

伝熱研究

1988
January
Vol. 27
No. 104

Journal of Heat Transfer Society of Japan

〈特集：産官学共同研究〉

【特集にあたって】

編集委員会

【現在の共同研究テーマ】

- | | |
|--|-------------|
| (1) ガスタービン・シュラウドの伝熱特性 | 熊田 雅弥 |
| (2) 産官学共同研究に関する我々の研究室の現状 | 谷口 博, 工藤 一彦 |
| (3) 産業用エネルギー有効利用技術における産官学共同研究の数例 | 笠原 敬介 |
| (4) 宇宙と伝熱 | 森岡 幹雄 |
| (5) EHD熱交換器の研究開発 | 矢部 彰 |
| (6) 山形大学ソーラ・アクイファー地下帯水層蓄熱法による
冷, 暖房及び融雪システム | 梅宮 弘道 |
| (7) 寒地環境工学研究会における産官学共同研究 | 福迫尚一郎 |

【産官学共同研究の重要性・実績・課題・将来】

- | | |
|--|-------|
| (8) 産官学共同研究の今後の重要性 | 甲藤 好郎 |
| (9) 成功した秘訣 | 二階 勲 |
| (10) 産官学共同研究の問題点
—化学プラントのプロセス技術開発を例として— | 新井 紀男 |
| (11) 宇宙工学に於ける課題 | 小林 康徳 |
| (12) 産学交流における企業側の課題 —エレクトロニクスの場合— | 中山 恒 |
| (13) 地域ニーズにもとづく産官学協同研究の課題と将来展望 | 武山 斌郎 |

【諸外国における現状など】

- | | |
|--|----------------|
| (14) HEAT TRANSFER IN THE UNITED STATES : INDUSTRY/
UNIVERSITY INTERFACES | F.P. Incropera |
| (15) Heat Transfer In Japan-Some Personal Observations | J.P. Hartnett |
| (16) 中国における産官学共同研究の役割 | 郭 克輝 |

【いくつかの分野における将来展望】

- | | |
|-------------------------------|-------|
| (17) 材料開発における今後の産官学共同テーマ | 椿 淳一郎 |
| (18) 建築・空調の分野 | 中原 信生 |
| (19) 自動車関連分野における産官学共同研究の現実と期待 | 藤掛 賢司 |
| (20) 電気事業に関連した産官学共同研究について | 竹内 元 |
| (21) ボイラ火炉研究会 | 渡部 教雄 |
| (22) 製鉄における伝熱の諸問題 | 高島 啓行 |

〈研究トピックス〉

低凝固点水溶液による水の温度
・濃度複合融解
菅原 征洋, 稲葉 英男

軸方向伝導を考慮した数学モデルに
基づくヒートパイプの熱輸送特性の解析
倉前 正志

〈解説〉

気液二相流研究の動向についての雑感
赤川 浩爾

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)	石 黒 亮 二 (北 大)
	(事務担当)	越 後 亮 三 (東 工 大)
地方連絡幹事	北 海 道	福 迫 尚 一 郎 (北 大)
	東 北	斎 藤 武 雄 (東 北 大)
	関 東	矢 部 彰 (機 械 研)
	東 海	新 井 紀 男 (名 大)
	北陸・信越	玉 木 恕 乎 (信 州 大)
	関 西	高 城 敏 美 (大 阪 大)
	中国・四国	須 藤 浩 三 (広 大)
	九 州	藤 井 丕 夫 (九 大)
幹 事	齊 藤 凶 (室 蘭 工 大)	梅 村 晃 由 (長 岡 技 大)
(23名)	山 本 春 樹 (旭 川 高 専)	滝 本 昭 (金 沢 大)
	熊 谷 哲 (東 北 大)	片 沢 昭 示 (京 大)
	宍 戸 郁 郎 (東 北 大)	藤 井 照 重 (神 戸 大)
	藤 田 尚 毅 (岩 手 大)	藤 井 雅 雄 (三 菱 電 機)
	有 富 正 憲 (東 工 大)	牧 野 俊 郎 (京 大)
	上 松 公 彦 (慶 應 大)	佐 古 光 雄 (広 大)
	落 合 淳 一 (石 川 島 播 磨 重 工)	本 田 博 司 (岡 山 大)
	笠 木 伸 英 (東 大)	岩 淵 牧 男 (三 菱 重 工)
	望 月 貞 成 (東 農 工 大)	小 山 繁 (九 大)
	加 藤 征 三 (三 重 大)	増 岡 隆 士 (九 工 大)
	児 山 仁 (静 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：産官学共同研究>

〔特集にあたって〕	編集委員会	.....	1
〔現在の共同研究テーマ〕			
(1) ガスタービン・シュラウドの伝熱特性	熊田 雅弥 (岐 阜 大)	.....	4
(2) 産官学共同研究に関する我々の研究室の現状	谷口 博, 工藤 一彦 (北 大)	.....	7
(3) 産業用エネルギー有効利用技術における 産官学共同研究の数例	笠原 敬介 (前川製作所)	.....	11
(4) 宇宙と伝熱	森岡 幹雄 (I H I)	.....	23
(5) E H D 熱交換器の研究開発	矢部 彰 (機械技研)	.....	25
(6) 山形大学ソーラ・アクイファー地下帯水層蓄熱法による冷, 暖房及び融雪システム	梅宮 弘道 (山 形 大)	.....	29
(7) 寒地環境工学研究会における産官学共同研究	福迫尚一郎 (北 大)	.....	37
〔産官学共同研究の重要性・実績・課題・将来〕			
(8) 産官学共同研究の今後の重要性	甲藤 好郎 (日 大)	.....	39
(9) 成功した秘訣	二階 勲 (I H I)	.....	46
(10) 産官学共同研究の問題点 - 化学プラントのプロセス技術開発を例として -	新井 紀男 (名 大)	.....	51
(11) 宇宙工学に於ける課題	小林 康德 (筑 波 大)	.....	56
(12) 産学交流における企業側の課題 - エレクトロニクスの場合 -	中山 恒 (日 立)	.....	62
(13) 地域ニーズにもとづく産官学協同研究の課題と将来展望	武山 斌郎 (東 北 大)	.....	66
〔諸外国における現状など〕			
(14) HEAT TRANSFER IN THE UNITED STATES : INDUSTRY/UNIVERSITY INTERFACES	F. P. Incropera (Purdue University)	.....	68
(15) Heat Transfer In Japan-Some Personal Observations	J. P. Hartnett (Univ. of Illinois)	.....	87

(16) 中国における産官学共同研究の役割	郭 克輝 (中国科学院広州エネルギー研究所)	96
〔いくつかの分野における将来展望〕		
(17) 材料開発における今後の産官学共同テーマ	椿 淳一郎 (J F C C)	98
(18) 建築・空調の分野	中原 信生 (名 大)	101
(19) 自動車関連分野における産官学共同研究の現実と期待	藤掛 賢司 (豊田中研)	106
(20) 電気事業に関連した産官学共同研究について	竹内 元 (電 中 研)	109
(21) ボイラ火炉研究会	渡部 教雄 (東京電力)	111
(22) 製鉄における伝熱の諸問題	高島 啓行 (住金総研)	116
<研究トピックス>		
低凝固点水溶液による氷の温度・濃度複合融解		
	菅原 征洋 (秋 田 大), 稲葉 英男 (北見工大)	120
軸方向伝導を考慮した数学モデルに基づくヒートパイプの熱輸送特性の解析		
	倉前 正志 (北 大)	127
<解 説>		
気液二相流研究の動向についての雑感		
	赤川 浩爾 (神 戸 大)	146
<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		161
(2) 東海研究グループ講演・見学会		162
(3) 北陸・信越研究グループ講演会		164
(4) 関西研究グループ講演討論会		166
<編集後記>		
Vol.27, No.104「産官学共同研究特集号」の編集経過		
	第26期編集委員長 谷口 博 (北 大)	168
<お知らせ>		
(1) 第25回 日本伝熱シンポジウムについて		171
(2) 第22回 夏期伝熱セミナー開催予告		173

「産官学共同研究特集にあたって」

「伝熱研究」編集委員会

1. はじめに

日本伝熱シンポジウムにおける産官学共同研究関連の発表論文件数は、昭和60年（東京）の12件（196件中）、昭和61年（札幌）の16件（252件中）に対して、昭和62年（松山）は32件（232件中）と大幅に増大し、産官学共同研究が活発化する傾向を示している。また、文部省の「民間等との共同研究制度」実施状況を、図1、図2に示すが、分野別研究課題数、実施状況とも、ここ数年急激に増加しており、共同研究が盛んになっていることが理解できる。

一方、伝熱を含めた熱工学の将来の姿に対する議論がここ数年来活発であり、エネルギー工学ばかりでなく、エレクトロニクス、材料、バイオ、宇宙などの様々な先端技術分野に関する伝熱へという研究対象分野の多様化傾向が指摘されている。この分野の多様化に対しては、表面的な研究領域の拡大により学問的な深みがなくなってしまうのではという悲観的な見方もあるが、多くの分野を横断的に結び付ける伝熱現象の研究は、様々な分野でなくてはならない役割を果たすであろうし、その分野に対して将来を切り開くきびを打ち込むような効果を持つかも知れないという考え方も見受けられる。

この様な先端技術に関わる伝熱研究の場合には、以下のような理由から、共同研究が重要になると共に、難しい問題を含んでいることが指摘できる。

- (1). 先端技術は、多くの学問分野の高度な知識を必要とするので、他分野の研究者との情報交換、共同研究の機会が増えるであろうこと。
- (2). 一方で、関連する分野が多ければ多いほど、また、製品に結び付いた先端領域であればあるほど技術的ノウハウのような非公開情報も多くなり、研究開発のニーズを与える情報も提供されにくくなる傾向を持つこと。

将来の伝熱研究会は、より広い分野の研究者の情報交換会、共同研究会的な性格を持つ可能性もあり、多くの学問分野を横断的に結び付ける伝熱の分野の特徴を生かすような分野多様化への対応法を、常に、かつ、積極的に模索しておくことは大切であると思われ、今回の特集を企画した。

2. 産官学共同研究特集号の構成について

共同研究についての議論に際して、数多くの側面があり、また、難しい問題点も少なくない

と感じられている方も多いであろうが、特に重要と思われる側面について以下にコメントしてみたい。

共同研究の必要性、重要性については、前述の研究対象の多様化の観点ばかりでなく、従来から指摘されている、共同研究をする各々が、特徴を出しながら、自分達だけではできないような面をサポートして貰い、お互いの協力のもとに共同で研究できれば、学問的にも基礎から応用まで含むスケールの大きな研究ができるだろうし、また、工業的インパクトの大きい技術を確立することも可能になるという点が重要であろう。

また、共同研究の姿について考えてみると、先ず、有益な情報交換から始まるが、各種の地方活動やセミナー、そして、ますます隆盛な伝熱シンポジウムが、有効な場として機能していると思われる。実際の共同研究が始まると、お互いに分担した研究や、一緒に実験する研究など、種々の形態がとられる。この様なやり方は、国際間や学問分野間などの共同研究でも同様であるが、本特集では、産学を中心とした産官学の共同研究に的を絞り、国際的な共同研究については、次号の国際交流特集に譲りたい。また、共同研究の成立する条件としては、共同研究する研究者相互にメリットがなければ長続きしないようであり、研究対象も、産業界が資金面を受け持つ場合には、販売できるような技術の確立に関連あるものに限られる傾向が見受けられる。

次に、共同研究の問題点としては、人の問題、テーマや目標の設定の考え方の違い、資金面の問題、そして、成果の取扱の問題など、多くのことが指摘されている。人間関係として、研究者同士が人間的に信頼しあい、尊重し合うことが大切であるのは、重要な基本的条件ではあるが、かなり難しい問題で、ノウハウも多いようである。また、テーマや目標の設定への考え方に従来からかなりのギャップが存在していることは、「伝熱研究」の産業界からの提言特集（No.92,93,1985）でも指摘されているところであり、十分すぎる程の話合いと相互理解を必要としている。一方、資金面も大きな問題ではあるが、近年、技術立国を目標とした諸制度が整備されつつあり、これらの諸制度を活用した共同研究の試みも増加し、また、積極的に利用して行くことも有効であると思われる。具体的には、新技術開発事業団制度、重要技術研究開発費補助金制度、石油代替エネルギー関係技術実用化開発費補助金制度などであり、また、文部省にも、「民間等との共同研究制度」ができています。

本特集号では、現在の共同研究テーマを先ず取り上げ、その内容と感想などを解説していただき、次に、共同研究の重要性、実績、課題、そして、将来についての御意見を述べていただいた。さらに、諸外国に於ける現状なども取り上げ、最後に、いくつかの分野に於ける今後の共同研究の方向、テーマ名などの将来展望をしていただいた。

本特集が、伝熱を研究している皆様にとって、共同研究についての検討時に、また、進行時に、何らかの参考になり、少しでもお役に立つことを期待しております。最後に、本特集号にお忙しい中を短い期間で、貴重な御意見を御執筆いただいた方々に、深く感謝致します。

（文責：谷口 博、新井紀男、矢部 彰）

分 野	件 数			
	58年度	59年度	60年度	61年度
材料開発（セラミックス等）関係	19件	49件	67件	68件
機器開発（電子顕微鏡等）関係	11	28	44	68
バイオテクノロジー関係	7	21	31	48
ソフトウェア関係	8	15	24	30
エネルギー開発関係	5	19	23	21
土木・建築関係	3	14	20	23
エレクトロニクス（電子工学等）関係	3	14	7	14
計	56	160	216	272

なお、これらの共同研究により、これまでに61件の特許共同出願契約が国と相手方機関との間で交わされている。

図1. 民間等との共同研究制度——分野別研究課題数

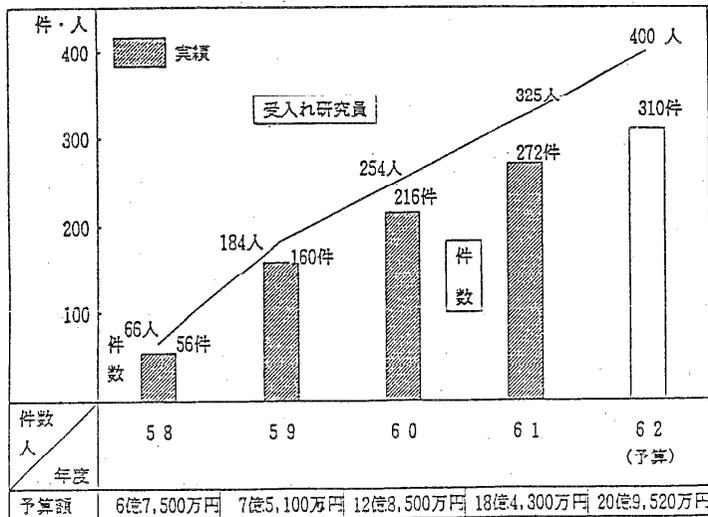


図2. 民間等との共同研究制度実施状況

ガスタービン・シュラウドの伝熱特性

岐阜大学工学部機械工学科

熊田 雅弥

昨年末、新井先生（名大）より、来年1月発行の「伝熱研究」は、産官学共同研究特集号であるが、テーマの内容と感想でもいいから何か書くようにご連絡を頂いた。しかし産学共同研究と言っても豊富な経験もなく、また幾度となく諸先生によって論ぜられた産学共同研究自身の功罪についての自分なりの考えがあってやってきたものでもないで、とても書けるものではないが、断われない依頼ということであったので、言葉通り、現在進行中の石川島播磨重工業株式会社との「共同研究」の内容と若干の感想を書くことでお許しを得たい。

研究目的は、表題に示すように、直接的にはガスタービン・シュラウドの伝熱特性を明らかにすることである。しかし、その背景にある問題は、ガスタービンの高効率・高出力化のために、タービン入口温度（TIT）は近年上昇傾向にあり、それに伴って高温部材やタービン要素の冷却技術に関する研究が重要になって来ていることである。特にタービン翼部の冷却技術は、全面膜冷却技術（FCFC）などかなりの成果が報告されている。しかし、TITの上昇は、翼部だけでなくエンドウォールやシュラウド（ケーシング）の効果的な冷却技術の改善を必要としつつある。それは、この場合、サイクル効率の悪化につながる冷却空気量の増加や過大な熱応力発生回避が可能となるからである。このような観点から、翼端隙間低減と翼端保護という利点から実用化が進められている、高温タービン用セラミックアブレイダブルシュラウド（Ceramic Abradable Shroud）の開発が現在重要な研究課題となって来ている。

本研究は、そのためにシュラウドの定常熱応力解析に必要な主流側熱伝達率の正確なデータを集積すべく計画されたものである。一方、シュラウド部での熱流体に関する研究は、ほとんどが動翼先端からの漏れ流れ（leakage flow）に関するものであり、主流側熱伝達率に関するものは極めて少なく、僅かにKarimovaら[1]、Guenetteら[2]、Dunnら[3]の研究を散見するのみである。なかでも、Karimovaらは、何種類かの試験条件について、シュラウド部主流側の平均熱伝達率を熱流束計により計測し、翼端隙間の効果を含んだ実験式を与えている。しかし、シュラウド部の流れは、漏れ流れ・流路内渦（Passage vortex）などの二次流れ、入口境界層、またかきとり渦などを伴う複雑な非定常流動場で、それらの形状や諸因子が複雑に関係しながら、熱伝達に影響している。そのため、Karimovaらの平均熱伝達率に関する結果がどの程度普遍性を有するものか明らかでない。

しかしながら言うまでもなく、実機の使用は無論のこと、航空機用ガスタービンは非常に高回転であり、実機対応の回転数で行なうことは実験室レベルではほとんど不可能である。

そこで具体的な実験としては、まず過給機のタービン（IHI-RU150）を用いてシュラウド部の局所熱伝達率を、ステンレス箔を用いた熱流束一定の条件で測定することにした。プログラム1として、現在遠心タイプの過給機を使用して実験を行なっている。プロアからの空気は、スクロール、案内羽根を通過してタービンロータを回転させる。空気流量は、フォトピックアップからの信号をユニバーサルカウンタに入力し計測された回転数との相関式で整理されている。なお、プロアの吐出圧が低いためコンプレッサのインペラを削り落とし、タービンロータをほぼ無負荷の状態で回転させている。本実験では、動力系の損失、おもに軸受潤滑油の粘性抵抗による損失との関係で決まる。そのため、潤滑油温度を一定に保つように十分配慮した。現実回転数の範囲は、4000~10000rpmである。シュラウド部の熱伝達率は、アクリル製のシュラウドの内面にステンレス箔（厚み30 μ m）を接着し、これを直流安定化電源で直接通電加熱する熱流束一定の条件で計測した。ステンレス箔は、シュラウドの直線部に接着され、翼（直線部の軸コード長さ25mm）およびその下流部に対向している。なお、翼端隙間の効果を調べるために、アクリル製のシュラウドを三種類製作し試験に供した。翼端隙間は、周方向に多少バラツキがあるが、ステンレス箔接着状態で実測してそれぞれ約0.3, 0.5, 0.7 mmである。

現在までに得られている結果は、近く学会（航空原動機に関する講演会）で発表の予定のため詳細は省略するが、回転数と翼端隙間に対する軸方向局所熱伝達率分布で、基本的には回転数や翼端隙間によらず下流に向かって単調に減少する傾向を示し、翼後縁下流で再び増加している。翼部での熱伝達率の減少は、絶対速度の軸方向への減少によるものであるが、翼後縁下流での再上昇傾向については、現段階ではその理由は明らかでない。全体的に、KarimovaらやGuenetteらの結果と定性的に一致している。また翼先端と対向するシュラウド面での平均熱伝達率は、代表速度としてロータ翼先端流面上の入口、出口絶対速度のベクトル平均速度、代表長として翼軸コード長で定義されたレイノルズ数に対してはほぼ0.8乗で整理できる。さらに本実験範囲では、翼端隙間の影響は非常に少ない。現在結果の妥当性を含め、シュラウド面上の静圧分布等の流動場の計測を準備中であり、その結果を待って詳細な検討を行なう予定である。またプログラム2として、軸流タイプの過給機タービンを用いて同様の実験を行なう計画をしている。

以上が、石川島播磨重工業株式会社との「共同研究」の内容の概略である。実験的には、多少回転場の実験ということで安全上の神経を使うこと、特にステンレス箔の接着状態によっては、箔自身が翼にむしりとられてしまうということもあって、翼破損に伴う防御だけは十分行なっていることを除いて、結果の発表制限など、特に会社との「共同研究」上での問題となることはない。また実験の内容・進行についても適宜検討する機会を持っているが、自由で、何よりもかなり時間的にこちらのペースで行なうことができる。ただ、これはテーマによることだろうと想像している。

最後に、このようなテーマで「共同研究」に至った経緯は、直接的には会社からの依頼によるものであるが、内容的に、今まで経験のない回転を伴う流動場の伝熱という点で興味があり、過去動翼の全面膜冷却（FCFC）を研究して来たこととの関連において興味ある問題として進める気持ちになった。すなわち、シュラウド側からみれば、回転する翼が存在しても基本的には貫流する流れにさらされることになり、特に回転が零の場合は、形状の特殊性があっても一般的には、単相境界層熱伝達に帰結する。そこに翼端隙間の程度の差があれ、周期的に境界層の外側を翼が流体の一部を流れと直交する形で排除した場合、基本的な境界層熱伝達の機構がどのように変化するかは、非常に興味ある問題であった。複雑な流動場であるため、現在の端緒についたばかりの進行状況のなかで軽々に言えないが、かなり壁近傍の粘性の支配的な層は、この程度の外乱に対しては強固のようであるという印象を持っている。特に漏れ流れや渦の存在など一次流れの存在の影響問題だけでなく、さらにそれに加えて過給機の設計条件と異なる低回転数での衝突流入状態（翼面上はく離を伴う流動場）での局所熱伝達特性が、基本的に無衝突流入状態と同じ傾向を示すことは、非常に学問的に興味ある問題として注目している。

終りにあたり、このような内容で産官学共同研究特集号の編集方針にそえる原稿になり得たか自信はないがお許しを得たい。また石川島播磨重工業株式会社の担当者に対して、このような報告内容が妥当かどうか検討して頂く間もなく、原稿を送ることになってしまった点お詫び申し上げます。なお「共同研究」の「」は、正規には奨学寄付金にて行なわれている研究であることを意味するために使用したということを付記させて頂く。

[1] A. G. Karimova, et al, *Aiatsinnaya Teknica*, Vol.16,1976.

[2] G. R. Guenetle, et al, *AIAA paper* 85,1985.

[3] M. G. Dunn AND A. Hanse, *ASME-GT-88*,1981.

産官学共同研究に関する我々の研究室の現状

谷口 博 (北大工)

工藤一彦 (北大工)

我々の所属する研究室は、熱機関学を専門としているので熱力学・伝熱学・燃焼学のいずれをも包含して教育・研究に当らなければならないという宿命を有している。そのため、学会活動でもこれらの分野に等分に足を踏み入れることとなるので、研究室の運営面から見て我々の側のみで研究を進めることに多少の困難さを憶えていたのである。例えば、実験装置および測定器具などを取揃えるに際し、上記の3分野を対象とすれば通常の2～3倍の資金が必要となり、大学の立場から見て非常に難しいこととなる。また、研究室に所属する研究者同志が、互いに異なる分野のテーマを抱えながらも協力し合って研究を進めるための努力をしなければならない。このような状況におかれた研究室は、必然的に大学外のグループとの共同研究を指向するようになり、初代の大賀憲二教授、引続き斎藤武教授と産官学共同研究の経験を積んできた次第である。

以前にも「伝熱研究」に著者の一人が意見を述べたことがあるように、とくに産業界との共同研究を進める場合には、複数年分野にまたがるテーマが通常のことであり、伝熱学のみ分野で共同研究ができることは稀なことではないか。種々の意見もあろうが、著者らは双方とも偶然にも10年余の産業界の経験を有しているので、その立場からと現状での産官学共同研究の経験から申しあげておくこととしたい。勿論、伝熱学の分野だけを考へても多くの産官学共同研究のテーマがあり、各大学で立派な研究成果をまとめたことを伺ってはいるものの、我々の研究室に持ち込まれたテーマは複合した分野を対象としていたのである。一方、国際間の共同研究も盛んに行われていることを知っているが、伝熱学の分野では必ずしも多くはないようである。日本および諸外国で開催される国際会議での発表者として、外国学会誌等への論文の著者として、2国間以上の大学等の名前を見ることはあまりにも少い。数年前、著者らは国外の大学に留学等で訪れていた機会を選び、海外との共同研究を産官学共同研究に組合わせることとしたのである。それ以降の国際会議には、2国以上の研究者間で連絡し合い、研究成果を発表し続けている。以下に我々の所属する研究室の現状を紹介することとしたい。

固体燃料の燃焼性

北海道は、産炭地でもあり石炭による電力エネルギー供給割合の多い地域としてよく知られ、石油過剰供給時代も石炭の研究の灯をともし続けてきた。我々の研究室は、国立の工業技術院北海道工業開発試験所、北海道立工業試験所、日立製作所エネルギー研究所との産

官学の研究者が共同して「固体人工燃料の着火性」をテーマに選ぶこととしたのである。研究開始後、中国杭州市にある浙江大学も研究に参加することとなり、本年9月に中国北京市での国際会議にその成果を発表した。この研究は、石炭を目標としたものではあるが、ご承知のとおり石炭の性状は種々様々であり、着火性を例にとっても影響する因子を個々に調べることは困難である。もし、固体人工燃料を調整し着火性を調べることができれば、着火成分のみを変えることが容易であり、一般の固体燃料を代表したシミュレーション実験を行い得るものと考えた次第である。このテーマにおいては、実験装置を国立研究所より借用し、実験者は北海道立研究所および北海道大学の双方より出し合い、関連する基礎研究および意見交換を全ての研究者間で行うこととしている。現在、着火性に及ぼす揮発分の影響、雰囲気酸素濃度の影響、灰分の影響などについての測定が一応終了し、着火性マップとして取まとめることができた。また、揮発分放出過程の影響、揮発性成分の違いによる影響など引続き検討を加える予定である。

火炉内の伝熱シミュレーション

実用規模の火炉を対象とした伝熱シミュレーションは、ボイラあるいは工業火炉の開発研究に欠かせない手法であるが、放射伝熱とくに三次元の解析に難しさがああり、必ずしも広く研究されているテーマではない。さらに、シミュレーション結果の検証ともなると、巨大設備の実測という大学の実験能力を超えた壁に突当ることも考えておかなばならない。我々の研究室では、東京ガス技術研究所との産学共同研究を進め北海道大学側でコンピュータ・シミュレーション、東京ガス側で実測と分担することとし、「モンテカルロ法および放射熱線法による三次元放射伝熱解析」のテーマに取組むこととした。最初は、比較的形状の単純な加熱炉等を対象に選び、昨年8月の米国サンフランシスコ市での国際伝熱会議、本年7月のカナダ・モントリオール市での数値解析国際会議にて研究成果を発表することができた。しかし、ご承知のとおり上記数値解析には膨大な計算時間を必要とし、実用解析手法として今一步の感がある。現在、とくに放射熱線法の応用に焦点を絞り、複雑な形状への適用を可能とするソフトウェアの開発を進めている。例えば、火炉壁より被加熱管を離して設置した場合など、実用加熱炉で三次元的な取扱いの要望されている対象を選び、壁面での反射も考慮して検討している。勿論、モンテカルロ法による解析のほうがソフトウェアの作成は容易であるが、計算時間の短縮を可能とする点から、放射熱線法の特徴を生かすことを主眼としているのである。研究開始以降、米国アナーバー市にあるミシガン大学とも緊密な関係を結び、国際間の共同研究にも発展しており、機会を得て大学側あるいは東京ガス側より訪問するなど実質的な討論も行っている。

散乱を伴う放射伝熱

上記の火炉内の伝熱シミュレーションに関連して、ガス中に浮遊する粒子による散乱の影響も考える必要が生じてきた。従来は、放射ガスの吸収特性に含めて略算していたので

あるが、微粉炭などの燃焼火炎を対象に選ぶ場合には散乱効果を無視することができない。散乱を取扱う手法は種々発表されているものの、三次元的な非等方散乱への応用にはモンテカルロ法が適切であり、我々の研究室でもこの手法を採用することとしている。最近、東京電力技術研究所などが中心となり、大型火力発電用ボイラの燃焼・伝熱シミュレーションの開発研究が進められており、上記の散乱を伴う放射伝熱の解析が重要な課題として取上げられるに至った。現在、単一粒子などを対象とした研究成果は発表されているが、粒子群への適用には種々の困難さがあり、産学共同によるソフトウェアの開発が望まれている例といえよう。もし、総合的なシミュレーション手法が確立し、産業界を中心とした実測結果との比較検討が可能となれば、大型研究プロジェクトとして育つものと期待している。

ヒートポンプによるエネルギー有効利用

全国的に地域冷暖房の普及が始ってから十数年を経ているが、エネルギー有効利用の面から果して有効か否かの論議が交わされ続けている。もし、配管損失を考慮するならば、場合によっては個別方式より不利な場合も多く、これが地域熱供給方式への疑問点の一つともなっているのである。最近、実用化に各方面が熱心となっているコージェネレーション（熱と電力の併給）方式を導入するならば、配管損失を補って余りあるエネルギー有効利用が可能であるが、熱のみを供給する専用ボイラ方式では性能向上に限界があるといえよう。一方、従来から実用化されているヒートポンプにおいても、電動方式にのみ固執していたのでは熱利用率の向上に限界が認められる。この点を打破するために、例えば、コージェネレーションとヒートポンプを組み合わせることにより、熱のみを供給する方式でも熱利用率を格段と向上させる可能性が出て来るのである。我々の研究室では、ヒートポンプ・ボイラ・システム の概念を提案し、新技術開発事業団、前川製作所との産官学共同研究を行うこととし、専用ボイラ方式での熱利用率90%をこのシステムによる150%~180%への改善に取り組むことになった。比較的小規模のパイロット・プラントの試作研究ではあったが、予想された性能を得ることができ、この研究成果を発表した空気調和・衛生工学会より昨年度の学会賞を授与され、産官学共同研究としての貴重な経験となった。

この研究と併行して、都市廃熱利用計画が札幌市において進められており、通商産業省に支援された検討会に著者の一人が参加し、上記システムを応用した場合の効果の検討に協力した。多少の変更も加えられたが、この検討結果を基として地下鉄廃熱利用によるヒートポンプ地域冷暖房システムの実用化が決定し、現在では実機プラントの設置に向けて工事が進められている。この場合は、通常の産官学共同研究の成果ではないが、我々の研究室での産官学共同研究の延長上と自負している次第である。北海道は、北方圏に属する地域で冬期生活の不利な点を克服することが重要な課題であり、産官学共同研究のテーマとして数多く取上げられる可能性がある。北海道大学における立場から考え、我々の果

たすべき責務が大きいことを認識する必要がある、とくに産業界からのご支援を期待する次第である。

今後の研究テーマ

各方面で利用されているボイラ設備を例にとると、もはや熱効率の向上は望めないものとされているが、燃焼ガスに含まれる水蒸気の潜熱を回収利用することができれば、10%程度の熱効率向上が可能となろう。しかし、そのためには伝熱面の耐食性向上が必須であり、伝熱の分野を超えて材料開発面との共同研究が望まれるのである。さらに、回収した熱エネルギーの利用対象いかんによっては、エネルギー有効利用の効果があまり認められない場合もあるので、システム全体を考慮した検討が必要となる。我々の研究室に所属し上記のテーマで工学博士（論文）を取得した留学生在が、中国瀋陽市に帰国し、現在、上記研究成果を中国において実証研究中である。このテーマに関連して、我々の研究室でも凝縮を伴う対流伝熱の解析に取り組んでおり、基礎研究の結果がまとまり次第、産学共同研究へと発展させたいと考えている。一方、この研究を行うに際し、可視化手法を筆者らの一人が米国ミシガン大学との交流により進展させるため留学した経験もあり、国際間の共同研究のテーマともなっている。上記の研究成果の一部は、国際会議および日本機械学会で発表済であるが、実用を目指した研究テーマに引継がれるものと期待している。

我々の研究室では、数値解析を中心とした研究テーマが多いので、熱力学・伝熱学・燃焼学の分野において、複数分野にまたがる研究テーマを取上げることとなろう。例えば、宇宙開発、高温ガスタービンなどに関連したテーマにも取り組むことを考える場合には、種々の形態の伝熱を包含するものとして検討する必要がある、実際面を予想した概念の取組みに産業界の支援が必要であるといえよう。種々の意見もあろうが、今後の研究テーマを探る場合に、産官学が協力し合うことが当然のこととなるので、互いの垣根を低くする努力が望まれるのではない。

最後に、大学における一研究室の立場から、学部学生および大学院学生の協力を得ながら研究を進める場合の重要なことを述べておきたい。産官学共同研究といえども、大学において実施する研究である限り、原則として研究成果は学会等で全て公表する必要があるものと考えている。もし、特定の範囲に研究成果を止めておくならば、教官と学生の協力関係の形成に支障を来たすこととなり、その結果として研究意欲の低下ともなる。従って、産官学共同研究に関連する産業界、官界のご理解を得ることが必要であり、大学での教育・研究の活性化を計るために一層のご支援をお願いする次第である。また、我々の研究室では、上記について各方面よりのご理解が得られており、学会等への発表をその都度行わせていただいている。関係各位に感謝の意を表す次第である。

産業用エネルギー有効利用技術における産官学共同研究の数列

笠原 敬介 (株)前川製作所

1. はじめに

各国のエネルギー防衛手段はエネルギー輸入国にとっては夫々特色がある。油危機を乗り切った日本の省エネルギー政策は効を奏し、その後の世界の油の需給関係を安定させたことに力があつた。見事な官民一体の省エネルギー技術研究開発と省エネ促進は浸透した。然し産油国と輸入国とは油価の安定とコスト低下によって輸入国においてエネルギー技術の開発が此処に来て格差が付き始めていることは事実である。

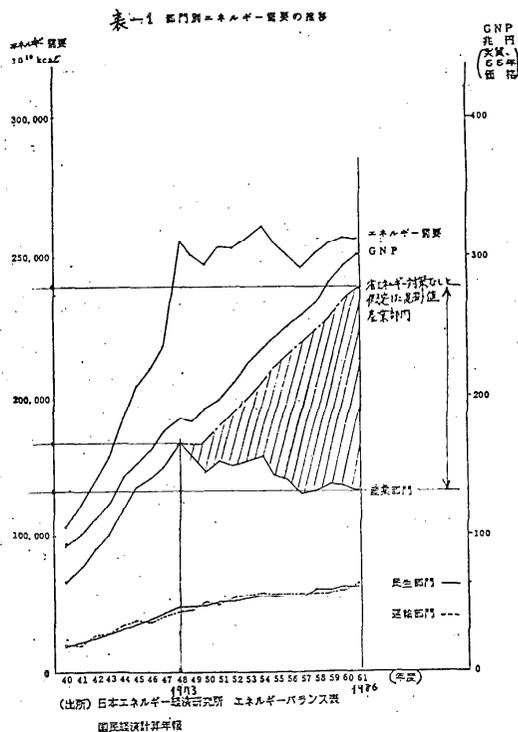
油危機以来明らかにエネルギー技術は単なる省エネ技術としてではなく本格的エネルギーマネジメント技術と共にカルノー、逆カルノーをドッキングした新しいエネルギープロセス技術として定着しつつある。

2. 産官学共同研究例におけるエネルギー有効利用技術

エネルギー輸入国の我が国で、油危機以来拾数年間に開発されたエネルギー有効利用の広範に亘る技術は、世界のリーダー的レベルに在る。この事はエネルギー資源を持たざる為の恩恵であったとも云える。その成果は、1973~1986以来の産業分野におけるエネルギー消費量の大幅な節減として表われ、それ迄は消費量はGNPに比例して増加していたが、1973年を境に下降となり、若し省エネ対策が行なわれなかったと仮定すると、1986年度の見掛値と同年度実際値との比は約1 : 0.54 となり驚異的な、省エネ効果を果たしたことになる。

更に1973年のピークよりも22%も減少しており'86年は1969年の消費量に逆戻りしていることが着目される。

(表1参照)



表の斜線部が見掛けの節約部分である。

この事は明らかに官民一体の省エネ対策と技術開発が行なわれたことを雄弁に物語る。その一つに政府(通産省/工技院)、関係団体等を中心としたサンシャインとムーンライト両計画推進等の強力に実行した産官学の共同研究の成果があった。更に現在においても研究は21世紀エネルギービジョンに向けて進行しつつある。

この計画路線に副い、一連の圧縮式(スクルー型)高温ヒートポンプの技術開発がここ数年間行なわれ、新しいエネルギー技術がコンポーネントからシステム化へ、又複合化へと進展している。その中で、以下にエネルギー有効利用の開発技術として弊社が関与した産官学共同研究開発の中での回転機に関連した数例について紹介する。

3. 産官学共同研究開発例

3.1 テーマ：「ヒートポンプ・ボイラ併用による高効率利用温水供給システム」

3.1-1 研究機関或は研究発注機関/共同研究機関及び研究委託企業

新技術開発事業団/北海道大学 谷口博教授・(株)前川製作所

3.1-2 研究開発期間及費用 研究開発完了

S56・3～S59・12 , 総額 35000万円(委託費,自己負担共)

3.1-3 研究開発の背景と目的

従来地域冷暖房や工場等における集中熱供給方式としては、一般にはボイラー加熱方式が用いられているが、これら低温度におけるボイラーの熱効率は最高でも80～90%であり、効率は1.0を越えることはない。熱供給における燃料を節約する方法は排熱等利用することによって行なわれている。又ヒートポンプを使用することも行なわれているが排熱が比較的高温度の熱源60℃以上が必要であり、ソフトエネルギーや大気や常温以外の温排水の低温度30℃以下でも効率よく利用できる新しい昇温技術が望まれていた。

3.1-4 研究開発の概要

本新技術のヒートポンプ・ボイラー併用による高効率熱利用温水供給システム(HBS)は、熱利用を効率的に行なった温水供給システムに関するもので、高温の蒸気から動力(回転力)と熱を取り出し、得られた動力でヒートポンプを駆動し従来利用困難であった大気温排熱等の低熱源から熱をくみ上げ昇温し、これと先の蒸気による熱とを合わせて利用し、70～80〔℃〕程度又はそれ以上の温水を供給するものであり、地域冷暖房や工場等の温水供給設備への利用が期待される。

このHBSは、図1に示すように、高温の蒸気による熱エネルギーを利用する「熱併給蒸気サイクル」と「ヒートポンプ・サイクル」とからなっている。さらに「熱併給蒸気サイクル」はボイラ及び燃焼装置、蒸気動力発生機(熱機関)、蒸気凝縮器(復水器)、ボイラ給水ポンプから構成され、「ヒートポンプサイクル」はヒートポンプ圧縮機、二相流動力回収機(膨脹機)、ヒートポンプ凝縮機、低温熱源くみ上げ用蒸発器から構成されている。

このHBSはボイラで発生した高温の熱蒸気を使って蒸気動力発生機を動かす。この動力でヒートポンプ(スクリュウ式)を駆動してフロンガスを圧縮し、低温熱源くみ上げ用蒸発器に送り、このフロンガスで熱をくみ上げて中温の熱を作り出す。これに熱機関の排熱を加えて使用目的に合った温度の熱を得るものである。又、低温熱源、外気、太陽熱、冷却目的などを熱源とすることができる。

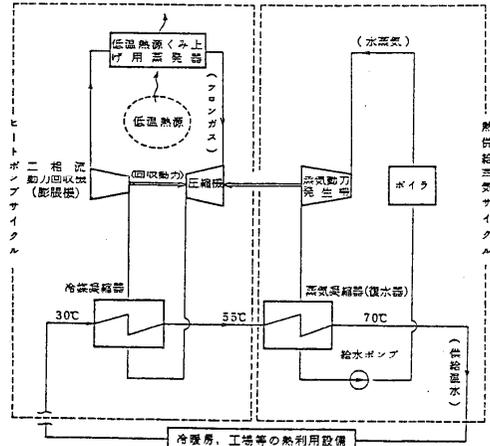


図1 ヒートポンプ・ボイラシステム

このように本HBSは、蒸気動力発生機で発生する動力によりヒートポンプを直接駆動していることから電力により駆動する場合に比べ、動力を得る過程でのエネルギー交換が省略されるので、エネルギーの利用効率の向上が図れる。

また「ヒートポンプサイクル」では、通常減圧(膨脹)過程で膨脹弁が用いられているが、本HBSでは気体と液体とを扱う二相流動力回収機を用い、動力回収も併せて行なう方式を採用している。この回収された動力は、蒸気動力発生機の動力を補うヒートポンプ駆動動力として使用できるので、「ヒートポンプサイクル」の効率向上に寄与している。二相流膨脹機は冷媒サイクルにおけるエンタルピーの増加する利点がある。

本システムは投入される熱量を100%とすると出口熱量は120~160%(投入熱量の1.2~1.6倍)のトータル熱量として取り出せる。写真1は本システムの実験装置である。

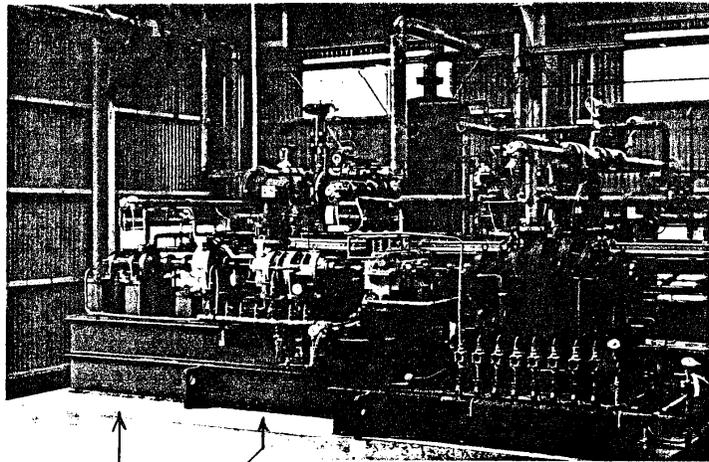


写真1 HBS装置

二相流動力回収機 ヒートポンプ圧縮機 蒸気動力発生機

また、このHBSでは地域熱供給等における温水需要量の変動幅が大きいこと、液相、気相の二相流を扱うことなどの条件に対応できるスクリー型蒸気動力発生機及びスクリー型二相流動力回収機を新たに開発して用いた。本システムの三つの回転機が総てスクリー型を用いていることも特長である。

このHBSは低温熱源を有効利用することによって、高い熱利用率が得られることから、従来のボイラ方式に比べ、燃料を大幅に節約できるので、0.5~15〔Gcal/H〕程度の地域冷暖房(250~7500戸)や給湯設備や食品工場等の産業用熱供給設備として新設はもとより、既設の給熱設備との組み合わせ等により適用範囲は広い。

また、このHBSを構成する動力回収機及び動力発生機は、単独で冷凍・冷蔵設備や企業内の小容量発電プラント或は直接駆動等に組み込まれエネルギーの有効利用、省エネルギーに効果を発揮するものと期待される。

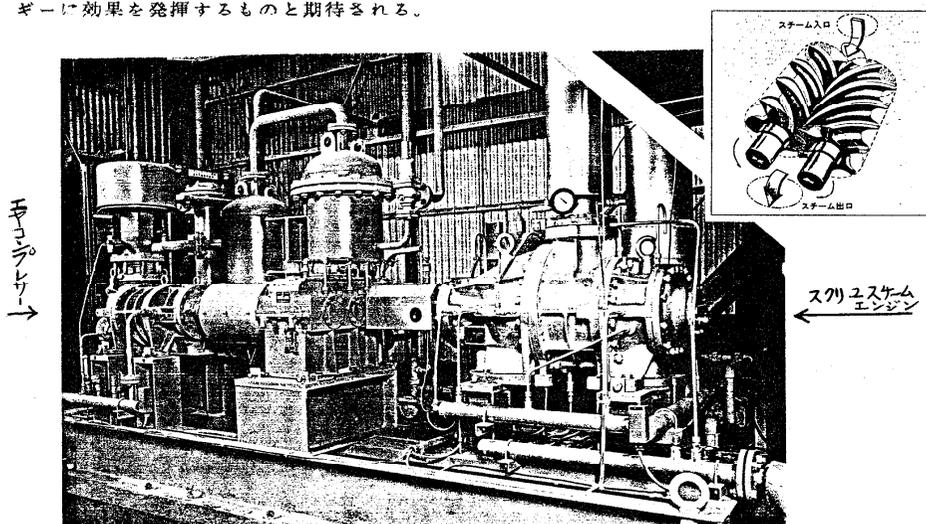


写真2 減圧弁に替わり背圧型スチームスクリー膨脹機による空気圧縮機駆動

3.1-5 コメント

現在本蒸気動力発生機は単独にスクリー型蒸気膨脹機(スチーム用又スクリー・エンジン)として市場に出ている。(写真2)膨脹機は容積式のスクリー型回転機であるため遠心型ターボの欠点をカバーし、湿り液体に強い。膨脹機は復水型と背圧型スクリー膨脹機の両機種があり夫々特長がある。排熱やスチームアキュムレーターの減圧弁等から動力回収することができる。所謂ボトムング機関専用機として強力な動力機関として使用されている。1台で60kw-120kwが自在であり、200kw迄が商品化している。

又、地熱水から動力発生機として有望である。

3.2 テーマ：「高効率キャンドモーターを用いた気体圧縮装置」

3.2-1 研究機関或は研究発注機関／共同研究機関及び研究委託企業

新技術開発事業団／科技庁・金属材料研究所 — (株)前川製作所

3.2-2 研究開発期間及費用 研究開発完了

S57・3～S60・9 ， 総額 15000万円(委託費,自己負担共)

3.2-3 研究開発の背景と目的

従来からキャンドモーターと云えばポンプ、そのポンプと云えばセントリフューガルポンプと云う程小型の水ポンプでは一般化して珍しくない。軸封機構がなく漏洩を防ぐと云うことが最大の特色である。然し乍ら有害流体で大型のノンシール用ポンプやガス圧縮機に対してはノンシール型モーターは現在にはない。但し冷凍機用フロン系ガスは銅材料を侵さない理由でハーメテック圧縮機としては存在するが主として冷凍機用に限定される。アンモニヤや他のあらゆる有毒ガスに対してノンシール圧縮機や人型モーターに対して、キャン構造として効率が落ちないノンシール・モーターが望まれている。

3.2-4 研究開発の概要

図2は軸封装置型の駆動体(A)、冷凍機用ハーメテック型駆動体(B)、本案キャンドモーター型駆動体(C)の3種類の概念略図である。キャンドモーターの高効率化を計るための開発の焦点は固定子と回転子との空隙にあるキャンであって、科学技術庁金属材料技術研究所の開発による軟磁性金属材料を基本としたものである。この磁性金属の素材は結晶軸が特定方向にそろっており、板面の法線方向の透磁率が高く、圧延方向に対して大きな方向性を持たせたもので、さらに鉄損渦流損が少なく、電気抵抗が高いもので、同時に機械的強度も高く、加工性、溶接性の良いもの、また耐蝕性に優れたものとしての諸条件が満たされたものが理想的素材となるが、これは容易でない。

従来はキャン材として意識的に非磁性材を選択して使用されていたものであるが、この開発ではこの点が異なっている。このように諸条件が理想的に満足され、従来の汎用機の諸特性に近づくことができても、それを上回ることはできない。

供試モーターは200V、1.5KW、4極とし、これらの諸特性を求めて解析し、最終目標の高圧3000V級、37KW、2極、50Hz、連続定格、F

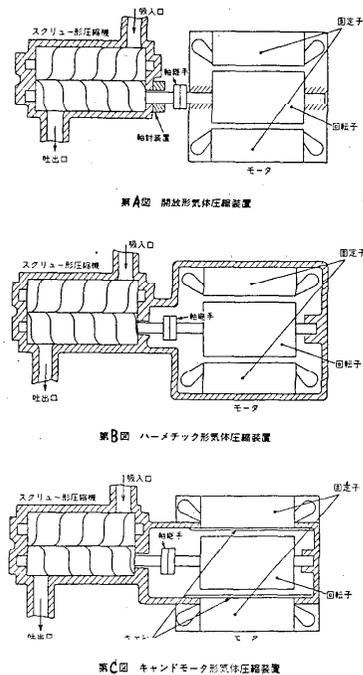


図2

種、水冷却、サーモカップルを埋め込み、効率目標を80%、スクリーコンプレッサの駆動用とした。キャンの厚みは0.4mm、固定子鉄心の両側、すなわち線輪端の部分は補強環でキャンを外周より包み耐圧強度をもたせた。固定子線輪の取められる線輪溝は高圧モーターのため開口溝であり、固定子内側のキャンの外周の補強と開口部分の磁束の脈動損を減少させるために磁性楔を使用した。キャンドモーターの損失の発生場所はキャンを境として回転子側と固定子側とに分けられる。損失の中でキャンの損失の割合は大きく、さらにその中の渦流損の比率が大きい。このためにキャンの厚みを薄く、回転子径を小さく、磁束密度を少なく、導電率の小さな材料などを選び、磁性材としての軟磁性材の使用はキャン挿入のため空隙増による励磁電流の増加をおさえて銅損の減少を計ることであった。回転子側ではその表面を平滑にして、流体の攪拌で生ずる摩擦損を減少させることである。回転子には汎用機のように冷却扇を使用することはできない。回転子側で発生する熱損失は圧縮機側で処理される。一方において従来のような冷却扇はモーターの騒音源となり大きなものであったが、キャンドモーターでは騒音源がなくなり、これに供なって生ずる振動も少なく、静粛な運転が可能となった。固定子側の発生熱はモーター本体の外周に設けた水套による水冷却として設計したが、回転子内の冷媒の蒸発、外気温の低下などによる凍結のおそれや錆、腐蝕などの点で、冷却特性は低いものの、油などによる冷却が行われる。線輪は外気側にあるので、他の冷却扇で強制送風による冷却方法もあり、常温で相変化の行なわれる冷媒によるヒートサイフォン式による冷却方法もある。産業用冷凍機のキャンドモーターの容量も大きなものとなるので冷却およびその排熱の利用も重要なことになる。モーターの諸特性を図3に、その試作品を写真3に示す。

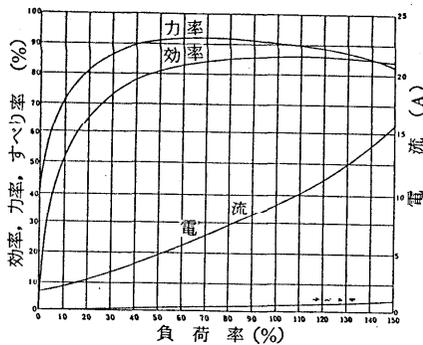


図-3 37KWキャンドモーター特性図

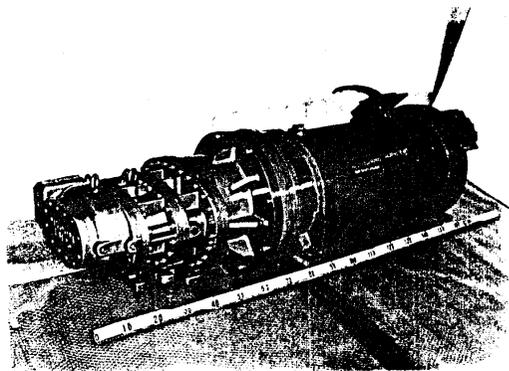


写真3

スクリー式キャンドモーター冷凍機

3.2-5 コメント

産業用コンプレッサーとキャンドモーターとを結合し、軸封装置を必要としない無漏洩のキャンドモーターコンプレッサーの試作を行ない、目標値の効率を超過して85.9%が得られた。これによって製品化が始められ、遠からずして市場に出廻ることになるものと思われる。

同時にコンプレッサ潤滑用としての体積型歯車ポンプと結合したキャンドモーターオイルポンプやキャンドモーター冷媒液ポンプも商品化ができ(写真4)、冷却装置全体の無漏洩化を図ることができるようになった。

