

# 伝熱研究

1987

October

Vol. 26

No. 103

Journal of Heat Transfer Society of Japan

## 〈特集：第21回夏季伝熱セミナー〉

相原 利雄	伊藤 猛宏	飯田 嘉宏	小竹 進
荒木 信幸	藤城 俊夫	熊谷 哲	広野 洋一
宗像 鉄雄	齊藤 武雄	棚沢 一郎	

## 〈故・佐藤俊先生を偲んで〉

佐藤俊君を想う	水科 篤郎
佐藤俊先生のご逝去を悼む	岐美 格
「佐藤 俊先生を偲んで」	鈴木健二郎
佐藤 俊 先生の思い出	木枝 茂和
In Memoriam	Ernst R. G. Eckert
In memory of Professor Takashi Sato	Professor and Mrs. Warren H. Giedt

## 〈国際会議〉

国際会議「Numerical Methods in Thermal Problems」(第5回)

小竹 進

## 〈研究トピックス〉

超流動現象とその応用	村上 正秀
超臨界圧ヘリウムの乱流熱伝達	伊藤 猛宏
キャビテイ底面からの強制対流熱伝達	山本 春樹
低圧力損失型流動層熱交換器とその着霜制御について	相原 利雄・円山 重直
循環流動層の流動特性と熱交換器への応用	武内 洋
HOKKAIDO Islandの「氷室」	媚山 政良

## 〈解 説〉

金属の凝縮 —ミクロ的伝熱への一つのアプローチ—	石黒 亮二・杉山憲一郎
乱流伝熱の数値解析	鈴木健二郎
石炭ガス化複合発電に関する研究の現状と今後の課題	瀬間 徹

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 凵 (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 査 (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

### <特集：第21回夏季伝熱セミナー>

第21回伝熱セミナーを終えて …… 準備委員長 …… 相原 利雄 (東 北 大) ……	1
夏期伝熱セミナー所感 …………… 伊藤 猛宏 (九 大 工) ……	3
パネルディスカッション「熱工学で新材料はどこまで可能か」 の話題から …………… 飯田 嘉宏 (横浜国大) ……	4
伝熱セミナー：「数値解析で伝熱のどこまでわかるか」 について …………… 小竹 進 (東 大) ……	6
新材料開発と熱物性値 …………… 荒木 信幸 (静岡大・工) ……	8
原発反応度事故 …………… 藤城 俊夫 (原 研) ……	12
伝熱セミナーを終えて …………… 熊谷 哲 (東北大学) ……	16
会場係としてセミナーに参加して …………… 広野 洋一 (東北大工) ……	17
第21回伝熱セミナーに参加して …………… 宗像 鉄雄 (東 大 院) ……	18
第21回伝熱セミナーを振り返って …………… 齊藤 武雄 (東 北 大) ……	19
「大放談会を司会して」 …………… 棚沢 一郎 (東 大) ……	21
第21回伝熱セミナー大放談会記録 ……………	23

### <故・佐藤俊先生を偲んで>

佐藤俊君を想う …………… 水科 篤郎 ……	57
佐藤俊先生のご逝去を悼む …………… 岐美 格 (京 大) ……	58
「佐藤 俊先生を偲んで」 …………… 鈴木健二郎 (京 大) ……	60
佐藤 俊先生の思い出 …………… 木枝 茂和 (日 立) ……	63
In Memoriam …………… Ernst R. G. Eckert ……	65
In memory of Professor Takashi Sato … Professor and Mrs. Warren H. Giedt ……	66

### <国際会議報告>

国際会議「Numerical Methods in Thermal Problems」(第5回) …………… 小竹 進 (東 大) ……	67
---	----

### <研究トピックス>

超流動現象とその応用 …………… 村上 正秀 (筑波大) ……	69
---------------------------------	----

超臨界圧ヘリウムの乱流熱伝達 .....	伊藤 猛宏 (九 大) .....	83
キャビテイ底面からの強制対流熱伝達 .....	山本 春樹 (旭川高専) .....	94
低圧力損失型流動層熱交換器とその着霜制御について .....	相原利雄, 円山重直 (東北大) .....	102
循環流動層の流動特性と熱交換器への応用 .....	武内 洋 (北開試) .....	114
HOKKAIDO Island の「氷室」 .....	媚山 政良 (室工大) .....	131

#### <解説>

金属の凝縮 —ミクロ的伝熱への一つのアプローチ .....	石黒亮二, 杉山憲一郎 (北大) .....	135
乱流伝熱の数値解析 .....	鈴木健二郎 (京大) .....	143
石炭ガス化複合発電に関する研究の現状と今後の課題 .....	瀬間 徹 (電力中研) .....	153

#### <地方研究グループ活動報告>

(1) 北海道研究グループ講演会 .....	170
(2) 関西研究グループ講演会 .....	172
(3) 中国・四国研究グループ講演会 .....	175
(4) 中国・四国研究グループ講演会 .....	177
(5) 九州研究グループ講演会 .....	178

#### <編集後記>

Vol.26, No.103の編集経過と Vol.27, No.104「産官学共同研究特集号」の企画について .....	第26期編集委員長 谷口 博 (北大) .....	180
---	---------------------------	-----

#### <お知らせ>

(1) 第25回日本伝熱シンポジウム講演募集 .....	183
(2) 2nd International Symposium on Transport in "TURBULENT FLOWS" .....	184
(3) 「数値流体力学の初歩から実用まで」 .....	190
(4) 熱工学シンポジウム「熱工学の現状と展望」 .....	191
(5) 第11回人間-熱環境系シンポジウム .....	194
(6) 第6回混相流シンポジウム .....	195
(7) INTERNATIONAL CENTRE for HEAT and MASS TRANSFER .....	197
(8) EXPERIMENTAL HEAT TRANSFER FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS .....	200
(9) ウォータージェット技術国際会議 .....	201
(10) "International Cooperation for the Advancement of Energy Technology" .....	203

## <特集：第21回夏季伝熱セミナー>

### 第21回伝熱セミナーを終えて

準備委員長 相原利雄（東北大）

宮城県鳴子温泉郷の近く、東北大学付属農場の一角に在る川渡共同セミナーセンターにおいて、8月5日（水）午後から7日（金）午前にかけて、昭和62年度の伝熱セミナーが開催された。東北新幹線が開通したものの、古川駅で陸羽東線に乗替え、更に川渡駅から会場まで乗用車でピストン運転と言う不便さにもかかわらず、北は八戸工大の青木先生から九州工大の増岡先生まで、99名もの参加を得て、盛会裡にセミナーを開催する事が出来た。

セミナーのプログラムについては、本誌26巻102号で紹介されており、その詳細は省くが、3つのパネルセッションと放談会、並びに特別講演が用意された。まず第1日目午後には、『熱工学で新材料の開発はどこまで可能か』と題するパネルディスカッションが、5名の講師を迎えて行われたが、司会の飯田嘉宏先生（横国大）のお人柄もあって、和やかな雰囲気醸し出すのに成功した。例年に比べ、8℃も低く、曇り空の涼しい天候を喜んでいたが、夕刻から雨になり、ジギスカン料理の懇親会は、急遽予定していた芝生の庭からセンターの軒庇の下に移設することになった。雨のしおきが吹き込み、肘と肘とがおつかり合う様な狭い懇親会場に、実行委員長として身の縮む思いであったが、何人かの先生方から『参加者の数密度が高くなって、反って懇親の実が上がったのではないか』と慰められた。懇親会には、東北大工学部長でご多忙の大谷茂盛会長、東北大の武山颯郎元会長、八戸工大の江草龍男先生、芝浦工大の片山功蔵先生など、伝熱研究会の長老の先生方をお迎えし、また次期セミナー準備委員長の伊藤猛宏先生（九大）の御参加も得て、盛大かつ極めて賑やかに進められた。

懇親会が閉じたあと、7つの研修棟のうち、3つの大研修棟において、二次会がそれぞれ随意に持たれた。。特に第8棟での二次会には、自然発生的に助手クラスの若手研究者と院生諸君が集り、若人達のエール交換の場となったことは、本セミナーの目的の一つが達せられたものと、大いに喜んでいる。

2日目の午前には、小竹進先生（東大）司会のもとで、『数値解析で伝熱のどこまで分かるか』と題するパネルディスカッションが開かれ、5件の話題提供が行われた。現在、若い方々に最も人気のあるテーマなので、活気のあるセッション展開となった。この日の午後は、まるまる休息に当てた。見学コースでは平泉の中尊寺・毛越寺を訪れ、帰途に鳴子温泉で汗を流して頂いた。テニスコースでは25名もの参加を得て、恒例の熱戦が繰り広げられた。夕食後、棚沢一郎先生（東大）の総合司会で、『21世紀の伝熱：その予測をタイムカプセルに詰めよう』と題する放談会が行われた。テーマが大き過ぎた為か、当初、エンジンの温まるのに若干時間を要した様であったが、棚沢先生の洒落な司会のおかげで中盤頃から熱気を帯び、延々3

時間近い大放談会となった。この放談会の模様は、齊藤武雄幹事が記録にとどめ、タイムカプセルとして本誌に紹介頂ける由である。

最終日は、まず東北大の阿部博之教授によって「次世代の地熱開発としての高温岩体の利用」と題する特別講演が行われた。国際的に著名な先生の研究が、豊富な資料と巧みな論旨の展開によって紹介され、多くの示唆と境界領域への関心を喚起したものと思われる。最後に、越後亮三先生（東工大）によって、『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』と題するパネルディスカッションが行われた。最新の話題5件を集めたこのセッションは、特に若い方々にとって、今後の研究課題の選択に資するところがあつたに相異なる。

以上、自費を含めてセミナーの概要を記したが、以下にはセミナーの準備と実施の経緯を述べたい。準備委員会は、当初、大谷先生の委員長でスタートしたが、大谷先生が工学部長・化学工学会会長・伝熱研究会会長・熱物性研究会会長等の要職に多数つかれた為、今春から筆者が準備委員長を引き継ぐこととなった。筆者は、実行委員長をお引受けした際、次の様な方針だけは何とか堅持したいと考えた。すなはち、まず、セミナーを成功させようと言う煩惱は、初めから捨てよう。次に、遠方から参加される方も、お世話する地元の者も、双方が楽しめる雰囲気を作ろう。最後に、成否は別にして、ともかくベストを尽くす。

この方針に沿って、事故を避けるため、学生諸君には車の運転を自粛して貰い、仙台からの器材や食糧、人の輸送は全て教職員と化学工学科のトラックで行ったが、結果的には、助手以上の先生方（特に宍戸先生）には大変ご負担をおかけして仕舞った。一方、参加費を安くするため、会場には、第11回の時と同じ東北大学川渡共同セミナーセンターを使用した。しかし10年の歳月は、セミナーハウスの建屋を老朽化し、他方で我々の生活水準を向上させた。従って、他のセミナーに比べて、居住性は見劣りしたに相違ない。また元および前副会長の先生方から、セミナー若返りの要望が出されていたので、講師には中堅の先生方に多数加わって頂き、各セッションのテーマも上記の様な呼びかけ調（少々行き過ぎたかも知れない）にした。更に若い方達の為に、食事は質より量に重点を置いたが、年配の先生方々にはお口に合わぬものも多々あつたことと思われる。この様な筆者の思いにもかかわらず、若い方々の発言は期待に反して少なかった。これらを考えれば、むしろ自省すべきことの方が多い。

さりながら、御多忙の中をお越し頂いた司会・講師の先生方、齊藤武雄（総務）・熊谷哲（会場）・宍戸郁郎（会計）・三浦隆利（編集）ほか多数の東北大の先生方の活躍、そして山田悦郎（秋田大）・山川紀夫（岩手大）ほか東北地区の先生方の熱心な協力に支えられ、更に東北大を中心とする院生諸君の実に献身的な奉仕を得て、無事セミナーを終了することができた。これらの方々と共に、本セミナーに参加され、有形無形にお力を貸して下さいました方々に、心からの感謝を申し上げ、準備委員長の挨拶とさせていただきます。

## 夏期伝熱セミナー所感

伊藤 猛宏 (九大工)

今回の宮城県川渡における第21回セミナーに参加した感想か何かを、次回第22回セミナーの準備委員長として執筆するようにとの依頼に接しました。いざワープロに向かって書き始めてみて、厄介なもののをしよい込んだとの思いが募ります。批判的になればお世話下さった方々の心証を害しますし、かつ立派なことを述べれば次回のお手並拝見となります。

さていろいろの事情で今回のセミナーに限らず、今までのセミナー全般にわたって、意見や感想を書いてみます。とはいっても八王子、蓼科、福岡、鳴門および今回の川渡と、過去21回のうちの5回ぎりの参加経験では、規定打席数に達しておらずよく全体が見渡せるとは思いませんが、やむをえません。ともあれ、この種の行事の自明な直接的評価は、参加者、伝熱研究会および準備関係者の金銭および時間の負担にふさわしいだけのものを、セミナーが生んできたかどうかということによりましょう。

もっとも著しい成果は、非公式的な雰囲気の中かで多くの人に接する場を提供してきたことではないでしょうか。よかれあしかれ先輩や後輩の生きざまを垣間見ることもあり、学問や研究のインフラストラクチャー、特定の研究の工学および工業における位置づけ、あるいは研究の発展過程の一般的なパターンなどなどに思いをいたすことも多かったかと思えます。これらが書物や論文および通常の研究発表の場からでは得られにくいものであることが、関係各位が献身的なご努力を傾注され、20回を越える永きにわたってこのセミナーを受け継いでこられた原動力であったろうかと推察するわけであります。したがって、その意味では話題は格別に伝熱学でなくてもよかったのだと思考します。ただこのような行事から多くのことを学ぶことができるのは、この道に入って日の浅い層であるとする、参加する立場からすれば旅費等の負担が小さくなく、参加者が開催地の近くの在住者に限定され、準備側のその層においてはセミナーの設営と運営に忙殺され、セミナーの成果を十分に吸収する暇がなかったのではないか、などいろいろと考えさせられます。これらの原因は詰まるところ、参加すべき層と研究会の財政的貧困にあるはずで、昨今この国における意図的な内需拡大の動き、膨大な資本の流出あるは対外援助など、金が余っているとしか思えないような施策と現象を観察するとき、どうも国の財政が間違っているといえ、短絡的に過ぎるのでしょうか。創造的・科学的・技術的の進展も健全な投資に待つところが大きいことがあまねく認識されているとは思えません。

ともあれ今回は十分にテニスを楽しみ、鴨子温泉でくつろぎ、かつ仙台七夕をナフツと見物し、久しぶりの休養ができました。お世話下さいました皆様方ありがとうございました。

パネルディスカッション「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」  
の話題から

飯田嘉宏（横浜国大）

8年前の同会場でのセミナーが印象深いものだったので再度の参加を考えていたところ、パネルディスカッション [P1] の司会をやってくれとの連絡を受けました。「P1」は「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」との主題で、5名の方に話題提供していただき、自由で賑やかな感じでやりたいとの企画側の御意見でした。当日はまことに心もとない司会者でしたが、パネラーと会場の皆様の御協力でどうやら無事に進めることができたので、お礼かたがたその簡単な報告をいたします。

「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」と聞くと、新材料開発の目的のためには熱工学が主役を果たすような印象を受けます。企画側が大向うをねらおうとしてつけた主題のような印象を受けたのですが、同時に熱工学の成果如何が新材料開発の成否を左右しうることを表現しようとしたのかも知れません。それはそれとして少し謙虚に言えば、「新材料開発に熱工学はどこまで寄与できるか」なる主題になるでしょう。各パネラーの話題提供は、この主題に従っていたと言えるように思いました。ただこの主題ですと新材料開発の主役に対して、熱工学は脇役のようになります。各話題の具体的な内容もさることながら、本パネルのもうひとつの共通のテーマは、熱工学が主役なのか脇役なのかの議論であったような気がします。

平沢氏（日立・機械研）の話題提供題目は「半導体製造・結晶成長」で、拡散装置に関する御自身の研究を中心として半導体製造行程における熱的問題を概説されました。同問題の主要な課題は、温度分布を均一化させることであることが実例と共に良く理解できました。また、それら課題は熱応力や化学反応とも深く関連して多様であり、プロセスの高精度化、均一化に対して伝熱研究者の担う役割の重要なことが指摘されました。

電総研の黒川氏は、「太陽電池」をテーマにその概要と現状を紹介され、特に太陽電池の製造と利用に関係する諸技術の流れを詳細に示されて、その内において熱工学が関係するであろう課題を考えさせました。

西尾氏（東大・生研）は、「急冷凝固に関する熱工学の現状と将来」と題する話題提供をされ、急冷凝固技術の意義と現状を適格に紹介され、急冷凝固と熱工学上の問題点を指摘すると共に両者の関係の将来について、示唆ある見通しを示されました。問題点の中で特に興味深かったのは、従来の伝熱学が扱ってきた伝熱面寸法よりはるかに小さな、 $10\mu\text{m}$ 程度の物体の伝熱を扱う「微細伝熱学」なる言葉を示されたことと、従来から常にひとつのブラックボックスであった接触熱抵抗の問題が、こうした場合にも重要な問題として列記されたことでありまし



た。

一方、本パネルにおいて西尾氏は、急冷凝固技術を例にとり、「熱工学の将来像のひとつは境界領域にある」ことを示そうとしたのだと考えられます。すなわち、「工業技術環境の二次的自然化、工業技術の実験室化および境界・学際化を特徴とする高度科学技術において、熱工学もこうしたすう勢の例外でなく、今後熱工学もより基本的事実の体系化とともに、他学問領域との本質的接近を迫られるもの」と理解されているのです。

荒木氏（静岡大・工）は「新材料熱物性」と題して、とくに新材料の開発や利用にとって、いかに熱物性が重要かということを実例を挙げて情熱的に語られました。熱物性値の「データそのものが先端技術や新材料開発のkey point にすらなり得る」と説くのです。

塩治氏（石川島重工・技研）は「 $\mu$ -G宇宙材料」と題して興味深い話題を提供されました。何故宇宙で材料を作ろうとするのかの理由も良く判りましたし、無重力状態とは言え搭乗員の動作でそれがくずれるなどのこと、それに最終的には経済性が重要なことなど、なるほどと理解できました。氏によれば、「宇宙基地、宇宙工場では熱利用、熱制御が非常に重要な技術である」とし、「熱工学の貢献度はこの方面でさらに高く、宇宙利用を経済的に可能にする鍵の一つである」としています。マランゴニ対流の貴重なビデオ画面の公開も行われました。

以上のパネラーの方々は非常に熱心にお話し下さり、ディスカッションの時間がほとんどなくなる程でしたが、それぞれの話題例を通じて、今後の産業で大きな分野を占めるであろう新材料方面における熱工学の役割り像が見えたように思いました。しかし言うまでもなく、と云ってはいいい過ぎでしょうが、熱工学は主役と言うよりは矢張り脇役でありましょう。では、どんな位置の脇役かが問題です。劇の構成にとって、さしみのつま的なものか、或いはその脇役なくては劇そのものが成り立たないものか、と云うことです。

パネラーの方々の話題では、熱工学が後者の役割を演じることが非常に多い、ということ为例証したのだと思います。これはあたかも原子力開発における熱工学の役割と対比できるかも知れません。主役は核工学でしょうが、実用化に当たって不可欠で、最も重要な技術の一つが熱工学でした。ただ、原子力と新材料とで大きく相違する点は、前者が大きなプロジェクトの中で数少ない具体的課題を持っていたのに対し、新材料に対する課題は、まことに複雑多様であることです。従って、熱工学者としては、従来の熱工学にとらわれず、積極的に多様かつ複合的な問題に進出していく意識が今後必要とされるでしょう。この際には同時に、西尾氏が指摘されたように、熱工学が「具体性を失わないで本質にせまる」態度をとっているならば、塩治氏が表現されたように、「熱工学が信頼され役立つ武器を提供」でき、「材料開発が実用化に近づいたとき、なお熱工学の助けを求められる」ようになる、というものでしょう。

伝熱セミナー：

「数値解析で伝熱のどこまでわかるか」について

小竹 進（東大）

昨年の幹事会で、伝熱セミナーは年令の若い層を対象にしているのに若い層の評価が低いので、次回は若い層による発想で若い層によるセミナーを企画してほしいとお願いした。このようなことを考慮されて相原準備委員長は、「・・・はどこまで可能か？・・・どこまでわかるか？」という問いかけ型にして、講師陣も大きく若返らせ、若い層に魅力あるものをと企画に苦勞されたようである。しかし、この問いかけ型のセミナーは、一見魅力的に見えるが実際には本質的に非常に難しい面を含んでおり、結果としては及第点に至らず非常につまらないものに終わったのではないかと思っている。

その大きな理由は、まずこうした問いかけに答え得る立場に問題がある。与えられた命題を現在専門に研究している立場では、現在の研究の外挿的な延長線を外れることは困難であるし、専門にしていな立場では内容が空転し想像的な「お話」になる。単なるお話として楽しむなら後者の立場が面白いであろうが、遠路参加費を払って窮屈な会場でお行儀よく耳を傾けるほどのものでもないだろう。もう一つの問題は、こうした問いかけの答えを聞く立場にある。すなわち、こうしたことを聞いてどうしようということかということである。文化教養的な問題なら単に教養として受け流すにとどまることもできようが、自分の研究内容に直接利害関係が生じるような問題ではより積極的な対応にならざるを得まい。したがって、ここまでわかりますよ、可能でありますよと言われても、それが論理的推論である場合以外はこうした立場の人には興味がない。しかし、こうした論理的推論は多くの場合現在の外挿的延長線上にあり、こうした人々には分り切ったことである場合が多い。論理的でなく主観的な要素が含まれているときは、論理的な討論は不可能でありただ拝聴するしかないつまらないものになる。

いずれにしても、面白いような面白くないような難しい内容のセミナーであり、講師の先生方もたいへん苦勞されたことと推察されるが、「数値解析で伝熱のどこまでわかるか」については、

- (1) 乱流伝熱 鈴木健二郎（京大）
- (2) ふく射 黒崎晏夫（東工大）
- (3) 熱伝導・相変化 斎藤武雄（東北大）
- (4) 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）
- (5) 数値解析と実験のはざま 荻野文丸（京大）

の諸先生に講演をしていただいた。以上の理由で討論は低調にならざるを得ないと思っていたが、さらに司会の拙さが重なってより低調に終わったのは残念であり、せっかく

準備していただいた相原先生以下の準備委員会の先生方に申し訳ないと思っている。

悪口のついでに各先生の講演内容の勝手な批評を許していただくことにする。

まず、「乱流伝熱」では、LESを含めて乱流モデルの確立およびその妥当性の検証のために、「数値解析で伝熱がわかる」には一層の実験的研究が必要であると結論されている。すなわち、数値解析は実験以上のことはできない、数値解析をするならまず実験をやれという悲観的展望である。厳密には現状では当然のことであるが、厳密性をどのように緩和した場合どこまでなができるか、できるようになるかという議論が欲しかった。

「ふく射」では、実験が難しいために数値解析は大いに利用されであろうが数値計算法の確立が急務であると述べ、しかし数値解析で画期的なことができるかどうかは懐疑的であると結んでいる。現状のほんの少しの延長線でしか考えられないであろうというこれも悲観的な話である。しかし、現在のふく射伝熱ばかりでなく、遠赤外光やレーザー光などの最近急激に発展している光工学を利用する応用分野での問題に対してはどのようなだろうか？

「相変化を伴う熱伝導問題」では、主として移動境界問題を中心にしてその解析手法を解説し、凍結・凝固の問題にますます利用されるであろうといわれたが、相変化による単なる境界の移動の処理技術の重みが強く、相変化そのものが数値解析でどうわかるようになるかということがわからなかった。相変化そのものの詳細がわかるようになることも数値解析の利用の一つであるように思えるのだが。

「スーパーコンピュータによる大規模熱流解析」では、動燃事業団における高速増殖炉内の熱流動解析例をしめし、まさに「数値解析で伝熱のどこまでわかるか」の実例をしめしていただいた。短時間で数多い例をしめしていただいたので、なにがどこまでどのようにわかったか、問題がどこにあるのかがわからなかったのではないかと思う。こうした解析例が今後数多く発表されであろうが、会場でも指摘があったようにどのような境界条件や初期条件が重要であるとか、メッシュ数・大きさや収束条件によって結果がどう変わるとかというノウハウ的な情報交換がセミナーやシンポジウムの重要な意義の一つとなるであろう。

最後の「数値解析と実験のはざま」の「はざま」は、オーバーラップという解釈であり、両者は互に相補関係にあるとして、締めくくりに要領よくまとめてくださったが、時間がないためもあって概念的になりすぎ具体性に欠け全体としてわかりにくい話に終わったのは残念である。

命題そのものが難しいこととその大きな問題を3時間の間に5件も取り上げるという欲張ったプログラムで、どのような成果があったか非常に疑問であるが、今後こうした問題が多くの場合で話題になるきっかけになれば幸いであると思っている。

## 新材料開発と熱物性値

荒木信幸（静岡大・工）

### 1. まえがき

伝熱セミナーでは、実行委員の齊藤先生からいただいた「新材料熱物性」という題目で話題提供を行った。その内容は、①新材料開発と熱物性値との関連、②新材料の熱物性値情報の実体、③新材料の熱物性値測定方法、の3点にまとめられる。

また、パネル討論の主題は「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」であったが、このセッションのパネリストの方々には新材料の開発における熱工学の役割がいかに大切かをそれぞれの分野の具体例をあげて説明された。しかし、「どこまで可能か」の限界に対しては「支援的役割」ととどまる事例が多いように感じた。

「熱工学」を「熱物性値研究」に置き換えた場合、支援的役割の傾向がさらに強くなると感じる人が多いと思う。これは、熱物性値を知らなくとも新しい材料は開発されるし、関係するとしても出来上がったものを評価するために熱物性値を測定するという状況が一般的であるためである。このような場合は、確かに、熱物性値研究が主体的に材料開発に携わったとは言えない。しかし、「このような熱物性を持つ材料を開発したい」との要求は新材料開発の原点であり、熱物性値と言えども、物性論に基ずく研究の成果などにより意図する熱物性値を持つ材料の開発が可能となってきている。つまり、「熱物性値研究で新材料を開発する」と言える状況が生まれつつあると思う。本稿では、伝熱セミナーで提供した話題のうちの①と②に関連したことの概要を述べる。

### 2. 熱物性値の情報

熱機器を設計したり、熱に関与する実験をしたり、コンピュータにより熱的現象をシミュレーションする場合など、そこに関与する物質の熱物性値を必ず必要とする。従来から使用されている物質であれば、ほとんどの方々は手近かにあるハンドブック等を利用することになるが、その資料によっては随分異なった値を示す場合が多い。例えば銅のようにありふれた材料であってもTPRC<sup>(1)</sup>がまとめた熱伝導率の測定者による違いは温度10K付近で20から20,000W/(m・K)もの間にばらついている。不純物等を規定せずにデータ収集したことがこれらのばらつきの最大原因であるが、たとえそれらの材料性質を特定してもばらつきはおさまらない場合が多い。

真の値は「神のみぞ知る」であるが、星の数ほどあるデータの中から、物性論的考察や測定誤差の検討などによりその真値を探る努力も行われている。TPRCが求めた銅の熱伝導率の推奨値は測定値の平均ではなく、数あるデータ群の外側にある。

権威ある機関の推奨値と言えども評価方法や測定法の進歩により変化するものと認識しておくべきである。たとえばトルエンの熱伝導率データは年々値が小さくなる経年変化(?)を示している<sup>(2)</sup>。現在ではTPRCの推奨値よりかなり小さい値が「真値」とされている。このように従来のありふれた物質であっても、熱物性値情報には常に気を配る必要がある。

### 3. 新材料開発と熱物性値とのかかわり

新しく材料を開発した場合、その諸物性値を計測して従来の材料との相違を明確にして、新しい材料を特徴づける必要がある。従って、材料の開発と物性値計測とは車の両輪のごとく不可分なものである。また従来の材料であっても用途の多様化、使用範囲の拡大のために物性値を新たに必要とする状況が生じる。このように技術が先端であればある程、素材が新しければ新しい程、確度の高い物性値情報が要求される。

このような状況においては、データ情報が商品価値を持つようになり、特殊な物質のデータは機密扱いを受けるようになる。昔の英国、ドイツ、第2次世界大戦後の米国、ソ連がそうであったように、日本も先端技術、新素材の開発が盛んであることを反映して熱物性値研究のリーダーシップをとるべき立場になったとみなしても良いようである。しかし、まだ、「物性値は誰かが測るもの」との後進国性をお持ちの方が多いのは残念である。ここに、新材料開発あるいは先端技術と熱物性値が深くかかわり合っている例を紹介する。

#### (1) 超伝導(超電導)材料開発

超伝導現象を示す材料の開発がブームとなっている。開発した材料が超伝導状態になっているかどうかの判定にはマイスナー効果などにより行われるが、比熱の測定によっても確認できる。特に比熱による場合には物体の内部まで超伝導になっているかどうかの判定ができる。これは臨界温度 $T_c$ において、第II次相転移による「潜熱のない比熱の飛び」が発生するからである。

#### (2) 超流動現象の解明と応用

超伝導と同様に液体ではラムダ点で超流動現象の発生にともない比熱に不連続点が生じる。また、HeIIの熱伝導率はHeI(λ点より高温領域)と比較し、桁違いに大きい。その伝導のメカニズムを研究することはもちろん大切であるが、熱伝導率あるいは熱伝達率の正確な測定もHe利用の応用面からきわめて重要である。

#### (3) 半導体デバイス用高熱伝導性材料の開発

ICチップや半導体モジュールの高密度化、高性能化を進める上で熱の除去がデバイスの成否を左右するキープポイントとなっている。このため半導体デバイス用高熱伝導性材料の開発が盛んに行われている。たとえば半導体モジュールに高熱伝導性SiCセラミックス(単結晶では銀以上の熱伝導率を有し、しかも電気絶縁性がある)を使うと従来の $Al_2O_3$ セラミックスを使った場合の大きさと比較し、桁違いに小さくなり信頼性も向上するようになる<sup>(3)(4)</sup>。

また、半導体デバイスは積層状にして使用することから熱膨張率の違いによる熱応力が発生

し、デバイスを破損させる事故が発生している。従って熱伝導率が大きいと同時に膨張率がSiと同程度とすることも必要である。最近開発された窒化アルミニウム(AlN)は熱伝導率が70~260 W/(m·K)と大きいが、熱膨張率は $4.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ で、単結晶シリコンと大きな差がない<sup>(5)</sup>。

#### (4) 半導体結晶成長技術

半導体を固化しながら結晶を成長させていくプロセスにおいては、潜熱発生を伴った伝熱をはじめ、伝導、対流、放射による熱移動が高温雰囲気にて複雑にからみ合っている。しかも、これによって生じる温度分布や融液の動きが製作される単結晶に大きな影響を及ぼしている。この非常に微妙な結晶成長技術を試行錯誤的な手段ではなく、シミュレーションによって確立することが求められている。そのためには融液などの熱物性値を正確に求めることが急務となっている。融液の物性値の与え方次第によっては対流の方向も逆転することもある。

#### (5) 傾斜機能材料開発

日本においても宇宙往環機(スペースプレーン)の開発構想が進められている。このような航空宇宙開発を念頭において「傾斜機能材料」と称する超耐熱材料の開発研究も行われ始めた<sup>(7)(8)</sup>。これは、熱伝導率や機械的強度に連続した分布を持たせ、熱応力の軽減や熱しゃ断性能の向上を計るものである。この材料開発においては、物性値の分布関数決定が材料の開発製作に先行している。

### 4. 新材料に対する測定技術の進歩

新しい特性を持つ材料は、その形状や熱物性値も従来のものと大きく異なっていることが多い。その場合、熱物性値を測定する方法も従来のものを適用できず、新しく開発しなければならぬ事態が発生する。従来の材料であっても、高温・高圧などの新しい条件下で使用する場合も同じである。熱物性値の中でも熱伝導率は測定者や測定方法によってデータのばらつきが非常に大きくあらわれる。データの精度を上げるためには、試料形状や状態によって最適な方法を選択することも解決策の一つであるが、詳しい事は資料(9)を参照していただく事にしてください。ここでは省略する。

### 5. あとがき

「熱」を扱う研究者や技術者が何気なく使う熱物性値データにも種々の問題点が含まれており、データそのものが先端技術や新材料開発のkey point にすらなりうることを少しでも御理解いただければ幸いです。

最後に、相原先生をはじめ実行委員の方々の献身的な奉仕の姿勢を肌身に感じ、全く頭が下がる思いでした。また、3日間を本当に楽しく過ごさせていただきました。厚く御礼申し上げます。

#### 文 献

- (1) Y.S. Touloukian, Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Plenum Pub., vol.10 (1970), 9a.

- (2) 蒔田、計量管理、33-4(1984), 7 または長坂、長島、第1回熱物性シンポジウム論文集(1980), 68.
- (3) 飯田、新材料、新作動流体の熱物性値の研究促進に関する総合的研究報告書(関)、(1986),32.
- (4) 浦、中村、工業材料、31-12 (1983), 172.
- (5) 日経ニューマテリアル、No.28 (1987-6), 10.
- (6) 山本、熱物性値の新測定技術に関する調査研究分科会資料(P-SC122)、(1987).
- (7) 新野、他、宇宙輸送シンポジウム、(1986),53.
- (8) 科学技術広報財団、複素化による機能発現と熱応力緩和のための基盤技術に関する調査報告書、(1987),7.
- (9) 荒木、機械学会誌、90-822, (1987), 597.

## 原発反応度事故

藤城俊夫（原研）

伝熱工学が極限環境下の安全性確保に重要な役割を果たしている事例の一つとして、発電用原子力施設、いわゆる原発の反応度事故に関する研究の一端を御紹介して、御参考としたい。

### 1. はじめに

チェルノブイリ事故以来、もともと原子力の専門用語である「反応度事故」という言葉が一般にも良く知られるようになった。この不幸な事故は、この型の原子炉が出力増加に対し正のフィードバックが働く特性であったことに加え、制御が殆ど利かない運転条件の下で安全保護系まで停止させて実験を強行したため生じたものである<sup>(1)</sup>。この結果、原子炉が暴走し出力が定格の数百倍に増加して炉心が破壊し、更に、原子炉建家までもが破壊され、極めて広範囲に放射性物質が放散される大事故になってしまった。

このように、反応度事故は炉心破壊につながる可能性があったため、原子炉開発の初期から研究が開始され、米国のTREAT実験、SPERT実験、PBF実験等の、各種の原子炉を用いた実験が行われてきた。我が国においては、1976年から原研においてNSRR（Nuclear Safety Research Reactor）実験が開始され、これまで820回を超える燃料破損実験が実施された。これらの成果に基づき我が国の原発の反応度事故に対する安全規制、基準が整備されてきている。

### 2. 反応度事故時の燃料のふるまい

我が国の原発の主流である軽水炉は、チェルノブイリ原発とは異なり、出力上昇に対して強い負のフィードバック特性を有しているため、何等かの原因で制御棒を急速に引き抜くような大きな外的要因が生じない限りは、反応度事故には至らない。このため安全評価を行う場合には、最大想定事故として、加圧水型炉（PWR）では、何等かの原因で制御棒駆動装置の部分が破断し、原子炉容器内の高圧により制御棒が急速に炉心から逸出する事故（制御棒逸出事故）を、また沸騰水型炉（BWR）では、制御棒が駆動部から外れて炉心内に残留したまま運転し、運転中にこの残留制御棒が落下して炉心から急速に抜け出す事故（制御棒落下事故）を想定する。図1は電気出力1100MW級のBWRの制御棒落下事故の解析例である<sup>(2)</sup>。原子炉出力は、最初、指数関数的に上昇するが、負の反応度フィードバック作用によって、自動的に降下し、パルス状の出力履歴をとって事故は収束する。燃料温度は、この暴走時の出力によりほぼ断熱的に上昇し、もし、被覆管温度が溶融温度近くになると燃料の破損が生じる。軽水炉の安全設計では、上記の最大想定事故でも燃料の損傷は炉心の一部の燃料被覆管にクラックが生じる程度で収束し、破壊力の発生には至らないような配慮がなされている。

NSRR実験等の原子炉を用いた実験においては、実際の原子炉の燃料を図2に示すように強固



な実験カプセルに封入し、パルス炉を用いて高出力でパルス中性子照射することにより反応度事故時の暴走出力の発生を再現している。図3はNSRR実験で測定された燃料被覆管の温度履歴を、また、図4は、燃料に与えられた発熱量に対応する実験後の試験燃料の外観写真を示したものである<sup>(3)</sup>。反応度事故では、暴走出力は数msから高々1~2sの極めて短い時間に発生するので、原子炉燃料にはほとんど断熱的に熱量の蓄積が生じる。このため燃料の発熱の指標として、燃料の最大エンタルピが通常用いられる。図3および図4に示すように、燃料エンタルピが約85 cal/g UO<sub>2</sub>以下ではDNBは発生せず、燃料棒にも何等外観上の変化は生じない。燃料エンタルピがこれを超えてDNBが生じると被覆管温度は1000°C以上に達し、膜沸騰が数sから数10s間維持された後にクエンチする。燃料エンタルピが増加し、約220 cal/gUO<sub>2</sub>になると被覆管内面が溶融して燃料破損が生じる。さらに、燃料エンタルピが約325 cal/gUO<sub>2</sub>を超えると燃料が溶融分散し、蒸気爆発を引き起こす。ソ連の評価によると、チェルノブイリ事故では、燃料エンタルピは300 cal/gUO<sub>2</sub>を超えたとされているので、炉心の大部分の燃料が図4に示されているように分散に至ったものと推定できる。

### 3. 燃料挙動を支配する伝熱現象

以上の燃料挙動は、全て燃料ペレットに与えられた熱エネルギーに源を発するものであるから、伝熱現象に強く支配されている。ここで特徴的なのは、伝熱現象が急激な過熱に伴う燃料棒の動的な変形等と相互作用しつつ推移することである。

DNBの発生と被覆管温度の急上昇：DNBの発生には、燃料エンタルピのしきい値が存在するが、これは燃料ペレットと被覆管の間のギャップ熱伝達に関係する。即ち、暴走出力により急加熱された燃料ペレットが熱膨張によって被覆管との間のギャップを閉じ、十分な大きなギャップ熱伝達が生じるかどうかによってDNBの発生が支配される。また、燃料ペレットは断熱的に昇温し、高温になってから被覆管に接触して伝熱を開始するという一種の熱的な助走期間が存在するため、 $10^7$  kcal/m<sup>2</sup>h を超えるような高熱流束が実現し、DNB後は被覆管温度は $10^4$  deg/sもの極めて大きな速度で昇温する<sup>(4)</sup>。

安定膜沸騰の維持と膜沸騰熱伝達：被覆管温度の急上昇の後には、被覆管の熱膨張と燃料ペレットの収縮とにより、再び燃料ペレット間にガスギャップが形成されて熱流束が低下し、安定な膜沸騰が維持される。しかし、昇温の過程で、燃料と被覆管の境界面温度が両者の共晶反応が急速に進行し始める温度（約1200°C）を超えると、燃料と被覆管の融着が生じ良好なギャップ熱伝達が維持されて、被覆管は急速に溶融、破損へと進行する。また、DNB後の被覆管温度は極めて高温になるため、被覆管表面では冷却材との間で急激な酸化反応を生じて水素が発生する。従って、被覆管表面での膜沸騰は通常の一成分系の膜沸騰ではなく、蒸気膜中に水素の湧き出しが加わったものとなる。このため気相膜は厚くなるが、水素の良好な熱伝導と水素発生に伴う気液界面の乱れの影響等により、結果的には実用上は通常の膜沸騰熱伝達式で評価できる熱伝達率となっている。

燃料分散時の破壊力の発生：燃料エンタルピが325 cal/gUO<sub>2</sub>を超えると、燃料は溶融・分散し、蒸気爆発を生じる。反応度事故における蒸気爆発の特徴は、溶融燃料が冷却材中に噴

出し混合することである。これは燃料被覆管内の加熱されたギャップガスや燃料蒸気あるいは気体状の核分裂生成物等の内圧によって溶融燃料が被覆管の破断孔から噴出するためである。従って、溶融燃料の噴出時に燃料はすでにかなり微粒子化しており、冷却材との接触によって微粒子化が更に進行するものと考えられる。微粒子化した燃料の多くは球形で、内部に空孔が生じているのが特徴であり、微粒子化の進行のメカニズムを解明する上で、冷却材の巻込みの可能性等について示唆を与えている。蒸気爆発の結果、衝撃圧や冷却材の吹上による水撃力等の機械力を生じ、また冷却材の流出に対する抵抗が大きい系では静圧上昇が生じる。これらの機械力は燃料エンタルピの上昇と共に増大し、最高値は21 MPaに達するが、約400 cal/gUO<sub>2</sub>以上になると飽和する傾向にある。又、燃料に与えられた熱エネルギーが機械的エネルギーに転換する効率は燃料エンタルピに対して指数関数的に増加する。これは燃料の微粒子化の進行に符合しており、図5に示すように、表面積平均した燃料粒子の平均径によって良く整理されることから、伝熱面積が支配的因子であることがわかる<sup>(5)</sup>。

#### 4. まとめ

反応度事故における、燃料の破損挙動や破壊力発生について多くの事柄が解明されてきているが、この中で伝熱工学的な側面からの研究は、現象のメカニズムを解明し、実験結果を一般化していく上で大きな役割を果たしてきている。そして、これらの成果は、原子炉の安全設計や安全規制に広く活用されてきている。これからの反応度事故に関する研究は、使用済み燃料や改良型燃料、さらに、高速炉燃料に関する研究へと展開されていくが、ここでも伝熱工学は大きな役割を担って行くものと期待される。

#### 参考文献

- (1) USSR State Committee on the Utilization of Atomic Energy, The accident at the Chernobyl nuclear power plant and its consequences, information compiled for the IAEA experts' meeting, August 25-29 (1986), Vienna.
- (2) M. Ishikawa et al.; Proceeding of Topical Meeting on Thermal Reactor Safety Report, CONF-770708, (1977).
- (3) 石川、藤城；原子炉反応度事故と安全性研究の課題、化学工学、47-8, (1983).
- (4) T. Fujishiro and S. Tanzawa; Nucl. Engng. Des., 73-3, (1982).
- (5) T. Tsuruta et al.; J. Nucl. Sci. Technol., 22-9, (1985), 742.

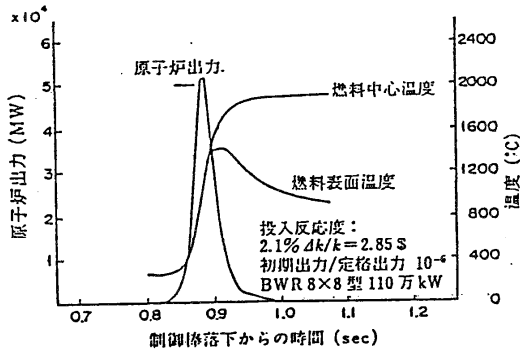


図1 BWR制御棒落下事故における原子炉出力と燃料温度の過渡変化

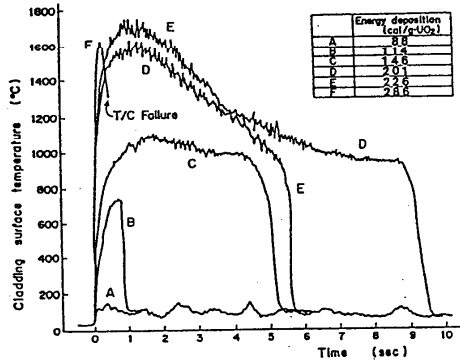


図3 燃料被覆管の代表的な温度履歴

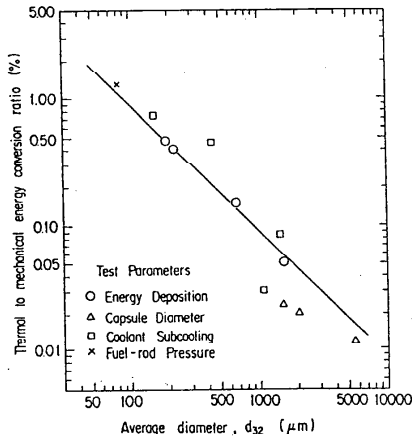


図5 機械的エネルギー転換率と燃料粒子径の関係

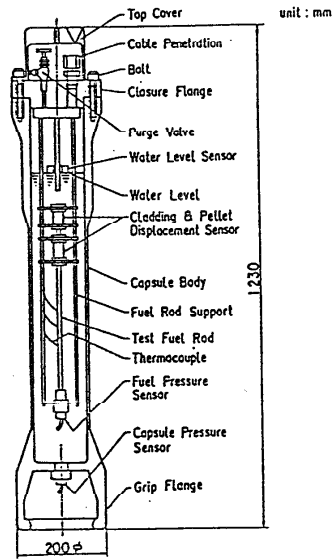


図2 NSRR実験カプセルの概要 (大気圧実験カプセル)

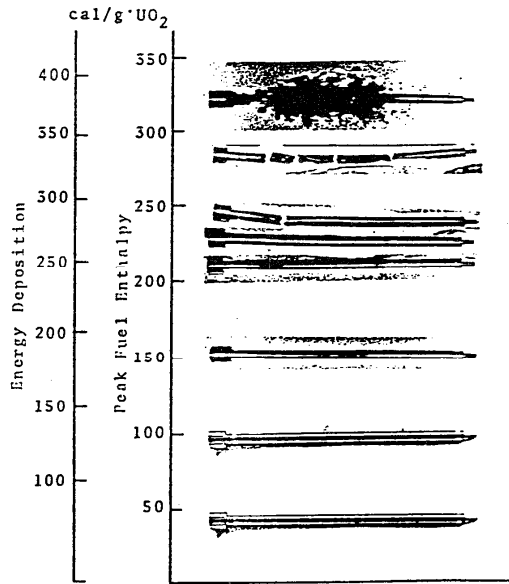


図4 パルス照射後の試験燃料の外観

## 伝熱セミナーを終えて

東北大学工学部 熊谷 哲

セミナーを振り返って、今改めて皆様に感謝申し上げたい気持ちで一杯である。あのような片田舎まで足を運んで下さった参加者の皆様、お忙しい中を快くお引き受け下さった講師、話題提供者ならびに司会者の皆様、そして夜遅くまで献身的に働いてくれた助手、学生の諸君に、厚く御礼申し上げる次第です。

セミナーを担当して一番頭の痛いのは、参加者の人数の予測である。会場は、東北地区でセミナーをお引き受けすることに決めたのと同時に、東北大学川渡セミナーセンターに決まったが、周りを取り立てて観光地もなく、交通も不便なところへ、果たしてどれくらいの人数が集まるだろうか。ましてや、前回参加して下さった方々は、とてもその気になれないのでは。など、不安は尽きず、その上、もし万一逆に参加申込が多く、全体で100名を越えるようなことがあったら大変で、将に綱渡りの企画だったが、結果としての参加者99名は、上出来だったといえる。武山教授に言わせると、儲けるのでなければ参加者に「ありがとう」はおかしい、ということになるが、このような状況のため、感謝の気持ちは自然に湧いてくる。

会場は、クーラーの設備が全然なく、伝熱のセミナーといいながら、暑さには全くのお手上げ状態で臨まざるを得なかったが、幸いにも異常な長梅雨のお蔭で、用意したうちわも殆ど要らない程涼しい3日間であった。温泉地のごく近くにありながら温泉の出ない会場で、風呂にどのように入って戴くかも大変な難問だったが、2日目の午後をまるまるレクリエーションに当て、テニスと見学のグループそれぞれの帰りに温泉に奇っ戴くという形で、なんとかクリアできたと思っている。

しかし、当初屋外でのバーベキューパーティを考えていた懇親会が、大雨のために軒下の狭い場所でやらざるを得なかったのを始め、食堂や寝室でのセルフサービスなど、窮屈な思いをさせたりで、果たして高い参加費と交通費分の何かしらをお持ち帰り戴けたか、真に心もとない。

宿泊棟に帰ってからの二次会はどことも賑やかだったようで、アルコール類の消費量は我々の予想を越える(勿論不足することはなかったと思っているが)ものだったが、全体としては、前回から較べると若い人達が多に行儀のいいのが気になるセミナーだった。

とまれ、いろいろな事態を考え、あれこれ思い悩んだものの無事に終わることができたのは、始めに申し上げた皆様のお蔭である。とくに今回ご講演をお願いした方々は、正に多忙を極めておられる方々であり、中でも飯田先生、棚沢先生、西尾先生には、大勢の学生諸君を伴って参加戴き、深く感謝します。

## 会場係としてセミナーに参加して

広野 洋一 (東北大工)

今回の伝熱セミナーでは、私はパネルディスカッションの会場係を務めさせていただきました。そしてこれが初めての伝熱セミナーの参加でした。伝熱シンポジウムのセッションなどの会場と較べると至らぬ点が多く、特に今回は会場が狭いという条件も加わり、参加した方々にはいろいろご不便をおかけしたことと思います。

さて、“会場係として苦心したこと、感想”を書くように、ということですので、その窮屈な会場設営とならざるを得なかったこと、それによる不手際、感想を極く簡単にひとつずつ書かせていただきます。

そもそも、このディスカッション会場となった東北大学川渡共同セミナーセンターの唯一の会議室の定員は80名程度です。そこで会場係の最大の課題は、ここにスライドプロジェクター、OHPなどの機材の設置場所を確保しつつ、セミナー参加予定者100名の席を設ける、というかなり無理な条件の会場作りでした。いろいろレイアウトを考えて、可能な限り詰めて全員のテーブルとイスを用意しようと試みましたがどうしても無理で、会場壁際の空いているところにイスだけという席を設けることで、人数分だけは用意した形となってしまいました。スライド、OHP用のスクリーンもそれぞれ専用に用意したかったところですが、やはり場所の余裕がなく、一つのスクリーンで共用することにしました。

したがって、出来上がった会場はどうしても窮屈なもので、その結果今度は会場内の通路のスペースが削減したことから、講演終了後のディスカッションでは、会場係がそれぞれの方のところへマイクを速やかに持っていくことが出来ず、たびたびマイクなしのディスカッションとなり失礼致しました。

ところで、今迄は伝熱セミナーなるものを私はせいぜい“伝熱研究”の特集記事を通してしか知らなかったわけですが、参加してみると伝熱シンポジウムや学会などのような緊張した雰囲気と異なり予想以上に和やかであったということです。特に“夜の部”を見ていると、伝熱セミナーは学生にとって、著名な伝熱の先生や企業の伝熱のエキスパートとざっくばらんに接することができる絶好の場であり、さらに他大学の伝熱研究室の学生との交歓の場でもあると感じました。と同時に残念だと思うのは、どうしても“昼の部”の会場では学生の意見が出なくなるということです。私としてはできるだけ多くの学生にも伝熱ヒミナに参加してもらい、そして学生が“夜”、“昼”問わずにディスカッションできるセミナーがあってもいいような気もしました。

## 第21回伝熱セミナーに参加して

宗像 鉄雄 (東大院)

私が伝熱セミナーに参加するのはこれで4回目である。第18回伝熱セミナー(場所は岐阜の御獄山)が最初であり、それから連続して4回楽しく参加させて頂いた。特に今回の伝熱セミナーにおいては、私の現在の研究テーマが「単結晶材料製造における融液中の対流」であり、材料製造の模擬実験及び数値解析により研究を進めている関係もあって、特に第1日目の「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」というディスカッションと第2日目の「数値解析で伝熱のどこまで分かるか」というディスカッションには大きな興味を持って参加させて頂いた。

まず第1日目の「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」というディスカッションについての感想を述べたいと思う。現在毎日のように新聞紙上でてくるといっても過言ではない”高温超伝(電)導材料”を始め電子機器産業の基盤をなす超LSIなどの基となる”各種半導体材料”など最近の「新材料」開発はめまぐるしいスピードで進んでいる。しかしながら第24回伝熱シンポ講演論文集を見ると材料開発に関係すると思われる論文の数はわずかに4編だけである。この論文の少なさは、得たいと思う材料の物性は材料の構造に依存しているが、伝熱学では主にマクロな現象を取り扱っているために、伝熱学を利用してはまだ結晶構造を制御するような技術は困難であり、ミクロな目で見ることのできる学問でない材料開発の主流にはなれないためであると思われる。そこで、今回のセミナーで話題となったマイクロ伝熱学なるものが進展していくと材料の構造にまで立ち入ることができ材料開発に関連する論文がもっと増えてくるものと期待される。そのためには、伝熱研究会が多方面の分野の方々との接触が得られる研究会になっていくことに期待したい。第2日目の「数値解析で伝熱のどこまで分かるか」というトピックスについての感想は、数値計算に多大な自信を持っている人は別にして、一般の人は数値計算でおもしろいという結果が得られた場合、まず数値計算と同様な実験を行い実験でその現象が起こるかどうかが確かめられると思われる。反対に実験を行なっておもしろい結果が得られた場合、数値計算でその現象が起こることを確かめると実験及び計算をより強固なものにする。数値計算についてこのような使い方をする限り数値解析だけでは何も言えず、やはり実験とペアとなって数値解析の方も進展していくのではないだろうかと思われる。

最後に、セミナー期間中は東北地方はまだ梅雨が明けておらず連日小雨が降っていたが、2日目のレクリエーションの時だけはきれいに晴れ上がり思う存分テニスができた。また、3日目は都合により朝早くセミナーハウスを後にしたが、有意義な時間を作って頂いた準備委員会の諸先生方に感謝しています。

## 第21回伝熱セミナーを振り返って

齊藤 武雄 (東北大)

第21回伝熱セミナーが仙台の近くの川渡で行われ、予想を大きく上回る99名ものご参加を戴き何とか無事終えることができた。準備委員長には最終的に相原教授を戴き、小生も連絡幹事という立場から総務を担当した。テーマの設定等企画の当初から携わったので、その経緯などを少し述べたい。セミナー開催についての最初の下打ち合わせは、昨年6月初旬に一部の実行委員で行い、運営の基本方針を決めている。まず、大きな柱として講師陣の若返りを図ることが提案された。また、伝熱シンポジウムとは異なった和やかなインフォーマルなセミナーにすることも了承された。テーマについては、新材料やエレクトロニクスなど先端技術に関するテーマを採用すべきとの意見がこの時点で出された。

このあと、小生と熊谷幹事の2人は、小諸市で開かれた第20回伝熱セミナーに参加し、“偵察”も兼ねて、その運営方法などを学んできた。この収穫として講師1人あたりの講演時間をできるだけ短縮し討論時間を多くしようということになった。こうして、昨年第2回幹事会(9/27)において提出した日程案で、最終的なプログラムの7~8割が既に固まった。その後、昨年12月の段階で、若い層にもアピールするようにとテーマを呼びかけ調に改めた。すなわち、たとえば、「熱工学で新材料開発はどこまで可能か」などである。講師の依頼も、このころから平行して行われ、次々とその骨子ができ上がって行った。

こうして、セミナー開催まで計4回もの準備委員会と多数回の実行小委員会を開いて、実施案を練り漸く開催に漕ぎ着けた。

会場の設営、運営など用意周到に計画したつもりであるが、場所が辺鄙なところであることと、参加者数が大幅に増えたこともあり会場が狭く、参加者の皆様には何かとご不便をおかけしたと思う。

2日目の夜には、司会に東大の棚沢一郎教授をお願いして「21世紀の伝熱」 “その予測をタイムカプセルに詰めよう”と題する大放談会が開催され、夜の更けるのも忘れ未来の伝熱の話に花が咲いた。伝熱研究会にはタイムカプセルを作る予算はないので、セミナー終了後、その模様をテープから掘り起こし、この特集号に、ほとんど、そのまま載せて載くことになった。小生の研究室の学生・院生4~5名が延べ50時間以上を費やして完成させた貴重な記録であるので、是非読者諸兄のご一読を勧める。特に、後半のアルコールが効いてきた部分の話は、まさに放談そのものであって面白い(?)。

研究会の編集担当幹事の1人として、たまたま、この特集号の編集の任を編集委員長の谷口博先生から仰せつかった。原稿を整理しているうち、ある先生からの本セミナーに

対する誠に手厳しいご批評に接することになった。（このような意見はお1人だけであったが…）勿論、ご意見に反駁するつもりもないし、弁解するつもりもないが、準備委員長始め準備委員および実行委員の涙ぐましい努力の結果、無事終えたものとの確信を持っている。参加者すべての期待を完全に満たすセミナーは、これからも困難と思うが、このことは貧乏世帯の研究会のこれからの課題であろう。

小生は、6月初めから7月初旬にかけて2度程国際会議のため出張したが、その間、本学の熊谷哲、三浦隆利の両先生および宍戸郁郎氏が肩代わりをしてくれた。ここに記して深く感謝したい。

末筆ながら、司会を担当された飯田嘉宏、小竹進、棚沢一郎、山川紀夫、越後亮三の各先生方ならびに快くお引き受け戴いた講師およびパネリストの方々に深く感謝の意を表します。



## 「大放談会を司会して」

棚沢一郎（東大・生研）

僕は未来予測に類するものを好まない。おみくじ、星占い、手相・人相、八卦などはほとんどインチキと思われるのはもちろんのこと、時折いろいろな団体から送られてくるデルファイ法による未来予測に至るまで、僕はナンセンスなものと考えている。このデルファイ法について言えば、ごく数年前の常識経験者による予測では、いわゆる高温超伝導体の出現は久しく21世紀まで待たなければならないはずであった。このことは、何事によらずわれわれにとっては「一寸先は闇」であることを如実に示している。だから、第21回伝熱セミナーの準備委員長の相原利雄教授から、この大放談会の司会を依頼されたときには戸惑いを感じた。少なくとも僕自身には、21世紀の伝熱についての予言を適中させる自信がなかったからである。

しかし、御宣託的な未来予測はともかくとして、われわれ人間はいやおうなしに未来へ向かって駆り立てられている存在である。未来予測のインチキ性は、未だ来たらざる時間の流れに、あたかも既定の事実であるかのごときものを割り付けるところにある。未来は白紙としてわれわれの前に拡がっており、その上に何を描くかは、われわれの自由な意志と行為にゆだねられている。

最近「伝熱研究」「日本機械学会誌」その他の誌上で、伝熱研究の将来についての記事を目にすることが多い。これは、わが国の伝熱研究が一つの転機を迎えつつあることを示すものであろう。このような時期に、未来に向かってのわれわれの意志を確認し合うのも有意義かも知れないと僕は考えた。そこで、放談会を単なる放談会よりはましなものにし、タイムカプセルを開いた時にも多少は評価に耐えうるような予言を残すべく、スピーカーをお願いした方々には予め4つの設問についての回答を用意しておいていただくことにした。4つの設問とその意味については、放談会記録の最初の司会者の発言の中で説明されている。また当初は、スピーカーの方々から回答用紙をいただいて、僕が何らかのまとめをしようという心積りであったが、ほとんど一言一句残らず再生された記録が「伝熱研究」に掲載されるとのことなので、僕の仕事は大変楽になった。

簡単に放談会の感想を言うなら、大変面白かったの一言に尽きる。予定時間をはるかにオーバーし、3時間を超える長きにわたったが、9人のスピーカーの御意見とそれに対する評論とを僕は楽しく拝聴した。伝熱研究の未来は、必ずしも前途洋々ではないにせよ、悲観的なものでもないらしいとその時は感じた。しかし、いまその記録を読み返してみる

と、将来の伝熱研究がどの分野に光明を見出しうるかについて、具体的なイメージを描くことは難しいという印象を持たざるを得ない。これから暫くは混迷が続くかも知れない。そこから脱け出すには一人の芭蕉の出現が必要であろう。

## 第 2 1 回 伝熱セミナー 大放談会 記録

場所：東北大学川渡セミナーセンター

日時：1987年8月6日 19:00～21:30

### 「21世紀の伝熱、その予測をタイムカプセルに詰めよう」

(司会) 時間になりましたので、今日の大放談会を始めたいと思います。皆様、午後はそれぞれいろいろなコースで楽しまれたことだと思いますし、私自身はテニスをやって、あとはビールを飲んで寝ちゃうのがいちばんいいんですけども、準備委員会の企画がそうなっておりますし、意外にすぐ寝てしまうよりも面白い話があるかもしれない、ということもありますので、これから9時半迄の予定で大放談会をお楽しみ頂きたいと思います。

私10年前のこの川渡セミナーハウスでの伝熱セミナーに出席しまして、そのときにも2日目の晩に大放談会がありまして、テーマは何だったかあまり覚えていないんですけども私がスピーカーの一人であったことを覚えております。森康夫先生とか甲藤先生とか、この間なくなられた佐藤先生とか、我々の一世代前の大先生方も御出席になって大放談に大分注文をつけられたような記憶があります。時代は変わりましたが、今日のテーマは「21世紀の伝熱、その予測をタイムカプセルに詰めよう」というわけです。しかし、タイムカプセルはお金が高くて買えないので、タイムカプセルの代わりに今日の皆さんの放談をテープにとりまして、「伝熱研究」に内容を載せようという企画を……。ご承知のように、四月ごろだったですかね、「伝熱研究」に放談が載りまして黒崎先生、小竹先生がお世話をされた大放談会だったんですけども、話の内容について、もう化石になったといわれる先生から非常に痛烈なコメントが頂けましたので、今度もなるべく羽目を外して頂くと「伝熱研究」の記事からまた色々御批判が頂けるかもしれないと、そういう事ですのでなるべくあまり筋道だった話ではなくて、適当な放談をして頂ければ有難いと思います。しかし、テープをとって内容をまとめて頂くのもかなり大変だという気が致しましたので、私の方で今から一ヶ月くらい前に、今日放談で話題提供をお願いしている方に少なくともこういう事については話して下さいというお願いを致しました。それをちょっとOHPでお見せ致します。

「21世紀の伝熱、その予測をタイムカプセルに詰めよう」というのをテーマとして、放談ですから何を喋って頂いてもいいんですけども、皆さんの議論が重ならないということですと後で議論がしにくいかもしれないということで、基本的な設問が二つあります。

イントロダクションみたいなことで、あまり21世紀の伝熱とは関係がないかもしれないんですけども、今から23年後、2010年の時点で、というのが一つの前提条件です。第一問は「日本伝熱研究会は、ほぼ今の形で存続していると思いますか」、答えは「はい」「いいえ」「その他」の三つから選んで頂くわけです。それで、「はい」というお答えは大変素直なお答なんで、あまり理由を聞く必要はないだろうと思うんですけど、「いいえ」といわれる方は大分伝熱研究会に恨みを持っているか、伝熱研究会にいろいろ不服があるか、まあ何らかの理由があると思いますので補足説明をして頂きます。それから「その他」と言うのは非常にひねくれた答えですから、どういう理由で「その他」を選ばれたか御説明して頂くということにしたいと思います。二番目は「あなた自身は伝熱の研究になんらかの形で関わっていると思いますか」という設問なんです。今日、話題提供をお願いしている方の中でも、何割かの方は2010年には、もうすでに定年退職されて次の大学に移られたり、他の仕事をやっておられるかもしれないですけど、まあそういう事までいろいろ含めて、伝熱研究に関わっておられると思われるかどうかお尋ねしたい。それから、その時点で現役の方はですね、大抵の方は現在の大学なり研究所なりにおられると思いますが、もう、そろそろ2、3年で伝熱研究会から足を洗いたいと思っている方もおられるかもしれませんので、そういう方にはご解答頂きたい。何らかの形というのは各自、自由に考えて頂きたい。で、「はい」という答えは非常に率直ですからあまり御説明はいらないんですけども、「いいえ」「その他」につきましては補足説明をして頂きたい。それから三番目は「そのころ伝熱研究あるいは技術の、もっとも重要あるいは盛んなテーマはなんだと思いますか」、伝熱研究について、いろいろ座談会をしたりするときにはですね、だいたい、これから重要なテーマはなんであろうかというのが、一応、皆様の御関心の中心になる場合が多いだろうと思います。むかし私が助教授になりたての頃に機械学会の分科会、そのときは熱及び熱力学委員会とかいう分科会がありまして、そこで伝熱研究の将来について座談会とかディスカッションをやったことがあるんですね。そのとき非常に悲観的な方が多かったです。それにもかかわらず以後20年位だんだん伝熱研究は盛んになってきたんですが、平家物語ではありませんけれど、あらゆるものは満ちれば欠ける、沸騰曲線でいえば上までいけば必ず下がるわけですね。いつまでもいつまでも上になる曲線というのは有り得ないんじゃないかという気がするんです、こういうものでは。ですから、それを何らかの意味でカバーするためには自分自身でどういうテーマが最も重要であると思うか、自分でどういうテーマをやりたいかということと、あるいはもうちょっと客観的に、どういうテーマをやれば伝熱研究の Societyがつぶれないかということが皆さん考えておられる一つの重要なことだと思うんですけども、ただ2010年といえば大分先ですから予測がしにくいと思うんですがね。5年先位だったら簡単に予測できるかもしれませんが。しかし、強いて何か言っていたいただければ、今日ここに参加されてい

る大学院の学生さんくらいには非常に役に立つだろうと思います。2010年に伝熱研究をやっておられない方のご意見でも役に立つに違いないと思います。で、そこまでが必修科目といえますか、とにかく何とかしてもお答え頂きたい。それで時間が多少余るでしょうから、その他21世紀、これは21世紀というのは2001年からですかね、2000年からですか、まあどうでもいいですが、そのころからの伝熱についてご意見あるいは予測を簡単に述べて下さい。ですから四番目は放談会の趣旨に沿っているわけです。2010年という年を選んだのはどうしてかといいますと、23年後と非常に、はんばなんですけれども、私が学生のとき、サルトルという人の著作に非常に凝ってまして、あの人はいろんな事を言っているんですけども、未来予測というのはあまりいいことじゃない、未来というものは創っていくものであって予測すべきものではない、自分の、これから30年位の自分の人生の先に向かって自分はどういうことをやりたいかということは考えておくべきであるというようなことを言っている訳です。それで30年たちますとね、今1987年ですから2017年になりますけれども2017年に私自身が生きている可能性は非常に少ないだろうと思うんでそこらへん予測してもらってもあまり面白くないので、7年はしよらせて頂いて2010年とした訳です。「2001年宇宙の旅」という私の大好きな映画があったんですけども、その続編のくだらない「2010年」という映画もあるのでそれにあわせて23年後を予測していたかどうかというわけです。それから未来予測について記憶に残っているのは、安倍公房という作家がいて、もう昔の事なんであまりはっきり覚えていないんですけども「第四間氷期」という小説があるんですね。その中に未来予測の話が出てきます。その中に出てくる一人の人が、人間についての未来予測は非常に矛盾していると、例えば「一年後あなたは階段からおこちて怪我をする」という予測を誰かしますね、そうするとその予測が正確であるとしましても、その人はその日になったら非常に注意して階段は全部避けてしまう、そういう事をやると予測というのは当たらないわけですね、その人為というか人間の意思が入る。正確な科学的な予測というのは、人間がそういう予測をされて階段から落ちないように注意するというFactorをさらにいれて、いろいろイタレーションをやっていく、そうすると予測はどんどん正確になっていくだろうというような話が印象に残っているんですけど。まあ、皆さんかなり無責任にやられるかもしれないんですけど、そういう予測がいろいろ集まっていくとすね、現実にもそういう事が実現するという可能性があるのではないかと、そんなことを考えています。

それでパネリストに、実際には12人の方をお願いしたのですが、最初にお願いしたうちのW氏とそれからI社のX氏とそれからY氏ですね、ご都合が悪くてお帰りになりまして、残っておられるのは9人の方です。パネリストをお願いした基準は特になんですけども、このためだけにわざわざ遠くから出てきて頂くのも大変だろうと思ったので、とにかくこのセミナーに来てもらえるというのが私の方で分かっている方だけにお願

いしましたので、あるいはその他の方でもここに書いたような設問に是非答えてみたい、あるいは何か意見を言ってみたいといわれる方もあるかと思います。最初9人の方に全員しゃべって頂きまして、それから会場におられる方にそれについてご意見あるいは自分自身のタイムカプセルに詰める未来予測ということをお話して頂こうと思います。お願いしたのはお一人の方に8分程度最初に話をして下さい、それほど正確でなくともいいんですけれども。それで話して頂いた時点でその方の話について質問を二～三人の方だけにさせて頂いて、そして次の方に進むと。そうしますと大体お一人の方が11～12分で終ると思いますので、1時間半から1時間45分くらいで全員の方の話と簡単な質疑が終り、それから残りの数十分でディスカッションをしようと、まあこのように考えております。

で、ビールもあるようですので、これはZ先生に乾杯の言葉を述べてもらって、乾杯をまずやった方がいいような気がしますでしょうか・・・（拍手） それでは乾杯が終ってから、A氏から順番にやって頂きたいと思います。

