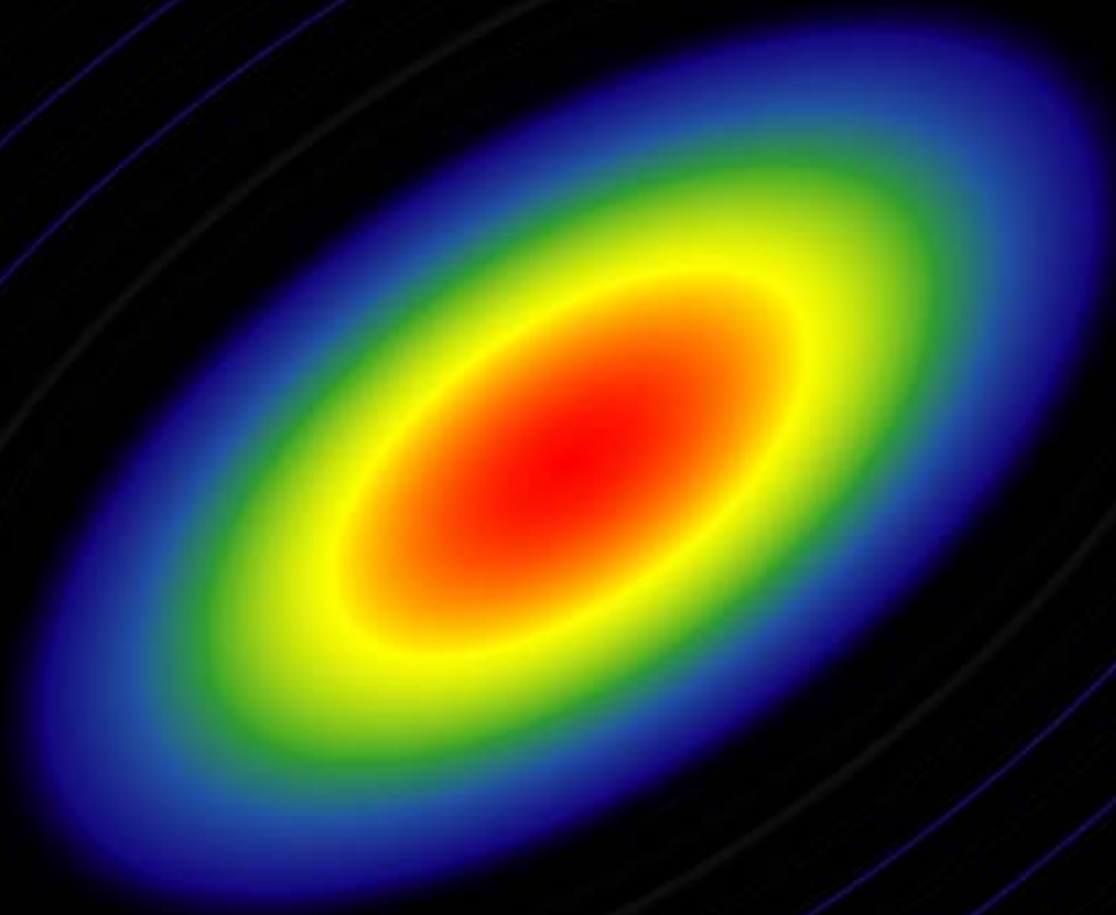


伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692

Vol. 45, No. 192
2006. 7



HSTJ

◆第45期出発売◆
◆熱エネルギー変換・貯蔵材料◆

(社)日本伝熱学会 第45期(平成18年度)役員・評議員

会 長

望月 貞成(東京農工大学)

副会長

(企画, 国際・広報)

康 倫明(ダイキン)

(編集出版)

牧野 俊郎(京都大学)

(総 務)

宮内 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)

山田 純*(芝浦工業大学)

茂地 徹** (長崎大学)

大島 伸行(北海道大学)

工藤 一彦(北海道大学)

稲村 隆夫(弘前大学)

青木 和夫(長岡技科大学)

石塚 勝(富山県立大学)

辻 俊博(名古屋工業大学)

中部 主敬(京都大学)

村上 幸一(愛媛大学)

田中 収(三浦工業)

小山 繁(九州大学)

†:企画部会長, ‡:編集出版部会長, *:総務部会長, **:伝熱シンポジウム担当

監 事

青木 博史(豊田中央研究所)

山田 幸生(電気通信大学)

評議員

店橋 護†(東京工業大学)

黒田 明慈(北海道大学)

田部 豊(北海道大学)

近久 武美(北海道大学)

河合 洋明(北海道工業大学)

廣瀬 宏一(岩手大学)

泉 正明(石巻専修大学)

青木 秀之(東北大学)

丸田 薫(東北大学)

古畑 朋彦(群馬大学)

杉山 智之(原子力研開機)

大曾根 靖夫(日立製作所)

古市 紀之(産総研)

中込 秀樹(千葉大学)

川口 靖夫(東京理科大学)

鹿園 直毅(東京大学)

白樫 了(東京大学)

鈴木 雄二(東京大学)

井上 剛良(東京工業大学)

加藤 之貴(東京工業大学)

平井 秀一郎(東京工業大学)

佐藤 洋平(慶應義塾大学)

長坂 雄次(慶應義塾大学)

黒坂 俊雄(神戸製鋼所)

三矢 輝章(リコー・リソテック)

橋本 克己(電力中央研究所)

姫野 修廣(信州大学)

寺西 恒宣(富山工業高専)

松田 理(石川工業高専)

永井 二郎(福井大学)

桑原 不二郎(静岡大学)

中川 勝文(豊橋技科大学)

板谷 義紀(名古屋大学)

田川 正人(名古屋工業大学)

濱田 幸弘(名古屋工技振協)

河原 全作(京都大学)

黒河 通広(三洋電機)

芝原 正彦(大阪大学)

竹森 利和(大阪ガス)

加賀 邦彦(三菱電機)

浅野 等(神戸大学)

平澤 茂樹(神戸大学)

大西 善元(鳥取大学)

橋本 律男(広島大学)

水田 桂司(三菱重工業)

富永 彰(宇部工業高専)

逢坂 昭治(徳島大学)

長山 暁子(九州工業大学)

河野 正道(九州大学)

横峯 健彦(九州大学)

光武 雄一(佐賀大学)

桃木 悟(長崎大学)

山口 朝彦(長崎大学)

†:総務担当副会長補佐

委員会委員長

伝熱シンポジウム実行委員長

表彰選考委員会委員長

学生会委員会委員長

国際伝熱会議招致委員会委員長

広報委員会委員長

国際交流委員会委員長

TSE チーフエディター

茂地 徹(長崎大学)

牧野 俊郎(京都大学)

黒田 明慈(北海道大学)

笠木 伸英(東京大学)

芝原 正彦(大阪大学)

佐藤 勲(東京工業大学)

河村 洋(東京理科大学)

伝 熱

目 次

〈新旧会長挨拶〉

会長就任にあたって……………	第 45 期会長 望月 貞成（東京農工大学）……………	1
会長退任にあたって……………	第 44 期会長 庄司 正弘（神奈川大学）……………	2

〈第 18 回日本伝熱学会賞〉

日本伝熱学会賞選考の報告……………	表彰選考委員会委員長 勝田 正文（早稲田大学）……………	3
日本伝熱学会学術賞を受賞して……………	須賀 一彦（大阪府立大学）……………	
……………	T.J. CRAFT, H. IACOVIDES（マンチェスター大学）……………	5
日本伝熱学会学術賞を受賞して……………	小山 繁，桑原 憲（九州大学）……………	
……………	中下 功一（㈱デンソー）……………	6
日本伝熱学会技術賞を受賞して……………	吉永 信也（日立アプライアンス社）……………	
……………	増田 正（関西電力），森本 勝也（中部電力）……………	7
日本伝熱学会技術賞を受賞して……………	田中 清志（機械振興協会）……………	
……………	岡本 章（NEC 東芝スペースシステム）……………	
……………	伊地智 幸一（無人宇宙実験システム研究開発機構）……………	8
日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………	村上 陽一（東京大学・ライス大学）……………	9

〈第 43 回日本伝熱シンポジウム〉

第 43 回日本伝熱シンポジウム（名古屋）の報告 実行委員長 長野 靖尚（名古屋工業大学）……………	10
--	----

〈特集：熱エネルギー変換・貯蔵材料〉

New Composite Adsorbents for Conversion and Storage of Low Temperature Heat: Activity in the Boreskov Institute of Catalysis……………	Yu. I. ARISTOV（Boreskov Catalyst Research Center, Russia）……………	12
吸着式冷凍機用吸着材料の高密度化……………	汲田 幹夫（金沢大学）……………	20
吸着ヒートポンプの課題 地球と室内のエアコン……………	伊藤 睦弘（富士シリシア化学）……………	26
Recent Development on Adsorption Refrigeration……………	Hideharu YANAGI (Cyclelect Electrical Engineering Pte Ltd)……………	32
高熱伝導性ケミカルヒートポンプ反応材……………	藤岡 恵子（ファンクショナル・フルイッド）……………	40
炭素繊維を用いた熱エネルギー利用機器の伝熱促進……………	深井 潤，中曾 浩一（九州大学）……………	46
セラミックス吸収材を用いた CO ₂ 分離技術の開発……………	越崎 健司（東芝）……………	52

〈特別寄稿〉

沸騰の科学（7）	甲藤 好郎（東京大学名誉教授）	58
海洋上の台風の研究	杉山 卓也（琉球大学）	64
大学と企業の伝熱研究のギャップと壁	横堀 誠一（東芝）	68

〈プロジェクトQ〉

原子炉の安全を確保せよー NSRR における原子炉安全性研究 ー	杉山 智之（日本原子力研究開発機構）	71
鮮度チューハイ「-196℃」開発秘話	渡部 徳富（サントリー）	77

〈International Letter〉

北米の大学における研究及び人事に関する制度について	川路 正裕（トロント大学）	80
---------------------------	---------------	----

〈国際活動・会議報告〉

第6回沸騰伝熱国際会議報告記	門出 政則（佐賀大学）	85
第4回ナノチャンネル・マイクロチャンネル・ミニチャンネル国際会議（ICNMM2006）報告	井上 浩一（九州大学）	86
第4回 ASME 燃料電池国際会議参加報告	近久 武美（北海道大学）	88

〈博物館めぐり〉

アイアンブリッジ溪谷博物館	吉田 英生（京都大学）	89
---------------	-------------	----

〈Heart Transfer〉

「風水」 沖縄に見る Heart Transfer 技術	瀬名波 出（琉球大学）	94
------------------------------	-------------	----

〈行事カレンダー〉

〈お知らせ〉

社団法人日本伝熱学会 第44期（平成17年度）総会議事録	97
日本伝熱学会東海支部企画 第13回 伝熱コロキウム「最新の環境・エネルギー技術」	99
日本伝熱学会 東北支部秋季伝熱セミナーのご案内	100
第3回流動ダイナミクスに関する国際会議	100
日本伝熱学会東海支部企画 第17回東海伝熱セミナー	101
事務局からの連絡	102
編集出版部会ノート：革新的エネルギー材料技術と伝熱	加藤 之貴（東京工業大学） 110

Vol. 45, No. 192, July 2006

CONTENTS

< New and Former Presidents' Address >

Address as the New President

Sadanari MOCHIZUKI (Tokyo University of A&T)1

Address as the ex-President

Masahiro SHOJI (Kanagawa University)2

< The 18th Heat Transfer Society Awards >

On Selection of the Heat Transfer Society Awards for Scientific Contribution and Technical Achievement

Masafumi KATSUTA (Waseda University)3

On Receiving Heat Transfer Society Award for Scientific Contribution

Kazuhiko SUGA (Osaka Prefecture University)

Timothy J. CRAFT and Hector IACOVIDES (The University of Manchester)5

On Receiving Heat Transfer Society Award for Scientific Contribution

Shigeru KOYAMA, Ken KUWAHARA (Kyushu University), Koichi NAKASHITA (Denso)6

On Receiving Heat Transfer Society Award for Technical Achievements

Shinya YOSHINAGA (Hitachi Appliances, Inc.)7

On Receiving Heat Transfer Society Award for Technical Achievements

Kiyoshi TANAKA (Japan Society for the Promotion of Machine Industry)

Akira OKAMOTO (NEC TOSHIBA Space Systems, Ltd)

Kouichi IJICHI (Institute for Unmanned Experiment Space Free Flyer)8

On Receiving Heat Transfer Society Award for Young Investigators

Yoichi MURAKAMI (University of Tokyo, Rice University)9

< The 43rd National Heat Transfer Symposium of Japan >

Report on the 43rd National Heat Transfer Symposium of Japan

Yasutaka NAGANO (Nagoya Institute of Technology)10

< Thermal Science for Innovative Energy Materials >

New Composite Adsorbents for Conversion and Storage of Low Temperature Heat: Activity

in the Boreskov Institute of Catalysis

Yu. I. Aristov (Boreskov Catalyst Research Center, Russia)12

Development of Densified Adsorbent for Adsorption Refrigeration

Mikio KUMITA (Kanazawa University)20

Study of Adsorption Heat Pump - Air Conditioning System for Earth and Room -

Mutsuhiro ITO (Fuji-Silysia Chemical Ltd.)26

Recent Development on Adsorption Refrigeration

Hideharu YANAGI (Cyclelect Electrical Engineering Pte Ltd.)32

High Thermal Conductive Reactant for Chemical Heat Pump

Keiko FUJIOKA (Functional Fluids Ltd.)40

Heat Transfer Enhancement of Thermal Energy Equipment Using Carbon Fibers Jun FUKAI, Koichi NAKASO (Kyushu University).....	46
Development of CO ₂ Separation Technique Using Lithium-Containing Oxide Kenji ESSAKI (Toshiba Corporation).....	52
< Contribution >	
Science of Boiling (7) Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of the University of Tokyo).....	58
Researches of Typhoons over the Ocean Takuya SUGIYAMA (University of the Ryukyus).....	64
Proposal to Collaborate Heat Transfer R&D between University and Corporation Seiichi YOKOBORI (Toshiba).....	68
< Project Q >	
Secure the Nuclear Reactor Safety - Nuclear Safety Research at NSRR - Tomoyuki SUGIYAMA (Japan Atomic Energy Agency).....	71
Unknown Episode about Freshness Chu-hai “-196°C” in a Development Phase Tokutomi WATANABE (Suntory Limited).....	77
< International Letter >	
Research and Performance Evaluation at North American Universities Masahiro KAWAJI (University of Toronto).....	80
< Report on International Conference >	
Report on 6th International Conference on Boiling Heat Transfer Masanori MONDE (Saga University).....	85
Report on Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels Koichi INOUE (Kyushu University).....	86
Report on 4th International ASME Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University).....	88
< Museum Tour >	
The Ironbridge Gorge Museums Hideo YOSHIDA (Kyoto University).....	89
< Heat Transfer >	
“Hunsi” Heat Transfer Technique in Okinawa Izuru SENAHA (University of the Ryukyus).....	94
< Calendar >	95
< Announcements >	97
Note from the Editorial Board: Thermal Science for Innovative Energy Materials Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology).....	110

会長就任にあたって

Address as the New President



望月 貞成 (東京農工大学)

Sadanari MOCHIZUKI (Tokyo University of A&T)

e-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp

日本伝熱学会は、多くの偉大な先人により築き上げられてきた、大変に質が高く特色ある学会であると思います。このたび、このように立派な伝統を有する日本伝熱学会の第45期会長を仰せつかり、文字通り身が引き締まる思いをいたしております。微力ながら全力を尽くしたいと思います。どうぞよろしくお願い申し上げます。

伝熱学会の将来は、一つには、伝熱研究の必要性あるいは研究者の興味を引くテーマが将来に渡りあり続けるかどうかにかかっています。伝熱研究を、熱の本質をより根元から解き明かすための研究(science)と熱が関与する様々な現実の諸問題を解決するための研究(engineering)とに大別すると、いずれについてもまだまだ問題は多く残されていますが、特に後者については今後ますます様々な問題が増え続け、伝熱研究には後者からの必要性が一層高まるものと考えられます。何故ならば、伝熱は、原理的にこの世で生ずるあらゆる現象に伴って必ず発生するので、これまではあまり問題にならなかった伝熱の問題が科学・技術が進むにつれて顕在化し、伝熱問題が解決されないと先に進まないという場合が今後ますます増えると思われるからです。米国などでは伝熱研究は下火だといわれます。その原因のひとつには米国政府が伝熱研究に余り予算を出さなくなったことが挙げられています。しかし、私は、上述の理由から伝熱研究はむしろこれからますます必要とされるのではないかと考えています。

ところで、伝熱学会あるいは伝熱シンポジウムのあり方についてですが、本来、研究は、個々の研究者の自発性の発露であるべきだと思いますので、研究の方向は、学会が率先して指し示すべきものではないし、またそうできるものでもないと思います。研究の動向といったものがあるとするれば、それは、様々な研究を見渡したとき結果として姿を現すものであらうと思います。組織として

の学会は、その動向を捉え、必要とあればそれを一層盛んにすべくしかるべき企画を立てることになると思います。学会の重要な使命のひとつは、研究者が情報を交換し互いに刺激しあい知的快楽を得られる場を用意し、また、それらの結果を総括し会員ならびに社会に提供することにあると思います。伝熱学会は上記目的のために、各種シンポジウムや講演会を開催し、学会誌および論文集を発行してきています。とりわけ伝熱シンポジウムは例年盛会で発表論文数の多さは異常とも思える状況ですが、このこと自体学会としては間違いなく歓迎すべきことと思います。研究内容の質は研究者次第であり、またそれに対して行われる討論の深さは参加者の力量に依存します。むしろ、今後参加者が減らないようシンポジウムが魅力的であり続けるためにはどうすべきかを考えることが重要でしょう。

近年、いろいろな国際会議における日本からの参加者や発表論文の数は多く、日本からの参加なくしては会議そのものの成立が危ぶまれるという場合が少なくありません。伝熱関連においても例外ではありません。いまや、日本の伝熱研究は質的にも量的にも世界のトップクラスにあるといっても過言ではないでしょう。国際的なリーダーシップを日本伝熱学会が名実ともに担わなければならない時代に来たものと思います。そのためには、既存の国際枠組み(例えば、国際伝熱会議)内での積極的な活動のみならず、学会独自の企画(例えば、国際伝熱フォーラムなど)を推進する必要があります。

以上、思いつくままに勝手なことを申しあげました。貴重な紙面を浪費したことをお許しください。

会長退任にあたって

Address as the ex-President



庄司 正弘 (神奈川大学)

Masahiro SHOJI (Kanagawa University)

e-mail: shoji@kanagawa-u.ac.jp

大任を終え、ほっとしております。まず、この1年の間、学会の運営、活動にご協力くださった役員、会員の皆様に心より御礼申し上げます。

昨年6月の総会で会長職を拝命した際、自分のできること、すべきことをいろいろと考えました。以前、総務担当副会長を2年やらせていただき、学会の実情や抱えている問題をある程度は把握しておりましたが、自分の能力や性格を考えると華々しいことは到底できないため、目立たなくとも学会の将来のために、細かな問題点を少しでも整理し解決しておこうと意を決しておりました。しかし今振り返ると、当初の意気込みは月日がたつごとに次第に希薄となり、成し得たこと極めて僅かであり、充分なことが出来ずに終わりました。大変申し訳なく思っております。そこで反省の意味も込め、学会の特に学会運営に関する2、3の問題に触れ、今後に託したいと思います。

先ず学会運営に関する基本的態度であります。以前にある大先輩から、伝熱学会は「和を以て尊し」とすると言うか、話し合いによって運営してきたし、そうあるべきであって定款や内規（文章で規定されたもの）はそのほんの土台に過ぎない、と聞かされたことがあります。私もその通りと思います。近年、学会に限らず大学にあっても、規則に従ってスムーズに管理したり事務処理を進めることが、あたかも優れた組織運営と錯覚されているように感じられます。考うに、規則通りにやることは誰でもできることであり、そうでないことに知恵を出すことこそ、任にある者のなすべきことと思います。この問題に関連し、時間の大半を配布資料の説明や事務報告に費やしている理事会のあり方はいかにももったいなく、懸案事項の審議に充てて欲しいと思います。

次に学会の経理に関する問題です。最近、一般社会のみならず学術社会においても経済不祥事が多く、そのあおりで監督部署からの細かな指示が

多くなっております。こうした上意下達は気持ちのいいものではありませんし、伝熱学会で経理上の問題が起こるとも考えられません。がしかし、言われてみると、我々は財務を担当する役職も置いていませんし、学会の会計、財務の管理は委託会計法人に任せきりです。たとえば学会の支出事項の決定の仕方、資産の将来的見通しや中長期的な有効活用法などに確たる方針を持っておりません。また、役員に監事を選んでおりますが、正直申して本来の監事の仕事はしない（やらせない）できました。監事はやはり本来の職務に立って常に理事会を監査し、特に予算立てや支出（経費執行）について厳しい意見を述べるべきと考えます。

伝熱学会は比較的規模の小さな（会員数の少ない）学会です。それにしては一人前にたくさんの委員会がある、との嫌味（悪口）を耳に挟んだことがあります。それを聞いたときにはやや腹立たしく感じましたが、しかし落ち着いて考えてみると、我が学会の最大の特色は伝熱シンポジウムという他に類を見ないすばらしい学術講演会を毎年開催している点にあるのではないかと思います。昨年会長就任に際しても同じようなことを申し上げましたが、この意味で、内容の充実した会誌（論文を含む）の発行と、内容の濃い魅力的なシンポジウムをしっかりと行っていけば、たとえその他が皆無であっても伝熱学会の存立は将来とも保証されるのではないかと考えます。小さな政府ならず、小さくてもピリリとした特色ある学会である可能性があり、このささやかな可能性は我々にとってまことに幸運なことと言えます。

いろいろ記しましたが愚痴に近くなりそうなのでこのあたりまでとし、沈着冷静な望月次期会長と有能な理事の皆さんに今後を託したいと思います。最後になりますが、多くの関係者並びに会員の皆様にはこの1年大変お世話になり有り難うございました。重ねて厚く御礼申し上げます。

日本伝熱学会賞選考の報告

*On Selection of the Heat Transfer Society Awards for
Scientific Contribution and Technical Achievement*

勝田 正文 (早稲田大学)

Masafumi KATSUTA (Waseda University)

e-mail: katsuta@waseda.jp

学術賞, 技術賞及び奨励賞について公募を行い, 応募のあった学術賞 3 件, 技術賞 3 件, 奨励賞 1 件 (他薦) に対して, 所定の手続きにより慎重に審査を行い, 各賞の授賞候補者を下記のように決定した (授賞研究の記載は順不同). なお, 各賞の贈呈式は, 6 月 1 日に名古屋市 (国際会議場) で開催された総会において実施された.

1. 学術賞

1) 論文題目: 『汎用的な解析壁関数モデル』
(第 1 報, 第 2 報) 日本機械学会論文集 B 編 71 巻 711 号 (2005-11)

代表研究者: 須賀一彦 (大阪府立大学大学院工学研究科 機械系専攻 機械工学分野 教授)

共同研究者: Timothy J. Craft (School of Mechanical, Aerospace and Civil Eng., The University of Manchester Senior Lecturer)

Hector Iacovides (School of Mechanical, Aerospace and Civil Eng., The University of Manchester Professor)

産業流体機器設計の現場における大規模応用解析の中で, 高度な乱流壁面伝熱の解析法を計算環境に導入するには, 汎用性やコストの面で難点があり, 旧来の経験的な対数則壁面モデルが用いられているのが現状である. この研究では, 支配方程式を解析的に積分することで汎用性を保ちつつ, 対数則壁関数と同等コストである新しい乱流熱壁関数モデルを導き提案している. 市販ソフトなどへの組み込みも進行中で, 産業界への貢献も期待され, 本会学術賞に値するものと認める.

2) 論文題目: 『Condensation of Refrigerant in a Multi-port Channel』 Proceedings of 1st International Conference on Microchannels and Minichannels

『An experimental study on condensation of refrigerant R134a in a multi-port extruded tube』 International Journal of Refrigeration, Vol.24

代表研究者: 小山 繁 (九州大学大学院総合理工学研究院 エネルギー物質科学部門 教授)

共同研究者: 桑原 憲 (九州大学大学院総合理工学研究院 エネルギー物質科学部門 助手)

共同研究者: 中下 功一 (株式会社デンソー 冷暖房開発 3 部 開発 2 室)

本研究は, 相当直径約 1mm の矩形流路内の凝縮実験から, ミニチャンネルから内径数 mm の管内まで適用できる二相摩擦圧力損失の相関式, および凝縮熱伝達相関式を提案している. 加えて, 矩形, 円形流路内での強制対流熱伝達特性の相違や, 流動様式・熱伝達に及ぼす影響についても考察し, 将来なお一層必要となると思われる, ミニチャンネル内伝熱研究に貢献し, かつ更なる発展が期待され, 本会学術賞に値するものと認める.

2. 技術賞

1) 授賞名 『高出力一体形自然冷媒 (CO₂) ヒートポンプ給湯機の開発』

発表論文等 冷凍 (日本冷凍空調学会) 他

代表研究者: 吉永 信也 (日立アプライアンス社)

共同研究者: 増田 正 (関西電力)

共同研究者：森本 勝也（中部電力）

ヒートポンプユニットとタンクを一体化させた一体型 CO₂ 冷媒ヒートポンプ給湯機を開発し、商品化している。使用時に水を必要な温度まで加熱する『高効率瞬間直接給湯方式』の採用と CO₂ 冷媒のとくせいに合せた圧縮機、水冷媒熱交換器等の開発により、定格 COP 4.6 を達成している。また設置面積を貯湯式ヒートポンプ給湯機の約 1/2 としコンパクト化にも成功しており、普及による省エネ効果が非常に期待できる。

2) 受賞名 『CPL を用いた展開ラジエータ技術』
発表論文等 第 38 回伝熱シンポジウム論文集

代表研究者：田中 清志 ((財)機械振興協会技術研究所技術協力センター)

共同研究者：岡本 章 (NEC 東芝スペースシステム(株) 技術本部)
伊地智 幸一 ((財)無人宇宙実験システム研究開発機構 研究開発第一部)

本技術に採用されている『CPL』は、ヒートパイプの概念を拡張しループを構成する熱輸送デバイスで、人工衛星内の機器からの放熱を効率的に展開ラジエータに輸送し、高度な温度制御を可能と

している。加えて展開ラジエータ技術は、衛星規模を増大させずに放熱面積を拡大できることから、人工衛星内の空間の効率利用および衛星の小型化に貢献できる技術である。これらトータルシステムをユーザーズ（人工衛星ニックネーム）に搭載して、軌道上での技術検証も行っており成果を挙げた。以上より、今後の宇宙開発に大いに寄与しうる技術であると認めた。

3. 奨励賞

1) 受賞者名 村上陽一（東京大学）

論文題目： 『単層カーボンナノチューブの光吸収特性』

第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 第 1 巻, 2005)

本論文は、著者らが開発した熱 CVD 法で高純度単層カーボンナノチューブの垂直配向膜を世界に先駆けて生成し、これを用いた光吸収測定によって、グラファイトなどの炭素材料にも共通する興味深い光吸収特性を見つけたものである。放射伝熱の基礎的な知見となるとともに様々な応用、発展が期待される。

日本伝熱学会学術賞を受賞して
On Receiving Heat Transfer Society Award for
Scientific Contribution



須賀 一彦 (大阪府立大学), T.J. CRAFT, H. IACOVIDES (マンチェスター大学)
Kazuhiko SUGA (Osaka Prefecture University)
Timothy J. CRAFT and Hector IACOVIDES (The University of Manchester)

平成 18 年 6 月 1 日名古屋で開催された日本伝熱学会第 44 期総会におきまして、英国マンチェスター大学の T.J. Craft 上級講師、H. Iacovides 教授とともに日本伝熱学会学術賞をいただき、受賞者一同大変光栄に思っております。選考委員会ならびに関係各位に対し心から感謝申し上げます。

受賞対象となりました論文は、昨年度の伝熱シンポジウムで講演した内容(「滑面～粗面乱流伝熱に対応した解析的壁関数」第 42 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 pp.27-28)を基にまとめた「汎用的な解析的壁関数モデル(第 1 報, 第 2 報)」日本機械学会論文集 B 編 71 巻 711 号(2005-11) pp.2725-2740 です。本研究は英国 UMIST と私が所属していた(株)豊田中央研究所の共同研究として 2002 年に開始したものです。

当時、エンジン設計に関する応用解析担当グループの意見をよく聞いてみたところ、レシプロエンジンの内部はバルブをはじめいろいろな突起物もある大変複雑な流路形状をしていることから、境界層を丁寧に格子分割するのは経験ある技術者でも至難の業で、低レイノルズ数(LRN)乱流モデルは設計現場にとっては宝の持ち腐れだということでした。また、仮に計算メモリに余裕ができて LRN 計算用ではなく、計算領域拡大に格子点数を使いたいこと、場所によっては必ずしも流体力学的に滑面とは言えない部分もあること等の理由で、当分は対数則壁関数の使用が前提であるということでした。(LRN 乱流モデルの研究を長く行ってきた私にとっては予想されたこととはいえ、いろんな意味でショックではありました。)そこで、かつて私がお世話になった英国 UMIST (現マンチェスター大学)の B.E. Launder 教授の研究グループが共存対流伝熱を対象とした壁モデルの研究を行っていたので、その基本概念を下敷きにして昔の仲間と共同で、滑面でも粗面でも適用できる汎用的な乱流伝熱の壁関数モデルの構築を行う

ことにしました。これが汎用的な解析(的)壁関数(AWF)と呼んでいるものです。

AWF の詳細は受賞論文を見ていただきたいのですが、考え方としては、境界層積分方程式とよく似た手順で壁面に隣接する計算要素中で運動量の式とエネルギー式を解析積分し、要素内の正確な速度、温度分布を求めます。そして、それらから内部格子点計算のための境界条件となる壁面摩擦応力、壁面熱流束等の関数式を導出するのです。解析積分の境界条件には 1 つ内側の内部格子点の情報が含まれるため、壁面摩擦応力、壁面熱流束等は計算ステップ毎にその情報を反映して更新されていきます。そして AWF の特徴として、標準壁関数用の計算格子でも LRN 計算格子でも壁面粗さに関係なく精度良く計算できること(温度場に関しては粗さ高さ以上の最小格子サイズが必要)、圧力勾配の効果を関数式中に含むのではなく離流れ等でも安定に高精度であること、計算コストは標準壁関数と同等ということが挙げられます。

AWF は壁面境界近傍で支配方程式の解析積分を行うことから、界面での複雑な熱物質輸送現象に対応できるポテンシャルを秘めています。そこで我々の研究グループでは、多孔体壁面を流れる乱流への適用に焦点をあてて AWF の更なる拡張の研究をしています。

この研究を始める前は「いまさら壁関数?」という思いもありました。しかし、如何に乱流の研究が進み高度な現象モデルの提案があっても、設計解析の現場にそれを展開するための研究を怠ったならば、両者の溝は簡単には埋まらないということが今更ながら良く分かった気がしています。

最後に、本研究に様々なアドバイスを賜った B.E. Launder 教授、(株)豊田中央研究所の諸兄に紙面をおかりして感謝の意を表します。これからは今回の受賞を励みとして、さらに評価されるような研究を遂行していく所存です。

日本伝熱学会学術賞を受賞して
*On Receiving Heat Transfer Society Award
 for Scientific Contribution*



小山 繁, 桑原 憲 (九州大学), 中下 功一 (㈱デンソー)
Shigeru KOYAMA, Ken KUWAHARA (Kyushu University), Koichi NAKASHITA (Denso)

平成 18 年 6 月 1 日, 名古屋で開催された日本伝熱学会第 44 期総会において, 日本伝熱学会学術賞をいただき, 大変光栄に思っております. ご選考下さいました選考委員の方々および関係各位に厚く御礼申し上げます. 対象となりました論文は, 1st International Conference on Microchannels and Minichannels で講演いたしました”Condensation of Refrigerant in a Multi-port Channel”, および International Journal of Refrigeration, Vol.24 に掲載されました”An Experimental Study on Condensation of Refrigerant R134a in a Multi-port Extruded Tube”で, ミニチャネル内の局所凝縮熱伝達および圧力損失に関する実験を行い, 現象解明を試みたものです.

本研究は, バブル経済が終焉を迎え, 地球温暖化問題がクローズアップされ始めた 1990 年代半ば頃, カーエアコン用凝縮器を小型化・高性能化するための指針を得るために, 某自動車部品メーカーからの依頼で始まりました.

熱交換器の高性能化に関する指針を得るためには, 伝熱管内部の相変化伝熱現象の把握が重要ですが, そのためには単管試験による局所測定が必要でした. しかしながら, 相当直径 1mm 以下の流路を持つ単一扁平多孔管内の交換熱量は非常に小さいため, 交換熱量を測定するのに一般的によく用いられる水カロリーメーター方式では, 冷却水の出入口温度差を精度よく測定する必要がありますが, その為には相当な長さが必要となり, 局所測定は困難でした. 実際, その当時同様の研究を行っていた数少ない研究者たちのほとんどが, 局所測定はせず, 1 m 前後の管内の平均熱伝達測定を行っていました. 例えば本研究で行った, 熱流束が約 5000~30000 W/m² の範囲では, 冷却水流量を約 0.05 kg/s とした場合, 冷却水の出入口温度差は約 1.3~8 K/m となります. したがって, 水カロリーメーター方式で交換熱量の測定を行う場合,

サブセクションの出入口温度差は最低でも 1 K 程度は必要となり, その場合低熱流束ではサブセクション長さが 750mm 程度必要となり局所とは言い難い距離となりました. そこで本研究では, 交換熱量の測定に高精度の熱流束センサーを導入し, サブセクション長さ 75mm で測定を行いました, センサーの面接触を均一に近づけるために大変苦心しました. また, 局所圧力損失測定に関しても, 流路直径が小さいため, 内部の流動に対する影響が少ない圧力ポートの設置法を考案する必要がありましたが, 単一細径円管内の圧力損失測定の経験を基に試行錯誤により解決することが出来ました. 以上のような工夫を行った結果として, 従来ほとんど測定できなかった熱伝達と圧力損失の局所特性に関する十分有用なデータを得る事は出来たと考えております. しかしながら, その反面, 学術的に重要な一般性の探求に関してはデータの蓄積量に対して十分とは言えないように今も感じております.

ここまで述べてきましたように, 本研究は学術的な考察が必ずしも十分とは言えないにもかかわらず学術賞をいただけたことは, 実験的に有用情報を得る事も学術的に十分意味があることとして認めていただけたと感じると同時に, 今後研究に従事していく中で, 実験により正確なデータを蓄積することはもちろんとして, その上で現象の考察をより一層深め, 物理現象の支配機構の解明, 一般性の探求などをしていかなければならないと身の引き締まる思いがしております.

最後になりましたが, 本受賞は研究室のこれまでのスタッフ, 学生, および意見交換を通じてご指導賜りました諸先生方のおかげによるものであり, 深く感謝の意を表させていただきます.

日本伝熱学会技術賞を受賞して
*On Receiving Heat Transfer Society Award
 For Technical Achievements*



吉永 信也 (日立アプライアンス株式会社)
 Shinya YOSHINAGA (Hitachi Appliances, Inc.)
 e-mail: shinya.yoshinaga.bg@hitachi.com

この度名古屋国際会議場で開催されました日本伝熱学会第 44 期総会において、「高出力一体形自然冷媒 (CO₂) ヒートポンプ給湯機の開発」に対し、日本伝熱学会技術賞をいただきました。受賞の対象となりましたテーマは弊社と関西電力株式会社、中部電力株式会社との共同研究により開発したものであり、共同研究者である関西電力増田正、中部電力森本勝也を含めた受賞者一同を代表いたしまして、ご推薦いただきました方々、選考委員の方々ならびに関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

自然冷媒を採用した高効率ヒートポンプ給湯機(エコキュート)は 2001 年の発売以来、家庭用給湯需要の省エネルギー化ならびに温室効果ガスの削減に貢献する機器として期待され、急速にその普及が進んでいます。本研究テーマの商品は従来の貯湯式エコキュートとは異なり、瞬間連続的に沸き上げたお湯を直接給湯できる業界初の家庭用エコキュートで、コンパクト性と省エネ性を更に進め、技術開発を行い、2005 年 4 月に商品化したものです。特長としましては①大量のお湯を貯湯せず、必要な時に沸き上げて給湯するので大きな貯湯タンクが不要であり、従来の約 1/2 となるコンパクトで省スペース性を実現しています。②使用中は連続的に沸き上げるので湯切れのリスクが小さい。③日立独自の PAM 制御技術により圧縮機のハイパワー化を実現しかつ業界トップクラスの COP 4.6 と高効率な給湯機です。□ヒートポンプ給湯機の中でも省エネ性にすぐれており業界最少クラスの CO₂ 排出量を実現しています。

本開発機の原理は給水された水をヒートポンプの高温冷媒により所定の温度に加熱し、水で薄めず直接給湯するというもので、小型化、高効率化が可能になるというコンセプトを具現化するために、関係する要素技術開発から新たにに取り組む必要がありました。



項目	仕様
冷媒	CO ₂
定格加熱能力	23kW
定格 COP	4.6
貯湯温度	60～90℃
タンク容量	45L
外形寸法 (高さ x 幅 x 奥行)	1500x900x450 mm

開発機の外観と主な仕様

性能向上を図るための主な開発技術としては業界初となる高出力 CO₂ 横型スクロール圧縮機、これには高压冷媒である CO₂ の漏れ損失を低減するための新形状の歯型を採用しています。水をお湯にする水・冷媒熱交換器は冷媒配管と水配管をロウ付けにより接触させた対向流型とし、冷媒の特性に合わせて冷媒配管を細径化し、小型高性能化を図っています。外気から吸熱するための空気・冷媒熱交換器はクロスフィンチューブ型とし CO₂ 冷媒対応の内面溝付管を用いて伝熱促進による高性能化を図っています。

その他システムとしての完成度を高めるために使い勝手向上につながる制御技術まで関係者が一丸となりチームで開発を進めました。このような総合的な開発の取り組みを含めて技術賞としてご評価いただきましたことに対し関係者一同大変喜んでおります。今回は商品の PR という形を合わせたご紹介で申し訳ありませんでしたがこの受賞を励みに、より一層の技術向上に努め、お客さまから喜んでいただける商品開発に取り組んでまいります。最後に関係者の皆様に改めて感謝申し上げますと共に、日本伝熱学会の発展と会員の皆様のご健勝をお祈り申し上げます。

日本伝熱学会技術賞を受賞して
On Receiving Heat Transfer Society Award for
Technical Achievements



田中 清志 ((財)機械振興協会), 岡本 章 (NEC 東芝スペースシステム(株)),
伊地智 幸一 ((財)無人宇宙実験システム研究開発機構)

Kiyoshi TANAKA (Japan Society for the Promotion of Machine Industry)

Akira OKAMOTO (NEC TOSHIBA Space Systems, Ltd)

Kouichi IJICHI (Institute for Unmanned Experiment Space Free Flyer)

このたび第 44 期総会において、「CPL を用いた展開ラジエータ技術」について、日本伝熱学会技術賞をいただきました。ご推薦、ご選考下さいました諸先生方ならびに日本伝熱学会会員の皆様に心よりお礼を申し上げます。

人工衛星の消費電力は、機能・性能要求の高度化に伴い年々増加する傾向にあります。電波として放射されるエネルギー以外は最終的に熱に転換し、人工衛星表面のラジエータから宇宙に排熱する必要があります。しかし単位面積あたりの熱放射量は物理法則により上限があり、かつラジエータとして使用できる人工衛星の表面積もロケットフェアリングの収納能力から制約があります。さらに衛星の熱制御に関しては、人工衛星の大型化、発熱量の増大に対して人工衛星構体のラジエータだけでは放熱面不足になると考えられます。そのために人工衛星外に、太陽電池パドルのように展開・拡張可能なラジエータが必要になります。人工衛星内部に搭載された機器の熱を、この展開ラジエータまで CPL (Capillary Pumped Loop) を用いて輸送することにより、温度制御性が良く軽量で信頼性の高いシステムを構築することができます。このシステムの宇宙実証として「展開ラジエータ (CPDR : Capillary Pumped Deployable Radiator)」が計画され USERS (Unmanned Space Experiment Recovery System) に搭載されました。なお、本開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構受託業務により実施されました。

CPDR は、熱輸送のための CPL、実験制御のための制御ユニット、電力供給のための電源ユニット、軌道上で部品の劣化を評価する部品評価ユニット、ラジエータ (ラジエータ内熱拡散のために L 型ヒートパイプ 6 本、直管型ヒートパイプ 1 本、および凝縮器が埋め込まれています)、および展開・保持機構から構成されています。重量は約 30kg、形状はラジエータ展開前が約

700(L)×400(W)×240(H)mm の直方体であり、軌道上でこの直方体の長手方向から 700(L)×400(W)×25(H)mm のラジエータが 180°回転・展開する構造となっています。CPL に関しては、作動流体に R11 を用い熱輸送能力として 90W を目標としました。作動温度範囲は 0~60℃、熱輸送距離は約 2m です。ラジエータの展開に関しては、Ni-Ti 系形状記憶合金を使用したフランジボルトを加熱することによるフランジボルトの伸張により分離ボルトの切断を行ない、コンスタンスプリングによりラジエータの展開を行ないました。

装置の開発にあたっては、CPL の研究/開発に非常に苦労しました。CPL はヒートパイプと同様に毛細管力を駆動力としており、機械式ポンプのような可動部が無いため、長寿命、無振動の点で優れています。しかし、参考となるものが NASA/Lewis の Stenger による基礎実験結果のみしかなく、一からの開発でありました。心臓部となるポンプの考案、駆動力となるウィックの開発および特性の把握、温度制御のためのリザーバの考案、さらに複数の熱源に対応すべく並列型のシステムの検証等にかかなりの年月と労力を費やしました。さらに、航空機の微小重力を利用した実験を行ない人工衛星で使用できることを確認しました。この開発は、NEC (株) と早稲田大学の永田/勝田研究室との共同研究として実施しました。

本技術は、人工衛星の高発熱化に対し、人工衛星規模を大きくせず放熱面積を増大できることにより、小型で低コストの人工衛星の開発が可能となる利点があります。さらに、本技術に使用した「CPL」は機器の熱を効率的に輸送できる利点があり、パソコン、液晶 TV、工作機械等の温度制御に応用していくことが可能であると考えています。

最後に、本開発に対し多大なご助言を賜りました早稲田大学の永田勝也教授、勝田正文教授に感謝申し上げます。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して
*On Receiving Heat Transfer Society Award
 for Young Investigators*



村上 陽一 (東京大学・ライス大学)
 Yoichi MURAKAMI (University of Tokyo, Rice University)
 e-mail: Yoichi.Murakami@rice.edu

名古屋国際会議場で開催されました日本伝熱学会第 44 期総会において、「単層カーボンナノチューブの光吸収特性」の研究に対し、日本伝熱学会奨励賞を頂きました。ご推薦・ご選考下さいました先生方および関係者の方々に深く御礼申し上げます。

研究の対象とした単層カーボンナノチューブは 1993 年に透過型電子顕微鏡下で発見された sp^2 結合の壁面からなる筒状材料であり、構造に起因する離散的な電子状態・優れた電子や格子振動の輸送特性など様々な興味深い物性を有することから、現在幅広い分野で研究が行われています。

提案されている応用の一つに、そのサブバンド間遷移（近赤外～可視のエネルギーに対応）を利用した光吸収体・発光体があります。その形状が一次元であることから、偏光依存性を期待できることも利点の一つと考えられます。しかし通常はスパゲッティ状のランダムなバンドル（束）として合成されるため、従来ではこれを処理して並べさせることは困難であり、従って偏光依存性についての実験的研究は当時極めて少なく、特に顕著な吸収極大を示す近紫外域においては皆無でした。

本研究では測定試料として束状になった単層カーボンナノチューブが石英基板表面に垂直に立った状態で膜状に合成されたものを用いましたが、これは合成時点においておおよそ向きが揃っているという独特な試料であり、比較的容易に透過偏光測定が行えるという利点を有していました。

得られた偏光依存光吸収スペクトルにおいて予想外であったのが、それまで一つのピークと考えられ専門書などでは π プラズモン励起であると説明されていた 4.5 - 5 eV (約 250 - 275 nm) に現われる顕著かつ幅の広い吸収極大が、偏光依存性の異なる二つの成分から成り立っていることでした。さらに二次元的にランダムな膜と垂直配向した膜の近紫外吸収を比較したところ、やはり両者の吸収

ピーク位置は明確に異なっていました。この事実気付いてから暫くは、観測された偏光依存挙動が大きな謎のように感ぜられましたが、文献調査、考察とその確証実験を進めるにつれ、徐々に理解までたどり着くことができました。

4.5 eV (276 nm) の位置に現われる吸収は、1) ピーク位置が、直径が極めて小さい (< 1 nm) 場合を除き直径に依存しない事、2) このピークは周囲の誘電率変化および電気化学的な化学ポテンシャル変化では変化しないことを実験により確認した事、そして 3) グラファイトは面内方向に 4.5 eV の位置に $\pi \rightarrow \pi^*$ のバンド間遷移を有することが知られており、その偏光方向が当該ピークの偏光方向と一致した事、から、この吸収極大はグラフェンの物性に由来する $\pi \rightarrow \pi^*$ のバンド間遷移であると結論しました。また 5.2 eV (238 nm) 付近に位置する吸収ピークについては、上記 2) の実験で顕著な変調を受ける事から、直交方向へのプラズモニックな励起であろうという推定に至っています。

さらに、光吸収スペクトルの角度依存解析から垂直配向膜における物理的な配向の度合い（オーダーパラメータ）の導出方法を見出し、これにより試料の乱れの影響が取り除かれた真性光吸収断面積を、ナノチューブ軸に平行・直交の各偏光について定量的に求めることができました。

本研究を通じて学ぶところ・反省すべきところを様々な形で体験できたことは、大変幸運であったと思います。

最後に、大学院博士課程およびポスドクとしての一年間を通じ、懇切なご指導を賜りお導き下さいました丸山茂夫教授に心より感謝申し上げます。また当研究室の井上満助手、渡辺誠技術員、および過去・現在の研究室メンバーには多大なご助力を受けました。これらの方々のご指導とご助力によりまして奨励賞を受賞させて頂きましたことを、ここに深く御礼申し上げます。

第 43 回日本伝熱シンポジウム(名古屋)の報告

Report on the 43rd National Heat Transfer Symposium of Japan

実行委員長 長野 靖尚 (名古屋工業大学)
Yasutaka NAGANO (Nagoya Institute of Technology)
e-mail: nagano@heat.mech.nitech.ac.jp

1. 日本伝熱学会年次大会に向けて

第 43 回日本伝熱シンポジウムを、平成 18 年 5 月 31 日(水)～6 月 2 日(金)の 3 日間に亘り、名古屋国際会議場において開催しました。最初の開催年から既に 43 年になる、非常に歴史ある会議です。日本伝熱学会の主催の下に 25 の学協会の共催と日本学術会議の後援を得ていて、名実共に法人学会の年次大会として位置付けられるものです。今回のシンポジウムは 427 件の発表、850 名の参加者があり、例年のように成功裡に終えることができました。講演者、参加者、関係各位に、この紙面をお借りして御礼申し上げます。

日本伝熱シンポジウムの学術的意義は、「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にあります。伝熱が関連する学術分野は、機械工学、化学工学、原子力工学、冷凍空調、バイオエンジニアリング、食品工学、建築学、地球科学など幅広く、基盤分野はもとより学際領域への波及効果が大きいことから、シンポジウムの参加者の学術的活動は広範囲に及びます。本シンポジウムは、前述のように長い歴史に裏付けられていて、基礎的な学術分野を軸として、常に新しい研究分野を包含しつつ体系的に進展してきたものです。そのために、本年のシンポジウムも日本伝熱学会の年次大会に相応しいように、プログラム構成には特に注意を払いました。ご承知のように、文部科学省が示した「第三期科学技術基本計画の五つの戦略」において、第一に人材戦略、第二に基礎研究戦略、第三にイノベーション戦略、第四に基幹技術戦略、そして第五に国際戦略を挙げています。これらを、何らかの形で包含するよう試みたことは言うまでもありません。伝熱は、ライフサイエンス、ナノテクノロジー・材料、情報通信、環境と言った国策としての重点 4 分野の全てに関わる基幹の学術分野ですが、今回の会議では、名古屋の特色を活かし

て、「燃料電池」、「自動車」、「航空・宇宙」をテーマとする特別セッションを設けました。また、学問分野を考慮して、伝熱学会元会長の荒木信幸、黒崎晏夫、藤田恭伸各先生に、「研究の回顧と後進への期待」と言う特別講演をお願いしました。混沌とした現在でこそ温故知新はより重要と考え、基礎研究からイノベーション創出への道筋を説いて頂きました。同時に、先達の講話を通して、若手研究者にインセンティブを与えることを考えました。国際セッションや優秀プレゼンテーション賞に繋がる若手研究者によるポスター発表なども企画しましたが、基底にある理念は同じです。

2. シンポジウムに関する統計データ

本シンポジウムへの総講演申込数は 429 件でしたが、その内 2 件の講演辞退がありました。最先端の成果を世に問う会議ですから、発表する側も真剣勝負です。知的所有権を守るために、実行委員会内では守秘義務を徹底させました。

各セッションにおける講演数など、本シンポジウムの基礎データを表 1 に示します。本表を分析すると、研究の集積や分散が見えてきます。対流伝熱、ふく射伝熱、マイクロ伝熱といった伝熱の基礎に関する研究は健在です。また、沸騰・凝縮、二相流伝熱などが増えています。国プロとして原子力発電技術の開発が再び叫ばれていますが、このような社会的背景が影響しているかも知れません。OS では、PEFC や SOFC 等の燃料電池に関する発表が多かったのも時代を反映しています。

学生会委員会企画による、若手研究者に授与する優秀プレゼンテーション賞のセッションは熾烈を極めました。エントリー数が 31 件で、マイクロ・ナノスケール、対流・熱伝達、環境・エネルギーのキーワードを基に 3 室に分かれ、先ず各自 3 分程度の口頭発表から審査されました。その後一堂に会してポスター展示による審査を受けまし

表 1 各セッションにおける講演数と
TSE への自動投稿希望数

セッション名	件数
一般セッション	317
層流熱伝達	4
乱流構造と伝熱	8
はく離流における伝熱	5
噴流・せん断層の流動と伝熱	7
乱流のモデル化と数値シミュレーション	7
密閉空間内の自然対流	4
複合対流伝熱	5
対流熱伝達の促進・制御	10
多孔質体の伝熱	11
電子機器の冷却	15
生産・加工プロセスにおける流動と伝熱	13
限界熱流束	4
膜沸騰・極小熱流束	4
核沸騰	7
凝縮伝熱	4
沸騰・凝縮における伝熱促進	5
二相流のモデル化と数値解析	4
二相流の流動と伝熱	22
相変化利用機器	4
蒸発伝熱	5
ヒートパイプ・熱サイフォン	13
高性能コンパクト熱交換器	12
蓄熱蓄冷	9
粒子-流体系における伝熱	9
熱物性値と測定法	9
燃焼および反応プロセスにおける伝熱	21
ふく射伝熱	8
計測技術	11
ヒートポンプ・冷凍・空調	16
バイオ伝熱・食品の伝熱	9
自然エネルギー利用	7
融解・凝固	14
伝導伝熱	4
分子動力学	11
マイクロ伝熱	11
電場・磁場・電荷移動下での伝熱	5

た．各室 5 名の審査員による評価とポスター展示でのプレゼンテーションで賞が競われました．ポスター展示では，審査員評価に加えて，一般参加者による投票による評価が加味されました．その結果，5 名の若手研究者が受賞者に選ばれましたが，エントリーをした若手研究者全員に研究への熱意を多くの方が感じられたようです．

オーガナイズドセッション	76
燃料電池における熱流体問題 (展望講演 1 を含む)	23
自動車における熱流体問題 (展望講演 1 を含む)	14
航空・宇宙における熱流体問題 (展望講演 1 を含む)	13
遷移沸騰に関連する諸問題 (急速冷却や加熱面の濡れなど)	15
IECEC2006 PRE-SYMPOSIUM セッション	11
特別講演	3
研究の回顧と後進への期待	3
優秀プレゼンテーション賞セッション	31
TSE への自動投稿	36

3. 日本伝熱学会論文誌 (TSE) への直接投稿

本シンポジウムでは，講演論文集としてオフセット印刷版 (冊子体) と CD-ROM 版を作製しました．印刷版は従来と変わらず 1 題目あたり 2 ページですが，CD-ROM 版では 8 ページ以内のフルペーパーも掲載することにしました．そして，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るシステムを理事会と論文誌編集委員会の合議を経て確立しました．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にしましたが，これは成功であったと思います．表 1 のように，TSE への直接投稿は 36 件ありました．

4. あとがき

懇親会を全日空ホテルズ・ホテルグランコート名古屋で伝熱学会総会後に開催しましたが，300 名余の参加者があり盛会でした．例年のごとく，若手研究者がシニアを交えてフランクに歓談する慣習は今後も守っていききたい伝熱学会の良き点だと思います．(社)日本機械学会東海支部及び日本アビオニクス販売(株)には研究発表機器等で支援を受けました．(財)大幸財団と(財)名古屋観光コンベンションビューローの支援も受けました．ここに記して謝意を表します．また，講演論文集記載の実行委員会委員の皆様方には献身的な実務をお願いしました．改めて心より御礼を申し上げます．

New Composite Adsorbents for Conversion and Storage of Low Temperature Heat: Activity in the Boreskov Institute of Catalysis

Yu. I. Aristov

Boreskov Institute of Catalysis, Prospekt Lavrentieva 5, Novosibirsk 630090, Russia

1. Introduction

The current threat of global changes of the climate, due to emission of greenhouse gases [1], bring to the fore an increased necessity of rational use of heat. This requires new approaches and materials for efficient conversion and storage of heat. In this presentation we consider, first of all, adsorption methods to transforming a huge amount of low temperature heat (50-120°C) which now is poorly used and mostly dissipated in the ambient in vain. They are adsorptive heat storage, heat pumping and cooling. Although these three applications are overlapped, each one does impose specific requirements to an adsorbent that is optimal namely for this particular application.

