



# Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 45 No. 190 2006. 1



◆吸着の世界 ─ミクロからマクロ,そしてシステム─◆

#### 「伝熱」原稿の書き方

How to Write a Manuscript of Dennetsu

伝熱 太郎(伝熱大学) *Taro DENNETSU (Dennetsu University)* 著者が了解するときは記入→ *e-mail: taro@dennetsu.ac.jp* 

#### 1. はじめに

以下の注意事項に留意して原稿を作成すること.

#### 2. 「伝熱」用原稿作成上の注意

#### 2.1 標準形式

原稿は Microsoft Word 等を用いて作成し,図や 写真等は原稿に張り込み一つのファイルとして完 結させる.原稿の標準形式を表1に示す.

	我 I 까闹 까 你 平 // > N					
用紙サイズ	A4 縦長(210mm×297mm),横書き					
余白サイズ	上余白 30mm,下余白 30mm					
	左余白 20mm, 右余白 20mm					
タイトル	1 段組,45mm 前後あける (10 ポイン					
	ト(10×0.3514mm)で 8 行分)					
本文	2 段組, 1 段 80mm, 段間隔余白 10mm					
活字	10 ポイント(10×0.3514mm)					
	本文					
	(Windows) MS 明朝体					
	(Macintosh) 細明朝体					
	見出し					
	(Windows) MS ゴシック体					
	(Macintosh)中ゴシック体					
	英文字・数字					
	Times New Roman または Symbol					
1行の字数	1段あたり23文字程度					
行送り	15 ポイント(15×0.3514=5.271mm)					
	1 ページあたり 45 行					
	ただし,見出しの前は1行を挿入					

表1 原稿の標準形式

#### 2.2 見出しなど

見出しは**ゴシック体**を用い、大見出しはセンタ リングし前に1行空ける.中見出しは2.2 などの ように番号をつけ左寄せする.見出しの数字は半 角とする.行の始めに、括弧やハイフン等がこな いように禁則処理を行うこと.

#### 2.3 句読点

句読点は ,および .を用い, 、や 。は

避けること.

#### 2.4 図について

図中のフォントは本文中のフォントと同じもの を用いること.

#### 2.5 参考文献について

2.5.1 番号の付け方

参考文献は本文中の該当する個所に[1], [2, 4], [6-10]のように番号を入れて示す.

#### 2.5.2 参考文献の引き方

著者名, 誌名, 巻, 年, 頁の順とする. 毎号頁 の改まる雑誌(Therm. Sci. Eng.など)は巻-号数のよ うにして号数も入れる. 著者名は, 名字, 名前の イニシャル. のように記述する. タイトルの有無 は自由. 雑誌名の省略法は科学技術文献速報 (JICST)に準拠する. 日本語の雑誌・書籍の場合は 著者名・書名とも省略しない.

#### 参考文献

- [1] 伝熱太郎, 伝熱花子, 伝熱のフォーマットに 関する取り決め, 日本機械学会論文集 B 編, 80-100 (1999) 3000.
- [2] Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (1976).
- [3] Smith, A. et al., How to Write a Manuscript of Dennetsu, Therm. Sci. Eng., 7-5 (1999) 10.
- [4] 山田太郎, やさしい伝熱, 熱講社 (1980).

原稿作成用のテンプレート(MS-WORD)は伝 熱学会のホームページよりダウンロードできます. 原稿は,特に指定のない限り,出版部会長宛て に e-mail で提出して下さい.なお,ヘッダー・フ ッターや最後の横棒は,編集出版部会で整えます ので,記入する必要はありません. No. 190

January

### 伝 熱

目 次

#### 〈論壇〉

#### 〈追悼:小竹 進 先生〉

小竹進先生のご逝去を悼む	剛良	(東京工業大学)	3
小竹進先生と日本伝熱学会	洋	(東京理科大学)	5

#### 〈特集:吸着吸着の世界 - ミクロからマクロ, そしてシステム-〉

吸着ヒートポンプ用機能性吸着材の開発	
下岡 里美,大島 一典,武脇 隆彦,垣内 博行 (㈱三菱化学)	8
多孔体内部の吸着現象	14
高密度化学蓄熱材の開発	21
吸着ヒートポンプの吸着器内熱・物質移動現象渡辺 藤雄,窪田 光宏(名古屋大学)	27
蒸気吸着現象を用いた潜熱・顕熱の独立制御濱本 芳徳,森 英夫(九州大学)	
吸着式デシカント除湿・空調プロセス	
吸着冷凍サイクルおよびその展開秋澤 淳(東京農工大学)	45

### 〈特別寄稿〉

沸騰の科学(5)			·甲藤	好郎	(東京大学	学名誉教授)	50
スケートはどうし	、て滑るのですか?	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		対馬	禹 勝年	(富山大学)	56

#### 〈ネイチャーQ〉

### 〈プロジェクトQ〉

多段蒸気インジェクタの開発と伝熱奈良林	直	(北海道大学),	森	治嗣	(東京電力)	65
---------------------	---	----------	---	----	--------	----

#### 〈国際活動・会議報告〉

⟨Hea𝗚t Transfer⟩			
ノイズ・・・・・廣田	真史	(名古屋大学)	71
〈行事カレンダー〉			73
〈お知らせ〉			
第43回日本伝熱シンポジウム参加申込方法			75
International Heat Transfer Conference 2006 出席ツアーのご案内(予告版)			
事務局からの連絡		••••••	
編集出版部会ノート:吸着に関する特集へのおもい	「山」	繁(九州大学)	92

		日本伝熱学会 2005 年	度(第	3 44 期)会長・副会長・理事・	・監事
◆会 長	庄司	正弘(産業技術総合研究	所)		
♦副会長	勝田	正文(早稲田大学)	久角	喜徳(大阪ガス) 宮内	1 敏雄(東京工業大学)
◆理 事	佐藤	勲(東京工業大学)	吉田	英生(京都大学) 花村	↓ 克悟(東京工業大学)
	池川	昌弘(北海道大学)	円山	重直(東北大学) 辻	俊博(名古屋工業大学)
	青木	和夫 (長岡技科大学)	竹中	信幸(神戸大学) 逢坂	〔 昭治(徳島大学)
	小山	繁(九州大学)	長野	靖尚(名古屋工業大学) 田中	1 収(三浦工業)
	森治	台嗣(東京電力)	康(	侖明(ダイキン)	
◆監 事	工藤	一彦(北海道大学)	青木	博史(豊田中央研究所)	

## Vol. 45, No. 190, January 2006

### CONTENTS

< Opinion >	
Strategy and Tactics	
Masafumi KATSUA (Waseda University)	…1
< Memorial >	
Mourn over the Death of Prof. Susumu Kotake	
Takayoshi INOUE (Tokyo Institute of Technology)	3
Contributions of the late Professor Kotake to HTSJ	
Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science)	5
< Field of Adsorption - From Micro to Macro, and Associated Systems ->	
Development of Functional Adsorbent Material for Adsorption Heat Pump	
Satomi SHIMOOKA, Kazunori OSHIMA, Takahiko TAKEWAKI, Hiroyuki KAKIUCHI	
(Mitsubishi Chemical Group Science and Technology Research Center)	8
Adsorotion phenomena inside porous materials	
Hirofumi DAIGUJI (The University of Tokyo)	14
Development of materials for high density chemical heat storage	
Junichi RYU (Tokyo Institute of Technology)	21
Heat and Mass Transfer Phenomena in Adsorber for Adsorption Heat Pump	
Fujio WATANABE, Mitsuhiro KUBOTA (Nagoya University)	27
The Application of Water Vapor Adsorption Phenomena to the Independent Control of Latent and Sensible Heat	
Yoshinori HAMAMOTO, Hideo MORI (Kyushu University)	33
Adsorptive Desiccant Cooling / Dehumidification	
Akio KODAMA (Kanazawa University)	39
Basics of Adsorption Refrigeration Cycle and Advanced Cycles	
Atsushi AKISAWA (Tokyo University of Agriculture and Technology)	45
< Contribution >	
Science of Boiling (5)	
Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of the University of Tokyo)	50
Why skate so slippery ?	
Katsutosi TUSIMA (University of Toyama)	56
< Nature Q >	
Astrophysics and Thermodynamics	
Masa-aki SAKAGAMI (Kyoto University)	60

### < Project Q >

Development of Multi-Stage Steam Injectors with Innovative Heat-Transfer
Tadashi NARABAYASHI (HokkaidoUniversity), Michitsugu MORI (TEPCO)65
<b>Report on International Conference</b> >
Prof. Masanori Monde and Prof. Yuichi Mitsutake of Saga University Received ASME 2005 Best Paper Award
Niro NAGAI (University of Fukui)70
Hea <sup><i>r</i></sup> t Transfer >
Noize
Masafumi HIROTA (Nagoya University)71
<b>Calendar</b> >
Announcements >
Note from the Editorial Board: A Thought for Special Forum on Adsorption Phenomena
Sigeru KOYAMA (Kyushu University)92

戦略と戦術 Strategy and Tactics

論壇

#### 1. 経緯

編集出版部会長の吉田英生先生から,今期から は編集出版担当副会長たるもの少なくとも一回は 「伝熱」に何か投稿せよ.との命を受け,拙文が 今後に禍根を残す悪例になってしまうのでは,と いささか躊躇しつつ年を跨いで最近思うところを 取りまとめた次第であります.是非,これを契機 にご批判,ご提言をお寄せいただければと思いま す.

#### 2. 大いなる矛盾

第44期出発号(伝熱 Vol.44 No.187)の巻頭言 に44期会長 庄司先生のメッセージが掲載され ております.この中で,『原点に立ち返り考え直し てみる』ことを述べておられ,特に,本学会定款 を引用され,『伝熱学の進歩普及,学術の発展に寄 与する』の箇所を強調されております.一方,現 実に立ち返ってみると小生など完全に世の風潮に 流され(天の声でしょうか?),いつの間にか職場 の産学連携,研究推進,知財本部などの中核にい ることを思うと自戒の念に苛まれます.そう言え ば,昭和40年代の前半,大学の研究活動における 産学連携に歯向かったのは,他でもない我々の世 代(俗に言う団塊です)であったのです.これは 大いなる矛盾ではないかと.

#### 3. 戦略と戦術

しかしながら時は流れ,キャッチアップの時代 からトップランナーを経て,環境と経済のバラン スの取れた持続的な発展を期する時代となってい ることは,紛れもない事実だと思います.すなわ ち,価値創造の源泉に科学技術を位置づけ,社会 ニーズに即応した技術革新に効果的につなげなけ ればならない時代になったといえるのではないで しょうか(これも天の声でしょうか?). 勝田 正文(早稲田大学) Masafumi KATSUTA (Waseda University)

ここで,改めて我々の学会の原点ですが,学の 進歩普及および学術の発展は,得られた知見が社 会的なニーズに即した応用に供されること,もう 少し大げさに言えば,産業化に結びつけ,ひいて は技術革新や持続的な発展に寄与することを企図 しているに他ならないと考えます.

そうなれば、学会の広報など必要なくなり、伝 熱研究を経てエンジニアとなる後輩のキャリアパ スも明確になるばかりでなく、研究者にとっては、 なにより次の基盤研究のための資金をも得られる こととなります.

我々末端の研究者は、日々の活動に追われこれ に対応すべく詳細な戦術のみを議論し、細かな対 応を強いられているのではないでしょうか.

内閣府の総合科学技術会議議員である元三菱重 工の柘植氏は、最近日本機械学会ホームページの コラム(http://221.249.198.218/column/200503.htm) に私見であるがと断りつつ、以下の文章(抜粋) を寄せておられます.「アカデミア側等の基礎研究 実施者も、その成果を国力と産業化まで結びつけ るロードマップが不鮮明なままで基礎研究を推進 する傾向が強く、各論では所期の成果を上げつつ あるものの、国家投資としての成果にまで結びつ ける"目的指向型基礎研究"重点化へのインセンチ ブに欠けた傾向が有る」.

すなわち,基礎分野では特に技術開発研究のロ ードマップ構築(一種の戦略)が国家的投資を促 すことのできる研究への早道であると言っておら れます.本会においても,できるだけ早く学会の 戦略を俎上に上げる必要があるのではないでしょ うか.

#### 4. おわりに 伝熱学, 工学が拓く物

著者が言うのも歯痒いのですが,伝熱学,伝熱 工学は基盤となる学術です.また,どのような技 術にも必ず必要な学問体系であり,どちらかとい うと表には現れず,黒子に徹していると言えます. であるからこそ,世に言う先端や重点領域を拒否 するだけでなく,巧みに取り入れつつ,伝熱とい う伝統ある学問分野の広がりを楽しむようなした たかさを持っております.今後は,さらに先端の 融合領域におけるイノベーションへの貢献が期待 されると思います. また、学会という場を用いて大学と企業の技術 開発力や研究に関する違いを理解し、互いに祖の ギャップを埋める努力をするとともに、リエゾン 的な機能を学会が発揮すべきだと思います.これ にはアドバンスフィルギャップ活動が必要なので はないでしょうか?

#### 編集出版部会からのお知らせ: "伝熱"誌は今年から季刊に

編集出版部会と理事会で審議しました結果,今年から"伝熱"誌の発行を,これまでの隔月から季刊(1,4,7,10月)に変更させていただくことになりました.

- この理由としては
- ・編集作業の負担を軽減するとともに、1回の編集に十分な時間をかけて、より充実 した内容とすること
- ・最近のインターネットと電子メールの発達によって、会告の迅速な伝達についての 会誌の役割が軽減したこと

などです.

この変更により,38巻148号(1999年1月)で,誌名を"伝熱研究"から"伝熱" に変更するとともに TSE とも分冊にして隔月発行となった本誌は,発行形態につき ましては7年以前と同様なものに戻ります. 小竹進先生のご逝去を悼む Mourn over the Death of Prof. Susumu Kotake

本会元会長,小竹進先生は去る平成17年11月10 日午後ご逝去されました.故人およびご遺族の強いご 希望によりご葬儀はご親族で執り行われましたこと をご報告させていただきます.また,本会のこれまで の慣習では,著名な先生がご逝去された場合速やかに メーリングリスト等でご連絡させて頂いております が,すでに小竹先生は本会を退会されており,また生 前お伺いしておりました先生のご意思ではそのよう なことは好まないと言うことでしたので,私の判断で 公式のご連絡は控えさせていただきました.このため, 今回の葬儀の件で多くの先生方にはご迷惑をおかけ しましたことと拝察いたします.誠に申し訳ありませ んでした.

さて,昭和56年以来今日までの長き間,公私にわたり大変お世話になったものとして,先生の思い出をご紹介させていただき,深甚なる哀悼の意を表します.

先生は昭和9年6月24日茨城県にお生まれになり, 昭和33年東京大学工学部航空学科をご卒業になり, 同年4月に川崎航空機株式会社に就職されました.そ の後,昭和38年に東京大学航空研究所の助手になら れ,昭和39年同研究所助教授,昭和53年東京大学宇 宙航空研究所(旧航空研究所)教授に任ぜられました. その間,昭和39年1月に東京大学より工学博士の学 位を授与されました.東京大学宇宙航空研究所が文部 科学省直轄の宇宙科学研究所に改組されるプロセス の中で,東京大学境界領域研究施設を経て,昭和56 年に工学部機械工学科に移られ,平成7年3月東京大 学工学部を定年退職されました.その後は,日本原子 力研究所,東洋大学で研究,教育に務められました.

私が先生に初めてお目にかかったのは,昭和 56 年4月に私が大学院修士課程に進学するときでした. 卒業研究の指導教授から,凝縮の素過程を研究して いて面白いということで小竹先生の研究室を推薦し ていただき,研究室配属において小竹先生を希望し ました.4月に工学部7号館の一室で面接を受けた 井上 剛良(東京工業大学) Takayoshi INOUE (Tokyo Institute of Technology)

のですが、「学生は要らない. 足手まといだから要ら ない.」と何度も断られました.博士課程に進学した 後日,この話を持ち出すと,先生は「1回や2回断 られたから来なくなる様な学生は要らないんだ. そ れでも来るという学生なら受け入れる.」と言われて, 「そんなものかな」と煙に巻かれたことを覚えてい ます. 今の研究室配属を思いますと隔世の感がいた しますが、先生も天邪鬼ならば学生も意地っ張りで 変わっていたのでしょう.研究室に所属してすぐに、 当時研究室に来られていました東海大学の佐野妙子 先生に、「先生に怒られているうちは大丈夫.何も言 われなくなったら、良くなったか見捨てられたかの どちらかで,良くなることはないから.」と言われた ことを覚えています. この後約四半世紀にわたって ご指導いただくことになるのですが,意欲のある者, 新しいことに挑戦する者に対してはたとえ年齢が若 くても親身になってサポートするけれども、新しい ことに挑戦しない者は相手にしない、という姿勢は、 亡くなるまで一貫していたように思います.

私が研究室に所属していた頃は、小竹先生はクラ スターの研究を始められてから数年という頃でした. 在外研究でカナダに滞在されて古典的核生成論を用 いた凝縮の研究に従事され、帰国後はその凝縮過程 の最初であるべきクラスター生成に興味をもたれて おりました.「どこかの学会で発表したときには、ク ラスターと言うことで核燃料棒のクラスターと間違 えられて原子力のセッションに入れられた」という ような時代でしたが,機械工学でもこのような分子 原子を理解すべきとの強い信念だったと思います. 前に、小竹先生になぜマイクロスケールの熱を始め るようになったのか伺ったことがあります. そのと きの話では、液滴燃焼、燃焼騒音、噴流騒音、無重 力化での沸騰気泡の挙動(これについては、今の天 皇陛下が皇太子時代に宇宙航空研究所を視察された ときにご説明されたと伺いました. 最近は無重力下



1983年6月,太宰府天満宮にて(第20回伝熱シンポジウム) 当時小竹研究室で研究していたメンバー 左から,小竹先生(48歳),高本先生,筆者,佐野先生,青木先生

での伝熱の研究が活発ですが、先生のご研究はあま りにも早かったので、まったく引用されないよと笑 っておられました.)、反応を伴う流れ、凝縮を伴う 流れなど、伝熱のさまざまな分野の研究をしてきた が、連続体として取り扱う伝熱の限界が見えたので、 それを打ち破ることを考えたらマイクロスケールに 至った、とのことでした.

小竹先生の研究は多岐にわたるので整理すること は難しいのですが、最近のミクロ分野につながると いう観点で、私なりに解釈してみます.まず、先生 は熱工学に化学反応を取り込むという点において、 東工大の森康夫先生らとともにかなり先駆的であっ たように思います.もともと液滴燃焼の研究を行っ て岡崎・小竹の理論を確立され、1980年頃までは、 化学素反応を速度論として流れの基礎式と連立する ことにより、反応を伴う流れのシミュレーションに 従事されていました.ここで一応のレベルで流れと 化学反応を統合することを完成したのではないかと 思います.次に、さらに一段深いレベルで輸送現象 と化学反応を統合することを考えられたように思い ます.つまり化学反応や輸送現象を統計的ではなく、 個々の分子の輸送として扱うということです.その ような取り扱いを考えると、それぞれの分子の個性 を扱うことになり、分子動力学法や量子シミュレー ション手法へと発展して行ったと理解しています.

先生は道半ばで逝かれてしまいましたが,後輩の 私たちにはその道を進んでいって欲しいと託された のではないかと考えております.

先生のご冥福をお祈り致します.

小竹進先生と日本伝熱学会 Contributions of the late Professor Kotake to HTSJ

私が小竹進先生の訃報をうかがったのは、ちょ うど、この「伝熱」誌の前号(44巻、189号)に、 TSEの合本版への復帰についての原稿を準備して いた頃でした.まさに、小竹先生がTSEを立ち上 げられたり、その発展にご尽力されたことを思い 出して整理していた最中でしたので、ご訃報を伺 ったとたん、ちょうど本学会の大きな変革期に小 竹先生のお手伝いをさせていただいていた頃のこ とが、次々と頭の中に浮かびました.

日本伝熱学会においては、小竹先生は、昭和60 ~61 年度にいわゆる事務担当の副会長を,平成3 年度には会長をお務めになりました. このような 重要な役職をお務めになられことと並行して、小 竹先生の本学会および伝熱研究への大きなご功績 は、私の存じ上げる範囲では、四つあると思いま す.一つ目は、伝熱数値解析の普及、二つ目は本 学会の社団法人化,三つ目は論文集 TSE の発刊と 発展、四つ目は原子分子(ミクロ)伝熱研究の立 ち上げと普及です. このうち, 四つ目の原子分子 伝熱研究について書くことは、その分野で小竹先 生の教えを受けられた方がたくさんおられますか ら、私の任ではありませんので、ここでは、他の 三つの項目について、書かせていただきたいと存 じます.ただ,論文集 TSE に関しては,前号に書 かせていただいたので、この部分は一部重複する ことをお許し下さい.

私が最初に小竹先生にお目にかかったのは,は っきりとは覚えていませんが,伝熱数値解析に関 する研究会を日本機械学会の熱工学部門に立ち上 げようというときで,1985年前後でした.先生は, 元来は東京大学航空宇宙研究所のご所属でしたが, 当時は改組によって工学部附属境界領域研究施設 のご所属であったと思います.その頃は,ようや く研究者ひとりひとりがパソコンを持って研究す ることが出来るようになり始めた時代でした.当 時は,文書作成にはワープロ専用機を使うのが通 河村 洋(東京理科大学) Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science)

常でしたが,研究者達は,何とかしてパソコンを 研究と文書作成の両方に使おうとしていました. パソコン本体は,日本語表示の簡便さから NEC の PC9801 系が主流で,ワープロソフトとしては 「松」というソフトが広く使われていましたが, 次第に「一太郎」が広まりつつありました.その 頃の小竹先生は,「松」と「一太郎」では,各々こ れは出来るが,これはどうしても出来ない,とい うことを詳細に調べておられて,ある学会の原稿 用紙に合わせてぴったり打ち出せたのは,一太郎 だったというようなことを,しばしば熱心に話し ておられました.

このように、先生はコンピューターを使いこな すことに関して大変ご熱心でしたので、当然のこ とながら、これを伝熱研究にも向けられて、コン ピューターを用いた伝熱数値解析の発展に非常に ご尽力されました.詳細は省略しますが、日本機 械学会の中に,研究会や研究分科会を立ち上げら れ,(故)土方邦夫先生(東工大)と私が,幹事と してお手伝いをさせていただきました. 小竹先生 はいろいろとご発案になって,研究情報の交換, 研究動向の展望、数値解析手法の比較(ベンチマ ークテスト)などを実施して、伝熱数値解析の研 究と実用の両面での普及に努められました.先生 は国際的にも, 学術誌 Numerical Heat Transfer のエ ディターを務められるなどして、この分野で指導 的な役割を果たしておられました.また,1988年 には土方先生と共著で,「パソコンで解く熱と流 れ フロッピーディスク付き」[1]という大変ユニ ークな本を出版されました. この本では、従来の ように数値解析の計算手法を説明するだけではな く、プログラムをフロッピーディスクに書き込ん で添付し、実際に計算をしてみることが出来るよ うにされました. この本は、広く用いられただけ でなく、その後多くの書籍がこのフロッピー付き のスタイルを倣いました.お二人共著のユニーク

な書籍は他にもありますが,このお二人共が故人 になってしまわれました.

日本伝熱学会は,昭和 37 年(1962年)に日本 伝熱研究会として発足しました.当初は,学会で はなく比較的小さな研究集団として,自由な雰囲 気での研究会活動をその目標と特徴としていまし た.その後,伝熱学が基礎をより強固にして学問 としても発展すると同時に,我が国の産業規模の 拡大,各種の技術革新,省エネルギーの重要性拡 大に支えられて,伝熱研究会の活動範囲や会員数 も大きく増加しました.そのため,伝熱研究会を 公認された社団法人化すべきかどうかの議論は, 長年に亘り何度か「法人化委員会」を設置する等 して審議されてきました.しかし,法人化をする にもこのままの状態にも共に利害得失がある,と いうような結論のままで,かなりの年数が経過し ておりました.

これについて、まず第29期の石黒会長の時代に、 名称を研究会から日本伝熱学会に変更しました. さらに、これに結論を出そうとされたのが、第30 代の会長になられた小竹先生でした. 私がこの件 で最初に小竹先生に呼ばれたのは、ご任期中のい つ頃だったかはよく覚えていませんが、いまでも 良くおぼえていますことは、小竹先生が「伝熱学 会の法人化の問題は,検討されながら長年が経過 しているので、何とかしたいと思う」、とおっしゃ いましたので、私が「委員会をもう一度作って今 度は結論を出してもらいましょうか」,と申し上げ たところ、「いや、検討委員会ではなんども審議し てもらったので、もうどちらかに決めないといけ ない. 法人化するという方向で進めたい」とおっ しゃいました. ついては,研究所勤務時代に企画 室で対官庁の仕事を経験していた私が文部省との 交渉を中心とする実務を担当するようにと命じら れました.

そこで学会の法人化の条件をざっと調べました ところ,いわゆる公認団体として認可される条件 というのは,(1)学術団体として活発に活動してい ること,(2)一定数以上の会員数を有すること,(3) 活動を補償できる一定の資産を保有すること,等 でありました.これらのうち,会員数は十分満た しており,基金についてもある程度の備蓄があり ましたが,会員各位の募金によるご協力をいただ き,要件を満たすことができました.

他方、学会としての活動は、伝熱シンポジウム や地方支部活動を通じてむろん活発に行っていま したが、論文集を発行していないことは、学会と しては多少変則的でありましたので、論文集を発 行することとして,この件は,土方先生(東工大) にご担当を依頼されました. このようにして本学 会の論文集 TSE が発足することになりました.こ の発足の事情とその後の経緯は,前号(44巻,189 号)にやや詳しく書かせていただいたとおりです. (その記事の中で, TSE 発足当時のエディターの お一人が、九州大学の藤田恭伸先生でありました のを,同姓の藤田先生(名大)のお名前を書いて おりました、おわびして訂正させていただきま す.) このようにして、TSE の論文内容や投稿規 程等は土方先生が小竹先生とご相談されて整備さ れ、小竹先生は、長年に亘りチーフエディターと して TSE の継続・発展に並々ならぬご尽力をされ ました.

さて,対文部省との交渉については,小竹先生 が,藤井(哲)先生(九大)にきっかけを作って いただこうとおっしゃって、平成4年に藤井先生 と当時の藤江会長と小竹先生と私の4人が文部省 の担当課の課長に挨拶に伺い、手続きを開始しま した、その後は、私が文部省の担当官のところに 何度も伺いながら、伝熱学とは何かの説明をし、 定款等の条件を次第に整えました.他方,本学会 の特徴である地方支部の活発な活動をさらに展開 できる体制を,長野先生(名工大)や芹澤先生(京 大)のご協力を得て整備しました.このような準 備を経て、平成6年に文部省の担当課の内諾を得 て、札幌で行われた総会において、社団法人に移 行しました.この間,小竹先生は,私達のような 実働部隊が動きやすいようにつねに状況を整えて 下さいました.

このように本学会の社団法人化には、小竹先生 のご貢献が非常に大きいのですが、法人化後の本 学会の活動については、小竹先生は、むしろ厳し い目でご覧になっていました.たとえば、学会創 立40周年を記念した「伝熱」誌の歴代会長特集[2] に、「もともと法人への移行は、伝熱という研究分 野も一応論理体系が整ってきたので、この辺で今 までの自由気楽な研究会の特徴を維持しながら、 研究結果と活動の公的化をはかってもいいのでは ないかということを主旨としている.しかし、一 旦形が出来るとどうしても形そのものを維持する のに力が入りがちであるが、あくまでも本質は中 身であって、中身がなくなれば形は壊せばよいと 云う柔軟な発想から出発している(一部略).」と 書いておられます.このように、小竹先生は、形 式にのみ流されることなく、学会としての内容を 充実させることが重要であることを、繰り返し説 いて来られました.

これ以外にも、小竹先生の学会や学問のあり方 に関する鋭いお言葉は、数多く「伝熱」誌に残さ れています.たとえば、学会の形式を保つためだ けの会議に時間を費やすべきでないこと、学会誌 に形式的な文章を書くくらいなら内容ある学術論 文を書くべきこと、学会ではつねに真剣な学問的 な議論を戦わすべきこと、内容の伴わない学会に は存在意義はない等です.これらを代わってお伝 えできる力は、私には到底ありませんので、先生 がお書きになった記事、たとえば、前述の歴代会 長特集[2]や、"「伝熱研究」と「TSE」"[3]をぜひ 直接にお読みいただきたいと思います.これらの 記事のいずれもが、学会と伝熱学に対する鋭い警 鐘で、まさに旧約聖書の預言者の言葉のようであ ります.

小竹先生がお亡くなりになって、学会や研究活 動の立場からこのような追悼記事を書く最適任者 は、じつは、間違いなく(故)土方邦夫先生(東 工大)であります.しかし、土方先生は、順序を 逆にして、先に逝ってしまわれました.そのため、 逆に小竹先生が、土方先生の追悼文を書いておら れます[4].そこには、土方先生に対する信頼と敬 愛のお気持ちが暖かくにじみ出ています.

小竹先生の掲げられたことは、つねに志も目標 も非常に高く、きびしいものでありました.それ を、我々にも実行可能な形にアレンジして実現さ れたのが土方先生でした.土方先生は、小竹先生 の最強のサポーターであり、かつ最良のパートナ ーでありました.いま.お二人は再び冥界を共に しておられます.土方先生が、「小竹さん、ここで はぼくが少し先輩ですからね」、などとおっしゃり ながら,お二人で,「永遠の世界におけるエントロ ピーとエクセルギー」などというご研究を始めて おられるかも知れません.

私がこんな記事を書いているのをご覧になった ら、小竹先生はきっと、「河村さん、ぼくは、そん なことをいろいろ書かれるのは好きじゃないんだ けどね.第一、そんな記事を書いても誰も読まな いから、その時間で、良い論文を書きなさい.」と おっしゃるでしょう.でも小竹先生、先生が繰り 返しおっしゃって来たことを記録に残すのは、と ても大切なことなのです.人の命は有限です.し かし、その人の語った言葉は、残された人々の中 に残り続けます.先生の鳴らされたいくつもの鋭 い警鐘は、語られたお言葉や「伝熱」誌の記事を 通して、いつまでも我々の学会に残り続けます. そして折に触れて思い出されて、この学会のあり 方と進むべき方向の道しるべとなり続けるでしょ う.

このような追悼文の締めくくりは、安らかにお 休み下さいと言うのが常套句ですが、小竹先生に は、全く相応しくありません.小竹先生、新しい 世界で自由を謳歌なさって、ますます新しい分野 にご挑戦下さい.先生は、きっとすでに、もう一 つのライフワーク[5]であった"美と感性"や、あ るいはもっと面白いテーマに、新しいチャレンジ を始めておられることでしょう.合掌.

#### 参考文献

- [1] 小竹 進, 土方邦夫, パソコンで解く熱と流 れ フロッピーディスク付き, 丸善出版 (1988).
- [2] 歴代会長特集号, 第 30 期小竹進先生, 伝熱, 41-168, (2002) 32.
- [3] 小竹 進,「伝熱研究」と「TSE」,伝熱研究, 37-146, (1998) 68-69.
- [4] 小竹 進,「土方」伝熱研究の将来像, 伝熱研究, 36-142, (1997) 90-91.
- [5] 小竹 進, 感性工学の基礎, 美とエントロピ ー, 丸善出版 (2005).

#### 吸着ヒートポンプ用機能性吸着材の開発

Development of Functional Adsorbent Material for Adsorption Heat Pump

下岡 里美,大島 一典,武脇 隆彦,垣内 博行((株) 三菱化学科学技術研究センター\*) Satomi SHIMOOKA, Kazunori OSHIMA, Takahiko TAKEWAKI, Hiroyuki KAKIUCHI (Mitsubishi Chemical Group Science and Technology Research Center\*) e-mail: 3803594@cc.m-kagaku.co.jp (垣内)

#### 1. はじめに

地球温暖化ガスの排出抑制や更なる省エネル ギーを目的として、コジェネレーション、燃料電 池,自動車、太陽温水器などで得られる 363K 以 下の低温排熱の有効利用が強く求められている. 排熱利用機器として吸収式ヒートポンプが実用化 されて久しいが、吸収式ヒートポンプの効率が低 下し始める 358K 以下の排熱利用や、自動車など の移動体には吸着ヒートポンプが適していると考 えられる.シリカゲルを用いた吸着ヒートポンプ は 1920 年代後半に基本概念が提案され [1],1980 年後半から商品化されている [2,3].しかしなが ら、吸収式ヒートポンプに比べ装置が大きい、価 格が高いなどの理由のためか広く普及していると は言えない状況である.

吸着ヒートポンプが広く普及するには、①吸着 ヒートポンプの運転範囲で大きな吸着容量差が得 られる新規吸着材、②熱・物質移動特性に優れた熱 交換器、の開発が不可欠と考える.そこで、我々 は吸着ヒートポンプの運転相対湿度範囲で吸脱着 し、かつ狭い湿度範囲で吸着量が大きく変化する 新しい吸着材の開発に取り組んだ.本稿では、開 発に成功した機能性吸着材 FAM(Functional Adsorbent Material)の特徴および吸着ヒートポン プに適応した場合の小型化の可能性などについて 概説する.

#### 2. 吸着ヒートポンプの原理

冷熱生成モードの吸着ヒートポンプの動作原 理を図1に示す.吸着ヒートポンプは、少なくと も吸着材が充填された吸着器、蒸発器、凝縮器か らなり、操作相対湿度範囲は $T_L$ :冷熱温度, $T_M$ : 中間温度, $T_H$ :再生温度の3種類の温度から決定 される.吸着過程の相対湿度 $\varphi$ 1 は蒸発器温度 $T_L$ と吸着器温度 $T_M$ から決まり、脱着過程の相対湿 度  $\varphi$ 2 は凝縮器温度 T<sub>M</sub> と吸着器温度 T<sub>H</sub>から決ま る.この関係を式(1)および式(2)に示す。この時, 吸着時と脱着時の相対湿度の差  $\Delta \varphi$  が吸着ヒート ポンプの運転範囲を示し,吸着時と脱着時の吸着 量の差  $\Delta Q$  が吸着ヒートポンプの大きさを決める 要素となる.小さい  $\Delta \varphi$  でも,大きな  $\Delta Q$  が得ら れる吸着材が好ましい.