（Z氏） あ、善は急ぎましょう。乾杯！

（一同） 乾杯！

\*\*\*\*\*

（A氏） 実はこの解答を書いたものをここまで持ってきたんですが、部屋の方に忘れてきまして、書いたことがあまり記憶に残っていないんですが、一番目は多分「いいえ」と答えたと思います。それはむしろ今のままのような形で残るような伝熱研究会なら解散した方がいいでしょう、という補足説明をしておきました。二番目は、「何等かの形で関わっていると思いますか」というのは、今日、私、会場にきてから聞いたんですが、今日の放談会のパネリストは新進気鋭の若手の方だという話がさる先生からありまして、何でおまえが入ったんだと言われました。で、そうしてみますと、ただ一人の50代、ちょうど50才になったんですが、ただ一人の50代じゃないかと思います。で私自身もなぜ入ったかわからないんですが、榎沢先生が来るだろうということで何か喋っていけということのようですので。それで2番目の問は、やはり「いいえ」と答えておきます。それは、もういま50才ですから、伝熱に関わっているようであれば伝熱研究会は減びるだろうと思います。それから3番目は、もうちょっとまともに答えたと思うんですが思い出せませんが、テーマが、もし、わかるんであれば教えて頂きたいと、ですからこれは答えませんが、それから4番目の、これが主題なんですが、昨日、今日の話でいろいろな話がありました。その中でV氏も盛んにお話をしていたんですが、だんだん微細なものにむかって向かっていくべきだと、そうさせて頂きます。そういう御説明がいろんな場所ではありますが、私は、それには非常に賛成です、考えとしてはですね。ただミクロばかり、ミクロ一辺倒ではなくて、マクロの方にも学ぶべき事がある、マクロの方も通常のマクロではなくて非常に大きなスケールのものにも学ぶべき事がある。私はある時期、オイルショックの頃に

ですね、非常に大きな設備、まあ原子炉であるとか熱交換器であるとか製鉄所の大型のプラントを見たりすると非常にうつろに感じるのですが、割合ちよくちよくあるんです。例えば熱交換器の大きな物を見て非常にうつろなものを見ているような感じを持つことがあります。それはここに書いております自然の、自然現象、例えば生体のもつ精ちさ、こういうものに対して我々の扱っているもの、伝熱現象を応用する装置、設備は非常に大きいですから、もっと自然の摂理、バイオの精ちさといったものに学んでいく必要があるんじゃないかと。人間の体を、例えばある食品を食べてエネルギー変換をして活動する一つのエネルギー変換機関と考えますと、とても我々の伝熱的な感覚では対応できないような精ちさというものがあります。例えばセンサーというもの、例えばステーキを食べる前に、まず目で見て、鼻で嗅いで、フォークとナイフを持って、手で切る感覚というものを味わいますが、いったん口の中に入れますと舌の肌触りとか、そういうふうにはセンサー一つをとってみても人智の及ばないようなことがあります。話をこちらに移しますと、伝熱の中で重要な柱といいますのはエネルギーということがあると思いますが、だんだん脱エネルギーという方向に伝熱学が動くことはあまり私は賛成ではないんですけど、その中に「自然エネルギー」という言葉がよく使われるんですが、われわれのやっている大部分のエネルギーはですね、これの反対の「不自然エネルギー」をやっていると思います。不自然エネルギーというのは不思議なことに言葉としてないんですが、自然エネルギーに対応する不自然エネルギーというのはやはり自然の摂理を打ち破る部分を持っているわけですね。ですから、こういうものを少し考え直していく必要があるだろうと。

時間が限られているので、もっといろいろ話したいことをOHPに書いてきたんですが、一つだけです、ミクロな話はいろいろありましたので、地球の大気のもつ機能の話をちょっとさせて頂きます。御存知のように地球の半径というのは6000kmあまり、大気というのは10km、その中でエネルギーバランスというのはよく御存知のように、ほぼ、3分の1が地球からのふく射として出ていきます。それから4分の1が大気に吸収されて熱エネルギーになると。地球上のエネルギーバランスは実は、この10kmの中の大気で非常に微妙にバランスが保たれているんですね。昨日の、あれはどなたのお話だったのでしょうか、地球の温度はエネルギーバランス的にだいたい20℃位になるとお話がありましたが、実は、そんな単純なエネルギーバランスではなくて、大気の担う役割というのは非常に重要なんですね。それで大気というのは10kmの厚さがあるんですけど地球の直径は1200km、それに対し10kmといいますと1000mmに対して1mmなんですね。それで1mのものに対して1mmの非常に薄い表皮でエネルギーバランスをこれだけ精ちな活動でもってバランスを保持している。例えば人間の体のある温度で維持したいときに、おそらくビニールの薄いシートぐらいの、薄い皮膚ぐらいの中で体温の調整をしているんだと。原理的に、われわれの伝熱学の英知を持ってすれば、できるんじゃないかと。例えば、部屋の空間暖冷房なんかやめ

て、皮膚に何か液を塗れば一週間ぐらい涼しい思いができると。それもやめて皮膚の周りのコンマ1mmくらいのオーダで、体温調整ができるようになるかもしれません。まあ、いろいろお話ししたいこともあります、時間も過ぎているんではと思うんで、このへんで最初の放談をやめさせていただきます。どうも有難うございました。

(司会) 何かA氏にご質問、あるいは反対のご意見、お二人まで受けつきたいと思いません、どなたかございませんか。

最後のお話は、大気圏の伝熱現象みたいなことに、もうちょっと、われわれは関心を向けるべきである、そういう御提案ですか。

(A氏) いえ、そういう意味ではなくて例えば地球規模ぐらいのスケールのもので、非常に薄い層の中で精巧なエネルギーの授受のやりとり、あるいは温度の制御が行われているということから、われわれの周辺のものにそのような機構を取り入れることを学んでいく必要があるんじゃないかと。

(司会) どなたかございませんか。もしなければ、もう少しビールが吸収されてからご意見が出るだろうと思しますので、とりあえず次のB氏にバトンタッチいたします。

(B氏) 先程A氏から、50歳台はただ一人だろうというお話しがありましたが、私、本当に間違われたのなら光栄なんです、51歳になっております。昨年私は在学研究員で、イギリスに3カ月間おりました、そのとき大学の女子寮に世話になりまして、そこがお客さんとしては非常勤で来ているよその国の御婦人だけなんです、私特別にいれてもらったんですがそのエレベーターの中で、その女子学生の一人から、「貴方は大学院の学生ですか」と聞かれまして、とっさに「No」と答えたんですが、そのとき「Yes」と答えていればもう日本に帰ってきていないんじゃないかと思うんですが、A氏が間違えたんだったら自信を持ちたいと思います。私がどうして柵沢先生から御指名頂いたのか分かりませんが、私は大先生方に比べたらまったくの伝熱の素人で、いつも勉強させて頂いているんですが、なにかとんでもないことを言えば酒の肴になるんじゃないかと思うんですが。

私の答ですが、一番目は「いいえ」です。その理由としては、はっきり言うと伝熱研究会の中の熱物性の分野の人たちが熱物性研究会を創る、あるいは最近できた各大学の先生、大阪大学の先生が中心になっているのか分かりませんが、二相流ですか、三相流ですか、の学会を創られて、そんな形でいろいろな分野の人たちがいろいろな学会を創るということで、伝熱研究会から分化するような形になるんじゃないかと思えます。伝熱研究会は、27年前に発足したとき、私は大学院の学生で、「こういう会ができたから、あまりかしまった会ではないからおまえ行ってみろ」と言われて参加させて頂いてそれ以来参加しているんですが、そういった本来の伝熱研究会の意義はもう失われているんじゃないかなあという感じがします。ただし、そういうようなものをバイディングするような、共通



した進化した形で日本伝熱学会が何かにしようというような形になっていると思います。

二番目ですが、「あなた自身は何らかの形で伝熱の研究に関わっていると思いますか」に対する答ですが、「いいえ」という答になります。23年後にはまともに定年を迎えればあと10年、さらにその後11年あるんで、たぶん死んでしまっているかも分からないということで「いいえ」と、あるいは今から23年後で76歳ですから分からないと。まあ生きていれば新聞配達でもしたいと思います。

次に三番目、「そのころ伝熱研究の最も重要なテーマは何だと思えますか」ということで、一応三つ掲げておきましたが、先程A氏からの、かなり精妙な観点からとりあげた場合というのとなんか共通点があります。あとは、海の中、宇宙のことはかなり実験的にも行われているわけですが、地球の土の中のことはまださっぱり手がつけられていない。

四番目、21世紀の伝熱についての件、三つ掲げておきましたが、今の超伝導、新しい物質がニュースになっていますが、伝熱の方では、超何とかというものがニュースになればいいと思いますが、超熱伝導物質の発見あるいは発明を期待します。まあヒートパイプなんかは金属の熱伝導率の500倍とか1000倍とかいうオーダーで、そういったものの考え方から考え出す超熱伝導物質ができないか、あとは電気の方なら、二つ目ですが、電気の完全な絶縁体があるわけですが、超断熱物質の発見あるいは発明が期待できるのではないかと。これは地球内部の伝熱のような場合にそういったものがないと適応できない。あとはバイオ伝熱工学、これは先程のA氏のお話と共通することになります。こんなものでよろしいでしょうか。

(司会) 今8分ですね。

(B氏) では一応このあたりで・・・。

(司会) どうもありがとうございました。何かご質問・ご意見ございませんか。超熱伝導物質というのはどの様なものですか。超熱伝導物質とは熱伝導率無限大のことですか？

(B氏) 無限大というか、そうですね、10の二乗から三乗くらい、今のヒートパイプを熱伝導率に換算すれば、まあそのくらいのオーダーまでいけばと。あとは断熱の方ですね。超断熱、低温の方ですと最近0コンマ0000位か、それを高温域、2~3000度位までできるようなになればと。物性を考えると新物質を作る場合にですね、伝熱屋がこうこうこのようにやればこういう物質ができるはずだと、設計を伝熱屋がやってこうすればこうできるはずだからと、伝熱学でどこまでできるのではなくて、設計を伝熱屋がやって、こうすればこうできるはずだからというところまで言えるようなになればいいと思っています。

(質問) 今お話し頂いた中に、バイオ伝熱工学というものがありましたが、具体的にどういうもの、あるいは分野だと想像されますか。

(B氏) まだ想像していません。いろいろなイメージが浮かんだら、是非皆さんから聞かせて頂きたいと思っています。

(司会) ではまた後程にでもご意見・ご質問ありましたら。

三番目はC氏ですね、宜しくお願いします。

(C氏) 棚沢先生からこういう設問を頂いてずっと考えていましたが非常に忙しかったということもあるんですが、というのが理由になるかどうか分かりませんが、落ち着いて書く時間がありませんで、一応答らしきものを書いてきたんですが、それをOHPのフィルムにとってくることすらもできなかったということで・・・。

まず、最初の設問、一番目の設問ですけれども、伝熱研究会が今の形であるかどうかにつきましては、私も一応答は「いいえ」ということにしております。非常に否定的ということではないんですけれども、今の完全な学会の形でない伝熱研究会の形というのは、それなりにいいところがあると思います。ただ最近、伝熱研究会から皆さんにもアンケートがいて、その回答のパーセントが伝熱研究に載せられているというような現状を見ても、何かしら転換期にさしかかっている、それは会員数の問題、あるいは人員構成の問題が一番だと思いますが、そういうふうな所で実際には伝熱研究が時代に対応すべくいろいろな問題があるためにというよりは、むしろ、その他諸々の事で、何らかの変革が必要であるというふうに私は思いました。ただ、今言いましたように、伝熱研究に対する要求が消滅するという事はないと思いますので、どういう形であれ伝熱研究会が存在するという事は当然だと思っております。従いまして二番目の答も、何らかの形で関わっているかといえば、今お二人の先生方が50歳台になったということですが、私はまだありませんので、23年後何をしているか分かりませんが、何らかの形で伝熱にはまだしがみついていると思っております。伝熱研究が技術革新の表舞台で主役になるということは、昨日E氏もちょっとおっしゃっていましたが、主役になることはないのかもしれませんが、ただ、今言いましたように、伝熱研究でなく伝熱の問題が無くなってしまおうというのはない訳でありますから、何らかの形で関わっていられるのではないかと思います。

三番目の、伝熱研究の最も重要な23年後のテーマと申しますと、例えば23年前の工業技術、まあ我々の生活を見ても、とても想像の及ばないところから今の技術の段階まで進んでいると思っておりますので、例えばマンガに書かれていた世界が現実になっているというようなことが言えるのかも知れませんが、23年後に実際にどうなっているのかというと、例えば最新の、昨日のテーマにもなります新材料、去年の冬からですか、超伝導、超伝導材料が液体窒素温度を超えて室温までいくのではというのほんのここ数年で、とても想像できないということを考えますと、23年後を想像しろというのは難しいだろうと思えます。ただ、23年後ということ、しかも放談会ということであえて言わせて頂きますと、B氏も言われましたが、人間の生活に基本的に要求されるものとして、やはり食料の問題が非常に大きくあるのではないかと思います。ここは東北大学農学部農場の中にある建物でありますので、あえて農業関係の、あるいは食品等の、どちらかといえば農業の

方に機械工学あるいは伝熱の問題が関わって行けるのではないかと、最近なんとなく考えている訳であります。で、お役に立てたらなあという意味でありまして、今どのようなことをやればいいのかということは勿論分かりません。例えば農業、我々にとって機械技術とは何か、技術進歩とは何かといいますが、私なりに極端な言い方をすれば、地球上で住める、あるいは扶養できる人類の数がどれだけ増やせるかということになるんじゃないかというふうな気がする訳です。そういう意味で、農業の技術革新というのが非常に重要で、科学の分野と、機械、まあ大型機械の開発という点で、非常に進歩してきた、何と言いますか工業的な進歩から比べますと非常に遅いとは思いますがそれでも非常に進歩したわけですが、それでも大規模な農業とか、科学薬品を非常にたくさん使った農業というのがやはり転換期にさしかかっていると。もう少し地球を大事にして農業をやりながら、地球上の人類をたくさん扶養できるような形にしていく事がこれから必要なんだとすると、我々その中で何か役に立つような仕事ができないだろうかということです。で、そういうふうに長い将来の事でなくて、伝熱における未来と言いますが、勿論そういうテーマを選んだつもりで今回のセミナーがあるわけでありましてけれども、例えば一つ挙げるとすれば、極限を追求するような研究というものがあるのではというふうな事を考えます。私はどちらかというど沸騰をやってきた人間でありますから、沸騰の熱伝達の極限みたいなことをこれから追求できたらなあということをちょっと考えています。(司会に) いまどれぐらいでしょうか。

(司会) まだ一分程あります。

(C氏) あ、そうですか。まあ、あえて言いますとまた長くなりますから、一応これくらいで切っておきます。

(司会) どうも有難うございました。何かご質問・ご意見お願いします。・・・農業と沸騰とどういうふうに・・・？

(C氏) 農業等は23年という非常に長いスパンで考えた場合、我々にとって重要な問題であるというだけでありまして、沸騰と農業とは直接は今の所は頭の中で全然結び付いておりません。

(司会) どなたかご意見・ご質問ございませんか。

それでは一応また後でご討議頂くということで・・・。

4番目はD氏をお願いします。

(D氏) 今までの3人の先生はOHPをちゃんと用意されていたんですが、私、実は、昨日汽車に飛び乗って、それでセミナー関係のファイルをペラペラとめくって、今日の話の準備をしようかと思っていたら、欄沢先生から頂いた手紙が見つかりまして、ああ今日放談会があったんだということで、汽車の中でどうしようかと思ってきた訳です。それで一応汽車の中で書き込んだりしたんですが、「君子豹変す」という言葉もありますの

で、今日こう言って明日は変わるかもしれませんが。

それで、最初の、一番目と二番目の答えは「そう希望する」という、つまり「その他」になるんでしょうかね。ただ二番目の方はいいえに近い希望するということとして、その理由はおそらく最初のお二人の先生の次に私の年齢がくるのではと思いますので23年後の年齢を考えると、希望すると言っても難しかろうなど、そういう事です。それで一番目の方ですが、私は今までの方と違ってむしろ「はい」に近い「そう希望する」ということです。その理由は、現在非常に急激に情報機器の発達が進んでいます。伝熱研究会に限らず、あらゆる学会がそのことと関連して従来やってきた情報の集結・配分のNODEになるというソリッドな役割がかなり減ってくるのではなかろうかと思えます。そういった意味で変革を迫られるであろう、そして、従って生き残ってゆくためにはむしろ緩い共同体としての学会というものが必要じゃなかろうかと思えます。ソリッドな結合体としての意義はだんだん薄らいでいくだろう、それでそういう観点からしますと伝熱研究会はそういう意味では非常に先取りをしたようになっている訳でして、生き残れる可能性があるんじゃないかなという気がいたします。それで特に今すでに集まっておりますけれども、こういう人間的な共感を呼ぶ集まりというのが伝熱研究会にとっては生き残れる第一のチャンスではなかろうかと思えます。ですからシンポジウムの懇親会も大変大事ですし、こういうセミナーの懇親会も大変大事であると。そういうもので生き残っていくとすると学問的にどうなるかという心配はあるんですが、しかし伝熱研究会としては残るんじゃないかなあという、そう希望するのであります。

それから、三番目の、2010年の時点での最も重要なテーマは何だ、何かということなんですが、これは今までの方と実は同じでありまして、23年後と言いましても、23年前を振り返ってみますと、驚天動地の変革があったのではないと思えます。それで、exponential状に変化が激しくなるとしましても、そんなに大きな変化というのはどうも予想しがたいなど。従って、23年後に伝熱学というのは、エネルギー関連の基礎学問としての価値というのは失っていないと思えます。しかし、2010年の時点で、おそらく一番のトピックスになっているのではと思うのは生体関連ですね、その伝熱学じゃなかろうかと私は思えます。A氏はうつろな感じを持つと先ほどおっしゃったんですが、私の若いときは生き物に対する、生き物に触ることに対する恐怖感のようなものがあつたんですけれども、歳のせいかもしれないが、だんだん、有機物に対する親近感と言いますか、無機質ばかり扱っていることについての空虚さを時々感じる場合があります。ですから、そういう事からくる、むしろ主観的な要求と言いますか、そういうものが三番に対する私の答が作つたかも知れませんが、先程棚沢先生が学問的・客観的な予測をとおっしゃったんですが、そういう意味では甚だちょっと違った方向になっているかなと思うんですが、伝熱学が益々盛んになる一つの糧は、やはり生体関連の伝熱工学ということに道を見つけるとい

うことではなからうかと思ひます。

4番目はその事と関連がありまして、2010年の伝熱学では、今の時点からみるとずっと精密さが要求されるだらうと思ひますし、それから制御性ということが非常に大事なんではなからうかと思ひます。制御性という事は同時に非正常性も含んでいると思ひますので、現在は割と定常な現象に対する理解というものが先行しておりますけれども、非正常な現象に対する制御性で、その制御性もですね、生体を相手にするということであると、これも非常に剛体的な制御性ではなくて、世の中で今言われております「あいまいさ」を含んだような制御性、そういうものが要求されるのではなからうかと思ひます。そういう意味では知識工学と言ひますが、AIとのつながりというものもある程度必要になるのだらうと思ひます。大体汽車の中で考えましたことはそういう事ですが、時間が足りないでしょうか。

(司会) またあとで補足していただくことにして……。何かご意見・ご質問ありませんか。

(質問) 生体制御とはどういうことですか。

(D氏) 今の熱交換器の静特性の延長にあるかもしれません。私は先程も申し上げたように、汽車の中で書き放ったものですから十分掘り下げてはひないんですが、一例として人間の体というのは、例えば今まで暑い所にいて、急に冷たい部屋に入った、そうすると自分の意思力によって、その環境に対応しようとしている部分もそうかもしれませんが、必ずしもこういう風に制御すればこうなるはずだという論理を人間の体が知っているわけではなくて、割とあいまいな形で、一生懸命それに近づいていっているような制御というものをしているんじゃないかと思ひますね。そういうものが生体の伝熱工学を対象にしようとするとき必要になってくるのではなからうか。それは具体的な形で現在の伝熱工学ではまだ内面ではなからうかと私は思っているんですが、何か非常に具体的な形でお話できるほど見積っていないんですけど、よろしいでしょうか。

(質問) あの制御性はですね、一つはなんとひうか、特性をどうこうしようという意味の本来の自動制御という制御性ですね。もう一つは、今のその高性能伝熱面とかなんどかの熱伝達係数というのは与えられたものだ、決まったものだといひのでなくて何か細工してどうこうしようという意味での制御性と。鉄鋼なんかでは制御冷却などといひますね。それは要するに熱伝達係数を人為的にどうとしようという意味だと思ひうんだけれども、先生の言われるのはやはりその自動制御の方の制御性に近いような印象を受けたんですが、そうですかね。

(D氏) はいそうです。

(司会) ほかにござひませんか……。はいどうぞ。

(A氏) 私が言うべきじゃないんですが……。

E氏がつぎに話されるんですが、その前に事後の質問ではなくて、昨日の話のつながりとの関連で、こういうこともできたらお話して頂きたいと。そのE氏の話を受けていろいろな方から話しを受けているうちにですね、伝熱屋さんというのは所詮お手伝いだという話がありましたね。それで私先程ちょっと申し上げたんですがやはりエネルギー、伝熱屋がエネルギーから脱却する、脱エネルギーということが伝熱屋の中から始まると、私はやはり伝熱学そのものをある意味では崩壊に導く始まりではないかという感じも持つんですね。それはそれで別に無理やり止めることもありませんし、現象としてそういうことが起こるんであればそれでいたしかたないと思うのですが、E氏が言われた真意はお手伝いの範囲に留まらずに、伝熱屋の領域の中に飛び込んでしまおうという気迫のようなものを感じたんですがね。そういう疑問を持ってお話を聞いたということ念頭において今からの放談をして頂けたらという注文です。いや、注文というか希望です。

(司会) D氏への希望ではなく、E氏への希望ですか。

(A氏) 両方です。

(司会) それでは、そういうお話がありましたので、次はE氏をお願いします。

(E氏) まずこんな格好で、学生みたいな姿で申し訳ありませんが。学生みたいな姿というのは、多分2番目の質問か何かに関連すると思うんですが。2010年には、残念なことに定年になっているんですが、定年後まだ一年だと。60歳が定年ですので61歳になっておりまして、まだ1年で、まあ若干若手の方にはいるのではないかとということで、この格好はお許し願いたいと思います。それから、放談会でないときに、昨日のセッションで放談的なことを申し上げていろいろ誤解等あろうかと思うんですが、それは、おおい、話の中で述べさせて頂くことにしまして、まず解答について御説明したいと思います。

まず、第一番目の前提としまして、伝熱工学、伝熱工学というのは好きじゃなくて伝熱学という言葉の方が好きなんです、そういうものの中心部分、エネルギー関連の仕事であるということは大前提だと思います。それで、敢えて、そういう部分を削った上でこの前はお話をしたということで、今日もそういう事を削った上でお話をしたいというつもりであります。それが半分ぐらいの答えということです。ですから私自身、エネルギー関連の仕事に余りタッチをしておりませんが、それが中心部分であり、非常に重要な要素をしめていくことは確信しております。それを捨ててはいけないということは大前提です。それで第一番目ですが、伝熱研究会は、ほぼ今の形で存続していると思いますか、ということですが、これは一応「いいえ」と答えさせて頂きます。なぜかという、もう少し、僕はエネルギー関連の開発あるいは自然的な研究というものが必要だということ、まず大前提としておきまして、それを除いた領域でいかに伝熱学が発展する余地があるかということをお考えますと、一つは伝熱というのはtoolになるべきだと思っています。toolとは何かということになると、昨日お手伝いということをお話ししましたけれ

ども、それは私、実感として持っているわけですが、お手伝いというのは幹にはどうしてもなれない、けれども栄養分には絶対必要なんですね。伝熱学というのは絶対必要、つまりお手伝いだというのは、なくてもいいということではなくて、絶対に必要なものけれども、昨日お話しした超伝導のように幹ではないが為に、木が変わってしまうと栄養を吸い上げて供給していた木が変わってしまうというような意味で申し上げたわけです。そういう意味で絶対必要で、対象というのはいろいろ変わりうるわけですね。そういう時にどんな分野でも適用できるようなtoolとしてもう一つ生きる道があるのではないかと。そのためにはよりシンプルでより分かりやすくというのが非常に必要だと。で、我々例えば研究屋からすると、自分が持っている知識、難しい知識の体系というのは非常に重要な財産だと思います。それをいつまでも難しいと言っているようでは、伝熱学はいっこうに広がって行かないだろうと。そういう意味で伝熱研究会というものは、よりシンプルで、分かりやすい体系を目指して解体されているのではないかと、解体されているというより、もうちょっと形を変えているという意味で「いいえ」です。

二番目としまして、先ほど申しました2010年に研究を続けているかと言うことですが、これは61歳定年を迎えていますので、それまで、まあ運良く大学にいても定年になっている訳で、研究を続けているか解りませんが、研究を続けているとしたら、相変化に関する伝熱と言うものを依然として続けているだろう。幸か不幸か、そのころになっても相変化を含む伝熱というのは、科学になっていないのではないかと思います。だから、まだ私達が知りたいことは、幸か不幸か、いっぱい残っていると思います。

それから、3番目、伝熱研究のもっとも重要なテーマは、昨日も話しましたけれど、ミクロ…また、あるいは先程からでている、もっとマクロな、マクロというのは、文章の中にもありますが、地球規模のようなもの、或は、もっとミクロなものを対象とするような伝熱学が、きっと盛んになるだろう。ミクロというのは、先程D氏の話にあったことに関係するのですが、一部分、例えば、こういう話をすれば解りやすいんでしょうが、いまコンピューターの電子デバイスの冷却というのは、チップ当りの冷却、これを、いかにいっぱいあるチップを均一に冷却するかということがターゲットになります。でも、もっと進めると配線ごとの温度分布をなくすということになっていきます。もっと進めていくと配線ごとの時間的な変動まで対象としたものになっていくのではないかと、という意味でミクロです。それからマクロという意味は、地球環境というものを与えられたものじゃなく、雨の降らない砂漠地帯にいかにして雨を降らせるかとか、そういうコントロール、気象の、ある意味でのコントロールするようなことでもでてくるのではないかと。これが生態系にいかに影響するかというのは、また別の話、アセスメントをする必要があると思います。

それから四番目の問題について、これは21世紀について、意見を簡単に述べます。これは、先程から何回も言って、昨日から発言して、問題になっていることですが、伝熱は、

エネルギー関連の仕事でしたら、これはリーディングテクノロジーとして十分成り立つわけですね。それ以外に拡張しようとする、どうしてもリーディングテクノロジーになり得ない部分で仕事をしなければならない。そういう部分でリーディングテクノロジーになるものを一生懸命探すのは”あすなろ”に近いのではないだろうか。全部の技術が勿論熱エネルギーをやっているということでリーディングテクノロジーとなりえるわけですが、それ以外の分野でリーディングテクノロジーとならなければいけないのか。そんなことはないだろう。そこでそういうものを支えるtool、先ほど申しましたtoolというものに、もう一つ体系化よりシンプルな体系化ということを行う必要があると思います。以上です。

(司会) 何かご意見、ご質問お願いします。はい、Lさん。

(L氏) 伝熱工学が、道具というか、助人みたいな役割になるかということなんですけれども、わたしが考えますに本来的に、理屈の上で決まる面と、もしかしたら、力関係できまる面があり、さっき言いました超伝導のマグネットでいいますと、電磁的設計と強度の設計の人と、伝熱の人がですね、今、多分、電磁設計の人が、日本では、やっぱり主流と言うか、あーだから、こーだから、強度設計をやってくれ、伝熱でどうなるかということだと僕は理解していますが。しかし、その学問の上でも、アピアランスがあって、そういう分野の中でも、発言力があればですね、伝熱がこうなっているんですから、それに合はんものはだめですよ、電磁設計も強度設計も、それに合わせて下さいよという、発言が出来る。道具と言うと、みじめのような気がします。(笑い)。おおいに頑張ってますね。伝熱研究に合はんものはだめですよと言えるよう、がんばらにやいかんと、僕はそう思うんですよ。(笑い)。

(D氏) E氏のおしゃる科学と言うのはどういう意味ですか。

(E氏) これは、非常に難しい意味でして、boilingに関してという意味で使ったんですが、つまり、割合、支配方程式がハッキリして、それを議論すれば、例えば、それを解く方法を議論する段階になるとという意味です。ここで、科学という意味になります。

(D氏) 今は科学ではないんですか。

(E氏) 私自身は、そう思います。勿論、boilingの世界が、全部そうだと言うものではありません、そう言う部分が多い、まあ放談会ということなので...

(D氏) 単に体系化出来る前段階ということであって、今の段階も科学でなからうかと思えますけれども。

(司会) ほかによろしいでしょうか。・・・では、どうもありがとうございました。次は、F氏です。

(F氏) 私の専門分野は固体力学、機械学会の分類ですと材料力学が専門です。夫はこれに出席しなさいという話があり、なんでもいいから、喋ればいいと、聞いていたんです



が、そのうち例のこれがきたものですから、これは話が全く違うと・・・。(笑い) 21世紀というのは途方もなく遠い将来と思っていたんですが、良く考えればたった23年後なんですね。私は、多分生きてると思うんですが、さっき、そこのロビーで話をしていたときに、このタイムカプセルに詰めようというのは、私は単なるキャッチフレーズだと思っていたんですが、それがどうもこれは、今やっているか解りませんが、テープに取って、23年後に聞くと言うんですね。そうすると、これは明らかに生き恥をさらす、これは非常にやばい事じゃないかと思っていたんですけども。よく考えてみれば、材料力学も将来何をやったらいいか、右往左往しているんだと思うんですが、伝熱屋さんも何をやったらいいか良く解らなくて、右往左往しているだ、ほとんど、そういうわけで私は、伝熱自体ど素人で、武山先生の講義を聞いて以来、殆ど何もやっていない。という状態ですので、答えは簡単で、1番はその他、つまりよくわかりません。(笑い) 実態を把握してませんので今のまま、存続しているか答えられないんですけども。ただ一つ、その隣の若造から思うことは、こういうインティメイトな状態、よりよい結束というのは絶対必要だと思います。それは今のまま残るのがいいと思います。

2番目は、ユーザーとして、何か伝熱のまわりをうろうろして、少しは扱っているとおもいます。それから3番目ですけども、三番の質問で重要なところは、この「最も重要な、盛んな」というところだと思います。なぜ重要であるかということ、まず主流であること、伝熱研究の主流はなにかという質問であると私は理解しました。そうすると23年後というのは、私が生きていて、近い将来でしょう、先程も、先生方から話がありましたように、現在の延長線上に、主流は延長線上にあると思います。トピックス的なものは、予想できないことが出てくると思うんですけども。

主流は今の延長線上にあつて、そうするとどうも使い古された言葉ですが軽薄短小な方向にどんどんいってしまうのではないかと考えています。すごい局所的なところの温度の制御をどうするか研究しているのではないかと、隣村から見ると、そういう風に見えます。

4番目は、これは私の希望なんですけれども、そうでなくてももう少し大ざっぱな大きい、さっきから地球という話が出ていますけれども、そういう大きいシステムの中で、大体こんなもんで、こういう風になるという話をすすめていて、いろんな大きいプロジェクトが作られつつありますけれども、そういうものの基盤的な学問分野となっていく。なっていくって欲しいと隣村からそう思います。隣村の住人が何をやっているかということと関連させて頂きますと、私はある研究所に住まわせてもらっていますけれどもこの研究所というのは何をやっている研究所か解らない名前が名前ですけども、そこがまたいいところです。そこで地面の中からエネルギーを取り出すにはどうしたらいいのでしょうかというのを固体力学の観点からやっています。これはステップを、時間的ステップというのがあると思うんですけど、これは今やっている、実際に行われています、パターンですけども、

これは単に天の恵みをおめこぼしをつかんでいる使っている、何か掘ったら蒸気が出てきて、もう1つ当たって天の恵みを積極的に利用する。温度があっても水がないので水を入れてやって熱交換をやって水を貯める。ここまでは積極的な利用なんです、もっと、これを進めていきますとマグマがありますから、そこまで穴を掘って行って、そこからエネルギーや燃料を取る。ここまできると天の、天というのは神様ですけども、秘かにとっておいた大事なものをかすめ取る、という作業になってくる。そうすると材料力学も機械力学も伝熱も地球物理も地質屋さんも、みんなよってたかって神様の目をごまかして、取ってこなくてはいけないことになるわけで、そういう大きな仕事の機械工学というのは、そういう物なんですけれども、基盤的な技術となっていくことを私は希望します。以上です。

(司会) どうも有難うございました。なにかご質問ございますか。はい、Tさん。

(T氏) 私もある研究所でして(笑い)八百長くさくなるかもしれませんが、今夜のセミナーに違う専門分野のF氏をご参加下さったのは非常に有意義だったと思います。自分の姿というのは自分ではわかりませんで外からみて頂くと穴も良いところもわかると思うんですが、F氏が一番最後に言った言葉は私がいつも考えていることでして、今日はいろんな先生にお話頂きまして、この後もいろいろ話があると思うんですが、伝熱工学というと例えば医者の方でいいますと耳鼻科であるとか内科であるということにこだわって、こだわるとい言いは良くないですが、そういう立場で学問していると思うんです。医学の本当の目的は人を生かすということなんですね、耳鼻科の耳だけ良くなれば良いというものではない。ですから伝熱工学というのは単なる入口に過ぎないだろう。伝熱工学を研究していた方が、地熱の方に行かれることがあってもいいし、あるいは半導体屋さんになってもいいのではないのでしょうか。今日、斎藤先生がかなり細かい数値計算の話をしておられましたが伝熱工学的立場から言うとあの辺が限界じゃないか。実際金属の結晶が出てくるところまでやろうとすると、伝熱工学のもっと外に出なくては行けない。それで私は、伝熱工学は入口だと思って頂いて、若い方には21世紀の時代には伝熱工学という入口だけ入って、その学問といえますか全体を把握する方が出てきてもいいんじゃないかと思っています。それでF氏の1番最後の言葉は非常に貴重だと思います。

(司会) 外に八百長のご質問は？

(雑談) 入口でも裏口じゃないですか。(笑い) 正門はもっと別なんですね、ですから通用門くらい。

(司会) どなたかありませんか。

(質問) 私は伝熱半分、横目でみながら、ずっと10年くらいお付き合いしている者なんですけれども、こういうテーマに非常に興味があるんですけども、ちょっと不満なのは、今日の講師の先生方は、もうちょっと、プラスのことを言って我々がそういうこと、

こういうこと、悪いこともあるんじゃないかと、それを受け答えて盛り上げて頂くと、いいんじゃないかと思うんですが。何か、最初の先生方、けちをつけるわけではないんですが、少し湿っぽい話が多かったんじゃないかと。(笑い)若い人は伝熱というものを毎日、裏口なんて言わんで正面から入ったら道は開けている、間違っているかもしれんけど、道は開けている、そういう展望を見せる、あるいはそういう展望を創るというような配慮も必要じゃないかと、少し批判めいたことを言いました。

(司会) 次の話題提供の方から少し注意して頂くことにして。(笑い)

(G氏) 先程、実は私、これをお引受けしたはずなんですけれども、そのときには放談というのはあんまり気にしないでいたんですけれども、その後に先程から話題になっている「伝熱研究」がありまして、いわゆる熱工学部門であった放談会の御批判を頂きまして、私、全然関係ないのですけれども、たまたま私の名前がH氏、(笑い)H氏はおまえじゃないかと言われ、どうも放談会というのは、好きなことを言えるのが放談会なのに、好きなこと責任を取られるのめかなわない。もう1つは、これは私の先生のM先生のお話ですけれども、M先生は、私は昔、決して相変化はやらないと言ったと、それをこういうオフィシャルな席ではなくて、かなりプライベートな席で私はそういうものはやらないと言ったという話がN先生の所に聞こえてまして、それ以降会う毎に、沸騰とか凝縮の研究をやったあたりに、おまえは相変化はやらないと言ったじゃないかと責められ、どうも放談会というのは放談会じゃないんじゃないか。(笑い)今日も、かなり好きなとか非常に馬鹿なことを言おうと思ってましたので、これはまったくの放談だと思ってかんべんして、聞き流して頂きたい。まず第1に、設問の23年後に何をやっているか。伝熱研究会がこのままあるかといったら、私は全く、このままあると思いますね。それはどうしてかといいますと、私が初めて伝熱シンポジウムに出席したのは第3回の伝熱シンポジウムでして、仙台であったわけですが、それは19年前です。ですから、伝熱研究会ができたのが大体21年前ということですね。21年前を考えてみますと、例えば21年前の論文を年号を抜きにして持ってくる、それから今ある論文を年号を抜きにして持ってきて、どちらが先に出たか当ててみなさい、皆さんに回したら確率は50%だと思うんですね。伝熱研究の進歩なんてそんなもんだらう。そうしますと、これから21年後にだって大幅に変化するなんて事はまず考えられませんから、1番は確実に「はい」だらう。ということでよろしいんですか。(笑い)

2番目の問題ですけれども、なんらかの格好で関わっているか、といいますとこれは深く関わってはいないだらうと思います。比較的若くは見えますけれど、見えませんが、こんな白髪があって(笑い)、この時は定年6年後位になっておりますから、大体定年というのはそれで仕事を止めなさいという話だと思いますから、伝熱研究には携わっていないというのが2番目の答えです。

3番目の最も重要なテーマは何か、これは私が伝熱研究をやっている、やっていないに関わらず、伝熱研究には重要なテーマがあると思います。それは、機械学会誌に六ヶ月位前投稿されたんですけども、伝熱の将来を書けということで、その中で私が申し上げたのは、一つは、E氏がおっしゃってくださったマイクロ、いわゆるマイクロ・ヒート・トランスファー、もう一つはサブ・ディグリー・コントロール、0.1℃以下の温度の制御を正確にする、それが伝熱学としてはかなり重要な要素を占めているというのが私の予想です。エネルギー問題、伝熱とエネルギーとはものすごく関わっているという意味からしますとエネルギーという観点から、伝熱を見ると私は、その時点で重要になっていることは、やはり直接発電、直接エネルギー変換に関わる伝熱問題が主流になっている、こういうふうを考えています。21世紀の伝熱がどうなるかという、僕は21世紀の伝熱は将来、前途洋々であると考えるわけです。それが、今、そういう事を言えといわれて言ったわけではなく、一つは学問的に信頼性がある情報なんて思われたら困るんですけども、超伝導というのを皆さんお聞きになったときに、多分、そのエネルギーが、電流が無限に流れ続ける。マグネットを積むのが簡単であるかと思つたと、頭に浮かんだと思うんですが。私自身一番最初に頭に浮かんだのは熱電発電の性能が上がる、というのは、熱電発電というのは、いってみれば銅-コンスタンタンの熱電対ですけども、その場合発電するその電流が流れる方向と熱が流れてしまう方向は相関関係にあるわけですから、電気を流そうとすると、どうしても熱も流れてしまう。このために効率というのが、熱からエネルギー、電気への直接変換の効率はかなり低く抑えられるわけですね。そういう状態で熱伝導率だけは、もとの状態に保たれていて、電気の方だけがツーツーに流れるという状況になりますと、いわゆる性能指数というものが、仮にペルチェ効果で少しでも電位が出るという前提ですけども、それでも二種類の超伝導物質を接触させたときにエレクトロンが流れて、接触電位なんて出ないだろうという意見もありますけれども、もし少しでも接触電位が出るということであれば、これは、エネルギー変換はですね、ものすごく効率が上がってくる。そのようなシステムでエネルギーの出ってくる量を規定するのは何かというと、伝熱そのもの、素子への伝熱そのものが、全体の伝熱をdecideする。ですから、そのヒートトランスファーの促進がすごく出力の促進につながる。いわゆる変換効率を支配するのは伝熱であると、変換効率を支配するのが伝熱であって、そういう状況になれば少なくとも伝熱研究というのは、エネルギー研究の主流になるんだと、こじつけに近いんですけども、かなり、そういう事が起こりうる可能性があるんじゃないか、これが私のひとつの見方です。

もう一つは、そういう事、エネルギー問題と無関係に、電気をとらなくても熱というものに我々は毎日接触しているわけですから、接触している中で、伝熱の問題は当然残ってくるわけです。そういう残ってくる問題の中で、今申し上げたような細かいものの伝熱が

重要であるということは、E氏も指摘されていますけれども、私は、やはり、温度コントロールの精度を上げていくということが、一番かなり重要な要素になっているんじゃないだろうか。で、先程までの話は、かなり、まゆつばもの話ですから、信頼して聞いて頂くと困るわけですが、これから話す話は、もう少しまともな話で、実はこの間ハワイで学会がありまして、何とかこじつけをしましてハワイに行ったわけなんですけれども、少しは何かしなければいけないんじゃないかということがありまして、実はハワイ島に行ったわけです。ハワイ島に行って何を見てきたかといいますと、いわゆるマウナケアーの上にあります天文台を見てきたわけです。この天文台はNASAの天文台でして、直径が3.2mの赤外の望遠鏡が、こういうものが・・・これがどのように伝熱学と関わりがあるのかというのを次にするつもりですけれども、例えばこれが、非常にハワイ島というのは日がよく出ていまして、どのくらい天体観測が出来るかというパーセンテージが出ています。一年の内、非常に良く星が見えるというのが、マウナケアーですと70%を越して80%位ある。日本で観測しますと、大体三分の一以下しかいかない、天文の場合には、たまたま天文学者に会ったんですけれども、何も今日見れなかったから明日見ればいいというものではない。今日見れなかったことは一年後の今日でしか見れなかったかもしれないし、下手をすると星との関係で33年後の今日にならないと見えないかもしれない。そのために星の場合、良く見えるパーセンテージが高いというのは、ものすごく重要な一つの因子になっているわけですね。そういうわけで、日本でも遅ればせながらハワイに大型の天文台を作ろうというわけです。これは、棚沢先生なんか御存知かもしれませんが、天文台でここに書いてありますように、口径7.2mの望遠鏡を作ろうということを考えているわけです。これを作りますと、どういうことが起こるかという、既に敷地等は確保されていまして、・・・どのくらいの精度で星が見えるようになるかという、確か0.2分のオーダーで7.5mの望遠鏡を使うと、星の分解能が出てくるということになります。ところが実は、それを機械研の山田さんが計算しまして、これに大気との間に温度分布があったら、どのくらい精度が悪くなるかという計算をやっているわけです。ここにありますが、1度ちょうど真中の所に、seeing out 0.1分以下に抑えるためには、温度は0.2℃です。7.5mの望遠鏡を作ってますね、それが意味あるためにはここに書いてありますように少なくとも、0.2℃あるいは、もう少し緩やかにしても0.5℃で、大気と望遠鏡の温度を同じにしない限り、7.5mのものを作るそもそもの意味が失われてしまうということになってしまいます。それでは、これは、どの位の精度かという、実はハワイで温度分布をやってみますと、大気というのは温度変化しているわけです。ハワイの温度変化を測ってみますと、たしかここに書いてあると思いますけれども、1時間に0.5℃変わるわけです。1時間の間に0.5℃変わって、それと同じ温度変化を与えながらいかない。そうしますと1時間に0.5℃温度を下げるわけです、けれども望遠鏡は7.5

mですから重さにして20トンあるわけです。20トンあるものを1時間に0.5℃温度を下げるのにどのくらい、風量がいるか、これは実はハニカム構造になっていまして、裏から噴流で吹くんですけれども、とても常識で考えられるような、強制対流伝熱では、こいつを1時間に0.5℃冷やすことは出来ないわけです。では、今どうやっているかといいますと、NASAの望遠鏡みたいなのは、床を冷房しておくわけですね、昼間の内にドームを閉めておいて夜の予測温度になるように部屋の温度をコントロールしてやる。夜になったら、それを開けて、観測するわけです。どの程度合うんですかと聞いたんですけども、減多に合わないらしいんです。(笑い) 0.5℃の温度差で夜の温度を推定してそこにもっていくことは、ほとんど不可能だと。ただNASAの場合には3.2mですけど。

私自身なんか、伝熱学というのか、世の中のいわゆる先端産業と言われているものは、精度が上がれば上がるほど、やはり伝熱学に課せられてくる精度というのは随分厳しくなってくる。伝熱学は、そういうエネルギー問題を抜きにしても、伝熱学の将来は必ずしも貧しくないんじゃないかということがあります。それから、もう一つ、先程の精度よく測るという観点からしますと、私が大学院に入ったときには、今の学生さんには及びもつかないでしょうし、居られる先生方は、ああそうだそうだとおしゃるんじゃないかと思うんですけれども、いわゆる熱電対で、ぱっと温度が何度何度と出てくることなんか無いわけですね。ボタンを押して針が動くか動かないか、ボリュームを変えてやって、針の動かなくなるところを捜すという、捜しても、もう少し温度が高い方がいいと思うと、どういうわけかそうなるわけですね。(笑い) それで、大先生というのは上手だったわけです。はっきり申し上げる、ヘタな人は大先生になれない、どうしてかという論文書けませんから。そういうのが上手でなくても、今の時代、熱電対つなぎますと、27.5℃とか27.1℃とかでてくるわけです。今の学生諸君は27.1℃と書きますけれども、測定器のほうをみれば、この測定機の誤差は、コンマ0.5℃しか保証しませんと書いてある。27.5℃と書くわけですね、そういうのに。測定器の精度というのは格段に進歩していると思うんですが、これからはもう少し温度の測定精度の上がったものがでてくるだろう。で、それは赤外線detectorが、これからの温度測定のメインになるだろうと私は考えているわけです。それで、どうしてそういう事を考えているかといいますと、先程から生物学の話がたくさん出ていますけれども、動物博物誌というのが朝日からでていて学生にいろんな動物はどの様な伝熱的機構を持っているかという話を記述しているわけなんですけれども、ここに描いてあるのは「塚作り」という動物なんです。ここに大きな塚みたいなものがありますけれども、ここに卵を生みまして暖めるわけですし、自分では暖めない。この中にあるものを発酵させて、草を発酵させてその温度で暖めるわけです。その温度を制御させなければいけないんですけれども、その温度をこの鳥は33.5℃に保つそうです。温度がちょっとでも下がると、足で砂をかぶせて温度を高くして、逆に温度が高

くなると空気を入れて温度を下げます。コントロールは  $33.5^{\circ}\text{C}$  と書いてありますから、少なくとも  $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$  のオーダーでコントロールしているわけです、その鳥は。そういう意味からすると、棚沢先生はそんなに精度がないと仰るんですけども、人間は自分の血液の温度を視床下部で大体  $0.01^{\circ}\text{C}$  の温度で検出してといわれているわけです。ここに書いてあるのはサイドワインダーと書いてありますけれども、僕は、サイドワインダーというのはミサイルだとばかり思っていたんですけども・・・（笑い）僕の無知をさらけ出すようですが・・・。サイドワインダーというのは蛇の一種ということなんですね、それで眼と鼻の間なんかには赤外線のリテクターが付いておりまして、それで検知して、その検知精度と言うのは  $10\text{cm}$  離れたところで、 $0.1^{\circ}\text{C}$  の検知精度がある。これは今、我々が測っている熱電対の温度精度よりも一桁いいオーダーで、動物というのは測っている訳ですね。そういうことから赤外線のリテクターを使つて、もう少し、温度レンジは広くないけれども、ある範囲で非常に精度が良く測れる。しかも面内の温度が一様に一定に測れるというようなことが  $20$  年後かには実現していることだろう。そういう風に私は考えるわけです。そうすると伝熱学というのは、もう少し精度が良くて、あんまり自分の主観をいれないで、正しいデータが取れて今までの進歩より早い速度で進歩してくれるのではないのかな・・・。総て楽観的な見通して申し訳ありません・・・（笑い）・・・私の放談とさせていただきます。

（司会） U先生よろしいですか、今のような話で・・・。

（質問） 多少、先日の話と関係して引きずり落とすことになるかもしれませんが、超伝導と熱電発電の関係を説明されたんですが、私ちょっと素人でわからないんですが、先日こう申しました、超伝導の現象、何ヶ所かに分けなければいけないんですが現在、特に、新聞ダネになっている超伝導現象というのは、エレクトロンの伝播機構が、ちょっと違います。そうしますと先程話しましたように、熱伝導率と電気伝導率が桁違いに違う。ウィーデマン・フランツの法則が全く成り立たないという状況が現在の高温超伝導の話なんですけれども、そこで、先程、ペルチェ効果のお話が出たわけですが、最初の質問なんですが、引きずり降ろすような話で申し訳ないんですが、それと伝熱が無限に広がる話がどう結び付くかちょっとお伺いしたいんですが。

（G氏） 昨日話があったように、超伝導の電気のリテ機構というのはフリーエレクトロンではありませんから、最初申し上げたのは、そういうような場で、まずペルチェ効果みたいに接触電位差が出るだろうかということについては、出るとも出ないとも今言えないのが現状であろう。私としてはもし出るとしたら電気の方は無限に流れて、熱の方は流れないわけですから、いわゆる熱電発電の性能指数というものが非常に高い値になる。そういう非常に高いものになると熱電発電の素子の両端面にかかる温度差よりも、むしろその両サイドにあるトランスファー媒体の流体の部分での温度差がメインになる。その温度差

を減らすことによって発電性能というものは、どんどん上がってくる。今までだったら素子の中でのエネルギーの輸送が全体を律速していたのに対し外側の伝熱形態の方がエネルギーの発生を律速する状況になり得るだろう。そうすると強制対流熱伝達が2倍になれば出力も2倍になるだろう。そういうふうにエネルギー変換機構を伝熱学が直接支配するということになるのではないですかという話をしたんです。

(質問) 私もまだ分かりませんが、今のところはそれがまだ、なっていないと。

(G氏) なっていないというのは何が？

(質問) ベルチエ効果というのがあれば超伝導というのではないだろうと。

(G氏) ベルチエ効果がないとしましても、片一方は超伝導媒体があって、それでもう1つは超伝導媒体を使った場合には私自身はベルチエ効果は出ると思います。超伝導、超伝導の接合面についてベルチエ効果が出るか出ないかは私も分かりません。

(質問) それを伝熱工学が洋々たるという話と結び付けると過大になってしまうんじゃないかと思ったんですが、将来の事は全く予想できませんで超伝導も数年前までは全く予想できなかった、今は実現していますが。

(G氏) もう一つは私が考えているのは超伝導ということではなくて、いわゆる今までのベルチエ効果の温度というのは金属あるいは合金を主体に考えてきた。そうすると材料的にも、もう少し別な検索の仕方もあるんじゃないかな、ということも頭にはある。先程言いましたように超伝導であれば無限になりますけれども、片一方超伝導であっても一向に構わないわけで、そうしますと少なくとも性能は倍に上がっていくでしょうから。かなり大きな事と私は思いますけれども。

(質問) 予測つかないことなものですから、現状と将来の予想はちょっと分からない話ですけれど、もう1回皆さんの判断にまかせてみたいと思います。

(G氏) 逆に私の言ったことを弁護するわけではないんですが、23年後にですね、そうなるだろうとかならないだろうとかいうのは全く愚問で、そうであればという前提です。

(司会)他にどなたかありませんか。ではどうも有難うございました。8番目にH氏にお願いします。

(H氏) G氏みたいに上手な話の後に出来ますと途端に暗くなるかもしれませんが、8分間ですのでどうぞ御辛抱下さい。私、原子力の研究所に勤めているわけなんですけれども、原子力関係からみた将来というものを多少用意してきましたんですが先程、棚沢先生の話にありました、ここにくる人は必ず御指名されたということで、それで了解したわけなんです。それと、もう一つ、その前にご質問も頂きましたんで、これに対しても話をしなければならぬと思います。私は企業にいますもので熱といっても、割と、いろいろなことをやらなくてはならない、深い突っ込みができないということもありますし伝熱研究会にも出ない、伝熱研究会の割と劣等生でシンポジウムにも出たり出なかったり、あるいはセミナー



にもこれが初めてということですし、2010年にどうなりますかといわれても、先程仰った格好でお答えしなければならぬんですが、それでも余り失礼と思いましたので、そこで会員名簿をひっくり返してきました、現在の会員の構成がどうなっているか調べました。そうしますと非常に面白いことが分かりまして、主構成員、これが35～50才という、いまバリバリ活躍されている方に非常に大きなウエイトがある。今や全盛期なんですね、伝熱研究会の。それと、もう一つ、ここに第二のピークがあるのですが、これは、もう定年過ぎられた方ですけれども、おそらく、これは伝熱研究会を作られた方が、健在でいろいろやっておられる。育てられた方が、ここで一つのピークを作っているのが現状という気がします。これが、もう一つ気になりますのは、ここに急に下がっている。普通人口分布ですとこうなるわけですが、二つ解釈がありまして、一つは伝熱研究会というのはかなりアカデミックな方々の集まりで、ある程度の年齢に達して経験を積まないとそこに顔を出せないというようなウエイトがあると考えますと、こうなるのも当然だと思いますけれど、もう一つは歴史的に凋落傾向にある。(笑い)まあ、こう言った予備知識を元にして将来どうなって行くかということを考えるんですけど、もう一つは、凋落傾向というのは別にしても、いずれにしても、かなり、現在のメンバーは、今の中心、いろんな分野で中心になっている人たちですので、これがこのままで推移するとしますと、そちらに、どんどん変わっていくだろう。ですから伝熱研究会も、おそらく変わるだろうと思うんですけども、しかし、一つの山、二つの山ということを見ると、どうも、そうではない感じが強いわけでした、たぶん20年後が、それほど遠い未来ではないところの意味合で考えますと、多分このグループもマジョリティが、ここにかなり活躍されまして、現状では、そのままではないかというのが予想でした、ですから私は、ノーと言う方が多いんですけどもイエスに近い答えが第一問です。

それから、23年後どうですかということですけども、今、私この位置におりましてもう黄色のラインにおりまして、たぶん「ノー」であろう。特に企業におりますと、もうこの辺で脱落するんじゃないかと考えます。その後、定年後続けられる方は、おそらく定年で大学を出られて更に、その分野で活躍される方、非常に伝熱学では恵まれた方ですので、はっきり私自身は「ノー」です。

次に、将来の話ですけども、もう一つ気が付いたことは、専門別に会員を会員名簿を元にやり作りしましたがけれども、基礎的な分類で、こちらは応用ですけども、マジョリティは強制対流、自然対流、沸騰・蒸発、混相流、非常に、どちらかというクラシックな、強いて言いますと19世紀的な(笑い)ところにマジョリティがある。さらに、変わらないだろうという確信を持ちそうな気がします。応用を見ますと、熱交換器とか空調、原子力がありますけれども、そういったクラシックな分野がマジョリティとして、この傾向は23年後でもそう変わらないであろう。

それから、2010年の話ですけれども、実は原子力の分野でも転換期にありまして、いろいろ10年後の計画があり20年後の計画を立てまして、それとも関連しまして考えましたが、2010年でフュージョンとフィッション両方についてあり、フィッションの中で軽水炉と高速炉が実現に近いものとなるわけでございますけれども、軽水炉、2010年の予想でも相変わらず主流でいるというのが現在の予測でして、一層の高度化を図るとというのが課題です。それから、高速炉に関しては20年、30年というところで多少遅れておりまして、当初は2000年実用化でしたが、実用化が20年、30年というところなんです。いずれにしてもこれは、その技術を高度化すると言うところで常に熱屋はいなければならないのですが、新しいエリアの研究というわけではなさそうです。もう一方、始めておりますのは新型炉の開発でして、いろいろアイデアはあるわけですが超安全原子炉の炉心を常にドブ漬けにしておいて、異常状態が起こっても冷却条件が保てる。もう一つは超小型、遠隔地でも使える、或は宇宙でも使うという概念でやっております。おそらく、新しい技術としては、この辺が主流になってくるのではないかと、そしてもう一つは、こういったものを作る上では新しい設計概念が必要ですから、新技術ということであるかも知れませんが具体的にそれが何であるかは分かりません。ただ一つははっきり言えるのは宇宙利用への展開というのは非常に魅力的でありますし、小型炉の応用としては有効な分野です。特に2010年位になりますと、かなり宇宙利用が活発になりますでしょうし。大体10kW位までの熱源ならば、太陽熱で充分なんですけれども、それを越えると、むしろ他の熱源でないとおかしい、むしろ原子炉の方が有利である。さらに離れたところのアクティビティをしようとする、当然太陽熱は使えませんし、何等かのものを使う。

あるいは他にもあるかも知れませんが、そういった意味で利用されていくと思います。ただ原子力は軍事とカップルしておりますので、その辺で・・・用心しながらできるだけやっけて行こうというのが現状でして、いずれにしろ無重力、宇宙空間での伝熱、あるいは宇宙での人、測定器の環境を整えるというのが伝熱屋のかなり活躍できる分野だと思います。もう一つフュージョンの方ですけれども私はあまり詳しくありませんけれども一応目標としているところは、2000年から2010年が自己着火期間を達成しようということの研究が行なわれておりまして2000年2010年で、それが達成できないとしますと、それ実用化というのはかなり難しいという雰囲気を感じます。ですからフュージョンに関する研究も実用化という具体的な形でしながらやっけていく時代になると考えるわけです。その辺真面目な話で、放談的な事を言わないといけないと思ひまして、将来の話をもう一つしますと、もう皆さんおっしゃたので、敢えて言う事でもないのですが、E氏も明るいところで作業されている方もそう感じられるということで、そんなもんかと感じましたけれども、現場で働いておりまして、原子力分野で働いておりまして、縁の下の力持ちの印象は拭えない。それで、しかし、なくてはならないということでは自負は持っているわけです。

けれども縁の下であっても、それが先端技術を引っ張っていく形でハッスルできないものか、つまり、伝熱学が先端技術といわれる中心の問題の突破口を開くようなものになっていく方向になっていかないかということをするわけです。いろいろなランクがあるでしょうけれども、先ほど申しました宇宙利用、これは非常に厳しい環境ですし、熱的なものが保証されない限りアクティビティはないという意味では伝熱屋の一つのフューチャアであろう。もう一つは、先程原子力は不自然だとE氏が言いましたけれども、正に、エネルギーの発生ということを考えますと、我々は地球の上に乗っているわけですが、地球そのものは熱を発生して、非常に大きな熱源の上に生活している。そういうことからいうと、もう少し地下からエネルギーをもらっても、まだ人間は生きていけるんじゃないか、そういう努力が先程F氏が話されましたように、正にあの様な方法で、原子力とは別にですね、もっと具体的にやってみてもいいんじゃないかという気がしますし、今こそ伝熱屋が、道を切り開くというエリアじゃないかと。

今、エネルギー輸送を考えますと、ほとんど電気でやっているわけです。電気が便利だから非常に長距離輸送が便利なだけなんですけれども、実際は熱で使うのがかなりあるんです。それで、もっと楽に伝熱ができるようなアイデアができないかと。例えば、電気を送るような格好で伝熱ができればですね。地域社会のいろいろな熱利用であっても、あるいは遠いシステムでもいいんですけど、随分局面が変わるんじゃないかと考えて、ヒートポンプ・ヒートパイプは今ありますが、またもっと別の概念があればと、長々と申し上げました。

(司会) どうも有難うございました。ご質問、ご意見ありますか。

宇宙に原子炉ができれば、どのくらいの規模ですか。

(H氏) 一つ上げた例があるわけです。衛星で。

(司会) それはR Iですか。

(H氏) いや、原子炉です。R Iは、実際には宇宙通信用に現役で生きておりまして、ただ大きさに制限があります。もっと大きなパワー得ようとする、どうしても原子炉となります。

(司会) 何キロ位、どの位の大きさですか

(H氏) 100kW位から1000kWを目指しています。炉心はこんなもので、直径は50cm位です。ただ、問題は人間が中に入ると、しゃ閉しなければならぬ、放射能をですね、それが非常に重くなる。

(司会) 今はしゃ閉なしで?