Attempts to formulate these requirements have been done in many papers [2-8]. Here we mainly discuss how to synthesise such optimal adsorbent and which practical tools are available to do it? This paper is directed to summarise the activity of the Boreskov Institute of Catalysis, BIC, (Novosibirsk, Russia) on synthesis and study of new composite adsorbents of water to be used for conversion and storage of low temperature heat (sorbent characterisation was partially done in co-operation with the ITAE/CNR, Italy).

2. The concept of composite adsorbents

Results of [2-8] clearly showed that for each of the three mentioned applications quite different adsorbents are required to provide the best performance. Moreover, even for fixed application (e.g., an adsorptive cooling), in various climatic zones optimal adsorbents should significantly differ. Typical cycle of adsorptive chiller is displayed in Fig. 1; its description can be found in [2-4]. The cycle is determined by the evaporator temperature T_e , condenser temperature T_c and maximal desorption temperature T_3 . In any case the temperature of an external heat source which drives the cycle has to be higher than T_2 . This threshold temperature can be estimated from the Trouton's rule (the intersection of vapor pressure lines for T approaching infinity [2]) as [9]

$$T_2 = T_c^2 / T_e. \quad (1)$$

Fig. 2 presents as calculated T_2 vs T_c for the three cooling applications, namely, the deep freezing ($T_e = -30^\circ\text{C}$), ice making ($T_e = -5^\circ\text{C}$) and air conditioning ($T_e = 10^\circ\text{C}$). The value of T_2 appears to considerably differ for various climatic zones and covers the ranges of 80÷156, 47÷116 and 30÷96°C for the above applications (Fig. 2) [8].

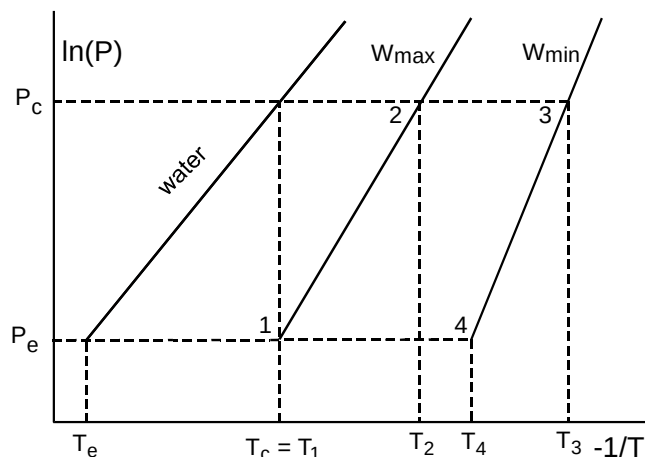


Figure 1. Thermodynamic cycle of an adsorptive cooling.

One might thus expect that an optimal adsorbent for these particular applications and climatic conditions should be quite different and, hence, is a subject of careful choice or specific synthesis.

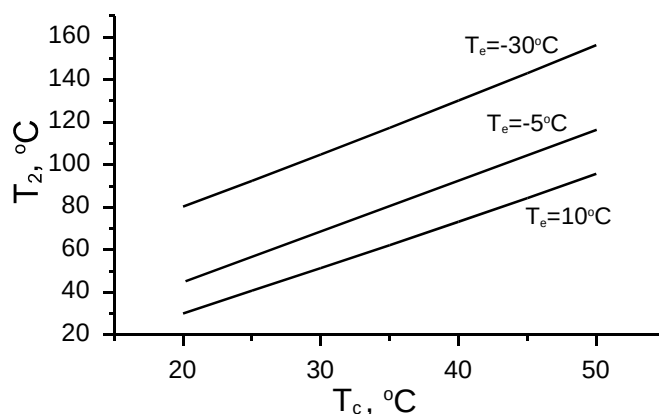


Figure 2. T_2 vs. T_c calculated according to eq. (1) for various cooling applications: freezing ($T_e = -30^\circ\text{C}$), ice making ($T_e = -5^\circ\text{C}$) and air conditioning ($T_e = 10^\circ\text{C}$).

This choice can hardly be done among common single component adsorbents. Indeed, although there are many trade marks of adsorbents, only few types of commercially available materials are known and popular among thermal engineers. The majority of literature data concern few working pairs, namely, "water – zeolite", "water – silica gel" and "methanol – activated carbon" [10, 11]. Many types of zeolites are commercially produced, but just

two of them are commonly studied for adsorption cooling, 4A and 13X, probably because they are large-scale products and, hence, they are easily available, well-characterized and cheap.

Similar situation exists with silica gels: mainly high density silicas have been tested for heat conversion, like Fuji types A and RD [12, 13], Davison gel types 125 and 127 (Grace and Co.) [14], Speschim (France), KSMG (Russia) [6], etc. For all these materials the pore diameter d is 2.0-3.5 nm, the pore volume V_p is 0.3-0.4 cm³/g and the specific surface area S_{sp} is 400-700 m²/g. Another famous type of silica is that of regular density [15] with $d = 10-15$ nm, $V_p = 0.7-1.2$ cm³/g and $S_{sp} = 250-450$ m²/g. Sorption properties of these two types are different and represent two boundary situations. The properties of other silicas are more or less between them because the synthesis technologies allow a change in the sorption properties within a relatively narrow range. The high density silica adsorbs more water than the silica with regular density and larger pores, and the difference can reach the factor of 2. Thus, for a **single component** adsorbent tools to vary sorption properties are rather restricted. Commonly, it is possible to change only the chemical nature of adsorbent and the size of its pores. Sometimes its crystalline structure can also influence sorption properties (for Al₂O₃, TiO₂, etc).

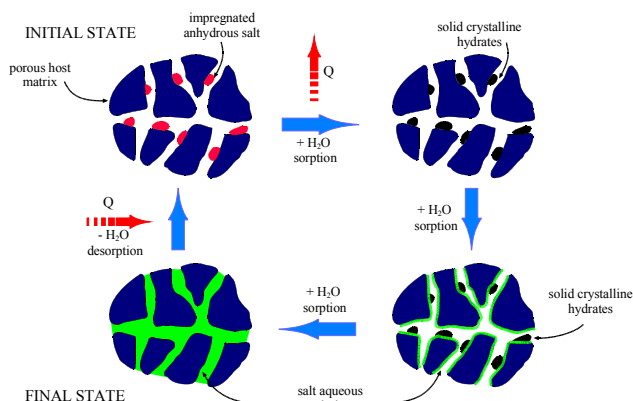


Figure 3. Scheme of water sorption on SWSs.

For a **two-component** adsorbent like "a porous host matrix modified by an active substance" at least two new parameters appear: the chemical nature of the modifying agent and its content, that can open new opportunities in varying and designing sorption properties of the composite. First substances used as the modifying agents were hygroscopic inorganic salts. Since 1929 composite "CaCl₂ in porous alumina" was patented as a dehydrating material [16]. Then, other two-component composites have been proposed for this application, and composite "CaCl₂ in porous carbon" was used in gas-masks. However, no comprehensive study was done to learn properties of the composites because the goal of those studies was technologically focused and restricted to the particular

conditions of gas drying. Anyway, it became clear that the modification of common adsorbents by hygroscopic salts can give a tool for managing their sorption properties. This idea was then almost forgotten.

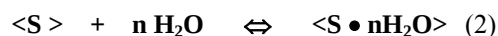
Recently, a new impact has come from the material science to promote this concept. It was originated from a basic research of ultradispersed solids and was aimed to answer the question "How do sorption properties of a salt change when it is dispersed inside a porous host matrix?" and "Which factors do influence these changes?" The answer required systematic study, that has been undertaken and resulted in a number of publications on the new family of composite adsorbents "a hygroscopic salt confined to a porous host matrix" synthesised at the Boreskov Institute of Catalysis [17-29]. These materials were called Selective Water Sorbents (SWSs) [18-20]. Now similar adsorbents are being synthesised and studied in many other research centres [30-38]. The SWSs are considered as promising for energy storage [5, 39], heat pumping [40] and cooling [30, 37, 41, 42], because they take an intermediate position between salt hydrates and solid adsorbents and, thus, can combine advantages of both these materials. Indeed, a pure salt can hardly be directly used, because of its corrosive properties, strong swelling/expansion during the reaction with water, very slow kinetics and hysteresis of this reaction, etc. [8]. The salt confinement to pores allows overcoming these obstacles and easy management of composite sorption properties to fit demands of given application, as it will be considered below.

3. Selective Water Sorbents: design of sorption properties

In this Section we review the results on SWSs obtained so far and try to answer the following question:

"Which tools has material science to design a composite adsorbent with predetermined properties optimal for particular application in energy sector?"

Here we summarise the activity of the Boreskov Institute of Catalysis in the synthesis of SWSs. So far, more than 40 new sorbents based on halides (CaCl₂, LiBr, LiCl, MgCl₂), sulphates (Na₂SO₄, MgSO₄, CuSO₄) and nitrates (Ca(NO₃)₂, LiNO₃, Mg(NO₃)₂) of metals incorporated into hydrophilic (silica gels, alumina, clays) or hydrophobic (porous carbons) matrices have been synthesised and studied. After that peculiarities of reversible reaction



between a confined salt S and water were studied. The reaction results in the formation of the hydrated salt $\langle S \cdot nH_2O \rangle$. The results of the study were presented in

more than 40 papers, 50 abstracts and 8 patents and have been summarized in [8, 26-28].

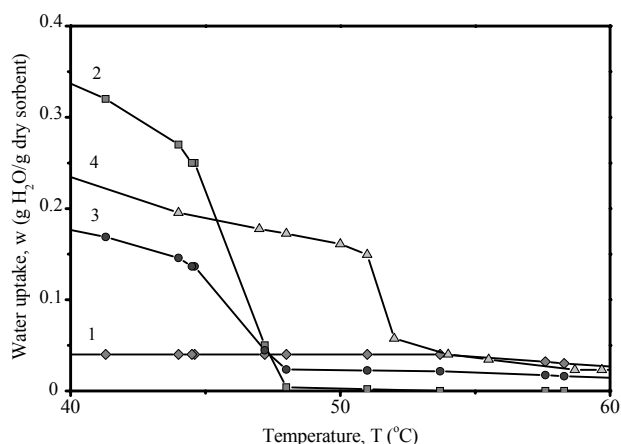


Figure 4. Isobars of water sorption by silica gel (pore size 12 nm) (1), by bulk $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (2), their linear superposition (3) and isobar for composite $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2/\text{silica}$ (4) [29]. $P(\text{H}_2\text{O}) = 17$ mbar.

The main findings can be generalized as follows:

- three mechanisms of water sorption have been found: a) adsorption by the host matrix, b) chemical reaction between water and salt resulting in the formation of crystalline hydrates, and c) absorption by the salt aqueous solution in the pores (Fig. 3);
- sorption by composite is not a linear combination of that of the host matrix and salt (Fig. 4);
- the matrix can accommodate the salt swelling caused by a chemical reaction between the salt and water;
- gas-solid reaction is much faster for a confined salt than for a bulk one, so that the rate of sorption process is commonly controlled by inter- or intrapartical diffusion;
- inside pores, the synthesis-decomposition hysteresis can be reduced or even avoided (see below).

Moreover, a host matrix provides a network for efficient transfer of heat and reagent which greatly enhances these processes, as it was conceived and reached for composite sorbents of ammonia “salt + expanded graphite” [43] or “salt + carboneous textile Busofit” [44].

The data obtained so far are a fundamental to answer the question “Which practical tools are available to design the optimal adsorbent?” First, we shall list these tools and then give examples of how do they affect sorption properties of a composite “salt in porous matrix”. In our previous studies [18-29, 45-49] it has been clearly shown that sorption properties of SWSs can be peculiarly changed in a wide range by varying

- a) chemical nature of confined salt,
- b) average size of pores of the host matrix,

- c) salt content,
- d) synthesis conditions.

3.1 Effect of the chemical nature of the confined salt

Since the active substance in SWSs is an inorganic salt, its chemical nature is of prime importance. Fortunately, a plenty of salts can form crystalline hydrates according to reaction (2).

Table 1. Relative pressure η_r corresponding to various transitions between different salt hydrates, both bulk and confined to silica pores of 15 nm in size.

Salt	Transition	η_r (bulk)	η_r (confined)
Na_2SO_4	$1 \Rightarrow 7$	0.80	0.5 – 0.6
	$7 \Rightarrow 10$	0.91	-
Na_2HPO_4	$0 \Rightarrow 2$	0.37-0.39	-
	$2 \Rightarrow 7$	0.52-0.57	-
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$0 \Rightarrow 2$	0.21-0.23	0.15 – 0.19
MgSO_4	$0 \Rightarrow 1$	0.03	0.001-0.003
	$1 \Rightarrow 2$	0.05-0.06	0.003-0.01
	$2 \Rightarrow 4$	0.15-0.17	-
	$4 \Rightarrow 6$	0.24-0.30	-
CaCl_2	$0 \Rightarrow 1/3$	< 0.01	-
	$1/3 \Rightarrow 2$	0.04-0.05	0.03-0.04
	$2 \Rightarrow 4$	0.16-0.18	0.12-0.14
LiBr	$0 \Rightarrow 1$	0.01	0.01
	$1 \Rightarrow 2$	0.04-0.05	0.02-0.03
LiCl	$0 \Rightarrow 1$	0.09-0.12	0.04-0.05
	$1 \Rightarrow 2$	0.12-0.13	0.06-0.09

Table 1 demonstrates that reaction (2) for various hydrated salts in bulk does occur at values of P/P_0 distributed over a wide range of 0.01 to 0.91. Thus, the first step of salt selection should be the calculation of relative pressure η_2 which corresponds to point 2 of the cycle diagram (Fig. 1) and searching the salt hydrate decomposed at η equal or close to η_2 . Then, the chosen salt can be placed inside pores of a host matrix.

3.2 Effect of the pore size of the host matrix

Table 1 also shows that the transition humidity η for confined hydrate can significantly differ from that in bulk. Thus, confining salt to small pores can result in shifting the equilibrium of hydrate formation towards lower relative pressure (higher temperature), what gives a valuable tool for adjusting the transition temperature.

This effect was comprehensively studied by confining $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ to silica with different pore size [29]. A gradual shift was found for the transition between anhydrous salt and its dihydrate (synthesis reaction) from 45-48°C for bulk salt to 53-58°C and 83-105°C for the salt confined, respectively, to pore of

12 and 3.5 nm in size (Fig. 5). Confining the salt inside the pores of silica also reduces the sorption/desorption hysteresis which becomes almost negligible for 3.5 nm pores (Fig. 5).

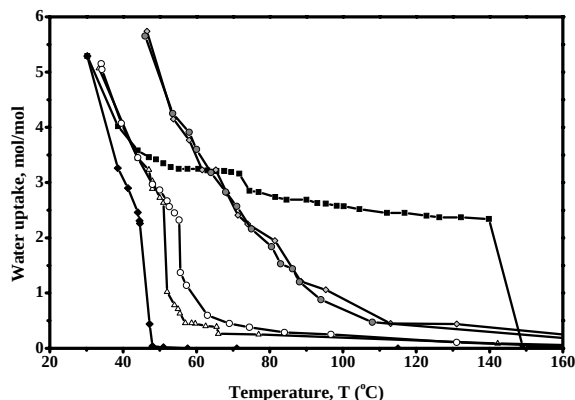


Figure 5. Isobars of sorption/desorption for $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$: bulk ($\blacklozenge/\blacksquare$), confined to pores of 12 nm (Δ/o) and 3.5 nm ($\circ/\blacklozenge$) [29].

3.3 Effect of the salt content

The salt content can affect both the final water uptake and the reaction temperature (Fig. 6) [24].

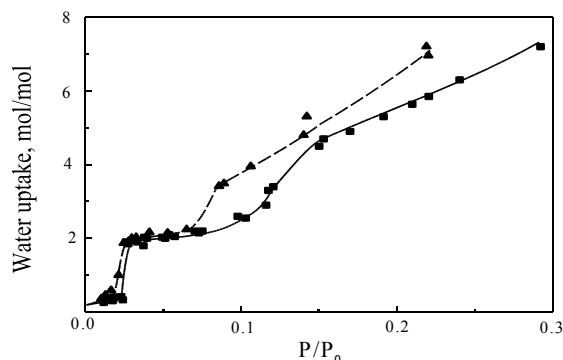


Figure 6. Temperature independent curves for $\text{CaCl}_2/\text{SiO}_2$ with the salt content 22.3 ($\blacktriangle$) and 33.4 % ($\blacksquare$).

It was found that reducing the salt content from 33.4 to 22.3 wt.% shifts the transitions ($0.33 \Rightarrow 2$) and ($2 \Rightarrow 4$) to lower relative pressure (Fig. 6). This effect is caused either by smaller size of salt nano-crystallites deposited on the silica surface from less concentrated salt solution or by the salt-silica interaction [45-47].

3.4 Effect of the synthesis conditions

We have found that among conditions, which can be varied during synthesis procedure the most important are pH of the impregnating solution [46, 47] and calcination temperature [45]. The increase of pH and T_{calc} leads to qualitatively similar impacts: the transition becomes less sharp and proceeds over wider range of the relative pressure. This can be explained by the ion exchange interaction between the silica surface

and the salt solution, which occurs during the impregnation procedure [45-47]. This interaction was found to cause the formation of the surface complexes $\equiv\text{Si}-\text{O}^-\text{Ca}^{2+}\cdots\text{Cl}^-$, which stabilizes two phases of the confined salt, namely, the volume crystalline phase and the surface X-ray amorphous phase. The fractions of the crystalline and amorphous phases depend on the salt content and pH of salt solution and affect the sorption equilibrium between the composites and water vapor. Water sorption by the composites, which contain predominantly crystalline salt, leads to the formation of crystalline hydrates of the salt with monovariant equilibrium. Water sorption by the composites, containing predominantly X-ray amorphous phase, monotonically changes with the increase of relative pressure, which is typical for salt solutions and hydrates of the lacunary structure. Relative contributions of the mentioned phases can be also controllably changed by varying the temperature of SWS final treatment [45].

3.5 Adsorbent properties vs. unit performance

Several SWSs synthesised in the Boreskov Institute of Catalysis have already been tested in the ITAE/CNR (Italy) [50, 51]. The adsorber of the chiller was filled with SWS-type material –calcium chloride in silica gel KSK (SWS-1L). The host matrix, active salt and its content (33 wt. %) were selected based on the knowledge gained as described above. The aim was to obtain solid sorbent optimal for air conditioning cycle ($T_{\text{ev}} = 10^\circ\text{C}$, $T_{\text{cond}} = 35^\circ\text{C}$) driven by low temperature heat. The tests showed that the cooling COP can achieve 0.6 at desorption temperature as low 85-95°C [50]. This was a gross COP that is affected by heat losses, the heat capacity of the inert masses and the heat efficiency of exchangers, which will be optimised in the next unit. Of course, it can be further improved in a multi-bed system with internal heat recovery. So large COP achieved for a simple unit configuration shows the advantage of this new composite sorbent with respect to common commercial materials (zeolite or silica gel) at such a low regeneration temperature. Indeed, 85-90 °C can be easily obtained with a simple and cheap flat receiver of solar energy or from industrial waste heat. Another prototype has been tested with consolidated SWS layer [51].

Despite encouraging results of the laboratory investigations, only further strict testing of SWSs in real prototypes of adsorptive heat transformers can prove the worth of these new materials.

4. Kinetics of water sorption on SWSs

So far, we considered only **equilibrium** sorption properties of new composite adsorbents and showed that they can be regulated in a wide range during synthesis stage. For heat pumps or cooling machines with short cycle times **dynamical** properties like the specific power, become important, too. That is why we

have measured isothermal kinetics of water sorption on loose grains of SWS-1L at $T = 33 - 69^\circ\text{C}$ and $P(\text{H}_2\text{O}) = 8 - 70$ mbar for various grain sizes R_p (0.355 - 1.4 mm) [52]. For comparison we also measured the same kinetics on loose grains of well-known adsorbent – silica Fuji Davison RD [12, 13]. It was indicated as the adsorbent of water used in Japanese commercialized adsorption chillers which utilize low-temperature heat ($50-80^\circ\text{C}$) [53, 54].

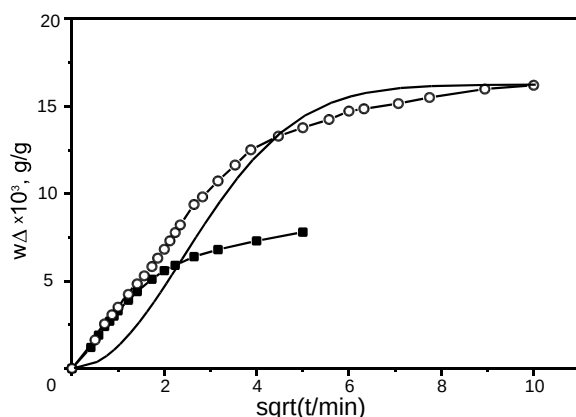


Figure 7. Water uptake m_t/m_0 vs. square root of time for silica gel Fuji Davison RD, the average grain size $D_p=0.9$ mm (■), and SWS-1L, $D_p=0.8$ mm (○). $T = 49^\circ\text{C}$, $P_{\text{H}_2\text{O in}} = 17$ mbar, $P_{\text{H}_2\text{O fin}} = 19.5$ mbar. Line - approximation for SWS-1L based on the LDF approach.

It is appeared, that kinetic behavior of both materials conforms well with the Fickian diffusion model [52, 55] rather than with the Linear Driving Force (LDF) model (Fig. 7) that is often used for modeling adsorptive heat pumps and chillers [56]:

- the dependence of the water uptake on $\sqrt{t}$ is linear at short times (Fig. 7);
- the apparent water diffusivity depends on the local slope of the water sorption isotherm;
- the Knudsen mechanism of the interparticle diffusion is found;
- contribution of thermal effects for water sorption became significant for small grains.

The pore diffusivity of water in SWS-1L was calculated from experimental data over temperature range $33-69^\circ\text{C}$ $D_e = (1.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-6}$ m²/s, that is 2-4 times lower than that of the pure silica KSK. The possible reason might be related to a partial blockage of the silica pores by the salt. It could result in the increase of the pore tortuosity and, thus, in the reduction of the effective pore diffusivity.

Despite of this difference in the D_e , the specific cooling power $W = (m_t/m_0) \Delta H_{ev}/t$ generated at the beginning of sorption is the same for both the materials, as the initial slopes are equal (Fig. 7). This is due to the fact that for SWS-1L, the lower diffusivity is compensated by larger equilibrium uptake (Fig. 7), which also leads

to higher COP than for the pure silica [52, 55].

The obtained results evidence that for layer of loose grains of the both adsorbents rather short adsorption times can be realized. This could result in the average cooling power 500-1000 W/kg, that makes it possible construction of quite compact adsorptive units for heat transformation.

5. Other SWS-type materials

Composite materials for sorption of ammonia [43, 44, 57-62] and methanol [63-66] have also been developed and tested taking in mind application for heat conversion.

5.1 Ammonia

Recent study of CaCl_2 and BaCl_2 inserted to inorganic matrices [62] confirmed that the ability of the confined salt to absorb NH_3 can differ from those of a bulk salt:

- transitions between complexes $\text{CaCl}_2 \times n\text{NH}_3$ are shifted to higher ammonia pressure in comparison with those in bulk;
- both the enthalpy and entropy of complex formation for the confined salt are significantly reduced respect to those for the bulk one;
- the equilibrium of ammonia sorption in the confined state is divariant that means the NH_3 uptake increases continuously as the NH_3 pressure rises;
- the solid compound $\text{CaCl}_2 \times 8\text{NH}_3$ does not form inside pores. This could be caused by the formation of a CaCl_2 /ammonia solution inside the pores.

5.2 Methanol

A new family of methanol sorbents “salt in mesoporous silica” for utilization in adsorptive air conditioner driven by solar energy or low temperature waste heat ($T=65-100^\circ\text{C}$) has been proposed in the BIC [63-66]. The composites were synthesized by impregnation of various silica gels with an aqueous solution of different salts (CaCl_2 , LiCl , LiBr , MgCl_2 , NiBr_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, MnCl_2 , CuCl_2 , CoCl_2 , MgBr_2 , BaCl_2 , CaBr_2). The methanol sorption capacity of composites, under conditions of typical cooling cycle, was measured by using a new express method [64, 65]. Furthermore, estimation of the cooling COP was carried out in order to compare the performance of such sorbents with other methanol, ammonia and water sorbents. Results obtained showed that most of the composites synthesised present methanol sorption ability which is higher than that of common methanol sorbents (e.g. active carbons). The composite $\text{LiCl}(30.6 \text{ wt.}\%)/\text{SiO}_2$ appears to show the highest sorption capacity $w_{ads} = 0.8$ g/g. Methanol uptake after desorption stage decreases as well $w_{des} = 0.09$ g/g giving an uptake variation per cycle $\Delta w = 0.71$ g/g. The corresponding cooling COP is 0.74 (maximum $T_{des}=363$ K, single-bed cycle), which is comparable to

the typical COP values of the best water sorbents.

6. Other Applications

Two other applications of SWSs have been realised commercially in Russia. They are a) adsorptive drying of a compressed air that was implemented in twelve oil refinery plants and cryogenic stations in Russia (more than 200 tonnes of SWS-1A are in use) [67] and b) thermal protection of electronic memory chips ("black box") [68]. Other possible applications of SWSs for obtaining water from air [69], desiccant rotary wheels [38], regeneration of heat and moisture in ventilation systems [70] are under intensive investigation.

7. Conclusions

In this communication we give the review of activity developed at the Boreskov Institute of Catalysis of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk) on synthesis and characterization of new composite materials which can be used for conversion and storage of low temperature heat. We mainly focus on how to design new solid sorbents with sorption properties close or even equal to those perfectly fitting particular cycle of heat transformation. It has been concluded that such sorbents should be two-component materials "hygroscopic salt confined to porous host matrix" (called Selective Water Sorbents, SWSs). More than forty SWS composites were synthesised and studied. It was proved that sorption properties of SWSs can be monitored by a proper choice of the chemical nature and content of the confined salt, the average size of pores of the host matrix and synthesis conditions. All these tools can be used to adjust the real adsorbent to the ideal one which was predetermined as an optimal for chosen cycle. Thus, we review the current state-of-the art at the BIC on the new family of the SWS composites.

It is important to mention that although we have mainly considered here water as a refrigerant, new efficient composites of the SWS-type have also been prepared for sorbing ammonia and methanol, thus, confirming the general approach which we are using for synthesis new adsorbents.

8. Acknowledgements

The author thanks the INTAS (grant 03-51-6260) and the RFBR (grants 04-02-81028, 05-02-16953 and 05-08-50223) for partial financial support.

References

- [1] The Kyoto Protocol, http://unfccc.int/essential_background/convention/items/2627.php
- [2] G. Alefeld, R. Rademacher, Heat Conversion Systems, CRC Press, Boca Raton, 1994, p.31.
- [3] R. E. Critoph, Performance limitation of adsorption cycles for solar cooling, Sol. Energy, **41** (1988) 21.
- [4] D. Tchernev, A waste heat driven automotive air conditioning system, Proc.Int.Sorption Heat Pump Conf., Munich, Germany, March 24-26, 1999, p.65.
- [5] D. Mugnier, V. Goetz, Energy storage comparison of sorption systems for cooling and refrigeration, Sol. Energy, **71** (2001) 47.
- [6] D. M. Chalaev, Yu. I. Aristov, Analysis of adsorptive chiller operation: Influence of water sorbent properties, Proc. V Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators", Minsk, Belarus, Sept. 8-11, 2003, pp. 471-477.
- [7] F.P. Schmidt et al, Influence of sorbent characteristics on the performance of an adsorption heat storage cycle, Ind. Engn. Chem. Research, **42** (2003) 4910.
- [8] Yu. I. Aristov, An optimal sorbent for adsorption heat pumps: thermodynamic requirements and molecular design, Proc. VI Int. Seminar "Heat pipes, heat pumps, refrigerators", 12-15 Sept. 2005, Minsk, Belarus, pp. 342-353.
- [9] L. E. Haseler et al., Absorption cycle heat pumps for domestic heating, AERE-G 104R, Harwell, 1978.
- [10] N. C. Srivastava et al., A review of adsorbents and adsorbates in solid-vapor adsorption heat pump systems, Appl. Therm. Engn., **18** (1998) 707.
- [11] F. Meunier, Solid sorption heat powered cycles for cooling and heat pumping applications, Appl. Therm. Engn., **18** (1998) 715.
- [12] H. T. Chua et al., Adsorption characteristics of silica gel-water system, J.Chem.Eng.Data, **47** (2002) 1177.
- [13] X. Wang et al., Investigation of the isotherms of silica gel/water system: TG and volumetric methods, J. Therm.Anal. and Calorimetry, **76** (2004) 659.
- [14] J. Y. Andersson et al., Experimental and theoretical investigation of the kinetics of the sorption of water vapour by silica gel, J. Chem.Soc., Faraday Trans. 1, **81** (1985) 2681.
- [15] R. K. Iler, The Chemistry of Silica, Wiley, New York 1979, 896 p.
- [16] US Patent N 1,740,351. Dehydrating substance, H. Isobe, Dec. 17, 1929.
- [17] E. A. Levitskii, Yu. I. Aristov et al., "Chemical Heat Accumulators" - a new approach to accumulating low potential heat, Sol. Energy Mater.Sol.Cells, **44** (1996) 219.
- [18] Yu. I. Aristov et al., Selective water sorbents for multiple applications: 1. CaCl₂ confined in mesopores of the silica gel: sorption properties, React.Kinet.Cat.Lett., **59** (1996) 325.
- [19] Yu. I. Aristov et al., Selective water sorbents for multiple applications: 2. CaCl₂ confined in micropores of the silica gel: sorption properties, React. Kinet.Cat.Lett., **59** (1996) 335.
- [20] L. G. Gordeeva et al., Selective water sorbents for

- multiple applications: 5. LiBr confined in mesopores of silica gel: sorption properties, *React.Kinet.Cat. Lett.*, **63** (1998) 81.
- [21] J. Mrowiec-Bialon et al., Effective inorganic hybrid adsorbents of water vapor by the sol-gel method, *Chem.Mater.*, **9** (1997) 2486.
- [22] L. Gordeeva et al., Properties of the system "LiBr-H₂O" dispersed in silica gel pores: vapour equilibrium, *Rus. J. Phys. Chem.*, **72** (1998) 1236.
- [23] L. Gordeeva et al., Properties of the system "lithium bromide - water" in pores of expanded graphite, Sibunit and aluminum oxide, *Russ. J. Phys. Chim.*, **74** (2000) 2016.
- [24] L. G. Gordeeva et al., Influence of calcium chloride interaction with silica surface on phase composition and sorption properties of dispersed salt, *Russ. J. Phys. Chem.*, **77** (2003) 2019.
- [25] L. G. Gordeeva et al., Sorption of water by sodium, copper, and magnesium sulfates dispersed into mesopores of silica gel and alumina, *Russ. J. Phys. Chem.*, **77** (2003) 1715.
- [26] Yu. Aristov, Thermochemical energy storage: new processes and materials, Doctoral Thesis, Boreskov Institute of Catalysis, Novosibirsk, 2003, 375p.
- [27] L. G. Gordeeva, New materials for thermochemical energy storage, Ph.D. thesis, Boreskov Institute of Catalysis, 2000, 146p.
- [28] M. Tokarev, Properties of the composites "calcium chloride in a porous matrix", Ph.D. thesis, Boreskov Institute of Catalysis, 2003, 138p.
- [29] I. Simonova, Yu. Aristov, Sorption properties of calcium nitrate dispersed in silica gel: the effect of pore size, *Russ. J. Phys. Chem.*, **79** (2005) 1307.
- [30] K. Daou et al., Development of a new synthesized adsorbent for refrigeration and air conditioning applications, *Appl. Therm. Engn.*, **26** (2006) 56.
- [31] J. Jänchen et al., Calorimetric investigation on zeolites, AlPO₄s and CaCl₂ impregnated attapulgite for thermochemical storage of heat, *Thermochimica Acta*, **434** (2005) 37.
- [32] Y. Liu et al., Continuous cycle unit for extracting water from air, *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, **55** (2004) 1002.
- [33] C. Liu et al., Water sorption of CaCl₂-containing materials as heat storage media, *Chemistry Letters*, **33** (2004) 292.
- [34] K. Daou et al., Desiccant cooling air conditioning: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **10** (2006) 55.
- [35] J. Jänchen et al., Studies of the water adsorption on zeolites and modified mesoporous materials for seasonal storage of solar heat, *Solar Energy*, **76** (2004) 339.
- [36] X. Zhang et al., Moisture transport and adsorption on silica gel-calcium chloride composite adsorbents, *Energy Conversion and Management*, **47** (2006).
- [37] R. Critoph, Y. Yang, Review of trends in solid sorption refrigeration and heat pumping technology, *Proc. Inst. Mech. Engn., Part E: J. Mech. Proc. Engn.*, **219** (2005) 1.
- [38] X. Zhang et al., Parametric study on the composite silica gel - calcium chloride desiccant rotary wheel employing fractal BET adsorption isotherm, *Int. J. Energy Res.*, **29** (2005) 37.
- [39] T. Nunez et al., Adsorption cycle modelling: characterization and comparison of materials, *Proc.Int.Sorption Heat Pump Conf.*, Munich, Germany, March 24-26, 1999, p.209-217.
- [40] B. Dawoud, A hybrid solar-assisted adsorption cooling unit for vaccine storage, *Renewable Energy*, **31** (2006).
- [41] Yu. I. Aristov et al., New working materials for sorption cooling/heating driven by low temperature heat: properties, *Proc.Int.Sorption Heat Pump Conf.*, Munich, Germany, March 24-26, 1999, p.247-254.
- [42] Yu. I. Aristov et al., A family of new working materials for solid sorption air conditioning systems, *Appl.Therm.Engn.*, **22** (2002) 191.
- [43] S. Mauran et al., Active component and its use as reaction media, US Patent 5,283,219, Feb. 1, 1994.
- [44] L. L. Vasiliev et al., NaX, Carbon Fibre and CaCl₂ Ammonia Reactors for Heat Pumps and Refrigerators, *Adsorption*, **2** (1996) 311.
- [45] L. G. Gordeeva et al., Composite water sorbents of the salt in silica gels pore type: the effect of the interaction between the salt and the silica gel surface on the chemical and phase compositions and sorption properties, *Russ. Kinetics and Catalysis*, **46** (2005) 736.
- [46] L. G. Gordeeva et al., Influence of calcium chloride interaction with silica surface on phase composition and sorption properties of dispersed salt, *Russ. J. Phys. Chem.*, **77** (2003) 1843.
- [47] L. G. Gordeeva et al., Impact of phase composition on water adsorption on inorganic hybrids "salt/ silica", *J. Coll. Interface Sci.*, **303** (2006).
- [48] Yu. I. Aristov et al., Selective water sorbents for multiple applications. 11. CaCl₂ confined to expanded vermiculite, *React. Kinet.Cat.Lett.*, **71** (2000) 377.
- [49] M. Tokarev et al., New composite sorbent "CaCl₂ in mesopores of MCM-41" for sorption cooling/heating, *Int.J.Thermal Science*, **41** (2002) 470.
- [50] G. Restuccia et al., Selective Water Sorbents for solid sorption chiller: experimental results and modelling, *Int.J. Refrig.*, **27** (2004) 284.
- [51] A. Freni et al., An advanced solid sorption chiller using SWS-1L, *Appl. Therm. Engn.*, **26** (2006) 156.
- [52] Yu. I. Aristov et al., Kinetics of water sorption on SWS-1L (calcium chloride confined to mesoporous silica gel): Influence of grain size and

- temperature, Chem. Engr. Sci., **61** (2006) 1453.
- [53] M. Matsushita et al, Adsorption chiller using low-temperature heat sources, Energy Conservation, **39** (1987) 96.
- [54] Adsorption refrigerator uses low-temperature waste heat, Newletters, 2000, N 1, 7.
- [55] Yu. I. Aristov et al., Kinetics of water adsorption on silica Fuji Davison RD, Microporous Mesoporous Materials, 2006 (in press).
- [56] B. Saha et al., Computer simulation of a silica gel-water adsorption refrigeration cycle – The influence of operating conditions on cooling output and COP, ASHRAE Transactions: Research, **101** (1995) 348.
- [57] L. L. Vasiliev et al., A solar and electrical sorption refrigerator, Int.J.Thermal Sci., **38** (1999) 519.
- [58] L. Vasiliev et al., Multisalt-carbon chemical cooler for space applications, J. Engineering Physics & Thermophysics, **72** (1998) 595.
- [59] L. L. Vasiliev et al., Solar-gas solid sorption refrigerator, Adsorption, **7** (2001) 149.
- [60] B. Spinner, Ammonia-based thermochemical units, Heat Recovery Systems, **13** (1993) 301.
- [61] L. Wang et al., Compound adsorbent for adsorption ice makers on fishing boats, Int. J. Refrig., **27** (2004) 401.
- [62] V. Sharonov et al., Ammonia sorption on "CaCl₂ in inorganic host matrix": isosteric chart and its performance, Int.J.LowCarbonTechn., **1** (2006) 191.
- [63] L. G. Gordeeva et al., Methanol sorption on "CaCl₂/ silica gel" composite: sorption equilibrium, calorimetry, Proc. 14th Int.Conf.Chem.Proc.Engn., 27-31 Aug., 2000, Praha, Czech Rep., v.2, p.250.
- [64] L. G. Gordeeva et al., A new family of methanol sorbents for adsorptive air conditioning driven by low temperature heat, Submitted for Int. Conference on Heat Powered Cycles, Newcastle, Sept. 11-14, 2006.
- [65] L. G. Gordeeva et al., Methanol sorbents "salt in mesoporous silica": salt screening for adsorptive air conditioning driven by low temperature heat, Ind. Engr. Chem. Research, **45** (2006).
- [66] Yu. I. Aristov et al., Sorption Equilibrium of Methanol on New Composite Sorbents «CaCl₂/ Silica Gel», Adsorption, 2006 (in press).
- [67] Yu. I. Aristov, Selective Water Sorbents for air drying: from the lab to the industry, Catalysis in Industry, (2004) N 6, 36.
- [68] V. N. Parmon et al., Use of modern composite materials of the chemical heat accumulator type for fire protection and fire extinguishing, Prevention of Hazardous Fires and Explosions, V.E.Zarko et al. (Eds.), 1999, Kluwer Academic Publishers, p.34-48.
- [69] Yu. I. Aristov et al., New composite sorbents for solar-driven technology of fresh water production from the atmosphere, Solar Energy, **66** (1999) 165.
- [70] Yu. I. Aristov et al., New approach to regenerating heat and moisture in ventilation systems. 1. Lab prototype, J. Engr. Thermal Physics, **79** (2006) 143.

吸着式冷凍機用吸着材料の高密度化

Development of Densified Adsorbent for Adsorption Refrigeration

汲田 幹夫 (金沢大学)

Mikio KUMITA (Kanazawa University)

e-mail: kumita@t.kanazawa-u.ac.jp

1. はじめに

1997 年に気候変動枠組条約第 3 回締結国会議 (COP3) で採択された京都議定書が 2005 年 2 月に発効し, 日本では 2012 年までに二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量を 1990 年比で 6 %削減することが求められている. こうした状況において二酸化炭素の排出削減を図るためには, さまざまな分野における省エネルギー (エネルギーの有効利用) を推進し, 一次エネルギーの消費量を低減する必要がある. エネルギーの総合的な有効利用を考える場合, エネルギーの最終形態である熱の問題を避けて通ることはできず, さまざまな温度レベルの熱エネルギーをカスケード的に利用するための技術やシステムの開発をさらに一層進めなければならない. しかし, このカスケード利用のボトムに位置する低温熱エネルギー, とりわけ 100℃以下の廃熱は, 産業分野のみならず我々の身の回りにも膨大な量が存在しているにもかかわらず, 周囲環境との温度差が小さいためにその利用が困難であり, 一部が給湯や暖房の熱源に利用されている以外は環境中に放出されている. したがって, この温度レベルの熱エネルギーを回収利用する技術の開発はエネルギーの有効利用にとって極めて重要であり, その候補技術のひとつに 100℃以下の熱源で駆動し, 冷房や冷凍, 冷却用の冷熱を生成する吸着式冷凍機が挙げられる.

本稿では, 吸着式冷凍機の特徴と問題点 (開発課題) 等[1]を概説し, その後, 著者らが取り組んでいる吸着材の高密度化について述べる.

2. 吸着式冷凍機とは

2.1 作動原理

吸着質の蒸発・凝縮現象と固体吸着材/吸着質間の吸脱着現象を利用して熱変換を行う吸着ヒートポンプ (AHP: Adsorption Heat Pump) は, 臭化

リチウム/水系等の吸収式や酸化カルシウム/水系等の化学反応式とともに広義のケミカルヒートポンプに分類され, 特に, 冷熱の生成を目的とする吸着ヒートポンプは吸着式冷凍機 (吸着冷凍システム, 吸着式チラー) と呼ばれ, その最初の報告は 1929 年の E. B. Miller のシリカゲル/SO₂ 系吸着冷凍システム[2]までさかのぼる.

吸着ヒートポンプは図 1 に示すように, 固体吸着材と吸着質 (冷媒) が封入された真空容器間を吸着質蒸気が行き来することで作動する. まず, 水, 低級アルコール, アンモニアなどの冷媒吸着質が蒸発器内において蒸発し, それより圧力の低い吸着器に移動して, 内部のシリカゲル, ゼオライト, 活性炭などの吸着材に吸着する (吸着過程). この時, 蒸発器では熱の吸収 (気化熱) により冷熱が生成され, 吸着器では蒸気吸着に伴う吸着熱が放出される. 通常, AHP で起こる蒸気吸着現象は比較的弱い相互作用による物理吸着で, 吸着熱は吸着質の凝縮熱程度であるため, 低温の廃熱等

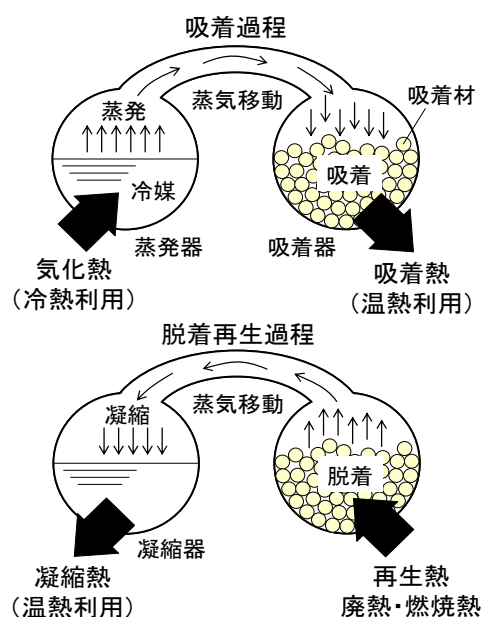


図 1 吸着ヒートポンプの作動原理

で吸着材を加熱することで容易に再生させることができる。脱着再生過程では、外部熱源による加熱で脱着した高圧の吸着質蒸気が凝縮器に移動して凝縮し、凝縮液は蒸発器に戻される。この時発生する凝縮熱は温熱として利用可能である。

このような原理で作動する最も単純な単段式 AHP システムを図 2 に示す。AHP では吸着と脱着再生の 2 つの操作過程が不可欠なため、冷熱や温熱を連続的に取り出すためには 2 器以上の吸着熱交換器（吸着器）を用意し、それぞれで吸着と脱着再生を交互に繰り返すことになる。なお、現在実用化されているシリカゲル／水系吸着式冷凍機やこれを利用したシステムはインターネット上で閲覧することができる[3, 4]。

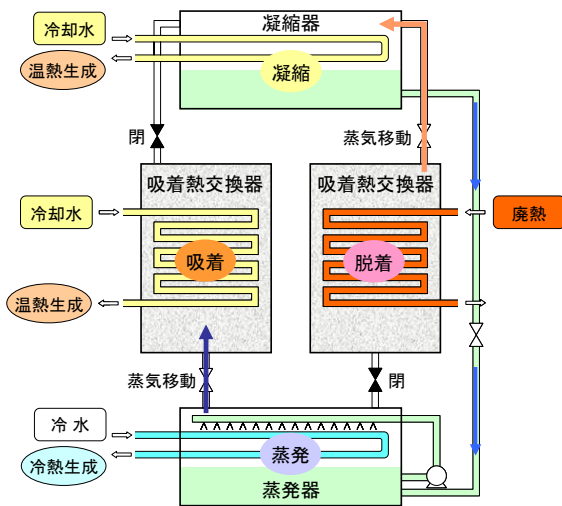


図 2 単段式吸着ヒートポンプシステム

2.2 特徴と問題点

吸着式冷凍機（ヒートポンプ）の特徴は、①吸着材と吸着質が、圧縮式ヒートポンプのフロン系、アンモニア系冷媒および吸収式冷凍機の臭化リチウム吸収剤に比べて環境負荷が小さく、安全で装置材料の腐食の心配が少ない、②未利用低温廃熱を駆動熱源に利用でき、特に 80℃以下の熱源利用では吸収式冷凍機に比べて熱効率が低い、③熱源温度および熱量の変動による熱変換性能の変化が比較的少ない、④低温・減圧下での物理吸着操作のため吸着材や吸着質の劣化が殆どなくメンテナンスフリーである、⑤装置構成および内部構造が単純である、⑥数分の起動時間で定格運転ができ（吸収式冷凍機では立ち上がり数十分を要する）、即時の運転停止も可能である、⑦原則的に熱

駆動型のため電力消費が極めて少なく騒音や振動も少ない、などが挙げられ、高い省エネルギー性と好環境性を併せ持つ熱源機器と言える。

このような魅力的な特徴を有し、実用化後約 20 年が経過しようとしている吸着式冷凍機であるが残念ながら広く普及するには至っていない。これは、年間 3,000 台前後の出荷台数[5]を誇る吸収式冷凍機に比べて、吸着式冷凍機が大型で重い装置になることと価格が高いことに起因している。つまり、吸着式冷凍機では、①吸収液が循環する吸収式冷凍機とは異なり、固体吸着材を固定層として利用し、複数の吸着熱交換器による吸着と脱着再生の交互バッチ操作を行うために大量の吸着材を必要とする、②圧損が少ない大型の蒸気バルブ・蒸気ダンパが不可欠で、吸着熱交換器内にも蒸気の移動流路を確保しなければならない、③固体吸着材充填層の有効熱伝導率は一般的に小さく、吸着熱の除去と再生熱の供給を迅速に行うためには大きな伝熱面積が必要である、④吸着熱交換器内の伝熱促進を図るための吸着材の微粒化・塊状化や吸着材／熱交換器の一体化はコスト上昇をもたらす、など改善を図るべき問題点がある。

表 1 吸着式冷凍機の開発課題

項 目	内 容
吸 着 材 の 高 性 能 化	・蒸気有効吸着量の増大(材料設計, 細孔制御, 薬剤添着) ・かさ密度の増大(塊状化, 微粒化) ・可逆性と耐久性の確保
吸 着 熱 交 換 器 内 の 伝 熱 促 進	・熱交換方式の高度化(吸着材充填層への伝熱促進体の挿入, 強制対流の利用等) ・接触熱抵抗の低減(吸着材／伝熱面の圧着接触, バインダ等による一体化, ケミカル接合)
蒸 気 移 動 促 進	・吸着材充填方式の最適化 ・小型低圧損蒸気バルブの開発 ・バルブレス方式の採用
サイクル操作	・装置内熱回収の高度化 ・新規サイクル操作の提案 ・発生冷熱および温熱の用途先開拓 ・バッチ操作からの脱却
低コスト化	・吸着材の低コスト製造法の確立(天然原料, 廃棄物の利用) ・吸着熱交換器構造の単純化

このような問題点を踏まえ、吸着式冷凍機を広く普及させるために取り組むべき開発課題としては表1に列挙する項目が考えられる。

3. 吸着材充填層の伝熱性能の改善

吸着材開発の観点から吸着式冷凍機の小型化を図るためには、表1からもわかるように、吸着材の蒸気有効吸着量（冷凍機の実作温度範囲における最大吸着量と再生時残留吸着量の差）を増大させ、吸着熱交換器への充填量を相対的に減らすことと、吸着材充填層内の伝熱抵抗および吸着材／熱交換面の接触熱抵抗を、吸着材の形体（微粒状、塊状）や充填方法等の工夫によって低減することが重要である。とりわけ後者の吸着材充填層の伝熱性能については、シリカゲル、ゼオライト、活性炭などの粒状吸着材の場合、その粒径や形状、吸着質種にもよるが充填層の有効熱伝導率は $0.1 \sim 0.25 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ と低く、熱交換面との接触熱伝達係数も $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 程度にとどまる。

この問題を改善するために国内外においてこれまでに、有機系接着剤（酢酸ビニル[6]、エポキシ樹脂[7]）によるシリカゲル粒子の金属伝熱面への固定化、膨張化グラファイト[8]や発泡金属（銅、ニッケル）[9]中へのゼオライトの担持、発泡銅表面上へのゼオライト層の合成[10]、アルミニウムプレート上への水酸化アルミニウムによるゼオライト層の化学的接合[11]、有機系バインダ添加による活性炭の高密度塊状化[12]、粒状および繊維状の活性炭の混合成形によるプレート化[13]、などの検討が行われている。

