

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

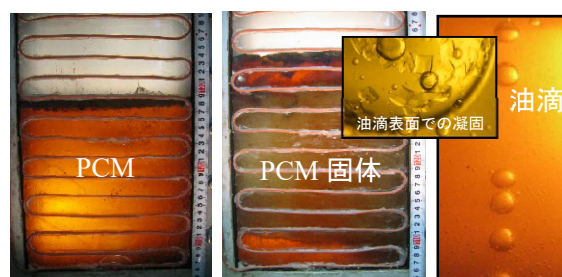
ISSN 1344-8692 Vol. 57, No. 240
2018. 7

Thermal Science and Engineering

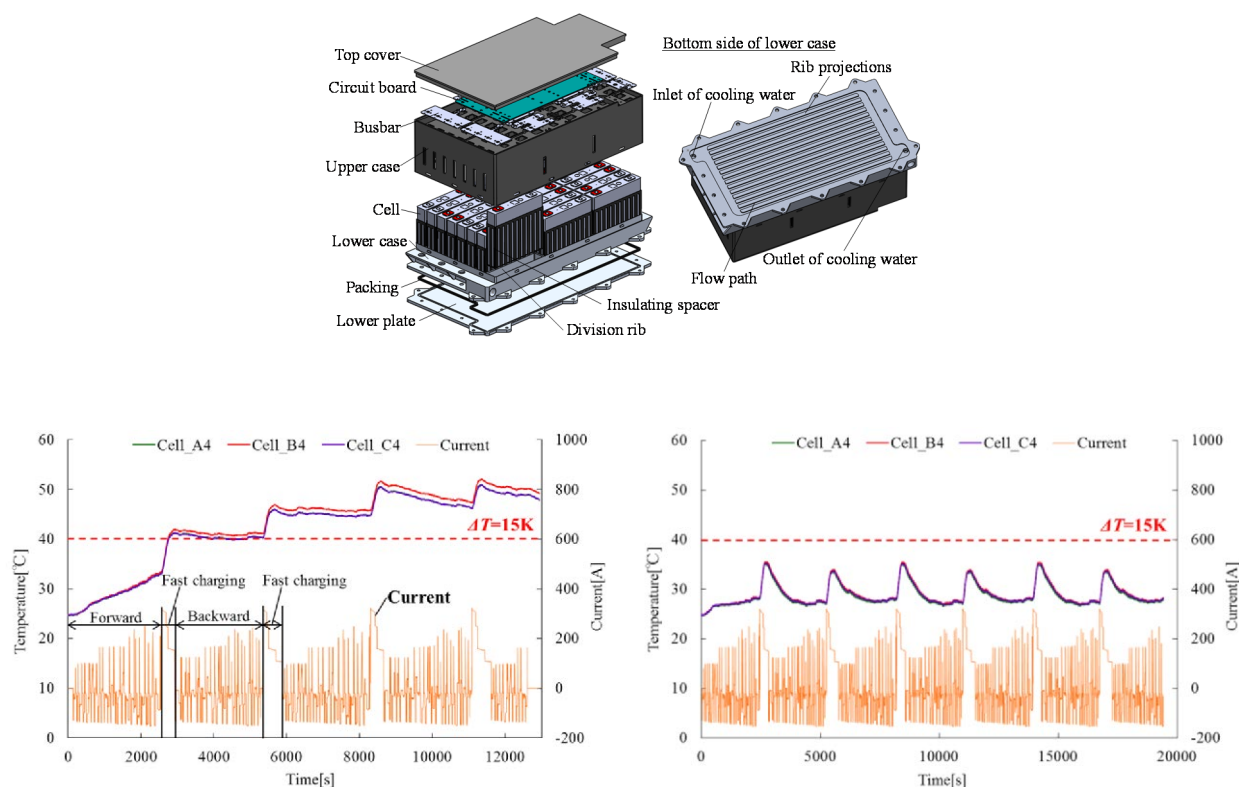
ISSN 0918-9963 Vol. 26, No. 3
2018. 7

HSTJ

◆特集：エネルギー貯蔵



上図は PCM にエリスリトールを用いた直接接触蓄熱槽の凝固挙動の例を示している．ノズル板を通り PCM 液層に流入した熱媒体の低温オイルは滴状になり，表面に薄膜の PCM 凝固相が形成される．全体では多孔質状に凝固が進行するため，伝熱面積が大きく凝固層の熱抵抗が少ない熱回収が可能となる．
(特集記事「潜熱蓄熱・熱輸送について（堀部 明彦）」より）



上段の図は水冷電池モジュールの分解図である．ヒートシンクの役割を持つ下ケースにセルを收容し，底面に冷却水を流す冷却構造とした．下段（左）は LRT（Light Rail Transit）運行パターンにおける冷却をしない場合の温度推移，下段（右）は 5 L/min の冷却水で冷却した場合の温度推移である．本冷却構造によって温度上昇を 10 K 以下に抑制することができ，LRT への適用が可能であることを実証した．

（特集記事「高出力用途向け水冷リチウムイオン電池モジュールの開発（和田 怜）」より）

第 55 回日本伝熱シンポジウムの報告
 ……………大島 伸行，戸谷 剛，小林 一道，坂下 弘人，橋本 望（北海道大学），
 津島 将司（大阪大学），櫻井 篤（新潟大学），
 近藤 義広（日立製作所），河村 洋（公立諏訪東京理科大学）…………… 17

〈特集：エネルギー貯蔵〉

特集「エネルギー貯蔵」にあたって	岩井 裕（京都大学）	23
潜熱蓄熱・熱輸送について	堀部 明彦（岡山大学）	24
未利用排熱の活用に向けた「熱バッテリー」の開発	小林 敬幸（名古屋大学）	31
高出力用途向け水冷リチウムイオン電池モジュールの開発	和田 怜（東芝）	37
持続可能なエネルギーシステムのための電力貯蔵の役割とレドックスフロー電池	田部 豊，近久 武美（北海道大学）	43
再エネ時代の PEEC の課題	伊藤 衡平，李 海文，林 灯，立川 雄也，分山 達也（九州大学）	51
安全・大容量な電力貯蔵を目指して：固体酸化物形鉄-空気二次電池	岩井 裕（京都大学），塚本 壽（CONNEX SYSTEMS 株式会社）	57

〈エデュケーション Q〉

ニュートンの冷却法則（その 2）ニュートンの温度スケールについての考察	圓山 重直（八戸工業高等専門学校），守谷 修一，岡島 淳之介（東北大学）	65
--	--	----

〈ヒストリー Q〉

人と熱の関わりの足跡（その 2） ボイラ技術の展開 ―高効率化への挑戦と破裂との戦い―	小澤 守（関西大学）	70
--	------------------	----

〈活動報告〉

北海道地区企業の工場見学会報告	企画部会 産学交流委員会 福島 直哉（東海大学），佐藤 航（日立製作所）	78
--------------------------	--	----

〈行事カレンダー〉

79

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 56 期（平成 29 年度）総会議事録	81
平成 30 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	83
日本伝熱学会主催講習会「計測技術 ～理論から最新研究まで～」	84
・事務局からの連絡	85
・新入会員一覧	86

〈編集出版部会ノート〉

91

Vol.57, No. 240, July 2018

CONTENTS

< Opening-page Gravure:heat-page >

Akihiko HORIBE (Okayama University)	
Satoshi WADA (Toshiba)	Opening Page

< New and Former Presidents' Addresses >

The 56th Term in Retrospect	
Koichi HISHIDA (Keio University)	1
Inauguration Address as the 57th President	
Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)	2

< Eulogy >

Eulogy on the late Professor Mitsunobu OGASAWARA	
Kenkichi OHBA (Professor Emeritus, Kansai University)	3
Memorial Tribute of Professor Mitsunobu OGASAWARA	
Toshimi TAKAGI (Professor Emeritus, Osaka University)	5

< Commission Report >

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2017	
Kazuyoshi NAKABE (Kyoto University)	9

< The 30th Heat Transfer Society Awards >

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Atsushi SAKURAI (Niigata University)	11
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Hiroshi TAKAMATSU, Haidong WANG, Takanobu FUKUNAGA, Kosaku KURATA (Kyushu University)	12
On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Atsushi SATO, Fubito WAJIMA, Shigeo CHIBA, Takahiro FUJIWARA, Kenta YAMAKAWA (Nikko Co., Ltd.) Takaaki INADA, Hiroshi NAGAISHI (AIST), Takeya YOSHIOKA (Hokkaido Industrial Technology Center)	13
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Eita SHOJI (Tohoku University)	14
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Tsuyoshi NAGASAWA (Tokyo Institute of Technology)	15
Best Presentation Award	
Atsushi SAKURAI (Niigata University)	16

<The 55th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Report on the 55th National Heat Transfer Symposium of Japan

Nobuyuki OSHIMA, Tsuyoshi TOTANI, Kazumichi KOBAYASHI, Hiroto SAKASHITA, Nozomu HASHIMOTO (Hokkaido University), Shoji TSUSHIMA (Osaka University), Atsushi SAKURAI (Niigata University), Yoshihiro KONDO (Hitachi, Ltd.), Hiroshi KAWAMURA (Suwa University of Science)	17
--	----

<Special Issue: Energy Storage>

Preface to the Special Issue on “Energy Storage”

Hiroshi IWAI (Kyoto University)	23
Latent Heat Storage and Heat Transportation Akihiko HORIBE (Okayama University)	24
Development of “Heat Battery” for Utilizing Unutilized Energy Noriyuki KOBAYASHI (Nagoya University)	31
Development of Water Cooled Lithium-ion Battery Module for High Output Power Applications Satoshi WADA (Toshiba)	37
Future Role of Electric Power Storage and Redox Flow Battery for Sustainable Energy Systems Yutaka TABE, Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)	43
Issues of PEEC in Use of Renewable Energy Kohei ITO, Haiwen LI, Akari HAHASHI, Yuya Tachikawa, Tatsuya WAKAYAMA (Kyushu University)	51
Towards Safe and Large-capacity Electric Power Storage: Solid Oxide Iron-Air Battery Hiroshi IWAI (Kyoto University), Hisashi TSUKAMOTO (CONNEXX SYSTEMS Corp.)	57

<Education Q>

Newton’s Law of Cooling, Part 2, Consideration on Newton’s Temperature Scale

Shigenao MARUYAMA (Hachinohe College, NIT), Shuichi MORIYA, Junnosuke OKAJIMA (Tohoku University)	65
--	----

<History Q>

Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 2):

Development in Boiler Technologies — Towards High-Efficiency Boiler and Prevention of Explosion —

Mamoru OZAWA (Kansai University)	70
--	----

<Activity Report>

Report on the Factory Tour in the Hokkaido Area.

Naoya FUKUSHIMA (Tokai University), Wataru SATO (Hitachi, Ltd.)	78
---	----

<Calendar>	79
------------------	----

<Announcements>	81
-----------------------	----

<Note from the JHTSJ Editorial Board>	89
---	----

第 56 期を振り返って The 56th Term in Retrospect



菱田 公一（慶應義塾大学）
Koichi HISHIDA (Keio University)

札幌コンベンションセンターにて開催された第 55 回日本伝熱シンポジウムにおいて、5 月 30 日に総会が開催され、今期の事業報告を行い、会長を退任することになりました。昨年藤岡前会長から引き継ぎ、あつという間の 1 年でありました。

56 期の伝熱学会は公益法人として持続可能な体制の構築が急務でした。その体制改革にあたり、原点に立ち返り、就任時に述べさせて頂いた「学会の共通の課題は若い研究者、技術者、大学院学生会員に刺激を与え、有益な情報を発信し、また学術上の交流の場を提供して、若い力の台頭を促すことである」を基軸に検討を進めてきました。伝熱研究会の頃より、この学会の重要行事は伝熱シンポジウムと伝熱セミナーである事は間違いありません。この点を議論の中心にして活動すべき内容について検討し、その上で公益法人としての体制を整えることにしました。

公益法人としての伝熱学会の活動の概略を図 1 に示します。学会は会費とシンポジウムや講演会の参加費より収入を得、それを、図の右側に示される事業に使って、学会活動を行っています。