図 1 a)吸着ヒートポンプの原理図および b)吸脱 着等温線と吸脱着操作範囲の関係

蒸発器温度TLの飽和蒸気圧	(1)
φ1	(1)

ω <u>γ</u> —	凝縮器温度Tмの飽和蒸気圧	(2)
φ2—	吸着器温度Tнの飽和蒸気圧	(2)

#### 3. 求められる吸着材の特性

ホーシリカゲル [4], 水ーゼオライト [5], 水 ー活性炭 [6], エタノールー活性炭 [7] などが吸 着ヒートポンプの吸着質および吸着材の組み合わ せとして知られている.筆者らは, 蒸発潜熱量が 大きいことおよび安価, 安全であることから水を 吸着質として選んだ.代表的な吸着材の吸着等温 線と吸着状態を図2に模式的に示す.



#### 図 2 代表的な吸着材と吸着状態の模式図

ゼオライト(アルミノシリケート)は均一で小 さい細孔であるが強親水性であるため,低い相対 湿度で水蒸気を吸着するが,吸着力が強いため脱 着させるには373K以上,好ましくは473K以上が 必要と考えられる.シリカゲルは幅広い大きさの 細孔を持ち,表面は親水性である.どの相対湿度 でも平均的に水蒸気を吸着するため吸着ヒートポ ンプやデシカント空調システムに使用されている. しかし,目的とするような狭い相対湿度範囲で大 きな吸着量差を得ることはできない.活性炭は比 較的均一な細孔を持ち,狭い相対湿度範囲で吸着 する特徴を有するが,疎水性であるため目的とす る低い相対湿度で水蒸気を吸着しない.

そこで,求められる吸着特性を満たすにはゼオ ライトのように均一な細孔を有し,かつゼオライ トほど強い親水性ではない材料を開発すればよい ことがわかる.筆者らはこの要求特性を満たす材 料としてアルミノフォスフェート系ゼオライトに 着目し,機能性吸着材 FAM と称する新規吸着材 を開発した.

#### 4. 機能性吸着材 FAM の特徴

#### 4.1 基本物性

機能性吸着材 FAM-Z01 は 0.73nm の細孔径を有 する AFI 型モレキュラーシーブであり、その骨格 は酸化アルミと燐酸と酸化鉄からなる [8]. FAM-Z02 は 0.38nm の細孔径を有する CHA 型モレ キュラーシーブであり、その骨格は酸化アルミと 燐酸とシリカからなる [9]. FAMの基本特性を 表 1 に示す.

表 1 FAM-Z01, FAM-Z02 の基礎物性

		FAM-Z01	FAM-Z02
Bulk density	kg∙dm <sup>-3</sup>	0.6-0.7	0.6-0.7
Particle size (typical)	μm	5-2,000	5-2,000
Thormal conductivity	W1 IC-1	0.113(303 K)	0.117(303 K)
	w·m ·ĸ	0.123(343 K)	0.128(363 K)
Differential heat of adsorption(H <sub>2</sub> O, 298 K)	kJ∙mol <sup>-1</sup>	56.0	58.8
Specific heat	kJ∙kg⁻¹∙K⁻¹	0.805(303 K)	0.822(303 K)
-	0	0.896(343 K)	0.942(363 K)

#### 4.2 吸着特性

FAM-Z01, FAM-Z02 および他の吸着材の 298K の 水蒸気吸着等温線を図3に示す.水蒸気吸着等温 線および水蒸気脱着等温線は容量法水蒸気吸着量 測定装置(Belsorp18,日本ベル(株))および磁 気浮遊式天秤(ルボサーム(株))を用いた重量法 蒸気吸着量測定装置(三菱化学(株))を用いて測 定した。従来の吸着材として、FAU型アルミノシ リケート(触媒化成工業社製),A型シリカゲル(富 士シリシア化学社製),ヤシ殻活性炭(三菱化学カ ルゴン社製)を用いた. 図 3 より FAM-Z01, FAM-Z02 の水蒸気吸着等温線は従来の吸着材と 大きく異なり,低い相対湿度付近ではほとんど水 蒸気を吸着せず、少し相対湿度が高くなると急激 に水蒸気を吸着し始めることが判る. FAM の水蒸 気吸着等温線はS字曲線の様であり、求められる 吸着材に非常に近い吸着特性を有することがわか る.



#### 図 3 FAM-Z01, FAM-Z02 と代表的な吸着材の 298K における水蒸気吸着等温線

次に, FAM-Z01 と FAM-Z02 について異なる温 度で水蒸気吸着等温線を測定した. 図 4 に 298K, 318K, 333K と 348K で測定した FAM-Z01 の水蒸 気吸着等温線を示す. 図 4 より FAM-Z01 の水蒸 気吸着等温線は温度に依存して変化することが判 る.また,333K と 343K で脱着等温線を測定した 結果, FAM-Z01 は吸脱着のヒステリシスが ほと んどないことが判る.

図5に298K, 318K, 328Kと363Kで測定した FAM-Z02の水蒸気吸着等温線を示す.図5より FAM-Z02も水蒸気吸着等温線が温度依存性を有 することが判る.同様に363Kでの脱着等温線を 測定した.

FAM-Z02 はわずかに吸脱着のヒステリシスが 存在することが判る.平衡論的に吸着ヒートポン プの組み込み特性を議論する場合, FAM-Z02 の 脱着サイドは脱着等温線を用いる方がより正確に 挙動を評価することができる.

FAM に見られる吸着等温線の大きな温度依存 性はシリカゲル,アルミノシリケートや活性炭な どこれまで検討されてきた吸着材にはない特徴で ある.この吸着等温線の大きな温度依存性によっ てFAMは吸着ヒートポンプの吸着材として優れ た性能を示す可能性が考えられる.



図 4 FAM-Z01 の各温度における吸着等温線と 脱着等温線



#### 図 5 FAM-Z02 の各温度における吸着等温線と 脱着等温線

#### 4-3. 吸脱着耐久性

吸着材の耐久性は吸着ヒートポンプやデシカ ントの用途では重要な要因である. FAM と同じア ルミノフォスフェートの AIPO-17 や AIPO-18 は水 蒸気の吸脱着に対して不安定であり,それらのア ルミノフォスフェートは吸着材として使用は困難 である.しかしながら, FAM は吸着ヒートポンプ やデシカントの操作条件において非常に安定であ り,これも強みの一つである.

FAM-Z01 と FAM-Z02 の水蒸気の吸脱着耐久性 は耐久性評価装置(三菱化学社製)を用いて評価 した. FAM-Z01 の結果を図 6 に, FAM-Z02 の結 果を図 7 に示す.図 6 より, FAM-Z01 は 20 万回 繰り返した後の吸着等温線は初期の吸着等温線と 全く異ならず,水蒸気の吸脱着に対して高い耐久 性を有することがわかる.図 7 に FAM-Z02 の初 回,2万回後,6万回後,10万回後および20万回 後の水蒸気吸着等温線を示す.2万回以降の水蒸 気吸着等温線はほとんど同じであるが,初回とは わずかに異なる特性となっている.筆者らはこの 現象を次のように考える.FAM-Z02は水蒸気を吸 着することによって,早い段階で表面が親水性に 変わり,その後安定する.結果,2万回から20万 回にかけての変化は小さい.

20 万回は,たとえば吸着ヒートポンプにおいて 吸着5分/脱着5分のサイクルで10時間/日,365 日/年で運転する場合の約5年半に相当する回数 である.20万回経過時点で全く性能低下がないこ とから20万回を過ぎて急激に特性が低下するこ とは考えにくく,FAM-Z01,FAM-Z02とも実用で きる十分な耐久性を有していると考えられる.



図6 FAM-Z01の耐久性評価結果





#### 4-4. 吸着ヒートポンプへの平衡論的組み込み特 性評価

ここで、固体高分子燃料電池や太陽温水器で得 られる 333K の低い温水で吸着ヒートポンプを作 動させる場合について考察する.吸着ヒートポン プの作動温度条件を T<sub>L</sub>/T<sub>M</sub>/T<sub>H</sub> = 283K/303K/333K とすると,操作相対湿度範囲は¢1=0.29, ¢2=0.21 となる.この操作湿度範囲での吸着量差(ΔO) に ついて FAM-Z01 と A 型シリカゲルについて比較 した. ΔQ は φ1 と φ2 に於ける平衡吸着量の差で ある.図8にFAM-Z01、シリカゲルの303Kの吸 着等温線と333 K の脱着等温線を示す. FAM-Z01 は操作温度によって吸着等温線、脱着等温線が大 きく異なったが、シリカゲルは 303 K の吸着等温 線と 333K の脱着等温線が重なり、全く差がない 結果となった. 図 8 より FAM-Z01 の有効吸着量 ΔQ は 0.16 kg/kg であり, 0.04 kg/kg であるシリカ ゲルの ΔQ の約4 倍であることがわかる.本結果 から FAM-Z01 を吸着ヒートポンプの吸着材とし て用いるとシリカゲルを用いた場合に比べ、1/4 の吸着材量で同出力が得られる可能性があること がわかった. 今後, FAM-Z01 の効果を確認するた めに吸着ヒートポンプを作製して動特性の評価を 行うことが必要と考える.



#### 図8 FAM-Z01とA型シリカゲルの吸着ヒートポ ンプへの組み込み特性比較

一方, FAM-Z02 は自動車の排熱やガスエンジン コジェネレーションの排熱など少し高い熱源を用 いた吸着ヒートポンプの吸着材に適している.こ こで吸着ヒートポンプの作動温度条件を $T_L/T_M/T_H$ = 283K/313K/363K とすると,操作相対湿度範囲

は $\phi_1 = 0.17$ ,  $\phi_2 = 0.11$ となる. 図 9 に FAM-Z02, Y型ゼオライト,シリカゲルの313Kの水蒸気吸 着等温線と 363 Kの水蒸気脱着等温線を示す. FAM-Z02 は操作温度によって水蒸気吸着等温線, 水蒸気脱着等温線が大きくことなるが, Y型ゼオ ライトおよびシリカゲルは操作温度によって大き な差は見られなかった. 図9より, 平衡論的には FAM-Z02 は Y 型ゼオライトの約 4.8 倍, シリカゲ ルの約3.8倍の有効吸着量を有することがわかる. 吸着ヒートポンプの出力は操作温度に大きく依存 する. 今回想定した自動車の冷却水やガスエンジ ンコジェネレーションの冷却水を用いて 313 K の 冷却温度で、283 Kの冷熱を製造する場合は作動 相対圧範囲が 41 = 0.17, 42 = 0.11 と狭く, この条 件で運転する場合, FAM-Z02 は Y 型ゼオライト やシリカゲルに比べて約 1/4-1/5 の使用量で同じ 出力が得られることがわかる.しかし、冷却温度 が 303 K であれば作動相対圧は広くなり, FAM-Z02 と Y 型ゼオライトやシリカゲルとの有 効吸着量の差は小さくなる. FAM-Z02 の特徴が活 かされるのは、今回設定した温度条件のように、 従来の吸着材では装置が大きくなりすぎて実用に 供さない用途である.



図 9 FAM-Z02, A 型シリカゲルおよび Y 型ゼオ ライトの吸着ヒートポンプへの組み込み特性

#### 5. 結言

コジェネレーション,燃料電池,自動車,太陽 温水器などで得られる 363 K 以下の低温排熱を有 効に活用する吸着材として FAM-Z01 および FAM-Z02 を開発し,基本特性,吸着等温線,耐久 性を評価し,平衡論的な吸着特性から FAM-Z01 および FAM-Z02 の吸着ヒートポンプへの組み込 み特性について検討・評価を行った. その結果,

- FAMの水蒸気吸着等温線はS字曲線を描き, 温度によって変化し,吸脱着のヒステリシスは ないか非常に小さい.これらの特徴によって, FAMは吸着ヒートポンプなどにおいて狭い操 作相対湿度範囲でも大きな吸脱着容量差を得 ることができる.
- 2. FAM-Z01 は水蒸気の吸脱着に対して高い耐久 性を有する.耐久性試験において 20 万回の吸 脱着を繰り返しても吸着特性は初期と比べ変 化がなく,実使用に問題ないレベルの耐久性を 有していることがわかった.
- 3. FAM-Z02 は耐久性試験後の2万回,6万回,10 万回と20万回の水蒸気吸着等温線はほとんど 同じであるが,初回とはわずかに異なる特性と なった.しかし,吸着容量に大きな変化はなく, 水蒸気吸着等温線の変化も小さく実使用に問 題ない耐久性を有していると考える.
- 4. 吸着ヒートポンプを T<sub>L</sub>/T<sub>M</sub>/T<sub>H</sub> = 283 K/ 303 K/ 333 K の温度条件で運転する場合,平衡論的に は FAM-Z01 の有効吸着量差はシリカゲルに比 べ4倍大きいことがわかった.FAM-Z01 を吸着 ヒートポンプの吸着材として用いることで,吸 着ヒートポンプが小型化できる可能性が示唆 された.
- 5. 吸着ヒートポンプを T<sub>L</sub>/T<sub>M</sub>/T<sub>H</sub> = 283 K/313 K/363 K の温度条件で運転する場合,平衡論的 には FAM-Z02 の有効吸着量差は Y 型ゼオライ トに比べ 4.8 倍,シリカゲルに比べ 3.8 倍大き いことがわかった.

#### 参考文献

- Miller, E. B., *The Development of Silica Gel Refrigeration*, Refrigerating Eng., 17-4(1929)103.
- [2] 株式会社前川製作所ホームページ http://www.mycomj.co.jp
- [3] エネサーブ株式会社ホームページ http://www.eneserve.co.jp
- [4] 渡辺藤雄,小塚淳,汲田幹夫,架谷昌信,化 学工学論文集, 19-6 (1993) 1165.
- [5] Mizota, T., Zeolite-water heat-pump system for effective use of waste heat, Proc. 13th IPCWS Physical Chemistry of Aqueous System, Toronto,

Canada (1999) 1-8.

- [6] 垣内博行,山崎正典,山本英里,日高秀人, 池畑富美子,赤繁悦史,化学工学会エネルギー 部会シンポジウム講演論文集, 3-1 (2003) 11
- [7] Kumita, M., Mori, S., Yokogoshiya, T. and Otsubo, S., J. Chem. Eng. Japan., 36 (2003) 812
- [8] 垣内博行,下岡里美,岩出美紀,大島一典、 山崎正典,寺田秀,渡辺展,武脇隆彦,化学工 学論文集,**31-5**(2005)361.
- [9] 垣内博行,下岡里美,岩出美紀,大島一典, 山崎正典,寺田秀,渡辺展,武脇隆彦,化学工 学論文集, **31-4**(2005)273.

多孔体内部の吸着現象 Adsorotion phenomena inside porous materials

#### 1. はじめに

多孔体とは内部に大小さまざまな孔をもつ固体 の総称であり、通常の固体とは種々の異なる性質 をもつ. その性質は孔の存在により固体全体の構 造に変化が生じることによるものであり、また孔 の表面の微細構造がもたらす一種の界面現象によ るものである. 一般に, ゼオライトなどのように 2nm以下の細孔をもつ物質をミクロ多孔体,多孔 質ガラスなどのように 50 nm 以上の細孔をもつ物 質をマクロ多孔体, その中間をメソ多孔体と呼ぶ [1,2]. 近年,多孔体は様々な方法で合成され,分 子スケールの構造制御も可能になってきている. 本稿では、主にミクロ/メソ多孔体を対象とし、 これらの物質がもつ様々な性質の中から吸着性能 に着目し、その内部の吸着現象について解説する. 前半は吸着の代表的な物理モデルを説明し、後半 は吸着の分子シミュレーションについて最近の研 究動向を述べる.

#### 2. 吸着の物理モデル

#### 2.1 吸着等温線の分類

吸着の理論は、一定量の固体が一定の温度・吸 着質濃度の条件下で、吸着質をどれほどまで吸着 可能であるかという固体の吸着能(吸着容量)を 考える吸着平衡論と吸着平衡に達するまでの速度 を問題とする吸着速度論に分かれるが、ここでは 吸着平衡論について考える.

気体が固体に吸着する場合,単位質量の固体に 吸着する吸着質の量vは気相の平衡圧pと温度T の関数とあるが,よく用いられる定温吸着実験の 結果はpのみの関数で表される.臨界温度以下の 気体,すなわち蒸気ではその飽和蒸気圧をpsとす ると,相対圧 p/psの関数として次式のように表さ れる.

$$v = f(p / p_s)_T$$

大宮司 啓文(東京大学) Hirofumi DAIGUJI (The University of Tokyo) e-mail: daiguji@k.u-tokyo.ac.jp

図 1 は IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry)の分類に基づく,各種吸着剤へ の気相吸着等温線を表す[3]. I 型はミクロ孔の多 い固体でみられ,Langmuir型といわれる.一般に 単分子層吸着に基づいた考え方で説明される.II 型は細孔をもたない,微粒子状の固体への吸着で 見られる.また II 型と IV 型は B 点と呼ばれる変 曲点をもつのが特徴である.III 型と V 型は蒸気吸 着の典型的な等温線を表す. IV 型と V 型はメソ 孔の多い固体で見られ,吸着と脱着の等温線が一 致しない,いわゆる履歴現象(hysterisis)を示す. VI 型は階段状の等温線で特殊炭素への窒素吸着 で見られる.

吸着等温式の定式化は長い歴史をもち,これま で数多くのモデルが報告されている[4].これらの モデルは主に次の2種類に大別される.すなわち (i)特定の表面領域に着目するもの,(ii)孔の体積や 大きさの分布に着目するものである.前者は主に ミクロ多孔体における吸着モデルであり,代表的 なモデルとして「多分子層吸着理論」がある.一 方,後者は主にマクロ多孔体における吸着モデル であり,代表的なモデルとして「毛管凝縮理論」 がある.メソ多孔体においては「層状吸着」と「毛 管凝縮」の両方の現象が見られ,いずれか一方で 吸着現象を説明するのは困難である.ここで特に





(1)

興味深いのは、「層状吸着」と「毛管凝縮」という 2 つの異なる吸着様式はどこで遷移するかという 点にある.ここでは「多重定常状態間の遷移」の モデルについて簡単な吸着モデルを用いて説明す る.

#### 2.2 多分子層吸着理論

多分子層吸着理論のモデルとしては Brunauer, Emmett, Teller の導出した BET 多分子層吸着モデ ルがある[5,6]. このモデルにおいては,図2に示 されるように気体分子は固体表面で単分子層から n 分子層までの種々の多分子層を形成して平衡を 保つと仮定される. すなわち Langumuir の単分子 層吸着(化学吸着)モデルに第2層以上の物理吸 着過程を加えてより一般化したものといえる.

Langmuir の考えに基づくと,吸着していない場所 (面積  $S_0$ )に吸着して単分子層(面積  $S_1$ )を形成 する速度は相対圧  $p/p_s \ge S_0$ に比例し、単分子層か らの脱離速度は  $S_1$ に比例する.平衡状態では吸着 速度と離脱速度が等しいことから次式が成立する.

$$k_{a0}(p / p_s)S_0 = k_{d1}S_1$$
<sup>(2)</sup>

ただし、 $k_{a0}$ 、 $k_{d1}$ はそれぞれ  $S_0$ への吸着速度定数、 および  $S_1$ からの脱離速度定数である.なお吸着平 衡定数  $K=k_{a0}/k_{a1}$ は吸着熱 $E_a$ との間に次式の関係が ある.

$$d\ln K / dT = E_a / RT^2 \tag{3}$$

したがって、*S*<sub>1</sub> と *S*<sub>0</sub>の面積比を *x* (=*S*<sub>1</sub>/*S*<sub>0</sub>)とすると 式 2, 3 より次式が成立する.

$$x = g_{a}(p / p_{s})\exp(E_{a} / RT)$$
(4)

ただし、 $g_a$ は吸着・脱離の速度定数比を表す定数 である.第2層以上の吸着・脱離に対しても同様 の考え方を適用することができるが、ここでは第 2層以上の全ての吸着層に対して、吸着熱 $E_a$ の代 わりに凝縮熱 $E_i$ を, $g_a$ の代わりに $g_1$ を用いる. 今、  $S_i$ をi分子層吸着する部分の表面積とすると、 $i\geq 2$ において、 $S_i$ と $S_{i-1}$ の面積比y(= $S_i$ / $S_{i-1}$ ) について 次式が成立する.

$$y = g_1(p / p_s) \exp(E_1 / RT)$$
<sup>(5)</sup>

ここで,式4,5で定義された $x \ge y$ の比を $c \ge t$ ると,cは次式のように表される.

$$c = x / y = (g_a / g_1) \exp[(E_a - E_1) / RT]$$
 (6)

式6で定義された定数 c は第1層における分子滞 留時間と第2層以上における分子滞留時間の比を 示している.今,吸着気体の全容積を v,全表面 を単分子層で覆うのに要する気体の容積 vm とす ると,次の関係式が成立する.

$$\frac{v}{v_{\rm m}} = \left(\sum_{i=0}^{n} iS_i\right) / \left(\sum_{i=0}^{n} S_i\right)$$
(7)

式7を式5,6で定義された定数*y*,*c*を用いて表 すと次式のようになる.

$$\frac{v}{v_{\rm m}} = \left(c\sum_{i=1}^{n} iy^{i}\right) / \left(1 + c\sum_{i=1}^{n} y^{i}\right)$$
(8)

ここで、気相圧 p が飽和蒸気圧  $p_s$ に等しいとき、 吸着質蒸気は通常の液体となって固体表面に凝縮 すると仮定すると、 $p/p_s=1$ のとき y=1となる. す なわち yは相対圧  $p/p_s$ を表すことになる.そこで、 式 8 に  $y=p/p_s$ を代入し、簡単な式の変形を行うと 次式が導出される.

$$v = v_{\rm m} \frac{c(p / p_{\rm s})}{1 - (p / p_{\rm s})} \left[ \frac{1 - (n + 1)(p / p_{\rm s})^n + n(p / p_{\rm s})^{n+1}}{1 + (c - 1)(p / p_{\rm s}) - c(p / p_{\rm s})^{n+1}} \right] (9)$$

この式は BET 有限層式と呼ばれ,単分子層吸着量 $v_m$ ,最高吸着層数n,定数cの3つのパラメータによって吸着気体の全容積vと相対圧 $p/p_s$ の関係が与えられる.BET 有限層式でn=1とおくと,cの値によらず,Langmuir式(図1の1型)が導出される.

$$v = v_{\rm m} \frac{c(p/p_{\rm s})}{1 + c(p/p_{\rm s})}$$
(10)

一方, n→∞とすると, BET 無限層式が導出される.



図 2 BET 多分子層吸着理論モデル[5,6]

$$v = v_{\rm m} \frac{c(p / p_{\rm s})}{\left[1 - (p / p_{\rm s})\right]\left[1 + (c - 1)(p / p_{\rm s})\right]}$$
(11)

この BET 無限層式においては, *c*≤2では III 型, *c*の値が大きくなるとII型の等温吸着線を与える. 一般に BET 有限層式(式9)においては, *n*≥3 で 定数 *c*にある特定範囲の値を与えると,図1に示 した VI 型を除いた 5 つの型の吸着等温線全てを 表現することができる.しかし,たとえ吸着等温 線をフィッティングすることができたとしても, すべての吸着が層状に進むと結論付けることはで きない.

#### 2.3 毛管凝縮理論

毛管凝縮理論は蒸気の吸着を液体として細孔内 に凝縮する物理現象と考えるもので,化学吸着の 概念を含まない[7].活性炭やシリカゲルなどメソ 孔の多い多孔体に起こる場合が多く,細孔形状が インクつぼのように径の異なる部分をもつ筒型や 楔型の細孔の集合体であると考えて,次の Kelvin の式を適用する.

$$\frac{p}{p_{\rm s}} = \exp\left[-\frac{2V_{\rm m}\gamma\cos\theta}{rRT}\right] \tag{12}$$

ここで、 $V_m$  は吸着質の分子容積、pは吸着質の表面張力、 $\theta$ は接触角である.この式から毛管半径rと蒸気の相対圧  $p/p_s$ の関係が求められる.もし毛管の形状として、入口が狭く、内部が広いインクつぼ型であった場合、蒸気が凝縮し、内部が液で満たされていくときは内部の広い径が支配的になり、逆に満たされている液が蒸発するときには入口の狭い径が支配的になる.その結果、蒸気脱離曲線は凝縮吸着曲線を上まわるという等温線の履歴現象を説明することができる.毛管凝縮理論においては、複雑な吸着特性は孔の形状や大きさの多様性に起因すると考えるが、実際には半径が等しい円筒形の毛管においても履歴現象は見られる.多孔体内部の吸着現象をすべて「細孔内における凝縮」と捉えるのはやはり無理がある.

#### 2.4 多重定常状態間の遷移

細孔内の吸着現象は,一般に,吸着量が少ない 時は細孔の内壁に「層状吸着」が起こり,吸着量 が多くなるに従って細孔内部で「毛管凝縮」が起 こると考えられる.ミクロ多孔体においては細孔 の容積が表面積に対して小さいため,表面吸着が 支配的であり,毛管凝縮は無視することができる. このような場合に「多分子層吸着理論」が適用さ れる.一方,マクロ多孔体においては細孔の容積 が表面積に対して大きいため、毛管凝縮が支配的 であり、表面吸着は無視することができる.この ような場合に「毛管凝縮理論」が適用される.し かし、メソ多孔体においては「層状吸着」と「毛 管凝縮」の両方が同程度に重要であり、どちらか 一方を無視することはできない. ここで興味深い のは2つの異なる吸着様式はどこで遷移するかと いう点である.このような問題は一般に「多重定 常状態間の遷移」の問題として知られている[8]. 今, 簡単なモデルとして, N 個の結合部分を有す る格子表面を考える. その系は濃度が固定された 成分 X。の物質浴と接触している. X。は空の部位に 結合することによって格子に吸着する. その吸着 した成分を X とする. X は脱着によって再び X<sub>e</sub> にもどる.この現象は次の式で表わされる.

$$F + X_{e} \xrightarrow{k_{1}} X$$

$$X \xrightarrow{k_{2}} X_{e} + F$$
(13)

ここで、Fは空の部位を表わす. 速度式は

$$\frac{dX}{dt} = k_1 F X_e - k_2 X = -\frac{dF}{dt}$$
(14)

ここで, X+F=N (=一定)とすると,式 14 は次式の ようになる.

$$\frac{dX}{dt} = k_1 X_e \left[ N - \left( 1 + \frac{k_2}{k_1 X_e} \right) X \right]$$
(15)

吸着,脱着の平衡定数を  $K=k_2/k_1X_e$  および  $k_1X_e = \alpha$ 





とすると式15は次式のようになる.

$$\frac{dX}{dt} = \alpha \left[ N - (1 + K)X \right] \tag{16}$$

さらに吸着,脱着が協同的であると仮定する.す なわち *k* が既に吸着している *X* の数に依存すると 考え,以下のように仮定する.

 $K = K(X) = K' \exp[-\eta X / N]$ (17)だたし, Kとnは定数である. 今, 式 17 を式 16 に代入し, dX/dt=0 とすると, 定常状態における吸 着量 X と平衡定数 K の関係が求められる. n>4 の 場合, K1'< K'< K2'の間の値に対して3つの平衡解 が存在する(図3参照).そのうちの2つの状態は 安定で、第3のものは不安定である(図3の点線 の領域は不安定領域となる). これは、1次相転移 の van der Waals の理論と非常に良く似ているが、 厳密に対応つけるのは困難である.一方, η≤4 の 場合,吸着量は吸着平衡定数 K の一価関数となる ため、履歴現象は現れない. ここで取り上げたモ デルにおいては、"吸着, 脱着が協同性"を表わす パラメータηが履歴現象を特徴付けているが,分 子論的に考えると, 吸着剤-吸着質の相互作用と 吸着質-吸着質の相互作用の大小関係,あるいは、 細孔の表面積と体積の大小関係、より詳細には、 表面の構造や細孔の形状が「層状吸着」と「毛管 凝縮」間の履歴現象に影響を与えると考えられる. そこで、次に吸着の分子シミュレーションについ て最近の研究動向を述べ、どの程度まで理論計算 により吸着現象を表現できるか考察する.

# 3. 吸着現象の分子シミュレーション 3.1 ミクロ多孔体

ミクロ多孔体としてX型およびY型ゼオライト への水蒸気吸着について考える.ゼオライトは多 孔質結晶性のアルミノケイ酸塩およびメタロケイ 酸塩の総称であり,多孔質の穴の入口径が 0.4~ 0.8 nm 程度であるため,その穴の入口より小さな 分子は細孔内に進入できるが,大きな分子は進入 できないという分子ふるいの作用をもつ[9].また 吸着・触媒作用などに対する材料として利用され ている.ゼオライトには様々な種類があり,その 性質はその細孔構造に大きく依存しているが,こ こでは比較的大きな細孔をもつX型およびY型の ゼオライトについて考える.X型およびY型のゼ オライトは図4に示されようにソーダライトケー ジの6員環どうしが連結し,3次元細孔をもつ立 方晶の合成ゼオライトである. 天然ゼオライトの ホージャサイトと同じトポロジー(構造コード FAU [10])をもつ. 一番大きな孔(スーパーケー ジ)の入口は円形の12員環(直径0.74 nm)であ り、1ケージあたり4つの入口で隣のスーパーケ ージと連結している. Na型の場合,単位組成は Na<sub>n</sub>Al<sub>n</sub>Si<sub>192-n</sub>O<sub>384</sub>·xH<sub>2</sub>Oであり, nが48~76をY 型,77~96をX型と呼ぶ. nの増加とともに親水 性が高まるが, n=58のホージャサイトにおいても x=240 と多くの吸着水をもつ. また主なカチオン 交換サイトはスーパーケージおよびソーダライト ケージ内にある.

ゼオライトの水蒸気吸着等温線は一般に Langmuir型(図1のI型)であり、単分子層吸着 型と考えられる.しかし、次の2つの実験結果は 単分子層吸着ではないことを示している. 一つ目 は、分子占有断面積(0.125nm<sup>2</sup>程度)を仮定し、式 10から求められた有効吸着面積が、結晶学的に求 められるゼオライト細孔の表面積より大きくなる という実験結果である[11]. 二つ目は微分吸着熱 が吸着量によって変化するという実験結果である [12-14]. 微分吸着熱 q は n mol の吸着が終わって いるところへ、さらに吸着質Δn mol を吸着させた ときの発生熱量を $\Delta q$  とし、 $q=\Delta q/\Delta n$  と定義され る.実験においては、吸着の過程で発生する熱を 熱量計で測定することにより求められる.もし水 蒸気がすべて単分子層吸着をするならば、微分吸 着熱は吸着量に依存せずに一定にならなければな らないが、実際は、吸着量の変化に伴い微分吸着 熱が変化する.

無水ゼオライト,および結晶水を伴うゼオライ



図 4 ゼオライト FAU (左図) とソーダライトケ ージ (右図) の骨格構造. T 原子 (Si 原子, ある いは Al 原子) は直線の交点にあり, 酸素原子は 各線分の中点にある.

トの結晶構造(飽和状態まで水蒸気を吸着した状態)については詳細にその構造が知られているが [10],無水状態から飽和状態に至るまで,どのようにゼオライト内部で水蒸気吸着が進んでいくか についての分子論的描像は必ずしも明らかではない.このようなとき,分子シミュレーションは有 効な解析手法となる.ゼオライトの骨格構造を再 現するポテンシャル関数はこれまで数多く提案さ れているが[15-19],様々な骨格構造をもつゼオラ イトをすべて表現できるような汎用性のあるポテ ンシャル関数というものは存在しない.さらに,

「ゼオライトと水」のような「吸着剤と吸着質」 の分子シミュレーションにおいては、吸着剤一吸 着質間のポテンシャル関数をどのように定めるか がポイントとなる. Shirono ら[20]は水分子モデ ルとして SPC/E [21]を用いて, 300K における様々 な含水量の NaX 型(Si/Al=1.0)および NaY 型 (Si/Al=2.0) ゼオライトの分子動力学シミュレー ションを行った.図5はゼオライトに水蒸気が吸 着される際に発生する微分吸着熱についての計算 結果である.計算値は実験値[12-14]より若干大き いが, グラフの傾向, あるいは NaX 型ゼオライト の微分吸着熱の方が NaY 型ゼオライトのそれよ りも大きい点は実験結果と一致している. またこ れらのグラフより, NaX型, NaY型ゼオライトへ の水蒸気吸着は以下の3つの領域に分けて考える ことができることがわかる. すなわち(1)非常に大 きな吸着熱を発生する領域(親水性サイトへの吸 着)、(2)微分吸着熱が吸着量によらずに一定の領 域,(3)吸着熱が減少し,水の凝縮熱に近づく領域 (毛管凝縮)の3つの領域である. さらに、微分 吸着熱がどの分子間の相互作用によって発生した かを調べるために、微分吸着熱を水分子-ゼオラ イト原子間,水分子間,ゼオライト原子間に働く 相互作用に起因する微分吸着熱に分解した.水分 子ーゼオライト原子間の相互作用に起因する微分 吸着熱において、NaX 型ゼオライトでは中間の含

水量域に平坦な領域があるが, NaY 型ゼオライト では平坦な領域がない. NaX 型ゼオライトでは, 吸着量によらず一定の吸着熱が発生することから, ゼオライトの内壁に単分子層吸着をしていると予 想されるが, NaY 型ゼオライトでは, 吸着量が増 えると吸着熱が小さくなることから, 除々に不安 定な位置に吸着するようになると考えられる. こ れらの微分吸着熱から予想される構造的性質は, 分子シミュレーションの計算結果を解析すること により検証された. Shironoら[22]はさらに,水分 子モデルとして,バルクの水分子モデルである SPC/E の代わりに水分子内の電荷変動を許したモ デル SPC-FQ[23]を用いて同様の計算を行い, SPC-FQ モデルを用いた方が.微分吸着熱の N に 対する変動が大きく,実験値によく一致すること を明らかにした. これらの計算結果はミクロ多孔 体内部の吸着であっても,単純な単分子層吸着で はないことを示している.



図 5 NaX 型(上図), NaY 型(下図) ゼオライ トへの水蒸気吸着における微分吸着熱, |∂H/∂N|, および水-ゼオライト,水-水,ゼイライト-ゼ オライト相互作用に基づく微分吸着熱, -∂U<sub>w-Z</sub>/∂N, -∂U<sub>w-w</sub>/∂, -∂U<sub>Z-Z</sub>/∂N と単位格子内の水分子数 N の 関係.水分子は SPC/E モデルである [20].

#### 3.2 メソ多孔体

メソ多孔体としてオーダードメソポーラスシリ カを考える.オーダードメソポーラスシリカは均 ーな円筒形のメソ孔をもつ二酸化ケイ素のメソ多 孔体である.ゼオライトの細孔では対応できない 大きな分子が関与する吸着・触媒作用などに対す る新材料として期待されている [9].水の吸着に 対してはメソ孔のサイズにしたがって異なった吸 着等温線をもつこと,シリカゲルよりも大きな最 大吸着量をもつ場合があること,履歴現象を示す 場合があること等が報告されている[24].メソ多 孔体は一般にアモルファスであるが,製法によっ ては結晶成分が多く含まれる.