(H氏) 今は、しゃ閉なしで、炉心だけでやっています。

(司会) 何かご質問・ご意見ありますか。ではI氏、最後というのはトリとって、少し長く喋ってもいいんですが(笑い)。

(I氏) ええ、まことにトリを勤めるには申し訳ないいでして、粗雑な内容で、先程のC氏より時間があつたわけなんです、そういうわけであまり大した事はできませんでした。2010年になりますと、大学に籍があれば、退官の年です。ところが、私の所属する実験施設は10年の時限立法でありまして、あと5年で無くなるわけです。その前に、O先生が私の師匠ですけれども、O先生は後1年半で退官になりますので、その時に私も解散ということになりますれば、どのようになっているか分かりませんが。

伝熱研究会に関していえば、うちの先生が会長ということでもありまして、いろいろな面で関わりがあるということもありまして、私自身、エネルギーに関しましては、一生涯、63才の退官までしがみつければ、続けていきたいと、「イエス」という状態で全部やりたいと思ったわけです。そういう状態から伝熱研究会の動向、1、2、3、4の質問がありましたが、それを一切無視いたしまして、問題を自分からすり替えまして、要するに学生の試験の結果と同じく自分で勝手に問題を変えまして申し訳ありません、棚沢先生から怒られるかもしれませんけど。

伝熱研究会の魅力というのは、ここにありますように伝熱という観点から、チェック機構、伝熱研究の情報が入手できる、各自の研究の宣伝の場ができる。ところが、21世紀の地点でそうかということを見ると、単一の伝熱研究は予算的にも存在し得ないだろう。伝熱現象を解くデータの供給としましては、魅力と同じで、そのまま続いていくと考えています。シンポジウムとか会誌が、容易に手に入ればよろしいんですが、なかなか手に入らないという面があります。先程のH氏の、減衰の傾向がありましたけれども、あれは当然じゃないかという観点から考えますれば、伝熱研究者にとって絶対入会する必要はないいでして、いわゆる研究会というのは、テレビのチャンネルの一つなんです。だから好きなきに入って好きなきに出たりということをして、だんだん膨れ上がったり減ったりしていくものがこう言うものだろうと考えているわけです。新しい血を入れないと衰退の一途をたどる、これはもう天皇陛下を例にとっちゃいけないですけども、お互い皇族同士で結婚しているとろくな事にならないという事もございますんで、あまり放談過ぎますが(笑い)、新しい血を入れて、それで衰退しないようにと考えればよろしいんじゃないか、そうすれば私も伝熱研究を続けていける、伝熱研究会にずっと入っていられるんじゃないかと思えます。

二番目なんです、日本伝熱研究会との関わり合いということなんです、おそらく大学の研究というのは地盤低下が激しくてですね、産官学共同の研究所の台頭、いわゆる第三セクター的な研究所が新興するんじゃないかと思えます。従いまして体系的な学問というものは、例えばフーリエ数を解いて会社の人に供給するとか、そういう奴は、あまり好まれなくなる。あるいは、21世紀の地点ではそういう物はある程度、ソフト化されて、やらなくてもできるような、誰でもできる状態になっているかもしれない。問題解決の為



の自分自身の、ということをお断りしたいと思います。まず高等的な研究による二  
ーズの開拓ということです。これは、自分の所で、黙っていても、なかなか情報が掴めな  
いということがありますので、そういった事を考えたわけです。それから短期間に総合  
的な研究をしなくては行けない。これは先ほどから何かいろいろありましたが、結局、生物  
を勉強しなければ、生物の方面で伝熱研究者がリーダーシップを取っていくことはでき  
ないだろう、と考えているわけです。従って、あらゆる情報をなるべく短期間に掴んで勉強  
していくと、その勉強の計画としてある程度、生物なり、なんなりをやるというその遺伝  
子学的なことをやるというところで自分の意見を述べてゆくことができるように伝熱研究  
者にはならなければならない。そういう意味で書いているわけです。それから常に他人を当  
てにするとともにセンスの異なる人という風には書いてありますが、これはですね、自分一  
人で伝熱研究をやっているとしても、これは無理なわけですし、生物とかなんとか或は  
そういう事を仰る限りにおいてはですね、自分の力で勉強しだしたら、その人と同じくら  
い時間がかかるわけです。従いまして、なるべく友達に例えば生物やってる人を持つと、  
そしてその人を当てにしましてですね、それであるいはその人の持っている装置を当てに  
しまして（笑い）、その人と仕事を行うという・・・・・・（笑い）

I大学のR先生と話してたんですけど、こつこつやる研究というのは、どうだろうかと  
いう話で私自身一度仕事をしてしまうと後で振りかえりたくないもんですから、穴だらけ  
の研究をする性格なのです。研究というのは性格によって大要が出来てしまうのではない  
かと思っているわけなんですけれども一度尽きてしまいますと、その所である程度、穴  
というものが分かる面もあると思います。そういったことを、ある程度やる必要があるん  
じゃないかと、それからデータの蓄積に能力を割かないっていうのも皆さんから叩かれる  
と思うんですけど、まず、あのG氏の師匠のM先生に前に、あの機械工学のデータに比較  
して化学工学のデータは、ばらつきが多いとかデータ数が少ないとかなんとかって、いろ  
いろ言われたんですけど、データの集積に能力を割かないというのは私自身、なるべく正  
確なデータを少しでも汲み上げておけばある程度、自信がついて、それに対してある程度  
のコメントができるような力をつけられるんじゃないかと思っています。そんなに昔のように  
実験式を作るとか、なんとかっていう努力をしないで、なるべくそのデータを信頼してあ  
る程度の事が言えるようにしていきたい、という風に思っているわけです。以上、トリと  
しては誠に申し訳ないようなお話でちょっとまずいんじゃないかと思っているんですけど  
よろしくおねがいします。（笑い）

（司会） 大変、最後にふさわしい話をして頂きました。（笑い）これで9人の方のお話  
が終わって準備委員会の方の計画としては、前にこう椅子が並んでいますがそこに全員を  
集めて、それでdiscussionを行おうということのようですけど、残り13分しかありま  
せんので、そういう面倒くさい事はやめまして、あとは、ご質問でもご意見でも承って9

時30分に解散したい、こういう風に思います。I氏のお話についてご質問ご意見を伺っておきたいと思います。いかがでしょうか。O先生、居られないから何を言っても・・・

(笑い)

(質問) さっきのOHPの中に芸術というのがあったんですが、あれはなんですか。

(I氏) あの芸術というのは神戸だか、どっかの万博で微粒化の装置を10個ほど並べまして、それを、ろくろから吹き出して芸術と称しているメーカーがありまして、それを見まして、ああ、こういうのも芸術なんだなあと思ひましてですね、それで私の兄弟子に今日も来ておられるS先生がおられるんですけど、凝縮の現象を見ていると1時間でも2時間でも飽きない、と言う人がいまして、それを見ているとやっぱり、ああ、これも芸術だなあという感じがします。それであればですね、要するに芸術っていうのはなんでもいっていいことになる。(笑い)日展かなんかに作品として出すには、ちょっと、どうかと思いますけど、ある程度の事は芸術みたいな形で貢献できるのではないかと。私は仙台市を見てますと噴水が少ないっていう例がありまして、噴水を、もうちょっと芸術的に、伝熱屋じゃなくて例えば微粒化なんかを含めまして、そういったものを公園とかなんかに設置することが出来るのではないかというふうに思ひまして、それに伝熱研究者がどの様に貢献できるのかということとは別としまして、何かこう考えることが出来るのではないかとということで芸術という風に書いたわけです。芸術を理解しないものが芸術って書いてすみません。

(R氏) 今のI氏の芸術っていうのに対して私も同感でありまして、つい一ヶ月ほど前なんですが、芸術工芸をやっているところが製作の事でちょっと私のところへ相談にきたんですが、その時にですね、たまたま流れの可視化のハンドブックとそれから講習会があったんですね、その時の写真をこういうこともできるんだよと見せたらですね、非常に感心というか驚かれましたですね、こういうこと、ぜひ、なんていうんですか、ウィンドーのファッションに使えますね。そういうふうに区切りたいとかいひましてですね、それこそ、あの日展もそういう可視化部門とかね(笑い)。

一応先程の人口分布ですか、見て感じたんですけど非常に尻すぼみな現象と感じられたんですが、それとあのもう一つはですね、大体40代ぐらいの人にピークがあるわけですね。ということは現場で何人か部下を持って中心的な活躍をしている、もしくは学生会を十人も抱えているとともに、ということであればですね、もう自分だけが伝熱研究会に加入しているんじゃないくて、弟子も部下も加入させればですね、何も尻すぼみになることはないと思います。ということからいけば最も働き盛りの人たちがですね、自分の研究だけにでなくてですね、もう少し弟子、部下を育てるということですね、それを、あの先程、テレビのチャンネルということですね、伝熱研究会だけでなくということですが、まあそれは、伝熱研究会に入って部下を前にして自分ができないと困るということもあるの

かもしれません。けれども、そこは目をつぶって、下をできるだけ増やしていく努力が必要なんじゃないかなあというふう感じたわけです。あのままでいきますと、いわゆる初代がおこして二代目が発展させて三代目で食いつぶしてしまう・・・。(笑い) その意味からいけば、一つの伝熱研究会の方向性というのか、そういうところにも表れてきているのではないかと思うのですが、先程、T先生が、伝熱研究というのは一つのとりかかりであって、それから次に発展していくんだと。

それからE氏のも表現は違いますけれど内容的には同じことじゃないかなと思います。例えば機械科、あの私は機械科なんですけれども、メカトロニクスという形で、メカトロニクスというのが非常に騒がれてきて、我々も堅くなった頭を絞って一生懸命勉強してきて、大抵そういう風なものも検討しているわけなんですけれども、さて学内にやる人がいない。そこから頼んでくれという形になっているわけなんですけれども、あのメカトロニクスを覚えたらそれで論文になるかというのと、やっぱりそうじゃなくてメカトロニクスを使って伝熱の・・・。そういう形になるかと思うんですよね。これが、立場が違くと中には伝熱をtoolとして別の仕事をすることもありますし、いろんな仕方があるんじゃないかなと思います。だいたい長びきましたんで頭のほうが回ってこなくなったんで、また思い出しましたら何かの機会を見つけて発表したいと思います。

(司会) どうもありがとうございます。今のは別に質問じゃないですね。

(R氏) はい、そうですが。

(司会) 放談と一緒にですね。外に何か、だんだん時間がなくなってきましたけど。

(D氏) 先程、T先生が言われた、伝熱学が入口というんですかね、表口か裏口かという話があるんですが、私はこういうふう考えるんですけれども。伝熱学というのはもともと熱力学を基盤としている、熱力学から分かれ出た一つの学問分野ではなかろうかと思うんです。従ってエネルギー問題を突破口としてというんですか、それをベースとして伝熱学は発展してきたんだと思います。現在、エネルギーの問題から、離れた分野で伝熱学を応用するということが、いろんな所で必要になっているわけでして、それは私の考えでは伝熱学が一人立ちして発達したことの現れではないかと思います。ですから、その正面の入口が何もエネルギー工学だけでなくてもいいのではないかと。窓口がどんどん広がってですね、それが機器の例えば測定技術であったり、或は温度の制御技術であったり、ですね、そういう事を基盤にして更に伝熱学は発展していいんじゃないかという風に私は思うんですが、ですから何も悪いことではなとじゃないような気がするんですが。

(A氏) 悪いという問題は、私は両方であると思います。やはり今、E先生がおっしゃった内容な意味ではいいという面がかなり強調されていると思うんですよね。私も、今話題になった先の放談会でもあるイニシャルで登場しているんですが、そこで伝熱屋が外に出て非常に成功した例を述べたんです。それは、ニューヨークのですね、S.U.N.Y.と



いう大学に、ご存じかもしれませんが、R. B. Cessという大プロフェッサーがいて、この人もともと Radiationをやっていた人なんですね。この人がそこからでましてやはり、ちょっと私もさっきお話したんですが、大気のエネルギバランス、それから大気のみく射伝熱を中心とした問題をとっかかりにしましてですね、非常に研究所をオーガナイズして、ここの研究成果がですね、例のSSTの飛行を禁止した研究成果に結び付いたのです。それほどインフレンシャルな、しかも21世紀の地球を維持していく上で重要な役割を担っていると思われる研究所に伝熱屋がそこへ出ていって、出ていくだけでなく中樞になって研究しているんですね。ですから、そういう意味では非常にいいと思うんです。

ただ私、E先生がいわれた意味でお手伝いのような範囲で留まるんじゃないくて、E先生はそう言われたんじゃないんですよ。はじめはお手伝いでもいいと思うんですけどね、やはり本流までいなくても、もうかけがえのない立場に立っていくと、ちょっと言葉の緩で言ったんですが、裏口と言ったのはですね、今いろいろな問題に発生して、かなり裏口っぽいところがあるんで、それをもっと切り開いて大きな間口にしていったらいいんじゃないか、その意味じゃ非常にいいと思いますね。

しかしながらやはり今の伝熱研究は先程の材料の話も、それから熱物性の話もありましたけど、熱物性は新しいものが出てきたらそこで急いで測る。これだけじゃちょっと私、悲しいんじゃないかと思うんですね。やはり、こういうニーズのある材料を作っていくと、それから私もそういう研究をやらなくて、批判めいたことを言うのはあれなんですけど、単結晶の製造とかいう研究がかなりの伝熱の中で広まっているんです、御存知の通りです。ところがチョコラスキーという製造方法は、確か、もう50年かその前に原理があって、それを今精度良く計算するために伝熱屋さんが、かなり力を注いでいるわけですね。ある特定のレーザーなり波長を使う技術というのは今、あるわけです。これもレーザーというのは Radiation現象の一つの極まったものなんですけれどこれでその単結晶の中というのは全然インタラクションなく、通す光というのを自由に我々、得られることができるわけですね。そうしますと結晶と非結晶の界面を Radiationで暖めながら温度制御をしていって結晶製造をする技術というのは、これはもしできるかできないか知りませんが、できるとすればおそらく伝熱主導の、クリスタルグローステクノロジー、といったものができると思います。そういう物をですね、お手伝いじゃなくて、リーディングに成るようなものを、我々の仲間からですね、培っていける事柄を皆で、結集してやって行くことがないと思いますね、やはり衰退していくんじゃないか。そんな風な意味で言ったんですけれど。

(司会) 時間は延長してもいいんですか。では延長いたします。

(P氏) 順番は先生と私が同時に挙げたつもりなんですけど。

同じ質問をしようと思って、それがもう一部、A氏から答えが帰ってきたんですけれど、一部っていうのはA氏だけの答えだという風に感じましたので、再度手を挙げさせて頂き

ました。一つは、実は今、この付近に私の子どもがうろちよろしておまして、今小学校の6年生なんです、小学校3年の頃だったと思います。「お父さん、どうして、ヒマラヤとか、高い山が太陽に近いのに温度が低いのか」こう聞きました。それで答えるのに窮しまして、どうやって説明したらいいか非常に困りました。それで、A氏からその答えを教えて頂きたいと思うんですが、それが一つありまして、更にその地球規模という話が更にまあ、一部A氏からお答え頂いたんですけど。更にバイオっていう話がたくさん出てきました。超伝導の話も出てきました。そういう物が、具体的に、伝熱研究とどう関わるかということは抽象的にはわかるんですね。抽象的ながら21世紀を目指した場合に、ある程度の萌芽っていうんですかね、芽があると思うんですよね。そのどういう方向で具体性がある、こういう研究をすると、いま言った地球規模の研究で、主体性が伝熱研究者に得られる。あるいは、バイオの関係に行った場合には、伝熱研究者がどういう風な立場でそれが得られるか、ということがあるんじゃないかなと思います。今、K先生が隣にいて20年後は変わらん、変わらん、といっていますが本当に変わらないのか、もうちょっとしたら芽があるんじゃないかなと思いますんで、それくらいのバイオあるいは地球規模・・・。またこうおっしゃっておられる先生方が、伝熱とどういうふうに関わり、どう言うふうに進展するかという具体的なこと、一つでもおっしゃっていただければと思います。(A氏) 今の小学校3年生の坊やの質問をですね、私も小学校3年生の時に小学校の先生にしたことがあります、それで私が大学に入ってラジエーションの問題を専攻してから、大変酷な質問をしたな、と思いました。その時先生がですね、いやーそりゃ寒いからだよ。(笑い)・・・としか返ってこなかったんです。それはその、ラジエーションと、地球と、地球の大気は、1mの球の表面僅か1mm、まあ林檎の皮位なものですからね。だからその皮の中の斑点、温度差があるのにですね。その温度差をラジエーションの微分だけでは・・・結局大気層の中のラジエーションとコンバインしたコンベクションとコンダクションの問題なんです。で、これを知るのにやはりラジエーションを専攻して、そういう計算をしてきて、それでわかったんですね。だから、この先生に大変悪いことをしたなと思う反省を40年経ってしているわけですけど、ですからですね。3年生、6年生の坊やにどう答えたらいいいのかっていうのは、やはり将来、伝熱学をやりなさい・・・(笑い)

(司会) えーと、そのバイオとか何とか具体的に。

(J氏) 今、あのP先生が言われたことで、非常に残念なことはですね、あの7月の機械学会誌で、熱工学委員長だったもんだから、これからの熱工学の展望ということを中心さんたんして書いたんですね。それ全然読んでくれなかったんでしょか・・・(笑い)。読んでない・・・?(笑い)。そこでその私が言ったのは、その化学工学とか材料とか、今のバイオとか農学との関係の話とかそれからさっきのマントルの話とか、一生懸命いる

んな人から聞いたり勉強したんですけれど、そこにだいたい答えが載っていると思います。

(司会) 機械学会誌を読んで下さい。(笑い)

(Z氏) 一言で申しますと、私は話をじらす天才でございます、(笑い)私は結論的に、とりのI氏に大賛成でして、・・・その後私が話をじらしちゃいまして、とびとびになってしまいました。

(司会) Eさん。

(E氏) 何で手を挙げたのか忘れてしまいました・・・(笑い)。A氏の話が終わったところで手を挙げてたんだと思います。私は語いが非常に少ないので、今回も幾つか申し上げた中で用語集をちょっと作って解説をしておかないといけないのではないかと考えているわけですが、まず三つ申し上げたい。まず、toolという言葉と、それからお手伝いという言葉と、それから具体性を見失わないで本質的なことを願うという三つを申し上げたいと思うんですけれども、その前に、私が23年後にこういう会でビールを飲んでいるかどうかというのは多分飲んでいるでしょう。それがどういう形であれ、とにかく人間がいろんな女の人とつき合うと大きくなるのと同じ様に、やっぱり、栄養源というのはかなり必要で、いろんな分野の人とつき合うことがかなり必要だと、あのD氏は割合タイトじゃなくてルーズな関係、ルーズとは仰らなかったんですけれど割合緩い関係っていうのが重要だと仰った意味は私も非常に理解できますから、多分飲んでると思います。ただ白髪じゃなくて・・・(笑い)

それで一つはtoolという言葉。みんな関連あるんですけど、まさに皆さんの仰ってる意味と、多分あんまり変わらないと思うんですけど、伝熱を足場にしていろんな所に出て行きたいということなんですね。それでいろんな人と付き合わないで栄養源が得られないのと同じように、我々例えば伝熱を一つの核としてもっているわけですけど、それがもっともっというんな所で使われ、先程のG先生の設計のようなもののお話とか。今の日本の中にある天文台なんかでもそういう制御の話ってのは、かなり重要になって、実際に熱の設計しているわけですけども、そういう熱だけをやって いるんじゃないくて、それを使って大いにいるんな所に出て行こうという、そういうふうでtoolという言葉をとって頂きたい。

それから、具体性を失わない本質的なことというのはまさにこれで、具体性というのは何かというと、熱或は温度と言うのはどういうことで問題になるかということ、我々はよく知らなければ問題のたてようがないんですね。或は、提供しようがない。でそこで、あの凝固過程でも平面解析を前提として於ておく限りはですね、発展のしようがない。或は材料のどういふかの重要であるかという事を我々知らなければですね、熱屋の仕事がない。そういう意味で具体性を失わないで本質的なことを願うというのは、そういう意味なんです。

(司会) 時間をもう22分延長してやらしていただいていますけど、いくら何でも10時を過ぎないようにしたいと思いますが。あの、最後のチャンスで何かご発言が。(何人か挙手) これは10時を過ぎるかも知れない。

(以下テープ切れ)

<故・佐藤俊先生を偲んで>

### 佐藤俊君を想う

水科篤郎

佐藤俊君が手術のため入院したと聞いた時はびっくりとがっくりが同時であった。それまで、よく朝の京阪電車と一緒に、学部長をやめたとたんに血圧が下り、最近血圧を測るのを忘れる程安定していることなどを、元気に話していたからであり、またひそかに、今春からエネルギー・資源研究会の会長を彼にやって貰おうと考えていたからである。

佐藤君は年齢は私と同じであったが、大学卒業が私の方が一年上、教授になったのも早かったし、彼の温和な性格からも私を立ててくれた。同じ伝熱工学を専攻するもの同志であったが、彼は解析をよくし、私は直感型であるから、いろいろな点で助けて貰った。

佐藤君と一緒に計画したり、実行したりした仕事は数多い。関西伝熱研究会を初めて行ったのも彼と一緒にだったし、その後東大の橋先生との話し合いで、現在の伝熱研究会に発展させた時も一緒であった。国際伝熱会議Assemblyのメンバーである私を助けて、提出論文の審査や、東京における国際伝熱会議の企画実行にも知恵をかしてくれた。その他文部省科学研究費によるエネルギー特別研究を初めた時も、エネルギー・資源研究会を創設した時も佐藤君の協力による所大であった。更に私が主査となった多くの伝熱関係の学位論文の審査に当っては、三人の審査委員の中に殆んどの場合佐藤君が含まれ、すぐれた意見を得ることができた。

彼と一緒に仕事をしている間、やゝもするとカッカとなる私を温厚な彼は抑えてくれ、また理論整然と筋道を正してくれた。この様な佐藤君の協力にどれだけ助けられたことか。その畏友今はなし。多くの老筆の輩が矍鑠然とふるまっているこの世から、何故彼の様な立派な人が早く姿を消すのか。寂しく悲しくおもう毎日である。

合 掌

## 佐藤俊先生のご逝去を悼む

京都大学 岐美 格

本年1月発行の伝熱研究100号をご覧いただきたい。それには、佐藤俊先生が、日本伝熱研究会の創成に当って重要な役割を果たされたことが、甲藤好郎教授によって書かれている。実際その頃、流体力学がご専門であった京都大学の藤本武助先生を中心として、関西地区で伝熱の研究会が開かれていた。私もアメリカから昭和35年8月に帰国後、その研究会に出席したことを覚えている。ご承知のように、藤本・佐藤共著の「伝熱学概論」が昭和31年10月に発行された。その序に、「この書は伝熱学の概要を記述したものであって伝熱理論の入門書である。第一の著者は数年来京都大学工学部において機械工学科および応用物理学の学生諸君のための伝熱学の講義を担当し、また第二の著者は同じく機械工学科において伝熱学の研究に従事してきた。そしてこの経験がもとになってこの書ができたのである。……」とある。その翌年の3月から、佐藤先生は米国ミネソタ大学に出張され、Eckert教授のもとで1ヶ年研究された。その頃のことを写真入りで、佐藤先生ご自身が、同じ伝熱研究誌上に書かれている。昨年、1986年8月、サンフランシスコでの国際伝熱会議に久しぶりで出席され、そこで30年ぶりでミネソタ大学のEckert研究室のスタッフ一同が元気に再会できたことを、大変喜んで書いておられる。先生はあまり昔話は書かれなかったように思うので、貴重な文献である。国際伝熱会議には、私も同じグループ旅行の一人として参加した。ホテルから会議場までの、あの坂道を先生と二人で歩いてのぼったが、息を切らしたのは私の方のように思えた。先生はスポーツマンで、足がはやく、長いこと陸上競技部の部長であった。国際伝熱会議のポスターセッションの会場でも楽しそうにしておられた。も一つ重要なこととして、先生の文章の中に、*International Journal of Heat and Mass Transfer*の創刊と、そのeditor就任の経緯が書かれている。1960年に創刊された同誌のVol. 30, No. 2, 1987年2月号には、先生の65才のお誕生日を祝い、長年にわたるご活躍をたたえる一文が、鈴木健二郎教授によって書かれている。

佐藤先生は昭和18年9月に京都帝国大学工学部機械工学科を卒業され、特別研究生として研究に従事されたが、昭和20年9月に京都大学講師、同22年12月に同助教授に就任され、菅原菅雄先生のもとで、われわれ後進の指導にもあたられた。私が菅原先生の研究室で、卒業研究を行ったのは昭和22年4月からであるが、戦後の混乱期であったので、菅原研究室の運営を助けておられた佐藤先生のご苦勞は大変であったろうと推察する。昭和34年1月に京都大学教授に昇任され、蒸気、伝熱、燃焼、エネルギーなどの分野で着々と研究成果を挙げてゆかれたが、昭和43年末頃から大学紛争が始まり、むつかしい問題をかかえて、同47年11月

に京都大学評議員、同 51 年 4 月には文部省大学局科学官を併任、同 56 年 4 月から、京都大学を停年退官される同 58 年 3 月まで工学部長として大学行政に携われた。その間、日本伝熱研究会の副会長を第 7 期（昭和 43 年度）に、また同会長を第 16 期（同 52 年度）につとめられ、日本機械学会副会長を第 57 期（同 54 年度）につとめられた。どちらかというところ、退官前の 10 年間ほどは、ご研究よりも、行政的なことに時間をさかれ、ご心労も多かったのではないかと拝察する。前述のサンフランシスコの国際伝熱会議に、12 年ぶりで出席することができたと、先生ご自身が書いておられるが、そのお気持ちがよくわかる。

本年 4 月にイリノイ大学の Hartnett 教授が来日し、京都大学にも立寄った。彼は佐藤先生に会うことを楽しみにしていたが、先生のお身体の都合でできなかった。その頃から急に病魔が動き出した由である。

佐藤俊先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

## 「佐藤 俊先生を偲んで」

京都大学 鈴木健二郎

佐藤俊先生が亡くなられて3ヶ月になる。先生は、昨年11月検査のため京都大学付属病院に入院されたが、先生御自身何の自覚症状も持っておられなかったし、私の目にも先生が御病気とはとても見えなかった。だから入院していることは誰にも言わないようにと仰言ったことも、この程度のことで周囲に気遣いさせたくない、と言う先生の御考えから出ているものと極く自然に受け止めた。手術をされると聞いて大変驚いたが、献血を御願ひした関係で事情を御報せした教室関係者も一様にびっくりされた。手術後は順調に回復され、3月中旬、ハワイで開催されたASMEとの合同熱工学会議の頃退院された。3月初めには、京大会館で開催されていた学会に病院から通われたようであったし、退院許可が遅いと御不満の口振りでもあったので、ゆっくりと養生される方がよいですよと申し上げたくらいであった。しかし、4月に入って不調を訴えられ、京都に見えた旧友のHartnett教授にも会われるのを断念された。それ以降、御病状は好転せず、松山の伝熱シンポジウムの最中に再入院され、6月27日とうとう不帰の人となられた。

佐藤俊先生は、昭和18年9月に京都帝国大学機械工学科を卒業され、大学院で特別研究生として2年間を過ごされたのち講師に任じられ、助教授を経て昭和34年に教授に昇任され、昭和58年京都大学を退官された。私は、先生が機械工学科の蒸気工学講座の担任になられてまもなくの頃に研究室に入れて戴き、その後混乱を極めた大学紛争時も、御多忙であった評議員や学部長を勤められた期間も、先生の言動を真近かに見聞きすることが出来て、研究、教育上はもちろん人生指針の上でも測り知れない多くの事を学んだ。

先生は学生時代から菅原菅雄先生（第6代伝熱研究会会長）の研究室に所属されていたが、同時に藤本武助先生 [”伝熱概論”の共著者で御他界までInternational Journal of Heat and Mass TransferのHonorary Advisory Editorial Boardメンバー]の研究室に出入りされたらしい。私には謹厳な方だとその学生時代に受けた印象しかなかったが、先生は藤本先生を深く尊敬されていた。先生は、自己の利益につながる発言や行動を極力避けることを旨としておられたけれども、それは藤本先生の人生訓をそのまま受け継がれたものらしかった。また御若い頃から乱流伝熱の研究に手を染められたのも、あるいは藤本先生の感化を受けられた故ではないかと推察する（藤本先生は、乱流境界層の外層速度分布を対数則以外の関数で表示した最初の研究者として認知されている）。



”研究に指導なし”と言われることがある。先生は、それに類する言葉を口にされたことは一度もなかったが、研究を志す弟子達にとられた方針はそれに近かった。大筋の方向を時折チェックされ、場合によって”大丈夫なんやろな”と念押しされた。これが、危険信号であることを察知せずに突っ走ると、後で悪戦苦闘することが良くあった。そのようなときにも、余程のことが無い限り口出しされなかった。弟子達も、片意地張った手前もあるので、おいそれと音をあげることはできなかった。研究方法は、自分で会得すべきものとの御考えを実践されたように思う。気が短い私にはいまだに真似が出来ない点である。

先生は、自分と異なる意見に対して大きな包容力を持っておられた。私などは、それを良いことになり上手な事を言って甘えた一人である。議論の際には、良く”僕のセンスでは”と言う前置きを使われた。学生に対してもそうであった。”意見の相違は有り得ても良い”と予め知らせるためであったと思う。研究の上でも、未熟な考えを一蹴されることはなく、ひとまず宿題を与えて学生が自分で気付くのを待つ姿勢をとられた。どの学生に対しても同じようにふるまわれたので、学生自身気付くことは極めて希であったが、その反面”一を聞いて十を知るかどうか”と言った、先生一流の厳しい学生鑑識基準を持っておられた。宿題は、いわばそのテストでもあった。

先生は音楽が御好きで、御自分でも良く歌を唄われた。年に数度ある研究室のコンパでは、全員が歌を披露し終わるまで御開きにならなかった。歌の上手な学生を二次会、三次会へと連れ回って可愛がられた。もっとも、”うまい”とほめられる場合と、”センスが良い”と評される場合があった。歌があまり得意でない私には長い間その違いがはっきりしなかったが、”センスが良い”のは歌ばかりではなくて、むしろ歌にことよせて自分の鑑識眼にかなった学生であることを私達に知らせておられたのだろうと思っている。

学生時代に、私の書いた原稿を見られて、”類似の研究があって迷うことがあれば、国内の研究を優先して引用せよ”と言われたことがある。この件については、私は今も教訓として守るようにしている。伝熱分野は、多くの大先輩の先生方の御努力で比較的早く国際化した分野ではあるが、1960年代初頭には国内で行われた研究が国外で直ちに引用される雰囲気はまだ出来上がっていなかった。当時先生はInternational Journal of Heat and Mass Transferの初代Editorをしておられて、国内の研究のBibliographyを作成して掲載されていたが、日本の研究が欧米のそれに比肩することを、あらゆる機会を通じて周知徹底することに、腐心されていたのであろうと思う。

先生は御若い頃ミネソタ大学のEckert先生の下に留学されていた。先生は、御自分のことを話されない方であったが、ミネソタの話だけは、時折されることがあった。20年程前に、機械学会の全国大会が今年と同じように北海道大学で開催された。そのとき、“発表が終わったからもう良いだろう”と、初めての講演をした私を文笏湖に連れ出して下さった。遊覧船の上で、風景がミネソタに似ているとなつかしがっておられた。そのとき、“ミネソタは僕の第二の故郷や”と言われたのが今も鮮明に蘇ってくる。日本の研究が国際レベルにあるとの実感もミネソタで培われたようで、私が留学をしたときにも、“限られた時間ではまとまった研究は無理だから張り切りすぎないように。むしろ、どこの研究も同じだと言うことをしかと把んで来るように”と言われた。丁度先生が退官された翌年にミネソタ大学から私の研究室に留学生を受け入れたことがあった。そのとき、時代も変わったなあと感慨深げの御様子であった。昨年サンフランシスコの国際会議で、当時研究室で一緒に過ごされた方々に会われた話しは、先生御自身が伝熱研究誌上に書かれているが、5年振りにEckert先生に会われたことは勿論だが、留学以来始めてIbelle教授に会えたことも喜んでおられ、また20年前に客員教授として滞在されたBerkeleyにも久しぶりに寄られて満足されたようであった。HemisphereのBegell氏より、サンフランシスコで撮影した写真を表紙にしたHeat Transfer Engineering 一部の寄贈を受けたので、病室の先生に御届けした。先生はその翌朝亡くなられた。写真中の方々には、先生御逝去の悲報を御報せした。Irvine教授の御返事には、

I was most shocked and saddened to hear of the death of Professor Sato. He was a dear old friend of mine. Our friendship goes back over thirty years. It is strange that on June 27th a number of friends were in my house for my birthday. During the evening we were looking at the San Francisco photograph and talking about and remembering Professor Sato. So he was in our minds at the very last.

と書かれていた。彼岸に旅立たれた先生への何よりのたむけの言葉ではないかと思っている。筆を置くにあたって、佐藤俊先生の御冥福を衷心より御祈り申し上げます。

## 佐藤 俊 先生の思い出

木枝茂和 (日立 機械研究所)

佐藤俊先生ご逝去の知らせが届いたのは、亡くなられた日の夜半過ぎであった。具合を悪くされて入院されていたとは伺っていたものの、昨年8月サンフランシスコの国際伝熱会議でお目にかかったときのお元気そうな様子からは想像もできず、電話の前でしばし茫然としていた。

佐藤先生の研究室の一員に加えていただいたのは、昭和48年の5月である。それ以来、職を得て京都を離れるまで、ODの期間も含めて約8年間お世話になったことになる。入った当時の研究室では、ちょうど乱れによる対流伝熱や二相流に研究の焦点が移ってきたところであり、鈴木健二郎先生を中心に多くのエネルギーな先輩たちによる活発な研究活動が行われていた。また故園友孟先生の研究室の方々も、同じ部屋に机を並べておられ、多彩で賑やかな雰囲気の研究室であった。佐藤先生は、多忙な時間の合間をぬってしばしば研究室や実験室に足を運ばれ、研究の進み具合や実験の問題点などを議論していかれた。時には先生の若かりし頃の苦勞話や、伝熱研究会発足当時のエピソードなどにも話が及ぶことがあった。

佐藤先生の講義は、学部の熱力学から院の伝熱工学特論までもれなく受講させていただいた。手元にある先生の講義ノートを見れば、実に様々なことを教わっていたことに改めて驚かされる。講義は、先生の長身で端正な容姿と相まってとても魅力的であった。滑らかな語り口と運筆な板書で進められた講義は、明解であると同時に先生ご自身の興味を浮きだたせたものであった。しかし、講義中には良く分かったつもりであったものも、いざ下宿に戻って見直してみると、途端にわけのわからないものとなるが多かった。後に先生は、教科書に書いてあるようなことは自分で勉強すれば良いのだからあまり話したくないとおっしゃっていたが、その言葉どおり、講義では、個々の伝熱現象について自分はどう考えているかを重要視して話されていたように思う。まだ実際の現象にあまり触れたことのなかった学生にとっては、先生の長年にわたるご経験と感覚とに基づいたお話はなかなか理解できなかった。講義の折、先生は良く「なにになにの現象の捕らまえかた」という表現を用いられた。伝熱にまつわる現象の一つ一つを実際に測定され、整理し解釈しながら、伝熱という分野を切り拓いてこられた先生ならではの表現であったように思う。体系化され、道具立ても豊富になってからの伝熱に参加した者にとって、この少し耳慣れぬ言葉はとても新鮮な響きを持っていた。

先生の研究に対する姿勢に最も良く触れたのは、週一度開かれる研究室の研究会であった。学生たちの報告を聞き、データを子細に検討しながら、物理的にうまく納得できない場合には一心に考え込まれるので、報告した方がかえって恐縮するくらいであった。先生の指摘は実に

鋭く、まったく予想もしない点を突かれて驚くこともしばしばであった。またその一方では、いきなり「そうか、そういうことか」とさっさとご自分で納得してしまわれたりするので、発表している本人がひどく焦ったこともある。先生は特に、研究を進める上での方向性を大切にされた。具体的にどうこうしろとおっしゃることはほとんどなく、学生の自主性を重んじられた。それも、実際に学生の面倒を見られていた鈴木先生の細かな指導を信頼されていたためと思う。その頃私は、流れの数値解析を行っていたが、解析技術も未熟でなかなか結果も出ず、先生にはずいぶんご心配をかけた。数字を追いかける日々が続いたが、先生はそれにたいして強い危惧を示され、ことある毎に、実際の現象を理解するための感覚の鍛錬の大切さを繰り返された。

先生は他人に対しては、常に誠実かつ丁重であられた。学生たちに向かっても言葉を選ばれ、相手を思いやって話をされた。指摘や問題の投げかけはとても鋭かったが、命令調になったり、叱りつけたりされたことはなかった。しかしこちらの考えが至らぬ時は、「それでいいのか、どう考えているのか」などと問いただされ、この答えにくい質問に何度も頭を抱えた覚えがある。

いつだったか先生は、「教授が退官すれば、その講座をなくす制度があるらしいが、それは良いと思う」などと物騒なことを言われたことがある。隣にいた鈴木先生もうなずいておられたのでほっとしたが、いかにも佐藤先生らしいと強く印象に残っている。伝統とは乗り越えられるべきもの、ということであろうか。そのような先生の気概と情熱がとても好きであった。先生の考えに集中されているときの凛とした緊迫感、物に向かっておられるときの気迫が懐かしく思い出される。この先生のお姿の記憶は、私にとって代えがたい財産である。

先生はまた多くの趣味をお持ちであった。教授室にはご自身の筆による油絵や丹精された植木鉢が飾ってあった。若いころには合唱もやっておられたとかで、学生たちの歓迎会や忘年会の席では、美声を披露されるのが常であった。そのような集まりの締めくくりは、先生の指揮による全員の合唱であった。その折には、先生の手の中の本の割箸が、たちまちのうちにタクトに変じた。それらは佐藤研究室恒例の、心楽しい慣わしであった。

研究会が開かれた大学の一室からは、大文字山が良く見えた。山腹の木々の、季節ごとの色の移り変わりを何度も楽しんだわけであるが、京都を離れてから後も、季節の変わり目にはよく先生のことが思い出された。見ていただいても恥ずかしくない仕事ができれば、真っ先にお見せしに行こうと心ひそかに思っていたが、それもかなわぬこととなった。あまりにも早すぎのご逝去は、ただただ残念でならない。しかし、佐藤先生に出会えたことは、何物にも代えがたいほど貴重なことであった。未熟なままの学生であったが、若い日々を佐藤研で過ごさせて頂いたことを、心からありがたく思っている。そしてこれは、多くの諸先輩方をはじめ、佐藤先生の研究室に集った者全員のいつわらざる気持であると思う。

先生のご冥福を心からお祈りいたします。

In Memoriam

Ernst R. G. Eckert

In the year 1956, a young assistant professor at Kyoto University, Takashi Sato, inquired whether he could participate in the research at the Heat Transfer Laboratory of the University of Minnesota, indicating that he was especially interested in solar energy utilization. He joined us in the beginning of April, 1957 and carried out research in various fields, among them on cooling problems in gas turbines. He also attended the Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers at Boston, participating in the sessions on heat transfer. He stayed with us until the end of March 1958 and then returned to Kyoto University. A trip to the United States brought him, together with S. Sugawara, again to our University for a short visit.

I stayed in touch with him through the following years. He was a gracious host to my wife and myself when we visited Japan for the first time in 1970 and at subsequent visits. He showed me the laboratory in which he worked and gave us a guided tour through the historic sights of Kyoto. We met afterwards at international heat transfer conferences and I was frequently in touch with him on matters of the International Journal of Heat and Mass Transfer, where he was a founding editor.

I will always remember him as a dear friend and hold him in high esteem as a kind and upright person, deeply devoted to the education of the youth, to the increase of knowledge by research, and to the need for international cooperation in science and in general. The heat transfer community has lost a valuable member.

In Memory of Professor Takashi Sato

Professor and Mrs. Warren H. Giedt

Mrs. Giedt and I treasure our long friendship with Professor Takashi Sato. We were especially pleased to meet and talk with him at the recent Eighth International Heat transfer Conference in San Francisco. The news of his death was a shock, and we were saddened by the loss of our friend.

However, we realize that we were fortunate to have the opportunity to enjoy his friendship for a quarter of a century. Although our acquaintance resulted from common professional interests and activities, there was a deeper bond based on his appreciation of cultural and artistic values and his personal sincerity.

One of our fondest memories is being welcomed to Kyoto by Professor Sato during our first visit to Japan in 1963. His thoughtfulness and arrangements in introducing us to this beautiful area contributed immeasurably to our understanding of the culture of Japan. We shall never forget the mizutaki lunch in Kyoto temple, the trip to Mt. Hiei, and experiencing the tea ceremony performed by a master in his private garden and tea house.

We shall miss Professor Sato, but he will never be forgotten. He has left a record of engineering accomplishments and achievements, and the memory of a warm and perceptive individual and of an understanding and loyal friend.

<国際会議報告>

国際会議「Numerical Methods in Thermal Problems」(第5回)

小竹 進(東大)

「私は日本からきた。H大学のT教授だ。こんな研究は日本ではもう10年も前に終わっている研究だ。なぜ、いまさらこんなものをとりあげるのか？」

いままでの元気よい得意げな講演は、急にシヨンポリして

「そのような研究があるとはしらなかった……」

Swanseeでの第4回会議のとき、このような元気の良いT教授の厳しい討論があちこちで聞かれた。これを聞いていた組織委員長の Prof. Lewis が、私に

「それにしても日本からのpaperの数は少ないんじゃないか？」

「いや、日本ではこうした数値解析手法や技術そのものは論文にはなりにくい。こうした手法や技術は、実験装置の作り方や組み立て方に似ていて、論文全体がそのような内容ばかりということは非常に特殊なもの以外は考えられない。完全に流体関係の場合は少し違うが、熱関係の研究は現象が中心である場合が多いので特にこの傾向が強い。」

「数値解析手法が確立されれば、そうかもしれないが、それまでは研究(Scientific work)ではないのか。実験装置の作り方とは本質的に異なる問題だ。とにかく、日本では、この方面の多くの立派な仕事があるとおもうが、発表はどうしているのか？」

「われわれもその点を考えており、そういう情報交換ができる Community, Society を考えているところだ。」

「それならこのつぎの会議には是非日本から質の高い多くのpaperを集めてもらいたい。日本で会議を開くことも考えられる。」

ということで、組織委員の一人に加えられ、第5回国際会議「Numerical Methods in Thermal Problems」は、カナダのモントリオールで6月29日から7月3日まで5日間開かれることになった。会場は市内 Mont Royal 公園の麓の du Parc Hotel, 論文数は170件、このうち日本からは14件。大きなことを言った割には、少し数が少なかったが、前回に比べると質、量ともにはるかに良くなって、「やはり、日本のpaperは質が高い」という評判を聞いて、なんとか面目を保つことができた。それもそのはずで、参加いただいた先生は、九大の藤井哲先生、北大の谷口博先生をはじめとした、日本伝熱研究会の著名なウルサイ先生方と、新進気鋭な研究者ばかり。したがって、討論もニコニコだんまり型ではなく、伝熱シンポジウム型の辛辣な討論が日本の先生方から多く発言されていた。参加者は約400名とっていたが、3会場に常時みられた人数はこの約半分で、他は市内でフランス語の勉強(?)にも熱心だったのではないかと思う。

Thermal Problems ということで、内容が非常にひろく、それだけにプログラムの編成が難しく、どれを聞くか選択に困るが、それでも対流関係は圧倒的に一番多かった。分類の仕方に問題があるが、プロシーディングの目次は、相変化関係 16、熱伝導 8、自然/強制対流 30、物質移動 16、燃焼 7、原子力 4、熱負荷(変形、応力) 13、解析手法 27、応用 43 件と分類されている。

つぎに、全体の大まかな内容を紹介します、

- (1) 相変化では、casting, welding, forging, における melting, solidification の熱対流、熱応力の問題、
- (2) 対流関係では、cavity flow や pipe flow で、輻射や表面張力が入るとか、porous であるとか、形状を複雑にしたものが多い。
- (3) 前回から比較すると、FDM、FEM ともに、3次元の計算が目立ってきたこと、したがって、速度-圧力法も多くなったことが特徴である。
- (4) 物質移動、燃焼関係では、輻射、炉内燃焼、着火、化学変化や蒸発凝縮の相変化を伴う流れ、
- (5) 応用分野としては、steel rolling, buried cable, discharge lamp, electronic chip, cooling tower, arc welding, building, fire など多種多様である。
- (6) 手法としては、BEMによる熱伝導問題の改良、LESの検討、対流項の処理、multigrid法の改良などである。

熱的な問題は、現象が多種多様であり、数値解析といっても、その現象をどのように理解するかで、数値解析をするモデルがきまってしまう。逆にいうと、そのモデルをみると著者がその現象をどのように理解しているがはっきりしてしまう。そこで、そんなことよりこういうことの方が大切であるとか、これを考えないのでは意味がないとか、それではその現象をよく理解していないとか、いろいろ素直な意見が出て現象そのものについても非常に勉強になる。最初に、内容的にも質的にもこんなに巾が広いのではピントが合わなくてとボヤいていた先生も、最後のころには、なかなか巾があって面白いと関(感)心していた。

2年後の次回(1989年)は、日本で開催することを検討しようということになり、開催する場合どのような予算、会場、local organising committeeになるかなど一応の計画書を出して欲しいということなので、何人かの先生と相談して原案を組織委員会に提出する予定です。円高で問題が多いですが、次の組織委員会で日本になるかヨーロッパになるかが決定することになっています。日本になった場合は、伝熱研究会の会員の皆様にご協力いただかなければならず、よろしくお願い申し上げます。



### 1. まえがき

少し以前には、この種の紹介記事の文頭は「各種超電導関連機器や…の極低温冷却に、超流動性を呈する液体ヘリウム（He II）が目ざされ…」といった表現とすることができました。ところが今年になり、超電導の臨界温度（ $T_c$ ）の上限がどんどん上昇してゆくことが報ぜられ、上の表現に多少のためらいを感じない訳にはゆきません。しかし、良く考えてみますと、超流動ヘリウム温度（2 K以下）を本質的に必要とする応用は、赤外線（特に遠赤外）ディテクタの冷却をはじめとして少なからず存在していますし、超流動現象が相当に興味のある

現象であり、しかもまだ十分に明かとなっていないこと、そして現状では超電導の応用にはやはり液体ヘリウム温度を必要とすること等を考え合わせますと、上の文頭の件はともあれ著者にとってはそんなに大きなインパクトを与えてはいない気がします。

さて、超流動という術語から連想されるのは、絶対零度に近い極低温と摩擦なしの流れということでしょうか。しかし、そのどちらか、あるいは両方を併せても「超」流動というには不十分です。流体現象は、一般にレイノルズ数をはじめとするいくつかの無次元パラメータで支配され、温度そのものが単独で意味をもつことはありませんし、摩擦が無いというだけならば完全流体という既に熟した表現が存在しています。つまり、このあたりを強調することが本紹介の第一義であろうかと思われます。まず、 $^4\text{He}$ の極低温での状態図（図1）を見てみましょう。（安定な同位体である $^3\text{He}$ にも近年もっと低温で流動現象が発見されていますが、ここでは触れないことにします。）大切な点は、3重点が存在しないこと、入線に分けられる2つの液体相が存在すること、絶対零度で液体相が存在しうることなどです。 $^4\text{He}$ が初めて液化されたのは、オランダのライデンに於いて1908年のことですが、程なく2 Kより少し高い温度で比熱の異常（ $\lambda$ -字形の不連続）が発見され、後にそこで第2種の相転移が起きていることが分かり、図に示すようなHe IとHe IIの2つの相があることが確認されました。このうち、低温側のHe II相だけが超流動性を示すのに対して、He I相は普通の粘性流体です。He II相は絶対零度でも存在します（それ故、永久液体とも称されます）ので、その振舞に量子効果が効いてくること

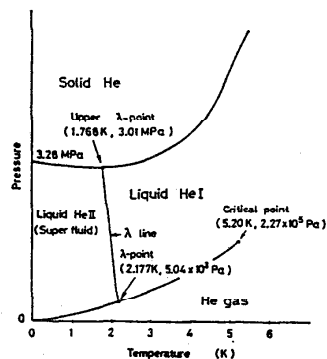


図1 Heの状態図

が示唆されます。この視点からの議論は、適当な教科書 [1, 2, 3] にあることを指摘するだけにしておきます

## 2. 超流動現象と2流体方程式

### 2.1 2流体モデルと2流体方程式

超流動現象を説明する現象論的方程式である2流体方程式は、Landau [4] によって1941年に提案されましたがそれに先だって多くの興味ある実験事実が報告されました。それらのほとんどは、所謂、2流体モデルでおよその説明を与えることができます。これは、通常の流体と同様な粘性をもった常流動部分と、粘性の無いしかもエントロピーが零である超流動部分との混合系として超流動流体を捉えるものです。これに依って、発見当初は不可解であった多くの現象に納得のゆく定性的説明が与えられました。そのいくつかをとりあげてみましょう。

a) 音速測定や、器の底から重力によって流下するトリチエリー流れでは He II に特異性は見出されない。

b) 極く狭い間隙を流れることができるのは粘性が無いからである。

c) 弾性糸で吊下げた円板の面内回転振動の実験では、減衰が観測され、粘性は零ではないことが認められた。

a) の例では、He II の流れは通常の流体の流れと変わるところはないことを示していたのに、b) と c) の例では互いに相反する結論が導かれました。それに対する2流体モデルによる説明は、次の様になります。a) では、常・超流動两部分が一緒に同一の運動をしたので特異性は現われない。b) は実験装置に生じた極めて小さな(サブミクロン程度で、常温状態での真空チェックでは漏れが検知されない)穴ないしはクラックを通して He II が自由に漏れ込んだ(スーパーリーク)という、多分に苦い経験が発端となって発見されたに違いないのですが、このとき常流動部分は狭隙中で自らの粘性によって流れられず(クランプ状態)、超流動部分のみが流れ、結果的に He II は粘性が無いと判断されたのでしょう。c) の例では、常流動部分の粘性が観測されたのです。

一方、超流動現象の解明にとってもう一方の柱となったのは、熱が加えられたときの He II の特異な挙動でした。

d) 噴水効果(又は熱機械効果: 図2)

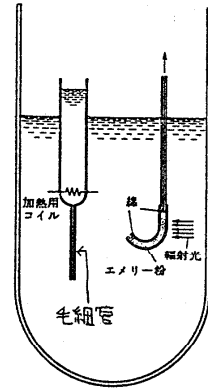
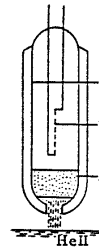


図2 噴水効果(熱機械効果) [1]



1. He II の液面  
2. リン管抵抗線(温度計)  
3. スーパーフィルター

図3 機械熱効果 [6]

右側の例では、光をあてる（放射加熱）と毛細管の先端から10cm以上の高さに及ぶ噴水が生じます。

この現象は、超流動流体を完全流体と看做すだけでは全く説明がつかず、次に説明する現象と共に真に超流動と呼ぶにふさわしいものです。He IIは温度差（数mK程度以下）があると、圧力差のある状態で力学的平衡状態を達成します。このような平衡状態を達成する方向に状態変化が起こりますが、このとき、

超流動部分が流入してきます。ところがその流入によって圧力が高まったも、常流動部分は流路が狭い（左：毛細管、右：エメリー粉粒子間隙）ので流出できず、結果として上記の現象が起こります。なお、このような超流動部分だけを通す一種のフィルターをスーパーリークと呼び、超流体を扱うに際して特別な役割を果たします。

e) 機械熱効果（図3）。器内のHe IIがスーパーリークを通して流出すると器内温度が上昇し、逆に器を沈めてHe IIをスーパーリークを通して器内に流入させますと温度が低下するのが測定されます。

この際、流出入に関与したのは超流動部分だけであり、従って器内のHe IIの質量は変化したにもかかわらずエントロピーは不変であり、結果として温度変化となって観測されたものです。なお、この現象は、流出入に関して可逆的であることが確かめられています。

この種の実験を定量的な域にまで高め、現象を厳密に測定してLandau等に至る途を開いたのが次に示すKapi tza [7] の実験です。

f) カピッツァの実験（図4）。ヒーターHで加熱したとき、光学ガラスの表面間の狭隙（スーパーリークとして機能する）Sを通して流入するHe IIの流量 $\dot{V}$ と温度上昇 $\Delta T$  圧力上昇 $\Delta p$ 、加熱量 $\dot{Q}$ 等間の関係を調べた。この実験では、平行状態ではロンドンの関係式

$$\Delta p = \rho S \Delta T \quad (1)$$

ただし、 $\rho$ と $S$ はHe IIの密度および単位質量あたりのエントロピーである、が成立すること、 $\dot{Q}$ と $\dot{V}$ の間には

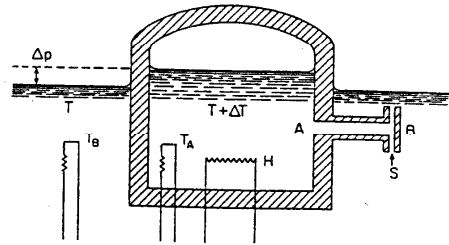


図4 カピッツァによる熱機械効果の実験装置。  
H：ヒーター、S：光学ガラスを重ねてできる細隙  
 $T_A$ 、 $T_B$ ：温度計

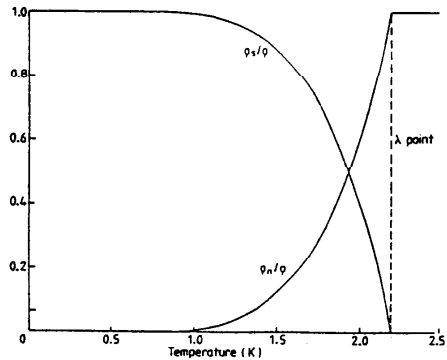


図5  $\rho_s / \rho$  と  $\rho_n / \rho$  の温度依存性

$$\dot{Q} = \rho S T \dot{V} \quad (2)$$

が成立すること、そしてこれ等の関係が崩れる $\dot{Q}$ の臨界値が存在すること、などが結論されました。特に

(2)式は、流入して来た流体のエントロピーが零であることを示しており、これに確信を得て2流体方程式が提案されました。エントロピーが零という性質は量子統計で現われる基底状態に落ち込んだ(ボーズ=アインシュタイン凝縮)巨視的な部分に超流動部分が対応していると考えたと理解を助けることになるでしょう。では、次に、2流体方程式を示しましょう。簡単の為に常流動部分の粘性も省略してありますが超流動の本質を説明するにはこれで十分です。なお、常流動、超流動量部分をそれぞれ添字nとsとで示してあります。質量保存式は、

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot \rho \vec{v} = 0 \quad (3)$$

と表わされます。ただし、

$$\rho = \rho_n + \rho_s, \quad v = (\rho_n \vec{v}_n + \rho_s \vec{v}_s) / \rho \text{ です。}$$

なお、平衡状態では $\rho_n$ と $\rho_s$ とは温度と圧力で決まります。図5には、飽和状態での $\rho_n / \rho$ と $\rho_s / \rho$ とを温度の関数として示してあります。また、全体としての運動方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_n v_n + \rho_s v_s)_i + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (p \delta_{i\alpha} + \rho_n v_{n,i} v_{n,\alpha} + \rho_s v_{s,i} v_{s,\alpha}) = 0 \quad (4)$$

と書けます。ここで、添字iと $\alpha$ とは座標成分を表わしますが、繰り返し使用の時は和を表わすものとします。エントロピーは常流動部分のみによって運ばれることを考えますと、エントロピーの保存則は次のようになります。

$$\partial (\rho s) / \partial t + \nabla \cdot (\rho s \vec{v}_n) = 0 \quad (5)$$

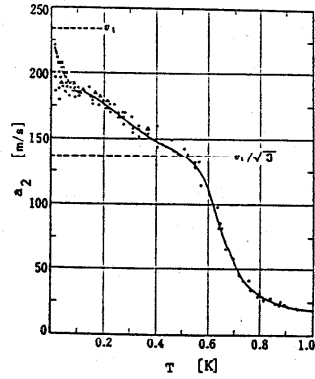
これ等に加えてLandauは超流動部分はポテンシャル流体だと仮定して

$$\frac{\partial \vec{v}_s}{\partial t} + \nabla \left( \frac{v_s^2}{2} + \mu \right) = 0 \quad (6)$$

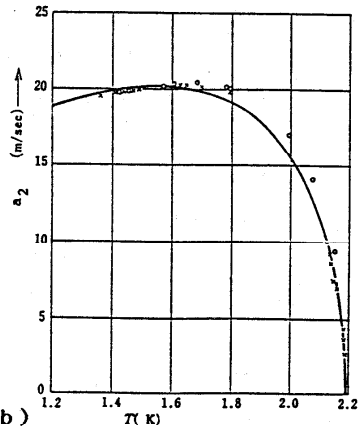
を導きました。ただし、 $\mu$ は化学ポテンシャルであり、次の関係式が成り立ちます。

$$d\mu = -s dT + \frac{1}{\rho} dp - \frac{1}{2} \frac{\rho_n}{\rho} d|\vec{v}_n - \vec{v}_s|^2 \quad (7)$$

なお、(6)式は、ここでは天下りの的に与えましたが、微視的観点からの正当化が可能です。大雑把な言い方をすれば、これ等の方程式は $\vec{v}_n$ と $\vec{v}_s$ によって支配されますので、



(a) 0 K ~ 1.0 K. Klerk, Hudson and Pellam [10] による実測値



(b)

X: Peshkov [8], O: Lane et al. [9]

図6 第2音波の速さ

方程式の数は通常流体の2倍になると言うことができます。また、平衡状態を考えると、(7)式からただちにロンドン関係式が導かれます

## 2.2 2流体方程式からの帰結

2流体方程式の成功を決定づけたのはなんといっても第2音波の存在を予測し、しかもその伝播速度と実測値とがみごとな一致をみたという事実でありましょう(図6)。その音速 $a_2$ は、第1音波のそれ $a_1$ と共に2流体方程式から容易に求められます。

$$a_1^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s, \quad a_2^2 = \frac{T S^2 \rho_s}{C_p \rho_n}$$

なお、第1音波は図7-aで述べた通りその変動が $\bar{v}_s \approx \bar{v}_n$ と近似され、通常流体中の音波(圧力波)と同じものです。第2音波では、常流動部分と超流動部分とが全体としての重心移動を零とるように振る舞い(熱かき流)、従って密度(圧力)変動は無視できる程度となり、ほぼ純粋な温度(実はエントロピー)の波となります。このような両方の音波の変動の様子を模式的に図7に示しました。第2音波に於いても有限振幅の波に対しては非線形性が表われ、熱衝撃波へと成長することもあります。図8には、パルス状加熱によってつくられた第2音波パルスが伝播につれて波の前面が急峻となり衝撃波となった例(a)、逆に温度によっては温度の低い部分の伝播速度が大きくなり、通常流体の衝撃波では存在が考えられない波の背面が不連続を形成する例(b)、そしてその中間の温度では、前と背面の両方に不連続が形成される例(c)が示されています。さらに、第1・第2音波に加えてあと3つの微小攪乱伝播モード、第3・第4・第5音波についても2流体方程式がうまく現象を説明することがわかっています。

2流体方程式で扱うことのできる別の例として、いわゆる超熱伝導を取り上げてみましょう。dだけ離れた2枚の平行平板間のHe IIに、それ等と平行な方向に温度勾配 $\Delta T/l$ を与えたときの伝熱量を2流体方程式から求めてみ

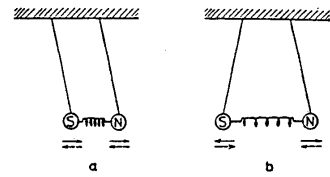
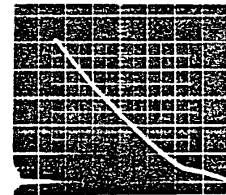
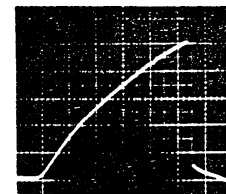


図7

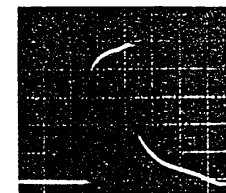
第1音波と第2音波のモデル。弱く結合した単振子のSを $\rho_s$ 、Nを $\rho_n$ と考えると、aの第1音波に対して、bの第2音波では、SとNが全体としての重心位置を不変とするよう、逆位相で振れている。



(a)  $T_0 = 1.952 \text{ K}$



(b)  $T_0 = 1.915 \text{ K}$



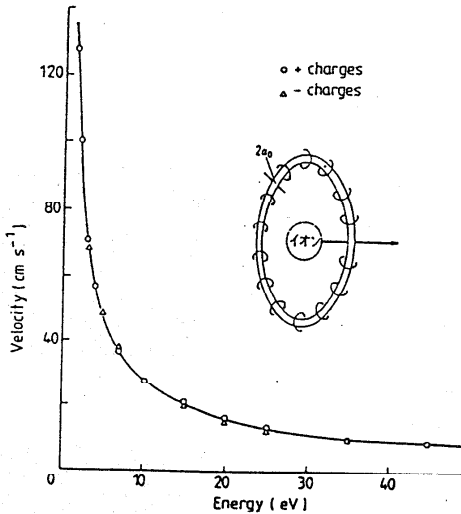
(c)  $T_0 = 1.874 \text{ K}$

図8 熱ショックの形成  
t - T 曲線

ますと、

$$q = -\lambda \frac{d^2}{12} \frac{\Delta T}{l} \quad (9)$$

となります。ただし、 $\lambda = \rho^2 S^2 T / \eta_n$  となり、 $(\eta_n$  は常流動部分の粘性率)、このときの実効熱伝導率  $\lambda \frac{d^2}{12}$  の値は、例えば、 $d = 10^{-3}$  cm に対して、液体ヘリウムの熱伝導率の  $10^7$  倍となります。この値は確かに超熱伝導率と呼ぶにふさわしいほどに大きいのですが、実はこの現象は熱伝導ではなくむしろ対流による熱移動と考えるべきです。つまり、高温側（加熱側）から低温側に向かう常流動部分と、これと逆向きで全体としての質量移動を相殺している超流動部分の運動が生じ（熱カウンター流）、熱エネルギーは常流動部分のみによ



○と△は、それぞれ正および負イオンが作る渦輪を、それらイオンをトレーサーとして測定したもの。実線は、量子数を1とし、コア半径として1.2Åをとった時の理論値で、両者の一致は見事である。

図9 渦輪の移動速度とそのエネルギーの関係 [5]

て運ばれますので、一方的な熱移動が起こるのです。このように、He IIは見掛け上の熱伝導率が極めて優れていることにより、沸騰は起こりません。

ところで、超流動現象は巨視的レベルで現われた量子効果であると言われていますが、これまでの議論には量子力学の象徴ともいべきプランク定数  $h$  が現われてはいません。この意味でも、2流体方程式で記述できる現象は全く古典的であると言えるかもしれません。ところが、次節では、2流体方程式の枠内では説明し尽くされない現象のあることを示すとともに、プランク定数も登場することになります。

### 2・3 超流動の崩壊

次のような問題（回転パラドックスと呼ばれている）を考えてみよう。回転円筒中のHe IIの温度を静止状態で超流動転移温度（ $T_\lambda = 2.17$  K）以下に下げて、He IIとした後、この系を回転させます。2流体モデルによれば常流動部分のみがやがて剛体回転を示し、

超流動部分は静止したまま、ということになります。しかし実験事実は回転数が極めて小さいうちは確かにそうであるが少し大きくなると全体の角運動量の実測値から判断して超流動部分も回転していたというものでした。しかもこのような回転状態に於いても第2音波の存在など超流動現象は依然見だされ超流動性が消失してしまっただけでもありませんでした。このようなハラドックスの解決は回転速度(すなわち $|\nu_s - \nu_n|$ )がある臨界値を超えたとき、超流動部分に渦が

発生したと説くことによって与えられました。この渦糸は、 $10^{-8}$  cmオーダーの核(そこで $\rho_s = 0$ )を持つ特異線と考えられ、その存在のために場( $\vec{V}_s$ 場)は渦無しであるが多重連結領域となる為に回転的な運動が許されるというものです。円筒が回転した時、超流動部分は静止しているよりも渦糸を生じて回転運動をする状態のほうが自由エネルギーが低くなるという訳です。しかも生じた渦(循環)は次のように量子化されています。

$$\oint \vec{v}_s \cdot d\vec{l} = nK \quad (K = \hbar/m, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (10)$$

ここで初めてプランク定数が超流体の流体力学に導入されたこととなります。この点に関する理論はFeynman [3]によって与えられました。

実験では、まず2流体モデルの示す(亜臨界状態での)永久回転流が確認[12,13]され、その回転速度が大きくなったときに発生する余分な散逸の原因として渦の存在が確かめられました[14,15]。文献15の結果を図9に示しましたが、ここで得られた印加エネルギーとそのときのイオンの移動速度の関係は、図9中の挿入図にあるようにイオンの移動に際してそのまわりに渦輪が誘起され、結果的にこの渦輪の運動によってイオンの運動が支配されたと解釈すれば説明がつくことを示しています。そしてそのような渦が量子化されていることの実験的検証は、細線の振動によって誘起された渦についてWhitmoreとZimmerman [16]が、回転系中ではPackard [17] (図10)など多くの報告があります。最近では、UCBのグループ[18] (図11)により、回転速度・渦糸の本数の関係と、発生した渦の配列パターンが可視化法により明かにされるに至っています。これ等の現象の解釈および理解に最しては、第II種超伝導体の混合状態とのアナロジーが有益であったはずですが[19]。つまり、磁界が臨界値を超えると、それ以下では超伝導体内部に侵入できなかった(マイスナー状態という)磁束が、量子化された大きさをもって超伝導体内部に

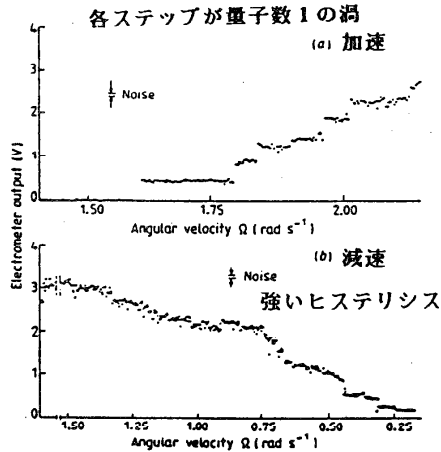


図10 直径1 mmの円筒の回転速度とそのときに存在する渦の本数の階段状変化 [16]。

侵入するようになる、という現象です。つまり、量子化された渦と磁束とのアナロジーが成立しています。

### 3. 乱れた超流動流れ

常流動部分と超流動部分との相対速度がある臨界値を超えると渦が発生して、超流動の崩壊が始まることは既に述べましたが、ここではその相対速度がさらに増加したとき、やがて渦長密度がますます大きくなり互いに複雑に絡み合うほどとなった状態について議論します。このような状態では、前に述べた余分な散逸効果が顕著となり、第2音波の減衰が増加する等の観測はもちろん、最も重大な点は、超流体の両部分間に摩擦が働くようになる（相互摩擦）ことです。超流動部分にも巨視的な境界層の形勢といった粘性流体と似た挙動も見られるようになり、一般にこの状態は超流動

乱流と称されています。ただこのような崩壊状態であっても、超流動の本質、例えば熱機械効果が消失してしまうわけではないことは、もう一度強調しなくてはなりません。つまり、所謂超流動乱流は、渦糸がびっしりと絡み合った状態を指しているのであり、通常の粘性流体で観測される”乱れた”乱流とは状態を異にしていると考えられて来たようです。そのことは、Feynman [3] が「最終的には、超流動乱流は、通常流体の乱流より単純であるということがわかるであろう」と述べていたことからわかります。ただ、後に述べるように、我々の行なった可視化やLDVによる測定からは、むしろ通常の乱流との類似性の方が目立ちます。このように、超流動の崩壊と超流動乱流とは超流動流れに於ける新しい課題であるように思われます。ただ、その発生論や理論的展開については、本文の「紹介」という性格を超えますので、割愛することになります。興味のおありになる方は、流体力学会誌「流れ」の拙文[20]や、いくつかの原著論文[21,22,23]を参考にして下さい。

以下ではひとつの典型的な例、熱カウンター流について説明します(図12)。ヒーターHのある加熱チャンバ-Rと外界のHe IIとは細管(φ0.1以上で常流動部分も流れられる程度には太い)Cで結ばれており、CとRは断熱のため真空ジャケットJに収納されています。ヒ

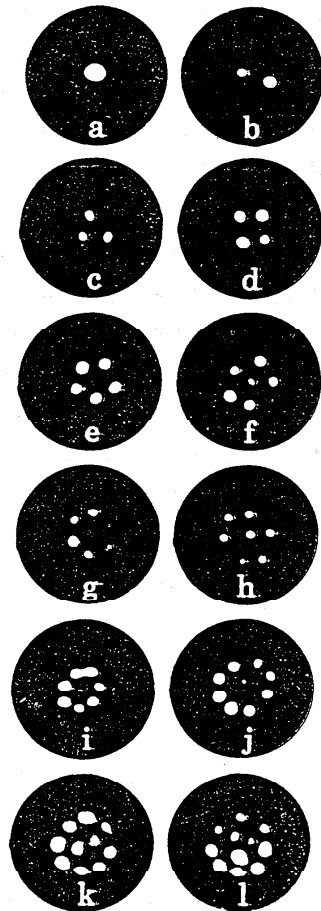


図11 直径2mmの回転円筒内に発生した渦の可視化写真[18]



ーターでR内のHe IIを加熱しますと外へ向かう常流動流れとRへ流入する超流動流れが生じ、所謂熱カウンター流がC内に生じます。このとき、連続の条件は満足させなくてはなりませんから、正味の質量流量は零、すなわちC内には見掛け上流れは生じていません。

$$\rho_s \bar{v}_s + \rho_n \bar{v}_n = 0 \quad (11)$$

なお、この式は第2音波の説明の所にも出て来たことに注意して下さい。測定は、加熱量 $\dot{Q}$ 、細管両端間の温度差 $\Delta T$ 及び圧力差 $\Delta p$ に対して行なわれます。結果の1例を図13-aに説明の為の模式を13-bに示しました。 $\dot{Q}$ が小さなうちは、 $\dot{Q}$ に比例した極く小さな温度上昇(1mK程度以下)しかなく、 $\Delta p$ も粘性を持つ常流動部分の流れ(層流)に対して発生しますのでやはり $\dot{Q}$ に比例します。 $\dot{Q}$ が $\dot{Q}'$ (図13-b)を越えると急激に余分な温度上昇 $\Delta T$ が生じ、更に $\dot{Q}$ を増大させると $\Delta T$ は非線形的に急上昇します。この状態が超流動乱流です。逆に $\dot{Q}$ を減少させますと、ヒステリシスを呈し、最終的に線形のプランチに復帰します。なお図13-bの2および3で現わされる部分は流路が矩形のときには見出されませんが、それらの間の状態(図13-b中の1の部分)はどんな場合にも共通して現われ、およそ

$$\Delta T \propto \dot{Q}^3 \quad (12)$$

が成立することが知られています[25]。面白いのは、乱流状態に移しても $\Delta p$ は $\Delta T$ 程には急激な上昇をしないことで、これは、常流動・超流動に働く相互摩擦力が一種の内力として作用することを示しています。以上の事実から、超流動乱流状態では、運動方程式の常流動部分に対する式に相互摩擦力の項 $\bar{F}_{sn}$ を加え、超流動部分に対しては、 $-\bar{F}_{sn}$ を加えるべきことが示唆されます。そして、この相互摩擦力は相対速度( $v_{ns} = |\bar{v}_n - \bar{v}_s|$ )がある臨界値 $v_0$ (およそ1cm/sのオーダーの量)を越えたときに生じると考えて

$$\bar{F}_{sn} = -A(T) \rho_s \rho_n (v_{ns} - v_0)^2 \bar{v}_{ns} \quad (13)$$

という模型がVinen [21]によって提案されました。A(T)は実験的に求められており、これを用いた予測は実測と少なくとも細管中の熱カウンター流れについてはまずまずの一致をみえています。

このように超流動には、崩壊・乱流化といった現象の現われる可能性があるアとを特に応用に関しては念頭に置くべきです。さらに、沸騰が起こらないと前に述べましたが、これは乱流化した状態では必ずしも正確な記述ではなく、(余分な)散逸が増大すれば沸騰

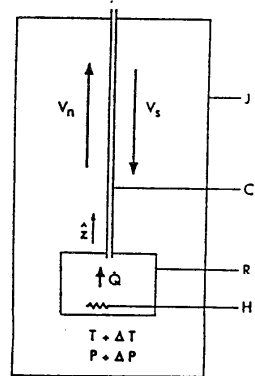


図12 細管中の熱カウンター流の実験装置



しかるべきエレクトロニクスを使えば、1 mK程度の分解能を得ることができます。白金抵抗温度計やSiダイオード温度計は、互換性に於いて利点があるものの、前のものと同程度のエレクトロニクスの使用を前提とすれば、分解能では劣ります。一方、流速計測になりますと、現在では体積流量を断面積で除したり、あるいは超音波流速計を用いたりして平均流速が求められる程度で、高い時・空間分解能を持つ測定手段は存在しません。

このような研究動向に鑑て、私たちの最近の研究目標のひとつをこの方面の技術開発に定め、流れの全体像の把握を可視化法により、また高い時・空間分解能を持つ流速測定をLDVの応用により追及して来ました。He II中での可視化は、極低温であること、粘性も密度も特に極めて小さいことから、粒子追跡法が適当と考えられますが、その粒子の中立安定性の実現はたいへん難しい課題でした。つまり、He IIよりも少しでも密度が大きければただちに沈降してしまい、逆に小さければ浮上してしまい、トレーサーとして利用できません。ここで用いた中立安定粒子は、水素-重水素 (H-D) 混合固体微粒子と、軽量空中ガラス球で、共に0.1mm程度の大きさです。それ等を用いて撮影された写真の例を図15と16に示しました。前者は、図12と同じ原理で作られた熱カウンター流で常流動部分が外界の静止He II中へ流出してゆくときに形成されるジェットを可視化したものです。この実験の狙いは、団体壁の影響から自由な超流動乱流を調べることにありました。この実験では、ジェットの噴出口での平均流速(常流動流束)は理論的には次のように与えられ、決して加熱量だけでは決まりません。

$$\bar{v}_n = \dot{Q} / \rho S T A \quad (14)$$

写真から分かる第1の点は、ジェットのパターンは流速次第で通常粘性流体と同様の変遷をすることです。第2には図15-bから分かるように、周囲のHe IIがジェット内へ大規模にエントレインメントを起こしていることです。また速度分布の概略をえて計算した運動量流束の値からは、ジェット中では、決してカウンター流れ、(11)式、を実現しているのではなく、むしろ常流動・超流動两部分共に同一方向に動いているとみなすべきことが示唆されました。これは単純な予想とは異なる結果ではありますが、相互摩擦について考えれば妥当な結果といえます。さらに詳しくは原論文[26]をごらん下さい。また、図16はH-D粒子をトレーサーとした、He II中の巨視的渦輪の可視化写真です。この渦輪はピストンを駆動することでHe II中に作られたもので、トレーサーは常流動部分に追随していますが、超流動部分も相互摩擦により粘性流体に対応する挙動をし、渦輪の構成に与かっているものと考えられます。

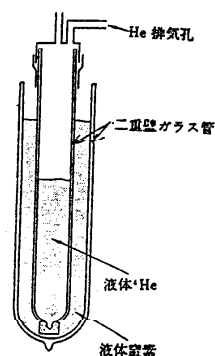
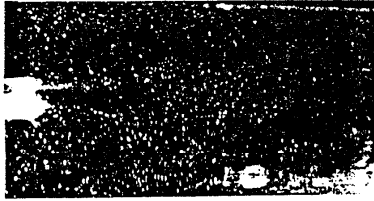
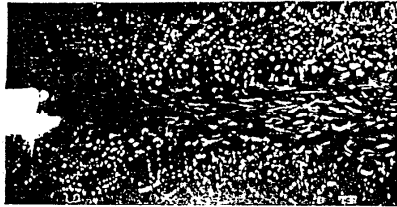


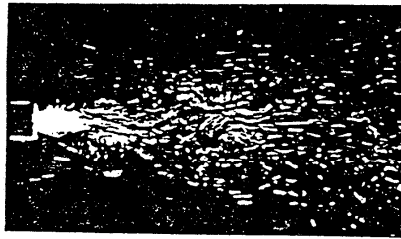
図14 デュワーびん



a  $T = 1.99 \text{ K}$ 、  
 $q = 1.06 \times 10^3 \text{ w/m}$   
 H - D particles  
 1/2 sec (多重露光)



b  $T = 1.95 \text{ K}$   
 $q = 1.77 \times 10^4 \text{ w/cm}$   
 H - D particles  
 1/2 sec (多重露光)



c  $T = 1.90 \text{ K}$   
 $q = 3.78 \times 10^4 \text{ w/cm}$   
 Glass particles  
 1/8 sec.