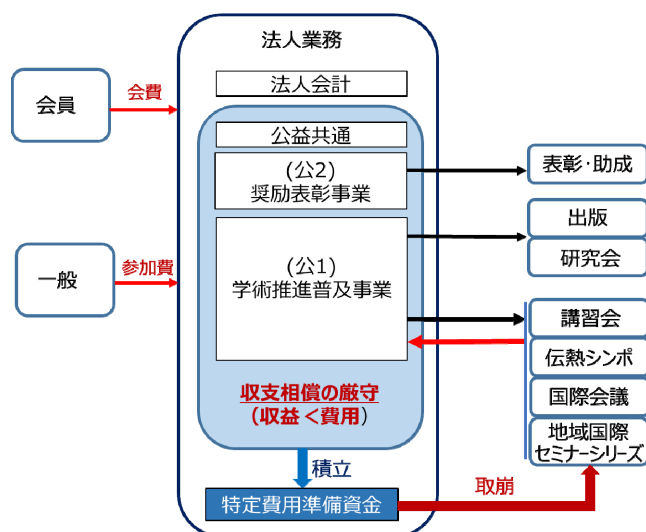


図 1 公益法人としての活動概略

公益法人では、「収支相償」という、規定により定められた事業（公益事業 1, 2 など）において収益がないように運用することが求められますが、これを本学会が達成できていなかったために、内閣府から強い指導を受けた次第です。これを満たす方法として、余剰金を特定費用準備資金に積み立て、計画的にこれを使用していくことで、持続可能な運営ができようになります。

この検討を進めるにあたり理事会で集中的な議論を行いました。9 月に理事全員で、複数のグループに分かれて、基本とすべき活動、支部活動の在り方、国際連携についての議論を泊まりがけで行いました。その結果、各地区で、特に次世代を担う若手が積極的に参画できる行事を行うこと、それを継続させていくことが重要であるとの結論に達しました。

学会活動を活発化する意義は、最新の成果の解釈、応用などの議論を幅広く行うことにあります。若手の研究者が資金を獲得し、その最終報告を行う際に、関連する海外の研究者を招待し、地域で国際セミナーを開催する。個人の研究に直結した議論をグローバルに行える機会を得られるように支援することにより、その研究者が将来大きく育っていくことを願っています。

最後に、56 期は副会長の平井、中部、木戸氏らを中心に理事の方々には多大な時間と労力をいただき、ここまで仕上げることができました。心より御礼申し上げます。57 期の近久会長（北大）にはこの体制を基本としてさらなる活動として、推進すべき研究課題、産学連携の新しいあり方、地域活性化などの課題を解決すべく、そのリーダーシップを発揮されることと期待をしています。今後とも、会員の皆様の温かいご理解とご協力、積極的な参画を賜りますようお願い申し上げます。会長退任の挨拶とさせていただきます。

第 57 期会長就任に当たって Inauguration Address as the 57th President



近久 武美 (北海道大学)
Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)

菱田公一会長の後を受けて第 57 期の会長を務めさせていただくことになりました。もともと内燃機関の領域で研究を始め、エンジンや基礎的な燃焼を主として行う傍、ヒートポンプや化学蓄熱のような研究を恐る恐る伝熱シンポジウムに発表し始めたのが、伝熱学会との繋がりでの始まりでした。エンジン燃焼の領域から見ると、伝熱学会が扱う研究領域は基礎的で実に幅広く、末長く重要な学術領域を担い続けるものと考えます。ただ、会員数は徐々に減少しており、企業との交流も十分に活性化しているとは言えない点が、改善していく課題と思います。

伝熱学会のように基幹となる学会が活性化することは、我が国の科学技術レベルを維持する上で、極めて重要です。そこで、今後努力すべき当学会の課題として以下の点を挙げました：

1) 公益社団法人としての事業整備と会計の適正化、2) 伝熱シンポジウムにおける企業研究者の参加の促進、3) 学会討論の活性化と、若手研究者に対する刺激の提供。

まず、公益社団法人は一般社団法人と異なり、経営の安定化のために資金を蓄積することはできません。この点、内閣府から強い指摘を受け、昨年度、菱田前会長のもとで、今後の運営法の基礎を築いていただきました。今年度はこれを引き継ぎ、ルーティーン化業務で任務を全うできるレベルに引き上げたいと考えています。次に 2 および 3 は伝熱シンポジウムの活性化であろうと思います。企業会員の増加に関しては藤岡元会長が尽力され、化学工学関連の発表も大いに増えました。これをさらに前進させ、伝熱シンポジウムにおいて興味深い研究発表を増やす一方、企業研究者の参加を促す何らかの方策を検討していきたいと思っています。

さて、このところ日本の学術レベルが低下しており、世界における大学ランキングが下がり続けているとよく言われます。図 1 は本年 6 月 22 日付で、日経電子版に掲載されたロボットに関する論

文数の変化です。他の国が継続的に論文増加しているのに対して、日本だけが特異な曲線を示しており、2007 年から減少し始めています。これは国立大学法人化とほぼ符合しています。国立大学法人化によって、大学の基礎研究費が削減された一方、各大学が様々な新しい教育プログラムの提案を競うようになり、その結果として研究者が疲弊してしまったと解釈されます。また、より上級の研究費を獲得することが評価につながるために、必要以上の研究費の獲得とその消費に加えて成果報告に忙殺されるような事象が生じているように思います。ここで、私たちに必要なことは、こうした目先のトレンドに踊らされることなく、自身が重要で意義深いと感ずるものに、じっくりと真摯に取り組む姿勢だと思います。

今後、伝熱シンポジウムをはじめとした伝熱学会の活動が、こうした腰の座った研究の育成と活性化につながるように貢献できれば、誠に幸いです。会長としての力量は微力ですが、副会長らと連携して努力していきたいと思っています。会員の皆様の温かいご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます。

国別のロボットに関する論文数

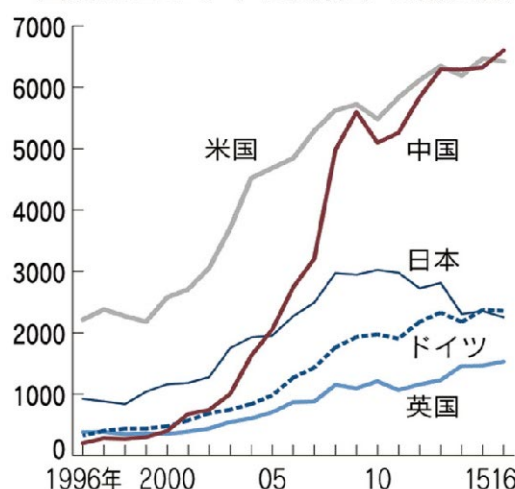


図 1 国別のロボットに関する論文数の推移
(出典：日経電子版 2018.6.22)

小笠原光信先生の思い出（深甚なる感謝を込めて）
Eulogy on the late Professor Mitsunobu OGASAWARA

大場 謙吉（関西大学名誉教授）
Kenkichi OHBA (Professor Emeritus, Kansai University)
e-mail: ohbak@kve.biglobe.ne.jp

小笠原光信先生のご逝去の報に接し、最初に私の頭をよぎったのは、晩年お会いする機会を持てなかったことへの後悔の気持でした。

先生に改めてお会いして、私が若い頃に先生から賜った大きなご恩に対する感謝と共に、本当に色々ご迷惑をお掛けしたことへのお詫びの気持をお伝えしたいとずっと思いながら、時を過ごしてしまい、機会を失ったことへの自責の念でした。

本誌に故・小笠原光信先生への追悼文を書く機会を与えられましたので、深甚なる感謝の気持を込めて先生の思い出を書かせて頂きます。

但し、記述内容は、私の狭い個人的な体験に限られますし、60歳代より若い現役世代の方々にとっては昔話を読まされる気分かと拝察致し、申し訳なく思いますが、情報ネットワーク社会が私の世代が生きてきた工業社会を完全に包み込んでいる現代から見て、四、五十年前にはこんなこともあったのかというエピソードの一つとして捉えて頂ければ望外の幸せです。

50年前、私は博士課程で核融合研究をやろうと思ひ立ち、船舶流体力学から超高温プラズマ理工学に専攻を変え、大阪大学超高温理工学研究施設で3年間実験に打ち込みました。その挙句、指導教授の故・伊藤博先生から「この分野では君は変わり種として珍重されるかも知れないが、先行きは不透明だ。機械系に帰きなさい。」と引導を渡されました。核融合炉の実現の目途さえ立っていない今から振り返れば、親心からのご指導だったと分かりますが、その時は本当に落胆しました。

そんな失意の私を受け入れ、助手として採用して下さいったのが小笠原光信先生で、それが先生との初めての出会いでした。

1969年4月に小笠原先生の熱物質移動学研究室に入れて頂いてからも、先生の当時の主テーマであった燃焼研究とは異なり、凝縮、気液二相流、模擬血管内の流れの研究、混相流用レーザー流速計(LDV)や光ファイバーLDVの開発にのめり込みました。

先生は当初、火炎中に微量存在する電離気体の研究を私に期待されていたのではと推察しますが、そのご期待を見事に裏切った訳です。そんな私の振舞いを許容し、見守って下さった先生のお心の広さには只々感謝しかありません。

先生は1977(昭和52)年に阪大退官後、関西大学工学部教授になられましたが、その3年後の1980年には私を関大に引いて頂きました。幸運も重なりましたが、先生のご尽力と後ろ盾のおかげで就任直後から助教授ながら独立した研究室を持つことができました。

関大の新しい研究室で新規の教育と研究を立ち上げ、軌道に乗せるために躍起になっていた当時の私には工学部全体のことまでは考えが及びませんでした。小笠原先生は1979年11月から1983年9月までの4年間、関大大学院工学研究科長を務められ、私の赴任当時は国立大学に比べて遅れているとされていた私立大学の大学院教育の拡充・発展策を色々考えておられたようでした。

一方、大学院生の確保が新研究室の教育・研究にとって死活問題と考えていた私は赴任直後に当時の工学部長であられた故・前田春興先生と工学研究科長の小笠原先生にご面会を求め、両先生に大学院学内進学制度の早急な創設と実施を直訴・懇願しました。

この制度は、4年生の大学院進学希望者に対して企業からの就職内定が出る前の5月又は6月に学内進学試験及び面接を実施し、すぐ可否通知を

出す制度で、その年から日本で初めて早稲田大学で実施されると報道されていました。そして幸いなことに、両先生のご決断によって教授会も動き、翌 1981 年から関大でも同制度が実施されました。

その結果、大学院進学者数が数倍に跳ね上がった上、次の年はさらに増加し、以後その水準を保ち続けました。修士課程修了者の就職は好調、入社後の社内の評判も上々で、関大大学院の社会的評価を高めることができ、私自身も研究室運営の基盤を固めることができました。

又、同時期の学科名称変更問題でも私の提案が採用されるなど、新参者ながら古参・生え抜きの教員の方々からそれなりの扱いをしてもらえ、赴任直後で新研究室立ち上げ直後の不安定な時期を何とか乗り切ることができたのは、当時の私は目の前で次々に起こる課題・難題を克服することに懸命で気が付きませんでした。小笠原先生の後ろ盾があったからこそと今では分かります。

小笠原先生は 1984 年に関大を定年退職されましたが、私にとりましては関大赴任の 1980 年から 5 年間の立ち上げ期に先生の後ろ盾を得て、研究・教育の基盤をしっかりと築くことができたことで、以後 32 年間、関大で先端科学技術推進機構の設立や近隣の大学群と連携した臨床医工情報学教育の実施など、教育・研究を思う存分やることが出来たと思います。ここに、改めて先生のご恩に感謝申し上げる次第です。

ここまで書いて来て、自分が当時の先生の年齢を超えた現在、自らを顧みて、今まで果たして後進の教員や学生たちに小笠原先生のような心の広い、暖かい指導をやって来れたのかと考えると冷や汗が出る思いですが、人生 100 年時代を額面通り受け取れば、今後私にも未だやれることがあるのではと考え、精進しますと故・小笠原先生にお誓い申し上げている次第です。

小笠原光信先生、安らかにお眠り下さい。

小笠原光信先生を偲んで

Memorial Tribute of Professor Mitsunobu OGASAWARA

高城 敏美 (大阪大学名誉教授)

Toshimi TAKAGI (Professor Emeritus, Osaka University)

e-mail: ttakagi@tcn.zaq.ne.jp

大阪大学名誉教授で、本会第 11 期会長を務められました小笠原光信先生が、平成 30 年 1 月 16 日に、老衰のため、ご逝去されました。享年 104 歳であられました。そのご連絡をいただいた時には、葬儀は近親の方で、既に執り行なわれたとのことでした。

