

伝熱研究

1987
July
Vol. 26
No. 102

Journal of Heat Transfer Society of Japan

——〈特集：第24回日本伝熱シンポジウム〉——

第24回日本伝熱シンポジウムを終えて

二神 浩三

Impressions around the 24th Japanese Heat Transfer Symposium
in Matsuyama

Erich Stuhltraeger

第24回日本伝熱シンポジウムに関する各分野のレビュー

- | | | | |
|---------------------------------|-------|----------------------------------|-------|
| (1) 強制対流・流動層：強制対流・流動層セッションのレビュー | 長野 靖尚 | (8) 熱物性 | 岡田 昌志 |
| (2) 自然対流：『自然対流』セッション | 藤井 丕夫 | (9) 熱伝導：『熱伝導セッション』雑感 | 荒木 信幸 |
| (3) 凝縮：凝縮に関する研究 | 本田 博司 | (10) 環境伝熱：『環境伝熱セッション』について | 斎藤 武雄 |
| (4) 沸騰：沸騰セッションに参加して考えたこと | 塩津 正博 | (11) 測定法：『測定法』セッション | 藤田 秀臣 |
| (5) 蒸発：蒸発セッション雑感 | 飯田 嘉宏 | (12) 二相流・ミスト冷却：二相流・ミスト冷却に関するレビュー | 戸田 三朗 |
| (6) 熱交換器 | 山中 晤郎 | (13) ふく射：ふく射伝熱発表寸評 | 黒崎 晏夫 |
| (7) ヒートポンプ・ヒートパイプ | 梅宮 弘道 | | |

〈特別寄稿〉

化石人類の戯言

森 康夫

〈アンケート結果〉

'86アンケートの集計報告

小竹 進

〈研究トピックス〉

流水中におかれた一桁管群周りの接続凍結

平田 哲夫, 横沢 成昭, 涌沢 篤

一様発熱する垂直平板上の空気の流れ境界層

宮本 政英

周方向に部分過熱される流路の伝熱に対する壁内熱伝導の影響

黒崎 晏夫, 佐藤 勲

〈解説〉

プレートフィンチューブ熱交換器の研究

瀬下 裕, 藤井 雅雄

モンテカルロ法による放射熱伝達解析

工藤 一彦

日本伝熱研究会
Heat Transfer Society of Japan

日本伝熱研究会第26期（昭和62年度）役員

会 長		大 谷 茂 盛 (東 北 大)
副 会 長	(無 任 所) (事務担当)	石 黒 亮 二 (北 大) 越 後 亮 三 (東 工 大)
地方連絡幹事	北 海 道 東 北 関 東 東 海 北陸・信越 関 西 中国・四国 九 州	福 迫 尚 一 郎 (北 大) 斎 藤 武 雄 (東 北 大) 矢 部 彰 (機 械 研) 新 井 紀 男 (名 大) 玉 木 恕 乎 (信 州 大) 高 城 敏 美 (大 阪 大) 須 藤 浩 三 (広 大) 藤 井 丕 夫 (九 大)
幹 事 (23名)	齊 藤 冨 夫 (室 蘭 工 大) 山 本 春 樹 (旭 川 高 専) 熊 谷 哲 (東 北 大) 宍 戸 郁 郎 (東 北 大) 藤 田 尚 毅 (岩 手 大) 有 富 正 憲 (東 工 大) 上 松 公 彦 (慶 應 大) 落 合 淳 一 (石 川 島 播 磨 重 工) 笠 木 伸 英 (東 大) 望 月 貞 成 (東 農 工 大) 加 藤 征 三 (三 重 大) 児 山 仁 (静 大)	梅 村 晃 由 (長 岡 技 大) 滝 本 昭 (金 沢 大) 芹 沢 昭 示 (京 大) 藤 井 照 重 (神 戸 大) 藤 井 雅 雄 (三 菱 電 機) 牧 野 俊 郎 (京 大) 佐 古 光 雄 (広 大) 本 田 博 司 (岡 山 大) 岩 渕 牧 男 (三 菱 重 工) 小 山 繁 (九 大) 増 岡 隆 士 (九 工 大)
監 事 (2名)	香 川 達 雄 (東 芝)	田 中 宏 明 (東 大)
「伝熱研究」編集委員長		谷 口 博 (北 大)
第25回日本伝熱シンポジウム準備委員長		林 勇 二 郎 (金 沢 大)
第22回伝熱セミナー準備委員長		伊 藤 猛 宏 (九 大)

伝 熱 研 究 目 次

会長就任にあたって	第26期会長	大谷 茂盛 (東 北 大)	1		
会長退任の挨拶	第25期会長	長谷川 修 (九 大)	2		
<特集：第24回日本伝熱シンポジウム>					
第24回日本伝熱シンポジウムを終えて					
.....	準備委員長	二神 浩三 (愛 媛 大)	3		
Impressions around the 24th Japanese Heat Transfer Symposium					
in Matsuyama	Erich Stuhltraeger (佐 賀 大)		5		
第24回日本伝熱シンポジウムに関する各分野のレビュー				7	
(1) 強制対流・流動層：強制対流・流動層セッションのレビュー					
.....		長野 靖尚 (名 工 大)	8		
(2) 自然対流：『自然対流』セッション				藤井 丕夫 (九 大)	12
(3) 凝縮：凝縮に関する研究				本田 博司 (岡 山 大)	13
(4) 沸騰：沸騰セッションに参加して考えたこと					
.....		塩津 正博 (京 大)	15		
(5) 蒸発：蒸発セッション雑感				飯田 嘉宏 (横浜国大)	17
(6) 熱交換器				山中 晤郎 (三菱電機)	18
(7) ヒートポンプ・ヒートパイプ				梅宮 弘道 (山 形 大)	21
(8) 熱物性				岡田 昌志 (青 山 大)	23
(9) 熱伝導：『熱伝導セッション』雑感				荒木 信幸 (静 岡 大)	24
(10) 環境伝熱：『環境伝熱セッション』について				斎藤 武雄 (東 北 大)	25
(11) 測定法：『測定法』セッション				藤田 秀臣 (名 大)	26
(12) 二相流・ミスト冷却：二相流・ミスト冷却に関するレビュー					
.....		戸田 三朗 (東 北 大)	28		
(13) ふく射：ふく射伝熱発表寸評				黒崎 晏夫 (東 工 大)	31
<特別寄稿>					
化石人類の戯言				森 康夫 (電 通 大)	33

<アンケート結果>

'86アンケートの集計報告 …… 第25期副会長 …… 小竹 進(東 大) …… 41

<研究トピックス>

流水中におかれた一行管群周りの接続凍結
…… 平田哲夫(信州大), 横沢成昭(信州大院), 涌沢 篤(ほくさん) …… 59
一様発熱する垂直平板上の空気の流れ境界層 …… 宮本 政典(山 口 大) …… 69
周方向に部分過熱される流路の伝熱に対する壁内熱伝導の影響
…………… 黒崎 晏夫, 佐藤 勲(東工大) …… 77

<解 説>

プレートフィンチューブ熱交換器の研究
…………… 瀬下 裕, 藤井 雅雄(三菱電機) …… 84
モンテカルロ法による放射熱伝達解析 …… 工藤 一彦(北 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 …… 124
九州研究グループ講演会 …… 126

<編集後記>

Vol.26, No.102の編集をお手伝いして
…………… 編集委員長 …… 谷口 博(北 大) …… 127
『伝熱研究』の原稿のワープロ化のお願い …… 『伝熱研究』編集委員会 …… 128

<お知らせ>

(1) 事務局移転のお知らせ …… 131
(2) 第21回夏期伝熱セミナーのお知らせ …… 132
(3) 第21回化学工学の進歩講習会「燃焼・熱工学」 …… 135
(4) 第11回人間-熱環境系シンポジウム開催要綱 …… 136
(5) 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAT TRANSFER …… 137
(6) INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT
AND ENERGY CONSERVATION (ISHTEEC) …… 139
(7) 9th International Heat Transfer Conference (IHTC) …… 140

<特集：第24回日本伝熱シンポジウム>

会長就任にあたって

東北大学 大谷茂盛

このたび伝統ある日本伝熱研究会の第26期・会長を仰せつかりました。身に余る光栄と存じますと共に、責任の重大さを痛感いたしております。

私、もとより浅学菲才ですが、幸いにしてお二方の副会長始め、地方連絡幹事、幹事および各委員長に素晴らしい方々をお迎えすることができ、非常に心強く思っています。これらの方々のお力を得、微力ではありますが、歴代会長の意を体して研究会の発展に些かなりともお役に立てばと念じておりますので、会員皆様のご協力をお願い申し上げます。

本会は同じ伝熱研究を志す士の集まりとしては、日本最大且つ最高の集団であることは申すまでもありませんが、年1回開催されますシンポジウムで発表される研究成果が、それぞれ所属する学協会の論文集に掲載され、その内容が世界的にも高く評価されていることは、誠にご同慶のいたりでございます。

本研究会は日本がいわゆる高度成長をとげている真最中に発足し、オイルショックの試練を浴びて、ここに四半世紀が過ぎました。今後の研究会が如何にあるべきかなどを含めて、甲藤先生を委員長とする「将来問題検討委員会」が出来、今期中に答申をいただくことになっております。これを受けて21世紀に向け、さらなる発展を期待するものです。

最後に、重ねて会員皆様のご支援をお願いして、ご挨拶といたします。

会長退任の挨拶

第25期会長 長谷川 修（九大）

25期の会長の任を終わり、26期の長谷川盛会長に引継ぐことができまして大変嬉しく、またホッとしております。今期の諸事業は、例年通りのシンポジウム、セミナー、「伝熱研究」、地方活動等は非常に活発に行われました。

なお今期は丁度発足以来四分の一世紀を経過した締めくくりの年ですので、来る四分の一世紀への第一歩を踏み出すにあたり、今期の幹事会では日本伝熱研究会の将来について検討することの意義について、慎重に検討致しました。その結果会員の皆様をお願いして、アンケートにより意識調査をさせて頂きましたところ、60%以上の方が将来問題を検討して、本会の活性化をはかるべきであるとのことでしたので、「日本伝熱研究会将来問題検討委員会」を発足することに決定しました。甲藤好郎委員長、他9名の方々も快く委員をお引き受け頂きましたので、早速本年4月11日に第一回の会合を開き、検討に入って頂きました。ご多忙の中ですが約一年の期間で検討して頂くようお願いしております。活力にあふれた将来が開けるような、新しい四分の一世紀に向けての本会の進路をお示し頂けるものと期待しております。

もう一つ嬉しく、有難いご報告がございます。財団法人天野工業技術研究所の粟野誠一理事長様より、日本伝熱研究会で有意義に使って頂きたいとのご趣旨で百万円のご寄付を賜りました。古い会員の方はよくご存知と思いますが、粟野先生は本会の創立以来の会員で、「伝熱工学」の著書も出版しておられます。ずっと暖かく本会の成長を見守って頂いたのであろうと存じます。正式なご寄付の手続きが終わりましたのが、本年5月18日でしたので、これをどのように使わせて頂くかについては次期の幹事の方々にその検討をお願いしますが、伝熱学の研究にお示し頂きましたご理解に、深く感謝の意を表し、有難くお受けした次第であります。

最後に素晴らしい会場で、盛会裡にシンポジウムが進行し、総会を終えることができましたことに対し、ご尽力頂きました愛媛大学の二神浩三準備委員長をはじめとする地元の皆様に厚くお礼を申し上げます。またこの一年間会長を支えて頂きました堀、小竹副会長始め幹事の方々、更には会員の皆様方に心からお礼を申し述べて挨拶を終わりたいと思います。特に小竹先生には二年間の副会長の期間に、本会の事務処理のソフトを完成して頂き、今後の本会の運営に多大のご盡力をして頂きました。有難うございました。

第24回日本伝熱シンポジウムを終えて

準備委員長 二神 浩三 (愛媛大)

5月27日～29日の間、第24回日本伝熱シンポジウムが、松山で開催され、盛会裡に終了することができました。615名という、予想を遥かに上回る多数のご参加を頂きましたことを準備委員一同厚く御礼申し上げる次第です。昨年5月札幌における総会で準備委員長の大役を仰せつかってからこの1年、予算案に始まる諸準備について長谷川会長を始め、種々ご助言を頂きました小竹副会長並びに幹事会の皆様のご支援に心から感謝申し上げます。また、実務上の諸問題に対しまして詳細なご教示を頂きました北大の石黒先生、杉山先生に心から御礼申し上げます。

年々、伝熱シンポジウムが隆盛を続けていることはご同慶のいたりですが、毎回準備する側から出ている問題として、会場、論文集、特別企画などが上げられていることは“伝熱研究”でご承知のことと思います。今回初めて準備する側に立って、これまでになされてきた準備委員の方々の御苦労が身にしみて分かりました。そこで、今後のためにも二三思い付くことを述べさせていただきます。

(1) 特別企画について；シンポジウムのマンネリ化に対するご批判から何か変った企画をとの声もありますが、そうした企画には予算と会場の問題が関係してくることになり、開催予定地ではかなり前から議論して置く必要があるかと思えます。今回は、そうした下地もなく、ただ会場確保が優先してしまい特別な企画に至りませんでした。

(2) 会場について；多数の参加者を3日間収容できる会場の問題では、何処の開催地でも頭を痛める事と思えます。当地では、たまたま、愛媛県県民文化会館なるものが61年5月頃オープンする予定であり、学会や国際会議も開催できる構想であるとの耳寄りな話があり、工事中に予約をした訳ですが、大きな外郭の割には広い部屋が無く、どうしても5部屋にせねばなりません。特にD室、E室では手狭でご迷惑を掛けたことと思えます。更に、公共建物であるから使用料金はそれほどではないだろうと云う予想も見事に外ずれてしまいました。そこで、会場借上費を節約するため、各セッション間の休憩時間を10分に短縮し、3日目にはE室をキャンセルすることにしたため、忙しい思いをされた方もいらっしやったかと思えます。また、各会場の空調、照明、音響の操作は、会場係が行ったわけですが、馴れない会場だけに不手際もあり、空調の効き過ぎて風邪をひかれた方もあり、申し訳ありませんでした。それら諸々の不都合にもかかわらず、立派な会場でと労いの言葉を頂戴し、恐縮している次第です。

(3) 論文集について；以前から使われていた原稿用紙がなくなり、縮小印刷した段階で読みやすくとのかえから従来どおりとし、1,927字(41行×47字)の用紙を3年分印刷しました。但し、ワープロ用以前よりは厚手のものとなりました。しかし、ワープロの機能をフルに発揮され

字数を大幅にこえるものも送られ、当惑しながらも書き直しをお願いしました。式や図を貼り付けられるのは一向に差し支えありませんが、ノリは、剥がれず、変色しないものを選んでください。論文集の表紙が昨年から一新され、好評を得ていますが、今回はローカル色として伊予密柑の色を配しました。いい色になったと文字どうり自画自賛していますが、いかがでしょう。

(4) 送金について；学会が細分化するなかで、諸会費の請求が多くなっているのも事実かと思いますが、振替用紙をよく見て頂きたいと思います。まず申込整理費の段階で、会費を送られ方が幾人かありました。参加費の送金では、送金内容に未記入の方、送金額が間違っている方、会費を送ってくださった方、2度も送金された方等等あり、準備委員会事務局としては、それらの処置に悪戦苦闘致しました。今後、ご送金の際には、送金内容の記入及び送金額の確認をお願いします。

(5) 銀行講座振替について；公金の扱いに郵便局が利用できず、銀行しか利用できない理由がどうにも理解できないのですが、とにかく銀行振込のご要望が予想以上に多い現在、多少の経費と手間が要りますが、今後検討されるべきかと思えます。

(6) 懇親会について；これも年々隆盛を極めている1セッションかと思えます。北大の杉山先生から、とにかくよく食べ、よく飲みますよ。と伺っていきまして、ホテル側とも何度か打ち合わせ、これだけあればご心配いりませんとの言葉に安心していましたが、1時間ほどでまず食べるものが無くなり、1時間半も経つと飲むものも無くなりかけ、準備側としては些か慌てました。

しかし、たまたま来日中のHartnett 教授及びOstrach 教授ご夫妻にご参加頂きスピーチを頂けたことは、講演発表に外国の方が参加されることとともに国際化の一助にもなったかと喜んでいきます。

二三のつもりが沢山になってしまいました。今後の参考になれば幸いです。

中国・四国とは云っても瀬戸内海を挟み、実務上の問題は全て愛媛で実行せねばならず、しかも、伝熱に関係のある講座も少ない状況の中にあって、この1年は大変な年でした。しかし、綿密な水上先生の日程表に従って、準備委員会を度々開く代わりに、毎日準備を進めて来られたことになります。準備委員会では基本的な事柄を決めて頂きましたので、後は、殆ど実行面上の事のため、独断で行ってしまい、準備委員の方々には大変申し訳なく思っています。ただ、当日には、手不足のため色々ご協力を頂き、誠に有り難く厚く御礼申し上げます。

また、今回のシンジウムボに対しまして、愛媛県並びに松山市から助成を頂きましたことを付記して感謝の意を表します。

次期、金沢でのシンボジウムの盛会をお祈りします。

IMPRESSIONS AROUND THE 24th JAPANESE HEAT TRANSFER SYMPOSIUM
in MATSUYAMA 27.-29. MAY 1987

By

Erich Stuhltraeger
Saga University

It is an honour to be allowed to contribute to the Journal of Heat Transfer Society of Japan, especially since coming from the field of fluid-dynamics, the field of heat transfer is quite new to me.

Let me express my thanks not only for the hospitality and the impressive good organisation of this year's symposium in Matsuyama, but also for the one two years before in Tokyo, at the time I could hardly understand a Japanese word.

I realized at the this year's symposium that at the Japanese Heat Transfer Symposium the newest results of the research in the field of heat transfer and the connected fields are presented. Observing the presentations during two years, the fast progress of the laboratories' research in the field of heat transfer and the fields connected to it can be well seen. Moreover, having the occasion to talk with many members, it gives me the impression to be able to feel the pulse of the Japanese heat transfer research.

The impression of a very fast output and freshness is deepened by the fact that also young researchers and graduate students have the possibility to present their research and getting a strong motivation combined with the feeling of acknowledgement of their research.

Looking back to the times before I could come to Japan, it was not easy to understand from the Japanese papers published in English or German, how fast the research is progressing here in Japan. From the today's point of view, the results of the research done here in Japan are comparatively much more often published in Japanese than e.g. in English. I feel it a pity and not due to the results that by this circumstances, the acknowledgement of this newest, latest results are mainly restricted to the scientists being able to read the chinese characters. In the today's world of very fast communication to every place, a time lag of one or two years until the results might be published is, I think, a too long period.

If I remember my impressions of the 22nd Japanese Heat Transfer Sympo-

sium and if I compare it with the 24th one, let me write about some other ideas which are coming up. Two years before, hardly knowing a Japanese word, I could understand those presentations, which were carefully prepared and thoughtfully presented. I realize that if the key information of the work and the results are all included in the well written figures, the main content can be grasped with very few accompanying words. This encourages me in the sense that in fact, the communication barrier, which is usually thought to be high, especially if the spoken language is not understood, is at least in the technical field not so difficult to surmount. In the technical fields, by using figures, formulas and symbols, few words are needed to transmit the content and to show the listener the results. Now, at the 24th Japanese Heat Transfer Symposium, I realized how important the way of presentation is and that even very excellent research and results can not reach the listener, if the presentation is not well thought over.

It remains me to thank for the always very impressive highlight of the symposium's party. It shows me once more that one important point of the symposium is the direct contact and discussion between the scientists and which is not restricted to topics of the technical fields. The advantage of the group of scientists in heat transfer in which everyone knows each other is that it prevents overlapping in research topics and so, research can much more efficiently be done. After the cool facts of the technical presentations it reveals the warm human beings standing behind this research. The communication between the human beings is one general need, certainly not only in Japan but all around the world. I get the idea that a human can feel at ease at a place which is not necessary connected to a definite location but at a place, where the communication is well and the social network is dense.

第24回日本伝熱シンポジウムに関する各分野のレビュー

編集委員会

昭和62年5月27日～29日に恒例の日本伝熱シンポジウムが開催された。新しい装いの愛媛県民文化会館における研究発表は、例年にも増して充実しており、討論も種々の観点から行なわれ、学術的意義は勿論のこと実用面にも及ぶ論議がなされていた。この盛会は、愛媛大学二神浩三準備委員長をはじめとする各委員の御努力の賜物でありましょう。特に、伝熱シンポジウムに関する各分野のレビューをまとめるに際し、事前に綿密な検討を行ない、これらの方々のご尽力により、バラエティに富んだ執筆者を推薦させていただくことができたのである。

前年度からの申継ぎにより、各分野のレビューを各執筆者にお願いすることとなったが、5月末の伝熱シンポジウム終了後に原稿依頼するのでは、7月号発行には到底間に合はないため、異例のことではあるが事前に執筆者を予め推薦させていただいたのである。編集委員長および編集委員の約半数が交替するので、正式原稿依頼は、5月29日（伝熱シンポジウム最終日）の第26期第1回編集委員会の決定を待って行なうこととした。上述のとおり、二神浩三委員長のご援助によりスムーズに執筆者の推薦も終わり、予めお願いした方々に連絡することができた次第である。

分担していただく分野については、必ずしも例年と同様でなく、伝熱シンポジウムの会場の区分とも多少異なっているようにも思われるが、読者の興味あるいはレビューの効果を予想して、

「強制対流・流動層」、「凝縮」、「自然対流」、「沸騰」、「二相流・ミスト冷却」、「熱交換器」、「ヒートポンプ・ヒートパイプ」、「熱物性」、「環境伝熱」、「放射」、「測定法」、「蒸発」

に分けることにした。事前に相談させていただいたことも幸いして、各分野とも個性のあるレビューをいただくことができたものと思っている。

「伝熱研究」も表紙の装いを新たにしたので、学術的な内容への要望も増えてくるものと予想しているが、「伝熱学会」ではなく「伝熱研究会」の会誌としての考え方も尊重して、今回のような各分野のレビューにまとめたことを了解願いたい。都合がつかないため、止むを得ず参加できなかった方々に、第24回日本伝熱シンポジウムの内容をこのレビューを通して一部でも理解いただければ幸いである。会員各位のご協力によって、この種のレビューが他のシンポジウム等についても取りまとめることができ、掲載する見通しがつくことを期待する次第である。また、このレビューが伝熱研究会の最も重要な催しである伝熱シンポジウムの成果をかみしめる記事として、次回以降へと生長し続けることをお願いすることとしたい。

(1) 強制対流・流動層：強制対流・流動層セッションのレビュー

長野 靖尚（名工大）

今回の伝熱シンポでは、強制対流12セッション（発表論文48編）、流動層1セッション（同5編）でA室が占められた。従って、ここでレビューすべき論文数は、全発表論文の約1/4に相当する。限られた紙面で全部を網羅することは、却って本特集号の意図に反すると思われるので、ここでは筆者の独断でセッションを再分類し、成果の波及効果が大きいと思われる論文を中心にレビューする。内容の分類が著者の意図と異なった場合は、ご容赦願いたい。

1. 基礎

(1) 乱流伝熱のモデリングと数値解析法

改良k-εモデルを用い、熱伝達を予測する方法が提案された(A114)。乱流プラントル数 Pr_t の真値の議論は別に行う必要があるが、主として高Pr流体の伝熱解析に本法を薦めたい。また、スカラー量の非等方拡散の解析法(A113)は、電子機器の冷却、大気拡散等応用範囲が広いので研究の完成を期待したい。

乱流伝熱の統計論が本格的に展開され(A111, A112)、より物理現象に立脚した数学モデルが示された。N.S.方程式への組込みが次の課題である。N.S.方程式の直接解法では、2D流れの渦形成と混合のDNSによる解析結果が示された(A115)。恐らく、中途半端な離散渦法より本法の方が優れていると思われる。

数値解析法としては、3次元傾斜差分法(A311)が注目に値する。3次精度風上差分との比較が残されているが、空調関係の研究者は一読して欲しい。

(2) Extra strain ratesの影響

Extra strain ratesとしては旋回(A141)と流線の曲り(A142, A143)が論ぜられた。旋回流についてはk-εモデルは破綻し、応力・スカラー流束モデルに頼らざるを得ないことが示された。Extra strain ratesによる生成はモデル化の必要がないので適切な選択と言える。圧力・速度勾配相関項はLRRモデルよりも、 $\Phi_{ij} = -C_1(\varepsilon/k)\{\overline{u_i u_j} - (\delta_{ij}/3)\overline{u_k u_k}\} - C_2\{P_{ij} - (\delta_{ij}/3)P_{kk}\}$ として、 $C_1=3.0$ 、 $C_2=0.3$ (Younisの値)が現状では最良とされていることをコメントしたい。

曲り管の計算も通常のk-εモデルには限界があり、応力方程式モデルのエッセンスを取り込んだA143のアプローチは妙味が有る。

(3) 外的操作による乱流構造の変化

レイノルズ数が急変したとき新しい乱流構造が形成される迄の過程は、前の古い構造が極め

て重要な役割を為し、何か普遍的な法則がありそうだ(A134)。乱流の仮面を一つ剥せるかも知れないこの研究の進展を期待したい。

チャンネル内乱流で一樣吹き出しを行うと、吹き出し開始点近傍で層流化現象が発生することが見出された(A133)。著者はこの系の応用を考慮して、二相流の基礎研究として位置付けているが、人為的操作による乱流構造の変化に着目して乱流を探るという基礎研究としても意味があろう。

安定な温度成層流での乱流混合の抑制を調べたA132の研究は、温度がもはや単に受動スカラー量に留まらない乱流場の解明に広く役に立つ。内部構造、モデル化へのヒントを今後明らかにして欲しい。

(4) 固体壁内熱伝導の乱流伝熱への影響

公称「等熱流束条件」の実験が、実はそうっていない。A153の研究は、 q_w =一定の乱流伝熱の実験屋に強い警告を発している。流体中の温度乱れ強度、乱流プラントル数は固体壁内熱伝導の影響を受けていることを、実験屋のみならず計算屋も忘れてはならない。固体壁が部分加熱されると、話は一層難しくなる(A154)。後の研究は異形流路の周方向熱伝導によるフィン効果を調べたもので意義深い。固体壁内熱伝導で流体側の様子が変わることの配慮はされていない。現時点では已む無しと言うべきか。

2. 剥離と再付着を伴う流れ

伝熱促進に関する応用研究の大半がこのカテゴリーに入るが、基礎研究としてはステップ流れを見ればよいであろう。後向きステップ流れの層流熱伝達について、レイノルズ数、プラントル数、チャンネル拡大率等の影響が、数値解析により克明に調べられた(A121)。層流の数値解析では、従来不明であったことを、実験に代わって系統的に明らかにするというA121のような姿勢が不可欠と信ずる。同じ形態のステップ流れでも、乱流になると主役は実験になる。再付着領域の伝熱の時・空間的非定常性について新たな側面を見出したA122の研究は、今後の研究の誘い水となるであろう。

前向きステップ流れについての我々の知識は、後向きの場合よりはるかに少ない。A123で示された基礎的な知見さえこれ迄は欠如している。今後の進展を望みたい。

突起付き伝熱面のような剥離と再付着に基づく伝熱促進を試みている研究者は、このようなステップ流に関する基礎研究に特に造詣が深いことが、今後一層望まれるであろう。

3. 噴流および伴流

噴流に関する基礎研究では、応用面が多岐に亙ることから、高いよどみ点熱伝達率が得られる衝突噴流に関するものが伝熱工学では重要である。音波により圧力変動を与えて噴流を励起し、その結果現れるよどみ点熱伝達率の変化から伝熱促進機構を調べたA332の研究は、前述の

「外的操作による乱流構造の変化」でも述べたように、乱流を探る有効なアプローチの一つである。よどみ域下流では、熱伝達率は通常急激に低下する。そこでこの領域の伝熱を促進する二つの方法が提案された。一つは突起付き伝熱面(A321)、他は extra strain rateを与えて壁面垂直方向の乱れの増大を図ったもの(A323)である。前者は妥当な発想で、それなりの効果も現れている。後者は、衝突噴流の自由界面が拘束される等の影響も重なり所期の目的は達成されなかったが、このような思想の明確な研究から独創的なものが芽生えると思う。

伴流については、熱交換器設計の指針となることを意図し、円柱周りの流れと壁乱流の干渉及びそれに伴う円柱からの乱流伝熱の変化が調べられた(A231, A232)。管群になると一様流中でも問題は複雑であるから、境界層内となると基礎研究としては余りにも難し過ぎる。現在はまだ実験事実の蓄積段階にあると思われるが、乱流構造の解明へと今後進展することを期待したい。

4. 伝熱促進

色々な手法による伝熱促進術が発表された。

(1) 波状流路(A151, A152)： 基本的には剥離と再付着による伝熱促進である。流れの3次元性も実際には問題となる。

(2) 突起付き伝熱面： 局所的な乱れの増加を図ったものは、2次元突起(A213)であれ、3次元突起(A233)であれ、あるいは斜め突起列(A223)であっても、全て剥離と再付着による伝熱促進効果の応用である。設計資料として供するには、A213のような系統的実験が必要であろう。促進のメカニズムを知るためには、乱流諸量の測定が必要である。

VLSIチップの冷却法として、ダイヤモンド形の微細フィンを設けるアイデア(A222)は、伝熱有効面積を増すことによる伝熱促進と、ルーバ付きコルゲートフィンと同様に、温度境界層の発達を抑えて高熱伝達率を得ることを図って面白い。

(3) 境界層を円柱で攪乱： A211はこの手法の一連の基礎研究で、(すきま)/(円柱径)が伝熱を支配する基本因子であることを明確にしている。円柱にスリットを付ける(A214)と、低流速で伝熱促進効果が増す知見は、応用の際に役立つであろう。

(4) 内管挿入： 伝熱管内に突起を作ることの手間を省くために、管内に複数の小径の内管を挿入するという突飛な方法が提案された(A224)。有効性を保証するには、まだ情報が少ないように思える。

(5) 磁場、電場等の付加： 磁場を加えた場合の伝熱促進効果が $k-\epsilon$ モデルで解析された(A241)。願わくば、今後は現在評価の良くない Jones-Launderモデルではなく、最近のモデルを用いて欲しい。コロナ放電を利用した伝熱促進(A242)も、未知の事柄が多いので、モデル解析の先行はほどほどに留めた方が良いように思える。電場付与による伝熱促進(A243)は、これまでに国内でも色々と研究されている。相互の情報交換が欠如していないだろうか。

(1)～(5)の伝熱促進法全般に言えることだが、促進効果を謳う場合は、同一ポンプ動力（印加電圧が必要な場合はその消費電力も含める）での性能の相対的比較を常にやって欲しい。

5. 流動層

流動層熱交換器の基礎(A341, A342, A343), 流動層乾燥器(A344), 同蒸発器(A345)についての研究発表があった。この内、最後の冷媒蒸発器に関するものは、流動層の粒子運動を積極的に利用し、冷却管周りの着霜を防止したもので、成果はすぐ実際面に反映されるであろう。流動層熱交換器の伝熱促進メカニズムの解明には、伝熱管近傍の粒子の流動特性が明らかになって初めて有力な手掛かりが得られたと言えよう。その点で、A341, A342の研究には夢がある。乾燥すべき粉体粒子に振動を加えて流動化させ、それに伴う熱・物質移動の促進と様な粒子混合により乾燥斑を少なくしようとするA344のアイデアは評価できる。

6. その他

強制対流の研究の主流から若干外れているかも知れないが、石炭・ホスラリーの熱伝達(A313), 凍結・着氷(A144, A314), ファウリングの基礎(A315)は意義のある研究と思う。この種の研究では我国は立ち遅れているようであり、研究の完成を望みたい。

今回の伝熱シンポでの発表論文を基に具体的レビューを書けとの指示に従い、波及効果、ブレイクスルーの程度が多いと感じた論文を中心にして本稿を纏めた。この8月にピッツバーグで開催されるアメリカの伝熱シンポ(24th ASME/AIChE/ANS National Heat Transfer Conference)の案内と日本のそれを比べると、確かに我国は基礎研究が多いと思われる。しかし論文を詳しく読むと、我国の研究は表題は基礎研究を表していても、中味は基礎とは程遠いのが少なからずある。

情報公害の交通整理をするのも本稿の役目のようであるが、評価の仕方は当然本稿と異なるものもあり得る。最終的には各人の判断に委ねるしかない。

(2) 自然対流：『自然対流』セッション

藤井 丕夫（九大 機能研）

まず昨年のシンポジウムでの傾向と今回のそれとの全体的な比較について述べる。今回は 8 セッションに分かれ 32 件の講演発表がなされた。昨年は 9 セッション 31 件でほとんど変化がない。また、32 件のうちの約 1/4 が昨年からの継続的な研究と見なせる。研究内容・目的に関して、セッションの分割とは無関係に分類すると、(1)密閉容器内（6 件）、(2)原子炉あるいは放射性廃棄物の熱除去の問題に関連した液体金属や発熱性流体の伝熱および自然循環ループ（5 件）、(3)多孔質層における伝熱（5 件、内 1 件は膜沸騰）、(4)電子機器の冷却（3 件）および(5)結晶や薄膜形成（4 件）に関連した研究、(6)その他が発表されている。

大略の傾向は昨年と同様で、応用研究における相似則の問題や複雑な系に対する結果の整理法等についての全体的印象も変わらない。以下、今回の研究発表について若干の感想を記す。

閉空間内および多孔質層における自然対流は広範な応用があることと、計算機や計算手法の進歩により数値解析の対象となり易い問題になってきたことから、ここ数年来自然対流研究の主流を占めている感がある。合わせて 10 件以上の発表のうち殆どが数値解析による理論を主とした研究である。数値解析では問題の設定に応じて解が得られるわけであるが、系統的な計算とその結果をどう整理するかが重要であり、計算法の開発が目的でない場合は、'一つの計算例'に終らないようにする必要がある。この点に留意した研究や実験的検証を加えた研究が増えつつある。

CVD による薄膜形成に関連した共存対流場で現象にヒステリシスが起ることが示されたが、このようなことは他の共存対流でも生じると考えられ、大変興味深く感じるとともに、今後の研究の進展が期待される。原子炉の安全性および結晶の生成や電子機器の冷却に関連した研究は漸増の傾向にあるが、一般性があり実用的な成果を得るにはより多くのデータの集積が必要と思われる。

そのほか、平行平板間の共存対流乱流について昨年からの継続研究が 2 件発表されている。また、蓄熱に関連した水の凍結・融解、および濃度分布がある場合の自然体流についての研究がなされている。いずれも伝熱機構のより詳細な説明は今後の課題と思われる。

一つ疑問に感じたことがある。現象のより詳細な把握といった目的そのものは理解できないでもないが、'層流域での乱れ分布'、'乱れスペクトルが層流的'などの表現が使われた発表があった。層流の定義や乱れの性格を明確にすべきと考える。また、層流の非定常計算でかなり不規則な振動現象が得られたものがある。実験結果と良く一致するというのが不思議に思える。計算法や結果の吟味が必要なのかそれともこのようなことは今では常識なのか。

(3) 凝縮：凝縮に関する研究

本田 博司（岡山大学）

1. 発表論文の分類

膜状凝縮	9編 (B111-B114, B121, B151-B154)
滴状凝縮	3編 (B122, B132, B142)
凝縮二相流	3編 (B141, B143, C233)
直接接触凝縮	2編 (B131, C323)
核凝縮	1編 (B144)

分野別の発表論文数は昨年とほぼ同様であるが、新しい傾向として二成分蒸気の凝縮に関する論文数が増えている。論文の内容は多岐にわたっており、筆者にはコメントできるだけの知識がないものもある。従って、ここでは筆者の主観的な感想を述べさせて頂きたい。なお、凝縮セッションの発表論文中にはLiBr水溶液への水蒸気吸収に関する論文2編と、直接接触蒸発及び直接接触熱伝達の促進に関する論文各1編が含まれていた。これらの研究については他分野のレビューにおいて取り上げられることと思われるので、ここでは言及しないが、どの研究についても出席者の関心が高く、活発な討論が行われたことを付記しておく。

2. 膜状凝縮

純蒸気の膜状凝縮については、平滑管(B111)およびフィン付き管(B112)の管群、内面溝付き管(B121)、EHD凝縮器(B113, B114)に関する発表があった。初めの3編（筆者ら）は目新しいテーマではないが、研究の動機はこれらの凝縮形式について信頼性のある熱伝達の予測法がないことにある。特に各種の伝熱促進管（面）については、使用条件に応じた表面形状の最適化を可能にするためにも、妥当な物理モデルに基づいた予測法を確立する必要がある。EHD効果を利用した伝熱促進法は矢部らによって研究が進められてきたが、今回は鉛直管上のR113の凝縮について、液の引き出し効果だけを利用した場合と、更に擬似滴状凝縮現象も利用した場合の伝熱性能が示された。得られた熱伝達係数は水平フィン付き管等に比べてまだ小さいが、最終的な評価は大型の凝縮器について、コストをも考慮してなされるべきであろう。今後の研究に期待したい。

二成分蒸気に関しては、非共沸相互溶解性の物質について3編(B151-B153)、共沸相互不溶解性の物質について1編(B154)の発表があった。これらの研究は高性能ランキンサイクル、ヒートポンプサイクルの作動媒体として二成分蒸気を実用化するための基礎となるものであり、出

席者の関心も高かったようである。非共沸二成分系の凝縮伝熱抵抗はガス相の拡散抵抗と液膜の抵抗との和になるが、それらの相対的重要性は凝縮条件によって異なる。管内凝縮に関する実験結果を比較すると、B151の水平流・R11-R113系では二成分と単成分の伝熱特性にあまり差がみられない。一方、B152の水平流・R22-R114系では特に下流側において熱伝達係数が低下しており、また組成による影響がみられる。B153の鉛直下降流・R113-R114系では低流量において顕著な平均熱伝達係数の低下がみられ、流量の増大につれて単成分の結果に近づいている。これらの実験結果を統一的に予測できるガス相の拡散抵抗および液膜抵抗の計算法を確立することが今後の課題であろう。なお、B151では平均熱伝達係数に関して凝縮区間長さ l を含む実験式が提案されているが、完全凝縮の場合の l の値は流入蒸気量と平均熱流束によって定まるため、独立変数ではない。従って l を消去した形の式と実験値を比較されることを望みたい。B153ではまた、低蒸気流速域の強制対流凝縮について表面形状、管配置、蒸気流方向の組合せが伝熱性能に及ぼす影響が明らかにされている。この研究は二成分蒸気に適した凝縮器の形式を定める上で重要と考えられるが、管群を構成した場合には蒸気流速がもっと高くなると考えられるので、高蒸気流速域のデータを追加されることを望みたい。

共沸相互不溶解性の二成分系に関するB154の実験結果は、チャネリングモデルによる予測値と良く合うことが示された。しかし凝縮様相はモデルと必ずしも一致しないとのことである。現象写真を示されると理解に有益であろう。

3. 滴状凝縮

粗面上の凝縮を取り扱ったB122では、離脱液滴の挙動と摩擦係数とを関連づけた整理がなされている。離脱液滴の挙動と摩擦係数が共に伝熱面粗さに関係しているのは事実であろうが、小液滴と液体の充満流に作用する壁面摩擦が同一の機構によるとは考え難い。より説得力のある理論を期待したい。狭さく熱抵抗を取り扱ったB132は、滴状凝縮に関して残されていた問題の一つを解決した重要な理論的研究であると考えられる。ただ、実験値との比較がなされていないため、狭さく熱抵抗が現実にとどの程度重要かが理解しがたい。膜状一滴状遷移を取り扱ったB142では、伝熱面端部の濡れ性によって、凝縮温度差を減少させた時に膜状から滴状へ遷移する場合と、最後まで膜状を維持する場合のあることが示された。後者は新しく見いだされた現象であり、興味深い。伝熱面の大きさ(8mm ϕ)の影響はないであろうか。

4. 凝縮二相流

過冷水流中に水蒸気を平行に噴射した場合の圧力変動特性を計測したB141については、まえがきに言及されているECCSと本実験系との相違、従来の関連研究の調査の不備が出席者から指摘された。研究の目的を明確にするためにも、これらの点には十分注意したいものである。B143は過冷水のプール中に水蒸気を注入する際に発生する振動現象の数値シミュレーションに

関するものであり、熱の仕事への変換という観点による明解な解釈が与えられている。C233では蒸気泡を含む過冷水の鉛直上昇流における気泡の挙動の統計的性質が明らかにされている。計測結果に基づいた流動・伝熱モデルが提出されることを期待したい。

5. 直接接触凝縮

B131は蒸気中を落下する相互不溶解性の過冷液滴への凝縮に関するものであり、R113蒸気と水滴及び固体球の組合せについて比較実験がなされている。前者では相互不溶解性のために、落下液滴は特異な生長経過をたどることが鮮明な写真によって示されており、興味深い。また、熱伝達係数は特に凝縮の初期において後者より高くなっている。C323では大口径水平管路内の水蒸気流中へ鉛直下向きに過冷水を注入した場合の水温上昇が求められている。本研究のような大規模実験では、実験値及び整理式が得られた意義は大きいと考えられる。しかし、水層内には温度分布があるので、水温の測定法について工夫が欲しい。また、複雑な現象のためにやむを得ない面もあるが、整理式に使用された無次元量の意味が必ずしも明確ではない。

6. 核凝縮

B144は分子線による H_2O クラスター生成に関するものであり、凝縮の初期過程を取り扱った独創的な研究である。通常の凝縮しか取り扱ったことのない筆者には良くわからないが、実験にあたっては特有のご苦労があるとのことである。分子クラスターは種々の新しい技術への応用が考えられるとのことであり、今後の発展に期待したい。

(4) 沸騰：沸騰セッションに参加して考えたこと

塩津 正博（京大原研）

沸騰セッションで報告された論文は、全部で24編あった。最近の伝熱シンポジウム後の本誌のレビューでもよく言われていることだが、単純な系での沸騰現象の基礎研究が少しずつ減少し具体的な機器と結び付いた特定系での沸騰現象の応用研究が増加しているように思われる。