図15 熱カウンター流ジェットの見視化写真



渦輪は左下のピストン(直径8mm)  
 から打ち出される。

$T = 1.9 \text{ K}$   
 H - D PARTICLES  
 1/8 sec

図16 He II中の巨視的渦輪の見視化写真。

一方、同様の例について、同じくH-D粒子（ただし、粒径はずっと小さくて1 $\mu$ mオーダー）をトレーサーとしてLDVによる測定も進行中です。その結果によれば、十分に発達した超流動乱流に於いては、粘性流体の乱流と同様な速度乱れが測定されておりますし、熱カウンター流ジェットでは加熱開始後のジェットの非定常状態についても詳しい測定がなされ、渦増殖の様子が知ることができそうなレベルにまで来ております。

#### 5. 超流動ヘリウムによる冷却

これまでの説明で、He IIを用いる冷却には、単に温度が低いというだけでなく、いくつかの利点があることが分かって頂けたことと思います。その第1は見掛け上の熱伝導率が極めて優れていること、第2には薄膜流によって容易に表面が被れ、均温化に役立つということが挙げられましょう。反面、超流動の崩壊や乱流化といった現象の存在についてはマイナス要素として十分認識しておかなくてはなりません。

応用としては、何といたっても超電導マグネットの冷却があります [27,28]。また宇宙用の赤外線望遠鏡の冷却にも用いられます [29]。他の応用としては電子顕微鏡の試料ステージの冷却 [30] や超音波顕微鏡の音響カブラ [31] への応用等も、He IIの特質を生かしたものと云えるでしょう。これ等の応用面からの要請として最近大がかりな研究が行なわれているものとして、加圧超流動の利用とHe IIによる強制冷却 [32,33] があります。前者は、加圧により状態を飽和状態から隔て、沸騰へのマージンを大きくすることを目的にしています。この方面については、最近出版された Van Scieverの著書 [34] に詳しく述べられております。

#### [ R e f e r e n c e s ]

- (1) F.London: Superfluids II (1954), 井口訳 (講談社)
- (2) ランダウーリフシツ: 統計物理学, 第6章 (岩波, 1966).
- (3) R.P.Feynman: Progress in Low Temperature Physics, ed.C.J.Gorter, Chap.1, 17 (North-Holland, 1955)
- (4) L.Landau: The Theory of Superfluidity of Helium II, J.Phys.USSR 5 (1941) 71.
- (5) Tilley, D.R. and Tilley, J., Superfluidity and superconductivity. 2nd ed. Graduate Student Series in Physics. Adam Hilger Ltd., Bristol, 1986
- (6) 低温工学ハンドブック編集委員会編、低温工学ハンドブック、内田老鶴圃新社 1982年。VDI: Lehrangshandbuch Kryotechnik
- (7) P.J.Kapitza: Phys.USSR. 5(1941) 59.
- (8) V.P.Peshkov: Dokl. Akad. Nauk USSR. 45 (1944) 365; J.Phys.USSR 8 (1944) 381

- (9) C.T.Lane, H.A.Fairbank & W.M.Fairbank: Phys. Rev. 71 (1947) 600.
- (10) D.de Klerk, K.P.Hudson & J.K.Pellam: Phys. Rev. 89 (1953) 326 and 662.
- (11) Liepmann, H.W. and Laguna, G.A., Nonlinear Interactions in the Fluid Dynamics of Helium II, Annual Review of Fluid Mechanics ed. by M. van Dyke, 16, 1984, pp. 139-177
- (12) J.D.Reppy & D.Depatis: Phys. Rev. Lett. 12 (1964) 187.
- (13) W.M. van Alphen, R. de Bruyn Ouboter & K.W. Taconis: Phys. Lett. 24, A (1967) 380.
- (14) H.A. Snyder & D.M. Linekin: Phys. Rev. 147 (1966) 131
- (15) G.W. Rayfield & F. Reid: Phys. Rev., 136A (1964) 1194.
- (16) S.C. Whitmore & W. Zimmerman: Phys. Rev. 166 (1968) 181
- (17) R.E. Packard & T.M. Sanders: Phys. Rev. Lett. 22 (1969) 823
- (18) E.Y. Yarmchuk, J.V. Gordon & R.E. Packard: Phys. Rev. Lett., 43 (1979) 214
- (19) ローズ=インネス, ロデリック (島本, 安河内訳): 超電導入門, 12章 (産業図書)
- (20) 村上正秀: ながれ; 3 (1984) 23.
- (21) W.F. Vinen: Proc. Roy. Soc. A 240 (1957) 114 (part I). A 240 (1957) 128 (part II). A 242 (1958) 493 (part III). A 243 (1958) 400 (part IV).
- (22) K.W. Schwarz: Phys. Rev. B 18 (1978) 245.
- (23) K.W. Schwarz: Phys. Rev. Lett. 49 (1982) 283; 50 (1983) 364.
- (24) D.R. Lander & J.T. Tough: Phys. Rev. B 17 (1978) 1455.
- (25) C.J. Gorter & J.H. Mellink: Physica 15 (1949) 285.
- (26) 村上正秀、市川直樹: 低温工学 22-3 (1987) 21.
- (27) R. Mardion et al.: Proc. 6th Int. Cryo. Eng. Conf. (1976) 159.
- (28) 小林、安河内: 低温工学 15 (1980) 226.
- (29) A.R. Urbach et al.: Advanced Cryo. Eng. 27 (1982) 1039.
- (30) 山岸、原田: 学術月報 39 (1986) 177.
- (31) J.S. Foster: Appl. Phys. Lett. 42 (1983) 869.
- (32) R. Srinivasan et al.: Cryogenics 25 (1986) 641.
- (33) A. Kashani et al.: Advanced Cryo. Eng. 31 (1986) 489.
- (34) Van Sciver: "Helium Cryogenics", Plenum

## 1. まえがき

表題に関する  $k-\epsilon$  法による数値計算を、この夏モントリオールで開催された第5回熱問題数値解析国際会議で発表しました<sup>(1)</sup>。本誌にそれを紹介するようにとの編集委員長のご指示でありましたが、お許しを得てあつかましくも、この計算を始める動機になった実験<sup>(2)(3)</sup><sup>(4)</sup>についても書かせていただくことにしました。しかしここで論文を書くという主旨ではありませんので、崩れた形式で失礼します。

ヘリウム(正確にはヘリウム4)の主な定数は、分子量 4.0026 [-], 臨界圧力 0.2275 [MPa], 臨界温度 5.2014 [K], 大気圧における沸点 4.2244 [K], などであり、液体ヘリウムはその低い沸点の故に、従来および現在実用超電導体のブール沸騰冷却の冷却剤として使用されています。しかしこの方式で超電導電磁石を冷却しようとする、巻線の隙間に液体を行きわたらせ、発生した気泡を円滴に除去するためには、巻線は隙間だらけの構造になります。これにより巻線の機械的強度と電気絶縁の確保が困難になるといわれています。これに代って、中空の導体を用いて巻線を構成し、中空流路に超臨界圧ヘリウムを強制循環させる方式が提案され、現在超臨界圧ヘリウムによる強制冷却型超電導電磁石の開発は、大型電磁石の分野では一つの課題になっています。

筆者らがこの方面の研究に着手した1974年当時では、超臨界圧ヘリウムによる強制冷却型超電導電磁石の設計例はCERNのオメガ・マグネットというものがただ一つでありましたが、近年の核融合炉用大型超電導電磁石の開発において、超臨界圧ヘリウムによる強制冷却が真剣に議論されるようになり、大変喜ばしく思っておりました。ところが昨年来いわゆる高温超電導体なるものの発見が相次ぎ、大電流容量の実用導体にまで到達するにはまだまだ遠い道程があると考えても、気持ちの上では多少とも鼻白んでいます。

さて図1に超臨界圧 ( $P = 0.3$  [MPa],  $P/P_c = 1.32$  [-]) におけるヘリウムの物性値の等圧線を示します。エンタルピの線が変曲するところで、定圧比熱が極大値をとります。この点は従来その圧力(図1においては 0.3 [MPa])に対する擬臨界点、特にそこにおける温度は擬臨界温度と呼ばれてきました。最近この「擬臨界点」および「擬臨界温度」という呼び方は適当でないように思え、数ヶ所で「擬沸点」および「擬沸点の温度」あるいは「擬沸点温度」を提案して使ってみました(英語の場合は"pseudoboiling point"あるいは"temperature at the pseudoboiling point")。格別異議を唱える人もいないようでしたので、ここでもその意図をご説明してご批判をいただきたく思います。もっともこれを聴いた人のなかには、異議はあつ

でも、意味が通じて首尾一貫して使うのであれば別に拘る程のことでもない、用語のことをウダウダ言うようでは伊藤も老化を始めた、とお考えになった方も大勢おられたかと思います。

ともあれ書かせていただきます。その理由は、1) 問題のその点は物質の等圧線上の特別の点である臨界点を「擬」しているのではなく、それぞれの圧力に対応して一つ決まるような点であるから、圧力依存性を暗示すべきである。2) その点における流体が「擬」しているのは臨界点の性質ではなく、気液2相平衡状態の性質である、の二つであります。ならばなぜ「擬気液2相平衡点」と呼ばないのか、という疑問が当然ありましょう。それに対する答えは、もっぱら平衡状態を論ずる古典的熱力学においても、非平衡現象である沸騰や凝縮を暗示する「沸点」や「露点」が用いられており、用語にはこの程度の泥臭さあってもよいくらいの気持ちです。さらにまた、ではなぜ「擬露点」でなく「擬沸点」でなくてはならないのか、という疑問もありましょう。これについてはほとんど答えに窮しますが、強いて言えば、超臨界圧流体の伝熱の議論は、超臨界圧流体が冷却剤として用いられるになされることが多いので、冷却剤の体積増加を暗示する方を取ったということでしょうか。

なお超臨界圧流体の冷却剤としての伝熱特性を、それを「沸騰類似現象」とか「ボイリングもどき現象」とみて、亜臨界圧における沸騰になぞらえて解釈しようとする立場があります。しかし「擬沸点」の用語を用いようとするのは、このことを支持したり、しなかったりしようという意図ではなく、特定の状態点にたいする熱力学的な名称を提案してみたということを超えるものではありません。

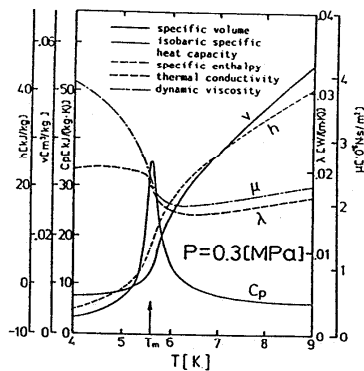


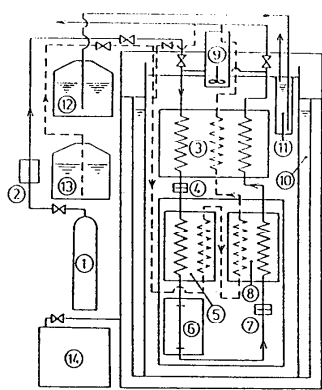
図1 0.3 [MPa]におけるヘリウムの物性値



## 2. 実験

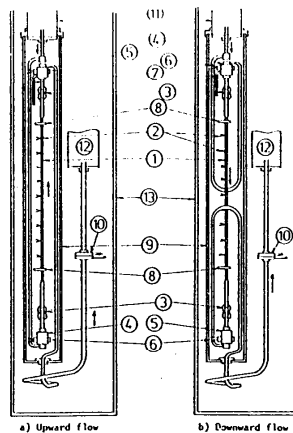
実験装置の流動系統を図2に、伝熱試験部を図3に示します。試験流体の超臨界圧ヘリウムは低温ポンプ⑨を出て、⑨→③→④→⑤→⑥→⑦→⑧の経路で循環します。この試験装置を設計した1974年当時10[K]の領域で動作するポンプは存在しておらず、科研費採択後に大いに慌てました。結局インペラにおいて圧力3[MPa]以下、温度15[K]以上において動作するというPhillips社の寒剤移送用ポンプを買い求め、熱交換器に③、⑤および⑧による試験流体の予冷と寒冷(コールド)の回収を組み合わせるのぐことになりました。このため寒冷経済は大いに悪化し、最大熱流束が低下しました。また十分に検討したわけではありませんが、そのために装置の熱流動安定性が低下していると思われ、一層寒冷経済が悪くなっているようです。

図3の伝熱試験部において、左側のa)が垂直上昇流配管、右側のb)が垂直下降流配管であり、④および⑤が混合室、⑧が加熱用直流電源を接続するためのプス・バー、③が電気絶縁用のバイレックス・シール、①が伝熱試験用のステンレス管、②がその外周に取り付けられた金-鉄合金とクロメルの9対の熱電対となっています。すべての場合について一様熱流束加熱で、流路の各断面における流体温度と質量速度は熱収支により求めました。また管内壁の温度は、外壁の温度を満足する熱伝導の方程式の解から求めます。伝熱試験用のステンレス管は、内径1.25[mm]、長さ280[mm]、加熱長さ200[mm]です。また上昇流と下降流の両方で実験を行い、試験圧力は0.3、0.5および0.8[MPa]の3種類、試験部入口における流体の温度は4.7から10.8[K]、質量速度は20、40および80[kg/m<sup>2</sup>s]の3種類、熱流束は500、1000、2000および4000[W/m<sup>2</sup>]の4種類に変化させました。



- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| 1 Helium gas storage    | 8 Third heat exchanger   |
| 2 Filter                | 9 Centrifugal pump       |
| 3 First heat exchanger  | 10 Liquid nitrogen       |
| 4 Filter                | 11 Liquid nitrogen       |
| 5 Second heat exchanger | 12 Liquid nitrogen dewar |
| 6 Test chamber          | 13 Liquid helium dewar   |
| 7 Flow meter(orifice)   | 14 Vacuum pump           |

図2 実験装置の流動系統



- |  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 1 Test section(SUS304, 10/00-1.25/1.62[mm], heated length=200[mm]) | 7 Pressure tap                  |
| 2 Gold iron - chromel thermocouple                                 | 8 Electrical terminal           |
| 3 Pyrex seal   | 9 Inner copper radiation shield |
| 4 Upstream mixing chamber  | 10 Flow meter(orifice)          |
| 5 Downstream mixing chamber  | 11 Second heat exchanger        |
| 6 Germanium resistance thermometer                                 | 12 Third heat exchanger         |

図3 伝熱試験部

図2に示してあるように伝熱試験部と3個の熱交換器などは低温の空間に置かれていて、その低温を発生し維持するために液体ヘリウムと液体窒素が使われます。大学の研究室にとっては高価な液体ヘリウムを蒸発させながらおこなうわけでありますから、迅速・慎重な実験の遂行を図るためのコンピュータによるオンライン監視、計測およびデータ解析が必須であります。試験装置が稼働を始めた1975年当時では、マイクロコンピュータも世にでる前でありましたから、今では昔懐かしいミニコン HP2100 A がつながれておりました。またたとえば流体温度を熱収支から求める際には、まず比エンタルビが出てきて、それから圧力と比エンタルビの関数として温度を求めなければなりません。この一連の計算を蒸気表でやっていたのではまったく間尺に合わず、コンピュータにヘリウム蒸気表の機能がプログラムされていなければなりません。そのソフトウェアは初め Oxford 大学低温研究室の Hands 氏から供給を受けました<sup>(5)</sup>が、この方面の活動はその後大いに進展することになりました。すなわち北部九州地域の大勢の方々のご協力により、現在では13種類の流体の、各80種類程度の関数を含むプログラム・パッケージPROP ATH<sup>(6)</sup>に発展し、国内の主要大学をはじめ、全世界の20以上の研究機関のメインフレーム・コンピュータで公開されております。

だいぶ脱線しましたが、図4から7に実験結果の一部を示します。これらの図において縦座標は流体温度や管内壁温度、横座標は流体温度であり、一様熱流束加熱でありますから流体温度は加熱開始点(上流側プス・バー)からの距離に比例しております。図中の実線は流体温度を、破線はディタス・ベルタ整理式(以下DBCと略記)から予測される管内壁の温度を、▽や○などによるプロットは管内壁温度の測定値を示します。図中の水平な一点鎖線は擬沸点の温度、垂直な一点鎖線は擬沸点における比エンタルビであります。系圧力はいずれも0.3 [MPa]、質量速度は図4および5においては40 [kg/m<sup>2</sup>s]、図6および7においては半分の20 [kg/m<sup>2</sup>s] になっています。

まず図4および5について説明します。前者は上昇流、後者は下降流の結果であります。熱流束500および1000 [W/m<sup>2</sup>] においては、測定結果はDBCとよく対応しています。また熱流束2000 [W/m<sup>2</sup>] においては、流体温度が擬沸点に近い領域で管内壁の温度はDBCの予測より大きく、したがって熱伝達係数は小さくなります。しかし管内壁温度の分布には流動方向(と浮力の方向との関係)の影響は現れておりません。

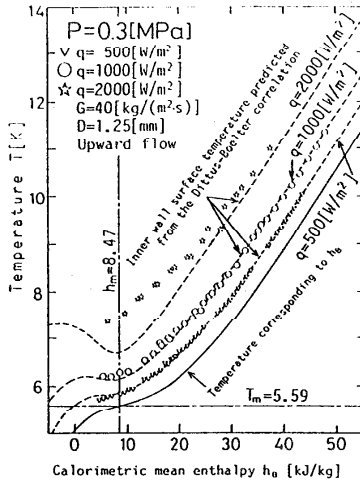


図4 管内壁温度の流動方向の分布,  
G = 40 [kg/m<sup>2</sup>s] における上昇流

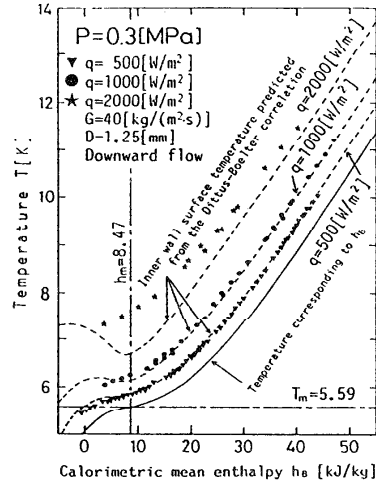


図5 管内壁温度の流動方向の分布,  
G = 40 [kg/m<sup>2</sup>s] における下降流

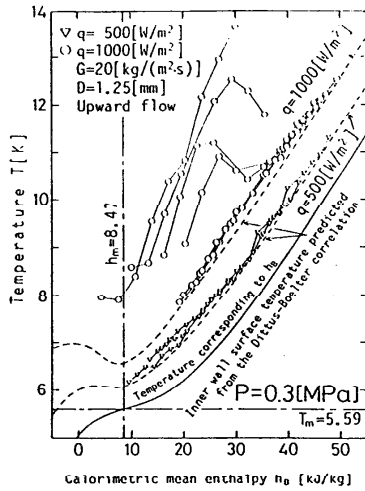


図6 管内壁温度の流動方向の分布,  
G = 20 [kg/m<sup>2</sup>s] における上昇流

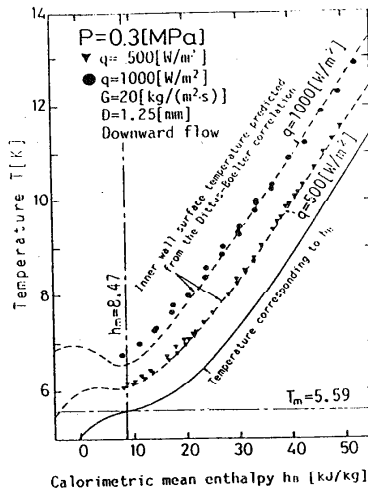


図7 管内壁温度の流動方向の分布,  
G = 20 [kg/m<sup>2</sup>s] における下降流

つぎに図6および7を見てみます。前者は上昇流、後者は下降流の結果であります。熱流束  $500 \text{ [W/m}^2\text{]}$  においては、測定結果はDBCとよく対応しています。さて問題は熱流束  $1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  の結果であります。流動方向の効果が劇的に現れます。下降流(図7)においては擬沸点のごく近傍を除いて実験結果はDBCとよく対応していますが、上昇流(図6)の結果は大変に複雑です。図6のデータは折れ線です。これは一組の設定条件において試験流路内に同時に実現された一連の状態を示すものであります。図4と5や5、図6の  $q = 500 \text{ [W/m}^2\text{]}$  および図7においては、入り口温度のみが異なるデータは互いに重なってしまいますので、図6の  $q = 500 \text{ [W/m}^2\text{]}$  以外では折れ線は付してありません。図6の  $q = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  に注目していただきます。流体の状態が擬沸点の近くにあるとき、管内壁温度が異常に上昇している部分があります。また入口条件の異なるデータは互いに重なっておらず、さらに同一流体状態に対して異なる管内壁温度、したがって異なる熱伝達係数が対応する場合があります。擬沸点近傍のデータでもDBCとよく対応することもありうるということが認められます。実は図6および7の  $q = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  に対する伝熱特性の際立った相違が、浮力の効果により理論的に予測されるものであるかどうか、これを検討することが次項の主題となるわけであり、

また、

なお図4および5の  $q = 2000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ 、図6の  $q = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$  のデータに見られるように、流体の状態が擬沸点の近くにあるとき、壁温が高くなる、したがって熱伝達係数が低下する現象は超臨界圧領域の対流熱伝達における伝熱劣化 (impairment, deterioration) と呼ばれることがあります。しかしこれが、通常対流熱伝達機構には含まれない特別の現象の故の劣化なのか、物性値の温度変化により起こるべくして起こったものであるのか、わかっているわけではありませんので、劣化という表現が適当であるかどうかは議論の分かれるところであり、Hall<sup>(7)</sup> や Jackson<sup>(8)</sup> は浮力効果による壁近傍におけるせん断応力の減少に伴い、乱流熱輸送の低下するという機構で伝熱劣化の解釈を試みています。

### 3. 数値解析

さて前項の実験結果が乱流伝熱の数値解析によってどの程度説明できるかを検討した結果を次に述べます。ここで扱いました問題の性質を一言で要約しますと、円管内の垂直上昇流あるいは下降流の乱流であり、熱物性の温度依存性の故に本質的に未発達領域を扱うことになり、その熱物性値の温度依存性は簡単な数式で表現できるようなものではなく、また実験結果によれば浮力(重力)の効果があつたりなかつたりするような問題であります。数値計算のやり方としては、使い古されている混合距離理論による渦粘性係数を使う解析(0方程式モデル)と、近ごろ流行しているk-ε法解析(2方程式モデル)の二つを試して見ることにしました。計算に取り掛かった動機をもっと正直に言いますと、k-ε法解析があまりにも流行しているように見え、一体k-ε法解析によれば、混合距離理論ではお手上げのような問題を正しく解析するこ

とができるのであろうか、と考えてみたからであります。そしてありきたりの問題では、すでにk-εモデルに含まれている定数がしかるべく調節されている(これをtuningと言うらしい)恐れがあり、なるべく珍しくて複雑な系を選ぶべきで、その目的には今の系はなかなか適していると思わしたわけです。

差分法による解析はもっぱら Patankar<sup>(9)</sup>によりました。まず定物性層流のSiegelら<sup>(10)</sup>の解および定物性乱流のSparrowら<sup>(11)</sup>(Deisslerらの混合距離モデルを使っている)の解に相当する解が、作製した差分法による計算プログラムでも十分正確に再現されることを確認し、計算コードが然るべく動作していると判断しました。

ついで代表的な混合距離モデルとk-εモデルを選定して本題の計算をすることになります。前者には Van Driest<sup>(12)</sup>モデルを、後者には河村モデル<sup>(13)</sup>を採用しました。ただし後者においては、常圧の空気に対して定物性の計算をしたところ、多少とも発達状態の熱伝達係数がDBCなどと食い違うので、ε方程式に含まれる定数  $C_1$  を次のように修正しました。

$$C_1 = 1.42[1 + 0.15\exp\{-\text{Ret}/50\}^2]$$

なお Van Driest のモデルによる常圧の空気に対する定物性の計算結果は、発達状態の熱伝達係数でDBCと2 [%]程度食い違うようです。

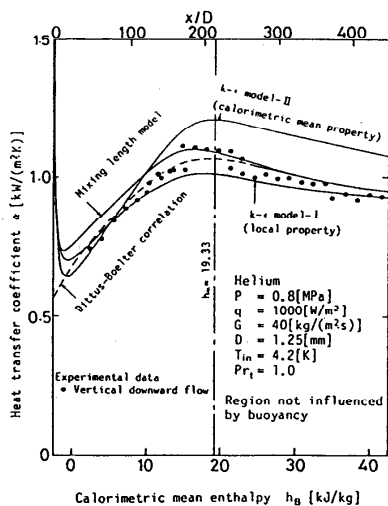


図8 0.8 [MPa] の計算結果、  
重力項を含まない

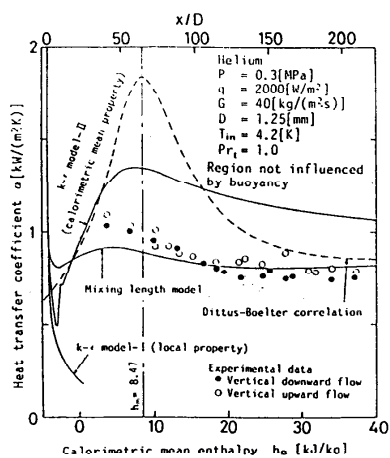


図9 0.3 [MPa] の計算結果、  
重力項を含まない

さて図8に高压で物性値変化のゆるやかな 0.8 [MPa] における熱伝達係数の計算結果を示します。図中 k-εモデルⅠはk-ε方程式で真に局所的な物性値を使った計算を、k-εモデルⅡはk-ε方程式で流体温度の物性値を使った計算を意味します。なおその他の通常の保存式や混合距離モデルによる渦粘性係数の計算では常に局所的な物性値を使用しました。またここではモーメント式に重力項は入れてありません。●は浮力の効果が認められない領域の上昇流の実験結果です。k-εモデルⅡがいくらか大きすぎる熱伝達係数を与える以外は、いずれもなかなか良い予測をしています。次いで浮力効果が認められない領域で圧力を 0.3 [MPa] に下げてみました。図9。ここでもモーメント式に重力項は入れてありません。皮肉なことに混合距離モデルの結果がもっとも正常で、k-εモデルⅡは熱伝達係数の絶対値は過大であるものの、分布形状は正常らしい結果を与えています。問題は k-εモデルⅠで、凝沸点領域で熱伝達係数が急激に減少し、回復することなく図の下方に暴走してしまいます。そういう訳で以下の計算では、k-εモデルにおいてはⅡのみ使います。

いよいよ浮力効果のある領域の計算結果を示します。図10および図11において○が上昇流、●が下降流の実験結果で、また計算においてはモーメント式に重力項が入れてあります。図10には混合距離モデルによる、図11にはk-εモデルⅡによる計算がしてあります。混合距離モデルによる計算は肝心の凝沸点領域ではまったくいけません、凝沸点領域から離れますと頗る正常になります。○の上昇流のデータは右端近くで途切れていますが、これは必ずDBCの水準に向かうべきものです。k-εモデルⅡによる計算結果はなかなか印象的ではありますが、上昇流が凝沸点領域に近づくと、そこから遠ざかるところで問題があります。前者は入口効果の領域から物性値変化の効果の領域への移行過程で何かが起こったのかもしれない。後者は重大な欠陥のように思われます。どんどん計算を進めて行けばいつかはDBC水準に近づくのかもしませんが、実験結果が示す回復よりはだいぶ遅れるようです。

図11の上昇流の計算の過程で得られた管断面内速度分布を図12に、せん断応力分布を図13に示します。前者では浮力による壁近傍の速度の盛り上がり、後者ではそれに対応する著しいせん断応力の現象が見られます。これらの図を眺めておると、Hall<sup>(7)</sup>やJacksonら<sup>(8)</sup>の浮力効果による壁近傍におけるせん断応力の減少に伴う、乱流熱輸送の低下が伝熱劣化をもたらすという推論がもっともらしく見えてきます。

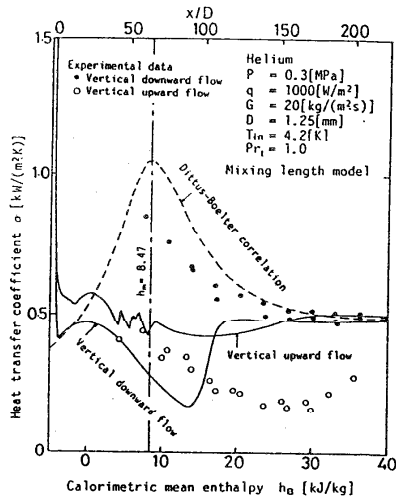


図10 0.3 [MPa] の計算結果、  
混合距離モデルで重力項を含む

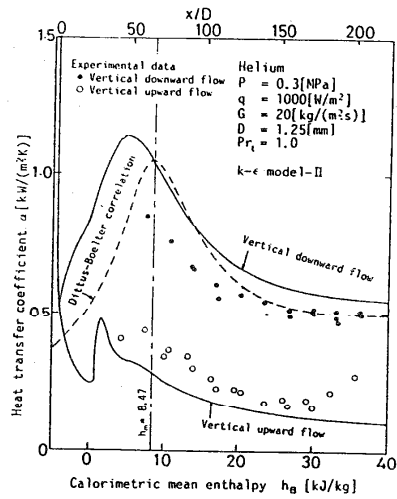


図11 0.3 [MPa] の計算結果、  
k- $\epsilon$ モデルIIで重力項を含む

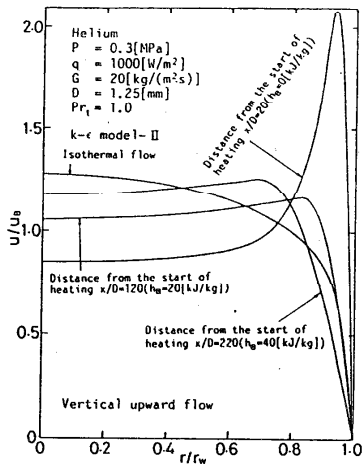


図12 図11の上昇流における  
管断面内速度分布

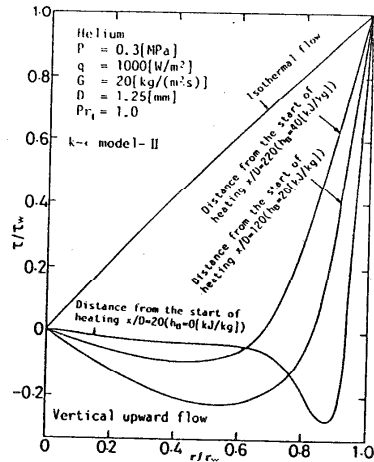


図13 図11の上昇流における  
管断面内せん断応力分布

ここで計算をやめておけばk-εモデルにいくらか好意的な感情を持つところでありましたが、さらに計算をやってみたために、いよいよわからなくなりました。図9は実験的には浮力効果のない領域であります。この場合の条件でことさら重力項を入れて計算してみましたのが図14および15です。前者は混合距離モデル、後者はk-εモデルIIによるものです。混合距離モデルによる計算の内では上昇流の結果に奇妙な陥没が出ていますが、全体的にみればk-εモデルIIによる図15よりよほど正常です。つまり図15のk-εモデルII計算においては、ないはずの浮力効果が異常に大きくできます。

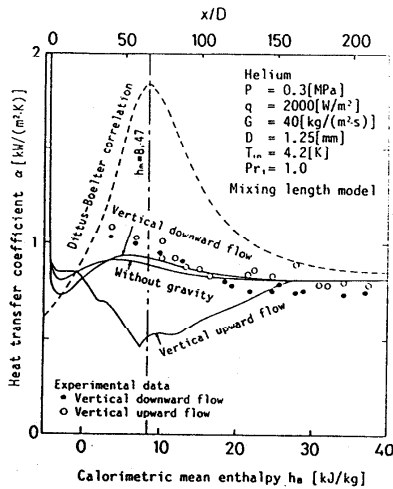


図14 図9に対応する、混合距離モデルで重力項を含む計算結果

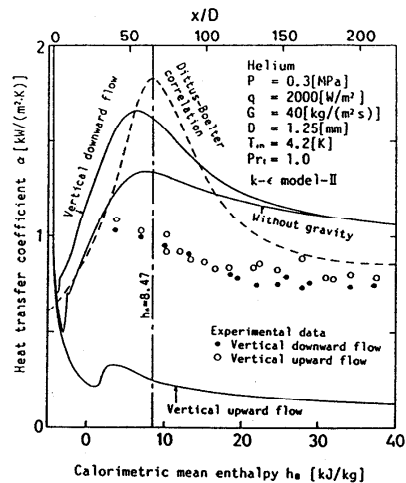


図15 図9に対応する、k-εモデルIIで重力項を含む計算結果



#### 4. あとがき

計算の方について感想を述べます。意図はk-εモデルを試してみたかったわけですが、ご紹介した計算結果からしますと、k-εモデル計算法に対して大変懐疑的になります。とてもこの計算法が実験の代替になるとは考えられません。本来チャンとした計算法は、実験によって確認しなければならないようなものであってはならないはずですが、しかしk-εモデルにはなお検討や改良を要するところがあるのかもしれないし、変物性問題への適用の仕方に問題があったのかもしれない。この道ご専門の諸賢のご批判・ご教示を乞う次第であります。

名古屋工業大学長野靖尚教授にはk-εモデル計算法に関してご教示賜った。実験の部分は研究室の笠尾大作助手をはじめ、たくさんの学生諸君の協力によるものであり、計算は山口方士君（現石川島播磨重工（株））の学位請求論文の一部であります。

#### 参考文献

- (1) T. Ito and M. Yamaguchi, Proc. 5th Int. Conf. Numerical Methods in Thermal Problems, Montreal, 5, Pt. 1(1987-6)pp.404-413.
- (2) T. Ito, et al., AIChE Symposium Series, Cryogenic Properties, Process and Applications 1986, 82, 251(1986-11)pp.86-91.
- (3) 伊藤 他, 低温工学, 21, 6(1986-12)pp.327-333.
- (4) T. Ito, et al., Memoirs Fac. Eng., Kyushu Univ., 47, 1(1987-3)pp.51-73.
- (5) B. A. Hands, HEPROP - A Computer Programme for the Thermal Properties of Helium, Dept. Rep., Dept. Eng. Sci., Univ. Oxford, (1972).
- (6) まとまった印刷物としては、伊藤 他, PROPATH 第2. 1版, 九州大学大型計算機センター広報, 18, 3(1985), 145. 現在の第4. 1版は大幅に拡張されている。
- (7) W. B. Hall, Adv. Heat Transfer, 7, (1971), 1, Academic Press.
- (8) J. D. Jackson and W. B. Hall, Turbulent Forced in Channels and Bundles, (1975), 563, McGraw-Hill.
- (9) S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, (1980), McGraw-Hill.
- (10) R. Siegel, et al., Appl. Sci. Res., A-7, (1958), 386.
- (11) Sparrow et al., ibid., A-7, (1958), 386.
- (12) E. R. Van Driest, J. Aeronaut. Sci., 23, (1956), 1007.
- (13) 河村, 第2 1回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1984), 40.

1. はじめに

キャビテイにおける対流熱伝達問題はフィンや粗面における熱伝達問題の基礎として従来から多く扱われている<sup>1,2,3)</sup>。また、近年、都会地における各種排出ガスの拡散、ビルなどの構造物周辺での伝熱や流れ<sup>4)</sup>、さらに盆地のような凹部地形内での大気内浮遊物の拡散、水面からの蒸発や局地的な気象の問題、さらにエレクトロニクス分野における集積回路の高密度配置に伴う熱拡散などの諸問題の基礎的取扱いとしても重要である。

ここでは筆者がこれまで扱ったキャビテイ・モデル<sup>5,6,7)</sup>のうち、最も基本的と考えられる矩形キャビテイについて、強制対流のもとでの底面での熱伝達挙動を実験と計算の両結果から概括的に述べる。

2. キャビテイ・モデルと流れ

図1(a)に示す2次元矩形キャビテイ・モデルにおいて、底面の幅 $W$ を一定とし、深さ $D$ を変えることにより種々の形状を扱うことができる。実験では $W=50\text{mm}$ として深さ $D$  ( $\leq 50\text{mm}$ )を変え、アスペクト比( $D/W$ )を $D/W \leq 1.0$ の範囲内で幾つかの形状を扱った。通電加熱面を底面とするキャビテイは風洞床面に設置される。なお他の面は断熱壁となっている。図2は底部の詳細を示す。

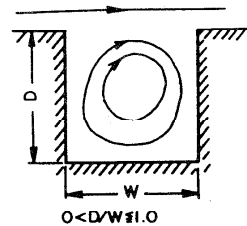


図1(a) キャビテイ・モデル

図3は、主流に沿って上流側角から流入させた煙による、キャビテイ内部の一連の流れ可視化写真である。 $D/W = 0.04$ 程度の非常に浅い場合には、上流角から剝離した流れは底面上に再付着し、底面の広い範囲にわたっていわ

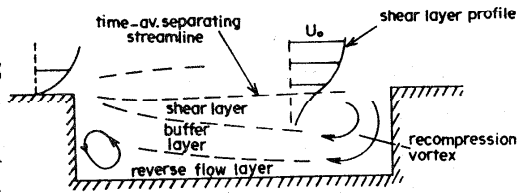


図1(b) 浅いキャビテイ流れの構造<sup>8)</sup>

ゆる後向きステップにおけると同様の流れが生ずる。 $D/W$ の増加とともに上流域に生じていた再循環流れ域が発達しながら徐々に下流域に移動し、 $D/W=0.12$ に至って扁平な循環渦流れがキャビテイ全体を占める。さらにアスペクト比の増加とともに下流域に中心をもつ渦流れが発達し、 $D/W=1.0$ においてはキャビテイ全体を占める循環渦流れ場が形成される。さきの図1(b)はCharwatら<sup>8)</sup>による比較的浅いキャビテイにおける流れの構造のモデルであるが、上述の各形状に対応してそれぞれ異なった流れの構造が考えられる。

### 3. 底面の熱伝達率分布

図4は、主流が層流および乱流境界層流れとその中間の流れに相当する三つの速度範囲

について、底面における熱流束  $q_w = \text{一定}$  のもとで得た局所熱伝達率  $h_x = q_w / (\theta_{wx} - \theta_\infty)$  の分布を示している。ただし、 $\theta_{wx}$  および  $\theta_\infty$  はそれぞれ底面および主流の温度である。部分加熱平板に相当する  $D/W = 0.0$  における  $h_x$  の分布は、上流のみに不加熱部分をもつ Eckert (層流)<sup>9)</sup> および Scesa (乱流)<sup>10)</sup> の結果と比較した場合、そ

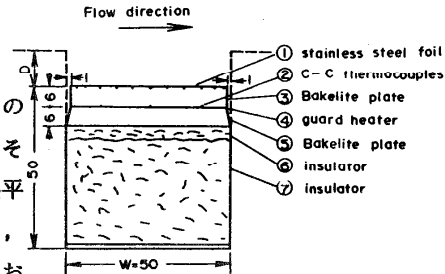


図2 加熱底部

れらと若干の条件の違いを考慮に入れば、熱伝達率の分布傾向は良く一致している。

各キャビティでは、乱流域における  $h_x$  の分布は前述の流れと良く対応している。すなわち、 $D/W = 0.04$  および  $0.08$  では、剝離流れの底面での再付着による極大熱伝達率点の発生が明確に認められ、また、 $D/W$  の増加とともに  $h_x$  の値は低下しながら下流側底面上では再循環渦流れの発達に伴う熱伝達率の増加がある。

図5は、上述の極大熱伝達率を示すキャビティ底面上の位置  $X_{max}$  とレイノルズ数  $Re_D (= U_\infty \cdot D / \nu_\infty)$  の関係を数値計算 (層流域) と実測 (乱流域) の両結果について示している。また、同図中には比較のため、後向きステップにおける再付着点の位置  $x_r$ <sup>11,12,13)</sup> を記入してある。ただし、 $x_r$  の式は層流域については、 $x_r/D = 2.13 + 0.021 Re_D$ 、 $10^2 \leq Re_D \leq 5 \times 10^2$  であり、また、乱流域では  $x_r/D = 5.0 - 8.0$  の値の範囲である。

層流域では  $X_{max}$  が  $x_r$  よりも若干上流側に位置するのに対し、乱流域では両者はほぼ一致する。また、層流域では  $X_{max}$  が  $Re_D$  とともに増大するが、 $D/W = 0.1$  では  $Re_D = 100$  程度

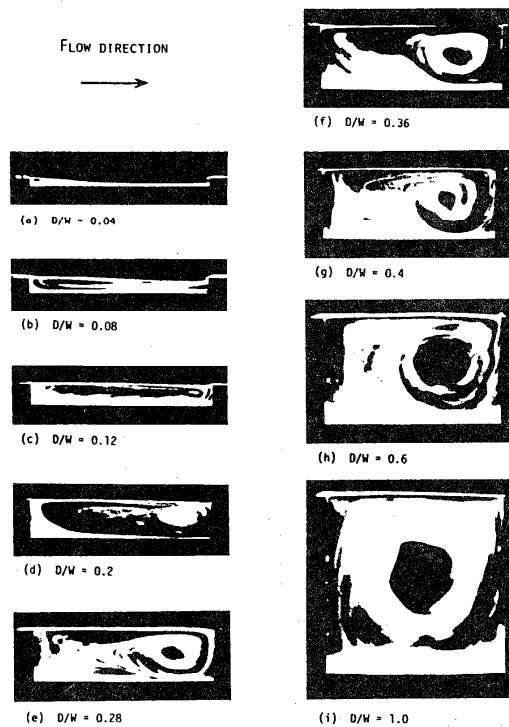


図3 キャビティ内の流れ ( $U_\infty = 1.6 \text{ m/s}$ )

において  $X_{max}=4.5$  であり,  $D/W=0.15$  では  $Re_D=45$  程度において  $X_{max}/D=2.0$  であるように, 各アスペクト比毎に  $X_{max}$  の限界点があり, その場合よりも大きな主流速度においては底面上での極大熱伝達率点は存在しないことがわかる. 他方, 乱流域では, 極大熱伝達率点の存在が実測によって明確に認められる  $D/W=0.04$  および  $0.08$  の両キャビティにおける  $X_{max}$  は  $Re_D$  の増加とともに上流側に移動するとともに, 主流速度の値に対応して一義的に決まる. また, 両キャビティにおける  $X_{max}/D$  の最小値はいずれも  $5.6$  程度であり, 後向きステップにおける乱流の場合の  $x_r/D$  の範囲内にある. さらに,  $X_{max}$  はキャビティ幅  $W$  に達せず, その最大値は  $D/W=0.04$  では  $Re_D=10^2$  において  $X_{max}/W=0.6$  であり, また  $D/W=0.08$  では  $Re_D=2.2 \times 10^3$  において  $X_{max}/W=0.64$  であるごとく, 各  $X_{max}$  の上限がある.

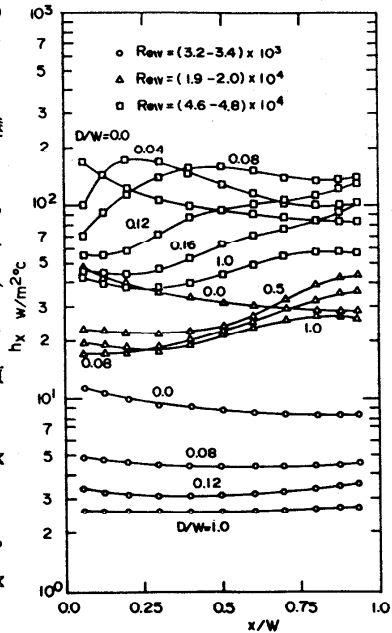


図4 局所熱伝達率分布

4. 平均熱伝達の挙動

各キャビティについて, 底面での平均ヌセルト数  $Num$  をキャビティ幅  $W$  に基づくレイノルズ数  $Re_w = U_\infty \cdot W / \nu$  に対して示したのが図6である. ただし, 平均ヌセルト数

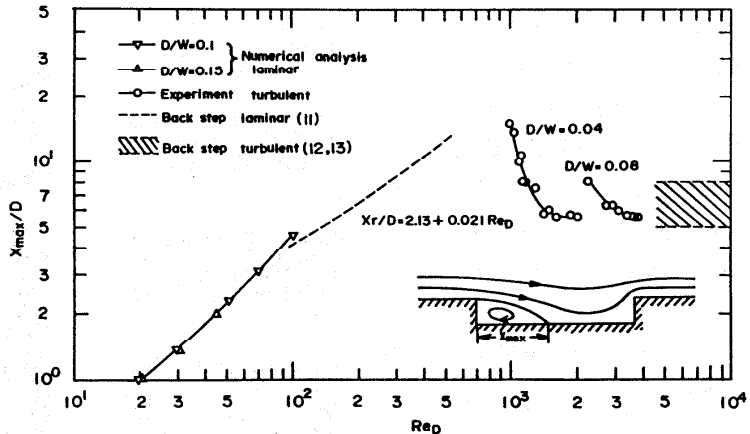


図5 極大熱伝達率点の遷移

$Num$  は次のように定義される.

$$Num = \int_0^W q_w / \{k_f \cdot (\theta_{wx} - \theta_\infty)\} \cdot dx \quad (1)$$

図中, 実測値はおおよそ  $Re_w \geq 2 \times 10^3$  の範囲であり, また  $Re_w \leq 2 \times 10^3$  の値は数値計算による. なお, 計算は2次元基礎式を風上差分法で解いたものであり, その中で浮力と慣性力の大きさの程度を表すパラメータ  $Gr_w / Re_w^2$  を実験におけるオーダに合わせて  $0.1$  としている.

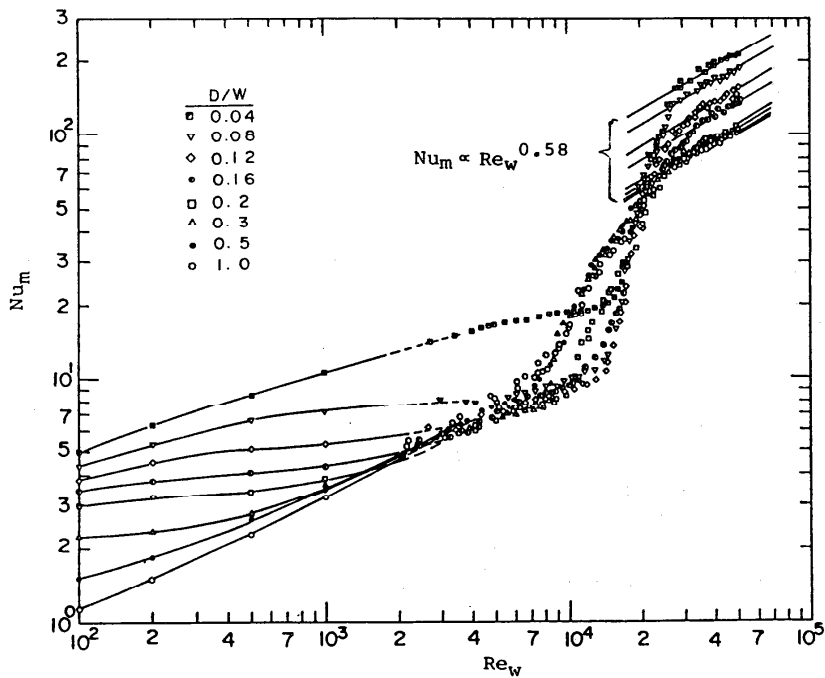


図6 底面における平均ヌセルト数Num

同図に見られるように、 $10^2 \leq Re_w \leq 5 \times 10^4$  の範囲においてNumは $Re_w$ の増加とともに全体的に増加するが、その値の大きさや $Re_w$ への依存性、さらにD/W毎の変化の傾向などから、 $Re_w \leq (0.9 \sim 1.7) \times 10^4$ 、 $Re_w \geq (2.4 \sim 3.0) \times 10^4$  およびそれらの中間の各領域は層流、乱流および遷移の各熱伝達領域に対応している。

層流熱伝達域においてはD/Wの増加とともにNumは減少するが、その程度は主流速度の増加とともに大きくなる。また、各キャビティについてみた場合、Numは $Re_w$ とともに全体的に増加する傾向にあるが、たとえばD/W=0.08の場合の $10^3 \leq Re_w \leq 7 \times 10^3$ におけるごとく、 $Re_w$ の変化にも拘らずNumは殆ど変化しない領域が存在し、そのような領域はD/Wの増加とともに $Re_w$ のより低い側へと移動する。さらに、層流熱伝達域においては、底面加熱による浮力の影響が生じ、それは一般的には主流速度の低下とD/Wの増加に伴って大きくなると考えられるが、数値解析の結果によると、 $Re_w = 10^3$ および $Gr_w = 10^5$  ( $Gr_w / Re_w^2 = 0.1$ )では、D/W=1.0において浮力の効果を無視した場合に対してNumは80%程度増加するが、D/W $\leq$ 0.3においては3%程度の増加がみられる。このようなNum分布の挙動から、各キャビティの層流域におけるNumと $Re_w$ との関係を簡単な関係式として求めようとする場合には困難の生ずることが推察されが、D/W=1.0においては $Num \propto Re_w^{0.46}$ 程度の相関を得ることができる。

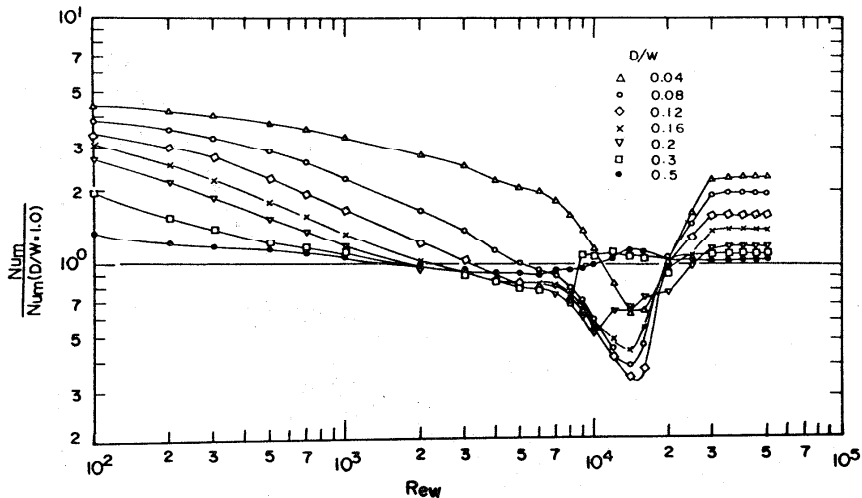


図7 D/W=1.0のNum に対する各キャビテイのNum

他方、乱流熱伝達域におけるNumの挙動はD/WやRew の変化に対して層流域におけるよりも系統的であり、D/Wの低下に伴って増大するとともにRew とともにほぼ一様に増加する。また、NumのRew への依存性については、各キャビテイとも $Num \propto Rew^{0.58}$  程度の関係を得ることができる。

図7は形状による熱伝達の相対的な大きさを示すために、各キャビテイにおける平均ヌセルト数をD/W=1.0との比 $Num / Num(D/W=1.0)$ として示したものである。実測による $Re_w \geq 2.0 \times 10^3$  および数値解析による $Re_w < 2 \times 10^3$  の殆どの範囲において、この比の値は1.0より大きく、D/W<1.0 の各キャビテイ底面からの熱伝達は正方形キャビテイにおけるよりも全般的に高い値を示しているとともに、D/Wが小さいほどその値は大きい。しかし、それぞれのキャビテイについては $Re_w = 10^4$  前後のある $Re_w$  範囲において、D/W=1.0におけるよりも低い熱伝達率を示している。そのような範囲はたとえばD/W=0.04, 0.2および0.5のそれぞれでは $Re_w = (1.1 \sim 2.0) \times 10^4$ ,  $2.0 \times 10^3 \sim 2.5 \times 10^4$ , および $1.5 \times 10^3 \sim 1.0 \times 10^4$  であるごとく、各キャビテイによって異なったものとなっている。従来、キャビテイにより熱伝達の促進を図る場合にはD/W<1.0の形状のものが有効であるとされてきたが、前述のような主流速度の範囲においては、むしろD/W=1.0の場合が効果的であると言える。

## 5. 熱伝達の整理式

これまで述べてきたような特性をもつ矩形キャビテイ底面における熱伝達挙動を熱伝達の表示式のかたちで表すことは実用上の観点からも重要である。その場合、底面における

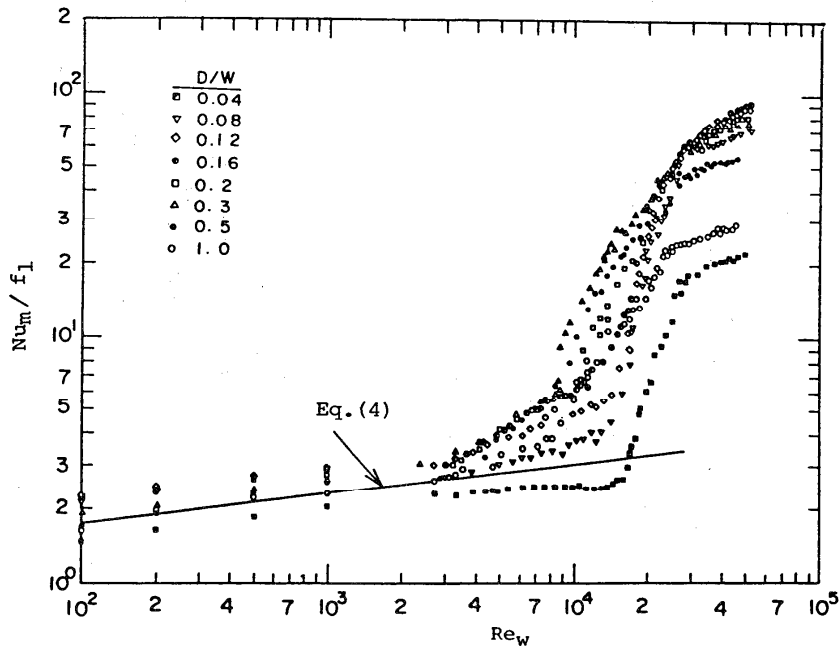


図8 層流熱伝達域の整理式表示

平均ヌセルト数 $Num$ は一般には主流速度、キャビテイ形状および浮力などを含むものとして表すことになる。しかし、前述のように層流域と乱流域とでは熱伝達におよぼす浮力の影響は異なることから、両者に対する熱伝達の表示式を次のように区別して扱うのが適切と考えられる。すなわち、層流域については、

$$Num = f_l(Re_w, D/W, Gr_w/Re_w^2) \quad (2)$$

また、乱流域については、

$$Num = f_t(Re_w, D/W) \quad (3)$$

として、 $Re_w$ 、 $D/W$ および $Gr_w/Re_w^2$ などの無次元量を用いて表すものとする。

層流熱伝達域においては、底面における $Num$ におよぼす $Re_w$ や $D/W$ のそれぞれの変化による影響、さらに底面加熱による効果などについてはすでに述べた通りであるが、これらの関係を熱伝達の整理式のかたちとして一般的に表示する際には、さきの図6の分布からも推察されるように、多くの困難を伴うものと考えられるが次のような表示を試みた。

$$Nu_m = 2.3 \exp\left(-3.6 \frac{D}{W}\right) \cdot Re_w^{0.094} \left\{ \ln \frac{D}{W} + 1.9 \right\}^{2.0} + 0.12 \quad (4)$$

$$\times \left\{ 2.4 \frac{D}{W} \cdot \left( \frac{Gr_w}{Re_w^2} \right) (1.1 - 0.65 \frac{D}{W}) + 1.0 \right\}$$

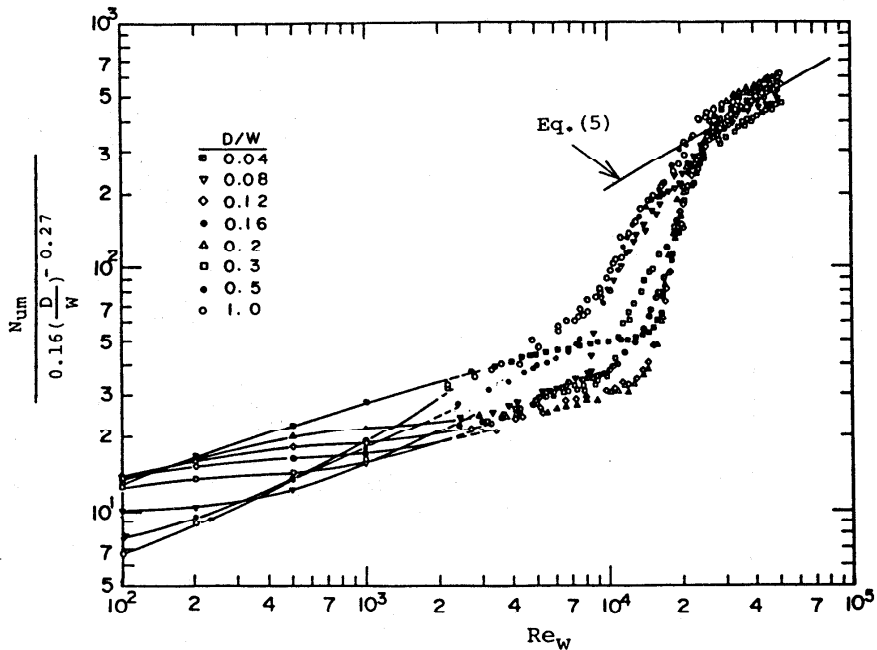


図9 乱流熱伝達域の整理式表示

前式は、 $D/W$ の増加とともに $Num$ は減少するが、とくに $D/W$ の低い値において大きな減少を表すものである。また、 $Re_w$ への依存性を $Re_w^m$ のかたちで表現し、 $D/W=0.04$ における $m=0.28$ から $D/W=1.0$ における $m=0.46$ までを表示するものとして、 $m=0.094 \times \{\ln(D/W)+1.9\}^{2.0}+0.12$ のごとくアスペクト比を含むかたちで得たものである。さらに、浮力による効果の表示として、 $D/W>0.3$ 程度のキャビティにおいては $Gr_w/Re_w^2$ の値による $Num$ への影響が大きく現われることを考慮している。図8にはここに求めた層流域での熱伝達の表示式と計算および実測とによって得た $Num$ との対応性を示してあって、この表示式によれば±25%程度の範囲内で実測および数値計算の結果を表示している。

他方、乱流熱伝達域の場合、 $Num$ の $Re_w$ への依存性については前述のように各キャビティとも $Num \propto Re_w^{0.58}$ の関係によって表示できる。一方、 $D/W$ への依存性については、 $D/W \leq 0.16$ および $D/W > 0.16$ のそれぞれのキャビティにおいて異なった傾向にある。これは、 $D/W \leq 0.16$ 程度の浅いキャビティでは底面への再付着流れがそこでの熱伝達に大きく寄与するためであるのに対し、 $D/W > 0.16$ 程度のキャビティではその内部に形成される循環渦流れが熱伝達挙動を支配することによる。これらの $D/W$ の両範囲について $Num$ と $D/W$ との関係を求めると、 $D/W \leq 0.16$ では $Num \propto 0.462(1.0-3.19 \times D/W)$ として得られ、また、 $D/W > 0.16$ では $Num \propto 0.209 \times (1.0-0.126 \times D/W)$ が得られる。他方、本報で扱った $D/W \leq 1.0$ の全キャビティを一括して表示できる熱伝達式を得ると次式になる。



$$\text{Num}=0.16 \text{Re}w^{0.58} (D/W)^{-0.27} \quad (5)$$

図9はここに提案した表示式と実測値との対応性を示したものであり、表示式は±20%程度の範囲内で実測値と対応している。

なお、アスペクト比をも考慮に入れたキャビティ底面からの熱伝達表示式については他に比較するものは見当たらないが、Aung<sup>14)</sup>はキャビティにおける熱伝達表示のいくつかの方法を紹介している。

## 6. おわりに

キャビティにおける強制対流は、流れの剝離や再付着を伴う熱伝達問題とも関連して、これまで多く扱われてきたものである。しかし、近寄り流れ特性や熱的条件、あるいはキャビティ形状などの各条件までを含めて、熱伝達の挙動を系統的に述べたものは少ない。また、キャビティ内流れの三次元性や脈動を含めた非定常の問題、さらに、低速度域あるいは深いキャビティでの浮力の影響など、各種の構造物空間での熱および物質移動問題とも関連して考えると、なお多くの明らかにすべき事柄があると思われる。

これまで筆者の得た、はなはだ瑣末な知見をご紹介させていただいた。本報告をまとめるに際し、種々有益なご助言をいただいた北海道職業訓練短期大学校長 関 信弘 先生、北海道大学工学部教授 福迫尚一郎 先生に謝意を表します。

## 文 献

- 1) Knudsen, J. G., Katz, D. L., Chem. Eng. Prog., 40, 1950, 490-500.
- 2) Townes, H. W., Sabersky, R. H., Int. J. Heat Mass Transf., 9, 1966, 729-738.
- 3) Lewis, M. J., J. Heat Transf., Trans. ASME, May 1975, 240-254.
- 4) 近藤次郎, 日本機械学会誌, 76巻653号(昭48-5), 619-627.
- 5) Yamamoto, H., Seki, N., Fukusako, S., J. Heat Transf., Trans. ASME, Aug. 1979, 475-479.
- 6) Yamamoto, H., Seki, N., Fukusako, S., Waerme-u. Stoffuebertrag., 16, 1982, 219-227.
- 7) Yamamoto, H., Seki, N., Fukusako, S., Waerme-u. Stoffuebertrag., 17, 1983, 73-83.
- 8) Charwat, A. F., Roos, J. N., Dewey, F. C., Hitz, J. A., J. Aerospace Sciences, 28, June 1961, 457-470.
- 9) Eckert, E. R. G., Drake, R. M. Jr., "Analysis of Heat and Mass Transfer," McGraw-Hill, 1972.
- 10) Scesa, S., Sauer, F. M., Trans. ASME, 1952, 1251-1255.
- 11) Goldstein, R. J., Eriksen, V. L., Olson, R. M., Eckert, E. R. G., J. Basic Engineering, Trans. ASME, Dec. 1970, 732-741.
- 12) Seki, N., Fukusako, S., Hirata, T., Bull. Faculty of Engineering, Hokkaido Univ., 79, 1976, 21-26.
- 13) Moore, T. W. F., J. Royal Aeronautical Society, 64, Nov. 1960, 668-672.
- 14) Aung, W., Proc. 1983 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., 1983, 499-515.

