

Vol. 25

No. 96

1986

January

伝 熱 研 究

News of HTSJ

第 96 号

日 本 伝 熱 研 究 会

Heat Transfer Society of Japan

日本伝熱研究会第24期(昭和60年度)役員

会 長		岐 美 格(京 大)
副 会 長	(無任所)	平 田 賢(東 大)
	(事務担当)	小 竹 進(東 大)
地方連絡幹事	北 海 道	工 藤 一 彦(北 大)
	東 北	戸 田 三 朗(東北大)
	関 東	黒 崎 晏 夫(東工大)
	東 海	荒 木 信 幸(静岡大)
	北陸・信越	日 向 滋(信州大)
	関 西	片 岡 邦 夫(神戸大)
	中国・四国	千 葉 徳 男(広島大)
	九 州	藤 田 恭 伸(九 大)
幹 事	坂 爪 伸 二(釧路高専)	花 岡 裕(室蘭工大)
(23名)	三 浦 隆 利(東北大)	梅 宮 弘 道(山形大)
	新 野 正 之(航空宇宙 技術研究所)	小 澤 由 行(東工大)
	庄 司 正 弘(東 大)	長 島 昭(慶応大)
	成 合 英 樹(筑波大)	渡 辺 健 次(石川島 播磨重工)
	態 田 雅 弥(岐阜大)	藤 田 秀 臣(名 大)
	竹 越 栄 俊(富山大)	森 茂(金沢大)
	石 原 勲(関西大)	柘 植 綾 夫(三菱重工)
	塩 津 正 博(京 大)	平 田 雄 志(阪 大)
	北 山 正 文(広島工大)	水 上 紘 一(愛媛大)
	児 玉 英 男(九州電力)	井 村 英 昭(熊本大)
	福 田 研 二(九 大)	
監 査(2名)	鳥 居 薫(横浜国大)	中 山 恒(日立製作所)
「伝熱研究」編集委員長		荻 野 文 丸(京 大)
第23回日本伝熱シンポジウム準備委員長		石 黒 亮 二(北 大)
第20回伝熱セミナー準備委員長		久 我 修(信州大)

伝 熱 研 究

目 次

〈特集〉 先端領域における伝熱

- (1) エレクトロニクス技術における伝熱の
Large Problem 中山 恒(日立・機研) 1
- (2) 伝熱における先端領域を旨として—
電場による伝熱技術 矢部 彰(機械技研) 5
- (3) 宇宙関連機器の熱的制御 桑原 啓一・塩治 震太郎(石川島播磨) 11
- (4) 先端領域の「凝縮」と伝熱 小竹 進(東大) 16
- (5) 単結晶育成とマランゴニ対流 棚沢 一郎(東大) 19

〈外国滞在記〉

- ミシガン大学滞在記 工藤 一彦(北大) 26

〈研究トピックス〉

- (1) 寒冷地におけるソーラポンドによる
太陽エネルギーの利用 金山 公夫(北見工大) 30
- (2) Inverted Annular Flow 研究雑記
..... 赤川 浩爾・竹中 信幸・西田 浩二(神戸大) 40
- (3) ミスト流による伝熱促進 林 勇二郎(金沢大) 47

〈地方研究グループ活動報告〉

- (1) 東北研究グループ 55
- (2) 北陸信越研究グループ 57
- (3) 関西研究グループ 58
- (4) 九州研究グループ 60

〈お知らせ〉

- (1) 事務局から60年度会費未納者へのお願い 64
- (2) 第23回日本伝熱シンポジウム講演募集 65

(3) 第2回 ASME-JSME 熱工学会議のお知らせ	66
(4) 第18回 ICHMT 国際シンポジウム "Heat and Mass Transfer in Cryoengineering and Refrigeration"	68

＜特集＞先端領域における伝熱

(1) エレクトロニクス技術における伝熱の Large Problem

中山 恒(日立・機研)

1. 緒 言

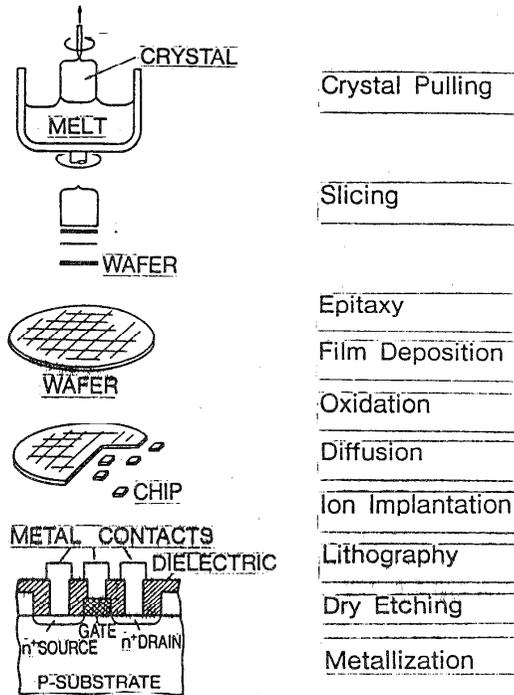
エレクトロニクス技術と伝熱工学との結びつきはますます深くなりつつあり、国内外で伝熱研究者の関心を集めている。筆者は先に電子デバイスの冷却問題に関し、問題の背景と研究トピックスの紹介を行なった。^(1, 2) また最近、これからの電子デバイスが呈するであろう研究課題の展望を試みた。⁽³⁾ 本稿では対象の範囲を広げ、エレクトロニクス技術を支える半導体製造プロセスの伝熱問題にも言及したい。

2. 集積回路チップの製造

半導体チップの製造は単結晶ロッドの引き上げから始まる(図1)。現在実用に供されている

半導体の基盤材料はシリコンで、シリコン単結晶のほとんどが回転引き上げ法、別名チョクラルスキー法、により生産されている。回転引き上げ法では回転するにつばにシリコンの融液を入れ(融点1685K)、これも矢張り回転する引き上げ棒の先端に円柱状の単結晶を成長させるものである。⁽⁴⁾

単結晶のロッドは輪切りにされ、ウェハと呼ばれる薄片を得る。ウェハには100を超える種々のプロセスを経て微細な回路パターンが設けられる。これらのプロ



Manufacturing Process of IC Chips

図1. 集積回路チップ製造の諸工程

セスの殆んどが、熱伝達、物質伝達、化学反応のプロセスで、回路パターンの微細化が進むにつれ、プロセスの制御、とりわけ熱流制御の精度向上が要求されている。

3. 単結晶成長過程における伝熱問題

回路パターンの微細化は、より高い品質の単結晶を要求している。ここで品質とは結晶欠陥の存在密度、不純物の濃度およびその分布の均一性、などを指す。シリコンの場合、結晶欠陥と呼ばれているものの多くは格子間原子の集合で、通常数 μm の径を有する。このような集合を促す要因には炭素原子の存在があげられている。引き上げ装置の構成材料のあるものには黒鉛が使われており、炭素の発生源となる。シリコン単結晶の中に取り込まれる不純物原子のうち最も大きな濃度割合を占めるのが酸素である。酸素は石英のつぼから溶出するもので、融液中の酸素濃度はつぼからの溶出速度と融液表面からの蒸発速度のバランスから決まってくる。

単結晶成長は一般に十数時間を要するゆっくりしたプロセスであるが、この間に上記の不純物原子の濃度ばかりでなく、結晶にとっての熱環境、結晶が融液と接する界面の形状なども変化する。固液界面の形状は結晶内の熱応力、不純物濃度の取り込み機構などを通じ結晶の品質に影響を及ぼすので、これを平らに保つ努力が必要である。結晶成長の熱解析では従来定常状態を仮定したものが殆んどであった。しかし実際に重要なのは、結晶が経験する熱応力、不純物原子の取り込み、などの履歴である。履歴を知るには結晶の成長を時間的に追わねばならない。

回転引き上げ法による結晶の成長はかなりの実績を持つものであるが、これまでの技術は主として経験から得たノウハウに基づいている。しかし今後ますます大きな直径の結晶が要求されるにつれ、経験の蓄積に頼っていたのでは開発費が膨大になる。何故経験に頼ることが多かったか、についてはいくつかの理由をあげることができる。伝熱の面から見た場合の最大の理由は、固液界面近くの融液の温度、および結晶内の熱の流れを細かく制御することの難しさにある。引き上げ装置での温度および熱流の制御手段としてはヒーター入力の制御がある。このほか、つぼと引き上げ棒の回転速度の制御なども、間接的に熱流に影響を及ぼす。これらの制御手段の幾何的寸法、温度差、時間のスケールは、単結晶の品質に直接影響を及ぼす現象のスケールにくらべ、きわめて大きい。たとえばヒーター温度と装置の壁面温度との差は4数百度(摂氏)に達するが、融液の温度変動は振幅が1℃程度のものでも結晶品質に重大な影響を及ぼす場合がある。マクロスケールの制御手段とミクロスケールの現象の間の因果関係を把握することがきわめて難しく、このことが経験の蓄積に頼らざるをえなくしている。

4. 電子デバイスの冷却問題に見る今後の研究課題

今後重要になってくるであろう問題の例をあげてみる。

- (1) 回路パターンの微細化、チップの大形化、発熱量の増大、マルチチップパッケージの採用などが進み、電子回路の信頼性に対する要求が厳しくなっている。これに対応してチップおよびパッケージの詳細な温度分布の検討が必要になる。チップを例にとると、最小エレメントであるトランジスタジャンクションやアルミ配線の代表寸法でチップの領域を分割すると、分割要素の数は $10^9 \sim 10^{11}$ にのぼる。このような膨大な数のマイクロエレメントから成るシステム（チップ）の解析は、現在の最大級のスーパーコンピュータを使ってもできない。
- (2) 一般に用いられる電子デバイスの殆んどは、空気の自然対流または強制対流で冷却されている。電子デバイスが多様な環境で用いられるようになり、空気冷却の熱設計の精度を大幅に向上させる必要がでてきた。しかし、基板上のパッケージの配列パターンは多様で、個々の場合について伝熱流動の詳細解析をすることは实际的でない。多様な場合に対応できるアプローチ法が望まれている。
- (3) 伝熱促進技術はますます重要になる。但し、対象とする伝熱面が小さいので、より確実な伝熱促進効果、あるいは熱伝達率のばらつきをきわめて小さくすること、が要求される。たとえば沸騰伝熱面では加熱を始めてから伝熱面の温度が制限値を越えてしまう前に、発泡が起これないと困る。小さい面積からの発泡を確実に保障することを目的とした研究は、従来の沸騰研究には見られなかった。気泡核の安定性には気液界面と伝熱面との動的接触、あるいは局所的な液の流動など、予測し難い現象が関わっている。こうした現象のランダム性を、各種の考案によっていかに減らすかが、最大の課題である。

5. Large Problem へのアプローチ

上記 3、4 節に紹介した問題の特徴をあらためて記すと次のようになる。

- 長時間にわたるプロセスで、短い時間スケールの現象が及ぼす影響の蓄積が無視できない（単結晶成長の問題）
- 制御手段のスケールと、制御したい現象のスケールとの間に大きな開きがある（単結晶成長の問題）
- 熱的境界条件はマクロスケールのシステムに対して与えられるが、知りたいのは膨大な数にのぼるマイクロエレメントの温度である（チップの温度分布の問題）
- 伝熱流動に関し、適用範囲の広い推定法を確立したいが、部品の配置パターンが多様に過ぎる（パッケージが搭載された配線基板の問題）
- 本来その発生にランダム性を伴う現象を利用するに当り、発生確率を 100% に近づけたい（沸騰熱伝達の問題）

これらの特徴は上記の例のみならず、半導体製造プロセスの種々の段階、あるいは種々の電子デバイスの問題に見られるものである。個々の要素（時間分割、回路要素、部品設置パターン、伝熱面サンプル、など）とシステム（プロセス、伝熱システム、統計データの集合体）の間の因果関係を調べようとすると、膨大な計算あるいは実験を行わねばならない。こうした問題を Large Problem と呼ぶことにする。Large Problem なる呼称は、複雑構造物の熱解析⁽⁵⁾に既に使われている。

Large Problem に対する挑戦は始めばかりで効果的なアプローチを示す多数の具体例があるわけではない。ただし Large Problem とひと口にいても問題はいくつかのグループに分類でき、グループごとに適切なアプローチが考えられよう。

- ① 大きなスケールの現象が小さなスケールの現象を支配する、master-slave 関係が成り立つ問題。単結晶成長過程の問題の多くがこの分類に属する。この場合には大きなスケールの問題から解き、その解を境界条件または初期条件として、より小さな変数スペースに注目した解を求めればよい。
- ② エレメントの配列パターンが規則性を有している場合で、対象領域を有限個数の異なる規則パターン領域に分割できる問題。チップの上のトランジスタジャンクションと配線の設置パターンは規則性を有し、チップの全領域は数個の異なる規則パターン領域から成っている場合が多い。配線基板上のパッケージの配列でも同様の状況が見られる。この場合、(i)個々の規則パターン領域における伝熱の特性を把握する、(ii)異なる規則パターンの領域間の影響を調べる、といった手順が考えられる。(i)ではミクروسケールの現象に注目するのであるが、配列の規則性を利用し、注目する規則パターン領域におけるマイクロエレメント全部を考慮対象にしなくてもよくする。(ii)では、規則パターンを有するマイクロエレメントの集合を、ある特性を備えた大きなスケールの lump とみなし、数個の lump が共存する領域での伝熱を考える。
- ③ 伝熱面に表面構造を設けて伝熱促進を図る問題。冷却流体の流動抵抗および熱伝達率に関する不確かさを極力減らすために、伝熱促進のための構造は、単純な形状の微細な冷却流路または熱伝導経路の集合とする。個々の伝熱経路での熱流動問題は単純で、たとえば管内層流熱伝達のように、理論的に説明が進んでいる問題の状況に近くなるようにする。沸騰伝熱の場合でも、多孔構造体⁽⁶⁾の微細チャンネル内の二相流のように、流動の自由度が制限された比較的単純な状況を作り出してやるのが考えられる。

6. 結 言

半導体製造プロセスにおける伝熱問題、あるいは電子デバイスの冷却問題は、従来、特定な

状況のもとでの解を要求する伝熱技術⁽⁷⁾の問題が多かった。このため伝熱の基礎研究課題としてはとり上げ難かったことは確かである。しかし今後は既存の研究手段に頼ってはいず解決が難しい問題が増えてこよう。物理現象の研究と共に、実際の技術の発展に貢献する新しい方法論の提案も求められている。

7. 文 献

- (1) 藤江、中山、伝熱研究、vol.23、№88 (1984)、53
- (2) 中山、機誌、88巻802号(昭60-9)1084
- (3) 中山、機論(寄稿中)
- (4) 白木、機誌、88巻802号(昭60-9)、1054
- (5) Winget, J.M. and Hughes, T.J.R. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.52 (1985)、711
- (6) Nakayama, W., ほか2名、ASME Paper、84-WA/HT-89 (1984)
- (7) 森、伝熱研究、vol.24、№93 (1985)、1

(2) 伝熱における先端領域を旨として……電場による伝熱技術

矢部 彰(機械技術研究所)

1. はじめに…「先端領域における伝熱」について

本稿の標題は、今回の特集のテーマ「先端領域における伝熱」をもじってつけたものであるが、近年、伝熱の分野においても先端技術に関する話題が多い。たとえば、「先端技術における熱工学」(小特集:機械学会誌昭和60年9月号)、「先端技術とエネルギー問題における伝熱技術」(日米セミナー、昭和60年9月)、「先端技術と熱的制御」(機械学会講習会、昭和60年6月)などであり、今後とも「先端技術と伝熱」に関するテーマは増えるものと思われる。

この傾向の生じた原因を考えると、熱工学は、蒸気機関、原子力利用、新・省エネルギー技術など、常に、その時代の先端技術と深くかかわって発展してきており、また、工学・技術の3本柱であるエネルギー・材料・情報のうちのエネルギーばかりでなく、材料や情報にも熱工学が進出するようになってきたという伝熱研究の動向に関する指摘は⁽¹⁾的を得ているものと思われる。このことを言い換えれば、先端技術とかハイテクという言葉で意味される分野の

中心は、近年、新・省エネルギー技術から、電子機器や新材料などの情報や材料に関連する分野に移ってきているということができよう。こうした状況は、研究テーマが社会情勢を反映しやすい産業界や外国の研究者によってしばしば言われていることでもあり、今回の特集の意図は、この材料・情報の分野での熱工学の役割を考えることでもあるのだろう。

しかし、ご存知のように、日本におけるエネルギー問題は、他国とは比較にならないほど重要であり、大学や国立研においては、今なお主要な研究テーマである。特に、国立研究所では、サンシャイン計画、ムーンライト計画などのエネルギー研究に関連する伝熱問題が数多く存在しており、今後とも、エネルギー研究を中心に取り組む予定となっている。

このように考えてみると、数年来、「伝熱研究」紙上をにぎわしている産業界と学界との研究の有機的関連について、研究課題までもが、材料・情報等の先端領域とエネルギー研究というふうに大きくずれてきて、有機的連携は果してうまくゆくのだろうかという心配が生じてくる。また、国立研は、先端領域に対してどのように対応したらいいかも大きな問題である。これに関連して、昭和60年4月の機械学会総会での「企業と大学の接点を探る」という討論会とその後の二次会での話の内容から、いくつかを御紹介したい。

- ・ 技術開発には、10年の歳月が必要であり、たとえ、先端領域で企業が研究を始めてから大学で基礎研究を始めたとしても、その成果は、コスト計算や詳細設計の時に役立つので有用である。特に、信頼性や他への応用を考える時には、メカニズムの解明されていることが重要であり、基礎研究の役割は大きい。
- ・ 材料や電子機器などの分野を考えてみれば、伝熱研究者にとって面白く、かつ、メカニズムのわかっていない現象が、たくさん出てきている。そういう分野では、現象の解明から出発できるので、実り多い研究となるかもしれないし、さらに、種々の境界領域の学問分野を作って、伝熱の分野はますます拡大してゆくだろう。
- ・ 先端領域における伝熱研究の重要性は、その現象にとって伝熱過程がどの程度本質的であるかに依存している。たとえば、光ファイバー製造プロセスや超精密加工は、伝熱プロセスそのものであり、伝熱研究者の役割は大きいであろう。
- ・ 企業と大学との共同研究を成功させるには、目的・目標をよく詰めて一致させることが最低限必要であり、先端領域では、企業のニーズを大学が十分に理解することが重要で、また、研究を始めるタイミングも大切である。余談になるが、好奇心旺盛で楽観的で性能本位に考える先生と、必死で悲観的でコスト第一の企業の研究者のコンプの場合、うまくゆくようである。
- ・ 企業においては、研究テーマがしばしば変わるが、大学や国立研ではなるべく、産業界を

巻き込むような革新的技術を目ざしたテーマで、長期的に取り組んでほしい。たとえば、エネルギー研究は、こうしたテーマの一つであるが、もし新しい技術が出来そうになれば産業界でも取り上げるので、大学と共通のテーマで研究することができるようになり、企業の研究者にとって有難い。

これらをまとめてみると、先端領域における基礎的な伝熱研究の重要性は大きく、これに関して企業と大学は充分情報交換し、ニーズをよく把握した上で共同研究することが望ましい。そうでない場合、大学や国立研は、産業界を巻き込むような一般性、応用性のある革新的技術を目ざして研究してほしい、ということになる。

これから、国立研の取り得る一つの道として、先端領域の課題にも関連のあるテーマで、しかも、後者の新しい技術を目ざす研究をすることが望まれるのではなからうかと思っている。

2. 電場による伝熱技術の目的

ますます分野を拡げようとする伝熱研究の最近の傾向、そして、省エネルギー研究に残された多くの課題を見ていると、研究目的は多様化して、全体として発散しているように思える。しかし、多くの問題に共通の課題として、先端領域に関しては、電子機器の信頼性向上、超塑性などの新材料製造や超精密加工などに特に必要となる、温度などの「熱的制御」技術が、また、エネルギーに関しては、小温度差熱利用や有効エネルギーの損失低減などのための「伝熱促進」技術があげられるのではなからうか。以下では、電場による伝熱技術の目的について述べるが、特に、この「熱的制御と伝熱促進」という観点から、研究開発の重要性を示してみたい。

近年、電子機器の小型化・高性能化に伴いジュール熱の発熱密度が増大しているため、高熱流束を除熱でき、しかも、機器の高信頼性を保持するため、電子機器の温度を一定に保持する冷却技術が重要な課題になっている。そのための一つの方法として、冷却物体をフロン系の電気絶縁性液体の中に浸し、沸騰現象や液体への対流熱伝達を利用して冷却する方法が盛んに研究されている。こうした中で、電場をかけることにより沸騰熱伝達の促進されることが知られており、また、電場をかけていても電圧の低い時と高い時で、伝熱促進の割合が異なっている。このことは、電場を変化させることにより沸騰性能を変えて除熱量を制御でき、核沸騰開始のヒステリシスをなくせる可能性のあることを意味しており、電場という能動的な伝熱促進法を使用することにより、機器や種々の材料の熱的制御を実現する方法の検討は、今後の重要な課題となっている。

一方、省エネルギーの推進を目的とした100℃以下の工場温排水の有効利用法としては、温排水を高温熱源とし、フロンなどの熱媒体を用いて、発電に利用する方法と、電力などでヒ-

トポンプの圧縮機を運転し、温排水の熱を使ってより高温の熱を発生させ、産業や給湯に利用する方法が考えられる。しかしながら、どちらも小温度差熱サイクルであるため、熱交換器の中で必要な温度差を極力小さく抑えてサイクル性能を上げる必要があり、それに伴う熱交換器の伝熱面積の増大、大型化、高コスト化が大きな問題となっている。この問題は、地熱バイナリー発電などの小温度差利用熱技術にとって共通基盤的な研究課題となっており、革新的な伝熱促進技術を伴う高性能熱交換器の実現が強く求められている。このような状況において、小温度差サイクル用の熱媒体として主に使われるフロン系の有機物熱媒体は、電気伝導度が小さく、高電圧をかけても消費電力は無視しうるくらい小さいという特徴を持つので、従来の水などの熱媒体にはないこの特徴を活かして、電場を付与することにより、大幅な熱伝達の促進を実現しようという考え方が生じている。この考え方は、近年かなりの関心を持たれるようになっており、去る9月に開かれた日米セミナーでも発表する機会に恵まれたので、以下に概要を説明する。

3. 電場による伝熱技術の特徴

〔電場が流体に及ぼす力の物理的意味〕 電場が流体に及ぼす力は、物理的には二種類の力から構成されている。一つは、真電荷に働くクーロン力であり、放電などによって生じたイオンが電界に引かれて移動する時に生じる力である。もう一つは、誘電体に働く力であり、流体中に生じた分極電荷が電界に引かれて生じる力で、電界の強い方に生じている分極電荷の方により強い力が働くので、流体は電界の強い方に引かれる。一番目の力が主要になる現象としては、コロナ放電により生じるイオン風などがあり、対流熱伝達の促進に有効である。また、二番目の力は、気-液界面の不安定などを生じさせることができ、気液界面の不安定現象を利用した凝縮熱伝達の促進などに有効である。この2つの力が、電場により生じる種々の現象の原因になっているが、液体中の伝熱場では、温度勾配があるため物性値である電気伝導度の勾配も生じ、この勾配のある所に電界がかかっていると、正負の電荷量が差が生じ、実質的な電荷が現われる。このことは、放電のみでなく、温度勾配によっても電荷が生じることを意味しており、温度場、電場、流れ場が相互に作用し合って種々の現象を生じさせている。

