

# 伝 熱

## 目 次

### 〈支部の話題〉

関東支部のエネルギー研究から	横堀誠一 (東芝)	1
ガスタービンコージェネレーション用低NO <sub>x</sub> 燃焼器の開発	森 雅晶 (東京ガス)	2
酸素燃焼システムの伝熱	刑部真弘 (東京商船大学)	6
熱起電力を利用した高温超電導コイルの通電	小野通隆・栗山 透 (東芝)	12
CO <sub>2</sub> ヒートポンプの開発研究	橋本克巳 ((財) 電力中央研究所)	16

### 〈連載〉

インタビュー「Joint Research グループリーダーに聞く」		
5. 電気通信大学(東京工業大学名誉教授), 黒崎晏夫教授		
.....聞き手: 川口靖夫 (工業技術院, 機械技術研究所)		20

### 〈ワンポイント伝熱〉

沸騰現象の観察と熱伝達に及ぼす重力の影響について	大田治彦 (九州大学)	23
--------------------------	-------------	----

### 〈懇話会報告〉

分子伝熱懇話会 (立山) での討論	芝原正彦 (大阪大学)・岩城敏博 (富山大学)	29
-------------------	-------------------------	----

「伝熱」 vol.39, No.156 の語句の修正と補遺		32
-------------------------------	--	----

### 〈行事カレンダー〉

		33
--	--	----

### 〈お知らせ〉

日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 公募のお知らせ		35
第38回日本伝熱シンポジウム開催案内		36
ジョイントシンポジウム 生活の場における温度・湿度と人間 (日本伝熱学会, 空気調和・衛生工学会, 人間生活環境系会議, 生気象学会共催)		37
中国四国支部企画「中国四国伝熱セミナー・岡山渋川」のご案内		38
日本伝熱学会九州支部企画「九州地区伝熱講演会」のご案内		39
寄付会費へのご協力をお願い		40
名簿原稿の提出についてのお願い		40
「伝熱」会告の書き方		41
事務局からの連絡		42
日本伝熱学会, 入会申込み, 変更届用紙		43
日本伝熱学会, 賛助会員入会申込み, 変更届用紙		44

インターネット情報サービス

- <http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/htsj/>  
最新の会告・行事の予定等を提供
- [htsj@asahi-net.email.ne.jp](mailto:htsj@asahi-net.email.ne.jp)  
事務局への連絡の電子メールによる受付

**Journal of The Heat Transfer Society of Japan**  
**Vol.39, No.158, September, 2000**

**CONTENTS**

**<Branch Topics>**

A Forward on Topical Energy Researches from HTSJ Kanto Area Seiichi YOKOBORI (Toshiba Corporation).....	1
Development of a low-NO <sub>x</sub> combustor for a gas turbine co-generation system Masaaki MORI (Tokyo Gas Co.,Ltd.).....	2
Heat Transfer in Oxygen Combustion System Masahiro OSAKABE (Tokyo University of Mercantile Marine).....	6
High Temperature Superconducting Magnet Excited with Thermoelectric Power Michitaka ONO, Toru KURIYAMA (Toshiba Corporation).....	12
Development Research on CO <sub>2</sub> Heat Pump Katsumi HASHIMOTO (CRIEPI).....	16

**<Serial: Joint Research>**

Preface to "Interviewing a group leader of joint research"	
Interviewing a group leader of joint research, 5. Prof. Yasuo KUROSAKI of the University of Electro-Communications, Prof. Emeritus, Tokyo Institute of Technology Interviewer: Yasuo KAWAGUCHI (Mechanical Engineering Laboratory, AIST MITI).....	20

**< One Point of Heat Transfer>**

Observation Technique for Boiling Phenomena and Gravity Effect on the Heat Transfer Haruhiko OHTA (Kyushu University).....	23
---	----

**<Report on Seminar>**

Discussions on Molecular Heat Transfer Seminar in Tateyama Masahiko SHIBAHARA (Osaka University), Toshihiro IWAKI (Toyama University).....	29
---	----

Errata for "Journal of The Heat Transfer Society of Japan" Vol.39, No.156.....	32
--	----

<b>&lt;Calendar&gt;</b> .....	33
-------------------------------	----

<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	35
------------------------------------	----

## 関東支部のエネルギー研究から

A Forward on Topical Energy Researches from HTSJ Kanto Area

編集委員 横堀 誠一 (東芝)

Seichi YOKOBORI (Toshiba Corporation)

### 1. はじめに

編集委員会の方針により、今月号は関東支部の研究トピックスを纏めることになったが、他地区に比べて郷土色など独自性は出しにくい。私自身が企業に属することもあって、「ものづくり」最前線での熱流体問題を縦糸に、オーバオールのエネギー問題を横糸として、動力エネルギー現場の一線で活躍の方々に成果の一端をまとめていただいた。時勢を反映した動きに敏感な関東支部からの成果をお届けする。新聞発表など最近の動きから、「環境と省エネ」の具体的な動きはいくつかに分類できるように思われる。

### 2. 分散電源に関する研究

燃料電池・マイクロガスタービンに関する熱問題については、5月に神戸で開催された日本伝熱シンポジウムのフロンティアフォーラムや6月の機械学会講習会の盛況からも関心の高さが伺える。ジャーナリスト的な魅力的情報と現場での実力の乖離を埋めるためのブレイクスルー技術などについて、いずれ本誌でも特集号が組まれることもあるだろうが、東京ガス、東京電力など関連企業の多数が集中する関東支部からも技術成果が発信されていくと思われる。

### 3. 熱システムの省エネ・環境に関する研究

本号ではNO<sub>x</sub>低減やボイラの排ガス回収など、代表的な研究成果を紹介していただいた。

トータルエネルギーの有効利用研究については、火力・原子力など集中発電の母体となる蒸気サイクル(ランキンサイクル)を基本とするエネルギーシステムは単独の効率に限りがあり、トータル熱効率向上策としてガスタービンとのトッピングサイクル(リパワリング)や低沸点媒体のボトムリングサイクルなどの具体化も、国プロなど最近の公募研究に研究

応募が見受けられる。また発電所からの多量の温排水を有効利用して地域共生を図る気運があるが、低温多量の熱を有効利用するための動きは意外に容易ではなく、コンパクトで高性能な熱交換器の出現まではコスト面での不利を挽回できない状態が続いている。

### 4. 発電用エネルギー機器の開発研究

エネルギー機器の開発はメーカーのノウハウが含まれるので情報の公開に限界があるのは止むを得ないが、本号では超伝導機器開発の一端を紹介していただいた。原子力に関する熱流体研究も基礎・応用ともに相変わらず盛んな報告がある。機器の性能向上にあたっては流れを調べるなど基本に戻った動きとシミュレーションによる検討が続いている。

### 5. おわりに

単純な伝熱面積を増やす考えから相変化利用を経て触媒・吸収など化学反応を利用する技術まで。本号の4編だけを見ても、現場の要求が高性能の熱交換技術に帰着するものが少なくない。CO<sub>2</sub>ヒートポンプの開発も、まず家庭での使用から始まって大型化するであろう。

ともすれば、学会の関心はマイクロ伝熱など未知の物理現象の解明に行きがちであるが、発電などトータルシステムの研究が重要なことは言うまでもない。机上では単なるヒートバランスに過ぎないシステムも、現場で巨大なシステムに組むには多大な努力を要する。本号を契機に、関連する成果が「伝熱」やTSE上に盛んに掲載されて議論を深めていただきたい。メーカーの発表には工夫を要するだろうが、来年の伝熱シンポジウムではこうしたマクロな報告が活発に紹介されることを期待したい。

こうした編集方針を理解され、多忙ななかを執筆いただいた寄稿者各位に感謝申し上げます。

NO<sub>x</sub>

Development of a low-NO<sub>x</sub> combustor for a gas turbine co-generation system

森 雅晶 (東京ガス)

Masaaki MORI (Tokyo Gas Co., Ltd.)

1. はじめに

最近の CO<sub>2</sub> に代表される温暖化ガスへの削減要求の高まりから、産業界ではより高度な省エネルギー化への早期転換が求められている。また、大都市圏においては大気環境の改善が進まないことから、NO<sub>x</sub> 等の大気汚染物質については各種法規制により排出量が厳しく規制されており、今後より厳しくなる傾向と思われる。このような中、近年高効率化が著しいコージェネレーションシステム（以降 CGS）は省エネルギーと環境適合性に優れ、上記の諸問題に対する最も有効的な手段としての認識が高まっている。

東京ガスでは、この省エネルギー・環境適合性に優れた CGS の普及に向けた環境整備、技術開発、エンジニアリング技術強化などに積極的に取り組んでいる。ガスタービン CGS においては、東京ガス独自に環境対策に向けた低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術（ドライ低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術）の開発を進めると共に、ガスタービンメーカーやパッケージと連携し、低コスト化や高性能化にも努めている。本報告では、東京ガスで開発を進めてきた超低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術と、この燃焼技術を採用し石川島播磨重工業株式会社（以下 IHI）と共同開発した、低 NO<sub>x</sub>・高効率 2MW ガスタービン CGS について紹介する。

2. ガスタービンにおける NO<sub>x</sub> 規制と低減技術

ガスタービン CGS に対する NO<sub>x</sub> 排出規制については、1988 年に施行された国の大気汚染防止法での 294ppm(0% O<sub>2</sub> 換算) が示された。更に大都市圏の各地方自治体（東京・神奈川・千葉・埼玉・愛知・大阪）からも指導値が示されている。表 1 に示すとおり 特に出力 2MW を越えるものは 150～50ppm(0% O<sub>2</sub> 換算) という厳しい指導値が示されている。これらは一般的なガスタービンの NO<sub>x</sub> 排出量が 350～400ppm(0% O<sub>2</sub> 換算) である事を考えれば、非常に厳しい値である。しかしながら、

これら環境規制は、大気環境改善が進捗していないことから、今後も強化されていく可能性がある。

現在、大都市圏におけるガスタービンを原動機とする CGS では、水・蒸気噴霧や排ガス脱硝などによる NO<sub>x</sub> 削減手法が取られている。しかしながら、今後一層の環境性向上を考えると、これら手法では低 NO<sub>x</sub> 化に限界が有ったり、必要付帯設備の増強による設置スペースやコストの大幅増加が伴い、CGS 本来の経済性が損なわれる心配があり、CGS の普及を拡大していく上での検討課題である。

表 1 出力 2 MW 以上のガスタービンに関する主な NO<sub>x</sub> 排出規制

	対象地域	対象規模 (重油換算 又は出力)	規制値 (ppm: O <sub>2</sub> =0%)
大気汚染防止法	全国	50L/h 以上	294
東京都指導要綱	第 1 種地域	2 千 kW 以上	100
	第 2 種地域	2 千 kW 以上	150
千葉県指導要綱・ 千葉市指導要綱	千葉市・特別地域	50L/h 以上	84
	その他の地域	50L/h 以上	126
横浜市指導要綱	市内全域	2 千 kW 以上	60
神奈川県指導要綱	横浜市・川崎市・ 横須賀市	2 千 kW 以上 10 万 kW 未満	84
	その他の地域	2 千 kW 以上 10 万 kW 未満	84
名古屋市公害防止 条例	市内全域	1 千 kW 以上	総量規制、 約 128
愛知県指導要綱	名古屋市以外全 域	50L/h 以上	147
大阪市指導要綱	市内全域	6 千 kW 以上 2 万 kW 未満	50
大阪府指導要綱	総量規制地域	2 千 kW 以上 2 万 kW 未満	85
	その他の地域	2 千 kW 以上 2 万 kW 未満	120

備考：(1)規制値は全て O<sub>2</sub> = 0% 換算値。  
 (2)対象規模の重油換算(L/h)は、燃料の燃焼能力。  
 (3)東京都の第 1 種地域とは 23 区および武蔵野市、三鷹市、調布市、保谷市、狛江市。第 2 種地域とは、第 1 種地域以外の地域を対象。  
 (4)千葉県の特別地域とは、野田市、流山市、柏市、松戸市、鎌ヶ谷市、市川市、船橋市、浦安市、習志野市、市原市、袖ヶ浦市、木更津市、君津市、富津市。

このためガスタービンメーカー各社は、これら NO<sub>x</sub> 削減の付帯設備を必要としない、希薄予混合燃焼を用いた燃焼段階での NO<sub>x</sub> 削減技術（ドライ低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術）の開発を行っている。しかしながら、希薄予混合燃焼は従来ガスタービンで用いられている拡散燃焼に比べ大幅な低 NO<sub>x</sub> 化が可能である反面、燃焼の不安定化や失火し易い等の特徴を持つ。このため、この扱いの難しい希薄予混合燃焼を、如何にガスタービンが必要とする広域な運転範囲に適応させるかが開発ポイントである。これまでに、燃焼用空気流量制御方式、マルチバーナ方式、ステージ燃焼方式等の様々な低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術が開発されてきた。しかしながら、比較的大型のガスタービンを対象としたものが多く、CGS 用小型ガスタービンへの適用が困難、燃焼制御が煩雑、低 NO<sub>x</sub> が得られる運転範囲が狭いなどの問題がある。このため、より簡易な構造および制御により十分な低 NO<sub>x</sub> 化が可能な、小型ガスタービン用低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術の開発が望まれていた。

### 3. 小型ガスタービン用低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術の概要

#### 3.1 本開発の超低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術の特徴

本開発の超低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術は、大幅な NO<sub>x</sub> 低減と共に小型ガスタービンへの適応が可能で、シンプルなバーナ構造および燃焼制御手法が特徴である。このため、数百 kW クラスの超小型ガスタービンにも適応可能であり、従来通りの燃料流量制御だけで CGS 常用運転範囲である負荷 100 ~

75% において NO<sub>x</sub> 値 84ppm (0%O<sub>2</sub> 換算)以下を達成できる。

#### 3.2 超低 NO<sub>x</sub> 燃焼技術の燃焼原理

前述したように希薄予混合燃焼は、従来の拡散燃焼に比べ安定燃焼範囲が非常に狭く、扱いの難しい燃焼である。本燃焼技術は、特徴的な予混合燃焼ノズルを用いる事により広い負荷範囲において超低 NO<sub>x</sub> と安定燃焼の両立を可能としている。

弊社では本燃焼技術を、バーナ構造の特徴からダブルスワラー燃焼技術と称している。この燃焼技術の概念図を図 1 に示す。この燃焼器の特徴である予混合ノズルは、二組の同心円上に配置される円筒形予混合ノズルで構成される。各ノズルは上流部にスワラーを持ち、旋回流により燃焼安定性を強化している。また、各燃料ガスは各スワラー上流のガスノズルから供給され、空気と予混合され燃焼室に噴出される。

燃焼方法としては、まずパイロットバーナで着火すると共に内側の一次予混合ノズルに一定量の燃料を供給し、希薄予混合火炎を形成する。この一次予混合火炎は、安定かつ NO<sub>x</sub> があまり発生しない一定の空気比（ $\phi = 1.4 \sim 2$  程度）に設定される。一次予混合火炎の周囲に噴出する外側の二次予混合気は、一次予混合気よりさらに希薄な空気比範囲（ $\phi > 2$ ）で燃料量を制御し、ガスタービンの負荷変化に対応する。この二次予混合気は非常に希薄であるため、単独では燃焼が困難であるが、安定な一次予混合火炎と接触し、熱・活性基

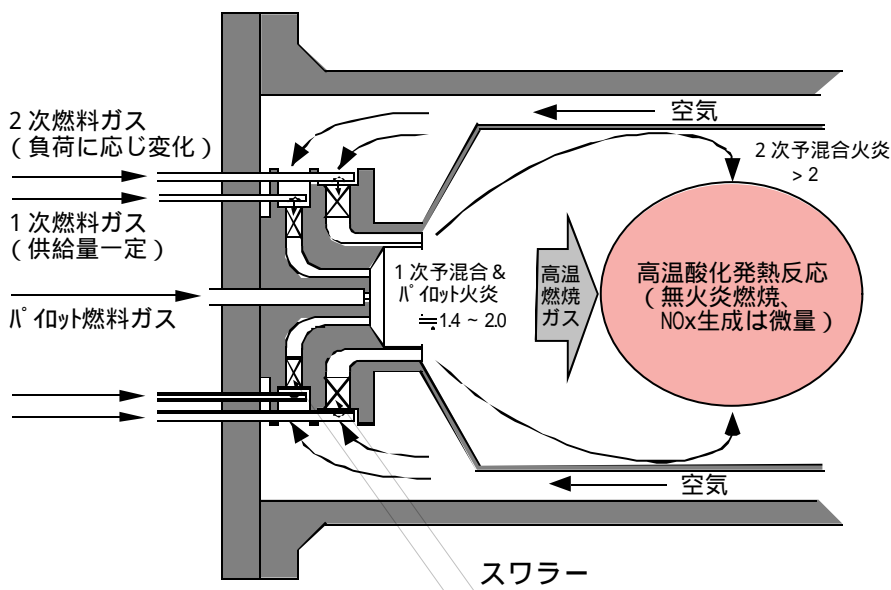


図 1 ダブルスワラー燃焼技術の概念図

などの供給を受けることにより燃焼が可能となる。この二次燃焼は超希薄燃焼であるため、通常の火炎燃焼ではなく火炎を伴わない酸化発熱反応となり、その反応温度レベルは 1500 以下であり NO<sub>x</sub> はほとんど生成しない。このため、燃焼で生成される NO<sub>x</sub> は、一次希薄予混合火炎から発生する少量の NO<sub>x</sub> だけとなり、全体で大幅な低 NO<sub>x</sub> 燃焼を可能としている。このような燃焼手法により、燃料の供給量を変化させる簡易な方法で低 NO<sub>x</sub> と安定燃焼の両立が可能な燃焼器となっている。

#### 4. ガスタービンコージェネレーションの開発

本燃焼技術の CGS への適用例を紹介する。東京ガスは IHI と共同で、低 NO<sub>x</sub>、高効率、低コストを目指した都市ガス用ガスタービン CGS の開発

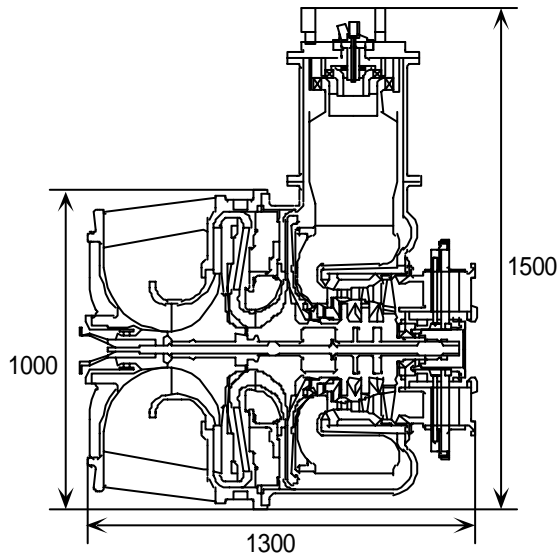


図 2 ガスタービン構造図

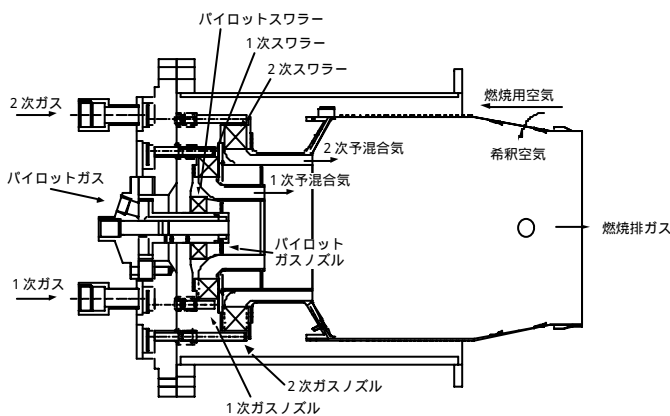


図 3 低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の構造図

を実施した。本システムは IHI が航空用ガスタービン技術を用いて独自開発したガスタービン本体に、前述したダブルスワラー型低 NO<sub>x</sub> 燃焼器を搭載したものである。本システムの主要仕様を表 2 に示す。発電出力は 2MW、発電端効率および総合効率はこの発電量クラスの高タービンとしては最高レベルの 25.4%、78.2% を達成し、また排出 NO<sub>x</sub> 値についても世界最高レベルとなる 84ppm (0%O<sub>2</sub> 換算) 以下を達成している。

図 2 に本ガスタービンの構造図を示す。エンジン構造は 1 軸式で 2 段遠心圧縮機、3 段軸流タービン、単缶型低 NO<sub>x</sub> 燃焼器を備える。また、図 3 に低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の構造図を示す。

同ガスタービンについて、平成 7 年からの 2 年間で各部要素試験・エンジン試験を行いながら改良を重ね、量産型ガスタービンの開発を完了した。

表 2 IM270 ガスタービン CGS 主要仕様

機 関 名 称	IM270
型 式	単純開放サイクル一軸式
構 造 (圧縮機/タービン)	遠心 2 段/軸流 3 段
燃 焼 器	単缶型低 NO <sub>x</sub> 燃焼器
圧 縮 比	1.2
定 格 回 転 数	20, 295 rpm (50Hz)
燃 料	都市ガス 1.3 A
定 格 発 電 出 力	2,000 kW
発 生 蒸 気 量	5900 kg/h
発 電 端 効 率	25.4 %
総 合 効 率	78.2 %
NO <sub>x</sub> (O <sub>2</sub> =0%)	84 ppm 以下 (負荷 60%以上)



図 4 パイロットプラント外観写真

また、平成9年に神奈川県横浜市にある東京ガスの主力ガス製造工場内にパイロットプラントを設置し、本開発機の耐久性・信頼性等の総合的なシステム評価を実施した。本パイロットプラントの外観写真を図4に示す。