1. はじめに

流動層は、層内温度分布が均一で、熱伝達が良好なことから、熱交換器や燃焼装置への応用が図られ、活発に研究が進められている。特に固気流動層中の単一円管の熱伝達については、粒子物性と粒径の影響が、長橋ら[1]、福迫ら[2]、Grewalら[3] などによって報告され、分散板の影響や、希薄相内の熱伝達がGrewalら[4]、Biyikliら[5] によって、それぞれ研究されている。また固気流動層内での管群の熱伝達については、Georgeら[6]、Borodulyaら[7]、福迫ら[8]、宮本ら[9]による研究がある。最近、黒崎ら[10][11]は、円管回りの流動と伝熱のメカニズムを明らかにした。またスターリングエンジン用熱交換器[12]の開発が山田によって試みられている。

一方、空冷熱交換器として現在多用されているフィン付管には、エネルギー消費材のアルミニウムフィンが主として用いられており、製造コストが高く、伝熱面が複雑なため、汚れによる伝熱特性の劣下も招きやすい。またヒートポンプ用空気熱源式蒸発器では着霜が重要な問題となるが、フィン付管の場合は、着霜による流路閉塞が伝熱特性の劣下と圧力損失の増大を招く。このため、ごく最近、流動層による防霜効果が着目され始め[13][14]、除霜と伝熱促進を同時に行うヒートポンプ用流動層熱交換器が著者らによって開発されている[15]。

既存の流動層熱交換器の研究は、ほとんどが静止充てん高さ(すなわち静止層高)の大きい流動層について行われたものであって、伝熱特性が優れている反面、圧力損失が大きく、単相熱交換器に比較して送風動力の増大が難点となっていた。この圧力損失を低減するため、現在二つの方法が試みられている。すなわち、一つは松島ら[16]、熊田ら[17][18]、Glicksmanら[19]による発泡ポリスチレンなどの軽量粒子を用いる方法であり、他は静止層高  $l$  を極力小さくする方法である[20][21]。

著者らは、固気流動層中に裸管群を挿入し、熱伝達率を向上させてフィンの省略と汚れ問題に対処し、さらに流動層の圧力損失を低く抑えて、送風動力の増大を回避しようと試みた。すなわち、まず各伝熱管の直下にスリットを有する分散板を用いて衝突噴流群を形成し、この噴流によって粒子循環を円滑にして、静止層高が極端に低くても、良好な流動化状態が得られる極浅層流動層を考案した。この流動層を用いて一列管群の伝熱実験を行い、管ピッチ、粒径、空塔速度、分散板と円管群との距離、静止充てん高さ、などが熱伝達特性と圧力損失に及ぼす影響を明らかにした[20]。次いで、分散板形状に改良を加えて圧力損失の低減を進め、多列管群についても実験を行った[21]。更に、これら衝突噴流型極浅層流動層をヒートポンプ用蒸発

器に応用し、冷却管群の着霜制御を行い、無着霜熱交換器の開発に成功した[15]。

本稿は、上記の低圧損型流動層熱交換器の諸特性と着霜制御について、著者らが行った研究を中心に概説を行ったものである。

## 2. スリット形分散板と流動特性

一般に低層高の流動層では、チャネリングや流動不安定などが生じやすく、通常の多孔形分散板を用いた場合には、均一な流動化が得られにくい。そこで著者らは、管群の1列目の各円管直下にスリットを有する「スリット列分散板」を導入し、衝突噴流群を形成して流動化の安定を図った。図1は、供試分散板の各種断面形状を示したもので、タイプAは、スリットからの粒子漏出を防ぐため、同寸法のスリット列分散板2枚の間に325メッシュの金網を2枚はさんで接着したものである[20]。タイプAのスリットの開口比は、管ピッチにかかわらず、スリット面積の合計が、熱交換部の前面面積 $A_r$ の14%となるようにしたものである。

スリット列分散板を用いた実験に先立ち、まず標準的な多孔形分散板（穴径4.8mm、開口比8.6%）を使用し、管群のない場合について、流動化状態の観測と最小流動化速度 $u_{mf}$ の測定を行った。図2は、流動層自体の圧力損失 $\Delta p_b$ （分散板の圧損は除外）と空塔速度 $u$ との測定例を示したものである。静止層高が大きい時は、 $u_{mf}$ は明確に定められ、 $u > u_{mf}$ における圧損は粒子重量に基づく値 $m_p/A_r$ にほぼ一致するが、層高を低くするにつれて流動化開始点は不明確となり、 $l_o = 22\text{mm}$ の場合にはチャネリングや流動不安定を生じて、固定層と流動層の境

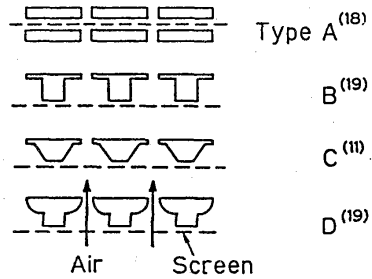


図1 各種のスリット列分散板の断面形状

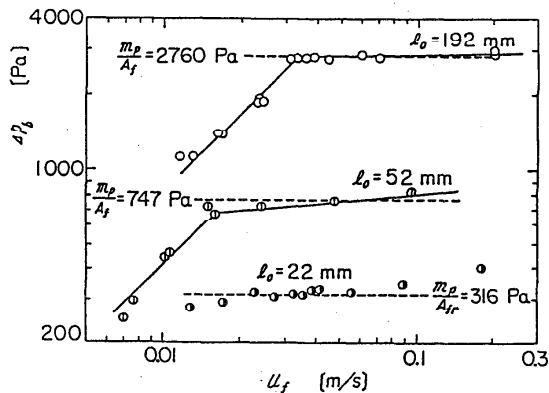


図2 流動層自体の圧力損失 $\Delta p_b$ （多孔形分散板の圧損は含まず）と空塔速度 $u$ との関係（ $\bar{d}_p = 195 \mu\text{m}$ ）

界が定かでない。なお空塔速度を減少させつつ測定した最小流動化速度  $u_{mf}$  の測定値は、Shah[22]、Leva[23]、Frantz[23]などの既存の実験式からの推算値とほぼ一致している[20]。

表1 最小流動化速度の比較[15]

平均直径 $\bar{d}_p$ (mm)	最小流動化速度 $u_{mf}$ (m/s)			沈降速度 $u_f$ (m/s)
	Leva(23)	Wen and Yu(24)	実測値	
0.92	0.63	0.71	0.32	8.94

図3は、スリット列分散板を用いた流動層自体の圧損  $\Delta P_0$  を示したものである[20]。低層高時には、やはり  $u_{mf}$  の厳密な特定はできないが、チャネリングを生じることなく、 $u_f$  の増加につれて層内の流動化領域が広がり、やがて塔断面の全域を覆うようになる。以後、 $\Delta P_0$  はほぼ一定となるが、上記のどの状態においても安定した流動化状態にあることが観察された。スリット列分散板を用いた大径粒子の流動層 ( $\bar{d}_p = 920 \mu\text{m}$ 、 $l_0 = 10\text{mm}$ ) の最小流動化速度の測定値を、Leva[23]およびWenら[24] の実験式から推算した結果と共に、表1に示す[15]。スリット列分散板を用いた、本報の極浅層流動層は、静止層高の大きい従来形に比較して、ほぼ1/2の空塔速度で流動化を開始することが知れよう。

通常の大層高流動層では、分散板の圧損  $\Delta P_0$  が全圧損  $\Delta P$  にしめる割合は小さいが、低層高の流動層では、分散板の圧損が全圧損の50%以上をしめる場合もある[20]。そこで、図1のタイプA～Dの分散板(開口比7%)について、流動化特性と圧力損失試験を行った。分散板の下面には、スリットからの粒子漏出を防ぐため、金網を接着してあるが、通風抵抗を低減するため、金網には比較的大きな100メッシュ(目開き150 $\mu\text{m}$ )を使用し、通路面積も増し、更にスリットに丸みを加えてオリフィス損失も低減した(タイプD)。これら

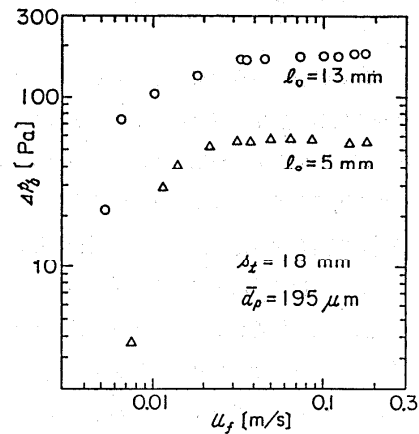


図3 スリット形分散板を用いた流動層自体の圧損特性[20]

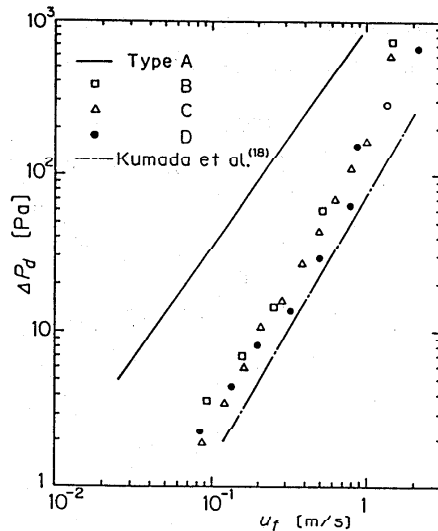


図4 スリット形分散板の圧損特性[21]

分散板の圧損 $\Delta p_0$ を図4に示す。タイプDでは、前報の分散板[20]に比べてかなり圧損が低減されており、熊田ら[18]の低密度粒子用の分散板特性に近い値になっている。

### 3. スリット列分散板を用いた極浅層流動層の熱伝達特性

#### 3.1 層内温度分布と平均熱伝達率

一般に層高の大きい通常の流動層では、層内温度はほぼ一様である。しかし、静止層高 $l_0$ が5~50mm程度の極めて浅い流動層では、鉛直方向に比較的大きな温度分布が存在する(吸引式温度計による測定[20])。このことは、分散板の極く近傍に active bed section と呼ばれる温度の急変領域が存在すること[25]や、熱抵抗が加熱円管表面と分散板直上にある[26]とする既存の結果からも首肯される。また空塔速度が極めて低い場合には、層外の冷気がサーモサイフォン効果によって、排気ダクトの上方から侵入し、上部希薄層域の粒子を冷却するようになる。したがって熱収支から推算した見かけの層内固気混合平均温度は、その真値より過人評価され、出口空気温度よりも大きく見積られがちである。

従って、極浅層流動層では、流動化状態と無関係に層内温度の代表値を規定できない。そこで本報では、衝突噴流や単相流中の一列管群と同様に、管群の平均熱伝達率 $\bar{h}_i$ は下記の定義によった。

$$\bar{h}_i = \dot{Q} / \{A_i (\bar{T}_w - T_{i1})\} \quad (1)$$

ここで $\dot{Q}$ は正味伝熱量、 $A_i$ は円管群の全表面積、 $\bar{T}_w$ は円管群の平均表面温度、 $T_{i1}$ は流動層への流入空気温度である。さらに実際の空冷熱交換器では、流入空気温度 $T_{i1}$ 、全交換熱量 $\dot{Q}$ 、前面面積 $A_i$ が与えられて設計する 경우가多く、従って次式のごとく、前面面積基準の平均熱伝達率 $\bar{h}_{ri}$ を定義する。

$$\bar{h}_{ri} = \sum_{j=1}^N \dot{Q}_j / \{A_i (\bar{T}_w - T_{i1})\} \quad (2)$$

ここで $\dot{Q}_j$ はj列目の円管群からの伝熱量である。熊田ら[17][18]の用いた出口温度基準の平均熱伝達率 $h_{sto}$ とは、次式の関係にある。

$$\frac{1}{h_{sto}} = \frac{1}{\bar{h}_{ri}} - \frac{1}{\rho c_p u_r} \quad (3)$$

流速が小さい場合には、 $\bar{h}_{ri}$ と $h_{sto}$ とは大きく異なり、空塔速度 $u_r = 0.5 \text{ m/s}$ 、 $\bar{h}_{ri} = 300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ のとき、 $h_{sto}$ は見掛け、約3倍も大きく見積られることになる。

#### 3.2 粒径および静止層高の影響

熱伝達におよぼす粒径 $\bar{d}_0$ の影響を、空塔速度 $u_r$ と管径 $d_i$ に基づくレイノルズ数 $Re$ と平均ヌセルト数 $\bar{N}u_i$ の形で図5に示す。図中には、同一管ピッチの空気単相実験の結果も示してある。 $\bar{d}_0 = 50 \sim 195 \mu\text{m}$ の比較的小粒径の場合には、粒径による差異はほとんど認められな

い。スリット列分散板による本流動層では、大半が  $l_o = 13 \sim 23 \text{ mm}$  と極めて浅く、固気衝突噴流による伝熱促進効果も取り入れてあるため、粒径が大きくなると慣性力が増大し、粘性底層のかく乱や滞留時間が増すが、層内の平均数密度や加熱円管への接触頻度は低下するため、これら両者が相殺し合って粒径の影響が顕著に現れなかったものと思われる。

そこで、平均粒径  $\bar{d}_p$  をさらに大きくした場合を図6に示す。 $\bar{d}_p > 295 \mu\text{m}$  では、粒径の増大と共に  $\bar{h}_{ri}$  は減少し、 $\bar{d}_p = 770 \mu\text{m}$  では単相衝突噴流の  $\bar{h}_{ri}$  とほぼ同じ値となる。この場合、伝熱促進はスリット列分散板が形成した衝突噴流によってのみなされていることになる。低流速で流動層の熱伝達率が単相衝突噴流の値より小さいのは、流動化が不十分な上に、粒子層の存在によって、噴流の伝熱促進効果が弱められるためと考えられる。

図7は、静止層高  $l_o$  の影響を示したものである[20]。スリット列分散板を用いた流動層では、1列管群の場合、静止層高が円管群の位置まであれば、ほぼ良好な伝熱特性が得られ、それ以上に層高を上げても圧損が増大するだけである。管列数  $N=2$  の場合、層高  $l_o \approx 10 \text{ mm}$  であれば平均熱伝達率はほぼ一定となり、 $l_o > 10 \text{ mm}$  にしても1列管群と同様、粒子による圧損のみが増大する傾向にある[21]。

### 3.3 水平方向管ピッチの影響

図8~10に、1列円管群の水平方向ピッチ  $s_i$  が熱伝達特性に及ぼす影響を示した。図8は、入口温度  $T_i$  基準の平均熱伝達率  $\bar{h}_i$  を、すまレイノルズ数  $Re$ 。に対して打点したものである。単相気流の熱伝達率  $\bar{h}_i$  は、管ピッチ  $s_i$  にかかわらず、 $Re$ 。によって統一的に整理され、一樣流中(すなわち  $Re = Re_o$ )の単一円管に対する下記の実験式[25]によく一致する。

$$(\bar{h}_i) d_i / \lambda = 0.43 + 0.48 Re^{0.5} \quad (\text{適用範囲: } Re = 1 \sim 4000) \quad (4)$$

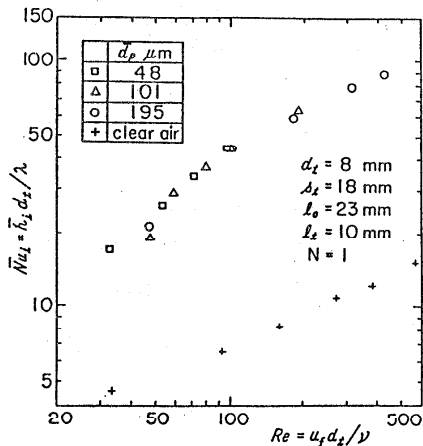


図5 平均熱伝達率  $\bar{h}_i$  に及ぼす粒径  $\bar{d}_p$  の影響

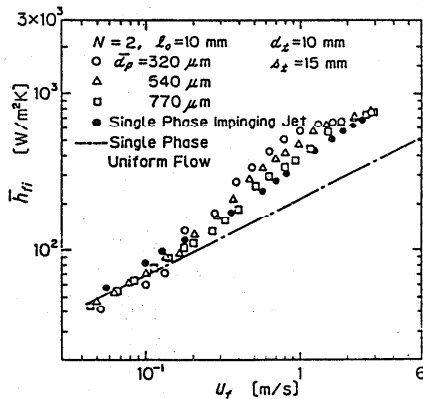


図6  $\bar{h}_{ri}$  に及ぼす粒径の影響

しかし流動層の場合には、管ピッチ  $s_i$  の減少につれて  $\overline{Nu}_i$  は大幅に低下する。これは円管どうしの接近（従って噴流どうしも接近）によって噴流が合一し、上方の高温粒子が分散板の噴口近くに循環供給されにくくなり、また前面面積当たりの管数増加によって層の固気混合平均温度が上昇し、有効温度差が減少するためと思われる。図9は、流動層熱交換器の平均熱伝達率  $\overline{h}_i$  を単相管群の熱伝達率 ( $\overline{h}_i$ ) で除した伝熱促進率を示したものである。スリット列分散板の採用によって、静止層高  $l$  が13ないし38mmと、極めて浅い流動層であるにもかかわらず、伝熱促進率は最大9.4に達している。

図10は、空塔速度  $u_r$  に基づくレイノルズ数  $Re$  と前面面積基準の平均熱伝達率  $\overline{h}_{r1}$  との関係を示したものである。この場合には管ピッチ  $s_i$  が  $\overline{h}_{r1}$  に及ぼす影響は図8と逆になり、 $s_i$  の小さいほうが  $\overline{h}_{r1}$  は大きくなる。ただし伝熱面積基準の熱伝達率  $\overline{h}_i$  は  $s_i$  の減少につれて低下するので、 $\overline{h}_i$  は管数に比例した増加はしない。

### 3.4 管列数の影響

図11は、管列数  $N$  を変えた場合の前面面積基準の平均熱伝達率  $\overline{h}_{r1}$  の変化を示したものの

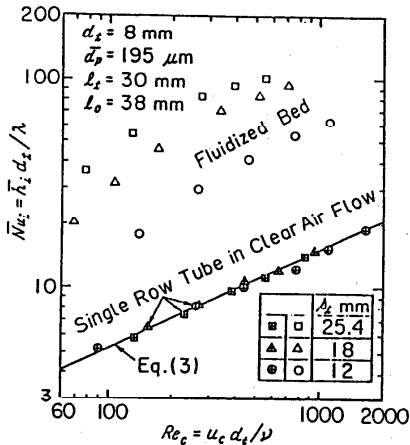


図8 平均熱伝達率  $\overline{h}_i$  に及ぼす管ピッチ  $s_i$  の影響 (1列管群)

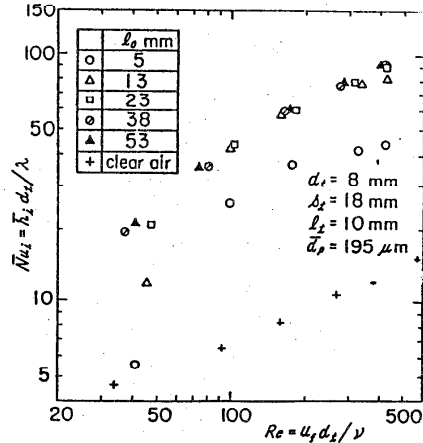


図7 静止層高  $l_0$  が平均熱伝達率  $\overline{h}_i$  に及ぼす影響 (1列管群)

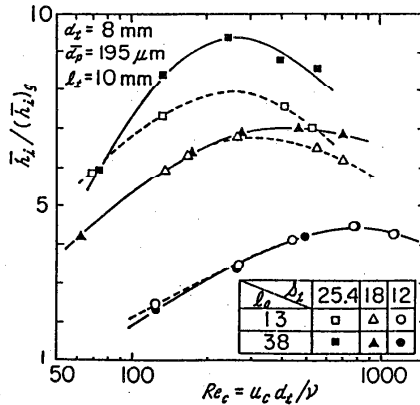


図9 流動層の熱伝達率と単相の熱伝達率との比較 (1列管群)

である[21]。管列数 $N$ を増大させると、伝熱促進効果は減少する。また、 $N=2$ と $3$ の管群では、熱伝達率 $\bar{h}_{r,i}$ にあまり変化がないことから、このタイプの流動層では、 $N \geq 3$ にしても伝熱性能上のメリットは少ないと考えられる。図12は、3列管群の熱交換器について、各列ごとの平均熱伝達率 $(\bar{h}_{s,i})_j$ の変化を示したものである[21]。図によれば、 $u_r$ が $0.6\text{m/s}$ を越えたところで $(\bar{h}_{s,i})_1$ は急速に減少し、 $(\bar{h}_{s,i})_2$ と $(\bar{h}_{s,i})_3$ は急増している。 $u_r$ が小さい間は、一列目だけが粒子層内にあり、従って一列目の熱伝達率 $(\bar{h}_{s,i})_1$ は大きいが、流速が増して粒子層が全ての列まで膨張すると、各列の $(\bar{h}_{s,i})_j$ はほぼ同じ値となる。

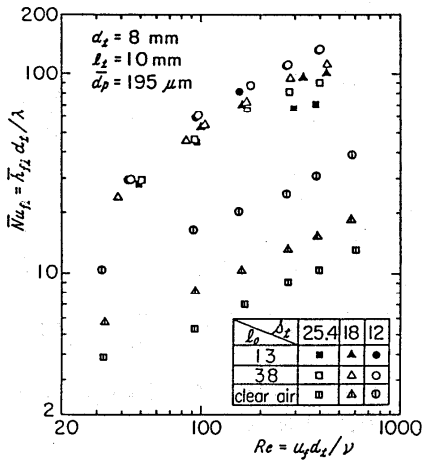


図10 前面面積基準の平均熱伝達率 $\bar{h}_{r,i}$ に及ぼす管ピッチ $s_i$ の影響(1列管群)

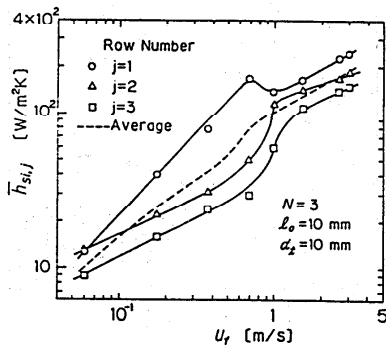


図12 各列における $(\bar{h}_{s,i})_j$ の変化

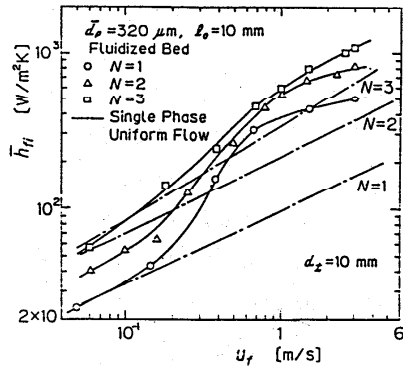


図11  $\bar{h}_{r,i}$ に及ぼす段数の影響

Present Experiment			Fukusako et al. <sup>[8]</sup>	
$L_z=10\text{ mm}, d_z=8\text{ mm}$			$L_z=80\text{ mm}, d_z=10\text{ mm}$	
$d_p=195\text{ }\mu\text{m}$			$d_p=150\text{ }\mu\text{m}$	
○	12	325 Mesh, Double	+	15
△	18		Y	20
■	25.4		x	40
▲	18	150 Mesh, Single		
▲	38			

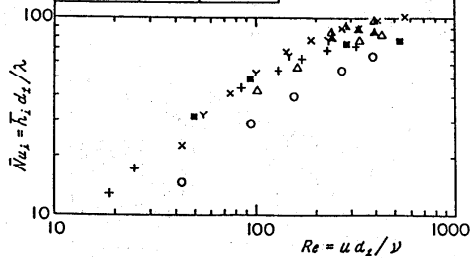


図13 本流動層と在来形流動層[8]との熱伝達特性に関する比較



#### 4. 圧力損失と熱伝達性能

図13は一列管群に関する本実験結果と、 $d_t$ 、 $s_t$ 、 $\bar{d}_p$  が類似な千鳥配列管群 ( $N=3$ ) を持つ従来形流動層 ( $l_o=150$  mm) の実験結果たとえば[8] とを対比したものである[20]。本報の流動層は、層高が格段に小さいにもかかわらず、 $s_t=12$  mmの場合を除けば、従来形の大層高流動層とほぼ同程度のすぐれた伝熱特性を示している。

図14は、 $s_t=18$  mm、 $l_o=10$  mmの流動層について、分散板の圧損(図1参照)も含む全圧力損失 $\Delta p$ に及ぼす層高 $l_o$ の影響を、白抜きの記号で示したものである。同図には分散板の圧損に相当する

$\Delta p - (m_p/A_f)$  の値も打点してあるが、これらは層高によらず、ほぼ1本の曲線にまとまっている。両者の比較から、空塔速度 $u_t$ の増加と共に、 $\Delta p$  に占める分散板の圧損の割合が増大することが知れる。

この点を改善するため、スリット板の間に150メッシュの金網1枚だけをはさんだ分散板を試作したのであるが、これを用いた場合には、図中に□と○で示すごとく、圧損 $\Delta p$ は格段に軽減されている。また図中の破線は、標準形流動層( $l_o=150$  mm)の全圧損 $\Delta p$ を描いたものである。これと比べると、伝熱促進が良好な  $Re=150\sim 300$  付近では、 $l_o=13$  mmの本流動層の圧損は、標準形の1/6~1/8程度であり、1枚金網の分散板では、実に1/14の圧損しかない。

以上の考察から、本報の極浅層流動層熱交換器は、在来形の大層高流動層に比べ、

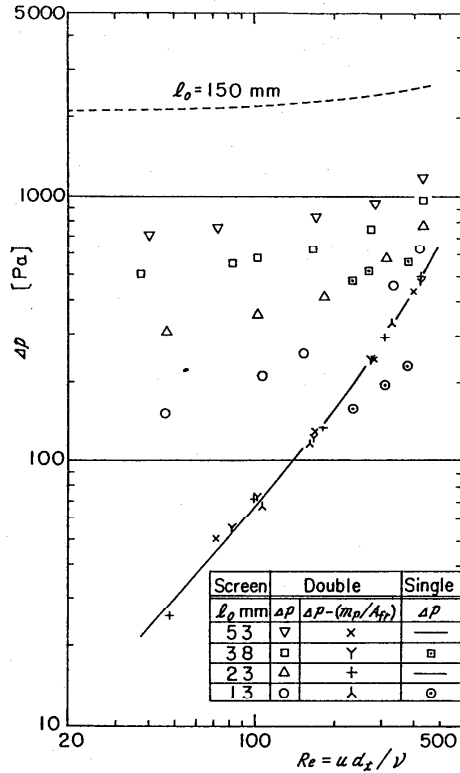


図14 流動層の圧力損失に及ぼす静止層高 $l_o$ の影響 ( $l_t=10$  mm,  $s_t=18$  mmの場合)

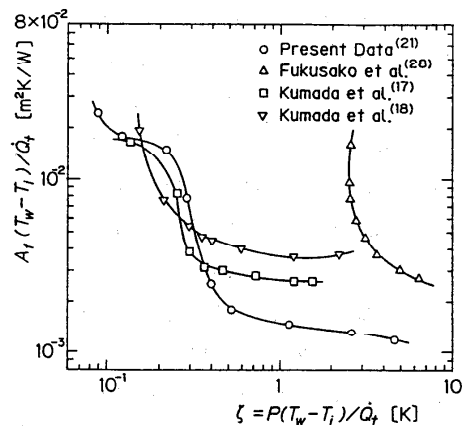


図15 各種の流動層熱交換器特性

伝熱特性はほぼ同等で、圧力損失は格段に少ないことが明らかとなった。

図15は、熱交換器のコンパクト性を表す $(\bar{T}_w - T_i) A_f / \dot{Q}_t$ と、次式で定義の送風動力パラメータ $\xi$ によって、各種流動層熱交換器の特性を整理・対比したものである。

$$\xi = P(\bar{T}_w - T_i) / \dot{Q}_t = \Delta p u_f / \bar{h}_f \quad (5)$$

ここで $P$ は必要な送風動力 $u_f \Delta p A_f$ である。図から明らかな様に、流速が低く、 $\xi$ が小さい場合には、熊田らの発泡ポリスチレン粒子による流動層[17][18]の方が前面面積 $A_f$ を小さくできる。しかし $\xi$ を大きくとれる場合には、本報の流動層は前者の約半分の前面面積で設計条件を満足することができる。

### 5. 流動層による管群蒸発器の着霜制御

近年、寒冷地における空気熱源式ヒートポンプの需要が急速に高まっている。しかし蒸発器としてフィン付管型熱交換器を使用した場合、空気中の水蒸気が伝熱面に着霜し、伝熱性能の劣化と圧力損失の増大を招き、ついには熱交換器の閉塞に至る。著者ら[15]は、以上に述べた衝突噴流式極浅層流動層内の粒子運動を利用して、一列冷却管群の着霜防止とその制御を試みた。

実験には、流動層入口の空気の温度と湿度を独立に制御できる回流型風洞を使用し、円管の冷却には低温のメタノールを用いた。供試円管には、外径 $d_t = 9.5 \text{ mm}$ の銅管にテフロン被覆を施したもの（仕上がり外径 $d_t = 10.0 \text{ mm}$ ）を使用し、粒子には平均粒径 $\bar{d}_p = 0.92 \text{ mm}$ のガラス粒子を用いた。

図16は、着霜面積率 $\xi$ （＝着霜面積／全伝熱面積）におよぼす被覆層外表面での熱流束 $q$ と空塔速度 $u_{fr}$ の影響を示したものである。図の実験は、入口の空気温度 $T_i = 5^\circ \text{C}$ 、相対湿度 $\phi = 80\%$ の条件で、実験開始から2時間後に、流動層内の粒子を吸引除去して $\xi$ の観察を行った結果である。空塔速度 $u_{fr}$ が大きくなるにつれて、無着霜領域（ $\xi = 0$ ）が増大している。これは、空塔速度の増大と共に流動化が良好となり、粒子の保有する運動エネルギーが増し、その結果、除霜効果が向上したためと考えられる。

流動層による除霜効果を確認するため、

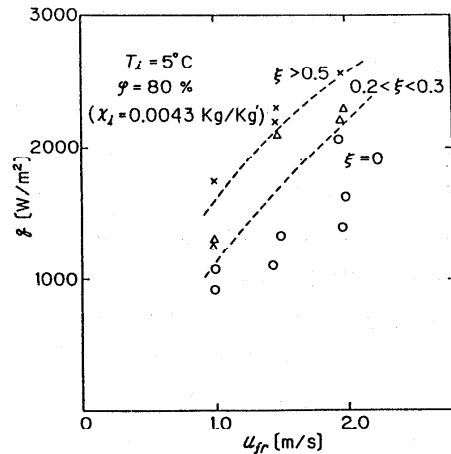


図16 除霜限界に及ぼす空塔速度 $u_{fr}$ と熱流束 $q$ の影響

測定部ダクトの中央に鉛直の仕切り板を入れ、一方を流動層、他方を一様单相気流として、比較実験を行った。図17は、管ピッチ15mmで円管を各5本ずつ設置した場合について、 $T_i = 0^\circ\text{C}$ 、 $\phi = 80\%$ 、メタノール温度 $T_m = -10^\circ\text{C}$ の条件で、実験開始から20時間経過後に、流動層の粒子を吸引除去した直後に撮った写真である。一様気流中におかれた裸銅管群は全面にわたって着霜し、ほとんど閉塞状態に至っているが、流動層中に置かれたテフロン被覆管群では、全く着霜していないことが知れよう。

図18は、テフロン被覆円管を使用して、衝突噴流および流動層での伝熱実験を行った結果を示したものである。单相の衝突噴流では、メタノール温度 $T_m$ の低下と共に着霜量が増し、霜層の熱抵抗が大きくなるため、その平均熱伝達率は図のように低下する傾向を示す。しかし、著者らの流動層では着霜がほとんどないため、熱伝達率はメタノール温度によって変化せず、その値は一様单相気流中における加熱実験の約5倍に達している。

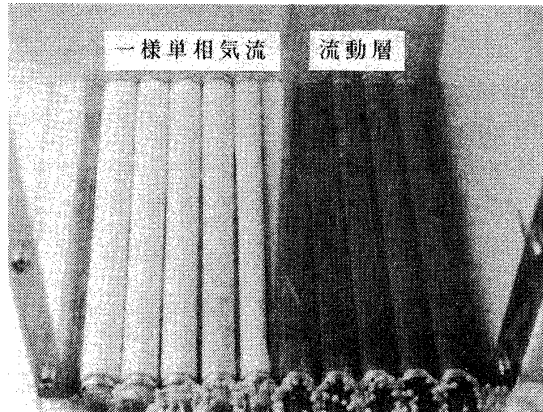


図17 流動層と一様单相気流中での着霜状態の比較

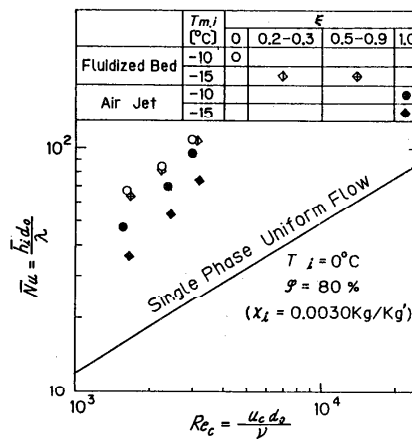


図18 衝突気流と流動層における熱伝達率 $\bar{h}_i$ の比較

## 6. おわりに

流動層熱交換器の圧力損失低減を目的として、スリット列分散板による極浅層噴流式流動層を考案し、これに裸管群を挿入して伝熱実験を行った。更に本流動層の特徴を生かして、冷却管群の着霜制御についても実験的研究を行った。それらの結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 静止層高が低い場合には、従来多孔板形分散板を用いた大層高流動層は、流動化が不安定となるが、スリット列分散板を用いた本報の流動層では、極端に層高が低くなっても、かなり安定した流動化状態が得られ、かつ最小流動化速度も大層高流動層に比べて小さい。

(2) 平均粒径 $48\sim 195\mu\text{m}$ の範囲では、管群の熱伝達特性に及ぼす粒径の影響はほとんどないが、これ以上の粒径では平均熱伝達率は次第に低下し、ついにはスリット列分散板によって生成される単相衝突噴流の熱伝達率と同じになる。

(3) 本流動層では、粒子の静止層高が1列目の伝熱管の高さ以上にあれば、分散板と加熱円管との距離や静止層高が熱伝達特性に及ぼす影響は、ほとんど認められない。

(4) 管ピッチが小さくなると、前面面積基準の平均熱伝達率は増大するが、円管表面積基準の平均熱伝達率は低下する傾向にある。ただし、管列数を3列以上にしても、前面面積基準の熱伝達率は、あまり向上しない。

(5) 本報の流動層は、静止層高が $13\text{mm}$ と極端に低い場合でも、既存の大層高流動層とは同程度の熱伝達特性を示し、かつその圧力損失は既存の流動層の $1/14$ 程度にまで低減することができた。

(6) 冷却管群を本報の流動層中に設置することによって、除霜と伝熱促進とを同時に行うことが可能であり、伝熱面に全く霜の付着しない無着霜領域が存在することを明らかにした。この無着霜限界の熱流束は、空塔速度の増大とともに増加する。

(7) 本報の流動層による除霜伝熱実験によれば、その熱伝達率は一様単相気流中での加熱実験の約5倍に達することが明らかとなった。

## 5. 参考文献

- [1] 長橋・平山, 機論, 49-446, B (昭58-10), 2163.
- [2] 福迫・ほか3名, 機論, 51-463, B (昭60-3), 989.
- [3] Grewal, N. S. and Saxena, S. C., Int. J. Heat Mass Transfer, 23 (1980), 1505.
- [4] Grewal, N. S. and Saxena, S. C., Chem. Eng. J., 18(1987), 197.
- [5] Biyikli, S., ほか2名, AIChE J., 28-5(1983), 712.

- [6] George, S. E. and Grace, J. R., *AIChE J.*, 28-5(1982), 759.
- [7] Borodulya, V. A., ほか4名, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27(1984), 1219.
- [8] 福迫・ほか3名, 第20回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭58-6), 301.
- [9] 宮本・ほか3名, 第24回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭62-5), 151.
- [10] 黒崎・ほか2名, 機論, 53-488, (昭62-4), 1284.
- [11] 石黒・ほか2名, 第24回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭62-5), 146.
- [12] 山田, 第23回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭61-5), 707.
- [13] 福迫・ほか3名, 第65期全国大会講論集, (昭62-8), 292.
- [14] 鳥越・ほか2名, 第65期全国大会講論集, (昭62-8), 294.
- [15] 相原・ほか3名, 第24回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭62-5), 157.
- [16] 松島・岩田, 第61期通常総会講論集, (昭62-3), 90.
- [17] 熊田・ほか3名, 機論, 53-487(昭62-3), 1032.
- [18] 熊田・ほか3名, 第23回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭61-5), 719.
- [19] Glicksman, L. R. and Modlin, J., 8th, *Int. Heat Trans. Conf.*, 5, (1986), 2605.
- [20] 相原・ほか3名, 機論, 52-476, (昭61-4), 1718.
- [21] 円山・ほか3名, 第24回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭62-5), 516.
- [22] Babu, S. P. and Shah, B., *AIChE Symp. Ser.*, 74-176(1978), 176.
- [23] Botterill, J. S. M., *Fluid-Bad Heat Transfer*, (1975), 68, Academic Press.
- [24] Wen, C. Y. and Yu, Y. H. *AIChE J.*, 12-3(1966), 610.
- [25] Gutfinger, C. and Abuaf, N., *Advances in Heat Transfer*, 10(1974), 167, Academic Press.
- [26] 関・ほか3名, 第16回日本伝熱シンポジウム講論集, (昭54-5), 271.
- [27] 機械学会編, 機械工学便覧, 第6版(昭52), 11-27.
- [28] 福迫・ほか3名, 機論, 51-470, (昭60-10), 3174.

## 1. はじめに

気泡流動層のガス空塔速度を使用している流動化粒子の終末速度以上にすると流動層からの粒子の飛び出しが盛んになる。この飛び出した粒子をサイクロン等を用いて補集し、再び流動層内に戻すことにより循環流動層が形成される。循環流動層を用いると、固気接触が非常に良好になる、粒子の処理量が多くしかも粒子の滞留時間が自由に調節できる等の気泡流動層のすぐ長所がある。ところが、どのようなメカニズムで固気接触が行われるかについての知見が不十分で、現在のところ実用装置としては石炭燃焼ボイラーあるいはアルミナの焼成炉等に用途が限られている。そこで、この不明な点を明らかにし、循環流動層をより幅広く固気接触装置として利用するために基礎研究が盛んに行われている。

循環流動層には、乱流流動層、高速流動層および希薄輸送層の3つの流動状態があるが、本稿では循環流動層を論ずるに当たっては避けられない“高速流動化状態とは？”という問題に対し、その流動特性について筆者らが行った基礎実験からの考察<sup>(1)(2)</sup>を紹介する。そして、循環型流動層を、蒸発器の表面に着霜させることなく寒冷地の大気から熱を採る熱交換器に適用することを前提に、その除霜特性と伝熱・流動特性について検討した結果を述べる。2では高速流動化状態について、3では気泡流動層を用いた除霜について、4では粒子循環型熱交換器について述べる。

## 2. 循環流動層の流動化状態

### 2-1. 循環流動層の分類と高速流動化状態

ガス空塔速度の増加にともなう粒子層と気体の接触様式の変化を模式的に図1に示す。気体の流れは鉛直上向きである。この図は Grace<sup>(3)</sup>が描いた図に筆者が Dilute（希薄輸送状態）を付け加えたものである。塔内の流動状態は粒子の径、密度およびガス空塔速度によって変化する<sup>(4)</sup>ので、これらの組合せ方によっては必ずしも観察されない状態もある。Fixedはガス速度がほとんど零の場合である。Bubbleless は非常に細かい粒子を流動化する場合、層内に気泡が生成することなく膨張する状態である。一般に常圧下では粒径が 20~100ミクロンの粒子でこの現象が起こる。Bubbling は気泡流動状態でガス空塔速度が最小流動化速度 $U_{mf}$ 以上で得られる状態である。この流動化状態は細かく分けると分散器近傍の領域（grid region）、流動層領域（bubbling region）およびフリーボード領域（freeboard region）の3つに分類される。

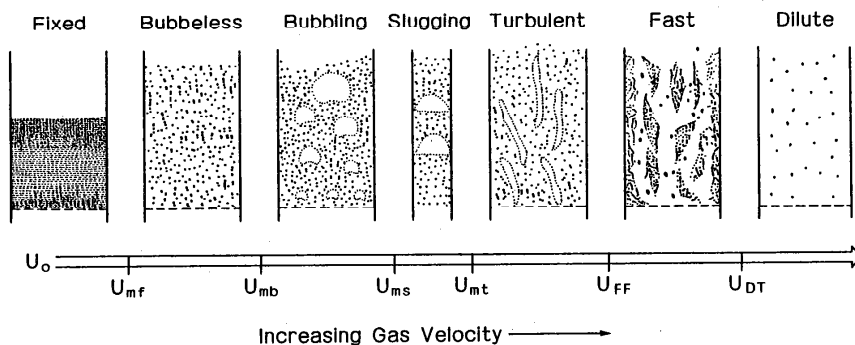


図1. 粒子層と気体の接触様式

Sluggingは、ガス空塔速度をさらに増加させると気泡径が塔径とほぼ等しい大きくなる時の状態である。Turbulentは、層内の気泡の動きが気泡流動化状態に比べより激しくなり、合体分裂を繰り返す状態である。その結果、気泡流動層で見られるような球型に近い気泡はもはや存在し得ない。Fastは、粒子の終末速度を越えるガス空塔速度の場合に粒子が上方へ輸送され、下部にはそれに見合うだけの量の粒子が供給される場合に起こりうる状態である。流動状態は粒子循環量およびガス空塔速度に大きく依存する。層内には粒子濃度の高い、クラスターあるいはストランズと呼ばれる粒子塊が形成され、この粒子塊が生成したり、崩壊したりする過程で粒子とガスの混合が良好に行われるといわれている。Diluteは、空気輸送の場合に多く用いられる流動状態で、粒子がガスに搬送され、ガスと粒子とのスリップ速度が非常に小さい状態である。

このように高速流動化状態は、乱流流動化状態と希薄輸送状態の間に存在する。しかし、これらの分類はあくまで定性的なものであり、どんな粒子を用いて、どのような装置で、どういった操作条件で流動化すれば高速流動化状態が得られるかについては定説がない。高速流動化状態について代表的な研究者による定義とクラスターについての考え方を紹介する。

Yerushalmi と Cankuit<sup>(6)</sup>は、空隙率が0.95以下で、粒子循環量が大きい場合を高速流動層と定義している。あわせて、ガス空塔速度がチョーキングとはもはや無関係になる速度  $U_{TR}$  (輸送速度) 以上の領域で高速流動化状態になるとしている。そして、高速流動化状態では粒子のスリップ速度は個々の粒子の終末速度の1オーダー高い値をとるとしており、その説明にクラスターあるいはストランズの存在を仮定している。また、高速流動化状態で固気の接触が良好な理由に、クラスターあるいはストランズの激しい生成消滅過程をあげている。

Li と Kwank<sup>(6)</sup>は、ガス流速が比較的大きく、粒子循環量が大きいときに層下部に濃厚な相があり上部に希薄な相を有する流動状態を高速流動化状態と定義し、ガス流速と空隙率を両軸にして、乱流流動化状態あるいは希薄輸送状態を併記する流動状態図を示している。

Rhodes と Geldart<sup>(7)</sup>は高速流動化状態はガス空塔速度がある程度大きい場合におこり、ガス空塔速度あるいは粒子循環量の変化に層の圧力損失があまり敏感でないような状態であると

定義している。高ガス流速の固気流中のクラスターの存在は認めているものの、スリップ速度が大きいくことに関しては、Verushalmiらのようにクラスターの存在を仮定しなくても、単に半径方向の粒子濃度の不均一性から解釈でき、中心部が希薄で壁近傍が濃厚な粒子濃度分布の場合においては、断面平均のスリップ速度を考えるのは無意味であると指摘している。

この半径方向の粒子濃度分布に関しては、Gajdos と Bierl<sup>(8)</sup> が X線写真の結果から、層内は中心が速度の速い希薄な相であり、それを高濃度で粒子が下降する相がとりまく構造になっていることを示し、Verushalmiらの主張するようなクラスターの激しい生成消滅の仮定を否定している。また、Weinsteinら<sup>(9)</sup> も同様に X線写真から半径方向の粒子濃度分布を示している。これによると、粒子循環量が大きくなるほど半径方向の濃度勾配は大きくなる。

Verushalmiらおよび Rhodesらはガス空塔速度の下限を示して高速流動化状態を規定しようとしているが、上限の値については触れていない。また、いらにしても状態図を示しているが、その境界についてなんらの言及もない。どのような流れ場の条件にすれば、問題になっている“高速流動化状態”になるのか、あるいは固気接触がどのように行われているのかについては不明の点が多い。

## 2-2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を図2に示す。テストセクション（ライザー一部）は内径が 0.10m、高さが 5.5mの透明の亚克力パイプである。ガス分散板は開口比 13%である。ダウンカマーは内径が 0.20m、高さが 3.0mの気泡流動層である。ダウンカマー内は最小流動化速度のガス流速で常に流動化し、循環粒子をダウンカマーの下部からライザー下部に供給する。粒子は流動化ガスである空気に同伴されてライザー内を上昇し、サイクロンで捕集され再びダウンカマーへ戻る。粒子循環量はダウンカマー下部とライザー下部の間に設置したボールバルブでライザー内を流

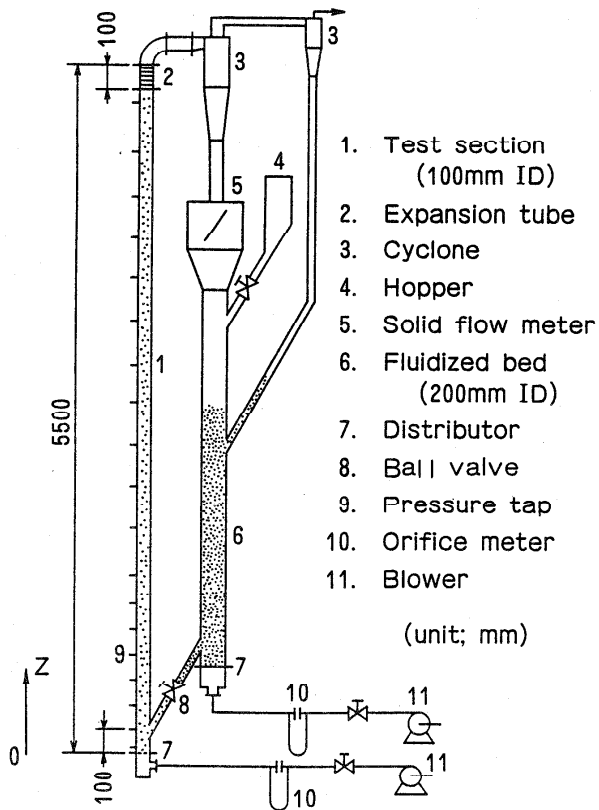


図2. 循環流動層基礎実験装置概略図



表1. 粒子諸物性値

Powder	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$u_{mf}$ (m/s)	$u_t$ (m/s)	$\epsilon_{mf}$ (-)
FCC	1080	69	0.002	0.16	
Zircon sand	4700	130	0.032	1.2	0.41
Aluminum	2700	422	0.20	1.1	0.56

れる空気流速とは独立に設定した。粒子循環量はサイクロンとダウンカマの間に取り付けられた粒子流量計で電気信号として連続的に測定した。この粒子流量計の原理については井伊谷らの論文<sup>(10)</sup>を参照されたい。ライザーの静圧分布は17個の圧力タップを用いて測定した。

表1に実験に使用した FCC粒子 (シリカアルミナ触媒) の諸物性値を示し、図3にその粒径分布を示す。

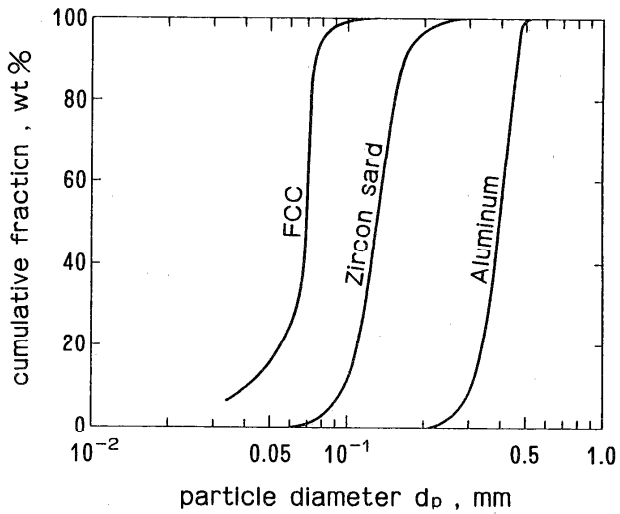


図3. 粒径分布

図4にはライザー内の流動状態を可視化して写真撮影するために用いた装置の概略図を示す。この装置をライザーの高さ 2.3 m の位置に挿入した。光源は閃光時間が 1/22000秒のストロボで、その光を26本の光ファイバーを用いて格子板側面から格子板内に導入した。格子板は厚さ 3.5mm、一辺の長さ 70mmの正方形のガラス板である。その裏面はつやけしにし、その上にアルミニウムの微粉を蒸着し、側面から格子板内に入った光を乱反射させ格子板を発光させた。格

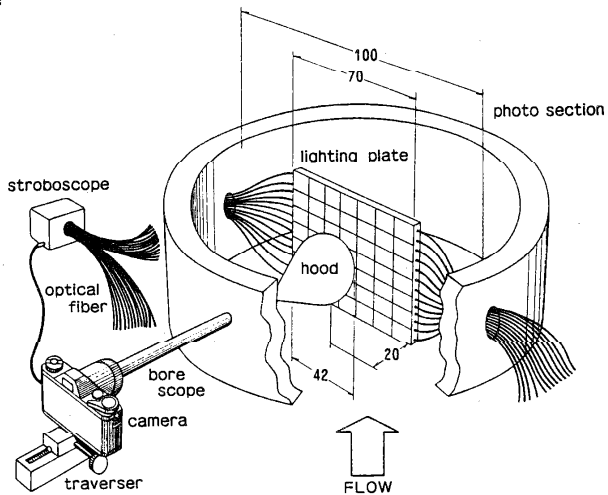


図4. 可視化装置概略図

了板の前面から 0.02m の位置にフードを取り付けたボアースコープを設置し、これを介して写真撮影を行った。なお、格子 1 ますは 0.01m 角である。

### 2-3. 高速流動化領域

図5にライザーの静圧勾配分布を示す。実験は粒子循環量  $G_s$  を一定に保ちガス空塔速度  $U_g$  をパラメーターにして行った。ガス空塔速度が比較的大きい場合は、圧力勾配はライザー内で一定であり、ライザー内での流動状態が気薄輸送状態であることを示している。粒子循環量を一定に保ちながら空塔速度を下げると、ライザー内の粒子ホールディングは増加し、ある空塔速度  $U_{DT}$  を境にして静圧勾配がライザー下部では高い一定値を、上部ではそれより低い一定値を示すようになる。すなわち、ライザーの下部に粒子の濃度が均一で濃厚な層が形成されたことを表している。さらに空塔速度を減じると、ライザー内の粒子濃度はさらに増加し、粒子濃度が濃厚な層の高さは増加する。しかし、図6に示すようにある空塔速度  $U_{FF}$  を境にし、もはやそのガス流速では一定値に保持してきた粒子循環量を維持できなくなり、粒子循環量は大幅に減少してしまう。粒子循環量を任意に選んだ場合、空塔速度が  $U_{FF}$  と  $U_{DT}$  の間の流動状態は非常に安定してはいるが、気泡流動化状態よりもダイナミックであり、この流動状態を高速流動化状態と定義する。

$U_{FF}$  は図6に示した方法で求めたが、 $U_{DT}$  は図7のプロット

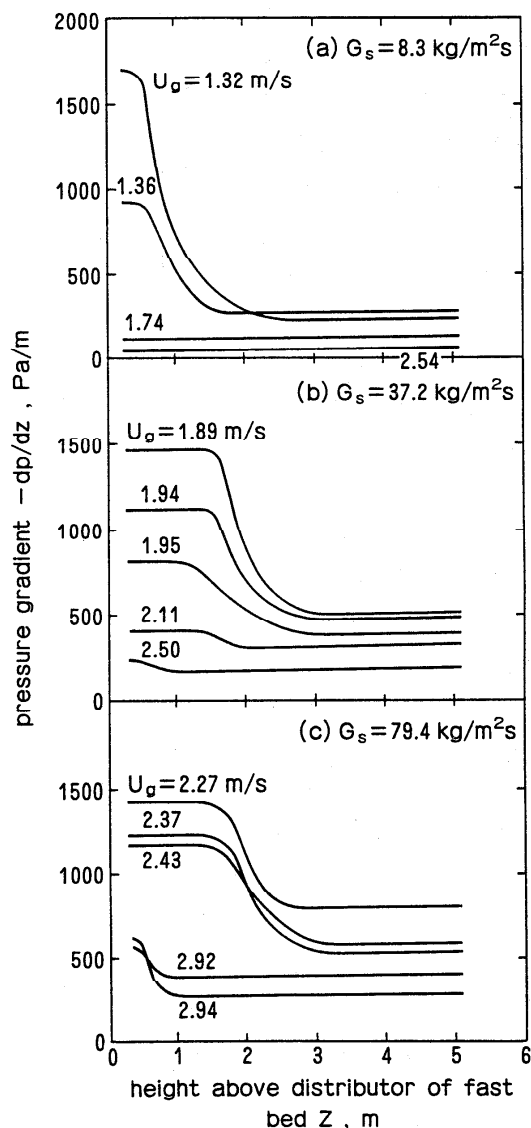


図5. ライザー内静圧勾配分布 (FCC粒子)

を用いて求めた。すなわち、粒子循環量をパラメーターにしてライザー下部および上部( $Z/D = 10, 40$ )における静圧勾配の空塔速度に対する変化をプロットした。図中の○印で示す下部での値と△印で示す上部での値が異なる場合が静圧分布に変曲点があり、ライザー下部に粒子濃度が一定で濃厚な層が形成されていることを示している。粒子循環量を一定に保ち、空塔速度を増加させるライザー上部での静圧勾配の値と下部での値が等し

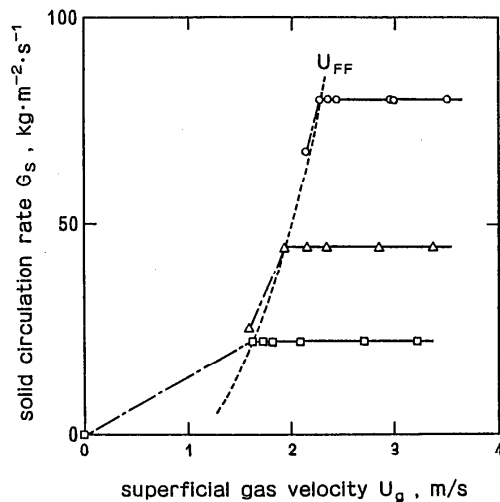


図6.  $U_{FF}$ の決定方法

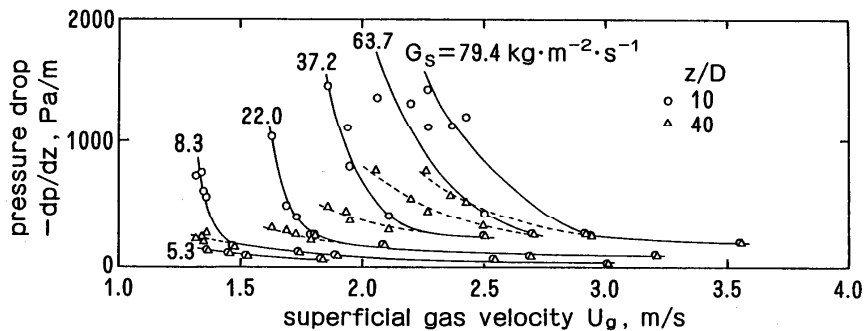


図7.  $U_{DT}$ の決定方法

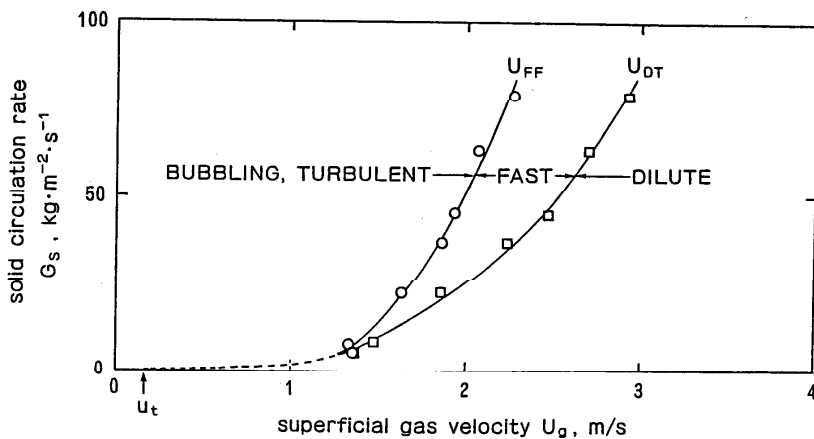


図8. 高速流動化領域

くなり、層内の流動状態が希薄輸送状態になったことを示す。

したがって、任意の粒子循環量に対してそれぞれ○印および△印を点綴し、それらの曲線の交点を与えるガス空塔速度 $U_0$ が、その粒子循環量での $U_{DT}$ となる。

いくつかの粒子循環量に対して求めた $U_{FF}$ と $U_{DT}$ の値を図

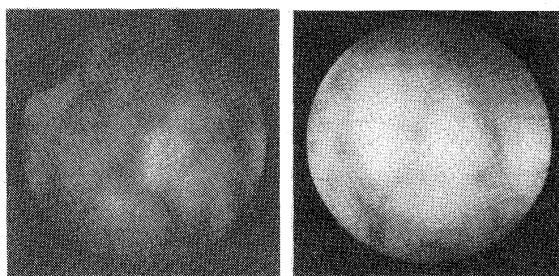
8に示す。 $U_{FF}$ と $U_{DT}$ で囲まれる領域が高速流動化領域である。粒子循環量が $5.3\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ よりも小さい場合 $U_{FF}$ と $U_{DT}$ は一致した。すなわち粒子循環量が小さければ流動状態は希薄状態から高速流動化状態を経ずして気泡・乱流流動化状態へと遷移する。これに対して、粒子循環量が大きい場合には、高速流動化状態が2つの流動化状態の間に存在し、粒子循環量が大きければ大きいほど高速流動化状態を与える空塔速度の範囲が増加する。また、高速流動化状態を与える最小のガス空塔速度 $1.3\text{m}/\text{s}$ の値は、YerushalmiとAvidan<sup>(11)</sup>が同じ粒子物性値をもつFCC粒子を用いて得た輸送速度 $U_{TR}$ の値に等しい。

図9に流動状態を撮影した結果を示す。視野は直径約 $0.05\text{m}$ の円である。図(A)および(B)ともに粒子循環量を一定値( $45.6\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ )に保ち、ガス空塔速度を、それぞれ、 $2.12\text{m}/\text{s}$ および $2.79\text{m}/\text{s}$ に設定した場合の結果である。図8によれば、この2つの流動状態は、それぞれ、高速流動および希薄輸送の流動状態に属している。図(A)で色の濃い部分がクラスターであり、その形状は不定型であることがわかる。図(B)では周囲よりやや濃度の濃い部分があるが、全体に粒子濃度は非常に薄く、 $0.02\text{m}$ 離れた格子板が見える。この可視化の結果から、高速流動化状態ではクラスターが存在することが確かめられた。

#### 2-4. 粒子物性の影響

図2の実験装置で循環粒子にFCC粒子を用いると気泡・乱流流動化状態と希薄輸送状態の間に高速流動化状態が存在することがわかった。しかし、装置のディメンジョン等の装置条件あるいは平均粒子径や粒径分布等の粒子物性などが変われば、どのような操作条件で高速流動化状態となり得るかという問題に関してはあまりに多くのパラメーターがあり、今後の研究に待ったところが多い。

図10は図2と同じ実験装置を用い、循環粒子にジルコン砂を使用した場合のライザー内の静圧勾配分布である。ジルコン砂の粒子物性および粒径分布は表1および図3に示した。実験はFCC粒子の場合と同様に粒子循環量を一定に保ち、ガス空塔速度をパラメーターにして行った。空塔速度が比較的大きい場合、静圧勾配はライザー内で均一で希薄輸送の状態である点、また、



A

B

図9. 可視化による流動状態の比較

粒子循環量を一定に保ち、空塔速度を下げて行くとライザー内の粒子ホールドアップが増加する点は FCC粒子の場合と変わりはない。大きく異なるのは、空塔速度を下げたとき、FCC粒子の場合のようにライザーの下部に均一濃度の濃厚層が、本実験条件下では現れず、粒子ホールドアップが高さとともに急激に減少する点である。観察した流動状態はライザーの最下部で気泡流動層の状態であり、高さが増加するとともにその気泡が壊れて不規則な形となり、粒子の混合状態も気泡流動状態に比べ、より激しいものとなっている。さらに高い部分では、ライザーの壁面でダウンフローが観察される。さらに上部では、循環粒子が希薄輸送の状態で運ばれていく。このように、ジルコン砂を用いた場合には、高速流動化状態は得られなかった。しかし、FCC 粒子の場合と同様にある一定の粒子循環量に対してはやはりその循環量を維持できなくなる空塔速度  $U_{FF}$  が存在した。図10に示した3つの  $G_s$  に対する  $U_{FF}$  の値は、それぞれ、図(a)、(b)および(c)中の最小のガス空塔速度の値である。

図5と図10の結果から、装置が同一であっても粒子が異なれば流動状態がまったく異なることがわかる。しかし、いずれの流動状態にも、ある空塔速度には saturation carrying capacity が存在し、このときの空塔速度が  $U_{FF}$  であり、 $U_{FF}$  がいわゆるチョーキング速度にあたる。したがって、FCC 粒子

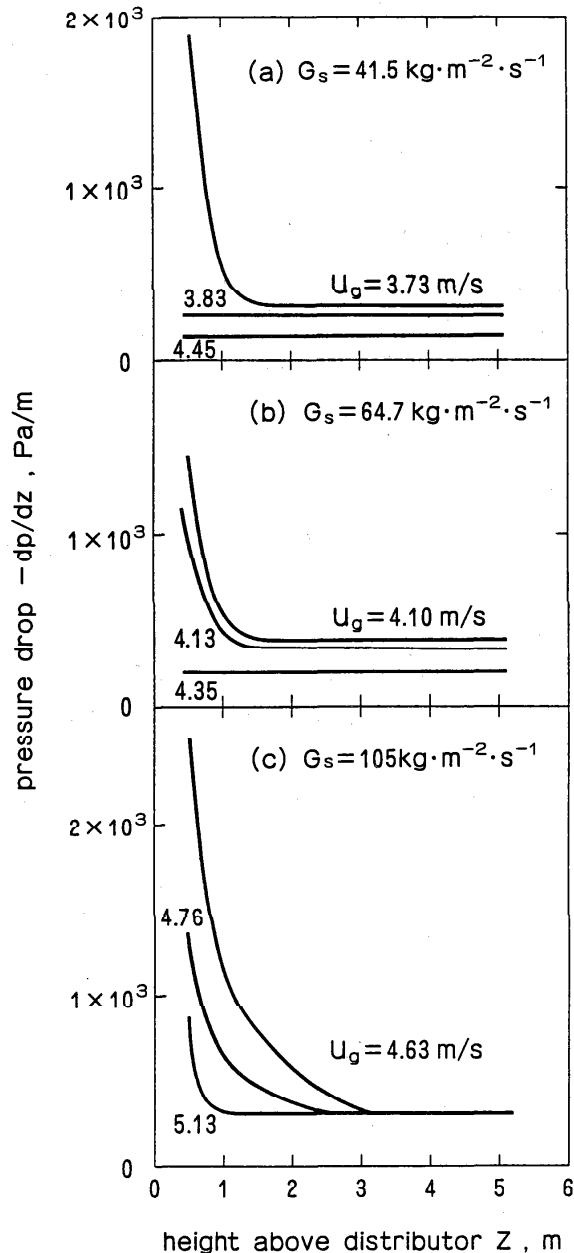


図10. ライザー内静圧勾配分布 (ジルコン砂)

の場合、チョーキング速度は高速流動化状態を規定する一つの境界の速度となる。チョーキング速度とそのときの粒子循環量の関係については Zenz と Othmer<sup>(12)</sup>、Yousfi と Gau<sup>(13)</sup> および Yang<sup>(14)</sup> らが相関式を導出し、実験結果との比較を行っている。FCC粒子を用いた本実験結果を、Biswas と Leung<sup>(15)</sup> が Yousfi と Gau<sup>(13)</sup> の式でよく相関されることを指摘している。しかし、ジルコン砂の場合の  $U_{FF}$  はいずれの相関式を用いてもよい相関は得られなかった。これは Yang<sup>(14)</sup> が述べているように、チョーキング現象は“clear-cut” な現象ではなく管の形状とか粒子物性などに大きく依存し、またチョーキング自体の定義にも問題があるからである。

### 3. 流動層熱交換器の除霜特性

寒冷地においては外気温が氷点近傍あるいはそれ以下になることが多く、このような条件下で大気からの採熱を行うと蒸発器の伝熱面に霜が発生する。ここでは流動層内に着霜の可能性のある伝熱面を挿入し、流動化粒子の働きにより、どのようにして着霜が妨げるか、あるいは除霜を行い得るかについて考察する<sup>(16)(17)</sup>。

#### 3-1. 従来の研究

寒冷地において大気から採熱を行う場合、いかにして蒸発器での着霜を防ぐかあるいはいかにして除霜を行うかが大きな問題となっている。

Ditchev<sup>(18)</sup> は流動層内に蒸発器を挿入し、伝熱係数の実測を行った。流動化粒子は直径が 3.77mm のポリエチレン粒子であり、3種類のコイルを用いた。しかし、目的は除霜を積極的に行うのではなく、霜が付着した伝熱面での伝熱係数を測定することであり、流動層を用いて着霜をいかに防止するか、あるいは除霜がどの程度まで可能であるかについては考察していない。したがって、伝熱面に熱を付加することによる除霜のサイクルにも言及している。

Sarubbi と Chen<sup>(19)</sup> は流動層熱交換器をヒートポンプシステムの大気採熱器として用いたことを報告している。そしていくつかの条件で流動層の着霜防止あるいは除霜能力について実験を行った。しかし彼らの行った実験条件は限られたもので流動層熱交換器を寒冷地において大気採熱器として用いるためにはより多くの、しかも系統的な実験が必要である。

#### 3-2. 実験装置および方法

実験に用いた流動層は、一切の長さが 0.20m の正方断面を有し、高さ 1.2m である。分散板は開孔比が 1.2% のものを用いた。ブローアを含む実験装置全体は恒温恒湿室内に設置し、室温を -30℃ から 15℃ まで、相対湿度を 30% から 100% までの範囲で変化させて実験を行った。流動層の静止層高は 0.3m とした。実験装置の概略図を図 11 に示す。

実験に用いた粒子はガラスビーズ、珪砂および AS ビーズ (アクリロニトリル・スチレン共重

表2. 粒子諸物性値

Material	$\bar{d}_p$ $\mu\text{m}$	$\rho_s$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$U_{mf}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$G_{mf}$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$C_{ps}$ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\epsilon_{mf}$	$\phi_s$
Glass beads	347	2520	0.17	0.221	0.75	0.46	0.94
Silica sand	363	2600	0.14	0.182	0.80	0.46	0.79
AS beads	282	1070	0.04	0.053	1.35	0.44	0.90

化合物)の3種類でそれらの粒径分布を図12に、物性値を表2に示す。平均粒径 $\bar{d}_p$ は次式により算出した。

$$\bar{d}_p = 1 / \left( \sum_i (w/d_p)_i \right) \quad (1)$$

硅砂は粒径、密度ともにガラスビーズに近いが、ガラスビーズに比べ角ばっており形状係数が小さい。ASビーズはガラスビーズに比べ粒径、密度ともに小さい。

着霜実験は氷点下の一定温度に保ったメタノールを外径10mmの銅製のテストチューブ内に循環して行った。テストチューブは分散板から0.2mの高さに水平に層内に挿入した。チューブに付着した霜の厚さは読み取り顕微鏡を用いて測定した。

テストチューブと同じ位置に挿入した伝熱棒を用いて伝熱棒表面と流動層との間の伝熱係数の測定を行った。伝熱棒はステンレス製で外径が10mm、発熱部の長さが150mmであり、発熱部の中央には直径0.5mmの熱電対

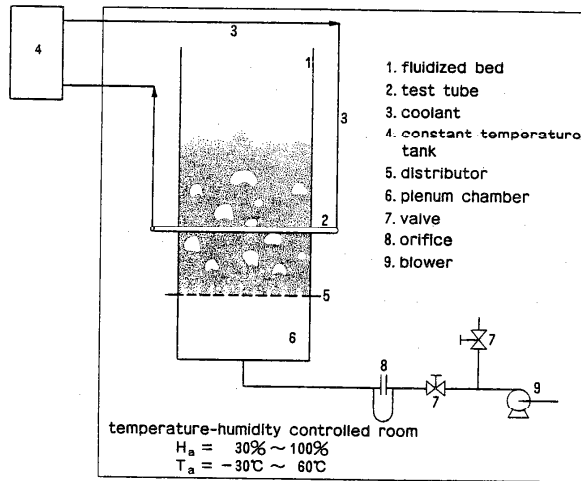


図11. 流動層熱交換器実験装置概略図

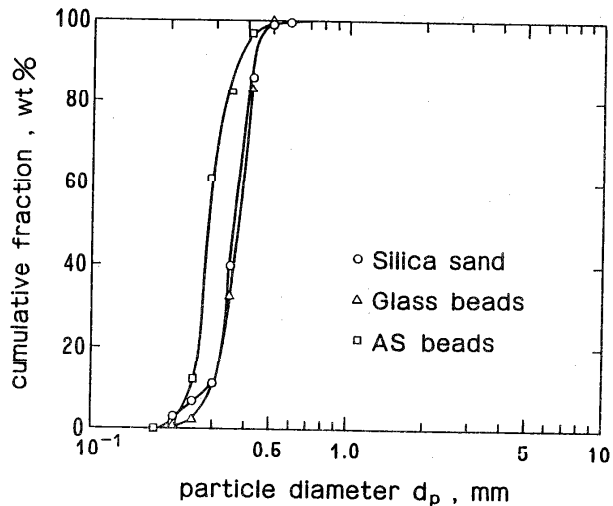


図12. 粒径分布

1本が埋め込まれている。伝熱棒の概略図を図13に示す。温度差を測定する流動層内の熱電対との距離は水平方向に35mmである。伝熱係数の値は伝熱棒の周方向の7カ所の局所値を平均して求めた。伝熱棒のヒーターは直流定電圧電源を用いて加熱した。伝熱棒の両端はアクリル製プラグで断熱したが、赤外線カメラ(Thermo-Camera, Avionics)を用いてその表面温度分布を測定した結果から熱損失は15%程度と推算される。流動層の層内に粒子を入れずに強制対流の状態では測定した結果は13~27W/(m<sup>2</sup>K)の範囲であり、次式により相関された。

$$Nu_{av} = (0.35 + 0.47 Re^{0.52}) Pr^{0.3} \quad (2)$$

### 3-3. 除霜特性

図14に着霜実験の結果を示す。室内の温度および湿度を、それぞれ、-5℃ および 70%に設定して実験を行ったが、流動化空気はブローアにより温度上昇するので、流動化空気の温度、湿度の値はそれぞれ5℃、40%に変化した。流動化の強さ( $U_0 - U_{mf}$ )は一定の値にした。テストチューブ内を流れる冷媒の温度は各粒子による除霜能力の違いを明確にするため、現実の値(-10℃~0℃)より低い-37℃に設定した。グラフの縦軸は霜の厚さを加えたテストチューブの外径であり、横軸は時間である。t = 0 でテストチューブ内に冷媒を流し始め、同時に流動層を流動化した。流動層内に何も粒子を入れない場合の強制対流状態では3時間で3mmの霜がチューブ表面に付着した。流動層を用いると強制対流状態よりも除霜はなされるが、流動化粒子が異

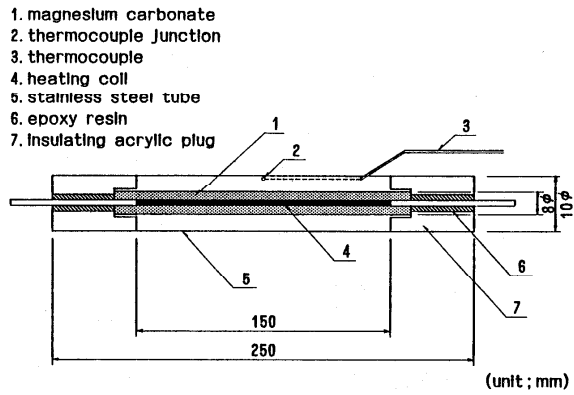


図13. 伝熱棒の概略図

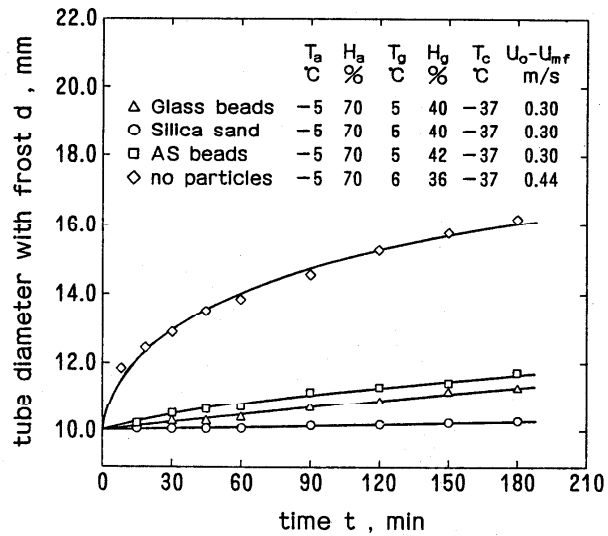


図14. 除霜能力の差



なれば除霜能力にも差がある。粒径、密度がともにガラスビーズよりも小さいASビーズは除霜能力が最も低く、一部の粒子は生成した霜層に付着する。粒径、密度ともにガラスビーズにほぼ等しい珪砂の除霜能力が最も高いが、これは珪砂がガラスビーズに比べ角ばっており（形状係数が小さい）、霜をかきとる能力が高いと考えられる。

流動層内に挿入した伝熱面での霜の付着と除霜のメカニズムは簡単に考えると図15のようになる。2相説によると、流動層は気泡相とエマルジョン相とから成っており、エマルジョン相のガス濃度は相対的に低い。したがって、気泡相の中に空気中の湿分の大部分が存在し、エマルジョン相には湿分があまり含まれないと考えられる。図15の (a)に示すように伝熱管が気泡に覆われた場合は気泡中の湿分が管表面に凝結して霜が成長する。一方、エマルジョン相が管表面を通過する場合には流動化

粒子が霜層と接触する。流動化粒子の除霜能力は主に熱的なもの（融かす能力）と力学的なもの（かき取る能力）に起因すると思われる。流動層の温度が $0^{\circ}\text{C}$  以上の場合、伝熱管表面の霜層の一部は流動化粒子により融かされてしまう。層内温度が $0^{\circ}\text{C}$  以下の場合、粒子に霜層をかき取る能力が十分にあれば霜は粒子により力学的に除かれる。また粒子にこの能力がない場合は、霜は図15の(b)に示すように伝熱管表面に押し付けられる。そして再び気泡が伝熱管を覆い新しい霜が成長する。このようなパターンの繰り返しにより霜層の密度は徐々に増加する。