〔電場による伝熱技術の特徴〕 電場を利用する伝熱技術の特徴としては、以下の4点が挙げられよう。①、伝熱促進効果に比べて消費電力が極めて小さいこと。②、針、線、金網などの電極と小さな変圧器があれば簡単に実現できること。③、送風機やポンプでは実現しにくい複雑な流路の冷却や局所的な伝熱促進ができること。④、電場をかけるという能動的な伝熱促進法であるから、電界強さを変えることにより伝熱量を制御することができること。

4. EHD凝縮熱交換器

電場による伝熱技術の一例として、ここでは、凝縮熱伝達の促進法を説明する。凝縮伝熱を律速する最大の要因は、凝縮液膜の熱抵抗にあるので、電場により凝縮液体を伝熱面から剥ぎ取って除去することにより、薄い凝縮液膜を実現する方法を提案した。この方法は、新たに見出した電場による液体の引き出し現象を用いており、伝熱管を接地し、伝熱管のまわりにらせん状に巻いた線電極に、高電圧をかける。すると、鉛直伝熱管の管外を流れ落ちていた凝縮液体が、線電極に引き出され、電極間に膜状に液体が保持され、らせんに沿って落下する。この液体の引き出し現象は、電極間に存在する凝縮液面の不平等電界中での界面不安定現象として、定性的にも定量的にも説明されるが、液体内のイオンの一部が気液界面に移動し、このイオンが気体側の電極に引かれて界面を引っ張る効果と、表面張力による復元力との動的不安定現象である。さらに、このらせん状の電極を、所々で、伝熱面から離しておくと、凝縮液体は遠心力の作用で伝熱面から離れ、らせん電極に乗り移って排出される。この方法により、現在までに、凝縮液体の96%までを伝熱面から取り除くことに成功しており、凝縮液膜も薄くなり、熱伝達率は2.8倍まで増加している。さらに、らせん電極により凝縮液膜を薄くした後の伝熱面に、平等電界をかけると、滴状凝縮に似た現象が実現する可能性のあることも示されている。

この凝縮熱交換器は、EHD凝縮熱交換器と名付けられたが、ここで、EHDとは、電気流体力学 (Electro - Hydro - Dynamics) 略称であり、液体の電場による引き出し現象という電気流体力学的な現象にもとづいて伝熱促進した凝縮器という意味を持っている。現在、ムーンライト計画の大型省エネルギー技術研究開発プロジェクトである「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムの研究開発」に取り上げられ、実用化を目的として、基礎研究から開発研究までの広い範囲にわたる研究に取り組んでいる状況にある。

5. 液滴の熱物質伝達に及ぼす電場の促進効果

日米セミナーでは、慶応大学の森康彦先生も、上記の題目で発表されたので、以下簡単にその内容を示す。詳しくは、論文集をご参照願いたい。液滴と溶媒間の輸送現象は、金属などの溶媒抽出法、噴霧乾燥、亜硫酸ガスの噴霧による浄化法、また、直接接触熱伝達時に生じる。電場を付与することにより、液滴は変形し、液滴の内外には循環流が発生し、また、液滴が電荷を持つ場合には、電界からクーロン力を受け移動する。さらに、ノズル等の吹き出し部では、電場による微粒化作用により液滴が生じる。液々の直接接触熱伝達の伝熱促進に対しては、液滴が浮力や重力で運動するだけでなく、電場により液滴に形状振動やジグザグ運動を起こさせると効果がある。液滴の変形振動は、断続電場と正弦波状電場で生じ、主に電場方向に偏長したラグビーボールの形に変形し、またもとの球に戻る形状振動をする。また、電場の周波数が大きくなるにつれ、最大変形量まで到達しなくなり、効果が小さくなるが、液滴球の共鳴振動

域でも形状振動が生じており、熱伝達率は最大で、3倍程度まで増大している。最後に、実際の直接接触熱交換器の形状に触れ、応用時のハードウェアを検討している。

6. 浅川効果

電場による伝熱技術に関して早くから行われている研究の一つに、浅川効果と呼ばれる現象がある。以下、内容が多岐にわたっているので、上述した凝縮、対流、混相流、それに沸騰を除いて、各分野ごとにその特徴を簡単に述べる。

〔燃焼〕 コロナ放電部を火炎の中に挿入することに特徴があり、燃焼促進効果は拡散火炎において特に大きく、火炎の長さ、幅が大幅に増加し、火炎形状制御も可能になると考えられる。この現象は、イオン風の効果、放電の間欠性による乱れの発生、および、発生するイオンによる燃焼生成物の変化などを生じていると考えられ、今後の研究が期待される。

〔ふく射、熱伝導〕 ふく射伝熱に対しては、 $3000\text{ (cm}^{-1}\text{)}\sim 4000\text{ (cm}^{-1}\text{)}$ の赤外線域で水の吸収スペクトルが電場により増加するという実験が行われた。また、熱伝導に対しては、原因は不明であるが、内部に高電圧が存在することにより、金属ブロックの冷却が遅延する実験結果が示されている。

〔蒸発〕 蒸発に関する実験結果は、コロナ放電イオン風の効果で定性的に説明することができる。

〔食物保存〕 伝熱とは直接関係しないが、電場の効果で、果物や穀類の鮮度が長い期間落ちない現象が見出されており、今後の応用が期待されている。このメカニズムとしては、コロナ放電により発生するオゾンの殺菌作用や、発生するイオンによる食物の荷電現象とそれに伴って発生する表面電界の効果が考えられる⁽²⁾。

〔粉体の挙動〕 ノズルからの砂の噴出が促進され、また、電界により制御することができるので、流動層熱交換器等への応用が考えられる。

7. おわりに

伝熱における先端技術を目ざして研究してきたものが、先端領域における伝熱という大きなテーマをもらってしまったために、かくも頭でっかちな文章になってしまったことを、お許し願いたい。

本稿では、企業の方々の今後の伝熱研究に対する希望の一端と、電場を利用する伝熱技術について、その概要と特徴を述べさせていただいた。

今回の日米セミナーでは、お陰様で多くの先生方に電場に対して興味を持っていただくことができ、大変有難く存じているが、これからも、電場を利用する伝熱技術の実用化を目ざして、積極的に研究開発を進めてゆく予定であり、今後共、皆様の御指導と御協力をよろしくお願い

いたします。

〔参考文献〕

(1) 棚沢一郎：機械学会誌 vol.88、№802 (1985)、1041

(2) 浅川勇吉：科学朝日 1984-7、76

(3) 宇宙関連機器の流れと熱制御

桑原啓一・塩治震太郎(石川島播磨・技研)

1. まえがき

現在日本においては、次の3つの大きな宇宙プロジェクトが進められている。

(1) 大形衛星とその打上げ用ロケット“II-II”の開発(1988年)

(2) スペースシャトルによる“第1次材料実験”(1988年)

(3) 宇宙基地計画(1992年構築、日本・アメリカ・ヨーロッパ・カナダの国際協力)

このため、従来の宇宙技術における熱工学の領域(ロケット燃料の燃焼、極低温燃料、高速気体による空力加熱と耐熱保護、衛星の宇宙空間へのふく射やヒートパイプを用いる受動型熱制御)から、宇宙基地などにおける大熱量化による二相流体ループを用いる能動型熱制御、宇宙基地や軌道間輸送などの動力系の熱管理や環境制御、II-II用大型極低温機器、新しい宇宙航行用の推進機および推進系、宇宙で材料を製造する場合の融液中の流体挙動と結晶成長への影響などに大きく広がって来ている。

本稿では、宇宙環境の特徴およびそれが流体の挙動にどのような影響を与えるかを述べた後、著者等が研究を行っている熱制御と流れに関する2つの問題について紹介したい。

2. 宇宙環境の特徴

人工衛星の軌道(高度約1000Km)やスペースシャトルの軌道(高度約300Km)、宇宙基地(高度約450Kmを予定)での機器のおかれる環境の特徴について簡単に述べる。

(1) 重力 宇宙空間では万有引力の法則により、地球の重力は距離の二乗に反比例して小さくなるが、0(無重力)にはならない。ところが、宇宙船は地球中心の軌道をまわっているため遠心力が働き、これが地球の重力とつり合って重量を感じない無重量状態となり、無人宇宙基地では、 $10^{-5} \sim 10^{-6} g_n$ が期待される。

実際には塔乗者の動作、機器の振動、ガスジェットの反作用、ドッキング作用あるいはコ

リオリ力によって発生する種々の重力があるため、 $10^{-2} \sim 10^{-3} g_n$ 程度まで重力が上昇することがある。しかし、微小重力場と呼ぶのにはふさわしい環境である。とくに重力が不規則に振動する状態を g -jitter と呼ぶ。このように重力の影響が小さくなると、表面張力や電磁力など、地上では表に現われなかった力が支配的になってくることに注意しなければならない。図1に各種の重力の値を示した。⁽¹⁾

- (2) 熱放射 太陽からの熱放射は、大気中での吸収・散乱がないので地上よりも強く(約1.5倍)、 $1350W/m^2$ である。また低高度では太陽光の地球による反射(0.45倍)と地球(300K)からの赤外放射の影響を受ける。そして、周期的に地球の陰に入るため、日陰率の影響も考慮して、宇宙船への入熱量を算出する必要がある。
- (3) 真空 真空中にばく露された機器の伝熱は、対流が存在しないから一見簡単に見えるが、接触熱抵抗や多面熱放射などが問題となる。真空度は、高度300Kmで約 10^{-7} Torr、1000Kmで約 10^{-10} Torr である。したがって、宇宙船から放出するガスの船構体への影響、環境汚染など将来へ新たな配慮が必要となってくる。
3. 微小重力場での流体の挙動

宇宙船が地球のまわりの軌道を動いている場合には、重力も慣性力もほとんど働かない微小重力場であるため、通常(宇宙船内で装置の回転等を行わない場合)は流体は表面張力支配の状態になると考えられる。このような場合は、液体の自由表面は球状になろうとし、また表面張力とぬれが非常に重要な問題となってくる。このような表面張力支配の限界は、毛管径 r と液中高さ h の関係 ($\rho gh = 2\sigma/r$ 、 ρ : 密度、 σ : 表面張力) から導かれたボンド数(重力/毛管力)、 $Bo = \rho gr^2 / \sigma$ による。静学的には、 $Bo \ll 1$ ($r/h \ll 1$) のとき表面張力支配となる。これは、重力が小さいか、半径が小さいかに対応する。動学的には、慣性力と毛管力の比、ウェーバ数 (We)、 $We = \rho u^2 l / \sigma \ll 1$ が表面張力支配領域である (u : 速度、 l : 長さ)。見方によれば、宇宙では抱束力がなくなるので、液体の本性が強く現われるとも言える。図2に支配力による流体挙動の分類マップを示す。⁽²⁾

温度差によって生じる対流も、宇宙では地上とは著しく異なる。例えば長さ5.0mmの伝熱面と水の温度差が10℃の場合、地上でのグラスホフ数は 10^6 程度であるが、 $10^{-4} g_n$ の微小重力場では 10^2 と小さくなり、浮力熱対流は微弱になる。しかし、 g -jitterが生じると流れに変化が生じて問題となってくることもある。これは、温度こう配が加速度に垂直のときに起りやすく、振動数の低い程速度変動・温度変動への影響が大きい。

浮力に代わって支配的になるのが表面張力差で、温度差や濃度差に起因する対流が発生する。気液界面の表面張力は一般に温度が低い程大きい。これをマランゴニ効果と呼び、この効果に

よる対流をマランゴニ対流と呼ぶこともある。温度勾配が気液界面に沿っている場合には、表面分子は低温側へ引張られ、流れが発生する。マランゴニ効果は粘性に対する比を考えたマランゴニ数 Ma によって表わす。図3に水平流体層の対流領域を示す。⁽³⁾ 図中の σ_t : 表面張力の温度係数、 ΔT : 温度差、 l : 代表長さ、 ν : 動粘度、 a : 温度伝導率、 ρ : 密度、 Ra : レーレー数、 β : 体膨張率である。

4. 電磁プラズマアークジェット of 熱制御

電磁プラズマアークジェット (MPDアークジェット) は、電気推進機の一つで、電極間に供給する推進剤に大電流を流してプラズマ化し、電流と自己誘起した周方向の磁界との干渉による電磁力 (フレミングの左手の法則) を利用して加速を行なう (図4参照)。現在、将来の宇宙航行用主推進機を目指して精力的に開発が進められている。効率は、最高60%程度で、約30%が電極への浸入熱となる。放電時間が周期 (1s) に比べて非常に短い (1ms) ので、瞬間的に高熱負荷 (1kW級で 10^6 W/m^2 程度) を生じ、電極の耐熱性が問題となってくる (平均熱負荷で 10^6 W/m^2 程度)。

熱制御の基本は、宇宙船内への推進機からの浸入熱を減らし、宇宙空間へ直接放射冷却し、電極や周辺機器の温度を抑えることで、具体的には図4に示すように、放射パネルを用いかつ構体と電極部の間に熱抵抗部 (サーマルチョーク) を設けている。熱系の解析を行なう一方、 10^6 回の連続放電試験に成功し、熱の流れと温度の制御が、予測どおり行なわれたことが確認されている。⁽⁴⁾

MPDアークジェット推進機を将来宇宙空間で使用する場合は、100日間 (10^7 回連続放電に相当) の運転と数kW級への出力の増大を実現しなければならない。そのためには、100日以上の寿命を持つ電極を開発する必要があり、放電による電極損耗に関する研究が行なわれるようになった。上で述べたように、放電時間が周期に比べて非常に長いことから、温度の大きな変動は電極の表面でしか起こらず、それが表面での蒸発・融解・飛散といった現象を引き起こすという考え方が提案され電極損耗のメカニズムが検討されている。⁽⁵⁾ しかし、電極表面では、放電のスポット化という現象も生じており、また電極の材料にバリウムを含浸した多孔質タンクスランなどを使用している場合もあるので現象が複雑になり、それらを完全に説明できるまでには至っていない。

5. 宇宙実験

第1次材料実験 (FMPT) は34のテーマがあり、主に宇宙での新材料の製造実験が行なわれる予定である。ところで、融液から結晶を成長させる方法では、多くの場合自由表面が存在し、そこに温度勾配が生じるので、マランゴニ対流が発生する。これは、高品質結晶におけ

る制約条件となるものと予測され、FMPT全搬に関連するテーマである。よって、著者等は FMPT において、ブリッジマン法を模擬した実験を計画している。融液のかわりに室温で凝固するパラフィン液を供試液として、アンブル内融液形状を模擬した円柱状液体を形成させる。温度こう配により冷却側から徐々に凝固させ、このときのマランゴニ対流をアルミ粉末または液晶をトレーサとしたスリット光照明により可視化してビデオ画像に記録する。これらのデータを解析してマランゴニ対流の知見を得ようとするものである。

図5は著者等が行なった基礎研究の解析結果の一部で、図中に示した2次元矩形セル内の流動におけるマランゴニ数 (Ma) とレイリー数 (Ra) に対する表面流速の変化を示している。これから、レイリー数が小さくなるとマランゴニ対流が支配的になることが確認できる⁽⁶⁾ また、細線接触や電磁力による対流抑止効果の検討も行っている⁽⁷⁾

マランゴニ対流が大きくなると定常的な対流から周期的な対流に遷移することがフローティングゾーンによる実験で明らかになった。これは、転位など結晶欠陥の発生原因となる。なお、フローティングゾーンに関しては、ヨーロッパとドイツで広範な研究が行なわれている。

研究の最終目標は、欠陥のない高品質の材料を作ることであり、流れ、熱、拡散現象を伴う系の解析・制御の技術がその過程で深くかかわってくる。容器と材料のぬれおよび接触状況の流れへの影響、結晶成長面近傍での対流の影響などミクロな機構の解明も課題である。

ここでは、宇宙関連機器の流れと熱制御に関してごく一部しか紹介できなかったが、最初に述べたようにその範囲は広く興味をそそる研究対象は数限りなくあると思われるので、伝熱研究者の新たな取組みを期待したい。

〔参考文献〕

- (1) Malmejac, Y., ほか3名, Microgravity Research in Space, (1981), 2, esa.
- (2) 庄司, 機械の研究, 26-11 (昭49), 1449
- (3) Kuwahara, K., ほか5名, Proc. 17th IEPC (1984), 404
- (4) Kuwahara, K., ほか3名, AIAA Paper, 85-2041, (1985)
- (5) Ochiai, J., ほか5名, 5th Europ. Symp. Mater. Sci. under $\mu-g$, (1984), 291
- (6) Morioka, M., ほか6名., Proc. 14th ISTS, (1984), 1591

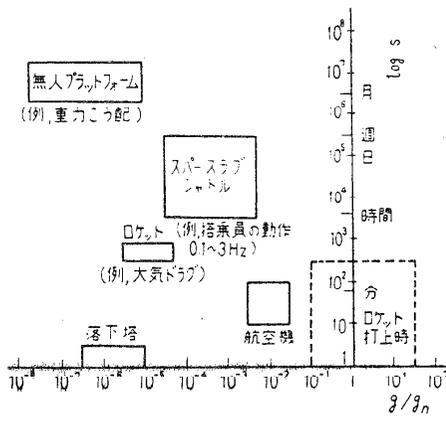


図1. 各種実験の加速度レベル

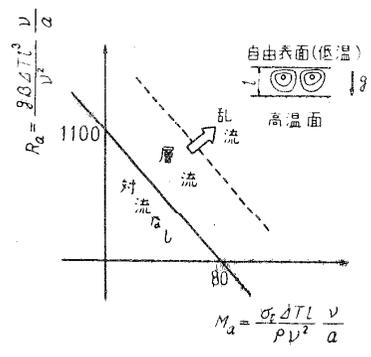


図3. 自由液面を持つ水平流体層の対流

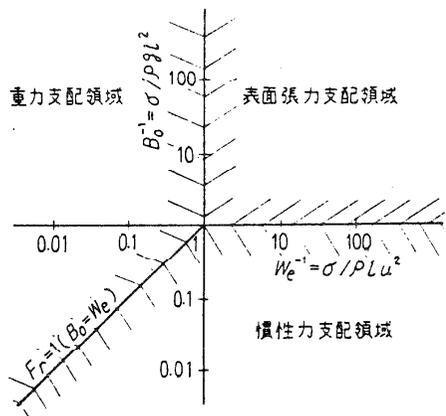


図2. 支配力による流体挙動の分類

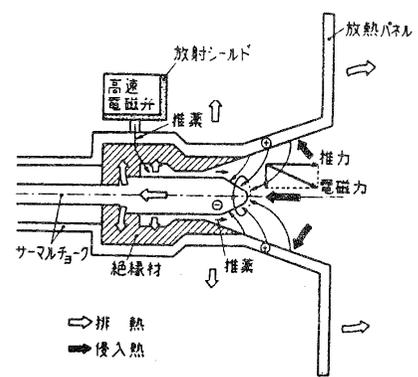


図4. MPDアークジェットヘッドの熱制御

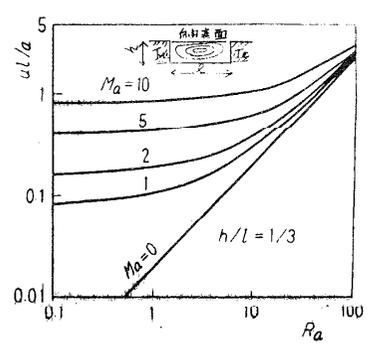


図5. 表面速度 u に与える Ra , Ma の影響

(4) 先端領域の「凝縮」と伝熱

小竹 進(東大工)

RAMはMBの時代になり、RNAは組み替えができるなど、広い意味での分子原子の「凝縮」現象は、ある程度人間の手でコントロールできる範囲に入ってきたとみることができる。これらは、原子や分子を適当に選択して、その並べ方を制御して、任意の物性や形状をもつものを作る「凝縮」させることとみることができるからである。こうした凝縮制御の可能性は、遠い将来においては無限に考えられるかも知れないが、ここでは現状でのこうした「先端領域」という尺度でみた凝縮と、それにかかわる伝熱の問題を考えてみることにする。

話の筋として、ある分子を選択し集めて希望の設計図通りに並べた凝縮体を作る場合を考えてみることにする。広い意味での「分子設計」ということもできる。化学的な反応である生成体を作る場合は、自然に並び方がうまくいくような道筋を用意しておいて希望の生成体を作る場合が多い。逃げ道を作っておいて獲物をそこへ追いやるやり方である。深いエネルギーの谷を作っておいて、玉を山の上から転がしてその谷にはめ込むやり方である。しかし、この場合、獲物が逃げ道に入り込むのも、玉が谷にはまりこむのも、ある程度獲物や玉の勝手であり自由が残されている。逆に言うとその自由度だけ人間の希望通りになる自由度が少なくなっている。

したがって、反応のエネルギーが小さくなって逃げ道がはっきり分からなくなったり、谷が浅くなったりする場合には、この不自由度のためにこの方法は殆んど使えないことになる。玉をある程度人為的に希望通りの特定な谷にはまりこませることができたとしても、玉は隣の谷への移りが容易なために最も自然に落ち着き易い谷へと移動していつてしまうであろう。この自然に落ち着く谷への移動が、玉のエネルギー最小とか系のエントロピー最大とかの状態できまるとすると、人為的にこうした自然の移動を阻止することはできない。すなわち、「反応」エネルギーの小さい凝縮体は自然には容易に形成されるが、人工的にこうしたものを作ることは、そのエネルギーが小さくなればなるほど難しくなる。

化学的な反応をしない、物理的な凝縮は、ほとんどこのような「反応」エネルギーの小さいカテゴリに入ってしまう。このような場合、その凝縮過程を人為的にコントロールできる可能性はないだろうか。ここで考えられることは、その自然に落ち着く谷への移動に要する時間を長引かせることができれば、比較的長い時間にわたって非平衡の状態を維持できるのではないかということである。すなわち、この場合の問題は、玉を特定な谷に近づけることができるかということと、近づけた後の玉の移動の緩和時間を大きくすることができるかということになる。後者の緩

和時間を大きくする方法は、金属などのアモルファス構造の材料などの製造に現在すでに利用されている。

こうした緩和時間の大きさの問題は観測者の時間スケールとの相対的な問題である。両者の比をデボラ数（緩和時間／観測時間）と呼んでいる。デボラという女予言者が、「（人間には不動であるとみられる）岩や山も、（長い観測時間を持つ）神の前では、（水のように）流れる」といったことにちなんている。人間に対するデボラ数は、小さい方は人間の視覚の特性時間でできまり、大きい方は人間の寿命時間でできまるとみると、それぞれ 10^{-6} 秒、100年（ 3×10^9 秒）ぐらいの時間を基準にとることができる。すなわち、実用的には、 10^{-6} 秒以下の現象は瞬間的であり、100年以上の現象は不変なものであるとみることができる。したがって、秒以下の現象の緩和時間を年以上のオーダーに引き延ばすことができれば、エネルギーあるいはエントロピー的に非平衡な状態を凍結できた、あるいは非平衡状態が実現できたとみて良いであろう。

