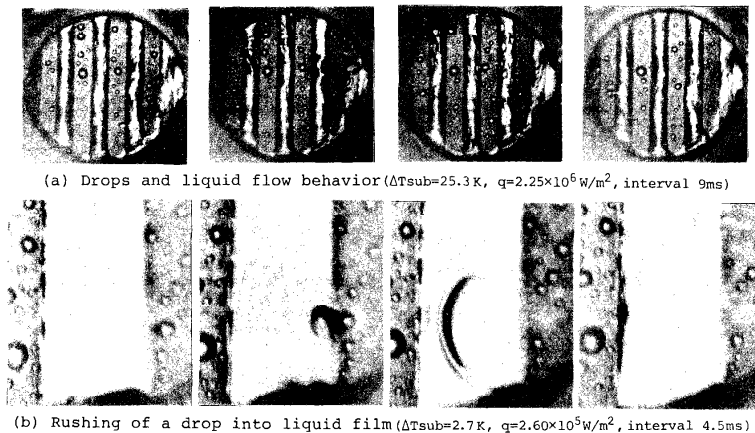


図7 膜状部の液膜の乱れ

## 2. 5 滴状凝縮の共存による膜状凝縮熱伝達の促進

前節で、滴状部分と膜状部分を共存させた場合に、熱伝達が促進されるのは膜状部分の側で、滴状部分はむしろ劣化する傾向にあることが示された。そこで、滴状凝縮の共存により、積極的に膜状凝縮熱伝達を促進することへの応用が考えられる。

一般に滴状凝縮促進剤はその安定性、耐久性が最大の課題で、そのために、非常に大きい熱流束が得られるにもかかわらず、滴状凝縮が工業的に応用された例は殆ど無い。種々の滴状凝縮促進法が考えられている中で、最も有望とされているものの中に、伝熱面に高分子皮膜を形成する方法がある。このとき伝熱面には安定で良好な滴状凝縮が実現できるが、この方法の欠点は皮膜層の熱伝導率が小さいために、 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ の薄さでなければ膜状凝縮と比べてそれほど大きな熱流束が期待できないことである<sup>(7)</sup>。もし安定で十分な耐久性をもたせるためにある程度の厚さが必要で、それが大きな熱抵抗を伴うものである場合、この滴状部分を膜状部分と適当な分布割合で共存させることで膜状部分の熱伝達を促進し、その結果伝熱面全体としての平均熱流束を全面膜状凝縮の場合よりも大きく増大できれば、高性能凝縮伝熱面の一つの形と考えることが出来よう。このとき、同じ面積比率で熱抵抗の大きい部分が伝熱面表面に存在す



る場合、それを細かく分けて分布させた方が一つに固まっている場合よりも、全体としての熱抵抗が小さくなることも考慮する必要がある。

## 2. 6 滴・膜共存による全熱流束の促進の可能性

さて、縦分割においては図3に示したように、共存伝熱面の平均熱流束は、全面滴状凝縮面の熱流束を越えることはできなかった。他のパターンではどうであろうか。図8は、放射状パターンにおける分割幅をパラメータにした凝縮曲線で、この場合も面積比は50%である。この実験では蒸気を伝熱面に対し垂直に衝突噴流の形で吹き付けている。したがって、伝熱面上で蒸気は放射状外向きに流れている。放射状パターンでも、分割を細かくすると熱流束は増大する。この場合、遷移凝縮が開始する伝熱面温度は、

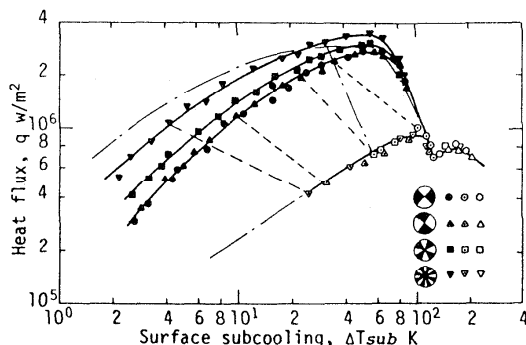


図8 放射状分割共存面の凝縮曲線

過冷度の大きい方にずれる傾向を示す。しかも、1/6分割においてはその最大熱流束が全面滴状凝縮のそれを上回っている。これは蒸气流のせん断力により、滴状部分の液滴を効率よく突入、排除させながら、膜状部分の液膜を周囲に向かって押し流しているためと考えられ、高性能凝縮伝熱面としての可能性が期待される。

## 2. 7 膜状凝縮の共存が滴状凝縮の遷移過程に及ぼす影響（沸騰との類似）

共存凝縮伝熱面の実験は最初、膜状凝縮部分の共存が滴状凝縮部分の滴から膜への遷移に何らかの影響を及ぼすであろうことを予想して始められたものである。しかし種々のパターンに対し、統一的で明確な傾向は得られなかった。最近宇高ら<sup>(8)</sup>は、滴状凝縮を行う円形伝熱面の周囲全体に膜状部分を共存させたり、あるいはこの円形伝熱面が膜状に遷移した後でも、周囲全体または一部が滴状に保持される共存凝縮伝熱面における遷移特性についての実験を行い、とくに膜状から滴状への遷移に対し、それぞれの共存が大きな影響を及ぼすことを報告している。これは、凝縮液が伝熱面上を流下するという凝縮の沸騰との相違よりも、むしろ沸騰との対比から、すなわち膜沸騰の崩壊に及ぼす伝熱面端部の条件の影響<sup>(9)</sup>と共通する部分を感じられ興味深い。

## 3 むすび 再び沸騰と凝縮の対比に戻って

滴・膜共存凝縮に対応する核・膜共存沸騰は実現が困難である。同一伝熱面上に核沸騰と膜

沸騰を共存させることは、例えば拡大伝熱面を用いれば容易に実現できるし<sup>(10)</sup>、そうでなくても細線の加熱に工夫を施したり<sup>(11,12)</sup>、あるいは同じく細線に超音波を照射した最近の研究<sup>(13)</sup>でも見られるものである。しかしこれらの伝熱面では、核沸騰部分と膜沸騰部分の温度が大きく異なっており、ここで取り扱った滴・膜共存凝縮面のように、ほとんど同一伝熱面温度で両者を共存させたものとは状況が異なる。

沸騰曲線はN字形で、同一熱流束に対し伝熱面温度は3値を取ることができ、細線に関してはおよそこの状況が実現されている。しかし、伝熱面温度に対し熱流束は1値であり、したがって一様伝熱面温度では共存できないことになる。凝縮曲線は図1に見られるように、撥水性伝熱面だけを見ると沸騰曲線に似ているが、親水性伝熱面をも含めると伝熱面温度に対し2値を持つため、このような形の共存が安定に存在できることになる。熱伝達特性曲線のこの違いも沸騰と凝縮の大きな相違の一つといえるだろう。

なお、滴状から膜状への遷移に関し宇高ら<sup>(14)</sup>は、凝縮液の粘性の増加による排液力の低下に注目した見解を述べている。また、粗面における滴状凝縮熱伝達特性の劣化について泉ら<sup>(15)</sup>は、表面摩擦係数に着目した整理の方法を提案している。いずれも伝熱面に沿った液滴の流動が系の伝熱現象を支配しているという考え方である。今後この観点に沿った特殊滴状凝縮系が提案されることが期待される。

## 文 献

- (1) 棚沢、滴状凝縮、伝熱工学の進展、4(昭50)、229、養賢堂。
- (2) 棚沢、生産研究、37-1、(1985)、3。
- (3) Takeyama, T. and Shimizu, S., Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf., 3(1974), 274.
- (4) 宇高・棚沢、機論、46-409、B(昭55)、1844。
- (5) 棚沢、ほか3名、機論、42-361(昭51)、2846。
- (6) 泉、ほか5名、化工論、12-6(1986)、647。
- (7) Marto, P. J. ほか3名、Int. J. Heat Mass Transf., 29-8(1986)、1109。
- (8) 宇高、ほか3名、24回伝熱シンポ講論、(1987)、200。
- (9) Shoji, M. ほか3名、JSME Int. Journal, 30-268(1987)1587。
- (10) 熊谷、ほか4名、機論、49-448、B(昭58)、2847。
- (11) Faber, E. A. and Scoria, R. L., Trans. ASME, 70-4(1948)、369。
- (12) 西川・下村、機論、29-204、(昭38)、1381。
- (13) 飯田、筒井、24回伝熱シンポ講論、(1987)、359。
- (14) Utaka, Y. ほか3名、2nd ASME-JSME Thermal Engng. Joint Conf., 4(1987)、377。
- (15) 泉ほか3名、24回伝熱シンポ講論、(1987)、176。

## 温度依存性温度伝導率の簡易測定法

佐野雄二、薄井洋基、山本修一、岡崎浩英（山口大工）

### 1. はじめに

温度依存性を持つ熱伝導率あるいは温度伝導率の測定法は定常法と非定常法に大別され、これまで種々の方法が提案されているが、新しく装置を製作し測定に熟練を要するとか、煩雑な繰り返し計算を必要とするなどそれほど簡単ではない<sup>(1, 2, 3)</sup>。ここには熱伝導現象と拡散現象の相似性に着目し、筆者ら<sup>(4)</sup>が先に求めた相互拡散係数が濃度依存性を示す場合の高分子フィルム脱着実験から拡散係数を濃度の関数として算出する方法を平板熱伝導に適用し、単に平板の中心温度の非定常変化を測定するのみで未知の温度伝導率の温度依存性を求め、更に熱束や温度分布を近似的に算出する方法を示す。また、この方法の妥当性を検討するため、温度伝導率の温度変化の比較的大きいポリエチレンを用い、平板中心温度の時間変化を測定する簡単な実験を行い、この方法に基づき温度伝導率を求め文献値と比較検討した。

### 2. 平板非定常熱伝導数値解析結果の概要<sup>(4)</sup>

この解析に使用した平板非定常熱伝導方程式を次式で表す。

$$\frac{\partial m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \phi} \left[ D_r \frac{\partial m}{\partial \phi} \right] \quad (1)$$

初期条件は

$$\tau = 0, \quad m = 1 \quad (2)$$

境界条件は

$$\phi = 0, \quad \partial m / \partial \phi = 0 \quad (3)$$

及び

$$\phi = 1, \quad m = 0 \quad (4)$$

ここに変数は次の無次元変数を用いる。

$$m = (\theta - \theta_1) / (\theta_0 - \theta_1) \quad (5)$$

$$\tau = \alpha_0 \cdot t / L^2 \quad (6)$$

$$\phi = x / L \quad (7)$$

$$D_r = \alpha / \alpha_0 = f(m) \quad (8)$$

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c_0) \quad (9)$$

また熱束は

$$F = -Dr \left. \frac{\partial m}{\partial \phi} \right|_{\phi=0} = \frac{dE}{d\tau} \quad (10)$$

ここに

$$E = 1 - \int_0^1 m \, d\phi = 1 - \bar{m} \quad (11)$$

式 (1) における温度伝導率  $Dr$  の温度依存性を表す関数としては、通常温度の一次関数が考えられるが、以下には拡散の場合をも含み次の3つの型を考えた場合の結果を述べる。

$$\text{一次関数} \quad Dr = am + (1-a), \quad -1 \leq a \leq 1 \quad (12)$$

$$\text{指数関数} \quad Dr = \exp\{a(m-1)\}, \quad -1 \leq a \leq 3 \quad (13)$$

$$\text{べき関数} \quad Dr = m^a, \quad 0 \leq a \leq 4 \quad (14)$$

ここに、密度  $\rho$  と比熱  $C_p$  は一定、 $a$  をパラメーターとする。(一次関数については  $a = 1 - \lambda/\lambda_0$  である。)

これらの関数を用い、基礎式 (1) を初期条件 (2) 及び境界条件 (3), (4) と共に、Crank-Nicolson法により差分化しコンピューターを用い数値計算を行った。以下に数値計算により得られた結果の概要を述べる。

平板表面の熱伝達率が十分大で、式 (4) の境界条件が成立する時、伝熱過程は次の三つに分けられる。

- 1) Penetration Period (以下 PP と略す。)
- 2) Transition Period (以下 TP と略す。)
- 3) Regular Regime (以下 RR と略す。)

PP は表面で  $m = 0$  に保たれ、なお中心温度が初期温度を維持している期間である。温度変化の起こる範囲が中心に迄達し PP が終わると TP に入り中心温度が下がり始め、次いで RR に至る。RR は、その温度分布が初期条件によらず決まる期間である<sup>(5,6)</sup>。これら三期間の温度分布の時間による変化の様子を図 1 に示した。

数値計算結果の一例として  $Dr$  が指数関数で  $a = 1$  の場合を図 2 に示した。この図

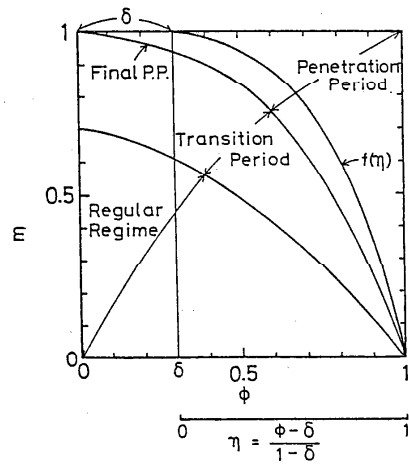


図 1 温度分布

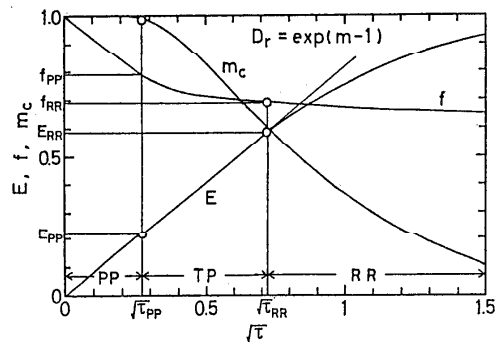


図 2 数値計算結果例

よりPP及びTP期間ではEと $\sqrt{\tau}$ の関係は直線となり、その勾配を $\beta$ とすると

$$\beta = E / \sqrt{\tau} \quad (15)$$

TPの後RRに入るとEと $\sqrt{\tau}$ との間の関係は直線より逸脱し始め、以後RR期間となる。この逸脱し始める点でのEの値を $E_{RR}$ とすると、PP期間終了時のEの値 $E_{PP}$ との間に次の関係が成り立つ。

$$E_{PP} = 0.40 E_{RR} \quad (16)$$

また、同図における $f$ は無次元温度 $m$ の値の平板における平均値と中心値の比を表す。

PP期間では積分平均の温度伝導率 $\overline{Dr}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} K_{YPP} &= \frac{m_0 \overline{Dr}_0 (1-f_{PP})}{(\beta^2/2)} \\ &= 0.35 f_{PP}^{-0.75} \end{aligned} \quad (17)$$

ここに

$$\overline{Dr}_0 = \left( \int_0^1 Dr dm \right) / m_0 \quad (18)$$

なお、この場合PP期間であるので $m_0 = 1$ である。また、 $f_{PP}$ はPP終了時における $f$ の値である。

$$f_{PP} = \overline{m} / m_0 \quad (19)$$

式(17)の関係は図3に示した。

更にRR期間では $\overline{Dr}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} K_{YRR} &= m_0 \overline{Dr}_0 / F \\ &= 0.50 f_{RR}^{-0.60} \end{aligned} \quad (20)$$

ここに

$$\overline{Dr}_0 = \left( \int_0^1 Dr dm \right) / m_0 \quad (21)$$

$$f_{RR} = \overline{m} / m_0 \quad (22)$$

式(20)の関係は図4に示した。

なおRR期間では $f_{RR}$ につき次式が成り立つ。

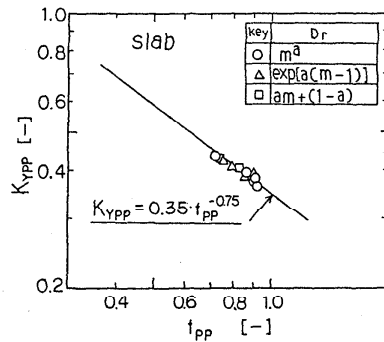


図3  $K_{YPP}$  VS.  $f_{PP}$

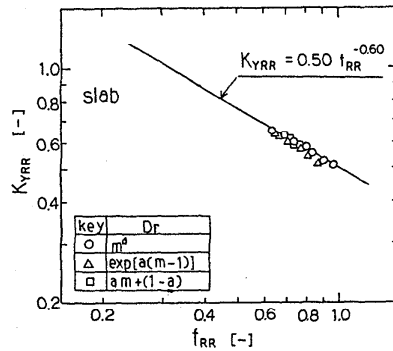


図4  $K_{YRR}$  VS.  $f_{RR}$

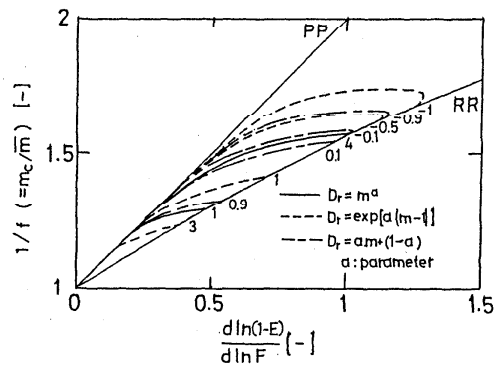


図5  $1/f$  vs.  $d \ln(1-E)/d \ln F$

$$1 / f_{RR} = 1 + 0.643X - 0.0813X^2 \quad (23)$$

ここに

$$X = \ln(1-E) / \ln F \quad (24)$$

式 (23) の関係は図 5 に示した。

次に、無次元温度分布を

$$\bar{m} = f(\eta) \quad (25)$$

で与える時、 $\bar{m}$  の値が  $f_{PP}$  あるいは  $f_{RR}$  となる  $\eta$  の値を  $\eta_m$  とすると、PP および RR によらず図 6 の関係が得られた。ただし無次元座標変数  $\eta$  は

$$\eta = \frac{\phi - \delta}{1 - \delta} \quad (26)$$

$\delta$  は図 1 に示す値で、 $(1 - \delta)$  が PP 期間での温度低下を生じる Penetration Depth を表す。 $\delta$  は TP および RR 期間では 0 となる。

### 3. 近似計算手順

前述の解析結果を用い、平板材料の中心温度の時間変化を測定して温度依存温度伝導率を算出する手順を以下に述べる。

1) 中心温度の時間変化の測定値より  $m_c$  及び  $\tau$  を算出する。

2)  $m_c = 0.99$  となる  $\sqrt{\tau}$  を  $\sqrt{\tau_{PP}}$  とする。

$$\sqrt{\tau_{RR}} = \sqrt{\tau_{PP}} / 0.40 \quad (27)$$

上式より  $\sqrt{\tau_{PP}}$  の値から  $\sqrt{\tau_{RR}}$  を求める。これは式 (15) 及び (16) に基づき、 $E$  と  $\sqrt{\tau}$  が比例関係にある事による。これより  $\tau \geq \tau_{RR}$  の範囲を RR 期間とする。

3)  $m_c$  と  $\tau$  の関係より  $(-dm_c/d\tau)$  を求め、さらにこの値を  $m_c$  に対し両対数でプロットする。RR 期間につき  $X = d \ln m_c / d \ln (-dm_c / d\tau)$  を求め、式 (23) より  $f_{RR}$  を求める。これは RR の期間で  $f_{RR}$  の変化が小さく

$$d \ln(1-E) / d \ln F = d \ln m_c / d \ln (-dm_c / d\tau) \quad (28)$$

として良い事に基づく。

4) RR 期間につき 3) で求めた  $f_{RR}$  より

$$\bar{m} = f_{RR} m_c$$

を用い  $\bar{m}$  を求める。なお、 $\tau_{RR}$  における  $\bar{m}$  の値を  $\bar{m}_{RR}$  とし、これより  $E_{RR} = 1 - \bar{m}_{RR}$  を求める。

5)  $E_{RR}$  より式 (16) を用い  $E_{PP}$  を求め、さらに  $f_{PP} = 1 - E_{PP}$  より  $f_{PP}$  を求める。

6)  $E_{PP}$  と  $\sqrt{\tau_{PP}}$  より  $\beta$  を求める。

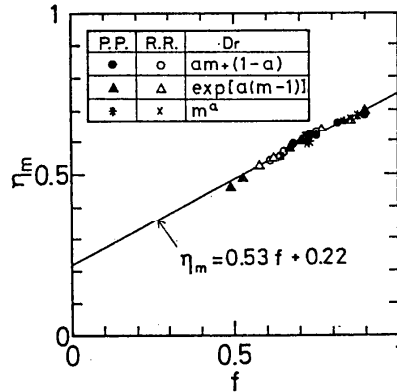


図 6  $\eta_m$  vs.  $f$

$$\beta = E_{PP} / \sqrt{\tau_{PP}}$$

7) PP 期間で

$$F = \frac{\beta}{2\sqrt{\tau}} \quad (29)$$

RR 期間で  $f_{RR}$  の  $\tau$  による変化を無視し

$$F = - \frac{d \bar{m}}{d \tau} = - f_{RR} \frac{d m_o}{d \tau} \quad (30)$$

これらの両式より PP と RR に対する F の値をそれぞれ求める。

8)  $m_o \bar{Dr}_o$  を PP につき式 (17)、RR につき式 (20) より算出し  $m_o$  に対しプロットしその図微分より

$$\frac{d(m_o \bar{Dr}_o)}{d m_o} = \frac{d}{d m_o} \int_0^{m_o} Dr \, d m = Dr(m_o) \quad (31)$$

に基づき  $Dr$  を  $m_o$  の関数として求める事ができる。

以上の計算において  $\alpha_o$  は未知であるが、計算は  $\tau$  の代わりに  $\tau' = t / L^2$ 、 $Dr$  の代わりに  $Dr' = \alpha$  を用いて行う事ができ  $\alpha_o$  の値は必要としない。これは、式 (17) 及び (20) の分子と分母に  $\alpha_o$  が含まれこの演算の過程で  $\alpha_o$  が消去されるためである。

次に平板内の温度分布の計算法につき述べる。温度分布を5次までの多項式で近似し、境界層速度分布の近似計算法と同様に分布関数に必要な条件を以下の様に設定する。

$$m / m_o = f(\eta) = a + b\eta + c\eta^2 + d\eta^3 + e\eta^4 + f\eta^5 \quad (32)$$

$$f(0) = 1$$

$$f(1) = 0$$

$$f'(0) = 0 \quad (33)$$

$$f''(0) = 0$$

$$f'(1) = -F(1 - \delta) / (m_o \bar{Dr}_{m=0}) \quad (34)$$

また、図 6 に示した関係より無次元温度分布において  $m$  が  $f_{PP}$  あるいは  $f_{RR}$  を与える  $\eta$  の値を  $\eta_m$  とし

$$f(f_{PP} \text{ or } f_{RR}) = \eta_m \quad (35)$$

以上、式 (32)~(35) の関係を用い、式 (32) の定数  $a, b, c, d, e$  および  $f$  を決定する事ができ、温度分布を求める事ができる。

