

# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 Vol. 54, No. 229  
2015. 10

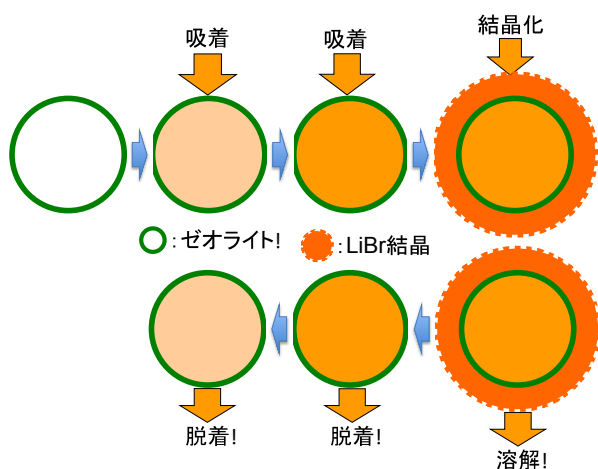
*HTSJ*

◆特集：反応や物質移動を伴う熱利用機器の最新研究

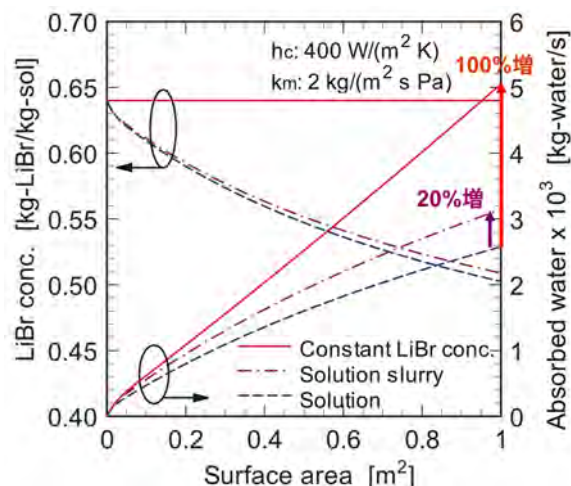


左図：過飽和 LiBr 水溶液の結晶成長状態

右図：過飽和 LiBr 水溶液の微細結晶スラリー状態



ゼオライト周りへの LiBr 微細結晶成長概念図



微細結晶スラリー吸収液の蒸気吸収性能

### LiBr 微細結晶スラリーによる吸収式ヒートポンプの性能向上効果

#### Advanced Effect of Vapor Absorption Performance into Fine LiBr Crystal Particle Slurry

吸収式ヒートポンプの性能向上のため、吸収液濃度を高くして飽和蒸気圧を低くすることで蒸気吸収能力を高くすることが一つの方法である。しかし、高濃度で操作すると飽和濃度になり結晶成長して操作が不能になるリスクがある。従来、種々の溶解度の高い塩基や有機物利用する吸収液が提案されているが、著者らは LiBr/水系吸収液について、写真のように大きな結晶塊への成長を抑制して安定的にスラリー化する方法を発見した。このときのスラリー化は概念図に示すように、吸着剤として吸収液に分散させたゼオライト微粒子に吸着した LiBr が核となり、飽和濃度以上ではゼオライト粒子周りに結晶が成長すると考えられる。本 LiBr 微細結晶スラリーを吸収液に利用したときの蒸気吸収性能を理論的に解析したところ、通常の均質な吸収液を用いた場合に比べ、吸収速度が約 2 倍に促進されることを明らかにした。このような性能向上効果はラボ試験結果からも確認しており、詳細は本誌「排熱回収型吸収式ヒートポンプによる高温生成システム」を参照されたい。

板谷 義紀 (岐阜大学)

Yoshinori ITAYA (Gifu University)

# 伝 熱

## 目 次

### 〈巻頭グラビア〉

LiBr 微細結晶スラリーによる吸収式ヒートポンプの性能向上効果

.....板谷 義紀 (岐阜大学) .....表紙裏

### 〈追悼〉

長野靖尚先生を偲ぶ

.....服部 博文, 田川 正人, 保浦 知也, 飯田 雄章, 辻 俊博 (名古屋工業大学)

河村 洋 (諏訪東京理科大学), 宮内 敏雄 (東京工業大学), 笠木 伸英 (東京大学)

Brian LAUNDER (Manchester University)

Kemal HANJALIĆ (Delft University of Technology) ..... 1

### 〈特集：反応や物質移動を伴う熱利用機器の最新研究〉

化学蓄熱による熱エネルギー有効利用 ..... 加藤 之貴 (東京工業大学) ..... 5

吸着冷凍のための高伝熱性水蒸気収着材の開発 ..... 汲田 幹夫 (金沢大学) ..... 12

デシカント空調システム ..... 窪田 光宏 (名古屋大学) ..... 18

排熱回収型吸収式ヒートポンプによる高温生成システム ..... 板谷 義紀 (岐阜大学) ..... 24

### 〈エデュケーションQ〉

ニュートンの冷却法則 (その1) ..... 円山 重直 (東北大学) ..... 31

### 〈博物館めぐり〉

英国の巨人 Newton, Watt, Joule, Kelvin, Maxwell たちを訪ねて

.....吉田 英生 (京都大学) ..... 35

### 〈行事カレンダー〉

..... 41

### 〈お知らせ〉

平成 27 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ ..... 43

第 53 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 ..... 44

優秀プレゼンテーション賞 (第 53 回日本伝熱シンポジウム) について ..... 46

日本伝熱学会主催 第 4 回 国際伝熱フォーラム ..... 47

事務局からの連絡

・編集出版部会からのお知らせ ..... 48

・新入会員一覧 ..... 49

### 〈編集出版部会ノート〉

..... 53

Vol.54, No. 229, October 2015

CONTENTS

< Opening-page Gravure:heat-page >

Advanced Effect of Vapor Absorption Performance into Fine LiBr Crystal Particle Slurry  
Yoshinori ITAYA (Gifu University) ..... Opening Page

< Eulogy >

To the Memory of Professor Yasutaka NAGANO  
Hirofumi HATTORI, Masato TAGAWA, Tomoya HOURA,  
Oaki IIDA, Toshihiro TSUJI (Nagoya Institute of Technology)  
Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science, SUWA)  
Toshio MIYAUCHI (Tokyo Institute of Technology)  
Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo)  
Brian LAUNDER (Manchester University)  
Kemal HANJALIC´ (Delft University of Technology) ..... 1

< Special Issue: Latest Research on Thermal Utilization Device Associated with Reaction and Mass Transfer >

Heat Utilization by Thermochemical Energy Storage  
Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology) ..... 5  
Development of Transcalent Sorbent for Water-Vapor Sorption Refrigeration  
Mikio KUMITA (Kanazawa University) ..... 12  
Desiccant Air Conditioning System  
Mitsuhiro KUBOTA (Nagoya University) ..... 18  
High Temperature Generation System by Absorption Heat Pump Recovering Exhaust Heat  
Yoshinori ITAYA (Gifu University) ..... 24

< Education Q >

Newton's Law of Cooling, Part 1  
Shigenao MARUYAMA (Tohoku University) ..... 31

< Museum Tour >

Visit to Great Scientists and Engineer in United Kingdom: Newton, Watt, Joule, Kelvin, Maxwell, et al.  
Hideo YOSHIDA (Kyoto University) ..... 35

< Calendar > ..... 41

< Announcements > ..... 43

< Note from the JHTSJ Editorial Board > ..... 53

## 長野靖尚先生を偲ぶ

*To the Memory of Professor Yasutaka NAGANO*

服部 博文, 田川正人, 保浦 知也, 飯田 雄章, 辻 俊博 (名古屋工業大学)  
河村 洋 (諏訪東京理科大学), 宮内 敏雄 (東京工業大学), 笠木 伸英 (東京大学)

*Brian LAUNDER (Manchester University), Kemal HANJALIĆ (Delft University of Technology)*

*Hirofumi HATTORI, Masato TAGAWA, Tomoya HOURA, Oaki IIDA, Toshihiro TSUJI (Nagoya Institute of Technology)*

*Hiroshi KAWAMURA (Tokyo University of Science, SUWA), Toshio MIYAUCHI (Tokyo Institute of Technology)*

*Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo)*

名古屋工業大学名誉教授、本学会元会長である長野靖尚先生におかれましては、2015年6月6日、病気療養中のところご逝去されました。享年73歳は長いとは言えない生涯でした。先生のご冥福を心からお祈り申し上げます。

長野靖尚先生は、1943年9月15日、三重県にてお生まれになりました。ご尊父を先の戦争で亡くされ、母親一人の手で育てられた先生は、その家庭事情から、工業高校へと進学されました。しかし、高校の恩師が早くから先生の明晰な頭脳に気づかれ、熱心に大学進学を勧められたそうです。それから大学を目指す勉強を始め、1962年に名古屋工業大学工学部機械工学科に入学されました。当時の工業高校には英語の授業がなく、大学受験勉強に大変苦労されたそうですが、この時のご努力が、後々の先生の様々な活動の基盤となり、幾多の功績へとつながったことと思います。名古屋工業大学ご卒業後は、東京大学大学院工学系研究科修士課程へ進学され、大学院修了後は日本電装株式会社（会社名は当時）に就職されました。就職されて1年後に、名古屋工業大学に工学部助手として赴任されましたが、会社の当時の上司は、快く大学へ送り出してくれたとのこと。名古屋工業大学では、菱田幹雄先生（故人）のもと、乱流伝熱の研究に従事され、1976年同大学講師、1978年助教授、1984年の米国スタンフォード大学客員研究員を経て、1987年に教授に昇格されました。この間、1977年に乱流場における速度と温度同時計測に関する業績により、名古屋大学から「円管内乱流境界層の速度ならびに温度場の実験的研究」のタイトルで工学博士の学位を授与されました。教授ご昇格後は、念願であった大学院後期課程（博士課程）の設置（1985年）と相まって、多くの博士を輩出されました。先生の粘り強くあくなき探求心は、博士課程の学生のみならず、修士



学生、学部生の指導にいかんなく発揮されました。その後、工学部学生部長（1999年）、第二部主事（2003年）、副学長（2004年）を務められた後、2004年の国立大学法人化に伴って2006年まで理事の要職に就かれ、法人化で激動する大学の牽引役として尽力されました。理事の任期満了後は、名誉理事として定年を迎えられ、名古屋工業大学名誉教授を授与されるとともに、プロジェクト特任教授として研究の第一線に復帰され、科学研究費補助金（基盤研究S）の助成と相まって、益々のご活躍でありました。この基盤研究Sには中間審査と最終審査があり、中間審査ではその後の研究の継続の可否だけでなく、すべての審査結果が公表されることもあって、研究成果に対して厳しい要求がありました。長野先生の陣頭指揮の結果、中間審査では厳しい意見もいただきましたが、最終審査では非常に高い評価をいただき、ご退職前の研究に花を添えられたことに、研究室一同ほっと胸を撫で下ろしたことが思い出として残っています。

さて、長野先生は、学会活動も精力的にこなされました。日本機械学会では熱工学部門長（2000



2006年9月29日 ドブロクニック(クロアチア)で開催された THMT-5 にて挨拶をされる長野先生

年), 理事 (2001~2002 年) を歴任され, 日本冷凍空調学会では理事 (1993 年~2000 年, 2003 年~2007 年) を, 日本流体力学会では, 副会長 (2000 年) を経て 2001 年に会長職を務められました. 本学会では, 東海支部長 (1999 年~2001 年), 副会長 (2002 年) を務められた後, 会長 (第 48 期, 2009 年) にご就任されました. この時期の学会は, 社団法人から新法人制度への移行時期であり, 会長として, 新法人への準備作業などに尽力され, 無事 2012 年に公益社団法人へ移行したことは, 本学会員の方々のご記憶にも新しいことと思います.

研究での功績は, 乱流伝熱の研究を中心として, 日本機械学会賞 (論文賞): 「乱流の組織構造と熱輸送」 (1988 年), 同: 「実用的な LES のための混合時間スケール SGS モデル」 (2004 年), 日本機械学会熱工学部門研究功績賞 (2002 年), 同部門国際功績賞 (2010 年), 本学会では学術賞: 「速度とスカラーの三重相関乱流モデル」 (1991 年) を受賞され, また 「乱流の準秩序構造の解明と乱流モデルの構築」 (2001 年) で流体科学研究賞を受賞されるなど, 主に乱流伝熱に関連する実験と計算の両面で多大な功績を残されました.

国際的な研究活動では, 数々の国際会議の組織委員等を歴任されましたが, International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer (通称 THMT) の共同議長を, オランダデルフト工科大学の Hanjalić 教授と 2000 年の名古屋開催から, 2012 年のイタリア, パレルモでの開催まで務められ, 国際的にも乱流, 熱・物質輸送現象の研

究の進展に貢献されました. この THMT は, 本年度もボスニア・ヘルツェゴビナのサラエボで第 8 回が開催されますが, ご出席を目指してご闘病されている途中に旅立たれたことは残念でなりません.

最後に, 長野先生と縁が深い 4 名の先生方から追悼文を頂きましたので, この紙面にてご紹介させていただきます.

\*\*\*\*\*

長野靖尚先生を悼む

長野先生に最後にお目にかかったのは, 昨年 (2014 年) の夏に京都で開催された第 15 回国際伝熱会議のレセプションであったと思います. 国際的にも知己の多い先生は, 多くの方と楽しそうに談笑しておられまし, 私もいつものように親しくお話をさせていただきました. 私が最初に長野先生のお名前を拝見したのは, 日本原子力研究所に勤務を始めて高温ガス炉の研究開発に従事し始めた頃でした. 当時の私は乱流には全く経験がなく, 手探りで研究を始めた頃でしたので, 長野先生の速度変動と温度変動の同時測定 (機論, 昭 52) や V 形熱線による詳細な乱流測定 (機論, 昭 55) に大きな感銘を受けました. 後になって学会の会場で議論をたたかわせたことも多かったです, とくに乱流プラントル数の挙動については何度も議論したことが, なつかしく思い出されます.

長野先生は, 国際的にもつねに指導的な活動をしておられ, 2000 年には国際会議 Turbulence, Heat and Mass Transfer (THMT) を名古屋で主宰されてわが国の乱流伝熱研究レベルを世界に認知せしめられました. その後も THMT の co-chair や ICHMT (国際熱物質伝達センター) の科学諮問委員を永年に亘って務められる等, 世界の乱流伝熱研究の発展にも大きな貢献をして来られました. 国内でも, 日本伝熱学会の第 48 期の会長をお努めいただき, 新公益法人制度への対応や学会 50 周年に向けての基礎固めをして頂きましたし, 比較的最近の 「乱流工学ハンドブック」 の編纂では, 長野先生の深いご造詣が同書の完成と成功をもたらしました.

ここに深く哀悼の意を表するとともに, ご冥福を心からお祈り申し上げます. 合掌.

河村 洋 (諏訪東京理科大学)

長野靖尚先生を偲んで

東京工業大学  
名誉教授  
宮内敏雄

長野靖尚先生は乱流伝熱、乱流のモデリングと直接数値計算、環境乱流輸送、分散型エネルギー、再生可能エネルギーなどの分野で優れた業績を挙げられました。私共の研究とは乱流、直接数値計算など共通する分野があったため、1980年代から親しくご指導頂きました。特に長野靖尚先生、笠木伸英先生との共著「乱流伝熱のダイレクトシミュレーション」や、笠木伸英先生を総編集とし、長野靖尚先生、河村洋先生と編集にあたった「乱流工学ハンドブック」刊行にあたっては、長野先生の学識の深さと見識の高さに触れる貴重な機会を得ることが出来ました。

長野先生は長らく International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer の Co-Chairman を務めるなど国際的にも活躍されており、今年の7月始めにメルボルンで開催された Ninth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena において、長野先生の訃報を知った海外の若手研究者からも「長野先生には大変お世話になった」との言葉が聞かれ、長野先生のお人柄の一端に触れる思いでした。

また、長野先生は名古屋工業大学において、学生部部长、理事、副学長などの重責を担われておりましたが、この間も教育研究に熱心に取り組み、深夜まで研究室で研究指導にあたっておられたと伺っており、先生の学問に対する真摯な態度は後進の者が見倣うにふさわしいものと思われま

す。  
長野先生のこれまでの研究業績、学会に対する貢献、国際的な業績に感謝するとともに、心より先生のご冥福をお祈り申し上げます。

## Professor Yasutaka Nagano

It is with deep respect and affection, coupled with profound regret at his passing, that I write these few words of appreciation of Yasu Nagano. We had been collaborators in the effort to accurately model turbulent shear flows for well over 30 years during which he made many substantial contributions to clarifying heat transport processes, especially in the region close to a wall where molecular effects exert a strong influence. His contribution, earlier this year, to a special issue of the *International Journal of Heat & Fluid Flow* to mark the 75<sup>th</sup> anniversaries of our joint friend Kemo Hanjalić and myself is especially appreciated.

He, with Japanese colleagues Nobuhide Kasagi and Hiroshi Kawamura, burst onto the turbulence modelling scene with great impact in the 1980s and through their efforts played a major role in shaping the way the subject has developed in the years that followed. In 1999, in organizing an advanced summer programme on turbulence modelling at the Isaac Newton Institute in Cambridge, I invited Professor Nagano to contribute the lectures on heat transport which he subsequently reshaped into a major chapter in the subsequent volume from the meeting. My other strongest memory is from an outstandingly successful meeting on *Turbulence Heat & Mass Transfer* that he organized in Nagoya in 2000.

As a final impression, in putting forth his ideas, Yasu was never forcefully assertive, always preferring a gently persuasive approach – a strategy that won him widespread respect and many friends.

**Professor Brian Launder, FRS, FEng  
Manchester University**

**Yasutaka Nagano – Some Reflections, August 2015**

Professor Yasutaka Nagano, a dear colleague and friend, passed away prematurely on 6 June 2015 after a long struggle with an illness. It will take time to assimilate this loss and reflecting on Yasu while the sadness and grief are still fresh and intense, cannot go without deep emotion.

Yasu was a person with whom I shared years of pleasant professional and personal memories. We collaborated for over 20 years on various matters to my great enjoyment and professional fulfilment. Initially our contacts were related to research matters of joint interest, but our main joint project was the organization and running of a triennial conference series on Turbulence, Heat and Mass Transfer initiated in 1994 with the first event held in Lisbon. With an ambition to expand its reach worldwide under the auspices of the ICHMT (International Centre for Heat and Mass Transfer) I was looking for a renown, entrepreneurial and influential colleague in Asia who would support our endeavours and incite scientists and engineers in Japan and other Far East countries for this event. Our closer relation began in late nineties, when he kindly accepted my invitation to organize the 3th conference (after Lisbon and Delft) in Japan. He accepted my invitation enthusiastically, and the outcome was a very successful and memorable meeting in Nagoya in 2000.

Since then, Yasu remained permanently on the Organizing Committee and acted productively with a sustaining endurance and initiatives as Co-Chairman for all subsequent THMT events held in Antalya, Dubrovnik, Rome and Palermo. The participation from Far East, and especially from Japan, rose steadily to the present day bringing a strong Asian flavour and imprint to the THMT conference series, making it a truly global and recognisable international event.

Despite his health ailment that he heroically

endured for quite some time, he has been until very recently still active, followed with interest the progress in the organisation of our next (THMT'15) conference to be held in September 2015 in Sarajevo. Some time after his operation in September 2014 he wrote to me optimistically that his wife Masae and he had planned to attend the conference in Sarajevo, and we were all very much looking forward to seeing them again.

Yasu was a great person, excellent scientist, professor, educator and leader, and a wonderful colleague. His contribution to science in general has been notable and will stay marked in the history of fluid flow, turbulence, heat and mass transfer. He was also a great promotor of Japanese science worldwide. Working with Yasu over all these years was a real pleasure - he was always very enthusiastic, responsible, constructive and supportive.

We all loved Yasu and will miss him very much, but he will stay in our memories for ever.

**Kemo Hanjalic**

\*\*\*\*\*

あとがき

本追悼文は当初、公私にわたり親しい関係にあった笠木伸英先生に依頼しましたが、ご自身の体調などを考慮された結果、名工大の関係者や長野先生と共同で著書を執筆された先生方にも加わって頂きたいという笠木先生のご要望に沿い、他の著者の方にもご理解頂き、共著での執筆となっています。しかしながら、本稿執筆中の7月29日に、笠木伸英先生がお亡くなりになりました。日本の乱流伝熱研究を先導しレベルの高い研究成果を世界に発信し続けてこられたお二人が相次いでお亡くなりになったことに、深い悲しみとともに喪失感が募ります。笠木伸英先生のご冥福をお祈りいたします。



## 化学蓄熱による熱エネルギー有効利用 *Heat Utilization by Thermochemical Energy Storage*

加藤 之貴 (東京工業大学)

*Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology)*

*e-mail: yukitaka@nr.titech.ac.jp*

### 1. はじめに

省エネルギーにおいて未利用熱の貯蔵（蓄熱）による回収，有効利用は重要である．ここでは300°C程度の中温熱の蓄熱向け技術として化学蓄熱を紹介し，とくに候補として酸化マグネシウム/水系化学蓄熱の可能性を示す．化学蓄熱装置の実用化においては蓄熱材料と熱交換器とをパッケージとして一体的に開発し，包括的な熱交換性能を向上させることが重要である．このために化学蓄熱材料の熱伝導度の向上が重要である．この目的に適した蓄熱材料として水酸化マグネシウム/膨張化グラファイト複合化学蓄熱材料が開発された．この材料は従来の水酸化マグネシウム蓄熱材料に比べて高い熱伝導度，反応性および形状の成型性を有しており，実用反応器への応用が期待できる．本稿ではこの技術の開発事例を示し，化学蓄熱分野における伝熱研究の有用性を示す．

### 2. 蓄熱の必要性

平成23年3月の東日本大震災に伴う福島原発の事故を契機に日本のエネルギー需給構造の再構築が希求されている．震災後，エネルギーコストの著しい上昇は社会の健全な発展に悪影響を与えており，省エネルギー推進は環境のみならず経済的にも重要である．日本の一次エネルギーの7割以上はプロセス熱利用で消費され，副次的に大量の排熱が排出されている．排熱の有する熱エネルギーの有効利用は日本のエネルギー消費の削減，ひいては二酸化炭素排出削減につながると考えられる．とくに200~500°Cのいわゆる中温域の排熱または未利用熱の高効率回収，再利用が重要な候補対象といえる．我が国の産業部門の200°C以上の未利用熱は $1.25 \times 10^{18}$  Jで，我が国の民生部門業務分野のエネルギー消費量 $2.87 \times 10^{18}$  Jの4割に相当する[1]．中温排熱の回収利用は国規模で効果が大きいと期待される．

中温排熱は工場プロセス，ゴミ焼却，また内燃機関エンジン，燃料電池，太陽熱システムなどから発生する．例えば太陽熱を中温熱として回収利用できると，出力変動が大きな太陽熱システムの熱的な電池（サーマルバッテリー）になり，太陽光システムの負荷平準化，高効率利用が可能になる．100°C以下の排熱の回収利用は既に多くの研究がされており，また500°Cを超えた排熱は蒸気タービンなどで回収されている．しかしながら中温熱を回収，貯蔵（蓄熱）する技術は少ない．

中温熱の蓄熱技術として化学蓄熱に可能性がある．化学蓄熱は熱を比較的高密度に長期間にわたり貯蔵，再利用できる利点があり，次世代技術として重要と期待される．化学蓄熱の実用化は未だ世界的にも確立していないが，他の蓄熱技術にない特徴を持つ．

### 3. 熱プロセスへの蓄熱機能のハイブリッド化

中温排熱は種々のプロセスから未利用熱として排出されている．その回収活用方法として，蓄熱機能をハイブリッド化した高温プロセスの概念が提案されている[2]．上述の通り200~500°Cの中温熱の活用が未だ不十分であり，高温熱プロセスの高効率化のためにはこの温度域の熱貯蔵・利用が重要な課題と考えられる．とくに移動体向け内燃エンジンなどに関しては検討の余地がある．エンジンの燃料から軸出力へのエネルギー変換効率は約20%であり，残りは500°C以下の排気ガスとして30%，90°C以下の冷却水排熱としてラジエータから30%が放出されている．排熱回収は顕熱，潜熱による回収が既に行われているが，これまでは100°C以下の蓄熱が主でありとくに，エンジン排気熱である中温排熱の回収・貯蔵・有効利用に検討の余地がある．

実用熱システムにおいては起動時，運転時の非定常性が総合エネルギー効率に与える負の影響を

看過できない。例えば移動体エンジンでは起動→出力変動→停止の繰り返しで操作全体の非定常性が顕著である。起動時であればシステム暖機などのために余分なエネルギー消費が発生し、実質の総合効率も定常理想操作に比べ低下する。一般に熱利用システムでは、高温プロセスからの熱発生と熱利用側の需要変動が独立に変動するため、一方に追従すると他方に追従ができず、エネルギー入出力に過不足が生じる。熱発生と熱利用変動に追従できる仕組みが望まれる。

近年、余剰駆動力をバッテリーに電力貯蔵するハイブリッド自動車が市場に登場し大きな省エネルギー効果を実証している。この手法を熱に適用し、余剰熱を蓄熱する機能をハイブリッド化し、エンジンをはじめ高温プロセスの定常操作性を高めシステムの高効率化を目指すことが期待できる。図1に内燃エンジンを対象として蓄熱ハイブリッドシステム (Vehicle's thermal energy storage system, VTES) の構成を電力貯蔵ハイブリッドシステムと比較して示す。

電力貯蔵ハイブリッドではエンジンと軸出力との間に蓄電池による電力としての動力貯蔵機能が組み込まれ、パワーコントローラで電力の入出力制御を行う。制動回生エネルギーまたはエンジンからの発電出力を、さらに外部電力をプラグイン方式で貯蔵し、駆動側の需要に応じて電力を駆動側に供給する。これによりエンジンの負荷平準化、総合エネルギー効率の向上を実現している。蓄熱

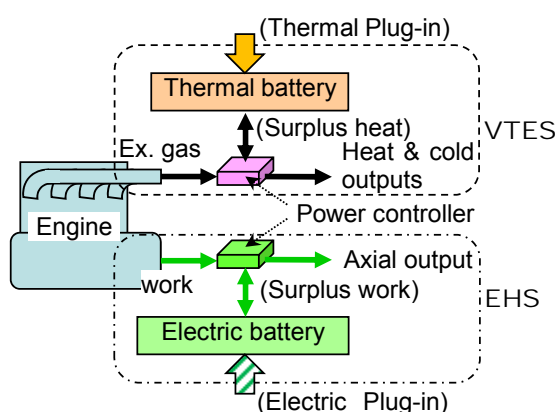
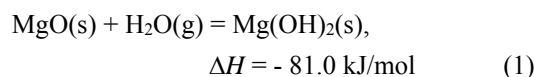


図1 内燃エンジンと蓄熱機能を複合した移動体向け蓄熱システム (vehicle's thermal energy storage system (VTES) と電力ハイブリッドシステム, electric hybrid system (EHS))

ハイブリッドは熱エネルギーについて同様の構成を有する。エンジンからの排気熱系に蓄熱装置(サーマルバッテリー)を組み込み、余剰熱を、または外部熱をプラグイン方式で蓄熱し、熱利用側の需要に応じて熱を供給する。蓄熱装置を活用することでエンジンの負荷変動を軽減し、効率的な条件でエンジン操作を行うことで総合エネルギー効率の向上が可能になる。蓄熱ハイブリッドの実現には、適切な蓄熱装置による高密度な蓄熱、高速の蓄熱・熱出力の両方が必要とされ、化学蓄熱が有力な候補である。

#### 4. 中温化学蓄熱材料の開発事例

中温化学蓄熱材料としては酸化マグネシウム/水系 (MgO/H<sub>2</sub>O) 化学蓄熱システム (式 (1), (2)) がある[3].