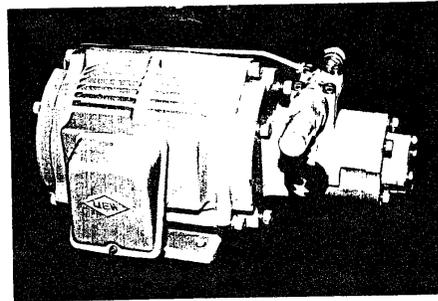


写真4

キャンドモーター冷凍ポンプ

3.3 テーマ：「未利用蒸気利用システムに関する実用化開発」

3.3-1 研究機関或は研究発注機関／共同研究機関又は研究委託企業

通商産業省・工技院・資源エネルギー庁／(株)前川製作所・サントリー(株)

3.3-2 研究開発期間及び費用 研究開発完了

S57・4～S60・3 ， 総額 60000万円(企業負担50%)

3.3-3 研究開発の背景と目的

従来、食品、化学産業に蒸溜、蒸発、乾燥工程においてMVR或はVRCと呼ばれ、ターボ圧縮機やルーツブロアーを使用するヒートポンプ・システムが一部利用されている。エネルギーコストの高騰によって一段と見直された。システムは原理的に非常に単純であり、且つ省エネルギー効率が高いものである。然し遠心式ターボやルーツ式は圧縮比が小さい、ミストに脆弱、キャピテーションを起こし易い、エロージョンを起こし易い。之とは逆に高圧縮比、湿り液に強い、キャピテーションに強い、エロージョンに強い等の従来MVRにない特長のある容積型回転機のスクリー式水蒸気圧縮機を開発し、新しいMVRの適用の範囲を拡大すると共に、水蒸気(汚濁腐蝕性分)の作動媒体としたプロセス用の閉サイクルオープンタイプのヒートポンプシステムが可能となった。本システムの実施例の好例としてビール工場麦汁煮沸釜に適用して、高い省エネルギーシステム技術を開発するものである。

3.3-4 研究開発の概要

本開発システムは Screw Type Steam Compression Heat Pump System (SSHP)と呼び、スクリー型水蒸気圧縮式ヒートポンプのコンポーネントの開発は前川製作所、之を用いてビール工場麦汁煮沸釜へ適用実施例としてサントリー(株)と共同で

開発した新しいMVR装置である。

一般に廃熱回収システムとして理想的なものは、廃熱発生部と利用部が接近かつ同時性を有するもの、すなわち、回収した廃熱を直接その発生元へ戻して有効利用するシステムである。本システムはこの観点を重視したものであり、シンプルと即時性がその特徴である。

図4、5にSSHP概念図を示す。図4では、塔頂から排出される水蒸気をスクリー壓縮機に直接吸引して昇圧、昇温する場合を、図5では、塔頂蒸気を直接吸引することに問題点(品質問題、腐蝕性、爆発性等)があり、熱交換器を介して間接的に水蒸気を発生させて壓縮機に吸引する場合を示したものである。いずれの場合も、壓縮機に吸引された水蒸気は、塔底で加熱可能な条件まで昇圧・昇温されてボイラに送られる。このとき、吐出蒸気を持つエネルギーは、吸引された蒸気の保有熱に壓縮動力が加わり、プロセスが必要とする加熱用エネルギーと常に同等以上のエネルギーを供給することが可能である。

このことは、一度立上げられたプロセスが従来必要としたボイラ蒸気エネルギーに比し、大幅に少ない壓縮機駆動エネルギー(コスト20~50%程度)のみで継続運転が可能となることを意味する。写真5は本SSHPのスクリー型蒸気壓縮機である。

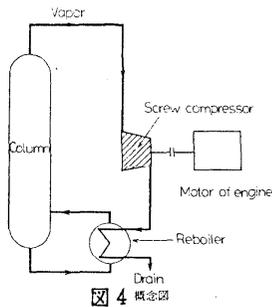


図4 概念図

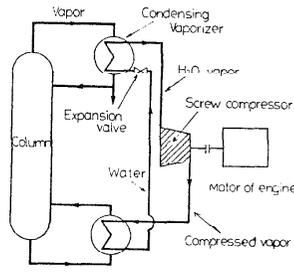


図5 概念図

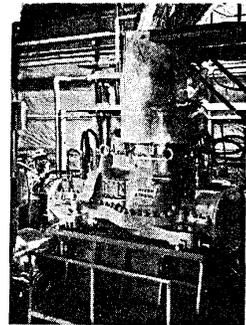


写真5 壓縮機外観

- スクリー型水蒸気壓縮機の特長として、(1) 壓縮比が大きくとれ温度幅も大である。(2) 耐久性、信頼性が高い、湿り蒸気ミストに対して有効である。(3) 負荷変動に対して優れた追従性を持つ、回転数制御が連続的かつ効率よく運転できる。

ビール工場麦汁煮沸釜への適用例

図6は、従来の麦汁煮沸用釜を示したものである。釜内部に加熱コイル、釜外部に加熱ジャケットを有し、共にボイラ蒸気にて麦汁を煮沸する。現状の煮沸はバッチ式で行なわれ、バッチ毎に釜上部から、当初張込量のやく10%前後の水分を蒸発させている。

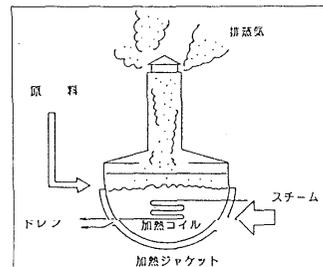


図6 麦汁煮沸用釜

図7は、煮釜にSSHPを適用した本システム
の概念図である。煮釜上部より排出される100℃、
大気圧の水蒸気を、スクリー式水蒸気圧縮機に
直接吸引し、圧縮することにより再度加熱利用の
可能な温度レベル(130~140℃)まで昇圧、昇温す
る。吐出された水蒸気は、煮釜外部に設けた熱交
換器を介して、麦汁を加熱する。煮沸開始時ま
では、ボイラスチームにてエネルギーが供給され
るが、システム作動後は、そのスチームを止めて
も、圧縮機が十分なエネルギーが供給され、煮沸を継続させることができる。

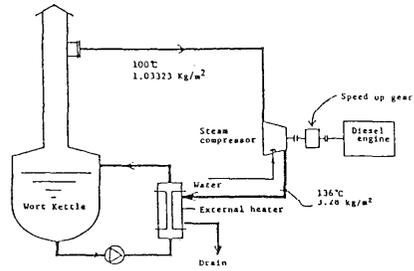


図7 本システムの概念図

本システムの評価は、品質に対する影響、システムの安定性、経済性(省エネルギー効果)の3点に焦点が置かれた。以上の3点についても実機成績は品質は従来サンプルと変わらず、正確なコントロールが可能なため品質安定した煮釜上部から吸引される水蒸気と加熱に用いる圧縮機吐出蒸気が常に等しくシステムバランスが安定している。経済性については従来のエネルギーコストの33%にて本システムは運転され非常に経済性の優れた設備である。

3.3-5 コメント

産業用として食品、化学等のプロセス内の蒸溜、蒸発、乾燥に広範な利用が考えられ、MVRとして用途がある。その商品実用化の一例としてアルコール蒸溜塔への応用として使われている。

図8は蒸溜塔に応用したシステムでエタノール水溶液(エタノール6.5wt%)よりエタノールを回収する場合のSSHP応用例を示したものである。

塔頂より共沸物に近い組成のエタノール蒸気(エタノール95.6wt%, 78.2℃, 760mmHg)を取り出し、コンデンサ/エバポレータにて73℃、265.3mmHgの飽和水蒸気を発生させる。この水蒸気をスクリー圧縮機

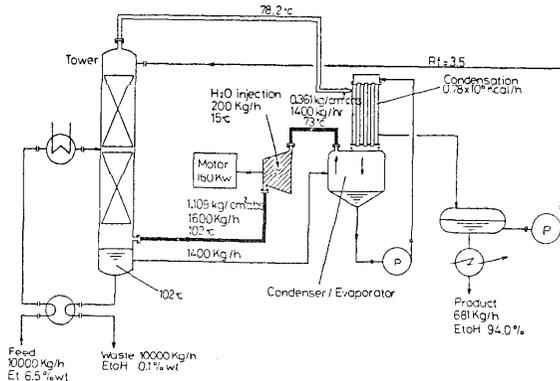


図8 システムフロー

にて816.5mmHg(飽和温度102℃)まで昇圧・昇温する。このとき圧縮比は3.08である。

本例においては、塔底部のアルコール濃度0より、圧縮機吐出蒸気を直接塔底に吹き込むことができ、リボイラが不要となる。これは設備費、動力費の面から極めて経済的である。また、塔は高性能低圧力損失の充填物の採用を前提としており、理論段数20、1段

当たりの圧損を20mm Aqと仮定した。

表2はボイラ蒸気により加熱する従来方式と、本システムのランニングコストを比較したものである。表からも明らかなように、本SSH Pを適用する場合は従来方式の36%程度のコストで蒸溜操作を行なうことができ、年間36,092,000円のエネルギーコスト節減が可能である。

型 式	MYCOM STM 250 L	
吸入蒸気	0.361 kg/cm ² ・a	73°C (飽和)
吐出蒸気	1.109 kg/cm ² ・a	102°C (飽和)
回転数	10,600 rpm	
押し除け量	6,200 m ³ /h	
所要軸動力	147kW	
稼働率	7,000 h/年	

表2

3.4 テーマ：「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」(S・H・P)

超高性能圧縮式ヒートポンプ高温出力型低温熱源用の研究開発

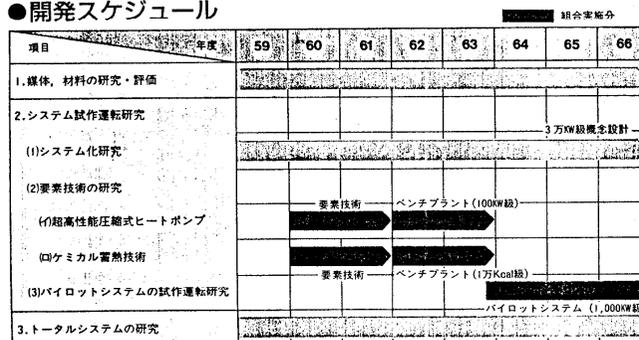
3.4-1 共同研究機関或研究発注機関／共同研究機関及び研究委託企業

通商産業省・工業技術院 — 新エネルギー総合開発機構／

S・H・P研究組合(17会社) — (株)前川製作所 現在進行中

3.4-2 研究開発期間 表3 参照

●開発スケジュール



出所：S・H・P技術研究組合パンフ 表3

3.4-3 研究開発の背景と目的

ムーンライト計画の一環として、従来技術に比べ飛躍的に高い効率及び出口温度を有するヒートポンプと極めてコンパクトなケミカル蓄熱装置を組み合わせた大出力システムの研究開発。

このシステムによると電力の負荷平準化に貢献する。

開発目標

項目			目標		
			出力温度	成績係数	
要素技術	超高性能圧縮式 高効率型	温熱専用	85℃	8	
		冷温兼用	(温) 45℃ (冷) 7℃	6 7	
	ヒートポンプ	低温熱源用	-150℃	3以上	
		高温出力型	高温熱源用	-300℃	3以上
	ケミカル蓄熱技術		出力温度	蓄熱能力	熱回収率
	高温蓄熱機: 能	~200℃	50Kcal/kg(媒体)以上	75%以上	
	低温蓄熱機: 能	10℃以下	30Kcal/kg(媒体)以上	75%以上	
トータルシステム	このスーパーヒートポンプ・エネルギー蓄熱システムは、従来のシステムにおいて、経済性、適用性、負荷平準化効果等の点において、現状のどのシステムよりも優位性があることを前提とする。 パイロットシステムでの目標は次のとおりとする。				
	適用対象	出力温度	エネルギー効果		
	事務所ビル空調	(温)	45℃	4.5	
		(冷)	7℃	5.3	
	地域冷暖房・給湯	(温)	45℃	4.5	
(冷)		7℃	5.3		
産業プロセス加熱		85℃ 150~300℃	6 2.3以上		

出所：S・H・P技術研究組合パンフ 表4

研究組合参加企業は表4の各要素技術を分担し、その目標値に達するように現在研究開発中のものである。弊社の開発要素技術としては超高性能圧縮式ヒートポンプの高温出力型、低温熱源用であって工場等から排出される低品位温排水から顕熱回収し、利用用途の高い

150℃程度の高温水を熱経済性のある成績係数3以上で発生できる大容量スクルー圧縮式ヒートポンプを開発し、高温蓄熱機能をもったケミカル蓄熱技術と組み合わせ、夜間余剰電力を用い、電力の負荷平準化を計ることを研究目標としている。

3.4-4 研究開発の概要

本研究のヒートポンプシステムを図9に示す。

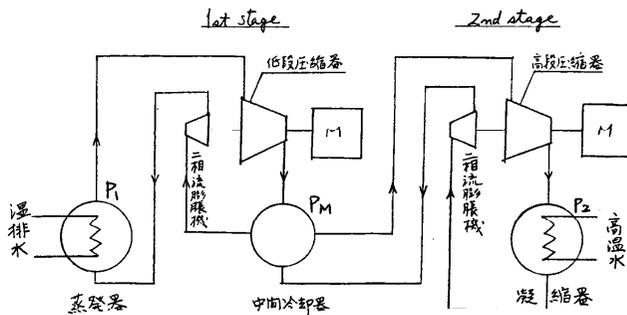


図9 ヒートポンプシステム系統図

高率を高めるためにスクリーヒートポンプを二段圧縮式に構成としている。スクリーのローターはWヘリカル歯形としスラスト相殺型圧縮機である。推力の低減を計り、歯形は非対称形新プロファイルである。

熱媒はトリフロエタノール・水系の熱媒は新しい国産開発のものである。

ヒートポンプサイクルの低段側サイクルと高段側サイクルは中間冷却器の中間圧力 P_m と低段圧力 P_1 、及び高段圧力 P_2 の夫々の圧力差による膨脹弁の替わりに夫々2相流膨脹機を直結して動力回収を行ない総合効率を高めるようにしている。高温水が 150°C 以上であるのでフロン系冷媒は使用不可能であり、新しい非共沸熱媒を開発している。

3.4-5 コメント

現在本研究開発は期間表に示す如く進行中のものであるため公表されたものに限定し省略する。今後の開発コンポーネントとシステムの商品化が期待される。

4. おわりに

— エネルギー有効利用技術の流れ —

産官学共同研究の数例を紹介したが、これより先S51・4～S56・3に通商産業省のムーンライト計画の一環として省エネルギー技術開発が行なわれ、これに弊社も参画し、排熱利用技術の中、圧縮式ヒートポンプによる熱回収技術の研究開発が完了した。

これはスクリー式圧縮機を用いた高温ヒートポンプの要素技術開発であって、 $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ の低温廃熱から 120°C 前後迄に昇温するものであった現在のポピュラーなフロン系熱媒を用いては最高の温度のものであった。これらの研究開発が先行した技術によって以後の研究開発が確実なものとなった。

産業用の作用温度は $100^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ に集中しており、之等を満たす高温ヒートポンプの必要が望まれ、熱媒として、水蒸気によるヒートポンプやペンタン及びヘキサン等の高温ヒートポンプ要素技術開発に繋がって来ている。そして現在進行中のSHP研究開発はトリフロエタノール系(フロリノール85相当)がフロン系熱媒に対抗しての国産開発により、安全で而も 150°C 以上の新熱媒として研究が行なわれている。産官学のエネルギーの共同開発技術の流れは、新しい熱の有効利用技術としてプロセスの中に定着する時代に入りつつあり、又ヒートポンプとエンジンや他の熱機関のコンポーネントと複合に組み合わされて全体の熱効率を上げるトータルシステム指向となり、コ・ゼネレーションシステムの分散據点型やエネルギーの自己完結型の傾向にある。

21世紀エネルギーに対する考え方は大きな様変わりをし、エネルギーに対するインフラストラクチャーの新しい体制が将来に向けて序々にではあるが出来上がって行くように思われる。

終わりに本開発に際してご指導ご協力を戴きました官学各機関、各位に対して深く感謝する次第です。

1. はじめに

大型人工衛星や宇宙ステーションの中で発生する熱を排出するためには、地上で容易に行なわれているような大気や海水を利用して冷却することができず、ラジエータと呼ばれる放熱器から深宇宙の暗黒部へ放射によって排熱するしか手段がない。さらに人工衛星や宇宙ステーションが大型であるため内部からラジエータまでの熱輸送距離が長くなり、熱伝導と内部の放射だけでは排熱能力が不十分である。このためヒートパイプや強制循環による熱輸送方式が採用されるようになってきた。

地球近くの宇宙空間における伝熱を考える上で特徴的なことは周囲が真空であること、太陽光の直射や地球による照り返し、赤外線放射にさらされること、周期的に地球の影に入ること等である。また地球の周囲を回転しているため自由落下運動をしているわけで、内部では見かけ上微小重力となる。したがって、地上における伝熱と比較すると上述の真空中での放射伝熱という特徴の他に微小重力下での伝熱という特徴がある。

本稿では、宇宙での伝熱に関して大学の先生から御指導いただいているテーマについて述べる。

2. コールドプレートの伝熱

宇宙ステーションにおける発熱機器の冷却法には大きく分けて2つの方法がある。1つは、冷媒を直接機器内部に通して冷却する方法であり、もう1つはコールドプレートと呼ばれる冷却板の中に冷媒を通し発熱機器をその上にボルト止めて間接冷却する方法である。両者共に一長一短があり、冷却効率は直接冷却の方が良いが、発熱機器の着脱についてはコールドプレートの方がはるかに容易でありクリーンなインターフェースがとれる。

宇宙における熱交換機器は打上げ重量を軽減するために軽量コンパクトである必要がある。これに加えて電力を太陽電池により得るため電力料が非常に高く、ポンプ動力の制限があり、流量を減らすため高性能伝熱面を開発する必要がある。

コールドプレートは全体の厚みが高々数mmの薄い伝熱板で内部を流体が流れるようになっていく。面積は500mm²平方程度である。このコールドプレートの内部の流れを均一にし、しかも圧力損失はできるだけ少なく強制対流熱伝達率の分布が均一になるように設計するのが宇宙の伝熱屋の腕の見せどころである。ところが、このような薄く広いコールドプレートの内部に流

体を均一に流すことはそれほど易しいことではない。

次にコールドプレートと発熱機器の間の接触熱抵抗の問題がある。コールドプレートと発熱機器の間の伝熱は、地上では空気がはさまれているために接触熱抵抗はそれほど大きくはならないが宇宙の真空下では空気がないため熱抵抗が激増する。その対策としては、コールドプレートと発熱機器の間にフィラー材と呼ばれる薄くてやわらかい物質をはさみ込み、固い2面間のすき間をうめて、接触熱抵抗を減らす方法と、ボルトの締付力を大きくして面圧を上げる方法の2つが試みられており、いずれも接触熱抵抗を減らす上で有効である。ただし、接触熱抵抗の値の定量的な予測のためには従来の経験だけでは不十分であり、真空度、面圧、表面あらさ、平坦度の接触熱抵抗へ与える影響を知ることが不可欠である。またフィラー材を使用する場合でも、フィラー材の硬さ、熱伝導率、厚さ、表面あらさ等の接触熱抵抗へ与える影響を知ることが大切である。

3. 共同研究

コールドプレート内部の流れと熱伝達の間係を基礎的にはっきりと把握するために、横浜国大の鳥居教授にお願いして共同研究を行なった⁽¹⁾。

実機大の亚克力製モデルを用い、流路各部の形状を種々変化させて大気中で水流動試験を行ない、できる限り流量分布が均一で圧力損失が少ない形状を検索し、その結果に基づき設計したコールドプレートについて熱伝達率を測定したところ、極めて高い値が得られた。また、その理由を検討するために、流動試験用モデルにおいて、圧力分布の測定、レーザドップラ流速計による流速分布の測定、流れの可視化を行なった。

この他、接触熱抵抗についても、考え方や試験方法について御相談をしている。

4. むすび

宇宙の特殊な環境下での伝熱機器はこれから開発が進められようとしている。新しいアイデアや巧みな伝熱機構により高性能、高信頼性の伝熱機器を開発することが必要で、今後ますます大学の先生方のお力をお借りする必要があると考えている。

参考文献

- (1) 第24回 伝熱シンポジウム講演論文集 D111 (1987-5)

1. はじめに

省エネルギーの推進を目標に、超高性能圧縮式ヒートポンプ(スーパーヒートポンプ)を実現するための高性能熱交換器の研究開発に、我々も取り組んでおり、本稿では、現在までの研究経過の一端を、産官学共同研究の一例としてご紹介させていただき、共同研究について皆様の何らかのご参考になれば幸いであると存じている。

本稿で主に紹介する研究は、通産省ムーンライト計画、「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」プロジェクトにおいて研究開発されている「EHD凝縮器の実用化研究」と、実用化研究を支援するために工業技術院機械技術研究所で実施している「EHD熱交換技術の研究開発」である。研究内容は、電気流体力学的(EHD的)な現象を活用し、静電気により有機物熱媒体の凝縮液膜を薄くしたり、粒状にしたりして、凝縮熱伝達を促進する技術で、150℃程度の高温出力のヒートポンプの凝縮器として性能を実証し、実用化に近づけることを目的とした研究開発である。電場を活用する伝熱技術の原理は、伝熱研究の96号に書かせていただいているので、メカニズム的な記述は拙文を御参照願いたい。

我々の研究を産官学共同研究という立場からみると、産としては、スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム技術研究組合、また、機械技研と技術指導関係にある(株)東芝の重電技術研究所の熊谷幹夫部長のグループ、官としては、工業技術院ムーンライト計画推進室、及び、機械技術研究所のEHD研究グループ、さらには、平素から研究の進め方、及び、基礎研究において種々の有益なアドバイスをいただいている学としての電通大の森康夫教授、東工大の土方邦夫教授らに支えられており、EHD熱交換技術を是非実現して省エネルギーの推進に貢献したいという目標を持つ産官学共同研究の一例になっているのではないかと考えている。以下に、どんな研究開発をしてきているかを簡単にご紹介し、産官学共同研究としての本研究の特徴と、共同研究の感想を述べてみたい。

2. 共同研究の内容

EHD熱交換技術の実用化を達成するためには、いくつかの難問を解決しなくてはならない。一つは、技術シーズとして、EHD熱交換技術が、優れた性能を発揮する技術であり、他の伝熱促進法に勝る特徴を持つことを、定性的、定量的に示すことであり、基礎研究の積み重ねが要求されている。今一つの大きな点は、高電圧を使う伝熱促進技術であることから、性能の持

統性、信頼性、安全性を確認すること、また、温度差、膜レイノルズ数などを変化させた熱交換器としての性能評価、さらには、製作性を考慮した電極形状の工夫、最適化することであり、これは経済性とも強く結び付いている。今回の共同研究では、第一の基礎研究を中心とした課題を機械技術研究所が担当し、第二の製品を頭に描きながら種々の工夫をして行く実用化研究をスーパーヒートポンプ技術研究組合のグループが担当し、各々に実験装置をつくり、自主性を保ちながら実験を進めてきており、各サブテーマ毎に役割分担しながら研究開発を進めている。

機械技研の凝縮伝熱の促進に関する研究は、昭和54年度から開始しており、新たに見いだした液体のEHD的な引出し現象のメカニズムの解明と凝縮伝熱への応用可能性の実証、続いて、螺旋電極の考案とその形状の最適化、さらには、螺旋電極と平板電極の組合せによるEHD的な擬似滴状凝縮現象の再現性の良い実現へと進んで来ており、共同研究を開始した昭和60年度には、上記の基礎研究がかなり進んでいた。また、共同研究開始後は、平板電極の絶縁によるEHD擬似滴状凝縮現象の安定化、平板電極の最適形状化、熱伝達率分布の測定などに取り組んで来ている。一方、技術研究組合側は、一本の鉛直伝熱管による性能確認実験で、信頼性、電力消費が極端に少ないことを確認した後、管群ループでの実験、温度差一熱伝達率特性の測定、製作性を考えた格子状電極の考案による擬似滴状凝縮現象の活用などの研究を進めており、その成果の一部は、伝熱シンポジウムなどで発表されている。[1] 研究の打ち合せは、1-2ヶ月に一度の割合で行い、研究内容の検討、進め方や問題点についての話し合いを続けて来ており、研究に対する考え方まで含めた相互理解は、かなりなされているように感じている。

ここで、EHD凝縮熱交換器の特徴を、いくつかあげておくと、(1).設置面積の小さくてすむ鉛直管外伝熱面に対して有効であり、伝熱管が長くなっても性能が落ちない。(2).加工しにくい材質の平滑管にたいしても伝熱促進が容易にできる。(3).電圧を変化させることにより、性能をコントロールできる。(4).R123などの代替フロンを含めてフロン系の熱媒体に対して消費電力は無視できるほど小さい。などである。

3. 共同研究の特徴と感想

EHD熱交換器の研究開発に関する共同研究の特徴を、EHD熱交換技術の性格、及び、研究開発費の面にみることができよう。技術の性格として、EHD凝縮熱交換技術は、研究を開始して9年近くをかけて基礎研究を積み重ねている技術であり、試行錯誤を繰り返しながら、少しずつ問題を解決して行くという進み方をしており、数多くのアイデアを出して初めて、研究が少し進むというケースが多かった。これは、流れ場、電場、温度場が複雑に影響し合うため、また、学問的にも、EHDが、まだ体系化まで至っていない分野であることに原因があると思われる。次に、研究開発費の面では、工業技術院のムーンライト計画で実施しているため、主に公的資金で研究できている点であり、本研究のように、基礎研究から出発している技
伝熱研究 Vol. 27, No. 104

術開発には、大変有難い制度であると思う。

現在は、本研究にとって大事な時期であり、本年末に行われる中間評価を目指して、性能を更にあげ、製作性も考えた電極形状を実証することに全力投球している段階であり、まだ、どこまで実用化に近づけるか分からない技術に対して感想を述べるのは適切ではないし、また、その余裕もないのだが、何かのお役に立つかも知れないと思って、敢えて、普段感じていることを述べる。なお、あくまで、私の個人的な感想であることをお断りしておく。

一つは、この共同研究を始めて良かったと思っている点である。機械技研だけでは、とても数十kWクラスの管群熱交換器や高圧高温ループのような大きなスケールの研究はできなかったと思われ、研究が自分ではできない部分まで進んだ事に感謝している。この経験から、各々が得意とするところを発揮できれば、共同研究の価値は大きいのではないかと感じている。それと同時に、EHDという分野が、伝熱の中では、まだ特殊な分野であることも共同研究をやり易くするように働いたと思われる。

二つめは、産業界の関与するプロジェクトは、国家プロジェクトと言えども進行速度がとても速いことである。現在まで9年分の凝縮伝熱促進の基礎研究の蓄えを、僅か3年で全部出し切ってしまう、基礎研究を急いで下さいと言われている現状であり、少し基礎研究も手伝って下さいとお願いしている始末である。特に張り切って開発研究が進められた経緯はあるが、それでも、基礎研究の進み方の遅さと、開発研究の進み方の速さの違いを思い知らされている。今回のプロジェクトのように研究開発スケジュールが決まっている場合には、調整せざるをえないから良いが、役割分担だけ決まっていてスケジュールが前もって決まっていなかった場合には、このペースの違いが、共同研究の進展の大きな障害になるのではないかと心配である。研究開発において、使われる時間の大部分は基礎研究、実験装置の占有面積の大部分は開発研究が占めるように感じられて仕方がない。

三つめは、研究開発の推進力として、研究対象としている現象が、どの程度興味深く、また、不可思議であるか、発展性があるか、などの現象のもつ魅力も大事ではないのかと思う。おそらく企業の方からは、そんな心情的な要因は殆どないと言われてしまうであろうが、基礎研究においては、特に、メカニズムの解明に苦労したとしても、うまく解明できたときに、魅力的な現象だと思わせてくれれば、研究者の心意気も違ってくるのではなかろうか。

4. おわりに

本稿では、産官学共同研究の一例として、EHD熱交換器の研究開発について、簡単に、その内容、特徴などをご紹介した。エネルギーの分野で、実際に、産官学共同研究に携わることができているとは、大変貴重な経験をさせていただいていると思われ、国立研究所にとっても、このような研究の進め方は有難い研究方法なのではと感じている。こういう機会を与えて下さった方々に心より感謝致したいし、また、是非とも、成功させたいと思い、仲間と共に、精

いっぱい研究を進めているのが現状である。今後とも、皆様の御助言、ご支援をどうぞ宜しくお願い致します。

[1]. 山下勝也ほか5名、第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集 B114, p.170, 1987.

1・開発の背景

裏日本の豪雪地帯では、冬期積雪が2 mを越す事も希ではないが、単位面積当たりの融雪エネルギーを夏期の太陽エネルギーと比較すると、わずか10%にも満たない。何らかの方法で、夏のエネルギーを蓄熱し、冬期の暖房・融雪に利用する事ができれば、さらに加えて、冬期の冷熱も次の夏に活用できるようになれば豊かな自然の恵みにより、裏日本の生活は、一変するであろう。このような大容量・低温度差・長期蓄熱法として注目を集めているのが地下帯水層蓄熱であり、太陽熱も雪の冷熱もその利用価値が格段に高められる。

2・システムの構成

地下帯水層蓄熱法は、日本国内ではまだ実験段階にあり、実験場も山形大学のソーラ・アクイファを含めて6ヵ所を数えるにすぎない。山形大学ソーラ・アクイファは、そのルーツをたどると、今から16年前、「散水消雪道路の地下水確保の研究」にさかのぼる。当時、米沢市が散水消雪道路の建設を進めたところ、冬期に一般家庭の井戸水が枯れ、大騒ぎとなった。その対応策として市は、山形大学工学部に上記研究を委託したという経緯である。8年前、日本機械学会RC-SC47「低温度差エネルギー有効利用研究分科会」からの研究費支援を機会に実験場を工学部キャンパス内に移し、市、県、企業、文部省科研費の研究助成を得て逐次設備を補強し、今日に至っている。現在のシステムは図-1に示す様に、200mの温水井と50mの冷水井の間を、水熱源ヒートポンプ、床冷、暖房設備、河川パヨネット熱交換器、融雪道路を兼ねたソーラコレクター、融雪屋根を兼ねたソーラコレクター、都市ゴミ焼却場を模擬した廃タイヤボイラーを接続している。これら熱利用機器は、夏、冬兼用であり、期間中は、連続運転を原則としている。

夏には、西井戸から冷水を汲み上げ、ヒートポンプ、河川パヨネット熱交換器、融雪道路を兼ねたソーラコレクター、融雪屋根を兼ねたソーラコレクター、都市ゴミ焼却場を模擬した廃タイヤボイラーの順に通水し、冷房を兼ねながら集熱し、温水を200m 井戸に注入する。なお、建物の冷房は、エンジン、ヒートポンプ、電動ヒートポンプを介して、行っている。冬には、200m 井戸より、蓄熱温水を汲み上げ都市ゴミ焼却場を模擬した

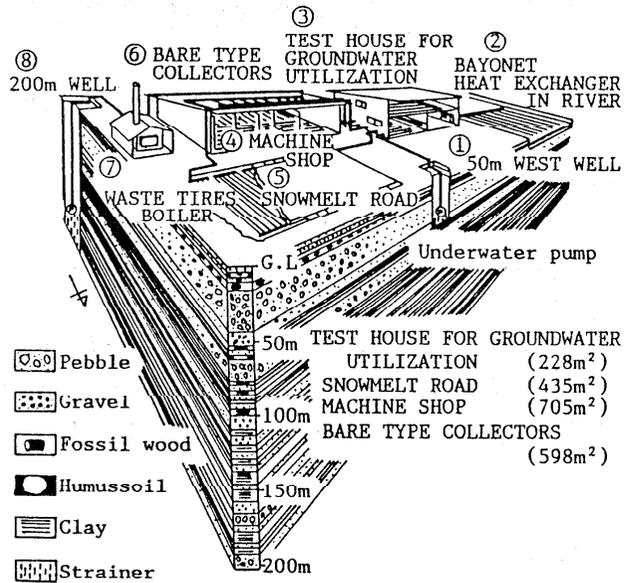


Fig.1 Experimental site

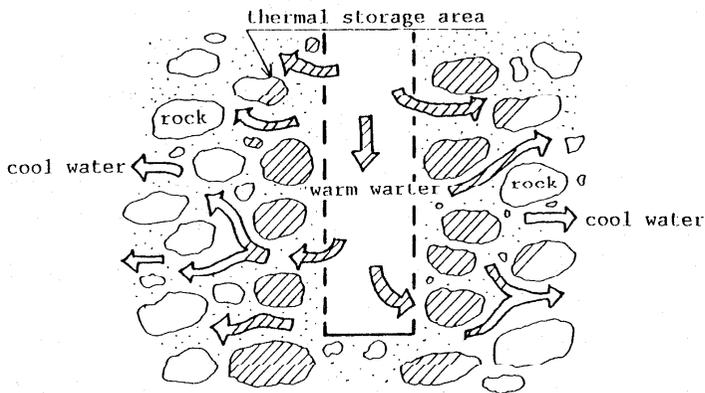


Fig.2 Thermal storage in aquifer

廃タイヤボイラー、ヒートポンプ、融雪道路を兼ねたソーラコレクター、融雪屋根を兼ねたソーラコレクター、河川バヨネット熱交換器、の順に通水して暖房。融雪に利用すると同時に、極力温度を下げて、西井戸に注入し、次シーズンの冷房熱源を確保する。なお建物の暖房は、ヒートポンプを介して床暖房方式で行なっている。

本システムのコレクターは表-1に示すように、温熱・冷熱 複合利用である点が一つの特長である。

表-1 各種 複合利用コレクター

コレクター	夏期	冬期
a 河川用バヨネット型熱交換器	温熱集熱	冷熱集熱
b 建物の床暖房設備	床冷房 (温熱集熱)	床暖房 (冷熱集熱)
c 無雪道路	温熱集熱	道路融雪 (冷熱集熱)
d 露出型コレクター	温熱集熱 (弱い冷房)	屋根融雪 (冷熱集熱)

3・システム要素

3-1 蓄熱井戸と蓄熱性能

帯水層による蓄熱機構は、図-2 に示すように、注入された温水が、砂礫の空隙をゆっくり流れ、温水と砂礫との熱のやりとりで、温水の熱エネルギーが砂礫に移り、水自体は冷やされて遠方に流れ去る。逆に、冬期、井戸から水を汲み上げると、周囲から自然水が押し寄せ、暖かい砂礫層を通過する段階で受熱し、温水が得られるという機構である。帯水層蓄熱法の特長を列挙すると、

- a) 容量が1テラ ジェル 以上と極めて大きい。
- b) 他の蓄熱方式に較べて安価である。
- c) 盆地であれば何処でも適用できる。適用地域が広い。
- d) クローズドシステムの採用により、地下水の水質保全に役立つ。

こと等が挙げられる。

山形大学 ソーラ アクイファによる過去5サイクルの蓄熱実験を表-2 に示す。注入熱量に対する回収熱量の比で表した熱回収率は、初年度の23% から、5サイクル目の59% まで向上した。表から明らかなように、地下帯水層蓄熱法では、

- 1) 注入量が多いほど、
 - 2) 温度レベルが低いほど、
 - 3) サイクルを繰り返すほど、
- 熱回収率は、向上する。

Table.2 Experimental results of thermal storage utilizing aquifer

Cycle number		1st (1982-1983)	2nd (1983-1984)	3rd (1984-1985)		4th (1985-1986)	5th (1986-1987)
Charge	Amount [m ³]	7,600	8,000	16,800		30,300	30,200
	Mean temperature	25.0 °C	34.7 °C	32.6 °C		27.4 °C	27.2 °C
	Energy [GJ]	260 (1)	615 (2.4)	1,100 (4.2)		1,300 (5)	1,280 (4.9)
Recovery	Amount [m ³]	7,600 (1)	8,000 (1.05)	16,800 (2.21)	22,800 (3)	30,300 (3.99)	30,200 (3.97)
	Mean temperature	18.9 °C	21.5 °C	23.1°C	22.4°C	22.5 °C	23.0 °C
	Energy [GJ]	61 (1)	172 (2.8)	428 (7)	505 (8.27)	682 (11.18)	750 (12.59)
Recovery factor [%]		23 (1)	28 (1.22)	39 (1.70)	46 (2)	52 (2.26)	59 (2.6)

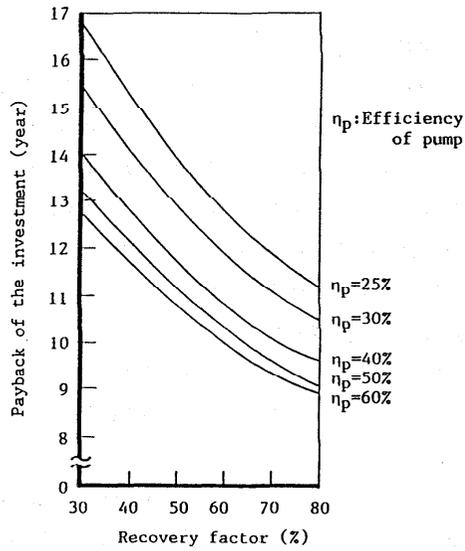


Fig.3 Payback of the investment

3-2 各種ソーラ コレクタ

a 河川用バヨネット型熱交換器

地下水層蓄熱利用にとっては低温度差大容量の熱エネルギーの確保が最重要課題となっており、河川を持つ低密度大容量の熱エネルギーはきわめて魅力的である。本研究室では、河川水を持つ低密度大容量の熱エネルギー回収を目指してビニールホースを用いたバヨネット型熱交換器を試作し、集熱実験を行なった結果、以下のような結論を得ている。

1. バヨネット型の採用により、河川のゴミがまとわりつく問題は解決された。
2. 集熱能力は天候にほとんど左右されず、かつイニシャルコストが200 円/mと安い。
3. 特に冷熱集熱に向いており、出口温度5 °Cで冷熱集熱能力 400W/m²を発揮する。
たとえば直径20mm、長さ50m のビニールホースでは、一本当たり1.3kW の能力になる

b 建物の床暖房設備

床暖房設備を冬の暖房、夏の床冷房に活用するとすれば、視点をかえれば、床暖房設備は、冬期の冷熱集熱器、夏期の温熱集熱器とみなす事が出来、一種の顕熱ソーラコレクターである。山形大学工学部の機械工場700 m²を床暖房設備に改修し、実測したところ、以下のような結果が得られた。

1. 安価なビニールホース伝熱管とワイヤーチップ・コンクリート複合材の使用により、施工費を4900 円/m² まで低減することが出来た。
2. 連続通水法によれば、床下2mまでの土壌蓄熱効果と相俟って、十分な冷、暖房効果が得られる。
3. シーズン平均すると、出口水温20°Cに対して夏期温熱集熱能力、冬期冷熱集熱能力はそれぞれ30及び40W /m² である。

c 無雪道路

東北・北陸地方の豪雪地帯に於いては、冬期の交通網確保のため、機械除雪・ロードヒーティング融雪・地下水散水消雪等が実施されている。この中で、地下水散水消雪は、コスト・融雪能力両面に優れており市街地主要道路に止まらず、一般家庭にまで急速に普及した。しかし、この方式は大量に地下水を汲み上げるうえに、散水した後の地下水は、汚れがひどく、再利用が困難なため、測溝を経て河川に放流される。そのために、地下水位の異常低下から派生する地盤沈下問題等様々な社会問題を引き起こしている。

地下水消雪法は、水そのものよりも、水の熱エネルギーを利用する方法である。そこで、地下水の持つ熱エネルギーのみを利用するためには、クローズドシステムが考えられ

、この方法により使用済みの地下水をそのまま地下に戻すことができ、散水方式の弊害を防止する事が可能である。

本方式は、道路の舗装板直下に櫛目状に伝熱管を埋設し、それに地下水を連続通水して、コンクリート舗装板・道路下の土壌に伝熱蓄熱しておき、降雪時に伝熱管と蓄熱領域からの放熱の相乗効果により、強度と融雪能力を維持するものである。国道クラスの車道を対象とした5年間の野外実験結果を整理すると

1. 降雪のない時間に伝熱管からコンクリート板・土壌への熱伝導により、道路表面下約2 mまで蓄熱される。降雪時には、伝熱管からの放熱に加え、蓄熱領域から熱の供給が有り、かぶり20 cmのコンクリートであっても13°C、200 cc/(min・m²)の地下水により200 W/m²の融雪能力を発揮する。
2. 夏期は出口温度20°C 台のソーラーコレクターとして連続運転すると、熱出力は一日平均、約100 W/m²が得られ、帯水層蓄熱法の熱源として活用出来る。

d 融雪器を兼ねた露出型コレクター

裏日本でも利用価値の高いコレクターの開発を目指し、プラスチック（ポリ酢酸ビニル及びエチレン、プロピレン、デュエン、モノマー共重合体）製、チューブ型コレクターを夏は温水器、冬は融雪屋根として利用することを考え、実規模野外実験を行なった結果

1. 高温給湯用としては不利であるが、45°C以下で風呂水あるいは洗濯用水として十分活用する事が出来る。
2. 出口水温が大気温度以下の集熱に対しては、日射のみならず、空気及び降雨の顕熱まで熱源として活用する事ができる。
3. 13°Cの地下水を流すだけで、融雪能力は、300W/m²に達する。これは、新雪密度を0.05 g/ccとすると、155 cm/dayの降雪強度を始末する熱出力に相当する。夏期のエネルギーを地下蓄熱して置き、冬期活用することにより融雪能力は格段に向上する。
4. システムの経済性

山形大学 ソーラークイファの一年を通した成績係数 = (冷房熱 + 暖房熱 + 融雪) / (投入電力エネルギー) は、10.1と優れたものである。循環ポンプの性能改善、容量の適正化、システムの自動化を図る事により、30台の数値が得られる見通しである。また、本システムを従来の冷、暖房・除雪システムに対比して簡単な経済計算を行なってみると、図-3に示すように、本システム（熱回収率60%、ポンプ効率60%）は、約10年でそのイニシャルコストを回収する事が可能である。エネルギー単価の上昇に伴い、回収年限は、大幅に低下するものと考えられ、省エネルギー技術として将来性に富んでいる。

5. 問題点、解決課題のまとめ

地下帯水層蓄熱利用法に残された問題点

A. 蓄熱に関して

- 1) 簡便で正確な地層探査法の開発。地層が判明しない限り正確なシミュレーションは不可能。
- 2) ボーリング費用の低減。
- 3) 候補地・地下図の整理。
- 4) 許認可制、専有権等法的整備。

B. 複合利用コレクター

a 河川からの集熱

- 1) バヨネット熱交換器専用マンホールドの準備等による人件費の低減。
- 2) 流雪溝との併用。
- 3) 農業用水確保及び防災を優先するあまりに、河川水の熱利用は極めて難しい状態にある。法的整備が待たれる。

b 建物からの集熱

- 1) 建物のベースロードとピークロードに対応した熱機器の使い分け。
- 2) ヒートポンプとの接続。蓄熱微温水を熱源とした小型、高性能ヒートポンプの開発と、その経済性の検討。
- 3) 低ヘッド高効率小型ラインポンプの導入。

c 道路からの集熱

- 1) 道路構造と熱特性に関する、より厳密な研究。
- 2) コスト低減を目指したコンクリート複合材の研究。
- 3) 低ヘッド高効率小型ラインポンプの導入。

d 屋根からの集熱

- 1) 専用マンホールドの準備など工事費の削減。
- 2) パイプ状コレクターの普及・コストダウン。
- 3) 低ヘッド高効率小型ラインポンプの導入。

e 農業、特に施設園芸との接続

6. おわりに

6-1 地下帯水層蓄熱利用の発展

豪雪地帯では、冬期は屋根雪、交通網の雪対策に追われるものの、夏期の六月から十月には、有り余る程の太陽熱に恵まれるといった地域の特性を考えたとき、雪国の将来は、この自然エネルギーをいかに使いこなすかに懸かっているといっても過言ではない。自

然エネルギー利用システム、すなわち、ソーラーシステムであるが、雪国のそれは、温熱用の単能ではなく、冬は融雪器の働きもする、温熱、冷熱両用器でなければならない。

夏の温熱利用と同時に、冬期融雪に伴う冷熱の集熱を兼るとなると、夏の熱エネルギーと冬の熱エネルギーを半年遅らせて使用する地下帯水層蓄熱利用が最も望ましい。長期蓄熱となれば、その熱回収率を上げる目的から、個人用ソーラーシステムではなく、集合システム、地域ソーラーシステムと、規模の拡大は、必須となる。また、地域冷暖房であるならば、地域にかならず存在する都市ゴミ焼却所も、システムの熱源に組み込む事により、暖房、融雪効果は、著しく向上する。

以上のように、豪雪地帯の克雪システムは、克雪だけに捉われることなく、都市機能と有機的に結合、利用することにより、はじめてシステム全体の利用率を向上させる事ができ、経済的にも成り立ってくる。

6-2 産、官、学共同研究について

共同研究の実施に当たり、様々なトラブルを繰り返した末に、辿りついた結論は以下の二つに要約される。

1. 大学では、学生の教育が第一であるから、卒業研究もしくは修士論文の研究課題に積極的に組み込む。更に共同研究期間もそれぞれの研究期間に合わせて一年以上とするこの二条件を満たすことの出来ない課題は、大学に馴染まない研究課題である。
2. 委託研究受け入れの際に問題になるのが文部省による費用の30% 天引きである。共同研究は大学の通常教育経費不足を補う役割を果たしている事実を考えれば、文部省は、逆に、奨励金を準備してその拡大を計って然るべきと考えるのであるが、現実は、正反対の有様である。文部省には共同研究受け入れ体制の早急なる整備を期待するものである。

最後に、先にも述べたように、本研究は、市、県、企業、大学、学協会、文部省と数え切れないほどの支援があって実施しているものであって、どなたに御礼を申し上げればよいものやら、日本中の方々に頭を下げたい気持ちである。本誌をお借りして心からの御礼を申しあげる次第である。

福迫尚一郎（北大工）

1. はじめに

編集委員会より、現在北海道を中心として盛んな研究活動を行っている『寒地環境工学研究会』（会長、関信弘 北海道大学名誉教授、北海道職業訓練短期大学校長）について記述することを求められた。ここでは、設立主旨、研究会の性格、研究部門、および活動状況について簡単に述べてみたい。

2. 設立主旨

北海道や東北地方など、いわゆる積雪寒冷地においては、冬期間の降・積雪および低温度のため種々の生活上ならびに工業上の障害が発生しており、多くの技術的分野でその早急な解決が求められている。たとえば、水道管や構造物の凍結破壊、河川の凍結や道路の凍結損傷、溶接あるいは塗装などの低温環境下において起こる施工上の問題、建築物、特に壁構造物内外の結露・凍結、凍上による破損、農業、畜産業、水産業（特に着氷災害など）における凍害問題、都市交通や電気・通信施設における凍結・積雪障害、などを上げることができる。また、積雪寒冷地における太陽・地熱などの有効利用（特にヒートポンプの熱源として利用する場合）には特別な解決せねばならない問題があり、さらに、廃棄物やバイオマスエネルギーの有効利用など多くの課題がある。

従来これらの問題に対しては、それぞれの分野の関係者が独立して問題の解明に努力して来ていたため、一貫性のある成果が得られることが少なかった。また、北海道内には関連する研究機関が存在するにもかかわらず、企業あるいは技術者は遭遇した問題について、資料や情報を得られず、特に学際的な立場からの適切な助言を得られないことが多かった。

このような問題を解決するために、産業界、官界、および学界に属するものが一堂に会し、問題の提示、情報の提供と問題解決のための指導助言を自由活達に行うことを目的として、本会は設立されたものである。官・学会よりの構成員は、熱工学の分野のみならず、電気工学、電子工学、土木工学、化学工学、および環境工学などの専門家よりなり、問題解決への指導助言の範囲は非常に広いものとなっている。

3. 研究会の性格および研究部門

本研究会の活動は研究指導および研究委託という形をとり、具体的には、内外の技術研究に関する情報の提供・解説、講演会、講習会、および見学会等を通して行われている。研究は専門領域により8つの部門に分かれており、日常はそれぞれが連絡を取りつつ独立

して活動を行っている。年1回、全会員が一堂に会し、研究成果を中心としてシンポジウムが行われている。

現在、官・学界の会員36名、産業界99社が参加しており、盛んな活動がなされている。各研究部門とその対象領域は以下の通りである。

(1) 上下水道凍害部門（主査：花岡裕教授） 上下水道に関する凍結災害防除などを対象としている。

(2) 風雪凍害部門（主査：坂本弘志教授） 交通および住宅などへの風雪対策を対象としている。

(3) 住宅関連凍害部門（主査：斉藤図教授） 住宅に関連する断熱材料、結露・凍結、融雪対策などを対象とする。

(4) 材料凍害部門（主査：田頭孝介教授） 低温環境下における材料強度、溶接凍害などを対象としている。

(5) 電気応用凍害部門（主査：山城迪教授） 送電線の着雪低温障害および積雪地における電波障害などを対象とする。

(6) 資源および廃棄物利用部門（主査：小林正義教授） 廃棄物およびバイオマスの有効利用などを対象としている。

(7) 自然エネルギー有効利用部門（主査：金山公夫教授） 寒冷地における太陽エネルギーや地熱エネルギーなどの有効利用を対象とする。

(8) 熱利用部門（主査：稲葉英男助教授） 積雪寒冷地における蓄冷・蓄熱の問題、各種エネルギーの有効利用を対象としている。

4. 活動状況

昨年度、各部門において行われた講演会、講習会、および見学会は総計28回にわたり、盛んな活動がなされていることがわかる。講演会は話題提供の形で行われることが多く、特に産業界の出席者から活発な質問がよせられている。また見学会は、産業界の方には接する機会が少ない、官・学界の研究設備に関するものも企画されている。

年1回の合同シンポジウムは、昨年度は1月16日北海道大学学術交流会館で行われた。発表論文数27件、参加者は産・官・学界より152名であった。なお、論文は『寒地環境工学合同シンポジウム講演論文集』として公表されている。

5. あとがき

以上、全国より延べ99社の参加のもとに、北海道を中心として研究活動が行われている、『寒地環境工学研究会』について述べた。このような産・官・学界にわたる共同研究は、各界の視点やニーズが異なるため、種々の問題が生ずることが多いが、現在まで順調に経過しているこの会が、かかる研究会の一つのモデルケースとなるべく、さらに発展することを希望したい。

産官学共同研究の今後の重要性

甲藤好郎（日大・理工）

1. はじめに

「産官学共同研究の今後の重要性」について書けとのご依頼である。この表題は仮題だから変更してもよいとのご指示だが、とにもかくにもご依頼を受けた当初、なぜ私のような者にこんなテーマの執筆をと不思議な思いが一瞬頭をかすめた。自分で言うのも気がひけるが、日本の工学分野でよくまあ暮らして来ることが出来たものだと時おり感じたりしている私である。

しかし、ふと考え直してみると私自身、幸か不幸かいくつかの特徴的な機関で、それぞれ相当の期間、研究の仕事をするという運命を担って来ている。大学では付置研究所（東大・理工学研究所：これは東大・航研の後身で、かつ東大・宇航研の前身）にも居たし、国立、私立の学部（東大・工学部、および日大・理工学部）の経験もある。また官庁の研究所（最初は総理府所属、後に科技厅の新設によりその所属になった航空宇宙技術研究所）にも居た。残念ながら企業とは無縁だが、それでも航技研時代の仕事の大半は企業と密接な関係があった。というのは、戦後禁止されていた航空研究の再開に際して新設されることになった航技研で、遷音速風洞、ジェットエンジン関係の試験設備、またロケットエンジンの試験設備など新しく大きな設備の計画と建設の仕事に関係したからである。