先生はご高齢ではございますが、1 年程前には普通に電話で話をされておられました。このたびの突然のご訃報に驚いています。心よりご冥福をお祈り申し上げます。

昭和 37 年以来今日までの永き間、大変お世話になったものとして、先生の歩んでこられた道、ご業績、思い出、等を紹介させていただきたいと思っています。

先生は大正 2 年 11 月 7 日、東京都にお生まれになり、昭和 14 年 3 月、大阪帝国大学工学部機械工学科をご卒業になり、直ちに愛知時計電機（株）に入社されましたが、その後、昭和 16 年 3 月に大阪帝国大学助手となられ、昭和 17 年 3 月同講師、昭和 18 年 5 月同助教授に昇任されましたが、同年 10 月に応召、陸軍兵器学校教官として軍務に服されました。終戦後間もなく本務に復帰され、昭和 34 年 4 月工学博士、昭和 34 年 10 月大阪大学教授に任ぜられ、機械工学第四講座（熱力学・内燃機関）を担当され、ついで昭和 41 年 4 月から創設された産業機械工学科第二講座（熱および物質輸送）を担当されました。昭和 44 年 2 月から昭和 46 年 2 月まで大阪大学評議員、昭和 48 年 10 月から昭和 50 年 9 月まで大阪大学工学部長を務められ、昭和 52 年 4 月停年により退官し、同大学名誉教授とされました。

この間、昭和 36 年に付置された工業教員養成所、ならびに昭和 41 年に開設された産業機械工学科の創設に尽力され、ことに大学紛争激化の昭和 44 年からは評議員として、さらに昭和 48 年からは



小笠原光信先生

工学部長として大学の正常化に尽され、大学の発展に貢献されました。

大阪大学退官と同時に関西大学教授に就任、昭和 54 年 11 月から昭和 58 年 9 月まで関西大学大学院工学研究科長を務められましたが、昭和 59 年 3 月停年により退職されました。

以上の経歴からは想像できませんが、先生の半生には生死を分ける壮絶な体験、等があります。先生の書かれた文書[1],[2]により、一部紹介させていただきます。

先生の大学受験のとき、縁あって初代大阪帝国大学総長の長岡半太郎先生に相談されたところ、ぜひ阪大へ行けとのこと、長岡先生はおそらく理学部を言われたのであろうが、小笠原先生は念願の機械工学科に入学された。卒業研究は阿部久三郎先生の許で、当時珍しかったピエゾによるエンジン指圧線図の誤差の検討であった。卒業後は、さる製作所でのスチーム・タービンを、しかも寮の部屋まで決まっていたそうである。ところが、日中事変もたけなわ、民需産業への就職まかりならぬとお達し、ようやく捜し当てたのが前記、

愛知時計電機（株）で、仕事は軍艦の主砲の設計であった。弾の回転によるマグナス効果、発射から弾着までの地球の自転による修正、等も入っていた。厳しい務めではあったが、仕事は面白かったそうです。

昭和 15 年の中頃、恩師の阿部先生から、大学に戻ってこないか、とのお誘いを受けられた。研究者に憧れていたのでうれしい話であった。

大学で助教授になられた昭和 18 年に戦時の赤紙がきたため、東京の近くの補充隊に入隊された。厳しい訓練をする隊で、山奥から出てきた文字が読めない男、五ヶ条の軍人勅諭がどうしても覚えられない男、等種々の人達と一緒にあった。しかし、彼らの心の美しさにうたれ、教養とは、教育とは何であろうか、と真剣に考えられたのは大きな人生勉強になったという。

昭和 20 年に見習士官となられ、その卒業時に「君は先生をしていたのだから、ここに残って教官をやるように」とのことであった。7 月ごろ、火砲の組み立てのため、下士官候補生 20 名を引率して、大阪造兵廠へ行かれた。終戦の前日（8 月 14 日）のこと、空襲警報、空には編隊の爆音、猛烈な爆弾音、第一波から第六波。壕に 1 トン爆弾が直撃。大きなすり鉢状の穴。もし、爆弾投下が数万分の 1 秒でも違っていれば、先生はこの世におられなかったであろう。

昭和 20 年 9 月初旬、ポツダム少尉として復員。甲子園の借家は焼夷弾で焼失、ようやく、人の好意により、2 階住まいをすること 9 年、ひたすら、非線型熱伝導方程式の解析に苦心された。

昭和 27 年のこと、ひどい下血の直後、吐血。それ以後、慢性胃潰瘍に悩まされましたが、健康体になる原因を作ったのが大学紛争でした。

昭和 44 年、評議員となられたが、評議員は、全学の問題を審議するため、各部局から 2 名ずつ選出されるのであるから、当時の大学紛争では、その矢面に立つことになる。大衆団交がもとで、胃潰瘍患者（小笠原先生）は出血、入院。胃の 2/3 を切除。それが、その後の健康体のもととなった。

顧みると、人生の重大な転機はほとんどのものが巡り合わせに左右されていることを感じる。理念とか努力とかは、その間の微々たるものである。生死の問題は元より、如何ともし難い「運」とい

う要素が大きく影響しているように思える、という。

小笠原先生の初期の研究は阿部先生の影響で、熱伝導の解析である。理学部へ永宮健夫先生の物理数学の講義を聴きに行かれたり、Carslaw 他著 "Conduction of Heat in Solids", Watson 著 "The Theory of Bessel Function", Jeans 著 "The Dynamic Theory of Gases" 等、を一生懸命読まれたという。敗戦までの 2 年間、内務班でとくに許しを得て複素関数論の勉強をされたことは後で非常に役に立ったという。

連立微分方程式の数値計算を行い、温度分布を得るのに、当時は、手回し計算機によった。次に、実験と照合すべく、固体内のすべての温度変化が分かる、いわば熱流の可視化ができないかと悩まれた結果、示温塗料を用いることを考えつかれ、刻々に変形する等温線をとらえ、計算結果がこれとよく合うことを確かめられた。

その頃、小笠原先生が阿部先生の「熱力学・内燃機関」という名の講座を引き継ぐことになり、熱機関に共通的な「燃焼」をテーマにしようと考えられた。「燃焼」は、熱・物質・運動量の移動のほかに化学反応が錯綜する。

そこで、ディーゼル燃焼の基礎現象として重要と思われる単一油滴燃焼を、次に、規則的に配列された油滴群、さらに、噴霧の燃焼に進まれた。それぞれの研究結果から、噴霧の燃焼は油滴の燃焼の集合体ではない事が解かる。噴霧から蒸発した燃料蒸気が合体し、周囲空気と乱流拡散燃焼することを示された。

ガソリン機関では、Na の D 線の輻射強さを測ることにより、燃焼ガス温度の時間変化および空間変化を測定された。

そのころ、燃焼によって排出される NO_x, CO, HC 等の低減が課題となっていました。そのためには、火炎の構造と化学種の挙動を知る必要があります。当時、機械工学の分野で、反応動力学に関係している研究者はおられなかったため、東京大学（化学工学）の正田強先生から反応速度定数のデータをお借りしました。そのデータは NO_x 反応過程や CO, HC のサーマルリアクターでの反応動力学計算に役立ちました。

火炎構造を知るため、LDV（レーザドップラー流速計）を使って乱流拡散火炎内の乱れの強さ、

ミクロ・マクロスケール等の統計的諸量の測定を行うとともに、温度、化学種濃度の分布を系統的に測定した。それらの結果は、数値解析モデルの検証のためのデータベースとして、ドイツの Aachen 工科大学の Peters 先生、Darmstadt 大学の Janicka 先生らによっても用いられた。

その後、2 波長 LDV による 2 速度成分測定、レーザレーリ散乱を用いた温度や 2 成分系の濃度測定、流速と濃度の同時測定による乱流輸送流束の測定や、面上に検出器が配置された CCD 光検出器を複数用いて、レーリ散乱、レーザ誘起蛍光などを同時に検出し、温度や OH, CH 濃度および流速の 2 次元分布を測定することにつながりました。

レーザや光検出器は鉄鋼設備窒素酸化物防除技術開発基金、通産省 (NEDO) 独創的産業技術研究開発基金および文部省科学研究費の補助金によりました。

先生は燃焼の分野以外でも積極的に取り組みました。それは、「燃焼」から化学反応を除けば、流れを伴う熱・物質移動となり、さらに物質移動を除けば、対流伝熱の問題となり、それぞれが燃焼の基礎分野となるからであり、また、計測法は種々の問題に応用されるからです。たとえば、噴霧流における熱および物質移動について、日本で最初に開催された第 5 回国際伝熱会議 (1974) で発表されました。また、レーザ応用計測技術によって気泡流の流速とボイド率の同時測定を行われました。

この間、3 度にわたって日本機械学会論文賞 (昭和 41 年, 昭和 48 年, 昭和 57 年) を受けられ、また、日本燃焼学会から功労賞、日本機械学会から功労賞および名誉員の称号を受けられました。昭和 61 年には勲二等瑞宝章が授与されました。

研究活動とともに、学会運営についても関心を払い、日本機械学会副会長、同理事、同関西支部長、日本伝熱研究会 (現学会) 会長、日本燃焼研究会 (現学会) 顧問、高温学会参与・評議員、日本設計製図学会理事・評議員、日本舶用機関学会、日本ガスタービン学会ならびに自動車技術会評議員などを歴任されるとともに、伝熱、燃焼、ガスタービン、液体微粒化、等の各国際会議の実行・組織委員として活動し、学会の発展に貢献されました。さらに、文部省学術審議会専門委員として、研究の振興に寄与されました。

工業教育にも深い関心を持たれ、大阪高等技術研修所には 25 年にわたって講師を務められるかわら、教務委員、特別研修部運営委員として、その運営に参画されました。関西工業教育協会では、評議員、副会長として協会の発展に尽くされました。昭和 57 年度の全国大学機械工学教育研究集会では実行委員長を務められました。さらに、全国中小企業技術者研修協会からは永年の技術者教育への貢献により、感謝状が贈られました。

また、民間の研究・教育助成団体の活動にも協力を惜しまず、関西地区大学セミナーハウスの監事、またその外郭団体である友の会の会長、谷川熱技術振興基金の研究助成および表彰選考委員会委員、山岡育英会の評議員として活動されました。

小笠原先生からお預かりした資料、等によると、京都大学の佐藤 俊、水科篤郎両先生らと共に関西で伝熱懇話会を開かれていたが、各地でもこのような動きがあり、それらが発展して日本伝熱研究会になりました。昭和 36 年の同会、第 1 期 第 1 回幹事会議事録によると、会長小林昭先生、副会長橘藤雄先生、はじめ、そうそうたる先生方が幹事としてお名前が挙がっている。小笠原先生は編集幹事の一人でありました。

第 1 回日本伝熱シンポジウムは昭和 39 年に京都会館で開かれ、実行委員長は水科篤郎先生でありました。発表の申し込み数は 43 件であったが、1 会場 2 日間とするため、採択数を 30 件とする。絞り方は 1 研究室 1 件とする、とある。数の絞り方は特異ではあるが、座長および講演者は全国から集まった、そうそうたる先生方、研究者であった。私は、当時、大学院修士課程 1 年生であったが、会議室の片隅で一生懸命に講演を聞いたように思う。

第 8 回日本伝熱シンポジウムは、昭和 46 年、大阪科学技術センターで開かれ、実行委員長は小笠原先生であり、発表論文数は 106 件でありました。発表論文数は年々増加し、平成 4 年では 400 件を超えました。

昭和 51 年 (1976 年) のことになりますが、第 16 回国際燃焼シンポジウムが米国の MIT (マサチューセッツ工科大学) で開かれました。大阪大学の水谷幸夫先生、小沼義昭先生、東京工業大学の森康夫先生の研究室におられた宮内敏雄先生、そして、私の 4 名が、米国の西海岸から MIT のある

東海岸まで約 1 か月かけてレンタカーと飛行機で回り、UC Berkeley (Sawyer 先生)、Stanford 大学 (Kruger 先生)、Minnesota 大学 (Strehlow 先生)、Purdue 大学 (Refebvre 先生)、Princeton 大学 (Bracco 先生)、MIT (Heywood 先生) 等の研究室を訪問しました。いくつかの訪問先ではスタッフや学生を含めた討論も行われ、有意義でありました。森康夫先生と小笠原先生は私たちを送り出していただきました。いい思い出です。

小笠原先生は、温厚篤実な人柄で多くの学生、研究者、技術者の信望を担い、機械工学、特に、内燃機関学、燃焼工学、伝熱工学、熱および物質移動学、等の広範囲の分野における研究と教育に尽力され、また、産業界の技術向上に貢献されました。

ここに、小笠原先生の研究室を出られた方々、さらに、その後の研究室を出られた方々、等の教授名を挙げさせていただきました。企業にも大勢の方々が活躍されていますが、ここには記しておりません。

