

# 伝 熱

## 目 次

### 〈支部の話題〉

「中国四国支部の伝熱研究」特集にあたって	西村龍夫 (山口大学)	1
マイクロバブル技術による水産養殖実験	大成博文 (徳山工業高等専門学校)	2
廃プラスチック加圧二段ガス化システムの開発	寺内 誠・林 茂也 (宇部興産 (株))	8
人工ゼオライトの利用による砂丘地土壌の改良—乾燥地における持続的な灌漑計画に関する研究—	山本太平・魏 江生 (鳥取大学乾燥地研究センター)	12
ゼオライト—水系ヒートポンプの開発と課題	溝田忠人 (山口大学)	18
伝熱研究への期待	福地 健 (バブコック日立 (株))	26
蓄冷熱システムの進展に向けて	堀部明彦 (岡山大学)	28
伝熱研究への想い	水田桂司 (三菱重工)	30
音響エネルギーの有効利用	野村信福 (愛媛大学)	32
食材冷却と伝熱	松藤幸樹 (三浦工業 (株))	34
液—液系二相流と固—液相変化熱伝達に関する研究	草野剛嗣 (徳島大学)	36

### 〈ワンポイント伝熱〉

「拡散項3兄弟」を考える	小原 拓 (東北大学)	38
--------------	-------------	----

### 〈行事カレンダー〉

		45
--	--	----

### 〈お知らせ〉

第38回日本伝熱シンポジウム研究発表申込者の方へ (提出書類及びお願いなど)		
講演原稿等 提出方法		46
提出物チェックシート		47
講演論文の書き方		48
JICST データベース用 講演論文集抄録提出のお願い		50
ホテル及び会場のご案内		51
第38回日本伝熱シンポジウム・宿泊のご案内		52
第38回日本伝熱シンポジウム・宿泊申込書		53
日本伝熱学会研究会「マイクロマシンと熱流体」第5回会合のお知らせ (電気学会 マイクロマシン研究会・マグネティックス研究会会合との同日開催)		54
First Announcement and Call for Papers		
International Conference on Energy Conversion and Application (ICECA' 2001)		56
「伝熱」会告の書き方		59
事務局からの連絡		60
日本伝熱学会, 入会申込み, 変更届用紙		61
日本伝熱学会, 賛助会員入会申込み, 変更届用紙		62
広告		63

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.40, No.160, January, 2001**

**CONTENTS**

**<Branch Topics>**

Recent Topics on Heat Transfer Research in Chugoku-Shikoku Area	
Tatsuo NISHIMURA (Yamaguchi University).....	1
Fisheries Experiments of Cultivated Shells using Micro-Bubbles Techniques	
Hirofumi ONARI (Tokuyama College of Technology) .....	2
Development of Pressurized Twin Internally Revolving	
Fluidized-bed Gasifier System for Treating Refuse Plastics	
Makoto TERAUCHI, Shigeya HAYASHI (UBE INDUSTRIES,LTD).....	8
Application of Artificial Zeolite for Sand Improvement and Sustainable Irrigation Scheduling	
Tahei YAMAMOTO, Jiangsheng WEI (Arid Land Research Center Tottori University) .....	12
Development of Zeolite-Water Heat Pump and Subjects to be Solved	
Tadato MIZOTA (Yamaguchi University).....	18
Hopes for Advances in Heat Transfer	
Takeru FUKUCHI (Babcock-Hitachi K.K.).....	26
For Development of Thermal-Energy Storage Systems	
Akihiko HORIBE (Okayama University) .....	28
Some Notes for The Study of Heat Transfer	
Keiji MIZUTA (Mitsubishi Heavy Industries, LTD.).....	30
Effective Utilization of Acoustic Energy	
Shinfuku NOMURA (Ehime University).....	32
Food Cooling and Heat Transfer	
Koki MATSUFUJI (Miura Co. Ltd.).....	34
Heat Transfer Research on Liquid-Liquid Two-phase Flow and Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer	
Koji KUSANO (The University of Tokushima).....	36

**< One Point of Heat Transfer>**

Thought on Three “Diffusion” Terms	
Taku OHARA (Tohoku University).....	38

<b>&lt;Calendar&gt;</b> .....	45
-------------------------------	----

<b>&lt;Announcements&gt;</b> .....	46
------------------------------------	----

「中国四国支部の伝熱研究」特集にあたって

*Recent Topics on Heat Transfer Research  
in Chugoku-Shikoku Area*

支部の話題

西村 龍夫 (山口大学)

*Tatsuo NISHIMURA (Yamaguchi University)*

編集委員長より中国四国支部の活動状況や地域の特色などをまとめるように昨年度依頼され、元広島大学におられた編集委員の鈴木先生と相談して、他の支部とは少し趣を変えて特集を組んでみました。ここでは、「中国四国支部の特長と最近の活動」そして「特集の方針」を若干述べさせていただきます。

本支部は瀬戸内工業地帯に面し、企業との研究も比較的さかんで毎年開催される伝熱関係の行事でも企業からの参加が多くあります。定期的行事としては春の総会、夏の伝熱セミナーおよび秋から冬にかけての工場見学会または研究会が各地区持ち回りでそれぞれの特徴を活かして開催されています。ちなみに本年度の伝熱セミナーは岡山県立大学の野津先生のお世話で、情報化における製造業の動向と技術的な諸問題についての話題がいくつか企業側から提供され、社会の連携が強求められている今、大学側の人間にとっては社会がすさまじい勢いで変化していることを垣間見ることができました。すなわち、情報化の波が社会の合理化と多様化を促進しているということです。しかし、技術的な問題は複合的ですが依然として残っており、伝熱もまだまだ社会に目を向ければ仕事の種はいくらでもあるということで、いささか安心しました。

上述のような背景もあり、特集としてはまず中国四国地区において伝熱を専門としない研究者および技術者からの熱および物質移動に関連するホットな話題を提供していただくという方針で執筆者4名を選びました。すなわち、環境改善の話題が2件「マイクロバブル技術による水産養殖実験」、

「人工ゼオライトの利用による砂丘地土壌の改良」、そして熱および資源リサイクル関係が2件「廃プラスチック加圧二段ガス化システムの開発」、「ゼオライト-水系ヒートポンプの開発と課題」です。これらの話題は専門がやや異なるので少し読みにくいところがあるかもしれませんが、伝熱研究の新しい方向についてヒントを我々に与えてくれるものと思っています。

また、支部での伝熱会員の話題についても6名の方々に執筆していただきました。ただし、年輩者の会員については毎年開催されている伝熱シンポジウムで研究を発表されており、それらの紹介は避けさせていただきました。ここでは21世紀を担う若手研究者および技術者に伝熱研究への思いを書いていただくようお願いしました。一般に大学側の研究者は基礎から応用への展開という方向で研究が進められています。一方、技術者は製品開発など実用的立場からみて必要な研究を進めており、周知のとおり大学と企業における研究のスタイルが異なっています。しかし、これから科学技術の著しい進歩を促すためには戦略的方針である「大学と企業の関係づけ」を明確にするともにお互いの理解と融合が不可欠で、若手研究者と技術者は今後より親密なコミュニケーションが求められます。したがって、若手伝熱会員の思いを聞き、それを実現できるような支援体制を構築していくのも本学会の役割の一つだと思って、後半の特集を組ませていただきました。

最後に多忙な中、快く短い期間で執筆していただいた寄稿者各位に感謝します。

## マイクロバブル技術による水産養殖実験

Fisheries Experiments of Cultivated Shells using Micro-Bubbles Techniques

大成 博文 (徳山工業高等専門学校)

Hirofumi ONARI (Tokuyama College of Technology)

## 1. はじめに

1990年代後半から、全国の各地で水産養殖業の深刻な不振が続いている。たとえば、1998年には、広島湾でヘテロカプサ赤潮が発生し、それに伴う酸欠現象によって40億円を越えるカキ斃死の被害が発生した。また昨年、新潟佐渡島で8割に及ぶカキの大量斃死が発生し、関係者に大きな打撃を与えている。

愛媛県では、90年代半ばまでの400億円に近い真珠年産額が、最近ではその1割近くまで減少するほどの低迷が続いている。北海道噴火湾でも、98年に養殖ホタテの大量斃死があり、昨年末には、地巻きホタテの大量斃死が発生した。三重県でも、この数年、国産アコヤガイの大量斃死が続き、真珠養殖業者を失意に陥れている。さらに、海水温度の上昇でサンゴが死滅し餌が無くなることによって魚が北上し、奄美大島のマベガイが食べられるようになり、その防御のために金網に貝をいれたところ、それに汚れや生物が付着し、貝が死ぬという事態まで出現している。

これらの海域は広大であるにもかかわらず、流れが停滞し、海底にヘドロが堆積するという内湾特有の地理的地質的条件が存在することで共通しており、それに水質や水環境の微妙な悪化が加わると、上述の深刻な状況に陥るほど海が弱っている。

このような深刻な事態に直面して、水産養殖業者は、必死に打開策を模索しつづけている。

以上のような状況を背景として、地元カキ業者の依頼を契機として、カキ養殖業へのマイクロバブル技術の適用が98年から始まり、今日までにいくつかの成果を得てきた[1-3]。本論では、それを踏まえ、最近のトピックスを紹介する。

## 2. マイクロバブル

## 2.1 マイクロバブルとは

「マイクロバブル」とは、その発生時において、10～30マイクロメートル( $\mu\text{m}$ )前後の気泡径を有する微細な気泡のことをいう。この気泡径が非常に小さいことは、従来のバブルが単に小さくなったことに留まらず、さまざまな固有の特徴を生み出すことになる。また、このようなサイズの気泡は、通常自然界には大量に存在しないことから、二重の意味で従来の「バブル」の概念や範疇を越えたものとして区別される必要がある。

以下、その特徴を示す[1-3]。

- ①簡単、省エネ型の装置で、マイクロバブルを大量に発生させることが可能である。
- ②10～30 $\mu\text{m}$ 前後の非常に均一なマイクロバブルが発生し、気泡同士の合体や吸収が起こらず、分散性に優れる。
- ③水中での上昇速度が非常に遅く、水域での酸素吸収効率に優れる。わずかな流れがあるとそれに追従して広範囲に漂うことが可能となる。
- ④発生気泡径ごとに寿命を有する。
- ⑤マイクロバブルの発生で、水のさまざまな物理化学的変化が起こる。
- ⑥マイクロバブルの物理化学的特性に依存して、生物の生理活性が起こる。

これらの特徴を考慮すると、マイクロバブルには重要な高機能性が存在することが予測され得る。

## 2.2 マイクロバブル発生装置

マイクロバブルの発生装置にはM型とW型の2通りがあるが、ここでは前者を中心に解説する。M型では、現在までにM1～M2の装置が開発されている。いずれもマイクロバブルを大量に発生させることを特徴としているが、装置内にポンプで圧力水を送り、空気を自吸することを基本としている。

装置の大きさは、最大で直径15cm、最小で数mm程度まで製作可能で、4～6cm程度を標準としている。図-1に、M1型装置を示す。また、それぞれの

型式によってマイクロバブルの発生に関する特徴があり、それを踏まえ、適用対象ごとに装置設計を行うことが可能である。たとえば、ダム貯水池（兵庫県Aダム、山口県B貯水池など）では、M2型を10機程度配備した大型装置から、M3型2機を水中ポンプに配備した海面用装置（図-2参照）、実験室での小型水槽用のM1～M3の小型用まで揃っている。

これらの装置の開発思想は、装置の内部構造をより単純化するとともに高性能化を図る、さらには、大型化、超小型化を可能にすることにあり、それがより新型の装置ごとに実現されている。

### 2.3 マイクロバブルの発生機構

マイクロバブルは、図-3に示されるように、次の2段階の流体力学的なプロセスを経て発生する。

#### [第1段階]

装置中心部に液体および気体の2層旋回流を発生させ、その回転軸部分に空洞を形成させる。また、この回転空洞部分を竜巻状に細くして、強力な回転せん断が発生させる。そして、装置上部から吸入した気体を、この空洞部に注入、通過させる。

#### [第2段階]

この気体空洞部を回転制御作用で切断・粉碎することによって、マイクロバブルが大量に発生する。

この2段階を有する方式が従来とは異なる特徴といえる。また、マイクロバブルは空洞部で、液体中の気体成分が溶出して発生した成分と、自吸した空気両方から構成されており、これも重要な特徴として指摘される。

### 2.4 海水マイクロバブルの特徴

マイクロバブルの発生状況は、液体の性質に応じてそれぞれ異なる。その発生量は、蒸留水、水道水、海水の順でより増加する。これは、液体の組成に依存してマイクロバブルが発生することを示唆しており、当然のことながら、液体中に界面活性剤やアルコールを含んでも、その発生状況は異なる。

そこで、海水中に発生したマイクロバブルを「海水マイクロバブル」と呼ぶ。通常の世界の海水には、植物性あるいは動物性のプランクトンを根源とする有機物を大量に含んでいることから、この有機物を含むと海水の表面張力が低下し、泡の形成がより容易となる。同時に、この有機物の混入は海水の粘性を増加させ、泡の強度や寿命を長期化させる[4]。

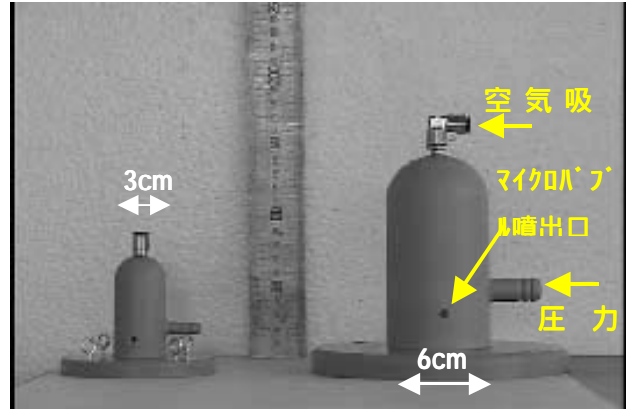


図-1 M1型マイクロバブル発生装置

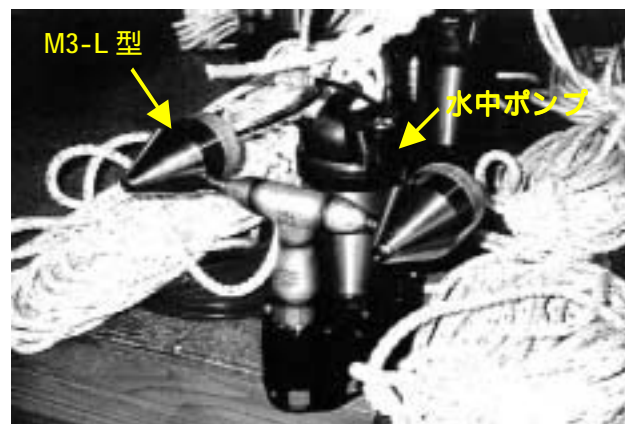


図-2 M3型海面用マイクロバブル発生装置

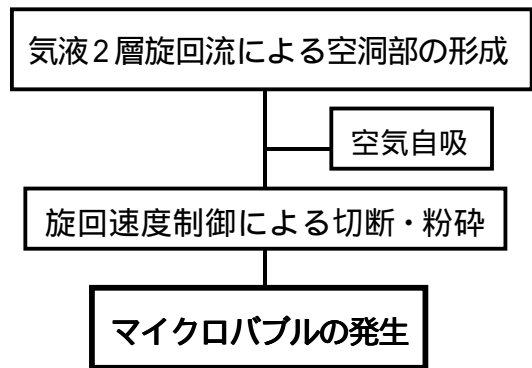


図-3 マイクロバブルの発生概念

図-4～7に、M1-L型発生装置を用いて発生させた海水マイクロバブルの発生状況を示す。これより、海水マイクロバブルが装置稼動と同時に白く煙のように発生し、2秒、4秒とマイクロバブルが水槽内に増加し、10秒を過ぎると装置が見えないほどに水槽内がマイクロバブルで充満している様子が明らかである。

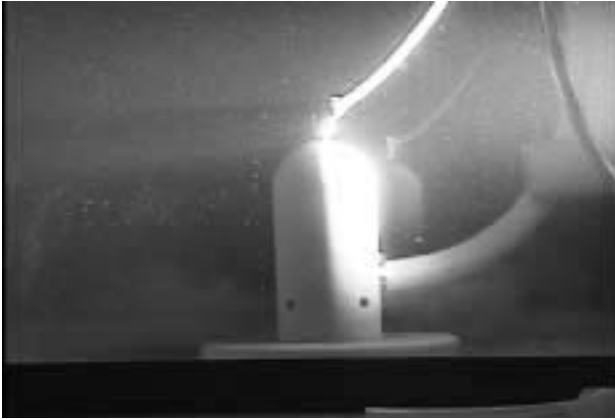


図-4 海水マイクロバブルの発生状況 ( t =0 秒)



図-6 海水マイクロバブルの発生状況 ( t =4 秒)



図-5 海水マイクロバブルの発生状況 ( t =2 秒)



図-7 海水マイクロバブルの発生状況 ( t =12 秒)

この海水マイクロバブルの発生頻度を調べると、その気泡径が  $10 \mu\text{m}$  をピークとして、ほとんどが  $5 \sim 40 \mu\text{m}$  の範囲で分布する [1]。この傾向は、水道水の場合と比較して発生気泡径が  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  ほど小さくなっているようで、この相異は興味深い現象である。

ところで、自然界に存在するマイクロバブルは、約  $70 \sim$  数  $100 \mu\text{m}$  [4] といわれているが、それと比較すると、本装置によって発生したマイクロバブルは、その約  $1/10$  程度に相当する。また、発生量については、毎秒  $1\text{cm}^2$  につき  $3840$  個を観測している [1]。これは、自然海岸における計測例の約  $120$  倍に相当する値となり、気泡径の小ささとともに、その発生量においても優れた性能を有していることが注目される。

なお、これらの特徴を有する海水マイクロバブルは、数秒から数  $10$  秒間の寿命を有しているようであり、その発生から消滅までに至る物理化学的特性を明らかにすることが重要と思われる。

### 3. マイクロバブルによるカキ養殖効果

#### 3.1 広島カキとヘテロカプサ赤潮被害

わが国におけるカキ生産は広島県が第1位で、全生産量の約  $6$  割を占めている。しかし最近では、94年から年々生産量が減少し続け、最盛期の  $6$  割にまで落ち込むようになってきた。この不振の原因のひとつとして、ヘテロカプサ赤潮が指摘されている。ヘテロカプサは渦鞭毛藻の一種で、その正式名は、*Heterocapsa circularisquama* と呼ばれている。

この赤潮は、95年に広島県宮島西の大野瀬戸で大量発生し、カキやアサリなど2枚貝に約  $3$  億  $3$  千万円の被害を出し、さらに、98年8月末から9月にかけてヘテロカプサが大量に発生し、約  $40$  億円を越える被害（史上2番目）となった。

もうひとつの重要問題は、赤潮が大量に発生した後には起こる「酸欠現象」であり、現地カキ業者内では、この現象が最も怖いと言われていた。現に98年には、江田島湾のカキ筏における水深  $2\text{m}$  以下のカキのほぼすべてが斃死した。

### 3.2 カキ用マイクロバブル発生装置

本システムの設計の際に、カキ業者から要請されたことは次の3点であった。

- ①装置を小型化し、カキ筏の吊り手同士の間隔（約40cm）に入るようにする。
- ②駆動には水中ポンプを用い、筏同士や筏の任意の地点まで簡単に持ち運びを可能とする。
- ③水深10mまでの深さに設置可能とする。

そこで、1カキ筏（縦23m、横11m）にマイクロバブル発生装置5セット（1セットは、水中ポンプ1台とM2-Lカキ用装置（図-8）2機で構成）を設置することを基本とした。また、水深10mの位置に、装置1機あたり毎分5lのマイクロバブルを発生させるために小型コンプレッサーを利用した。

そこで、以下の具体的目的のもとに99年5月から実験を開始した。

- ①酸素溶存効果をも高め、酸欠を改善する。
- ②マイクロバブルの対ヘテロカプサ効果を調べる。
- ③マイクロバブル発生による水理学的効果を調べる。
- ④マイクロバブルのカキ生理活性効果を調べる。

### 3.3 マイクロバブルによるカキ養殖効果

図-9に、カキ筏下の水中で発生するマイクロバブルの流動状況を示す。マイクロバブルは、白い煙のようにゆっくりと上昇し、水深5～10付近で滞留し、この領域で溶存酸素濃度を大幅に改善させた。これは、例年この水深域でカキの成長が良くなかったことから、好都合のカキ成長促進効果となった。

図-10に、カキ筏内のマイクロバブル発生地点直上における溶存酸素濃度の経時変化の一例を示す。これより、夏場で常時酸欠状態になりやすい水深5m以下で溶存酸素濃度の改善は著しく、マイクロバブル発生開始後60分で最大1.5mg/l、90分で3mg/lほど増加していることが明らかである。このほかに、マイクロバブルの発生によってカキ筏内の鉛直流動が生起し、水深5mまでの水域で最大2℃の水温低下、約10%の高塩分化が達成された [1]。これらもカキの成長における好条件となった。

さて、99年夏に入り、少数であるがヘテロカプサが観測されるようになり、カキ筏でのマイクロバブル供給が連日行われた。これは、直接的には低酸素水域の改善とカキの体力増強を狙って行われたが、それが非常に重要であった。この時期のカキは、5mm～数cm程度の大きさであり、この稚貝段階で



図-8 カキ用マイクロバブル発生装置



図-9 マイクロバブルの流動状況

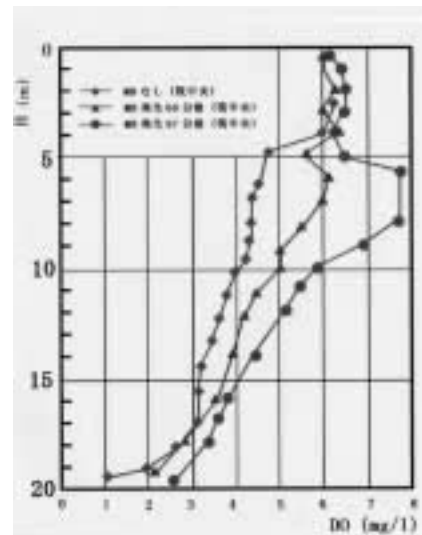


図-10 溶存酸素濃度分布

マイクロバブルを供給すると大きく成長することが、夏を過ぎて秋の身入り状態になって判明した。結果的にヘテロカプサも大量発生せず夏場のマイクロバブル集中的な供給が、当時としては31年ぶりに1年のもの（実質6ヶ月で出荷可能になった）のカキ「若」復活に大きく寄与していたことが徐々に明らかになった。この若の復活は、1年半から2年



を要してカキ養殖を行っている広島カキ業者にとっては驚きであり、朗報となった（このニュースは、NHK などマスコミで詳しく報じられた）。

さらに、朗報が加わったのは、昨年夏に、同じくマイクロバブル技術を用いて、広島では史上初めてとなる「若」の「夏ガキ」が誕生したことであった。これは、カキの養殖サイクルを約半年ずらして行われた結果であるが、この出荷で「R」の字がつかない月にはカキが食べられないという常識が完全に覆されてしまった。この夏ガキ出荷の決定的な要因は、カキが従来からの半分以下の期間で成長することに加えて、ほぼ完全な除菌がマイクロバブルによってなされたことにあった。すなわち、出荷前の水槽でカキにマイクロバブルを15時間供給し、一般細菌数と大腸菌数が激減し、「検出できない」というほぼゼロに近い状態にまで改善した。この結果を踏まえ、夏ガキに関する広島県の「指針」が新たに制定された。

図-11に、みごとに成長した今年の若ガキを示す。若ガキの特徴は、殻の成長よりも身入りの方が優先され、グリコーゲンの量が圧倒的に多く、おいしいことにある。図-12に、今年の若ガキと丸2年を要したカキの身の断面を比較している。カキの身の黒い部分は内臓であり、その周りの白い部分がグリコーゲンの豊富な身の部分に相当する。これら両者の相異は顕著であり、そのことが味覚でもすぐに確かめられた。

さて、最大の謎は、マイクロバブル技術の適用で、なぜ、このようなカキが出現したかにあり、その原因としては、次の5つが考えられる。

- ①稚貝成長期にマイクロバブルを供給すると大きな成長率を發揮する。
- ②溶存酸素濃度改善、低温化、高塩分化を伴う3次元の流動がカキ筏内にゆっくりと形成される。
- ③夏場に産卵抑制を行う。
- ④カキ生体の除菌を行う。
- ⑤通常よりも2倍開口し、血流を促進させる。

これらについては、より詳しい検討が今後必要とされるが、ここでは、⑤についてのデータの一例を図-13に示す。カキの心臓に血流計センサーを取り付け、カキの血流量と心拍波形を計測した。本図は、平均血流量を示しており、その縦軸は、マイクロバブルを与える前の血流量 $Q_0$ で、マイクロバブルの供給量 $Q$ を無次元化している。これより、水槽

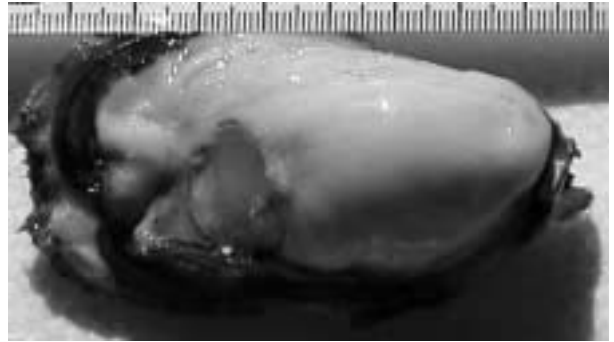


図-11 よく成長している若ガキ（2000年11月）

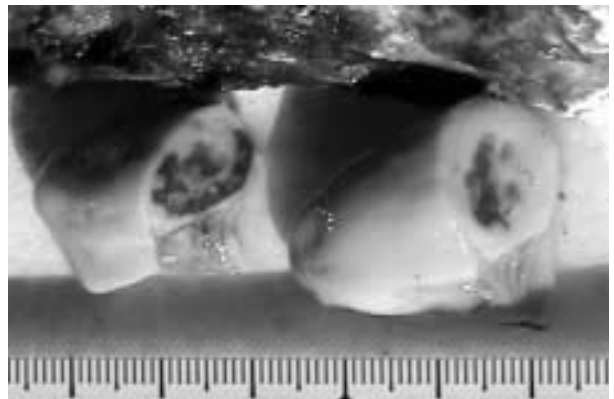


図-12 若ガキ(右)と2年ものカキ(左)の比較

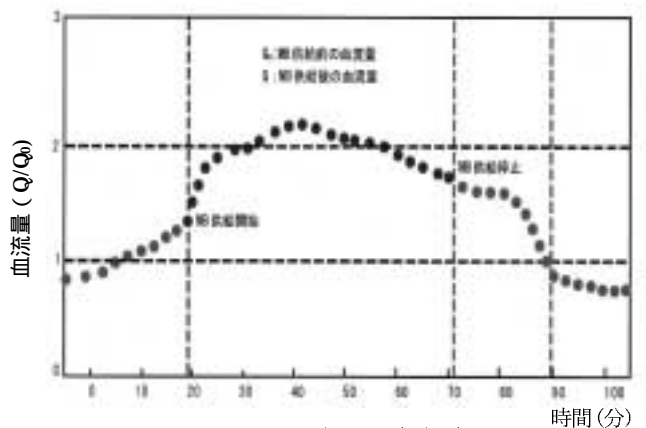


図-13 カキ心臓の平均血流量

内のカキにマイクロバブルを供給すると、血流量が急速に増大し、約20分後にはピークとなり、通常の約2倍の血流量が比較的長時間維持されている。注目点は、マイクロバブルの発生を停止しても約12分ほどは、それ以前の血流量を維持していることにある。その後、血流量は徐々に低下し、マイクロバブルの発生停止後20分でマイクロバブル供給前の血流量に戻っている。