メソ多孔体の分子モデルとしては、アモルファ ス状の円筒を計算により作り出す方法、理想的な 円筒形を仮定する方法など様々であるが、Shirono ら[25]はα石英の結晶に円筒状の穴を開けること でオーダードメソポーラスシリカの分子モデルと した.分子シミュレーションのアンサンブルとし ては、グランドカノニカル集団(*µVT*一定)を用い ると吸着等温線を求めることができ、カノニカル 集団(*NVT*一定)を用いると、図3に示されるよ うなS字曲線が求められる.(正確には、図3に おける横軸はエネルギーではなく、自由エネルギ ーであるため、カノニカル集団の計算に加えて、 自由エネルギーの計算をする必要がある.)

Shironoら[25]は直径が 2.0 nm と 2.86 nm のオー



図 6 (a) 直径が 2 nm と(b) 2.86 nm のオーダードメ ソポーラスシリカへの水蒸気吸着の *NVT* 分子シミ ュレーション (幅 0.5 nm の断面図).水分子の数は 上図が (a-I) 48, (a-II) 144, (a-III) 288, 下図が(b-I) 384, (b-II) 480, (b-III) 672 [25].

ダードメソポーラスシリカへの水蒸気吸着を対象 として, 300 K における NVT アンサンブルの分子 動力学シミュレーションを行った.図6は計算結 果の一例である. 直径が 2.0 nm の場合は、はじめ に層状吸着が起こるが、細孔表面がすべて水で覆 われる前に凝縮が始まる様子が捉えられている. さらに、図3に示されるような化学ポテンシャル -吸着量曲線はあまり明確なS字曲線にならない ことが示された.一方, 直径が 2.86 nm の場合は, はじめに層状吸着が起こり,細孔表面がすべて水 で覆われた後,毛管凝縮へ移る様子が捉えられた. また,化学ポテンシャル-吸着量曲線は明確な S 字曲線になり、図 3(b-II)に示されるような状態は 不安定であることが示された.実験においては, 1.4 nm 以下の直径のオーダードメソポーラスシリ カでは等温吸着線にヒステリシスが見られないが, それ以上の大きさの細孔径をもつものではヒステ リシスが見られることが知られている[26]. 直径 が大きい方が明確なS字曲線になるという計算結 果は妥当な結果といえる. また微分吸着熱につい ては、2 つの細孔とも吸着量によらすほぼ一定に なるという傾向,その値は実験結果[27]をよく再 現している.

#### 4. おわりに

多孔体内部の吸着現象について,吸着モデルの 解説,および分子シミュレーションの最近の研究 を紹介した.ミクロ多孔体,マクロ多孔体のみな らず,メソ多孔体についても構造や組成と吸着特 性の関係が次第に明らかになりつつある.近い将 来,用途に応じた材料設計が自由できるようにな ることが期待される.

#### 参考文献

- Raman, N. K., Anderson, M. T. and Brinker, C. J., Chem. Mater., 8 (1996) 1682.
- [2] Davis, M. E., Nature, **417** (2002) 813.
- [3] Sing, K. S. W., Everett, D. H., Havic, R. A. W., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J. and Siemieniewska, T., Pure Appl. Chem., 57 (1985) 603.
- [4] Dąbrowski, A., Adv. Coll. Interface Sci., 93 (2001) 135.
- [5] Brunauer, S., Emmett, P. H. and Teller, E., J. Am.

Chem. Soc., 60 (1938) 309.

- [6] 高橋克明,塩川二朗編,現代の物理化学Ⅱ, 朝倉書店 (1987).
- [7] Zsigmondy, R., Z. Anorg. Chem., 71 (1911) 356.
- [8] Nicolis, G. and Prigogine, I., Self-Organization in Nonequilibrium System –From Dissipative Structure to Order through Fluctuations, John Wiley & Sons (1977).
- [9] 小野嘉夫,八島建明編,ゼオライトの化学と 工学,講談社サイエンティフィク (2000).
- [10] http://www.iza-structure.org/
- [11]近藤精一,石川達雄,安部郁夫編,吸着の科学(第2版),丸善(2001).
- [12] Chuikina, V. K., Kiselev, A. V., Mineyeva, L. V. and Muttik, G. G., J. Chem. Soc. Far. Trans. I, 72 (1976) 1345.
- [13] Dzhigit, O. M., Kieselev, A. V., Mikos, K. N., Muttik, G. G. and Rahmanova, T. A., Trans. Faraday Soc., 67 (1971) 458.
- [14] Moïse, J. C., Bellat, J. P. and Méthivier, A., Microporous and Mesoporous Mater., 43 (2001) 91.
- [15] Jackson, R. A. and Catlow, C. R. A., Mol. Simul., 1 (1988) 207.

- [16] Demontis, P., Sufftirri, G. B., Bordiga, S. and Buzzoni, R., J. Chem. Soc. Faraday. Trans., 91 (1995) 525.
- [17] Auerbach, S. M., Henson, N. J., Cheetham, A. K. and Metiu, H. I., J. Phys. Chem., 99 (1995) 10600.
- [18] Faux, D. A., J. Phys. Chem. B, 103 (1999) 7803.
- [19] Jaramillo, E. and Auerbach, S. M., J. Phys. Chem.B, **103** (1999) 9586.
- [20] Shirono, K., Endo, A. and Daiguji, H., J. Phys. Chem. B, 109 (2005) 3446.
- [21] Brendsen, H. J. C., Grigera, J. R. and Straatsma, T.
   P., J. Phys. Chem., 91 (1987) 6269.
- [22] Shirono, K. and Daiguji, H., Chem. Phys. Lett., 417 (2006) 251.
- [23] Rick, S. W., Stuart, S. J. and Berne, B. J., J. Chem. Phys., 101 (1994) 6141.
- [24] Endo, A., Miyata, T., Inagi, Y., Yamamoto, T., Ohmori, T., Akiya, T. and Nakaiwa, M., Proc. of 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, Poland (2003) 425.
- [25] Shirono, K. and Daiguji, H., Proc. of 2005 AIChE Annual Meeting (2005) 612f.
- [26] Inagaki, S. and Fukushima, Y., Microporous and Mesoporous Mater., 21 (1998) 667.
- [27] Matsumoto, A., Sasaki, T., Nishimiya, N. and Tsutsumi, K., Coll. Surf. A, 203 (2002) 185.

高密度化学蓄熱材の開発 Development of Materials for High Density Cchemical Heat Storage

劉 醇一(東京工業大学) Junichi RYU (Tokyo Institute of Technology) e-mail: cyliu@nr.titech.ac.jp

#### 1. はじめに

2005年2月に京都議定書が発効された.批准国 数の問題や数値目標の根拠はともかく,日本では 2012年までに二酸化炭素排出量を1990年比で6% の削減が求められている.しかしながら,二酸化 炭素排出量は増加する一方であり,数値目標の達 成は困難である.

この問題を解決するためには,現行の化石燃料 の燃焼(消費)によるエネルギー供給システムか ら,未利用エネルギーを有効利用するエネルギー 供給システムへの転換が不可欠である.未利用エ ネルギーを利用する方法の一つとして,産業排熱 等の蓄熱技術やケミカルヒートポンプ技術の開発 が重要であり,すでに多くの研究が進められてい る[1].また,ごく最近では首都圏における冷房用 の冷熱源として,北海道で冬場に製造した氷を用 いる「雪氷輸送物流システム」の実証試験も始め られている[2].

化学蓄熱,すなわち何らかの化学反応による熱 の出入りを用いて蓄熱をする場合,そこで用いる 反応には環境負荷が少なく安全な材料(物質)を 用いることが社会への普及において重要である.

ここでは,筆者らが行なっている金属塩系材料 開発の概要を紹介し,その特徴や問題点等につい て論じる.

#### 2. 固体と水蒸気との反応

化学蓄熱に用いる反応には多くの研究例がある. しかしながら,環境負荷や安全性等を考慮すると 反応媒体として水蒸気を用いるのが実用的であり, 固体材料(蓄熱材)との反応熱を用いて蓄熱する 方法が好ましい.

固体と水蒸気との反応様式は、大きく分けて3 つに分類される.1つ目はゼオライトやシリカゲ ル等の高表面積物質表面への吸着[3],2つ目は酸 化マグネシウム等の金属酸化物の水酸化物形成反 応[4,5], 3つ目は塩化カルシウム等の金属塩の水 和反応[6-9]であり,それぞれ以下のような反応式 で表される.

$Zeolite + nH_2O \rightarrow Zeolite \bullet nH_2O$	(1)	
$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$	(2)	
$CaCl_2 + nH_2O \rightarrow CaCl_2 \cdot nH_2O$	(3)	

ここでゼオライト表面への水蒸気吸着を便宜的 に反応式(1)で表している.これらの反応が正反応 (水和)側に進むか,逆反応(脱水)側に進むか は,反応温度と水蒸気圧に依存し,反応式(2)と(3) については熱力学的に計算することが可能である ことから,蓄熱操作を行なう熱源の温度によって 適宜材料を選択することが可能である.

いずれの反応においても, 蓄熱状態(脱水状態) にある材料と水蒸気とを接触させることによって 生ずる反応熱を取り出し(放熱操作), 使用後の材 料を加熱操作(蓄熱操作)によって再生し, 再度 水蒸気と反応させることによって熱を取り出すこ とができる.

図1に、平成12年の産業排熱温度分布[10]を示 す.円グラフの外側が全産業からの温度分布,内 側が清掃業からの温度分布を示す.産業排熱全体 では150℃以下の排熱が40%程度を占めるが,清 掃業に着目すれば比較的高温(200℃程度)の熱が 多く排出されていることがわかり,未利用エネル ギーを有効利用する上では注目すべきである.

筆者らは、この温度域で蓄熱操作が可能な蓄熱 材の開発[7-9]を進めている.ここで用いる蓄熱材 には、①より低い水蒸気圧において水蒸気との反 応量が多く、単位重量当たり(もしくは単位体積 あたり)発熱量、すなわち蓄熱密度が高いこと、 ②蓄熱を行なう温度域において、蓄熱材の脱水(蓄 熱)が可能であること、③反応速度や伝熱速度が 十分に速いこと、などが求められる.

熱力学計算の結果より,200℃程度の温度域で蓄 熱操作を行なう反応としては、先に研究例のある



図1 産業排熱の温度分布(平成 12 年)[10]

反応式(2)で表される金属酸化物の水酸化物形成 反応よりも、反応式(3)で表される金属塩の水和 (脱水)反応が適している.

#### 3. 金属塩の水和反応

#### 3.1 金属塩を用いる利点と欠点

金属塩の水和反応は身近で観察することができ る.典型的な例としては、塩化カルシウムの水和 反応を押入れの乾燥剤に利用する製品が市販され ている.また小学校の理科教育では、植物の葉か ら蒸散する水蒸気の検出法として塩化コバルト紙 の変色(塩化コバルトの水和反応によって、青か らピンクに変色)が用いられている.

ここで、蓄熱材として金属塩を用いる場合の利 点と欠点を整理する.1つ目利点のとして、物質 1モル当たりの水蒸気反応量が多いことが挙げら れる.塩化カルシウムを例に取ると、安定した水 和物として1水和物、2水和物、4水和物、6水 和物の存在が知られている.

$CaCl_2 + H_2O \rightarrow CaCl_2 \cdot H_2O$	(4a)
$CaCl_2 \bullet H_2O + H_2O \rightarrow CaCl_2 \bullet 2H_2O$	(4b)
$CaCl_2 \bullet 2H_2O + 2H_2O \rightarrow CaCl_2 \bullet 4H_2O$	(4c)
$CaCl_2 \bullet 4H_2O + 2H_2O \rightarrow CaCl_2 \bullet 6H_2O$	(4d)

さらに、一定の水蒸気圧以上になると潮解によってさらに多くの水蒸気と反応し、塩化カルシウム水溶液を生成することができる.

CaCl<sub>2</sub>•6H<sub>2</sub>O + nH<sub>2</sub>O → CaCl<sub>2</sub> aq (5)
 2つ目の利点として、2種類(もしくはそれ以
 上)の金属塩を複合することにより、金属塩と気
 体との反応性を制御できることが挙げられる.筆

者らは、塩化カルシウムの水和反応と類似の反応 であるアンモニア吸収反応(アンミン錯体形成反 応)において、臭化カルシウムを塩化カルシウム と複合することによってアンモニア吸収圧力が変 化することを見出している.この現象はカルシウ ムイオン近傍の陰イオンの種類と数によって、カ ルシウムイオンとアンモニアとの間の相互作用が 変化するためであると結論づけている[11,12].

その一方で、金属塩を用いる欠点も存在する. 1つ目は、先に挙げた潮解によって生成する金属 塩水溶液が、蓄熱を行なう反応器を腐食する可能 性が挙げられる.この問題を回避するためには、 耐腐食性材料製の反応器等が必要である.

2つ目として,金属塩の加熱による分解や昇華 が挙げられる.例えば金属硝酸塩は 300℃程度で 分解し窒素酸化物を放出し金属酸化物となる.ま た,遷移金属のハロゲン化物等は加熱によって昇 華するものがあり,蓄熱操作の条件によっては使 用することができない.

3つ目は水和反応の速度の問題である. ゼオラ イトやシリカゲルへの水蒸気吸着は固体表面のみ でおこるのに対し,金属塩の水和反応は結晶構造 の変化を伴いながら,金属塩粒子表面だけでなく 結晶内部まで反応が進行するため,反応が終了す るまでの時間が固体表面への吸着に比べて遅く, 短時間で転化率 100%を達成するのは容易ではな い.

#### 3.2反応に用いる金属塩の選択

先に述べたように金属塩を蓄熱材として使用す

(5)

る場合には、いくつかの欠点が存在する.特に、 加熱分解や昇華の可能性のある金属塩は使用でき ない.例えば 200℃程度で蓄熱操作を行なう場合 は、硝酸塩の使用は困難である.

蓄熱材として用いる適切な金属塩を選択するに は、2つの方法がある.1つ目は熱力学計算、2 つ目は熱天秤によるスクリーニングである.

金属塩の水和反応は、以下の式で表される.

salt•mH<sub>2</sub>O + (n-m)H<sub>2</sub>O  $\rightarrow$  salt•nH<sub>2</sub>O (4)

この反応の平衡条件は,温度の逆数(1/T)と圧 力の対数(lnP)とが直線関係にあり,以下に示す 式で表される.

 $\ln P = -\Delta H / RT + \Delta S / R$ 

ここで、ΔH とΔS はそれぞれ、反応におけるエ ンタルピーとエントロピーの変化であり、いくつ かの反応については値が求められていることから、 目的の温度と水蒸気圧に合わせた金属塩の選択が 可能である[13].

これらの値が得られない場合は、金属塩水和物 の脱水挙動を、熱天秤を用いて測定することによ って、脱水反応の挙動を容易に知ることができる. また、熱天秤を用いることによって、分解温度や 昇華温度を知ることもできる.

#### 4. 新規蓄熱材の開発

#### 4.1 金属塩添加多孔体の調製

現在筆者らは,200℃程度で蓄熱可能な新規蓄熱 材の開発[7-9]を進めている.

まず初めに,数種類の金属ハロゲン化物の水和 物と金属水酸化物の脱水挙動を,熱天秤を用いて 測定した結果を図2に示す.

図2の縦軸は温度,横軸は加熱による重量減少 速度を表す.図2より,塩化リチウム,塩化カル シウム,塩化ストロンチウムが200℃程度で脱水 可能であることがわかる.

ここでは容易に入手可能な塩化カルシウムを金 属塩として用いる.しかしながら,塩化カルシウ ムは 25℃において水蒸気圧 6.6 Torr(相対湿度 28%)以上で潮解するため,そのまま用いること はできない.筆者らは潮解による反応器の腐食を 防ぐべく,活性炭やメソポーラスシリカ等を,塩 化カルシウムを固定化する担体として用いた材料 を,新たな蓄熱材として用いた.これらの担体は 高表面積(1000m<sup>2</sup>/g 以上)を持つ多孔体であり,



図2 熱天秤による脱水測定結果



図3 金属塩添加多孔体モデル図 [7]

その細孔内や結晶粒子間に塩化カルシウムを固定 化することにより,通常の固体材料と同様に扱う ことが可能となる(図3).

金属塩と多孔体との複合材料は、含浸法によっ て容易に調製できる.所定濃度の金属塩溶液中に 多孔体の粉末(もしくはペレット)を加え、蒸発 乾固して得られるスラリーを、乾燥、焼成するこ とによって試料が得られる.

#### 4.2 物性評価

このようにして得られた試料の物性評価は,反 応熱測定,水蒸気昇温脱離測定,水蒸気収着等温 線によって行なっている. 表1に,所定温度で脱水(蓄熱)した材料に対して,25℃で水蒸気と反応させた場合の発熱量をまとめた.

試料	蓄熱温度	湿度	発熱量
ガナラノレ	450 °C	78 %	1.08 kJ/g
2374 1		430 C 11	11 %
メソポーラス	450 °C	78 %	2.10 kJ/g
シリカ		11 %	0.56 kJ/g
	450 °C	78 %	2.03 kJ/g
メソポーラス		11 %	1.26 kJ/g
アルミナ	200 °C	78 %	1.18 kJ/g
200 C	200 C	11 %	0.90 kJ/g

表1 25℃における発熱量

表中の試料について、「ゼオライト」は市販のY 型ゼオライト、メソポーラスシリカとメソポーラ スアルミナは、それぞれ33重量%の塩化カルシウ ムを添加した多孔体である.いずれの塩化カルシ ウム添加多孔体もゼオライト表面への水蒸気吸着 よりも高い発熱量を示すことがわかる.塩化カル シウム添加メソポーラスアルミナの蓄熱温度を 200℃に下げた場合でも、ゼオライトの値よりも高 い発熱量を示すことがわかる.

図4に,それぞれの試料の水蒸気昇温脱離測定 の結果を示す.昇温脱離測定は固体を一定の昇温 速度加熱することによって脱離する気体成分を質 量分析計やガスクロマトグラフを用いて分析し, 固体と気体成分の相互作用の強さを評価する手法 である.熱天秤を用いた評価法は加熱処理による 重量変化しか検出できないが,この方法では複数 の気体成分が脱離する場合も評価可能である.

これらの材料に対し,湿度20%で反応させた後 に測定を行った結果,水蒸気以外の気体は検出さ れなかった.いずれの試料も 200℃までの加熱処 理によって 75%以上の水蒸気が脱離したことか ら,200℃での蓄熱操作が可能であることがわかる.

#### 4.3 金属塩添加多孔体の問題点

ここまでに述べたように、金属塩添加多孔体は ゼオライトよりも温和な蓄熱条件で高い発熱量を 示すことがわかった.しかしながら、高水蒸気圧 条件においては、使用後の試料の表面に塩化カル シウム水溶液による「濡れ」が観察された.これ



図4 昇温脱離測定結果.(a)ゼオライト, (b)10重量%塩化カルシウム添加メソポーラ スアルミナ,(c)33重量%塩化カルシウム添 加メソポーラスアルミナ,(d)33重量%塩化 カルシウム添加メソポーラスシリカ



図5 25℃における水蒸気収着等温線.(●) ゼオライト,(○)33 重量%塩化カルシウム添 加メソポーラスアルミナ,点線はメソポーラ スアルミナの細孔容積を表す

は、潮解によって生じた塩化カルシウム水溶液が 多孔体の細孔もしくは粒子間の空隙からあふれ出 たものである.

図5に、塩化カルシウム添加メソポーラスアル ミナとゼオライトの水蒸気収着等温線を示す.こ こで「収着」(sorption)は、「吸収」(absorption) と「吸着」(adsorption)の両方の意味を含み,金 属塩の水和は「吸収」に分類される.いずれの試 料も湿度 20%以下の低湿度条件においても水蒸 気を収着するが,ゼオライトの水蒸気収着量は湿 度 20%程度で飽和する一方で,塩化カルシウム添 加メソポーラスアルミナの水蒸気収着量は湿度 20%以上においても増大する.これは塩化カルシ ウム水和物の生成,潮解による塩化カルシウム水 溶液の生成によるものである.

ここで、塩化カルシウム添加メソポーラスアル ミナの細孔容積と水蒸気収着量とを比較すると、 湿度 40%以下において試料の細孔容積が水蒸気 収着量を上回ることがわかる.すなわち、水蒸気 収着量が細孔容積を上回る場合は生成する塩化カ ルシウム水溶液が細孔内からあふれ出して試料表 面に析出し、「濡れ」として観察される.よって、 水蒸気収着量が細孔容積を上回らない条件におい て、この材料を蓄熱材として使用することが可能 である.

#### 5. 今後の研究開発課題

#### 5.1 新規多孔体の合成

現在までに検討を行った多孔体(メソポーラス シリカ、メソポーラスアルミナ)は細孔容積が十 分に大きくないため、塩化カルシウム水溶液が試 料表面にあふれ出すという問題がある.この問題 を解決するためには、さらに細孔容積の大きな多 孔体を使用する必要がある.また、多孔体への水 蒸気吸着挙動は細孔径に依存することから、多孔 体の細孔径の最適化をする必要もある.

多孔体の表面(結晶外表面,細孔内表面)の金 属塩分散を向上し,金属塩を微結晶として表面上 に固定化するには,表面が親水性を持ち金属塩と 相互作用する必要がある.

蓄熱システムの性能を向上する上で,十分な伝 熱を行なうための装置設計は必要不可欠であるが, 実際に用いる蓄熱材そのものの伝熱性能を高める ことも必要であり,このような観点からの材料設 計,例えば炭素系材料の使用も重要であると考え られる.

#### 5.2 使用条件に合わせた材料設計

先に述べたように,金属塩を2種類以上複合す ることによって,金属塩と気体との反応性を制御 することができる.従って,蓄熱温度条件に合わ せた複合金属塩の合成や,多孔体内に固定化によ って,新たな蓄熱材を得られると考えられる.

多孔体内における金属塩の水和反応は,通常の 水和反応と挙動が異なり,未解明な部分が多い. 赤外分光法や電顕観察等によるキャラクタリゼー ションによって新たな知見を得ることができる.

#### 5.3 スケールアップによる実証

本研究は主に物理化学的な手法を用いて数十ミ リグラムスケールの実験によって蓄熱材の性能評 価を進めてきた.材料の実用化にあたっては数百 グラム~数キログラムスケールの充填層反応器等 を用いた実証試験が必要である.充填層反応器内 における水和反応や脱水反応の挙動を解析するこ とによって反応速度や伝熱速度が得られる.ここ で発生する問題点を材料開発にフィードバックす ることにより,高性能蓄熱材の実用化を目指したい.

#### 謝辞

本研究は、加藤之貴東京工業大学助教授、秋鹿 研一東京工業大学名誉教授をはじめ、多くの大学 院生と共同で進めているものである.ここに謝意 を表する.

#### 参考文献

- [1] 架谷昌信,神沢淳, 蓄熱技術-理論とその応用, 信山社サイテック (2001).
- [2] 北海道開発局ホームページ, http:// www.hkd.mlit.go.jp/kanribu/chosei/yusou.html
- [3] 溝田忠人, ゼオライト-水系ヒートポンプの 開発と課題, 伝熱, **40** (2001) 18.
- [4] Y. Kato et al., Kinetic study of the hydration of magnesium oxide for a chemical heat pump, Appl. Therm. Eng., 16 (1996) 853.
- [5] Y. Kato et al., Magnesium oxide/water chemical heat pump to enhance energy utilization of a cogeneration system, Energy, **30** (2005) 2144.
- [6] Y. Hirata et al., Preparation of fine particles of calcium chloride with expanded graphite for enhancement of the driving reaction for chemical heat pumps, J. Chem. Eng. Jpn., 36 (2003) 827.
- [7] C. Y. Liu et al., Water sorption of CaCl<sub>2</sub>

containing materials as heat storage media, Chem. Lett., **33** (2004) 292.

- [8] 劉醇一 他,金属塩添加多孔体による水収着 型蓄熱に関する研究,触媒,46 (2004) 480.
- [9] C. Y. Liu et al, Water sorption into metal salt added porous materials as heat storage media., Pacifichem 2005, #1396, Honolulu (2005).
- [10]財団法人省エネルギーセンターホームページ, http://www.eccj.or.jp/wasteheat/index.html
- [11] C. Y. Liu et al., Effect of the Cl/Br molar ratio of a CaCl<sub>2</sub>-CaBr<sub>2</sub> mixture used as an ammonia storage material, Ind. Eng. Chem. Res., 43 (2004) 6994.
- [12] C. Y. Liu et al., Ammonia absorption into alkaline earth metal halide mixtures as an ammonia storage material, Ind. Eng. Chem. Res., 43 (2004) 7484.
- [13] International Critical Tables of Numerical data, Physics, Chemistry and Technology, McGraw-Hill, New York, 7 (1929) 224.

吸着ヒートポンプの吸着器内熱·物質移動現象 Heat and Mass Transfer Phenomena in Adsorber for Adsorption Heat Pump

> 渡辺 藤雄, 窪田 光宏(名古屋大学) Fujio WATANABE, Mitsuhiro KUBOTA (Nagoya University) e-mail: watanabf@nuce.nagoya-u.ac.jp

#### 1. はじめに

吸・脱着現象を利用した熱利用技術として「吸 着ヒートポンプシステム」(Adsorption Heat Pump:以下 AHP),「デシカント空調システム」 が知られている.これらはいずれもシリカゲル, 活性炭,ゼオライトなどの吸着材による吸着質(主 として水,他にアルコールなど)の吸・脱着に伴 い発生・吸収される吸着熱・脱着熱を用いて冷房・ 暖房用熱の生成あるいは温湿度コントロールを行 うシステムである. 特長として 1) 環境温度以上 100 ℃以下の低温熱源のみで駆動可能,2) 熱源温 度の低下による出力性能の低下が小さい、3)吸・ 脱着の可逆性に優れ、副反応も生じない、4) 吸着 材・吸着質が無毒・非腐食性、などがあげられる ことから環境共生型熱エネルギーシステムとして 注目されている. このような観点から, 我々の研 究室では吸着ヒートポンプの開発を継続的に実施 してきた.これまでの研究成果については、伝熱 研究第36巻140号(1997年)において「吸着ヒ ートポンプの吸着剤充填吸着器内熱・物質移動」と 題して,AHPの作動原理,充填層内の熱・物質移 動促進を目的としたモジュール化手法について一 部を寄稿させていただいている[1]. しかし, 前回 の寄稿からすでに 10 年近くが経過していること から、前稿と重複する部分もあるが、本稿では改 めて AHP 技術について概説をした後,平成 13~ 15 年度に NEDO からの助成を受けて実施した高 性能 AHP 開発の研究成果の一部を熱・物質移動の 観点から紹介したい[2].

#### 2. 吸着ヒートポンプの作動原理

吸着ヒートポンプでは放熱過程で温熱または冷 熱を生成し,蓄熱過程で吸着材の再生を行う.通 常,AHPは吸着器2器と蒸発器,凝縮器各1器か ら構築され,各々の吸着器で放熱・蓄熱を交互に 切り替えながら連続的に出力を得る.ここでは, 空調用への適用が見込まれる冷熱生成について解 説する[3].図1は、ある平衡吸着量*q*になる平衡 温度と蒸気圧力の関係を示した吸着等量線図であ る.AHPでは吸着系と対になる反応系として吸着 質の蒸発/凝縮現象を利用するため、図1には吸 着質の飽和蒸気圧曲線も示されている.



蓄熱過程では、平衡状態にある③(温度: $T_M$ , 圧力: $P_3$ )において、吸着器、凝縮器それぞれに 温度 $T_H$ (吸着材再生熱源温度:工場排熱など)お よび $T_M$ (環境熱源温度:大気温度)の熱を加え、 吸着器を④( $T_H$ ,  $P_4$ )に、凝縮器を( $T_M$ ,  $P_1$ )と する.ここで吸着器と凝縮器を連結すると、両容 器間の圧力差( $P_4$ - $P_1$ )により吸着器から吸着質が 脱着、凝縮器へ移動して蓄熱状態になる(①).

放熱過程ではバルブを閉じた状態で,吸着器, 蒸発器に  $T_{\rm M}$  および  $T_{\rm L}$  (発生冷熱温度:冷房への 供給温度)の熱源を供給することにより,吸着器 を② ( $T_{\rm M}$ ,  $P_2$ )に,蒸発器を( $T_{\rm L}$ ,  $P_3$ )とする. ここでバルブを開くと,吸着質が蒸発器から吸着 器へ移動し,吸着材に吸着されて蒸気圧  $P_3$ に対す る平衡吸着量  $q_2$ になる(③).この間の蒸発に伴 う蒸発潜熱 $\Delta H_{\rm eva}$ により蒸発器で冷熱が生成する. 吸着ヒートポンプの出力として,以下の2つの 評価指標がある.

- 吸着材と吸着質の吸着平衡関係ならびに吸着 質の物性値により決定される平衡論的出力
- 2) 吸・脱着速度ならびに発・吸熱速度により決定 される速度論的出力

1)の平衡論的出力は,いわば AHP の理想的な 出力である.これに対して,2)の速度論的出力は AHP を実際に駆動させた場合の実出力である.こ れは吸着器内における熱と物質の移動速度が相互 に影響しあった総括速度として決定される.AHP の実用化に向けては2)の速度論的出力の向上が 不可欠であることから,本稿では2)を支配する 吸着器内での熱・物質移動現象に着目し,次節から 解説を行う.

#### 3.吸着器内の熱・物質移動

吸着ヒートポンプの吸着器は基本的に吸着材粒 子充填層となる.この粒子充填層内を吸着質蒸気 が移動しながら吸・脱着が進行していくが,吸着 (脱着)現象では吸着材が吸着質蒸気を吸着(脱 着)する際に発熱(吸熱)が生じる.従来吸着が 応用されてきた吸着分離・精製プロセスなどでは, 吸着質のバルク濃度が低く発熱量が小さいため, 等温吸着系としての取り扱いができる.これに対 して,単成分系の吸着ヒートポンプでは吸着熱の 発生を無視できなくなり,非等温吸着系として取 り扱う必要がある.このような吸着材粒子充填層 内における熱・物質移動をモデル的に図2に示す.



図2 吸着材充填層内の熱・物質移動(吸着時)

物質移動について,通常の物理吸着では M-2 の 吸着(脱着)は迅速に進行するため,細孔表面の 各点において局所的な吸着平衡が成立すると考え られる.よって,総括の物質移動速度は充填層内 の蒸気圧差を推進力とする吸着質の充填層内移動 であるM-1および粒子内の吸着量差を推進力とす る吸着質の粒子内移動であるM-3により支配され る.なお,M-1とM-3の各物質移動速度は粒子径 の影響を強く受け,粒子径が小さくなるほど粒子 内物質移動(M-3)が迅速になる一方,充填層内 物質移動(M-1)速度は小さくなる.この相反関 係のために,物質移動の観点からは最適な粒子径 が存在する.シリカゲル充填層における実験と数 値解析の結果より,粒子径 500 µm 以上では層内 物質移動抵抗は緩和されるものの粒子内物質移動 速度が低下することが示されており[4],AHP では 粒子径 100~500 µm の吸着材が用いられている.

熱移動に関して, M-2の吸着に伴い発生した吸 着熱は粒子内を伝熱していくが (H-1),上述した ように AHP では粒子径 100~500 μm の小粒径の 吸着材を使用することが多いため,粒子内温度を 均一とする lumped heat capacity model が成立する 場合が多い.これに対して,充填層内伝熱である H-2 は,粒子充填層の有効熱伝導度が小さいため (シリカゲル系:約0.15 W/m K),熱移動の律速 段階となる.



図3 充填層型吸着器の温度・吸着量の経時変化

図3は外部熱交換式の充填層型吸着器(直径: 54 mm,層高:208 mm)の層内温度・吸着量の経 時変化を示しているが,実験開始直後から吸着に 伴う発熱により層内温度が30~70 Kも上昇し,層 内有効熱伝導度が低いために初期温度への回復ま でに10時間以上を要している.これに伴い吸着の 進行も大きく妨げられていることが分かる[5].

本図のように,吸着現象は温度に対する依存性 が強く,粒子充填層の除熱(吸着時)・給熱(脱着 時)能力の不足は物質移動速度にも大きな影響を 与えることから,吸着器の性能は充填層内熱移動 速度により支配されるといっても過言ではない.

この充填層内の低伝熱性と言った問題点を踏ま え,我々は充填層における除熱・給熱速度の向上 を目的として,バインダーを用いて吸着材を直接 伝熱管に塗布する直接熱交換型モジュール(DS モジュール)[6]や吸着材を伝熱管と一体にした伝 熱管一体構造型熱交換吸着材モジュール(ST モジ ュール)を開発してきた[7].ST モジュールにつ いては前稿で紹介を行った.本稿ではST モジュ ールの発展形として,さらなる伝熱促進を目的と して伝熱管にフィンを設置したフィン付ST モジ ュール(FST)モジュールについて概要を述べる.

#### 4. FST モジュールの開発

#### 4.1 FST モジュールの概要

図4に、FST モジュールの写真および概略図を 示す.FST モジュールはフィン付き銅製伝熱管, シリカゲル,ステンレス網から構成される.シリ カゲルはフィンとフィンに挟まれた隙間部分に充 填されており,その周りをステンレス網で包むこ とにより,シリカゲルをフィン間に保持しつつ蒸 気透過性を維持している.フィン付き伝熱管は銅 管からフィンが転造加工されており銅管-フィン 部の接触熱抵抗が極めて小さく優れた伝熱性能を 有している.



図4 FSTモジュール

#### 4.2 FST モジュールの熱・物質移動挙動

FST モジュールを用いて吸着実験を行った際の モジュール内温度および吸着量の実測値を図5に 示す.本図には4.3以降で紹介する数値解析によ る解析結果も併示してある.

本図より,モジュール内温度は吸着開始直後に 吸着の進行に伴う発熱により最大の温度上昇を経 た後,初期温度に回復している.なお,本図には 示されていないが,この最大温度上昇幅を前稿で 紹介した ST モジュールと比較すると, FST モジ ュールの方が吸着材充填量が3倍も大きくなって いるにも関わらず,温度上昇幅が小さく (FST モ ジュール:8.0 K, ST モジュール:9.4~13.5 K), フィン付き伝熱管の伝熱促進効果が確認できる. また,FST モジュールの外周部と中心部の温度差 も1K程度と小さくなっていることから,半径方 向でほぼ一様に吸着が進行している様子が見てと れる.吸着量については,実験開始10分で平衡吸 着容量の60%にまで達しており,吸着が迅速に進 んでいることが分かる.以上より,FST モジュー ルは AHP の吸着器用モジュールとして優れた性 能を有することが明らかとなった[8].