安達 勤 (筑波大学)、福岡秀和 (大阪大学)、水谷幸夫 (大阪大学)、高城敏美 (大阪大学)、西川栄一 (神戸大学)、小沼義昭 (豊橋科学大学)、大場謙吉 (関西大学)、江口邦久 (帝京大学)、土佐陽三 (日本文理大学)、橋本律男 (広島大学)、伊藤智博 (大阪府立大学)、桜井 厚 (立教大学)、大村雄史 (近畿大学)、香月正司 (大阪大学)、西田修身 (神戸大学)、申 鉉東 (韓国科学技術院)、久角喜徳 (大阪大学)、毛笠明志 (大阪大学)、吉本隆光 (神戸高専)、瀧端 学 (近畿大学)、石丸伊知郎 (香川大学)、岡本達幸 (京都工芸繊維大学)、平井秀一郎 (東京工業大学)、武石賢一郎 (大阪大

学)、小宮山正治 (岐阜大学)、木下進一 (大阪府立大学)、吉田憲司 (広島工業大学)、赤松史光 (大阪大学)、芝原正彦 (大阪大学)、西田耕介 (京都工芸繊維大学)、津島将司 (大阪大学)。

私は、小笠原先生から、反応を伴う熱および物質移動の研究をするように言われた。それで、燃焼に伴う NOx の生成・排出過程、乱流拡散火炎と旋回火炎、噴霧流とその火炎、拡散火炎における選択拡散・曲率・歪の影響、レーザ応用計測、エクセルギー解析と燃料電池、等の研究[3]を行った。ただ、1 つだけ心残りがある。分子または原子が衝突したときに反応するか否かを量子・分子動力学で予測できれば、と想ったりする。これは、若い方々におまかせしよう。

私どもが行った研究は、小笠原先生の意向に沿っているかどうか、心許ないが、一生懸命、考え、行った結果であり、お認めいただけたと思っている。

小笠原先生、永い間、ご指導ありがとうございました。

心安らかに、お休みください。

参考文献

- [1] 小笠原光信「巡り合わせを想う」蒼穹会 (阪大機械工学科の同期会) 卒業 60 周年の文集 (平成 11 年) 1-5.
- [2] 小笠原光信「過ぎ去った日々」(研究随想) 日本機械学会論文集 (B 編) 49 巻 440 号 (昭 58) 745-746.
- [3] 高城敏美「一研究者の熱工学—その軌跡」(研究随想) 日本機械学会論文集 (B 編) 79 巻 808 号 (平成 25 年) 2769-2773.

第 56 期（平成 29 年度）表彰選考委員会からの報告

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2017

表彰選考委員会 委員長

中部 主敬（京都大学）

Chair of the Award Selection Committee

Kazuyoshi NAKABE (Kyoto University)

e-mail: nakabe@me.kyoto-u.ac.jp

1. 日本伝熱学会賞

平成 29 年度 日本伝熱学会賞 学術賞，技術賞，奨励賞および貢献賞について公募を行い，応募のあった各賞の候補に対して所定の手続きを経て慎重に審査しました．その結果，各賞の授賞対象者を以下のとおり決定しました．授賞対象者の所属は申請当時のもので，順不同・敬称略で記載しています．

表彰式は平成 30 年 5 月 30 日に札幌市（札幌コンベンションセンター）で開催された日本伝熱学会第 56 期総会の付帯行事として執り行いました．

1.1 学術賞（Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan）

- 1) 代表研究者：櫻井 篤（新潟大学）
共同研究者：Bo Zhao（Stanford University）
Zhuomin Zhang
（Georgia Institute of Technology）
「メタマテリアルによる熱ふく射スペクトル制御に関する先駆的研究」
関連研究論文：
第 51 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，
H344，2014 年．
- 2) 代表研究者：高松 洋（九州大学）
共同研究者：王 海東（九州大学）
福永 鷹信（九州大学）
藏田 耕作（九州大学）
「マイクロビームセンサを用いた流体の熱伝導率測定に関する研究」
関連研究論文：
第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，
H224，2015 年．

1.2 技術賞（Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan）

代表研究者：佐藤 厚（（株）ニッコー）
共同研究者：輪島 史（（株）ニッコー）
千葉 繁生（（株）ニッコー）
藤原 隆弘（（株）ニッコー）
山川 健太（（株）ニッコー）
稲田 孝明
（産業技術総合研究所）
永石 博志
（産業技術総合研究所）
吉岡 武也
（北海道立工業技術センター）
「小型漁船搭載型の製氷機による漁獲物鮮度保持用シャーベット状海水氷の大量製造技術」

1.3 奨励賞（Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan）

- 1) 研究者：庄司 衛太（東北大学）
「熱物質輸送の可視化計測へ向けた大視野位相シフト光干渉計の開発」
関連研究論文：
第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，
K133，2016 年．
- 2) 研究者：長澤 剛（東京工業大学）
「吸着種領域モデル及び同位体クエンチ可視化による固体酸化物型燃料電池多孔質電極の反応メカニズム・ダイナミクス解明」
関連研究論文：
第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，
B314，2017 年．

1.4 貢献賞 (Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan)

該当者はいませんでした。

2. 名誉会員の顕彰

名誉会員として第 56 期では以下のとおり、2 名の方々（順不同、敬称略）を前出の付帯行事において顕彰しました。

- 1) 青木博史（(株) 豊田中央研究所）
第 52 期副会長，第 32～33 期理事（企業）
 - 2) 藤岡恵子
((株) ファンクショナル・フルイッド)
第 55 期会長，第 52 期副会長
-

3. 文部科学大臣表彰の推薦

平成 30 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰について、本学会からの推薦者はいませんでした。

4. 謝辞

日本伝熱学会賞，名誉会員の顕彰，文部科学大臣表彰の推薦に関わる選考には本学会第 56 期表彰選考委員会の委員の方々に尽力いただきました。また，学会賞ならびに文部科学大臣表彰の募集に際しましては本学会会員の方々から推薦をいただきました。この場をお借りして，推薦ならびに選考に携わられた方々に深く御礼申し上げます。

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



櫻井 篤 (新潟大学)

Atsushi SAKURAI (Niigata University)

e-mail: sakurai@eng.niigata-u.ac.jp

日本伝熱学会学術賞は、私がいつか一生に一度で良いから頂けるように努力を続けよう、と密かに心に誓い、目標としていた賞です。そのため今回は、伝熱学会から受賞のお知らせを頂いたときには夢でも見ているのかとしばし呆然と致しました。この身に余るほどに光栄な、そして大変名誉な賞を賜り、表彰選考委員会の先生方ならびに学術賞に推薦して下さいました松原幸治先生に心より深く感謝申し上げます。

今年は、マックス・プランクが量子論によってノーベル物理学賞を受賞してから、ちょうど 100 年目にあたります。熱ふく射に関するプランクの法則の発見が、後に量子論の基礎となったことはあまりに有名ですが、その節目にあたる年に「メタマテリアルによる熱ふく射スペクトル制御に関する先駆的研究」というタイトルで、このような賞を頂けたことに遠からぬ縁を感じています。

プランクの法則は、ご存知のように物質内の電子や原子核のランダムな熱振動から放射される熱ふく射エネルギーを、波長と温度の関数で見事に表現したとても美しい法則です。熱ふく射は、そのランダム性に起因するためとても広いスペクトルを持ち、偏光性も指向性も無い光です。ところが近年、ナノテクノロジーの進展と共に、ナノスケールの微細構造体から、特異的な熱放射が起こることが実験的にも次々と明らかになりました。私の恩師である圓山重直先生は、このことにいち早く気づき、2001 年に *Applied Physics Letters* で発表しています。一方、光学の分野では、新たにメタマテリアルという光を自由自在に操ることができる新材料の研究が発展してきました。

メタマテリアルはいわば光アンテナを作り、電磁波の送受信を行うようなものです。私はこれを熱ふく射スペクトル制御に応用するというアイデアに魅了されました。光を共振させるナノ構造を上手に設計すると望んだスペクトル領域でのみ波

長選択的に熱放射させることができます。熱ふく射という無秩序な現象が、きれいに秩序正しく振る舞う様子にとっても興奮しました。さらに、それが理論だけでなく実験によって実証されたときは、研究者という職業について本当に良かったなと思える瞬間でした。

表彰式前日には、圓山先生が個人的に祝宴を開いてくださいました。不肖の弟子で、学生時代から現在に至るまで、滅多に褒められることはありませんでしたが、さすがに今回の受賞はとても喜んでくださいました。このときいただいたお酒の味は生涯忘れられないでしょう。

懇親会の席では、花村克悟先生に冒頭の「一生に一度は…」のお話をしたところ、「あらゆる賞を総なめにするくらいでなくては」とニコニコしながら仰ってくださいました。そんな無茶な…と思いましたがそれくらいの気概を持って研究しなさいという意味だと受け止めています。

共同受賞者であるジョージア工科大学の Zhuomin Zhang 教授、スタンフォード大学の Bo Zhao 博士も、この受賞を大変喜んでくださいました。このお二人の多大なるご協力が無ければ、この賞を頂くことはできなかったと思います。また、ここに書ききれないほど多くの皆様から日頃より暖かくご支援とご指導を頂きました。

熱ふく射の研究者にとって、今はとてもエキサイティングな時代になってきていると感じています。そんな中、熱ふく射を専門としてアカデミックな研究ができる環境に恵まれたことは、この上なく幸せなことだと思います。新潟大学光エネルギー工学研究室は、メンバー全員が熱ふく射を研究している日本では稀な研究室です。これからも研究室の学生達と一緒に、質の高い研究ができるよう、より一層の努力を続けたいと思います。

今後ともご指導ご鞭撻の程、どうぞよろしくお願い申し上げます。

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



高松 洋, 王海東, 福永 鷹信, 藏田 耕作 (九州大学)
Hiroshi TAKAMATSU, Haidong WANG, Takanobu FUKUNAGA, Kosaku KURATA (Kyushu University)
e-mail: takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp

このたび、札幌市で開催されました日本伝熱学会第 56 期総会において、日本伝熱学会学術賞をいただき、大変光栄に存じます。ご推薦いただきました先生と審査いただいた選考委員会の先生方に心からお礼申し上げます。

受賞研究は、「マイクロビームセンサを用いた流体の熱伝導率測定に関する研究」であり、流体の熱伝導率を、液体の場合ではあればわずか 1 滴のサンプルで測定可能な方法を開発しようとした研究です。

流体の熱伝導率測定には、通常、非定常細線法が用いられます。この方法では、鉛直に張った長さ数十 cm の金属細線を流体試料中で加熱し、自然対流が発生する直前までの過渡温度上昇より流体の熱伝導率を求めます。この方法は、円筒座標系の半径方向一次元熱伝導の解との比較がベースとなっているため細くて長い線を使用する必要があり、測定には数百 mL の試料を要します。

一方、短い細線を用いて、軸方向温度分布を前提とした測定を行うのが短細線加熱法です。この方法の特徴は、細線の両端が熱容量の大きい太い電極に取り付けられているので、加熱しても両端の温度が初期温度のまま一定に保たれ、放物線状の温度分布が形成される点にあります。しかし、この方法でも数十 mL の試料を必要とします。

これに対して、本研究では、短細線の代わりにマイクロビーム MEMS センサと名付けた自立白金薄膜がシリコン基板上の溝に懸架されたセンサを用います。センサの両端はセンサと比べて熱容量が極めて大きい基板と一体になっているため、短細線法と同様、両端の温度は不変です。実際には長さが約 10 μm 、幅が 0.5 μm 程度、厚さが約 40 nm の白金薄膜センサを用いました。このように小さいセンサの場合には、加熱開始後、数 100 μs で定常状態に達し、かつ Rayleigh 数が極めて小さ

いため自然対流の影響もありません。したがって、他に類を見ない簡便な流体の定常測定が実現できます。受賞対象となった Int. J. Heat and Mass Transfer (2018) に掲載された論文では、この方法を用いて 0.03~0.6 W/(m $\cdot$ K) の範囲の 6 種類の流体の熱伝導率を 4%以内の誤差で測定しています。今のところ、30 μL の試料の測定にも成功しています。

筆者は、この方法を思いついた瞬間を鮮明に覚えています。2007 年に九大の藤井丕夫先生とともに産総研を訪問し、そこで、先生が T 型センサと名付けた方法でカーボンナノチューブの熱伝導率を測定した話を伺いました。その際に自己発熱温度センサとして用いられたのが、MEMS 技術で作製された自立型薄帯センサでした。その晩、つくばの居酒屋で、藤井先生考案の短細線法のセンサの代わりこのタイプのセンサを使うというアイデアを話したところ、「それは思いつかなかったなあ」と言われたことを思い出します。