本プラントでの運転試験結果について述べる。先ず図5に無負荷から最大負荷までの燃料供給スケジュールを示す。パイロット燃料は全運転範囲で一定とし、急激な負荷変化時の燃焼安定性を確保している。低負荷領域では一次燃料量の制御によりエンジン負荷変化に対応する。さらに50～60%負荷以上の高負荷領域において、燃焼器内部の温度条件が前述した超低NO<sub>x</sub>燃焼を実現できる温度レベルに達する事から、パイロットおよび一

次燃料量を一定とし、二次燃料の供給を開始すると共に、二次燃料量の制御によりエンジン負荷変化に対応する。したがって、一般的なCGSの常用運転負荷範囲であるエンジン負荷100～75%においては二次燃料量の制御だけで対応可能となる。

図6に運転試験で得られたNO<sub>x</sub>及び燃焼効率の代表性能を示す。図に示すように、約60%以上の負荷範囲でダブルスワラー燃焼が開始されると共に、超低NO<sub>x</sub>と高い燃焼効率を両立した良好な燃焼を達成している。本プラントで実証されたNO<sub>x</sub>排出レベルは、一般的なガスタービンの1/7以下となる50ppm(0%O<sub>2</sub>換算)という超低NO<sub>x</sub>性能を達成している。

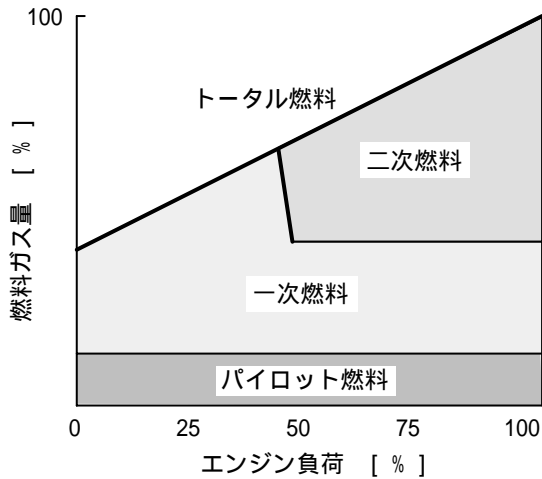


図5 燃料供給スケジュール図

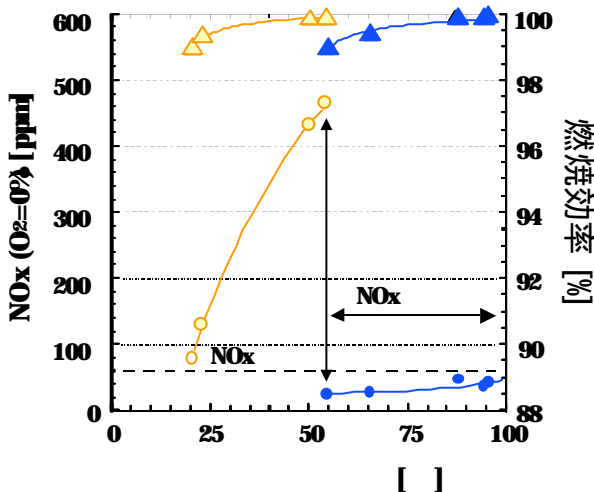


図6 NO<sub>x</sub> と燃焼効率の代表性能図

### 5. おわりに

東京ガスではCGSの普及拡大に向け、NO<sub>x</sub>に限らず環境対策全般にわたる技術開発や、高効率化の技術開発を推進している。また、最近注目されているマイクロガスタービン等を含め、多様化するニーズに対応した商品開発に取組み、小型ガスタービンコージェネ市場の活性化を図り、その普及に寄与できれば幸いである。

### 参考文献

- [1] 森，佐藤他，東京ガスエネルギー技術研究所技報，第2～5号(1992～1995).
- [2] 佐藤，森他，第8・12回ガスタービン秋季講演会講演論文集，(1993，1997).
- [3] 佐藤，森他，ASME 96-GT-53(1996).
- [4] 森，池浦，第26回ガスタービンセミナー資料集，(1997)P.23～31.



刑部 真弘 (東京商船大学)

Masahiro OSAKABE (Tokyo University of Mercantile Marine)

1. はじめに

一般的な燃料中の主成分は炭素と水素である。燃料 1kg を燃やすのに必要な空気量は、炭素が多い場合には約 15kg であり水素が多くなるとそれ以上 (水素のみだと約 35kg) 必要とされる。最もこれらは燃焼に必要な最低限の理論空気量であるから実際にはもっと多くを供給しなければならない。これらの大量空気中の約 80%は窒素である。この窒素は燃焼ガス中で有害な窒素酸化物を生成したり、熱を含んで排ガス熱損失の原因となったりする。人類は有史以来、空気を用いた燃焼により、ほとんどの熱および動力を得てきた。現在、ゼオライト等の窒素吸着物質やセラミックス製の酸素透過膜の研究開発が急速に行われており、比較的安価な酸素が得られる環境が整いつつある。燃焼に空気ではなく酸素を用いると、例えば工場等から排出される低カロリーガスを燃やすことができたり、排ガスを大きく減らせると共に CO<sub>2</sub> 回収が容易になる等のメリットがある。また、窒素酸化物やダイオキシン等の有害生成物を抑制することも可能となる。本稿では、この酸素燃焼システムの伝熱問題について紹介する。

2. 酸素製造のエクセルギー

酸素を空気中より分離する過程をエクセルギー的な観点から検討してみる。温度  $T_0$  における外気の組成がモル分率  $x_{i0}$  ( $i=1 \sim k$ ) で与えられるとき、任意の混合理想気体の組成モル分率が  $x_i$  ( $i=1 \sim k$ ) とすると、その混合気体 1 モルのエクセルギー  $E$  は、次の式で定義される。

$$E = RT_0 \sum_{i=1}^k x_i \ln \frac{x_i}{x_{i0}} \quad (1)$$

ここで、 $R$ : 気体定数 ( $=8.31441 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ )。

外気温度  $T_0=298.15$  で、その組成が窒素(N<sub>2</sub>): 79%、酸素(O<sub>2</sub>): 21%とした場合の、富裕空気  $1\text{m}_N^3$

当たりのエクセルギーを計算すると図1のようになる。外気の酸素濃度である 21% から、酸素濃度を高めていくと富裕空気のエクセルギーは上昇する。このエクセルギーは、気体分離によって生じたものである。100%酸素とすると、エクセルギーは約 170kJ となる。この 100%酸素のエクセルギーは、同体積の空気を約 400 まで予熱した場合のエクセルギーに等しい。すなわち、酸素を分離するために必要な純物理的なエネルギーは大きなものではない。今後の技術革新により、工学的な酸素製造エネルギーもこのレベルに向かって減少していくものと期待される。

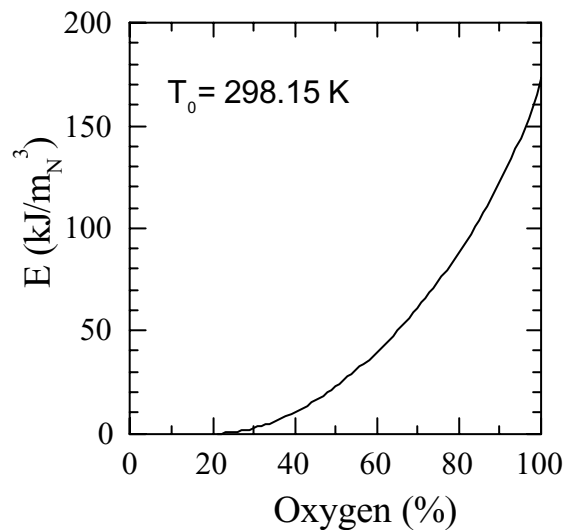


図 1 富裕空気のエクセルギー

従来から酸素製造に用いられてきたのは、リンデの空気液化装置等に代表されるような冷却装置によって空気を冷却・液化し、その沸点の違いを利用して分離する深冷法である。当然、この深冷法によって製造した場合には、液体酸素及び窒素が生成される。大気圧の条件で、この液体酸素の

沸点は 90.19K、液体窒素の沸点は 77.36K であり、図 2 に示したような冷熱エクセルギーを保有している。この冷熱によるエクセルギーは、気体分離によって生じたエクセルギーよりも 1 オーダー大きい。実際の深冷法による酸素製造設備においては、原料空気との間で熱交換を行い液化酸素・窒素をガス化することが多く行われている。ただし、ガス化して採取した場合においても、必要製造電力は冷熱エクセルギーとほぼ等しい。

この深冷法に対し、現在急速な技術革新が行われているのが吸着分離法や膜分離法である。吸着分離法は、空気中の窒素をゼオライト等の吸着剤に吸着させ酸素を分離する方法である。加圧状態で窒素を吸着させ、常圧に下げて窒素を脱着させる PSA (pressure swing adsorption) と、常圧下で窒素を吸着し真空排気により脱着を行う VSA (vacuum swing adsorption) がある。また、膜分離法は有機高分子膜やセラミック膜により、酸素のみを通過・選別する方法である。これらの新しい方法は、冷却プロセスを含まないため、高性能な吸着剤や透過膜等の開発次第では、大きなエネルギー消費低減が期待される。特に、セラミック膜について、米国 DOE は酸素製造のエネルギー消費およびコストが、現在の深冷法等の酸素製造方法に比べて 1/3 になる可能性があるとして発表している。

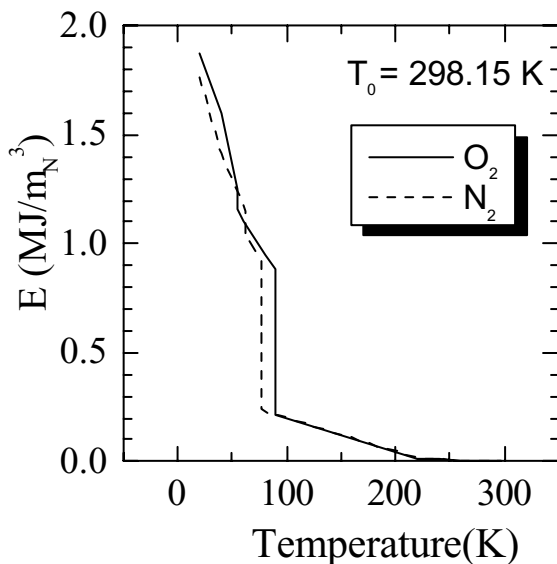


図 2 冷熱エクセルギー

### 3. 酸素燃焼排ガスの潜熱回収

炭酸ガス排出抑制問題に関連して、ボイラ等の熱プラント効率の向上は、重要な課題となっている。ボイラにおける最も大きな損失は、排ガスによって大気中に放出される排ガス熱損失である。通常、排ガスには燃料中の水素分により生成された水蒸気が含まれる。酸素燃焼の場合には、排ガス中に窒素が含まれていない分だけ、排ガス中の水蒸気濃度は高い。水蒸気を含んだ排ガスを露点以下まで冷却し、顕熱とともに潜熱も回収すれば、ボイラ効率の大幅な改善が得られる。酸素燃焼の場合には、酸素製造のために使われたエネルギーを少しでも補填・回収するために、排ガス潜熱回収は重要と考える。

図 3 に示したのは、A 重油を用いたボイラでの排ガス温度とボイラ効率（低位発熱量基準）の関係である。計算は、酸素比 1.05 の酸素燃焼とした場合と、空気比 1.2 の空気燃焼とした場合について行った。排ガスの露点においてボイラ効率の急激な上昇が見られる。これは、これ以下の温度において、潜熱の回収が行われるためである。酸素燃焼の場合には、窒素が無い分だけ熱効率が高く、しかも水蒸気濃度が高いので露点温度も高い。このため、排ガス温度をそんなに低くしなくても高い熱効率を得られることがわかる。

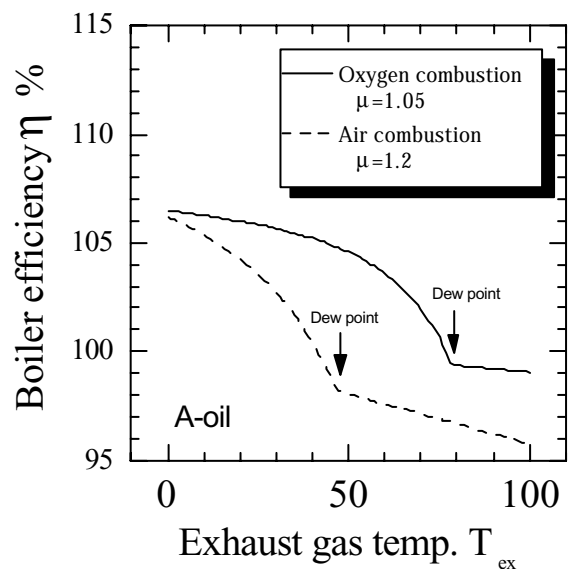


図 3 ボイラ効率

排ガスの潜熱回収に関する研究は、数十年前から行われており技術的に確立されていると考えているメーカーのエンジニアも多い．ところが日本を代表するメーカーのエンジニアに、空気燃焼排ガスの潜熱回収熱交換器を設計してもらおうと、我々の計算よりも大幅に異なったものとなった．これは、実排ガスの物性値の決め方や、対数温度差等を用いた従来の排ガス熱交換器設計手法をそのまま適用してしまうこと等による．また、熱および物質伝達に関する単純なアナロジー関係式が成立しないとされた研究報告も多数あり、実際に設計するのは簡単なものではない．さらに、水蒸気濃度が高い酸素燃焼排ガスの場合には、アナロジー関係式からのズレの問題や大量に発生する凝縮水の影響を検討する必要がある．このため、実験的な検討を行うとともに、熱交換器設計のための予測計算プログラムを作成した．これらの成果について以下にまとめた．

### 3.1 単段実験

図4に実験装置概略図[1-2]を示す．温水ボイラの排気管より、熱交換器や煙道で適度に冷却した排ガスを整流部を通してテストセクションに吸引する．吸引にはインバータ制御のフリクションブローを用いた．また、試験部上流で水蒸気またはSO<sub>2</sub>を注入し、酸素燃焼排ガスの模擬ができるようになっている．

試験部は図5に示すように、断面が160mm×101mmの透明ポリカーボネイト製ダクトで、可視化観察を容易にした．このポリカーボネイトダクト外壁は、断熱性を高めるため厚さ10mmとしている．このダクトに、長さ160mm、外径d=21.7mmのSUS316製の試験伝熱管3本をピッチp=33.7mmで水平に並べ、これをダクト外部で直列に接続した．この伝熱部のp/d=1.55である．

伝熱管は水冷却とし、その流量をタービン流量計で計測した．誤差は、計測流量の±2%以内である．ダクト外部の伝熱管はグラスウールで充分断熱した．試験伝熱管の冷却水出入口温度及び試験部中央部排気ガス温度を、外径0.5mmのシースK熱電対により計測した．冷却水出口温度は、流体混合セル部を設け混合平均温度となるように配慮し、出入口温度差は数度とした．熱流束の測定誤差は、熱流束が小さい非凝縮域が一番大きく±20%以内、凝縮域では±5%以内まで減少する

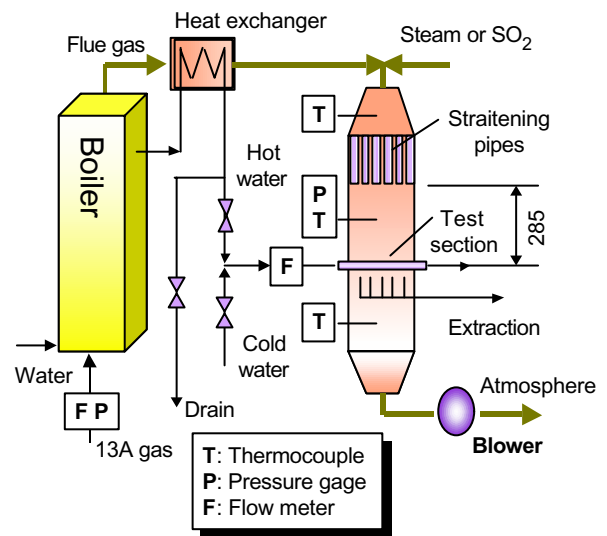


図4 単段実験装置概念図

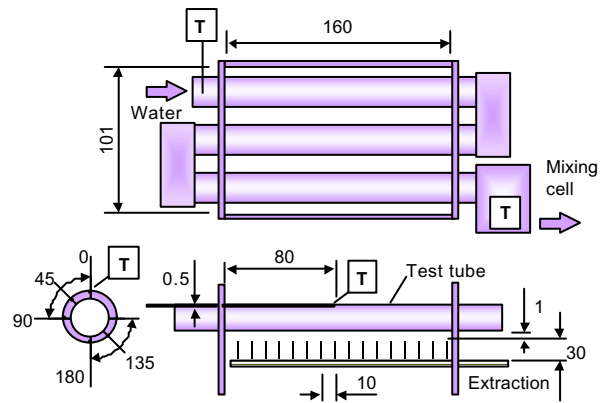


図5 単段実験部

と考えられる．

また、図5のように試験部中央部伝熱管の表面温度を、外径0.5mmのシースK熱電対を、最上部より0、45、90、135、185°の外周5箇所に、0.5×0.5mmのキー溝に埋め込み測定した．

従来の研究[3]によれば、流れが垂直に横切る裸伝熱管の平均熱伝達率に関するヌッセルト数  $Nu_f$  は、

$$Nu_f = c Re_f^{0.6} Pr_f^m (Pr_f / Pr_w)^{0.25} \quad (2)$$

適用範囲は、 $10^3 < Re_f < 2 \times 10^5$  である．なお、本実験の in-line banks の一列目では、 $c=0.26, m=0.37$  であるとされている．

速度境界層と濃度境界層が相互に干渉しない場合、熱伝達と物質移動のアナロジーが成立すると考えられている．この場合、平均物質伝達率に関

するシャーウッド数は，

$$Sh_f = c Re_f^m Sc_f^{0.37} (Sc_f / Sc_W)^{0.25} \quad (3)$$

酸素燃焼排ガスの場合には，従来の空気燃焼排ガスよりも水蒸気濃度が高い．空気燃焼の場合には，水蒸気質量濃度で約 10% 程度であったものが，約 30% 程度まで上昇する．水蒸気は，伝熱面表面で凝縮し，あたかも表面で吸収されたような効果を伝熱にもたらすと考えられる．このことを考慮して導いたのが，次の修正 Sh 数である[4]．

$$Sh_f = \frac{1}{1-w_i} \left( \frac{1-w_i}{1-w_f} \right)^m c Re_f^{0.6} Sc_f^m (Sc_f / Sc_W)^{0.25} \quad (4)$$

ここで W は水蒸気質量濃度であり，添え字 i は気液界面，f は主流での値を示す．

燃焼ガスは，N<sub>2</sub>，CO<sub>2</sub>，O<sub>2</sub>，CO，H<sub>2</sub>O，SO<sub>2</sub> の 6 種類の混合ガスとして扱い，例えば熱伝導率は Lindsay&Bromley の式[5]，粘性係数は Wilke の式[6]を用いて求めた．また，一般的に，物質と熱の拡散係数には強い相関があると考えられる．良く知られた空気中の水蒸気の拡散係数 D<sub>air</sub> を，熱拡散率で修正したものを，排ガス中の水蒸気の拡散係数 D とした[1-2]．

図 6 に示したのは，排ガス中に m<sub>s</sub>=53 kg/h の蒸気注入をした実験での総合熱流束と蒸気注入を行わなかった実験の比較である．排ガス中の蒸気質量濃度は，蒸気注入なしの場合には 0.103 であったが，蒸気注入により酸素燃焼並みの 0.279 まで上昇した．なお，これによって露点は，55.5 から 75.6°C まで上昇した．図中の破線は，単純アナロジー関係式による予測であり，蒸気濃度が比較的小さな場合には良い予測を与えることがわかるが，蒸気濃度が高い場合には低めの予測を与える．これに対して，凝縮量が多い場合の修正 Sh 式を用いた実線は比較的良好な予測を与えることがわかる．一点鎖線で示した Rose の半経験式[7]は多少低めの値を与える．

実際の熱交換器を設計するにあたって，伝熱管にフィン付き管を採用することは，特に顕熱回収領域においては，そのコンパクト化に大いに貢献すると考えられる．ところが凝縮等の相変化現象がある場合には，その高い熱伝達率によるフィン効率の低下から，フィンを設置する意義は薄れて

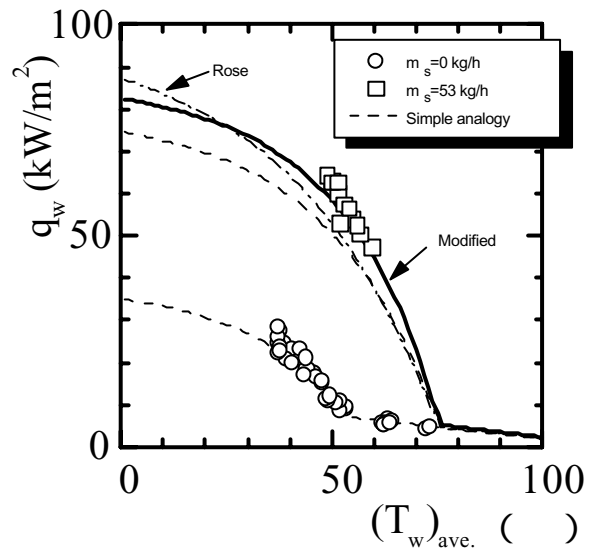


図 6 修正アナロジー式



図 7 フィン付き管

くる．例えば，蒸気タービンシステムの復水器には，フィン付き管は用いられていない．理想的には，熱伝達率の増加に対応してフィン高さを減少させる必要がある．

図 7 に示したのは，排ガスの顕熱回収で一般に使用される螺旋状フィン付管である．前出の矩形ダクト中に，フィン管一本を水平に設置した伝熱流動実験[8]を行った．排ガスはフィン管に対してクロス流れとした．図 8 に示したのは，この実験装置により得られたフィン効率と，経験式及び熱伝導数値計算から求めたフィン効率の比較である．熱伝導数値計算は 24 分割メッシュのコントロールボリューム法を用いた．フィン基底部平均温度 (T<sub>w</sub>)<sub>ave</sub> が露点になると，フィン効率が急激に降下