そして思い返してみると、それぞれの機関に現実にも身を置いて、周囲の他の機関の人々や仕事を見た場合、身を置いた場所ごとに随分違った見方になったものである。また一つの機関の内と外の両方を体験してみると、例えばわが国の大学の学科や教官の耳には、外部にある批判や見方が身にしみては、ほとんど伝わらないシステムになっているようにも見える。ともあれ、そんなことをいろいろ考えてみると、前記の表題について何か書く資格が、私にも少しはあるのかなという気持ちにならないでもない。

2. 産官学共同研究とは

そこで多少の意見くらいは書いてみようかとペンを取りあげてみたのだが、しかし少し困るのは「産官学共同研究」と言う言葉の持つ意味、内容、範囲が必ずしも明確でないことである。本誌の編集委員長は何も説明されずに原稿を依頼して来られたから、そんなことは自明と考えておられるのだろう。また最近ではマスコミにも時々登場する言葉である。だから今さら四の五の言うのは、へそ曲りと言われそうだが、本当にそうだろうか。

少なくとも私には気になることがいろいろある。まず第一は、同じ言葉で表される行為でめ

っても国によって性格が随分相違することである。元来、日本の社会は欧米にくらべて非常にソリッドな社会である。例えばアメリカの場合、大学のある教授が自分のいる大学よりアルゴンヌの国立研究所の方に魅力を感じたとしよう。そんな時、彼は試みにアルゴンヌで一年間仕事をしてみて、その結果、元の大学の方がやはり自分にとってよかったとなると再び前の大学に戻る事が出来る仕組みがある。しかし日本ではとてもそんなことは許されまい。また仮に許されたとしても、再び戻った職場では忠誠心を云々されて居たたまれなくなることだろう。

また、産、官、学はもともと互に目的も使命も性格も異なる社会組織である。もちろん最近では科学技術の非常な高度化と共に、それらの間の境界が薄れて来た面も少なくないが、それでもなお産、官、学が存在する状況下に、それらが固有の責任を忘れ、産官学、あるいは産学一緒に仕事をするだけのことをもって共同研究と言うのなら、関係者一同無責任のそしりをまぬかれまい。また「官」も「学」も社会に奉仕する責任を持つが、だからと言って、「官」、「学」をもつばら「産」の目的に従わせるような下請仕事をもって共同研究と言うのなら、これまた無定見というものである。

もともと日本の場合、少なくとも従来は、明治開国以来どうしても模倣的というか二番手戦略というか、社会全体が欧米の方に目を向けていた。実際、例えば国立研究所のプロジェクトなども多額のものは、外国に研究の前例がないと大蔵省は金を出さなかった。また企業も MIT を初め外国の大学には以前から多額の献金をしたりしていたが、国内の大学には冷たい面もあったと言えよう。一方、大学人の研究も例外を除けば二番手戦略的で、いわゆる重箱の隅をつつく形のものが多かったと言わざるを得まい。もちろんこれは日本の置かれた歴史と周囲環境から来る仕方のないものだったと言えるが、その当然の結果として産、官、学が、それぞれのあるべき姿で互に有機的な関係を樹立するという状態にまでは至らなかったのである。

3. 急に訪れた大きな転換期

ところが、そのわが国にとって、いささか唐突とも言える形で大きな転換期が目前に姿を現すようになった。その背景にあるものは、第一に科学技術の質的な変貌で、これは何と云っても量子力学ないし量子力学的知識の応用が広く多様な面で現実的なものになって来たことに大きく起因している。そしてそれは全く新しい技術分野を開きつつあると同時に、従来の技術分野をも新しい方向に力強く蘇生させているようである。当然、産業構造も大きく変化しつつあるわけである。また「重厚長大から軽薄短小へ」と言うマスコミ的表現が、皮相的に見えながら、その実、何かしら真実を感じさせるのも、上の流れから言って根拠のない事ではない。

さて次に第二は、そのようにして世界の科学技術が質的に新しく変貌する丁度その時期に、わが国の科学技術水準が世界的なレベルに接近してきた事である。そしてその事は、わが国が従来のような二番手戦略的の道から新しく創造的な道に軌道変更をして行かない限り、その将来が無いだけでなく、前述のように急速に変貌する新しい科学技術の創造的展開に対し責任の

分担が必要になる事をも意味している。それに、そうして世界の先頭に立ち人類の歴史を切り開いて行く立場に立つからには、日本の科学技術者ももはや単なる職人ではなく、文化的に深い精神構造を持つ人間であることが必要になるであろう。

最後に第三は、世界の各地を短くつなぐ航空、宇宙、情報、通信などの発達を主な原動力に最近生じている地球のわい小化、つまり国際化（あるいは世界統一化）の急速な波である。そしてそのために上述の第一、第二の問題が何乗にも倍化され、その対処に遅滞が許されぬような状況になっている。

4. これまでの日本の姿

言うまでもなく前節に述べたような大きな変換期に際会して、科学技術の急速な高度化の中で、研究の創造性、研究内容の質的向上の面から、わが国の産、官、学は否応なしに、これまでのあり方や相互関係、つまり旧態からの急速な転換を余儀なくされることになったわけである。しかし、前にも述べたように日本は非常にソリッドな社会であって、例えば人の交流などもきわめて流動性が少ない。よく言われる終身雇用、年功序列、学歴社会なども皆それにかかわりがある。その上、日本の文化は古来から、どの分野においても目に見えるものだけを尊ぶ風が顕著で、物事の基礎的な原理や、形而上学的なフィロソフィーにまで論理的に切込んで行くことはまず無かった。だから例えば宗教観、宇宙観などを見てもかなり幼稚貧弱で、ある著名な作家によると日本仏教は「親らん（1173-1262）」で止り、以後停滞したままになっていると言われる。そして悪いことに、この日本文化固有の特性は、わが国の社会において、「真の」基礎研究への熱意を生まず、また「真の」基礎研究に対する尊重心を希薄にする実用主義の風潮を強くはびこらせる風土でもあるのである。

もっとも世の中は上手くしたもので、今述べて来たようなソリッドで、また実用主義的な社会は、明治開国から今日までの日本の二番手戦略的な歩みの中では実に有効に働き、かつ無駄を排して、能率的に機能して来たと言える。少し無茶だが非常に簡単化して言うなら、国全体のスケールでは人々は欧米に追い付くことをもって国民的使命と考え、また企業、大学などは社会のなかに江戸時代の幕藩体制にも見まがうような縦割りの組織を構成しながら、それに所属する人々の組織への忠誠心を軸に、それぞれが能率的な形で欧米の後を追いかけた。そして、そのような状況下であるからには、画期的創造性に関するノーベル賞の受章者が数少ないことなどは当然として、しかし少なくとも既存技術の実用化、改良、生産などを主とする面では、現実に世界的規模で貿易摩擦を引起こすまでになったのである。

ある意味でこれは、明治以来の日本の国民的課題の達成と言えるかも知れない。もっとも振り返って見ると、ごく最近まで絶えず欧米は遠い遠方にあったのが、近頃ふと気が付くと彼に追い付き、ものによっては追越す状況にまでなっていたと言うのが真実で、夢ではないかと寝惚けまなこをこすっている風もなくはない。しかし、前節で述べたような変換期に日本がさしか

かっていることは否定出来ない事実であろう。

5. 日本に起こりつつある変容

さて、その日本が今の時点で経つつある状態は、あたかも垂直離着陸機（VTOL）が離陸垂直上昇飛行から水平飛行に移行しつつある時と同じようなもので、そのコントロールは大変に難しい。しかも航空機に比べて人間社会は非常に複雑で、かつ不確定なことも多い。従って、産も官も学も、また学会なども含めて各界に、将来の不透明性に基づく不安もあれば混乱もあろう。仮にそういうものが無いような組織があるとすれば、よほど時流に乗っているか、あるいは近視眼的な見通しの下に転換期を自覚していないのかも知れない。

とは言え一般的に言えば、いま日本においては、産官学ともに上述のような不安や混乱の中で、本能的に未来をかぎわけながら、二番手戦略ではない本当の創造活動の道へ軌道を修正すべく、それに適した新しい体制や考え方への転換をはかり始めている。そしてその中に含まれる大切な項目の一つとして挙げられるのが「産、官、学の協力問題」である。もちろん不幸にして、わが国の産、官、学は本来の意味での協力体制をこれまで経験して来てはおらず、つまり、大学は企業の出来るような研究をするのではなく、基礎的な面、また未来性の面で現実には価値ある研究をおこない、一方、企業は当面の利益ではなく長期的に大学の研究を評価するといった状態は、一部の例外を除いては未経験である。また、わが国に固有の体制や歴史などが立ちふさがり問題もある。だから、一朝にして、あるべき姿になることは不可能であり、産官学ともに旧態を多く残すのは当然だが、ただ大切なことは産、官、学協力の方向に前向きに進み始めていることである。

もちろん、わが国の大学と企業などの間に、これまで依託研究、その他で協力関係が全く無かった訳ではない。しかし前にも述べたようなソリッドな国柄で、だから例えば国立大学の場合なども、学問の中立性が特に強く云々され、また外部との間に予算上のきびしい鉄のカーテンが置かれるなど、ただただ厳しすぎた。これに対しイギリスを例にすれば、その大学は国家から大半の経費を受けて実質上、国立大学であるにもかかわらず、例えば学内の試作工場は暇な折は学外の仕事をこなして収入を得ることが許されたり、要するに柔軟性がある。わが国では私学でさえ、もしそういうことをやれば、学校らしからぬと税金や私学補助金の面で規制されそうである。

だが今や、その日本にもソフト化の暖かい風が徐々とながら吹き出し始めた。例えば、文部省は国立大学の中に企業からの寄付による講座を置く制度を作った。そして、それによって例えば東京大学の先端科学技術研究センターには、日本電気からの寄付による講座がまず新設され、その指導教官にはアメリカ人研究者が来日担当することになっている。また、国立の研究機関でも、産業界や大学との人的交流、また外国人研究者への門戸開放など、従来の常識を破る形の制度「研究促進法」が新しく成立した事は新聞などの報じるところである。またこのよ

うな交流に伴って生じる出向休職期間と退職金の問題、特許権の帰属問題、研究発表の制限問題、その他の細々した技術的問題もそれなりに処置され、また処理されて行くことであろう。そして要するに国立研究機関でも外部との共同研究が容易になりつつあることを意味している。

6. 主題の問題について

ここでいよいよ、そうした時代の流れを背景に「産官学の共同研究」の話に焦点を絞らねばならないが、もちろんこれは「産官学の協力」問題の一部である。そして後者の中心が長期的な戦略や大規模な技術開発事業までも含む広がりと深さを持つのに対し、前者の方はどちらかと言うと短期的な戦術にかかわる問題と言うことが出来る。ただもちろん、一口にそうは言っても、そこに含まれる視野の広がり的大小で、「産官学の共同研究」にもいろいろのグレードのものがあり得るが、一般的には比較的短い期間内の開発、従って換言すれば、企業的問題の解決、あるいは企業的な新しい展開を目指すものが多いと言ってよいであろう。

そして、そう言う性格から見ることにすれば、いわゆる産官学の共同研究は別に目新しいことではなく、わが国でも従来から多く行われて来た。また直接の共同研究ではないにしても、例えばわが国の大学人のなかには、これまで産業界で解くことが出来ずに放置されている問題を取り上げ、自分の研究テーマにして来たと言う人もいる。そして、直接、間接いずれの形にせよ産官学が互に関連を持ち合うこと、それ自体は決して悪いことではないと思う。ただだからと言って、互に関係を持ち合えば、また共同で研究を行えば、それでいいと言うものでは決してないことに思いをはせる必要がある。

呉越同舟、頭数だけふやしても決して質は向上しない。大事なことはやはり、これまでも述べてきたごとく、産官学がそれぞれ本来の性格、使命、特色をはっきり保持した形で協力しあい、それによってこそ生まれ得る筈の非常に優れた成果をものにするのである。そして、このことは過去、現在、未来すべてを通じて適用出来る原理であって、事実、これまでわが国で行われて来た産官学の共同研究でも、その優れたものは皆このタイプであり、質的に高度かつ波及効果も大きなものであった。少し具体的に言えば、例えば大学ないしその付置研究所などで基礎的な新しい原理や考え方を研究検証し、それを基礎に技術製品の開発が展開されるとか、あるいはまた複雑なプロセスに新しく広範な理論が構成され、その理論を基礎に企業での技術的開発が行われると言った類である。そして例えば多くの工業分野の中で、わが国の技術輸出が輸入を超えて来たのは鉄鋼の分野だけであるが、そこでは恐らく上述のようなタイプの研究活動が大きく寄与している筈である。また一方、従来、日本の企業が外国の大学などに多額の献金をしながら、国内の大学にそれほどの関心を持たなかった事実についても、企業の安易かつ未成熟な行動による所も多いが、なお上述のような研究活動の方も全般的には国内で未成熟だったこともあざかっている。

7. 注意すべき事柄の中から

ともあれ、以上のようなことで産官学共同研究は今後ますます重要になる訳だが、ただ注意すべきは、「月並みな」産官学共同研究などはむしろ弊害があり、「正当な姿の」産官学共同研究こそが重要になるということである。そして後者が十分に充実して来れば、前に述べた所のスケールの大きな産官学の協力問題も、ある意味で自然に実質的解決が与えられることになるのかも知れない。

それにしても今後、異なる組織間の協力に関連して注意すべき事柄も少なくない。実は前に4節で、わが国の社会に存在して来たのは江戸時代の幕藩体制にも見まがうような縦割りの組織というようなことを述べたが、この種の性格の組織はとかく自己中心的で、他の組織との協力や共存には興味を持たないという本質がある。伝え聞くところによると、わが国の建設関係の企業などの中には入札に際し談合をやる所もあるそうだが、共存のためとは言えこれも結局は自己中心のものであろう。なお考えてみると、東洋人は「悟り」にもみられるように、各自が小宇宙に閉じこもり勝ちで、だから隣人に大変親切でも、キリストのような意味での愛を隣人に抱くまでには至らない。

そして、もちろんこれだけが理由でも無いだろうが、上述のような性格の組織が、もしそのまま世界に乗り出し、自由競争だけの旗印のもとに商売に熱中すれば貿易摩擦も必然的に起こり得るというものではなかろうか。少なくとも企業の経営者は今後、値段を最低に決めて世界中のシェアを席卷してしまうようなやり方ではなく、むしろよい製品はそれにふさわしい高い値段で適当に売りながら、他国との共存をはかるようにして賣りたいものである。また通産省なども従来の方針をよほどよく考え直して行く必要があると思われるが、世界的に激しい競争場裡、難しい経済的問題が沢山あることを承知の上で、このことを敢えて言うのも、それが未来のあるべき姿だからである。

とまれ話が少し横道にそれたようである。従って産官学共同研究という本筋の話に戻らねばならないが、いま問題にしているのは、当面われわれは、前述のような「自己中心的性格」の強い縦割り組織、しかも産、官、学という異なる組織の間で正当な姿の共同研究の育成を推進して行かねばならないということである。そしてこれは考えようによって、簡単には行かない可能性がないでもないことを一応認識しておく必要がある。なぜなら、例えば5節の終りで述べたような政策がいかに進められても、もし各組織の体制が、それにまた各組織に属する人々の意識が、異質な外部との協力協調を尊ぶものに自己改革されるのでなければ、すべては昔のままと言うことになりかねないからである。思うにオーケストラのように、多くの異質な楽器を集め、しかも互いの独自性を保ちながら、全体として一つの美しいハーモニーを奏でさせるといった思想は、もともと単一民族、農耕民族の身内の協力、共同作業とはまるで異質なものである。

8. むすび

筆者に与えられた主題について、なお考えるべき事柄が他にもいくつかあろう。特に気になるのは外国にも門戸を開いた形の産官学共同研究などである。しかし、特に緊急かつ重要なものとして、ここでは国内問題だけを考えることで任を果すことにしたい。そして筆者の願いは、筆者らの後を継ぐ若い研究者の方々の努力によって今後、産官学共同研究は言うに及ばず、さらに国内の産、官、学それぞれの研究も真に進んだ内容、性格のものになって行くことであり、それに対し本稿が僅かでもお役に立つことがあれば望外の幸せである。

なお本文では共同研究の正当な姿として産、官、学のそれぞれの特色の保持を強調している。そしてその真意は本文に述べた通りであるが、ただ不注意な誤解を避けるため最後に一文を添えておきたい。古来、日本では進んだ知識はすべて、最初は外国から渡来した歴史を持ち、そのためか、いわゆる学問に対して、現実より上立つ神のような純粋さを期待する国民的傾向がある。科学や工学は、日頃われわれを取り巻いている自然と具体的に関係する一般的知識だが、それでも筆者の体験では、例えば学生（東京大学）に試験の時、具体的な値や数字を含む問題を出すと評判必ずしも芳しからず、一般的証明問題を出すと学問に触れる思いで満足すると言った風潮がないではない。また科学や工学の教科書の書き方などでも、西欧の書物とわが国のとで、真の意味での具体性と一般性のニュアンスに何となく差異があるのを感じたりする人も少なくない筈である。そしてこうした精神的傾向もまた、これまでわが国の大学の性格形成に一役買っていたようにも思われるだけに、この辺の意識変革も今なお日本では必要であるのかも知れない。つまり筆者は、従来の大学のあり方などをそのまま擁護する形で産、官、学の特色保持を言っているものではないのである。

1. まえがき

今から10数年前、東京工業大学と当社で濃度差エネルギーシステムに関して共同研究を行いました。当時のことを思い出しながら本稿を書いて見ます。この研究は当時同大学生産機械工学科の一色尚次教授（現在、日本大学教授）の発案された濃度差エネルギー機関に関するもので、水溶液のもつ濃度のエネルギーを機械動力に変換するという非常に斬新なアイデアがその中心になっておりました。

目標を1KWの濃度差発電システムの実証に定めて約3年間研究を続けてその目的を達成できましたが、研究がスタートしてから成果を得るまでに、何度かきついハードルを越えたように思います。以下にての内容を示します。

2. 研究の着手

当時私は設計部門から研究部門に転籍になり、高速炉用のナトリウム加熱蒸気発生器の試験や、高性能沸騰伝熱管の研究を行っていました。その一方で学会の委員会に出席したり、大学の研究室の輪講に出させていただきながら新規のテーマを探してしました。そのバックグラウンドにはオイルショックによる省エネルギーや新エネルギーに関する機器の開発の必要性が会社側にあったからです。

一色先生の研究室の論講に出ていたある日、先生に呼ばれて当時先生が構想を持たれていた濃度差エネルギーシステムの説明をされ、その研究をやってみないかと言われました。先生はその内容を多面的な角度から説明されましたが、当方が未熟なため全体を理解するのにやや時間がかりました。しかしこのシステムを研究開発することはエネルギー問題を解決する一つの手段になり得ること、公害問題にも対応が可能なクリーンなシステムであることを感じました。研究としてはとりあえず作動媒体になる水溶液の性能とコストを調べることから始めました。

研究が始まったとき、このことは会社の上層部にまでは伝わっていませんでした。少し調査が進んで目標が見え始めたころ（実際は当方がこのシステムを理解できたころと言った方が良いと思いますが）、先生に会社のトップに会っていただき共同研究の着手が企業側としてオーソライズされました。企業側にとってはこのことは大変大切なことです。ここに一つの高いハードルがあります。これを十分にクリアしないとその後の研究に支障があります。当時私は管理職ではありませんでしたから、特にトップとの合意を正式にやっ

ておく必要がありました。先生はそのことを良くわかって下さり、上述のように時間を見て会社のトップに会うことを先生の方から申し入れて下さり、(本来なら企業側からお願いするものだと思いますが)、これが大変タイミングが良かったのです。

この合意で、両者の目標、目的がはっきりし、私としてはその後は目標に向かってひたすら邁進すれば良かったのです。

3. 研究の方針

研究のやり方は最終目標である1KWの発電装置を先生(大学)が発注され当社がこれを製作・納入し共同で試験・評価をすることで合意されていました。但し装置の発注は公になされるわけですから当社に落札するとは限りません。この辺に共同研究のむっかしさがあります。

本来、試験装置は共同研究を実施する企業が製作する必要はないわけですが、この研究のようにハードの開発が主となるものは、図面には示しきれない仕様のあることや、仕様変更が多いこと、試験が進むにしたがって改造が多発することなどを考え併せると、共同研究者が製作した方が効率、費用の面で有利と言えます。

幸い装置の主要機器である蒸気発生器に当時当社が開発をし、私が研究担当をしていた高性能沸騰伝熱管を採用することになり、これを使うことで当社が製造業者に指定され装置を作りました。

最近では「民間企業等との共同研究制度」が創設され、民間企業等の研究者が国立大学の研究者と共同で研究を行うとき、両者が研究者、研究設備、研究費を提供し合い研究を遂行することが制度化され、国立大学について大変やり易くなったと聞いています。

研究方針で大切なものは言わゆる人・物・金です。先生は助手の方や担当の学生さんを決めて下さり、また装置を据付ける建屋と製作費用を用意されました。企業サイドもこれに対応して最終装置に到るまでの予備試験装置や基礎試験装置、または改造や補修のための費用を用意することを基本にし、人・物・金を決めました。特に人は私を大学の研究生にいただきましたので、大学側と密なコンタクトをとれるようになりました。私の場合は共同研究を行う研究室が私の出身のところでしたので、知人も多くややもすれば安易に出入りが出来ることもあり、立場を明確にするため、会社で正式に決裁をとって研究生になりました。これは企業側にとっては作業の安全を含めた労働基準法にもかかわる問題できちんとしておく必要があります。

以上のように共同研究のやり方をオーソライズしておけば、あとはわき目もふらずに研究に邁進できます。このような環境を出来るだけ早く作ることが大切であると思われます。

4. 研究の遂行

研究は3年余続き、試験が終了しても結果の評価や論文のまとめ等を含めると長きにわ

たり共同の作業が続きいくつものハードルを越えました。当時のノートや日誌を見るとその内容の詳細が思い起されます。これを全て記述することはできませんが特に教訓や問題点として印象に残っているものを項目に分けて書いてみたいと思います。

4.1 研究の方法

最終のターゲットは決っていましたが、そこに到る方法には種々の道があります。共同研究には両者の立場の関係がいろいろありますが、私どもの場合は先生のアイデアを実証することが目的でしたから先生指導型のものになっていました。先生は1KWの装置に到るまでに小型の装置を作ってスケールアップされることを提案され、そのスピードアップを強調されました。企業としてこれは大変有難いことで、早急に先の見きわめができるメリットがあります。しかし、私は研究者として装置を設計するのに必要な水溶液中への蒸気吸収伝熱の基礎実験を早急に行いたいと考えていました。ここにギャップがありました。通常であれば大学側が基礎研究をベースにし、企業側が実機を想定したスケールアップの研究を望むところですが、この共同研究の場合はまったく逆でした。しかしこのギャップが良かったのです。両者が歩みよって、というより先生が当方の未熟さに目を閉じて容認下さり、小型の装置兼伝熱試験装置になり得る小型の濃度差エネルギー機関なるものを製作し実験しました。その結果、濃度差エネルギー機関の可能性が実証され併せて伝熱のデータも得られ1KWの発電装置の製作に目度がたちました。

研究方法ではいろいろ議論がありましたが、両者のコミュニケーションが密に行われたため、問題点をいつも共通の場で認識することができトラブルの対応も早く、全体として順調な研究進捗になったと思います。

4.2 他の企業との関連

研究が進むにつれ、また成果が公表されると他の企業の方から共同研究に加わりたいとの申し入れがありました。これはシステムのユーザとなる企業で大変熱心でした。この企業と当社とは取引のある関係だったこともあり、三者の研究会が発足しました。この頃は芝浦工大の鴨志田先生も研究に参加されていたので実際は四者の研究会となりました。この研究会が全体の研究を加速しました。進捗会議が定期的にもたれましたし、大学、ユーザ、メーカーと異なる分野の人の集りが研究・開発を活発にしました。システムの研究が進んだのもこの頃です。

ここで問題となったのが共同研究の契約のことでした。先生と当社とは装置の発注者と受注者ということ以外は特に契約書を取かわしてはおりませんでした。但し特許については共同出願することで合意しており、実際に何件かの特許を出しました。ユーザの企業と当社とは結果として契約をかわしませんでした。先生も含めて共同で特許を出しました。特許を共同で出すことは紳士協定のようなものでした。今なら前述の「共同研究制度」の中に共同発明が生じたときには国立大学と民間企業が共同

出願し、特許が共同所有になることが原則とされておりますので、問題はなかったと思いますが、当時は、他に手はあったと思いますが、先生の御意向もあり紳士協定で研究が進んでおりました。

4.3 人の問題

共同研究を通じて先生と私とは多くの時間を打合せや論議に費しました。装置の製作、データの解析、トラブル処理、特許の出願など、常に当方の状況を報告しましたし、先生も考えのすべてを私にぶつけられました。先生はいつも当方の未熟さを容認され、共同研究であると同時に教育の一貫としてこの研究に望まれていたのだと思います。それから先生は研究のスピードアップを決して督促されませんでした。装置の設計や実験が遅れても楽観的に対応して下さいました。しかしこちらが相談に行くときは時と場所を選ばずいつでも受入れていただきました。

研究を通じてうまく行かなくなると私の方が悲観的になることが多かったように思います。その時は先生が楽観的に考えて下さり大変助かりました。共同研究を実施するときは、指導していただく先生が楽観的で、指導を受ける方が悲観的なコンビネーションが良いように思いました。両方が同じタイプだとうまく行っている時は良いのですが、トラブルのときにいわゆる落込みが大きくなる恐れがあるように思えました。

4.4 成果の公表

研究の成果は論文や特許あるいは、新聞や雑誌に公表されました。前述のように研究は紳士協定で進んでおりましたから、論文の発表に制限はありませんでしたし、対外的な発表も先生におまかせしておりました。しかし、対外発表の時は必ず研究会の席で先生が発表の内容とタイミングのお話をされ許可をお取りになっていました。成果の取扱いは共同研究にとって非常に大切な一面です。企業側としては特許の優先的实施を望むでしょうし、大学側は公の立場ということで必ずしもそうではないでしょう。今はこれに関しても企業の一定期間の優先的实施が可能になっているようなので問題は少なくなったと思われます。

1 kWの濃度差エネルギー機関が無事に運転され、成果が報告書にまとめられて研究が完了しました。その内容の大半は論文などで公表しましたが、研究会の申し合せで公表しないデータも一部ありました。

5. あとがき

以上、共同研究を行った当時を思い出しながら書いてみましたが、研究内容の具体的なことは数多くあり書き切れませんでしたので、出来るだけ標題に示した成功した秘決に注力してみました。

共同研究を成功させるにはいろいろな要素がありますが、両者が同じ土俵で研究を進めることが望ましく、

①共同研究の当事者が研究内容について十分に合意すること。

②人・物・金を両者から出し合うこと。

③成果は共同の財産であることを認識すること。

等が重要と思われます。特に③の成果については研究自体の成果だけでなく、これにたづさわった企業側の人が受けた教育が大きな成果であることを認識すべきです。私自身はこの共同研究に出会い一色先生の寛容な御指導により技術的にも人間的にも大いに進化し、ここで得られたことがその後の仕事に大いに役立っており、大変感謝しております。

産学共同研究が民間企業間の共同研究と大きく異なるのは教育の側面があることだと思います。共同研究は同じ土俵で研究を進めることが望ましいと書きましたが、企業としては共同研究を通じて大学側の御指導により担当した人の創造性が開発され、視野が拡大されるなど、人材が育成されることも期待します。企業において創造性のある研究・開発を促進させるためには人材の育成が不可欠で、これを最優先することが有効な成果を得ることになります。研究・開発の成果は、アウトプットの質と、これに携さわった個人あるいはグループのレベルアップの度合いとで評価されるべきで、企業側としてはこの点を踏まえて産学共同研究に期待するところが大きいのです。

以上、産学共同研究を行った経験を書きましたが、最後にこれは企業側の担当者から見た一方的な記述であることをお断りしておきます。

産学共同研究の問題点

— 化学プラントのプロセス技術開発を例として —

名古屋大学工学部 新井 紀男

本号の特集記事を担当・企画した編集委員の1人として私に与えられたテーマは、上記のようなことであると理解している。問題点というからには、化学プラントのプロセス技術開発では産学共同がなかなか難しいと、他の分野の方々からは受け取られているようである。このことを、化学工学系学科が石油化学工業の発展にともない設立された歴史的経緯、約5年前にスタートした文部省の民間等との共同研究概要、昨年(2007年)の第25回全国大学工業化学・化学工学合同研究会でのアンケート調査報告、さらには企業サイド現場からの問題点提起等々の基礎データに、私自身の独断と偏見を交えて考えてみることにより、どのような問題点があるかの一端を浮き彫りにしてみたい。

問題点の分析をどうしても私自身が現在まで所属してきた周辺、すなわち化学工学関連、名古屋大学工学部に視点を限定して行うための外れになることも多々あることを恐れるが、あえて筆を進めることをまずは御容赦願いたい。

1. 石油化学工業の黎明期から発展期での産学共同

我が国に石油化学工業が萌芽した大正時代の終わり頃においては、化学プラントの主要プロセスの多くはアメリカ・ヨーロッパで技術開発され、技術導入されたものであった。当時導入に直接参画した技術者は、理学部の化学科および工学部の応用化学科を卒業したケミストが主流であった。化学プロセスの運転および改良に必要なエンジニアリング部門は、これらケミストに加え、機械工学系出身者が担当せざるを得なかった。第2次大戦後、石油化学工業が徐々に拡大するに従い、国家的見地からケミストリーとエンジニアリングを修めたケミカルエンジニアの育成が焦眉の急となり、戦前の昭和15年に相前後して設置された京都帝国大学・化学機械学科と東京工業大学・化学工学科に続く形で、昭和27年、戦後初めて名古屋大学に化学工学科が新設され、その後、東京大学、東北大学等々と続々化学工学科が設置された。私が学生当時指導を受けた先生方から、石油化学工業の実際プロセス技術の改良に必要な基礎研究を企業と共同で行い、化学プラントの質的向上に少なからざる貢献をしたことを折に触れ聞かされ、その過程で特許をいくつか取得していた先生方もいたようである。また、先生方の多くは化学工業会社に数年間勤務した後大学に戻られた、いわば、実際の化学プロセスを知っていて、さらにその結果として企業と人的結びつきばかりでなく、研究テーマの面においても太いパイプ

のある方々であった。したがって、産学共同研究は実質的には比較的スムーズに行われていたものと想像される。それが、最近では化学プラント関連の産学共同研究に多くの問題点と困難さがあると認識されているのは、一体どのような理由があるのであろうか。この点に関し、本稿の後半で企業の方からの意見も紹介するが、主なる原因は次のようなことにあったと推察される。まず企業側からみた場合、石油化学工業の発展期においては多くの化学会社が乱設立され、企業間の技術開発競争が激烈であり、どうしても特許などの点で企業秘密を守ることが急務であったこと、プラントを加速度的に大型化することが最優先され、多くの技術者がスケールアップに力点を置いた技術開発に腐心しなければならなかったこと、さらには、化学会社は高度成長の波に乗って巨大企業となり、自社内に独自の基礎研究部門を置く資金的余裕があったことなどが共同研究にまで進展しなかった原因と考えられる。一方、大学サイドでは、化学プロセスで問題となっている課題を基礎から解明するため、実際現象をスケールダウンした実験室規模の装置で検討し始めた。このこと自体は、方法論として問題はなかったのであるが、場合によっては、次のような弊害も現れてきた。例えば、気泡・液間の物質移動を単一気泡まで掘り下げて研究しているうちに実際プロセスへのフィードバックを忘れ（実は、蒸留塔内の現象把握ということから派生した課題であった）、研究を進めることが見受けられるようになった。このように、企業と大学両サイドに共同研究の必要性に対する接点が少なくなって、徐々に両者間のギャップが増大したように思われる。しかし、第1次および第2次オイルショックが石油化学工業に最も深刻な打撃を与えた結果として、近年、大量生産・スケールアップを中心とする企業体質から、省資源・省エネルギー型の高付加価値製品の開発へと方向転換が余儀なくされ、大学や国立研究機関との共同研究を復活しようとする気運にある。とは言っても、次項で示すデータのごとく他の分野に比べ共同研究の件数は少ない現状にある。これは化学工業関連が特に少ないと言うのではなく、わが国の技術立国としての今後によりやく危機感を持った文部省が、民間等との共同研究を積極的に推進しはじめたのが、昭和58年度というごく最近のことであることに最大の原因があると考えるのが至当であろう。

2. 国立学校と民間等との共同研究の実態

文部省内容計事務研究会が編著した「国立学校会計事務必携」によれば、文部省が認可した国立学校への外部資金には、1)受託研究、2)奨学寄附金、および、3)民間等との共同研究の3つのカテゴリーがある。このうち、本特集に特に関係の強い3)項については、実質的に昭和58年度にスタートした。序言に示した昭和61年度の統計によれば、共同研究数は272件、資金は18億円余、また受け入れ研究員は325名と、スタート次の昭和58年度の56件、6億円余、66名に比べて着々拡大する傾向にある。内容を詳しく見てみると、材料開発（セラミックス等）と、機器開発（電子顕微鏡等）関係が全体件数の約半数を占めている。一方、名古屋大学工学部における、昭和58年度から昭和62年度（昭和62年10月末現在）まで

の共同研究の延べ件数は59件であり、そのうち化学工業会社との共同研究は、住友化学工業、東亜燃料工業、鐘紡、東洋紡績、興和紡績、東邦瓦斯、豊田合成、東海ゴム工業など10件程度あるが、化学プラントのプロセス技術開発に関連したケースは皆無に近い。これらの統計データから推定する限り、化学プラントのプロセス技術開発関連の産学共同研究は、予想以上に難しい状況にあるようである。ただし、多くの化学会社は前項で述べたごとく最近著しく体質改善が行われ、機能性材料の開発やバイオテクノロジーなどの先端分野に進出し、工学部以外の医学部等との産学共同研究も多くなっているため、上記のデータをそのまま解釈することはできないことを付記しておく。

3. 第25回全国大学工業化学・化学工学共同研究集会アンケート調査結果

化学プラントのプロセス技術開発に関連した産学共同研究を別の観点より検討する意味から、昨年7月、山口県宇部市で開催された第25回工化・化工合同研究集会において報告された産学共同研究に関するアンケート集計結果の一部を、私自身も参加する機会を得たので紹介する。

表. 第25回全国大学工業化学・化学工学合同研究集会アンケート調査より抜粋*

----- 化学工学系大学院における産官学共同研究 -----

項 目	国公立大学	私立大学
共同研究を： 実施している	18 (53%)	7 (70%)
実施していない	16 (47%)	3 (30%)
共同研究の相手として： 民間企業	11 (28.2%)	2 (11.8%)
その他は学内他学部・他学科、国立研究機関等		
共同研究テーマ： 資源エネルギー	16 (35.5%)	4 (19.0%)
新素材	14 (31.1%)	7 (33.3%)
バイオテクノロジー	11 (24.4%)	4 (19.0%)
ライフサイエンス	2 (4.4%)	3 (14.2%)
エレクトロニクス	2 (4.4%)	2 (9.5%)
情報科学	0	1 (4.7%)
合計	45 (100.0%)	21 (100.0%)
今後重要と考えられる： 産学共同研究	33 (45.2%)	5 (21.7%)
共同研究の相手先 専攻相互間共同研究	21 (28.7%)	6 (26.0%)
他大学との共同研究	12 (16.4%)	8 (34.8%)

* 昭和62年7月13日～15日 山口県宇部市で開催

表は、化学工学系大学院における産・官・学共同研究の実態と将来に対する展望に関するアンケート結果である。産・官・学の何れが共同研究相手先かは不明であるが、国公立大学、私立大学ともに半数以上が共同研究を実施しており、研究テーマは、資源、エネルギー、新素材およびバイオテクノロジー関連で全体の約90%（国公立大学）、約70%（私立大学）を占めている。注目されることは、今後重要と考えられる共同研究として大学と民間企業との共同研究と回答した割合は多いが、専攻相互間および他大学との共同研究、すなわちインターファカルティおよびジョイントカレッジ的な共同研究が重要であるとの答えが約半数に及んでいることである。このことは、大学の使命は基礎研究を最優先とするセルフコントロールが働いているのか、また工業化学・化学工学系特有の傾向であるのかは残念ながらこのアンケート結果だけでは不明であるが、化学プラントのプロセス技術開発に対する産学共同研究の困難さの一面を窺い知ることができる。

以上、1～3において、主として大学サイドから産学共同研究の問題点を探ってきたが、民間企業側の現場ではどのように考えているのかの一端を次項で紹介し、本稿の締めくくりを試みたい。

4. 企業側の化学プラントのプロセス技術開発への取り組み方

名古屋大学化学工学専攻修士過程を昭和46年に修了し、三井東圧化学（株）で約15年間仕事をしている中田三郎氏に企業側からの考え方を聞き出すことができた。他の会社では多少異なるかも知れないという彼のコメントを前提に、その概要を紹介することにする。

化学プラントのプロセス技術の開発については、概ね以下のステップで実施されている。

- (i). 化学反応の特定：反応経路、反応物質の特定
- (ii). 化学反応条件の特定：収率と反応生成物（化学製品）のコスト分析
- (iii). 小規模実プラントの設計・建設・実運転
- (iv). 適正規模化学プラントの設計
- (v). 既存旧法プラントが存在すれば、部分的に新法を適用してプラント改造

この中で大学の研究室で担当し易いステップは(i)および(ii)であり、(iii)～(v)は設備が比較的大規模であり、企業では多くの場合過去のプラントの部品または塔槽類を転用利用しており、少なくとも大学キャンパス内では実現することが困難である。加えて、実際に化学プラントの技術がギャランティー条項を含めた契約で販売される場合には、大なり小なり(v)のステップを必ず経由しており、工場敷地内研究が必須条件となっている。さらに別の観点から言うなら、(i)および(ii)の解析に不可欠な気液平衡関係式等の物性が多くの場合、多成分系のために経験則となっており、これ

が実際には(iii)あるいは(v)のステップで補正近似され実用に供されることから、結局のところ(1)および(11)のステップも実際には工場内基礎研究部門との共同研究が必要となる。当社(三井東圧化学)の過去のプロセス開発の例では、三井東圧法尿素プロセスの開発の時に複数の大学と(i)および(ii)に関連して共同研究を行ったが、これも初期のプロセスであり、尿素製造法がV法(5番目というのではなく、主要尿素プロセスだけを順序づけたもので実際には十数個の改良プロセスが存在)まで至ったときには、完全に(i)~(v)まで企業内で実施せざるを得ない状況になってしまった。

以上の彼の話を読者諸氏はどのように受け取って戴けるであろうか? やはり化学プラントのプロセス技術の開発は、産学共同研究テーマとして難しいのであろうかと悲観的になってしまいそうである。大学サイドにいる自分としては、(iii)~(v)のステップでの共同は困難と思われるが、少なくとも(i)および(ii)のステップにおいて官・学側にある潜在的活力を企業側が積極的に受け入れる姿勢を示すことが化学会社の一層のレベルアップにつながるものと信ずるが、これは私の独りよがりの考え方であろうか。

最後に、産官学共同研究を成功させるためには、費用の分担、特許関係、成果の公開・非公開などの解決すべき問題が多々あるが、これらに対し、共同研究機関両者が相当な弾力性をもって対処することがもっとも肝要と考えられる。言うは易く行うは難しいが、一步一步、地道に実績を積み重ねれば、たとえ困難とされる化学プラントのプロセス技術開発の分野でも産学共同研究が両サイドにとり有益なものになると確信する。

1、はじめに

周知のごとく、宇宙開発は国家的プロジェクトである。わが国の宇宙開発体制は「宇宙開発政策大綱」の指針にしたがって確立された計画のもとに、個々の機関で行われる研究開発を国として一体性を保ちつつ実施されるよう図られている。現在のわが国の宇宙開発体制と宇宙開発総予算の変遷は図1及び図2に示されるとおりである(資料1からの抜粋)。現在、年間、約1200億円程度の予算額であるが、その配分内訳は大略、主要開発研究機関である宇宙開発事業団(NASDA)が910億円、宇宙科学研究所(ISAS)が125億円で、残りが通産、郵政、運輸、建設省、科学技術庁などの研究機関に渡っていることが分かる。なお、NASDAの場合には約940人の従業員の人件費を含めての値である。これらの予算の大半は担当機関を通じて実際に設計製作を請け負う複数の企業(メーカー)に流れるから、現実には宇宙産業界が扱う年間売上額は高々1000億円ということになる。この予算規模の大きさ(小ささ)を表現するとき、よく比較の対象として、これと同程度の売上市場をもつ家庭用照明機器あるいは味噌醤油産業界が引き合いに出される。産業界にとってみれば、宇宙産業という華やかなイメージとは程遠い、小さなパイでしかない、というわけである。

最近のH-IIロケットの開発や宇宙ステーションの設計検討などでは特別な予算措置も構じられているようであるが基本的な宇宙開発の予算規模に大きな変化はない。それにも関わらず国内の大手電機・機械、重工業メーカーが現状の契約予算額の何倍もの出費を覚悟でこれに参画し、活発に計画検討に当たっている。いうまでもなくこれらの巨大プロジェクトが発進したときの主契約あるいは担当者となることを期しての事であろう。さらに、将来計画のAdvanced Projectに登場するATP(実験用フリーフライヤ)、HOPE(宇宙往還機)などいくつかの宇宙構造物が本格的に検討され始めた(資料2)。これらが実現されれば、宇宙産業は2000年代初めには6兆円市場に急成長するという予想もあって、この頃は国内の有力企業がそれぞれの技術蓄積を背景に宇宙開発関連事業への参入を表明し多方面で活発に活動を始めている。将来、世界的な政治経済の状況が大きく変化しない限り、ある程度の宇宙開発産業の伸びは期待できるのだろう。

しかし、この小文では1200億円規模の宇宙開発体制の中での産官学共同研究の難かしさについて、筆者個人の乏しい経験から得た率直な感想を記して責を果たさせて頂くことにする。私事にわたるが、筆者は一時期を私企業の宇宙機器開発の技術者として、その後NASDAの客

員研究員、I S A S の併任教官として主として機械、熱制御の立場からいくつかの実用および科学衛星の開発設計の現場に接してきた者である。従って、宇宙開発全般に渡る視野と見識に欠けること、独断が入ってくるだろうことを予めお断りしておく。

2、わが国の宇宙開発の状況について

2-1、宇宙工学と宇宙構造物の特徴

宇宙工学という術語が一般に認知されているか否か筆者は知らない。とりあえず、この小文では、宇宙工学とは、電気通信、機械、制御、伝熱、など既存の多数の専門工学分野を宇宙開発に役立てるべく統合した学問・技術の総称を指す、と筆者流に定義しておく。その意味では宇宙工学の個々の要素は宇宙環境条件を相手とする以外、従来の工学技術の知識や手法と本質的に異なるところは何もない。ただ、これらの要素技術や研究はそれらを共通に貫くもう一つの重要な工学部門、すなわちシステム工学、の思想によって調和統合されるとき宇宙工学として力を発揮する。宇宙開発の成果はこのシステム工学部門が十分に機能するか否かにかかっているとと言ってもよい。例えば大型通信衛星を開発する事を考えよう。これに必要な技術と専門知識が集められ整理されるだろう。しかし、これらを単に加え合わせるだけでは衛星は出来上らない。個々の専門技術を縦糸とすれば、それを横に通して整然と編みあげる横糸（システム工学）が必須となるのである。開発の現場では、この横糸の役目をするシステム技術者が衛星全体系にわたる広範な知識と的確な判断力で各部の専門技術を組み上げて行くが、一方、各専門家も程度の差はあれシステム工学の素養を持たねば適切な役割を果たすことが出来ない。このあたりに宇宙開発に従事する技術者の難しさがある。。

ところで、宇宙工学で取り扱う宇宙構造物は各種人工衛星、宇宙往還機、宇宙ステーション、フリーフライヤなど多種多様である。そして、これらの構造物はいずれも特定のミッションを満足させるべく数年の年月をかけて設計・製作された非常に高価な製品であることはもとより、これを宇宙空間で正常に運用させるまでには打ち上げロケットや射場作業、追跡管制業務まで含めるとこれに倍する経費がかかることを知る必要がある。例えば、気象衛星「ひまわり」クラスの实用衛星で数百億円、小さな科学観測衛星でも百億円に近い。従って、開発に失敗した場合の資金的、時間的な損失の大きさを考えると、宇宙構造物の設計・製造に当たっては、どうしても保守的な手法を選び、無難な設計に落ち着かざるを得ない。ここでは確かに先端技術を取り扱う。しかし、評価の定まらない最先端技術は取り上げられない。一般に、部品単体やパーツの信頼度が、99.9999...%といった品質保証付きの部品以外は使用しないことや過去に宇宙実績のない手法は原則として採用しないことが開発設計の基本的姿勢になっているからである。過去の宇宙開発の成果が我々の日常生活にもたらした最大の副産物は品質管理と信頼性管理の手法の確立である、と言われる由縁はここにある。我が国の産業界が米国で生まれたこの品質管理の考えをいち早く普及発展させて工業製品の性能を向上させ、引いては現在の質

易摩擦の遠因を作り出していることは周知のことであろう。

それでは真に新しい技術や手法はどのようにして宇宙技術の中に取り込み発展させて行くのか。この重要な開発過程は、どこかで誰かが失敗の可能性を背負って実行しなければならぬ。しかし、わが国の実用衛星の開発ではこの危険な過程を極力避け、米国の成果を利用することによって効率よく開発を進めてきたところが特徴的である。当然の事ながら、開発の段階を追って技術の国産化率を高めることが開発計画の大きな課題として荷せられてきた。一方、開発理念や体制、立場などの違いはあるが、その科学衛星観測によって宇宙物理学に数々の学問的成果をもたらしたISASの固体ロケットや人工衛星の構造機構・姿勢制御の手法などには積極的に独自の改良や工夫を加えられてきた経緯があることは銘記しておく必要があるだろう。一般に新規の技術や手法の開発過程は公的研究機関が受け持ってしかるべきであるが、宇宙工学の分野では従来も現在でもこのような開発的試行実験を遂行できる環境（人、場所、資金、需要）が非常に限られ、十分に機能していない。

2-2、宇宙産業界の現状

わが国は宇宙産業を防衛産業を始めとする他の国家的開発事業と同じく複数の企業間で競合させながら育成していく方針を取っている。従って、各企業は開発の途上で得られた技術やKnow-howを競争相手を意識して秘守することになり公開の場でこれらが評価、議論されることは殆どない。従来、開発を推進する監督官庁でさえ成果報告書の内容を更に詰めようとするれば担当企業と個別に折衝せざるを得ず、その場合でも必ずしも技術の深奥に迫れない悩みがたびたびあった。このようなわが国の企業技術の非公開性は何も国家プロジェクトに限らないが、宇宙開発のような巨大プロジェクトではその効率を著しく阻害する恐れがある。

また、これらの蓄積された技術やKnow-howの特徴はそのほとんどが外国（西欧）の有力企業との提携によって得られた導入技術をベースにしていることであり、ある意味では独自の発展性を望みにくい。特許や提携条項の制約もさることながら技術の基盤になっている基本思想や仕様まで理解することが困難である場合が多いからである。もっとも、企業がこのような技術ベースを持つに至ったことについては開発推進者側の短兵急な成果要求と長期展望に欠ける開発方針に責任の一端があるが、他方で次の節で述べる事実とも深く関連している。

2-3、大学・公的研究機関の実力

宇宙開発という言葉が使われ始めてから30年ほどになるが、従来わが国の大学・研究機関で一貫して宇宙工学プロパーの研究に本格的に取り組んできたところは、宇宙科学研究所（旧東京大学宇宙航空研究所）と航空宇宙技術研究所（NAL）の一部を除けば、皆無に近いと言って過言でない。どうしてなのか。ISAS誕生の経緯を辿るとその原因の一端を理解できるが、ここでそれに触れる余裕はない。ISASが大学の付属研究所として宇宙開発に取り組み始め

た頃は、その研究対象の規模の大きさ、大学と企業の共同体制による多人数での仕事、研究内容の性格上マスコミの対象となり易いことなど、いくつかの点で異色の研究形態であったため、企業技術の非公開性以上に閉鎖的独善的な研究環境に馴染んできた従来の人々には、宇宙工学は研究の風上にも置けない代物、と写ったとしても不思議でない。事実そのような冷やかな見方を持つ批判勢力が常に存在したし、現在でもこのような状況は基本的には変わっていないだろう。しかし、これらは各人の世界観によるもので、その是非を議論する性質のものではない。ただ、筆者の印象では、最近、このような状況も含めて世間一般の宇宙開発に対する風潮が変わってきたように思われる。この分野の研究は多分に一般世論や日常生活と無縁には進められない要素を含んでいるようだ。

前置きが長くなってしまった。そのようなわけでISASと一部NALの研究実績（その他強いて挙げれば、宇宙通信技術）などを除けば、現在、わが国の大学・研究機関の宇宙工学関連の研究蓄積と実力は殆ど見るべきものが無いのである。にわか勉強で宇宙工学の研究者を自認する学識者はいても、開発の最前線で苦勞を強いられる企業の技術者達が一様に外国からの輸入知識と技術に頼り彼らに一片の助言も期待してこなかった事実がこれを雄弁に物語っている。開発の初期の頃はNASDAさえも外国企業との技術提携を積極的に奨励してきたし、事実この手段で比較的短時日に宇宙先進国の仲間入りを果たしたことは先に述べたとおりである。現在でも外国企業との技術提携による基本的な協力体制はそのまま維持している企業が多いことも事実である。ともあれ、企業の知識と技術力が大学・研究機関のそれを数等上回っている現状では、当面、発注元と請負者という関係以外での自由対等な産官学の共同研究など成り立ちようがない。

先述のごとく、近年、宇宙ステーション計画の進行や将来計画の登場により、産業界の興味と肩入れの度が高まると共に、幾つかの研究機関でも組織や研究方針の見直しを行い、宇宙関係の研究に取り組むところが出てきた。宇宙関係の仕事に興味を抱く個人的な研究者層も増えつつあるようである。一日も早くこのような若い研究者層が成長し、企業の研究・技術者と対等に共同研究が組める時代が到来することを祈るのみである。

3、開発研究の協力体制について

このように、わが国の宇宙開発の実力を基盤技術の確立という観点から見るとまだまだ底が浅く脆弱と言わざるを得ない。特に、最近この方面の技術導入が格段に厳しくなってきたことを考え合わせると、早急に他力本願の体質を改め、産官学の協力体制を作り出して対処せざるを得なくなるだろう。我々が宇宙工学と技術を駆使してわが国の宇宙開発産業の着実な伸展に寄与できるためには何が必要であろうか。

まず第一にわが国の開発推進者が国家的コンセンサスを集めて長期的な展望を掲げ具体的な方針を出すことが何よりも肝要であろう。そうでなければ将来とも宇宙産業の実体は確立せず、

いつまでも外国から高価な買物を強いられることになるだろう。

次に、宇宙開発技術に関連する大学・研究機関の基盤研究を積極的に支持し研究活動の活性化を図るべきである。あらゆる意味で宇宙工学のポテンシャルを上げることが急務であることは言を待たない。

最後に、宇宙開発の規模を拡大させていく上で最も重要な要素となる質、量共に十分な技術者を確保することである。予算規模が大きくなっても人材育成の問題が解消されなければ産業の拡大発展に結び付かないことは明白である。これの対応が決定的に遅れている。然るに当事者にその配慮が全く欠けているのは不思議としか言いようがない。大手企業の開発現場では、現在すでに質の良い宇宙工学・技術者の不足が共通の悩みになりつつある。

結論は簡単である。わが国の国民的コンセンサスを得た宇宙開発の長期展望と人材育成の対応策を早急に作り上げることである。これが出来れば産官学の協力体制はおのずと推進され、新しいあるいは独自の技術や学問への寄与も生まれてくるだろう。

4、最後に

書き終わってみると、その積もりはなかったが、わが国の宇宙開発の進め方への批判みたいな内容になってしまった。宇宙工学の興隆を、と言ったところで大学や研究機関で取り扱える基礎的な研究範囲はどれくらいあるかと問われると筆者にも心細いところがある。また、見方を変えれば、宇宙開発の実態はすでに産官学共同研究そのものではないか、と主張される方もおられる。改めて難しい課題を引き受けてしまったと反省している。読者諸兄の忌憚のないご批判を頂ければ幸いである。