なお、マイクロバブルの供給開始前に、カキの血流量が徐々に増加傾向にあるが、これは、この実験の前に、異なるカキでマイクロバブルを供給する実

験をおこなったために、マイクロバブルの残存効果があったことによるものと思われる。

このように、マイクロバブルはカキの血流量を約2倍に増大させ、マイクロバブル停止後も、しばらくはその効果を持続させ、即効性ととも持続性も発揮されている。これは、カキ体内の新陳代謝が活発となり、体質改善が持続的に行われていることを示唆している。この生理活性効果によって、図-12に示されるようなグリコーゲンの蓄積量の相異が生まれたように思われる。なお、マイクロバブルの供給で、図-14に示されるようにカキは通常の2倍以上に開口するが、これによって、海水に含まれるプランクトンの摂取量が増大し、成長促進効果が付加されたとも考えられる。

以上のように、マイクロバブルは、水質浄化の機能に加えて、生物の活性にも寄与することを特徴としていることが注目される。

#### 4. ホタテ養殖効果

上述のカキ養殖における成果を踏まえ、北海道噴火湾において、ホタテ漁に関する実験が昨年5月から始まった。これは、(財)マリノフォーラム21からの支援を受けた長万部漁協から依頼されたもので、水槽と海面の2つの実験で構成されている。前者では、ホタテの稚貝から耳吊り貝までの作業時に使用し、後者では、図-2に示される装置を開発した。本研究は2001年3月まで継続されることから、現段階では、その中間的な報告しかできないが、以下の成果が明らかになりつつある。

- ①耳吊り（数cmまで成長したホタテをロープに吊り下げることをいう）作業時にホタテの斃死がなくなり、夜の作業を取りやめた（従来は、夜昼の2交代で作業をしていた）。この斃死解消は、稚貝分散時においても同じで、従来よりも格段の進歩となった。
- ②稚貝、耳吊り貝ともによく開口し（図-15）、従来を勝る成長を遂げている（稚貝段階では1.5倍の成長率を達成）。
- ③マイクロバブルを与えた貝とそうでない貝では付着生物が異なる。前者では、まったく付着生物がない。また、貝柱がよりやわらかく甘味があっておいしい。
- ④マイクロバブルで育ったホタテは元気がよく、貝柱の表面温度がより高い。  
これらの成果を踏まえると、マイクロバブル技術

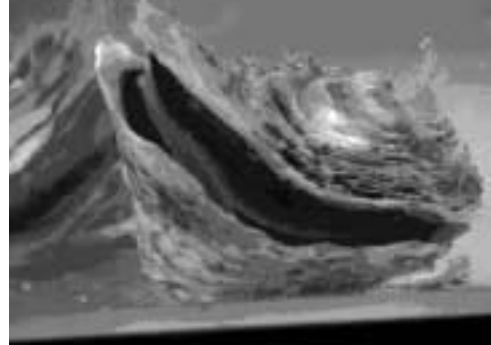


図-14 マイクロバブルで開口したカキ

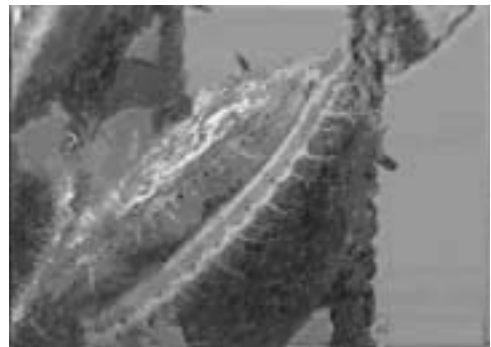


図-15 マイクロバブルで開口したホタテ

で新たに長万部ホタテブランドを創生する可能性があり、今年その実現が大いに期待される。

#### 5. おわりに

マイクロバブルの物理化学的特性と、それを踏まえたカキおよびホタテ養殖に関する若干の成果を紹介してきた。これらの現地実験を通じて、いくつもの重要な課題が生まれており、それらの解明が今後重要となる。カキ、ホタテのほかに、アコヤ貝、マベ貝においても同様の成果を得ているが、それについては別稿に譲る。冒頭で述べたように、日本の漁業環境は厳しくさまざまな否定的状況が生まれており、その改善に、マイクロバブル技術が役立つことを願っている。また、漁業のみならず、他の第1次産業、第2次産業、環境などの分野における問題解決に、本マイクロバブル技術を役立てることが期待されている。

#### 参考文献

- [1] 大成博文, 文部省科研報告書 (1999).
- [2] 大成博文, 資源処理技術, 52-58(1999)46.
- [3] 大成博文, 高等専門学校教育と研究, 12-20 (1998)3,4.
- [4] 阿部友三郎, 海水の化学, 日本放送出版協会 (1975).

## 廃プラスチック加圧二段ガス化システムの開発

*Development of Pressurized Twin Internally Revolving  
Fluidized-bed Gasifier System for Treating Refuse Plastics*

寺内 誠・林 茂也 (宇部興産 (株))

Makoto TERAUCHI, Shigeya HAYASHI (UBE INDUSTRIES, LTD)

### 1. はじめに

わが国の経済は「大量生産・大量消費」により、目ざましい発展を遂げてきたが、その一方で、これによって生み出された廃棄物は増大の一途をたどり、それらの最終処分場、焼却設備の立地はますます困難な状況となっている。このような状況の中で、良好な環境の維持と経済の持続的な発展のためには廃棄物の発生抑制を図るとともに廃棄物を資源として有効利用する循環型社会システムへの転換を図っていくことが求められている。

特に今日では、一般廃棄物のうち、容量で約56%、重量で約23%を占める容器包装廃棄物（1997年厚生省調べ）について、適正な処理が緊急の課題となっており、政府は1995年に容器包装リサイクル法を制定し、容器包装廃棄物の有効利用を推進することになった。2000年には容器包装リサイクル法が完全施行され、それまでのガラス瓶、ペットボトルに加えて廃プラスチック類も「容器包装廃棄物」に加えられることになった。

ここに紹介する「加圧二段ガス化システム (EUP)」は容器包装廃プラスチックの再商品化技術の一つである「ガス化」に分類され、一般廃棄物系の廃プラスチックの化学工業原料化を目的とする。「EUP」は1998年度に(社)プラスチック処理促進協会が新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から受託し、宇部興産(株)と(株)荏原製作所が共同研究開発した技術である。実証設備 (廃プラスチック処理能力30トン/日) は1999年11月に山口県宇部市内に完成し、2000年9月末に9ヶ月間におたる実証試験を終了した。本報では、この「EUP」について、そのプロセスの概要及び特徴を、実証試験の状況を交えて報告する。

### 2. 実証設備及びプロセス概要

本設備は前述の通り、容器包装廃プラスチックを原料として、加圧下で低温ガス化炉及び高温ガス化炉の二段ガス化システムにて熱分解及び部分酸化させ、 $H_2$ 及びCO主体の化学工業原料として適した合成ガスを製造することを実証する設備である。設備の主要部分のプロセスフローを図1に、設備の外観を写真1に示す。以下に研究開発の中心となった工程を中心に説明する。

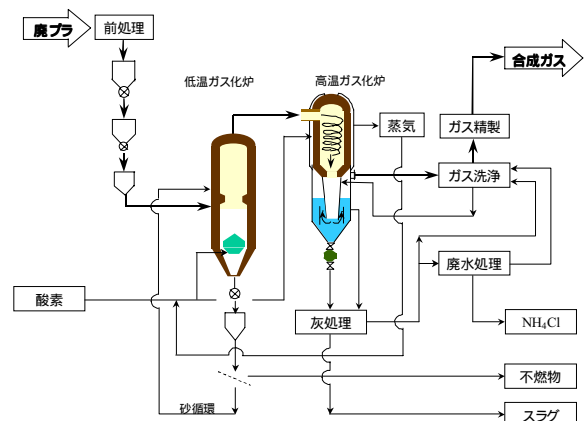


図1 実証設備主要部分プロセスフロー



写真1 実証設備外観

## 2.1 原料供給・低温ガス化工程

原料の廃プラスチックは前処理工程にて粗破碎の後、原料に同伴する鉄分が磁選機にて除去され、簡易成形機により成形される。成形された原料は原料供給系へ移送され、ロックホッパシステムにより低温ガス化炉へ供給される。低温ガス化炉は内部循環型の流動床ガス化炉であり、圧力0.8～1.6MPaG、温度600～800℃の条件下で運転される。流動媒体には珪砂を用いている。低温ガス化炉流動床底部から供給される酸素及び水蒸気をガス化剤として、原料廃プラスチックは緩慢な条件下にて熱分解及び部分酸化され、分解ガス、タール、チャーの混合物を発生させ、後段の高温ガス化・除塵工程へ供給される。一方、原料中の不燃物は流動媒体と共に炉底部からロックホッパシステムにより抜き出され振動篩により流動媒体と分離され、系外へ抜き出される。

## 2.2 高温ガス化・除塵工程

高温ガス化炉は巡回溶融型のガス化炉であり、上部に燃焼室、下部に急冷室を有している。燃焼室は圧力0.8～1.6MPaG、温度1,300℃以上の条件下で運転される。低温ガス化炉から供給された分解ガス、タール、チャーの混合物は、燃焼室側面から供給される酸素及び水蒸気をガス化剤として、瞬時に熱分解及び部分酸化され、 $H_2$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ を主成分とする合成ガスを発生させる。また、低温ガス化炉からのチャーに含まれる原料中の灰分は燃焼室内の高温雰囲気下で溶融スラグ化される。燃焼室で発生した高温の合成ガス及び溶融スラグはガス化炉下部の急冷室にて外部から供給されたアルカリを含む急冷用水と直接接触し、200℃以下の温度まで冷却される。溶融スラグは水砕スラグとなって急冷室底部よりロックホッパシステムにより系外へ抜き出される。合成ガス中に含まれるHClは急冷用水中のアルカリと中和反応し、塩となって水中に固定化される。また、合成ガスに同伴する未燃炭素および微粒のスラグは急冷室および後段のベンチュリスクラバ、ガス洗浄塔において水側に移動し、さらに後段のフィルタプレスより系外へ排出される。

## 2.3 プロセスの特徴

前述の通り、本プロセスは内部循環型流動床炉（低温ガス化炉）と巡回溶融型ガス化炉（高温ガス

化炉）とを組み合わせさせた技術で、次世代型ごみ焼却処理技術として脚光を浴びているガス化溶融技術のうち流動床タイプをさらに発展させた技術であり、以下の特徴を有している。

### (1) 原料

原料となる廃プラスチックの種類に制限がなく塩ビ系や熱硬化性樹脂の処理も可能である。

### (2) ダイオキシン類

ダイオキシン類は、1,300℃以上の高温雰囲気下に2～3秒間さらされるため、完全に熱分解される。さらにダイオキシン類の再合成についても還元無酸素雰囲気であることに加え、水による急冷により、再合成危険温度領域を瞬時に通過させることでこれを防ぐことができる。

### (3) 合成ガス

廃プラスチックから化学工業原料として使用可能なレベルの $H_2$ 、 $CO$ を主成分とする合成ガスが得られる。

### (4) 不燃物

原料中に含まれる不燃物は低温ガス化炉から抽出し可能である。さらに不燃物中の鉄、アルミニウムは炉内が還元雰囲気であるため未酸化状態で回収することが可能でありマテリアルリサイクルに適している。

### (5) 水砕スラグ

高温ガス化炉から排出される水砕スラグはセメントへのリサイクルの他、建設資材等へのリサイクルの可能性もある。

## 3. 実証試験の状況

2000年1月より9ヶ月間にわたる実証試験の状況について以下に記す。

### 3.1 原料

実証試験では燃焼不適物として収集された廃プラスチックAと容器包装リサイクル法に準拠して収集された廃プラスチックBの2種を簡易成形機にて成形（RDF化）し、低温ガス化炉に供給した。それぞれの原料の性状分析結果を表1に示す。

表1に示す値は平均値であり、実際は季節変動で代表される長期変動の他、廃棄物であるが故の不均一性に由来する短期変動（成分、発熱量、不燃物混

表1 廃プラスチック原料の性状分析結果

分析項目		単位	A	B
水分		wt%(wet)	1.06	0.95
工業分析値	揮発分	wt%(dry)	79.44	91.70
	固定炭素分	wt%(dry)	4.85	2.48
	灰分	wt%(dry)	15.71	5.82
元素組成	C	wt%(dry)	62.6	74.2
	H	wt%(dry)	8.7	10.7
	N	wt%(dry)	0.51	0.36
	O	wt%(dry)	9.56	6.33
	全 Cl	wt%(dry)	2.74	2.50
	全 S	wt%(dry)	0.29	0.08
低位発熱量		MJ/kg	28.9	35.1

表2 合成ガス組成

組成	単位	測定値
H <sub>2</sub>	vol%	30 ~ 39
CO	vol%	20 ~ 35
CO <sub>2</sub>	vol%	23 ~ 35
N <sub>2</sub> (計算値)	vol%	5 ~ 12
CH <sub>4</sub>	volppm	0 ~ 20

入量，嵩密度等)がある。焼却操作と異なりガス化操作での原料変動はガス化温度に与える影響が大きく，特に1,300℃以上の雰囲気の高温度ガス化炉でのこのような変動は，安全面，合成ガス組成，スラグ挙動といった観点から重大な問題を引き起こす可能性がある。実証試験では，こうした変動特性を把握し，前処理工程（原料成形）及び原料供給・低温ガス化工程において可能な限り変動を吸収する運転操作方法の探索が重要課題となった。その結果，(1)原料成形性及び成形寸法，(2)合成ガス流量一定化のための原料供給量制御，(3)低温ガス化炉の運転温度管理等が安定した運転に大きく寄与することがわかった。

### 3.2 合成ガス組成および冷ガス効率

高温ガス化炉で発生した合成ガスは，ダストの除去，熱回収が行われた後，H<sub>2</sub>，CO，CO<sub>2</sub>，CH<sub>4</sub>について連続分析される。合成ガスの組成は概ね表2に示す通りであった。

合成ガスの発生量は，原料性状，運転（試験）条件によっても異なるが原料単位重量当たり，約2,600m<sup>3</sup>(NTP)/tであった。一方，合成ガスの低位発熱量は約8,400kJ/m<sup>3</sup>(NTP)であった。これらから計算される冷ガス効率は，目標値の「70%以上」に対し，概ね60～70%となっている。今後，運転条件を最適化することにより，70%以上を達成したいと考えている。



写真2 低温ガス化炉から排出された不燃物

また，合成ガス中の微量有害成分については，化学工業原料に使用可能なレベルであることを確認している。

### 3.3 不燃物，スラグ

低温ガス化炉底部から排出された不燃物を写真2に，高温ガス化炉急冷室から排出された水砕スラグを写真3に示す。

不燃物は，アルミニウムやステンレス等の金属，石，陶磁器等からなり，金属類は未酸化の状態で抜き出されていた。

水砕スラグはそのほとんどが灰分であり，未燃炭素のほぼ全量が微粒スラグ側へ移行していることがわかった。水砕スラグの溶出試験結果は，埋立基準値はもちろん，土壤環境基準値もクリアしており，セメントへのリサイクルの他，建設資材へのリサイクルの可能性も有している。

原料重量に対する不燃物及びスラグの排出割合を表3に示す。原料中灰分と排出物のバランスは良く一致していた。



写真3 高温ガス化炉から排出された水砕スラグ

表3 不燃物，スラグの排出割合

	単位	廃プラスチック原料	
		A	B
原料中の灰分	wt%	15.7	5.8
不燃物	wt%	5.0	1.5
水砕スラグ	wt%	6.3	2.0
微粒スラグ*1)	wt%	4.1	2.2

\*1) 微粒スラグ中の灰分は約75%

#### 4. 結言

以上、報告した「廃プラスチック加圧二段ガス化システム」の実証試験は、2000年1月に開始され、運転データの蓄積を行って同年9月末に終了した。2001年1月からは容器包装リサイクル法に基づく再商品化事業を開始する予定である。

実証試験では、設計段階で予想し得なかったトラ

ブルが明らかになった。紙面の都合上、触れられなかったが、予想外の種々のトラブル、課題について、設備上、運転上の改良・対策を重ねることで解決してきた。

今後は廃プラスチックのリサイクルを支える技術の一つとして、より長期の安定した運転を目指し、本技術の優位性をアピールしていく所存である。

## 人工ゼオライトの利用による砂丘地土壌の改良

—乾燥地における持続的な灌漑計画に関する研究—

*Application of Artificial Zeolite for Sand Improvement and Sustainable Irrigation Scheduling*

山本 太平・魏 江生 (鳥取大学乾燥地研究センター)

Tahei YAMAMOTO, Jiangsheng WEI

(Arid Land Research Center Tottori University)

## 1. はじめに

現在我が国ではリサイクル資材の開発と利用に関する研究が積極的に進められている。人間社会で多量に排出される、種々の廃棄物を再加工してリサイクル資材を開発するには高いレベルの技術が要求される。非結晶性の石炭灰を NaOH 水溶液で 95°C 程度の加熱処理すると結晶性に転化し、石炭灰表面にゼオライト鉱物 (主にフィリップサイトとホージャサイト) が形成され、人工ゼオライトといわれる。人工ゼオライトはガスや水分吸着、イオン交換機能に優れている [1]。

人工ゼオライトの吸水機構を利用して土壌の保水性の向上が考慮される。わが国では透水性の高い畑地や灌漑施設の不十分な生産緑地に対し土壌保水材、土壌侵食が生じやすい緑地に対し緑化基盤材として利用されている。乾燥地では灌漑水や土壌に塩類を含むことが多いので、人工ゼオライトのイオン交換機能を利用して塩害軽減の効果が期待される。例えば、カルシウム型的人工ゼオライトの場合ゼオライトを構成する特定イオンの交換が塩類土壌の改良に効果的になり、乾燥地の持続的発展に貢献できると推察される。

本研究では人工ゼオライトを適用した持続的灌漑法の用水計画に必要なガイドラインの整備を目的とする。持続的灌漑法として節水的な利点を有する点滴灌漑を取上げた。鳥取大学の乾燥地研究センターの砂丘地圃場を利用して、1996～1997年度に人工ゼオライトによる砂丘砂の土壌改良、1998年度に人工ゼオライトの利用による塩類土壌の改良に関する実験を行った。ここではこれらの研究結果を利用して検討を試みた。なお、供試した主要な人工ゼオライトは木村化工機製 (K ライト) であり、Na 型と Ca 型の粉状ゼオライトまたは粒状ゼオライトを用いた。

## 2. 乾燥地開発の考え方

## 2.1 砂漠緑化と農業開発の意義

周知のように、乾燥地の砂漠化防止活動には砂漠

緑化と農業開発がある。このうち、砂漠緑化は地球環境の改善に大きな役割を有している。例えば中国の砂漠地はわが国の近い位置に分布するので、環境改善のためには特に積極的防止活動が必要であろう。また、乾燥地は作物の生育を促す太陽エネルギーが豊富であるので、適正な灌漑条件下や土壌条件下ではわが国の場合より農業生産地として高い潜在力を有している。

乾燥地は地球上の全陸地面積の 40% 近くを占める。砂漠化は乾燥地において年間 580 万 ha も達するといわれる。この砂漠化は土地利用別によって発生面積が異なっており、牧草地が 320 万 ha、降雨依存農地が 250 万 ha、灌漑農地が 13 万 ha 程度となっている。

世界の灌漑農業は今世紀になって急増し、FAO (世界食料機構) によれば灌漑面積が 2 億 5 千万 ha に達する。耕地 (草地面積を除いた農地) 面積に対する灌漑率は 17% (農地面積の 5%) に過ぎないが、食物総生産量の 1/3 を担っている。大陸別ではアジア、ヨーロッパ、北・中アメリカが 10～30% と灌漑率が高いのに対し、南アメリカ、アフリカ、オセアニアが 5～8% と低い。21 世紀の灌漑開発は南半球を中心に進行すると推定される。

一方、1992 年の地球サミット以来、灌漑農法も環境との調和が課題とされ、持続的開発が謳われている。特に乾燥地は作物の生育を促す太陽エネルギーが豊富であるので、適正な土壌水分条件下では驚異的な作物生産が期待できる。持続可能な農法には、降雨依存方式と灌漑方式の二つの流れがある。前者では作物生産の発展が期待できない。乾燥地を有する先進国では後者が積極的に実施され、FAO 等によって開発技術の体系化が進められている。灌漑農業が引き起こす砂漠化の課題は、土壌の風水食や塩類集積のメカニズムと対策、ひいては農地の持続的保全を目的にすることになる。

## 2.2 持続可能な開発

乾燥地の開発プロジェクトではプロジェクトを実

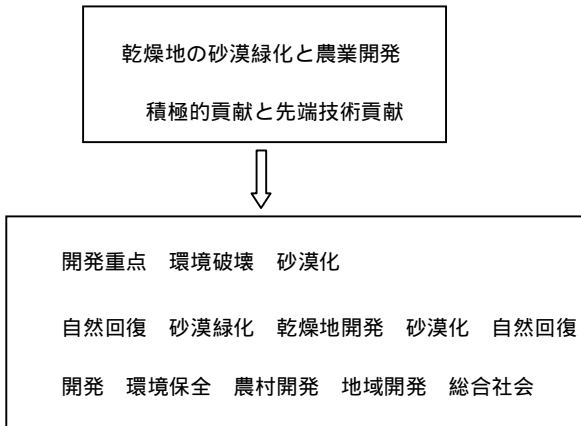


図1 持続可能な開発への概念図

表1 乾燥地に導入されている我が国の環境保全技術

砂漠緑化
灌漑排水
衛星・環境モニタリング(塩類、水質、水量、植生、温度等)
自然エネルギー(太陽、風、地温等)
海水の淡水化・再生水
資源のリサイクル(石炭灰、紙、木、プラスチック等)
バイオテクノロジー
省エネルギー
その他

施した結果水資源の枯渇や塩類問題が生じ、開発前より砂漠面積が拡大した事例が多い。乾燥地開発に携わる研究者や技術者が十分考慮せねばならないことは、砂漠化が進行しないように開発プロジェクトを研究、計画、実施することである。

図1は持続可能な開発に関する概念図を示す。ここで環境保全はリサイクル技術開発と同じ概念と考えた。持続可能な開発方式には②と③の2種類が提案される。②の自然回復により環境保全を保つ方式は、過去の歴史においてもしばしばみられる。開発に伴う砂漠化と自然回復のパターンが繰り返され、対象地において新しい発展が期待されない。実証的開発方式では、③の開発に伴う環境保全を策定することが重要になる。ここでは、自然回復方式より優先させ、対象地に古来発達した伝統的技術と先端技術との融合を図り、総合社会を将来像とした乾燥地開発について提案したい。

次に、現在わが国が国際的に貢献している乾燥地開発はフィールドにおける実証的な開発活動と先端技術による環境保全開発技術に分けられる(表1参照)[2]。本研究はリサイクル開発技術の一翼を担うが、研究対象はオリジナルな分野を有し、乾燥地における塩類土壌の改良、ひいては砂漠化農地の再生と持続的保全を目標にしている。

### 3 点滴灌漑のシステムと用水計画

点滴法は、灌漑水の効率的利用と作物の塩害軽減に特徴を有するので、乾燥地の代表的灌漑方式としてみなされている。灌漑施設は、水源、配水管路、末端制御装置、給水管路、点滴ブロック等から構成される(図2参照)。配水管路から取水された圧力水は、末端制御装置によって、点滴ブロックへの切り換え、一定の使用圧力(1~0.5kg/cm<sup>2</sup>)への調整、除塵、液肥混入、灌水時間の設定等が行われ、給水管路を経て点滴ブロックへ送られる。点滴ブロックでは、滴下管が作物の植栽間隔に対応して配置(地表、棚上、地中)されている。滴下管には取り付けタイプのエミッターと滴下管と一体化したタイプのエミッター(点滴チューブ)があり、これらのエミッターによって圧力水は水滴状になり作物の根元を中心に滴下する[3]。

点滴法では土壌水分が2次元または3次元に分布するので、湿潤域と水分消費域が必ずしも同一領域を示さない(図3及び図4参照)[4]。湿潤域は灌水対象領域を示す。水分消費域は作物根が分布している領域で一般に圃場全面を示すが、基本単位として