一方、著者らは、低級アルコール系吸着式冷凍機に適用する吸着材として、アルコール蒸気を大量かつ迅速に吸脱着し得る活性炭素繊維（ACF: Activated Carbon Fiber）に着目し、その構成繊維が高度に密集する ACF 成形吸着材の製造に取り組んでいる[14, 15]。

4. 活性炭素繊維の高密度化

脱臭、VOC 除去、浄水、調湿等に利用されている ACF は、セルロース、フェノール樹脂、ポリアクリロニトリル（PAN）、ピッチ系の原料繊維を炭化・賦活処理することで製造され、ペーパー、クロス、フェルト、ハニカムなどの多様な形状に加工されている。ACF の一次繊維径は $10 \sim 30 \mu\text{m}$ と

極めて細く、かさ密度は $0.05 \sim 0.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ と粒状活性炭 ($0.35 \sim 0.65 \text{ g}/\text{cm}^3$) に比べて小さい。しかし、ACF はその極細の繊維表面に無数の細孔（平均細孔径 $1 \sim 3 \text{ nm}$ ）が直接開口する構造をとるため、吸着容量が大きく（比表面積が大きい）、吸着速度も速いなど吸着式冷凍機の吸着材に求められる特性を有している。そこで、我々はこの特性を生かしつつ ACF のかさ密度を増大させるために、三浦らが開発したホットプレス法[16]により ACF の高密度化を試みた。

4.1 高密度 ACF の製造方法

ACF 原料としてフェノール樹脂繊維（東洋紡績（株）ご提供）を選定し、以下の手順でその高密度化を行った。原料繊維を直径 17 mm の金属製円筒鑄型に入れ、 40 MPa の圧力で機械的に圧縮しつつ、 $20 \text{ K}/\text{min}$ の速度で 400°C まで昇温加熱するホットプレス法により高密度の ACF 前駆成形体を得た（通常、活性炭の塊状化を行う場合には有機系のバインダを添加する手法が採られるが、バインダの添加は細孔の閉塞をもたらす場合がある。本法ではバインダ無添加）。次に、この ACF 前駆成形体を不活性雰囲気下で 900°C まで $10 \text{ K}/\text{min}$ で昇温加熱して炭化し、引き続き、同温度で 2 時間炭酸ガス賦活処理（炭材のガス化反応による微細孔の発達）を施すことで繊維が高度に密集した高密度 ACF 成形吸着材（HD-ACF: High Density ACF）を製造した。

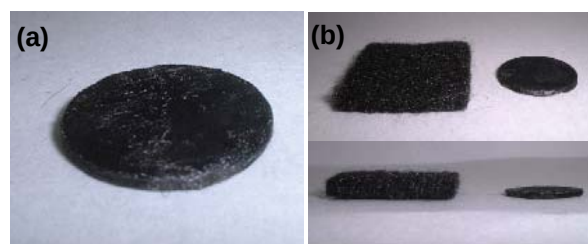


図3 製造した高密度 ACF の写真 (a) HD-ACF, (b)フェルト状 ACF との比較

4.2 基本物性

図3-(a)に示すように、得られた HD-ACF は直径 13.6 mm 、厚み 1.0 mm 、重量 111 mg の円盤状で、最終的な製造収率は 0.37 であった。また、かさ密度 ($0.76 \text{ g}/\text{cm}^3$) はフェノール樹脂系フェルト状 ACF（東洋紡績（株）製 KF フィルタ）の 12.7 倍に達した。なお、図3-(b)は HD-ACF と同重量

のフェルト状 ACF を比較したものである。

図 4 に、本 HD-ACF の SEM 写真と窒素吸着法により評価した細孔径分布を併せて示す。SEM 写真より、HD-ACF は 20 μm 前後の繊維が高密度に集合した状態であることが観察される。また、本材料に形成された微細孔のほとんどは半径 3 nm 以下で、一般の ACF と同様にミクロ孔が非常に発達していることがわかる。その他の細孔特性値は次の通りである：BET 比表面積 1061 m^2/g 、細孔容積 0.440 cm^3/g 、平均細孔径 0.92 nm。なお、ホットプレスとその後の炭化・賦活処理に関わる操作条件の調整や賦活剤の変更などにより HD-ACF の基本物性を制御することができる。

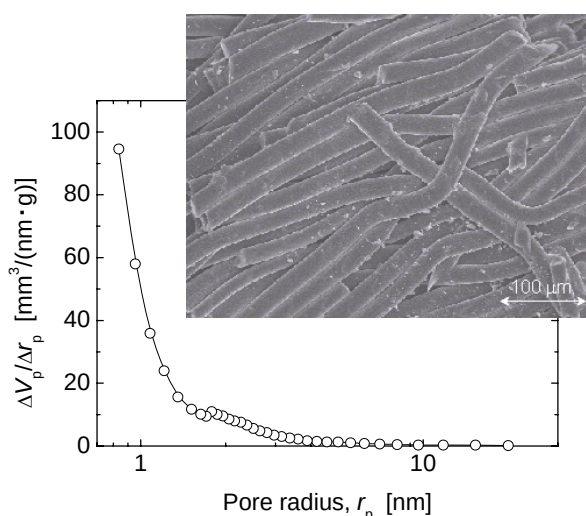


図 4 HD-ACF の細孔径分布と SEM 写真

5. HD-ACF のアルコール蒸気吸着特性と吸着式冷凍機への適用性

ACF を含めた活性炭は疎水性の細孔表面を有しアルコール吸着に適した材料のひとつである。本研究では、磁気浮遊天秤 (Rubotherm MSB) を利用する重量式吸着量測定装置を使用して、HD-ACF の低級アルコール (メタノール、エタノール) 蒸気に対する基礎的吸着特性の評価を行った。

5.1 メタノール蒸気吸着平衡

図 5 に、30～80℃において実測した HD-ACF のメタノール蒸気吸着等温線を示す。なお、横軸の相対圧 ϕ は吸着温度におけるメタノールの飽和蒸気圧に対する吸着平衡蒸気圧と定義され、 $\phi=1$ の時、圧力はその温度における飽和蒸気圧となる。

図 5 より、本 HD-ACF のメタノール蒸気吸着量は、いずれの温度においても低相対圧域で急激に

増大し、その後緩やかになる。この変化傾向は比較材料のフェルト状 ACF や粒状活性炭 (GAC: Granular Activated Carbon) のメタノール吸着系でも同様に確認された。また、HD-ACF/メタノール系の吸着平衡には温度依存性が認められ、吸着温度が上昇するにしたがい蒸気吸着量は明確に減少する。つまり、このような特性を示す吸着系では、系内の圧力を下げ、さらに吸着材の温度を上昇させることで効果的に吸着材の再生が可能になることが直感的に理解できる。

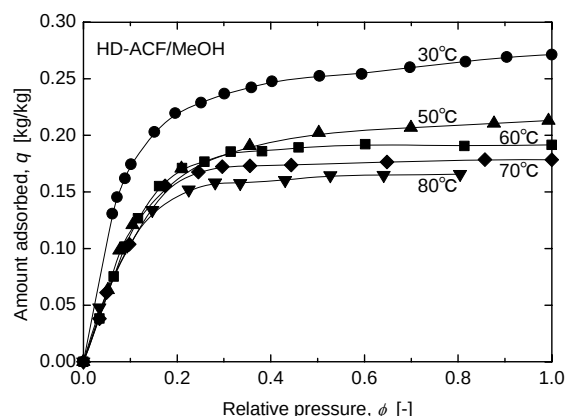


図 5 HD-ACF のメタノール蒸気吸着等温線

5.2 吸着速度

吸着式冷凍機では、冷熱の取り出し量と熱効率 COP (Coefficient of Performance, $\text{COP} = \text{冷熱取出量} / \text{投入エネルギー量}$) が最適となるようにサイクル時間が決められ、通常、数分から十数分で吸着過程と脱着再生過程が切り換えられる。つまり、実際の操作では、吸着材が真に蒸気吸着平衡状態に至ることはなく、吸着速度が著しく遅くなる直前で操作が打ち切られる。したがって、作動吸着系の選定には、図 5 に示すような吸着平衡関係とともに、平衡に至るまでの過渡的变化傾向を把握することが重要である。

図 6 に、HD-ACF のアルコール蒸気吸着量の経時変化を、フェルト状 ACF を用いた場合の結果と比較して示す。なお、吸着温度 T_{ads} と蒸発温度 T_{ev} はそれぞれ 30, 15℃とした。本図より、HD-ACF/メタノール・エタノール系では、フェルト状 ACF の場合と同様に、操作開始後、速やかに吸着量が増大し、数分で吸着平衡に近づくことがわかる。このことは、ACF の特徴のひとつである速い吸着速度が高密度化を施した場合でも確保される

ことを示しており、HD-ACF／アルコール系が吸着式冷凍機の有望な作動吸着系になり得ると考えられるひとつの判断材料と言える。

なお、HD-ACF のアルコール蒸気吸着量がフェルト状 ACF に比べて少ないことが認められるが、これは HD-ACF の比表面積や細孔容積が ACF (BET 比表面積 $1909 \text{ m}^2/\text{g}$ 、細孔容積 $0.863 \text{ cm}^3/\text{g}$ 、平均細孔径 0.90 nm) より小さいためと考えられる。現在、4.1 節に示した HD-ACF 製造条件を見直し、アルコール蒸気吸着により好適な細孔構造を有する高密度 ACF の調製に継続的に取り組んでいる。

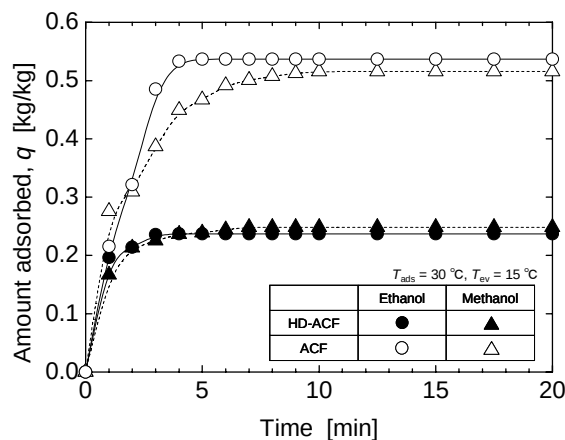


図6 HD-ACF およびフェルト状 ACF のアルコール蒸気吸着量の経時変化

5.3 冷媒蒸気有効吸着量と冷却効果の算出

着目する吸着系の吸着式冷凍機への適用性は、冷凍機操作温度範囲をカバーする図5のような吸着等温線に基づいて平衡論的に定量評価することができる。なお、ここで紹介する評価法では温度（圧力）以外の操作因子や装置条件を考慮していないことに注意していただきたい。

図7に、HD-ACF／メタノール系の実測吸着平衡データ（図5）を吸着量－温度線図にまとめ直したものを示す。図中の横軸には飽和水蒸気温度 T_{sv} （副軸：飽和蒸気圧 P_{sv} ）をとり、吸着材層温度（吸着温度 T_{ads} もしくは脱着再生温度 T_{reg} ）をパラメータとした。本図に基づいて、例えば、吸着式冷凍機の吸着過程が吸着温度 30°C 、蒸発温度 10°C で操作される場合のHD-ACF に対するメタノール蒸気の最大吸着量 q_{max} は、 30°C の吸着等温線と $T_{sv} = 10^\circ\text{C}$ の波線の交点から求められ、 $q_{max} = 0.241 \text{ kg-MeOH/kg- (HD-ACF)}$ となる。一方、脱着

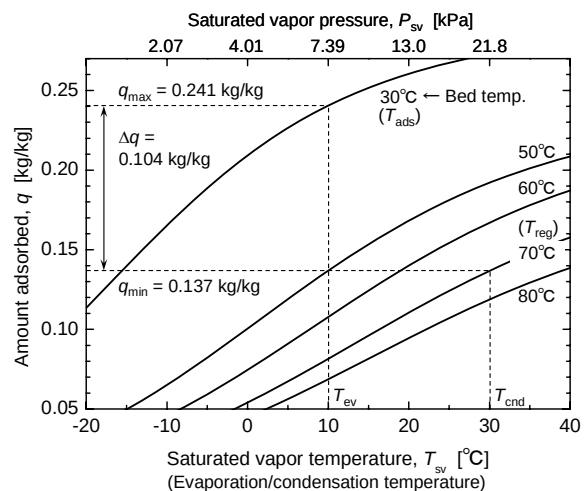


図7 HD-ACF／メタノール系の吸着量－温度線図

再生過程を再生温度 $T_{reg} = 70^\circ\text{C}$ 、凝縮温度 $T_{cnd} = 30^\circ\text{C}$ で操作する場合は、同様に 70°C の吸着等温線と $T_{sv} = 30^\circ\text{C}$ の波線の交点から再生時最小（残留）吸着量 $q_{min} = 0.137 \text{ kg-MeOH/kg- (HD-ACF)}$ が得られる。ゆえに、この操作温度条件での有効蒸気吸着量は $\Delta q = q_{max} - q_{min} = 0.104 \text{ kg-MeOH/kg- (HD-ACF)}$ となる。

有効蒸気吸着量が見積もられれば、着目吸着系の冷熱生成能を次式により評価することができる。

$$CE_w = \Delta q \cdot \Delta H_{ev} \quad (1)$$

ここで、 $CE_w [\text{J/kg}]$ は吸着材単位重量当たりの冷熱生成量（一般に冷却効果（Cooling Effect）と言われる）を表し、 $\Delta H_{ev} [\text{J/kg}]$ は冷媒の蒸発潜熱である。つまり、ここでの冷却効果にはサイクル中で実際に冷媒が凝縮温度から蒸発温度まで変化する際の顕熱量は考慮されていない。また、吸着熱交換器の所要容積を検討する場合には、次式によって吸着材の見掛けの単位体積当たりの冷却効果 CE_v を算出すると便利である。

$$CE_v = \rho_b \cdot CE_w \quad (1)$$

ここで $\rho_b [\text{kg/m}^3]$ は吸着材のかさ密度を表す。

5.4 操作温度条件と冷却効果の関係

上記の手順に従い、HD-ACF、フェルト状 ACF、GAC のそれぞれの吸着材と、冷媒としてメタノールを組み合わせ、吸着過程： $T_{abs} = 30^\circ\text{C}$ 、 $T_{ev} = 10^\circ\text{C}$ 、脱着再生過程： $T_{reg} = 70^\circ\text{C}$ 、 $T_{cnd} = 30^\circ\text{C}$ の温度条件で吸着式冷凍機を作動させた場合の冷却効果 CE_w 、 CE_v を求めた結果を表2に示す。

フェルト状 ACF に比べて HD-ACF のメタノー

ル蒸気有効吸着量 Δq は少なく、その CE_w 値はACFの場合の56%にとどまる。しかし、単位体積当たりの冷却効果 CE_v は、HD-ACFのかさ密度が他に比べて大きいために、ACF系の7.1倍、GAC系の1.9倍となり、吸着材の高密度化が吸着式冷凍機の装置容積の50~60%を占める吸着熱交換器の小型化に極めて有効であることがわかる。

表2 冷却効果の比較

Adsorbate		Methanol		
Adsorbent		HD-ACF	ACF	GAC
Δq	[kg/kg]	0.104	0.185	0.093
CE_w	[kJ/kg]	126	225	113
CE_v	[MJ/m ³]	95.8	13.5	50.9

注) GAC: BET 比表面積 1045 m²/g, 細孔容積 0.459 cm³/g, 平均細孔径 0.88 nm

図8に、HD-ACF/メタノール系における吸着材体積基準の冷却効果 CE_v に及ぼす蒸発温度および再生温度の影響を示す。なお、 T_{ads} と T_{end} は夏場でも確保可能な冷却水の温度として30℃を選択した。本図より、蒸発温度と再生温度のいずれか、もしくは両方が上昇するとともに冷却効果 CE_v が増大することがわかる。これは、蒸発温度の上昇により吸着過程における冷媒メタノールの蒸気圧が上がり、HD-ACFへの蒸気吸着量が増大するために、また、脱着再生過程では再生温度の上昇、つまり、吸着材の温度が上昇すると冷媒の脱着がより一層進行するために、いずれの場合も1サイクル中での冷媒蒸気移動量が増大することに起因する。

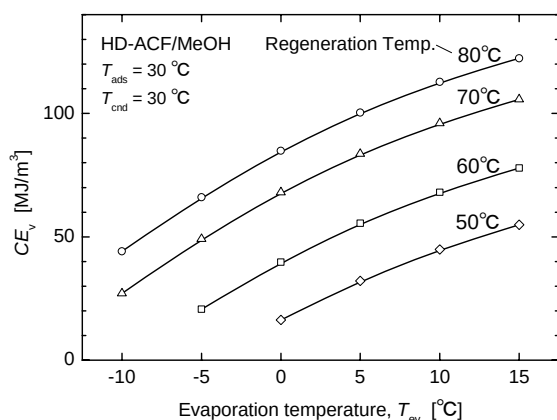


図8 冷却効果に及ぼす蒸発温度、再生温度の影響

6. おわりに

吸着式冷凍機は周囲環境温度に比較的近い低温廃熱を駆動源に利用して有用な冷熱を取り出し得る魅力的な熱源機器であり、今後の更なる省エネルギー化の推進には欠かせない技術のひとつに挙げられる。本稿の表1に例示した技術的課題が改善・解決され吸着式冷凍機が社会に広く普及することを切望する。

参考文献

- [1] 化学工学会エネルギー部会編, 亀山秀雄監修, 加藤之貴編集, 骨太のエネルギーロードマップ, 化学工業社 (2005).
- [2] Miller, E. B., Refrigerating Eng., **17-4** (1929) 103.
- [3] 株式会社前川製作所ホームページ <http://www.mycomj.co.jp/>
- [4] エネサーブ株式会社ホームページ <http://www.eneserve.co.jp/>
- [5] 社団法人日本冷凍空調工業会ホームページ http://www.jraia.or.jp/frameset_statistic.html
- [6] 渡辺藤雄, 小塚淳, 尾前純也, 汲田幹夫, 架谷正信, 化学工学論文集, **20-3** (1994) 339.
- [7] 井上誠司, 井上哲, 小林敬幸, 化学工学会第37回秋季大会研究発表講演要旨集, (2005) O104.
- [8] Poyelle, F. et al., Ind. Eng. Chem. Res, **38-1** (1999) 298.
- [9] Guilleminot, J. J. et al., Heat Recovery System & CHP, **13-4** (1993) 297.
- [10] Bonaccorsi, L. et al., Micropor. Mesopor. Mater., **91** (2006) 7.
- [11] Restuccia, G. et al., Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf. '99, (1999) 343.
- [12] Tamainot-Telto, Z. and Critoph, R. E., Int. J. Refrig., **20-2** (1997) 146.
- [13] 金森道人, 葛山弘一, 渡辺藤雄, 松田仁樹, 架谷正信, 辻本聡一郎, 栢原義孝, 化学工学論文集, **24-1** (1998) 131.
- [14] Kumita, M. et al., J. Chem. Eng. Japan, **36-7** (2003) 812.
- [15] Kumita, M. et al., Proc. 10th APCCHE Cong., (2004) 2G-11.
- [16] Miura, K. et al., Carbon, **38** (2000) 119.

吸着ヒートポンプの課題 地球と室内のエアコン

*Study of Adsorption Heat Pump
Air conditioning System for Earth and Room*

伊藤 睦弘 (富士シリシア化学株式会社)
Mutsuhiro ITO (Fuji-Silysia Chemical Ltd.)
e-mail: ito@fuji-silysia.co.jp

1. はじめに

地球は水の惑星と言われるほど水に満ち、地表の70%は海で覆われ、上空を青く澄み切った空と白い雲が活発に動き回っている。この雲の活動は地表に降り注ぐ太陽の日射エネルギーを、水の蒸発により水蒸気に蓄え、空気が上空へ昇り水蒸気が凝縮することで雲を発生させ、水蒸気の移動と共に熱エネルギーを上空へ移動させている。上空に移動した熱エネルギーは宇宙へ放射され、この大気中の水蒸気が介在する熱移動が地球の熱バランスを安定させる大きな役割を担い、地球のヒートポンプとして機能している。一方、吸着ヒートポンプは、水蒸気を吸着材が吸着、脱着することで、水蒸気の吸脱着熱を利用した熱・物質移動システムであり、地球のヒートポンプとよく似ている。また、373K以下の低温熱エネルギーで直接駆動できる熱変換システムであり、エネルギーのカスケード利用の最下流を担い総合エネルギー効率向上の可能性が期待されている。しかし、地球規模のシステムとは異なり、民生用システムとして稼働するには、その規模、システム化、熱効率、蓄熱性などに問題を抱え、エネルギー消費を抑える切り札として普及するには至っていない。

本レポートは、この吸着ヒートポンプの現状と課題について報告する。

2. 密閉式吸着ヒートポンプ

密閉式吸着ヒートポンプのモデルを Fig.1 に Fig.2 にその作動 PT 線図を示す。吸ヒートポンプの冷却能力は

$$Q = \Delta H \cdot W \cdot \Delta q \cdot \eta / \tau$$

ΔH : 蒸発潜熱, W : 吸着材料, Δq : 水分吸着率

η : 吸着効率, τ : 切替時間

で表され、できるだけおおきな Q を得るため吸着水分量をできるだけ大きくすること、切替時間を短くすることに技術的な課題がある。

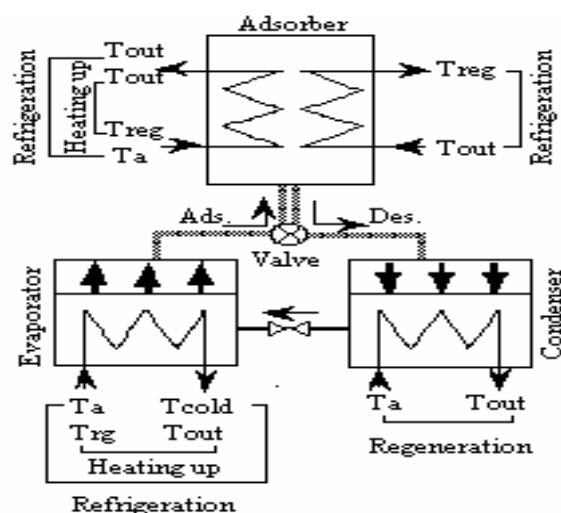


Fig.1 Conceptual drawing of AHP

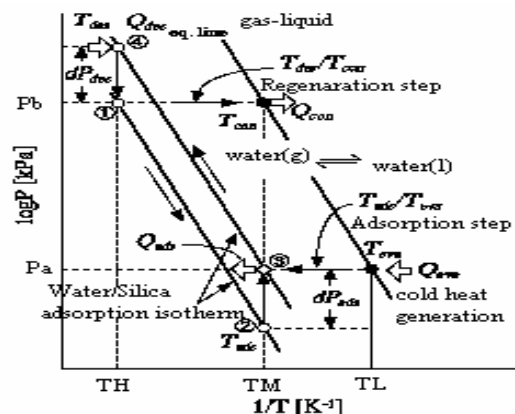


Fig. 2 The P-T curve for the AHP

Fig.3 には代表的な吸着材の吸着等温線を示す。稼働領域である $P/P_0 : 0.1 \sim 0.3$ の領域での汲み上げ熱量に相当する水分吸着量をできる限り大きくすることが、吸着材に要求されるが、現状では、一般に検討されているシリカゲル RD タイプ[1]以外にメソポーラスシリカの FSM[2]と鉄アルミノフォスフェート FAM[3]が開発され吸着等温線上で有効性が高いことが示されている。FSM は製造工程でテンプレートを使用し均一な細孔径を得、毛細管凝縮での吸着量が大きく低相対圧での吸着

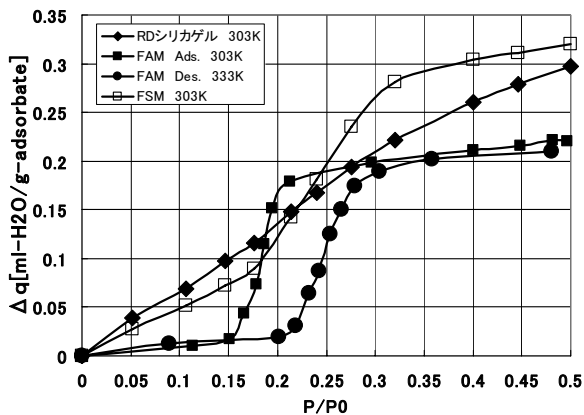


Fig.3 水蒸気吸着等温線の比較

がシリカゲル同様に立ち上がり細孔内の親水性が示している.FAM の場合、低相対圧の吸着量は小さく疎水的な挙動を示し、303K の吸着等温線に比較し 333K の脱着等温線が右にシフトし大きな温度依存性を示す. 高湿での吸着容量は低いものの、稼働相対湿度領域での吸着量差が大きい. 吸着量を増加するためには毛細管凝縮に関わる細孔径ばかりか、細孔内表面の親疎水性の制御も大きな因子となっている. 吸着材の吸着等温線の改良にも増して重要なポイントとして動吸脱着特性がある. 吸着器内水蒸気細孔内拡散, 吸着速度は十分速く、実質吸着速度を支配するのは吸着器熱の除去速度であり、吸着器内の熱移動を促進する方向で検討が進んでいる. 熱媒として水蒸気は低密度のため、水蒸気の顕熱より熱移動は小さく、吸着熱の除去媒体としては機能し難い、このため吸着層の伝熱促進に頼らざるを得ないが、伝熱のベースとなる吸着材の伝熱は Fig.4 にシリカゲルの場合を例に示すように、吸着材充填密度に依存し、粒子径に依存しないこと、また、たとえ高密度充填された比較的熱伝導の良い状態であっても、熱交換器の熱伝導率 $390[\text{W/m}\cdot\text{K}]$ (銅) の $1/1000$ 以下で吸着層内の伝熱は悪く [4]、これが密閉系吸着ヒートポンプの性能を制限している大きな原因と考えられる. しかし、吸着材粒子径、充填方法、バインダーなどの充填層の工夫、熱交換器構造の最適化検討である熱交換の改良について熱交換器一体型吸着器 [5]、真空パック吸着器 [6]、エロフィン熱交換型充填吸着器 [7] などが提案され、システムのコンパクト化、効率向上が進められている.

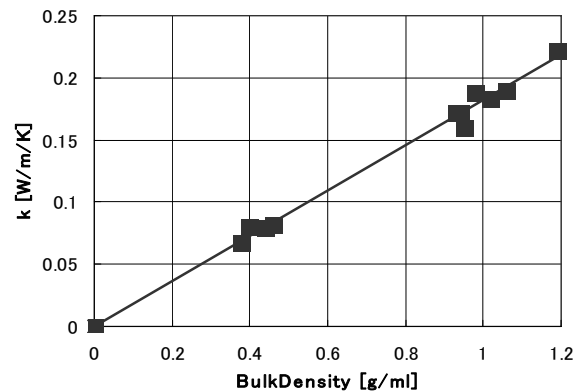


Fig.4 シリカゲルの熱伝導度と充填密度

3. 開放系吸着ヒートポンプ

開放系吸着ヒートポンプのひとつとして、デシカント空調(DCS)が挙げられる.DCS は空気中の水蒸気を吸着材が吸着除湿することで除湿空気を得、室温程度に熱交換後室内へ導入する方法、さらに水噴霧による加湿冷却で低温空気を冷房に用いる方法がある. この基本である吸着のモデルと空気線図の関係を表すと Fig.5 のようになる. 吸着材の顕熱は水の蒸発潜熱に比較し小さく無視できるほどなので、本図では無視している. 断熱系のため高温な空気は吸着除湿により、等エンタルピー線上を移動し、高温で低湿な空気を得られる. 逆に吸着飽和した吸着材を低湿空気にさらせば、等エンタルピー線を遡り低温高湿の空気が得られる. この吸着および脱着の変化は可逆変化である.

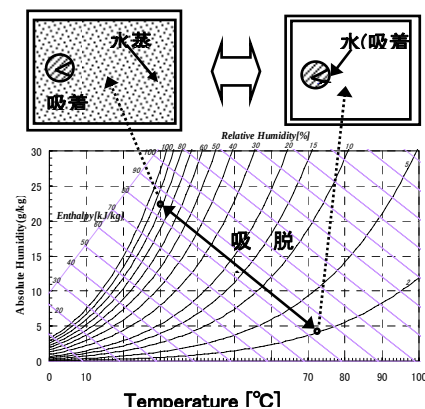


Fig5 空気中の吸脱着モデルと空気線図

開放系吸着ヒートポンプは、空気中の水蒸気の吸着脱着を行うため、 1 m^3 の空気に対し十数 g の水分を吸脱着する. このため吸脱着熱の移動には、

空気も熱媒となり、吸着層の伝熱による熱移動と空気を熱媒とする熱移動が同時に進行する。このため、発生した温・冷熱を伝熱による熱交換で系外へ取り出すこともできるが直接空気温度を変化させることができるため、効率的に加熱冷却が可能である。吸着材への水蒸気拡散及び吸着熱の除去と吸着層への導入する空送動力を抑制することが大きな課題となる。しかし、熱密度が低い空気を直接吸着器内へ流入することになり、吸着器から室内外までのダクト配管をも考慮すると装置周辺の必要体積が大きく、密閉系吸着ヒートポンプの熱密度が大きな水冷却媒の使用と比較した場合には密閉系吸着ヒートポンプが優位である。

開放系で使用する吸着材としてシリカゲルを例に吸着等温線を Fig.6 に示す。高温駆動熱源を 353K 程度とし夏季の冷熱出力を想定すると、相対湿度(RH)5～100%の広範囲の吸着脱着等温線範囲が稼働領域となり、既存シリカゲルの吸着等温線で十分な吸着量が確保され、密閉系に比較し稼働領域が広く特定領域での吸着性能を新たに改善する必要はないが、吸着操作に要する最適吸着等温線を選定する必要がある。

従来の DCS では、除湿空気に水噴霧する水蒸発潜熱による加湿冷却で空気温度を低下させているが、一度除湿した空気に水分を与えることで、除湿に要したエネルギーが消費され“もったいない”。

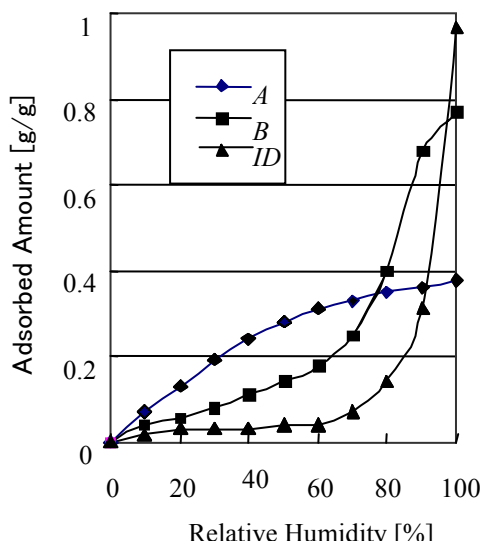


Fig. 6 Adsorption Isotherm

我々はシリカゲルの湿度調整機能が DCS の稼働湿度変化領域内にある事および調湿に伴う熱移動に着目し、DCS の水噴霧冷却に代わって吸着飽和層へ除湿空気を流入させ吸着水を脱着させ、この時の脱離冷却作用を利用する空調システムへの応用を検討し、湿度スイング冷房システム(HSA)を開発した[8]。

3.1 HSA 構成[8]

湿度スイング冷房のシステムフロー図及びその操作線図を Fig. 7 に示す。シリカゲル充填層である吸着部、冷却部、再生部の 3 部及び吸着器出口熱交換器、再生部入口加熱器で構成される。1 サイクルにおける各部は以下の機能を果たす。吸着部では、高湿度室内空気が導入され、水蒸気が吸着除去され、低湿度空気となって熱交換器を経て冷却器へ向かう。この過程で吸着器は除湿水蒸気の吸着に伴って吸着熱が発生し、昇温する(1-2)。吸着熱は外気と熱交換され回収され(5-6)、除湿空気は冷却される(2-3)。冷却部は、水蒸気を既に吸着飽和した充填層で、除湿空気を導入し、脱着に伴い冷却される(3-4)。この 1-4 の工程で 1 サイクルが構成される。一方、冷却部脱着工程での未再生部分を補うため 5-6 の熱回収空気をさらに 6-7 で加熱し再生部へ導入しシリカゲルは高度に再生される。この一サイクルの後、吸着器が冷却部に、冷却部が再生部に、再生部が吸着部に切り替えることにより連続的に冷却空気を得ることができる。

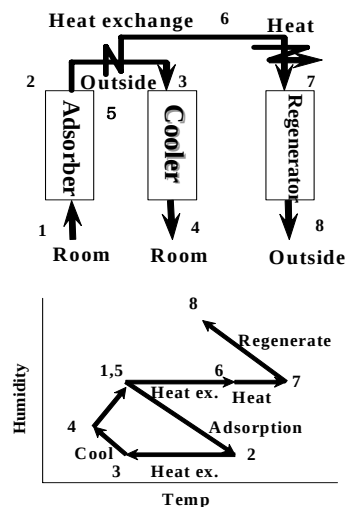


Fig. 7 Schematic Diagram of HSA

3.2 冷却特性評価に用いたシリカゲルの物性及び充填層による冷熱生成確認操作

HSA システムでは、冷却部での冷熱の効率的生成が中心的課題のため、シリカゲル充填層の水蒸気脱着による冷熱生成特性の検討を行った。シリカゲル試料には富士シリシア化学(株)製の水蒸気吸着特性が異なる代表的 A, B, ID タイプのシリカゲルを用いた。シリカゲル充填層水蒸気脱着の実験装置の概略を Fig.8 に示す。充填器は塩化ビニル製の円筒で、その外部はガラスウールで断熱されている。また、充填器には内径 75mm、長さは 250mm に約 1.1 ㎏のシリカゲルが充填されている。温度計測は K 熱電対によって円筒中心軸方向に 3 点、充填器の入口、出口の合計 5 点、湿度は高分子湿度センサー（チノ製）で、充填器入口と出口で計測した。実験は、予めシリカゲル充填層を 303K に保持し、303K、相対湿度(RH)80%の空気を流通させ、層内を水蒸気吸着飽和状態とし、303K、RH0%、の空気 3.8m/min を導入し、充填層出口流出空気の湿度および充填層内温度の経時変化を測定した。一部については、導入空気湿度 RH が 15%、30%の場合の検討も行った。

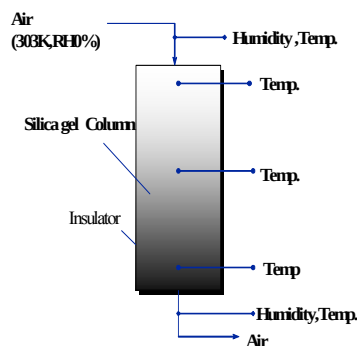


Fig.8 Diagram of Test Column (70mm DIA * 200mm LENGTH)

3.3 各種シリカゲルの脱着冷却特性

Fig. 9 に B 型シリカゲルを例とする温・湿度変化を示す。充填層入口 RH は 0%であるが、出口 RH は開始直後に最大値約 80%に達する。その後、RH は下降し約 60%で長く維持し、約 20 時間で穏やかに RH10%程度に低下した。一方、充填層内温度は開始直後に降下し約 286K で一定値を保ち、充填層の上部より水分が蒸発破過し 303K に上昇する。充填層出口温度が 303K に達するまで約 20 時間要した。

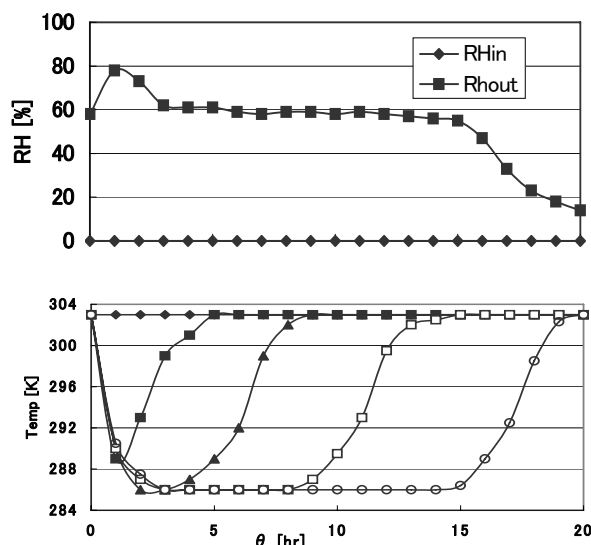


Fig.9 Temperature and Humidity profile of B type silica gel

この温・湿度変化傾向はシリカゲルの種類、および充填層入口湿度条件が異なっても同様に観測されたが、到達温・湿度、充填層破過時間が条件により異なったのでこれらを一括して Table 1 に示す。A 型シリカゲルでは、充填密度、出口温度、脱着後の含水率が高く、出口湿度が低い。逆に ID 型シリカゲルでは、充填密度、出口温度、脱着後の含水率が低く、出口湿度が吸着平衡湿度 80%に近い 73%を示した。また、B 型シリカゲルでは、ID 型に近い冷熱が最も長時間得られたため、充填層入口湿度を上昇させた場合も検討した。入口湿度が上昇しても出口湿度は変化せず、入口出口の湿度差が大きな条件ほど温度降下が大きく破過時間が長かった。更に、破過後の含水率は入口湿度に比例しており吸着剤の吸着水分による冷却作用と同時にシリカゲルの再生が達成され、通常吸着材で行われる加熱再生と同様に常温の除湿空気でも水分を脱離再生し同時に加湿冷却が可能となり、HSA サイクル稼動が示唆された。

Table1 シリカゲルの種類と入口湿度の違いによる脱離冷却特性 Inlet temp: 303K

Type of Silica gel	Inlet RH [%]	Inlet T [K]	Outlet RH [%]	Outlet T [hr]	Water content before [%]	Water content after [%]
A	0	291	35	19	35	4
B	0	286	62	20	40	2
B	15	291	64	16	40	6
B	30	296	63	15	40	8
ID	0	285	73	4	14	1

3.4 ハニカムローター型吸着機による HSA システムの稼働特性[9]

HSA の基本的な脱離冷却機能が確認されたため、HSA のシステム化のため 250mmφ×200mm シリカゲルハニカムローター型吸着器 2 個で構成されるシステムの稼働を確認した。用いたシステムモデルを Fig.10 に示す。本試験では外気条件を高温高湿度環境下である 303K・RH75%(絶対湿度 20g/kg)の一定条件とし、二次除湿ローター再生温度を 353K, 363K, 373K で変化させた時の各ローター入出口温湿度を計測した。本試験結果を Table.2 に稼働温度と熱効率と共に示す。

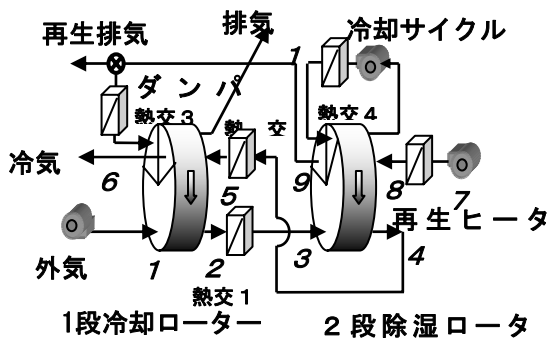


Fig.10 2 段ハニカムローター型 H.S.A のモデル

Table.2 ハニカムローター型 H.S.A.の稼働結果

Regenerate Air Temp [K]	Cooling Air Temp [K]	Dehumidify Air Dehum [g/kg]	COP [-]
373	273.7	2.1	0.91
363	293.4	3.2	0.98
353	294.6	5.0	1.03

1 段冷却ローターでは、2 段除湿ローターの加熱再生排気ガス導入で水分補給を行い、加湿冷却効率を上げることで冷却顕熱がローターに蓄えられる。この冷熱がローターで発生する吸着熱を相殺し一次除湿に大きく貢献している。2 段除湿ローターでは、加熱再生顕熱が残り、吸着材の持つ除湿能力が十分に発揮されないため、冷却サイクルによるローターの冷却工程を入れることで、高湿度負荷に対しても除湿が可能となり、除湿空気を 1 次ローターに送り込み冷氣を得ることが可能となった。このようにハニカムローター型 HSA システムでも冷熱が生成され、直接熱駆動型として高い熱効率が確認された。しかし、吸着熱が顕熱として蓄えられることで、吸着等温線で示される吸着

容量は、システム操作の動吸着においては得られないことが明確となり、あらためて吸着器内熱移動がクローズアップされることとなった。

3.5.1 駆動熱源を求めない蓄熱型 H.S.A の検討[10]

充填層、ハニカムローター型吸着器の吸着能力を向上させるためには吸着熱を熱交換で排除することが必要であるが、この吸着熱も含めた加熱除湿及び加湿冷却作用を密閉空間で利用する場所を求めた。その結果、農業用園芸ハウスの除湿・冷房および暖房の適応について駆動熱源を求めずハウス周りの昼夜の湿度変化を駆動源とすることで検討が可能となった。

3.5.2 ハウス内の環境

ハウス内の温湿度は、日射により急激に変化し、植物にとっても過酷な条件となっている。昼夜のハウス内外温湿度変化を Table.3 に示す。

Table3 昼夜のハウス内外温湿度変化

	昼/夜(ハウス内)	昼/夜(ハウス外)
夏期	高温高湿/中温露結	高温中湿/中温高湿
冬期	適温適湿/低温露結	低温低湿/低温高湿

夏期の昼間は温度が 40℃以上になるためにハウスを開放し外気を導入、過熱を防止する。一方夜間は昼間の余熱で蒸らされ高湿度な所に外気温低下のためハウス表面で冷却され露結、かびの発生などによる病害の可能性が高くなる。冬期は昼間の日射により加熱され、適温適湿であるが、夜間の冷え込みを防ぐため暖房が必要となる。

3.5.3. 農業ハウス用システムと操作モード

ハウス用 HSA のシステムフローを Fig.11 に、各操作モードを Table2 に示す。吸着器入口及びファン出口はダンパによりハウス及び外気へ切り替えることができる。夜間は年間を通し飽和状態のハウス内空気を吸着器に循環することで除湿および

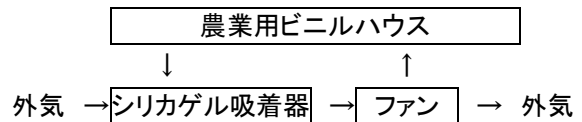


Fig.11 農業用ハウス温湿度制御システムフロー

Table3 各操作モード（空気の流れを示す）

夏期/昼間(冷却):	外気→シリカゲル→ハウス
夏期/夜間(除湿):	ハウス→シリカゲル→ハウス
冬期/昼間(再生):	外気→シリカゲル→外気
冬期/夜間(暖房):	ハウス→シリカゲル→ハウス

吸着熱で暖房を行う。吸着器再生は昼間の低中湿外気を導入し行われ、夏期は脱離冷却効果で外気より低温になった再生排気をハウスに導入することで冷房する。冬期は低温の再生排気はハウス外へ排気する。本システムでは、熱交換器は無く、ファンと切り替えダンパ動力のみで、ハウス内外の湿度差をシリカゲル吸着器に蓄え、昼夜の温湿度を制御する。

3.5.4 稼働試験結果

14m×10m×2.7mHigh の園芸ビニルハウスで、充填層 46 cm×50 cm×20 cm High (27kg) のシリカゲル吸着器を3ユニット並列に接続 220[m³/Hr]送風稼働した。使用したシリカゲルは、広い相対湿度範囲で直線的に吸着量変化のあるタイプを用いた。

冬の一日の稼働結果を Fig.12 に示す。昼間日射によりハウス内が急激に温度上昇、これに伴い湿度は低下する。一方、外気は 10℃程度まで上昇し湿度も 40%程度まで低下した。これによりシリカゲル充填層では、脱着し温度低下と同時に再生する。16 時頃には、急激にハウス内温度が低下し湿度も上昇してくる。ハウス内温度が 10℃を下回らない状況では、絶対湿度も比較的高い状況にあり、この時点で暖房モードに切り替える。暖房モードによりハウス入口温度充填層入口より 4℃程度上昇しハウス内を除湿暖房し、ハウス内外の昼夜温湿度変化を吸着材が貯め、空気流路を換えることで放出することができた。目的空間内外の温湿度変化があれば、吸着材に空気を流通させ水分を吸着脱着させることで蓄熱可能性が示唆された。また、水分の吸脱着熱は、水の蒸発潜熱にほぼ相当するため比較的高密度の蓄熱が可能であった。

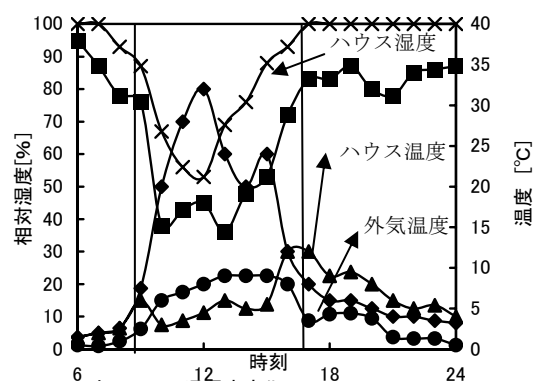


Fig.12 ハウスHSAの温湿度変化

4. おわりに

空調をエンタルピーから見ると、空気線図で示される空気エンタルピーは水蒸気のもつ蒸発潜熱が大きく寄与しているが、密度が低く希薄な状態である。一方、室内空間のエンタルピーをヒートポンプで外部へ移送し、穏やかな温湿度制御により快適な空間を得ることが空調である。本報告の吸着材の吸脱着現象をエンタルピー濃縮・放出と捉えると大気中の現象をコンパクトに押し込めることが可能となる。また、空気と吸着材のエンタルピー差（温湿度差）は、分子オーダーの平衡移動をもたらすため直接駆動源として働き、エンタルピー濃縮保存、放出を速やかに達成する。空調という希薄なエンタルピー変化を与えるには空気のエンタルピーに直接働き、それより少し大きなエンタルピー差が駆動源として利用できる吸着系が好ましいと思われ、今後も自然の熱移動現象から学ぶべき点が多いのではないだろうか。

参考文献

- [1] 渡辺ら, 化工論文集, 19,1165-1170(1993).
- [2] 井上誠司, エネルギー部会熱利用分科会要旨集, 2006.3.17
- [3] 垣内ら, 化工論文集, 31,pp.361-364,(2005)
- [4] 伊藤ら, 化工論文集,25,420-433(1996)
- [5] 渡辺ら, 化工論文集,20,339-345(1994)
- [6] 伊藤ら, 化工論文集,26,483-485(2000)
- [7] 伊藤ら, 化工論文集,25,420-433(1996)
- [8] 伊藤ら, 第 36 回日本伝熱シンポジウム講演論文集,819-820,(1999-5)
- [9] Asano et al, SCEJ Proc. 34th Autumn Symposium,B306(2001)
- [10] 伊藤ら, 第 68 回化学工学年会講演要旨集, P.456(2003)

Recent Development on Adsorption Refrigeration

Hideharu YANAGI (Cyclelect Electrical Engineering Pte Ltd)

e-mail: Yanagi.h@cyclelect.com.sg

INTRODUCTION

It is well known that adsorption chillers have a distinct advantage over other systems due to their ability to produce cooling using waste heat and being absolutely benign for the environment. They have higher efficiency at low driving temperatures than absorption chillers. However adsorption technology has a few weaknesses for practical use.

1. They are more expensive per kW cooling capacity than absorption chillers.
2. There is a limited market choice (only two manufacturers in Japan).
3. The process has a cyclic nature, which requires more effort in design and control.
4. The machines are big and heavy.

Hence most research efforts have been made to cancel its weaknesses or improve the benefits of adsorption.

One effort is to aim for compact and lower cost in production. However its efficiency is sacrificed by housing both adsorption heat exchanger and evaporator/condenser in the same vacuum chamber. The heat capacity of evaporator/condenser becomes heat loss for cooling due to a cyclic operation.

Other effort is to improve the adsorbent properties by impregnating salt or by forming into consolidated composite.

In this article, I would first review ongoing research and development on adsorption refrigeration and thereafter propose a system to extend its development and market.

RECENT RESEARCH AND DEVELOPMENT

Let me sum up on-going or finished research and development works in order to grasp trends of investigations on adsorption chillers:

1. Hybrid adsorption cooling system with a booster pump.
2. Four-bed adsorption chiller.
3. Adsorption Heat Pump where its adsorption reactor and evaporator/condenser are housed in the same vacuum chamber.
4. Adsorption chiller using a heat pipe on evaporator.
5. Adsorption chiller using a direct contact evaporator/condenser with refrigerant spray.
6. New working materials for adsorbents.

1. Hybrid adsorption cooling system with a booster pump [1]

Adsorbent/adsorbate	Silica gel / Water
Cooling capacity/ COP	50kW/10 defined by electricity input (9 °C outlet)
Features	Booster pump facilitates desorption process and enable high efficiencies at lower driving temperatures as 55°C
Developing Institutes	Mycom & Chubu Electric Power Company (Japan)

2. Four-bed adsorption chiller [2]

Adsorbent/adsorbate	Silica gel / Water
Cooling capacity / COP	17.6kW/0.6 (10°C outlet)
Features	Delivery of steadier cooling than two-bed systems and waste heat recovery with a high temperature difference $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$
Developing Institutes	National University of Singapore (Singapore)

3. Adsorption Heat Pump where its adsorption reactor and evaporator/condenser are housed in the same vacuum chamber. [3]

Adsorbent/adsorbate	Silica gel / Water
Cooling / COP	6.84kW/0.37 (16°C outlet)
Features	Adsorption reactor and evaporator/condenser are housed in the same chamber and no vapor valve
Developing Institutes	Fraunhofer-Institute (Germany)

Figure 1 shows an adsorption module where its reactor and an evaporator/condenser are placed face to face.

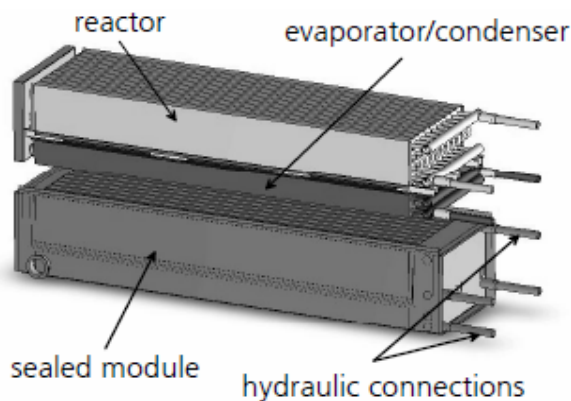


Figure 1: Adsorption module

No vapor valve is placed between its adsorption reactor and evaporator/condenser; therefore no moving element is inside the vacuum container.

The temperature of each heat exchanger and thus its equilibrium pressure governs mass flow of the vapor from the adsorption reactor to and from the evaporator/condenser. Each module has about 35 kg of Silica gel and its external dimension is 355mm high, 260mm wide and 1360mm long. The total weight including adsorbent and process water is about 130 kg.

I would say that COP of 0.37 at a 16 °C of chilled outlet is a little bit lower.