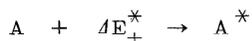
生物あるいは生体内の反応現象では、触媒作用をうまく利用して、こうした緩和時間を適当にコントロールして非平衡状態を作り、さらにその非平衡状態を利用して他の非平衡状態を作るといった巧妙な仕組みが用いられている場合が多い。こうした方法の利用は「先端領域」の一つで非常に魅力のある分野ではあるが、非線形要素が強く難しい問題を抱えており、系統的な論理が確立されるまでにはかなりの道程が必要である。ここではこうした複雑な分子原子の凝縮ではなく、もっと簡単な分子原子の凝縮制御を対象にして考えてみる。

一つの例として、B分子で構成されている凝縮体（固体、液体）があり、その上にA分子をある特定を並べ方で並べる凝縮過程を考えることにする。この過程としては、

- (1) B分子の凝縮体とA分子を用意する。



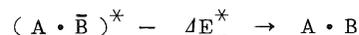
- (2) A分子をB分子に近づくに十分なエネルギー状態に励起する。



- (3) A分子を凝縮体B分子の適当な位置に近づく



- (4) 適当なA, B分子の状態エネルギーを取り去ってA分子の運動を凍結する



という過程が考えられる。

まず、(1)のきれいなA, B分子を用意することから考えてみる。この問題は最近の超真空技術の進歩により大きく改善され、原子分子の種類にもよるが、本質的な問題とはならない。(2)のA分子を適当なエネルギー状態に励起するという問題は、一見簡単そうであるが静かな（物理的な）

凝縮を目的にする場合は技術的にかなり難しい問題をふくむ。すなわち、化学反応のエネルギーは1 eV のオーダーであり、これに対する励起エネルギーは10 eV以上のオーダーでよい。A分子がこれ以上のオーダーのエネルギーを持ってB分子に近づくときは、両者の電子雲が重なり、電子の交換(化学反応)が起こって、A分子凝縮体は破壊されてしまう恐れがある。一方、A分子のエネルギーがあまり小さい値であると、B分子に対する接近が十分でなくなる恐れがある。したがって、これらの恐れがない物理的な凝縮を目的とするには、A分子の励起エネルギーを(1-10) eV のオーダーに保つ必要がある。問題はこの範囲のエネルギーの実現が技術的に難しいことである。純度を維持してA分子にエネルギーを与える方法としては、熱的加速および電磁気加速が考えられる。前者は熱的な加熱であるために、エネルギーとしてはせいぜい1 eV 程度が限界である。後者は上限は大きくとれるが、下限は空間電荷の制限のために10 eV程度が限界である。したがって、この間の(1-10) eVのエネルギーをA分子に励起するという事は、これらの方法の限界の谷間に入り難しい問題である。

(3)のA分子を凝縮体B分子の適当な位置に近づけるという問題は、A分子の運動方程式が記述できるなら、A分子の運動の初期条件の設定のコントロールに帰することができる。すなわち、A分子の運動方程式がわかる状態にA-B分子系の環境を設定することと、A分子の運動の初期状態の制御がどの位できるかということになる。簡単な分子原子の場合は、現在の数値計算技術・分子工学技術を十分に利用すればこうしたことは不可能なことではないが、複雑な分子になるほど困難になる。

A-B分子系($A \cdot \bar{B}$)^{*}の過剰エネルギー $4E_-^*$ の除去の問題(4)が、このA-B分子凝縮体の形成の最大のカギである。 $4E_-^*$ の大きさのエネルギーを除去すること自体の問題よりも、そのタイミングと除去の速さである。A、B分子が適当な位置および運動状態にあるときに、 $4E_-^*$ を瞬間的に除去することができれば、A、B分子の位置構造は固定され、希望のA-B分子凝縮体を形成することができる。しかし、その除去速度がゆっくりしていれば、A分子はB分子の作用範囲以外に行ってしまうA-B凝縮体とならないか、あるいは凝縮体となっても、A分子を適当な位置に配置することができず、自然な平衡状態の位置に並んだ「自然」凝縮体になってしまうであろう。このエネルギーの除去は、分子原子の回転・振動・電子エネルギーのどのような形態でおこなわれるかの別はあるが、完全に伝熱の問題であり、伝熱の技術である。こうした適当なエネルギーを、適当な時刻、適当な時間内に除去するあるいは与えるという伝熱の技術問題は、今後、このような分野ばかりでなく多くの「先端領域」分野でその成否を決定する重要な問題となることは確かである。

(2)、(4)の問題の一つの解決方法として、分子クラスターの利用が考えられる。A分子を適当な

クラスター状態にしておき、クラスターの内部エネルギーの自由度を利用して(2)の励起エネルギーを分配させ、さらに(4)の過剰エネルギーを吸収させるという方法である。この場合は、A分子を適当な大きさのクラスター状態に制御することが一つの大きなカギとなる。

これら(1)–(4)の問題が一応解決され、このような希望通りのA–B分子凝縮体を作ることができれば、その3次元構造への拡張、三成分以上の凝縮体への拡張の可能性は容易に考えられる。さらに、エネルギー伝達の制御が確実になるにつれて、A、B分子の方向性まで考えた配列構造の凝縮体を作って、三次元方向性をもつ熱物性や電磁気物性の人工物質の可能性が夢ではなくなる。

問題は、このようなマイクロな問題に、マクロな伝熱屋さん達が、どのくらい力を入れるかあるいはどのくらい力をいれることができるか、ということにかかっているのではないと思われる。分子「凝縮」というエントロピーを減少させる問題は、マイクロ的な見方だけでは解決できず、どうしてもマクロ的な見方が必要不可欠であるからである。伝熱シンポジウムなどでも、このような分野が現在の強制対流や沸騰以上に多くなる日が近いのではないかと期待している。

(5) 単結晶育成とマランゴニ対流

棚 沢 一 郎(東大・生研)

1. はじめに

液体の表面張力(あるいは界面張力)は、その温度や溶けている物質の濃度に依存する。気・液あるいは液・液界面の温度や濃度が一様でない場合には、そこに表面(あるいは界面)張力の勾配が生じ、時によってはこれに起因する流体運動が生ずる。こうした表面(界面)張力の不均一性によって誘起される流れは、表面張力対流(capillary convection)あるいはマランゴニ対流(Marangoni convection)と呼ばれている。

マランゴニ対流が重要な役割を演じる現象はいくつか知られている。ワイン・グラスの内面で、ワインの滴が上昇下降を繰り返す不可思議な現象はLord Rayleighによって「ワインの涙」(wine's tears)として紹介されているが、これはワインの滴の周縁部でアルコール分が蒸発するために生じる表面張力の不均一が原因となっている。このほか、風呂場のタイルの上に石けんを落としたときに水膜が逃げて行く現象、あるいは昔夜店でよく見かけた、樟脳によって駆動され不規則に動きまわるセルロイド製の舟なども同じ原理に基づくものである。

最近になって、宇宙材料実験との関連でマランゴニ対流が関心を集めるようになってきた。宇宙材料実験は、スペースシャトルや、スペースシャトルから打上げられる飛行体（フリーフライヤー）上での微小重力場内で、単結晶育成、合金製造、その他の新材料製造を試みることによって、地上では得られないような高純度・高均質性・高品質などの材料を製作する可能性を探ろうとするものである。例えば、現在単結晶育成には、チョクラルスキー（Czochralski）法、ブリッジマン（Bridgman）法あるいはボート（boat）法、浮遊帯域法あるいはフローティングゾーン（floating zone）法など（図1参照）が用いられているが、これらのいずれの方法においても、地球上での過程では融液と凝固面の間の温度差に起因する密度差対流が発生する。一般に融液内での流動は、結晶の成長速度や固・液界面の形態に影響を与えるが、強い流動は、多くの場合、格子不整等の原因となると言われている。もし、無重力下で単結晶育成を行うことができれば、密度差対流は発生しないから、地上よりははるかに高品位の単結晶が得られるものと期待されている。

しかし、ここに一つの問題がある。図1を見ればわかるように、いずれの単結晶育成法においても、融液は自由表面を持っており、その表面上の温度あるいは濃度に不均一があれば、表面張力差に起因する対流、すなわちマランゴニ対流が発生する可能性がある。そして、マランゴニ対流のために、無重力場での材料製造に期待される利点が帳消しになるかも知れないという心配が生じてくる。

前述のように、表面張力に起因する流動現象は、自然界に広く見られる現象ではあるが、地上においては、他からの強制力や浮力などに起因する流れにほとんど隠されており、あまり重要とは考えられていなかった。しかし、無重力空間においては事情は一変する。米国航空宇宙局（NASA）や欧州宇宙局（ESA）がスポンサーとなって行われつつある微小重力研究計画の中の流体実験においては、マランゴニ対流に関するテーマの数が多いのは当然といえるであろう。

筆者らの研究室では、数年前から、宇宙材料実験に関連して、単結晶育成時に問題となるような浮力・表面張力共存対流の特性を明らかにすることを目的とする基礎研究を行ってきたが、第2回日米伝熱セミナーでは、その成果の一部を紹介した。本稿ではその概略について述べるが、筆者らの研究成果の詳細については文献⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾を参照していただきたい。

2. チョクラルスキー法のモデル化

著者らは、まず図1(a)のチョクラルスキー法をモデル化してみることにした。この方法では、るつぼ内の融液の上部自由表面中央部に固・液界面が形成され、そこで結晶生成が行われる。その際、融液の温度は、凝固面上でもっとも低くなるから、自由表面上では、周辺部から中央

部に向かって表面張力の勾配が生じ、これによって流れが誘起されるはずである。地上で実験を行う場合には、当然密度差による対流もこれに付加される。

図2は著者らのモデルである。ただし、図2(a)では、水平液体層の両側の鉛直側壁が加熱されており、図2(b)では底面が加熱されている。現在、工業的規模で行われているチョコレート法での加熱条件はどちらかといえば図2(a)に近い。融液上部の自由表面の中央部の液面と接する位置に低温壁があるが、これは凝固面を模擬したものである。〔Polezhaev⁽⁸⁾も図2(a)と同様なモデルを用いていることが最近になってわかった。〕なお、チョコレート法による結晶生成においては、種結晶を鉛直軸のまわりにゆっくりと回転させ、また融液を入れた容器をこれとは逆向きに回転させるのがふつうのようであるが、本モデルでは回転は考えていない。

加熱条件の異なるこれら二つのモデルについて、それぞれ実験および数値解析を行って得られた結果をまとめると次のとおりである。

まず、側壁加熱の場合：

- (1) 加熱壁面上での平均熱伝達率は、容器のアスペクト比および冷却壁の無次元幅には依存しない(ただし、実験条件内で)。
- (2) マランゴニ数(表面張力効果の指標)が小さい場合には、低温壁面上での局所熱流束はほぼ一定であるが、マランゴニ数が大きくなると、局所熱流束が一定となる領域はなく、低温壁両端での熱流束は非常に大きくなる。このような状態は、単結晶育成には好ましくないと考えてよいであろう。

次に底面加熱の場合：

- (1) 加熱壁・低温壁間の熱伝達特性は、容器のアスペクト比と冷却壁の無次元幅の組合せによって変化する。
- (2) 冷却壁の幅が広い場合、ある臨界レイリー数以上では、冷却壁下に偶数個のロール状ヒルが発生し、それに応じて局所的な熱伝達特性も変化する。

このような結論を総合すると、低温壁下の流動を抑え、低温壁における局所的な熱流束の値を一定にするためには、ある程度低温壁の幅を広くして、マランゴニ効果による対流が低温壁下に侵入するのを防ぎ、また底面の加熱を臨界レイリー数を越えない程度にとどめることである。従来の地上でのチョコレート法は、側面加熱あるいは底面・側面同時加熱に近い条件となっているため、低温壁面上での局所熱流束の不均一は大きくなり、単結晶育成には不利な条件となっていると言える。

3. 自由表面をもつ矩形断面水平流体層における対流発生条件

浅い水平液層を底面側から加熱し、上部の自由液面から放熱させると、やがて六角形セル状運動 (Benard Cell) が発生することは古くから知られている。Benard 自身は、このセル状運動の成因として、密度差に起因する駆動力だけを考えていたようであるが、⁽⁹⁾近年になって Pearson、⁽¹⁰⁾ Scriven and Sternling⁽¹¹⁾らによる理論的研究の結果、自由表面における表面張力が対流発生における重要な因子となっていることが示された。しかし、これらの研究は、無限水平流体層における対流不安定理論を対象とするものであって、現実の有限流体層への適用には限界がある。すなわち、無限の水平流体層の不安定問題における固有値問題は、流動のパターンについて無限の可能性をもった解を与えるが、実際の有限容器内の対流不安定問題については必ずしも正しい結果を与えないと考えられる。

前章において著者は、底面を加熱し自由液面の中央部を冷却した場合の密度差・表面張力差共存自然対流に関する実験結果について述べたが、その極限の形として上部液面全体が自由表面となった場合を想定し、有限容器内の水平液層における対流不安定問題を考察することは興味あるテーマであろう。

紙数の関係で、ここでは結果の一部を紹介するにとどめる。

図3は、円筒容器内の対流不安定問題についての解析および実験の結果を示したものである。円筒容器は、その中心軸が重力方向に一致するように置かれ、内部の液体の上面は自由表面となっている。図3中に描かれた曲線は、いろいろなレイリー数とマランゴニ数の組合せにおける安定不安定境界線である。図には容器内液層の半径と深さの比(A)を1および3とし、自由表面での伝熱条件を表すピオ数が1、5、10の場合の不安定流動開始曲線が示されている。予想されるように、レイリー数が大きくなると臨界マランゴニ数は小さくなるが、半径・深さ比Aとピオ数Biの組合せにより曲線の形が大きく変り、それらの不安定流動開始に与える影響が大きいことがわかる。また、図中に示された点は、流れの可視化によって判断した安定・不安定領域で、解析結果とほぼ一致していることがわかる。

このような解析および実験の結果として興味深いことは、ここで扱ったような比較的半径・深さ比の小さい円筒容器内液層においては、不安定流動開始後には同心のドーナツ状セルが発生し、よく知られた六角形ベナールセルは見られないということである。例えばA=5の場合には4つのドーナツ状セルが発生する。このことは計算と実験の双方によって確認されたが、実験中、さらに温度差を大きくしていても他の流動モードへの遷移は起らなかった。六角形セルを観察するためには、かなりAの大きな液層が必要と思われる。

4. その他の問題について

4.1 磁場による対流抑制

はじめに述べたように、融液からの単結晶の育成あるいは合金の製造の過程では、融液内に生ずる流れは凝固相の育成速度を支配するのみでなく、育成される材料の質をも左右する。現在までのところ、融液内対流と材料欠陥の発生との間の因果関係については、未だ十分な知識は得られていないようであるが、もし流れを完全に抑制することができ、凝固相の成長が熱伝達率および物質拡散のみによって支配される状態におくことができれば、欠陥発生の割合はきわめて小さくなるであろうと言われている。宇宙実験室における材料製造に期待が寄せられているのも、一つには微小重力場においては浮力による対流が抑制されると考えられているからである。しかし、前章までの結果からもわかるように、微小重力場においても表面張力差による対流は存在しうるから、これに対する方策を講じておくことが必要である。そうした方策の一つとして実用上の可能性の高いものは、融液が導電性をもつ場合に外部磁場を賦与する方法である。著者らは、この方法に関連して、磁場の下での浮力・表面張力共存対流の特性について解析を行っている。その結果、磁場は少なくとも対流の発生を抑えるのにはきわめて有効であることがわかった。詳しい内容については、文献⁽³⁾⁽⁶⁾を参照していただきたい。

4.2 凝固を伴う浮力・表面張力共存対流

これまで述べてきた研究結果は、いずれも高温壁面および低温壁面の位置を不動と考えたものであった。実際の結晶育成においても、結晶の成長速度と引上げ速度が等しい場合には、ほぼこのような条件が成立すると考えられるが、凝固面の形状はもっと複雑になるものと思われる。

著者らの研究室では、現在チョクラルスキー法を模擬したシステムについて凝固までも含めた数値解析を試みているが、その結果についてはまだ発表する段階に至っていない。これとは別に、ブリッジマン法による材料製造をモデル化し、融液内の流れと凝固面の形状および成長速度について実験および解析を行い、結果の一部を発表している⁽⁷⁾。このような、凝固を伴う対流伝熱過程についての研究は今後いっそう重要となるものと思われる。

5. おわりに

表面張力は弱い力であって、対流伝熱過程において大きな影響を持つことはほとんどない。しかし、弱いというのはあくまでも相対的な表現であり、状況によっては表面張力が主役を演ずる場合もありうる。とくに、宇宙空間のような微小重力場においては、その働きは重要となる。現在、欧米で実施あるいは計画されている宇宙実験の中に、表面張力の効果を調べるテーマが多いのは当然であるが、なぜか日本ではあまり取上げられていないようである。表面張力の問題に限らず、宇宙という限りない夢を秘めた世界に、伝熱研究者の関心がもっと集っても

よいのではないかと思う。

6. 引用文献

- (1) Maekawa, T. et al.: XXV COSPA Conf. Paper No. G. 1.4.2 (1984)
- (2) Ochiai, J. et al.: Proc. 5th European, Symposium on Material Science under Microgravity, Paper No. CP6 (1984)
- (3) 前川、棚沢: 第21回日本伝熱シンポジウム論文集 (1985)、410
- (4) 前川、棚沢: 日本機械学会論文集、51-465 (1985)、1468
- (5) 前川、棚沢: 日本機械学会論文集、51-465 (1985)、1475
- (6) 前川、棚沢: 日本機械学会熱工学講演会別刷 (1985)
- (7) 宗像、棚沢: 日本機械学会熱工学講演会別刷 (1985)
- (8) Polzhaev, V.I.: Crystals 10, Growth and Defect Structures [Springer-Verlag] (1984)、87
- (9) Berg, J.C., Acrivos, A. and Boudart, M.: Advances in Chemical Engineering, vol.6 [Academic Press] (1966)、61
- (10) Pearson, J.R.A.: J. Fluid Mech., 4 (1958)、21
- (11) Scriven, L.E. and Sernling, C.V.: Nature, 187 (1960)、186

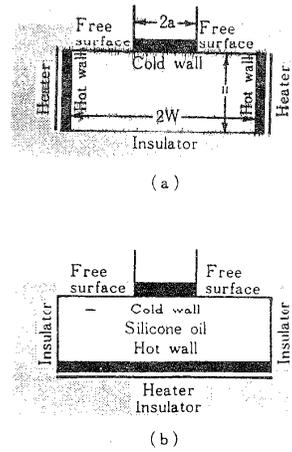
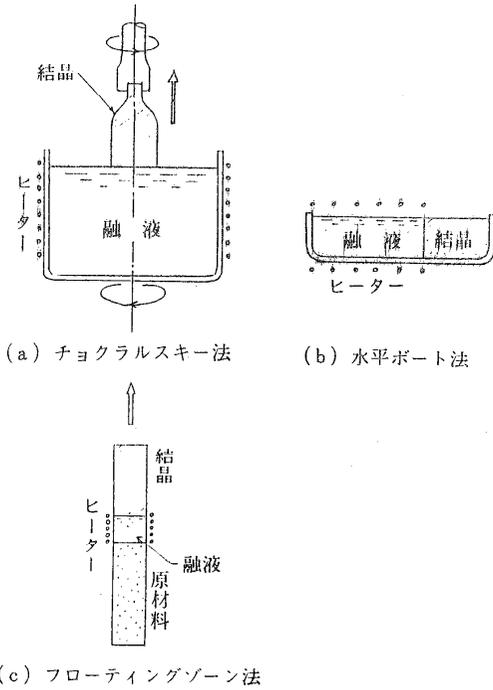


図2. チョクラスキー法のモデル化

図1. 代表的な単結晶生成法

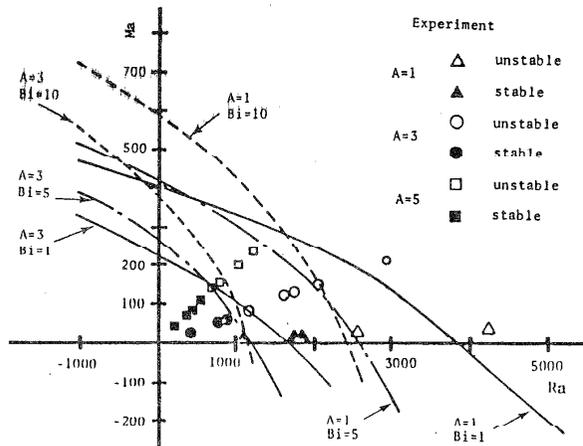


図3. 円筒容器内水平液層内の浮力・表面張力共存対流の安定・不安定境界

<外国滞在記>

ミシガン大学滞在記

工 藤 一 彦(北大工)

昨年の3月より9月まで約半年間、米国ミシガン大学の機械工学応用力学科、Wen-Jei Yang教授の研究室に滞在する機会を得ました。ミシガン大学は、アメリカ中北部のデイトンから西に車で1時間位の所にある。アンナーバという静かな大学町にあり、古くからの中央キャンパスと、工学系の新しい北キャンパスから成っています。私はこの北キャンパス内の既婚学生用のアパートに入り、徒歩5分の研究室に通うことになったわけです。

私としては、これが米国長期滞在の2回目ということ、また半年ということもあって、今回は家族を日本に置いての単身赴任ということになり、自炊等面倒な面もありましたが、公私のいわゆる雑用も無く、好きな時に好きなだけ目的に専念するという意味で、しばしの青春を楽しませてもらいました。前回はミネソタ大で1年、マッハツェンダを用いて内部発熱水平自然対流層の伝熱実験を行ないましたが、はじめての外国生活ということで、すべてがものめずらしく、夢中のうちに1年が終ってしまった感がありました。今回は半年ということで、1つの研究を最後までし上げるというよりは、米国での研究の進め方、研究動向、自分の今後の研究テーマ等を調べてこようというつもりで出かけたわけですが、根が貧乏性なもので、色々なことに首をつつこんであわただしさのうちに半年が過ぎたという感じでした。