図16に3種類の粒子をそれぞれ流動化粒子として用いた場合の伝熱係数の測定結果を空塔速度に対して示す。いずれの粒子についても、ガス空塔速度が最小流動化速度  $U_{mf}$  をこえると伝

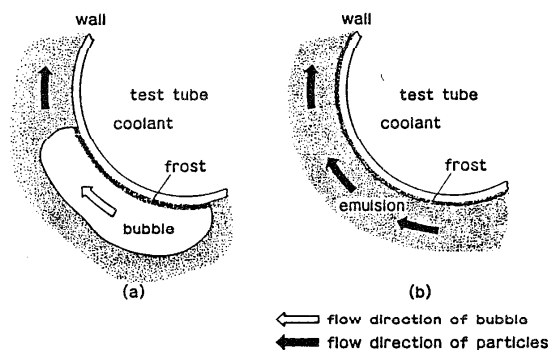


図15. 伝熱面での着霜・除霜モデル

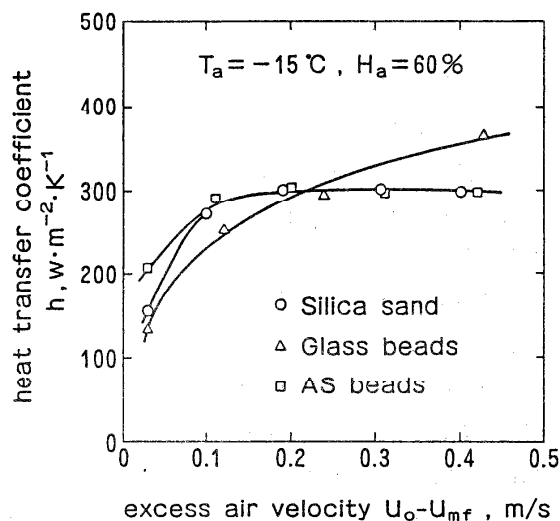


図16. 伝熱係数

熱係数の値は急激に増大する。図14に示した実験では、流動化空気の温度が  $0^{\circ}\text{C}$  以上になっているので、除霜能力の差が単に力学的な能力の差のみによって説明できるか検討が必要である。図14の実験は流動化の強さ  $(U_0 - U_{mf})$  が0.3である。図16によれば  $(U_0 - U_{mf}) = 0.3$  のとき、伝熱係数の値はガラスビーズがわずかに大きいのが、どの粒子もほぼ  $300\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  であり、どの粒子を用いても、層内からテストチューブ表面への顕熱の移動量はほぼ等しく、熱的な能力は同程度であると考えられる。したがって、除霜能力の差はかき取り能力のちがいがから説明できる。

### 3-4. 問題点

以上述べたように流動層熱交換器には除霜能力があり、しかも伝熱面に霜が存在しなければ、流動層は強制対流に比べ10数倍の伝熱係数が得られるので熱交換器として優れている。この理由から、流動層熱交換器を寒冷地用ヒートポンプの大気採熱器として用いれば、除霜操作も不用で高い伝熱係数で採熱が可能となる。しかし、流動層は層全体を均一な流動化状態に維持するために分散器に大きな圧力損失をかけている点、粒子層での圧力損失が大きい点など流動層を動かすエネルギーに問題がある。除霜能力についても、気泡すなわち湿分が存在する場での熱交換なので、操作条件あるいは粒子の選択を適切に行わなければ逆に着霜を促進してしまう。また、外気温の変化に対して採熱量を変える場合も、単に空塔速度を変化させて対応することしかできず、空塔速度の選択が着霜とも密接な関わりを持っている点を考え合わせると、流動層熱交換器の操作条件はかなり限られたものになるであろう。

## 4. 粒子循環型熱交換器

### 4-1. 循環流動層の適用

流動層熱交換器のもつこのような問題点を考慮し、移動層内に蒸発器を挿入し、移動層とライザーの間を粒子が熱媒体として循環する粒子循環型熱交換器の流動および伝熱特性について実験的考察を行った<sup>(20)</sup>。図17に粒子循環型熱交換器の概要を示す。ライザー内で循環粒子は空気より熱を得る  $(T_{s1} \rightarrow T_{s2})$ 。冷やされた  $(T_{g1} \rightarrow T_{g2})$  空気は系外へ放出されるが、粒子は移動層内

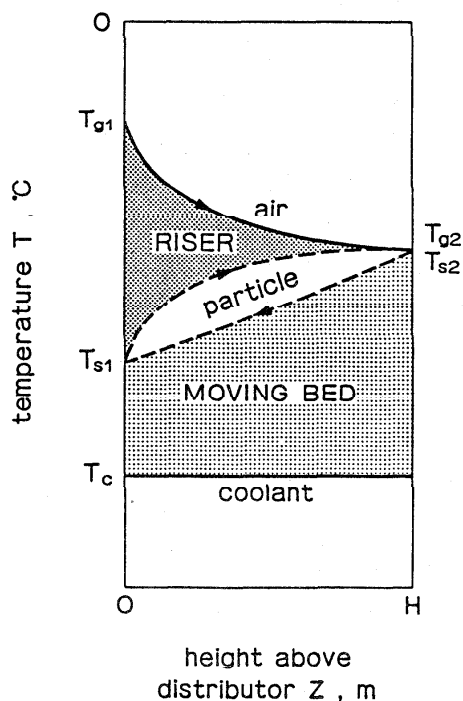


図17. 粒子循環型熱交換器の概要

に入り、層内を下降する間に蒸発器に熱を与え( $T_{s2} \rightarrow T_{s1}$ )、層底部からライザーに戻る。粒子循環型熱交換器を用いるとライザー部での空隙間率が大きく、特別な分散器も不用となるので、圧力損失が流動層に比べかなり小さくなる。また、霜は空気中の水分が凝結して生成するので、流動層に比べ空気流れの少ない移動層内に蒸発器を置くと、蒸発器表面での着霜の可能性を著しく減じることができる。

#### 4-2. 実験装置および方法

実験装置の概略図を図18に示す。装置はライザーと移動層を組み合わせたもので内部の粒子が観察できるように透明アクリル板で製作した。ブローアを含めた装置全体は、流動層熱交換器と同様に、低温の恒温恒湿室に設置した。循環粒子は移動層下部からライザー下部に入り、空気によって上方へ搬送され、ディフューザー内で減速し、移動層に再び戻る。粒子循環量は移動層下部のバタフライバルブで調節し、移動層内を下降する粒子速度から求めた。移動層内には蒸発器を想定した長さ 300

mm、幅150mm、厚さ13mm のプレート状の粒子冷却器2枚を移動層の粒子の流れと平行に挿入し、内部には一定温度に保った冷媒を流した。セパレーターおよびディストリビューターは 100メッシュのステンレス製金網である。したがって、ライザー内に空気のみを約 10m/sの速度で流した場合でも金網による圧力損失は 1mm 水柱程度であった。循環粒子はアルミニウム粒子でその粒径分布を図3に、主な物性値を表1に示す。移動層の層高は約 0.9mである。移動層内を下方から上方へ流れる空気流量は移動層部の静圧勾配から求めた<sup>(18)</sup>が、本実験範囲ではライザー内の空気流量に比べ無視小であった。

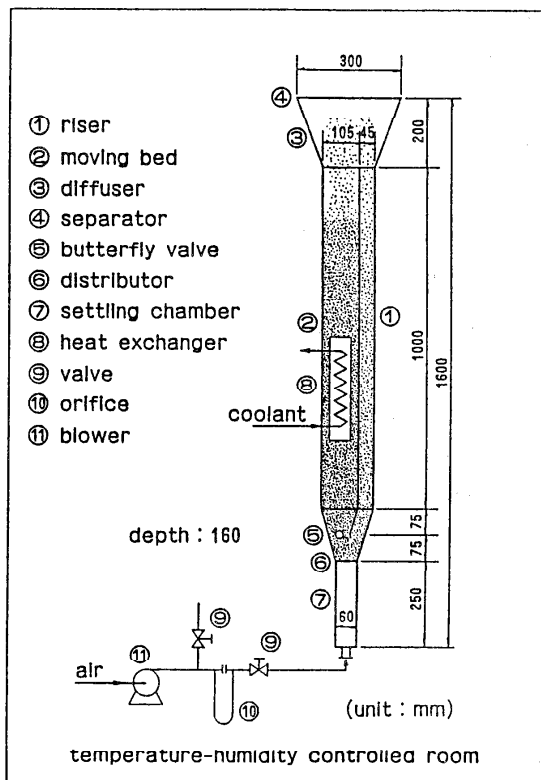


図18. 粒子循環型熱交換器実験装置の概略図

### 4-3. 実験結果

図19に粒子循環型熱交換器の温度および静圧分布の測定結果の一例を示す。室内の温度、湿度および冷媒の温度をそれぞれ $-10^{\circ}\text{C}$ 、50% および $-14^{\circ}\text{C}$ に保った。装置内の条件はライザー部の空気流速が $2.8\text{m/s}$ 、粒子循環量が $1.82\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 、移動層内の粒子下降速度が $1.5\text{mm/s}$ である。ライザー内の温度分布の測定結果から、ライザー内の温度は分散器から約 $0.2\text{m}$ 以上の高さで一定温度になっている。また、静圧分布の測定結果から、ライザー下部には約 $0.2\text{m}$ の高さまで粒子濃度が濃い。このことから、ライザー内での空気と粒子の熱交換は粒子濃度の濃いライザー下部で完結すると考えられる。この条件で3時間、連続運転の実験を行ったが、冷却器表面には着霜が認められなかった。また、循環する粒子の動きにも実験開始から全く変化はなかった。

ライザー内での粒子の挙動および濃度は粒子と空気の熱交換およびライザー部の圧力損失に大きく影響する。図20はライザー内のガス空塔速度 $U_{G1}$ を一定に保ち粒子循環量 $G_s$ を変化させた場合のライザー内の静圧勾配分布である。(a)~(c)の各図において最大の $G_s$ が、そのガス空塔速度 $U_{G1}$ の最大粒子輸送量である。換言すれば $G_s$ に対する $U_{F1}$ を求めたことになる。 $U_{G1} = 2.8\text{m/s}$ の条件では静圧勾配が

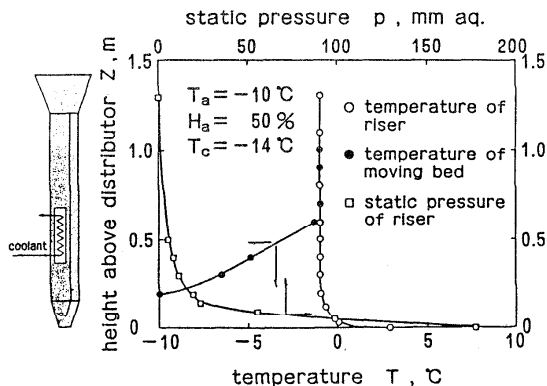


図19. 温度および静圧分布の測定例

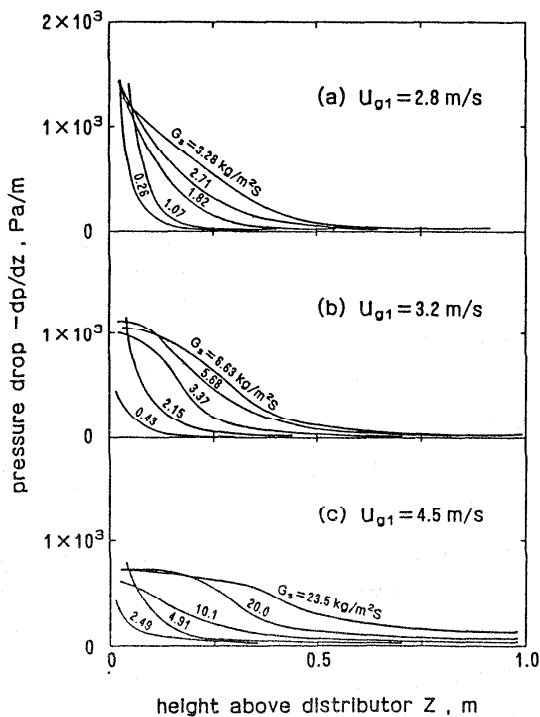


図20. ライザー内静圧勾配分布 (アルミニウム)

高さとともに減少し、2-4で述べたジルコン砂を用いて得られた静圧勾配の結果と類似であり、ライザー内の流れの状態は高速流動化状態とはいえない。 $U_{a1} = 4.5\text{ m/s}$ の条件で $G_s$ が大きいき、ライザー内が粒子濃度が均一である濃厚な層と希薄な層とに分かれており、ライザー内の流れは2-3で述べた高速流動化状態となっている。高

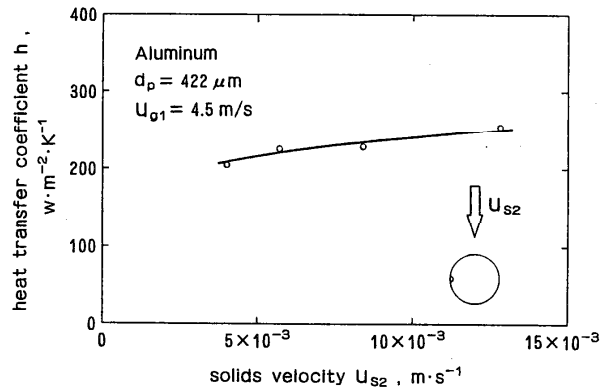


図21. 移動層内の伝熱係数

速流動化状態は固気の接触が非常に良好な流動状態であり、空気と粒子の熱交換には適している。しかし、この状態にするとライザー内での粒子ホールドアップが上昇し、圧力損失をさほど低くは抑えられない。図19の流動状態は高速流動化状態ではないが、粒子と空気の熱交換はライザー下部の粒子濃度が高い部分で完結している。したがって、高速流動化状態にこだわらずに、ライザー内の粒子ホールドアップを熱交換の条件を満足しながらどれほど下げられるかについての検討が必要となろう。

移動層内に伝熱棒を水平に挿入して測定した伝熱係数の値を粒子下降速度に対して図21に示す。粒子下降速度が4~13mm/sの範囲では伝熱係数の値は約220W/(m<sup>2</sup>K)となり、流動層の伝熱係数よりは小さいが、強制対流の際の伝熱係数の値に比べかなり大きい。

#### 4-4. 問題点

以上述べたように粒子循環型熱交換器は、除霜能力あるいは低圧力損失等、流動層熱交換器にはないいくつかの利点がある。しかし、粒子循環型熱交換器はライザー部と移動層部を組み合わせた装置であるが故に、2つの部分の特長を生かしつつ装置全体の特性を検討しなければならない。

#### 5. あとがき

循環流動層の基礎とその実用化の可能性について述べた。高速流動化状態についてはまだまだ不明な点が多く、装置形状、操作条件あるいは粒子物性を考慮して基礎研究を進めなければならない。しかし、循環流動層は、本稿で述べたように、従来の気泡流動層よりも優れた除霜能力を持つ熱交換器に適用できる可能性がある。循環流動層は粒子を循環するメリットを十分に活かし、他にも実用的に数多く利用され得る装置であると考えられる。

引用文献

- (1) Takeuchi, H., et al., Powder Tech., 47(2), P.195(1986)
- (2) Takeuchi, H., et al., Proc. of World Congress III of Chem. Eng., Tokyo, 81-156(1986)
- (3) Grace, J.R., "Fluidized Bed Hydrodynamics" in "Handbook of Multiphase Systems", Hetsroni, G. (ed), Hemisphere Pub. (1982)
- (4) Geldart, D., Powder Tech., 7, P.285(1973)
- (5) Yerushalmi, J. and N.T.Cankult, Powder Tech., 24, P.187(1979)
- (6) Li, Y. and M.Kwauk, "Fluidization", Grace, J.R. and J.M.Matsen(eds.), Plenum Press, P.537(1980)
- (7) Rhodes, M.J. and D. Geldart, Proc. of 1st Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds, Halifax, Nova Scotia,(1985)
- (8) Gajdos, L.J. and T.W. Bierl, Topical Report for the U.S. DOE, Contract No.EX-C-76-01-2449. U.S.DOE, Washington, D.C. (1978)
- (9) Weinstein, H., et al., Proc. of 5th Int. Conf. on Fluidization, P.329(1986)
- (10) 井伊谷ら, 粉体工学会誌, 3, P.424(1966)
- (11) Yerushalmi, J. and A. Avidan, "Fluidization", Davidson, J.F., et al.(eds.), Academic Press, P.225(1985)
- (12) Zenz, F.A. and D.F.Othmer, "Fluidization and Fluid-Particle Systems", Reinhold Pub.(1960)
- (13) Yousfi, Y. and G.Gau, Chem. Eng. Sci., 29, P.1939(1974)
- (14) Yang, W.C., Powder Tech., 35, P.143(1983)
- (15) Biswas, J. and L.S.Leung, Powder Tech., 51, P.170(1987)
- (16) Takeuchi, H., et al., Int. Symp. on Cold Regions Heat Transfer, Edmonton, P.171(1987)
- (17) 武内ら, 化学工学協会北海道大会講演要旨集, A213(1987)
- (18) Ditchev S., Proc. of Int. Cong. on Refrigeration, 4, P.250(1978)
- (19) Sarubbi R.G. and J.C.Chen, DOE/ET/11297--T1(1981)
- (20) 武内ら, 化学工学協会北海道大会講演要旨集, A214(1987)
- (21) L.S.Leung, "Fluidization", Grace, J. R. and J. M. Matsen(eds.), Plenum Press, P.25(1980)

## HOKKAIDO Island の「氷室」

堀山政良 (室工大)

まずは内緒の話から。

北海道がこんなに面白く興味深い土地であると、つい最近まで知らなかった。思いも寄らなかった。流水の寄せる最南端の海・オホーツク海。遠く大陸の道へ続く日本海。黒潮と親潮がしのぎを削る解放された太平洋。室蘭には蝦夷梅雨があって、そして、夏冬の温度差が60度以上にもなる和寒（「わさむい」と読む）。北海道には湘南もある。この愛ランドの住人は具体的でなければ冬は越せない。具体的な熱の問題（自然ばかりではなく人の心にも）が無造作に転がっていることに気付かなかったこともここだけの内緒の話。人と自然がしのぎを削り共存する HOKKAIDO 私stand いたるところが熱の狩場。

さて、「氷室」の話。この（少々熱っぽい意地張りで、ロマンチストで世間知らずの室蘭の仲間でごそ行い得たと秘かに自負する）仕事には、語れぬ逸話が多くて、。一発度胸の熱設計。往復700キロの日帰り実験。実験所、学生達は野ら仕事。実弾なくて、暗い夜道に鷺を追い。田舎者、なくともできると意地になり。記録計、足りなきや、と鶴の一声。寒くとも氷も作れぬ陸月の阿呆。雪が冬の便りなら、氷は夏への酒落れた変身。歌詠みが訪ねてきては酒を詠む。あの野郎、この野郎、飲み明かしぐちを言っても、朝は三指おはようさん。なぜかしら神話の生まれる氷室の世界。意識して忘れた頃の異様な暑さ。データを震え聞く手が涙に変わり。良くて飲み、悪くて飲んだ、だけが取柄の負乏実験。追った夢を一つ手に入れ、会社を一つ、。室蘭の熱食い虫どもらはいまだ健在。――この仕事を終え1年近く経つというのに、まだ、からだのぬくもりは消えず、感謝に漬れた私の小さな胸の傷は癒えない。

はじめに

冬期間の冷熱を氷の形で貯蔵し、夏期にそれを冷熱源として用いる、古くからのいわゆる「氷室（ひむろ）」の考え方をもとに、冬期間の冷熱エネルギーの新しい貯蔵-利用システムを開発することを試みている。このシステム開発および付帯する関連技術の開発の全体を我々は「氷室計画」と呼んでいる。同計画の一環として研究開発を進めてきている氷室を利用した農産物の長期保冷貯蔵庫（以下「氷室型保冷庫」と略称する）は技術的にも経済的にも充分実用に供せることが判明し、その建設が北海道において急速に始まった。

北海道は農産物の主要生産地域であるにもかかわらず、農産物の消費地から遠いため様々な問題を内包している。その解決策の一つとして農産物を長期保冷貯蔵し、出荷調整を行うことが広く提案されている。しかし、保冷貯蔵を行うには多額の設備費および運転費がかかり、また、品質を低下させず農産物を長期間貯蔵させる技術が完成していないなどの問題があり、一般の農業者で農

産物の長期保冷貯蔵を行うまでには至っていない。このような状況を背景に、本研究では、なんらかの方法、たとえば散水し製氷を行ったり、河川、湖、沼、ダムなどでできる天然の氷を用いたりあるいは雪氷変換機により雪を氷に変換するなどにより冬期間の冷熱を氷ないしはそれに近い形で蓄冷、保存し、これを冷熱源として用い農産物を夏期にかけて安価に、また、長期間安定した状態で保冷、貯蔵する保冷库—氷室型保冷库—を開発した。

### 氷室型保冷库の熱設計

自然冷熱の採取を行い得る期間は一年一冬期間に限られており、また、冷熱源（氷）の温度は機械的な冷凍機と異なりかなり高いため保冷库の熱的環境を十分把握し、氷室型保冷库を熱設計する必要がある。氷室（氷の貯蔵室）に貯蔵する水量は、冬期間から目標保冷期日までの必要冷熱量（冷凍負荷）により決められる。通常の冷凍庫の熱設計において行われているように全冷凍熱量  $Q_0$  は次式により算出される。

$$Q_0 = \sum_{d=ds}^{de} \left\{ \sum_{h=1}^{24} \left[ \sum_{i=1}^4 q_i \right] h \right\} d$$

ここで、 $q_i$  ( $i=1\sim 2$ ) は冷凍負荷の成分であり、 $h$  は時間、 $d$  は日数、 $ds$  は保冷開始日、 $de$  は終了日を示す。冷凍負荷成分  $q_1$  はあらたに入荷した荷の温度を低下させるための熱量である。

$q_2$  は断熱壁、地面を通して侵入する熱量である。ここでは壁外壁温度として太陽からの日射および地中での熱伝導の遅れを考慮した温度を推定しておく必要がある。太陽および周囲環境からの放射による熱取得の計算方法として相当温度差法を用い、また、日射量の資料は月別（水平面）全日射量を用いた。なお、地中温度は経時変化を考慮した。荷（保冷対象物＝農産物）の呼吸により炭酸ガスを発生するため、これを外気と置換する必要があり、これに伴い置換空気の冷却も必要となる。その熱量を  $q_3$  とする。保冷库内で発生する熱量  $q_4$  は、本保冷库では荷の呼吸熱を考えれば十分である。

### 氷室型農産物長期保冷库の実証実験

**実験施設** 先に述べた熱計算方法および帯広市の気象データを基に図1に示す実証実験用「氷室型保冷库」を設計した。断熱構造はA級冷蔵庫（熱通過率  $= 0.2 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ ）程度とし、また、保冷対象物を貯蔵付加価値の高いながいも（110ton）とした。北海道中川郡幕別町糠内に建設した実験施設は建設途中の納屋の一部を急ぎよ改造

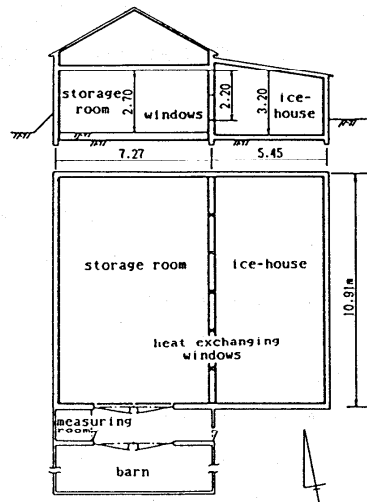


図1 実証実験用氷室型保冷库



したものである。納屋は地上式であったが、特に、断熱構造を要求される保冷库および氷室の位置は夏期に比較的温度が低く、直射日光の当たらない地下に埋没するのが望ましく、荷の出し入れを考え、地表面より1m程度掘り下げた半地下式とした。また、氷室は保冷库に隣接し新築した。氷室の位置は種々考えられたが、構造を極力簡素にすることから、図に示す形式とし、その範囲で氷と空気の接する表面積を大きくとることに努めた。

庫内温度、湿度などの制御用機器など付属機器の利用を極力避けるため、氷室の氷の冷熱は冷気流通窓を解放し、自然対流によって保冷库へ伝達する構造とした。なお、保冷対象物のなごいものは11月下旬に入荷し、保冷库を冬期間保温庫として利用するため冬期間は保冷库と氷室の間の冷気流通窓を密閉した。なお、氷室内の氷は冬期間、氷室内に散水し、寒冷外気を自然通風させることにより155ton作った。

### 実験結果（その1：熱的結果）

実証実験の結果を一部理論解析の結果と比較し、示す。氷の残存量の実験結果を図2に示す。同図には残存量の計算結果（初期の貯蔵氷量は設計値（110ton）とし、氷の残存量は実験時のなごいもの貯蔵量（35ton）に対応してある）および計算に用いた月平均外気温および実験時の

月平均外気温も併記してある。氷室による保冷を始めてから6月中旬までの外気温は例年と大差がなかったため、残存量の実験結果は理論的に予測した値に沿っているが、6月中旬から7月にかけて温度が低く冷夏となったため実験による残存量の方が多くなっている。しかし、解析結果と実験結果とは良い一致を示しておりこの結果より本報で用いた理論的な氷の消費量の推定方法は利用に値するものであることがわかる。

庫内温度の測定

例として、図3に月平均温度と湿度を示す。また、図4に1986年7月28日の庫内の温度および保冷库、氷室をとりまく温度を示す。図3に示すように庫内の月平均温度は外気温（図2に併記）の変化にかかわらず安定

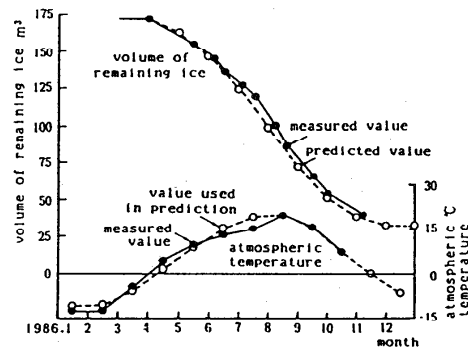


図2 氷の消費量、残存量の実験、計算結果および月平均外気温度

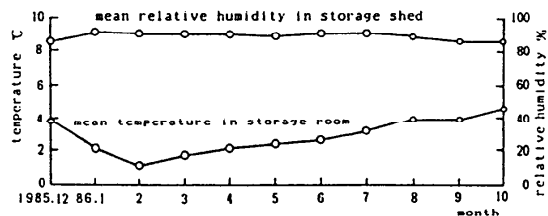


図3 庫内の平均温度と湿度

しており、冬期間には保温庫として機能している。また、湿度は90%前後と高い値に保たれており、多くの農産物の含水率と同程度の値を示している。また、夏期における日射による外壁温の急激な上昇にもかかわらず、図4に示すように庫内温度は安定しており、さらに、庫内温度のむらも少ない。なお、庫内空気の流れの測定も試みたが庫内での最大速度は 5cm/s 以下の低速であった。

### 実験結果（その2：農産物の保存結果）

本実証実験での主な保冷対象であるながいもの減耗率（重量比）を図5に示す。一般に、収穫後の農産物は呼吸作用により、自らの重量を減耗し、30日間経過すると減耗率は5%に達すると言われている。しかし、図5から明らかなように氷室型保冷庫において保冷開始初期の30日間（1985.11.15～86.12.15）での減耗率は1.6%と非常に低い値を示した。この期間保冷庫は単に断熱構造の保温庫としての機能を果たしたに過ぎないことから、収穫後のながいものを取り巻く熱的環境が安定し、また、温度が 4℃程度で休眠状態に移行しつつあったためであると思われる。これ以降の90日間（86.1.1～ 4.1）はながいものは休眠状態となり減耗は認められなかった。4月以降は庫内温度の若干の上昇などに伴い緩やかに減耗したが、9月上旬（収穫入荷後300日）においても減耗率は 4%程度に留まっており、また、鮮度、味覚は良好に保たれておりながいものは高品質のまま長期間保存された。その他、春堀ごぼう、馬鈴薯、にんじんなどの根菜類、キャベツ、ほうれん草などの葉物、りんご、梨、みかんなどの果物についても良好な保存結果を得ている。

### まとめ

氷室型保冷庫では、大きな伝熱面積を持つ氷の表面により制御機器を用いずに、低温度、高湿度および低風速の状態を作り出すことができ多くの農産物を高品質の状態でも長期間保存することが可能であることを示した。 また、氷室内の氷の消費量の推移はほぼ理論的に予測される程度であり、本報で用いた熱設計の方法は実用に供せることがわかった。 さらに、並行して行った経済性からの検討も満足行くものであり、ここで提示した氷室型保冷庫は寒冷地における自然冷熱エネルギーを貯蔵、利用した実用的な農産物の長期保冷貯蔵庫であることを確認した。

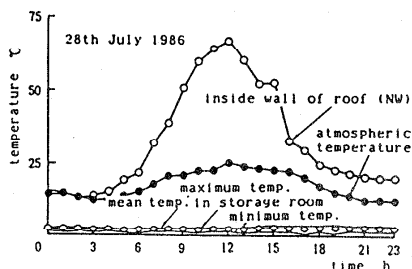


図4 庫内温度および保冷庫、氷室をとりまく温度

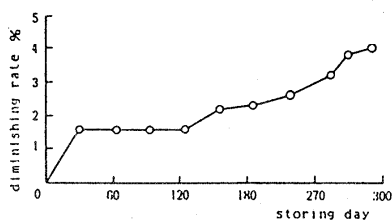


図5 ながいもの減耗率の変化

< 解説 >

金属の凝縮  
—ミクロ的伝熱への一つのアプローチ—

石 黒 亮 二 (北大工)

杉 山 憲 一 郎 (北大工)

1. ま え が き

最近、本誌や日本機械学会誌に、伝熱学に関する展望が幾つか掲載された<sup>1) - 4)</sup>。これらの記事は、それぞれに課題も違い、従って論点やニュアンスに相違はあるが、総じて、「日本がこれまで進めてきた基礎重視の研究姿勢は間違いでなく、今後は多様な応用分野を意識しつつ、その基礎となる現象をしっかりと把握してゆくことが大切である」という主旨に読み取れる。そして、筆者らもこの主旨に全く同感である。

ところでこのような展望が、盛んに行われる背景には、対象とする系を連続体と見なす伝熱の研究が、乱流や二相流などの例外はあるにせよ相当程度まで解明されて、ほとんど一段落したかに見えるようになり、伝熱学が、今後ハイテクと言われるフィールドで、主要な役割を演じて行くためには、一步踏み込んだ新しい方法を確立しなければならない時期にさしかかっているためと思われる。

2. 最近の1つの研究動向

米国における最近の最優先研究課題の一つとして、薄膜と界面の問題が取り上げられている。界面と界面近傍での現象は、伝熱の分野の主題でもあるが、先端技術との関連で取り上げられる界面の問題では、温度レベルや圧力レベルの範囲が大きく広がり、また一段と物理的正確さが要求されることが多く、気体分子運動論的な取り扱いや分子論的な考察を含めた、いわゆるミクロの分野からの解明が要求されている。

たとえば、原子力分野のハイテクとして先進各国で競って開発が進められているウランのレーザー濃縮を取り上げてみる。レーザー濃縮とは、高温低圧下で、金属ウランを蒸気状態とし、これにレーザーを照射して、特定の同位体を選択的に電離させた後、電場中を通過させることによって同位体分子を所定の位置に導き、それを固体壁上に凝縮させることにより分離する技術である。このような装置の設計や性能解析には、当然のことながら、重金属の高温低圧下における蒸発や凝縮のミクロの知識が必要である。このような事情は、VLSI製造などの他のハイテク分野でも同様である。本稿では上述の研究動向を意識しつつ、ミクロ的な取り扱いが

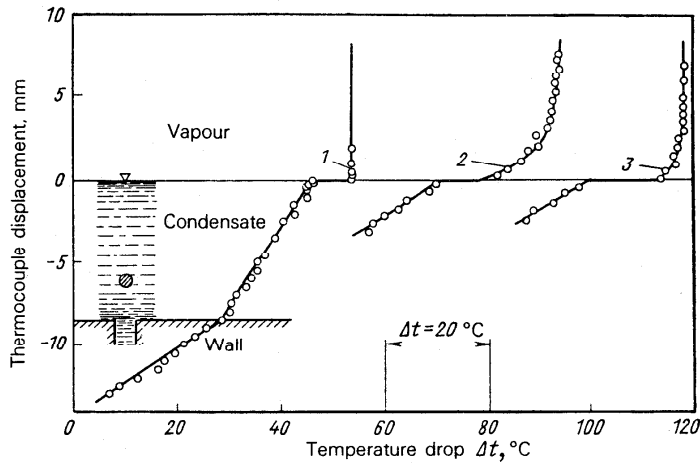
要求される液体金属の凝縮について述べる。

### 3. 金属の凝縮

金属の蒸発・凝縮の研究は、低融点、低沸点の材料を用いて数十年以前より行われてきた。その一つの動機は、宇宙船の大型電源に原子炉を用いる計画が検討され、その熱媒体としてアルカリ金属が適していると判断されたことによる。また、最近では、熱エネルギー有効利用のための二流体ランキンサイクルや高温ヒートパイプの熱媒体としてのアルカリ金属の利用も考えられている。

このような背景から、1950年代後半から1960年代にかけて、水銀やアルカリ金属を用いた凝縮実験結果が、SubbotinらやRohsenowらのグループを中心として幾つか発表された<sup>5)~9)</sup>。その結果、金属の凝縮問題においては、気液界面の強い非平衡性が重要な検討課題であり、通常用いている連続体の方程式や拡散の法則だけでは現象の本質を理解できないことが明らかになった。

金属の凝縮の際に生じる温度ジャンプの測定例をFig. 1に示す<sup>10)</sup>。いずれの場合も相当大きな温度ジャンプが生じている。この界面近傍の現象をミクロ的に説明する(Fig. 2参照)。凝縮相からはTsの飽和圧力に対応してマクスウエルの速度分布をもって分子が飛び出していると推定される\*。蒸気側からの分子は巨視的流速(V)を中心にTvでの平衡状態に近い速



1—pure potassium vapour at 349 °C; 2—lithium vapour with addition of helium at 767 °C; 3—sodium vapour with addition of lithium at 800 °C.

Fig. 1 温度ジャンプの測定例

\* 真空度が高い空間へのナトリウムの蒸発では確認されている。

度分布を持って凝縮相に近づいて来る。この結果、凝縮面から平均自由行程の数倍程度の領域では、この性格の異なる2方向からの分子が衝突を繰り返し、マクロの凝縮量に相当する分子数が凝縮相に飛び込む。ただし、この衝突は弾性的であり、質量、運動量、エネルギーは保存されている。従って、Fig. 1の温度ジャンプは平均自由行程の数倍程度の領域で生じており、巨視的な温度ジャンプは、微視的には界面を除き滑らかな変化が生じていると言える。

以上の説明から分かるようにFig. 1の温度ジャンプを定量的に評価するためには、系が種々の速度を持った分子で構成されかつ衝突を繰り返していることが数学的に表現されなければならない。すなわち、Navier-Stokes方程式のかわりに次に示すBoltzmann方程式を使用しなければならない。

$$\frac{\partial(nf)}{\partial t} + \mathbf{C} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F} \cdot \frac{\partial(nf)}{\partial \mathbf{C}} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f'f_1' - ff_1) g \sigma d\Omega d\mathbf{C}_1 \quad (1)$$

上式は、空間( $\mathbf{r}$ )、分子速度( $\mathbf{C}$ )、時間( $t$ )を独立変数とする規格化された速度分布関数( $f$ )で記述されていて、物理的には、空間および速度に関する微小要素内の分子数の変化のバランスを表現している。即ち、左辺第1項は、時間に対する、第2項は対流に基づく、第3項は外力に基づく分子数の変化であり、右辺は分子同士の衝突による分子数の変化を表す項である。ただし、 $n$ は数密度、 $\mathbf{F}$ は外力、 $g$ は分子の相対速度、 $\sigma$ は微分断面積、 $d\Omega$ は立体角の微小要素、 $d\mathbf{C}_1$ は速度の微小要素、添字1は衝突相手の値、プライム符号は衝突後の値を示す。なお、上式の各項に $m$ 、 $m\mathbf{C}$ 、 $1/2 m c^2$ をかけ $\int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{C}$ の操作を行えば、連続の方程式、運動量方程式およびエネルギー方程式を得ることができる。すなわち $\int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{C}$ の操作により種々の速度を持つ分子の個性が失われ、巨視的な物理量である密度、流速、温度に関する基礎式が得られる。

以上の基本的観点に立って従来の金属の凝縮の研究について述べる。SubbotinらやRohsenowらに代表される実験結果は、ほとんどの場合Schrageの理論<sup>1)</sup>と比較され金属の凝縮の特性が議論されている。Schrageの理論の構成は以下の通りである。

- 凝縮相より放出された分子
- 蒸気相よりの分子

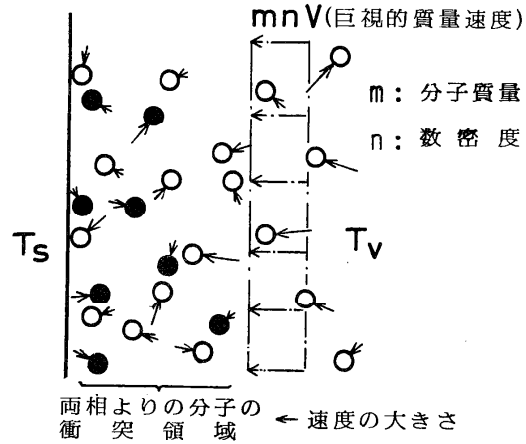


Fig. 2 凝縮相近傍の分子の挙動

蒸気側から凝縮相に向かう蒸気量 ( $W_-$ ) はマクスウエル分布を仮定し、マクロの流速を  $V$  として次式で与えられる。

$$W_- = - \frac{Pv}{\sqrt{2\pi RTv}} \Gamma \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \Gamma = e^{-V^2/2RTv} - V \sqrt{\frac{\pi}{2RTv}} \{ 1 - \text{erf} ( V/\sqrt{2RTv} ) \} \quad (2a)$$

なお、 $Pv$  は蒸気圧、 $R$  はガス定数、 $Tv$  は蒸気温度である。凝縮相から蒸気側に放出される蒸気量 ( $W_+$ ) は、その表面温度 ( $Ts$ ) に対応する飽和圧力 ( $Ps$ ) でマクスウエル分布を持って分子が放出されるとして、次式で与えられる。

$$W_+ = \frac{Ps}{\sqrt{2\pi RTv}} \quad (3)$$

正味の凝縮量  $\phi_n$  は、凝縮係数  $\sigma_c$  と蒸発係数  $\sigma_e$  を導入し、次式で求まるとしている。

$$\phi_n = \sigma_c(-W_-) - \sigma_e W_+ = \frac{\sigma_c Pv}{\sqrt{2\pi RTv}} \Gamma - \frac{\sigma_e Ps}{\sqrt{2\pi RTs}} \quad (4)$$

$\sigma_c$  と  $\sigma_e$  は、上式から分かるように界面に到達した分子のうち実際に凝縮する割合と界面からの蒸発のうち実際に蒸気相に放出される割合を表す係数である。 $\sigma$  の値は薄膜や界面に関連する工学の問題においては非常に重要であるが、現時点では物理学的に解明されているとはいえない値である。通常この値は凝縮と蒸発で同一と見なし  $\sigma_c = \sigma_e = \sigma$  とおく。平衡からのずれが小さいとすれば、(4) 式の右辺の自乗根の分母では  $Tv = Ts$  としても実質的な誤差が生じない。かつ、この条件では、(2a) 式の  $\Gamma$  の右辺第1項は1、中括弧内第2項は0と置ける。従って、(4) 式は簡単な形に整理でき、通常良く用いられている次式のSchrageの式が得られる。

$$\phi_n = \frac{2\sigma}{2-\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{Pv - Ps}{\sqrt{RTv}} \quad (5)$$

この導出過程で明かなようにSchrageの式では、単に蒸気側からの蒸気量と凝縮相からの蒸気量の差引により正味の凝縮量を定めている。すなわち、Fig. 2に示した蒸気側からの分子と凝縮相からの分子の衝突は考慮されていない。従って、(1) 式を厳密に満たしていない。系の代表寸法に比べ、分子の平均自由行程が大きい(真空度が高い)場合、すなわちクヌッセン数が大きい時には分子同士の衝突の頻度は極めて低くなるのでこの理論は妥当であると言える。しかし、我々が、工学的に問題とするのは、蒸気圧が高い系であり、従って分子の平均自由行

程が小さくクヌッセン数が0に近い場合である。勿論上述のSubbotinらやRohsenowらの実験も蒸気圧の高い場合である。従って分子の衝突は無視できない系である。この意味で、(5)式は近似式である。この点に関して、1970年のパリの国際伝熱会議においてRohsenowらの論文<sup>9)</sup>に対しLabuntsovは興味のある討論を行っている<sup>12)</sup>。彼は、金属の凝縮特性を明らかにするためには(5)式ではなく(1)式に基づいて得られた彼らの式、(6)式、と実験値が比較されるべきであると主張している。

$$\phi_n = \frac{2\sigma}{2 - 0.798\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{P_v - P_s}{\sqrt{RT_v}} \quad (6)$$

SubbotinらやRohsenowらは彼らの実験値を(5)式に代入して液体金属では $\sigma$ の値はほぼ1であると結論している。しかし、同じ実験値を用いて(6)式により $\sigma$ を求めてみると $\sigma > 1$ となる。先に述べた定義により $\sigma$ が1を越えることは凝縮相に到達した分子よりも多くの分子が凝縮することを意味し、物理的にはあり得ないことである。この点について、Labuntsovは、Schrageの理論の問題に加えて(6)式で $\sigma > 1$ を与える実験は精度上の問題があり再検討されるべきだと述べている。

筆者らは実験によりこの問題を検討することを計画した。その結果上述の問題を本質的に解明するためには、次の4つの項目の測定精度が保障されなければならないという結論に達した。

- 1 凝縮液面温度および凝縮熱流束の測定精度
- 2 蒸気圧力の測定精度
- 3 不凝縮ガスの影響の除去
- 4 解析の系との幾何学上の対応性

従来の実験的研究において、上記の4項目総てについて客観的評価が可能な記述を行っている論文は存在しない。

これらの問題を解決して得られた著者らの実験値<sup>13)</sup>と、強い(非平衡度の大きい)凝縮までを含んだLabuntsovとKryukovの解析結果<sup>14)</sup>(平衡に近い $\phi_n \approx 0$ の領域では(6)式と同一である)との比較をFig. 3に示した。 $\xi$ は次式で定義される係数である。

$$\phi_n = \xi \frac{P_v - P_s}{\sqrt{RT_v}} \quad (7)$$

なお、Fig. 3の右縦軸には $\xi$ のスケールに対応させて(5)式の $\sigma$ を $\sigma_s$ として示した。LabuntsovとKryukovの解析は $\sigma = 1$ として得られており筆者らの実験値と良い一致を示している。(5)式と(6)式の相違を明らかにするため話を $\phi_n \approx 0$ の領域に限定する。 $\sigma = 1$ とすれば、Schrageの(5)式では $\xi = 0.8$ (Fig. 3の $\sigma_s = 1$ に対応する値)、Labuntsovの(6)式では $\xi = 0.67$ (Fig. 3の破線の値)となる。実験値は外挿値として $\phi_n \approx 0$ で約0.67

を示している。この相違はどこから生じているであろうか？(7)式で明らかなように $\xi$ はコンダクタンスに相当する係数と見てよい。凝縮相から放出された分子と蒸気側から凝縮相側へ接近してくる分子が衝突を繰り返しながら凝縮が行われている系は、衝突がない系に比べ、系の巨視的な抵抗が大きくなる。従って、 $\xi = 0.8$ と $0.67$ の $1.19$ 倍の相違は分子衝突の有無によって生じていると言える。Labuntsovらの解析は原理的に(1)式に基づいており、分子の衝突を考慮した解析となっている。従って、筆者らの実験は分子の衝突の効果を確認できたことになる。

なお、Fig. 3にはSubbotinら<sup>5)</sup>の平衡に近い場合として得た実験値も併記した。彼らの実験は必ずしも平衡に近いとは言えない( $\phi_m \approx 0$ と言えない領域にある)が、ほぼ $\xi = 0.8$ ( $\sigma_s = 1$ )を与えている。同じ $\phi_m$ で見れば、筆者らの値との差は僅かである。彼らの値から $\phi_m \approx 0$ の値を推定する場合、 $\xi$ の非平衡度(凝縮量の変化)による依存性を意識しなければ、 $\xi \approx 0.8$ を見積ることになり、本稿の結論に到達しない。当時彼らは非平衡度による依存性を意識していなかったと想像される。

金属凝縮に関する研究のわが国最初のものとして、森ら<sup>15)</sup>による報告が知られている。しかし、この研究は、筆者らのものと目的が違い、まとめの方法も異なるため比較の対象とはしなかった。金属の場合ほど顕著ではないが、凝縮中の気液界面における非平衡熱抵抗は、通常熱媒体の場合にも現れる。田中ら<sup>16)</sup>は、最近、低圧の水蒸気における凝縮係数を測定して、1よりはるかに小さい値を報告している。カリウムと水とで凝縮係数がどれ程異なるかの検討は、分子構造の違いに踏み込んで行わなければならない。小竹らのグループ<sup>17)</sup>による凝縮初

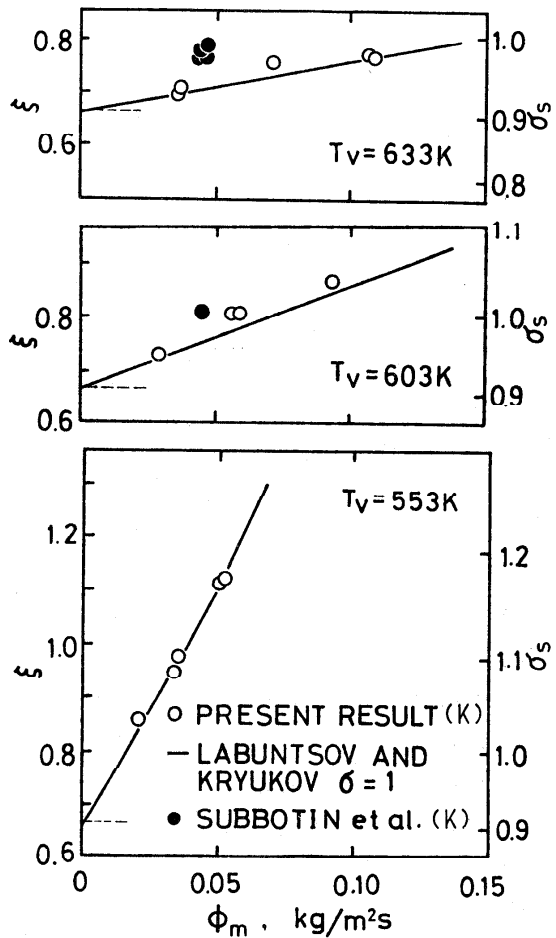


Fig. 3 筆者らの実験値と従来の結果との比較



期過程におけるクラスター生成に関する一連の研究は、そのような研究へのアプローチであり、真の意味でのミクロ的伝熱学といえる。

#### 4. あ と が き

筆者らのカリウム凝縮の研究の発端は、文部省科学研究費補助金エネルギー特別研究に負うところが大きい。昭和51年、熱工学と化学の大先輩の先生方を中心として、特定研究「エネルギーの有効利用に関する熱工学および化学的研究」\*を申請する気運が高まり、幸運なことに筆者の一人も分担者としてのお誘いを戴いた。その分担課題として取り上げたのが、カリウムの凝縮実験であった。筆者らの研究室では、当時すでにナトリウムの強制対流の実験を推進していたので、アルカリ金属の取扱の経験はあったが、しかもなお新しく開発せねばならぬ技術も多く、結局この科研費の期間内（5年間）では、十分なデータを得ることができなかった。しかし、貴重な発端を与えて戴き、またその後も折りに触れてご討論やご指導を賜ったエネルギー特別研究、「高温エネルギー利用の技術的限界の拡張」研究代表者甲藤好郎先生をはじめ、この特別研究にご関係された先生方に衷心より感謝申し上げます。

また、この研究の推進にあたり、東京大学棚沢一郎教授には、いろいろご討論を戴いた。加えて、類似の研究を進めていたロンドン大学クィーンメリー校J. Rose教授\*\*へのご紹介を戴いた。両教授より賜った貴重なご示唆に感謝申し上げます。

#### 文 献

- (1) 森、伝熱研究、26-102, (1987), 33.
- (2) 土方、日本機械学会誌、90-818, (1987), 118.
- (3) 小竹、日本機械学会誌、90-824, (1987), 68.
- (4) 棚沢、日本機械学会誌、90-824, (1987), 72.
- (5) Subbotin, V. I., ほか3名, Teplofiz. Vys. Temp., 2-4, (1964), 616.
- (6) Sukhatme, S. P. and Rohsenow, W. M., J. Heat Transfer, 88-1, (1966), 19.
- (7) Bakulin, N. V., ほか3名, Teplofiz. Vys. Temp., 5-5, (1967), 930.
- (8) Ivanovskii, M. N., ほか2名, Atomn. Energ., 24-2, (1968), 146.
- (9) Wilcox, S. T. and Rohsenow, W. M., J. Heat Transfer, 92-3, (1970), 359.

\* この計画は、昭和51年度には準特定研究として認められ、その後特定研究、エネルギー特別研究へと続いた。

\*\* 内容の関係で本稿では彼らの研究には触れていない。興味のある方は文献13を参照のこと。

- (10) Ivanovskii, M. N., ほか2名, *The Physical Principles of Heat Pipes*, (1982), 148, Clarendon Press.
- (11) Schrage, R. W., *A Theoretical Study of Interphase Mass Transfer*, (1953), 32, Columbia Univ. Press.
- (12) Grigull, V. and Hahne, E. ed., *Heat Transfer*, 1970, 10, (1971), 257, Elsevier.
- (13) 石黒・杉山、日本機械学会第948回講演会、昭和62年11月20日、東京。  
あるいはIshiguro, R. and Sugiyama, K., *Heat Transfer* 1986, 4, (1986), 1635, Hemisphere Pub. Corp.
- (14) Labuntsov, D. A. and Kryukov, A. P., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22-7, (1979), 989.
- (15) 森・ほか3名、日本機械学会論文集, 39-320, (1973), 1296.
- (16) 幡宮・田中、日本機械学会論文集, 52-477, (1986), 2214.
- (17) 例えば、Inoue, T. ほか3名, Oguchi, H. ed., *Rarefied Gas Dynamics*, 2, (1984), 767, Univ. of Tokyo Press.

## 乱流伝熱の数値解析

鈴木 健二郎 (京都大学)

### 1. 緒言

数値解析が、物質の流動機構や熱の移動機構の把握に利用しうる有力な手段の一つである事については、おそらく多くの賛同が得られるであろう。しかし、それが万能的手段であるか、それとも補助的手段でしかないかについては、応用対象が何かによって意見が分かれる所ではないかと思う。以下に乱流伝熱の数値解析について、私見を述べる事にする。

### 2. 乱流および乱流熱伝達

乱流および乱流伝熱の数値解析について述べるまえに、準備として乱流現象の特性につき述べておく。

乱流運動は、次のNavier-Stokes式に従うものと考えられている。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_m} (\rho U_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_m} (\rho U_m U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{im}}{\partial x_m} + F_i \quad (2)$$

Navier-Stokes式から導かれるPoisson の式は非圧縮性流体に対しては

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x_k \partial x_k} = -\rho \frac{\partial U_m}{\partial x_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_m} \quad (3)$$

である。

乱流は、高いレイノルズ数のもとで実現される、慣性力が支配的な流れである。流速を上げると境界層が薄くなることから推定できるように、レイノルズ数が高くなると、粘性力の作用はより狭い範囲に限られることになる。いま、流路の中にその間の距離が粘性力の作用範囲を越えるような2点をとるものとする(図1参照のこと)。このとき、ある瞬間に各々の点にある流体粒子の相対運動は、慣性力のみ作用下にあることになる。完全に慣性力支配の流れである完全流体

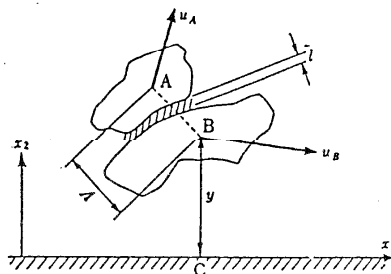


図1 流体塊の相対運動

の流れを例にとると理解できるように、慣性力は速度が不連続になる事を妨げない。したがって、それぞれの点を通過する流体粒子は、相互に別の方向に、異なった速度で運動しても不合理ではない。レイノルズ数が十分大きくて、流路幅内にそのような2点の対を多数取ることができる場合には、各断面内には極めて不規則な速度分布が実現される。同様の理由から、流れ方向座標に沿う速度分布も不規則となる。このようなわけで、乱流流路内には速度の大きさや運動方向が異なる、多数の流体塊が存在することになる。

Poisson の式を積分すると、各位置の圧力は形式的に次のように定式化出来る。

$$P = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \left( \rho \frac{\partial U_m}{\partial x_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_m} \right) \frac{dV}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|} \quad (4)$$

ある位置  $\mathbf{x}$  における圧力  $P(\mathbf{x})$  は、任意の位  $\mathbf{x}'$  に存在する速度場の影響を受ける。このため、一点における乱流運動は Navier-Stokes 式中の圧力勾配を通じて、周りに存在する多数の流体塊それぞれの各瞬間における運動のあり方に依存して定まる。

ところで、実在流体では粘性の影響を無視する事は出来ない。いま多数の流体塊の中から、隣接する二つの流体塊を取り出して

考えると、その中間には粘性力が支配的な層が存在していて、そこでは速度が連続的に変化しているので、二つの流体塊が不連続な速度で滑り合う訳ではない。粘性力が支配的なこの層は薄く、その内部に存在している速度勾配は大きい。したがって大きな渦度が集中している。実際の乱流中には多数の流体塊が存在しているから、流域内には多数の、渦度が集中した領域が斑点状に存在している (図2参照)。

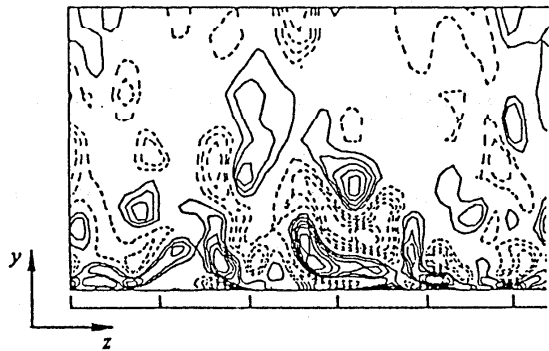


図2 渦度  $\omega_x$  の等高線 (11)

この渦度の集中した領域はそれぞれ、その周囲に慣性力の作用による誘起速度場を形成する。乱流中の各点の速度は、その周囲に存在する渦度集中領域それぞれが、その点に作る誘起速度の重畳した結果としても定まっている。この原因によって位置  $\mathbf{x}$  に誘起される速度ベクトル  $\mathbf{u}(\mathbf{x})$  は、任意の位置  $\mathbf{x}'$  の渦度ベクトルを  $\boldsymbol{\omega}'(\mathbf{x}')$  とすると、Biot-Savartの法則によって、

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = - \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{x}') \times \boldsymbol{\omega}'}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^3} dV \quad (5)$$

と求められる。位置  $\mathbf{x}$  が互いに大きく相違する2点では、それぞれの渦度集中領域からの距離  $(\mathbf{x}-\mathbf{x}')$  が異なるので、誘起される速度にも著しい相違が生じる。このため、流路内には前記のような速度の大きさと運動方向が異なる多数の流体塊が発生する事になる。

すでに述べたように、渦度の集中領域は粘性力の支配的な薄い層内に限られているから、渦度の空間相関は距離の増大に対して速やかにゼロに近づく。したがって、渦度の1点2次相関  $\overline{\omega_p \omega_p}$  のスペクトルは大きな波数（小さな寸法）領域に集中している。これに対し、慣性力はもっと大きな範囲に及ぶから、速度の空間相関は比較的大きな距離において始めてゼロに近付く。したがって、乱れ運動エネルギーのエネルギースペクトルは、渦度が集中している波数より小さな波数（大きな寸法）域に集中している（図3参照）。

渦度ベクトルの  $\mathbf{x}_p$  軸方向の成分  $\omega_p$  を支配する方程式は、非圧縮性流体中では次のように書ける。

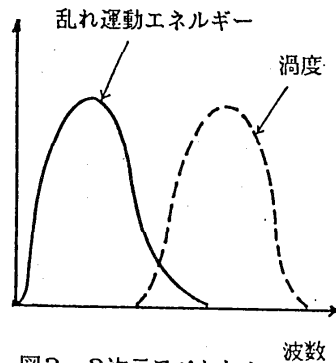


図3 3次元スペクトル

$$\rho \frac{\partial \omega_p}{\partial t} + \rho U_p \frac{\partial \omega_p}{\partial x_p} = \rho \omega_p S_{pq} + \mu \frac{\partial^2 \omega_p}{\partial x_p \partial x_p} \quad (6)$$

ただし、 $S_{pq}$  は局所の変形速度であって、

$$S_{pq} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_p}{\partial x_q} + \frac{\partial U_q}{\partial x_p} \right) \quad (7)$$

と定義される。渦度は、粘性の影響（式（6）の右辺第2項）によって消失するが、 $S_{pq}$  を含む生成項（右辺第1項）によって補給され、 $\overline{\omega_p \omega_p}$  の値は定常値を保っている。 $S_{pq}$  を含む項は、主応力の方向にあっては渦の伸張による渦度成分の増大率を、またその他の方向ではせん断変形による渦度ベクトルの方向変化に基づく、各軸方向成分間の渦度の再配分をも表している。局所の変形速度  $S_{pq}$  の大きさは、平均速度場及び運動エネルギーが集中している比較的大きなスケールの変動速度場と関連して定まっている。

以上のことをまとめると、次のように言える。乱れの運動エネルギーは大きな寸法の流体塊に集中している。そのような流体塊の運動は、流路内に現れる他の多数の流体塊の運動によって影響されると同時に、小さな寸法の渦集中領域からの影響も受ける。他方、かかる渦集中領域内の渦度は慣性力が支配的な大きな寸法の流体塊との相互干渉の結果として定まっている。したがって、大きな寸法の流体塊と小さな寸法の渦集中領域とは、互いにもちつもたれつの関係にある。したがって、乱流現象を忠実にシミュレートするためには、大きな流体塊の挙動と

同時に小さな渦の挙動をも正確に捉え得る計算が必要になる。

### 3. 数値解析の目的および乱流の組織構造

乱流の数値解析には、大別して二つの目的がある。その一つは、物体に働く抗力や、物体表面における熱伝達率等の実際応用上重要な量を計算する事である。それらの量の多くは、平均速度や平均温度の空間分布のみに依存しているから、この目的で行う計算では乱流を特徴づけている、時々刻々の諸量の空間分布の変化を計算する事は必ずしも必要ではない。いっぽう、数値解析のもう一つの目的は、乱流現象の基礎研究の一端として、不規則な3次元非定常流動現象を計算機を用いてシミュレートすることである。かかる目的を達成するための数値解析では、乱流の本質に関連する組織構造のシミュレーションが重要となる。そこで、乱流の組織構造について付言しておく。

一見不規則に見える諸量の時間変化の中に全く同一ではないが、しかし相互に類似した変化パターンが繰返されることが知られており、かかる変化に関連する乱流運動を乱れの組織構造と呼んでいる。乱れの組織構造は、乱れの生成、運動量や熱の乱流輸送機構など、乱流の本質と深いかわりがあるとされている。このため、諸量の各時刻における空間分布やその時間変化を観察することによって、この現象を解明しようとする研究が多数行われている。

乱流の組織構造には、固体壁面近傍で特に顕著に認められるバースティング現象と、自由せん断層および境界層の主流端近傍で認められる間けつ構造（大規模渦構造）とがある。

バースティング現象は間けつ的に生じるスィープ（高速流体の壁面への接近運動）とエジェクション（低速流体の壁面からの離脱運動）によって特徴づけられる現象であり、壁乱流における乱れ運動エネルギー生成の主要な機構であるとともに、壁近傍における運動量や熱の主たる乱流輸送機構であるとされている。たとえば、壁面からの吹き出し<sup>(4)-(6)</sup>による摩擦係数やヌセルト数の低下現象、境界層中に挿入した物体によるかく乱によって、壁面摩擦係数が低下する一方で熱伝達率が増大する現象<sup>(7)</sup>なども、バースティング現象の性質の変化として捉えることが出来る<sup>(8)</sup>。

間けつ構造は、乱流部と非乱流部の境界領域に生じる乱流部の凹凸構造のことである。ある位置に到達する乱流突出部を条件付き抽出によって調べると、突出部の寸法や到達時間間隔などは時々刻々に変化するものの、それらは全く不規則ではなくて、それぞれに対して流れ形式、せん断層幅、流速などによって規定される統計的平均値が存在する。乱流突出部はある大きさの循環（渦度の総和）を持っており、その結果乱流突出部の回りに慣性力支配の流れを引き起こし、この流れによって、乱流突出部の間（凹部）から乱流域内に非乱流部流体が巻き込まれる。この巻き込みは、噴流拡散火炎における外部からの酸素の供給や、固体面近傍への高運動量流体の供給、ならびに加熱面に沿う温度境界層への冷たい主流流体の供給、などを担う主要な機構であるから、間けつ構造はバースティング現象に劣らず重要なものである。

#### 4. 乱流の計算法

乱流現象の計算方法には、いくつかの方法がある。

前述のように、乱流運動は流体の質量保存則と運動量保存則（連続の式（1）とナビエ・ストークス式（2））に従っている。乱流のひとつの計算方法は、直接数値シミュレーション（DNS）と呼ばれる方法である。この方法は、式（1）、（2）を計算機を用いて直接解く方法であるので、結果として諸量の空間分布の時々刻々の変化が計算できると期待されるものである。

いっぽう、式（1）、（2）に統計的平均操作を施すと

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_m} (\bar{p} \bar{U}_m + \overline{\tilde{p} u_m}) = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\bar{p} \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_m} (\bar{p} \bar{U}_m \bar{U}_i) \\ &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{im}}{\partial x_m} - \bar{p} \bar{F}_i - \frac{\partial}{\partial x_m} (\bar{p} \overline{u_i u_m}) \\ & \quad - \frac{\partial}{\partial t} (\overline{\tilde{p} u_i}) - \frac{\partial}{\partial x_m} (\overline{\tilde{p} u_m u_i} + \overline{\tilde{p} u_i u_m} + \overline{\tilde{p} u_i u_m}) + \overline{\tilde{p} f_i} \quad (9) \end{aligned}$$

となる。ここで $\rho$ は、密度変動を、また小文字  $u_m, u_i, f_i$  等はそれぞれの量の変動成分を表す。工学的に重要な量（例えば圧力損失、ヌセルト数）の多くは、平均速度 $U_i$ 及び平均温度 $T$ の空間分布に依存する。したがって式（8）、（9）を解く方法も工学的意義を持つひとつの乱流の計算法である。式（8）、（9）を解くには、変動量の相関量（例えばレイノルズ応力）の値を別途求めるために、乱れモデルを必要とする。以下この方法を乱れモデルを用いる計算法と呼ぶことにする。

上記の二つの乱流計算法の中間的な性格を持つ計算法として大渦シミュレーション（LES）がある。この方法では波数空間を二分し、ある波数よりも小さな波数成分と関連する流体運動（大規模流体運動）について下記の方程式を数値計算する。

$$\frac{\partial \langle \bar{U}_m \rangle}{\partial x_m} = 0 \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \langle \bar{U}_i \rangle) + \frac{\partial}{\partial x_m} (\rho \langle \bar{U}_m \rangle \langle \bar{U}_i \rangle) &= -\frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial \langle \tau_{im} \rangle}{\partial x_m} + \rho \langle F_i \rangle - \frac{\partial L_{im}}{\partial x_m} \\ & - \frac{\partial}{\partial x_m} \left[ \rho \left( \langle u_i' u_m' \rangle - \frac{1}{3} \delta_{im} \langle u_k' u_k' \rangle + \langle \bar{U}_i \rangle u_m'^2 + \langle u_i' \bar{U}_m \rangle \right) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、流体は非圧縮 ( $\rho$ 一定) としてあり、 $u_i'$ ,  $u_m'$  は計算では直接注目しない高波数 (小規模) 流体運動の速度成分、 $\langle \rangle$  は注目する各量の全変動成分から大規模流体運動と関連する変動量を抽出するための空間平均操作を表し、ある量  $A$  についてみると

$$\langle A(\mathbf{x}) \rangle = \int G(\mathbf{x}-\mathbf{x}') A(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (12)$$

である。ただし、 $G(\mathbf{x}-\mathbf{x}')$  はフィルター関数であって、格子間隔  $\Delta$  に対して  $|\mathbf{x}-\mathbf{x}'| \gg \Delta$  なる領域では  $G \rightarrow 0$  となる特性を持つ関数である。 $l_m$  はレオナード応力と呼ばれ、平均操作に伴う補正項である。 $u_i'$ ,  $u_m'$ ,  $u_k'$  などを含む項は、高波数流体運動が大規模流体運動に及ぼす影響を表すが、 $u_i'$  などは計算ではその値が求まらない量であるので、式 (6) は閉じた形をしていない。従って、それらを  $\Delta$  および計算量  $\langle U_i \rangle$ ,  $\langle U_m \rangle$  によって記述するためのモデルを必要とする。大規模流体運動に限って言えば、時々刻々の変化を計算するので、直接数値シミュレーションと類似しているが、モデルを必要とする点で乱れモデルを用いる計算とむしろ類似している。

以下では、それぞれの乱流計算法について筆者の現状展望を述べる。

#### 4.1 直接数値シミュレーション (DNS)

すでに述べたように、この方法ではナビエ・ストークス式を計算機を用いて数値積分する。原理的には、時間依存項を含むエネルギー式をこれに加えて数値積分すると乱流熱移動現象の直接シミュレーションが可能であり、また反応項を含む各化学種の時間依存質量保存式を連立して数値積分すれば、乱流燃焼現象の直接シミュレーションが可能である。DNS では、現象を支配する基礎式を直接積分する。したがって、現象に対する仮定やモデルを一切用いていないから、計算法が適切であれば、得られる結果は自然現象の観察結果と同等に取り扱って良い筈である。むしろ現在の測定技術には種々の限界がある (たとえば化学種成分濃度の時間変化や変動圧力については精度の良い測定はできないし、また流速や温度についても数点程度の同時測定は可能であるとしても、乱れの3次元構造の解明に十分と考えられる多点計測は難しい) ので、実験的に入手不可能な量について定量的情報を提供する可能性がある。DNS は、その実現に大きな期待がかけられている。

ところで、数値計算では流れ場の全域を取り扱うことはできないので流れ場内の一部の領域に限って計算を行う。また、計算領域内に格子点を配置し、それぞれの格子点における諸量の値を時々刻々求めるわけであるから、計算結果には格子間隔より細い空間分解能は期待できない。前述のように、乱流中にある渦は大小さまざまであって、最大渦の大きさは流れ領域の寸法 (境界層厚さ、チャネル高さ、噴流幅など) と同程度であるが、最小渦はそれよりはるかに小さく、 $\eta$  (Kolmogoroffの長さスケール) 程度である。意味のある直接シミュレーションを



行うためには、計算領域内で数個以上の最大渦の相互干渉を実現し、また最小渦の運動を正確に補足する必要がある。このためには、計算領域寸法は最大渦寸法の10倍程度とし、格子間隔は $\eta$ 以下にする必要がある。