もちろん、いい研究成果が出るまでには、多くの予期せぬ問題をクリアしなければなりません。この受賞はこれまでにこの研究に携わってくれた多くの学生諸君のお陰であることは間違いありません。この場をお借りして感謝の意を表します。きっかけをいただいた藤井丕夫先生の墓前にも近いうちに報告に行きたいと思っています。



図 1 本研究の実験を開始した頃の藤井丕夫先生
 (2009 年九州伝熱セミナーでの一場面)

日本伝熱学会技術賞を受賞して
On Receiving Technical Achievement Award of the
Heat Transfer Society of Japan



佐藤 厚, 輪嶋 史, 千葉 繁生, 藤原 隆弘, 山川 健太 (ニッコー)
稲田 孝明, 永石 博志 (産総研), 吉岡 武也 (北海道立工業技術センター)
Atsushi SATO, Fubito WAJIMA, Shigeo CHIBA, Takahiro FUJIWARA, Kenta YAMAKAWA (Nikko Co., Ltd.)
Takaaki INADA, Hiroshi NAGAISHI (AIST), Takeya YOSHIOKA (Hokkaido Industrial Technology Center)
e-mail: t-inada@aist.go.jp

このたび日本伝熱学会第 55 期総会におきまして、日本伝熱学会技術賞を賜りました。このような伝統のある賞を賜りましたこと、たいへん光栄に存じております。ご推薦、ご選考くださったみなさまに、心より厚く御礼申し上げます。

今回受賞対象となりましたのは、「小型漁船搭載型の製氷機による漁獲物鮮度保持用シャーベット状海水氷の大量製造技術」です。従来から、獲れたての漁獲物を船上でシャーベット状の海水氷で処理することにより、その鮮度を有効に保持できることが知られていました。しかし、漁獲物の量に見合った大量の氷を船上で短時間に生産するには、どうしても大型の製氷機が必要であり、空間的に制約がある小型漁船での製氷は困難でした。そこで我々は、20 トン未満の小型漁船にも搭載可能なシャーベット状海水氷の製氷機の実現を目指して、二重管式の製氷用熱交換器の開発に着手しました。

コンパクトな製氷用熱交換器で、大量の氷を短時間に生産するためには、設計上は伝熱面温度を -15°C 以下に設定した上で、氷を掻き取っていく必要がありました。しかし伝熱面温度を下げると氷の付着力が大きくなるため、熱交換器の閉塞を招いてしまい、安定な製氷が困難となります。つまり、伝熱性能の向上と製氷の安定性がトレードオフの関係にありました。このような課題を解決するために、模擬的な製氷実験装置を使って氷の剥離機構を観察し、その結果に基づいて熱交換器中の氷のかきとり機構に工夫を凝らしていきました。その結果、熱交換器の伝熱性能を維持したまま、 -15°C 以下の伝熱面温度条件においても、安定な製氷を実現する技術を確認することができたのです。

さらに我々は、この技術を用いて製造したシャーベット氷を使い、実際にさまざまな漁獲物の鮮

度を調べ、科学的な測定結果に基づいてシャーベット氷による鮮度保持効果を実証しました。鮮度保持を科学的に実証することで、製氷技術の価値も高まり、今では今回の受賞技術で製造したシャーベット氷が、水産物の付加価値向上やブランド化にも大きく貢献しています。

今回受賞対象となった製氷技術に基づいて開発した製氷機は、株式会社ニッコーにおいて「海氷」として製品化されました(図 1)。「海氷」で製造した粒径わずか $10\ \mu\text{m}$ オーダーのシャーベット氷は「シルクアイス」と呼ばれ、水産関係者の間でたいへん好評を得ています。今後は伝熱技術に立脚した新たな氷のハンドリング技術を目指し、微力ながら伝熱技術を通じての社会貢献を実現していく所存です。引き続き学会のみなさまのご指導、ご鞭撻をいただきますよう、よろしくお願い申し上げます。

最後になりましたが、本技術の開発にご協力くださいました多くの関係者のみなさまに、あらためて感謝申し上げます。



図 1 小型漁船搭載型製氷機「海氷」

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

*On Receiving Young Researcher Award
of the Heat Transfer Society of Japan*

庄司 衛太 (東北大学)

*Eita SHOJI (Tohoku University)**e-mail: eita.shoji@tohoku.ac.jp*

この度は、日本伝熱学会奨励賞という荣誉ある賞をいただきまして、誠に光栄に存じます。これまでご指導下さいました先生方ならびにご推薦、ご選考下さいました先生方、また、伝熱シンポジウムをはじめとした多くの学会を通じて議論させていただいた皆様に深く感謝申し上げます。

今回、受賞対象となりました「熱物質輸送の可視化計測へ向けた大視野位相シフト干渉計の構築」は、私が学生時代に東北大学圓山重直教授のもとで行った研究であり、大視野かつ高い分解能を有する位相シフト干渉計の開発を通して、対流熱伝達における熱や物質の輸送メカニズムの解明を目指した研究です。

研究対象である対流熱伝達は、流体移動を伴う伝熱形態であり、その研究の歴史は古く、対流熱伝達の基本的な法則であるニュートンの冷却法則は 18 世紀初めには見出されていたといわれています。近年では、電子機器の発熱が問題となっていますが、対流熱伝達は現在もその冷却において重要な役割を果たしています。物体を冷却する際には温度境界層が熱伝達特性評価において重要なことは言うまでもありませんが、一方で、流体のバルクの運動次第で境界層の状態も変わります。そこで、温度境界層の評価と同時にバルクの温度場がどのようなになっているかを知りたい、というのが研究の始まりでした。

本研究では、光干渉計の一つであるマッハ・ツェンダー干渉計に着目しました。光干渉計は非接触計測であることから、流動場を乱すことなく、温度場や密度場などの情報を取得できます。そのため、対流熱伝達と同様に古くから用いられており、本研究でベースとしたマッハ・ツェンダー干渉計も 19 世紀に考案された歴史ある手法です。通常のマッハ・ツェンダー干渉計は数 mm から十数 mm とした視野での観察に用いられることが多く、まずこの視野の拡大から研究を始めました。

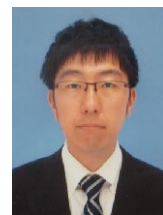
視野の拡大は光学収差との闘いです。当初は繊細な光干渉計が数 m もの光学パスを有するため、光学素子の調整の問題が大きいと考えておりましたが、多くの時間を要した末、不可避の光学収差が問題となっていることが分かりました。そして、補正用光学素子を導入することで解決し、自然対流熱伝達の可視化計測を行うことができました。

干渉計の大視野化に目途が立った頃、圓山教授より風洞へ組み込みたい、高速現象にも応用したい、最終的には大視野で音が見えると面白いね、といったご提案を立て続けにいただきました。その後、風洞へ組み込むために新しい光学系を構築したり、企業と共同で独自の光学プリズムやレンズを開発し、高速現象への適用やさらなる大視野化を行ったりと、多くの経験を積ませていただきました。大視野で音を視るところまでは到達できませんでしたが、最終的には大視野かつ風洞への組み込みが可能な光学系の提案、光干渉計の画像処理技術の一つである位相シフト技術の導入、光学プリズムの開発を行い、時間・空間ともに幅広いスケールでの可視化計測が可能な干渉計の構築に至りました。ただ、自然対流熱伝達の実験を本格的に始めようとした矢先の数多くのご提案でしたので、対流熱伝達の実験はどうなるのだろうと少なからず不安を感じましたが、今となってはそれも良い思い出です。本干渉計は、多様な対流熱伝達現象や物質輸送現象を明らかにできる可能性があると考えておりますので、本研究が伝熱研究の発展に少しでもお役に立てば幸いに存じます。

最後になりますが、私は 2016 年 4 月に東北大学大学院工学研究科化学工学専攻の助教に着任し、化学工学における熱物質輸送に関わる研究を始めました。現在は、ナノスケールの界面現象や高温融体の熱物性測定などの研究を進めております。伝熱工学の進展に貢献できるよう精進する所存ですので、今後とも何卒よろしくお願いいたします。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

*On Receiving Young Researcher Award
of the Heat Transfer Society of Japan*



長澤 剛 (東京工業大学)

Tsuyoshi NAGASAWA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: nagasawa.t.ab@m.titech.ac.jp

この度は、札幌コンベンションセンターにて開催されました日本伝熱学会第 56 期総会にて、名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと、誠に光栄に存じます。この場をお借りしまして、これまでご指導いただきました諸先生方、ならびにご選考くださいました選考委員の皆様、これまで伝熱シンポジウムにおきまして議論させていただきました皆様に厚く御礼申し上げます。

受賞対象となりました、「吸着種領域モデル及び同位体クエンチ可視化による固体酸化物型燃料電池多孔質電極の反応メカニズム・ダイナミクス解明」は、私が東京工業大学大学院在籍時に花村克悟教授のもとで行った研究であり、固体酸化物型燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell: SOFC) の多孔質電極にて進行する電気化学反応を、新規反応速度論モデルの構築と反応場分布の可視化という 2 つのアプローチから調べたものです。

SOFC は燃料電池の中でも特に 700~1000℃ の高温域で動作し、60% を超える高い発電効率や水素の他に炭化水素燃料を直接使用できる点から注目を集めています。SOFC の本格的な普及に向けては、発電温度の低温化によるコストダウンやスタックの高耐久化を達成する必要がありますが、そのためには電極の性能及び安定性の向上が不可欠となります。SOFC の電極としては現在、Ni/YSZ (イットリア安定化ジルコニア) 燃料極や LSM (ランタンストリンチウムマンガンナイト)/YSZ 空気極などの多孔質コンポジットが広く使用されています。高い性能と安定性を有する電極を設計する上では、電極内部における電子・イオン・ガスの輸送及び電気化学反応を正確に理解し記述することが重要となります。このような電極内部における輸送・反応はこれまで主に数値計算によって研究が進められてきましたが、特に電気化学反応の部分に関しては経験的な式によって記述される場合が多く、素反応過程に基づく信頼性の高いモデル

の構築が必要とされてきました。

そこで本研究では、燃料極における水素酸化反応の新規速度論モデルの構築に取り組みました。燃料極での反応は主に電子、酸化物イオン、ガスが出会うことが可能な Ni/YSZ/気相の三相界面において進行します。本研究ではこれまでの三相界面を 1 次元の線として捉え、この線上において水素と酸素の競争吸着を仮定する考え方では実験結果の一部が説明不可能なことに着目し、これを 2 次元平面的に捉える新規モデル (吸着種領域モデル) を提案しました。その結果、従来、低電流密度域と高電流密度域では別々に表現されていた過電圧表現を共に含んだ、包括的な燃料極過電圧の解析式を導出することが出来ました。この式を用いることにより、文献上の複数の実験結果を統一して整理可能なことを見出しました。

また、数値計算と比較して多孔質電極内部の輸送・反応を実験的に調べた試みは非常に限られます。そこで本研究では SOFC 反応のクエンチと酸素同位体ラベリングを組み合わせ、空気極内の反応場の可視化を行いました。この際、セル温度を 800℃ から 300℃ まで 1 秒間に冷却できる、He ガス衝突噴流冷却装置を組み込んだ発電装置を新たに構築し、クエンチ後に二次イオン質量分析計によって取得した酸素同位体分布から、空気極/電解質界面近傍の LSM 粒子において反応が激しく進行している様子が観察されました。本研究により、初めて SOFC 多孔質電極内の反応場分布を微構造スケールにて捉えることが出来ました。

最後になりましたが、今年 4 月より東京工業大学の小酒・佐藤研究室に助教として着任し、新たに内燃機関や自動車排ガスの後処理技術に関する研究に取り組んでいます。様々なテーマに取り組む中で、伝熱工学を核とした幅広い研究者となっていければと考えております。今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願いいたします。

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
— 第 55 回日本伝熱シンポジウム —
Best Presentation Award

学生会委員会幹事
櫻井 篤 (新潟大学)

Atsushi SAKURAI (Niigata University)

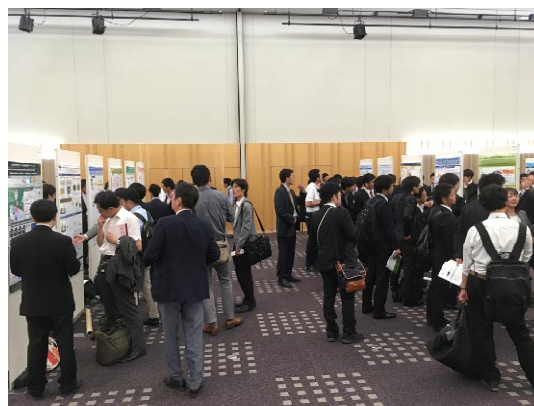
e-mail: sakurai@eng.niigata-u.ac.jp

平成 30 年 5 月 30 日に札幌市（札幌コンベンションセンター）で開催されました日本伝熱学会総会において、第 55 回日本伝熱シンポジウム優秀プレゼンテーション賞セッションで発表を行い、優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介します。