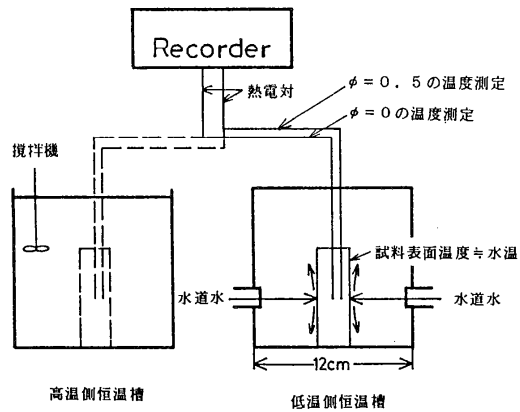
#### 4. 実験装置および方法

実験装置を図 7 (a) に示した。温度を記録するレコーダーと恒温槽 2 個の非常に簡単な装置である。低温側恒温槽は、水道水(温度一定)の流れが試料平板の表面に垂直に当たり、平板の両表面の熱伝達率が十分大となり、式 (4) で表される境界条件が満足されるようにし

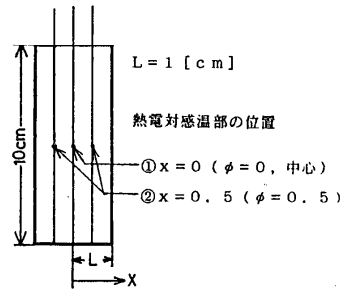
た。測定試料を図 7 (b) に示した。試料としては、温度伝導率の温度変化の比較的大きい材料としてポリエチレンを使用した。試料は、1 枚の厚さが 5 mm で、表面が約 10 cm 四方の平板 4 枚を張り合わせたもので、試料平板の厚さの 1/2 の位置 ( $\phi = 0$ ) と 1/4 の位置 ( $\phi = 0.5$ ) に直径 0.1 mm の熱電対を挿入した。温度伝導率の算出には中心位置 ( $\phi = 0$ ) のみの温度の測定で十分であるが、さらに

温度分布の推算の妥当性も検討するため  $\phi = 0.5$  の位置での温度も測定した。なお、ポリエチレンは、平板表面にシリコングリースを塗布し、圧着して周囲 4ヶ所をねじ止めした。

測定は、まず試料平板を一定温度の高温側恒温槽に漬け設定温度となるまで十分放置した後試料を素早く低温側恒温槽に移し、以後の温度の非定常変化をペンレコーダーに記録させる事により行った。なお、高温側および低温側の水の温度は別に熱電対を用い測定した。



(a) 測定装置



(b) 測定試料

図 7 実験装置

### 5. 結果および考察

実験により平板の  $\phi = 0$  と  $\phi = 0.5$  の位置での温度変化がペンレコーダーに記録される。この測定例を図 8 に示した。この場合  $\theta_0 = 58.2^\circ\text{C}$ ,  $\theta_1 = 8.6^\circ\text{C}$  である。このチャートから、 $m_0$ ,  $m(\phi=0.5)$  及び  $\tau$  を算出しプロットした結果を図 9 に示した。これらの図より  $\sqrt{\tau_{PP}}$  を求めると、 $\sqrt{\tau_{PP}} = 530$  [ $\text{s}^{1/2} \text{m}^{-1}$ ] の値を得た。この値より式 (27) を用い  $\sqrt{\tau_{RR}}$  の値を求めた。さらに、図 9 より図微分により  $(-dm_c/d\tau)$  を求め  $m_c$  に対し両対数にプロットし、図 10 に示した。式 (28) に基づき、RR 期間での図 10

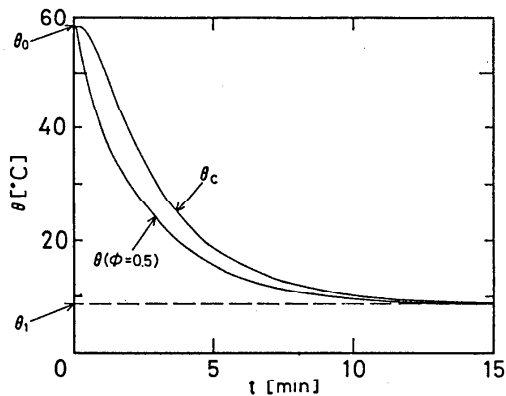


図 8 測定結果



の直線部分の傾斜の逆数を  $X$  とし、式 (23) より  $f_{RR} = 0.653$  の値を得た。RR 期間について  $f_{RR}$  を用いて  $\bar{m} = f_{RR}m_0$  より  $\bar{m}$  を求めて図 9 に示した。この  $\bar{m}$  より  $E_{RR} = 0.666$  となり、式 (16) より  $E_{PP} = 0.266$ 、従って  $f_{PP} = 0.734$  および  $\beta = 5.22 \times 10^{-4}$  を得た。PP 期間で式 (29)、RR 期間で式 (30) より  $F$  を求め  $\sqrt{\tau}$  に対してプロットした結果を図 11 に示した。図 11 において TP 期間の  $F$  の値は、PP と RR で求められた  $F$  をスムーズに結ぶことで得られる。 $m_0 \overline{Dr}$  を PP につき式 (17) より、 $m_0 = 1$  に対する 1 点と RR につき RR 開始点以降の数を式 (20) より求め、 $m_0$  に対してプロットした結果を図 12 に示した。図 12 を図微分することにより  $Dr$  が  $m_0$  に対して得られるわけであるが、降温実験の場合わずかに上に凸 (昇温の場合は下に凸となる) の形となり、これは温度伝導度が温度の上昇に伴い低下することに対応する。しかし実験の精度はこの傾斜を温度の関数として細かく表すほどには十分ではない。図 12 は図 8 の測定値につきこのプロットを示したものである。 $m_0 = 0$ 、RR 開始点の  $m_0$ 、 $m_0 = 1$  について図微分を行い  $Dr' = \alpha$  を求め、 $m_0 = 0$  ( $\theta = 8.6$  [°C]) の時、 $\alpha = 2.70 \times 10^{-7}$  [ $m^2/s$ ]、 $m_0 = 0.51$  ( $\theta = 34.1$  [°C]) の時、 $\alpha = 2.29 \times 10^{-7}$  [ $m^2/s$ ]、 $m_0 = 1$  ( $\theta = 58.6$  [°C]) の時、 $\alpha = 1.80 \times 10^{-7}$  [ $m^2/s$ ] の値を得た。同様にして得た  $\alpha$  と  $\theta$  のプロットを図 13 に示した。繰り返し計算法による岡田らの値<sup>(2)</sup>と連続加熱法による片山らの値<sup>(7)</sup>と両者のばらつきの範囲内で良く一致したデータが得られていることが解る。

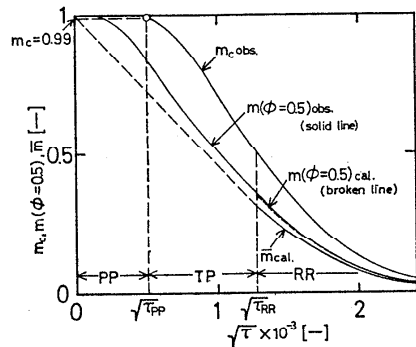


図 9  $m$  vs.  $\sqrt{\tau}$

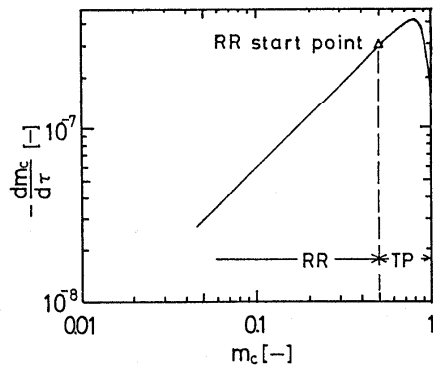


図 10  $-dm_c/d\tau$  vs.  $m_c$

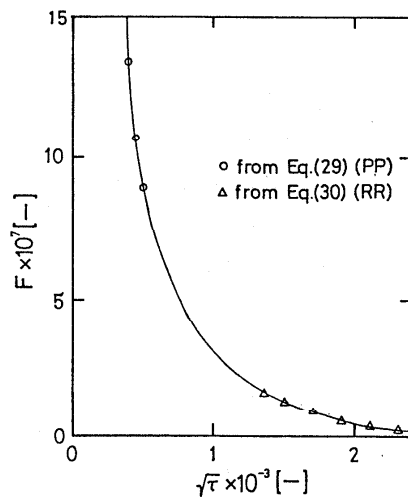


図 11  $F$  vs.  $\sqrt{\tau}$

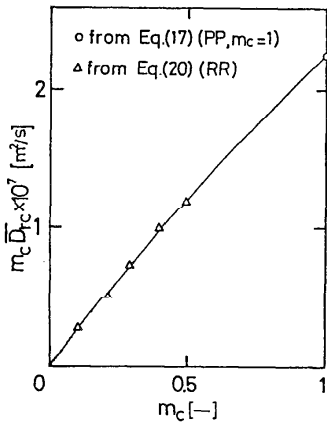


図 12  $m_c \bar{D}_c$  vs.  $m_c$

次に、図 8 の測定値についての  $\phi = 0.5$  の温度とこの近似法による  $m_c$  ( $\phi = 0$ ) から推算した温度分布の結果との比較を図 14 に示

した。また、 $m_c$  ( $\phi = 0$ ) と  $m_c$  ( $\phi = 0.5$ ) の比の RR 期間における測定値を図 15 に示した。RR 期間では、 $m_c$  ( $\phi = 0.5$ ) /  $m_c$  ( $\phi = 0$ ) は全範囲に渡り一定で実測値と計算値がよく一致した。

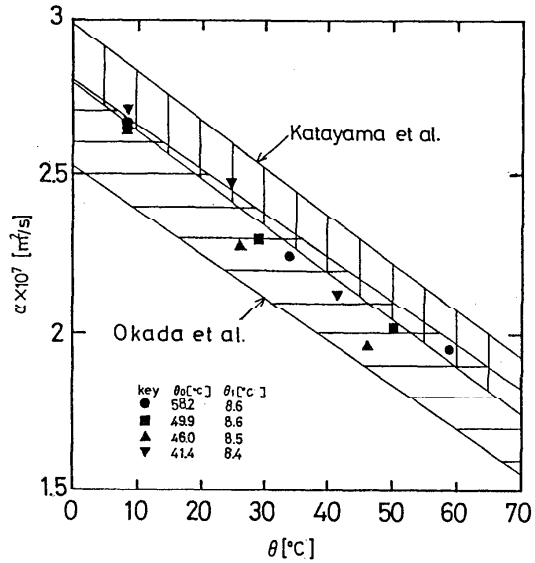


図 13  $\alpha$  vs.  $\theta$

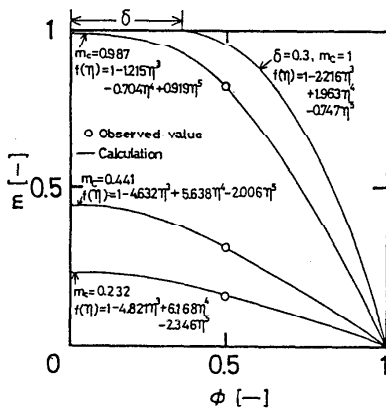


図 14  $m$  vs.  $\phi$

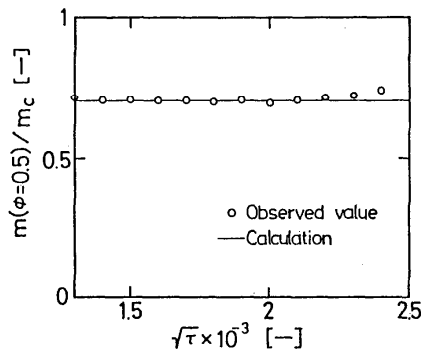


図 15  $m(\phi=0.5)/m_c$  vs.  $\sqrt{\tau}$

## 6. おわりに

平板の中心温度の時間変化を測定し、温度伝導率の温度依存性、熱束、温度分布等を求める方法を示した。また、ポリエチレンを用いて中心温度の時間変化を測定する実験を行い、温度伝導率の温度依存性を求めたが、文献値とよく一致した。また、温度分布は、近似計算値と実験値がよく一致した。この方法は、平板の中心温度の時間変化のみを測定する簡単な実験により温度依存性のある熱物性値を得ることができる点有用である。

## 7. 使用記号

- a : パラメーター [-]
- $C_p$  : 比熱 [J/kg·K]
- $D_r$  : 無次元温度伝導率 [-]
- E : 熱伝導達成率 [-]
- F : 熱束 [-]
- $K_v$  : Flux比 [-]
- L : 平板厚さの1/2 [m]
- m : 無次元温度 [-]
- t : 時間 [s]
- X : 式(24) [-]
- x : 距離 [m]

## Greeks

- $\alpha$  : 温度伝導率 [ $m^2/s$ ]
- $\beta$  : 式(15) [-]
- $\delta$  : 未浸透深さ [-]
- $\eta$  : 式(26) [-]
- $\theta$  : 温度 [ $^{\circ}C, K$ ]
- $\lambda$  : 熱伝導率 [ $W/m \cdot K$ ]
- $\rho$  : 密度 [ $kg/m^3$ ]
- $\tau$  : 無次元時間 [-]
- $\phi$  : 無次元座標 [-]

## Subscripts

- c : 中心値
- PP : Penetration Period

RR : Regular Regime

0 : 初期値

1 : 最終値

Superscript

— : 平均値

#### 8. 参考文献

- (1) 飯田嘉宏、重田治彦：日本機械学会論文集（B編）47-415，pp. 470-477（1981）.
- (2) 岡田昌志、片山功蔵、堀口博：日本機械学会誌 79-688，pp. 247-255（1976）.
- (3) Ohshita, S.; "Drying'85", ed. by R.Toei and A.S.Mujumdar，pp. 503-509，Hemisphere Pub. Co.(1985).
- (4) Sano, Y. and S.Yamamoto; "Drying'86", ed. by A.S.Mujumdar，vol.1，pp. 85-93，Hemisphere Pub. Co.(1986).
- (5) Schoeber, W.J.A.H. and H.A.C.Thijssen; AIChE Symp.Ser.，vol.23，pp. 12-24（1977）.
- (6) Luikov, A.V.; "Analytical Heat Diffusion Theory", Acad. Press，New York（1968）.
- (7) 片山功蔵、岡田昌志、吉田和道：日本機械学会論文集（第2部）37-298，pp. 1195-1203（1971）.

## 管群の熱伝達（円管間隔が狭い場合）

相場 真也（秋田高専）

### ◎ はじめに

熱交換器として最もなじみのある管形熱交換器は単管式、2重管式、多管式、多管円筒形、フィン付管形があり、この中で多管式、多管円筒形が大型熱交換器として、(i)構造が簡単、(ii)安価、(iii)高压に耐えうる、(iv)圧力損失が少ない、(v)耐久力があることなどの理由により古くから用いられてきている。

管形の熱交換器内における管群の熱伝達、圧力損失に関しては従来より多数の研究がなされているが、管群全体としての熱伝達、圧力損失に関するものが多く、管群内部の各管まわりの伝熱特性あるいは流動より議論した研究はきわめて少ない。特に、熱交換器のコンパクト化という時代の要請にもかかわらず、円管間隔が密な場合に関する研究は従来ほとんどなされていない。

本解説ではこのような背景にもとづいて主に気流に直交する管群の熱伝達挙動を特に円管間隔が狭い場合の各管まわりの伝熱特性と役割を述べ、管形熱交換器設計に対する新たな指針を示そうとするものである。

### 1. 管群の熱伝達に関する従来研究

管形熱交換器の特徴は上で述べたようなことが挙げられるが、伝熱工学的には更に熱交換器の単位体積当りの伝熱量が大きいたことが重要な問題となる。このため円管群の配列の様式、円管間隔に対する熱伝達が問題の中心となる。従来、管形熱交換器の評価は熱伝達と同時に圧力損失との関連で行われてきているが、管形熱交換器の単位体積当りの伝熱量を増大させるために円管間隔を密にすれば圧力損失の増加をもたらすことになる。

一般に管群の熱伝達、圧力損失に関しては各々配列様式、円管間隔、レイノルズ数などによって異なる修正係数を用いて整理されているが、性能が極大となる円管配列様式、あるいは間隔に対する指針は示されなかった。また、前述のように管群全体の熱伝達に関する研究は多数行われているが<sup>(1)~(8)</sup>、管群内部の円管個々の役割について論じたものは極めて少ない<sup>(9)~(11)</sup>。将来円管個々にかかる熱負荷が増大することが予想されることを考慮すれば、これらの伝熱挙動を把握しておくことはきわめて重要な事柄となるように思える。

多数管で構成された管群内部の流れは複雑であるため、各円管まわりの伝熱特性の把握は困難であることは否めない。このような事情から少数管からなる管群モデルを用いて伝熱挙動を

明白にしようとする試みが行われるようになってきたが<sup>(12)~(14)</sup>、得られた知見が多数管で構成される管群の伝熱挙動の理解にどのように対応を持つものであるか今のところ明かではなく、管群の性能向上の手がかりを与えるまでには至っていない。

次に、管群の熱伝達に関する従来の研究について年代順に問題点を指摘しつつ解説を加えてみる。

1933年 Colburn<sup>(15)</sup> は千鳥形配列管群の熱伝達率を無次元の形で次式を示した。

$$Nu_{mt} = 0.33 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{0.60} \quad (1)$$

ここで、レイノルズ数 $Re$  は管群の最小間隔を流れる平均流速  $U$  と管直径  $d$  に基づいて定義されている。また、 $Nu_{mt}$  は管群全体としての平均ヌセルト数である。式(1)の適用範囲は  $Re=2 \times 10^3 \sim 3.2 \times 10^4$  である。基盤目形配列の場合は上式の定数が 0.26 となる。

しかし、管群の熱伝達に関して次元解析を行えば、 $Nu_{mt} = \psi(Re, Pr, C_x/d, C_y/d)$  となるので、厳密な立場からすれば円管間隔による影響が考慮されなければならないことはいうまでもない。ここで、 $C_x, C_y$  は各々流れ方向とそれに直角方向の円管間隔で、 $Pr$  はプラントル数である。Pierson<sup>(11)</sup> は 9 行 10 列 からなる管群の基板目配列については 22 種、千鳥形配列については 16 種と広範な実験を行い  $Re=2 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$  で各管とも加熱した結果を 1937 年に報告している。Huge<sup>(2)</sup> も数種の円管間隔について基盤目形、千鳥形配列管群の熱伝達に関する実験をほぼ Pierson と同時期に行っている。配列様式、円管間隔によらず Pierson より 5~10% 程度高めの結果を示しているが、基盤目形配列の狭い円管間隔 ( $C_y/d=1.25, C_x/d=1.25$ ) の場合だけは逆に 10% 程度低めの結果を得ている。この理由については説明がなされていない。

Grimison<sup>(4)</sup> は Pierson の結果に基づいて 10 列からなる管群の空気流に対する平均熱伝達率を次式で与えた。

$$Nu_{mt} = h_m d / \lambda = C Re^n \quad (2)$$

ここで、 $C, n$  は配列様式、 $C_x/d, C_y/d$  によって変化する値であり、この結果は現在でも広く使用されている。平均熱伝達率  $h_m$  は管群入口と出口の流体の平均温度  $T_m$  と円管表面温度  $T_w$  との平均温度差  $(T_w - T_m)$  で定義され、物性値は  $(T_w + T_m) / 2$  の温度によって整理する。しかし、円管個々の管群全体の熱伝達に果たす役割が不明であり、管群の性能向上に対する手がかりを得ることは難しい。

Grimison は、また、 $C_y/d=1.75, C_x/d=2.0$  からなる基盤目形配列の場合を基準にして配列係数 (Arrangement Factor)  $Fa$  を導入し、

$$Nu_{mt} = 0.284 \cdot Fa \cdot Re^{0.61} \quad (3)$$

なる形で熱伝達の整理を試みている。ここで、 $Fa$  は円管配列、円管間隔、レイノルズ数によって異なり線図で示されている。(2) 式で求められた結果と (3) 式で得られた結果は勿論同一である。

Fishenden ら<sup>(5)</sup>は(3)式と同形式の

$$Nu_{mt} = 0.33 \cdot Fa \cdot Re^{0.60} \cdot Pr^{0.33} \quad (4)$$

なる整理を行っている。Fa は Grimson が示した Fa と同一の値を取り、空気以外の流体にも使用できるようになっている。

次に、比較的列数が少ない場合について述べる。一般に列数に対する補正は(3)式に補正係数  $\Psi_1$  を乗じて行う。この  $\Psi_1$  は列数が 10 の場合を 1.0 としていて、列数が減少するにしたがって徐々に低トし、第 5 列付近から急激に低下し、1 列では 0.65 程度となる。Fishenden らはこの点に関し、第 5 列近傍から管群まわりの乱れた流れが定常状態に至るものと推論している。

次に、測定円管のみ加熱した場合に於ける従来の結果について述べる。Tucker<sup>(16)</sup>は 5 列からなる千鳥形配列の第 3 列めの円管に関する実験を行ったが、円管間隔が変化しても平均熱伝達率は変わらないという興味深い結果を示した。このことは円管間隔が変化してもそれに対応した伝熱挙動があり、平均的にはそれほど相互の差異は生じないことを示唆している。

Snyder<sup>(10)</sup>は 6 行 10 列、 $C_y/d=1.8$ 、 $C_x/d=1.8$  (以下  $C_y/d \times C_x/d$  のように記す) からなる千鳥形管群に関して  $Re = 8 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4$  の場合について実験を行っている。その結果によれば、第 1 列めの円管から第 3 列めまでの各円管の平均熱伝達率は急激に増大し、第 5 列め以降でやや低下し、その後はほとんど列によって変化しないことを見出している。Kostić ら<sup>(11)</sup>も 3 行 9 列、 $2.2 \times 1.5$ 、 $Re = 2.4 \times 10^4$  の場合における千鳥形管群により実験を行い Snyder とほぼ同一の傾向を持つことを確認している。しかしながら、両実験とも円管間隔が一種類にすぎず、第 3 列めの円管まわりの熱伝達率が最大となる理由については明らかにしていない。また、碁盤目形配列の場合の実験は行っていない。

比較的最近、管群の熱伝達に関する研究が Žukauskas らによって組織的に進められている<sup>(8) (17)~(21)</sup>。

Žukauskas らによれば管群全体の平均熱伝達率  $Nu_{mt}$  に対しては、 $Re = 10^3 \sim 2 \times 10^5$  の範囲について次式のごとく示される。

碁盤目形配列

$$Nu_{mt} = 0.27 \cdot Re^{0.63} \cdot Pr^{0.36} (Pr/Pr_w)^{0.25} \quad (5)$$

千鳥形配列

$C_y/C_x < 2$  に対し

$$Nu_{mt} = 0.35 \cdot (C_y/C_x)^{0.2} \cdot Re^{0.60} \cdot Pr^{0.36} \cdot (Pr/Pr_w)^{0.25} \quad (6)$$

$C_y/C_x > 2$  に対し

$$Nu_{mt} = 0.40 \cdot Re^{0.60} \cdot Pr^{0.36} (Pr/Pr_w)^{0.25} \quad (7)$$

ここで、 $Pr_w$  は管表面温度に相当するプラントル数である。また(5)~(7)式は 20 列からなる場合に該当し、列数が少ない場合は補正係数  $\Psi_2$  (図 1) を乗ずる。図で実線は碁盤