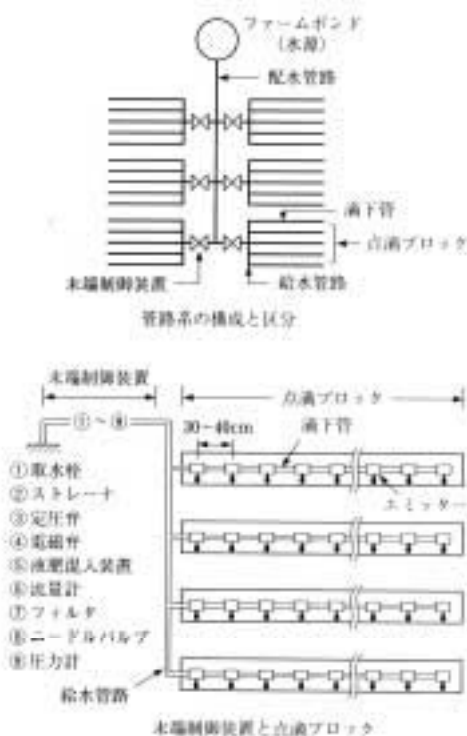


図2 点滴灌漑施設



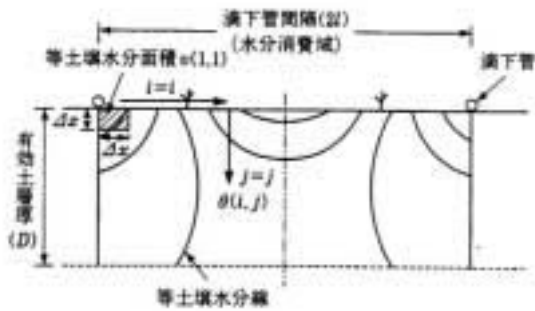


図3 点滴灌漑のエミッターによる土壌水分分布

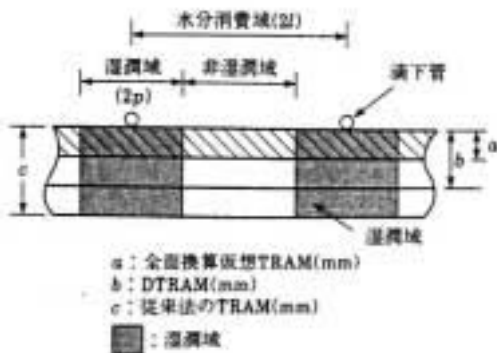


図4 湿潤域と非湿潤域の模式図

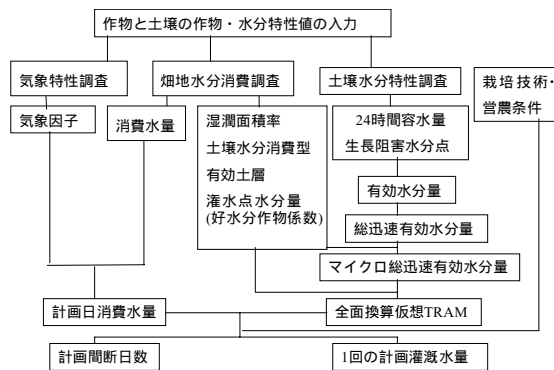


図5 用水計画における計画灌漑水量のフローチャート [6]

は滴下管間隔の中央から中央までの領域になる。この結果水分消費は灌水の場合主に湿潤域において生じ、降雨の場合湿潤域と非湿潤域で生じる。

点滴法の計画灌漑水量までの算定過程が図5のように整理される [5]。まず対象作物の好水分作物係数を求める。次に湿潤幅の決定、点滴 TRAM (DTRAM)、水分消費域における消費水量を求める。ここで、マイクロ総迅速有効水分量 (MTRAM) は湿潤域における深さ別の平均減少水分量から求められる点滴法の総迅速有効水分量である。MTRAMは湿

潤面積率 (全湿潤域面積/圃場面積) を乗じて水分消費域を対象にした全面換算仮想 TRAM に変換する。次に、全面換算仮想 TRAM を水分消費域の計画最大日消費水量で除して計画間断日数が得られる。

点滴法の計画間断日数は、MTRAM、全面換算仮想 TRAM、湿潤面積率、消費水量等の要因によって左右され、一般に従来法 (スプリンクラー法や地表法) に比べて短くなる。また計画灌漑水量は、(計画灌漑水量) = (時期別の計画日消費水量) × (計画間断日数) となり、点滴法では 1 回当りの計画灌漑水量が従来法より小さくなる。これらの結果から、用水計画上、点滴法は少量頻繁の灌漑になりきめ細かな水管理を必要とする。一方、水源水量を算定する場合を図6に示す。ここで純用水量とは、圃場単位用水量から有効雨量を差し引いた計画灌漑水量のことであり、計画日消費水量、間断日数、有効雨量等の計画諸元値を用いて計算できる。多目的利用を行う場合には、圃場管理用水量を考慮する。純用水量と灌漑効率によって粗用水量が求まり、粗用水量の積み上げ計算と地区内利用可能水量、その他用水量を考慮して水源水量が決まる [6]。

#### 4. 人工ゼオライトを用いた点滴灌漑の特徴

##### 4.1 耐干性機構の改善

##### 4.1.1 砂丘砂の根群域水分量の増加

砂丘砂において人工ゼオライトを混入すれば作物の根群域水分量の増加が認められた。本研究で供試した作物は牧草類がトールフェスク、コーン等、野菜類がダイズ、オクラ、ビート、サイトウ、ヒマワリ等である。多くの供試作物の生育・収量が向上したのは根群域水分量が増加したためと推定される。

一例としてガラス室内の斜面灌漑試験区における牧草の生育結果を図7と図8に示す。牧草の収量は砂 (対照) 区に比べて 70% 程度増加した。

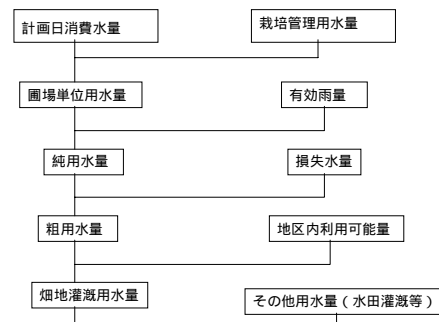


図6 灌漑に必要な水源水量のフローチャート [6]

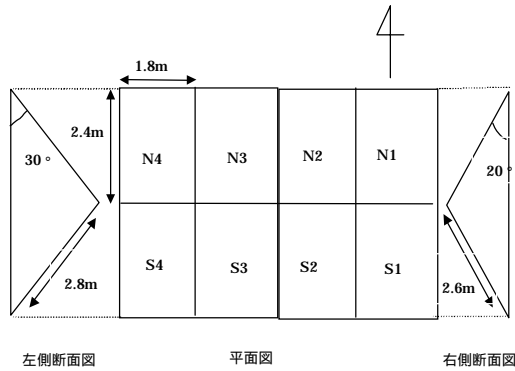


図7 斜面実験区の概要

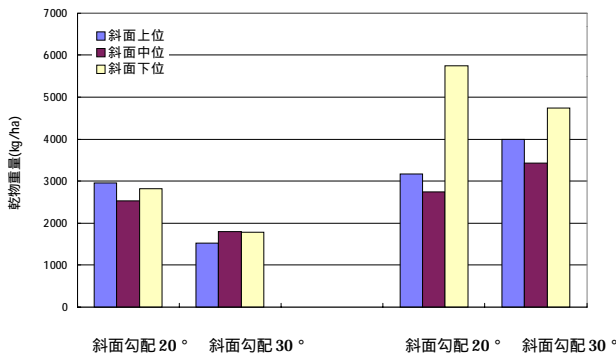


図8 砂斜面におけるマイクロ灌漑条件下の牧草収量

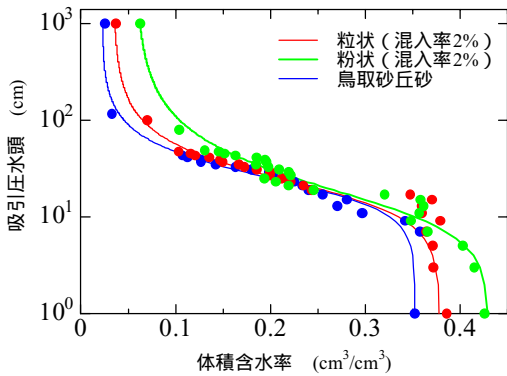


図9 鳥取砂丘砂，粒状2%，粉状2%の水分保持曲線

表2 人工ゼオライトにおける有効水分量

	吸引圧水頭： 65cm(pF1.8) の水分量 (vol%)	吸引圧水頭： 1000cm(pF3.0) の水分量 (vol%)	有効水分量 (vol%)
鳥取砂丘砂	7.0	1.8	5.2 (100%)
粒状 2%人工 ゼオライト	8.0~9.0	3.0~4.0	5.0~6.0(106)
粉状 2%人工 ゼオライト	12.9	6.3	6.6 (127)

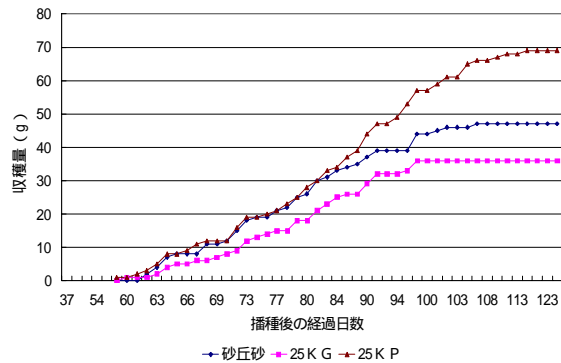
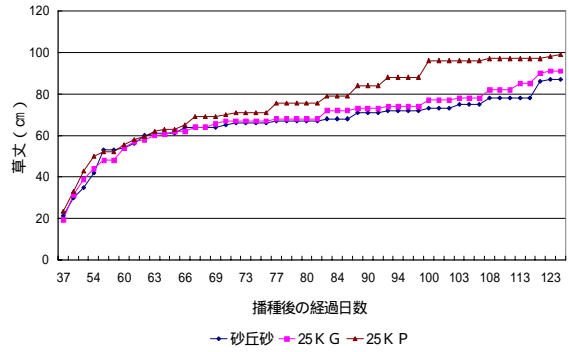


図10 NaCl2000ppmの点滴灌漑条件下におけるオクラの草丈及び収量結果 (1997)

さらにゼオライト区では地温が減少しやすいので、夏季の根群域の高温障害対策として用いることができる。一方地温低下が生じやすいので、ハウス内の早期・抑制栽培において地温上昇に必要なマルチ等を施用する必要がある。さらに水分量増加による土壌面蒸発ロスの防止対策が必要とされる。次に粘土質土壌の場合には保水性が向上し根群域水分量が増加することは反面、作物の湿害を生じやすいので注意する必要がある。

#### 4.1.2 pF 水分曲線と水源水量の節減

人工ゼオライトの混入率に伴い砂丘砂の透水性が低下するが有効水分量が増加した(図9及び表2参照)。土壌保水性の改良を有効水分量で表すと、砂丘砂に比べ2%混合砂の場合、粒状ゼオライトが1.06倍、粉状ゼオライトが1.27倍を示した。

有効水分量が増加する結果、一回当たりの灌漑水量と間断日数の増加し灌漑管理の省力化が期待される。同時に土壌の有効雨量の増加が期待でき水源水量の節減につながる。仮に鳥取県に分布している砂丘砂に人工ゼオライトを混入して火山灰土壌の有効水分量が得られたとすれば有効水分量が2.2倍に増加する。この結果、点滴灌漑の灌漑水量は普通畑作物で145mmから107mm、ナガイモで316mmから259mmに減少し、18~26%の節減になる。またス

プリンター灌漑に比較すれば、点滴灌漑では25～53%の節減になる[7].

## 4.2 耐塩性機構の改善

### 4.2.1 塩水灌漑の一事例

ハウス内砂床における点滴法による塩水灌漑実験を行った[8]. 対象作物はオクラとエダマメ、塩水はNaClが1000ppmと2000ppmである。ゼオライトは天然ゼオライト(Nライト), 人工ゼオライト(新日鉄製Sライト及びKライト)を用い、混合率は1%, 5%, 10%, 25%と対照区である。

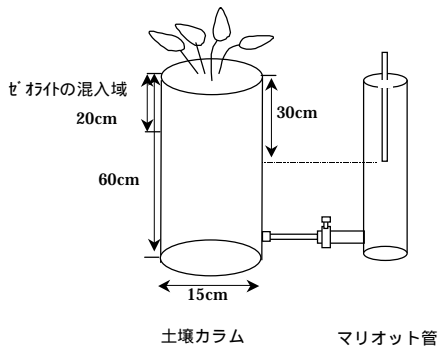


図11 閉鎖系の下方給水土壌カラム

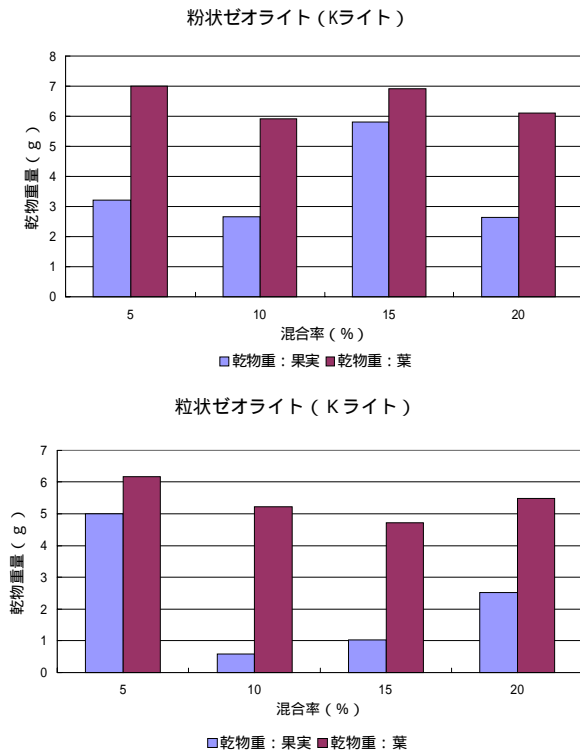


図12 下方給水土壌カラム実験によるピーマンの生育・収量結果(Kライトの場合)

6月1日に播種し、塩水灌漑は7月18日～9月30日の間蒸発散比法を用いて毎日灌漑を行った。実験結果の一例として、粉状Kライトの25%混入区ではオクラの生育・収量が最も高くなる結果が得られた(図10).

### 4.2.2 塩水灌漑における人工ゼオライトの特性

人工ゼオライト区では次のような特徴がみられた。①土壌溶液中においては、ゼオライト区がNaイオンの割合が増加した(ゼオライトを構成するNaイオンの影響)。天然ゼオライトは人工ゼオライトより電気伝導度ECが増加しない。pHはゼオライト区では初めpH9～10と高いが灌漑に伴ってpH6～7に減少した。②収穫した作物中の栄養素特性においては対照区のNaイオンが増加するのに対し、人工ゼオライト区において減少する傾向がみられる(CaイオンとNaイオンの交換反応)。③人工ゼオライト区では茎葉中のリンの吸収量が増加し生育収量に好結果を生ずる(ナトリウムの拮抗作用)[9].

### 4.2.3 閉鎖系の土壌カラム

人工ゼオライトの混入直後における土壌溶液中ではNaイオンとpHが高くなる。深部浸透水が滞留する閉鎖系の土壌カラム実験(ポット栽培等)ではリーチングができないので、イオンが根群域内に集積するだけになり栽培管理に注意を要した[10].

ピーマンを供試した下方給水による閉鎖系土壌カラムにおいて人工ゼオライトによる生育・収量阻害がみられた。むしろNaイオンとpHの影響のない天然ゼオライト区の方が良い結果が得られた(図11, 図12及び図13参照)。

### 4.2.4 点滴灌漑の耐塩性特性

浸透水が解放系の実験圃場において点滴灌漑を適用した。作付け前にリーチングを十分行い、播種・定植期の用水量(栽培管理用水量)を給水した結

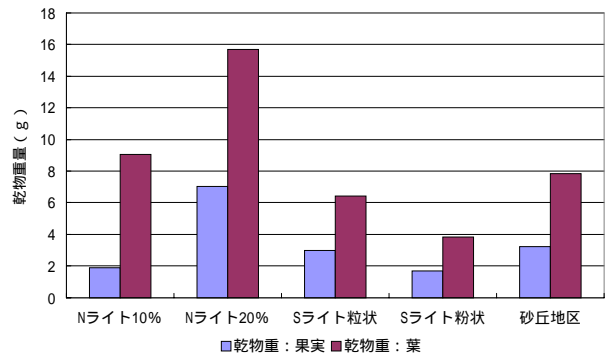


図13 下方給水ポット実験においてピーマンの生育・収量結果(Nライト及びSライトを用いた場合)

果, 4.2.1 で述べたように, 作物の品質収量が向上した。我が国の畑地灌漑設計基準では播種・定植・除塩・連作障害回避のため, 露地では20~30mm/年, ハウスでは250~400mm/年の管理用水が考慮されている。点滴灌漑では作物の茎葉に灌漑水が付着しないように給水することができる。土壌中に塩分を有する場合には, 根群域内を高水分量に保持することにより塩類濃度が減少し作物の塩害軽減につながる。

特に灌漑水または土壌中にNaイオンを有する乾燥地では4.2.2の②と③で述べた特色が活用できる。即ち, ゼオライト区のCaイオンとNaイオンの交換反応による土壌中の伝導度低下及び作物のリン吸収増加による生育向上と塩害軽減が期待できる。

#### 4.3 耐水食機能の改善

人工ゼオライトは塩類土壌の透水性と耐水食作用を向上させる機能がみられた。粉状の人工ゼオライトを2%混入した塩類土壌の水食実験において土壌の透水性が高くなり地表面流が減少する結果が得られた。これは土壌中に吸着しているNaイオンがゼオライトに交換・吸着されたために, 土壌の膨潤・分散やクラスト層の発達が抑制され, 浸透水量が増加したためと推定された[11]。さらに詳細な水食メカニズムの検討が必要であるが, 粘土質の塩類土壌における水食防止に役立つ結果が得られれば, 乾燥地における地表灌漑や降水による地表面流の侵食作用に対し人工ゼオライトによる水食防止工法への新しい技術開発が期待できる。

#### 5. おわりに

人工ゼオライトを適用した点滴灌漑の用水計画に必要なガイドラインの整備を目的として, 主として鳥取砂丘砂の保水性と耐塩性の向上, さらに塩類土壌の耐水食性に関する研究結果を紹介した。砂丘砂のような透水性土壌では人工ゼオライトの混入によって有効水分量と有効雨量が増加し, 水源水量の節減が期待された。さらに塩水灌漑を行った結果では, 管理用水を考慮することにより人工ゼオライトの適正混入率において塩害軽減の効果が認められ塩類土壌改良の可能性が提案された。同時に塩類土壌の耐水食性の効果も示唆できた。本研究はまだまだ基礎的検討を必要とし検討課題が数多い。主な課題として人工ゼオライトの適正混入率の検討, 粘土質の塩類土壌と混入した人工ゼオライトの基本的特性の把握さらには乾燥地フィールドへの適用研究等あげられる。

#### 参考文献

- [1] 逸見彰男：産業廃棄物のゼオライト転換による再資源化・有効利用技術開発, 環境対策シリーズ(1), (株) ニュー・テクノロジー&サイエンス(1994).
- [2] 山本太平：中国における砂漠化防止活動と毛烏素砂漠砂漠の牧農村計画, 農地・農村の整備—環境保全の工学的展望(高須俊行編), 土地改良技術情報センター, (1993) 429-446.
- [3] 山本太平・藤山英保：乾燥地における砂漠緑化と農業開発(その3)—水資源・水消費特性と灌漑技術—農業土木学会誌, 56-12, (1988) 59-66.
- [4] 山本太平：点滴灌漑における消費水量-点滴灌漑の用水計画(1)-農業土木学会誌, 57-6, (1989) 25-31.
- [5] 農林水産省構造改善局計画部：土地改良事業計画指針, マイクロかんがい, 土地改良事業計画指針, (1994) 12-26.
- [6] 農林水産省構造改善局計画部：土地改良事業計画設計基準, 計画, 農業用水(畑). (1997) 74-89.
- [7] 山本太平：点滴灌漑における有効雨量-点滴灌漑の用水計画(2)-農業土木学会誌, 57-8, (1989) 13-18.
- [8] 森智子, 山本太平, 吉岡武雄, 井上光弘：ハウス内砂床における人工ゼオライトの施用による塩水の灌漑効果試験, 平成9年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, (1997) 218 - 219.
- [9] 山田美奈・植平真稀・李 相勲・遠藤常儀・山本定博・本名俊生・藤山英保：強アルカリ土壌での栽培に対する人工ゼオライトの施用効果, 第96回日本土壌肥料学会関西支部講演会要旨. (2000) 29.
- [10] 吉永光秀, 山本太平, 井上光弘：人工気象室条件下におけるホウレンソウの塩類ストレス, —Ca型人工ゼオライトの施用による塩類土壌の改良—, 平成9年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, (1997) 220 - 221.
- [11] 祐谷有恒・山本太平・Guang Wen・井上光弘：人工ゼオライトによる塩類土壌の水食防止, 平成12年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, (2000) 524 - 525.

## ゼオライトー水系ヒートポンプの開発と課題

Development of Zeolite-Water Heat Pump and Subjects to be Solved

溝田 忠人 (山口大学)

Tadato MIZOTA (Yamaguchi University)

## 1. はじめに

ゼオライトー水系ヒートポンプは、ゼオライトを水蒸気の吸着材として用い、その吸脱着エネルギーを利用して、低温の廃熱、太陽熱などの回収・利用を行うシステムである。Tchernev (1978, 1980) がゼオライトを用いて、太陽熱エアコン、冷蔵庫が実現できる [1, 2]、と発表し、注目され、その後、多くの研究がなされたが、現在まで実用化に至っていない。

我々は、ゼオライトの水和熱測定を行う過程で、このシステムに興味を持ち、その動作原理、すなわちゼオライトと水の関係について主として、熱力学的な検討を行い、このシステムが、特に低い温度の熱源の利用のために極めて魅力的であることに確信を持った。現在、小型ヒートポンプを作って、このシステムについて検討を続けている [3, 4]。この報告では、ゼオライトー水系ヒートポンプの熱力学的特徴と、実用に至らなかった理由すなわち問題点、現在の課題および可能性について論じる。

## 2. ゼオライトー水系ヒートポンプ

このヒートポンプの構造は極めて単純である。図1にその概念図を示す。ゼオライトからなる吸着材の詰ったベッド(ZB)と、それに配管でつながった凝縮器(CND)、水溜(WR)の3つの部分からなる。内部にはゼオライトと水だけ(厳密にいうと液体の水と水蒸気の2相)が入っており、ベッドと他の部分の間にはバルブが設置されている。ゼオライトベッド、凝縮器、水溜には熱交換装置が組み込まれている。動作は以下のようなものである。

1) 脱水・凝縮過程：ZBのゼオライトに熱源から熱が供給され温度が上昇し(せいぜい200℃程度)脱水が起こる。水蒸気はCNDで冷却・凝縮されて水

になり、WRにたまる。

2) 冷却過程：次にバルブを閉めて、水蒸気の移動を止めZBを室温に冷やす。これによりZB内部は、「極めて低い水蒸気圧」になる。

3) 蒸発・水和過程：コックを開けるとWRから蒸発が起こり、水蒸気はZBに吸収されてゆく。WRは蒸発熱を奪われ、冷却する。WRの周囲を断熱すると氷の製造が可能である。冷房等にも応用できる。一方ZBの内部は水蒸気を吸収して発熱する。この熱を温熱源として使うこともできる。勿論、ZBは放熱して冷やさないと、水和が十分行われないが、脱水ゼオライトはかなり高温でも蒸気圧が低いのが特徴(水蒸気圧-組成の非線形性)である [2, 4, 5]。

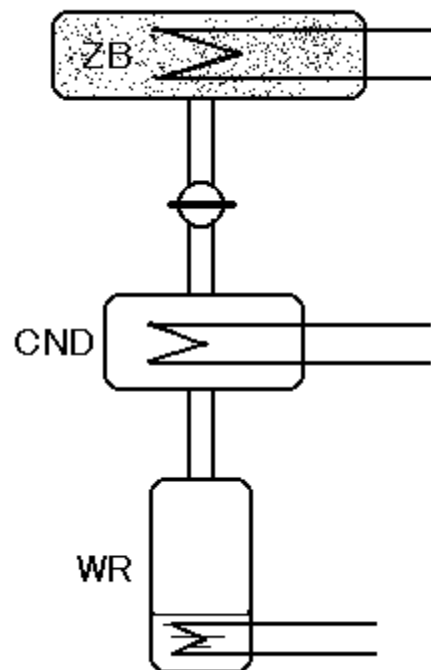


図1 ゼオライトー水系ヒートポンプ概念図。ZB：ゼオライトベッド，CND：凝縮器，WR：水溜

以上でヒートポンプの1サイクルの運転が完成する。蓄熱エネルギーの利用は、温熱としてZBから、冷熱としてWRから取り出すことができる。この蓄熱は「断水」によって行なわれるので、基本的に蓄熱中に「断熱」する必要が無い。また、脱水能力を利用して、乾燥システム、特に低温または凍結乾燥も実現できる [3, 4].