の駆動原理を図2に示す。装置は水酸化マグネシウム (Mg(OH)<sub>2</sub>) 容器と水容器それを連結する配管からなる。図中の操作温度値はこれまでの実験で得られたものである。今後の材料開発により広

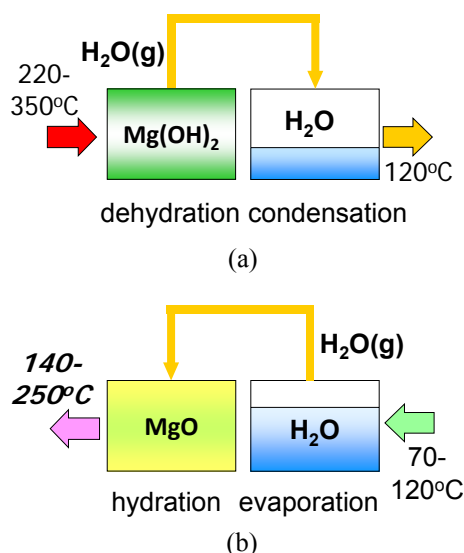


図2 MgO/H<sub>2</sub>O 化学蓄熱の操作原理 (a) 蓄熱操作, (b) 熱出力操作



図 3 開発された高い繰り返し反応耐久性を有する水酸化マグネシウムペレット ( $\phi 1.9 \times 5 \sim 10$  mm)

域化に余地がある。図 2(a)で示す蓄熱モードの初期には水酸化マグネシウムを充填する。中温 (220 ~ 350°C程度) の余剰熱で材料を加熱し脱水反応を進める (式(1)左方向に相当)。

材料は酸化マグネシウムとなり発生水蒸気は水容器にて凝縮させ水として貯蔵する。その際凝縮熱 (120°C程度) 出力は、温熱需要側で利用できる。反応材料と水を個々に貯蔵することで長期の熱エネルギー保存が可能になる。図 2(b)に示す熱出力モードでは水を低温余剰熱 (70~120°C) にて気化し、水酸化マグネシウム反応器に供給する。MgO 水和反応が発生し、熱出力 (140~250°C程度) を得ることができる。

化学蓄熱の反応系には繰り返し反応に対する材料の耐久性が必要である。MgO/H<sub>2</sub>O 単体系について繰り返し耐久性の向上に対する材料開発の検討が行われている[4]。不純物が繰り返し耐久性の阻害要因であることを見出している。一般利用むけの酸化マグネシウムは純度 95~97%程度である。繰り返し反応に対して不純物が反応材料の凝集を促進し、20 回程度の繰り返し反応で次第に反応活性が 1/3 程度まで低下する。これに対して高純度の超微粒子酸化マグネシウム (MgO 純度 99.9%以上、宇部マテリアルズ) を先駆体とした反応材料ペレット (Mg(OH)<sub>2</sub> 単体ペレット) (図 3) が開発されている。本ペレットは最初の 7 回程度で反応性が 1 割程度減少するが、その後 20 サイクル以上



図 4 化学蓄熱システム用のフィンチューブ型熱交換器の例

での反応耐久性の維持が実証されている。

## 5. 化学蓄熱材料の高性能化

MgO/H<sub>2</sub>O 系自体は既知の反応系である。この系を化学蓄熱に利用するには材料の改良が必要である。とくに実用には反応材料の熱伝導度の向上が重要である。以下に材料の開発事例を示す。

### 5.1 化学蓄熱材料の高熱伝導度化

化学蓄熱システムにおいては迅速な蓄熱、熱出力を可能とする反応器設計が重要である。実用においては図 4 に例示したフィン型熱交換器を用いて、フィン間に化学蓄熱材料を充填した構成の反応器を利用することになる。この構成に適した化学蓄熱材料の開発が必要である。

化学蓄熱システムにおける充填層型反応器の熱伝導度の定性的な性質を図 5 に示す。図 5(a)に従来の Mg(OH)<sub>2</sub> 単体ペレット (図 3) を用いた充填層型反応器を示す。この構成では材料粒子自体の熱伝導度が低く、さらに伝熱面と材料は主に点接触のため、伝熱面において伝熱抵抗が大きく、包括的な熱伝導度が劣る。熱伝導度が低い場合、単位伝熱面積当たりの熱流量が多く取れずフィン面積、ひいては反応器体積を大きくしなければならない。また熱源と受熱側の温度差を大きく取る必要があるため例えば熱出力時に、材料の発熱反応で高温が発生しているにも関わらず、低い温度で熱を取り出さざるを得ず、熱エネルギーの質的利用が阻害される。よって実用においては反応器における熱の高速・効率的な貯蔵・放出実現のため

に蓄熱材料の熱伝導度の向上，さらには熱交換器フィンの接触性を高めた材料形状への容易な成形性が重要である。

高伝熱性化学蓄熱材料として，後述する熱伝導度が高く化学的に安定な膨張化グラファイト (Expanded graphite, EG) と  $Mg(OH)_2$  とを混合した複合化学蓄熱材料 (図 6(b)) が開発されている [5,6]. この複合蓄熱材は高純度  $Mg(OH)_2$  に比べ熱伝導度が高く，材料形状の高い成形性を有する。図 5(b) に高熱伝導度を有する開発した複合化学蓄熱材料を導入した望ましい充填形式の反応器の構成を示す。材料形状の成形性が有れば化学蓄熱材料は伝熱面に密着した形状に成形でき，伝熱面の熱抵抗を低減できる。結果として蓄熱材料と熱交換器が合理的にパッケージ化された包括的に高

い伝熱性，熱的性能を有し，かつコンパクトな反応器が構成できる。

## 5.2 高熱伝導複合材料の開発

図 5(b) の構成を実現するための高熱伝導度複合材料の開発が行われている。利用された EG (図 6(a)) は直径  $300\ \mu\text{m}$  程度のグラファイトが積層された構造を持ち，層間にあらかじめ配置された膨張剤を  $700^\circ\text{C}$  程度で膨張させることで，層間に広い空間を有した多孔構造を有している。  $Mg(OH)_2$  粉体を水と混合しペースト状にした後，EG と一定の重量比で混合させる。その後，乾燥させ水分を除去する。得られた乾燥材料を錠剤成形器にて一定の密度，形状のペレットに成形した。重量比  $Mg(OH)_2 : EG = \alpha : 1$  の種々の蓄熱材料を作成し，材料を  $EM\alpha$  と呼称した。図 6(b) に  $EM8$  のタブレット形状の化学蓄熱材料 (直径  $7\ \text{mm} \times$  高さ  $3.5\ \text{mm}$ ) の写真を示す。

目標材料の形状は図 5(b) に示すスラブ状である。工学的には材料の厚みが重要である，実用的な厚みを有する基本形状としてタブレットでの試験が行われている。得られたタブレットを図 6(c) に示す充填層型反応器 (直径  $48\ \text{mm} \times$  高さ  $48\ \text{mm}$ ) に充填し化学蓄熱試験が行われている [7].

$EM4$ ,  $EM8$ ,  $EM16$  と  $Mg(OH)_2$  単体ペレットの 4

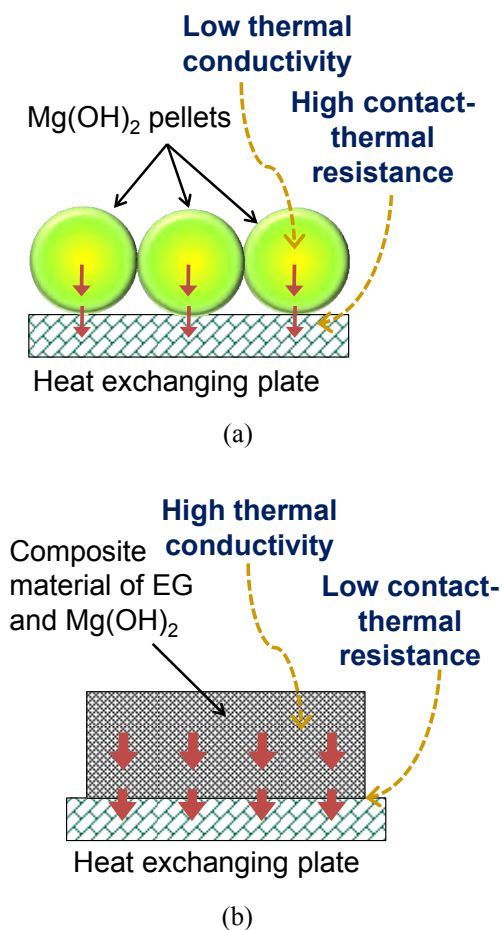


図 5 化学蓄熱反応層の伝熱促進コンセプト (a) 通常の  $Mg(OH)_2$  ペレットと伝熱面の熱交換形体、(b)  $EG/Mg(OH)_2$  複合材料と伝熱面との熱交換形体

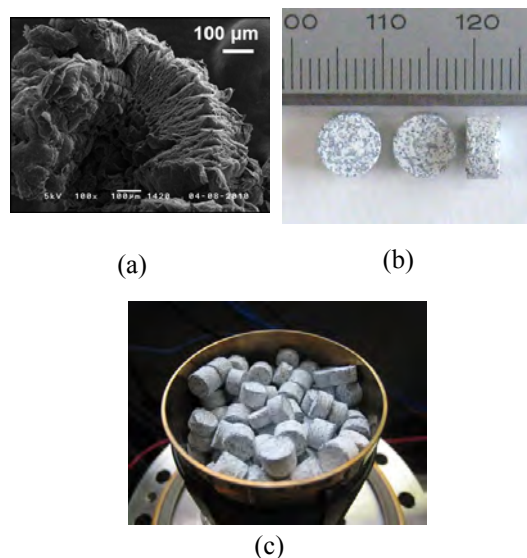


図 6  $EG/Mg(OH)_2$  複合材料 (a) 膨張化グラファイトの電子顕微鏡写真，(b) タブレット成形体 ( $EM8$ ) (直径  $7\ \text{mm} \times$  高さ  $4\ \text{mm}$ ) [7]，(c)  $EM8$  充填層 (直径  $48\ \text{mm} \times$  高さ  $48\ \text{mm}$ )

種類について化学蓄熱実験が行われた。図 7 に EG/Mg(OH)<sub>2</sub> 複合タブレットと Mg(OH)<sub>2</sub> 単体ペレットの充填層における見かけの熱伝導度、 $\lambda_{bed}$  [W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>], を示す。熱伝導率計 (QTM-500, 京都電子) を用い非定常細線加熱法で測定した。充填層は不均一性が高いため 30 回の測定から平均値として値を求めた。Mg(OH)<sub>2</sub> ペレット, EM16, EM8, EM4 タブレットの順に  $\lambda_{bed}$  が向上し, EM4 では Mg(OH)<sub>2</sub> ペレットの 2 倍程度まで上昇した。EG 混合量を増やすことで反応層の伝熱促進することが確認された[7]。

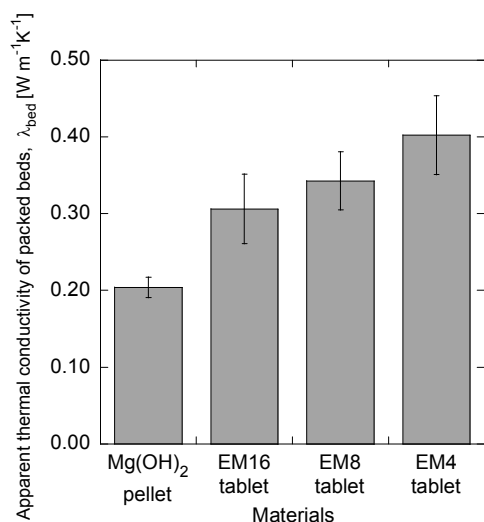


図 7 EG/Mg(OH)<sub>2</sub> 複合タブレットと Mg(OH)<sub>2</sub> 単体ペレットの充填層における見かけの熱伝導度 (30 回の平均値、エラーバーは値分布)

充填層実験においては Mg(OH)<sub>2</sub> 状態のそれぞれの蓄熱材料を反応器に充填し, 反応器を真空脱気した。充填層の外周に配したシースイーターにより蓄熱材料を加熱し Mg(OH)<sub>2</sub> 脱水反応を行った。発生する水蒸気は水容器で凝縮回収された。反応器内の水蒸気圧力は水容器の水温度 ( $T_{cond} = 20^\circ\text{C}$ ) で維持され, 平均圧力  $P_{cond} = 2.3 \text{ kPa}$  であった。

反応層側面の温度を配した熱電対で測定し, その温度を代表温度  $T_d$  [°C] とし, 目標温度  $T_d = 400^\circ\text{C}$  までは一定電力で加熱し, 到達後は目標温度一定に温度調節した。反応器を入れた反応装置全体の質量を精度 0.1 g で測定し, 重量変化から脱水反応による水の移動量を測定し, 充填蓄熱材料の平均

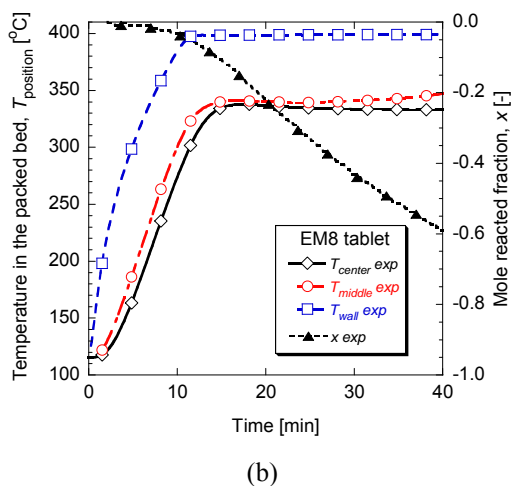
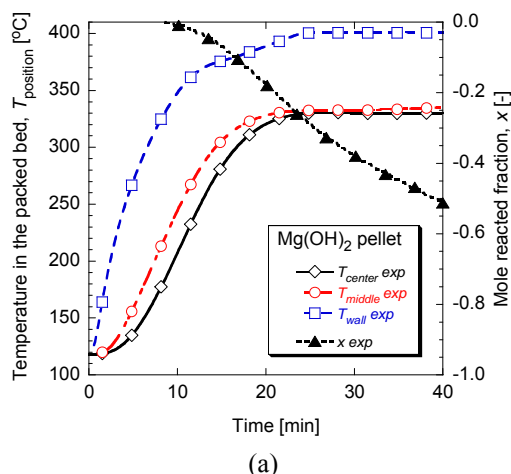


図 8 充填層蓄熱 (Mg(OH)<sub>2</sub> 脱水反応) 実験における反応層温度と反応転化率経時変化。(a)Mg(OH)<sub>2</sub> 単体ペレット, (b)EM8 タブレット。 ( $T_d = 400^\circ\text{C}$ ,  $P_{cond} = 2.3 \text{ kPa}$ ,  $T_{cond} = 20^\circ\text{C}$ .)

反応転化率を算出した。

充填層型反応器の蓄熱操作 (Mg(OH)<sub>2</sub> 脱水反応) 実験結果を図 8 に示す。横軸は脱水反応時間, 第 1 縦軸は反応層壁,  $T_{wall}$  [°C], 中心温度,  $T_{center}$  [°C], 第 2 縦軸は反応転化率,  $x$  [-], を示す。図 8(a),(b) はそれぞれ Mg(OH)<sub>2</sub> 単体ペレット, EM8 タブレット充填層の結果を示す。EM8 タブレットは反応層の昇温速度が速く 10 分程度で脱水温度に達し一定となる。Mg(OH)<sub>2</sub> ペレットは脱水温度到達に 20 分以上を要している。結果としてタブレットは反応が促進され反応転化率の変化進行が, ペレットに比べ速く進み, 短時間で蓄熱反応が進んでいることが判る。これはタブレットー充填層の熱伝導

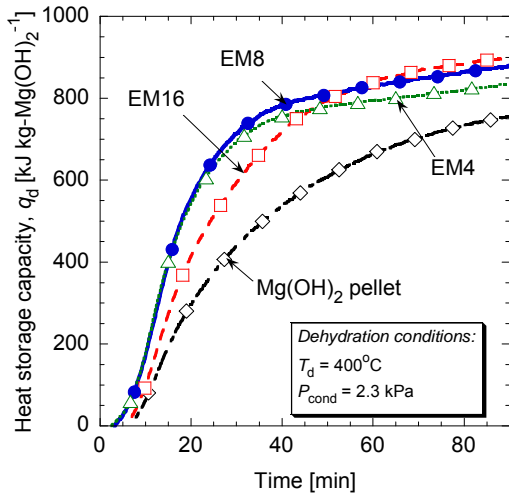


図 9 各蓄熱材料の  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  単位重量当たりの蓄熱密度の経時変化 ( $T_d = 400^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{cond}} = 2.3 \text{ kPa}$ ,  $T_{\text{cond}} = 20^\circ\text{C}$ ).

度が高く反応熱が迅速にペレットに輸送されたためである。

図 9 に各蓄熱材料の  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  単位重量当たりの蓄熱密度の経時変化を示す。横軸は昇温開始時刻を統一した反応時間、縦軸は脱水反応転化率から求めた反応器内に充填した  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  単位重量当たりの化学蓄熱密度  $q_d$  [ $\text{kJ kg-Mg}(\text{OH})_2^{-1}$ ]を示す。EM8, EM4 が蓄熱密度が最も早く上昇した。これは反応材料の熱伝導度の向上により、ヒーターからの熱が迅速に EM タブレット内の  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  粒子

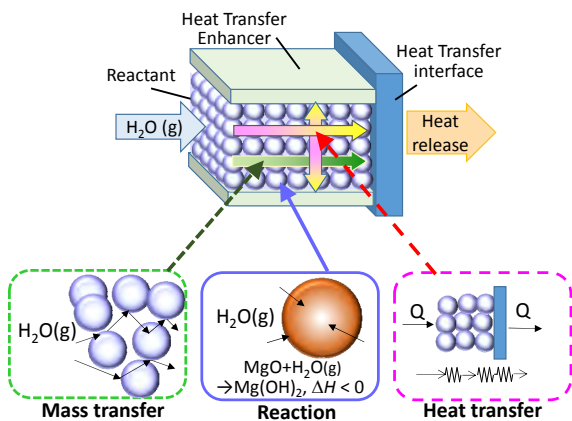


図 10 気固反応を用いた化学蓄熱における輸送現象 ( $\text{MgO}$  水和反応による発熱現象を例に.)

に伝達され、短時間でタブレット温度が上昇し、吸熱反応が促進されたためといえる。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  単体ペレットは熱伝導度が低く充填層全体への熱伝導が進まず、EM に比べて蓄熱密度の上昇が遅かった。また、EM16 では EG の相対混合量が減少し熱伝導度の促進の度合いが小さく、反応促進の向上は見られず、単体  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ペレットと EM8 の中間の傾向となった。EG の混合量が多い EM4 は反応器体積あたりでは蓄熱密度は EM8 より小さい。以上から EM 材料は熱伝導度の向上によって従来材料より反応進行度が促進されることが確認され、本実験条件では EM8 付近の混合比が熱伝導度の向上と反応促進の両方を実現できる最適な値であると判断された。以上から EM8 に代表される EM 材料は反応性を損なうこと無く熱伝導度、反応速度が高く、材料形状の成形性に優れた特性を有しており、実用的な化学蓄熱材料と期待された。図 10 に  $\text{MgO}$  系化学蓄熱の熱出力操作(図 2(b))を例とした系内の輸送現象を示す。化学蓄熱は物質・熱輸送と化学反応が非定常に同時進行する複雑系である。現象理解には各輸送現象の定量的な評価と律速段階の把握が重要である。化学蓄熱には蓄熱密度としての量的な性能向上と同時に迅速な蓄熱、熱放出の速度的な性能向上の両方が求められる。これらの実現には反応材料のみならず反応器システム全体の輸送現象の理解と最適化が必要である。

## 6. まとめ

熱エネルギー有効利用は環境、経済面でともに重要である。排熱の有効利用が日本全体のエネルギー消費節約においても量的な貢献性が大きく実質的に有用である。化学蓄熱は実用に向けての未開発の部分が多いが、従来の蓄熱、熱利用技術にない広い操作温度域、熱貯蔵性などを持ち、排熱回収に柔軟に対応できる可能性がある。化学蓄熱装置の実用化においては材料と熱交換器との合理的なパッケージ構成が必須となり、包括的な熱交換性能、反応性能の向上による装置の性能向上が重要である。そのために化学蓄熱材料の伝熱性の向上、材料成形性が重要な開発事項である。膨張化グラファイトと  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  を複合した高い熱伝導度を有する EM が対応技術事例である。システムのパフォーマンス向上には EM および EM 充填層の輸送現象

象の解明と最適化が重要である。その解明には伝熱工学的なアプローチが重要である。化学蓄熱システムの最適化により熱のさらなる高度有効利用が期待できる。

#### 参考文献

- [1] 財団法人省エネルギーセンター，平成 12 年度「工場群の排熱実態調査」(2000)
- [2] Y. Kato *et al.*, *Int'l J. of Refrigeration*, **32**, 661(2009)
- [3] Y. Kato *et al.*, *Appl. Therm. Eng.*, **16**, 853 (1996)
- [4] Y. Kato *et al.*, *J. Chem. Eng. Japan*, **40**, 1264 (2007)
- [5] S. Y. Kim, J. Ryu, Y. Kato, *Progress in Nuclear Energy*, **53**, 1027(2011)
- [6] M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, *Appl. Therm. Eng.*, **61**, 853 (2013)
- [7] M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, *Appl. Therm. Eng.*, **64**, 339 (2014)
-

## 吸着冷凍のための高伝熱性水蒸気収着材の開発

Development of Transcalent Sorbent for Water-Vapor Sorption Refrigeration

汲田 幹夫 (金沢大学)

Mikio KUMITA (Kanazawa University)