図5 FST モジュールの吸着量・温度変化

#### 4.3 最適 FST モジュール構造の決定

前節で FST モジュールの有効性が示されたが, FST モジュールの場合, 伝熱管のみでなくフィン による除熱・給熱効果も加えていることから, フ ィンピッチ(充填層厚み)が層内伝熱速度に影響 を与える.また, フィン長さ(充填層高さ)およ び粒子径は吸着質である水蒸気の層内物質移動に 影響を与える.つまり, フィンピッチ, フィン長 さ, 粒子径をパラメーターとすることによりモジ ュール構造の最適化が図れ, さらなる吸着器性能 の向上が見込める.

このために行った理論的検討について紹介する [9]. 上述したように FST モジュールはフィン間に 粒子充填層が形成されることから,基本的には 3 で説明した熱・物質移動モデルが適用される. FST モジュールの解析モデルを図6に示す.本解析で はフィンとフィンに挟まれて形成される1フィン ピッチ間の粒子充填層についての解析を実施した.



図6 FST モジュール数値解析モデル

ここで、以下の仮定をおくと吸着器の熱・物質 移動方程式は式(1)~(6)で表される.

- 1. 吸着材粒子内物質移動は表面拡散支配である
- 2. ステンレス網での蒸気移動抵抗は無視できる
- 3. モジュール外表面からの熱損失は無視できる
- 4. ステンレス網の熱容量は無視できる
- 5. 熱交換媒体は非圧縮性で栓流流れである
- 吸着材粒子充填層の物質収支式

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_{v}}{\partial \theta} = \frac{D_{b}}{\mu \rho_{0}} \left[ \rho_{v} \left( \frac{\partial^{2} \rho_{v}}{\partial R^{2}} + \frac{1}{R} \frac{\partial \rho_{v}}{\partial R} + \frac{\partial^{2} \rho_{v}}{\partial Z^{2}} \right) + \left( \frac{\partial \rho_{v}}{\partial R} \right)^{2} + \left( \frac{\partial \rho_{v}}{\partial Z} \right)^{2} \right] - (1 - \varepsilon) \rho_{A} \frac{\partial \overline{q}}{\partial \theta} \qquad (1)$$

○吸着材粒子内の物質収支式

$$\frac{\partial q}{\partial \theta} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_S r^2 \frac{\partial q}{\partial r} \right)$$
(2)

$$\overline{q} = \frac{3}{r_0^3} \int_0^0 r^2 q dr \tag{3}$$

○吸着材粒子充填層の熱収支式

$$\rho_B C_{p,B} \frac{\partial T_B}{\partial \theta} = \lambda_B \left[ \left( \frac{\partial^2 T_B}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_B}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 T_B}{\partial Z^2} \right] + \rho_B \Delta H \frac{\partial \overline{q}}{\partial \theta}$$
(4)

○伝熱管の熱収支式

$$\rho_C C_{p,C} \frac{\partial T_C}{\partial \theta} = \lambda_C \left[ \left( \frac{\partial^2 T_C}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T_C}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 T_C}{\partial Z^2} \right]$$
(5)

○熱交換媒体の熱収支式

$$\rho_W C_{p,W} \left( \frac{\partial T_W}{\partial \theta} + u_W \frac{\partial T_W}{\partial Z} \right) = \frac{4h}{D} \left[ T_{W,R=R_i} - T_W \right] + \lambda_W \frac{\partial^2 T_W}{\partial Z^2} \tag{6}$$

表1 解析に用いた主な物性値

$D_{\rm s}(200 \ \mu {\rm m})$	$D_{ m b}$	$\Delta H$	$\lambda_{ m B}$
$[m^2/s]$	$[m^2]$	[kJ/kg]	[W/(m K)]
$2.3 \times 10^{-13}$	$1.32 \times 10^{-11}$	2,500	0.14

計算に使用した代表的な物性値を表1に示す. シリカゲル充填層の熱伝導度は実測値を使用した. 吸着熱ΔH は水の蒸発潜熱と等しいものと仮定し た. 粒子内拡散係数 D。は既報の手法により実測値 から算出した。また、モジュール内のシリカゲル-伝熱管・フィン外壁には接触熱抵抗が存在すると し、h<sub>c</sub>=20 W/(m<sup>2</sup> K)とした.計算は、式(1)~(6)を 前進差分法により解いた.本解析の詳細について は、参考文献[8]を参照していただきたい.

先述した図5に本解析による計算結果を実測値 と共に示しているが,実験結果と計算結果は良好 に一致しており、本解析の妥当性が示された.

そこで、本解析を用いて FST モジュールの最適 構造の決定を行った.この際, AHPの稼動条件と して T<sub>L</sub>/T<sub>M</sub>/T<sub>H</sub>=15/30/80 ℃,吸・脱着時間 600 s と した. 最適化の指標としては、モジュール1フィ ンピッチ間の水蒸気吸着容量を用い、基本的には これが大きいほど優れた性能を有すると判断した. 4.3.1 最適フィンピッチ

図7に,吸着過程600s間におけるシリカゲル1 kg あたりの水蒸気吸着量∆g [kg/kg]とモジュール 一本あたりに充填可能なシリカゲルの重量 W。 [kg/module]の積, すなわちモジュール一本あたり の水蒸気吸着量  $q_w = \Delta q \times W_s$  [kg/module]を示す.



図7 最適フィンピッチの決定 (d<sub>p</sub>=200 µm)

伝熱 2006年1月
本図より,各々のフィン長さにおいて qw [kg/module]が最大値を示すフィンピッチが存在す ることが分かる.これは,フィンピッチの増大に 伴いΔq [kg/kg]は減少し,W<sub>s</sub> [kg/module]は増大する という相反関係による.前者の理由は,フィンピ ッチの増大に伴いフィンによる伝熱促進の寄与が 小さくなるためであり,後者の理由は単一モジュ ールあたりの挿入フィン数の減少による.本図よ り,フィン長さによらず最適フィンピッチは 1.0 ~2.0 mm であることが明らかとなった.

#### 4.3.2 最適フィン長さ

図 8 に、単一モジュールあたりの水蒸気吸着量  $q_w$  [kg/module]と単一モジュールあたりの必要装 置面積 S [m<sup>2</sup>] (図 9 参照)の逆数 1/S [1/m<sup>2</sup>]の積  $q_w/S$  [kg/(m<sup>2</sup> module)]を示す.本図より、フィンピ ッチの場合と同様に、それぞれのフィンピッチに 対して最適なフィン長さが存在することが分かる. これはフィン長さの増大に伴い $q_w$  [kg/module]が 増大する一方、1/S [m<sup>-2</sup>]が減少するという相反関 係による.なお、 $q_w$ はフィン長さの増大に伴って 蒸気透過性が低下するため吸着材の利用率は低下 するが、一方で吸着材の充填量が増加するため、 結果的に吸着量は単調増加することとなる.本図 より、最適フィン長さは 11~14 mm と決定された.



図8 必要装置面積 S の定義

#### 4.3.3 最適 FST モジュールの性能評価

4.3.1, 4.3.2 により決定された FST モジュール構造の最適化の効果について評価を行う.本検討を行うにあたり、前節での吸着器単位面積あたりの水蒸気吸着量差  $q_w/S$  [kg/(m<sup>2</sup> module)]を用いて、次式により吸着器単位容積あたりの冷熱出力  $Q_{\text{output}}$  [kW/m<sup>3</sup>]を算出した.

$$Q_{output,1} = (q_w/S) \cdot H_0^{-1} \cdot \Delta H_{eva} \cdot \tau_{cycle}^{-1}$$
(7)

式(7)において、 $H_o$ は FST モジュールの全長 (= 0.5 m)、  $\Delta H$  は水の蒸発潜熱 (= 2,500 kJ/kg)、 $\tau_{cycle}$ は サイクル時間 (= 600 s) である.

私2 取過化によるF3F モンエ ルの田乃向工										
	$q_{ m w}/{ m S}$	$Q_{\text{output},1}$	$V \times 10^2$							
	$[kg/m^2]$	$[kW/m^3]$	$[m^3/kW]$							
最適化前	3.01	25.1	3.98							
最適化後	6.44	53.7	1.86							

表 2 最適化による FST モジュールの出力向上

表2より,FST モジュール構造の最適化により, 最適化前の既存FST モジュールに比べて吸着器容 積を約1/2にコンパクト化することが可能である ことが明らかとなった.

#### 5. 最適 FST モジュールを用いた AHP の連続運転

4節で最適なFST モジュールの構造が決定され たことから,実際に最適FST モジュールを用いた AHPを試作し,連続運転試験を実施した.

### 5.1 連続運転試験装置

AHPの連続運転試験では、市販伝熱管の中から 最適FSTモジュール構造に最も近いフィンピッチ =2.3 mm、フィン長さ=11 mmのフィン付伝熱管を 選定し、図9に示す吸着器を試作した.吸着器は 2器の吸着器から構成されており、各器に最適FST モジュールを3並列12直列で36本ずつ組み込ん だ.シリカゲル重量は5.8 kg-dry basis であった.



図9 最適 FST モジュール組み込み吸着器

各吸着器は吸着・脱着過程において蒸発器・凝 縮器に連結され, FST モジュールに充填されたシ リカゲルが水蒸気の吸・脱着を交互に行うことに より, 蒸発器から連続的に冷房用の冷熱を取り出 すことが可能となっている.実験は種々の運転条 件で行ったが、一例として  $T_{\rm I}/T_{\rm M}/T_{\rm H}=14/30/75$  °C, 吸・脱着時間 300 s, サイクル準備時間 30 s での 定常サイクル運転時における吸着器 1,凝縮器, 蒸発器の熱交換流体入口・出口温度を図 10 に示す. 本図より, 凝縮器, 蒸発器にはそれぞれ所定温度 の冷却水  $(T_{\rm M})$  および冷水  $(T_{\rm L})$  が供給されてい る.一方,吸着器には吸・脱着過程で冷却水およ び高温水(T<sub>H</sub>)が交互に流通している.凝縮器で は、吸着材から脱着した水蒸気の凝縮に伴う発熱 により出口温度が上昇している. 吸着器では吸着 過程では吸着熱の除熱、脱着過程では脱着熱の給 熱により出口温度が上昇・下降している.一方, 蒸発器では水の蒸発に伴う吸熱が生じ、わずかな 変動は見られるものの,10 ℃前後の冷熱が安定に 得られている. AHP では、この冷熱を冷房空調用 として利用することから、本試験装置により AHP の連続的な冷熱生成が実証された.



図 10 AHP による連続冷熱生成の実証

ここで,得られた冷熱出力を次式により算出する.

$$Q_{output,2} = \rho_W \cdot C_{p,W} \cdot F_{eva} \cdot \Delta T_{eva,ave}$$
(8)

式(8)において、 $F_{eva}$ は蒸発器の熱交換媒体流量、  $\Delta T_{eva,ave}$ は吸着期間における熱交換媒体の入口・出 口温度差の平均値として定義される.上記運転条 件での冷熱出力を算出すると、 $Q_{output,2}=2.76$  kW と なり、この冷熱出力と吸着器容積から本 AHP につ いて吸着器基準の比出力を算出すると、107 kW/m<sup>3</sup>-adsorber となる. 一方, 市販されている AHP の比出力は 48 kW/m<sup>3</sup>-adsorber 程度と推測される. 以上より, 最適化された FST モジュールを組み込 んだ吸着ヒートポンプの吸着器は, 市販 AHP の吸 着器の約 2 倍の比出力を有することが実証され, 本 FST モジュールが AHP のコンパクト化に対し て, きわめて寄与が大きいことが明らかとなった.

#### 6. おわりに

本稿では、吸・脱着を利用した熱利用技術の一 つである吸着ヒートポンプについて、吸着器内の 熱・物質移動現象の理解とその促進と言う着眼点 に立ち、我々がこれまで実施してきた研究結果を 中心に概説してきた.吸着ヒートポンプは環境温 度に近い低温排熱の有効利用が可能という点で、 環境共生型熱エネルギーシステムとして大きな可 能性を秘めていると確信している.京都議定書の 発効により二酸化炭素排出量の削減、つまりはエ ネルギー消費量の削減が求められている昨今、幅 広い分野の研究者らの協力による横断的な研究推 進により、吸着ヒートポンプの実用的な開発が一 層進展することを切望し、結びとする.

#### 参考文献

- [1] 渡辺藤雄, 架谷昌信, 伝熱研究, **36-140** (1997) 12-17.
- [2] NEDO, エネルギー使用合理化技術戦略的開発発 平成15年度報告書(100003368) (2004).
- [3] 化学工学会蓄熱・増熱・熱輸送技術特別研究 会編, 蓄熱技術 – 理論とその応用 第 II 編 「潜 熱蓄熱、化学蓄熱」, 信山社サイテック (2001).
- [4] Yamamoto, E., et al., J. Chem. Eng. Japan, 33-1 (2000) 12-18.
- [5] 渡辺藤雄ら, 化学工学論文集, **19-1** (1993) 83-90.
- [6] 伊藤睦弘ら, 化学工学論文集, 22-1 (1996) 163-170
- [7] 渡辺藤雄ら,化学工学論文集,20-3 (1994) 339-345.
- [8] 藤沢亮ら, 化学工学論文集, 28-3 (2002) 247-254.
- [9] Li, J., et al., J. Chem. Eng. Japan, 37-4 (2004) 551-557.

蒸気吸着現象を用いた潜熱・顕熱の独立制御 The Application of Water Vapor Adsorption Phenomena to the Independent Control of Latent and Sensible Heat

> 濱本 芳徳, 森 英夫(九州大学) Yoshinori HAMAMOTO, Hideo MORI (Kyushu University) e-mail: y-hama@mech.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

最近は、住環境の快適性、食品の加工・管理に おける安全性および産業機器の生産性向上に関す る需要が増加しており、高性能・高効率でありな がら同時に排熱などを活用した省エネルギー型の 潜熱・顕熱の制御技術の開発が急務となっている.

蒸気吸着現象を応用した潜熱・顕熱の独立制御 技術として吸着除加湿機と吸着冷凍・ヒートポン プ[1-3]がある.一般に前者はオープンサイクルと 呼ばれ,空気中の湿分が吸着材と吸脱着する.後 者はクローズドサイクルと呼ばれ,外気と密閉さ れた容器内で,伝熱面上に充てんされた吸着材に 蒸気が吸脱着する.両者の吸脱着現象は基本的に 同じである.また,これらはコージェネレーショ ンシステムや燃料電池との複合化によって熱エネ ルギーのカスケード的利用を促進する技術として 位置づけられ,要素機器内の伝熱(熱と物質移動) 特性が性能に大きく関与する.

本稿では,主にオープンサイクルに注目して, 蒸気の吸脱着と潜熱・顕熱の独立制御,蒸気の移 動原理と吸着材について,さらに吸着を応用した 除加湿機器の要素とシステムに関する研究を紹介 する.なお,潜熱・顕熱の独立制御とは,空気を 除加湿する潜熱処理操作と,空気の温度を上げ下 げする顕熱処理操作を,それぞれ適した方法によ って個別に行うことである.

# 2. 潜熱・顕熱の独立制御と蒸気の吸脱着 2.1 独立制御と省エネルギー性

図1には吸着式(デシカント)と蒸気圧縮式(冷 却式)のそれぞれによって制御される空気の温湿 度状態を空気線図上に示した.吸着式において処 理空気は吸着材で除湿され,発生する反応熱は顕 熱交換器で熱回収され,さらに冷却器で供給温度 に制御される.また,再生空気は顕熱交換器にて 熱回収し,加熱昇温され,吸着ロータあるいは吸 着材充てん層を通過する.そのとき吸着材は加熱 され,湿分が脱着して再生される.一方,蒸気圧 縮における供給空気は,まず露点温度以下の伝熱 面に接触して過冷却され,湿分が結露して取り除 かれる.その後,供給空気温度まで再熱される.

エネルギー消費の視点から図2に示すように, デシカントにおける脱着再生過程と供給空気の冷 却過程に要するエネルギーが,蒸気圧縮における 過冷却と再熱操作に要するエネルギーよりも小さ い場合に,吸着式の省エネルギー性は優位となる. 排熱を有効活用する吸着式は,省エネルギー性の 高い温湿度制御技術である.



図1 吸着式と冷却式の空気状態



#### 2.2 蒸気の吸脱着現象と吸着材

#### 2.2.1 蒸気の移動原理

気相と吸着材との間の水分子(蒸気)の移動は、 気相中の湿分の分圧と吸着材表面の蒸気圧に依存 し、その蒸気圧は温度と吸着量に依存する.吸着 材表面の典型的な蒸気圧曲線を図3(a)に示す.蒸 気圧は、温度と吸着量の増加とともに増加する. 図3(b)には、蒸気が吸着材表面に接触したときの それぞれの蒸気圧を示す.蒸気は,吸着材表面と 空気中の蒸気圧の差で移動する. したがって, 吸 着材温度が T<sub>A</sub>よりも小さいとき (図中の除湿, 吸 着現象の領域),蒸気は気相から吸着材へ移動する. 吸着が進むと吸着量が大きくなるので、同じ温度 であっても,表面の蒸気圧は徐々に大きくなり, やがて周囲の蒸気圧に到達すると移動は終了する. 逆に温度が T<sub>A</sub>よりも大きいとき (図中の加湿, 脱 着現象の領域),蒸気は吸着材から気相へ移動する. 脱着が進むと吸着量は小さくなるので表面の蒸気 圧は低下し、やがて周囲の蒸気圧に到達すると移 動は終了する.

吸着現象は,常に発熱を,脱着は吸熱をともな うので,蒸気の移動促進には,吸着時の除熱,脱 着時の加熱が重要である.



(a) 吸着材の蒸気圧 (b) 吸着材と周囲の蒸気圧

図3温度-蒸気圧-吸湿量の関係と移動原理

#### 2.2.2 吸着材

吸着材はシリカゲル,アルミナゲルおよびゼオ ライトなどが代表的である.これらの吸着平衡曲 線を図4に示す.シリカゲルとアルミナゲルはゼ オライトよりも比較的高い相対湿度で大きい平衡 吸着量を示す.また,図中の細孔径が制御された 吸着材と記した曲線は,メソポーラスシリカ[4]が 示す特性を模擬したものである.なお,これらの ほかにも高分子系[5]や機能性材料[6,7]がある.

#### 2.2.3 再生温度と除加湿能力の関係

除加湿は吸着と脱着を交互に繰返して行われる. 吸着時と脱着時の平衡吸着量(吸着材と接触する 空気の相対湿度に対応する平衡状態の吸着量)の 差 *Δq\*max*と再生温度の関係を白抜き記号で図5に 示す.これは,温度が 24°C で相対湿度が 60%の 空気(絶対湿度が 11.2g/kg')が吸着され,これと 同じ絶対湿度をもつ空気を加熱して吸着材を再生 した場合の結果である.なお,図中の黒塗り記号 については後述する.

除加湿能力は空気条件にも依存するが、細孔径 が制御された吸着材とシリカゲルは、再生温度が 低くても能力があり、前者は60℃程度以下、後者 は80℃程度以下に適している[8]. このように再 生温度と除加湿される空気条件に応じて適切な特 性を示す吸着材を選択すること、またはそのよう な特性をもつ材料を開発することが重要である.





図5 除加湿能力に及ぼす再生温度の影響

#### 3. 吸着除加湿の要素機器とシステムの技術研究

### 3.1研究内容の分類

吸着除加湿に関する研究を大まかに分類すると (1) 除加湿ロータの性能予測のためのモデリング, 計算および最適化の検討, (2) 熱交換過程や熱・ 物質移動に関する要素研究, (3) 吸着除湿と従来 の冷房機を組み合わせたハイブリッドシステムの 性能評価[9], (4) 地域の気候条件を考慮したシス テムの省エネルギーポテンシャル評価[10], (5) 吸 着除湿システムの導入と性能評価[11]に分類でき る.以下では要素に近い(1), (2)および(3)に関連す る研究について簡単に紹介する.

### 3.2 吸着ロータの特性解析

#### 3.2.1 理論解析

吸着材はほとんどの実用機器でロータに加工さ れており、ロータ内局所における吸着材と蒸気の 吸脱着現象が除加湿性能に大きく影響する.した がって、熱と物質の移動促進の指針検討が重要で あり、実験や計算によってロータの性能に及ぼす ロータの比熱、長さ、吸着熱、回転速度、平衡吸 着特性、再生温度、吸脱着面積比率および脱着空 気流量の影響などが明らかにされている[12-14].

例えば図6に示すようなロータを解析対象とし, 吸着材とバルク空気間の熱・物質移動の抵抗を考 慮して性能を予測した.表1にシミュレーション の基礎式[14]の例を示す.

図 5 にロータ長さが 0.02m, 等価物質伝達係数 が  $1x10^4$ m/s の場合における各吸着ロータの除加 湿速度  $\Delta M$ を黒塗り記号で示す.除加湿速度は単 位時間あたりの除加湿量であり,ロータの吸着側 出入口の平均の絶対湿度差に空気の質量流量を掛 けて求められる.また,図7には除湿効率を示す.

これは,吸着側ロータ入口空気の相対湿度が出口 までに変化しうる相対湿度との差(吸着側と再生 側の相対湿度差)に対して実際に到達した相対湿 度との差(吸着側の出入口の相対湿度差)の比で 求められる.

シリカゲルや細孔径を制御した吸着材は,再生 温度が低くても除加湿速度は大きい.効率が最大 となる再生温度は55°C程度であり,この温度域で 再生用の熱エネルギーは効率よく変換される[8].

さらに、除加湿速度に及ぼす移動係数の影響を 検討した結果、吸着材の表面拡散係数の値を現状 の10倍に大きくすると移動速度は約35%増大し、



図6 解析対象のロータとモデルのイメージ

表1 シミュレーションの基礎式[14]						
Mass balance						
$\rho_a \frac{\partial x}{\partial t} + \rho_a u_a \frac{\partial x}{\partial z} + \frac{a_b}{a_a} \rho_b \frac{\partial q}{\partial t} = 0$						
Adsorption rate						
$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{k_b}{a_b} (q^* - q)$	(2)					
Heat balance in the air side						
$\rho_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a u_a c_{pa} \frac{\partial T_a}{\partial z} + \frac{q_s}{a_a} = 0$	(3)					
Heat balance in the bed						
$\rho_b c_{pb} \frac{\partial T_b}{\partial t} = \rho_s \frac{\partial q}{\partial t} q_h + \frac{q_s}{a_b}$	(4)					
Heat transfer between the air and the bed						
$q_s = \alpha_s (T_a - T_b)$	(5)					
Equilibrium adsorption						
$q^* = f(x, T_b)$	(6)					
a:厚さ[m], cp:比熱[J/(kg·K)], kb:等価	T物質					
伝達係数[m/s], L: ロータ長さ[m], q: 则	<b>b</b> 着量					
[kg-水/kg-吸着材], q*: 平衡吸着量[kg->	水/kg-					
吸着材], qh: 吸着発熱量[J/kg], T: 温度[	°C],					
t:時間[s], x:絶対湿度[kg/kg'], z: ロータ	マ長さ					
方向の位置[m], u: 風速[m/s], α <sub>s</sub> : 熱伝	達率					
[W/(m <sup>2</sup> ・K)], ρ: 密度[kg/m <sup>3</sup> ]である.						
添字 a: 空気,b: 吸着材を表す.						



図7 除湿効率に及ぼす再生温度の影響

逆に 1/10 倍にすると 1/5 程度に低下する[15]. こ のように移動係数の向上が高性能化には重要であ り,係数の推定が性能予測に必要である.

なお、ここでは紹介しないが、シミュレーショ ンによりロータ内局所の温湿度、吸着量の分布お よびロータ回転方向のそれらの分布も容易に予測 されており、これらのデータを用いて移動促進の ための指針が検討されている[15].

#### 3.2.2 熱・物質の移動促進と移動係数

移動促進に関する研究としては,吸着時の発熱 除去と脱着時の熱供給が速やかに行われるように 設計された吸着積層体や同時熱交換除湿機の開発 およびそれらの性能評価が行われている[16, 17].

移動係数に関しては、ロータ要素への基礎的な 吸着実験、すなわち吸着平衡状態(再生後に相当) にある要素に所定の温湿度の空気をステップ状に 与え、吸着による質量変化と温湿度を計測する実 験が行われ、得られたデータから等価物質伝達係 数 k<sub>b</sub>と熱伝達係数 a<sub>s</sub>が算出されている[18].等価 物質伝達係数は、式(2)で与えた吸着速度式の駆動 力 q<sup>\*</sup>-q にかかる係数であり、熱伝達係数は式(5) で与えられる.

図8には面風速を変えて得た開始後の吸着量と 等価物質伝達係数を示す.面風速が大きくなると 吸着速度と係数は大きくなる傾向が得られた.図 示していないが相対湿度が増加,また温度が低下 すると係数は増加する傾向が得られ,熱伝達係数 も面風速に依存している.

これらの係数を無次元化して,式(7)と式(8)で表 される一般的な平板層流における整理式からの値 と比較した.

$$Sh = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{3}}$$
(7)

$$Nu = 0.664 Re^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}$$
(8)

ここに  $Sh(=(k_bL/D_a)\cdot(D_a/D_s))$ は修正したシャーウ ッド数,  $Nu(=(\alpha_sL/\lambda_a))$ はヌセルト数,  $Re(=u_aL/v_a)$ は レイノルズ数,  $Sc(=(v_a/D_a)\cdot(D_a/D_s))$ は修正したシ ュミット数,  $Pr(=v_a\rho_a c_{pa}/\lambda_a)$ はプラントル数を表し,  $u_a$ は空気流速, Lは流れ方向の流路長さ(ここで は 0.04m),  $v_a$ は空気の動粘性係数である.  $D_s$ は表 面拡散係数であり, 吸着材の温度が 30°C で約 1.5x10<sup>-11</sup>m<sup>2</sup>/s, 80°C で約 1.5x10<sup>-10</sup>m<sup>2</sup>/s である.

ヌセルト数の実験値は理論値の2倍程度に、修

正したシャーウッド数の実験値は 20 倍程度に補 正することで簡易的に係数を推定できるが,今後, もっと詳細な検討を行う必要がある.



図8 面風速が速度と移動係数に及ぼす影響

### 3.3 吸着冷凍機と組合せた潜熱・顕熱独立制御ハ イブリッドデシカントシステム

ハイブリッドシステムとしては既に蒸気圧縮冷 凍機と組合せたシステム(吸着除湿機による潜熱 制御と蒸気圧縮冷凍サイクルによる顕熱制御を組 合せた冷房システム)の性能解析シミュレーショ ンが行われており,潜熱・顕熱の独立制御を行わ ないシステムと比べると24%のエネルギー消費量 の削減効果が見込まれた[19].また,太陽熱と補 助熱源で駆動する吸収冷凍機と組合せたシステム についても検討されている.太陽熱未利用システ ムと比べて,潜熱・顕熱独立制御によるエネルギ ー消費量の削減効果は,8月の気候条件では10% 程度,9月では35%程度であった[20].

ここでは 60°C の低温排熱の有効利用を目的と したシステムの実験について紹介する. 図9にシ ステムの概要図を示す.特徴は 60°C 程度の温水を 熱源とする二段型吸着冷凍機(図 10 (a))により 顕熱処理を,同じ熱源で再生する除加湿ロータ(図 10 (b))により潜熱処理を行う.

運転実験は、温水温度が55℃、処理空気温度が 26.5℃、湿度が10.5g/kg′の条件で行われた.図11 に各要素機器の出入口における空気の温湿度を黒 丸印で空気線図上に示す.図中Aは処理空気、B は供給空気の状態を示す.点Aの状態にある空気 は、除加湿ロータで除湿され、熱交換後さらに冷 却器で点Bの供給空気の状態まで冷却された.そ の結果,ロータは 50℃ 程度の空気により加熱再生 され、上記条件で運転可能であることが実証され た.



図9 吸着ハイブリッド除加湿システムの概略



(a)



(b)

### 図 10 二段型吸着冷凍機(a)と吸着除加湿 システム(b)の写真



図 11 吸着ハイブリッド除加湿システムの 実験結果およびシステム比較

また、従来の水噴霧式デシカントシステムとの 性能を比較した.水噴霧式のシステムで得られる 処理空気の温湿度がB点となるように運転した場 合、各点の状態は白丸印で示すようになる.水噴 霧式では本システムに比べて除加湿ロータで低湿 度の空気を作る必要があり、そのために97℃(温 度差5K)の再生熱源が必要となる.したがって、 本システムは40Kも低い熱源で駆動可能である.

さらに、吸着冷凍機だけで潜熱・顕熱処理を行 う過冷却式システムと比較した. 過冷却式では空 気を8℃付近まで冷却する必要があり、その場合、 吸着冷凍機の冷媒蒸発温度は低い条件で運転され る. したがって、本システムよりも冷凍機の成績 係数 COP は低くなる.本システムで必要とするデ シカント再生熱量を考慮しても過冷却式の COP は 23%も低いため、本システムの省エネルギー性 能は 30%高いことが明らかになった.

このように顕熱と潜熱の独立処理が行われる本 システムは、従来の吸着除湿システムに比べて低 温再生が可能で供給空気の温湿度も自由に設定で き,かつ過冷却式よりも省エネルギーであるので、 次世代の空調技術として有効性が高い.

#### 4. むすび

吸着材の吸着特性の視点からは、除加湿される 空気の温湿度条件に対して最適な平衡吸着曲線を 描く吸着材を、細孔径などを制御することによっ て、開発することが重要である。

要素の構成や運転の視点からは、ロータと空気 との間の熱と物質の移動速度を最大限引き出すた めの運転条件をシミュレーションによって予測分 析し,低温排熱で効率よく駆動する温湿度の独立 制御システムを開発し,実用運転することが課題 である.

はじめに述べたように以上のような省エネルギ 一型の潜熱・顕熱の独立制御技術の導入によって 低温度の排熱エネルギーをうまく活かすことが望 まれる.例えば産業分野の排熱量[21]を参考にす ると、年間の総温水排熱量 94.2PJ/year のうち、温 度が 40-60℃の温水排熱量は 46.1PJ/year、60-80℃ では約 15.1PJ/year、80-99℃ では約 12.6PJ/year で あり、それぞれ全体の約半分、16%および 13%を 占める.したがって、本システムのような熱駆動 型により総温水排熱量のうち約 3 割(温度範囲が 60~99℃の排熱)程度は活用することができる.

最後に上述の排熱量は、日本の産業部門全体の 年間エネルギー消費量 7534PJ/year[22]のうちの約 0.4%であり、社会全体に対するインパクトが大き いとは言えない.そこで、本システムのような低 温排熱駆動システムは、電気の使用が困難な地域 や用途先への導入を踏まえて開発することも重要 と思われる.

#### 参考文献

- [1] Saha, B. B., Alam, K. C. A., 濱本芳徳, 秋澤淳, 柏木孝夫, 日本冷凍空調学会論文集, 18-1 (2001) 1.
- [2] 児玉昭雄, 広瀬勉, 冷凍, 77 (2002) 226-234.
- [3] Kashiwagi, T., Akisawa, A., Yoshida, S., Hamamoto, Y. and Alam, K. C. A., Proc. of Int. Sorption Heat Pump Conf., (2002) 50.
- [4] 遠藤明, 宮田竜彦, 山本拓司, 大森隆夫, 秋谷 鷹二, 中岩勝, 日本冷凍空調学会学術講演会 講演論文集, D202 (2002) 577.
- [5] 稲葉英男, 日本機械学会誌, 104-987 (2001) 86.
- [6] 垣内博行,下岡里美,岩出美紀,大島一典,山 崎正典,寺田秀,渡辺展,武脇隆彦,化学工学 論文集, 31-4 (2005) 273.

- [7] 垣内博行,下岡里美,岩出美紀,大島一典,山 崎正典,寺田秀,渡辺展,武脇隆彦,化学工学 論文集, 31-5 (2005) 361.
- [8] 濱本芳徳,森英夫,中島洋一,松岡文雄,日本 冷凍空調学会年次大会講演論文集,C114 (2005).
- [9] 例えば Dhar, P. L. and Singh, S. K., App. Thermal Eng., **21** (2001) 119.
- [10] 例えば Joudi, K. A. and Dhaidan, N. S., Energy Conversion and Management, **42** (2001) 995.
- [11] 例えば Mazzei, P., Minichiello, F. and Palma, D., App. Thermal. Eng., **22** (2002) 545.
- [12]Kodama, A., Hirayama, T., Goto, M., Hirose, T. and Critoph, R. E., App. Thermal Eng., **21** (2001) 1657.
- [13] Dai, Y.J., Wang, R.Z. and Zhang. H.F., Int. J. Thermal Sci., 40, (2001) 400.
- [14]濱本芳徳,岡島次郎,松岡文雄,秋澤淳,柏木 孝夫,日本冷凍空調学会論文集,19-3 (2002) 281.
- [15]濱本芳徳,村瀬壮介,松岡文雄,岡島次郎,秋 澤淳,柏木孝夫,日本冷凍空調学会論文集, 21-1 (2004) 63.
- [16]児玉昭雄, 栗屋るみ, 後藤元信, 広瀬勉, 岡野 浩志, 化学工学会第 66 年会研究発表講演要旨 集, C314 (2001).
- [17]児玉昭雄,秋澤淳,濱本芳徳,平成 16 年度研 究助成事業成果報告会予稿集 産業技術研究助 成事業 第2分冊 (2005) 208.
- [18]石川惣一郎, 濱本芳徳, 秋澤淳, 柏木孝夫, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, B202 (2004).
- [19] 濱本芳徳, 冷凍, 78 (2003) 586.
- [20] Tran, T. N., 濱本芳徳, 秋澤淳, 柏木孝夫, 日本冷凍空調学会論文集, 20-4, (2003) 497.
- [21]省エネルギーセンター、調査報告 省エネル ギー技術戦略, http://www.eccj.or.jp/strategy/ chr33-a1.html (2003).
- [22]資源エネルギー庁, 統計情報 2003 年度エネ ルギー需給実績, http://www.enecho.meti.go.jp/ info/statistics/2003ygaiyou.pdf (2005).