ヤン先生は日本に何度も来られ、皆様にはお馴染みの方だと思いますが、日本語もたっしやで、また日本的気配りも行き届き、単身で行ったこともあり、家族同様の暖かいお世話をいただきました。ヤン先生の研究室では、現在、(1)液面に温度分布のある蒸発性液体層の重力と表面張力による対流の発達過程、(2)充填球中の放射伝熱、(3)急速蒸発液滴中の対流と表面不安定、(4)生体工学(皮膚火傷のモデル化)等の研究が行なわれていました。これを行なっている大学院生はヤン先生が台湾出身の中国人ということもあってか、全員台湾、中国からの留学生でした。米国人の大学院進学率が低く、外国人留学生が大学院に大きな割合を占めつつあるというのが、ミシガン大にかぎらず全体の傾向との話でした。研究室はおかげでヤン先生と私は日本語、先生と学生は中国語(北京語)、私と学生は英語というややこしいものでした。ミシガン大につくとすぐ、ヤン先生の部屋に、先生と背中合わせに机をいただきました。このおかげでアメリカの教授の仕事の進め方について大いに勉強になりました。ヤン先生は世界中に知己が多く、並行していくつもの国際会議の計画を准めておられ、その打合せ、連絡等かなり大変なようでしたが、人と人が会

う国際交流の重要性を強調されたのが印象に残りました。文献は良いことしか書いて無く、直接会って討論することが相互の刺激と発展に絶対必要で、異なる考え、アイデアを持った人との接触から新しい種が生まれる。その時代の学問の中心となっていてところに人も集まるもので、ルネサンスのイタリア、市民革命のフランス、産業革命のイギリス、工業化のドイツ、科学技術のアメリカと国際交流の中心は移ったが、これらの国々では他国の頭脳を引きつけ、ますます伸びていった。というので、日本もアジアの優秀な頭脳を引き入れていくべきだ。というのがヤン先生のお話でした。これは先生が台湾からアメリカに来られ、日本とアメリカの違いを御自身の経験でもって比較された結論としての話で、今後日本が速いペースで伸びていくための人材不足とからみ、決断を要する問題になってくると思いました。大学院の学生として優秀な留学生を大学が受け入れ、卒業後活躍の場を与える社会的な条件作りが必要ですが、産業界の渴望にも等しい人材要求が、日本におけるこのような国際化を進める原動力になっていくのではないかと思います。

さてミシガン大学に行つての最初の仕事は、「ハイテクノロジー分野への伝熱の応用」に関する文献サーベイで、主として電子機器の冷却と、マテリアルプロセッシング（単結晶成長、光ファイバ製造、アモルファス鉄製造、溶接、圧延、クラッド、連続鋳造、プラスチック成型、複合材料の混合等）についてまとめてみました。結論から言えば、電子機器の冷却の分野は、ほぼ成熟期に達した伝熱の分野である自然対流、強制対流、沸騰等の伝熱形態から外れるものではなく、従って対象オリエントな研究がほとんどで、目的に応じていかによりまく伝熱学を用いて解決するかという方向で研究が行なわれ、その意味で米国の産業界と大学との連携の良さが発揮される分野であると感じました。また、マテリアルプロセッシングの分野では、マランゴニ対流、熱泳動、主要な流れ方向を持つ3次元流れ場の、流れ方向と、流れ直角方向の2つ解析への分離技術（プラスチックの混練に応用）、プラスチック中のグラスファイバ繊維の方向の統計的解析など、これまであまり取り扱われなかった現象あるいは新しい手法が散見され、新しい高度な素材の製造過程、あるいは高度な製造法の中に新しい熱物質伝達研究のシーズが含まれていることを示していました。この分野もやはり先端技術と取り組む産業界との接触から触発されたテーマが多く、アメリカの研究予算制度の効果が感じられました。

1月ほどで文献サーベイを終え、次は「マランゴニ対流の実験をやってみないか。」というヤン先生のすすめではじめたのが、表面張力と重力による対流の共存時の対流パタンの特徴を、レーザーホログラフィを用いて調べる実験でした。この研究は数年前からヤン先生のところで行なわれておりました。蒸発中の液滴の対流の研究から発展したテーマです。私のミシガン大滞在中よく夕食をごちそうになった台湾からの留学生の謝（シェー）君の学位論文のテーマとして解析は

大体終わっていたものです。具体的には、上面開放の直方体容器に蒸発性の液体（エチルアルコール）を入れ、また液面中央に接触させたヒータで中央部を線状に加熱し、液面に温度分布をつけたときの対流パタンの発達過程と定常時のパターンを調べるものです。定性的には上面冷却の水平自然対流層内の対流と、液面中央を加熱したマランゴニ対流の合成になるわけですが、両者の強さ、対流の発達の高さのちがいにより過渡時及び定常時にさまざまなパターンが生じるわけで、これを可視化で見てみようということになったわけです。これに近い現象としては、海上にこぼれたLNGの火災、溶接プール、液滴蒸発等が上げられています。水平層自然対流についての可視化は、前述のように10年程前にミネソタでマッハツェンダを用いて経験済みであったので、半年でなんとかなるとは思っていました。時代が変わり、マッハツェンダ用の両面平行な窓ガラスの入手に6ヶ月かかると言われ、あわててホログラフィに切り換えました。マッハツェンダは、光学系さえきちんとしておけば、写真乾板の現像という面倒もなくしませんが、それなりに便利なものだと思うのですが、この世界にもはやり、すたりがあるようです。というわけで、ホログラフィの本を片手に光学系を組み立てたわけですが、テストセクションのすえつけ1枚目からしんがらしたときはうれしくなり、研究室の大学院生を集めてカメラのファインダをのぞかせたものでした。実験について言えば、ヤン先生の話によると、最近学生だけでなく研究者の間で、答がはやく出て、かつ論文もたくさんかける解析を好む人が多くなり、地道な実験がおざりにされる傾向があるとのことでした。コンピュータグラフィックス、計算機実験等を見せられると、学生がな人でもこれのできるような気になり、物事の本質を考えようとしなくなる、というのは、ある程度本質をついているのかもしれない。

解析と言えば、同じ機械科に東工大出身の菊池先生という若い教授（34才）がおられ（ミシガン大の教授です。）有限要素法のメッシュの自動最適化に取り組んでおられました。今米国ではこのような分野に非常に金が出るとのこと、最近エネルギー関連研究の予算は、スターウォーズ計画関連を除いて非常に低調だというヤン先生の話と合わせ、アメリカでの研究のある意味での効率化、ある意味での流行の行きすぎを感じました。

上述の実験は、やってみるとやはり色々なトラブルが出て、結局帰る直前にやっとデータがとれたしだいで、論文にまとめるのは帰国後になってしまいました。この実験以外に手をつけたことは、5月末のLabor Dayの3連休に、特に予定も無く、アパートで1人ぼっねんとしていてもつまらないので始めた、「充填球中での3次元放射伝熱のモンテカルロ法による解法」があります。充填層中あるいは多孔質中の伝熱は、放射以外、対流伝熱、沸騰伝熱等、今米国で花盛りの状態で、「これまでの伝熱研究を、すべてもう1度多孔質中でやりなおしている。」というヤン先生の感想通りです。よってその充填層中の放射伝熱は、従来、固体粒子を散乱源として、その

散乱エネルギーを2方向に積分し、正負2方向に進むエネルギー束の微分方程式を立ててこれを解く、1次元の連続体近似の2流束モデルが一般的ですが、粒子の配列、表面物性と微分方程式中の定数の関係が明確ではなく、また多次元化も実用上困難な状態にありました。日本で、放射性ガス中の放射伝熱に関して、モンテカルロ法によれば、3次元化及び場所による物性値変化も容易に取り扱れることを経験済みであったので、これを球の充填層にも適用しようと考えたわけです。この解析は、連休最初の2日間で可能性確認のためのプログラムを作り、3日目に大学の部屋にあった、IBMのパソコンにかけてみました。モンテカルロ法の計算は、プログラミングのときに幾何学的な座標変換の面倒をいとわないことと、計算時間の長いことをいとわなければ、プログラムはそれほど長くもなく、またメモリをやたらに食うわけでもないので、パソコンに十分かかります。朝、何万本のエネルギー束の計算をスタートさせ、別室でホログラフィの実験をやり、昼に部屋に戻れば結果が出ているという毎日が以後続くことになりました。プログラムのバグは、少数本のエネルギー束の計算で大程つぶせますので、長時間計算が無駄になることはほとんどありませんでした。この解析では、結局、粒子の配列が規則正しいと充填層の透過率が1~2ケタ減少すること、配列の規則性がくずれるに従い、透過性が上り実験値に近づくこと、粒子の表面の放射率が透過率に非常に大きな影響を持つことなどが明らかとなりました。これらは今後さらに検討を重ねていくことを考えております。

今回のミンガン大滞在中は、第20回 IECEC でヒートポンプ・ボイラシステムの講演をするため、マイアミビーチに行ったことと、帰国直前に、サンディエゴで開催された日米伝熱セミナーに参加させていただき、その往路ミネソタ大に立寄って旧交を暖めた以外はあまり歩きもしませんでした。毎日が忙しく過ぎてしまう日常からはなれ、日本と、自分のこれから等を考える時間が与えられたことは非常にありがたく、今後の教育・研究の面で生かしてゆきたいと考えております。また、単に知識だけでなく、ヤン先生の人となりにつつまれ、その研究に対する考え方に身近に接することができたことも非常に幸せであったと感じている次第です。

<研究トピックス>

(1) 寒冷地におけるソーラポンドによる太陽エネルギーの利用

金山 公夫(北見工大)

1. ソーラポンドとは

ここではソーラポンドとは、集熱器などの機器装置を用いずに、大規模かつ安価に太陽エネルギーを集めて貯蔵する能力をもつ天然または人工の池であると定義する。

人工のソーラポンドは広い池に大量の塩水で満たして熱媒とし、表面に降り注ぐ太陽エネルギーをこの熱媒に吸収させて集熱し、同時にその大きな熱容量によって大量にしかも長期間の蓄熱を行なうものである。ソーラポンドは蓄熱能力が大きいのでポンド水温度は日射の日変化には殆んど影響されず、日射の季節変化による比較的長い周期で変化し、大気温度より2~3カ月遅れて推移する。したがって夏場の強い日射を集熱・蓄熱して、これを秋冬の熱需要期に抽出して使用することが可能である。

ソーラポンドの集熱面に相当する水面は常に水平面であるから、一般に低緯度の、しかも日射の強い温暖地域において適するが、最近、高緯度においても実現可能であるとの報告がある。すなわち、アメリカ、オハイオ州、コロンバス(北緯 $40^{\circ}00'$)において農業用温室熱源⁽¹⁾のほか暖房用熱源⁽²⁾として利用することが試みられ、アラスカ州フェアバンクス(北緯 $64^{\circ}19'$)においても反射板を有効に利用することによってソーラポンドの実現の可能性があり、⁽¹⁾驚くことは南極(南緯 $77^{\circ}35'$)にも天然のソーラポンド⁽³⁾が発見されている。

2. ソーラポンドの原理

ソーラポンドには多くの種類があり、図1に示すように非対流式ソーラポンドと対流式ソーラポンドに大別され、前者を塩水ソーラポンドとも言う。普通ソーラポンドと言えば非対流式塩水ソーラポンドを指し、本文で対象とするものもこの種のものであり、太線でその系統を示す。この他に、コレクタを併用した特殊なソーラポンドもある。

池や潮沼に入射した日射は、水深に応じてたとえば図2に示すような割合で水に吸収され温度上昇をもたらすが、通常は熱利用できるほどの温度に到達しない。その理由が主にポンド表面近くで起る対流、放射および蒸発によるもので、それらによる水面から大気への熱損失が大きいためである。すなわち普通の池では、内部で吸収された日射により温度上昇した池の水は密度が低下し、それによる浮力にもとずいて大きな対流が発生し、池底部に蓄熱された熱が表面に運ばれることによって損失が増大する。したがって、池内部に発生する自然対流を抑制す

ることにより、底部の温水からの熱損失が防止され、それによる温度上昇が蓄熱作用をもたらす。この自然対流を抑制する手段に塩水溶液を用い、これに濃度差をつけることによって温度上昇にもつづく密度低下を下まわる密度上昇を作り出す方法がソーラポンドの原理である。濃度差を有する塩水溶液を濃度勾配層と称し、この場合池底部に向って濃度が上昇するように勾配を付与する。

3. 濃度勾配層の安定の条件

Weinberger⁽⁴⁾によれば濃度勾配層の静水力学的な安定の条件は次の通りである。

$$\frac{\partial \rho}{\partial Z} = \frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial Z} + \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial Z} \geq 0 \quad (1)$$

ここで、Sは塩水濃度、 ρ は密度、Tは温度およびZは垂直座標で下方を正とする。

しかし、勾配層内に微小な変動により混合層が発達することがあるので、これより厳しい条件を必要とする。すなわち

$$\left(\frac{\nu + k_s}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial Z} + \left(\frac{\nu + k_T}{\rho} \right) \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial Z} \geq 0 \quad (2)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 k_s は塩拡散係数、 k_T は温度拡散係数。一方 Taber and Winberger⁽⁵⁾の理論解析によれば、温度勾配層を安定させるための条件は

$$\frac{\partial \rho}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial Z} \geq -1.14 \frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (3)$$

であることが示される。式(3)は温度の拡散性が濃度の拡散性より大きいので、濃度による密度勾配は温度による密度勾配より1.14倍大きく保たなければならないことを意味する。すなわち、式(2)と(3)から

$$(\nu + k_T) / (\nu + k_s) = 1.14 \quad (4)$$

$\partial \rho / \partial T$ が負の値で、 $\partial \rho / \partial S$ と同様に濃度によって僅かに変化する。 $\partial T / \partial Z$ は日射その他の要素で変化する。北緯35°(死海)の真夏にポンド表面で $\partial T / \partial Z \sim 500^\circ\text{C}/\text{m}$ 、底部で最大 $400^\circ\text{C}/\text{m}$ に達する。この値はポンド内に対流がない場合であり、実際は下部に対流層があり、また熱抽出が行われて強制対流が加わるから、局部温度勾配はこれより小さくなり、食塩水の場合 $200^\circ\text{C}/\text{m}$ 以下である

実際の塩水ソーラポンドでは図3に示すようにポンド水を上下二層に大別し、上部に濃度勾配層(断熱層)を配置し、下部に濃度一様な蓄熱層を配置する。さらに最上部には薄層の上部対流層がある。日射はこれら濃度勾配層および上部対流層を透過して蓄熱層に到達するのでその透過率によって集熱量、したがって蓄熱量が左右され、これを高く保つことがポンド性能を

向上させるための第一要件である。一方濃度勾配層でカバーすることにより蓄熱層からの対流と放射にもとづく表面からの熱損失を防止することが出来る。このほかポンド側面および底面から地中への伝導による熱損失があり、これらは地下構造、ポンド側壁および底部構造によって影響される。表面からの日射の入熱が最大となり、これらの損失が最少となる時ソーラポンドの集熱効率が最大となる。ポンド水深が2～3 mの場合、濃度勾配層と蓄熱層の厚さの比は普通1：1にとることが多い。

濃度勾配を有する非対流層の塩水濃度勾配は分子拡散、熱拡散および風波により日時の経過とともに崩壊され、濃度勾配の低減による濃度の均一化および局部的な乱れによる対流を惹起し、本来持っている断熱層としての役割を果さなくなり、そのことはソーラポンドの機能を失なうことを意味する。一般に自然の状態で分子および熱拡散に対して濃度勾配を維持できる期間は5～6カ月と言われ、それ以上の日時は経過したり、異常な事態によって濃度勾配が崩れたりすると濃度勾配を補修しなければならない。そのために蓄熱対流層に、時には濃度勾配層に高濃度の塩水を注入して拡散塩分を補給する。一方ポンド表面には間欠的に真水を注入して濃度を低く維持し、表面に浮かぶゴミ、花粉、枯葉その他汚物を洗い流し、同時にバクテリア、藻などの発生を抑えてポンド水の透過性を高く保つ。この様にして安定な非対流断熱層を長期間保つためには、實際上、濃度20%程度の蓄熱層に対して13%/m程度の濃度勾配を維持するようにいろいろな方策と技術が必要となる。この場合 $\partial T / \partial Z = 50^{\circ}\text{C}/\text{m}$ とすると $\partial S / \partial Z = 100\text{Kg}/\text{m}^4$ となる。

ソーラポンドの建設後、蓄熱層温度を利用し得る50℃以上に上昇させるには、春から秋にかけての3～4カ月を要し、8月から一時的な熱抽出が可能で、次年以降は日射量の10～20%の熱量を定常的に抽出して利用できる。この場合、濃度勾配層を乱すことなく蓄熱層内の高温塩水を一様に抽出し、外部熱交換後再び蓄熱層に注入することが、集熱効率を上げる要因となり、ひいては経済性を生み出す要因ともなる。熱抽出および注入用のディフューザの寸法、形状、配置および抽出速度を適切に保つことによって濃度勾配層を乱すことなく蓄熱層の塩水全体を立体的に取出すことが可能で、その技術を用いて大型ソーラポンドの性能が向上される。

4. 塩水溶液の透過率

ソーラポンドへの日射の入熱量を増大させるために透過率の高い塩水溶液を注入して、その透明度を長く維持することが重要である。当研究室では試薬食塩(1級)および一般食塩の水溶液(蒸溜水)の透過厚さ1～100mmの試料について分光透過率を測定し、その単位長さ当りの分光透過率 τ_{λ} から厚10～100cmの試料の分光透過率を算出する。さらに式(5)を用いて濃度勾配層の平均分光透過率 $\bar{\tau}_{\lambda}$ を算出し、これを式(6)に代入して波長積分することにより深さ3.2

m の濃度複合層への日射の到達割合 (全透過率) τ を算出した。

$$\tau_{\lambda} = \exp \{ -(\mu_{\lambda_1} + \mu_{\lambda_2} + \dots + \mu_{\lambda_n}) \} \Delta \ell \quad (5)$$

ここで $\mu_{\lambda_1}, \mu_{\lambda_2}, \dots, \mu_{\lambda_n}$ は厚さ $\Delta \ell$ の濃度勾配層 1 ~ n の吸収係数

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} E_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda} \quad (6)$$

E_{λ} : 日射エネルギーのスペクトル分布 (エアマス 0 ~ 5)

その結界を図 4 および図 5 に示す。

図 4 (a)~(c) は試薬食塩、並塩および一般食塩 (商品名キングソルト) の濃度 0 ~ 20% に対する分光透過率の計算値である。並塩およびキングソルトの成分分析結果を表-1 に示す。試薬食塩の分光透過率は全体に透過率が大で、特に波長範囲 0.47 ~ 0.58 μm では厚さ 1 ~ 100 m ではほぼ 1 とみなされる。それに対し並塩およびキングソルトは不純物の影響で波長域 0.47 ~ 0.58 μm において厚さと濃度が増すと透過率が明らかに低下する。それ以上の波長域では三者とも 0.76、0.97 μm の強い吸収バンドおよび 0.81、1.07 μm の明瞭な透過バンドを有して水と類似のスペクトルを示し透過率は急激に減少し、厚 10 cm 以上の試料では波長 1.13 μm 以上では透過率は零となる。しかし近赤、赤外域での透過率は塩濃度が増すと増加の傾向を示し、特に試薬食塩においては長波長域で大きな透過率を有する食塩の性質が明瞭に現われる。

図 5 は実用ソーラポンドを想定し試薬食塩 (NaCl)、一般食塩 (KINGSALT) および並塩 (NAMIEN) の純水層 0.2 m 、濃度勾配層 (C.G. Layer) 1.5 m および一様濃度 (U.C. Layer, 20%) 1.5 m からなる複合層の日射透過率を示す。垂直入射 (エアマス 1) に対して深さ 3.2 m のポンド底面への日射到達割合は試薬食塩 42%、KINGSALT 34% および NAMIEN 32% を示し、不純物の影響でそれぞれ試薬食塩に対して KINGSALT で 19%、NAMIEN で 24% の低下となる。

5. モデルソーラポンドによる実験

北見工大構内に小型実験ポンドを設置し、濃度勾配層の濃度および温度の変化および冬期の結氷による影響を確かめた。実験ポンドの大きさは 1.34 $m \times 2.84 m$ 、深さ 1.92 m でサンクランドの方法を用いて初期濃度勾配を形成した。蓄熱対流層の形成時には温度の高い蒸気復水を用い、初期水温を 40°C に保ち計測を行った。

これらの測定結果の一例を図 6 および図 7 に示す。またポンド表面の凍結状況の観測結果を表-2 に示す。これらの測定結果から、冬期間の結氷はラフなザラメ状で最大 150 mm の厚さに達する。側壁への凍結力は殆んど発生しないが、結氷により日射の集熱は期待できない。またその間、蓄熱槽の温度は月日の経過とともに低下し、1月9日に 13°C まで下がったが、濃度

勾配層の濃度分布は結氷によりむしろ安定に推移し殆んど変化はみられなかった。

6. 実証ソーラポンド

石油代替エネルギーの開発を目的として、網走市能取湖畔において大規模なソーラポンドの建設による実証試験が国のプロジェクトとして行なわれている。

研究開発の目標は、(1)塩水ソーラポンドとし、塩水漏れのない構造であること。(2)ソーラポンドは同筒形で大きさは直径4.4m(面積1500 m^2)、深さ3mとする。(3)年間の熱抽出量は表面積1 m^2 当り 100×10^3 kcal以上が可能であること。(4)ソーラポンドから供給される熱量は 120×10^3 kcal/h以上、温水供給温度40~60℃を維持し、不足分はヒートポンプで補充する。

ソーラポンド本体、機械建屋および計測小屋は昭和59年11月6日に完成し、昭和60年6月初旬から塩水溶液の作成および注入を開始し、6月24日に濃度勾配を張り終え、主要な作業を終了し、以後集熱・蓄熱および熱抽出の実験が行われている。濃度勾配層の形成にはザングランドの方法が用いられた。ソーラポンド本体の構造を図8に示す。濃度勾配作成時の塩水濃度分布および温度分布の測定結果を図9に示す。対流蓄熱層の温度の推移は、6月24日(塩水層完成時)；26℃、7月1日；34℃、7月24日；48℃、7月30日；53℃および9月6日；70℃に達し予測を大きく上まわる温度上昇を示した。その理由は予測では種々の条件を厳しく設定した安全側の値であるのに対して、実際のポンドにおいては塩水作成に用いた食塩を吟味し、水質の良い水道水を用い、さらに外部タンクで十分混合攪拌して法入するなどの配慮によって透過率の高い塩水層が得られたこと、ポンド側壁および底面に厚さ80mm以上の発泡ウレタンの吹付け断熱を十分に行なったことなどが上げられる。

本実証ソーラポンドの熱抽出は今年は10~12月の3ヶ月間断続的に行ない、また昭和61年からは5~12月の8カ月間を定常的に前月の日射量の10~20%を行なって水産加工場のボイラ給水、処理水その他の雑用水として供給される。給湯温度は40~60℃でこの期間はソーラポンド主体の供給可能であるが、熱需要側の負荷変動による不足熱量および冬期間に対する熱供給のためにヒートポンプシステムが組込まれている。

文 献

- (1) Fynn, R.P. and Short, T.H., Proc. 1980 Annual Meeting ASME Energy symposium, 1980. Kansas city, Mi.
- (2) Rabl, A. and Nielsen, C.E., Int. J. Solar Energy, vol.17 (1975) 1~12
- (3) 由佐悠紀、南極ビクトリアランドの塩湖の水温について、水温の研究、vol.17, №14 3114.
- (4) Weinberger, H.Z., Int. J. Solar Energy, vol.15 (1973), 57~61
- (5) Tabor, H., Int. J. Solar Energy, vol.27 (1981), №3, 181