原子炉開発、宇宙開発等の巨大プロジェクトによる工業的ニーズに支えられて一般的な沸騰現象の基礎研究は工学的利用の観点からの研究としては殆ど終了し、現在の工業的ニーズが具体的な機器と結び付いた特定系における沸騰現象の応用研究へと移行してきているものと思われる。しかしながら、一般的な系における沸騰現象は、上述のように工学

的利用という意味では、ほぼ把握されているものの、ミクロの物理現象として十分に理解され解析されているとは言い難い。沸騰の教科書を見ると、沸騰開始から、核沸騰、極大熱流束、遷移沸騰から膜沸騰に至るまで見てきたような図を含めて各々の物理的機構が解説されているが、これらの中には、充分な理論的、実験的裏付けに基づかない単なる憶測モデルのようなものがいつのまにか学術的成果として定着してしまったものが多いように思われる。例えば、私がここ数年来研究している膜沸騰の分野でも、膜沸騰下限界を与える Zuber, Lienhard等の表示式の基本となっている離脱気泡径や離脱気泡周期等、全く実験事実と異なっていることが明らかにされている。このように沸騰現象の各過程の物理的機構の研究には、その他未解決な研究課題が残されていると思われるが、さしあたって工業的利用に意味が少ないため基礎研究が衰退傾向にあるのは残念である。このような状況で、具体的機器と結び付いた特定の系における沸騰現象を研究していこうとすると、いろいろ困難を生じてくるのではないだろうか。例えば、このセッションで発表された低温差熱源からの高効率エネルギー伝達を目指した核沸騰促進面の研究においても、通常面の沸騰開始の機構がはっきりしていなければ、低い沸騰開始過熱度が、常に期待できるかどうか実際に使用する液体や使用条件でいちいち実験してみなければ解らないし、どのようなパラメータがそれに影響を与えるのかもはっきりしないといった問題を生ずる恐れがあり、又、沸騰開始に限らず全ての問題で出来るだけ実際の体系に近い条件で研究を行わないと外挿がきかない可能性がある。

一般的な系、特定系に拘らず沸騰現象の各過程の物理的機構を解明しようとするような研究を基礎研究、主として特定系の沸騰現象を工学的に把握しようとする研究を応用研究と呼ぶことにすれば、このどちらも重要であることは言をまたないが、個々の研究ではこのどちらかに徹底することが必要であると思う。今回の伝熱シンポジウムで発表された論文を見ると、ここで述べているような意味での基礎研究はすくなく、応用研究と呼ぶには当たらないが、かといって、自分なりの考えに基づいて現象を追求する姿勢も強く感じられず、ある応用に関連してなんとなくやっている風情の研究、いわば、“パフォーマンス研究”的なものがかかりあるように思われた。

私は、これから沸騰研究が発展するためには次のような点が重要であろうと考えている。

- 1) どっちつかずの研究ではなく、基礎研究か応用研究に徹する。
- 2) 基礎研究では、自分自身の考えのもとに、深く掘り下げた研究を行う。
- 3) 人の研究のオリジナリティーを尊重する。ある程度見通しがつくと大勢が同じ研究テーマに寄ってきて最初に見通しがつくところまでもってきた研究者と殆ど同じ考え方や方法で研究し、いつのまにか誰のオリジナルな研究か解らなくしてしまう様な風潮があってはならない。

以上、思い付くままに勝手なことを書いたが、沸騰分野の研究が一層発展するよう期待している。

(5) 蒸発：蒸発セッション雑感

飯田 嘉宏（横浜国大）

理化学辞典によれば、『蒸発とは液体の表面だけで気化が行われる現象』とあるが、応用を旨とする伝熱工学上は大雑把に解釈されて良いのかも知れない。それにしても『蒸発』という key word で編成された当2セッション、8研究の内容はとてもvariouslyに富んでいた。そのようなわけで、本感想も個々に関するものと、本当の雑感になり、系統的な意見を記し得ない点にお許しを得たい。

高温面上の液滴の蒸発に関係するものは2編で、片方は固体面上、他方は液体面上におけるものであった。E211は金属表面に薄いセラミックス層を設けると、より高温の広い温度領域にわたって蒸発時間が非常に短くなることを示した。現象的には、いわゆる膜沸騰伝熱における低熱伝導性被覆層の効果と関係しているようにも思えるが、実用的な重要性は高い発見と考えられる。機構の解明と、それに基づく更なる発展が期待される。一方のE221は水面上での液化ガス滴の蒸発を基礎的に調べた実験である。

E212, E213, E214はそれぞれ一連の研究に関する第5報, 第6報, 第3報である。また内容はそれぞれミスト冷却熱交換器、直接接触式蒸発器、液膜式蒸発器という各装置の開発なる目標を持った研究である。このような開発研究の進め方には大別して2種あるように思える。一方は具体的目的の下に使用流体や規模等の条件をある程度定めた上で、しゃにむに実用化してしまう方法であり、他方は基礎的挙動も考慮しつつ、広い応用範囲に適する一般性を考えて帰納的に研究を進めようとするもので、大学で行われた3件の発表は後者のように思える。しかし、後者の方法で行うのは、単なる基礎的研究を行う場合に比較して多分に難しい問題を含んでいる。すなわち、資金的な問題もさることながら、パラメータは多すぎるに関わらず現象として肝心なことは落としてならず、細かい所に余り注意を払い過ぎるのは無意味だし、全体としていささか粗っぽくてもバランスがとれていることが必要だろう。そのくせ、研究結果に対しては表面性状の定量化や効果など厳しいことも要求されたりする。当3研究はいずれも力作ぞろいであって、将来の体系的実用化が特に期待されるものだが、拝聴して上記を感じた次第である。

E222は沸騰のセッションに入るべきものだが、気泡成長に対する溶液中の溶質の影響などの

成果を与えている。これは著者らの永年にわたるフラッシュ蒸発の研究上で出てきた課題と考えるが、こうしたニーズに応じた研究には、新しいものが出るという実例だろう。E223は噴射される非定常過程中の噴霧の粒径分布を測定しようとした研究で、困難な目的をなんとか可能にした意義は大きいと思える。しかし、測定範囲など、今後の問題も残る。E224は液滴列の蒸発挙動を調べた実験で、貴重なデータと思うが、このままでは具体的問題への評価につながり難いように思えるので、理論的定量的検討を加えて、一般化されると特に貴重になると考えられた。

(6) 熱交換器

山中晤郎（三菱電機・中研）

熱交換器のセッションでは、主として空冷用を対象とした高性能伝熱面の特性解析（8件）と実使用時の着霜等の問題（3件）、ファウリングによる熱交換特性への影響（3件）、吸収式ヒートポンプ・冷凍機用の吸収器を中心とした熱交換器熱物質移動解析（5件）さらには蓄熱槽の性能解析（3件）の発表が行なわれた。いずれの講演も会場を埋めつくす参加者があり、この技術分野への関心の深さがうかがえた。

1. 強制空冷用熱交換器の高性能フィン

周知のように熱交換器の高性能化研究は長い歴史を有している。しかし、昨今ではヒートポンプ・冷凍機が空調分野のみならず、産業分野に至るまで目ざましく普及し、これらに関連して各種の熱交換器の研究開発が産学とも活発に続けられている。

今回のシンポジウムでも、空気側の伝熱促進の向上を図る新型フィンの伝熱・流体特性に関する報告が目立った。伊藤のピンフィン熱交換器、越後らの編込み細線を有する極細管熱交換器、鳥越らのメッシュフィンと細管を用いた熱交換器、そして藤井らの拡大・縮小流路を構成する多孔伝熱面は、従来のオフセットフィン等の伝熱促進と異ったメカニズムに支配されていると示唆されている。いずれも従来のプレートフィンチューブもしくはプレートフィン熱交換器に比較して単位体積当りの伝熱量は大巾に増大し、将来の実用化が期待できる。しかし、実用化にあたっては、フィン効率の向上や流体圧損の低減、ダスト対策等の改善を要すると思われる。

一方、これらの高性能フィンは、IC、LSI、のような素子のヒートシンク、基板や電

子機器の冷却用への導入も十分に期待でき、先端技術分野への伝熱応用の好例となろう。

現在最も多く利用されているオフセットフィンに関しては、従来よりの種々の詳細な解析が行なわれている。今回、小林らと竹内らによってオフセットフィンの特性に及ぼすフィン構成や材料の影響が、流れの可視化と数値計算によってマイクロに解析され、報告された。さらに、鳥居らは、宇宙基地等に用いられる電子機器冷却用コールド・プレートの高性能化のため、このフィンを用いた結果を報告した。

他に、主として産業用途と思われるが、円山らは従来の浅底流動層熱交換器よりもさらに低い層高に加えて、分散板形状に工夫を加えた低圧損形多列管群の伝熱流体特性実験結果を報告した。

2. ファウリングの影響

熱交換器の使用にあたって、ファウリングは避けがたい問題である。さまざまな環境におけるファウリングの度合とファウリングによる性能変化（一般に低下することが多い）を把握することは工学上きわめて重要となる。

冷凍機用シェルアンドチューブ熱交換器の高性能化のため、しばしば伝熱促進管が用いられる。高橋らは管内3次元リブ付管を用いた場合の冷却水汚染による熱伝達率の低下を加速試験により調べた。その結果、1000時間後には平滑管と同程度になることが示されたが、今後の実機運転による検証を踏まえる必要があるが、貴重なデータとなると考えられる。

また、腐食性作動流体を用いたとき、伝熱面が腐食汚染により表面形状が変化した結果、沸騰熱伝達特性に影響が出ることが考えられる。鴨子田らの報告によると、熱伝達率は腐食の進行の度合いによって影響される他、熱流束の大小によっても左右されることがわかった。

火山灰の効果と堆積による太陽熱コレクタの熱効率低下に関する玉利らの研究は鹿児島という地域に密着した興味あるものだが、今後直接的にコレクタ表面の太陽熱透過率の低下を解析することにより一層、精度が向上すると思われる。

3. 着霜特性

北陸、東北、北海道といった寒冷地へのヒートポンプの普及が図られている。このため、非共沸混合冷媒の利用等冷凍サイクル側の技術革新が行なわれている一方、室外機（暖房時には蒸発器となる）熱交換器に発生する着霜現象は、除霜のためのエネルギー使用や暖房運転が一時停止することによる快適性の低下の面から、また適正な能力仕様値への設計の面からも正しく把握しなければならない。

今回、小川らはフィンやパイプに一樣な着霜が発達することを仮定して、着霜時の熱・物質伝達特性が着霜による風路の狭まりを考慮して予測できることを単列プレートフィンチューブ熱交換器を用いた実験データと理論モデルから示している。この方法は、フィン表面等が空気中の湿分の凝縮により濡れ面を形成したとき、伝熱・流体特性が凝縮水による流路巾の減少を評価した瀬下らの研究結果に基づいている。

また、青木らは、4列の熱交換器を用いた着霜実験を行ない、やはり一樣着霜モデルでの解析結果と良い一致を見ている。

両者の解析はいずれも一樣着霜を仮定しているが、除霜後にフィンやパイプへの滞溜水が再結氷したときはこの仮定は成立し難いと考え、今後の研究の進展が待たれる。

4. 吸収器の解析と性能向上

最近の吸収式ヒートポンプの普及とともに、吸収器等の熱交換器の研究も盛んになりつつある。昨年の第23回伝熱シンポ（北海道）での縦型吸収器の解析を契機として、今回も吸収器の熱・物質移動現象をモデル化した特性解析に関して5件の発表があった。

従来、吸収式ヒートポンプ・冷凍機の熱交換器は横型が一般的であったが、最近では熱効率の向上等の観点から縦型が増えつつある。今回、河野ら、井上、永岡らが縦型吸収器の吸収プロセス・モデルに基づく解析を、また永岡らはその結果の横型へ応用を発表した。いずれも、リチウムブロマイド水溶液の流下液膜流への水蒸気冷媒の吸収を扱うもので、これらの解析精度の向上には液膜表面近傍での水冷媒の拡散メカニズムの把握が重要となり、特に設計面では拡散係数の把握が必要となる。

一方、柏木らは、リチウムブロマイドと水の組合せに代って、昇温巾が大きく、結晶析出の心配のないアンモニア冷媒の今後の普及を予測し、アンモニア蒸気の水への吸収過程を光学的手法で可視化し、拡散係数の把握を始めとしてそのメカニズムの解明に取り組んでいる。

5. 蓄熱装置の性能向上

深夜電力や排熱利用によるビル空調等の普及とともに、それらのシステムに導入される蓄熱装置の有用性が高まっている。

温度成層型蓄熱水槽では、槽に流入した温水が直接槽から流出する短絡流の発生が問題となる。宮武らはこの防止のため、槽内に水平邪魔板を取付け、流れの可視化と温度計測からその効果を調べ、温度効率の面から有効性を論じている。

また、竹内らは二重円筒形の温度別蓄熱槽を提案し、数値解析による流動解析により望ましい槽形状に関する設計指針を示している。

潜熱蓄熱ではその材料はカプセルに封入されることが多く、システムの応答性から熱の出入りは極力早いことが望まれる。このため、斎藤らは、送風機動力低減と蓄熱終了までの時間短縮の面から、カプセル形状等の最適構成を数値解析等により示すことができた。

(7) ヒートポンプ・ヒートパイプ

梅宮 弘道 (山形大工)

講演数は、7題。ヒートポンプ関連が3題、ヒートパイプ関連が4題であった。分類の中では、応用伝熱工学に入り、なかなか纏め難いこともあって、発表数は予想より少なかったように思われる。以下に、その概要と会場の反応を記述する。

D221 可逆熱化学反応を用いる高温化学ヒートポンプの基礎研究

松田 仁樹、宮崎 光俊、架谷 昌信 (名大工)

$\text{CaO}/\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可逆熱化学反応と水の蒸発/凝縮を組合せた常温 $\sim 800\text{K}$ の作動範囲を持つヒートポンプユニットを実験室規模で試作し、基本的特性について実験的検討を行なっている。すなわち、サイクルの特性を伝熱律則とみなして、放熱・蓄熱過程の非定常熱伝導特性と総括反応速度との関連について調べている。

会場からは、伝熱律則というよりも、拡散律則ではないか。体積変化による不都合はないか。c.o.p は、どれほどになるか等の質問があった。

D222 地下帯水層蓄熱法によるヒートポンプシステムの経済評価

梅宮 弘道、芳賀 恵寿、(山形大学) ほか4名

地下帯水層蓄熱の場合、地下構造を簡単な方法で、正確に予測する事は、難しく、ひいては、シミュレーションの意義を失わせる。野外実験による、大まかな特性をしらべることは、極めて有意義である。

本報告では、5年間にわたる野外実験の結果、熱回収率59%を達成した事、及びその延長としてシステムにヒートポンプを組み込んだ場合を想定し、経済的にも成り立つ見通しが得られた事を報告している。

会場では、経済評価により多くの場合分けが欲しいと云う意見、帯水層伝導損失熱の蓄積効果に関する質問があった。

D 223 ソーラ、ヒートポンプシステムの簡易計算法

山本 政樹、金山 公夫、馬場 弘 (北見工大)

ソーラ、システムの設計において月間性能を簡便な方法で求める簡易計算法を提案している。すなわち、北見工業大学自然エネルギー実験室の実験結果を基に、精算法によるコンピュータシミュレーションプログラムを作成し、ソーラシステムとヒートポンプを並列接続したソーラ、ヒートポンプシステムの簡易計算法を提案し、実験結果と比較している。その結果、 $\pm 10\%$ の精度でシステム性能の予測が可能である事がわかった。

会場からは、システムコンポーネントの位置を、自由に変更できるプログラムに発展させて

欲しい旨の希望があった。

D 231 金網ヒートパイプの最大熱輸送量に及ぼすウィック層数の効果

野田 英彦、吉岡 啓介、浜武 俊朗 (大分大工)

作動液を蒸留水とし、蒸発部長さ0.3mの平板金網型ヒートパイプを用いて、100メッシュ及び300メッシュウィックについてトップヒートモードで実験を行ない、最大熱輸送量に及ぼすウィック層数及びメッシュ数の効果について検討している。そしてメッシュ数により気液界面の挙動が異なっている事、及び、換算ウィック層数で評価すれば、最大熱輸送量の実験値は、予報値と良く一致することを報告している。

会場より、これらの結果が、そのまま円管ヒートパイプに適用できるかとの質問があった。

D 232 表面蒸発式加湿器の研究 (3)加湿板内における水流・不純物移動の解析

丸本 健二、大串 哲朗、村上 政明、山中 悟郎 (三菱電機中研)

表面からの蒸発を伴う多孔平板内の水流及び不純物移動に関し、多孔材料特性、平板の形状、蒸発速度、水流方向を考慮した解析を行ない、濡れ長さ、排水率、過渡吸水特性、不純物濃度分布などを報告している。

会場より、三次元現象になるのではないかと、との質問があった。

D 233 2成分混合媒体を用いたヒートパイプの研究

土方 邦夫、長崎 孝夫、長谷川浩巳 (東工大)

R113とR11の混合媒体を用いた2成分ヒートパイプにつき実験的研究を行なって、以下のような結論を報告している。(1) 低熱入力領域では、小さな温度上昇により熱入力が大いに増大する定温特性を示す。(2) 高熱入力では、単成分ヒートパイプの性能にちかずく。(3) 不凝縮ガス入りヒートパイプも同様な特性を示すが、2成分媒体よりその性能は低い。(4) 2成分混合媒体では、伝熱性能が最小となる混合比が存在する。

会場からは、始動時の安定特性について、質問があった。

D 234 水平管外流下液膜式蒸発器に関する研究

小山 由夫、橋詰 健一 (東芝総研)

水平管外流下液膜式蒸発器は、媒体液の水頭損失がない。この型式の蒸発器の高性能化を目指して試作した焼結伝熱管を用いて蒸発特性をしらべている。その結果、焼結溝つき管を用いる事により、蒸発器の小型化が計れ、しかもそのドライアウト抑制機能が良好なため、従来必要とされていた媒体液再循環ポンプなしの新型高性能蒸発器を実現できる見通しを報告している。

会場からは、蒸発現象が、多孔質層内の核沸騰律則ではないのか等の質問があった。

(8) 熱物性

岡田昌志 (青山学院大)

今回のシンポジウムで熱物性のセッションの座長を仰せ仕ったことから、このセッションのレビューを書くように依頼された。今年度の熱物性のセッションの発表論文数は3編であり、過去10年間は5～11編(平均 8編)であったのと比べて最低であった。おそらく7月22～24日に開催される熱物性シンポジウムと時期が近かったことから伝熱シンポジウムでの発表数が少なくなったのだと思うが、昨年度、本誌Vol.25 No.98で指摘されたように「伝熱屋」と「物性屋」との交流の機会の増加が互いの発展に寄与すると考えるので、今回の発表論文数の減少は残念である。発表会場 D室は適当な広さであり、ほぼ満席の出席者を得て活発な質疑応答がなされた。おかげで座長として大変やり易いセッションであった。以下本セッションの内容紹介と勝手な感想を記す。

D241は発表者らが開発したステップ状加熱による熱拡散率の測定法をふく射透過性物体(ガラス)の測定に適用した場合、ふく射伝熱の効果を補正し熱拡散率の真値を得る方法を示している。実際の測定装置における表面状態や温度測定方法と解析の境界条件式との関係を求める質問がなされ、輻射熱流束の大きい場合に対する適応限界が問われた。また「結局試料厚さは薄い方が良いのかどうか」と言う素朴な疑問を持った。すなわち、ふく射透過性物体において適切な測定条件(試料厚さ、測定時間、入熱量)は非透過性物体と異なるのではないかと。大変苦勞の多い実験だと思うが今後の成果を期待したい。

D242は強制レイリー散乱法による液体の温度伝導率の測定の第5報である。この方法は光の干渉を利用した、非接触で短時間に少量の試料で測定できる特色ある測定法である。本報は1000°C以上のKCl 熔融塩の測定がなされている。原理上試料温度を得るための炉は光路を妨げないようにオープンにされているが、高温では試料に温度分布が生じるのではないかと。との質問に、1000°Cで数°Cの分布が認められたが、測定時間が短いことと測定部の寸法が小さいことから問題ないとのことであった。その他は、本報が第5報であるにもかかわらず原理的に目新しい方法であるため、基礎的な質問であった。この度の測定に当り、高温での染料の選定に苦勞した様子で、スマートな測定原理にも意外な泥臭い所が問題になるのだなと思った。大変特色ある方法であり今後の発展が楽しみである。

D243は充填層内熱分散の異方性の報告で、ここで熱分散率、分散長さと言うあまり聞き慣れない量が議論されている。これは乱流における渦温度伝導率に相当し、物性値では無いのではないかと。との質問もあったが、従来充填層の有効熱伝導率は間隙流体が静止している時の値を基準に、流動している場合は流れ方向または直角方向の有効熱伝導率として示されてきたことを思えば、このセッションに相応しいテーマだと思う。この熱分散率が充填層の構造や間隙流体の速度によりどのように定められるかを見出すのが発表者らの狙いだと思うが、面白い考え方であり今後の展開が楽しみである。

(9) 熱伝導：『熱伝導セッション』雑感

荒木 信幸（静岡大・工）

熱伝導は熱移動の三形態の一つと言う位置づけにありながら、純粋な熱伝導に関する研究発表は非常に少ない。これは、この分野が成熟し、問題点が少ないためであろう。世界的に見て、非定常非線形熱伝導の境界値問題に対する厳密解法、複合材料における非定常問題に対する変数分離法や固有値法による解法、さらに、相変化を伴う移動境界問題に対する解析など応用数学的取扱いも行われているが、コンピュータ時代を反映して、いかに迅速で、精度の高い数値計算を行うかに関する研究が多い。

研究発表が少ないと言う話は「純粋な」熱伝導に限ったことであって、対流など他の熱移動形態と共存する問題まで範囲を広げると膨大なものとなり、発表者がどの伝熱形態に重きをおくかによってセッション名が変わることになる。例えば、潜熱蓄熱の応用を旨とする溶融・凝固を伴う熱移動は液体側の伝熱形態のとらえ方によって、伝導とか自然対流のセッションに分けられる。今回のシンポジウムでは「伝導」に4件、「自然対流」に4件、「熱交換器」に2件となっている。

このような観点で「熱伝導セッション」に組込まれた12件の論文を見ると、純粋に熱伝導問題と言えるのはD311とD312の逆問題とD331の溶融を伴う熱伝導の近似解法の3件のみであり、他は対流やふく射が共存している。特にD321～D323の3件は、物質移動および化学反応を伴う充填層内の熱移動を扱ったもので熱伝導成分の役割はきわめて小さい。D313は超流動ヘリウム熱伝達特性を測定したもので、これも伝導による熱移動の解析が目的のものではない。しかし、私としては、熱伝導セッションがアメリカにおけるようにもっと大きくあってしかるべきと思っているので、純粋な熱伝導問題だけでなく、複雑な複合伝熱現象を単純な熱伝導側から解析する研究が「熱伝導セッション」を賑わすことを望んでいる。

熱伝導セッションへの参加者は比較的少ないのが一般的であるが、今回は3日目の早朝という悪条件(?)にもかかわらず、最初のセッションへの参加者が多かった。これは、超流動ヘリウムや真空断熱材など論文題目の中に話題性のあるkey wordsがあったからではないかと想像している。D315の真空断熱材に関する論文は断熱材の中の熱移動を解析し、有効熱伝導率を求めたものであるが、その解析よりも製造法とその性能に参加者の関心があったように思われる。事実、セッション終了後にも会社の方々との質疑応答が続いていた様子であった。このような実用性に即した研究発表は、シンポジウムの隆盛につながる一つの道でもあると思う。会社関係の方々との積極的な発表と参加を望む次第である。

(10) 環境伝熱：『環境伝熱セッション』について

齋藤 武雄（東北大）

「環境伝熱」のセッションが、伝熱シンポジウムのプログラムに最初に登場したのは、昭和59年の京都で開かれたシンポジウムであり、ことして4年目を迎える。

人類の生産および消費活動が時代とともに活発となり、また、とくに都市において消費するエネルギーや物質の絶対量が急増するに及んで、近年は、人間と環境の係わり合いが議論されるようになってきている。

科学技術は、これまで物を生産する手段として、専ら利用されてきたが、これが結果的には、大気、海、および土壌などの、いわゆる“環境”へのインパクトをもたらしたと言える。これからの人類は、自然との調和 (Harmony between man and nature) を念頭において、後始末をも含む科学技術を開発して行く必要がある。この意味で、伝熱シンポジウムの1つのsessionとして、このような「環境伝熱」の開設は、極めて意義のあることで今後共継続すること切望するものである。

さて今回の環境伝熱のセッションには、3篇の発表があった。

D341は、新しい融雪方法として、水蒸気を用いる方法を提案しており、その有効性を調べるため基礎実験を行い、その結果を報告している。その結果(i)水蒸気の供給方向は垂直方向がよいこと、(ii)水蒸気の有するエネルギーの変換効率が高いこと、(iii)融雪水の質量速度は試料の充填速度にわずかに比例する傾向があること、などが明らかになった。

ただ、融雪というプロセスの意義を考えると、有効エネルギー（エントロピー）の概念からは、もっと低温で融雪する方が望ましくたとえば温水スプレーなどの手段が考えられないか一考をお願いしたい。

D342は、都市ヒートアイランドの3次元モデリングについて報告したもので著者らによる過去8年間の研究に立脚した、現在考えられる最新の知識をもとにヒートアイランドの3次元シミュレーションを試みている。研究の主な要点は(i)都市形状などの具体的把握のため三角形要素法を用いたこと、(ii)従来のプラントルの混合距離理論と2方程式モデルを具体的に比較したこと、である。

このような研究は、今後、都市大気環境予測に留まらず都市計画、都市の設計および防災などに役立つものである。

D343は、都市の建造物の谷間にできる、いわゆる都市キャニオンの熱輸送の構造を明らかにするため、実在ビルを対象に温度、熱流束などの測定を行ったものである。

この研究の難しさは、ビルが設置されている周囲の条件や表面性状などの個体差の影響が現われることである。また、大気を相手にしているだけに、日射や天空あるいは大気放射の影響の考慮も難しい。

しかし、大変興味ある問題で、数値解析も含めた多角度からの研究の進展を期待したい。今後、「環境セッション」の発表件数が増えることを期待してペンを置きたい。

(11) 測定法：『測定法』セッション

藤田 秀 臣 (名 大)

測定法のセッションでは、3件の論文が発表された。それらは、測定の対象としている現象、測定原理、測定手段など相互に関連性はない。強いて共通点を求めれば、いずれも、本シンポジウムの他のセッションに入れた場合に、おさまりがあまりよくないということであろう。従って、統一的なレビューはできないので、各論文の内容を簡単に紹介し、私の感想を若干述べることによって責めを果たさせていただくことにする。

E151は、容器内の密度成層が熱的条件の急変によって急激に逆転するような、ロールオーバー現象の発生機構の解明を目的としている。引用文献から察するところ、本現象はLNGタンクの安全性などに関連して産業界で注目されてきたもので、学問的研究は緒についたばかりと見うけられる。この段階では、現象の全体像を把握することが極めて大切である。その意味で、本研究に用いられた温度場の可視化は目的にかなっている。会場においても同じような意見が述べられていたが、流体の運動に関する可視化の情報をも温度場と同時に示すことができれば、現象を解明するうえでさらに有力な手段となるのではなかろうか。

本研究で採用されたマイクロカプセル化した液晶を感温トレーサとする液晶懸濁法は、伝熱研究における広い分野で利用できる温度場の可視化技術である。本法を利用しようとするれば、マイクロカプセル化した液晶の種類、入手の難易、価格なども関心事項となろう。

E152は、発表者らが最近開発した、水蒸気の赤外吸収特性を利用した光ファイバー局所湿度測定装置に関する論文である。本論文では、温度変動による光強度の変動を実時間で相殺できるように測定法の改良が提案されている。鉛直平行平板間の熱と物質の同時移動を伴う自由対流場において境界層内の水蒸気濃度分布を測定した結果によれば、所期の目的は達せられているといえる。

筆者は約20年前に、落下液膜と対向気流との間の蒸発を伴う熱伝達に関連して、湿度の局所分布の測定の可能性を検討したことがあるが、当時市販されていた湿度センサーは再現性が悪く、室内のバルクの湿度さえ満足に測定できないような代物であった。本論文で、境界層内の濃度分布が1mm程度の間隔で測定されているのを見るにつけ、その著しい進歩に驚いている。今後、取り扱いが比較的容易な計測器として実用化されることを期待したい。

E153は、固液界面における濡れおよび接触角に関する研究である。固体壁の下面に形成される軸対称の液体メニスカスの形状を理論的に明らかにしたうえで、そのメニスカスの安定・不安定を系のもつエネルギーの観点から検討している。その結果、系のエネルギーが最小でなく

ともメニスカスが安定に存在できる場合があることを示している。また、円錐面の下方に形成されたメニスカスが壁面から離脱するときの円錐面の高さを測定することによって後退接触角を求める方法を提案し、さらにその拡張として前進接触角を求める方法をも提案している。

接触角は、凝縮や蒸発・沸騰などの相変化を伴う伝熱現象や二相流においては重要な量であるが、その値は固体面の性状によるところが大きく不明確な点が多い。会場においても、接触角の定義およびその物理的意味の解釈をめぐって活発な討論がなされた。なお、本論文は筆者らの研究である。測定装置として確立するまでにはさらに幾多の検討、工夫を要すると思うが、本論文の範囲内では実験による裏付けも得ており、接触角に対して一つの見解（ミクロな意味ではなく、見かけ上の、あるいは実用的な意味で）を示し得ていると考えている。

上述のようにE153は筆者らの論文であるが、申込書に講演希望分野を書く段階で大いに迷った。結局、蒸発や凝縮をも包含するものとの考えから二相流伝熱と記入したが、プログラムでは「測定法」のセッションに組込まれた。本稿を執筆するに当たって、過去10年ほどの講演論文集の日程表を眺めてみたが、「測定法」と名のつくセッションは見あたらず、今回が初登場のようである。これはもちろんこれまで測定法に関する論文がなかったというわけではない。通常、最も関連が深いと思われる分野の中に入れられてきたのであり、今回も大部分の論文はそうになされたものと思う。従って、「測定法」のセッションが新しく設けられたのには、それなりの理由があり、準備委員会の先生方のご苦心の作と拝察する。今回の筆者の個人的経験によれば、蒸発や沸騰あるいは熱物性などの分野にご造詣の深い先生方から示唆にとんだ貴重なご意見やご討論を頂くことができ、非常に有益であったと喜んでいる。講演数が230件にも及び、5室で並列に講演が行われている現状では、広い分野の研究者による種々の角度からの討論は望み難くなってきた。しかし、比較的应用範囲が広いと思われる測定法や計算法などについては、従来のような現象による分類にはとらわれないセッションを設けることは可能であり、それはまたシンポジウムの本来の姿に照らしても意義があると思う。本セッションには、そのような意図がこめられているようにも思われ、今回の試みに敬意を表す次第である。

測定法のセッションではないが、たまたま出席していたあるセッションで、測定法の不確かさ (uncertainty) に関する質問があった。また、今回の論文集には不確かさを明記した論文もみられた。我が国においてもそろそろ不確かさの議論が必要になってきたのかもしれない。

(12) 二相流・ミスト冷却：二相流・ミスト冷却に関するレビュー

戸田三朗 (東北大工)

この数年来にわたり伝熱シンポジウムにおける二相流研究の発表内容のあり方については多くの議論があったやにおもうが、単成分二相流で伝熱、相変化に直接かかわる論文が大部分を占めるようになってきたことは良い傾向である。ミスト冷却は、従来は二相流の一部に区分されていたが、昨年より独立セッションとなり、上の傾向とともに喜ばしい。

発表論文数は、二相流セッション21件、ミスト冷却セッション5件で前回とほぼ同数である。現状の二相流研究の多様性がそのまま表れており、単純な分類は困難であるが、あえて示せば次のような内容別件数である。

二相流セッション：

(1) 各種形状、ノズル、バンドルなどの流路内二相流動	5
(2) 蒸発、凝縮を伴う二相流	3
(3) 液膜流のダイナミクス	3
(4) 対向流	3
(5) 逆環状流	2
(6) その他の二相流問題	2
(7) 固気及び固気液混相流	3

ミスト冷却セッション：

(8) ミスト冷却	4
(9) 衝突滴	1

ところで、筆者はミスト冷却セッションには自然対流セッションの発表があつて出席出来なかったので、論文予稿のみから講評させていただいた。他の論文は全て拝聴したので、先の分類に従って、当日の討論結果も加えてレビューすることにする。

(1) ノズル、ベンチュリなど断面の急変する流路内の二相流動の研究が報告されている。流動様式を積極的に変換しようという実験(C231)では、変換器の後流管路がない条件で行われており、応用上の説得力がやや乏しいものとなっている。低質エネルギーの有効利用に関連する基礎研究として、ノズル内の高速ミスト流動の解析(C321)、サブクール条件で流入する過熱水のノズルでの圧力アンダーシュートの減少を目指す実験(C322)が報告されているが、後者で細線を挿入する点が実用上問題となろう。軽水炉の小破断事象に関連して、矩形流路における環状・スラグ流遷移の研究(C232)があるが、Kelvin-Helmholtz不安

定条件の適用について明確な物理的整合性が必要であろう。ロッドバンドル内の二相流動をX線CTスキャン装置で測定した実験報告(C342)は、従来ボイド率分布の実測データがないだけに、大変興味深いものである。さらに、特記すべきこととして、ドリフト・フラックスモデルが適当であり、従来のコード解析に使われているZuber-Hindley式が最も良好な一致を示すことが報告されている。X線CTスキャン装置が広く研究に利用できるようになれば、二相流研究は格段に発展することになるだろう。

(2) サブクール・バルク中で蒸気泡が凝縮、消滅していく非平衡二相流の実験的研究(C233)、蒸気中のサブクール水流への直接凝縮による水温上昇の報告(C323)、非共沸混合液の沸騰域から強制対流域に至る二相流熱伝達の特性(C234)の報告があり、いずれも複雑な凝縮あるいは蒸発に強く依存する二相流伝熱の研究であり、今後に期待される課題である。なお、2件目の研究での水温上昇式に熱伝達のファクターが考慮されていない点が強く指摘され、整理式の見直しが必要であると思われる。

(3) 液膜流の界面波の3次元シミュレーション解析(C241)は、数値流体力学が界面波をどこまでリアルに見せてくれるかという観点から、大変興味深く、討論もひとときわ活であった。波動観察実験のデータとの1対1の対応が次回にデモンストレーションしていただければと願っている。他方、この波動特性を実験的に追求した報告(C242)、水平円管の波状流が成層流理論に従わないことを示した実験解析(C243)が報告されたが、熱伝達との関連に発展した研究の提出が期待される。

(4) 原子炉チャンネルにおける事故時の熱流問題の1つとして、円管以外の狭い矩形流路における対向二相流の実験(C332, C333)が報告され、CCFL条件についての比較検討が加えられている。また、円管の比較的長い流路の出入口形状および上部蓄水位がフラディング現象に強い影響を与えることが報告(C331)されている。

(5) 軽水炉の再冠水時の燃料のクエンチフロント下流域では、二相流動状態は逆環状流、液体スラグ流、噴霧流と変遷するがその各域での熱伝達、圧損、あるいは流動様式変遷条件等について、細管での実験(C334)、相関式の提示(C335)がなされている。

(6) その他の気液二相流問題として、単成分気泡流中の圧力波の伝播速度が相変化量とともに低下することが微小振幅波理論および実験(C341)により示されている。また、空気巻き込みを応用した二相流攪はん機の二相渦の研究(C324)は興味深いのが、攪はん性能に直接かわる空気吸い込み量の実測および動力との関係について今後の検討が必要であろう。

(7) 円管内固気二相流について、微細・粗大の中間の粒子を含む流れをStochasticモデルにより、鉛直上昇昇達域についてシミュレーション計算が試みられている(C343)。まだ、粒子と流れ間の相互作用の評価が十分ではないとのことであるが、気液のミスト流への適用も可能と思われ大変興味深い。固気二相衝突噴流による熱伝達促進が、乱れの顕著な増加と対応づけられることを、LDV測定による実験(C344)により明らかにされている。他方、固

気液三相スラグ流の体積率を、広く気液二相スラグ流で認められている大気泡上昇速度を適用して推定する方法（C345）が提案されている。

（8）液体金属を液相に用いることにより、非常に広い高温温度域で高熱流束除熱が期待される液体金属ミスト冷却の実験（C311）が報告されている。液体ナトリウムが使われ、飽和温度以下の伝熱面上の強制対流域について、衝突噴流部の比較的広い伝熱面のミスト滴流量分布と熱伝達分布の関係が実験的に調べられている。また、平板に沿う液相蒸発を伴う噴霧状二相流の乱流境界層とその熱伝達特性について、空気・水系による実験（C312）が報告されている。固気二相流との違いとして、壁面近傍における液滴群の流動の相似性すなわち乱れの抑制効果の少ないことが指摘されている。伝熱面温度が飽和温度以上のいわゆる沸騰に対応する温度域については、いずれも水・空気による実験であるが、水質量流量の低いフォグ冷却の実験（C313）により、遷移および膜沸騰相当域の熱伝達整理式が提案されている。さらに、製鋼における制御冷却を目的とし、伝熱面表面粗さと冷却速度曲線との関係を調べた実験（C314）が報告され、特定の粗さが予め付加されていると、冷却速度が安定化され、制御に効果的であることが示されているが、ミスト流動のパラメータと粗さがどのような相関にあるのかマクロ的整理にとどまることなくさらに考察を進める必要がある。

（9）加熱面に衝突する液滴（数mmの大きさ）が遷移沸騰域で微粒子となって飛散する現象についての解析（C315）が出されている。しかし、液滴と伝熱面間の蒸気膜厚さの変動解析に導入されている疑似定常流、残存液膜、サブクール遷移沸騰の関係などの仮定に大きな疑問があり、これらの適否を十分に検討せねばならないであろう。

以上、レビューを行った。紙面に限りがあり十分に意を尽くせない点も多いと思われるが、今年のシンポジウムの動向はお分かりいただけたと思う。

(13) ふく射：ふく射伝熱発表寸評

黒崎 晏夫 (東工大)

ここ数年の伝熱シンポジウムで発表されるふく射関連の論文数の全体に占める割合は、約5%ではほぼ変わっていない。この値は、ここ数回の国際伝熱会議、数年のInt. J. Heat Mass Transfer、J. Heat Transfer等におけるふく射伝熱の論文の占める割合とほぼ同じである。しかし、その研究内容を米国と比較した場合、昨年「日本伝熱シンポジウムの寸評」(伝熱研究25-98)で越後教授(東工大)が書かれているように、日本はいく分見劣りすることを認めざるを得ない。その原因の一つには、研究者の層が他の分野に比較して薄い点にある。これには、いくつかの理由が考えられるが、(1)ふく射伝熱は、他の伝熱過程と概念が全く異なるために取つきにくいので、手掛ける人が少ない、(2)ふく射伝熱を進展させる原動力となった1960年代の宇宙開発に日本は参加していなかったため、ふく射伝熱の研究に積極的に進出する人が少なかった、などが考えられる。しかし、ふく射伝熱の重要性は、いろいろな分野で認識されているのは周知の通りであるので、より多数の人々がふく射の分野に興味を持たれることを期待するところである。

本年度の伝熱シンポジウムのふく射伝熱のセッションの11編の発表を分類してみると、(1)ふく射熱交換の数値解析、(2)ふく射伝熱の新計算法の提案、(3)ふく射伝熱促進・実験、(4)ふく射物性・データベースである。これを別の観点からみると、ふく射伝熱の発表は実験に関連する発表が少なく、理論・数値解析に関連する発表が多いのが特徴である。これは、ふく射伝熱が、高温、波長依存性などの問題から、実験にはいろいろと困難な点があり、したがって実験装置・計測器等が高価となり経済的に実験が不可能となることが多い。したがって、数値計算の研究発表が多くなる傾向は、ある程度やむを得ないことである。

それだけに、理論・数値解析の果たす役割は非常に大きいと云って良い。特に、電算機の発展に伴い、従来、数値計算では求められなかったふく射伝熱の問題の解が何とか求まり、その結果、ふく射伝熱を予測できるようになり、理論・数値解析は大いに成果を上げてきた。今後も更に発展して、より有効な成果を上げると予想される。

ふく射伝熱の数値計算法に関しては、これまでに、アナログ法、区分分割法、モンテカルロ法、差分法、有限要素法などが使用されて来ているが、非線形性の非常に強いふく射伝熱に適する計算法は、現状ではまだ十分に確立されていない。特に、燃焼炉などのように、ふく射性媒体が存在する系におけるふく射伝熱の計算に適する方法は、まだ十分に検討されていない。それ故、新しい計算法を提案する際には、その物理的意味、計算方法を十分に説明

し、他の計算法との比較検討も必要である。その点、「対流-ふく射共存伝熱系における新数値解析法」での数値微分の新提案は、ふく射の非線形性が、従来の線形計算とは異なる結果をもたらすことを示唆しており興味深い。

次に、「スターリングエンジン用高温熱交換器の固体ふく射による伝熱促進」および「高性能輻射変換体を用いた熱交換器の反応装置への応用」などのふく射伝熱促進に関する研究は、今後のふく射伝熱研究の発展して行く一つの分野と考えられる。

また逆に、「透明プレート境界を有する散乱性媒体のふく射物性の推定」は、非常に基礎的な問題であるが、やはりこの種の地道な研究は非常に大切であり、大学における研究として続けて行く必要がある。

最後に、今年の伝熱シンポジウムのふく射伝熱のセッションに出席して、故国友先生の名前が拝聴でき無くなったことに大変寂しさを感じたのは、小生のみでなく、ふく射伝熱の研究にたずさわっている全員が同じ思いをされたのではないだろうか。

<特別寄稿>

化石人類の戯言

森 康夫、電通大

1. プロローグ

本研究会のJournal も 100号から内容が一新され、充実した展望・最近の研究の紹介とともに最近の2号には「日本伝熱研究会のゆくえ」と言う放談会の記事も載るようになり、編集担当委員のご努力のお陰で楽しく読める記事が多くなった。従来はシンポジウムやセミナーなどについての記事・報告にはかなり美言・れい句的なものが多く、失礼なことながら斜め読みをすることが多かった。