目形、破線は千鳥形配列の場合に対するものである。

また、管群内の各円管まわりの平均熱伝達率においては  $Re > 10^3$  ではほとんど変化しないとしている。また、Grimison や Fishenden らと同様流れ方向の円管間隔が狭いほど管群全体の平均熱伝達はやや向上すると述べている。このことについて、Zukauskas は次のように推論している。すなわち、乱流格子の背後におかれた単独円管の熱伝達はその位置が格子に近いほど熱伝達が向上するという根拠をおいている。

しかし、流れ方向の円管間隔が極めて狭い場合は円管前後で流れが淀み熱伝達率が低下することは避けられないことは明らかである。

管群内の各円管まわりの局所熱伝達率に関する研究は極めて少なく<sup>(9)・(11)</sup>、高熱流束など過酷な状況で使用される場合の熱応力、材料の選択などの問題とも関連し多くの実験データの蓄積が望まれる。

管群の場合流れが極めて複雑であるため、伝熱挙動を流れ特性から明確にする目的から、比較的少数管からなる場合について研究が行われてきている。Kostić ら<sup>(12)</sup>は流れに対して直列におかれた2円管の場合を取り挙げた。 $C_x/d=1.6\sim 9.0$ ,  $Red = 1.2 \times 10^4 \sim 4 \times 10^4$  について熱伝達と圧力分布の測定を行い管群の伝熱特性を把握しようとしたもので、その試みは基盤目形管群の伝熱挙動を明白にするための重要な試行であったと評価できよう。しかし、前述のように流れ方向の円管間隔が狭いほど、多数管の場合熱伝達率は増加するという結果もあり、 $C_x/d < 1.6$  の範囲について実験を行っていないことが惜まれる。また、後方円管の影響を考慮に入れるならば最低でも流れに対して3本の円管でモデル化し、結果を論議すべきであろうと著者は考える。また、桧和田らによっても直列2円管に関する研究が行われている<sup>(13)・(14)</sup>。前述のように、このようなモデルによって得られた結果が、多数管からなる管群の伝熱挙動とどのように対応するかについてはまだ十分な検討がなされていない。また一方、流れに対して直列や並列におかれた2～3本の円管に関する流れ特性の研究が流体力学的干渉という流体力学的興味から活発に行われている。流れに対して円管が並列に置かれた場合円管間隔が狭いと、流れが偏ることが報告されているが、この場合の伝熱特性について明らかにされていなかった。

以上多数管、少数管による従来の研究について概説したが、これまで述べた範囲で不明な点を列挙すると次のようである。

- (1) 円管間隔が狭い場合の伝熱特性が不明である。
- (2) 円管間隔による熱伝達の差異はどの程度であるのか。
- (3) 管群内の円管個々の全体の熱伝達に対する役割はどのようなものか。
- (4) 伝熱工学的立場からどのような配列様式が管群の設計時に有利であるかなどについて指針がない。
- (5) 流れが偏った状況における円管まわりの熱伝達特性はどのようなものか。
- (6) 管群の性能向上にかんする提案はきわめて少ない。



(7) 少数管で得られた結果と多数管の伝熱挙動との対応が明白にされていない。

以上のような多くの問題点が残されていることを踏まえて、著者がこれまで行ってきた研究を中心に、基盤目形管群の基礎と考えられる1行、1列管群を少数管でモデル化した伝熱特性について述べるとともに、3円管からなる千鳥配列管群の場合を紹介する。次いで、多数管からなる管群の円管個々の熱伝達の結果を、上述した比較的単純な系で得られた結果と比較しつつ説明する。また、管群全体としての熱伝達、特に円管間隔の狭い場合について述べるとともに、流体輸送動力との関連で新たな性能評価を試みる。更に、管群全体の性能向上に関する具体的提案を行い、配列様式に関する一つの指針を示す。

## 2. 少数管からなる管群の熱伝達

### 2.1 1行管群の熱伝達

先づ、基盤目形管群の基本的構成単位と考えられる3～4本の円管からなる1行管群の熱伝達について解説する。

流れに直交しておかれた2～3本からなる円管まわりの流れ特性に関する研究は数多く存在するが<sup>(22)～(31)</sup>、伝熱特性に関する研究はあまり多くない<sup>(12)～(14)</sup>。基盤目形管群の伝熱特性を明白にするためには2本からなるモデルより、著者が初めて取り上げた3～4円管モデルは管群全体の伝熱特性の把握という点ですぐれている<sup>(32)～(35)</sup>。管群の上流側から第1円管の場合は2円管モデルの場合とそれほどの差異は存在しないが、第2円管以降において大きな差異がある。第一に、後方円管の影響を受けること。第二に、第1円管は低乱れの一様流におかれているため、剥離点は単独円管の位置とそれほど変わらないので、第2円管は比較的后流幅の広い剥離領域におかれた状況となっている。しかし、第3円管の場合は第2円管の剥離点が第1円管のそれより後方岐点側に移動している影響を受けて、第2円管の伝熱特性とは異なったものになる。

図2は流れに対して4本の円管を直列に並べ、第3円管の局所ヌセルト数の円管間隔による変化を $Re_d=4.1 \times 10^4$ の場合について示したものである( $Re_d$ は管群上流の一様流の速度 $U_0$ にて定義する)。 $C_x/d \geq 4.0$ を除いて最小ヌセルト数となる角度 $\theta$ は円管間隔に依存せずに、 $\theta=110 \sim 120^\circ$ 付近に存在し、一般に円管前面の熱伝達率が大きければ背面の熱伝達率が小さく、逆に背面が大きければ前面のそれは小さくなっていることがわかる。ここで、 $\theta$ は円管前方岐点からの角度を示す。従って、平均熱伝達率は円管間隔にそれほど依存しないことを示している。しかし、円管間隔が狭い場合( $C_x/d < 1.3$ )は円管前面、背面とも一様に熱伝達が悪化する。

次に、局所ヌセルト数に対するレイノルズ数の依存性について示す。図3は第3円管、 $C_x/d=1.3$ の結果を示したものである。 $Re_d \geq 2.2 \times 10^4$ では $\theta=50^\circ$ 付近に $Nu_{max}$ が存在し、円管前後の熱伝達率は $Nu_{max}$ と大きな差異はみられない。一方、 $Re_d \leq 2.0 \times 10^4$ では $Nu_{max}$ を

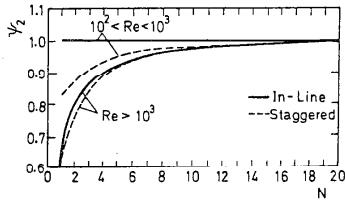


図1 列数による補正係数 (e)

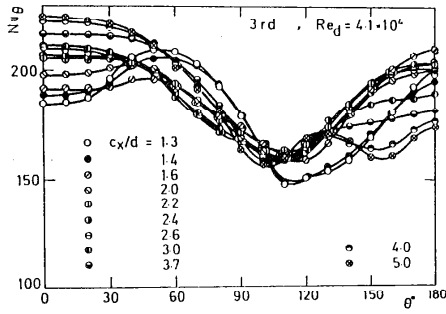


図2 局所ヌセルト数と円管間隔

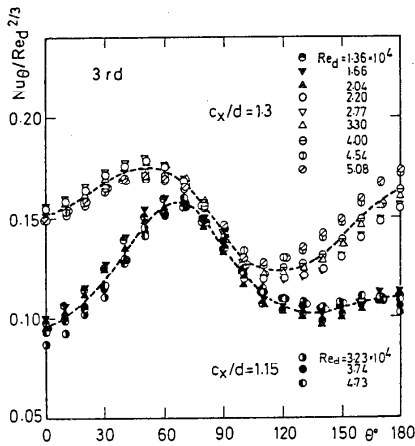


図3 局所ヌセルト数の変化

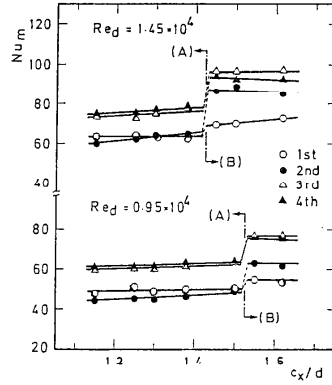


図4 Num -  $c_x / d$

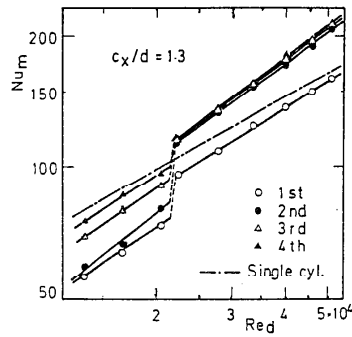


図5 Num -  $Re_d$

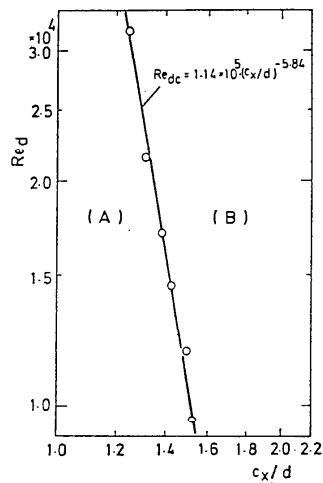


図6  $Red_c - c_x / d$

示す位置が $\theta = 60 \sim 70^\circ$  近傍に後退し、円管前後の熱伝達は  $Re \geq 2.2 \times 10^4$  の場合と比較してきわめて低下していることがわかる。

また、円管間隔がきわめて狭い  $C_x/d = 1.15$  の場合も図に示してあるが、レイノルズ数に依存せず  $C_x/d = 1.3$ ,  $Red \leq 2.0 \times 10^4$  の場合と同一の傾向を持つことがわかる。このように円管間隔が狭い場合の特異な現象は管群のコンパクト化を図る上で留意すべき点である。

図4は  $Red = 0.95 \times 10^4$ ,  $1.45 \times 10^4$  の場合における  $C_x/d$  を変化させた場合の平均ヌセルト数  $Nu_m$  の変化を示したものである。 $Red = 0.95 \times 10^4$  の場合は  $C_x/d = 1.52$ ,  $1.45 \times 10^4$  の場合は  $C_x/d = 1.43$  を限界として階段状に  $Nu_m$  が変化している。すなわち、このような円管間隔 ( $C_x/d$ ) 以下では最大30%程度 (第2円管の場合) も  $Nu_m$  が低下していることがわかる。図5は  $C_x/d = 1.3$  の場合における各円管の  $Nu_m$  の  $Red$  による変化を示したもので、 $Red < 2.1 \times 10^4$  で各円管とも単独円管の場合より熱伝達率が小さく、 $Red = 2.1 \times 10^4$  近傍で急増している。このような現象を円管間隔が狭い場合の跳躍現象 (一般に2円管モデルでの跳躍現象は  $C_x/d = 3.5 \sim 4.0$  近傍で生ずる) と呼称することにし、このレイノルズ数を限界レイノルズ数  $Red_c$  と定義する<sup>(34)</sup>。

種々の円管間隔が狭い場合に関して実験を行った結果を整理すると、 $Red_c$  は図6に示すように  $C_x/d$  が増加するほど減少し、 $Red_c$  と  $C_x/d$  との間には次式が成立する。

$$Red_c = 1.14 \times 10^5 \cdot (C_x/d)^{-5.84} \quad (8)$$

上式の適用範囲は  $C_x/d = 1.15 \sim 5.0$ ,  $Red = 10^4 \sim 5 \times 10^4$  である。図6に示した領域 (A) は一様流におかれた単独円管よりも熱伝達が低い領域であり、 $Red_c$  を境にして (B) 領域では熱伝達が高くなることを示している。すなわち、同一の  $Red$  の場合でも、(B) 領域に属する  $C_x/d$  では (A) 領域の場合より熱伝達が高いことを表している<sup>(34)</sup>。

なお最近、五十嵐は4円管モデルによる一行管群の流れ特性を詳細に検討し、フローパタンから式 (8) に近い形で  $Red_c$  を求めている<sup>(31)</sup>。

## 2. 2 一列管群の熱伝達

管群は一般に多数列から構成されている場合が多いが、第一列めの熱伝達がこれより後方列の場合と比較して通常きわめて低い<sup>(8), (36), (37)</sup> ( $Re < 1000$  では、第一列のほうが高い<sup>(20), (21)</sup>)。したがって、列数が少ない管群の場合は第一列めの管群全体に対する比重が大きくなるので、一列管群の伝熱特性を明らかにしておくことは重要となる。管群におけるレイノルズ数  $Re$  は次式で示される。最小隙間速度  $U_t$  で定義される場合が多く、本解説でも特に断らない限りこれに従う。

$$U_t = \left( \frac{C_y/d}{C_y/d - 1} \right) \cdot U_\infty \quad (9)$$

流れに並列におかれた円管群の後流は、円管間隔が狭くなると偏ることは、よく知られている<sup>(38)~(41)</sup>。図7は一列管群における後流の速度分布の状況を熱線流速計により測定した結果の一例を示したものである (後流域で熱線流速計による測定結果の信頼性は高くないにして

も伝熱特性との対応を考える上では意味がある)。測定位置は円管中心から流れ方向へ円管直径と同一の位置の断面で行ったものである。後流が広がっている部分と狭くなっている部分とがほぼ交互に並んでいる状態にある。後流が広がっている場合と狭い場合とでは熱伝達は当然異なってくるものと考えられる。図8に局所ヌセルト数の分布の測定例を示した。●印の場合が後流域が広がった場合に相当し、○印が狭い場合に相当するが、平均熱伝達に対する偏流の影響は最大でも15%程度であり、後述する偏流後流中におかれた円管まわりの熱伝達に比較すればその差異は比較的少ない。なお、多数列からなる管群の最終列においてもこのような偏流による伝熱挙動が観測される。

一列管群の熱伝達に関して Ward ら<sup>(42)</sup>は、高ブロックージ比のもとにおける単独円管まわりの熱伝達として取り扱っているが、モデル化の妥当性、後流の偏りなどを考えればやや問題がある。

図9は1列管群の平均ヌセルト数  $Nu_m$  の著者の実験結果を、Ward らのデータも同一の整理を行って示したものである。結局  $Nu_m$  は円管間隔がきわめて狭い  $C_y/d=1.1$  の場合も含め  $\pm 10\%$  の偏差で次式のように表される。

$$Nu_m = 0.118 \cdot (C_y/d)^{0.60} \cdot Re^{0.60} \quad (10)$$

ただし、 $Re=2.1 \times 10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ ,  $1.1 \leq C_y/d \leq 2.0$  である。

### 2.3 3円管による千鳥形管群モデルによる熱伝達

管群において第一列めの円管まわりの熱伝達は単独円管の場合と類似の挙動を示す ( $C_y/d$  が小さいと高ブロックージ比のもとにおける単独円管の場合)。多数管からなる千鳥形管群では第2列めの平均熱伝達率は第1列めのそれより大きく、比較的円管間隔が広い場合は第3列めで最大となる<sup>(10)(11)</sup>。

基盤目形管群の基本的特性を明かにするために、3~4本からなる一行管群からなるモデルを用いその伝熱挙動を説明したが、ここでは流れ方向および流れと直角方向の円管間隔を広範囲にわたって変えることが可能な千鳥形に配列された3円管モデルを取り上げ、特に、円管間隔が狭い場合について述べる。

千鳥形管群において第2列め以降の各円管まわりの熱伝達率分布では前方岐点近傍の熱伝達率が他の位置に比較して大きい<sup>(8)(11)</sup>。従って、この近傍の伝熱挙動を明らかにすることは千鳥形管群の平均熱伝達の挙動を知る上で重要である。特に、 $C_y/d$  が小さい場合は前方円管の隙間からの流れが衝突し、衝突噴流の場合の如き伝熱挙動を示す。図10は  $C_x/d=1.7$  一定とした場合の前方2円管の間隔  $C_y/d$  を変化させた場合の後方円管の局所ヌセルト数の変化を示したものである<sup>(47)</sup>。 $C_y/d$  が狭い範囲で  $Nu_o$  の変化は著しく、 $C_y/d=1.2$  の場合が  $C_x/d=1.7$  に対応した衝突噴流熱伝達の伝熱挙動となっている。 $C_y/d=0$  の場合は上流2円管の外側からの剥離せん断流の付着により  $\theta=80^\circ$  近傍に  $Nu_o$  の最大値が存在している。また  $C_y/d=1.1$  の場合は2.2項で述べたように上流の隙間を通る流れが偏り、測定円管に達せず、前

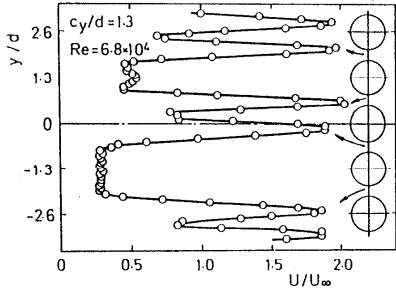


図7 円管後方の速度分布 ( $x/d = 1.0$ )

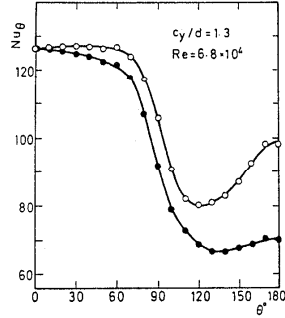


図8 渦流による  $Nu_{\theta}$  の変化例

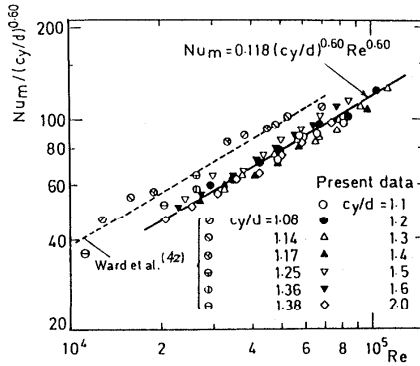


図9 1列管群の平均ヌセルト数

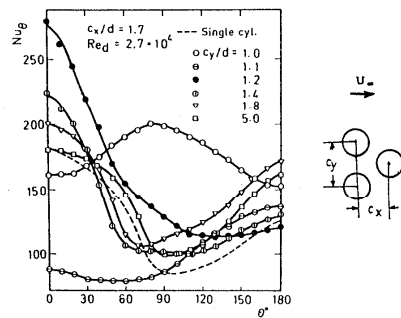


図10  $Nu_{\theta}$  分布の変化例  
(千鳥配列の3円管モデル)

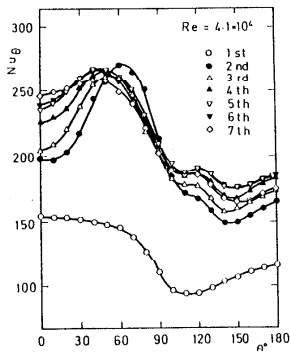


図11 基盤目配列の  $Nu_{\theta}$  ( $1.6 \times 1.6$ )

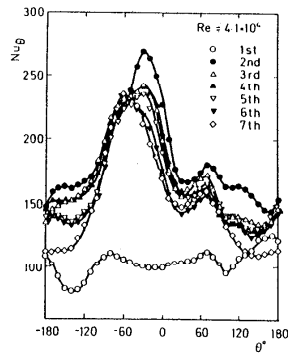


図12 基盤目配列の  $Nu_{\theta}$  ( $1.2 \times 1.2$ )

方円管の外側の剥離せん断層に合体する。このような場合は円管まわりの流れはよどみ熱伝達は全般的に悪くなる<sup>(47)</sup>。

偏った後流中に円管が置かれると、偏流が矯正されることは石谷らによって見出されている<sup>(44)</sup>。しかし、偏流を阻止できる流れ方向の円管間隔は  $C_y/d=1.2$  の場合、 $2d$  付近がその限界であるとされているようである<sup>(44)</sup>。

### 3. 基盤目形管群の熱伝達

#### 3.1 局所熱伝達の挙動

図11は  $C_y/d \times C_x/d=1.6 \times 1.6$  の場合における5行7列の場合の各円管まわりの局所ヌセルト数  $Nu_\theta$  の変化を示したものである。第1列めの円管の挙動は単独円管のそれに類似し第2列めの円管の場合は  $\theta=60^\circ$  近傍に  $Nu_{max}$  が存在し、これより下流側の円管と比較して鋭いピークを持つ。また第3列め以降の  $Nu_\theta$  分布はほぼ同一であり、1行管群の第3円管の場合と類似の挙動を示している。 $1.2 \times 1.2$  の場合(図12)は、円管上下 ( $\theta=0 \sim +180^\circ$ ,  $\theta=0 \sim -180^\circ$ ) で分布が異なり、流れが偏っていることを示している<sup>(36)</sup>。また、 $1.6 \times 1.6$  の場合と比較すれば明らかなように同一のレイノルズ数 ( $Re_d=4.1 \times 10^4$ ) であるが、円管前後の熱伝達率は相当低下している。

図13には  $1.2 \times 1.2$  の場合における可視化実験 ( $Re \approx 0.7 \times 10^3$ ) の結果を示してある。円管前後で流れがきわめて淀み、流れの偏りも認めることができよう。流れに並列におかれた円管間隔が比較的狭い場合の後流の偏りについては前述の通りで、後方に円管が存在するとある程度偏りは阻止されることを述べた。しかし、 $1.2 \times 1.2$  の場合にみられる管群全体を通しての偏流は  $C_y/d$  がきわめて小さいため後方円管群の存在が偏流を矯正するまでに至らない。この点後述の多数管からなる千鳥形配列の場合は  $1.2 \times 1.2$  でも偏流は生じない。

#### 3.2 管群全体の平均ヌセルト数 $Nu_{mt}$

比較的円管間隔が狭い場合の管群全体としての平均熱伝達率  $Nu_{mt}$  について述べる。列数があまり多くない場合の実験においては第1列めの円管の比重が大きくなるので、多数列からなる管群の整理式を得るためには、第一列めを除外する方法がよい。図14は著者が求めた  $Nu_{mt}$  の結果である。 $1.2 \times 1.2$  の場合を除く他の円管間隔の場合は全て同一の結果を示していることがわかる。 $1.2 \times 1.2$  の場合は他の間隔の場合と比較して約18%も熱伝達率が低く、図示していないが  $2.4 \times 1.2$  の場合も同様の結果を示すことから、流れ方向の円管間隔  $C_x/d$  が  $1.2$  と小さいことを考慮すると、一行管群において階段状に熱伝達が低下したことと基本的には同一の現象と考えられる。

流れ方向の円管間隔  $C_x/d$  が  $1.27$  では円管間隔が広い場合と大差ないことと Hüge<sup>(2)</sup> の結果を考えると  $C_x/d=1.25$  付近で、熱伝達率が急激に低下する限界の円管間隔が存在するものと判断される。一点鎖線は(5)式に示した Zukauskas<sup>(8)</sup> の推奨している結果である。前

述のように Žukauskas は流れ方向の円管間隔が狭いほうが管群全体の熱伝達は向上しているが（具体的な結果は示していない）、 $C_x/d=1.2$  の結果は全く相反する結果となっていることがわかる。一方 Pierson の結果<sup>(1)</sup>においては $2 \times 3$ の場合は Žukauskas の推奨式にほぼ一致し、 $1.25 \times 1.25$ の結果は $2 \times 3$ の場合より高めとなっている。他方、Huge の結果は Pierson とは逆に  $1.25 \times 1.25$  の場合は $2 \times 3$ の場合より低めの結果となり、著者が求めた  $1.2 \times 1.2$ の結果とはほぼ同一の挙動を呈し、レイノルズ数は小さい範囲にあるが、 $2 \times 3$ の結果は  $1.2 \times 1.2$  以外の円管間隔の場合と同一の傾向にあることがわかる。