2018 年度 受賞者

- ◆ 山崎 龍朗 【関西大学】
主流の脈動を伴う平行平板間乱流熱伝達に関する DNS
- ◆ 塘 陽子 【九州大学】
カーボンナノチューブ内の純水液膜の安定性に関する実験的研究
- ◆ 藤川 凜太郎 【筑波大学】
分子動力学シミュレーションを用いた CO₂ ハイドレート膜を透過する分子の輸送挙動
- ◆ 武藤 真和 【東京理科大学】
光熱効果を用いた非接触液滴ソーティング
- ◆ 杉本 茉菜 【同志社大学】
定在波熱音響システムにおけるスタック内部温度操作
- ◆ 喜多 由拓 【九州大学】
濡れ性勾配をもつ超撥水面上の液滴可動性
(順不同)

優秀プレゼンテーション賞セッションは、1 ページのアピールスライドによる研究内容アピール、およびポスターセッションでの研究発表というスタイルで行われ、ポスターセッションでの質疑応答までを含めた研究発表が審査評価対象となりました。参加された発表者の皆様は独自の工夫を凝らし、セッションに臨まれました。



優秀プレゼンテーション賞ポスター会場風景



表彰式の様子



大島実行委員長との記念撮影

第 55 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 55th National Heat Transfer Symposium of Japan

大島 伸行, 戸谷 剛, 小林 一道, 坂下 弘人, 橋本 望 (北海道大学), 津島 将司 (大阪大学),
櫻井 篤 (新潟大学), 近藤 義広 (日立製作所), 河村 洋 (公立諏訪東京理科大学)
Nobuyuki OSHIMA, Tsuyoshi TOTANI, Kazumichi KOBAYASHI, Hiroto SAKASHITA, Nozomu HASHIMOTO
(Hokkaido University), Shoji TSUSHIMA (Osaka University), Atsushi SAKURAI (Niigata University),
Yoshihiro KONDO (Hitachi, Ltd.), Hiroshi KAWAMURA (Suwa University of Science)

1. シンポジウム概要

第 55 回日本伝熱シンポジウムが、平成 30 年 5 月 29 日 (火) から 5 月 31 日 (木) にかけて、札幌コンベンションセンターで開催されました。札幌での開催は今回で 7 回目になり、札幌コンベンションセンターでは 2 回目の開催となりました。

シンポジウムには 375 件の発表件数があり、参加者総数は、762 名 (ご招待者 9 名を含む) でした。

今年のシンポジウムでは、例年通り、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が行われました。また、並行して特定推進研究特別ワークショップを開催しました。2 日目の午後に、札幌保健医療大学 保健医療学部 教授であり、北海道フードマイスター認定制度 運営委員会 委員長である荒川義人氏による特別講演「北の大地・北海道が育む農産物の魅力」が行われました。特別講演、総会の後、札幌コンベンションセンター大ホールにおいて、懇親会を開催し、総勢 335 名 (ご招待者 15 名を含む) の方々にご参加いただきました。

今回のシンポジウムでも企業から機器展示 (6 社)、広告 (6 社) のお申し込みをいただきました。

以上、本シンポジウムの概要を簡単にまとめました。シンポジウムの運営状況や各行事の様子につきましては、各担当者による以下の記事をご覧ください。
(大島伸行, 戸谷 剛)



図 1 札幌コンベンションセンター

2. ホームページ・参加登録

本シンポジウムに関する情報は、ホームページ (<http://htsj-conf.org/symp2018/index.html>) 上と学会誌の会告で公開しました。今回のシンポジウムでも、講演申込をホームページ上から受け付け、プログラムや講演論文集 (CD-ROM 版, ウェブ版) を自動生成できるシステムを用いました。内容や動作確認については、委員全員のご協力をいただきました。ホームページやシステムの運用の仕方について、マニュアルが整備されていないため、前回ご担当された芝浦工業大学の丹下 学先生とホームページやシステムを構築されたワークスポット・ジェーピーの亀井亜佐夫氏に多大なるご助言をいただきました。参加登録、参加者キット (講演論文集電子版, 講演プログラム, 名札など) の発送については、(株) 近畿日本ツーリスト北海道殿にお願いいたしました。

ホームページの整備や講演申込、プログラムの作成、参加登録は、開催地の実行委員が行うのではなく、日本伝熱学会の各種委員会の委員にご担当いただければ、日本伝熱学会の方針をシンポジウムに反映しやすくなるとともに、開催地実行委員の労力を大幅に減らすことができ、特に北海道支部のような会員数の少ない支部には有効だと感じました。

(戸谷 剛)

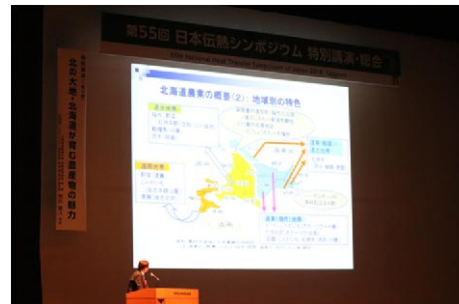


図 2 特別講演の様子

3. プログラム

今回のシンポジウムの発表件数の総数は 375 件でした。昨年と同様に「登壇者を学会員に限る」とした発表資格の制限による発表件数の減少が懸念されましたが、第 54 回の大宮 (323 件)、第 53 回の大阪 (346 件)、第 52 回の福岡 (388 件) と比べ、同程度の発表件数となりました。

本年のオーガナイズドセッションとしては、「燃焼伝熱研究の最前線」、「熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進」、「水素・燃料電池・二次電池」、「非線形熱流体現象と伝熱」、「化学プロセスにおける熱工学」、「乱流を伴う伝熱研究の進展」と昨年度も開催されたオーガナイズドセッションの他に、新たに 3 件のセッション「宇宙機の熱制御」、「ナノスケール熱動態の理解と制御技術による革新的材料・デバイス技術の開発」、「人と熱とのかかわりの足跡 (一般公開)」が加わり、合計 147 件の講演が寄せられました。また、本年度特筆すべきこととして、オーガナイズドセッションにおける議論を盛り上げるために、「各オーガナイザーの推薦があれば伝熱学会員でなくても登壇可能」という対応をしました。

一般セッションは、「バイオ伝熱」、「沸騰・凝縮」、「電子機器の冷却」、「強制対流」、「多孔体の伝熱」、「物質移動」、「計測技術」、「融解・凝固」、「混相流」、「自然対流」、「自然エネルギー」、「ふく射」、「空調・熱機器」、「熱物性」、「ナノ・マイクロ伝熱」、「熱音響」、「ヒートパイプ」、「分子動力学」となっており、合計で 177 件の講演が寄せられました。プログラム編成では、講演募集時の希望に添えるよう、セッション時間を調整しつつ編成しました。

今回のプログラム担当は 4 名で構成されており、以下に各分担を示します。

- ・オーガナイズドセッション担当： 小林委員 (北大)
- ・一般セッション担当： 黒田委員 (北大)
- ・プログラム作成： 三戸委員 (北見工大)
能村委員 (北大)

優秀プレゼンテーション賞セッションには 46 件の講演が寄せられました。ご尽力いただきました学生会委員会の皆様に深く感謝申し上げます。

(小林一道, 黒田明慈, 三戸陽一, 能村貴宏)

4. 講演論文集 CD-ROM 版・プログラム冊子

開催前の予算では赤字になることが予想されたため、費用面の制約から講演論文集の媒体を CD-ROM に戻しました。紙媒体のプログラム冊子は例年通り作成しました。講演論文集 CD-ROM 版は、会員向けに公開された講演論文集 Web 版と同一の構成となっています。プログラム冊子は、タイムテーブル、概要、プログラム、索引の後に、企業広告 (6 件)、会場案内図を掲載する構成になっています。プログラム冊子のコンテンツの作成・校正については、担当する実行委員各位にご協力いただきました。表紙のデザインは、(株) 近畿日本ツーリスト北海道にお願いいたしました。ご協力いただいた皆様に心から御礼申し上げます。
(戸谷 剛)

5. 会場

今回のシンポジウムでは、札幌コンベンションセンターを会場として使用しました。10 の講演室を確保するため、講演室として使用できる部屋を全て使用しましたが、1 日目は一部の講演室で立見の状態が生じ、参加者の皆様にはご迷惑をお掛けしました。会場に設置されているプロジェクターは全て RGB 端子による接続しかできないものでした。最近のノートパソコンには外部映像出力端子として RGB 端子が備わっておらず、HDMI 端子のみが備わっていることが多い傾向を鑑み、実行委員会にて HDMI→RGB の変換コネクタを購入し、全ての講演会場に用意しました。

今回も、座長席に加え、講演者席を最大 6 席ご用意いただきましたが、「講演者席に座ると他の発表者のスライドが見えなくなるため、講演者席は無くしてしまっても良いのではないかな? 総合討論の時間帯も、講演者が前方の一般席から講演台まで移動することで特に問題無いように思う。」とのご意見を頂戴しました。PC 切り替え器はトラブルが多いため、近年は使用されていないこともあり、次回以降、講演者席を廃止するという選択肢も検討していただけるよう、次回の実行委員会にお伝えしました。

優秀プレゼンテーションセッション (ポスター) 会場、休憩スペース、クロック、企業展示 (6 社) を中ホールに集約し、なるべく多くの参加者に企業展示を見ていただけるよう、工夫いたしました。

また、中ホール内と受付の横に 50 インチのプラズマディスプレイを配置し、1 日目は優秀プレゼンテーションセッションのアピールスライドを繰り返し上映し、2 日目以降はシンポジウム関連情報や他の国際会議の情報等を上映しました。

特別講演および総会は大ホール西側半面を使用し、懇親会会場はその隣の大ホール東側半面で行いました。想定よりも懇親会への当日申し込み者の数が多かったため、懇親会の料理の量が足りておらず、ご迷惑をお掛けいたしました。特別講演会でも紹介いただいた北海道産の食材を多く使用した少々高級なメニューをご用意させていただきました。

大小 5 つの会議室を用意し、期間中 15 件の各種附帯会議にご利用いただきました。

また、当日多くの研究室の学生に講演会場等でのアルバイトにご協力いただきましたので、この場を借りて御礼申し上げます。



図 3 懇親会での料理の一例
(橋本 望)

6. 機器展示・広告

これまでの伝熱シンポジウムと同様に、今回の伝熱シンポジウムでも機器展示、プログラム冊子への広告掲載に多くの企業から申し込みを頂きました。以下にご協力いただいた企業を紹介させていただきます（敬称は省略させていただきます。）

[機器展示]

- ・株式会社 TFF フルーク
- ・西華デジタルイメージ株式会社
- ・日鉄住金テクノロジー株式会社
- ・日本原子力研究開発機構
- ・日本カノマックス株式会社
- ・株式会社フォトロン

[広告掲載]

- ・計測エンジニアリングシステム株式会社
- ・西華デジタルイメージ株式会社

- ・株式会社ファンクショナル・フルイッド
- ・北海道ガス株式会社
- ・池田煖房工業株式会社
- ・株式会社フォトロン

今回のシンポジウムでは、参加された方々の目に留まる機会を多くするために、機器展示ブースの場所をポスターセッションおよび休憩室と同会場と致しました。このこともあり、特に初日のポスターセッションの時間帯を中心に、多くの参加者にお立ち寄り頂きました。

ご協力いただいた企業の皆様には改めて感謝申し上げます。



図 4 企業展示の様子
(坂下弘人)

7. 日本伝熱学会特定推進研究特別ワークショップ

本学会は創立 50 周年（平成 23 年 11 月）と新公益法人化を機に、特定推進研究企画委員会を設置しました。同委員会を中心として、社会の期待に応えるための社会的課題と科学技術課題あるいは我が国の今後の成長分野に特化した個別先鋭的な研究課題を設定し、各課題において主査のもとに研究グループを構成し、推進しています。

これを受けて毎年の伝熱シンポジウムにおいて特定推進研究特別ワークショップを開催しており、ここ数年は初日の午後に開催しています。今回のワークショップでは最初に花村克悟委員長から、特定推進研究企画委員会の活動ならびに特定推進研究課題の目的などについての説明がなされ、その後、以下の 4 件の特定推進研究関連の報告および特別講演が行われました（以下、敬称略）