しかし内容が一変されてからは、いわゆる読ませる内容のものが増えており、特に放談会の記事は興味深く通読した。しかしその会で述べられている意見のなかには賛成できないものが幾つかみられた。この放談会は8人のメンバーによって行なわれたようである。これらの方々はいわゆる新人類といわれるような若い人たちではなく、また私のような化石人類でもなく、現在第一線で活躍している上記の分類でいえば旧人類と呼ばれる方々であると思う。従って私とは異なる新しく進歩的な考えをお持ちの方ばかりと思うが、「伝熱研究」は各層・各方面の方々を読まれるので、違った意見を持つ人もおられると言う意味で、特に後半の放談会の記事の中で、発言者と異なった見解・意見を持つ幾つかの点について私見を述べさせていただく。

2. 教科書的なテーマ

H氏は「アメリカではcondensationとかboiling とかいう一般的なテーマじゃないものに対する、何と言おうか、指向性がもう少し強いんじゃないかな。ざっくりばらんに言えば、そのテーマで金を貰うというような面で、日本では教科書的なテーマをやっていると、金が貰える。そうしていると、予算も付くし、科研費も来る。」と話されておられる。

このH氏の発言の中で、私が特に意見を述べたいのはアメリカでは指向性の強いテーマが取り上げられ、わが国では教科書的なテーマが取り上げられて、それに対して科研費が付与され易いというように思われる発言である。この意見の中には2つの問題点があると思う。その1は教科書的というのはどういうことを意味するのだろうか。伝熱の教科書は多くの場合凝縮とか沸騰とかいう伝熱の重要な主要分野によって大別されて基礎現象が説明されている。しかしながら、この場合の基礎的現象は伝熱の最先端の研究に関連して注目されている研究者にとっての基礎現象とは全く異なることは言うまでもない。すなわち

教科書的テーマは科研費の対象には全くなならない。しかし例えば先端技術等に関係する基礎現象は非常に重要なものとして科研費の交付対象になるものと考えられる。最近の科研費の審査の詳しい方法を私は知らないが、嘗てその審査をしていたときに一緒に審査に携わっておられた先生方の考え方は決して教科書的なテーマに重きを置いたのではなく、学問的に最も重要なまた注目されていて独創的で発展性・波及効果のある研究問題、あるいはその分野の基礎研究に重点が置かれて審査されたと記憶している。失礼であるが現在では化石人類と呼ばれるような先輩が、わが国の伝熱分野でのこのような基礎研究に重点を置いた長い間の努力の蓄積が、現在のようにわが国の伝熱の学問、技術の水準を世界的なものにしたと思う。すなわち教科書的なテーマの研究ではなく、現時点で学問的に重要な・基礎的な研究を行なうべきだと思う。

さてH氏がふれておられる研究費についての私見を述べると、米国の大学における研究は多くの場合米国政府の National Science Foundation (NSF)よりの助成金によっており、民間企業との共同研究による場合もかなりある。一方わが国における国立の大学の場合を考えると、いわゆる講座費と科研費が研究費の内容のほとんどであるといっても良いであろう。私は統計を取っていないので自分の経験から話をすると、私自身これまでに多くの基礎研究を行ない発表してきたが、学会の論文集等に掲載された論文の70%以上は講座費で行ってきたと思う。講座費は他国に例のない制度であり、自分でテーマを選べる自由を持っており、これを有用に学問の先端領域・分野での研究に使うことこそ、国立大学で研究している人々の務めであると思う。私も一年に1・2回NSFから研究助成申請書の審査を依頼される。その経験および最近米国の大学教授の人々との話から、最近のNSFの最終決定をする地位の人が基礎研究よりも短期的に社会から関心を持たれるテーマに重点を置いて審査決定をする傾向があるといわれている。これが見方によっては指向性を持つ研究テーマが選ばれる所以の一つと考えられる。しかし基礎知識・知見で裏付けされていないハイテクノロジーは一見指向性を持っているようであるが、長期的には競争力を失うことはこれまでも幾つかの例が知られている。この基礎知識・研究に欠けているが、研究費を受けるために指向性を内容とする研究が多くなっていることは最近多くの米国の seniorの研究者により心配されている。例えば私が昨年の米国の工学アカデミーの総会に出席したとき、High Technology Scienceという問題が熱心に議論されていた。このHigh Technology Scienceというのはわが国ではあまり知られていない言葉であり、初めは私も理解に苦しんだので米国の友人に聞いたところ、High Technologyの基礎をなす科学を意味すると教えてくれた。そこでアカデミーでそのメンバーが行なった議論の内容を、今後High Technologyに関連する基礎研究をどう行なっていくべきかということの頭に置きながら聞いてゆくと、その根底に米国の world leadership の回復ということが大きな中心課題であることが分かってきた。言い換えると第二次世界大戦以後ほとんどの科学技術の

分野で世界のリーダーシップを取ってきた米国が、最近および今後重要な分野と考えられる多くのHigh Technology の分野で、わが国および西独にそのリーダーシップを脅かされあるいは取られるようになりつつあることを強く認識し出してきたことである。そこでそのリーダーシップを取りもどすにはどうしたらよいかの問題についての多くの議論の結果、重要なハイテクノロジーの基礎すなわち先端技術の基礎科学・基礎工学からしっかりと研究していくべきであるということを経験として確認し、それをどのように具体的に行なうのが今後の問題である。すなわち先端技術の派手な部分にのみ関心に向ける指向性を持つ研究への反省が強く感じられ、先端技術の基礎研究にこそこれからの研究の重点を向けるべきであるという反省と、研究の方向転換の必要が叫ばれるようになった。

以上のことをまとめると、H氏の言われる伝熱の研究、例えばコンピューターのチップの冷却のような問題でも、米国の今後の研究傾向も、わが国の多くのその分野の研究者が行なっているような基礎研究に重点を置いた研究がこれからは多くなると思われる。この意味でわが国の研究者は最近の国際的成果を踏まえて、自信を持って基礎研究を進めていくべきであると考えられる。

ことによると私がH氏の言われていることを誤解しているかも知れないとも思うので、そのときは化石人類に免じて許していただくことを願っている。これからの伝熱研究分野の基礎研究としてどういうものを選ぶべきかは、旧人類の人々を中心に決めるべきものである。高い知見と深い洞察力、新しいアイデアを基にして、将来を見通し、学問的必然性、将来の発展性、波及効果、工学技術への応用の可能性を考慮したテーマを選び、わが国の伝熱に大いに寄与する研究が行なわれることを願っている。

3. カルノーサイクル

放談中の中ごろに次のような談話がある。

F (氏) : でもやっぱり、教える順序としては伝熱学の方が興味を持ってもらえると思えますね。

H (氏) : 現象に即していますね。

F (氏) : はやい話がカルノーサイクルが出てきたところで、実際世の中どこでカルノーサイクルが動いているんですか、頭の中の産物じゃないですか。

B (氏) : じゃ何故カリキュラムに載せて置くんですか。取ってしまえばよい。

カルノーサイクルを実現している機関が現在は実在しないことは厳然たる事実である。私はこれまでカルノー機関の科学史・技術史を詳しく調べたことはない。しかしかつてエネルギー転換の単行本を書いたときに考えたことがあるが、現在の技術を考えてときにカルノーサイクルを実現する場合の最大の問題点は短時間に高温熱源から作動媒体に伝熱す

ることの困難さである。カルノー機関を内燃機関として検討するとき最近のディーゼル機関の技術を考慮すると、この問題はそれほど難しいとともおもえないが、低温熱源への短時間の定温条件での放熱が容易ではないことが分かる。上に述べたようにカルノーサイクルが実現されていない幾つかの理由のうちのほとんどの問題が伝熱に関係している。

物理学を構成する重要な分野の一つである熱力学は、物理学の中でも早くから学問体系が確立され、その熱力学の中でのカルノーサイクルの重要な役割は今更言うまでもない。しかしカルノーサイクルを実現するための過去の多くの研究・開発にもかかわらず、その当時の知識と技術ではこの理想のサイクルを実現することが出来なかった。そこでカルノーサイクルよりは理論効率は低い、実現し易いオットー・ディーゼルサイクルが提案されて実用になったと思う。

しかもエネルギーショック以来カルノーサイクルと密接な関係を持つスターリングサイクルを実現する機関についての熱心な研究・開発と、熱エネルギーを用いる化学プラントの熱利用有効率を上げるために有効エネルギーの概念の導入が行なわれ、広く利用されるようになった。特に強調したいのはカルノーサイクルと同じように長い間サイクルを実現する機関が開発されなかったスターリングサイクルが最近大きな関心を引き、わが国でもムーンライト計画として政府のエネルギー計画の中で開発が行なわれていることである。しかもその研究開発項目の重要なものは燃焼ガスから作動流体であるヘリウムへの伝熱性能の向上であり、熱心な研究開発により徐々に性能の向上が行なわれている。私が先に述べたカルノーサイクル実現の可能性を今後も考えていかなければならないと思うのは、その重要性和発展する工学・技術による難点の解消とともに、カルノーサイクル実現のための課題は伝熱の分野のものであると考えられることなどである。

伝熱の問題が重要な項目であるスターリングサイクルも、逆スターリングサイクルが早くから実用になり、そのための技術開発が行なわれ、やがてエネルギーショックによって熱機関としてのスターリングサイクルが日の目を見ることになった。カルノーサイクルは学問の体系からも有効エネルギーの今後の広い利用性からみても、機関としての実現の可能性が技術の発展可能性が残ると考えられるかぎり、学問体系の中に残すべきものとする。

上に述べた理由で、何故放談会でカルノーサイクルのカルキュラムにおける無用論とも思われる意見がでたのか理解に苦しむ。カルノー機関が実現するか否かは、あるいは伝熱の研究者の努力と研究・開発によるかもしれない。即ち私見としては今後のカルノー機関の実現は容易でないとしても、これからの熱工学・技術の進歩にかかっており、熱力学的にも多きな意義を持つカルノーサイクルをカリキュラムから除くことについては全く賛成しかねることである。

4. セクレタリー

放談会の中の“教科書的テーマ”の議論の前に次のような発言が載っている。

D (氏) : 皆さんがそれだけ四苦八苦しているのになぜ出ない(特定のテーマ論文のことと思われる? : この部分文意不明確であり私の推測)かというのはね、結局忙しいからなんですよ。それは、学生に論文を書かせなければならない。それがあるから拘束されるので、それが無ければ自由になって、もっと仕事ができると思うな。教育や研究の補助の設備とかセクレタリーとか、外国並の組織が日本にもあれば余分な雑用をしなくてもよくなる。

D氏の言われていることは一見もっとものように見られるが、アメリカのレベルの高い大学をみると、その大学の教官はD氏の言われるようにセクレタリーを持っている人はほとんどなく、多くは学科共通のセクレタリーを使っている。そしてNSFから研究費を貰うために、学生を励まし、教官としての雑用をしつつ同時に学生と熱心に討論して優れた論文を発表している。2章で述べたように、しかも米国の大学の教官は研究費を得るためにNSFの研究費審査官の関心があるような研究題目を選ぶ必要がある。したがってD氏のいう外国並の組織とは何を指すのだろうか。私が初めて研究のため米国から呼ばれた約25年前は、確かに米国の大学の研究や教育の設備はわが国のものに比べて非常に優れていた。それでも学科には2、3人のセクレタリーがいるのみで各教授がセクレタリーを持つことはありえなかった。もちろん教官は多くの雑用と忙しい学生の教育と研究助言に多忙を極めた。その後わが国の教育や研究の設備が米国並に整備されて現在に至った。したがって、私が見るかぎり現在では設備も、組織も、多忙さも、米国の大学の教官もわが国の教官も余り差はないと考えてよいようである。

多くの方がご存じであるように、米国の大学では講座制がほとんど行なわれていないので、教授と助教授は独立でそれぞれ研究室を持っており、しかも何れの大学にもわが国の大学のような常勤の助手はいない。すなわち教授といえども助手を持って研究の手伝いをしてもらうためには、助手の給料を研究費などから支給しなければならない。たとえば10万ドルの研究費をNSFから交付されても、その約80%はその研究を実施するために大学院学生の奨学金として支払うか、上述のいわゆるResearch Associateの人権費として使用され、実際に研究そのものに用いられるのは300万円ぐらいで、幾つかのテーマに対して研究費を受けたとしても、実際に研究に使用する研究費も、研究に協力する人の数も、日米の間に余り差はないと考えられる。このことは伝熱の分野でも日米の論文の質と量の差が次第になくなってきた?とからもある程度理解される。

さてそれではD氏がセクレタリーがいて余分な雑用がなくなれば仕事ができると言っておられるときの仕事とは何を意味するのか。勿論“行革”がますます進む今日、セクレタ

リーを持つことはいよいよ困難になる。そこでD氏の議論からはずれて(というのはD氏が仕事の内容を明確にしていけないので)セクレタリーがいない今後、どうしたら研究を進められるかという問題に話題をすりかえて私見を述べることにする。われわれ研究者が研究を進め、その結果を論文にまとめて公表するまでの一連の段階の中で起こる重要な研究者の仕事は、

1. 学問的に重要な、独創性のある先駆的研究テーマを考え出すこと。
2. 出来るだけ大きい規模の新たな研究体系を考え出し、それに属し、あるいは関連する主要な研究テーマを組織的に考えること。
3. 上記1あるいは2のテーマを具体的な研究で実施する上で必要な幾つかのアイデアを考え出すこと。
4. さらに実際に理論あるいは実験を実施する上で起こる困難な問題、あるいはたとえば実験結果の説明のために必要なブレイクスルーを考え出すこと。

などであろう。

さてD氏が問題にしたかったと思われることは、上のような教授など研究者の仕事を着実にこなすにはセクレタリーなどがいて自由な時間を持つ必要があるということかもしれない。したがって研究者の仕事の内容を具体的に説明したわけで、忙しい中でそれらの仕事をどのようにしてこなしてゆくかについての私見も述べる必要があるようである。科学史などでは現代の基礎を築いた大科学者の有名な発明・発見についての多くの逸話を挙げている。その中には理解できるものもあるが、多くは後世の人が作った逸話と思われるものもある。したがってここではおこがましいが、伝熱学の研究をして化石人類になり長い経験を持つものとして意見を述べることにする。

学問的な今後の展開の方向にあり、独創性と発展性・波及効果を持つ研究分野の選出、研究課題・テーマなどを考えることを学生の指導をしながら、どのようにして進めていくかについての方法は、人によりいろいろ異なっていると思う。しかし恐らくある程度共通なことは暇で自由な時には新しいアイデアとかブレイクスルー的な考えはむしろ得られにくいと思われることである。場所とか時間を問わず、むしろある問題に思考を集中して色々な方向からその問題の内容、具体的な問題点等の検討を繰り返し、解決を見いだすようけんめいの努力をする必要があると思う。以下に研究分野の体系の確立、新しい研究テーマの考案、研究上の問題点を如何にしてブレイクスルーするかなどについての経験を述べる。

1. 私が自分ではある研究分野の体系を確立したと思っているものに2次流れを伴う強制対流熱伝達がある。現在はこの問題の多くが計算機を用いて解かれているが、計算機が未だ用いられない約20年前、この問題を境界層理論を用いて解き、同時に実験との一致を報告した。しかし初めは曲管内の遠心力が外力である場合の研究を行ない、次に水平管の

加熱流における浮力による2次流れの研究をしているとき、この2つの研究は外力と管形の多くの組み合わせの中の2つの場合であることに気づき、各種の外力による2次流れを伴う対流伝熱の一般的な体系を確立することができた。

この一連の体系的な研究は計算機の利用が非常に容易になった近年においても国際的に高く評価されており、ユーコラプリアにある国際熱物質センターの数年前の国際会議において招待講演と呼ばれ、その体系と、最近の応用分野の研究結果を加えて話をした。このような体系をなすか、互いに密接な繋がりのある幾つかの研究の大成を作り上げるときに、研究のはじめからそのような体系を考え出せることは殆ど困難であり、幾つかの研究が完成した段階で着想が得られることが多い。これに対し、互いに全く無関係な、いわばばらばらなテーマの研究の積み重ねては一つ一つが非常に独創性に優れない限り余り高い評価は受けない。

2. 具体的に研究テーマをどのようにして選び、実施するかは、研究者のそれまでの研究実績・研究環境・研究設備のいわば個人的問題と、学問的発展の方向、社会の伝熱学に要求・あるいは期待する方向等を考慮して決められなければならない。もし学生が論文をまとめるのが容易であるようなことでテーマを選ぶと、上の1において述べたような体系的な研究は行なえない。また他の人が既に報告している研究、例えば自然対流を強制対流に置き換えたようなテーマの研究は、伝熱技術的にはその結果を利用されることはあっても、学問的には評価されないことが多い。伝熱分野の最新の知見の蓄積と、伝熱と余り関係のない他の分野の新しい知識の水平思想的な利用は非常に重要であり、このためには研究者は他の分野の独創性のある研究について常に勉強する必要がある。あるいはこのためにD氏の言われるセクレタリーが必要なことがあるのかもしれないが、研究者個人の問題である。

3. ここでは研究を実施している途中で遭遇する問題点・困難に対しいかにしてブレイクスルーを行なっていくかということについての私見を述べる。問題によって解決法もいろいろありうることは言うまでもない。大学の研究において最も度々起こり、また研究者にとっても、学生にとっても有効に利用し、また役に立つものは学生との討論の機会であり、それをD氏が言われるように研究者を拘束するものだと考えるのは賛成できない。このような討論の機会こそ、研究者は己の全知識・全能力を動員して、たとえば学生の持ち出す問題点のブレイクスルーを見いだす努力をしなければならない。すなわち先ず討論により学生の持つ問題点を明確にし、その問題点を学生と討論するとき研究者は単に話を聞くというのではなく、そのときに当該問題に関するに総知見を集中して、時には暫く沈黙しても頭のなかでブレイクスルーのあらゆる可能性について考えることが望ましい。私の経験では学生とか教官の身分を考えず、皆が研究者という立場で一緒になり、熱心な討論を行なう中にこそブレイクスルーが生まれることが多い。学生との打ち合わせが時間

の無駄だとは決して思わない。

5. プロポーザル

この化石人類の戯言は「日本伝熱研究会のゆくえ」という放談会の記事について意見を述べるためであった。しかしこの章を書くに当たって改めて放談会の記事をぎっと読み直してみると、「研究会のゆくえ」とはなにを議論し話合ったのかがよくわからない。すなわち「ゆくえ」とはこれまでの歴史なのか、これからどの方向に進もうとしているのか、あるいはどの方向に進むべきであるというのか、のどれを言いたいのか不明である。

しかし放談会の運営について意見を述べるのは私の本意でもなく、またこの“戯言”の目的から考えても全体的結論の意見を述べるつもりはない。ただ私は多くの伝熱の研究者に会い、新・旧人類の研究結果を聞くことを楽しみにして伝熱シンポジウムに出席する。しかし今年の伝熱シンポジウムでは、その講演論文集の重さに閉口した。皆様の研究結果を収録した論文集について文句を言うのではないが、私のような化石人類でも持ち歩きやすいようにしてほしいと思う。そのためのプロポーザルとして本稿を執筆したついでに、次のようなプロポーザルをしたい。

(a) 英文抄録を別冊とする。

(b) 1論文を2ページとすることも考えられるが、最近各学会が前刷のページを2ページ以下とすることが多い、本シンポジウムは議論を従来通り活発にしておくことが望ましいという意味で3ページのままとしておくが、たとえば5部屋に別れているシンポジウムを行なうときでも2冊に分冊する。

また従来のシンポジウムは学会の講演会的構成と同じで、セッションに分かれて発表・討論より成っている。しかし今回取り上げた放談会の記事を見て、特に若い人のためによい企画であると思うので、「伝熱学の将来」とか「最近の伝熱学の話題」などという学問的分類でないセッションを1つ設け、パネル討論などをするを第2のプロポーザルとしたい。

色々な意見を述べさせていただいたが、あくまで私の“たわごと”であることを再度強調して筆をおく。

<アンケート結果>

'86 アンケートの集計報告

第25期副会長（事務担当）

小竹 進

研究会の現状と将来について検討をする参考資料ということで、'86年12月から'87年1月にかけて個人会員全員にアンケートをお願いしましたが、その集計ができましたので報告いたします。

アンケートは本文末にしめすように、

- (1) 研究会の現状に対する評価
- (2) 今後のあり方に対する意見
- (3) 研究会の名称についての意見
- (4) 研究会についての意見、要望

の4項について点数制および選択形式で質問いたしました。回答者数は全個人会員1066名（昭和61年12月現在）中627名で回答率は58.8%でした。回答率は表1にしめすように年令とともに高くなり、10才ごとに約10%増加して60才代では80%を越す好成績でした。

表2に全体の集計、表3以下には各項目に対する年令別、大学企業別の集計分布をしめします（“%”は該当する各回答者総数に対する百分率）。これらの結果から概略つぎのようなことがわかります。

(1) 研究会の現状に対する評価（表3、図2）

・研究会の現状に対する評価は、5点満点で伝熱シンポジウム（4.3）、事務（3.9）、伝熱セミナー（3.7）、個人会員（3.6）、地方活動（3.5）、「伝熱研究」（3.4）、維持会員（3.0）とほぼ満足の状態である。

・伝熱シンポジウムは、年令職別を問わず5点満点でほぼ一律に4.3点と評価が非常に高い。

・伝熱セミナーも平均的には評価が高いが、若い年令層を対象にしているのに拘らず若い年令ほど評価が低いことには注目すべきである。

・地方活動、「伝熱研究」誌、ともにやはり若い年令層の評価が低い。

・個人会員数に対しては、中間層（40代）の評価が高いのは興味あることである。

・維持会員数に対しては、評価が全体的に低い、企業の中間層が比較的高い評価をしているのは気にかかることである。

・（研究会事務を伝熱シンポジウムについて評価していただいたのは、いままでの事務担当の先生方が一生懸命にやっていただいたことの結果と思って感謝しております）

(2) 研究会の今後のあり方に対する意見（表4、図3、4）

・研究会の維持については、ほぼ半数の人（特に40代）が現状で良いとしているが、50代層が大学企業とも一番大きな不満足をしめしている。その大きなものは、会員を

増やすべきだということにあるが、この要望は年齢が若くなるとともに少なくなる（図3）。

- ・なんらかの方法で研究会の収入を計るべきだとするものは全体的に少ない。
- ・研究会の活動については、38%の人が現状で良いとしている。特に60代、40代層が現状維持の意見が多い。
- ・活性化すべきであるとしている人は、まず「伝熱研究」と地方活動を、ついでシンポジウム、セミナーを活性化すべきであるとしている。「伝熱研究」を活性化すべきであるとする意見は年齢が若くなるほど強くなり、20代では45%にも達することは一考を要する（図4）。（ただし、「伝熱研究」については100、101号発行以前のデータであることに注意）
- ・伝熱シンポジウム、伝熱セミナーを活性化すべきであるとするのは15%前後と少ないが、50代、60代にその意見が多い。
- ・新企画やその他の意見はさらに6、7%と少ないが、こうした意見は40代に一番多い。
- ・研究会の将来については、なんらかの検討をすべきであるという人が60%をしめ、30%の人は自然に任せるべきだとしている。割合からいうと、「検討すべき」という人は40代がもっとも少なく、40代より離れるにしたがって多くなる。したがって、30、40代は自然に任せるという人の割合が多い（図5）。

(3) 研究会の名称についての意見（表5、図6）

- ・研究会の名称については、現在のままで良いとするものが60%、「伝熱学会」などとした方が良いとするものが30%である。50代がもっとも現在の名称に不満をもっており、これより若くなるほど、あるいは年をとるほど現在のままで良いとしている。とくに、企業の人にその傾向が強い。
- ・したがって、「学会」が良いとするのは、大学関係の50代に多く、これより遠ざかるにつれて少なくなる。
- ・その他の名称としては、「日本伝熱会議」、「日本伝熱協会」、「日本熱工学会（協会）」、「日本伝熱技術会」、「熱交換技術会」、「日本熱物理研究会」、「日本熱現象学会」、「日本伝熱アカデミー」、などの提案があった。

(4) 研究会への意見・要望（表6、図5）

研究会への意見・要望としては154件、(2)項の会の維持、活動、将来に対する意見90件を含めると240件以上のご意見をいただいた。とくに、これらの意見は50代特に企業関係の人からのものが多かった。それらを整理するとつぎのようになる。

- ・「日本伝熱研究会の組織体制」について
企業関係の会員、機械以外の分野の会員、学生会員の増強をすべき
地方分散、地方分権（化学工学協会を見習って）の組織体制にすべき
専門による研究者の組織化を内部で図るべき
会長、副会長は公選にすべき

幹事、執行部の若返りをすべき
研究会事務に対する負担の軽減を考えるべき
事務局を私学にも
学術会議の連絡委員会の実行機関としての役割が重要である
海外に対しての窓口として社団法人組織化をすべき
講習会、広告等で研究会の収入増を計るべき
・「日本伝熱研究会の活動」について
産業界と密接した研究を重要視し、それらを結ぶ役割、さらにその指導性の発揮も
企業のニーズや悩みを聞き、意見交換する場、Q & Aコーナー等を設けては
発見的な研究とニーズ対応の実践的研究の推進
研究テーマを特定した、参加自由な研究グループ活動を
最先端技術など新分野の討論普及の場を
若手研究者のやる気を鼓舞する企画を
他専門分野の学協会との交流セミナー
企業の人が企画したシンポジウム、セミナーを
国際的シンポジウムを開催したらどうか
データバンクの作成、伝熱関連のコンサルタント、受託研究を
伝熱研究動向に対するレビュー、簡易実用伝熱問題集の発行を
「サロン」的情報交換の場の設立
賞を作ったり、他の賞への推薦をし、伝熱研究の発展を刺激する
その他、伝熱シンポジウム、伝熱セミナー、「伝熱研究」誌に関するご意見を多数
いただいたが、今後それぞれの企画においてこれらのご意見を十分に参考あるいは検
討していただくことにして、ここでは省略させていただきます。なお、これらの「研
究会への意見・要望」については、将来問題検討委員会の矢部彰委員に詳細に整理し
た資料を作成していただいた。ここにお礼申し上げます。

総括的には、40代層は研究会の現状にほぼ満足し、50代は会の名称を含めて不満足
度が高い。年令が若くなるにつれても、この不満足が多くなり、「伝熱研究」、セミ
ナー、地方活動など活性化あるいは検討を要望している（ただし、会の名称にはあま
りこだわらない）。これらを平均すると60%の会員が研究会の検討を要望しているこ
とになり、将来問題検討委員会への期待は大きい。

伝熱研究会に関するアンケート

御氏名 _____

(1) 研究会の現状について、5点法で採点して下さい(5 最高、1 最低)。

___ 個人会員数(現在1070名) ___ 維持会員数(現在 32社)
___ 地方グループ活動 ___ 「伝熱研究」
___ 伝熱シンポジウム ___ 伝熱セミナー ___ 研究会事務

(2) 研究会の今後のあり方について(該当するものに×印)

研究会の維持

- 現状のままで良い
積極的に 個人会員、維持会員の増強をはかるべきだ
講習会、広告などにより会の収入をはかるべきだ
その他(_____)

研究会の活動

- 現状のままで良い
地方活動、シンポジウム、セミナー、「伝熱研究」を活性化すべき
 _____)を企画すべき
その他(_____)

研究会の将来問題について

- 積極的に検討すべきである
自然に任せる
その他(_____)

(3) 研究会の名称について(該当するものに×印)

- 現在の「日本伝熱研究会」の名称が良い
現在の非法人のままで名称のみを「日本伝熱学会」とした方が良い
その他、名称を「 _____ 」(日本伝熱会議など)とした方が良い

(4) 研究会についてのご意見、ご希望など

表1 '86アンケートの回答数と回収率

'86アンケートの集計(平均)
04/14/87 現在

集計総数 = 627
回収率 = 58.8%

年齢	**29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	32	119	174	83	87	495
企業	12	45	43	21	11	132
計	44	164	217	104	98	627
%	44.0	50.0	58.6	69.3	83.1	58.8

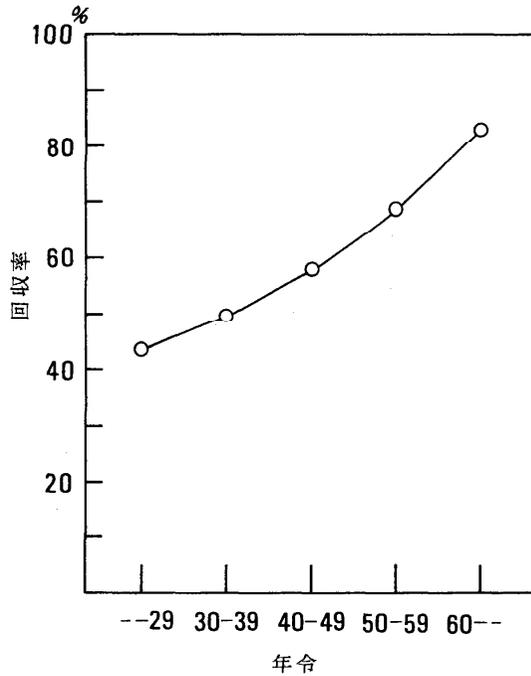


図1 '86アンケートの回収率

表2 '86アンケートの集計(平均)
04/14/87 現在

集計総数 = 627
回収率 = 58.8%

(1) 研究会の現状 (5点満点)

個人会員数 3.59
維持会員数 2.97
地方活動 3.47
「伝熱研究」 3.44
シンポジウム 4.23
セミナー 3.64
研究会事務 3.89

(2) 今後のあり方

研究会の維持について
現状で良い 47.0 %
会員を増強すべき ... 36.2 %
収入をはかる 22.6 %
その他 5.1 %

研究会の活動について
現状で良い 38.4 %
活性化すべき
地方活動を 23.1 %
シンポジウムを ... 15.3 %
セミナーを 13.1 %
「伝熱研究」を 28.7 %
新企画をすべき 7.0 %
その他の意見 6.2 %

会の将来について
検討すべき 60.6 %
自然に任せる 31.6 %
その他の意見 3.0 %

(3) 会の名称について
現在のままで良い ... 60.6 %
「学会」が良い 31.3 %
その他の名称 3.2 %

(4) 研究会への意見 154 件
24.6 %

表3 研究会の現状に対する評価

(1) 研究会の現状 (5点満点)

個人会員数 平均 3.59

点数 =

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	3.6	3.5	3.8	3.6	3.7	3.7
企業	3.0	3.4	3.9	3.4	3.1	3.5
計	3.4	3.5	3.8	3.5	3.7	3.6

維持会員数 平均 2.97

点数 =

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	3.0	2.8	3.0	2.9	3.0	2.9
企業	2.6	2.9	3.5	2.8	2.9	3.1
計	2.9	2.8	3.1	2.9	3.0	3.0

地方活動 平均 3.47

点数 =

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	3.5	3.4	3.5	3.7	3.8	3.5
企業	3.3	3.2	3.6	3.3	3.5	3.4
計	3.5	3.3	3.5	3.6	3.7	3.5

「伝熱研究」 平均 3.44

点数 =

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	3.1	3.4	3.6	3.6	3.6	3.5
企業	3.6	3.2	3.5	3.2	3.4	3.4
計	3.2	3.3	3.5	3.6	3.6	3.5

シンポジウム 平均 4.23

点数 =

年齢	** -29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	4.3	4.2	4.4	4.3	4.3	4.3
企業	4.2	4.2	4.5	4.3	4.3	4.3
計	4.3	4.2	4.4	4.3	4.3	4.3

セミナー 平均 3.64

点数 =

年齢	** -29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	3.4	3.5	3.9	3.9	3.9	3.7
企業	3.7	3.5	3.9	3.6	3.7	3.7
計	3.5	3.5	3.9	3.8	3.9	3.7

研究会事務 平均 3.89

点数 -

年齢	** -29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	3.9	4.0	4.2	4.2	4.1	4.1
企業	3.7	3.6	4.0	3.4	3.8	3.8
計	3.8	3.9	4.2	4.1	4.1	4.1

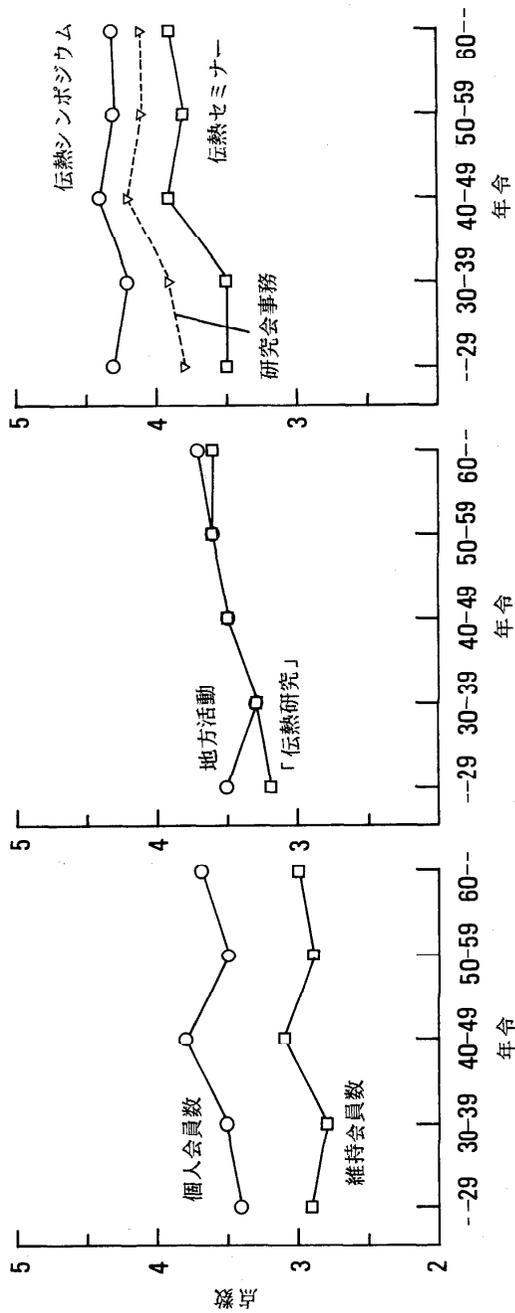


図2 研究会の現状に対する評価

表4 研究会の今後に対する意見

(2) 今後のあり方

研究会の維持について

現状で良い 47.0 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	18	50	86	30	42	226
%	56.2	42.0	49.4	36.1	48.3	45.7
企業	4	25	25	8	7	69
%	33.3	55.6	58.1	38.1	63.6	52.3
計	22	75	111	38	49	295
%	50.0	45.7	51.2	36.5	50.0	47.0

会員を増強すべき ... 36.2 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	7	47	57	37	35	183
%	21.9	39.5	32.8	44.6	40.2	37.0
企業	6	16	8	11	3	44
%	50.0	35.6	18.6	52.4	27.3	33.3
計	13	63	65	48	38	227
%	29.5	38.4	30.0	46.2	38.8	36.2

収入をはかる 22.6 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	5	29	31	21	25	111
%	15.6	24.4	17.8	25.3	28.7	22.4
企業	3	11	9	5	3	31
%	25.0	24.4	20.9	23.8	27.3	23.5
計	8	40	40	26	28	142
%	18.2	24.4	18.4	25.0	28.6	22.6

その他 5.1 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学%	1 3.1	3 2.5	14 8.0	5 6.0	5 5.7	28 5.7
企業%	0 0.0	1 2.2	2 4.7	1 4.8	0 0.0	4 3.0
計%	1 2.3	4 2.4	16 7.4	6 5.8	5 5.1	32 5.1

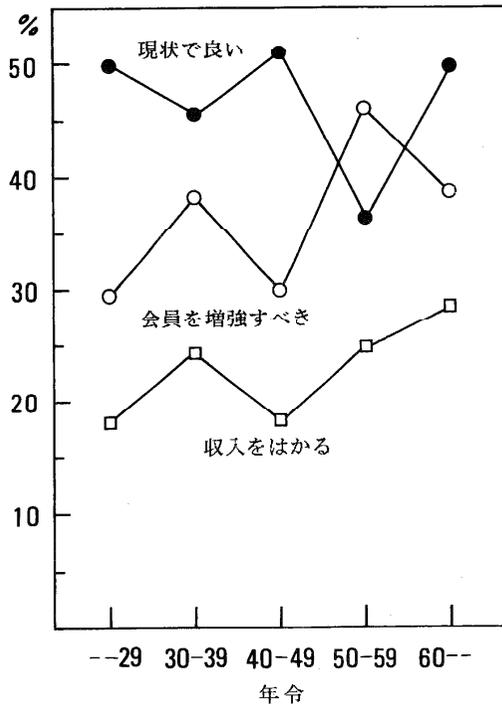


図3 研究会の維持について

研究会の活動について

現状で良い 38.4 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	7	45	74	32	46	204
%	21.9	37.8	42.5	38.6	52.9	41.2
企業	4	9	16	4	4	37
%	33.3	20.0	37.2	19.0	36.4	28.0
計	11	54	90	36	50	241
%	25.0	32.9	41.5	34.6	51.0	38.4

活性化すべき

地方活動を 23.1 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	5	26	39	23	20	113
%	15.6	21.8	22.4	27.7	23.0	22.8
企業	2	11	11	7	1	32
%	16.7	24.4	25.6	33.3	9.1	24.2
計	7	37	50	30	21	145
%	15.9	22.6	23.0	28.8	21.4	23.1

シンポジウムを ... 15.3 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	5	19	18	14	19	75
%	15.6	16.0	10.3	16.9	21.8	15.2
企業	1	8	6	4	2	21
%	8.3	17.8	14.0	19.0	18.2	15.9
計	6	27	24	18	21	96
%	13.6	16.5	11.1	17.3	21.4	15.3

セミナーを 13.1 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	4	14	14	15	11	58
%	12.5	11.8	8.0	18.1	12.6	11.7
企業	2	9	4	8	1	24
%	16.7	20.0	9.3	38.1	9.1	18.2
計	6	23	18	23	12	82
%	13.6	14.0	8.3	22.1	12.2	13.1

「伝熱研究」を 28.7 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	15	41	43	22	16	137
%	46.9	34.5	24.7	26.5	18.4	27.7
企業	5	17	10	8	3	43
%	41.7	37.8	23.3	38.1	27.3	32.6
計	20	58	53	30	19	180
%	45.5	35.4	24.4	28.8	19.4	28.7

新企画をすべき 7.0 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	0	4	20	6	4	34
%	0.0	3.4	11.5	7.2	4.6	6.9
企業	1	3	4	1	1	10
%	8.3	6.7	9.3	4.8	9.1	7.6
計	1	7	24	7	5	44
%	2.3	4.3	11.1	6.7	5.1	7.0

その他の意見 6.2 %

年齢	** -29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学 %	0 0.0	2 1.7	17 9.8	7 8.4	4 4.6	30 6.1
企業 %	1 8.3	5 11.1	2 4.7	1 4.8	0 0.0	9 6.8
計 %	1 2.3	7 4.3	19 8.8	8 7.7	4 4.1	39 6.2

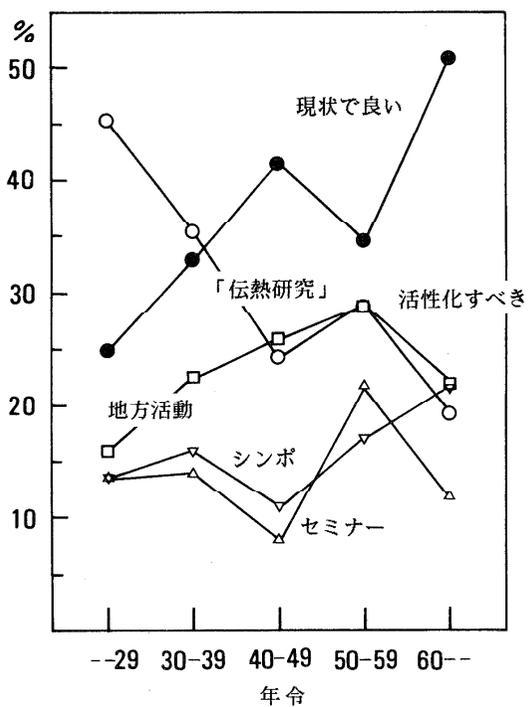


図4 研究会の活動について

会の将来について

検討すべき 60.6 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学 %	22 68.8	71 59.7	94 54.0	51 61.4	57 65.5	295 59.6
企業 %	8 66.7	29 64.4	25 58.1	18 85.7	5 45.5	85 64.4
計 %	30 68.2	100 61.0	119 54.8	69 66.3	62 63.3	380 60.6

自然に任せる 31.6 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学 %	9 28.1	41 34.5	67 38.5	20 24.1	23 26.4	160 32.3
企業 %	3 25.0	14 31.1	13 30.2	3 14.3	5 45.5	38 28.8
計 %	12 27.3	55 33.5	80 36.9	23 22.1	28 28.6	198 31.6

その他の意見 3.0 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60 **	計
大学 %	0 0.0	3 2.5	4 2.3	6 7.2	2 2.3	15 3.0
企業 %	1 8.3	2 4.4	1 2.3	0 0.0	0 0.0	4 3.0
計 %	1 2.3	5 3.0	5 2.3	6 5.8	2 2.0	19 3.0

表5 研究会の名称についての意見

(3) 会の名称について

現在のままで良い ... 60.6 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	21	79	104	39	51	294
%	65.6	66.4	59.8	47.0	58.6	59.4
企業	10	30	28	14	8	90
%	83.3	66.7	65.1	66.7	72.7	68.2
計	31	109	132	53	59	384
%	70.5	66.5	60.8	51.0	60.2	61.2

「学会」が良い 31.3 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	8	35	52	34	31	160
%	25.0	29.4	29.9	41.0	35.6	32.3
企業	2	14	13	5	2	36
%	16.7	31.1	30.2	23.8	18.2	27.3
計	10	49	65	39	33	196
%	22.7	29.9	30.0	37.5	33.7	31.3