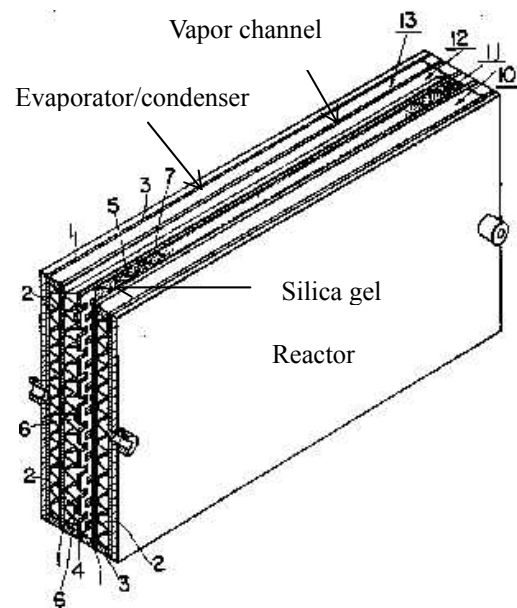
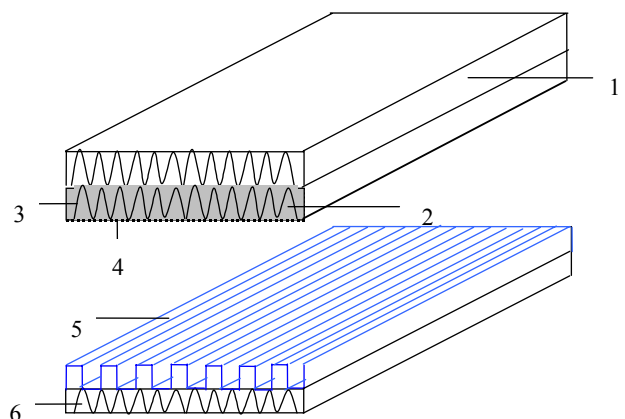


Figure 2(a): One body system of adsorption module



1	Hot /cooling water channel	4	Perforated cover
2	Silica gel	5	Corrugated serrate-fin
3	Perforated corrugated-fin	6	Cooling/chilled water channel

Figure 2(b): Inner structure of adsorption module

When I began to investigate adsorption chillers in 1991, I have first tried a system in the same philosophy as the above adsorption module, which was made of an adsorption heat exchanger and an evaporator/condenser as one body as shown in the Figure 2(a).

Figure 2(b) shows its inner structure [4]. The module, taking into accounts its heat transfer and heat loss due to heat capacity, was made of aluminum plate-fin and housed in a vacuum chamber. The client requested to obtain a COP larger than 0.5 at 75°C heat input in addition to being compact.

As shown in Figure 2(a) and 2(b), its structure could be made simple and compact, and also an inventory of refrigerant could be less. It seemed the efficiency became better, though the heat capacity of heat exchanger itself became heat load of its cooling due to a cyclic operation of condenser /evaporator. Hence the value of COP resulted in less than 0.4.

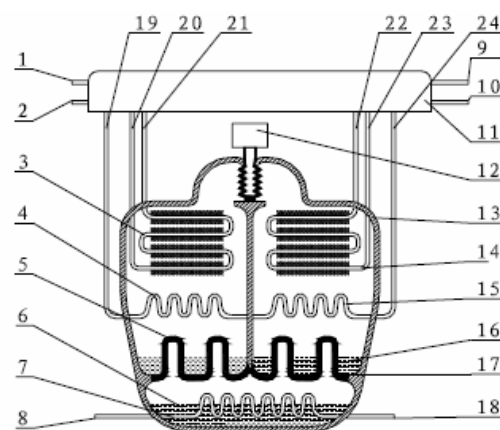
Another reason was that at the beginning of adsorption cycle the adsorption strength was so strong and then liquid droplets from the evaporator directly sucked in silica gel. At that time no eliminator was provided between the adsorption heat exchanger and the evaporator/condenser.

Nowadays environmental considerations are most important issues. Even if a COP is not high enough, as long as their cost and installation size become less and can contribute to reducing greenhouse gas effects, this kind of adsorption chillers would be recognized as waste heat recovery unit.

Though one body system, which is made of adsorption reactor and evaporator/condenser is thought to be limited to smaller machines up to 35kW (10RT), it can be applied in solar assist cooling or co-generation with Microturbines (MGT). IEA Task 25 final report strongly recommended the development of 15kW class solar panels driven ad/absorption chillers.

4. Adsorption chiller using a heat pipe on evaporator

Adsorbent/adsorbate	Silica gel / Water
Cooling / COP	6-10kW/0.3-0.4 (11°C outlet)
Features	Adsorption reactor and condenser are housed in the same chamber and evaporator is made of heat pipe.
Developing Institute	Shanghai Jiao Tong University (China)



(1-hot water outlet, 2-hot water inlet, 3-left adsorber, 4-left condenser, 5-left isolator, 6-methanol, 7-evaporator, 8-chilled water inlet, 9-cooling water outlet, 10-cooling water inlet, 11-vavle unit, 12-vacuum valve, 13-the chiller shell, 14-right adsorber, 15-right condenser, 16-refrigerant (water), 17-right isolator, 18-chilled water outlet, 19-condenser outlet, 20-left adsorber inlet, 21-left adsorber outlet, 22-right adsorber outlet, 23-right adsorber inlet, 24-condenser inlet).

Figure 3: Small scale adsorption chiller schematic

Figure 3 shows an adsorption chiller where its reactors and condensers are placed in the vacuum chamber and its evaporators are composed of heat pipes [5]. This system is also a structure of no vapor valve in between.

However heating and cooling become heat loss due to the cyclic operation of condensing and evaporating of liquid at the bottom. And also the heat capacity of its bottom evaporator outer wall causes the heat loss.

kJ/kg-SWS-1L. It sounds good that the chemical sorption effect on the adsorption heat is small.

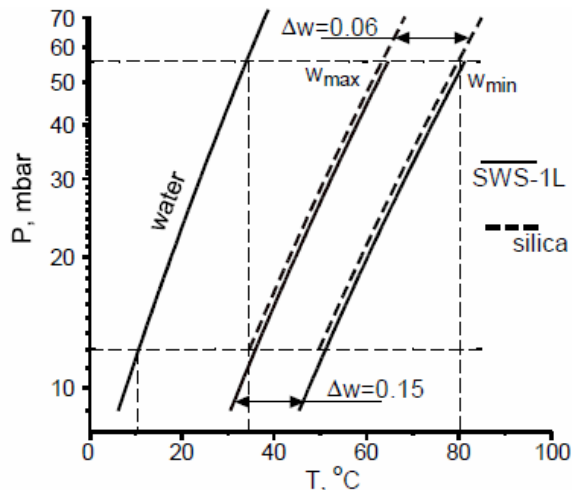


Figure 5: Comparison of the silica gel and SWS-1L in standard refrigeration cycle

6.1 Adsorption reactor using consolidated Silica gel [9]

Adsorbent/adsorbate	CaCl ₂ impregnated Silica gel / Water
Cooling / COP	0.17-0.48
Features	High specific power density: 60-200 kW/kg. Longer cycle time: 20-40min.
Developing Institutes	Boreskov Institute of Catalysis (Russia)

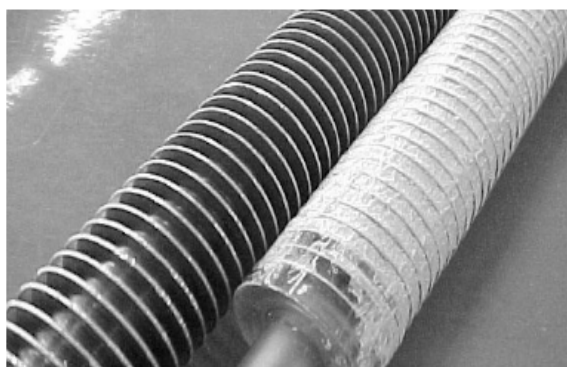


Figure 6: Finned tube covered with consolidated adsorbent

Figure 6 illustrates a finned tube covered with consolidated adsorbent. Even if the specific power

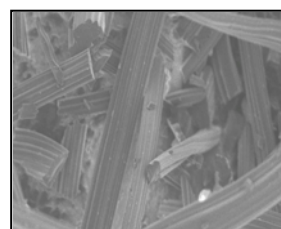
density is high, the cycle time of 20 to 40 minutes is too long. The reason is that mass transfer rate is considerably decreased due to consolidated composite. Increase of up taking refrigerant/cycle and rising temperature of desorption due to an improved heat conductivity of adsorbent were all canceled out by a longer cycle time. The original purpose of consolidating adsorbent is to shorten cycle time by improving heat transfer rate, that is, to increase of specific cooling power density per unit adsorbent [10]. For that purpose coating adsorbent layer on the fin tubes should be thinner than 4mm to a few minute of cycle time.

6.2 CaCl₂ impregnated active carbon fiber felt (ACF) on ammonia adsorption [11]

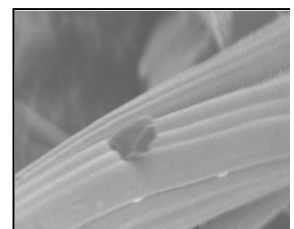
This salt impregnated adsorbent has been developed originally for utilizing an ammonia scrubber but the material is applied to an adsorption chiller as well.

Table 1: Properties of a Activated Carbon Fiber (ACF)

Type	ACF-1000
Specific Surface Area (m ² /g)	900-1000
Benzene Adsorption (wt%)	30-35
Iodine Adsorption (mg/g)	850-900
Pore Volume (ml/g)	0.8-1.2
Average Pore Diameter (nm)	1.7-2.0
Weight (g/ m ²)	400
Thickness (mm)	4
PH	5-7
Fire Point (deg C)	> 500



×1000



×10000

Figure 7(a) SEM photograph of cross section of 45wt% CaCl₂ impregnated sample

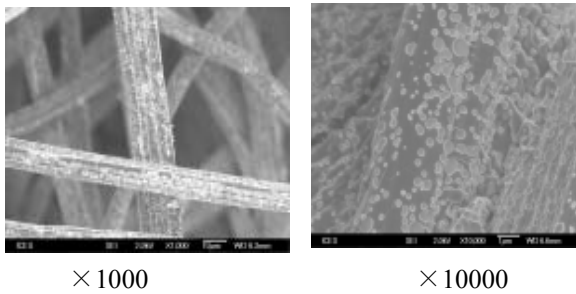


Figure 7(b) SEM photograph of surface of 35wt % CaCl_2 impregnated sample

Table 1 illustrates a base material ACF provided by Nantong Tonghui Industrial & Trading Co., Ltd in China.

Figure 7(a) and (b) shows typical SEM photographs of the samples. The calcium chloride is uniformly deposited on the active carbon fiber surface as well as cross section.

The test sample of 31 wt% calcium chloride impregnated carbon fiber was synthesized using ACF felt and CaCl_2 aqueous solution and then isosters of ammonia sorption were measured at $T = 20\text{-}90^\circ\text{C}$ and $P = 0.1\text{-}9.0$ bar.

From the measured isosters the adsorption isotherm curves were evaluated as Fig.8 [12]

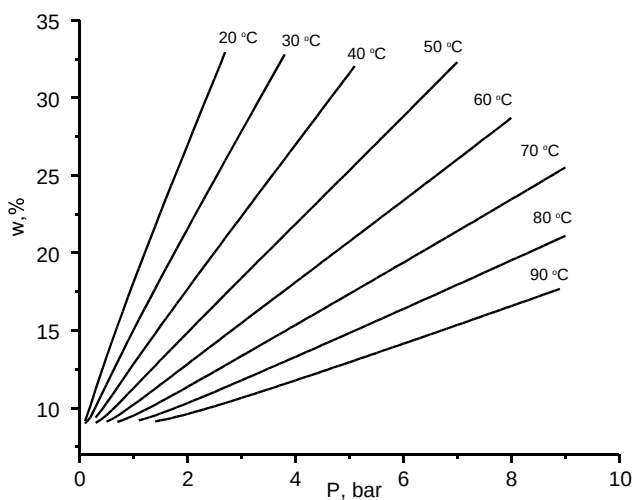


Figure 8: Isotherms on ammonia sorption
evaluated by the polanyi potential theory

Based on the above discussions, I would like to propose

how to progress on development and to extend market extension of adsorption chillers.

PROPOSAL ON FUTURE DEVELOPMENT AND MARKET EXTENSION

Table 2 represents the specification of adsorption chillers to be developed.

Table 2: Proposed Adsorption Chillers

Component	Developing Item
Cooling capacity	15-35kWclass with heat & mass recovery cycle under 10°C chilled water outlet
Adsorbent	CaCl_2 impregnated granular silica gel: at lower regenerating temperature as 75°C uptake refrigerant per cycle should be increased.
Adsorption reactor	Aluminum plate heat exchanger should be fabricated as unit module.
Evaporator/condenser 1st option	Aluminum plate fin heat exchanger with corrugated serrate fin
2 nd option Evaporator/condenser by direct contact spray	Spray nozzle: Optimization of nozzle shape and spray patterns
Market	Solar assisted cooling in Europe & Co generation by MGT in Asia

As far as silica gel/water pair is concerned, the consolidated composite adsorbent is considered to be not suited for adsorption reactors.

Adsorption capacity on impregnated composite is surely increased but in fact due to added binder its effective adsorbent density itself becomes low, in addition its mass transfer rate becomes also too low. Hence increase of uptake of refrigerant per cycle is compensated by decrease of density and longer cycle time. For practical use adsorption/desorption cycle time should be less than 10 minutes.

Accordingly the improvement of adsorbent should be made on granular silica gel by impregnation of suitable chemicals taken into material of heat exchanger.

For air conditioning fan coils are normally standardized

as 7/12°C (supply/return temperature), but in order to make use of benefits for adsorption properties chilled water 10/15°C (rate of change of uptake refrigerant per cycle significantly increases) should be allowed to increase cooling capacity and to design more economically. In Germany radiation cooling on the ceiling at 15°C has been widely used combined with adsorption chillers.

Plate-fin type heat exchangers were expensive in 1990 years. Most of applications were cryogenically use as air separation, hydrogen, helium refrigeration and liquefaction. At that time only one company in Japan was dealing with brazed aluminum plate-fin heat exchangers and so they were once very expensive. However they are now widely used and it is readily ease to get plate-fin type heat exchangers with reasonable cost [13,14].

Even if commercially available fin copper tubes are used for adsorption heat exchangers as shown in the Fig. 9. End disk and cylindrical mesh cover made of stainless steel must be fixed and welded to each fin tube.

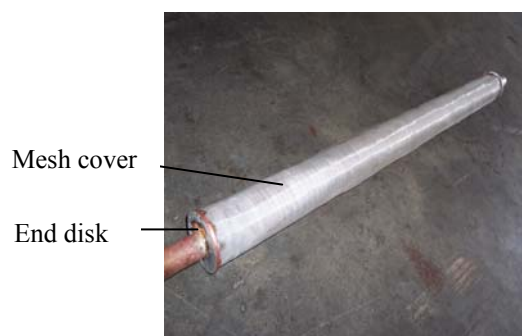


Figure 9: Fin tubes type adsorption module

For example to get cooling capacity of 35kW, 400 bundles of fin tubes with loading of 360kg silica gel have to be fabricated. Processes of filling silica gel into fin tubes and fix mesh cover and seal welding are quite tedious thereby increasing fabrication cost.

Whereas if plate fin type adsorption heat exchangers are employed with 15kg loading /one panel, we have only to fabricate 24 panels. Lesser manufacturing processes compensate the additional blazing cost.

Moreover when the CaCl_2 impregnated silica gel is applied, aluminum plate fin heat exchangers are appropriate after taking into consideration of material and heat capacity. Because copper is severely corroded by contacting with CaCl_2 impregnated silica gel.

CONCLUSION

Finally I would say that all we have to do is first to fabricate the above proposed one with a reasonable cost. If we could make it, then the market for adsorption chillers will improve.

REFERENCES

- [1] Yanagi, H. et al., Low Temperature Driven Hybrid Adsorption Cooling System with A Mechanical Booster Pump, Proc. of the 2nd International Heat Powered Cycles Conference, Vol. I pp95-100 (2001)
- [2] Yanagi, H. et al., Performance testing of 4-bed adsorption chiller, Proc. of 7th IEA Conference on Heat Pumping Technologies, Vol.2 pp.901-906 (2002)
- [3] Nunez, T. et al., Development of a Small Capacity Adsorption System for Heating and Cooling Applications, ISPHC-063-2005.
- [4] Yanagi, H. et al., Adsorption Reactor, Open to Public Patent H5-157400.
- [5] Wang, R.Z. et al., Performance Research of Micro CCHP System with Adsorption Chiller, Proc. of ISPHC-044-2005.
- [6] Yanagi, H. et al., R&D on Vapour Valve Less Adsorption Chiller Combined with μ Gas Turbine, Proc. of 3rd International Conference on Heat Powered Cycles, 2215-2004.
- [7] Yanagi, H., Performance testing of vapour valve less adsorption chiller, Proc. of POWER-GEN ASIA (2005).
- [8] Aristov, Y.I., Comparative Study of Water Adsorption on Micro porous Silica and SWS-1L: Equilibrium and Kinetics, Proc. of ISPHC-079-2005.
- [9] Restuccia, G., An Advanced Solid Sorption Chiller Using SWS-L: Performance Analysis and Hydrothermal Cycling Stability of The Sorbent Bed, Proc. of ISPHC-078-2005.
- [10] Yanagi, H. et al., Heat and mass transfer

characteristics in consolidated silica gel/water adsorption cooling system, ASME ASIA'97, RP 97-AA-33(Page 7P), (1997)

- [11] Yanagi, H. et al., Performance Testing of Ammonia Scrubbing System, Proc. of 2005 Summer Heat Transfer Conference-HT2005-72474.
 - [12] Yanagi, H. et al., Adsorption Isosters Measurements on CaCl_2 Impregnated ACF Felt for an Application of Ammonia Scrubber, will be presented at AIChE 2006 Meeting in November 2006.
 - [13] Yanagi, H. et al., Development of Adsorption Refrigerators Using Silica gel-Water Pairs, Proc. of Absorption Heat Pump Conference '91, September, P.115-121 (1991).
 - [14] Liu, Y.L., Experimental Study on a Continuous Adsorption Water Chiller with Novel Design, International Journal of Refrigeration 28 (2005) 218-230.
-

Additional Remark

I have been invited in 2003 to join in CYNERGY research project under RISC (Research Incentive Scheme For Companies) grant administrated by Singapore Economic Development Board (EDB). Since then I have been engaged in R&D on adsorption refrigeration by co-working with professor Ng Kim Choon of NUS (National Univ. of Singapore). Lately I have developed a mobile Ammonia Scrubbing Vehicle under the Singapore Civil Defense Force (SCDF) through the TEC (The Engineering Challenge) grant administrated by the Singapore Prime Minister Office.

高熱伝導性ケミカルヒートポンプ反応材 High Thermal Conductive Reactant for Chemical Heat Pump

藤岡 恵子 (株)ファンクショナル・フルイッド*)
Keiko FUJIOKA (Functional Fluids Ltd.)
e-mail: kfujioka@functional-fluids.co.jp

*：旧社名 (株)シンセイ冷却水システムより
2006年8月1日 社名変更

1. はじめに

ケミカルヒートポンプは、化学反応を用いて熱エネルギーを化学エネルギーに変換し、目的に応じた温度の熱エネルギーに再変換するシステムである。熱エネルギーの温度変換、貯蔵、輸送機能によって、低温排熱利用や熱源と利用温度の不一致、エネルギー需給の時間差解消に利用でき、コジェネレーションの総合効率向上に寄与する技術として期待されている。数あるケミカルヒートポンプの中でも気固反応と作動流体の相変化を組み合わせ構成される気固系ケミカルヒートポンプは、大きな蓄熱密度、低熱損失による長期蓄熱、幅広い作動温度条件が特長であるが、作動安定性、反応材の耐久性、装置の単純化をはじめとして克服すべき課題も多い。中でも、固体反応層の伝熱性改善は、反応の高速化と熱回収率向上に直結するため、気固系ケミカルヒートポンプ高性能化の核となる技術である。本稿では、反応材粒子層の伝熱促進、高熱伝導性材料開発の現段階を紹介し今後の課題を検討する。

と付加反応②、蓄熱（再生）過程での脱離反応③と凝縮④から成り、それぞれ作動流体の蒸気圧と反応平衡圧力との差 ΔP_a 、 ΔP_d を推進力として反応が進行する。しかし基本的な装置形態である粒子充填反応層の有効熱伝導度は低くケミカルヒートポンプに利用される気固反応は反応熱が大きいために、反応層温度が上昇（放熱過程）あるいは低

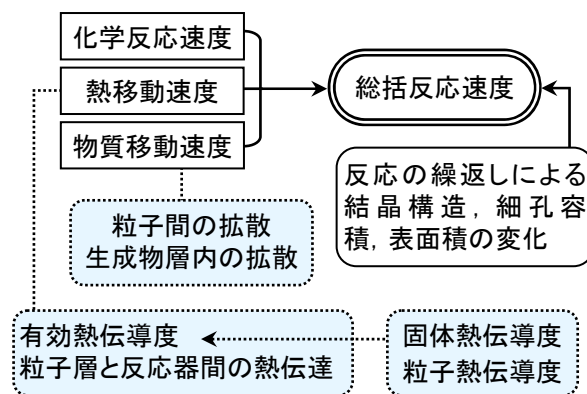


図1 気固反応速度に影響を与える因子

2. 作動サイクルと反応層の熱伝導性

気固系ケミカルヒートポンプの出力速度は、化学反応速度、熱移動速度、物質移動速度が複合した総括反応速度によって決まる（図1）。反応材が多孔性であれば、熱移動については粒子層と粒子の二つの有効熱伝導度を、物質移動については粒子間と粒子内生成物層の拡散現象を考慮する必要がある。さらに、反応の繰り返しによって結晶構造、粒子体積、細孔容積、表面積などが変化して反応速度に大きな影響を与える場合もある。反応促進のためには熱移動速度、物質移動速度、化学反応速度に影響する一次粒子の比表面積をいずれも大きくすることが理想である。

図2に示すように、気固系ケミカルヒートポンプの作動サイクルは放熱（出力）過程での蒸発①

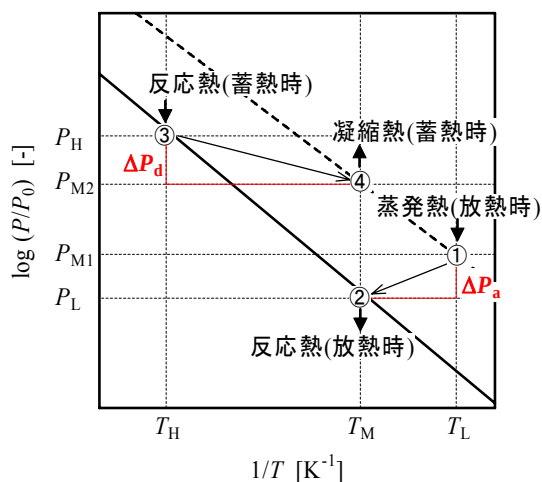


図2 ケミカルヒートポンプの作動サイクル
---:作動流体蒸気圧, —:反応平衡圧力

表 1 伝熱促進法

伝熱促進材	調製方法	反応系
膨張化グラファイト (EG)	単純混合	$\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$ [1]
	EG に無機塩水溶液を含浸・脱水・焼成	$\text{CaCl}_2/\text{CH}_3\text{OH}$ [2], $\text{CaCl}_2/\text{CH}_3\text{NH}_2$ [3]
	圧縮・成型した EG に無機塩水溶液を含浸・脱水・焼成	$\text{CaCl}_2/\text{CH}_3\text{NH}_2$ [4], $\text{MnCl}_2/\text{NH}_3$ [4,5] $\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$ [5], $\text{BaCl}_2/\text{NH}_3$ [5]
	圧縮・成型した EG に樹脂をバインダーとして活性炭を混合	活性炭/ CO_2 [60]
炭素繊維	無機塩水溶液を含浸・脱水	$\text{CoCl}_2/\text{NH}_3$ [7]
	ブラシ状炭素繊維を粒子層に挿入	$\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ [8]
	層間化合物生成	$\text{MnCl}_2/\text{HN}_3$ [9]
金属フォーム (Cu, Ni)	バインダーに懸濁して含浸・圧縮・焼成	ゼオライト/ H_2O [10], 活性炭/ CH_3OH [11]
樹脂 (ポリアニリン等)	粒子表面に網状に樹脂をコーティング	ゼオライト/ H_2O [11]
SiC, グラファイト	$\text{Al}(\text{OH})_3$ 等をバインダーとして混合・圧縮・焼成	ゼオライト/ H_2O [12]
金属板・管	フィンを粒子層に挿入	$\text{CaO}/\text{H}_2\text{O}$ [13]
	伝熱板またはフィンチューブとの一体化	シリカゲル/ H_2O [14,15], ゼオライト/ H_2O [16]

下 (蓄熱過程) して反応推進力差 ΔP が減少する。したがって出力速度増大のためには熱伝導性改善は最も大きな効果が期待できる領域であり、多くの研究・開発が行われてきた。

3. 様々な伝熱促進法

ケミカルヒートポンプに用いられる固体粒子層の有効熱伝導度は、反応系によって異なるが概略 $0.05 \sim 0.2 \text{ W/mK}$ 程度と他の固体材料に比べて非常に低い。熱伝導性改善のためには、反応材に高熱伝導性材料 (伝熱促進材) を様々な方法で添加する。これまでに開発された伝熱促進法を、添加される伝熱促進材別に表 1 にまとめた。表 1 には、伝熱促進が気固系化学反応と同様の重要性を持つ吸着ヒートポンプ材料も含めている。伝熱促進法は、(1) 伝熱促進材と無機塩や吸着材を混合して複合反応材を調製する方法と、(2) 炭素繊維や金属フィンを粒子層に挿入したり伝熱板・管と反応材粒子を一体化する方法 (装置的方法) に大別できる。

3.1 複合反応材

複合反応材の最も基本的な調製法は、粒子状膨張化グラファイトや炭素繊維に無機塩水溶液を含浸させ、脱水・乾燥・焼成する方法である [2]。この方法で調整した活性炭繊維あるいは膨張化グラファイトと塩化カルシウムの複合反応材の SEM 写真を図 3 に示す [17]。図 3(e, f) の膨張化グラファイト複合反応材の有効熱伝導度は塩化カルシウム

粒子層の数倍～10 倍に増大する。膨張化グラファイトは嵩密度が大きいので、圧縮して空隙率を減少させると熱伝導性をさらに向上させることができる。例えば、圧縮してブロック状に成型した膨張化グラファイトに無機塩水溶液を含浸・脱水・焼成する方法が用いられている [4,5]。シリカゲル

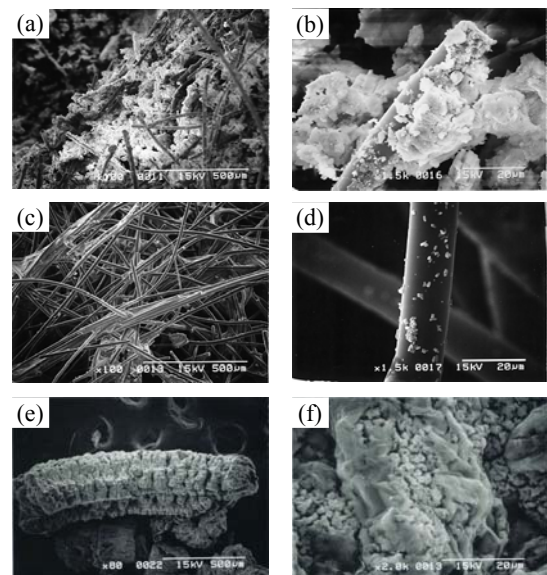


図 3 塩化カルシウム複合反応材の SEM 写真
(a),(b): 活性炭繊維複合反応材 (重量比*15 : 1)
(c),(d): 活性炭繊維複合反応材 (重量比 1.9 : 1)
(e),(f): 膨張化グラファイト複合反応材 (重量比 15 : 1)
* 重量比 = CaCl_2 重量 : 伝熱促進材重量

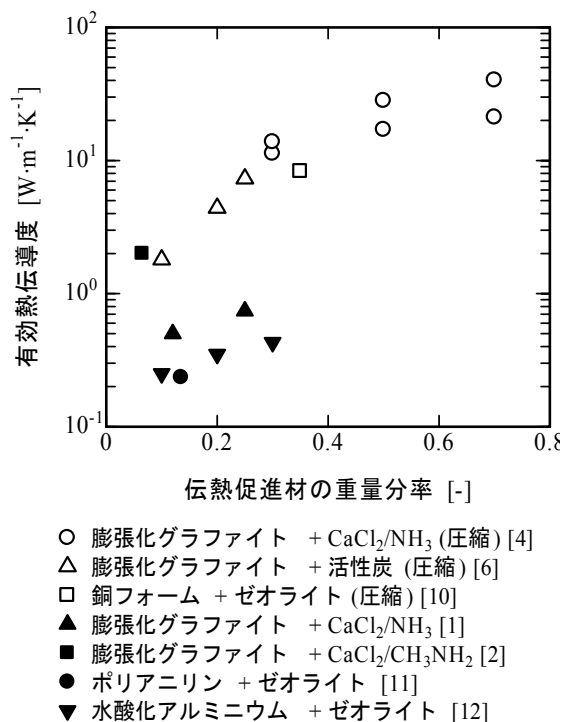


図4 伝熱促進材の重量分率と有効熱伝導度

や活性炭のように適当な溶媒がない場合には樹脂など不活性なバインダーを用いて伝熱促進材と反応材を密着させる[6].

3.2 装置伝熱促進法

フィン等の効果については、体積分率 0.01 以下のフィンによって有効熱伝導度が 6 倍に[13]、体積分率 0.05 の炭素繊維ブラシ挿入で有効熱伝導度が 4 倍に増大した事例[8]がある。酢酸ビニルをバインダーとしてシリカゲルを薄円盤状に成形・積層した一体型反応器[14]や、バインダーなしでフィンチューブ伝熱管のフィン管にシリカゲル粒子を充填した反応器では、吸着時間を大幅に短縮している[15].

伝熱促進法の開発は有効熱伝導度増大を中心として進められてきたが、有効熱伝導度がある程度大きくなると、粒子層と反応器壁間の熱伝達が重要になる。反応器壁での熱伝達向上には、一体型反応器が有効である。ゼオライト粒子をアルミニウム伝熱板上に化学反応を利用して付着させた反応器では、吸着材層内の有効熱伝導度は 0.09 から 0.4 W/mK に約 4 倍大きくなっただけだが、壁面での熱伝達係数は 20 から 800 W/m²K へと 40 倍に増大した[18].

表 2 中のいくつかの有効熱伝導度を試料中の伝熱促進材の重量分率に対して図 4 にプロットし比較した。これらのデータ間には反応系や測定条件、圧縮の程度に違いはあるが、伝熱促進材の重量分率に比例して有効熱伝導度が大きくなっている。オープンキーで示した圧縮を伴う複合化粒子層の有効熱伝導度はクロズドキーで示した圧縮なしの場合よりも全体的に 1 オーダー大きい。圧縮した伝熱促進材を高比率で含む複合反応層では有効熱伝導度は 10 W/mK 以上で、もとの粒子層の数 100 倍の高い熱伝導度である。

4. 伝熱促進法の問題と今後の課題

4.1 反応気体の透過度

粒子層の有効熱伝導度は空隙率が小さいほど大きく、一方物質移動抵抗は空隙率が大きいほど少なくなる。粒子層の高熱伝導性と反応気体の高透過性は相矛盾するが、この二つの課題を同時に満たすために熱伝導性が高く内部に多くの空隙をもつ膨張化グラファイト、炭素繊維、フォーム状金属などが伝熱促進材として多用されている。しかし、嵩密度の高い添加材を高い含有率で用いても、圧縮によって反応層の密度が高くなるにつれて透過度は減少する。図 5 は $\text{CaCl}_2/\text{NH}_3$ 系 (8 モル付加時) の反応層を圧縮して行った時の密度と有効熱伝導度ならびに反応気体透過度の関係を示している[5,19]. 有効熱伝導度は反応層密度に比例して

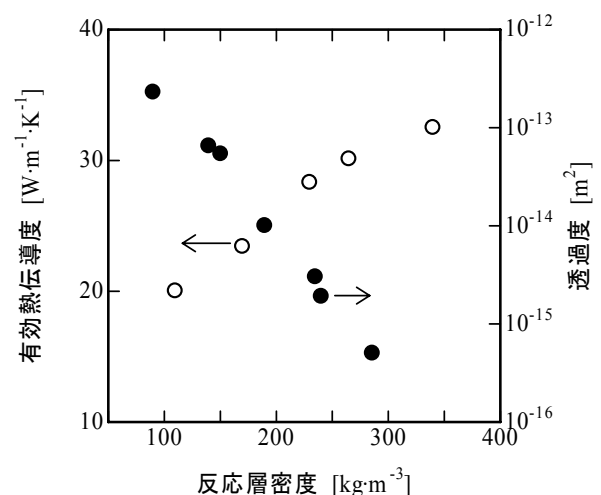


図5 反応層密度と粒子層の有効熱伝導度, 反応気体透過度の関係 ($\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$, 膨張化グラファイト重量分率 0.55)

増大し、透過度は減少する。例えば反応層密度が 100 から 200 kg/m³ になると有効熱伝導度は 20 から 25 W/mK へ 1.25 倍になり、透過度は 2×10^{-13} から 10^{-14} m² へ 1/20 に減少する。

反応気体透過度が反応特性に与える影響については、透過度が 10^{-14} m² 以下になると低操作圧の反応層は物質移動律速に移行するという報告がある[20]。より直接的な反応速度と圧縮の関係の実験的検討としては、炭素繊維/MgCl₂の複合化反応材とアンモニアの反応で、粒子層を圧縮してゆくと粒子層の見かけ密度 700 kg/m³ までは反応速度が増大するが、それ以上になると減少した。見かけ密度 700 kg/m³ までは圧縮による熱伝導度増大、それ以後は圧縮によって反応気体の透過性が低下したためである[21]。

4.2 反応促進効果

もう一つの問題は、高い有効熱伝導度が必ずしも反応速度増大に帰結していないことである。例えば、1 W/mK 程度までは有効熱伝導度に比例して熱出力が増大するが、有効熱伝導度がさらに 30 倍になっても熱出力は 3 倍弱しか増大しなかった例が報告されている[4]。これは高い有効熱伝導度の下では粒子と反応器壁との接触熱抵抗が支配的となることに加えて圧縮のために反応気体の透過抵抗が増大したためと考えることができる。

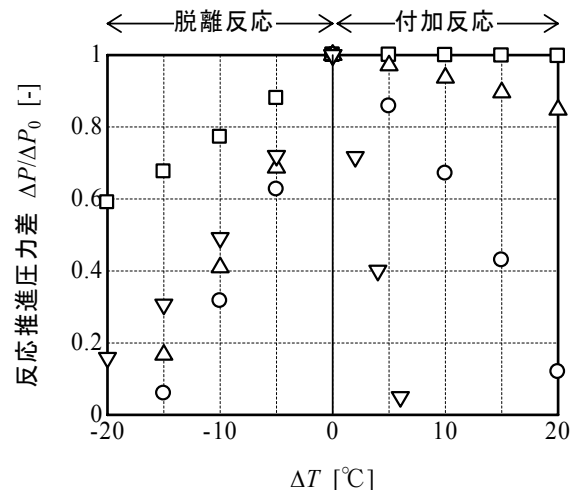
現在の高熱伝導性反応材には極端に高い比率で伝熱促進材が添加されている点も再検討が必要だろう。粒子層の 100 倍以上の有効熱伝導度を持つ複合化反応材では体積の半分以上が伝熱促進材であり、有効熱伝導度が 300 倍の反応層は 80 vol% 近い伝熱促進材を含む[5]。反応器や調製法の複雑化・大型化とコストアップを避けコンパクトな伝熱促進法へと開発方向をシフトする必要があると考える。

4.3 反応系・作動条件に応じた伝熱促進の最適化

温度変化による反応推進圧力差の減少は、反応系と作動温度・圧力条件によってかなりの違いがあり、伝熱促進が反応速度に与える効果も異なる。図 6 は想定されているケミカルヒートポンプ作動条件下での反応層の温度変化 (ΔT =反応層温度－設定温度) と反応推進圧力差の関係である。CaCl₂/H₂O や CaCl₂/CH₃NH₂ のように作動温度域での反応平衡圧力と操作圧力の差が小さい反応系では伝熱促進は反応促進に大きな効果を持つ。他方、

MgO/H₂O の場合には反応推進圧力差が十分に大きく、特に付加反応では伝熱促進による反応速度増大はほとんど期待できない。

さらに、ヒートポンプとしての作動条件のもとで熱伝導性の評価を行うことも重要である。図 7 は CaCl₂/CH₃OH 反応層の有効熱伝導度と気相圧力の関係を示している[22]。メタノールとの反応



- MgO/H₂O ($T_a=110^\circ\text{C}$, $T_v=80^\circ\text{C}$, $T_d=350^\circ\text{C}$, $T_c=50^\circ\text{C}$)
- △ CaO/H₂O ($T_a=300^\circ\text{C}$, $T_v=20^\circ\text{C}$, $T_d=400^\circ\text{C}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)
- CaCl₂/H₂O ($T_a=30^\circ\text{C}$, $T_v=5^\circ\text{C}$, $T_d=100^\circ\text{C}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)
- ▽ CaCl₂/CH₃NH₂ ($T_a=30^\circ\text{C}$, $T_v=5^\circ\text{C}$, $T_d=80^\circ\text{C}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)

図 6 反応層温度変化による反応推進圧力差減少
 T_a : 付加反応時の反応層設定温度, T_v : 蒸発器温度
 T_d : 脱離反応時の反応層設定温度, T_c : 凝縮器温度

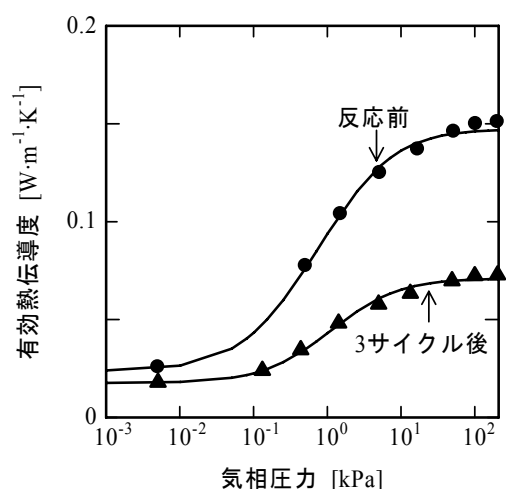


図 7 粒子層の有効熱伝導度と気相圧力の関係
(CaCl₂/CH₃OH, 反応前と 3 サイクル経過後に
ほぼ完全に脱離反応が完了した状態)

サイクルを3回繰り返した後にほぼ完全に脱離させた粒子層の有効熱伝導度は反応前と比べて大きく減少している。他の CaCl_2 反応系でも、反応サイクルを数回繰り返すと有効熱伝導度は反応前の無機塩の1/2から1/3に減少する。

また、充填層の伝熱では粒子接点近くでの熱移動の寄与が大きいために比較的高い圧力条件から気相圧力の影響を受け、1/10気圧付近から急激に有効熱伝導度が低下する。反応粒子の熱伝導度測定は困難であることが多く常圧の不活性気体中で測定した反応前の粒子層の熱伝導度に基づいて伝熱特性が評価される場合もあるが、実際の熱利用サイクルにおける熱伝導度は作動条件によっては反応前よりもかなり低くなることに注意が必要である。反応系と作動条件の特性に応じて必要・十分な伝熱促進法を検討することが今後の課題の一つとなるだろう。

4.4 目標設定と伝熱促進技術の総合化

それでは、どの程度まで熱伝導度を向上させれば十分だろうか。 $\text{SrCl}_2/\text{NH}_3$ の実験結果から求めた反応速度パラメータを用いたシミュレーションより、伝熱律速を回避できる条件として有効熱伝導度 15 W/mK 以上、反応材と反応器壁の間の熱伝達係数 $800 \text{ W/m}^2\text{K}$ 以上という値が報告されている[23]。 $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 系についての同様のシミュレーション結果は、実測よりも数桁大きい化学反応速度のもとでも有効熱伝導度が 2 W/mK 以上であれば総括反応速度は有効熱伝導度に依存しないことが示されている[8]。

この値は有効熱伝導度に関しては圧縮を伴う複合反応材ですでに達成されているが、低い伝熱促進材比率で反応気体透過性を損なうことなく有効熱伝導度と伝熱係数を増大させる必要がある。そのためには、高熱伝導性材料との複合化、一体型反応器や伝熱フィンのような装置的工夫など、これまで個別に進められてきた技術の結合が不可欠と考える。

5. おわりに

化学蓄熱、ケミカルヒートポンプに利用される気固系反応材の伝熱促進技術を紹介し、問題点を検討した。今日までに多くの伝熱促進法が開発されており、これを総合してより現実的で効果的な装置開発に向かう材料が出揃った段階と現状を捉

えることができるだろう。伝熱促進と、本稿では触れなかったが種々試みられている反応促進[24]を組み合わせれば、体積あたりの出力速度を現在の10～20倍に増大させることは十分可能である。既存技術と競合できる性能を示して実用化を加速するために、伝熱促進技術の一層の進展を目指したい。

引用文献

- [1] Valkov, V., *et al.*, Proc. Int. Sorption Heat Pump Conf., Shanghai, (2002) 444
- [2] Hirata, Y. *et al.*, J. Chem. Eng. Japan, 36 (2003) 827
- [3] Fujioka, K. *et al.*, Proc. 6th World Congress of Chemical Engineering, Melbourne (2001)
- [4] Mauran, S., *et al.*, Heat Recovery Systems & CHP, 13 (1993) 315
- [5] Han, J. H., *et al.*, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 13 (1999) 481
- [6] Goetz, V., *et al.*, Ind. Eng. Chem. Res., 40 (2001) 2904
- [7] Aidom, Z., *et al.*, Applied Thermal Engineering, 22 (2002) 1943
- [8] Nakaso, K., *et al.*, Proc. 10th APCCHE, Kitakyushu, (2004)
- [9] Dellerio, T., *et al.*, Applied Thermal Engineering, 19 (1999) 991
- [10] Guilleminot, J.J., *et al.*, Heat Recovery Systems & CHP, 13 (1993) 297
- [11] Hu, E.J., *et al.*, Trans ASME (Journal of Heat Transfer), 119 (1997) 627
- [12] Pino, L., *et al.*, Adsorption, 3 (1996) 33
- [13] 小倉裕直ら, 化学工学論文集, 17 (1991) 916
- [14] 伊藤睦広ら, 化工論文集, 22 (1996) 163
- [15] 藤沢亮ら, 化工論文集, 28 (2002) 247
- [16] Freni, A., *et al.*, Proc. 3rd Int. Conf. on Heat Powered Cycles, Cyprus (2004)
- [17] Fujioka, K. *et al.*, Applied Thermal Engineering, 26, (2006) in press
- [18] Restuccai, G., *et al.*, Materials Eng., 12 (2001) 315
- [19] Han, J.H., *et al.*, Applied Thermal Engineering, 21 (2001) 453
- [20] Lu, Hui-Bo, *et al.*, Chem. Eng. Sci., 51 (1996)

- 3829
- [21] Dello, T., *et al.*, Applied Thermal Engineering, 19 (1999) 1001
- [22] Fujioka, K., Proc. SEE 2000, Hong Kong, (2000) 628
- [23] Huang, H. J., *et al.*, Separation Purification Technology, 34 (2004) 191
- [24] 藤岡恵子, 骨太のエネルギーロードマップ (分担), 化学工業社(2005) 211
-

炭素繊維を用いた熱エネルギー利用機器の伝熱促進

Heat Transfer Enhancement of Thermal Energy Equipment Using Carbon Fibers

深井 潤, 中曾 浩一 (九州大学)

Jun FUKAI, Koichi NAKASO (Kyushu University)

e-mail: jfukai@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

熱エネルギー有効利用機器として期待される吸着や化学反応を利用した蓄熱・ヒートポンプは、粒子充填層での固気反応が利用される。また、安定な水素貯蔵法として材料開発が進んでいる水素吸蔵合金も同様の形態で利用される。気固反応(不均一反応)における総括の反応速度は、反応以外に熱移動や物質移動によって影響されることは一般的によく知られているところである。粒子充填層では、熱伝導率が高い金属粒子であっても、充填層の有効熱伝導率は大幅に低下する。水素吸蔵合金粒子層の場合でもその有効熱伝導率は 1 W/(m K) 程度であり、熱移動速度が総括の反応速度を支配する場合が多い。そのため、熱移動速度を十分に大きくし、熱媒体との熱交換をスムーズに行わせる必要がある。この点が、粒子充填層を利用する機器の実用化において課題となっている。

粒子充填層の低い有効熱伝導率は、化学プラントにおいてもしばしば問題となっており、フィンの使用や伝熱管本数の増加などの対策が取られている。しかし、コスト高を招くことやスペースの制約がさほど厳しくないことから、多くの現場では最低限の解決策しか取られていないというのが著者らの印象である。

一方、上述の機器の多くは大量生産を目指すことになる。したがって、組み立て工程の簡略化は直接コスト削減につながる。また、伝熱面拡大が装置容積の極端な増大につながれば、蓄熱密度の低減 (= 装置容積の増加) という自体を招き、反応熱利用の特徴である高蓄熱密度の利点を活かさないことになる。このように、実用機器を考えた場合、蓄熱密度の低下を極力抑え、熱・物質移動速度が律速とならないような伝熱促進法が要求される。

これまで検討されてきた伝熱促進方法は、複合化により粒子充填層の有効熱伝導率を向上させる

方法と伝熱面を拡大する方法に大別される。それについては、最近であれば、引用文献[1]や[2]にレビューされている。

本稿では、著者らが行ってきた炭素繊維を利用した伝熱促進法を中心に紹介する。まず、反応を伴う場合に伝熱促進が熱交換速度に及ぼす影響について数値的に検討した例を紹介する。次に、蓄熱炭素繊維の利用形態とそれを潜熱蓄熱に応用した結果について述べる。最後に、その方法を粒子充填層へ応用するための基礎的な研究を紹介する。

2. 有効熱伝導率が反応速度に及ぼす影響

図 1(a)に示すような多管型熱交換器の使用を想定する。容器上部から反応ガスを導入し、粒子充填層内で反応させる。反応熱は伝熱管内の熱媒体との熱交換で除去する。解析では、(b)に示すように、伝熱管一本分の領域を考えて軸対称 2 次元円筒座標系で解析した。気相と固相内の質量、運動量およびエネルギーの収支式を数値的に解いている。計算においては、熱負荷一定の条件を想定し、伝熱管内壁と熱媒体の熱交換速度が一定となるように、熱媒体の流速を変化させている。

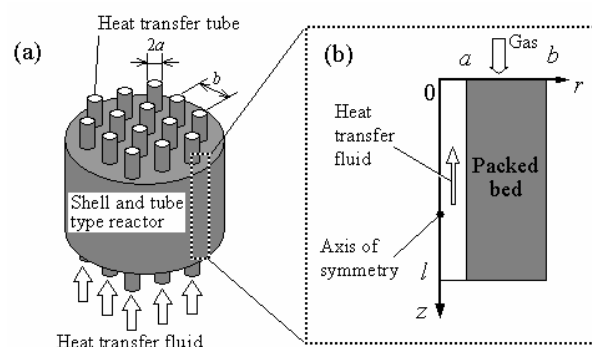
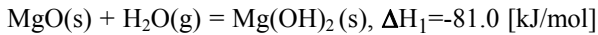


図 1 多管式熱交換器型反応器と解析領域の概略

2.1 MgO/H₂O 系

水和と脱水反応の反応温度差を用いてヒートポンプサイクル利用[3]が検討されている。反応式を以下に示す。



MgO 微粒子として、直径 2 mm、長さ 2-10 mm の円筒状に成形した多孔質粒子を考え、反応速度式およびその反応定数は実測値に基づいて与えている[4]。

図 2 は、無次元設定熱負荷 $q^* = 10$ における管熱媒体の無次元出入口温度差 $\Theta_{h,\text{out}} - \Theta_{h,\text{in}}$ および無次元熱媒体流速 U_h^* と無次元時間 τ の関係である。 λ_{eff}^* は伝熱促進した場合の粒子充填層内有効熱拡散率を促進しない場合の有効熱伝導率で規格化した値である。 $\lambda_{\text{eff}}^* = 1$ の場合、熱媒体への反応熱の輸送速度が小さいので、反応熱の除去が不十分であり、熱媒体の温度差は小さい。設定熱負荷を達成するために $\tau = 6$ 付近から熱媒体流速が大きく上昇し、利用可能な熱量 Q_{tot} の 6 割程度しか出力できない。一方、 $\lambda_{\text{eff}}^* = 5$ あるいは 10 のように有効熱伝導率を増加させると、熱媒体温度差は大きく上昇し、設定熱負荷を維持できる時間が顕著に長くなる。ただし、 λ_{eff}^* を 5 から 10 へと変化させても計算結果に大きな差異は見られない。

ここで、設定熱負荷の 90% 以上を有効放熱と考え、 q^* が設定熱負荷の 90% まで減少した時の総放熱量 Q_{dis} を求めた。理論蓄熱量を Q_{tot} として、有効放熱率 $Q_{\text{dis}}/Q_{\text{tot}}$ と λ_{eff}^* の関係の一例を図 3 に示す。 λ_{eff}^* の増加とともに有効放熱率は急激に増加するが、 $\lambda_{\text{eff}}^* > 10$ 以上で有効放熱率の変化は緩やかになる。これは、有効熱伝導率をある程度以上大きくすることによって、水和反応の進行が熱移動支配から反応速度支配へ移行するためである。

2.2 水素吸蔵合金

水素吸蔵合金は、燃料電池用等の次世代水素貯蔵槽のみならず、水素の吸蔵・放出反応を利用したアクチュエータ、水素コンプレッサの動力源、さらに、ケミカルヒートポンプへの応用も期待されている。ここでは、LaNi₅ の水素吸蔵反応について、上記 MgO/H₂O 系と同様な検討を行った[5]。MgO/H₂O 系との伝熱的な違いは、LaNi₅ 粒子が金属であるため、有効熱伝導率が約 6 倍大きい点である。上記の場合と同様に $q^* = 10$ を与えて計

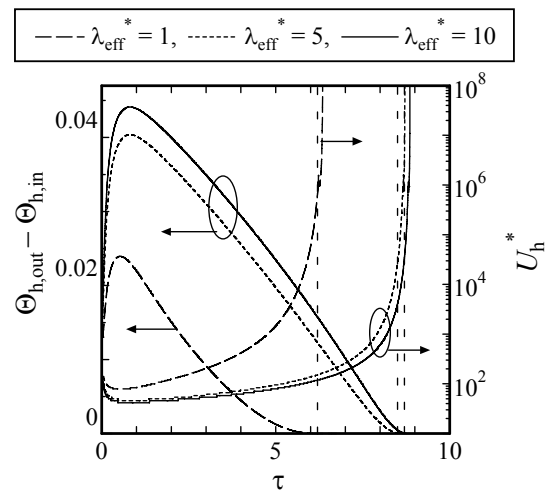


図 2 熱媒体の無次元出入口温度差 $\Theta_{h,\text{out}} - \Theta_{h,\text{in}}$ 、無次元熱媒体流速 U_h^* の経時変化 ($q^* = 10$)

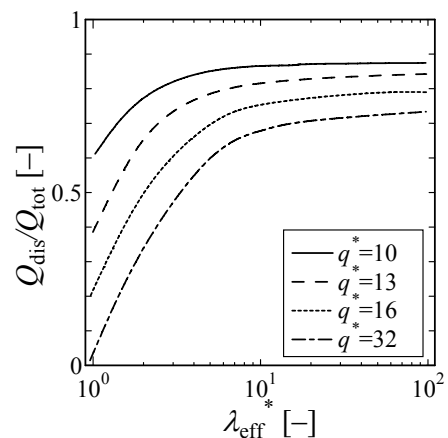


図 3 有効熱伝導率と有効放熱率の関係 (MgO/H₂O 系)