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

### 1. はじめに

かなり古いデータになるが、(財)省エネルギーセンターの平成 12 年度の排熱実態調査[1]によると、工場群からのガス排熱量は 102 万 TJ/年、蒸気を含む温水排熱量は 9.3 万 TJ/年で、60~100°C の温水排熱と 100~200°C のガス排熱を合わせた低温度域の排熱量は 76 万 TJ/年に上る。これは固体排熱を加えた総排熱量 114 万 TJ/年の 3 分の 2 に相当する。また、三菱総合研究所の平成 24 年度調査報告書[2]によれば、利用可能な排熱量推計値として 80°C 以上の温水排熱と 120~175°C のガス排熱の合計値は、平成 10 年度で 2.6 万 TJ/年、平成 22 年度で 2.5 万 TJ/年となっている。このように、排熱の温度レベルが環境温度に近づくにつれて、その回収は難しくなるが、吸収や吸着現象を利用するヒートポンプ・冷凍機は、比較的低温度の排熱を回収利用できる熱変換機器である。

本稿では、著者らが吸着式冷凍機の小型高性能化を目指して取り組んでいる新規の伝熱促進型低温蓄熱材料について紹介する。

### 2. 吸着式冷凍機

#### 2.1 基本構成と作動原理

吸着式冷凍機(吸着ヒートポンプ)は、冷媒となる吸着質と固体吸着材の組み合わせを作動系としており、冷媒蒸気と固体吸着材間の吸脱着現象に付随する冷媒の蒸発と凝縮によって冷熱や温熱を生成する熱駆動型の熱変換機器であり、広く普及している蒸気圧縮式ヒートポンプに対して、広義のケミカルヒートポンプに分類される[3]。なお、同分類には、冷媒と反応剤間の可逆化学反応を利用する化学反応式、冷媒と吸収液間の吸収・脱離を利用する吸収式が属する。

図 1 に、吸着式冷凍機の基本構成を示す。吸着式冷凍機の構成は、そのサイクル操作によって変わる場合があり、固体吸着材が充填された吸着器

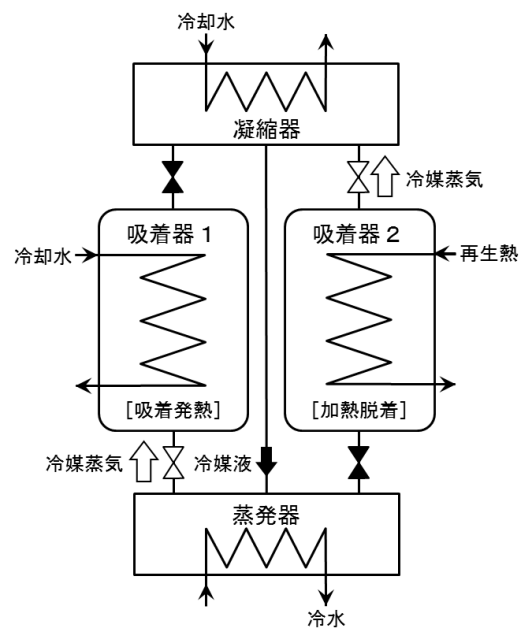


図 1 吸着式冷凍機の基本構成

を 3 器以上、蒸発器や凝縮器を複数用いるものもあるが、本図に示す吸着冷凍機は最も単純な単段吸着冷凍サイクル (Two-beds, single-stage adsorption refrigeration cycle) によって作動する。この場合の吸着冷凍サイクル線図(圧力-温度-吸着量線図)を図 2 に示す。図中の実線は冷媒吸着質の飽和蒸気圧線、一点鎖線は使用吸着材の冷媒蒸気に対する吸着等量線(一定の吸着量を与える圧力-温度関係)をそれぞれ表している。

図 1 に示すように、吸着式冷凍機は、固体吸着材が充填された複数の吸着器(吸着熱交換器)と、蒸発器および凝縮器から構成される。固体吸着材は、吸収式ヒートポンプの吸収液(H<sub>2</sub>O/LiBr 系の LiBr 水溶液、NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O 系の水)のように装置内を循環流動させることが困難なために、通常は吸着材粒子を充填層として密閉容器内に固定して使用する。したがって、吸着冷凍サイクルは、冷媒蒸



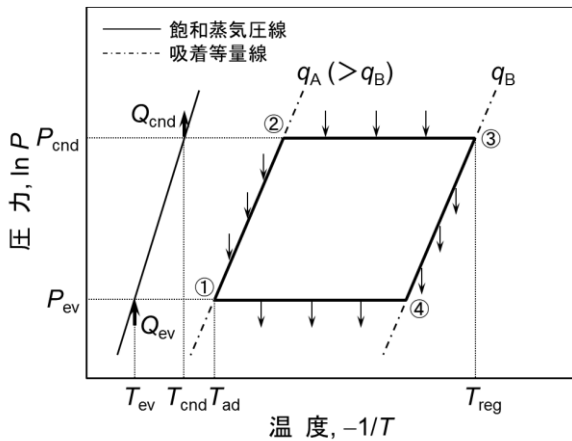


図2 単段吸着冷凍サイクル線図

気が吸着材に吸着する吸着工程と、吸着飽和に達した吸着材から冷媒を脱離させる脱着再生工程を交互に繰り返すバッチ操作となる。なお、主な作動吸着系としては、水/シリカゲル系、水/合成ゼオライト系、アンモニア/活性炭系、低級アルコール/活性炭系等が挙げられ、実用機には、長期の吸脱着安定性が確認されている水/シリカゲル系と水/合成ゼオライト系が採用されている[4, 5]。後述するように、吸着式冷凍機では、操作温度範囲において冷媒吸着質の気液相変化を起こす必要があるため、冷媒に水や低級アルコールを用いる場合には装置内はほぼ真空に近い状態で、また、アンモニア冷媒の場合には加圧状態でそれぞれ操作される。

蒸発温度  $T_{ev}$  (冷媒蒸気圧  $P_{ev}$ )、吸着温度  $T_{ad}$  で吸着飽和 (図2の状態①)、あるいはそれに近い状態に吸着材が達した時点で、吸着器 (図1の吸着器2) と凝縮器 (凝縮温度  $T_{cnd}$ ) 間のバルブが開かれて吸着材の脱着再生工程に移る。脱着再生工程 (図2, 状態①→②→③) では、吸着器に排熱や太陽熱などを投入することで吸着材を加熱し、吸着している冷媒を脱着させる (到達温度  $T_{reg}$ )。吸着器内の圧力は、吸着工程終了時の圧力  $P_{ev}$  から上昇し、温度  $T_{cnd}$  における飽和蒸気圧  $P_{cnd}$  に到達する。このとき冷媒吸着量は吸着等量線  $q_A$  から  $q_B$  に向かって減少し、温度  $T_{reg}$ 、圧力  $P_{cnd}$  での吸着平衡状態③に至る。なお、脱着した冷媒蒸気は凝縮器内で凝縮し、液体となった冷媒は蒸発器に送られる。

脱着再生工程が終了すると、図1に示す吸着器1のように、吸着器と凝縮器間のバルブが閉じら

れ、そして、吸着器-蒸発器間のバルブが開かれて吸着工程に移る。吸着工程 (状態③→④→①) では、環境温度近傍の冷却水 (温度  $T_{ad}$ 、クリーニングタワー等を使用して温度調整) が吸着器に導かれて吸着材の温度が下がり (到達温度  $T_{ad}$ )、器内圧力も  $P_{cnd}$  から  $P_{ev}$  に降下する。一方で冷媒は、温度  $T_{ev}$  の蒸発器内で蒸発し、その蒸気が相対的に圧力の低い吸着器に移動して吸着材に吸着する。これが温度  $T_{av}$ 、圧力  $P_{ev}$  における吸着平衡状態①に至るまで続き、この間に冷媒吸着量が  $q_B$  から  $q_A$  に増大する。そして、この差  $q_A - q_B$  が本工程での冷媒蒸発量、すなわち冷熱生成量  $Q_{cv}$  に対応し、この冷熱によって蒸発器に供給される冷水やその他の熱交換媒体が冷却され、冷房や冷凍操作などに利用される。

以上の吸着工程と脱着再生工程が、単段吸着冷凍サイクルでは2つの吸着器で交互に繰り返され、これにより蒸発器において冷熱が連続的に生み出される。なお、吸着工程と脱着再生工程の間に、短時間の予熱 (予冷) 工程を入れる場合がある。これは、脱着再生工程終了時に吸着器内に残留する熱 (温度  $T_{reg}$ ) を回収し、吸着工程が終了したもう一方の吸着器 (温度  $T_{ad}$ ) の予熱に利用する工程であり、この操作を加えることで吸着式冷凍機の成績係数 COP を向上させることができる。

## 2.2 吸着熱交換器の伝熱促進

吸着式冷凍機は、(1)低温排熱や太陽熱等の未利用熱を駆動熱源に用いることができる、(2)水などの環境負荷の少ない自然冷媒を使用できる、(3)熱源温度や熱量の変動による性能変化が少なく、短時間の起動・停止が可能、(4)作動吸着系の劣化がほとんどなく、装置構成も単純でメンテナンスが容易、(5)消費電力が極めて少なく、騒音や振動も少ない、などの優れた特徴を有している[6]。

その一方で、吸着式冷凍機は、吸収式やその他のヒートポンプに比べて装置容積が大きく (冷熱出力密度が小さい)、その設置箇所が制限される場合がある。装置の大型化は、吸着冷凍サイクルが基本的にバッチ操作であるために必ず複数の吸着器 (吸着熱交換器) が必要なこと、さらには、図3(a)に示すような充填層型吸着熱交換器では、粒子充填層の有効熱伝導率が  $0.1 \sim 0.25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  と低く、迅速な吸着熱の除去と脱着再生熱の供給を実現するために非常に多くの金属製伝熱フィンの

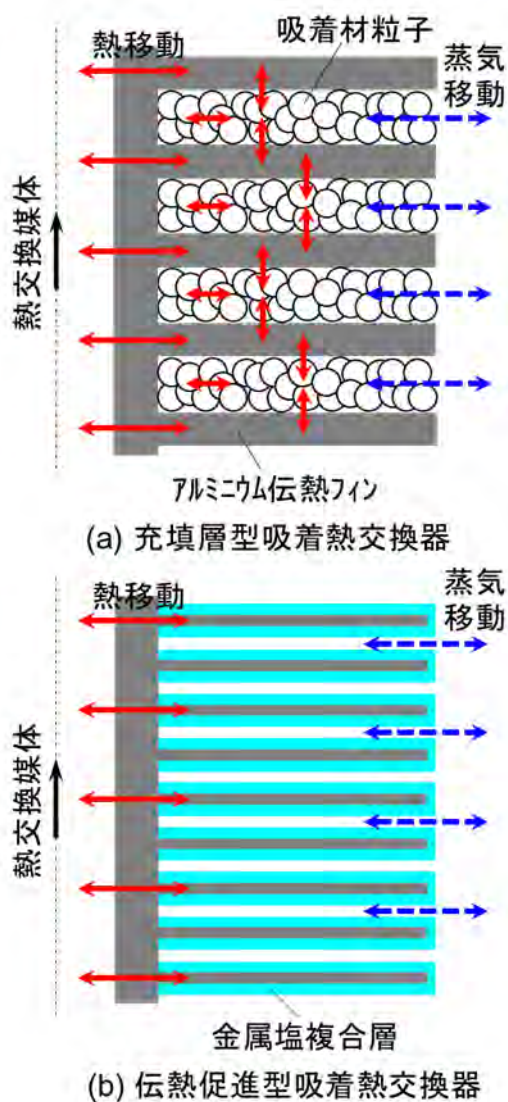


図3 充填層型と伝熱促進型の吸着熱交換器

挿入が不可避であることなどに起因する。車載用など吸着式冷凍機の適用可能範囲を拡げるためにもその小型高性能化が必要であり、これには、固体吸着材の冷媒蒸気吸着能の向上とともに、冷凍機容積の6割以上を占める吸着熱交換器の小型化、すなわち、器内の伝熱促進が極めて重要となる。

熱の良導体である金属アルミニウムは軽くて加工性に優れ、一般的な吸着熱交換器の伝熱フィン材料として利用される場合が多い。そこで著者らは、図2(b)に示すように、アルミニウムの表面を改質して水蒸気吸着能を付与することができれば、充填層内伝熱ならびに吸着材粒子-金属面接触伝

熱の両過程を概ね省略することが可能になると考え、金属塩-アルミニウム複合吸着材の開発研究を始めた。

アルミニウムは酸素との親和性が非常に強く、空気中でも容易に酸化して、その表面に1 nm程度の極めて薄い酸化アルミニウム層（自然酸化皮膜）を形成する。著者らは、陽極酸化法によって、アルミニウムの表面に多孔質な酸化皮膜（一般的にはアルマイトと呼ばれる）を人工的に形成させ、この皮膜内部に水との反応性に富む金属塩を添着することでアルミニウムに水蒸気吸着能を付与することにした。なお、水蒸気吸着を目的としたアルミニウムの表面改質では、Shimookaらが、吸着冷凍サイクル用に設計・調製したゼオライト系吸着材微粒子を、アルミニウム表面に塗布した熱交換器を開発しており[7]、Bonaccorsiらは、アルミニウム材料表面へのゼオライト薄層の直接合成を試みている[8]。

## 2. アルミニウム陽極酸化皮膜

アルミニウムを陽極に設置し、ある種の水溶液中で電気分解することを陽極酸化処理と言い、特に、硫酸、リン酸、シュウ酸、クロム酸などの酸性電解液を用いる処理では、アルミニウム表面に微細孔を持つ多孔質型の酸化皮膜が形成される[9, 10]。具体的には、アルミニウムから生成するアルミニウムイオン  $Al^{3+}$  と水の電気分解により生ずる酸素イオン  $O^{2-}$  が結合することで酸化アルミニウム  $Al_2O_3$  が生成する。一方で、酸化アルミニウムは電解液によって溶解するため、陽極酸化皮膜の成長は、前者の生成反応と後者の溶解反応のバランスで進行することになる[11]。

図4に、アルミニウム陽極酸化処理（定電圧電解）における多孔質型酸化皮膜の成長過程（①～③）の概念図を示す。

- ① 電解開始後、アルミニウム表面が酸化され、バリアー層と呼ばれる緻密な薄い酸化皮膜が形成される。
- ② バリアー層が体積膨張することで凹凸表面が出現し、表面での電解電流密度の分布が生じる。電流密度が大きな凹部では、電解作用と電解液による化学溶解によって多数の細孔が形成される。
- ③ 細孔が大きくなり、アルミニウム素地に向か

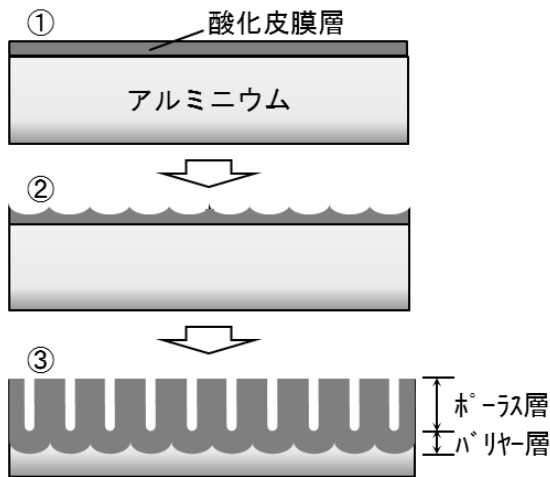


図4 多孔質型酸化皮膜の成長過程の概念図

って鉛直に酸化皮膜が成長する。皮膜底部には常にバリア層が存在し、その上部にポラス層が形成され、皮膜は二重構造となる。このように形成される多孔質型酸化皮膜では、ひとつの細孔が六角柱の中心軸に位置し、この六角セルが規則的に配置する皮膜構造をとるとのモデルが提唱されており、細孔壁の厚みはバリア層厚みの約2倍に相当すると言われている[9]。また、酸化皮膜の厚み、細孔径および細孔数密度は、電解浴の種類、電解電流・電圧、電解時間、電解液温度等の陽極酸化処理条件に強く依存する。例えば、細孔径は使用する電解浴の種類によって変化し、硫酸浴  $\text{H}_2\text{SO}_4$  の場合、直径  $10\sim 30\text{ nm}$  の比較的小さな細孔が形成され、シュウ酸浴  $(\text{COOH})_2$  では  $30\sim 80\text{ nm}$ 、リン酸浴  $\text{H}_3\text{PO}_4$  では  $80\text{ nm}$  以上の細孔となる。また、リン酸浴陽極酸化では、厚

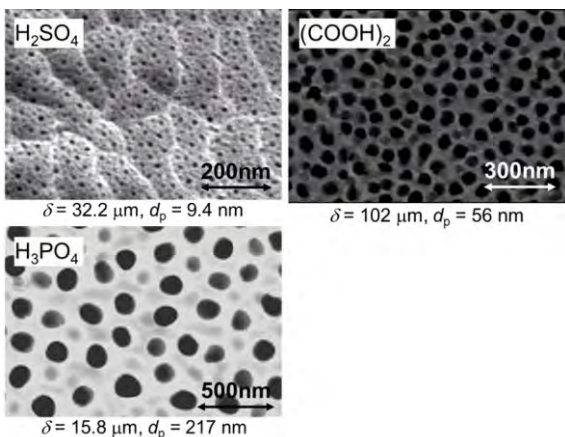


図5 陽極酸化アルミニウム皮膜の表面 SEM 像

い酸化皮膜を形成させることは困難であるが、硫酸浴やシュウ酸浴では、 $100\text{ }\mu\text{m}$  程度の酸化皮膜を付けることができる[11]。この皮膜厚と細孔径の変化傾向は、著者らが3種類の酸性浴を用いて調製した陽極酸化皮膜の観察・測定結果(図5、皮膜厚 $\delta$ 、平均細孔径 $d_p$ )でも確認できる。

図6に、シュウ酸浴を用い、積算通電量  $800\text{ Ah/m}^2$  一定の条件で定電流陽極酸化処理を行った場合の酸化皮膜の厚み、細孔径および空隙率と、印加電流密度の関係を示す[12]。積算通電量を固定した定電流電解において低い電流密度の場合は、長時間の電解を行うことになり、生成した酸化皮膜が酸性の電解液に晒される時間が長くなり、皮膜厚は急激に減少する。一方で、高い電流密度の場合は、電解時間は短くなるが、通電によるジュール熱の発生で電解浴温度、とりわけ試料(陽極)まわりの温度が上昇するため、皮膜の溶解が促され、細孔径は徐々に大きくなり、皮膜厚は薄くなると考えられる。また、電流密度の増大には高い電解電圧が必要となるため、この電圧上昇がバリア層と細孔壁の厚みの増大に繋がる[9]。その結果、酸化皮膜中の細孔数密度が減少して空隙率が低下すると推察される。

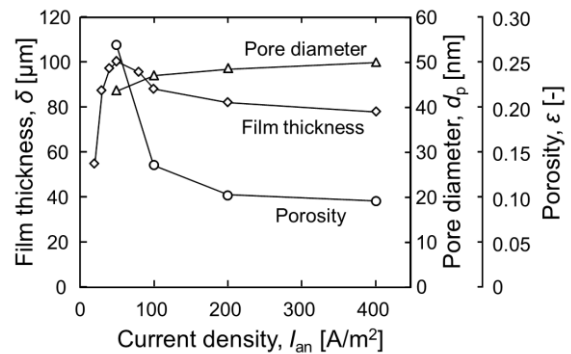


図6 陽極酸化皮膜の構造特性値の変化[12]

### 3. 金属塩-アルミニウム複合材

#### 3.1 複合材調製方法

硫酸塩、リン酸塩、硝酸塩、金属塩化物など多くの金属塩が吸湿性を持つ[13]。本研究では除湿剤や融雪剤などに広く使用されている塩化カルシウム  $\text{CaCl}_2$  を金属塩に選定し、溶液含浸法によって多孔質型酸化皮膜内部に金属塩を添着した[14]。なお、金属塩添着操作の前に、陽極酸化処理を施した平板アルミニウム試料を硫酸水溶液に所定時

間浸すことで、細孔壁を溶解させて細孔を拡げた（細孔径拡大処理）。その後、飽和塩化カルシウム水溶液中に試料を浸し、減圧脱気を行うことで細孔内に水溶液を十分浸透させる。試料を取り出し、皮膜外表面に残留する水溶液を取り除いた後に、所定温度で焼成することで  $\text{CaCl}_2$ -アルミニウム複合材を得た。

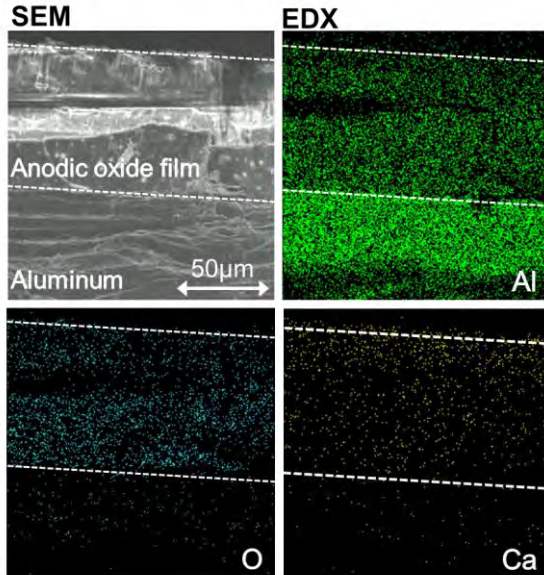


図7  $\text{CaCl}_2$  添着複合材断面の SEM 像と EDX 分析結果 ( $\delta = 79.6 \text{ mm}$ ,  $d_p = 99 \text{ nm}$ )

### 3.2 塩化カルシウム添着特性

シュウ酸陽極酸化皮膜中への塩化カルシウム添着を確認するために、試料断面の SEM 観察とエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX) による元素分析を行った。図7中の破線で挟まれた領域が多孔質型酸化皮膜で、その下部がアルミニウム素地である。本 SEM 像からは添着された塩化カルシウムを明確に確認することは困難であるが、EDX の元素マッピングから、アルミニウム Al は全領域に、酸化皮膜の構成元素である酸素 O と添着金属塩の構成元素であるカルシウム Ca は、ほぼ皮膜部分にのみ分布することが観察される。これより、塩化カルシウムは溶液含浸法によって陽極酸化皮膜内部に添着可能であることが確認された。

電解浴の種類や、陽極酸化処理および細孔径拡大処理時の操作条件を変化させることで細孔容積が異なる多孔質型酸化皮膜を調製することができる。図8に、添着前の酸化皮膜の見掛け密度  $\rho_a$  と、

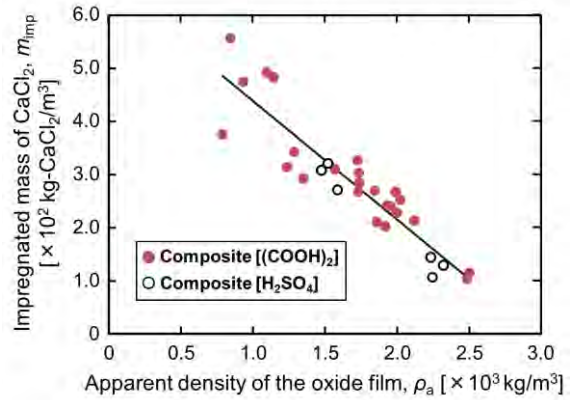


図8  $\text{CaCl}_2$  添着量と皮膜密度の関係

単位皮膜体積あたりの  $\text{CaCl}_2$  添着量  $m_{\text{imp}}$  の関係を示す。硫酸とシュウ酸のいずれの電解浴を用いて調製した陽極酸化皮膜でも、 $\text{CaCl}_2$  添着量は概ね皮膜の見掛け密度に対して負の相関が認められる。これは、見掛け密度が小さい、すなわち皮膜中の全細孔容積が大きな酸化皮膜の方が、より多くの  $\text{CaCl}_2$  水溶液を細孔内に充填することができるためである。また、硫酸浴に比べてシュウ酸浴の方が皮膜密度を広範囲に変えることができるため、 $\text{CaCl}_2$  添着量の自由度の観点から見ればシュウ酸陽極酸化皮膜の方が優位と言える。

### 3.3 水蒸気収着特性

陽極酸化皮膜中の  $\text{CaCl}_2$  含有量が異なる複合材を4種類用意して水蒸気収着等温線を測定した。図9の横軸は、収着温度  $30^\circ\text{C}$  における飽和水蒸気圧を基準とした相対蒸気圧  $\phi$  を示し、図中には、比較材料として用意した市販の RD 型シリカゲル

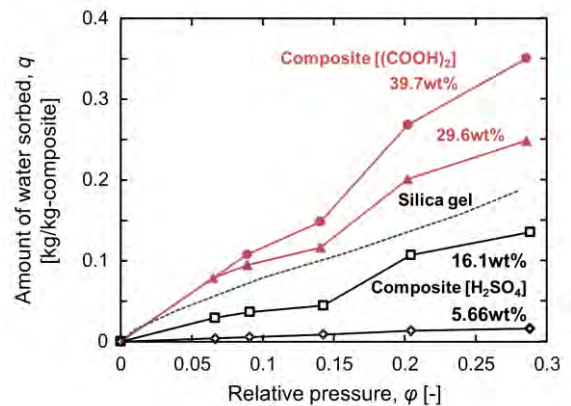


図9  $\text{CaCl}_2$ -アルミニウム複合材の水蒸気収着等温線 ( $30^\circ\text{C}$ )