# 吸着式デシカント除湿・空調プロセス

Adsorptive Desiccant Cooling / Dehumidification

#### 1. はじめに

2005 年 2 月 16 日,京都議定書が発効した.わ が国に課せられた温暖化効果ガス排出量の削減目 標を達成するには今や 13~14%の排出量抑制が 必要とされている.そして,それには京都メカニ ズムの運用と並行して省エネルギー効果の高いプ ロセスの開発と普及が不可欠である.

エネルギー利用の効率化を目指して各種コジェ ネレーションシステムやヒートポンプ式給湯器の 普及が進んでいるが、そのエネルギー利用効率を 高く維持するためには余剰温熱を積極活用するこ とが必要である.特に余剰温熱量が増加する夏季 には、冷房装置の駆動熱源として活用することが 合理的と言える. 熱駆動冷房装置の中でもデシカ ント除湿空調プロセスは換気型かつ除湿重視のシ ステムであり, 室内空気品質の改善効果も得るこ とができるとして注目されている. デシカント空 調システムは図1に示すように基本的に除湿機, 熱交換器、冷却器(オプション)、加熱器、送風機 から構成されており,状況に応じて様々な組合せ, あるいは多様な流路構成が可能である. その除湿 操作は吸着剤あるいは吸収液への水蒸気の吸着/ 吸収作用を利用しており、特に潜熱負荷の大きな 空間で有効である.従来空調機との組み合わせ(ハ イブリッド化)では、温度と湿度の独立制御が容 易になるとともに、従来空調機は顕熱処理に専念 できることから, COP 値の向上が期待できる[2]. なお、デシカント空調機はその除湿操作に固体吸 湿材を用いる吸着式プロセスと塩化リチウム等の 液体吸湿材を用いる吸収式プロセスに大別できる が、設備費あるいはメンテナンスの点からは吸着 剤除湿ローターを用いた吸着式デシカント空調機 が有利とされる.

普及しつつあるデシカント空調機ではあるが, 駆動熱源となり得るコジェネレーションシステム の導入数に遠く及ばない.これは操作原理/設計 児玉 昭雄(金沢大学) Akio KODAMA (Kanazawa University) e-mail: kodama@t.kanazawa-u.ac.jp



図1 2 ローター式デシカント空調プロセス[1]

指針が確立されていないこと,装置が大型である こと,高コストが最大の理由である.これらの課 題解決に加えて,今後普及が期待される家庭用燃 料電池や小型コジェネレーションシステムと組み 合わせを考えると 50-60℃程度の熱駆動でも十 分な除湿性能が発揮できる吸着剤,流路・システ ム構成,運転手法を開発しておく必要がある.

本稿では高湿度対応と更なる低温熱駆動を目指 した当研究室での取り組み(図 2)を中心に吸着 式デシカント空調プロセスの研究開発状況を紹介 する.詳しくは参考文献[3-7]をご覧頂きたい.



図2 当研究室におけるデシカント空調機の開発

#### 2. 従来型デシカント空調機の高度化

### 2.1 究極性能と除湿機の性能向上

図 3(a)に理想的な除湿機,温度効率 100%の顕 熱交換器,加湿効率 100%の冷却器を用いた冷却 器付デシカント空調機(Desiccant Evaporative Cooling)の空気状態変化を示す.このデシカント 空調機の究極性能は外気温湿度 35℃・14.2g/kg, 室内温湿度 26.7℃・11.2g/kg という ARI 条件にお いて再生温度 80℃の場合,冷却効果(給気と還気 のエンタルピー差) CE=23kJ/kg,室内空気基準 COP=1.5 である.残念ながら,実際のプロセス内 空気状態変化は図 3(b)に示すように理想挙動とは 異なり,理想性能に比べて極めて低いプロセス性 能を示す.



図3 全換気デシカント空調機内の空気状態変化 (a)理想的な変化と(b)実際

例えば、デシカントローターではほぼ断熱状態で 除湿が進行するため、得られる空気湿度の下限界 は図 3(a)中②で示されるが、実際の除湿操作では (1)吸着材ローターを介した再生側から給気側へ の顕熱移動による除湿出口空気のエンタルピー増 加,(2)水の蒸発潜熱よりも大きい吸着熱,(3)物質 移動抵抗,により除湿性能が低下する.これに対 する改良策の一例として,吸着ゾーン初期部分へ のパージゾーン設置がある.また、「吸着材」の改 良によっても対応可能である. すなわち, 吸着容 量が大きく吸着速度が速い吸着ローターを用いる ことによって, 最小湿度を示す除湿ローターの回 転数すなわち最適回転数が低くでき、回転によっ て持ち込まれる熱量を低減することができる.当 然,吸着材の改良は物質移動促進の点からも重要 であり、デシカントローターの性能予測や最適化 など吸着材開発につながる研究が多くなされてい る.吸着材自体の開発として、平衡吸着特性を制 御するために, 感温性材料を採用した研究や孔径 が均質なメソポーラス吸着体の採用などが提案さ れている.いずれも対象空間の温湿度に対して、 最も効果的に吸脱着量を稼ぐ吸着材の特性発現が 目的である.

#### 2.2 除湿機再生の効率化

効率的な除湿機再生方法として再生ゾーンを 2 分割して段階的に吸着材再生を行う「段階再生手 法」が有効である[4]. 段階再生手法とは図4に示 すように顕熱交換器を通過した還気を再生ヒータ ー手前で2つに分け,1つは加熱器により昇温し て本再生空気とし,もう一方は顕熱交換器の熱回 収により余熱された空気をプレ再生空気として加 熱器を通過させず除湿機の再生前段部分に通気さ せることで再生効率の向上が期待できる.



図5は除湿量に与える加熱再生ゾーン面積比率 の影響の一例である.外気湿度が低い場合,加熱 再生ゾーン面積比率の影響が小さい.これは低い 外気湿度領域では吸着量が少なく,加熱再生ゾー ン面積が小さくてもプレ再生過程とともに脱着に 必要なエネルギーを供給することができるからで ある.しかしながら高い外気湿度領域では大きな 加熱再生ゾーン面積比率が必要となる.よって, 求められる給気湿度によっては加熱再生ゾーン面 積を調整することでエネルギー投入量の削減が可 能である.また,高い外気湿度領域では除湿量変 化が小さいが,これは吸着材の吸着等温線形状お よび吸着速度に起因し,今後のデシカント空調プ ロセス用途吸着材開発の重要な検討課題の一つで ある.



図 5 除湿量に与える加熱再生面積比率の影響 (ローター断面図は再生側入口から見たもの)

図6は加熱再生ゾーン面積比率と相対冷却効果 CE/CE'(ゾーン1-6全てを加熱再生した場合に得られる冷却効果を1とする)および投入熱量比 kW/kW'(ゾーン1-6全てを加熱再生した場合の投 入熱量を1とする)の関係である.加熱再生ゾーン 面積比率が小さくなるにつれて熱投入量は直線状 に減少しているのに対し,相対冷却効果は当初緩 やかに減少する.この結果,例えば加熱再生ゾー ン面積比率 0.67 の場合,投入熱量比は 0.75 に対し て相対冷却効果は 0.9 程度を維持できており, COPm 値は 20%向上できることになる.

#### 2.3 熱交換器

室内への給気のエンタルピーを下げているのは 顕熱交換器の働きによるものであり,その温度効 率向上の重要性は言うまでもない.数値シミュレ ーション結果から 5%の温度効率の向上によりプロセス性能が格段に上昇することが予想されている.また,回転型熱交換器は除湿ローターに比べて数十倍高速で回転するために再生側空気から給気側への湿分の移動は避けられない.この湿分移動を抑制するためにプレートフィン形などの静止形熱交換器の利用が抜本的な解決法になると思われるが,回転型よりも低い温度効率が難点である.



図6 段階再生手法による省エネルギー効果



図7 断熱除湿限界と等温除湿の有効性

#### 3. 断熱除湿限界の克服

図7に示すように除湿が断熱的に進行する限り は除湿出口湿度の下限界は外気空気と等しいエン タルピー線と再生空気と等しい相対湿度線の交点 (A点)である.よって従来の流路構成では 50-60℃程度の再生温度では十分な除湿量が得ら れない.この断熱除湿限界を克服するためには除 湿に伴って発生する吸着熱を除去する仕組みが必 要である.例えば,図1の装置形式のままであれ ば,室内への供給空気の一部を除湿ローター入口 に再循環させることで,除湿性能を幾分か向上で きるが,給気風量が減少するという欠点がある. 当研究室では給気風量の減少を伴わない手法とし て除湿操作の多段化を検討した.

#### 3.1 2段除湿型プロセス

図8は除湿操作を2段にした吸着式デシカント 空調プロセスの概略図である.この流路構成では, まず一段目の除湿機で高湿度な外気"1"を"A"の状 態にまで除湿し,外気と熱交換した後にさらに除 湿と熱交換を行い,得られる低湿度な空気"3"を得 るものである.



図8 2段除湿型デシカント空調プロセス

図 9 は 2 段除湿型プロセスの除湿性能および COP である.比較のために従来型プロセスの結果 もあわせて示す. 従来型プロセス単体では対応す ることが困難な高湿度条件下でも2段除湿型プロ セスは高い除湿性能を維持した.これは2度の除 湿操作に加え、除湿機間の顕熱交換器により吸着 熱が除去され、有効吸着量の低下が抑制されたた めである.また、実質的な熱エネルギー利用効率 の向上を目的とした異温度再生方式(プロセス内 熱カスケード利用型"2-1 モード")も2つの加熱器 に同温度の熱を供給する同温度再生方式(Parallel) には若干劣るが、良好な除湿量を得ることができ た. また, COP<sub>m</sub> 値も高く, 実質的なエネルギー 利用効率の観点からは有効な流路構成であるとい える.一方で2段除湿型デシカント空調プロセス は装置が大型化し、普及の妨げの一因となる. そ こで、装置の省スペース化を図るために、通常の 半分であるローター幅 0.1m の除湿ローターを導 入した結果,高湿度条件下でも性能低下は 10%程 度に留まった. これは断熱除湿では吸着熱発生に よって空気流れ方向に空気の相対湿度が急激に低 下するため、除湿ローター下流域の吸着量は上流 域に比べて少ないためである.言い換えれば、デ シカント空調のように究極的な乾燥が必要ない除 湿操作ではローターに含まれる吸着材の半分は効 率よく機能していない.数値計算によると除湿機 再生温度が高いほどこの傾向は強くなる[7].

Heat supply											
Parallel		Serial(2-1mode)			Conventional						
Mark	1st	2nd	Mark	1st	2nd	Mark	1st	2nd			
0	50	50	$\diamond$	50	60	•	50	-			
	60	60	×	60	80		60	-			
Δ	80	80	$\backslash$				80	-			

 Parallel:
 除湿機2台とも同じ再生温度

 Serial:
 プロセス内熱カスケード利用



図9 2段除湿型プロセスの除湿性能およびCOP

#### 3.2 同時熱交換型除湿プロセス

図7に示したように等温操作における除湿空気 湿度の下限界は、点Pである. すなわち 50℃の再 生空気による等温除湿では、90℃の再生空気によ る断熱除湿と同じ除湿性能が得られることになる. また、等温除湿と断熱除湿で得られる除湿量を比 較すると、低温度再生になるほど等温除湿の有利 性は顕著になることがわかる. なお、等温除湿を 達成するためには吸着工程に入る前に吸着剤の冷 却,吸着工程中には吸着熱の連続除去が必要であ り、吸着材の伝熱促進および熱交換性能向上のた めの工夫が不可欠となる.研究開発の一例として 図 10 に同時熱交換型除湿ローターを示す.等間隔 で放射状に 60 個設置したアルミ製のスリットの 間に扇形のハニカム吸着剤が組み込まれている. 再生用温水をこのスリット内に通過させ、壁から の熱交換により吸着材を加熱することも可能であ る. この場合,加熱あるいはそのままの温度の外 気を吸着剤層に供給し、水蒸気を脱着除去する. 一方,吸着側ではスリット内に冷却空気を流し, 吸着熱を除去して吸着材を冷却する. このとき再 生側で用いた温水がスリットの内壁に残存してお り,冷却空気の流れに伴う残存水の気化熱により, 吸着熱をより効果的に取り除くことができる.

図 11 に除湿実験結果の一例を示す.再生過程で はスリットに温水を供給し,かつ吸着材層には外 気を温水と同じ温度まで加熱して供給した.吸着 熱除去は十分ではなく等温除湿は達成できていな いが、スリット内に残存した水の蒸発潜熱による 吸着材の冷却効果もあり、45-50℃という低い再生 温度でも良好な除湿性能を得ることができた.例 えば 45℃再生で 23g/kg という高湿度外気から 8g/kg 除湿しているが、これは従来の除湿ロータ ーを同温度で再生した場合には決して得ることの できない除湿量である.一方,除湿量に与える再 生温度の影響は小さく,特に原料空気湿度が高い 領域でその傾向が強い. これは、アルミスリット 等の導入により吸着材ローターの熱容量が増加し たことも影響して吸着材の冷却が迅速ではなく, 再生温度が高いほど吸着材層温度が高いままで吸 着工程を移動することを示唆する.また、中間湿 度域で除湿性能の低下が見られるが. これは除湿 ローターに担持した吸着剤の特性が影響している. 上記結果からローター内伝熱抵抗の削減と吸着









材特性の検討により除湿性能の改善が期待できる. そこで,吸着材層とアルミスリット間を熱伝導性 の高い材料で接合,伝熱抵抗の削減を図った.ま た,等温除湿に適した吸着材特性としては,良好 な吸脱着速度に加えて,再生空気の相対湿度を境 に平衡吸着量が大きく変化することが望まれる. よって,このような特性を有する㈱三菱化学製の 新規吸着材 FAM-Z を無機バインダーによりアル ミニウム製のハニカムマトリクスに担持した.こ の吸着材では,温度上昇により等温線が立ち上が



図13 伝熱促進と新規吸着材導入による同時熱交換除湿ローターの性能改善

る相対湿度域が加熱再生に好都合な方向に移動す る.図12に改良型除湿ローターの性能を示す.こ こで吸着材再生は加熱空気だけで行った. 吸着材 の冷却効果を高めるために少量の冷却水を追加供 給したこともあり, 旧熱交換除湿ローターと比べ ても除湿性能は大きく向上した.また,同時熱交 換型除湿機は従来型に比べ吸着ゾーンの断面積が 約40%小さいものの、2倍近い除湿量を達成して おり、装置の小型化にもつながる結果となった. しかしながら、研究開始当初に期待した高速吸脱 着サイクルとは程遠いローター回転数での操作で ある.3.1 項にも記したように試作した 20cm 層高 の除湿ローターでは空気流れ方向後半部分の吸着 剤が効率よく働いていないこと,また,その部分 への蓄熱が高速サイクル化を妨げていることが予 想される.この点で吸着材層高さの思い切った削 減は小型高性能デシカント空調プロセスを導くも のとして,現在検討中である.

#### 5.おわりに

当研究室における吸着式デシカント空調機の高 度化研究を紹介させて頂いたが,湿度スイング吸 着(富士シリシア化学),高分子収着剤応用プロセ ス(岡山大学),バッチ式等温除湿プロセス(名古 屋大),吸着ヒートポンプとのハイブリッド化(東 京農工大・九州大)など国内でも注目すべきデシ カント関連研究が数多く進んでいる.この中で低 温熱駆動を目標とした研究開発の多くは吸着熱除 去による等温除湿を目指しており,よりシンプル な装置構造でいかに効率よく吸着熱を除去するか がブレークスルーの鍵となっている. 国内普及数は大規模施設を中心に 200 件程度に 留まっているが,80℃程度以上の再生温度があれ ば既に実用性能域にあるデシカント空調プロセス である.今後,コジェネレーションシステムの普 及とともにデシカント空調機の特長が認知されれ ば,快適環境を必要とする学校や劇場への導入も 進む.私たちの家庭を考えると少ないエネルギー 消費量で24時間換気空調が実施でき,さらには結 露を防ぐことで建物そのものの寿命も長くできる. オフィスではデシカント空調機による高温低湿度 空気の供給で冷房による健康被害が少なくなる. 自動車への適用には小型化は不可欠であるが比較 的高温のエンジン排熱が利用できる.デシカント 空調機は省エネルギーだけではなく,快適空調も 提供するものであり,更なる研究開発が望まれる.

#### 参考文献

- [1] 株式会社西部技研ホームページ http://www.seibu-giken.co.jp/
- [2] L. Z. Zhang and J. L. Niu, Energy, 28, (2003) 275.
- [3] Kodama, A. et al., J. Chem. Eng. Japan, 36, (2003) 819.
- [4] 児玉昭雄,安藤幸助,広瀬 勉,後藤元信,岡野浩志,日本冷凍空調学会論文集,22-1,(2005)
   33.
- [5] Kodama, A. et al., Adsorption, 11-Supplement 1, (2005) 603.
- [6] Ando, K. et al., Adsorption, 11-Supplement 1, (2005) 631.
- [7] 辻口拓也, 児玉昭雄, 日本冷凍空調学会論文 集, 22-4, (2005) 49

### 吸着冷凍サイクルおよびその展開 Basics of Adsorption Refrigeration Cycle and Advanced Cycles

秋澤 淳(東京農工大学) Atsushi AKISAWA (Tokyo University of Agriculture and Technology) e-mail: akisawa@cc.tuat.ac.jp

#### 1. はじめに

過去 20 年の民生部門におけるエネルギー需要の 動向をみると、比率的に最も伸びているのは冷房負 荷である.既に周知の通り、オゾン層を破壊しない 代替フロンも地球温暖化を引き起こしてしまう.し たがって、グローバルな環境問題であるオゾン層破 壊の防止、地球温暖化抑制の観点から冷凍機の今後 の動向は重要な意味を持っている.これらを同時に 満足させる冷媒は地球上に天然に存在する物質、す なわち自然冷媒である.自然冷媒には水、アンモニ ア、アルコール、炭化水素、空気など様々なものが あるが、本稿では水を冷媒とし、固体吸着材(シリ カゲル)を用いて冷熱を発生させる吸着冷凍機につ いて解説する.

吸着冷凍機は吸収冷凍機と並んで熱駆動ヒートポ ンプに位置づけられる.これらはコージェネレーシ ョンや工場排熱など,一度利用されてから排出され た熱を有効利用できる技術であり,ヒートカスケー ディング(熱の多段階利用)を構成し,低温排熱か ら冷熱を発生する役割を担っている.特にシリカゲ ルを用いた吸着冷凍機は既存の吸収冷凍機よりも低 温の駆動熱源で運転可能であることから,低品質の 熱を再活用するヒートカスケーディングの最終段と して期待されている.

#### 2. 吸着冷凍サイクル

#### 2.1 動作原理

広く普及している吸収冷凍機が LiBr 水溶液ある いはアンモニア水溶液などの吸収溶液を使うのに対 し、吸着冷凍機は固体の吸着材を用いる.吸着材と してはシリカゲル,活性炭,ゼオライトなどが使わ れる.一方,冷媒としてはシリカゲルには水が,活 性炭にはメタノールが使われる.シリカゲルは比較 的低温(80℃以下)で吸脱着するため,低温排熱利 用に適した材料である.



図1に基本的な動作原理を示す.吸着冷凍機は蒸 発器(Eva),吸脱着反応器(Ads/Des),凝縮器(Cond) から構成される.シリカゲル槽を冷却することによ って冷媒蒸気が吸着される.その際,蒸発器で潜熱 を奪うため冷熱が生じる.その後,シリカゲル槽を 加熱すると冷媒は脱着され,蒸気は凝縮器に移行し て液化される.これをくり返すことによって冷却効 果を発生させる.

この様子を図示したものが図2に示すデューリン グ線図である.横軸はシリカゲルの温度,縦軸は飽 和水蒸気圧を表し,斜めの斜線は吸着等濃度線を示 す.右側の四角形はシリカゲルが水蒸気を吸う状態 (低圧で濃度が高くなる)と吐く状態(高圧で濃度



図2 デューリング線図に表した吸着サイクル

が低くなる)の間を時計回りに変化する様子を示し ている.一方,左側の直線は水100%の状態であり, 冷媒蒸気が凝縮して蒸発器に戻る工程を表している. 四角形の一番右側が再生温度,左側が冷却水温度, 直線の左側の端点が蒸発温度,右側の端点が凝縮温 度に対応する.四角形の横幅が吸着材に吸着される 冷媒濃度の差を示しており,冷凍出力に直接つなが る指標である.

#### 2.2 単段型吸着冷凍サイクル

前述の方法では一サイクルの間に半分の時間しか 冷熱が発生できないため、バッチ運転を行って常時 冷却能力を維持するよう,吸脱着反応器を2基有し、 半周期位相をずらせて交互に吸着反応と脱着反応を 行うように運転される.吸着冷凍機の基本構成を図 3に示す.このサイクル動作は次の通りである.

① 蒸発器と一方のシリカゲル槽が接続され,蒸気が吸着される(吸着器).他方のシリカゲル槽は凝縮器と接続され,シリカゲルが加熱されることによって蒸気を放出し,凝縮器へ移動する(脱着器).

② 蒸発器,凝縮器との間にあるバルブが閉じられ、高温の脱着器は冷却される一方、低温の吸着器は加熱される.この工程は次の吸着・脱着を行うための準備工程である.

③ 脱着器だった反応器は蒸発器と連結され,吸 着器に替わる.一方,吸着器だった反応器は凝縮器 と連結され,脱着器に替わって運転される.

④ 再びバルブが閉じられて準備工程に入り,脱着器は冷却,吸着器は加熱される.その後①に戻ってサイクルを繰り返す.

この基本的なサイクルを,後に述べる多段型サイ クルに対比して単段型サイクルと呼ぶ.加熱温度 70 ~80℃で COP(冷熱出力/温熱入力)は 0.6 程度と,



図3 単段型吸着冷凍機の構成

単効用吸収冷凍機とほぼ同程度の変換効率を持つ. 課題は吸脱着反応器を2基持つためサイズが大きい こと,バッチ運転で反応器の加熱・冷却をくり返す ため,顕熱的なエネルギー損失が発生することがあ げられる.この損失は COP を引き下げる要因として 働く.

なお、この単段型吸着冷凍機は日本で商用化され ており、ディーゼルエンジンのジャケット冷却水排 熱(75℃)を利用した冷房用冷水の製造などに応用 されている[1].

#### 3. 吸着冷凍サイクルの低温熱駆動化

#### 3.1 多段吸着冷凍機

熱駆動冷凍機の大きな技術開発課題の一つは駆動 熱源の低温化である.一般的に低温になるほど排熱 が多いと考えられるので、より応用範囲が広がると 予想される.シリカゲルは比較的低温に向いている ため,より環境温度に近い温度域で動作する吸着冷 凍サイクルが研究されている.具体的には,吸脱着 反応器ペアを多段に積み重ねることによって、熱源 の低温化を図ることができる.図2より、加熱温度 が低下するにつれて吸着の濃度幅は小さくなり、や がて出力がとれなくなることがわかる.この時、単 段型のデューリング線図の四角形を中間圧力で二つ に分割し, 上部を左側に寄せることによって駆動温 度(四角形右側の端)を低温側に移動させることに より,低温でも冷熱出力の取り出せるようにできる. これが図4(a)に示す2段型サイクルである. さらに 三つに分割した場合が図4(b)であり、3段型サイク ルに相当する.3段型では2段型よりもさらに駆動 熱源が低温側に寄っていることが見て取れる.2段 化することによって,熱源温度を60~70℃に低下さ せることができ、さらに3段にすれば60℃を下回る 排熱を使って冷水を製造することが可能となる.図 5に2段型吸着サイクルの装置構成を示す. 下段の 反応器が蒸発器から吸着した蒸気は、再生工程で上 段の反応器に吸着される. さらに, 上段から再生さ れた蒸気が凝縮器で液化され、蒸発器に戻ってサイ クルを繰り返す.

多段にするほど反応器の数が多くなり, 顕熱ロス が増加するため効率が低下すると同時に容積が大き くなる難点がある.多段化にしたがって反応器の数 が増えるため,コンパクト化が大きな課題である. 図6には実験によって得られた単段型,2段型,



(a) 2段型サイクル



図4 多段型吸着冷凍サイクル線図

3 段型における熱源温度に対する冷凍出力 SCP(吸着材重量あたりの冷凍出力)の比較を示す[2]. 段数によって吸着材使用量が異なるため,その重量で規格化している. なお,冷水入口温度を 14℃,出口温度を 9℃一定の条件としている. 熱源温度が低温になるにしたがっていずれのサイクルも冷凍能力が直線的に低下する. この結果より,単段型は 70℃以上で,2 段型は 55℃~70℃で,3 段型は 55℃以下で優位となることがわかる. COP についても各サイクルの優位な条件はほぼ同様の温度範囲となる.ただし,COP の改善は熱温度が上がるにつれて飽和する傾向を示す.

### 3.2 ハイブリッド吸着冷凍機

単段型のままで駆動熱源温度を下げる試みとして,



図6 単段および多段サイクルの吸着剤充填量 あたり冷凍出力の比較(冷水出口9℃)

圧縮機と組み合せたハイブリッド方式がフィールド 試験されている[3].高質なエネルギーである電力を 若干加えてやることにより,40℃の排熱によって駆 動し,冷熱を取り出すことが可能となる.本サイク ルのデューリング線図を図7に示す.40℃レベルの 加熱の場合,脱着器から発生した冷媒蒸気を凝縮さ せるには低温の冷却水が必要になるが,この蒸気を 圧縮して高圧にすることによって通常の環境温度で 凝縮を可能とする.すなわち,吸脱着反応器と凝縮 器の間に圧縮機を持つことがこのハイブリッドシス



図7 ハイブリッド型吸着冷凍サイクル線図

テムの特徴である.性能としては、圧縮機用電力の みを入力と考えた(再生工程での排熱入力は除外す る)ときの COP は 10 を達成することが報告されて いる.

### 4. アドバンスト吸着冷凍サイクル

### 4.1 リヒートサイクル

単段型吸着冷凍サイクルでは吸着/脱着工程終了 後に加熱/冷却がなされ,次の脱着/吸着工程に向 けて反応器の温度を調整する.吸着/脱着工程が終 了したとき,吸着器は低圧状態にあり,脱着器は高 圧状態にある.蒸発器・凝縮器との間のバルブを閉 じ2つの反応器を接続すると,反応器内の圧力が同 じになるので,吸着器側は圧力が上昇し,脱着器側 は圧力が低下する.すると,デューリング線図から わかるように,温度一定で圧力が上がれば吸着量が 増加し,圧力が下がれば吸着量は減少する.すなわ ち,脱着器内の吸着材はより脱着が促進され,その 冷媒蒸気は吸着器側に移動して吸着されることにな る.したがって,吸脱着の濃度幅が拡大する結果, 冷凍出力が増強される.

このプロセスを図示したものが図8である(ただ し、模式的に反応器間を接続する前後で冷却/加熱 の準備工程を含むように表している).この線図より 本サイクルは単段型のシステム構成でありながら、 擬似的に2段型サイクルと同じような経路を描いて いることがわかる.2段型サイクルは上下二つのサ イクルが分離しているが、本サイクルでは直列につ ながった形態をしている点に違いがある.サイクル の駆動熱源温度は線図の最も右側の端点が規定して



図8 リヒートサイクルのデューリング線図



図9 リヒートサイクルと既存サイクルとの比較

いるので、本サイクルでも2段型と同じような低い 熱源温度において冷凍出力を取り出すことができる. このサイクルをリヒートサイクルと呼んでいる.

このサイクルはサイクル時間を長くとれば2段型 と同じように働く一方,サイクル時間を短くとれば 単段型サイクルに近づいていくので,単段型のよう に運用できる特徴を持つ.サイクルシミュレーショ ンによって得られた駆動熱源温度に対する性能の比 較を図9に示した[4].ただし,サイクル時間を長く すると冷凍出力がとれない時間帯が長くなるため, 連続的に冷凍出力を維持するためにはもう一組の吸 脱着器を持ち、バッチ運転することが必要となる.

リヒートサイクルでは、サイクル時間を調節する ことによって一台で熱源温度に応じた運転が可能と なり、様々な温度域の排熱源や時間的に変動する排 熱源を有効利用するのに適していると考えられる.

#### 4.2 マルチベッド吸着冷凍機

マルチベッド型とは吸脱着反応器を4基ないし6 基有する単段型吸着冷凍機である.通常の単段型で は反応器の位相が180度ずれて運転されているのに 対し、マルチベッド(4基)型では90度ずれて運転 される.さらに、先行する反応器の熱源水あるいは 冷却水を追随する反応器がカスケード的に利用する 点に特徴がある.すなわち、脱着工程から排出され る若干温度が低下した温水を準備工程の加熱および 脱着工程初期に利用する.また、吸着工程から排出 される若干温度が上昇した冷却水を準備工程の冷却 および吸着工程初期に利用する.

この位相差運転により、マルチベッド型では常に いずれかの反応器が蒸発器とつながっているため冷 熱出力が途切れることなく、バッチ運転でありなが ら冷熱出力の変動が抑制される特徴を持つ(通常の 単段型サイクルでは準備工程で出力が出ない).

マルチベッド(4基)型の実験結果を図10に示す [5].サイクル時間を変化させた場合の結果を見ると, COP については従来の単段型とマルチベッド型は 概ね同程度となっているが、冷凍能力ではマルチベ ッド型の方が上回っている。特にサイクル時間が短 い範囲において大幅な改善が認められる。その理由 はサイクル時間が短くなるにつれてそれに占める準 備工程時間が大きくなり、従来型では出力がとれな いことに起因する。マルチベッド化することによっ て常時出力が取れることの効果が表れている。

#### 5. おわりに

本稿では固体吸着材を利用した冷凍機(ヒートポ ンプ)として吸着冷凍機について紹介した.吸着冷 凍サイクルは低温の熱で駆動できることが大きな特 徴である.熱を利用するため夏季昼間の空調負荷に よる電力システムのピーク負荷を削減することに寄 与するのみならず,ヒートカスケーディングの最終 段として他では使えない排熱からさらに有用なエネ ルギーを取り出せる技術であることを強調したい.



図10 マルチベッド型吸着サイクルの出力特性

また,太陽熱やバイオマス燃焼熱などの再生可能エ ネルギーが利用できることも特徴である.日本やア ジア地域において空調を省エネルギー的に実現する ことは,地球温暖化抑制を背景として将来的な課題 になると予想される.今後,吸着冷凍サイクルの役 割が期待される.

#### 参考文献

- [1] 前 川 製 作 所 ホ ー ム ペ ー ジ , http://www.mycomj.co.jp/adref/nadoref1.html
- [2] 秋澤 淳,濱本芳徳,赤平 亮,柏木孝夫,冷水 出口温度一定条件における多段吸着冷凍サイク ルの出力特性,平成17年度日本冷凍空調学会学 術講演会講演論文集 (2005) C110-1~C110-4.
- [3] 中 部 電 力 ホ ー ム ペ ー ジ , http://www.chuden.co.jp/press/data/pre2001/pre0220 \_02.html
- [4] Uyun Aep Saepul, K.C. Amanul Alam, 赤平 亮, 濱本芳徳, 秋澤 淳, 柏木孝夫, リヒート二段型 吸着サイクルの性能シミュレーション, 日本機械 学会第14回環境工学総合シンポジウム2004講演 論文集 (2004), 356-359.
- [5] Ng, K.C., Chua, H.T., Wang, J.B., Wang, X.L., Kashiwagi, T., Akisawa, A., Saha, B.B., Experimental Investigation on a Novel Four-bed Adsorption Chiller, Proceedings of the Asian Conference on Refrigeration and Air Conditioning 2002, Dec. 4, Kobe, Japan (2002) 371-374.

### 甲藤好郎先生ご遺稿 「沸騰の科学(5)」 Science of Boiling (5)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授) Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

#### 5 核沸騰の限界

#### 限界というもの

この世の中で光の速度より速い速度はないと言 われます.従って光速は速度の限界ということに なりますが,これは自然界がそういう風に出来て いるからであって,それを認める他なく,なぜ光 速があらゆる速度のなかで最高速度になるのかと いった議論をしてみても意味がありません.

一方これとは違い、背景にいろいろの物理的原 因があって,そのためある境界の前後で状況が質 的に変ってしまうといった場合がいろいろありま す. 一例として航空機に普通使われているジェッ トエンジンを考えてみましょう. このエンジンで は、前方から吸込む空気を圧縮するため沢山の羽 根のついた軸流圧縮機が中でまわっています. そ してこの種の圧縮機は一般に,空気の流量が十分 あって正常に動く領域と、流量が少なくて激しい 振動を引き起こす領域とを持っています. そこで エンジンのスタートの際など空気流量が少ない時, この振動領域に入らないような工夫がされ、それ によってエンジンは安全に作動するわけですが、 このようにある境界線の前後で状況がまるで違っ てしまうような場合、私たちはよく、その境界の ことを一方の領域の限界と呼ぶことがあります. そしてこれから本章でお話しようとしている核沸 騰の限界も,このような意味合いのものなのです.

#### 簡単な実験

さて物体の表面と、それに接して流れる流体と の間に、なるべく少ない温度差で、なるべく多量 の熱を交換出来る状態ほど、熱伝達の性能が良い と言うことになります.そして、これについて核 沸騰、特に「強い核沸騰」は、驚くほど優れた熱 伝達性能を持つものなのです.例えば、大気圧、 温度 100℃の飽和水が,温度 120℃の加熱面に触れ て沸騰する時,加熱面と飽和水との温度差が僅か 20℃しかないのに,加熱面の面積1平方メートル あたり約 1100 キロワットもの熱が水側に伝わり ます.また圧力が例えば大気圧の約 73 倍の飽和水 (飽和温度約 290℃)の時には,前と同程度に過 熱された加熱面から約 4800 キロワットの熱が伝 わります.

従ってこのような核沸騰の状態そのままを保ち ながら加熱面の温度をあげ、加熱面から伝わる熱 の強さをさらに増して行くことが出来れば、比較 的低い加熱面温度で実に多量の熱を伝える事が可 能になる筈です. そこでことの成否を確かめるた め、とりあえず簡単な実験をやってみましょう. すなわち、容器内の飽和水の中に、2本の電極を 入れニクロム線を張って, それに流す電流を徐々 に増してみます. そうするとニクロム線の上に沸 騰が始まり、さらに電流を増して行くと沸騰が盛 んになって行きます. しかしそれは何時までも続 くものではなく、電流の増加と共にやがてあると ころでニクロム線が突然パッと赤熱して焼け切れ てしまいます. つまり, この赤熱焼損が起こる直 前までは、飽和温度に近い比較的低い温度で優れ た沸騰熱伝達を続けていたニクロム線が、ほんの 僅か電流を増すと突然、熱伝達の劣化のため非常 な高温になり瞬時に焼け切れるという劇的な変化 が起こるわけです.