講演 1. 「次世代鉄鋼材料創製技術の研究」

高田 保之（九州大）、永井 二郎（福井大）、
光武 雄一（佐賀大）

講演 2. 「未来型エネルギーシステムのための乱流伝熱/燃焼研究の新展開」

店橋 護（東工大）

講演 3. 「マイクロセンサー・デバイスを援用した次世代伝熱研究」

中別府 修 (明治大学)

講演 4. 【特別講演】「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」

花村 克悟 (JST さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」)

講演 1 では、昨期に終了した研究課題「次世代鉄鋼材料創製技術の研究」について報告がなされました。高強度の鉄鋼製品を作るためには、結晶の微細化が重要であること、結晶微細化により加工性が劣化すること、強度と延性のバランスが良い加工のための技術開発が重要であること、が述べられ、冷却過程の正確な理解を通して冷却技術を進展させることによって結晶粒子の微細化とその成長を制御することが可能であることが示されました。研究成果のうち、スプレー冷却に及ぼす表面酸化膜の影響、ならびに、濡れ開始時の現象解析についての報告がありました。

講演 2 と講演 3 は、いずれも今期、新たに設置された特定推進研究課題であり、設置の背景ならびに目的についての説明がなされました。

「未来型エネルギーシステムのための乱流伝熱/燃焼研究の新展開」においては、乱流研究、伝熱研究、燃焼研究等の現況を調査検討し、未来型エネルギーシステムにおいてそれぞれの研究分野で求められる学術的課題を明確にし、分野間での共有と産業界との連携をはかりながら、新燃焼システムの学術的方向性の提言や統合的国産解析プラットフォーム整備等の研究シーズの発信を行っていくことが述べられました。

「マイクロセンサー・デバイスを援用した次世代伝熱研究」においては、伝熱研究のけん引役としてのナノテクノロジー、MEMS 技術への期待が述べられ、これまで本学会に所属する研究者らが独自に発展させてきた MEMS を援用した伝熱研究を俯瞰・整理して、今後の研究の方向性を提示すること、異分野の研究者・技術者との連携を推進していくこと、などが活動計画として示されました。

講演 4 の特別講演では、JST さきがけ「熱輸送のスペクトル学的理解と機能的制御」について、戦略目標である「ナノスケール熱動態の理解と制御技術による革新的材料・デバイス技術の開発」

の背景ならびに同研究領域で対象となる研究、さらに「スペクトル学的なアプローチ」についての説明がなされました。本学会に所属する多くの若い研究者への期待についても述べられました。

最後の総合討論では、特定推進研究課題の実施者側からの意見に加えて、特定推進研究企画委員会の設立時から現在に至る活動と今後の本学会における位置づけなど、将来への展開について活発かつ有益な意見交換が行われました。

本ワークショップは準備した 200 余部の資料が出回り盛況でした。特定推進研究企画委員会としてご参加いただいた皆様に御礼を申し上げます。



図 5 特別ワークショップ会場風景
(特定推進研究企画委員会 津島将司)

8. 優秀プレゼンテーション賞セッション

本セッションは、本学会の学生会員や 28 歳以下の若手研究者会員の研究を広く紹介し、研究意欲を高めるとともに発表技術を磨き上げる場として、毎年シンポジウムの初日に学生会委員会が企画・運営しているものです。今回は 45 件の発表があり、ここ数年の申込件数が 40 件程度で推移していることを考えますと、今回もこれまでと同規模の活発なセッションを開催できたといえます。

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションは、例年通りポスターセッションによる討論の時間を長く設け、150 分間行いました。今回は、事前にアピールスライドの冊子体を制作し、シンポジウム参加者へ参加者キットと共に郵送いたしました。これにより、発表の概要について事前にじっくりと吟味できたのではないかと思います。またセッションの会場である P 室には多くのシンポジウム参加者が集まり、多くのポスターの前で活発な議論がなされていました(図 6)。終了時刻に近づいても会場は大盛況のままであり、発表者も参加者も納得のいくまで深い議論ができたのではないかと

と思います。

審査についてですが、総勢 25 名の先生方にご協力頂き、ポスターならびにアピールスライドの内容、質疑応答の内容、理解度といった多くの観点から厳正に審査を行いました。またポスター会場では参加者による優秀ポスターの投票も行い、審査員による審査結果を学生会委員会にて慎重かつ厳正に集計いたしました。その結果、山崎龍朗（関西大学）、塘陽子（九州大学）、藤川凜太郎（筑波大学）、武藤真和（東京理科大学）、杉本茉菜（同志社大学）、喜多由拓（九州大学）（敬称略/順不同）の 6 名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました。惜しくも受賞に至らなかった発表者におかれましても、非常にレベルの高い発表ばかりであったとの感想をいただいております。

末筆ながら、限られた時間内で多くの審査項目を懇切ご丁寧に行っていただいた審査員の皆様、また多大なご協力をいただいたシンポジウム実行委員会の皆様に、心より深く御礼申し上げます。



図 6 優秀プレゼンテーション賞セッションの様子
（学生会委員会 櫻井 篤）

9. 産学交流イベント

学会への企業の方の積極的参加ならびに大学の先生方とのコラボレーション探索を目的に、伝熱シンポジウムの二日目午前に、企業特別セッション「北海道地区企業による部品開発・技術開発の紹介」を北海道支部と産学交流委員会の合同で開催しました。講演頂いた企業（敬称略）は、(株)白石ゴム製作所、(株)Will-E、(株)よねざわ工業の北海道中小企業家同友会産学官連携研究会 3 社と、北海道ガス（株）、北海道電力（株）、JFE エンジニアリング（株）の合計 6 社です。本セッションの内容は講演論文集に掲載せず、講演当日、会場に足を運ばないとわからないものとなりました。また、参加登録されていない方でも聴講いただけ

る一般公開セッションと致しました。一般聴講者は 9 名でした。北海道地区の企業が今まさに抱えている伝熱技術の課題を提起頂き、大学の先生方、企業の方から視点を変えた適切なアドバイス、質問が出され、セッション時間を超過するほどでした。次回以降の伝熱シンポジウムでも開催地区の企業の方々に講演頂き、開催地区ならではの伝熱技術の課題にフォーカスを当てた企業特別セッションを、開催地区の支部に協力を仰ぎながら、継続開催する予定です。今回講演頂いた企業の方々に深く感謝するとともに、次回の特別セッションへの皆様の参加を期待いたします。



図 7 ご講演の様子
（産学交流委員会 近藤義広、西剛司）

10. オーガナイズドセッション

「人と熱との関わりの足跡」

本学会が対象とする「熱」は、古来、人々の生活や文化を支え、また近代日本の科学・技術の発展にも大きく寄与してきました。そこで、「熱遺産委員会」を新たに発足させ、各地域や団体・企業等に残されている「人と熱との関わりの足跡」をたどり、その調査結果を日本伝熱シンポジウムや「伝熱」誌、さらには一般向けの書籍としても出版する等によって、広く一般社会へ公開することとしました。今回はその初回のオーガナイズドセッションとして開催したものです。

タイトルと講演者は以下の通りです。

(1) 人と熱との関わりの足跡：

河村 洋（公立諏訪東京理科大学）

(2) ボイラ技術の展開－高効率化への挑戦と

破裂との戦い－：小澤 守（関西大学）

(3) 冷たさを届ける－函館五稜郭氷－：

野村祐一（函館市教育委員会文化財課）

(4) 札幌オリンピックの雪を白く－札幌の都市熱

供給－：白石貞二（(株)北海道熱供給公社）

セッションでは最初に委員長による主旨説明のあと、ボイラ技術の展開における「破裂との戦い」について、豊富なデータに基づいてご講演を頂きました。その内容は「伝熱」誌の今号のヒストリーQに掲載されています。

次に今回開催の北海道地域に関する足跡として、明治初期から関東地方、後には全国に冷熱を大量に供給することに成功した函館五稜郭の天然氷と、札幌五輪にむけて大気汚染の解決に取り組んだ札幌市の地域暖房について、北海道の自治体及び企業の方からご紹介を頂きました。お二人とも、ご自身の自治体や企業が保有される貴重なデータや画像を豊富に使って、それぞれの地域への熱意のこもったご講演でした。



図 8 セッションの紹介 (その 1)



図 9 セッションの紹介 (その 2)

(左上: 五稜郭で氷を切り出す光景 (函館市中央図書館), 左下: 現在の五稜郭の冬の光景, 右上: 地域暖房導入前の札幌市の大気汚染 ((株) 北海道熱供給公社), 右下: 青空の回復を伝える新聞報道 (1971/11/29 読売新聞夕刊))

本セッションは、一般へも開放し、参加者は全体で約 50 名、会員以外からも講演者を含めて約 10 名の参加がありました。このように今回は、近代における熱技術の発達と北海道地域に刻まれた「足跡」の両面から「人と熱との関わり」を辿ることにより、その目的を十分に果たすことができた

と考えています。講演者及びセッションへの参加者各位に心から感謝致します。熱遺産委員会では、今後も調査研究結果の「伝熱」誌への掲載を継続すると共に、来年度の伝熱シンポジウムに於いてもその地域における「人と熱との関わり」を探り出して紹介して行く予定です。

(熱遺産委員会 河村 洋)

11. あとがき

第 55 回日本伝熱シンポジウムを開催するために、北海道地区の会員と一部非会員の先生方にも実行委員会に入っていただき、ホームページの作成、プログラムの編成、論文集の編集、講演会と懇親会会場の準備、受付対応、展示・広告の勧誘など、数多くの仕事を引き受けていただきました。北海道地区のような会員数の少ない地域で、シンポジウムを開催する時は、開催地の委員でないと出来ない作業を開催地の実行委員会が担当し、講演申込、プログラム編成、論文集の編集の作業など、開催地の実行委員会でもなくてもできる作業を、本部の委員が担当するという分業制度を導入していただけると、大変助かると感じました。講演申込やプログラム編成を本部が担当すれば、日本伝熱学会の方針を反映しやすいというメリットがあると思います。

最後に、本シンポジウムの運営にご協力いただいた委員の皆様、シンポジウムに参加いただいた参加者各位に御礼を申し上げるとともに、本学会のさらなる発展と会員各位のご活躍を祈念いたします。

(大島 伸行, 戸谷 剛)

第 55 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長	大島 伸行	北海道大学
幹事	戸谷 剛	北海道大学
委員	岡本 吉央	近畿日本ツーリスト北海道
	黒田 明慈	北海道大学
	小林 一道	北海道大学
	坂下 弘人	北海道大学
	田部 豊	北海道大学
	寺島 洋史	北海道大学
	富樫 憲一	北海道立総合研究機構
	能村 貴宏	北海道大学
	橋本 望	北海道大学
	平野 繁樹	北海道立総合研究機構
	三戸 陽一	北見工業大学
	山田 雅彦	北海道大学

特集「エネルギー貯蔵」にあたって
Preface to the Special Issue "Energy Storage"

岩井 裕 (京都大学)

Hiroshi IWAI (Kyoto University)

e-mail: iwai.hiroshi.4x@kyoto-u.ac.jp

食料, 水, お金, 知識・情報, 私たちは日常的に様々なものを“蓄える(貯える)”. 何かを蓄えるのは対象自体あるいはそれを蓄えることに価値を見出すからで, 安全, 安心, 利便性そのほか蓄えておくことで将来何かよいことにつながりそうだと期待するからだ. 特に消費するものに注目すると, 蓄えることの利点はより明確になる. 例えば一定の需要があるのに供給が断続的であるときや, 一定の供給はあるものの一度に大量の需要が生じるときなど, 蓄えがあればそれは需要と供給の隔たりに対応するバッファとして機能する.

エネルギーについて考えてみる. 最初のエネルギー貯蔵は食料だろう. 農耕が始まる前には, 人の営みと関係なく勝手に生った果実を森で採取し, 貯蔵・消費して需要を満たしたことだろう. 農耕が始まってからは, 今日に至るまで, 能動的に作物を育成して収穫し, 貯蔵・消費して需要を満たしている. 食料に限定せずより広く今日の私たちの社会を見てみると, それを量的に支えている“一次エネルギー”は化石燃料だ. 何百万年の間に人の営みとは関係なく勝手にたまった石炭・石油・天然ガス等を採取し, 貯蔵・消費して需要を満たしている. この観点では, 現在の社会は採取社会に近い.“農耕型”へのシフトは可能だろうか? 作物の育成との大きな違いは, 化石燃料生成の時間スケールと人の時間スケールの違いが大きすぎることである. 化石燃料は貴重なエネルギー源として大切に使うのがよさそうだ. これに対し, 同じく太陽エネルギー由来でもバイオマス, 水力, 風力, 太陽光といったいわゆる再生可能エネルギーは, 人の時間スケールと折り合いがつきそうであり, “収穫”のための技術も存在する. ただし蓄えることが容易なものばかりではない.