### 3. ゼオライトヒートポンプの熱力学

#### 3.1 ゼオライト-水系の熱サイクル

このように単純な装置でヒートポンプが組める要因は、ゼオライトと水の組み合わせに由来するので、その熱力学的性質を明らかにしておく必要がある。このヒートポンプの動作サイクルを図2のように画いてみる。この図では、当初行った我々の実験 [3]を模擬して、運転サイクルを室温と100°Cの間で

行うものとする。

含水ゼオライト（左下）は25°Cから加熱( $Q_h$ )され、100°Cに達する(左上)。この時、実際には加熱途中で一部脱水が起こるが、簡単のためそれを無視する。100°Cにおいて熱( $\Delta H_d$ )の供給により脱水し、脱水ゼオライト(ただし、この脱水温度ではゼオライト水はかなり残っている)と水蒸気(圧 $P_d$ )に分かれる。脱水ゼオライトは冷やされ( $Q_c$ )、25°Cとなる。一方水蒸気(右上)は、25°Cに冷却( $Q_{vc}$ )され、かつ蒸気圧が $P_h$ になるまで膨張( $Q_{ex}$ )させられる(これは、可逆的にサイクルを回す場合のためである)。次に25°Cで水和し、水和熱( $\Delta H_h$ )が生じる。以上で1サイクルが終わり、元の含水ゼオライトに戻る。

ゼオライトヒートポンプは、上述のサイクルを回るが、このサイクルモデルは理論的にはいくつか問

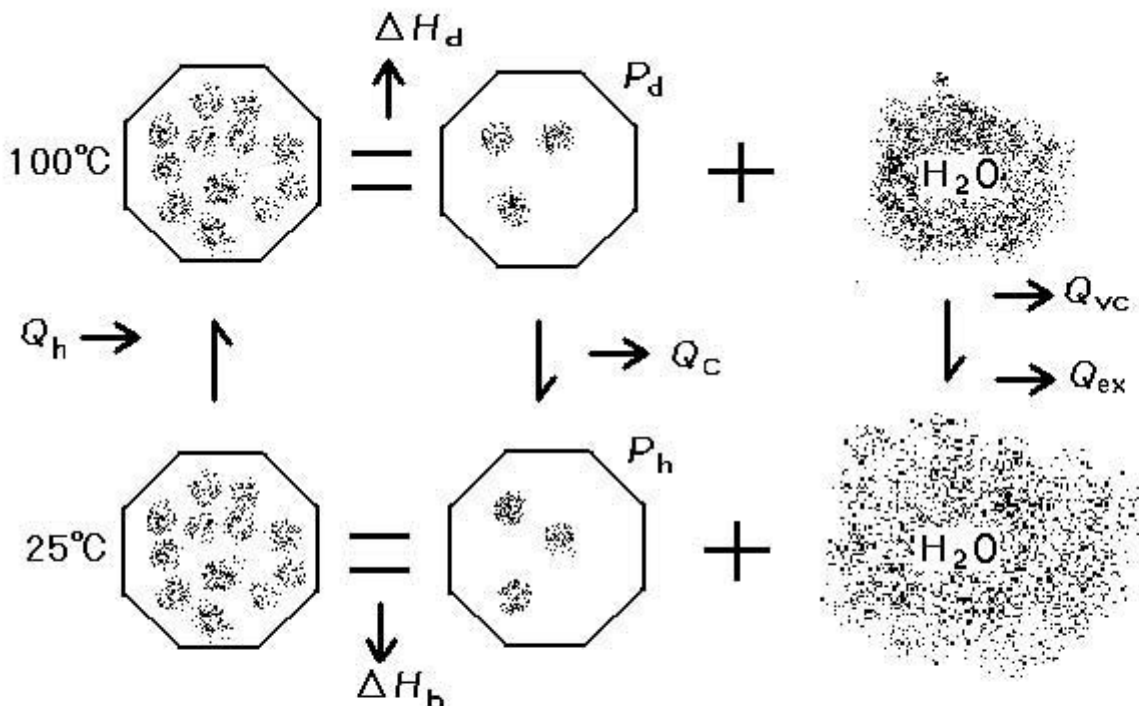


図2 ゼオライト-水蒸気サイクルの熱収支、水和時は25°C、脱水時は100°Cとする。  $\Delta H_d$ 、  $\Delta H_h$  : 水蒸気の脱水および水和エネルギー；  $Q_h$  : 含水ゼオライトの加熱エネルギー；  $Q_c$  : 脱水ゼオライトの冷却エネルギー；  $P_d$ 、  $P_h$  : 脱水および水和時の平衡水蒸気圧；  $Q_{vc}$ 、  $Q_{ex}$  : 水蒸気の冷却エネルギーおよび膨張エネルギー。八角形がゼオライトのフレームワークを示す。矢印は、変化の方向と、エネルギーの移動方向を示す。

題がある。1つは、前述の、ゼオライトの加熱過程で脱水が連続的に起こることである。他は、ゼオライトの水蒸気圧 $P_d$ ,  $P_h$ である。実際の運転では、 $P_h$ は、室温(25°C)の自由水の蒸気圧である。すなわち、ゼオライト水の平衡蒸気圧ではなく、水蒸気を供給する水の蒸気圧である。従って、運転時の水和は非平衡で行っている。

### 3.2 ゼオライト水のエントロピー

実際に脱水ゼオライトの25°Cにおける平衡水蒸気圧を測定すると極めて低く、また水和に伴って蒸気圧は上昇・変化する。従って、熱力学的に厳密な可逆平衡サイクルを考える場合には、ある含水量における微分吸着熱を用いなければならない。 $P_d$ についても同様であるが、ここでは論じない。ゼオライトの平衡水蒸気圧、 $P_h$ 、の温度変化測定より、微分吸着熱を算出できる[4, 6]ので、厳密な可逆過程の解析が可能である。これにより、「独立成分 $H_2O$ 」を仮定すると、ゼオライト水のエントロピーが25°Cで殆どゼロであると結論された[6]。すなわち、ゼオライトの中では、フレームワークと交換性陽イオンの作る細孔の中で水分子が、固体状態の水の結晶以上の強い拘束を受けている事を示している。このことは、従来ゼオライト水が、自由水と氷の間の性質を持っていると考えられていたのとは大きな違いである[6, 7]。

驚くべきことは、ゼオライト中の比較的弱い結合水も極めてエントロピーの低い状態にあることである。例えば、Mg50-A(A型ゼオライトのNaの半分をMgで交換したもの)では、水分量が27%程度あるが、15%脱水(真空中で100°Cで脱水した場合に相当)状態から飽和水和までの水分子の平均のエントロピーもゼロに近いのである[6]。

更に重要なことは、このゼオライト水の状態は、水蒸気を介して「利用可能」なことである。一般に、絶対零度などの極低温状態は、物質の移動が期待できないので利用することが極めて難しいばかりでなく、その状態を作るのにクライオスタットなどの装置とかなりの運転エネルギーが必要である。しかるに、ゼオライト-水系を用いると、せいぜい100～

200°Cの温度と、室温の2つの熱源で簡単に低エントロピー状態が生成できる。しかも、 $H_2O$ の独立成分として、水蒸気を脱水ゼオライトに触れさせることで、直ちにそのエントロピー状態の交換が出来る。すなわち、ゼオライト水はあたたかも、バケツに入った水のように容易に利用できるので、「仮定」ではなく実質的には独立成分として「利用可能」なのである[6, 8, 9]。

ここで、従来混乱のあったゼオライト水のエントロピーの導出について確認を行う必要がある。独立成分と「仮定」したゼオライト水のエントロピーは、水分子の状態を考えると有用で、従来から多くの研究がなされ、大別して2つのアプローチが行なわれてきた。

1つは、ゼオライトの水和物と脱水物の0 Kからの熱容量を断熱型熱量計により測定し、次式によりエントロピーを求める方法である[10-14]。

$$S_{zw} = \int_0^T \frac{Cp^h}{T} dT - \int_0^T \frac{Cp^d}{T} dT \quad (1)$$

ここに、 $Cp^h$ ,  $Cp^d$ は、それぞれ水和物および脱水物の熱容量である。この式は、その積分範囲で相転移などの変化は無いものとしている。(1)式には、水とフレームワークの相互作用の項、すなわち脱水または水和による変化に関わる項が無い。従って、この式によって求められる $S_{zw}$ は、フレームワークによって「少し拘束を受けた“水”」のエントロピーの値を示し、当然、水と氷の中間の値、ないし氷程度の値になるであろう[6, 7]。

2つ目は、水和またはそれと可逆な脱水のエントロピー変化を求め、正確に分かっている標準状態の水蒸気のエントロピー( $S_w^\circ = 188.825 \text{ JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$ )から熱化学的に導出する方法である。この方法に必要な水和(脱水)エントロピーの求め方には、水和熱量計を用いる方法と、水蒸気圧の温度変化から、Clausius-Clapeyronの関係を用いる方法の2つある。前者は、水和させる範囲の平均の積分水和エントロピーを求める方法であり、後者は、ある水和レベルにおける微分水和エントロピーを求める方法である。厳密には、微分水和エントロピーが求めれば、

(2) 式が成り立つ：

$$S_{zw} = 188.825 - R \ln \frac{P}{P_0} + \frac{\Delta H_h}{T} \quad (2)$$

ここに、 $P$ はゼオライトのTKにおける平衡水蒸気圧、 $P_0$ は標準圧101,325Paである。すなわち、(2)式は、標準状態(298.15K, 101,325Pa)における水蒸気を、平衡圧 $P$ に可逆膨張させ、ゼオライト水へともたらす可逆プロセスにより、ゼオライト水のエンタロピーが求まる事を示す[6]。(2)式は、理論的に厳密であり Barrer(1984)によってもゼオライトへの吸着現象に関して与えられている[15]。しかし、水分子に関しては、過去にこの式を用いて、正しくゼオライト水のエンタロピーを評価した研究が無い。類似した扱いにも、標準状態の水蒸気の扱い等に混乱があつて、結果として、水と氷の中間の値としている[6]。人間の常識が、場合によっては、いかに危険かを示す好例であろう。

正しくこの式を適用して求めたゼオライト水のエンタロピーは、氷のそれよりはるかに小さい値であつた。Mg50-Aにおいては、5%脱水レベルで13 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>となり[8, 16]、これから類推しても、15%脱水レベルでは極めて低いエンタロピーであろう。もっと脱水状態の進んだ低圧において水蒸気圧を精密に測定することが難しいので、詳しい測定は今後の課題である。

水和熱量計を用いて、15%脱水から飽和まで、298Kにおける水の平衡水蒸気圧下で水和させ、平均の積分水和エンタルピーを求め、平衡水蒸気圧を水の蒸気圧と仮定して求めたエンタロピーは3JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup>となった。液体の水を水和させた実験でも同じ値を得た[6]。この方法は厳密ではないが、実用評価上の意味は持っていると考えられる。

#### 4. ヒートポンプによる冷熱・温熱の生成

図2の最下部の水和プロセスに、図3のプロセス

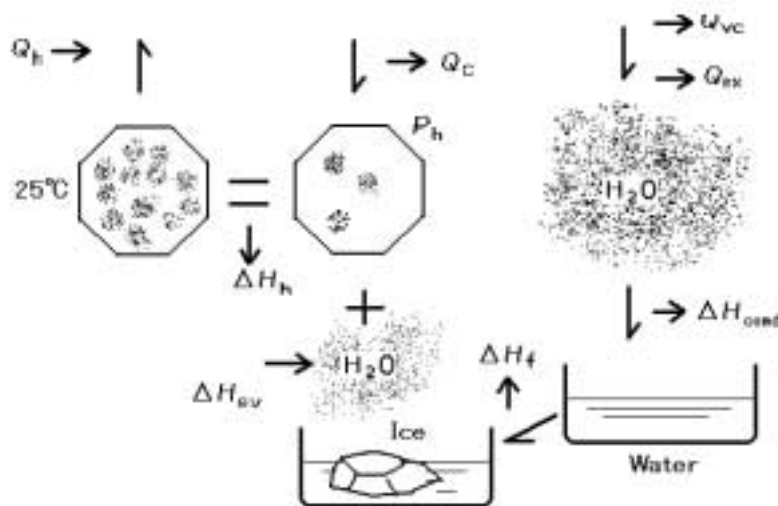


図3 ヒートポンプ冷却プロセス。図2の下部に冷却プロセスを加えて書き直したもの。 $\Delta H_{\text{cond}}$ ：水蒸気の凝縮エンタルピー、 $\Delta H_f$ ：水の凍結エンタルピー、 $\Delta H_{\text{sv}}$ ：氷や水の昇華、蒸発エンタルピー。これらのエンタルピーの他に、水蒸気、水、氷の温度変化に必要な熱も必要であるが省略した。



を付加すると、冷熱を生成できる。ここで、利用できる熱は、温熱の場合、水和熱 $\Delta H_h$ 、冷熱の場合、水の蒸発熱若しくは氷の昇華熱 $\Delta H_{ev}$ である。室温における水和熱は $-64\text{kJ/mol}$ 程度で、ゼオライトの加熱脱水に要するエネルギーもこの程度と考えられる[9]。水の蒸発熱は $44\text{kJ/mol}$ なので、冷熱としての利用は $44/64=0.69$ 、すなわち、最大で69%有効に使える。ゼオライト3kg レベル実験用ヒートポンプの水和時のベッド内部の最高温度は、脱水15%レベルのとき、 $90^\circ\text{C}$ 以上を記録した。ゼオライト350gレベルの小さなヒートポンプで、3%脱水レベルでさえ、魔法瓶で断熱して冷却した場合、最低到達温度は $-18^\circ\text{C}$ であった[3]。

この時の氷の水蒸気圧は約 $100\text{Pa}$ である。現在最もヒートポンプ吸着材として能力の高いMg-50A型ゼオライトでは、1kg当たりの蓄熱能力は $540\text{kJ/kg}$ (15%脱水)であるが、高温( $200^\circ\text{C}$ 程度)で、もっと脱水すると $800\text{kJ/kg}$ にも達する。蓄熱密度では、高性能なアルカリ電池などに匹敵する。

## 5. ゼオライト-水系ヒートポンプの問題点と今後の課題

先にも述べたように、このヒートポンプは20年前に提案され、興味をひき、多くの研究がなされた。しかし、現在まだ実用化に至っていないことも事実であり、そこには解明しなければならない問題点があった。以下、それらについて述べる。

### 5.1 実験用ヒートポンプの運転時のトラブル

このシステムが20年間実用化できなかった技術的理由を明らかにしなければならない。これは我々がこのテーマに取り組んだ当初から気にかかっていたことである。Mg-A型ゼオライトの大きな熱交換能力を見いだして[17]からは、理論的には何の障害もないように思えた。しかし、1998年から本格的にガラス製の小型ヒートポンプなどを作製し、運転を繰り返す過程で、次第にその「魔物」の正体が明らかになってきた。

このヒートポンプを作製した当初、1回目の運転は問題ないが、2回目には、脱水や水和が十分行なわれなくなり、3回目には殆ど何も出来なくなって

しまった。例えば脱水操作においては、ゼオライトベッド内部の温度・圧は上昇するが、全く脱水しなくなる。水和過程では、水溜からの蒸発が止まってしまう。考えられる原因は2つあり、第1は、加熱によりゼオライトが構造破壊し、水和能力を失う致命的な場合；第2は、空気の混入により、水蒸気の移送が閉塞する場合である。前者については、それまでの繰り返し水和熱測定によって、 $160^\circ\text{C}$ 程度では、Mg50-A型ゼオライトの構造がつぶれるような事はないとの確信があった。もし、その確信が無かったら、我々も研究を止めていただろう。従って、第2の理由のみに原因が絞られた。確かに、このような閉塞が起こった時、空気が存在する可能性のある末端部を僅かに真空ポンプで吸引すると、能力が回復する、しかし、直ぐまた閉塞する状態が続いた。運転中の内部の温度と蒸気圧を丹念に測定することで、この原因が解明された。理解を容易にするために、図1のZBの内容積を $50\text{dm}^3$ 、CNDとWRを合計して $2\text{dm}^3$ と見積もる。これは、現在我々が、ゼオライト量3kgとして作った実験用小型ヒートポンプのスケールに近い。このヒートポンプの $160^\circ\text{C}$ における脱水時の最大の蒸気圧は $15,000\text{Pa}$ 程度である。当初は、数気圧になると考えていたが、意外に低い圧であった。この圧で脱水とCNDにおける水蒸気の凝縮が継続すると、水蒸気がCND+WRに移送される過程で、もし混入した空気があれば、そこに集まってくるだろう。高々 $2\text{dm}^3$ の空間に空気がこの気圧で満たされた場合は、水蒸気はパイプ内を空気内の拡散でしか動けず、事実上凝縮できないことになる。この時の空気の量は、 $0.013\text{mol}(0.36\text{g})$ でしかない。脱水可能な水の量はこの場合 $450\text{g}$ 程度なので、モル比では0.05%ほどの空気が混入していても閉塞する。

一方、水和過程では、蒸気圧は、 $25^\circ\text{C}$ の水の蒸気圧として約 $3,000\text{Pa}$ である。この場合約 $50\text{dm}^3$ のベッドを閉塞する空気の量は $0.06\text{mol}(1.7\text{g})$ 程度である。これも全水の量に対してモル比で0.24%程度である。水温が下がると蒸気圧も下がるので、もっと僅かの空気の混入でゼオライトは水和できなくなってしまふ。このくらいの量の空気は、バルブやジョイ

ント等からのわずかな真空漏れ、ゼオライトに吸着しているガス成分の離脱、WRに予め水を入れておく場合には、水に溶解した空気成分などの離脱などで、系内に容易に溜まるであろう。

## 5.2 空気輸送による運転

一方、このような真空対策は面倒な問題なので、空気をポンプで移送して、空気中の水分により水和させる方法も検討された例もある [7]。しかし、これには次のような、致命的な欠陥がある。

大部分のゼオライトは空気も吸着する。特に窒素は、特異吸着するので、ゼオライトは空気中の窒素と酸素の分離に使われている (プレッシャースイング法)。系内に窒素などが存在した場合、ゼオライトの吸着過程は以下のように考えられる [5] :

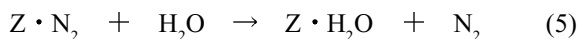
脱水過程



冷却過程・水和過程



水和過程



脱水過程 (3) では、正常に水が離脱したとする。脱水終了後および冷却され水和が始まった時は、先ず空気成分の窒素などがゼオライトに吸着するであろう (4)。引き続き水和過程 (5) では、窒素分子と水分子の交換反応になる。この場合、窒素の吸着熱はゼオライトの種類に依存するが、室温付近で、 $-26\text{kJ/mol}$  から  $-38\text{kJ/mol}$  程度である [15]。これは、水蒸気の吸着熱 ( $-64\text{kJ/mol}$ ) の半分程度の大きさなので、ゼオライトベッドの加熱能力・脱水能力は半減する。

空気中の水分量は、水蒸気分圧に比例するので、室温では、3% 程度しか含むことが出来ず、97% の空気の送風に無駄なエネルギーを使わざるを得ない。

この他にも、ゼオライトと水分子の会合は、ゼオライト粒子間の隙間を通して行なわれる。ゼオライト粒子間では、速やかに水分子のみゼオライトに補

足され、水分子の補充は、狭い粒子間を満たした空気分子の中を拡散することによって行なわれる。空気の通路を大きくすれば、ゼオライトベッドが大きくなる。そして、結果として低密度の充填では、熱伝達・熱交換が遅くなるだろう。従って、ゼオライトヒートポンプにおいては、空気などの水分子以外の気体は混入させるべきでなく、ゼオライト-水系で設計すべきである。

ゼオライト表面は、含水量の大きいゼオライトでは親水性であるが、表面で液体の水が現れ、水蒸気の輸送を妨げるような運転状況は、故意に行う以外は存在しないであろう。なぜなら、そのような場合には、ゼオライトは完全に水で飽和しており、脱水操作を待つ前の状態だからである。すなわち、ゼオライト-水系ヒートポンプのゼオライトベッド内部は完全にいつでも“ドライ”な状態である。

## 5.3 ゼオライトヒートポンプは真空装置

以上述べてきたように、ゼオライトヒートポンプでは、高圧側でせいぜい  $13,000\text{Pa}$  程度 (ただし、Mg-A 型ゼオライト、 $160^\circ\text{C}$  脱水において)。一方低圧側は、 $160^\circ\text{C}$  で重量比 15% 脱水したゼオライトを室温に戻した時の蒸気圧は恐らく  $10\text{Pa}$  程度の低圧であろう。従って、かなり高度な真空装置と理解しなければならない。一般の化学装置の真空レベルは  $600 \sim 700\text{Pa}$  程度で設計されるので、それに比べると 2 桁高真空を保持しなければならない。ここに、これまでゼオライトヒートポンプが実用化できなかった最大の問題点があった。フロンやアンモニアに慣れたヒートポンプの設計者はこのような低圧のことを重要と考えなかったし、ゼオライトの研究者はそのような事態になることの装置上の深刻さを理解はしていなかったであろう。

それでは、今後もゼオライトヒートポンプは実用化されないのだろうか。言葉を変えると  $10\text{Pa}$  の汎用装置は不可能なのだろうか。加速器や宇宙航空分野における高真空とは比較にならないが、民生用のステンレス製の魔法瓶が何年も使用に耐えている例もある。要は発想の転換であろう。このような低圧装置が必要で、利益を生むと確信をすれば技術上の問題はほとんどないに等しい。低温熱源を有効

利用できる方法はこれ以外にないといっても過言でない。

#### 5.4 水蒸気のエネルギー輸送

一方、低圧の水分子ではエネルギー輸送速度が低いのではないかと、ほとんど真空であるゼオライトベッドの中では熱伝達が十分できないのではないかと疑問がある。しかし、水蒸気分子は、気体であるがゆえに大きなエネルギー、すなわち分子運動速度（室温で約600m/s）を持ち、大きな水と熱（64 k J/mol）を運んでくれる。これは、10mの距離を1秒間に3840kJのエネルギーを輸送することになる。もし、流水によってこのエネルギーを運ぶとすれば、10mの距離を100℃の水を流して25℃にするとして、毎秒約13dm<sup>3</sup>流す必要がある。水蒸気は気圧差のみで輸送され、水であれば、かなりのポンプエネルギーを必要とすることは明らかである。ベッドの中においても、ゼオライト粒子間を高速で飛び回る水蒸気分子によって、熱伝達・熱交換も容易と推定されるが、定量的な検討は今後の課題である。

#### 5.5 アモルファス系との違い

ゼオライトと同様にシリカゲル等のアモルファス系の乾燥剤もヒートポンプ吸着材として使われている。むしろ、今はゼオライトのほうがマイナーな存在である。しかし、ゼオライトは結晶であるという点でアモルファス系の固体吸着材と決定的に異なる。結晶中の孔は、形も大きさも、性質もそろっており、従って物理化学的性質が均質で、中に入る水のエネルギー状態も比較的均質である。これは、そのゼオライトに特有な温度・圧において脱水、水とが一斉に起こる事を示す（蒸気圧-温度、水組成関係における非線形性）。アモルファス系の物質は、これに対して、蒸気圧が、温度、水組成に対して線形的に変化する。ゼオライトは比較的狭い温度範囲で、蒸気圧を大きく変えるので、その狭い温度域で、吸着剤として有効なのである[18]。あるヒートポンプの開発者は、「ゼオライトは理論的には面白いが、そのP-T-C関係が分からず設計できないのが、利用されない理由だ」と言っていた。これは重要な指摘である。

ゼオライトは、天然と合成を含めると100種以上

がある。また、陽イオン交換により性質を自在に変える。この変化に伴って、蒸気圧-温度、組成曲線も変化する。従って、厳密に言えば、利用する温度域に最適なゼオライトを選ぶ必要がある。シリカゲル等は、相互にこのような差があまり無いので、どれでもそれなりの性質を示すが、ゼオライトでは、それぞれに個性がある。このことは、ゼオライトを利用しようとする場合の面倒な側面でもある。各ゼオライトに関して、現時点ではP-T-Cの関係を明らかにして初めて有効な能力が引き出せるのである。これも今後の必要な課題である。

また、アモルファス系の吸着剤と異なり、ゼオライトは水の吸脱着による体積変化が殆ど無く、破壊温度以下で使った場合、性質の経時変化もないという優れた点がある。

#### 6. おわりに

このヒートポンプは、現在無為に捨てられている低い温度の廃熱や太陽熱を回収し、熱の有効利用を図るためのシステムであるが、ゼオライトが環境対策上極めて安全な点[5]も強調できる。一方、動作媒体は、水以外にも考えられるが、環境問題の観点から、水系で実用化されるのが最も良いと思われる。

ゼオライトなどマイクロポーラス物質という物質界の異端児と、物理化学的な異端児としての水の組み合わせが、エネルギー的にも環境的にも最も魅力ある組み合わせであろう。

200℃以下の熱と室温から簡単に冷熱を生成する本システムは、排熱環境温度を下げることにより、一般の機関のカルノー効率を上げる手段としても利用価値がある[5, 6, 8]。また、100℃以下の、より低温で有効な吸着材の開発にも興味をもたれている[19]。

謝辞：この研究は、平成11年度から3年間NEDOの新エネルギー・産業技術創造型提案公募事業プロジェクトとして進められている。同時に平成11・12年度（財）中国技術振興センタープロジェクトとして研究会が組織され、援助されている。また（財）

日本鉱業振興会から平成11年から3年間の研究助成により主として天然ゼオライトの利用に関して研究会を行っている。このような支援の下に、本研究が行われ、研究会に参加されている多くの企業、行政機関、研究所、大学の方々の励ましや、援助に負う所が大きい、合わせて感謝する。

#### 参考文献

- [1] D. I. Tchernev, *Natural Zeolites*, L.B. Sand and F. A. Mumpton (eds.), Pergamon P./Oxford, (1978) 479.
- [2] D. I. Tchernev, Proc. 5th Int. Conf. on Zeolite, L. V. C. Rees, ed., (1980) 788.
- [3] 溝田忠人, 資源と素材 **115** (1999) 195.
- [4] 溝田忠人, 応用鉱物学の分野, 鉱物学雑誌, **28-2**(1999) 47.
- [5] 溝田忠人, マテリアルインテグレーション, (2000) 25.
- [6] T. Mizota et al., *Steam, Water, and Hydrothermal Systems: Physics and Chemistry Meeting the Needs of Industry*, P. R. Tremaine et al. eds., NRC Res. Press/Ottawa, (2000) 623.
- [7] 溝田忠人, 熱測定, **24-1** (1997) 79.
- [8] 溝田忠人, ゼオライト, **17-3**(2000) 108.
- [9] 溝田忠人, 資源処理技術, **46-4** (1999) 225.
- [10] G. K. Johnson, et al., *Am. Mineral.*, **67** (1982) 736.
- [11] G. K. Johnson, et al., *Am. Mineral.*, **68** (1983) 1134.
- [12] G. K. Johnson, et al., *Am. Mineral.*, **70** (1985) 1065.
- [13] A. Howell, et al., *Zeolites*, **10** (1990) 525.
- [14] B. S. Hemingway and R. A. Robie, *Am. Mineral.*, **69** (1984) 692.
- [15] R. M. Barrer, *Zeolites: Science and Technology*, F. R. Ribero et al., eds., NATO ASI Series, Martinus Nijhoff Pub./The Hague, Boston, Lancaster) (1984) 227.
- [16] T. Mizota, et al., *J. Thermal Anal. Calor.* (投稿中).
- [17] T. Mizota et al., *Thermochim. Acta*, **266** (1995) 331.
- [18] 溝田忠人, 中山則昭, 熱測定, **25-3** (1998) 67.
- [19] M. Suzuki, et al., *Mineral. J.* **22-1**(2000) 1.

## 伝熱研究への期待

*Hopes for Advances in Heat Transfer*

福地 健 (バブコック日立㈱)

Takeru FUKUCHI (Babcock-Hitachi K.K.)