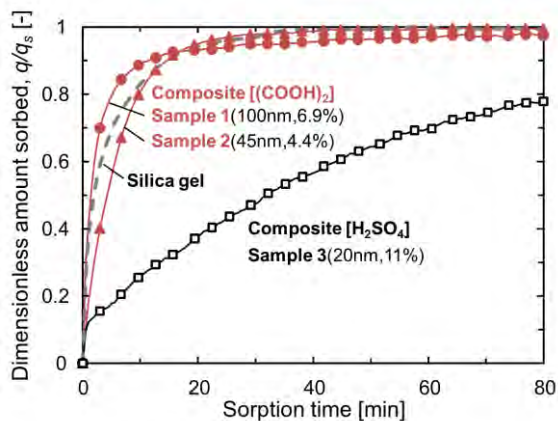


図 10 CaCl<sub>2</sub>-アルミニウム複合材の水蒸気吸着量経時変化

の結果も併示した。なお、吸着冷凍サイクルの標準温度条件として、吸着工程： $T_{ev} = 10^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{ad} = 30^{\circ}\text{C}$ 、脱着再生工程： $T_{cnd} = 30^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{reg} = 80^{\circ}\text{C}$ で操作した場合の相対蒸気圧範囲は $\phi = 0.09 \sim 0.29$ となる。また、「吸着 (sorption)」は吸着と吸収の両方の意味を含み、水/CaCl<sub>2</sub> 添着複合材系は吸収に分類される。本吸着系では、水蒸気圧によって塩化カルシウムに水が付加する水和と水溶液に変化する潮解が起こる可能性がある[15]。

図 9 より、CaCl<sub>2</sub>-アルミニウム複合材は低圧域において水蒸気吸着能を示し、その平衡吸着量はCaCl<sub>2</sub> 含有量の増加に伴って増大することがわかる。特に、CaCl<sub>2</sub> 含有量 30%以上の複合材では、シリカゲルを上回る水蒸気吸着量が認められる。

また、図 10 の水蒸気吸着量経時変化から、比較的大きな細孔を有するシュウ酸陽極酸化皮膜 (Sample 1: 100 nm, Sample 2: 99 nm) に塩化カルシウムを添着した複合材では、シリカゲルと同等の速度で水蒸気を吸着することがわかる。

#### 4. まとめ

吸着式冷凍機は低温度域の排熱や太陽熱を駆動熱源として駆動する省エネ型の熱変換機器である。本稿の後半で紹介した金属塩-アルミニウム複合材は、市販シリカゲルと同等以上の水蒸気吸着能を示し、吸着式冷凍機用の新たな蓄熱材料になり得ると考えられる。しかし、本複合材の水蒸気吸

脱着の繰り返し安定性や材料自身の腐食性の評価、陽極酸化皮膜の構造ならびに金属塩添着量の最適化など、多くの検討課題が残されている。また、調製条件によっては水蒸気吸着挙動が大きく異なる複合材が出現することから、その原因を明らかにする意味でも、皮膜細孔内での金属塩と水蒸気の反応機構を解明する必要がある。

#### 謝辞

本研究は、金沢大学理工研究域・大谷吉生教授、瀬戸章文教授、東秀憲助教、そして、諏訪祐司君をはじめとする多く学生の協力のもとで実施しているものである。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- [1] (財)省エネルギーセンター, 工場群の排熱実態調査 (2000).
- [2] (株)三菱総合研究所, 平成 24 年度新エネルギー等導入促進基礎調査報告書 (2013).
- [3] (社)化学工学会編, 蓄熱技術—理論とその応用, 第 II 編「潜熱蓄熱, 化学蓄熱」, 信山社サイテック (2001).
- [4] (株)前川製作所ホームページ, <http://www.mayekawa.co.jp/ja/>
- [5] ユニオン産業(株) ホームページ, <http://www.union-industry.co.jp/index.html>
- [6] 汲田幹夫, 伝熱, **45**-192 (2006) 20.
- [7] Shimooka, S. et al., J Chem. Eng. Japan, **40-13** (2007) 1330.
- [8] Bonaccorsi, L. et. al., Micropor. Mesopor. Mat., **144** (2011) 40.
- [9] 佐藤敏彦, 神長京子, 新・アルマイト理論, カロス出版 (1997).
- [10] 材料技術研究協会編, 実用表面技術総覧, 産業技術サービスセンター (1993).
- [11] Lei, Y. et. al., Prog. Mater. Sci., **52-4** (2007) 465.
- [12] Suwa, Y. et. al., J. Chem. Eng. Japan, **47-7** (2014) 602.
- [13] Aristov, Yu. I., 伝熱, **45**-192 (2006) 12.
- [14] Kumita, M. et. al., Appl. Therm. Eng., **50-2** (2013) 1564.
- [15] 劉醇一, 伝熱, **45**-190 (2006) 21.

## デシカント空調システム Desiccant Air Conditioning System

窪田 光宏 (名古屋大学)  
Mitsuhiro KUBOTA (Nagoya University)  
e-mail: kubota@nuce.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

我が国の資源・エネルギー問題を語るとき、将来的に「熱」というキーワードを外すことは不可能になるであろう。「熱」は、あらゆるエネルギープロセスに介在するだけでなく、エネルギーの最終形態として大量に廃棄されているためである。実際に我が国のエネルギーフローではエネルギー転換終了時ですでに1次エネルギー投入量の31%を損失している [1]。さらに最終エネルギー需要の損失まで含めると、一次エネルギーの実に50%近くが未利用のまま熱として廃棄されていると推定される。この損失を回避してエネルギーの利用効率を向上させるためには、熱のハンドリングを高効率に行う熱利用技術が必要不可欠である。この要請に対応する技術として、吸着現象や化学反応に伴う吸・発熱を利用する熱利用技術があり、古くから研究開発が継続的になされている。本稿では、この中でも特に80°C以下の低温排熱により駆動して湿度制御を実現するデシカント空調システムについて述べる。デシカントは吸湿材を意味し、塩化リチウムなどの塩水溶液を吸湿材として用いる液体式、シリカゲルやゼオライトなどの吸着材を用いる吸着式に大別される。このうち液体式は吸収液による金属腐食や結晶化、吸収液の飛散などの課題が多く、我が国では吸着式の研究開発が進んでいる。そこで本稿では吸着式デシカント空調システムに着目し、その作動原理・特徴について概説をした後、我々が取り組んでいる直交流熱交換器型吸着器を用いたシステムの研究成果を紹介する。

### 2. 吸着式デシカント空調システム

#### 2.1 基本構成

上述のように、吸着式デシカント空調システムはシリカゲル、ゼオライトなどの吸着材（多孔質固体）が有する水蒸気の吸・脱着作用を利用して

空気の除・加湿を行う。吸着材の水蒸気吸・脱着作用を利用する点では冷熱生成を目的とした吸着式冷凍機と同じであるが、吸着式冷凍機が密閉減圧系であるのに対して、デシカント空調システムは開放常圧系で動作が行われる。このため、吸着式冷凍機をクローズドサイクル、デシカント空調システムをオープンサイクルと呼ぶ場合もある。

デシカント空調システムは、家庭用の小型除湿器～産業用の大規模装置に至るまでの幅広い処理容量に対して、ハニカムロータを吸着器とするシステムがすでに実用化されている。そこで、まずこのロータ方式について概説する。

図1にロータ方式のデシカント空調システムのシステム構成を示す。ここでは基本構成としてハニカムロータと熱回収用の顕熱交換ロータを組み合わせた2ロータシステムについて示している。

デシカント空調システムの中心構成要素であるハニカムロータはコルゲート状に成型された無機繊維の母材（厚さ：0.2 mm程度）上にシリカゲル、ゼオライトが直接合成あるいはバインダーを用いて塗布されたものである。また、処理空気、再生空気が流通する空気流路の大きさは、除湿性能と圧力損失のバランスを考慮して、幅3 mm×高さ2 mm程度となっている。さらに、このロータが所定の面積比で除湿ゾーンと再生ゾーンに仕切られており、それぞれ処理空気と再生空気が流通する仕組みとなっている。一方、顕熱交換ロータはアルミシートをコルゲート状に成型した構造となっており、再生空気と処理空気それぞれの顕熱を回収・熱交換するための要素機器である。

#### 2.2 動作原理

デシカント空調システムにおける流通空気の温湿度の状態を表した空気線図を図2に示す。図1と図2を用いてロータ方式のシステムの動作原理を説明する。

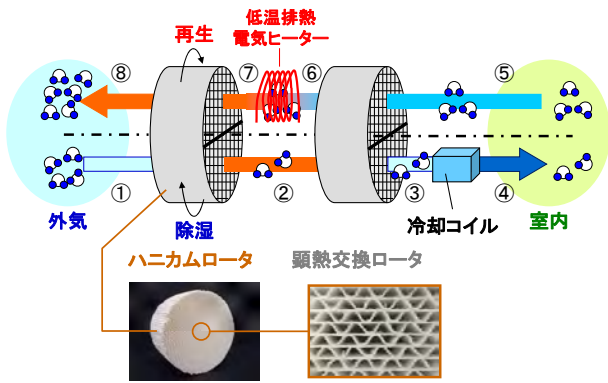


図1 デシカント空調システムの基本構成

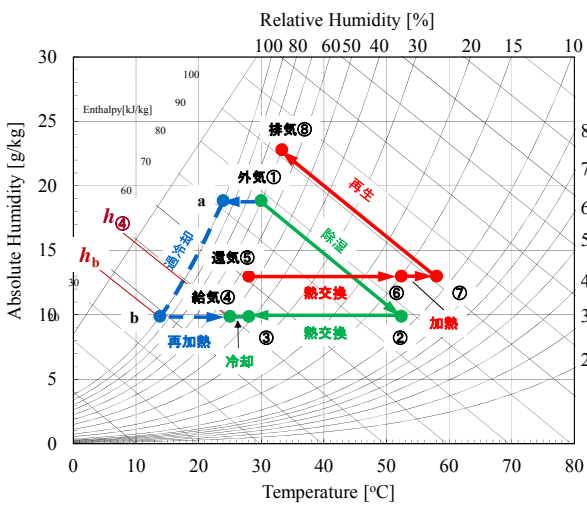


図2 デシカント空調システムの空気状態

### 2.2.1 除湿過程

外気 (①) が除湿ゾーンにあるロータを通過すると、ロータ上の吸着材に水蒸気が吸着されて除湿空気 (②) が得られる。吸着熱の発生に伴い温度上昇した除湿空気 (②) は、顕熱交換ロータを用いた熱交換により室温近くまで冷却された後 (③)、さらに冷却コイルによって温度を下げた上で室内に供給される (④)。

### 2.2.2 再生過程

室内からの還気 (⑤) は顕熱交換ロータを通過する際、除湿空気との熱交換により予熱される (⑥)。この予熱還気が低温排熱あるいは電気ヒーターにより再生温度まで加熱された後 (⑦)、再生ゾーンのロータに供給される。すると吸着材から水蒸気が脱着し、還気はより高湿度となって、最終的に外気に排出される (⑧)。

システム稼働時には、ハニカムロータが 30 rph

程度で回転しながら除湿ゾーンと再生ゾーンを通過することにより、1 つのロータで除湿と再生が連続的に行われる。

### 2.3 特長

デシカント空調システムの利点として以下が挙げられる。

- 1) 80°C以下の熱エネルギーにより駆動可能  
⇒低温排熱や太陽熱の利用が可能
- 2) 熱駆動であるため電力消費量が少ない
- 3) 温度と湿度を独立に制御可能
- 4) 低い環境負荷 (吸着材・吸着質が安全・無害)
- 5) シンプルな構造 (ロータ方式の場合)

### 2.4 省エネルギー性

吸着式と蒸気圧縮式除湿システムのエネルギー消費量を比較するため、図2に蒸気圧縮式システムにおける空気状態を併示する。蒸気圧縮式システムでは外気を露点温度以下にまで冷却することにより (図2:a)、水蒸気が凝縮・結露して除湿空気を得られる。しかし、そのままでは空気温度が低すぎるため、供給空気温度まで再加熱をした後 (図2:b)、室内に供給される。この際、蒸気圧縮式に比べて吸着式のエネルギー消費量の方が  $h_{④}-h_b$  だけ小さい。このため、特に再生熱源として排熱を用いた場合、デシカント空調システムは高い省エネルギー性を有している。

### 2.5 熱・物質移動

ハニカムロータでは吸着質である水蒸気の物質移動とともに吸・脱着に伴う発・吸熱による熱移動が生じる。除湿時の熱・物質同時移動現象の概念図を図3に示す。物質移動では流通空気と吸着材層間の境膜物質移動 (M-1)、吸着材塗布層内の粒子間拡散 (M-2)、吸着材粒子内拡散 (M-3)、水蒸気吸着 (M-4) が生じる。一方、熱移動については水蒸気吸着に伴う発熱 (H-4)、吸着材粒子内伝熱 (H-3)、吸着材塗布層内の粒子間伝熱 (H-2)、流通空気と吸着材層間の対流伝熱 (H-1) が生じる。除湿速度はこれら各速度過程が相互に影響した総括吸着速度により支配される。

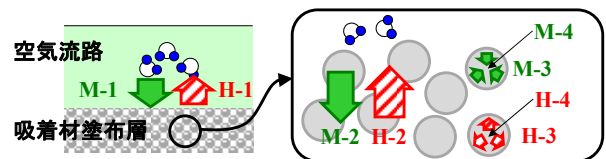


図3 ハニカムロータ内の熱・物質移動

## 2.6 高度化に向けた課題

ロータ方式のデシカント空調システムはすでに実用化されているが、さらなる高度化を目指す上で課題点もある。その一つに断熱除湿が進行するロータ方式では、水蒸気吸着に伴いロータ温度が上昇してしまう点が挙げられる。たとえば、理想的な断熱除湿でもロータ出口の空気温度は 30°C から 45.2°C (30°C, 60 %RH : 16 g/kg-DA $\Rightarrow$ 10 g/kg-DA への除湿) に上昇するが、一般に吸着熱は凝縮熱に比べて大きいため、実システムではさらに温度上昇する。吸着材の水蒸気吸着量はこの温度上昇に伴う相対湿度の低下により減少するため(図4)、ロータ出口に近づくほど吸着材の利用率が低下する。実際には、上流部での除湿によって下流部の絶対湿度がさらに低下しているため、下流部ほど水蒸気吸着能力の低下が顕著になり、吸着材がほとんど利用されないことになる。

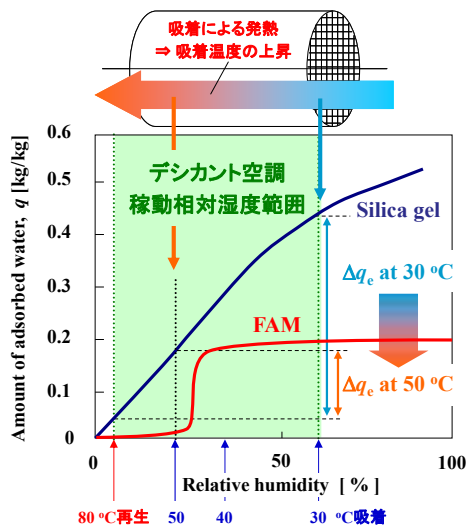


図4 ロータ方式における断熱除湿の問題点

また、再生から除湿過程に移行する際、再生ゾーンの通過により温度上昇したロータがそのまま吸着ゾーンに入り、水蒸気吸着能力が十分でない状態が生じるロータ顕熱の持ち込みも問題である。

我々はこれらの問題を根本的に解決すべく、吸着器としてロータではなく熱交換器を用いることにより、除湿時に積極的に吸着器を冷却して吸着材の利用効率を向上させるシステムに着目し、研究を実施している。次節ではこの熱交換器型吸着器を用いたシステムについて紹介する。

## 3. 熱交換器型吸着器を用いたデシカント空調システム

### 3.1 システム概要

図5は、直交流熱交換器型吸着器を用いたシステムの概念図である。本システムではガス-ガス熱交換で用いる金属製積層型直交流熱交換器に吸着材を塗布することにより吸着器としている。具体的には、空気流路のフィン表面にシリカゲル、ゼオライトなどの吸着材を塗布した吸着材塗布層と吸着材未塗布の冷却用熱交換媒体の流通層を作成し、それらを交互に配置した構造となっている。この構造により、除湿操作時には吸着材を塗布した流路に処理空気を流通し除湿を行うと同時に、その流路と直交する冷却用熱交換媒体の流路に冷却空気を流通させる。この結果、冷却空気により吸着材温度の上昇が緩和され、吸着材の利用効率の向上が期待できる。一方、再生操作では吸着材を塗布した流路に加熱空気を直接流通させて、吸着材の再生を効率的に行う。

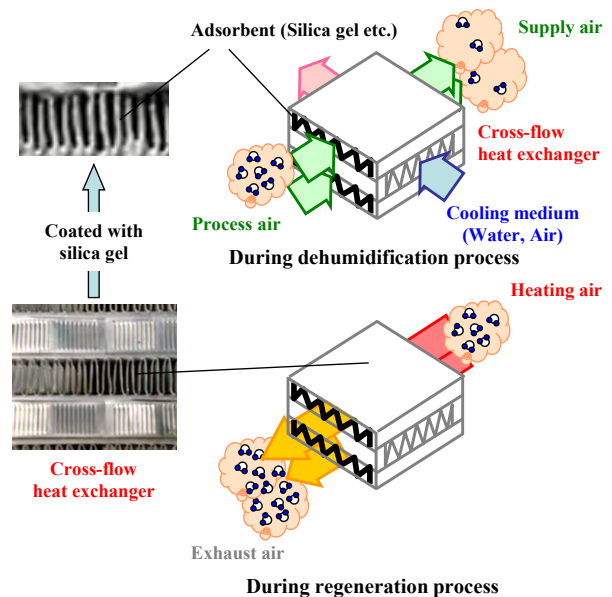


図5 直交流熱交換器型吸着器を用いたシステム

### 3.2 類似システム：ダイキン工業 DESICA

熱交換器表面に吸着材を塗布する方式としては、他にダイキン工業株式会社の水配管レス調湿外気処理機 DESICA があり、すでに市販されている。DESICA では図6に示すように、圧縮式ヒートポンプの凝縮器と蒸発器の表面に吸着材を塗布したハイブリッドデシカント素子 (HB デシカ素子)



を開発している。HB デシカ素子では除湿時に圧縮式ヒートポンプの冷媒の蒸発潜熱を利用して吸着材の冷却を行う。一方、再生時には冷媒の凝縮熱により再生エネルギーを供給して効率的な熱の授受を行い、除湿性能の向上と再生温度の低温化を実現している。

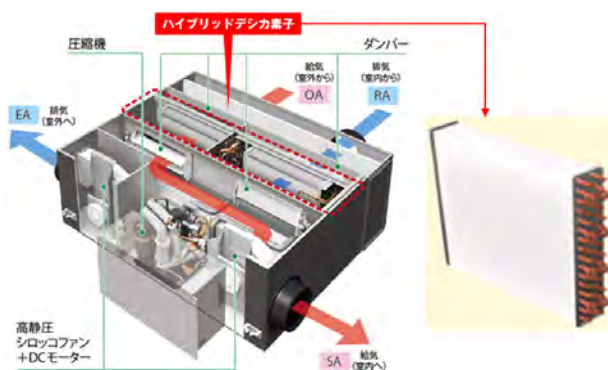


図 6 DESICA の構造 [2]

上述した DESICA は熱交換媒体が気液二相流であるのに対して、我々のシステムでは空気の利用を想定しているため、吸着器となる熱交換器の構造は両者で大きく異なっている。気液二相流や液体を熱交換媒体とする方が、気体を用いるより伝熱性能はるかに優れていることは周知の事実であるが、本システムでは熱交換媒体用の配管の設置が困難な応用先、たとえば移動体などを想定しているため、空気を熱交換媒体としている。

### 3.3 特徴

熱交換器型吸着器を用いたデシカント空調システムの特徴を以下に示す。

- 1) ◎ 熱除去による吸着材利用率の向上  
⇒ 除湿性能の向上, 均一な吸着材利用による空気流れ方向の装置のコンパクト化
- 2) ◎ 熱除去による処理空気温度の上昇抑制  
⇒ 顕熱負荷の低減による省エネルギー化
- 3) ◎ 擬似的な等温除湿の達成  
⇒ 再生温度の低温化が可能
- 4) ◎ 水蒸気吸着の相対湿度依存性が大きい  
吸着材の除湿性能の向上
- 5) △ 連続除湿には 2 器の吸着器が必要
- 6) △ 空気搬送用ブロー動力の増大

特徴 3) について、図 7 の空気線図を用いて説明する。本システムでは水蒸気吸着に伴い発生する熱を積極的に除去するため、理想的には吸着器

出口の空気温度が入口温度と等しいまま除湿が行われる等温除湿が実現される。この場合、45°C の再生温度では 7 g/kg-DA の除湿空気を得られる。この除湿空気を断熱除湿が行われるロータ方式で得るには 71°C の再生熱源が必要となることから、等温除湿では再生温度の低温化が可能となる。

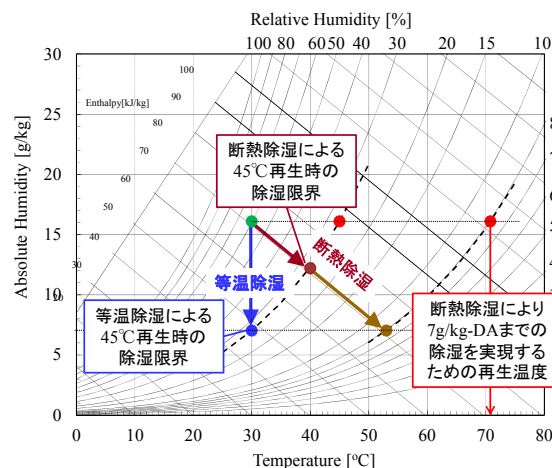


図 7 等温除湿の優位性

また、特徴 4) について、近年、デシカント空調分野への応用が進む Functional Adsorbent Material (FAM) や Mesoporous Silica (MPS) などは特有の S 字型の吸着等温線を示す(図 4 参照)。これらの吸着材では狭い相対湿度範囲で急激な吸着量変化が生じるため、除湿と再生がこの吸着量変化を挟む相対湿度条件で行われる際には、いずれの条件でも高い有効除湿量を得られる。しかし、例えばロータ式で吸着材の温度上昇により、吸着量変化が生じる相対湿度以下になった場合、急激な除湿性能の低下が引き起こされる。これに対して、本システムでは処理空気の温度上昇を抑制できるため、水蒸気吸着量の相対湿度依存性の強い吸着材を用いても、幅広い処理条件で除湿性能を維持することが可能となる。

### 3.4 研究状況

以上のように優れた特性を持つ熱交換器型吸着器を用いたデシカント空調システムについて、我々はこれまでに 1) 除湿速度を支配する水蒸気の総括物質移動係数の等温条件下での測定 [3]、ならび 2) ラボスケールの試作吸着器による空気冷却による除湿性能の向上の実証[4]を行ってきた。このうち、次ページ以降、空気冷却による除湿性能向上に関する実証実験の結果を紹介する。

### 3.4.1 ラボスケールの試作吸着器による空気冷却による除湿性能の向上の実証

直交流熱交換器型吸着器を用いたデシカント空調システムに関する検討は世界で数例なされているものの、実際に吸着器を用いて除湿性能についての実験的検討を行っている例は少ない。そこで、我々は最も汎用性の高い吸着材であるシリカゲルを用いたラボスケールの直交流熱交換器型吸着器を試作し、空気冷却による水蒸気吸着性能の向上を実証するとともに、処理条件が吸着器の伝熱・水蒸気吸着特性に及ぼす影響について考察を行った。このために、図8のようにアルミ製ハニカム積層直交流熱交換器の一方の流路にシリカゲル（富士シリシア化学，粒径： $<7\ \mu\text{m}$ ）を塗布した直交流熱交換器型吸着器を試作した。熱交換器は全11段（吸着用流路：5段，冷却用流路：6段）から構成され、波形フィンには高さ8 mm，幅2.5 mmの形状である。また，各流路は厚さ1.1 mmのアルミ板で仕切られている。