これまで述べた流れ方向の円管間隔がきわめて狭い場合の局所熱伝達の挙動（図12）や、流れ模様の可視化実験の結果（図13）から、円管前後の流れがきわめて淀んでいることが考えられ、Žukauskas が述べているような、流れ方向の円管間隔が狭いほど熱伝達率が増加するとは考えにくい。

結局、空気流の下では、流れ方向の円管間隔  $C_x/d$  が 1.27 以上で  $Nu_{mt}$  は次式のように整理される。

$$Nu_{mt} = 0.19 \cdot Re^{0.66} \quad (11)$$

ただし、 $1.27 \leq C_y/d \leq 3.2$ ， $1.27 \leq C_x/d \leq 3.2$ ， $Re=10^4 \sim 4.5 \times 10^4$  である。また、 $1.2 \times 1.2$  の場合は 0.19 が 0.156 となる。

### 3. 3 圧力損失と流体輸送動力

従来から管群の性能は主に熱伝達率と圧力損失で評価され、熱伝達率が大きく圧力損失が少ない管配列の模索がなされてきた。このような観点からすれば、 $1.2 \times 1.2$  の場合は最も不適当な配列となる。しかし、圧力損失が大きくとも流体輸送のための動力、すなわちポンピングパワーが小さければ問題がない場合が多い。以下、圧損とポンピングパワーとの関連について述べる。圧損  $\Delta P$  は圧力損失係数  $\zeta_p$  により次式で与えられる。

$$\Delta P = \zeta_p \cdot \frac{\rho}{2} U_t^2 \cdot N \quad (12)$$

ここで、 $N$  は列数である。いま、管束断面積を  $F$  とすれば、ポンピングパワー  $L_p$  は次のようになる。

$$L_p = U_\infty \cdot F \cdot \Delta P \quad (13)$$

これを、最小隙間速度  $U_t$  で表すと次のようになる。

$$L_p = F U_t \cdot \frac{\rho}{2} U_t^2 \cdot N \left( \frac{C_y/d - 1}{C_y/d} \right) \cdot \zeta_p \quad (14)$$

ここで、単位列あたりの無次元ポンピングパワー  $L_p^*$  を次のように定義する。

$$L_p^* = \frac{L_p}{F U_t (\rho/2) U_t^2 N} \quad (15)$$

従って、 $L_p^*$  は次式のようになる。

$$Lp^* = \frac{(C_y/d-1)}{(C_y/d)} \cdot \zeta_p \quad (16)$$

本解説で取り扱っているような円管間隔が狭い場合の  $\zeta_p$  に対しては、西川ら<sup>(45)</sup>が示した次式が適用できる。

$$\zeta_p = 0.105 \cdot \left( \frac{C_x/d}{C_y/d-1} \right) \quad (17)$$

$\zeta_p$  はレイノルズ数に依存せず、適用範囲は  $1.1 \leq C_x/d \leq 2.0$  ,  $1.05 \leq C_y/d \leq 3.0$  ,  $2 \times 10^3 \leq Re \leq 4 \times 10^4$  である。上式を(16)式に代入すると

$$Lp^* = 0.105 \cdot (C_x/d) / (C_y/d) \quad (18)$$

となる。

この結果から、 $C_x/d$  が小さいほど、また  $C_y/d$  が大きいほど、 $Lp^*$  は減少する。なお、 $C_y/d$  が小さいほど  $Lp^*$  は増加するが、 $F$ 、 $d$  を各々一定とすると、 $C_y/d$  が小さいほど行数が増加し、単位行数で考えた場合、 $Lp^*$  は  $C_x/d$  のみに依存することになる。

### 3. 4 管群熱伝達の新たな総括的評価

前述のごとく、管群の評価は熱伝達と圧力損失との関連で行われるのが通例であるが<sup>(5)</sup>、それらの相関関係を適切に表すまでに至っていない。このことから管群の性能を評価する場合の指標として、修正ヌセルト数  $Nu_{mt}^*$  ( $= Nu_{mt} / Re^n$ ) と無次元ポンピングパワー  $Lp^*$  との比、すなわち、次式で定義される成績係数  $\eta$  を用いる方がよいと考えられる<sup>(46)</sup>。

$$\eta = Nu_{mt}^* / Lp^* \quad (19)$$

式(11)などで表される結果を基にして  $\eta$  を求めてみると、流れ方向の円管間隔  $C_x/d$  は 1.3 の場合が  $C_y/d$  によらず  $\eta$  が最大値となる。また、 $C_y/d$  が増大するほど  $\eta$  は増加の傾向を示し(図21)、後述する千鳥形配列の場合とは全く正反対の挙動となる。

## 4. 千鳥形管群の熱伝達

### 4. 1 局所熱伝達の挙動

図15は4行7列、 $1.6 \times 1.6$  の場合における各円管まわりの局所ヌセルト数分布の測定例を示したものである<sup>(37)</sup>。基盤目形管群の場合と同様、第1列めの熱伝達が下流側のそれに比較し小さく、その分布の傾向は単独円管の場合と類似している。第2列めの熱伝達率は第1列めの場合に比較して全体的に向上している。これは第1列めの場合より円管前面に到る速度が大きいためである。◎印は前述の3円管モデル(1.5×1.5)の前方岐点の結果である<sup>(47)</sup>。ほぼ第2列めの前方岐点の熱伝達率と同一の値をとっていることがわかる。この場合、測定円管に対する近寄り流れはほとんど乱れることなく円管前面に達している<sup>(47)</sup>。従って、この第2列めの場合も比較的乱れの少ない状態で円管前面に流れが達しているものと考えられる。

第3列以降の各円管はほぼ同じような局所熱伝達率分布を示しているが、一般に言われているように第3列めの円管が幾分ではあるが最も熱伝達率が高い。これは近寄り流れの速度が第2列めの場合と同程度であること、前方円管の存在により乱れ強さが増大していることによ



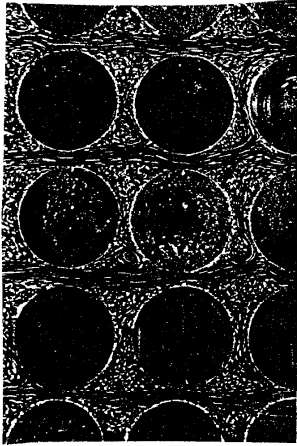


図 13 フローパタン (1.2 x 1.2)

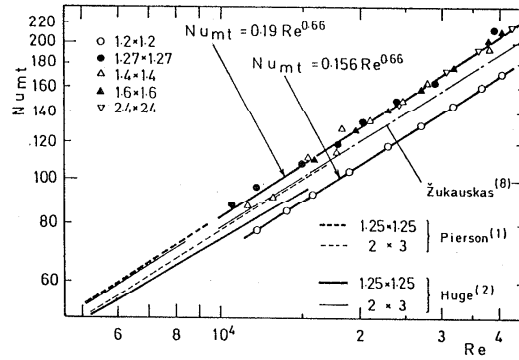


図 14 基盤目配列の  $Num_t$  と  $Re$  の関係

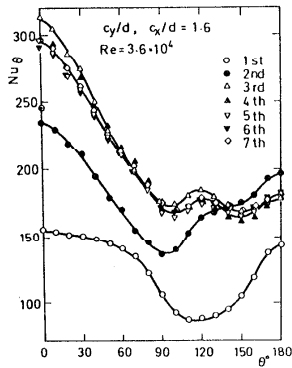


図 15 千鳥配列の  $Nu_{\theta}$  (1.6 x 1.6)

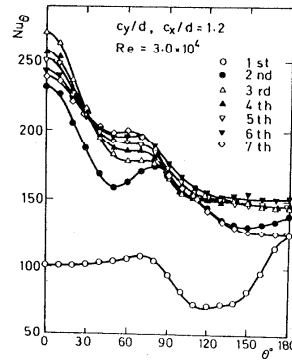


図 16 千鳥配列の  $Nu_{\theta}$  (1.2 x 1.2)

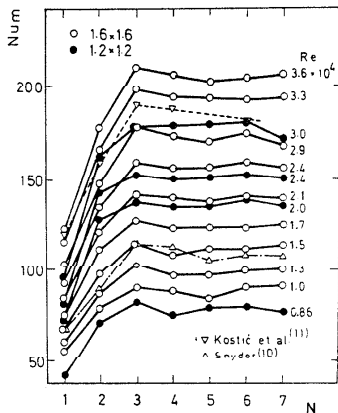


図 17  $Num$  の  $N$  による推移

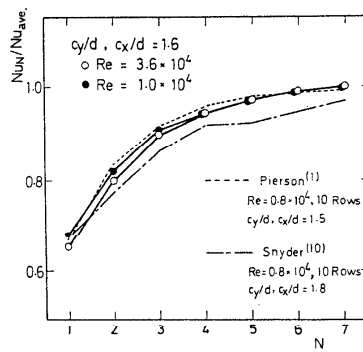


図 18 列数と補正の関係

るものである<sup>(37)</sup>。また、 $\theta = 120^\circ$  近傍に極値が存在しているが、これは円管間隔が広い場合に共通で、圧力分布の測定結果などを考慮すれば、高乱れの流れの場におかれた単独円管の伝熱挙動と類似していると理解してよい。

次に、円管間隔の狭い  $1.2 \times 1.2$  (図16) の場合について述べる。第1列めの結果は図12の場合とほぼ同一である。しかし、第2列め以降の熱伝達率分布は  $1.6 \times 1.6$  の場合と異なり、 $\theta = 50^\circ$  近傍に極小値が存在し、流れが一時的に淀むことを示している<sup>(37)</sup>。 $\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$  では第2～第6列まではほぼ同一の結果を示し、第7列のみ、やや  $Nu_m$  が小さくなっている。これは碁盤目形の場合と同様、最終列において円管背面の流れが偏っているためである。

#### 4. 2 各円管の平均熱伝達率

図17は各円管の平均ヌセルト数  $Nu_m$  の円管位置  $N$  による推移を Kostićら<sup>(11)</sup>、Snyder<sup>(10)</sup> の結果と共に示したものである。Kostićらの結果 ( $2.2 \times 1.5$ ,  $Re = 2.5 \times 10^4$ ) は著者の結果より幾分高めを、Snyderの結果 ( $1.8 \times 1.8$ ,  $Re = 2.0 \times 10^4$ ) は逆に低めの結果となっている。

$1.2 \times 1.2$  と円管間隔がきわめて狭い場合は第1列めの  $Nu_m$  がきわめて小さいこと、第2列め以降の  $Nu_m$  にはほとんど差異が認められないことがわかる。また、碁盤目形管群の場合と異なり同一の  $Re$  では  $1.6 \times 1.6$  における各円管 ( $N = 1$  は除く) の平均熱伝達率との相違が少ないことから、熱交換器をコンパクトにしようとする場合には都合がよい。

以上のような各円管の  $Nu_m$  の結果に基づいて、列数が少ない場合の補正について考察を行ってみよう。図18は  $1.6 \times 1.6$  の場合における第1～第7列めの円管までの各円管の  $Nu_m$  の平均値  $Nu_{ave}$  を求め、これで第1列から対象としている列までの平均値  $Nu_N$  を除したもので、下流側の列ほど1.0に近づく。図の Pierson<sup>(1)</sup>、Snyder<sup>(10)</sup> の結果はいずれも10列からなる管群の結果を1.0として列数を減らした場合の実験結果である。前述の列数に関する補正係数  $\Psi_1$  はこのような結果から導かれたものと考えられる。

レイノルズ数、円管間隔が異なるにもかかわらずいずれも同一の傾向を示していることがわかる。ただし、 $1.2 \times 1.2$  の場合にたいしても同様の整理を行ってみると、前述のごとく第1列めの  $Nu_m$  が極端に小さいので列数の少ない範囲では図の場合より  $Nu_N / Nu_{ave}$  は低めの結果となる。要するに、管群の第一列めの  $Nu_m$  が  $\Psi_1$  に大きな比重を持っているのである。なお、図1に示した Žukauskas による補正係数  $\Psi_2$  において、 $Re = 10^2 \sim 10^3$  で碁盤目形管群の場合は  $N$  によらず  $\Psi_2 = 1.0$  となっていることは、第1列めの円管まわりの  $Nu_m$  が後方円管のそれと変わらない大きさであることによることを示している。

#### 4. 3 管群全体の平均熱伝達

碁盤目形の場合と同様、第1列めの結果を除外して整理した結果が図19である。比較的円管間隔が密な結果を示してあるが、円管間隔による差異はほとんど認められない。また、碁盤目形の場合と異なり  $1.2 \times 1.2$  の場合も他の間隔の場合と同一の結果となっている。

2点鎖線は Žukauskas の推奨式 (式 (6)) で、 $Nu_m$  に対する  $Re$  のべき指数は 0.60 で

あるのに対し、著者の結果は 0.64 と大きくなっている。レイノルズ数がこのオーダーであれば単独円管の場合であっても  $Re$  のべき指数は 0.60 程度であること、千鳥形配列の場合は前述のように円管まわりの流れはきわめて高乱れとなっていること<sup>(37)</sup>を考えれば  $Re = 10^4 \sim 4 \times 10^4$  の範囲においては Zukauskas の結果に対していささか疑問が残る。

他方、Pierson<sup>(1)</sup>や Hoge<sup>(2)</sup>の円管間隔が狭い場合の結果は著者の結果ときわめて近い。結局、 $1.2 \times 1.2$  の場合も含めて、 $Nu_{mt}$  は次のように整理できる。

$$Nu_{mt} = 0.24 Re^{0.64} \quad (20)$$

ただし、 $Re = 0.8 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$  である。

なお、基盤目形の場合と比較すれば  $1.2 \times 1.2$  では 22~28% 程度、これ以外の円管間隔の場合でも数%程度高めの結果を示す。管群のコンパクト化という観点に立ち、熱伝達のみで配列様式を考える場合は明らかに千鳥形配列が有利である。なお、円管間隔がきわめて狭い場合 ( $1.1 \times 0.87$ ) の管胴形熱交換器を当研究室で試作した結果においても、式 (20) で示される結果とほぼ一致した<sup>(48)</sup>。

#### 4. 4 無次元流体輸送動力と成績係数

西川らが千鳥形配列の場合に対して示した圧力損失係数  $\zeta_p$ <sup>(45)</sup>を用い、式 (16) で表される無次元流体輸送動力  $L_p^*$  を線図で示した一例が 図20 である。基盤目形の場合と異なり、一般に、流れと直角方向の円管間隔  $C_y/d$  が小さいほど  $L_p^*$  は減少している。さらに、 $C_y/d < 1.7$  では流れ方向の円管間隔  $C_x/d$  が小さいほど  $L_p^*$  は小さくなっていることがわかる。即ち、円管間隔が密であるほど  $L_p^*$  は減少する。一見、円管間隔が密であればポンピングパワーは増大するように考えがちであるが、最小隙間速度に基づくレイノルズ数が同一であれば間隔が密であるほど、管群を通過する単位時間当りの流量が減少することになり、この流量の減少割合が圧力損失の増加割合を上まわる結果、ポンピングパワーは減少するのである。なお  $L_p^*$  はレイノルズ数によって大きな傾向の変化は認められないが、レイノルズ数が大きいほど  $L_p^*$  は全般的に減少する傾向を持つ。いずれにしても、千鳥形配列の管群においては管束断面積、最小隙間速度を一定とした場合、行数を増加させ、流れ方向の円管間隔を狭くすることにより  $L_p^*$  を小さくできる。

#### 4. 5 管群熱伝達の新たな総括的評価

基盤目形の場合と同様、管群全体の修正ヌセルト数  $Nu_{mt}^* (= Nu_{mt}/Re^n)$  と無次元ポンピングパワー  $L_p^*$  との比を用い千鳥形管群の性能を総括してみる。前述のように千鳥形管群の場合  $Nu_{mt}^*$  は円管間隔に依存しない。従って、 $\eta$  は  $L_p^*$  のみに依存することになる。千鳥形管群の  $L_p^*$  は円管間隔を密にすればするほど減少するので、 $\eta$  は逆に大きな値をとることになる。図21 は  $\eta$  の結果 ( $Re = 2.0 \times 10^4$ ) である。図には基盤目形の場合の  $\eta$  も破線で示してある。千鳥形と基盤目形では  $\eta$  の傾向は全く逆の傾向を呈している。すなわち、一般に流れと直角方向の円管間隔  $C_y/d$  が大きいと基盤目形の  $\eta$  が大きく、 $C_y/d$  が小さい

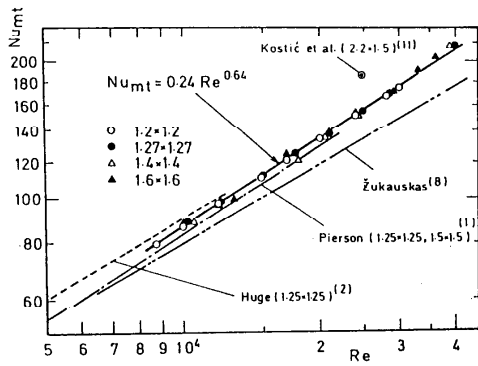


図 19 千鳥配列の  $Num_t$  と  $Re$  の関係

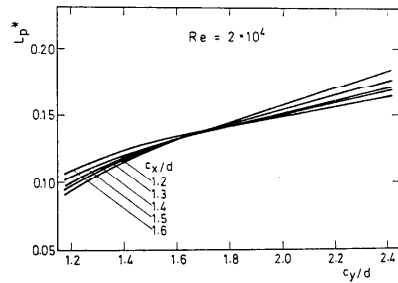


図 20 千鳥配列の無次元動力

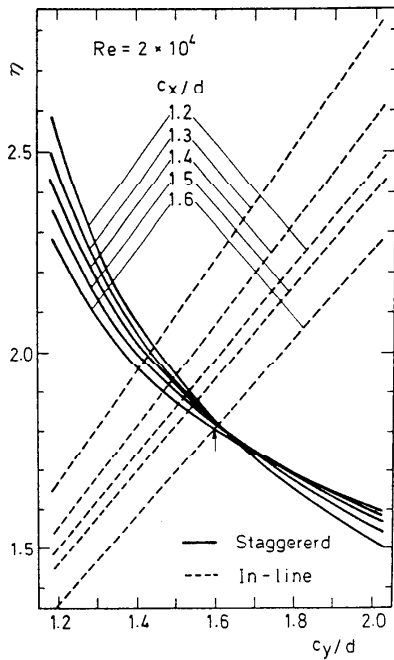


図 21 成績係数  $\eta$  の挙動

表 1 配列様式選定基準値 ( $c_y/d$ )

$c_x/d \backslash Re$	$10^4$	$2 \times 10^4$	$3 \times 10^4$	$4 \times 10^4$
1.20	1.45	1.53	1.58	1.62
1.30	1.37	1.44	1.48	1.52
1.40	1.40	1.49	1.54	1.58
1.50	1.45	1.54	1.60	1.64
1.60	1.49	1.59	1.66	1.70

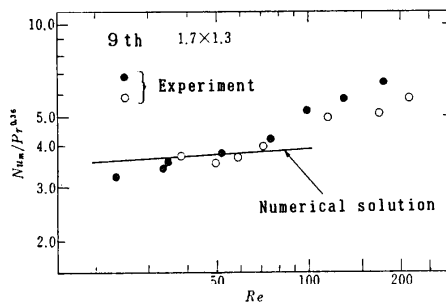


図 22 平均ヌセルト数

場合は千鳥形のほうが大きいことがわかる。要するに管群のコンパクト化に対しては千鳥形配列のほうが概して有利であることをこの図は明瞭に示している。

また、従来配列様式の選定に関する伝熱工学的な面からの指標は見当らないことはすでに述べた。しかし、この  $\eta$  によって選定することが一つの有力な方法であるように考えられる。すなわち、図に示した千鳥形配列に対する  $\eta$  の曲線と基盤目形配列の  $\eta$  (破線) との交点を境にして配列様式を定めるのである。例えば、 $C_x/d = 1.6$  の場合であれば  $\uparrow$ 印で示したように、 $C_y/d < 1.59$  では千鳥形配列、 $C_y/d > 1.59$  では基盤目形配列とする如くである。このようにして定められた選定基準値は、レイノルズ数によって変化し、表1のようにまとめられる<sup>(46)</sup>。

#### 4. 6 管群の性能向上に関する一つの提案

前述のごとく管群の第1列、第2列めの熱伝達がこれらの後方例のそれより悪く、列数と比較的少ない場合は管群全体の熱伝達率が低下する。著者は第1列、第2列にピラミッド形の粗さ(粗さの高さは0.27~0.50mm)を持つ円管(直径25mm)を配置し、熱伝達の実験を行った<sup>(49)</sup><sup>(50)</sup>。配列様式、円管間隔、レイノルズ数、粗さの高さなど関連する要因は多いが、第1列めの場合には最大40%程度、第2列めでは45%程度裸管の場合より熱伝達が向上することを見出している。また、そのような場合、第1列めの流動抵抗は粗さにより剥離点が下流側に後退し低下する。ただし、第2列めの流動抵抗が幾分増大するため結局トータルでは流動抵抗は変わらない<sup>(49)</sup>。

#### 5. 低レイノルズ数領域の管群の熱伝達

レイノルズ数が比較的小さい領域における管群の熱伝達に関する研究は極めて少なく、わずかに Bergelin<sup>(6)</sup><sup>(7)</sup>や、比較的最近では Žukauskas ら<sup>(20)</sup><sup>(21)</sup>によって行われているにすぎない。低レイノルズ数領域では圧力損失が少ないため、流体輸送時における動力を軽減でき、省エネルギーの立場から、この領域の熱伝達特性を明らかにすることは重要である。一方、電子計算機の性能向上に伴って、流れの中でも最も複雑なものの一つと考えられる管群まわりの流れ、熱伝達に関する数値解析が試みられるようになってきている<sup>(51)</sup>~<sup>(56)</sup>。千鳥形配列の場合に関しては Launderら<sup>(52)</sup>によって扱われ、Bergelin らの結果と比較的よく一致している。また、 $Re = 10 \sim 100$ 、基盤目形配列を取り扱った Le Feuvre<sup>(51)</sup>の結果によれば、流れが十分発達した状態での平均熱伝達率はレイノルズ数に全く依存しない。また、円管間隔による差異は明らかに認められ、Žukauskas らの実験結果とはかなり相違している。

基盤目形配列の場合について数値解析を行い、かつトランス油を用いた実験(管群は水平に設置)を行った結果の一例を図22に示すが<sup>(54)</sup>、 $Re < 100$ では両者がよく一致している。なお、●印は測定円管のみ加熱した場合、○印は周囲の全円管をも加熱した結果である。

Bergelin, Žukauskas らの実験結果は  $Re < 100$ でもレイノルズ数の依存性が大きく(これは円管を垂直に設置して実験を行っている結果、伝熱管の表面温度の評価に問題があると考  
伝熱研究 Vol. 27, No. 106

えられる)、数値解析の結果と異なる傾向がある。また、円管間隔が狭い場合は、円管間隔による熱伝達の相異は少ない<sup>(20)(21)</sup>。

比較的最近 Nishimura<sup>(55)</sup>は2列からなる管群の物質移動に関する数値解析を行い、第2列めのシャード数  $Sh$  を次式のように与えている。

$$Sh = C \cdot Re^n \cdot Sc^{1/3} \quad (21)$$

千鳥形配列の場合は  $C=1.09$ ,  $n=0.37$ 、碁盤目形配列の場合  $C=0.95$ ,  $n=0.35$  であり、 $Sc$  はシュミット数である。また、藤井ら<sup>(56)</sup>は出入口領域を含む千鳥形配列の熱伝達に関する数値解析を行い円管間隔やプラントル数の影響を詳細に検討している。

#### ◎ むすび

金沢での伝熱シンポへ出席する直前に標題のことに関してトピックまたは解説を何か書くようにと編集委員長から命ぜられ、安請負をしたものの、刷上がり20ページのものということを知って後悔した。シンポから帰秋してすぐ構想をねってほめたものの、期限に間に合いそうもなく、やむなくこれまでの小生のささやかな研究成果を書き連ねることに相い成った。したがって、客観的であるべき解説がかなり独断的に成ってしまい誠に汗顔の至りである。かなりの文献が手元にありながら、未整理や不勉強のため特に最近の研究に関する解説がおろそかになってしまったことを恥じ、お詫びする。

最後に、本校技官杉沢久雄氏には本稿作成にあたり協力いただいたことに対し、深く感謝する次第である。

#### 引用文献

- (1) Pierson, O. L., Trans. ASME, 59(1937), 563.
- (2) Hoge, E. C., Trans., ASME, 59(1937), 573.
- (3) Grimison, E. D., Trans. ASME, 59(1937), 583.
- (4) Grimison, E. D., Trans. ASME, 60(1938), 381.
- (5) Fishenden, M. and Saunders, O. A., Introduction to Heat Transfer, (1950), 132, Oxford Clarendon Press.
- (6) Bergelin, O. P., et al., Trans. ASME, 72-3(1950), 881.
- (7) Bergerin, O. P., et al., Trans. ASME, 74(1952), 953.
- (8) Žukauskas, A., Advances in Heat Transfer, 8(1972), 93, Academic Press.
- (9) Thompson, A. S. T., et al., Proceedings of general discussion on heat transfer, Inst. Mech. Eng. London, and ASME, New York, (1951), 177.
- (10) Snyder, N. W., Chemical Engng. Progr. Sympo. Ser., (5), 49-11(1953), 11.
- (11) Kostić, Z. and Oka, S., Heat and Mass Transfer in Boundary Layers, 1(1972), 451.
- (12) Kostić, Z. and Oka, S., Int. J. Heat Mass Transfer, 15(1972), 279.
- (13) 松和田・ほか2名, 機論 48-427 (昭57), 499.
- (14) 松和田・ほか3名, 機論 44-385(昭53), 3134.
- (15) Colburn, A. P., Trans. Am. Inst. Chem. Eng., 29(1933), 174.