することがわかる．これは，凝縮熱伝達の開始とともにフィン内を大量の熱が流れ，基底部に比べてフィン部温度が高くなりフィン効率が低下するためと考えられる．また，凝縮域での実験結果は，1次元熱伝導による式に近いことがわかる．このように凝縮域では，フィン効率が急激に減少するため，潜熱回収のためにはフィン高さを低くするか，裸管を用いることが望ましい．

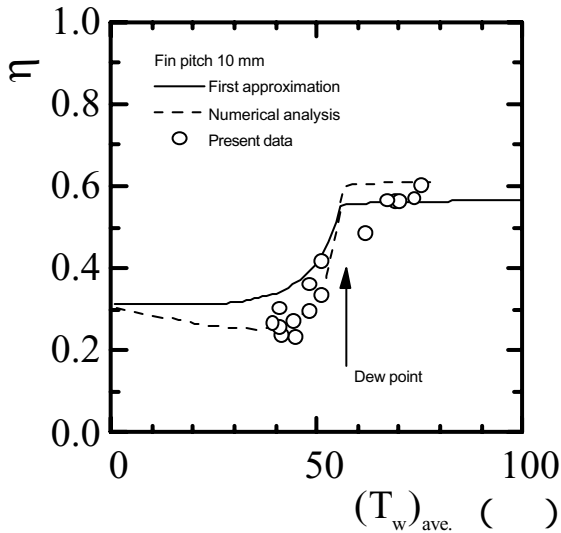


図 8 実排ガス中のフィン効率

### 3.2 中規模潜熱回収実験

以上の単段実験により得られた知見を利用した予測計算手法を作成するため，定格総合熱回収量 140kW（潜熱 120kW）の実験を行った．図 9 は，実験装置概念図である．実験装置は，内径 21.4mm，外径 25.4mm の裸伝熱管を 3 列 22 段含む対向流熱交換器 3 台で構成される．A 重油酸素燃焼ボイラの排ガスが，下降流として第一熱交換器で熱交換をする．第二熱交換器では上昇流となり，第三熱交換器で再び下降流となって排出される．

熱交換器内伝熱流動を予測するために，一次元熱および物質バランス計算[9-10]を行った．図 10 は第 N 段目の伝熱管列を通過する排ガスである．温度  $T_f(N)$  は対流熱伝達により  $T_f(N+1)$  となり，水蒸気体積濃度は伝熱管への物質移動により  $H_2O(N)$  から  $H_2O(N+1)$  になる．物質移動に関しては，修正 Sh 数によって計算した．段計算を進めていくと，ガス温度が，水蒸気の飽和温度以下になるようなことが想定される．この場合，実際にはガス中の水蒸気が結露することにより潜熱を放

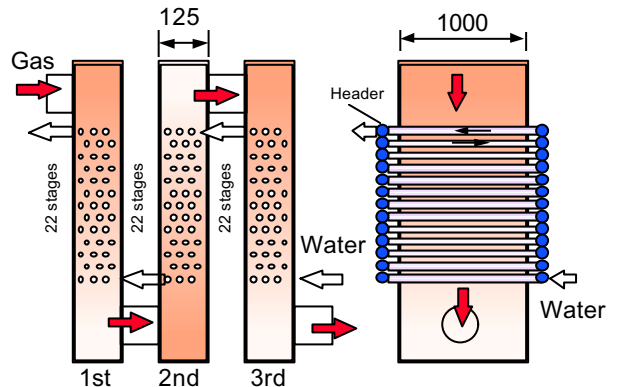


図 9 中規模潜熱回収実験装置

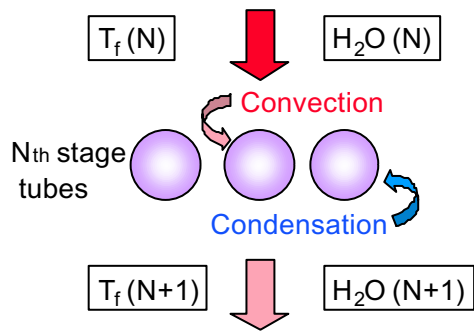


図 10 段ごとの熱・質量バランス計算

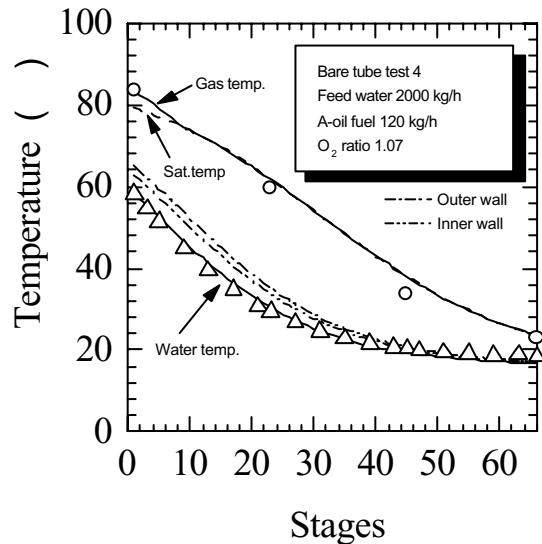


図 11 実験結果と予測計算結果の比較

出して，ガス温度と飽和温度が等しくなると考えられる．エネルギーバランスにより結露による水蒸気体積濃度の減少とガス温度の上昇を決定した．

図 11 の実験結果と予測計算結果の比較図にお



いて、実線はガス及び水温度，1点鎖線は伝熱管外壁温度，2点鎖線は伝熱管内表面温度である．破線は排ガス中の水蒸気分圧に対応した飽和（露点）曲線を表す．伝熱管外壁温度が飽和温度以下の領域が凝縮を起しているのので，熱交換器全領域が凝縮域である．また，熱交換器入り口近傍で，ガス温度と露点が一致して減少する白煙状態が示されている．この場合，ガス中の水蒸気は潜熱を放出しながら微小な水滴（白煙）となり，見かけ上温度低下し難い状態となる．実験データはガス温度であり，水温度であるが，実験結果と予測結果は良い一致をする．

### 3.3 大規模潜熱回収実験

A 重油酸素燃焼ボイラの排ガスを用いた定格総合熱回収量 900kW(潜熱 730kW)の実験を行った．図 12 は，潜熱回収熱交換器の概念図である．内径 20.2mm，外径 25.4mm の伝熱管に，高さ 8mm，ピッチ 8.47mm の螺旋状プレートフィンを溶接したフィン伝熱管を 13 列 36 段含む対向流熱交換器 2 台で構成される．伝熱管及びフィン材質は SUS316L とした．

図 13 は実験結果と予測計算結果の比較である．この場合にも実験結果は予測結果と良い一致をし，フィン付管についても予測プログラムの妥当性が示された．

### 4. 今後の展望

酸素製造技術の進展により製造に要するエネルギーおよびコストが減少し，今後，種々の分野で酸素燃焼技術が用いられる可能性がある．この場合，本研究の予測計算プログラム等により設計された熱交換器により適切な潜熱回収が行われることが期待される．また，潜熱回収熱交換器として最適な形態の検討が今後の課題である．

#### 参考文献

[1] 刑部真弘，石田和彦，矢木清之，伊東次衛，大政国光，機論 B, 64-626, (1998), 3378-3383 .  
 [2] 刑部真弘，矢木清之，伊東次衛，大政国光，機論 B, 65-632, (1999), 1409-1416 .  
 [3] Zukauskas, A., *Advances in Heat Transfer*, 8, Academic press, New York, (1972), 93-160 .  
 [4] Osakabe, M. et al., Proc. of 5th ASME/JSME

Joint Thermal Eng. Conf., AJTE99-6397, (1999) .  
 [5] Lindsay, A.L. and Bromley L.A., *Indust. Engng. Chem.*, 42, (1950), 1508-1510 .  
 [6] Wilke, C.R., *J. Chem. Phys.*, 18, (1950), 517-519 .  
 [7] Rose, J.W., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 23, (1980), 539-546 .  
 [8] 刑部真弘，伊東次衛，大政国光，船機誌, 35(4), (2000), 260-267 .  
 [9] Osakabe, M., Proc. of ASME IMECE'99, HTD-vol.364-2, (1999), 43-50 .  
 [10] Osakabe, M., Proc. of 35<sup>th</sup> IECEC, AIAA-2000-2945, (2000), 804-812 .

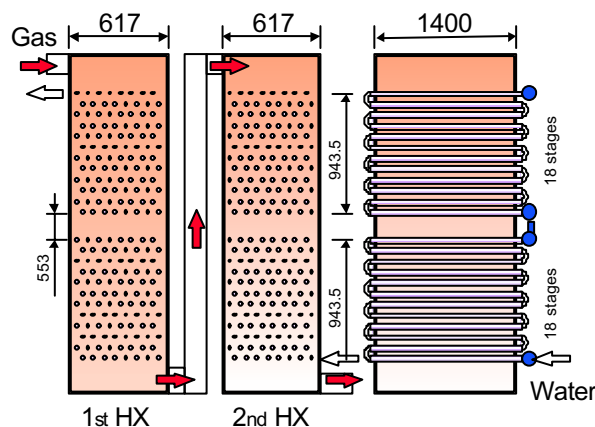


図 12 大規模潜熱回収実験装置

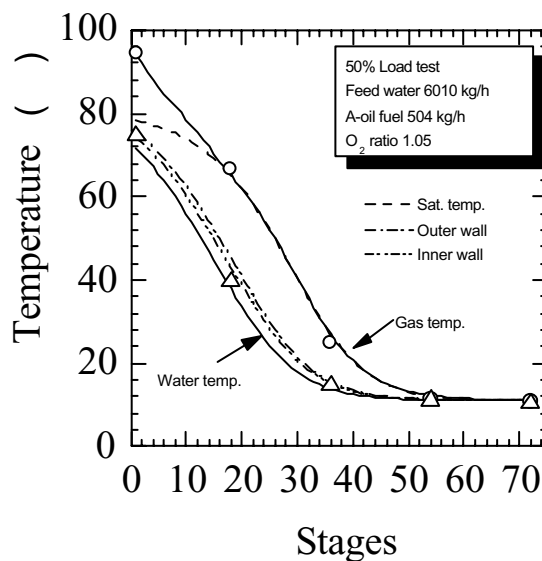


図 13 実験結果と予測計算結果の比較

High Temperature Superconducting Magnet Excited with Thermoelectric Power

小野 通隆・栗山 透 (東芝)

Michitaka ONO, Toru KURIYAMA (Toshiba Corporation)

1. はじめに

超電導マグネットは、電気抵抗によるジュール発熱無しで、広い空間に強力で均一な磁界を発生することができる。また、電気抵抗がゼロである特性を利用して、いったん電流を流してしまえば半永久的に電流を流す永久電流モードでの運転が可能である。このような特徴を生かして、医療用MRIや単結晶引上げ機に対する磁場印加装置、磁気浮上鉄道などに超電導磁石が利用されている。

従来は、超電導線材に金属系の超電導材料を使用しており、絶対温度4K程度までの冷却が必須であった。ところが、近年、従来よりも高い温度で使用できる高温超電導体の実用化が急速に進み、高温超電導線体を利用したマグネットの開発も進みつつある。ところが、高温超電導線は従来の低温超電導線と比べると、電気抵抗ゼロの超電導状態から常電導状態への移行が緩やかであり、臨界電流(1μV/cmの電圧が生じる電流値)以下の範囲でも僅かな抵抗(フラックスフロー抵抗)が発生することが知られている。このフラックスフロー抵抗のため高温超電導マグネットでは、永久電流モードにしようとしても無視できない電流の減衰を引き起こしてしまう。

今回、我々はこの問題の解決策の1つとして熱電素子の起電力を利用して高温超電導磁石に通電するシステムを提案した<sup>[1]</sup>。極低温領域で用いられる超電導マグネットの運転温度と室温との温度差(200K程度)を利用した場合の素子の熱起電力はせいぜい数mV~数十mVであるが、上述のフロー抵抗による減衰を補うには十分な電圧である。

本稿では熱起電力を用いて超電導コイルに通電するシステムの概要、原理実証試験の結果および実機に適用した際の問題点について延べる。

2. 熱起電力を用いた超電導コイルの通電

2.1 熱起電力による通電の概念

熱起電力による超電導コイルの通電の概念図および電気回路図を図1に示す。通常超電導マグネットには室温部に置かれた電源と超電導コイルを結ぶ電流リードが設けられているが、ここでは、電流リードの一部分に熱電素子(熱電対、ペルチェ素子等)が設置される。図1に示したように、室温部(約265K)から約77Kまでの電流リードに熱電素子を用い、77K部分から超電導コイル(約20K)までには、通常の電流リード(ここでは高温超電導を用いた電流リード)を使用する。室温部では熱電素子は短絡されており、熱電素子と超電導コイルで図1に示すような閉回路が構成されている。熱電素子の両端に発生する熱起電力を利用して超電導コイルに電流を流すのが本提案のコンセプトである。ここで、回路内には素子自体の内部抵抗、超電導コイルのフラックスフロー抵抗および回路構成のための接続抵抗が存在し、これらの抵抗で発生する電圧と熱電素子の起電力がつりあうような電流が回路に流れること

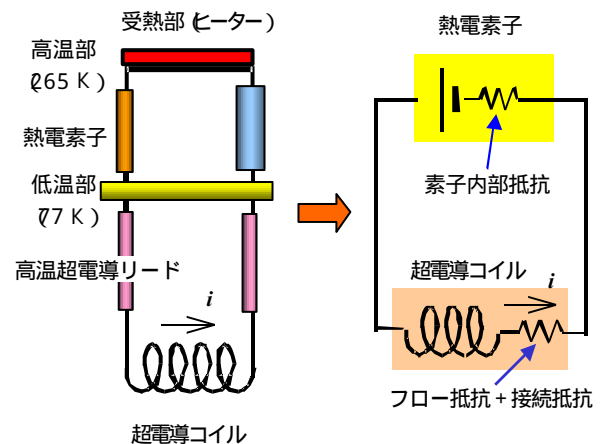


図1 熱起電力によるコイル通電の概念および電気回路図

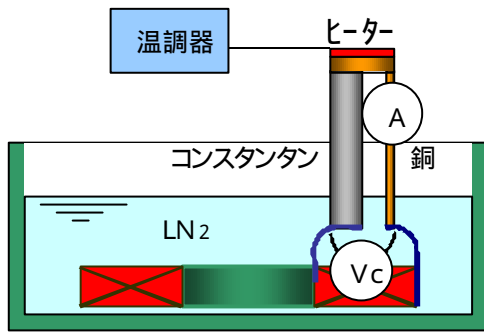


図2 モデル試験装置の概要

になる。従って、個々の抵抗値と起電力を事前に見積ることによって、超電導コイルに所望の電流値を流すことができる。また、熱電素子の温度差を制御することで、電流値を変化させることも可能である。

### 2.2 原理実証

上述したコンセプトを実証するために、高温超電導コイルと銅-コンスタンタン熱電対を接続したモデル試験装置を試作し通電試験を実施した。図2にモデル試験装置の概要を示す。銅-コンスタンタン熱電対を電流リードとしても兼用し、一方を高温超電導コイルに、他方を短絡して閉回路を構成した。使用した高温超電導コイルの諸元を表1に示す。高温超電導コイルは温度77Kの液体窒素に浸漬され、銅-コンスタンタンの他端は室温部に置かれてヒータにより温度制御される。

表1 高温超電導コイル諸元

コイルタイプ	シングルパンケーキ
コイル内径	120mm
コイル外径	200mm
インダクタンス	1.9mH
ターン数	90 ターン

図3は、モデル試験装置の冷却時および昇温時の超電導コイル両端の電圧と回路を流れる電流の関係を示した試験結果である。超電導コイルを液体窒素中に入れ、熱電対に起電力が発生しても、コイルが十分冷えて超電導状態になるまでは電流が流れないが、超電導状態になると急激にコイルに電流が流れることが分かる。逆に、昇温を始めると起電力の低下とともに電流は減少し、超電導

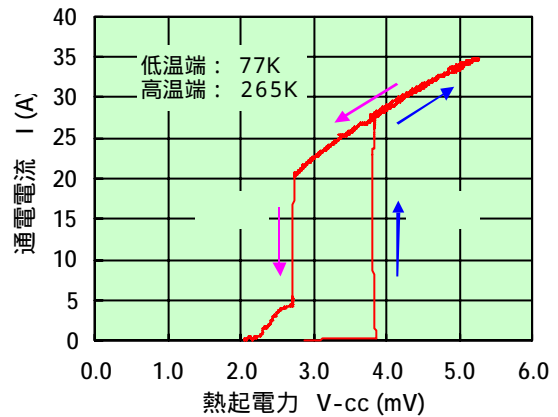


図3 通電試験結果

状態が壊れた時点で電流はほとんどゼロとなる。冷却時と昇温時において熱起電力-電流の間にヒステリシスを示すのは、高温超電導コイルの熱容量が熱電素子の熱容量より大きく、コイルが素子に比べ冷えにくく温まりにくいいためである。今回の試験では素子の高温端の最高温度を260K(5.2mV)とした時に、コイルに最大34Aの電流が流れ、コイル中央に約200ガウスの磁界を発生した。

以上の実験により、電源を使用せずに高温超電導コイルに通電可能であること、さらに冷却さえし続ければフロー損失があるにもかかわらず擬似的な永久電流モードが実現できることを実証した。

更に、室温部の温度制御によって超電導コイルの通電電流をアクティブに制御するために、高温端に設置したヒータを利用した試験を実施した。図4にヒータ入熱による熱起電力、電流の制御結

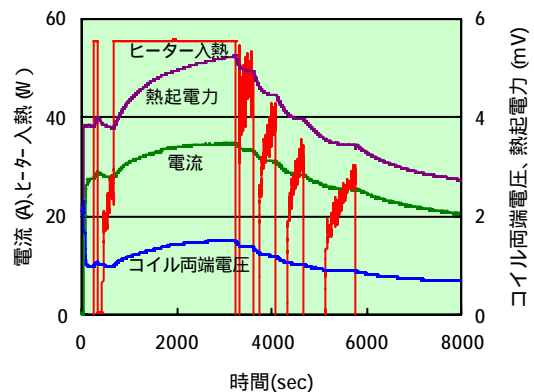


図4 ヒータによる電流制御結果



果を示す．ヒータは高温端の温度を一定にするようにPID制御されている．図4より，ヒータの入熱量と熱起電力，通電電流の対応が明確に示されており，温度制御によってコイルの通電電流制御が可能であることが実証された．

### 3. 熱電素子を用いた超電導マグネット

#### 3.1 システム概要

本節では，熱電素子を用いた通電システムを超電導マグネットに組込んだ場合の構成について考察する．図5に熱電素子により通電される高温超電導マグネットの構成図を示す．本マグネットは，2段の冷却ステージを持つ極低温冷凍機によって冷却される．高温超電導コイルは冷凍機の2段ステージによって約20Kに冷却される．冷凍機の1段ステージは，熱電素子の低温端および超電導マグネットのサーマルシールドを冷却する．1段ステージの温度は50K～70K程度である．

ここで超電導コイルに100A～1kAの大電流を流すためには熱電素子自体の内部抵抗を小さくする必要あり，かつ，その値は高温超電導コイルのフロー抵抗と同等あるいはそれ以下にしなければいけない．通常の超電導マグネットで用いられる電流リードの抵抗は熱侵入を低減するために最適化され0.1～1m程度に設定されている．

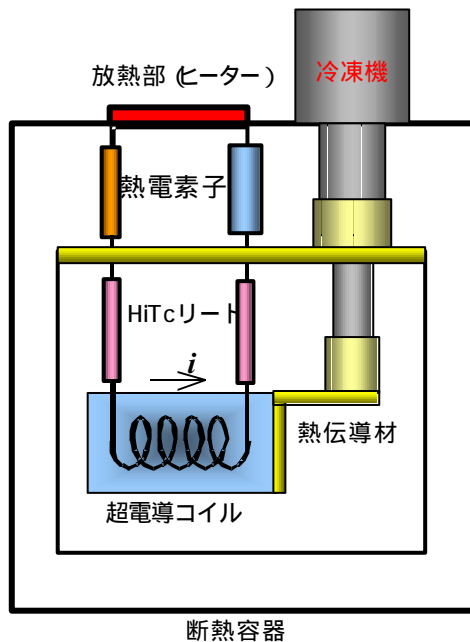


図5 熱電素子によって通電される高温超電導マグネットシステムの構成図

この抵抗値を下げることは侵入熱の増加につながり，熱電素子を冷却するための冷凍機の所要動力が大きくなる問題が生じる．そこで，熱侵入が極力小さく，かつ熱起電力のおおきな熱電素子を使用することが重要になる．熱電素子として半導体素子を用いれば金属材料に比べ熱起電力が大きい上に熱伝導率が小さく，素子を通しての侵入熱の低減が期待できるが，熱起電力が大きい分素子の低温端でのペルチェ熱が増大することに注意を要する．