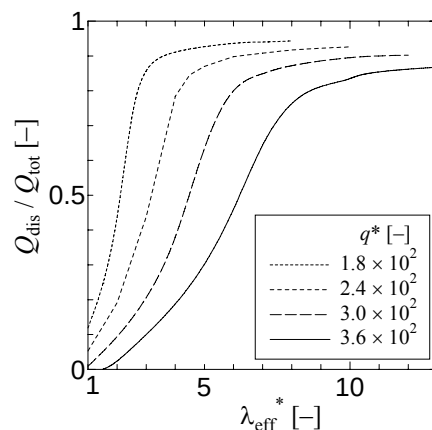


図 4 有効熱伝導率と有効放熱率の関係

算を行ったが、 $\lambda_{\text{eff}}^* = 1$ において、すでに $Q_{\text{dis}}/Q_{\text{tot}}$ は 0.98 であった。このため、図 4 に示す解析結果例では、上記よりも大きな熱負荷において検討している。この場合も、 $Q_{\text{dis}}/Q_{\text{tot}}$ の値は $\lambda_{\text{eff}}^* = 5-10$ 程度で飽和する傾向にある。

以上のように、粒子充填層内の伝熱促進では、 λ_{eff}^* が小さい時に大きな効果が得られるが、ある程度以上大きくすれば熱出力にほとんど影響しなくなる点に注意しなければならない。

3. 炭素繊維の利用

前節で述べたような高い有効熱伝導度を如何に実現するか？ 著者らのグループではこれまで炭素繊維を用いて検討してきた。

大量生産されている炭素繊維には PAN 系とピッチ系があり、ピッチ系炭素繊維の有効熱伝導度は 1000 W/(m K) 以上の製品もある。また、軽量で耐食性に優れ、酸化雰囲気でも約 400°C の高温に耐えるとされている。ただし、一般的には、熱伝導率は剛性率や弾性率などの機械的物性と相関関係にあることから、適切な形状に加工できるグレードは機械的物性に制限されることが多い。

著者らは、これまでチップ状炭素繊維[6]、ブラシ状に加工した炭素繊維（図 5(a)）[7-12]とクロス状の炭素繊維（図 5(b)）[13-14]による伝熱速度と反応速度の向上を検討してきた。図 6 は、それらを多管型熱交換器内へ挿入した時のイメージ図である。炭素繊維ブラシは蓄熱材の有効熱伝導度の向上を、炭素繊維クロスは簡易な伝熱面拡大法として提案したものである。

4. 潜熱蓄熱における検討

熱伝導率が低い潜熱蓄熱材（特に、有機系蓄熱材）を使用する蓄熱槽においても、伝熱速度向上という課題がある。図 6 の各方法の特徴を示すために、潜熱蓄熱槽での解析例を紹介する。

4.1 炭素繊維 ブラシ

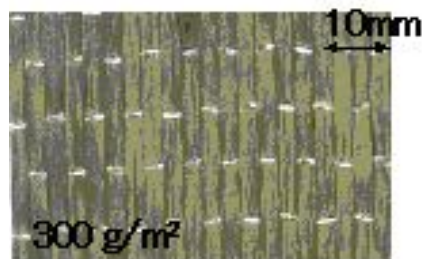
円筒カプセル内におけるブラシの伝熱促進効果も検討しているが[7]、実際的な多管型蓄熱槽を対象とした結果を以下に紹介する。

図 7 に示すような熱交換器の一部（伝熱管 4 本の領域）を模擬した容器内に炭素繊維（ 190 W/(m K) ）と蓄熱材（ n -オクタデカン）を充填し、管内に温水を流した時の過渡温度応答を内部に設

置した 5 本の熱電対により測定した。なお、図 7(b) がブラシであり、(a) は参照実験として行ったチップ（繊維長さ 5 mm ，同一熱伝導率）である[6]。図 8 は、測定温度の経時変化と伝熱モデルから導き出した有効熱伝導率 k_{eff} と繊維充填量（ X_{tot} = 蓄熱槽容積に対する繊維の体積分率）の関係である。縦軸は、蓄熱材の熱伝導率 k_m で規格化してある。ここで、 k_{eff} は蓄熱材と熱媒体の熱交換操作において有効に作用する蓄熱材の見かけ効熱伝導率と定義している。 k'_{eff} はさらに蓄熱材から管内壁まで



(a) 炭素繊維ブラシ(ブラシ容積に対する炭素量 0.8 vol.%)



(b) 炭素繊維クロス(目付け 300 g/m²)

図 5 炭素繊維による伝熱促進

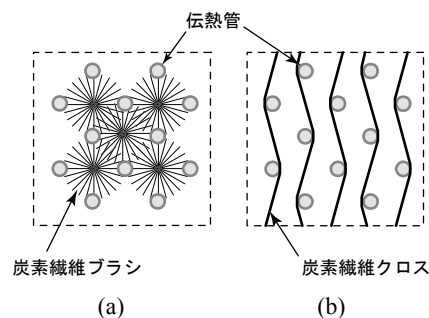


図 6 熱交換器内部の炭素繊維

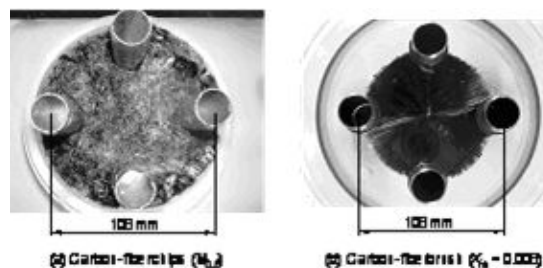


図 7 伝熱管間隙部のチップとブラシ[6]

の熱抵抗を考慮した見かけ有効熱伝導率である。本システムでは、ブラシの繊維方向が必ずしも熱流方向に一致していないので、ブラシの k_{eff} はチップより小さいが、 k'_{eff} の値はブラシの方が大きい。これは、伝熱管近くでチップは管壁に対して平行に配向するために、その部分が大きな伝熱抵抗（図中、 h_{ct} は接触熱伝達係数）となるためである。ブラシ伝熱抵抗は、繊維の弾性力によって管壁に密着するので、チップより小さいが、炭素繊維量が増加するほど、管回りの伝熱抵抗が支配的となり、総括的な伝熱速度は頭打ちになる。

4.2 炭素繊維クロス

クロスの効果を有効熱伝導率で評価してブラシと比較することは不可能ではないが、ここでは、1999 年に暖房用蓄熱槽として開発し、(株) 九電工で現在も運転している実証機に対する検討結果を紹介する。

この潜熱蓄熱槽では、スタティック型氷蓄熱槽内（内寸 L 4360 × W 2100 × H 1900mm）に、蓄熱材として市販パラフィン（融点約 49 °C）を充填し、2 槽の蓄熱槽内にそれぞれブラシ[10-11]およびシート[14]を挿入した。38-55 °C における蓄熱量は 1 槽あたり約 2 GJ である。

蓄熱槽の評価方法の一つとして、所望の熱出力を放出し続けることができる時間とその時の最終放熱率（=実際の放熱量/理論蓄熱量）がある。図 9 は、放熱速度 q_{dis} を一定に保った場合に算出される放熱率 $Q_{\text{dis}}/Q_{\text{tot}}$ を示す[14]。要求される熱出力 q_{dis} が大きいほど、熱交換速度の追従が困難となるため、いずれの曲線においても q_{dis} の増加に伴い、放熱率は減少する。ここで、各体積分率（ X_{fa} ）におけるブラシとクロスの放熱率を比較すると、クロスの方がブラシよりも小さい X_{fa} で大きな放熱率が得られている。このことは、ブラシでは上述の熱流束方向と繊維方向の不一致や伝熱管付近での熱抵抗の問題があるのに対し、クロスは比較的小さい体積分率で、伝熱面積が大きく拡大できることを示している。

このように、粒子充填層と同様な熱的課題を有する潜熱蓄熱槽において、高熱伝導の炭素繊維を利用した伝熱促進を検討してきた結果、フィン付き管を使用するよりも安価で、蓄熱密度を極力抑える方法を開発することができた。

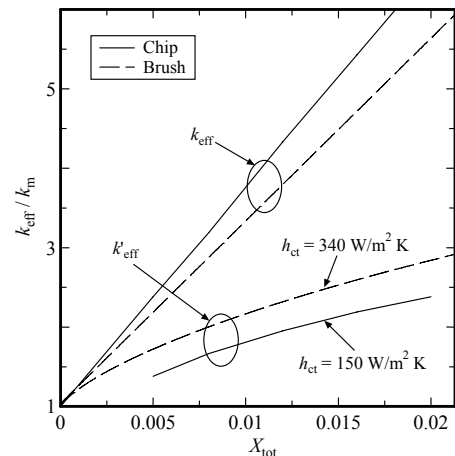


図 8 ブラシおよびチップの有効熱伝導率[6]

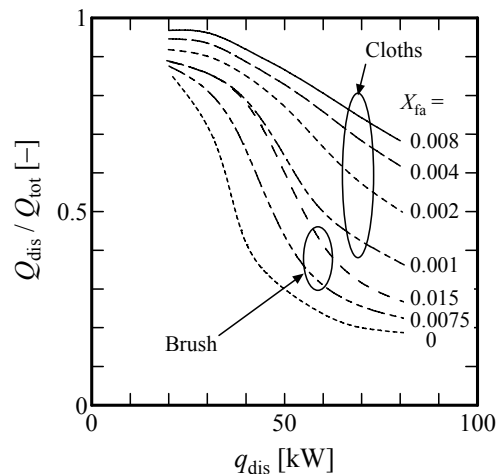


図 9 有効放熱率と熱負荷の関係

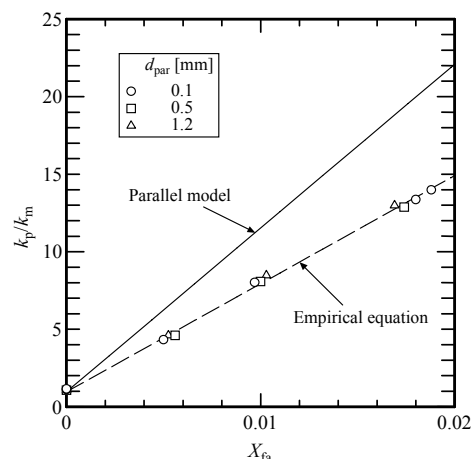


図 10 ガラス粒子充填層の有効熱伝導率に及ぼすブラシの影響[7]

5. 粒子充填反応器

以上のような知見を基づいて、炭素繊維の粒子充填層への適用を検討している。ここでは、ブラシ炭素繊維の実験的な検討例について紹介する。

5.1 粒子充填層の有効熱伝導率

図 10 は、不活性なガラス粒子充填層にブラシを挿入した際の繊維方向の有効熱伝導率(k_p)である[7]。室温での測定であるので、低温で粒子径(d_p)に依存しない。パラフィンの様な連続体では、図中の実線（平行モデル）にほぼ一致するが、粒子層では粒子と繊維の伝熱抵抗が存在するために、平行モデルより 2/3 程度小さな値となっている。しかし、伝熱促進法としては有望である。

5.2 温度分布と反応速度への影響

上述した $\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 系に対する検討を以下に示す。 MgO 微粒子を直径 2 mm、長さ 2-10 mm の円筒状に成形して多孔質粒子とし[3]、内径 55 mm × 高さ 150 mm の円筒反応器内に充填した（空隙率=約 0.50）。減圧した反応容器へ水蒸気を上部から流入し、反応を開始する。図 11 および 12 は、それぞれ半径方向温度と反応率の経時変化の測定結果である[4]。ブラシを 1.0 vol.% ($X_f = 0.01$) 挿入することにより、内部温度分布は均一化されており、反応率が最終値の 90 % に達する時間 (t_{90}) も約 30 % 短縮されている。

水素吸蔵合金粒子充填層についても同様の検討を行った。水素吸蔵合金としては LaNi_5 を用いた。反応器は同心二重円筒状の容器を用い、内筒の内側には充填層を、内筒と外筒の間には熱媒体を流通させ、徐熱を行った。熱伝導促進体としては、先ほどと同様に炭素繊維ブラシ 1.0 vol.% ($X_{fa} = 0.01$) とした。実験では、予め水素リザーバー内に所定の圧力・温度に保っておいた水素を反応器内へ導入することで水素吸蔵反応を開始し、反応に伴う層内温度変化を充填層中心部分に設置した熱電対により測定した。また、供給水素流量を測定し、これより反応率を求めた。図 13 は、反応率ならびに中心温度の経時変化を示した図である。炭素繊維を設置することで、中心部分の温度の低下が早いため、反応熱の効果的な除去が行われていることが伺える。反応率について着目すると、反応時間が 40 % ほど短縮できていることがわかる。

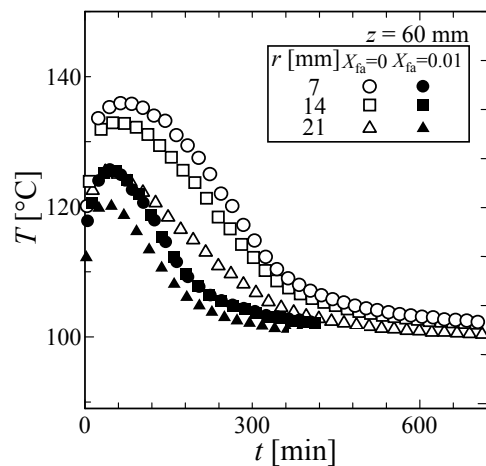


図 11 内部温度に及ぼすブラシの影響 ($\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 系)

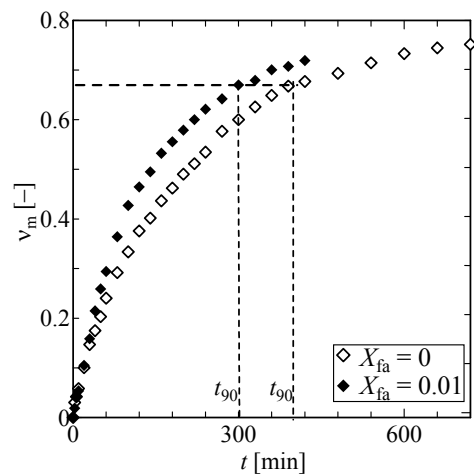


図 12 反応器内の平均反応率の経時変化 ($\text{MgO}/\text{H}_2\text{O}$ 系)

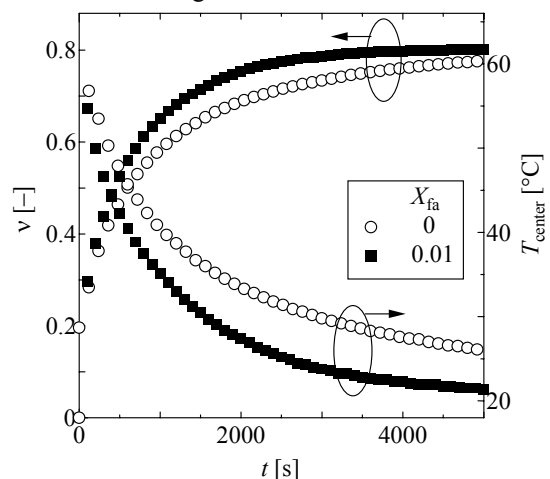


図 13 平均反応率と充填層中心温度の経時変化 (LaNi_5)

6. おわりに

エネルギー有効利用の観点より、潜熱蓄熱槽や化学反応を利用した熱エネルギー利用機器の高性能化が期待されているが、本稿で概説したように、内部の低熱伝導性に起因した熱出力の低下が大きな課題となっている。これまで、著者らが検討してきた炭素繊維を利用した伝熱促進法はその解決策の一例である。潜熱蓄熱材についてはおおよそ検討を終了している。本稿で紹介した粒子充填層への適用は未だ基礎研究の域を出ておらず、クロスの検討も今後進める予定である。

著者らは、伝熱促進法として炭素繊維にこだわっているわけではないが、熱的・化学的に安定であるという炭素の特徴は伝熱促進のブレークスルーがなされた時に、反応系との相性をあまり考えずに様々な系へ利用できる魅力がある。また、ここではブラシとクロスの利用形態を紹介したが、その他にも様々な利用形態が考えられる。反応器の形態を加味しつつ、最適な利用形態を考えていく必要がある。

参考文献

- [1] Sharama, S. D., *et al.*, *International Journal of Green Energy*, **2**, 1(2005)
- [2] Fujioka, K., *et al.*, *Applied Thermal Engineering*, in press
- [3] Kato, Y., *et al.*, *Appl. Therm. Eng.* **16**, 853 (1996)
- [4] Nakaso, K., *et al.*, *10th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress* On-line number 504, (2004)
- [5] Nakaso, K., *et al.*, *4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT) 2005*, NK1 (2005)
- [6] Hamada, Y., *et al.* *Solar Energy*, **75**(14), 317(2003)
- [7] Fukai, J., *et al.*, *Energy Conversion & Management*, **41**(14) 1543 (2000)
- [8] Fukai, J., *et al.*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **25**(24), 4781(2002)
- [9] Hamada, Y., *et al.*, *Energy*, **30**(2-3), 221 (2005)
- [10] Hamada, Y. and Fukai, J., *Energy Conversion & Management*, **46**(20) 3221(2005)
- [11] 深井潤ら, 空気調和・衛生工学会論文集, **94**, 35 (2004)
- [12] Fukai, J., *et al.*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**(23), 4513 (2003)
- [13] Nogami, S., *et al.*, *Futurestock'2003* (September 1st-4th, 2003), Warsaw (POLAND), F24
- [14] Yoshimura, A., *et al.*, *10th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress*, On-line number 1072 (2004)

セラミックス吸収材を用いた CO₂ 分離技術の開発 Development of CO₂ Separation Technique Using Lithium-Containing Oxide

越崎 健司 (東芝)
Kenji ESSAKI (Toshiba Corporation)
e-mail: kenji.essaki@toshiba.co.jp

1. 緒言

近年、二酸化炭素 (CO₂) を始めとする温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化が声高に叫ばれており、2005 年には京都議定書が発効され、温室効果ガスの削減目標が各国で定められている。我が国でも京都議定書目標達成計画 (2005 年) に示されるように具体的な対策が立てられ、環境税導入についても検討が行われている。この削減目標を達成する方法としては様々なものが挙げられ、省エネルギーの推進、エネルギー変換効率の向上及び新エネルギー源の創出に加え、発電所や工場の排ガスからの CO₂ 分離と森林及び海洋による CO₂ の固定がある。特に CO₂ 分離・固定は比較的短い期間で大きな効果が望める現実的な方法だと考えられており、物理吸着法や膜分離法、化学吸収法など様々な技術開発が各国の研究機関によって進められている[1-7]。それらの研究においては、分離によって生ずるエネルギーの最小化、分離装置の小型化・低コスト化および材料の長寿命化が課題となっていた。これに対し、発電所の燃料改質プロセスから CO₂ を分離するいわゆる「燃焼前分離」が有利だという報告がある[8]。燃料ガスは窒素の影響を受けないために流量が小さく、CO₂ 分圧は燃焼後の排ガスに比べ高いため、CO₂ 分離には有利となる。しかし、燃料改質プロセスが高温で行われるのに対し、これまでの CO₂ 分離技術は高温で使用するができず、燃料改質プロセスから直接分離することができなかった。

この問題に対し、東芝ではリチウム複合酸化物から成るセラミックスを用いた新しい CO₂ 分離技術を開発している[9-16]。この方法は 450℃ から 700℃ の範囲で用いることができるため、排ガスの温度を下げることなく CO₂ を分離できる利点がある。リチウム複合酸化物の中でもリチウムオルトシリケート (Li₄SiO₄、以後リチウムシリケートと記す) は最も優れた分離特性を示し、自重の約 36% の CO₂ を

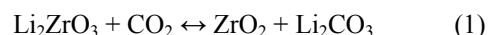
吸収することができる。これは自らの 400 倍の体積に当たる量である。これまでに図 1 に示すようなペレット状リチウムシリケート (球状、5 mm) を作製し、充填層を用いた検討を進めている。本稿では、リチウムシリケートの開発経緯と優れた特徴、及び応用プランについて紹介する。



図 1 ペレット状リチウムシリケート

2. 開発の経緯

熔融炭酸塩型燃料電池 (MCFC) の長寿命化研究で、リチウムジルコネート (Li₂ZrO₃) が電解質板への添加物として検討された。熔融炭酸塩中での安定性を調べると、Li₂ZrO₃ は 700℃ 付近を境に高温側では Li₂ZrO₃、低温側ではジルコニア (ZrO₂) になる式(1)に示す可逆反応を起こすことが判明した。



これは MCFC の電解質板材料としては適当ではないものの、むしろ CO₂ 吸収材として利用できるのではないかと考え、CO₂ 吸収材の研究を開始した。可逆反応により吸収材は吸収・放出を繰り返すことが可能であることも判明した。現在では他機関も含め Li₂ZrO₃ に関する研究が広まりつつある[17, 18]。

Li₂ZrO₃ には高温で使用可能だという特長があ

る一方、原料にジルコニアを用いているため価格が高く、重量が大きいという問題がある。そこで低コスト、軽量な新材料探索を行った。Li₂ZrO₃のCO₂吸収は図2に示すようにLi₂ZrO₃中の酸化リチウム(Li₂O)が表面でCO₂と反応し、炭酸リチウム(Li₂CO₃)を形成することで行われる。

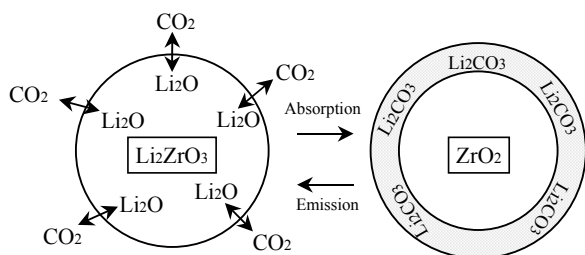


図2 吸収・放出反応の模式図
(リチウムジルコネート)

そしてこのLi₂CO₃がLi₂OとCO₂に分解することでCO₂放出が行われる。すなわち、CO₂の吸収・放出に直接関与しているのはLi₂Oであり、ZrO₂はその保持材の役割を果たしていると考えられる。この吸収・放出メカニズムに基づき、ZrO₂を安価で軽量の酸化物に置き換えたリチウム複合酸化物の中にLi₂ZrO₃に替わる新たな吸収材を見出せると考えた。ここでもう1つ重要なことは、500℃程度の高温域で吸収・放出を可逆的に行うということである。これらの考えに基づき様々なリチウム複合酸化物に対し熱力学データ[19]による計算、及びCO₂吸収実験による検討を行った。その結果、Li₄SiO₄が高温でLi₂ZrO₃を大幅に上回るCO₂吸収特性を有することが判明した[20, 21]。吸収後の構成相から、Li₄SiO₄とCO₂の反応式は以下のものであると判断された。



式(2)に示されるように、Li₄SiO₄においてはLi₂ZrO₃におけるZrO₂(式(1)及び図2)がリチウムメタシリケート(Li₂SiO₃)に置き換わった反応となる。図3に式(1)式及び式(2)を元に算出した、Li₂ZrO₃及びLi₄SiO₄のギブス自由エネルギー変化(CO₂分圧：101 kPa)を示す。

この図で自由エネルギー変化が負の領域では反応は右側に進むことになり、ゼロとなる温度が見か

け上吸収と放出が切り替わる平衡温度である。この図から、Li₄SiO₄がLi₂ZrO₃同様の平衡温度を有することがわかる。

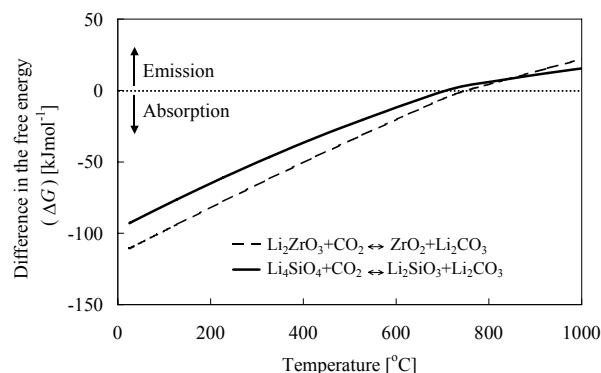


図3 ギブス自由エネルギー変化

Li₂ZrO₃及びLi₄SiO₄は通常のセラミックス技術により容易に合成することができるため、原料コストが最終コストに大きな影響を与えることになる。Li₄SiO₄を作製するための原料としてはシリカ(SiO₂)を用いることができ、シリカの原料コストがジルコニアより大幅に下がることから、Li₄SiO₄の採用により低コスト化が実現される。

Li₄SiO₄はLi₂ZrO₃同様1モル当たり1モルのCO₂を吸収するが、分子量は120でありLi₂ZrO₃の153より軽量化された。その結果、Li₄SiO₄のCO₂吸収量(理論値)は36.7 wt%となりLi₂ZrO₃(28.7 wt%)より約30%高い値となった。また、実際に熱重量分析装置(TG)を用いた測定においてもLi₄SiO₄は約35 wt%の重量増加を示した。

3. リチウムシリケートのCO₂吸収特性

以上のようにして見出されたLi₄SiO₄は、CO₂吸収に関し様々な特長を有する。

まずは、幅広い温度域で使用が可能だという点が挙げられる[22]。高温での吸収に関しては、上述のように700℃付近までCO₂吸収が可能であると同時に、吸収速度が非常に速い。図4に20 vol%CO₂雰囲気下500℃で保持した場合のLi₄SiO₄のTG曲線をLi₂ZrO₃のものと比較する。20 vol%と低いCO₂濃度の場合でもLi₄SiO₄はLi₂ZrO₃に比べ約50%高い吸収量(50分後)を示している。さらに、Li₄SiO₄の吸収初期におけるTG曲線の傾きがLi₂ZrO₃に比べてかなり大きいことがわかる。それぞれ吸収材1 g当たり、Li₂ZrO₃では1分間に

約 1.8 mg の CO_2 を吸収するのにに対し、 Li_4SiO_4 では約 62 mg であることが確認された。すなわち、 Li_2ZrO_3 に比べ Li_4SiO_4 は約 30 倍の速度で CO_2 を吸収できることになる。図 5 に 2 vol% CO_2 雰囲気下 500°C で保持した場合の Li_4SiO_4 と Li_2ZrO_3 の TG 曲線をそれぞれ示す。20 vol% CO_2 雰囲気の場合に比べると吸収速度は遅くなっているが、 Li_4SiO_4 は明らかに CO_2 を吸収していることがわかる。一方、 Li_2ZrO_3 はほとんど重量増加を示していない。したがって、 Li_4SiO_4 は Li_2ZrO_3 が十分な吸収速度を示さない CO_2 濃度が低い領域でも使用可能である。

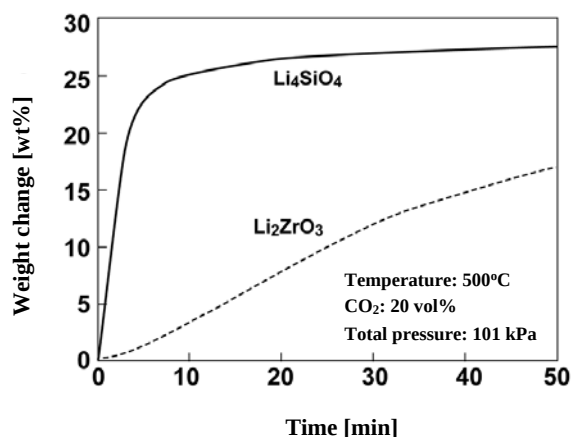


図 4 TG 曲線 (500°C, 20 vol% CO_2)

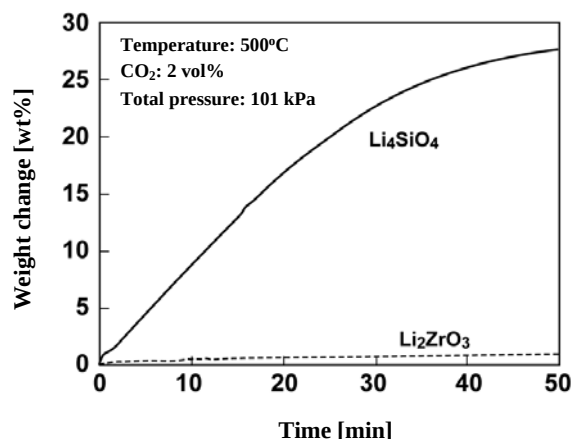


図 5 TG 曲線 (500°C, 2 vol% CO_2)

さらに、 Li_4SiO_4 は Li_2ZrO_3 では対応できなかった室温での CO_2 吸収も可能である。本来 Li_4SiO_4 及び Li_2ZrO_3 による CO_2 吸収は発熱反応であり、図 3 に示したように平衡上は温度が下がるほど進行しやすい。一方、速度論上の制約から高温に比

べると吸収速度は小さくなるものの、理論上は室温で大気中から CO_2 を吸収することも可能である。実際に Li_2ZrO_3 、 Li_4SiO_4 それぞれについて大気中からの CO_2 吸収性能を評価した結果を図 6 に示す。測定は各粉末を金製の皿に載せ、十分空気が循環する容器内に設置し、1 週間重量変化を調べた。室内の温度と CO_2 濃度は空調により 25°C と 500 ppm となるように調整した。 Li_2ZrO_3 がほとんど重量増加を示さなかったのに対し、 Li_4SiO_4 は約 30 wt% の重量増加を示しており、これら 2 つの吸収材の差異は明らかである。

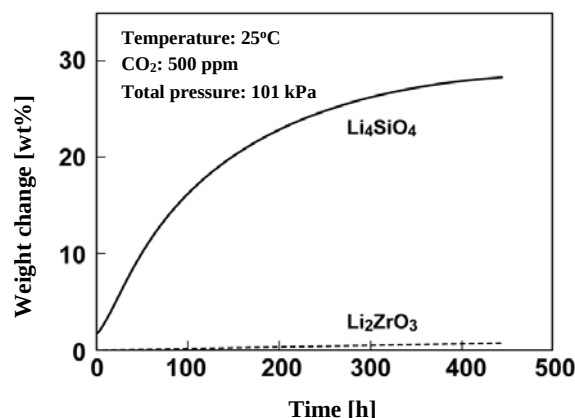


図 6 重量変化曲線 (25°C, 500 ppm CO_2)

この重量増加には CO_2 吸収以外に大気中の水蒸気も含まれるが、放出ガス組成の分析により主に CO_2 吸収によるものであることが確認されている。また、 Li_4SiO_4 顆粒 (200-500 μm) を充填した吸収管による空気の流通試験では、ほぼ 100% という高い CO_2 捕集率が示された[23]。

さらに、 Li_4SiO_4 は吸収及び放出の繰り返しにおいて高い耐久性を有する。従来高温でよく用いられる酸化カルシウム (CaO) と CO_2 の反応式を以下に示す。

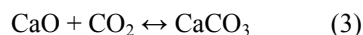


図 3 と同様にギブスの自由エネルギー変化を求めると CaO の平衡温度は 900°C となり、 Li_4SiO_4 と約 200°C の差がある。実際、101 kPa の 100 vol% CO_2 雰囲気下での放出温度は Li_4SiO_4 が約 800°C であるのに対し、 CaO では約 950°C である。したがって Li_4SiO_4 は CaO に比べて CO_2 を放出するのに必要な温度がかなり低いため、容易に吸収と放出を繰

り返すことができる[24-27]．さらに耐久性を高めるための添加物について検討を進めており，5 mm 程度のペレットを用いても高い吸収性能維持率が得られている[28, 29]．

4. 応用

Li_4SiO_4 は従来材に比べ大容量の CO_2 を吸収できるため，装置の小型化が期待でき，また室温から 700°C のような高温まで幅広い温度域での使用が可能のため，様々な用途への応用が検討されている．

Li_4SiO_4 による CO_2 分離を考えた場合，通常は放出温度の方が吸収温度より高いため再度吸収を行う際に吸収材温度を低下させることになる．そのため Li_4SiO_4 に蓄えられた顕熱を利用することが望ましい．また， Li_4SiO_4 による吸収反応は発熱であり，その逆反応である放出反応は吸熱反応である（各熱量は 142 kJ/mol-CO_2 ）．つまり，放出において反応熱を供給する必要があるが，同等の熱がその後の吸収において得られる．したがって Li_4SiO_4 を用いる装置で効率の高さが求められる場合，これらの熱の有効利用が重要となる．

そこで Li_4SiO_4 の応用例の中で，温暖化対策としての発電プラントにおける CO_2 分離，及び Li_4SiO_4 を用いた新しい化学反応プラントの2つに関し，熱利用に関わる観点とともに紹介する．

4.1 発電プラントからの CO_2 回収

CO_2 を連続的に分離するには，リチウムシリケートを充填した複数の反応器を順次切り替え，各反応器に CO_2 捕集（吸収）と吸収材再生（放出）を交互に行わせる方式が有望であると思われる．図7に発電プラントからの CO_2 分離システムの概略を示す．このシステムでは，高純度の CO_2 を分離する必要性から再生温度は 850°C としている．また，再生後の吸収材の顕熱を利用するため，吸収材温度が吸収温度域になるように 400°C の排ガスを再生後の反応器に導入する．ここで，分離装置としての性能を予測するため，排ガス中のどの程度の CO_2 が捕集されたかを示す CO_2 捕集率を，物質収支，熱収支及び速度データを基に計算した．排ガス中の CO_2 濃度は 11 vol% である．排ガス温度の影響も調べるため，反応器入口のガス温度を $400\sim 600^\circ\text{C}$ として求めた CO_2 捕集率を図8に示す．

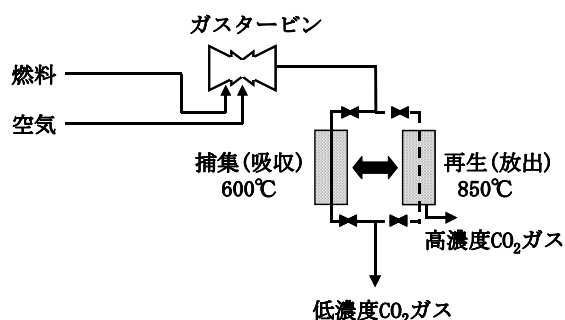


図7 発電プラントからの CO_2 回収システム

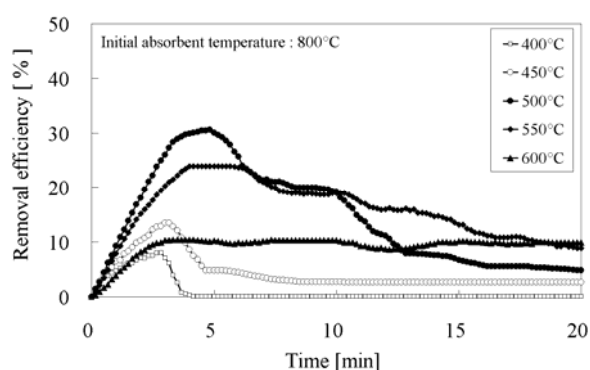


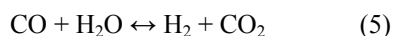
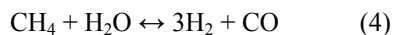
図8 CO_2 捕集率の経時変化

いずれの場合もガス導入直後はほぼゼロであり，5分以内に増大することがわかる．これは排ガスの導入により吸収材温度が低下し，5分後に吸収温度域に入ったことを意味している．さらに，排ガス温度が 500°C と 550°C の場合は他の温度の場合に比べて高い捕集率を示すことがわかる．これは約 10 vol% の CO_2 ガスに対し， Li_4SiO_4 が $500\sim 600^\circ\text{C}$ の範囲で高い CO_2 吸収性能を示し， 600°C を超えると急激に性能が低下することによると思われる[30]．

4.2 化学反応の促進

メタン (CH_4) の水蒸気改質は吸熱反応であることから， Li_4SiO_4 による CO_2 吸収と組み合わせると吸収時の発熱を利用することができ， CO_2 分離に関わる効率を高められると期待される．このとき改質用触媒と吸収材を混合充填した反応器を用い，水蒸気改質で副生する CO_2 をその場で除去すれば，非平衡状態で反応が促進されることも見込まれる．改質反応器において通常生じる反応を以

下に示す.



吸収材により CO_2 が除去されることで、水性シフト (式(5))，さらには水蒸気改質 (式(4)) が促進される.

このような非平衡改質反応器は，たとえばボイラ等の燃焼装置の燃料から燃焼前に CO_2 を分離するシステムへの適用が考えられる．そこでその可能性を明らかにするため，ベンチスケール装置を用いて CH_4 転化率と CO_2 捕集率を測定した． CH_4 転化率は燃料の CH_4 が消費された割合であり，反応の進行度を示す指標として用いた．

触媒と吸収材の混合物を直径 50 mm，長さ 1200 mm の反応管に充填し，電気炉を用いて加熱した．ガスは反応管上部から導入し，下部から排出した．まず，水素により触媒を 600°C で還元した後，水素を窒素に切り替え， 700°C まで昇温した．そして窒素から CH_4 と水蒸気に切り替え，水蒸気改質を開始した．水蒸気改質の進行に伴い，温度は徐々に低下し CO_2 吸収温度域に到達し， 600°C になった時点で一定となるように制御し保持した．30 分保持後 CH_4 の導入を止め， 700°C まで昇温して水蒸気雰囲気下で CO_2 を放出させた．最後に水蒸気の導入を止め，窒素に切替えて室温まで自然冷却した．比較のため，触媒を単独で充填した試験も行った[31]．

図 9 にメタン転化率の温度依存性を示す． 650°C 以上では CO_2 吸収材を混合した場合も触媒単独の場合もほぼ同じ値を示している．一方， 650°C 以下では CO_2 吸収材を混合させた場合の方が高い転化率を示すことが明らかになり，吸収材の効果が示された．また，図 10 に示す CO_2 捕集率の経時変化より，45 分間にわたり CO_2 捕集率が 90% 以上を示すことが明らかになった．したがって，このような反応器が CO_2 分離の面でも優れた性能を有することが示された．現在この検証に向けた運転条件の最適化を行っているところである．さらに，非平衡改質反応器による水素収率向上の効果に重点を置いた，高効率でありながら CO_2 供給も可能な CO_2 回収型 H_2 製造システムの検討も開始している[32]．

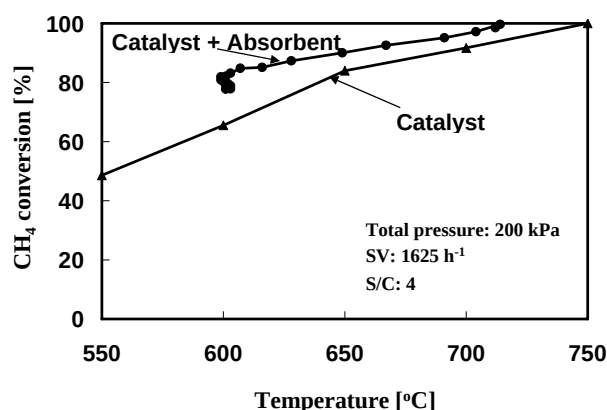


図 9 CH_4 転化率の温度依存性

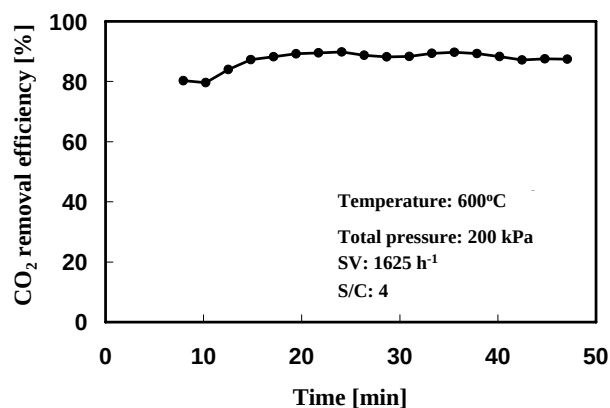


図 10 CO_2 捕集率の経時変化

5. 結言

700°C までの温度範囲で CO_2 を吸収するリチウム複合酸化物を開発した．これらの中でリチウムシリケートは最も性能が優れ，大容量吸収，高速吸収，幅広い温度範囲，そして繰返し使用という特長を有している．様々な応用が検討される中で，発電プラントからの CO_2 回収は温暖化防止対策として最も求められている応用プランである．他の有望な応用プランとして， CO_2 吸収とメタンの水蒸気改質を組み合わせた燃焼前 CO_2 回収システムについて検討を行っている．今後これら応用プランの早期実用化に向け，長期信頼性検証およびシステム面での最適化を進めていく．

謝辞

化学反応促進に関する研究は，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の基盤技術研究

促進事業「セラミックス吸収材利用の燃焼前 CO₂ 回収プラントの実用化研究」の成果の一部です。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Park, J. J., Kawai, C., Nakahata, S., Yamagiwa, M., Nishioka, T., Takeuchi, H. and Yamakawa, A., *Ceram. Trans.*, **94** (1999) 337.
- [2] Kuraoka, K., Kubo, N. and Yazawa, T., *J. of Sol-Gel Sci. and Technol.*, **19** (2000) 515.
- [3] Kwak, B. I., Hyun, S. H. and Kim, G. T., *J. Mater. Sci. Lett.*, **20** (2001) 1893.
- [4] Iijima, M., Mitsuoka, S., Mimura, T. and Suda, T., *JSME International Journal*, **41** (1998) 1007.
- [5] Yasuda, Y., Moritsuka, H. and Izaki, Y., *JSME International Journal*, **41** (1998) 1012.
- [6] Wolsky, A. M., Daniels, E. J. and Jody, B. J., *Environmental Progress*, **13** (1994) 214.
- [7] Shaw, T. P. and Hughes, P. W., *Hydrocarbon Processing*, (May 2001) 53.
- [8] 松橋隆治, 石谷久, 朴炳植, *電気学会論文誌 B*, **112** (1992) 531.
- [9] Nakagawa, K. and Ohashi, T., *J. Electrochem. Soc.*, **145** (1998) 1344.
- [10] Ohashi, T. and Nakagawa, K., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **547** (1999) 249.
- [11] Nakagawa, K. and Ohashi, T., *Electrochemistry*, **67** (1999) 618.
- [12] Nakagawa, K. and Ohashi, T., *The Sixth Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, Abstract, Brighton, UK*, **1** (1999) 193.
- [13] 中川和明, 大橋俊之, *化学と工業*, **52** (1999) 285.
- [14] 中川和明, *工業材料*, **48-8** (2000) 57.
- [15] Essaki, K., Kato, M. and Nakagawa, K., *J. Ceram. Soc. Jpn.* **109** (2001) 829.
- [16] Kato, M., Essaki, K., Nakagawa, K., Suyama, Y. and Terasaka, K., *J. Ceram. Soc. Jpn.* **113** (2005) 684.
- [17] Fauth, D. J., Hoffman, J. S. and Pennline, H. W., *Int. J. Environ. Technol. Management*, **4** (2004) 68.
- [18] Ida, J. -I. and Lin Y. S., *Environ. Sci. Technol.*, **37** (2003) 1999.
- [19] Barin, I., *Thermochemical Data of Pure Substances*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Germany (1989).
- [20] 加藤雅礼, *日本エネルギー学会誌*, **80** (2001) 781.
- [21] Kato, M. and Nakagawa, K., *J. Ceram. Soc. of Jpn.* **109** (2001) 911.
- [22] Kato, M., Yoshikawa, S. and Nakagawa, K., *J. Mater. Sci. Lett.*, **21** (2002) 485.
- [23] Essaki, K., Nakagawa, K. and Kato, M., *J. Chem. Eng. Jpn.*, **37** (2004) 772.
- [24] Balasubramanian, B., Ortiz, A. L., Kaytakoglu, S. and Harrison, D. P., *Chem. Eng. Sci.*, **54** (1999) 3543.
- [25] Gupta, H. and Fan, L. S., *Ind. Eng. Chem. Res.*, **41** (2002) 4035.
- [26] Amoros, D. C., Joly, J. P., Solano, A. L., Gomis, A. M. and Martinez, C. S., *J. Phys. Chem.*, **95** (1991) 6611.
- [27] Oakeson, W. G. and Cutler, I. B., *J. Am. Ceram. Soc.*, **62** (1979) 556.
- [28] Kato, M., Essaki, K., Yoshikawa, S., Nakagawa, K. and Uemoto, H., *J. Ceram. Soc. of Jpn., Supplement*, **112** (2004) S1338.
- [29] Essaki, K., Imada, T., Kato, Y., Maezawa, Y. and Kato, M., *Proceedings of 22nd Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh, USA* (2005) (CD-ROM).
- [30] Essaki, K., Kato, M. and Uemoto, H., *J. Mater. Sci.*, **40** (2005) 5017.
- [31] Kato, M., Maezawa, Y., Takeda, S., Hagiwara, Y. and Kogo, R., *J. Ceram. Soc. of Jpn.* **113** (2005) 252.
- [32] 越崎健司, 村松武彦, 加藤雅礼, *化学工学会第 71 回年会研究発表講演要旨集*, (2006) 534.