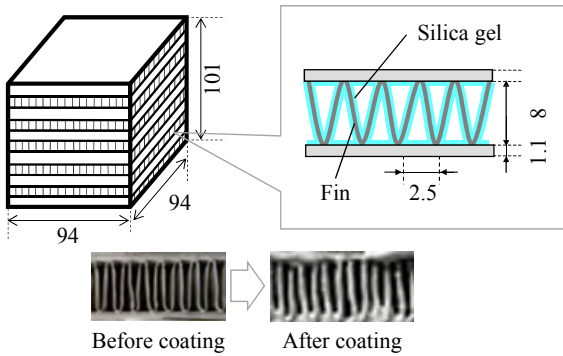


図8 直交流熱交換器型吸着器

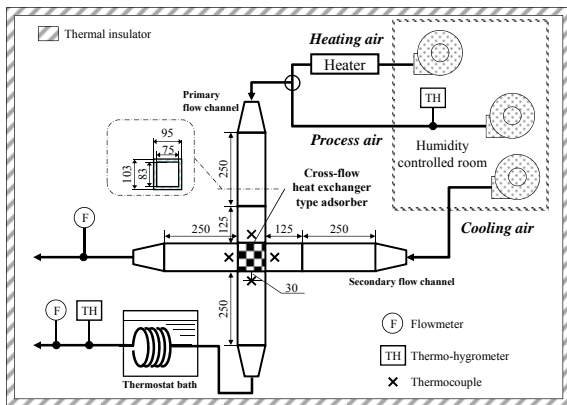


図9 実験装置図

この直交流熱交換器型吸着器を組み込んだ実験装置を図9に示す。本装置は上述した直交流熱交換器型吸着器，それに直交する2つの空気流路，湿度調整部，エアヒーター，ブロワーなどから構成される。空気流路は吸着材を塗布した流路（Primary flow channel：吸着過程では処理空気：PAを，再生過程は加熱空気：HAを流通）と吸着材を塗布していない流路（Secondary flow channel：吸着時に冷却空気：CAを流通）から成っている。

図10は，冷却空気を流通させない場合と流速 $u_{CA}=4.0\ \text{m/s}$ で流通させながら吸着実験を行った際の処理空気の出口温度およびシリカゲルの水蒸気吸着率 $q/q_e$ の経時変化を示したものである。本図より，吸着時に冷却空気を流通させることにより，処理空気出口温度の降温速度が向上するとともに吸着速度も大幅に増大している。たとえば実験開始8 min後では $u_{CA}=4.0\ \text{m/s}$ の方が $u_{CA}=0\ \text{m/s}$ の場合に比べ2.2倍の吸着率を達成しており，水蒸気吸着性能の向上に対する空気冷却の有効性が実証された。

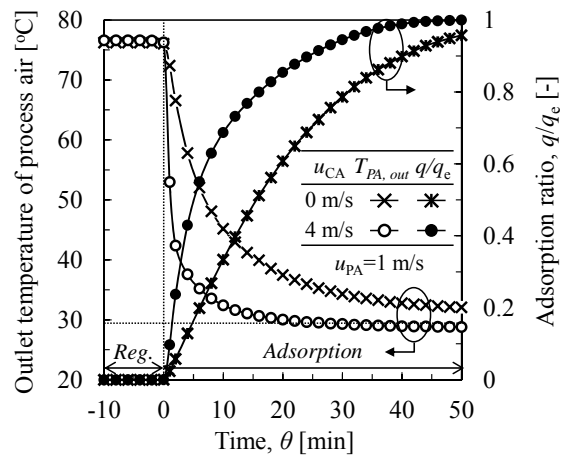


図10 冷却空気の有無が処理空気の出口温度ならびに水蒸気吸着率に及ぼす影響

次に，水蒸気吸着の促進効果の冷却空気流速に対する依存性を明らかにするため，図11に冷却空気流速 $u_{CA}$ と吸着開始から2~8 min後の吸着率との関係を示す。本図より，いずれの吸着時間でも冷却空気流速の増大に伴い吸着率が向上している。しかし，冷却空気流速に対する吸着率の増加割合は $u_{CA}=2\sim 4\ \text{m/s}$ でかなり小さい。これは，処理空

気の除熱に対する冷却空気の効果が  $u_{CA}=2$  m/s 以上で大きく減少するためである。

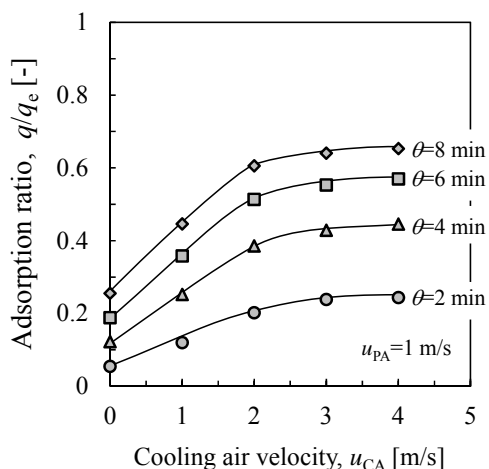


図 11 水蒸気吸着率の冷却空気流速依存性

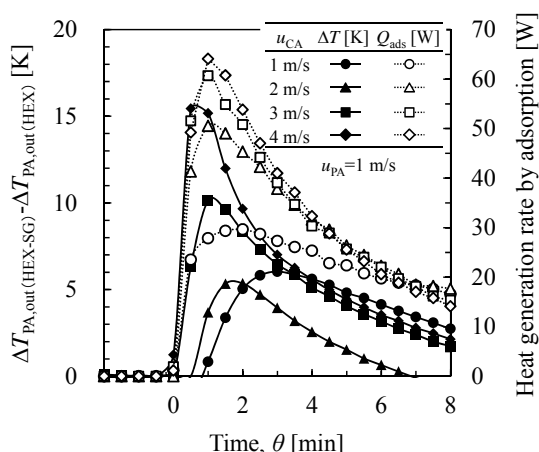


図 12 処理空気出口温度と吸着熱の関係

さらに、冷却空気流速をパラメータとした際の本吸着器における熱・物質移動について考察するため、図 12 に熱交換器型吸着器 (HEX-SG) とシリカゲルを塗布していない熱交換器単体 (HEX) の処理空気出口温度の差の経時変化を示す。また、水蒸気吸着速度と水の蒸発潜熱から求めた吸着熱の経時変化も併示する。本図では、熱交換器型吸着器と熱交換器単体の温度差を求めることにより、水蒸気吸着に伴う発熱の有無が処理空気出口温度に及ぼす影響を明らかにしている。本図において、吸着熱の発熱挙動と処理空気出口温度の差の経時変化を比較すると、若干のずれは認められるものの出口温度差の極大値と吸着熱の極大値は時間的

に近接しており、その後の経時変化も比較的類似している。この結果から、本実験装置においては吸着熱の発生が出口空気の温度変化に大きな影響を与えており、冷却空気の流通により除熱が促進されるものの、吸着現象に伴う発熱速度に対して除熱速度が十分でないことが示唆された。このことから、吸着性能のさらなる向上には吸着器の熱促進が不可欠であることが明らかになった。

#### 4. おわりに

本稿では、熱エネルギー、特に  $80^{\circ}\text{C}$  以下の低温熱により湿度制御を可能とする吸着式デシカント空調システムについて、その概要説明から、現在我々が検討を進めている直交流熱交換器型吸着器を用いた新規システムの紹介を行った。デシカント空調システムについては、企業、大学が精力的に研究開発を進めており商品化もなされているものの、大規模な市場導入には至っていない。デシカント空調システムに限らず熱利用技術は適用先ごとに需要と供給のニーズが異なるため、画一的なパッケージ化が難しい。このため、たゆみない技術開発により高いエネルギー効率、コンパクト、低コストなシステムを開発していくことはもちろんであるが、市場ニーズとのマッチングを図っていくことも重要である。

前述の通り、将来的なエネルギー利用において「熱」は重要な役割を担うものと考えられる。さまざまなプレイヤーの参画により社会実装性の高いデシカント空調システムが構築されていくことを期待する。

#### 参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁, 平成 26 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2015) (2015).
- [2] ダイキン工業株式会社ホームページ, <http://www.daikinaircon.com/catalog/desika/>
- [3] 柴田翔子, 堀江永有太, 窪田光宏, 松田仁樹, 日本冷凍空調学会論文集, **29 (2)** (2012) 271-278.
- [4] 窪田光宏, 柴田翔子, 松田仁樹, 日本冷凍空調学会論文集, **30 (3)** (2013) 213-220.

## 排熱回収型吸収式ヒートポンプによる高温生成システム

### High Temperature Generation System by Absorption Heat Pump Recovering Exhaust Heat

板谷 義紀 (岐阜大学)

Yoshinori ITAYA (Gifu University)

e-mail: yitaya@gifu-u.ac.jp

#### 1. はじめに

大幅な省エネルギーと炭酸ガス排出削減を図る上で、未利用であった低レベルエネルギー回収が不可欠となっている。吸収式ヒートポンプは、熱駆動型の冷凍機としてすでに多くの実用化が図られ、商用器として市販に至っている。このような吸収式ヒートポンプをできるだけ低温排熱でも効率よく駆動するように、さらなる高性能技術を開発することは、短期的に省エネルギー効果を向上させるためにも重要課題である。

筆者らは、臭化リチウム/水系 (LiBr/H<sub>2</sub>O) 吸収式ヒートポンプ (AHP) を利用して、80℃程度の温排熱から 120℃以上の高温空気および 100℃レベルの蒸気生成システムに関するベンチスケール試験を実施している。また、AHP の高性能化を目指して、吸収液にゼオライトなどの吸着剤微粒子を分散したスラリーを吸収液に利用する方式を検討してきた。その研究過程で、吸着剤微粒子分散吸収液スラリーが LiBr 溶解度以上の過飽和状態になると、LiBr 微細結晶スラリーが形成されることを発見した。このようなスラリーは流動性を十分維持するため、AHP の性能向上や蓄熱剤としての活用が見込まれる。本稿では、AHP による排熱回収型高温生成技術と吸収液のスラリー化を利用した性能評価に関するこれまでの成果の一端を紹介する。

#### 2. 排熱回収型 AHP 高温生成

##### 2.1 システムの概要

著者らは、九州大学、岡山県立大学、森松工業、ThyssenKrupp Otto、高砂熱学工業との産学連携により、図 1 に示すように 80℃の温排水から熱回収して、150℃以上の高温蒸気を生成するシステム開発を実施し、高温蒸気生成に成功している。本システムは、ゼオライトによる吸着式ヒートポンプを利用して、ゼオライト層に 80℃の温水を

直接接触させて 150℃以上の高温蒸気を生成させる方式である。水を吸着したゼオライトの再生には、デシカントで露点温度-40℃以下に乾燥した空気を、80℃の温水を熱源とする AHP により 120℃以上に昇温して、熱風の通気乾燥を行う。このような方式を採用することにより、ゼオライト充填層の伝熱抵抗および装置の熱容量損失を抑制して、高温蒸気生成および吸着剤再生を効率よく行うことができる。これらの成果の詳細は、文献を参照されたい [1-3]。

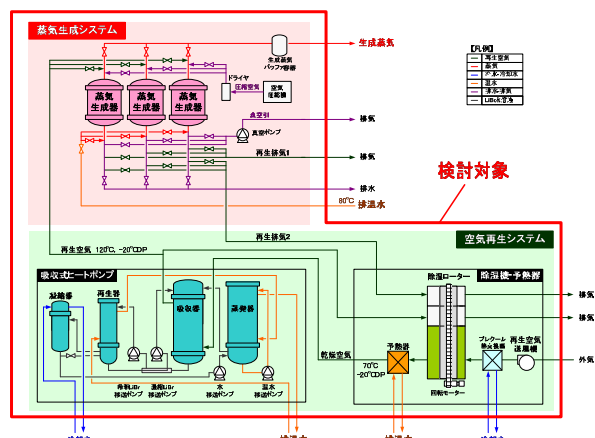


図 1 温排熱回収型高温蒸気生成システム

著者らの岐阜大学と森松工業のグループでは、温熱回収型の高温空気生成 AHP システムを試作して、性能評価試験を実施した [4]。

##### 2.2 ベンチスケール AHP 試験装置

本温熱回収型ベンチスケール LiBr/水系 AHP 試験装置の概略図を図 2 に示す。装置は吸収器、蒸発器、再生器、凝縮器から構成され、さらに熱回収用の蒸発器 2 も設置されている。模擬排熱には 80℃の温水を用い、再生器から蒸発器 1 へと供給することにより、吸収液の再生熱源および水の蒸発熱源に利用する。蒸発器で蒸発した水蒸気は吸収器内で濃縮吸収液に吸収され、発熱した熱は伝

熱管を通して空気と熱交換し、熱風を生成する。吸収器の伝熱管には空気加熱の伝熱促進を図るために、スパイラル銅管を垂直多管に配置して、銅管内面に吸収液を液膜状に流下させ、上部から供給される水蒸気を管内部で吸収する。このような吸収器上部構造の詳細を図2の下部に示す。空気は多管周りを流通する間に加熱され、吸収器内部で空気を直接加熱する構造とした。吸収器出口の希釈吸収液はまだ高温状態を維持しているために、蒸発器2で蒸気としての熱回収を行った後、再生器で再生濃縮が行われる。再生器で蒸発した水蒸気は冷却水で冷却しつつ凝縮器で凝縮され、蒸発器へと供給される。

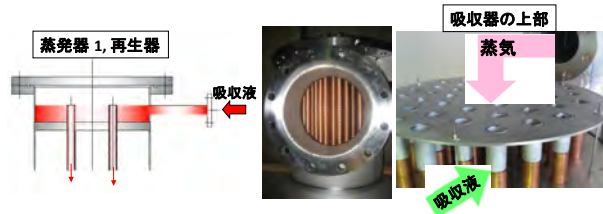
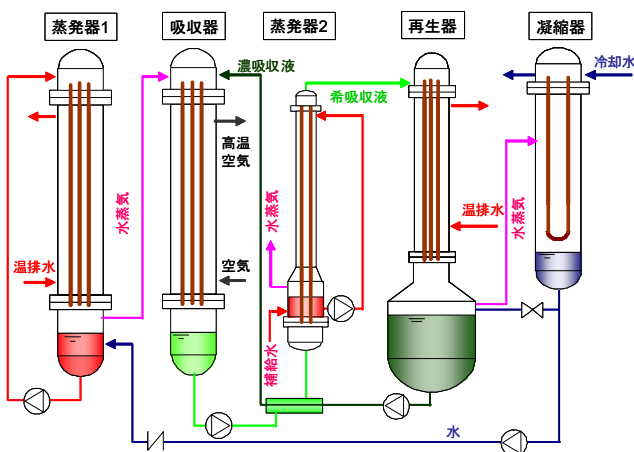


図2 ベンチスケール AHP 試験装置フロー図

### 2.3 ベンチスケール AHP 性能評価結果

本 AHP 試験装置により得られた結果の一例を図3に示す [4]。ここでは、熱源である温水温度 80℃、流量 9.9 kg/s、凝縮器冷却水温度 15℃、流量 7.2 kg/s としたときの各部の温度および空気流量を示している。吸収液は水蒸気吸収により吸収器出口で 130℃以上の高温に達し、空気は吸収器内で 80℃から 125℃まで加熱されている。また、吸収器出口の高温の吸収液から熱回収するために、蒸発器2で 80℃の水から蒸気生成させたところ、

100℃の蒸気が 0.0047 kg/s 得られた。蒸気生成量を 0.0025 kg/s に絞った場合には 110℃の蒸気が生成した。

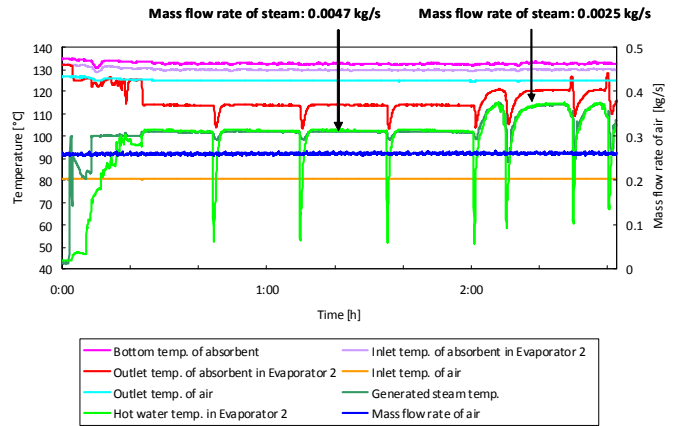


図3 AHP 試験による温度と熱風生成量の経時変化

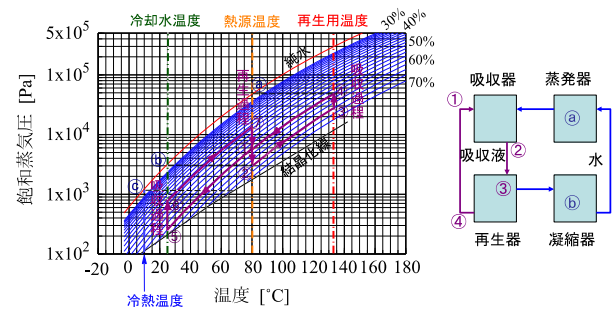


図4 LiBr/水系飽和線図と AHP サイクル

このような温度パターンは、図4の LiBr/水系飽和線図上で①→②→③→④→①の AHP サイクル操作から理解できる。また、吸収器出口での吸収液はまだ高い濃度を有しており、さらに継続して①→⑤→⑥→⑦→①のサイクルを利用すれば、高温と 10℃以下の冷熱の同時生成システムを構成することが可能となる。ただし、本図でのサイクルでは凝縮器の冷却水温度を 25℃としており、平衡論的には冷却水がこの程度の温度では、130℃と 10℃のヒートアップと冷熱生成が原理的には可能であることを示している。

本試験結果から、熱源は排熱を前提として吸収液、温水、冷却水等の液循環ポンプ動力ベースでの熱風および蒸気生成の COP を試算したところ、蒸気温度 100℃の場合には 25 に達する高いヒートポンプ性能が得られた。

### 3. 微細結晶スラリー吸収液

#### 3.1 微細結晶スラリー効果

AHP では吸収液の水蒸気吸収に伴う濃度低下が水蒸気吸収速度の低減要因となる．これまで、LiBr/H<sub>2</sub>O 系吸収液に第3成分を添加剤として混合させることにより、吸湿性増大や蒸気吸収に伴う希釈熱低減を図る研究が行われてきた [5-7]. これに対して、LiBr/H<sub>2</sub>O 系吸収液に吸着剤を分散した場合、溶質である LiBr が吸着剤に吸着して見かけ上、飽和溶解度以上に吸収液中の LiBr 含有率を高くすることができる．このとき AHP 吸収器内では吸収液は水蒸気を吸収して LiBr 濃度が徐々に低下する過程で、吸着していた LiBr が脱着することにより LiBr 濃度低下が緩和される [8].

吸着剤微粒子を分散した吸収液スラリーが過飽和濃度以上になると、吸着剤を核として粒子周りに結晶成長して LiBr 微細結晶スラリーが形成される．図 5 は、80 °C 程度に加温した状態で LiBr を溶解させ、常温に冷却して飽和溶解度以上に達したときに結晶成長した状態を示した写真である．図 5 (a) は溶液だけで結晶成長したもので、(b) は予めゼオライトを吸着剤として分散させておいた場合の微細結晶スラリーである．前者は明らかに大きな結晶塊に成長しているのに対して、後者は流動性を有するシャーベット状のスラリー形成が確認された．このような微細結晶スラリーが形成される過程の概念図を図 6 に示す．吸収液の高濃度化に伴い LiBr がゼオライト吸着剤粒子内に吸着され、飽和濃度に達すると粒子周囲に結晶が成長する．一方、吸収液が水蒸気を吸収して希釈されると、まず結晶が溶解し吸収液はほぼ飽和濃度に維持され、全ての結晶が溶解すると吸着 LiBr の脱着が開始される．このような吸収液スラリーを用いた場合の AHP サイクルは、飽和蒸気圧 vs. 温度の飽和線図上で図 7 に表すことができる．線図上の記号は、右図の AHP システム各位置での状態に対応する．ゼオライト微粒子を吸収液に分散しておくことで、再生過程で高濃度まで濃縮した場合でも、温度が低下して飽和濃度に達したとき微細結晶スラリー化して流動性を維持できるため、高濃度での操作を継続することが可能となる．しかし、通常の吸収液単独操作では全サイクルを通して飽和濃度以下で操作する配慮が必要となり、高濃度への再生は避けなければならない．



(a) ゼオライト分散無 (b) 微細結晶スラリー  
図 5 過飽和結晶状態

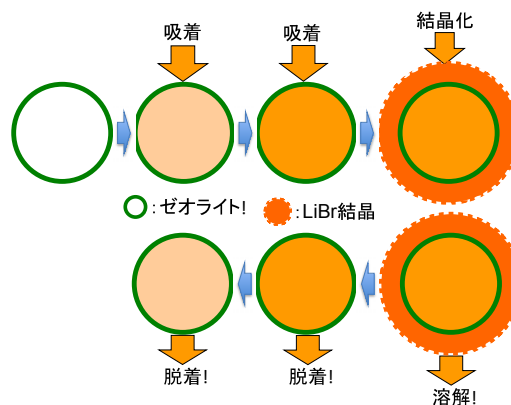


図 6 微細結晶スラリー形成過程概念図

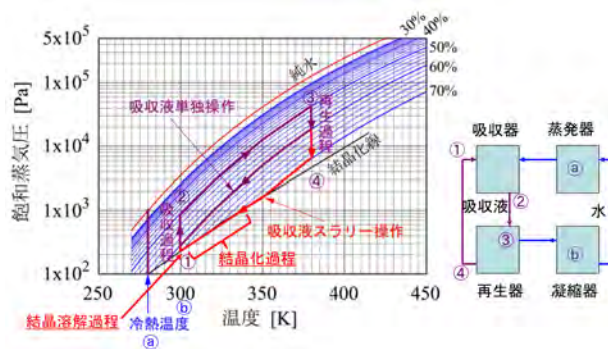


図 7 AHP サイクルの吸収液単独操作と吸収液スラリー操作

### 3.2 微細結晶スラリー特性

#### 3.2.1 粒度分布

微細結晶スラリーの調製条件に与える微細結晶粒度分布の影響を明らかにするために粒度分布の計測を行った．計測には、島津製作所製レーザ回折式粒子径分布装置 SALD-2300 を使用した．

種々の条件で調整した微細結晶の粒度分布を図 8 に示す [9]. 図中の記号は表 1 に示すスラリー調

製条件に対応する。図は粒子径に対して積算相対粒子量を示している。粒度は Run No. E, F を除いて、5~200 $\mu\text{m}$  のサイズに分布している。ゼオライト分散量がほぼ等しい場合には、LiBr 結晶濃度または結晶比が大きくなるに伴いメディアン径が大きくなる傾向が見受けられる。一方、結晶生成量をほぼ同一にしてゼオライト分散量を低下させると、メディアン径が増大し、E では、結晶粒子同士の付着で塊状となり、測定不能という結果になった。結晶比をほぼ一定として、結晶濃度やゼオライト濃度を本実験範囲で変化させた場合は、粒度分布はほぼ同様の分布となり、いずれのメディアン径も約 70  $\mu\text{m}$  となることから、メディアン径は結晶比との関係で決定できるものと考えられる。ただし、F のように結晶比が 1.5 kg-crystal/kg-zeolite 程度まで大きくなると、他とは異なり粒径 500  $\mu\text{m}$  までの幅広い分布をしている。これは、結晶スラリーの凝集の影響が強くなり、さらに結晶比が増大すると E のような凝集塊が形成され始めるものと考えられる。このような状態の溶液を実際のヒートポンプで使用することはトラブル発生の可能性が高いと考えられ、結晶比は 1 程度以下の操作が必要と考えられる。

表 1 微細結晶調製条件

Run No.	Conc. of LiBr crystal [%] (100×kg-crystal/kg-solution)	Conc. of zeolite [%] (100×kg-zeolite/kg-solution)	Ratio of crystal (kg-crystal/kg-zeolite)
A	1.32	3.00	0.44
B	2.33	3.00	0.775
C	3.02	3.00	1.01
D	2.29	2.04	1.12
E	2.24	1.01	2.22
F	3.02	2.04	1.48
G	4.83	5.04	0.958
H	1.09	1.01	1.07

### 3.2.2 粘度

微細結晶スラリーの流動性を評価する上で、粘度は重要な物性値となる。図 9 に、回転粘度計により計測した粘度を示す [10]。微細結晶スラリーは LiBr 濃度 63.4 %，ゼオライト分散濃度 5.56 % とし、温度を 20, 35, 50  $^{\circ}\text{C}$  と変化させることでスラリー中の結晶量を変えることにより調製した。