いま、チャンネル流を直接数値シミュレーションしてバースティング構造につき検討を行った Kim-Moin<sup>(1)(2)</sup> の計算例について考えて見よう。彼等は、レイノルズ数  $Re=3,200$  の場合について計算をおこなっている。計算領域としてはチャンネルの全高 ( $H^+ = H \times u^+ / \nu = 180$ ,  $H$ : チャンネル高さ,  $u^+$ : 摩擦速度,  $\nu$ : 動粘性係数) をカバーしているが、流れ方向には長さ  $X^+ = 2,300$ , スパン方向に  $Z^+ = 1,150$  の領域を設けており、この領域内に総計約 400万個の格子点を配置している。この結果、格子間隔はほぼ  $\eta$  と同程度になっている。計算領域はやや小さいものの、空間分解能の点では、DNSの条件をほぼ満足している。したがって、DNSが現実的な乱流計算法の一つになりつつあることは事実である。しかし、それが近い将来において乱流計算法の主役となるとは必ずしも言えない。乱れの運動エネルギー  $k$  が集中している大きな渦の代表寸法を  $l_e$  とすると、 $l_e/\eta$  の値は流れのレイノルズ数が増大するとそれにほぼ比例的に大きくなる。(  $l_e/\eta \sim Re^{3/4}$  あるいは  $Re^{7/8}$  と推測される)。従って、 $Re=3,200$  のチャンネル流の計算では約  $10^8$  個の格子点が必要であり、 $Re=320,000$  のチャンネル流の計算では約  $10^{11}$  個の格子点が必要とされる。しかし、必要となる計算機容量や計算時間からして、現在ではもちろん近い将来においても、かかる多数の格子点を設けることはできない。ところで、運動量や熱の乱流輸送は大きな渦によっているから、小さな渦についての取り扱いが不正確になっても本質は損なわれない筈なので、粗い格子配置を用いても良いとする考え方が一部にある。しかし、筆者はこの考え方には賛同できない。たとえば乱流燃焼における化学反応は分子レベルの熱・物質輸送が支配的な小さな渦内で生じているので、粗い格子を使用したのでは実験現象の正確なシミュレーションはできない。また、粗い格子を用いると、小さな渦に集中している渦度の計算値が不正確になる。このとき、渦度集中領域の循環によって誘起される運動速度、したがって大きな流体塊の運動も正確には計算できないことになる。同じことを、別の角度から述べると、乱れの運動エネルギー  $k$  の粘性消散率  $\epsilon$  が小さく計算される。 $\epsilon$  の値は、波数空間でのエネルギー伝達率と等しい筈であるから、その値が小さく計算されることは、エネルギー伝達率を規制している大きな渦の活発度を低く見積る計算になっていることを意味する。すなわち、実際よりは低いレイノルズ数の乱れを計算していることになる。したがって、DNS を定性的な目的やレイノルズ数に強く依存しない量の計算に用いるのであれば別だが、粗い格子を用いたのでは実際現象をそのままに再現しようとする DNS の本来の主旨は達成できない。この意味で、直接数値シミュレーションが近い将来に乱流計算法の主流になるとは言えないように思う。

## 4. 2 大渦シミュレーション (LES)

大渦シミュレーション (LES) では、大規模な流体運動のみについて、その時々刻々の変化を計算しようとするものであるから、直接数値シミュレーションで必要とされる格子間隔よりはかなり大きな格子間隔を使用することができる。したがって、現世代の計算機を用いても実用範囲のレイノルズ数の流れを取り扱うことが可能である。この意味で、LES は現実的な乱流計算法のひとつであると考えられており、実際の計算例がいくつか報告されている。

LES で大規模流体運動のみに注目する理由は、運動量や熱の乱流輸送が主として大きな渦、大規模な流体運動と関連して生じるからである。したがって、大規模な流体運動、それによって生じる熱輸送などが正確に計算できなければシミュレーションとしての意味はなくなる。それが正確に計算できるかどうかは、使用する基礎式が実際現象を忠実にモデル化しているかどうかにかかっている。すなわち式 (11) で言えば  $U_i'$ ,  $U_m'$ ,  $U_k'$  などを含む項のモデル化が重要である。同様の項は、エネルギー式にも、また各化学種成分濃度の支配方程式にも現れるから、それらのモデル化も重要な課題となる。これらの項は、波数空間内における大きな渦と小さな渦との相互干渉と関連する項であり、前節で述べたこととも関連して、大規模流体運動へのその影響が小さいとは言えない<sup>(3)</sup>。

波数空間で生じている現象については、特殊な等方性乱れでは多少の知見はあるが、一般のせん断乱流にたいしては確立された知見が乏しく、モデル化の指針は明確でない。したがって、LES を一般的な乱流計算法として確立して行くためには、まず乱流についての基礎研究を今一層進める必要がある。

## 4. 3 乱れモデルを用いる計算法

この計算法は、DNS や LES のように諸量の空間分布の時々刻々の変化が計算できる訳ではないので、現象の解明に役立つものではない。したがって、乱れモデルを用いる計算法を原理的な面で評価すれば、他の方法に比して優位な点は全くない。また、この計算法は、レイノルズ応力、乱流熱流束、物質輸送束を計算するためのモデルを必要とし、計算結果はモデルの予測性能に依存する。乱れモデルについては多数の提案があるが、一般的に推奨できるモデルは見出だされていない。しかしながら、この計算法には次に述べるように、DNS や LES に比べていくつかの利点がある。

[1] 必要とされる格子点が少ないので計算は便簡かつ低コストである。とくに、一方向に一回解き進めば結果が得られる境界層型の流れ、一断面内の繰り返し計算だけで済む充分発達した流れ、などではこの計算法のコスト上の優位は顕著である。

[2] 統計的平均値を取り扱うので、これまでに得られている知見に基づいて境界条件を設定するのが比較的容易である。DNS や LES で取り扱う不規則に時間変化する量に対しては、一般的に合理性のある境界条件の設定法は開発されていない。たとえば、先の Moin-Kim の計算

では、上流側境界と下流側境界とで周期性を仮定する境界条件が使用されている。この方法は、必ずしも適切なものではないが、その議論は別にしても、この方法では発達過程の流れを取り扱うことができない。これに対して、乱れモデルを用いる方法では、十分発達した流れに対する条件は明確であり、また発達過程の流れに対しても下流側境界条件は工夫できる。<sup>(9)</sup>

[3] 平均流の方向はある程度の推測がつくので、流れの方向に格子点列を並べ易く、このことによって数値粘性の影響を減じることができる。DNS や LES では、流れの方向が時々刻々変化するので、全時間帯にわたって数値粘性を減じることの困難さが大きい。

[4] 統計的平均量については実験的に測定できるものが多く、計算結果が妥当かどうかの吟味が、したがって乱れモデルが妥当かどうかの判定がし易い。これに対して、DNS や LES で得られる諸量の時々刻々の変化については実験値と対比する手段がない。このため、DNS や LES における数値上の不安定や過度の安定化、LES で使用するモデルの妥当性について、間接的な判定しかできない。

以上のように、いくつかの利点があると同時に、応用面から見ると、平均速度や平均温度の空間分布に依存する工学的に重要な量が計算できるので、この方法は実際応用上重要であり、今後もその重要性は変わらないと考える。したがって、乱れモデルの改良をはかる研究は、他の計算法について検討することと同様に意義がある。現在までの筆者の限られた経験<sup>(10)</sup> からすると、定量的には多少の実現象との差異を認めなければならないが、定性的な目的に限れば、比較的簡単な  $k-\varepsilon^2$  方程式モデルを用いても、かなり複雑な伝熱現象が取り扱えると考えられる。

## 5. まとめ

以上、乱流の計算法について筆者の私見を述べた。乱流現象は極めて複雑であるため、その本質は十分には解明出来ていない。したがって今後も多くの研究が必要である。直接数値シミュレーションは、原理的には乱流機構の把握に有用な1手段となりうると期待されるが、実際は計算機容量や計算時間の制約があって、現世代ならびに次世代の計算機では実用的なレイノルズ数範囲の乱流を取り扱う事は容易ではないと考えられる。したがって、乱流現象の解明のためには実験的研究が重要である。大渦シミュレーションは、現世代の計算機を用いて実行できる計算法であるが、小寸法渦と大寸法渦の相互干渉に関する確固としたモデルは無いので、その妥当性について検討すべき点が少なくない。この検討のためには、乱流に対する詳細な実験結果の集積がまず必要である。実際応用上重要な抗力係数や熱伝達率の計算には、乱れモデルを用いる計算法がむしろ適している。一般性のある乱れモデルは、開発できていないが比較的簡単な  $k-\varepsilon^2$  方程式モデルを用いても、かなり複雑な伝熱現象が取り扱える。ただし、その結果に定量的な正確さは期待できないので、実験を併用しか使用が望ましい。また、乱れモデルの改良のためには、複雑な系での実験データの蓄積が望まれる。いずれにしても、実験的

研究の一層の進展が望まれる。

#### 文献

- (1) J. Kim, Proc. 5th Symp. on Turbulent Shear Flows, (1985), p.9.23.
- (2) J. Kim and P. Moin, J. Fluid Mech., 162, (1986), p.339.
- (3) J.P. Chollet, Proc. 4th Symp. on Turbulent Shear Flows, (1983) p.9.13.
- (4) M. Senda et al., Proc. 3rd Symp. on Turbulent Shear Flows, (1981), p.10.7.
- (5) M. Senda and K. Suzuki, Symp. on Turbulence, (Ed. G.K. Patterson and J.L. Zakin), (1983), (Proc. 7th Symp. on Turbulence), p.278.
- (6) O.B. Nyden and M.O. Ramnefors. Proc. 9th Symp. on Turbulence. (1984), p.4-1.
- (7) Y. Kawaguchi et al., Symp. on Turbulence (Ed. X.B. Reed et al) (Proc. 8th Symp. on Turbulence), p.26.
- (8) Y. Kawaguchi et al., Proc. 9th Symp. on Turbulence, (1984), 28-1.
- (9) K. Suzuki et al., Numerical Methods in Thermal Problems (Ed. R.W. Lewis et al.), (1981), p.1048.
- (10) 経験を列記すると、(1)円柱によりかく乱を受ける乱流境界層 [機論 46-408(1980), p.1447], (2)管内噴流の流動、伝熱、乱れ [Mem. Fac. Engng Kyoto Univ., 40-2(1978), p.41; 機論48-425(B), (1982), p.122; 機論49-443(B), (1983), p.1513; Proc. 4th Symp. on Turbulent Shear Flows, (1983), p.18.1], (3)オリフィス下流の円管内乱流熱伝達 [機論48-425(B), (1982), p.132], (4)吹き出しと吸い込みを伴う円管内乱流 [3rd Asian Congress on Fluid Dynamics, (1986)], (5)液体金属乱流熱伝達 [International Symp. Heat Transfer, (1985); 8th Int. Heat Transfer Conference, (1986)] (6)蒸発を伴う環状流熱伝達 [PCH Physico Chemical Hydrodynamics, 6-3, (1985), p.311], (7)大型燃焼炉の炉特性 [EV-1011, Delft University of Technology, (1977)], (8)熱分解を考慮した乱流燃焼 [機論52-476, (1986), p.1905] などである。
- (11) P. Moin and J. Kim, J. Fluid Mechanics, Vol.118(1982), p.341.

石炭ガス化複合発電に関する研究の現状と今後の課題

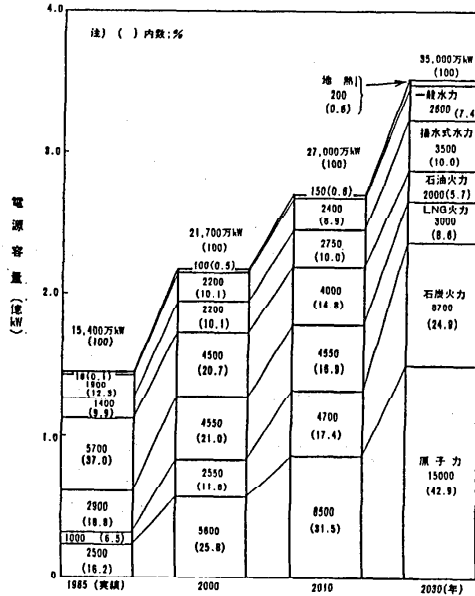
瀬 間 徹 (電力中央研究所)

1. 石炭の新利用技術開発 — 必要性と総合評価 —

1.1 必要性

2度にわたる石油ショックを契機に、石炭は長期的にみて安定供給が可能で、かつ経済的にも優れていることからクローズアップされ、電気事業においても、原子力を補完する有力な電源として石炭火力を位置付け、石炭利用の拡大に向けて、その技術開発が重要な課題となっている(図・1)。

当面の石炭利用技術として、微粉炭火力の拡大を図るため環境対策の一層の高度化や、COM、CWMなどの石炭流体化、また次世代の技術としては、石炭ガス化複合発電や熔融炭酸塩型燃料電池などの実用化を目指して、国・NEDO、および電気事業等において鋭意研究開発が進められている(表・1)。



図・1 我国電源構成の将来予測

表・1 電気事業における石炭利用拡大のための技術開発課題

当面の技術開発課題	
環境対策技術の高度化	硫黄酸化物対策 窒素酸化物対策 ばいじん対策
石炭灰の処理・処分技術	石炭灰の有効利用 土壌環境影響評価
石炭流体化	COM、CWM技術
低品位炭利用	流動床燃焼技術
次世代の技術開発課題	
微粉炭火力の高性能化	超々臨界圧
石炭ガス化技術	流動床石炭ガス化複合発電 噴流床石炭ガス化複合発電
燃料電池発電技術	熔融炭酸塩型燃料電池複合発電

\* : Coal Oil Mixture    \*\* : Coal Water Mixture

## 1.2 総合評価

石炭利用に伴う種々の新発電技術のうちで、将来電力供給用として有効な発電技術を評価し、研究開発の戦略をたてるために総合的な技術評価を行った。

この結果によれば、2000年ごろまでは在来型の微粉炭火力が経済的に優れているが、それ以降は石炭ガス化複合発電と熔融炭酸塩型燃料電池複合発電が経済的に優位になることが予測された。石炭ガス化複合発電は、①石炭供給源の分散化（電力の安定供給）、②高効率化（発電コストの低減）、③高度な環境保全性（ガス化によるクリーン化）、④負荷追従性の向上（ミドル火力対応）（表・2） — などの面で優れており、石炭利用発電技術の中核として2000年頃を目ざした開発導入（実用化）が期待されている。

### 表・2 石炭ガス化複合発電の優位性

- ① 石炭供給源の分散化(電力の安定供給)
- ② 高効率化（発電コストの低減）
- ③ 高度な環境保全性(ガス化によるクリーン化)
- ④ 負荷追従性の向上（ミドル火力）

当所では、国のエネルギー政策や電気事業のニーズを踏まえ、また、前述の総合評価の結果や内外の研究機関の研究状況などを総合勘案し、石炭利用拡大にかかわる研究課題の中でも将来を見通して環境性に優れ、しかも高効率で大容量の電気事業として最適な噴流床石炭ガス化複合発電の技術開発を最重点課題として位置づけ、研究の推進をはかっている。

## 2. 石炭ガス化複合発電の概要

### 2.1 発電システムの特徴

石炭ガス化複合発電のプラント構成図を図・2に示す。

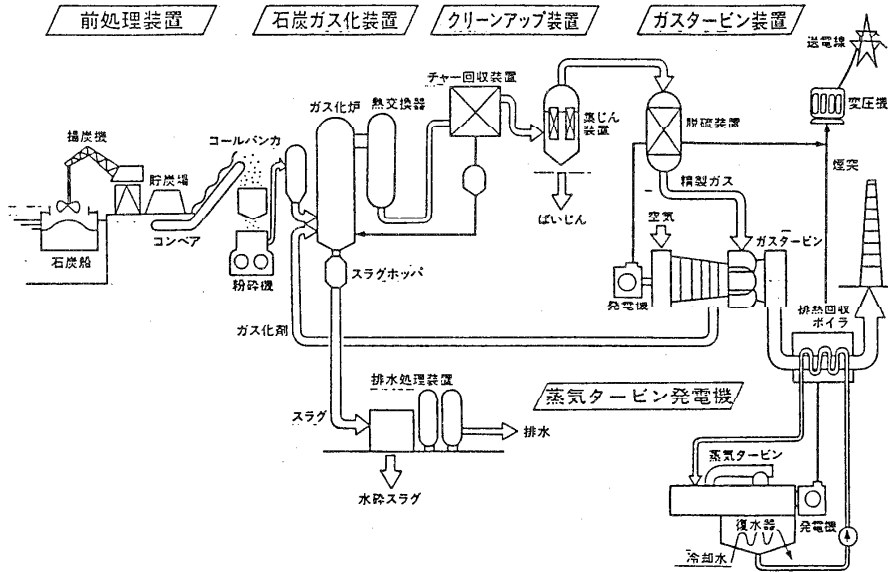


図-2 石炭ガス化複合発電プラント構成図

石炭とガス化剤（空気または酸素）をガス化炉に投入して石炭をガス化する。次にガス化炉で発生した粗成ガスをクリーンアップ装置で脱硫・集じんし、クリーンな石炭ガス化ガスにして、ガスタービン燃焼器に導き、燃焼させてガスタービンを駆動し、発電する。同時に、ガスタービンの排ガスを排熱回収ボイラに導き、そこで蒸気を発生させ、その蒸気で蒸気タービンを駆動し、発電する。

このように、石炭ガス化複合発電は、ガスタービンおよび蒸気タービンの2つの発電サイクルで構成されており、各々の単一サイクルでは到達できない高い熱効率を得ることができました。蒸気タービン復水器における放熱量も低減されるため、温排水量が減少するメリットがある（表・3）。

表・3 石炭ガス化複合発電の特長  
(微粉炭火力に比べて)

- ① 熱効率が約3～5%高い（1300℃級ガスタービンで、乾式クリーンアップの場合）
- ② SO<sub>x</sub>、ばいじんの排出量が石油火力並みに減少
- ③ 発生する灰はガラス状で処理が容易
- ④ 温排水量が約30%低減する
- ⑤ 幅広い炭種の石炭が利用できる
- ⑥ 経済性の点でも有利になる可能性がある





アメリカでは、テキサコ社の加圧1段噴流床式石炭ガス化炉を基にした1000T/D石炭ガス化複合発電プラントの開発をクールウォータープログラムとして進めている。これには、テキサコ、SCE、EPRI、GE、ベクテルと我が国の東京電力<sup>㈱</sup>、<sup>㈱</sup>東芝、石川島播磨重工業<sup>㈱</sup>および当所が参加し、1984年から5ヶ年計画で実証研究は順調に進められている。

### 2.3 プラントシステムの総合評価

国は、内外における石炭ガス化複合発電技術開発の機運の高まりから、フィージビリティスタディを計画し、当所はNEDOを通じて昭和58年からこれを受託し、3ヶ年かけて実施した。その目的は、国が進める200T/Dの噴流床方式石炭ガス化複合発電パイロットプラントの基本計画を立案するに当たり、各種の噴流床ガス化炉やクリーンアップ方式の組み合わせについて総合評価を行い、最適なプラントシステムを選定することにある。

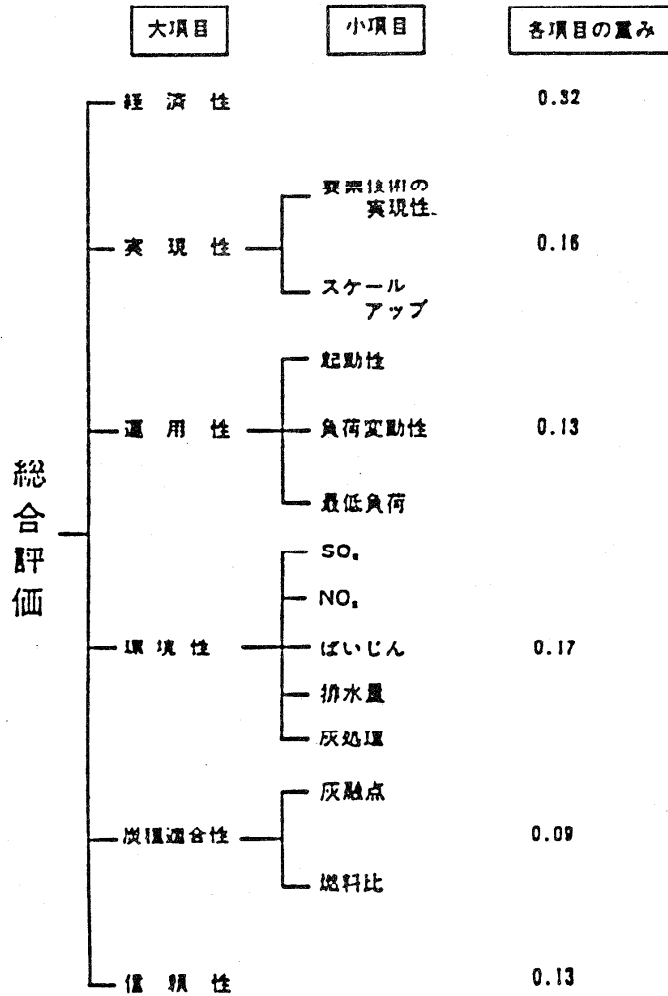
FSに当っては、2000MW級の実用プラントを想定して、炉型式、石炭供給方式、ガス化剤の組み合わせから、表・5に示すA～Dの4基本方式を選び、ガス精製方式として大々に乾式と湿式を組み合わせさせた8タイプのシステムについて総合評価を行った。

表・5 フィージビリティスタディにおいて総合評価の対象とした噴流床石炭ガス化炉の8タイプ

基本方式	A方式		B方式		C方式		D方式	
ガス化炉型式	加圧2室2段噴流床炉		加圧1室2段噴流床炉		テキサコ型噴流床炉		テキサコ型噴流床炉	
石炭供給方式	ドライフィード (空気搬送)		ドライフィード (窒素搬送)		スラリーフィード		スラリーフィード	
ガス化剤	空気		窒素		空気		窒素	
ガス精製方式	乾式	湿式	乾式	湿式	乾式	湿式	乾式	湿式
タイプ名	A	A'	B	B'	C	C'	D	D'

総合評価の結果(表・6)によれば、噴流床石炭ガス化複合発電に対する経済性向上への期待から、高い熱効率が得られ、発電コストも低いA・A'方式、すなわちドライフィード(空気搬送)、空気酸化加圧2室2段噴流床炉を用いたシステムが他の方式に比較して高い評価となった。

表・6 多目標評価法における評価項目



3. 噴流床石炭ガス化複合発電技術の開発—当所における研究成果

3.1 2室2段噴流床石炭ガス化技術

わが国の電気事業に適したガス化炉の要件として、①高効率化、②大容量化、③炭種適合性、④環境保全性、⑤負荷応答性などがあげられ、当所はこれらを念頭に、経済性のあるガス化炉の開発を目指して、三菱重工と共同研究を開始した。

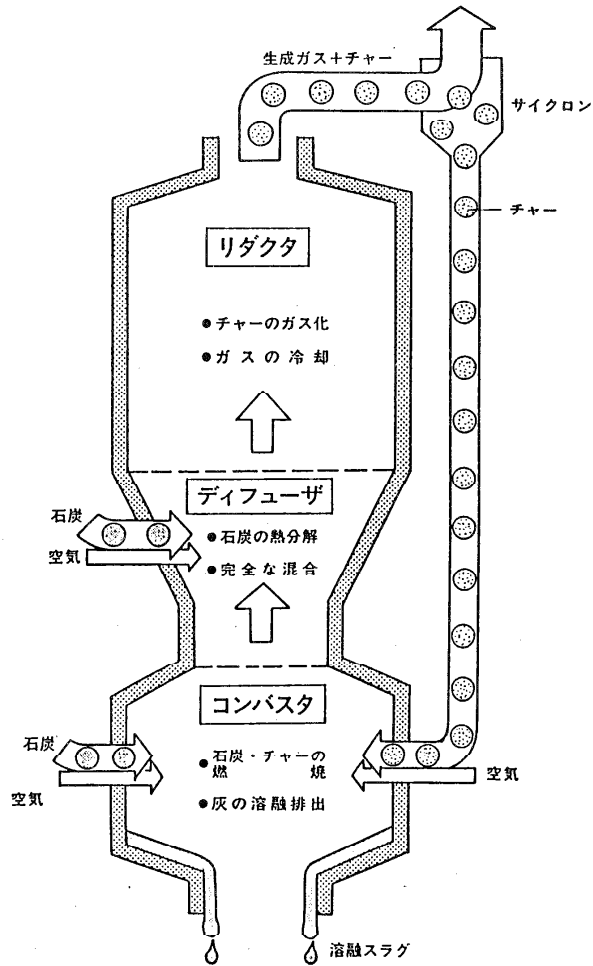
昭和58年に世界初の空気酸化加圧2室2段噴流床方式による2T/D石炭ガス化基礎実験装置を竣工させ、鋭意試験を継続中である。

3.1.1 2室2段噴流床石炭ガス化方式の原理

噴流床ガス化炉は、0.1mm以下に粉碎した微粉炭をバーナで炉内に噴射し、高温下でガス化するものである。図・3に示すように2室2段噴流床ガス化方式は、2段階のガス化プロセスに対応してガス化炉を上下2室に区分したもので、下室のコンバスタと上室のリダクタから構成される。コンバスタは、石炭とチャー（主成分は未燃炭素と灰分）を高温で燃焼しリダクタでガス化するための高温熱源を発生するとともに、石炭灰を熔融スラグとして排出する機能を有している。

リダクタでは、コンバスタからの高温ガス流に2段目の石炭が投

入混合され、まず石炭の熱分解が行われ、続いてチャーのガス化が進む。



図・3 2室2段噴流床石炭ガス化方式の原理

### 3.1.2 石炭ガス化基礎実験装置の概要

本装置は、原炭から微粉炭を製造（石炭前処理設備）、加圧したのち空気による気流搬送（微粉炭供給設備）、ガス化炉本体、生成ガス中に高濃度で含まれるチャーのリサイクル系（チャー供給設備）、スラグ灰の排出系、生成ガスの焼却（生成ガス処理設備）、除害設備などから構成されている（図・4）。

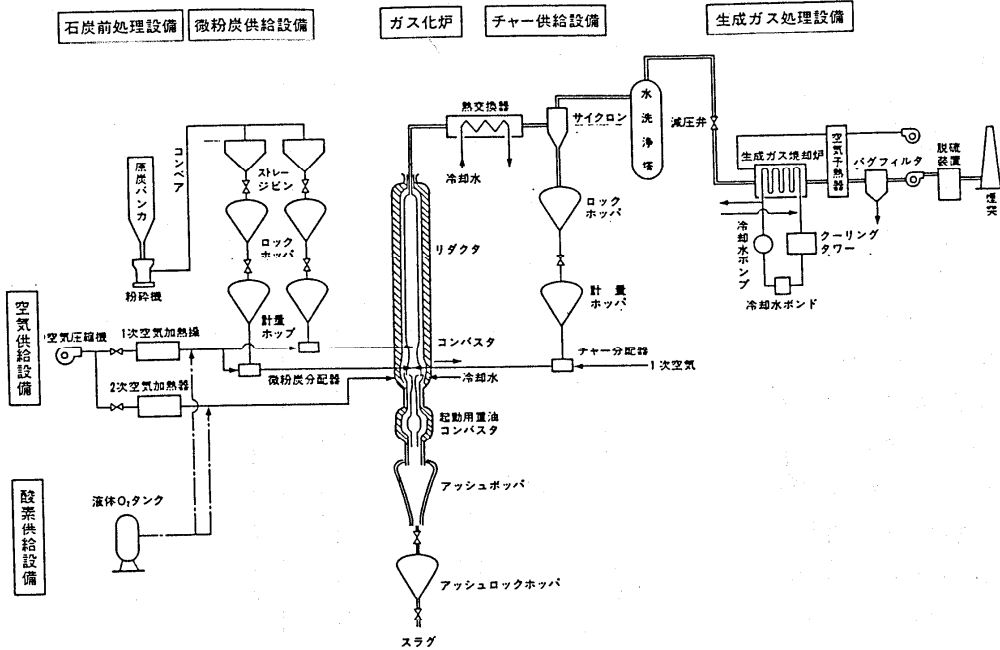


図-4 2T/D石炭ガス化基礎実験装置

### 3.1.3 主要研究成果

昭和62年3月末現在のガス化炉運転実績は次の通りである。

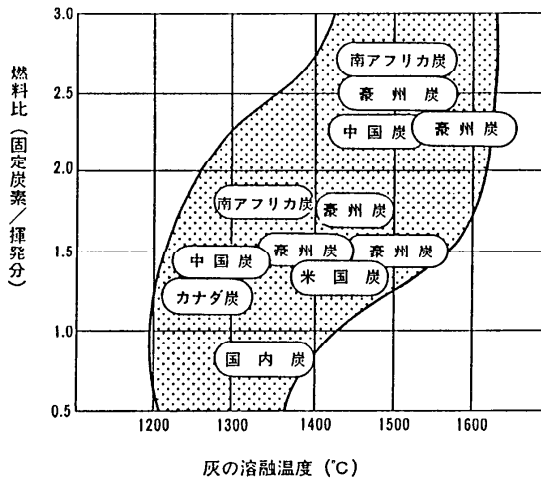
ガス化炉累積運転時間	1071.2時間
石炭ガス製造量	37万5600 m <sup>3</sup> N
供給炭種	12炭種

#### a) 炭種適合性

図・5に示すように、石炭中に含まれる炭素の比率や灰分の溶融温度が異なる12炭種についてガス化試験を行った。その結果、広い範囲の炭種について、石炭ガスが安定して得られることを確認した。

#### b) 生成ガス発熱量および組成

生成ガスの発熱量は 700~1000kcal/m<sup>3</sup>Nと低くガス中の不燃成分は60%以上で、燃えにくい低カロリーガスとなっている。



図・5 2T/D炉 試験炭の性状

c) スラグ溶融排出性

灰の溶融排出のかぎを握るコンバスタ底部のスラグタップに対して、当所が開発したファインセラミックス内張り方式を採用した結果、広い範囲の炭種について、円滑なスラグの溶融排出が可能である。

d) 環境保全性

ガス化炉から排出されるスラグは溶融固化したガラス質の粒状で未燃炭素をほとんど含まず通常の石炭火力の灰に比べて容積が半分以下となることなどから、環境保全性に優れ、埋立てや骨材としての利用など幅広い用途が考えられる。

以上の研究成果をふまえ、木ガス化方式は、昭和61年～67年度に計画されている国・NEDO・電気事業による200T/D噴流床石炭ガス化複合発電パイロットプラントの炉型式として採用されることが決定しており、パイロットプラントの設計に反映させるために、ひきつづき本ガス化炉を用いて要素支援研究を続行している。

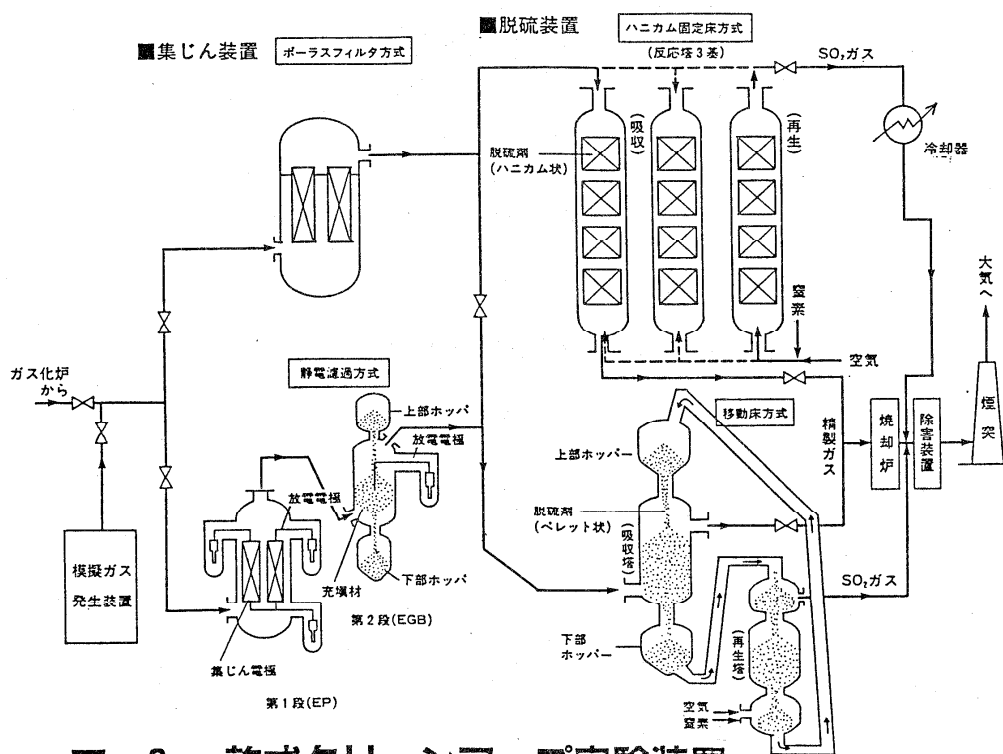
3.2 乾式クリーンアップ技術

石炭ガス化炉から生成する石炭ガス中に含まれる硫黄分とばいじんを除去し、ガスタービン燃料として使えるまでに精製するクリーンアップ技術には、湿式と乾式の2方式がある。

乾式は、ガス化炉からの生成ガスを高温（400～500℃）のままでクリーンアップするので、石炭ガスの顕熱損失が少なく、湿式を用いた発電プラントの熱効率41.5%に比べてさらに約2%の熱効率の向上が期待できる特徴がある。

### 3.2.1 乾式クリーンアップ基礎実験装置の概要

実験室規模での要素研究成果を踏まえ、当所は昭和60年11月に三菱重工業㈱と共同で、2T/Dガス化炉と同容量のガスを精製できる乾式クリーンアップ実験装置を建設し、実験を開始した。この装置は、脱硫・集じんのそれぞれ2方式の組み合わせについて実験できるようにになっている(図・6)。



図・6 乾式クリーンアップ実験装置

脱硫装置：

- ① ハニカム固定床方式 — 脱硫剤として酸化鉄を含有させたハチの巣（ハニカム）状のセラミック製担体（固定床）に生成ガスを接触させて脱硫する。
- ② 移動床方式 — 吸収塔内を降下移動する酸化鉄系ペレット（直径5mm程度）に生成ガスを逆流接触させる。

集じん装置：

- ① ポラスフィルタ方式 — セラミック製の円筒の壁に微細な孔を無数に作り、その孔（フィルター）をガスが通過してばいじんを除去する。
- ② 静電濾過集じん方式 — 粒子充填層に静電気を作用させて、ばいじんを捕捉する。

### 3.2.2 主要研究成果

#### a) ハニカム固定床方式による脱硫・再生性能

設定した目標条件（反応塔出口で  $\text{H}_2\text{S}$  濃度 100 ppm 以下）を達成できることが確認された。

また、ガス化炉の起動時における低温度域でも目標条件を達成できることがわかった。

脱硫・再生の 260 回に及ぶ繰り返し実験の結果、耐久性にも優れていることが確認された。

#### b) ポーラスフィルターによる集じん・再生性能

3～100g/m<sup>3</sup>N と幅広く変化させたフィルター入口でのばいじん濃度に対して、出口濃度は約 5 mg/m<sup>3</sup>N 以下となり、目標値（10 mg/m<sup>3</sup>N 以下）を十分達成することができた。

集じん・再生（除じん後の石炭ガスの逆送によるばいじんのはらい落し）の繰り返し実験の結果、再生後のフィルターは初期状態に回復することが確かめられた。

これらの成果は、国、電気事業からも、実現性の高い発電用に適した乾式クリーンアップ方式として評価されつつある。

今後は、より大規模な実証プラントの概念設計を行うとともに、システムとしての長期信頼性実証の試験を継続実施する。また、より一層高効率でコンパクトな移動床脱硫、静電濾過集じんの 2 方式についても、基礎実験によって目標値を達成できる性能が確認されており、実用化へ向けて研究を継続する。

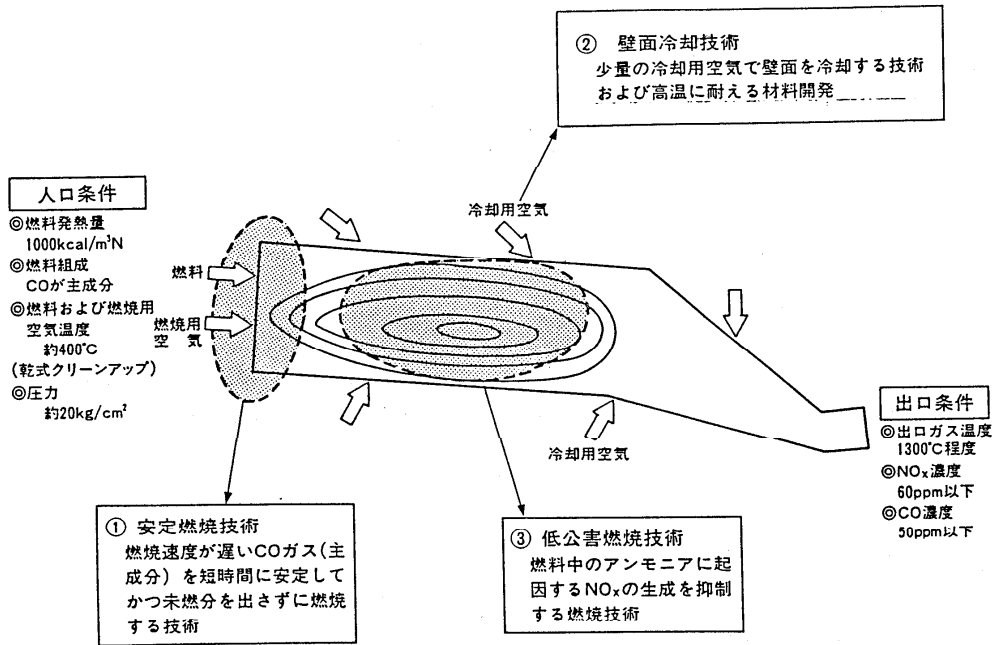
### 3.3 ガスタービン用低カロリーガス燃焼技術

#### 3.3.1 研究の背景と開発課題

空気酸化噴流床ガス化方式により生成される石炭ガスは、大部分が窒素 ( $\text{N}_2$ ) や二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) などの不燃性成分（全体の 60% 以上）である。このため発熱量が低く可燃性成分のうち比較的燃えにくい  $\text{CO}$  濃度が高い点に特徴がある。

このような石炭ガスを燃料として、ガスタービン入口温度が 1300℃ 以上で安定して燃焼させる技術は難度が高く、噴流床石炭ガス化複合発電システムの成立性を左右する重要な技術である。

出口ガス温度 1300℃ 程度、排ガス中の  $\text{NO}_x$  濃度 60 ppm 以下および  $\text{CO}$  濃度 50 ppm 以下となるような開発目標を達成するための燃焼器の技術開発課題は、次の 3 点が重要である（図・7）。



図・7 燃焼器の重要開発課題

- 1) 低カロリーガスを安定かつ完全に燃焼させる技術の開発
- 2) 従来の冷却構造に比べて、少ない空気量で、壁面温度の低下および均一化が可能な壁面冷却技術の開発
- 3) 燃料中のアンモニアに起因するNO<sub>x</sub>の生成を抑制する燃焼技術の開発

### 3.3.2 主要研究成果

研究の第一ステップとして、「低カロリーガス燃焼基礎実験装置」を用いて模擬ガスによる基礎的検討を行った結果は次の通りである。

- ① 安定燃焼範囲 — 燃焼安定性に及ぼすバーナー形状や燃焼用空気量の影響を明らかにした。
- ② CO排出特性 — 低負荷時を除き常用の運転条件ではCOの排出はない。
- ③ NO<sub>x</sub>発生状況 — 燃焼用空気の投入方法を工夫すればNO<sub>x</sub>の発生を低減できる。

### 3.3.3 石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備の概要

石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の研究開発を加速化するために、当所は、昭和62年4月、横須賀研究所に「石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備」を設置し、実験を開始した(図・8)。





表-7 セラミックガスタービンの  
開発効果

セラミック燃焼器による高温化の達成

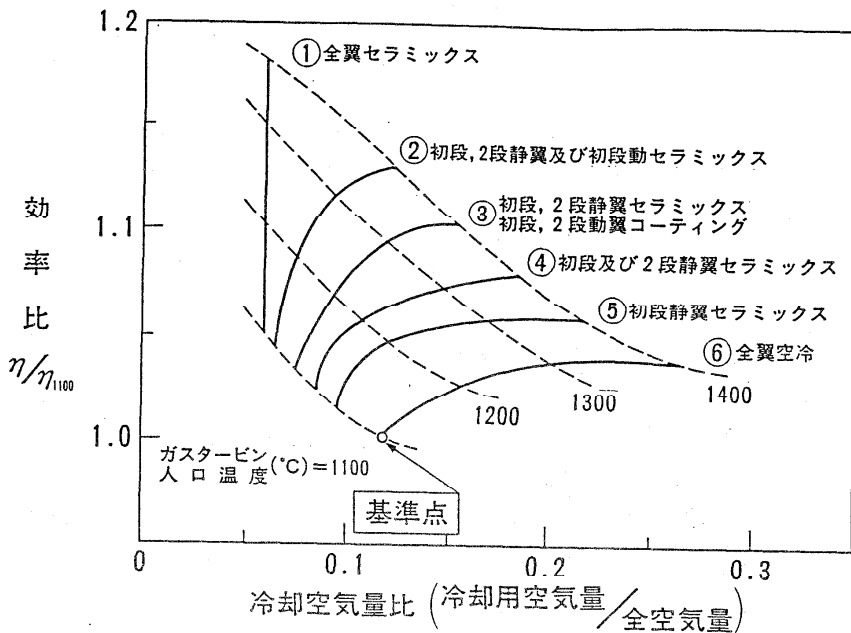
- ① 冷却空気量の大幅な節減により、ライナーの耐久性を損うことなくガス温度の高温化が可能。
- ② ライナー温度を高温(1000°C以上)に保てるので、燃焼器出口ガス温度分布が均一化。
- ③ ライナー温度が高温のため、石炭ガス化ガスの安定燃焼が容易。

セラミック静動翼の導入による高効率化

- ① ガスタービンの高温化による高効率化。
- ② 翼の無冷却化が可能となり、冷却空気量の節減による効率向上。

(共通的に)

燃焼中に含まれる微量なダストや腐食促進物質に対する耐食・耐摩耗性も向上。



図・9 セラミックス利用による複合発電プラントの熱効率

## b) セラミック燃焼器の開発

超高温ガスにさらされる燃焼器・壁面の内周にセラミックタイルをかん合被覆する超高温熱遮蔽構造を開発し、この熱遮蔽構造を利用した超高温セラミック燃焼器が優れた耐熱性能を持つことを明らかにした。

## c) セラミック静翼の開発

### i) セラミックスの高温耐久性

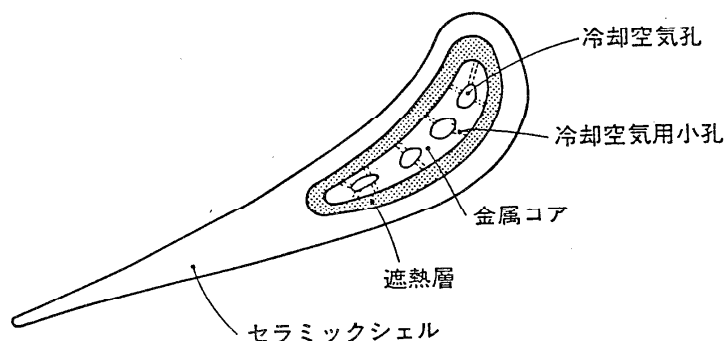
セラミック静翼の研究開発を朝日製作所と共同で進め、1300℃以上の高温高速下では、炭化珪素が優れた特性をもつことを明らかにした。

### ii) セラミックスの耐熱衝撃性評価

セラミック単体翼モデルおよび翼列を対象に超高速高温ガス流（マッハ1、1500℃）中における熱衝撃破壊試験手法を開発した。

### iii) セラミックス・金属ハイブリッド静翼の開発

セラミックスのもろい欠点を克服し、耐熱性の優れた性質を活用するため、セラミックスと金属を組み合わせた新しい構造のハイブリッド静翼を考案した（図・10）。



図・10 セラミック金属ハイブリッド静翼の構造

この静翼は、

- ① 高温燃焼ガス流に曝される部分をすべてセラミックス化しているため、耐熱性に優れている。
- ② 冷却は金属製の翼芯のみである。
- ③ ケーシング等への取付け部が金属で構成されており、現在のガスタービンにそのまま適用できる。

などの基本的な特長をもっている（表・8）。現在、高温燃焼ガスによる曝露試験によって、耐熱性能および信頼性の評価研究を行っている。

表・8 ハイブリッド静翼の特徴

- 1) ・要耐熱性の翼表面をセラミックス } ハイブリッド化。  
・力の伝達を分担する翼芯を金属 }
- 2) 冷却は金属製の翼芯のみ。
- 3) 現用ガスタービンにも取付け可能。

3.4.2 その他の研究開発

- a) 新超合金によるガスタービン翼の高温化
- b) 接触燃焼器の石炭ガス化複合発電への適用によるプラントの低コスト化
- c) タービン動翼の水冷却による高効率化

3.5 研究成果の総括

以上、現在までの研究成果を総括すると、次の4点に集約される。

- ① 世界最初の方式である空気酸化・加圧2室2段噴流床方式ガス化炉について、開発目標である広い炭種適合性、灰の溶融排出性、優れた環境保全性を達成できたこと。
- ② 技術的難度の高い乾式クリーンアップ技術に挑戦し、脱硫・集じん性能、長期耐久性について開発目標を達成できる見通しを得たこと。
- ③ 他機関に先がけていち早く着手したセラミックスのガスタービンへの適用技術の開発研究において、1500℃級の超高温セラミックガスタービンの夢の実現を可能とする基礎的成果を得たこと。
- ④ 当所のガス化炉方式、乾式クリーンアップ方式は国・電気事業により評価され、前者は国の200T/Dパイロットプラントに採用されたこと。

#### 4. 今後の課題

石炭ガス化複合発電の経済性を、在来火力と比較するために、2000年時点での発電コストを試算した結果、LNG火力と比較すると、石炭価格の上昇率がLNG価格の上昇率以下であれば、石炭ガス化複合発電が有利である。

微粉炭火力と比較すると、固定費の上昇率を年2%とした場合、2000年時点で両者の発電コストはkWh当り約15円ではほぼ同等であるが、石炭価格の上昇率が固定費の上昇率(年2%)を上回れば、効率のよい石炭ガス化複合発電の方が有利となる。

このような試算は、あくまでも燃料価格の上昇率の仮定のもとに成り立っているので、石炭ガス化複合発電が絶対的に経済的優位性にあるとは今のところ断言できない。

したがって、今後、石炭ガス化複合発電の実用化を推進するためには、他の競合電源であるLNG火力、微粉炭火力に比べて数段まさる経済性をそなえることが必須である。このため、当所は、国や電気事業の長期研究開発スケジュールに呼応して、大幅なコスト低減を目指した高効率・高性能のガス化炉やガス精製システムの開発、超高温・高効率のセラミックガスタービンの開発などの技術開発課題に挑戦し、それらの研究成果をふまえて、当面はパイロットプラントの技術の支援、将来的には実証プラントに向けての技術確立に貢献してゆきたいと考えている。

<地方研究グループ活動報告>

(1) 北海道研究グループ講演会

日 時：昭和62年5月9日(土) 13:30～16:30

場 所：釧路工業高等専門学校 機械工学科演習室

講 演：1) ヒートパイプの過渡特性について

\* 倉前 正志 (北大工)

2) 流下液膜の流動特性に関する研究

\* 関根 郁平 (苫高専)、熊田 俊明、石黒 亮二 (北大工)

3) 直接シミュレーションによる放射熱伝達の解析

\* 早坂 洋史 (北大工)

4) 波長帯別日射量の特性について

\* 馬場 弘、金山 公夫 (北見工大)

5) 水分蓄積を伴う場合の建築材料の熱伝導特性

坂爪 伸二、\* 工藤 均 (釧路高専)

6) 北欧米諸国に滞在して

\* 稲葉 英男 (北見工大)

<講演概要>

講演1) ヒートパイプの熱輸送における過渡特性について検討するために、ヒートパイプの構造を考慮したモデルに基づき解析を行なった結果、その特性が主に二つのパラメータに支配されることが示された。また、他の三種の簡単化モデル(階段モデル、集中モデル、均質モデル)についても考察を行ない、それらが構造モデルの特別な場合に含まれることを明らかにした。さらに、条件の異なる4本のヒートパイプのステップ応答に関する測定結果と比較した結果、適切な過渡応答の推定のためには、構造モデルにおいて実際のヒートパイプ系に即応したパラメータの値を用いて行なう必要があることが示された。

講演2) 2プローブ法により流下液膜の流下方向の波形や個々の波の速度を求め、波の時間および空間的諸特性を明らかにした。また、波が基底膜上を滑り落ちると仮定して波の液輸送量を求め、全流量との差から基底膜流量を求め、更に速度分布がNussellの理論に従うとして流量からの演算差基底膜厚さを求め、実測値と比較した。この結果より、波は下部に基底膜より早く移動する液を伴うことを示唆した。

講演3) ある原子において、電子が内側の軌道に落ちることにより放出された放射エネルギーの移動を追跡するには、放射性ガスによる吸収、すず粒子などによる散

乱、固体壁面による吸収と反射等の放射特有の複雑な現象を考慮する必要がある。これらの現象を直接シミュレーションする解析手法としての放射熱線法につき、その原理、解析手順をフローチャート、図、式を用いて詳しく説明するとともに、箱形火炉モデルを用いて、ホテルらのゾーンメソッドなど他解析手法との比較も行ない、放射熱線法の妥当性について報告したものである。

講演4) 昭和59年から61年まで北見工業大学においてカットオフフィルターを使用して波長帯別全天日射量の連続観測を行なった。3種類のフィルターによって、それぞれ波長域 0.305  $\mu\text{m}$  以上の波長帯別日射量 (H305)、0.395  $\mu\text{m}$  以上の日射量 (H395) および 0.715  $\mu\text{m}$  以上の日射量 (H715) を得た。H305は全波長域にわたる全天日射量であり、この値と他の2つの波長帯別日射量の値とを比較した。その結果、H305に対し H395 および H715 は一次の相関関係を有し、H395 に関する勾配は 0.97 ~ 1.03、H715に関する勾配は 0.48 ~ 0.59 で冬期の勾配が夏期よりも急になることがわかった。

講演5) 寒冷地の住宅に使用される建築材料は、室内外の温度差によって生じる水蒸気分圧差のために水分が蓄積され、外壁の断熱性能の低下が起り、内壁に結露が発生する。この影響を明らかにするために、水分蓄積を伴う場合の熱伝導変化を測定できる試験装置を試作し、これにより建築用断熱材や石膏ボード、建材の熱伝導率を水蒸気分圧差、材料厚さ、水分蓄積率、経年変化などについて測定した。この結果、材料の内部構造によって水分蓄積の分布や挙動に差異を生じ、この蓄積分布状態が熱伝導特性に大きな影響を与えることが明らかになった。

講演6) 昭和61年2月より11月までの10ヶ月間北欧米諸国に滞在する機会を得たので、特に伝熱およびエネルギー関係の研究を主体として、スライドによりその訪問先の現況を紹介した。アリゾナ大学では、濃度・温度の2重拡散問題の不安定性に関する研究、凝固に伴う樹枝状結晶発達過程のモデル化、複雑な形状を有する物体周りの熱・流れの不安定現象などに見られる非定常問題の研究が、カナダのアルバータ大学およびNRCでは地域の特色を生かした着霜、氷および風雪害防止に関する研究が行なわれていた。西ドイツでのミュンヘン工科大学では、二相流、物性、極低温およびエネルギー有効利用に関する実験主体の研究が行なわれており、一つの課題を長期間に渡って研究し、後世に残る多くの貴重なデータを採取しているのが大変印象的であった。

(北海道地方連絡幹事 福迫尚一郎)

(2) 関西研究グループ講演会

日時：昭和62年4月24日（金） 13:00- 17:00

場所：神戸大学工学部 視聴覚教室（105号室）

講演：1) 伝熱研究と原子炉、ボイラ技術の発展

\*赤川浩爾（神戸大工）

2) プレートフィンチューブ熱交換器の伝熱・流動特性

\*瀬下 裕、藤井雅雄（三菱電機中研）

3) 旋回流における熱、物質及び運動量の乱流輸送の数値予測

\*平井秀一郎、高城敏美（阪大工）

4) 凍結を伴う液体の強制対流熱伝達

\*菊地義弘（神戸大工）

[ビデオ・フィルムセッション]

5) Inverted Annular Flow のフローパターン

\*竹中信幸（神戸大工）

6) 渦流れの可視化（テイラー渦流、カルマン渦流、噴流渦輪）

\*片岡邦夫（神戸大工）

<講演概要>

講演1) (1)わが国の発電設備容量は 第2次大戦後の1945年の1千万kWから 現在の1億6千万kWへと急激に増大した。この増加率の状況を図により示した。

(2)このような増大の大部分は火力発電と原子力発電によるものである。その設備の進展は次のようであった。最初の自然循環ボイラから始まり、つづいて 強制循環ボイラ、貫流ボイラへと発展し、さらに 超臨界圧ボイラから現在の変圧運転超臨界圧ボイラへと変遷した。また 1970年から沸騰水型原子炉および加圧水型原子炉がボイラと並行して急増した。これらの設備容量の比率も図により示された。

(3)これらのボイラと原子炉における熱水力的設計基準の重要なものとして、バーンアウト熱流束あるいはバーンアウト乾き度がある。これに関連して 自然循環ボイラでは「蒸発管出口ボイド率」および「循環速度」（質量流束）、強制循環ボイラでは「循環比」（これは実質的には蒸発管出口乾き度）が 設計基準値として用いられてきた。次の発展段階として 貫流ボイラと強制循環ボイラにおいては「限界熱流束」および「限界乾き度」という考え方が設計の指標として 用いられるようになった。

(4)一方、原子炉においては最初から「限界熱流束」、「限界乾き度」が重要な設計制限値として用いられた。これらの限界値を定めるための研究が 大規模に行われてきて、実験および相関式が漸次発展をしてきた。それらの歴史について示し、特に、



初期の頃は、バーンアウトに関するきわめて少ないデータの下で原子炉の設計が行われてきたこと、次の段階で、バーンアウト限界の下限を与えるような実験式によって設計が行われていたことを明らかにした。その後の発展により、実験値に対する各因子の影響をとり入れたベストフィットの実験式の採用、および最近の統計的熱設計手法への変遷などについて解説した。

(5)以上により、ボイラ技術における熱的設計から原子炉における熱的設計に至るものは、同一のバーンアウトを指標とするものであることを示し、その伝熱研究による予測精度の向上の発達経過を述べた。

講演2) プレートフィンチューブ熱交換器は、コンパクト熱交換器の1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囲に使用されている熱交換器である。本研究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性能を実験的に調べ、影響因子たる諸構造パラメータが性能に及ぼす影響を系統的に検討することにより現象の物理的イメージを明確にし、実験結果に合理的解釈を与え、その性能の統一的整理を試みた。検討の結果、プレートフィンチューブ熱交換器の性能が3種類の領域(助走領域、遷移領域、渦領域)のモデルで表現できることを示し、各領域ごとの性能の無次元整理式を示した。また、それらが比較的高いレイノルズ数にも拡張できることを示すとともに、物質伝達を伴う場合の特性についても簡単に述べた。本研究で得られた結果は、プレートフィンチューブ熱交換器の使用に際して、熱交換器または熱交換システムの合理的設計を可能にする。同時に近年種々提案されている伝熱促進法の種類とその適用領域に対して有効な情報を与えるものである。

講演3) 2つの旋回乱流場について、運動量、熱および物質の乱流輸送が旋回の影響により抑制される現象を数値計算により予測を行い、検討した。はじめに自軸回りに回転する円管内乱流の層流化に伴って熱伝達が低下する現象を輸送方程式モデルを用いて予測できることを示した。次に、静止円管内旋回乱流場について、 $k-\epsilon$ モデルを用いた計算は旋回による特徴的な流動特性および混合が遅延する現象を予測できないのに対して、輸送方程式モデルを用いた計算はそれらの現象の生じる原因について検討し、運動量、熱および物質の輸送方程式において旋回により生じる生成項が乱流輸送を減少させる方向へ働いていることを明らかにした。

講演4) 管内を流動する液体の凍結現象を明らかにするため、水の凝固点以下に保たれた二平行平板間(間隔:20 mm)に水を流して実験を行い、凍結層厚さ分布を測定した。凍結試験部の長さは400 mmと1000 mmの2種類である。層流の場合、凍結面は滑らかであって、下流に行くに従って凍結層が厚くなる単調増加型になった。そして、実験結果は理論解析から予測される計算結果とよい一致を示した。一方、乱流の場合は、必ずしも単調増加型分布にならず、凍結厚さが流路の途中で減少するような波型をと

ることもあった。これは凍結層の形成による流路段面積の現象に伴う流れの加速と関連しており、今後、波型凍結の発生条件、形成過程を究明する必要がある。

講演5) 原子炉の再冠水過程や低温流体配管中では壁温が飽和温度に比べて非常に高く、膜沸騰が生じ、通常の環状流とは気液の逆転した Inverted Annular Flow (IAF)が生じる。IAFはクオリティの増加にともない、液柱がくずれ、やがて噴霧流に遷移するが、その詳細についてはあまり研究されていない。本研究ではフロン113 を作動流体とし、内径 10 mmの円管で実験を行い、熱伝達の特徴が3領域に分類できることを明らかにし、各領域の流動様式を 16 mmフィルムに撮影した。流動様式は熱伝達の特徴に対応し、IAF と IAF の気液界面が激しく乱れた Agitated Inverted Annular Flow (AIAF)及び噴霧流(DF)に分類でき、これらを編集したフィルムを上映した。また、表題とは別に感温液晶を用いて温度成層を可視化したVTR も上映した。

講演6) 自由噴流を伝熱面に衝突させることによる伝熱促進の研究に関連して、混合域で形成されるVortex Ring を伴う組織構造を水素気泡法により可視化してビデオで示した。その中で、せん断層の不安定性によるVortex Ring の形成と下流でのVortex の合体、Vortex Filament の不安定性によるVortex の崩壊、Large-scale eddyの形成を示した。

カルマン渦流も同様に水素気泡法によるビデオで観察した。乱流遷移現象の基礎的研究として、テイラー渦流の高次の不安定現象の実験的研究を紹介した。その一方法として微細なアルミ箔片による波動テイラー渦流の可視化についてビデオで示した。この研究の目的がカオスの発生とそのスペクトル進化の機構を明らかにすることで、非常に困難で現在、電気化学的方法と併用して進行中であることを述べた。

(前年度関西地方連絡幹事 片岡邦夫)

(3) 中国・四国研究グループ講演会

日時：昭和62年5月15日（金） 13:30～17:00

場所：広島教育会館

講演：1)非定常噴霧の蒸発過程の計測

※広安 博之（広島大） 田端 道彦（マツダ）

新井 雅隆（広島大）

2)水平円板間液中に吹込まれた気泡の挙動に関する研究

村上 幸一（愛媛大）

3)水平管群を流れる冷媒 R113の凝縮熱伝達

本田 博司（岡山大） 内間 文顕（岡山大）

野津 滋（岡山大） ※中田 裕紀（岡山大院）

4)正方形断面を有するベンド内の乱流

※板野 則弘（広島大院） 須藤 浩三（広島大）

講演1) ディーゼル噴霧などに見られる非定常液体噴霧の微粒化の測定に関する報告である。

まず、光源にパルスレーザを用いて噴霧のフランホーヘル回折像を直接写真撮影し、その回折像を画像処理装置およびマイクロコンピュータにより解析して噴霧の平均粒径を計測する方法が紹介された。ついで、高温高压霧囲気下において、本測定装置を用いて測定した実際のディーゼル噴霧についての結果が示され、平均粒径や噴霧の軸方向の粒径分布などに及ぼす霧囲気温度・圧力の影響が明らかにされた。

講演2) 二枚の水平平行板間にある液中に下方円板の中心に設けたノズルより加圧気体を急激に吹込んだ場合の気液界面の非定常挙動や気泡の挙動を支配する因子および気泡通過後の上方円板に付着する液膜厚さについて主として実験的に検討したものである。その結果、気泡の挙動には、二枚の平板間に充満して成長する場合と、下方に液が残留したまま上方の干渉円板に沿って成長する場合があります。前者についてはその界面成長速度を一次元モデルで表わすことができること、また上方円板に付着する液膜厚さは表面張力の影響の大きい領域とそうでない領域に分けられ、後者の領域では液膜厚さは0.08mm程度であったこと等が報告された。

講演3) フロン系冷媒の水平管群における凝縮熱伝達に関する研究で、冷媒R113蒸気の鉛直下降流に直交する基盤目配列管群における凝縮熱伝達について行った実験結果と、既報<sup>1)</sup>の千鳥配列管群における実験結果を比較し、さらに従来の実験値を考慮して導いた実験式が提案された。

1) 本田・ほか4名，第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集（1986-5），479。

講演4) 上流, 下流に直管を接続した断面 $80 \times 80 \text{mm}^2$ , 曲率半径 $160 \text{mm}$ の  $90^\circ$ ベンド内の流れ  
( $u=7.4 \text{m/s}$ ;  $Re=4 \times 10^4$ ) の時間平均速度を, 熱線流速計を用い回転プローブ法により, 上流から下流までの12断面について三次元的に測定したものである. その結果, ベンド上流部ですでにベンドの影響による二次流れが発生していること, 二次流れの強さはベンドの出口付近で最大になること等が報告された.

(中国・四国地方連絡幹事 須藤 浩三)

(4) 中国・四国研究グループ講演会

日時：昭和62年8月31日（月） 13:30～

場所：川崎製鉄(株)水島製鉄所 見学センター

講演：1)ボイラ炉内における流動解析とモデル実験との比較

※尾崎 雅則（パブコック日立），吉廻 秀久（パブコック日立）

2)二重管型凝縮器の研究（混合冷媒 R114+R113による実験結果）

本田 博司（岡山大工），野津 滋（岡山大工）

※青山 亨（岡山大工院），洪鉄 賢一（岡山大工院）

3)波状流路内の振動流れ

西村 龍夫（広島大工），※荒川 伸吾（広島大工院）

村上 慎一郎（広島大工院），河村 祐治（広島大工）

講演1) 大型ボイラにおける炉内ガスの流動状況を把握するため、数値計算および水流モデル実験を行って、両者の結果を比較したものである。数値解析にはk- $\epsilon$ モデルを用い、計算は直交Staggered MeshによるHSMAC法で行った。一方、実験では500×200×1000mm<sup>3</sup>の水槽を用いて可視化を行い、画像処理装置によってその流動様相を解析した。これらの結果を比較したところ比較的良好に一致し、本プログラムによって大型ボイラ内の流れの概略が予想できるということが報告された。

講演2) 非共沸混合冷媒を作用流体とする冷凍システムの有効性の検討および熱交換器設計の最適化を行うための基礎研究として行った。フロン系非共沸混合冷媒の管内凝縮に関する実験的研究である。実験には、冷媒として沸点差が比較的大きい R114+R113系を用い、純冷媒用高性能伝熱管として実用化されているワイヤコルゲート管を内管とする水平二重管型凝縮器を使用した。管内局所熱伝達係数、圧力降下および蒸気組成の管軸方向変化の測定結果および凝縮器内の流動・伝熱に及ぼす冷媒流量、蒸気組成等の影響が報告され、圧力降下、液膜の熱伝達係数および気相の物質伝達を表す実験式が示された。

講演3) 膜型人工肺等に利用されている正弦波状流路内の振動流れの熱・物質移動促進機構を明らかにするため、実験および数値計算を用いてその流動パターンを検討したものである。ここでは二次元対称波状流路内の粘性支配領域を中心に検討が行われ、Re数およびS数によって、流路の一波長中に渦が4個形成される場合(4-Vortex System)と8個形成される場合(8-Vortex System)があること、その境界はRe数とS数の積であるウォマズリー数によって決定されることが報告された。

（中国・四国地方連絡幹事 須藤 浩三）

(5) 九州研究グループ講演会

講演会 I 日時: 昭和62年 7月20日(月) 15:00~17:00

場所: 九州大学工学部 機械系大会議室

講師: Johannes Straub

Professor, Lehrstuhl A für Thermodynamik  
Technische Universität München

題目: "Boiling Mechanism and Heat Transfer without Buoyancy  
Force (Experiments in Space)"

講演会 II 日時: 昭和62年 9月11日(金) 14:30~18:00

場所: 九州大学工学部 2号館生産機械314号室

講演:

1. 水平蒸発管内熱伝達係数の管周方向分布の測定について  
吉田 駿, 松永 崇, 洪 海平(九大工)
2. 狭い空間における沸騰熱伝達—実験結果の整理—  
石橋英一, 長 誠一郎(大分大工)
3. 狭い空間における沸騰熱伝達—拡大伝熱面に関する実験結果—  
石橋英一, 後藤一久(大分大工)
4. 熔融塩の冷却特性および鋼材熱処理への応用  
三塚正志, 福田敬爾, 鈴木孟文(新日鉄)
5. 高温面の水冷却に関する研究  
膜沸騰相当領域におけるフォグ冷却の理論解析  
伊藤猛宏, 高田保之, 劉 振華(九大工)

講演概要

I 無重力下におけるプール沸騰の伝熱機構と伝熱特性に関して, ロケットおよびスペースシャトル内の実験結果に基づいた講演がなされた. 無重力下での伝熱特性におよぼす液のサブクールおよび熱流束の影響を明らかにし, 表面張力が支配的な現象下で, 気液界面の伝熱機構や気泡合体の機構が通常重力下のそれらと異なることが示された. 実験装置および手法についても詳細に話され, 特異な現象について16ミリフィルムによる映像が示された.