その他の名称 3.2 %

年齢	**-29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学	1	2	8	5	1	17
%	3.1	1.7	4.6	6.0	1.1	3.4
企業	0	1	1	0	1	3
%	0.0	2.2	2.3	0.0	9.1	2.3
計	1	3	9	5	2	20
%	2.3	1.8	4.1	4.8	2.0	3.2

表6 研究会への意見

(4) 研究会への意見

154 件
24.6 %

年齢	** -29	30-39	40-49	50-59	60-**	計
大学 %	5 15.6	26 21.8	43 24.7	25 30.1	21 24.1	120 24.2
企業 %	1 8.3	12 26.7	9 20.9	9 42.9	3 27.3	34 25.8
計 %	6 13.6	38 23.2	52 24.0	34 32.7	24 24.5	154 24.6

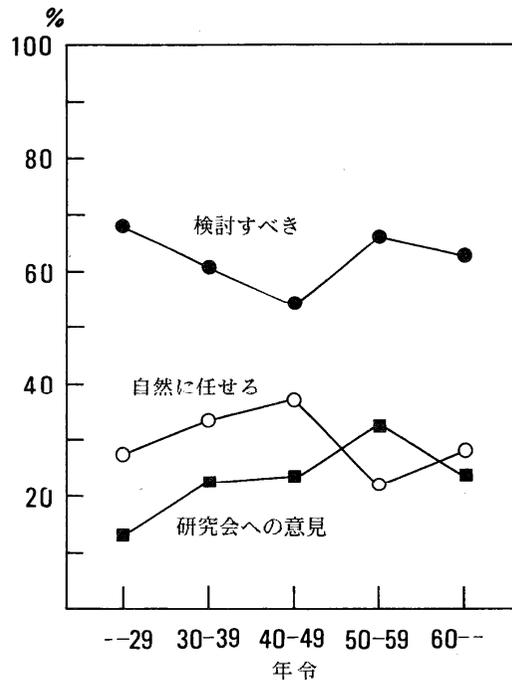


図5 研究会の将来について

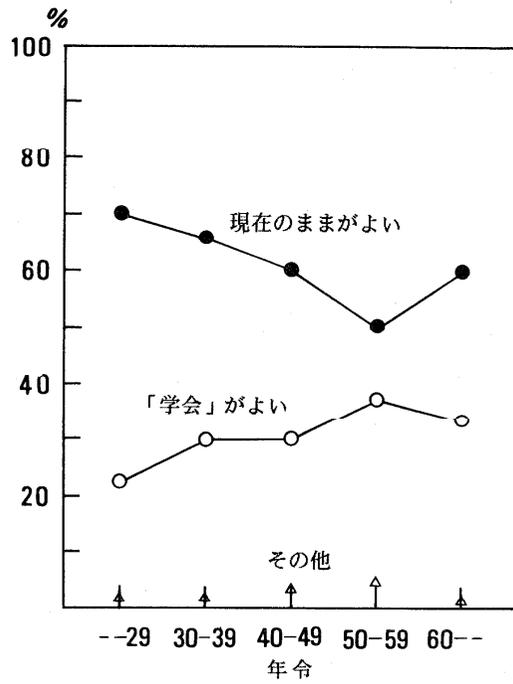


図6 研究会の名称について

<研究トピックス>

流水中におかれた一行管群周りの凍結（管ピッチ60mmの場合）

平田哲夫（信州大），横沢成昭（信州大），涌沢 篤（ほくさん）

1. 結 言

強制対流の凍結問題としては，一般に冷却平板上や円管内における凍結現象について従来から多くの研究がなされているが，円管周りの凍結を取扱ったものは少ない現状である．円管周りの凍結現象は，例えば冷凍装置における冷却管周りの着氷による熱効率の低下あるいはアイスバンク方式⁽¹⁾といわれる氷による蓄冷システム⁽²⁾などに関連があるが，これらにおいては管群周りの凍結問題として取扱わねばならない．

流れに直交する単一円管周りの凍結については，岡田ら⁽³⁾が実験と理論解析を行い定常状態における凍結層形状を整理する無次元数を見いだしている．また稲葉ら⁽⁴⁾，Chengら⁽⁵⁾は凍結層周りの平均熱伝達率を整理し，さらに円管周りの凍結層を蓄冷媒体としてとらえその蓄冷熱量をまとめている．一方，管群周りの凍結に関してはほとんど報告されておらず，わずかにLockら⁽⁶⁾が流れをせき止める目的のもと，二本の冷却円管を適当な間隔で流れに直角方向に並べた場合の円管間の凍結層成長について調べている．管群周りの凍結現象については，凍結量が多い場合にはそれぞれの冷却管が凍結層で連なってしまい，単一円管周りの凍結挙動とは全く異なるものとなる．

本研究では，管群周りの凍結における基礎的段階として，流れに直交しておかれた1行10段の冷却円管群を取り上げ，円管周りの凍結挙動や熱伝達率について実験的に調べた．なお，本報では管ピッチが60mmの場合に限定して述べる．

2. 主な記号

A_i : 円管単位長さ当りの凍結量

A^* : 無次元凍結量，式(2)

$C_{p,w}$: 水の比熱

d : 円管外径

D : 凍結層平均厚さ，図1

h_x : 局所熱伝達率

L : 円管群有効長さ，図1

L_i : 水の凝固熱

Nu_x : 局所ヌセルト数， $h_x x / \lambda_w$

- p : 円管ピッチ
 Pr : プラントル数
 Re_d : 円管レイノルズ数, u_d/ν_w
 Re_x : レイノルズ数, $u_\infty x/\nu_w$
 T_∞, T_f, T_w : 主流温度, 水の凝固温度及び円管壁温
 u_∞ : 管群上流の近寄り速度
 u, u_a : 非凍結時と凍結時の周囲流体速度, $u_\infty W/(W-d)$, $u_\infty W/(W-D)$
 W : 試験部幅
 x : 第1円管前面端よりの距離
 y_i : 管群中心軸より凍結層表面までの距離
 $\delta(x)$: 局所凍結層厚さ
 θ : 無次元冷却温度, $(T_f - T_w)/(T_\infty - T_f)$
 λ^* : 氷と水の熱伝導率比, λ_i/λ_w

3. 実験装置及び実験方法

実験装置は、水とブラインそれぞれの恒温槽と循環装置、整流部、試験部、流量計などからなっている。試験部は流路断面 $150\text{mm} \times 40\text{mm}$ 、高さ 1000mm の透明アクリル製であり、低流速における自然対流の影響を小さくするため垂直に設置し上向き流れとした。試験部下部の整流部を出た流れは一様流となり、それより 200mm 上方に図1に示す直径 $d=41\text{mm}$ 、長さ 40mm の冷却円管10個をピッチ $p=60\text{mm}$ で配列した。円管は厚肉銅パイプを使用し、円管内部にはブラインが循環し表面に凍結層を形成する。なお、本実験モデルはごばん目状管群の一行を想定したもので、試験部幅は凍結層の成長により流れが閉塞しない程度にとり、円管ピッチはさまざまな凍結挙

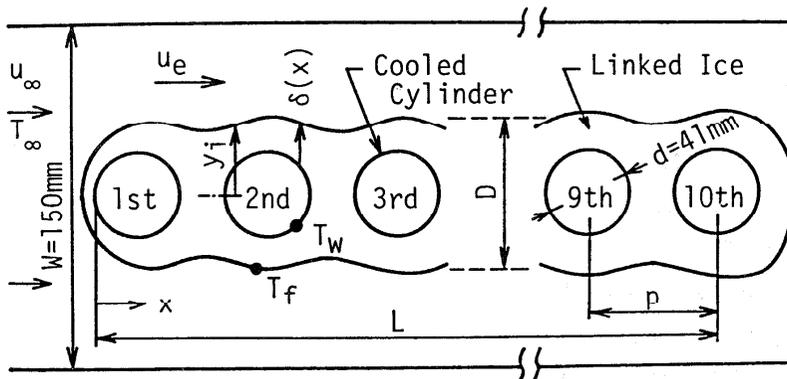


図1 試験部概略と記号

動が観察されるように決めた。

水温 T_{∞} は試験部入口と出口の平均値とし、冷却円管壁温 T_w (等温条件) は第3円管と第8円管で測定したがそれらはほぼ一致していた。凍結層厚さの測定は、まず水をインクで着色し凍結界面の識別を容易にした上で写真撮影を行い、印画紙に焼付けて寸法を読取った。この場合、レンズ収差によるゆがみを小さくするため特殊レンズ(ニコンマイクロニッコール200mmF4.5)を用いた。方眼紙を被写体として調べた結果、ゆがみはほとんど認められなかった。

第10円管の後面は、その下流に管がないため流れの条件が異なる。したがって、有効な管群長さとしては図1に示す $L=560.5\text{mm}$ とし、測定はこの範囲内で行った。凍結界面の二次元性については、凍結層が管軸方向に一様であることより確かめた。ただし、管端面ではアクリルを通しての熱伝導の影響が約5mmの範囲で認められたが全体的にはほとんど影響がないものと考えられる。

実験は $u_{\infty}=0.02\sim 0.11\text{m/s}$, $T_{\infty}=1.3\sim 4.5^{\circ}\text{C}$, $Re_d=570\sim 3160$, $\theta=0.51\sim 4.93$ の範囲について行い、測定は全て定常状態で行った。なお、凍結層が成長しながら定常状態へ到達する場合と融解しながら到達する場合の影響についても調べた。

4. 局所熱伝達率の算出

単一円管の凍結層周りの熱伝達率を求める方法としては、例えば凍結層を多数のメッシュに分割し、二次元定常熱伝導解析から算出する方法⁽³⁾⁽⁷⁾、辺点法による近似理論解法⁽⁴⁾などが従来より報告されている。しかしながら管群においては実験条件によって管が凍結層により連なるため、凍結層形状は単一円管周りのそれとは全く異なってくる。この場合、円柱座標系はもはや適用できずまたメッシュ分割も容易ではない。他に凍結界面水流側の温度勾配を測定して局所熱流束を求める方法もあるが、これは比較的大きな測定誤差を伴う。

本報では、境界要素法⁽⁸⁾を用いて定常状態における凍結層表面の局所熱伝達率を算出した。境界要素法に必要な入力データは、凍結層界面座標とその境界条件のみであるため簡便な方法といえる。図2は、管群周りの凍結層が取り得る形状を三つのパターンに分類し、それぞれの境界要素の分割数を示している。分割数の解の精度に与える影響を調べるため、図2(c)において、 $m=28, 56, 84, 112$ の各分割数について試算を行い、 $m>56$ で分割数の影響がほとんどないことを確かめた。境界の分割方法は一定境界要素とし、境界条件は、凍結層表面と冷却円管表面で等温条件 $T=\text{一定}$ 、その他の境界上で断熱条件 $\partial T/\partial n=0$ とした。計算により凍結層表面における凍結層内の温度勾配を求め、次式により定常状態の局所熱伝達率 h_x を算出した。

$$h_x(T_{\infty} - T_f) = \lambda_i \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{y=y_i} \dots\dots\dots (1)$$

ここに T_f は凍結界面温度 (水の凝固温度)、 λ_i は氷の熱伝導率、 y_i は凍結層表面の座標である。

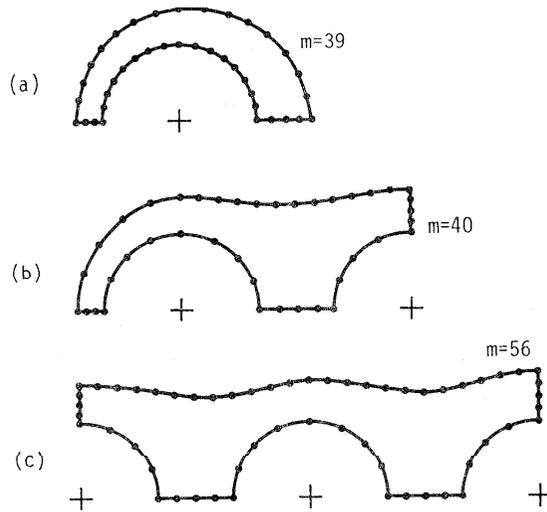


図2 一定境界要素の分割数

5. 実験結果と考察

5.1 凍結挙動と熱伝達

図3には定常状態における凍結層形状の代表的な例を示す。流れは左から右方向であり円管周囲の白い部分が凍結層である。

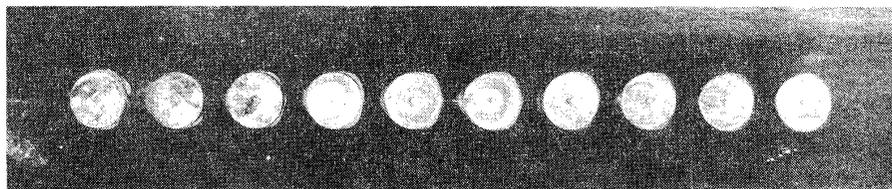
図3(a)は流れが比較的速度く、無次元冷却温度 θ が小さい条件である。この場合凍結層はそれぞれの円管に独立に形成されるが、凍結層形状は前後の円管の影響を受けていることがわかる。例えば左より第5円管に注目すると、流れ方向に対して円管前面部分に凍結層が突き出し局所的に厚くなっている。これは円管間の流れが凍結層成長に伴い淀んだ状態になっていき、局部的に熱伝達が低下するためと考えられ、単一円管周りの凍結現象⁽³⁾⁽⁴⁾と大きく異なる点である。この円管間の凍結層の突き出しは流れをさらに淀ませるため、突き出し量はある限界を超えると加速的に大きくなる性質をもっている。図3(a)の実験条件は、円管ピッチ60mmにおいて全円管の凍結層が独立に存在するほぼ限界の条件である。なお、この場合凍結層は流れ方向に対して必ずしも左右対称とはならない傾向がみられた。

図3(b)は図3(a)より凍結層が少し厚くなる条件で得られた結果である。主流の水温が冷却円管をよぎるたびに低下するため、この場合第5円管以降の下流側で円管が凍結層により連なっている。この場合のような凍結層が比較的薄い条件のもとでは、円管間の凍結層はあまり発達しないため凍結層表面に剝離流が存在し、図3(b)第5円管以降にみられるような円管間の凍結層のくびれ現象がみられる。

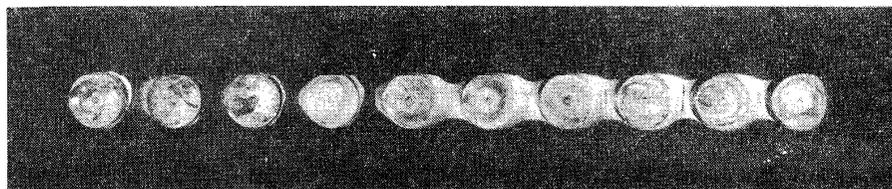
図3(c)は円管全てが連なった例を示している。凍結層表面は、図3(b)でみられたような剝離流によるくぼみはみられないが、円管ピッチに相当した波長の正弦波的形状を呈している。これは凍結層表面より円管への熱伝導による熱流束が円管の配置に大きく影響され局所的に異なるためである。また凍結層厚さは下流側で厚くなっており、流れによる熱伝達の影響も受けている。なお、このように円管が連なる場合には、左右対称の凍結層が形成された。

図4には凍結層形状 y_i 、局所凍結層厚さ $\delta(x)$ 、局所熱伝達率 h_x を直交座標で示す。横座標の局所的に線が太い部分は円管の位置を示している。図4(a)は凍結層が独立に存在する場合であり、凍結量が比較的少ない。局所熱伝達率は Re_d が比較的小さいため、従来管群に対して得られているような⁽⁹⁾ 第1円管のみが小さく他はほぼ同じ値となる傾向とはならない。図4(a)の場合、第2円管は第1円管で剝離した流れの再付着領域に位置しているため局所熱伝達率が大きくなっているが、第3円管以降では流れが円管をよぎることによる流れの乱れの増加のため下流ほど h_x が大きくなる傾向となっている。

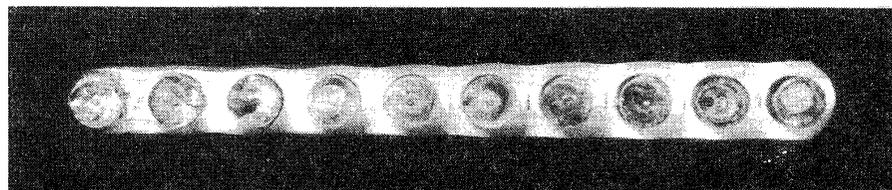
図4(b)は全ての円管が連なる場合であり、図4(a)の凍結層厚さ $\delta(x)$ と比較してみると、連続凍結の場合の凍結量がいかに多いかがわかる。また凍結層が下流側で徐々に厚くなる傾向や局所熱伝達率が増減を繰返しながら減小する様子が明らかである。本研究では主に図4(b)のような場合に注目している。



(a) $Re_d=3170, \theta=0.98$

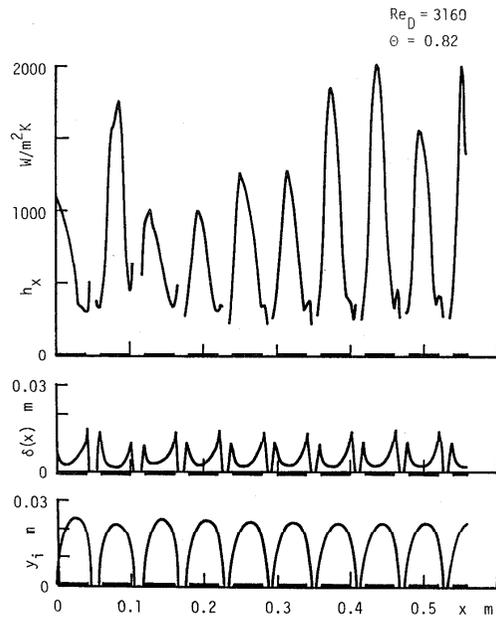


(b) $Re_d=2310, \theta=1.17$

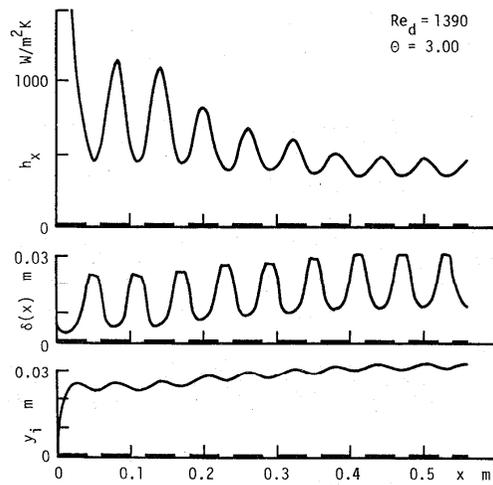


(c) $Re_d=2060, \theta=2.44$

図3 凍結挙動（流れは左から右方向）



(a) $Re_d=3160, \theta=0.82$



(b) $Re_d=1390, \theta=3.00$

図4 凍結層形状と局所熱伝達率

5.2 局所ヌセルト数

冷却円管が凍結層により連なる場合、凍結層表面の熱伝達率はもはや円管群のそれとしては取扱えず、凍結層はむしろ平板上に発達する形状に近い。本報においては、原点を第1円管前面端（図1参照）にとり、平板上の熱伝達と同様なまとめ方を試みた。その結果を図5に示す。ここで横座標の Re_x は代表速度に凍結層外側の平均速度 u_0 を用いている。本実験の Re_x の範囲は、平板上であれば遷移領域や層流領域に相当しているにもかかわらず、 Nu_x は局所的な増減を繰返しながらも全般的には乱流平板の勾配にそって変化していることがわかる。これは波状凍結層による流体の局所的な加速、減速の繰返しが、流れを不安定にするためであろうと推測される。

なお、本実験に用いた冷却円管の長さは直径に対して十分長いとはいえ、管群直後の流れは側壁の影響を受けている可能性がある。この点については、図5の Nu_x の Re_x に対する変化が全円管にわたって一貫した傾向を示していることより、側壁の影響は波状凍結層表面の流れに対して、この場合小さいと判断した。

5.3 凍結量の整理

凍結量の無次元表示については、従来単一円管周りの凍結層の場合⁽⁵⁾、円管相当体積の凍結量に対して無次元化されているが、ここでは次式で定義する。

$$\Lambda^* = \left(\Lambda_i + \frac{\pi d^2 L}{4p} \right) / \frac{\pi d^2 L}{4p} = 4p\Lambda_i / \pi d^2 L + 1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに p は円管ピッチであり、 L/p は円管個数を表す。

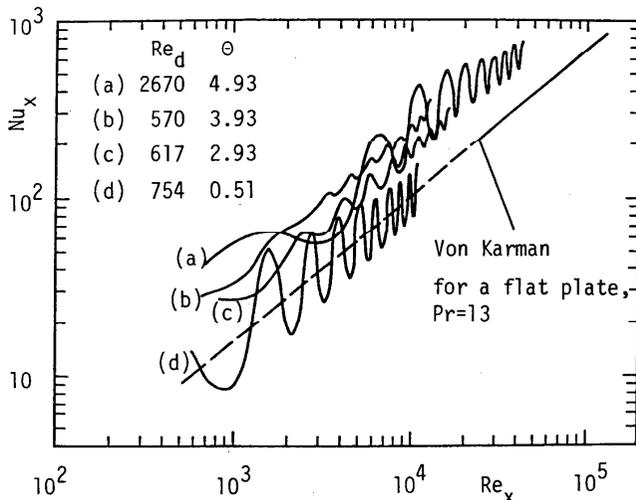


図5 凍結層の局所ヌセルト数

図6には単一円管に対して得られたChengら⁽⁵⁾の結果と比較してある。横座標は岡田ら⁽³⁾により求められた単一円管周りの凍結量を整理するパラメータである。図6の○印は凍結層が独立している場合を示しており、 Re_d が大きいと連接凍結とはならないため凍結量が減少し、単一円管の値に近づく傾向がみられるが、 Re_d が小さい場合は単一円管の2倍以上の凍結量を示している。また、本実験結果は単一円管に対するパラメータ Re_d/θ^2 では整理できないことがわかる。

ここで図5の結果をもとに、凍結層表面が乱流熱伝達に支配されているとすれば、凍結量について以下のように考えることができる。仮に円管ピッチがその限界まで減少したとすると、巨視的に円管群は平板とみなすことができ、凍結層厚さは乱流平板上に発達するものより推測できるであろう。乱流平板上の凍結量は左右両面を考えると次式で与えられる。

$$A_i = 2 \int_0^L \delta(x) dx \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに

$$\delta(x) = \lambda^* \theta x / Nu_x \quad \dots\dots\dots(4)$$

である⁽¹⁰⁾。また乱流平板の Nu_x としては $5 \times 10^5 < Re_x < 10^7$ に対する次の簡易式⁽¹¹⁾を用いる。

$$Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8} Pr^{1/3} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(3)~(5)を式(2)へ代入し、 $Re_L = Re_d L/d$ を用いると次式が得られる。

$$A^* = 292 (Re_d^{0.8} / \theta)^{-1} + 1 \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(6)は、円管群に対する式(2)へ乱流平板上の凍結量を代入して得られているので右辺の係数

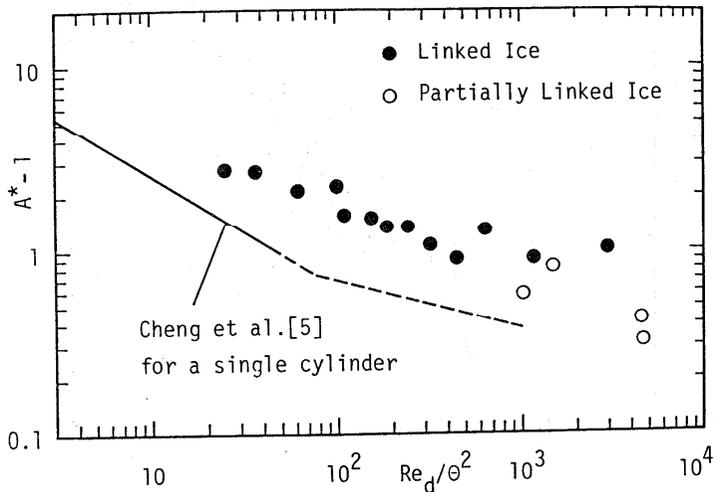


図6 単一円管周りの凍結量との比較

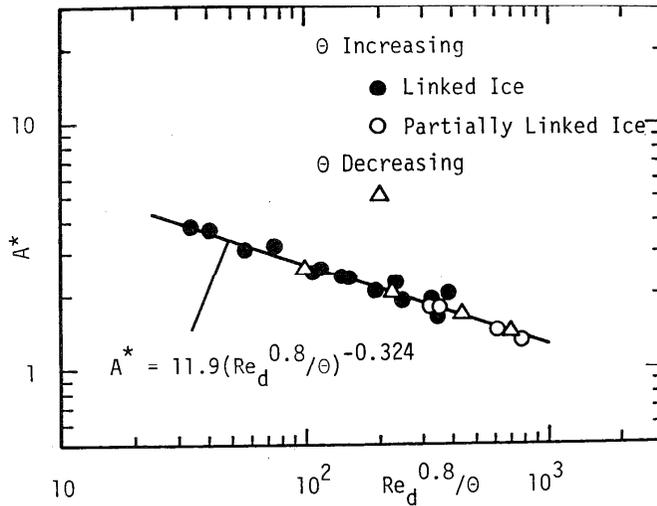


図7 凍結量の無次元整理

や指数にはあまり意味がないが、無次元量 $Re_d^{0.8}/\theta$ は A^* を支配する物理量と考えることができる。

図7はこれらのパラメータを用いて整理したものである。本実験範囲においては、凍結層が部分的に独立する場合のデータも含めて良い相関を示している。また図7には、いったん凍結層を厚くし、融解させながら定常状態へ到達した結果 (Δ 印) も示してある。観察によれば、同じ実験条件であっても、成長しながら定常状態になる場合は独立した凍結層となるが、融解しながらの場合は接続凍結層となる傾向がみられたが、これは凍結層が連なる限界条件近傍において局部的に起ることであり、円管群全体としては、図7にみられる様にその違いはほとんど認められなかった。

全てのデータに対して、最小二乗法を用いて次の実験式を求めた。

$$A^* = 11.9(Re_d^{0.8}/\theta)^{-0.324} \dots\dots\dots (7)$$

ただし適用範囲は $34 < Re_d^{0.8}/\theta < 770$ とする。式(11)は、 $A^* = 1$ が漸近値となる様定めべきであるが、本実験範囲では漸近の程度が明らかではないため、本報ではこれにとどめておく。

6. 結 言

流れに直交しておかれた1行10段の冷却円管周の凍結挙動、接続した凍結層の熱伝達、凍結量などについて実験的に調べ、本実験範囲で以下の結論を得た。

(1) 凍結層表面の熱伝達率は局部的に規則的な増減を示しながらも、接続凍結層全体としては平板上の乱流熱伝達と同様な傾向を示すことがわかった。

(2) 接続凍結層では、凍結層が円管間を連なることによる凍結量の増加が著しく、単一円管周りの場合より2倍以上大きくなること、また無次元凍結量は式(7)で整理できることを示した。

なお、円管ピッチ変化の影響や管配列の影響については今後の課題である。

文 献

- (1) 高田, 冷凍, 59-680(昭59),61.
- (2) 宅, 冷凍, 59-680(昭59),54.
- (3) 岡田, ほか4名, 機論, 44-378(昭53),624.
- (4) 稲葉・Cheng K.C., 冷凍, 58-663 (昭58),13.
- (5) Cheng K.C.,ほか2名, Trans.ASME, J.Heat Transfer,103-4(1981),733.
- (6) Lock G.S.H. and Kaiser T.M.V., Int.J.Heat Mass Transf.,28-9(1985),1689.
- (7) Cheng K.C. and Sabhapathy P., Trans.ASME,J.Heat Transfer,107-3(1985),703.
- (8) 田中, ほか2名共訳, 境界要素法入門, 培風館, (昭58) .
- (9) 相場, ほか2名, 機論, 47-422(昭56),2004.
- (10) Hirata T.,ほか2名, Int.J.Heat Mass Transf.,22-10(1979),1435.
- (11) Holman J.P., Heat Transfer, McGraw-Hill (1976),180.

1. はじめに

加熱された垂直平板上に生じる自由対流境界層は、浮力によって誘起される流れの内、最も基本的なものの一つとして、工学的にも実用的にも極めて重要であり多くの研究が行われてきた。

(1) ここには山口大学機械工学科における著者の所属する研究室で行われた実験⁽²⁾の内、既報^(3,4)において十分に紹介出来なかった結果を中心にして、その特性の一端が紹介されている。実験装置は 4000 mm x 5400 mm 高さ 6000 mm の、ベニヤ板(厚さ10 mm)で作られた密閉された空間の中央に垂直に置かれた幅 980 mm 高さ 5000 mm の一様に発熱する伝熱面であり、流体は空気である。(実験装置の詳細については既報^(3,4)を参照)

2. 伝熱面上の温度分布

空気中において一様に発熱する垂直平板上の温度分布(T_w)、対流熱流束の分布(q_c W/m²)および周囲流体温度分布(T_{∞})の一例が模式的に図1に示されている。Xは平板の前縁から鉛直上方に測った長さである。伝熱面の温度分布が極大となる点 X_{c2} を藤井ら⁽¹⁾に倣って第2遷移点(所謂、層流から乱流への遷移開始点)、極小となる点 X_{c3} を同じく第3遷移点と呼ぶ。境界層は第3遷移点から遷移乱流域を経て発達した乱流となる。伝熱面が密閉された有限な大きさの対流空間に置かれているため周囲流体には、温度成層が生じる。

図2には種々の伝熱面発熱量(q W/m²)に対するこれらの分布の実測例が示されている。伝熱面温度は遷移域と乱流域では時間的に変動しており、遷移域での変動が最も大きく図中の値は平均値を示す。対流熱流束 q_c は発熱量 q から放射熱流束 q_r を補正し

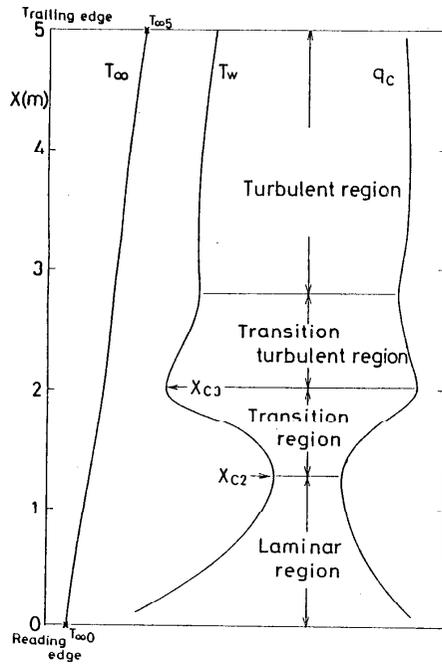


図1 伝熱面温度、周囲流体温度および対流熱流束の分布と境界層の各流動領域

て求められた。図より発熱量が大きい程遷移点は低下する。同じ発熱量に対して二組の分布が示されているが、何れも右側の分布は左側の分布に比較して遷移点が高い位置にある。これらの実測は何れも外気温温度の日変化が比較的に小さい深夜、加熱開始後、伝熱面温度が準定常状

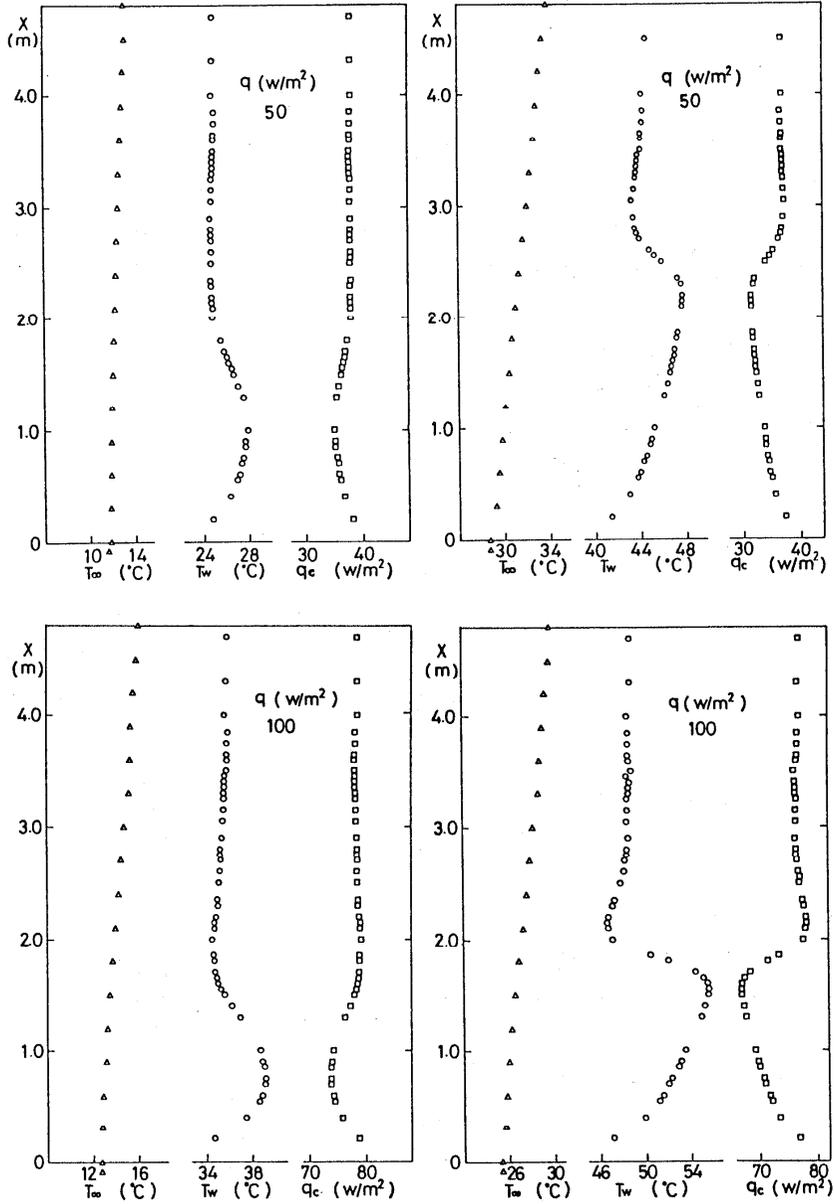


図2 a 伝熱面温度、周囲流体温度および対流熱流束の実測例

態となる約1時間半後に行われたが、同じ実験装置を用い、同じ発熱量に設定されているにも係わらず遷移点の位置にはかなりの差が存在することがわかる。これらの分布を比較すると、遷移点の高い右側の分布は周囲流体の温度も高く（従って夏季に測定された、左側の分布は冬季に

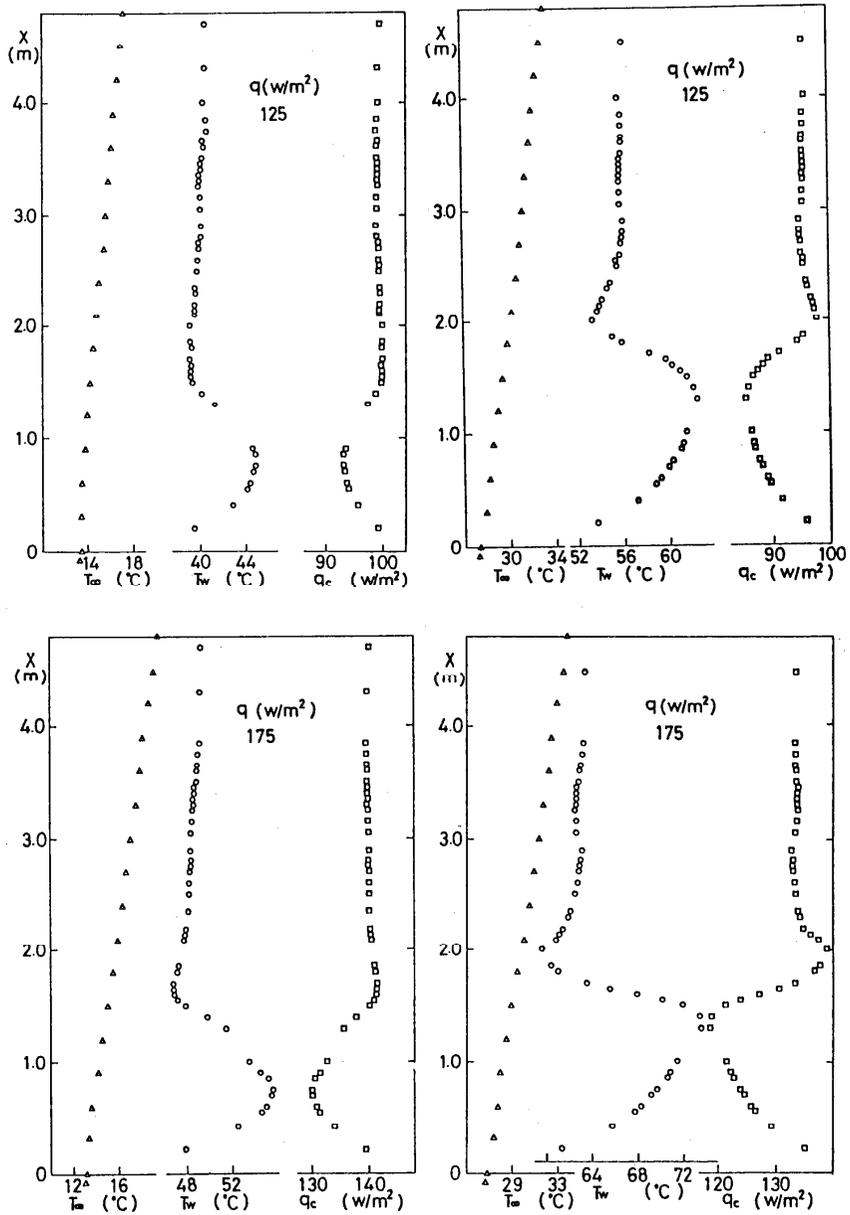


図2 b 伝熱面温度、周囲流体温度および対流熱流束の実測例

得られた)、その温度勾配もやや大きい様に見える。更に右側の分布には遷移乱流域の存在が明瞭に認められるが左側は明瞭ではない。

これら以外の実測結果も含めて第2、第3遷移点における修正グラスホッフ数 ($Gr_{xc}^* = g\beta q_c X^4 / \lambda \nu^2$) を遷移点における対流熱流束 q_{cc} に対して示すと図3の様になる。黒く塗り潰した記号は遷移乱流域の存在が明瞭に認められない場合を示す。特に第2遷移点における修正グラスホッフ数にはかなりの幅があることがわかる。全般的に遷移点における修正グラスホッフ数は発熱量が大きいと低下する傾向にある。遷移域における伝熱面温度分布のこれ以上の詳細な検討は別の機会に譲りたい(一部については既報⁽⁵⁾参照)。

層流域の局所ヌッセルト数 ($Nu_x = qcX / (T_w - T_{\infty}) \lambda$) と修正グラスホッフ数の関係を整理し、一様熱流束の相似解の結果と比較すると図4が得られる。横軸は積分された放射熱流束を q と Xc_2 の積で無次元化した値であり、放射熱流束の平均的割合をしめす。この図では黒く塗り潰した記号は遷移乱流域の明瞭な夏季のデータであり放射熱流束が相対的に小さい。放射熱流束が一様でないため対流熱流束は一様ではなく、伝熱面温度分布は一様熱流束の相似解とは必ずしも

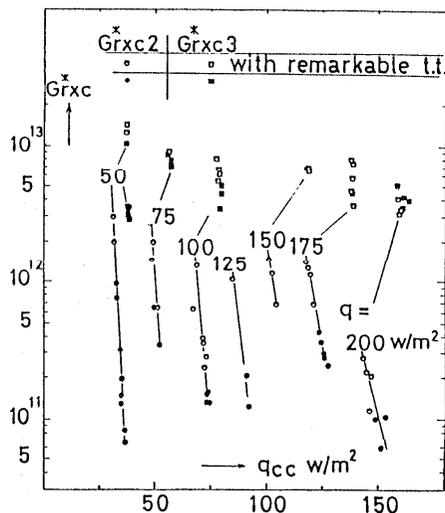


図3 第2、第3遷移点における修正グラスホッフ数

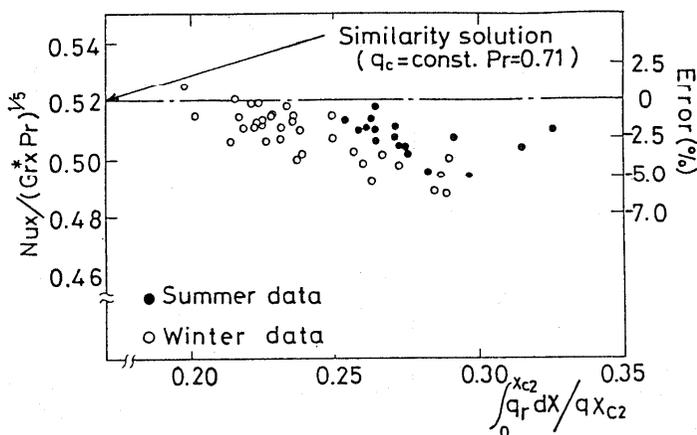


図4 層流域における局所ヌッセルト数とグラスホッフ数の関係

一致しない(差はそれ程大きくない)、一般的に放射熱流束の大きい程差が大きくなる。これらの問題は藤井ら⁽⁶⁾によって検討されており、最近 Sparrow ら⁽⁷⁾は同じ様な実験の結果を得これらは通電加熱された薄い金属箔が一様に発熱する証拠であると述べている。

発達した乱流域の伝熱面温度を同じように、局所ヌッセルト数と修正グラスホッフ数を用いて整理すると夏と冬のデータの間には有意な差が認められず、既報⁽³⁾に述べられた如く

$$Nu_x = 0.104 (Gr_x \cdot Pr)^{0.272}, \quad 1.5 \times 10^{13} < Gr_x \cdot Pr < 1.7 \times 10^{14} \quad (1)$$