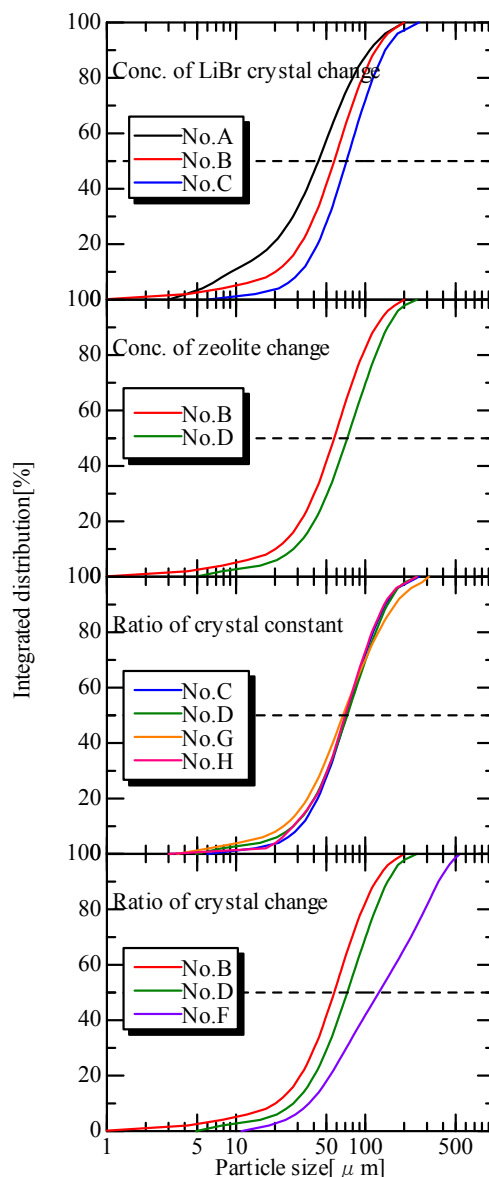


図 8 微細結晶スラリー粒度分布

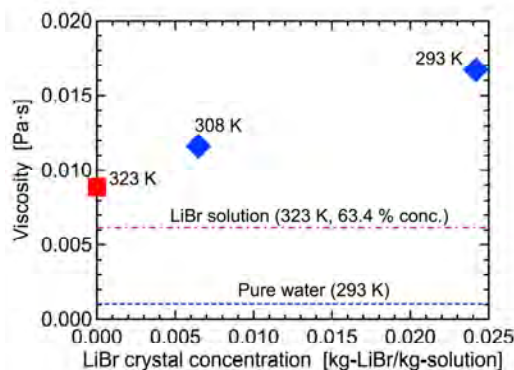


図 9 微細結晶スラリーの粘度

結晶量が 0 kg-LiBr/kg-solution のプロットは、飽和溶解度が高く結晶が存在しない温度 323 K でのゼオライト分散溶液の粘度、その他のプロットは温度を 308 と 293 K に低下させることで結晶析出割合を増加させた場合の粘度を表す。一点鎖線はゼオライトを含まない 323 K, 63.4 % の LiBr 溶液、破線は 293 K の純水粘度の文献値 [11] を表す。飽和溶解度以下での吸収液濃度と温度が同一でも、ゼオライト粒子の分散により粘度が約 50% 高くなる。また、微細結晶スラリーでは結晶濃度の増加に伴い粘度も増加する傾向が認められるが、本計測範囲で最も粘度が高くなる 293 K, 0.024 kg-LiBr/kg-solution のスラリーでも吸収液単独の 2.7 倍程度であり、十分な流動性を有することが明らかとなった。

### 3.2.3 吸収器内解析モデルによる蒸気吸収性能

微細結晶スラリーを吸収式ヒートポンプに応用した場合の性能向上効果、すなわち水蒸気吸収量向上効果について理論解析による検討を行った。本解析モデルでは、熱交換器の伝熱面を挟んで、吸収液が液膜状で、熱媒体が流路を流通するとした。本解析での主な仮定は以下の通りである。1) 吸収液は熱交換器伝熱面表面を一樣な厚さの液膜で流下、2) 液膜厚さ方向の流速、温度及び濃度分布は一樣、3) 液膜表面の蒸気圧は液膜の濃度と温度に対する吸収液の飽和蒸気圧、4) 蒸発器および凝縮器内蒸気圧はそれぞれの温度における純水の飽和蒸気圧、5) 冷却または加熱のための熱媒体は、吸収液膜の流下方向に対して向流で流通、6) 微細結晶スラリーを吸収液とする場合、水蒸気吸収に伴い LiBr 結晶が溶解するため吸収液濃度は飽和濃度で一定、7) 周囲への放熱量、吸収液膜と熱媒体の流れ方向の伝熱は無視小。以上の仮定に基づき、物質およびエネルギー収支式は以下の通り与えられる。

$$\text{LiBr 収支: } -w_c \frac{d\phi_{ad}}{dA} = \frac{d(wC_{LiBr})}{dA} \quad (1)$$

$$\text{水収支: } \frac{d\{w(1-C_{LiBr})\}}{dA} = \dot{m} \quad (2)$$

エネルギー収支:

$$\frac{d(h_s w + c_{pa} w_c T + c_{LiBr} w_c \phi_{ad} T)}{dA} = q_{cond} - q_w \quad (3)$$

ここで、 $w_c$  [kg-adsorbent/s] は吸収液中の吸着剤質量流量、 $\phi_{ad}$  [kg-LiBr/kg-adsorbent] は LiBr 結晶比、 $A$  [m<sup>2</sup>] は伝熱面積、 $w$  [kg-solution/s] は吸収液流量、 $C_{LiBr}$  [kg-LiBr/kg-solution] は吸収液中の LiBr 濃度、 $\dot{m}$  [kg-water/(m<sup>2</sup>·s)] は水蒸気吸収速度、 $h_s$  [J/kg-solution] は吸収液エンタルピー、 $c_{pa}$  と  $c_{LiBr}$  [J/(kg·K)] はそれぞれ吸着剤と LiBr の比熱、 $T$  [K] は温度、 $q_{cond}$  [W/m<sup>2</sup>] は相変化に伴う潜熱エンタルピー、 $q_w$  [W/m<sup>2</sup>] は熱媒体と吸収液間の熱伝達速度である。熱伝達および蒸気吸収速度は、それぞれ次式で与えた。

$$q_w = h_w (T - T_w) \quad (4)$$

$$\dot{m} = k_m (p_{evap} - p_s) \quad (5)$$

ここで、 $h_w$  [W/(m<sup>2</sup>·K)] は総括熱伝達係数、 $T$  [K] は吸収液温度、 $T_w$  [K] は熱媒体温度、 $k_m$  [kg/(m<sup>2</sup>·s·Pa)] は圧力差に基づく物質移動係数、 $p_{evap}$  [Pa] は蒸発器または凝縮器内蒸気圧、 $p_s$  [Pa] は吸収液表面の飽和蒸気圧である。上式を解くにあたり、吸収液に関する諸物性値、エンタルピーは文献値 [11-14] を用いた。

本解析モデルに基づき、微細結晶スラリー、吸着剤分散吸収液、吸収液単独の 3 つの条件について、吸収器での蒸気吸収性能向上効果を検討した。微細結晶スラリーでは、水蒸気吸収しても結晶溶解の効果により濃度が変わらないため一定とし、吸着剤分散吸収液では、吸着剤の脱着効果により水蒸気吸収による濃度低下に合わせて LiBr が脱着するとした。吸着剤への LiBr 吸着平衡については、既報 [8, 10] を参照されたい。

伝熱面積に対する吸収液膜に沿った濃度分布・水蒸気吸収量に関する解析結果の一例を図 10 に示す [10]。微細結晶スラリーでは濃度一定と仮定しているため変化はないが、吸着剤分散吸収液では吸着剤の LiBr 脱着効果によりわずかながら濃度低下が抑制されている。伝熱面積 1 m<sup>2</sup> としたときの水蒸気吸収速度は、吸収液が吸収液単独に対し、吸着剤分散吸収液では約 20 %、微細結晶スラリーでは約 100 % の増加を期待できる結果が得られた。

### 3.2.4 微細結晶スラリーによる蒸気吸収促進効果

バッチ式ラボスケール吸収器と蒸発器から構成される試験装置により、微細結晶スラリーの蒸気



吸収性能評価を行った。試験は、蒸発器側の水温をクーラーで 15 °C 一定に保ちつつ、真空ポンプで系内を水の飽和蒸気圧以下まで減圧させることにより十分に脱気を行い、あらかじめ吸収液貯めに入れておいた吸収液または微細結晶スラリーを吸収器に移すと同時に吸収液温度の経時変化を計測した。測定中は吸収器内の吸収液をスターラーにより攪拌させ、温度・濃度を均一にした。

LiBr 濃度 62.1 % で結晶量 9.09 g、結晶比 0.757 の微細結晶スラリー吸収液を用いた場合と LiBr 濃度を 60.6, 54.7, 50.8 % で吸収液単独の場合について、それぞれの吸収液温度の経時変化を図 11 に示す [9]。濃度が高いほど昇温速度ならびに最高温度も高くなり、微細結晶スラリーの場合にはさらに高い昇温速度と最高温度に達することが確認された。このような昇温速度と最高温度の上昇は、蒸気の吸収速度の増大によるものであり、本結果から微細結晶スラリーを AHP に利用した場合に高性能化が期待されることを示唆している。

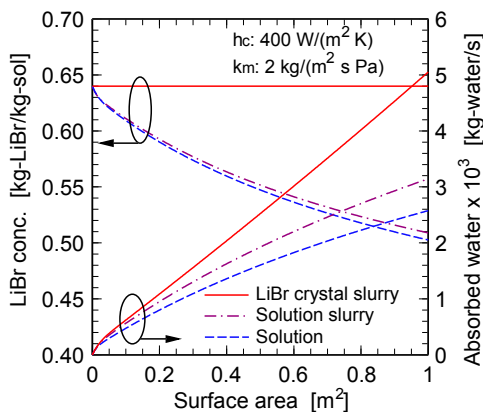


図 10 吸収器内の吸収液濃度と蒸気吸収速度

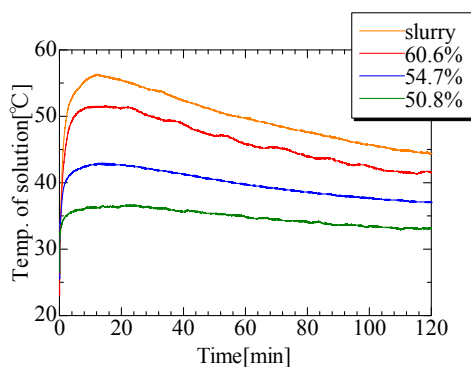


図 11 蒸気吸収試験による吸収液温度の経時変化

#### 4. まとめ

LiBr/水系 AHP による排熱回収型高温生成を目的として、ベンチスケール試験装置による性能評価試験を実施した。本システムでは 80 °C 程度の温熱から 120 °C 以上の熱風および 100~110 °C レベルの蒸気生成に成功し、液循環ポンプ動力基準での COP が 25 に達することを実証した。また、さらなる高性能化を目指して、LiBr 水溶液の過飽和状態で微細結晶スラリー化する技術を開発し、その粒度分布や粘度を計測した。これらの成果から AHP の高濃度操作が可能になるとともに、高い蒸気吸収性能が得られることを理論モデルとラボ試験から明らかにした。本稿では、これら一連の研究概要を紹介した。

#### 謝辞

本研究の一部は、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 平成 21 年度「エコイノベーション推進事業」と平成 23 年度「省エネルギー革新技术開発事業/先導研究」の補助を得て実施された。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- [1] Kawakami, Y., Abe, Y., Ito, K., Marumo, K., Aoyama, T., Tanino, M., Nakaso, K., Nakagawa, T., Itaya, Y. and Fukai, J., AICHE Annual Meeting, San Francisco, CA, USA, November 3-8 (2013).
- [2] 中曾浩一, Oktariani, E., 野田敦嗣, 深井潤, 板谷義紀, 中川二彦, 低温排熱有効活用のための水蒸気回生ヒートポンプシステムの開発—基本概念と省エネルギー効果の予測—, エネルギー・資源, **32-5** (2011) 316.
- [3] Nakagawa, T., Nishi, T., Notoji, Y., Kawakami, Y., Tanino, M., Abe, Y., Ito, K., Marumo, K., Aoyama, T., Itaya, Y., Nakaso, K. and Fukai, J., Development of Absorption Steam Generator without the Fossil Fuels Consumption, *Journal of Energy and Power Engineering*, **8-4** (2014) 589.
- [4] Marumo, K., Aoyama, T., Itaya, Y., Lithium Bromide-Water Absorption Heat Pump System for Heating up Air from Waste Heat, AICHE Annual Meeting, San Francisco, CA, USA,

- November 3-8 (2013).
- [5] Kim, K. S. and Lee, H., Differential Enthalpies of Dilution of the Lithium Bromide 1,3-Propanediol Water and Lithium Bromide Lithium Iodide Lithium Chloride Lithium Nitrate Water System, *J. Chem. Eng. Data*, **47** (2002) 397.
- [6] De Lucas, A., Donate, M. and Rodriguez, J. F., Vapour Pressures, Dencities, and Viscosities of the (Water Lithium Bromide Potassium Acetate) System and (Water Lithium Bromide Sodium Lactate) System, *J. Chem. Thermodynamics*, **38**, (2006) 123.
- [7] Donate, M., Rodriguez, L., De Lucas, A. and Rodriguez, J. F., Thermodynamic Evaluation of New Absorbent Mixtures of Lithium Bromide and Organic Salts for Absorption Refrigeration Machines, *Int. J. Refrig.*, **29** (2006) 30.
- [8] 板谷義紀, 市橋伸久, 小林信介: 吸収液/吸着剤スラリーによる吸収式ヒートポンプ性能向上効果, 化学工学論文集, **36-5** (2010) 505.
- [9] 板谷義紀, 高野智史, 永谷貢一, 増井龍也, 丸毛謙次, 微細結晶スラリー化による LiBr/H<sub>2</sub>O 系吸収式ヒートポンプ性能に関する研究, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2013).
- [10] 板谷義紀, 市橋伸久, 小林信介, 丸毛謙次, 増井龍也, 過飽和微細結晶スラリーによる LiBr・水系吸収式ヒートポンプ性能向上効果, 化学工学論文集, **39-1** (2013) 46.
- [11] Florides, G. A., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A. and Wrobel, L. C., Design and Construction of a LiBr-Water Absorption Machine, *Energy Convers. Manag.*, **44** (2003) 2483.
- [12] Sun, D. W., Thermodynamic Design Data and Optimum Design Maps for Absorption Refrigeration System, *Appl. Therm. Eng.*, **17** (1997) 211.
- [13] Sencan, A., Yakut, K. A. and Kalogirou, S. A., Exergy Analysis of Lithium Bromide/Water Absorption Systems, *Renewable Energy*, **30** (2005) 645.
- [14] Herold, K. E., Radermacher, R. and Klein, S. A.; Adsorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press (1996).

- November 3-8 (2013).
- [5] Kim, K. S. and Lee, H., Differential Enthalpies of Dilution of the Lithium Bromide 1,3-Propanediol Water and Lithium Bromide Lithium Iodide Lithium Chloride Lithium Nitrate Water System, *J. Chem. Eng. Data*, **47** (2002) 397.
- [6] De Lucas, A., Donate, M. and Rodriguez, J. F., Vapour Pressures, Dencities, and Viscosities of the (Water Lithium Bromide Potassium Acetate) System and (Water Lithium Bromide Sodium Lactate) System, *J. Chem. Thermodynamics*, **38**, (2006) 123.
- [7] Donate, M., Rodriguez, L., De Lucas, A. and Rodriguez, J. F., Thermodynamic Evaluation of New Absorbent Mixtures of Lithium Bromide and Organic Salts for Absorption Refrigeration Machines, *Int. J. Refrig.*, **29** (2006) 30.
- [8] 板谷義紀, 市橋伸久, 小林信介: 吸収液/吸着剤スラリーによる吸収式ヒートポンプ性能向上効果, 化学工学論文集, **36-5** (2010) 505.
- [9] 板谷義紀, 高野智史, 永谷貢一, 増井龍也, 丸毛謙次, 微細結晶スラリー化による LiBr/H<sub>2</sub>O 系吸収式ヒートポンプ性能に関する研究, 第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2013).
- [10] 板谷義紀, 市橋伸久, 小林信介, 丸毛謙次, 増井龍也, 過飽和微細結晶スラリーによる LiBr・水系吸収式ヒートポンプ性能向上効果, 化学工学論文集, **39-1** (2013) 46.
- [11] Florides, G. A., Kalogirou, S. A., Tassou, S. A. and Wrobel, L. C., Design and Construction of a LiBr-Water Absorption Machine, *Energy Convers. Manag.*, **44** (2003) 2483.
- [12] Sun, D. W., Thermodynamic Design Data and Optimum Design Maps for Absorption Refrigeration System, *Appl. Therm. Eng.*, **17** (1997) 211.
- [13] Sencan, A., Yakut, K. A. and Kalogirou, S. A., Exergy Analysis of Lithium Bromide/Water Absorption Systems, *Renewable Energy*, **30** (2005) 645.
- [14] Herold, K. E., Radermacher, R. and Klein, S. A.; Adsorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press (1996).

## ニュートンの冷却法則（その1）

## Newton's Law of Cooling, Part 1

円山 重直（東北大学）

Shigenao MARUYAMA (Tohoku University)

e-mail: maruyama@ifs.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

アイザック・ニュートン（1642-1727）は、今から約 300 年前の江戸時代に活躍した科学者です。彼は、リンゴが落ちたことで発見したといわれる万有引力の法則など、多くの科学的発見をしています。これらの科学的功績が認められ、彼の遺体はウエストミンスター寺院に葬られ、昔の 1 ポンド紙幣の裏面には彼が発明したといわれる反射望遠鏡と共に図案化されています。

ニュートンは多くの法則を生み出しました。ニュートンの力学法則で代表される古典力学の体系化や光の性質など、近代の科学に欠かせない多くの発見をしました。理論的考察から音速の推定も行っています。ニュートン力学は近代科学の基礎となり、飛行機やロケットの飛行だけでなく機械の設計には欠かせない大事な科学となっています。また、国際的な単位系である SI 単位では力の単位として N（ニュートン）が使われています。



図1 旧1ポンド紙幣に描かれているアイザック・ニュートン

ニュートンは熱科学にも興味を持ち、その研究成果が 1701 年に英国王立協会の科学雑誌に発表されました[1], [2]。この論文の一部が伝熱の分野では良く知られている「ニュートンの冷却法則」です。本稿では、ニュートンの熱科学に関するラテン語の論文「Scala graduum Caloris. (A Scale of the Degree of Heat, 温度の尺度)」[1]と当時の熱科

学の実情について述べたいと思います。

## 2. ニュートンの論文

図2に示す、論文はニュートンの熱科学に関する論文として知られています。しかし、論文はラテン語で書かれ、かつ匿名（著者不明）として出版されました。その中には、「ニュートンの冷却法則」の基となる記述も含まれています。図2中の注釈は、論文の英語訳[2]を基に著者が記入したものです。

この論文はたったの6頁で、しかもその半分が表で占められている短いものです。論文の中には図が無く、数式が一本も出てきません。しかも、著者は匿名なので、本当にニュートンが書いた論文か疑っている科学者もいるほどです[3]。ニュートンは当時、国会議員に選出されるほどの有名人だったので、ちょっと自信のない論文は自分の名前を出したくなかったのかもしれませんが。この論文は多くの科学者が検証しています。

18世紀では温度を測ること自体が重要な科学でした。ニュートンも温度計測に興味を持ちこの論文を書いたようです。温度計測には基準となる温度定点が必要ですが、比較的よく使われた水が凍る温度（0度）と体温（12ニュートン度）を基準として温度目盛りを作っています。

彼の興味は水が沸騰する沸点（100℃、約34ニュートン度）より高い温度計測に興味があったようで、スズや鉛が溶ける温度を基準としてより高温の温度を測っています。そのため、高温まで沸騰しないアマニ（亜麻仁）油の熱膨張現象が温度計に使われました[3]。



図2 1701年に英国王立協会から出版された熱科学の論文[1]

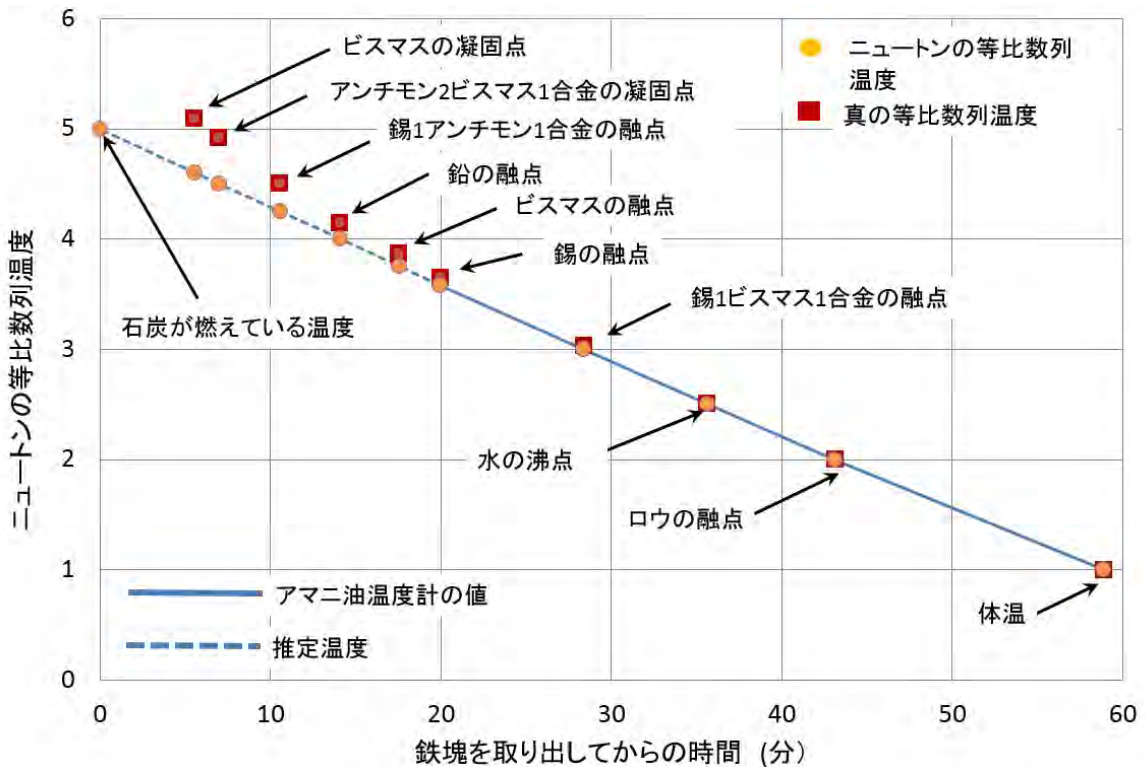


図3 1701年の論文を再現したニュートンの温度と冷却時間の変化

### 3. ニュートンの冷却法則

ニュートンはさらに高い温度の測定にチャレンジしています。つまり、台所のコンロで赤く燃えている石炭の温度です。さすがに、ニュートンの温度計でも燃えている石炭の温度を測ることは出来ません。温度計で測れない温度を測るために、ニュートンは一計を案じました。

まず、鉄のかたまりをコンロの中に入れて赤く

燃える石炭と同じ温度になるまで加熱します。その鉄のかたまりをコンロから取り出して空気中に置き、その冷え方を調べたのです。鉄の上には鉛や錫を置いて、それが冷えて固まる時間を測定しました。比較的低温で固まる金属の温度は、ニュートンの温度計であらかじめ測っておきます。つまり、鉄が冷えて温度計測が可能になってから温度と、鉄をコンロから取り出してからの時間を測

定したのです。この、鉄の冷える速度を理論的に考察すると、はじめに鉄の温度が何度なのかが推定出来ます。ニュートンの推定ではその温度は 192 ニュートン度 (592°C) と推定されました。

温度計で測れない高温を測るためにニュートンは仮定をおきました。つまり、物体が冷却する速さは物体と周囲の空気温度の差に比例するとしました。また、物体は風が吹いている状態で冷やしたという記述があります。この 2 つの文章が「ニュートンの冷却法則」の起源と考えられます。現在では、熱流束  $q$ 、流体と物体の温度差  $T - T_{\infty}$ 、熱伝達率  $h$  としたとき、次式の関係がニュートンの冷却法則として使われています。

$$q = h(T - T_{\infty}) \quad (1)$$

#### 4. 高温物体の冷却特性

図 3 は、ニュートンの等比級数温度を使い、鉄塊の冷却時間を計ることによって、当時の温度計では測ることの出来ない高温を測定できることを示しています。この温度は、ニュートン温度を  $T(N)$  として次式で定義されます。

$$T' = \log_2(T/12) + 1 \quad (2)$$

物体の温度は時刻で変化します。そのため、現在の対数目盛りにあたる「等比級数温度(degree of heat in geometrical progression)」を使いました。図 3 は、その目盛りで赤熱した鉄のかたまりを冷やしたときのニュートン温度の変化を時間に対してプロットしたものです。アマニ油を使った温度計はせいぜいで錫が溶ける温度 (232°C) までしか測れませんが、それを延長することによって鉄の最初の温度を推定することが出来ます。

ニュートンの他の記述では鉄塊の重さは 4.25 lb (ポンド) で[4]、論文中[1]には「かなり厚い鉄片を赤く加熱した」という記述があります。鑄鉄の密度を考慮すると鉄片の大きさは 1×4×4 in (インチ) と推定できます。この大きさの鉄片を「板の上に置いて」冷やしたとしていますから、特性長さを計算し、ふく射も考慮した等価熱伝達率を 39 としてビオ数を求めると 0.011 となります。