参考資料

- 1、宇宙科学研究所年次要覧、昭和61年度版
- 2、宇宙開発事業団年報、昭和60年度版

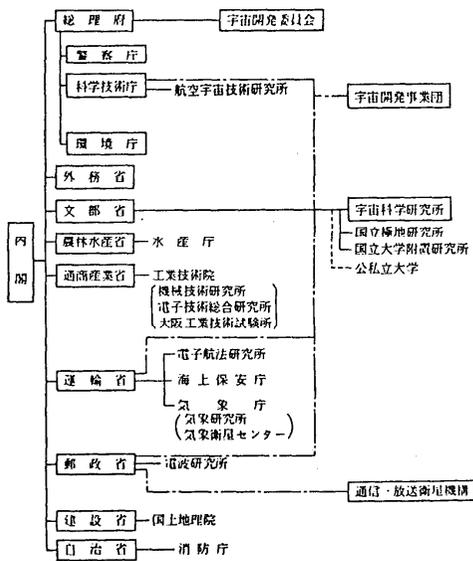


図1 我が国の宇宙開発体制

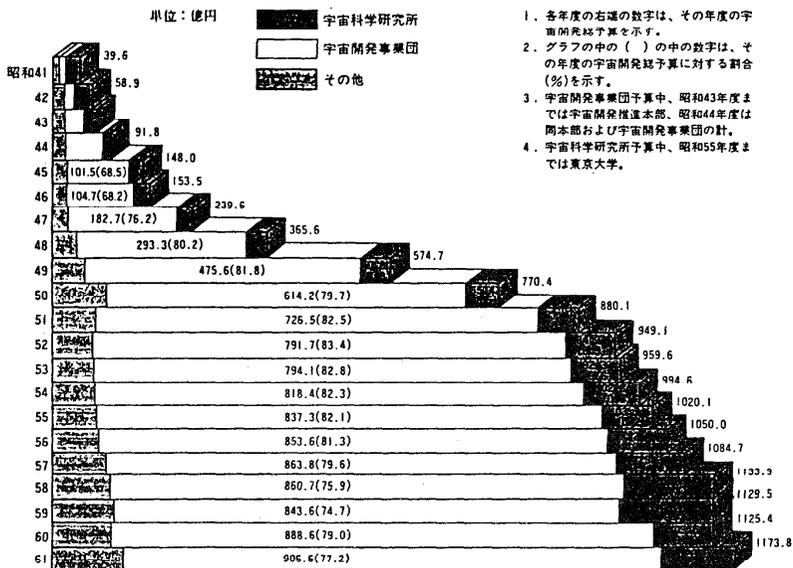


図2 我が国の宇宙開発総予算

産学交流における企業側の課題

— エレクトロニクスの場合 —

日立機研 中山 恒

この度の産学共同研究に関する特集号は世の中の機運の高まりを反映したタイムリーな企画で、自分なりに考えを整理するのに役立つかと考え寄稿をお引き受けした。産学交流とひと口にいってもさまざまな場と形態があり、学会の講演会、学会で組織される委員会、研究会、分科会などの集まり、企業から大学に出されている委託研究、文部省科研費の申請に見られる企業との共同研究の奨励、企業からのコンサルティング依頼、企業で催される大学の研究者の招待講演などを思い浮かべると、交流も活発に進められているとの感を抱く。しかし一方ではこれら豊富な機会にも拘らず、研究内容において産学間に関心のずれ違いを見られる方も多いと思う。ずれ違いの主たる要因として、先ず第一に企業と大学その他の教育機関で働く人々の間に存在する目的意識の違いがあげられるよう。即ち、企業で働く技術者の仕事の大半は目前の技術課題を解決することで、一方大学の研究者は長期ビジョンの下で仕事を展開したい。こうした目的意識のギャップは洋の東西を問わず存在し、また今始まったことでもない。但し対象がたとえば原子力のような巨大技術である場合、開発期間が長いこともあって上記のギャップはきわめて小さい。ところがエレクトロニクスを初め先端技術と一般に呼ばれている領域では、電子工学その他の専門工学に接する境界領域の問題が多いえに技術の展開のテンポが速く、とくに伝熱という基盤研究分野での産学間の研究者意識のギャップは大きい。平たくいえば企業の技術者の大半は現場の問題の対応に追われ、

「学」側の研究者にとっては何をやったらよいかわからない、ということである。筆者が近年携わっている電子機器の冷却と、半導体の製造に必要な熱環境制御の研究の面でも、大きな関心を寄せられている大学研究者が居られるものの、一般には上記のギャップが認められる。ところで電子技術の今後の進歩のためには伝熱工学の支えが不可欠で企業内での研究努力のみでなく学界で広がりをもつ研究基盤が必要になってきている。多くの研究者に参加してもらうには産学の双方の努力が必要であるが、ここでは企業側が抱える課題について考えてみたい。

「学」側の研究者に関心を持ってもらうには、企業の側からの技術課題の説明、しかもかなり具体的な事例に基づく問題の投げかけが必要であろう。この際、企業機密の保持と技術の発展への公共的貢献とのバランスをいかにとるか、という問題が生ずる。企業が抱えている技術情報で機密とされるもののうち、重要度の高いものから順に三つだけあげるとすると、次のものがある。

- (1) 将来の製品計画が他社にわかってしまう技術情報
- (2) 自社製品の技術的優位を保つのに必要な設計データ及び生産技術のノウハウ
- (3) かなりの額の研究投資を行なって得た基礎データ

(1) の製品計画に関する情報は、市場でのシェアと企業利益に直接係わるために、自由競争社会では当然機密とされるべきものである。しかし市場での先手争いという観点からみた情報の価値は、製品が市場に出してしまえば消滅するわけで、厳重な機密度が要求される期間は比較的短い。

(2) の内容の情報のうち、特許にできるものについては権利化して保護しておけば他者に公開して差支えない。しかし、ノウハウに関するもので、他者の無断使用を検知するのが難しいものは門外不出とされる。先端技術の領域では半導体の製造プロセスにこの種の知識が多い。他のたとえば化学プラントにおいても、プロセス条件と材料の成分などは部外者に知りえない。

(3) の情報はいずれは公開されるものであるが、企業内でのデータ取得から公開までの日は企業利益と公共利益への貢献のバランスから決められる。

保有する技術知識を全て秘密にしてしまうのが、企業にとっては最も安全のように見える。しかし、一方では過度の機密重視を防ぐ下記の力が働いている。即ち、

- (a) 手持ちの技術データが新鮮なうちに公開して技術レベルの高さを世の中に印象づける。
- (b) 自社の技術進歩が停滞しないように外部との交流により刺激を受ける。技術レベルの向上は技術者、研究者に依存するので、これはまた自社の人の育成でもある。とくに研究者の場合、外部からの受益のみでなく、科学技術の進歩に自ら貢献していると意識が良い仕事をする事につながる。
- (c) 公共の知的財産の蓄積に貢献をすることにより、自社の Prestige を高める。

さて先端技術分野での産学交流を促進するには、企業側の人間が何をしたらよいか？という問いに立ち返ってみたい。何よりも先ず、交流を長期的視野のもとに進める必要がある。即ち、目前の技術課題の解決を目的とするのではなく、長期間にわたり継続し、しかも広がりや深さを増すような研究テーマ作りを「学」側の研究者と一緒に進める姿勢が必要であろう。この観点に立って自らが抱えている技術課題を整理する。そして、先に記した機密と公開の判断尺度を適用する。こうしたステップを踏むと、現在見られるよりも更に多くの共同研究テーマが浮かび上がってこようかと思われる。と書いても具体的事例を挙げないことには何をいっているのか相変わらずわからないかも知れない。筆者は拙稿^{1) 2)}で具体テーマのい

くつかを提案した。これらはもとより微力の作業の結果であるので、より多くの識者の方々の知恵の結集が必要である。前回の機械学会調査研究分科会に続き、熱工学部門に新しく研究会（「電子機器の熱環境制御」）を準備しているので、多くの方々の参加をお願いしたい。特に企業側から「問題解説者」が多く出て頂くことは、意義ある交流を進めるのに不可欠である。

ここでついでに企業で働く研究者、技術者をとりまく環境の変化に関し、二、三指摘しておきたい。一般によくいわれているように、わが国の工業界は欧米の先進技術に追いつく努力を払う学習期から、自ら新しい技術の流れを産み出すことが要求される時期に入ってきた。学習期には、技術者にとって仕事のターゲットは明確で、目前の仕事以外のことに関心を向ける必要がなかった。この時期の技術者心理は与えられた任務を全力で遂行するのに必要なミリタントなものである。ところが自分で任務を作り出し自らに課さなければならない時期が急速に訪れた。自分の仕事をより高い観点から広い枠組みの中でとらえる努力を払わないと、新しい時代に対応するのが難しくなる。

昨今、国際会議その他の場で感じるのは、非常な成功を遂げている日本の企業からの知識輸出をもっと増やせという圧力である。海外における日本企業の研究発表はかなりの件数に上っており、研究開発に携わる企業人もそれなりの努力を払っている。しかし経済面での成功が人々の心の中で余りにも大きなイメージになっているために、われわれの努力について認識を得るのは容易でない。この問題には日本社会と欧米社会の間の歴史的背景の違いもからんでいる。即ち後者では職能別階級社会の影響が強く残り、プロフェッショナル同士の連帯意識が強い。競争関係にある会社の技術者同士が、互いに自社の損にならない範囲で知識や技術動向に関する見方を活発に交換しているのはよく見られることである。わが国で欧米型の技術者社会を作ろうとするのは実情に沿わない。しかし、国際社会の中で共存共栄路線を歩む必要、また先に記した技術者の視野を広げる必要、を考え合わせると、技術者および研究者同士が会社の壁、産学間の壁を超えて知識を分かち合う努力をさらに積み重ねたいものである。

次に分かち合う知識の内容について言及しておきたい。従来から企業の間には自分達がやっていることは学術的でなく、従って学会その他の場で「学」側の人達に聞いてもらう価値が乏しいと思いつく傾向がある。特に伝熱のような基盤研究分野ではこの傾向が強い。しかしこの際、「工学とは何か？」との原点に立ち戻って考える必要がある。手持ちの材料を粗み合わせて目的の機能を備えたものを何とか作り出す行為が工学（エンジニアリング）と考えれば、一般にいう泥臭い経験も各種の学術的発見と同じ程度に重要だといえる。但し自らの経験なりノウハウにさまざまな角度から検討を加え、他の技術者の参考になる形にまとめる努力はもち論必要である。

エレクトロニクス技術が情報流通手段に画期的変革をもたらし、これによって従来から存在する社会の中の壁を取り払い、ひいては人の心の中にある旧来の観念を変え、新しい環境を作り出しつつある。新しい時代の到来と共に、企業の行動も商売一点ばりのパターンから脱却し、世界あつての企業という高い観点からのものになってきた。これに伴い利益追求という企業目的の一面に対する見方も変わってきた。即ち私利益の追求を疑問視する儒教的観点は後退し、人々に仕事をする場を用意し、社会の物質的及び知的レベルの向上に必要な富を産み出す面が評価され、企業の生産的な役割に対する評価は基本認識として定着してきた。企業で働く人達には、世界的な規模での知的財産の蓄積に、いままで以上に積極的に貢献する環境が整い、また貢献することを求められている。

- (1) 中山、機論52巻476号(昭61-4), 1439.
- (2) W.Nakayama, Applied Mechanics Reviews, Vol.39, No.12, Dec.1986, 1847.

「地域ニーズにもとづく産官学協同研究の課題と将来展望」

東北大工 武山斌郎

工学なき工業はない

産学協同という文字にアレルギー的変調を感じなくなってから十年以上も経過したであろうか。さらに、最近は産学官協同という言葉もそこかしこに眼につくようになり、とくに改まった抵抗を感じなくなった。まことに結構なことであるかも知れないが、一体、その本質はどんなものであるのか、あるいはその実態はどうなっているのか考えてみると雲をつかむ観がないわけではない。とくに現在私は小さな産学協同を目的とする財団法人の理事長をお引き上げしているが、県内からは又隣りの県からも千客万来である。

産学協同の本質的哲学的考察は手前勝手ではあるが私なりに確立している。それは、産も学も同じ工学の世界の中で経緯の関係にあり文化のカーペットを織らねばならない宿命をもつとあれば、協力しなければならないのは当然であろう。

「何をすれば儲かりますか」という質問に対しては、「工業に工学を応用することは儲かるものです」と答えることにし、さらに、「あなたは学会のメンバーですか」と質問することになっている。

一文珠菩薩の知恵を役立てるには

産学協同の観点に立つと、企業に三つの形があるように思う。

X：大学と同じような、あるいはそれ以上の工学的実力をもち、大学と対等に共同研究をおこなう企業

Y：大学に積極的に指導を仰ぎ、大学院学生が学位論文を作成するように研究し、工業に応用する。

Z：大学のあることは知ってはいるものの、大学を利用して儲ける方法を知らない。

官城県程度の地方では、XおよびYに属する企業もいくつかは存在するが、Zに属するものが、実に数多くあるのはどんな風に解説しなければならないのであろうか。大学はどのうもシキイが高くて頭をかきながらも、大学を訪れる努力をしない無関心派である。

東北地方の太平洋岸側の国民所得は最低と聞いている。それでも美味なるものの宝庫であり、西方浄土なのであろう。男子を三人産み、遠洋漁業に二、三年も従事させれば忽ち家の一軒は建つという環境がなせる業かも知れないが、それではいざという時に滅亡してしまうおそれがある。

大企業の組立て工場も多く、本社のいいなりであり、自分自身の技を持っていないので、何時も低賃金の高労働を強いられて、じっと我慢の子であるのは淋しい。

要するに中小企業の産学協同を望むニーズは必ずあるに違いないがそのためのシーズがないので現実の形になって現われてこない。逆に、シーズがないのでニーズがない。

われわれ研究者が手甲脚絆で手弁当をぶら下げて托鉢をする愚を繰り返す必要は全くなければ、やがてそのような企業は滅びるであろうと警鐘を鳴らすこと位はしなくてはならないのであろうか。

HEAT TRANSFER IN THE UNITED STATES: INDUSTRY/UNIVERSITY INTERFACES

F.P. Incropera
Heat Transfer Laboratory
School of Mechanical Engineering
Purdue University
W. Lafayette, Indiana, USA 47907

1. Introduction

In the post World War II era, the United States has invested heavily in research and development and its universities have responded to government established priorities. In the fifties and sixties, for example, emphasis was placed on the development of space and military technologies, while in the seventies much of the nation's resources were devoted to health, energy and the environment. Today, however, the emphasis is on economic competitiveness and, more than ever, universities are being called upon to assist U.S. industries in the research and development process. It is clear that the university heat transfer community can, and must, respond to this call. The subject of heat transfer permeates many important industrial activities relating, for example, to the production and efficient use of energy, the processing of materials, and environmental thermal control in diverse systems such as refrigeration compartments and electronic equipment.

If it is to contribute in a meaningful way to enhancing economic competitiveness, it is becoming clear that the university heat transfer community must effect changes in both the type of research which is performed and the manner in which it is performed. There is clearly a need for more *problem-oriented* research which relates to specific industrial technologies. Moreover, since these technologies are rarely confined to the

boundaries of a traditional discipline, there is also a need for cross-disciplinary research, involving collaboration between the heat transfer specialist and, for example, specialists in the materials processing and manufacturing sciences. However, to maximize prospects for impacting industrial technology, collaborative efforts should not be confined to university laboratories but should, instead, include a true partnership between university and industrial researchers.

In this paper an assessment of university/industry interfaces in heat transfer is provided. The assessment represents a personal perspective on the subject and an attempt to delineate barriers to collaboration, as well as mutual benefits. Three examples, based on the author's research, are provided to indicate the variety of forms that collaboration may take.

2. Barriers to Collaboration

A major impediment to the establishment of productive industry/university interfaces arises when there is an absence of mutual understanding. Misunderstanding occurs when one or both parties fail to recognize the goals of the other party.

To varying degrees, university researchers are motivated by three major goals which include (i) providing a valuable educational experience for graduate student development, (ii) contributing to the repository of basic knowledge, and (iii) contributing to the development of new technologies or the advancement of existing technologies. While the first goal has always been an integral part of university research in the U.S., the second and third goals have been subject to historical swings. In its formative years, heat transfer research was driven strongly by specific applications in industries related to power production, materials processing, and

environmental control. Particularly successful studies were those which contributed new knowledge, as well as improved product or process technologies. In the sixties and seventies, however, there was a definite movement away from research driven by applications, and all too often token efforts were made to justify one's research interests in terms of real industrial needs. Although many contributions were made to the science of heat transfer, much of the work involved highly idealized conditions which had little to do with actual system behavior. Moreover, even when related to industrial needs, research tended towards filling niches and making incremental changes to the body of knowledge. It is fair to say that a sizeable portion of the academic heat transfer community became adverse to taking risks and was drawn to problems which yielded readily to solution and hence to speedy publication. However, with emergence of the eighties and the concern for economic competitiveness, pressures were mounting for a return to applied research driven by real economic needs and for the enhancement of industrial interfaces.

The establishment of meaningful industry/university interfaces depends strongly on the mindset of the university researcher. If the researcher is resistant to nontraditional, multi-disciplinary, and/or high risk problems it is unlikely that effective collaboration will occur. If such collaboration is to occur, university researchers must be more willing to confront problems which do not have well defined boundaries, resist generalization and which have the potential to impact industrial technologies. The strength of the collaboration will be directly proportional to the researcher's desire to have such an impact. In the process, however, the researcher need not abandon his inherent drive to contribute to the science of heat transfer. Since practical problems which do not reveal deficiencies in basic knowledge are rare,

they frequently suggest excellent opportunities for fundamental studies.

The mindset of the industrial researcher will also contribute to the success or failure of a collaboration. The industrial researcher should recognize that an improved understanding of fundamentals related to a particular product or process could substantially improve product design or process efficiency. He should also recognize that, because most university research is performed with graduate students, the duration of a project (approximately 18 months for an MS thesis and 36 months for a Ph.D. thesis) may exceed the period of a typical industrial development cycle. Hence, the current trend towards shortening the period of such cycles suggests that university research is better directed to satisfying medium and long term industrial needs.

Based on the foregoing comments, it is believed that successful industry/university interfaces depend strongly on maintaining frequent and dynamic communication. While university researchers have been and will continue to be important sources of innovation, they may also be somewhat naive to the real needs and problems of an industry. The interface should therefore begin with industry's presentation of the problems, preferably at the industrial site, and a subsequent response by the university researchers, preferably at the university. The response could include a presentation of possible solutions, special interests, and limitations or opportunities associated with the availability of experimental facilities, computers and technical support staff. Such meetings would hopefully lead to a selection of research tasks which satisfy mutual interests. Under the best possible conditions, the research would contribute to satisfying industrial needs, elevating the level of basic knowledge, and providing a quality educational experience for graduate students.

Once a project is initiated, periodic meetings should be conducted in which difficulties and results are presented by the university researchers, and feedback, with possible redirection, is provided by the industrial monitors. Such meetings would reinforce the *commonality* of goals and enhance the prospects for achieving these goals. In using the term *commonality*, it is implied that *all* parties benefit when the industrial problem is solved, the related knowledge base is enhanced, and graduate students receive an education that better prepares them for participation in industrial research and development.

Once agreement is reached on a particular research topic, potential barriers related to funding, publication and patent rights may still exist. Although most industry-related university research is funded by a particular company having a vested interest in the research results, other funding arrangements are possible. For example, the research may be funded by a consortium or association of companies within a particular industry. In fields related to heat transfer, examples would include the Electric Power Research Institute (EPRI), the Semiconductor Research Corporation (SRC) and the American Institute of Steel and Iron (AISI). Alternatively, funding may be provided by the U.S. government or a state government. In funding schemes established by state governments, the intent is to enhance the technical base of a local company and monies may be provided for research at the company, as well as the cooperating university.

For all of the foregoing funding arrangements, it is common to grant the university researchers complete freedom concerning publication of the results. However, exceptions do arise when support is provided by a company and there is

concern that competitive advantages derived from the research would be lost through publication. In such cases, the company may request that theses based on the research be made confidential and that open literature publication be deferred for a certain period (typically two years) following completion of the work. The decision to accept or reject this request rests with the university researcher. Within the U.S. heat transfer community, sentiment is strongly in favor of maintaining the right to public dissemination of research results. Among those involved with industry-related research, a common argument is that the research should become part of the public domain. If the research has commercial prospects, it is likely that the company would have to invest additional resources (usually substantially larger than those originally committed to the university) within its own organization to develop a final product. If the company does not accept this argument, the industry/university interface is terminated, unless the principal investigator relents and agrees to defer release of results to the public domain.

With regard to decisions involving patent rights, the company and principal investigator are joined by a third party representing the university administration. In most major U.S. research universities, it is the policy of the administration that all patents resulting from university research become property of the university, regardless of the source of research funding. Although the university may agree to assign exclusive manufacturing and marketing rights to the corporate sponsor and the university research team may share in royalties, it is seldom that the university would waive its right of patent ownership. This issue can be a major barrier to consummation of a cooperative venture, and much to the dismay of the researchers, cooperative arrangements are sometimes terminated due to failure to reach agreement.

Apart from collaborative research efforts, another mechanism for enhancing industry/university links is through the process of continuing education. In the U.S. there is an extensive network of courses designed to keep practicing engineers current with the latest developments in technology. Many of these courses are taught by university faculty in a variety of formats, which include live lectures in university or company settings, satellite transmission of lectures from the university to multiple industrial sites, and ASME special courses offered at national meetings. However, a potentially valuable permutation of this interaction, which has not been exploited, could involve short courses offered by industrial associations for university professors. The courses could delineate the state of technology in the particular industry, emphasizing problems and research needs. Such courses could do much to stimulate meaningful university research on industrial problems.

3. Industry/University Collaboration: Some Case Studies

Needs for heat transfer research span a wide range of industrial activities. For example, more compact and/or increased effectiveness heat exchangers are needed in many sectors of the energy production, transportation and environmental control industries. Advanced cooling schemes are also needed to dissipate the large heat fluxes associated with many of today's microelectronic packages. An improved understanding of transport phenomena in general would also benefit the numerous industries engaged in materials production and processing. Just a few of the many possibilities would include glass melting and forming; metal casting, which could involve static, continuous or rapid solidification; solid shaping processes such as rolling, extruding and machining; heat treating and quenching processes; crystal growth;

plasma spraying; and laser welding or cutting. In many cases technologies have developed more through practice of the art, rather than the science, of heat transfer, and many opportunities exist for improving performance through better control of heat transfer processes.

Within the Heat Transfer Laboratory at Purdue, research projects involving industrial collaboration have been conducted for well over a decade. The list of industrial partners is extensive and includes companies such as Chrysler, Ford, IBM, PPG, Alcoa and Inland Steel, as well as industry associations such as CRI (Gas Research Institute) and EPRI (Electric Power Research Institute). The following paragraphs summarize key features of three projects with which the author has been specifically involved. The examples clearly show that there is no single pattern of industry/university cooperation, but that many different arrangements are, in fact, possible.

Electronic Cooling

This project, which has been funded by IBM, concerns the study of liquid immersion cooling concepts for large power density ($\sim 100 \text{ W/cm}^2$) VLSI chips. Emphasis has been placed on the use of dielectric liquids and cooling by single phase forced and mixed convection, as well as by heat transfer with phase change. A major thrust has been to assess means of enhancing heat transfer by coupling extended surfaces to the chips or to caps within which the chips are enclosed. One example of the configurations which have been considered is shown in Fig.1. The photograph shows an array of 12 heaters (4 rows with 3 heaters per row) which can be mounted to one wall of a cooling channel. Each heater simulates a chip and is provided with its

own array of 16 circular pins with square fins. Experiments have been performed to contrast thermal performance with that obtained for arrays without enhancement (no finned pins) and with simply pins (no square fins). Related studies have considered the use of other compact surface arrangements, such as offset strip fins, and the feasibility of a semi-passive cooling scheme involving falling liquid films.

Initiation of the electronic cooling study was preceded by a 6 month dialog between IBM and Purdue researchers. In addition to frequent communication by phone and mail, separate meetings were held at Purdue and IBM, as well as at a national conference attended by both parties. This extensive dialog was needed to converge on research problems which were of interest to both parties. Ideas suggested by Purdue were rejected, largely on the basis of their poor relationship to IBM's needs. Similarly, several options suggested by IBM were rejected because of their involvement with large systems and their tenuous relationship to the basics of heat transfer. The option which was finally accepted was proposed by IBM (heat transfer enhancement in liquid immersion cooling) and appealed to Purdue because of its potential to yield new fundamental knowledge, as well as to contribute to the development of immersion cooling technologies. Start-up was delayed by an additional two months due to difficulties in reaching agreement on patent rights. However, no constraints were placed on dissemination of results in the public domain.

Execution of the research involved significant hardware development which, in some cases, severely tested Purdue's capabilities. Considerable effort was devoted to the development of miniature heat capable of dissipating up to 100 W/cm^2 and to the fabrication of miniature fins which could be attached to a single chip. To achieve the

project goals, it was essential that close communication be maintained between faculty, graduate students, and skilled technicians. In fact, many of the goals could not have been achieved without the ideas and craftsmanship contributed by the technicians.

Execution of the work also involved periodic meetings with IBM engineers, one of which was an annual two-day review conducted at Purdue. The first day focused on presentations by Purdue faculty and students, while the second day focused on responses by IBM engineers, which included an overall view of current international trends in computer cooling. Over a four year period, such interactions, combined with the actual research experiences, helped to transform the Heat Transfer Laboratory from being a non-participant to a major leader in research on computer cooling.

While most of the research has been concerned with assessing the performance of various heat transfer enhancement schemes, it has been possible to contribute basic knowledge related to single-phase forced convection and forced convection boiling from discrete heaters, as well as to conjugate heat transfer between discrete heaters and a substrate. Results have been published in archival heat transfer journals, as well as in literature intended for the electronic cooling community.

All participants have benefited from the project. IBM has been provided with a large information base which can be used to rationally assess options for advanced computer cooling technologies. Purdue has benefited from the establishment of a strong infrastructure which will permit it to maintain a leadership role in electronic cooling. Finally, Purdue graduate students have benefited enormously from their exposure to research which has combined the fundamentals of heat transfer with a

broad array of practical problems. Concerns for manufacturability, as well as thermal performance, and frequent interactions with faculty and skilled technicians on design and manufacturing problems provided them with excellent preparation for future participation in industrial research and development.

Macrosegregation

This research, which has been performed in cooperation with the Aluminum Company of America, concerns the solidification of binary substances, such as an Al-Cu alloy. Different solubilities in the liquid and solid phases result in preferential rejection (or assimilation) of constituents at phase interfaces, and advection results in the transfer of constituents throughout the two-phase mushy and single-phase liquid regions. The net effect can be the creation of significant nonhomogeneities in the final casting, and termed macrosegregation, it represents the principal cause of casting defects. Such effects are shown schematically in Fig.2a, which depicts segregation patterns observed in statically cast ingots. Segregates refer to regions of significant constituent enrichment, and both the cone and "V" segregates result from buoyancy driven advection due to rejection of the *heavier* constituent. The "A" segregates result from rejection of the *lighter* constituent.

For many years there has been great interest in suppressing macrosegregation in cast binary metals. It has also been recognized that reliable models of macrosegregation phenomena would be invaluable in suggesting control strategies. However, by subdividing the system into separate solid, mushy and liquid regions, past models have employed highly restrictive assumptions which severely limited their ability to predict actual behavior. To circumvent these limitations, it was felt that a

continuum model should be developed to collectively treat all three regions within the framework of a single set of conservation equations. The idea for this approach was formulated more than one year before the research was initiated at Purdue, and in that time advantages and disadvantages were subjected to considerable scrutiny in meetings conducted at both Purdue and Alcoa.

Cooperative arrangements for this project differed significantly from those associated with the previous activity on electronic cooling. In lieu of research grants to the University, Alcoa's contribution consisted of releasing one of its engineers (with payment of salary and benefits) to work on the problem as a full time Ph.D. student at Purdue. Hence, the roles of university researcher and industry monitor were merged in a single individual. Alcoa also paid all University tuition and fees and loaned equipment needed for experiments to validate predicted results. No restrictions were placed on publication of the results, and the question of patent rights was not an issue.

Subsequent research yielded a computer model which predicted many important, heretofore unpredicted, trends for macrosegregation. One such trend is shown in Fig.2b, which reveals the predicted segregation pattern in a two-dimensional casting of an $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ solution. This salt solution was chosen because it exhibits dendritic solidification which is analogous to binary metals, but still permits experimental flow visualization. With $\Gamma^{\text{H}_2\text{O}}$ representing the mass fraction of water, the final distribution clearly reveals a pattern of "A" segregates. In addition to delineating macrosegregation effects, the work has contributed to a greater understanding of the effects of momentum, heat and species transfer in casting processes.

Through its participation, Alcoa has benefited from possession of an algorithm which will aid in assessing strategies for restricting macrosegregation in aluminum alloys. It has also benefited from the return of an employee whose enhanced skills will provide important technical leadership for many years. The University has benefited through the development of an infrastructure for performing research on solidification phenomena. Ideas spawned during the cooperative effort have since led to other projects involving a team of graduate students.

Quenching of Strip Metals

This project deals with attempts to simulate, in the laboratory, conditions associated with the quenching of strip steel on the runout table of a hot rolling mill. With respect to inception and funding, it differs substantially from the preceding projects. Stimulus for the project originated with a representative of the National Science Foundation (NSF), who wished to see greater interaction between university researchers and the steel industry and who initiated an interface between Purdue University and the Inland Steel Company. Following several visits of Purdue faculty to Inland and a reciprocal visit of Inland engineers to Purdue, a decision was made to focus on quenching by impingement of a laminar slot jet. Seven months after the first interaction, a proposal was submitted to the National Science Foundation, and following favorable peer review, a grant was awarded to Purdue. Although all research was to be performed at Purdue, a provision of the grant was that Inland assign an engineer to monitor the work and to maximize prospective benefits to the steel industry. With funding from NSF, patent rights were automatically granted to Purdue and no restrictions were placed on publication.

Because of its goal to simulate important features of quenching under mill conditions (nucleate and film boiling on high temperature, $T \lesssim 1000^\circ\text{C}$, moving, $V \lesssim 20\text{ m/s}$, surfaces), the project has been one of high risk and has severely tested the capabilities of all those involved. One objective has been to obtain reliable heat transfer data and flow visualization for stationary steel strips electrically heated to temperatures large enough to insure a transition from single phase forced convection beneath the jet to film boiling in regions removed from the jet. Requirements include passing up to 1500 amp through 0.5 mm stainless steel strips to achieve heat fluxes up to 10^7 W/m^2 . Development of a heater module which satisfies these criteria has been impeded by the need to measure temperature without attaching thermocouples to the heater, to prevent buckling due to thermal expansion, to protect against failure at CHF, and to maintain dry conditions beneath the heater surface.

One of the several module designs which have been fabricated and tested is shown in Fig.3. Packaging difficulties associated with maintaining high current and flexible (to permit expansion and contraction) power delivery lines, spring loading (to prevent buckling), and air delivery (to exclude moisture from the interior) are apparent. In other experiments, designed to determine the effects of plate speed, major difficulties were associated with maintaining a uniform plate speed, implementing high speed data acquisition procedures, and developing methodologies for data reduction.

The foregoing difficulties are being resolved with several anticipated benefits. In addition to stimulating the development of new experimental techniques, the research is identifying the relative importance of the different heat transfer regimes and is

providing related heat transfer correlations. Because of the related difficulties, however, more than three years will have lapsed before the first submission of results for publication.

The foregoing research will yield an experimental data base and correlations which should aid in developing algorithms for controlling strip cooling on a run-out table. It will also yield recommendations for optimizing the installation and operation of jet impingement systems. From the university prospective, it has afforded an array of difficult experimental problems which have contributed greatly to graduate student (and faculty) education.

4. Summary

This paper has provided a personal view of mechanisms for establishing industry/university interfaces and of benefits associated with maintaining such interfaces. Although it is difficult for universities to participate directly in industrial product cycles, which can have durations of less than a year, they can still perform experimental or theoretical studies which establish the feasibility of a technical option or provide an information base for future development of the option. Such studies may also reveal fundamental features which suggest more rational design or operating conditions. From the viewpoint of a university researcher, an ideal collaboration is one which contributes to technology development, enhances the base of fundamental knowledge, and contributes to graduate student education.

Acknowledgements. I would like to take this opportunity to express appreciation to Messrs. Richard Chu (IBM), William Bennon (Alcoa) and Timothy Veslocki (Inland

Steel). These gentlemen have done much to sensitize me to their industry's technologies and needs and to identify a variety of rich and robust problems. My interactions with them have reinforced a long held belief that basic and applied research need not be mutually exclusive activities but can be coupled to benefit both science and technology.

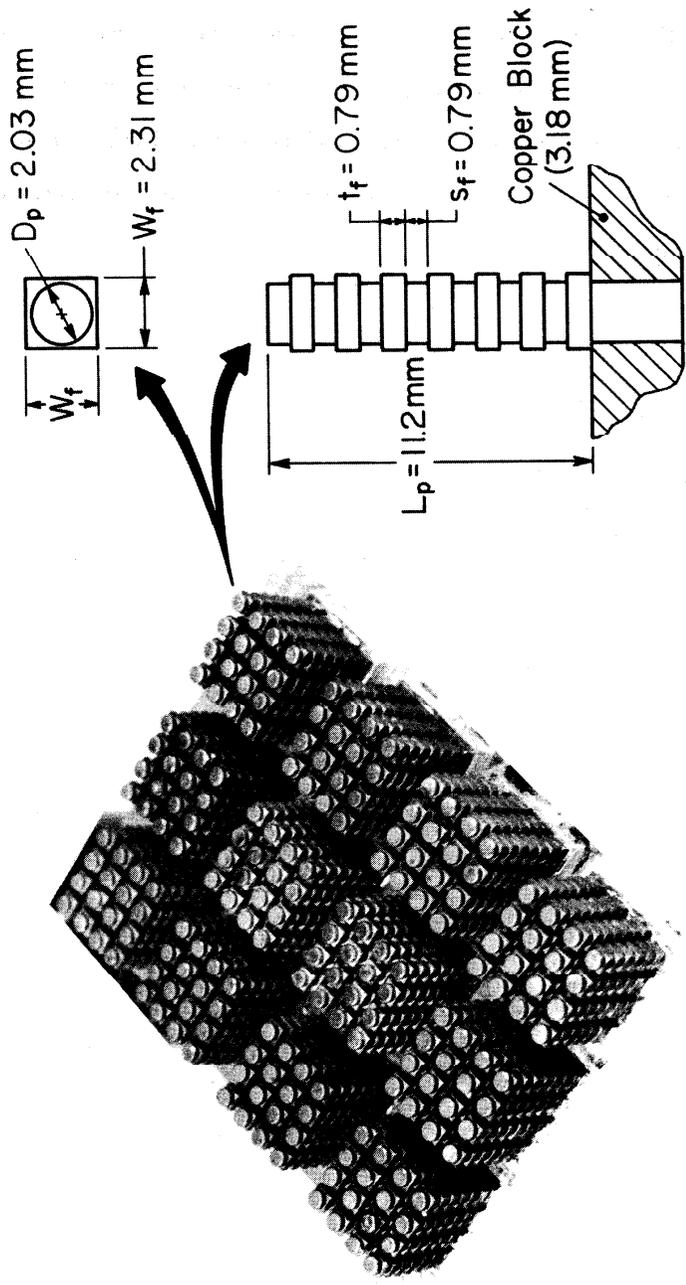


Fig.1 Finned-pin heat sink design for simulated multi-chip array.

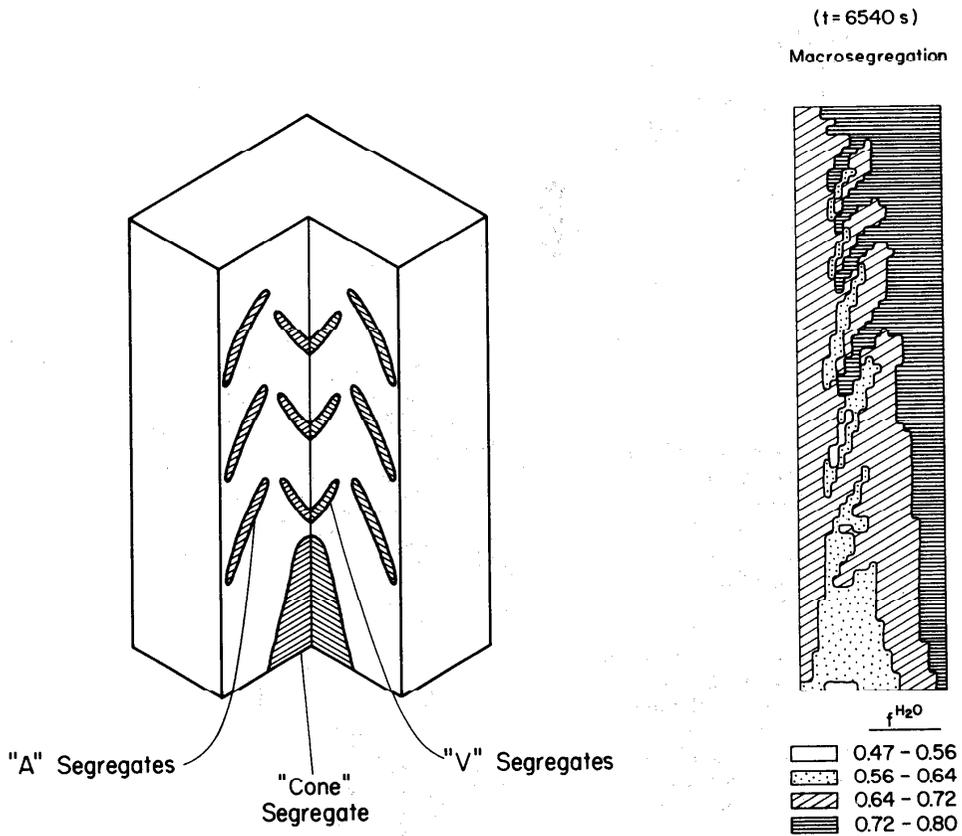


Fig.2 Macrosegregation: (a) Schematic of possible segregate patterns in a statically cast ingot, (b) Continuum model prediction of macrosegregation pattern in an $\text{NH}_4\text{Cl}-\text{H}_2\text{O}$ casting.

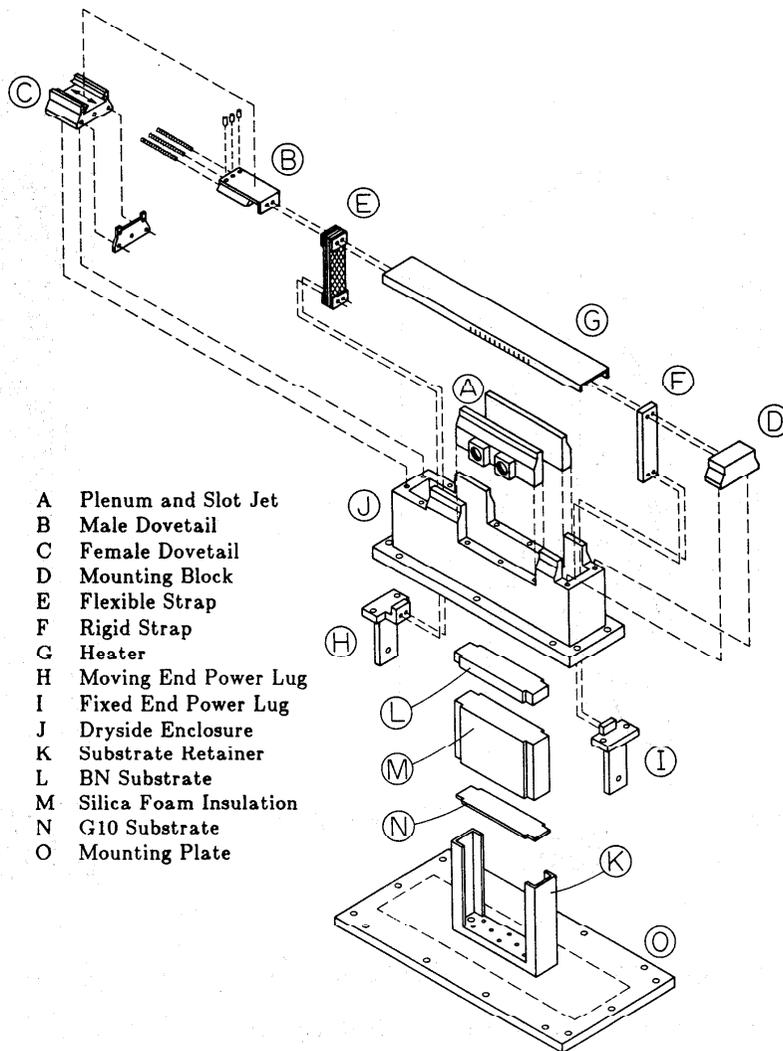


Fig.3 Assembly drawing of heater module used to simulate nucleate and film boiling in quenched strip metal products.

Heat Transfer in Japan - Some Personal Observations

J. P. Hartnett
University of Illinois at Chicago

My first direct contact with Japanese heat transfer came in the late 1950's, when I had the good fortune to meet the late Professor Takashi Sato of Kyoto University. At that time, I was Professor of Mechanical Engineering at Minnesota, associated with the Heat Transfer Laboratory directed by Professor E.R.G. Eckert. Professor Sato joined our group as a Visiting Professor, remaining at Minnesota for one year. I spent many hours with Professor Sato during that period and as result of my discussion with him I decided to visit Japan during my sabbatical leave which was scheduled for 1960.

As it turned out I had the good fortune to receive a Guggenheim Fellowship allowing me to spend six months as a Visiting Professor at the University of Tokyo in the Fall of 1960. I recall vividly my arrival by ship in Japan with my wife and five young children, ranging in age from two to thirteen years. We were met at the dock by Professor Niichi Nishiwaki and his young Associate Professor Masaru Hirata who transported us by automobile to our hotel. During the following months Professor Nishiwaki arranged for me to visit many of the other major universities involved in heat transfer research including the following universities: Tokyo Institute Technology, Kyoto, Tohoku, Hokkaido, Kyushu, Nagoya, Osaka and Yokohama. On these visits I had the good fortune to meet a number of Japanese pioneers in the field of heat transfer and fluid mechanics, including F. Tachibana (Tokyo); Busuke Hudimoto and S. Sugawara (Kyoto); Shiro Nukiyama, Y. Tanasawa and T. Tsubouchi (Tohoku); Kiyoshi Yamagata (Kyushu); and Takeshi Saito (Hokkaido). I also renewed my friendship with Takashi Sato who introduced me to his colleague Professor Tokuro Mizushina in the Chemical Engineering department at Kyoto. At Kyushu I met Kaneyasu Nishikawa and Shu Hasegawa, the two young colleagues of Professor Yamagata.

During my visit to Hokkaido University Professor Mikio Arie spent the better part of a week in showing me around the island, a memorable experience. During that same visit I met some of the younger faculty including Hiroshi Taniguchi and Ryoji Ishiguro.

It was during this period that the International Journal of Heat and Mass Transfer came into existence. Professor Takashi Sato agreed to become a member of the board of editors and played an important role in establishing the journal as the preeminent publication in the field. The Journal also acted as a catalyst in internationalizing the field of heat transfer, with Japan playing a leading role in this process.

In the following years I revisited Japan in 1967 on the occasion of the Semi-International Heat Transfer Conference and in 1974 when the International Conference was held in Tokyo. During this period I renewed my old friendships and made some new friends including Professors Yasuo Mori and Y. Katto.

In the meantime Professor Sato had left the board of editors of the International Journal of Heat and Mass Transfer, turning that task over to Professor Mizushina. In 1973, Professor Yasuo Mori took on the responsibility as Japanese editor and remained in that position until his recent retirement from the editorial board in 1986. Professor Itiro Tanasawa is the current editor, with Professor Echigo as Associate Editor.

During the early 1970's a new journal entitled Heat Transfer - Japanese Research, containing English translations of papers that were originally published in Japanese was launched with Professor Tokuro Mizushina as the Japanese editor. This journal served to further strengthen the already close bonds between Japanese and U.S. researchers in the field of heat transfer.

In the early 1980's, Professor Mizushina turned the editorship of Heat Transfer - Japanese Research over to Professor Takeshi Kunitomo who served until his untimely death in 1986. The current editor is Professor Kenjiro Suzuki who continues the excellent stewardship of this important linkage between our two communities.

Against this background I was pleased and honored to learn from Professor Ryoji Ishiguro in the Fall of 1986 that I had been granted a fellowship by the Japanese Society for the Promotion of Science. This fellowship allowed me to spend the months of April and May, 1987, in Japan visiting many of same institutions that I had visited in 1960. The principal purpose of my visit was to meet with university professors and industrial researchers to discuss the current state of heat transfer research in Japan and the United States. A secondary purpose was to discuss the current energy situation in Japan and the U.S.A. and to review research trends in the United States.

On my previously mentioned 1960 visit I was greatly impressed by the quality of the heat transfer research in Japan, which matched the best work underway in the U.S.A., Europe or the Soviet Union. However, the quality of Japanese research in heat transfer was modest at that time. Consequently it was possible at the conclusion of my 1960 visit to write an article entitled "Heat Transfer Research in Japan".

On my recent visit to Japan it was obvious that the quality of the heat transfer research remains world-class. It was equally clear that the magnitude of the heat transfer research effort currently underway in Japan is so extensive that it is impossible to cover in a short article. As evidence of this growth I can note that in many of the above institutions there was a single chair for the field of heat transfer in 1960, whereas today most of these universities have from three to five chairs devoted to the study of heat transfer. As additional evidence it can be noted that the Japanese Society of Heat Transfer has over 1,000

members. Over 650 members attended the 24th National Heat Transfer Conference held in Matsuyama in late May where over 250 papers covering the whole spectrum of heat transfer were presented.

Against this background I will not attempt to review in any detail the ongoing heat transfer research efforts. Rather, I will attempt to make some general observations about trends in heat transfer research in Japan, to note some differences in the Japanese engineering educational system as compared to the United States system and to discuss the level of university-industry interaction in Japan and the U.S.A..

As stated above, the quality and quantity of heat transfer research in Japan are very high, making Japan a world-class contributor to this field. As in the United States, much of the ongoing heat transfer research is related to the so-called energy crisis. This research is driven by the fact that a better understanding of many of the heat transfer problems being studied will lead to improved operation of current energy systems (i.e., lower energy use) and contribute to the design of more advanced energy-related technologies (e.g., fluidized bed systems, advanced nuclear plants).

Another similarity in the Japanese and American heat transfer research program is that more and more effort is being expended on multiphase flow systems. This comes about from the general belief that while we do not have a complete understanding of single phase systems (especially turbulent flow systems) nevertheless we know enough about single phase behavior that we can design such systems sufficiently well for most engineering applications. However, in multiphase systems we are far from that level of understanding. Since many advanced engineering systems including nuclear power plants, fluidized bed systems and chemical reactors involve multiphase flow, it is important to improve our basic knowledge of such flows.

Notwithstanding the increased attention being paid to multiphase systems a substantial effort is continuing on basic turbulence studies in single phase systems. In addition, free convection, mixed convection and radiation (especially in solid-gaseous flow systems) are also being investigated at a number of institutions, both in Japan and the United States.

It is not too surprising that the heat transfer research programs of Japan and the United States have the same general profile. This of course comes about as a result of the very close relationship between the researchers of the two countries. The early cooperative endeavors in launching the International Journal of Heat and Mass Transfer and Heat Transfer - Japanese Research and the superb organization of The International Conference in Tokyo in 1974 set the trend. Frequent visits by Japanese researchers to the United States, paralleled by visits of American researchers to their Japanese counterparts are now commonplace. Beginning in 1980, the National Science Foundation and The Japanese Society for the Promotion of Science initiated a series of binational heat transfer seminars, the most recent of which was held in Hawaii in the Spring of 1987. In addition Japan and the U.S. continue to participate in The International Assembly and in The International Centre of Heat and Mass Transfer in Yugoslavia. All of these interactions keep Japanese and American researchers working on those problems which are considered to be the most important by international heat transfer community.

While the general trends in heat transfer research are the same in Japan and the U.S.A., there are major differences in the way in which the research is carried out in the two countries. This results from differences in the structure and tradition of Japanese and American universities. Some of these differences are:

- (1a) Japanese universities operate with a "chair" system, with each chair including a full professor, assistant or associate professor and 2 research associates, generally Ph.D's. (There is some latitude in the staffing since it is possible to substitute a machinist or technician, or in some cases a secretary, for a research associate). Additionally each chair receives approximately 4 million yen per year, approximately \$30,000 at the 1987 exchange rate, for operating expenses.

(1b) American universities are built around academic departments which may have as few as ten or as many as one hundred faculty members. The department is administered by a department head appointed by the dean of the college with the approval of the upper administration of the university. Generally the department head serves for a substantial number of years. The operating budget, which is handled at the departmental level, includes salaries for the departmental faculty and supporting staff including teaching assistants, secretaries and technicians. It also provides funds for such operating expenses as telephones, xeroxing, publications and travel. In some instances the department head may consult a faculty advisory committee on the expenditure of such funds. In general the departmental operating budget contains little or no funding for research equipment or research activities.

(2a) In the Japanese university system the assistant or associate professor (selected by the professor with the approval of his professor colleagues) generally succeeds to the chair on retirement of the full professors.

The system leads to considerable inbreeding since the ranking professor tends to select his assistant/associate professor from graduates of his own institution.

(2b) Generally the total number of academic positions in an engineering department in the United States is fixed by the number of engineering students (undergraduate and graduate) in the program. Academic positions include professors, associate professors and assistant professors and there is no one-to-one relationship between these categories (i.e., an assistant or associate professor is not formally connected with a full professor). The promotion of an associate professor to full professor or an assistant professor to an associate professor is determined by performance as judged by a senior review committee and is not dependent on the retirement of a full professor. Consequently, there is no pressure on the senior faculty to retire early, and as a result many professors stay on beyond the age of 70 although they can elect to retire with full benefits at age 65.

With a few notable exceptions such as M.I.T. and California Institute of Technology, American universities do not retain their own PhD's for their faculty; rather they seek faculty members who are graduates of doctoral programs of other universities.

(3a) Engineering departments in Japan generally involve no more than 5 or 6 chairs. The small size of a department generally means that there are several mechanical engineering departments, each having the same curriculum. In each department the headship rotates on an annual basis among the five or six full professors. It is the responsibility of the department head to find positions for all graduates from his department. In order to carry out this responsibility he must meet with hundreds of industrial representatives. The relatively small size of the departments makes it possible for the faculty to know their students allowing the matching of the individual students with the most appropriate company.

Furthermore, this system means that every 5 or 6 years a full professor in his turn as department head meets hundreds of industrial representatives. This contact allows the academic staff to become familiar with the current problems facing industry.

(3b) At most American universities the department headship is not rotated among senior faculty, but rather the department head serves on a continuing basis at the pleasure of the dean. Furthermore, engineering faculty members in the United States are not involved in the job placement of undergraduate engineering students. Rather this is

handled by a general university office which deals with all university graduates. Consequently, the size of the engineering department in the U.S. is not limited by this consideration.

- (4a) Many of these Japanese universities I visited have a central campus involving undergraduate and graduate students and one or more research institutes, such as the Institute of Industrial Science at the University of Tokyo or the Institute of Advanced Materials Studies at Kyushu University. These research institutes are located away from the main university campus.

At the main university campuses I found few examples of special research activities sponsored by industry or by government agencies (other than the ministry of Education, Science and Culture which is responsible for funding higher education in Japan). There is no apparent financial incentive to carry out sponsored research since the faculty involved do not receive any additional income. Furthermore, since Japanese professors generally do not provide financial support of master's and doctor's student, the availability of sponsored research does not increase the number of graduate students available to a professor.