#### 3.2 システムの平衡電流と熱侵入

本システムの平衡電流について銅 - コンスタントンの場合について考察する．平衡電流は次式

$$I_b = V_{te} / (R_f + R_{cu} + R_{\gamma}) \quad (1)$$

$$V_{te} = 5.3 \text{ mV} \quad (265 \text{ K} - 77 \text{ K})$$

$$R_f = V_0 \cdot (I_b / I_c)^n \cdot L / I_b$$

$$R_{cu} = \rho_{cu} \cdot (L/S)_{cu}$$

$$R_{\gamma} = \rho_{\gamma} \cdot (L/S)_{\gamma}$$

で与えられる．熱電素子の内部抵抗を決める銅およびコンスタントンの形状（長さ，断面積）はそれぞれの抵抗率の比から決定される．即ち，電気抵抗率の比が  $\rho_{\gamma} / \rho_{cu} = 30$  のとき  $L/S$  の比  $(L/S)_{cu} / (L/S)_{\gamma}$  も30にすることで銅とコンスタントンの電気抵抗を等しくする．

このように平衡電流は素子の種類，形状そして超電導コイルの発生抵抗（フロー抵抗）により決まるが，このときの素子低温端への侵入熱は次式に示すように素子の形状と熱伝導率積分値で決定される．

$$Q = \frac{S}{L} \int_{T_L}^{T_H} \lambda dT \quad (2)$$

銅 - コンスタントンを用いて  $T_H = 265 \text{ K}$ ， $T_L = 77 \text{ K}$ とした場合，銅およびコンスタントンを通しての侵入熱は

$$Q_{cu} = 800 \text{ (W/cm)} / (L/S)_{cu}$$

$$Q_{\gamma} = 30 \text{ (W/cm)} / (L/S)_{\gamma}$$

であり，前述した  $(L/S)_{cu} / (L/S)_{\gamma}$  が30であることを考慮すると  $Q_{cu} \approx Q_{\gamma}$  となる．



図6 単結晶引上げ用高温超電導マグネット

2.2節で示したモデル試験装置の試験結果から、銅-コンスタンタン熱電対を用いて、100 A程度の電流リードを構成すると77 Kに約100 Wの熱が入ってくることがわかった。通常の最適化された電流リードでは、100 Aの電流リードあたり約10 Wの熱侵入<sup>[2]</sup>であるから、約10倍の冷凍が必要となる。

### 3.3 実マグネットへの適用例

銅-コンスタンタン熱電対を現在開発中<sup>[3]</sup>のシリコン結晶引上げ用高温超電導マグネット(図6に写真参照)に適用した場合についてL/Sの値をパラメータとして検討した。図7はL/Sが1000と2000の場合について、回路に発生する電圧と通電電流の関係を示したものである。L/S = 1000は、熱電素子の内部抵抗と超電導コイルのフロー抵抗がほぼ等しい場合であり、熱起電力を大きくしても平衡電流は殆ど増加しないことがわかる。一方L/S = 2000で銅-コンスタンタンの265 Kから77 Kまでの熱起電力の範囲では、素子の内部抵抗が回路の抵抗として支配的である。銅銅-コンスタンタンを用いた場合の各条件での平衡電流はL/S = 1000で175 A、L/S = 2000で135 Aとなる。

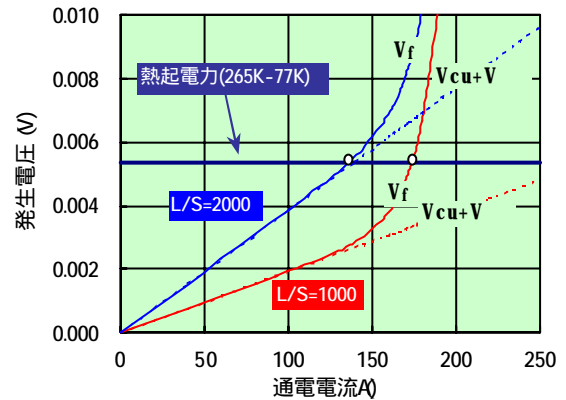


図7 回路に発生する電圧と電流の関係

## 4. まとめ

電源を使用せずに熱電素子の起電力を用いて高温超電導コイルに通電するシステムを提案し、原理実証試験の結果、実機に適用した場合の問題点などを述べた。電源を使用しないで通電し続けられるため、シンプルな構成となるが、起電力を生み出すために冷凍にかかる所要動力が増してしまう問題点もある。今後、熱侵入量が小さく大電流を流し得る熱電素子の開発を進めるとともに、本システムの特徴を生かすことが可能な応用製品について広く調査し実用化につなげていきたい。

### 参考文献

- [1] 小野通隆, 低温工学講演論文集 (2000) pp.134.
- [2] 荻原宏康編著, 低温工学概論, 東京電機大学出版局 (1999).
- [3] M. Ono et al, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol.10, No.1, pp. 499-502, March 2000.

CO<sub>2</sub> ヒートポンプの開発研究  
Development Research on CO<sub>2</sub> Heat Pump

橋本克己 ((財) 電力中央研究所)  
Katsumi HASHIMOTO (CRIEPI)

1. はじめに

オゾン層保護・地球温暖化防止の観点から、代替冷媒の探索・開発が必要になっている。このような状況の下、オゾン層保護を契機に、HFCを主要な代替冷媒として開発を進めてきたアメリカや日本に対し、ヨーロッパでは、フロンのような合成物ではなく自然界に存在する物質をヒートポンプの冷媒として見直す動きが始まり、最近では1997年に開催されたCOP3(地球温暖化防止京都会議)において、規制対象物質にHFCが含まれたことから、自然冷媒が世界的に注目を集め、日本国内でも関心が高まった。

電力中央研究所では、国内ではいち早く自然冷媒を比較・検討し、その結果、毒性・可燃性の無い二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)に着目し、CO<sub>2</sub>を利用したヒートポンプの可能性を評価するための研究を1995年より開始した。

CO<sub>2</sub>は毒性・可燃性がなく、熱的に安定で不活性、かつ、安価という大きな利点があり、加えて地球温暖化係数はフロンの千分の1程度である。ただし、空調や給湯用に使うと作動圧力が非常に高く、かつサイクルの高圧側が超臨界状態になるという特性をもつ。フロンではサイクルの低圧が5bar、高圧が25bar程度であるのに対し、CO<sub>2</sub>ではそれぞれ30bar、100bar程度と、耐圧設計が必要となる。しかし、圧力が高いということは、濃くて重いガスが流れるということであり、要素機器を小型化できる可能性がある。

このような特徴を有するCO<sub>2</sub>の冷媒としての可能性を評価するために、当所では以下の検討が必要と考え研究を進めてきた。

- ・CO<sub>2</sub>ヒートポンプサイクルの効率の把握・評価
- ・CO<sub>2</sub>ヒートポンプの挙動把握・制御方法の検討
- ・超臨界CO<sub>2</sub>の伝熱流動特性の解明

2. サイクル効率の把握

2.1 給湯サイクルの効率

まず、CO<sub>2</sub>サイクルの効率に関しては、サイクル計算により把握・評価した。CO<sub>2</sub>の場合、高圧側では温度が徐々に低下し水に熱を与えるが、比熱は一定ではない。従って、ガスクーラ(水加熱用熱交換器・凝縮器に相当する)におけるCO<sub>2</sub>および水の入口、出口温度さえおさえおけば、熱交換が可能というわけではなく、熱交換器内部の最小熱交換温度差( $\Delta T_{min}$ )を設定する必要がある。 $\Delta T_{min}$ を決めると、高圧圧力が高すぎる場合には、 $\Delta T_{min}$ が設定より大きくなり、低すぎる場合には小さくなることから、高圧圧力が決まることになる。従って、 $\Delta T_{min}$ によりサイクルが変化することに注意して、計算する必要がある。

サイクル計算の結果、図1に示すように、給湯用では、R22より高い成績係数(給湯出力/圧縮機

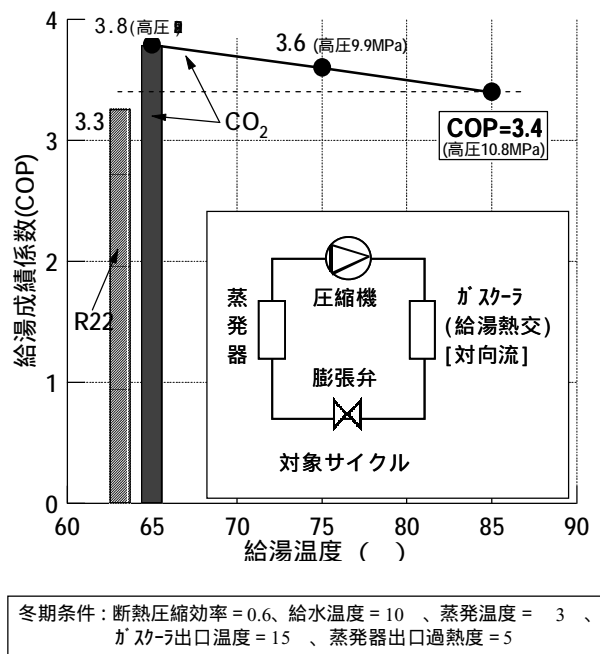


図1 給湯サイクル計算結果

電気入力 : COP) が得られること, 特に, 従来のフロンでは不可能であった電気温水器並の高温給湯 (85°C程度) においても高い効率が得られることが明らかになった. CO<sub>2</sub>では, 前述のように, 高压側が超臨界になるため凝縮はおこらず, 除熱とともに温度が徐々に低下していく. 従って, 給湯を行う場合のように, 加熱温度幅が大きい場合には, 加熱熱交換器を対向流とすることで熱交換温度差によるエントロピ損失を小さくすることができるため, 高いCOPが得られる [1].

### 2.2 空調サイクルの効率

図2に空調サイクル計算結果を示す. 単純な比較では, R22 (左) よりCOPは低下する. ただし, 熱交換最小温度差を小さくすることや膨張動力を回収するなどの工夫により, フロンと同程度のCOPが得られることが分かった [1].

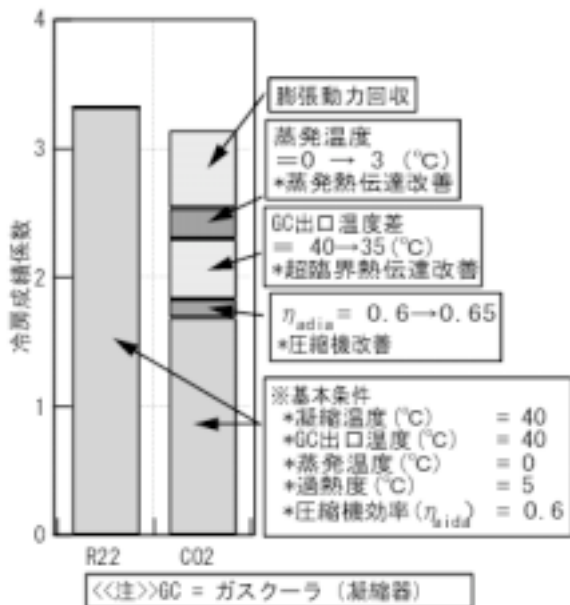


図2 冷房サイクル計算結果

### 3. サイクル挙動の把握

サイクルの挙動や制御方法に関しては, CO<sub>2</sub>のヒートポンプ (図3) を試作し, 熱源や熱負荷の温度・流量等を変化させる実験を行った.

図4に膨張弁を用いた蒸発器出入口温度差の制御結果を示す. 温度差は大きいものの, 圧縮機回転数変化に対して制御は良好であることが分かる.

図5にガスクーラへの給水温度を変えた場合のサイクル p-h 線図の変化を示す. 給水温度上昇によ

り, 膨張開始 (ガスクーラ出口) 温度が上がり, 同時に高压が上昇している.

このほかに様々な実験を行った結果, サイクル各点の圧力や温度等の変化は, フロンを使ったサイクルとほぼ同様であること, また, サイクル全体の制御方法に関しても, 従来のフロンに使われている電子式膨張弁とインバータ駆動の圧縮機による方式が使えることが明らかになった [1].

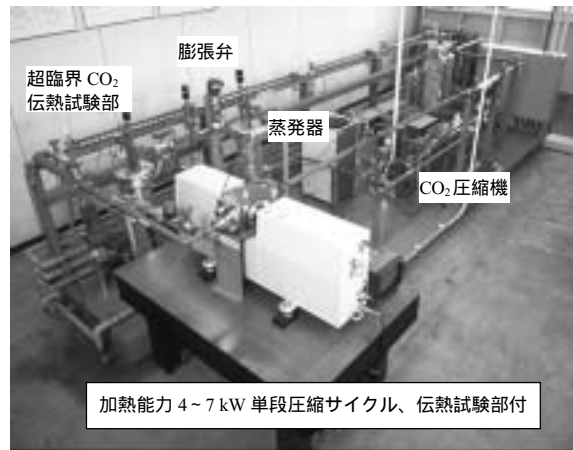


図3 CO<sub>2</sub>ヒートポンプ伝熱ループ試験装置

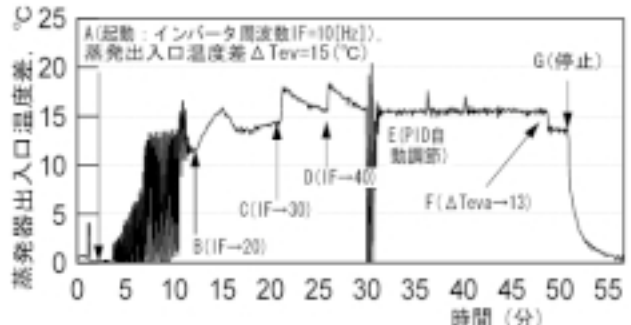


図4 膨張弁による自動制御トレンド

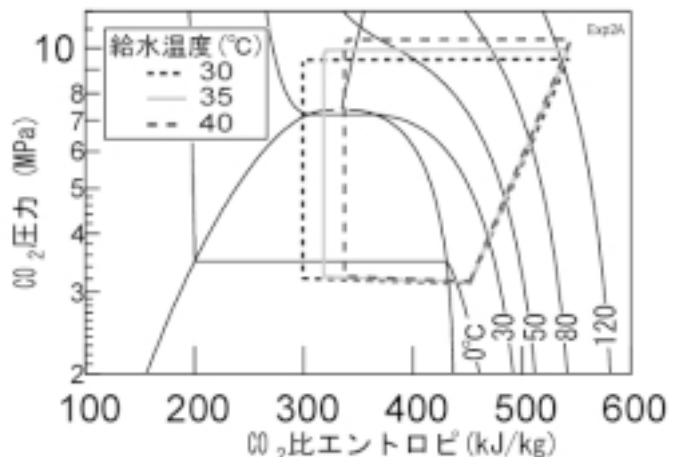


図5 給水温度変更によるサイクル変化

#### 4. 超臨界域でのCO<sub>2</sub>の伝熱

超臨界CO<sub>2</sub>伝熱は、CO<sub>2</sub>を加熱する場合については数多くの研究がなされているが、CO<sub>2</sub>を冷却する場合については、これまでの研究例は少なく、CO<sub>2</sub>ヒートポンプに注目が集まるようになったここ数年、急に報告例が増え始めた。ここでは、当所での基礎研究の概要を述べる。

図3のCO<sub>2</sub>ヒートポンプループに超臨界CO<sub>2</sub>伝熱試験部（伝熱試験部）を設け、実験により熱伝達率を計測した。伝熱試験部は、図6に示す伝熱管長さ1mのユニットを4つ直列に接続して構成した。ユニットは二重管式の熱交換器であり、内管内をCO<sub>2</sub>が、環状部を冷却水がCO<sub>2</sub>と対抗流となるように流れる（内管内径4mm、内管肉厚2mm、外管内径12mm）。

さらに、CO<sub>2</sub>ヒートポンプループの圧縮機はオイルフリーであり、CO<sub>2</sub>と潤滑油は混ざり合わないことから、純粋なCO<sub>2</sub>の熱伝達率を計測することが可能である。

図7に実験結果から求めた実験値と相関式から求めた計算値の比較を示す。横軸はCO<sub>2</sub>の温度、縦軸は熱伝達率である。図中の縦波線は試験圧力での「擬臨界点」である。

実験によるCO<sub>2</sub>熱伝達率（実験値： $\alpha_{exp}$ ）は、各ユニットごとの熱交換量と対数平均温度差から求めた熱通過率と、環状部熱伝達率補正式を使って算出した。

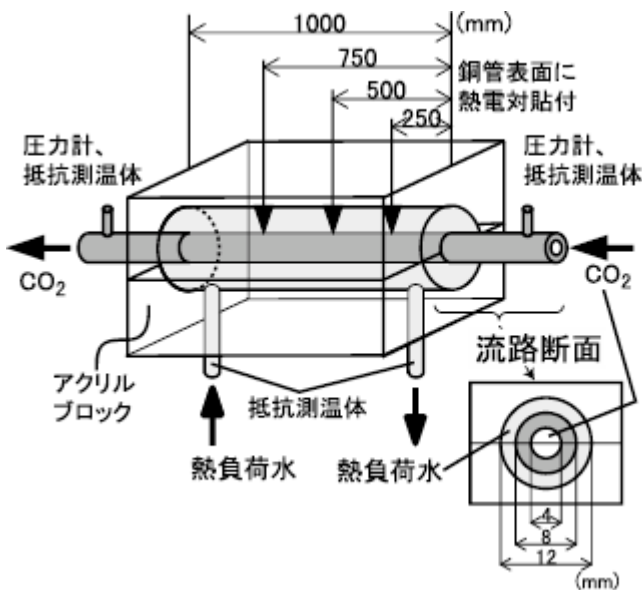


図6 伝熱試験部模式図

一方、熱伝達率の相関式として、次の2つの式を用いた[4]。一つは、広範囲のRe, Prで物性値変化が少ない場合に推奨されているPetukov - Gnielinskiの相関式（PG式）である。

$$Nu_{PG} = \frac{(f/2) \cdot (Re-1000) \cdot Pr}{1+12.7\sqrt{f/2} \cdot (Pr^{(2/3)}-1)}$$

ここで、 $f$ は、次式とする。

$$f = (3.64 \log_{10}(Re) - 3.28)^{-2}$$

もう一つは、超臨界流体を加熱する場合に推奨されているKrasnoshchekovの相関式（K式）で、

$$Nu_K = \left( \frac{(f/8) \cdot Re \cdot Pr}{1.07+12.7\sqrt{f/8} \cdot (Pr^{(2/3)}-1)} \right) \cdot \left( \frac{\rho_w}{\rho_b} \right)^{0.8} \cdot \left( \frac{Cp}{Cp_b} \right)^n$$

ただし、 $f$ は、

$$f = (1.82 \log_{10}(Re) - 1.64)^{-2}$$

$n$ は、

$$n = \begin{cases} 0.4 & (T_b < T_w < T_m \text{ or } 1.2T_m < T_b < T_w) \\ 0.4 + 0.2 \left( \frac{T_w}{T_m} - 1 \right) & (T_b < T_m < T_w) \\ 0.4 + 0.2 \cdot \left( \frac{T_w}{T_m} - 1 \right) \cdot \left[ 1 - 5 \cdot \left( \frac{T_b}{T_m} - 1 \right) \right] & (T_m < T_b < 1.2T_m) \end{cases}$$

ここで、添え字の***b***はバルク、***m***は擬臨界、***w***は壁を表す[4]。

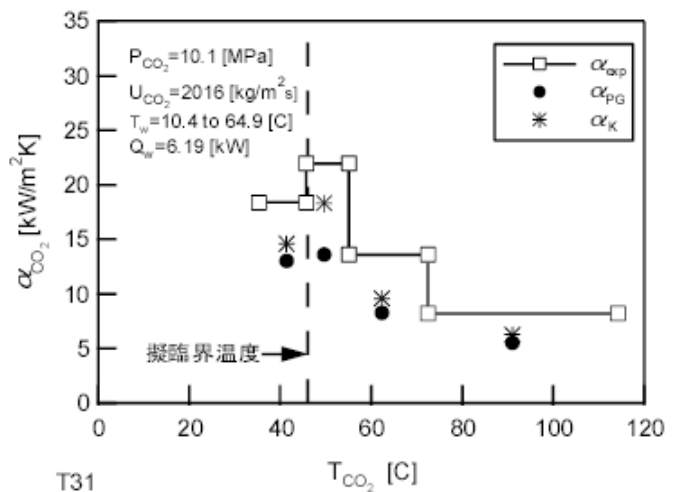


図7 超臨界CO<sub>2</sub>の熱伝達率試験結果

また、CO<sub>2</sub>の定圧比熱が変化することより、単純なユニット出入口平均温度は代表温度として使えないため、CO<sub>2</sub>と冷却水の熱バランスを考慮した代表温度を新たに定義した。この代表温度での物性値を求め、式から熱伝達率を推算した。なお、物性値推算にはPROPATHを用いた。

図7より、比熱が最大となる擬臨界温度より高い温度で熱伝達率が最大値を取ること。また、すべての温度範囲において、実験値が計算値より大きい値になることが分かる。

K式では先に示したように比熱項の指数 $n$ の定義でバルク温度、擬臨界温度、壁温度を使用するが、加熱を対象にしているため、壁温度がバルク温度より高いことを想定している。冷却の場合、壁温度がバルク温度より低いので、K式は熱伝達率の推定には使用できない（ここでは参考のため示す）。

実験値の計算に使用した対数平均温度差は、熱交換器内で定圧比熱が変わらないことを前提としているため、CO<sub>2</sub>に適用する事の可否は大きな問題である。

超臨界流体を加熱した場合には、擬臨界点より低い温度で最大値を取り、かつ、一定物性値の相関式との比較では実験値が小さくなる。図の結果は、これとは逆であるから、熱伝達率の傾向は実験によりとらえられていると考えて差し支えない。

超臨界CO<sub>2</sub>の熱伝達率は、水と同程度と十分大きいことから、CO<sub>2</sub>用のガスクーラーは小型化が可能であることが推測できる。

今後、実験の精度を向上させるとともに、乱流構造などの理解を進め、課題として残るメカニズム解明等を行いたい。

## 5. おわりに

以上の基礎的な研究成果から、CO<sub>2</sub>はヒートポンプの冷媒として十分利用可能であること、特に給湯に関しては、サイクル上の特別な工夫をしなくても高いCOPが得られるため将来有望であることが明らかになった。

我が国全体のエネルギー需要に目を向けてみると、民生用最終エネルギー消費のうち「給湯」が28%を占め、全体の最終エネルギー消費の7%に相当する。これは、一次エネルギー国内供給の5%、CO<sub>2</sub>総排出量の6%を占めており、エネルギー消費に占める給湯熱需要の割合は極めて大きいといえる。現状では、この給湯熱需要は、その90%が都市ガ

ス・LPGおよび石油系燃料などの化石燃料の直接燃焼により賄われており、ヒートポンプに代表される高効率機器の導入により省エネルギーの可能性が残されている分野でもある。当所では、これまでに二段圧縮式ヒートポンプにより給湯ヒートポンプの高効率化を目指したが、サイクルが複雑になるなどの点で商品化は困難であった。しかし、CO<sub>2</sub>は単純なサイクルで高温で高効率な給湯が可能である。現在、商品化を目指して、東京電力、デンソー、電力中央研究所の3社により、住宅給湯分野の省エネを目指し、CO<sub>2</sub>冷媒給湯器の開発を進めている[3]。

CO<sub>2</sub>冷媒は、これまでヒートポンプが不得手としていた高温差加熱が可能であることから、以上示したように給湯用はもちろんのこと、空調や乾燥等他分野へも適用できる可能性を秘めている。当所では、CO<sub>2</sub>の特徴を真に活かしたシステムとするための伝熱等基礎現象の解明や空調用サイクル高効率化のための膨張動力回収技術の可能性評価等、今後とも鋭意、研究開発を進めて行く予定である。

## 参考文献

- [1] 斎川路之, 橋本克巳, (財)電力中央研究所研究報告 W98004, (1999).
- [2] 橋本克巳, 斎川路之, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. I (2000).
- [3] M. Saikawa, K. Hashimoto, Proceedings of 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, (2000).
- [4] (社)日本機械学会, 伝熱工学資料改訂第4版, (1989).