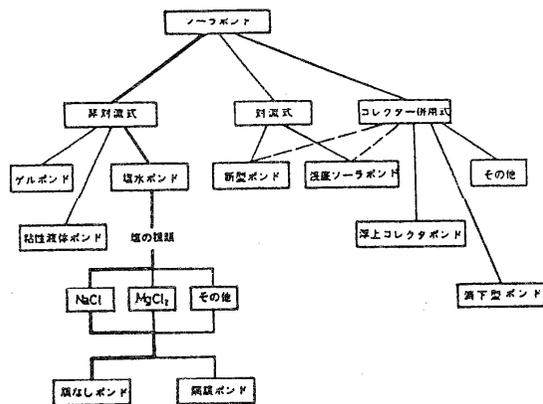


図1 ソーラポンドの分類

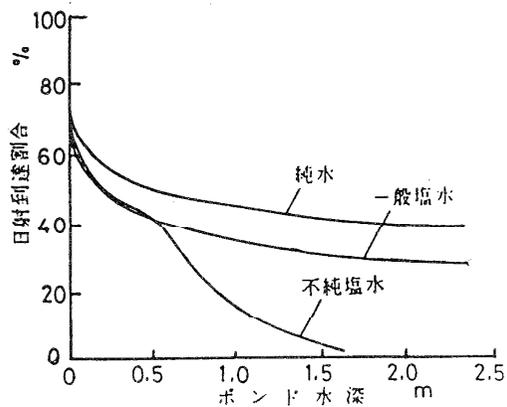


図2 ソーラポンド内の光線の吸収

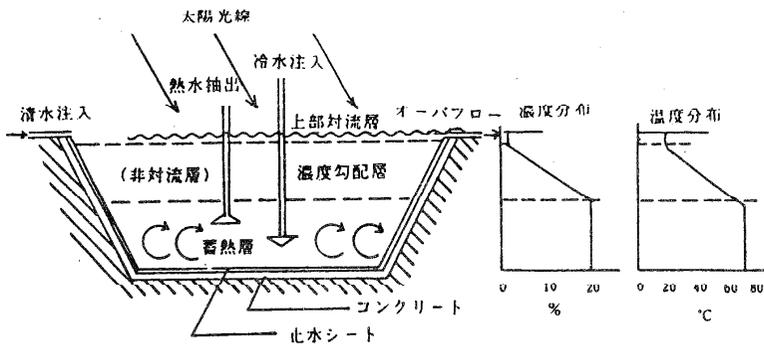


図3 ソーラポンドの原理と構造

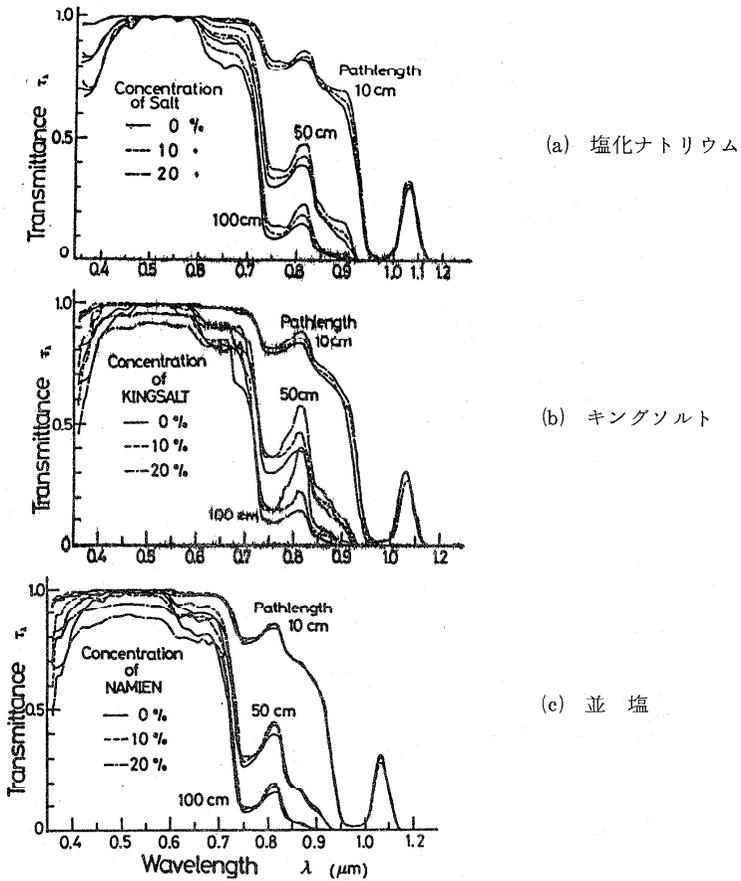


図4 食塩（塩化ナトリウム）、キングソルト、並塩水溶液の分光透過率

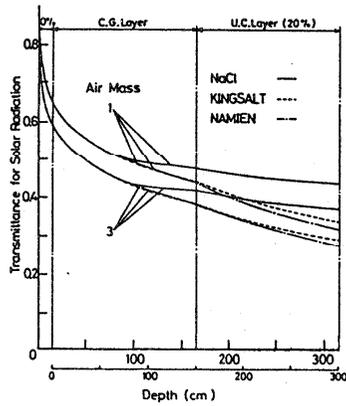


図5 ソーラバンドに対する日射の透過率

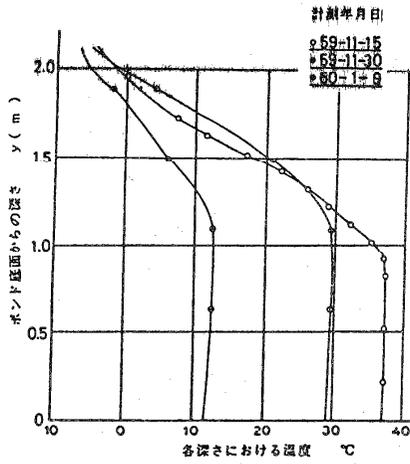


図6 実験ポンド内の温度変化

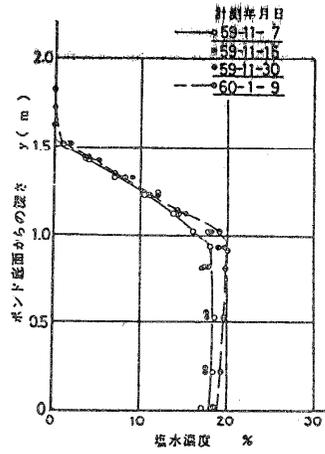


図7 実験ポンド内の濃度変化

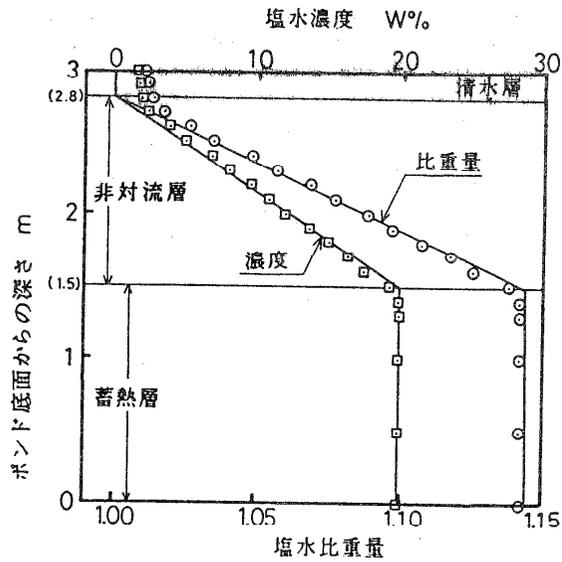


図9 実用ソーラポンド完成時の測定値

表1 塩の成分表

項 目 \ 塩 種		並 塩	キング ソルト (粗粒)
製 造 方 法		原料 ……>海水 イオン交換膜製塩法	同左
包 装 形 態		30kg紙袋	同左
成 分 比	NaCl 純 度 %	97.968	97.8
	水 分 %	1.576	1.618
	カルシウム (Ca) %	0.060	0.059
	マグネシウム (Mg) %	0.046	0.051
	カリウム (K) %	0.104	0.090
	硫 酸 根 %	0.081	0.021
	そ の 他 %	0.165	0.381
	計	100.00	100.00

表2 実験ポンドの凍結状況 (北見工大構内)

計測月日	氷 厚 (mm)	最低気温 (午前6時)	記 事
S59. 10. 31	0	- 3.5 °C	1. 氷の状態はざらめ状で冬期の日射集熱は期待できない。 2. 氷結による側圧は少なくポンドの変形は認められない。 3. 最低気温は 1月25日 -30°Cを境に以後気温は少しずつ上昇。 4. 濃度勾配の変化を見るため水の溶解時期 (4月中旬) まで計測を継続した。
11. 8	2	- 1.5 °C	
11. 15	20	- 7.5 °C	
11. 20	50	- 12.0 °C	
11. 22	50	- 7.5 °C	
11. 25	80	- 3.5 °C	
11. 30	110	- 5.5 °C	
12. 15	120	- 14.0 °C	
12. 25	120	- 17.0 °C	
S60. 1. 9	150	- 17.5 °C	
1. 24	150	- 28.0 °C	

(2) Inverted Annular Flow 研究雑記

赤川浩爾、竹中信幸、西田浩二（神戸大工）

1. 何故この研究を始めたか？——教授（ボス）の言葉——

表題の Inverted Annular Flow (IAF) とは「管内強制対流沸騰において伝熱面上に定常的に蒸気膜があり、管中心部に液流が存在する流れ」のことであり、この IAF の伝熱流動の研究を我々の研究室で始めて、現在かなりの成果をあげつつある。ところで「IAF の伝熱研究？、赤川さんは二相流屋さんではないか？、伝熱もやっているの？」という人もあるかも知れないし、またあるいは悪くとれば「二相流しか出来ないのではないか」と思う人もあるかも知れない。しかし私もちゃんと伝熱の研究をしたこともあるのであって、第 5 回国際伝熱会議では日本に割当ての約 30 編の中で藤井照重助教授と連名で「沸騰熱伝達に及ぼす fouling の影響」の論文を発表しているし、また二相流、あるいは動力発生に関する研究でも蒸気管の流動・伝熱を含む研究も行っているのである。何も伝熱を避けているわけでもない。そもそも二相流動を伴わなような沸騰伝熱の現象もないのであって、あまり伝熱と二相流を区別して考える事も無意味ではなからうかと思っている。なお西川先生には学会の懇親会でお会する度に、「二相流の研究にはつまらんものが多い」と一喝されるのであって、私もご趣旨に賛同する面もあるが、一方では大いに反論をしたいこともある。しかしアルコールに弱い私は常に受身に廻って、一言の反論の機会も持てないままになっている。

さて余談は置いて、本論の IAF 研究の動機に話をもどすことにする。現在、原研で実施されている「大型再冠水効果実証試験」の評価問題に私も関係していて、その実験結果と解析コードの大略を知る機会を得たが、その中で再冠水過程の IAF の流動・伝熱についての最も基本的な現象の IAF の流動・伝熱が予想外に明確でないとされた。そこで大学では到底できないような大規模の実験結果の解釈に役立つようなもので simple で小規模な実験的研究（大学で出来るもの）の必要性を感じていた。「そこでこの研究を始めた」と云えばかっこよいのであるが、実の所は私自身は他に多くの研究テーマをかかえているのでこの研究を開始するつもりはなかった。では直接の動機はと云うと次のようである。

昨年、研究室に竹中君が助手として着任した。同君は京大の岐美教授の指導の下で博士課程を終えて液体金属の伝熱で学位を得た伝熱の専門家である。今後の研究については当研究室の従来からの二相流関係の研究を行ってもらおうと共に、他に彼自身の主導するテーマを持ってもらうことにした。それによると IAF に興味あるとのことであった。

一方、昨年私の研究室に博士課程で西田君が入学してきた。神戸大学の自然科学系の博士課程は工学部・理学部・農学部を統合した後期3年の独立研究科(教育学部・教養部の自然科学系の一部教官を含む自然科学研究科)であるので、私としては同君に3年間で学位が与えられるような研究テーマを与えて指導をする責任があるわけである。同君は群馬大学の修士課程で稲田先生の指導の下に「加熱面に衝突する液滴の非定常熱伝達」の研究を行ってきている。この研究を通して得られた知識を生かして、しかも我々の研究室の得意とする二相流の研究にも深く関係するようなテーマを考えてみた。当時藤井照重助教授はオーストラリアに長期留学中であつたので、新任の竹中君と議論の上で最適のテーマとしてIAFを定めたのである。私の「感」では、このテーマでなら3年間で一応の成果をあげることが出来ると思ったのもある。

ところで実験を行うについては先立つものが必要である。しかしその見通しについてはまず日をつぶって、竹中君と理想的な実験装置の計画を始めた。この時点で幸運にも教室で持ち廻りの設備充実費約300万円が我々の講座に来ることになり、その全額をこの装置に当てることにした。

このようにして我々の研究室でIAFの研究態勢が出来上つたのである。帰する所は、人の利・時の利・金の利によるものである。ポスの仕事の第一はよい研究テーマを与えて、準備することである。後は若い人達の意欲と活力に期待し、研究経過の筋目で大いに議論し方向づけをあやまらないことであろう。

2. この研究への思い入れ——助手(下級士官)の言葉——

管内強制対流膜沸騰熱伝達の研究は従来、蒸発管の post-dryout 域における噴霧流の伝熱や原子炉の再冠水過程での quench 条件、及び quench front 近傍の伝熱に関連して行なわれてきており、最近原子力関係で多くの論文が発表されている。クォリティの増加に伴ない、IAFからIAFが乱れ液体スラグが現われ、やがて噴霧流に至る流動様式の遷移は1960年代後半の Rohsenow らの一連の研究が行なわれた頃には定性的に明らかにされていた。例えば植田先生の教科書に強制対流核沸騰の流動遷移と対比した流動様式図が引用されているが、定量的な遷移条件や流動・伝熱特性についての研究は充分でなく、最も基本的な体系での実験を強制対流核沸騰の勉強と並行して行うべきテーマであると思っている。

本研究を始めるに当たっての方針は、赤川先生・西田君と相談して決定したが、その大略は、

- 1) 差当って、定常的な膜沸騰域の流動・伝熱に限定する。伝熱形態の遷移を伴ない研究については実験を行いながら検討し、しかるべきブール沸騰の実験もあわせて行う。
- 2) 可視化に工夫を行い、できる限り細く流動様式の分類を行って流動様式線図の作成を行う。また分類に当って、当初は定性的・感覚的なものでよい。

- 3) 熱伝達係数・圧力損失の測定を行い、これらの結果と流動様式との対応を明らかにし、流動様式の分類数を減じつつ、各領域ごとにモデリングを行う。
 - 4) 気液界面状態について、何らかの測定法を工夫し、その性質を明らかにする。
 - 5) 差当って、垂直管内上昇流とし流体はフロンを用いるが、水平管や下降流また流体は水・窒素等できる限り多くの体系・多くの流体を使用する。
- であったと思う。

当初、可視化及び計測法については、いくつかの試行錯誤を行った。可視化の可能な加熱方法については、オイルや熔融塩による二重ガラス管の使用や輻射を利用する方法を検討したが、熱流束・温度の測定に難点があり、結局これらを放棄してもっとも簡単な方法として石英管にニクロム線を巻いたもので現象の全体像の把握を行う事とした。これらの流動様相は後に示す。可視化した流動様式と定量的な変動量を関連づけようという事で、まず液温測定用に熱電対を挿入した所、液体スラグや噴霧域でも飽和温度一定の値しか示さない。壁にぬれる事のできない不安定な流れの中にぬれる事のできるプローブを挿入したため、液がプローブに付着したためであり、蒸気流速が速くなれば Flooding を起して蒸気温度の測定はできるであろうが流動様式を乱す事になり、比較的クォリティの大きい IAF にはプローブの挿入は固難である事が解った。これは可視化を行った事の賜物であったが、管内にグリッド・スペーサ等の非発熱物がある場合の IAF の流動について新たなテーマの示唆を得たという事にして、他の非接触な測定法を現在検討している。

研究を始める以前から、ANL の Dr. Ishii が IAF の研究を開始している事を聞いており、去年に Northwestern Univ. の Prof. Bankoff が神戸大学を訪問されたおりに IAF を可視化した VTR を御見せした所 Dr. Ishii の研究を知っているかと言われて、“He is my great rival on this project” とか答えて、赤川先生共々大笑であった。こと原子炉の安全性という事になると大学での情報不足はいかんともしがたいが、強制対流膜沸騰熱伝達の一連の基礎研究という事では笑っている暇はない。

3. わかった事・わからない事 — 博士課程の院生（兵隊頭）の言葉 —

「IAF」、昨年5月研究テーマの打合わせで私が初めてこの名前を聞いた時、「逆の環状流」という単語の意味しか頭に浮ばず、その研究の重要性を全く知らなかった。ただ IAF が管内膜沸騰に属するものであると教えられ、流動がらみの伝熱ということで、これはおもしろそうだと思って、喜んでこのテーマをやらせていただくことにしたことを憶えている。

IAF の研究を始めるにあたり、関連する文献を調べると、伝熱を対象とする研究は多くあるのに対して、流動に関する研究は少なく、流動と伝熱の対応がよくわからなかった。

私自身 IAF を全く見たことがないので、まず可視化を試みます。そうすれば IAF の全体的なイメージをつかむことが出来、現象が我々に何か重要な情報を教えてくれるのではと思ったからである。実験は石英管外周にニクロム線ヒータを巻き付け間接加熱し、IAF を安定した状態で形成させ、35mm カメラと高速度ビデオを用いて観察した。また同時に管壁温度分布も測定した。図 1 は IAF の流動様相を写真観察より(A)~(F)の 6 タイプの流動様式に分類したもので、流動様式は一般にクエンチフロントから(A)→(F)へ遷移することがわかり、全体的なイメージを目に焼き付けることが出来たと思う。これによってステンレス管の伝熱実験でも、管壁温度分布から内部の流動状況がかなり適確に推定できるようになった。

「では伝熱特性は?」、「これらを支配するパラメータは?」、このような疑問をいただきながら Sus 304 管を直接通電して IAF を形成させ、次に流れ方向の熱伝達特性を調べた。その結果の例として、図 2・3 に流路方向の熱伝達係数 h_{TF} の分布を局所の熱力学的平衡クォリティ X_{eq} に対してプロットした結果を示す。ここで h_{TF} は壁面温度と R-113 の差から求められた熱伝達係数である。図 2 は熱流束 q をパラメータとした一例であり、図より h_{TF} に対する q の影響は X_{eq} が整理すれば小さく、また $X_{eq} \doteq 0$ での h_{TF} の極小点と $X_{eq} \doteq 0.15$ での h_{TF} の増加割合が変化する点(変曲点と呼ぶ)により熱伝達特性を 3 つの領域に分類できることがわかる。

図 3 は入口流速 V_{in} をパラメータとした一例であり、これによると h_{TF} は V_{in} により大きく影響されるが、各 V_{in} に対して図 2 と同じ様に極小点と変曲点があることがわかる。

「それでは、この極小点と変曲点は何を意味しているのか?」、「流動様式に何らかの変化を生じているのか?」、「とすれば各領域の熱伝達特性に対応する流動様式は?」とますます疑問が多くなって来た。このことは現在伝熱試験管の一部に可視部を設けて調べており、最終的には IAF の定量的な流動様式図を作成して解明する予定である。

また一方、伝熱特性と圧力損失特性の関係を調べている。従来、低クォリティ領域の管内膜沸騰熱伝達の Correlation の作成の際に、圧力損失特性を含めて吟味したものがなく、熱伝達特性と圧力損失特性の両方を同時に満すような modeling が必要と考えたからである。また圧力損失特性の情報は、流動様式の遷移のメカニズムを解析するためにはぜひとも必要な情報である。図 4 は入口からの距離 Z に対する対する圧力 ΔP の変化の一例である。図中の欠印は $X_{eq} - h_{TF}$ 曲線の極小点、変曲点の位置であって、これによると熱伝達曲線の極小点は ΔP の増加割合が減少しはじめる点に、そして変曲点は ΔP の増加割合が再び増大しはじめる点にほぼ対応していることがわかる。

最後に IAF の流動・伝熱について、現在わかったことと Correlation 作成のための問題点

を述べる。まず伝熱については、3つの領域に分類出来、 $h_{TP} - X_{eq}$ の熱伝達曲線では、極小点までの低クォリティ領域では蒸気膜を境界層として取扱うことが可能な蒸気膜の薄い図1の(A)、(B)の流動が支配的と考えられるが、蒸気膜内の速度分布・温度分布・界面での熱物質移動などをどのように定めるかが問題で、特に気液界面の乱れに関する情報が必要である。熱伝達曲線の極小点から変曲点までのクォリティ領域では、蒸気膜は厚く、液流の大部分が壁面での蒸気境界層の外に存在する図1の(C)、(D)の流動様式が支配的と考えられ、環状部を流れる蒸気流の熱伝達が重要であり、ボイド率の情報が必要である。変曲点以上の高クォリティ領域では、均質流的な流れである(E)、(F)の流動様式が支配的と考えられ、ここでは、液滴の分裂条件・液滴径分布・壁への衝突頻度・液滴によるライデンフロスト効果を評価する必要がある。

この他にも全領域での実クォリティ評価等の問題もあるが、先に示した3領域の物理量を現在測定しており、これらの情報によってIAFの流動・伝熱特性はかなり明らかにできると考えている。とにかく一つでも多くの情報をもとにIAFのCorrelationを作らなければと思っている。

4. むすびの言葉

上記のように三名の研究目的は同様であっても、最初には三人三様の考えで出発した研究は、成果があがるにつれて同じ考えで軌道上を勢よく走っている。なお修士・学部の学生諸君も協力して装置の整備・実験によく頑張っている。ANLの一步先を進んで、よいCorrelationをつくり、お役に立てたいと思っている。