が得られる。厳密には、遷移乱流域の不明瞭なデータのみを第3遷移点より下流側を全て発達した乱流域とみなして整理すると

$$Nu_x = 0.129 (Gr_x \cdot Pr)^{0.265}, \quad 4.5 \times 10^{12} < Gr_x \cdot Pr < 1.7 \times 10^{14} \quad (2)$$

式(1)とは多少異なる結果が得られる。しかし、式(1)は全てのデータを含んでいるから一般性が高く、空気について一様発熱面を用い、グラスホッフ数のより高い範囲まで実験した北村ら⁽⁸⁾の結果とも良く一致する(図2から乱流域では、ほぼ qc は一定、一様熱流束となる)。

3. 自由対流境界層の平均速度場

LDV を用いて測定された層流域の速度分布を一様熱流束の数値解と比較して図5に示す。

U_* 、 V_* は次式で定義される無次元速度である。

$$U_* = (\lambda / g \beta qc \nu^2)^{1/4} U, \quad V_* = (\lambda / g \beta qc \nu^2)^{1/4} V \quad (3)$$

$$X_* = (g \beta qc / \lambda \nu^2)^{1/4} X, \quad Y_* = (g \beta qc / \lambda \nu^2)^{1/4} Y \quad (4)$$

ここに

λ : 熱伝導率、 g : 重力の加速度、 β : 体膨張係数、 U : 時間平均 X 方向速度、
 ν : 動粘度、 V : 伝熱面に垂直な方向 (Y) の速度の時間平均

実測された X 方向速度の分布は、横軸の値が 1.5 から 4 の間で数値解より多少低い値を示しているが、比較的数値解とよく一致している。 V は U に比べて小さく図では相対的に3倍程度拡大されて示されており、数値解との差は見た感じ程大きくはない。

図6には発熱量 $q = 100, 200 \text{ W/m}^2$ の場合について層流域から乱流域まで、 U の分布の変化を示す。各分布の最大速度は層流域では加速され X と共に増加する。遷移域では境界層が急激に厚くなり最大速度は一旦低下するが、乱流域では再び加速される。

図7には伝熱面に垂直方向の平均速度 V の分布を示す。鉛直速度 U また変動成分に比較し

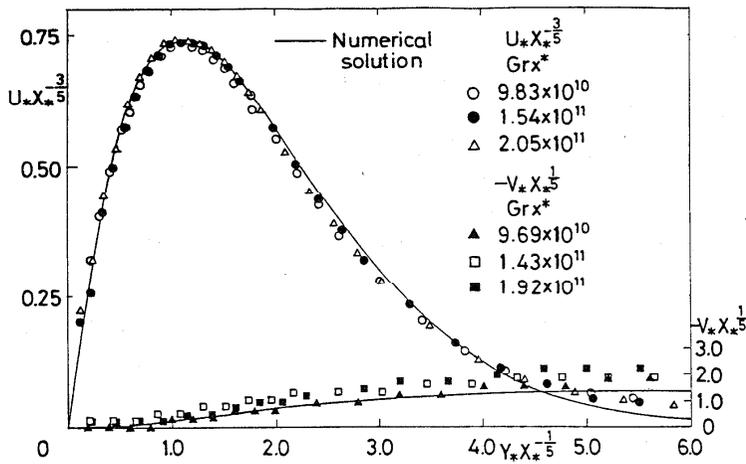


図5 層流域の速度分布

でも V は非常に小さく精度の高い測定が極めて困難であるが、遷移域の境界層外縁で V が大きい点は図6の結果と良く対応する。ただし $\xi = Y Nux/X$, $U_m : U$ 分布の最大値

4. 自由対流境界層の乱流場

自由対流境界層は遷移域や乱流域において、通常の強制対流と比較して速度が小さく、しかも激しい温度の変動を伴う。このため精度の高い速度の測定が極めて困難である。乱れの周波数は高々 50 Hz 程度であるから極細線熱電対 (25 μm C.A. など) と LDV とによる測定が有力な手段となる。LDV を用いた乱流場の実測結果は極めて少なく、Cheesewrightら^(9, 10)と著者の実験室とによって行われた例が知られている程度である。Cheesewrightらは、温度と速度場の乱れ強さまでを実測しており、レイノルズ応力と乱流熱流束は運動量積分式から計算によって求めている⁽¹⁰⁾。著者の実験室では LDV を用いてレイノルズ応力と乱流熱流束まで実測された。得られた乱れ場に関する実測値については既報^(3, 4)に大方の特性が述べられているので、ここでは実測結果から計算された乱流プラントル数 Prt の分布のみを図8に示す。 Prt は境界層全域にわたって大略 1 に近い値を示すが、 U の最大となる位置ではレイノルズ応力が零にならないため無限大となる。ただし、 $\text{Prt} = [(uv)/(vt)](\partial T/\partial Y)/(\partial U/\partial Y)$

垂直平板上の乱流自由対流境界層は、近年乱流モデルに基づく理論解析が行われており、藤井ら⁽¹¹⁾及び To ら⁽¹²⁾は理論解析と熱線流速計による測定^(13, 14)も含む実測結果とを比較している。LDV による実測結果^(4, 9)と理論解析は定性的には比較的良く一致している^(11, 12)。定量的に厳密な比較のためには、実測における種々の境界条件の十分な検討が必要であると思われる。

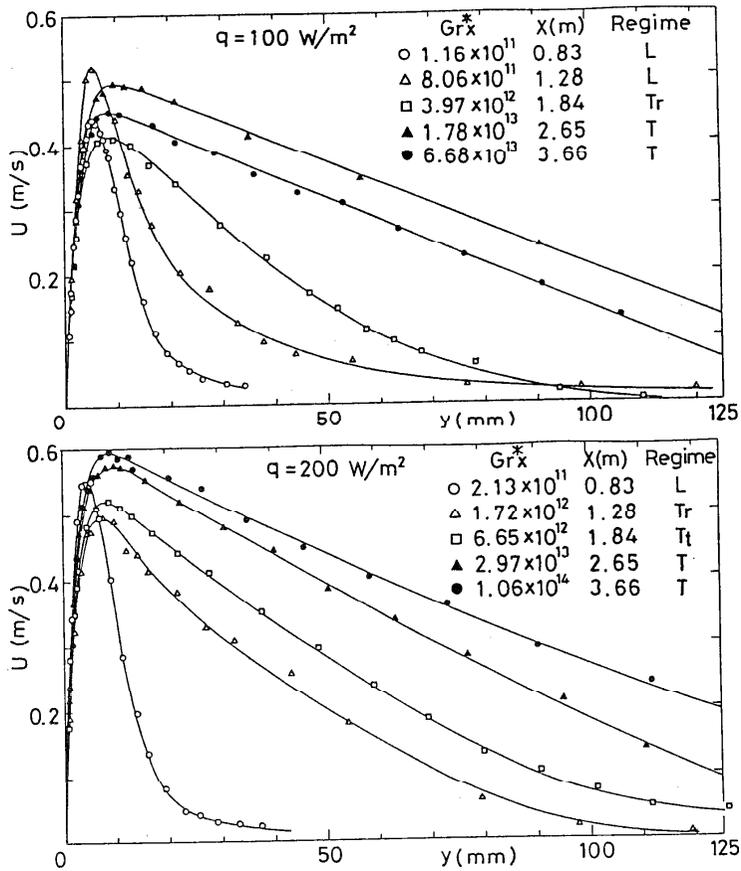


図6 鉛直方向平均速度の分布の変化

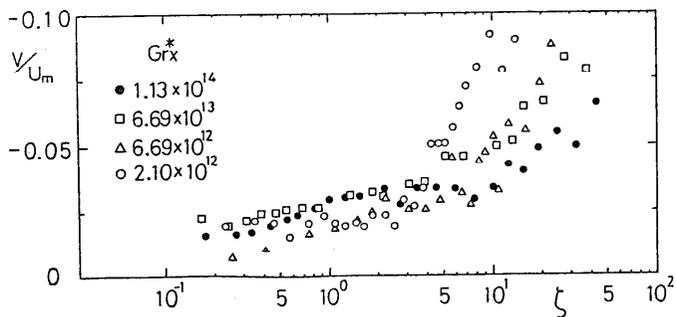


図7 水平方向平均速度の分布の変化

5. おわりに

垂直平板上の自由対流境界層は、浮力による流れ場の最も基本的なものとして重要である。ここでは、一様に発熱する垂直平板の場合について伝熱面温度分布および平均速度分布の特性の一端を紹介したが、遷移域や乱流域の特性にはいまだ説明されていない問題が多い。強制対流における基本的な流れ場程には乱流場に関する実験データは十分でない。今後の研究がさらに必要であろう。

6. 参考文献

- (1) 藤井哲：伝熱工学の進展 Vol.3 (昭和 49) 1、養賢堂
- (2) 橋野肇：山口大学工学研究科 修士論文 (昭和 57)
- (3) 宮本政英、岡山正義：日本機械学会論文集、48, 427 (昭和 57) 490
- (4) Miyamoto, M. et al. : 7th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 2, NC34 (1982) 323
- (5) 宮本政英ら：山口大学工学部研究報告、33, 1 (昭和 57) 1
- (6) 藤井哲、藤井丕夫：日本機械学会論文集、43, 374 (昭和 52) 3825
- (7) Sparrow, E.M. and Carlson, C.K. : Int. J. Heat Mass Transfer, 30, 3 (1987) 601
- (8) Kitamura, K. et al. : Int. J. Heat Mass Transfer, 28 (1985) 837
- (9) Cheesewright, R. and E. Ierokipiotis : 7th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 2, NC31 (1982) 323
- (10) Cheesewright, K. and E. Ierokipiotis : 1st U. K. Conference on Heat Transfer 2 (1984) 849
- (11) 藤井哲、藤井丕夫：伝熱学特論 (昭和 59) 62、養賢堂
- (12) To, W.M. and Humphrey, J.A.C. : Int. J. Heat Mass Transfer, 29, 4 (1986) 573
- (13) 菱田幹雄ら：日本機械学会論文集、47, 419 (昭和 56)
- (14) Smith, R.R. : Ph. D. Thesis, Univ. London (1973)

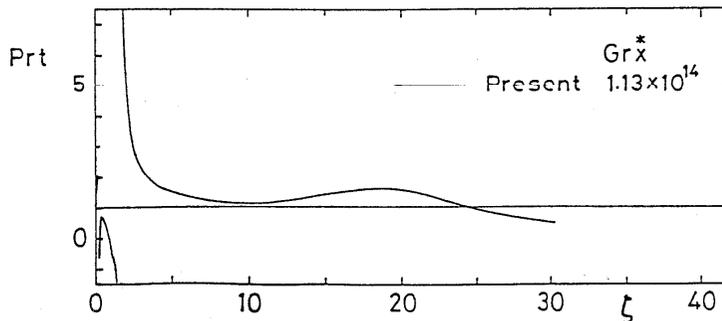


図8 乱流プラントル数の分布

1 はじめに

従来、ボイラ水管等の伝熱流路の熱設計では、流路の熱的条件が周方向に均一であるとする
ことが多かった。しかし、昨今のように、エネルギー機器の高効率化が進み、高精度な熱設計が
要求されるようになると、流路加熱条件の非均一性を考慮する必要が生じてくる。また、核融
合炉第一冷却壁やヘリオスタットを用いた太陽熱集熱器のように強いふく射性の熱源によって
加熱される流路では、その熱的条件は不可避免的に周方向に非均一となる。

著者等はこれまでに、さまざまな断面形状の流路が周方向に非均一に加熱されたときの伝熱
について数値的・実験的に検討を加えてきた^{1)~3)}。その結果、金属で作成されることの多い実
際の伝熱流路では、特に壁内の周方向熱伝導がその伝熱特性に強く影響することが明らかとなっ
た。このことから、周方向に非均一に加熱される流路の熱設計を高精度に行うためには、壁内
熱伝導の伝熱に対する影響を見積る方法が確立されている必要があると言える。本稿は、流路
壁非加熱領域を加熱領域に付加されたフィンと見なして、その伝熱に対する影響をフィン効率
を用いて推察、評価する方法について述べ、その結果を数値計算結果と比較したものである。

2 周方向に部分加熱を受ける円管の伝熱（壁表裏の温度差が無視できる場合）⁴⁾

2-1 熱伝達率に対する壁内熱伝導の影響 はじめに、最も一般的な場合として、断面が円
形である流路が周方向に部分加熱されたときの熱伝達に対する壁内熱伝導の影響を数値的に求
めてみた。図1は解析に使用したモデルを示したものである。流路は内半径 r_i 、壁厚さ δ で、
その壁面の外周の $\theta = \pi \pm \theta_h / 2$ の領域が熱流束一定の条件で加熱されている。他の部分は断
熱であるとした。また、流れは流体力学的に十分発達した流速分布をもって流路入口に流入す
るとする。さらに、ここでは簡単の為に、壁面表裏の温度差は十分小さく、壁内の熱の流れは
周方向に一次的であるとした。

図2は、このような流路の熱的発達過程の熱伝達率の計算結果の一例を示したものである。
流路の加熱角 θ_h が $\pi/4$ 、流れは乱流である場合を示した。図中の \bar{Nu} は流路壁全周平均のヌセ
ルト数を、 $Nu_{h\ app}$ は加熱領域の見掛けのヌセルト数（加熱領域に加えられた熱流束と加熱領域の平
均温度によって定まるヌセルト数）を、 $Nu_{h\ sub}$ は加熱領域の実質のヌセルト数（加熱領域内面
から流体へ伝達される熱流束と加熱領域の平均壁温から定まるヌセルト数）をそれぞれ示して

いる。この図に見られるように、加熱領域の見掛けの熱伝達率 Nu_{happ} は壁面の熱伝導パラメータ $k_w \delta / k R_1$ が大きくなると顕著に上昇することがわかる。これは、壁面熱伝導パラメータの増加とともに、加熱領域に加えられた熱負荷のうち壁内の周方向熱伝導によって非加熱領域へ運ばれてから流体へ伝達する割合が増加するからである。

2-2 加熱領域の熱伝達に対する壁内熱伝導のフィン効率による整理 上で述べた壁内熱伝導による加熱領域の見掛けの熱伝達率の向上は、加熱領域に非加熱領域というフィン（拡大伝熱面）を付加した効果として解釈することができる。そこで数値的に求めた温度分布から加熱領域の伝熱に対する非加熱領域の寄与を求め、これを相当フィン効率の形にあらわしてみた。結果を図3に示す。なお、ここで用いた非加熱領域の相当フィン効率 ϕ は次のように定義される。

$$\phi = \frac{\text{非加熱領域から流体へ伝達される熱量}}{\text{非加熱領域が加熱領域と同じ温度であるとしたときの伝達熱量}}$$

このフィン効率を用いれば、加熱領域の見掛けの熱伝達率 Nu_{happ} は、近似的に

$$Nu_{happ} \approx \left[\left(\frac{2\pi - \theta_h}{\theta_h} \right) \phi + 1 \right] \cdot Nu_{h sub}$$

としてあらわされ、これから加熱領域の壁面温度が容易に推定できるため便利である。

一方、円管の非加熱領域は、図4のような概念を用いれば、厚さ 2δ 、高さ $W=R_1(2\pi-\theta_h)/2$ の長方形フィンと見なすことができる。このフィンのフィン効率は次のように与えられる⁵⁾。

$$\phi = \tanh u / u, \quad u = \frac{W}{R_1} \sqrt{\frac{Nu_{1 sub}}{2} / \left(\frac{k_w \delta}{k R_1} \right)} \quad \dots\dots(1)$$

この長方形フィンのフィン効率を図3中に破線で示した。この結果からわかるように、部分加熱される円管の非加熱領域の相当フィン効率は、流路の加熱条件や壁面の条件によらず、概ね(1)式であらわされる。この結果は部分加熱を受ける伝熱流路の熱設計を行ううえで大変有効である。

3 周方向に部分加熱を受ける円管の伝熱（壁表裏の温度差が無視できない場合）⁶⁾

3-1 壁表裏の温度差の相当フィン効率に対する影響 2で述べたように、部分加熱される円管の非加熱領域の相当フィン効率は、相当する長方形フィンのそれで見積れることがわかった。しかし、この検討においては、壁の熱抵抗による壁表裏の温度差を無視しているため、核融合炉第一冷却壁やヘリオスタットを併用した太陽熱集熱器のように、熱負荷がきわめて大きく壁表裏に温度差が付き易い場合にもこの結果がそのまま使用できるか否かは疑問である。そこで、部分加熱を受ける円管壁内の周方向・半径方向二次元のエネルギー輸送を流体中のそれと

同時に解いて、壁表裏の温度差が壁内の周方向熱伝導にどのような影響を与えるかを調べてみた。

図5は、数値的に求めた壁面表裏に温度差のあるときの流路非加熱領域の相当フィン効率を図3と同様にプロットしたものである。相当フィン効率および u の値は、流路壁内面で定義される値を用いた。この図に示されるように、非加熱領域の相当フィン効率は、壁表裏の温度差を無視したときと異なり、壁面の熱伝導パラメータ $k_w \delta / k R_i$ が一定でも壁厚さ δ / R_i によって影響される。相当フィン効率が壁厚さとともに減少するのは、壁が厚くなると壁内の熱伝導が周方向・半径方向2次元となるため、壁の厚さすべてが相当フィンの厚さとして働かなくなるからである。しかし、壁表裏の温度差による相当フィン効率の変化は十分小さく、一般的な流路壁の条件では、壁表裏の温度差が無視できない場合にも部分加熱される円管の非加熱領域の相当フィン効率を長方形フィンのそれ(1式)で近似できることがわかった。

3-2 壁表裏の温度差に対する周方向熱伝導の影響 壁の熱抵抗による壁表裏の温度差は、流路外周の壁面温度によって求まる流路の実際の熱伝達率を低下させるため、熱的に厳しい高熱負荷を受ける流路の熱設計においては、その見積りが不可欠である。流路が周方向に均一に加熱される場合には、壁内の半径方向一次元の熱伝導を考えることによって容易に壁表裏の温度差を算定することができるが、周方向に部分加熱される流路では壁内に周方向・半径方向二次元の熱伝導が生じるため、その算定は難しくなる。そこで次にこれについて検討を加える。

今、壁表裏の温度差による流路の周平均熱伝達率の低下の割合を ε であらわすとすると、 ε は次のように定義される。

$$\varepsilon = \frac{\overline{Nu} - \overline{Nu}^*}{\overline{Nu}} = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{T_{wo} - T_b} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 \overline{Nu}^* は流路外周の壁面温度によって定まる周平均ヌセルト数である。壁中に半径方向一次元熱伝導に基づく温度分布を仮定し、 $T_{wo} - T_b \approx T_{wi} - T_b$ なる近似を用いると、均一加熱時の ε の値は次のようになる。

$$\varepsilon \approx \overline{Nu} \ln(R_o/R_i) / 2 \left(\frac{k_w}{k} \right) \quad \dots\dots(3)$$

図6は数値的に求めた ε を流路内面の真のヌセルト数 \overline{Nu} に対してプロットしたものである。図中には(3)で求まる ε の値を破線で示したが、この値と数値的に求めた ε とは、 ε のあまり大きくない領域では良く一致しており、部分加熱を受ける流路の周平均熱伝達率に対する壁表裏の温度差の影響を(3式)で見積もることが可能であることがわかる。なお、 ε が大きくなった領域での(3式)の誤差は、(3式)を導出する際に用いた $T_{wo} - T_b \approx T_{wi} - T_b$ の近似によるものである。

3-3 壁内熱伝導の分類図 ここまでに述べたように、壁が厚く、壁中に半径方向、周方向二次元的な熱伝導が生じている場合にも、周方向熱伝導の影響は(1)式で、壁表裏の温度差の影響は(3)式で評価できることがわかった。そこで、これらの結果を用いて、部分加熱を受ける流路の伝熱に対する壁内熱伝導の影響を分類・評価するマップを作成してみた。

図7は、(1)式と(3)式を用いて得られる熱伝導分類マップの一例である。流路の加熱角 $\theta_h = \pi/4$ 、壁と流体の熱伝導率の比 $k_w/k=0.478 \times 10^3$ の場合を示した。今、流路壁中の周方向熱伝導の影響の有無と壁表裏の温度差の影響の有無を判断する基準の ϕ と ϵ を決定すると、図7に示される流路の条件は2本の曲線によって4つの領域に分けられる(図7中の領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ)。それぞれの領域は次のような意味を持つ。

領域Ⅰ：半径方向、周方向とも熱伝導の影響を考慮する必要はない。

領域Ⅱ：壁表裏の温度差、周方向への熱伝導双方の影響を考慮する必要がある。

領域Ⅲ：周方向熱伝導は熱伝達に影響するが、壁表裏の温度差は無視できる。

領域Ⅳ：壁表裏の温度差は考慮する必要があるが、周方向熱伝導は無視できる。

このマップを用いれば、部分加熱される流路の伝熱に対する壁内熱伝導の影響を予め把握することができ、便利である。

4 非円形断面流路の伝熱に対する壁面熱伝導の影響

以上に述べてきたとおり、円形断面の流路が周方向に部分的に加熱された場合の壁内の周方向熱伝導の影響は、流路非加熱部を加熱部に付加されたフィンと見なし、そのフィン効率を用いて整理すれば良い結果を得られることがわかった。しかし、流路断面形状が円形でない場合、例えば矩形断面流路であるとか、三角形断面流路であるとかの場合には、この整理はそのままでは成立しない。なぜなら、(1)式であらわされるようなフィン効率の概念は、流路壁上局所の物理的な熱伝達率が一定でないと成立しないが、非円形な断面を有する流路では、例えば角部の伝熱が悪いなど、物理的熱伝達率が一定と考えることができないからである。

この問題を解決するためには、壁面上に熱伝達率の分布があることを前提とした相当フィン効率を考える必要がある。これに関して著者等は既に解析を終えており、その結果を本年の伝熱シンポジウムで講演する予定であるので、そちらを参照していただければ幸いである。

5 結 び

周方向に部分的に加熱される流路の伝熱に対する壁内の熱伝導の影響を、非加熱領域を加熱領域に付加されたフィンと見なし、そのフィン効率を用いて整理する方法について述べた。また、壁面が熱的に厚く、壁表裏の温度差が無視できない場合についても言及し、伝熱に対す

る周方向熱伝導と半径方向熱伝導（壁表裏の温度差）の影響を予測するためのマップを示した。

参考文献

- 1) 佐藤、黒崎：機論51-464B (1985) p.1342
- 2) 黒崎、佐藤：機論52-474B (1986) p.841
- 3) 佐藤、黒崎：機論52-476B (1986) p.1741
- 4) I.Satoh and Y.Kurosaki: Proc. 8th I.H.T.C. 6 (1986) p.2873
- 5) 伝熱工学資料(改訂第4版)、日本機械学会 (1986) p.203
- 6) 佐藤、黒崎：第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1986) p.13

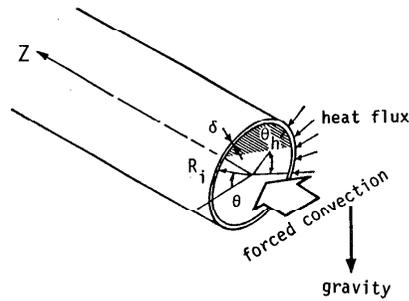


図1 モデル(部分加熱される円管)

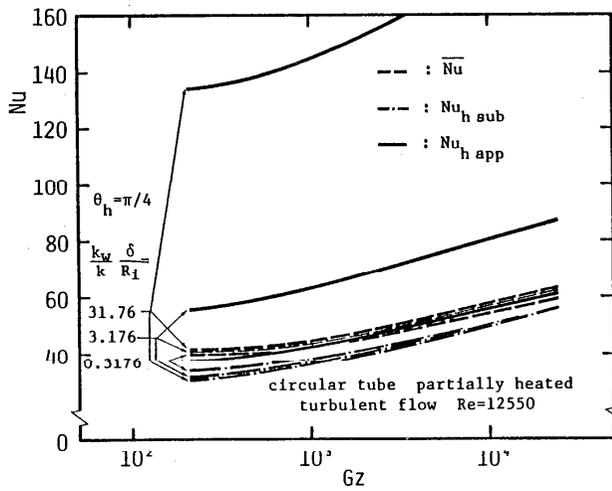


図2 熱伝達率に対する壁内熱伝導の影響

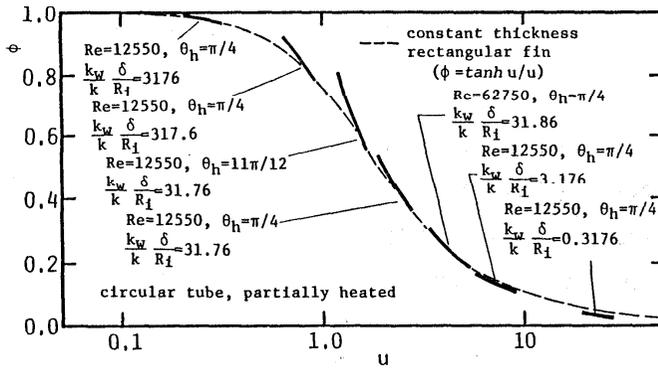


図3 部分加熱される円管の非加熱領域のフィン効率

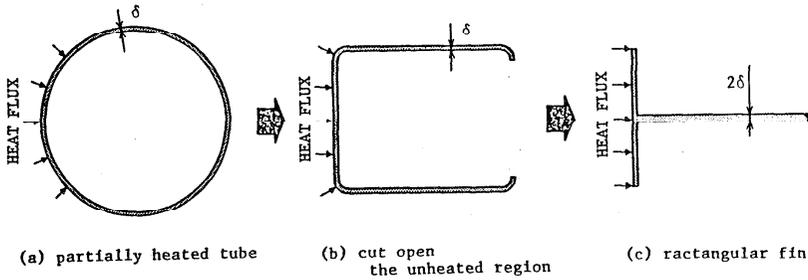


図4 相当フィンの概念

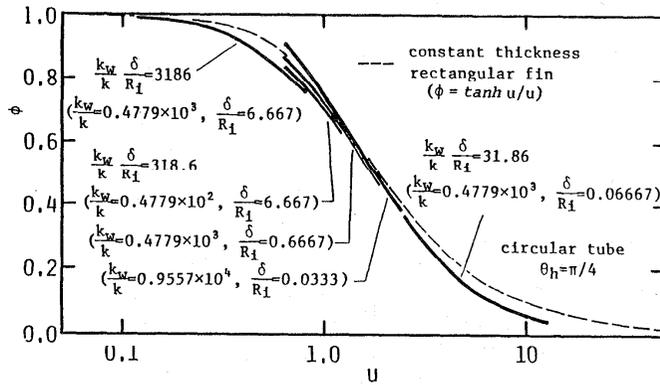


図5 非加熱領域のフィン効率(壁表裏の温度差がある場合)

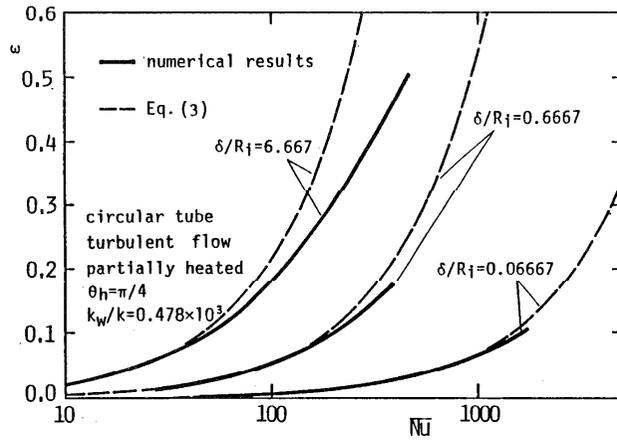


図6 周平均熱伝達率に対する壁表裏の温度差の影響

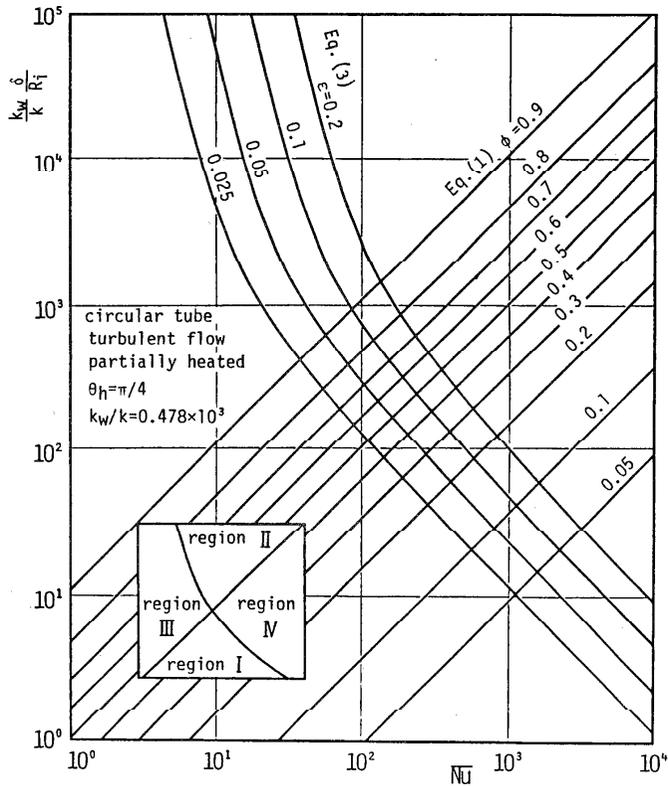


図7 壁内熱伝導の分類図

<解説>

プレートフィンチューブ熱交換器の研究

瀬下 裕 (三菱電機)

藤井 雅雄 (三菱電機)

1. はじめに

プレートフィンチューブ熱交換器 (Plate-Fin and Tube Heat Exchangers) は、コンパクト熱交換器の一形式として管内外の熱伝達率の差異が大きい場合、内外の面積比を任意に設定できることから、工業的に最も広範に使用されている熱交換器のひとつである。ところで、実際に熱交換器またはそれを含む系を計画・設計する場合、予条件である設置スペース・送風機特性などを合理的に満足させながら目的を達成する必要があることから、熱交換器の諸形態・通過風速などが熱伝達率や流動損失に与える影響を知ることが実用的には不可欠である。

本稿では、当該熱交換器の管外側 (air-side) の伝熱・流動損失性能を取扱う。この点に関する研究は、Webb⁽¹⁾ がレビューしているように、従来より比較的多くの例がある。しかし、次章で示すように、それらは、著者らの目的を十分に満足させるものではない。

山下⁽²⁾ が述べているように、従来の研究は「フィン間の流動の複雑さのために、そのほとんどが実機を用いてその性能を実験的に調べたものであり、技術資料として提供されてはいるが、流路内部の流動や熱伝達についての機構を詳細に調べ系統的に形状パラメータの影響を検討したものは少ない」というのは多分その通りである。ただし、次章で述べるが、提供されている「技術資料」は断片的なものも多く、研究者によって異なった結論が得られている場合もあるため、「機構を詳細に」調べるかどうかは別にして、多少の普遍化も含む広範で正確な「技術資料」も必要であろう。

本稿で紹介する著者らの研究は、「実機を用いてその性能を実験的に調べたもの」ではあるが、研究の過程では、可能なかぎり「系統的に形状パラメータの影響を検討」するようにし、その結果と従来の研究を参考にして、できるだけ「流動や熱伝達についての機構」を明確にするようにし、得られた内容が広範で正確なものとなるよう努めた。

前述のように本稿の内容は、当該熱交換器の管外側性能を対象としており、その中でも基本的な平滑フィンで構成されるものを取扱っている。また、本研究では、当該熱交換器の一層のコンパクト化によるフィン間隔の狭小化および機器の低騒音化要求に伴う管外側流速の低下に対応し、実験範囲を低レイノルズ数域中心としている。

本稿では、従来の研究について簡単なレビューを行うと共に、筆者らが行った当該熱交換器の性能の実験的検討に関し、単相の場合 (比較的高いレイノルズ数域も含む) と物質伝達を伴う場合の概要について紹介する。

2. 従来の研究

2. 1 単相伝熱

当該熱交換器に関しては、前述の理由から、従来よりいくつかの研究がなされている。Shepherd⁽³⁾は単列、管径3/8(inch)の38個のプレートフィンチューブ熱交換器について、フィンピッチ、フィン幅、管配列を変え実験を行っている。しかし、Shepherdの結果は、伝熱性能をフィンの温度降下を含めて $h \cdot \eta$ (η =フィン効率)の形で示しているため、一般性を欠き、基礎的な資料とはなりえない。Kaysら⁽⁴⁾は2種類のプレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動損失の実験データのみを示している。Rich⁽⁵⁾は4列、管径1/2(inch)の8個のプレートフィンチューブ熱交換器についてフィンピッチを4.42~20.6枚/inchの間で変えて実験を行って、代表長さを空気の流れ方向の管と管の距離(longitudinal tube pitch S_2)にとって無次元数を定義し、結果を整理している。しかし、そこで得られた結果は、単にひとつの管径、管配列の熱交換器の実験に基づいたものであり、更に、Rich自身が述べているように、 S_2 を代表長さに用いることの物理的意味が不明確で、得られた整理式の偏差も大きく、かつ、熱伝達率や流動損失性能がフィンピッチに拠らないという結果は、現象から見て奇異に感じられる。また、Rich⁽⁶⁾はフィンピッチ14枚/inch、管径1/2(inch)の6種類のプレートフィンチューブ熱交換器について、列数を1~6列の間で変えて、伝熱性能の実験を行っている。その結果、 Re が増加するにつれ、列数による性能の差異は無視できるほど小さいが、低 Re 域では列数の影響が大きく、少数列程、伝熱性能が高いことを示している。その原因についてRichは、後者の現象はunusual trendsで明確な説明はできないが、前者については、上流列で生ずるturbulenceの影響としている。McQuiston⁽⁷⁾はこの結果を用いて、単列の伝熱性能に対する複数列(千鳥配列)のその比を、列数とレイノルズ数の関数で表した。しかし、これらは、特定のフィンピッチ、管径、管配列の場合の列数変化に関する単なる実験式に過ぎず、物理的イメージも曖昧で僅かな外挿も不可能であろう。また、McQuiston⁽⁸⁾は、管径3/8(inch)、4列、1 inchの正三角形千鳥配列のプレートフィンチューブ熱交換器に関して、フィンピッチを4~14枚/inchの範囲で変えて実験を行い、その伝熱性能を管径に基づく Re 数と、管群の伝熱面積と拡大伝熱部を含む全伝熱面積との比の関数として示している。しかし、これらも、特定の熱交換器形態におけるフィンピッチ変化に関する単なる実験式に過ぎない。山崎ら⁽⁹⁾は、2列の場合について、管の配列密度を高めた場合、熱伝達率と流動損失が増大することを実験的に示し、それが流れの乱れの促進と管の後流wake領域の縮小に起因すると推定している。新津と内藤⁽¹⁰⁾は当該熱交換器に関して詳細な実験的検討を行っているが、その結果は多くの点で筆者らの経験則と異なっている。例えば、管列数が変わっても熱伝達率に相違が認められない、フィンピッチによる熱伝達率の相違は無視できる等である。これらは多分に実験範囲の Re 数域が大きいことに起因すると考えられるが明瞭でない。福井と坂本⁽¹¹⁾は、フィン付き管群内の流れの観察とナフタリン昇華法により検討を行い、伝熱管近傍に $Re \geq 450$ で渦列が発生し、その部分の局所熱伝達率が増大

することを示している。高橋ら⁽¹²⁾は、単列の場合について通電加熱でフィンの局所熱伝達率を測定し、現象が主流に加速のある層流境界層として説明できるとしている。Sparrowら^(13, 14, 15)はナフタリン昇華法により列数の異なる(1~3列)3種類の当該熱交換器の局所物質伝達率を示し、伝熱の機構に関し有効な情報を与えた。すなわち、低Re域で単列では助走区間の存在が高い熱伝達率を与えること、2列め、3列目では、管近傍の局所流速が上流管のblockageにより速くなり、そこに渦が発生し、それが、伝熱性能に強い影響を与えること等を示した。Naka-yamaら⁽¹⁶⁾は、この結果などを用いて、フィンをいくつかの領域に分け、フィンの伝熱モデルを作成している。また、山下ら⁽²⁾は、プレートフィンチューブ熱交換器の基本的構成モデルを、フィンとしての平行平板の間にチューブとしての角柱を垂直に設置した流路と考え、定常状態の層流(Re=200)における流動に関して、数値計算による解析を行っている。角柱のモデルの当否はともかくとしても、管群としての取扱いがされておらず、管の相互作用について触れていないこと、また、上流側境界で、流れは十分に発達した層流と考えていることなど、今のところはやや現実と遊離している。

以上述べてきたように、従来研究の多くは、単なる実験式の作成に終始したものが多く、そうではないものも、1つの構造パラメーターと熱交換器性能の単相関を取扱ったものであり、主な影響因子を網羅し、それらが性能に及ぼす影響を各々関連づけ、統一的に現象を説明し、実用に供し得る整理式を提示していない。

2. 2 物質伝達を伴う場合

ここでいう物質伝達とは、当該熱交換器が空冷熱交換器として専ら用いられることから、湿り空気中の凝縮を指している。

このような低推進力下の物質移動現象は、拡散に基づく界面での速度の法線成分が、微少であるため、温度場と速度場の独立性が保たれ、熱伝達とのアナロジーから物質伝達率の予測が可能であるとされており、事実、工業的にはそのように取扱われている場合が多い。また、熱交換器としての研究例では、アナロジー則の特殊例であるLewisの関係を前提としたものが、窪田ら⁽¹⁷⁾、瀬山ら⁽¹⁸⁾、Senshuら⁽¹⁹⁾のように、少なくない。内田ら⁽²¹⁾、McQuiston⁽²²⁾は、熱伝達と物質伝達のアナロジーの成立を実験的に示し、Kadambi⁽²³⁾も平行平板であるが、解析と実験の双方で同様の結果を得ている。しかし、植村ら⁽²⁴⁾、坂本ら⁽²⁵⁾、新津ら⁽²⁶⁾、また、管群の場合であるが、藤井ら⁽²⁷⁾は、熱伝達と物質伝達のアナロジーは、成立しないことを実験的に示している。加えて、物質伝達を伴う場合の熱伝達率と単相の熱伝達率との関係に関しても、明確な結論は得られていない。

3. 単相伝熱

本章では、比較的低レイノルズ数域を中心としたプレートフィンチューブ熱交換器の単相伝熱と流動損失性能を実験的に調べた結果について紹介する。

3. 1 実験方法及び供試熱交換器

本研究は実際の熱交換器に近いモデルを用いて、温水実験法により、その伝熱・流動損失性能を測定している。実験方法の詳細については、文献 [28]，[29] を参照願いたい。表 1 に形態パラメーターを系統的に変えた、35 種類の供試熱交換器の諸元を示す (Sparrow らの実験サンプルも併記)。各部の名称および記号を図 1 にしめす。表 1 のサンプルの管配列はすべて千鳥配列で、管は銅、フィン厚さは 0.12 mm のアルミニウムで製作され、機械的拡管により管と接合されている。またサンプルの管周囲に、フィンの剛性向上のために、図 1 に示す同心円状の成型 (以下リングパターンと言う) が施されている (一部平滑フィンのサンプルも含む)。それが性能に与える影響については後述する。

表 1 供試熱交換器諸元

No.	Nr	do	S1	S2	L2	Fp	No.	Nr	do	S1	S2	L2	Fp
1				320	←		17						2.3
2			254	220	←	1.5	18						2.1
3				200	←		19		7.94				1.8
4				180	←		20						1.5
5		9.52				2.2	21	2	204	17.7	354		1.2
6	1					1.8	22						2.1
7						1.5	23		6.35				1.8
8			204	17.7	←	1.2	24						1.6
9		7.94				1.5	25		25.4	22.0	66.0		1.5
10		6.35				1.6	26	3	9.52				2.2
11						1.2	27		204	17.7	53.1		1.5
12			254	220	440	1.5	28		7.94				1.5
13						1.8	29	4	9.52	25.4	22.0	68.0	1.5
14	2	9.52				1.5	30		7.94	204	17.7	70.8	1.5
15			204	17.7	354	1.2	31						1.0
16						1.0	32	5	9.52	25.4	22.0	110.0	2.2

Plain

33						1.5
34	2	9.52	254	220	440	4.0
35						6.0

Plain (Saboya et al. [13])

36	1				18.5	**
37	2	8.53	21.5	18.5	37.0	1.65
38	3				55.5	**

* dc
** Fp - Ft

(Unit: mm)

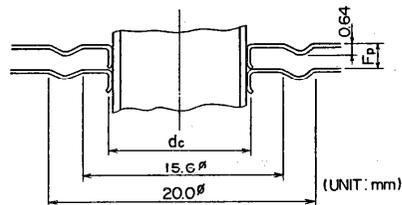
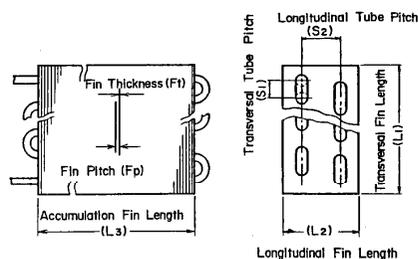


図 1 供試熱交換器

3. 2 平均熱伝達率など

本研究では、その伝熱性能を伝熱面の平均熱伝達率のかたちで記述する。周知のように、上述のような実験方法により平均熱伝達率を得る時には、介在する種々の熱抵抗を分離する必要が生じる。従来、この種のバルク実験の研究例では上記の諸熱抵抗の検討が十分に行われていない。また、Shepherd⁽³⁾、山崎ら⁽⁹⁾のように、諸熱抵抗を分離せず、総括伝熱係数の形で示しているものも多い。このようなことが、従来のバルク実験の研究結果の多くが、一般性を欠き、基礎的資料とはなりえないという低い評価しか得られず、明確な現象説明ができなかった主因とおもわれる。

著者らは、まず平均温度差について、このタイプの熱交換器を片側混合、他方非混合の直流の複合流れ形式としてモデル化し、解析的検討と実験による評価を行い、LMTDのcorrection factor あるいは温度効率と移動単位数の関係式を熱容量流量比、移動単位数、流れ形式の関数として求めた⁽³⁰⁾。