なおニクロム線の代りに、白金線を使うと、同 じく高温になりますものの耐熱性があるので焼損 だけは避けられます.しかしこの場合、ほとんど 白熱状態にまで高温になった白金線のまわり全面 を薄い蒸気膜が包むという、核沸騰とはまるで異 質な沸騰状態(次の6章で扱います)になってし まいます.

#### 限界熱流束の現象

ともあれ私たちはいま,簡単な実験によって核 沸騰の領域に限界があることを知りましたが,実 はもっと大きな加熱面を使った,あるいはもっと 複雑な実験でも事情はまったく同様なのです.

「強い核沸騰」は一般にきわめて熱伝達性能が優 れているだけに、これは非常に残念なことです. また、そういう優れた熱伝達状態が外見的には何 の前触れもなく突然消滅してしまうこと自体、地 震や噴火が突然起こるのに似て、私たちには何と も迷惑なことであります.

しかし,そんな人間的感情はさておき,この核 沸騰の上限の熱流束(単位面積、単位時間あたり 出る熱量)のことを一般に「限界熱流束」と呼び, またこの上限が現れる現象を指して「限界熱流束 現象」と言います.また加熱面の熱流束が限界を 超える時、前項のニクロム線の例でも見たように 赤熱焼損を起こすことが多いので、「バーンアウ ト熱流束」、「バーンアウト現象」などの言葉も使 われます. ここにバーンアウトとは, 焼きつくす とか,燃えつきるという意味です.また、これに 多少似た感じの言葉ですが、旧ソ連では「沸騰危 機」ということもあります.ただ、「バーンアウト」 は現象の原因でなく結果であり,また白金線の場 合のように焼損の起こらない場合もあるのですか ら,不適当な用語だという人もあり,最近は限界 熱流束 (critical heat flux) の用語の方が世界的に 広く認められて来ています.

さて、この限界熱流束は、すでに1章でも触れ たように、最近は原子炉や種々のエネルギー機器 その他、先端技術装置の安全性にも関係する非常 に重要な現象になっていますが、実は1934年、東 北大学の抜山四郎教授(1896-1983)が、船舶の ボイラーの小型化を目的として、ニクロム線や自 金線の沸騰実験から世界にさきがけて発見した現 象です.また、通常の状況下の飽和プール沸騰の 限界熱流束 q<sub>c</sub>の値は、ロシアのクタテラーゼ教授 (1914-1986)が1950年、彼がまだポルズノフ研 究所にいた時に提出した次の式で大体予測出来る ことが知られています.



この式は,限界熱流束の現象が,恐らく気体と液体の共存する流れの力学的な条件から起こるという推定に基づいて,この条件に関係しそうないろいろの物理的因子を考え,実験データの整理から経験的に求められたものです.しかし,さらに進んで,この限界現象が具体的にどんな物理的仕組みで発生するのか,その謎解きとなると随分やっかいな問題になりますが,本章では一応,熱容量が十分にある普通の加熱壁(厚さが 0.5 ミリメートル程度以上ある金属壁)の場合に限って,核沸騰の限界問題を考えてみることにしましょう(もし加熱壁の厚さをこれより薄くすると,限界熱流束の値が普通より小さくなるという,かなり面倒な問題が生じます).

#### 「気液相対速度の限界」モデル

前項で,核沸騰の限界を指す用語にいろいろあ ることをお話しましたが,科学上の用語について こんな事態を生じるのは,この現象に対して人々 の持つイメージの間に,かなりの分散があるため でしょう.また事実,この限界現象がどんなメカ ニズムで出現するのか,その発生機構についても, 従来いろいろの考えが提出されて来ました.けれ ども,それらを少し大胆に分類してみると二つの タイプに大別出来て,まずその一つをここで紹介 することにいたします.

さて、かなり以前、限界熱流束のメカニズムの 研究が始まった頃は、まだ沸騰の状況や様相自体、 特に「強い核沸騰」の様相が十分に把握されてい たわけではなく、私たちに身近な「弱い核沸騰」 の観察を主体に想定されたメカニズムが考えられ ていました。例えば熱流束が増すにつれて加熱面 近くの液中に小さな気泡が一杯に充満して来て、 それ以上もはや気泡が入れなくなった時に限界熱 流束になるのだと言った、素朴な考え方などがそ れに入りましょう。しかし沸騰の研究が進むにつ れて、やがて加熱面上に発生する蒸気が液体を通 して離脱して行くメカニズムについて、もう少し 現実的なモデルが考えられるようになります。

いま,条件をはっきりさせるため,広い水平加 熱面の上に生じている強い核沸騰を考えてみまし ょう.強い核沸騰ですから,加熱面からの熱がす べて,そこで蒸気の発生に使われてしまうと考え てよいわけですが,この発生蒸気は液体を押し分 けて上方に逃げる一方,沸騰が継続するためには, その蒸気と同じだけの質量の液体が加熱面の方へ 必ず供給されている筈です.つまり,蒸気と液体 はこうして互にすれちがう定常流れを作ることに なりますが,熱流束がさらに増すと,このすれち がいの動きがますます激しくなり,それでいつか 蒸気は液体を通して逃げることが出来なくなると 考えるのです.

そしてこの「気液相対速度の限界」モデルは, アメリカのズーバー博士が 1959 年に提出した学 位論文「沸騰熱伝達の流体力学的様相」の中の1 章に記されたもので,これから以下にお話しする ような理論の形をとり,しかも前項で述べた限界 熱流束に関するクタテラーゼの経験式をうまく説 明もしましたので,プール核沸騰の限界熱流束に ついての,いわば支配的な物理モデルとして世界 的に長く通用して来ました.

いま、その理論の筋を紹介いたしましょう.ま ず広い水平上向き加熱面の上で,4章でお話した テイラー不安定を考慮すると,その臨界波長ん(大 気圧の飽和水では15.7 ミリメートル)のピッチで 加熱面が基盤目状に分けられます。そしてこの各 単位区画ごとに,加熱面に垂直に,直径が前記ピ ッチの半分 λ/2 (大気圧の飽和水では 7.85 ミリメ ートル)を直径とする円柱状の蒸気噴流があって 定常的に蒸気を上に逃す一方、その周囲では液体 が加熱面に向かって逆に流れているという定常流 モデルを仮定します. これで蒸気と液体の流れる 断面の面積が決り,そしてそこを流れる蒸気と液 体の質量は互いに等しい筈ですから,加熱面から 出る熱によって発生する蒸気の流速 uvの値,およ び液体の流速 uLの値がすぐに求められ,結局,熱 流束qの時の気液のすれちがい速度 $u_V$ - $u_L$ の値が 決ります.

一方,この蒸気噴流の気液界面について,4章 の終わりの方でお話したヘルムホルツ不安定を考 え,界面上に生じる波の速度cを与える式の右辺 の平方根の中を零とおきます.ただ今回は,その 零とおいた式から,気液界面が壊れて行く臨界波 長  $\lambda_c$ ではなしに,気液のすれちがい速度 $u_V - u_L$ の 方を求めて

$$u_V - u_L = \sqrt{\frac{2\pi\sigma(\rho_L + \rho_V)}{\rho_V \rho_L \lambda}}$$

つまり、この式の与える相対速度になると気液界 面は不安定となり、蒸気は液体を通して逃げられ なくなると考えるのです.そして気液のすれちが い速度 *u<sub>V</sub>*- *u<sub>L</sub>*と熱流束 *q*の関係は前に求めてあり ますから、これで限界熱流束の値が求められるこ とになります.

しかし困ったことに、いま右に求めたすれ違い 速度  $u_{V}$ -  $u_{L}$ の式の右辺根号内に含まれている波長  $\lambda$  の値が分からないのです.そこで、この問題を 処理するため、液体の中を流れる蒸気噴流(現在 その直径は前述のように $\lambda_{c}/2$ )は、その気液界面 の波の波長 $\lambda$ が噴流の円周の長さ(現在  $\pi\lambda_{c}/2$ に なります)より大きい時、蒸気速度に関係なく常 に不安定になるという、別の不安定条件を考え合 せ、つまり $\lambda = \pi\lambda_{c}/2$ とおいて $\lambda$ の値を決めます. そしてこの $\lambda$ の値を使うと、驚いたことに前のク タテラーゼの経験式とほぼ同様な結果が出て来る のです.

#### 重大な問題点

「気液相対速度の限界」モデルに基づく限界熱 流束の発生機構の説明は、こうしてすばらしい成 果を収めました.また気液界面に起こる気液不安 定の考えを,初めて沸騰の研究に導入した功績は、 画期的なものと言えます.けれども、よく検討し てみるとこのモデルには重大な問題が含まれてい るのであって、いま3つの問題を挙げてみようと 思います.

第1の問題は、理論的問題です.4章で述べた ように、テイラー不安定は、与えられた大きさの 重力gの下にある気液界面に対して界面が壊れる 時の波長の値を示し、一方、ヘルムホルツ不安定 は与えられた相対速度 u<sub>V</sub>- u<sub>L</sub>で流れている気液の 界面に対して界面が壊れる時の波長の値を示すも のです.ところが現在のモデルでは、前者からは 確かに「波長」を求めますが、後者からは「相対 速度」を求めるという、まったく異質な取り扱い をしています.そしてそのため、後者の不安定波 長λの値が不定のままとなり、その値の決定のた め止むを得ず、ヘルムホルツの不安定条件の上に、 さらにもう一つ別の不安定条件を重複して適用す るという無理を犯さねばならなくなっているので す.

熱流束が増すにつれて, 蒸気の発生量がふえ,

従ってその蒸気が液中を逃げ去る時の気液の相対 速度 *u<sub>V</sub>*- *u<sub>L</sub>*が増し,その限界が限界熱流束と結び つくという考えは,大変自然な感じのものであっ て,誰しもそう考えたくなる魅力を持っています. しかし同一の界面に対して2つの不安定条件を重 複して考えるというのは,論理的にやはり問題が あります.

第2は、現在のモデルが主張する最も大切な事 柄に対し、明白に離反する実験的事実があるとい うことです.すなわち、このモデルによれば、限 界熱流束よりさらに高い熱流束の沸騰というもの は、その発生蒸気量が離脱可能な限界量を超える ことになりますから、どんな方法によっても実現 が不可能の筈です.ところが実際には、限界熱流 束に近い状態の加熱面の上に、たとえば注射針の ように細長い管(発生蒸気の挙動に影響を与えな い位の)を使って液体を人工的に補給してやった りすると、核沸騰をもっと高い熱流束まで容易に 上げて行くことが出来るのです.つまり加熱面上 で発生する蒸気の量が、このモデルのいう限界量 を超えて大きくなっても、蒸気は何の障害もなく 液中を通って離脱出来るのです.

第3に、このモデルでは、前にお話したように、 加熱面上に比較的大きな直径の「定常的」な蒸気 噴流の存在を仮定しています.しかし現実には3 章「強い核沸騰の出現」の項、また4章「空気の 流れが分断される話し」の項で述べたように、強 い核沸騰の場合、加熱面上には蒸気のかたまりが 「周期的」に生成離脱を繰り返しており、従って 実際の流れの状態が本モデルの仮定とまるで違う のです.

#### 「核沸騰液層厚さの限界」モデル

さて以上に見て来た「気液相対速度の限界」モ デルでは、加熱面より少し離れたところに仮想し た気体と液体のすれ違い流れが主役であって、加 熱面自身はただ蒸気を発生するだけの役割になっ ています.つまり加熱面は蒸気を発生しさえすれ ばよく、加熱面上で気液がどんな物理的状況にな っているかは問題ではありません.極端なことを 言うと、次の6章で述べる膜沸騰のように、加熱 面が液体で濡れていなくてもいいのです.

一方これに対して,もっと加熱面近くの状況, 特に加熱面を常に液体で濡れた状態に置き得る限 界こそが、核沸騰の上限をきめる重要なポイント だとの考えも従来から無かったわけではありませ ん.しかし理論化が上手く出来ないため、その主 張に力を欠いていました.けれども比較的最近、 東京大学で筆者を中心に、すでに4章に述べたよ うな蒸気のかたまり、核沸騰液層などの状況につ いての定量的なモデル化の研究が進むにつれて、 これらを基礎に限界熱流束の分析が出来るように なって来ました.しかもこれはプール沸騰だけで なく、加熱面に沿って液体が強制的に流されてい る時の沸騰まで、広くいろいろの状況下の核沸騰 の限界熱流束に対して、その説明を可能にする力 を持っています.本項と次項で、そのことを少し 見てみましょう.

#### 「広い上向き加熱面上の限界熱流束」

まず広く平らな上向き加熱面上の核沸騰を見て みましょう. この時,前と同様にテイラー不安定 の臨界波長んの間隔で分けられた単位区画が考え られますが、ただ今回は各区画ごとに蒸気のかた まりが成長,離脱を繰り返すと考えます.そして, その一つの単位区画(面積 $\lambda^2$ )に注目すると、そ こで一個の蒸気のかたまりが出来始めてから離脱 するまで,加熱面上に滞留する時間 tnが4章でお 話したメカニズムによって決ります. なお, いま 注目している区画の周囲にある各区画でもそれぞ れ, 蒸気のかたまりの底部がいつも加熱面を覆う 形になっていますので、いま注目している区画の 加熱面上への液体の補給は、この区画の蒸気のか たまりが上方に離脱し、その後に液体が入って来 る時だけに行われると近似的に考えて大きな誤り はないでしょう. そしてその時, 加熱面上の核沸 騰液層が限界厚さ(4章で述べた限界厚さ  $\delta_c$ ) まで回復し、それ以後、新しい蒸気のかたまりの 滞留時間 tpの間,液体の補給なしに蒸発消耗して 行くことになります. そしてこのような状況下に 加熱面の熱流束 q を増して行ったとすると、核沸 騰液層の初期厚さ  $\delta_c$  は  $q^2$  に反比例して薄くなる (4章参照)一方,液層の蒸発速度の方は q に比 例して速くなります. また液層が蒸気に覆われる 時間 tpの方は、4章でみたように熱流束 qによっ てあまり変りませんから,結局以上を総合して, 熱流束 qの増加と共にいつか必ず時間 tnの終りに, 加熱面上の液層がちょうど乾き切る限界状態が現 れることになります. つまり, これが限界熱流束

になるわけで,また事実,以上の解析を行うと, 前のクタテラーゼの経験式とほぼ同じような結果 が出て来るのです.

#### ②「下向きの加熱面の限界熱流束」

次に, 少し突飛な例ですが, 平らな加熱面を液 体の中に水平下向きに入れた特殊な場合の核沸騰 について, 限界熱流束の発生メカニズムを見るこ とにしましょう. もちろんこのような系では, 蒸 気が上に逃げられないではないかと心配な人がい るかも知れません.確かに加熱面が非常に広いと その通りです.しかし, 例えば直径 20 ミリメート ル位の加熱銅棒(その下端の端面を円形加熱面に する)のまわりをリング状の断熱部でカバーした ものを、液体プールの中に上から垂直に入れて見 ましょう. この時は、加熱面と周囲断熱部の下面 に蒸気がたまることになり、この蒸気のかたまり が十分大きく広がるたびに、端の方から上方に流 れ去るといった動きが周期的に起こります. そし て,一つの蒸気のかたまりが加熱面を覆う期間 to と、その間の核沸騰液層の蒸気消耗とから、前の ①の例と同様な原理で限界熱流束の定まることが 理解出来ます. この場合, たとい加熱面の大きさ が一定であっても、その周囲に付けた断熱部の外 径を増すと、蒸気の滞留時間 toが増しますから限 界熱流束の値が減って行くことになります.

#### 水平円柱加熱面上の限界熱流束

前項で述べた「核沸騰液層厚さの限界」モデル の他の適用例として、ここにさらに、長い円柱加 熱面を飽和液体の中に水平に保持した時の核沸騰 の限界熱流束について少し触れておきましょう.

#### 「プール沸騰の場合」

まずプール沸騰の場合,強い核沸騰状態になる と,例のテイラー不安定のせいで水平円柱加熱面 の軸方向に,統計的に,あるピッチごとに蒸気の かたまりの成長,離脱がおこることになります. ただ,そのピッチ間隔は,前に説明した広い平面 上のテイラー不安定の臨界波長よりは短く,かつ 円柱が細いほど短くなります.なぜなら前の平面 加熱面の時に比べ,現在は発生蒸気が円柱のまわ りを包む形になりますから,気液界面が円柱まわ りに曲がることになり,その曲がりの影響が加わ るからです.しかしそれ以外は,広い平面の時と ほぼ同様な機構によって限界熱流束の現象が起こ ることになります.

②「弱い強制流れを加えた場合」

次に、円柱加熱面のまわりの飽和液体を上向き に、ゆっくりした速度で強制的に流すようにした 場合はどうなるでしょうか.この時は、まだ液体 の流速がおそく、従って重力の作用、つまり浮力 の作用が支配的なので、前のプール沸騰の時と同 様な性格の蒸気のかたまりの成長、離脱の挙動が 見られます.しかし、液体の強制流れの中におか れる蒸気のかたまりは、その影響を受けて、加熱 面まわりに滞留する時間がプール沸騰の時より少 し短くなります.だから、限界熱流束の値は、こ の強制流れの流速の増加と共にプール沸騰の時よ り徐々に高くなって行きます.

#### ③「強制流動沸騰の場合」

最後に,前記の強制的に流す液体の流速を十分 に高くしてみますと, 浮力の作用が消えて, 今ま でとはまったく違う蒸気の離脱状態が現われます. すなわち加熱面上の核沸騰で定常的に作り出され る蒸気は、円柱加熱面から後流の方に続く一枚の シート状の蒸気流れを作り、そのシート状流れの 後縁から蒸気が不規則に千切れながら後方へ流れ 去るという状況になるのです. そしてこの時, 強 制的に流されている液体が、上流側から円柱加熱 面にまっすぐ当たる附近は, 蒸気の蓄積がまだ生 じない部分なので、ここから液体が絶えず加熱面 上の核沸騰液層に供給されていると考えることが 出来ます.そして熱流束が増すと、4章の終わり に述べたように核沸騰液層の限界厚さδ.が薄くな りますので、それに流入する液体の量は減少し、 一方,加熱面上での液体の蒸発量は多くなります. そして核沸騰液層に定常的に流れ込む液体が、ち ょうど加熱面上で蒸発しきるだけの熱流束に達し た時,限界熱流束になるわけです.この場合,液 体の流速が増すとともに液層に流入する液量がふ えるので、一般に液体の流速を増せば限界熱流束 の値が上昇します. ただしこの場合, 円柱加熱面 の直径がかなり大きくなると、前述のようにして 液層に流入した薄い液体の流れが粘性の影響下に 加熱面上をどのように流れて行くかの問題が大き くなります.従ってここでの説明は、ある程度以 上,細い円柱加熱面の場合であると考えて下さい.

なお次の式は, 直径 *d* の円柱加熱面を流速 *u*<sub>L</sub> の飽和液体の流れに直交するように置いた時の限

界熱流束q<sub>c</sub>について,理論式をベースにしながら, 蒸気と液体の密度の比が $\rho_V/\rho_L = 0.0005 \sim 0.4$ とい う非常に広い範囲にわたる実験データを整理して 求めた結果で

$$\frac{q_c}{\rho_L h_{fg} u_L} = K \left[ \frac{\rho_L \sigma}{(\rho_L u_L)^2 d} \right]^2$$

 $K = 0.00588 + (\rho_V / \rho_L)^{1.11}$ ここに

$$m = 0.42 (\rho_V / \rho_L)^{0.0428}$$

前に, プール沸騰の限界熱流束についてクタテラ ーゼの経験式(5章「限界熱流束の現象」の項参 照)を記しましたが、ここに記した強制流動沸騰 の式と比較し、プール沸騰(重力gに支配される) と強制流動沸騰(液体の流速 u<sub>L</sub>に支配される)と で、整理式の形がどのように変るかを見てみるの も面白いでしょう.

#### 液体に濡れにくい加熱面の場合

前に2章において, 圧力が非常に低い時の沸騰 が通常の沸騰とかなり違った様相のものになるこ とをお話ししましたが、それ以外にも、加熱面が 液体に濡れにくい場合など普通と少し様子の違う 沸騰状態がいくつかあります. 例えば最近, 表面 にテフロン加工したフライパンとか鍋(水に濡れ にくい)が家庭に出回っていますが、これに水を 入れてガスレンジにかけて沸騰させると, 普通の 沸騰とはまるで違う、ちょっと気味の悪いような 大きな気泡が加熱面上に混み合って現れることに, すでに気付いている人があるかも知れません. そ して,こうした場合,その加熱面上に生じる「強 い核沸騰」も、おおまかに言って、3章で述べた 普通の状況とはやや様子が変るのであって、なぜ なら加熱面への液体の供給や,加熱面と液体の接 触保持などがとかく難しくなるからです. そして そのため,低い熱流束で早く核沸騰の限界が来た り、また限界熱流束の値がばらつきの多いものに なったりしがちです.

(次号に続く)





熱流束による発生気泡の変化、d は加熱面の直径、

合体気泡(蒸気塊)体積の時間的変化. 離脱直前は気泡の周囲から加熱面に 液体の浸入があり、体積は急増する.

## (写真及び図は元東京大学伝熱工学研究室 横谷定雄氏 提供)

### スケートはどうして滑るのですか? Why skate so slippery?

本記事は、Torino 2006 冬季オリンピックに ちなんで、HP『化学の質問ありまへんか。』 http://www.chemistryquestion.jp/situmon/shitum on\_kurashi\_kagaku62\_ice\_skate.html から、対馬勝年 富山大学教授のご了解を得 て転載させていただきました. (編集出版部会)

#### 質問

スケートはどうして滑るのですか? 教えてください!

えり様(2005年4月)

#### 回答

ご質問は平らな氷のリンクの上で「スケートは どうして前進(滑って前進)できるのか?」を尋 ねているのか,それとも体育館やアスファルト道 路の上ではスケートを楽しめないのに「氷の上で はなぜ軽快に滑ることができるのか?」を尋ねて いるのかはっきりしません.後者の場合は「スケ ートはともかくよく滑る.なぜそんなによく滑る のですか?」という質問におきかえることにしま す.どちらも興味ある問題ですが,私の専門の後 者についてお答えします.

スケートがよく滑る原因としては歴史的にはい くつかの有力な学説が出されてきました.しかし, 現段階で私にお答えできることは,まだどの説が もっともよく当てはまるのか決着がついていない. 混沌の状態にあるということです.これでは質問 者は納得しないでしょうから,少し長くなります が以下に各学説を説明します.

いくつかの有力な学説とは以下の3つです.

対馬 勝年(富山大学) Katsutosi TUSIMA (University of Toyama) e-mail: tusima@sci.toyama-u.ac.jp

これは氷が水に浮くという特異性に注目したも のです.物質は凍ると密度が大きくなって液体の 底に沈んでいくのが普通です.氷のように凍ると 密度が小さくなり,液体に浮く物質は氷,ゲルマ ニウム,シリコン,アンチモン、ビスマス、ガリウ ムなどごく小数に限られ,大変珍しいことです. このような物質は圧力を加えると液体の存在領域 が氷点下の温度領域に広がります.氷に1気圧の 圧力を加えるごとに融点が0.0075℃ずつ下がりま す.

スケートは幅 1mm, 長さ 400mm ほどあります が,全体として前後方向にゆるく湾曲しています. ですから,スケートと氷の接触面は長さ 100mm 程度になるのが普通です. そこに体重 60kg(600N) の人がのったとすると, 圧力は 60 気圧になります. したがって、-0.45℃までは水が存在できることに なります.スケートの刃が氷の面に垂直ではなく, 傾いて滑ること、刃の底も10万分の1mm程度の 凹凸をもっていること, さらに氷の表面にも凹凸 があることを考慮すると,スケートの底とリンク の氷が密着している面積は 100mm<sup>2</sup> よりずっと小 さくなると予想されます. 仮に10分の1つまり, 10mm<sup>2</sup> であったとすると、-4.5℃まで水が存在で きることになります.この真に密着している面積 は滑走中のスケートでも,氷の上に静止している スケートでも測定することが難しく,未だ真の接 触面積が不明なのです.

したがって、氷という物質は高い圧力のもとで は、0℃以下でも氷と水が共存できる物質である. スケートでは氷の表面に高い圧力を発生できるか ら、実際に水が存在し、その水が滑りを良くして いるはずだというのが圧力融解説の主張です. 1886年にイギリスの物理学者ジョリー[1]によっ て提案されたものです.

多くの著書にこの圧力融解説がスケートの滑り 機構として紹介されてきました.

伝熱 2006年1月

さて,スケートは何度までよく滑るのでしょう か,-30℃,-25℃でも滑るのでしょうか? カナ ダや中国東北部では-25℃程度の低温でもスケー トが滑ります.低温実験室では-30℃でもスケート はよく滑ります.このことが圧力融解説が否定さ れる根本的な理由になるのです.圧力を加えるだ けでは氷は溶けませんから,氷を溶かすための熱 の供給が必要になります.秒速 10m で滑る場合, 氷がスケートに接触している時間は 1000 分の 1 秒程度です.その間に氷を溶かす熱が供給される 必要がありますが,他の反対論としては時間が短 すぎて融解は無理だろうという考えがあります.

さらに決定的な欠陥が巨大単結晶氷リンク実現 によって判明しました. つまり,氷の結晶面によ ってスケートの滑りやすさに違いのあることが判 明したのです. これこそ,圧力融解説では説明で きない新事実です.

#### ②摩擦融解説

とけ水がスケートの滑りを良くしていることは 間違いないとしても、その水は摩擦熱によって作 られるとする学説です. 1939 年英国のケンブリッ ジ大学キャベンディシュ研究所のバウデン[2] に よって提唱されました. 今日までもっとも強く支 持されてきた学説です.摩擦をすると熱が発生し ます. その熱で氷が溶けると主張するもので、ス ケートの滑りのいろいろが性質、たとえば、速度 が速いほど摩擦が小さい(よく滑る),温度が高い ほどよく滑る,熱伝導の小さいスケートほどよく 滑る, そのほか水をはじく能力の高いスケートほ どよく滑るなどの実験的裏付けのもとに主張され ました. ほとんど非の打ち所がないほど説得力の ある学説であり、圧倒的多くの学者に受け入れら れました. その後も実験や理論面でこの学説が補 強されていきました.

しかし,カナダで氷の摩擦を精力的に研究した ニーブン教授[3] は摩擦融解説に疑問を投げかけ, 水分子回転説という独自の学説を提唱しています.

私は次の③の学説を主張していますが、後世の 人が新学説を主張するには、それまでの学説の不 都合も明らかにする必要があります.私は水の発 生しないような条件下の滑りでもスケートはよく 滑るという実験結果を示すことで、バウデンらの 摩擦融解説が唯一の説明とは限らないことを主張 してきました.しかし,それでは二つの学説が並 ぶだけで説得力に欠けていました.長い苦闘の末, 遂に摩擦融解説の矛盾を見抜くことができたので す.それこそが摩擦融解説が否定される理論的根 拠となります.

摩擦融解説の矛盾を紹介しましょう.摩擦融解 説ではとけ水が潤滑剤の役割を果たして滑りを良 くすると主張します.では氷がどのようにして溶 けて水となるのでしょうか?氷に融解熱を供給 しなければとけ水は現れません.摩擦融解説では その水は摩擦熱が供給するのです.摩擦が大きい ときに氷は溶け,潤滑剤となる水が現れて滑りが 良くなります.では摩擦が極端に小さくなり,も はや摩擦熱で氷を溶かせなくなったらどうなるの でしょうか?摩擦融解説では「水がないから滑 らない」という結論になります.実際,バウデン は低速度の摩擦では発生する摩擦熱は大きくても, ゆっくり滑っているため発生する熱が伝導で摩擦 面から逃げてしまい,氷は溶けない.だから低速 度の滑りでは摩擦が大きいと主張しています.

高速度の摩擦でも,発生する摩擦熱を極端に小 さくしていけば,融解は発生せず,摩擦が大きく なる場合が現れるはずです.いいかえると,「摩擦 を小さくしていくと,摩擦が大きくなる」という のが摩擦融解説の主張です.これは明らかな内部 矛盾です.

このような単純な論理的矛盾を人類は半世紀以 上もの間(66年間)見逃してきたことになります. この矛盾は長野オリンピックの頃話題になった氷 筍リンクで立証されました. スケートと氷の間の 動摩擦係数は0.005程度と小さい(1972年の札幌冬 季オリンピックに関連した科学研究でもスケート の摩擦係数として 0.003-0.006 の値が計測されま した)のです. 普通の摩擦係数が 0.4 程度ですか ら、スケートの摩擦は極端に小さいといえます. 実際、地球上に存在する固体物質の中でもっとも 摩擦の小さい物質が氷です.氷筍リンクではリン クの氷の結晶面が氷の(0001)面に揃えられ、従来 の多結晶氷のリンクより 22%から 16%もよく滑 るリンクが実現しました.氷の結晶面による滑り の違いは摩擦融解説では説明できないのも事実で す.



図 1 氷の結晶面による摩擦の違いを示す摩擦曲線です.滑っていく氷の結晶粒が変る毎にスチールの玉の スケート(超小型スケート)の摩擦が変化することが示されています.(氷の結晶面による摩擦の異方性)



図 2 同一結晶面上で滑る方向を変えたときの摩擦曲線です.氷の(1,0,1,0)という同一面上でも滑る方向に よって摩擦が異なることが示されています.(同一氷結晶面上の滑る方位による摩擦の異方性)

③凝着説

凝着説そのものは一般の物質間の摩擦機構とし て 1930 年代に確立された学説です.それまでは摩 擦の原因は表面の凹凸のかみ合いによると考えら れていました.しかし,表面を磨いてなめらかに するほど摩擦が大きくなること,あるいは雲母の 劈開面のように分子オーダーの平滑な面の摩擦が ゼロにはならないという結果が明らかになって, 凹凸説は摩擦の本質を説明できないことが判明し, かわって凝着説が登場しました.これは表面の突 起部が接触し,接触面の大部分は隙間であるとい うことが明らかになったことに関係します.摩擦 の分野では「見かけの接触面」と「真の接触面」 を区別します.真の接触面に全荷重が集中します から,真の接触面は極めて高い圧力になります. そして,金属同士の摩擦の場合には溶接されたよ うな金属結合が瞬時に形成されます.そこを壊し て滑っていくのが摩擦です.壊れると,新しい結 合が見かけの接触面のあちこちで同時に発生する ため,すべりにはほぼ一定の力が必要になります. スケートの滑りの凝着説では氷の特性が注目されました.氷は比較的硬い物質です.-10℃では 1mm<sup>2</sup>で最大 100N の荷重に耐えます.これが真の接触面の圧力を与えます.一方,氷の剪断強さ

(横に滑らせる力で氷を壊す)は 1mm<sup>2</sup>で 1N 程 度と小さいのです.氷は大きな荷重を支える能力 があり,剪断の力には簡単に壊れて滑るという性 質があります.この氷の特性こそスケートがよく 滑る原因であるとするのが凝着説です.対馬が 1976年に提唱しました.[4,5]

単結晶氷を用いた滑りでは氷が決して溶けない と思われる低温,低速の条件下でもスケートはよ く滑りますし,氷の結晶面によって摩擦が異なり, さらに同一結晶面上でも滑る方向を変えると摩擦 が変化する結果が実験的に得られました.このよ うな単結晶氷から得られた結果は①の圧力融解説 でも,②の摩擦融解説でも,その他の学説でも説 明できないのです.凝着説だけが氷の摩擦,スケ ートの滑りに説明を与えることができます.

しかし,現段階ではスケートの滑り機構として の凝着説は国際的な学界で広く認知されているわ けではありません.そういうわけで,はじめのと ころで,スケートの滑る原因は現段階では混沌の 状態にあるという回答になったわけです.本文を 読まれた読者は混沌から抜け出すのは時間の問題 であると感じ取られたと思います.私も読者の期 待に応えるよう努力しようと思います.

### 参考文献

- Joly, J., The phenomena of skating and Professor J. Thomson's thermodynamic relation, Proc. Roy. Dublin Soc. (N.S.), Vol. 5, 453-454 (1886).
- [2] Bowden, F.P. and Hughes, T.P., The mechanism of sliding on ice and snow, Proc. Roy. Soc. London Vol. 172, No. 947, 280-298 (1939).
- [3] Niven, C.D., A proposed mechanism for ice friction, Can. J. Physics. Vol. 37, No. 3, 247-255, (1959).
- [4] 対馬勝年, 氷の摩擦機構について, 潤滑, 21巻, 5号, 287-294 (1976).
- [5] 対馬勝年,単結晶氷の摩擦(1),潤滑,22巻,8
   号,514-521 (1977).



対馬勝年 富山大学教授(理学部地球科学科) 専門:雪氷学,雪氷のトライボロジー,熱サイホ ン式発電を研究,1943年生まれ.

### 宇宙物理学と熱力学

Astrophysics and Thermodynamics

ネイチャーQ

阪上 雅昭(京都大学大学院人間・環境学研究科) Masa-aki SAKAGAMI (Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University) e-mail: sakagami@phys.h.kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

ラバールノズルを用いた流体でのブラックホー ルのシミュレーション実験[1]を共同で行ってい る縁で,編集出版部会長の吉田英生教授(京都大 学)から宇宙と熱力学の関わりについての記事の 依頼を頂いた.

宇宙では種々のドラマチックな現象が起こって いる.例えば,重い星の生涯の最後に起こる超新 星爆発ではマッハ数が 10,000 を超える衝撃波が 宇宙空間を伝搬し,中心には密度が10<sup>15</sup>g/cm<sup>3</sup> に もなる中性子星が形成される.これらの現象が私 たちと無縁かというと決してそうではない.銀河 系ではおよそ100年に一度超新星爆発が起こり, 太陽系も含めて銀河系の全ての場所が衝撃波の通 過を経験していると言われている.

#### 2. 星の物理と熱力学

宇宙物理学は恒星の研究から始まったといって 過言ではない.日本でこの分野の研究が発展した 経緯については日本物理学会誌の50周年記念号 に詳しく述べられている[2].まず,恒星の代表で ある太陽の輻射量という簡単な話からはじめよう. 太陽から地球に降り注ぐエネルギーフラックスは いわゆる太陽定数,約2 cal/(cm<sup>2</sup>min) (1.4 kW/m<sup>2</sup>) で与えられる.これと太陽と地球の平均距離 1.5×10<sup>11</sup>m (光で 500 s)から太陽が単位時間に放 射するエネルギー(輻射量) は

$$L \approx 4 \times 10^{26} \text{ W} \tag{1}$$

と求められる.ご存知のように恒星のエネルギー は中心部での核融合反応で供給されている.従っ て質量とエネルギーの同等性 $E = mc^2$ を用いると, 太陽では1秒間に $4 \times 10^9$ kgの質量が消費されて いることがわかる.太陽の質量は $2 \times 10^{30}$ kgである から,これを1秒あたりの消費量で割ると太陽の 寿命が計算できそうである.しかし,その値は実 際の寿命より3桁ほど大きくなってしまう.4個 の水素からヘリウムをつくる際の質量欠損が 0.7%であること,中心部の約10%の水素を消費すると星はその生涯を終えることを考慮すると約100億年という正しい値が導出できる.