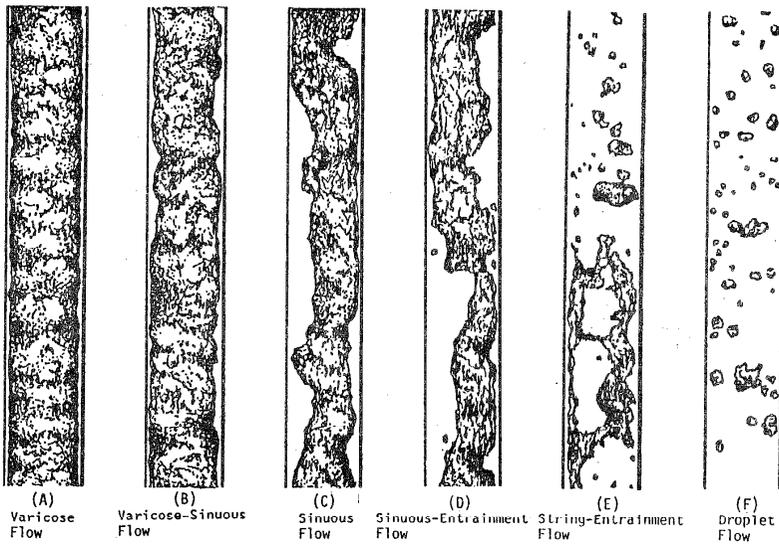


図1. IAFの流動様式

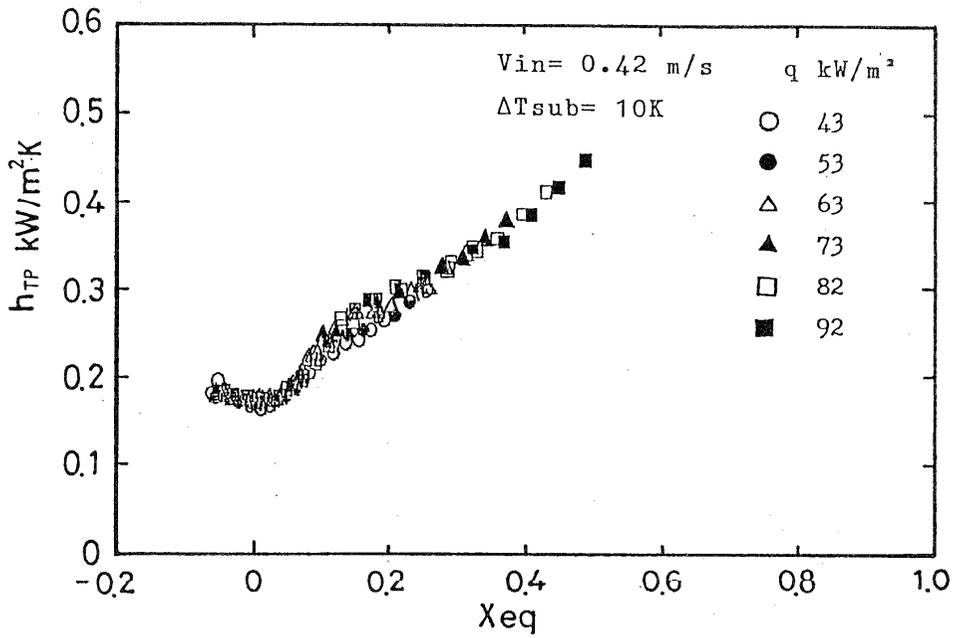


図2. 熱力学的平衡クオリティと熱伝達率

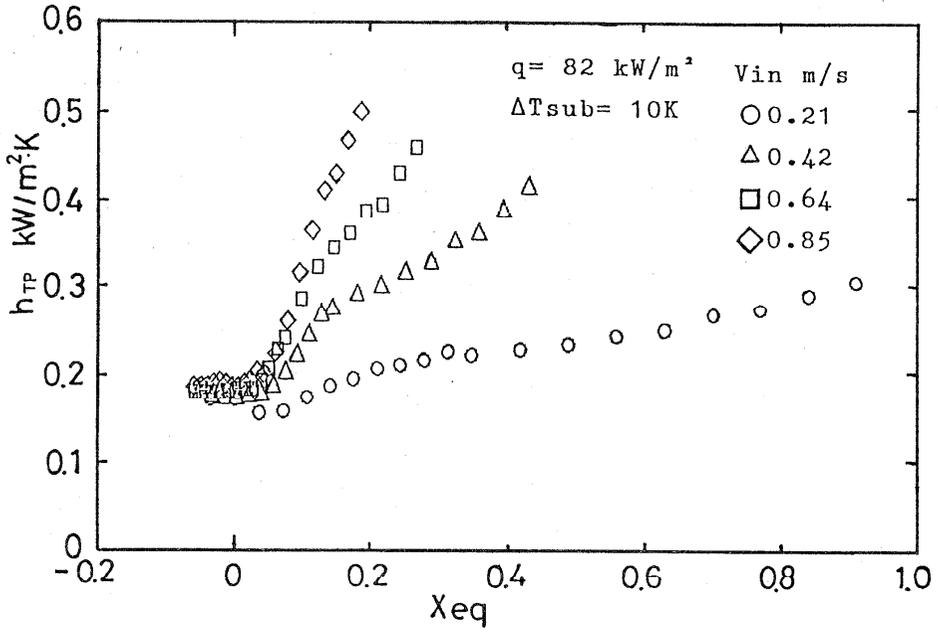


図3. 熱力学的平衡クォリティと熱伝達率

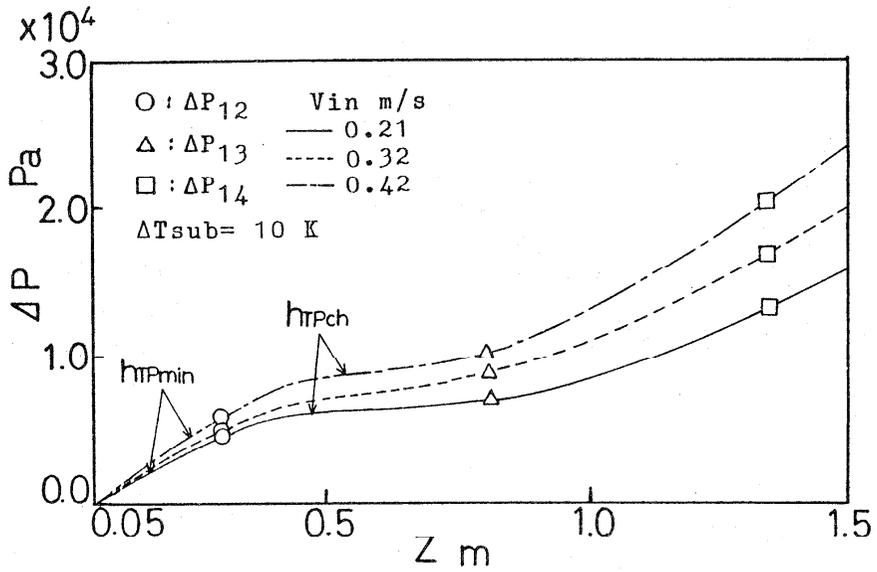


図4. 圧力損失の軸方向変化

(3) ミスト流による伝熱促進

林 勇二郎 (金沢大工)

1. はしがき

気流に微小液滴を懸濁したミスト流による冷却は、圧力損失の増大を伴わずに気流側熱伝達の向上を図り得るものであり、空気熱交換器の小型・省力化の有力な手段の一つとなる。比較的低温の加熱面を対象とした場合の冷却パターンは、壁面への液滴の衝突あるいは壁面濡れと関連して、ドライ、ドライアウト、ウェットの3種に大別されるが、伝熱促進の点からは壁面熱伝達が液膜蒸発支配となるウェットのパターンが最も効果的であり、少量の液滴噴霧によりできるだけ広範囲にかつ薄い液膜で伝熱面を覆うことが要求される。このことは、複數管からなる熱交換器がミストのエリミネータであるためばかりでなく、伝熱面上での液膜形成の臨界条件付近での評価の必要性を強調することになる。

ミスト流による伝熱促進の研究は以上の観点で進められており、それらの詳細は相原⁽¹⁾や中山⁽²⁾の解説に、またミスト冷却熱交換器の高性能化の指針を森・中山⁽³⁾の論文にそれぞれ見ることができる。表1は液滴が伝熱面に積極的に衝突する系を取り扱っている代表的な一例を、その内容とともに示したものである。これより、液滴群の気流中での飛行や壁面衝突、壁面での液膜形成と熱伝達などが複合するミスト冷却の問題を統一的に取扱うことが如何に困難であるかが判る。また、ミスト冷却熱伝達は液滴の衝突面だけではなく非衝突面を含めた全域に及ぶ議論によって、はじめて性能を評価することになるが、これについては実験観察に重きを置いたものとは言え、桑原らの⁽⁴⁾⁽⁵⁾研究が目につくだけである。

著者らのグループはこれ迄ミスト流による伝熱促進の研究を進めて来たが、本稿は鉛直下降流中に置かれた水平円柱のミスト流熱伝達に対して、解析的に閉じた形で結果を得たのでボックスとして紹介する。

2. 円柱前面における局所熱伝達率

液滴が積極的に衝突する円柱前面に対するミスト流熱伝達を論ずる。壁面上に形成される液膜の質量、エネルギー、運動量の式は、図1の物理座標系のもとで次の様に積分表示される。ただし液膜の慣性力は無視したものである。

(基礎方程式)

$$\frac{d}{dx} \left[\int_0^{\delta} \rho_l u_l dy \right] = m_c(x) - m_e(x) \quad (1)$$

$$q_i + m_c c_{p1} (T_i - T_\infty) + m_e L_H = q_w \quad (2)$$

$$\tau_i + g \rho_l \delta_l \sin \phi + \delta_l \rho_g u_\infty \frac{du_\infty}{dx} + \frac{m_c}{\rho_l} u_d \sin \phi = \tau_w \quad (3)$$

ここで気液界面における剪断力 τ_i 、熱伝達量 $q_i = h(T_i - T_\infty)$ 、物質伝達量 $m = h_D(\omega_i - \omega_\infty)$ は、 τ_i と h には固体円柱に対する関係式が、また h_D と h にはルイスの関係が適用されるものとする。

基礎方程式における質量、エネルギー、運動量に及ぼす液滴衝突の効果は重要であるが、衝突滴の質量速度 m_c は主流の噴霧滴の質量速度 G との比である捕集率の特性として式(7)が得られている。式中の d_p は滴の直径であり、分散滴に対しては体面積平均径が用いられる。

以上により気液界面でのすべての輸送量が基礎方程式に組み込まれ、ミスト冷却における気流中の問題と壁面問題が連結されたことになる。

$$\frac{\tau_i}{\frac{1}{2}\rho_g u_\infty^2} \sqrt{\frac{u_\infty d}{2\nu}} = 13.946 \left(\frac{x}{d}\right) - 21.856 \left(\frac{x}{d}\right)^3 + 9.344 \left(\frac{x}{d}\right)^5 - 2.342 \left(\frac{x}{d}\right)^7 + 0.022 \left(\frac{x}{d}\right)^9 - 0.2355 \left(\frac{x}{d}\right)^{11} \quad (4)$$

$$\frac{h d}{\lambda} = 1.14 Re_d^{0.5} Pr^{0.4} \left[1 - \left(\frac{\phi}{90}\right)^3\right] \quad \phi < 80^\circ \quad (5)$$

$$\frac{h d}{\lambda} = 0.6 Re_d^{0.58} Pr^{0.4} \left[1 - 0.486 \left(\frac{\phi}{90}\right)^{2.2}\right] \quad \phi < 80^\circ, \quad q < 5 \text{ kW/m}^2 \quad (6)$$

$$\frac{m_c}{G} = 0.675 \left(\frac{St_k}{1 + 0.125 Re_p^{0.72}}\right)^{0.2} \left[1 - C \left(\frac{\phi}{90}\right)^{1.8}\right] \cos \phi \quad (7)$$

$$C = 5.78 \times 10^3 Re_p^{-1.55} Re_d^{1.11}$$

[境界条件]

$$x=0 \quad ; \quad u=0, \quad d\delta_l/dx=0 \quad (8a)$$

$$y=0 \quad ; \quad u=0, \quad T=T_w \text{ (等温)} \quad \text{or} \quad q=q_w \text{ (等熱流束)} \quad (8b)$$

$$y=\delta_l \quad ; \quad u=u_i, \quad T=T_i \quad (8c)$$

$$\mu du/dy = \tau_i + \delta_l \rho_g u_\infty \frac{du_\infty}{dx} + \frac{\dot{m}_c}{\rho_l} u_d \sin \phi$$

解法の詳細は省略するが、境界条件を満たす速度および温度の分布式を基礎式に代入し、液膜

形成域において δ_i 、 u_i 、 T_i の値がよみ点より x 方向に順次計算された。ドライアウトの領域ではエネルギー式のみが有効となり、 $m_e = m_c$ 、 $T_i = T_w$ (等温加熱)、 $T_i = (q_w - m_c L_H) / (h + m_c \cdot C_{pl}) + T_\infty$ (等熱流束加熱) の置き換えをし、式(8b)の境界条件を用いて式(2)を $\theta = 85^\circ$ の位置まで計算した。式(9)で定義されるミスト冷却熱伝達率の計算結果を図2に示す。一般的な傾向として、単相流に対する噴霧二相流熱伝達は液滴噴霧量、流速および主流と壁面の温度差の増加とともに増大し、またそれはよみ点を中心とする濡れ領域と対応して壁面に沿って低下し、円柱背面での一定値に漸近する。実験値との一致は他の研究者によるものも含めて比較的良好だが、噴霧量の少ない等熱流束加熱の場合には、円柱のもつ熱容量が冷却能力の不足分を賄うため実験値は小さめとなる。

$$h = q_w / (T_w - T_\infty) \quad (9)$$

3 ミスト流による伝熱促進率

液滴噴霧量を増やしていくと液膜の形成は円柱の前面の全領域に及ぶが、それ以上では液は筋流としてオーバーフローして円柱背面を迂回し、やがて下端部より落下する。この筋流による背面の濡れは面積的に小さく従って熱伝達率への液蒸発の寄与は無視し得ること、などが実験的に確認される。

ここでは、円柱前面に対する解析と背面における実験事実とを導入し、濡れ面と乾き面からなる円柱全面に対するミスト冷却熱伝達を論ずる。円柱の冷却熱量 Q は、単相熱伝達 Q_c 、液蒸発による潜熱 Q_L 、液滴衝突による顕熱 Q_s 、円柱下端部よりの滴落下 Q_f の総和で与えられる。図3に示す円柱表面の乾き面と濡れ面の面積、各面での平均的な取扱い、さらには質量収支の採れた壁面への衝突滴、液蒸発、および落下液の質量速度を導入することにより、総熱量 Q の方程式系は閉じる。

$$Q = Q_c + Q_s + Q_L + Q_f \quad (10) \quad M_c = M_e + M_f \quad (15)$$

$$Q_c = \bar{h} (\bar{T}_i - T_\infty) A_w + \bar{h} (\bar{T}_w - T_\infty) A_d \quad (11) \quad M_c = \frac{d}{2} \int_{-90}^{90} m_c d\phi \quad (16)$$

$$Q_s = M_c C_{pl} (\bar{T}_i - T_\infty) \quad (12)$$

$$Q_L = M_e L_H \quad (13) \quad M_e = \frac{h}{C_p} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} (\bar{\omega}_i - \omega_\infty) A_w \quad (17)$$

$$Q_f = M_f C_{pl} (\bar{T}_w - T_\infty) \quad (14)$$

単相流に対するミスト流の平均熱伝達率の比である伝熱促進率 \bar{h} / \bar{h}_0 の結果を、円柱表面の濡れ面積比 A_w / A_0 および円柱下端部からの落下液量 M_f とともに、液滴噴霧量の関数として図4 (a)、(b)に示す。噴霧量の増加に伴い濡れ面積は増大するが、円柱の前平面が完全に濡れる $A_w / A_0 = 0.5$ となった時点で頭打ちとなるため、それ以上に供給される過剰の液はすべて円柱下端部より落下する。円柱前平面での衝突滴の挙動ならび液膜形成の状態は、衝突滴のド

ライアウトを経てよどみ点を中心に濡れが始まり、壁面に沿う液膜の流動の影響が加わりやがて完全濡れとなる。なお図中の白印、黒印および黒印のデータはそれぞれドライ、ドライ・ウェット、ウェットの状態を示す。即ち、濡れ面積が頭打ち ($A_w/A_o = 0.5$) となる迄は、前半面での液蒸発が熱伝達を支配するため、噴霧量に対して伝熱促進率は急な勾配をとるが、それ以降は過剰供給液の落下離脱による顕熱効果として比較的緩い促進効果を示す。

以上により鉛直下降流中に置かれた水平円柱まわりのミスト冷却熱伝達の詳細が明かとなったが、熱伝達率とミスト冷却における各種パラメータとの相関関係を得てはじめて、運転条件の最適化が図れる。ここで、著者らによって誘導された濡れパラメータ $G^*(6)(7)$ を導入し、整理した結果を図 5 に示す。詳細は略すが、衝突滴が壁面に安定に付着する条件が式(18)、(19)で与えられ、液の流動の影響を受けないよどみ点 ($\phi = 0$) での濡れ条件 G_i^* が濡れパラメータとなり得ること、さらに G^* によってミスト冷却熱伝達率が整理できることが判る。

$$f \frac{Gd}{\rho v (\omega_w - \omega_\infty)} \cdot Re_d^{-0.5} \frac{\cos \phi}{1 - (\frac{\phi}{90})^3} \geq 1.14 \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^2 3Pr^{-0.6} \quad (18)$$

$$f \frac{Gd}{\rho v (\omega_w - \omega_\infty)} \cdot Re_d^{-0.58} \frac{\cos \phi}{1 - 0.486(\frac{\phi}{90})^{2.2}} \geq 0.6 \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^2 3Pr^{-0.6} \quad (19)$$

4. 結 言

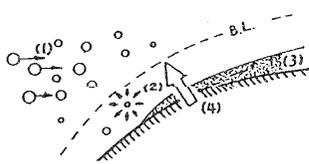
平滑管に対するミスト冷却熱伝達の詳細が明かとなり、これにより単一管に対する運転条件の最適化が決定される。しかしより重要なことは、ここで得られたミスト冷却の機構や熱伝達率についての知見が、ミスト冷却における高性能の伝熱管、さらには管群効果を踏まえた熱交換器の開発に対する方向性を与えることである。

〔参考文献〕

- (1) 相原、日本機械学会第 506 回講習会教材、(昭 55)、99.
- (2) 中山、日本機械学会第 506 回講習会教材、(昭 55)、88.
- (3) 森・中山、Heat Transfer in Energy Problems、Hemisphere、(1983)、211.
- (4) 桑原ら、日本機械学会論文集、47-414 B、(昭 56-2)、362.
- (5) 桑原ら、日本機械学会論文集、50-454 B、(昭 59-6)、1549.
- (6) 林ら、日本機械学会論文集、投稿中、(昭 85-602 A)
- (7) 林ら、日本機械学会論文集、投稿中、(昭 85-603 A)
- (8) 相原ら、日本機械学会論文集、51-463 B、(昭 60)、874
- (9) Goldstein, M.E., et al., Trans. ASME, J. of Heat Transfer, 89(1967),185

- (10) Kosky, P.G., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 19 (1976), 539.
 (11) Wilson, S.D., et al., *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 17-3 (1978), 183.
 (12) Lu, C.C., et al., *AIChE Journal*, 26-5 (1980), 762.

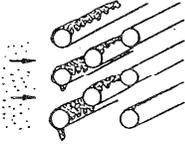
表1. 衝突型のみスト冷却に対する従来の研究



(1) Trajectory
 (2) Evaporation
 (3) Liquid boundary layer
 (4) Heat transfer

	(1)	(2)	(3)	(4)
 Smith (1966, Theo, Exp)	X	X	o	o
Goldstein (1967, Theo)	o	X	o	o
Kosky (1976, Exp)	X	X	X	o
Wilson (1978, Theo)	o	X	o	o
Nishikawa (1979, Theo)	X	o	X	o
Lu (1980, Theo)	o	X	o	o
Kuwahara (1981, Theo, Exp)	X	X	o	o
Aihara (1983, Theo)	o	X	X	X

 Hodgson (1968, Theo, Exp)	X	X	o	o
Aihara (1983, Theo)	o	X	o	o

 Thomas (1970, Theo, Exp)	X	X	o	o
Aihara (1978, Theo, Exp)	X	X	o	o
Hishida (1982, Exp)	o	X	X	o
Hayashi (1983, Theo, Exp)	X	o	X	o

Yang (1975, Exp)	X	X	o	o
Kuwahara (1984, Exp)	X	X	o	o
Mori, Nakayama (1980, Exp)	X	X	o	o

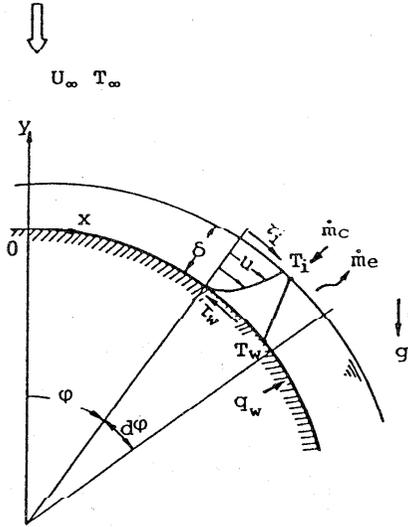


図1. 物理座標系

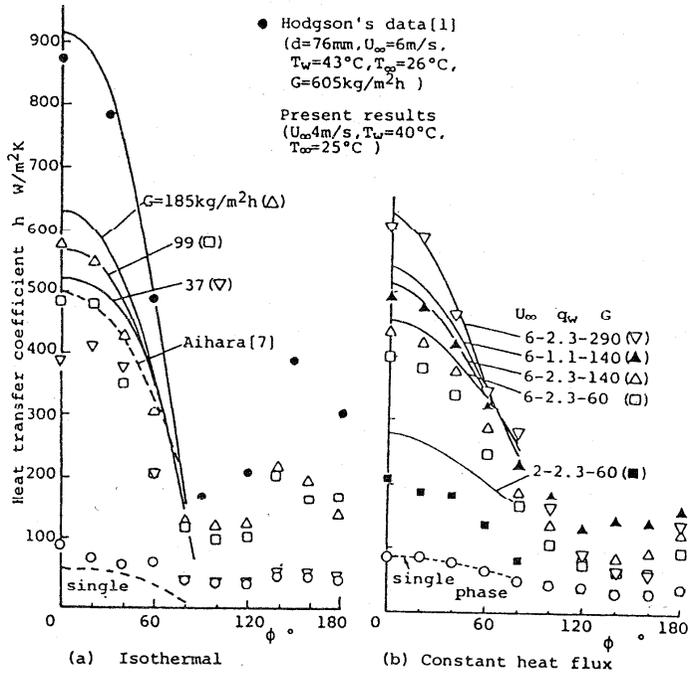


図2. 円柱前面における局所熱伝達率

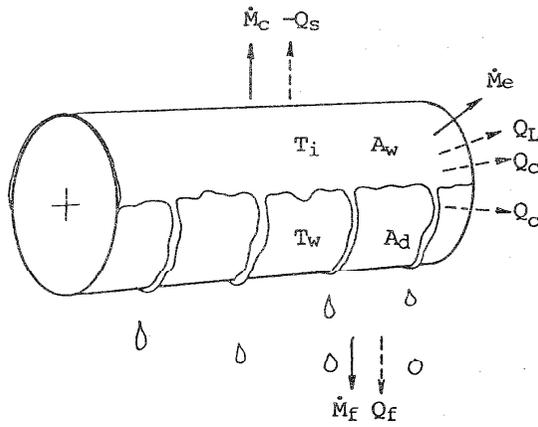


図3. 円柱表面での熱・物質バランス

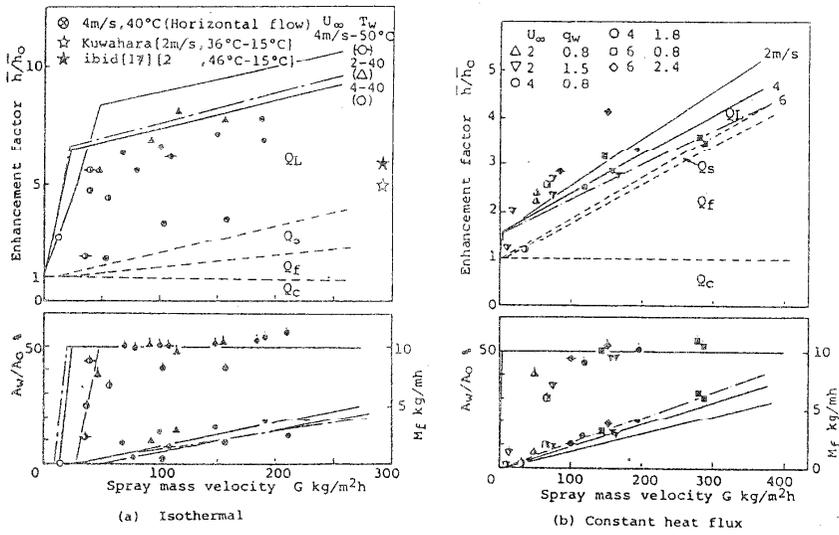
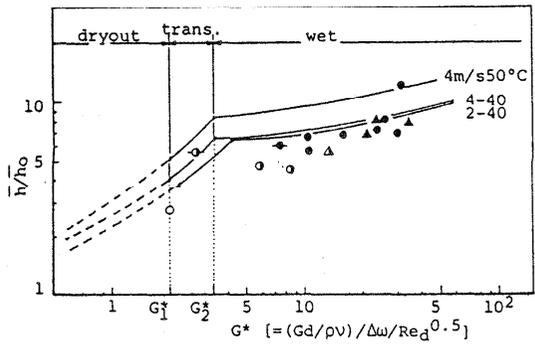
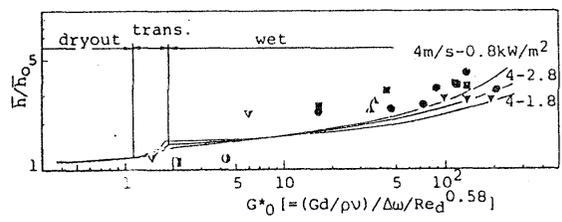