ニュートンの実験は集中熱容量系の仮定が成り立っており、鉄片はほぼ均一温度で低下したことが分かります。幸いにして、ニュートンが用いた鉄のかたまりは大きくなかったため、この仮定を自動的に満足していました。もっと巨大な鉄のかたまりで実験していたら、正確な温度は出なかつ

たかもしれません。

図 3 は、Ruffner の推定[3]によって「赤熱した鉄板が体温まで低下するまでに 60 分要した」という仮定に基づき、前述の熱伝達率を導いたものです。この冷却時間については諸説あるので、次報で検討したいと思います。

図 3 には、近代の金属工学を用い Grigull よって検証された同一成分の合金の融点から推定された正しい温度[5]も示しています。ニュートンはふく射伝熱による熱移動を知りませんでした。温度が低いとき、等価ふく射熱伝達率はほぼ一様ですが、温度が高くなるとふく射の寄与が大きくなり等価ふく射熱伝達率が一定という仮定が成り立たなくなります。そのため、ニュートンの高温の推定は実際より若干低めに見積もられています。しかし、高温の温度を再現するために、ニュートンは合金の成分を調整し、日本刀の刀鍛冶のように鉄の赤熱色と温度の関係も注意深く観察しています。

#### 5. なぜニュートンは高温物体の温度を測ったのだろうか (筆者の推測)

当時の熱科学では、温度の基準を決めることが重要なテーマで、皆さんが使っている摂氏 (セ氏温度, °C) や米国で使われている華氏 (カ氏温度, °F) もニュートン温度と同じ頃に考案されました。ただし、これらの温度は水が沸騰する温度である 100°C が上限でした。

ニュートンは 100°C より高い温度に興味を持ち、実際にその温度基準を作っています。また、1701 年に匿名の論文を出していますが、その温度 (ニュートン温度) を広めようとした形跡は見られません。なぜ、ニュートンは高温を正確に計ろうとしたのでしょうか。

ニュートンの論文の主要部分の実験と内容は、1693 年頃に行われたとする説があります[3]。文献を丹念に見ると[6]、実験は 1692 年か 1693 年の冬におこなわれた形跡があります。この論文が出版される 2 年前の 1699 年にニュートンは造幣局長に就任しています。ニュートンは、安い金属から貴金属 (特に金) を生み出そうとする錬金術 (れんきんじゅつ) に熱中していたと言われています。錬金術実験の一部は当時禁止されていたから、ニュートンはこっそり研究をやっていたのでしょうか。錬金術は金属工学ですから、金属が溶ける高

温を計測することはすこぶる重要です。そのために、正確な温度を計測する必要に迫られたと考えられます。

ニュートンは台所で燃えている石炭の温度(595°C)と鉛などの重金属の融点と凝固点を明らかにしています。金の融点は1064°Cですから、それより融点の低い重金属の性質を明らかにして、金と同じようなものを作り出そうとしていたと考えるのは私だけでしょうか。

造幣局長になってから、にせ金作りを摘発して功績を挙げたと言いますから、そのための温度測定研究とも考えられます。しかし、錬金術の研究から出てきた温度測定方法を匿名論文として出版し、こっそり科学者の反応を見ていたと考えられなくもありません。

## 6. おわりに

伝熱工学でなじみ深いニュートンの冷却法則を検証してみました。本稿では歴史的背景と著者の私見を述べてみました。次稿では、図3の冷却曲線について伝熱工学的視点からさらに考察をして

みたいと思います。

## 参考文献

- [1] “Scala graduum Caloris (A Scale of the Degrees of Heat)”, *Philosophical Transactions*, No. 270, pp. 824-829, (April 1701).
- [2] “The Correspondence of Isaac Newton, Volume IV, 1664-1703”, Edited by J.F. Scott, Cambridge University Press, PP.357-365, (1967).
- [3] Ruffner, J. A., “Reinterpretation of the Genesis of Newton’s Law of Cooling,” *Archives of History of Exact Science*, Vol. 2, pp. 138-152, (1964).
- [4] Simms, D. L., “Newton’s Contribution to the Science of Heat”, *Annals of Science*, Vol. 61, pp.33-77, (2004).
- [5] Grigull, U., “Newton’s Temperature Scale and the Law of Cooling,” *Waerme und Stoffuebertrag*, Vol. 18, pp.195-199, (1984).
- [6] Dobbs, B.J.T., *The Janus faces of genius, The role of alchemy in Newton’s thought*, pp.169-175, Cambridge University Press, (1991).

## 英国の巨人 Newton, Watt, Joule, Kelvin, Maxwell たちを訪ねて

*Visit to Great Scientists and Engineer in United Kingdom:*

*Newton, Watt, Joule, Kelvin, Maxwell, et al.*

吉田 英生 (京都大学)

*Hideo YOSHIDA (Kyoto University)*

*e-mail: sakura@hideoyoshida.com*

### 1. はじめに

7月末にGlasgowでのSOFC国際会議に出席した機会に、Londonを起点として英国北部のScotlandと中央部のEnglandを駆け足で旅した。London(北緯51.5度; 稚内より6度北方)から鉄道で4時間半ほど北上したGlasgow(北緯56度; 樺太北端とほぼ同緯度)はもちろん日本よりはずっと涼しいが、西岸海洋性気候のため高緯度のわりには温暖である。そして夏の英国は線路脇などいたるところにピンク色のヤナギラン(rosebay willowherb)が美しい。Scotlandでは昨年9月にEnglandからの独立住民投票が行われたものの小差(55/45)で否決されたことが記憶に新しく、Glasgowはその最大都市、70kmほど東方には首都のEdinburghがある(図1)。

The Scottish Science Hall of Fameのウェブサイト(<http://digital.nls.uk/scientists/index.html>)を見れば理解できるように、ScotlandはJames Watt(Greenock出身), Lord Kelvin(Northern IrelandのBelfast出身), James Clerk Maxwell(Edinburgh出身)など、科学と工学の巨人を多数輩出している。そこで、これ

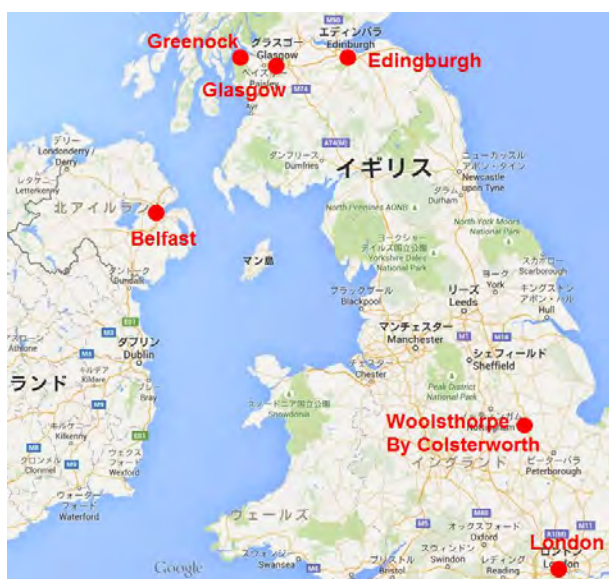


図1 United Kingdomの主要部

らの巨人にゆかりの深い大学や博物館を訪ねた。さらに、Londonの北方約100kmの田舎にあるIsaac Newtonの生家や、LondonのWestminster Abbeyに眠る科学の巨人達も訪ねたので、表面的な情報に過ぎないことは自覚しているが、近い将来に訪問される方々の一助ともなるよう、写真とメモ書きから再現した図(Westminster Abbeyでは写真禁止のため)を中心にご紹介したいと思う。歴史や哲学も含めた深みのある内容については太田浩一氏の書[1]や山口栄一氏のインターネットメディアでの連載記事[2]などをお薦めする。

### 2. University of Glasgow

WattはLondonで計測機器に関する技術を学んだ後、19歳(1856)でGlasgow CollegeのInstrument-Maker Workshopを与えられことがきっかけで、蒸気機関との接点ができ、かつ物理学者のJoseph Blackとも知り合って、その後のseparate condenser等の発明による蒸気機関の効率向上が産業革命につながった[3]。したがってGlasgowが近代文明の原点となったといえなくもない。



図2 University of Glasgow本館とMemorial Gate





(a) Hunterian Museum (b) Glasgow市 George Square (c) Nat'l Museum of Scotland  
図3 James Watt



(a) Hunterian Museum (b) Kelvingrove公園  
図4 Lord Kelvin

一方、Lord Kelvin (William Thomson) は10歳で University of Glasgow に入学、17歳で Cambridge University に入学、22歳で University of Glasgow 教授就任とのことで、その早熟ぶりにはただただ恐れ入る。絶対温度や熱力学第2法則、Joule-Thomson 効果などに名を残すが、大西洋横断電信ケーブルの敷設に成功したことで、ナイトの称号を与えられ、さらに Baron (男爵) として大学のそばを流れる Kelvin 川にちなんで Lord Kelvin と呼ばれる。

図2のように University of Glasgow の本館前の Memorial Gate には Watt や Kelvin さらに Adam Smith から 31 人の名前が埋め込まれている。また、本館の4階には Hunterian Museum があり、入口左側には Watt の像 (図3(a))、その上階には Kelvin が用いた研究機器や肖像画がある (図4(a))。大学から南側に下った Kelvingrove 公園には威厳に満ちた Kelvin の像があり、見るものを圧倒する (図4(b))。



図5 James Clerk Maxwell と床上方程式

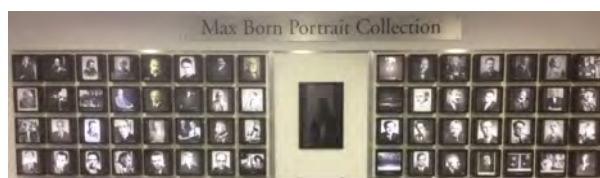


図6 Max Born に関するギャラリー

### 3. University of Edinburgh

19世紀の物理学者の中で Kelvin とともに偉大な存在である Maxwell は Kelvin より7年遅く Edinburgh に生まれ、16歳で University of Edinburgh に入学、3年後には Cambridge 大学に移った。Edinburgh 駅から南に3kmほどのところに位置する the University of Edinburgh に the James Clerk Maxwell Building があり物理や数学の研究所になっている。その2階には図5のように Maxwell の像と Maxwell 方程式が床に書かれている。また、Maxwell に向き合うように Max Born に関するギャラリー (図6) があり、ノーベル物理学賞や著名な数学者の写真が集められている。Born はドイツ人ながらナチスを逃れてここで教授職にあった。蛇足ながら Born は、筆者の学生時代「そよ風の誘惑」で人気を博した Olivia Newton-John の母方の祖父にあたる。

### 4. Woolsthorpe Manor (Newtonの生家)

わが国とは異なりヨーロッパでは何百年も前の住宅が多数残っているが、巨人 Newton が1642年に生まれた家があるのは感動的だ。

(<http://www.nationaltrust.org.uk/woolsthorpe-manor/>)

London の King's Cross 駅から Leeds あるいは York 方面の列車で1時間あまりの Grantham 駅下車し、12kmほど南下した Woolsthorpe by Colsterworth という田舎に生家はあった。といってもアクセスの詳細は上記サイトを見てもなかなかわからず、筆者が Grantham 駅で下車したときはタクシーもなく途方にくれた。やむを得ず駅から10分ほど歩くと

ISAAC NEWTON SHOPPING CENTREという田舎にしては派手な建物があり、付近は車の通行も増えて、その裏にバスセンターがある(図7)。しかし、オンライン時刻表(<http://www.traveline.info/>)で、‘Grantham’と‘Woolsthorpe by Colsterworth’を入力して調べても朝夕に若干のバスがあるだけなので、タクシーを拾う(生家ではチップを約束して



図7 Grantham駅周辺(右上の■がバスセンター)  
<http://www.nationalrail.co.uk/posters/GRA.pdf>



図8 Newtonの生家とリンゴ

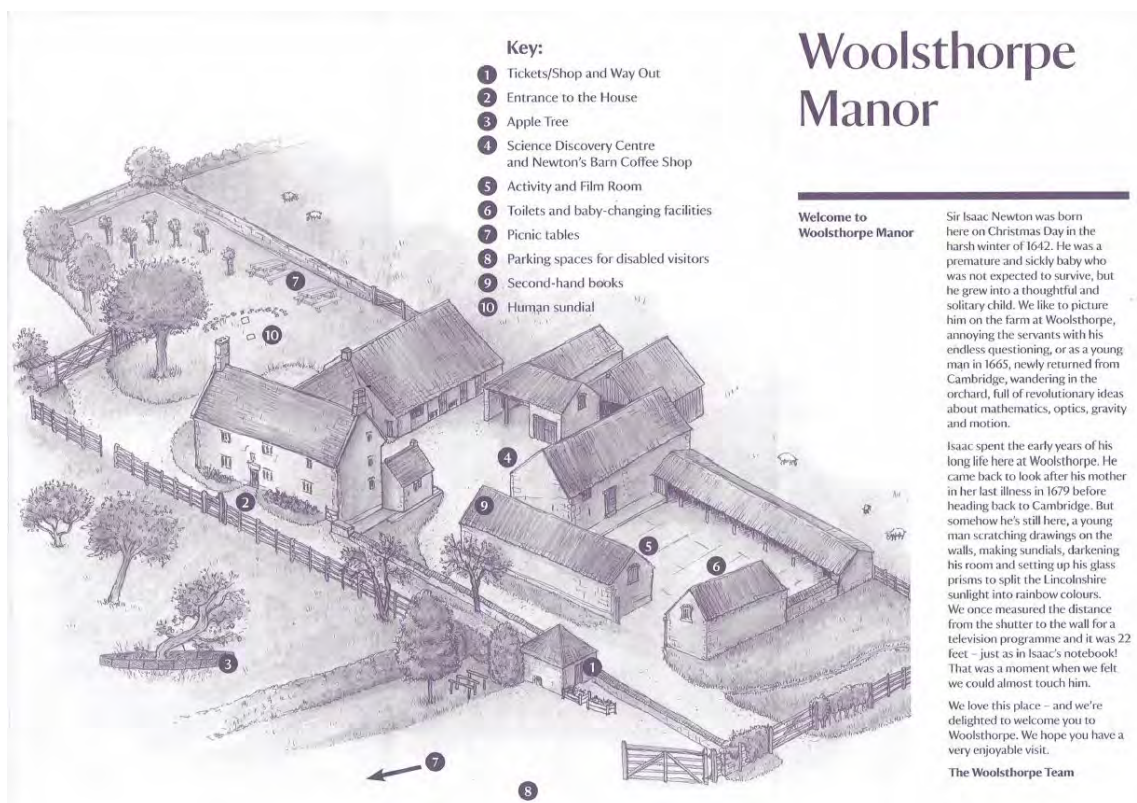


図9 Woolsthorpe Manorの建物配置図(National Trustのパムフレットより)

待っていてもらう) のが現実的であろう。Newtonの生家は図8, 9のように田舎の荘園にすぎないように見えるが, NewtonがGranthamのthe King's Schoolを経て19歳でCambridge大学に入学してから数年後には, 研究の場としても重要な意味を持つようになる。現地の案内書[4]から引用しよう。

It was at the manor house from 1665 until April 1667, while taking refuge from the plague, which had closed Cambridge University, that Newton conducted pioneering experiments in the refraction of light. Here he began the work that became the foundation of his masterpiece, the *Principia Mathematica* (1687), cornerstone of modern science.

また, りんごの落下による重力の発見に関しては, 以下のように解説されている。

#### The apple falls

Everyone knows the story of the apple falling on Newton's head, but this famous tale is a misconception that is regularly resurrected in everything from cartoons to computer ads.

Newton told a number of people about the occasion, but did not always mention the apple. After a conversation with Newton in 1726, his friend William Stukeley recorded:

The notion of gravitation ... was occasion'd by the fall of an apple, as he [Newton] sat in contemplative mood. Why should that apple always descend perpendicularly to the ground, thought he to himself, why should it not go sideways or upwards, but constantly to the earth's centre? Assuredly, the reason is that the earth draws it... there is a power, like that we here call gravity, which extends itself thro' the universe.

## 5. Westminster Abbey

英国国会議事堂の西側に位置するWestminster Abbeyは, 1066年にWilliam the Conquerorの戴冠が行われて以来, 英国国王の戴冠式を執り行う教会として1000年近い歴史を有する。また, 英国史上の著名な人物が埋葬されている。

北側の入口から入って日本語も含む多国語対応のレシーバーを無料で借りて西進するとすぐ左側(図10中の青色の★)に, 9人の科学者のプレートがΓ字型に並んでいる(図11)。なお, Newtonが2代目となったCambridge Universityのthe Lucasian professorship of mathematicsにはGeorge Gabriel Stokes(生年はJouleと同じ, Kelvinより5歳上)やPaul Diracも就いている。また, Royal Societyの会長としても, Newton(1703-1727), Stokes(1885-1890), Kelvin(1890-1895), John William Strutt, Lord Rayleigh(1905-1908)らが名を連ねている。

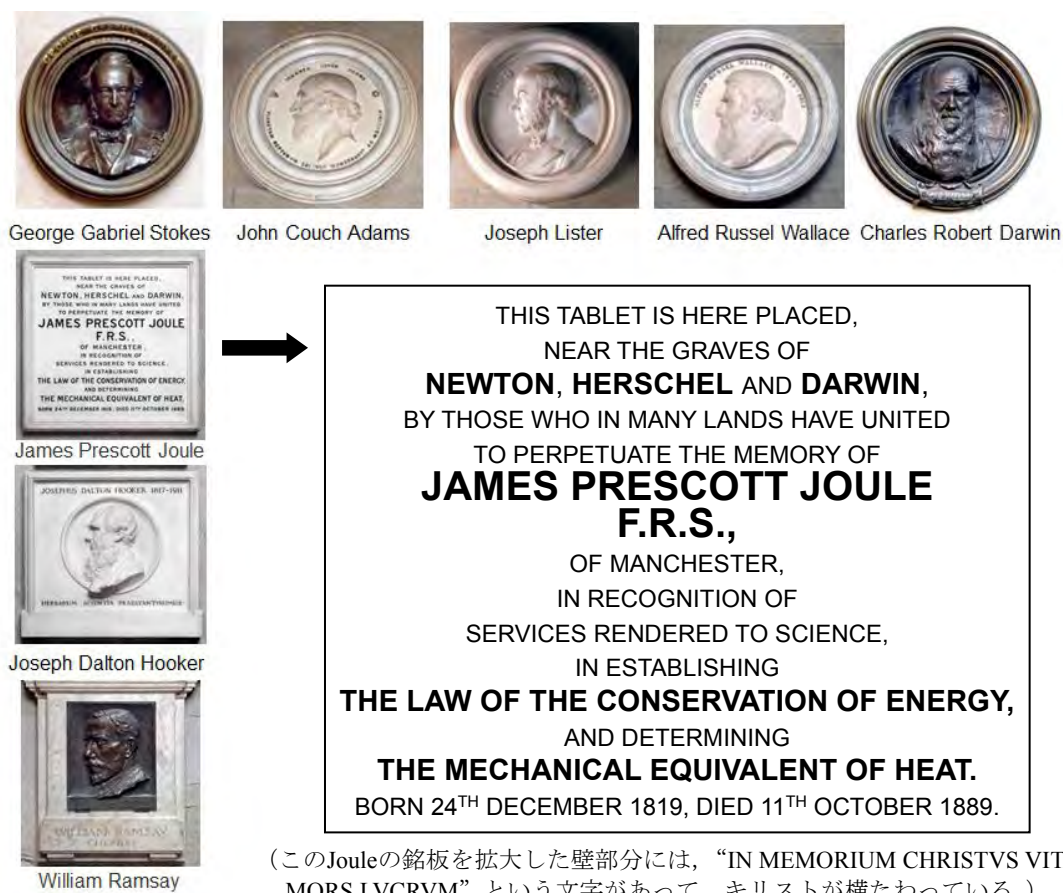


図10 Westminster Abbeyの中心部分平面図  
(同寺院のパンフレットより)

一方, nave前方左側(図10中の緑色の★)には図12のような豪華なNewton像と, その手前の床にNewtonをはさんでMichael Faraday, George Green, Kelvin, Maxwell, そして右上に少し離れてDiracの墓石が並んでいる。図12右側は筆者がメモした配置図に同寺院ウェブサイトから入手できる写真をそばに貼り付けたものだが, Greenだけ風車の絵がついている。パン屋の息子だったGreenは風車小屋で粉ひきをしていたことに由来するようだ。Faradayは製本業で働いていた門前の小僧であったそうだが, Greenも正規教育を受けていない点では共通する。あらためて英国が生んだ偉大な科学者や工学者の層の厚さに感銘を受けるとともに, 教育について考えさせられる史実でもあった。

#### 参考文献

- [1] 太田浩一, 物理学者のいた街, 東大出版会(2007), 同2, (2008), 同3, (2009), 同4, (2010).
- [2] 山口栄一, 科学者の魂を探して, 日経テクノロジーonline, <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20140819/371342/> (2014-2015).
- [3] Russell, B., *James Watt—Making the World Anew*, Reaktion Books, (2014).
- [4] National Trust, *Woolsthorpe Manor—Birthplace of Isaac Newton*, (2006).
- [5] <http://westminster-abbey.org/our-history/people/>に各人の名前を続けると図11と図12の各写真と説明にアクセスできる:  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/george-gabriel-stokes>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/james-prescott-joule>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/sir-joseph-dalton-hooker>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/sir-william-ramsay>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/john-couch-adams>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/joseph-lister>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/alfred-russel-wallace>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/charles-darwin>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/sir-isaac-newton>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/william-thomson-lord-kelvin>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/george-green>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/paul-dirac>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/michael-faraday>  
<http://westminster-abbey.org/our-history/people/james-clerk-maxwell>



(このJouleの銘板を拡大した壁部分には、“IN MEMORIUM CHRISTVS VITA MORS LVCRVM” という文字があつて、キリストが横たわっている.)