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学 (7)」
Science of Boiling (7)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)

Late Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

7. 気液の蜜月旅行

現代に活躍する気液二相の流れ

家の近くで水道工事があった直後など、水道の蛇口をひねると空気と水と一緒に勢いよく飛び出して来ることがあります。またジュースをストローで飲む時、あまり行儀よくありませんがコップの底に残り少なくなったのを無理に吸うと、ボコボコと音がして空気とジュースがストローの中を交互に上がって来ます。その他、コーヒーをパーコレーターで入れる時なども気液の混じった流れが見られましょう。いずれにせよ、このような場合、一つの流路の中を気体と液体の二つの相が同時に流れるわけで、こうした流れを一般に管内の気液二相流 (にそうりゅう) と言います。この二相流は、管内を空気だけ、または水だけが流れると言った単相流 (たんそうりゅう) に比べて随分複雑になりますが、現代の科学技術の世界では非常に重要な流れなのです。ごく身近な例をあげてみても、たとえば私たちの家庭にある電気冷蔵庫の中では、低温の庫内から熱をとり庫外へ運び出すための特別な流体 (冷媒と言います) が蒸発と凝縮を繰り返しながら流れていて、二相流を作っています。巨大なスケールのもものでは、火力発電所や原子力発電所で水が沸騰、あるいは凝縮しながら流れ、ここにも二相流が流れています。また現在、計画の進んでいる宇宙基地では、実験室や人間居住区内部に発生する熱を取り去って、宇宙空間に捨てるための放熱パネルまで送るループには効率のよい二相流が使われる筈です。しかも、これらの流れは熱を吸収したり、放出したりする重要な場所に関係しているのです。

ところで私たちは、これまで容器内にある液体の単純な沸騰、つまり「プール沸騰」を中心に沸騰現象を見てきました。そしていよいよこれから、

ボイラーや沸騰水型原子炉などの中に生じている沸騰の特徴的な事柄についてお話する段階に来たわけですが、これらの装置の中ではボイラーの蒸発管 (外側を火炎や燃焼ガスにさらしながら内部を水が通っている) とか、発熱している原子炉燃料棒の間の通路 (そこを水などの冷却材が流れている) とか、一般に高温の壁面に囲まれた長い流路内を液体が流れながら、その壁面に触れて加熱され沸騰しているのです。こういう風に流路内の強制的な流れに生じる沸騰を、流路内の「強制流動沸騰」といい、時には「流れの沸騰」と言うこともあります。いずれにせよ流路内には、蒸気と液体と一緒に流れる二相流が現われます。従って、そのような流路内に生じる沸騰の話 (8章) に入る前に本章で、管内の二相流というものの性格について簡単な解説をして置くことにしましょう。

流れのパターン

いま話を分かりやすくするため、垂直に立てた長い円管 (ただし非加熱) の中を上向きに、空気と水と一緒に流れている時を考えてみて下さい。この場合、誰でもまず気になるのは、空気が水の中に泡の形で含まれて流れるのか、あるいは空気と水が別々になって流れるのか、などといった二相の流れの姿ですが、一般にそれを「流動様式」あるいは「流れのパターン」と言っています。そしてこの流動様式は、例えば長いガラス管を立てた中に、下から空気と水を流し込んで観察することが出来ます。もちろん、空気や水を流し込む場所からしばらくの間の流れの様子は、それらの流し込み方でいろいろ違って来ますし、また管の長さ方向にも様子が変わって行きますが、十分な長さを経ると、やがて一定の自然な流れの状態に落ち着く筈で、このようになった流れを流体力学的

に平衡状態になった流れ、あるいは簡単に「流力平衡状態」の流れと言っています。

さて、こうして観察される非加熱管内の流動様式、つまり流れのパターンには、最も大切な基本形式として、3つのパターンがあります。まず、水の流量に比べて空気の流量が比較的少ない時、空気が小さな泡となって液中に分散した形の流れが現われ、これを気泡流（きほうりゅう）と言います。液中に分散する気泡の大きさと個数、また円管の断面上に気泡がどのように分布して流れるかなど、いろいろの問題がありますが一括して気泡流といいます。

次に、空気の流量がもっと増えると、前とは大分違った流れのパターンに変わります。すなわち空気が部分的に集まって、管断面をほぼ満たす大きさの、先の丸い砲弾状のかたまりになり、それらがある間隔毎に管の長さ方向に並び、その気体のかたまりとのかたまりの間に水（その中に小さな気泡が分散していることもあります）がはさまって流れる様式です。これを一般に「スラグ流（スラグリゅう）」または「プラグ流」と言います。スラグとは、節（ふし）のことであり、またプラグは栓で、いずれにせよ前述の流れの様子はそれらに似ています。なお、もう少し空気の流量が多くなると、このスラグ流にかなり似ていますものの、もっと乱れて不規則な形の流れとなり、これは「チャーン流」と呼ばれています。チャーンとは英語であわ立ちのことで、だから前記スラグ流の場合の大きな砲弾状の泡がもっと細長く、かつ形が乱れた不規則なものになり、やがては次に述べる第3番目の基本形式の流れにつながっていくのです。

すなわち、空気の流量がさらにずっと多くなると、水の流れは管壁側に押し退けられ、つまり水は壁面に沿う薄い層の形で流れ、空気は円管断面の中央部を大きく占めて高速で流れるようになります。この様式の流れを「環状流（かんじょうりゅう）」と言いますが、壁面に沿う水層の流れと中心気流の間の界面となる水面は一般に乱れています。そして流速の速い時は、その水面から飛び出す水滴が中心気流に乗って流れる一方、中心気流の方から水面に飛び込み水層の流れに捕えられる水滴もあると言った状況になります。この様式の流れを「環状噴霧流」と言うこともあります、こ

の流れが流体力学的に平衡な状態に落ち着いた後は、水面を出入する水滴の量が互いに釣り合い、壁面に沿って流れる水量、および中心気流と一緒に流れる水滴の量は、それぞれ管の長さ方向に変化せず一定に保たれることになります。

もちろん、いまお話して来たいろいろの流れのパターンは、空気と水の時だけに限るわけではありません。そして最近では、気体と液体がどんな条件の時、どのパターンになるのかを、前もって大体知ることが出来るようになって来ています。また以上は垂直管についての話ですが、水平管の場合は、液体の流量が少ない時、重力の影響で気体が管の上部に、液体が下部に分離して流れる傾向があり、またその分離した部分の間の界面に生じる波の問題などがあって、流れのパターンはその種類も含めてもう少し複雑になることを申し添えておきましょう。

管内の流れに生じる圧力損失

さて、空気であろうと水であろうと、あるいはガス、油、何であっても流体が管内を流れる時、摩擦などのため、管の入口から出口まで必ず流体の圧力が減って行きます。だから管の入口では、それだけ圧力を高くしておかないと、必要な量の流体を流すことが出来ません。例えば人がストローの一端を口にくわえて空気を吹く時、その人の口の中の圧力は大気圧より少し高くなっているのです。ストロー内を空気が流れるのです。また逆にストローの一端を口にくわえて空気を吸う時は、口の中の圧力は大気圧より少し低くなっています。

ともあれ、これからは簡単のため管内の定常的な流れを考えることにしますが、いま内壁面の滑らかで長さが L 、直径が d の寸法を持つ円管があるとしましょう。そしてまず、この管内に空気だけが流れるとか、あるいは水だけが流れるいわゆる単相流の場合は、その流体の密度を ρ 、また管内平均流速を u_m とすると、流れの摩擦による入口、出口間の圧力差 Δp を次式で簡単に求めることが出来ます。すなわち

$$\Delta p = f \left(\frac{L}{d} \right) \frac{\rho u_m^2}{2}$$

この式の右辺で、 f は一般に管摩擦係数と呼ばれ

ている係数ですが、この値は以下のようにして求められます。すなわち、いま流れている流体の粘性係数（流体の粘さを表す数）を μ とすると、一般にレイノルズ数と呼ばれている量 $\rho u_m d / \mu$ （これは、いわば流れの勢いが持つ力を粘性力と比べた値です）の値が定まります。このレイノルズ数の値を計算する時、これに含まれる密度 ρ や、流速 u_m や、直径 d や、粘性係数 μ のそれぞれの値を表すのに必要な「質量」、「長さ」、「時間」の各単位について、例えば「質量」をキログラムなら全部キログラム、ポンドなら全部ポンド、また「時間」も秒なら全部秒、分なら全部分で測るようにすれば、「質量」、「長さ」、「時間」にそれぞれどんな単位を使おうとも、レイノルズ数の値からは単位が消えてしまい、そして常に同一の値になるのです。このような数のことを一般に無次元数（むじげんすう）と言い、自然法則はすべて、こういう無次元数の間の関係として表されます。と言うのは、自然の法則は人間の作った単位には関係なく客観的に成立すべきものだからです。そして実際、前述の管摩擦係数 f の値もこのレイノルズ数だけの関数として、流体の物質には関係なく一義的に定まることが知られています。

なお普通、管内の流れのレイノルズ数の値が2300より低いと、流体は管内を整然と層をなして流れ、これを「層流」と言います。また流れのレイノルズ数がこれよりもっと大きいと、流体は管内を乱れながら流れるようになり、これを「乱流」と呼びます。このように、壁面摩擦の影響をうける流れには一般に層流と乱流があり、しかもそれを前述の無次元数 $\rho u_m d / \mu$ の値で区別出来ることは、イギリスのマンチェスター大学のレイノルズ教授（1842-1912）が1883年に発見したもので、その端緒はガラス管内の水流中に、染色した水の細い流れを流し込む方法によったものです。なおレイノルズ教授はその論文の中で、層流に対しては整然と行進する軍隊を、一方、乱流に対しては戦い敗れ無秩序に敗走する軍隊の姿を思い浮かべていますが、ひょっとするとワーテルローの戦（1815年、イギリス軍とプロイセン軍がナポレオン軍を撃破）などが念頭にあったかも知れません。なお、前述の実験のように流れの状態を目に見えるようにすることを、ちょっと難しい言い方ですが、流れの可視化（かしか）と言い、流れの研究に役立つ

一つの重要な手段なのです。

気液二相流に生じる圧力損失

ところで管内の気液二相流の場合、管の入口、出口間に生じる圧力差は、管内を気体と液体が一緒に流れていますから、単相流の場合のように簡単には行きません。また流れのパターンによっても様子が違って繰る筈です。そこで従来いろいろの研究がありますが、ここには二相流の圧力損失の予測法について、まず大胆なものを紹介しましょう。

いま一つの円管内を気液の二相流が流れている状況の下に、入口、出口間に実際に生じる圧力差が Δp であるとします。この時ももちろん、管内を流れている気体の流量、液体の流量はそれぞれ決まっているわけですが、いま圧力差の計算の手がかりにするため、仮にその気体だけが、その気体の流量のまま今の円管内を単独で流れている場合を仮想しますと、この時の管の入口、出口間の圧力差 Δp_G は前項の単相流の式で容易に求められます。そしてこの手がかりの圧力差 Δp_G を基準にして測った実際の圧力差 $\Delta p / \Delta p_G$ の値は一応、前述の気相だけの流れに液体の流れが加わった時の影響の度合いを示す数とみなせましょう。そして、この影響の度合いは、液体だけが同じ円管内を単独に流れると仮想した時の圧力差 Δp_L （これも前の単相流の式で容易に求められます）を、前述の手がかりの圧力差 Δp_G を基準に測った値 $\Delta p_L / \Delta p_G$ の大小に関係すると考えて、少なくとも大体の方向は示せるでしょう。このことを式の形で書けば

$$\Delta p / \Delta p_G = \text{func}(\Delta p_L / \Delta p_G)$$

ここに $\text{func}()$ は $\Delta p_L / \Delta p_G$ の関数（function）という意味です。そして実際に二相流の実験結果を調べてみると、この式の関係が大まかには成立つことが分り、関数 $\text{func}()$ の具体的な形が近似的に求められています。すなわち次の簡単な形の式が一例です。

$$\text{func}(\Delta p_L / \Delta p_G) = 1 + C \cdot (\Delta p_L / \Delta p_G)^{1/2} + \Delta p_L / \Delta p_G$$

ここで右辺に含まれる C の値は、前述のようにして単相流の式で計算した液相および気相の各単独流れが、それぞれ層流、乱流のどれになるのか（層流か乱流かの区別は前述のようにレイノルズ数の値ですぐわかります）の全組合せに対して次のよ

うに与えられています。

液相の仮想単独流れ	乱流	層流	乱流	層流
気相の仮想単独流れ	乱流	乱流	層流	層流
C の値	21	12	10	5

なお、前の式の左右両辺を $\Delta p_L / \Delta p_G$ で割って、次の形に書き変えることも出来ます。

$$\Delta p / \Delta p_L = \text{func}(\Delta p_L / \Delta p_G) / \Delta p_L / \Delta p_G$$

この左辺は、管内を液体だけが単独に流れるとした時の圧力差 Δp_L を基準に測った実際の圧力差 Δp の形になっていますが、もちろんこの式を使っても前と同じ Δp の値が得られます。

要するに、これらの式を使って、私たちは二相流の摩擦圧力損失 Δp を近似的に予測することが出来ることになります。そしてこれは、いまから40数年も以前(1949年)、ロックハートとマルチネリが提案した方法ですが、二相流の知識が貧しかった当時であればこそ、こんな大胆な考え方が出来たのでしょう。現在から見れば不十分な方法ですが、それでも便利なのでまだよく利用されています。

環状流の場合

前項でお話した二相流の圧力損失の予測法は、随分大まかなものとは言え、ある意味で巧みなものとも言えましょう。ただししかし取り扱いが何となく形式的で、実際の流れの物理的状況とのつながりが希薄な点に、不満を抱く人がおられるでしょう。そこで次は、むしろ流れの具体的状況に注目する簡単な予測方法の例を一つ紹介しておきましょう。

これは環状流の場合に限ります。環状流は前にお話したように、管壁に沿う薄い液層の流れと、中心気流とから成っていますが、いま中心気流の流速が十分に大きい場合を考えましょう。この時、中心気流に注目してみますと、それは周囲を波立つ液層表面に囲まれて流れていますから、さながら内面の粗い円管内を流れている気流の状況に近いわけです。

ところで、内面が滑らかな円管内を気流だけが流れる時、その入口、出口間の圧力差 Δp は一般に前々項の単相流の式で計算出来るのですが、もし円管がいま考えているように粗い管の場合は、流

速が十分高ければ、管摩擦係数 f の値が、管内面の粗さ ε を管直径 d で割った値 ε/d (これを相対粗さと言います)だけの関数としてほぼ決ることが知られています。そして問題は、こうした粗面管の特性が、環状流の中心気流の場合にも見られるかどうかですが、少なくとも近似的にはそう考えてもいいようで、環状流の実験データから管摩擦係数 f の値を調べた結果として、最近求められた式を掲げておきましょう。

$$f = 0.02 + 1624(\delta/d)^{2.04}$$

ここに、 δ は管壁に沿う液層の流れの平均厚さ、 d は管の直径です。環状流の観測結果によると、気液界面の波の高さは、管壁に沿う液層の流れの平均厚さ δ と深いかわりがあるとの報告がありますから、この式に含まれている δ/d は、前の粗面管の相対粗さ ε/d に対応するものと言えましょう。

ともあれ一例として、いま次のような計算を試みましょう。すなわち、直径 d が50ミリメートルの滑らかな円管の中を、まず空気(大気圧、温度20℃)だけが毎秒20メートルの平均流速で流れているとしましょう。この時、レイノルズ数の値は64,100と計算され、これから管摩擦係数 f の値は約0.02と定まります。次に、環状流の場合として、前と同じ管内に、いま厚さ0.5ミリメートルのごく薄い液層が管壁に沿って同時に流れているとします。この時の管摩擦係数 f の値は、 f に関する前の経験式の δ/d にその値0.5/50を入れて直ちに0.155と求められます。つまり、管内にまったく同じ量の空気を流しているのに、管壁の上に僅か厚さ0.5ミリメートルの液体があるだけで摩擦損失が前の7.75倍にも増加してしまうことが分かります。

そこでいま例えば地熱発電所を考えてみましょう。地熱発電所では多くの場合、方々に掘った井戸から出る蒸気を中心部にある発電所まで相当の距離を送気管で送らねばなりません。地下から出る蒸気は一般に飽和蒸気であり、かつ熱水を含んでいることが多く、それゆえ送気管内で前に記したような環状流の状況を起こしやすい訳です。従ってこれをそのままの状態にすると、送気管内の圧力損失が大きくなり、それだけで発電所の出力が減るので特に注意が必要になるのです。

逆に流れる気液二相流

これまでは液体と気体が一つの管内を仲よく同じ方向に流れる場合を見てきました。人間にたとえれば、新婚夫婦の蜜月旅行のようなものです。しかし長い人生の間には、夫婦といっても互いに意見が食違うようなことが、たまにはあるかも知れません。そして中には、一方が東へ行くのに、他方は西へ向かって歩くといった状態になってしまうケースが無いとは言えません。

ところで気液二相流を構成する気体と液体の間にも、実はそんなことが時にはあるのです。つまり一つの流路の中を気体と液体が互いに逆方向に流れるわけで、例えば不注意な空だきをしたために高温になった風呂の湯沸し器の通水管の中に、あわてて冷水を流し込むような場合、通水管内で発生する蒸気はかなりの勢いで逆向きに流出して来て水の流入を妨げることになりましょう。ともあれ、このように液体と気体が対向して逆向きに流れる二相流は非常に重要な技術問題になる訳で、その基礎研究のため次のような実験装置を作ってみることにしましょう。

すなわち、ある長さの円管を垂直に立てて、上の方から液体が管の内壁に沿って薄い液膜状で流れ落ちるようにします。そのためには、液体供給用の上部容器を用意し、その底面の孔に円管の上端をつなぎ、上部容器に外部から液体を定常的に補給するようにすれば、液体は自然に管内に流れ込むでしょう。あるいはまた、そうした上部容器を使わず、その代わりに垂直円管の上の方の一部管壁を多孔質の壁（金属粉を焼き固めて容易に作れるもので沢山の微小な隙間を持っています）とし、その壁を通して外から液体を管内に流し込む方法もあります。

そして次に、垂直円管の下端を別の下部容器につなぎ、その下部容器に外部の圧縮機などから気体を供給すれば、垂直管の中心部を上向きに気体の流れるようになります。このとき、この下部容器には管内壁に沿って流れ落ちて来る液体が流入することになりますが、下部容器内の気圧（気体を垂直管内に上向きに流すのに必要）を下げずに、上記の流入液体が容器外へ流れ出せるようにするのは技術的に可能です。そしてこのようにして、垂直円管内に液体と気体が互いに逆向きに流れる定常的な二相流を作り出すことが出来ることにな

ります。

フラディング現象

さて前述のようにして作った垂直円管内の気液の対向流（たいこうりゅう）において、上から流下して来る液体の流量を一定にしておいて、上昇する気体の流量を少しずつ増していく実験をしてみましょう。すると、気体流量がある値になるまでは、管壁に沿って流下する液膜流の流量は元のままで少しも変わりません。しかし気体の流量がある限界値 G_m を超えると、下向きの液膜流の流量は減り始め、それからさらに気体の流量が増すと、やがて下向きの液膜流が無くなって、垂直管内には上向き気流だけになってしまう、そういう現象が観察されます。

あるいはまた、前項でお話したように円管途中の多孔質壁の部分から液体を管内に流し込む場合は、気体流量がある限界値 G_m を超えると、供給液体の一部が多孔質壁の場所から管内壁に沿って上向きに流れ始め、さらに気体流量が増すと、やがて多孔質壁の場所から管内に供給される液体全部が上向きに流れるようになるわけです。

こうして、いずれにせよ管内を上昇する気体の流量が、ある限界値 G_m を超えて大きくなると、管内壁に沿う液膜の下向き流れが減少し始め、やがてその下向き液膜流がまったく無くなってしまうという現象が生じます。そして普通、下向きの液膜流の流量が減少し始める限界（換言すれば下向きの液膜流の一部が上向きに流れ始める限界）のことを「フラディングの開始」、または簡単に「フラディング」と呼びますが、最近では「対向流限界」と言う人もあります。ここに「フラディング」とは洪水のように液体が溢れることを言います。そして、この「フラディング」ないし「対向流限界」の現象は、何らかの事故で空だき状態が生じて高温になった原子炉の炉心に上方から緊急に水を注入して冷やそうとする時など、高温壁に触れて発生する蒸気の逆流が後続の水の流入を妨げる問題をはじめ、いくつかの大切な機器や装置の作動限界や安全性とからむ重要な現象なのです。

①「フラディング現象の発生原因」

では、このフラディング現象はどんな原因で発生するのでしょうか。一見、これは簡単なことであり、つまり管内を上昇する気流がその摩擦力で

液膜の流れを引き上げるために起こるように見えます。しかし、実はそうではないのです。実際、フラディングを発生させる時の気体流量は、実験の結果によると、液膜の流量が多い時の方がかえって小さく、またそれに、管上方の液流入部の形状、および管下方の液体流出端の形状の影響を受けていろいろ変化するのです。また状況によっては、気流が限界値 G_m に来ると、前述のような過渡現象を経ないで、下向き液膜流がほとんど瞬間的に無くなる（つまり液体のすべてが、ほとんど瞬間的に上向きに流れるようになる）こともあるのです。

そして、フラディング発生時の気液の様子を観察した結果によると、次のような状況が見られます。すなわち、上向きの気流の流量がある程度大きくなると、管下端ないしその近くで、管壁に沿って流下している液膜流の表面に波のような擾乱が急に生じます。そして、それがさらに気流流量の増加と共に成長し、大きくなった波がやがて気流によって上向きに押し上げられるようになってフラディング現象が発生しています。またこの時、乱れた波は上方へ押し上げられるだけでなく、その波面から液滴を気流中に飛出させ、その液滴が気流によって上方へ持ち去られる現象も加わっています。

なお、垂直管の下の方の一部管壁を多孔質壁にして、上方から流下して来る液膜流をそこで外へ吸い出すようにした実験では、フラディング発生限界に対し、管長（すなわち液体の流入部から流出部までの距離）の著しい影響が現われ、管長が短いほどフラディングが起こりにくくなるという

特徴を示します。そして、これは下方の多孔管質壁からの液体の吸出しのため、液膜流の波の波長がそこで抑えられる結果であろうと推定されます。

②「管径の影響」

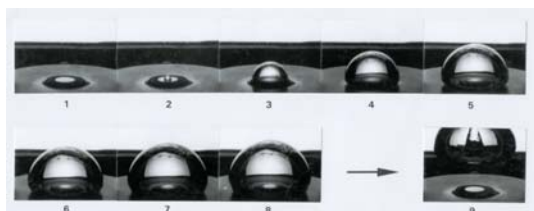
なお終わりに、フラディングに対する管径の影響について2つの事柄を付け加えておきましょう。

第1は、管壁に沿って流下する液膜表面に生じる波の高さは、限りなく大きくなり得るものではありません。従って管径が非常に大きくなると、管径が比較的小さい場合に比べてフラディングの性格がかなり違ったものになります。

また第2、対向二相流が流れている垂直管の下端の状況を考えると、管壁に沿って流下してきた液膜流が出口端から円筒の形をとって流出し、従って、その流出液膜流を周囲から気体が貫き破って管内へ流入して来るという原理になります。そのため、もし管径が小さいと表面張力の作用も加わって、液体が出口をふさいでしまい易く、換言すれば定常的な対向二相流が最初から作れない（換言すれば最初からフラディング現象が起こってしまう）ようなことになるでしょう。これを避けるには、垂直管の下方出口端から外に広がるフランジ面を付けるなどして、流出してくる液体がフランジ面を濡らしながら周辺方向に広がって流れるようにすれば、気体は液体に邪魔されずに管内に自由に流入できるようになります。

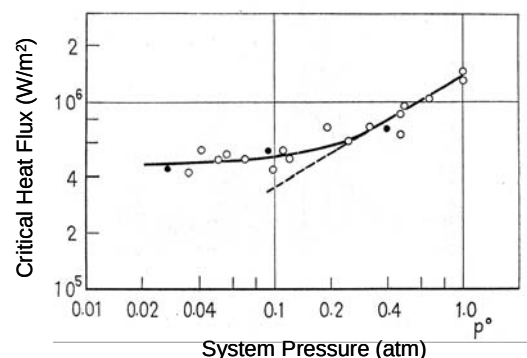
（次号に続く）

（図と写真は元 東京大学伝熱工学研究室 横谷定雄氏 提供）



低圧沸騰：

典型的な気泡の成長過程（上図）と限界熱流束（CHF）の系圧力による変化（右図）



海洋上の台風の研究

Researches of Typhoons over the Ocean

杉山 卓也 (琉球大学理学部)

Takuya SUGIYAMA (Faculty of Science, University of the Ryukyus)

e-mail: sugiyama@sci.u-ryukyu.ac.jp

1. はじめに

台風ないしハリケーンの発生領域は世界で 4 つ：発生個数順に、フィリピン東海沖、メキシコ湾とカリフォルニア沖、南インド洋、熱帯オーストラリアである[1]。2004 年 3 月には、記録上初めてブラジル沖でハリケーンが出現した。台風は成熟期までは海洋上を進行するから、フィリピンの北に位置する日本は台風大国である。なかでも沖縄は、海洋上の台風が西進・東進いずれも近傍を通過する転向点にあたるから、世界の台風ポイントである。

台風は ~100 個の積乱雲群からなりその特徴は雨と渦である。台風は降雨となる水滴を製造して凝結熱を発生する熱機関である。自前のエンジンを持っている成熟台風は自律的な存在である。これは、通常の気象現象が周囲環境の変化を原因として受身で発現するのに対して際立った対比をなしている。凝結熱を受け取った上空の空気は暖かく軽いから地表が低気圧となり、それによる風系は、領域 1000km に及ぶから地球自転によるコリオリ力が効いて、渦をなす。これは単品の積乱雲が渦巻かないことと対比される。台風の持続は 1 週間から 10 日に及び、個別の嵐としてはきわめて長い。さらには、台風は多様な進路変化をとる。

以上のような個々には明白な台風の特徴がどのように内的に関連して自律システムを形成しているのか？ 以下は我々が進めている海洋上の台風についての理解の要旨である。

2. 台風の構造：温度と雲

2.1 台風の温度構造

航空機からゾンデを投下することによりハリケーン Hilda(1964 年)の温度構造が観測された(図 1)。図 1 は、眼の上空部分(高度 10-12km)の温度が同一高度での周囲より 16℃高いことを示し

ている。上空の空気が軽いから、鉛直累積としての大気圧が地表近くで周囲に比べていちじるしく低くなる。すなわち、気圧傾度が下層で最も大きいから、台風の風は地表近くで最も強い。100m/s に達する偏西風は高度約 10km の希薄大気においてであることと比べると、空気密度の大きい地表で風が最も強いことは台風の際立った特異性である。今だこの図 1 が台風温度構造の集約的実測図としてあり、台風大国日本においてこのような現場観測がなされていないのは、沖縄の空が米軍管制下にあるための遠慮によるのだろう。

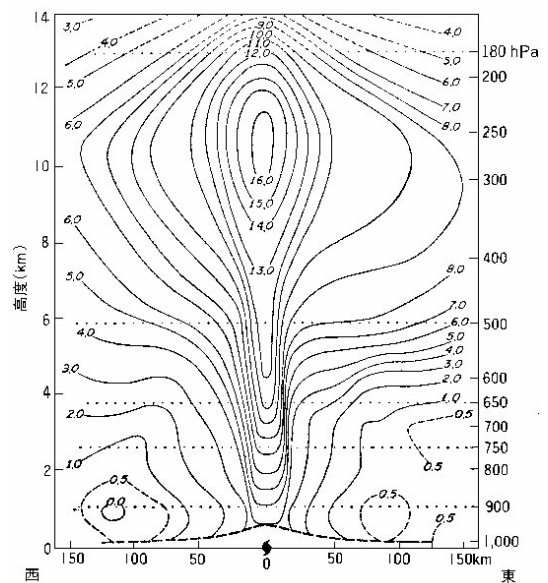


図 1 Hurricane Hilda 温度構造断面図

実線は等温度線。その数値は同一高度の温度からのズレ。5 本の点線は航空機航路[2]。

2.2 台風の雲の構造

図 1 に見たように台風は上部に発熱体を持ち燃料である水蒸気を下方から上昇気流によって補給する煙突である。図 1 のさらに上層には煙突から排気される流れがある。排気領域では上昇低圧化

による断熱的膨張で周囲より低温になっている。この事情は、赤道域で対流圏々界面が、極域と比べて、高く低温であることと類似である。すなわち台風の眼の上層で対流圏々界面は高く低温で、まわりに比べて高気圧である。そこから吐き出される風はコリオリ力の効果がめだつ外周で地表風とは逆に時計回りに回転する。静止衛星ひまわりがまず見るのは、台風が上層ではきだした微小雲粒子による赤外線熱放射である。これを以下では天蓋雲と呼ぶことにする(図2)。「ひまわり」台風画像を [www. supertyphoon.com](http://www.supertyphoon.com) での動画で確認すると、確かに外周の雲は時計回りに動いていることが分かる。これに対して台風中心付近では、天蓋雲自身も反時計回りであるから、回転向きによって天蓋雲の識別はできない。ともかく、「ひまわり」画像で台風の降雨構造を見るためには、一面の渦をなしている天蓋雲は邪魔である。

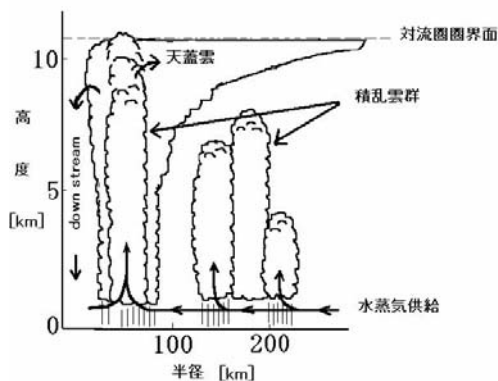


図2 台風雲構造の模式図

3. 台風の雲と雨

3.1 「ひまわり」から見た台風の雲

台風で雨を降らせている積乱雲群は天蓋雲というパラソルの下にあり、「ひまわり」から直視できていない。実際、熱帯降雨レーダー衛星(Tropical Rainfall Measurement Mission: TRMM)が示す雨領域は、通常の天気情報で示される「ひまわり」赤外画像の雲に比べて大幅に限定されている(図3)。

静止衛星である「ひまわり」は日本付近の撮像を毎時行っている。これに対してTRMMはレーダーエコー受信のために低高度を飛び、地球を1日~16周する周回衛星で、狭視野であり、台風を捉える機会は1日1回程度である。そこで、我々はひまわり衛星画像から台風雨域を解析する手法を開発している[3]。

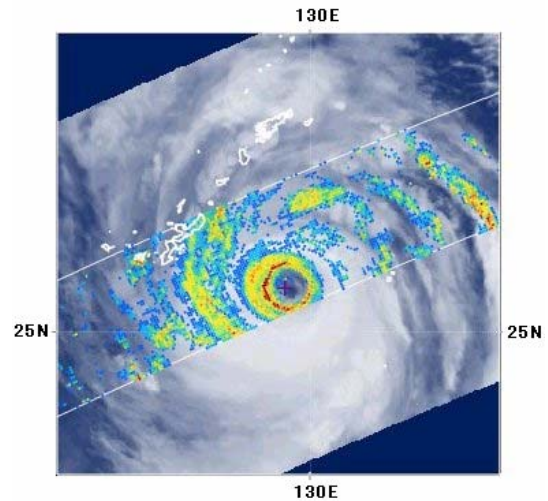


図3 ひまわり画像とTRMMレーダー雨量画像
右上がりの帯がTRMMのスキャンパス[4]。

3.2 「ひまわり」画像からの雨域推定

雲頂が低温である雲は高度が高い。これには発達した背の高い積乱雲群と天蓋雲が該当する。我々はこの2者の識別が温度とその空間勾配でできるのではないかと考えた。すなわち、天蓋雲の雲頂は対流圏と成層圏の圏界面にあってスムーズであるのに対して、積乱雲群はその短い活動寿命のために隣接雲の間でも雲頂高度、したがって雲頂温度、の凹凸が激しいだろう。

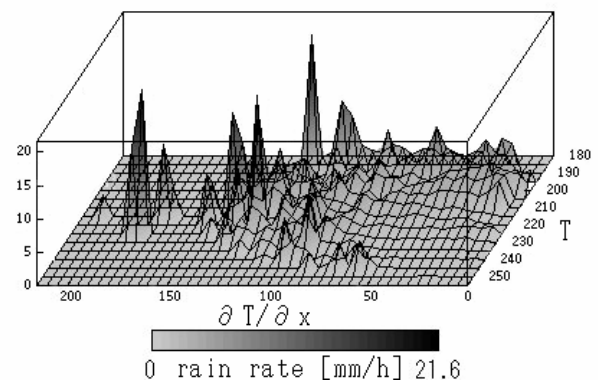


図4 ひまわり水蒸気画像での雲温度とその空間勾配に対応するTRMM雨量のダイアグラム。

「ひまわり」水蒸気画像におけるある緯度経度領域の温度とその空間勾配を、同じ領域のTRMM雨量と対応させたダイアグラムが図4である。図は14個の海洋上の台風を用いた統合解析によ

ている。水蒸気画像を用いるのは、天蓋雲に対する透過性が赤外画像よりも良いからである。図4は雲が低温であり、かつ、温度の空間勾配が大きい領域が大雨量の傾向にあることを示している。

図4が標準的な台風雲ダイアグラムであるとなれば、これを用いて台風の「ひまわり」水蒸気画像のみから雨域を見出すことができる(図5)。こうして分かったことは、日本本土上陸の台風による雨域構造は、海洋上の台風と大きく異なることである。本土上陸台風では南から湿った空気が山脈にぶつかって広域に雨を降らす(台風中心への水蒸気供給が不十分になっている)。これに対して沖縄の離島では、暴風雨警報が出されていて風が強いが雨はほとんど降っていない、ということを経験する。海洋上の台風では雨がレインバンドに偏在するからである。

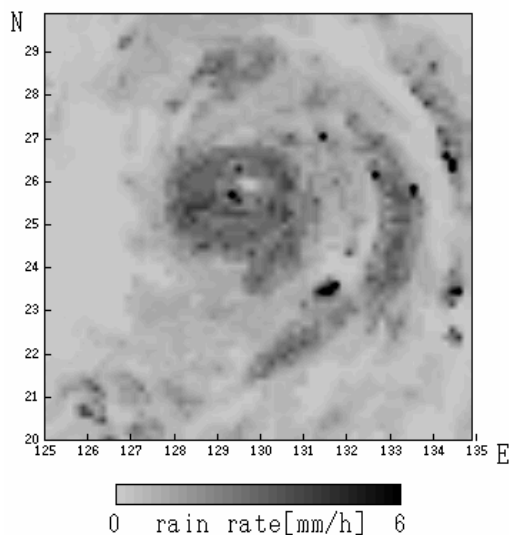


図5 ひまわり水蒸気画像から求めた海洋上台風雨量分布

4. 渦としての台風とその進路

台風移動に関する「藤原効果」は、双子台風は互いに他の周りに反時計回転する、というものである。仮想的(理想的)渦である渦糸は、半径無限小の回転剛体を渦芯とする2次元渦であり、渦芯の外側では、半径に逆比例する公転速度場をもっている。渦源がないゆえに角運動量が保存されるからである。複数の渦糸間の相互作用では、ある渦糸はその芯の位置において他の渦糸がつくっている速度場で移動する。その結果、多数の渦糸群

相互作用においては、ひとつの渦糸は周りの渦糸がつくる渦度の勾配・坂を登る[5]。相互作用において渦度分布の重心が保存されるためである。

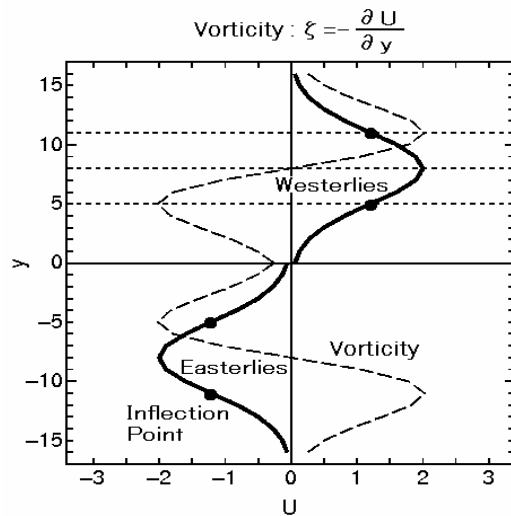


図6 モデル偏東風—偏西風速度場とその渦度
実線は偏東風・偏西風の強度、そのシアーがもつ渦度強度を点線で示す。y 軸は緯度に相当。

速度シアーは、それがきつくなると乱流が発生するように、渦度を内在している。逆に、無限個の渦糸を適当に分布させれば流体の任意の速度分布を再現できる。

我々は偏東風・偏西風をそれぞれ強度の等しい有限個の要素渦糸を配置して近似的に再現した上で(図6)、一個の強い渦糸で代表する台風との相互作用を調べた[6]。図6に示したモデル偏西風ではその南端に渦度の下り坂があり、これは台風北進のバリアーとなるだろう。

得られた台風の移動進路は、偏西風が相対的に強ければ西に進み続け、弱ければ東に転向した(図7)。夏前の台風は偏西風がまだ強く南よりに位置するから、台風は偏西風南端の入り口のバリアーに跳ね返されて西進する。盛夏には偏西風は北よりで弱まるから、台風は偏東風北端の渦度の登り坂に押されて北上し転向する。転向台風は偏西風の主軸に近づくから、本土上陸で摩擦がふえるにもかかわらず、移動速度を増す。このように偏東風・偏西風の速度場を渦糸で再現する手法によって、台風進路の因果関係を知ることができた。

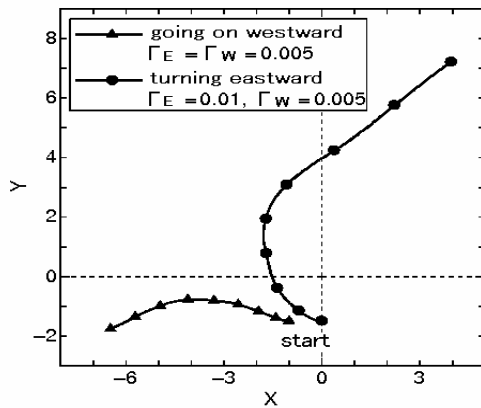


図7 台風の渦度と偏東風—偏西風の渦度の相互作用がもたらす台風の代表的進路
x 軸は経度, y 軸は図6と同じ. Γ_E , Γ_W は偏東風, 偏西風の要素渦糸強度.

5. 台風内の風系とそれをもたらす渦度分布

台風の活動をささえるエンジンは降雨であり, それは台風の「眼の壁」とスパイラルレインバンドに限定されている. 我々はこれら台風特有の雨域の存在理由を知りたい.

地球自転によるコリオリ力は, ローカルな攪乱の力に比べて決して大きくないから, 持続時間の長い大規模風系においてはじめてその効果が現われ, 台風ではまず外縁が反時計回りの風となる. 外側から水蒸気を運んでくる反時計回りの気流が台風中心低気圧に近づいたとき, 角運動量保存の結果, 公転速度が速くなり, 最後に雨域で上昇気流となる. これは「鳴門の渦」の上下反転版である. すなわち, 雨域は反時計回りの強い渦度を持ち, 台風内部の渦度分布は降雨強度と相関する, と考えていいだろう. さらに, 簡単な渦糸相互作用シミュレーションによって, スパイラルレインバンドについて次のような傾向が確認できる.

1. はじめに直線状に分布した渦源は相互作用の結果スパイラル構造をとる傾向をもつ.
2. 台風内部の要素渦源がスパイラル構造であると, 内部での風系は眼に対して吸い込みと吹き出しの道筋をつくる (図8). 吸い込みの道筋・風の谷は水蒸気供給のルートとなって台風活動の持続をささえているだろう.

単品の積乱雲では気流は, 強い渦をもたないか

ら, 上昇気流の根元の地表低気圧にストレートに入り込む. これに対して, 渦構造をもつ台風では, 遠心力が働いて, 中心への水蒸気供給が抑制される. さらに, 4. で見たように渦であるがゆえに移動進行する. 単品の積乱雲が急速発展・急速減衰するのに対して, 台風は渦であるために制約された活動となることが, むしろ, その持続可能性の鍵であろう.

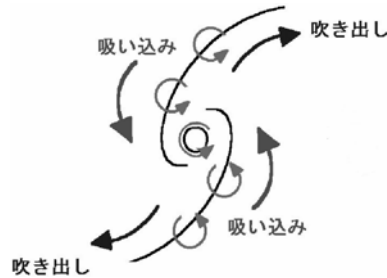


図8 台風内の渦度分布と風系の模式図

我々は以上のように台風の理解を進めている. 最後に, 自己組織体としての台風の研究・理解は海洋上の台風でなされるべきことを強調して, 沖縄からの台風リサーチの寄稿とします.

参考文献

- [1] Elsberry, R. L. ed., *A global view of tropical Cyclones*, Univ. Chicago Press (1989).
- [2] Hawkins, H. F., and D. T. Rubsam, *Mon. Wea. Rev.*, 99 (1968) 427-434.
- [3] 武井千恵, 真栄城尚, 新垣郁子, 杉山卓也, 第88回日本気象学会 (2006) A365.
- [4] JAXA/EORC 台風データベース, http://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP_DB/ (2006).
- [5] Kiwamoto, Y. et al., *J. Phys. Soc. Jpn. Lett.*, 68 (1999) 3766-3769.
- [6] Sugiyama, T., Y. Sugimura, and Y. Yamashita, *Sola*, 2 (2006) 21-24.



杉山卓也 琉球大学理学部講師, 専門 雲形成気象学: 夜光雲, 台風, 京都大学理学研究科物理専攻修了, 1946年生.

大学と企業の伝熱研究のギャップと壁

*Proposal to Collaborate Heat Transfer R&D between
University and Corporation*

横堀 誠一 (東芝)
Seiichi YOKOBORI (Toshiba)
e-mail: seiichi.yokobori@toshiba.co.jp

1. はじめに

前号の特集で「大学と企業の伝熱研究のニーズギャップと壁」と題して、各方面から産学連携の現状打開に関する有益な提言がなされました。本稿は産業界側からの追加記事です。企業で原子力の熱流体研究を手がけた経験から、前号にない切り口で提案を試みました。

2. 困難な産学連携

本稿では、産学連携問題を「産学共同研究」と狭く限定しないことを前提にしたいと思います。共

同研究の更なる活性化は相当の難問で、私とて解決案があるわけではありません。この問題を長年に亘って阻んでいるのは、最近では産業界側の事情と考えられます。産業界が大学に期待する内容はもともと打算に基づく多様なものですが（図 1 は期待する内容を分類したポートフォリオ）、企業が熱流体シミュレーションという道具を手にして一応の解が自前で得やすくなり、基礎体系に成果を集約しがちな大学と研究ニーズに関して距離が隔たってきた。簡単に言えばこういう構図ではないかと思っています。

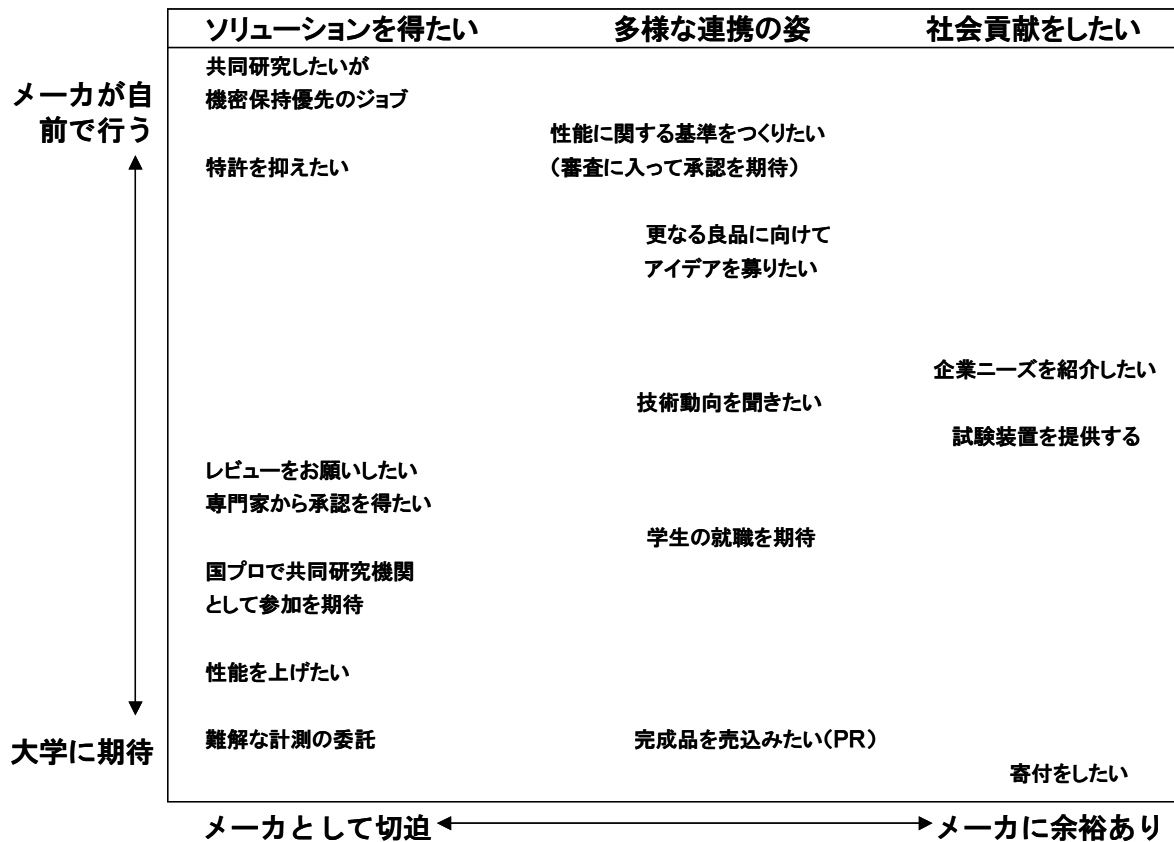


図 1 産業界から見た大学への期待の例

A 大学と B 社が組んで何か大きなプロジェクトや包括契約を行えば、他社はここに入り難いという単純明快な事情は勿論、企業には特許、機密保持、法制や契約の遵守等の制約が多くあるので産学の距離は縮まるどころか、連携推進の円滑化を阻害する障壁が生まれつつあります。規制自由化と規制遵守強化のアンバランスが当面続く逆風の時代ですが、現状を放置すると産学連携のメリットの芽を摘むだけでなく、折角築き上げたわが国の伝熱研究全体のポテンシャルがここ数年で確実に下がるのが予想されます。

3. 伝熱工学・学会の抱える課題

わが国の伝熱研究は大きく第3世代に入ったと思いますが、これまでの路線を延長してきた結果、随所にひずみが認められています。私なりに気になっている課題としては、以下のようなものが多いと思います。

- ・ 伝熱現象に対する物理的理解力の薄さ・低下
- ・ 熱流体実験の減少、継承・発展への危惧
- ・ 現象を見る機会の欠如
- ・ 産業界の現場で「もの」を見る機会の欠落
- ・ エネルギー問題の中での熱問題の認識の欠落

学会で満足いく質疑になかなか出会えない。シミュレーションの発表が増えて実験が減った。1Pa から 1kPa までの差圧レベルを体感したことがない、タービンの実物を見たことがない等々、シミュレーションを手に入れた産業界にしても、伝熱は本質的に実験主導の学問であることを軽視してきたツケも出ています。こうした彼我の問題を産学が共同で議論を開始し、解決することを提案の皮切りにしたいと思います。これなら企業も自社の情報開示を回避できるばかりか研究企画に参考となるので積極的に参加しやすくなると思います。

4. 包括的解決へ（提案1）

産学連携の活性化はこれだけを扱ってもうまくいかないと考えます。前節の問題提起はごく一例に過ぎません。伝熱学会が抱える諸問題の大方を洗い出し、一括して解決に当たることを提案します。理由は相互の問題が密接にリンクしているためです。

こうした構想の検討は、毎期を運営する執行部よりやや長め（2年くらい）のスパンで検討を進

めたらよいと思います。当学会に FILGAP とは別に「将来活動委員会」「学会ありかた委員会」のような特別専門委員会を設けて十分に議論を深めていただきたいと思います。他学会でも企画担当部門は得てして総務的活動に陥りやすく実態が伴わない例が散見されます。長期に企画、戦略というような構想を練る委員会を設置して、リーダ次第でユニークな活動を期待したいと思います。

5. 戦う学会への変身（提案2）

これまでの学会は、既存知識の体系化（便覧の刊行、基準の制定）やトピカルな技術課題の講習会開催など、情報サービスが主要な活動であったと思います。私自身、3年前に機械学会で熱工学講演会の前日にセミナーを開催したところ多くの方々の参加を得ることができました。ナノ・マイクロ、バイオ、水素と当時はやりの言葉を並べた訳ですが、こういう体験から、企画の大切さは産業界からも学会の大きな魅力となっています。こうした経験から、私はこれからの学会は、もっと技術を先取りして先導する時期に来ているのではないかと。学術の維持啓蒙は勿論、技術史を含む歴史観、倫理観、経済観などを踏まえた、総合的にバランスある感性で未来予測まで運営に含めるべきと思います。

私が描く「産学連携」とは、こういう技術戦略に産業界の協力を求めて推進したらどうかというものです。10年後がどういう世界になっているから伝熱研究もこうあるべきだろう、というグランドビジョンを提示することで、過去・現在のみならず未来にも責任を持った学会への脱皮を期待したいと思います。

将来の熱流体研究ビジョンが固まれば、懸案の産学共同研究など自然発生的に進むと楽観的に考えています。ひとつ間違えれば技術を誤った方向に導きかねないリスクもあるので毀誉褒貶あって当然ですが、医工連携ばかりでなく、構造との関係、防衛産業と熱工学の関係、変ったところでは芸術・文化財に見られる伝熱現象、何でも模索すべきなのです。機械学会熱工学部門でも企画重視の動きも出ており、当学会と企画のコラボレーションを検討するのも有力な具体案と思います。ただし、今後の大胆な予想を前提とするので、相当勉強して汗をかく必要があります。

6. 当面可能な産学連携の具体案（提案3）

こう考えてくると産学連携の切り口は広がったものになると思います。表 1 は自分の経験から考えた切り口の一例です。こうした問題を再整理して、創設される委員会で順次ポイントを議論して頂きます。その際、何事もネガティブに考えないことが重要だと思います。

7. あとがき（誰かがいつも悩むのが理想）

技術力維持と今後の戦略ビジョン。私の提案は以上 2 点を両輪にして学会が変容することに尽き、

その実行には産学連携が自動的に必須であるという構想です。誰かが絶えずこの問題に苦勞していればいい構想に結実すると確信していますので、将来活動委員会を提案しました。

これまでの産学連携が必ずしも順調でなかったとすれば、切迫感が希薄な時点で問題を持ち出したからでしょう。しかし今は違う。ここで手を打たないと折角世界をリードしてきた熱技術がリセットされてしまう。産学連携はこうした大きな問題の切り札として見るべきだと考えます。ロードマップに結実しなくても議論を開始することです。

表 1 産学で検討できる連携アイテムの一例

	連携の皮切りとなりそうな具体例
大学からの期待	モーティベーションある現場の熱問題の情報公開 モノ作り現場を見たい（工場見学の提供） 新たな熱問題の探求（特論等による熱設計・現場の紹介） JABEEでの救済（倫理教育の充実、熱問題に限らぬ） 新たな計測ニーズの調査（流量・流速・液膜厚さ・可視化等） 大規模・高圧の試験装置の貸与
産業界からの期待	設計に即した体系での熱的性能の見通しを得るためのコンサル 各大学の得意分野のリストを得たい（相談に行きたい） 技術標準を作りたい（専門家による審査の要求） 複雑な熱問題のコンサルテーション 知的財産の紹介 基礎研究の実施（小規模試験） 社会的企業人およびこれに続く学位請求の要求 完成した新製品のPR、改良に向けたアンケート
相互の期待	学生の就職への便宜（キー技術専門家の養成） 将来ビジョンへの討論（有償によるシンクタンク調査を含む） 技術者倫理問題の実例紹介（熱技術の周辺事例の紹介） シニア技術者による成功・失敗例の紹介 異分野間の交流（医学・化学・コスト・防衛・文学等） 産学定期連絡会の開催 HP上での情報共有のしくみ 実験装置や計測機器融通の斡旋 国プロでの協調

原子炉の安全を確保せよ
Secure the Nuclear Reactor Safety— NSRR における原子炉安全性研究 —
- Nuclear Safety Research at NSRR -

プロジェクト Q

杉山 智之 (独立行政法人 日本原子力研究開発機構)
Tomoyuki SUGIYAMA (Japan Atomic Energy Agency)
e-mail: sugiyama.tomoyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

原子力による発電は、1938年にウランの核分裂反応が発見されてから僅か十数年の間に実用化された。戦争が技術開発を加速した点は否めないが、人類が手にした新たなエネルギーへの期待こそが、これほど短期間で実用化を可能とした原動力であった。しかし、圧倒的な勢いで推進された開発の陰で、この高密度のエネルギー源を御するための闘いも行われていた。ここに紹介するのは、原子炉の安全、中でも反応度事故と呼ばれる事故に対する安全確保を目的として、原子炉安全性研究炉 NSRR で展開された研究・開発の歴史である。

本稿 2 章及び 3 章の一部については、NSRR の建設並びにその後の反応度事故研究をリードした石川迪夫氏の著作[1]を全面的に参考とさせていただいた。

2. 反応度事故

2.1 SL-1 事故[2]

それは 1961 年 1 月 3 日 21:01 に起こった。米国アイダホ原子炉試験場の実験炉 SL-1 で発せられた警報に駆けつけた者達が一見平穏な建物の中で目にしたのは、たちこめる蒸気、引きちぎられた配管、そして変形した原子炉容器だった。火災の気配は無く、ただ放射能レベルが異常に高かった。

一体何が起こったのか。米国原子力委員会は徹底的な調査の結果、「反応度事故」の発生と断定した。反応度事故とは、核分裂が連鎖反応を持続するために必要な中性子量を超えた供給が核分裂自身により即発的に行われた結果(即発臨界という)、マイクとスピーカーの間で起こるハウリングのように、瞬時に原子炉出力が上昇して制御が失われる、すなわち原子炉が暴走する事故である。反応度事故は、原子炉の概念が成立した当初から懸念されていた。それ故、米国は 1950 年代から研究炉を使った反応度事故研究を行い、意図的に

BORAX-1 という小型原子炉を破壊した経験さえ有していた。だが、小型とはいえ 16 トンにも達する SL-1 の原子炉容器が、配管を引きちぎって高さ 3m 近くも飛び上がるとは誰も想像し得なかった。

今日、SL-1 事故の過程は次のように説明されている。運転員の 1 人が原子炉の上部に立ち、制御棒を手動で大きく引き抜いた(この行為の理由は今なお謎である)。原子炉出力は瞬時に異常なレベルに達し、溶融したウラン燃料が冷却水と熱的相互作用を起こした。すなわち水蒸気爆発である。原子炉容器内の冷却水の一部は蒸気発生により吹き上げられ、勢いよく容器の天井に衝突したが、その運動エネルギーは、頑丈な原子炉容器を塑性変形させた後に、さらに 16 トン(容器全体重量)×3 m(上昇距離)分の位置エネルギーを賄う程に大きかった。複数の段階を経ているが、制御棒の引き抜きから原子炉容器が飛び上がるまでは一瞬だったはずである。この事故で 3 名が犠牲となった。

2.2 米国における反応度事故研究[1]

反応度事故では原子炉出力が数ミリ〜数十ミリ秒のうちに急上昇するため、事故発生後の有効な対処は困難である。よって、事故が起こった場合でも、原子炉出力が過度に上昇して原子炉が破壊されることのないように、予め原子炉、燃料、制御棒などを設計しておく必要がある。

前述の通り米国は反応度事故に関するデータを有していたが、商用炉の運転開始から間もない時期に SL-1 事故が与えた衝撃は大きく、反応度事故のさらなる究明を目的とした原子炉破壊実験が再開された。まず解明すべきことは、原子炉がどの程度の出力に耐え得るかという点であった。既に SL-1 事故過程の説明の中で示したが、原子炉に損傷を及ぼすような力は、燃料が溶融して水蒸気爆発を起こすために発生することが、一連の実験から分かった。つまり、燃料が健全な状態を保つ限

り原子炉は破壊されない。ならば、実験で原子炉を破壊するまでもなく、燃料単体の限界性能を調べればよい。この考えを反映した実験施設が建設され、いよいよ本格的な実験開始というところに来て、米国の研究リソースは、同時に抱えていた冷却材喪失事故の問題に優先的に割り当てられてしまう。

前置きが長くなったが、ここでようやく日本の登場である。

3. NSRR 計画

3.1 NSRR の建設[1]

戦後禁じられていたわが国の原子力研究が1952年に解禁され、遅れを取り戻すべく国を挙げて技術開発が進められた。その一環として、自らの手で安全を確保しようと、安全性研究専用の原子炉の設置が検討されたが、米国の研究規模には到底太刀打ち出来ない。原子炉を破壊する実験などは論外である。それなら、小規模な実験を数多くこなして、せめて米国のデータを補おうと小型研究炉の設置が決定された。こうして原子炉安全性研究炉(NSRR; Nuclear Safety Research Reactor)が日本原子力研究所・東海研究所(現在は日本原子力研究開発機構・原子力科学研究所)建設され、1975年6月に初臨界を迎えた。このとき既に、国内で軽水炉(PWR: 加圧水型及びBWR: 沸騰水型)の商業運転が開始されてから5年が過ぎようとしていた。

3.2 NSRR の概要[3]

NSRR の概略を図1に示す。NSRR は、訓練、研究、アイソトープ製造への利用を目的として米国 General Atomics 社により開発された TRIGA 炉と呼ばれる型式の原子炉である。シンプルな構造で、長さ38 cmの燃料棒150本余りを水中に配置して数本の制御棒を挿入しただけと言ってもよい。圧力容器も格納容器もないため、原子炉プールを見下ろすと水中に剥き出しの炉心が見える。

NSRR の最大の特長は、短時間に限り極めて大きな出力を発生出来る点である。これは、TRIGA 炉がウラン水素化ジルコニウムを燃料としていることに起因する。この燃料は温度上昇に対して強い負の反応度フィードバックを持つため、制御棒をいきなり引き抜くという手荒な操作を行っても、

原子炉出力は一旦急上昇した後に自動的に低下する。結果的に出力履歴は図2に示すガウス分布に似た波形を描き、NSRR ではそのピーク値が最大23GWにも達する(最大運転条件の場合)。現在一般的な発電用原子炉の電気出力は約110万kWであり、発電効率を3割強とすると熱出力は約300万kW(=3GW)なので、実にこの7倍もの出力を小さなNSRRが発生する計算になる。ただし、出力波形の半値幅は数ミリ秒と極めて短い。この「パルス出力運転」により、反応度事故における出力