フィンと管の接触熱抵抗は、別の実験によりもとめ、等価熱伝達率として与えた。筆者らの得た値は、沢井ら⁽³¹⁾の結果とほぼ一致しており、本実験範囲での接触部の相当熱伝達率（拡管量 0.5mm程度）は、14000 w/m²K 程度であった。

フィン効率については、解析的に検討した。この種バルク実験においては、フィンの温度降下をフィン効率として表現せざるを得ない。その正確な評価は、重要な点であるのに、従来の研究例では、十分な検討が行われていない（Jones⁽³²⁾は環状フィンで問題が生ずる場合があることを指摘している）。

著者らは、後に示すフィン面上の局所熱伝達率分布を用い、この問題を熱伝達率分布のある二次元平板の熱伝導問題として厳密に取扱って解析を行い、一般のフィン効率計算式が、少なくとも本実験範囲では妥当であることを検証している⁽³³⁾。

後に示す流動損失性能も含め、本研究の供試熱交換器群の実験結果の整理においては、フィンと管群を分離せず、フィンが支配的であると考えて性能の整理を行った（単純なフィンと管群の伝熱面積比が約 20:1とフィンが圧倒的に大きいため）。

3.3 実験結果と考察

(1) 列数が伝熱性能に及ぼす影響

列数をパラメーターとした時の伝熱性能の実験結果の一例を、Re-Nu の関係として図2に示す。変化パラメーター以外の形態パラメーターは全て同一である（無次元数の定義は後述する）。このように列数により伝熱性能が変化するという現象は、以下の二つの原因の複合によると考えられる。まず、図2の低Re数或で小数列の場合Nuが大きい理由は、後に示すように、フィン前縁に存在する高熱伝達率の助走区間の相対的な大きさが小数列程大きいことに起因する。

一方、列数が多い程Reに対するNuの勾配が大きい理由は、後述するvortex systemsによると考えられる。

このように、列数はプレートフィンチューブ熱交換器の性能支配因子としては最も特徴的なパラメーターである。以下の実験結果の検討では、このパラメーターを中心に考察を進める。

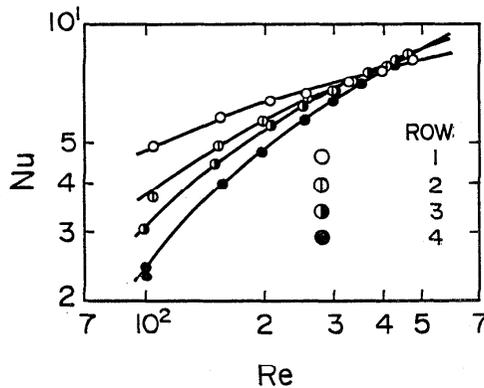


図2 列数が伝熱性能に及ぼす影響

(2) 単列および2列の場合

この場合の伝熱・流動損失性能は、図示しないが、フィンピッチや流路長さ(フィンの流れ方向長さ)を変えた場合の実験結果から明らかに助走区間支配の様相を示し、また、管配列や管径の影響は少なかった。図3は、Sparrowらがナフタリン昇華法により示した局所物質伝達率を著者が $(Sc/Pr)^{0.4}$ として^(3,4)等熱伝達率分布図として再整理したもので、図中の数値は、フィンの流れ方向断面の混合平均温度とフィン温度の差で定義された局所熱伝達率であり、斜線の領域はその局所値が平均値よりも大きい部分を示している。この図から、フィンの前縁部分の助走区間の熱伝達率が非常に大きく、この領域の伝熱がフィン全体の熱伝達特性に及ぼす効果の大きいことがわかり、本研究の実験結果の傾向をうらづけるものとなっている。

これらのことから、少なくとも単列・2列の場合の特性の整理にあたっては、助走区間の考慮が不可欠である。また、このような場合にはKaysらのように、最少すきまの平均流速 V_{max} で現象を説明することは必ずしも適切でない。そのため、著者らは、自由通過体積(free flow volume)とそれに基づく仮想的な自由通過断面積(free flow area) Ac を基準とした代表流速 V_{ac} と水力直径 De_c を用いて無次元数の定義を行った。 Ac は、熱交換器の全容積から管群の容積を引去り、フィン幅で除したもので、仮想的な自由通過断面積を示す。この Ac から定義された V_{ac} は、 V_{max} に較べ、フィン前縁の伝熱に関係が深いと見られる近寄り速度に近い値となり、管群の影響を相対的に小さく考えた代表流速となる。この場合の諸無次元数の定義を式(1)~式(3)に示す。諸物性値は全てサンプルの出入口空気温度の算術平均値で評価している。

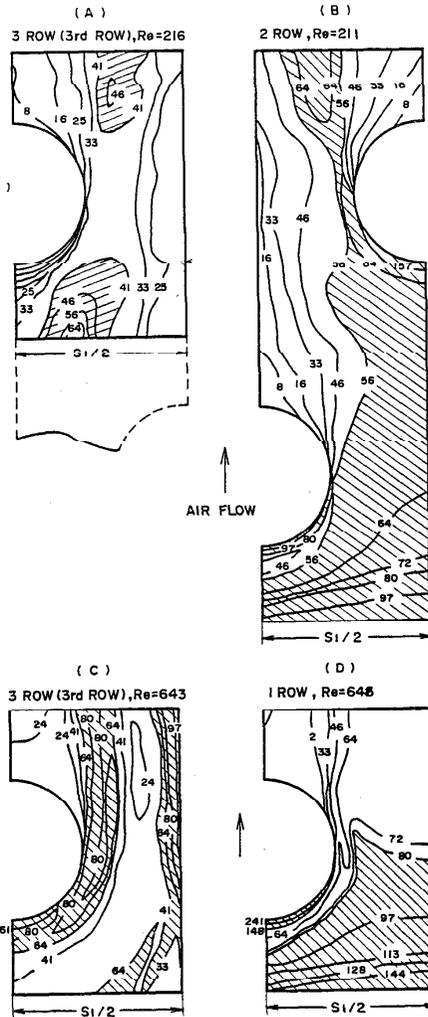


図3 局所熱伝達率分布(W/m^2K)

$$Nu = h \cdot D_{ec} / \lambda_a \dots\dots\dots (1)$$

$$Re = V_{ac} \cdot D_{ec} / \nu_a \dots\dots\dots (2)$$

$$f = \frac{D_{ec} \cdot \Delta P}{2L_2 \cdot \rho_a \cdot V_{ac}^2} \dots\dots\dots (3)$$

また、前述の助走区間を考慮するという観点から、単列と2列の実験結果に関して、熱伝達については (Re·Pr·Dec/L₂) Nu, 流動損失係数(f) に関しては (Re·Dec/L₂) (f L₂/Dec) の関係でまとめた (L₂はフィンの流れ方向長さを示す)。

単列と2列の場合の伝熱・流動損失特性を図4に示す。同図から、双方の伝熱・流動損失の実験結果は各々よく1本の線上にまとまっており適切な代表流速と水力直径で無次元数を定義し、かつ、助走区間を考慮すれば、本実験範囲の単列と2列の熱交換器の性能を統一的に表現できることがわかる。

図4の結果から当該熱交換器の平均熱伝達率と流動損失係数に関し、式(4)、式(5)の無次元整理式が偏差10%程度で得られている。

図4には、有限幅の等温平行平板群に対して実験的に求められた丸本らによる平均熱伝達率の整理式および Shah による流動損失性能の整理式も対比して示した。単列の場合の伝熱特性は、ほぼ平行平板群のそれに近い。同じく、流動損失係数は、平行平板群の方が多少小さく、管群の形状抵抗の影響を示している。単列と2列の比較では、後者の方が Nu, (f L₂/Dec) 共大きな値を示し、かつ横軸の変形Reの増大に伴い、列数によるそれらの差異は拡大している。

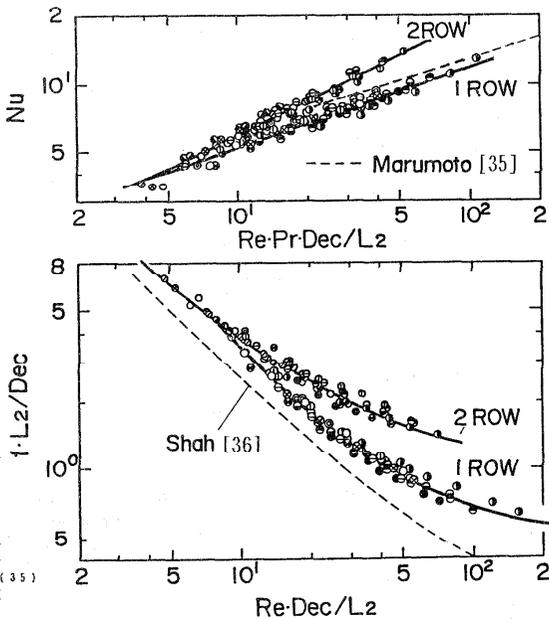


図4 単列と2列の特性

び Shah による流動損失性能の整理式も対比して示した。単列の場合の伝熱特性は、ほぼ平行平板群のそれに近い。同じく、流動損失係数は、平行平板群の方が多少小さく、管群の形状抵抗の影響を示している。単列と2列の比較では、後者の方が Nu, (f L₂/Dec) 共大きな値を示し、かつ横軸の変形Reの増大に伴い、列数によるそれらの差異は拡大している。

$$Nu = 2.1(Re \cdot Pr \cdot Dec/L_2)^{C_1} \dots\dots\dots (4)$$

$$f \cdot L_2 / Dec = C_2 + C_3(Re \cdot Dec/L_2)^{C_4} \dots\dots\dots (5)$$

Row	1	2
C ₁	0.38	0.47
C ₂	0.43	0.83
C ₃	35.1	24.7
C ₄	-1.07	-0.89

このような列数が性能に及ぼす鮮明な影響は、Sparrow らが指摘したように (図3参照)、Reが大きい程後流列でvortex systemsが活性化されるためであろう。また、変形Reの減少に伴い列数による性能の差異が縮小し平行平板群のそれと一致する傾向にあるのは、管外流れの構造が、方向としてポテンシャル流れに近づき、vortex systemsの影響力が低下するためと考えられる。

この様相を見るために、アルミニウム粉末を用いて水流モデルで流れを可視化した。図5はその結果の一例で、管群を含むフィン間の流れを模擬するために、円柱をアクリル板ではさみ、側壁（アクリル板）を介して撮影したもので、2列の場合である。図5からは、Sparrow らの言う渦領域は明確でない。しかし、レイノルズ数の増大に伴い後流 wake が拡大し、それに伴い流れは管間でより加速されているように見える。この加速されている部分、写真でwakeの周囲に、 $Re=600, 1000$ で特徴的に見られる縞状の部分が、前述の渦領域に対応すると思われる。

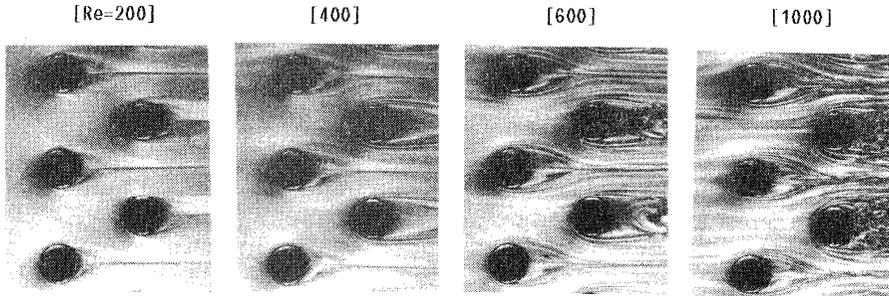


図5 流れの可視化

(3) 3列以上の場合

図3で示したように、後流列の管の前縁及び後流wake周囲にはvortex systemsによる高熱伝達率の領域が存在する。著者らの試行によれば、3列以上の場合は、前節⁽²⁹⁾に示した助走区間を考慮した整理方法は有効でなく、熱交換器の性能が渦領域支配に移行していると考えられる。また、この場合の実験結果から、管径、管配列ピッチなどのいわゆる管群の存在密度に關与するパラメーターの性能に対する影響が強いことが確認された。このことが示唆するように、vortex systemsの存在領域と発生機構を考慮すれば、直感的には、その現象支配流速として管間すきまの流速が適切と考えられ、Kaysらの無次元数の定義が整合性を持つことが予想される。

図6は、このような観点からKaysらの無次元数の定義に従い、3~5列の実験結果を整理したものである。図中の破線は、サンプルの形態が本実験のものに近い場合のKaysらの実験結果($Re>400$)である。同図から、伝熱・流動損

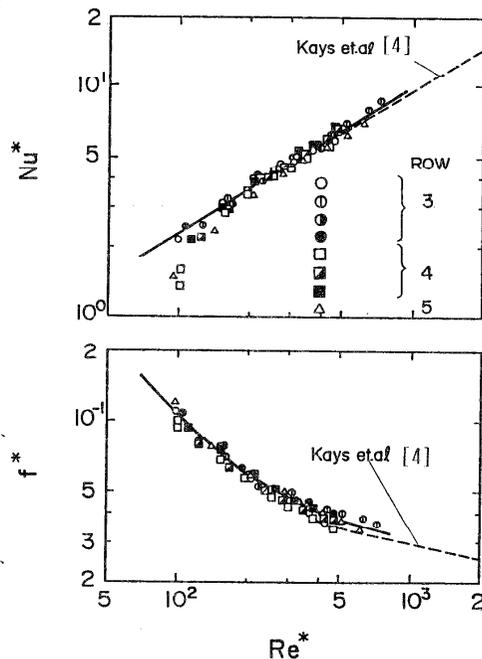


図6 3列以上の特性

失共、各実験結果は比較的良くまとまっており、さらにKaysらの結果とも実験範囲のRe数が重畳する領域では一致している。しかし、同図の $Re^* - Nu^*$ の結果において、低Re域($Re < 200$)では列数の大きいサンプルの伝熱性能の低下がみられ、低Re域ではvortex systemsの影響力が小さいことを示唆している(*印はKaysらの定義による無次元数を示す)。

3. 4 現象のモデル化と統一整理

以上の検討から、プレートフィンチューブ熱交換器の性能に関し、小さいRe領域を除き、図7に示す3領域で支配されるモデルを想定した。すなわち、1列目は境界層が徐々に発達する助走区間の伝熱・流動特性が支配的な領域(I)、3列目以降はvortex systemsが性能を支配し、フィン及び管群内流れが飽和発達していると考えられる領域(III)である。そして、2列目は、それらの中間的な領域(II)である。

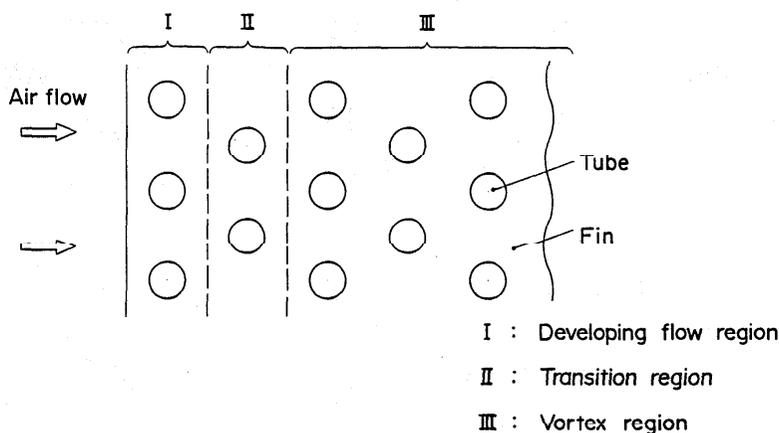


図7 支配領域のモデル化

(1) 領域(I)

ここで言う助走区間領域とはvortex systemsの影響が性能に対して支配的でなく、少なくとも助走区間を含み、それが支配的な領域を指す。単列の場合の特性は、3.3節で平行平板群の特性との対比で示したように、助走区間を含む層流として取扱えると考えられる。また、複数列($Nr \geq 2$)であっても低Re数域ではこの領域となることが予想される。

図8は3.3節の図4と同様な方法で、単列および複数列の伝熱・流動損失性能を整理したものである。図中には、実線で示す式(4)、式(5)と平滑フィンの実験結果(2列)とSparrowらの実験結果(平滑フィン、1~3列)も示した。各無次元数に付した数字は各領域に対応している。ただし、複数列は $Re < 155$ (リングパターン)、 $Re < 400$ (平滑)の場合で、その範囲内では複数列の実験結果も明確に単列の整理式(式(4)、式(5))と一致している。しかし、それ以上のRe数域ではこのような整理は複数列では不可能で、vortex systemsの影響を受け始めることが示唆される。また、このことから、リングパターンはvortex systemsの出現を早める作用があると考えられる。

(2) 領域(II)

単列の場合の伝熱特性は、複数列の1列目のそれとおおむね一致することが、Rich、Sparrow らの結果から確認できることから、2列の熱交換器の1列目の性能は式(4)、式(5)で示されると考えて良い。従って、領域(II)の性能は2列の実験結果から式(4)、式(5)の同一条件における計算結果を差引くことにより得られる。領域(II)では、1列目から継続して発達しつつある助走区間の影響が、図4で示したように、まだ支配的であると考えられることから、その性能を領域(I)と同様の定義に従って整理した結果、偏差10%程度で式(6)、式(7)が得られた。両式の右辺のレイノルズ数の指数が、領域(I)の場合(式(4)、式(5))に較べ大きく示されている。

$$Nu_2 = 1.13(Re \cdot Pr \cdot Dec / S_2)^{0.56} \dots\dots\dots (6)$$

$$f \cdot S_2 / Dec = 10.7(Re \cdot Dec / S_2)^{-0.54} \dots\dots\dots (7)$$

(3) 領域(III)

3列目以降の後流列では、流れはほとんど飽和発達していると考えられることから、3・4・5列目ともその性能は同一と考え、3・4・5列の各サンプルの実験結果から前出の上流列の計算結果を差引き等分して各列ごとの性能を求めた。

この領域では、3、3節において述べたように、vortex systemsが現象を支配していると考えられ、Kaysらの定義による無次元数を用いて性能を整理するのが妥当である。領域(III)の伝熱・流動損失性能は、式(8)、式(9)で整理できる。

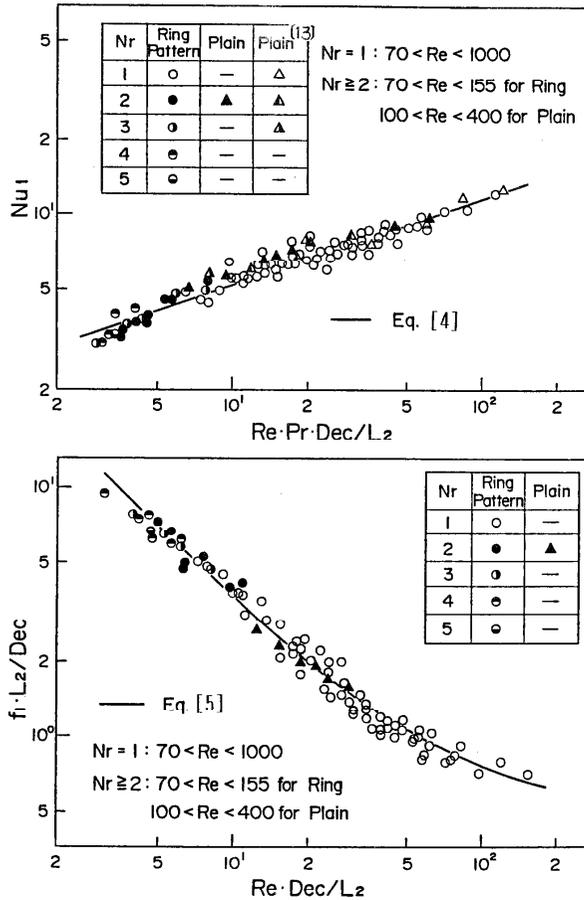


図8 領域(I)の熱伝達率と流動損失特性

$$Nu^* = 0.048 Re^{*0.8} Pr^{*0.4} \dots\dots\dots(8)$$

$$f^* = 0.152 Re^{*-0.25} \dots\dots\dots(9)$$

上式において、 Nu^* に対する Re^* の指数0.8 は通常の乱流熱伝達のそれと一致しており、領域(Ⅲ)では管群の存在により、このような低いレイノルズ数域でも、乱流状態となっていることが示唆される。つまり、管群は有効な turbulence promoter として機能している。

(4) 統一整理

各領域の性能の整理式が前項までに得られた。これらによる計算結果と、2列以上のサンプルの実験結果を比較したものを図9に示す。平均熱伝達率は±10%の範囲で、流動損失係数は、±20%の範囲で各々整理できる。

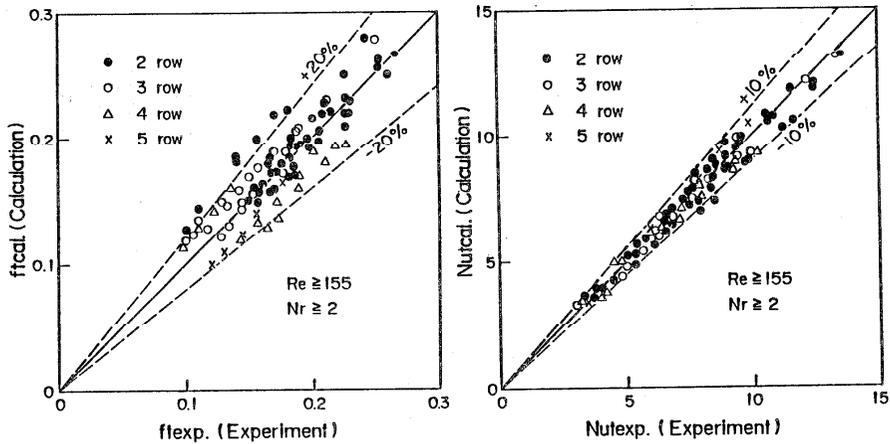


図9 熱伝達と流動損失特性に関する計算値と実験値の比較

単列の場合および、 $Re \leq 155$ (リングパターン), $Re \leq 400$ (平滑) での複数列のアレートフィンチューブ熱交換器の性能は、前項で示したように、式(4)、式(5)で与えられる。(但し単列の係数)

これらのことから、当該熱交換器において、前述の各領域の守備範囲をレイノルズ数と列数の関係で示すと図10が得られる。すなわち、平滑フィンに関して、 $Re \leq 400$ では単列・複数列によらず、領域

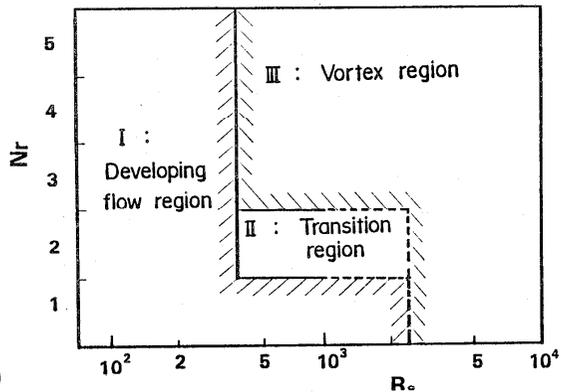


図10 Re と列数(Nr)で示す支配現象と領域

(I)として取扱える。ただし、1列目においても(I)の領域として扱えるのは、管内流などとの対比から $Re < 2000$ 程度と予想される。同様に、2列目においても $Re > 2000$ では領域(II)から領域(III)への移行が考えられる。また、図1に示すリングパターンのような突起がフィン面上に存在すると、vortex systemsの発生が早められ、 $Re \geq 155$ で、2列目は領域(II)へ、3列目以降は領域(III)へ移行する。

3. 4. 多数列で比較的高いレイノルズ数域の場合

著者らは、多数列で比較的高いレイノルズ数域($500 < Re < 8000$)の当該熱交換器の性能に関しても検討を行っているので、低レイノルズ数域・少数列の場合との現象の連続性などについて簡単に紹介する。表2に、11種類の供試熱交換器の諸元を示す。

後に示す流動損失性能も含め、この場合の供試熱交換器群の実験結果の整理においては、フィンと管群を分離している。それは、表2の供試熱交換器群におけるフィンと管群の伝熱面積比は、最も接近しているもので、約5:1と差が小さく、実験範囲の Re 域も高いため、フィンと管群の性能を分離せずに実験式を作成しても、物理的意味が不明確で、前章の結果との現象の連続性について議論できないと考えたからである。ここでは、フィンのみの伝熱性能を、実験結果から管群の寄与を差引くことで得た。本研究では、管群のみの性能を測定していないので、それに関し、Zukauskas⁽³⁹⁾の整理式を用いた。

表2 熱交換器諸元

No.	Nr	do'	S1	S2	Fp	Ft	
1	10	16.7	45.0	38.1	10.0	0.25	
2		13.4	35.0	30.0		0.20	
3		10.0	25.4	22.0	7.0	0.11	
4		8.34				0.11	
5		6.67	33.9	29.3		9.7	0.15
6			25.4	22.0			
7					19.0	16.5	
8		25.4	22.0	7.0	0.15		
9						19.0	
10		8	25.4	22.0	7.0	0.15	
11		6	25.4	22.0	7.0	0.15	

UNIT (mm)

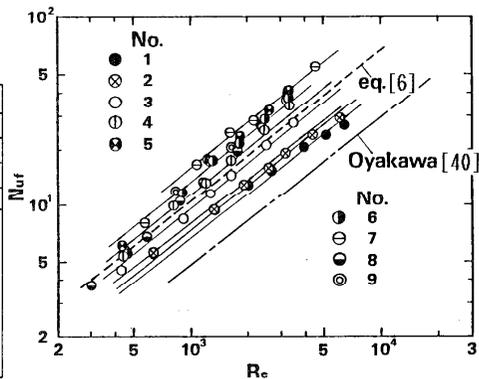


図11 フィンの伝熱性能

フィンの伝熱性能を図11に示す。図中の破線は、3.3節で示した領域(III)の伝熱性能の整理式($Re \leq 770$)を延長したものである。また、図中の一点鎖線は、親川ら⁽⁴⁰⁾による発達した平行平板間の乱流熱伝達率の整理式を低 Re 域にも外挿して示したものである。ただし、諸無次元数の定義は領域(III)と同様である(Nuf は、フィンの平均熱伝達率を hf として算出)。

図11によれば、実験結果の Nuf は、いずれも $Nuf = C \cdot Re^{0.8}$ のように相関され、領域(III)の伝熱性能の整理式の傾きと一致する。また、図11から平行フィン間中の管群の存在は、フィンにとって実質上の伝熱促進体として作用していることが明らかである。

次に、フィンの伝熱性能に関して、整理式を得るために、各形態ハフメータの性能に及ぼす影響について検討した。その結果、図12に示すように、 Nuf は管径のみに対して相関があり、

他の形態パラメータ（管配列密度，フィン間隔）と Nu_f の相関は見られなかった。このような高いレイノルズ数域における Nu_f の管径依存については、本研究の範囲ではそのメカニズムの明確な特定はできておらず、管群の伝熱促進効果に関して詳細な検討が必要である。（ d^* は、基準管径比（ $=d_0/d_{0s}$ ）で、管径 d_0 が 1.0 mm（ $=d_{0s}$ ）のものに対する比である）。

図中の実線は、前章で示した領域（Ⅲ）の伝熱性能の整理式（式(8)）を、基準管径比 $d^*=1$ として延長したもので、それは本実験結果と明白に一致し、高 Re 域における Nu_f の管径依存に関し解決すべき点は残るものの、

本実験範囲の多列の熱交換器の伝熱のメカニズムが、低 Re 域の渦領域（Ⅲ）と同一のものであることを明確に示している。

また、列数を変えた実験から、フィンの全領域を領域（Ⅲ）として取り扱えるのは 8 列以上で、少数列では助走区間の影響が表出することも明らかにしている。⁽³⁸⁾

流動損失特性に関しては、その大部分を管群の損失で説明することができ、別の検討が必要である。⁽³⁸⁾

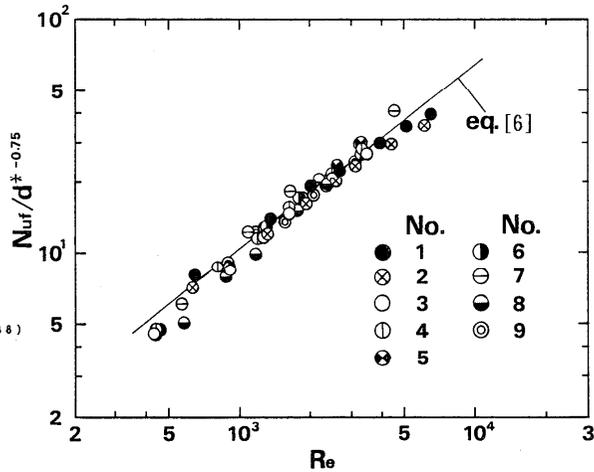


図12 フィンの伝熱性能の整理

4. 物質伝達を伴う場合

湿り空気を冷却すると、冷却面温度が露点以下であれば、その表面で熱伝達と物質伝達が同時に起こる。本章では、プレートフィンチューブ熱交換器が空気調和用途などに用いられる場合の比較的低推進力下の熱・物質同時移動現象を、湿り空気中の凝縮に関して検討した結果について紹介する。⁽⁴¹⁾

2.1 節でも述べたように、このような低推進力下の物質移動現象は、拡散に基づく界面での速度の法線成分が、微少であるため、温度場と速度場の独立性が保たれ、熱伝達とのアナロジーから物質伝達率の予測が可能であるとされており、事実、工業的にはそのように取扱われている場合が多い。加えて、物質伝達を伴う場合の熱伝達率についても明確な結論は得られていない。

4.1 実験方法など

実験は、単列の熱交換器を対象としている。実験方法、熱・物質伝達関係式、その解析モデルなどに関しては、文献 [41] を参照願うことにし、ここでは省略する。供試熱交換器は、ア

ンモニアの0.5%水溶液中で煮沸し、アルミ表面の処理を行っている。予備実験の結果、凝縮形態は膜状で、フィン表面は一様水膜に覆われているように見えた。ただし、図13に示すように、管下部に流下凝縮水の滞留が見られた。

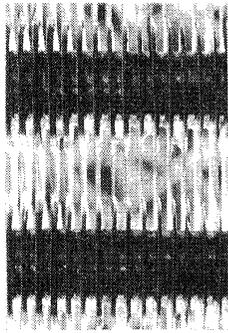


図13 凝縮様相

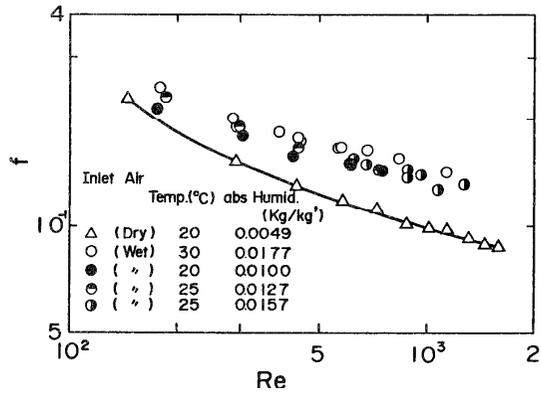


図14 物質伝達を伴う場合の流動損失

4. 2 実験結果

(1) 凝縮を伴う場合の流動損失

物質伝達を伴う場合の流動損失は、単相伝熱に比べ、図14に示すように増大する。このことは、図13に示したフィン間の管下部の滞留凝縮水とフィン表面の流下水膜の存在に起因すると考えられる。後述する伝熱性能の変化もふくめ、そのことを検討するために、凝縮水の存在様相を図15に示すようにモデル化した。フィン表面の流下水膜厚さ δf はBrauerの式により計算した。管の等価的な水膜厚さ δp は、流動損失増加を与えるみかけの管径変化として(流下水膜厚さも考慮)、3.3節、式(5)を用いて計算した。図16に結果を示す。 δp は約0.5~1.5mmで観察結果と対比して妥当な値である。図16の横軸Wは、物質流束である(ただし、 δp がWのみで整理できることを主張するものではない)。

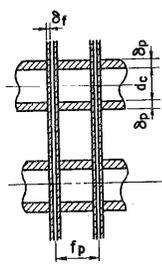


図15 滞留凝縮水のモデル化

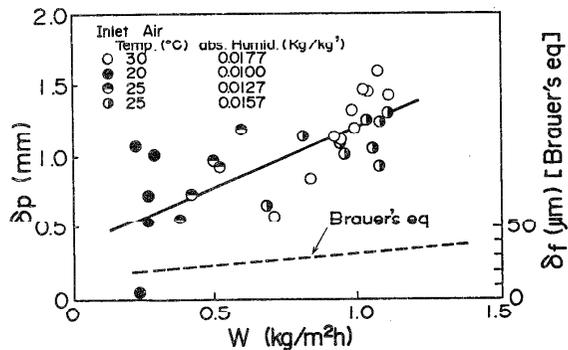


図16 水膜厚さの計算結果

(2) 凝縮を伴う場合の伝熱性能

凝縮を伴う場合の伝熱性能を单相の場合と比較した結果を図17に示す。同図から、この場合の伝熱性能は单相流のそれに比べ20%程度大きいことが明らかである。筆者らは、前述の流動損失の検討から、この現象が凝縮水の存在による熱交換器の見掛けの形態変化に起因すると推定した。それを確かめるために、前項で得た各実験点における δp 、 δf を用いて、それらによる熱交換器の見掛けの形態変化として実験結果の再整理を行った。結果を図18に示す(*印を付した無次元数は形態変化の考慮を示す)。同図から、凝縮を伴う場合の伝熱性能は单相流のそれと明確に一致している。

つまり、凝縮を伴う場合の伝熱性能は、凝縮水の存在による熱交換器の見掛けの形態変化を考慮することによって、单相流の場合と同様に取扱える。

(3) 物質伝達率

物質伝達率の実験結果を図18と同様に整理すると図19を得る。図中の実線は、図18の結果を再掲したもので、破線の物質伝達性能と比較すると、データのバラツキを考慮しても、 Sh^* は Nu^* よりも多少小さく、厳密には両者のアナログは成立していない。

図20は、そのことをより明確に

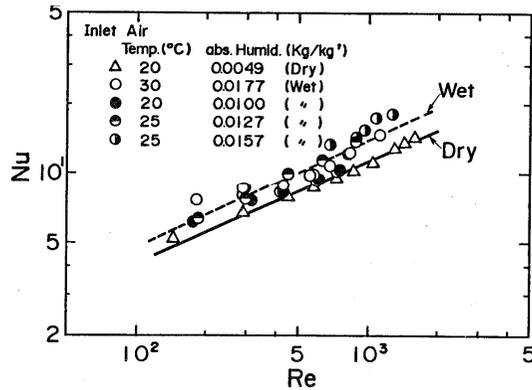


図17 伝熱性能の対比

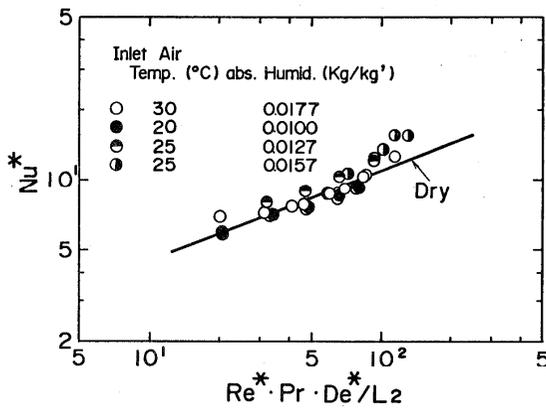


図18 凝縮水の存在を考慮した伝熱性能

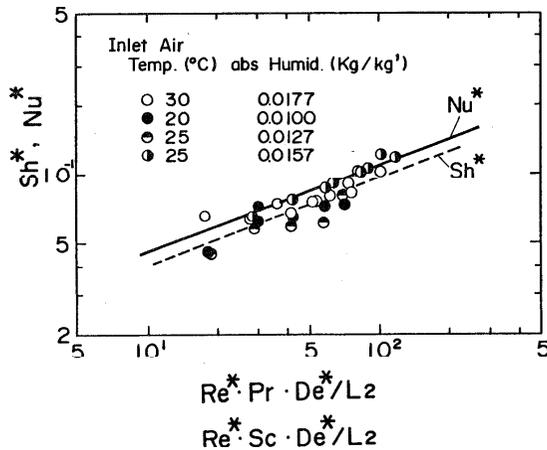


図19 物質伝達と熱伝達の対比

示すために、熱伝達率(h)，物質伝達率(h_D)の関係を示したものである。破線は実験結果を代表するもので、一点鎖線はアナロジー則から得られる関係 $Sh^*/Nu^*=(Sc/Pr)^{0.4}$ より導出される $h/h_D=0.26$ ($W \cdot h/kg \cdot K$)を示す。両者には明確な相違があり、本実験で得られた h/h_D の値は約 0.29 ($W \cdot h/kg \cdot K$)で、Lewis の関係 ($h/h_D=Cp$)に近いものとなっている。

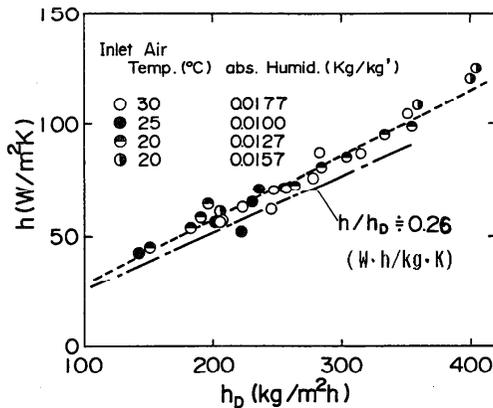


図20 物質伝達率と熱伝達率の関係

5. あとがき

プレートフィンチューブ熱交換器の管外側性能に関して、筆者らが行った研究の一部を紹介させていただいた。この種の熱交換器は相当に古くから存在しているのに、明確な現象把握や有効な特性整理式が存在しないことは、筆者らも当初は予想していなかった。

本文では、plain なフィンの場合について説明し、近年盛んな伝熱促進については、別に多くの報告があるので触れなかった。ただし、本稿の内容は、これら伝熱促進法をプレートフィンチューブ熱交換器に適用する場合に有益な情報を与えるものと考えている。

本研究の遂行にあたっては、多くの方の御助力に負うところが大きかった。ここに記して謝意を表す。

7. 文献

1. Webb, R. L., Heat Transf. Eng., 1-3, 33(1980)
2. 山下、ほか2名、機論、51-472(1985)
3. Shepherd, D. G., ASHRAE Trans., 62-505(1956)
4. Kays, W. M. and London, A. L., Compact Heat Exchangers, McGRAW-HILL, (1964)
5. Rich, D. G., ASHRAE Trans., 79, Part2, 137(1973)
6. Rich, D. G., ASHRAE Trans., 81, Part1, 307(1975)
7. McQuiston, F., ASHRAE Trans., 84, Part1, 290(1975)
8. McQuiston, F., ASHRAE Trans., 84, Part1, 266(1975)
9. 山崎、ほか3名、冷凍、56-648, 9(1981)
10. 新津、内藤、空気調和・衛生工学、39-4, 8(1965)
11. 福井、坂本、機誌、70-583, 49(1962)
12. 高橋、ほか2名、第18回伝熱シンポジウム講演、85(1981)
13. Saboya, F. E. M. and Sparrow, E. M., Trans., ASME, Ser. C, 96, 265(1974)

14. Saboya, F. E. M. and Sparrow, E. M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19, 41(1976)
15. Saboya, F. E. M. and Sparrow, E. M., *Trans., ASME, Ser. C*, 98, 520(1976)
16. Nakayama, W., Xu, L. P., *ASME-JASME Thermal Engineering Joint Conference Proceedings*, vol. 1 (1983)
17. 窪田、岡垣、*空気調和・衛生工学*、44-12, 1(1965)
18. 瀬山、ほか4名、*SANYO TECHNICAL REVIEW*, 15-1, 75(1983)
19. Senshu, T., ほか2名、*ASHRAE Trans.*, 87, Part1(1981)
20. Rich, D. G., *ASHRAE Trans.*, 81, Part1, 307(1975)
21. 内田、手塚、*衛生工業協会誌*、34-7, 32(1960)
22. McQuiston, F., *ASHRAE Trans.*, 84, Part1, 294(1978)
23. Kadambi, V., G. E. *TECHNICAL INFORMATION SERIES*, 80CRD102(1980)
24. 植村、ほか3名、*冷凍*、41-467, 8(1966)
25. 坂本、ほか2名、*冷凍*、42-481, 3(1967)
26. 新津、内藤、*空気調和・衛生工学*、42-6, 615(1967)
27. 藤井、ほか2名、*機論(B編)*、51-472(1985)
28. 瀬下、藤井、*機論(B編)*、53-486, 581(1987)
29. 瀬下、藤井、*機論(B編)*、53-486, 587(1987)
30. 瀬下、第19回空調冷凍連合講演会講演、45(1985)
31. 沢井、ほか2名、*冷凍*、44-502, 15(1969)
32. Jones, T. V., Russell, C. M. B. *ASME paper*, 80-ITT-121(1980)
33. 瀬下、第19回空調冷凍連合講演会講演、41(1985)
34. Rosman, E. C., ほか2名、*Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 106, 627(1984)
35. 丸本、ほか2名、第20回空調冷凍連合講演会講演、89(1986)
36. Shah, R. K. and London, A. L., *Laminar Flow Forced Convection in Ducts Advances in Heat Transfer*, Academic press(1972)
37. 藤井、瀬下、*機論(B編)*、53-490(1987)掲載予定
38. 瀬下、第21回空調冷凍連合講演会講演、57(1987)
39. Zukauskas, A., *Advances in Heat Transfer*, Academic press(1972)
40. 親川、馬淵、*機論(B編)*、47-414(1981)
41. 瀬下、ほか3名、第24回伝熱シンポジウム講演、531(1987)