Joint Research

ジョイント・リサーチ

5

( )

*Interviewing a group leader of joint research*

5. Prof. Yasuo KUROSAKI of the University of Electro-Communications,  
Prof. Emeritus, Tokyo Institute of Technology

聞き手：川口靖夫（機技研）

Interviewer: Yasuo KAWAGUCHI(MEL)

研究課題：赤外線照射支援による超精密高分子射出成型に関する研究

制度：NEDO 即効型提案公募事業，電子・情報技術

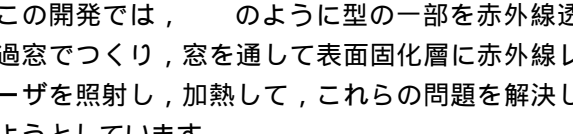
期間：H 1 0 年～ 1 1 年度

共同相手先：カンタムエレクトロニクス（株）

- 先生はプラスチック成形加工学会の会長もお引き受けになっているんですね。今回の話題も樹脂成形に関するものですが、まずこの共同研究の開発目標からお聞かせ願います。

CD やプラスチックレンズ、IC のコネクタといった高分子製品は、溶けた樹脂を金型に流し込んで成形します。射出成型はうまくやれば精密な部品が安価にできるので、電子・情報産業を支える重要な技術になっています。

ところが、精密成形には次の3つの問題点があります。まず第1に、(1) 薄物成形が困難であることです。例えば、IC カードのような薄い製品を作ろうとすると溶融樹脂は金型に触れた部分が冷えて表面硬化層ができ、これが流れを抑制するために樹脂が金型全体に行き渡らない場合があります。つぎに、(2) 転写が難しくなることです。例えば、表面硬化層のためにCD の微細なピットを忠実に転写できないこともあります。3番目に、(3) 光学的歪みが発生することです。例えば、レンズでは表面硬化層で高分子が配向して複屈折を生じ、光学的性質を損なうことが問題になります。

この開発では、のように型の一部を赤外線透過窓で作り、窓を通して表面硬化層に赤外線レーザーを照射し、加熱して、これらの問題を解決しようとしています。

- この図はどう見ればよいでしょう。  
まず、左下の図では、従来の成形法で溶融プラスチックが金型の中で流れながら型に触れて冷却さ

れます。こうなると表面硬化層ができ、固まってきたプラスチックの性質も変わります。左上の図は複屈折率の分布を示したもので、金型の近くは異方性が強く出ていることがわかります。この層が通路をふさぎ流動を妨げることがあるわけです。

さて、右下の図は、我々の研究で提案するもので、左側の型をふく射を透過する材料で作り、赤外線によってプラスチックを直接加熱してやります。こうすると右上の図のように、光学異方性の強い層が消えていることがわかります。

- 赤外線レーザーを使うことにどのようなメリットがあるのでしょうか。またその難しさは、表面硬化層の問題を避けるために、金型にヒータを埋め込んで加熱しながら成形し、ゆっくり冷やしてやるという方法も考えられますが、金型の膨張・収縮が起こるし、工程時間が長くなって望ましくありません。赤外線を使えば僅かなエネルギーを投入するだけで製品の品質が飛躍的に向上します。

この方法の難しさは、赤外線を通す窓材料（ZnSe, ZnS 等）がもろいことから生じます。私たちは赤外線照射支援による一工程による成形を試みましたが、面積が大きくなると窓が割れてしまうことがあります。

そこで考えついたのは、素成形は通常の方法で行い、次に赤外線照射支援を用いて精密なパターンを転写する、という二工程方式です。こうすることによって、圧力の高くなる素成形と、精密さの要求される転写工程を分業して全体を最適化できます。

転写工程はレーザーで表面を僅かに加熱し、材料の膨張を利用して成形するので、型全体を熱する方法に比べてはるかに早く成形を完了できます。また、圧力も低く窓の破損もありません。



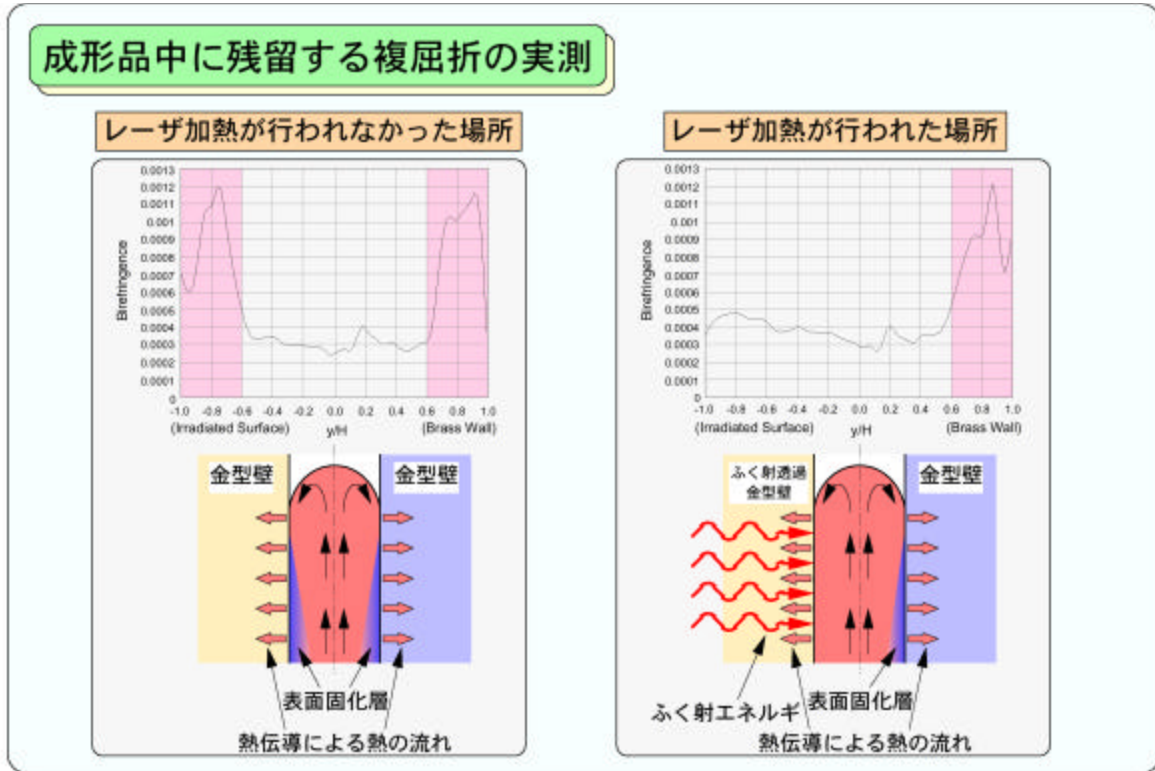


図1 赤外線照射支援による高品位射出成形

- 射出成形の不具合を、伝熱技術によって打開する、という方法は伝熱研究者にとって魅力的な事例ですね。こうしたアイデアはどこから。私は長い研究生活で、ふく射、固気混相流、プラスチックの成型といった分野で仕事をしてきました。今回のアイデアは、かつて金型内流動の可視化をして、成形の限界や「ひけ」の発生を解析していたことを発想の要素としています。私はもともと「もの作り」が好きですし、工学者であるかぎり現場の事を知らなければいけないと感じていました。プラスチック加工の現場は多くが中小企業ですから私たちのアイデアにも反応が早くて楽しいですね。プラスチックの成型は、高分子の専門家と加工屋さんが主な役者でしたが、伝熱研究者がイニシアティブをとれる余地がずいぶんあります。伝熱の問題がネックになってできなかったことを初めてできるようにし、技術を発展させられることは大変楽しいことです。

プラスチックの成形には、先に述べたような難しさもあるのですが、高分子には明瞭な融点がなく、温度の変化に対して粘度が高くなり固まる、というのは利点でもあるのです。ラップトップパソコンのケースがマグネシウム合金で作られると、金属なら放熱が良いし電磁シールドにもなります。ところが成形の難しさから強化プラスチックが未だに大勢を占めています。こんなところにも材料・成形・熱のおもしろい問題が潜んでいそうです。

- これからの工学研究は応用を強く意識していくものになるでしょうか。他の雑誌にも書いたのですが、伝熱研究の歴史を振り返ると、「技」の時代から学問への転身がとげられたのが大戦以後であると考えています。そこで大きな牽引力になったのが原子力利用と宇宙開発でした。この流れによって伝熱工学が成熟してきました。90年頃からは積極的に応用を掲げ、



複雑な現象にも伝熱研究の成果が浸透して行く段階になっていると私は考えています。これから、伝熱工学はバイオテクノロジー、医療技術やマイクロ・ナノスケール技術、材料加工といった広い分野へ浸透し、伝熱工学を切り口とした新しい技術の開発に貢献して行くこと確信しています。学問の発展は重要ですが、大学での工学研究はこれまでやや「純粋科学」の方に振れすぎたような気がします。工学は実社会に役立ち、生活を楽しみ、人を幸福にするものでなければなりません。一方では研究のシーズも実社会にたくさんこぼれています。

- 最近まで、共同研究となると大学が一企業のために働くように見なされて、やりにくいような雰囲気があったようですが。

そのとおりです。実は大学の特許に対する取り組みかたにも注文があります。現在大学からも多くの特許が申請されているのですが、実施例が多くありません。多くの大学にTLOと称して、会員企業から会費を集めて情報を提供する組織が作られているのですが、内輪で情報を廻すだけでは十分な社会貢献がなされていないと感じています。特許の流通については、大学側に理工学のわかる専任者をおいて、こちらの持つ特許情報を積極的に提供するとともに、需要を掘り起こす活動、言ってみれば「営業」活動が必要なのです。

- 今回の共同研究提案のいきさつは  
この提案は、実は別の区分に応募したのですが、「電子・情報」の区分に応募を薦められて再応募したのです。確かに電子・情報機器をプラスチック成形技術が支えている側面はありますね。先に述べたCDや、レーザ機器用のプラスチックレンズもそうですが、私の研究室ではLSI用コネクタについても取り組んでいます。最近のLSIは高集積化が進んでいるので電極数も多く、片側一面に電極が現れている形になります。これを基板に取り付ける場合にコネクタという3cm×3cm位のプラスチック板を使います。これに数百の接点があり、LSIを接合するわけです。そこでコネクタに「反り」があってはいけません。熱応力をうまく取り除いてやらなければなりません。そこにも伝熱工学の出番があります。

- 今回の共同研究では、パートナーとの関係はいかがでしたか。またこれからのご予定は  
カンタムエレクトロニクス(株)は、レーザ技術が専門なので、専門の強みを活かしてうまく協力体制が組めました。また、このプロジェクトは終了したのですが、今度は先方からレーザを使ったプラスチックの溶接について協力を求められています。プラスチックの溶接は部材内部の熱拡散が悪いので金属材料の溶接とは全く様子が異なります。ここにレーザ加熱を利用してみようというわけです。まだこれからも取り組むべき課題が沢山ありますね。

- どうもありがとうございました。

#### 参考文献および特許

- [1] 黒崎晏夫, 佐藤勲, 齋藤卓志: 日本機械学会論文集C編, 62-599 (1996) 2864.
- [2] 黒崎晏夫, 佐藤公俊, 繁友良太, 齋藤卓志: 第37回伝熱シンポジウム, 2 (2000) 495.
- [3] 特願平 11-343316「プラスチック成形加工方法」
- [4] 特願平 11-343395「プラスチック成形加工用スタンパー」

大田 治彦 (九州大学)

Haruhiko OHTA (Kyushu University)

## 1. はじめに

通常重力場における沸騰熱伝達の研究では、現象に対する物理モデルの構築を目的とした研究が多いが、多くの場合、その出発点となる現象観察や計測に費やされる労力は相対的に少なく、他の論文に委ねられる場合も多い。

微小重力環境を利用した理工学研究の一つの大きな特徴は、現象観察法や計測法の開発など、ハードウェアの工夫に大きなウエイトが置かれていることにある。以下に数年来、筆者が行ってきた微小重力環境下での沸騰実験をもとに、透明伝熱部を使用して得られた実験結果のなかで“常識と非常識??”として取り扱うにふさわしいものをいくつか紹介させていただく。とくに今から沸騰熱伝達に取り組まれる方々に、少しでも御参考になれば幸いである。

## 2. 透明伝熱管

従来、最も基本的な円管を対象とした強制流動沸騰においては、通常、加熱部に金属管を使用するために、沸騰様相の観察はガラス管を接続するなどで行われているが、沸騰の状況を直接観察することはできない。一方、ガラス管外に線状の発熱体を巻いたり、二重円管を用いて温水加熱とする方法は熱伝達データの計測という点において精度上の問題を残す。X線による管内透視も実験実施上、簡単には行えない。そこで加熱、観察、管内面温度計測を同時に可能とする透明伝熱管の構造を考案した。すなわち、Fig. 1 に示すように、パイレックスガラス管の内面に金の薄膜をスパッタリング法により一様にコーティングし、この薄膜に通電することにより加熱を行うとともに、この薄膜の電気抵抗値を測定して管内面温度に換算するものである。薄膜の厚さは $0.01\mu\text{m}$  オーダであり、管壁の透明性が確保されるので、観察結果と熱伝達データの直接対比が可能である。測定される管内面温度は電極間の平均温度であ

り、管軸方向の温度分布の測定には複数個の電極の設置を行う必要がある。基材ガラスの厚さを薄くすれば、現象の変化に対する応答はきわめて良好となる[1]。水平配置とした場合について、管周方向の温度分布を測定するために、管内面へのセンサー加工法について検討中である。

## 3. プール沸騰，狭あい流路内沸騰用透明伝熱面

プール沸騰および狭隘流路内沸騰を対象とし、伝熱面付着気泡底部の気液挙動観察、伝熱面局所熱伝達の評価を目的として、Fig. 2 に示すような透明伝熱面を製作した[2]。伝熱面の基材はサファイアガラスであり、その上に厚さ $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ の白金製薄膜温度センサーを複数個コーティングしている。一方、裏面には透明なITO膜をコーティングしており、これに直接通電することにより加熱が行われる。これら表面温度分布と裏面加熱熱流束を厚さ方向の境界条件として、伝熱面表面熱流束分布を基材内の非定常熱伝導計算により求め、局所熱伝達係数の評価を行っている。裏面加熱方式により、温度センサーと発熱体との間の電気絶縁が確実となり、同時に、表面加熱の場合に問題となる基材への熱損失の評価の曖昧さを排除している。ただしガラス基材の形状・寸法や物性が現象との連成により、熱伝達データに及ぼす影響については別途検討を要する。基材がガラスであるため、裏面からの気液挙動、とくに伝熱面付着気泡底部の液膜挙動の観察は容易であり、直接観察のほかに反射光を利用した気液両相の判定法[3]などが若干の工夫により適用可能である。サファイアガラスは高い機械的強度と同時に高い熱拡散率を持つために、裏面加熱としても発泡開始までの時間が短く、微小重力継続時間を有効に利用することができる。

さらに伝熱面上には熱伝達機構に直接関連したデータの一つとして、液膜厚さを測定するセンサーもコーティングされている。これは複数の電極を用い

で導電性液膜の電気抵抗値から液膜厚さを求める方法であり、従来、主として等温二相流の実験で使用されてきたものに大幅な修正を加えている。電極の個数と形状を最適化することにより、高精度の検定が困難な  $100\mu\text{m}$  以下の液膜厚さの測定を可能にしている[4]。

4. 環状液膜内の核沸騰とドライアウト

CHF 機構の議論などでしばしば問題となる中乾き度、高熱流束下での気液挙動について透明伝熱管を使用して調べてみる。Fig. 3はR113, 圧力  $P=0.1\text{MPa}$ , 質量速度  $G=150\text{kg/m}^2\text{s}$ , 入口乾き度  $x_{in}=0.26$ , 熱流束  $q=4\times 10^4\text{W/m}^2$  における気液挙動であるが、

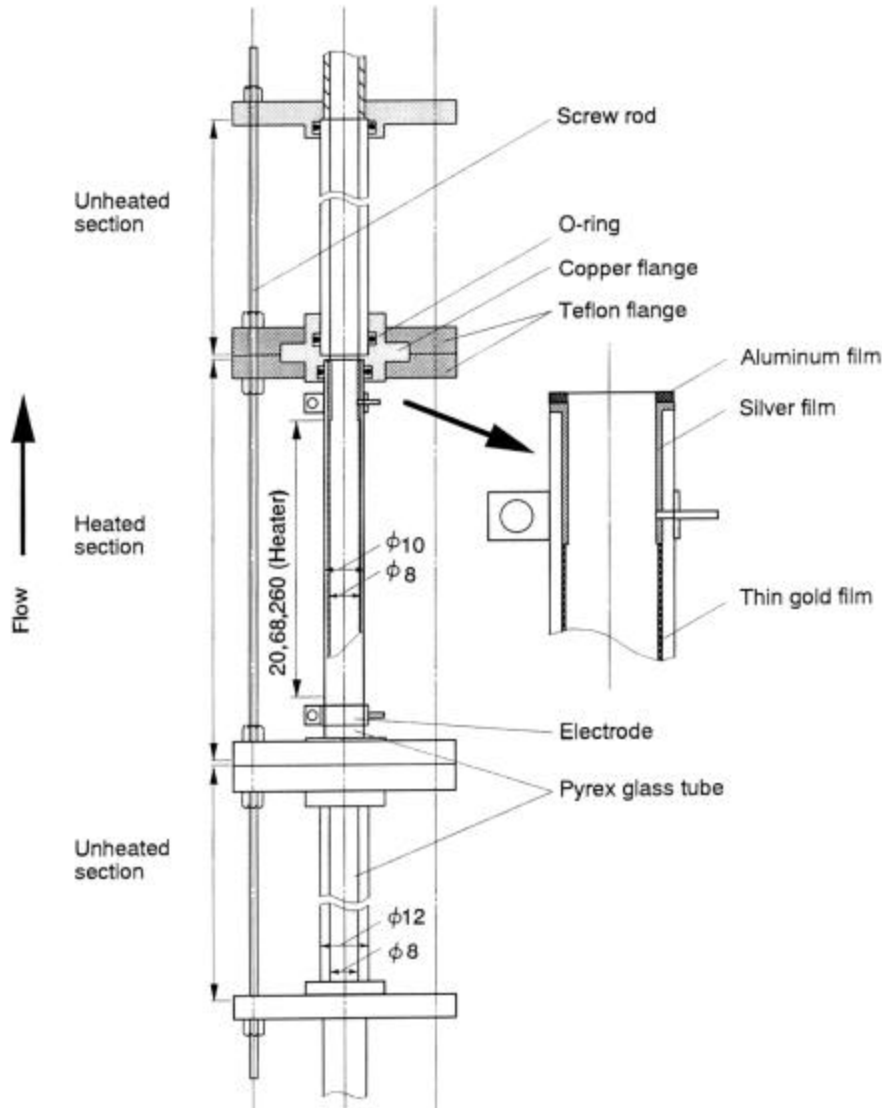


Fig.1 Transparent heating tube (Ohta et al. [1])