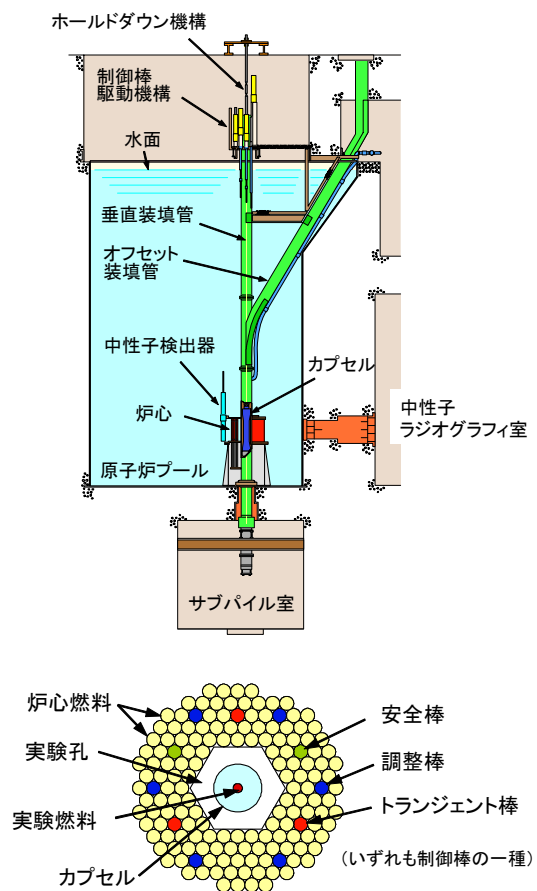


図1 NSRR 垂直断面及び炉心水平断面

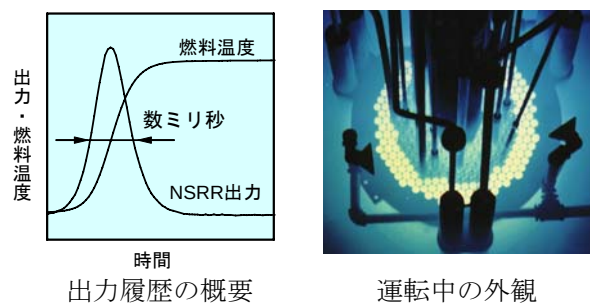


図2 NSRR パルス出力運転

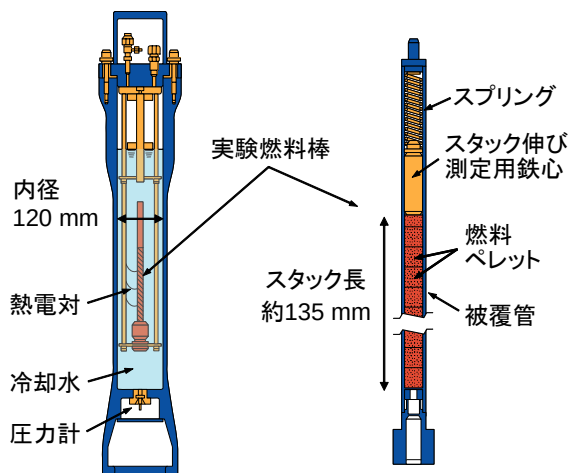


図3 実験カプセル及び実験燃料棒

急上昇を安全に模擬することが出来る。

NSRR のもうひとつの特長は、炉心中心に直径約 22cm と比較的大きな空間を有する点である。実験対象となる燃料を収めたステンレス鋼製のカプセルをここに設置してパルス照射を行う。図 3 にカプセルと実験燃料の例を示す。カプセル内には複数の実験燃料を設置可能だが、通常は 1 本で実験を行う。原子炉で発生した中性子は炉心中心に集中し、カプセル中心に位置する実験燃料において激しい核分裂反応を引き起こす。その結果、実験燃料のみが反応度事故に近い状態に置かれることになる。もし実験燃料が破損して破壊力が発生しても、高い耐圧性と気密性を備えたカプセルが原子炉本体の損傷を防ぐ。また、カプセルごと入れ替えることで、即座に次の実験に移行出来る。空間的制約と耐圧・気密性能を満たす限り、カプセル設計における自由度は高いため、後で示す多様なカプセルが開発され、様々な実験が行われた。

3.3 NSRR における燃料破壊実験

NSRR の主な研究対象は軽水炉燃料である。実際に発電所で使われる燃料棒は 4 m 近いが、長さ以外は本物と同等に製作したものを NSRR における標準実験燃料棒として大量に準備し、これらを使って丹念にパラメータを振った実験を行った。要するに、実験の数で勝負したわけだが、これが功を奏した。図 4 に、結果の一例として、燃料に与える熱的負荷の大きさ(つまり反応度事故の規模)と実験後の燃料状態との関係を示す。ここで、熱的負荷の指標としては実験中の最大燃料エンタ

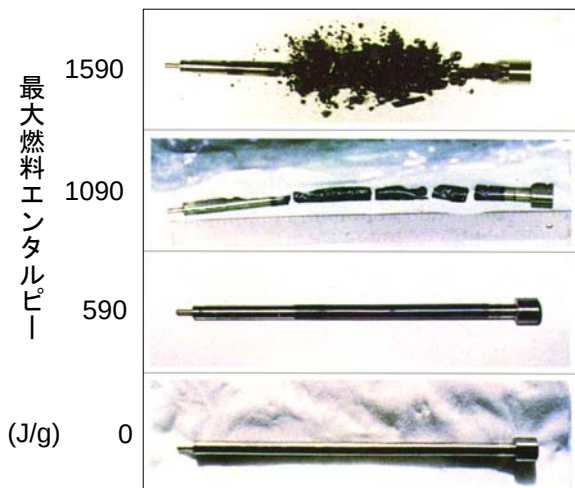


図4 最大燃料エンタルピーと破損状態の関係

ルピーを用いる。最大燃料エンタルピーが高くなるにつれ、壊れ方が激しくなり、最終的には燃料が熔融して水蒸気爆発が生じたために燃料が微粒子化している。一連の結果から、燃料が破損(被覆管の気密性が失われることをもって破損とする)に至るとき、また、水蒸気爆発により破壊力が発生するときの最大燃料エンタルピーを定量化した。さらに、発生する破壊力の大きさを同じく最大燃料エンタルピーの関数として得た。NSRR で得られた知見に基づいて、わが国の原子力安全委員会は、原子炉が反応度事故に対して安全に設計されていることを確認するための評価指針を 1984 年に定めた[4]。

3.4 可視カプセルの開発

実験中の燃料の挙動は、被覆管に取付けた熱電対や、カプセル内に設置した圧力計からの信号に基づいて推測出来る。しかし、実際の様子を見ることが出来れば、それに勝る情報はない。事故に近い状態にある原子炉の内部を覗くことは容易ではないが、カプセルの耐圧性及び気密性を損なうことなく光路を確保し、さらに、強烈な放射線によるガラスの透過率低下やフィルムの感光を最小限に抑えるという課題を克服し、1980 年に図 5 に示す可視カプセルが完成した[5]。カプセルにペリスコープを設け、16 mm フィルムを用いた高速度カメラを炉心から十分離れた高さに設置した。図 6 に映像の一部を示すが、被覆管表面で DNB が発生した後、クエンチするまでの様子が鮮明に記録されている。回数が限定された可視実験から得ら

れた定量的情報は少ないかも知れない。しかし、以後の実験では、被覆管温度の計測結果のみから確信を持って現象を描写することが可能になった。

3.5 高温高压ループの開発

NSRR 実験は基本的に室温・大気圧の冷却水条件で行われていたが、軽水炉の運転条件と同程度の温度及び圧力(PWR: 300℃, 15MPa, BWR: 280℃, 7MPa, いずれもおおよそその値)での実験も必要とされた。そこで、炉心に設置したカプセルと原子炉外部のポンプとの間に配管し、高温高压の冷却水を循環させるループを 1980 年に開発した。この高温高压ループを用いた実験により、水蒸気爆発が起こるときの燃料エンタルピーが室温・大気圧実験の場合と同等であることなどを確認した。

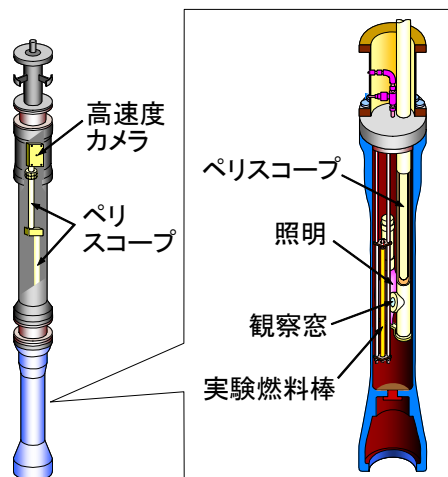


図5 可視カプセルの概略

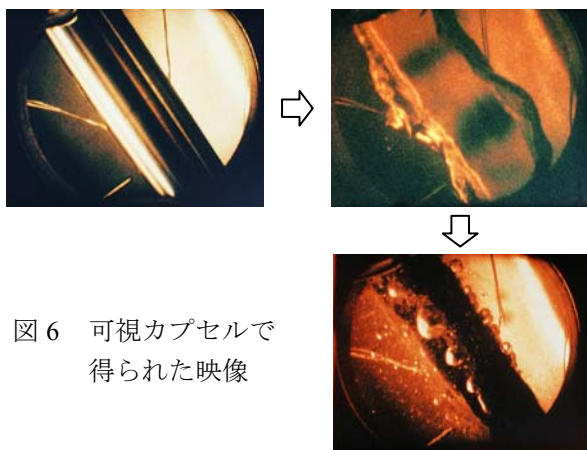


図6 可視カプセルで得られた映像

3.6 照射済燃料実験の実現及びその成果

NSRR 実験では原則として新品の燃料を対象としていたが、原子炉で長期にわたって使用(中性子照射)された燃料が劣化により壊れやすくなることが当初から懸念されており、実験による確認及び定量化が望まれていた。しかし、原子炉から取り出された燃料は高い放射能を持つため取扱いが極めて厄介である。特に压力容器すら持たない NSRR では、放射性物質の閉じ込めはカプセルのみが担う。そこで、図7に示すような二重のカプセルを開発し、照射済燃料実験における安全を確保した。さらに、燃料へのセンサー類の取付けや、カプセルへの封入等の従来は手で行っていた作業を、すべて遮へい・密閉された空間で遠隔操作により行えるよう施設を改造した。こうして、原子力発電所で実際に使われた燃料を対象とした実験が 1989 年から可能となった。現在、このカプセルを用いた照射済燃料実験が NSRR の活動の中心である。

長期間の照射が燃料に及ぼす影響のひとつは、燃料ペレット内部での核分裂性物質の蓄積である。一方、被覆管(軽水炉燃料ではジルコニウム合金製)は常に冷却水と接触しているため、外面で腐食が進行する。この状態に至った燃料で反応度事故が発生した場合、燃料は図4とは全く異なる挙動を示すことが 1994 年以降の実験で明らかになった[6]。図8に NSRR 実験で破損した照射済燃料被覆管の外観と輪切り写真を示す。被覆管は、腐食により外面が脆化していたため、燃料ペレットが

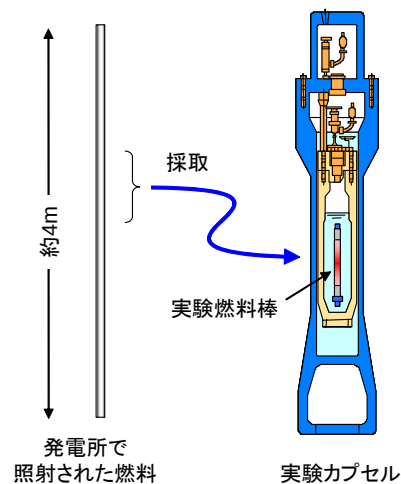


図7 照射済燃料実験カプセル

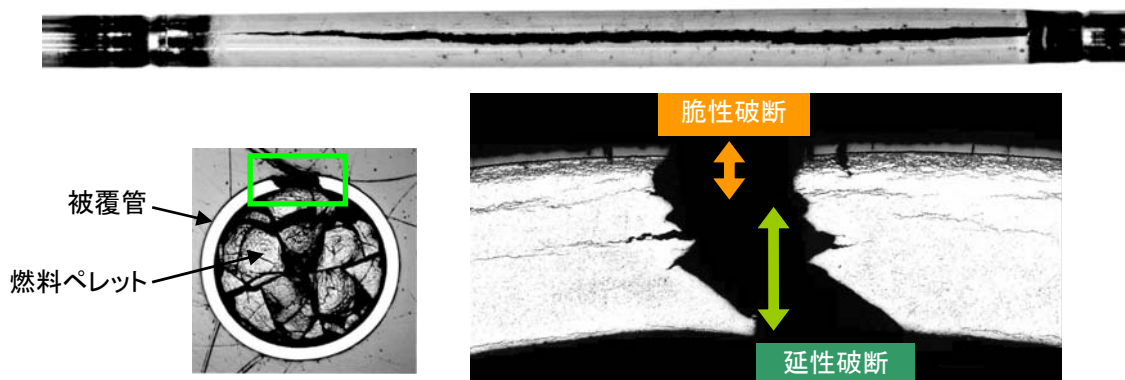


図8 NSRR 実験で破損した照射済燃料(PWR 燃料)

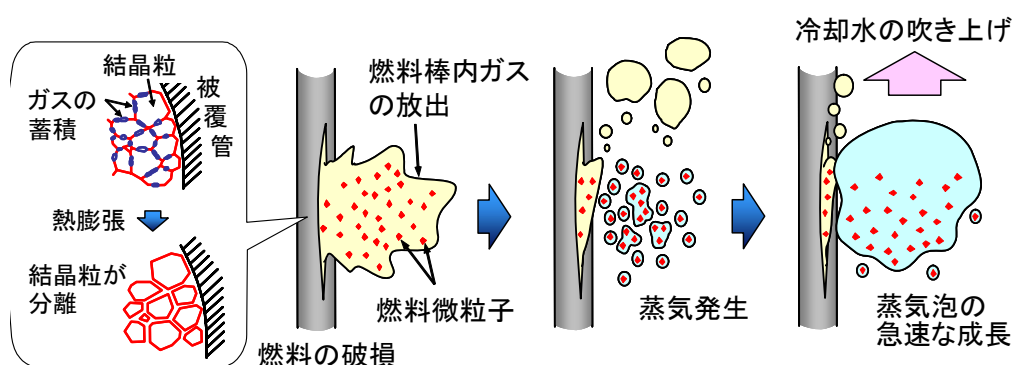


図9 照射済燃料の破損による破壊力の発生

熱膨張により被覆管を押し上げたときの変位に耐えきれずに割れたのである。このような破損に至るときの燃料エンタルピーは、燃料の溶融や、被覆管表面で DNB が起こるときの燃料エンタルピーよりもはるかに低い。様々な燃料で行った実験から、原子炉で使用された期間が長いほど破損時エンタルピーが低いというデータが得られた。

また、この様な破損に伴い、燃料の一部が微粒子化すること、また、機械的な力(破壊力)が発生し得ることが照射済燃料実験で明らかになった。長期間使用された燃料ペレットでは、図9に示すように、結晶粒の隙間にガスが蓄積されている。反応度事故時にはこのガスの熱膨張が結晶粒を押し上げる可能性があり、それが、溶融を伴わずに燃料が微粒子化するメカニズムになり得る。一方、高温かつ大きな比表面積を有する燃料微粒子が一斉に冷却水と接触したときには、激しい水蒸気発生が起こり、破壊力が発生すると予想される。粉碎した燃料を用いた NSRR 実験において、粒径(あるいは比表面積)に応じた破壊力の発生が確認されたことから、この予想は裏付けられた[7]。

照射済燃料実験で新たに得られた知見に基づき、原子力安全委員会は、1984 年の安全評価指針を補うものとして、燃焼の進んだ燃料に対する安全基準を 1998 年に定めた[4]。わが国が、世界でも類を見ないこの先進的な基準を定めることが出来たのは、NSRR という優れた道具を持ち、それを効果的に活用出来たからに他ならない。

3.7 照射済燃料用高温高压カプセルの開発

前節に述べた通り、照射済燃料は被覆管が脆化しているため壊れやすい。しかし、一般に金属の延性は高温状態で回復するため、実験開始時の冷却水温が十分高ければ、被覆管は破損を免れるかも知れない。この点を確かめるため、照射済燃料の高温実験が望まれていた。カプセル内の水温を 300℃程度に上げることは技術的には簡単だが、相手は高い放射能を持つ燃料である。十分な耐圧性、気密性に加えて、過度に圧力が上昇した場合の安全装置を設ける必要があった。さらに、高压容器であるため労働基準上の制約も受ける(ボイラーに携わる方はご存じであろう)。様々な試行錯誤の

結果、十分な性能と安全性を備えたカプセルが 2005 年に完成した。今年 8 月、このカプセルを使った最初の実験が行われるはずである。

3.8 32 年目を迎えた NSRR 計画

反応度事故実験を行う施設として、NSRR は建設当初こそ米国データの補完用と目されていたが、結果的には、早々に実験から撤退した米国よりもはるかに多くのデータを世に送り出すこととなった。これは、NSRR が小規模であるがために運用上の小回りが効き、シンプルな構造のため柔軟な拡張性を備えていたことによる。既に述べたが、NSRR は道具として非常に優れていたのである。なお、日本以外では仏、露が同種の実験能力を維持しているが、仏 CABRI 炉は現在改造中、露 IGR、BIGH 炉の実験対象燃料は同国及び東欧諸国でしか使われていない仕様と、現在 NSRR だけが多くの国で役立つデータを提供できる状態にある。それだけに、世界の原子炉安全性に関して NSRR が担う役割は以前にも増して大きい。

今日、燃料使用期間の延長(高燃焼度化)、及び混合酸化物燃料(MOX 燃料あるいはプルサーマル燃料)の本格導入が世界的に推進されている。この状況下で NSRR が役割を果たそうとした場合の困難は、データを先取りしようにも、十分に長い期間使用された燃料や実際に軽水炉で使用された MOX 燃料が日本に存在しないことであった。しかし、この困難は、経済産業省原子力安全・保安院からの支援と欧米各国の協力を得て解決した。長期使用や MOX 燃料導入について試験運用が認められている国から、照射済燃料を譲り受けることが出来たのである。それらは既に日本に輸送され、平成 16 年度から実験に供されている。得られるデータは順次公開されるが、国内のみならず、世界中で活用されることが期待される。

4. まとめ

NSRR における研究・開発を中心に、反応度事故に対する安全確保への努力の足跡を紹介した。

最後に申し上げておくが、原子炉の安全性という問題が重大さと責任を伴うからといって、研究者たちが日々悲愴な面持ちで仕事に臨んでいるわけではない。事故という極端な条件の下では、現象の時間的・空間的な非平衡性が高く、そこで起こる複雑な現象は研究対象として非常に面白い。また、安全性研究の目的のひとつは、未知であるが故に過度に保守的に評価されている現象を解明して安全余裕を合理化することだが、この達成には、探求心が満たされる悦びと、社会の利益のために貢献できる満足感が伴う。原子炉の安全性研究に携わる者たちが、実にポジティブな気持ちで研究を進めていることを知っていただけたら幸いである。

謝辞

既に冒頭でも記した通り、SL-1 事故から NSRR 計画初期までの事実関係は、石川迪夫氏の著作を全面的に参考にさせていただいた(要約させていただいたと言ふべきか)。石川氏への感謝の意を示すと共に、読者の皆様に対しては是非オリジナル [1]を一読されることをお勧めする。

参考文献

- [1] 石川迪夫, 原子炉の暴走 SL-1 からチェルノブイリまで, 日刊工業新聞社 (1996).
- [2] U.S. Atomic Energy Commission, IDO Report on the Nuclear Incident at the SL-1 Reactor, IDO-19302 (1961).
- [3] Ishikawa, M. and Shiozawa, S., Journal of Nuclear Materials **95** (1980) 1.
- [4] 原子力安全委員会安全審査指針集 (<http://www.nsc.go.jp/anzen/sisin/>).
- [5] Saito, S. et al., J. Nucl. Sci. Technol. **18** (1981) 427-439.
- [6] Fuketa, T. et al., Nuclear Safety **37** (1996) 328-342.
- [7] Sugiyama, T. et al., J. Nucl. Sci. Technol. **37** (2000) 877-886.

鮮度チューハイ「-196℃」開発秘話

Unknown Episode about Freshness Chu-hai “-196℃” in a Development Phase

渡部 徳富（サントリー株式会社）

Tokutomi WATANABE (Suntory Limited)

1. はじめに

酒類全般の消費が低迷する中で、「缶チューハイ」に代表される低アルコール市場はここ数年大きく市場を拡大させている注目の市場である。しかしながら、大手ビールメーカーの参入と共に低価格路線とシェア争いから、コスト面で非常に厳しい市場環境下にある市場でもある。あるレベル以上の数量が売れないと、ビジネスとして成立しないチューハイ市場で販売数量を追い求めるあまり、スーパーやディスカウント等の店頭で、1缶100円前後で販売されている光景が日常的になりつつある。酒税を負担する商品で清涼飲料より安く販売される実態はあきらかに異常である。

価格以外の魅力、付加価値を付与する技術革新なくしては、この市場の健全な発展性はない。単に、焼酎やウオツカに代表されるホワイトスピリッツ類に、果汁をブレンドするだけのチューハイでなく、今一度リキュール類の製造方法の原点に帰り、素材を酒に浸漬する原料酒で新たな香味創

りから取り組みたい。「缶チューハイ」というカテゴリーを越えて、酒類ビジネスに新たな付加価値（＝可能性）を生み出したい。

「-196℃」という非日常的超低温に、その新製法ヒントが隠されていた。

2. 鮮度チューハイ「-196℃」とは？

伝熱関係の研究や業務に関わる皆様には馴染みのある数字（温度）と思うが、「-196℃」という温度の意味を、消費者の皆さまから質問いただく。この温度は、液体窒素の沸点直前の温度であり、液体窒素を利用した超低温下での食品粉碎技術は、日本国内では昭和30年頃より本格的な技術検討が開始されている。現在に至るまでの食品分野における、液体窒素による低温粉碎技術の利点は以下のようにまとめられる。¹⁾

- 1) 常温では粉碎しにくいモノが容易に粉碎（微粉化）できる。
- 2) 通常より細かい微粉化が可能である。
- 3) 粒子形状が鋭角状で流動性の良い粉末が得られる。
- 4) 粉碎時の発熱による熱劣化（変性）が防止できる。
- 5) 不活性ガス（窒素）利用による、酸化防止ができる。

3. 実用化されている液体窒素による低温粉碎加工商品事例

- 1) 麺類やパン類に練りこむ「微粉碎精米・玄米」（微粉末化による吸水性の向上・常温流通の粉末）
- 2) ローストコーヒー豆（焙煎したての風味を維持した微粉碎コーヒー豆、低温～常温の粉末）
- 3) 抹茶（玉露）、煎茶（色・香り・味を維



図1 鮮度チューハイ「-196℃」

<http://www.suntory.co.jp/rtd/196/index.html>

持した「微粉末茶」、低温～常温の粉末)

- 4) ナッツ類 (舌触りのよい「ミックスペースト」、常温のペースト)
- 5) 生菓類 (有効成分の収率改善, 低温～常温の粉末)

これら以外にも、調味料用素材などでは甲殻類、豚骨肉、鶏骨肉、コンブ、しいたけ等の粉末・ペースト化が紹介されている。²⁾

こうした商品化例の特徴は、元の素材の水分が比較的少なく、常温下で取り扱いしやすい点にある。

4. 果実(素材)の魅力をお酒に活かすヒント

柑橘果実に代表されるような水分の多い果実を直接凍結粉碎した応用事例は少ない。(果皮部分のみをペースト状にした事例や練りこみ素材用のペーストに加工される事例が一部で実用化されていた。)

実際、実用化されている超凍結粉碎装置「リンレックスミル」でのカンキツ類の果肉部分を粉末にしたものは、常温下ではすぐに溶解・吸湿してペースト状になる。果汁代替原料として冷凍保管後、そのまま微粉末ペーストを低アルコール飲料にブレンドしてみたが従来の果汁ブレンドとの品質面での有意性は乏しいものであった。(この時点では「鮮度チューハイ」はまだ闇の中である。)

我々、サントリーの商品開発チームのメンバーが新たな素材や商品化のヒントを求めてヨーロッパに出張した際に、地中海のカプリ島で「レモンチェロ」というリキュールに出会った。その製法は、レモンの皮の部分のみを薄く剥ぎ、それを高アルコールに漬けてレモンの香味成分をお酒に抽出・ろ過し、砂糖で調味しただけの極めて単純な製法にも関わらず、非常に豊かな香味を有するリキュールである。このリキュールとの出会いが、果汁以外の果皮にまで注目した酒創り、香味創りのヒントとなった。

もう一つのヒントは、実は居酒屋の「生搾りサワー(チューハイ)」でした。他人に作ってもらった「生搾りサワー」は、正直感動する程美味しいわけではない。自ら、生の果実を搾り、その瞬間の果皮と果汁からの香りと、直接果皮から手についた新鮮な香りを身近に感じながら飲むと、格段に美味しく感じる。

この何気ない二つのヒントがあらためて液体室素での超低温下での粉末化に光をあてるキッカケとなった。

5. 新たなお酒創りの為の技術革新

果汁ブレンドを全て否定するつもりはないが、カンキツ果実本来の新鮮な香味を缶製品でも実現したいという思いと、競合商品にない価値を実現したいという思いから、加熱劣化や酸化劣化が少ない製造加工法として、一時あきらめていた、液体室素による低温凍結粉碎技術に再チャレンジした。

- 1) 先に紹介した二つのヒントから、果肉部だけでなく果皮もあわせて素材を粉碎する事。
- 2) 粉碎したものを果汁のように低アルコールに混ぜるのではなく、高アルコールの原料酒に漬けてその素材本来の新鮮な香味を原料酒に抽出・ろ過する事。

という新たな発想の組合せが突破口になり、今回の「鮮度チューハイ」原料酒部分の基本製法が完成した。

後は、イメージした香味ができるまで、原料調達、粉碎加工条件、浸漬条件の検討、さらにはその原料酒を使用した缶チューハイの試作と商品化までには数々の試練があるが、現在なお進化させている途中であるので、今回ここで詳細を紹介する事は省略させていただく。

6. まとめ

新しい技術を生み出す源は「好奇心」や「努力」であると言われるが、私のような普通の人間に言わせると単に「好奇心」や「努力」だけではダメと感じる。ある程度プレッシャー(私の場合は、納期を決められた商品開発)の中で日々「もがき、あがき」他人に助言を求める環境下でないと中々生み出せないと感じている。

-196℃という一般的には非日常の世界の中に、理想的に素材を加工するヒントが隠されていた。世間で話題の超電導技術の分野では、さらに低い温度が求められているとか…機会があればそういう未知の温度帯での食品加工を実験してみたいと思う今日この頃である。

技術革新の原動力は、「異分野への興味」と先に述べた日々の「もがき、あがき」(きれいに表現す

るなら試行錯誤であろうか…) コラボレーションなのかも知れない。

「-196℃」という商品はまだまだ発展途上ブランドである。今後の新製品やリニューアルにますますご期待いただくと共に、忌憚ないご意見やご提案、商品への感想をいただければ幸いです。

る（連絡先：webmaster@suntory.co.jp）。

参考文献

- [1] 深山 信一, 食品機械装置, 4, 1991, p. 47～55.
 - [2] 太陽化学（株）新食品素材パンフレット
-

北米の大学における研究及び人事に関する制度について

Research and Performance Evaluation at North American Universities

川路 正裕 (トロント大学)

Masahiro Kawaji (University of Toronto)

E-mail: kawaji@ecf.utoronto.ca

<http://www.chem-eng.utoronto.ca/faculty/kawaji>

1. はじめに

海外事情についての寄稿文を依頼され、さて何について書こうかと考えている時、日本の大学では最近行われた法人化に伴い色々な面で変化が起こりつつあるということを耳にした。そこで、北米の大学での研究や人事、その他の制度について少し書いてみたいと思う。

筆者はカリフォルニア大学バークレー校で学位を取得した後、日本原子力研究所に3年間勤務し、1986年にトロント大学工学部化学工学科へ赴任した。それ以来20年間トロント大学で教鞭を執っているが、その間学科の教務や人事、教官の業績評価などにも直接関わってきた。日本の大学での勤務経験は無いが、日本の研究者や大学関係者の方々とは色々な形で付き合いがあり、日本の大学の在り方など海外から興味深く観ることもしばしばである。なお、筆者はカナダの州立大学に勤務しており、米国の州立大学や私立大学とは多少の相違点があるかも知れないが、筆者の知る限り両国の大学・大学院制度は非常に良く似ているので、北米の大学事情として執筆したい。

2. 大学院生への手当てについて

北米と日本の大学の工学部における研究制度での大きな違いとして、まず大学院生に対する経済的な支援が挙げられる。北米の大学では研究に従事する院生に対して大学側が学費と生活費をほぼ全面的に支給するのが普通であり、指導教官はこの人件費の一部か全額を外部獲得資金から支払う必要がある。米国の私立大学などでは年間の学費が300万円を超えるため、一人の院生にかかる費用は多いところでは400-500万円にもなるようであるが、筆者の州立大学では、院生一人当たり年間約200万円の手当を支給することになっている。又、学科では大学院生の約半数が政府や大学から

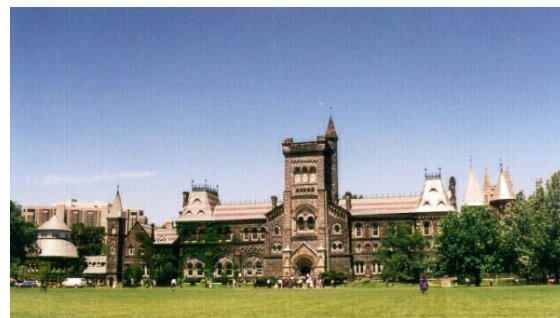


写真1 トロント大学

年100万円から150万円の返済義務の全く無い奨学金を貰っており、それらの院生には差額のみを指導教官が支払えば良い。しかし、残りの半数の院生は奨学金を貰えないため、手当ての全額を指導教官が研究費から支払っている。ポスドクなどの博士号を持つ研究員には大学院生の倍近い額又はそれ以上の給与を外部資金から支払う必要がある。

なお受託研究費などには大学の間接費が上乗せされるので、実際には院生や研究員に支払う手当や給与より20-40%増しの外部資金を人件費として確保せざるを得ない。大学によっては上乗せされる間接費の割合がもっと大きく、米国では100%増しといった大学もあると聞く。

奨学金や研究手当が少ない院生は、学部の授業を補佐する Teaching Assistant として働き学費や生活費を補っているが、研究に費やす時間が減り卒業が遅れてしまうという問題が出てくる。そのため研究室に入るのに奨学金を獲得出来る学生は有利になる。又、教官にとって同じプロジェクトで研究費を長期間確保出来る見込みが無ければ博士課程の院生を引き受ける事は難しい。

このように北米の大学院生は学位を取得するまで何年かかろうと本人への経済的な負担は少ないため、博士課程へ進学することに余り躊躇しない。

もし大学卒業後も大学院の学費と生活費を学生本人又は親が負担することになれば、博士課程へ進学する学生数は激減することであろう。

3. 外部獲得資金について

上記のように北米の大学の指導教官には各院生が卒業するまで手当てを支給し続ける義務がある。そのため、研究を手広くやっている教官は絶えず研究費の獲得と人件費のやりくりで多大な労力を割くことになり、まさに小さな会社を一人で経営しているようである。

この院生やポスドクへの手当てや給与の支払い義務の有無が北米と日本の大学での研究室運営に大きな違いをもたらすのは必至である。まず、北米では大学から自動的に支給される研究費はほぼ皆無であり、全ての教官は研究費を外部から調達しなければ院生やポスドクを雇えず、思うように研究を遂行出来ない。成果が出なければ論文が書けず、論文を出していなければ研究申請の審査が通らず、由って研究費が獲得出来ないという、悪循環に陥ってしまう。例えば、日本の科研費に相当するカナダ政府の研究支援機関（NSERC）への研究費申請では、研究の内容や手法に加えて申請者の過去6年間の業績が問われる。申請内容が優れていても、又昔素晴らしい研究をして多大な成果を上げていても、過去6年間に於ける業績が不十分であれば研究申請が不合格になってしまうこともある。よって一時的にでも研究を休むことは大学での研究者生命を危うくしかねない。

外部資金を調達するには政府機関へ研究申請書を頻繁に提出すると同時に、機会がある度に国の内外の企業へ働きかける必要が有る。筆者もこれまでカナダ、米国及び日本の大小の企業から受託研究費を貰ってきた。しかし、実際には北米でも企業から研究費を獲得するのは決して容易な事では無い。たとえある企業から研究費を一度獲得出来ても、もし十分な成果を上げなければ二度と貰えなくなる可能性が高い。又、受託研究では期限内にスポンサーである企業にとって役に立つ成果を上げるという義務が付きまとうため、受託研究のテーマは院生ではなく学位論文の提出や終了期限などの制約が無いポスドクなどに担当して貰うケースが多い。

外部のベンチャー企業が手がけているような新しい技術に関連する受託研究は魅力的ではあるが、

これも研究費を獲得するのは難しい。まず知的財産権の取り扱いで企業と大学との契約時に問題が生じやすく、企業側も鍵となるような技術の情報は大学の研究者へ開示したがない。又、ベンチャー企業の多くは委託研究費を出せるほど資金的に余裕が無いため、それらの企業から研究費を獲得するにはかなりの努力を要する。

政府機関からの研究資金も競争が激しく、申請書が通る確率は20%程度だと言われている。しかし、近年北米では産学間の協力を支援するため、国や州政府は国内や地元の企業から大学へ提供される研究費に対して同額の matching fund を拠出する体制を整えてきた。もちろん、この matching fund を獲得するにも申請書の提出が必要だが、審査は通りやすい。これは企業が大学へ資金を出す研究を政府が奨励する姿勢の現れであろう。

このように近年は基礎研究より応用的な研究テーマを扱う産学協同研究プロジェクトの方が研究費の申請は通りやすくなってきているため、多くの大学の研究者は研究テーマを時代の流れに合わせざるを得なくなっている。そして、応用的な研究テーマで外部資金を調達し、その人件費をやりくりして基礎研究も行い、ジャーナルに論文をせっせと出すことが工学部の研究者にとって現実の課題になっている。

研究活動が軌道に乗っていれば、工学部の多くの教官は専門知識を生かしてコンサルティング活動を行い、更に自ら起業し会社運営との両立を図る者も少なくない。筆者の学科でも半数以上の教官が研究成果を元手に起業し、小規模ながらも自分の会社を持っている。次に工学部教官のコンサルティング業務について説明する。

4. コンサルティング業務について

北米の大学では企業や政府機関などから依頼を受ければ、教官がコンサルタントとして働き、相応の報酬を受けても良いことになっている。特に工学部は産業界と近い関係にあるため、筆者の大学でも勤務時間の約1割位の時間をコンサルティングに割くことが学部から期待されている。これはコンサルティングという副業に対して日本の大学とは全く異なる考え方に拠るためだと考えられる。

日本の国公立大学と同じく北米の州立大学も予算は税金で賄われているが、民間の企業が大学の

教官に問題の解決を依頼して来た場合、その要請に応じるのは税金から賃金を貰っている者として当然であると考えられている。つまり、企業の問題解決に力を貸すことにより、その企業が収益を上げ雇用を増やせば、社会にとってもプラスになり、教官も専門知識を社会に還元出来るという訳である。又、コンサルティングの仕事に対して教官が報酬を貰うのは妥当な事であると考えられており、その額は企業と教官に委ねられている。但し、民間のコンサルタント会社と競合することを避けるため、教官はコンサルティングの宣伝はしない。

教官にとってコンサルティングのもう一つのメリットは、産業界が直面している実社会の問題に絶えず接することが出来るということである。しかし、一つ注意する必要があるのは、副収入を得られるコンサルティングを研究や教育の職務より優先する教官が出現しかねないことである。この歯止めには年度末の人事考課で研究実績の評価を十分行い、研究活動と教育面での貢献度を重視することが有効であると思われる。大学側から見れば十分に研究成果をあげ、教育面でもそれ相応の貢献をしている教官なら、いくらコンサルティングを行っていても特に問題にする必要は無い。次に人事考課のやり方について述べる。

5. 学年度末の人事考課について

筆者の大学では学年度末に各学科で全教官の人事考課を行っており、その結果に基づき翌年の給与の増額分が決められている。ご存知の方も多いかと思うが、北米では教授や助教授はそれぞれ独立して院生を指導して研究を行っており、皆横並びになっている。人事考課では各教官が1年間の活動報告書を提出し、学科が設置する評価委員会が教官全員の査定を行っている。活動報告書には、本人がその年度に担当した教科とその学生数、指導した4年生の卒業論文、大学院生の研究指導内容、その年度に出版した本や論文のリスト（ジャーナル、国際会議、報告書などを掲載済み、査読合格、投稿中に分類して書く）、学内外で講演した期日、場所と演題の一覧、その年度に申請・獲得・使用した研究費の一覧、出席した学会や国際会議、従事した学内の役職、学内外の委員会や学会での活動などの情報を決められた様式で書き入れることになっている。

評価委員会は、各教官の活動報告書及びその教官が担当した教科の学生による評価結果を吟味し、次のように採点する。評価委員はそれぞれ各教官の(i)研究活動、(ii)4年生や院生の研究指導を含む教育への貢献度、(iii)その他の活動についてそれぞれ5, 5, 2の比で点数をつける。そして個人の合計点の平均が審査の対象となる。給与の増額分においてはベースアップ分と査定分とに分かれており、評価が低くてもベアは毎年確保されるが、査定分に幅があり、「塵も積もれば山となる」の諺通り、10年も経てば同年齢で同職歴の教官の間でも給与の差が出てくるようになっている。この人事考課の仕組みは工学部全体で共通しており、ほぼ全教官に適用されている。

査定で最も重視されるのは、教官がその年度にどれだけの論文をどういうジャーナルに出したか、院生を何人指導し卒業させたか、どれだけの研究費を獲得していたかなどである。各教官はこれらの項目の評価が決して低くならないように絶えず努力することを求められているため、北米の大学では“Publish or perish”と昔から言われている。そして、研究活動が余りにも低迷していると学科主任から早期退職を勧められることがある。

6. 公正な業績評価と人事制度の透明性について

筆者が北米の大学制度で非常に高く評価するものに、公正な業績審査のやり方と人事制度の透明性がある。ここでは Assistant Professor が tenure (終身在職権) を取得する際の業績審査と、Associate Professor から Professor への昇格時の審査に話を限定する。最近日本でも tenure 制度を導入する大学が増えているそうであるが、北米の大学では Assistant Professor は雇用されてから5-7年後に研究と教育両面での業績審査を受け、その審査に合格すれば終身雇用へ切り替えられると同時に Associate Professor に昇格する。しかし、不合格になればその時点で大学を辞職しなければならない。従って公正で透明な審査が不可欠である。又、Associate Professor から Professor へ昇格する際も主に研究業績の審査を受けることになる。

業績審査の際、筆者の大学では国の内外を問わず他の大学の学者や官民の研究所の研究者など約10人に研究業績の評価を依頼しているが、他の北米の大学でも類似した方法を取っていると思う。人事において公正で透明な審査が求められる現実

的な理由として、もし当人が審査結果を不服に思った場合大学が訴えられかねないからである。そのため、筆者の大学では研究業績の評価を依頼する際、それらの評価を文書で審査委員会に提出してもらう方法を取っている。審査委員会は審査される本人と同じ研究分野の専門家の中から、他大学の学科主任などから評価者を選び、本人の履歴書、論文リスト、代表的な論文の抜き刷り約5-10編を各評価者へ送り、tenure 授与又は教授への昇格の是非について文書で回答してもらう。評価の基準は各評価者で異なるのは避けられないが、他大学の学科主任などに依頼する場合はその大学・学科での評価基準が使われるため、研究規模や評判等がほぼ同等の大学・学科の主任を選ぶことが多い。

審査委員会は研究業績の外部評価と共に教育面や社会に対する貢献度（例えば、公的な委員会や学会での活動など）を十分に吟味した上で結論を出し、学部長及び学長の下承を経て人事が決定する仕組みになっている。もし、外部評価の中に候補者に対する否定的な意見が多少なりとも含まれている場合は、慎重を期すため、更に数人の外部評価者を追加することもある。このように審査内容が文書で残るため、不公正な審査が起こりにくい仕組みになっている。又、国外の専門家に研究実績の評価を依頼するのは、本人の研究が国際的に評価されているかどうかを問う意図がある。

筆者もこのような外部評価を取り入れた業績審査に幾度も関わってきたが、改善すべき点はまだあるにせよ、良く工夫された仕組み・制度であると思っている。何よりも、公正で透明な審査を行うことは大学のように終身雇用制を持つ組織にとっては大変重要なことであろう。

7. 学位審査について

博士号の授与には大学の名誉が懸かっており、学位審査は厳格に行われ一定の水準に達した学位論文のみが受理されて然るべきである。日本の大学は海外からの留学生をなるべく増やす努力をしてきたが、大学院で博士号を取得した留学生は本国へは戻らず欧米へポスドクとして渡ってくる者が少なくない。学位に見合う専門知識と研究能力を身に付けた優秀な卒業生に混ざって、明らかに力不足の者もいるのを耳にするが、欧米の大学がそういったポスドクを受け入れた場合、学位を授

与した大学院の研究レベルが疑われることも有る。

留学生の場合、言葉の障壁があるため研究に慣れるまでより多くの年月がかかるのは仕方が無いが、学位審査では留学生であろうと、本人が学位に見合う専門知識と研究能力を身につけたかどうかを確認することが不可欠であることは言うまでも無い。そのため、筆者の大学では博士論文の審査には必ず学外の専門家による外部評価が義務付けられている。筆者の知る限りでは、カナダの大学のみならず、欧州の大学やインド工科大学なども外部評価を学位審査に取り入れている。学位の水準を維持するには、論文の審査においてその研究テーマに精通する国内外の他大学又は研究機関の専門家による外部評価を取り入れることは非常に有効な手段だと思われる。

8. サバティカル制度について

最後に、北米の大学の制度で多くの教官が重宝するサバティカル制度について書くことにする。筆者が北米の大学に就職した理由の一つにもサバティカル制度の存在があった。ご存知の方も多いと思うが、7年に一回、半年か1年間教務や学内の委員会から免除され、研究活動に専念出来る制度である。北米では多くの大学がこの制度を定めていると思う。筆者の大学ではサバティカルの期間中の給与は半年のサバティカルなら全額、1年なら8割を超えるため多くの教官がこの制度を利用している。7年に一回というのはユダヤ教やキリスト教で1週間の内一日は休養するということから来ているようであるが、あくまでもサバティカルの期間は休暇では無く、本を執筆したり、研究を更に進めるために他の大学や研究所に出向いて共同研究を行ったり、新しい研究テーマを見つけるために使うことになっている。

サバティカルの期間中は自分の研究室の運営を続ける以外に大学への義務はほとんど無く、自分の大学に留まろうと国内外の研究機関に滞在しようと本人の勝手である。このようにサバティカルが制度化されていると、他の教官に気兼ねすることなく誰もが7年に1回、半年から1年間学科を不在にすることが出来る。学科にとっては毎年約7分の1の教官がサバティカルで講義を受け持たないことになるので、他の教官に肩代わりしてもらう必要があるが、制度化されていると教官の間

に持ちつ持たれつという関係が成り立つため、教務担当者がサバティカル中の教官の代理を見つけるのに苦労するという話は余り聞かない。

以上、日本の大学との相違を念頭に、思いつくまま北米の大学の制度について書いてみた。書いている内に他にも色々頭に浮かんできたが、いつか又の機会にしたいと思う。



川路 正裕

- | | |
|----------|-------------------------------------|
| 1954 年 | 鹿児島に生まれる |
| 1968 年 | 父の赴任先のカナダ・トロントへ |
| 1978 年 | トロント大学工学部卒業 |
| 1983 年 | 日本原子力研究所へ就職 |
| 1984 年 | カリフォルニア大学
バークレー校 Ph.D. |
| 1986 年 | トロント大学化学工学科助教授 |
| 1993 年 | トロント大学化学工学科教授 |
| 1995-7 年 | トロント大学化学工学科
教務担当副主任 |
| 2002 年 | カナダ化学工学会
Jules Stachiewicz Medal |
| 2003 年 | カナダ化学協会(CIC)フェロー |
| 2006 年 | カナダ・オンタリオ技術者協会研究賞 |

第6回沸騰伝熱国際会議報告記

Report on 6th International Conference on Boiling Heat Transfer

門出 政則 (佐賀大学)

Masanori MONDE (Saga University)

e-mail: monde@me.saga-u.ac.jp

第6回沸騰伝熱国際会議が、イタリアのスポレート (Spoleto) で5月7日から12日まで開催されました。この国際会議は、3年毎に開催されており、筆者は縁あって第2回から連続して5回出席しており、なじみ深い会議である。

この会議では、標記の通り沸騰に関連する研究内容のみを発表する会議で、1セッションのみで講演が行われ、集中的に討論するというのが大きな特徴となっています。さらに、参加者が同じ宿に滞在し、朝・昼・晩の3食を共に過ごす、文字通り寝食を共にしながら相互に意見交換できるようになっていたが、今回はスポレートという田舎町で開催されたため、3つのホテルに分宿することになった。この点が、これまでの会議と異なっていたが、会議の基本精神は堅持されていた。

会議での講演数は75件で、参加者数は83名となっていた。数件の講演中止はあったが、これまでの会議とほぼ同じ実績となっていた。8件の特別講演が行われ、その内の2件は小澤先生 (関西大学) と鈴木先生 (東京理科大) によるものであった。また、一般講演は、高田先生 (九大)、稲田先生 (群馬大)、光武先生 (佐賀大)、院生の Kojo (東京理科大) さんと門出であった。日本からの講演は、いずれもレベルが高く多くの質問があり、実りあるものであった。特に、高田先生の講演内容「超撥水表面上での沸騰の様子」を説明したビデオには、強い印象と興味を持たれた。活発な討論が続きました。

ところで、今回の講演内容は Flow boiling, Microscale boiling, Critical heat flux, Spray-Jet cooling, Rewetting and Quenching, Enhancement of boiling heat transfer, Bubble, Boiling of mixture, Phase change, Numerical modeling, Heat exchanger, Falling film, Pool boiling と多岐にわたった内容で、多少散逸的となっていた点は否めなかった。また、沸騰現象の基礎的な研究から応用的な内容へのシ

フトも感じられた。

新しい測定法の開発によって、従来観測できなかった温度変化や流れの状況が美しいビデオを用いて発表されていた点が興味深かった。微細加工された液晶温度計を用いて表面温度の測定も興味深かった。

現在、筆者が最も興味を持って研究を進めている高温面の濡れ問題についての発表では、濡れの条件を依然として温度基準、例えばライデンフロスト温度、最小熱流束点温度や自発核生成温度を用いて解析や整理が行われていた。筆者は、温度はある状態を示す状態量であるので、濡らされていない面が濡らされた面に変化するのは、「ある大きさの熱が液側に伝えられ、その熱が力学的エネルギーに変換される過程において」ある限界が存在して、濡れ条件が定まるのではないかと考えている。この点について、多くの有益な議論をすることができ、それなりの賛同を得ることができた。なお、定常状態の CHF は、無限の熱源 (固体側) から液側に熱が供給されていることから、流体側の力学的問題だけで決定されている。

終わりに、写真は懇親会での筆者と主催者 (左から Prof. Grassi, Prof. Celata, Prof. Marco) である。美味しいイタリア産の赤ワインを堪能できました。



第4回ナノチャンネル・マイクロチャンネル・ミニチャンネル国際会議 (ICNMM2006) 報告

Report on Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels

井上 浩一 (九州大学)

Koichi INOUE (Kyushu University)

e-mail: inoue@aero.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

2006年6月19日(月)から21日(水)にかけて、ASME主催の第4回ナノチャンネル・マイクロチャンネル・ミニチャンネル国際会議がアイルランドのLimerick大学にて開催された(図1)。本会議は2003年に第1回が米国Rochesterで開催されてから毎年行われているが、今回は北米以外では初めての開催となった。また今回から会議名称に“ナノチャンネル”が追加されており、研究対象の超微細化を反映した格好になっている。

2. 会議の概要

会議ではPlenary講演3件、Keynote講演19件、一般講演157件の合計179件の講演が計画され、主催者によると、26カ国から240名を超える参加者があったそうである。前回第3回(カナダ・Toronto 2005年6月開催)の参加者数260名、論文数約200件と比べ、量的には同程度であったようである。きちんと数えたわけではないが、日本からの参加者数は前回の41名に比べると少々減っていた印象である。

講演はすべて口頭発表で、3-4セッションが並行して行われた。1件当りの講演時間は、質疑応答を含めKeynote講演20分、一般講演15分であ

った。日本からは高田保之教授(九州大学)がKeynote講演をされた。どのセッションにおいても熱心な討論が行われており、講演時間の短さが気になる場面も多く、本研究分野の活発さを物語っていた。

講演論文の研究分野別内訳を講演論文集の見出しを利用して分類すると、表1のようになる。研究分野および論文数内訳に関しては、前回から目立った変化はなかったように思われる。なお一日目と二日目の午前に行われたPlenary講演の題目と講演者は以下の通りであった。

- “Frontiers in Nanoscience and Technology in the 21st Century and New Models for Research and Education at the Intersection of Basic Research and Technology”, V. Narayanamurti (Harvard University)
- “Microfluidics and Personalized Medicine”, M. Davies and T. Dalton (University of Limerick)
- “Integrated Nanofluidic Devices and Circuits”, A. Majumdar (University of California, Berkeley)

表1 研究分野別の講演論分数

研究分野	Keynote	一般講演
Biomedical	1	6
Boiling	3	11
Condensation	1	3
Device/System Integration	1	6
Electrokinetic Flows	—	8
Electronics Cooling	1	14
Gas Flow	3	23
Heat Transfer	1	12
Lab-on-Chip	1	5
Single-Phase Liquid Flow	1	6
Microfluidics	1	16
Micro-Heat Exchangers	2	9
Micromixers	1	5
Nanofluidics	1	6
Novel Applications	1	4
Optics	—	5
Two-Phase Flow	—	18



図1 講演会場となったLimerick大学

参加者は大学および公立研究機関の関係者が大半であり、企業からの参加者は少ないようであった。一方、会場内にはマイクロチャンネルを対象とした計測器メーカーなど5社ほどのブースが設置されており、参加者の強い興味を引いていた。

3. 会議周辺、その他

本会議が開催された Limerick はアイルランド第3の都市で、米国など大西洋側からの空の玄関口である Shannon 国際空港から東へ 24km ほどのところにある。街は古く、13 世紀に建てられた Limerick 城が街の中心近くにあり、中世の香がいまだに漂っている（図2）。街を離れれば、すぐに妖精が出てきそうなほど深い緑に包まれる（アイルランドでは妖精の存在が信じられているらしい）。会場の Limerick 大学は街の中心からバスで20分程のところにあるが、やはり深緑の中にある。もちろん近くに商店やレストランはない。

参加者の多くは会場から徒歩5分ほどの大学敷地内にある Dromroe Village に宿泊した。Dromroe Village はユニークなデザインの建物群で、大学の学生寮のような施設である（図3）。つまり今回の会議は合宿に近い形式で行われたことになる。宿泊部屋は清潔であり、部屋の大きさに比べ、とても大きな机がある。一方、各部屋には電話やテレビはなく、今、考えてみると勉強するには最適の宿泊施設であったのかもしれない。問題は食事であった。朝食と昼食は提供されるので何とかなるが、夕食はバスで街まで出て行くしかない。筆者の場合、大学の売店で購入したサンドイッチとビスケットで済ませた日もあった。