## 1. はじめに

当社は日立グループの一員として、火力発電用ボイラ、排煙浄化装置、原子力機器、ごみ焼却設備、ダイオキシン処理触媒などを製造しており、私は呉研究所（広島県呉市）に所属している。

今回、自分と伝熱研究との関係を考える機会を頂いた。貴重な紙面を費やす意義があるものか自信はないが、発展途上の研究者に対し原稿依頼があったものと解釈し、自分なりの研究開発の経験を紹介する。

## 2. 研究内容の紹介

## 2.1 学生時代

同じ研究室で異なる3種の研究テーマを担当した。順に、

- ・有機媒体を用いたランキンサイクルの効率評価
- ・粒子による散乱を含む輻射伝熱数値解析
- ・はく離流れ場での対流伝熱（数値解析，実験）

である。どれもが現在の業務に深く関わっている。ボイラに関わる熱力学、火炉内伝熱、流体力学の基礎を学ぶことができた。

最後に示したテーマの目的は、主流温度の定義が明確でないはく離流れの系における、対流伝熱の機構を明らかにすることである。この際、熱輸送の機構を可視化するために用いた熱流線と称する考えが面白いと思われ、紹介する。要約すると、2次元の流れを流線で可視化する手法を、対流伝熱に適用したものである。

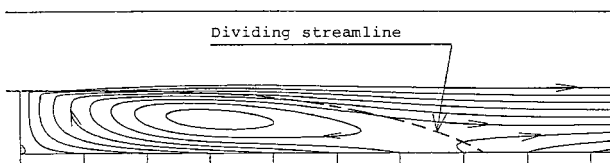


図1 熱流線（ステップ流れ，底面加熱）

図1は2次元後向きステップである。ステップレイノルズ数 $10^5$ にて標準k- $\epsilon$ 乱流モデルを用いて流動数値解析を行った後、乱流プラントル数0.9で対流伝熱を解析した[1]。底面を等熱流束加熱し、他の壁面は断熱とした。式(1)はエンタルピー輸送と渦拡散を考慮して拡張解釈した熱流束ベクトルであり、エネルギー式は式(2)となる。2次元の連続の式から流れ関数を定義したのと同様、生成項がない式(2)から、式(3)の $\phi$ を定義できる。 $\phi$ の等値線を熱流線と呼び、図1に示す。

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i} + q_y \mathbf{j} \quad (1)$$

ただし

$$q_x = \rho c_p [u(T - T_0) - \kappa_e \partial T / \partial x]$$

$$q_y = \rho c_p [v(T - T_0) - \kappa_e \partial T / \partial y]$$

$T_0$ : エンタルピーの基準温度

$$\text{div } \mathbf{q} = 0 \quad (2)$$

$$\phi = \int (q_x dy - q_y dx) \quad (3)$$

同図から、流れと渦拡散による熱輸送の様子が理解される。

## 2.2 企業での研究

‘91年の入社以来、ボイラ設計と運用決定への応用を目的とした数値解析を担当している。具体的には、多数のバーナを配置した大型（高さ約60m）火炉を対象とした流れ、燃焼、伝熱の数値解析である。自作・市販コードを種々試したが、当社と日立製作所で共同開発したプログラムを微粉炭燃焼ボイラの設計に活用している[2]。微粉炭燃焼ボイラの設計にあたっては、(1)燃料の燃焼が十分に進み灰中未燃分が少ないこと、(2)排ガス中の環境汚染物質であるNO<sub>x</sub>、COの排出量が少ないこと、(3)火炉水壁への熱流束分布に極端なピークがなく、火炉水壁出口部での蒸気温度が一樣であることが要求される。この目的のため、微粉炭の燃焼、輻射伝熱、水壁管内の流量配分・温度変化をシミュレートすることにした。

燃焼・NO<sub>x</sub>のモデル化にあたり、低NO<sub>x</sub>バーナ開発の経験[3]が応用されている。バーナ開発の第一ステップとして、基礎燃焼試験を綿密に行っている。ここで得られたデータを用い、炭種や運用条件に応じた固相・気相反応のモデル化を行った。また、実機の灰中未燃分、NO<sub>x</sub>、COの測定データによりモデルの検証を行っている。

大型ボイラの場合、火炉内の燃焼ガスから周囲水壁への伝熱は、ほとんどが輻射伝熱による。これは、燃焼ガスの温度レベルと火炉の寸法に伝熱機構が依存しているためである。上記のプログラム開発にあたり、この火炉内輻射伝熱を担当した。解析上は、輻射性媒体の物性と輻射輸送のモデル化が必要である。微粉炭燃焼で対象となる輻射性媒体は、気体分子(H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>)と固体粒子(原炭、チャー、フライアッシュ、すす)である。前者は光学データベースであるWeighted Sum of Gray Gasesで、後者はMie散乱理論で輻射物性を評価している。Mie散乱のプログラムは、学生時代に作ったものである。物性情報は前処理計算で数表化し、本計算に負担を与えないようにしている。輻射輸送の数値解法には、精度と計算負荷に関しDiscrete Transfer法が適当と判断して、採用した。実機の火炉検査窓から測定した輻射熱流束により、検証を行った。

本プログラムでは、火炉内の伝熱・燃焼に加え、水壁の熱流束分布と水管配置を考慮して、水管内の水・蒸気を解析できるのが大きな特徴である。ここには、原子力分野で培った2相流熱流動の技術を応用した。この水管内流動モデルと前述の石炭燃焼・輻射伝熱モデルを統合することで、水管1本1本の非定常熱流動特性を把握している。また、使用・休止するバーナの位置により実機の火炉水壁出口温度の分布が変化する。本プログラムではこの現象を再現したことから、適切な伝熱解析を行っているかと判断した。

本プログラム開発にあたっては、実機検証データに基づき、設計者の要求に照らし合わせ数値解法と物理モデルを取捨選択した。一般的に採用されている手法であっても、設計時に参照する物理量への影響が小さい、または明らかでない手法は効果がないものと考え排除した。

このように、火炉解析にはこれに特化した社内開発ソフトを用いているが、汎用的には市販CFDコー

ドを電卓感覚で使用している。伝熱工学資料などで扱えない複雑形状に対して大変便利である。ただし、市販コードは計算機能を提供するだけであり、計算結果に責任を持つのはユーザーであると認識している。不慣れな数値解法や物理モデルは、使う前に原理を学習するようにしている。一例として、輻射輸送の数値解法の中には、原理的に系でのエネルギー保存を近似的にしか満たさない手法もある。燃焼解析などへの応用には注意が必要である。

### 3. 今後の展望

これまでの業務経験から、輻射輸送の数値解法に興味を持っている。計算負荷、適用範囲、精度に関して普遍的に優れた手法は存在しないため、手法選択の指針があると便利である。一部分報告している[4]が、今後は系統的なサーベイをしたい。また、実用意義のある新手法の考案の夢も持っている。一般に、輻射伝熱の計算は面倒で敬遠される傾向がある。現場で手軽に計算できる仕組みが構築できれば有意義であろう。

これまでは発電システムの要素であるボイラに傾注してきた。これを発展させ、システム全体を捕えた上で、直接発電や複合サイクルへの展開を図りたい。手法としてはエクセルギ解析が主体になるが、素現象や熱力学での公理の本質的理解に機械分子工学を応用し、新システムの提案ができればと、具体案なく無責任ではあるが思っている。

伝熱研究の一端に参画することで、諸先輩の英知に触れる機会を得たことに感謝している。伝熱研究の閉塞感を訴える方もいるが、理学(基礎)と実機プラント(先端応用)の両方に目を向ければ、意義深いテーマは多数あると楽観的に考えている。

### 参考文献

- [1] 工藤一彦, 谷口博, 小林敏雄, 福地健, 日本機械学会論文集B編, **57-535** (1991) 1071.
- [2] 山本研二, 福地健, 茶木雅夫, 下郡嘉大, 松田順一郎, 日立評論, **82-2** (2000) 177.
- [3] 津村俊一, 木山研滋, 野村伸一郎, 小林啓信, 日立評論, **80-2** (1998) 211.
- [4] 福地健, 日本機械学会論文集B編, **61-584** (1995) 1477.

## 蓄冷熱システムの進展に向けて

For Development of Thermal-Energy Storage Systems

堀部 明彦 (岡山大学)

Akihiko HORIBE (Okayama University)

### 1. まえがき

現在, 太陽光や風力などのエネルギー供給源の多様化が進められている. これらのエネルギー源の多くは需要量に合わせて稼働させることが困難であり, 供給と需要の空間的・時間的ミスマッチが多くなる状況にある. そのため, エネルギー貯蔵の必要性は今後ますます増加するものと考えられる. 熱エネルギーについても使用温度や使用量等の各々の利用形態に応じた貯蔵・輸送・熱交換技術の構築が必要である. さらに, 大規模な地域熱供給システムや現在開発されているマイクロガスタービンや燃料電池など小規模なコジェネレーションシステムにおいても, 蓄熱などによる熱の有効利用が総合効率増加のための課題となっている.

著者の所属している岡山大学工学部の伝熱工学研究室では, 稲葉英男教授の下で蓄熱・熱輸送・熱交換技術を中心に研究を行っている. 特に, 相変化を伴い熱媒体の潜熱を利用したシステムは, 蓄熱等に有利であり, 現象面からみても複雑かつ非常に興味深い. 以下に弊研究室の研究題目の内, 氷水スラリーの生成と熱交換について簡単に述べる.

### 2. 氷水スラリーの管内連続生成

近年, 各電力会社では, 夏期における昼夜間電力の不均衡是正を目的としてエコアイスと名づけた氷蓄冷熱システムの導入を盛んに進めている. さらに, 製氷方法の多様性, 融解時の高い負荷追従性能等の観点から, スラリー状氷を生成貯蔵する氷蓄冷熱システムが新たに注目されている. 弊研究室では, 冷水に比較し5倍以上の熱輸送密度を有する氷水スラリーを直接配管輸送するシステムを提案し, 氷水スラリーの生成・管輸送・熱交換について各々研究を進めている.

図1は, 管内を流動する水溶液を周囲より冷却す

ることにより, 管内にて微細氷の連続生成を行う実験装置[1]の概要を示している. 試験部は, 内管内径10.5mmの二重管式熱交換器となっており内管に供試液, 外管に冷却液を流動させる. 本方法は, 管外

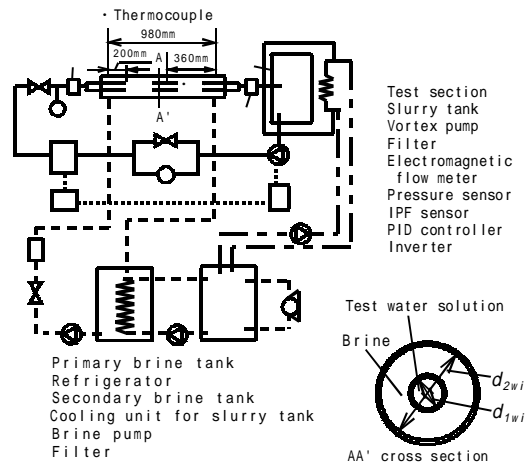


図1 管内氷水スラリーの生成実験装置

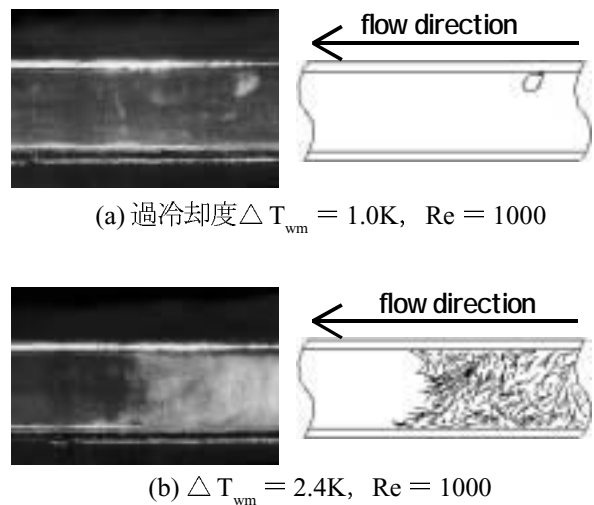
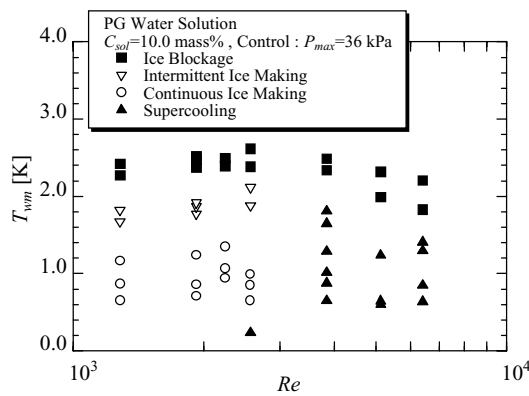


図2 氷生成挙動

図3 過冷却度と  $Re$  による氷生成挙動分布

にて過冷却水を板などに衝突させ過冷却を解消し製氷する方式に比べ効率が良いものである。図2は、氷生成挙動の例を示したものであり、冷却温度が高い場合には、壁面より成長した氷粒子が剥離し連続製氷が可能であるが(図2(a))、低すぎると管閉塞が生じる(図2(b))。氷生成可能領域は、図3に示すように、過冷却度と流動速度の関係より定まる。実機を考えた場合、管閉塞は厳に排除すべきであり、現在はさらに、製氷可能領域を広げる方法として、界面活性剤の微量添加や最大加圧力の増加による効果について検討している。

### 3. 氷水スラリーの融解熱伝達

冷熱需要側まで氷水スラリーを輸送し熱交換を行う際には、詳細な熱伝達挙動の把握が必要となる。氷水スラリー内の氷粒子は、低流速の場合、浮力により管上部に偏在することに加え、一般の粒子と比較し凝集しやすい特徴を有している。融解時には、図4に示すように、氷粒子が少ない部位が先に融解しクラスターを形成する。さらに融解が進むと管内流速分布の違いによりクラスターが回転する様子も観察される。

図5は、氷水スラリーの管長さ方向の局所熱伝達率(●)の例[2]を示している。水の場合(実線)に比較し約10倍程度熱伝達が増加しており、熱媒体として優位性を示している。これは、氷粒子の融解潜熱および温度境界層かく乱の効果によるものであり、氷粒子と同程度の密度・粒径を有するプラスチック粒子混合水によるかく乱のみ結果(○)と比較すると熱伝達増加に寄与する両者の割合はほぼ等しいと考えられる。

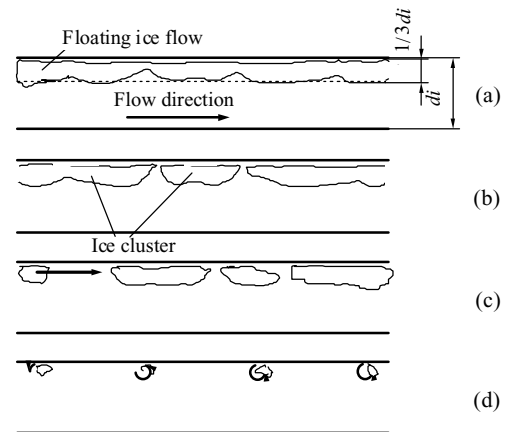


図4 氷粒子融解挙動

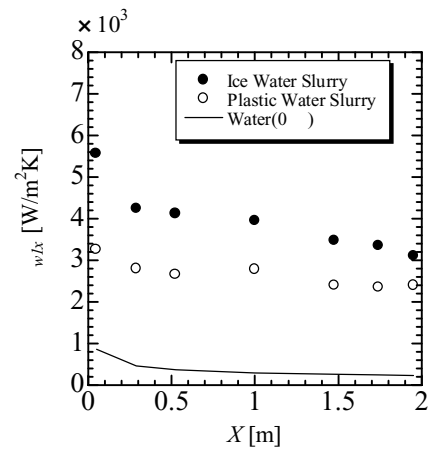


図5 氷水スラリーの熱伝達挙動

### 4. 終わりに

弊研究室が行っている研究は、氷水スラリーに関する研究の他に主なものとして、界面活性剤を用いた熱媒体の管内輸送時の流動抵抗低減、有機系収着材の熱物質伝達による温湿度制御、マイクロカプセル混合水の蓄熱・熱交換、等の研究を行っている。

現在、様々な熱的機能を有する新素材が開発されており、工業的に利用するにあたり伝熱工学的に解明すべき事項は多い。今後も基礎的現象を解明しつつ、技術開発に対応して実用化を目指した研究を進めていきたいと考えている。

### 参考文献

- [1] 稲葉英男他, 日本冷凍空調学会論文集, 14-3(1997).
- [2] 堀部明彦他, 第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2000).



伝熱研究への想い

Some Notes for The Study of Heat Transfer

水田 桂司 (三菱重工)

Keiji MIZUTA (Mitsubishi Heavy Industries, LTD.)

1. はじめに

初めまして。私は就職して以来、企業の研究所で伝熱研究に携わっております。日頃、客観的な報告書ばかり作成する中で、光栄にも私見を述べる機会をいただき、また”若手研究者”という言葉に気を良くしてキーを打ち始めました。私の業務内容は比較的、研究成果の利用者側に寄っています。特に最近の3年弱は設計部門に籍を置き、現場部門や客先から、伝熱に関わるより現実的な問題に関わる機会を得ました。そこでの業務の一例と、最近の所感を述べさせていただきます。

2. 業務事例のご紹介

私の担当する製品のひとつに製鉄機械があります。帯鋼板の製造では約 1500 の溶けた鉄からスラブと呼ばれる高温の厚板を鑄造し、さらにロールで薄く延ばしていく工程があります。ここでは、鑄造中のスラブを支えるモールドや、高温のスラブを圧下するロールが高い熱負荷を受けるため、それを正しく予測し適正な冷却方法を用いなければ重大なトラブルが発生します。

製鉄プロセスにおける最近の熱解析の事例を図1～図4に示します。図1は、連続鑄造工程における溶鋼およびその凝固鑄片の温度と厚さの変化を示しています。ここではスラブの圧延工程を省

力化するため、芯が未凝固の段階で外周の凝固鑄片を押しつぶして薄くする鑄造方法を模擬しています。どの時点で芯まで凝固しているかが設備計画のキーポイントとなります。解析における支配的境界条件は、モールドと鑄片およびモールドから外部への熱抵抗であり、種々の伝熱研究データから推定しています。

図2は、その後工程の熱間圧延におけるスラブの温度変化と、その表面に出来る酸化皮膜の厚さ分布の解析例です。酸化皮膜が過剰に成長したスラブは、圧延で表面に疵が発生したり、皮膜を酸洗いする手間が増えるなどの問題があります。また単に酸化量だけ生産量が減ること自体が損失となります。この解析により、圧延機、酸化皮膜剥離装置、保温と酸化防止用の炉、等の適正配置を検討します。

図3と図4は、熱間圧延工程における圧延用ロールの温度解析の例です。1000 以上のスラブを直接挟み込み、それを塑性変形させながら圧延するロールには、高い面圧、せん断力の他に、接触と摩擦による厳しい熱流束が負荷されます。このロールの強度を評価するには、まずロール表面温度を知る必要がありますが、その測定自体が容易ではありません。解析では入熱条件として、圧延材の加工発熱、摩擦発熱、それらの圧延区間内の分

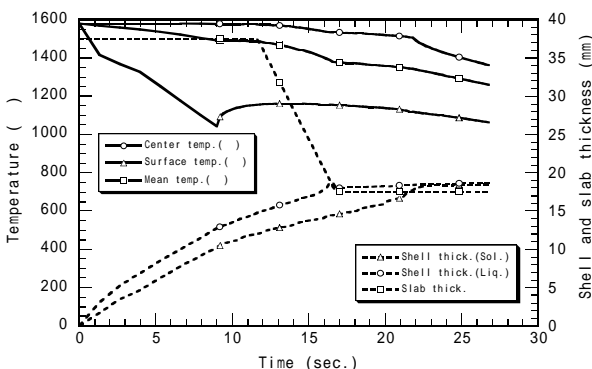


Fig.1 Example of steel casting and thickness reduction process simulation

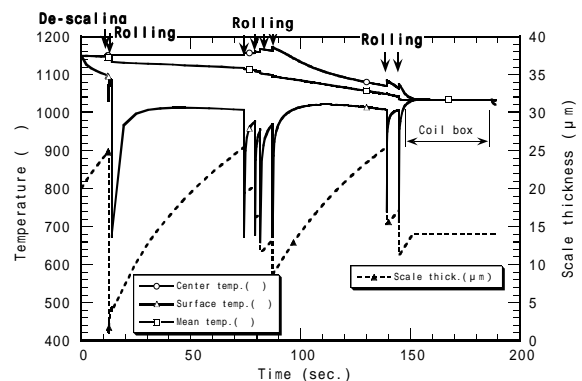


Fig.2 Simulation example of slab temperature and thickness of surface oxidized (scale) layer

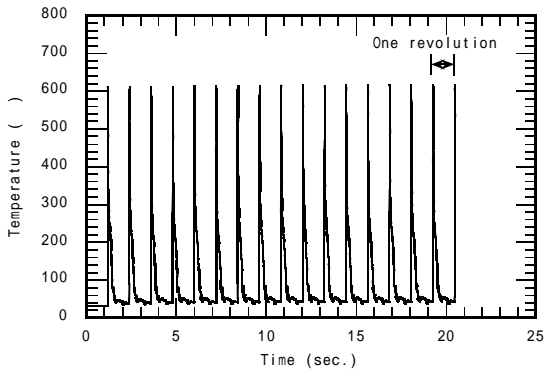


Fig.3 Example of work roll surface temperature simulation in hot strip rolling mill

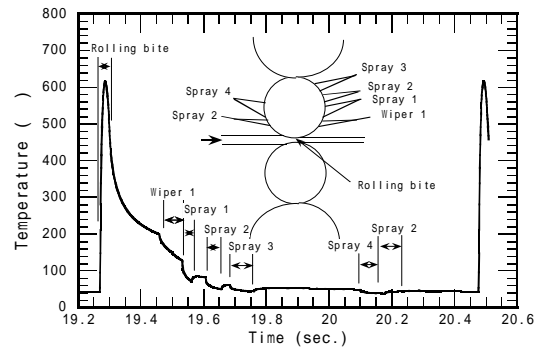


Fig.4 Example of work roll surface temperature simulation in one revolution

布，圧延による計算要素の変形，酸化皮膜を挟んだ状態のロールと圧延材の接触熱伝達，挟んだ皮膜の圧下による熱伝達の分布，ロールと圧延材の滑りによる接触要素の相対ずれ，等を考慮します．放熱条件としては，スプレやその他の溜まり水による冷却を考慮しています．これらの解析により，必要な冷却水量，スプレノズルの配置，等を決定しています．

### 3．伝熱研究の貢献度

現場部門における私の役割は，リスク要因を探し出し，とりあえず想定されているアナログ解（経験則）に対し，デジタル解（理論）をもって比較検証することでした．その場合まず最初の注意事項は，問題に関わる情報を整理することです．現場では，情報伝達時間削減のため多くの省略語すなわち現場用語が使われています．これには特に注意が必要であり，公用語によりしつこく情報の意味を確認することが必要です．また情報群の中には，個々が互いに矛盾しているものがあります．不完全な情報から全体のストーリーを作ろうとするため，補足の部分に主観が入り込むためです．とくに，説明が上手な人がその話術できれいに色付けしてしまった情報には注意が必要です．事実と主観を選別するには，例え断片的でも，事実のみをこちらのリードで聞き出すことが必要です．

事実と思われる情報が出揃ったら，何の情報も不足しているかが見えてきます．そこであらためて，この情報を入手する方法を交渉しますが，現実的には時間や費用の制約で困難な場合がほとんどです．そうなると，いくつかの仮定を置くこととなりますが，少なくともその根拠を記録し，後で検証できるようにしておくことが肝心です．

次いで，これまでせっせと蓄えてきた研究成果を紐解きます．私の場合，伝熱に関わる問題のうちおよそ90%は従来の教科書のどこかに考え方が示されており，そのうちおよそ90%は机上計算で解決できる問題でした．これらの数字はこれまでの諸先輩方の伝熱研究の成果を示すものであり，その量のみならず，系統的な整理のおかげです．最も恩恵を被るものの一人として感謝すべきところです．

ただ気になることに，引用する文献のほとんどが30年以上前のものであります．汎用的なテーマが無くなった，と言われるとすれば，利用者の立場からは必ずしもそうではありません．例えばロール，軸受，歯車，ボルト締結部，等は重要な機械要素であり常に伝熱解析対象の一部になるにも拘わらず，伝熱特性があまり明かにされておらず，全体の解析精度を落としています．今後は，革新的ではありませんがこういう実用的な研究テーマも，少しずつ取り組んでいきたいところです．

### 4．おわりに

最近では熱関連の問題の多くが数値解析により予測，解決できるようになりました．しかしまだ現場部門では，当然ながら普段から伝熱のことばかり考えている人はおりませんので，多くが長年培われた経験則，即ち脳裏のアナログイメージシミュレータを利用しています．それらは速度と信頼性の点で数値解析を凌ぎますが，定量性，普遍性が問題です．今後とも伝熱研究の貢献度を高めるには，研究の従事者が解析ツールを持って現場に入り込み，定性的に解を予測する人とともに互いをチェックし合い，またそこから研究課題をフィードバックすることが理想かと思えます．

## 音響エネルギーの有効利用

### Effective Utilization of Acoustic Energy

野村 信福 (愛媛大学)

Shinfuku NOMURA (Ehime University)

#### 1. はじめに

『音響エネルギー』という言葉はあまり聞き慣れない言葉かもしれない。音波や超音波あるいは弾性波のエネルギーを積極的に利用しようとする観点から、この言葉が使われるようになった。中四国を中心に関連する講演会や研究会が幾つか開催されてきている。

さて、音場中に置かれた物体には音響放射圧による力が作用することが知られている。近年、超音波浮揚や微小物体のマニピュレーション技術等、超音波を力として利用する研究が盛んに行われている [1]。1992 年にはスペースシャトルに円筒型超音波浮遊炉が搭載され、宇宙空間で物体を安定に保持させるためにこの放射力が利用された。

一方、液体中に超音波照射するとキャビテーション気泡（音響キャビテーション）が発生し、その気泡から発光現象が観察される。この音響発光は多泡性ソノルミネッセンス、単一気泡の場合は単泡性ソノルミネッセンス [2] と呼ばれている。音響キャビテーション内部の高温・高圧場を反応場として利用して、新材料の創製や有害物質を分解・無害化しようとする研究が始められている [3]。

機械材料のキャビテーションエロージョンなどに見られるように、音波の共振は局所的には非常に莫大な力を液体中に作用させることが可能である。本稿ではまず、私が音響エネルギーの有効利用として取り組んでいる超音波による熱流体への応用研究について紹介し、次に、21世紀の伝熱研究への思いとして、音響エネルギーに関連した医工学研究の話題について述べることにする。

#### 2. 音響エネルギーの熱・流体への応用

液体中の発熱体に超音波を照射すると、この発熱体の熱伝達率は飛躍的に増加する。超音波による伝熱促進機構は音響流による流動効果と音響キャビテーションの攪拌効果であると考えられている。図

1は数10kHz程度の超音波を水槽内に照射したときにできる流れの様子を模式的に示したものである。定在波音場中に音響キャビテーションの強制渦流れ（これを私は *Cavitation bubble streaming* と呼んでいる）が容易に観察できる。この流れが液体中に随伴流を誘起させる。*Cavitation bubble streaming* はしばしば超音波音響流と混同されてきたが、この流れは従来の音響流とは全く別の流れである [4]。*Cavitation bubble streaming* の発生が音場中にある加熱物体の熱伝達率を増加させる要因の1つになる。

音響キャビテーションは流体の乱流促進に利用することも可能である。高性能圧電素子の開発によって超音波は簡単に取り扱うことができるようになってきた。図2は矩形流路に超音波を照射するための実験装置の写真である。超音波振動子（1本5000円程度で購入できる。）は矩形流路下部のステンレス板にエポキシ樹脂系接着剤で接着されている。発振器から出力された連続正弦波をパワーアンプによって増幅し、振動子に入力すれば超音波を簡単に発生することができる。

図3は超音波照射による矩形流路内流れのメカニズムを示している。矩形流路内の流れが層流のとき、超音波を照射すると音響キャビテーション気泡が乱れ成分を増加させ、流れを層流から乱流への遷

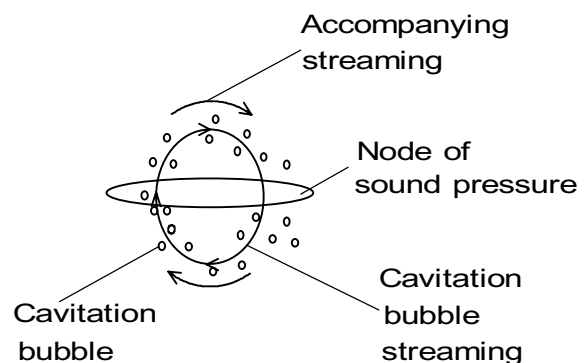


図1 定在波音場中に誘起される流れ [4]

移を促進させる [5]. また, 定在波にトラップされるキャビテーション気泡は流体に抵抗として作用し流体速度を減速させる効果がある [6].