At some of the university-connected research institutes the work may be more applied but even here the major support comes from the Ministry of Education, Science and Culture. The "chair" system also prevails in the research institutes, and there appears to be some difficulty in attracting graduate students. Again there does not appear to be any financial incentive to carrying out industrially sponsored research.

- (4b) American university professors who receive sponsored research support from a government agency or from industry can generally attract good graduate students because such students receive full tuition plus a stipend for carrying out the research. Furthermore a faculty member with such outside financial support can receive two to three months summer salary since the normal academic contract in the United States is for 9 months service. Thus there are substantial benefits of sponsored research, both direct and indirect, to an American faculty member.
- (5a) It is illegal for a Japanese professor associated with a national university to consult for a Japanese industry and to receive compensation for such consultation. While some informal consultation does occur it is certainly not encouraged by the current government regulations. Furthermore Japanese professors are prohibited from becoming entrepreneurs and establishing their own companies.
- (5b) American university professors are encouraged to engage in consulting for industry and to receive compensation for such activity. Furthermore they are also encouraged to become entrepreneurs, even to the point of establishing their own companies. There are some constraints to ensure the integrity of the university system and minimize the possibility of conflicts of interest.

Against this background I came away from my 1987 visit with several new impressions of the Japanese engineering educational system. First of all I was surprised to find that all senior and graduate engineering students carried out an experimental program requiring the actual fabrication of experimental equipment. This comes about because there are relatively

few machinists or technicians available in Japanese universities. As a result Japanese engineering students have much more "hands-on" experience in working with materials than do American students. One of the outcomes of this situation is that the quality of experimental facilities in Japanese universities is not uniform, reflecting the difference in the skills of the students.

Another difference in the two systems involves the financial support of graduate students seeking the M.S. and Ph.D degrees. In contrast with his counterpart in the American university who receives both tuition and a monthly stipend, the majority of Japanese graduate students pay tuition (although there are some government loans for tuition) and receive no stipend.

In recent years there appears to have been a decrease in the number of Japanese doctoral students and an increase in the number of foreign graduate students, particularly from the Peoples Republic of China, Korea and Taiwan. This same trend is apparent in the U.S.A., namely a decrease in the number of American graduate students accompanied by an increase in foreign student enrollment.

Finally, the most surprising finding was that there was not a close working relationship between Japanese industry and the university engineering faculty. Our perception in the United States is that there is considerable interaction and close collaboration between industrial organizations and engineering faculty. This is often cited as a major factor contributing to the international economic success of Japan. Acting on this perception, American colleges of engineering have been developing much closer working relations with industry. This trend is being urged by state and federal research agencies including the National Science Foundation and the U.S. Department of Energy.

Many Japanese engineering professors are aware of this trend in the United States and opinion is clearly divided on the advantages and disadvantages of bringing the Japanese university and industrial communities into closer collaboration. Only time will tell whether the current U.S. move to encourage university-industry interaction accelerates technology transfer, improves the national economy and contributes to strengthening the academic programs.

Acknowledgments

Let me conclude by expressing appreciation to the Japan Society for the Promotion of Science for providing the opportunity for me to visit with many of my old friends and colleagues throughout Japan. The visit also gave me the opportunity to meet many of the younger faculty who are carrying on the tradition of carrying out world class research in heat transfer. I also thank all of my academic and industrial hosts for the outstanding hospitality I received through my two months stay. Finally, I am especially grateful to Professor Ryoji Ishiguro of Hokkaido University who took the initiative in applying for the JSPS fellowship on my behalf and in making all of the arrangements for the visit.

中国における産官学共同研究の役割

郭 克 輝 (中国科学院広州エネルギー研究所)

私は、本年10月北海道大学に留学生として参りまして、工学部機械工学科の研究生として勉強中ですが、指導教官の谷口博教授より表題のテーマにて中国の事情を紹介するように言われました。1982年西安交通大学を卒業し、1985年広州エネルギー研究所にて修士課程を修了した後、引続き同研究所熱エネルギー研究室に勤務しておりますので、経験は浅く必ずしも全てを紹介することはできませんが、所属する研究室の状況も含め二三紹介することとさせていただきます。

ご承知のとおり、中国では日本と異なり産官学に相当する部門は全て国に属していますので、官学の二本立てとなるのですが、製造部門を産業界とみなして話を進めることとします。また、中国では大学の所属が教育部(文部省に相当)のみとは限らず、科学院(科学技術省に相当)所属の中国科技大学(安徽省合肥市)、成都科技大学(四川省成都市)などがあり、水力電力部(エネルギー省に相当)所属の東北電力学院(吉林省吉林市)など産業界に密着した大学も見受けられるのです。そこで、産業界、国立研究所、大学に分けて考えることとし、日本の事情に当てはめて産官学の役割を述べさせていただきます。

私の所属する研究室での研究題目は、新型ボイラの開発、ヒートポンプの開発、ヒートパイプの開発、内燃機関の性能解析、ガスタービン関連の技術開発、地熱利用技術開発などが現在進められており、産官学にまたがる研究が行われています。新型ボイラの開発を例にとると、技術担当の広州エネルギー研究所は産業界の無錫鍋炉工場(メーカー)、韶關冶煉工場(ユーザー)との研究交流は盛んであり、学界としても浙江大學、清華大學などを加えて共同研究を進めることが望まれています。ヒートパイプの開発に関しては、当研究所内で得られた成果を基とし広東省吳川縣機械工場と共同して試作研究を行い、実用化するなど産官の緊密な関係を保っております。その他にも、伝熱に関する共同研究が教育部華南工學院(広州市)との間で行われており、地理的に近いことも幸いして、官学共同研究の実をあげている例もあり、中国での産官学共同研究の役割は他国と同様重要であるといえましょう。この機会に、皆様方のご意見を伺えればと思っておりますので、各国より来られている留学生の方々も含めお教えいただければ幸いです。

現在、私の留学している北海道大学では、来年四月からの博士課程入学を目指して勉学中ですが、将来の研究テーマとしての「放射伝熱に関する数値解析」に関する検討も始めております。この研究を行うに際して、広州エネルギー研究所とも連絡をとりながら進め、また私の卒業した西安交通大学とは谷口博教授とともに交流しつつ共同研究として実施で

きればと考えています。最も大切な大学院課程での研究を中心に勉学することは当然ですが、日本に留学した機会を有効に利用するため、ヒートポンプに関する勉強も同時に進めさせていただくことを谷口博教授とも相談中です。ヒートポンプに関する研究は、広州エネルギー研究所での重要な課題の一つでもありますので、北海道大学との共同研究にもし発展することができればと考えています。日本におけるヒートポンプの産官学共同研究の様子について、二三伺う機会がありましたので、帰国後のことを考え上記の相談を進めている次第です。中国より日本に留学した人々は沢山おりますが、帰国後も共同研究を続け国際会議などで発表している例はあまり多くないようです。しかし、日本での研究成果を基とし論文博士の学位を取得した方、帰国後も研究を続けその成果を今年9月の石炭燃焼国際会議（北京市）で発表した方の経験を中国出発前に聞いて参りました。同じ国内の産官学共同研究に留まることなく、国際間の共同研究も併せて検討する時期に来ているのではないのでしょうか。折角の留学を機会に、此度の産官学共同研究に関する事項も勉強して行きたいと考えています。

此度の「伝熱研究・産官学共同研究特集号」の企画を見せていただき興味を持ちましたので、他の記事を読んで見たいと思っている次第です。留学直後でまだ日が浅いまの執筆であり、周囲の方々の御協力により本文を作成することができたことを感謝しております。また、博士課程に入学した後にでも、機会が得られれば研究内容など改めて紹介することができればと考えております。

椿 淳一郎 (JFCC)

1 はじめに

1年ほど前に、絶対0度近くの超低温領域でしか起こらないと信じられていた超電導現象の常識を破る物質が発見された。それが誰にでも作れる「焼物」であったことも手伝って、世の中に超電導ブームが湧き起こったことは記憶に新しいところである。

しかしこのブームの犯人である酸化物セラミックスが、超電導物質から超電導材料になるためには、幾つか越えなければならないハードルがある。まずは用途開発であり、次は用途に応じた材料を製造する技術の開発であり、次に製造コストの低減があげられる。超電導物質でも期待されている用途は電力の輸送であり、そのためにはセラミックスを線材化する技術を開発しなければならない。現在は、過熱状態にあったhigh T_c競争も90Kあたりで一段落し、電流密度(Jc)を上げることと、線材化に関心が移ってきているようである。

何年後かに、線材化の技術が確立したとしても、超電導材料が現在の鉄やガラスのように広く使われるためには、もう一つ解決しなければならない問題がある。それは材料の規格化であり、測定・評価法の規格化・標準化である。

現在新素材として期待されている、ファインセラミックスが抱えている課題の一つが、この規格化の問題である。

産官学が共同して取り組まなければならない課題は沢山あると思われるが、筆者の所属している(財)ファインセラミックスセンターは、ファインセラミックスの規格化を促進することを業務の柱として昨年本格オープンした試験研究所であり、筆者もそれに関係していることから、ファインセラミックスの規格化・標準化を進めるにあたって、産官学が共同してあるいはそれぞれが独自に取り組まなければならない研究課題について私見を述べてみたい。

2 規格化が必要となる背景

規格化・標準化の必要性については特別説明の要もないと思われるが、例えばワープロ用のインクリボンが各メーカー、機種によって異なる不便を考えればよく理解していただけるものと思う。また、盃と徳久利を考えてみると盃に大小の違いがあってもなんの不便もないが、徳久利に大小があると、外では安心して呑めないことになる。

規格化から得られる利益は、部品および製品に互換性ができ、消費者が無駄使いをしなくてすむだけでなく製造コストを下げることができ、かつ円滑な商取引を可能にする。また品質が保証されることも、規格化から得られる重要な利益の一つである。

互換性、円滑な商取引、品質保証が要求される背景には、その材料なり製品が相当量商品として市場に出回っているということがある。ファインセラミックス関係の規格化・標準化が望まれていることは、ファインセラミックスが広く使われだした証拠でもある。これは新素材と呼ばれる材料に共通しており、工技院が「新素材標準化特別委員会」を設置しファインセラミックス系新素材、金属系新素材、有機・複合系新素材の標準化を図っていることから理解できる。

この標準化の背景が準備されるのは、もちろん産業界の努力の賜である。

3 標準化すべき項目の選択

標準化・規格化の必要性が認識されれば、次は何を標準化・規格化するかが問題となる。つまり、材料を実用的な観点から分類分けできる評価項目を選定することである。例えば鉄関係では、化学組成特に炭素の含有量によって分類されている。それに対して、ファインセラミックスの場合は化学組成も重要であるが、そのほかにも密度（緻密さ）とか微構造など重要な因子があり、それらの因子がファインセラミックスの性質にどの様に反映されるか定量的に捉えられていない。ファインセラミックスの場合鉄やガラスやプラスチックと異なり、製造工程に溶融工程が入っていないため、各工程での取扱の良悪しがそのまま焼き上がったセラミックスの性質に累積されて反映される。従って原料粉末の評価、製造工程を支配する因子の定量的把握が重要になる。しかし現実には、ファインセラミックスがノウハウの塊によって製造されていることからわかるように、評価項目や因子が捉えられていない。例えば同じメーカーの原料粉でもロットが違うだけでトラブルを起こすという話はよく耳にすることである、もちろん化学的純度、粒度分布、比表面積、等にロット間の違いはない。

これらの評価項目、支配的因子を捜し出すということは、産官学それぞれ単独の研究では難しく、3者の共同研究によって始めて可能となる。

評価項目や因子の選定は測定手段の制約を強く受ける。従って、より精度の高い手段の開発、新しい原理にもとづく測定手段の開発が重要な意味を持つてくるが、これは主に「学」の課題ではないかと考える。

4 データの蓄積

それらしき評価項目も決って測定手段もあるとなると、次はデータによって選定した評価項目が妥当かどうか判断しなければならない。

データを採り評価するには中立性が要求されるし、時間がかかる地味な仕事で採算ベースにも乗らないので、「官」が担当すべき分野といえる。現実にも通産関係の研究所が中心的役割を果たしているが、業界が独自にデータを採っている例も多いようである。この傾向は民間活力の導入ということで今後も続くと思われる。

現在我々のグループもこのような観点にたち
高純度アルミナを20数種入手し、粉末の物性測定を開始している。続いて成形性、焼結性などの製造工程での評価を行い、最後に焼結体の様々な性質と結び付ける予定でいる。

5 おわりに

広く使われている鉄、セメント、ガラスなどの材料の場合、歴史も古くその標準化・規格化も長い時間をかけて積み重ねられてきた。しかし現在の材料開発とその普及のテンポは非常に早く、短時間のうちに規格をつくらなければならない。従って、規格化・標準化に関する研究は、産官学共同の研究テーマの中でその比重を増してくると思われる。

建築・空調の分野

中原 信生 (名大)

1. はじめに

建築の分野で伝熱に最も関わりの深いのは空調調和である。空調調和は建築における熱的環境と空気の衛生的環境を司るもので、一般的には前者の役割の方が比重が高い。建築における熱・湿気の伝達が建築環境工学の内の大きな分野を占め、その主たる応用が空調調和である。空調調和・衛生工学会の前身が衛生工業協会であったことを考えてもこの分野の産学協力の歴史は古い。ここでは産官学協力の現状と今後の方向などについて大局的に記述する。

2. 熱負荷計算問題

冷暖房負荷の計算は空調調和设计の原点であり、その計算結果が装置容量を決定し、ひいては環境の質、エネルギー消費量に影響するので空調設計の最大関心事である。建築施工の品質、使用材料の熱的特性の経常変化、建築物内に居住する人間活動の任意性・非定状性、外界条件変化の非定状性など工業伝熱とは様相を大きく異にするため、昭和47年頃に純非定状計算体系が確立されてからも議論が絶えない。特に我国の特長である間欠冷暖房における予熱・蓄熱の負荷、そしてそれが負荷計算のゾーニングとの相互関係が実態と計算体系に合致せぬところなどがあり、実務現場からのフィードバックが行なわれている。空調調和・衛生工学会の熱負荷算法小委員会では各社の計算プログラムを比較対照するなどしてこの問題に取り組み問題点の洗いだしを行なったが¹⁾、この問題は今後とも最大の産学協力テーマの一つとして引き続き研究されるであろう。

3. 空調システムシミュレーションプログラムの開発

空調システム設計は建築実務家の独壇場であったが上述の非定状負荷計算法の開発以来システム解析が学術分野で取り上げられ始め、さらに省エネルギー技術開発の波に乗って産業実務部門を中心にエネルギー消費量を予測するための空調システム全体のシミュレーションプログラムの開発が盛んになった。それらが出揃ってきた頃、プログラム間の計算結果の差が目立ち始め、一方では環境値(温湿度)の質の予測問題がクローズアップされてきたためここに日本建築設備士協会に産学協同のシミュレーションプログラム開発の委員会が発足し、近年その成果品を発表した。この開発の過程において各有力企業のプログラムの比較がなされそれぞれの利点・欠点などが明確になって自社にフィードバックされたに違い無く、同時に一般に流布可

能な汎用プログラムが発表され²⁾、斯界に大きく寄与できる基盤が整備された。しかし大型計算機用であることや価格の点、その完成度の点で今後も継続して研究されるべき多くの問題点が残されており、なかんずくパーソナルコンピューターが完全に普及した今日ではパソコン利用システムへの期待が大きい。これに関しても学、産それぞれにおいて開発の成果が発表され始めており³⁾、実務の現場からの要請は日ごとに高まっており、空調用のPC-CADD開発の産学協同も間近であろう。今後の大きなテーマである。

4. 太陽エネルギーシステム

太陽エネルギー利用システムは究極のエネルギーシステムとして常に期待されながら時代のエネルギー事情に対応して消長してきた。昭和50年代にエネルギー危機に対応して通産省のサンシャイン計画を始めとする官庁主導の大規模プロジェクトが核となり官産協力で大いに技術開発が行なわれ、また学術面ではこれとは別に文部省科学研究補助金によるエネルギー特別研究が大規模に展開されて昭和61年までに蓄熱・集熱・パッシブソーラーシステム・自然エネルギー利用システムの研究において多大の成果を挙げた。このようにこの10年間に産・官・学のそれぞれの立場での研究開発と相互の協力関係は目覚ましいものがあつたが、エネルギー輸入事情、原油単価が落ち着いてくるにしたがつて近年急速に太陽エネルギーに対する意欲が低下し、識者を憂えしむる所大である。この間日本太陽エネルギー学会は国際太陽エネルギー学会(ISES)との協力関係のもとにこの方面の研究、技術展開、普及への貢献を行なつて来たが、長期的観点から見て現状を憂慮し、いかにして意欲を保持せしむべきかについて産学間で協議の結果、昭和62年度より産学協力部会を新設して普及への問題点の発掘と技術開発を目指すことになった。最初のテーマは新ソーラーヒートポンプシステムであり、そのほか高性能集熱器、太陽冷暖房実績の解析・評価、システム設計法の整備ならびに住宅暖房システムの新しい観点からの見直しなどが有力テーマとしてアンケートから抽出されている。おりから同年秋にハンブルクにおいてISES大会が開催されヨーロッパ諸国の環境汚染への不安にもとづくクリーンエネルギーとしての太陽への期待で予想以上の盛況であつたと報告されている⁴⁾。アメリカと日本からの論文、製品の参加が少なくその技術レベルへの疑問さへ聞かれたという。1989年には日本の神戸にて次のISES大会が予定されており、それに向かつての産学協力関係が箱根大会⁵⁾以来の高まりを見せることが大いに期待されている。これを成功に導くことが環境・エネルギー問題に対する我国の認識を世界に示すことにならうから、官側の強力な応援が必要と思われる。

5. 蓄熱システムの開発

水蓄熱システムの研究は学術的な研究と実務側からのフィードバックも多くなされ温度成層型も含めてほぼ設計資料がまとまったが、この間、東京電力から学会ならびに大学に委託研究

されて際だった産学協力の実を挙げた⁶⁾。固体蓄熱・地盤蓄熱については上述のエネルギー特別研究において多くの成果が挙げられ、言わば官学協力の実を挙げた。化学蓄熱についてはまた別の分野における産官学協力による研究開発が行なわれている。一方、建築構造上の問題、スペースの有効利用、電力シフトの要請がより高密度で実用的な蓄熱システムを求め、これが近年氷蓄熱システムの開発を大いに進展させた。東京電力・中部電力などが自社開発も含め建設業や大学に研究委託を行ない、上述の水蓄熱の開発過程とは比較にならないくらいの短期間に理論的研究を含め最適化を目指した実用化の研究開発が行なわれつつある。低温利用を可能とする氷蓄熱はその経済性を確立するためにも蓄熱のみの問題でなく空調システム全般についての革新的展開を予感させるものがあり、この意味でこれからの一層の産学協力を期待されるものは多大なものがある。

6. 地域冷暖房・コジェネレーションシステム

都市における地域冷暖房の在り方に関してわが国地域冷暖房普及の初期に、建設省・大学・建設業界の研究チームからなる際だった産官学研究の成果があり⁷⁾、それに則った実施例があった⁸⁾。石油危機と省エネルギーの波の中で地域冷暖房は一時忘れ去られたようになったが、太陽熱利用とは逆に石油緩和とともに復活の兆しが優勢である。しかし大部分の現存システムは依然省エネルギー面からは問題点をはらんでおり、この点を解決しなければ再び落日の憂き目を見るのは確実である。そこで、エネルギー有効利用、省エネルギー、都市防災、社会資本、都市環境などの問題を総括的に把握して正しい方向性を確立するためにはセクショナリズムを排除した官庁主導型の産官学協力が必要とされる典型例である。それと関係づけて各種規模のコジェネレーションの適用性についても同様な総括的検討が必要である。

7. 人事交流と寄付講座

産学の交流を活発にするためには人事の交流が活発に行なわれることが望ましい。とくに空気調和を含む建築設備の分野の人材は社会のそれに対する要請に比してきわめて不足しており、大学の教官数はきわめて貧困である。筆者自身を含め最近10年間に企業から教育界へ数名を超える人材が移籍して産学交流の一里塚としての役割を果たしているが、大学へ転出する時の企業側における影響を考えると固定的な人材交流を推進することはなかなか困難である。ところが、最近国立大学への企業からの寄付講座設置に道が開かれ、東大、九大にいち早く設けられた。これに対して学問の独立性を阻害するものだとする意見もあるが、大学研究予算の制限や膠着した学科・講座の制約を超え、一定期間に亘ってその時期に最も社会が望む研究対象を大学に持ち込むには良策であると思われる。基幹的講座は学問・技術の基礎を担当し、寄付講座が先端的分野を次々に研究・教育の場に持ち込むことができれば陳腐化し勝ちな専門教官に与える刺激材としての役割も含め、きわめて有効に機能すると思われる。

8. 産官学交流の問題点

いずれかと言えば官学の結び付きに問題点が多いように思われる。それは単年度単位であることが多く、また若手担当官の業績とか予算消化が目的であるようなテーマも少なくないで、学術側研究者は意に反して表面的な語呂合わせに終わってしまったたり、官側の規定方針の隠れ蓑になってしまうことが少なくないようである。昨今、大規模プロジェクトと称する都市等の開発計画にその種のものが多い。環境・都市・エネルギーに関連の深い建築・建築設備・空気調和の分野の研究者は確かな信念のもとに行動することが特に要請される。産学交流についての問題点は言い尽くされて来ている。いずれにしても大学にある研究・教育の担当者として心しなければならぬのはまさにそのテーマが大学教育と研究者の育成に役立たねばならないと言うことであり、この事を肝に命じている限り交流研究の有害性は消滅するのであろう。

9. おわりに

空調の分野では伝熱問題そのものを扱うのは熱負荷計算ぐらいであって、そのほかは全てシステム問題である。そこでシステム特性の解析と最適化問題が最も重要なのであるが産・学とも従来これらを究めることが極めて少なかった。そこでそこそこ産学交流に残された多くのテーマが存在しているのであって、これらの一部に焦点を当ててその現状と将来、ならびに問題点などに言及してみた。ここに触れたもののほか、省エネルギー関連、ヒートポンプシステム、暖冷房システムと人体温冷感、省エネルギー効果の実績評価や空調環境のエネルギー・環境の視点からの総合評価など、産学協力研究に適したテーマがいくらかもあるが省略させて頂く。昭和62年11月に空気調和・衛生工学会創立70周年記念シンポジウム「空調における省エネルギーと最適化の諸問題」⁹⁾はこれらの諸問題を浮き彫りにしたものである。

文献

- 1) 空調設備基準委員会熱負荷算法小委員会・中間報告：設計用熱負荷シンポジウムテキスト、
空気調和・衛生工学会、1986、10
- 2) 建築設備十協会：空調システム標準シミュレーションプログラム (HASP/ACSS/8502)
解説書 同協会、1986
- 3) 中原信生ほか：パソコンによる設備設計システムの開発的研究、その1～その7、
日本建築学会学術講演更概集、同東海支部研究報告、
空気調和・衛生工学会学術論文集、等、1985-1987
- 4) 坪村宏：国際太陽エネルギー学会・ハンブルク大会に出席して
エネルギー・資源、VOL.8 No.6

- 5) 日本太陽エネルギー学会：PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE APPLI-
CATION OF SOLAR ENERGY April 7-10,1985,Hakone,Japan
- 6) 空気調和・衛生工学会：特集。蓄熱システム、空気調和・衛生工学、VOL.56,No.6,1982.6
- 7) 日本建築センター：都市における地域冷暖房の計画及び建設技術に関する研究、
研究報告 昭和45年-48年、同センター
- 8) 中原信生：岡崎地域冷暖房の計画と運転実績、第一～第二報
空気調和・衛生工学会学術論文集(1976)、日本建築学会東海支部研究報告集(1979)
- 9) 空調基準委員会省エネルギー小委員会：創立70周年記念シンポジウムテキスト
空調における省エネルギーと最適化の諸問題
空気調和・衛生工学会、1987. 11

自動車関連分野における産官学共同研究の現実と期待

豊田中研 藤掛賢司

自動車に関する研究・開発の立場から産官学共同研究について述べるようにこの御依頼を受けたので、会員の皆様のお叱りを受けることを覚悟のうえ、私見を述べさせていただきます。

産官学共同研究の必要性は、私が大学の教室から企業の研究所に移った当時（昭和36年）から強く感じていたことである。伝熱シンポジウムや機械学会の講演会などに出席した折りに、大学の先生に“大学では企業から研究費を出せば企業ニーズにもとづく研究をやっていただくことができるでしょうか。ただし、研究中はもちろん、終了後も数年間は非公開を守っていただきたいのですが。”とお尋ねしたことがある。当時、大部分の先生、とくに国立大学の先生からは“我々は公務員であるから特定の企業の利益になるような研究はできないし、大学での研究はすべて公開が原則になっております。”というお話で、満の深さを痛感した。それ以来私は「象牙の塔」と称する大学は、産業界との交流を敬遠する傾向にあるのではないかと思うようになった。しかし、最近、産学共同研究の必要性が大学側からも聞こえてくるようになりこうした傾向が徐々に変化してきているように見受けられる。

また、昭和60年度に制定された「研究交流促進法」、昭和62年から始まった共同研究センター制度（文部省）、官民連帯共同研究制度（通産省）などに、国の産官学共同研究を推進させようとする姿勢がうかがえる。しかし、産官学交流の実績を研究資金面で調べてみると我が国ではまだまだ少なく、米国などに比べると初歩的な域を出ていない。

総務庁の「61年度科学技術研究調査結果の概要」という資料をみると、昭和60年度における我が国の使用研究開発費62,564億円のうち産から学へ流れた資金は281億円である。これは、学の使用研究費10,754億円の2.6%である。ちなみに、米国の大学の使用研究費106億ドル（約14,000億円）のうち約6%が企業から流れた資金である。

一方、日本の企業から国外の大学へ流れた研究資金は237億円と国内の大学へ流れた資金とほぼ等しいが、寄付講座の設定、寄付金などによる供与が年々増加している。これは、日本の大学のような各種制約がないこと、依頼テーマの非公開が守られること、企業に対する研究資金援助活動が盛んなことなどが主な理由と考えられる。このような日本企業の米国人学への接近が勢いを増している事態を重視したNSF（米科学財団）は、日本の企業約1000社を対象

に調査を実施した。

それによると、米国の大学に研究資金を投じた日本企業は1983年度の56社（資金は計 366万ドル）から、'85年には98社（914万ドル）に急増しており、とくにMITには42社も集中している。トヨタ自動車、松下電器などは“冠講座”をもっているほか、特定の教授に研究費を出している企業が67社、大学教授をコンサルタントに雇っている企業が27社という調査結果が報告されている。分野別ではバイオテクノロジー、新素材関連においてこうした動きが活発のようである。NSFでは研究成果の帰属、特許権などの知的所有権が日本の企業にどれだけ流れたかを心配しており、近く再調査を行うとのことである。

我が国がさらに発展するためには、産官学が人事交流も含めてコミュニケーションを良くしその間に横たわる溝を産側からと官学側から埋めて、共同研究が容易にできるような環境を作ることがまず必要であろう。しかし、技術革新は急であり、かつ技術の複合化が急速に進む時代に産側ではゆっくりした動きは企業の命取りになりかねないという焦りがあり、基礎研究よりむしろ開発主体の自社の研究所に人と金を投入する傾向が強い。だが、このようなやり方は目先の開発に追われてしまい、大切な将来のための芽を出すということがまったくできないという不安が常につきまとう。一方、欧米の企業ではノーベル賞候補が何人もでるような、しっかりした基礎研究を行う立派な研究所を持ち、新しい芽を次々に出しているという現実がある。この脅威と、将来に対する不安から、自社内に基礎研究所を設立する日本企業が増加しつつある。

官学は基礎研究を、産はこのアウトプットをもとにした開発をという姿を夢見る人もおられるが、今の状況では、これを実現することは極めて困難と言わざるを得ない。つまり、企業の必要としている基礎研究は将来の新しい事業になる芽を出すということが念頭にあるために、最先端の科学技術に関連した分野、従来の学問分野の境界領域といったところが研究の主体になってくる。

一方、学側の研究体制はあまりにも学問体系化され、細分化され、かつ、大部分はそれらが個々に独立の研究体制で固まってしまっており、講座、学科にとられない研究体制がとられていない。また、各科、各講座が共通のテーマについて分担研究し、大きな成果を生み出すという研究管理体制もないように見える。したがって、伝熱学に関するニーズというように、細分化したテーマであれば産学共同研究、あるいは委託研究の可能性は出てくる。しかし、前述のような企業の必要とする基礎研究のニーズからすると、産学共同の道は少なくとも機械工学の分野では非常に限られてくる。

したがって、自動車技術の研究・開発の立場から伝熱研究の面で、今後、産学共同研究になりそうなものを述べるのは難しい。そのため、自動車における熱問題に関連した期待を述べて締めくくりにさせていただこうと思う。

自動車用熱交換器（ラジエータ、ヒータ、コンデンサ、エバポレータ、オイルクーラ、インタークーラなど）の性能改善として、30～40年前には乱れにより伝熱を促進する方法が取られたが、作動流体の流動抵抗の増加を招き、ファン、ポンプの動力増加と騒音の増加により、平板の前縁効果を積極的に利用して伝熱促進を計るルーバードフィンが研究・開発された。その結果、ラジエータの場合、単位重量当たりの放熱量はこの20年間に約3倍に増加した。つまり必要放熱量はエンジンにより決まるために大きく変化していない。したがって、それだけ薄型化が進んだ。そして、ルーバードフィンの最適設計が確立され、ルーバードフィンでは最早これ以上の小型化は期待できないところまで進歩した。しかし、自動車の低燃費化、高性能化、快適化のためには熱交換器の高性能化をさらに進める必要があり、前縁効果より優れた、飛躍的な改善が期待できる画期的な伝熱現象の発見が待たれる。

一方、自動車用エンジンの性能向上に筒内の燃焼速度を速くすることが有効である。そのため、筒内混合気にスワール、スキッシュなどにより乱れを与えて燃焼速度の向上が計られているが、乱れ、ガス流速の増加は燃焼室壁面の熱伝達も促進するために、壁面からの熱損失も増加し、熱効率の向上を妨げる。もし、熱損失を少なくすることができれば熱効率はさらに向上する。そのために、燃焼室壁を断熱すると、火焰伝播の途中で未燃混合気の温度が上がり過ぎ、爆発的に自発火する。つまり、ノッキングが発生し、その急激な圧力上昇によりエンジン性能が低下するとともに、著しい打撃音の発生、衝撃波による壁面熱伝達率の急上昇によりピストン頂部が溶損する。したがって、ノッキングの起こり易い低回転、高負荷時には壁面熱伝達率を大きくして、未燃混合気の温度上昇を防ぎたいし、それ以外の運転条件では壁面の熱伝達率を小さくして壁面からの熱損失を小さくしたい。つまり、筒内燃焼ガスの乱れ、流速に無関係に燃焼室壁面の熱伝達率が電場、磁場のようなもので制御できれば、自動車用エンジンの熱効率は飛躍的に向上する。応答良く燃焼場での壁面熱伝達率を制御できる画期的な現象の発見が待たれる。もう一つ、自動車の燃費向上の大きな課題として、排気熱エネルギーの回収、利用がある。トラック等の大型エンジンでは排気タービンで動力として回収し、車両の駆動軸に結合する方式のターボコンバウンドエンジンが研究されている。しかし、この方式は乗用車、小型トラック、商用車などの小型エンジンでは成立しない。排気熱回収については今までに色々の方式が検討されたが、ターボチャージャで吸気を加圧する方式が実用されているのみである。この方式もエンジンの中速、高速回転時における排気熱エネルギーの一部を回収しているにすぎない。新しい原理に基づく排気熱エネルギー回収システムの実現が待たれる。

自動車に関連した熱問題とその解決策への期待の一部を述べさせていただいたが、現在の伝熱学の範囲では解決することが困難な問題が山積している。賢明なる伝熱研究会諸兄のお力により電子、物理、化学、あるいはバイオ、新素材といった先端技術と複合させた新しい伝熱学が生まれ育つことを期待しております。

電気事業に関連した産官学共同研究について

(財)電力中央研究所
特別顧問 竹内 元

1. まえがき

伊藤科学技術庁長官は就任に際してのインタビューに答えて、産官学の研究協力体制を進めることの必要性を述べ、国としてこれを支援する施策を取る意向を述べた。これからは今までより一層産官学の共同研究が推進されるであろう。

かつては産学共同研究がもてはやされた時もあったが、最近は多くの場で産官学共同研究が叫ばれている。産学共同研究の場合には産業側のニーズと学術機関の研究力の融合によって成果を期待するものであったと思う。これに対して、産官学の共同研究においては、官が入ったことにより、ニーズの主体が国に移っているように思える。即ち国の必要とする研究課題で、産業側が関心を持っている研究課題の場合で、学術研究機関の知識や研究力が期待されるとき、産官学の共同研究が成立することになる。もともと「官」の意味するところは二つ考えられる。一つは研究を行う立場での国立の研究機関であり、一つは研究を推進する立場で国のプロジェクトとして国の資金を提供することである。産官学の共同研究という場合には、「官」の意味するところは国のプロジェクトの意味合いが強いように思える。国立の研究機関は「学」の立場に近いように思える。

国の施策を推進するための研究を実施するに当たり、学術機関の研究力のみによっても、産業側の知識や研究力を活用した方が効果的な場合がしばしばあるし、産業側としても国の資金を利用出来たり、研究成果の利用されることが、産業側として関心の深いときに、その成果の動向に関与できることは大きなメリットとなる場合が多い。

電力中央研究所は科技庁、通産省等から多くの委託研究を受託しており、また幾つかの技術研究組合に参加し、これを通じて委託研究の分担実施をしてき、また実施中である。

電気事業に関連した産官学の共同研究も多く進められているが、ここでは小生の知り得た範囲での知見に基づき、産官学の共同研究についての感想を述べさせて頂く。

2. 国の規格、基準策定、影響評価、確証試験等に関連して

前述のように産官学の共同研究は国の施策推進の一貫である事が多い。例えば原子力発電の推進に関連し、安全性確証試験とか、国の基準策定の為の実証試験などが該当する。このような試験研究はまさに産、官、学が共同して実施する意義が高いものと言える。安全性実証とか、国の基準策定に関し実施する試験研究は、まず国の研究として実施されるべきものである。国の研究機関がかかる問題について試験研究をしている場合には、その結果が基礎として利用されるのは当然のことである。しかし国の研究機関とは別の研究機関によりポテンシャルがある場合には、ここに試験研究が委託されるのが適切である。基礎的研究で有れば大学が適切であろうが、実証的試験研究では大規模の試験研究となるので、試験研究ヒン

ターとか、民間の研究機関が適当な機関となろう。実際に原子力に関連しては、原子力工学試験センターなど産官学の共同の試験研究を実施する機構が設立され、その機能を果たしている。

国の基準策定は産業界としても極めて関心が深いものであるとのので、その実施に当り民間の研究機関としてもこれに協力することに熱心になる。しかし民間産業界の研究結果だけでは国の基準策定の基礎として利用することには疑念を持たれる惧れがある。かかる状況に対処するために中立的な立場にある学識者の参加を得ることが極めて有意義である。

環境影響評価に関する研究も、原子力に関する研究と同様に、国民のコンセンサスが重要なため、また産業界としてもその結果に対して関心を持っていることから、産官学の共同の体制が極めて有効な分野である。

3. 新省エネルギーに関連して

少し性格の異なるものとして、新省エネルギーに関連した研究がある。これは前述の国の基準策定に密接にかかわるような、確証試験や評価手法の研究と異なり、技術開発の要素が強い研究開発となる。これとても国としての政策、施策の現れとしての委託研究であることには変わりがないが、その成果は企業化されることによって効果が発揮される性格のものであり、その研究成果は企業の製品に密接に関係することになる。しかるに官、学の立場では、特定の企業の利益追及は否定されるべきものになる。そこで、かかる研究の民間側の受け皿として、鉱工業技術研究組合制度が利用されることが多い。技術研究組合は企業の集合体であるので特定企業の利益追及ではなく、共通の利益を目指すので、国の施策への協力がやりやすい組織となり、この点からも鉱工業技術研究組合制度の活用は都合の良いものである。本来、技術研究組合は民間企業が共同して研究することが組合員共通の利益であるときに、設立されるものであるが、現実の姿としては国の指導のもとに国のプロジェクト遂行のための受け皿として設立されることが多いように見受けられる。この場合国立研究機関の研究成果の実用化と関連することが多いように思われる。

実際に技術研究組合の運営に当たってみるとノウハウの問題、研究の分担の問題など、組合員の個々の利害が対立する事例がないと言いえないが、小生の関係した技術研究組合では組合員の良識的対応で問題は解決されている。そしてかかる研究開発においても、官側の適切なご指導により、学術研究機関の独創的、基礎的研究の成果は、多いに活用され、また諸先生のご指導で具体的な研究開発の進め方について、多くの有益な示唆を頂き感謝をしている。

4. むすび

電気事業はエネルギー産業であり、エネルギー移動の一つの形態である伝熱の問題が、このような研究の過程で重要である課題は極めて多い。例えば、原子力に関係した各種の確証試験や、小生の関与してい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など伝熱の研究課題が重要な課題となっている。今後ともこの方面でのご指導ご協力をお願いする。

ボイラ火炉研究会

東京電力(株) 渡部教雄

1. はじめに

本研究会は、昭和58年に本研究会の代表幹事である石谷大阪大学名誉教授らの呼びかけにより設立されボイラ火炉中の流動・燃焼・伝熱に関する調査研究および火炉全体像の計測に関する調査、研究を行うことを目的に活動している。

なお、構成は、大学関係者22名、企業20社の産学共同となっている。

2. 研究会設立の趣旨

本研究会設立時の趣旨を以下に記述する。

ボイラ火炉の設計と運用は多方面の学術領域に関係するが、わが国の学界と業界におけるこれら関係領域、すなわち流動、燃焼、伝熱、計測、制御等の研究開発は最近急激に進展しつつある。その結果、かつての難問であった火炉出口ガス平均温度の計算は実用上充分正確に行なえるし、また炉内脱硝技術も当面の環境基準を充分満足させうる状態にある。しかし、ボイラに要求される条件はますますきびしくなりつつある。

すなわち、いわゆる超々臨界圧ボイラの開発、環境基準を上廻る高脱硝技術の開発、許容最低負荷限界のいっそうの切下げ等の諸要求と、石炭、アスファルト、天然ガス、オイルコークス等も含めた燃料の多様化への対応、これら諸条件下で火炉容積の巨大化をふせぎ建設費を節減する技術の確立、運転に際してボイラ効率を最高に維持しつつ安全を確保し、さらに異常の発生があればいち早く発見できる技術の確立等々が必要となってきた。この必要性は事業用火力発電所に限らず自家発電用、船用も含めて、程度の差こそあれすべてのボイラに共通しているといつてよい。

一方、光や音を利用したセンサ技術、これらを応用したコンピュータ・トモグラフィ技術(いわゆるCTスキヤニング)の発達の現状を見ると、ボイラの燃焼診断や炉内の反応制御にこれが応用される場合には大きな効果が予想される。その効果は技術開発の進展に応じて各段階ごとにそれなりの有効性を示すものであろうが、開発のある時点において、かつて1940年代前半にASME Boiler Furnace Performance Committeeが学界、業界の全面的協力のもとに実行したような、数台の実缶による大規模実験をいつの日にか企画、実行する必要があるであろう。

そのような大規模実験による総仕上げを念頭においた場合、さしあたってなされるべき研究、

開発はつぎの4種に大別してよさそうである。

- (1) 実缶で使用できるCTスキャンニング用センサの開発をめざす研究、開発
これは医療用とことなり超音波がきわめて使いにくいこと、高温の燃焼ガス雰囲気対策などが必要となりそのための研究開発を目指している。
- (2) 実缶の特定断面における小規模なCTスキャンニング技術の完成をめざす研究、開発
これは火炉出口、第二段燃焼帯域、再循環帯域、バーナ帯域など、さしあたりCTスキャンニングの効用の最も期待される部分に限定して、小規模なCTスキャンニング技術を開発することをめざす一連の研究、開発である。
- (3) 火炉中の流動、燃焼、伝熱およびその動特性を火炉全体にわたり把握する方法の研究、開発
これはいわゆるモデリングに関するもので、センサから得られる情報を最大に利用するために必要である。
- (4) 火炉中の流動、燃焼、伝熱およびその動特性に関するいっさいの要素現象に関する分析および総合的研究
この中の分析的研究としては、噴流の拡散現象、噴流と噴流の干渉現象、微粒子を含む気体中の音速、巨大燃焼室に発生する非対象流動、火炎の熱放射、火炎中の反応過程などがあり、また総合的研究としては、実缶における実績の詳細な分析、過去の燃焼室内ガス爆発、水蒸気爆発などの事例の研究などがある。

以上のような諸々の研究、開発はすべて各関係者がそれぞれ熱心に行ないつつあるが、所属と直接的興味が別々の各方面の運用技術者、設計者、研究者の協力が本来的に必要なこの種の研究、開発においては、とりあえず情報交換の場を設けることにより大きな効果が期待できるであろう。そのような場から近い将来の大規模共同研究の芽が成長することも期待できるであろう。

よってわれわれは、さしあたり学界の研究者相互間、および学界と業界の間の研究、開発の情報交換の場として、ボイラ火炉研究会を設立し、ボイラ火炉へのCTスキャンニング技術開発のための将来の大規模実験までの諸段階を、各界の協力により乗切の一助としたい。

3. 活動概要

研究会は、年4～5回(通算22回)開催している。活動内容は、研究会の目的に関連した研究をされている方々から、講演をしていただいたり、研究設備・実験設備の見学会を主としており、他にJTCSTによる文献調査や研究状況と成果の調査報告、国内外での学会や研究会の報告、文献の概要紹介等も合わせて実施している。

さらに年2回程度の幹事会で、活動内容のまとめ、次年度の計画と研究開発の方向性・内容の検討等を行なっている。

研究会内での研究は、委員であるメーカーとユーザによる音波を使った温度分布測定の研究や、光を利用した燃焼診断の研究、または産学のグループで実施しているボイラ火炉内の流動・伝熱・燃焼に関する数値シミュレーションの研究等、本研究会内で個人あるいは産学で特別にグループを作りながら研究が行なわれている。

さらに本研究会全体での研究として、昭和63年度文部省科学研究費総合研究（B）に申請している。研究課題名は「超大型火災の燃焼診断および評価に関する研究の企画」、研究目的は、超大型火災の燃焼診断に必要な技術を、産学共同体制の下で集大成し、実機による測定を行なうための基礎研究の企画をとりまとめる。さらに、燃焼状況を適確に評価するための技術の確立を目指し、運転上の諸問題解決への支援を考慮した基礎研究も合わせて行ない、検出およびデータ表示技術の研究に関する企画もとり入れる事としている。

昭和61年5月には、研究会内で講演していただいた内容について、「ボイラ火炉研究会講演論文集、第1巻」を発行しており「同、第2巻」を昭和63年4月に発行する予定である。

4. あとがき

ボイラ火炉研究会の概要について述べたが、本研究会は、産学の共同研究会として、活動しているため、基礎的な分野から実用的な範囲までの専門的技術や、大学、メーカー、ユーザーの広範囲なニーズが考慮されている。

最後に、本研究会に対するご批判・ご教示をいただければと思います。

研究会での講演内容と講演者リスト

天井焼きボイラの基本的フローパターン	日立造船（株）	中井誠一 氏
CTスキャン技術について	松下電器産業（株）	石渡裕政 氏
燃焼のレーザ計測について	大阪大学	高城敏美 氏
燃焼試験による模型実験	（財）電力中央研究所	瀬間 徹 氏
医療機器用CT技術について	（株）東芝	五老建彦 氏
Diesel Engine 燃焼研究の紹介	三菱重工業（株）	恒屋礼二郎氏
ボイラ燃焼設計の考え方	石川島播磨重工業（株）	池辺弘茂 氏
ボイラ運用の状況と目標	東京電力（株）	伊藤文夫 氏
燃焼伝熱シミュレーション	北海道大学	谷口 博 氏
燃焼のシミュレーションについて	日本ファーンエス工業（株）	田中良一 氏
気体および火災のInversion Analysisについて	京都大学	国友 孟 氏
ボイラ燃焼イメージ処理技術について	三菱重工業（株）	坂井正康 氏

レーザホログラフィと流体計測	東京工業大学	黒崎晏夫 氏
実用設計のための燃焼室熱計算	芦屋大学	大原清司 氏
ボイラ火炉内の流動伝熱シミュレーション	バブコック日立(株)	秋山 巖 氏
画像処理による火炎診断	(株)日立製作所	西川光世 氏
拡散火炎における煤の測定とその挙動	神戸商船大学	西田修身 氏
工業炉における火炎計測技術	(株)神戸製鋼所	大谷啓一 氏
超高負荷燃焼器に関する研究	(財)電力中央研究所	阿部俊夫 氏
ディーゼル機関における燃焼計測・監視・解析	三井造船(株)	下津正輝 氏
微粉炭燃焼における灰中未燃分の低減に関する研究	川崎重工業(株)	蔵田親利 氏
セラミックマイクロホン・スピーカー	松下電気産業(株)	川崎 修 氏
金属加熱炉用ガスバーナと、その利用技術について	大阪ガス(株)	柳原正直 氏
米国における燃焼研究の現状	北海道大学	早坂洋史 氏
流動層ボイラパイロット試験結果と実証試験結果	電源開発(株)	松田俊郎 氏
乱流燃焼のモデリングに際して考慮すべき層流火炎 の二、三の特性	埼玉大学	辻 廣 氏
レーザ技術と核融合	大阪大学	中井定雄 氏
石炭燃焼試験炉における研究概要	(財)電力中央研究所	田中 隆 氏
音響ホログラフィ	東京工業大学	梅沢清彦 氏
北海道における地域暖房の現状と課題	北海道熱供給 メンテナンス(株)	明城千弥 氏
診断用マイクロ秒放電とそのシーケンス制御の技術	大阪大学	後藤誠一 氏
音響による炉内温度分布測定技術	(株)神戸製鋼所	増田輝男 氏
レーザ計測による噴霧の粒子径と流速の同時測定	神戸商船大学	藤田浩嗣 氏
燃焼火炎の画像処理	群馬大学	中山満茂 氏
有限要素法を用いた副射伝熱の計算	東京工業大学	黒崎晏夫 氏
Coal Combustion Studies	I F R F	Dr.
Flam Diagnostics		MARK MORGAN
火炎監視装置	三菱重工業(株)	野田松平 氏
個別バーナ燃焼状態診断手法	東京電力(株)	冨永日都志氏
高カロリー石炭ガス化	(株)日立製作所	小山俊太郎氏
テキサコ炉の運転実績	宇部興産(株)	安原敬明 氏
21/D 石炭ガス化及び200T/D の計画	(財)電力中央研究所	瀬間 徹 氏
流動床ボイラ	電源開発(株)	藤田昌雄 氏
ボイラ火炉内流れの3次元解析	三菱重工業(株)	足立武司 氏

ボイラ火炉研究会委員名簿

	氏 名	所 属
大 学	○赤川浩爾	神戸大学 工学部
	◎石谷清幹	大阪大学 (名誉教授)
	一色尚次	東京工業大学 (名誉教授)
	大竹一友	豊橋技術科学大学
	大原清可	芦屋大学
	○岡崎健	豊橋技術科学大学
	小澤守	神戸大学 工学部
	越智敏明	大阪府立工業高等専門学校
	串山正	京都工芸繊維大学 工芸学部
	○黒崎晏夫	東京工業大学 工学部
関 係	斉藤武	北海道大学 (名誉教授)
	○高城敏美	大阪大学 工学部
	多賀正夫	近畿大学 理工学部
	○谷口博	北海道大学 工学部
	中西重康	姫路工業大学
	中山清茂	群馬大学 工学部
	西川栄一	神戸商船大学
	西川兼康	久留米工業高等専門学校
	架谷昌信	名古屋大学 工学部
	光永昭治	大阪大学 基礎工学部
企 業	村井一弘	姫路工業大学
	山崎泰雄	幾徳工業大学
	秋山 巖	バブコック日立 (株) 呉研究所
	池辺弘茂	石川島播磨重工業 (株) ボイラ事業部
	井坂弘	電源開発 (株) 火力部
	△伊藤文夫	東京電力 (株) 技術開発本部
	引頭正博	松下住設機器 (株) 住設機器研究所
	○冲上昇	日立造船 (株) 技術開発本部
	金森聖二	ボルガノ (株) 事業本部技術部
	小坂井正康	(株) 神戸製鋼所 技術開発本部
関 係	○坂井正康	三菱重工業 (株) 長崎研究所
	田本隆	(財) 電力中央研究所 石炭ガス化研究室
	土本信孝	(株) タクマ ボイラ技術部
	出口武	住友金属工業 (株) エネルギー管理部
	友保純直	三井造船 (株) 玉野研究所
	豊永肇	大阪ガス (株) 総合研究所
	永田一衛	(株) 東芝 火力制御システム技術部
	畠中敏樹	中外炉工業 (株) 技術本部
	前山卓三	関西電力 (株) 総合技術研究所
	山地康博	(株) 日立製作所 火力技術本部
係	山本史郎	出光興産 (株) 新燃料部
	渡辺徹児	川崎重工業 (株) 東京設計事務所

◎ : 代表幹事 ○ : 幹事 △ 事務局担当幹事

製鉄における伝熱の諸問題

高島啓行 (住金総研)

1. はじめに

製鉄プロセスは、熱過程の巨大な集合体であり、加熱、冷却、熱交換等の伝熱技術は鉄鋼製造全般に係わる最も基本的な技術の1つである。表1に製鉄工程における主な伝熱関連設備を示す。これらの熱設備について今後要請される技術課題は、高効率化、均一化、急速化であろう。

表1 製鉄工程における主な伝熱関連設備

分類 工程	加 熱	冷 却	熱交換
コークス	○コークス炉		○ドラム缶 ○蓄熱室
焼 結	○点火炉		○クーラー
製 鉄		○ステープ ○炉底鉄皮	○熱風炉 ○排熱回収装置
連続鋳造	○タンディッシュ	○モールド ○二次冷却帯	
圧 延	○加熱炉 ○エッジヒーター	○ロール ○熱延シフトゾーン	○スリットヒーター ○ウォールローラー ○排熱ヒーター
熱処理	○加熱炉 (直火または 間接加熱)	○厚板制御冷却 ○厚板熱処理 ○連続一次冷却 ○鋼管等熱処理	○ウォールローラー
加熱	○ボイラー水炉		○ボイラー
製 品			○ボイラー管 ○異型伝熱管

2. 加熱技術

2.1 高効率化

加熱技術で第一に重要なのは、鋼片加熱炉の高効率化である。これについてはこれまでも炉内に伝熱促進体を設置する1)、2)、3)等各種の試みがなされてきたが、なお一層の炉内伝熱効率向上法の確立が望まれる。

2.2 急速化

急速加熱法として、現状では熱延材のオンラインエッジヒーターに誘導加熱が使用されている。また、炉壁レンガの補修⁴⁾や鋼板の切断⁵⁾、表面改質⁶⁾等にプラズマが使用されるようになってきており、さらに多方面で利用拡大が進むものと予想される。プラズマの熱伝達については十分なデータがあるとは言いがたく⁷⁾、今後この方面の進展が期待される。

2.3 数値解析法

加熱炉の解析法として、従来から総括熱吸収率による方法⁸⁾が用いられてきた。この方法は炉中に挿入した熱電対の温度、いわゆる雰囲気温度を熱源の代表温度とし、熱源と鋼片間の熱

交換を表す係数である総括熱吸収率 (Φ_{CG})を実測値から求め、 Φ_{CG} によって炉内伝熱特性を一括して表すものであり、個別の炉については平均的な伝熱特性を表す方法として広く採用されているが、炉の形状変化とか、燃料流量の変動などで Φ_{CG} がどの程度変動するかは予測できない。