図4. 伝熱促進率



(a) Isothermal



(b) Constant heat flux

图 5. $\bar{h}/\bar{h}_0 - G^*$

＜地方研究グループ活動報告＞

(1) 東北研究グループ研究会（秋期）

日 時 昭和60年10月27日（日）、13:30～10月28日（月）、12:00

場 所 蔵王ハイッ（宮城勤労総合福祉センター）

参加人数 59名

講 演

10月27日（日）、13:30～17:00

1. 小野実信（森永エンジニアリング）

食品工業用噴霧乾燥機の技術的課題 13:30～14:10

2. 三浦邦夫（富士スタンダードリサーチ）

石油残渣の有効利用（炭素繊維の工業的開発） 14:10～14:50

3. 檜崎哲二（宇宙開発事業団角田ロケット開発センター）

国産ロケットエンジン開発の現状 15:10～15:50

4. 八柳信之（航空宇宙技術研究所角田支所）

高圧液体ロケット燃焼器の研究 15:50～16:30

5. 新岡 嵩（航空宇宙技術研究所角田支所）

固体ロケット燃焼の研究 16:30～17:10

見学会 10月28日（月）、8:00～12:00

航空宇宙技術研究所角田支所および宇宙開発事業団

角田ロケット開発センター見学

本年度の東北地区研究会は秋期研究会として、上記日程で開催された。場所は紅葉に包まれた蔵王山麓にある蔵王ハイッ（温泉保養施設）で、温泉に1泊してのゆったりとした研究会であった。東京と日立からの企業の会員の参加もあって、参加人員は59名という盛況であった。研究会のプログラムのように、本研究会は、我が国のロケット開発の重責を担う宇宙開発事業団開発センター、航空宇宙技術研究所が仙台近郊にあることから、同センターと研究所の最先端におられる講師の方々から、ロケット開発の現状、液体および固体燃料の燃焼についてお話をいただき、さらに我々の生活に特に密着した話題である食品加工技術と炭素繊維の製造技術について企業の製品製造に直接関連した研究で先端を担っておられる講師の方々からお話をいただいた。遠路東京より講演にお出で下さいました檜崎哲二氏（宇宙開発事業団）、小野実信氏（森永エン

ジュアリング)、三浦邦夫(富士スタンダードリサーチ)、ならびに地元ではありますが心良くお引き受け下さった八柳信之氏、新岡嵩氏(いずれも航空宇宙技術研究所)の諸氏に感謝申し上げる次第である。なお、参加者の内約半数が若い大学院学生であり、今後の研究に大いに反映してくれるものと期待する。

講演はどれも大変豊かで示唆に富む内容であった。その概要は短文での非礼を許していただくとして次のとおりであった。

講演1)は、安全かつ美味な食品を十分にそして安価に供給するために、食品の製造分野で念頭に置かねばならない諸事項およびその1例としての噴霧乾燥操作における問題点を中心に、微粒化、流動および乾燥に関する話であった。

講演2)は、工業材料が高機能、高性能材料へと指向していく中で、炭素繊維の製造上および物性面での問題を中心とした話であった。特に安価な石油残渣ピッチからの炭素繊維製造上避けられない液晶小球体(球晶)の発生、成長、合体過程の観察など興味深いものであった。

講演3)は、静止軌道に2 tonの衛星打上げ能力のある全段ロケットすべて国産技術によるH-IIロケットの開発の現状と、最も主要な主エンジン(LE-7)の開発研究の状況、開発手順、開発過程で発生する不具合(高温高圧燃焼、各部の大温度差の発生、振動、軽量化など)の要因解明、解決のための研究概要の話しを、来年度打合せ予定H-IIロケットの国産第2段エンジン(LE-5)をベースに解説されたものであった。

講演4)は、H-IIロケットの主エンジン(LE-7)の開発基礎研究における燃焼器の噴射器、2段燃焼による燃焼効率の改善、気液回転噴流下の燃焼モデル、燃焼器内の音響的振動燃焼、燃焼器内の高熱流束とその冷却方式および冷却壁の製造法、ハイドロ・カーボン・エンジンなどについて話があった。

講演5)は、アポジモーターに使われる固体燃料ロケットにおける基礎研究の紹介で、STAR-30Bロケットを中心に、燃焼圧の安定化、燃焼速度の抑制剤混入推進薬による多段燃焼による遅化、またそれによりノズル・スロート部の小型化およびその構造などについて興味深い話であった。

ご講演者の内容深い講演と長時間の多くの参加者のご協力によって有意義な研究会となったことを世話役の幹事(新野、三浦、梅宮、戸田)よりお礼を申し上げます。また、プログラム、会場の準備に熊川彰長氏(航空宇宙技術研究所)に多大のご協力をいただいている。ここに謝意を表する。また、2日目の見学会に、施設を開放して下さった宇宙開発事業団角田ロケット開発センター、航空宇宙技術研究所角田支所の関係者に謝意を表する。なお、来年度の研究会は盛岡地区で計画予定(希望)となっている。

(東北地方連絡幹事 戸田 三 朗)

(2) 北陸信越研究グループ研究発表会

日 時 昭和60年11月2日(土) 13:00~17:30

場 所 富山大学工学部

講 演

- 1) 非定常熱線法による金属の熱伝導率の測定
竹越栄俊、平沢良男、井村定久(富山大学工)、※紺谷隆(富山大院)
- 2) 乱流促進体による伝熱促進
※米谷正弘(富山大院)、宮下尚、若林嘉一郎(富山大工)
- 3) 熱サイホン発電装置の試作
※対馬勝年(富山大理)、中谷秀夫、宮下尚(富山大工)
- 4) 格子乱流中の二次元熱後流
※桑原浩久(新潟大院)、前川博、小林睦夫(新潟大工)
- 5) 二次元曲り流路内に発達する乱流
※窪田正博(新潟大院)、前川博、小林睦夫(新潟大工)
- 6) ヒートパイプを利用した融雪について
※沢井信樹(三井建設)

〔講演概要〕

講演1) 熱物性既知の比較物質と未知の質とで熱線をはさんだ試料を使った非定常熱伝導率の測定法が報告された。測定例として18-8ステンレス鋼とSS-41鋼についてなされ、比較的熱伝導率が金属としては小さい18-8ステンレス鋼については、ばらつきの少ない測定結果が得られている。

講演2) 矩形流路内の上下両壁面上に複数個の乱流促進体を設置した場合の物質移動実験から伝熱促進のメカニズムを研究した。その結果促進体の配列様式による伝熱への効果には大きな差異がないことがわかり、また促進体の存在は低レイノルズ数においてその寄与の割合が大きいことが示された。

講演3) 熱サイホンの一応用として、地熱や廃熱を高熱源とし、高所にある雪を低熱源とする温度差発電の提案がなされた。発電装置の試作がなされたが、未だ低効率に留まっている。

講演4) 格子乱流に対して垂直に置かれた線熱源の下流に発達する二次元熱後流が測定された。その実験結果に基づき、乱流熱流束輸送方程式中に現れる圧力温度勾配相関のモデルへの検討が加えられた。圧力温度勾配相関のふるまいは速度場の時間スケールだけでは決まらないことを示し、従来のモデルの改良の必要性を提示している。

講演5) 平行平板流路と二次元曲り流路内の乱流中で乱れに関する測定実験がなされた。

Launderらの3重相関モデルとの比較検討によると、実験値はモデルと定量的には一致しないが、定性的な傾向についてはおおむね表わすことが示された。

講演6) 現在富山大学前の道路において敷設工事がなされているヒートパイプを利用した融雪施設について、工事担当をしている三井建設、沢井信樹氏の特別講演が催された。講演後、融雪用ヒートパイプの利点および問題点について会員間で活発な討論があり、雪国北陸信越グループにとって関心事である一端を示した。

なお今回のグループ講演会は井村先生、竹越先生をはじめ富山大学の先生方のお世話でおこなわれた。参加者30数名を得、移転完了した真新しい研究室の見学会、懇親会も併せておこなわれ盛会であった。

(北陸・信越地方連絡幹事 日向 滋)

(3) 関西研究グループ講演会

日 時 昭和60年9月26日(木) 13:30~17:00

場 所 京都大学工学部機械系教室205講義室

講 演

- 1) 水平流体層の乱流自然対流
※河原全作(京大工院)
- 2) 繊維質断熱材の伝導・ふく射特性
※尚 熙善 吉田篤正
国友 孟(京大工)
- 3) 吹出しを伴う乱流境界層における間欠領域の乱流構造
※千田 衛 友成法雄(同志社大工)
鈴木健二郎(京大工)
- 4) 吹出しと吸い込みを伴う多孔壁円管内空気流に関する数値解析
※萩原良道 鈴木健二郎(京大工)
- 5) 二相流の基礎方程式について
※片岡 勲(京大原研)

[講演概要]

講演1) 内部発熱を伴う下面加熱、上面冷却の水平流体層の乱流自然対流において伝熱面近傍

に形成される温度境界層の挙動についての実験的研究を報告した。内部発熱を伴う場合でも境界層の温度変動の周期は過渡熱伝導と境界層剝離の繰り返しとする Howard のモデルで定性的に説明しうるが、変動周期から計算される熱伝達を定量的に説明するためには部分剝離を考慮して扱う必要があることを示し、実験から温度境界層の残留割合を評価した。また、境界層に起因する局所的な現象の物理量と巨視的なパラメータであるレイリー数との関連についての考察を行った。

講演 2) 繊維質断熱材は建築構造物、動力用及び化学プラント用諸設備に広く使用され、熱効率の向上に重要な役割を果たしている。これまで繊維質断熱材の断熱特性に関する研究の多くは主として有効熱伝導率の観点で行われている。本研究では繊維質断熱材の性能評価及び向上をはかるため定常形平行平板法による熱伝導率測定装置を製作し、三種類の繊維質断熱材について真空中で室温から 500℃ までの温度範囲で実験を行った。またふく射と伝導が共存する断熱層に対し、ふく射に関して等方散乱及び灰色体を仮定し、数値解析を行い、ふく射の寄与を調べた。実験結果より有効熱伝導率は両ヒーター面の温度差、層内のかさ密度、化学成分によって大きく変化することがわかった。また平均温度と温度差が上昇するとともにふく射の影響を受けて有効熱伝導率が増加することがわかった。数値解析により断熱層内のふく射場を支配する層の減衰係数の推定値を得、全熱流束に占めるふく射熱流束の割合を推定することができた。その結果、各種パラメータの関数として有効熱伝導率を示すことができた。

講演 3) 条件付抽出法を用いて吹出しを伴う乱流境界層の間欠領域で平均速度、乱れ強さ、レイノルズ応力を測定した。間欠領域における大きなスケールの流体塊（バルジ）では測定した諸量は吹出しの影響を受け、この領域における乱流構造が変化すること、およびバルジの平均渦度が吹出しとともに大きくなることなどが明らかとなった。また、乱流と非乱流域を識別するための検出関数には速度の時間微分ならびに瞬時のレイノルズ応力の時間微分を用いたが、これら 2 つの方法における結果の違いについても検討を行った。

講演 4) 円周及び軸方向に一樣な吹出しあるいは吸い込みを伴う多孔壁円管内空気乱流の流動と熱伝達に関する数値解析を Jones - Launder の $k-\epsilon$ 2 方程式モデルを用いて行った。この種の流れは壁面の冷却や混合物の分離等に応用される他、気液界面で著しい蒸発や凝縮を伴う環状二相流の流動を評価する良好なモデルとして有効である。多孔壁上流端から十分下流の、流れの自己保存性の強い領域における圧力勾配、壁面摩擦係数や熱伝達率と吹き出し（吸い込み）比の関係の解析結果は既存の実験結果や経験式などとよく一致し、本解析手法の有効性が確認された。また解析結果をもとに壁面摩擦係数、局所レイノルズ数と吹き出し（吸い込み）比の関係を表わす整理式を提案した。一方、吹き出し開始点直後の領域において軸方向乱れ強さの局所的な減少及びその下流での回復が実験により観察されているか、本解析結果はこの乱れ強さの軸方向の変

化や乱れ強さの減少に対応する粘性底層厚さの増加などを定性的によく予測しうる事が判明した。

講演5) 二相流の伝熱流動現象を解析する上で必要な基礎式について、瞬時・局所的な表示式及びそれを平均して得られる基礎式についての最近の研究成果を報告した。先ず各相の特性関数及び瞬時・局所的な二相界面積濃度を導入することにより、瞬時・局所的な質量、運動量、エネルギーの保存式が導かれることを示した。また、こうして得られた式を変形し、二相流を単一の流体と見なした場合の式及び2つの流体と見なした場合の式を導いた。次に上で導いた瞬時・局所的な基礎式を適当な仮定の下で平均化することにより、従来の代表的なモデルによる基礎式(均質流モデル、ドリフトフラックスモデル、二流体モデルによる式)が導かれることを示した。また、それぞれのモデルにおける仮定や近似の程度、解く上で必要となる相関式等について瞬時・局所的な基礎式との関連において解説した。

(関西地方連絡幹事 片岡 邦夫)

(4) 九州研究グループ講演会(1)

日 時 昭和60年10月9日(水) 16:00~17:00

場 所 九州大学工学部2号館生産機械314号室

Professor T.T.K. Frederking

Dep. of Chemical Engineering

Univ. of California at Los Angeles (UCLA)

題 目 Helium II Heat Transfer

[講演概要]

まず、ヘリウムIIの熱力学的性質の特異性に関して、とくにラムダ線近傍における物性値の異常性を述べ、さらに量子液体としてのヘリウムIIが持つ fountain effect や super leak などの特異な挙動を述べるとともに、ヘリウムIIの性質や熱流動現象の二流体モデルによる記述法についてレビューを行った。

さらに圧縮液領域におけるヘリウムII(加圧超流動ヘリウム)中での完全乱流領域の Gorter-Mellink対流の定常および過渡伝熱特性とこれら両者の関係について解説した。

九州研究グループ講演会(2)

日 時 昭和60年11月1日(金) 13:30~17:30

場 所 九州大学工学部2号館生産機械314号室

講 演

- 1) 多孔質材を伝熱管表面に取り付けた場合の沸騰熱伝達
※劉 振革、石橋英一(大分大学工学部)
- 2) 冷媒の水平蒸発管内熱伝達に及ぼす含有油の影響
※吉田 駿、松永 崇(九州大学工学部)
- 3) 加熱円柱群から軸方向流動流体への層流熱伝達に関する熱値解析
宮武 修、※岩下寛之(九州大学生産科学研究所)
- 4) 除湿エレメント内の熱・物質同時移動現象に関する研究
田中宏史、※白石啓一、宮武 修(九州大学生産科学研究所)
- 5) 密閉形二相熱サイフォンに関する研究
※近藤哲也、日高政陸、福田研二、福田豊実、長谷川修(九州大学工学部)
- 6) エチレングリコール水溶液のプール核沸騰熱伝達
藤田恭伸、大田治彦、※日高澄具(九州大学工学部)

[講演概要]

- 1) 太陽エネルギーによって駆動される吸収式冷凍機用蒸発器への応用を目的として、ポリウレタン製多孔質材を水平伝熱管表面に取り付けた場合の水のプール飽和核沸騰熱伝達の実験を大気圧および減圧下で行った。多孔質孔径0.7~3mm、圧力70~760mmHgに対して得られた実験データから、多孔質管による伝熱促進は顕著で、平滑管と比較して圧力に対応して約1.3~4倍程度の熱伝達係数が得られており、伝熱促進割合が減圧下では小さくなることが明らかとなった。また、各圧力で熱伝達係数が最大となる多孔質材の最適孔径が存在し、その値は気泡直径より若干小さい値である。
- 2) まず、二成分混合液および油を含む冷媒の沸騰・蒸発に関する従来の研究の簡単なレビューを行い、これらに関して今後究明すべき点が多く残されていることを指摘した。ついで、R22に冷凍機油マスコ3G8が0~6%含まれている場合の水平蒸発管内熱伝達の実験結果を報告した。冷媒に油が含まれている場合には、純粋な冷媒と比べて、一般に、低クオリティ域では伝熱が向上し、高クオリティ域では伝熱が低下する。この伝熱向上と低下は熱流束が高いほど著しい。これらの現象は、油を含むことによる管内面のぬれ面積の増大、粘性係数の増大および物質伝達の抵抗の影響によるものと推測された。

- 3) 三角形に配列された一様温度の加熱円柱群から軸方向に流動する流体への層流熱伝達について数値解析を行い、グレッツ数が 10^5 までの範囲、円柱の間隔と半径の比が $1\sim 4$ の範囲において、局所ヌセルト数、対数平均及び算術平均ヌセルト数に関する数値解を得て、それらの定式化を行った。
- 4) 空調用の回転式デシカント除湿機の性能を評価し、最適な設計運転条件を明かにするために、 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ の大きさのテスト用除湿エレメント内における非定常の熱と水分の同時移動について実験と数値解析を行なった。このエレメントはシリカゲルを含ませたセラミック紙を段ボール状に成形し、積層したもので、ここでは、吸着等温線、拡散抵抗及び密度が違う2種類のエレメントを用いた。数値計算では、エレメント内の軸方向の熱伝導を考慮した非定常次元のエネルギーと水分の釣り合いの式を差分法によって解き、また界面では別の実験で求めた吸着等温線と拡散抵抗を用いて計算した。実験は一様なエレメントの初期条件と一定の入口条件の下で行い、エレメントの温度と出口空気の温度、水蒸気濃度を測定した。いずれのエレメントでも実験と計算結果は良く一致した。したがって本数値計算を実機の回転式除湿機のシミュレーションに用いることが可能である。
- 5) R-113 を作動流体とする密閉形二相熱サイフォン内の熱流動解析を、気液二相流のモデリングの一つである二流体モデルを用いて行なった。解析は定常一次的であるとし、さらに簡単なようにフローパターンは環状流であるとして、管軸方向のボイド率、気相および液相の速度、温度分布等を求めた。この仮定は加熱部で気液混合部が消滅する場合、つまりドライアウトに相当し、その時の加熱量はドライアウト熱流束となる。
- 本解析モデルより得られるドライアウト熱流束は、既存の相関式に対して定性的には一致するが定量的にはかなり大きな値を与えることが判明した。これは二流体モデルに含まれる構成方程式の精度によるものと思われる。今後、ドライアウト領域での改良とフローパターンの変化を考慮する必要があるバーンアウト領域の解析を行なう予定である。
- 6) 自動車用水冷エンジンにおける冷却性能の向上を目的として、水-エチレングリコール二成分混合液のプール飽和核沸騰の実験を行った。伝熱面として、いずれもアルミニウム製の(i)水平上向き平滑および鋳物面、(ii)垂直平滑管、を用い、系圧力 $0.02\sim 0.2\text{ MPa}$ 、エチレングリコール濃度 $0, 15, 30, 50$ および $100\text{ vol}\%$ について、とくに垂直平滑管に対しては外筒で沸騰空間を制限して測定を行った。その結果、(i)いずれの伝熱面においても、エチレングリコール濃度 $15\sim 50\text{ vol}\%$ において単成分液と比較して熱伝達の劣化が生じる、(ii)垂直平滑管では外筒との間隙を小さくすると高熱流束において熱伝達の劣化が生じる場合がある、ことが明らかとなった。

九州研究グループ講演会(3)

日 時 昭和60年11月12日(火) 13:15~14:30
場 所 九州大学工学部2号館機械系4階会議室
講 師 譚 盈科教授
中国華南工学院 化工研究所
題 目 Effects of Fouling on Porous Surface During
Pool Boiling of Inorganic Salt Solution

〔講演概要〕

無機塩水溶液のプール核沸騰に及ぼす多孔質面の汚損の影響を調べるために、NaCl および $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液について、9種類の機械加工多孔質面および平滑面を用いて大気圧下で実験を行った。その結果、(i)多孔質面に対しては、水溶液のある限界濃度までは面が清浄に保ち得、その濃度は孔径が大きくなるほど増大する、(ii)多孔質面が清浄に保ち得るのは多孔質層内の液体の循環作用による、(iii) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 水溶液の場合に、その濃度が極端に低いとかえって汚損が進行して伝熱面過熱度が増大するが、その程度は多孔質面よりも平滑面の方が大きい、ことが明らかとなった。

<お 知 ら せ>

(1) 60年度会費未納者へのお願い

12月現在、約4割の会員が60年度会費未納になっております。60年度会費が現在既納か未納かは、「伝熱研究」7月号でお知らせしましたように、「伝熱研究」の送付封筒の宛名の氏名の次に数字でお分かりいただけるようになっております。すなわち、正会員の場合は

伝熱 太郎様 (5000/12)……………60年度会費既納

伝熱 太郎様 (0/12)……………60年度会費未納(12月現在)