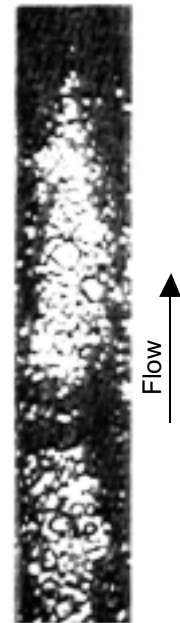


Fig.3 Nucleate boiling in annular flow regime (R113,  $P=0.1\text{MPa}$ ,  $G=150\text{kg/m}^2\text{s}$ ,  $x_{in}=0.26$ ,  $q=4\times 10^4\text{W/m}^2$ ) (Ohta et al. [1])

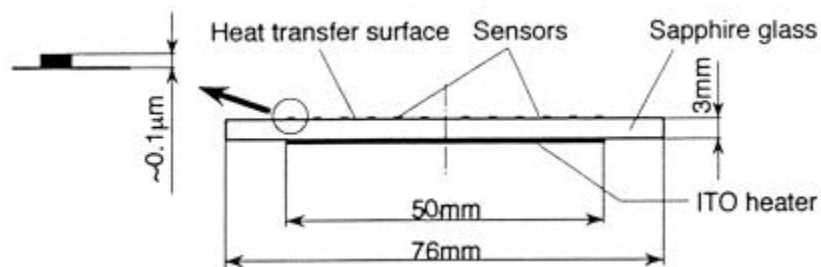


Fig.2 Transparent heating surface with thin film sensors (A model for pool boiling) (Ohta et al. [2])

環状液膜内で核沸騰を生じている様子が明らかである．従来提案されているボイリング数を含んだ熱伝達整理式や Chen の整理式 [5] によれば，二相強制対流の熱伝達への寄与が比較的小さい領域である．この条件下で重力レベルを変化させても，気泡径に変化はほとんど認められず，熱伝達も重力レベルに依存しない．

CHF 機構に関しては，低乾き度での DNB によるものと，高乾き度での環状液膜のドライアウトによるものとの間に中間的性質のものがあることが推定されている．この領域に対する実験結果の一例を示す．Fig. 4 は R113，圧力  $P=0.093$  MPa，質量速度  $G=150$  kg/m<sup>2</sup>s，入口乾き度  $x_{in}=0.2$  において観察された CHF 値よりもやや高い熱流束  $q=2.2 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup> における管内面温度  $T_w$ ，熱流束  $q$ ，熱伝達係数  $\alpha$  の経過を擾乱波の通過期間（図中の灰色の帯）と対比させて示したものである [6]．明らかにこれらの熱伝達データと擾乱波の通過との同期が認められ，擾乱波の通過後，熱伝達係数は一旦増加し，ついで減少する．図中の時刻の映像からもわかるように，環状液膜中に核沸騰気泡が観察され，また環状液膜は大きく拡大したドライパッチに囲まれ，リブレット状に残存している．熱伝達の増加は蒸発による基底液膜厚さの減少によるものであり，それに続く熱伝達の減少はドライパッチ面積の拡大によるものであると推定される．液体の補給は擾乱波の通過により行われるが熱流束が CHF 値よりも高い場合には，擾乱波通過直前における管内面温度の上昇を擾乱波通過によるクエンチングにより十分に低減すること

ができない．したがって擾乱波通過を繰り返すごとにドライパッチ面積が徐々に拡大してゆき，管内面温度は変動を繰り返しながら上昇してゆく．ドライパッチ面積が大きくなると，温度変動は小さくなる．入口乾き度が  $x_{in}=0.5$  でも定性的には同様であるが，CHF 熱流束を超えているにもかかわらず，擾乱波通過直前においても依然として数多くの液膜片が残存しており（エントレインメント液滴の再付着による可能性もある），管内面温度の上昇割合は乾き度 0.2 の場合よりも緩慢となる．以上は微小重力下での実験結果であるが地上でも定性的に大きな差異はない．

### 5. 核沸騰熱伝達に及ぼす重力の影響

この分野の研究を行っていて最も多く質問を受けるのは，微小重力下で核沸騰の熱伝達係数は通常重力下の値よりも増大するのか低下するのかということである．過去のプール沸騰の結果を見てみると，実験データごとにまちまちであり，両方の結果が報告されている．ここで興味あるのは，従来，報告されてきた核沸騰熱伝達の整理式に見られる重力の影響である．Fig. 5 に通常重力下における熱伝達係数との比  $\alpha/\alpha_g$  と重力レベル  $g/g_e$  との関係で示されるように，重力に関して正負両方の影響が見られる [7]．微小重力下でプール沸騰の実験を精度良く行うことはかなりの困難を伴い，飽和状態設定の精度，使用する設備固有の重力揺らぎや残留重力による気泡挙動への影響（例えば伝熱面からの離脱に関して），沸騰開始前に蒸気空間を作らないために沸騰容器中に導入されたベローズによる発生気泡の圧縮やそれに

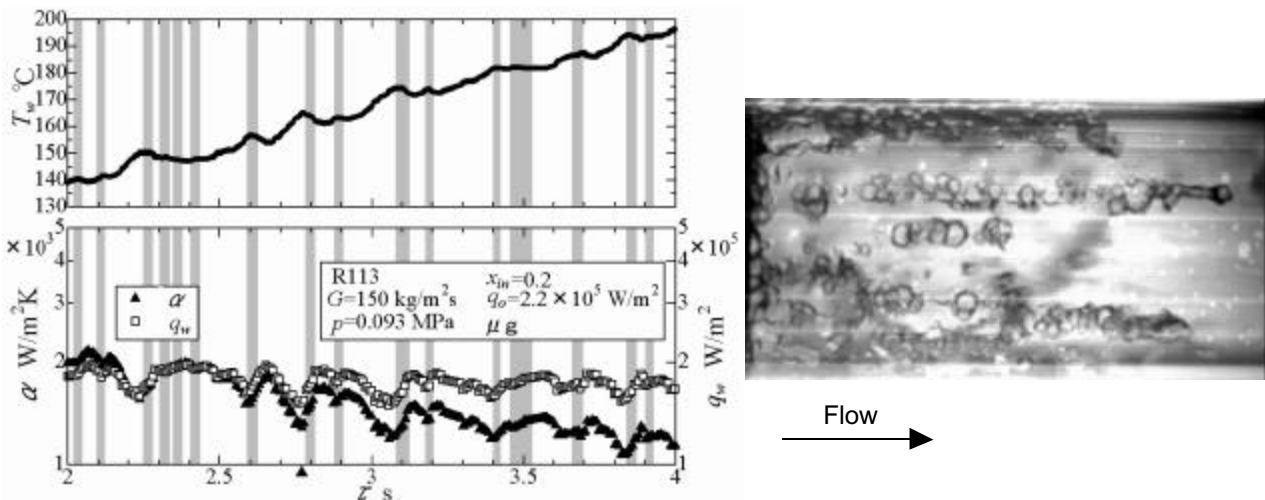


Fig.4 Heat transfer data and liquid-vapor behavior at dry out heat flux in moderate quality region (R113,  $G=150$ kg/m<sup>2</sup>s,  $P=0.093$ MPa,  $x_{in}=0.2$ ,  $q=2.2 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>) (Ohta et al. [6])

伴う凝縮などが問題となる。

微小重力下では条件により気泡が伝熱面上で大きく成長するので、短い周期で小さい気泡が離脱を繰り返す通常重力下のように、伝熱面平均（位置および時間平均）の熱伝達のみを議論する方法では現象を的確に捉えることが困難となる場合が少なくない。局所熱伝達を評価するために先に述べた伝熱面を考案し、エタノールを用いて減圧下  $P=0.01\text{ MPa}$  で行った航空機実験の結果について、Fig. 6 に熱伝達係数  $\alpha$  と重力レベルを対比させて示す。すなわち横軸は時刻で、重力レベルが放物状の飛行軌跡に沿って、通常重力(1g)、過重力(2g)、微小重力 ( $10^{-2}g$ , 便宜上  $\mu g$  と呼ぶ) の順で変化する。伝熱面は Fig. 2 の構造をもつ円板で、重力場において水平上向きとなるように配置されている。図より、伝熱面中心部では熱流束の大きさにより、通常重力下に比して、微小

重力下では熱伝達が増大する場合と低下する場合との両方のケースが認められる。これは透明伝熱面の裏面映像からも確認されているように、微小重力、低圧力下では合体泡底部における一次気泡の付着面積が大きく熱流束も高いために、伝熱促進に対してマイクロ液膜の蒸発による正の効果と、その中でのドライパッチが拡大することによる負の効果とがともに顕在化してくることを考えれば理解できる。ここで問題なのは、一次気泡が上部の合体気泡に吸収・合体されるまでの成長期間の反復に対して、準定常状態が維持可能かどうかである。ロケットを使用した低い重力レベル( $10^{-4}g$ )の実験では、飽和状態において、合体泡発生からしばらくの間は通常重力下の10倍程度の伝熱促進が観察されたが、15秒後には準定常状態を保ち得ず、合体泡底部に巨大な乾きが広がって CHF に至る様子が観察された[8]。

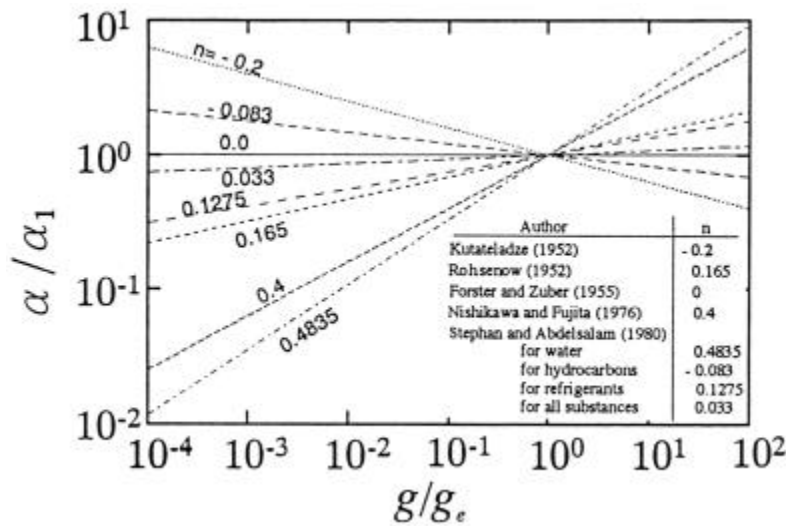


Fig.5 Effect of gravity observed in the existing correlations for nucleate boiling heat transfer (Ohta et al. [7])

- No.1 ( $r=3.2\text{mm}$ )
- No.2 ( $r=6.2\text{mm}$ )
- No.3 ( $r=9.2\text{mm}$ )
- No.4 ( $r=12.2\text{mm}$ )
- No.5 ( $r=15.2\text{mm}$ )
- No.6 ( $r=18.2\text{mm}$ )
- No.7 ( $r=21.2\text{mm}$ )
- No.8 ( $r=24.2\text{mm}$ )

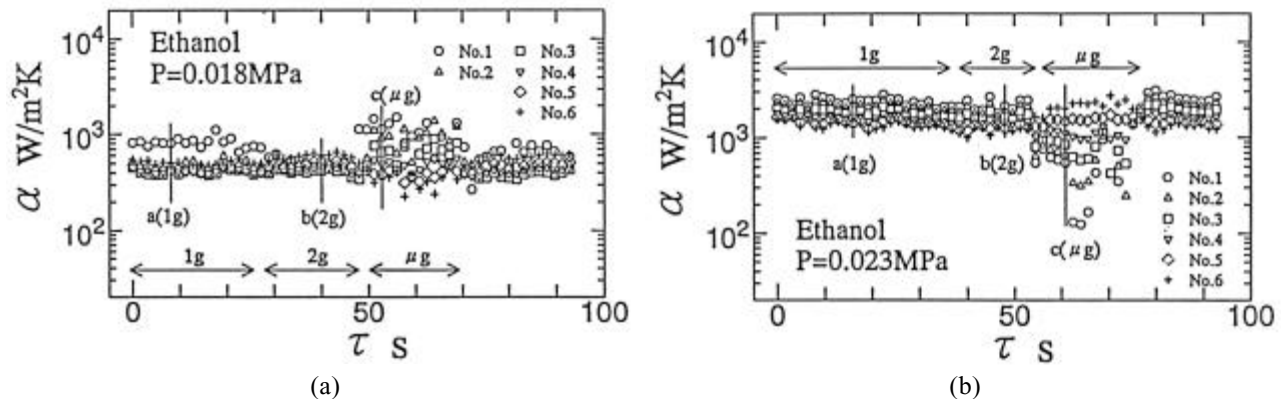


Fig.6 Different two trends of gravity effect on nucleate boiling heat transfer; (a) heat transfer enhancement, (b) heat transfer deterioration

6. 狭あい流路内強制流動沸騰

狭あい流路内沸騰の実験に際しては、伝熱面に流入する液体の条件を厳密に規定し、とくに気泡発生量すなわち熱流束によって液体速度が変化しないよう、強制流動系を採用した。狭あい流路内沸騰では管内流と同様に、一般に流路に沿って流動パターンが変化するため、熱伝達も流れ方向に変化するとして取り扱う必要がある。したがってプール沸騰の場合と同様に、薄膜温度センサーを備えた透明伝熱面を導入して、局所熱伝達の評価を可能とした[9]。実験は航空機により行い、機内圧約  $P=0.093$  MPaのもとに、蒸留水を使用して行った。テストセクションは重力場に対して垂直上向き流となるように配置し、テスト部入口における液体速度はすべての実験を通じて  $u_{in}=0.06$  m/s で一定としている。

Fig. 7は間隙幅  $s=2$  mm, テスト部における入口液体サブクール度  $\Delta T_{sub,in}=0$  K, 平均熱流束  $q_o=1.4 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>において、幅 40 mm, 流れ方向長さ 70 mmの伝熱面の中央位置における表面温度  $T_{w,M}$ , 局所熱流束  $q_M$ , 局所熱伝達係数  $\alpha_M$ を重力レベル  $g/g_e$ と対比させて示したものである。また各重力レベルにおいて典型的な映像も併せて示している。重力レベルによらず、扁平気泡は周期的に離脱する。1g下では扁平気泡底部におけるドライパッチの拡大による表面温度の上昇が頻繁に見られるが、2g下では認められない。μgでは1g下と同様の表面温度の上昇が見られる。これに対応して1gおよびμg下で局所熱流束や局所熱伝達係数の低下が観察されるが、μg下ではこれらの値が2g下の値よりも高くなる瞬間が明確に認められる。これはドライパッチに覆われて高温となっていた伝熱面が扁平気泡の離脱時に、バルク液によりクエンチされる瞬間に対応している。μg下における伝熱劣化を防止する目的で、入口液体サブクール度のみを  $\Delta T_{sub,in}=10$  Kに増加させたところ、Fig. 8に示されるように、μg下で大きな扁平気泡が停留する結果となった。上流部で凝縮が促進されるために成長が停止し、離脱周期も長くなる。液体は画面上下のフランジに隠れた部分を流れている。伝熱面中央部には大きなドライパッチが拡がり、液体サブクール度の増加がかえって伝熱劣化を強調する結果となった例である。

つぎに平均熱流束を  $q_o=1.1 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup>として、間隙幅を  $s=2$  mmから  $s=0.7$  mmに減少させた場合、Fig. 9の結果を得た。気泡は発生と同時に扁平とな

り、成長速度がきわめて大きく流路を閉塞することになるので、一定の液体供給流量を維持する結果、扁平気泡と液体とが非常に早い速度で複雑に入り組む。この結果、ドライパッチが大きく伸展することによる伝熱劣化はごく一瞬であり、すぐにバルク液体の流入によりクエンチされるので、熱伝達の変動幅は大きいものの、比較的安定した除熱効果が期待できる。またこのような系においては重力の影響は認められないので、微小重力環境下において実際に応用する場合には、地上での試験結果が適用でき、同一熱流束で間隙幅  $s=2$  mmとした場合よりも安全な作動が可能となると考えられる。

7. おわりに

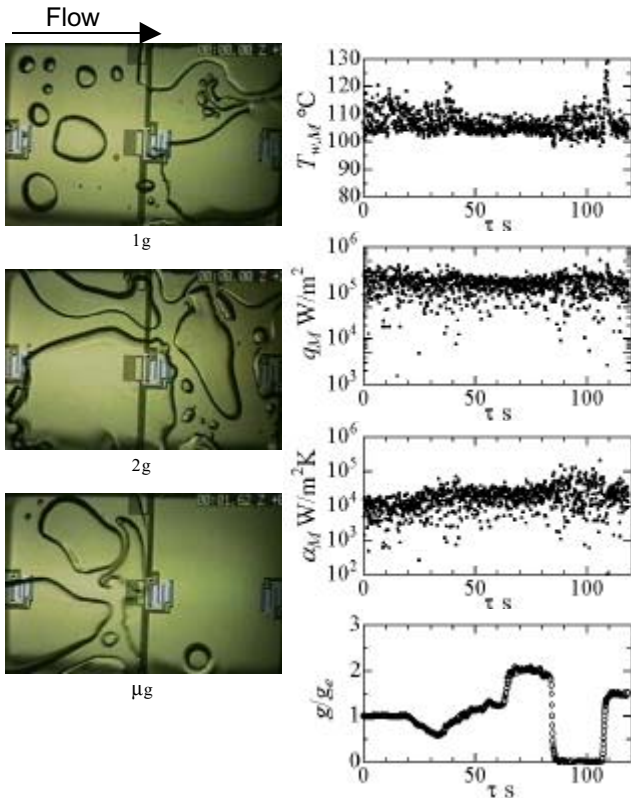
プール沸騰では銅ブロックの伝熱面が従来より、一つの“標準”として使用されており（私自身も使用しているので大変恐縮ですが）、実用面でのデータを蓄積してきた。しかしこの場合、表面温度の一意性は事実上問題ないとしても、表面熱流束分布に関しては、一般に気泡底部の気液挙動に連成して変化するものとして取り扱わなければ、少なくとも現象解明に寄与するデータは得にくいと考えられる。しかし銅ブロック内部のわずかな温度の差異から表面熱流束分布を精度良く推定することはきわめて困難で、これが先に述べた透明伝熱面の製作を試みた動機でもある。

上で紹介した一連の研究は過去数年間における宇宙開発事業団、宇宙科学研究所、(財)日本宇宙フォーラム、(財)宇宙環境利用推進センターの各機関からの支援を受けて行われたものである。

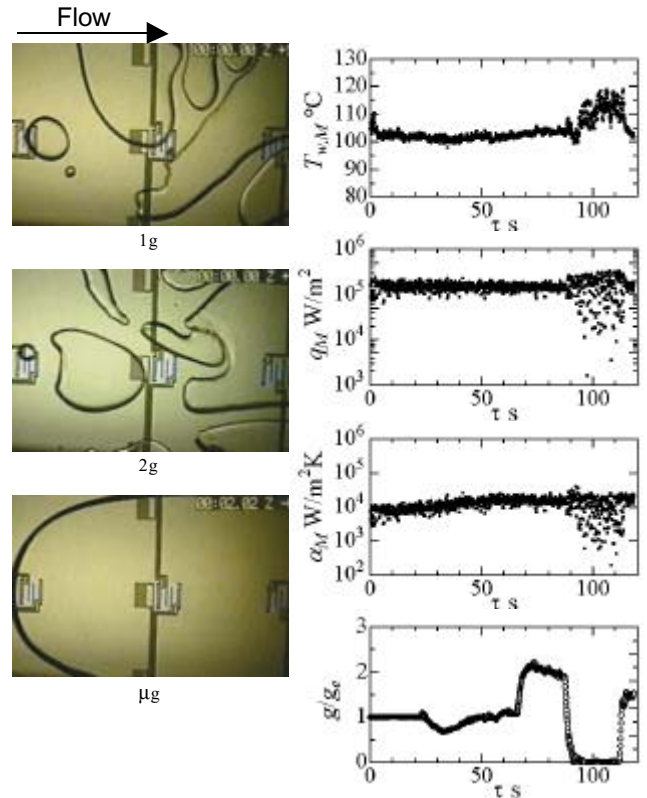
記号

$G$ : 質量速度、 $g/g_e$ : 重力レベル、 $n$ : 整理式中の重力の指数、 $P$ : 圧力、 $q$ : 熱流束、 $q_o$ : 付与平均熱流束、 $r$ : 半径、 $s$ : 間隙幅、 $T_w$ : 伝熱面表面温度、 $u$ : 液体速度、 $x$ : 乾き度、 $\alpha$ : 熱伝達係数、 $\alpha/\alpha_0$ : 通常重力下と任意の重力における熱伝達係数の比、 $\Delta T_{sub}$ : 液体サブクール度、 $\tau$ : 時刻、(下添字)<sub>in</sub>: 加熱部入口、<sub>M</sub>: 伝熱面中央局所値

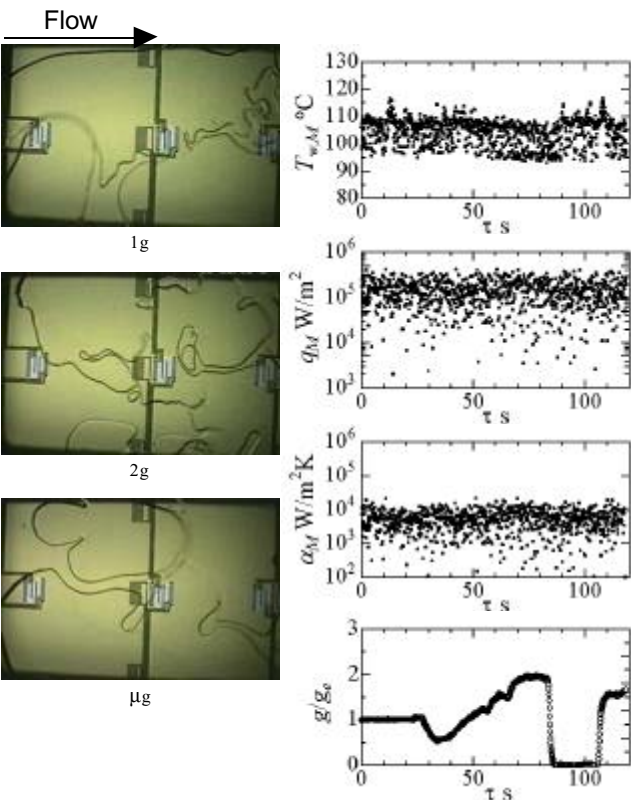




**Fig.7** Nucleate boiling in a narrow channel  
(Water,  $P=0.093\text{MPa}$ ,  $u_{in}=0.06\text{m/s}$ ,  
 $s=2\text{mm}$ ,  $\Delta T_{sub,in}=0\text{K}$ ,  $q_o=1.4\times 10^5\text{W/m}^2$ )



**Fig.8** Results for increased liquid subcooling at the inlet  
(Water,  $P=0.093\text{MPa}$ ,  $u_{in}=0.06\text{m/s}$ ,  
 $s=2\text{mm}$ ,  $\Delta T_{sub,in}=10\text{K}$ ,  $q_o=1.4\times 10^5\text{W/m}^2$ )



**Fig.9** Results for decreased gap size  
(Water,  $P=0.093\text{MPa}$ ,  $u_{in}=0.06\text{m/s}$ ,  
 $s=0.7\text{mm}$ ,  $\Delta T_{sub,in}=0\text{K}$ ,  $q_o=1.1\times 10^5\text{W/m}^2$ )

文献

- [1] Ohta H. et al., Proc. 4th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., 4 (1995) 547.
- [2] Ohta H. et al., ASME HTD- 354 (1997), 249.
- [3] 鳥飼・山崎, 機論, 31-223 (1965), 440.
- [4] Ohta H., Inoue K., Yoshida S. and Morita T.S., Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation, Russian Academy of Sciences, 539 (1997).
- [5] Chen J.C., Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 5 (1966), 322.
- [6] Ohta H. et al., Proc. 3rd European Thermal Sciences Conf., Heidelberg, Germany (2000) (to be published).
- [7] 大田・井上・山田・吉田, 機講論, 944-4, (1994) 69.
- [8] Ohta H. et al., Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf., 2, (1998) 401.
- [9] Ohta H. et al., Proc. 5th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., AJTE 99-6421 (1999) CD Rom.