- (16) Tucker, W.B., S.M. Thesis in Chemical Eng. Massachusetts Institute of Technology, (1936).
- (17) Žukauskas, A. and Makarevicius, V., Heat Transfer 1974, 2(1974), 330.
- (18) Žukauskas, A., et al., Heat Transfer 1974, 2(1974), 334.
- (19) Žukauskas, A. and Ulinskas, R., Heat Transfer 1978, 4(1978), 243.
- (20) Žukauskas, A. and Ulinskas, R., Heat Transfer-Soviet Research, 10-5(1978), 9.
- (21) Žukauskas, A., et al., Heat Transfer-Soviet Research, 10-6(1978), 90.
- (22) Hori, E., Proc. 9th Japan National Congress for Applied Mech., (1959), 231.
- (23) 高野・ほか2名, 日本機械学会講演論文集, No.710-15(1971), 77.
- (24) 石谷・ほか3名, 機論, 37-304(昭46), 2319.
- (25) Zdravkovich, M.M. and Stanhope, D.J., University of Salford International Report, FM 5/72(1972-7).
- (26) 小林, 機論, 42-357(1965) 1452.
- (27) Zdravkovich, M.M., Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, 99-4(1977), 618.
- (28) 岡島, 機論, 44-384(昭53), 2663.
- (29) 五十嵐, 機論, 46-406(昭55), 1026.
- (30) Kiya, M., et al., Trans. Journal of Fluid Eng. 102(1980), 166.
- (31) 五十嵐, 機論, 51-467(昭60), 2061.
- (32) Aiba, S. and Yamazaki, Y., Trans. ASME, J. of Heat Transfer, 98(1976), 503.
- (33) Baughn, J.W., et al., Trans. ASME, J. of Heat Transfer, 108(1986), 386.
- (34) Aiba, S., et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 23(1980), 311.
- (35) 相場・ほか2名, 機論, 46-406(昭55), 1134.
- (36) 相場・ほか2名, 機論, 47-422(昭56), 2004.
- (37) Aiba, S., et al., Bull. of the JSME, 25-204(1982), 927.
- (38) 石谷・ほか3名, 機論, 37-304(昭46), 2319.
- (39) 小林, 機論, 42-357(昭51), 1452.
- (40) 亀本, 日本機械学会第11回シンポジウム講演論文集, No.760-18(1976), 19.
- (41) Zdravkovich, M.M., Trans. ASME, Journal of Fluid Engineering, 99-4(1977), 618.
- (42) Ward, J. and Jeward, M.A., Heat Transfer 1978, 4(1978), 273.
- (43) 相場・ほか2名, 機論, 48-432(昭57), 1633.
- (44) 石谷・西川, 機論, 40-337(昭49), 2599.
- (45) 西川・石谷, 機論, 43-373(昭52), 3310.
- (46) 相場・土田, 機論, 48-436(昭57), 2655.
- (47) 相場・ほか2名, 機論, 48-434(昭57), 1976.
- (48) 相場, 機論, 52-461(昭61), 3310.
- (49) Aiba, S., et al., Wärme-und Stoffübertragung, 17(1982), 59.
- (50) 相場・土田, 空気調和・衛生工学会論文集, 22(昭58), 89.
- (51) Le Feuvre, Imperial College London, Mech. Engr. Dept. HTS/75/5, 1973.
- (52) Launder, B.E. and Massey, T.H. Trans. ASME, J. Heat Transfer, 100(1978), 565.
- (53) Massey, T.H., et al., Heat Transfer 1978, 4(1978), 261.
- (54) 相場・土田, 空気調和・衛生工学会論文集, 26(昭59), 21.
- (55) Nishimura, T., 学位論文, (1981).
- (56) 藤井・ほか2名, 機論, 52-476(昭61), 1694.

## 1. はじめに

1973年の石油危機以来、省資源、省エネルギーが叫ばれ、高性能熱交換器の開発に向けた多岐にわたる研究が今日まで続けられ、成果も急速に積み重ねられている。さらにはエレクトロニクス技術の飛躍的な発達とともに電子機器の冷却技術の向上が強く要求されるようになり<sup>(1)</sup>、また複雑な構造を有する高性能伝熱面の開発<sup>(2)</sup>も進んでいる。しかしながら、これら熱交換器の運転に伴い発生し、そして付着する汚れによって伝熱性能がいかなる変化を呈するのかといった観点からの研究はきわめて不十分のようである。

一方、前述の石油危機の後、化石燃料資源を殆ど保有しない我が国では、石油、石炭等への依存度を低下させるために、太陽熱、風力、波力、地熱などの自然界に存在するエネルギーを有効に利用するシステムの確立のための研究が精力的になされてきている。これら自然エネルギーの中でも、地熱エネルギーは火山国日本には豊富に存在し、しかも無尽蔵でかつ最も密度の高いエネルギーである。暖房・給湯・融雪・農業など多目的に利用されているのみならず、地熱発電所も全国に建設され、稼動している<sup>(3)(4)</sup>。地下から噴出した地熱蒸気と熱水の中、発電所で利用されるのは一般には蒸気のみであり、高温の熱水は地下に全量還元される場合が多い。この高温地熱水と清水との間で熱交換を行い高温水とし、様々な形でそのエネルギーを活用し、地域振興に役立てようとする試みも数多くなされている。しかるに、地熱水の圧力や温度の低下に伴い、熱交換器伝熱面や熱水輸送管表面には地熱スケールが付着し、熱効率の著しい低下や圧力損失の増加、腐食の要因となり、長期間にわたる安定な運転にとり大きな障害となっている。この対応策として、化学洗浄法・pHコントロール法・スポンジボール洗浄法ウォータジェット法や伝熱面材料の改良など種々考案され、実施されてはいるものの、いまだ問題は山積しているといっても過言ではない。

このような現状のもとでは、地熱スケールの付着による伝熱面の汚れを回避することは非常に困難と考えられるが、それに伴う熱交換器の伝熱性能変化に関する研究は数少ない<sup>(5)(6)</sup>。さらに、地熱熱水の利用に際して、スケール付着による管内閉塞の回避や、付着スケールの除去の容易さから、管外に熱水を流すことも試みられている<sup>(7)</sup>。これらのことを背景に、筆者は地熱スケールの付着に伴う熱交換器の伝熱性能変化ならびに汚れ特性を明らかにする基礎的研究として、熱交換器の伝熱面の基本的要素である楕円柱と円柱を取り上げ、その表面にシリカスケールを一様に付着させ、直交気流中における強制対流熱伝達の実験を行い、局所および平均熱伝達特性や汚れ係数のスケール粒子やレイノルズ数による変化を検討した<sup>(8)(9)</sup>。



本小文では、熱交換器の汚れに関する国際会議<sup>(10)</sup>や最近の研究報告等を基にそれらの概略を記述した後、筆者らの研究結果の一部を述べる。

## 2. 関連事項

前述のごとく、熱交換器の汚れは種々の要因によって複雑に変化し、統一的に解析、評価することは非常に困難である。本節では Epstein の概説<sup>(10)(11)</sup>、1979年に行なわれた国際会議<sup>(12)</sup>の成果を中心に関連事項について述べる。

### 2.1 経済的損失

熱交換器に付着する汚れのもたらす経済的損失は莫大である。それは

1. 汚れを想定することから過剰設備とせざるをえない
2. 伝熱効率の低下、圧力損失の増加によるエネルギー損失
3. 清掃、汚れ防止剤使用等の保守費の増加
4. 清掃期間中の運転停止、全体の効率減少による生産性の低下

などによるものである。これらを全て考慮した損失の評価は容易ではないが、Van Nostrand<sup>(13)</sup>は石油精製業について様々な観点から詳細に検討し、西側諸国についてだけでも年間約44億ドルにも達すること、Pritchard<sup>(14)</sup>によれば、英国においては国民総生産の約0.5%にもなることが提示されている。このようなことから熱交換器の汚れについてよりいっそうの研究の進展が期待される。

### 2.2 従来の方法

熱交換器の汚れが多くての要素によって複雑に変化することから、設計にあたっては Tubular Exchangers Manufacturers Association (TEMA) の推奨する汚れ係数を使用し、熱通過率を求めている<sup>(15)</sup>のが実状のようである。しかしながら、TEMAのデータについては次のような問題点を含んでいる。

1. 汚れ係数の時間変化を無視している
2. 個々の具体的な熱交換器の設計および操作に有効とはいえない
3. 限られた流体に対するデータのみである

したがって、高性能熱交換器の開発にとって汚れはますます重要度を増すことになると考えられる。

### 2.3 汚れの分類

熱交換器の汚れについては堆積率を支配する機構、熱交換器の用途、汚れの原因など様々な観点から分類できるが、Epstein<sup>(10)</sup>によればつぎの6つからなる。

- 1 . Scaling
- 2 . Particulate fouling
- 3 . Chemical reaction fouling
- 4 . Corrosion fouling
- 5 . Biofouling
- 6 . Freezing fouling

このうち1と6とは Crystalization fouling にまとめることもできる。また1から5は液体の加熱、6は冷却によって生ずる。

## 2.4 汚れの監視と測定

熱交換器の汚れは沈殿物堆積によって生ずるが、それを監視あるいは測定する方法は

- 1 . 伝熱面形状
- 2 . 加熱方法
- 3 . 監視方法

などに分類され、それぞれ多くの研究が発表されている<sup>(10)</sup>。それらの中で、汚れ係数を測定し、監視する方法が熱交換器の設計者及び運転者にとっては重要である。すなわち清浄面では

$$\frac{1}{U_0} = \frac{x_w}{\lambda_w} + \frac{1}{h_0} = \frac{T_{W0} - T_\infty}{q} \quad (1)$$

一方、運転時においては

$$\frac{1}{U} = \frac{x_w}{\lambda_w} + R_f + \frac{1}{h} = \frac{T_W - T_\infty}{q} \quad (2)$$

ここに  $U$  : 熱通過率,  $\lambda_w$  : 壁面熱伝導率,  $x_w$  : 壁面厚さ,  $h$  : 表面熱伝達率,  $q$  : 熱流束,  $T_w$  : 壁面温度,  $T_\infty$  : 流体温度,  $R_f$  : 汚れ係数

もし、汚れの堆積状態における表面熱伝達率  $h$  が清浄時と同一と仮定でき、 $q$  が一定であれば  $R_f$  は次式より定まる

$$\frac{1}{U} - \frac{1}{U_0} = R_f = \frac{T_W - T_{W0}}{q} \quad (3)$$

しかしながら、 $h$  の測定は非常に困難であり、未知であることが殆どである。したがって上述のように  $h = h_0$  の仮定のもとで  $R_f$  を求めることがなされてはいるが、問題は多い。このような方法で測定された汚れ係数の測定例<sup>(6)</sup> を図1に示す。ある程度までは清浄面と殆ど変わらないが、その後急速に増加し、伝熱効率が低下することを示している。

## 2.5 汚れのモデル

熱交換器の汚れはこれまでに述べたことから明らかなように、流体の物性値、温度、流れに依存するのみならず、伝熱面の材質、表面状態などにより著しく様相を異にする。したがって、その数学的モデルを確立することは容易ではない。

最も初期のモデルとしては McCabe と Robinson<sup>(16)</sup> のものがあげられるが、彼らは今考えている時間までに供給された熱量と付着スケール量は比例するとするものである。第2のモデルは Kern と Seaton<sup>(17)(18)</sup> による。そこでは沈殿量と剝離量の差が正味の付着スケール量と考えている。これらのモデルによる、付着量  $m$  を定性的に示すと図2<sup>(11)</sup> のようになる。図中の  $t_0$  は遅れ時間であり、ある程度の時間までは汚れ又はスケールが付着しないことを示している。汚れの沈殿量に関する解析モデルは数多く提唱されており、また除去される沈殿量 (re-entrainment flux) に対するモデルについても沈殿量に関する程ではないが様々に考案されている。それらは Epstein の概説<sup>(10)</sup> にまとめてあるので参照されたい。

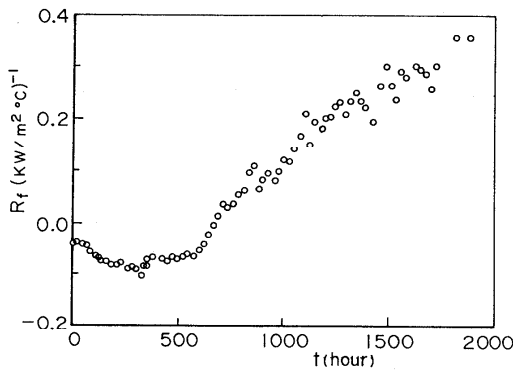


図1 汚れ係数の時間変化<sup>(6)</sup>

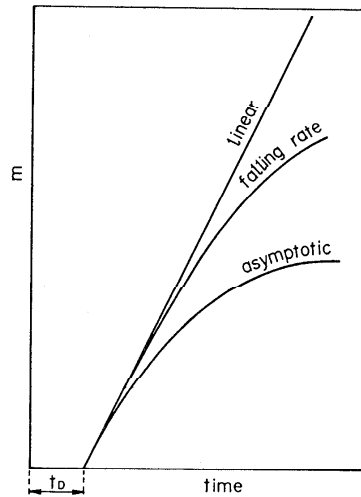


図2 付着量の時間変化に対するモデル<sup>(11)</sup>

### 3. 地熱スケールの付着に伴う熱伝達特性の変化

本節では、前述のごとく、筆者の研究室で行った地熱スケールが楕円管と円管に付着した場合の熱伝達特性の変化に関する研究結果<sup>(8)(9)</sup>の概略を述べる。2節で述べたように、熱交換器の伝熱面に汚れが付着した場合の伝熱性能の変化についてはいまだ説明されていない点が多く、しかも大部分は全体的な汚れ特性に関するものであり、局所的な特性にまで言及しているものはごく少ないようである。以下の結果はそのような観点からも有用な知見を提供するものと想定されている。

使用記号

C: 楕円柱長軸長さ, d: 円柱直径, h: 局所熱伝達率 =  $q/(T_w - T)$ , k: スケール粒子の大きさ, M: ふるいのメッシュ数,  $N_u$ : 局所ヌセルト数 =  $hC/\lambda \cdot h d/\lambda$ ,  $R_o$ : レイノルズ数 =  $U C/\nu \cdot U d/\nu$ ,  $R_f$ : 平均汚れ係数, S: 楕円柱前縁からの表面距離,  $U_\infty$ : 主流速度,  $\alpha$ : 楕円柱の迎え角,  $\theta$ : 前方岐点からの円周に沿う角度,  $\lambda \cdot \nu$ : 主流温度における空気の熱伝導率・動粘度,

添字 C: 清浄時, f: 汚れ時, m: 平均

#### 3.1 実験装置および方法

実験に使用した吹出し風洞<sup>(19)</sup>は、測定部が直径254mm、長さ605mmの円形測定部を有するが、厚さ10mmの2枚の亚克力板を150mm間隔で挿入し、測定部の約80%で流れの二次元性が確保されている。実験には、軸比1:3、長軸50mmの楕円柱と、それと同一円周長さの直径35.45mmの円柱を使用した。いずれもスパン方向長さは150mmである。楕円柱はFRP、円柱はベークライト管でそれぞれ作製され、その表面には0.07mmの銅-コンスタンタン熱電対を埋め込み、その上に厚さ0.05mmのステンレス箔を螺旋状に巻き付け固着し、加熱面とした。加熱はステンレス箔に交流電源から直接通電して行い、ほぼ等熱流束の条件で行なった。

地熱スケールは秋田県皆瀬村で実際に発生しているものを採取して使用した。主成分は89.2%の二酸化ケイ素<sup>(20)</sup>であり、乾燥した状態におけるスケール層の熱伝導率は約0.06~0.07 W/mKである。スケールは細かく砕き、ふるいで一様な大きさ(メッシュ数 M = 200, 150, 60, 32)に分け、ステンレス箔伝熱面に張り付けられた両面接着テープ上に一層で一様に散布した。

本研究ではスケール粒子の大きさ K はふるいのメッシュ数 M で示しているが、粒子は柱状のものが多く、その長さが M に対応しているものと見なされる。図3にスケール粒子の付着状況の一例を示した。

実験は主流速度が約 2m/s ~ 20m/s、対応するレイノルズ数は楕円柱で約 9,000~68,000、円柱で 4,500~50,000 の範囲で行った。主流乱れは約0.7%である。熱流束 q は約 910 W/m<sup>2</sup> とほぼ一定としたが、低レイノルズ数の場合には自然対流の影響が小さくなるように低い熱流束で実験を行った。以下に示す熱伝達特性は、両面接着テープによる局所熱伝達率の減少分を

加え、スケール付着による変化のみを考慮したものであるが、ブロック効果に関する補正は行っていない。

### 3.2 実験結果および考察

#### 楕円柱

図4～10には表面状態を種々変化させ、 $\alpha = 0^\circ$ と $90^\circ$ の場合における楕円柱の局所ヌセルト数分布を示した。図4～7は $\alpha = 0^\circ$ の場合である。清浄面に対する結果が図4に含まれているが、本実験のレイノルズ数の範囲内では、前方岐点で最大値を取り、層流境界層の成長とともに急減し、短軸近傍で最小値となり、この付近で流れが剥離することを示している。その後、剥離域の中心に向かい増加する。細かいスケール粒子が付着した場合には、図4に示されるように清浄面の場合と本質的には変わりなく、スケール粒子の断熱効果に伴い、一般的にヌセルト数は低下する。しかしながら $M = 60$ の粒子が付着した図5の結果は著しい変化を見せている。すなわちレイノルズ数がある程度以上に大きくなると、壁面粗さにより前方岐点から成長する層流境界層は乱流に遷移し、ヌセルト数は清浄面に比較して著しく増加する。一方剥離点が後縁のごく近傍まで移動する結果、後流幅が極端に小さくなり剥離域でヌセルト数は低下する。さらに、スケール粒子が粗くなると、乱流境界層への遷移とその発達に伴う伝熱促進と断熱効果が互いに打ち消し合い、図6の様に剥離域を除けば大きな相違は見られなくなる。

図7, 8は $\alpha = 90^\circ$ の場合である。迎え角が大きく、流れの塞止め効果も大きいために、近寄り速度は減少し、前方岐点で極小値を示し、長軸に向かう流れの加速と共にヌセルト数は増加する。さらに剥離域では大規模な渦塊の活発な運動のためにヌセルト数は増大し、後方岐点で最大値となる。スケール粒子が付着した状態においても、断熱効果が大きい楕円柱全面にわたりヌセルト数は概ね減少している。

図9に平均ヌセルト数のスケール粒子の大きさ $k$ による変化を種々のレイノルズ数について示した。 $\alpha = 90^\circ$ の場合、スケール粒子がある程度の大きさになるまでは清浄面の場合と殆ど変わらないが、それ以上では幾分急激に低下し、その後はほぼ一定となる。レイノルズ数が高い場合には、境界層が薄く、細かな粒子が付着しても平均ヌセルト数は減少し、その後はほぼ一定となる。 $\alpha = 0^\circ$ においては、低レイノルズ数では $\alpha = 90^\circ$ の場合と同様な変化を示すが、高レイノルズ数では乱流境界層への遷移の影響が大きく、レイノルズ数に依存する粒子の大きさで最大となり、その後減少する。図10に平均汚れ係数 $R_f$ のレイノルズ数による変化を示した。図9の平均ヌセルト数の変化に対応して汚れ係数は $\alpha = 0^\circ$ と $90^\circ$ の場合では著しく異なる傾向を示し、特に $\alpha = 0^\circ$ ではスケール粒子の伝熱促進効果のため汚れ係数が負となる領域が見られる。 $\alpha = 90^\circ$ ではレイノルズ数の増加と共に、スケール粒子の大きさには寄らなくなり一定値に漸近する傾向がある。