伝熱 太郎様 (-5000/12)……………59年度会費未納(12月現在)

のように表示してあります。「伝熱研究」1月号の封筒の宛名をお確かめください。

ご存じのように3月末日の会費既納者のみに次回の「伝熱シンポジウム」論文集を無料配布することになっております。したがって、事務局では、3月末日の会費納入状態にもとずいて、「伝熱シンポジウム」論文集の発送の宛名ラベルを自動的に作成いたします。この点をお含みおかれまして、60年度会費を未納の方はできるだけお早めに納入くださいますようお願い申し上げます。

なお、伝熱シンポジウム開催日以降の60年度分会費未納者には「伝熱シンポジウム」論文集は無料送付されず、「伝熱研究」の送付も自動的に停止されますのでご注意ください。

会費納入にあたっては、「伝熱研究」7月号に挿入いたしました郵便振替用紙をご利用くださるか、あるいは次の郵便振替口座にご送金ください。

郵便振替 東京6-14749

振込先 153 東京都目黒区駒場4-6-1
東京大学工学部境界領域研究施設気付
日本伝熱研究会

(2) 第23回日本伝熱シンポジウム講演募集

開催日 昭和61年5月27日(火)～5月29日(木)

会場 北海道大学学術交流会館(〒060 札幌市北区北8条西5丁目)

講演申込締切 昭和61年1月31日(金) 必着

原稿締切 昭和61年3月15日(土) 必着

講演申込先 〒060 札幌市北区北13条西8丁目

北海道大学工学部原子工学科内

第23回日本伝熱シンポジウム準備委員会

郵便振替 小樽0-27269

ただし、日本機械学会会員は、下記宛申込んで下さい。

〒151 東京都渋谷区代々木2-4-9 三信北星ビル内

日本機械学会企画室

講演申込方法

1. 伝熱研究本号の最終ページに添付されている申込用紙(またはそのコピー)、または、B5用紙に「第23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)所属学協会ならびに会員資格・日本伝熱研究会会員非会員の別・氏名(ふりがな、連名の場合は、講演者の頭に※印)・勤務先、(3)概要(100字程度)、(4)セッション振り分けのため、下記に示す分野1個と若干のキーワードおよび、(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(用紙別送)にて送金とともに申込んで下さい。なお、日本機械学会経由の申込みの場合は上記準備委員会宛郵便振替送金の領収書(コピー)を添えて日本機械学会に申込んで下さい。

分野：強制対流、自然対流、沸騰、凝縮、蒸発、二相流伝熱、流動層伝熱、放射、熱伝導、熱物性、熱交換器、燃焼、その他

2. 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。ポスターセッションは行いません。
3. 講演の採否は準備委員会のご一任願います。
4. 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×47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書(講演者)宛送付します。
 - ご注意 1. 講演申込後の取消しは、準備と運営に支障をきたしますので、ご遠慮下さい。十分検討した上、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) 「第2回ASME-JSME熱工学会議」
のお知らせ

記

開催日： 1987年(昭和62年)3月22日～27日

会場： 米国ハワイ州ホノルル市 (Hilton Hawaiian Village)

会議の形式： 日・米それぞれが企画するセッションごとの講演発表および
ポスターセッションとなる予定(使用言語は英語)

発表論文の資格： 未発表のもの(ただし、邦文でのみ発表された論文を英文に直して投稿することは認められています)。また、JSME企画のセッションに投稿されたJSME会員の未発表論文は、組織委員会で審査し、発表後普通講演扱いとしてJSME論文集に投稿できます。(ただし Bulletin of the JSME には投稿できません。)

copyright: 各学会企画のセッションで発表された論文のcopyright はそれぞれの学会に帰属します。

論文募集： アブストラクト締切 1986年3月1日 (JSME企画:4月1日)
著者への採否通知 1986年5月1日
フルペーパー提出締切 1986年7月1日 (JSME企画:8月1日)
最終採否通知 1986年10月1日
最終原稿提出 1986年11月15日
論文提出方法 次項参照

発表申込方法： 英文500語程度のアブストラクト3部を、ASME企画のセッションに提出を希望する場合には1986年3月1日まで、またJSME企画のセッションに提出を希望する場合には同4月1日まで、下記のいずれかの申込み先宛に提出して下さい。また、JSME企画のセッションに申込まれる場合には、A4用紙に「第2回ASME-JSME熱工学会議研究発表申込み」と題記し、(1)講演題目 (2)氏名、会員資格(番号) (3)勤務先、職名 (4)通信先、電話番号(以上、日英併記) (5)セッション名(論文募集分野の項参照)を記載して下さい。

申込み先 JSME セッション (社)日本機械学会「第2回ASME-JSME 熱工学会議」
組織委員会

ASME セッション Paul J. Marto
Distinguished Professor
Department of Mechanical Engineering
Naval Postgraduate School
Monterey, California 93943-5100
U.S.A.

論文募集分野： 次に掲げられているセッション以外のテーマ(例えば、Solar Energy, Geothermal Energyなど)の論文も歓迎します。その場合、発表申込用紙に記入するセッション名のところは空欄のままです。

JSME企画セッション

- * Thermophysical Properties
- * Heat Conduction
- * Natural Convection
- * Forced Convection
- * Boiling Heat Transfer
- * Condensation
- * Two-phase Flow
- * Thermal Radiation
- * Combustion
- * Heat Exchangers
- * Fundamentals of Turbulent Transport
- * Thermal Problems in Electronic Equipments
- * Thermal Problems in Energy Storage Systems
- * Thermal Aspects of Nuclear Reactor
- * Measurement and Control
- * Numerical Simulation
- * Heat Transfer Augmentation

ASME企画セッション

- * Heat Transfer in Discontinuous Heterogeneous Media
- * Direct Contact Heat Exchangers
- * Interfacial Heat/Mass Transfer
- * Enhanced Boiling Surfaces
- * Fundamentals of Chemical Vapor Deposition
- * Fundamental Problems in Drying
- * Heat Transfer to Droplets and Bubbles
- * Feed/Effluent Heat Exchangers
- * Fouling in Heat Exchangers
- * Multi-Phase Flow Heat Exchangers
- * Heat Exchangers for Alternative Energy System
- * Modeling of Combustion
- * Experimental Techniques in Combustion
- * Heat and Mass Transfer in Fires
- * Combustion Fundamentals
- * Unsteady Combustion (Pulse)
- * Heat Transfer in the Manufacturing Environment
- * Heat Transfer in Porous Media and Packed Beds
- * Natural Convection in Enclosures
- * Heat Transfer in Gas Turbines
- * Internal Thermal Enhancement Mechanisms in Microelectronic Cooling
- * External Thermal Enhancement Mechanisms in Microelectronic Cooling
- * Heat Transfer in Unsteady Flows
- * Heat Transfer in Laser Systems
- * Thermo-Hydraulic Aspects of Innovative Nuclear Reactor Designs
- * Heat and Mass Transfer in Biomedical Systems

この会議について、御意見・御質問などお持ちの方は、日本側組織委員会〔委員長 棚沢一郎（東大生研）、幹事 土方邦夫（東工大）〕宛に御連絡下さい。

(4) Call for Papers

XVIII International Symposium on

"HEAT AND MASS TRANSFER IN CRYOENGINEERING AND REFRIGERATION"

September 1-5, 1986

Hotel Libertas, Dubrovnik, Yugoslavia

organized by International Centre for Heat and Mass Transfer, Belgrade, Yugoslavia, sponsored by United Nations Educational Scientific and Cultural Organization, Paris, The International Institute of Refrigeration, Paris, and The Boris Kidric Institute of Nuclear Sciences Belgrade.

Scope

It is difficult to find a class of equipments in which heat and mass transfer devices present a larger diversity than in refrigerating and cryogenic machines.

Energy crisis has emphasized the importance of transport and heat transfer properties on the performances of refrigerating equipments.

The use of refrigerant mixtures for refrigeration and of multicomponent fluid mixtures liquefaction plants has given rise to the need for accurate experimental data and improved theoretical correlations and prediction methods.

At lower temperatures, design of heat transfer devices is always a source of original and difficult problems.

Storage of liquefied gases has brought up problems in insulation and rock freezing.

In many cases the distinction between low and very low temperature range seems to be rather artificial so it will be highly useful to bring together experiences of industrialists and scientists working on heat and mass transfer in the large temperature range covered by the Symposium.

Symposium will Comprise Sessions on:

1. THERMAL INSULATION
Conduction and radiation in porous materials; Super insulation; Measuring equipments
2. HYDRODYNAMICS, HEAT AND MASS TRANSFER IN REFRIGERANTS
Natural and forced convection; Boiling; Condensation; Heat transfer near the critical point
3. HEAT AND MASS TRANSFER IN REFRIGERANT MIXTURES
Transport properties in refrigerant mixtures, viscosity, thermal conductivity, diffusion coefficient; Convection; Heat transfer during boiling and condensation; Two-phase flow
4. HEAT EXCHANGERS IN REFRIGERATION EQUIPMENTS
General; Condensers; Evaporators; Evaporative cooling; Heat pipe applications; Direct contact heat transfer
5. HEAT AND MASS TRANSFER DURING WATER FREEZING AND MELTING
Penmafrost; Frost layers formation; Freeze drying
6. HEAT TRANSFER IN STORAGE OF LIQUEFIED GASES
Natural convection; Underground storage vessel; Rock freezing
7. HEAT AND MASS TRANSFER AT VERY LOW TEMPERATURE
Convection in cryofluids; Boiling and condensation; Heat exchanger in cryoequipments
8. COOLING OF SUPERCONDUCTING DEVICES
Boiling heat transfer; Instabilities, Convective heat transfer in super-critical conditions

**Contributions to the Symposium,
Paper Selection and Deadline**

Papers are invited to the subject area of the international symposium, within the scope of the sessions listed above. Persons wishing to contribute papers should submit an abstract in English of 500-700 words by January 20, 1986. The abstract should be of suitable technical quality so that a reasonable judgement based on comparative merit may form the basis for selection.

The authors will be notified of the acceptance of their papers by March 1, 1986.

Accepted papers will be required by April 1, 1986, and must be in English. Until that time the authors will be given mats to finalize their typescripts.

All papers will be published and distributed to the participants at the Symposium in Dubrovnik, Yugoslavia. Due to limited time schedule, one copy of the abstract should be forwarded to the Chairman of the Symposium

Organizing Committee:

Prof. J. Bougard
Faculte Polytechnique de Mons
Rue to Houdain
7000 Mons, Belgium

One copy should be sent to the Scientific Secretary of ICHMT:

Prof. N. Afgan
International Centre for Heat and
Mass Transfer (ICHMT)
P. O. Box 522
11001 Belgrade
Yugoslavia

Information on Symposium Sessions

At each session an introductory lecture will be presented by an invited expert who will present a state-of-the-art report on the particular subject of the session. The lecture will be followed by 20 minute presentation of papers.

The papers will be published by ICHMT publisher:

Hemisphere Publishing Corporation
1010 Vermont Avenue n.w.
Suite 612
Washington, D. C. 20005, USA

After the Symposium the bound volume of proceedings will be available for sale.

After each paper there will be discussions. Short contribution within these discussion periods should be arranged with the Chairman of the session in which the contribution is to be made.

Panel workshops may be arranged in specific topic areas to promote the incorporation of advances in the fundamentals of cryogenic heat transfer into practice and application. Experts interested to organize a panel should notify Scientific Secretary of ICHMT by March 1, 1986. They will be responsible for the course of the panel, and after acceptance they should invite other experts for participation.

Scientific film (8 or 16 mm) can be shown in special film sessions, with a maximum of 15 minutes. Authors are requested to notify Scientific Secretary of ICHMT by March 1, 1986, on the title, subject and duration of the film. The films are to be presented by the authors personally.

Mini Exhibition

Throughout the Symposium organizations can display samples, models, literature and associated materials illustrating their products and services. For further details about the arrangements, please contact the Scientific Secretary of the ICHMT.

Registration

The registration fee for participants registered before May 1, 1986, will be US \$ 275, and after that date US \$ 300. Participants presenting papers will pay the fee of US \$ 250. Registration includes a complete set of pre-prints, which will be made available at the start of the Symposium. More information may be obtained by writing either the Chairman of the Symposium or the Scientific Secretary of ICHMT.

Social Programme

A number of social and cultural activities are planned for participants and accompanying persons. Accompanying persons are invited to attend the opening of the Symposium in the morning of Monday, September 1, 1986.

A programme composed for guests accompanying the participants includes various sightseeing tours in Dubrovnik and inland tours, excursions on the nearest islands.

Place and Accommodation

The XVIII International Symposium will be held at the Hotel Libertas, Dubrovnik.

Dubrovnik is a city easily accessible by air, automobile or ship and the most celebrated medieval town on the Yugoslav Adriatic Coast. Participants and accompanying persons will be accommodated at the Hotel Libertas. A category Hotel Libertas is located in one of the most beautiful parts of the town facing the Lovrijenac fortress and the Island of Lokrum. It is within 15 minute walking distance from the old city. The reserved capacity in the Hotel is limited to 250 persons, and there is an additional limitation on the number of single rooms. Priority will be given to those who first submit Registration forms. Participants should make reservation directly with:

Hotel Libertas
Sales Department
Attn: Miss Neda Tlozco
7, Lavčevićeva St.
50000 Dubrovnik, Yugoslavia
Phone: (50) 27 444, Cable LIBHOT
Telex: 275 88 LIBHOT

Symposium Organizing Committee:

Chairman: Prof. J. BOUGARD
Faculte Polytechnique de Mons
Rue de Houdain
7000 Mons, Belgium

Invited Members:

1. Prof. C. L. TIEN
Department of Mechanical Engineering
University of California
Berkeley, CA 94 720, U S A
2. Mr. F. J. POWELL
Leader, Thermal Insulation and Measurements Group
Building Physics Division
National Bureau of Standards
Washington, D. C. 20234, U S A
3. Prof. G. G. HASELDEN
Department of Chemical Engineering
The University of Leeds
Leeds LS2 9JT, United Kingdom
4. Prof. W. WATANABE
Faculty of Science and Technology
Keio University
14-1, Hiyoshi, 3 Chome
Kohokoku, Yokohama 223, Japan
5. Prof. B. B. TODOROVIC
Department of Mechanical Engineering
University of Belgrade
27 marta 28, 11000 Belgrade, Yugoslavia
6. Mr. M. J. AGUIRRE-PUENTE
Laboratoire d'Aérothermie CNRS
4 ter, Route des Gardes
F-92190 Meudon, France
7. Prof. A. LACAZE
Centre de Recherches sur les Très
Basses Températures
Basses Températures, C.N.R.S.
B. P. 166 X, F-38 042 Grenoble Cedex, France
8. Prof. T. H. K. FREDERKING
University of California
School of Engineering and Applied Sciences
Los Angeles, CA 90024, U S A
9. Prof. GRIGORIEV
National Committee for Heat and Mass Transfer
Academy of Sciences of the USSR
Izhorskaya 13/19, Moscow 127412, USSR
10. Prof. KIRICHENKO
National Committee for Heat and Mass Transfer
Academy of Sciences of the USSR
Izhorskaya 13/19, Moscow 127412, USSR

Scientific Secretary: Prof. N. AFGAN
International Centre for Heat and
Mass Transfer (ICHMT)
P. O. Box 522
11001 Belgrade, Yugoslavia

第23回 伝熱シンポジウム

—— 宿泊・航空券のご案内 ——

昭和61年5月27日(火)～29日(木)の3日間札幌市におきまして、上記学会が開催され全国各地から学会に参加されます皆様の宿泊・航空券のお世話を、ジェイティービー企画にご下命いただきましたのでご案内申し上げます。

(株)ジェイティービー企画

1. 宿泊のご案内

(1) 宿泊月日 昭和61年5月26日(月)～29日(木)の4日間

(2) 宿泊ホテル・宿泊料金

ホテルクラス	ホテル名	客室タイプ	宿泊料金	申込記号	・宿泊料金は1泊朝食付、税金サービス料込です。 ・ツインルームご利用の方は同室者名もご記入下さい。
都市ホテル	札幌グランドホテル 他	シングル	12,000	A-1	
		ツイン	10,500	A-2	
ビジネスホテル1	札幌第一ワシントンホテル 他	シングル	7,500	B-1	
		ツイン	6,500	B-2	
ビジネスホテル2	札幌チサンホテル本館 他	シングル	6,000	C-1	
		ツイン	5,000	C-2	

2. 航空券のご案内

学会日程に合わせて、最適時間帯に指定便を設定し特別割引運賃でご利用いただけるようにいたしました。下記表より往路・復路ご都合のよい便をお選び下さい。又、ご都合で指定便をご利用いただけない方は、搭乗日・便名又、出発時間及び搭乗区間を備考欄にご記入下さい。指定便と同運賃でご利用いただけます。尚、座席確保の関係がございますので、できるだけ指定便のご利用をお願いいたします。

〈往 路〉

申込記号	搭乗月日	搭乗区間	出発時間帯	特別割引運賃	(参考)普通運賃
A	5月26日	東京～千歳	14:00～15:00	15,000	25,500
B	"	大阪～千歳	14:00～15:00	22,560	37,000
C	"	福岡～千歳	9:00～10:00	28,260	46,500
D	"	仙台～千歳	14:00～15:00	15,680	20,600
E	"	新潟～千歳	12:00～13:00	16,200	21,300
F	"	小松～千歳	9:00～10:00	22,880	30,200
G	"	名古屋～千歳	15:00～16:00	25,130	33,200
H	5月27日	東京～千歳	8:00～9:00	15,660	25,500
I	"	大阪～千歳	8:00～9:00	22,560	37,000
J	"	福岡～千歳	9:00～10:00	28,260	46,500
K	"	仙台～千歳	8:00～9:00	15,680	20,600
L	"	新潟～千歳	12:00～13:00	16,200	21,300
M	"	小松～千歳	9:00～10:00	22,880	30,200
N	"	名古屋～千歳	7:00～8:00	25,130	33,200

〈復 路〉

申込記号	搭乗月日	搭乗区間	出発時間帯	特別割引運賃	(参考)普通運賃
ア	5月29日	千歳～東京	18:00～19:00	1,566.0	2,550.0
イ	〃	千歳～大阪	17:00～18:00	2,256.0	3,700.0
ウ	〃	千歳～福岡	12:00～13:00	2,826.0	4,650.0
エ	〃	千歳～仙台	16:00～17:00	1,568.0	2,060.0
オ	〃	千歳～新潟	14:00～15:00	1,620.0	2,130.0
カ	〃	千歳～小松	11:00～12:00	2,288.0	3,020.0
キ	〃	千歳～名古屋	18:00～19:00	2,513.0	3,320.0
ク	5月30日	千歳～東京	11:00～12:00	1,566.0	2,550.0
ケ	〃	千歳～大阪	11:00～12:00	2,256.0	3,700.0
コ	〃	千歳～福岡	12:00～13:00	2,826.0	4,650.0
サ	〃	千歳～仙台	9:00～10:00	1,568.0	2,060.0
シ	〃	千歳～新潟	14:00～15:00	1,620.0	2,130.0
ス	〃	千歳～小松	11:00～12:00	2,288.0	3,020.0
セ	〃	千歳～名古屋	9:00～10:00	2,513.0	3,320.0

3. お申し込み方法

(1) お申し込み方法

宿泊・航空券とも別紙申し込み書に必要事項をご記入のうえ、予納金を添えて現金書留で弊社宛ご送付下さい。

(2) お申し込み先

〒060 札幌市中央区北3条西3丁目 大同生命ビル
 (株)ジェイティービー企画
 ☎ 011-221-4800 (代)

(3) 予 納 金

一律9,500円を頂きます。(お申し込み総額が9,500円以下の場合は費用全額を入金下さい。)

(4) お申し込み〆切月日

昭和61年4月20日(必着)

(5) 変 更 ・ 取 消

宿泊日・搭乗日の13日前以降下記の手数料を申し受けます。

お申し出日	種 別	航 空 券			
		宿 泊	仙 台	新潟・東京・小松	名古屋・大阪・福岡
宿泊日・搭乗日の13日前以降4日前迄	30%	2,000円	3,000円	4,000円	4,000円
宿泊日・搭乗日の3日前以降	50%	4,000円	6,000円	8,000円	8,000円

(6) クーポン券の送付について

お申し込み書及び予納金到着後各クーポン券を出発の1～2週間前迄にお送りします。同時に請求書と郵便振替通知票を同封致します。

(7) 精算について

残金につきましては、5月20日迄に同封の郵便振替通知票にてお振り込み下さい。

(8) 郵便・通信料について

郵便・通信料として、お1人様500円をいただきますのでご了承下さい。

旅行主催

(株)ジェイティービー企画 (北海道知事登録国内旅行業第193号)

・詳しい旅行条件は弊社迄お問合せ下さい。

第23回伝熱シンポジウム

宿泊航空申し込み書

(1枚の申込用紙で2名まで申込みできます)

お記入 各人 機数	1	整理№							
	2	整理№							

3	ふりがな 氏名	〒□□□□		
4	年齢	性別	男・女	
5	郵便番号 住所 （ターボ） 送付先	〒□□□□		
6	TEL	()	-	(内)

宿泊	月日	5/26	5/27	5/28	5/29	ツインでお申込の ときの同室者名
7	申込記号					

航空券(設定便)	往路	
8	(申込記号で記入下さい)	
	復路	
	(申込記号で記入下さい)	

※どりしても時間が合わないときは、備考欄に月日・区間・便名(出発時間)をお書き下さい。

予納金合計額	+	郵便通信料	=	送金額
		500円		円

※一律9,500円、申込内容総額が9,500円以内のときは、全額。
※通信料としてお1人様500円をいただいておりますので、予納金といっしに同封して下さい。

備考・通信欄	
--------	--

※住所・氏名・年齢・性別以外は、お手配希望だけご記入下さい。
※郵便番号は必ずお書き下さい。

3	ふりがな 氏名	〒□□□□		
4	年齢	性別	男・女	
5	郵便番号 住所 （ターボ） 送付先	〒□□□□		
6	TEL	()	-	(内)

宿泊	月日	5/26	5/27	5/28	5/29	ツインでお申込の ときの同室者名
7	申込記号					

航空券(設定便)	往路	
8	(申込記号で記入下さい)	
	復路	
	(申込記号で記入下さい)	

※どりしても時間が合わないときは、備考欄に月日・区間・便名(出発時間)をお書き下さい。

予納金合計額	+	郵便通信料	=	送金額
		500円		円

※一律9,500円、申込内容総額が9,500円以内のときは、全額。
※通信料としてお一人様500円をいただいておりますので、予納金といっしに同封して下さい。

備考・通信欄	
--------	--

※住所・氏名・年齢・性別以外は、お手配希望だけご記入下さい。
※郵便番号は必ずお書き下さい。

伝熱研究

Vol. 25 No. 96

1986年1月発行

発行所 日本伝熱研究会

〒153 東京都目黒区駒場4-6-1

東京大学工学部境界領域研究施設気付

日本伝熱研究会

電話 03(485)3111 (代) 内線288,285

振替 東京 6-14749

(非売品)