熱や流体場に超音波エネルギーを適用する場合は音響キャビテーションを発生させることが重要である. この現象を把握し, これを如何にしてコントロールするのが今後の課題である.

### 3. 21世紀の伝熱研究への思い

医療分野では超音波は診断用として古くから使用されてきているため, 超音波の応用技術は非常に多岐に及んでいる. 例えば, 胆石破壊, 薬物送達システム(DDS)や音響化学療法による癌治療などがあげられる [7].

伝熱に関連した話題としては『ハイパーサーミア』があげられる. 『ハイパーサーミア』とは生体を42℃程度に温めて癌細胞を壊死させる手法である. 温熱治療とも呼ばれている. ここでも超音波による加熱法が検討されている. 超音波は電磁波に比べて浸透性と収縮性に優れているため, 人体深部の



図2 矩形流路: 矩形流路は超音波振動面を除いてはアクリル製である. 振動子はそれぞれ独立に動作可能であり, 下部の振動面(ステンレス板)に種々の振動モードを形成させることができる.

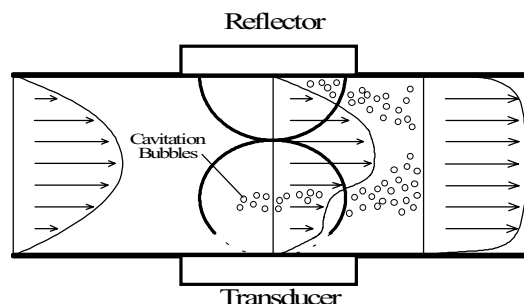


図3 超音波による乱流促進のメカニズム [5]

腫瘍組織を加熱するのに優れている理由による. 言うまでもないが, これら温熱療法に関して伝熱学を専門とされる研究者の知見が必要とされている. 臓器内部の温度予測や臓器加熱の手段など, 人体内部にまだまだ解決しなければならない問題はたくさんある.

21世紀(というより, すでに今世紀なのだが)の伝熱研究は, 効率や経済性よりも安全性と生命の大切さを再優先課題として取り組み, 人を対象として考える医学との協力関係を強化してゆくことが大切である. すでに, 生体内伝熱に関する研究会など医学と融合した研究会は幾つか国内にも存在している. 是非, 今世紀はそれを発展させて医学と工学サイドの専門家を交えた熱い議論が伝熱シンポジウムで展開していくことを期待している. 伝熱シンポジウムでの発表件数が増加し満足なプログラムが組めないなどの意見も聞かれるが, このシンポジウムでの研究発表は質・量ともに国内の熱流体関連シンポジウムの中で最も充実していると, 少なくとも, 地方の若手研究者?の私はそう思っているからである.

### 4. 中四国で動き出した医工学プロジェクト

愛媛大学では学部間の連携をはかり, 医療先端工学の共同研究を通じて医療現場で問題となっている諸問題を明らかにし, 新しい治療法や治療技術の基礎・開発研究を行うことを目的として, 医療先端技術研究会を学内に設置した. 同様な医工学研究は山口大学でも進められ, 中四国地方の総合大学の特色を生かしたプロジェクト研究が着々と進みつつある.

#### 参考文献

- [1] 小特集”力としての超音波”, 音響学会誌 **52-3** (1996) 195.
- [2] B.P.Barber and S.J.Putterman, *Nature*, **352** (1991) 318.
- [3] 前田 他, 超音波 *TECHNO*, **12-5**(2000)32.
- [4] S.Nomura et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39-6A** (2000) 342.
- [5] 野村 他, 機論(B編), **66-643** (2000) 716.
- [6] S.Nomura et al., *Jpn. J. Appl.Phys.*, **39-8A** (2000) 4987.
- [7] 立花克郎, 超音波 *TECHNO*, **12-7** (2000) 58.

## 食材冷却と伝熱

*Food Cooling and Heat Transfer*

松藤 幸樹 (三浦工業 (株))  
Koki MATSUFUJI (Miura Co. Ltd.)

### 1. はじめに

当社は「熱と水」をテーマに、小型貫流ボイラ事業を主力として、食品機械・メディカル機器・水処理装置・ボイラ薬品等の事業で新製品の開発をすると共にメンテナンス事業でオンラインメンテナンスによるサービスの提供をおこなっている。私は食品機械の開発設計部門に所属し、真空冷却機的设计を主に担当している。ここでは、食材冷却と伝熱について開発を手がけた製品の説明を交えながらおこないたいと思う。

### 2. 食材冷却の必要性

最近「内食」(家庭の食事)と「外食」(レストランや食堂での食事)の中間となる惣菜や弁当などが「中食」という言葉でよく使われている。この中食業界は食生活の形態が変わっていく中で、利便性や美味しさが追求され、市場規模が拡大している。しかし、一度に大量調理された後、商品として流通し消費者の口に入るまで時間がかかるため、衛生管理・美味しさの保持が大変重要になってきている。

一方、O157をはじめとする食中毒のほとんどが細菌性の食中毒であり30℃～50℃の温度帯で細菌は活発に繁殖すること(図1)が知られており、加熱調理後の冷却については、極力短時間で冷却することが大変重要となる。従来は扇風機やブラストチラー・冷蔵庫で食材を表面から冷却しており、食材内部の冷却には60分以上かかっていた。これに対して十数年ほど前から普及し始めた真空冷却機は、庫内を減圧することで食材内部に含まれる水分を蒸発させ蒸発熱を食材から奪って冷却するものである(図2)。このように食材を短時間で均一に低温化することで菌体の増殖を防止し、物理変化や化学変化を抑制し食材の風味を保持することが可能である。

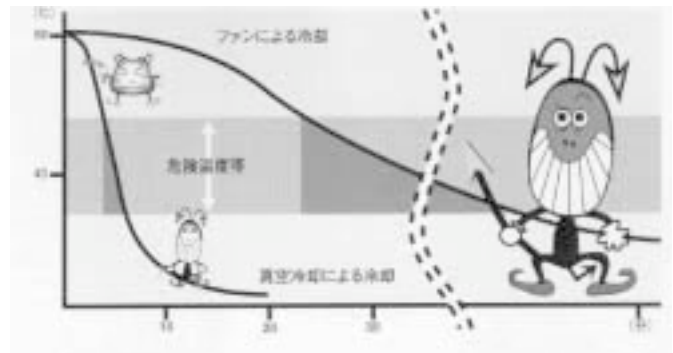


図1 冷却曲線



図2 冷却の違い

### 3. 真空冷却機の構造

従来の真空冷却機では常温程度の冷却が主流であったが、前述のような食中毒問題と流通時間の短縮化、さらには急速冷凍の前段階処理として10℃以下への冷却要求は潜在しており、その要求に応える低温冷却仕様の真空冷却機の開発に携わる機会を得、幸いにも数年前から学校給食関係、コンビニエンス食材分野で浸透し始めている。

真空冷却機で食材を10℃まで冷却する場合、食材雰囲気をも1.3kPa(10torr)まで真空にする必要がある。この方法として、水エジェクタを使用するシステム(図3)があったが、水エジェクタにより庫内の空気や食材蒸気を吸引して直接水に取り込み凝縮・排出させているため、この循環使用の水の衛生に課題があった。

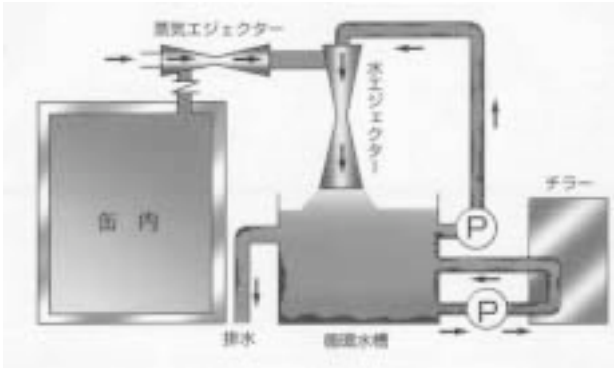


図3 水エジェクタ方式

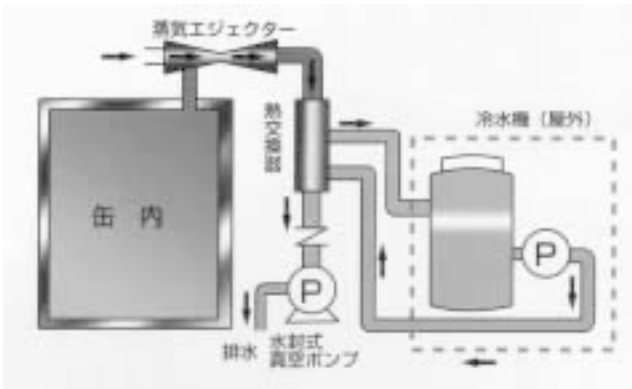


図4 蒸気エジェクタ方式

そこで当社では蒸気エジェクタ+熱交換器(凝縮器)+真空ポンプを使用するシステム(図4)を開発することとなった。

このシステムは、蒸気エジェクタにより庫内の空気や食材蒸気を吸引して、熱交換器で凝縮し、水封式真空ポンプで排出するものである。これは、蒸気エジェクタと熱交換器の選定で性能が決まる。

#### 4. 食材冷却と伝熱

制御フローは最初に水封式真空ポンプで缶内の空気を放出していくが、缶内圧力が低下していくと共に、沸点が下がっていくので食材の水分の一部が蒸発し蒸発潜熱が奪われ冷却されていく。この食材蒸気は熱交換器で凝縮熱伝達により水となり水封式真空ポンプから排出される。水封式真空ポンプだけでは限界があるため、蒸気エジェクタを利用し缶内の空気・食材蒸気を吸い込みながら缶内圧力を下げていく。これらの蒸気は同様に熱交換器で凝縮し水封式真空ポンプで排出する。そのため、熱交換器の性能が低下すれば、蒸気が処理しきれなくなり真空ポンプの排気量が間に合わなくなるため缶内圧力が下がらなくなってしまう。

蒸気側が汚れたり、冷却水側が汚れたり、冷却水温度が規定より高くなったりすれば、熱貫流率の悪化や対数平均温度差が小さくなるため能力は低下する。今まで性能低下の事例としては、冷却水温度上昇による場合・熱交換器の蒸気側にゴミが詰まり伝熱面積が低下してしまった場合などおこっている。

真空冷却機にも欠点はある。たとえば、殻で覆われている食材は内部の蒸気が放出する時に殻を壊さないといけないし、蒸発する水分がないものは冷却することができない。そのような食材は、冷水を潜らせたり、扇風機やブラストチラー・冷蔵庫などで食材自身の伝熱で冷やしているのが現状である。真空冷却できる食材も増えてはきたが、それぞれの特性に合わせたノウハウでおこなっている。ちなみに、冷水装置として当社には1℃の冷水を連続取水出来る蓄氷型冷水装置・低温循環型冷水装置がある。

冷却システムに使用している熱交換器は、食材からの油分蒸気による汚れや、冷却水側のスケール付着などの圧力損失を当初は懸念した設計をおこなったが、現在までのところ食材からの蒸気による汚れは、ほとんど付かないことがわかってきた。一方、冷却水側は当然のことながら流量を多く流し圧損が大きくなっている方が性能的には良好であるが、循環ポンプの選定でコストとの関係上なるべく小さいものにしたい。よって圧損が小さく性能が出せる熱交換器を選定している。

今後、真空冷却機は「中食」メニューの多様化と共に、各食材の冷却ノウハウを見つけだし、いかに短時間で冷却するかがポイントになっていくものと考えている。また、その他の付加価値を付けることで冷却する機器だけではないものも多くでてくと思う。

#### 5. おわりに

私自身は、研究者ではなく商品・設計者であり伝熱に関して専門でおこなっているわけではないが、入社後、我が社の主力であるボイラの設計や食品機械の設計をしていくなかで常に伝熱とかがかわっている。今後も伝熱専門の研究者となることはないと思うが、それに近い知識を得られるよう努力していき新しい商品を開発していきたい。

## 液 - 液系二相流と固 - 液相変化熱伝達に関する研究

Heat Transfer Research on Liquid-Liquid Two-phase Flow and Solid-Liquid Phase Change Heat Transfer

草野 剛嗣 (徳島大学)

Koji KUSANO (The University of Tokushima)

## 1. まえがき

筆者は、ここ徳島大学での研究生活を初めて約五年になります。今回、「若手研究者の伝熱研究への思い」というテーマについて原稿を依頼されましたので、学会に所属される諸先輩方に比べれば短いものではあります。私と伝熱との関わりと私自身の研究内容について述べさせていただきます。

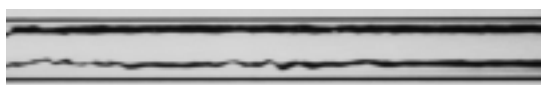
私と伝熱との本格的な関わりは学部学生の時代、卒業研究の研究室配属からですから、十年ぐらいになります。当時、同期の学生には熱工学研究室は人気があって、ほとんどが熱関連の研究がやりたくて入ってきた人達でした。余談ですが、最近はそのような学生をあまりみかけないような気がするのですが、いかがでしょうか。これまでの主な研究内容ですが、学部・大学院生時代は主に、多孔質層内や円筒周りの系での水の固 - 液相変化を伴う熱伝達現象に関する研究を行い、徳島大学着任後は油 - 水を用いた細管内の液 - 液系二相流に関する研究や、従来の研究の延長・発展として固 - 液相変化に関する研究も行っています。以下にこれらの研究の概説と今後の展望について報告いたします。

## 2. 細管内等密度液 - 液系二相流に関する研究

近年の世界的な環境問題の高まりとともに、伝熱機器はより高効率で環境への影響を最小限にすることが要求され、コンパクト化・密閉化の方向に向かいつつある。化学プラントなどにおける諸機器・輸送管内、さらに今後の発展が期待される人工臓器・人工血管などの系では流れは相間の密度差のない、または小さい二相流になる。このような等密度系の二相流に関しては一部の研究は行われているものの[1]、細管内に関してはいまだにデータも少なく、気液二相流に比較して十分に知見が得られていないのが現状である。

上の問題に対して著者らの研究室では、水と水に密度の近いシリコン油を用い、管内径 2mm 及び 5mm の細管内での混合流体の挙動について研究を行ってきた(実験装置・条件などの詳細は文献[2]等を参照)。図 1 に実験で撮影された主な流動様式を示す。実験での両相の見かけ速度が比較的小さいため油が粒状になるプラグ流が多く観察された。実験から流動様式、ホールドアップ、圧力損失及びプラグ諸特性(速度・長さ・頻度)に関する知見が得られた。特に、プラグ流の場合、圧力損失は細管内気液二相流とは大きく傾向が異なり従来の圧力損失推算モデル[3]はまったく適用できないことが明らかになった。これは、一般に気液二相流の場合には無視できる、(気体)プラ

(  $j_o$  : 油みかけ流速,  $j_w$  : 水みかけ流速 )

(a) 油泡流 (  $j_o = 0.04$  m/s,  $j_w = 0.40$  m/s )(b) プラグ流 (  $j_o = 0.02$  m/s,  $j_w = 0.02$  m/s )(c) 層状流 (  $j_o = 0.08$  m/s,  $j_w = 0.08$  m/s )(d) スラグ流 (  $j_o = 0.4$  m/s,  $j_w = 0.4$  m/s )(e) 環状流 (  $j_o = 0.80$  m/s,  $j_w = 0.4$  m/s )図 1 主要流動様式 (  $D = 5$  mm )

グ部分の圧力降下が、気体に比べて粘性の大きな油によって占められているために大きく、また、目視観察では流れは非常に規則正しく流れているように見えるものの、可視化粒子を混入した実験では油プラグ間を占める水スラグ部分において、非常に複雑な循環流が生じていることも要因となっている(図2にストロボ撮影による可視化粒子の追跡画像を示す)。これは、油プラグが前進するにしたがって界面の振動を起し、結果として生じる周囲の界面から水スラグ部分への流入水量・速度変化によってこの複雑な循環流が引き起こされていると考えられる。さらに、差圧圧力信号をウェーブレット変換することにより時間 - 周波数解析を行うと、プラグの通過周期などとは異なる比較的低周波数の成分の存在が分かるが、これも上記の振動・流入量の変動による影響の存在を裏付けていると思われる。

### 3. 固 - 液相変化に関する研究

固 - 液相変化に関する研究は以前より多く行われてきたが、近年、一般向けの氷蓄熱空調装置の販売が行われるようになり、基礎研究分野のみならず応用分野まで広く研究されるようになってきた。著者らはスタティック型の氷蓄熱器などでみられる、容器内に置かれた円管周りの水の凝固・融解について円管間隔や水の密度逆転現象などの種々の影響について実験的、解析的に研究を行ってきた。図3に数値解析によって得られた、水平二円筒周りの水の凝固結果を示す(図は半領域)。図からもわかるように、初期温度  $T_i$  で凝固を開始すると、初期においては相界面付近で下向きの流れを生じるものの、徐々に最大密度である約  $4^\circ\text{C}$  付近の水が容器下部に停滞し始め、下向きの流れは一時的に弱まり、その結果凝固速度は遅くなる。さらに時間が進むと、円筒周囲の界面から上向きの流れが生じ、容器上部に残っていた初期温度に近い水を急速に冷却し、凝固速度は増大する。この例に限らず、水を相変化材として用いる場合には密度逆転の影響を無視できず、容器と冷却管との位置関係も大きく影響する事が分かる。



(  $j_o = 0.04\text{m/s}, j_w = 0.06\text{m/s} : D = 5\text{mm}$  )

図2 水プラグ部分の流れの可視化

### 4. 現在の取り組みと今後の展望

以上、大変大まかに研究内容を紹介させていただきましたが、現在は、上記の研究内容を発展させて以下のような研究にも取り組んでいます。これらは近い将来、成果を発表する予定です。

- 液 - 液系二相流におけるプラグ界面の挙動やプラグ同士の合体・分裂現象(図3参照)。
- 多成分系水溶液の凝固・融解に関する研究
- 熱・エネルギーの観点からではなく環境問題に関連した固 - 液相変化の利用。

### 参考文献

- [1] 藤井照重 他3名, 日本機械学会論文集 B 編, 59-564 (1993) 2422.
- [2] たとえば 草野剛嗣 他4名, 第36回伝熱シンポジウム講演論文集, 熊本(1999).
- [3] 仮屋崎侃 他3名, 日本機械学会論文集 B 編, 57-544 (1991) 4036.
- [4] 笹口健吾, 草野剛嗣, 冷凍, 12-3 (1995) 295.

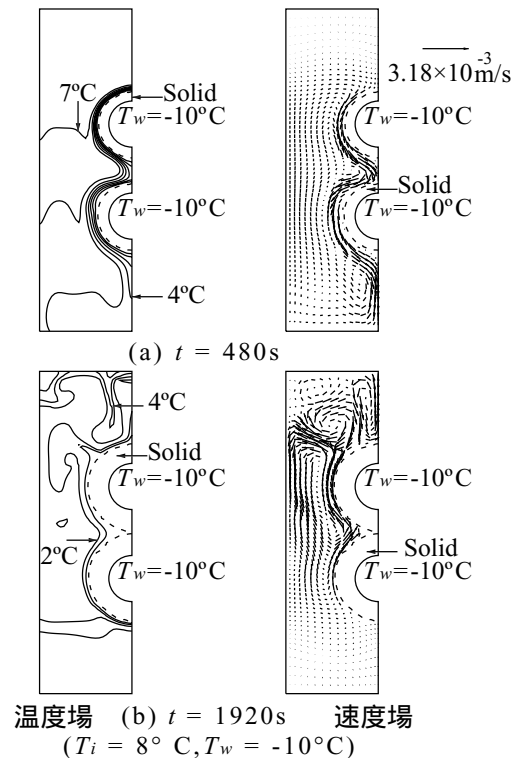


図3 温度場, 速度場及び相界面位置の時間変化



(  $j_o = 0.02\text{m/s}, j_w = 0.20\text{m/s} : D = 5\text{mm}$  )

図4 プラグの合体



- 伝熱の常識と非常識 -  
 「拡散項3兄弟」を考える  
*Thought on Three "Diffusion" Terms*

## ワンポイント伝熱

小原 拓 (東北大学)  
 Taku OHARA (Tohoku University)

## 1. はじめに

伝熱・物質伝達・流れの相似則にはいつもお世話になっている。物質・運動量・エネルギーが流体中を輸送される現象を記述する連続体方程式では、これらの流体に対する相対的な移動（物質拡散・粘性・熱伝導であるが、統一して使える用語が見当たらないので、ここでは全部まとめてカッコ付きの「拡散」と呼ぶことにする。）が拡散項として相似形で表され、その相似則は熱流体工学で重要なものとなっている。

これらの項は、それぞれの現象自体が拡散だと見做されてそう呼ばれるのか、あるいは数学的表現の相似性のみによるものか、その由来についてはよく知らないのだが、その実体はどのような「拡散」現象なのであろう。いずれの現象も、系全体の大局的な均一化（エントロピーの極大化）に向かう現象であるから、拡散をそこまで広い意味にとればすべての現象は等しく拡散であるが、ここでは、やや細かい分子レベルのメカニズムについて、特に気体と液体との比較や液体中における物質・運動量・エネルギー「拡散」の比較を中心にこれらを整理してみたい。

このような議論は、いろいろなレベルで行われている。分子の速度や位置の確率分布を記述するボルツマン方程式による議論では、支配方程式が統計的平衡状態において連続体方程式に収斂する過程を見ることができる（ただし、液体の場合は衝突項の取扱いが難しい）し、非平衡統計力学の教科書では、物質拡散・粘性・熱伝導がすべて同じ揺動散逸定理で説明されている（ただし、我々としては揺動力の中身が問題である）。これに対して筆者のスタンスは、これらの正統的な議論を踏まえつつも、熱流体現象をできるだけ分子動力学レベルで理解しようというものである。具体的には、古典分子動力学レベルにおける分子の唯一の基本的特性である分子間ポテンシャルが輸送現

象の特性を支配している機序を理解する、「バルク流体の平衡状態」から離れても通用する考え方をもつ、ということである。は希望の輸送特性をもつ流体はどのような分子によるものかを知って流体を「設計」することにつながり、は微小な時空間スケール（極短時間・界面など）における輸送現象を理解して制御することにつながる。近い将来には、我々熱流体のエンジニアが、分子間ポテンシャルのデータをにらみながら、「ポテンシャルのこの部分をいじってピコ秒オーダーの熱伝導(?)応答性をチューンしよう」とか、「粘性や発熱が小さく分子膜が切れない潤滑剤にはこの分子構造だ」などと適当な分子を探したり新しい分子を考えたりするようになるだろう。このような明るい未来に向かって、「拡散」3兄弟について基礎的かつ直感的なイメージをもつべく、これらの現象を考えてみたい。

## 2. 気体中の「拡散」現象

気体中の「拡散」現象は基本的に気体分子運動論で語り尽くされている。まず物質拡散のメカニズムをおおまかにまとめると、

濃度勾配（平均自由行程だけ離れた位置での濃度差）が場に存在する。

個々の分子自体はこの濃度差を顧慮することなく、単にランダムに（高濃度側にも低濃度側にも同じ確率で）動く。

このため、移動する分子数は濃度に比例する。高濃度側から低濃度側に動く分子の数は高濃度側の濃度に、逆向きの分子数は低濃度側の濃度に、それぞれ比例する。

マクロな物質移動量は（高濃度側から低濃度側への分子数）と（その逆向きの分子数）との差となり、全体としてこの現象は高濃度側から低濃度側への物質移動としてとらえられる。

拡散の質量流束は正負の移動方向について差し

引きしたネットの移動分子数についてのマクロな概念であること、その構成要素である個々の分子自体は単にランダムに動いていること、の2点がポイントである。

気体中の運動量の「拡散」は、分子が移動する際に必然的に自分自身が持っている運動量を持ち運ぶことによる。(まるで連続体方程式における対流項のような話であるが、これは拡散項に含まれている輸送である。) 気体のマクロな速度のある成分(例えば  $x$  成分)がゼロであれば、その方向に垂直に設定した  $yz$  検査面を通過する分子の数は正負それぞれの方向で等しい(もし等しくなければ、それはマクロな流れであるから、その分は NS 方程式では拡散項 = 粘性項ではなく対流項で評価される)が、このとき  $y$  方向速度に  $x$  方向勾配があれば、検査面を正方向に通過する分子と負方向に通過する分子では、もっている  $y$  方向運動量に平均的な差が生じる。この差が運動量流束になる。すなわち、運動量そのものが拡散するメカニズムを有しているというよりは、分子の(自己)拡散による直接の結果であるために、物質拡散と同じ特性を有していることになる。エネルギーの「拡散」も同様に、分子が移動する際に自分自身の運動エネルギーを運ぶことによる。

以上のことから、気体中の3つの「拡散」現象は基本的に相似であり、物質拡散係数・動粘度・温度伝導率の比であるプラントル数・シュミット数・ルイス数は、それ自体物理的意味をもつ定数となる。これに対して液体中の「拡散」現象はやや事情が異なる。次節以降ではこれについて考える。