一方、放射伝熱に関する種々の理論的な解析手法が研究されており、これらの手法を実用の系の解析に適用するため、ゾーン法^{9), 10)}やモンテカルロ法^{11), 12)}が提唱されている。ゾーン法やモンテカルロ法は鋼片加熱炉やボイラの解析に適用されるような段階に至っているが、依然として実用化の端緒に立っている状態であり、一層の実用化が望まれる。なお、理論的な解析では、発熱量分布、ガスの流動パターン、ガスや輝炎の吸収係数などを与えて計算するが、これらのデータあるいは計算式によって計算結果がかなり左右される。しかし、これらのデータには普遍的なものが少なく、今後の理論的な解析法の発展と併行して調査研究をする必要がある。

表2 製鉄工程における鋼材冷却の代表例

工 程	対象鋼材	冷却場所	冷却目的	冷却方法
連続鋳造	鋳造材	鋳型 二次冷却	凝 固	金属接触 スプレー ミスト
厚 板	熱間圧延材	圧延直後	熱 処 理	スプレー ラミネー(円状,板状) ジェット(円状,板状)
ホットストリップ	熱間圧延材	ランナウト テーブル	熱処理, 単 純 冷 却	ラミネー(円状,板状) スプレー,ジェット
形 鋼	熱間圧延 H形鋼	圧 延 後	残留 応力制御	スプレー ミスト
鋼 管	熱間圧延材	圧延直後	熱 処 理	スプレー,ミスト,浸漬 ラミネー(板状)
棒	熱間圧延材	圧延直後	熱 処 理	冷却管 (スプレー,ジェット, 浸漬)
線 材	熱間圧延材	圧延直後の コイル状線材	熱 処 理	ガスジェット,浸漬 (沸騰水,溶融塩)
コールドストリップ	冷間圧延材	連続焼鈍 ライン	熱 処 理	水中ジェット,ミスト ガスジェット,金属接触

3. 冷却技術

製鉄工程においては、設備の冷却や鋼材の冷却に強制冷却が頻繁に使用されている(表2)。しかも最近、製品の品質向上や新製品の開発にきめの細かい冷却が必要とされ、さらに水資源が有限であること、また省エネルギーの立場から、冷却に関する研究、設備の開発、改善に多大な努力が払われてきた。

3.1 鋼材冷却用冷媒と熱伝達係数

高温鋼材の冷却に用いられている主要な冷媒を表3に示す¹³⁾。熱処理用冷媒の場合、冷媒の沸点が冷却温度範囲内に存在するかどうかが重要である。したがって、表3では冷媒を沸騰の有無で分類している。

表3 鋼材熱処理用主要冷媒の特性比較¹³⁾

	冷 媒 名 称	熱 伝 達 特 性			そ の 他 の 特 性		
		冷 却 能 力	冷 却 安 定 性	急 冷 停 止 性	取 扱 い 易 さ	安 全 性 (対 人 体)	総 合 コ ス ト
沸騰型冷媒	水	◎	×~○	×~○	◎	◎	◎
	ミスト水	◎	△~○	×~○	◎	◎	◎
非沸騰型冷媒	沸騰油	×~△	△~○	△~○	○	×~◎	○~◎
	ス 溶 融 塩 融 金 属	×~○ ○~◎ ○~◎	◎	◎	◎	◎	△~○ △~○ △~○

注1) 有利 : ◎ ~ ○ ~ △ ~ × : 不利

注2) コスト : 設備費, 冷媒費, 電力費, 後処理費, 人件費などを含む

注3) 非沸騰型冷媒 : 鋼材の熱処理温度範囲内で沸騰しない冷媒

鋼材の冷却の場合、冷却用冷媒として、冷却能力が大きいこと、安価であること、取り扱いが容易であることから沸騰型冷媒である水が多用されているが、水による鋼材の冷却は多くの要因が組み合わさった複雑な現象であり、未だ十分には解明されていない。とくに製鉄工程で最も重要な部分を占める温度範囲は、鋼材表面温度が200～1300℃程度のところであり、このうち300～800℃程度の範囲の固体面と水との間の伝熱現象が最もわかっていない¹⁴⁾。しかしながら、日本鉄鋼協会では、各種文献データをもとに各種冷却法別に実用的な冷却能力（熱伝達係数）推定式をまとめている¹⁵⁾。1例としてスプレー冷却の場合の推定式（放射分を含む）を以下に示す。これらの式では、液滴径や液滴速度は考慮されていない。

$$\log \alpha = 2.35 + 0.646 \log W \quad (\theta_s = 50, 280 < W < 12,600)$$

$$\log \alpha = 2.69 + 0.595 \log W - 0.00179 \theta_s \quad (200 \leq \theta_s \leq 500, 5 \leq W \leq 2,000)$$

$$\log \alpha = 2.36 + 0.663 \log W - 0.00147 \theta_s \quad (500 < \theta_s, 5 \leq W \leq 2,000)$$

ここで、 α は熱伝達係数 (kcal/m²h^{1/2}°C)、 W は水量密度 (ℓ/m²min)、 θ_s は表面温度 (°C)である。

一方、非沸騰型冷媒は鋼材の熱処理範囲では沸騰しない。熔融塩や熔融金属の場合、浴温を保定温度より若干低く設定しておけば、鋼材の初期温度分布や表面性状が不均一でも各部の温度は浴温に収束する。したがって、これらは冷却停止の点では優れているが、安全性、経済性、取り扱い易さなどの点で水や空気に劣るため熱処理への利用例は少ない。そのため熱伝達に関する実験結果の報告は少なく、今後の研究が望まれる。

3.2 均一化

均一化について2, 3のトピックスを以下に述べる。まず、鋼材表面のスケールによる熱伝達の不安定現象がある¹⁶⁾。詳細な内容は元論文を参照されたいが、残留スケール重量によって冷却が大幅に影響を受け、表面断熱層の急冷促進効果とか保温層のパラドックスと呼ばれる現象が存在することが示されている。したがって、均一冷却を達成するにはデスケリングを十分に行うことが必要となる。このように鋼材の表面状況と熱伝達との関係を明らかにすることが一つの課題となろう。

次に、水平に置かれた鋼板を冷却する場合に上下面の問題がある。とくに板上に滞留した水が任意の方向に流動すると冷却の不均一の重大な原因となり¹⁷⁾、板上流動水の適切な制御が今後の課題である。

3.3 急速化

図1に示すような鋼材の水ジェット冷却の沸騰曲線の想像モデル図が提案されている¹⁴⁾。図中パラメータは水の運動量であり、上方の曲線ほど運動量が大きくなっている。また実線の部分はデータが現存する領域であり、破線で示された領域がまだデータのない領域である。

鋼材の水冷却は、固液の直接接触の度合いによってすべて規制され、鋼材表面温度が相当な高温でも蒸気膜を破って固液の接触が起こり、この度合いは一重に液滴の運動量によって決り、次々と冷たい液滴を鋼材表面に衝突させることにより強冷却が可能となることが示されている。このような原理に基づく超強冷却法の開発が望まれ、すでにいくつかのこころみがなされている¹⁸⁾。

4. おわりに

製鉄における伝熱の諸問題について、加熱技術と冷却技術に焦点を合せ、いくつかの解決すべき課題を述べてきたが、製鉄プロセスでは熱的課程に流動、反応、応力等が付随することが多く、今後実験にしろ解析にしろこれらの要素技術を複合化してゆく努力も必要となろう。

文献

- 1) 越後亮三：西脇研究所報告，79-03（1979）
- 2) 篠原度章，他：燃料と燃焼，48（1981）6，P. 52
- 3) 高島啓行，他：鉄と鋼，71（1985），S1199
- 4) 鈴木隆夫，他：鉄と鋼，72（1986），S 109
- 5) 福井孝文，他：鉄と鋼，72（1986），S 352
- 6) 阿久津幸一：工業加熱，24（1987）5，P. 47
- 7) 日本機械学会：伝熱工学資料（改訂第4版），（1986），P. 112
- 8) 日本鉄鋼協会：連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法，（1971）
- 9) H. C. Hottel and E. S. Cohen：AIChEJ，4（1958）1，P. 3
- 10) 杉山峻一，他：鉄と鋼，67（1981），S 362
- 11) 谷口 博，他：機械の研究，25（1973）5，P. 635
- 12) F. R. Steward and P. Cannon：Int. J. Heat & Mass Transfer，14（1971），P. 245
- 13) 三塚正志，他：日本伝熱研究会九州グループ講演会（昭62.9.11）
- 14) 平田 賢：第35回西山記念技術講座，（1975），P. 45〔日本鉄鋼協会〕
- 15) 日本鉄鋼協会：鋼材の強制冷却，（1978）
- 16) 村田杏坪：伝熱研究，25（1986）97，P. 47
- 17) 石田隆一，他：鉄と鋼，72（1986），S1186
- 18) 播木道春，他：鉄と鋼，73（1987），S1139

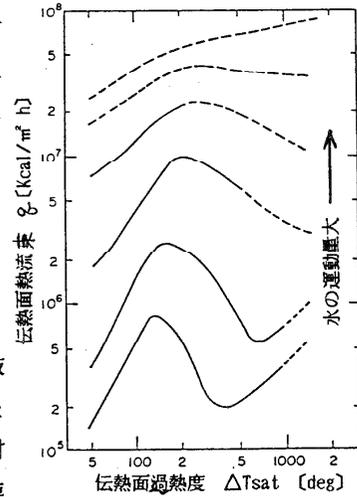


図1 鋼材の水ジェット冷却の想像モデル図¹⁴⁾

<研究トピックス>

低凝固点水溶液による氷の温度・濃度複合融解

菅原征洋（秋田大）、稲葉英男（北見工大）

1. はじめに

塩化ナトリウムなどの低凝固点水溶液による氷の融解に関しては、例えば海水中の海氷の融解が自然界で見られるほか、氷粒子の集まりである雪を水溶液で積極的に融解させようとするときに問題となる。このようないわゆる相変化問題を扱う場合の重要課題は固相の融解速度を予測することにつきると言っても過言ではないであろう。これまで、純水中の純氷の融解に関しては固液界面に垂直な温度こう配即ち固液界面に流入する熱量によって融解速度が決まり⁽¹⁾、解析結果と実験結果は比較的良好一致を示していることからほぼ完成された関係であると言って良い。一方、低凝固点水溶液中の純氷の融解に関しては前記の純水中の融解と同様に融解速度を求めているに留まっているのが現状である^{(2)、(3)、(4)}。筆者らはこれまで雪や氷層を低凝固点水溶液で融解させる基礎的な実験を続けており成果の幾つかを報告したが^{(5)、(6)、(7)、(8)、(9)}、これらの報告を基にして低凝固点水溶液による氷の融解の特徴的なものを現象を中心に述べてみたいと思う。

2. 融解挙動

2.1 雪層の融解

空隙率0.55の雪（氷粒子の集まり）を -5°C の温度に保ち、これと同温度の水溶液にすばやく挿入して融解実験を行った。雪粒子の見かけの径 d は 0.34mm で、用いた水溶液は塩化マグネシウム MgCl_2 、塩化カルシウム CaCl_2 、塩化ナトリウム NaCl の三種類である。水溶液の初期濃度 C_m は溶質基準で10、20、30wt%のごとく比較的高濃度の場合について実験を行った。図1は雪と水溶液からなる融解系の温度変化を示す。融解開始時の雪と水溶液の温度差が無いにもかかわらず融解系の温度は急激に低下していることが認められる。雪と水溶液の初期の温度差が無いことから、もし融解系で化学的、物理的变化がなにも起こらなければ融解系の温度は何も変化しない筈である。このように融解系の温度が変化するのは雪が融解したためそのときの潜熱に見合うだけの熱を融解系から吸収するからである。このことから、融解のための駆動力は従来のごとき温度差では無いことだけは確かである。融解系の温度降下は次第に緩慢になりやがて温度変化のない一様温度に落ち着く。

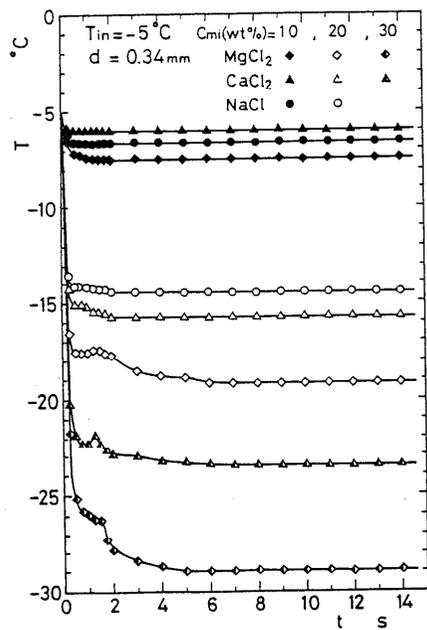


図1 融解系の温度降下

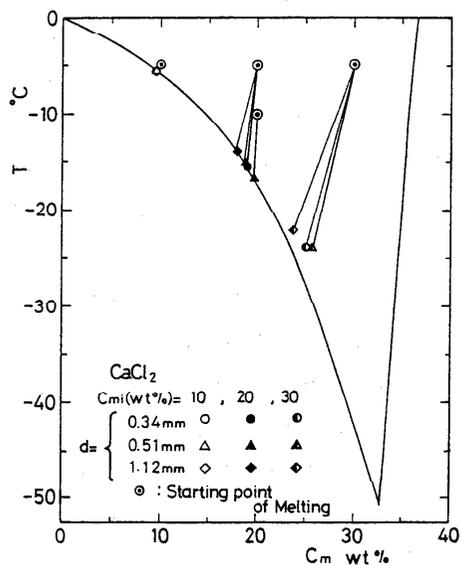


図2 融解開始点と融解終了点

図2は塩化カルシウム水溶液による融解の場合の融解開始点と融解終了点（前述の同様温度領域に相当する）を固液平衡図に示したものである。これより融解終了時の温度と濃度は固液平衡曲線上に位置していることが認められる。

融解系の時間的溫度降下（ dT/dt ）を測定して融解率を次のように求めた。

$$H = - \frac{C_{ps} \rho_s \varepsilon + C_{pi} \rho_i (1 - \varepsilon)}{4 \pi n r^2 L (C_{w1} - C_{w2})} \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

ただし、 C_p は比熱、 ρ は密度、 ε は雪の空隙率、 n は単位体積中に含まれる雪粒子の数、 r は雪粒子の見かけの半径、 L は氷の融解の潜熱、 C_{w1} は雪粒子の融解面の濃度、 C_{w2} は雪の空隙部分を満たしている水溶液の中ほどの濃度である。添字 s は水溶液、 i は氷粒子を示す。

このようにして求めた平均的な融解率 H は $5 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{wt}\%)$ の値であった。式(1)からわかるように、融解率 H は濃度差 ($C_{w1} - C_{w2}$) を融解の駆動力としていることがわかる。その後の検討により、融解率から通常の二成分系の拡散係数を誘導した結果、オーダー的に妥当な値が得られた。以上の結果を基にして濃度差支配型の融解モデルを設定して理論的な解析を行っているところであり、近い将来報告する予定である。

2.2 水平氷層の融解

前節では水溶液の占める体積が非常に小さい場合であるが、本節では逆に体積が大きい水平氷層の融解について述べる。すなわち、水平純氷層の上に所定の初期濃度 C_{i0} (wt%) の塩化カルシウムが存在する融解系の液表面を加熱しながら氷層を融解させたものである。

図3は加熱量 (q_r) 一定で初期濃度を变化させた場合の融解厚さ S の時間的变化を示したものである。たとえ加熱量が一定であっても水溶液（融解液）の濃度が増すに伴って融解厚さがかなり増加している。しかも、融解液が純水（Pure water）の場合と比較して水溶液の場合の方が大きく融解厚さが増している。

図4は初期濃度が一定で加熱量が变化した場合である。融解初期の $t = 5 \text{ min}$ では加熱量に関係なく同じ融解厚さを示している。融解時間の経過につれて次第に加熱量の影響が出て来ている。

図5は融解時における融解液層と氷層の温度分布の時間的变化を示している。両層ともに最初 0°C の同様温度分布であったのが固液界面の温度降下により、 0°C 以下の領域の温度分布が見られる。特に氷層内の温度こう配によって氷層内の顕熱が固液界面に向かって移動していることがわかり、この熱量が氷層の融解に寄与しているところが特徴的である。

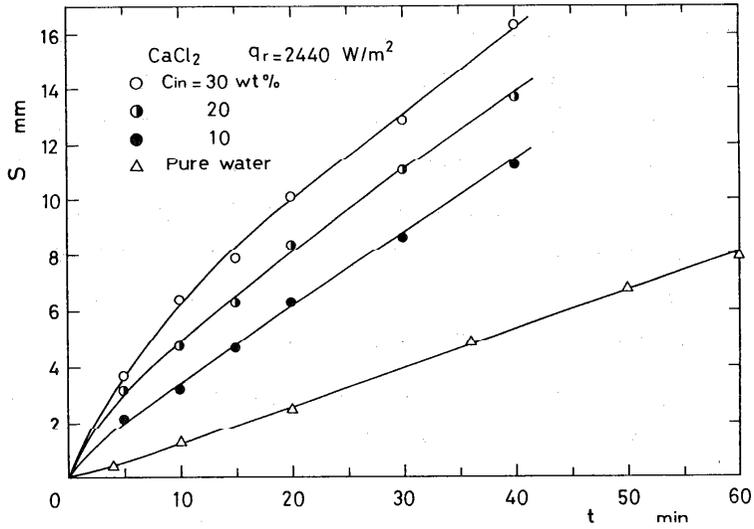


図3 融解厚さSにおよぼす濃度の影響

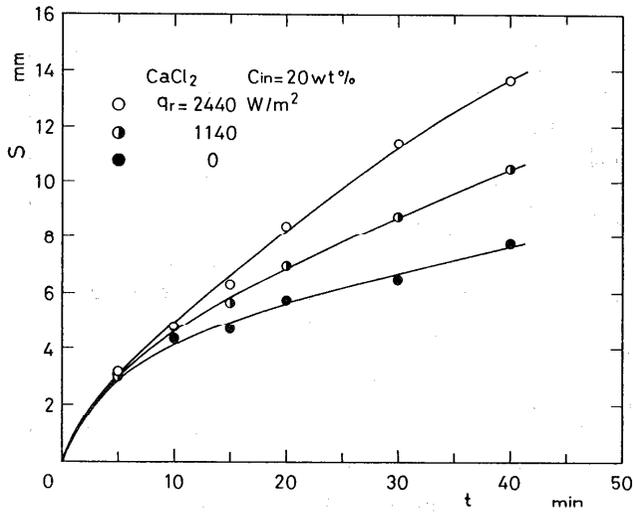


図4 融解厚さSにおよぼす加熱量の影響

図6は融解液層内の濃度分布の測定例である。濃度こう配はかなり小さく一様濃度分布を示していると言った方が良いかも知れない。固液界面 (Melt surface) の濃度も示してあるが、しかし、この界面の濃度を正しく測定することは非常に難しく、かなり測定誤差を含んでいると思われる。固液界面の濃度はもっと小さい筈であるが、このような非定常な融解の場合に濃度拡散が存在しない筈がないから、Nernst⁽¹⁰⁾が言うような非常に薄い濃度拡散層が存在しているのかも知れない。固液界面近傍の温度分布を精密に測定して、この界面に流入する熱量と融解量に相当する熱量を比較しているが、後者の熱量がかなり大きいことが明らかになった。つまり漠然としているが水層は温度差と濃度差との複合効果によって融解しているとみてよいであろう。このような複合融解問題を理論的に説明することをこれからの課題にしているが、筆者らのこれまでの基礎実験により、濃度差の融解に及ぼす因子が明らかになりつつある。

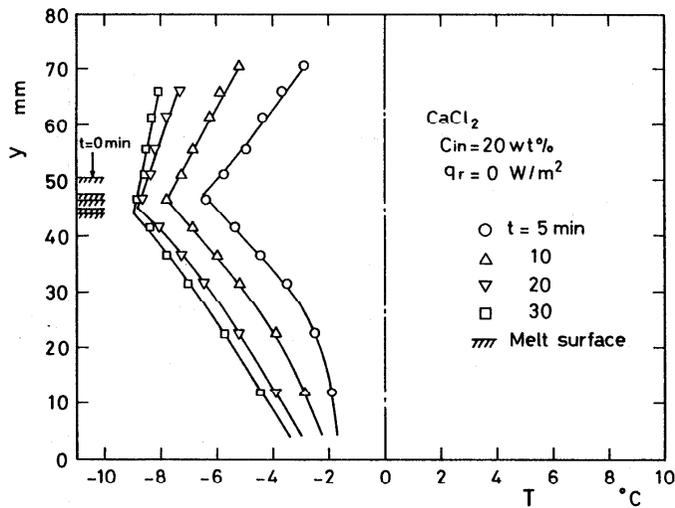


図5 融解層と氷層の温度分布変化

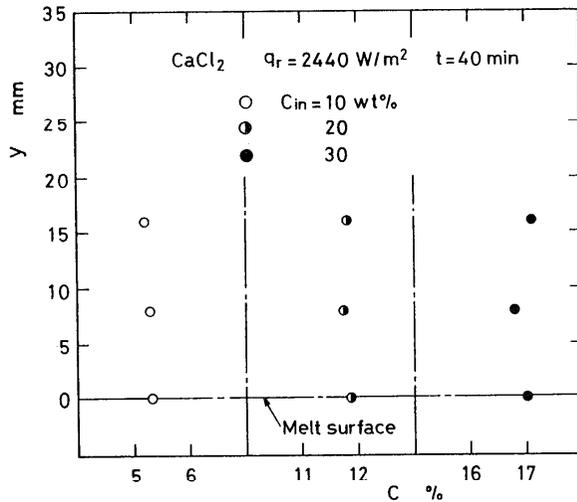


図6 融解層の濃度分布

3. おわりに

氷の複合融解問題を扱っていると、果してこれまでの伝熱学で融解現象を説明できるのだろうかと言う疑問がいつも頭から離れない。固液界面における物理・化学的な考察が真の融解挙動の解明につながると考えるが、これには長い時間を要するであろう。たとえ完全な解明が出来ないにしても工学的なアプローチの集積がやがて挙動の解明へ向かって漸近していくのかも知れない。

最近本誌⁽¹¹⁾で凝縮問題にかかわる気液界面の非平衡性や分子運動を述べておられたが、融解にかかわる固液界面においても筆者らはこのような疑問をいただいていたので興味深く拝読させていただいた。さらに、最近の機械学会誌⁽¹²⁾に掲載された熱工学の展望などから察して、伝熱学のある分野は今や一つの転換期にさしかかりつつあるような気がする。

文献

- (1) Carslaw, H. S. and Jeager, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., (1959), Clarendon Press, Oxford.
- (2) Josberger, E. G. and Martin, S., Journal of Fluid Mechanics, Vol.111, (1981), pp.439-473.
- (3) Carey, V. P. and Gebhart, B., Journal of Fluid Mechanics, Vol.117, (1982), pp.403-423.
- (4) Sammakia, B. and Gebhart, B., Int. Heat and Mass Transfer, Vol.26, No.10, (1983), pp.1439-1452.
- (5) Kimoto, K., Sugawara, M., Inaba, H. and Ishino, M., Wärme-und Stoffübertragung, Vol.20, (1986), pp.133-139.
- (6) 菅原・稲葉・西村、機論、52-484 (1986)、4041-4045.
- (7) Sugawara, M., Inaba, H., Nishimura, H. and Mizuno, M., Wärme-und Stoffübertragung, Vol.21, (1987), pp.227-232.
- (8) 菅原・稲葉・今田、日本冷凍協会論文集、4-1 (1987)、161-165.
- (9) Sugawara, M., Inaba, H. and Saito, H., International. Symposium Cold Regions Heat Transfer (Edmonton, Canada), (1987), pp.183-187.
- (10) 広田鋼蔵、化学反応の速度〈現代物理化学講座10〉、(1979)、46、東京化学同人、
- (11) 伝熱研究、26-103 (1987)、135-141.
- (12) 日本機械学会誌、90-824 (1987)、900-903.

1. はじめに

宇宙船や人工衛星の温度制御用素子としての開発から端を発したヒートパイプはその簡単な構造と優れた伝熱特性が広く知られるにつれ、最近における各方面への普及にはめざましいものがある。すなわち、1964年 Grover⁽⁷⁾によって再発見されて以来、今日にいたるまでの短期間における加速的な成長ぶりは、ちょうど我々のまわりにOA革命をひきおこしたマイコン(パソコン)のそれに類似しているように思える。この間、1973年より3年毎に国際ヒートパイプ会議が開催されてきており、またわが国でも1982年に日本ヒートパイプ協会が設立され、さらに本伝熱シンポジウムにおいても昨年より新たにヒートパイプのセッションが開設されるに至るなど、ヒートパイプに関する研究は熱工学に関連した各分野において国の内外を問わずますます盛んに行われている。このようななかで、ヒートパイプに関する基礎的研究とりわけヒートパイプ内で起こる現象を明らかにし、その熱輸送特性を推定するための方法を確立しようとする研究も数多くなされてきた^(3,4,10,15,16)。それらについての概要は、これまでに刊行されたいくつかの成書^(6,9,17,18,25)を見ればわかるであろう。実際にヒートパイプの設計・利用にあたっては、輸送すべき熱量と許容温度差とが指定されており、その伝熱特性を評価するための指標として限界熱輸送量と等価伝熱抵抗が用いられている⁽¹⁷⁾が、ヒートパイプの熱輸送特性に関する知見はこれらに有用な情報を提供するものである。ヒートパイプの熱輸送特性はヒートパイプの種類とその熱源に応じたヒートパイプ内で起こる移動現象により支配されると考えられ、これらは一般に①管壁およびウイックにおける熱伝導、②ウイック内における作動液の流れとそれともなう顕熱移動、③作動流体の蒸発・凝縮とそれともなう潜熱移動、④蒸気空間における作動流体の流れ、⑤加熱部・冷却部におけるヒートパイプ表面と対流などによる熱移動などから構成されており、いわゆる熱と物質の同時移動現象を呈している。したがって、これらの現象を何らかの方法で定式化して解くことができるならばヒートパイプの熱輸送特性を一般的に見積ることができる可能性が生まれてくる。しかし、上の諸現象を総て考慮して厳密に取り扱うことは非常に困難であり、一般には得策ではない。そこで単純化モデルに依らざるをえないことになるが、ヒートパイプの限界熱輸送量や等価伝熱抵抗を推定する方法についてのこれまでの共通した取り扱い方は軸方向の熱伝導などを無視してヒートパイプの熱輸送が潜熱輸送のみによってなされるとし、径方向のみの熱抵抗を考慮していることである。このような扱いはヒートパイプとしての理想の極限であるが、ドライアウト点以下で作動するヒートパイプの定常特性を扱う限りにおいてはきわめて合理的なものであると考えられる。従来理論的取り扱いがこのような線に沿ってなされてきたことは、元来ヒートパイプ自体がドライアウト点以下で作動させ

ることを原則としてきたこと、および一般にヒートパイプの熱応答が非常に速く、安定な始動が要求される高温用ヒートパイプや多成分ヒートパイプの場合をのぞけば過渡特性がそれほど問題になることはなかったことなどによるのであろう。しかし、本来ヒートパイプは受動的な熱輸送素子であり、その作動状態はヒートパイプが使用される環境によって決定される。そしてその環境は必ずしも一定の熱負荷を供給するものではなく、むしろ外的条件に応じて時間的に変動するのが一般であると考えべきである。またヒートパイプが普及しその利用分野が多岐にわたるにしたがい、特殊な環境のもとでの使用や外界条件の急激な変化をともしなう場での使用に関する要請も増えてくると考えられる。このような状況に対処するためには、最近にみられるマイクロヒートパイプ・長尺ヒートパイプ・可変コンダクタンスヒートパイプ・熱ダイオードヒートパイプ・分離型ヒートパイプなど特殊ヒートパイプの開発⁽¹⁷⁾と同時にヒートパイプの熱輸送特性に関してその熱の与え方や吸熱源の性質なども考慮し非定常過程とした取扱によるより一般的かつ総合的な立場からの理論的な再検討が必要であると思われる。本文ではこのような観点からドライアウト現象や過渡特性も含めたヒートパイプの熱輸送特性の解析に関して、軸方向伝導を考慮したヒートパイプの数学モデルに基づき、筆者の専門である化学工学的手法を用いて行った研究の一端を紹介したい。

2. ヒートパイプの定常特性

従来のヒートパイプの熱輸送特性に関する理論的な取扱の多くは、単純にヒートパイプ全体を等温と仮定したり、伝熱抵抗が径方向のみに存在するとしたものであるが、ここでは Sun と Tien^(23,24) の取り扱いと同様に一般にヒートパイプには軸方向に温度分布が存在するという前提に立ち、軸方向伝導を考慮したヒートパイプのモデルに基づいて検討する。すなわち我々は常温で使用されるウイックを持ったヒートパイプについて、

限界点以下の加熱量で定常状態で作動している状態を図1のようにモデル化した。ここでヒートパイプは管壁、作動液を含んだウイックおよび蒸気空間から構成され、軸方向に加熱部、断熱部、冷却部に分けられているとし、解析にあたり次のことを仮定する。

- ①管壁における温度分布は軸方向のみの一次元とする。
- ②ウイック内温度分布は軸方向および径方向の二次元で、作動液を含んだウイックについては有効熱伝導度の表現が可能であるとする。
- ③ウイック内液圧分布は軸方向のみの一次元とする。
- ④蒸発・凝縮はすべてウイック界面で起こり、

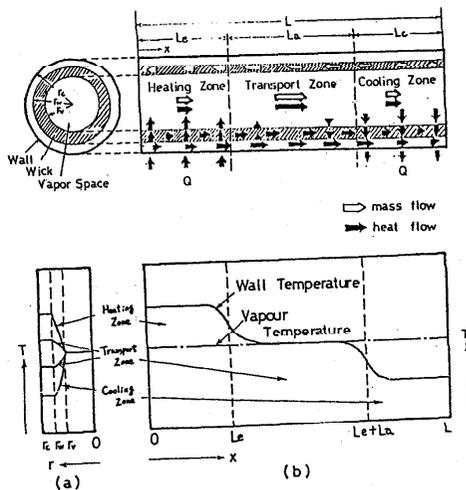


図1 ヒートパイプのモデル

蒸発・凝縮にともなう温度降下は無視する。

⑤蒸気空間内の蒸気の熱力学状態（温度・圧力）は一様とする。

⑥加熱部に加えられる熱量は一様とし、また冷却部は一定温度の流体の循環により対流で除去される。さらに断熱部からの熱損失はないものとする。

このようにして、管壁における軸方向熱伝導、ウィックにおける軸・径方向熱伝導と作動液の軸方向流れおよびそれにとりなう顕熱移動と運動量移動を考慮して、管壁軸方向微小区間における熱収支およびウィック微小区間における熱・物質および運動量収支をとることにより次の無次元常微分方程式が導かれる。

$$\frac{d^2 T^*}{dx^{*2}} + 2 Z^* - 2 Y^* T^* = 0 \quad (0 \leq x^* \leq x_{0}^*)$$

$$\frac{d^2 T^*}{dx^{*2}} - 2 Y^* T^* = 0 \quad (x_{0}^* \leq x^* \leq x_{a}^*) \quad (1)$$

$$\frac{d^2 T^*}{dx^{*2}} - 2 Y^* T^* - 2 H^* (T^* - T_{h}^*) = 0 \quad (x_{a}^* \leq x^* \leq 1)$$

$$\frac{d^2 T^*}{dx^{*2}} + \frac{2 Y^* T^*}{A^*} - \frac{du^*}{dx^*} + \frac{\alpha}{E^*} \left[T^* \frac{du^*}{dx^*} + u^* \frac{dT^*}{dx^*} \right] = 0 \quad (0 \leq x^* \leq 1) \quad (2)$$

$$\frac{dC^*}{dx^*} + \frac{G^*}{2} - \frac{u^*}{2P^*} = 0 \quad (0 \leq x^* \leq 1) \quad (3)$$

ここで境界条件は次式で与えられる。

$$T^*(x_{0}^{*-}) = T^*(x_{0}^{*+}), \quad T^*(x_{a}^{*-}) = T^*(x_{a}^{*+}) \quad (4)$$

$$u^*(x_{0}^{*-}) = u^*(x_{0}^{*+}), \quad u^*(x_{a}^{*-}) = u^*(x_{a}^{*+}) \quad (5)$$

$$\frac{dT^*}{dx^*}(0) = \frac{dT^*}{dx^*}(1) = 0 \quad (6) \quad u^*(0) = u^*(1) = 0 \quad (7)$$

$$C^*(1) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dT^*}{dx^*}(x_{0}^{*-}) = \frac{dT^*}{dx^*}(x_{0}^{*+}), \quad \frac{dT^*}{dx^*}(x_{a}^{*-}) = \frac{dT^*}{dx^*}(x_{a}^{*+}) \quad (9)$$

$$x_{0}^* Z^* = \int_{x_{a}^*}^1 H^* T^* dx^* \quad (10)$$

なお、式中の無次元数は次のように定義されたものである。

$$x^* = \frac{x}{L}, \quad x_{e0}^* = \frac{L_0}{L}, \quad x_{a0}^* = \frac{L_0 + L_a}{L}, \quad T^* = \frac{T - T_v}{T_v}, \quad \alpha = \frac{1}{1 - (r_w/r_v)^2} + \frac{1}{2 \ln(r_w/r_v)}$$

$$Y^* = \frac{k_w L^2}{k_c (r_c^2 - r_w^2) \ln(r_w/r_v)}, \quad H^* = \frac{h r_c L^2}{k_c (r_c^2 - r_w^2)}, \quad Z^* = \frac{q r_c L^2}{k_c (r_c^2 - r_w^2) T_v}$$

$$u^* = \frac{\rho_1 \varepsilon \lambda L u}{k_w T_v \alpha}, \quad E^* = \frac{\lambda}{c_v T_v}, \quad A^* = \frac{\alpha k_w (r_w^2 - r_v^2)}{k_c (r_c^2 - r_w^2)}, \quad C^* = \frac{L}{C}, \quad P^* = \frac{\rho_1 \sigma_1 \lambda K_p}{\mu_1 k_w T_v L}$$

$$G = \frac{\rho_1 g L^2}{\sigma_1}$$

c: 比熱, C: 界面曲率半径, g: 重力加速度, h: 対流伝熱係数, k: 熱伝導度, K: 透過率, L: 管長, P: 液圧, q: 熱流束, r: 径方向距離, T: 温度, u: ウィック内液流速, x: 軸方向距離, ε: 空隙率, λ: 蒸発潜熱, μ: 粘性, ρ: 密度, σ: 表面張力

<添字> 〇: 断熱部, 〇: 容器, 〇: 加熱部, 1: 液体, v: 蒸気相, w: ウィック

管壁軸方向温度分布 $T^*(x^*)$ は式(1)を(4),(6),(9),(10)の条件下で解析的または数値的に解くことにより得られる。またこれらに加えて、式(2),(5),(7)より液流速分布 $u^*(x^*)$ が、さらに式(3),(8)より気液界面曲率分布 $C^*(x^*)$ が得られる。図2は $x_{e0}^* = 0.2$, $x_{a0}^* = 0.8$ の場合について $H^*/Y^* = 1$ の条件下で求められた管壁軸方向温度分布の計算結果であるが、 Y^* が大 ($> 10^3$) の場合はほぼ階段状の温度分布を呈するのに対して、 Y^* が小さくなるにしたがいその分布形状はなだらかとなっていることがわかる。 Y^* の値はヒートパイプの諸元・材質・ウィックの種類などに依存し、その物理的意味は軸方向に対する径方向の伝熱コンダクタンス比であり、この値が小さくなるにしたがいヒートパイプに加えられた熱量のうち管壁を通して軸方向に伝導で伝わる熱量の割合が増加することを意味する。図3は $Y^* = 100$ の場合についてのその分布形状に及ぼす無次元管表面・流体間対流伝熱係数 H^* の影響を示しているが、このようにヒートパイプの蒸気温度 T_{0g} が一定の場合には H^* の値は温度分布形状にはほとんど影響を及ぼさないことがわかる。しかし図4に示すように T_{0g} の値は H^*/Y^* に大きく依存しており、このことは冷却部流体温度 T_{0h} を一定とした条件下では蒸気温度が H^*/Y^* により大きく変化することを示唆するものである。なお H^*/Y^* はヒートパイプのいわゆる Biot 数と考えることができる。次に、図5は液流速分布 $u^*(x^*)$ に及ぼす Y^* の影響を示したものであるが、これより $u^*(x^*)$ の分布形状は Y^* により影響を受け、 Y^* が大の場合には台形状を呈するが Y^* が小さくなるにしたがい境界付近が滑らかに低下していくことがわかる。また式(2)より $u^*(x^*)$ は Y^* のほかに A^* (無次元断面積), E^* (図6に示すような作動流体の物性値) および Z^*/Y^* をパラメータとして含んでいるが、図7, 8, 9に示すようにその影響は一般に非常に小さい。このことはウィック内の軸方向熱伝導や作動液の流れにともなう顕熱移動が潜熱移動に比べて極めて小さいことによるものであり、これらを無視した場合には式(2)はつぎのように簡単化

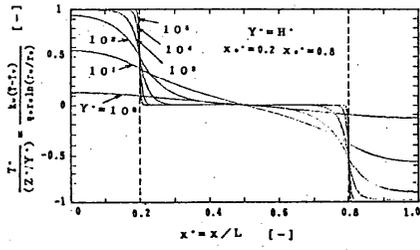


図2 管壁軸方向温度分布 (Y*の影響)

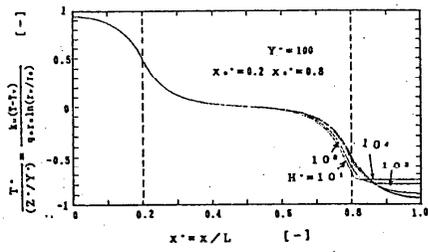


図3 管壁軸方向温度分布 (H*の影響)

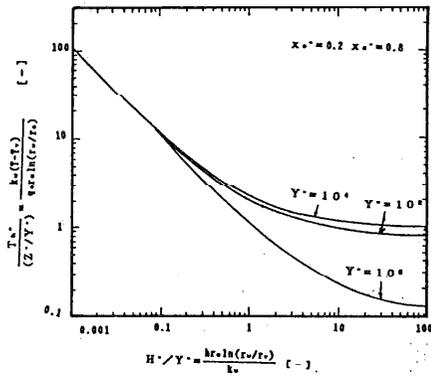


図4 T_w の H^*/Y^* による影響

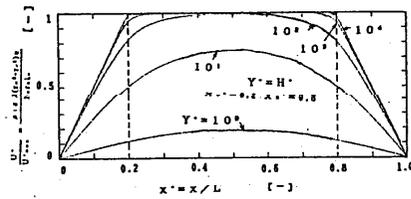


図5 ウィック内液流速分布 (Y*の影響)

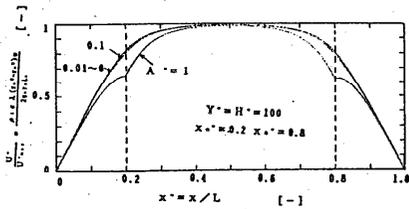


図7 ウィック内液流速分布 (A*の影響)

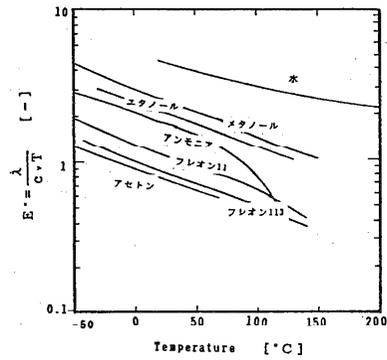


図6 各種作動流体の E^*

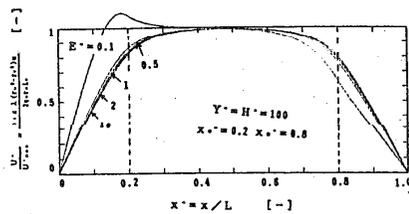


図8 ウィック内液流速分布 (E^* の影響)

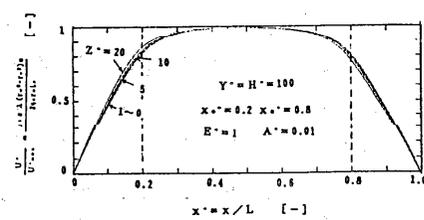


図9 ウィック内液流速分布 (Z^* の影響)

される。

$$\frac{du^*}{dx^*} = \frac{2 Y^* T^*}{A^*} \quad (11)$$

さらに重力の影響が無視できる場合($G^*=0$)における界面曲率分布 $C^*(x^*)$ の計算結果を図10に掲げてある。

図11, 12, 13は Y^* が異なると予想される3本のヒートパイプについてその中心部温度を一定(50°C)に保ちドライアウト点以下における種々の加熱量のもとで表面軸方向温度分布を測定した結果を無次元化して整理したものである。ここで実測結果から推定される Y^* の値は必ずしも一定ではなく加熱部と冷却部で異なったものとなっている。これは主に作動液を含んだウイックの有効熱伝導度が相変化の機構や含液率などにより影響を受けることによるとと思われる。同図中の実線は実測値に適合するような Y^* の値について計算され

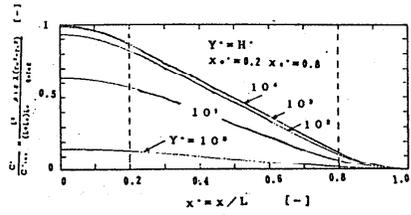


図10 界面曲率分布 (Y^* の影響)

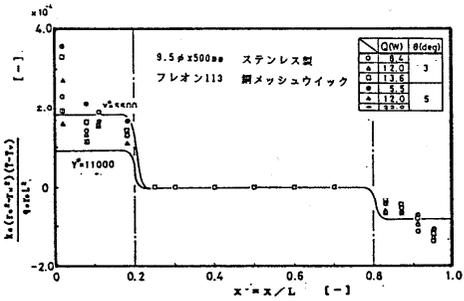


図11 実測値と計算値との比較

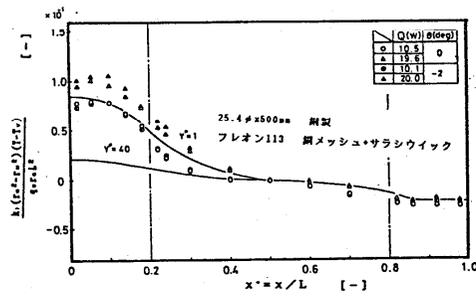


図13 実測値と計算値との比較

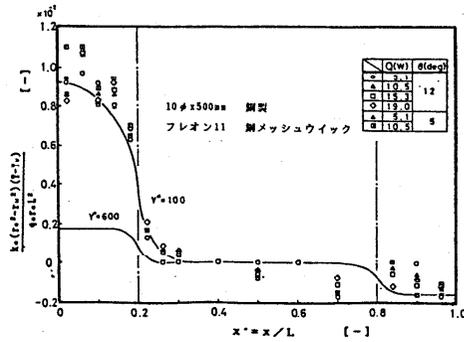


図12 実測値と計算値との比較

たものである。なおウイックの有効熱伝導度を既往の推算式⁽¹³⁾から見積ることにより Y^* を構成する諸因子から推定された Y^* の値はそれぞれ約2800, 100, 10であった。この結果よりヒートパイプ中心部温度を一定とした条件のもとではその表面温度はほぼ加熱量に比例して変化することともに、 Y^* の違いによる表面軸方向温度分布とくに加熱部・断熱部および断熱部・冷却部の境界付近における温度分布形状の違いを明らかに認めることができる。

さて従来におけるヒートパイプの毛細管限界熱輸送量 Q_c および等面伝熱抵抗 R の推算式はそれ

それ次の式(12), (13)で与えられている(10, 11)。

$$Q_c = \frac{\rho_w \lambda_w \pi (r_w^2 - r_v^2) K_w}{\mu_w [1/2(L+L_0)]} \left(\frac{2\sigma_1}{C_{max}} + \rho_w g L \sin \theta \right) \quad (12)$$

C_{max} : 最大曲率半径, θ : ヒートパイプ傾角

$$R = R_{ow} + R_{cw} \quad (13)$$

R_{ow} : 加熱部ウイックの伝熱抵抗

R_{cw} : 冷却部ウイックの伝熱抵抗

式(12)はヒートパイプに加えらる熱量が全てその場所での作動流体の蒸発に使用されるという考えに基づいており、また式(13)は図14に示すように径方向のみの熱移動を考慮していることによる。すなわちこれらはここで提示した取り扱い

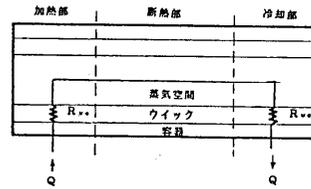


図14 伝熱抵抗モデル

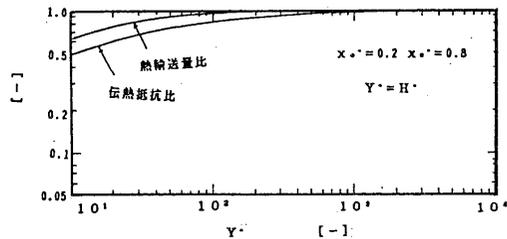


図15 ヒートパイプ熱輸送に及ぼす軸方向伝導の影響

いによると軸方向伝導を無視し $Y^* = \infty$ とした場合に相当するものである。図15は以上の結果から求められたヒートパイプの熱輸送量に占める潜熱輸送量の割合および等価伝熱抵抗の従来の取り扱い ($Y^* = \infty$) における値との比を示したものである。なお熱輸送量比は図10に示した界面曲率分布における $C^*(0)$ の値からまた伝熱抵抗比は図5に示した液流速分布の $u^*(x_0^*)$, $u^*(x_w^*)$ の値から直接求めることができる。図15の結果は Y^* の値の範囲が $10-10^4$ 程度であると考えられる通常のヒートパイプにおけるこれらの値が1に近いことを示しており、このことと(12), (13)式自体が粗い近似しか与えるものではないことを考えると、このような定常特性に関しては軸方向伝導を無視した従来の取り扱いが妥当であると言えよう。なお Y^* が小さすぎると径方向の熱抵抗が増大するなどによりヒートパイプの性能が低下することは言うまでもない。

3. ヒートパイプのドライアウト特性

元来ヒートパイプについてその輸送しうる熱量に最大値が存在することが知られており、特に常温で使用されるウイックをもったヒートパイプでは毛細管限界熱輸送量が重要であるとされている(4, 16, 21, 22)。一般にヒートパイプがこの限界点に到達すると加熱部端がドライアウトし温度が急上昇して伝熱性能が低下すると考えられている。ここではこのようなヒートパイプのドライアウト現象について前節で示したような軸方向伝導を考慮したヒートパイプのモデルにより検討する。

さて一般にウイックをもったヒートパイプが正常に作動しているためには、次式の関係が成立していることが必要とされている(1)。

$$\Delta P_{cmax} \geq \Delta P_1 + \Delta P_0 + \Delta P_v \quad (14)$$

ここで ΔP_{max} はウイックの最大毛細管圧力、 ΔP_f および ΔP_v はそれぞれ作動液および蒸気の流れによる圧力損失、 ΔP_g は重力などの体積力である。一方ヒートパイプの熱負荷が増加して上記の関係が失われると、加熱部端のウイックが乾きあがり、この部分の温度が上昇するいわゆるドライアウト現象が起こると考えられる。そこでウイックをもったヒートパイプについてその加熱部端がドライアウトした後の状態を図16のようにモデル化する。すなわち、加熱部のうちドライアウトした割合を δ で表しその区間をドライアウト部と称することにする。ここで先ほどの仮定①-⑥に加えて次のことを仮定する。

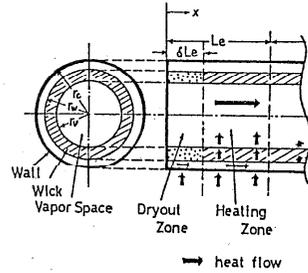


図16 ヒートパイプのドライアウトモデル

⑦ドライアウト部では表面に加えられた熱量が全て管壁を通り軸方向に伝達されるものとする。

このようにして加熱部端が δL だけドライアウトした際、(1)式のドライアウト部 ($0 \leq x^* \leq x_d^*$)における基礎方程式は次のようになる。($x_d^* = \delta L_e / L$)

$$\frac{d^2 T^*}{dx^{*2}} + 2 Z_0^* = 0 \quad (1)'$$

なお、加熱部 ($x_d^* \leq x^* \leq x_a^*$)、断熱部 ($x_a^* \leq x^* \leq x_b^*$)および冷却部 ($x_b^* \leq x^* \leq 1$)における表式は式(1)と同じである。また境界条件は式(4),(6),(9),(10)のほか新たに次式が新たに加わる。

$$T^*(x_d^-) = T^*(x_d^+) \quad (4)'$$

$$\frac{dT^*}{dx^*}(x_d^-) = \frac{dT^*}{dx^*}(x_d^+) \quad (9)'$$

上式を解いて得られるドライアウト後の管壁軸方向温度分布に関してもやはりヒートパイプ系によってオーダー的に異なる値をとると考えられるパラメータ Y^* が重要な役割を演ずる。すなわち種々の Y^* の値についてドライアウトの進行に伴って管壁軸方向温度分布の計算結果は図17に示すごとく Y^* の値が 10^4 と大きく軸方向伝導の寄与が

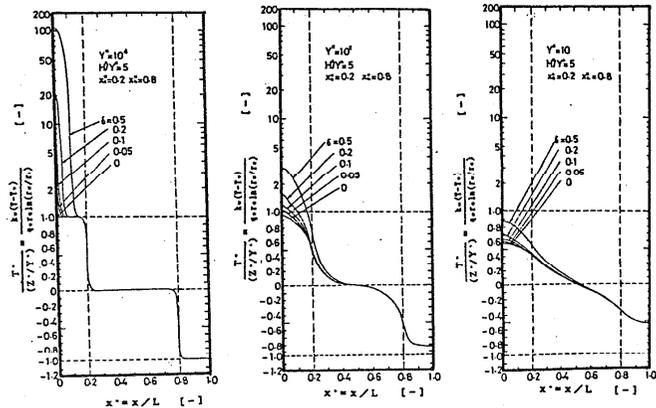


図17 ドライアウト後の管壁軸方向温度分布

小さいヒートパイプではわずかのドライアウトにより加熱部端温度が急激に上昇するのに対し、 Y^* の値が 10^2 および 10^1 と比較的小さく軸方向伝導の寄与が大きいヒートパイプの場合には限界点を越えてドライアウトがかなり進行しても加熱部の急激な温度上昇は見られず全体的になだらかな温度分布を呈している。図18には種々の Y^* の値についてドライアウトの進行にともなう加熱部端温度($T^*(0)$)の変化を示した。またドライアウト点における加熱部端の温度上昇の変化率 ζ を

$$\zeta = \lim_{x_d^* \rightarrow 0} \frac{dT^*}{dx_d^*} (x^*=0) \quad (15)$$

で定義し、 ζ と Y^* との関係を示したのが図19である。 ζ の値は見かけ上の限界点の明瞭さの度合を表すものと考えられ、 Y^* が大の場合にはドライアウト点における加熱部端の温度上昇の変化が顕著であるが Y^* が小さくなるとその変化が少なくなることがわかる。

次に δ と熱輸送量との関係については近似的に次式が導かれる。

$$\frac{Z_{\delta}^*}{Z_{cr}^*} = \frac{(x_a^* - x_o^* + 1)[2C_{max}^* + G^*(1 - \delta x_o^*) \sin \theta]}{(1 - \delta)[x_a^* - (1 + \delta)x_o^* + 1](2C_{max}^* + G^* \sin \theta)} \quad (16)$$