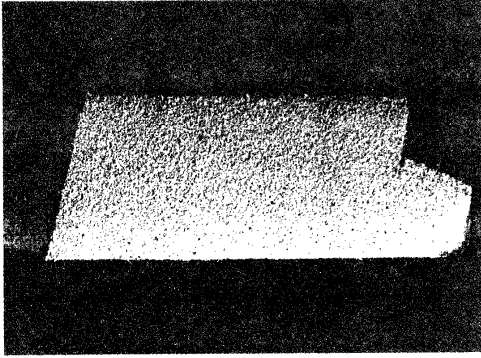


図3 スケール粒子の付着状況,  $M=80$

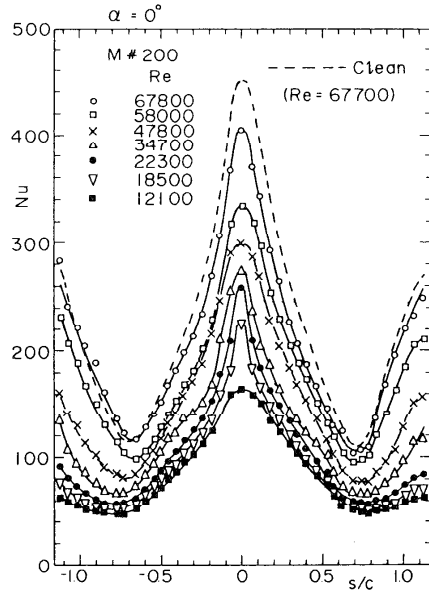


図4 楕円柱の局所ヌセルト数分布  
( $\alpha = 0^\circ$ )

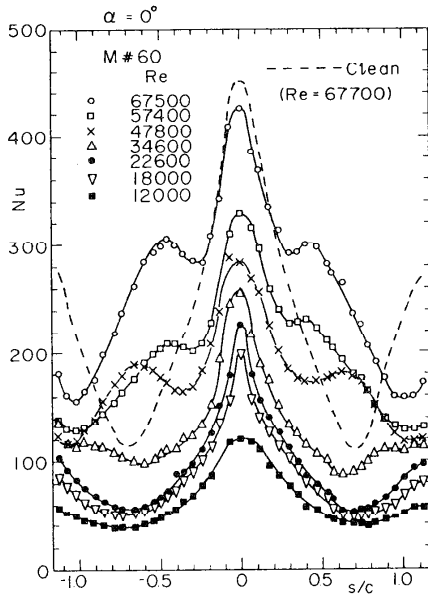


図5 楕円柱の局所ヌセルト数分布  
( $\alpha = 0^\circ$ )

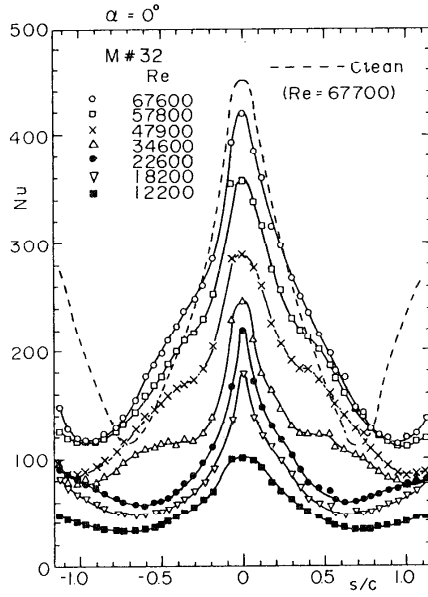


図6 楕円柱の局所ヌセルト数分布  
( $\alpha = 0^\circ$ )

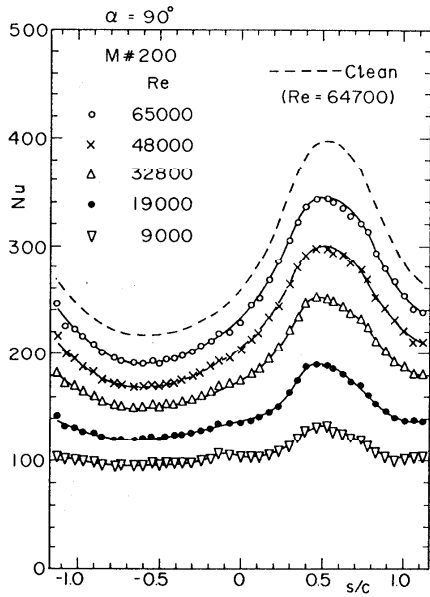


図7 楕円柱の局所ヌセルト数分布 ( $\alpha = 90^\circ$ )

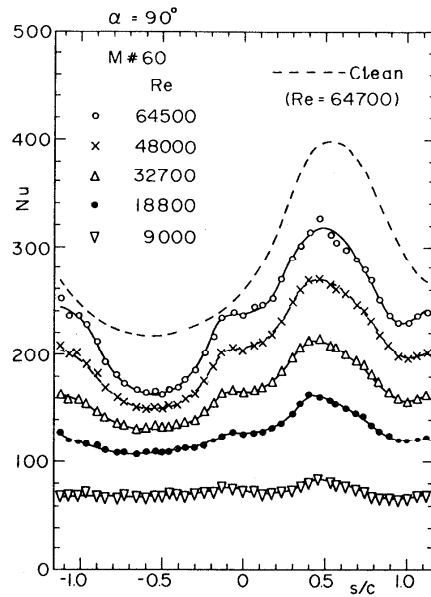


図8 楕円柱の局所ヌセルト数分布 ( $\alpha = 90^\circ$ )

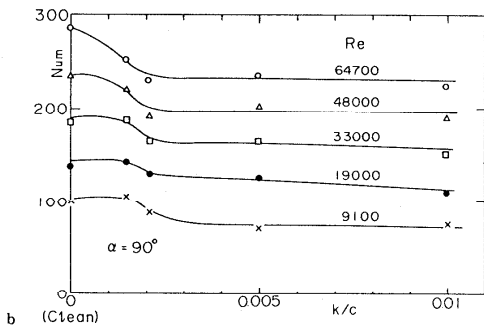
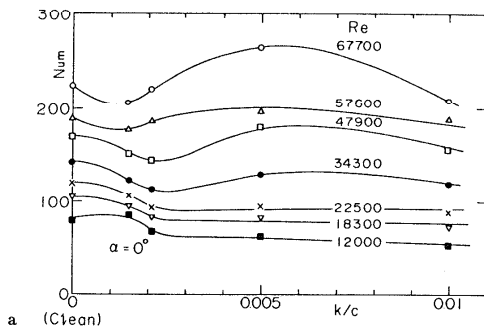


図9 楕円柱の平均ヌセルト数

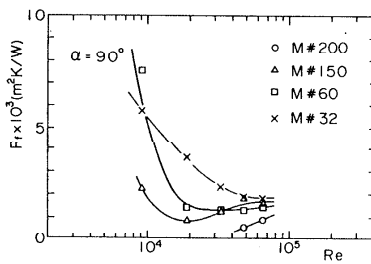
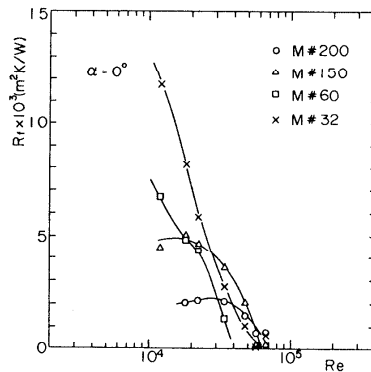


図10 楕円柱の平均汚れ係数

## 円柱

図11～13には円柱の局所ヌセルト数分布を種々の表面状態について示した。清浄面の場合には良く知られた特性を示す。 $M = 200$  とかなり細かいスケール粒子が付着すると円柱全面にわたり、ヌセルト数はほぼ一様に減少している(図11)。さらにスケール粒子が粗くなると図12に示されるように、楕円柱の場合と同様に乱流への遷移が早まり、剝離点が  $\theta = 120^\circ$  近傍まで移動し、剝離域のヌセルト数は低下する。他方、前方岐点近傍では断熱効果が著しく、前方岐点で極小値となる。図13に示すようにその傾向はスケール粒子の増加と共に顕著になり、 $M = 32$  の場合には、かなり鋭い立ち上がりを示し、清浄面の前方岐点で見られる極大値よりも高い最大値を生じるようになる。しかしながら一方では、剝離域のヌセルト数は逆にますます低下する。この様に層流境界層の遷移に伴う伝熱促進効果にも拘らず、特に剝離域の断熱効果が顕著となるため、全円周に亘る平均値は清浄面に比較し、10～30%程度減少する。

図14は平均ヌセルト数のスケール粒子の大きさによる変化を示したものである。 $\alpha = 90^\circ$  の楕円柱の場合の結果(図9)に極めて類似の変化であることは明白である。図15には平均汚れ係数のレイノルズ数による変化を種々のスケール粒子の場合について比較して示した。いずれの粒子の場合も定性的にはほぼ同一の傾向を有し、スケール粒子の大きさに依存するレイノルズ数で平均汚れ係数は最大となる。

図16, 17 は平均汚れ係数のレイノルズ数による変化を、楕円柱の場合と比較して示した。 $\alpha = 0^\circ$  の楕円柱は円柱の場合と定性的には同様の傾向を示すが、 $\alpha = 90^\circ$  の場合には両者は著しく異なる結果を示している。図18は、管内流れでしかも本実験とは異なるスケールが付着する場合の平均汚れ係数の結果<sup>(21)(22)</sup>と比較したものである。Bottら<sup>(21)</sup>は灯油に26%、9.6%の濃度でパラフィンワックスを溶かした場合、Watkinson ら<sup>(22)</sup>は炭酸カルシウムのスケールで本実験の円柱直径に最も近い内径の円管の実験結果をそれぞれ示している。Bottらの結果では、濃度が高くなると平均汚れ係数は増大し、しかも本実験結果とはかなり異なる傾向を示す。一方Watkinson らの結果とは定性的には同一の傾向となっている。



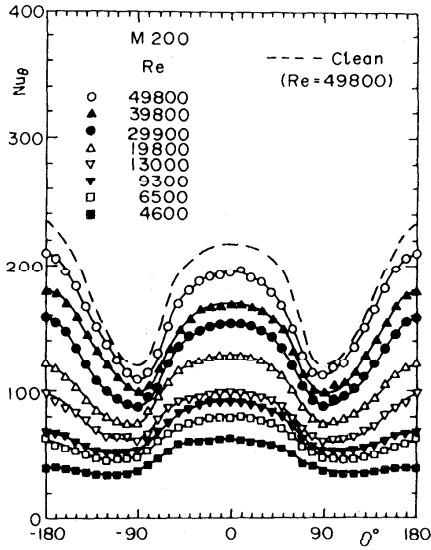


図11 円柱の局所ヌセルト数分布

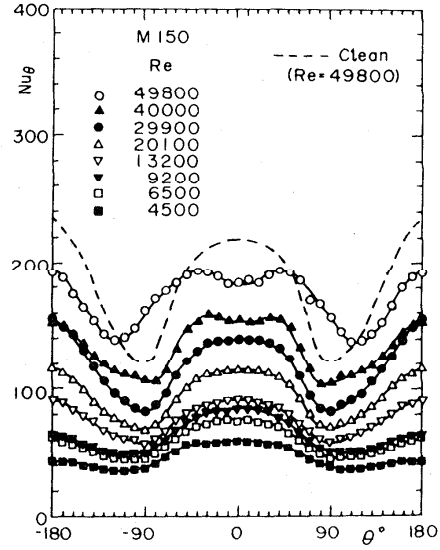


図12 円柱の局所ヌセルト数分布

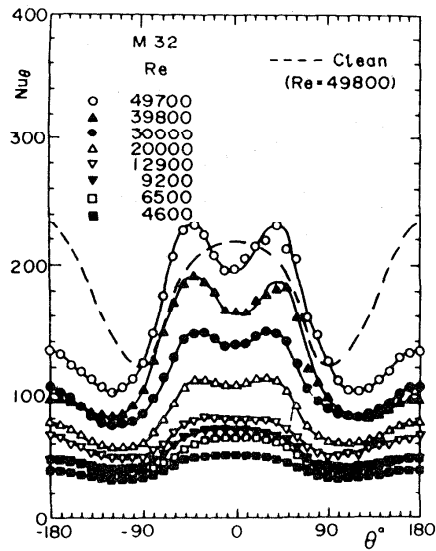


図13 円柱の局所ヌセルト数分布

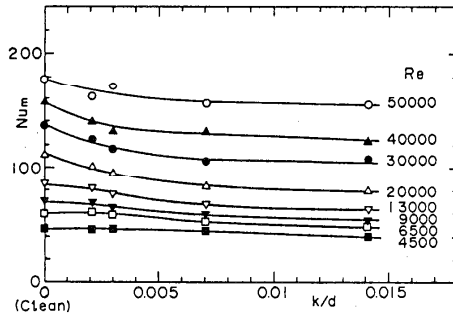


図14 円柱の平均ヌセルト数

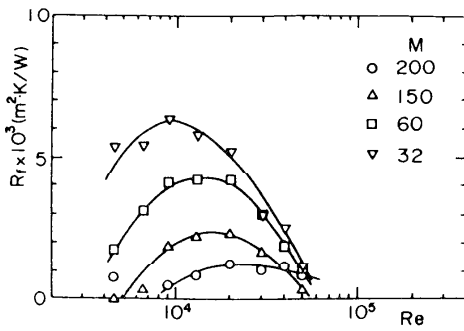


図15 円柱の平均汚れ係数

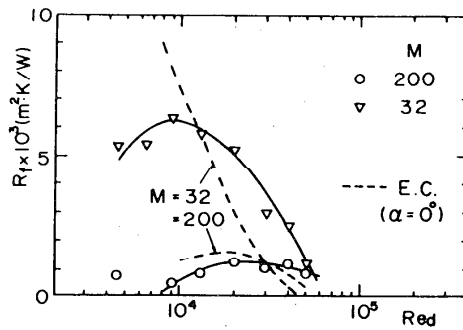


図16 平均汚れ係数の対比

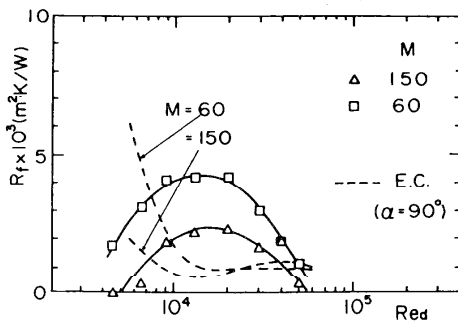


図17 平均汚れ係数の対比

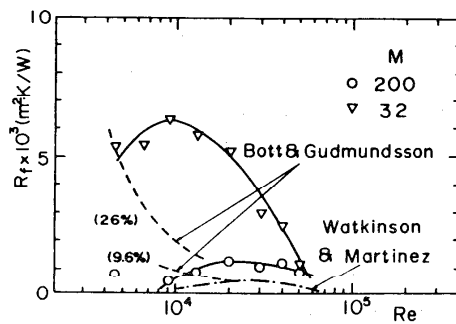


図18 平均汚れ係数の対比

#### 4. おわりに

熱交換器に汚れが付着した場合の伝熱性能の変化に関する既存の研究とその概説をもとにした簡単な解説を試みた。さらに、地熱スケールが付着した楕円柱と円柱について筆者らの行った研究結果の一部について説明をした。高性能熱交換器の開発、高性能伝熱面の研究・開発が精力的に進められている中、汚れの付着に伴うそれらの特性変化の解明は今後ますますその重要度が増すと考えるのは筆者一人ではなかろう。本拙文が一人でも多くの方々の熱交換器の汚れへの関心を引くことができればさいわいと考える。

おわりに、本稿をまとめるにあたり、秋田大学西山秀哉講師、金伸彦技官には多大な援助を頂いた、ここに謝意を表します。

#### 【参考文献】

- (1)中山, 機誌, 88,1985,pp.1048.
- (2)中島ら, 伝熱シンボ講論集, 1986,pp.169.
- (3)E.F.Wahl, "Geothermal Energy Utilization",Wiley,1979.
- (4)森, 陶山, "地熱エネルギー読本",オーム社, 1980.
- (5)L.L.Moresco ら, Letters in Heat Mass Transfer,8,1981,pp.337.
- (6)T.R.Bottら, Heat Transfer 1978,4,1978,pp.373.
- (7)秋田県鹿角市, "鹿角地域地熱熱水供給事業実証調査委員会報告書" 昭和55年度.
- (8)T.Ota ら, Wärme-und Stoffübertragung,19,1984,pp.93.
- (9)太田ら, 日本冷凍協会論文集, 1,1984,pp.163.
- (10)N.Epstein, Heat Transfer 1978,6,1978,pp.295.
- (11)N.Epstein, Heat Transfer Eng.,4,1983,pp.43.
- (12)E.F.C.Somerscales ら, "Fouling of Heat Transfer Equipment",Hemisphere,1981.
- (13)W.L.Van Nostrandら, "Fouling of Heat Transfer Equipment",1981,pp.619.
- (14)A.M.Pritchard, "Fouling of Heat Transfer Equipment",Hemisphere,1981,pp.513.
- (15)伝熱工学資料, 日本機械学会.
- (16)W.L.McCabeら, Ind.Eng.Chem.,16,1924,pp.478.
- (17)D.Q.Kernら, British Chem.Eng.,4,1959,pp.258.
- (18)D.Q.Kernら, Chem.Eng.Prog.,55,1959,pp71.
- (19)T.Ota, J.Heat Transfer,97,1975,pp.311.
- (20)秋田県地熱開発センター, 1979.
- (21)T.R.Bottら, Canadian J.Chem.Eng.,55,1977,pp.381.
- (22)A.P.Watkinson ら, J.Heat Transfer,97,1975,pp.504.

## 密度不均質を伴う乱流場での輸送現象

高城敏美, 平井秀一郎 (阪大工)

### 1. まえがき

流体の密度の不均質は一般に温度, 成分濃度または圧力の不均質によって生じる. たとえば (1)異なる流体が混合する領域 (空気と水素の混合領域では密度比が最大15程度), (2)燃焼が生じる領域 (非燃焼部と燃焼部での温度不均質により密度比が約7程度), (3)流体の一部が壁面から強く加熱される領域, (4)圧力の不均質が著しい領域 (高速流など), 等が考えられる.

このような密度が不均質な流れ場で, 運動量, 熱および物質の乱流輸送特性が均質密度乱流における場合に比べて, (a)特異な現象が生じるであろうか, (b)生じるとすると原因は何か, (c)数値予測ができるであろうか, 等が興味ある問題である. これらに関して, 上記(1), (2)の場合について, 主として筆者らの経験を述べる.

### 2. 火炎による層流化現象

周囲空気流中に水素 ( $H_2$ ) と窒素 ( $N_2$ ) を混合したガスを円管ノズルから噴出させ同軸噴流を作る. 火をつけると噴流火炎になる. 図1はノズル出口では同一条件の噴流で火炎のない場合とある場合および火炎のある場合でレイノルズ数が異なる場合のシュリーレン写真である. 円管ノズル内ではレイノルズ数が4200でも乱流となっている. 噴流内の乱れの状況はレイノルズ数と火炎の有無で著しく影響される. 写真から, 火炎のない場合 (図1(a))は噴流全体に微小な乱れをもつ乱流となっているが, 火炎のある場合でレイノルズ数が4200の場合 (図1(b))にはノズル出口に近い位置では, 乱れが存在するのは中心部にかぎられ, 周辺部 (高温部) では乱れが減少し, 局所的に層流化しているように見える. このような噴流および噴流火炎においてレーザ・ドップラ流速計により流速の乱れ強さを測定し対比すると, 火炎のある場合の局所的に層流化していると観察される高温領域では乱れ強さが顕著に減少していることが確かめられる<sup>(1)</sup>. また,

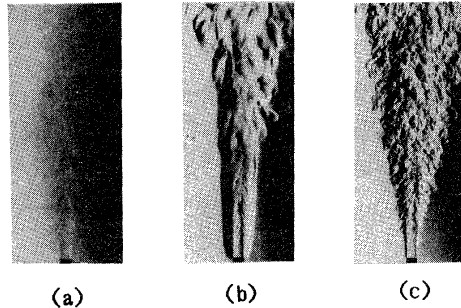


図1 シュリーレン写真

(a)  $Re=4200$ , 火炎なし

(b)  $Re=4200$ , 火炎あり

(c)  $Re=18000$ , 火炎あり

このような場合火炎のある方が成分の拡散が遅れる傾向がある。

このような層流化現象の原因として、(a)高温のため動粘性係数が増すことによる局所的な低レイノルズ数化、(b)燃焼による発熱のための膨張と流れの加速、が考えられる。しかし、この局所層流化現象の原因を直接実証したものはない。

二次元せん断流において生成される大スケールのコヒーレントうずが混合域での反応による動粘性係数の増加や温度上昇による膨張により生成されにくくなるのが直接数値シミュレーションで示されるが<sup>(2)</sup>、火炎による層流化現象の傍証とも考えられる。

火炎があっても、ノズル内のレイノルズ数が高い(高速の場合)は図1(c)のようにノズル出口近傍から乱れが発達し、火炎全体が乱れた構造となる。

以上のような噴流および噴流火炎における流れや混合、燃焼状況が数値的に予測できるかどうかを調べるため、実験<sup>(3)</sup>と計算<sup>(4)</sup>を比較し、次の結果を得ている。

(1)非燃焼の噴流(ノズル流体に対する周囲流体の密度比は1.7)および比較的高速(ノズル内レイノルズ数11000)の火炎の場合には密度変動の影響を考慮しない均質密度場で

適用できる $k-\epsilon$ 二方程式モデルによって乱流輸送流束や各種分布を予測できる(図2)。ただし、密度ははじめ各量の時間平均量の場所的な不均質は考慮する。

(2)ノズル内レイノルズ数の低い(低速の)場合で火炎の存在する場合はノズル出口近傍周辺部で乱流有効粘性係数が層流粘性係数と同オーダーとなり低レイノルズ数化する。このような領域では完全乱流を前提とした標準的な $k-\epsilon$ 二方程式モデルでは運動量、熱および物質の乱流輸送を過大に見積る傾向となる。このため、低レイノルズ数乱流モデルの導入が必要となる。

(3)上記(1)、(2)いずれの場合も運動量、熱および物質の乱流輸送は勾配拡散モデルで実用上十分表現できる。

### 3. 旋回流における混合の抑制と逆勾配拡散現象<sup>(5)</sup>

多くの場合、混合を促進するために旋回を加えると考えられてきたが、逆の効果があることも知られており、その原因を統一して説明することが必要である。ここでは旋回による混合の抑制現象とその原因について述べる。

いま、図3のように直円管に旋回羽根によって旋回を加えた空気を流し、燃料を管中心軸方

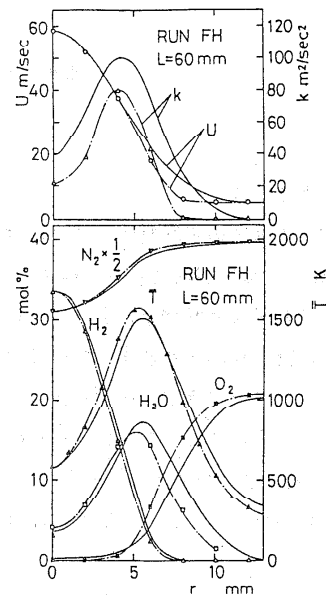


図2 乱流拡散火炎内の流速U、乱れエネルギーk、温度T、ガス濃度分布の実験値と計算値(実線)との比較

向に空気流と同軸に流し、直円管内に旋回流拡散火炎を作る。

図4に示すように流速の軸方向、半径方向、周方向の速度成分  $U$ ,  $V$ ,  $W$  のうち、 $U$  と  $V$  (または  $W$ ) を2波長LDVにより検出し、温度  $T$  を応答遅れを電氣的に補償した熱電対 (Pt-PtRh13%, 線径  $25\mu\text{m}$ ) により検出し、2速度成分と温度の同時測定を行った<sup>(5)</sup>。