### 3. 液体中の物質拡散

前節に述べた物質拡散のメカニズムは液体中でも同様である。しかし、分子の移動は気体のような自由飛行(この場合は、平均自由行程と平均速度 = 温度が拡散の速さを決める)ではなく、常に周囲の分子と相互干渉し、その過程ではいったん液体の局所的な構造を歪ませて次の安定構造に移ることになる。このポテンシャル障壁(といっても、液体の場合はさほど高い障壁ではない。このような現象が頻繁に発生するのに十分な運動エネルギー = 温度を分子が有している状態が液体である)を決定している局所的構造変化の大きさや液

体の構造強度(構造変化に必要なエネルギー)などが拡散速度を決定する大きな要素となる。また、溶媒分子と溶質分子の特性の違いが現象にどのように反映されるかも重要なポイントである。

拡散係数の値は、一般に気体と比較して非常に小さくなる。これに伴い、気体と同じメカニズム(拡散する分子が持ち運ぶ)による運動量やエネルギーの拡散は、液体では必然的に極めて小さくなる。ところが、液体の粘性や熱伝導率は、密度の違いを考慮しても、気体と比較してさほど小さいわけではない。これは、分子拡散の減少と共に、もう一つのメカニズムが運動量やエネルギーの「拡散」を担うようになるからである。すなわち、密度が大きくなって平均分子間距離が小さくなると、分子間力の作用範囲に常時多数の分子が隣接するようになり、分子間力の作用による分子から分子への運動量・エネルギーの伝搬が卓越する。

本稿で液体中の運動量・エネルギーの「拡散」現象を考える場合の問題は、この分子間相互作用による伝搬が拡散の性格をもっているかという点に絞られる。

### 4. 液体中の運動量「拡散」

液体中の運動量の「拡散」によるマクロな運動量流束を考える。速度の  $y$  成分が  $x$  方向に勾配をもつバルク液体中に検査面  $S_{yz}$  を想定し、 $y$  方向運動量の  $x$  方向流束  $J_{M_{y,x}}$  を考えると、

検査面を分子拡散により正負両方向に通過する分子の積算運動量差(気体と同じメカニズム)検査面を挟む分子間で分子間力の相互作用によりやり取りされる運動量

からなる。数式で表すと、

$$J_{M_{y,x}} S_{yz} = \sum_i (M_{i,y} / l) \frac{v_{i,x}}{|v_{i,x}|} + \sum_i \sum_{j>i} \dot{M}_{ij,y} \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (1)$$

となり[1]、右辺第1項、第2項が上記の、にそれぞれ対応する。ここで、 $M_{i,y}$  は分子  $i$  がもつ運動量の  $y$  成分(  $= mv_{i,y}$  ),  $v_{i,x}$  は分子  $i$  の速度の  $x$  成分、 $\dot{M}_{ij,y}$  は単位時間あたりに分子  $i, j$  間で分子間力の作用により伝搬される運動量の  $y$  成分、 $x_{ij}$  は分子  $i, j$  を結ぶベクトルの  $x$  成分である。右辺第1項の  $l$  は単位時間に検査面を通過する分子について ( $l$  は時間の次元を表わす)、第2項の

は検査面を挟む全ての分子対についての総和である。

先に述べたように、液体の場合は分子の移動自体が小さいので、第2項の寄与が支配的である。(例えば三重点近傍の単純液体(単原子分子などの液体)では約93%[1])。

ある2分子間に作用する分子間力により当該2分子の運動量が変化する(一方で増加し他方で減少する)現象を、2分子間で運動量の伝搬が行われたと解釈すると、古典力学により、単位時間あたり伝搬された運動量は分子間力に等しい。式(1)の右辺第2項における運動量伝搬率  $\dot{M}_{ij,y}$  は、分子  $i, j$  間に作用する分子間力の  $y$  方向成分  $F_{ij,y}$  となる。

単純液体を例として考えると、分子間力が分子間距離のみの関数であるという(ほぼ妥当な)仮定のもとでは、分子間の運動量伝搬率は当該2分子の位置関係のみで決定される。マクロな運動量流束は、検査面を挟む様々な分子間における運動量伝搬の合算(の時間平均)となるが、これは分子の時間平均的分布状態のみで決定されることになる。これまで述べてきた拡散の一つの要素であるランダム性には乏しく、以下に述べる静的な描像が成立する。

図1に示すように、 $x$ 軸方向に  $y$ 方向速度の勾配がある系における2分子間の運動量伝搬を考えると、 $y$ 方向距離がゼロではない分子間では  $y$ 方向運動量の伝搬があり、その伝搬率  $\dot{M}_{ij,y}$  は単に分子間力  $F_{ij,y}$  であるから、マクロな速度勾配の大きさには依存しない。原点の分子に対してある分子がなす運動量伝搬は、その分子と  $x$ 軸に関して対称な分子がなす運動量伝搬と大きさが等しく逆向きであり、これらは相殺されてしまう。すなわち、分子の周囲に一樣(ランダム)な周方向分布で分子が存在している場合は、マクロな運動量の伝搬はゼロになってしまう。せん断を受ける液体中で運動量が伝搬されるためには、分子の分布(液体の構造)に歪みが必須である。

せん断速度を与えた液体中にこの歪みが生じていることは、いくつかの分子シミュレーションにより報告されている[1-5]。図2に単純液体(アルゴン)の例[1]を示すが、ある分子から周囲の分子の時間平均的分布状態を観察した場合、せん断速度がない液体の場合は、一般に分子間力ゼロの位置(分子間力が反発力から引力に転じる位置)に

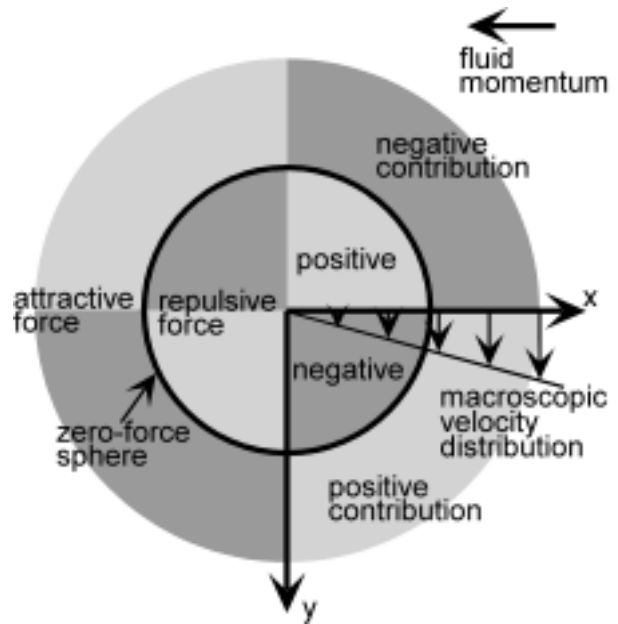


図 1. 速度勾配下での二分子間の運動量伝搬率。原点にある分子との間で、どの領域にある分子が正負どちらの運動量伝搬を行うかを表している。(ここでは、マクロな運動量流束の方向を正とする。) マクロな運動量流束への二分子間の運動量伝搬の寄与は二分子間の位置関係のみで決まる。寄与の正負は象限ごとに逆転し、また、分子間力がゼロとなる距離の内外でも逆転する。

隣接分子が集中(第一近接核)して周方向分布は一樣であるのに対して、せん断速度が与えられた場合は、そのピークが上流側ではやや内側(反発力の領域)に、下流側ではやや外側(引力の領域)にシフトし、その結果、 $x$ 軸対称に相殺されなかった分子間の運動量伝搬率がマクロな運動量流束として  $x$ 方向に伝搬される。

こうしてみると、液体の粘性は固体の歪み - 応力の発生と類似のメカニズムであると言える。ただし、液体の場合は一定の変形をいったん与えても、時間の経過と共に分子の移動により歪みが解消されてしまうため、一定の歪みを維持するためにはせん断速度を必要とする。すなわち、分子の移動とバランスしているせん断速度 - 歪みの関係と、分子間力と分子の位置関係により決定される歪み - 応力特性(固体と同じ)が液体の粘性を決定する。分子の移動が速くなれば、歪みの解消が早くなり、一定のせん断速度の下では応力が小さ

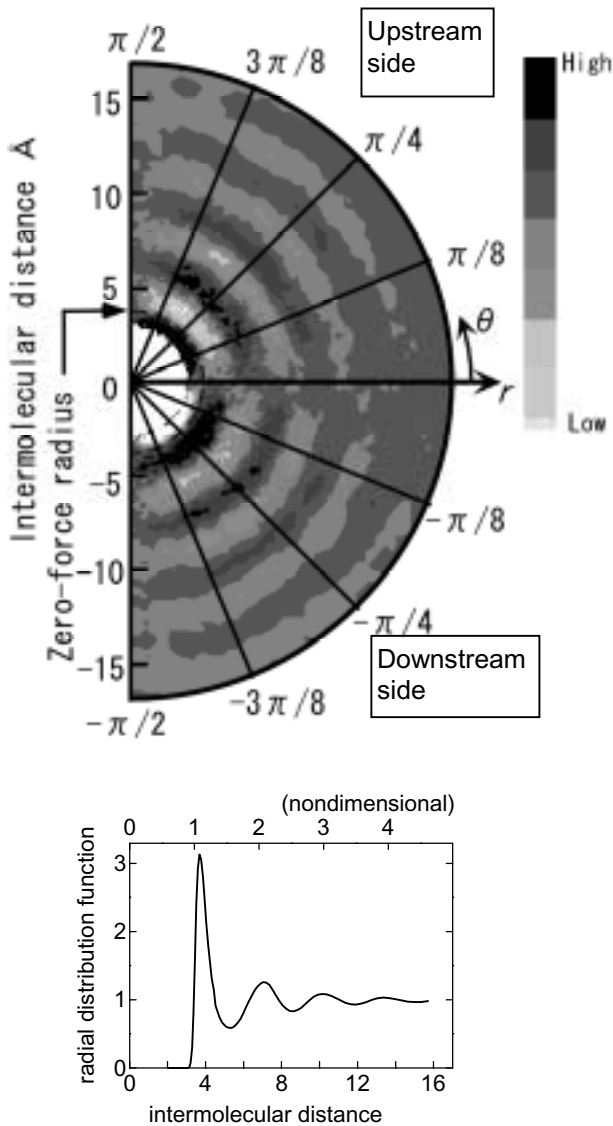


図 2. せん断速度を与えた液体アルゴン中における分子の相対位置関係。原点の分子から見た他の分子の分布を表す[1]。下は周方向平均の確率分布（動径分布関数）で、上はそれに対する増減で周方向分布を表す。中心の分子から見て、右側の分子は上から下へのマクロな相対速度をもっている。

くなる。この分子の移動は自己拡散と密接に関係しているが、液体中の運動量「拡散」を阻害する方向に作用し、液体の粘性係数に拡散係数とは逆の温度依存性をもたらしている。

以上述べたように、液体の粘性は単純な運動量の拡散過程ではない。このことに関連して、いくつかの興味深い特性が報告されている。まず、非

定常なせん断に対する粘性の時間応答特性であるが、一定のせん断速度が与えられても、それに対応した定常状態に歪み構造が達するためには一定の時間（おそらく 1~10ps のオーダー）を必要とするため、その間の過渡過程では小さな粘性しか観測されない。実際に、せん断速度に周期的変動を与えた単純液体中で周波数（THz オーダー）の増加と共に粘性が減少することが報告されている[5]。より“軟らかい”（ポテンシャルが遠距離から作用する）分子の場合は、これが GHz オーダーまで下がる可能性が高い。次に非ニュートン性であるが、単純液体でも高せん断速度（例えば  $10^{11} \text{ s}^{-1}$  以上）下で構造の歪みが大きくなると、剪断応力が剪断速度に比例しない（この場合は粘性係数が低下する擬塑性）ことが報告されている[6-10]。このような高せん断速度下では、すべての液体は Non-Newtonian である。

### 5. 液体中の熱「拡散」

前節の運動量と同様に、液体中のエネルギーの「拡散」によるマクロな熱流束を考える。x 方向に温度勾配をもつバルク液体中の検査面  $S_{yz}$  における熱流束  $J_{Q,x}$  は、一般に次式で与えられている。

$$J_{Q,x} S_{yz} = \sum_i (E_i / 1) \frac{v_{i,x}}{|v_{i,x}|} + \sum_i \sum_{j>i} \dot{q}_{ij} \frac{x_{ij}}{|x_{ij}|} \quad (2)$$

前述の運動量の場合と同様に、右辺第 1 項は拡散する分子が持ち運ぶエネルギー、第 2 項は検査面を挟んだ 2 分子間で分子間力の作用により伝搬するエネルギーを表し、それぞれの運動量の場合と同様の総和である。 $E_i$  は分子  $i$  の運動エネルギー ( $=1/2 \cdot mv_i^2$ )、 $\dot{q}_{ij}$  は分子  $i, j$  間で分子間力ベクトル  $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$  による相互作用により単位時間あたり伝搬されるエネルギーを表し、

$$\dot{q}_{ij} = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j>i} (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{F}_{ij} - \mathbf{v}_j \cdot \mathbf{F}_{ji}) \quad (3)$$

である。 $\mathbf{v}$  は分子  $i, j$  の速度ベクトルである。右辺先頭の 1/2 の物理的意味（なぜ分子間力による仕事率が半分にならなければならないのか？）については議論があるが、筆者は分子間力の作用に伴うポテンシャルエネルギーの変化の再配分によるものだと解釈している[11, 12]。

低温の液体の場合は第2項が支配的(三重点近傍の単純流体の場合で約90%[11],水の場合で約96%[12])であることも運動量の場合と同様である。

多原子分子の場合には,分子の回転運動にもエネルギーが与えられることから,式(3)の右辺には分子に作用するトルクと分子の回転角速度との内積からなる項が現われる。(式(1)の運動量伝搬には,多原子分子の場合にもこのような項はない)トルク的作用(回転運動の加速)が熱伝導に寄与する度合いは分子の構造によって異なり,CO<sub>2</sub>では熱流束に全く寄与しない[13](分子の運動エネルギー自体は併進と回転の各自由度に等分配されているにもかかわらず!)のに対して,三重点近傍の水では全熱流束の65%に及ぶ[12]ことが報告されている。

ここでの興味は,第2項による液体中の熱伝導がどんな特性をもっているかである。第2項で記述されるエネルギー伝搬には,運動量の伝搬を支配している分子間力だけではなく,物質拡散を決定している分子の速度も関与しており,このことがエネルギー伝搬にランダムな要素を与えている。分子間のエネルギーのやり取りの速さを表すエネルギー交換率 $\dot{q}_{ij}$ は,ゼロに近い僅かなオフセットを中心に正負に激しく振動しており,これを時間平均して得られる小さな値(これをここではエネルギー伝搬率と呼ぶ)が実質的にマクロな熱伝導に寄与している。三重点近傍の液体アルゴンについて分子動力学シミュレーションで観測したエネルギー交換率と伝搬率を図3に示すが,液体中で隣接した分子間では常に $10^{-6} - 10^{-10}$  J/s オーダの絶対値をもつエネルギーの交換を行いながら,そのうちで相殺されずに実質的にマクロな熱伝導流束に寄与しているのは, $10^6$  K/mの大温度勾配下ですら, $10^{-12} - 10^{-16}$  J/sの程度でしかない。

さて,液体中の熱伝導現象は,このランダム性ゆえに拡散現象とみなせそうである。「2. 気体中の「拡散」現象」に述べた拡散メカニズムに準じると,

温度勾配が場に存在する。

エネルギーは温度勾配に関係なく分子間をランダムに伝搬する。

高温側から低温側に移動するエネルギーの総量と,低温側から高温側に移動するエネルギーの総量には温度勾配に応じた差が生じる。

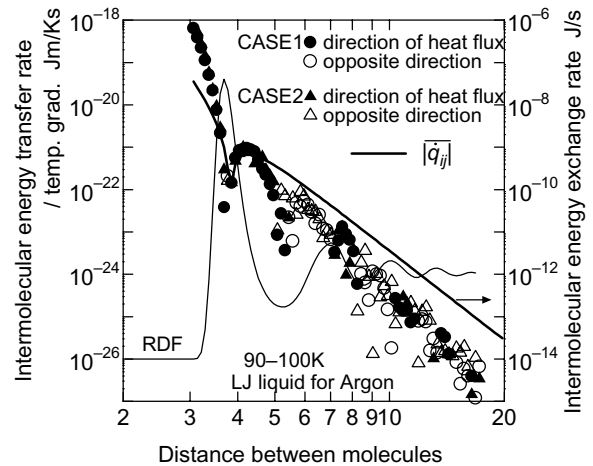


図3. 温度勾配下の液体アルゴン中における分子間のエネルギー交換率(瞬間値,実線)とエネルギー伝搬率(=エネルギー交換率の時間平均値,マクロな熱伝導流束への寄与)[11]. エネルギー伝搬率は温度勾配との比として表されている。エネルギー伝搬率はエネルギー交換率と強い相関を示すが,液体構造の影響を受けて逆流域( , 温度勾配に逆らってエネルギーが低温側から高温側に移動する)が周期的に現れる。

上記が差し引きされた残りのエネルギーの流れがマクロな熱流束となる。

となる。ただし,上記のを分子動学的に説明するのは容易ではない。エネルギー伝搬を行う2分子の運動にある程度相関があり伝搬が完全にランダムとは言い切れないこと,エネルギー交換率と温度が分子の速度を通じて関連していることなどがその原因である。また,マクロな熱伝導についての分子動学的議論としては,分子間のエネルギー交換率ではなくエネルギー伝搬率が重要であるが,この特性がどのように決定されているのかはあまり明らかになっておらず,現時点では,伝搬率は交換率の大きさを反映しつつ,液体の構造に影響を受けていることが分かっている程度である。(図3とそのキャプションを参照)

志を分子動力学からやや曲げて既成の概念を借りると,ここで問題にしている分子間のエネルギー伝搬は,固体ではフォノン伝導[14]として取り扱われている性質のものである。フォノンは分子間相互作用で伝播する量子化されたエネルギーの

概念であるが、まるで気体分子のように固体中を拡散する。(ただし、通常は統計力学的非平衡状態を考慮するため、拡散方程式ではなくボルツマン輸送方程式が適用される。) 拡散する分子に運ばれることで拡散の性質を示す気体のエネルギーとは異なり、液体中ではエネルギー自体に拡散するメカニズムが存在すると言える。

固体の熱伝導に限ってのことではあるが、フォノンの特性や挙動は詳しく明らかにされており、計算法や界面における取り扱いなど、その適用範囲を拡大する努力が広範に進められ、極めて有力な解析法となっている。さらにミクロを目指す分子伝熱の立場からは、これに匹敵する体系的な解析法を確立し解析結果を積み上げることにより、分子動力学レベルの確かな描像を形成してゆくことが、現在の課題である。

#### 6. おわりに

連続体方程式の拡散項が記述する物質・運動量・エネルギーの「拡散」を考察した。より厳密な議論(例えば、なぜこれらの流束が濃度・速度・温度の一次勾配で表されるのか、その近似はどの程度のものか、など)には、ボルツマン方程式レベルでの数学的展開が必要となる(ただし、液体についてはこれも万能ではない)。一方で、エンジニアが現象を思いのままに操る手法についてインスピレーションを得るためには、現象の直感的な理解が欠かせないと筆者は考えている。どのような切り口で現象を解析し、描像を確立するのが熱流体のエンジニアリングとして有効なのかを模索することが重要である。この点で読者の方々の様々なご教示を期待する次第である。

謝辞 本稿の執筆をお奨め下さいました水上紘一先生(編集出版部会委員・愛媛大学)に感謝申し上げます。

#### 参考文献

[1] T. Ohara and D. Suzuki, Intermolecular Momentum Transfer in a Simple Liquid and Its Contribution to Shear Viscosity, *Microscale Thermophys. Eng.*, **5** (2001), in print.  
 [2] W. T. Ashurst and W. G. Hoover, Dense-Fluid Shear Viscosity via Nonequilibrium Molecular

Dynamics, *Phys. Rev. A*, **11** (1975), 658-678.  
 [3] S. Hess and H. J. M. Hanley, Distortion of the Structure of a Simple Fluid, *Phys. Rev. A*, **25** (1982), 1801-1804.  
 [4] H. J. M. Hanley et al., Liquid Structure under Shear: Comparison between Computer Simulations and Colloidal Suspensions, *J. Chem. Phys.*, **79** (1983), 4448-4458.  
 [5] H. Farhat and B. C. Eu, Monte Carlo Method and the Nonequilibrium Structure and Non-Newtonian Viscosity of a Sheared Liquid, *J. Chem. Phys.*, **110** (1999), 97-108.  
 [6] W. G. Hoover et al., Lennard-Jones Triple-Point bulk and Shear Viscosities. Green-Kubo Theory, Hamiltonian Mechanics, and Nonequilibrium Molecular Dynamics, *Phys. Rev. A*, **22** (1988), 1690-1697.  
 [7] J.-P. Ryckaert et al., Shear-Rate Dependence of the Viscosity of Simple Fluids by Nonequilibrium Molecular Dynamics, *Phys. Rev. Lett.*, **60** (1988), 128-131.  
 [8] M. Ferrario et al., Shear-rate Dependence of the Viscosity of the Lennard-Jones Liquid at the Triple Point, *Phys. Rev. A*, **44** (1991), 6936-6939.  
 [9] R. Bhupathiraju et al., An Efficient Parallel Algorithm for Non-equilibrium Molecular Dynamics Simulations of Very Large Systems in Planar Couette Flow, *Mol. Phys.*, **88** (1996), 1665-1670.  
 [10] K. P. Travis et al., Strain Rate Dependent Properties of a Simple Fluid, *Mol. Phys.*, **95** (1998), 195-202.  
 [11] T. Ohara, Contribution of Intermolecular Energy Transfer to Heat Conduction in a Simple Liquid, *J. Chem. Phys.*, **111** (1999), 9667-9672.  
 [12] T. Ohara, Intermolecular Energy Transfer in Liquid Water and Its Contribution to Heat Conduction: A Molecular Dynamics Study, *J. Chem. Phys.*, **111** (1999), 6492-6500.  
 [13] B. Y. Wang et al., Nonequilibrium Molecular Dynamics Study of Molecular Contributions to the Thermal Conductivity of Carbon Dioxide *Mol. Phys.* **75** (1992), 1345-1356.  
 [14] 例えば C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons (1986).

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	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 (さいたま市,大宮ソニックシティー)	'01.1/19 (講演申込) '01.4/13 (参加申込)	'01.3/9	第38回日本伝熱シンポジウム実行委員会 〒184-8588 小金井市中町2-24-16 東京農工大学工学部機械システム工学科 望月研内 Fax:042-388-7088 E-mail:htsymp38@mlab.mech.tuat.ac.jp http://ht.t.u-tokyo.ac.jp	

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	掲載号
2001年					
5月 30日(水)~ 6月1日(金)	第6回 日本計算工学会講演会 (法政大学ポアソナードタワー(東京,市ヶ谷)(予定))	ア ストク '01.1/26	'01.4/8	日本計算工学会 事務局 Tel:03-3263-6014, Fax:03-3263-7077 E-mail:jsces@ics-inc.co.jp http://www.kajima.co.jp/jsces/wwwjsces/ jsces.htm(日本計算工学会)	
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工学科 湯 晋一 Tel:093-884-3174, Fax:093-871-8591 E-mail:yuu@mech.kyutech.ac.jp	
7月 17日(火)~ 19日(木)	第29回 可視化情報シンポジウム (工学院大学(新宿校舎))	'01.3/2	'01.5/11	(社)可視化情報学会 Tel:03-5993-5020, Fax:03-5993-5026 http://www.vsj.or.jp/symp2001	
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	
11月 3日(土)~ 4日(日)	(社)日本機械学会 2001年度熱工学講演会 (岡山大学 津島キャンパス)	'01.6/1	'01.8/17	岡山大学工学部機械工学科 稲葉英男 Tel:086-251-8046(稲葉), -8047(堀部,春木) Fax:086-251-8266(機械共通) E-mail:inaba@heat6.mech.okayama-u.ac.jp http://heat6.mech.okayama-u.ac.jp/ thermal/index.html	

第 38 回日本伝熱シンポジウム研究発表申込者の方へ  
(提出書類及びお願いなど)

論文原稿締切日：平成 13 年 3 月 9 日 (金)

締め切りに遅れると論文集には載りません

本シンポジウムでは、同じ内容の講演論文集を「CD-ROM」と「本(印刷物)」の二つの様式により発行することになりました。このため、論文の作成要項及び提出物が大幅に変更になっておりますので、ご注意ください。

CD-ROM 版講演論文集は、電子フォーマットとして PDF を採用いたします。これまでの講演論文原稿(印刷物)の他に CD-ROM 用の原稿として PDF ファイルも提出して戴きます。論文原稿の PDF ファイルへの変換は原則的に著者ご自身で行っていただく事とし(Adobe Acrobat を用いることで容易に行うことができます)、どうしても PDF ファイル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(5,000 円)を申し受けて、実行委員会にて紙からのスキャン、PDF 以外のファイル形式からの変換等を代行致します。

著者の皆様にいろいろとお手数をおかけする事になりますが、ご理解頂き是非ともご協力いただきたいと思います。

講演原稿等 提出方法

講演論文一件につき下記のもの揃えて、平成 13 年 3 月 9 日必着にてご提出願います。

1 講演論文原稿の PDF ファイル 1 部

- 原則として PDF ファイルによる提出をお願いいたします。
- ファイル名は、講演申込時に発行された受付番号(例：38-123)の下 3 桁 + 拡張子「.pdf」を用いてください。(例：123.pdf)
- PDF ファイルに問題があった場合は、再提出をお願いする場合がありますので、ご了承ください。
- PDF ファイル以外では、日本語版 MS-Word 95 以降の文書ファイル、一太郎 8 以降の文書ファイル、ポストスクリプトファイルからの PDF への変換、及び、カメラレディ原稿からのスキャンを受付ますが、変換手数料 5,000 円を別途申し受けます。4 月 13 日までに「伝熱」に綴じ込みの振込用紙に内訳を明記して郵便振込願います。  
(郵便口座番号：00290-9-54822, 加入者名：第 38 回日本伝熱シンポジウム実行委員会)
- ファイルは、下記の方法のいずれかで送付していただきます。重複しての送付、複数の方法による送付は、絶対におやめください。
  - a) ホームページを利用した送付 <http://ht.t.u-tokyo.ac.jp/cdrom/>
  - b) 電子メールでの送付 [cdrom@ht.t.u-tokyo.ac.jp](mailto:cdrom@ht.t.u-tokyo.ac.jp)
  - c) 郵送(フロッピーディスク、CD-R など) 下記郵送先