Banquet は二日目の晩に大学に隣接した Castletroy Park Hotel で開催された。本会議で Conference Chair を務められた Satish G. Kandlikar 教授（Rochester Institute of Technology）と Mark Davies 教授（University of Limerick）による御挨拶のほか Limerick の歴史に関する講話が行われた。美味しいワインと食事に Turner の絵が出てくる講話が加わって、参加者は Limerick の夜を心ゆくまで満喫できたものと思われる。

4. おわりに

私事ではあるが、本会議で微細円管内強制流動沸騰に関する講演発表を行った。これを基に海外の研究者と有意義な意見交換を行うことができた。次回メキシコで開催される ICNMM2007 に向けて、良い研究動機を得ることができたと思っている。



図2 Limerick 城と Shannon 川



図3 宿泊場所の Dromroe Village



図4 Banquet会場でのKandlikar教授（左端）

第4回 ASME 燃料電池国際会議参加報告

*Report on 4th International ASME Conference on Fuel Cell
Science, Engineering and Technology*

近久 武美 (北海道大学)

Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)

e-mail: takemi@eng.hokudai.ac.jp

去る6月19日から21日までの3日間に亘って、ASMEによる第4回燃料電池国際会議がアメリカカリフォルニア州のIrvine市にあるHyatt Regencyホテルで開催された。Irvine市はロサンゼルスから南に車で1時間ほどの小さな街であり、カリフォルニア州立大学の燃料電池研究センターがある。筆者にとっては昨年デトロイト近郊で行われた会議に引き続いて2回目の参加である。全体で約200名程度の参加者があり、日本からは笠木先生、鹿園先生(東大)、恩田先生(豊橋技科大)、伊藤先生(九大)、岩井先生(京大)のほか企業から十数名の参加があった。

初日に3名のキーノートスピーチがあった。まず、Pacific Northwest National LaboratoryのSinghal博士によってSOFC燃料電池のポテンシャル、各種現状技術の紹介、解決すべき課題について説明された。ついでトヨタ自動車の河合氏から自動車用燃料電池の開発経過、ポテンシャル、最新の水素搭載ボンベの構造等について紹介があった。トヨタ自動車では特に航続距離、すなわち水素搭載量を課題視していることが感ぜられた。最後にカリフォルニア州の大気問題委員をしている元UC-Berkley校のSawyer教授からカリフォルニア州における各種燃料電池の実証試験プロジェクトの紹介があった。Sawyer教授は著名な燃焼研究者であるが、現在燃料電池関連の仕事をされていることを知り、驚いた。

キーノートの後、3日間連続して3部屋に分かれて一般講演が行われた。PEM内の気液挙動、触媒、数値モデリング、SOFCのシステム解析、ガスケット技術、燃料電池内の伝熱計算、改質器内の伝熱や触媒技術、水素貯蔵技術、システム性能

計測、運転最適化法、燃料電池自動車のシステム解析、SOFCにおけるバイオマスガス利用等、全141件(講演キャンセルを含む)の様々な講演があった。アメリカの発表数が半数以上を占めていたが、その殆どはアジア系等の非ネイティブアメリカンによるものであった。また、日本、韓国、台湾、中国からほぼ同数程度の講演があった。

昨年はPEM内の水管理等に関する実験がある程度多かったのに対して、今回は特に数値モデリングに関する研究が多かったのが印象的である。シミュレーションはいずれも基本的に類似しており、実験との対比は殆どなされていなかった。この点、我が国ではきめ細かな実験が大学レベルで行われており、シミュレーション開発を推進する上で多少優位と感ぜられた。また、機械学会主催の今回の会議でも電池内現象の計測実験は少なく、機械工学者の活躍はまだまだ初期段階である印象を受けた。この他、昨年よりもSOFCに関する発表が多く、アメリカ政府がSOFCに対してより多くの資金投入をしていることが感ぜられた。

1日目夕刻にUC-Irvineの軽食付き見学会があった。そこでは主としてSOFCに関する研究が行われており、電解質セラミックスの形成からスタック性能計測まで多数の大学院生が参加して研究が行われていた。日本人を含む学生が丁寧に施設を案内してくれた。

カリフォルニアは毎日素晴らしい青空であった。来年は6月18-20日にニューヨークで開催される予定となっており、今後のシンポジウムの動向を見守って行きたいと考えている。

プログラムの詳細:

<http://www.asmeconferences.org/fuelcell06/>

アイアンブリッジ渓谷博物館 The Ironbridge Gorge Museums

吉田 英生 (京都大学)

Hideo YOSHIDA (Kyoto University)

e-mail: yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

1. Coalbrookdale 地方：産業革命のゆりかご

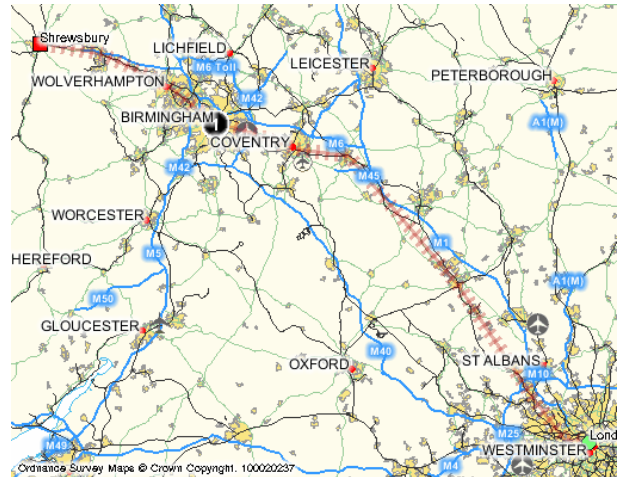
産業革命は、製鉄の生産性向上や蒸気機関による動力の効率化などを重要な柱として 18 世紀に英国で進展した。まず、製鉄の方は、Abraham Darby I (1678~1717) が今からほぼ 300 年前の 1709 年に、コークスを用いた blast furnace (高炉) を、Severn 川に沿う Coalbrookdale 地方に導入したことによって大きな技術革新がなされた。一方、蒸気機関は、これに約半世紀遅れて 1765 年に James Watt (1736~1819) が “separate condenser” を発明したことによって熱効率が大きく飛躍した。

Darby 家では、Abraham Darby I の息子 Abraham Darby II (1711~1763)、さらに孫 Abraham Darby III (1750~1789) が、この地を製鉄の拠点に育て上げた。“The Severn was the second busiest river in Europe.”と言われ、また Coalbrookdale 地方は“The Cradle of the Industrial Revolution”と呼ばれてきた。この渓谷は世界で最初の鉄橋が建設されたため Ironbridge Gorge とも呼ばれる。当時の建物を利用した The Ironbridge Gorge Museums (<http://www.ironbridge.org.uk/>, <http://www.ironbridgeguide.info/>) も擁するこの地域は UNESCO の World Heritage Site (<http://whc.unesco.org/en/list/371>)でもある。

筆者にとっては、この地を訪みたいというかねてからの念願が、2006 年 6 月 22 日によりやく実現した。一般の旅行ガイドブックでは関連する記述が極めて限られているようなので、これから当地を尋ねられる方の便も考慮して、ガイドブック的な情報も含めてご紹介させていただく。(なお、当日の換算レートは£1 = 216 円。)

2. Ironbridge 渓谷への道

図 1 に示すように London の Euston 駅から西北に向けて高速列車 (図 2) に乗ると約 1 時間 30 分で Birmingham New Street 駅に着く。ここで Shrewsbury 方面の路線に乗り換え、速い列車だと



<http://www.transportdirect.info/TransportDirect/en/JourneyPlanning/>

図 1 London から Shrewsbury 方面への鉄道路線



図 2 Euston 駅からの高速列車



図 3 Telford Central 駅と Birmingham 行き列車

約 30 分で Telford Central 駅に至る (図 3)。Telford



図4 Telford Central 駅に展示されている Richard Trevithick の蒸気機関車 (1803)

Central 駅構内には、図4のような Richard Trevithick の蒸気機関車が展示してあり、早くも産業革命の雰囲気を感じさせる。

駅前から、タクシーなら£7.60で20分程度、バスなら、まずは Telford Centre Bus Station まで£0.60で5分程度、ここで Ironbridge 方面(76番, 77番, 99番など)に乗り換えて£1.40で30分程度で Ironbridge 渓谷に着く。なお Shrewsbury 駅からのアクセスも可能であるが、London 方面から来た場合は鉄道が西側に一旦15km以上行き過ぎた分をバスで引き返すことになるので、Telford Central で下車するのがよい。そのことに気付く以前に筆者が購入した London-Shrewsbury (250km 程度) の往復切符は£134 (29,000 円程度) と高い。旅行前に日本国内で例えば Britrail England Pass (4日間) が 28,500 円で入手できるのでお薦めする(http://www.arukikata.com/europe/rail/rail_index.html)。

3. Abraham Darby による製鉄革命

そもそも、なぜこのような渓谷が産業革命の拠点になったのだろうか？ 実はこの地方には、製鉄に不可欠な鉄鉱石、石炭、石灰石を入手する便に加え、Severn 川の水力や水運など、必要な要素がほとんど揃っていたという。

燃料として木炭を用いる製鉄は17世紀に隆盛を極めた結果、周囲の森林を喰いつぶすとともに木炭が不足し燃料価格が高騰していた。石炭は、これに代わる安価な燃料であったが、製鉄に用いると石炭中に含まれる硫黄分によって、鉄がもろくなってしまう。そのような背景の中で、Abraham Darby I は石炭をコークス化した blast furnace により、鉄の生産性を一挙に引き上げたのであった。

コークスを用いる blast furnace の作動原理は BBC のサイト (http://www.bbc.co.uk/history/british/victorians/launch_ani_blast_furnace.shtml) に一目瞭然のアニメーションがあるので説明を省略するが、製鉄に関するいくつかの基本用語を英和対応させて表1にまとめておく。

ここで興味深いのは、炉に空気を送り込む bellows (ふいご) の動力源としての水力利用方法である。Abraham Darby I と II は、この渓谷に6個の貯水池を作って水力を有効に利用したが、それだけでは水が不足したので、一番低いところの池から一番高いところの池に水を引き上げることを考えた。このために、1733年には馬の力、1742年には Newcomen の蒸気機関、1781年には Boulton & Watt の蒸気機関を導入したという。

4. Ironbridge Gorge Museums を歩く

図5に示すように Ironbridge Gorge Museums は広範囲に分散するので全部を回するには車が必要であると思われたが、製鉄関連の博物館と後述する Ironbridge だけなら 2km 程度の範囲なので徒歩で移動可能であった。いずれにせよ、£14 で Annual Ticket & Passport を購入すれば、購入日から1年間、全ての博物館を繰り返し見ることができる。

表1 製鉄に関する基本用語

英 語	日本語	備 考
smelt	製錬する	製鉄では O・Si など除去
iron ore	鉄鉱石	Fe_2O_3 , Fe_3O_4 など
pig iron	銑鉄	炭素の割合が1.7%以上
cast iron	鑄鉄	銑鉄を鑄型にいたしたもの
wrought iron	鍛鉄	puddling process で製造



図5 Ironbridge Gorge の地図

Telford 方面から来て山中に入り, World Heritage Site の看板を見ながら Ironbridge に到着すると, 最初にあるのが Darby Furnace, Museum of Iron, Darby Houses である (図 6). Darby Furnace は, まさに 300 年前の建造物であるから三角形の建物の中で風雨が当たらないようにして大切に保存されており (図 7), およそ 10m 四方のれんが作りである (図 8). 図 9 は背後にある池で, 水力の源であり, れんが橋の上は鉄道になっている.

Darby Furnace と 200m くらい離れて反対側に向き合っている時計台付きの建物が, Museum of Iron である. おみやげ屋とカフェを兼ねた比較的小さな 1~3 階のスペースに 18 世紀の Ironbridge の様子を再現するとともに, Darby Furnace の模型なども陳列されている (図 10, 11).

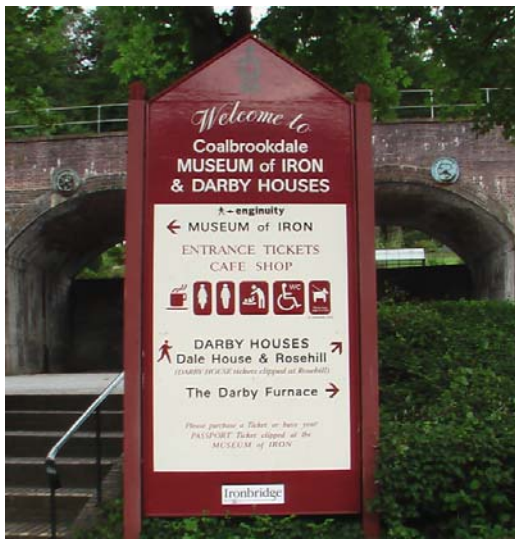


図 6 Ironbridge Gorge の入り口に立っている看板



図 7 Darby Furnace の納められた建物
三角形の建物の高さは 10m 程度ある (筆者が以前にインターネット上の写真で見っていたときは, 人の背丈程度と誤解していたので念のため.)



図 8 Darby Furnace



図 9 Darby Furnace の裏手にある池



図 10 Museum of Iron の内部 (1)



図 11 Museum of Iron の内部 (2)

Museum of Iron の裏手には子供を対象とする Enginuity という博物館がある。図 12 に示すような (赤い) ハンドルをギアで減速した先にワイヤーで蒸気機関車がつながれていて、自分がハンドルを回すことによってした仕事は何 J のエネルギーで、その結果、蒸気機関車が何 m 移動したかという表示が出るようになっていて、重い機関車を非力な子供の力でも動かせるということを実感できることは、驚きに違いない。



図 12 Enginuity にある蒸気機関車移動ゲーム

5. 世界初、文字どおりの Ironbridge へ

Enginuity の横手の道をしばらく登ると峠にさしかかる。この峠を 1km ほど下ってラウンドアバウトを左折すると、Museum of Gorge に着く。この博物館の前はバス乗り場にもなっている。博物館の中には、The Prince of Orange が 1796 年 8 月 12 日に訪問したときの Ironbridge の町並みが全長 10m 以上の模型で示されている。まず Severn 川上に浮かぶおびただしい数の帆船に、前述の“the second busiest river”を実感する。イギリスの町は、れんが造りの建物が中心で現在への連続性が強いので、これらの帆船がなければ、そして道路の舗装を無視すれば、町の賑わいから判断する限り、この模型と屋外の町のどちらが現在なのかかわからなくなるのではないかと思った。博物館の建物の中に入らなくても町中が博物館といっても過言で

はない Ironbridge で唯一現代的なものは、バス乗り場の背後に迫る火力発電所 (<http://www.eon-uk.com/578.aspx>) のれんが色の冷却塔 (図 13) ではなからうか。

Museum of Gorge を出て川沿いに 500m ほど登ると、右手にこの地域の象徴でもある文字通りの Ironbridge が現れる (図 14)。これは Thomas Farnolls Pritchard が 1775 年に設計し、Abraham Darby III が尽力して 1779 年に完成したものである。世界初の鉄製の橋であり、スパン長は 30.6m、使われた鉄は 380 トン。この地域だけでなく産業革命の象徴である。明石海峡大橋 (主塔高さ海面上約 298m) やフランスのミヨー大橋 (The Millau Viaduct : 地上より橋塔の高さ 343m) のような巨大な橋も見慣れてしまった現代人にとっては小さく映るが、当時の鉄の生産量から考えれば巨大プロジェクトであったことは想像に難くない。なお、この橋を渡ってすぐ右側にインフォメーションセンターがあり、さらに上流川に向かえば Jackfield Tile Museum や Coalport China Museum もある。



図 13 Musium of Gorge のそばの火力発電所



図 14 文字どおりの Ironbridge

6. むすび：世紀単位の時間スケールの中で

あらためて考えてみると、エネルギーの単位である[J]も[W]も、温度単位の中で最も本質的な[K]も、すべて英国人にちなんでいる。18・19世紀に世界を引っ張ったのは英国であった。その技術も学術も文化も国境を越え、世界の人類が多大な恩恵に浴することになった。

18世紀といえば、わが国では鎖国下で、元禄15年(1702年)赤穂浪士の討ち入り、吉宗による享保の改革(1716～1745年)、田沼時代(1767～1786年)、松平定信による寛政の改革(1787～1800年)などの時代である。この時期に近代の準備が英国を中心とするヨーロッパでなされたことを実感したのが今回のIronbridge訪問における強い印象である。

同時に、われわれが現在行っている活動や仕事は歴史の中でどのように位置付けられるか、あるいは不幸にも消えてしまわないか。今回300年前から200年前に遡ってみたことを未来に移し替えて、2200～2300年の人々が、われわれのことをどのように評価するのか？ そのような視点から、

全体からはケン粒のような存在ではあるが、自分のこれからの仕事をどうするのか、また残された人生をどのように生きるのか、など目の時間スケールから世紀単位の時間スケールの変換を与えてくれた今回のIronbridge訪問でもあった。

参考文献

以下の文献は、全般的に参考にさせていただいたので、本文中では特に箇所を明記して引用していない。

- [1] Ironbridge A World Heritage Site, The Ironbridge Gorge Museum Trust Ltd and Jarrold Publishing, ISBN 0-7117-0891-6 (1996).
- [2] The Ironbridge and Town, The Ironbridge Gorge Museum Trust Ltd and Jarrold Publishing, (2001).
- [3] Coalbrookdale and the Museum of Iron, The Ironbridge Gorge Museum Trust Ltd and Jarrold Publishing, (1996).
- [4] 森本哲郎, 文明の主役－エネルギーと人間の物語－, 新潮社 (2000).



付図 The Ironbridge Gorge Museums の観光パンフレットより

「風水」 沖縄に見る Heart Transfer 技術
 “Hunsi” Heart Transfer Technique in Okinawa

Hea^rt Transfer

瀬名波 出 (琉球大学)

Izuru SENAHA (University of the Ryukyus)

e-mail: senaha@tec.u-ryukyu.ac.jp

夏といえば青い空、青い海、南の島のリゾート (+冷えたビール!)... という連想からか?今回は沖縄在住の(ビール好き)会員から一風変わった沖縄観光案内をしたいと思います。

さて唐突ですが「風水」というものをご存知でしょうか。最近、特に主婦層に人気で一般的にはインテリア開運術の類と知られています。会員の中にも黄色や青色などの幸運の風水グッズが家にあるという方いらっしゃいませんか?ただし、今回お話しするのは流行のインテリア風水とは違い、中国から沖縄に伝わった「風水」(沖縄ではフンシと呼びます)技術について紹介したいと思います。

風水に詳しい土木・建築系の先生に聞くと、元来、風水は紀元前古代中国で生まれた環境・都市・住宅に関しての総合的な技術・学問だそうです。中国と縁の深い沖縄では琉球王国時代からこの風水技術を積極的に取り入れて都市計画等を図ってきました。その最たる大事業が首里城建設で、その場所・建築にいたるまで風水によって定められたようです。またその思想・技術は広く民衆にも伝えられ、以来、現在まで約400年の間、風水文化が脈々と続いており現在の沖縄独特の文化・風習につながっています。この風水ですが、誤解を恐れずにあえて簡単にまとめると「方位、地形から土地に流れる気(エネルギー)を知り、それを人の健康・幸福のために変える技術」と言えます。つまり「気(と呼ばれるエネルギー)の対流交換技術」すなわち「Heart(≡気)Transfer技術」とみなすことができそうです(ちょっと強引ではありますがお許しを)。このようにみなすことで従来の風水説にはない面白い立場から沖縄を見ることができそうです。いくつかの例を紹介します。

まず沖縄の古い民家の特徴に屋敷と門の間に屏風(ヒンプン)という大きな衝立があります。大きさは大体、人の目線より高いくらいでしょうか。これは実用的には通りから屋敷内の目隠しをする

役目がありますが、実はこれも風水思想からのものです。その由来は外から悪い気が入ってこないよう、また内部の良い気を逃がさないためのものだそうです。ただしそれだけですと単に蓋(ふた)としての効果しかないようにも思えます。そこで対流場の知識を応用し解釈すると、ヒンプンによりその背後にカルマン渦が発生することで家の内外の「気(エネルギー)」を交番的に交換させる意味があったのではないかと考えられます。実際に、昔は家の大きさに応じてこのヒンプンのサイズを決める式もあったようです。残念ながらその式は調べられませんでした。それが最適な渦発生に関する式だったらと想像すると面白いものです。

また沖縄ではT字路の突き当たりや塀の角に「石敢當」という魔よけの石碑が多くあります。これも気の交換という立場から考えると、突き当たりや塀の角などの岐点および離点では一方向的な流れ場となることより悪い気がたまりやすい場となるので、それを払うためのものと理解できます。さらに昔ながらの集落、屋敷、そして亀甲墓とよばれる沖縄独特の親族一門のお墓ですが、基本的には同様のコの字型となっています。また琉球王朝時代に植林された防風林がありますが、それも気を取り入れやすいようにわざと直列ではなく波状に植えたようです。これらについてもそれぞれをキャビティ形状および波状流路とみなして気(エネルギー)交換を考えると面白そうです。

以上、沖縄ではいろいろなところで「風水」(≡Heart Transfer)的なものを見つけることができます。改めて見ると風水のその字も「風と水」ですので伝熱工学になじみ深いものです。これを温故知新と呼んでいいかわかりませんが、昔からある身近な風景・文化のなかにある伝熱工学に通ずるような事象に新鮮な驚きを覚えます。ぜひ沖縄にお越しの際には、このように「風水」的視点から観光されるとおもしろいのではないのでしょうか?

行事カレンダー

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名(開催地, 開催国)	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2006 年					
9 月	8 日(金)	東海支部企画第 13 回伝熱コロキウム「最新の環境・エネルギー技術」 名古屋大学 ベンチャービジネスラボラトリー(VBL)	06.8.25	名古屋大学工学研究科化学・生物工学専攻 板谷義紀: yitaya@nuce.nagoya-u.ac.jp Tel: 052-789-3378, Fax: 052-789-3271 http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/	2006.7
10 月	14 日(土) ～ 15 日(日)	東北支部秋季伝熱セミナー 田沢湖高原リゾートホテル ニュー スカイ(水沢温泉郷)	06.9.29	秋田工業高等専門学校機械工学科 土田 一: tsuchida@akita-nct.ac.jp Tel: 018-847-6035, Fax: 018-847-6041	2006.7
11 月	10 日(金) ～ 11 日(土)	東海支部企画第 17 回東海伝熱セミナー ウェルハートピア長島(厚生年金ハートピア長島)	06.10.20	三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 丸山直樹 naoki@mach.mie-u.ac.jp Tel: 059-231-9386, Fax: 059-231-9663 http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/17th_seminar2006.htm	2006.7
2007 年					
5 月	23 日(水) ～ 25 日(金)	第 44 回日本伝熱シンポジウム 長崎ブリックホール			

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	問合せ先	掲載号
2006 年					
7 月	24 日(月) ～ 26 日(水)	第 34 回可視化情報シンポジウム(工学院大学 新宿校舎)		東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 川口達也 Tel: 03-5734-3090, Fax: 03-5734-3917 e-mail:kawat@mep.titech.ac.jp	
7 月	27 日(木) ～ 28 日(金)	文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発 第 1 回「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」シンポジウム (東京大学生産技術研究所 東京都目黒区)		東京大学生産技術研究所 計算科学技術連携研究センター Tel: 03-5452-6661, Fax: 03-5452-6662 e-mail:registration@rss21.iis.u-tokyo.ac.jp	
8 月	4 日(金) ～ 6 日(日)	日本混相流学会 年会講演会 2006(金沢工業大学 石川県石川郡)		金沢工業大学工学部機械工学科 日本混相流学会年会講演会 2006 実行委員会事務局 齊藤康弘 Tel:076-248-9182, Fax:076-294-6704 e-mail:y-sugi@neptune.kanazawa-it.ac.jp URL:http://www.kanazawa-it.ac.jp/jsmf2006/	
8 月	5 日(土)	第 25 回混相流シンポジウム(金沢工業大学 石川県石川郡)		金沢工業大学工学部機械工学科 日本混相流学会年会講演会 2006 実行委員会事務局 実行委員長 佐藤恵一 Tel: 076-248-9214, Fax: 076-294-6704 e-mail:y-sugi@neptune.kanazawa-it.ac.jp URL:http://www.kanazawa-it.ac.jp/jsmf2006/	
8 月	13 日(日) ～ 18 日(金)	The International Heat Transfer Conference IHTC-13		IHTC-13 Conference Managers Tel: +61 2 9265 0700 Fax: +61 2 9267 5443 e-mail: 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)		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)		富山県立大学工学部 機械システム工学科 教授 石塚 勝 Te: 0766-56-7500, Fax: 0766-56-6131 e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp	
9 月	14 日(木) ～ 15 日(金)	日本機械学会関西支部第 285 回講習会「企業の実例に学ぶ設計の勘所」 (大阪科学技術センター 大阪市)	06.9.7	社団法人 日本機械学会関西支部 Tel: 06-6443-2073, Fax: 06-6443-6049 e-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp	
9 月	15 日(金) ～ 17 日(日)	日本流体力学会年会 2006 (九州大学筑紫キャンパス 福岡県春日市)		九州大学大学院工学研究院環境都市部門(水工)日本流体力学会 年会 2006 実行委員会 小松利光 e-mail:nenkai06@civil.kyushu-u.ac.jp	
9 月	25 日(月) ～ 29 日(金)	5th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (Dubrovnik, Croatia)		Professor Yasutaka Nagano, Co-Chairman Department of Mechanical Engineering Nagoya Institute of Technology e-mail: thmt-06@heat.mech.nitech.ac.jp	2005.11

行事カレンダー

9 月	27 日(水)	セミナー「実用的省エネルギー新技術への取り組み」(大阪産業創造館 大阪市)			(社)化学工学会関西支部 Tel: 06-6441-5531, Fax: 06-6443-6685 e-mail: apply@kansai.scej.or.jp http://www.kansai.scej.or.jp/2006/180927energy.html	
10 月	15 日(日) ～ 18 日(水)	International Workshop on Process Intensification (IWPI2006)(神戸大学百年記念会館, 神戸市)			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	
10 月	20 日(金) ～ 21 日(土)	日本機械学会 No.06-29 第 10 回スターリングサイクルシンポジウム(神奈川大学工学部, 横浜市)		'06.9.11	(社)日本機械学会 滝本 Tel: 03-5360-3504, Fax: 03-5360-3507 e-mail: takimoto@jsme.or.jp	
10 月	26 日(木) ～ 27 日(金)	Sixth International Symposium on Advanced Fluid Information(AFI-2006) (Institute of Aerospace Technology, JAXA, Tokyo, JAPAN)			AFI-2006 secretariat Institute of Aerospace Technology, Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Tel: +81-422-40-3210 Fax : +81-422-40-3245	
11 月	7 日(火) ～ 9 日(木)	第 3 回流動ダイナミクスに関する国際会議 宮城県松島町 ホテル大観荘	'06.10.2		21 世紀 COE プログラム「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」リーダー 円山重直 (東北大学流体科学研究所) http://www.ifs.tohoku.ac.jp/21coe/icfd2006/index.html	2006.7
11 月	22 日(水) ～ 23 日(木)	第 14 回プラスチック成形加工学会秋期大会 元気な中部から創り出そう新しい成形技術 (岐阜大学 岐阜市)			岐阜大学工学部機械システム工学科 熊田雅弥(実行委員長), 三松順治(代表幹事) Tel: 058-230-1892 学科共通 e-mail: pls2006@comb.mech.gifu-u.ac.jp (秋季大会関連の問合せ先)	
11 月	24 日(金) ～ 25 日(土)	日本機械学会熱工学部門 2006 年熱工学コンファレンス (慶應義塾大学理工学部矢上キャンパス, 横浜市)		'06.9.22	慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科 菱田研究室内 Tel: 045-566-1739, Fax: 045-566-1720 e-mail: tedconf06_secret@mh.sd.keio.ac.jp http://jsme.kir.jp/Kouenkai/tedconf06/	
12 月	16 日(土)	計算力学技術者(1 級)及び(2 級)(固体力学分野の有限要素法解析技術者)ならびに計算力学技術者(2 級)(熱流体力学の解析技術者)に関する認定事業			日本機械学会能力開発促進機構 (社)日本機械学会 尾崎 TEL: 03-5360-3511, FAX: 03-5360-3509 e-mail: ozaki@jsme.or.jp http://www.jsme.or.jp/cee/cmnintei.htm	
12 月	18 日(月) ～ 20 日(水)	第 20 回数値流体力学シンポジウム (名古屋大学 名古屋市)	'06.9.30	'06.10.30	名古屋大学 エコトピア科学研究所 シンポジウム実行委員会事務局 長谷川達哉 Fax: 052-789-4506 e-mail: cfd20@civil.nagoya-u.ac.jp	
2007 年						
1 月	3 日(水) ～ 6 日(土)	International Conference on Thermal Issues in Emerging Technologies: Theory and Applications (ThETA)	'06.7.3	'06.9.4	http://www.thetaconf.org 国内連絡: 中山 恒 e-mail: watnakayama@aol.com	2006.4
12 月	2 日(日) ～ 7 日(金)	第 9 回国際ガスタービン会議 (京王プラザホテル 東京都新宿区)	'06.12.31		Gas Turbine Society of Japan Fax: +81-3-3365-0387 e-mail: igtcrainbow.dti.ne.jp http://www.soc.nii.ac.jp/gtsj/2006/IGTC2007.pdf	

社団法人日本伝熱学会第44期(平成17年度)総会議事録

1. 日 時 平成18年6月1日(木) 15時30分～16時45分
2. 場 所 名古屋市熱田区熱田西町1番1号 名古屋国際会議場 レセプションホール
3. 正会員数 1,194名
4. 出席者 687名(うち委任状出席548名). これは定足数(正会員数の過半数)を上回り, 総会は成立した.
5. 議事経過
議長に庄司 正弘氏を選出し, 次の議案について逐次審議した.

第1号議案 第44期事業報告の件

議長より, 社団法人日本伝熱学会第44期(平成17年度)総会議案(以下, 総会議案と呼ぶ)の第1号議案第44期事業報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第2号議案 第44期会務報告の件

議長より, 総会議案の第2号議案第44期会務報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第3号議案 平成17年度収支決算の件

議長より, 総会議案の第3号議案平成17年度収支決算について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第4号議案 平成18年度事業計画の件

議長より, 総会議案の第4号議案平成18年度事業計画について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第5号議案 平成18年度収支予算案の件

議長より, 総会議案の第5号議案平成18年度収支予算案について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第6号議案 日本伝熱学会賞の授賞の件

議長より, 総会議案の第6号議案日本伝熱学会学術賞・技術賞・奨励賞・優秀プレゼンテーション賞授賞について選考経過についての報告がなされた. 本年度の日本伝熱学会賞受賞者は, 次のとおりである.

- | | |
|-----------|--|
| 日本伝熱学会学術賞 | ・代表研究者: 須賀 一彦 (大阪府立大学) |
| | 共同研究者: Timothy J. Craft (The University of Manchester) |
| | Hector Iacovides (The University of Manchester) |
| | ・代表研究者: 小山 繁 (九州大学) |
| | 共同研究者: 桑原 憲 (九州大学) |
| | 中下 功一 (株式会社デンソー) |
| 日本伝熱学会技術賞 | ・代表研究者: 吉永 信也 (日立アプライアンス社) |
| | 共同研究者: 増田 正 (関西電力) |
| | 森本 勝也 (中部電力) |
| | ・代表研究者: 田中 清志 ((財)機械振興協会) |
| | 共同研究者: 岡本 章 (NEC 東芝スペースシステム(株)) |
| | 伊地智幸一 ((財)無人宇宙実験システム研究開発機構) |
| 日本伝熱学会奨励賞 | 村上 陽一 (東京大学) |

日本伝熱学会優秀プレゼンテーション賞 (所属は第42回日本伝熱シンポジウム当時)

- | | |
|----------------|----------------|
| 宋 吉達 (横浜国立大学) | 安藤 広敏 (慶応義塾大学) |
| 熊谷 尚憲 (大阪大学) | 宮内 雄平 (東京大学) |
| 塚原 隆裕 (東京理科大学) | 藤田 平 (金沢大学) |
| 佐々木宏衛 (千葉工業大学) | 原口 昇 (東京大学) |
| 松下 洋介 (東北大学) | 千葉紘太郎 (北海道大学) |
| 西田 耕介 (東京工業大学) | 茅野 健太 (豊橋技科大) |
| 斎木 悠 (東京大学) | |

第7号議案 名誉会員の顕彰の件

議長より、総会議案の第7号議案名誉会員の顕彰について以下のとおりに名誉会員顕彰の提案がなされ、満場一致でこれを可決した。

荒木 信幸 本田 博司

第8号議案 第45期役員選出の件

議長より、総会議案の第8号議案第45期役員選出について以下のとおりに次期役員の提案がなされ、満場一致でこれを可決した。

定款第16条第2項により退任する役員

理事（会長）	庄司 正弘	理事（副会長）	勝田 正文
理事（副会長）	久角 喜徳		

定款第16条第1項により退任する役員

理事	池川 昌弘	理事	円山 重直
理事	花村 克悟	理事	竹中 信幸
理事	逢坂 昭治	理事	森 治嗣
理事	康 倫明		
監事	工藤 一彦		

定款第16条第3項により退任する役員

理事 長野 靖尚

第45期に新たに選任される役員

定款第16条第2項により選任される役員

理事（会長）	望月 貞成	理事（副会長）	牧野 俊郎
理事（副会長）	康 倫明		

定款第16条第1項により選任される役員

理事	山田 純	理事	工藤 一彦
理事	稲村 隆夫	理事	中部 主敬
理事	村上 幸一	理事	大島 伸行
理事	石塚 勝		
監事	山田 幸生		

定款第16条第3項により選任される役員

理事 茂地 徹

定款第16条第2項ただし書きにより再任される役員

理事（副会長） 宮内 敏雄

第9号議案 議事録署名人選任の件

議長より、本日の議事の経過を議事録にまとめるにあたり、議長に加えて議事録署名人2名を選任したい旨の提案があり、協議の結果、勝田 正文氏、宮内 敏雄氏の2名を選任した。

以上により、本日の議事を終了した。

平成18年6月1日

社団法人日本伝熱学会第44期(平成17年度)総会

議長 庄司 正弘 _____ 印

議事録署名人 勝田 正文 _____ 印

議事録署名人 宮内 敏雄 _____ 印

日本伝熱学会東海支部企画 第13回 伝熱コロキウム 「最新の環境・エネルギー技術」

日本伝熱学会東海支部では標記のコロキウムを下記の通り開催いたします。ふるってご参加くださいませうご案内申し上げます。

記

日 時： 平成18年9月8日（金）13：30～19：00
場 所： 名古屋大学 ベンチャービジネスラボラトリー（VBL）
ベンチャーホール
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
ホームページ <http://www.nagoya-u.ac.jp/>
参 加 費： 無料
ただし、懇親会参加の場合 3,000円程度
定 員： 50名（先着順に受付）

プログラム

13:30～13:40 日本伝熱学会東海支部・支部長挨拶（森田支部長）

13:40～17:00 話題提供＜4件の講演＞

「木質系バイオマスの分散型総合利用システム」

名古屋大学工学研究科 小林 信介 氏

「木粉直噴バーナの開発とスターリングエンジン発電システムへの適用」

シーテック（株）技術開発部 西山 明雄 氏

「燃料電池用マイクロチャンネルリアクタ」

（株）豊田中央研究所 志満津 孝 氏

「真空加熱分離方式による PCB 除去技術の効率化」

愛知電機（株）開発・環境事業部 田中 良 氏

17:30～19:00 懇親会

参加申し込み方法：

「第13回伝熱コロキウム参加申込み」と明記の上、(1)お名前（ふりがな）、ご所属、(2)ご住所、(3)ご連絡先電話番号、FAX 番号、E-mail アドレス（可能ならば）、(4)講演会のみ or 講演会＋懇親会 or 懇親会のみ、参加の別をご記入の上、電子メール、郵送またはファックスにて下記までお申し込み下さい。できるだけ研究室などでまとめてお申し込みいただければ幸いです。（懇親会参加費は当日受付にて徴収します。）

申込期限： 平成18年8月25日（金）

申込先：〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学工学研究科 化学・生物工学専攻 板谷 義紀

電話：052-789-3378・FAX：052-789-3271 E-mail: yitaya@nuce.nagoya-u.ac.jp

支部HP http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/

日本伝熱学会 東北支部秋季伝熱セミナーのご案内

共催：東北伝熱懇話会

日 時：平成18年10月14日（土）、15日（日）

場 所：秋田県仙北市田沢湖生保内字下高野73-3

田沢湖高原リゾートホテル ニュー スカイ（水沢温泉郷）

TEL. 0187-46-2006 <http://www8.ocn.ne.jp/~newsy/>

参加費：会員および非会員（一般）16,000円 学生 10,000円

（ただし、セミナーテキスト、懇親会費、宿泊費を含みます）

定員：50名

申し込み：平成18年9月29日（金）

ただし、申込者数が定員に達し次第、申し込み受付を終了いたします。

日 程：

10月14日（土）

12:00～13:00 受付

13:00 開会挨拶 日本伝熱学会 東北支部長 横山 孝男

13:10～17:00 講演会

講 演

□秋田県立大 システム科学技術学部 教授 日向野 三雄

「秋田美人と酒造りに関する伝熱学的考察」

□秋田大学 工学資源学部 助教授 足立 高弘

「海洋温度差発電の現状紹介」

□秋田マグナス協会 事務局長 和久 礼次郎

「国内外の風力発電の現状と将来展望」

— 新型マグナス風車開発の現状と今後の展望 —

□秋田大学 教育文化学部 大学院生 小松 靖

「技術史の導入による教育効果」

17:00～16:30 休憩・入浴

18:30～20:30 懇親会

10月15日（日） 朝食後解散

申し込み：E-mail あるいは FAX にてお申し込みください。

標題に「東北支部秋季伝熱セミナー申し込み」と明記の上、参加者の氏名、所属、一般・学生の区別、連絡先住所、電話番号、FAX 番号、E-mail アドレスをご記入ください。

申し込み先：秋田工業高等専門学校 機械工学科 土田 一

E-mail : tsuchida@akita-nct.ac.jp TEL 018-847-6035 FAX 018-847-6041

第3回流動ダイナミクスに関する国際会議

この度、下記の要領で平成18年11月7日（火）～9日（木）に標記会議が開催されます。会議は風光明媚な松島で開催致しますので、皆様には是非ともご参加いただきたく宜しくお願い申し上げます。詳しくは下記のホームページをご覧ください。

<http://www.ifs.tohoku.ac.jp/21coe/icfd2006/index.html>

21世紀 COE プログラム「流動ダイナミクス国際研究教育拠点」リーダー 円山重直（東北大学流体科学研究所）、第3回流動ダイナミクスに関する国際会議 実行委員長 中橋和博（東北大学工学研究科）

アブストラクトの締め切り：10月2日（月）

著者への採択通知：10月13日（金）

事前登録締め切り：10月27日（金）

日本伝熱学会東海支部企画 第17回東海伝熱セミナー

日本伝熱学会東海支部では、第17回東海伝熱セミナーを下記の通り開催致します。本年度は特別企画としまして、多年にわたり日本伝熱学会の活動にご尽力され、来年3月にご退職されます先生方に、これまでのご研究、随想などをお話しして頂くことに致しました。また、企業の方々にも最新の伝熱関連技術について話題提供して頂く予定です。東海地区はもとより、全国各地から多数のご参加をお待ちしております。

記

期 日： 平成18年11月10日（金）午後～11日（土）午前
会 場： ウェルハートピア長島（厚生年金ハートピア長島）
〒511-1109 三重県桑名市長島町松之本 604-2
Tel：0594-42-2661 Fax：0594-42-3658 http://www.kjp.or.jp/hp_100/
交通：自動車；東名阪自動車道・長島 I.C より県道 168 号線經由約 5 分，2km.
電 車；近鉄長島駅（近鉄名古屋線）下車，送迎バス 13 分またはタクシー10 分。当日は，臨時の送迎バスを予定しています。詳しくは参加申込みを頂いた方に改めてご連絡します。
参加費： 一般（会員，非会員） 14,000 円（資料代，宿泊費，懇親会費含む）
学生（会員，非会員） 9,000 円（同）
ただし，宿泊無し（講演会，懇親会のみ参加）の場合は，一般，学生ともに 6,000 円。
参加費は，当日受付にて徴収致します。
定 員： 60 名
スケジュール：
11月10日（金）
12:30 受付
13:00 支部長挨拶 森田 昭生（三菱重工業）
13:10～17:30 講演会
「私の大同工大40年間の研究回顧録」
中村 肇（大同工業大学教授）
「乱流伝熱の実験研究とシミュレーションの融合を求めて
—失敗は成功の元を信じて続けた研究—」
長野 靖尚（名古屋工業大学教授，名誉理事）
企業からの話題提供（依頼中）
18:30 懇親会（18:30～ 21:00）
11月11日（土）
9:00～11:40 講演会
「『からくり』と『あやつり』に終始して」
加藤 征三（三重大学教授）
「機能性流体の流動・伝熱特性」
熊田 雅彌（岐阜大学教授）
企業からの話題提供（依頼中）
11:40 閉会
12:00 解散
※最終プログラムにつきましては，下記のセミナーホームページに後日掲載致します。
※都合により，講演順序の変更があることをご了承ください。

参加申し込み方法：

「第17回東海伝熱セミナー申し込み」と明記の上，(1)申込者氏名（ふりがな），(2)一般または学生の区別，(3)所属，(4)連絡先（住所，電話，Fax，e-mail），(5)その他ご要望など，をできるだけ e-mail にてお申し込み下さい。（郵送，Fax でも可）。宿泊は相部屋となりますので，お申し込み時にご希望をお知らせ頂ければ考慮致します。

申込期限： 平成18年10月20日（金）

申 込 先： 〒514-8507 津市栗真町屋町 1577 三重大学大学院 工学研究科機械工学専攻 丸山 直樹
e-mail：naoki@mach.mie-u.ac.jp，Tel: 059-231-9386，Fax: 059-231-9663
東海支部 HP: http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/

セミナーHP: http://www.es.mach.mie-u.ac.jp/~netsu_tk/17th_seminar2006.htm



編集出版部会からのお知らせ ー各種行事・広告などの掲載についてー



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値ある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット (HP: ホームページ, ML: メーリングリスト) で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対 象	対 応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています。)
本会 (支部) 主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載, MLでも配信	申込者は、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌: 1件当たり4分の1ページ程度で掲載 (無料) HP: 行事カレンダーに掲載しリンク形成 (無料)	申込者は、まず内容を説明する資料を総務部会長に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務部会長より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長 (会誌担当) と広報委員会委員長 (HP 担当) に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募 (伝熱に関係のある分野に限る)	会誌: 掲載せず HP: 条件付き掲載 (無料) ML: 条件付き配信 (無料)	申込者は、公募内容を総務部会長に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務部会長より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長 (HP 担当)・総務担当副会長補佐評議員 (ML 担当) に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌: 条件付き掲載 (有料) HP: 条件付き掲載 (バナー広告のみ, 有料)	申込者は、編集出版部会長 (会誌担当) または広報委員会委員長 (HPバナー広告担当) に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【今期 (2007年5月24日の総会まで) の連絡先】

- ・総務部会長: 山田 純 (芝浦工業大学): jyamada@sic.shibaura-it.ac.jp
- ・編集出版部会長: 吉田英生 (京都大学): yoshida@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長: 芝原正彦 (大阪大学): siba@mech.eng.osaka-u.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員: 店橋 護 (東京工業大学): mtanahas@mes.titech.ac.jp
- ・事務局: 倉水裕子: office@htsj.or.jp

【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはtextファイルをお願いします。
- ・HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・MLで添付ファイル配信する場合は、pdfあるいはjpgファイルで2MB以下をお願いします。

入会手続きについて

学会HP <http://www.htsj.or.jp/index-j.html>

から申込み用紙をダウンロードして下さい。詳細はHPを参照願います。

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 (総務担当副会長) 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

45 期新入会員 (2006. 4. 6～2006. 7. 19) 正 27 名・学生 38 名

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
正	平田 哲哉	エスベック㈱	学	谷口 和也	芝浦工業大学
学	栗田 英一郎	芝浦工業大学	学	堀本 太一	広島大学
学	小田 陽子	九州工業大学	学	末岡 裕章	広島大学
学	竹内 一平	名古屋大学	学	河野 啓史	広島大学
学	小笠原 仁	秋田県立大学	学	坂寄 純一	東京工業大学
学	山内 智裕	名古屋大学	学	鳥居 大地	東北大学
学	大黒 優也	中央大学	学	中野 雄大	東北大学
学	松本 健吾	中央大学	学	国枝 雅敏	名古屋大学
学	伊藤 優馬	東京大学	正	上之 和人	名古屋大学
正	川崎 哲也	株式会社 日本商社	正	大門 靖彦	住友金属工業㈱
学	岡島 淳之介	東北大学	正	鮫島 良二	株式会社 タクマ
正	福谷 和久	㈱神戸製鋼所	正	三木 康臣	北見工業大学
学	石井 秀和	慶應義塾大学	正	川畑 育生	日立設備エンジニアリング㈱
学	谷 啓太	九州大学	学	平井 隆之	早稲田大学
学	佐々木 誠一	慶應義塾大学	学	佐藤 允	東京工業大学
学	小田 祐介	大阪大学	学	志村 祐康	東京工業大学
学	岡野 僚太	広島大学	正	終平 啓	住友電気工業㈱
学	エリック エイナルソン	東京大学	正	小林 裕	三菱電機㈱
正	若嶋 振一郎	富山大学	正	良尊 弘幸	ソニー株式会社
学	平松 昌人	東京大学	正	筒井 裕二	松下電器産業株式会社
学	上野 雅之	玉川大学	正	吉永 隆夫	大阪大学 基礎工学部
学	吉高神 達	山形大学	正	柿山 史郎	住友軽金属工業株式会社
正	行本 正雄	中部大学	学	Smhaimi Illias	群馬大学
正	向 創太	㈱伊勢屋機械製作所	学	笠原 邦彦	東京大学
正	嶋貫 宏泰	㈱デンソー	学	村上 毅	京都工芸繊維大学
正	佐藤 郁	パナソニックコミュニケーションズ	学	小林 祐太	横浜国立大学
正	小松 喜美	秋田大学	学	平島 大輔	東京工業大学
正	山本 義暢	名古屋大学	正	山口 秀樹	大阪ガス (株)
正	田之上 健一郎	山口大学	正	堀 美知郎	大同工業大学
学	吉田 貴洋	芝浦工業大学	正	角 宗司	三浦工業株式会社
学	辻井 隆也	信州大学	正	稲富 誉也	株式会社 東芝 電力システム社
学	佐々木 一裕	筑波大学	正	中尾 一成	三菱電機㈱ 先端技術総合研究所
学	Cirtog Adina	東京農工大学			

45 期寄付会費 (2006. 4. 1～2006. 7. 19) 6 名 12,000 円

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
正	勝田 正文	早稲田大学	正	日向野 三雄	秋田県立大学
正	河村 洋	東京理科大学	正	久角 喜徳	大阪ガス
正	竹中 信幸	神戸大学	正	吉田 英生	京都大学

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

編集出版部会ノート：革新的エネルギー材料技術と伝熱

Note from the Editorial Board: Thermal Science for Innovative Energy Materials

オイルショックからオイルピークへとタームが変わり、あらためて人類はエネルギーの有限性と向き合う時代になった。技術的なエネルギー対策として、未利用熱エネルギーの有効利用が再認識されつつある。例えば内燃機関においてエンジン自体の効率はここ数十年の切磋琢磨ではほぼ飽和しつつある。内燃機関の効率向上において、これまで“排”気されてきた熱エネルギーの有効利用が注目されつつある。すなわち、エンジン効率 20%であれば、残り 80%は排気熱であり、後者の活用が見直されつつある。ハイブリッドや燃料電池自動車では室内空調分の熱源不足が燃費効率に直結する課題にもなっている。このように排気エネルギーを有用なエネルギーとして用いることが注視されつつある。熱エネルギー活用技術は地味な分野であるが、昨今の「もったいない」ブームを先取りした分野であるともいえる。

今回各位のご理解を頂き、本誌のフィールドから少し離れているようではあるが、ヒートポンプを中心とした熱エネルギー変換・貯蔵材料を特集することにご賛同を頂いた。幸いにも、この分野で第一線で活躍されている方々に執筆を頂き、世界基準の内容となったと自賛している。先ずこの機会を実現できたことに対し、執筆者ならびに関係各位に御礼を述べたい。

上述でフィールドが離れているとのべたが、熱エネルギー材料において、伝熱現象は極めて重要な要因である。またある意味、伝熱現象の最も前衛的研究分野であるともいえよう。吸着式または化学式ヒートポンプにおいては粒子層が用いられる。層内では反応ガスの移動、反応と熱移動が同時に進行する。同時に粒子層の密度、空隙率、熱容量、粒子自体ならびに粒子層の各熱伝導度が非定常に変化する。ま

た、材料としては繰り返しの吸収・脱離反応操作が必要であるが、繰り返しを進めるうちに伝熱物性も変化しえる。熱エネルギー変換・貯蔵材料技術はこのような複雑な現象を活用し、また制御して実用化に進む必要がある。伝熱性能はとくに重要であり、高効率な熱エネルギーの貯蔵、放出において伝熱の高度化は欠かせない。電熱の高度化のための原理は伝熱の教科書に基づくものの、実用的な高度化に向けては教科書の想定外の現象解明に多大な時間と労力を要する。

熱エネルギー変換・貯蔵技術分野が地味である理由は、エネルギー効率が低いながらコストが高く従来技術に比べ不利なためである。新技術の導入より、安価な一次エネルギーをそのまま消費することが簡易で確実であると判断されることが多いからである。熱エネルギー変換・貯蔵技術においては、その高度化のためには材料高効率化が最優先に重要である。すなわち革新的エネルギー材料が必要となる。そこで今回は“革新的エネルギー材料”を主題とすることを執筆陣に依頼した。幸い、全ての著者と革新材料の必要性を共有することができ、各自が各自の専門分野から課題抽出、対応策をお示し頂いた。そして特集を通して自ずから伝熱技術の重要性が明確になったと思っている。これらの点では世界初の特集であったとも思っている。

この特集が学会員各位のこの分野に関心をむける縁となり、さらにご自身の技術をこの分野で発揮頂きこの分野がより開かれることとなれば、編者として望外の喜びである。

加藤之貴（東京工業大学）

Yukitaka Kato (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: Yukitaka@nr.titech.ac.jp

副会長 牧野俊郎（京都大学）
委員

部会長 吉田英生（京都大学）

(理事) 辻 俊博（名古屋工業大学）	村上幸一（愛媛大学）	小山 繁（九州大学）
(評議員) 近久武美（北海道大学）	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）	黒坂俊雄（神戸製鋼所）
永井二郎（福井大学）	加賀邦彦（三菱電機）	

TSE チーフエディター 河村 洋（東京理科大学） 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 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

ISSN 1344-8692

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

Vol. 45, No. 192

2006 年 7 月 発行

THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING
(日本伝熱学会論文集)

ISSN 0918-9963

Vol. 14, No. 3

July, 2006

発行所 **社団法人 日 本 伝 熱 学 会**

〒113-0034 東京都文京区湯島 2-16-16

Tel : 03-5689-3401, Fax : 03-5689-3401

郵便振替 00160-4-14749

Published by The Heat Transfer Society of Japan

16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,

Tokyo 113-0034, Japan

Tel/Fax : +81-3-5689-3401