図5は燃料ノズルから300mm下流の断面における軸方向運動量の半径方向流束  $\overline{\rho u'' v''}$  の分布を半径方向距離  $R$  に対して示す。 $\rho$ は瞬時の密度で瞬時温度から算出する。 $''$ は密度加重 (Favre) 平均からの速度成分を表す。 $\theta$ は旋回流の角度であり、 $\theta = 0^\circ$ は非旋回流である。図より、旋回流によって軸方向運動量の半径方向流束が著しく減少することがわかる。

図6は  $\overline{\rho v'' T''}$  の半径方向分布を示す。この量は密度変動を考慮した半径方向への熱流束に比例する量であり、値が正であれば外側に向かって輸送されることを意味する。旋回流のある場合には  $\overline{\rho v'' T''}$  の値は負であるから、時間平均温度の低い周辺部から時間平均温度の高い中心部へ熱が輸送される逆勾配拡散が生じていることを示す。

これらの現象の生じる原因を  $\overline{\rho u'' v''}$  および  $\overline{\rho v'' T''}$  の輸送方程式の生成項に着目して、それらの大きさを評価した結果、次の結果が得られた。

(1) 旋回流がないときは  $-\overline{\rho v'' v''} \partial U / \partial r$  および  $-\overline{\rho v'' v''} \partial T / \partial r$  がそれぞれ運動量および熱の半径方向乱流輸送を駆動する因子となり、それらを半径方向の速度勾配および温度勾配に関係させる勾配拡散モデルの妥当性を支持している。

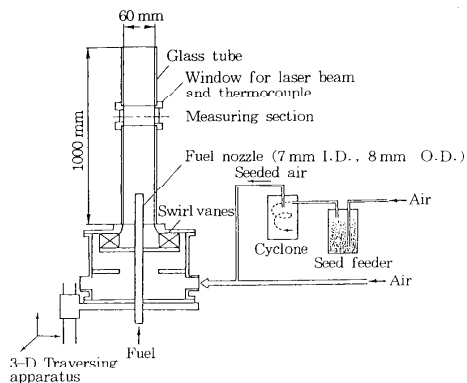


図3 旋回流燃焼器

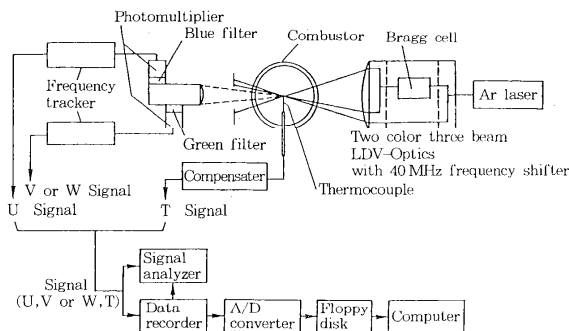


図4 2速度成分と温度の同時検出とデータ処理系

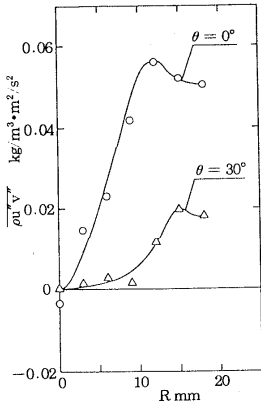


図5  $\overline{\rho u'' v''}$  の半径方向分布

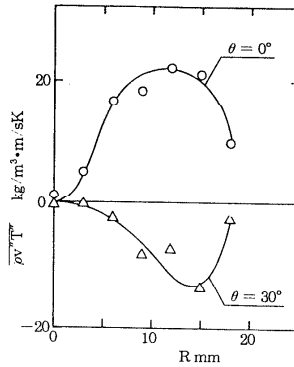


図6  $\overline{\rho v'' T''}$  の半径方向分布

(2) 旋回のあるときは上記(1)の因子以外に運動量輸送に関しては  $-\overline{u''} \partial P / \partial r$  が、熱輸送に関しては  $-\overline{T''} \partial P / \partial r$  がそれぞれ負の駆動因子となり、乱流輸送を抑制するかまたは逆輸送を生じさせる原因となる。これらの項が影響する程度に大きくなる原因は(a)旋回による遠心力により  $\partial P / \partial r$  が大きくなること、(b)  $\overline{u''} = -\overline{\rho' u'}/\overline{\rho}$ 、 $\overline{T''} = -\overline{\rho' T'}/\overline{\rho}$  の関係があり、密度変動があるため  $u''$ 、 $T''$  が0にはならないこと、による。

旋回流や密度不均質が乱流混合(成分の乱流輸送)特性におよぼす影響をさらに調べるため、図3の装置で燃料の代わりに周囲空気よりも密度の大きい  $\text{CO}_2$  または密度の小さい  $\text{He}$  を燃料ノズルから流し、濃度分布を測定し、数値予測値と比較した<sup>(6),(7)</sup>。得られた結果を要約すると次のとおりである。

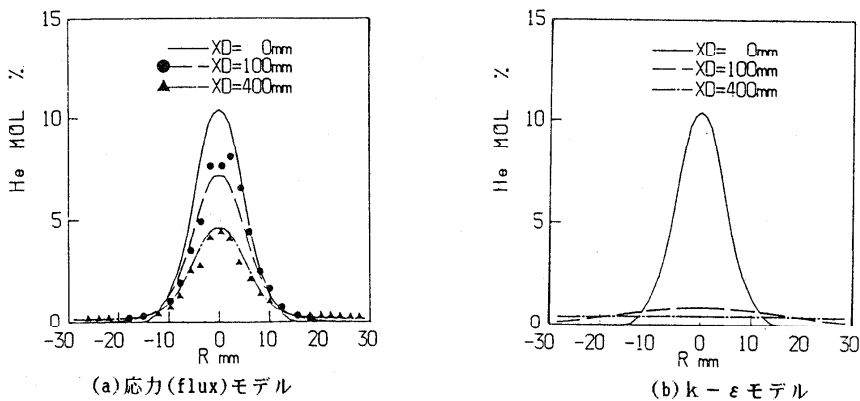
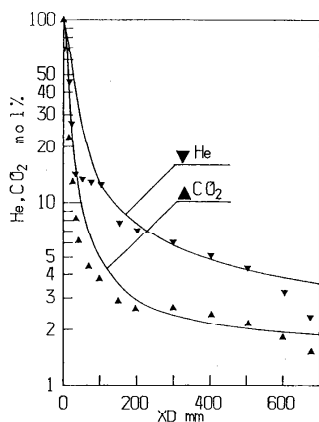
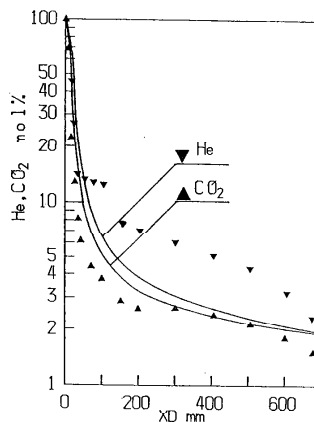


図7 旋回流れ場内の半径方向濃度分布の実験値(プロット)と計算値(線)の比較



(a)密度変動を考慮する場合



(b)密度変動を考慮しない場合

図8 軸方向濃度分布の実験値(プロット)と応力方程式による計算値(実線)との比較

(1)実験によると旋回のない場合に比べて、旋回のある場合の方が混合が遅れる傾向がある。この傾向はCO<sub>2</sub>およびHeのいずれにも見られる。CO<sub>2</sub>とHeを旋回のある場合で比較すると、密度の小さいHeの方が混合が遅れる傾向がある。

(2)k-ε二方程式モデルと応力(flux)方程式モデルを用いて数値計算し、流速や濃度分布を実験値と比較した。その結果、k-ε二方程式モデルによると旋回流れ場では混合を過大に見積ること、応力方程式によると実験値の傾向をかなりよく予測できる(図7)<sup>(6)</sup>。このような旋回による混合の遅延現象は密度変動を考慮しない場合でも応力(flux)方程式モデルで予測できる。その原因となる項は成分の質量の半径方向の乱流輸送流束 $\overline{v' m'}$ の輸送方程式に生じる $\overline{w' m' W/r}$ であり、これが旋回速度成分Wが存在することによって $\overline{v' m'}$ を減少させる方向に作用する。ここで、mは成分の質量分率であり、'は通常の変動成分をあらわす。このため応力(flux)方程式モデルでは実験的に得られている旋回による混合の抑制効果を予測できることになる。標準的なk-ε二方程式モデルではこのような効果を考慮することができない。

(3)密度の不均質の著しい旋回流れ場では密度の変動を考慮する必要がある<sup>(7)</sup>。密度変動を考慮する必要がある場合はたとえば、 $\overline{\rho v' m'}$ の輸送方程式には $-\overline{m''} \cdot \partial P / \partial r$ を加える必要がある。密度変動を考慮しない場合は $\overline{m''} = -\overline{\rho' m' / \rho}$ は0になる。

図8には中心軸上の濃度分布について密度変動を考慮した場合と考慮しない場合の応力(flux)方程式モデルによる計算と実験の比較を示す。XDはノズル先端からの軸方向距離である。密度変動を考慮した場合の方が実験で得られるHeとCO<sub>2</sub>の密度の違いによる影響をよ



く予測できる。

#### 4. 逆流を伴う旋回流の混合特性（旋回による混合の促進）<sup>(8)・(9)</sup>

旋回流を広い空間に噴出すると軸方向の圧力回復により、循環流（逆流）が生じる。このような流れ場で火炎のある場合とない場合について流動や混合特性を実験的に調べ<sup>(8)</sup>、数値計算と比較した<sup>(9)</sup>。その結果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 標準的な  $k-\epsilon$  二方程式モデルでは運動量の乱流輸送を過大に見積り、循環流を生じさせにくくする。このため実験で得られている循環流を適正に予測できない。
- (2) 3節の結果を考慮し、流線の曲がり（旋回）や密度勾配の影響をリチャードソン数で評価し、 $k-\epsilon$  二方程式モデルで用いる実験定数を修正した。旋回によって運動量の乱流輸送流束を減少させる効果が循環域の形成を助長することが知られた。
- (3) 循環域が形成されると流線が半径方向に傾き、その対流によって成分が輸送され全体的な混合が促進される。このため、旋回によって乱流輸送が低減されたことにより、循環域の形成が助長され、混合が促進されるという、逆説的な結果となる。

3節、4節の結果を総合すると、旋回により混合が促進されたり抑制されたりする現象の統一的な説明が可能となる。

#### 5. むすび

密度不均質を伴う流れ場での輸送現象を調べるには、実験的には瞬時の流速、密度、温度、濃度等を組み合わせた同時測定が必要となり、近年発達してきているレーザ応用計測が有力となる（文献(10)）。また、数値シミュレーションの手法も発展しており、計測とシミュレーションを対比することにより問題点の抽出や把握に役立つ。

密度不均質が影響する現象は成層乱流、ブルーム等多岐にわたると思われるが、本報では筆者らの研究室で経験した標題に関係したものに限定して述べた。

記述内容は研究室の岡本、小宮山、大学院生、学部学生の諸氏に負っていることを記し謝意を表する。

#### 参考文献

- (1) Takagi, T., Shin, H. D. and Ishio, A., Local Laminarization in Turbulent Diffusion Flames, *Combustion and Flame*, 37, 2, (1980) p. 163.
- (2) Takagi, T., Kamoda, M. and Komiyama, M., Numerical Simulation of the Vortex Formation and the Mixing Process in the Reacting and Non-Reacting Shear Layers, *JS-WSS/CI Joint Meeting on Combustion* (1987) p. 145.
- (3) Takagi, T., Shin, H. D. and Ishio, A., Properties of Turbulence in Turbulent Diffusion

Flames, Combustion and Flame, 40, 2 (1981) p. 121.

- (4) 高城, 古藤, 乱流拡散火炎における流れと燃焼の予測, 機論B編, 48, 436 (昭57)  
p. 2609
- (5) 高城, 岡本, 田地, 中筋, 近藤, 旋回火炎における運動量および熱の乱流輸送特性 (旋回による混合の抑制と逆勾配拡散現象) 機論B編, 53, 488 (昭62) p. 1418.
- (6) Hirai, S., Takagi, T. and Higashiya, T., Numerical Predictions of Flow Characteristics and Retardation of Mixing in a Turbulent Swirling Flow, Int. J. Heat and Mass Transfer, 掲載予定
- (7) 平井, 高城, 不均質密度と旋回を伴う管内乱流場の流動と混合の数値予測, 第25回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1988-6) p. 43.
- (8) 高城, 岡本, 北谷, 旋回火炎の構造に関する研究, 機論B編, 49, 441 (昭58) p. 1078.
- (9) 岡本, 高城, 旋回流における循環域の形成と乱流混合の予測, 機論B編, 53, 495 (昭62)  
p. 3338.
- (10) Takagi, T., Recent Measurements and the Consequent Understanding of Flow, Mixing and Combustion in Turbulent Diffusion Flames (invited paper), ASME-AIChE National Heat Transfer Conference, HTD-Vol. 45, (1985) p. 281.

東海研究グループ講演・見学会

日時： 昭和63年5月7日（土） 13:00 ～ 19:30

場所： 講演会 … 豊田工業大学 1302 演習室（本階3階）

見学会 … 豊田工業大学 熱工学研究施設、他

内容：（展望講演）

「最近の熱伝導率測定法の進歩」 小林清志（豊田工大・工）

最近5か年間の固・液体の熱伝導率測定法の進歩に関し、小林先生らのグループが開発しつつある方形波パルス加熱法による高温域測定を含めて、詳細にレビューされた。ステップ、パルス（又はフラッシュ）および周期的加熱法、線熱源法、プローブ法などの各種測定法の原理と特徴が分かり易く解説され、今後のわが国の熱物性関連分野の研究は、従来の海外データを利用するという受動的立場から信頼できるデータを海外に向けて供しうるように方向転換すべきであると結ばれた。

（一般講演）

展望講演に続いて次の5件の講演があり、各講演終了毎に、伝熱シンポジウムでは仲々実現する事が困難な、異なる伝熱要素研究分野の研究者相互の意見交換が、十分な時間をとって有意義に行われた。

(1) 断熱材の熱物性測定法

荒木信幸、仙波浩雅、牧野淳（静大・工）

(2) 速度と温度の三重相関の乱流モデル

長野靖尚、田川正人、久米英明（名工大・工）

(3) 超音波による液体層温度分布の音響学的測定

新井紀男、山本彰夫、架谷昌信（名大・工）

(4) 剥離を利用した自然対流の伝熱促進について

北村健三（豊橋技科大・工）

(5) 二重管潜熱蓄熱式熱交換器の単一作動時の熱通過有効度について

（準定常法による解析と実験との比較）

海野紘治（豊田工大・工）

講演会終了後、小林、海野両先生のご案内で熱工学研究施設、計算機センターなどを見学し、懇親会が催された。懇親会では、地方グループ活動の活性化について意見交換し、活性化のためには、1) 産業界からの参加、2) 学生を含む若手研究者の参加、3) 他分野との協同 などが必要であろうという指摘がなされた。なお、講演会参加者は40名であった。

（東海地方連絡幹事： 新井紀男）

関西研究グループ講演見学会

日時：昭和63年5月17日（火）13：00～17：00

場所：神戸 島文第3ビル8階 No. 3会議室

講演 1) F.C.C水注入時のコールドレグ流動振動研究の現状

綾 威雄（船研）

2) 比較的液流量が大きい場合の気泡流の流れ特性について

芹沢 昭示（京都大工）

3) 核沸騰蒸気泡周辺の伝熱機構について

浅野 強，神吉 達夫（姫路工大）

4) 各種固気接触熱交換装置の数値シミュレーション

箕浦 忠行，坂本 雄二郎（神戸製鋼）

見学 神戸製鋼所（株）機械研究所

〈講演概要〉

講演 1) 水平管内の蒸気流中へ大きなサブクールを持った水を注入した場合に生じる流動振動は、加圧水型軽水炉の一次冷却材喪失事故時に緊急炉心冷却水をコールドレグ部より注入する際に生じる可能性のある現象であることから、コールドレグ流動振動と呼ばれている。しかし、この流動振動は、蒸気を使用するプラントであればその物質いかに因らずどこでも起こり得るもので、蒸気を使用するプラントの安全運転を確保するため、十分解明されるべきものである。

コールドレグ流動振動についての従来の研究を調査した結果、その現象の大きな特徴の一つに、非常に高いピーク圧力を伴うWaterhammerの発生が挙げられている。流動振動中のWaterhammerは、水平層状流部の水がスラッグ化することにより形成される蒸気ボイドの急速な凝縮・崩壊により生じるものである。流動振動中のスラッキング条件を明らかにすることは、解析的取り扱いの困難さが予想されるが、今後、十分研究されるべき重要な課題である。

講演 2) 一般に、気液二相気泡流の流れの様相は液流量に依存して大きく変化する。ここでは、流路内の相分布や、乱れ特性の測定結果および気泡写真などに基づいて液流量の小さい場合と比較的大きい場合とで流れの様子がどのように異なるかを示すとともに、その原因について述べた。また、気液流量が与えられた場合の流路断面平均ボイド率 $\langle \alpha \rangle$ はホモジニアス・モデルによる値、すなわち、ガス $\beta$ の体積流量比 $\langle \beta \rangle$ を超えることはない従来より考えられていたが、円管内の空気-水系気泡流で液流量（フラックス）が1~2m/s以上になると、 $\langle \alpha \rangle < \langle \beta \rangle$ となり、従来の考え方が必ずしも成立しないことを実験結果に基づいて説明し、併せて、その理由について述べた。

講演 3) 核沸騰単一蒸気泡の生長機構について、1) 高速度カメラによる気泡成長の観察、2) マッハツインダー干渉計による気泡周辺流体の温度分布の測定および3) p-n 接合半導体 (感温部 13 点, 時定数  $0.25 \mu\text{sec}$ ) による伝熱板気泡接触部の温度の測定を行った。その結果、以下に示す実験的知見を得た。1) 気泡成長過程は 2 領域より成る (成長曲線は両対数紙で 2 本の直線で整理される)、2) 伝熱板の温度は気泡発生期より急激に降下し極小点を経て回復する。1) の 2 領域は伝熱板の温度の降下域と温度の回復域に対応する (成長曲線の不連続点に当たる時間は温度の極小点に対応する)。3) 気泡の成長は周囲流体境界層からの熱移動の寄与と伝熱板低部からの熱移動の寄与による。初期泡では、両者の寄与は同程度であるが、後続気泡では、前者の寄与が支配的である。4) 温度境界層の厚み  $\delta$  は、 $\alpha$  を温度伝導度とするとき、ほぼ、次式  $\delta = (1/3)(\pi \alpha t)^{1/2}$  に従って成長する。これは、気泡が成長するとき、境界層が移動境界によって薄層化される効果があることを示唆している。

講演 4) 固体と流体が接触し熱交換する装置の形式として、固定層、移動層、流動層が挙げられる。これらは広く産業界で利用されているものの、実装置に関する理論的検討は盛んに行われているとは言い難い。そこで著者らは、回気接触装置に着眼し、これを数学モデル化し、数値シミュレーションから装置の特性を把握して、設計に役立てる研究を進めてきた。その一例として、神戸製鋼にて設計製作されている装置あるいは製鉄所の生産設備として使用されている装置の内から、流動層焼却炉、焼結鉱冷却機および移動層式熱交換器を挙げ、主に熱交換に着目した数学モデルを紹介した。数学モデルによる数値シミュレーション結果、実測値との比較、シミュレーションにより得られた装置の特性および設計資料として役立てたシミュレーションの例を説明した。

高城敏美 (関西地方連絡幹事)

<訂正のお願い>

「伝熱研究」Vol.27, No.105, P. 100~101 関西研究グループ講演会報告の<講演概要>講演 3) の内容が誤タイプにより意味が逆になる箇所がありましたので下記のように訂正させていただきます。

講演 3) 円柱により攪乱を受ける乱流境界層の熱および運動量輸送の非相似性に関する研究

鈴木 洋 (京大工院) 鈴木 健二郎 (京大工)

前報によって報告された壁近傍の円柱により攪乱を受ける乱流境界層中に存在する熱輸送および運動量輸送の非相似性に関して、円柱が非加熱であったために生じた速度場と温度場の非相似な境界条件による影響をみるための実験的研究を行ったものである。本報では円柱を加熱し、円柱表面の温度を壁温とほぼ同温に保ち、速度場と温度場の境界条件を相似とし、壁面からの熱伝達率が測定された。その結果、速度場と温度場の境界条件の相違は熱および運動量輸送の非相似性を引き起こす主たる原因ではないと結論された。さらに速度変動 2 方向成分および温度変動成分の同時測定が行われ、象限分析法が適用された結果、interaction 運動の強化が熱輸送および運動量輸送の非相似性の主たる原因であると結論された。

中国・四国研究グループ講演会

日時：昭和63年 5月20日（金） 13:15～

場所：広島教育会館

講演：1) 粗い壁面をもつ曲り正方形管の流動抵抗

須藤 浩三（広島大工）， ※高見 敏弘（広島大工）

2) 不規則性についての一考察

※神田 健一（香川職訓短大）， 千葉 徳男（香川職訓短大）

3) 吸収式ヒートポンプの流下式液膜式再生器に関する研究

※松田 晃（愛媛大工）， 井出 哲夫（愛媛大工）

川村 輝夫（愛媛大工院）， 羽田 邦彦（愛媛大工院）

4) レイリー-散乱法による火花点火機燃焼室内混合気濃度の測定

角田 敏一（広島大工）， ※趙 福全（広島大工院）

津崎 秀男（広島大工院）

5) 水平回転円筒内凝縮熱伝達（続報）

※水上 紘一（愛媛大工）， 青山 善行（愛媛大工）

二神 浩三（愛媛大工）

6) 下向き浸漬凝縮面の伝熱促進に関する研究

本田 博司（岡山大工）， 野津 滋（岡山大工）

内間 文顕（岡山大工）， ※福森 洋（岡山大工院）

講演1) 粗い壁面からなる正方形断面の曲り管内流れの管摩擦係数に関する研究である。実験は、管壁上に粗さの異なる布やすり（等価相対粗さ $3.15 \times 10^{-3} \sim 1.94 \times 10^{-2}$ ）をはり付けた曲率半径比15および25の曲り管を用いて、レイノルズ数 $Re < 5 \times 10^4$ の範囲で空気を流して行い、圧力損失を測定して管摩擦係数を算出した。また測定結果を参考にして、境界層理論に基づく近似解析を行い、実験結果をよく説明できる乱流管摩擦係数の近似式を提示した。

講演2) 不規則過程の例として擬似乱数および不規則な連続関数を取りあげ、それらの諸性質について検討したものである。まず擬似乱数として一様乱数、シャフル型一様乱数および正規乱数を採用し、それらについて乱数列の連、自己相関係数、マルコフ度などの諸性質を吟味して、これらの過程がいずれも擬似マルコフ過程であることを示すとともに、一様乱数からフーリエ級数によって連続関数を合成し、その性質についても同様に検討がなされた。