これよりヒートパイプの諸元、作動流体の物性値などが与えられていれば δ と熱輸送量($Z_{\delta}^*/Z_{cr}^* = Q_{\delta}/Q_{cr}$)の関係が得られる。またこの関係と先ほどの基礎方程式の解とから δ を消去すれば、限界点以上の加熱量に対する管壁軸方向温度分布が計算される。図20には特に毛管力 \ll 重力($C^* \ll G^* \sin \theta$)および毛管力 \gg 重力($C^* \gg G^* \sin \theta$)の場合における δ と Q_{δ}/Q_{cr} との関係を示した。

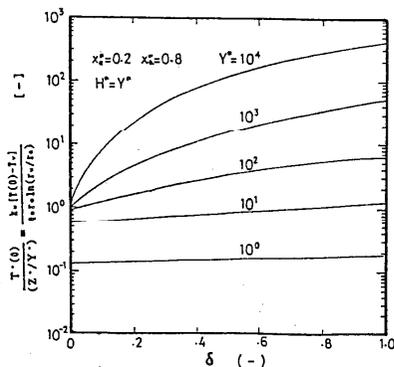


図18 ドライアウト後の加熱部端の温度上昇

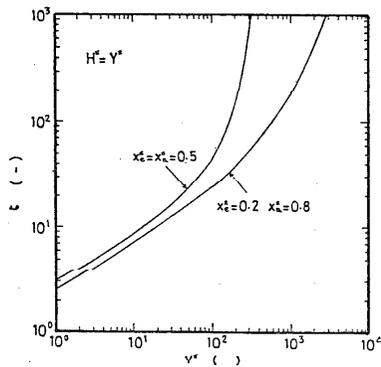


図19 ドライアウト点における加熱部端の温度上昇率

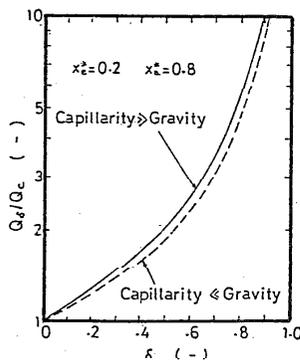


図20 δ と加熱量との関係

さて図21, 22, 23 はやはり Y^* の値が異なると予想される3本のヒートパイプについて、限界点付近の各々の加熱量に対する定常状態における管表面軸方向温度分布の実測値を無次元化して整理した結果を示したものである。これらの図には先ほどの解析から得られた推算曲線も比較のために掲げてある。なお計算にあたり各部の Y^* の値は限界点以下の加熱量における管表面軸方向温度分布の形状をもとにして推定したものをを用いた。図21と図22および23を比較することにより、 Y^* の値の相違によるドライアウトの進行にともなう加熱部温度上昇の違いがわかる。すなわち図21に示した Y^* の推定値が5000と比較的大きいヒートパイプではドライアウト点に達するとともに加熱部端にはりつけた熱電対によって測定される表面温度が急激に上昇するが、他の部分の温度はドライアウトの進行にはほとんど無関係にほぼ加熱量に比例して変化するのみである。これに対して図22および23は互いに管径およびウイックが異なるが加熱部・断熱部の Y^* の推定値がそれぞれ100および

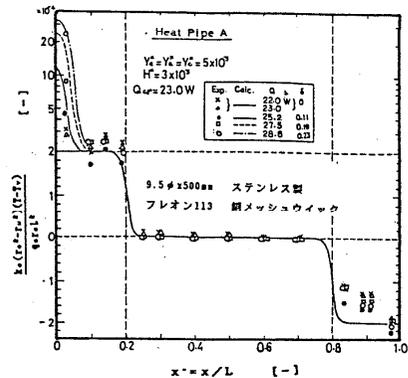


図21 実測値と計算値との比較

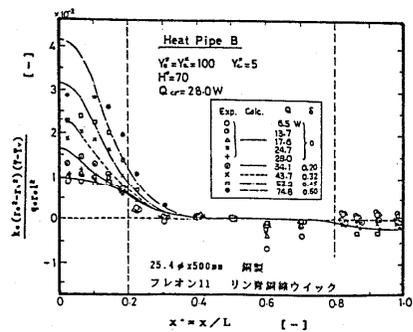


図22 実測値と計算値との比較

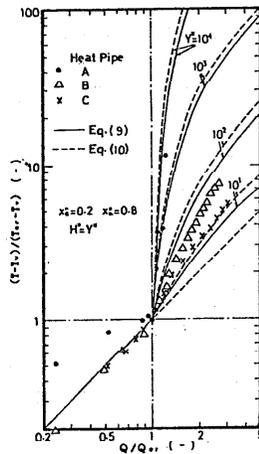


図24 加熱部端温度の実測値と計算値との比較

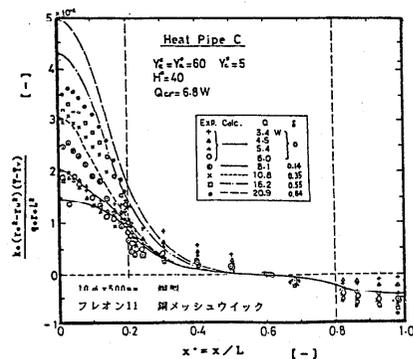


図23 実測値と計算値との比較

び 60 といずれも比較的小さいヒートパイプについての結果であり、限界点をかなり越えた加熱量（図中に示したように最大加熱量付近では δ の推定値が 0.5以上にも達している）に対しても加熱部温度がさほど上昇しないという傾向が見られる。これらは本解析結果から予測されるものとよく合っており、ここで提示したドライアウトのモデルが実際の現象をよく表現しているものであることを示していると思われる。図24はこれらの結果に基づき限界点付近における熱輸送量と加熱部端温度との関係を具体的に示したものである。なお両軸は限界熱輸送量および限界点における加熱部端温度 T_{or} を基準にして表示してある。

4. ヒートパイプの過渡特性

ヒートパイプの伝熱性能を評価するための指標としては、限界熱輸送量として規定される熱輸送能力や伝熱コンダクタンスの大きさなどのほかに、熱応答の速さも重要であると考えられる。このうち、前二者はヒートパイプの定常特性として従来より多くの検討がなされてきており理論的な推定もある程度可能となっているが、後者の過渡特性に関する研究^(6,7)は非常に少なくたとえば任意のヒートパイプについて応答の時定数を推定する手段などは現在のところ確立されているとは言えない。ここでは特にドライアウト点以下の加熱量におけるヒートパイプの過渡特性を推定することを目的として先に示した軸方向伝導を考慮したヒートパイプのモデルを非定常の場合にまで拡張して検討する。このようなモデルを他のモデルと区別するためにここでは構造モデルと称することにし、解析にあたり特に次の仮定を設ける。

⑧管壁および蒸気空間の温度は前節の仮定①, ②, ⑤の条件を満たしながら時間的に変化するものとする。またウイックにおける径方向温度分布は定常状態の場合と同じ形を保つとする。

このようにして、ドライアウト点以下の加熱量のもとでは、管壁、ウイックにおける熱収支より次の基礎方程式が導かれる。

$$\frac{\partial^2 T^\circ}{\partial x^{\circ 2}} + 2 Z^\circ - 2 Y^\circ (T^\circ - T_{v^\circ}) = \frac{\partial T^\circ}{\partial F^\circ} + \xi \frac{dT_{v^\circ}}{dF^\circ} \quad (17)$$

$$Z^\circ = \begin{cases} Z^\circ & (0 \leq x^\circ \leq x_{o^\circ}) \\ 0 & (x_{o^\circ} \leq x^\circ \leq x_{s^\circ}) \\ -H^\circ T^\circ & (x_{s^\circ} \leq x^\circ \leq 1) \end{cases} \quad (18)$$

また、蒸気空間における熱収支より次式が導かれる。

$$2 \int_0^1 Y^\circ (T^\circ - T_{v^\circ}) dx^\circ = E^\circ \frac{dT_{v^\circ}}{dF^\circ} + D^\circ \frac{dT_{v^\circ}}{dF^\circ} \quad (19)$$

さらに時間 0 においてヒートパイプ全体の温度が一様であるとすれば、初期条件として次式が与えられる。

$$F^* = 0 \quad \text{で} \quad T^* = 1$$

(20)

なお境界条件は式(4), (6), (9)で与えたものと同じである。

ここで新たに登場した無次元数は次のようなものである。

$$T^* = \frac{T - T_h}{T_h}, \quad Z^* = \frac{r_0 q L}{k_c (r_0^2 - r_w^2) T_h}, \quad E^* = \frac{\lambda}{c_v T_h}$$

$$F^* = \frac{k_c t}{L^2 [c_c \rho_c (r_0^2 - r_w^2) + \alpha (c_w \rho_w + c_l \rho_l) (r_w^2 - r_v^2)]}$$

t : 時間

$$D^* = \frac{c_v r_v D}{c_c \rho_c (r_0^2 - r_w^2) + \alpha (c_w \rho_w + c_l \rho_l) (r_w^2 - r_v^2)}$$

D : 蒸気密度

$$\xi^* = \frac{\alpha (c_w \rho_w + c_l \rho_l) (r_w^2 - r_v^2)}{c_c \rho_c (r_0^2 - r_w^2) + \alpha (c_w \rho_w + c_l \rho_l) (r_w^2 - r_v^2)}$$

なおここでは T_v を一定として行った定常特性の解析の場合と異なり冷却用流体温度を一定として取り扱うために無次元数 T^* , Z^* , E^* などは T_h を基準としたものを用いている。

さて上記システムは一般には非線形であるが、 Y^* , H^* が一定であり、かつ $Y^* \gg E^*$, $Y^* \gg D^*$ であれば、入力を加熱量 $\int_0^{L^*} Z^* dx^*$, 出力を熱輸送量 $H^* \int_{x_a}^{x_b} T^* dx^*$ とした応答に関し線形システムとなる。

図25はこのモデルから計算された種々の Y^* , H^* の値に対するステップ状の熱入力変化にともなう管壁軸方向温度分布の時間的変化を示したものである。また、図26は横軸に無次元時間、縦軸に正規化された無次元熱輸送量で表した時間領域での熱輸送量の応答に及ぼすパラメータ Y^* , H^* の影響を示してある。ここで、数値計算にはC

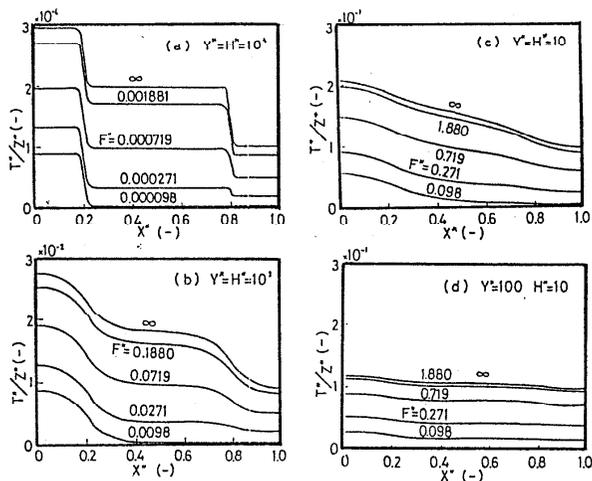


図25 管壁軸方向温度分布の時間的変化

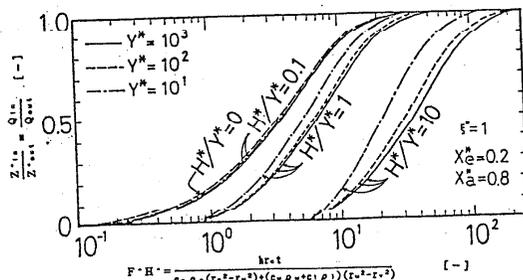


図26 構造モデルによる過渡応答の計算結果

rank-Nicolsonの陰解法(差分法)を採用し図27に示すフローチャートのように行った。なお、 x^* の刻み幅 Δx^* は1/500とし、また、 F^* の刻み幅 ΔF^* は $1.1^n \times 10^{-2}/H^*$ として、繰り返し数 n とともに増加するようにした。図25より一般に温度分布の時間的変化は定常特性の場合と同様に Y^* の値により影響され、また、 H^*/Y^* の値が小さい場合には温度分布は全体的に一樣に近い状態で変化していくことがわかる。

我々は更にヒートパイプの数学モデルとして上述の構造モデルの特別な場合に含まれる3種の簡単化モデル(階段モデル, 集中モデル, 均質モデル)についても検討した。これらの取扱いに基づく管表面軸方向温度分布の概念図は図28に示すようなものである。階段モデルはヒートパイプの熱移動が一般に径方向に支配的であることにより、表面軸方向温度分布が階段状を呈するとして取り扱うモデルであり、径方向の一次元熱伝導問題として与えられる。また集中モデルはヒートパイプ全体の温度が常に一樣であるとしていわゆる集中定数化近似により取り扱うモデルである。さらに均質モデルはヒートパイプが単純な金属棒のように均質物質からなるとして取り扱うモデルであり、これらの

モデルの基礎式、過渡特性を支配するパラメータや構造モデルとの関係などを表1に掲げてある。詳細は文献⁽¹⁴⁾を参照されたい。

さて先のモデル解析の結果は、ヒートパイプの熱輸送量の応答が諸々の無次元数の関数として整理されて

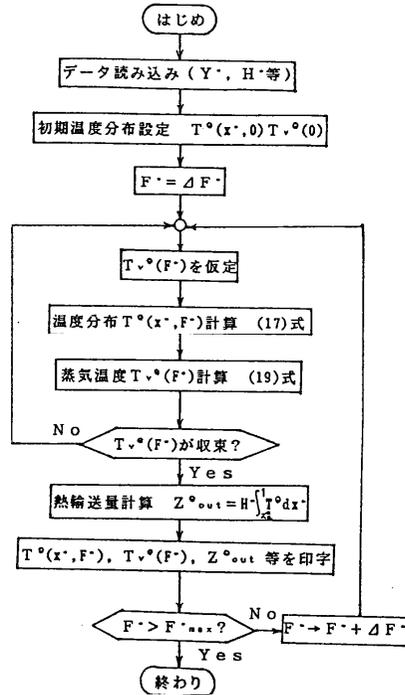


図27 計算のフローチャート

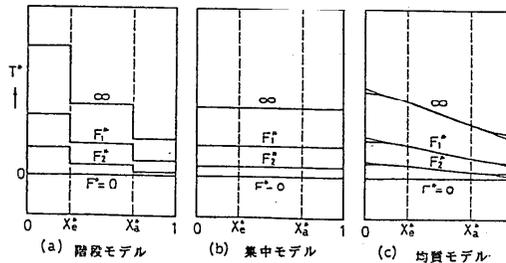


図28 過渡特性のモデル

表 1 過渡特性の簡単化モデル

	基礎方程式	境界条件 初期条件	熱輸送量の表式	過渡特性を支配 するパラメータ	構造モデル との関係
階段モデル	$0 \leq r^* < 1, 1 < r^* \leq 2$ $\frac{\partial T^*}{\partial r^*} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial r^{*2}}$ $r^*=1$ $\frac{\partial T^*}{\partial r^*} = \frac{x^*}{(x^*-x_a^*)} \frac{\partial T^*}{\partial r^*} + \frac{(1-x_a^*)}{(x^*-x_a^*)} \frac{\partial T^*}{\partial r^*}$	$r^*=0$ $-\frac{\partial T^*}{\partial r^*} = Z_{\delta^*} \cdot T^*$ $r^*=2$ $-\frac{\partial T^*}{\partial r^*} = H_{\delta^*} \cdot T^*$ $F_{\delta^*} = 0 \quad T^* = 0$	$Z_{\delta^*} = H_{\delta^*} \cdot T^* (r^*=2)$	$Z_{\delta^*} = \frac{q\delta}{kT_0}, r^* = \frac{r}{\delta}$ $F_{\delta^*} = \frac{kt}{c\rho\delta^2}, H_{\delta^*} = \frac{h\delta}{k}$	$Y^* \rightarrow \omega$ $(H^*/Y^* = \text{一定})$
均質モデル	$\frac{\partial T^*}{\partial t^*} = \frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + 2ZL^*$ $ZL^* = \begin{cases} ZL^* & (0 \leq x^* \leq x_a^*) \\ 0 & (x_a^* \leq x^* \leq x_b^*) \\ -HL^* & (x_b^* \leq x^* \leq 1) \end{cases}$	$x^* = x_a^*, x_b^*$ $T^* = T^*, \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = \frac{\partial T^*}{\partial x^*}$ $x^* = 0, 1$ $\frac{\partial T^*}{\partial x^*} = \frac{\partial T^*}{\partial x^*} = 0$ $F_L^* = 0 \quad T^* = 0$	$ZL^* = 2HL^* \int_0^1 T^* dx^*$	$ZL^* = \frac{qL^2}{k_c T_0}$ $F_L^* = \frac{kt}{c\rho cL^2}$ $HL^* = \frac{hL^2}{k_c T_0}, x^* = \frac{x}{L}$	$H^*/Y^* = 0$
集中モデル	$\frac{dT^*}{dt^*} = 2ZL^* - 2HL^* \cdot T^* (1-x_a^*)$	$F_L^* = 0 \quad T^* = 0$	$ZL^* = 2HL^* \cdot T^* (1-x_a^*)$	同上	$Y^* \rightarrow 0$ $(H^*/Y^* = \text{一定})$

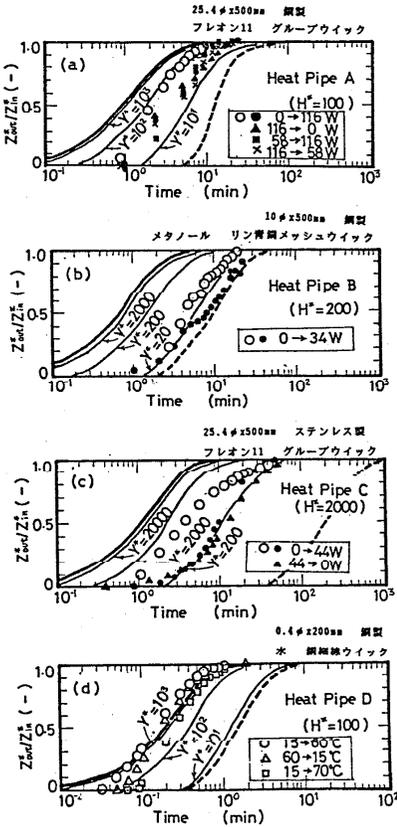


図 29 過渡応答に関する実測値と計算値との比較

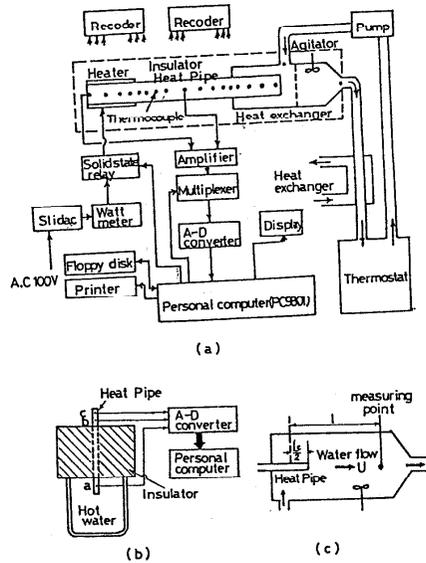


図 30 実験装置

いる。ここで、実測値との比較にあたり、直ちに推定しにくい物性値は h (ヒートパイプ表面・冷却用流体間伝熱係数) および kw (作動液を含んだウイックの有効熱伝導度) であるが、前者については定常状態における冷却部のヒートパイプ表面温度と冷却水流量および冷却水出入口温度差とから推定したものをを用いた。このようにして H^* (H_{δ}^* , H_{l}^*) を既知なものとして扱うことにより、構造モデルでは Y^* の値をパラメータとして、また他のモデルでは一義的に熱輸送量の応答を推定することができる。図29(a)-(d) は図30に示すような実験装置を用いて得られた条件の異なる4本のヒートパイプに関する熱輸送量のステップ応答の実測値 (●▲■×○△□) と各モデルから推算された結果 (— 構造モデル, — 集中モデルおよび階段モデル, ≡ 均質モデル) とを比較して掲げたものである。なおヒートパイプ(a)-(c)については図30(a)の装置により加熱部にドライアウト点以下でステップ状の熱入力変化を与えた際の冷却部熱交換器出入口温度差の応答から求めたが、この際図30(c)に示すようなヒートパイプ放熱部と出口温度測定点間の冷却水の滞留時間を考慮して熱輸送量の応答に補正を行ってある。またヒートパイプDについては図30(b)のような加熱部を温浴に浸した対流放熱実験における冷却部表面温度の応答から求めた。図29において、集中モデルと階段モデルによる推算結果が重なっているのは、 H^* を一定とした条件のもとでは $H^*/Y^* \rightarrow 0$ とするのと $Y^* \rightarrow \infty$ としたものが同一の結果をもたらすことによるものである。また同図 (a) - (c)には (1) 熱交換器出入口温度差の応答から求めた結果 (●▲■×) の他に、(2) 冷却部表面温度の応答から求めた結果 (○△□) もあわせて示した。両者の結果は必ずしも一致していないが、これは特に(1)の方法では冷却水の滞留時間の補正による誤差などの影響によると考えられる。次に、ヒートパイプの熱応答の性能を表す指標として、一般にその応答が無駄時間+一時遅れで近似できる⁽¹²⁾ ことに基づき、 Q_{out}/Q_{in} (または $T^o/T^{\infty o}$) = $1 - e^{-t/\tau}$ = 0.632 となる時間として時定数 τ を定義すると、構造モデルの場合には無次元パラメータ Y^* , H^* と無次元時定数 F^*H^* との関係は図31で与えられる。また、図32は各ヒートパイプについて冷却部表面温度に関する応答の時定数の推算結果と実測結果とを比較して示したものである。なお Y^* の回定については、(a) 定常状態におけるヒートパイプ各部の温度と冷却水温度から求

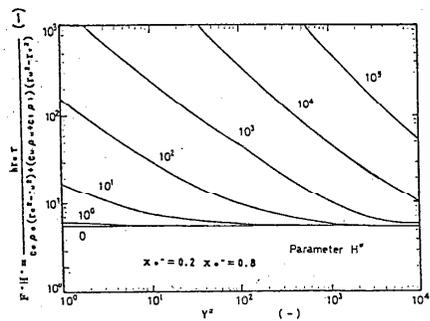


図31 時定数の計算結果

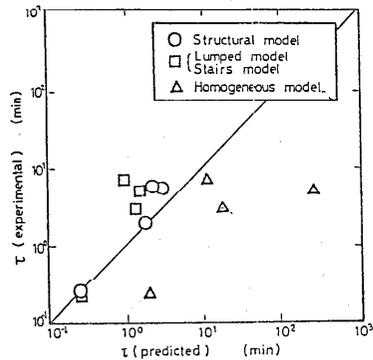


図32 時定数の実測値と推算値との比較

める方法、(b) 図2の結果にもとづき加熱・断熱部および断熱・冷却部境界の表面温度分布の形状から求める方法、(c) Y^{*}を構成する諸物性値から求める方法などが考えられるが、ここでは(a)の方法によった。

これらの推算結果と実測結果とを比較すると、ヒートパイプDをのぞいて集中(階段)モデルによる推算結果は実測値に比べて熱応答の時定数を過小に見積る傾向にあるのに対して、均質モデルでは逆に時定数を過大に見積る傾向があることがわかる。このことは、一般のヒートパイプでは集中化近似が必ずしも成立しないが、一方において単純な金属棒よりははるかに熱応答が速いことを示すものである。なお、ヒートパイプDではそのBiot数が0.003と小さく、集中化近似のための条件が成立しているために、集中モデルから推算される結果に近くなっていることがわかる。またヒートパイプBの実測値が均質モデルに近い結果を与えているのは、その管径が小さく全体積中管材の占める割合が大ききことによるものであり、一方ヒートパイプCにおける均質モデルの推算結果が他のモデルや実測の結果と大きくかけ離れているのは、その材質が銅に比べて熱伝導性の悪いステンレスであることによるものである。なお構造モデルにおいてパラメータ同定を行い推定された過渡応答の時定数は他のモデルに比べて実測値に近い値を与えている。結局これらより、適切なヒートパイプの過渡特性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Y^{*}、H^{*}の値を用いて行うことが必要であると言えよう。

5. ヒートパイプの周波数特性

ヒートパイプの動特性について検討を行うための手段としては前節で述べたようなステップ応答に基づく時間領域での解析のほかに、周波数応答法による周波数領域での解析も有用であると考えられる⁽¹⁸⁾。ここではこのようなヒートパイプの周波数特性について検討する。

まず先ほどヒートパイプの過渡特性に関するモデルについてその基礎方程式(17)をLaplace変換すると、加熱部・断熱部・冷却部についてそれぞれ次のような2階の常微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T^{\circ}}{dx^{\circ 2}} + 2(Z^{\circ} + Y^{\circ} T^{\circ}) - 2Y^{\circ} T^{\circ} &= s T^{\circ} + \xi^{\circ} s T^{\circ} & (0 \leq x^{\circ} \leq x^{\circ *}) \\ \frac{d^2 T^{\circ}}{dx^{\circ 2}} + 2Y^{\circ} T^{\circ} - 2Y^{\circ} T^{\circ} &= s T^{\circ} + \xi^{\circ} s T^{\circ} & (x^{\circ *} \leq x^{\circ} \leq x^{\circ **}) \\ \frac{d^2 T^{\circ}}{dx^{\circ 2}} + 2Y^{\circ} T^{\circ} - 2(Y^{\circ} + H^{\circ}) T^{\circ} &= s T^{\circ} + \xi^{\circ} s T^{\circ} & (x^{\circ **} \leq x^{\circ} \leq 1) \end{aligned} \quad (21)$$

ただし \bar{T}° などは無次元温度 T° などのLaplace変換を意味し、次式で定義されている。

$$\bar{T}^{\circ}(x^{\circ}, s) = \int_0^{\infty} T^{\circ}(x^{\circ}, F^{\circ}) e^{-sF^{\circ}} dF^{\circ} \quad (22)$$

次にこの方程式の一般解を求め、その未定係数を境界条件を適用することによって決定する。また式中に現れる無次元蒸気温度 \bar{T}° は次の関係から決定され、このようにしてs領域におけるヒ

ートパイプの管壁軸方向温度分布に関する解
が得られる。

$$\bar{T}_w(s) = \int_0^1 T_w(x^*, s) dx^* \quad (23)$$

次に入力を加熱量，出力を熱輸送量とした
場合における伝達関数 $G(s)$ ($= H \cdot \int_{x_0}^1 T_w(x^*, s) dx^* / x_0 \cdot Z_w(s)$) を求め， $s = j\omega$ (ω :角周
波数)とにおいてそのゲイン $|G(j\omega)|$ と位相角
 $\angle G(j\omega)$ を見積ることによりヒートパイプ
の周波数特性が計算される。

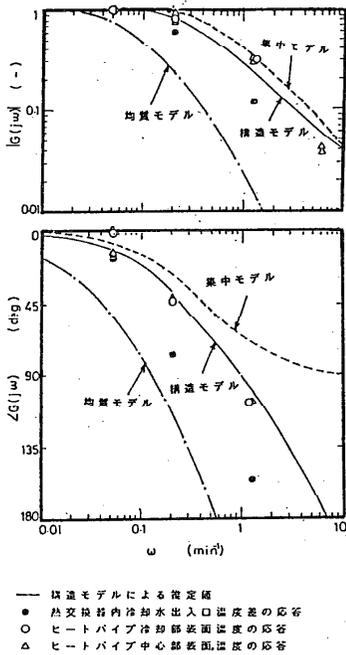


図35 実測値と計算値との比較

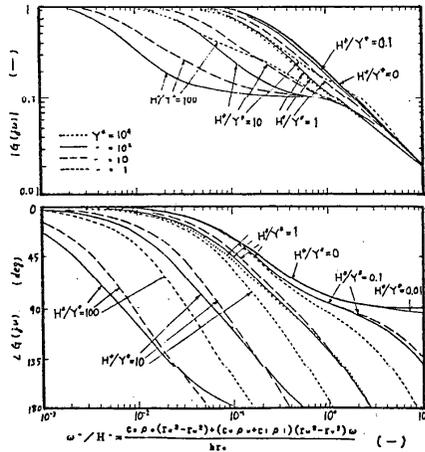


図33 周波数応答の計算結果

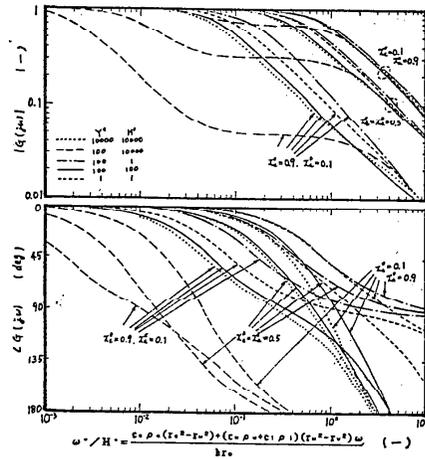


図34 周波数応答の計算結果

図33, 34はこのようにして計算された周波数特性をボード線図で表したものである。図33はヒートパイプの加熱部・断熱部・冷却部の割合が 1:3:1の場合についてその周波数特性に及ぼすパラメータ Y^* および H^* の影響を示したものであり、ここで太い実線はヒートパイプ全体の温度が一樣であるとして取り扱う集中モデルに基づく結果でそのボード線図は一次遅れ系の特性を示しており $H^*/Y^* = 0$ の場合に対応している。この図より一般にヒートパイプのBiot数(H^*/Y^*)が大きくなるほどまたBiot数が同じ場合には Y^* の値が大きくなるほど集中モデルの場合に比べて低周波域においてゲインが減少するとともに位相遅れが増大していることがわかる。しかしBiot数がそれほど大きくない場合には、そのゲイン特性がほぼ同様の軌跡を描き角周波数の増加とともに -1 の勾配で右下がりに減少している。このことと位相特性の形状は通常のヒートパイプの過渡応答がほぼ無駄時間+一次遅れ系で近似できることを示唆するものである。図34は断熱部が存在しない場合($x_0 = x_1$)における加熱部・冷却部の割合の周波数特性に及ぼす影響を示したものである。これよりそのゲイン特性は低周波数域では Y^* および H^* の値により異なるが高周波数域では Y^* , H^* によらず加熱部比に応じた時定数に相当した一次遅れ系の特性に漸近し、またその位相特性は低周波数域では Y^* , H^* の値のみならず加熱部比により異なるが高周波数域になると加熱部比にはよらず Y^* , H^* の値によって一定の方向に収束していくことがわかる。

図35は図30で示したのと同様な装置を用いてドライアウト点を越えない範囲で加熱部に1分, 5分, 30分, 120 分の各周期で正弦波状の熱入力変化を与えた場合におけるヒートパイプの熱輸送特性に関する実験結果に基づき、各周波数のデータについてゲインと位相角を計算しその結果をボード線図で表したものである。ここで Δ 印はヒートパイプ中心部温度、 \circ 印は冷却部表面温度、 \bullet 印は熱交換器内冷却水出入口温度差の応答を示している。また同図にはそれぞれのモデルについて前節で示した方法でパラメータ同定を行って推定された結果も掲げてある。

この結果より、ヒートパイプ表面温度の周波数応答に関する実測値と構造モデルによる推算値とはステップ応答の場合と同様に比較的良く一致していることがわかる。

表2 熱輸送特性に影響を及ぼす因子

定常特性	蒸気温度一定	Y^*
	冷却用流体温度一定	$Y^*, H^*/Y^*$
ドライアウト特性		Y^*
過渡特性		$F \cdot H^*, H^*/Y^*, Y^*$
周波数特性		$\omega^*/H^*, H^*/Y^*, Y^*, x_0, x_1$

6. 結 言

単一成分・通常型ヒートパイプの熱輸送に関する定常特性、ドライアウト特性、過渡特性、周波数特性について軸方向伝導を考慮した数学モデルに基づき解析を行い実測値と比較した結果、このモデルが実際の現象を良く表現しうるものであることが示された。またこの解析を通じて高性能熱輸送素子としてのヒートパイプの本質と限界とをより明確にさせることができたように思われる。表2には本解析によって明らかになったヒートパイプのそれぞれの特性に及ぼす主要な因子をまとめて示してある。なおここで提示したモデルは基本的にはSunら^(23, 24)が単一成分及びガス入りヒ

トパイプの定常特性の解析において取り扱ったものと同じ考え方によるものであるが、このような取り扱いがドライアウト特性や非定常特性の解析にも有用であることが示されたことの意義は大きいと思われる。また本文で述べられなかった問題としてたとえばドライアウト現象を含む非定常特性については実験的に興味深い知見が得られており⁽¹²⁾、その特性の解析に関しても本モデルを基礎とした非線形システム理論に基づいて展開されるであろう⁽¹³⁾。さらにこの軸方向伝導を考慮した取扱いは単一成分・通常型ヒートパイプばかりでなく温度・熱流の制御に用いられている多成分ヒートパイプや熱ダイオードヒートパイプの特性解析にも役立つと期待される。

参考文献

- (1) Busse, C.A. and J.E.Kemme: Int. J. Heat Mass Transfer., 23, 643 (1980)
- (2) Colwell, G.T. and W.S. Chang: Int. J. Heat Mass Transfer., 27, 541 (1984)
- (3) Cosgrove, J.H., J.K. Ferrell and A. Carnesale: J. Nuclear Energy., 21, 547 (1967)
- (4) Cotter, T.P.: Los Alamos Sci Lab Rept., LA-3246-Ms (1965)
- (5) Deverall, J.E., J.E. Kemme and L.W. Florshuetz: Los Alamos Sci Lab Rept., LA-4518 (1970)
- (6) Dunn, P.D. and D.A. Reay (伊藤訳): ヒートパイプ, 学献社 (1978)
- (7) Grover, G.M., Cotter, T.P. and Erickson, G.F.: J. Appl. Phys., 35, 1990 (1964)
- (8) 堀田: プロセス動特性., 培風館 (1975)
- (9) 池田, 伊藤, 梶田: ユーザーのためのヒートパイプ応用, 学献社 (1981)
- (10) Kunz, H.R., L.S. Langston, B.H. Hilton, S.S. Wyde and G.H. Nashick: NASA CR-812 (1967)
- (11) 倉前, 松本: 化学工学論文集., 10, 736 (1984)
- (12) 倉前, 柏: 化学工学論文集., 13, 515 (1987)
- (13) 倉前: 第23回日本伝熱シンポジウム論文集, 545 (1986)
- (14) Kuramae, M.: 6th I.H.P.C Preprint 1st session, 29 (1987)
- (15) Marcus, B.D.: NASA CR-2018 (1972)
- (16) Marcus, B.D.: TRW Inc. Rept. to NASA., Contract No. NAS2-5503 (1971)
- (17) 日本ヒートパイプ協会編: 実用ヒートパイプ., 日刊工業新聞社 (1985)
- (18) 大島: ヒートパイプ応用設計ハンドブック, JATEC (1976)
- (19) 大島, 松下, 村上: ヒートパイプ工学., 朝倉書店 (1979)
- (20) 柴山, 師岡, 北川, 石川: 日本機械学会論文集., 44, 1355 (1978)
- (21) 宍戸, 松田, 飯田, 大谷: 化学工学論文集., 9, 650 (1983)
- (22) Shishido, I., I. Ohishi and S. Ohtani: J. Chem. Eng. Japan., 17, 179 (1984)
- (23) Sun, K.H. and C.L. Tien: AIAA Journal., 10, 1051 (1972)
- (24) Sun, K.H. and C.L. Tien: Int. J. Heat Mass Transfer., 18, 363 (1975)
- (25) 山西, 清水: ヒートパイプとその応用., オーム社 (1980)

気液二相流研究の動向についての雑感

神戸大学工学部 赤川浩爾

1. はじめに

編集委員長の谷口先生から「最近の二相流伝熱・流動の研究の傾向」のテーマで原稿のご依頼を受けた。このテーマは「伝熱研究」誌にとってはまことに時宜にかなったものと思われるが、私の準備不足のために期限内にはとても書けそうでないので、先生のご了解をえて、最近の気液二相流の研究傾向にも関連する事柄についての私の雑感を書かせていただくことにした。先日、国際会議に出席して、直接に見聞した諸外国の研究の中で、私の研究テーマに関連した諸問題について感じたことを述べることにする。これはあくまで私個人の雑感であり一般的な研究動向の紹介ではないので、気楽な気持ちで読んでいただければ幸いである。

2. 二相流の過渡現象の国際セミナー（ドブロウニク）のこと

本年5月25日から29日までユーゴスラビアのドブロウニクで "Transient phenomena in multiphase flow" の国際セミナーが開催されて出席した。昨年、このセミナーのオルガナイザの芹沢昭示（京大）氏からの論文提出の打診があった時に、直ちに参加を申し出た。その理由は私の研究の一つがこの過渡現象のテーマに関係があり興味を持ったことは当然ではあるが、他に本研究会の多くの方々からドブロウニクの町の魅力について聞いていたためでもある。今回、出席してみて期待通りにアドリア海の風光と中世の城塞都市のロマンを満喫することができたとともに著名な方々からの直接の話を聞くことができ、極めて楽しい思い出がえられた。

さて、このセミナーはすべて招待講義と招待論文発表から構成されていて、表1に示されるような分野の分類と発表数であった。これによっても二相流研究の最近の動向の一部は推察することが出来るであろう。すなわちTransient phenomena の大テーマの下においても、大部分の発表は二相流のフォーミュレーション、モデリング、数値計算、波動現象 (wave phenomena) などの理論的論議であること、また参加者は特定部門のみの研究者ではなく、二相流の広汎な分野で著名な下記の方々であることから、このTransient phenomena が現在と近い将来の重要課題であることが明らかのように思える。Afgan (ユーゴ)、Delhay (フランス)、Hewitt (英国)、Lahey (米国)、Mayinger (独)、Nigmatulin (ソ連)、Spalding (英国)、Wijngaarden (オランダ)、芹沢 (日本)、Ishii* (米国)、(以上はオルガナイザー)、その他参加者 Bachelor (英国)、Bouré (フランス)、Pokusaev (ソ連)、Nakoryakov (ソ連)、Hochreiter (米国)、Cumo* (伊)、Dukler* (米国) (*印は欠席)。二相流研究者ならばよく知っておられるこれらの一流の方々に参加されている密度の高い国際会議であった。

以下にここでのいくつかの講演に関連して私の感じたことを述べる。またその一部の内容の紹介によって最近の研究動向の一端も理解していただけるものと思う。

	セッション名	Invited lecture	Invited paper	発表(出席)者
1	オープニング	2	0	
2	二相流のフォーミュレーション	2	3(1)	片岡(京大)
3・4	二相流の波動現象 I, II	2	13(1)	赤川、藤井(神戸大)
5・6	実験的研究 I, II	3	6	
7・8・9	過渡二相流のモデリング I, II, III	3(1)	16(3)	芹沢(京大)、長崎(東工大) 深野(九大)、松井(筑波大)
10	過渡二相流の数値解法	1	5(1)	中西(姫工大)
合計		13(1)	45(6)	

()内は日本の発表数

表1 二相流の過渡現象の国際セミナー(ドブrouニク)

3. 気液二相流の基礎方程式についての雑感

3.1 基礎式についての従来の私の考え

二相流の基礎式に関する私の古い考え方から話を始めることにする。二相流の研究を始めたばかりの頃には、気液二相流に関して厳密な意味での空間と時間座標に対する基礎の微分方程式は成り立たないと思っていた。その理由は、微分概念で空間的な対象の領域を小さくしてゆくと、その空間中の点は液相の中か気相の中に入ってしまう、二相流としての対象が消えてしまう。それをさけるためには、例えば気泡流では何個かの気泡を含むような領域(これは微小と云えるかどうか分からない)を対象として、何らかの平均値的な値に対して微分方程式の形をした式をたてざるをえない。このように考えると二相流に対する微分方程式(質量保存式、運動量式、エネルギー式)は実際の現象を忠実に表現するものではなくて、单相流に対する従来の基礎式の形を用いた仮想的なものであって、これらの式の中の二相流の速度とか密度などを逆に定義する必要があることになり、また実験によって各項の値(例えば局所損失、摩擦損失)を定める必要があると云うことになる。そこで以上のような式がつかられてしまうとそれ以上厳密に二相流の基礎式を追求する必要性はないように思っていた。すなわち研究初期の頃に行ったボイラの自然循環の解析、さらに強制循環ボイラ、貫流ボイラの流動解析の経験でも上記の基礎式で所要の結果がえられていたし、また原子炉の熱水力的計画に対しても、これで十分ではないかと思っていた次第である。

ところで1975年出版のDr. Ishiiの"Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow"により二相流の基礎方程式の厳密な定式化がなされていることを見て、新しい展開の幕が開かれつつあるのを感じた。このような定式化は当時Delhay, Bouréらによりフランスで行われており、その後もこれらの人々による定式化の論文が次々と発表される状況となると、私も前述の疑問をある程度は残したものの、この分野の研究の重要性と必要性を認めざるをえなくなった。そこで例えば1

1983年度の文部省科学研究総合(B)の「管路系および容器内の気液二相流の流動現象に関する総合研究」(研究代表者、赤川)の成果報告書(276頁)の13章の構成中では「基礎方程式」の項を重要事項として一つの章で取り上げることとなった。それは中西重康(姫工大)氏により書かれている。

3.2 最近の気液二相流の基礎方程式の定式化のこと

今回のセミナーにおいては基礎式の問題は重点事項として取り上げられていて、Delhayeによる"Foundation time-varying two phase flow formulation"、Nigmatulin "Dynamic of nonstationary two-phase flow"、及び片岡、芹沢氏の"Interfacial area concentration and its roles in local instant formulation of two-phase flow"などの論説がある。これらによる二相流の基礎方程式(質量保存、運動量式、エネルギー式)の定式化の新しい面を簡単に紹介しよう。上記の私の疑問の「対象領域を小さくしていくと気液両相のいずれかには入ってしまい、二相流の対象が消えてしまう」と言う問題は次のような数学的表現で見事に解決されている。すなわち、空間中の任意の点が気相中であれば0、液相中であれば1の特性関数(Heaviside関数)を導入して、これを密度 ρ 、速度 u に掛けた形で微分方程式を表すと、基礎式の形は前のものと同一であっても、両相の状況を適確に表すことになる。また気液両相の間で質量、熱の移動がある場合には、それに対して気液境界面積(これは巨視的には流動様式により定まる)が関係してくるが、これを表すために単位体積当りの気液境界面積(気液境界面積濃度)の特性値が用いられ、界面における変化に対してはデルタ関数が用いられている。このように基礎方程式を表すための超関数の応用と言うような数学的にもレベルの一段高い段階への進展が見られたのである。

このような超関数を用いることと、二相流の速度、ボイド率の断面上の分布の一次元流れへの平均化操作による基礎方程式の定式化については上記の片岡氏の論説で述べられているが、また1986年の第5回混相流シンポジウム論文集「混相流のモデリングとシミュレーション」中の同氏の論説「気液二相流のモデリング—基礎方程式と構成方程式」においても詳細に解説されている。それによると例えば基礎方程式の持つべき特性は次のように定義されている。

- (1) 基礎方程式に現れるすべての変数が考慮している時間・空間領域のすべての点の関数として定義されていること。
- (2) 基礎方程式は考慮している時間・空間領域のすべての点で同一の形をもつこと。

以上の条件は非常に簡潔に表現されているが、これを実現するためには超関数の応用のような高度の数学的基盤が必要であろう。私も二相流研究者の一員としてこのような手法を始めて知った時に、目を開かれた感があったが、正直な所、これらの数学的手法の理解は困難であった。しかしこのような研究の発達の必然性は十分に感じられるので、今後の若い研究者諸氏はこれに習熟されることを望むとともに、さらにこの定式化を概念的な体系化の段階で止めることなく、実際の技術的問題を解決のための具体的な形にして、その適用により精度の高い問題解決につとめてほしいと望むものである。

3.3 気液二相流の基礎方程式と構成式のこと

さて気液二相流に関する実際の技術的問題を解く場合について考えてみよう。これらの基礎式は例えば二流体モデル (Two fluid model) の場合には、質量保存式、運動量式、およびエネルギー式が気液両相に対して2個ずつで合計6個であるのに対して、変数の数はボイド率、速度、圧力、界面せん断力、界熱熱流束など合計35個にも達する(詳細は上記の片岡の論文参照)。これらの中で無視できるもの、相互の間で従属関係にあるものを除いてもまだ未知数17個となり、基礎方程式の数よりも未知数の数ははるかに多い。したがって二相流系の基礎式の解を得るためには、すなわち方程式系を閉じさせるためには、何個かの関係式が必要である。これらの関係式は前述の基礎式に対して構成式とよばれている。

次に構成式の例をあげて説明しよう。最も単純な流動様式の等温二成分二相流の環状流の場合を考えてみると、基礎方程式の気液各相の質量保存式、運動量式(等温の仮定によりエネルギー式は不要となる)は单相流のものと同様であって、容易に表されるが、これのみによっては与えられた気液質量流量 G 、 G_g に対して液膜の厚さ δ は求まらない。(δ が求まると各相の平均速度 u 、 u_g は求まり流動状況はすべてわかることになる。) すなわち基礎方程式のみでは系は閉じない。そこで液膜と壁面との間、および気液界面のせん断力 τ_i の関係式(構成式)が必要となる。後者の値は u と u_g の差のみならず液膜の厚さにも関係する(液膜表面の波高は液膜厚さにも関係する)から、 τ_i の関係式は何らかの実験によって求めなければならないであろう。もし対象が環状噴霧流であると構成式はさらに多くまた複雑であり、液膜からの液滴の飛び出し量(エントレインメント)の関係式、発生液滴径の関係式、また液滴の液膜への再付着量(デポジション)の関係式などが必要となる。

このように二相流の流動現象の解析には、厳密に定式化された基礎微分方程式と実験式(代数式の形をしている)の構成式からなる異質の式の組み合わせをコンピュータにより解くことが必要になるわけである。そこで数値計算上のテクニックとして基礎式と構成式の整合性も問題となるであろう。

3.4 気液二相流のトポロジカル式のこと

さて、基礎方程式を閉じさせることに関連して、新しい概念の構成式である topological law または topological equation について簡単に紹介しておこう。この概念は最初に Boure' によって 1978 年に提案されたものであるが、今回のセミナーにおいて Delhage が "Foundation of time-varying two-phase flow formulation" で極めて明快な解説をしているので、その中のごく一部を引用して説明する。私も最初に topological と云う言葉を聞いて位相幾何学、例えばひもの結び方などを対象とするような数学を連想し、また私の英語のヒアリング能力からもその実質的な意味がわからなかったのであるが、上記の論文を読んでやや合点がいった次第である。また基礎式に強い中西重康氏の教示を求めた所、同氏もそのネーミングは少しおかしいのではないかとの事であったので、私が理解できなかったのも無理からないことと安心している次第でもある。

さて最も簡単な例として図1のような水平流路中の相変化のない層状流を考えてみる。流路断面の速度分布を平均化して平均速度 \overline{u}_1 、 \overline{u}_2 について、質量保存式、運動量式は周知のように流体

1, 2 に対して式 (1) ~ (4) で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_1 \rho_1) + \frac{\partial}{\partial x} (h_1 \rho_1 \bar{u}_1) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_2 \rho_2) + \frac{\partial}{\partial x} (h_2 \rho_2 \bar{u}_2) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_1 \rho_1 \bar{u}_1) + \frac{\partial}{\partial x} (h_1 \rho_1 \overline{u_1^2}) + \frac{\partial}{\partial x} (h_1 \bar{p}_1) = p_{1i} \frac{\partial h_1}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_2 \rho_2 \bar{u}_2) + \frac{\partial}{\partial x} (h_2 \rho_2 \overline{u_2^2}) + \frac{\partial}{\partial x} (h_2 \bar{p}_2) = p_{2i} \frac{\partial h_2}{\partial x} \quad (4)$$

また気液界面における運動量式は

$$p_{1i} = p_{2i} \cong p_i \quad (5)$$

である。ここで H , ρ_1 および ρ_2 を既知の値とすると、5 個の未知数 h_1 , u_1 , u_2 , p_1 および p_2 、および 3 個の補足の変数 $\overline{u_1^2}$, $\overline{u_2^2}$ および p_i に対して方程式の数は 4 個のみである。ここで $\overline{u_1^2}$ と $\overline{u_2^2}$ の比は速度分布のために 1 ではないが、近似的に 1 としても上の方程式系は閉じないので、これを解くためにももう一つの条件式 (supplementary equation) が必要である。もし流体 1 の密度 ρ_1 が流体 2 の ρ_2 より大きい場合 (図 1 の場合) には流れは安定であるが、逆に $\rho_2 > \rho_1$ の場合には流れは不安定なはずである。ところが式

(1) ~ (4) のみからはこの特性は出てこない。したがってこのことを表す式、すなわち二つの流体の位置関係についての情報を与える式が必要である。そこで物理的直観 (physical intuition) によって流路の上下方向の圧力分布は静水力学的に次式で表されるものと仮定する。

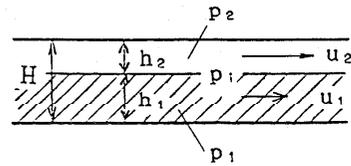


図 1

$$\bar{p}_1 = p_i + \frac{1}{2} \rho_1 g h_1 \quad (6) \quad \bar{p}_2 = p_i - \frac{1}{2} \rho_2 g h_2 \quad (7)$$

この式 (6), (7) から次式が成立する。

$$\bar{p}_2 = \bar{p}_1 - \frac{1}{2} g (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) \quad (8)$$

この式 (8) が topological law (topological equation) である。

この式 (8) の形は当然 y 方向の瞬時的局所的運動量式 (transversal local instantaneous momentum equations) から求まるものであるが、上記の基礎式 (1) ~ (4) の誘導では $\overline{u_1}$, $\overline{u_2}$, \bar{p}_1 , \bar{p}_2 のような平均化が行われているので、これに対応する y 方向の平均化された運動量式の (9), (10) からは \bar{p}_1 と \bar{p}_2 の関係は出てこないのである。

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_1 \rho_1 \overline{v_1}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_1 \rho_1 \overline{u_1 v_1}) + h_1 \rho_1 g = -p_i + p_{1w} \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (h_2 \rho_2 \overline{v_2}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_2 \rho_2 \overline{u_2 v_2}) + h_2 \rho_2 g = -p_i + p_{2w} \quad (10)$$

以上のことからわかるようにtopological equationは先験的な (a priori) 仮定により定められるものなのである。またDelhayeによると「topological equationは、(1) 方程式を閉じさせるために必要な方程式であり、また(2) 基礎方程式の平均化の過程で失われた情報を再導入する (re introduce) ための式である」と定義されている。私がトポロジイと云う言葉で最初に感じた疑問も、トポロジイを「図形の素朴な直観をあつかう数字」(ある数学書のまえがきの中の文)と解釈するとtopological と云う名前でも何となくわかるような気がする。

上記のDelhayeの解説でもわかるように簡単な層状流モデルにおいてさえも先験的な仮定のtopological lawが必要であるから、実際のもっと複雑な二相流の流動様式に対する解析には構成式、topological方程式の作成は非常に難しいことがわかる。なおDelhayeは、二相流の大部分の流動様式は非常にカオス的 (highly chaotic) であると言っている。従来、我々は二相流を確定的なものとして取り扱ってきており、私自身も他の数学、力学分野で脚光をあびているカオス的の見方が二相流の分野で出てくるものとは思っていなかったのであるが、今後はこのような研究も出てくるものと思われる。

4. 気液二相流の研究史で考えたこと

以上がドブロウニクのセミナーのフォーミュレーションとモデリングに関する発表を通して知った研究の状況であるが、これらのものを聞き、読んでいる間に私の考えの中で懸案になっていたことに答が出たような気がした。それは私の気液二相流の研究史の時代区分の中で、一つだけ未確定で残っていたのが現状の段階の分類である。それについて簡単に述べることにする。