## 分子伝熱懇話会（立山）での討論

Discussions on Molecular Heat Transfer Seminar in Tateyama

芝原 正彦 (大阪大学)

岩城 敏博 (富山大学)

Masahiko SHIBAHARA (Osaka University)

Toshihiro IWAKI (Toyama University)

マイクロテクノロジー・ナノテクノロジーの急速な進展にともない、原子・分子レベルにおける熱流体現象が重要となり、このような現象の理解や応用のために、分子動力学法などの手法を用いた研究が大変盛んになってきている。これまで、このような方法で何が理解され、何に活用されてきたのか、これから何をすることが重要となってくるか、また、従来のマクロな手法や物理量とどのように結び付けられるか、そして工業的に制御できる物理量がこのようなレベルの現象にどのような影響を与えるかなど、本質的、基本的な問題ははじまったばかりであり、議論の積み重ねが重要だと考えられる。このようなことから、伝熱シンポジウム「マイクロスケール」の会場で、時間に制限される講演会のほかに徹底的な討論が必要であるとの声が多く聞かれた。そこで、自由な参加と徹底討論のためには、以前に行ったような「懇話会」形式が適当であろうと考え、伝熱学会の会誌とHPに「懇話会」を案内し、参加を呼びかけた。「懇話会」は8月24日から26日にかけて、富山県立山雷鳥荘にて行われた。そして、参加できなかった会員に概略だけでも報告した方がよいとの意見になった。以下に概略を報告させて頂く。

8月24日の午後に富山駅に集合し、電車、ケーブルカー、高原バスを経て、夕方に室堂平の雷鳥荘に到着した。夕食後、早速セミナーがはじまり、26日の朝まで、懇話会が行われた。学会の講演では発表時間が限定されており、とかく研究成果中心の一方通行かつ社交辞令的な議論となりがちである。このようなことから、本懇話会では討論を主として、講演者と参加者が時間無制限に討論をするという形式で進められ、1講演者あたり1時間から2時間程度の討論が行われた。以下にセミナーの時間の経過とともに、その一部を会話形式で紹介する。ただし、下記の討論は単なる批判だけではなく、それぞれの論拠が示されていたが、詳細は割愛する。

## 1. 液膜の波状化を利用した汚染ガス除去の促進

講演者「凝縮液膜流と気流を対向させ、気流せん断力による凝縮液膜の波状化およびフラッディング現象と凝縮速度促進（ガス吸収速度の促進）のメカニズムについて実験的に研究している。」

- A「凝縮液膜の波状化とフラッディングの条件は？」  
 B「通常の化学工学的な手法にくらべて汚染ガスの除去の効率はどう上がるのか。」  
 C「フラッディング現象と間欠泉の現象は同じか。フラッディング現象の起こる条件を調べると面白いのではないか。」  
 D「この手法によりどれくらい伝熱促進ができ、どのような現実的な応用が見込めるのか。」  
 E「汚染ガス除去の促進のメカニズムはどのようなものと考えられるか。」

## 2. 気体の壁面への析出過程

講演者「固体表面の分子レベルの物性が熱流体現象に影響する場合、つまり、壁面での水中の溶解気体の析出過程を解析するために、窒素分子、水分子系で分子シミュレーションを行った。壁面が撥水性分子の場合と金属の場合で解析を行って比較した。」

- A「水分子、窒素分子、壁面の疎水性分子、金属分子間のポテンシャルがシミュレーション結果を大きく左右する問題となるので、ポテンシャルをもっと検討する必要があるのでは。」  
 B「完全に物理的にフラットな界面でシミュレーションを行っているが、壁面の疎水性、親水性は、壁面-液相間ポテンシャルだけではなく、界面の物理的構造によっても大きく影響するのではないか。そのような構造的な要因をポテンシャルの強弱で置換えることが可能か。」  
 C「析出過程をシミュレーションするには、物理的規模、計算時間が十分ではないのではないか。」



### 3. 熱物性値の予測

講演者「分子軌道法により、角度依存性を含むポテンシャル面を自ら作成し、熱物性値を分子シミュレーションにより予測することを目的としている。」

A「より正確なポテンシャル面を用いても、レナードジョーンズポテンシャルのような簡単なポテンシャルを用いても、計算される物性値は大きくは変わらないのではないか。」

B「必要な分子間ポテンシャルの精度は、計算目的とする熱物性値に依存するはずであり、一般的なポテンシャルというのは存在しないのではないか。何の物性値を計算するのが目的か？」

C「いわゆる熱物性値というのは、分子的には時間・空間的に平均されたものだと考えられる。時間的、空間的に平均されていない物性について論じる場合には、やはり分子間の正確なポテンシャル面が必要となるはずである。」

D「分子軌道法でさまざまな幾何配置のエネルギーを求めて、データベース化すればポテンシャル関数は必要でなくなると考えられる。」

E「単純な2原子分子間のポテンシャル面でも、多くの自由度があり、それらのすべてに対してポテンシャル面を求めることはきわめて難しい。それを工業的に用いられている複雑な分子で行うことは事実上不可能である。」

F「計算機の進歩にしたがって、分子軌道法の計算は高速で行うことができるようになっており、計算時間は問題でなくなってきた。」

G「既存の関数にフィッティングさせることを目的として、代表的な幾何配置に対してより精度の高い分子軌道計算を行った方が現実的ではないか？」

H「理想的にはポテンシャルの精度が高い方がよいので、このような正直な方法でのアプローチも必要である。また3体間の影響も考慮が必要だろう。」

### 4. 炭素ナノチューブの実験とシミュレーション

講演者「LaやNiなどの金属原子のシーディングをした場合の炭素クラスター生成過程の分子実験や、分子動力学シミュレーションを行った。また炭素ナノチューブの生成実験を行った。このような炭素ナノチューブを用いた応用として、水素吸蔵などの吸蔵過程のシミュレーションも可能であ

り、実験値をおおよそ予測できた。炭素ナノチューブはさまざまな微小機械部品として応用が考えられ、その熱伝導率や物性は非常に興味深い未知である。」

A「LaやNiなどを含む場合の炭素クラスター生成過程の分子シミュレーションでは、それらの金属と炭素間のポテンシャルが大きく影響するはずであるが、どのように扱っているのか？」

B「分子軌道計算を用いて、近接位置と炭素クラスターサイズにおける効果や電荷の移動を既定の関数に組み込むポテンシャルを自ら作成して用いている。すべての幾何的配置に関して分子軌道計算を行うことは不可能であるから、前節の議論にあったような完全なポテンシャル面を作成することは不可能である。しかし、クラスターサイズと安定性をシミュレートするという観点からは、十分に妥当なポテンシャルを用いていると考える。」

C「やはり、分子軌道法を用いて、より正確なポテンシャル面を用いるべきである。」

D「あなたのような正当で正直な研究はできない。」

E「分子軌道法にも限界があり、C60のような大きなクラスターと金属原子からなる電子が比較的多い系ではまだまだ計算的に難しいはずであり、このような方法は妥当である。」

F「LaやNiなどの金属原子は、炭素ナノチューブの成長過程でどのような作用をしているのか？触媒的な作用なのか。」

G「単純な触媒ではなく、さまざまな説があり、よく分かっていない。」

H「分子シミュレーションは実験結果を理論的に説明するために行っている。分子シミュレーションは実験結果をよく説明できている。また生成過程の説明も可能である。」

### 5. フォノン、熱伝導過程

講演者「数十万個以上の分子からなる大規模系において、定常、非定常の固体の分子動力学解析を行い、フォノン解析を行った。また、分子間ポテンシャルパラメータは全く同じで、質量のみ違う系において、フォノンの散乱や温度ジャンプの現象について解析した。」

A「薄膜などの熱伝導の物理的な解析は、フォノンの概念に基づく解析が有効であり、個々の分子運動とのつながりを明らかにすることが重要である。」

- B「分子動力学解析から、フォノンの自由行程などを決めて熱伝導率を計算した。」
- C「極低温で分子振動が調和的である場合をシミュレーションしても、その振動特性には非調和性がみられて、フォノンの概念とのつながりは難しいのではないか。」
- D「フォノンのような巨視的な概念が成立するには、さらに大きな系が必要ではないか。」
- E「個々の分子の運動と従来からあるフォノンなどの概念とのつながりを明らかにする必要がある。マクロからみたミクロな現象という意味でこれらのことを考えることは非常に重要ではないか？」
- F「このような解析からフォノンの概念が説明できているといえはできているし、できないといえはできない。」

#### 6. ジュール熱, ペルチェ効果解析のための基礎式

- 講演者「電子デバイスや薄膜中のジュール発熱, ペルチェ効果などのエネルギー輸送特性を, 物理化学的に解析するための基礎式を導出した. 局所密度汎関数法を用いて薄膜中の電子のエネルギー分布を求め, そのゆらぎから線形応答理論, 久保の公式より, 電気伝導度や電子と格子間のエネルギー輸送 (吸熱, 発熱量) を解析することを考えた。」
- A「密度汎関数法による電子状態の分布は, 固体や界面の周期性を基に展開をするはずであるが, 目的の電子デバイスのエネルギー輸送について解析できるのか。」
- B「このような基礎式からは定常状態の解析しかできないはずであるが, 発熱, 吸熱の特性は理論的に解析できるのか。」
- C「電子と格子の間の相互作用はどのように記述されているのか, あるいはこの手法で記述可能か?」
- D「本当の問題は, 自由電子と格子の間のエネルギー輸送をどのように表し, 自由電子の移動をどのように表現するかであると考えられるが, このような基礎式でそれらが解析可能か?」
- E「局所密度汎関数法を用いた方法は, 固体や界面の電子状態の解析には適しているが, 第一原理分子動力学法として解析する場合には, 格子系のスケールリングなどが必要になってくる. 計算技術的に電子-格子間のエネルギー輸送が解析できないのではないか。」

- F「問題点はあるが, 現在いろいろ計算手法を考案中である。」

#### 7. 薄膜のジュール発熱過程

- 講演者「薄膜の構造とジュール発熱の関係, 電子の移動過程と薄膜中の発熱過程を解析する手法を考えるために, 量子分子動力学的な解析手法を考えて, 薄膜温度や薄膜厚さと発熱量や電子移動距離の関係を解析した。」
- A「格子と自由電子間のポテンシャルの物理的根拠がわからない。」
- B「格子と自由電子間は湯川ポテンシャルや物理的な意味の明確なポテンシャルを使わなければならない。」
- C「ジュール発熱が生じるようなポテンシャルを用いた当たり前の解析ではないか。」
- D「格子と自由電子間ポテンシャルの意味は明確ではないが, それをパラメータとしてその強弱として論じており, 固体中の自由電子ガスを模擬するポテンシャルを用いた場合に, 自由電子と格子の衝突として物理モデルを考えられるかどうかを解析することを第一目的としたのでこのようなポテンシャルを用いている。」
- E「格子というのは一体何のことか? この物質は半導体薄膜か, それとも金属薄膜か?」
- F「自由電子によるエネルギー輸送がMDで解析できるかどうか, その相互作用のモデルはどのようなモデルがよいかを解析することを目的としている. したがって半導体のように自由電子が薄膜中に1個あり, 移動する過程を解析していると考えている。」
- G「言葉数は多いが何がしたいのかわからない。」
- H「薄膜中の電子移動というには, 薄膜の長さ方向が十分でなく電子の境界条件がおかしいのでは。」
- I「このようないかげんな解析では, だれも信じないだろう。」
- J「そうではない. 簡潔な表現で現象を示せば, それに越したことはない. その点を評価できる。」
- K「どのようにすれば, 分子レベルにおける自由電子による薄膜中の発熱過程やエネルギー輸送が解析できるか, それ自体問題である。」

#### 8. 物質拡散の分子動力学的理解

- 講演者「異分子が混合されている場合の相互拡散と自己拡散の現象について, 濃度勾配がある場を作

り、拡散速度や拡散現象の作用について解析、検討を行った。また相互拡散と自己拡散速度の理論式との対応も検討した。」

- A「拡散現象を解析するには解析時間が短過ぎるのではないか。また系にボイドがみられるが、圧力テンソルはどのようになっているのか？」
- B「境界条件の検討が必要である。」
- C「自己拡散と相互拡散の違いは何か？同種の分子をAとBと区別した場合の拡散現象と、自己拡散の違いは何か？」
- D「エントロピの観点からの記述は理論式にどのように表れてくるのか？」
- E「自己拡散速度と相互拡散速度は、理論的に導出した式としては異なったものとなっている。」

その他、エネルギー式、運動量の式、質量保存式とニュートンの方程式の基礎的な関係や、表面物質による摩擦低減の実験についても議論がなされた。

前述の話題のいくつかは研究としての完成への道りは遠く、その講演者は、その基礎式や境界条件、

果ては問題設定・前提条件すら、「誤っているのではないか？何を言っているのか分からない。」と言われるような次第である。しかし、いずれの話題をとっても、もし討論された問題点が解決され、その現象が体系的、理論的に理解でき、そして工学的応用へと結び付くことができれば、現象としては小さいが、大きな工学的前進が期待できるように感じられる。また、公式の講演会では頂けないような率直な意見も、その研究について出し惜しみすることなく率直に一緒に考えて、意見・批判を頂いたと考えることができ、いずれをとっても貴重な意見であった。

懇話会が行われた三日間は天候に恵まれ、立山の美しい景色を毎日、窓外に眺めることができた。25日の午後には、セミナー場所である雷鳥荘近郊にある地獄谷の散策、懇話会の終了後の26日の朝には、雄山の頂上へ全員で登り、頂上からの大パノラマを堪能することができた。懇話会の討論とともに、非常に有意義な体験であった。

#### 編集部会長から

今回の「懇話会」と称して行われたセミナーの記事が会の主催者から自主的に投稿されました。主催者にその経緯を伺ったところ、伝熱学会本部および支部に関連した行事では無く、伝熱シンポジウムの討論の中から自発的に行われたものだとの事でした。記事の内容は率直な意見が述べられ、このような活動が行われていることを伝熱学会会員に伝えることは意義深いことと考え、ここに記事として掲載いたしました。本来、研究交流は活発な討論の中ではぐくまれていくものであり、学会としてはこのような会員の活動をサポートしていくことが重要だと考えております。今後も会員諸兄からのこのような内容の記事の投稿を歓迎いたします。

(慶應義塾大学 菱田公一)

#### 「伝熱」vol.39, No.156の語句の修正と補遺

	誤		正
p.3 左欄 下から4～3行目	パッシブクリーニング	→	パッシブクーリング
p.5 右欄 中央部	JIKA	→	JICA

図1は九州大学総理工片山忠久教授が理科年表をもとに作成したものである。

図2は、澤地孝男ほか9名、「用途別エネルギー消費量原単位の算出と推定式の作成：全国的調査に基づく住宅のエネルギー消費とライフスタイルに関する研究(第1報)」日本建築学会論文報告集、第462号、(1994)41-48の一部をグラフ化したものである。

行事カレンダー

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2001年					
5月	23日(水)~25日(金) 第38回日本伝熱シンポジウム (大宮,ソニックシティー)	未定	未定	第38回日本伝熱シンポジウム準備委員会 委員長 望月貞成 東京農工大学工学部機械システム工学科	

本会共催,協賛行事

開催日	行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2000年					
9月	21(金)~22日(土) 日本睡眠環境学会主催 第16回睡眠環境シンポジウム (大阪ガーデンパレス)	'00.7/10	'00.8/4	第16回睡眠環境シンポジウム実行委員会 近畿大学理工学部 梶井研究室 Tel:06-6721-2332, Fax:06-6326-0214 E-mail:r9kajii@coed.kindai.ac.jp	
9月	26(火) 日本混相流学会主催 MEMSワークショップ「MEMSの可能性と混相流」 (日本大学理工学部磯谷河台校舎,9号館2階921室)	'00.8/31		日本大学理工学部機械工学科 木村 元昭 Tel:03-3259-0750, Fax:03-3293-8254 E-mail:kimura@mech.cst.nihon-u.ac.jp http://www.mech.cst.nihon-u.ac.jp/society/multiPhase/int.htm	
9月	27日(水)~29日(金) 日本流体力学会 集中講義 「流体・粒子混相流入門」 (工学院大学新宿校舎 3階大教室)	'00.9/13		大阪大学工学研究科 辻 裕 Tel & FAX:06-6879-7315 E-mail:tsuji@mech.eng.osaka-u.ac.jp http://www-mupf.mech.eng.osaka-u.ac.jp/nyumon.html	
10月	7日(土)~8日(日) 可視化情報学会全国講演会(札幌2000) (北海道工業大学)	'00.6/12	'00.7/31	(社)可視化情報学会事務局 Tel:03-5993-5020, Fax:03-5993-5026 http://www.vsj.or.jp/svs2000/	
10月	18日(水)~20日(金) 第21回日本熱物性学会シンポジウム (名古屋市工業研究所)	'00.6/16 (講演申込) '00.9/18 (参加申込)	'00.9/11 必着	第21回日本熱物性学会シンポジウム実行委員会 名古屋大学工学研究科 八田一郎 Tel:052-789-4466, Fax:052-789-3706 E-mail:a40114a@nuccl.ac.nagoya-u.ac.jp http://www.soc.nacsis.ac.jp/jstp2	
10月	19日(木)~20日(金) 日本機械学会 流体工学部門 講習会 流体解析用ツールとしての「使えるCFD技術」最前線 (日本機械学会 会議室)	定員80 になり次第		申込先 日本機械学会 流体工学部門 事務局 小泉まり子 Tel:03-5360-3500	
11月	5日(日)~6日(月) 人間-生活環境系会議 第24回人間-生活環境系シンポジウム (早稲田大学 国際会議場 井深ホール)	'00.7/21	'00.9/23	人間-生活環境系シンポジウム実行委員会 早稲田大学 宮崎 正巳 Tel:042-947-6760, Fax:042-938-1318 E-mail:hes2000@jshes.com	
11月	10日(金)~11日(土) 第4回オーガナイズド混相流フォーラム OMF'00-Takayama(混相流の乱流・ダイナミクス) (高山市飛騨半世紀世界産業振興センター)	'00.7/31	'00.10/6	名古屋大学大学院人間情報学研究科 峯村吉泰 Tel:052-789-4783 E-mail:mine@info.human.nagoya-u.ac.jp 内山和実 Tel:052-789-5187 E-mail:uchiyama@info.human.nagoya-u.ac.jp http://www.flow.human.nagoya-u.ac.jp/JSMF/OMF/OMF00/	
11月	16日(木) 日本原子力学会熱流体部門主催 「格子ガス法ならびに格子ボルツマン法による流体解析入門」 初心者向け講習会(筑波大学 大会館)	'00.10/31 (定員50名)		筑波大学 機械工学科 阿部豊 Tel&Fax:0298-53-5266 E-mail:abe@kz.tsukuba.ac.jp	
11月	21日(火) シンポジウム「快適と健康をもたらす次世代の空調技術」	'00.11/7		(社)自動車技術会 事務局 小嶋ふみ子 Tel:03-3262-8213, Fax:03-3261-2204 E-mail:komine@jsae.or.jp http://www.jsae.or.jp/	
11月	29日(水)~12/1日(金) 第38回燃焼シンポジウム (アークロス福岡)	'00.7/28	'00.9/18	九州大学大学院工学研究科燃焼科学専攻 第38回燃焼シンポジウム事務局 Tel:092-642-3467(城戸),3404(村瀬), 3468(北川),Fax:092-641-9744 E-mail:sympo38@comb.mech.kyushu-u.ac.jp http://www.soc.nacsis.ac.jp/cs2/cs2-j/symp38	
12月	14日(木)~15日(金) 第9回微粒子化シンポジウム (つくば市 工業技術院)	'00.10/6 (講演申込) '00.11/24 (参加申込)	'00.11/10	日本液体微粒子化学会事務局 慶應義塾大学理工学部 機械工学科 徳岡研究室 事務局長 徳岡直静 〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1 Tel&Fax:045-566-1514 E-mail:tokuoka@mech.keio.ac.jp	
12月	21日(木)~23日(土) 日本数値流体力学会 第14回日本数値流体力学シンポジウム (中央大学理工学部 春日キャンパス)	'00.9/20		東京理科大学 山本 誠 Tel:03-3260-4272 内3352,Fax:03-3260-4291 E-mail:yanamoto@me.kagu.sut.ac.jp http://www.rs.kagu.sut.ac.jp/~yanamoto/cfd14.html	