先に計算したように太陽の輻射量(1)は膨大で あり,エネルギー源としての核融合の可能性を表 しているように見える.本当にそうだろうか.そ こで,この値を太陽の質量で割ってみることにし よう.すると1kg あたりの輻射量は2×10<sup>-4</sup> W/kg とさほど大きくない.比較のために人間を考えて みよう.1日の基礎代謝量は約2000 kcal なので 人間は約100 W の熱源である.体重を50 kg とす ると1kg あたりの輻射量は2 W/kg となり,何と 人間の方が4桁大きいのである.単位質量あたり の輻射量での比較という方法には異論があるかも しれないが,エネルギー源としての核融合の可能 性に疑問を投げかける値だと感じさせられる.

さらに詳しく恒星の構造や進化を議論するため には、内部での輻射や対流による熱輸送、すなわ ち伝熱の問題を扱わなければならない.具体的に は、重力と圧力勾配のバランスを表す静水圧平衡、 中心での核融合反応によるエネルギー生成、そし て輻射と対流による熱輸送を同時に数値的に解い ている、しかし、ここではもっと定性的な議論を 紹介することにしよう.

太陽は、白色矮星としてその生涯を終えること が知られている。白色矮星の中心ではもはや核融 合反応は起こっておらず、電子の縮退圧で自分自 身の重力を支えている。縮退圧について正しく理 解するためにはフェルミ統計についての知識が必 要であるが、ここでは結果として圧力 p と密度 $\rho$ の間にいわゆる断熱変化の関係

$$p \propto \rho^{\gamma}$$
 (2)

が得られることだけを用いて議論を進める[3-5]. 今後この状態方程式をポリトロープ関係とよぶこ とにする. γは断熱指数(比熱比)で電子ガスの 場合は 5/3 である.しかし星の質量が大きくなる と、中心付近での電子の平均エネルギーが電子の 静止エネルギー  $m_ec^2$ を超える. これを宇宙物理 の分野では電子ガスが相対論的状態になったとい う. この時,電子ガスの性質は光子ガスに近づき  $\gamma = 4/3$  になることが知られている[3,4]. この断 熱指数の変化が白色矮星の安定性において非常に 重要な役割を果たす.



### 図 1

ここで図1のような半径 R,質量 Mの星を考え よう.星の構造は重力と圧力勾配のつりあい(静 水圧平衡)で決まる.つまり自己重力を圧力で支 えるわけである.本当は圧力勾配で支えるのであ るが,話を簡単にするため密度と圧力は一定とす る.この場合,静水圧平衡の条件は,白色矮星の 圧力をになう電子ガスの内部エネルギーと重力エ ネルギーの大きさが同程度であることを示す

 $pR^3 \approx \frac{GM^2}{R}$ 

という式で表すことができる. ここで Gは重力 定数である.また半径が変化しても星の質量は ら $p \propto \rho^{4/3}$ が導かれる.これは星の自己重力は密 度変化に対してγ=4/3 のガスと同じふるまいを することを示唆しており,宇宙物理の分野では"重 **力の y は 4/3**"と表現される.ただし, y=4/3のガ スが自己重力とつりあうことを意味するわけでは ない. むしろ逆である. γ=4/3のガスの場合, 何 らかの原因で収縮が始まると密度の上昇による圧 力の増加と重力の増加が同じなので収縮を食い止 めることができない. 一方,  $\gamma = 5/3$ のガスの場合, 圧力の増加の方が重力より大きいので、 収縮を食 い止めることができる.従って星が安定に存在す るためには、圧力の原因となっているガスの断熱 指数がγ>4/3 でなければならない.

ここで、白色矮星を支えている電子ガスの場合、 星の質量が大きくなると電子ガスの平均エネルギ ーが電子の静止エネルギーを超え(相対論的にな る) $\gamma = 4/3$ になったことを思いだそう.すると電 子の縮退圧で支えることができる質量に上限があ ることに気づくだろう.この臨界質量は発見者に ちなみチャンドラセカール質量(Chandrasekhar mass)と呼ばれている[6]. 臨界質量の導出は今となってはさほど難しいものではない. とはいえフェルミ統計と電子の縮退圧について多少の知識が必要なので、ここでは

$$M_{ch} \approx \left(\frac{1}{m_p}\right)^2 \left(\frac{hc}{2\pi G}\right)^{3/2} \approx 太陽質量の1.4$$
倍

という結果だけを紹介するにとどめておく[3,5]. ここで $m_p$  は陽子の質量, cは光速度そしてhはプ ランク定数[7]である.量子論(h),相対性理論(c) そして重力(G)を特徴づける基本的な物理定数の みでマクロな存在である星の質量が導かれている. 宇宙物理学の数々の成果の中でも最も美しい式で ある. Chandrasekhar のこの研究は 1930 年代とし ては画期的でありすぎたため,なかなか物理学 者・天文学者に受け入れられなかった.相対性理 論や天文学の第一人者であった Eddington 卿がロ ンドンの王立天文学協会で Chandrasekhar の研究 を批判する講演をしたことは有名である[6].

#### 3. 重力多体系の比熱

ここまで,熱力学,統計力学そして流体力学と 宇宙物理との関わりについて説明してきた.宇宙 では日常とはかけ離れたスケールでの現象が現れ る.そのおかげで物理法則の本質が浮かび上がっ て来ることが大きな魅力である.といって,そこ で登場する熱力学を始めとする物理法則が,日常 の物理現象を理解するためのものと大きく異なる のかというと必ずしもそうではない.物理量が極 限的な値を取るのであって,法則自体が大きく変 更されている訳ではない.





ところが重力が本質的な役割を果たす場合には 事情が異なってくる.ここでは球状星団という 100万個あまりの星の集団を考えよう.図2はヘ ラクレス座にあるM13という代表的な球状星団 である.この系は重力のみで相互作用する質点系 と見なせるので重力多体系とよばれている.重力 が長距離力であり、しかもクーロン力と異なりつ ねに引力であることから重力多体系の熱力学的性 質は通常のガスと大きく異なることは容易に想像 できるだろう.実は重力多体系の比熱は負なので ある.そのためこの系にはいわゆる熱平衡状態が 存在しない.

まず,負の比熱を理解するための簡単な例として 図3のような地球の周囲を回る人工衛星の等速円 運動を考えて頂きたい.



人工衛星の運動方程式は
$$m\frac{v^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}$$

で与えられる.ここで人工衛星の運動エネルギー と重力エネルギーを

$$K = \frac{m}{2}v^2, \quad V = -\frac{GMm}{R}$$

とすると(3)よりビリアル関係

$$2K + V = 0 \tag{4}$$

が得られる.ここで人工衛星の全エネルギー E = K + Vに上のビリアル関係(4)を代入し Vを 消去すると

$$K = -E \quad (E < 0) \tag{5}$$

が得られる.人工衛星は地球の重力に束縛されているので全エネルギー E は負であることに注意

して欲しい.次に,人工衛星が大気による抵抗を 受けているとしよう.この場合,全エネルギーは 保存しなくなるが,ビリアル関係(4)は近似的に成 り立つことが知られている.空気抵抗による微少 な全エネルギーの損失を Δ*E* で表すと

$$\Delta K = -\Delta E \tag{6}$$

と微少変化量についても(5)と同様の式が導かれ る.この式は大気圏に突入した人工衛星が空気抵 抗を受けることで減速ではなく逆に加速されるこ とを示している.重力系において"負の比熱"が 現れる最も簡単な例である.

もちろん1つの物体の運動なので,上の例には 温度という概念はない.摩擦により全エネルギー が減少するにもかかわらず,運動エネルギーは増 加する現象を"負の比熱"と比喩しただけである. 本当の意味での負の比熱は,星の集団である球状 星団(重力多体系)において現れる.この場合,*K* は系の全運動エネルギーである.そして*K*は球状 星団の温度に比例すると考えてよい.人工衛星の 議論ではビリアル関係が重要な役割を果たしてい たことを思い出して欲しい.重力多体系に対して もビリアル関係(4)は一般的状況で成立するこ とが知られている[8].従って,球状星団について も(6)式が成立し,比熱が負であることが示される.



### 図 4

(3)

### 4. 重力熱力学的不安定性

では球状星団はどのように進化するだろうか. 実は球状星団では自己重力が効く中心付近(コア) は負の比熱をもつのに対し,その周辺部(ハロー) は比熱が正の熱力学的に正常な系であることが知 られている(図4) そのため温度の高い中心部(コア)から温度の 低い周辺部(ハロー)に熱が流れると、中心部の 温度はますます上昇し、さらに多くの熱が流れる ことになる.これが**重力熱力学的不安定性**である. 中心部は温度上昇とともに密度も上昇する、コア 収縮という進化を示す.



### 図 5

図5はコア収縮した球状星団の観測例である.縦 軸は密度,横軸は中心からの距離を対数目盛でプ ロットしたものである.中心に近づくほどべキ的 に密度を大きくなっている.通常の系であれば温 度差が生じれば熱が流れ温度差をならし温度が一 様な,いわゆる熱平衡に最終的に落ち着く.一方, 球状星団では比熱が負の中心部で温度上昇と収縮 が続き,系は熱平衡とは全く異なるコア・ハロー 構造という状態へ進化するのである.このように 重力が本質的な役割を果たす系では,熱平衡とい う熱力学での最も基本的な概念すら変わってしま うのである.

熱力学第2法則が気になる方も多いだろう.自己 重力系だからといって第2法則が破れているわけ ではない. コア・ハロー構造が成長する過程でエ ントロピーはつねに増加している. 比熱が正の通 常の系であれば温度が一様な熱平衡状態がエント ロピーの極大であった. ところが重力多体系のよ うな比熱が負の系ではエントロピー極大状態が存 在しないのである. コアからハローへ熱を流すこ とでコア収縮が進み,系はよりエントロピーの大 きな状態に進化してゆく. 余談であるが,熱力学 第2法則に関連して**"宇宙の熱死"**が議論される ことがよくある. 温度差があると熱が流れ,宇宙 はやがていたるところ温度が一定の熱平衡状態に 陥ってしまう.それはもはや構造も進化もない"熱 死"の状態である,という考え方である.しかし, そのような心配をする必要はない.宇宙での諸現 象では球状星団と同様に重力が本質的な役割を果 たしている.従って,構造を造りながら宇宙のエ ントロピーは際限なく増加していくのである.

話を元に戻そう. 重力熱力学的不安定性による コア収縮はいつまでも続き球状星団の中心部の密 度はやがて発散するのだろうか. 図5ではコア収 縮した球状星団の密度分布を紹介したが、実はコ ア収縮を示さない球状星団も数多く観測されてい る. 中心部が高密度になると連星が形成されるこ とが重要である. 連星の傍を第3の星が通過する としよう. そのとき連星はより強く結合し重力ポ テンシャルの深い状態に移行し、余ったエネルギ ーを第3の星に与える.このメカニズムにより連 星は熱源としてふるまうのである. 球状星団の中 心部は比熱が負であったことを思い出そう. その ため連星から注入された熱によって中心部の温度 は下がり、コアの収縮は止められる. このときコ ア近傍では緩やかではあるが中心ほど温度が低い という逆の温度勾配が形成されている. そのため 周辺部から中心に向かって熱が流れコアが膨張す るという逆向きの重力熱力学的不安定性が進行す る(重力熱力学的膨張).

上の逆向きの温度勾配は中心付近に限定されて いた.また中心にあった連星も、第3の星にエネ ルギーを与えたときの反作用でやがてコアから飛 び出していく. こうして重力熱力学的膨張は終わ りを告げる.そしてコアからハローへ熱が流れ, コアが収縮する重力熱力学的不安定性が再び始ま るのである.このようにして球状星団はコアの収 縮と膨張を繰り返していると考えられている. 図 6は球状星団の進化をN体数値シミュレーション で調べた結果である.縦軸は中心密度(対数目盛) である. 粒子数Nは 2000 から 32000 と現実の球 状星団に比べるとかなり少ないが、熱力学的不安 定性によりコアが振動することを見事に示してい る. ただし振動の時間スケールは数10億年に相 当するため, 球状星団で実際にこの振動を観測す ることはできない.しかし,先に述べたように図 5のようなコア収縮した球状星団とコア収縮して いない球状星団が両方観測されることはコアの振 動の間接的な証拠だと考えられている.





### 5. まとめと最近の話題

こまで述べてきたように,宇宙は日常とはか け離れた現象を私たちに垣間見せてくれる. 実験 室では実現できない極限的な状況を準備し、さま ざまな物理法則の本質を見せてくれる.しかし, 球状星団のような重力が本質的な役割を果たす系 では、スケールがかけ離れているだけでなく、熱 力学のような物理の基本的枠組みに対してその見 直しをせまるのである.通常の系であれば温度差 があると熱を流し温度が一様な熱平衡状態に系は 進化する.従って何らかの構造は境界条件等の外 的要因により造らなくてはならない. 一方, 負の 比熱をもつ重力系では、外的要因に頼らずに内部 にコア・ハロー構造を形成することができる. こ の現象は、ハローというエネルギーやエントロピ ーの捨て場を系の内部にみずから用意することで 中心部のコアが進化していくと解釈できる. さら に, 連星系のような熱源を自発的に造ることも通 常の系では例のない興味深い性質である.

このように球状星団に代表される重力多体系は, 比熱が負であるため,その進化は本質的に非定常 非平衡である.そのため定性的な理解はここまで 説明してきた重力熱力学的不安定性で理解できる が,定量的な議論については数値シミュレーショ ンしか有効な方法が無いと考えられてきた.しか し最近,筆者は共同研究者とTsallis統計とよばれ る非加法的エントロピーを用いた枠組みが重力多 体系の準定常状態の進化を記述するのに有効であ る可能性を示している.この話題については私た ちのレビュー[9]をご覧いただきたい.

### 参考文献

- M. Sakagami, H. Yoshida, K. Takano, W. Kitazato, K. Kanamaru, M. Saito, H. Iwai and K. Takeishi, Black Hole and Hawking Radiation in Laval Nozzle, Extended Abstract, pp. 218-219, CD-ROM, 3-b-11, ExHFT-6 (2005).
- [2] 天体物理理論--京大天体核研究室の足跡から --http://www.soc.nii.ac.jp/jps/jps/butsuri/50th/nofr ame/50(3)/50th-p172.html
- [3] 佐藤文隆, 岩波講座現代の物理学111「宇宙 物理」岩波書店(1995), 1-3節
- [4] ランダウ, リフシッツ, 統計物理学(上)岩 波書店(1980), §58,§61
- [5] ランダウ, リフシッツ, 統計物理学(下)岩 波書店(1980), §106-§107
- [6] K・ソーン,ブラックホールと時空の歪み,白 揚社(1997) 第4章
- [7] 円山重直, 伝熱, Vol.44 No.186 (2005) p44
- [8] J. Binney and S. Tremaine, *Galactic Dynamics*, Princeton Univ. Press (1985)
- [9] M. Sakagami and A. Taruya, Continuum Mechanics and Thermodynamics 16 (2004) p.279



#### 阪上 雅昭

1957年大阪市生まれ.大阪大学理学部卒業, 大阪大学大学院理学研究科修了(理学博士).福井 大学教育学部助教授を経て,現在,京都大学大学 院人間・環境学研究科教授.専門は物理学.なか でも重力,相対性理論,宇宙物理,非線形物理な どの分野で研究をおこなっている.

プロジェクトQ

### 多段蒸気インジェクタの開発と伝熱

Development of Multi-Stage Steam Injectors with Innovative Heat-Transfer

奈良林 直(北大), 森 治嗣(東電) Tadashi NARABAYASHI (Hokkaido University), Michitsugu MORI (TEPCO)

### 1. はじめに

蒸気インジェクタ(SI)は蒸気と水で作動する噴 流ジェットポンプである. 蒸気の超音速噴流が気 相中に噴射された水噴流の表面に凝縮する際に水 噴流を加速する. 古くは蒸気機関車のボイラーへ の給水ポンプとして用いられていた. 蒸気インジ ェクタは噴流ポンプとしての作用のほか,優れた 直接接触式熱交換器としての用途もある. 著者ら は、このタイプの蒸気インジェクタのポンプ作用 や伝熱性能向上のため,汎用流動解析コードに分 離二相流モデルを組み込み、レーザードップラー 流速計(LDV)や極細線弦形熱電対を用いた可視化 基礎実験データを用いて検証と解析モデルの改良 を実施した結果,蒸気インジェクタ内の超音速噴 流や水噴流表面への蒸気凝縮を解析可能とした [1]-[4]. この流動解析コードを用いて蒸気インジ ェクタのノズル改良を進め, 縮尺モデル試験によ る検証を繰り返した結果,沸騰水形原子炉(BWR) の給水加熱器と同等の低圧蒸気で蒸気インジェク タを直接凝縮熱交換器として作動させ、従来の低 圧給水加熱器全12基を削除し、給水系の物量を大 幅に削減すると同時に現行の ABWR を凌ぐ熱効 率を得る見通しを得た.この技術開発は、日本原 子力学会と日本機械学会の技術賞を受賞したほか, 経済産業省の「革新的実用原子力技術開発公募事 業」の一環として実用化を目指した改良研究を実 施している[7][8]. 一連の開発研究は平成元年ころ から開始したが、しかしながら米国原子力企業で の開発試験の失敗や単純化 BWR 開発の中断等の 余波を受け、逆風に耐えながら開発研究を進めた 時期もあった.長期に亘った開発期間やドラステ ィックなシステムへのインパクトから開発中止の 要請があった一方、夢のある技術として開発継続 を支持されたこともあった.一方で、内部の伝熱 流動現象としては、超音速噴流や実在する凝縮熱 伝達として熱力学的分子運動論の上限である理想

凝縮熱伝達に迫る熱流束が得られており,非常に 興味深いこの現象究明への興味と実用化への執念 に対する共同研究者同志の情熱が,長年にわたる 研究の原動力となっている.人指し指1本に2 MW もの熱エネルギーを有する蒸気が,超音速で 凝縮する現象は実に興味深いものがある.

### 2.超高性能直接接触熱交換器-蒸気インジェク タの伝熱現象とその応用

### 2.1 蒸気インジェクタの作動原理

蒸気インジェクタ(SI)の作動原理を Fig.1 に示 す.常温水を軸中心に配した水ノズルから噴射し, 蒸気を水ノズル外側と混合ノズル入口とで形成さ れる環状の蒸気ノズルに供給すると, Fig.2 に示す 通り,可視化窓から器内の蒸気の流速を LDV で 測定した結果,混合ノズル内で蒸気は超音速流と なり,水噴流を加速してスロートに高速水流を作 ることを確認した.スロート以降では蒸気の凝縮 は終わり、流れは水の単相流となりディフューザ で減速され、ベルヌーイの定理により高い圧力に 昇圧される.一方,蒸気インジェクタを直接凝縮 熱交換器として用いる場合、蒸気インジェクタ内 の器内圧を下げて蒸気の超音速噴流を形成すると 蒸気の温度が低下し,熱交換器としての性能が低 下する.従って,蒸気インジェクタの蒸気ノズル 入口面積を十分に大きくして, 蒸気噴流を亜音速 流とし, 蒸気圧力を上げて, 断熱膨張に伴う蒸気 温度の低下を防止する必要がある.



Fig.1: Principle of a steam injector



Fig.2: A water jet in a visualized steam injector

First Stage Second Stage Third Stage Final Stage with Jet deaerator



Fig.3: Four-stage steam injector system



Fig.4: Balance of Plant (BOP) sytem of a current ABWR



Fig.5: Low-pressure fedd water heaters

### 2.2 世界初の試み-簡素化給水加熱系への多段 SI の適用

簡素化給水系に用いる蒸気インジェクタ(SI)は、
 Fig.3 に示すように蒸気インジェクタを3段直列
 に接続し、4段目にジェット脱気器を接続して
 Fig.4 に示す現行の ABWR の給水加熱器(全 12
 基)と同等の給水加熱機能を実現させるものであ

る[5]. Fig.4 から低圧給水加熱器の部分を抽出し たものが Fig.5 で, 4段それぞれに 0.05MPa, 0.1MPa, 0.21MPa, 0.4MPa のタービン抽気蒸気を 供給する.多段蒸気インジェクタでは、Fig.6 に示 す通り、各復水器に2基ずつ並列とし、3 系列の 復水器では計6基の SI を設置する. Fig.7 は現行 ABWR の復水器上部にネックヒータとして設置 された低圧給水加熱器である. Fig.8 はこれを多段 蒸気インジェクタに置き換えた場合の3次元 CAD 図である. 大型の給水加熱器が削除され, 小 口径の蒸気インジェクタに置き換えることにより, 復水器の高さ、つまりタービン主機の据付高さ(即 ち, タービン建屋の高さ)が 3.5m 低減できると 共に, Fig.9 に示す通り, 現在の低圧給水加熱系の 物量(体積および質量)が約 1/3 に削減できる [8][9].


Fig.6: Simplified feedwater heater system ushing multi-stage SI and a jet deaerater



Fig.7: Turbine condenser with necked low-pressure heaters



Fig.8 Multi-stage SI in a uppper part of a turbine condenser



Fig.9 Simplification of BOP systen using the muliti-stage SI.

# 3. 流動解析による多段 SI 給水加熱器の性能向上3.1 分離二相流モデル

蒸気インジェクタ(SI)内の高速二相流現象を解 析するため、蒸気、水のそれぞれに対して質量・ 運動量・エネルギーの基礎方程式を用意する分離 二相流モデルとし、気液界面に対して(1)式の理想 凝縮熱伝達率と(2)式の質量輸送と(3)式のエネル ギー輸送を考慮した. K-εの乱流モデルは、流動 解析コードの制約から液相にのみ適用した.

$$H_{\rm ci} = C_{\rm c} \sqrt{2} h_{\rm lg}^{3/2} / [\{v_g(v_g v_l)\} \{T_{sat}(T_{sat} T_{li})\}]^{1/2}$$
(1)

$$\dot{m}gl = H_{\rm ci}(T_s - T_{li})A_i/h_{lg} \tag{2}$$

$$div(\rho_l \vec{U} l h_l - \Gamma h_l \operatorname{grad} h_l) = \dot{m}_{gl} h_g \qquad (3)$$

気液界面の界面速度は次式のように界面をはさむ 気相と液相の速度に気液の剪断応力の重みを付け て算出した.

$$W_{li} = (\tau_{g}W_{g} + \tau_{g}W_{l}) / (\tau_{g} + \tau_{l})$$
(4)

 $\begin{array}{l} z \in \mathcal{C}, \\ \tau_g = (v_g + v_{gT}) / \Delta r_g \text{ and } \tau_l = (v_l + v_{lT}) / \Delta r_l \quad (5) \end{array}$ 

そこで気液界面は2次元軸対称の円柱状のメッシュの半径を moving mesh の機能を用いて気液界 面の圧力が連続となるように収束させた.このよ うに明確な気液界面が存在するため,気相および 液相は単相流として取り扱うことができ,気液界 面は蒸気に対しては凝縮に伴う流出境界,液相に とっては流入境界として(1)~(5)式を適用し,解析 を高速化した.



Fig.11: Improvement of temperature distribution by changing the shape of mix-nozzle diameter at the 1st stage steam injector[18]

## 3.2 簡素化給水系用多段 SI の流動解析

簡素化給水系では蒸気インジェクタ(SI)を直列3段 に接続し、4段目にジェット脱気器を接続する、ジェッ ト脱気器には第3段 SI の吐出温水がノズルから噴射 され,液滴化して飽和温度まで加熱されると共に,蒸 気との相対速度による液滴表面と内部との対流により 高性能脱気される.従って第4段の加熱性能は現行 ABWR の給水加熱器よりも良くなる. 従って, 簡素化 給水系の性能は、第1段から第3段までの多段 SI の 加熱性能と第3段 SI 吐出ノズルでの圧力がジェット脱 気器に十分な噴射をできる吐出を有しているかが判 定基準となる. そこで流動解析は Fig.10の CAD モデ ルに示すように第1段から第3段までの多段蒸気イン ジェクタをモデル化した. Fig.11に解析結果の温度 分布のカラーコンターを示す. 同図(a)は改良前, 同 図(b)は縮尺モデル試験での検証など[6]-[8]のステッ プを踏んで、第1段のノズル形状を改良した結果であ る. ノズル形状の改良を第1段に重点を押したのは第 1段の抽気蒸気圧力が 0.05MPa と最も低く, 第1段で この圧力の蒸気をなるべく多く使って加熱することが プラントの熱効率上,有利であるためである.ノズル 形状の改良は、ベルマウス部を軸方向に延長して水 噴流の加熱長さを長くすると共に, 第1段混合ノズル の下流側の内径を太くして蒸気流速を下げた、2点 である. Fig.12 に示す通り, 第1段の混合ノズル形状 を改良することにより, 第1段の加熱性能が向上し, 第1段の加熱性能は現行 ABWR の低圧給水加熱器 出口温度とほぼ互角になった.第4段の加熱性能は ジェット脱気器の方が高いので,第1段が互角に なることにより,給水加熱性能が現行 ABWR をし のぐことになる.

# 4. 結 言

実寸大の大型実証試験に代えて, モデル試験と 流動解析を併用した開発を進めている. 逆風に耐 えながら長年の粘り強い開発の成果は、大型の給 水加熱器が削除され小口径の蒸気インジェクタに 置き換えることにより、復水器の高さ、つまりタ ービン主機の据付高さ(即ち、タービン建屋の高 さ)が 3.5m 低減でき、現在の低圧給水加熱系の 物量(体積および質量)が約1/3に削減できるこ とを示した.将来大幅なコスト低減に寄与するこ とが期待される. さらに蒸気インジェクタ本体に ついては、第1段の混合ノズル形状を改良することに より第1段の加熱性能が向上し,第1段の加熱性能は 現行ABWRの低圧給水加熱器出口温度とほぼ互角 になることを示した. 第4段の加熱性能はジェット脱気 器の方が高いので、第1段が互角になることにより、 給水加熱性能が現行 ABWR を凌ぐことが解析的に 示され, プラント効率の改善が見込まれる. 今後は, 矢部らによって開発された気液の自由界面の取り扱 いが容易でかつ密度の異なる蒸気と水を同時に解析 することができる CIP 法[10]も, ノズル形状の改良に 用いる予定である.



(b) An improved shape of multi-stage SI

Fig.12: Improved result of water heat-up along the axis

# 参考文献

- Narabayashi, T., et.al., "Study on two-phase flow dynamics in steam injectors", Nuclear Engineering Design, 175, (1997), 147-156.
- [2] Narabayashi, T., et.al., "Study on two-phase flow dynamics in steam injectors II.High-pressure tests using scale-models", Nuclear Engineering Design, 200, (2000), pp.261-271.
- [3] Iwaki, C. et al., "Study of Heat and Momentum Transfer Mechanisms in Steam Injectors for Next-Generation Reactors, Proc. Winter Ann. Mtg. ASME (ME-94), Chicago USA, HTD-Vol.294,(1994), pp.19-30.
- [4] 奈良林 直,森 治嗣,岩城智香子,大森修一, 「蒸気インジェクタの気液界面熱輸送に関する 研究(コンパクト給水加熱器の開発)」,混相流 学会 OMF01-Fukushima, (2001).
- [5] 奈良林 直ほか,「蒸気インジェクタ加熱簡素

化給水系の開発 (5)流動解析による熱水力性能の向上」原子力学会 秋の大会 (2001).

- [6] Mori, M., Ohmori, S., and Narabayashi, T., "Development of Simplified Steam Injector Feedwater Heater System- Large Scale Model Tests and Design Improvement by CFD-", ICONE11-36488 (2003).
- [7] Mori, et al., Research and Development Program of Innovative Simplified and Severe- Accident-Free BWR by High-Performance Steam Injector System, ICAPP'03, Cordoba, Spain (2003).
- [8] 大森修一,奈良林 直,森 治嗣,「高性能蒸気インジェクタによる革新的簡素化原子力発電プラントの技術開発」,日本機械学会年次大会,2101 (2003).
- [9] Narabayashi, T., et.al., "Development of Technologies on Innovative Simplified Nuicler Power Plant Using High-Efficiency Steam Injectors(3) Development of Multi-Stage Steam Injector for Feedwater Heaters Using Two-Phase Flow Analysis, ICONE13-50780, (2005, Beijin, China).
- [10] 矢部 孝, 内海隆行, 尾形陽一著, 「CIP 法 原 子から宇宙までを解くマルチスケール解法」, 森 北出版 (2003)

## Nomenclature

С	shear coefficient of interface between
	gas liquid phases
Н	Heat-transfer Coefficient
h	Specific enthalpy (kJ/(kg s))
т	Mass flow rate (kg/s)
U, V, W	Velocity (m/s)

## (Greek letters)

- $\rho$  density (kg/m<sup>3</sup>)
- *r* radial ccordinate in cylindrical geometry (m)
- $\tau$  Shear stress (MPa)

#### (Subscripts)

g	gass
i	Interface between phases
l	liquid
sat	saturated

佐賀大学の門出政則教授と光武雄一助教授が ASME 2005 Best Paper Award を受賞 Prof. Masanori Monde and Prof. Yuichi Mitsutake of Saga University Received ASME 2005 Best Paper Award

2005年11月5日~11日にわたりOrland (アメリ カ・フロリダ州)のWalt Disney World Swan & Dolphin Hotel で 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition ( $\mathcal{T}$ メリカ機械学会の年次大会)開催されました. そ のBanquet Program (11月10日) において, 2005年 のHeat Transfer DivisionのBest Paper Award (伝熱部 門の最優秀論文賞)が、佐賀大学の門出政則先生 と光武雄一先生に贈られました. この賞はASME のJournal of Heat Transferの掲載論文から選ばれる 賞ですが、日本からの受賞は10年ぶり(前回受賞 者は, 故土方邦夫先生のグループ) で, 日本の伝 熱界にとっても大変名誉な受賞です. 両先生に心 よりお祝い申し上げるとともに、伝熱編集出版部 会の一委員として簡単な報告記事を執筆させて頂 きます.

Best Paper Award 受賞の対象となった論文は, ASME Journal of Heat Transfer, Vol.125, 2003, pp.1038-1045 に掲載されている" Ultra High Critical Heat Flux During Forced Flow Boiling Heat Transfer with an Impinging Jet"です. 今さら私が 申し上げるまでもなく皆様よくご存じのことです が,門出・光武両先生の佐賀大学熱工学研究室で は数十年にわたりずっと「限界熱流束」という大 きな研究テーマに取り組んでこられましたが,上 記論文はその内の1成果であり,世界最高の冷却 限界に挑戦するという壮大なテーマです. 門出先 生のコメントでは,「残念ながら世界最高の記録

(276MW/m<sup>2</sup>) には及ばなかった」そうですが、 衝突噴流沸騰系で分子運動論から決定される最高 限界熱流束の約50%近くまで漸近できたと同時に その限界熱流束を214MW/m<sup>2</sup>まで改善されました. また、この限界熱流束の範囲まで、門出先生らが 提案している予測式が適用できることを実験的に 検証した点が高く評価されたのではないでしょう か.私も両先生を目標として、今後の更なる精進 が必要だと痛感致しました.両先生の今後の益々 のご活躍をお祈り致します.

永井 二郎 (福井大学)
Niro NAGAI (University of Fukui)
e-mail: nagai@mech.fukui-u.ac.jp



門出政則佐賀大学教授 光武雄一佐賀大学助教授



ASME Best Paper Award の表彰状

# ノイズ

Noize

# Hea<sup>*r*</sup>t Transfer

廣田 真史(名古屋大学) Masafumi HIROTA (Nagoya University) e-mail: hirota@mech.nagoya-u.ac.jp

実験室の入っている建物のすぐ裏手に新しい施 設が建設されることになり、昨年の10月頃から 工事が始まっています.古い建物を取り壊してか ら基礎工事が始まったのですが、杭打ち工事に入 る頃から一部の測定器の信号にノイズが乗るよう になりました.これまでに経験したことのない執 拗なノイズで、大学院の授業中にこのことをふと 漏らすと、意外なことに工事現場からかなり離れ た研究室でも時期を等しくしてノイズが増えてし まい困っているとのこと.原因の推測で一通り盛 り上がったのですが、出てきた意見を列挙してみ ると、

- ・工事に使う機械のモーターが原因.
- ・モーターよりも溶接機の方が悪い.
- ・電気の使いすぎで電圧が不安定になった.
- ・杭打ちの影響でアースがおかしくなった.
- ・引っこ抜かれた木の祟りかも知れない.
- ・そう言えば清めの塩が置かれていた...

と、まあ最後はお決まりの所(?)へ落ち着きま したが、所詮は素人集団の悲しさ、結局原因は不 明のままですが、それでも研究室毎に様々なノイ ズ対策のノウハウが伝わっているらしく、聞いて いてなかなか興味深いものがありました.「研究 室の記憶」というやつですね.

学生の頃、乱流伝熱の実験を始めたときにも、 やはり測定器からの信号にノイズが乗り苦しんだ ことがあります.この時は試行錯誤を繰り返して どうにか解決(多分)しましたが、上手く行かな い時には「乱流なんて本当は存在しなくてノイズ を見ているだけなんじゃないの?」、「スペクトル は単に電子回路の特性を表しているのでは?」、

「本当はみんな怪しいと思っているけど言い出せ ないのかな?」などと八つ当たり気味に考えてい ました.オーディオアンプの設計者が、ノイズを 下げるために部品の配置にいかに気を使うかを語 っていた記事を思い出し、コンパクトにまとまっ た測定器に何となく不信の目を向けたことを覚え ています.考えてみれば,乱流はそもそも可視化 で発見されたわけですし,-5/3 乗則は理論的に導 かれた法則なので,これは全くの妄想だったわけ ですが,今回のノイズ騒動であの時感じた一種の 危うさを思い出しました.