1986年に「気液二相流の研究史と今後の展望」講演を「筑波混相流エネルギー懇談会(科技厅)」において松井氏(筑波大学)から依頼された。これに対して私は「二相流の研究史」は話せるが、「今後の展望」を述べる自信がないとして、「気液二相流研究史と関連技術の発展」について述べたことがある。この論説の中心をなすものは「二相流研究史と関連技術の相関表」であり、縦軸に年度をとり、横軸に「二相流研究発展段階の分類」、「気液二相流の代表的研究論文テーマ」、「各種原子炉の稼動開始年」をとったものである。この表により二相流の基礎的研究の発展の状態が明らかにされているとともに、この基礎研究と実用技術のボイラ、原子炉の発達のための時間的な関連も明らかにされている。それにより技術と基礎研究のつながりが論じられている。この詳細については「二相流研究No.32」(機械学会関西支部気液二相流懇話会, 1986)に全文が掲載されているので、興味のある方は参照されたい。

さて、この表の作成段階で「各年度の代表的研究論文テーマ」を記入していると、自づから発展段階の区別が浮かび上がって来た。それは偶然にも約10年きざみで4段階に分類することができた。その分類の一部は表2に示すようである。第I期は二相流研究が開始された時期であり、流動様式の分類、ボイド率の実験的表示 (correlation)、圧力損失のcorrelationなどの二相流の巨視的な値が求められていた。これはすべての工学分野での発展の初期段階で通るような諸性質の実験的データが集められる段階であった。次の第II期はこれらの性質を何らかの理論的基礎に基づい

表2 二相流の研究段階の分類

期	年度	研究発展の段階の分類	内容	基礎式
I	1948 ? 1959	二相流の巨視的・静的性質の研究 (実験値の純実験式的整理)	流動様式の種類、ボイド率 圧力損失など	純実験式的整理 分離流モデル、均質流モデル
II	1960 ? 1970	二相流の微視的・動的性質の研究 (実験値の理論による整理)	各流動様式の固有の性質 蒸発管系の流動、臨界流など	二流体モデル ドリフトフラックスモデル
III	1971 ? 1979	二相流の微細構造の詳細な研究 (測定方法の発達による)	気泡流の乱流構造、液膜、 液滴の特性、圧力波、 基礎方程式	基礎方程式の確立への始まり
IV	1980 ?	二相流の基礎式(場の方程式と 構成式)の定式化 (モデリングと フォーミュレーション)	二相流の研究対象の多様化 流動の微細構造 二相流基礎式の定式化	基礎方程式の定式化

て整理する段階であり、また同時に第I期の静的特性値のみの対象から動的特性値の研究が行われるようになった段階である。第III期はホットフィルム、LDV計測法などの発達により、二相流の微細構造の研究が盛んとなった時期である。この段階では二相流流動の基礎方程式の根本的な検討が開始された(例えば前述のIshiiの著書の出版が見られた)。ここまででは私にとって容易に発展段階の分類と定義が出来たのであり、またこのような分析を1977年頃に最初に行った時に、この分類により、自分なりに二相流研究の次の段階を予測することができていたのである。一般に分類して体系づけることの価値は時代的変遷を歴史の流れとしてとらえて、将来の予測と方向づけに役立たせることにあり、また特定の対象とする事項についてはその位置づけを可能にすることである。単なる機械的分類のみでは価値はないはずである。所で表2に帰って第IV期の分類であるが、前述の昨年(1986年)の表作成の場合には適切な名称をつけることができなかった。このことはまた「今後の動向」の明確な予測ができなかったことも意味している。そこで第IV期を仮に「二相流研究対象の多様化」の時期と名付けておいた。たしかにこの期間は蒸気発生機、原子炉などの二相流の従来の関連技術以外に二相流原動機(衝動タービン、ヘロー型タービン、ロータリー膨張機)の研究、ポンプ中の二相流の研究、圧力波の研究、二相流の微細機構の研究、基礎方程式の定式化の研究など研究対象が多方面に広がった時期ではあったが、研究発表段階の分類法としては「多様化」よりも他の適切なものがあつたはずである。それは今度のセミナーに参加して思い当たった「二相流の基礎方程式の定式化、構成式との統合化」の段階と云う分類である。あるいはこれを「モデリングとフォーミュレーションの確認の段階」と呼んでもよいかもかもしれない(このことは小沢守氏との討議での同氏の表現である)。このように私はこのセミナーにおいて得られた知識からかねてから気になっていた第IV期の分類を確定することができて、何か気持ちがあきらかになったような感じている。このような分類から現在の自分の研究の位置づけ、今後の研究の動向、研究を進展させるべき方向を見出す段階にきたわけである。ここでは私の見解は述べないが、読者諸氏にこの

分類を認めていただけるならば、これを今後の研究を進められる上での参考にしていただければ幸いです。

5. 二相流中の圧力波の研究についての雑感

5.1 二相流中の衝撃現象（圧力波）に関する我々の研究

このセミナーにおいて私は藤井照重助教授と連名で“Water hammer phenomena in one-component two-phase flows”の発表をした。その内容は二相流の管路系の下流端の弁を急閉した際に生ずる水撃現象（衝撃現象）すなわち圧力上昇値、圧力の過渡変化および圧力波の伝播特性に関するものであり、今回の発表はその線形解析により式で解を求めたものであった。これにより衝撃現象に及ぼす各種因子の影響を直接的に明らかにすることができた。この線形化手法のような古めかしい方法を今さら事新しく用いることに疑問を感じられる方もあると思うが、我々がこの方法を用いた理由は、現在までの7年間の気液二相流の衝撃現象の研究実績の上で、この段階ではこの方法が適当であると思ったからである。そこでまず研究の経過を簡単に説明しよう。

この問題を研究テーマとして取り上げた機縁は次のようであった。新型転換炉「ふげん」の開発に関連して、その冷却材喪失事故時の逆止弁急閉による圧力応答の研究が1975年当時に行われていた。その関係者の一人の方から複雑な管路系中の圧力応答実験値と理論解析値を示されて、私的にコメントを求められたことがある。私はその圧力波形中の何個かの圧力ピークの現象の物理的説明を求めたのに対して、その回答は、この「波形は基礎式を数値的に解いた結果であるので、その現象についての物理的解釈は考えていない」と言うことであった。私はこの回答にショックを感じて shock phenomena の研究を始めたとも云える。二相流の衝撃現象に関して、まず最も簡単な問題「直管中の二相流においてある液流速 u_{L0} とボイド率 α の下で弁急閉によって生じる最大圧力上昇値はいくらか？」の答がわかれば、上記の安全解析の大半の目的を達したことになり、特に圧力応答波形を求める必要もないはずである。ところでこの研究を始めた1976年当時にはこのように簡単な問題の答は知られてなかったし、それに対する検討もなされていなかったのである。そこで長さ18mのテスト管の実験装置を製作して空気-水系の気泡流に対する研究を開始した。（実際には飽和水-飽和蒸気系すなわち一成分二相流に関する実験が必要であるが、研究費が無かったのでやむをえず空気-水系で研究を開始した。しかし後になってみるとこの二成分二相流の簡単な実験から研究を始めたことは現象の理解の上からは有利であった。）この実験と並行して行った簡単な運動量理論による解析から、最大圧力上昇値 $\Delta P_{ps} = C_{TP} \rho_{TP} u_{TP}$ で表されることがわかり、また実験値とよく一致する結果をえた。ここで ρ_{TP} 、 u_{TP} はそれぞれ二相流の平均密度、平均速度であり、 C_{TP} は二相流中の有限振幅圧力波の伝播速度（衝撃波の速度）である。この式をさらに変形すると、 $\Delta P_{ps} = C_{TP} \rho_L u_{L0}$ となる。これらの式は水単相流の水撃圧力上昇値 $\Delta P = a_L \rho_L u_{L0}$ の Joukowski 式と相似である。ただし a_L が水中の音速（微小振幅の圧力波の伝播速度）であるのに対して、二相流の場合には有限振幅圧力波の伝播速度 C_{TP} である点が異なっているのみである。

上記の研究の第一段階について、第二段階として圧力応答波形全体像をえるために基礎方程式（質量保存式、運動量式、構成式）の数値解を求めた。これについても等速均質流モデル、および二流体モデルについての計算値の比較から、圧力応答波形を求めるためには均質流モデルの近似で十分の精度がえられることを明らかにした。また同時に図式解によっても圧力応答波形が十分の精度で求められること、および現象の物理的解釈を容易にすることが出来ることを明らかにした。以上の研究によって二成分二相流の衝撃現象の特性を運動エネルギーの圧力に変換される力学的問題として完全に明らかにすることができた。

現実のLOCAの問題では作動流体は一成分二相流であって、圧力変化に伴う蒸発、凝縮現象が生じるので、衝撃現象は上記の力学的原因のみならず熱および物質移動を伴う熱力的原因（熱力学的非平衡問題も伴う）に影響される。研究を開始してから4年目になって、たまたま学科内のローテーションによる研究費がえられる好機により一成分二相流（R-113）の実験装置をつくることが出来るようになって、研究の第3段階として1981年秋からやっと実験を開始することができた。これに対しては、二成分二相流についての実験結果の物理的解釈と数値計算の経験があったので、この一成分二相流の複雑な形の圧力応答波形データの解釈と分析が容易であり研究を早く進めることができた。また圧力波形の数値解においても質量輸送（凝縮）の時定数の適当な仮定のみで、実験値とよく一致する結果をえることができた。これによって研究の出発点での目標、すなわち一成分二相流の衝撃現象の予測法の確立を達成することができた。

ところで多くの数値計算によってパラメータサーベイを行い、各因子の影響を知ることは出来るはずであるが、より直接的に影響を表すためにはやはり解析解が望ましい。そこで研究の第4段階として今回の線形解析を行うことにしたわけである。これについての発想と実施は藤井助教授によりなされ、圧力応答特性に及ぼす力学的効果、熱的非平衡値、質量輸送、流路軸方向のボイド率分布などの個々の影響を明らかにすることが出来て、圧力応答特性の時間的、場所的な全体像を知ることができた。衝撃現象のような有限振幅圧力波の特性が線形解析（微小振幅圧力波を対象とするもの）で全体的に表示ができたが、勿論、その適用限界はある。しかしこの解析結果において a_{TP} （二相流中の音速）を C_T （有限圧力波伝播速度）に置きかえて無次元表示をしたものと実験結果との比較により、この解析結果は有用であることを確認している。

以上の研究経過とそのフィロソフィーについては、1987年春ハワイで開催された日米熱工学会議で東大、棚沢先生のお世話によるinvited paper "Development of research on water hammer phenomena in two-phase flow -- Progress in our research unit at Kobe University"（藤井照重と連名）に詳細に述べてあるので興味のある方は参考にされたい。以上のような研究の経過をふまえて私の感じていることは次のようである。最近のコンピュータによる計算技術の発達によって、技術的、工学的問題を処理するのに、ともすればその基礎式の数値解を求めることのみから出発し、計算結果が出れば、それをそのまま信用して、それで終わりとするような傾向がある。場合によっては計算結果が物理的現象として矛盾していることがあっても、それに気付いていないこともある、そのような検討の下でつくられた装置は危険性をはらんでいることになりかねない。

解析の手法としては極めて初歩的なもの（例えば上記の $\Delta P_{ps} = C_{TP} \rho g u_{q0}$ を求めるようなこと）から非常に高度な数学的処理をするもの、あるいは数値解法、数値解析結果の画像表示法など多くの方法があるが、目的に応じてそれらを使い分けることが必要であろう。技術、工学の問題では何が重要な問題であるかを判断すること、解析ではそれに対する価値ある結果を得ることが目的であって、手法自体が目的ではないはずである。

5. 2 二相流中の波動現象の体系化のこと (Bouré の分析の紹介)

前節のように我々は二相流中の圧力波研究の経験を持っていたのであるが、今回のセミナーにおいてまた圧力波に対する異なった見方を知り感銘を受けた。それはBouré による解説論文 "Properties and modeling of kinematic and pressure waves in two phase flows" によるのであり、これについての簡単な紹介と私の感じたことを述べる。

まずこの論文の最初の所に次のように書かれている。「一次元二相流モデルでは何個かの疑線形一階偏微分方程式（時間 t と座標 x を独立変数とする）と何個かの代数方程式から構成されている。 n 個の一階偏微分方程式と何個かの代数方程式の組合せでは $t-x$ 面上で n 個の特性方向がある。したがって一般に n 個の伝播現象 (propagation phenomena) がある。例えばいわゆる二流体モデル (6方程式モデル) では6個の一階偏微分方程式があるので6個の伝播現象があるはずである」。私は研究対象として圧力波のみに注目していたので、この文を読んで、圧力波は二相流中のボイド波、速度波、ドリフト波など多くの波動現象の中の一つとして同格で取り扱うことができると云う視点に初めて気付かされた。すなわちBouré は二相流の基礎式の型から伝播現象の種類と特性を論じようとしているのであり、一方我々は圧力波の実験値を基にしてその理論解析をしようとしており、両者の研究の進め方が対称的であるのである。

さてBouré の論文による二相流モデルの分類と波 (waves) あるいは伝播現象 (propagation phenomena, transport) の種類と特性の概要を表3に示す。ただしこの表は原論文にあるものではなく、誤解もあるかも知れないが、説明の便宜上から私が作成したものであることをおことわりしておく。二相流モデルは次の3種類に大別される：(I) 二相流体を非圧縮性（気体も非圧縮性）、両相間の質量輸送がないとするKinematic models、(II) 二相流体の圧縮性、両相間の質量輸送を考慮し、熱的平衡性のあるとするMechanical models、(III) 二相流体の圧縮性、両相間の質量輸送および熱的非平衡を考慮するThermomechanical models。さらにこれらの分類はより実情に近い条件によってレベル、0、1、2と分けられている。したがって表3の下ほど仮定の少ない一般化されたモデルとなっている。例えばKinematic modelsのレベル0は気液間のスリップのない最も低レベルの等速均質流モデルであり、レベル1はスリップを考慮した（スリップは何らかの形の実験式で与えられる）いわゆるドリフトフラックスモデルであり、さらにレベル2はボイド率に対しては後記の式(11)のようなtopological lawを用いるcomplete kinematic modelである。またMechanical modelsのレベル1、2はそれぞれ両相の圧力が等しいと仮定するものと、両相間に圧力差を考慮するモデルである。第3のThermomechanical modelsのレベル1、2はそれぞれ一つの相のみの熱的非平衡を考慮、両相の熱的非平衡を考慮したモデルである。これらの7種の小分類のモ

モデル大区分名称	レベル	モデル小区分の名称	条件	波の種類と特性
Kinematic models	0	Homogeneous models (Degenerate kinematic models)	圧縮性：なし mass transfer：なし スリップ：なし	速度波 } 伝播速度：無限大 圧力波 } (Degenerate waves) ボイド率：混合物の速度で伝播 dispersion, damping なし
	1	Drift flux models (Degenerate kinematic models)	圧縮性：なし mass transfer：なし スリップ：考慮	2種のdegenerate waves (速度、ドリフト、圧力信号 に関係する) ボイド率：ドリフト、圧力が関 係する dispersion, damping なし
	2	Complete kinematic models	圧縮性：なし mass transfer：なし ボイド率のtopological law を用いる	ボイド波 } dispersion、 ドリフト波 } damping あり、 また周波数に 依存する
Mechanical models	1	Generalized drift flux models (Equal pressure mechanical models)	圧縮性：あり mass transfer：平衡状態 両相の圧力は等しい	圧力波 } dispersionあり、 ボイド率 } damping は弱い、
	2	Complete mechanical models	圧縮性：あり mass transfer 両相の圧力を考慮 運動量のinteraction を考慮	圧力波 } dispersion、 ボイド率 } damping あり 両相の圧力差の緩和の波： dispersion, damping あり
Thermo-mechanical models	1	Thermo-mechanical models (level one)	Complete mechanical model と同一条件、および一方の相の熱的非平衡を考慮	Complete mechanical model の波、およびエントロピ波は存在するが不明確
	2	Thermo-mechanical models (level two)	Complete mechanical model と同一条件、および両相の熱的非平衡を考慮	Complete mechanical model の波、および各相のエントロピ波：各相の速度で伝播、dispersion, damping なし

表3 モデルの分類と波の種類と特性
(Bouré の論説にもとづいて著書が参考のために作成した表である
ので、波動の種類と特性などの項については不完全であり誤があ
るかも知れない)

デルに対して、それぞれ何個かの一階偏微分方程式とそれらを閉じさせるための構成式およびボイド率に対するtopological law が定められる。そこでこれらの方程式の数と型によって波(waves)の数とその性質の予測ができるのである。例えばKinematic modelsのレベル0では方程式系から3個の波があることがわかり、その中の2個は速度波と圧力波であって、これらは無限大の速度で伝播するdegenerate wavesであり、他の1個はボイド波であって、これは二相流の平均速度(等速均質流モデルであるから)で伝播する波(waves)であることが予測できるのである。以下の各モデルにおける波の種類と性質は表3に示されている(説明は省略する)。

上記のように方程式の個数から波の数が定まるはずであるが、原文にもその数と波の名称は明記されていない。ただ波の性質として伝播速度、減衰性(散逸性)およびdispersion(分散性)が述べられている。例えばThermo-mechanical modelsのレベル2の波は圧力波、ボイド波、両相の圧力

緩和の波、および両相のエントロピ波の存在とそのdamping、dispersionの特性が示されている。

さてここでBouré によるボイド率のtopological law (void fraction topological law) がどのようなものであるかを示しておこう。これは次式で表される。

$$\beta_1 \frac{\partial u}{\partial t} + \beta_2 \frac{\partial u}{\partial x} + \beta_3 \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \beta_4 \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \beta_5 \frac{\partial \delta}{\partial t} + \beta_6 \frac{\partial \delta}{\partial x} = f - \delta \quad (11)$$

ここでuは二相流の平均速度 $u = \alpha u_o + (1 - \alpha) u_g$ 、 α はボイド率、 δ はドリフトフラックス、fは完全に発達した流れにおける δ の値である。 $\beta_1 \sim \beta_6$ はu、 α 、および δ の関数である。このtopological law がどのような物理的意味を持っているかは私も全く理解していない（これに関する1987年の原論文を入手していない）が、式の形から見られるようにかなり数学的直観によりつくられたものようである。このtopological law については本文を書くについて二相流の基礎方程式に関する第一人者の中西重康氏に教示をねがったが、同氏もまだ調査が十分に出来ないとの事であったので、現段階で私の知らないことも止むをえないと思っている。ただここでは二相流の基礎方程式に関してこのような発展段階にあることを知っていただければよいと思う。

なおBouré 氏はかつて1971年にBergles、Tongらとともに二相流の流動の不安定現象の分類を行い、多様な不安定現象の全体の体系を明確にしている。その分類は以後の流動安定性の研究指標となった。私もかつて不安定流動の研究を行っていたので、その分類によって優れた研究者としてのBouré 氏を知っていたのであるが、今回は流動安定問題とは異なった二相流中のwave phenomena (伝播現象) の分野についての美しい体系化に接して、その数学的基盤のしっかいらしていることと洗練されたセンスに感心させられた。私自身では5.1の二相流中の衝撃現象の研究において、一成分二相流（相変化のない場合—純粋に力学的問題）、と二成分二相流（相変化を伴う場合—力学的原因と熱力学的原因）とに大別して、衝撃現象の全体像を見ており、本質的には同様な分類をしていたことになるのでこのBouré による方程式の型にもとづくpropagation phenomena の全体（その中に圧力波が含まれている）の洗練された体系化に特にひかれたのである。

5.3 二相流中の圧力波に関するソ連の研究

今回のセミナーのセッション"Wave phenomena"の15編中7編がソ連研究者のものであるので（実際の提出論文では10編中の4編）、ソ連のこの分野の研究の層の厚さがわかる。その研究の内容は二相流中の圧力波の基礎理論に重点がおかれたものであって、我々の実用面から出発した圧力波の研究とは研究上の立場がかなり異なっている。それがどのように理論的なものであるかを簡単に紹介しておく。

今回のセミナーのInvited lecture でNakoryakovとPokusaevによる"The wave dynamics of a vapor-liquid medium. Experimental investigations" に基づいて説明する。これによるとまず、相変化のある液中の波の伝播は式(12)に基づいて検討できると云うのがこの論文の出発点である。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - a_o \frac{\partial p}{\partial x^2} - \frac{2\kappa}{\kappa+1} a_o^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\Delta p}{p_o} \right)^2 - 2\beta \frac{\partial^4 p}{\partial t^2 \partial x^2} = 2\gamma \frac{\partial q_L}{\partial t} \quad (12)$$

ここで a_o^2 は凍結音速であり、 $a_o^2 \equiv \kappa p_o / (\rho_{TP} \alpha_o)$ 、 $2\beta \equiv R_o^2 / 3\alpha_o$ 、 $\gamma \equiv 3\kappa p / 2R$

$\rho_a L$ である。 κ : 断熱指数、 ρ_{TP} : 二相流の平均密度、 α_0 : 初期ボイド率、 R : 気泡径、 L : 蒸発潜熱。また q_L は気泡と周囲の液との間の熱流束であって、気泡の共振周波数 ω よりはるかに小さい周波数範囲 $\omega \ll \omega_0$ では液の非定常熱伝導の式 (13) で表される。

$$q_L = \frac{\lambda_l}{\sqrt{\tau_1 a_2}} \int_0^t \frac{\partial \tau_s}{\partial t} \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \quad (13)$$

ここで λ_l 、 a_2 は液の熱伝導率、温度伝播率であり、 T_s は飽和温度である。式 (12) は二方向への波動伝播を表すものであって、一方向への伝播の場合には上式から最終的に次の圧力波の無次元伝播式で表される。

$$\frac{\partial p^*}{\partial \tau} + \frac{\partial p^*}{\partial \xi} + M p^* \frac{\partial p^*}{\partial \xi} - \frac{M}{R_l} \frac{\partial^2 p^*}{\partial \xi^2} + \frac{M}{\sigma^2} \frac{\partial^3 p^*}{\partial \xi^3} = -WM^{1/2} \int_0^\tau \frac{\partial p^*}{\partial \tau} \frac{d\tau}{\sqrt{\tau-\tau}}, \quad (14)$$

ここで p^* 、 τ 、 ξ はそれぞれ圧力、時間、距離の無次元数であり、特性数 σ 、 W 、 R_l 、 M はそれぞれ次式の値である。

$$\sigma = \Omega_0 \left[\frac{(\kappa+1) \Delta p}{2 \kappa p_0 R_0^2 / 6 \alpha_0} \right]^{1/2}, \quad W = m \left[\frac{\kappa p_0 a_0 \Omega_0}{2 \pi R_0^2 C_0^2 \Delta p (\kappa+1)} \right]^{1/2}$$

$$R_l = (\kappa+1) C_0 \Delta p_0 \Omega_0 / (2 \kappa p_0 \eta), \quad M = u_0 / C_0 = \frac{\kappa+1}{2 \kappa} \frac{\Delta p_0}{p_0}$$

また $W^* = W \sigma^{-1/2}$, $m = 3 \kappa p_0 \rho_l C_{p_l} (dp/\alpha \rho_a)_s / \rho_a \cdot L$

であり、 p_0 : 初圧、 Δp_0 : 初期の圧力上昇値、 η : 粘度、 Ω_0 : 圧力波の幅、 u_0 : 圧力波の伝播速度である。この式 (14) で見られるように、この研究は非線形波動を対象とするものであることがわかる。また、この式のいずれかの項を省略すると、非線形波動に関する基本的な式の Burgers 方程式 (式 (15) の型)、Kortweg-de Vries 方程式 (KdV 方程式) (式 (16) の型) となる。

$$\frac{\partial p^*}{\partial \tau} + \kappa_1 p^* \frac{\partial p^*}{\partial \xi} - \kappa_2 \frac{\partial^2 p^*}{\partial \xi^2} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial p^*}{\partial \tau} + \kappa_3 p^* \frac{\partial p^*}{\partial \xi} - \kappa_4 \frac{\partial^3 p^*}{\partial \xi^3} = 0 \quad (16)$$

これらの式の解ではソリトン (孤立波) が出て来る。ここでこのような非線形波動の式をわざわざ示したのは次の理由による。私自身が二相流中の水撃圧力上昇の研究をしているにもかかわらず、まさかこの現象が物理学上で近年よく取り上げられているソリトンと関係があるとは私は気が付かなかったのである。すなわち水撃圧力上昇は階段状の圧力上昇であるのに対して、ソリトンは1個の波すなわち孤立波であるから、両者は異なるものは私が思いこんでいた。しかし非線形波動についてわずかでも勉強していたなら、水撃圧力上昇の圧力波は非線形波動の一典型的なものであって、上記の式 (15)、(16) などとの関係も初歩的段階でわかってはずである。そんなことも気が付かなかったのかと云われるかも知れないが、はずかしながらこれが事実である。またついでに云うと予め読んでおくべき名著「非線形波動」(岩波書店)の著者谷内俊弥君(名大教授)は私の中学

時代からの親しい友人である。

さて元の式(14)にかえてみると、波型の特性は σ 、 W 、 R_0 、 M によって定まることがわかる。すなわち σ は波の形を変化させる非線形効果を与えるもの、 W は熱移動と非線形効果を、 R_0 はレイノルズ数であり相変化のない場合の散逸性を与えるものであり、 M はマッハ数である。本論文においては波形の分類を W^* と σ の両座標面上でなされており、 $W^* > 1$ の領域(Thermal regime)では両相間の伝熱(質量輸送)が支配的であり、慣性および非線形効果が小さい。 $W^* > 0.1$ の領域(Inertial regime)では伝熱の影響は小さく、波の特性は σ の値に支配され、 $\sigma < 6$ ではwave packetsとなり、 $\sigma \gg 6$ では孤立波(Solitary wave)となる、この中で $M > 0.3$ (ΔP が大きい)では脈動波型となり、 $M < 0.3$ では滑らかな波型となる。以上のような圧力波形の特性が理論的に予測されていて、これに基づいてこれらの特性値の各範囲で実験計画がたてられており、それらによって圧力波型の各特性が実験的に示されている。すなわち実験は最大長2mのShock tube(液は流動してなくて、管の下方から気泡を吹きこんで二相混合状態をつくるもの)で行われていて、流体、圧力、初期ボイド率、 ΔP などを変えた場合の圧力応答波形が求められている。なお上記のような二相流中の圧力波に対する式(12)に基づく一連の研究はこのグループによって1970年代後半から行われているのであって、今回のセミナーで新しく発表されたものではない。

さて以上の研究の簡単な紹介から、話を私の感想にもどすことにする。今回のセミナーの出発直前にこの論文の著書のPokusaev氏から従来の発表論文とともに討論したいとの手紙を受け取っていた。会場でお会いしてcoffee break時からロビーでdiscussionを始めたのであるが、同氏およびそのグループの若い人達との話に熱が入り(と云っても一方的に同氏の研究の説明を聞かされると云う状態であったのであるが)、とうとう次のセッションにも出席できぬままに昼になってしまった状況であった。研究内容の討議は別として、話し合いの最後で私が疑問に思っていたことをたずねてみた。「この研究の目的は原子炉の安全性の解析のためか、あるいはその他の目的の下になされているのか?」。これに対してPokusaev氏は全くためらいもなく「全くapplicationは考えていない、純粹に科学的な興味のためである」と答えられた。これは私には予想外のことであり、続く言葉も出なかったのであるが、これによってこの研究がいわゆる理学的な立場でなされているもので、我々の工学的立場のものやや異なっていることがわかり、やや安心もした次第である。しかしこのように理論的に一般化された結果の応用範囲は広く、作動媒体が水、フロンに限らずナトリウム、水素であっても、その圧力波の特性が予測できると云う優れた点があることを認めざるをえないのである。

また二相流中の圧力波に関して、Pokusaev、Nkoryakov氏の所属のNovosibirskのソ連科学アカデミ(シベリアBranch)の熱物理学研究所、Nigmatulin氏所属のTyumenのソ連科学アカデミ(シベリアBranch)のNorth Development Problems研究所、モスクー大学の力学研究所、およびUfaのソ連科学アカデミ(Baslikiriam Branch)の物理数学教室で同種の研究が行われていることをかねてから文献で知っていた。そこでNovosibirsk所属のBorisov氏に何故に同様な研究がなされている

かとたずねた所、「私は前にモスクー大学の力学研究所で教授の指導を受けていたのでその研究を Novarivirsk の研究所でも続けている」との答であった。このこのからソ連のような国でも研究テーマには人間的なつながりもあることを知った。また特に感じたことは二相流中の圧力波に関する研究に対しても上記のように多数の研究所で並列に行われていること、しかも直接の応用を考えないような科学研究（実際には広汎な応用ができると私には思えるが）が自由に多数の研究所で行われていることに、ソ連の技術、科学の学問的な底の深さと厚さを痛感した次第である。

6. むすび

私の研究テーマに関係している問題であって、ドプロウニクの国際会議で発表された論文に関連した諸問題について私の感じたことを書いた。また、一面では気液二相流の最近の研究の動向にもふれているので、谷口先生のご要望の一部にはお答えしたつもりである。なお本文では平常書きなれている論文のように主観を排除して客観的に表現するものところが、読物としてもっばら私の頭の中の考えを表に出すようにしたつもりである。したがって、読者諸氏がこれをどのように思われるかは自由であって、人によっては”あの人の考えはあの程度のことではないのか”と思われるかも知れない。それがまた若い人の自信にもつながって、より適格にまた合目的に研究テーマの選定と研究の進め方を考えられる一助ともなれば幸いであると思っている。

なおドプロウニクの国際会議では日本側参加者の優れた発表と一部それに関連するインフォーマルの特別討論会が夜の9時過ぎからも開催されたりした。これらのことは枚数の関係で全くふれてはいない。

また、今回の会議で公私とも（もっばら私的の面の方が多かったが）大変お世話になった参加者の松井剛一（筑波大）、長崎孝夫（東工大）、芹沢昭示、片岡勲（京大）、藤井照重（神戸大）、中西重康（姫工大）、深野徹（九大）の諸氏に深く感謝の意を表する。

<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9月22日（火） 13:00～17:00

場所：旭川工業高等専門学校・構内福利施設2階研修室

講演：1) 人工永久凍土の造成

* 沢田 正剛 (北見工大)

2) 返しベンドの凍結熱伝達

* 田子 真、 福迫 尚一郎 (北大工)

3) 低温熱源利用による融雪技術の基礎研究

* 山本 春樹 (旭川高専)、福迫 尚一郎 (北大工)

野村 正治、松尾 泰博 (旭川市水道局)

素谷 順二 (古河電工)

4) 米国ケンタッキー大学に滞在して

* 戸倉 郁夫 (室工大)

<講演概要>

講演1) ヒートパイプを用いて冬の寒さを地中に蓄えて人工的地中凍土を造成し、これを維持することができれば、種々の工学的応用の可能性がある。このような目的のために数シーズンにわたって野外実験を行なって来たが、今回の発表は主として今まで得られたヒートパイプ表面温度などのデータをもとに、ヒートパイプを群設した場合の地中凍土の消長に関する電子計算機によるシミュレーションの結果について述べた。

講演2) アスペクト比の比較的大きな矩形断面を持つ返しベンド内外両曲面上の凍結熱伝達挙動について実験的検討を行なった。返しベンド外曲面上の凍結挙動については、低流速域においてゲルトラー型縦渦列の影響が顕著に現われ、氷層面はスパン方向に凹凸になり、また流れ方向の氷層断面についてもなめらか凹凸状となることが観察された。一方、内曲面上においては、ダクト高さが小さい場合には流れ方向の熱伝達率の急激な増加により、氷層厚さが急激に減少するステップと呼ばれる氷層が形成され、このステップ発生位置が流速の増加と共に上流に向かって移動する現象が観察された。

講演3) 冬期間の汚水は北海道のような積雪寒冷地においても10℃以上の温度を保有している。当地における平均的な気象条件下では1平方mあたりの融雪に対し250 W程度の熱量が必要である。地表面下3 mに埋設されている直径1 mの幹線污水管に挿入したヒートパイプ(外径25.4mm、材質SUS304、封入作動液R12蒸発部1 m、凝縮部1.3m、全長5.5m)により1本当たり60W程度の熱を汲み上げることができ、分岐管式ヒートパイプの使用や高熱伝導率舗装材の開発などにより、たとえば融雪機への実用化等を期待できる。

講演4) 文部省の在外研究員として昭和61年9月から約10ヶ月間ケンタッキー大学(米国)に留学した体験を、スライドを用いて説明した。その中で、機械工学科・燃焼研究室(K.Saito 助教授)で行なわれている『原油の燃焼』の研究概要を紹介し、非定常細線加熱法を用いた原油の熱伝導率測定実験について報告を行なった。

(北海道地方連絡幹事 福迫尚一郎)

(2) 東海研究グループ講演・見学会

日時： 昭和62年11月7日(土) 13:30~18:30

場所： 三重大学工学部中会議室(事務棟2階)

講演： 1). 太陽熱顕熱蓄熱システムの最適化

相良 和伸 (三重大学工学部建築学科)

2). 希薄気体における熱伝達

藤本 哲夫 (名古屋大学工学部電子機械学科)

見学： 三重大学工学部機械工学科及び建築学科

〈講演概要〉

講演1): 文部省科学研究費「エネルギー特別研究」の一環として、先生がこれまで行った太陽熱蓄熱研究のうち、水蓄熱、固体蓄熱および地中蓄熱のいずれも太陽熱を顕熱の形で蓄熱するシステムの最適化に関し解説された。水蓄熱では、バランス型温度成層式を組み込んだ蓄熱システムが従来の非バランス式に比べ蓄熱効率が高いことが実験とシミュレーションにより示され、一方、川砂利、レンガ、コンクリートを用いる実用化を目的とした固体蓄熱に関しては、蓄熱材に応じた最適蓄熱槽容積が存在することが明らかにされ、槽内圧力損失をも考慮した最適化が必要であることが示された。最後の地中蓄熱では、有限要素ガラーキン法により太陽熱の過渡的蓄熱現象をシミュレートする手法が提案され、これをヒートポンプの最適運転の評価に応用しうることが述べられた。

講演2): 1940年代に出版されたTsienらのSuperaerodynamicsの著書を契機に、先生が希薄気体の流れと熱伝達に関する研究活動に入れ、以後今日まで行われた数多くの研究業績例が、含蓄ある経験談を交えて解説された。非線型の微積分方程式であるBoltzmann方程式から求められる気体分子速度分布関数の各種モーメントから温度、圧力、密度などの巨視的諸量が誘導され、さらにBoltzmann方程式を濃厚気体に適用すれば、Chapman-Enskog近似で代表されるように、通常、我々が繁用する連続の式、モーメントの式、エネルギー保存式などが導き出されることが、実に分かり易く明確に述べられた。さらに、最近の先生の研究のなかで、自由分子流れと連続粘性流れが併起する中間流域での希薄気体ジェット流の数値実験の結果が紹介された。最後に、今後のこの分野の研究として、1). クリーンな高真空の達成、2). 特定ガスの温度、圧力などの精密コントロール、3). 大排気量ポンプの開発、4). 油拡散ポンプの見直し、

5). ミクロ伝熱に関連するガス・固体面間の干渉、6). 核融合炉の重水素流れなどの内部流の解析、および 7). 流れを利用する混合気体の精密分離が特に重要であると結ばれた。

講演会終了後、加藤征三・相良和伸両先生の御案内で、機械工学および建築学の両学科の伝熱関連研究・実験施設を見学した。引き続き両講演講師の参加を得て懇親会を行い、今後の研究会のあり方、特に地方活動の活性化などについて意見交換するとともに、次回グループ研究会は来春、豊田工業大学で開催予定であることを決めて散会した。当日参加者は33名であった。

(東海地方連絡幹事：新井紀男)

(3) 北陸・信越研究グループ講演会

日時：昭和62年10月17日(土) 13:30~17:20

場所：新潟大学工学部 大会議室

講演：1)回転同心2重円筒間の乱流熱伝達(時間平均速度・温度分布と速度乱れ相関の測定)

小林 陸夫(新潟大工)、前川 博(新潟大工)、※山田 幸英(新潟大院)

2)非接触法による流体の速度測定に関する研究

日向 滋(信州大織)、久我 修(信州大織)、桜井 正幸(信州大織)、

※黒柳 征治(信州大院)

3)垂直におかれた水柱の融解挙動

※服部 賢(長岡技科大工)、青木 和夫(長岡技科大工)、岡田 昌章(長岡技科大工)、桐生 吉栄(長岡技科大院)

4)溶液凝固における不安定と不均一

※林 勇二郎(金沢大工)

講演1) 内筒が回転する同心2重円筒間の流体の流れと熱伝達については多くの研究があるが、ここではより高い回転数の範囲における熱伝達を伴う乱流テイラー渦につき、速度場と温度場を実験により詳細に測定したものである。

回転する内筒を加熱し、静止している外筒を冷却する実験から、つぎのことが明らかになった。(1)乱流テイラー渦は広い回転数範囲で定常的に存在し、その形状は正方形に近い。渦の速度分布は層流テイラー渦と異なり、軸方向に鋸歯状、半径方向に放物線状分布となる。(2)運動量とエンタルピの輸送との間に相似則が良く成立し、これらの輸送は乱流拡散よりも乱流テイラー渦による対流輸送によるところが大きい。(3)1点2重速度相関の分布は、対応する輸送方程式中の生産項と2次流による対流項により支配的に影響される。

講演2) 流体中の微小気泡の速度を測定するにはいくつかの方法があり、大きくわけて接触法と非接触法がある。本報告は、探測面に格子を置く空間フィルタ法による光学的な非接触測定による研究である。受光のセンサとしてフォトダイオードを使用し、気泡が格子上を通過した波形を高速フーリエ変換してピーク値の周波数を読みとり、それから気泡速度を算出する。

静止流水中と流動水中における気泡速度測定の実験結果は、これまでの実験式の値と良く一致し、この方法は脈動流の速度測定として適用できよう。ただし、気泡径が比較的大きい場合や液流速が速い場合には測定が困難となる問題点がある。

講演3) 水は、固相の比体積が液相のそれに比して大きいこと、4°Cに最大密度点を有しその

上下では密度が下がること、の2点が他の物質と大きく異なっており、それにより融解の際に局所熱伝達率、等温場、および融解速度に特異な挙動を表わす。この特性を氷柱を使って実験を行い、モデルによる解析結果と比較した。

その結果、密度反転を伴う垂直加熱面からの融解では、加熱面の温度によって加熱融解に伴う渦の発生とその成長、および局所熱伝達率が変化し、加熱面温度が8°Cのとき熱伝達率が最低となり、渦の発生が融解速度を減少させ界面の形状に影響を与える。液相内温度分布と界面形状の経時変化は、モデルによる解析と良い一致を示し、解析の有用性を与えている。

講演4) 溶液が凝固あるいは融解する際の現象についての最新の全般的な研究の解説である。

内容は、溶液が凝固または融解する際に生じる不安定と不均一の現象が液相内の微小流動の変化、熱的過冷、組成的過冷、熱的不安定によって起きることを指摘し、界面近傍での物質拡散と相まった複雑な現象の機構を解析から明確化している。例えば、凝固の際生じる樹枝状晶出がどのような条件の範囲で起きるかを実験し、解析の結果と比較してその有用性を実証している。本結果は、自由水とコロイド水を有する食品の冷凍や生体の低温保存、融解熱を利用する蓄熱、金属の鋳造など、凝固と融解を応用している産業に直接適用できる。

(北陸・信越地方連絡幹事 玉木 恕平)

(4) 関西研究グループ講演討論会

日時 : 昭和62年9月8日(火)

場所 : 大阪大学工学部図書館吹田分館 視聴覚ホール

講演 : (1) 密度不均質を伴う 2,3 の流れ場(旋回流, 二次元せん断流, 非定常噴流)

における流動と混合の直接数値シミュレーション

*伊藤隆行, *加茂田昌史, 高城敏美 (阪大工)

(2) ルーバーフィンの数値流体解析

*平松道雄 (日電装)

(3) 多層膜構造集積型アモルファスシリコン太陽電池のレーザーパターニング

*木山精一 (三洋電機中研)

(4) 拡散装置のふく射温度計算

*平沢茂樹 (日立機械研)

(5) FBR(高速増殖炉)の熱流動に関する研究

*入谷陽一郎, 谷本浩一, 鶴飼修, 藤本哲郎 (三菱重工)

〔講演概要〕

講演1) 2次元せん断流において形成される渦やその合体等を含む流動および混合の過程を数値計算によって予測した。また、反応によって密度や物性値の変化による影響も調べ、渦の形成が粘性係数および拡散係数の増加ならびに膨張の影響によって抑制されることが示された。同様な計算を非定常噴流において行い、渦の形成、合体、混合の過程ならびに噴流先端到達距離等について実験で得られる結果をよく予測できることが示された。また、容器内旋回流れ中の密度の不均質ガス塊の運動や混合の挙動が数値シミュレーションされ、不均質密度と遠心力の影響で生じる2次流れが重要な役割をもつことがしめされた。

講演2) 自動車用ラジエータ等に用いられるルーバーフィン内の流れの可視化を行った。フィンの寸法、形状に応じて2種の流動形態すなわちフィンに沿う流れと沿わない流れがあること、前者の場合に伝熱特性がよいこと、等が明らかになった。また、数値解析により、それらの流れ様式の予測ができることが示された。これらの結果を用いてラジエータのコンパクト化がなされた。

講演3) サブミクロン膜厚の多層膜構造からなる集積型アモルファスシリコン太陽電池の各層をマスクを使用せずに高出力レーザーによりパターニングする場合の熱的解析を行った。レーザー照射時に多層膜内で吸収された光エネルギーが熱エネルギーにかわるとして3次元熱伝導方程式を解くことにより熱的挙動を求めた。所定の薄膜の溶融と除去に必要なレーザーパワー

の予測値と実験値がよく一致することが示された。

講演4) 半導体製造プロセスおよびその技術動向について説明があった。続いて拡散プロセスにおける熱的問題を数値シミュレーションによって検討した。均一にウエハ熱処理を行う目的で装置内の温度均一化とヒータ構造との関係を検討した。また、高温中にウエハ列を挿入する時の熱応力を低減する目的でウエハ面内の非定常温度分布とウエハ列の挿入温度、配列ピッチとの関係を検討した。これらの結果について解説があった。さらに、CVDによる薄膜形成における装置内のガスの対流、単結晶引上げにおける単結晶内の温度分布、クリーンルーム内の流れとじんあい挙動などの数値解析の解説があった。

講演5) FBR(高速増殖炉)の熱流動問題に関して、スクラム時にプレナム内に発生が予想される安定な温度成層流について、実験および数値解析の両方からのアプローチが説明された。特徴は、(1)冷却剤が液体ナトリウムという低プラントル数流体であること、(2)安定成層流という強い浮力の影響をうけた流動であること、(3)成層界面の上昇を伴う非定常現象であること、である。プレナム内の熱流動現象を模擬した水模型実験結果、およびナトリウム模型実験結果がそれぞれ示されるとともに、浮力項を考慮した $k-\epsilon$ 型乱流モデルによるシミュレーション結果が比較して示された。この場合、低ペクレ数領域の安定成層流の乱流プラントル数が必要であり、その測定例が示された。

(関西地方連絡幹事 高城敏美)

<編集後記>

Vol. 27, No. 104 「産官学共同研究特集号」の編集経過

第26期編集委員長 谷口 博

昨年夏頃より、No. 104を「産官学共同研究特集号」とすることが本決りとなり、分担していただくこととなった矢部彰委員および新井紀男委員により企画が進められた。No. 103の編集後記でも紹介したとおり、広い分野からの原稿を期待していたのである。その後、12月5日の第3回編集委員会にて最終の詰めを行ない、今回の取りまとめができた。執筆者各位のご協力により、この特集号がまとめられたのであるが、半年にも及ぶ上記両委員のご努力に敬意を表させていただきたい。

産官学共同研究をテーマに特集号をとりまとめたが、海外の研究者からの原稿も幸い間に合い、とくに産業界よりの絶大なご協力を得ることができた。この面を将来に生かして、伝熱研究の発展の一助ともなればと考えている。特集号記事に限らず、今後とも産業界、官界よりの「伝熱研究」への投稿をお願いする次第である。

ご承知のとおり、「伝熱研究」は1月、4月、7月、10月の年4回発行となっておりますが、原稿は随時お届けくださって結構です。原稿のワープロ化をお願いしておりますので、次頁を参照のうえ執筆していただければ幸いです。

「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い

「伝熱研究」編集委員会（伝熱研究会）

1. はじめに

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

2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式

2. 1 標準出力フォーマット

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

★縦長、横書き。（プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。）

★全角文字を標準とする。（英語、数字は半角が望ましい。）

★一行に印字する文字数：42文字程度（40～44文字の間なら構いません。）

横 幅：160mm 程度（150mm～170mmの間なら構いません。）

（この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。）

★一頁の行数：34行程度（33～35行の間なら構いません。）

縦の長さ：255mm 程度（245mm～265mmの間なら構いません。）

（この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。）

★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。

（以上よろしくお願ひいたします。）

1 (一行目は表紙の頁のみ空白とする。二頁目以降は文章を書く。) 40・42・44
 10 20 30
 「伝熱研究」の原稿のワープロ化のお願い
 (表題は三行目の中央に文章と同じ大きさの文字で書く。)
 5 「伝熱研究」編集委員会・(伝熱研究会)
 (表紙の頁は一行空白) (氏名、所属〔略称〕を右に詰めて書く。)
 1. はじめに (本文スタート↓)
 ・日本伝熱研究会の会誌「伝熱研究」の原稿をワープロで打って提出して下さる方が、近年
 増加しており、現在では、かなりの割合に達しております。もし、ワープロ原稿をそのまま会
 誌にのせることができれば、.....
 ↑
 ↑
 |
 ←----- 16.0mm -----→
 15 |
 2.55mm | ←-----
 ↓ 10mm
 ・なお、..... ↓
、事務局で対応できますので、お気軽にお申し付け下さい。
 20 (一行空白)
 2. 「伝熱研究」用原稿の標準書式
 2.1 標準出力フォーマット
 ★この用紙の書式を参考にして、A4の用紙に打出す。(切り貼りは自由。印刷時にB5に
 縮小します。なお、縮小された大きさでB5に打出しても構いません。)
 25★縦長、横書き。(プリンターは、24×24ドット以上の文字構成とする。)
 ★全角文字を標準とする。(英語、数字は半角が望ましい。)
 ★一行に印字する文字数：42文字程度(40～44文字の間なら構いません。)
 横 幅：160mm程度(150mm～170mmの間なら構いません。)
 (この場合、文字間隔は1/8文字程度に対応します。)
 30★一頁の行数：34行程度(33～35行の間なら構いません。)
 縦の長さ：255mm程度(245mm～265mmの間なら構いません。)
 (この場合、行間隔は1文字分程度に対応します。)
 ★図面・表は、シンポジウム講演論文集と同様に貼り込む。
 (以上よろしくお願いたします。)
 35

<お知らせ>

(1) 第25回日本伝熱シンポジウムについて

【共催：日本学術会議熱工学研究連絡委員会、本会ほか9学協会】

- 開催日 昭和63年6月1日(水)～6月3日(金)
- 講演会場 石川厚生年金会館
〒920 金沢市石引4-17-1 (0762) 22-0011
- 懇親会会場 6月2日(木) 18:00～20:00
金沢スカイホテル
〒920 金沢市武蔵町15-1 (0762) 33-2233
- シンポジウム
参加費 1名につき事前申込5,000円, 当日申込6,000円,
但し学生・院生は事前申込2,500円, 当日申込3,000円
(いずれも講演論文集代を含まず)
- 講演論文集代 1冊5,000円, 但し郵送の場合は5,550円(送料含む)
なお, 日本伝熱研究会員には1冊無料進呈いたします。
- 懇親会費 1名につき事前申込6,000円, 当日申込7,000円
但し, 同伴夫人は無料です
- 申込要領 本号に同封の郵便振替払込用紙を1人1枚あて使用し, 裏面の通信欄に必要事項 [(1)氏名, (2)勤務先または学校名, (3)参加費, (4)懇親会参加費, (5)講演論文集冊数] をご記入の上, 当該費用を送金下さい。参加証は当日受付にてお渡しいたします。
なお, 事務の簡素化と経費節減のため原則として領収書の発行を略させて戴きますので, 郵便局で受取られる郵便振替払込金受領書を保存下さいますようお願い致します。
- 事前申込締切 昭和63年5月10日(火) 消印有効
- 申込先
- 郵便振替口座： 金沢3-30768
第25回日本伝熱シンポジウム準備委員会
- 〒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
(0762) 61-2101 FAX(0762) 64-1047
- 当日受付 第1日目8時30分よりシンポジウム会場にて行います。

※ 特別セッションについて

本シンポジウムでは、従来の普通セッションの他に①数値計算と境界条件、②半導体製造における伝熱、③直接接触熱交換、④レシプロエンジンにおける伝熱、⑤宇宙環境利用の伝熱、の5テーマについて、オーガナイズ方式の特別セッションを企画しております。これらのセッションにおいては、展望講演が予定されるなど、発表の内容・形式のすべてがオーガナイザーに一任されています。研究発表申込の詳細については本会誌10月号の会告欄をご覧ください。

なお、講演を1名1題とする条件は普通セッションについての制約であり、特別セッションは別枠といたしますのでご注意ください。

※ 講演発表方式について

学会発表の趨勢を受けて、講演発表をOHPとスライドの両方式を採用致します。OHPの利用をなるべくお勧めしますが、スライドを利用する場合でもスライドのホルダへの装填および送り操作を各講演者をお願い致します。なお、本シンポジウムでは座長と副座長により講演の進行が取り仕切られますので、何なりとご相談下さい。

懇親テニス大会のご案内

日時	昭和63年5月31日(火) PM1:00より(雨天中止)
会場	石川県兼六園テニスコート(全面クレーコート) 金沢市丸の内2-1(石川県庁裏) 31-6845
宿泊・懇親会場	ラポート・兼六 31-2109 〒920 金沢市兼六2-5
参加費	9,000円(宿泊・懇親会費含む:当日徴収します)
集合場所	ラポート・兼六(午後12:30まで)
試合方法	ダブルス8ゲーム先取のトーナメント(参加人数により変更あり)
申込締切	昭和63年4月9日(土)
申込方法	葉書に『テニス大会参加申込』と表記し、 1. 申込者の氏名、年齢、および所属(連絡先) 2. ペア希望者(無い場合は世話係で決めさせていただきます) を記載し下記宛にお申し込み下さい。 詳細は後日連絡致します。

〒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
懇親テニス係(担当 多田)
(0762)61-2101 内線282

第22回夏期伝熱セミナー開催予告

第22回伝熱セミナーは「仏の里」として知られる国東半島で以下の要領で開催される予定です。多数の方の参加を期待します。

準備委員長 : 伊藤猛宏 (九州大学工学部)
 会期 : 昭和63年7月20日(水)～22日(金)
 会場 : いこいの村 国東
 大分県東国東郡国東町黒津崎
 Tel. 0978-72-4111
 [大分空港から車で10分]
 会費(予定): 会員 24,000円, 学生 20,000円, 非会員 28,000円
 日程

日時	7月20日(水)	7月21日(木)	7月22日(金)
9:00		(朝食) 9:30	(朝食) 9:30
10:00		混相流伝熱	工業製品における伝熱工学的課題
11:00			
12:00		12:30	11:45
13:00	受付 13:30	(昼食) 13:30	
14:00	環境における熱と物質の輸送	レクリエーション	
15:00		テニス ゴルフ 観光 海水浴 etc	
16:00	16:10		
17:00	16:30 特別講演		
18:00	17:30	17:30 (夕食)	
19:00	18:30	19:00	
20:00	懇親会	伝熱放映会	
21:00	20:30	21:00	

観光は「富貴寺」などを会場のマイクロバスで巡る予定にしています。
 テニスは会場にコートがあります。
 希望者があればゴルフコースも設けます(費用は別途徴収)

連絡先 〒812 福岡市箱崎6-1
 九州大学工学部動力機械工学科
 吉田 駿
 電話 092-641-1101 内線 5533

伝 熱 研 究

Vol. 27 No. 104

1988年 1 月発行

発行所 **日 本 伝 熱 研 究 会**

〒152 東京都日黒区大岡山 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 G 14749

(非売品)