近年、各種エネルギー機器、熱機関の高温化による高効率化および小型高負荷化、半導体製造に代表される加熱、拡散プロセスの高精度化、あるいは宇宙機器のように他の放熱手段が無い分野の発展等に伴い、放射伝熱を正確にかつ簡便に解析する手段にたいする要求が高まっている。本報ではこのような実用的な目的に資するために、筆者等がこれまで進めてきたモンテカルロ法による放射伝熱の解析手法について、その概略と開発の現状について述べる。モンテカルロ法の特長は、取り扱える次元、物性値変化、形状等の制限が無く、対流伝熱等の他の伝熱と結合した共存伝熱の解析が容易なことにあり、また筆者等の経験では、本報程度の基礎知識があれば、プログラミングも差分法による流れ解析のプログラム作りに比べれば、はるかに容易である。本報で取り扱うのは、灰色壁に囲まれた灰色ガス中の多次元放射対流共存伝熱問題である。本報ではまず、これをモンテカルロ法で解くために必要な最小限の放射伝熱に関する定義等について簡潔書き的に述べた後、放射対流共存伝熱解析の基礎式とモンテカルロ法による定式化および解析結果の実例について述べる。

1. 放射伝熱の基礎

1.1 固体の熱放射特性に関する定義と法則⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

放射エネルギー流束 E

物体表面から単位時間、単位面積当たり放出される熱放射エネルギー。

黒体（表面に到達する熱放射を完全に吸収する物体）からの放射の場合

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1)$$

σ : ステファン・ボルツマン定数 ($5.6687 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$)

放射率 ϵ

黒体でない一般の物体からの放射エネルギー流束を E としたとき、下式で定義。

$$E = \epsilon \sigma T^4 = \epsilon E_b \quad (2)$$

黒体は $\epsilon = 1$ 、一般に $E_b \geq E$, $0 \leq \epsilon \leq 1$

単位波長幅についても同様の式が下記のように成立し、

$$E_\lambda = \epsilon_\lambda E_{b,\lambda} \quad (2')$$

各変数 E_λ , ϵ_λ , $E_{b,\lambda}$ (それぞれ単色放射エネルギー流束、単色放射率、黒体の単色放射エネルギー流束と呼ぶ。) を波長について 0 から ∞ まで積

分すると(2)式の各変数になる。このうち、 ϵ_λ は物質および表面状態により異なる物性値であり、 $E_{b\lambda}$ はプランクの公式⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾によって温度の関数として与えられる。

灰色体

下記の特徴を有する固体壁。

- ・ ϵ_λ が波長にかかわらず一定
- ・ 表面が乱射性(後述の放射エネルギー強度が方向によらず一定)
- ・ 表面が乱反射性(反射後の放射エネルギー強度が方向によらず一定)

吸収率 α

$$\alpha = [\text{吸収エネルギー(反射、透過以外のエネルギー)}] / [\text{入射エネルギー}]$$

灰色体では $\alpha = \epsilon$ が成立。 (3)

放射エネルギー強度 i

放射エネルギーの進行方向に垂直な単位面積から単位時間当たり、単位立体角内に射出されるエネルギー。

ランバートの余弦法則

面積 dA の平面から天頂角 η の方向の立体角 $d\Omega$ の内部に射出される放射エネルギー。

$$d^2Q = i dA \cos \eta d\Omega \quad (4)$$

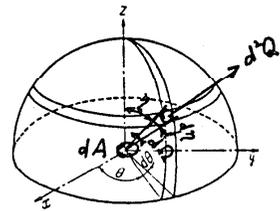


図1 灰色壁からの放射エネルギーの射出角度

放射エネルギー流束 E と放射エネルギー強度 i の関係

上記余弦法則より、面積 dA から上の半球内に単位時間当たり射出される全放射エネルギーは、面積 dA の位置における放射エネルギー流束を E とすると、

$$E dA = \int_{\Omega} d^2Q = \int_{\Omega} i \cos \eta dA d\Omega = dA \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\pi/2} i \cos \eta \sin \eta d\eta \quad (5)$$

乱射面では、 i が一定なので積分の外に出て、

$$E = \pi i \quad (6)$$

となる。(ここで灰色体の場合 $E = \epsilon \sigma T^4$)

黒体の場合、

$$E_b = \pi i_b (= \sigma T^4) \quad (7)$$

1.2 気体の熱放射特性に関する定義と法則⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

熱放射体

水素、酸素、乾燥空気などはほとんど熱放射を出さず、また熱放射にたいして透明とみなせるが、主として燃焼ガス中に含まれる二酸化炭素や水蒸気は、

特定の波長域のみで熱放射の吸収と射出を行なう（選択放射）。

灰色ガス

本来は、吸収のある波長域の放射エネルギーと無い波長域の放射エネルギーに分割し、別々に解析する必要があるが、これはめんどうであるので、通常は固体と同じく吸収および射出特性が波長によって変化しない（灰色ガスの仮定）とし、下記の吸収係数として、取り扱っている波長域での等価の値を用いることにより、解析を行なう。

吸収係数 K

$$i \, d\Omega \, dF = i_0 \, d\Omega \, dF \, e^{-KS}$$

左の面から射出される放射エネルギー強度 右の面から入射する放射エネルギーが
放射エネルギー強度 左の面から出ていく時の放射エネルギー強度

$$i = i_0 e^{-KS} \quad : \quad \text{ビアの法則} \quad (\text{吸収係数の定義式}) \quad (8)$$

$$d i = i K d S \quad (8')$$

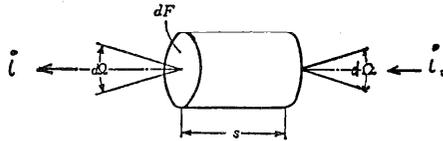


図2 厚さ s のガスによる放射エネルギーの吸収

指向放射率 $\epsilon_g(S)$

厚さ S の気体塊から射出される放射エネルギー強度を、この気体塊の表面が同じ温度の黒体と仮定したときに射出される放射エネルギー強度で割ったもの。

$$\epsilon_g(S) = i(S) / i_b = \pi i(S) / E_b \quad (= \sigma T^4) \quad (9)$$

(7)式

この値は S、圧力、温度の関数としてグラフの形⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾で与えられている。

指向吸収率 $\alpha_g(S)$

厚さ S の気体塊内部で吸収された放射エネルギー強度 ($i_0 - i$) を、この気体塊に入射する同一方向の放射エネルギー強度 i_0 で割ったもの。(8')式を厚さ S の間で積分することにより下式のように求まる。

$$\alpha_g(S) = 1 - e^{-KS} \quad (10)$$

灰色ガス (K が波長によって変化しない) の場合、

$$\epsilon_g(S) = \alpha_g(S) = 1 - e^{-KS} \quad (11)$$

となり、指向放射率 $\epsilon_g(S)$ より吸収係数 K を求めることができる。

等温気体塊の放射エネルギー流束 E

微小体積 $dV = dF \, dS$ から微小

立体角 $d\Omega$ 内に放出されるエネルギーは、

$$j dF dS d\Omega = j dV d\Omega \quad (12)$$

ここで

j : 単位体積の気体塊から単位時間当たり単位立体角内に射出される放射エネルギー
 [ただし、自分の内部での吸収(自己吸収)は考えない]

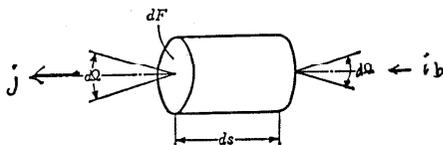


図3 ガスの微小体積への放射エネルギーの入、出射

また

$$j = K i_b \quad \text{: キルヒホッフの法則} \quad (13)$$

空洞中のガスの微小体積を考えると、これへの入射(空洞中であるからその放射エネルギー強度は黒体の値、 i_b に等しい)のうち、この中で吸収される量と、これから射出される放射エネルギーは等しい。

ここで微小体積 $dV = dF dS$ から微小立体角 $d\Omega$ 内に放出されるエネルギーは(12)より、 $j dF dS d\Omega$

入口断面積 dF のこの微小体積に立体角 $d\Omega$ の角度で入射する放射エネルギー流束 $i_b dF d\Omega$ が、長さ dS のこの微小体積内で吸収される量は、 $i_b dF d\Omega K dS$ ((8)より)

この2つが等しいことから、キルヒホッフの法則が成立する。

したがって、上述の微小体積 $dV = dF dS$ から微小立体角 $d\Omega$ 内に放出されるエネルギーは

$$\begin{aligned} j dV d\Omega &= K i_b dV d\Omega \\ &= K (E_b / \pi) dV d\Omega \quad \leftarrow (7) \text{式より} \\ &= K (\sigma T^4 / \pi) dV d\Omega \end{aligned}$$

よって、微小体積 dV のガス塊から全方向(立体角 = 4π)に射出されるエネルギー(この気体塊の放射エネルギー流束)は

$$\begin{aligned} E &= 4\pi K (\sigma T^4 / \pi) dV = 4K\sigma T^4 dV \\ \boxed{E} &= \boxed{4K\sigma T^4 dV} \quad (14) \end{aligned}$$

1.3 固体面間の放射伝熱の基礎方程式とその解法⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾

形状係数 F_{12}

面 A_1 から射出される放射エネルギーが面 A_2 に到達する割合。

面 A_1 から面 A_2 に正味伝達される放射熱量は、

$$Q = \sigma T_1^4 A_1 F_{12} - \sigma T_2^4 A_2 F_{21} \quad (15)$$

$T_1 = T_2$ で $Q = 0$ であるから、

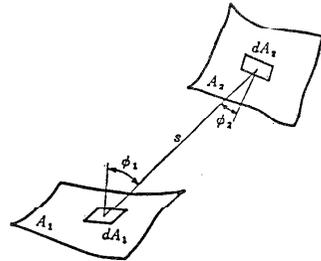
$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad (16)$$


図4 固体面間放射伝熱

射度 G

単位面積当たり表面から射出されているエネルギー量

$$G_i = \epsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \alpha_i) J_i \quad (17)$$

自分の熱放射 外来照射の反射

ここで J_i : 面 i の単位面積当たりに受ける照射量

α_i : 面 i の吸収率 ($= \epsilon_i$) (3) 式より)

面 i から出て行く正味の伝熱量 Q_i は、

$$Q_i = \sum_{k=1}^n (G_i - G_k) A_i F_{ik} \quad (18)$$

また、 $Q_i = (G_i - J_i) A_i$

と (17) 式とから

$$Q_i = (\sigma T_i^4 - G_i) A_i \epsilon_i / (1 - \epsilon_i) \quad (19)$$

以上の (18)、(19) 式は、 $i = 1 \sim n$ として、 $2n$ 個の式になる。境界条件として各面における T or Q (n 個) を与えるので、上記の式を各面の T or Q (n 個) + G (n 個) = $2n$ 個の未知数について解けば、固体面の間の放射伝熱を解くことができる。

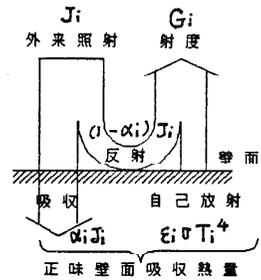


図5 壁面への放射エネルギーの出入り

1.4 放射対流共存伝熱における基礎方程式⁽³⁾

エネルギー方程式 微少要素に入出力あるいはそこで発生するエネルギーの平衡式。

$$\underbrace{\rho C_p \frac{DT}{D\tau}}_{\text{対流輸送}} = \underbrace{\frac{Dp}{D\tau}}_{\text{圧力仕事}} + \underbrace{\nabla \cdot (k \nabla T - \vec{q}_r)}_{\text{熱伝導}} + \underbrace{q''' + \Phi}_{\text{放射 化学発熱 粘性発熱}} \quad (20)$$

ここで $\vec{q}_r = 4 \int_{\omega=4\pi} \vec{i} \cos \theta d\omega$: 放射熱流束ベクトル (21)
(ある断面を通過する全放射エネルギー)

放射熱流束ベクトルの発散式 ($\nabla \cdot \vec{q}_r$): (方向性無し、位置のみの関数)

$$\nabla \cdot \vec{q}_r = 4 \int_0^\infty \underbrace{[a_\lambda(\lambda) e_{\lambda b}(\lambda)]}_{\text{単位体積からの放射}} - \pi \underbrace{\{a_\lambda(\lambda) + \sigma_{s,\lambda}(\lambda)\}}_{\substack{= K_\lambda(\lambda) \\ \text{入射エネルギーの吸収と散乱による減衰}}} \bar{i}_\lambda(\lambda) \quad (21)$$

自己放射
入射エネルギーの吸収と散乱による減衰
($\propto T^4$)
($\propto \bar{i}_\lambda(x_\lambda)$)

$$+ \underbrace{\frac{\sigma_{s,\lambda}(\lambda)}{4} \int_0^{4\pi} \int_0^{4\pi} \bar{i}(\lambda, \omega_1) \cdot \underbrace{\Phi(\lambda, \omega, \omega_1)}_{\text{位相関数}} d\omega_1 d\omega}_{\text{散乱による射出}} d\lambda \quad (22)$$

(ω_1 : 入射方向、 ω : 散乱方向)

$$\bar{i}_\lambda(\lambda) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} i_\lambda(\lambda) d\omega$$

輸送式 各位置 x_λ での各方向 ω の放射エネルギー強度 ($\vec{i}_\lambda(x_\lambda, \omega)$) の式
(Equation of Transfer) (位置、方向、波長の関数)

(積分型)

$$\vec{i}_\lambda(x_\lambda, \omega) = \underbrace{\vec{i}_\lambda(0) \exp(-x_\lambda)}_{\text{境界からの入射の到達分}} + \underbrace{\int_0^{x_\lambda} \vec{I}_\lambda(x^*, \omega) \exp\{-(x_\lambda - x^*)\} dx^*}_{\text{各ガス要素のソース項 I の到達分}} \quad (23)$$

(微分型)

$$\frac{d \vec{i}_\lambda}{d x_\lambda} + \vec{i}_\lambda(x_\lambda) = \vec{I}_\lambda(x_\lambda, \omega) \quad (24)$$

(光学長: $x_\lambda(s) = \int_0^s K_\lambda(s^*) ds^* = \int_0^s (a_\lambda + \sigma_{s,\lambda}) ds^*$)

ソース関数の定義式 各位置 x_λ での各方向 ω の単位厚さ当たりの放射エネルギー強度増加 [=ソース関数・位置、方向、波長の関数] の式

$$\vec{I}(x_\lambda, \omega) = \underbrace{(1 - \Omega_0) \vec{i}_{\lambda b}(x_\lambda)}_{\text{その位置での自己放射}} + \underbrace{\frac{\Omega_0 \lambda}{4\pi} \int_0^{4\pi} \vec{i}_\lambda(x_\lambda, \omega_1) \Phi(\lambda, \omega, \omega_1) d\omega_1}_{\text{散乱による } \omega \text{ 方向へのエネルギーの方向変換分}} \quad (25)$$

($\propto T^4$: 方向性無し) ($\Phi(\lambda, \omega, \omega_1)$: 位相関数)

従来の放射伝熱解析は、主として上記基礎方程式の微積分方程式をそのまま用いて解くことを試みてきた。これらの解法で用いる独立変数としては、系内各点において、その点から周囲に放射される自己放射を決める温度 T 、この自己放射とその点における周囲への散乱を加えたソース関数 \vec{I} 、このソース関数にしたがって各点から射出された放射エネルギーが、系内各点で各方向に通過する際の通過エネルギー量としてあらわされる放

射エネルギー強度 \vec{i} 、およびこれを各点の周囲で(21)式のように積分した、任意断面を通過する全熱放射エネルギーとしての放射熱流束 \vec{q}_r の4つがある。これらのうち、ソース関数と放射エネルギー強度は(23)(25)式を介して相互に関連しあっており、また、これら2つの変数から(22)式で求められる放射熱流束は、エネルギー式(20)を介して対流および伝導伝熱と結び付けられている。したがって一般的に放射対流伝導共存伝熱を解こうとすると、ソース関数の式(25)、放射エネルギー強度の式(放射輸送式)(23)、これらから放射熱流束の発散(ガス単位体積の正味の放射エネルギーの射出をあらわす。)を求める式(22)、およびこの放射熱流束の発散と放射以外の熱輸送の微小体積内での平衡式であるエネルギー式(20)の4式を連立させて解かねばならない。独立変数が4個で式が4個であるから、理論的には解けるわけであるが、放射伝熱は電磁波による遠隔的な伝播であることにより、系内各点のソース関数 \vec{I} と放射エネルギー強度 \vec{i} およびこれらから求められる放射熱流束の発散 $\nabla \cdot \vec{q}_r$ が、系内の他のすべての点の値の影響の積分で表わされること、および、前2者が単にその位置のみならず方向の関数でもあるため、その解析は非常に困難になる。したがって、これらの式を解析的あるいは数値的に解く場合、変数の方向性による困難を避けるため、散乱を等方性と仮定したり、また次元数を1次元に制限したりすることがよくおこなわれてきた。また、物性値が一様、あるいは他の伝熱形態との連成を断つため、伝熱が放射のみでおこなわれるとする仮定もよく用いられてきた。

1.5 モンテカルロ法による放射伝熱の考え方

放射対流伝導共存伝熱解析における放射項の解析には、上述のエネルギー式(20)の中に入って来る、放射熱流束ベクトルの発散 $\nabla \cdot \vec{q}_r$ の、各位置での値がわかれば良い。これは(22)式より、その位置での微小体積からの自己放射によるエネルギー流出項((22)式右辺第1項)と、その微小体積中での放射エネルギーの吸収によるエネルギー受領項((22)式右辺第2項の中括弧内第1項)(両者合わせてその位置における放射による熱収支)より求めることができる。ここで、(22)式右辺第2項の中括弧内の第2項の散乱減衰と第3項の散乱による射出項は量的に等しいので、キャンセルできる。上述の自己放射量と吸収量はともに位置のみの関数で方向性の無いスカラー量であり、前者は各位置での温度の4乗に比例するかたちで容易に求まる。したがって、後者を簡単に求めることが放射伝熱解析の簡単化につながる。従来法では後者を求めるとき、すべての位置でのこの値を同時に求めようとするため、上述のように系内のすべての位置で、方向性を有するソース関数と放射エネルギー強度を定義し、これに伴って(23)(25)式を導入し、これらを解く必要が出てくる。

しかし本来、放射によるエネルギー輸送は、気体分子あるいは固体壁分子から射出された多数の独立な光子の散乱と吸収挙動の集積によって行なわれており、上述のソース関

数および放射エネルギー強度等の変数はその挙動をマクロ的にとらえるための手段に過ぎない。これに対し本報で使用しているモンテカルロ法では、この光子に相当する多数の独立な放射エネルギー粒子を系内の各点から周囲に射出し、その1個1個の散乱吸収挙動を追跡および集計することにより、放射によるエネルギー輸送の物理的な過程を直接シミュレートしている。これにより、各位置から射出された上述の自己放射エネルギーの系内での吸収量分布（前述の各微小体積中での放射エネルギーの吸収によるエネルギー受領項の分布）を、直接数値的に求めることができる。放射と他の伝熱はその機構が異なるため、この計算の過程では放射解析とその他の伝熱解析を分離して解くことが可能となる。また、直接各位置の吸収量分布が求まるため、上述のような方向性を有するソース関数や放射エネルギー強度を求める必要がなく（必要があれば容易に求まる）、解析が大幅に簡単化され、上述の種々の仮定や制限が不用となる。

ここでモンテカルロ法では、すべての光子のシミュレートは時間的メモリのあまりにも膨大で不可能なため、乱数を用いて無作為に抽出した有限のエネルギー粒子でこれを代表させているが、これによる標本数の減少と使用する擬似乱数の不完全性による結果のばらつき、および計算時間の長いことが問題とされてきた。これらの問題については、以下に述べる我々が提案してきたREAD法⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾により精度と計算時間を実用的な範囲内に納めることが可能となってきた。放射を含め対流、伝導伝熱のみの系のエネルギー方程式の数値解法は、ある要素と隣接要素との間の伝熱に関する関係を用いて、逐次近似法で温度分布を収束させるが、READ法を用いたモンテカルロ法では、この各要素間でのエネルギーのやりとりが、隣接要素のみでなく遠隔要素にも拡張されるだけで、まったく同様に逐次近似法で温度分布を求めることができるため、共存伝熱解析が非常に容易となる。

1. 6 モンテカルロ法で解く場合の放射対流共存伝熱における基礎方程式

固体壁とガス（火炎及び燃焼ガスを含む）よりなる系の共存伝熱を解く場合は、図6のように各々を適当な数の壁要素とガス要素に分割する。この中の1つの要素に着目し、それに出入りする熱エネルギーを考えることにする。これは(21)式のエネルギー式を各要素について積分したものに相当する。

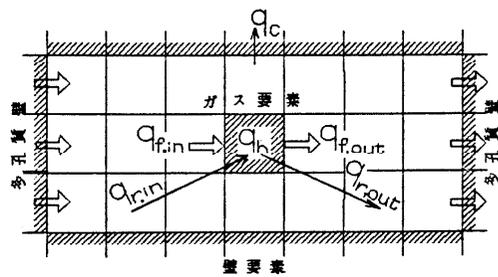


図6 放射対流共存伝熱解析モデル

ガス要素における熱収支

$$\underbrace{q_{r, out} + q_g + q_{w, out}}_{\text{流出熱量}} = \underbrace{q_{r, in} + q_h + q_{w, in}}_{\text{流入熱量}} \quad (26)$$

$T_{s,up}$: 上流側の要素の温度

C_p : 定圧比熱

エンタルピ流出項 $q_{f,out}$ は、

$$q_{f,out} = W_s C_p T_s \quad (33)$$

W_s : 下流側の要素との界面に垂直な質量速度

T_s : 着目している要素の温度

各種物性値、要素の形状、 α_s 、 R_d 、 h 、 W_s 、および壁における境界条件としての T_w あるいは q_w を与えると、(28)-(33)式を代入した(26)(27)式は温度のみの関数となる。したがって、各要素に関する(26)あるいは(27)式を逐次近似法で解けば、ガス温度 T_s と壁面受熱量 q_w あるいは壁温 T_w の分布が求まる。ここで上記の各入力値の内、 α_s と R_d 以外は上述のように算定可能であり、またこの2種の変数については、次章に述べるようにモンテカルロ法により求めることができる。なお剪断力の働く噴流の界面など、乱流うず拡散による流れに垂直な方向の熱移動が無視できないときは、乱流うず拡散による要素間の熱移動を、 $q_{f,in}$ 、 $q_{f,out}$ の形で(26)式の計算に入れる必要がある。また、温度による物性値変化が大きいときには、放射伝熱計算と対流の計算を連立して(実際には双方の式を交互に繰り返して)解く必要がある。

2. モンテカルロ法による放射伝熱解析

2.1 モンテカルロ法による放射伝熱の定式化

放射伝熱をモンテカルロ法を用いて解けばいい、前述のように熱放射エネルギーその大きさが連続可変ではなく、一つ一つが一定のエネルギーを有する離散的な粒子(光子あるいはこれを一定個数まとめたもの)として考える。このエネルギーの離散化が、通常の数値計算で用いられている差分法などにおける離散化と異なるのは、通常の数値計算が、座標変数のみの離散化を行ない、この座標上で定められる変数は連続量として取り扱うのに対し、モンテカルロ法では、この変数も離散化していることにある。このように放射エネルギーをアナログ量からデジタル量に変換することにより、系内各部分の間での放射エネルギーの交換量の計算が、放射エネルギー強度といった連続量の積分ではなく、一個一個のエネルギー粒子の挙動の総和として求めることができる。以下、モンテカルロ法による放射伝熱の取り扱いの具体例について述べる。

ガス中での放射エネルギーの吸収

一点Pからx方向に射出された強度 i_0 の放射エネルギーは、図7に示されるように前述の(8)式のピアの法則にしたがって、ガス中で連続的に吸収されて減衰する。したがってこの点Pから射山された放射エ

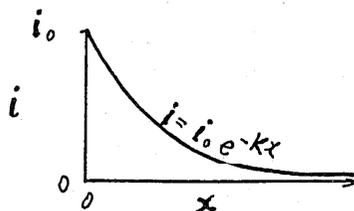


図7 ガス中での放射エネルギーの減衰

エネルギー i_0 のうち、点 P から x だけ離れた点のまわりの dx の幅の間で吸収されるのは、 $i_0 K e^{-Kx} dx$ となる。したがって、 x 方向単位長さ当たり吸収されるエネルギー量は $i_0 K e^{-Kx}$ となる。これをモンテカルロ法で取り扱うばあい、点 P から i_0/N のエネルギーを有する N 個の粒子を x 方向に飛ばすと考える。ここで、 N の値は多いほど精度が上がり、計算時間とのかねあいで決定する。これらの粒子は、それぞれ適当な距離を飛んだあと（飛行中は吸収はなく、粒子の有するエネルギーは不変であるとする。） x 軸上の適当な点でそれぞれが有する全エネルギーを放出するものとする。（まさに光量子の考え方である。）このようにして、 N 個の粒子が放出したエネルギーの x 軸上の分布が、

(8) 式のピアの法則から算出される吸収量分布にしたがうように、上記粒子の各々の飛距離を定めてやれば、モンテカルロ法と前述の連続的な吸収とで吸収量分布が一致することになる。

この各粒子の飛距離の決定のために、モンテカルロ法では、0 から 1 の間の均等乱数 RND を用いる。この方法は簡単で、0 から 1 の間の値を等確率に取る変数を、乱数 RND で置き換えれば良い。飛距離のばあい、累積吸収確率（入射した放射エネルギーが、原点からの距離が 0 から S までの間で吸収される確率 $= (i_0 - i) / i_0$ ）がこれにあたる。すなわち、たとえば原点から射出された上述の N 個の全粒子のうちの 40% は累積吸収確率が 0 から 40% の間に入り、残りの 60% は累積吸収確率の 40 から 100% の間に入る（これは累積吸収確率の定義そのものである。）ということで、0 から 1 の値をとる累積吸収確率の座標軸上では、 N 個の粒子が等確率に分布していることがわかる。ここでこの累積吸収確率は、(8) 式のピアの法則より、

$$(i_0 - i) / i_0 = 1 - e^{-Kx} \quad (34)$$

で表わされる。

したがってこの累積吸収確率の式 (34) の右辺を 0 から 1 の間の乱数 RND と等値し、

$$RND_x = 1 - e^{-Kx} \quad (35)$$

(RND_x: x を求めるために使用する乱数)

これを変形すると、

$$SK = -\ln(1 - RND_x) \quad (36)$$

が得られる。この (36) 式に 0 から 1 の均等乱数の値を順次代入して求めた SK を飛距離（吸収距離）とする N 個の粒子の吸収量分布は、上述のピアの法則を満足することになる。ここで、系内のガスの吸収係数 K が均一ならば、吸収されるまでの粒子の飛距離は、 $SK/K = S$ となるが、 K に分布があるばあい、 K が均等とみなせる各領域 K_i 内での飛距離を S_i とすると、吸収されるまでの全飛距離 S は、 $\sum S_i K_i$ が上記 (36) 式で求められた SK に等しくなったときの $\sum S_i$ に等しい。

(36) 式を用いて求めた 3000 個の粒子の飛距離 S の分布を図 8 に示す。ここで $K = 1 \text{ m}^{-1}$ とした。横軸は飛距離 S 、縦軸は飛距離 1 メートルあたりの放射エネルギーの吸収量

(各1メートルごとの吸収粒子の個数に比例)を入射強度で無次元化したものである。丸印がピアの法則を微分して求めた理論値、棒グラフが(36)式に3000個の均等乱数を代入して求めた値である。これより、(36)式でピアの法則がシミュレートできていることがわかる。

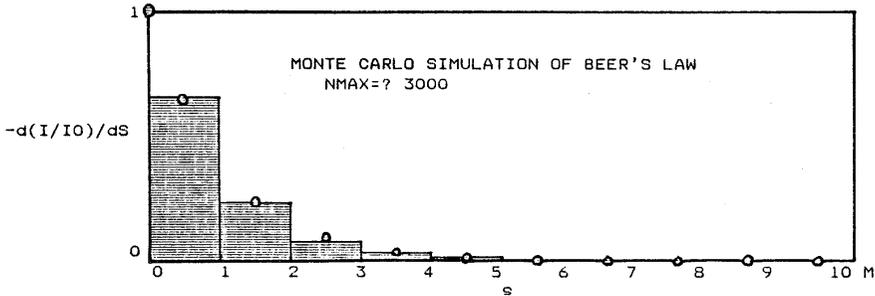


図8 放射エネルギー粒子の飛距離分布
(モンテカルロ法によるピアの法則のシミュレーション)

ガス要素からの射出方向

ガス塊から射出された放射エネルギーを粒子と考えたときの飛距離は、上述のようにして求められるが、1次元でない限りその放射の方向も決定する必要がある。一般にガスの放射は等方的であるから、その方向も乱数で均等に割り振ってやればよい。図9のような球座標で考えると、 θ 方向は $0 \sim 2\pi$ の間に均等に射出されるので、

$$RND_{\theta} = \theta / 2\pi \quad (37)$$

つぎに η 方向に関し、 0 から η の間の角度で射出される確率を考える。放射が等方的ということは、球の単位表面積当たりを通過する放射エネルギーが均等ということであるから、この確率は図10の中心角 η ではさまれた球の表面積

$$\int_0^{\eta} 2\pi (r \sin \eta) \cdot r d\eta = 2\pi r^2 (1 - \cos \eta) \quad (38)$$

に比例する。球の全表面積は $4\pi r^2$ であるから、全射出エネルギーのうち 0 から η まで

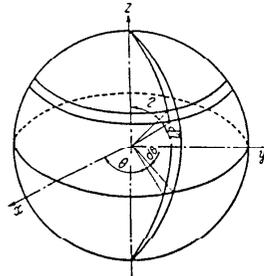


図9 ガス要素からの射出方向角度

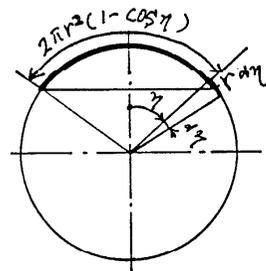


図10 中心角 η 内の累積射出確率

の間の角度に射出されるエネルギーの確率（累積射出確率）は、

$$2 \pi r^2 (1 - \cos \eta) / 4 \pi r^2 = (1 - \cos \eta) / 2 \quad (39)$$

となる。この累積射出確率は前述の累積吸収確率と同様、0から1の間の値を等確率でとるので、これを乱数RND η で置き換えることにより、各エネルギー粒子の射出角度 η を求めることができる。

$$RND_{\eta} = (1 - \cos \eta) / 2 \quad (40)$$

したがって、各エネルギー粒子の射出方向 (θ, η) は2つの乱数RND θ , RND η を用いて、以下のように求められる。

$$\theta = 2 \pi RND_{\theta} \quad (41)$$

$$\eta = \cos^{-1} (1 - 2 RND_{\eta}) \quad (42)$$

ガス要素中での射出点位置

前述のように、モンテカルロ法では系を有限個の壁面とガス要素に分割し、その各々の間での放射伝熱のやりとりを解析する。壁面要素から射出される放射エネルギーは、ガス要素との界面の面積の中央から射出してもなんら問題はないが、ガス要素のばあい、その中心点のみから射出させると、その要素から要素外に出るまでの飛距離に沿って求めた吸収量の平均値が、実際の場合（要素内が等温とすれば、その内部の全ての位置から均等に射出される）に比して、大きくなる。したがって、自分の要素内での吸収（自己吸収）の割合が増加し、要素間で交換される放射エネルギーが減少する。これは、要素の大きさを大きくしたとき顕著となる。これを防止するため、モンテカルロ法を用いるときには、要素内からの各放射性粒子の射出位置 (x_0, y_0, z_0) を下記のように3個の乱数RND $_1$, RND $_2$, RND $_3$ を用いて、要素内に均等に分布させるようにする。

$$x_0 = (RND_1 - 0.5) \Delta x + x_c \quad (43)$$

$$y_0 = (RND_2 - 0.5) \Delta y + y_c \quad (44)$$

$$z_0 = (RND_3 - 0.5) \Delta z + z_c \quad (45)$$

(x_c, y_c, z_c) : 要素の中心点座標

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 直方体の形をした要素の各辺の長さ。

壁要素からの射出方向

壁要素からはガス要素との界面の中央の点からN個のエネルギー粒子をランバートの余弦法則にしたがうような角度で射出し、その飛距離は(36)式で与えれば良い。

θ に関しては(32)式と同様にして

$$RND_{\theta} = \theta / 2 \pi \quad (46)$$

η 方向に関しては、壁面の微小面積 dA から垂直方向に放射エネルギー強度 i で放射があるとき、天頂角 η 方向の微小立体角 $d\Omega$ 内には $i dA \cos \eta d\Omega$ のエネルギーが射出され

ている((4)式参照)。

ここで図11より

$$\begin{aligned} d\Omega &= r d\eta (r \sin\eta) d\theta / r^2 \\ &= \sin\eta d\theta d\eta \quad (47) \end{aligned}$$

よって、 dA から射出され、天頂角 $0 \sim \eta$ の間の球面を通過する放射エネルギー

$E_{0,\eta} dA$ は

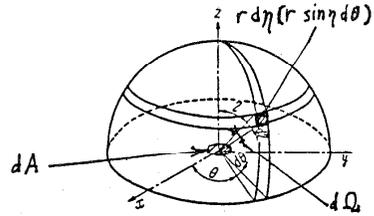


図11 壁要素からの射出方向

$$\begin{aligned} E_{0,\eta} dA &= \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\eta i dA \cos\eta \sin\eta d\eta \\ &= i dA \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\eta \cos\eta \sin\eta d\eta \\ &= i dA \cdot 2\pi (1 - \cos^2\eta) / 2 \quad (48) \end{aligned}$$

dA の面積から上半球中に射出される全エネルギーは(6)式より

$$E dA = \pi i dA \quad (49)$$

よって

$$E_{0,\eta} / E = 1 - \cos^2\eta \quad (50)$$

これが、 dA から射出されるエネルギー粒子の天頂角が、 0 から η の角度までに入る確率(累積射出確率)である。これは前述のように 0 から 1 の間の値を等確率でとる。したがって、

$$RND_\eta = 1 - \cos^2\eta \quad (51)$$

と置くことができる。したがって壁要素から射出されるエネルギーの射出方向は

$$\theta = 2\pi RND_\theta \quad (52)$$

$$\eta = \cos^{-1} \sqrt{1 - RND_\eta} \quad (53)$$

となり、これはランバートの余弦則(4)式を満足することになる。

壁面での反射と吸収

ガス要素あるいは壁要素から(41)(42)式あるいは(52)(53)式の方法に射出されたエネルギー粒子は、(36)式の距離だけ飛んで、その到達点におけるガス要素に吸収されることになるが、そこまでいくあいだに壁要素に衝突したばあいは、壁での反射か吸収を考える必要がある。(3)式より明らかなように、灰色壁に入射した放射エネルギーのうち、 $\alpha (= \epsilon)$ の割合のエネルギーは壁に吸収され、残りの $1 - \alpha (= 1 - \epsilon)$ の部分か反射される。したがって、 0 から 1 までの値をとる乱数 RND_r を用いて、

$$\boxed{RND_r \leq \epsilon} \quad (54)$$

のときに吸収

$$\boxed{RND_r > \epsilon} \quad (55)$$

のときに反射とすれば、(3)式を満足することになる。壁面が灰色体であるとする、乱射面であるので、反射したあとのエネルギー粒子の飛ぶ方向は、新しい乱数2個を(52)(53)式に代入して決定する。また、吸収されるまでの飛距離は、反射の前にその粒子が保有していた値が保存されるものとする。したがって、その粒子の射出時に与えられた飛距離から、反射前の実際の飛行距離を引いた値が反射後のその粒子の飛距離となる。

2.2 擬似乱数の求め方

なんらかのアルゴリズムを用いて計算機で求めた数列は、なんらかの規則性を有しており、真の乱数ではないが、比較的これに近いものを擬似乱数と呼ぶ。以下にその求め方について述べる。

乗積合同法

```
SUBROUTINE RANDOM (NRAN, RAN)
NRAN=MOD (23*NRAN, 10000001)
RAN=FLOAT (NRAN) *1. E-7
RETURN
END
```

NRAN: 0から10000000の間の整数の一様乱数

RAN : 0から1.0までの一様乱数

NRANの初期値として5249347をあたえるとこのプログラムで周期 30万回程度の擬似乱数列が発生される。ここでMOD(m, n)は、mをnで割った余りをしめす。ただし、パソコンでこれを試みたところ、桁数の関係からか数千回程度で同じ数の繰り返しが始まり、好ましくない結果となった。したがって、擬似乱数の使用にあたっては、自分が使う計算機で少なくとも以下のチェックはやっておく必要があろう。

乱数の検定に当たっては色々な方法があるが、一番手軽なのは以下のディスプレイを利用する方法である。すなわち、対象とする擬似乱数発生プログラムを用いて2個の乱数の組を連続して発生させ、この2個の乱数の値をx-y座標とする点をCRT上に順に打っていく方法である。このプログラムを走らせてCRT上でみていると、点がランダムに打たれていく。もし前と同じ組み合わせの乱数が発生するとそれ以後は前に打った点と同じところに打たれるので、それ以上点の数は増加しないのですぐわかる。また、点が打たれる位置がランダムかどうか(時系列のおよび空間的に)で、その擬似乱数の

ランダムさがわかる。なお、上記プログラムの周期現象は、必ず最初の初期値に戻るの
で、初期値と乱数列の各値を順に比較することでチェックできる。

また図8のように、採用した擬似乱数を用いて求めた多数の粒子の飛距離や射出角度
等の分布が、ピアの法則やランバートの余弦則等に一致しているかどうかのチェックも
一度はやっておく必要がある。

2.3 放射伝熱解析手順

従来のモンテカルロ法

放射伝熱のみの存在する系を考え、エネルギー粒子1個当たりのエネルギーを e とすると、
ガス要素の温度分布および壁要素の受熱量分布を求める計算のフローチャートは次頁の
図12のようになる。

READ法

上述の従来の方法では、温度分布が収束するまで、多数の乱数を使用して時間がかか
る(A)の部分のモンテカルロ法の計算を繰り返すことになる。これは、前述の従来法
では、各要素間で交換される熱量を、モンテカルロ法で直接求めているため、繰り返し
計算によって温度分布が変わるたびに、(28)式にしたがって $q_{r,0,0}$ が変わり、そ
のたびにモンテカルロ法の計算をやりなおす必要が出てくるためである。これにたいし
当研究室では、(30)式の R_d が系の中の吸収率 K の分布のみによることに着目し、
上述のモンテカルロ法の計算の繰り返しを避ける方法(READ法)を提案してきた。
この R_d は、射出点の要素の位置 (i_0, j_0, k_0) (ここで、 i, j, k は、系を直交座
標系に平行な直方体要素に分割したときの各要素の要素番号)、吸収点の要素の位置
 (i_1, j_1, k_1) の関数 $R_d((i_0, j_0, k_0), (i_1, j_1, k_1))$ としてあらわされ、前述のよう
に各要素からその外部に放射される全放射エネルギーのうち、他の各要素に吸収される割
合を示しており、1つの射出要素 (i_0, j_0, k_0) に対するその合計は下記のように1
になる。

$$1 = \sum_i \sum_m \sum_n R_d((i_0, j_0, k_0), (i_1, j_m, k_n)) \quad (56)$$

これら1セットの R_d の値は各要素の間の距離と吸収率 K 分布が変化しなければ定数と
なり、一度モンテカルロ法で求めればよい。この R_d をREAD(Radiative Energy
Absorption Distribution)とよぶ。またこのREADの算出過程において(22)式
の自己吸収係数 α_s の値を求めることができる。 α_s は1つのガス要素中で射出された放
射エネルギーが、その要素中で吸収される割合を示しており、以下のように求めることが
できる。このREADおよび α_s の計算過程を、図13のような内面灰色の5m x 5m
の角柱形ダクト壁で囲まれた2次元空間を例にして示す。解析を行なうにあたり、ガス
空間は5 x 5 = 25個のガス要素に、また壁は5 x 4 = 20個の要素に分割する。要素