熱流動の計測では、デジタル技術の進歩に伴い イメージングを利用した手法が主流になりつつあ りますが、乱流のように時間・空間分解能の高い 連続波形を取りたい場合には、旧来のアナログ機 器が性能的に優れているように思います.件(く だん)の測定器(市販のアナログ温度計)はその 後も使い続けていますが、諸事情から一時期自作 を試みたことがありました. 元々手作りに近い製 品で、原理的にはさほど難しくなく、部品なども 開発当時に比べれば進んでいると思ったため、す ぐに信号が取れるものと期待しましたが、これが 全く上手く行かない. 色々原因を調べてみると, どうやら使われている電子部品一つ一つの質の違 いが性能の差になって現れているらしい.事情通 によると、この測定器に使われた部品はどれも選 りすぐりの高品質品で、こうした部品は現在では もう生産されておらず、入手は困難とのことでし た. 何の変哲もない箱のような装置ですが, 設計 者の魂をそこに見るようで、昔疑ったことも忘れ て古い友人のように感じた次第です. それにして も、一旦途切れてしまったアナログ技術は多分二 度と復活することは無く, 今は当たり前に観察し ている波形もそのうち見られなくなるかも知れな いと思うと、何か喉がひりつくような焦りを感じ ます.

冒頭のノイズですが、なかなか消すことが出来 ません、本当に工事が終わると消えるのか、ある いは悩みの種がまた一つ増えてしまうのか、期待 と不安が半々です.工事は少し遅れ気味ながらも、 着々と進んでいます.

## 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	問合先	掲載号
2	2006年					
5月	31 日(水)	第43回日本伝熱シンポジウム	'06.1.20	'06.3.13	第43回日本伝熱シンポジウム実行委員会	11月号
	$\sim$	名古屋国際会議場			名古屋工業大学 しくみ領域内	1月号
	6月2日				FAX: 052-735-5343,	
	(金)				E-mail: nhts43@thermo.mech.nitech.ac.jp	
					HP: http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/	

# 本会共催, 協賛, 後援行事

	開催日	行事名(開催地,開催国)	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2006年						
1月	26 日 (木) ~ 27 日 (金)	2005 年度ガスタービンセミナー 「ガスタービンの最新技術動向と将来展望」			〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13 第3 工新ビル4階 (社) ガスタービン学会	
					TEL:03-3365-0095 FAX:03-3365-0387 E-mail:gtsj@pluto.dti.ne.jp	
2月	2日(木) ~ 3日(金)	12th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" (Mate 2006)	'05.9.1	'05.11.18	〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間町 1-11 (社)溶接学会 Mate 2006 事務局 TEL:06-6879-4166 FAX:06-6879-4166 E-mail:mate@casi.osaka-u.ac.jp	
3月	7日(火) ~ 8日(水)	第6回 GSC シンボジウム(学術総合センター・一橋 記念講堂)(東京)			<ul> <li>〒101-0051 東京都千代田区神田神保町</li> <li>1-3-5</li> <li>(財)化学技術戦略推進機構内GSCネットワーク事務局担当 松山一夫</li> <li>TEL:03-5282-7270</li> <li>E-mail:matsuyama@jcii.or.jp</li> </ul>	
3月	13日(月) ~ 15日(水)	日本実験力学会 2006 年度年次講演会(中部大学・愛 知県春日井市)	`05.12.1	'06.1.13	〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200 中部大学工学部機械工学科 加藤 章 TEL:0568-51-9385 FAX:0568-51-1194 E-mail:katoa@isc.chubu.ac.jp	
4月	20日(木) ~ 21日(金)	ここは串本,むかいは大島セミナー(No.06-12日本 機械学会熱工学部門企画セミナー)(国民宿舎「あ らふね」和歌山県)			神戸大学 工学部 浅野等 (熱工学部門講 習会委員会・幹事) TEL/FAX 078-803-6122 E-mail:asano@mech.kobe-u.ac.jp	
5月	25日(木) ~ 26日(金)	Second International Sympojium on Standard Materials and Metrology for Nanotechnology (SMAM-2)		'06.3.31	〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 産総研 中央第5 SMAM2-EC@m.aist.go.jp T.Fujimoto@aist.go.jp	
6月	11日(日) ~ 15(木)	Second International Conference on Transport Phenomena in Micro and Nanodevices Il Ciocco Hotel and Conference Center Barga, Italy	'05.11.30		Co-Chair: Professor Nobuhide Kasagi Department of Mechanical Engineering The University of Tokyo Hongo, Tokyo 113-8656 E-Mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp	
8月	13日(日) ~ 18日(金)	The International Heat Transfer Conference IHTC-13		'05.7.31	IHTC-13 Conference Managers GPO Box 128 SYDNEY NSW 2001 AUSTRALIA Phone: + 61 2 9265 0700 Fax: +61 2 9267 5443 Email: ihtc-13@tourhosts.com.au http://ihtc-13.mech.unsw.edu.au/	
8月	27日(日) ~ 9月1日 (金)	10th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-2006)	,06.2.28	,05.12.15	〒554-0022 大阪市此花区春日出中 2-14-9 日本液体微粒化学会 事務局 ㈱学術出版印刷気付 事務局長 近藤 健 Tel:06-6466-1588 Fax:06-6463-2522 E-mail:info@ilass-japan.gr.jp	
9月	4日(月) ~ 8日(金)	The Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-17)		'06.03.18	〒939-0398 富山県射水郡小杉黒河 5180 富山県立大学工学部 機械システム工学科 教授 石塚 勝 Tel:0766-56-7500 Fax:0766-56-6131 e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp	

9月	25日(月)	5th International Symposium on Turbulence, Heat and	'06.1.31	'06.5.31	Professor Yasutaka Nagano, Co-Chairman	11月号
	$\sim$	Mass Transfer (Dubrovnik, Croatia)			Department of Mechanical Engineering	
	29日(金)				Nagoya Institute of Technology	
					Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555	
					E-mail: thmt-06@heat.mech.nitech.ac.jp	
					URL: http://www.ichmt.org/Thmt-06	
10月	15日(日)	International Workshop on Process Intensification		'06.04.15	〒657-8501	
	$\sim$	(IWPI2006)(神戸大学百年記念会館、神戸市)			神戸市灘区六甲台町 1-1	
	18日(水)				神戸大学大学院自然科学研究科	
					鈴木 洋	
					Tel / Fax:078-803-6490	
					e-mail: hero@kobe-u.ac.jp	

# 第43回日本伝熱シンポジウム参加申込方法

- ・開催日 平成18年5月31日(水)~6月2日(金)
- ・会場
   名古屋国際会議場(〒456-0036 名古屋市熱田区熱田西町1番1号, Tel: 052-683-7711, http://www.u-net.city.nagoya.jp/ncc/)
- ・シンポジウム 一般(事前申込:8,000 円,会場申込:10,000 円)
   参加費 学生(事前申込:4,000 円,会場申込:5,000 円)
- ・講演論文集 伝熱学会会員:無料 (CD-ROM 版を事前に送付します. 印刷版はシンポジウム参加者 に当日手渡します.)
  - 非会員:8,000円(ただし,会場受付で日本伝熱学会に入会される場合は無料です.論 文集の託送を希望される場合は,別途送料1,000円を申し受けます.)
- ・懇親会 日時: 平成18年6月1日(木)
  - 会場: 全日空ホテルズ ホテルグランコート名古屋
     (〒460-0023 名古屋市中区金山町一丁目1番1号, Tel: 052-683-4111, http://www.grandcourt.co.jp/)
  - 参加費: 一般(事前申込:8,000円, 会場申込:10,000円, 夫婦同伴者1名無料) 学生(事前申込:4,000円, 会場申込:5,000円)
- ・参加申込方法
   原則として、本シンポジウムのホームページ(http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/) からの参加申込とします.ホームページにある参加登録様式に必要事項を入力すること で参加登録できます.実行委員会が参加申込を受理すると、登録いただいた電子メール アドレスに参加申込完了通知を送信しますので、参加受付番号と登録内容を確認のうえ メールを大切に保存ください.参加費は、下記の郵便振替口座に4月14日(金)までに送 金ください.送金にあたっては、本号に綴込みの払込取扱票の通信欄に、参加申込1件 ごとに「参加受付番号、参加者の氏名、金額」を必ず記入ください.4件を超える分の 送金については、郵便局備付の払込取扱票により上記と同じ書式で送金ください.一度 参加登録された内容は変更できません.ホームページから参加申込できない場合には、 下記事務局までお問い合わせください.
- ・参加費払込先 郵便振替口座
   口座番号:00820-1-167564
   口座名称:第43回日本伝熱シンポジウム実行委員会
- ・事前申込締切 平成 18 年 4 月 14 日 (金)
- ・宿泊・航空券 実行委員会では、宿泊、航空券等の斡旋・仲介はいたしませんので、次頁の会場への交 通案内等をご参考に各自で手配くださるようお願いします.本シンポジウムのホームペ ージには宿泊・旅行用の Web サイトを掲載しています.
- ・お問い合せ先
   〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 しくみ領域内
   第 43 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
   FAX: 052-735-5343
   E-mail: nhts43@thermo.mech.nitech.ac.jp
   URL: http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/

会場への交通案内



<sup>※</sup>名古屋国際会議場ホームページ (http://www.ncvb.or.jp/ncc/koutu/kouiki/index.html) より転載 (一部改変)

交通アクセ	ス
-------	---

名古屋駅	タクシー	名古屋駅 ───────── 名古屋国際会議場	約 20 分	約 2,000 円
<ul> <li>・東海道新幹線</li> <li>・JR線</li> </ul>	地下建	名古屋駅 ──→ 東山線「栄」 ····· 乗換 ····· 桜通線「久屋大通」 ····· 乗換 ·····	約 20 八	地下鉄
<ul><li>・名鉄線</li><li>・近鉄線</li></ul>	地下鉄	→ 名港線「日比野」 予車 → 名城線「西高蔵」 下車 → <sup>徒歩約5分</sup> 名古屋国際会議場	初 30 分	230 円
中部国際空港	名鉄線	中部国際空港 空港線快速特急 25 分 金山 地下鉄 2 分	約40公	空港線 1,140 円
(セントレア)	地下鉄	名港線「日比野」 名城線「西高蔵」 下車 → そ古屋国際会議場	小J <b>40</b> [J]	地下鉄 200 円



会場周辺のホテルなど

※名古屋国際会議場ホームページ (http://www.ncvb.or.jp/ncc/guide/shukuhaku/index.html) より転載 (一部改変)

# 第 43 回日本伝熱シンポジウム講演論文原稿の提出方法

# 論文原稿について

- ・講演論文集として、オフセット印刷版(冊子体、白黒)と CD-ROM 版を作製します.印刷版の講演論文の 長さは1題目あたり A4 サイズで2ページとします.論文の作成フォーマットは前回と同様です(2 段組× 片側 26 字×60 行).ただし、CD-ROM 版には、オフセット印刷版と同じものか、または8ページ以内のフ ルペーパーを掲載することができます(様式は印刷版と同じ.カラー使用可.ただし、ファイル容量は最 大で2 MBです.また、アニメーションを挿入することはできません). CD-ROM 版に掲載されたフルペ ーパー論文は、著者の希望により、伝熱学会論文誌 Thermal Science and Engineering (TSE) にそのまま投 稿できます.論文原稿の作成方法および TSE への投稿についての詳細は下記をご参照ください.
- ・論文原稿の投稿方法は,原則として、シンポジウムホームページのWeb入稿システムによりPDFファイル で提出する形式です.Web入稿システムで投稿できない場合は、下記の実行委員会事務局にお問い合わせ ください.なお、CD-ROM版の製作にともなって日程が厳しくなっていますので、原稿締切後に提出され た論文は講演論文集に掲載されないことがあります.原稿提出締切日には十分ご注意ください.
- ・PDF ファイルで提出できない場合には、変換作業料(1件につき 3,000円)を申し受けて、実行委員会側で 論文原稿を PDF に変換します.
- ・講演論文集の抄録を科学技術振興機構 (JST) のデータベースに入力します.入稿の際には JST データベー スへの入力もお願いします.詳細については下記をご覧ください.
- ・論文題目と著者 (連名者を含む)の変更,論文原稿の再提出は原則として認めません.著者所属の変更については,入稿用 Web ページの連絡欄に変更内容を記入ください.
- ・フォントや画像などは PDF ファイルに完全に埋め込み,どのパソコンでも同様に表示・印刷できるように PDF 変換ソフトウェアを設定ください.講演論文集掲載時の諸問題については原則として著者の責任とし ます.
- ・論文の作成および電子ファイル化(PDFへの変換)にあたっては次の解説が参考になります.

小林健一,「Microsoft Word を使った論文作成方法」,日本機械学会誌,103-979 (2000.6), pp. 396-403. 川野浩一郎・岡本孝司,「論文の電子化について(より良い PDF を作るために)」,可視化情報,20-77 (2000.4), pp. 133-138.

# JST データベース用和文抄録の提出のお願い

本シンポジウムで発表される論文の抄録は科学技術振興機構 (JST) のデータベースに収録されますので, ホームページの入稿案内にしたがって JST データベース用抄録(和文)を提出ください. 講演申込時のアブ ストラクトを変更しない場合には,改めて提出する必要はありません.変更する場合には,入稿用 Web ペー ジの該当欄に変更後の抄録を入力ください.本シンポジウムで発表された論文が速やかにかつ広く引用され ることが目的ですので,ご協力くださるようお願いします.

## 伝熱学会論文誌 "Thermal Science and Engineering" (TSE) への投稿について

本シンポジウムの講演論文のうち CD-ROM 版に掲載されたフルペーパーは、日本伝熱学会誌「伝熱」と の合本である"Thermal Science and Engineering"(以下 TSE) へそのまま投稿できます. TSE へ投稿を希望さ れる場合は、原稿提出の際に Web 入稿システムでその旨お知らせください. 投稿を希望される前に、TSE の 投稿規定をご一読願います(旧 TSE の投稿規定と基本的に同一です). 査読はシンポジウム終了後、CD-ROM 版に掲載された講演論文をもとに、TSE チーフエディターの下で行われますので、その指示に従ってくださ い. 掲載可となったとき、TSE のテンプレートを用いた最終原稿の書き直しの指示があります. その段階で、 ワープロ入力ミス等不適切なものがある場合には、編集者が著者に再度修正等の指示を行いますので、それ に従ってください. その他については,日本伝熱学会 TSE のホームページに掲載してある内容に準拠する ものとします.なお,本システムで TSE へ投稿された場合,論文受理日は伝熱シンポジウム実行委員会が論 文原稿を受け付けた日になります.また,カラー原稿の場合でも TSE 掲載時はモノクロで印刷されますが, 希望によりカラー印刷も可能です(有料).

【お問い合せ先】

 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 しくみ領域内
 第 43 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
 FAX: 052-735-5343
 E-mail: nhts43@thermo.mech.nitech.ac.jp
 URL: http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/

【論文原稿提出の締切】

平成18年3月13日(月)

# 伝熱シンポジウム講演論文の書き方

ここでは、論文原稿の書式とPDFファイル化を中心にして、講演論文の書き方を説明します.

#### 「論文原稿の長さ(従来とは異なる点)」

論文原稿の長さ(ページ数)は、印刷版では2ページ以内(モノクロ)と従来どおりですが、CD-ROM 版では8ページ以内(カラー可)まで書けるようになりました.ただし、いずれの場合でも原稿のファ イルサイズは2MB(メガバイト)に収めてください.

## 「印刷版はモノクロ, CD-ROM 版はカラー対応」

印刷版の講演論文集(冊子体)は、従来どおりモノクロで編集・印刷されます.一方、CD-ROM版では、 カラーの図および写真を使用できます.ただし、文章を色づけすることは避けてください.また、図の データ表示に多くの色を使用すると論文集では判読できない場合がありますので、線の種類や太さをう まく選択して印刷版(モノクロ)でも判読できるように図を作成ください.

#### 「文章,図・表・写真,数式などの電子化」

原稿の PDF ファイルを作成するために、文章、図・表・写真、数式など論文で使用する全ての素材を電子ファイル化して、それらをワープロソフト等でレイアウトしてください.

#### 「PDF ファイルのサイズ」

1つの論文あたり2MB(メガバイト)に収まるように調整ください.ファイルサイズが2MBを超える 原稿は受理されない可能性があります.どうしても収まらない場合には事務局にご連絡ください.

#### 「使用可能なフォント」

論文(本文,図・表など)では下表に示すフォントを使用ください.これ以外のフォントを用いると, 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.

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

使用	可能	なフ	オ	ン	$\mathbb{P}$

#### 「Microsoft Word 用テンプレート」

Microsoft Word により原稿を作成する場合は、用紙設定、使用するフォント、スタイル等が予め設定されたテンプレート(書式が設定された文書ファイル)を、シンポジウムのホームページ (http://thermo.mech.nitech.ac.jp/~nhts43/)からダウンロードしてご利用ください.

#### 「PDF の作成: Acrobat の設定」

Adobe Acrobat を用いれば、プリンタで印刷する場合と同様の手順で PDF ファイルを作成できます. Acrobat には、PDFWriter と Distiller という 2 種類の PDF 変換方法がありますが、論文原稿を PDF に変換 するには、出力解像度等が設定できる Distiller を使用してください.

各種ワープロソフトから Distiller により PDF を作成する手順は次のとおりです.

1. 論文原稿ファイルを開いて(Microsoft Word などで),ファイルメニューから印刷を選択する.

- 2. プリンタとして Adobe PDF (Distiller がインストール済みとする)を選択する.
- 3. Adobe PDF プリンタを次のように設定する.
  - ・画像:カラー 300 dpi 以上,グレースケール 300 dpi 以上,白黒画像 1,200 dpi 以上.
  - ・「フォント: すべてのフォントを埋め込む」にチェックを入れる.
  - ・Acrobat Distiller Ver. 7.0 であれば、プレス品質のジョブオプションを設定する(旧バージョンの

- 場合は、過去の会告等を参照ください).
- 4. 印刷を実行し、出力された PDF ファイル を検査して問題がないことを確認する.
- 注) 講演番号, シンポジウム名, ページ番号等 は実行委員会側で記入します.

## 「原稿書式の詳細」

講演論文の原稿は以下の要領で作成ください. ◇表題部分

- 右図のように段組みせずに幅150 mm に収めて ください. 論文題目, 会員資格・著者名・所属 (略記) は講演申込時の内容と一致させてくだ さい. 申込時と異なると目次等には反映されま せん. 連名の場合には講演者氏名の前に\*印を 付けてください. 英文所属が複数ある場合は, 下の見本のように上付き数字で区別ください.
- ◇本文

1ページ目は、右図のように2段組(片側1行 26 文字程度)にして9ポイントで作成ください. 2ページ目以降は、ページの先頭から2段組(片 側60行程度)に設定してください.

#### ◇ 図および表

図表中の記号および図表の標題(キャプション) は英語で書いてください.

- ◇参考文献
  - 引用したい箇所に小括弧付きの文献番号(1)を挿 入します. 文献リストは, 次の様式による一覧 形式で本文の末尾に配置してください.
  - (1) 伝熱・他2名, 機論(B), 99-999 (2005), 123.
    - [著者名, 雑誌略称, 巻-号 (発行年), 先頭ページ].



論文原稿の見本(先頭ページの書式)

用紙: A4 (210 mm×297 mm) の縦



お知らせ



2006 年 8 月 13 日(日)~18 日(金)の 6 日間オーストラリア シドニーにて International Heat Transfer Conference 2006 (IHTC2006) が開催されます.弊社は,これまで前回のグルノーブルでの会議をはじめ, AJTEC 2003 のオフィシャルエージェンシーとして会議の運営から参加者の旅行手配まで幅広くお手伝いさ せていただきました.今回も(社)日本伝熱学会からオフィシャルエージェントのご指名をいただきました.開 催時期が 8 月のお盆ということで航空機等のご予約も非常に混雑が予想されるため,ご出席される方々の利 便を考え,又便宜を図るため,この度下記の様な学会出席ツアーを企画致す所存です.尚,詳細は本年度 3 月頃に改めてご案内致します.是非,ご利用頂きますよう社員一同お待ち申し上げております.

> 株式会社ワールドクリエーション 代表取締役 満田 武敏

# 当社ツアーの特色

- 1. 成田,名古屋,関西,福岡,札幌等の各空港よりシドニーまでの航空機座席の確保
- 2. 講演会場での近くで、ご希望のお値段でのホテルのご案内.
- 3. ブルーマウンテンツアー, エアーズロック等へのオプショナルツアーの充実
- 4. お申し込みの方へ,オーストラリア電子入国許可 (ETAS) 無料取得
- 5. 大学等への旅費申請のための見積書無料作成

## 料金の目安

- 1. 基本ツアー(航空券+ホテル+ [2人部屋]+空港~ホテル間送迎バス) ¥262,000 より(10 日間)
- 2. 自由プラン(航空券,航空券+ホテル[会場近くのホテル]) 航空券 ¥112,000 より ホテル1泊 ¥9,200 より
- 3. 航空券(各航空会社の正規割引運賃,団体適用割引運賃〔格安運賃〕,ディスカウント ビジネス運賃,夫婦割引運賃等)の取り扱い
- 充実のオプショナルツアー ブルーマウンテンツアー,ディナークルーズ,ブリッジクライム,エアーズロックツアー等

お問い合わせは	杜국 수거 ㅁ_	いたりリナいっい
IHTC オフィシャルエージェント	怀式云社リー	・ルトンリエーション
国土交通大臣登録旅行業第 1381 号	日本旅行業協会正会員	IATA 公認代理店
(社)日本伝熱学会賛助会員 (社)	日本機械学会特別員	(財)原子力安全研究協会賛助会員
〒105-0003 東京都港区西新橋 2-18-2	2 NKK ビル 2 階	
TEL: 03-3431-2291 FAX: 03-343	1-2781	
担当:湯口 E-MAIL: yuguchi@wci-jp	.com 矢澤 E-MAIL: yaza	awa@wci-jp.com

# 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, 会員相互およ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.

1. 「伝熱」,「Thermal Science and Engineering」 を郵送します.

(本年度発行予定:4,7,10,1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
- 2. 「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,送金者側の 負担にてお願い致します.フリガナ名の検索によ って入金の事務処理を行っておりますので会社 名のみで会員名の記載がない場合には未納扱い になります.

#### 【変更届について】

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

(賛助会員の代表者変更)

賛助会員の場合には,必要に応じて代表者を変更 できます.

(学生会員から正会員への変更)

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

(変更届提出上の注意)

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

# 【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15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,近く除 名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 応対,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,新入会員への学会誌「伝熱」,
- 論文集「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: office@htsj.or.jp
HP: http://www.htsj.or.jp
(土日,祝祭日を除く,午前10時~午後5時)

(注意)

- 1. 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・E-mail等の書面にてお願い します.
- 2. 学会事務の統括と上記以外の事務は、下記に て行っております.

# 〒152-8550

東京都目黒区大岡山2-12-1-I1-54 東京工業大学大学院理工学研究科 機械宇宙システム専攻 宮内 敏雄 Tel/Fax: 03-5734-3183 E-Mail: tmiyauch@mes.titech.ac.jp

\_\_\_\_\_

# <u>「伝熱」会告の書き方</u>

「伝熱」会告の書き方のテンプレート(MS-WORD)は、下記の伝熱学会のホームページよりダウンロードできます.

伝熱学会のホームページ: http://www.htsj.or.jp/den\_guide.html

44 期新入会員(2005.10.1~2006.1.20) 8 名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
Æ	宮崎 研	(㈱シーデイー・アダプコ・ジャパン	学	長谷川 豊	長岡技術科学大学院工学部
Æ	八木 誠一郎	(㈱小糸製作所	学	由川 格	東京工業大学大学院理工学研究科
Æ	高松 邦吉	日本原子力研究開発機構	正	高橋 正樹	富士電機アドバンストテクノロジー(㈱
ΤĒ	山口 真也	株式会社 リガク	学	山本 孝祐	日本大学理工学部

# 44 期寄付会費(2005.10.1~2006.1.20) 5 名 9,000 円

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	山岸 英明	釧路工業高等専門学校	Ē	久野 勝美	㈱東芝研究開発センター
正	河村 洋	東京理科大学理工学部	IE.	西村 龍夫	山口大学工学部
正	酒井 逸朗	帝国ピストンリング㈱			

# 日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届出用紙

(右の該当に○を記入) 1. 正会員・学生会員入会申込書																	
(注意	<b>(</b> )	・楷書体 ・通信文	2. で明瞭 は余自	変更減に記	名( 入 入	う田 に	よる	<ul><li>由田の</li><li>・氏名</li><li>・申込</li></ul>	み安住	可け) りがな 郵便振	こを付 長替に	す て会習	費納入				
0	申込年月日						年			月			日				
1	Ę	会員資格	-	正・学			-	-	-	-		-	-	-			
2		氏名															
3		ふりがな															
4		生年月日	1	9			年			月			日		•		<u> </u>
5		名称															
6	* #4																
7	野	T															
8	先	所在地											<u> </u>				
9	•																
10	学	TEL													11.5	ਾਡ ਜ	÷ m
11	校	FAX													共	圃•貝	<b>补</b> 用
12		電子メール					1	1									
13		Т												1			
14	自	住所															
15	宅																
10		I EL															
10		FAX		出	1家生	こ。白	<u></u> 之	<u> </u>		白夕	<b>卡</b> 斯	<b>走</b> ,今月	ーク 迩	) フラコま	 	1.5	<b></b>
10	1	<u> </u>		푌	バカノ	_* H	1			Нt	1月 平区	とエテ	ミー府	•(└──□└─□	現し/よ	v	
20	Ē																
20	- <b>Л</b> Х	<u>家業年次</u>	Г	1•2•	-1								l				<u> </u>
$\frac{21}{22}$	公亩	<u>十余十八</u> 其磷的分野	1		•			1									
23	<b>万</b> 守 野門	<u>広田分野</u>			•			$\leftarrow$ (	下記	の専	門分	野の	番号	·)			
24	<u>در</u>	生会員の提	(二) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1	⋛道券	6百万	<u> </u>	*										ЕП
※直門	「分野		<u>   •]</u>	177	<u><u>1</u></u>								1	<u> </u>		<u> </u>	1 1*
基础	整的分!	野															
1	l:強制		然対流	ž 3:	表面	脹力駒	区動対	流 4:	沸騰	・蒸発	• 凝約	縮 5	:混相)	売 あまし			
11	):	・疑回 /: 熱/ 質伝熱 12: 極/	広導 低温	8: 13:	放射 熱物	生		9: 14:	反応 計測	・	i l化	10 15	:物質4 :数値:	多動 シミュ	レー	ション	/
16: EHD・MHD       17: 混合物       18: マイクロ伝熱       19: 分子スケール伝熱       20:その他(       )																	
<u>応月</u> 1	<u>応用分野</u> 1: 熱交換器 2· 茎執 3· 浍凍・空調 4· 電子機器・情報機器 5· ヒートパイプ・執サイフャン																
6	5: 航空	・宇宙機器 7: 海 電池 12: 対	「洋機器	器 8: 盘 12:	火力	発電フ	プラン	ト 9:	ガスク	タービ	ンプラ	v l	10:地	熱	,,,,,	,	
16	· <sup>旅神</sup> 5:材料	<ul> <li>・加工 17: 流</li> </ul>	、电叉1 動層	央 15: 18:	一定産業	物処理	<sub>只」</sub> 成 王	14:	<sup>示</sup> 」 生体	・人間	シノ、	/ 「	13. 殺 20: バ	イオ・	食品		
21 26	l:エン 5: MEN	ジン 22:住 1S 27・レ	:環境 ·ーザ·	23: - 28·	都市り	環境 ーンコ	ニネル	24: ギー・	地球 5 小型	環境 分散∶	ェネル	/ギー	25:建 29:そ	築・± の他	二木 (		)
*)	;i	学生会員入会申述	込者は	 :学校:	名,学	牟部,	学科,	研究	,	学年	E (M2	2, D3	など	) を 言	、 三す.		,

, \*\*) \*\*\*) \*\*\*\*)

# 日本伝熱学会 賛助会員新規入会申込み届け用紙

0	申込年月日					年			月			日
---	-------	--	--	--	--	---	--	--	---	--	--	---

※ご記入に際しての注意

日本伝熱学会からの郵送物は代表者にお送りしておりますので、代表者の所属に変更がありましたら、書面 にて事務局宛ご連絡くださるようお願いします.

1	슻貭	員資格	賛助会員	]								
2	代表	表者氏名							]			
3	ş,	りがな										
4	15	名称										
5	7て	(所属)										
6	衣	F			—							
7	有料	正之地										
8	劉	12111140										
9	務	TEL										
10	冘	FAX								共通	・専用	
11	口娄	汝	П									

## 日本伝熱学会入会のご案内

- 1. 学会の会計年度は毎年4月1日から翌年3月末日までです.
- 2. 賛助会員の会費は1口30,000円/年で、申し込みは何口でも結構です。申し込み口数により、次のよう に分けております. A (3口), B (2口), C (1口)
- 3. 会員になりますと「伝熱」「Thermal Science and Engineering」をお申し込み口数1口につき各1部お送り します.「日本伝熱シンポジウム講演論文集」等をお申し込み口数1口につき1部無料でさしあげます. この伝熱と Thermal Science and Engineering は通常,年4回(4,7,10,1月号)発行しております.但し, 日本伝熱シンポジウム講演論文集につきましては,前年度の会費を年度末までに完納された会員に限り 当該年度のものを無料でさしあげます.なお,年度途中でご入会された方には残部の都合でお送りでき ない場合もありますので,あらかじめご承知おきください.
- 4.本学会では、事務作業簡素化のために会費の領収書の発行は郵便振替や銀行振込の控えをあてています. 簡単な書式の領収書はご用意できますが、それ以外の場合には貴社ご指定の書式をご送付下さいますようお願い申しあげます。

<u>申込書送付先;</u> 〒113-0034 東京都文京区湯島 2-16-16

社団法人日本伝熱学会事務局 Tel/Fax;03-5689-3401

会費の振込先;

 (1)郵便振替の場合—郵便振替口座 00160-4-14749 社団法人日本伝熱学会
 (2)銀行振込の場合—みずほ銀行 大岡山支店 普通預金口座 145-1517941 社団法人日本伝熱学会
 (3)現金書留の場合—上記の事務局宛に御送金下さい. 広告

センサテクノス

広告 テクノオフィス 広告

日本カノマックス

広告

共栄通信社

# 編集出版部会ノート:吸着に関する特集へのおもい

#### Note from the Editorial Board: A Thought for Special Forum on Adsorption Phenomena

今号の特集は、吸着の世界---ミクロからマクロ まで、そしてシステムへー」(Field of Adsorption -From Micro to Macro, and Associated Systems) とい うことで、ミクロな視点での材料開発と吸着現象 のモデリング,マクロな視点での熱物質移動現象 の解析と吸着器の最適化, そして, 吸着システム の高度化まで、低温排熱で駆動可能な吸着冷凍シ ステム, デシカント空調システムなどを実用化す る上で重要な研究開発課題を取り上げて、第一線 でご活躍中の先生方に以下の内容でご執筆頂きま した.(1)下岡氏らによる吸着ヒートポンプの原理 と吸着剤に求められる性質、さらに新規に開発さ れた吸着剤の物性に関する解説,(2)大宮司先生に よるミクロな視点による吸着物理モデルの解説と 分子シミュレーションの最近の動向の解説, (3)劉 先生による化学蓄熱材としての金属塩系材料の開 発状況の紹介,(4)渡辺先生らによる吸着器内の熱 物質移動のモデリングと吸着器の最適設計法およ びシステムの性能評価結果の紹介, (5)濱本先生先 らによる潜熱・顕熱独立制御方式による空調シス テムの解説、(6)児玉先生による高度な吸着デシカ ント式空調システムの解説,(7)秋澤先生による密 閉式の吸着冷凍システムの高性能化に関する解説.

本特集をご執筆頂いた先生方も述べておられる ようにこれまで廃棄されていた熱をとことん使い 切る技術は今後ますます重要になるものと確信し ています.本特集が,多くの研究者および技術者 が「吸着の世界」に目を向けて頂くきっかけにな れば幸いです.

化学・材料系研究分野を中心とした研究所の機 械系教員として研究教育活動を行っているせいか,

はたまたそのような研究所における自らの存在意 義を見い出そうとする無意識の生存意欲からなの か、日頃から「材料とエネルギーシステム」との 関わりを強く意識しており、昨今の環境・エネル ギー問題の中で、冷凍空調分野に関する研究に携 わっている一研究者として、蒸気圧縮式冷凍空調 システムの更なる可能性を信じつつ、一方でブレ ークスルーを生む可能性のあるシステムとして吸 着現象を応用した熱駆動式あるいは圧縮・熱駆動 ハイブリッド式冷凍空調システムに強い興味と研 究の必要性を個人的に強く感じていました. その ようなこともあって、今回、勝手ながら、出版部 会で上記のような特集の企画を立てさせて頂きま した.本特集において、ご多忙にもかかわらず、 執筆者には貴重な解説論文をご投稿頂きました. ここに、厚く御礼申し上げます.

なお、本特集に当たり、当部会委員の東京工業 大学の加藤之貴先生の絶大なる支援を頂きました (実際には完全に頼り切っていました)ことを申 し添えます.

> 小山繁(九州大学) Shigeru KOYAMA (Kyushu University) e-mail: koyama@cm.kyushu-u.ac.jp

副会長 委 員	勝田正文	(早稲田大学)	部会長 吉田英生 (京都大学)
(理事)	森 治嗣	(東京電力)	逢坂昭治(徳島大学) 小山 繁(九州大学)
(評議員)	丸田 薫	(東北大学)	杉山智之(日本原子力研究開発機構)
	中込秀樹	(千葉大学)	加藤之貴(東京工業大学) 永井二郎(福井大学)
	田坂誠均	(住友金属工業)	平澤茂樹(神戸大学)
TSE チーフ	'エディタ・	一 河村 洋(東京理和	斗大学) TSE 編集幹事 佐竹信一(東京理科大学)
編集出版事	務局:京都	都大学大学院 工学研究	科 航空宇宙工学専攻 吉田英生・犬山健二
606-8501 3	京都市左京	区吉田本町 Tel/Fax:(	075-753-5255 yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.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 Tel : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

### 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 Tel : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

伝 熱 Journal of the Heat Transfer Society of Japa	ISSN 1344-8692 n
Vol. 45, No. 190	2006年1月発行
THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING (日本伝熱学会論文集)	ISSN 0918-9963
Vol. 14, No. 1	January, 2006
発行所 社団法人 日本伝熱学 〒113-0034 東京都文京区湯 Tel:03-5689-3401, Fax:03-56 郵便振替 00160-4-14749 Published by The Heat Transfer Society o 16-16, Yushima 2-chome, Bunk	会 法局 2-16-16 589-3401 f Japan cyo-ku,
Tokyo 113-0034, Japan	