II-1. 水平蒸発管内の熱伝達係数が管周方向に大きく変化する場合について, 管外壁温度の限られた測定点での値から熱伝達係数の周方向分布を正確に算出する方法を提案した. まず,

測定された温度分布を境界条件として管壁内の熱伝導方程式を解くことによって得られる熱伝達係数の分布は不正確になることを示した。次に、管内の流動状態の観察をもとに気液が上下に分離した場合について、6個のパラメータで表される時間平均熱伝達係数の分布形状を仮定し、これを境界条件として逆に管外壁温度を算出し、結果が測定値と一致するように上記6個のパラメータ値を修正する方法を提案した。この方法によれば、7点の管外壁温度の測定値により、種々の流動条件下（波状流および半環状流）での熱伝達係数の管周方向分布が妥当な精度で算出できることが示された。

- II-2. 狭い間隙における核沸騰熱伝達に関する藤田らの最近のデータを、著者らの方法にしたがって  $Nu$  vs.  $Re^{1/2}$  の関係で再整理することを試みた。西川の式の代表寸法として間隙寸法を採用することにより、これらの実験データの大部分が +30 ~ -40% の範囲で整理できることを示した。
- II-3. 太陽熱利用吸収式冷凍機の蒸発器および発生器に関する基礎的沸騰熱伝達研究として、裸管の場合と伝熱管周りに狭い空間を形成させた場合（伝熱部にネジ溝加工およびローレット加工を施した二種の表面加工伝熱管を用いた）に対して、減圧状態で沸騰熱伝達実験を行った。実験データ整理においては平滑伝熱管に対する実験結果と比較、検討を行った。その結果、裸管のデータには起泡度を適当に選定した西川の整理式が有効であり、液体不足領域を含む合体泡領域のデータには合体泡発生頻度を基にしたフーリエ数による整理が有効であることがわかった。また、平滑管に対する狭い空間による熱伝達促進効果は、加工が比較的簡単なネジ溝加工管ではある程度認められたが、加工が複雑で起泡度の大きいローレット加工管では殆ど認められないことがわかった。
- II-4. 内容は、(1) 圧延鋼材熱処理プロセスの動向、(2) 制御冷却・保定熱処理用冷媒、(3) 熔融塩の冷却特性、(4) 熔融塩の圧延鋼材熱処理への応用に大別される。(1)では、圧延鋼材の熱処理プロセスの動向は、「圧延熱利用の制御圧延・制御冷却・恒温変態〔保定〕処理」である。すなわち、高温域（約800℃以上）から中温域（約300~600℃）までを制御冷却〔緩冷~強冷〕し、中温域に保定するプロセスが志向されている。(2)では、このプロセスに対し、水冷の場合、上記中温域での熱伝達が非常に不安定に急増するため、適さないことを説明した。(3)では、著者らがやっている熔融塩熱伝達実験結果を説明した。熔融塩浸漬冷却の冷却能力は、圧延鋼材の熱処理に対し、不足するケースが多い。(4)では、熔融塩を線材や軌条の熱処理へ応用した例を説明した。
- II-5. 水質量速度が低く液滴径がかなり小さいフォグ冷却の膜沸騰相当領域の伝熱特性について、放射および空気の強制対流熱伝達の影響を考慮して理論解析した。空気の強制対流については軸対称よみ点流れの理論式を採用し、液滴は空気の流れにひきずられて蒸発しながら伝熱面上を外側へ移動するモデルをたてて解析し、実験結果との良好な一致を得た。

（九州地方連絡幹事 藤井丕夫）

## < 編集後記 >

Vol. 26, No. 103の編集経過と

Vol. 27, No. 104「産官学共同研究特集号」の企画について

第26期編集委員長 谷口 博 (北大)

5月29日に開催された第1回編集委員会にて、No. 103(10月号)は「伝熱セミナー特集号」とすることが決まり、分担して頂くこととなった斎藤武雄委員、藤井丕夫委員と相談の上、編集方針を決め原稿依頼を開始した。また、第16期会長を務められた故・佐藤俊先生の追悼文を掲載することとなっていたので、関西地方連絡幹事である高城敏美委員にそのとりまとめをお願いした。8月5日～7日の伝熱セミナーも盛会の内に終わり、予定通り記事を集めることができたのは、一重に関係各位のご援助の結果と感謝している。頂いた各原稿は、ワープロ化へのご理解に支えられ、百数十頁の奇麗な仕上りのものを届けて頂いた。今後ともこの方針を守って行くことができればと、一層の御協力をお願いする次第である。

No. 104(1月号)は「産官学共同研究特集号」とすることが決まり、新井紀男委員、矢部彰委員のご努力による案をもととして、9月12日の第2回編集委員会での編集方針を検討した。その結果、つぎのような内容を盛り込むこととしたのである。

### 「産官学共同研究特集号」

〔序言〕伝熱シンポジウムにおける産官学共同研究の割合の変化

20回 13/193      22回 12/196

23回 16/252      24回 22/201

〔現在のテーマと内容の解説〕

- ・大学
- ・企業
- ・国立研
- ・地域ニーズ
- ・その他

〔過去〕

- ・産官学共同研究により解決した問題
- ・成功した秘訣
- ・問題点
- ・その他



〔諸外国の状況〕

- ・アメリカにおける産官学共同研究の役割
- ・中国における産官学共同研究の役割

〔将来〕

- ・先端技術における産官学共同研究の難しさとその解決法（宇宙、エレクトロニクスなど）
- ・地域ニーズにもとづく産官学共同研究の課題と将来展望

〔今後の産官学共同研究希望テーマ〕

- ・製鉄の現場から
- ・自動車の現場から
- ・原子力から
- ・エネルギーから
- ・建設系から
- ・材料系から
- ・その他

ご承知のとおり、近年ますます産官学共同研究の重要性が指摘され、各方面でその成果が数多く発表されるようになった。今回の企画に対し、会員各位のご意見あるいはご経験などをとりまとめ、この特集号に投稿頂ければと期待している。必要に応じて、各編集委員あるいは私宛にご連絡賜れば幸いです。



## 第25回日本伝熱シンポジウム講演募集

- ・開催日 昭和63年6月1日(水)～6月3日(金)
- ・会場 石川厚生年金会館(〒920 金沢市石引4-17-1)
- ・講演申込締切 昭和63年1月23日(土) ……特別セッション  
昭和63年1月30日(土) ……普通セッション
- ・原稿締切 昭和63年3月15日(火) 必着
- ・講演申込先 〒920 金沢市小立野2-40-20  
金沢大学工学部機械システム工学科内  
第25回日本伝熱シンポジウム準備委員会  
TEL 0762-61-2101 FAX 0762-64-1047  
郵便振替 金沢3-30768

### ・講演申込方法

1. 本シンポジウムでは、従来の普通セッションの他にオーガナイズド方式の特別セッションを企画いたします。それぞれの内容は次のように分類されますが、特別セッションの詳細については各オーガナイザーに直接お問合せ下さい。

#### 【普通セッション】

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

#### 【特別セッション】

- |                 |               |
|-----------------|---------------|
| ①数値計算と境界条件      | 小竹 進 (東大)     |
| ②半導体製造における伝熱    | 中山 恒 (日立機研)   |
| ③直接接触熱交換        | 棚沢 一郎 (東大)    |
| ④レシプロエンジンにおける伝熱 | 藤掛 賢司 (豊田中研)  |
| ⑤宇宙環境利用の伝熱      | 塩治 震太郎 (石橋技研) |

2. 伝熱研究本号の最終ページに添付されている申込用紙(またはコピー)あるいはB5用紙に『第25回日本伝熱シンポジウム研究発表申込』と標記し、(1)題目、(2)日本伝熱研究会会員非会員の別・所属学協会ならびに会員資格・氏名(ふりがな、連名の場合は講演者に本印)・所属(勤務先)、(3)概要(100字程度)、(4)普通セッションと特別セッションの別、それぞれの内容を示す記号(a, b, ……あるいは①, ②, ……)と若干のキーワード、さらに(5)連絡先を記入し、整理費1,000円を上記準備委員会宛郵便振替にて送金とともに申し込んで下さい。
  3. 講演は1名1題に限り、講演時間、討論時間はそれぞれ10分の予定です。
  4. 講演の採否は、準備委員会にご一任願います。
  5. 前刷原稿：前刷集はオフセット印刷、原稿執筆枚数は、1,927字(41行X47字)詰原稿用紙3枚以内、原稿用紙は準備委員会より講演申込者(講演者)宛送付します。
  6. 特別セッションの講演時間や前刷原稿枚数などについては、必ずしも上記の方法を採りませんので、これについては各オーガナイザーの指示に従って下さい。
- ・ご注意
1. 講演申込後の取消しは準備と運営に支障をきたしますのご遠慮下さい。十分検討の上、お申込み下さい。
  2. 申込書と前刷原稿の題目や講演者に不一致が生じないように申込書の控えをお残し下さい。
  3. 特別セッションは、場合によっては一部取りやめになることもありますので、ご承知おき下さい。
  4. 機械学会会員で将来機械学会論文集等に投稿希望の方は、本申込書の写し2部を機械学会事業課宛送付して下さい。

## 2nd International Symposium on Transport Phenomena in "TURBULENT FLOWS"

The University of Tokyo,  
Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan

October 25-29, 1987

Professor N. Kasagi  
Secretary General  
2nd Int'l Symp. Transport Phenomena  
Department of Mechanical Engineering  
The University of Tokyo  
Telephone: 03-812-2111 ext.6417

### GENERAL INFORMATION

#### Symposium Location

The official site of the symposium is the University of Tokyo's Hongo campus. All technical sessions will be held at the Main Conference Hall in the Faculty of Engineering Building #8. The reception will be held at the Sanjo Conference Hall on October 25th. Banquet will be held at the Tokyo Garden Palace, which is within a 20 minute walk from the campus, on October 27th.

#### Symposium Language

All presentations will be in English, which is the official language of the symposium.

#### Advanced Registration

#### On-site Registration

Individuals who do not register in advance may do so at the symposium during the following hours:

Sunday, October 25	4:00 PM - 7:00 PM at Sanjo Conference Hall
Monday, October 26 through Wednesday, October 28	9:00 AM - 4:00 PM at Registration desk in Eng. Bldg. #8

#### Registration Fees

Symposium Registration - including Symposium Volume, Reception and Banquet	¥40,000
Symposium Registration - including Symposium Volume and Reception	¥30,000
Spouse/Family Member - including Symposium Reception and Banquet	¥10,000

#### Publications

A volume containing all keynote papers and general papers will be available at the symposium. All registrants are entitled to one symposium volume, which can be picked up at the registration desk. Additional volumes are available separately on request. The price is ¥12,000 plus handling and shipping.

After the symposium, the proceedings will be printed and published by Hemisphere Publishing Corporation, Washington D.C.

#### Audio-Visual Aids

#### Social Events

Sunday, October 25, 6:00 PM - 8:00 PM

Reception: at Sanjo Conference Hall of the University of Tokyo. One ticket to the reception is included with each registration.

Tuesday, October 27, 6:00 PM - 9:00 PM

Symposium Banquet: at Tokyo Garden Palace.  
Price: ¥10,000 per registered person.

## TECHNICAL PROGRAM

(KN: Keynote Paper)

Monday, October 26, 1987

9:00-12:00

### Opening Session

#### Session 1 - Coherent Structures I

KN 1, Coherent Structures Associated With Turbulent Transport  
R.F. Blackwelder

#### Session 2 - Coherent Structures II

On Coherent Structure

W.O. Criminale

Eruption Mechanism for Turbulent Flows Near Walls

J.D.A. Walker and S. Herzog

Study of Streamwise Vortical Structures in a Two-Dimensional Turbulent Channel Flow by Digital Image Processing

K. Nishino, K. Kasagi and M. Hirata

Coherent Structures in the Inner Layer of Wall Turbulence Under the Spatial Restriction

S. Maruyama and H. Tanaka

The Generation of Surface Renewal Eddies in an Open-Channel Flow

S. Komori, Y. Murakami and H. Ueda

13:20-18:00

#### Session 3 - Coherent Structures III

KN 2, Coherent Structures and Turbulence Management in Free Shear Flows

A.K.M.F. Hussain

Incoherent Turbulence Structure in the Vortex-Street Wake of a Normal Plate

M. Kiya and M. Matsumura

On Large Scale Coherent Structure in Turbulent Plane Plume

A. Murota and K. Nakatsuji

Turbulence Measurements in a Nearly Homogeneous Shear Flow

M. M. Gibson and V. E. Kanellopoulos

#### Session 4 - Coherent Structures IV

Turbulence Characteristics Downstream of Two Types of Turbulence Promoters

J.C.S. Lai, K.J. Bullock and T.B. Walker

Coherent Structure of a d-Type Rough Wall Boundary Layer

H. Osaka and S. Mochizuki

On Physical Mechanism of Turbulent Drag Reduction Using Riblets

K.S. Choi

#### Session 5 - Fundamentals I

Some Contributions to Asymptotic Theory for Turbulent Flows

K. Gersten

The Probability Density Function for Contaminant Concentration in Some Self-Similar Turbulent Flows

P.C. Chatwin and P.J. Sullivan

Experimental Investigation of the Effect of a Strong Contraction on Homogeneous Turbulence

Y. Han, A. Shabbir and W. K. George

Turbulence Subjected to Compression, and Passive Scalar Transport

J.P. Bertoglio

Tuesday, October 27, 1987

9:00-12:00

**Session 6 - Fundamentals II**

**KN 3, High Rayleigh Number Turbulence Convection**

R.J. Goldstein

The Growth and Collapse of a Turbulent Patch in a Stratified Fluid

H.J.S. Fernando and I.P.D. DeSilva

The Effect of Embedded Longitudinal Vortex Pairs on Turbulent Boundary Layer Heat Transfer

W.R. Pauley and J.K. Eaton

**Session 7 - Free Shear Flows I**

Concerning the Wake Effect on the Initial Instability Development of a Mixing Layer

J.J. Miao and C.T. Hsu

The Effects of Stabilizing and Destabilizing Curvature on a Turbulent Mixing Layer

M.W. Plesniak and J.P. Johnston

An Experimental Study of Flow Around a Square Prism

D.F.G. Durão, P.S.T. Gouveia and J.C.F. Pereira

The Entrainment Eddies in a Wake Flow

M. Tabatabai, J.G. Kawall and J.F. Keffer

13:20-17:00

**Session 8 - Free Shear Flows II**

**KN 4, The Organized Motion and Its Contribution to Transport in Turbulent Shear Flows**

R.A. Antonia

Covariance and Mixing of Temperature Fluctuations from Line Sources in Grid Turbulence

H. Stapoutzis

Transport Phenomena in Three-Dimensional Turbulent Surface Jets with Buoyancy Effect

F. Ogino, A. Kimoto and M. Kageyama

Prediction of a Gas-Particle Turbulent Jet with the Fluctuation-Spectrum-Random-Trajectory Model

J. Fan, K. Cen, H. Taniguchi and H. Zhao

**Session 9 - Applications**

Application of an Algebraic Stress Model to Axisymmetric Flows in an Engine-Like Cylinder

S.H. Kang and C.H. Lee

Simulation of an Axisymmetric Jet under Controlled Excitation

E. Stuhltracger and T. Miyauchi

Experimental and Numerical Studies of Propagation Phenomena in Turbulent Flows Around Buildings

W. Frank

A Generalized Approach to Wind Set-Up

I.K. Tsanis

Local Mass Transfer from Skewed Cavities

M.K. Chyu and J.S. Kapat

Wednesday, October 28, 1987

9:00-12:00

**Session 10 - Wall Shear Flows I**

**KN 5, Recent Results in the Prediction of Turbulent Separated Flows**

H. Pletcher

Statistical Characteristics of Transfer Processes in a Wall Turbulent Shear Flow

Y. Nagano and M. Tagawa

The Influence of Jet-Grid Turbulence on Turbulent Boundary Layer Flow and Heat Transfer

J.C. Han and C.D. Young

**Session 11 - Modeling and Numerical Simulations I**

Application of a Two-Equation Model to Heat Transfer and Fluid Flow of an Impinging Round Jet

T. Kunugi and H. Kawamura

Application of an Improved  $k-\epsilon$  Turbulence Model to the Calculation of Pipe Flow with Circumferentially Nonuniform Heating

H.K. Myong, N. Kasagi and M. Hirata

The Finite Element Turbulent Flow Analysis of Three-Dimensional Large Scale Problems

H. Okuda, Y. Eguchi and G. Yagawa

A Refined Numerical Procedure for Turbulent Heat Transfer with Coarse Grids of Finite Difference Calculation

I. Satoh and Y. Kurosaki

13:20-18:00

**Session 12 - Wall Shear Flows II**

**KN 6, Turbulent Transport in Wall Shear Flows**

T.J. Hanratty

Effect of Injected Polymer Thread on Turbulence in a Pipe Flow

H. Usui and Y. Sano

Experimental Studies on Laminarization of Turbulent Duct Flow by Fluid Injection

K. Suzuki, T. Baba, A.K.A. Rahman and Y. Hagiwara

**Session 13 - Measurements I**

Direct Measurement of Streamwise Vorticity Fluctuations With a Cylinder Probe

E. Bawirzanski, M. Randolph and H. Eckelmann

Tracking of Macroscopic Particle Motions Generated by a Turbulent Wind via Digital Image Analysis

A.D. Ciccone, J.G. Kawall and J.F. Keffer

Liquid-Crystal Thermometry Based on Automatic Color Evaluation and Applications to Measure Turbulent Heat Transfer

N. Akino, T. Kunugi, M. Ueda and A. Kurosawa

Measurements in Heavily-Laden Jets with Phase-Doppler Anemometry

Y. Hardalupas, A.M.K.P. Taylor and J.H. Whitelaw

**Session 14 - Measurements II**

An Experimental Study on Turbulent Transport in Two-Dimensional Shear Layer by Simultaneous Measurement of Velocity and Concentration with a Laser Doppler Velocimeter and a Laser-2-Focus System

I. Yokota, T. Nakajima, R. Matsumoto and S. Noda

The Characteristics of Periodic Motions in Swirling Flows with and without Flame

J.K. Yoon and H.D. Shin

Direct Measurements of Momentum and Mass Transport in Turbulent Shear Flows by Combining LDV and Laser Fluorescence Method

T. Takagi, T. Kondo, M. Komiyama and Y. Shintani

Dispersed Phase Transport in a Confined Plane Mixing Layer

H. Kobayashi, S.M. Masutani, S. Azuhata, N. Arashi and Y. Hishinuma

Thursday, October 29, 1987

9:00-12:00

**Session 15 - Modeling and Numerical Simulations II**

**KN 7, Investigation of Heat and Momentum Transport in Turbulent Flows via Numerical Simulations**

J. Kim

Numerical Simulation of Homogeneous Compressible Turbulence

K. Dang and Y.F. Morchoisne

Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High and Low Reynolds Numbers

K. Horiuti

**Session 16 - Wall Shear Flows III**

**Large-Scale Vortical Structure in the Turbulent Boundary Layer Flow Under Unstably-Stratified Conditions**

H. Ueda, S. Komori and K. Fukui

Turbulence Transport Phenomena Across Stable Thermal Stratified Layer in a Rectangular Channel Duct

K. Hishida, T. Ogita, M. Maeda and S. Yokobori

Fluctuations and Massive Separation in Three-Dimensional Shock-Wave/Boundary-Layer Interactions

M.I. Kussoy, J.L. Brown, J.D. Brown, W.K. Lockman and C.C. Horstman

Modeling Turbulent Heat Transfer in Impinging Jets

K. Kataoka, H. Degawa, Y. Hamada and S. Hamano

13:20-16:20

**Session 17 - Modeling and Numerical Simulations III**

**KN 8, Advances in Turbulent Transport Modeling Based on Direct Simulations of Turbulence**

W.C. Reynolds

Large Eddy Simulation of Turbulent Swirling Flow

T. Kobayashi and Y. Morinishi

Numerical Predictions of Flow Characteristics and Retardation of Mixing in a Turbulent Swirling Flow

S. Hirai, T. Takagi and T. Higashiya

**Session 18 - Modeling and Numerical Simulations IV**

**Finite-Volume Calculations of a High Reynolds Number Backward Facing Step Flow Employing Non-Staggered Numerical Grids**

S. Obi, M. Peric and G. Scheuerer

A Closure Model of Diffusion Transport of the Reynolds-Stress Equation and its Application to a Turbulent Step Flow

R.A. Amano

The Simulation of Flow and Heat Transfer in Channels with a Ribbed Surface

T.R. Fodemski

**Closing Session**



ADVANCED REGISTRATION FORM

2nd International Symposium on Transport Phenomena in Turbulent Flows  
The University of Tokyo, Tokyo, Japan  
October 25-29, 1987

Please print or type information

Prof./Dr./Mr./Ms./Mrs./Miss \_\_\_\_\_  
Last name First Middle Initial

Spouse name if attending \_\_\_\_\_

Name of company or firm \_\_\_\_\_

Street address or P.O. Box number \_\_\_\_\_

City State Zip

Country Telephone number

Note: A compilation of business addresses will be provided to all participants. If you do not want to be included on the list, please indicate. ( ) Do not list.

Optional Home Address Information

Home address \_\_\_\_\_

City State Zip

Country Telephone number

Registration Fees

( ) Symposium Registration - including Symposium Volume, Reception and Banquet \_\_\_\_\_ × ¥40,000 = \_\_\_\_\_

( ) Symposium Registration - including Symposium Volume and Reception \_\_\_\_\_ × ¥30,000 = \_\_\_\_\_

( ) Spouse/Family Member - including Symposium Reception and Banquet \_\_\_\_\_ × ¥10,000 = \_\_\_\_\_

Total Enclosed \_\_\_\_\_

Payment: ( ) check, ( ) money order, ( ) cash, ( ) bank transfer

日本機械学会関西支部 第153回講習会

「数値流体力学の初歩から実用まで」

協賛予定：化学工学協会関西支部、関西造船協会、日本ガスタービン学会、ターボ機械協会  
 流れの可視化学会、流れの計測懇談会、日本伝熱研究会、日本流体力学会、日本航空宇宙学会関西支部、日本造船学会

日時 昭和62年11月12日(休)、13日(金) 9:00~17:20

会場 日生中之島研修所 6階 特別教室

大阪市北区中之島4-3-43 電話(06)443-3131代  
 ○地下鉄四ツ橋線「肥後橋」下車、北へ100m、朝日ビル北側を西へ800m(なにわ筋東側)  
 ○大阪駅前から市バス③船津橋行に乗車、「玉江橋」下車すく、または淀屋橋から市バス⑩境川行に乗車、「土佐堀1丁目」下車、北へ300m、玉江橋手前東側  
 ○国鉄環状線「福島」駅下車、または阪神電鉄「福島」駅下車、南へ600m、玉江橋渡り東側

趣 旨 最近の流体機器やエネルギー機器の設計・開発において、流れの数値解析は重要な役割を果たすようになってまいりました。さらに、パソコン(パーソナルコンピュータ)の長足の進歩と著しい普及によって、流れの数値解析は大型計算機とパソコンとが問題によって使い分けられるようになってきております。このような現状から、昨春秋に流れの数値解析に関する講習会を企画いたしましたところ、大変好評でございました。そこで、本講習会では高レイノルズ数流れとその応用、機器設計や音場への応用、パソコン利用による解析などの話題を取り上げました。講師の方々は斯界の第一人者ですので、講習の実があるように、各講演の終りに講師との討論の時間(約15分)を設けております。奮ってご参加ください。

題目・内容・講師

日 時	題 目	内 容	講 師
11月 9:00~10:40	数値流体力学の基礎	流体力学の基礎方程式を各流れ領域に対して解くための代表的数値解法の数学的基礎概念を具体例とともに解説する。	京都工芸繊維大学 工学学部 星 深 信 行
12日 10:50~12:30	高レイノルズ数流れに対する差分法の試み	高レイノルズ数流れにおけるナビエ・ストークス方程式の差分法について具体例を示しながら解説する。	鳥取大学工学部 河 村 哲 也
(休) 13:30~15:10	数値流体力学における流れの可視化	数値計算結果から流れの構造を理解し易くするための可視化手法について、具体例を示しながら解説する。	日産自動車㈱ 開発システム部 姫 野 龍 太 郎
15:20~17:00	格子形成法の基礎	数値流体力学に用いられる格子形成法の代表的手法とその特徴を具体例を示しながら解説する。	航空宇宙技術研究所 中 橋 和 博
11月 9:00~10:40	境界要素法の基礎と機器設計への応用	境界要素法の基礎を解説し、計算手法を述べる。機器の設計に応用した具体例につきその有効性を示す。また、その限界と今後の課題について述べる。	三菱電機㈱中央研究所 秋 下 貞 夫
13日 10:50~12:30	流れ場の中の音場の数値解析	流れ場と点音源による音場の干渉の問題について差分法の具体例を示し、騒音問題における数値解法について解説する。	大阪大学基礎工学部 椿 下 庸 二
13日 13:30~15:10	パソコンによる流れの有限要素解析	パソコンを用いた有限要素法による流れ解析の具体例を示し、パソコン利用の現状と将来性について解説する。	福岡大学理学部 大 西 和 榮
(金) 15:20~16:20	パソコンによる数値計算の高速化	パソコンを利用し、高速演算する手法やグラフィックスの高速表示に適した手法などを具体例を示し解説する。自作処理系を使用。	大阪府立大学工学部 荒 谷 敏 朗
16:20~17:20	パソコンによる原子炉内の熱流動数値解析	原子炉内での熱流動を解析するために、COBRA-3Cコードが広く用いられているが、このコードをパソコン用(IBM-PC)に改良し、大型計算機との比較によりその実用性を確認した。	原子力エンジニアリング 村 田 保

聴講申込み締切 11月9日(月)  
 定 員 120名

関西支部 第153回講習会 聴講教材 申込書

昭和 年 月 日

金 額		所属学協会名・資格	氏 名
聴講料 (教材代金含む)	会 員 正・准員 25,000円 大生・官公庁 12,500円 院生・学生員 6,000円 会 員 外 40,000円		
教材のみ	会 員 4,000円 会 員 外 6,000円	勤務先 (所属部 課 名)	
送金方法	現金書留 銀行振込	通信先 (目 毛 勤務先)	〒 (電話 )
※入金	年 月 日		

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

# 1990年代における熱工学の展望

第948回講演会=熱工学(新方式)

## 熱工学シンポジウム 『熱工学の現状と展望』

特別講演会

『最先端技術と熱工学』

『熱工学における数値計算の最前線』

開催 11月18~20日 (日本機械学会熱工学部門主催  
日本学術会議 共催)

開催日: 昭和62年11月18日(水)、19日(木)、20日(金)

会場: 日本学術会議(6階)第4部・第7部会議室  
(東京都港区六本木7-22-34 (03) 403-6291...内線 283)

交通: (地下鉄)千代田線 乃木坂駅(原宿側出口)徒歩1分)

日程:

月日	第4部会議室(A室)	第7部会議室(B室)	行事
11月18日(水)	自然対流 I (9.30 ~ 10.50)	燃 焼 (9.30 ~ 10.50)	
	自然対流 II (11.00 ~ 12.00)	その他 (11.00 ~ 12.00)	
11月19日(木)	熱工学シンポジウム 『熱工学の現状と展望』 燃焼(13.10~14.20) 伝熱(14.30~15.40) 熱物性(15.50~17.00)		日本学術会議熱工学 研究連絡委員会主催
11月19日(木)	凝固を伴う自然対流 (9.30 ~ 10.40)	サイクル I (9.10 ~ 10.40)	懇親会 (18.00 ~20.00) 健保会館 (411室)
	凝 結 (10.50 ~ 11.50)	サイクル II (10.50 ~ 12.00)	
11月20日(金)	特別講演会 『最先端技術と熱工学』 (13.00 ~ 14.55) (15.05 ~ 17.00)		
11月20日(金)	強制対流 I (9.10 ~ 10.30)	相 変 化 (10.40 ~ 12.00)	
	強制対流 II (10.40 ~ 12.00)		
11月20日(金)	特別講演会『熱工学における数値計算の最前線』 強制対流(13.00~14.00) 自然対流(14.00~14.40) 自由界面流・二相流・相変化(15.00~16.00) ふく射・混合・燃焼・物性(16.00~17.00)		

## 熱工学シンポジウム 『熱工学の現状と展望』

日本学術会議熱工学研究連絡委員会主催  
日本機械学会熱工学部門 共催

11月18日(水) 13時~17時 第4部会議室(A室)

伝熱・燃焼・熱物性の各熱工学分野における研究の現状と展望に関する講演とトピックス的な研究についての講演および討論

(次第)

13.00 ~ 13.10 挨拶

熱工学研究連絡委員会委員長

西川 兼康(久留米高専学長)

13.10 ~ 14.20 【対流伝熱】(座長 木村 逸郎(東海大学))

1. 燃焼研究と燃焼技術の動向と問題  
大阪大学教授 工学部 水谷 幸夫

2. 内燃機関内の燃焼に関する研究動向  
京都大学教授 工学部 池上 詢

14.30 ~ 15.40 【伝熱伝導】(座長 枝美 裕(京大))

3. 伝熱研究の現状と展望  
東京工業大学教授 工学部 越後 亮三

4. ミクロ伝熱 東京大学教授 工学部 小竹 進

15.50 ~ 17.00 【燃焼物性】(座長 棚沢 一郎(東大))

5. 高効率エネルギー利用技術における熱物性値  
— 潜熱蓄熱技術を中心にして —  
ダイセル化学工業株式会社 主席 小沢 丈夫

6. 先端科学技術における熱物性研究の重要性  
慶応義塾大学教授 工学部 長島 昭

## 特別講演会 『最先端技術と熱工学』

日本機械学会熱工学部門主催  
日本学術会議 共催

11月19日(木) 13時~17時 第4部会議室(A室)

1990年代の日本を支える先端技術の現状とその展望について、その分野の第一人者が熱工学分野の研究者のために、熱工学との関わりなどについて分かり易く解説する。

(13.00 ~ 14.55) (座長 黒崎 晏夫(東工大))

1. バイオエンジニアリングの現状と展望  
早稲田大学教授 理工学部 土屋 喜一

【新材料の現状と展望】  
2. 金属基複合材料 金属材料技術研究所 渡辺 修

3. 薄膜技術 三菱電機株式会社 LSI研究所 平山 誠

(15.05 ~ 17.00) (座長 高城 敏美(阪大))

4. 高温超電導物質の現状と展望  
株式会社 東芝 総合研究所 萩原 宏康

【レーザー技術の現状と展望】  
5. 燃焼のレーザー計測技術  
豊橋技術科学大学教授 大竹 一友

6. レーザ加工技術  
株式会社 ソルテック 研究所所長 池田 正幸

冬季別言語研究会  
「熱工学における数値計算の最近の進展」

11月20日(金) 13時～17時 第4部会議室(A室)

1990年代を支える若手研究者が、強制対流、自由界面流等の広い範囲の流れ場における熱・流動現象の数値解析について、現在解析中の経験に基づき数値計算上のポイントとノーハウについて講演する新企画の特別講演会

13.00～14.00【強制対流】(座長 小竹 進(東大))

1. 乱流数値解析のポイント  
東京大学生産技術研究所(D2) 谷口 信行
2. 乱流モデルとその数値解析のポイント  
東京大学船用機械工学科(D3) 明 賢国
3. スーパーコンピュータによる熱流動解析のポイント  
朝日立製作所機械研究所 研究員 加藤 千幸
4. 3次元非定常流計算のポイント  
名古屋大学工学部機械工学第2学科助手 楢田玄一郎

14.00～14.45【自然対流】(座長 土方 邦夫(東工大))

5. 発熱流体の自然対流計算のポイント  
東京大学工学部原子核工学科助手 黒川 政秋
6. 自然対流不安定問題解析のポイント  
東京大学生産技術研究所(D3) 宗像 鉄雄
7. 宇宙材料実験シミュレーションのポイント  
石川島播磨重工業株式会社技術研究所主任 内田 博幸(休職)

15.00～16.00【自由界面流・二相流・相変化】(座長 川口 修(慶応大))

8. 水溶液凍結問題の数値解析のポイント  
北海道大学工学部機械工学第2学科(D1) 山田 雅彦
9. 流下液膜上の界面波解析のポイント  
東京工業大学工学部機械物理工学科助手 長崎 孝夫
10. 自由界面をもつ流れ解析のポイント  
京都大学工学部機械工学科助手 萩原 良道
11. 軽水炉蒸気発生器の二相流動解析のポイント  
三菱重工重工業高砂研究所研究員 中森 信夫

16.00～17.00【ふく射・混合・燃焼・物性】(座長 吉田 亮(東京電機大))

12. 有限要素法によるふく射計算のポイント  
東京工業大学工学部生産機械工学科助手 佐藤 勲
13. 旋回乱流場における流動・混合計算のポイント  
大阪大学工学部産業機械工学科助手 平井秀一郎
14. 燃焼の動力学的計算のポイント  
京都大学工学部工業化学科(D2) 阪口 恵蔵
15. 物性値データベースの使用のポイント  
九州大学工動力機械工学科助教 高田 保之

熱工学言語研究会(新方式)

(1)講演番号右横に付した記号、Aは論文講演A、Bは論文講演B、番号のみは要旨講演を致します。

(2)講演・討論時間

	講演	討論	合計
論文講演(A,B)	20分	10分	30分
要旨講演	15分	5分	20分

(3)本次第書において筆頭者が講演発表者です。

(4)連名者で所属(勤務先・通学先)が省略されている方は前者と同一です。

文書討論のお願い

- ◆文書による討論(質問)の提出は下記の要領でお願いします。
- ◆論文講演に対しては、講演終了後1週間以内は自由討論(質問)を受け付けますので文書でご提出ください。
- ◆討論の採否は理事会にご一任下さい。
- ◆記入用紙:大きさはA4判の用紙で1枚以内(400字程度)
- ◆記入項目:「948 回講演会=熱工学」と題記、(1)論文の講演番号、講演者名、(2)討論提出者の氏名、勤務先、通学先、(3)討論(質問)の内容
- ◆討論送付先: 本会編集課まで

11月18日(水)

第4部会議室(A室)

9.40～10.50(座長 山岸 英明(室蘭工大))  
【自然科学分科 I】

- 101A 垂直な平板に沿う強制-自然非対称対流の乱流熱伝達(対向流の場合)  
稲垣 照美(豊田高専)、北村 健三(豊橋技科大)
- 102 水平流体層乱流自然対流の熱輸送機構に対するプラントル数の影響について  
河原 全作(京大)、嵯峨 裕、岸ロー平太
- 103A 水平環状多孔質内非定常三次元自然対流のガラキン法による解析  
舘 燕飛(九大)、福田 研二、長谷川 修

11.00～12.00(座長 北村 健三(豊橋技科大))  
【自然科学分科 II】

- 104A 密閉形円管熱サイホンの流動様式と伝熱機構  
山岸 英明(室蘭工大)、石黒 亮二(北大)  
熊田 敏明(北大)、丸子 洋一(北海道松下)  
杉山 弘(室蘭工大)
- 105A 鉛直平板上での3成分混合気の熱と物質の同時移動を伴う層流自由対流  
渡部 正治(九大)、藤井 哲、小山 繁

第7部会議室(B室)

9.30～10.50(座長 永井 伸樹(東北大))  
【自然対流】

- 201A 2連式バルブレスパルスバーナに関する研究(第1報、燃焼の安定性への当量比と質量流速の影響)  
斎藤 和夫(東芝)、江口 邦久(筑技研)  
岸本 健(国士館大)、斎藤 俊彦(東芝)  
藤井 昭一(筑技研)
- 202 酸素富化空気によるディーゼル機関駆動の研究  
寺尾 邦夫(横浜国大)

- 203A 水素噴射エンジンにおける燃焼圧力変動に関する研究  
Pichainarong Pichan(武蔵工大)、福岡 隆雄  
大塚 千之、古浜 庄一

11.00～12.00(座長 斎藤 俊彦(東芝))  
【その他】

- 204A 強制レイリー散乱法による液体の温度伝導率測定の研究(第3報、溶融塩の測定)  
長坂 雄次(慶応大)、島山 拓也、奥田 真一  
長島 昭、宮崎 拓也

- 205A 回転体表面の液体の微粒化(第1報、回転体表面の液膜の挙動と液滴生成)  
大黒 正敏(八戸工大)、阪水 秀明(東京三洋)  
永井 伸樹(東北大)

11月19日(木)

第4部会議室(A室)

9.30~10.40【座長 福田 尚一郎(北大)】  
【添付図表を伴う自然対流】

- 106B 凝固と発熱を伴う水平管内自然対流熱伝達  
(第2報、非定常の場合)  
寺野 哲浩(豊橋技科大), 三田地敏史, 五十嵐隆典
- 107 結晶育成過程における融液内の自然対流に対する鉛直磁場の効果  
宗保 鉄雄(東大), 棚沢 一郎
- 108 チョクラルスキー法を模倣した回転容器内の融液中の自然対流における温度場の振動現象に関する研究  
宗保 鉄雄(東大), 棚沢 一郎

10.50~11.50【座長 棚沢 一郎(東大)】  
【添付図表】

- 109B 円管内気液成層流の凍結熱伝達  
高橋 正人(北大), 細迫 尚一郎  
矢野 正人(富士重工)
- 110A 曲がり円管の凍結破壊  
(第3報、45°曲がり円管および直円管の凍結挙動)  
稲葉 英男(北見工大), 追分 重隆, 福田 武幸  
菅原 征洋(秋田大)

第7部会議室(B室)

9.10~10.40【座長 黒崎 晏夫(東工大)】  
【サイクルI】

- 206B ソーラヒートポンプシステムの性能予測に関する研究  
山本 政樹(北見工大), 金山 公夫, 馬場 弘
- 207A 二空間モデルによる二成分二相スターリング機関の性能予測  
松野 好洋(日本板硝子), 平田 賢(東大)  
笠木 伸英(東大), 黒田 明彦, 二宮 尚
- 208A フロン系冷媒R22の熱力学状態曲面とサイクル特性  
香川 澄(東芝), 田中 寛(豊田自動織機)  
上松 公彦(慶応大), 渡辺 康一

10.50~12.00【座長 上松 公彦(慶応大)】  
【サイクルII】

- 209 一つの空気液化サイクルについて  
高玉 綱(発電技研)
- 210 一つの液体空気動力発生サイクルについて  
高玉 綱(発電技研)
- 211B 平板状ヒートパイプの熱輸送限界  
村上 政明(三菱電機), 大串 哲朗, 山中 昭郎

11月20日(金)

第4部会議室(A室)

9.10~10.30【座長 鈴木健二郎(京大)】  
【添付図表を伴う自然対流 I】

- 111B 壁面の一部が加熱された流路の熱伝達に対する壁内熱伝導の影響  
佐藤 勲(東工大), 黒崎 晏夫
- 112 空間的・時間的不均一な発熱体のガス冷却特性  
小川 矩弘(東大), 秋山 守
- 113A 外面を局所加熱した円管内層流強制対流  
新里 寛英(九大), 小山 繁, 藤井 哲  
田中 守也(三井石油化)

10.40~12.00【座長 小山 繁(九大)】  
【添付図表を伴う自然対流 II】

- 114A ダクト内乱流の吹き出しによる層流化に関する実験的研究  
萩原 良道(京大), 鈴木健二郎  
馬場 利秋(神戸製鋼), Ali k. A. Rahman(京大)
- 115 圧延鋼材の制御冷却技術に関する一考察  
土枝 正弘(新日鐵), 松崎 捷成, 嶋崎 誠治
- 116A 前向きステップによるはく離点近傍伝熱特性の時空間的微小構造解明の研究  
(層流および乱流境界層の場合)  
小泉 博義(電通大), 森 康夫, 野吾祐一郎

第7部会議室(B室)

10.40~12.00【座長 小竹 進(東大)】  
【添付図表】

- 212A カリウムの凝縮熱伝達に関する実験的研究  
杉山憲一郎(北大), 石黒 亮一
- 213 半導体パッケージに相変換剤を封入した時の簡易な熱解析モデル  
石塚 勝(東芝)
- 214A プール膜沸騰における蒸気膜の安定性について  
田中 宏明(東大)

懇親会

日時: 昭和62年11月19日(木) 18.00~20.00  
会場: 健康会館 411会議室(港区南青山1-24-4)  
講演会場より徒歩2分 ☎(03)403-0531(代表)  
交通: (地下鉄)千代田線乃木坂駅上(赤坂側出口)  
会費: 5,000円

ご参加の方、是非お買い求め下さい。!!

講演資料集: 11月20日開催の「熱工学における数値計算の最前線」の特別講演会の講演資料集(講演者一人4ページ、15分)を1冊(またはまとめて収録したものです)。  
定価: 2,000円

講演概要集: 熱工学講演会の論文講演A, Bの概要(1ページ)(No.870-11)と要旨講演の講演要旨(2ページ)を1冊にまとめて収録したものです。 定価: 1,000円

論文抜刷: 講演会当日会場でのみ販売いたします。論文講演A・Bを1論文ごとにゼロックスコピーしたものです。  
価格: 1論文100円  
(当論文抜刷は会期以外の販売並びに郵送による)お申込はお受けできません

事前申込をしてない方は、会場受付で申し込みお支払い下さい。

事前申込について

▼事前申込: 懇親会参加および講演概要集の購入ご希望の方は、日本機械学会あて事前にお申込ください。

▼申込締切日: 11月6日(金)

▼申込方法: はがき大の用紙に「第948回熱工学講演会申込」「同懇親会申込」と題記し、(1)講演資料・概要集(冊数とも)(2)申込者氏名(3)通信先(会社の時は詳細に)、(4)送金額を明記のうえ、代金を添えて本会あてお申込ください

〒151 東京都渋谷区代々木2-4-9 (三信北星ビル5階)  
☎(03)379-6781, FAX(03)379-0934

# 第11回 人間-熱環境系シンポジウム

実行委員長：国立公衆衛生院 橋原 裕 期日：昭和62年12月4日(金) 5日出 場所：国立公衆衛生院(〒108 東京都港区白金台4-6-1)TEL(03)441-7111

## 第1日 12月4日(金)

- 9:00 開会の辞 ..... 準備委員会代表 後 藤 滋  
 9:05 研究発表 衣服の熱抵抗の非対称と熱的快適性 ..... デンマーク工科大 B.W.Olesen, R.de Dear, お茶の水女子大 長谷部 ヤエ  
 9:22 \* 衣服内気候と快適性 ..... 武蔵川女子大 横 山 宏太郎  
 9:39 \* 寝床内気候が睡眠へ及ぼす影響(その2) ..... 松下住設機器 萩野弘之, 西田弥生, 山本照夫, 石井克己  
 9:56 \* 運動中の衣服下気候と着心地に及ぼす綿シャツ地の吸水性性能の影響 ..... 昭和女子大 三ツ井紀子, お茶の水女子大 中島利誠  
 10:13 \* 気温上昇時にポリエステルシャツを着用すると綿シャツを着用する時よりも発汗が開始する時間が速い ..... 奈良女子大 登倉孝史, 有沢伸枝, 越川知子, 日清紡績 柳内雄一  
 10:30 \* 体温自動調節器に関する研究 ..... 三洋電機 日野谷勝弘, 大隅正人, 新頭昌和, 菊本 誠, フェニックス 萩原素雄, 製薬研 多屋秀人  
 11:00 \* 動物が温度に順応するための時間について ..... 横浜国大 佐藤 忠, 寺尾邦夫  
 11:17 \* 高温環境におけるラットの自発行動 ..... 国立公衆衛生院 市川 勇  
 11:34 \* 高血圧自然発症ラット(SHR)の体温調節反応の特徴 ..... 産医研 津 田 晋一  
 13:00 特別講演 System View of Temperature Regulation ..... 司会 吉田 燦, Dr. Wolf-Herbert Weibe  
 14:30 パネルディスカッション 熱環境と衣服 ..... 司会 中 島 利 誠, 田 村 照 子  
 至適温度と衣服重量は時代と共にどの様に变化したか ..... 実践女子大 吉田 敏一  
 障害者・高齢者・子供の体温調節 ..... 山梨医大 来 正 躬  
 着衣の熱抵抗測定法の諸問題 ..... 大阪市大 三 平 和 雄  
 衣服着用の実態 ..... 芝浦工大 南 野 尚  
 着衣量ならびにその支配要因に関する日英比較 ..... 大阪教育大 奥 朝 子  
 18:00 懇 親 会

## 第2日 12月5日(土)

- 9:00 研究発表 小型温冷感センサーの開発 ..... ダイキン工業 小林 昇, 小林正博, 上村茂弘  
 9:17 \* 室内環境評価とその応用例 ..... 三菱電機 菅原作雄, 原 正 規  
 9:34 \* 住宅熱環境の調査と評価法 -環境体温計による全国調査- ..... 横浜国大 川島美穂, 今多靖子, 河内佑一郎  
 9:51 \* 冷・暖房時における室内の空間的溫度分布測定 ..... 横浜国大 福 素 茂 夫, 山 本 一 彦, 古 林 誠  
 10:08 \* 都市の建物キャニオンの熱環境測定 ..... 京大 吉 田 篤 正, 綿 谷 茂  
 10:40 \* 通風・室内気流が人体の熱的快適感に及ぼす影響に関する実験研究 ..... 司会 森 田 矢次郎, 堀 井 宏 修  
 10:57 \* 室内気流の人体影響に関する実験的研究(その7) ..... 奈良女子大 久 保 博 子  
 11:14 \* 熱流束計による体表全面的対流熱流束分布実測 ..... 九大 尾 添 謙 之  
 11:31 \* 変動熱環境に対する反応のインパルス応答 ..... 関西大 桜井美枝, 森本 宏, 三重大 松原吉樹, 元関西大 堀江悟郎  
 13:00 特別講演 Carrying Load, Exposure to Radiant Heat and Sweating Efficiency under Stress ..... 司会 長 田 泰 公, Dr. Eliezer Kamon  
 14:30 研究発表 シャワーの湯温, 湯量による人体反応 ..... 司会 棚 沢 一 郎, 藤 田 憲 生  
 14:47 \* 環境体温計によるサーカディアンリズムの調査 ..... 昭和大 田中正敏, 大中忠勝, 建研 坊垣和明, 東京ガス 榎井秀夫, 杉山博子, 日本女子大 洪 玉珠, 東大 鎌田元康, 筑工大 中山明宏, 市川忠良  
 15:04 \* 前額部あるいは顔部冷却時の鼓膜温変動について ..... 横浜国大 川島美穂, 新垣 学, 小菅 円, 今多靖子  
 15:21 \* 各種熱環境指標による日本の体感気候分布に関する研究 ..... 後藤 康 宏, 服部正明, 後藤 宏  
 15:38 \* さまざまの日常生活要因による熱感応障害の研究(1) -血管拡張剤の耐寒性に及ぼす影響の動物モデルおよびヒトによる検討- ..... 日大 吉田 燦, ヘキスト 重信幹夫, 実践女子大 吉田敬一, 国立公衆衛生院 橋原 裕, 日大 角館英美, 蜂巣浩生  
 16:10 \* 温熱環境が運動時の人体に及ぼす影響に関する研究-第2報- ..... 司会 田 中 正 敏, 松 原 尚 樹  
 16:27 \* 室内外気温差の人体影響に関する研究-第1報- ..... 奈良女子大 早 川 和 代  
 16:44 \* 正弦温度変化と体温 ..... 奈良女子大 磯 田 憲 生  
 17:01 \* 人間の局所的温冷感に関する研究 ..... 東京ガス 後 藤 信 之, 東大 棚 沢 一 郎  
 17:18 \* 屋外気候環境における快適感に関する実験 ..... 九州工大 石 井 昭 夫  
 17:35 閉会の辞 ..... 横浜国大 川 島 美 穂

共 催：空気調和・衛生工学会(幹事学会), 人間協働学会, 日本伝熱研究会, 日本生気象学会, 計測自動制御学会, 生理人類学会  
 協 賛：日本産業衛生学会, 日本生理学会, 日本M B学会, 日本サーモグラフィ学会, 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, 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, 日本繊維環境学会, 日本病院設備協会, 日本熱物性研究会, 全国コンプレックス協会  
 後 援：日本学術会議

参加費：5,000円(報告集代を含む) 懇親会：12月4日 18:00~20:00 会費4,000円の予定  
 参加申込：往復の切符に(1)氏名(ふりがな) (2)勤務先 (3)連絡先 (4)所属学協会 (5)懇親会出席の有無 を記入して下記までにお送り下さい。  
 定員300名で締切らせていただきます。  
 連絡先：〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156 横浜国立大学工学部生産工学科内 TEL 045-335-1451 内線 2666 (川島) 第11回 人間-熱環境系シンポジウム準備委員会

## 第6回混相流シンポジウム

混相流シンポジウム実行委員会

開催日 昭和63年1月26日(火)、27日(水)、28日(木)

会場 日本学術会議講堂

(〒106 東京都港区六本木7-22-34) Tel. 03-403-6291

共催 日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会他 14学協会(予定)

開催趣旨

混相流という学問、技術分野が国内的にもまた国際的にも確立されてまいりました。わが国においては、1982年に日本学術会議水力学水理学研究連絡委員会(水力研連)のもとに混相流小委員会が設立されて、それまで各種混相流の研究がそれぞれの分野で独立に進められてきましたのを横に結ぶ活動が開始されました。その一環として「混相流シンポジウム」が水力研連他、多数の学協会の共催のもとで、混相流小委員会、そして現在の混相流シンポジウム実行委員会の企画によって合計5回開催され、混相流の基礎から応用まで広範囲にわたっての解説がなされました。そしてその論文集は多数の大学、企業さらには海外の図書館にも収められ、現在では混相流研究の中心の一つと認められるようになりました。

そこで今回は従来からの活動をさらに広げ、発展させることを意図して、従来行ってまいりました主要テーマに関する依頼講演とは別に、広く一般から募集した講演も行うことと致しました。混相流の基本的な科学・技術について各種混相流の分野を越えて共通の場で議論し、情報交換を行い、今後の混相流の科学・技術の進展をはかるとともに社会への貢献を行おうとするもので、以下のようなテーマで講演を募集いたします。

(1) 混相流の流動特性、流動機構、熱物質移動現象

自然現象としての混相流

管路、容器内外の混相流

生体系中の混相流 など

(2) 混相流のモデリング、シミュレーション

(3) 混相流のダイナミックス

(4) 混相流の計測技術

(5) その他混相流に関連する科学技術

なお、本シンポジウムでは応募される講演の内容が既発表か未発表かを問いません。また混相流の基礎的事項に関する問題提起やレビュー的な内容のものも歓迎いたします。

第6回混相流シンポジウムにおける依頼講演の内容は次のとおりです。

管水混相流の諸問題

管のスラリ輸送 : 白壁正高氏 (長岡技術科学大学)  
海洋の水(深氷) : 青田昌秋氏 (北海道大学)  
河川の水 : 平山健一氏 (岩手大学)  
船と氷 : 北川弘光氏 (船舶技術研究所)

混相流の基本的な流動機構、流動現象

固液混相流 : 岸力氏 (北海道大学)  
固気混相流 : 松本繁氏 (東北大学)  
気液混相流 : 有富正憲氏 (東京工業大学)  
スラリ : 益山忠氏 (東北大学)  
キャビテーション : 加藤洋治氏 (東京大学)

### 募集要旨

- (1) 講演の採否は企画責任者にご一任願います。
- (2) 講演時間は15分程度の予定ですが件数によって多少変更があるかもしれません。
- (3) 講演原稿ページ数は原稿用紙(1927字詰め)4ページとし、そのままオフセット印刷致します。

講演申込み締切 昭和62年9月末日

原稿締切 昭和62年11月末日

### 講演申込要旨

- (1) 講演申込者は上記申込締切日までに次の二項のものを添えて下記までご送付ください。
  - (A) 申込書：葉書大の要旨に「第6回混相流シンポジウム講演申込」と題記し、題目、発表者名(連名の場合は発表者に\*印をつける)、所属機関名、連絡先を明記する。
  - (B) 講演概要：B5版の要旨一枚に講演題目、発表者名および800字程度の講演概要を記入して申込書とともに提出する。
- (2) 講演申込締切後ただちに講演概要に基づいて採否を決定し、申込者に通知致します。講演採用者には原稿用紙を送付致しますので、四枚に執筆の上、締切日までにご送付下さい。
- (3) 講演者より講演申込整理費(1件1000円)を申し受けますので原稿提出時に合わせてお送りください。

### 参加費等

シンポジウム参加費として8000円(学生、院生3000円)を申し受けます。ただしシンポジウム参加者には第6回混相流シンポジウム講演論文集(依頼講演、募集講演ともに)を無料進呈致します。

昭和63年1月27日夜に懇親会を開催する予定です。

講演申込書、概要、原稿などはすべて下記までご送付ください。

(参加申込)

---

送付先：〒657 神戸市灘区六甲台町1-1

神戸大学工学部 赤川浩爾 気付

混相流シンポジウム実行委員会

TEL 078-881-1212

内線5139(赤川浩爾)、5160(小澤守)

FAX 078-881 0036

---

なお、ご不明の点などございましたら、混相流シンポジウム実行委員会事務局までご一報ください。




  
**INTERNATIONAL CENTRE**  
**for HEAT and MASS TRANSFER**  
Belgrade, Yugoslavia  
**FORTHCOMING**  
**MEETINGS**

**1988**

May 16-20, 1988 Dubrovnik, YU  
 International Seminar NEAR WALL TURBULENCE  
 CHAIRMAN: Prof. Stephen Kline  
 Stanford University, Thermoscience Division, Mechanical  
 Engineering Department, Stanford, CA 94305, USA  
  
 August 22-26, 1988 Dubrovnik, YU  
 Advanced Course ELECTRONIC EQUIPMENT COOLING  
 DIRECTOR: Prof. Allan D. Kraus  
 Department of the Navy, Naval Postgraduate School, Monterey, CA  
 93943-5100, USA  
  
 August 29 - September 2, 1988 Dubrovnik, YU  
 XX International Symposium HEAT TRANSFER IN ELECTRONIC  
 AND MICROELECTRONIC EQUIPMENT  
 CHAIRMAN: Prof. A. Bergles  
 Department of Mechanical Engineering, Aeronautical Engineering  
 and Mechanics, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York,  
 12180-3590, USA  
 SCIENTIFIC SECRETARY: Prof. E. Ganić  
 Mechanical Engineering Faculty, University of Sarajevo, 71000  
 Sarajevo, Yugoslavia

**1989**

March 13-17, 1989 Sarajevo, YU  
 International Forum MATHEMATICAL MODELING IN ENERGY  
 SYSTEMS  
 CHAIRMAN: Prof. K. Hanjalic  
 Mechanical Engineering Faculty, University of Sarajevo, Omladiniko  
 Setaliste b.b. 71000 Sarajevo, Yugoslavia  
  
 May 22-26, 1989 Dubrovnik, YU  
 International Seminar HEAT AND MASS TRANSFER ASPECTS OF  
 FISSION PRODUCT RELEASES  
 CHAIRMAN: Prof. J.T. Rogers  
 Department of Mechanical and Aero Engineering, Carleton  
 University, Ottawa, ONT K1S5B6, Canada  
 CO-CHAIRMAN: Dr D.W. Ross  
 US Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C. 20555, USA  
  
 September 4-8, 1989 Dubrovnik, YU  
 XXI International Symposium HEAT TRANSFER IN BUILDINGS  
 CHAIRMAN: Prof. C.L. Tien  
 College of Engineering, Mechanical Engineering Department  
 University of California, Berkeley, CA 94720, USA  
 CO-CHAIRMAN: Prof. C.J. Hoogendoorn  
 Technical University Delft, Department of Applied Physics  
 Lorentzweg 1, Postbus 5046, 2628 CJ Delft, The Netherlands  
 SCIENTIFIC SECRETARY: Prof. B. Todorovic  
 Mechanical Engineering Faculty, Belgrade University,  
 27. marta 80, 11000 Belgrade, Yugoslavia

**FURTHER INFORMATION:**  
 Further information available from Chairman of related meetings and from Secretariat  
 Office of the International Centre for Heat and Mass Transfer, P.O.Box. 522, 11001 Belgrade, Yugoslavia, Telephone (11) 455-663, Telex:  
 11563 YU Atn. ICHMT



## INTERNATIONAL CENTRE for HEAT and MASS TRANSFER

XXth International Symposium

# Heat Transfer in Electronic and Microelectronic Equipment

Sponsored by:

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris  
The Boris Kidric Institute of Nuclear Sciences, Belgrade

August 29, September 2, 1988  
Hotel Libertas Dubrovnik, Yugoslavia

### Symposium Objective

The International Centre for Heat and Mass Transfer has chosen Heat Transfer in Electronic and Microelectronic Equipment as the subject of its 1988 Symposium. The successful operation of modern electronic devices, ranging from large power tubes to microelectronic chips, is critically dependent on efficient and reliable heat transfer. The need for improved electronic cooling technologies has recently attracted the attention of a large number of industrial and university researchers. The 1988 Symposium is intended to bring together experts from around the world who will share their knowledge on this increasingly important subject.

The organizers encourage researchers to present their best work at this Symposium for eventual inclusion in the series of archival proceedings. It is expected that the proceedings will be comprehensive, up-to-date, and presented in a form useful to both researchers and designers.

Because of its location and traditions, ICHMT has successfully presented interchanges among experts from many different countries. In its 1988 Symposium, the Centre will strive especially to provide a meeting format and atmosphere that will promote communication between industrial and academic specialists.

### Symposium Format

The opening session will be at 09.00 hours on Monday, August 29, and the closing session will conclude in the afternoon of Friday, September 2. Wednesday afternoon is free to join the scheduled tour or other leisure activities. Sessions will consist of invited lectures, contributed papers, and discussion. The final session will feature a panel presentation and general discussion of directions of heat transfer research for electronic equipment.

### Scientific Program

Monday, August 29, morning

Opening of Symposium

Keynote Lectures: Evolution of Cooling Technology for Electronic and Micro-electronic Equipment  
Air Cooling technology

Contributed Papers on: Air Cooling

Monday, August 29, afternoon

Keynote Lecture: Overall Strategy for Thermal Control of Computers

Contribute Papers on: Air Cooling

Tuesday, August 30, morning

Keynote Lecture: Liquid Cooling — Indirect

Contributed Papers on: Liquid Cooling

Tuesday, August 30, afternoon

Keynote Lecture: Liquid Cooling — Direct

Contributed Papers on: Liquid Cooling

Wednesday, August 31, morning

Keynote Lecture: Conduction Aspects

Contributed Papers on: Conduction

Thursday, September 1, morning

Keynote Lecture: Thermal Control of Power Electronic Devices

Contributed Papers on: Heat Transfer in Power Electronic Devices

Thursday, September 1, afternoon

Keynote Lecture: Thermal Control of Peripheral Equipment

Contributed Papers on: Heat Transfer in Peripheral Equipment

Friday, September 2, morning

Keynote Lecture: Thermal Control of Electronic Equipment in Severe Service Application

Contributed Papers on: Heat Transfer in Low Gravity, High Temperature or Low Temperature Applications

Friday, September 2, afternoon

Panel discussion with general participation

### Scientific Information

General papers for the Symposium will be accepted on the basis of extended abstracts. These papers should be original contributions to the literature; however, review papers may also be submitted. The abstracts should be approximately 500 words in length and include sufficient figures or sketches to give an adequate indication of the full extent of the contribution. The final papers will be prepared by authors in a uniform format for direct reproduction according to instructions to be provided after paper acceptance.

Abstract should be sent to:

Professor Arthur E. Bergles  
Department of Mechanical Engineering  
Aeronautical Engineering and Mechanics  
Rensselaer Polytechnic Institute  
Troy, New York 12180-3590  
Telephone: (518) 276-6388 Telex: 0710050 RPITROU

One copy should be sent to the Secretary General of ICHMT.

Prof. N. Afgan  
International Centre for Heat and Mass Transfer  
P. O. Box 522, 11001 Belgrade, Yugoslavia

### Deadlines

Extended Abstracts: December 15, 1987  
Announcement of Acceptance: February 1, 1988  
Full Papers: June 1, 1988

NOTE: Manuscripts not received by this time cannot be preprinted by the Centre. Authors will then be responsible for bringing sufficient copies for distribution at the meeting. The mats must also be brought to the meeting.

### Preprints and Proceedings

Papers will be provided to all participants on arrival at the Symposium. The Symposium Committee and session chairmen will review all papers to assess their suitability for publication in the volume of proceedings. It is expected that the majority of the submitted papers will be suitable for this archival publication; however, minor revisions may be required. The proceedings will be published by Hemisphere Publishing Corporation.

### Advanced Course

An Advanced Course on a related subject will be held at the Hotel Libertas from August 22—26, 1988. The subject will be "Electronic Equipment Cooling".

Course Faculty Members:

Prof. Allan D. Kraus, Course Director;  
Prof. Avram Bar-Cohen,  
Prof. Rober Moffat.

A copy of the prospectus is available from the Symposium Secretary.

### Symposium Organizing Committee

#### Chairman

Professor Arthur E. Bergles  
Department of Mechanical Engineering,  
Aeronautical Engineering and Mechanics  
Rensselaer Polytechnic Institute  
Troy, New York 12180—3590, USA

#### Invited members

Professor M. Michael Yovanovich  
Department of Mechanical Engineering  
University of Waterloo  
Waterloo, Ontario N2L 3G1, CANADA

Professor Frank P. Incropera  
School of Mechanical Engineering, Purdue University  
West Lafayette, Indiana 47906, USA

Dr. Wataru Nakayama  
Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.  
502, Kandatou, Tochigi, Ibaraki, JAPAN

Professor Dr. Luiz Fernando Milanez  
Departamento de Engenharia Mecânica  
FEC/DEM Universidade Estadual de Campinas  
Caixa Postal 6122, 13081 Campinas, BRAZIL

Jean-Pierre de Jannou, Ingenieur  
Division Systeme Environnement  
Centre National d'Etudes des Telecommunications  
BP40, 22301 Lannion Cedex, FRANCE

Professor Chung-Fang Ma (tentative)  
Institute of Thermal Science and Energy Conversion  
Beijing Polytechnic University, Beijing 100022  
PEOPLE'S REPUBLIC CHINA

G. N. Dulnev  
Leningrad Institute of Mechanics and Optics,  
Leningrad, USSR

#### Scientific Secretary

Prof. Ejup Ganić  
Mechanical Engineering Faculty, University of Sarajevo  
Omladinsko šetalište b.b. 71000 Sarajevo, Yugoslavia

#### Symposium Secretary

Jovica R. Riznić  
International Centre for Heat and Mass Transfer  
P. O. Box 522, 11001 Belgrade, Yugoslavia

Announcement and Call for Papers

FIRST WORLD CONFERENCE

ON

EXPERIMENTAL HEAT TRANSFER, FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS

September 4 - 9, 1988 Dubrovnik, Yugoslavia

The objectives of the Conference are to bring together the experimental researchers and industrialists active in the areas of thermal and fluid science and engineering, to exchange their expertise and experiences in many research areas with cooperation and friendship, and to further stimulate their research activities. All participants will also have an opportunity to get informed on:

- \* advances in basic phenomena of heat transfer and fluid flow through conventional and sophisticated experiments
- \* state-of-the-art in experimental techniques and instrumentation
- \* innovative applications of research results through cross-fertilization of ideas from conference participants of various disciplines
- \* validity of experimental results in many fields
- \* definition of needs for further measurements
- \* experience gained and lessons learned from building test facilities and reducing test data

Papers dealing with experimental work together with theory, analysis and numerical studies on all aspects of heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics will be considered. Also, papers analyzing original or existing experimental data together with theory or numerical results will be accepted.

The Conference Scientific Committee (made up of leading world authorities and experimentalists in heat transfer, fluid mechanics, and thermodynamics) is in charge of approving the acceptance of papers and final conference program.

Deadlines

- \* Nov. 1, 1987 Three copies of up to 1,000 word abstract.
- \* Dec. 1, 1987 Notify abstract acceptance
- \* Jan. 15, 1988 Full-length paper due
- \* Mar. 15, 1988 Notify paper acceptance
- \* Apr. 15, 1988 Author-prepared mats due

Send abstracts and further inquiry to: Professor T. Aihara, Institute of High Speed Mechanics, Tohoku University, Katahira, Sendai 980; telephone: 022-227-6200, Ftx. 3337; Telex: 852246 A.B.:THUCOM J



The Water Jet Technology  
Society of Japan

## ウォータージェット技術 国際会議の御案内

9th International Symposium on  
Jet Cutting Technology

1988

10月4日(火)～6日(木)

仙台・東北大学工学部

### 趣 旨

高速ウォータージェット技術は、先端技術のひとつとして近年その応用分野が著しく広がっており、今後の開発の方向に産業界から強い関心が寄せられています。新しい技術が実用化されるまでには関連する多くの問題を解決しなければなりません。本国際会議は、ウォータージェット技術に関する基礎から応用までの研究成果を中心に国際的情報交換を行うことを目的とし、下記の要領で実施することになりました。この分野に関心のある方々が多数ご参加下さいますようご案内申し上げます。

### 講演募集テーマ

主として、ウォータージェット技術に関する次の分野をテーマとします。

- \* 噴流の流体力学的特性
- \* アブレイシブジェットおよびクリーニングの機構
- \* キャビテーション
- \* 脈動噴流およびバルス噴流
- \* 噴流と加工材料の干渉
- \* 安全性と適用環境
- \* 設計と計測
- \* 工業への応用(加工、洗浄、採鉱、掘削、建設、原子力、海洋など)
- \* 21世紀の展望

### 開催要領

特別講演会を含む学術講演会は10月4日から6日までの3日間。それと併行して、3回のパーティ、レディスプログラム、展示会を開催。学術講演会に引き続き研究施設の見学会、旅行会などを予定しています。

### スケジュール

- 1987年11月16日 講演申込み書・論文概要  
提出期限
- 1988年3月7日 論文原稿提出期限
- 7月1日 参加登録開始(予定)

### 使用言語

英語  
ただし、講演は日本語でも可。同時通訳あり。

### 講演・参加申込み方法

1. 参加希望者は、予備登録として次頁の申込み書(英文)を国内事務局にお送り下さい。次のサーキュラで詳細な実施要領などを連絡致します。
2. 講演希望者は、次頁の申込み書に論文概要を添付し、国内事務局にお送り下さい。論文概要は、A4判1ページに英文で、著者名、所属、概要(シングルスペース300語以内)をタイプすること。様式は任意。  
提出期限 昭和62年11月16日。
3. 講演希望者に対し論文執筆要領をお送りします。論文原稿の提出期限は昭和63年3月7日です。内容は未公表の研究成果または研究展望とします。論文の長さは、論文集の10ページ以内。
4. 展示会出品および論文集広告掲載の希望者は、次頁の申込み書の該当欄にチェックして下さい。詳細要領を国内事務局からお送りします。

### 国際会議事務局

- (1) 〒980  
仙台市荒巻青葉  
東北大学工学部機械工学第二学科  
小林 陵二 教授  
Tel : 022-222-1800  
(Ext. 4185・4157)  
Fax : 022-267-4403  
Telex : 852246 THUCOM J
- (2) BHRA, The Fluid Engineering Centre  
Cranfield Bedford  
MK43 OAJ England  
Tel : (0234) 750442  
Fax : (0234) 750074  
Telex : 825059 BHRA G



The American Society of  
Mechanical Engineers

# IECEC 1988

23rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference

"International Cooperation for the  
Advancement of Energy Technology"

July 31 - August 5, 1988  
Denver Marriott Hotel  
Denver, Colorado

**General Chairman**  
OZER ARNAS  
California State University, Chico  
Mechanical Engineering Department  
Chico, CA 95620  
(916) 895-6353

**General Co-Chairman**  
TONY C. MIN  
North Carolina A&T State University  
Mechanical Engineering Department  
Greensboro, NC 27411  
(919) 334-7620  
Telex \*510-600 7089

**Program Chairman**  
ROBERT J. COPELAND  
Solar Energy Research Institute  
1617 Cole Boulevard  
Golden, CO 80401  
(303) 231-1012  
Telex \*910-937-0738 WLSOQ GLDN

**Program Co-Chairman**  
VIGOR COSENTINI  
North Carolina A&T State University  
Mechanical Engineering Department  
Greensboro, NC 27411  
(919) 334-7799  
Telex \*510-600-7089

**Pacific Coordinator**  
NAOTSUGU ISSHIKI  
c/o T. HARAJIMA  
The Japan Society of Mechanical  
Engineers  
Sanshin Hokusai Bldg., 4-9 Yoyogi 2 Chome  
Shibuya-Ku, Tokyo 151, Japan  
(03) 2-940-0151  
Telex \*2322493

**European Coordinator**  
SERGIO S. STECCO  
Universita Degli Studi di Firenze  
Dipartimento Di Energetica  
Via di S. Maria, 2-1 20139 Firenze, Italia  
(055) 471925-4796  
Telex \*580681

**Administrative Office**  
Meetings Department  
American Society of  
Mechanical Engineers  
345 East 47th St.  
New York, NY 10017.  
(212) 705-7057  
Telex \*710-981-5267

## Call for Papers

The Intersociety Energy Conversion Engineering Conference provides a forum to present and discuss engineering aspects of advanced technology or nonconventional energy conversion systems and devices. The conference is supported by seven participating societies and three cooperating societies. The American Society of Mechanical Engineers will serve as host society for the 1988 IECEC. The conference will cover recent accomplishments in energy conversion research, development, and engineering requirements for energy conversion progress and application; disclosure of concepts with potential for future advancements; and results of research and engineering studies.

### 1988 IECEC Topical Areas

Aerospace Power	Innovative Energy Concepts
Alternative Fuels	Marine/Terrestrial Energy Systems
Biomass	MHD & Other Topping Cycles
Biomedical Power	Nuclear Fission
Brayton Cycle	Nuclear Fusion
Co-Generation	Photovoltaics
Fossil Fuels	Rankine Cycle
Fuel Cells	Solar Energy Conversion
Electrical Propulsion	Solar Heating and Cooling
Electrochemical Energy	Stirling Cycle
Energy Conservation	Thermoelectric Power
Energy Power and Planning	Thermionic Power
Energy Storage Systems	Unique Power Systems
Geothermal Power	Wind Power
Hydrogen Energy Systems	

Four copies of abstracts should be submitted to:

Dr. Robert J. Copeland  
Program Chairman  
Solar Energy Research Institute  
1617 Cole Boulevard  
Golden, CO 80401  
(303) 231-1012  
Telex: 9109370738 WLSOQ-GLDN

Abstract Due: December 1, 1987  
Abstract Acceptance and  
Instructions for Papers: February 15, 1988  
Final Manuscript at ASME: April 25, 1988

Summaries should contain about 500 words presenting facts that are new and significant and should indicate the results achieved. The abstract should include an introductory statement indicating the purpose of the work and a closing statement summarizing the significant new results. Authors will be notified of abstract acceptance and will receive instruction for paper preparation on or about February 15, 1988. Accepted papers are to be presented orally and authors will be required to provide a complete camera ready manuscript for publishing in the proceedings of the 1988 IECEC meeting.

For technical inquiries contact the Program Co-Chairmen, European Coordinator or Pacific Coordinator as appropriate.



9th International Symposium on  
Jet Cutting Technology

Sendai, Japan: 4-6 October, 1988

Offer of Paper Form

TITLE:

AUTHOR(S) & AFFILIATION(S):

SYNOPSIS up to 300 words including figures/tables on additional paper.

DELEGATES

I would like to attend the Symposium. Please send me further details when published.

EXHIBITION

My Organisation is interested in participating in the exhibition.

Please send me further details.

ADVERTISEMENT

My Organisation would like to advertise in the Volume of Papers.

Please send me further details.

FROM:

Prof./Dr./Mr./Ms. Initials \_\_\_\_\_ Surname \_\_\_\_\_

Position/Appointment \_\_\_\_\_

Organisation \_\_\_\_\_

Postal Address \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ Country \_\_\_\_\_

Tel \_\_\_\_\_ Telex \_\_\_\_\_ Fax \_\_\_\_\_

Signed \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_





伝熱研究  
Vol. 26 No. 103

1987年10月発行

発行所 日本伝熱研究会

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

日本伝熱研究会

電話 03(726)1111(代) 内線 2169, 2179

Fax 03(729)0563

振替 東京 6-14749

(非売品)