2 講演論文原稿の印刷物 1 部

- 論文原稿は原則として返却いたしません。返却を希望する場合、宛先を記入した返信用封筒(切手貼付)を同封願います。
- 別刷りは配布いたしません。

3 講演論文原稿の印刷物のコピー 3 部

4 JICST データベース用抄録 1 部

5 提出物チェックシート 1 部

書類郵送先	〒214-8571 神奈川県川崎市多摩区東三田 1-1-1 明治大学理工学部機械工学科 小林 健一 電話、Fax：044-934-7401 E-mail：cdrom@ht.t.u-tokyo.ac.jp
-------	---

実行委員会とは別の宛先となります。ご注意ください。



## 提出物チェックシート

提出物をご確認の上、チェック覧にチェックしていただき、書類に同封してください。

講演受付番号		代表 著者名	
E-mail アドレス			
表 題			

提出物	部 数	提出方法	チェック覧
論文原稿ファイル	1	ホームページを利用した送付	*
		電子メールでの送付	*
		郵 送	*
		* 上記三つの方法の中からどれか一つの方法で送付し、利用した提出方法の覧にチェックをしてください。	
論文原稿	1	郵 送	
原稿のコピー	3		
JICST データ ベース用抄録	1		
本チェックシート	1		

## 論文原稿ファイルの形式

提出いただく論文原稿ファイルの形式に丸印を付けてください。

PDF		
PDF 以外の形式	MS-Word 95	
	MS-Word 97,98	
	MS-Word 2000	
	MS-Word 2001	
	一太郎 8	
	一太郎 9	
	一太郎 10	
	Postscript ファイル	
	紙	
	その他	
PDF への変換を依頼します。 代表著者名： _____		

## 講演論文の書き方

講演論文原稿の書式は、原稿見本に示すとおり従来の書式からほとんど変更はありません。詳しい論文の書式設定については、本シンポジウムのホームページにて解説いたしますのでご覧ください。

ここでは、今回から提出をお願いする PDF ファイルを作成するに当たり、特に注意していただきたい点について解説いたします。

文章、図、表、写真、数式 全ての素材の電子化が必要

PDF ファイルを用意するには、文章、図、表、写真、数式などの論文中で使用する全ての素材を電子化し、ワープロソフト等を利用してレイアウトする必要があります。

微妙な違いを表現する写真等、電子化の難しい素材の場合は、PDF ファイルには電子化したものを利用してレイアウトし、印刷用原稿には素材をしっかりと貼ってください。

CD-ROM はカラー対応、印刷物はモノクロ

印刷物（本）の論文集は、従来通りモノクロで編集・印刷いたしますが、CD-ROM 版の論文集では、カラーの図及び写真を用いることができます。ただし文章中での色使用は避けてください。

PDF ファイルのサイズは、1 論文当たり 1MB（メガバイト）以下に

文書中で使用できるフォント

論文中では、本文、図・表等においても、下表のフォントを使用してください。これ以外のフォントを用いた場合、PDF ファイルを作成したコンピュータ以外では正しく表示されない場合がありますのでご注意ください。

論文中で使用できるフォント一覧

	Windows	Macintosh
明朝体	MS 明朝	細明朝体
ゴシック体	MS ゴシック	中ゴシック体
Times	Times New Roman	Times
Arial	Arial	Arial
Symbol	Symbol	Symbol

MS-Word 用テンプレートの利用

MS-Word を用いて講演原稿を作成する場合は、用紙設定、使用するフォント、スタイル等をあらかじめ設定したテンプレートファイルを本シンポジウムホームページにて提供しております。できるだけ、テンプレートの利用をお願いいたします。

PDF ファイルを作成する際の Acrobat の設定

PDF ファイルは、Adobe Acrobat を用いることにより、プリンタで印刷するのと同じ手順で作成することができます。Acrobat には、PDFWriter と Distiller という二種類の PDF 変換方法がありますが、講演原稿用 PDF ファイル作成には出力解像度等を設定できる Distiller を用いてください。

各種ワープロソフトから Distiller を用いて PDF ファイルを作成する手順は、

1. Distiller の解像度等の設定
2. 使用するプリンタを Distiller に設定
3. 文書を印刷

となります。講演原稿用 PDF ファイルを作成する場合、Distiller の解像度設定は、Distiller を起動すると表示される画面から、[ジョブオプション]を[PrintOptimized]に設定してください。

講演番号、シンポジウム名、ページ番号等は、実行委員会にて挿入します

論文作成に関する質問は - 明治大学・小林まで、電話、Fax：044-934-7401 E-mail：cdrom@ht.t.u-tokyo.ac.jp

講演論文 PDF ファイル及び講演論文原稿は、以下に示す要項に従って作成してください。

**表題パート**

表題パートは、図のように、段組せず幅 150mm に収まるようレイアウトしてください。

論文タイトル、会員資格・氏名・所属（略記）は、申込書と同じものを、同一順序でお書き下さい。申込書と異なる場合でも、目次等には反映されませんので、ご注意ください。

連名者がある場合には、講演者の前に \* 印をつけて下さい。英文の所属機関・所在地は、複数の場合には上付き数字で区別して下さい。

**本文パート**

本文は 1 ページ目を右図の様に 2 段組み片側 1 行 26 文字程度、9 ポイントで作成下さい。2 ページ目は、先頭から 2 段組みとし、片側 60 行程度を目安として作成下さい。

**図表**

図表中の記号及びキャプションは英語でお書き下さい。

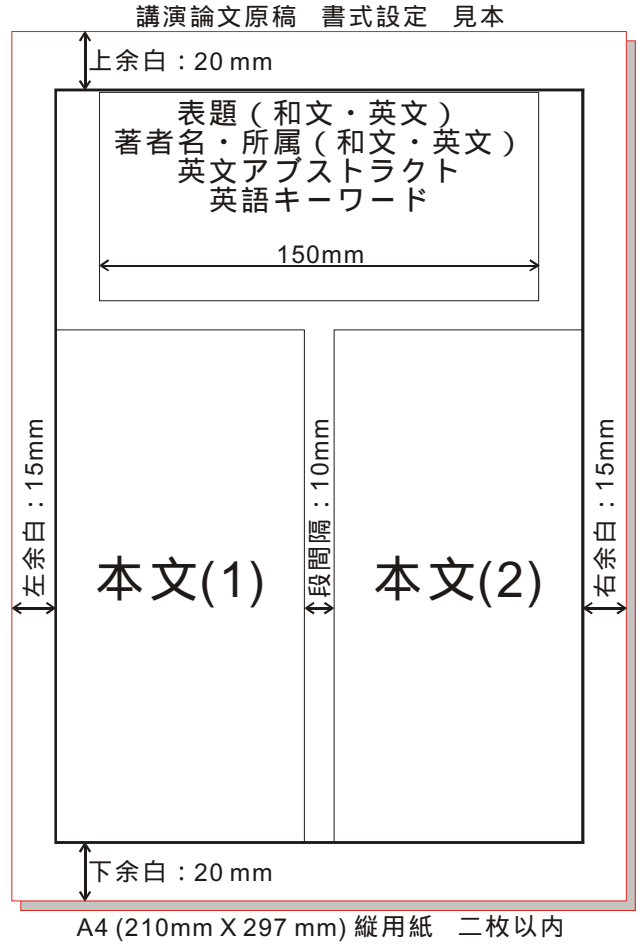
**文献**

文献を引用する場合には、本文中の引用箇所の右上に小括弧を付けた番号<sup>(1)</sup>で表し、本文の末尾に下記のようにまとめて文献を列記して下さい。

- (1)伝熱・他 2 名, 機論(B), 12-345(2001), 1234.  
 ( 著者名), ( 雑誌略称), ( 巻 - 号( 発行年)), ( 先頭ページ数)

**その他**

講演論文原稿（印刷用）は、右上隅の余白部分に講演者名とページ（伝熱・1 / 2）, 及び研究発表申込時に発行した申込番号を、薄く鉛筆でご記入下さい。



**伝熱シンポジウム講演論文の書き方 (和文表題・14 ポイント)**  
 (和文副題・12 ポイント, 無い場合は 1 行あける)  
 Instruction for Preparing a Paper (英文表題・12 ポイント)  
 (英文副題・12 ポイント, 無い場合はつめる)  
 (1 行あける)

伝正 \*伝熱 太郎 (熱重工) 機正 機械 次郎 (伝工大)  
 伝学 熱力 花子 (伝工大) (12 ポイント, 発表者には \* を付ける)  
 (1 行あける)

Taro DENNETSU<sup>1</sup>, Jiro KIKAI<sup>2</sup>, Hanako NETURIKI<sup>2</sup> (10 ポイント)  
<sup>1</sup>Netsu Heavy Industries Ltd., 1-2-3 Sakura, Ohmiya, Saitama 123-4567  
<sup>2</sup>Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Inst. Tech., 4-5 Fuji, Yokohama, Kanagawa 890-1234  
 (1 行あける)

(5 文字あける) English abstract. (英文アブストラクト・10 ポイント, 100 語程度)

(1 行あける)

Key Words : Heat Transfer, Forced Convection... (10 ポイント・3~5 個程度)

表題パートの見本

### JICST データベース用講演論文集抄録提出のお願い

本シンポジウムで発表される論文は速やかにかつ広く引用されることを目的として、その抄録を日本科学技術情報センター(JICST)のデータベースに収録されます。つきましては下欄に貴論文の概要を必ずご記入の上、原稿に添付してご提出願います。

なお、シンポジウムホームページ(<http://ht.t.u-tokyo.ac.jp>)に記入用テンプレートを準備しておりますので、ご利用下さい。

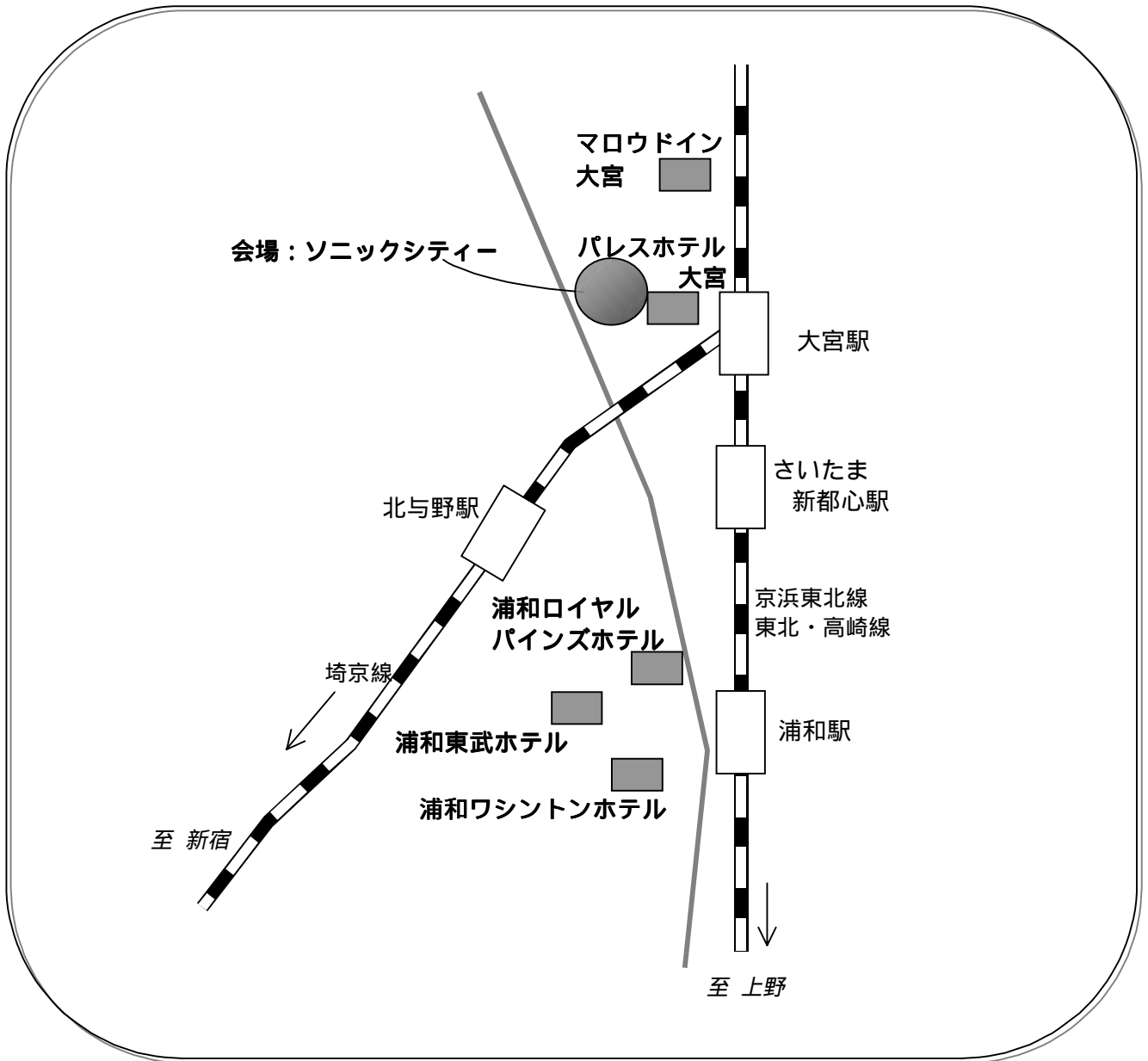
- (記入上の注意) 1. 著者名：講演者を筆頭に書き、連名者も含め全てふりがな(カタカナ)を付す。  
2. 抄録：200~250字以内でご記入下さい。

実行委員会で記入  
↓

講演会名称	第38回日本伝熱シンポジウム	貴講演番号	
著者名			
フリガナ			
講演者勤務先			
フリガナ			
表題	主		
	副		

右欄はJICSTが記入


# ホテル及び会場のご案内



## 最寄駅からのアクセス

パレスホテル大宮  
マロウドイン大宮

大宮駅より徒歩 3 分

浦和ロイヤルパインズホテル  
浦和東武ホテル  
浦和ワシントンホテル

浦和駅より徒歩

7 分  
8 分  
3 分

### 第 38 回 日本伝熱シンポジウム・宿泊のご案内

「第 38 回 日本伝熱シンポジウム」にご参加の皆様には便宜をはかるため、下記の通り宿泊のご案内をさせていただきます。別紙申し込み用紙に必要事項をご記入のうえお申し込みください。

宿 泊

お一人様 1泊朝食付き（税・サービス料含む）

番号	ホテル名	シングル	ツイン
A-1	パレスホテル大宮	12,500円	10,500円
A-2	浦和ロイヤルパインズホテル	12,500円	11,000円
A-3	浦和東武ホテル	11,500円	10,500円
B-1	浦和ワシントンホテル	9,000円	9,000円
B-2	マロウドイン大宮	7,500円	6,500円

ご希望のホテル番号を宿泊申込書にご記入下さい。ご希望ホテルが満室の場合は、カテゴリー（A又はB）内で調整させていただきます。

（延泊・JR・飛行機などの手配希望の方は、ご相談をお受けしますので、別紙申込書の備考欄にお書き添えください。）

通信連絡費、郵送料等諸経費として1件あたり¥500円を別途申し受けます。

都市圏のためビジネスホテルの設定が多い関係上、日頃から満室状態であり当日予約は難しいことをあらかじめご承知おきください。

- ・お申込方法 別紙申込書に必要事項をご記入のうえ、下記宛てに FAX 又はご郵送ください。
- ・お申込締切 平成 13 年 3 月 30 日（金）
- ・お支払方法 お申込受付後、4 月下旬に宿泊券・請求書をお送りします。  
4 月 27 日（金）までに下記口座へお振込みください。

郵便振替：口座番号 10310-40612451  
加入者名：株式会社 ジェイティービー 団体旅行埼玉支店

振込み手数料は  
お客様にて  
ご負担願います。

- ・取 消 料 取消・変更等は必ず FAX・郵送でご連絡ください

宿泊 14 日前～8 日前	宿泊 7 日前～前々日	宿泊 日前日	宿泊 日当日
10%	20%	50%	100%

お申込み・お問い合わせ先

J T B 団体旅行埼玉支店  
埼玉県大宮市仲町 2-75 〒330-0845  
TEL：048-644-3071 FAX：048-648-3578

JTB 団体旅行埼玉支店 「伝熱シンポジウムデスク」  
 担当 : 金本・安田 行き  
 FAX : 048-648-3578

『 第 38 回 日本伝熱シンポジウム 』  
 宿 泊 申 込 書

申込代表者名		所属(詳しく)					
電話 ;		FAX :		取消にともなう返金先口座 銀行 支店			
書類送付先住所 (〒 )				□座番号 □座名義			
(フリガナ)	部 屋	宿泊希望日			希望ホテル		
お名前	タイプ	2 2 日	2 3 日	2 4 日	第 1 希望	第 2 希望	第 3 希望
例) おおみやたろう 大宮太郎	S T				A-1	B-1	B-1
	S T						
	S T						
	S T						
	S T						
	S T						
備考 : (ホテル希望、その他手配など)							

S (シングル) T (ツイン) のいずれかに をつけてください。  
 ツインをお申し込みの場合、同室者をお知らせください。  
 お申込締切は、平成 13 年 3 月 30 日 (金) です。  
 この申込書をファックス、又は郵送で下記宛てお送りください。

送り先 : JTB 団体旅行埼玉支店 「日本伝熱シンポジウムデスク」  
 〒330-0845 埼玉県大宮市仲町 2-75 大宮フコクビル 7 F  
 TEL : 048-644-3071 FAX : 048-648-3578

日本伝熱学会研究会「マイクロマシンと熱流体」第5回会合のお知らせ  
(電気学会 マイクロマシン研究会・マグネティックス研究会会合との同日開催)

標記会合を下記の通り開催致します。本研究会(主査:笠木伸英(東大),副主査:藤田博之(東大),顧問:下山勲(東大),幹事:村田章(農工大))はマイクロマシンに関連した熱流体を広く対象とし、意見交換、勉強会、見学会などを行っております。第5回会合は昨年同様に電気学会マイクロマシン研究会(委員長:佐藤一雄(名大))との同日開催とし、さらに今回は、電気学会A部門マグネティックス研究会(委員長:角野圭一(横国大))とも同日開催になります。本研究会委員以外の方の参加も歓迎致します。整理の都合上、参加ご希望の方は下記問い合わせ先までご連絡下さい。

○日時:平成13年 2月28日(水) 午前9:00から午後5:00

○場所:立命館大学理工学部びわこ草津キャンパス ローム記念館5階大会議室

JR京都駅からJR西日本琵琶湖線(東海道線)にて20分、南草津駅下車。

東口より近江鉄道バス「立命館大学行き」または「立命館大学経由飛鳥グリーンヒル行き」にて「立命館大学」下車、徒歩1分。

URL: <http://www.ritsumeit.ac.jp/cinfo/map/index.htm> をご覧下さい。

○参加費:無料(但し論文集は有料)

○プログラム

9:00-14:25 電気学会マイクロマシン・センサシステム-マグネティックス合同研究会講演1

- ・シンクロトロン放射光によるPTFEのドライエッチングに及ぼす加工環境の影響  
西信嘉(立命館大学), 加藤隆典(住友重機械工業), 上野洋, 杉山進(立命館大学)
- ・SR光を用いた平面-断面転写法による三次元微細構造体の製作  
上野洋, 杉山進(立命館大学)
- ・ポリシリコン振動型ジャイロスコープに用いる薄膜真空室の大気圧によるたわみの解析  
土屋智由, 船橋博文, 坂田二郎(豊田中央研究所)
- ・感覚毛型マイクロ気流センサ  
尾崎至弘, 安田隆, 下山勲(東京大学)
- ・マイクロ脱気デバイス  
楊, ソマロン, 前田龍太郎(機械技術研究所)
- ・トリエチルアミンの熱分解による炭素磁性体の合成と物性評価  
山本節夫, 栗巣普揮, 松浦満(山口大学)
- ・フェライトの低温作製法  
渡邊潔, 柿崎浩一, 小林秀彦, 平塚信之(埼玉大学)
- ・MMIC用(CoFeB)-(SiO<sub>2</sub>)高電気抵抗薄膜磁心の高周波透磁率特性  
宗像誠(崇城大EE研究所), 本山真潮(デルタワークス), 八木正昭(崇城大学EE研究所), 島田寛, 馬場誠, 山口正洋, 荒井賢一(東北大学通研)

12:20-13:10 昼休み



13:10-14:25 電気学会マイクロマシン・センサシステム-マグネティックス合同研究会講演 2

- ・ 2GHz, Q=25 を目指すサドイッチ型 RF 集積化インダクタの試作  
馬場誠, 山口正洋, 荒井賢一 (東北大学通研)
- ・ 磁気弾性効果を用いた歪みセンサのスマートアクチュエータへの応用  
今村幸喜, 石山和志, 荒井賢一 (東北大学)
- ・ 薄膜 FG センサを用いた残留磁気法による平面曲げ疲労評価  
藤山陽一 (榊島津製作所), 岡茂八郎, 薬師寺輝敏 (大分高専),  
槌田雄二, 榎園正人 (大分大学)

14:25-14:35 休憩

14:35-17:00 伝熱学会研究会「マイクロマシンと熱流体」講演

- ・ 超音波を応用した微量液の非接触攪拌技術 / 加藤宗 (日立製作所)
- ・ 乱流制御に用いるマイクロデバイスの開発 / 鈴木雄二 (東京大学大学院)
- ・ マイクロ流体システムの化学分析への応用 / 渡慶次学 (神奈川科学技術アカデミー)
- ・ 光圧回転体による流体攪拌 (仮題) / 浮田宏生 (立命館大学)

○問い合わせ先: 〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

東京農工大学 工学部 機械システム工学科 村田 章

TEL 042-388-7089 FAX 042-385-7204 (学科共通)

E-mail murata@mmlab.mech.tuat.ac.jp

URL <http://www.mmlab.mech.tuat.ac.jp/micromachine>

**First Announcement and Call for Papers**  
**International Conference on Energy Conversion and Application**  
**(ICECA' 2001)**

June 17 - 20, 2001, Wuhan, P.R. China

Sponsored by:

Huazhong University of Science and Technology (HUST), P.R. China  
University of California, Los Angeles (UCLA), USA  
The University of Nottingham, UK  
Nippon Institute of Technology, Japan  
Hong Kong University of Science and Technology (HKUST), Hong Kong  
University of Otago, New Zealand

Supported by:

National Natural Science Foundation of China  
Chinese Society of Engineering Thermophysics  
Chinese Society of Solar Energy  
Broad Air Conditioning  
Tsinghua Solar Ltd., Tsinghua University  
Hubei Province Society of Engineering Thermophysics  
Hunan Province Society of Engineering Thermophysics  
National Laboratory of Coal Combustion (HUST)

Call for Papers

Theme

The conference will focus on effective utilization of energy. Environment problems related to energy conversion and application will also be presented.

Topic

Energy Conservation and Management  
Heat and Mass Transfer  
Thermodynamic Systems  
Combustion Theory and Equipment  
Refrigeration and Air Conditioning  
Thermal Power Systems  
Solar Thermal Application  
Solar Photovoltaic Material and Device  
Energy System in Building  
Energy and Environment  
Measurement Technology

Conference Place: Wuhan, P.R. China

Conference Date: June 17-20, 2001

**Deadline for Submission of Abstracts and Papers:**

The extend abstracts must be submitted before Dec.1, 2000. The accepted abstracts will be informed by Jan.15, 2001, and the accepted papers should be sent by March 15, 2001. All accepted papers will be published in the proceedings. An extended abstract of approximately 1000 words, containing paper title, three keywords in the order of importance, author names, affiliations, full address, phone and fax number, e-mail address, in English should be submitted by mail, email or fax to:

Prof. Wei Liu  
Department of Power Engineering  
Huazhong University of Science and Technology  
Wuhan, 430074, P.R. China  
Tel: (86) 27-8754-2518  
Fax: (86) 27-8754-0724  
E-mail: weiliu@public.wh.hb.cn

**The Location**

The ICECA'2001 will be held at HUST located in Wuhan, Which, the capital city of Hubei Province, is known as the Transportation Hub of Central China. Located in the suburb of Wuhan City, Huazhong University of Science and Technology is one of largest universities in China. It has four campuses with area of 400 hectare, over 4000 faculty members and 33000 on campus students. The guest-house building (correspond to 3-star hotel) will be reserved for conference participants. In June, the temperature of Wuhan is about 30°C (86F).

**Registration Fee**

Participant: US\$340/person

Accompany : US\$ 60/person

This will include meals, tea breaks during the days of the conference, a banquet and a bound volume of the proceedings.

**Language**

The official language of the conference will be English. Abstract, manuscript and presentation should be made in English.

**Post Conference Tours**

Plan A: Wuhan Full Day Tour

Tour Fare: US\$25/person

Plan B: Three Gorges 4-Day Tour (Economical class)

Tour Fare: US\$250/person

**Brief of the Three Gorges**

From Baidi City in Sichuan province at the west end and Nanjin Pass of Yichang City in Hubei province at the east, the Three Gorges, including Qutang Gorge, Wu Gorge, and Xiling Gorge, are total 192 km in length. The Qutang Gorge, known for its magnificence, is 8 km long. The Wu Gorge, 44 km long, is famous for its deep and quiet valley. Among the Twelve Peaks of Wu Mountain, Goddess peak is the most beautiful. The Xiling Gorge, extending 66 km in length and full of rapids and whirlpools, is one of the most dangerous shoals on the Yangtze River. The famous Three Gorges Hydraulic Power Station, to be the largest in the world, is now being built here.

Please complete the pre-registration form and return to the following address:

Prof. Wei Liu  
Department of Power Engineering  
Huazhong University of Science & Technology  
Wuhan, 430074, P.R. China  
Tel: (86) 27-8754-2518  
Fax: (86) 27-8754-0724  
E-mail: weiliu@public.wh.hb.cn

Pre-Registration Form

Title: Prof. / Dr. / Mr. / Ms.

Name: \_\_\_\_\_

Affiliation: \_\_\_\_\_

Address: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Tel: \_\_\_\_\_

Fax: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_

Please make the following choices:

I tend to submit a paper.\_\_\_\_

I plan to attend the conference.\_\_\_\_

I am interested in the conference. Please send me further information.\_\_\_\_

I will take the post conference tour. Plan A \_\_\_\_ Plan B \_\_\_\_

I suggest that you also send the conference announcement to the following person:

Name: \_\_\_\_\_

Address: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 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の手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13年1月31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. 40, No.160

2001年1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