図11 Westminster Abbey : 北側入口から西進する通路左側面にある科学者のコーナー

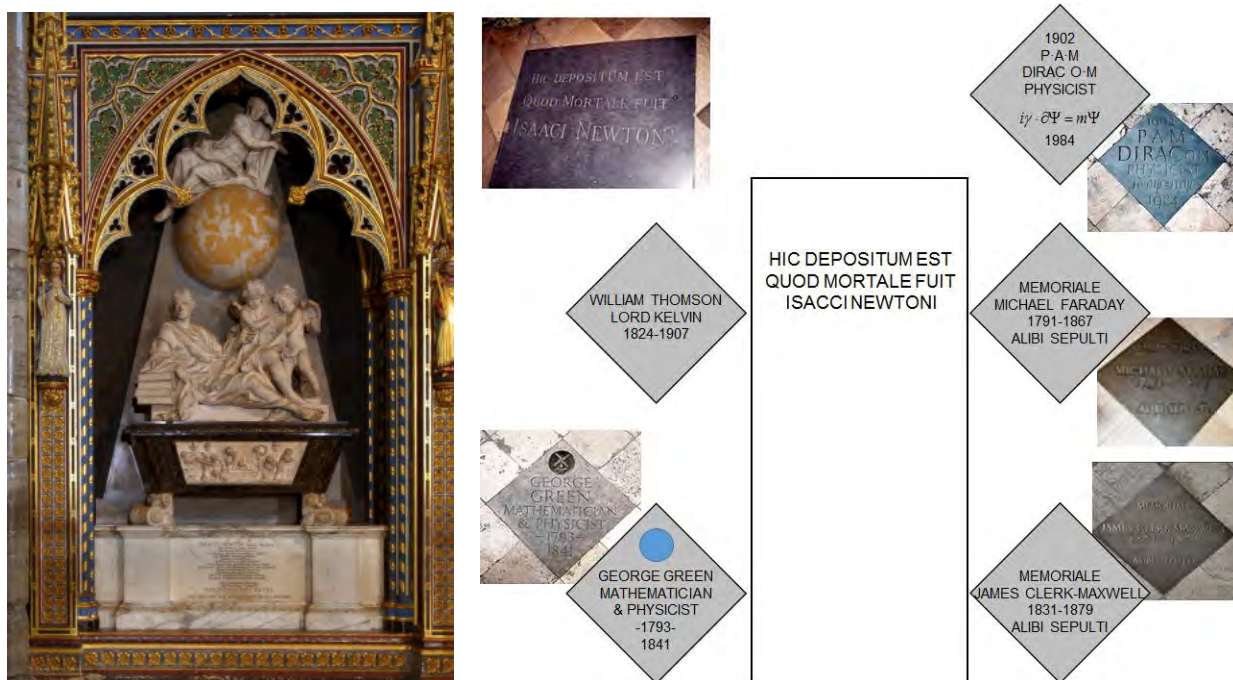


図12 Westminster Abbey : nave前方左側にあるNewtonの像と、その手前の墓石 (Newtonの墓石にあるラテン語の意味は‘Here lies that which was mortal of Isaac Newton’)

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2016年					
5月	24(火) ～ 26(木) 第53回日本伝熱シンポジウム (開催場所: グランキューブ大阪 (大阪府立国際会議場))	2016.1.15	2016.3.11	実行委員会委員長 吉田篤正 大阪府立大学 大学院工学研究科 機械工学分野内 Email: symp2016@htsj-conf.org Fax: 072-254-9231	
11月	2(水) ～ 4(金) The Fourth International Forum on Heat Transfer (IFHT2016) (開催場所: Sendai International Center)	2016.4.29	2016.7.29	Organizing Committee Chair Taku Ohara URL: http://ifht2016.org/index.html	

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2015年					
9月・12月	9月6日 (日) ・12月19日 (土) 2015年度計算力学技術者(CAE技術者)資格認定事業(上級アナリスト/1・2級) (開催場所: 日本機械学会会議室, 各地会場)			日本機械学会事業企画G 石澤 Tel: 03-5360-3506 Fax: 03-5360-3509 E-mail: caenintei@jsme.or.jp	
9月	9(水) ～ 10(木) 第43回日本ガスタービン学会定期講演会 (開催場所: 米子コンベンションセンター Big SHiP)	2015.5.11	2015.7.21	日本ガスタービン学会事務局 Tel: 03-3365-0095 Fax: 03-3365-0387 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
9月	24(木) ～ 25(金) No.15-95 講習会 『伝熱工学資料(改定第5版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用 (開催場所: 東京大学山上会館)			日本機械学会熱工学部門(担当職員 小倉辰徳) Tel: 03-5360-3502	
9月	26(土) ～ 28(月) 日本流体力学会年会2015 (開催場所: 東京工業大学大岡山キャンパス)	2015.6.14	2015.7.25	日本流体力学会2015実行委員会 実行委員長 灘岡和夫 E-mail: nenkai15@navier.mes.titech.ac.jp	
9月	27(日) ～ 10月1(木) The 26th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-26) (開催場所: オーストリア・レオーベン)	事前登録 2015.7.10	Abstract 2015.5.1 Manuscript 2015.8.1	幹事 伏見一慶(東京工業大学) (Email: fushinok@mech.titech.ac.jp) URL: http://www.istp26.at/ Email: istp26@unileoben.ac.at	
10月	10(土) ～ 11(日) 可視化情報学会全国講演会(京都2015) (開催場所: 京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス)	2015.6.5	2015.7.31	可視化情報学会全国講演会(京都2015)実行委員長 村田滋(京都工芸繊維大学) Tel: 075-724-7363 Fax: 075-724-7300 E-mail: murata@vsj.or.jp	
10月	19(月) ～ 21(水) 第36回日本熱物性シンポジウム (開催場所: 東北大学片平キャンパス)	2015.6.26	2015.7.31	東北大学多元物質科学研究所 安達正芳 Tel: 022-217-5830 Fax: 022-217-5178 E-mail: info@jstp2015.com	
10月	20(火) ～ 23(金) 2015年度日本冷凍空調学会年次大会 (開催場所: 早稲田大学西早稲田キャンパス)	2015.6.12	2015.8.28	日本冷凍空調学会年次大会実行委員長 齋藤潔 E-mail: jsrae15@jsrae.or.jp	
10月	20(火) No.15-108 講習会(見学会付)「低炭素エネルギー時代における石炭利用法」 (開催場所: (株)IHI横浜事業所ゲストハウス(横浜))	2015.10.8		日本機械学会(担当職員 櫻井恭子) Tel: 03-5360-3505 E-mail: sakurai@jsme.or.jp	
10月	21(水) ～ 23(金) 日本地熱学会平成27年度学術講演会 (開催場所: 別府国際コンベンションセンター B-Con Plaza)	2015.8.17	2015.9.7	日本地熱学会 行事委員 窪田ひろみ(電力中央研究所) Tel: 04-7182-1181 E-mail: hiromi-n@criepi.denken.or.jp	
10月	24(土) ～ 25(日) No.15-48 熱工学コンファレンス2015 (開催場所: 大阪大学吹田キャンパス)	2015.7.3	2015.9.4	熱工学コンファレンス2015実行委員長 赤松史光 Tel: 06-6879-7305 Fax: 06-6879-7305 E-mail: ted2015@ene.mech.eng.osaka-u.ac.jp	
10月	29(木) 日本機械学会関西支部第339回講習会「応力計測の基礎とその応用(デモンストレーション付き)」 (開催場所: 大阪科学技術センター8階中ホール)	2015.10.22		日本機械学会関西支部事務局 Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
11月	1(日) ～ 4(水) The 10th International Symposium on Advance Science and Technology in Experimental Mechanics(10th ISEM'15-MATSUE) (開催場所: Kunibiki Messe(島根県))			日本実験力学学会事務局 小林 Tel: 025-368-9310 Fax: 025-368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
11月	12(木) ～ 13(金) 日本機械学会関西支部第340回講習会 新エネルギーシステムのフロンティア	2015.11.6		日本機械学会関西支部事務局 Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	

行事カレンダー

		技術を学ぶ (開催場所:大阪科学技術センター8階中ホール)				
11月	15(日) ~ 20(金)	International Gas Turbine Congress 2015 Tokyo (IGTC2015 Tokyo) 2015年国際ガスタービン会議東京大会 (開催場所:虎ノ門ヒルズ)			公益社団法人日本ガスタービン学会事務局 Tel: 03-3365-0095 E-mail: igtc2015@gtsj.org	
11月	16(月) ~ 18(水)	第53回燃焼シンポジウム (開催場所:つくば国際会議場)	2015.7.10	2015.9.4	第53回燃焼シンポジウム事務局 西岡研究室 内(筑波大学) Tel: 029-853-5121 Fax: 029-853-5207 E-mail: sympo53@combustionsociety.jp URL: http://www/combustionsociety.jp/sympo53/	
11月	18(水)	日本機械学会関西支部 ステップアップ・セミナー2015 オープン・イノベーションが切り拓く新たな事業創造 (開催場所:大阪科学技術センター8階中ホール)	2015.11.11		日本機械学会関西支部事務局 Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
11月	19(木) ~ 20(金)	第49回化学工学の進歩講習会「環境エネルギー 最新技術の基礎と応用」 (開催場所:名城大学名駅サテライトキャンパス)			化学工学会東海支部 Tel: 052-231-3070 Fax: 052-204-1469	
11月	20(金) ~ 21(土)	第39回人間-生活環境系シンポジウム (開催場所:産業技術総合研究所・臨海副都心センター別館)	2015.8.21	2015.9.29	大会長 都築和代(産業技術総合研究所) Tel: 029-861-6619 Email: t-info-ml@aist.go.jp	
11月	26(木) ~ 27(金)	第5回潜熱工学シンポジウム (開催場所:金沢大学サテライト・プラザ)	2015.9.18	2015.10.12	金沢大学理工研究域機械工学系 寺岡喜和 Tel: 076-234-4750 E-mail: Latent_heat@ml.kanazawa-u.ac.jp	
11月	29(日) ~ 12月2(水)	World Engineering Conference and Congress 2015 (WECC 2015) 第5回世界工学会議 (開催場所:京都国際会館)	2015.3.10	2015.6.1	WECC2015 運営事務局(株式会社コングレ内) Tel: 03-5216-5303 E-mail: wecc2015-reg@congre.co.jp	
11月	30(月) ~ 12月4(金)	The 12th International Conference on Power Engineering 2015 (ICOPE2015) 第12回動力エネルギー国際会議 (開催場所:パシフィコ横浜)	2014.11.30	2015.3.31	ICOPE-15 実行委員会委員長 刑部真弘(東京海洋大学) E-mail: icope15@jsme.or.jp	
12月	5(土)	No.15-47 第18回スターリングサイクルシンポジウム (開催場所:東京農工大学小金井キャンパス BASE 本館)	2015.7.3	2015.10.23	実行委員長 上田祐樹(東京農工大学) Tel: 042-388-7853 Fax: 042-388-7853 E-mail: uedayuki@cc.tuat.ac.jp	
12月	15(火) ~ 17(木)	第29回数値流体力学シンポジウム (開催場所:九州大学筑紫キャンパス)	2015.9.25	2015.10.23	CFD29 実行委員会事務局(九州大学応用力学研究所新エネルギー学部内) Tel: 092-583-7776 Fax: 092-583-7779 E-mail: tananori@riam.kyushu-u.ac.jp	
12月	17(木) ~ 18(金)	第24回微粒化シンポジウム (開催場所:神戸大学深江キャンパス総合学術交流棟)	2015.8.31	2015.10.23	日本液体微粒化学会事務局 Tel: 06-6466-1588 Fax: 06-6463-2522 E-mail: info@ilass-japan.gr.jp	
12月	27(金) ~ 29(日)	ISETS'15 エコトピア科学に関する国際シンポジウム2015 (開催場所:名古屋大学)	2015.6.30	2015.8.15	ISETS'15 シンポジウム事務局 Tel: 052-581-3241 Fax: 052-581-5585 E-mail: isets15@intergroup.co.jp	
2016年						
8月	7(日) ~ 10(水)	第20回国際乾燥シンポジウム(IDS2016) (開催場所:岐阜市長良川国際会議場)	2015.11.30	2016.3.10	実行委員長 板谷義紀 Tel: 058-293-2532 E-mail: yitaya@gifu-u.ac.jp	
10月	29(土) ~ 11月2(水)	The 5th International Conference on Human-Environment System(ICHES2016 Nagoya) (開催場所:名古屋大学)			ICHES2016 Nagoya 事務局 E-mail: iches2016office@davinci.nuac.nagoya-u.ac.jp	
11月	1(火) ~ 4(金)	The 11th International Symposium on Advance Science and Technology in Experimental Mechanics(11th ISEM'16-Ho Chi Minh, Vietnam) (開催場所:Saigon Vissai Hotel)			日本実験力学会事務局 小林 Tel: 025-368-9310 Fax: 025-368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	

## 平成 27 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

日本伝熱学会では本年度も各賞の表彰を実施いたします。つきましては、下記の要領に従って本年度の学術賞、技術賞、貢献賞および奨励賞の候補者推薦募集を行いますので、自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい。

### 1. 対象となる業績

- (1) **学術賞**の対象は、原則として、最近3年間の Thermal Science and Engineering 誌または Journal of Thermal Science and Technology 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究を主体的に行った研究者とその共同研究者とします。なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と厳密に一致する必要はありません。
- (2) **技術賞**の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします。
- (3) **貢献賞**の対象は、日本伝熱学会が主催する事業の実施において、顕著な貢献を行った会員とします。
- (4) **奨励賞**の対象は、原則として、最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、またはこれに準じる者（大学卒業後5年以内の者）とします。
- (5) 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限ります。
- (6) 贈賞数は、学術賞2件程度、技術賞1件程度、貢献賞2名程度、奨励賞4件程度とします。

### 2. 選考方法

- (1) 各賞の選考は、「表彰選考委員会」が「日本伝熱学会賞審査・選考方法内規」によって行います。
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に、各賞の候補を推薦することが出来るものとします。

### 3. 提出書類

- (1) 申請書・推薦書 1通
  - ・ 申請書・推薦書の書式は、学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい。
  - ・ 学術賞、技術賞、貢献賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので、ご注意ください。
- (2) 論文抜刷または技術内容参考資料 6部 (貢献賞以外の賞)
- (3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6部 (学術賞、奨励賞のみ)

### 4. 提出期限

平成 27 年 12 月 18 日 (金)

### 5. 提出先および問い合わせ先：

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3 棟 d2S06

京都大学大学院 工学研究科原子核工学専攻 功刀 資彰 宛

E-mail : kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp Tel & Fax: 075-383-3921

## 第 53 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 53 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
委員長 吉田篤正  
幹事 木下進一

開催日： 平成 28 年 5 月 24 日（火）～5 月 26 日（木）

会場： グランキューブ大阪（大阪府立国際会議場, <http://www.gco.co.jp>）

所在地 〒530-0005 大阪市北区中之島 5 丁目 3 番 51 号 電話 06-4803-5555

アクセス 京阪電鉄中之島線・中之島（大阪国際会議場）駅すぐ

JR 大阪環状線・福島駅より徒歩約 15 分, JR 東西線・新福島駅より徒歩約 10 分

阪神電鉄本線・福島駅より徒歩 15 分

大阪市中央公会堂 (<http://osaka-chuokokaido.jp>)（重要文化財）

所在地 〒530-0005 大阪市北区中之島 1 丁目 1 番 27 号 電話 06-6208-2002

アクセス 地下鉄御堂筋線／京阪電鉄・淀屋橋駅より徒歩約 5 分

京阪電鉄中之島線・なにわ橋駅より徒歩約 1 分

講演申込締切： 平成 28 年 1 月 15 日（金）

講演論文原稿提出締切： 平成 28 年 3 月 11 日（金）

事前参加申込締切： 平成 28 年 4 月 8 日（金）

ホームページ URL： <http://htsj-conf.org/symp2016/>

### 【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
  - a) 一般セッション（口頭発表）
  - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
  - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 53 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。

### 【研究発表申込方法】

- 原則としてウェブによる申込に限らせていただきます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力してください。ウェブによる申込ができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせください。
- 申込の際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択してください。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞セッション（第 53 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。
- 発表申込時に、論文要旨（日本語で 200～250 字）を入力してください。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- 講演発表申込は、講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- 講演の採否およびセッションへの振り分けは、実行委員会にご一任ください。

### 【講演論文集 CD-ROM】

- 講演論文集として電子版（CD-ROM 版）のみを発行し、印刷版は発行しません。講演論文はウェブ上で一定期間公開します。
- 講演論文集 CD-ROM を参加者に当日配布します。なお、講演論文集 CD-ROM は参加できなかった会員にも希望があれば配布しますので、シンポジウム終了後に日本伝熱学会事務局にお申込みください。
- 講演論文集の長さは 1 題目あたり A4 サイズで 4～6 ページです。講演論文の作成様式は、1 段組み×



片側 50 字×46 行です。

- 講演論文原稿の執筆要綱は会誌 1 月号の「お知らせ」および本シンポジウムのホームページに掲載します。
- 講演論文原稿は、原則として PDF ファイルで提出していただきます。
- 講演論文締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集 CD-ROM およびウェブに掲載されません。十分にご注意ください。

#### 【講演論文の公開日】

- 講演論文は会員を対象にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の 1 週間程前からウェブ上で公開します。従って、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますので、ご注意ください。
- 会員が当該講演論文を後日原著論文として学術論文誌等に投稿される場合に配慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にすべく、シンポジウム終了後、一定期間を経て講演論文の公開を終了します。

#### 【参加費等】

- シンポジウム参加費  
会員一般                      事前申込：12,000 円、会場申込：15,000 円  
非会員一般                    事前申込：15,000 円、会場申込：18,000 円  
会員学生                      事前申込：5,000 円、会場申込：7,000 円  
非会員学生                    事前申込：7,000 円、会場申込：8,000 円  
※特別賛助会員は 1 口につき 3 名、賛助会員は 1 口につき 1 名、参加費が無料になります。
- 講演論文集 CD-ROM  
日本伝熱学会会員：無料（講演論文はウェブ上で事前に公開します。参加者には当日、講演論文集 CD-ROM を配布します。参加されない会員のうち希望者には講演論文集 CD-ROM を事後にお送りします。）  
非会員：9,600 円（会場受付にて日本伝熱学会に入会を申し込まれる場合は無料となります。）

#### 【懇親会】

- 開催日：平成 28 年 5 月 25 日（水）
- 会 場：大阪府中央公会堂
- 参加費：  
一般                      事前申込：8,000 円、会場申込：10,000 円、同伴配偶者無料  
学生                      事前申込：4,000 円、会場申込：5,000 円

#### 【ご注意】

- 講演申込の取消および講演論文原稿の差し替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮ください。
- 論文題目と著者名が、講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください。
- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクトのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参ください。
- 参加費、懇親会費等は参加取消の場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認ください。
- その他、ご不明の点がありましたら、実行委員会事務局まで e-mail または FAX でお問い合わせください。

#### 【お問い合わせ先】

第 53 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局  
大阪府立大学 大学院工学研究科 機械工学分野内  
Email: symp2016@htsj-conf.org      FAX: 072-254-9231

## 優秀プレゼンテーション賞（第53回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会  
委員長 桃木 悟

第53回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：平成28年5月24日（火） シンポジウム第1日
- 発 表 形 式：発表者1名あたり、発表内容をまとめた1枚のアピールスライド提出とポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。今回より口頭による3分間のショートプレゼンテーションは行わない予定です。詳細については、決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成28年3月31日現在で28歳以下の者、または、申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応 募 資 格：発表時（審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）であること、または入会申込中であること。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応 募 件 数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応 募 方 法：第53回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本号掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”の項目を選択し、“指導教員または研究グループ長等の氏名”および“研究分野の分類番号”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。

---

**日本伝熱学会主催 第4回 国際伝熱フォーラム**  
**International Forum on Heat Transfer (IFHT2016)**

**趣 旨**

日本伝熱学会は、世界最大かつ最もアクティブな伝熱の研究者・技術者集団として、世界中の研究者が集い、新しい伝熱研究のトレンドを生み出す国際伝熱フォーラムを開催します。2004年に京都でフォーラムがスタートし、2008年には東京、前回、2012年には長崎で第3回のフォーラムが開催され、毎回150件を超える発表で盛り上がりを見せています。第4回は、2016年に仙台でフォーラムを開催します。伝熱分野の最先端を走る研究者によるキーノート講演も企画しています。一般セッションでは伝熱の広い分野から発表を募集します。多くの方々のご発表及びご参加をお願い致します。

**開催日時** 2016年11月2日(水)～4日(金)

**会 場** 仙台国際センター  
〒980-0856 仙台市青葉区青葉山無番地 (<http://www.aobayama.jp/>)

**キーノート講演**

世界各国から、6件の招待講演を計画しています。

**フォーラム構成**

- ・ キーノート講演
- ・ ポスターセッション (150件を予定：ショットガン形式の口頭発表+ポスター)
- ・ The Nukiyama Memorial Award 受賞者による記念講演

**スケジュール**

2016年4月29日 Short abstract (発表申し込み) 提出締切  
5月31日 発表申し込みの受理通知  
7月29日 Full manuscript (Copyrightは著者が保持) 提出締切 (A4, 2～6ページ)  
8月25日 Full manuscript 受理通知  
9月15日 Final manuscript 提出締切  
9月30日 事前参加申込締切

**Web ページ** 最新情報は、<http://ifht2016.org> でご確認ください。

**問い合わせ先** 組織委員会委員長 小原 拓  
〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1  
東北大学 流体科学研究所  
Tel&FAX: 022-217-5277 E-mail: [ifht2016@microheat.ifs.tohoku.ac.jp](mailto:ifht2016@microheat.ifs.tohoku.ac.jp)

実行委員会委員長 麓 耕二  
〒036-8561 弘前市文京町 3  
弘前大学 大学院理工学研究科 知能機械工学専攻  
Tel&FAX: 0172-39-3676 E-mail: [kfumoto@hirosaki-u.ac.jp](mailto:kfumoto@hirosaki-u.ac.jp)



## 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の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、記事を総務担当副会長補佐協議員（ML 担当）、広報委員会委員長（HP 担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください。
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てリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員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担当副会長補佐協議員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、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員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担当副会長補佐協議員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）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 <a href="http://www.htsj.or.jp/banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/banner.pdf</a> をご参照下さい。

### 【連絡先】

- ・総務部会長：小野直樹（芝浦工業大学）：naokiono@sic.shibaura-it.ac.jp
- ・編集出版部会長：廣田真史（三重大学）：hirota@mach.mie-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：田口良広（慶應義塾大学）：tag@sd.keio.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：笹部 崇（東京工業大学）：sasabe.t.ab@m.titech.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子：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 では、原則としてテキスト文の送信となります。pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

## 事務局からの連絡

---

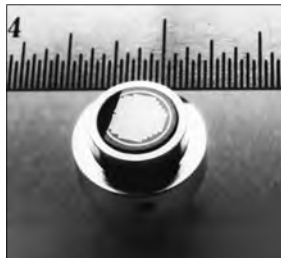
54期入会（2015.6.18～2015.9.15）正2名，賛助1名，特別賛助1名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	花島 博徳	株式会社 日立情報通信エンジニアリング	賛助	中澤 勲	オリンパス株式会社
正	片岡 則之	日本大学 工学部 機械工学科	特別賛助	千葉 健	(株)カネカ 先端材料開発研究所

# 熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 ( $W/cm^2$ ) に比例した直流電圧を出力します。  
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。  
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、  
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

## 熱流束 マイクロセンサー



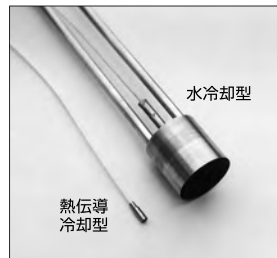
### 特徴

- 最高速の応答 (約  $6\mu$ 秒)
- $850^{\circ}C$ まで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

### 使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラブル実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

## サーモゲージ



センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタントで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国防務航空局のファイヤー・スモークテスト

## gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、 $72m^2$ の広さを持ち、厚さは $0.4mm$ です。レベル0パッケージの最適化ポリマーと1レベルパッケージの金属の構造になっています。

### 使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

## 熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。



センサテクノ株式会社

URL [www.senstech.jp](http://www.senstech.jp)

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F  
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

E-mail [info@senstech.jp](mailto:info@senstech.jp)



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

### CAPTEC 社(フランス)

CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。  
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

#### 熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm  
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)  
温度範囲: -200～200°C  
応答速度: 約 200ms  
オプション: 温度計測用熱電対内蔵  
形状: 正方形・長方形・円形  
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

#### 輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm  
厚み: 0.25mm  
温度範囲: -200～250°C  
応答速度: 約 50ms  
オプション: 温度計測用熱電対内蔵  
形状: 正方形・長方形・円形  
波長領域: 赤外/可視+赤外

### MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

#### 熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft<sup>2</sup>sec(フルスケール)  
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)  
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)  
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)  
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下\*  
再現性: ±0.5%  
較正精度: ±2%  
オプション: 輻射窓・視野角指定等

\*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

#### 超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】  
表面温度及び表面熱流束計測  
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等  
【最小プローブ径】  
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】  
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C  
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C  
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C  
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C  
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

### ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

#### 高温用熱流板



最高温度: 980°C  
応答速度: 0.1s  
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

#### 水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C  
応答速度: 0.1s  
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm<sup>2</sup>

#### 当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

#### 有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B  
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522  
URL: <http://www.techno-office.com>

## 編集出版部会ノート

### *Note from the JHTSJ Editorial Board*

エネルギー問題を考える際に「熱」の取り扱いが重要です。我が国のエネルギーフローによると、エネルギー転換終了時ですでに一次エネルギーの31%が未利用のまま熱として廃棄されています(エネルギー白書2015より)。排熱を有効活用できれば、化石燃料に代表される限りあるエネルギー資源の消費を押さえつつ、増加するエネルギー需要に応える持続可能な社会が構築できると考えられます。排熱を駆動源として、吸着・吸収現象や化学反応に伴う吸・発熱を利用する技術が長年精力的に研究されています。そこで本号では、「反応や物質移動を伴う熱利用機器の最新研究」に関する特集を組みました。これらの熱利用機器の開発は、伝熱だけでなく化学反応や物質移動の制御も同時に考慮しなければいけないため複雑です。また、伝熱促進のためには材料開発も欠かせず、材料からシステムまでの広範な研究マネジメント力が要求されます。今回執筆をお願いしました筆者の方々は長年化学工学の分野でもご活躍されており、技術の要素課題から社会ニーズまで俯瞰した立場で研究を展開されています。したがって、本特集には、機械工学がご専門の読者の方々にとっても興味深いアプローチ方法や提言も含まれると思われま。最近の伝熱シンポジウムでも関連オーガナイズド・セッションが継続的に企画されており、幅広い分野の方々の技術交流の深化が期待されます。最後に、本特集に快くご寄稿いただきました著者の皆様に厚くお礼申し上げます。

西村 顕 (三重大学)

*Nishimura, Akira (Mie University)*

*e-mail: nisimura@mach.mie-u.ac.jp*

副会長 功刀 資彰 (編集出版担当, 京都大学)

部会長 廣田 真史 (三重大学)

委員

(理事) 桑原 不二郎 (静岡大学), 野村 信福 (愛媛大学), 山田 雅彦 (北海道大学)

(協議員) 須賀 一彦 (大阪府立大学), 鈴木 雄二 (東京大学), 多田 幸生 (金沢大学),  
土屋 敏章 (富士電機(株)), 中村 元 (防衛大学校), 中山 浩 (中部電力(株)),  
西村 顕 (三重大学), 服部 博文 (名古屋工業大学)

TSE チーフエディター 花村克悟 (東京工業大学)

編集幹事 伏信一慶 (東京工業大学)

編集出版部会 連絡先: 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

廣田 真史

Phone & Fax: 059-231-9385 / E-mail: hirota@mach.mie-u.ac.jp