- 講演3) 吸収式ヒートポンプの再生器に流下液膜式を用いるための基礎研究である。実験では、液膜を流下させる再生器の濡れ壁部にステンレス管(外径15.7mm,内径14.0mm,高さ580mm)を用い、作動冷媒には臭化リチウム水溶液を使用した。測定は再生器圧力8.0kPaのもとで、フィード液濃度,加熱水温度,フィード液流量を変化させて行い,塔頂・塔底液温度,塔底液濃度および蒸気発生量を測定して,それらに対する再生器作動条件の影響を検討した。また蒸発速度を,連続の式,拡散方程式,エネルギー方程式をもとに数値解析によって求め実験結果との比較を行った。
- 講演4) レーザレイリー散乱法を適用した自動車用火花点火機関の燃焼室内における混合気濃度測定に関する研究である。ここでは,実機に近い条件での現象を把握するため,無鉛レギュラガソリンおよびR113を供試機関の燃焼室に間欠的に噴射し,代表的な測定点における蒸気温度の時間的変化について測定を行った。その結果より,ガソリン蒸気濃度測定へのレイリー散乱の適用を検討するとともに,測定結果に対する燃料液滴からのミー散乱光の影響が調べられた。また蒸気温度に及ぼす燃料供給方法の影響について測定が行われ,極大蒸気温度,蒸気到達時間,蒸気存在時間に及ぼす噴射期間,吸入空気流量などの影響が報告された。
- 講演5) 製紙工場の抄紙工程での乾燥機に見られる水平円筒内凝縮熱伝達に関する研究であり,円筒内部に取り付けた凝縮液(作動媒体としてR113を使用)をかき取るためのスクレーパを回転円筒内壁面から離して設置することによって,凝縮液膜が厚い場合の熱通過率を測定するとともに,可視化を行って凝縮液膜の状態を検討した。以上の結果を前回(昭和63年1月29日)に報告された液膜が薄い場合の結果と比較し検討するとともに,液膜が厚い場合についての解析結果と実験結果が比較された。
- 講演6) 電子素子を浸漬冷却する際に凝縮面として浸漬冷却モジュールの上壁を利用するための基礎研究である。供試流体にR113およびメタノールを用い,凝縮温度差を1K~35Kまで変化させて実験を行い,下向きフィン付き凝縮面に多孔質排水板を取り付けたことによる伝熱促進効果が(浸漬型),蒸気空間中に設置された場合と比較することによって検討された。また可視化を行うことによって,浸漬型および蒸気空間型での凝縮状態も検討された。

(中国・四国地方連絡幹事 須藤 浩三)

## 第106号編集後記

第27期編集委員長 宮木 政英（山口大）

はからずも第27期「伝熱研究」編集委員長を拝命し、微力ではあるが、「伝熱研究」の編集に努力したいと思っている。編集委員の諸先生は常日頃尊敬している方々であり、編集にも豊富な経験をお持ちであるから、御協力を得て「伝熱研究」を更に魅力あるものしたいと願っている。

さて、各期の最初の会誌の編集は、その期の役員等が正式に決定する総会より以前に開始されているのが、止むを得ない例年の実情のようである。今期についても同様である。更に、今期は事情のため、編集委員長拜命の内示を例年よりかなり遅く4月初旬にいただき、まさに編集委員長など予期せぬことであつたため、第106号については発行までに十分な日程の余裕が無い状態で、慌ただしく編集の準備を開始した。谷口前期編集委員長の御懇切な引き継ぎ、御指導、編集委員を始め関係各位の御努力により、無事発行の運びとなった。御無理をお願い申し上げた執筆者各位を始め、御協力いただいた皆様に深く謝意を表したい。本号は例年通り伝熱シンポジウム特集号であるが、特に普通講演各セッションのレビュー記事は、出来るだけ例年の執筆者とは異なる方々に御依頼申し上げ、新風を吹き込むよう配慮されている。

今期第106号以後の各号の編集は、昨年の例にならって、下記の編集委員に主に分担していただくことが第1回編集委員会において了承された。

No. 106（1988年 7月号）： 玉木恕乎委員（信州大）、 太田照和委員（東北大）

No. 107（1988年10月号）： 藤井丕夫委員（九大）、 須藤浩三委員（広島大）

No. 108（1989年 1月号）： 笠木伸英委員（東大）、 高城敏美委員（阪大）

No. 109（1989年 4月号）： 金山公夫委員（北見工大）、 新井紀男委員（名大）

更に、今期の基本的な編集方針として、タイミング良く出された将来問題検討委員会の答申を配慮することが、編集委員会において確認された。答申の全てを、即実行することは不可能であるが、今期に実現可能なものから順次取りあげていくことにしている。

次の107号には、伝熱研究会主催の最後の夏季伝熱セミナーとなる第22回夏季伝熱セミナーの特集号を予定している。併せて研究トピックス、解説、展望、その他の記事によりますます誌面を充実させることが企図されており、次号に限らず会員の皆様の積極的な御投稿を期待している。執筆者各位の御協力により原稿のワープロ化は既に定着したが、第106号より英文の目次を設けることになった。御寄稿の際、英文の題目、氏名、所属を併せてお知らせ頂くことをお願いする。





**Program at a Glance — First World Conference on  
Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics**

Croatia Hotel, Dubrovnik, Yugoslavia  
September 4-9, 1988

<i>MONDAY Sept. 5</i>	<i>TUESDAY Sept. 6</i>	<i>TUESDAY Sept. 6</i>	<i>WEDNESDAY Sept. 7</i>
8:15-9:15 Opening Ceremony 9:15-10:15 Plenary Lecture	8:15-9:15 Keynote Lecture	1:30-2:30 Keynote Lecture	8:15-9:15 Keynote Lecture
The Role of Experimentation in Thermo-Fluid Sciences, by A.E. Bergles	Microsensors for Heat Transfer and Fluid Flow Measurements, by K.S. Udell	A Review of Recent Advances in Multiphase Flow Measurements and Methods, by C. Snoek	The Potential for Image Analysis and Processing for Fluids Research, by R.S. Brodkey
10:30-11:30 Keynote Lecture	9:25-11:45 Technical Sessions	2:35-5:00 Technical Sessions	9:25-11:45 Technical Sessions
Experimental Techniques in Heat Transfer, by R.J. Moffat	8. Panel Discussion: Flow Induced Vibrations in Heat Transfer Equipment	15. Panel Discussion: Thermo-Fluid Problems in Materials Processing	22. Panel Discussion: Two-Phase Flow in Compact Heat Exchangers
1:30-2:30 Keynote Lecture	9. Natural Convection in Channels	16. Natural Convection in Enclosures	23. Heat Transfer with Fluid-Solid Phase Change
Optical Techniques for Fluid Flow and Heat Transfer, by F. Durst	10. Separated and Recirculating Flows and Heat Transfer	17. Liquid Metal Systems	24. Gas Turbine Flow and Heat Transfer
2:35-5:00 Technical Sessions	11. Heat Transfer Augmentation	18. Internal Turbulent Flows	25. Condensation
1. Panel Discussion: Optical Techniques in Heat Transfer	12. Pool Boiling	19. Drop Size and Jet Expansion Measurements in Two-Phase Flow Systems	26. Stability and Decompression in Two-Phase Systems
2. External Natural Convection	13. Fire Phenomena and Heat Transfer in Reacting Systems	20. Forced Convection in High-Temperature Systems	27. Internal Laminar Flows
3. Wake Flows	14. Non-Newtonian Flow and Heat Transfer	21. Recent Developments in Heat Transfer	28. External Turbulent Flows
4. Heat Transfer in Noncircular and Complex Ducts			
5. Heat Transfer in Porous Media			
6. Two-Phase Two-Component Flows			
7. Thermal Radiation and Insulation Systems			

<i>THURSDAY Sept. 8</i>	<i>THURSDAY Sept. 8</i>	<i>FRIDAY Sept. 9</i>
<b>8:15-9:15 Keynote Lecture</b>	<b>1:30-2:30 Keynote Lecture</b>	<b>8:15-9:15 Keynote Lecture</b>
Visualization of Thermal Behavior of Fluid by Laser Holographic Interferometry, by Y. Kurosaki	Thermophysical Property Measurements, by R. Tufeu	Thermophysical Property Measurements near the Critical Point, by P. Jany
<b>9:25-11:45 Technical Sessions</b>	<b>2:35-5:00 Technical Sessions</b>	<b>9:25-11:45 Technical Sessions</b>
29. Panel Discussion: Measurements of Unsteady Flows with High Turbulence Intensity and Reversals	36. Panel Discussion: Experimental Uncertainty Analysis	41. Round Table Discussion: Laser Speckle Photography
30. Measurements of Thermophysical Properties	37. Two-Phase Dispersed Flows	42. Measurements in Single Component Two-Phase Flows
31. Fluidized Beds	38. Jet Instability, Transition and Turbulence Structure	43. Heat Pipes and Thermosiphons
32. Gas-Solid and Liquid-Solid Two-Phase Flows	39. Heat Transfer in Engines, Burners, and Rockets	44. Magnetohydrodynamics
33. Heat Exchangers	40. Axisymmetric and Rotating Flows	45. Turbulence Measurements
34. Two-Phase Film Boiling Flows		46. Measurements in Prototype Heat Transfer Systems
35. Open Forum		<b>1:30-2:30 Keynote Lecture</b>
		Acoustics and Experimental Methods: The Influence of Sound on Flow and Heat Transfer, by M.C. Welsh
		<b>2:30-2:45 Closing Ceremony</b>
		<b>2:45-3:30 Wine and Cheese</b>

First KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference  
(日本機械学会熱工学講演会)

[共催 日本機械学会熱工学部門, 大韓機械学会熱流体工学部門]

開催日 1988年11月1日(火)～3(木)  
[4(金)～5(土)見学等予定]

開催地 大韓商工会議所ビル, 大韓民国ソウル特別市

行事概要 熱工学, 熱・流体工学に関する約170件の論文発表(多成分媒体の相変化を伴う伝熱に関するオーガナイズド・セッションを含む), 電子機器冷却に関するワークショップ, 展示会および見学. 次ページにプログラムの概要を示す.

使用言語 英語

参加登録料

	88年9月20日まで	現地で支払い
参加費*	8,000円	50,000ウォン
学生参加費*	2,000円	15,000ウォン
ランチ(11/2)	5,000円	30,000ウォン
同同伴者	2,000円	10,000ウォン

\*プロシーディングス1セットを含む

プロシーディングス 講演会終了後下記価格により頒布します(郵送料を含む).

会員 4,000円  
会員外 5,000円

詳細問合せ先

伊藤 猛宏  
☎ 812 福岡市東区箱崎6-10-1  
九州大学工学部動力機械工学科  
☎ 092-641-1101内線5543  
FAX 092-641-9744(機械系)  
なるべく書信かFAXをご利用下さい.

November 1 (Tuesday)

November 2 (Wednesday)

November 3 (Thursday)

	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5	Room 1	Room 2	Room 3	Room 4	Room 5						
9:00-9:25	OPENING CEREMONY																				
9:25-9:50	Heat Transfer with Phase Change I	Two-Phase Flow I	Natural Convection Heat Transfer I	Fluid Mechanics & Equipment I	Combustion in S.I. Engines I	Specially Organized Sessions					Environmental Thermal Engineering	Internal Flow Heat Transfer I	Experimental Fluid Mechanics I	Combustion Fundamentals	Phase Change Phenomena II	Miscellaneous Problems in Thermal Engineering I	Miscellaneous Thermal Power	Compressible Flow			
9:50-10:15	COFFEE BREAK										COFFEE BREAK					COFFEE BREAK					
10:15-10:40	COFFEE BREAK										COFFEE BREAK					COFFEE BREAK					
10:40-10:59	COFFEE BREAK										COFFEE BREAK					COFFEE BREAK					
10:50-11:15	"	"	"	Analytical & Numerical Fluid Dynamics I	"	Heat Storage System	"	"	"	"	Heat	"	"	Burner/Diffusion Flame I	Physical Properties	"	"	Heat Exchanger	Fluid Machines & Equipment II		
11:15-11:40	"	" II	"	"	"	Storage System	"	"	"	"	System	"	"	"	"	"	"	"	"	" II	
11:40-12:05	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
12:05-12:30	" II	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
12:30-13:30	LUNCH BREAK										LUNCH BREAK					LUNCH BREAK					
13:30-13:55	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Heat Exchangers/Heat Storage System	External Flow Heat Transfer	"	"	"	"	"	"	"	"	
13:55-14:20	"	" III	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
14:20-14:45	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
14:45-15:10	" III	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
15:10-15:20	COFFEE BREAK										COFFEE BREAK					COFFEE BREAK					
15:20-15:45	Phase Change Phenomena I											Coupling of Convection & Radiation					Miscellaneous Problems in Fluids Engineering				
15:45-16:10											" IV					" III					
16:10-16:35											" III					" III					
16:35-17:00											" III					" III					
BANQUET																					

## 第12回人間-熱環境系シンポジウム 開催要綱

人間-熱環境系を体系的に把握するためには医学、生物学はもとより、空気調和、被服衛生、伝熱工学、計測・制御工学などの広い分野の研究者の有機的協力が必要とされます。

第1回の会台を1977年8月に空気調和・衛生工学会会議室にて開催して以来「人間-熱環境系シンポジウム」は、毎年1回、盛況裡に回を重ねて参りました。この間の各位のご協力に対し厚くお礼申し上げます。

本年度は第12回シンポジウムとして、講演「高齢者の住まい、人間-熱環境系における計測、ファジ理論の人間-熱環境系への応用」およびパネルディスカッション「高齢者の生活と熱環境」を予定しています。尚、例年どおり各位の研究発表を募集しますので、ふるってご参加下さるようお願い致します。

### 記

期 日：昭和63年12月9日（金）～10日（土）2日間

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

内 容：(1) 共催、協賛団体会員の講演  
(2) 公募研究論文の発表

共 催：空気調和・衛生工学会（幹事学会）  
人類動態学会、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（予定）

後 援：日本学術会議（予定）

協 賛：日本産業衛生学会、日本生理学会、日本ME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、日本機械学会、日本建築学会、日本労働衛生工学会、電気学会、日本冷凍協会、繊維学会、日本生物物理学会、日本栄養・食糧学会、日本医科器械学会、日本繊維製品消費科学会、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（予定）

---

発表申込方法：ハガキに 1) 氏名(ふりがな) 2) 題目 3) 勤務先 4) 連絡先 5) 所属学協会  
6) 懇親会参加の有無 を記入して、下記宛にお申込み下さい。

発表申込締切日：昭和63年7月31日

英文抄録提出日：昭和63年8月31日

原稿提出締切日：昭和63年10月15日

---

参加申込方法：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) 懇親会参加の有無  
を記入して、下記宛にお申込み下さい。定員300名で締切らせて頂きます。

参 加 費：5,000円

懇 親 会：昭和63年12月9日（金）17:30～19:30（会費4,000円 予定）

---

大 会 長：東京工業大学 森田次次郎

準 備 委 員：後藤 滋\*（代表）、川島美勝\*（事務局）、枡原 裕\*、石井昭夫、磯田憲生\*、鶴飼 恒  
内野欽司、大中忠勝\*、長田泰公\*、梶井宏修\*、勝浦哲夫、菊池安行、肝付邦憲\*、小林陽太郎  
佐藤 忠\*、田中正敏\*、榎沢一郎\*、田辺新一\*、田村照子\*、登倉尋実、中島利晴\*  
西 安信、堀越哲美、松原斎樹、南野 脩、三平和雄、森田次次郎\*、嶋山真太郎\*、吉田 燦\*  
吉田敬一\*（\*印は実行委員）

諮 問：北 博正、松岡脩吉、三浦豊彦

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

人間-熱環境系シンポジウム準備委員会 ☎ 045-335-1451（内線2666 川島）

ANNOUNCEMENT  
AND  
CALL FOR PAPERS

6TH  
INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON  
NUMERICAL METHODS  
FOR  
THERMAL PROBLEMS

SWANSEA, U.K. 3RD - 7TH JULY, 1989

OBJECTIVES

The conference is the sixth in the continuing series of conferences on "Numerical Methods for Thermal Problems". The most recent, held at Montreal in 1987, generated considerable interest. The resulting proceedings, published and distributed internationally by Pineridge Press, has been cited widely and constitutes a major source of up-to-date research in the rapidly expanding area of computational heat transfer.

The conference will provide a forum for the presentation and discussion of recent developments in the application of numerical methods to solve thermal problems. The broad spectrum of research topics under the subject heading "Thermal Problems" will, tentatively, be integrated into the following main subject areas:

- COMPUTATIONAL ALGORITHMS AND PARALLEL COMPUTATION
- COMPUTATIONAL ASPECTS OF HEAT TRANSFER IN COMPOSITES AND CERAMICS
- THERMAL/STRUCTURES, INTERACTIONS, MODELLING/ANALYSIS
- INTERDISCIPLINARY RESEARCH DEVELOPMENTS
- CAD/FEM INTERFACE FOR THERMAL PROBLEMS
- ADAPTIVE/HIERARCHICAL TECHNIQUES IN HEAT TRANSFER
- SOFTWARE DEVELOPMENTS
- MICROCOMPUTER IMPLEMENTATION AND COMPUTATIONAL ASPECTS

The Organizing Committee will welcome the submission of papers describing recent work within this general area.

## CALL FOR PAPERS

Abstracts of approximately 300 words offering papers in the above or related fields are invited immediately or at the latest by 15th January 1989. Notification of acceptance will be forwarded within one month of receipt of the abstract and at the latest by 15th February 1989, at which stage the recommended format for the preparation of manuscripts and associated material will be sent to the prospective authors. Since the conference proceedings will be presented to the delegates at the conference, the completed manuscripts will be required by 1st April 1989.

To ensure that the presentations and proceedings are of maximum benefit to the greatest possible number of participants, authors are urged to stress the general as well as the detailed aspects of their work. In particular, the papers should outline the approaches used and the major observations which have led to the current views held by the authors. With this approach, the conference proceedings should provide an overview of recent and projected studies being pursued in various centres active in the above areas. The detailed timing and scheduling of presentations will be arranged to maximize the time available to allow in-depth consideration of specific themes. Several solicited papers by renowned scientists will also be presented to review current progress in computational heat transfer. In this way, the conference aims to cater for a "state-of-the-art" coverage, leading to identification of the principal avenues along which future activities should be directed.

It is expected that most submitted papers will report on recently developed computational techniques, in particular Finite Differences and Finite Element Methods. However, papers dealing with the comparison of standard numerical models with experimental data are also welcome. Papers on industrial application are, as in the previous conferences, strongly encouraged.

## ABSTRACTS

Please submit 300 word abstracts immediately or at the latest by January 15th, 1989 to:

PROFESSOR R.W. LEWIS  
INSTITUTE OF NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING  
UNIVERSITY COLLEGE OF SWANSEA  
SINGLETON PARK  
SWANSEA SA2 8PP, UNITED KINGDOM.

或いは、  
小竹進  
113文京区本郷 7-3-1  
東京大学工学部機械工学  
03-812-2111 内6405



# turbulent shear flows

## CALL FOR PAPERS

### Seventh Symposium on Turbulent Shear Flows

Stanford University

August 21-23, 1989

The *Seventh Symposium on Turbulent Shear Flows* aims to advance understanding of the physics of turbulent motion and capabilities for predicting momentum, heat and mass transport processes in turbulent shear flows of engineering importance.

Approximately 20 technical sessions are planned. Contributed papers are invited on original work in the following general areas:

<i>Fundamentals:</i>	New measurements, theories and concepts that illuminate the nature of the turbulence
<i>Turbulence Models:</i>	New developments in single and two-point closures; large-eddy and other numerical simulations; novel experiments and new findings
<i>Experimental and Calculation Techniques:</i>	New and improved experimental and calculation methods for turbulent flow
<i>Heat and Mass Transfer:</i>	New developments in scalar modeling; related measurements and calculations
<i>Combustion:</i>	New developments in modeling of turbulent flames and their application; experiments and calculations of combustions flows
<i>Applications:</i>	Contributions to applied turbulent flows including those concerned with internal and external aerodynamics; geophysical flows and engineering processes

#### Abstracts

Paper selection will be based upon a review of extended abstracts of approximately 1000 words which should be double-spaced and state clearly the purpose, results and conclusions of the work with supporting figures as appropriate. Five copies of the abstract should be submitted to:

Professor F. W. Schmidt  
Secretary, Turbulent Shear Flows  
Department of Mechanical Engineering  
The Pennsylvania State University  
University Park, PA 16802 USA  
814-865-2072

#### Deadlines

Final date for receipt of abstracts: *October 31, 1988*

Authors informed concerning acceptance: *March 15, 1989*

Final date for receipt of camera-ready manuscript: *May 31, 1989*

#### Special Sessions

Four subjects have been chosen for special attention and authors who would like to have their abstract considered for one of these sessions should indicate the session in their cover letter. These special sessions are:

- Combustion-turbulence Interactions
- New Techniques in Numerical Simulation
- Oceanography
- Turbulence Control

#### 7TH SYMPOSIUM PAPERS COMMITTEE

W. C. Reynolds (Chairman)	F. Durst	J. F. Keffer	J. H. Whitelaw
Center for Turbulence Research	Lehrstuhl für	Simcoe Hall, Room 222	Department of
Bldg. 500	Strömungsmechanik	University of Toronto	Mechanical Engineering
Stanford University	Friedrich-Alexander	Toronto, Ontario	Imperial College
Stanford, CA 94305 USA	Universität	M5S 1A1	London, SW7 2BX
415-723-3840	8520 Erlangen	Canada	UK
	F. R. Germany	416-978-2181	01-589-5111 (ext. 6207/8)
	09131-857820		

#### ADVISORY COMMITTEE:

R. J. Adrian (USA)	C. H. Gibson (USA)	A. Leonard (USA)
J. C. André (France)	M. M. Gibson (UK)	M. Lesieur (France)
R. A. Antonia (Australia)	V. W. Goldschmidt (USA)	J. L. Lumley (USA)
G. Bergeles (Greece)	K. Hanjalic (Yugoslavia)	P. Moin (USA)
R. W. Bilger (Australia)	T. J. Hanratty (USA)	Y. Nagano (Japan)
R. F. Blackwelder (USA)	J. R. Herring (USA)	I. Nakamura (Japan)
L. J. S. Bradbury (UK)	R. Houdenville (France)	W. Rodi (F. R. Germany)
P. Bradshaw (UK)	J. A. C. Humphrey (USA)	G. S. Samuelsen (USA)
M. Coantic (France)	J. Hunt (UK)	U. Schumann (F. R. Germany)
J. Cousteix (France)	A. K. M. F. Hussain (USA)	M. Sokolov (Israel)
R. Friedrich (F. R. Germany)	N. Kasagi (Japan)	R. L. Street (USA)
I. S. Gartshore (Canada)	W. Kollmann (USA)	K. Suzuki (Japan)
W. K. George (USA)	E. Krause (F. R. Germany)	M. Wolfshtein (Israel)

#### ORGANIZING COMMITTEE:

F. Durst	B. E. Launder	F. W. Schmidt	J. H. Whitelaw
----------	---------------	---------------	----------------

伝熱研究  
Vol. 27 No. 106

1988年7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)