## 行事カレンダー

### 本会共催，協賛行事（つづき）

2001年					
7月	12日～13日	混相流シンポジウム2001 (北九州国際会議場)			九州工業大学工学部機械知能工学科 湯 晋一 Tel:093-884-3174, Fax:093-871-8591 E-mail:yuu@mech.kyutech.ac.jp
7月	12日～13日	日本混相流学会 年会講演会2001 (北九州国際会議場)			九州工業大学工学部機械知能工学科 湯 晋一 Tel:093-884-3174, Fax:093-871-8591 E-mail:yuu@mech.kyutech.ac.jp
10月	4日～5日	東北大学流体科学研究所 主催 The First International Symposium on Advanced Fluid Information AFI-2001 (宮城蔵王ロイヤルホテル)			東北大学 流体科学研究所 円山 重直 Tel & Fax:022-217-5243 E-mail:maruyana@ifs.tohoku.ac.jp

## 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 公募のお知らせ

日本伝熱学会の内規に基づき、学術賞、技術賞、および奨励賞が設けられています。つきましては、下記の要領に従って本年度の募集を行いますので、自薦、他薦を問わず応募下さいますようお願い申し上げます。

### 記

#### 1. 対象となる業績

- ・ 学術賞の対象は、原則として、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、**Thermal Science and Engineering** 誌またはその他の国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱研究論文とする。
- ・ 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術とする。
- ・ 奨励賞の対象は原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、またはこれに準ずる者（大学卒業後5年以内の者）とする。
- ・ 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限る。
- ・ 学術賞は2件程度、技術賞は1件程度、奨励賞は4件程度とする。

#### 2. 選考方法

- ・ 学術賞・技術賞・奨励賞の選考は、「表彰選考委員会」が「日本伝熱学会賞審査・選考方法内規」によって行う。
- ・ 表彰選考委員は、公募の他に学術賞・技術賞・奨励賞候補を推薦することができる。

#### 3. 提出書類

所定用紙「日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞 申請書・推薦書」 1通  
論文抜刷または技術内容参考資料 6部  
日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部

#### 4. 提出先

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1  
岐阜大学工学部 機械システム工学科  
熊田雅弥宛  
TEL 058-293-2530 FAX 058-230-1892

5. 提出期限：平成13年1月9日（火）必着

6. 問い合わせ先：提出先に同じ

## 第 38 回日本伝熱シンポジウム開催案内

開 催 日 平成 13 年 5 月 23 日 (水) ～ 25 日 (金)  
会 場 大宮ソニックシティ (〒 331-8669 埼玉県大宮市桜木町 1-7-5, TEL : (048)647-4111)  
(平成 13 年 5 月 1 日より「さいたま市」に市名変更)

研究発表申込締切 平成 13 年 1 月 19 日 (金)

論文原稿締切 平成 13 年 3 月 9 日 (金)

### 【シンポジウムの形式】

一般申込みによるセッション形式で実施し、講演は 1 題目につき 20 分 (発表 10 分, 質疑 10 分) の予定です。

### 【研究発表申込方法】

- Web による申込み (ホームページ : <http://ht.t.u-tokyo.ac.jp>) と致します。
- 講演発表申込は、講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- 詳細は会誌「伝熱」(平成 12 年 11 月号) に掲載致します。

### 【論文】

- 講演論文集は原寸大のオフセット印刷および CD-ROM として作製致します。論文の長さは、1 題目当たり A4 用紙 2 ページとし、作成フォーマットは前回と同様の予定です (2 段組×片側 26 字×60 行)。
- 執筆要綱は、会誌「伝熱」(平成 13 年 1 月号) 及びホームページに掲載致します。
- 本シンポジウムでは講演論文集を CD-ROM 化するため、論文原稿は原則として PDF ファイルで提出して戴きます。但し、どうしても PDF での提出が困難な場合には、論文申込整理費のほかに別途変換作業料 (5000 円) を申し受けて、実行委員会が PDF 化を代行致します。CD-ROM 化のため印刷日程が厳しくなっており、原稿締切りに遅れると論文集と CD-ROM には載りませんのでご注意ください。
- 論文の電子化 (PDF 化) については、下記文献が参考になります。  
小林, Microsoft Word を使った論文作成方法, 日本機械学会誌, 103-979 (2000. 6), pp. 396-403.  
川野・岡本, 論文の電子化について (より良い PDF を作るために), 可視化情報, 20-77 (2000. 4), pp. 27-32.

### 【講演登録及び参加費用】

- 講演申込整理費 : 3,000 円 (当日会場支払い : 4,000 円)
- シンポジウム参加費 (論文集代は含みません, 日本伝熱学会会員, 非会員共)  
一般 (事前申込 : 8,000 円, 会場申込 : 10,000 円), 学生 (事前申込 : 4,000 円, 会場申込 : 5,000 円)
- 講演論文集 : 日本伝熱学会会員 : 無料, 非会員 : 8,000 円

### 【懇親会】

- 開催日 平成 13 年 5 月 24 日 (木)
- 会 場 大宮ソニックシティ 市民ホール
- 参加費 一般 (事前申込 : 8,000 円, 会場申込 : 10,000 円, 事前申込, 会場申込共に夫婦同伴者 1 名無料)  
学生 (事前申込 : 4,000 円, 会場申込 : 5,000 円)

### 【ご注意】

- 研究発表申込の取消は、準備と運営に支障をきたしますのご遠慮下さい。
- 論文の題目と著者名が発表申込時と論文提出時において相違ないようお願い致します。
- その他ご不明な点がありましたら下記まで FAX または E-mail にてお問い合わせ下さい。

### 【お問い合わせ先】

第 38 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
東京農工大学 工学部 機械システム工学科内  
FAX : (042) 388-7088, E-mail : [htsymp38@mmlab.mech.tuat.ac.jp](mailto:htsymp38@mmlab.mech.tuat.ac.jp)

第 38 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
委員長 望月 貞成

**ジョイントシンポジウム 生活の場における温度・湿度と人間**  
**(日本伝熱学会, 空気調和・衛生工学会, 人間生活環境系会議, 生気象学会共催)**

日本伝熱学会企画部会では、標記のようなテーマでジョイントシンポジウムを企画しました。近接したテーマを研究している場合、通常、異なる学会で活動している場合、議論・情報交換が行えないままになっていることが多いと思われます。住空間・被服に関連したこのような研究者に情報交換の場を提供し、それぞれの研究の進展とテーマの広がりにも寄与することを、シンポジウムの目的としています。省エネルギーと人間の生理的・心理的反応を中心にテーマを設定し、また、新しいテーマとして、環境弱者の問題を取り上げてみました。多数の方々のご参加を期待しています。

開催日時：平成12年12月7日(木) 9:25～17:20 (懇親会 17:30～19:00)

開催場所：早稲田大学 大久保キャンパス 62号館W棟1階大会議室 (東京都新宿区大久保3-4-1)  
 (懇親会：同 56号館地下生協カフェテリア)

参加費：講演会1,500円、懇親会2,500円(当日申し受けます)

参加申込：平成12年11月22日(水)までに、電子メールまたはFAXで申込みください。申込みの際は、ジョイントシンポジウム参加申し込みと標記し、氏名、所属、連絡先(住所、電話番号、電子メールアドレス)、所属学会、シンポジウムと懇親会への参加の有無(シンポジウムのみ参加、シンポジウムと懇親会に参加、懇親会のみ参加)をお書きください。(定員となり次第、受付を中止させていただきますのでお早めに申込みください)

参加申込および問合せ先：〒211-8686 神奈川県工学部機械工学科 原村嘉彦  
 電子メール haramy01@kanagawa-u.ac.jp, FAX 045-481-5122 (機械工学科共通),  
 TEL 045-481-5661(代表)

プログラム：

9:25- 9:30	開会の挨拶	
セッション1	空調と省エネルギー (9:30～11:30)	
9:30-10:00	低床加圧式床吹出し空調システム	三橋 太 (高砂熱学工業)
10:00-10:30	住環境における熱放射環境	宮永俊之 (電力中央研究所)
10:30-11:00	居住空間の省エネルギー問題	木村建一 (早稲田大学)
11:00-11:30	居住空間の空調設計と省エネルギー	銚井修一 (京都大学)
セッション2	温熱環境と人体の反応 (I) (12:30～14:30)	
12:30-13:00	発汗挙動について	多屋淑子 (日本女子大学)
13:00-13:30	着衣を通しての熱・水分移動の測定とこれによる着衣の快適性予測	田村照子 (文化女子大学)
13:30-14:00	温熱環境評価のための人体熱モデルとCFDの連成システム	庄司祐子 (大阪ガス)
14:00-14:30	人と環境との間の熱伝達とその取扱い	持田 徹 (北海道大学)
セッション3	温熱環境と人体の反応 (II) (14:45～17:15)	
14:45-15:15	温熱的快・不快感の脳機構	彼末一之 (大阪大学)
15:15-15:45	人体熱収支に基づく温熱指標と心理反応	堀越哲美 (名古屋工業大学)
15:45-16:15	環境弱者の温冷感の問題	吉田 燦 (日本大学)
16:15-16:45	環境弱者の視環境の問題	吉田あこ (実践女子大学)
16:45-17:15	バイオエアコンによる温熱環境の制御	橋本博文 (筑波大学)
17:15-17:20	閉会の挨拶	
17:30-19:00	懇親会	



中国四国支部企画  
「中国四国伝熱セミナー・岡山渋川」のご案内

- [概要]: デジタル化とインターネットの普及は研究開発や設計生産に大きな変革をもたらせています。本セミナーでは、設計生産を支援する情報技術(IT)の概要と Design by Analysis による熱設計について、主として大学院生を対象とする講演を企業から提供していただきます。奮ってご参加下さいませよう、ご案内申し上げます。
- [日時]: 平成12年11月3日(金)13時30分から4日(土)13時まで(昼食後解散)
- [場所]: 岡山県渋川青年の家 Phone(0863)81-8039 Fax(0863)-81-8083  
〒706-0028 岡山県玉野市渋川2丁目7番1号  
瀬戸中央自動車道児島ICから国道430号経由で約20分。詳細は下記URL参照。  
URL= <http://www.pref.okayama.jp/kyoiku/shibukawa/shibukawa.htm>
- [参加費]: 一般8,000円、学生4,000円(宿泊、食事、懇親会とテキスト代を含む)
- [定員]: 65名(先着順に受付です。どなたでも参加できます)
- [申込方法]: 「伝熱セミナー・岡山渋川」と明記の上、氏名と所属、役職(学年)、連絡先の住所、電話、FAX、E-mailアドレスを、下記へ郵送、FAX また E-mail でお知らせください。参加費は当日集めます。申し込み後の取り消しはご遠慮下さい。
- [申込締切]: 10月10日(火)
- [申込先]: 〒719-1197 総社市窪木111番地 岡山県立大学情報工学部 野津滋  
Phone and Fax (0866)-94-2129 E-mail: [nozu@cse.oka-pu.ac.jp](mailto:nozu@cse.oka-pu.ac.jp)
- 

- [プログラム]: 11月3日(金)
- 13:00-13:30 受付
  - 13:30-14:00 オリエンテーション
  - 14:00-15:20 設計・製造業における Web 配信技術の動向  
日立造船情報システム(株) S I 統括部 前田陽規氏
  - 15:40-17:00 設計・製造を支援する CAE システム  
日立造船情報システム(株) 製造システム統括部 西村成人氏
  - 17:30-20:00 懇親会
- 11月4日(土)
- 9:00-10:20 CAE を利用した熱設計事例  
三井造船(株)技術本部 機械制御技術開発センタ 土井宣男氏
  - 10:30-12:00 交流会
  - 12:00-13:00 昼食後解散

[その他]

- @交流会では地引き網を予定しています。サンダルを忘れずに持参してください。  
雨天の場合は、渋川海洋博物館の見学等を計画しています。  
@「青年の家」に隣接の市営駐車場が使用できます。駐車場へは国道430号線から進入して下さい。

日本伝熱学会九州支部企画  
「九州地区伝熱講演会」のご案内

日本伝熱学会九州支部では平成12年度第1回講演会を下記の要領にて開催いたしますので、奮ってご参加下さいますようお願い申し上げます。

日 時：平成12年11月16日（木）

講演会：13：30-17：00

懇親会：17：30-19：30

場 所：九州大学箱崎キャンパス ベンチャービジネスラボラトリー 3階ゼミナール室

参加費：無料 ただし 懇親会費 3000円

連絡先：九州大学機能物質科学研究所 今石宣之 (imaishi@cm.kyushu-u.ac.jp)

Fax:092-583-7796

九州大学工学研究科

深井 潤 (jfukai@chem-eng.kyushu-u.ac.jp)

Fax:092-642-3519

---

プログラム：11月16日（木）

- 13：30-14：15 氷蓄熱に関連する固-液相変化を伴う伝熱  
“Solid/Liquid Phase Change Heat Transfer Related to Ice Thermal Energy Storage”  
笹口建吾（熊本大学工学部）
- 14：15-15：00 吸収・放射・散乱を伴う任意の3次元非灰色媒体の放射伝熱  
“Radiative Heat Transfer of Arbitrary 3-D Non-gray Absorbing, Emitting and Scattering Media”  
円山重直（東北大学流体科学研究所）
- 15：00-15：15 休憩
- 15：15-16：00 赤外線ふく射照射支援による二工程高分子成形精密転写法の提案  
“A Tandem Polymer Processing for Precise Transcription Assisted by Infrared Irradiation”  
黒崎晏夫（電気通信大学電気通信学部）
- 16：00-17：00 “Heat transfer during pressing/cooling of TV glass panels”  
R. Viskanta (Purdue University)
- 17：30-19：30 懇親会（於：九州大学工学部食堂内教職員食堂）

会 員 各 位

### 寄付会費へのご協力をお願い

総 務 部 会

5月30日に開催されました第38期総会において、寄付会費制度の導入が承認、決定されました。この制度は、会員各位から会費に上乘せした形でボランティア的な会費をご寄付いただき、学会活動に必要な資金を恒常的に補填、確保する目的で導入されたものであり、用途につきましては学会細則第3章第6条の規定に従い、学会定款第2章第5条に定める諸事業の活性化に充てるものであります。つきましては、会員諸子には本制度の趣旨をご理解いただき、ご協力をお願い申し上げます。

ご寄付は下記の方法でお願い申し上げます。

- 学会費振り込みの際、所定の郵便振替用紙に、会費と共に寄付会費の欄に金額をご記入いただき、お振り込み下さい。郵便振替用紙は、学会事務局にご請求いただければ送付いたします。

[(社) 日本伝熱学会事務局] 〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16

Tel/Fax: 03-5689-3401, e-mail: htsj@asahi-net.email.ne.jp

寄付者一覧 (平成12年6月～8月の間)

鈴木健二郎, 牧野俊郎, 望月貞成, 福迫尚一郎, 武石賢一郎, 中山 顯, 大隅正人, 石塚 勝,  
水上紘一, 庄司正弘, 小林睦夫, 勝田正文, 今石宣之, 康 倫明, 熊田雅弥, 久角喜徳, 吉田駿,  
吉田英生, 丸山茂夫, 横堀誠一, 宇高義郎 (以上、いずれも2,000円)

### 名簿原稿の提出についてのお願い

総 務 部 会

新名簿の発行を来年1月に予定しております。現在、会員各位には原稿の確認、修正、訂正を文書によりお願い致しております。回答の期限が9月末日となっておりますので、宜しく願い申し上げます。なお、名簿に関するお願いの文書が、万一お手元に届いていない場合は学会事務局へお問い合わせ下さい。

## 事務局からの連絡

## 1. 学会案内と入会手続きについて

## 【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

## 【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。

## 【会員の種別と会費】

会員種別	資格	会費(年額)
正会員	伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人	8,000円
賛助会員	本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人	1口 30,000円
学生会員	高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人	4,000円
名誉会員	本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者	8,000円 但し、70才以上は0円
推薦会員	本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者	0円

## 【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

- 「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。  
(本年度発行予定：5, 7, 9, 11, 1, 3月号)  
・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付  
・賛助会員に口数分の冊数送付
- 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。  
・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

## 【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

## (注意)

- 申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- 会費納入時の郵便振替用紙には、会員名(必要に応じてフリガナを付す)を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の取扱いができず、会費未納のままとなります。
- 学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明(署名・捺印)が必要です。

## 2. 会員の方々へ

## 【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口) B(2口) C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いいたします。

## 【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金額から減額します。フリガナ名の検索によって入金事務処理を行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

## 【変更届について】

(勤務先、住所、通信先等の変更)

勤務先、住所、通信先等に変更が生じた場合には、巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい。通信先の変更届がない場合には、郵送物が会員に確実に届かず、あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります。また、再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くことになります。

(賛助会員の代表者変更)

賛助会員の場合には、必要に応じて代表者を変更できます。

(学生会員から正会員への変更)

学生会員が社会人になられた場合には、会費が変わりますので正会員への変更届を速やかにご提出下さい。このことにつきましては、指導教官の方々からもご指導をお願いします。

(変更届提出上の注意)

会員データを変更する際の誤りを防ぐため、変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします。

## 【退会届について】

退会を希望される方は、退会日付けを記した書面にて退会届(郵便振替用紙に記載可)を提出し、未納会費を納入して下さい。会員登録を抹消します。

## 【会費を長期滞納されている方へ】

長期間、会費を滞納されている会員の方々は、至急納入をお願いします。特に、平成11年度以降の会費未納の方には「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており、近く退会処分が理事会で決定されます。

## 3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております。

事務局	
(業務内容)	i) 入会届、変更届、退会届の受付 ii) 会費納入の受付、会費徴収等 iii) 会員、非会員からの問い合わせに対する対応、連絡等 iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付、新入会員への「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送、その他刊行物の発送 v) その他必要な業務
(所在地)	〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16 社団法人日本伝熱学会 TEL, FAX: 03-5689-3401 E-MAIL: htsj@asahi-net.email.ne.jp (土日、祝祭日を除く、午前10時～午後5時) 学会HP: <a href="http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/htsj/index-j.html">http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/htsj/index-j.html</a>

## (注意)

- 事務局への連絡、お問い合わせには、電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信欄やファックス等の書面にてお願いします。
- 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記にて行なっております。

〒113-8656	文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 機械工学専攻 庄司 正弘 TEL:03-5841-6406 FAX:03-5800-6987 E-MAIL: shoji@photon.t.u-tokyo.ac.jp
-----------	--

◇編集後記◇

第39期編集出版部会委員

副会長	熊田雅弥	岐阜大学
部会長	菱田公一	慶應義塾大学
委員		
理事	小林睦夫	新潟大学
	山田雅彦	北海道大学
	牧野俊郎	京都大学
	西村龍夫	山口大学
監事	横堀誠一	東芝
評議員		
	小原 拓	東北大学
	川口靖夫	機械技術研究所
	佐藤 勲	東京工業大学
	泰岡顕治	慶應義塾大学
	花村克悟	岐阜大学
	吉田敬介	九州大学大学院
	水上紘一	愛媛大学
	康 倫明	ダイキン環境研究所
	石黒 博	筑波大学
	鈴木 洋	神戸大学
TSE チーフエディター		
	小竹 進	
TSE 出版担当		
	瀧本 昭	金沢大学

平成12年9月30日

第39期編集出版部会長 菱田 公一

編集出版事務局：〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1  
慶應義塾大学工学部システムデザイン工学科  
菱田公一  
TEL: 045-566-1739  
FAX: 045-566-1720  
e-mail: hishida@sd.keio.ac.jp

## 複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。なお、著作物の転載・翻訳のような複写以外許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F  
学術著作権協会 (TEL/FAX: 03-3475-5618)

アメリカ合衆国における複写については、次に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.(CCC)  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone : (978) 750-8400 FAX : (978)750-4744

### Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies (CCAS)  
41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan  
TEL/FAX : 81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)  
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA  
Phone : (978) 750-8400 FAX : (978)750-4744

伝 熱

ISSN 1344-8692

(Journal of The Heat Transfer Society of Japan)

Vol. 39, No.158

2000年9月発行

発行所 社団法人 日 本 伝 熱 学 会

〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16

電話 03(5689)3401

Fax. 03(5689)3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan  
16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,  
Tokyo-113, Japan  
Phone, Fax: +81-3-5689-3401