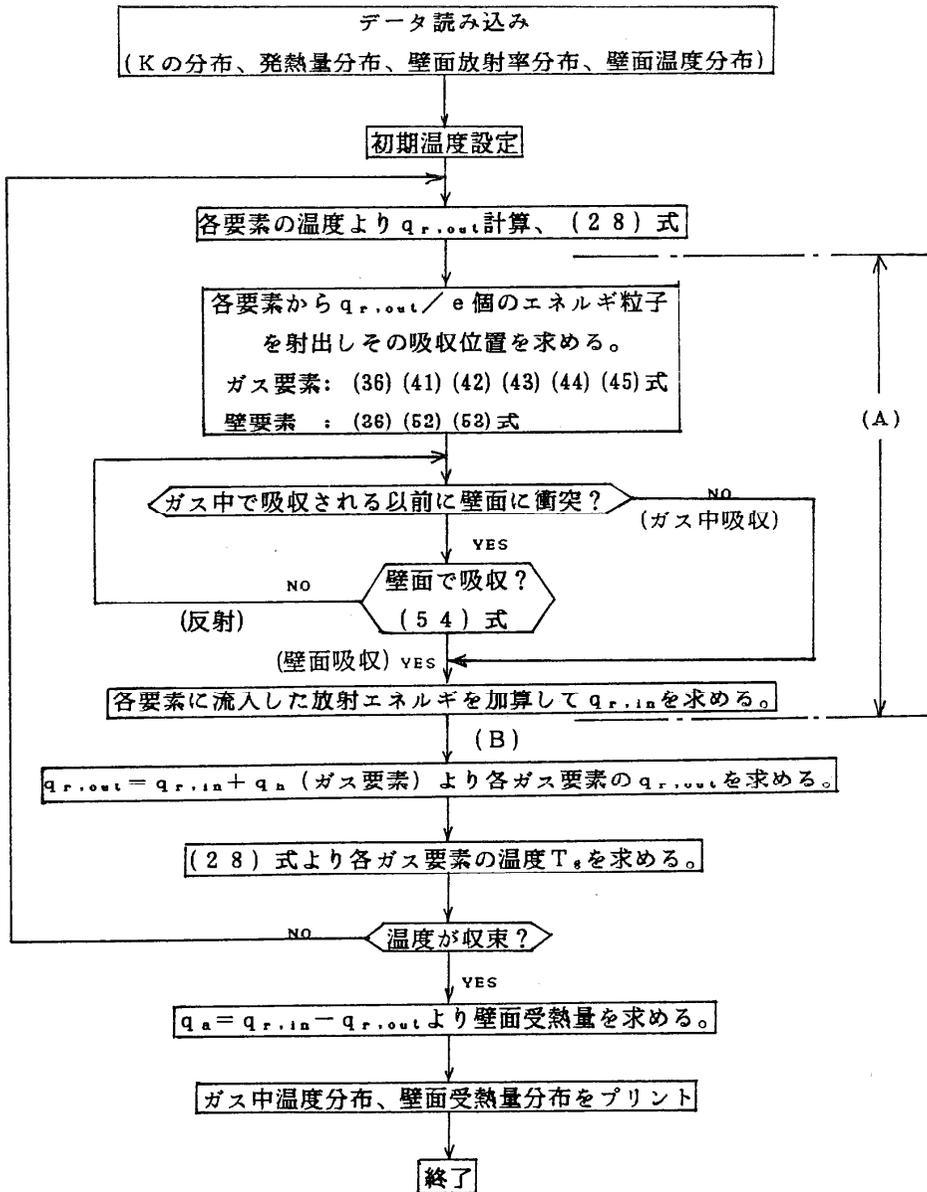


図 1 2 従来のモンテカルロ法による放射伝熱解析のフローチャート

分割は表示の簡単化のために2次元にしてあるが、以下の軌跡の計算はすべて3次元で行なっている。図14は、中央のガス要素から射出された1個のエネルギー粒子が、吸収されるまでに飛ぶ軌跡の1例である。壁での反射の様子を示すために、壁の放射率を小さくし ($\epsilon = 0.1$)、また飛距離を長くするために、ガスの吸収係数も小さく ($K = 0.1 \text{ m}^{-1}$) してある。壁のこのガス要素 (i_0, j_0, k_0) と他の要素との間の R E A D の値を求めるには、まずこの要素から一定の個数 N のエネルギー粒子を、それぞれについて、(43) (44) (45) 式に3個の乱数を代入して求められた射出点位置 O から、(46) (47) 式で求められた方向へ、(36) 式で求められた距離だけ飛ぶように射出する。図14では ($\overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DE}$) の3次元空間での長さが、この(36)式で求められたこの粒子の飛距離である。ここで(36)式で求められた距離飛ぶ前に壁面に衝突したばあい、(49)式でその壁面要素での吸収、反射を決定する。図13ではA, B, C, D点で壁面に衝突し、反射されている。灰色壁であるので反射される場合には(52) (53)式のように乱反射される。このため、A, B, C, D点での入、反射の角度は異なっている。このエネルギー粒子は、最終的には、上左のガス要素中の点Eで吸収されている。

つぎに図14で壁が黒体壁とすると、図15のように壁に当たったすべてのエネルギー粒子は吸収され、反射がおこらず、その軌跡は壁要素に吸収点を持つ。

また、図14の $K = 0.1 \text{ m}^{-1}$ の場合に比してガスの吸収係数を $K = 0.8 \text{ m}^{-1}$ (輝炎の中の値) と増加させると、図16の例に示すように中央のガス要素から出発したエネルギー粒子の平均飛距離は、図14に比してはるかに短くなる。図17にこの場合 ($K = 0.8 \text{ m}^{-1}$, $\epsilon = 1$) の中央のガス要素から射出された3000個のエネルギー粒子の吸収位置の計算結果を示す。ガスの吸収係数が多いので、この要素の中で射出された放射エネルギーのかなりの部分が自分自身の要素あるいはその近傍で吸収されることがわかる。

また左壁中央の壁要素から射出されたエネルギー粒子の軌跡の1例を図18に、また、 $K = 0.8 \text{ m}^{-1}$, $\epsilon = 1$ の条件でのこの壁要素から射出された放射エネルギー粒子の吸収位置分布を図19に示す。

このようにして求められた、各要素から射出された N 個のエネルギー粒子の吸収位置の分布より、上述の α_s 、および R E A D の値を求めるには、以下のように行なえば良い。これらのエネルギー粒子のうちで、自分の要素から外に飛び出す前にその中で吸収された個数、およびいったん外に出た粒子が反射、散乱等で方向が変化して元の要素に戻って吸収された個数の合計を N_s とすると、この要素の自己吸収割合は

$$\alpha_s = N_s / N \quad (57)$$

となる。また、他の要素 (i_1, j_1, k_1) に吸収された個数を N_1 とすると、もとの要素とこの要素との間の R E A D の値は

$$R_d((i_0, j_0, k_0), (i_1, j_1, k_1)) = N_1 / (N - N_s) \quad (58)$$

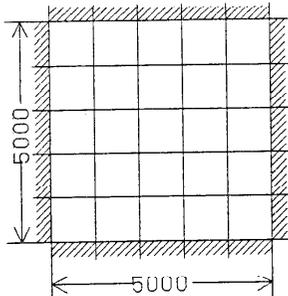


図 13 READ解析用
2次元モデル

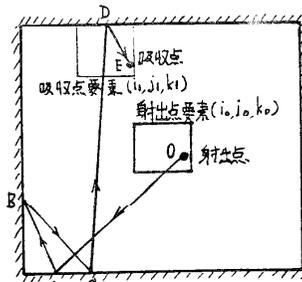


図 14 放射エネルギー粒子軌跡
($K=0.1m^{-1}$, $\epsilon=0.1$)
(ガス中射出、ガス中吸収)

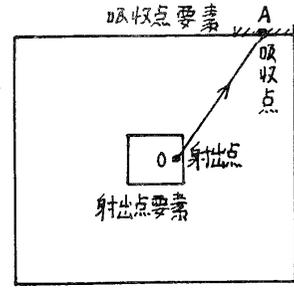


図 15 放射エネルギー粒子軌跡
($K=0.1m^{-1}$, $\epsilon=1$)
(ガス中射出、壁面吸収)

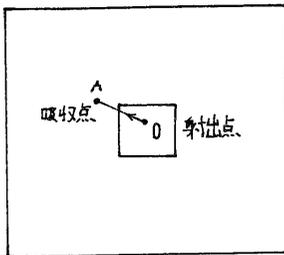


図 16 放射エネルギー粒子軌跡
($K=0.8m^{-1}$, $\epsilon=1$)
(ガス中射出、ガス中吸収)

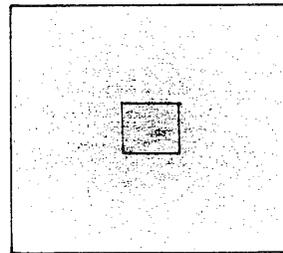


図 17 放射エネルギー粒子吸収点分布
($K=0.8m^{-1}$, $\epsilon=1$)

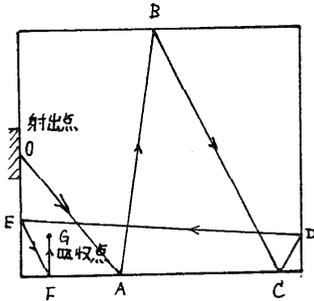


図 18 放射エネルギー粒子軌跡
($K=0.1m^{-1}$, $\epsilon=0.1$)
(壁面射出、ガス中吸収)



図 19 放射エネルギー粒子吸収点分布
($K=0.8m^{-1}$, $\epsilon=1$)

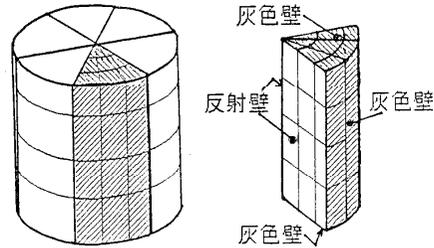


図 20 円筒座標モデル
円筒炉解析領域

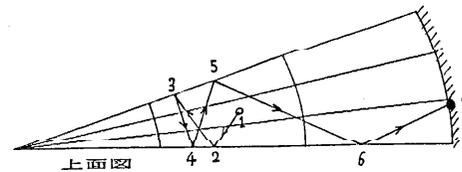
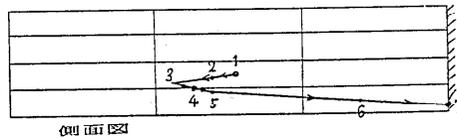


図 22 放射エネルギー粒子軌跡 ($K=0.1m^{-1}$, $\epsilon=1$)
(ガス中射出、壁面吸収)

となる。READは各要素とそれを除く他の全ての要素との間に定義されるので、その数は全要素の数を n とすると、 $n(n-1)$ となる。

以上の解析は直交座標で行なったが、図20のような円筒座標を用いてももちろん可能である。また、円筒の周方向に均等に伝熱管等がならぶなど周期性がある場合には、図21のようにこれを周方向に分割し、分割面を反射壁として取り扱うことにより、解析時間を短縮できる。図22はこのような分割領域での放射エネルギー粒子の3次元軌跡の1例で、点1のガス要素から射出されたエネルギー粒子が反射壁で鏡面反射されながら外周の灰色壁上の点7で吸収されるまでの軌跡を示している。

このREADを用いた放射伝熱計算のフローチャートは図23のようになる。この方法ではモンテカルロ法でREADの値を求める計算が温度の収束計算ループの外部に出ているため、時間のかかるモンテカルロ法の計算を1回やればよく、したがって、従来法に比して計算時間の短縮がはかれる。

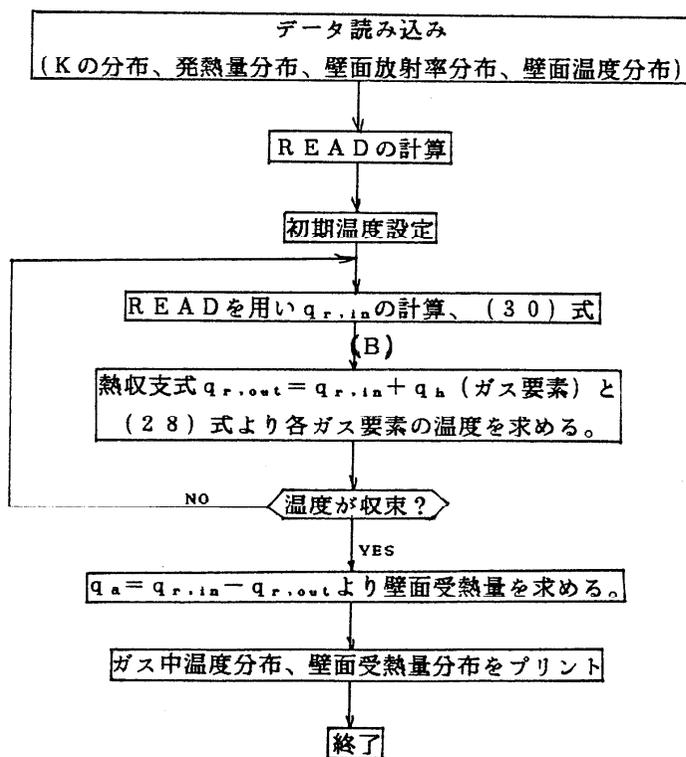


図23 READを用いたモンテカルロ法による放射伝熱解析フローチャート

2.4 放射対流共存伝熱解析

上述の解析では放射伝熱のみ取り扱い、対流の項がはいっていなかった。これをいれるには、フローチャート上の熱収支の式 $q_{r.out} = q_{r.in} + q_h$ (ガス要素)、 $q_a = q_{r.in} - q_{r.out}$ (壁要素) をそれぞれ (26)、(27) 式と入れ替えればよい。(26)、(27) 式の中の対流項 q_c 、 q_a は、上記フローチャートの (B) 部でそのときの温度を (31) (32) (33) 式に代入し、別途求めた質量流量分布を用いて求めることができる。

3. 開発の現状

3.1 精度、計算時間⁽⁸⁾

モンテカルロ法の精度と計算時間の目安として、2つの例を以下に示す。

精度確認の例として、図23のような2枚の透明平板境界間の1次元、吸収-非等方性散乱系の一方から、放射エネルギー強度が等方性の放射エネルギーを入射させたときの、入口出口両境界での無次元放射エネルギー流束 $Q(0)$ 、 $Q(1)$ について、モンテカルロ法の計算結果を、Viskantaらの2流束法、球面調和関数法 (P_3) および1次元にしか適用できないが厳密解を与える F_N 法 (F_9)の結果⁽⁹⁾と比較した。位相関数は図24のような強い前方散乱特性を有するものを用いた。図25、26に光学厚さ τ_0 と $Q(0)$ 、 $Q(1)$ の関係の解析結果を示す。これよりモンテカルロ法が、従来よく使用されてきた2流束法に比し、厳密解によく一致する解を与えることがわかる。図27はモンテカルロ法で使用するエネルギー粒子の個数と解の収束状況を示す。5万個程度で収束していることがわかる。図25、26では20万個を使用しており、このときの計算時間を図28に示すが、パソコン(日立B16/EX(8087付))上のFORTRANで10-30分であった。計算時間は同図に示すように τ_0 大で散乱回数が増加するので増加し、一定値に漸近する。 τ_0 を減少させるとガス中での相互作用がほとんどないまま反対側の壁にエネルギーが到達するので、計算時間は減少して一定値に漸近する。

また図29に非等方性散乱の効果を求めた解析の例を示す。これは、黒体壁に囲まれた粒子含有ガス(放射吸収散乱性媒体)中での2次元放射対流共存伝熱を解析しており、粒子の散乱に関する位相関数は、波長に比して大きい灰色粒子のそれ⁽³⁾(強い後方性散乱を有する)を用いる。物性値は一様、ガスと粒子は同温、ガス中左下部に発熱部を設置、流れは簡単のために上向きの一様流とし、上下壁は内部をガスが通過するときガスと熱交換しない多孔質壁とする。またガスと壁面の間の対流熱伝達率は一定の値を与える。要素分割数は、ガス要素が150、壁要素が50である。ガス中温度分布と壁面受熱量分布および上壁からの流出エンタルピを図30に示す。同図では、実線が散乱無し、破線が散乱が有る場合を示しているが、発熱部から遠い右と上の壁で散乱のない場合の方が壁面熱流束が高いのは強い非等方性散乱が、放射伝熱を妨げるためである。また左と下の壁では熱流束のピークが発熱部位置に対応しているが、発熱部から離れた

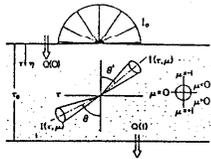


図 2 3 1 次元吸収非等方性散乱系

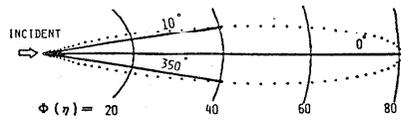


図 2 4 位相関数 ($n=1.50-0.10i, x=8.0$)

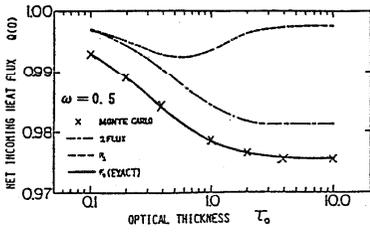


図 2 5 入射熱流束に及ぼす光学厚さの影響

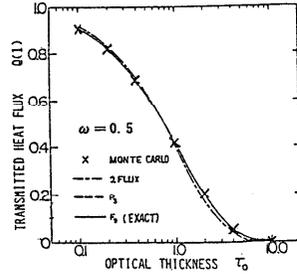


図 2 6 透過熱流束に及ぼす光学厚さの影響

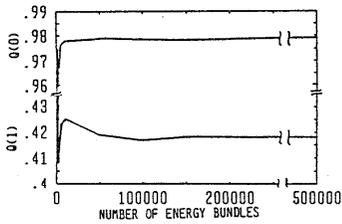


図 2 7 モンテカルロ法の収束状況 ($\tau_0=1$)

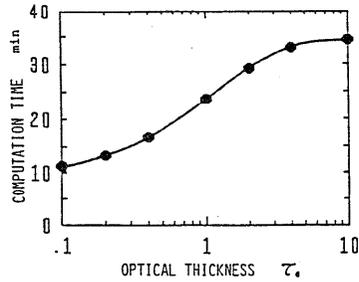


図 2 8 計算時間に及ぼす光学厚さの影響

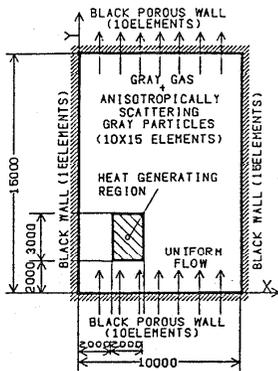


図 2 9 2 次元放射対流共存伝熱系

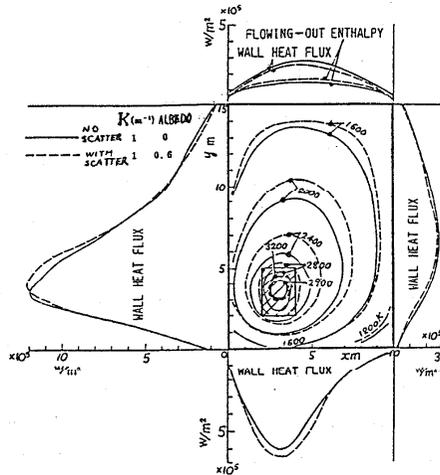


図 3 0 非等方性散乱効果

右と上の壁ではその近傍のガス温度のピークに対応して熱流束のピークが出ている。これは2次元計算によって初めて出る特徴である。この計算の全使用エネルギー粒子数は200万個で、計算時間は北大大型計算機センターのHITAC M680で1-2分程度であった。

3.2 開発の現状

現在までに開発済みの問題を下記の表に示す。

表1 モンテカルロ法による放射対流伝熱解析の現状

	開発済み	開発中
次元	1~3	
ガス層	灰色 ⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾ 微粒子含有(等方性, 非等方性 : 粒子ガス同温) ⁽⁷⁾ 物性値分布あり ⁽⁵⁾⁽⁶⁾	波長依存性あり(2波長は開発済) ⁽¹²⁾ 微粒子含有(等方性, 非等方性散乱 : 粒子ガス間熱伝達あり)
壁面	断熱または伝熱壁 黒体, 灰色体, 鏡面 } ⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾ 任意形状境界 ⁽¹⁰⁾	
充填層	均一径粒子充填層 ⁽¹¹⁾	配列の不規則性の効果

参考文献

- (1) 甲藤, 伝熱概論, 養賢堂, 1967, 337-393.
- (2) 西川, 藤田, 伝熱学, 理工学社, 1982, 289-353.
- (3) R. Siegel, J. R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer 2nd. Ed., McGraw-Hill, (1981).
- (4) 日本機械学会, 熱と流れのコンピュータアナリシス, コロナ社, (1986) pp150-175.
- (5) H. Taniguchi, et. al., Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., 2 (1986) pp757-762.
- (6) 早坂 他, 船用機関学会誌, 21, 5 (S61) pp311-316.
- (7) K. Kudo, et. al., Proc. 5th Int. Conf. on Numerical Methods for Thermal Problems (1987).
- (8) 工藤 他, 第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集, E113 (1987-5).
- (9) M. P. Mengüç, R. Viskanta, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 29, 5 (1983) pp331-394.
- (10) 早坂 他, 火力原子力発電, 34, 2 (1983 2) pp165-177.
- (11) 工藤 他, 機械の研究, 39, 1 (1987-1) pp211-215.
- (12) 谷口, 船津, 日本機械学会論文集, 36, 284 (S45-4) pp610-621.

東海研究グループ講演および見学会

日時：昭和62年5月9日（土）13:30～17:30

場所：岐阜大学工学部24番教室他

講演：（１）産業用蓄熱システムの開発と伝熱問題

中原 崇文（三菱重工㈱名古屋研究所）

（２）半透過性媒体の伝熱問題

西村 誠（岐阜大学工学部）

見学：岐阜大学工学部機械系及び化学系伝熱関係研究室

<講演概要>

講演（１）：産業用設備の三例、すなわち １）．ロケットエンジン航空性能試験設備、２）．
鑄造工場排熱有効利用設備および ３）．転炉スラグ風砕設備における蓄熱システム
の開発経過とこれらにおける伝熱諸問題に関し、多くの実用データとシミュレー
ション結果を含めて解説された。１）では、H1ロケット推進を水蒸気噴射でモデル
化した場合のアキムレーターへの水潜熱の蓄熱、超音速ディフューザーへの蒸気
エジェクションなどにおける伝熱現象の解明と、実用設計手法が示された。２）で
は、静層型蓄冷熱ハイブリッドシステムを採用し、水頭熱の形で排熱を回収・有効
利用するトータルシステムの開発に関連した伝熱問題が述べられた。このハイブリ
ッドシステムは安定な水の静層形成が必須の要件となり、その安定条件は浮力と慣
性力の比で定義されるリチャードソン数に依存することが示された。最後に、３）
では、転炉スラグを高圧空気噴流で風砕することにより得られる球状スラグ粒に貯
えられた固体頭熱を熱回収する場合の輻射および対流伝熱問題が述べられた。

講演（２）：輻射理論体系の概要につづいて西村先生がこれまで研究された体輻射理論展開と
その実験的検証例を中心に詳細に解説された。伝導共存系では、高温ガラス融体層、
低温ガラス板層、非流通式太陽熱集熱流体層などの半透過性媒体内伝熱が熱源およ
び媒体内の単色性をも考慮した伝熱理論により解析され、それらの妥当性が多くの
室内およびフィールドテストで実証されたことが示された。その他、対流共存系で
は、炭酸ガスの管内層流熱伝達、体積受熱型ソーラコレクター内の半透過性作動流
体層伝熱などに関するシミュレーションとその実験的検証も示された。更に、蓄熱
に関連した半透過性PCM（パラフィン）の溶解・凝固、塗膜乾燥の基礎となる有機
溶剤の蒸発などの相変化・物質移動を伴う輻射伝熱系のシミュレーション理論と非
定常実験データとの良好なる対応が述べられた。

2件の講演終了後、岐阜大学工学部の機械工学科の馬淵、熊田岡先生および応用化学学科の倉石、西村両先生の御世話で伝熱関連研究室を見学し、その後、懇親会が開かれた。当日の参加者は、延べ42名と多くの方々が参加され、盛合裡に今回の講演および見学会は終了した。

(担当幹事： 荒木信幸、新井紀男)

九州研究グループ講演会

- 講演 (1) 日時: 昭和62年 6月 3日(水) 15:00~17:00
場所: 九州大学工学部 機械系大会議室
講師: James P. Hartnett
Professor and Director, Energy Resources Center
University of Illinois at Chicago
題目: "Energy in U.S.A. and Japan"
- 講演 (2) 日時: 昭和62年 6月13日(土) 13:30~15:00
場所: 九州大学工学部 機械系大会議室
講師: C.L. Tien
Professor of Mechanical Engineering
Vice Chancellor-Research
The University of California, Berkeley
題目: "Heat Transfer in Porous Media"

講演概要

- (1) 日米間のエネルギー事情の相異について、以下の項目の比較に基づいて解説された。
- (a) 石炭、石油および天然ガスの埋蔵量と現在の消費傾向から予測される利用可能期間。
 - (b) エネルギー消費量の変遷とエネルギー資源の輸入依存度。
 - (c) 民生、輸送、工業用等利用分野別エネルギー消費割合。
 - (d) 省エネルギー技術開発の成果およびそれに関連した研究体制の相異。
- (2) 多孔質における伝熱に関して、Super Insulation、多孔質管内流および porous heat pipe 等を例に、現象の把握と応用について最新の研究成果と測定法や解析モデルの問題点について解説された。また研究上のエピソードを混じえながら、伝熱研究における基礎研究の重要性を強調された。

<編集後記>

Vol. 26, No. 102の編集をお手伝いして

第26期編集委員長 谷口博 (北大)

昨年12月頃、第25期副会長(事務担当)小竹進先生より、次期の「伝熱研究」の編集を手伝うようにとの内示があり、同期編集委員長黒崎晏夫先生より編集に際してのノウハウを教えるからとの連絡を受けた。その時は、あまり実感が沸かなかったが、日本伝熱シンポジウムの開催日が近付くにつれ、原稿をとりまとめる場合の見通しについての前例を伺うことにし、不安を解消することとした。元来楽観主義の立場をとることにはいるものの、最初のNo. 102(7月号)は伝熱シンポジウム開催日と発行日が意外と接近していることに気付き、第25期編集委員長と相談のうえ、事前に非公式な執筆依頼を開始したのである。

止むを得ないこととはいえ、総会における正式な選出も終わらぬうちに、軽率妄動したことを反省しているが、執筆者各位の暖かいご理解に支えられ、場合によっては半月程度の期間に原稿を仕上げていただいたのである。既に、原稿のワープロ化への途が開かれていたので、100頁を超す全原稿は綺麗な仕上がり状態で届けられ、今後の編集に際しての安心感を抱くことができた次第である。また、5月29日(伝熱シンポジウム最終日)に開催された編集会議にて

- (1) No. 102 (7月号) --- 須藤浩三委員、玉木恕乎委員
- No. 103 (10月号) --- 斎藤武雄委員、藤井丕夫委員
- No. 104 (1月号) --- 新井紀男委員、矢部 彰委員
- No. 105 (4月号) --- 高木敏美委員、福迫尚一郎委員

に主として分担願うこととし、

(2) 各号とも特集記事を中心に企画することにより、内容の充実をはかる方針を立てているので、各方面からの「伝熱研究」への投稿を期待している。必要に応じて、上記編集委員にお問い合わせいただくか、私宛にご連絡賜れば幸いです。

原稿をお届けいただいた執筆者各位、種々御教示いただいた第26期副会長(事務担当)越後亮三先生、編集委員各位に心より謝意を表する次第です。

「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い

「伝熱研究」編集委員会（伝熱研究会）

1. はじめに

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

なお、もちろんのことながら、ご無理な方は、従来通りの手書き原稿を事務局にお送りいただければ、事務局で対応できますので、お気軽にお申し付け下さい。

2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式

2.1 標準出力フォーマット

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

★縦長、横書き。（プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。）

★全角文字を標準とする。（英語、数字は半角が望ましい。）

★一行に印字する文字数：42文字程度（40～44文字の間なら構いません。）

横 幅：160mm程度（150mm～170mmの間なら構いません。）

（この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。）

★一頁の行数：34行程度（33～35行の間なら構いません。）

縦の長さ：255mm程度（245mm～265mmの間なら構いません。）

（この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。）

★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。

（以上よろしくお願ひいたします。）

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

事務局移転のお知らせ

昭和62年6月より、下記の通り事務局を移転しましたのでお知らせ致します。

記

〒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

TEL 03-726-1111, Ext 2169, 2179

FAX 03-729-0563

郵便振替口座 東京6-14749

(従来と変わらず)

銀行口座 第一勧業銀行 大岡山支店

普通 1265519

第21回夏期伝熱セミナーのお知らせ

1. 会期 昭和62年8月5日(水)～7日(金) 2泊3日
2. 会場 東北大学川渡共同セミナーセンター
宮城県玉造郡大口字逢田117
Tel.02298(4)7309
[新幹線 古川駅のりかえ 陸羽東線 川渡駅下車、徒歩30分
またはタクシーで5分(2.5km)]
3. 参加費 (宿泊、食事代、懇親会費を含む)
日本伝熱研究会会員 20,000円
学 生 17,000円
会 員 外 23,000円
なお、日程の一部に参加される方からも同額を徴集いたします。
4. 定員 先着80名
5. 申込 締切 7月6日(月)
方法 本号添付の郵便振替用紙に必要事項を記入の上参加費とともに申込んで下さい。
なお締切後の取消しには、参加費を返却致しません。
連絡先 〒980
仙台市荒巻字青葉
東北大学工学部機械工学科
熊谷 哲 助教授
Tel.022(222)1800 内 4110
6. 御参考 青森ねぶた祭 8月3日～7日
秋田竿灯祭 8月5日～7日
仙台七夕祭 8月6日～8日
山形花笠祭 8月6日～8日
(従って 混雑が予想されますので切符の手配はお早目に
どうぞ)

7. セミナー日程表

8月5日(水)

13:00～15:00	受付, テニス, 散策
15:00～15:10	準備委員長挨拶 相原利雄(東北大)

15:10 -17:30 パネルディスカッション：P 1

「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」

司会 飯田嘉宏（横国大）

テーマ 講師

- | | |
|--------------------|------------|
| (I) 半導体製造
単結晶育成 | 平沢茂樹（日立） |
| (II) 太陽電池 | 黒川浩助（電総研） |
| (III) 急速冷却技術 | 西尾茂文（東大） |
| (IV) 新材料熱物性 | 荒木信幸（静大） |
| (V) μ g宇宙材料 | 塩治震太郎（IHI） |

18:30 ～ セミナーセンターで懇親会と夕食。

8月6日（木）

9:00-12:00 パネルディスカッション：P 2

「数値解析で伝熱のどこまで分るか」

司会 小竹進（東大）

テーマ

- | | |
|-------------------------------|------------|
| (I) 乱流伝熱 | 鈴木健二郎（京大） |
| (II) ふく射 | 黒崎 俊夫（東工大） |
| (III) 熱伝導・相変化 | 斎藤武雄（東北大） |
| (IV) スーパーコンピュータ
による大規模熱流解析 | 前川 勇（動燃） |
| (V) 数値解析と実験のはざま | 萩野文丸（京大） |

12:00-13:00 昼食

13:00-18:00 見学およびレジャー

◎見学コース（定員 55名）

観光バスで平泉（中尊寺、毛越寺など）を見学

◎レジャーコース（定員 50名）

・セミナーセンター近くのコートでテニス

- ・ゴルフ（希望者があれば）
- ・近くの体育館で卓球，バドミントン，その他。

18:00-19:00 夕食

19:00-22:00 大放談会 テーマ： 総合司会：棚沢一郎（東大）
「21世紀の伝熱」

“その予測をタイムカプセルに詰めよう”

パネリスト：

越後亮三（東工大）， 荻野文丸（京大），
塩冶震太郎（IHI）， 鈴木健二郎（京大），
土方邦夫（東工大）， 西尾茂文（東大），
藤城俊夫（原研）， 幾世橋 広（東北大），
熊谷 哲（東北大）， 宍戸郁郎（東北大），
林 一天（東北大）， 三浦隆利（東北大），

8月7日（金）

9:00-10:20 特別講演： 司会：山川紀夫（岩手大）
「次世代の地熱開発としての高温岩体の利用」
講師 阿部博之（東北大）

10:30-12:30 パネルディスカッション：P3
「伝熱工学で極限環境下の安全性はどこまで確保できるか」

司会 越後亮三（東工大）

テーマ

- | | |
|-------------------------|------------|
| (I) 原発反応度事故
(メルトダウン) | 藤城俊夫（原研） |
| (II) 蒸気爆発 | 小木曾千秋（横国大） |
| (III) 過熱液体放出・熱衝撃 | 戸田三朗（東北大） |
| (IV) ジェットエンジン | 新岡 嵩（航技研） |
| (V) 地熱開発における伝熱 | 太田照和（東北大） |

12:30 ～ 昼食（昼食後解散）

第21回化学工学の進歩講習会「燃焼・熱工学」

主催 化学工学協会東海支部

共催 日本伝熱研究会ほか

日時 昭和62年10月20日（火）～22日（木）

会場 愛知県産業貿易館 西館 第一会議室

（名古屋市中区丸の内3-1-6 ☎(052)231-6351）

第1日〔10月20日（火） 9:00～16:30〕

- (1) 総論 (9:00～9:30) (名大工) 架谷 昌信
 (2) 核沸騰の機構と熱伝達 (9:30～11:00) (九大工) 藤田 恭伸
 (3) 高温熱交換器 (11:00～12:30) (東工大) 越後 亮三
 (4) 流動層伝熱の現状 (13:30～15:00) (東農工大) 堀尾 正毅
 (5) 伝熱の基礎とその促進法 (15:00～16:30) (東工大) 土方 邦夫

第2日〔10月21日（水） 9:00～17:00〕

- (6) 燃焼計測技術 (9:00～10:30) (豊橋技科大) 大竹 一友
 (7) メタノールの燃焼 (10:30～12:00) (東大工) 幸田 清一郎
 (8) 蓄熱・熱輸送 (13:00～14:30) (東工大) 神沢 淳
 (9) 省エネルギー燃焼技術と高負荷燃焼技術 (14:30～16:00)
 (阪大工) 水谷 幸夫
 (10) 伝熱促進プロセス (16:00～17:00) (名大工) 外山 茂樹

第3日〔10月22日（木） 9:00～16:00〕

- (11) ふく射性媒体の伝熱 (9:00～10:30) (岐大工) 西村 誠
 (12) 希薄燃焼 (10:30～12:00) (東大工) 竹野 忠夫
 (13) 石炭の燃焼 (13:00～14:30) (群大工) 定方 正毅
 (14) 高度化する最近のクリーン燃焼技術 (14:30～16:00)

(名大工) 新井 紀男

参加費	参加日数	3日とも	2日のみ	1日のみ
	正会員	25,000	20,000	15,000

*主催・共催学協会の法人会員も正会員扱い致します。

テキスト 化学工学の進歩（第21集）燃焼・熱工学（槇書店A5版）

申込方法 葉書大用紙に氏名、勤務先、住所、電話番号、受講日を明記し、現金書留にて下記あてお申し込み下さい。

申込先 〒460 名古屋市中区栄2-17-22 名古屋科学館内

化学工学協会東海支部 ☎(052)231-3070

第11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回の会合を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11回シンポジウムとして、開催致します。尚、例年通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62年12月4日（金）～ 5日（土）2日間

場 所：国立公衆衛生院

〒108 東京都港区白金台4-6-1

内 容：(1) 国外研究者の招待講演（予定2名）

(2) 共催、協賛団体会員の講演

(3) 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、生理人類学研究会（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（予定）

発表申込方法：ハガキに 1) 氏名（幼称） 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62年7月31日

英文抄録提出日：昭和62年8月31日

原稿提出締切日：昭和62年10月15日

参加申込方法：往復ハガキに 1) 氏名（幼称） 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62年12月4日（金）17:30～19:30（会費4,000円 予定）

実行委員長：国立公衆衛生院 栃原 裕

準備委員：後藤 滋*（代表）、川島美勝*（事務局）、栃原 裕*、石井昭夫、磯田憲生*、鴉飼 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*、棚沢一郎*、田辺新一*、田村照子*、登倉尋実、中島利誠*
西 安信、堀越哲美、松原斎樹、南野 脩、三平和雄、森田矢次郎*、横山真太郎*、吉田 燦*
吉田敬一*（*印は実行委員）

顧 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

第11回人間-熱環境系シンポジウム実行委員会 ☎ 045-335-1451（内線2666 川島）

2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAT TRANSFER

August 8-12, 1988
Tsinghua University, Beijing, CHINA

FIRST ANNOUNCEMENT & CALL FOR PAPERS

Organizer and sponsor: The Institute of Thermal Science & Engineering,
Tsinghua University, Beijing
Co-sponsor: The Heat and Mass Transfer Division, Chinese
Society of Engineering Thermophysics

The International Committee:

Chairman: Professor Bu-Xuan Wang,
Thermal Engineering Dept.
Tsinghua Univ., Beijing 100084, CHINA
Members: Prof. A. Dolinsky (Kiev, USSR)
Prof. Z. Y. Guo (Beijing, CHINA)
Prof. S. Y. Ko (Beijing, CHINA)
Prof. J. R. Lloyd (East Lansing, USA)
Prof. F. Mayinger (München, F. R. GERMANY)
Prof. T. Mizushima (Kyoto, JAPAN)
Prof. Y. Mori (Tokyo, JAPAN)
Prof. C. L. Tien (Berkeley, USA)
Prof. K. T. Yang (Notre Dame, USA)
Prof. S. M. Yang (Shanghai, CHINA)
Prof. W. J. Yang (Ann Arbor, USA)

Background: The 1st International Symposium on Heat Transfer, Beijing '85, sponsored by the Institute of Thermal Science and Engineering, Tsinghua University and supported by the China State Commission of Education, was a great success with over 100 papers presented and over 150 scholars and scientists attended from 9 countries. The Proceedings has been published by the Hemisphere Publishing Corp., Inc., N.Y. (U.S.A.), entitled "HEAT TRANSFER SCIENCE AND TECHNOLOGY—Proceedings of ISHT, Beijing '85", 1987. It had been decided at the closing ceremony of the ISHT, Beijing '85 that the 2nd ISHT will still be held at Tsinghua University, Beijing, in 1988.

Scope: The scope of the 2nd ISHT will reflect the increasing importance of international exchange of various information about new ideas and recent achievements especially in expanding fields of heat transfer.

Working Language: English

Call for papers:

All aspects of heat transfer are included in the Symposium program, such as:

- Basic transport phenomena;
- Flow and heat transfer visualization;
- Two-phase flow and heat transfer with phase change;
- Heat and mass transfer in porous media;
- Combustion and high-temperature heat transfer;
- Enhancing heat transfer;
- Heat exchangers;
- Industrial heat transfer;
- Numerical heat transfer and mathematical modeling;
- Measuring techniques; etc.

The following schedule should be followed:

Prospective authors are requested to submit an abstract about 500 (not exceed 1000) words to state the purpose, method results and conclusions of the work for (three copies in English not later than December 31, 1987 (deadline) as follows:

- (1) Two copies to Professor T. Mizushima for Japanese scholars and scientists, to Professor W. J. Yang for American scholars and scientists, to Professor F. Mayinger for German scholars and scientists, to Associate Professor Nengli ZHANG, secretary of the 2nd ISHT for scholars and scientists of other countries;
- (2) one copy to Associate Professor Nengli ZHANG, Secretary of the 2nd ISHT Notification of abstract acceptance by February 15, 1988 Submission of full-length manuscripts due by April 15, 1988 (deadline). Further information please contact with:

Associate Professor Nengli ZHANG, Secretary of the 2nd ISHT
Thermal Engineering Department
Tsinghua University
Beijing 100084, CHINA

2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HEAT TRANSFER
August 8-12, 1988, Tsinghua University, Beijing, CHINA

APPLICATION FORM

Mr. Mrs. Ms. _____ Nationality _____

Title _____

Institution _____

Address _____

Telephone Number _____ Telex _____

Date _____ Signature _____



**Announcement and Call for Papers
INTERNATIONAL SYMPOSIUM
ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT
AND ENERGY CONSERVATION
(ISHTEEC)**



2-5 August, 1988, Guangzhou (Canton), China

Sponsored by: South China Institute of Technology
Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences
Clean Energy Research Institute, University of Miami

Supporters: Chemical Industry and Engineering Society of Guangdong
Chemical Industry and Engineering Society of Guangzhou

OBJECTIVE: This symposium will provide the latest information on the status of heat transfer enhancement and energy conservation research, development and applications.

TOPICS: (1) Theories and Techniques of Heat Transfer Enhancement for Single and Multi-Phase Fluid Flows, for Boiling or Condensation by Treated Surfaces, Additives, Mechanical Aids, Electric or Magnetic Fields, Injection or Suction, and by Compound Techniques, etc. (2) Techniques for Energy Conservation such as: Heat Pumps, Heat Pipes, Refrigeration, High Efficiency Heat Exchangers, High Efficiency Kilns, Waste Heat Utilization, Energy Storage, Optimization, Corrosion and Fouling Control of Heat Exchangers, etc.

LANGUAGE: The working language of the symposium will be English.

CALL FOR PAPERS: Please send your typewritten abstract (about 500 words), including the title of the paper, names and full mailing addresses of all authors, as soon as possible, but no later than 31 August 1987, and also requests for information to:

ISHTEEC Secretariat
c/o Chemical Engineering Research Institute
South China Institute of Technology
Guangzhou (Canton), China

The authors of the abstracts selected will be informed by 31 October 1987. Completed papers will be due 28 February 1988.

REGISTRATION FEE: The \$200 (U.S.) registration fee includes all teabreak refreshments, the banquet, a sightseeing tour and a copy of the symposium proceedings. The fee for accompanying (\$100 U.S.) includes the banquet and special sightseeing tour.

ORGANIZING COMMITTEE:

A.E. Bergles, Rensselaer Polytechnic Institute
J.C. Chen, Lehigh University
Xue-Jun Chen, Xian Jiaotong University
Song-Jiu Deng, South China Institute
of Technology (Chairman)
F. Durst, Friedrich-Alexander Universität
Tetsu Fujii, Kyushu University
Kunio HijiKato, Tokyo Institute of Technology
F.A. Holland, Salford University
S. Kakac, University of Miami
Ji-Fan Lin, Dalian Institute of Technology
Zhen-Qun Liu, South China Institute of Technology

F. Mayinger, Technische Universität München
Wataru Nakayama, Hitachi, Ltd.
Fumimaru Ogino, Kyoto University
A.C.C. Tseung, the City University
C.L. Tien, University of California
Ichiro Tanasawa, University of Tokyo
Ying-Ke Tan, South China Institute of Technology
T.Nejat Veziroglu, University of Miami (Co-Chairman)
Bu-Xuan Wang, Tsinghua University
Zhi-jian Wu, Guangzhou Institute of Energy
Conversion
Wen Wu, Guangzhou Institute of Energy
Conversion (Co-Chairman)

日本伝熱研究会個人会員申込書・変更届書

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

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

5	*勤務先	名称						
6								
7		〒		—				
8		所在地						
9								
10		TEL						

11	自宅	〒		—				
12		住所						
13								
14		TEL						

15	通信先	勤務先・自宅
----	-----	--------

16	学位	
17	最終出身校	
18	卒業年次	
19	専門分野	

← (下記専門分野の番号)

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

専門分野

- | | | | | |
|------------|---------|---------|----------|---------|
| 1：自然対流 | 2：強制対流 | 3：熱伝導 | 4：凝縮 | 5：沸騰・蒸発 |
| 6：混相流 | 7：物質移動 | 8：反応・燃焼 | 9：放射 | 10：熱物性 |
| 11：熱交換器 | 12：流動層 | 13：蓄熱 | 14：冷凍・空調 | 15：内燃機関 |
| 16：ガス・ピストン | 17：蒸気機関 | 18：原子力 | 19：太陽熱 | 20：環境 |
| 21：その他（ | | | | ） |

*）学生の場合は在学学校名、学年（M2、D3など）を記す。

伝熱研究
Vol. 26 No. 102

1987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)