今号の特集テーマとして「エネルギー貯蔵」を設定した. エネルギー貯蔵はエネルギーの需要と

供給との間の時間的, 空間的, 質的および量的ギャップを埋める技術であり, その重要性に疑いの余地はない. これまでもエネルギー変換など種々の特集テーマに内包される形で, 熱エネルギーや電気エネルギーの貯蔵に関する記事は掲載されてきているが, 貯蔵という切り口が陽に特集テーマに現れたのは, 主に吸着式・化学式ヒートポンプを想定しその材料に注目した 2006 年 7 月号「熱エネルギー変換・貯蔵材料」まで遡る. 干支がひと回りする間にエネルギー貯蔵に対する要求と期待はさらに高まっていると言えそうだ. 排熱利用の高度化や熱機器の高効率化の追求にとどまらず, 例えば自動車の電動化の潮流は移動体における電力及び熱エネルギーの要求をより挑戦的なものにしていく. また上で取り上げた再生可能エネルギーの中でも発電出力の変動が大きい太陽光・風力発電の導入拡大は, 大容量電力貯蔵実現へ向けた研究の駆動力となっている.

熱エネルギー貯蔵にせよ電力貯蔵にせよ, 高エネルギー密度, 高耐久そして高貯蔵効率が要求される. 原理的には可逆な現象を利用するものの実際には不可逆的な損失があり, それら損失はしばしば熱・物質あるいは電荷移動と関わっている. 特に高出力作動の実現には輸送フラックスの制御や大フラックス時の損失低減が鍵となるだろう. また(電気)化学反応を伴う場合には反応速度の温度依存性にも注意が必要であり, 安全かつ高効率な作動には適切な熱管理・温度管理が欠かせない.

本特集では熱エネルギーと電気エネルギーの貯蔵について, 従来技術のさらなる高度化や, 今後の発展が期待される比較的新しい手法について先進的な研究をされている方々(本著者除く)に特集記事を執筆いただいた. 皆様たいへんお忙しいところお引き受けくださり, 心より御礼申し上げる次第である.

潜熱蓄熱・熱輸送について

Latent Heat Storage and Heat Transportation

堀部 明彦 (岡山大学)

Akihiko HORIBE (Okayama University)

e-mail: horibe@okayama-u.ac.jp

1. はじめに

蓄熱・熱輸送システムは、熱エネルギーの供給と需要の間に生じる時間的・空間的、および量的・質的な差異を解消することでエネルギー利用効率が向上できるシステムである。産業界や一般社会で多く利用され、ロスや廃棄量も大きいエネルギーは熱であり、熱の形態で貯蔵・輸送することが有益な場合が多い。蓄熱・熱輸送は従来から行われている技術であり、これまで様々な技術的進歩がなされているが、蓄熱システムを導入する場合、エネルギー利用の観点からはメリットが多い場合においても、経済性は比較される原油の価格等の社会的情勢に左右され、単純に技術や科学的進展とシステムの普及が結びついていない。一方で最近では、地球温暖化防止対策が喫緊の課題となっており、工場排熱のさらなる利用、熱利用システムの高効率化、および建築物における ZEB や ZEH を実現するために蓄熱を利用する試みなど、これまで以上に熱の有効利用が求められている。蓄熱・熱輸送のなかで潜熱蓄熱システムは、様々な実用化や研究がなされて今後も発展の可能性が大きい。本稿では、潜熱蓄熱に関してシステムや蓄熱材料の基礎的事項を示し、加えて研究や実用化されている蓄熱材料・システムの例について説明する。

2. 蓄熱システムの形態と潜熱蓄熱

蓄熱方法は、貯蔵するエネルギー形態により大別して顕熱蓄熱、潜熱蓄熱、および化学蓄熱がある。さらに、貯蔵する熱の温度帯や熱貯蔵のサイクル期間による区別もできる。潜熱蓄熱の特徴は、蓄熱および放熱が物質の相変化や転移の際の熱を利用する点である。これにより一般の顕熱蓄熱に比べて蓄熱密度が大きくなり、省スペースでの蓄熱が可能となる。また、相変化時のある一定範囲の温度での熱の出し入れができることも特徴であ

る。さらに後述のような潜熱蓄熱材粒子を含有した熱媒体を用いると熱輸送密度の増加や熱交換器での熱伝達向上を図ることができる。

潜熱は、気体・液体間の凝縮蒸発、または液体・固体間の凝固融解や転移等を利用することが考えられる。単純な気体・液体間の凝縮蒸発の利用は、気体になる際に圧力または体積が大きく変化するために困難であり、気体を利用する例としては、水蒸気と吸着材等を用いた蓄熱などが検討されている[1]。一方で、相変化時に体積変化が少ない液体・固体間の潜熱や相転移の利用は多くの実用化例や研究がなされており、本稿では、液体・固体間の相変化等に関する事項について記述する。

3. 潜熱蓄熱

3.1 潜熱蓄熱槽

代表的な潜熱蓄熱槽の形態を図 1 に示す。図 1 の (a) は潜熱（相変化）蓄熱材（Phase Change Material: 以下 PCM と呼ぶ）が平板型で一番簡単な構造であり、(b) は PCM の中を伝熱管が通過するシェラアンドチューブ式、(c) は円筒のカプセル等のなかに PCM を封入した蓄熱槽、(d) は熱媒体と PCM が直接接触する蓄熱槽である。(a) から (c) は、間接触方式（隔板式）であり、PCM と熱媒体を壁で分離している。熱需要側への輸送する熱媒体には、温度に応じて水、オイルやブラインなどが用いられる。間接触式の長所としては、構造が単純であること、PCM と熱媒体が直接接触していないため扱いやすいことなどが挙げられる。一方、放熱時に PCM が熱交換部にて凝固し熱抵抗となるため、熱通過率は減少していき単位時間あたりに回収できる熱量が低下しやすく、熱回収率（熱媒体温度がシステムとして利用できる限度の基準温度に達するまでに回収できる熱量）も小さくなる。これは PCM の熱伝導率が低い場合に特に問題となる。図 1 (c) に示した円筒状容

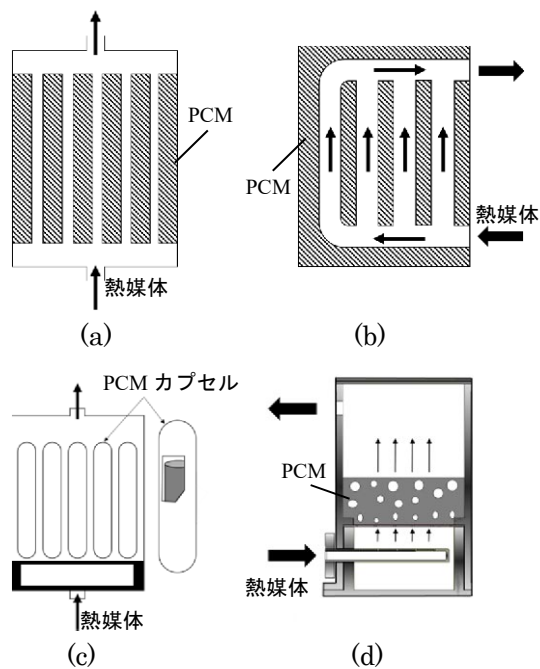


図1 種々の潜熱蓄熱槽

器や球形のカプセルに PCM を封入した形式は比較的伝熱面積が大きいため熱伝達特性が向上する利点があるが、カプセルの材質やカプセル内の凝固融解時の伝熱性能が課題となる。

一方、(d) の直接接触式は、熱媒体を蓄熱層内へ流入させ、PCM と直接接触させながら熱交換させて熱媒体のみを回収するものである。長所としては、PCM と熱媒体の伝熱面積が大きく PCM が固体となっても熱抵抗の影響が少ないため熱移動特性が非常に優れていること、および PCM 充填率が高くできることが挙げられ、高効率で高密度にエネルギーを蓄えることが可能になる。ただし、熱媒体に PCM が溶けないような組み合わせであることなど選定できる材料が限られる。また、熱媒体回収時の PCM の流出を防ぐ工夫が必要となる。

上記の他に、氷スラリー、マイクロカプセルスラリーなど PCM 粒子含有流体（以下 PCM スラリー等と呼ぶ）を貯蔵する蓄熱槽がある。潜熱物質を含有する流体を蓄熱と熱輸送に用いることができるため利点が多く、後述のように様々な PCM 粒子を用いたシステムに関する基礎研究や実用化研究が現在なされている。

3.2 潜熱輸送

潜熱を利用する熱輸送に関しては、PCM を液体

状態としてコンテナなどに充填してオフラインで輸送し熱需要側で放熱させて固体として回収するシステム[2,3]や、上述の PCM スラリー等をパイプでオンライン輸送するシステムが実用化されている。オフラインの場合、パイプ輸送より輸送距離の範囲が広がる利点があるが、コンテナのトラック輸送等における人件費などが課題となる。一方、パイプ輸送できる PCM スラリー等として現在実用化されているのは氷スラリー、マイクロカプセルスラリー、および包接型水和物スラリーなどである。例えば水や水溶液による氷スラリーを用いると、冷水の顕熱輸送と比較して大きな熱輸送量となり、配管径の減少やポンプ動力の削減を図ることができるため、一部の地域冷暖房やビル空調にて用いられている。一方で、氷は融点が 0°C 、エチレングリコール水溶液等の氷では融点が 0°C 以下となり、冷房用としては温度が低く冷凍機の成績係数が低下する。そのため、後述するように約 5°C から 10°C の融点をもつ、パラフィン含有マイクロカプセルスラリーや包接型水和物スラリーの利用が検討されている。

3.3 潜熱蓄熱材料 (PCM) に必要な性質

潜熱蓄熱システムでは、想定する熱源(熱媒体)温度に対応した相変化温度を有する PCM を選定して用いる。熱媒体温度と PCM の相変化温度との差が大きいと蓄放熱が速くなるが、潜熱に対して顕熱の比率が大きくなり、潜熱蓄熱による長所が減少する。PCM を選定する際には一般に次のように考える。まず対象とする熱源に対して相変化温度が適しており、単位体積/単位質量当たりの蓄熱容量(融解潜熱)が大きい物質を対象とする。氷の融解潜熱が約 334kJ/kg と比較的大きく、他の蓄熱材の潜熱の比較基準となる。伝熱性能としては、可能な限り熱伝導率大きいことが望ましいが、例えばパラフィンは $0.3\sim 0.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 程度[4]と一般にはさほど大きくないため装置の形状など伝熱促進の工夫が必要となる。

さらに、留意すべき点としては、凝固時の過冷却度が小さいことが挙げられる。液体状態の PCM から放熱するとき、その PCM の融点温度で固体状態にならず過冷却現象が発生する場合がある。例えば、多くの無機水和塩の PCM は過冷却現象を伴う。過冷却度が大きい場合、蓄熱した時の温度で熱放出が行われず、熱的な価値が小さくなり、

表 1 PCM 候補の例[4-8]

種類	物質	融点 [°C]	融解潜熱 [kJ/kg]
水	水・氷	0	334
パラフィン	n-テトラデカン $C_{14}H_{30}$	5.9	229
	n-オクタデカン $C_{18}H_{38}$	28.2	243
	n-triacontan $C_{30}H_{62}$	65.4	251
包接型水和物	トリメチロールエタン 3 水和物 $CH_3C(CH_2OH)_3 \cdot 3H_2O$	11	272
	臭化テトラブチルアンモニウム 28 水和物 $(C_4H_9)_4NBr \cdot 28H_2O$	12	180
水和塩	酢酸ナトリウム 3 水和塩 $NaCH_3COO \cdot 3H_2O$	58	264
	塩化マグネシウム 6 水和塩 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	116	172
糖アルコール	エリスリトール $HOCH_2(CHOH)_2CH_2OH$	119	340
	マンニトール $HOCH_2(CHOH)_4CH_2OH$	166.5	304
熔融塩	硝酸リチウム $LiNO_3$	253	363
	亜硝酸ナトリウム $NaNO_2$	282	216

また過冷却は確率的現象であるためシステムの運転も不安定なものとなる。過冷却を解放するために一般的には核剤等を使用するが、物質によっては核剤が効果的でないものもある。

また、一般的事項として、有毒性の有無や廃棄時の環境負荷、腐食性、コストなど種々の面から検討する必要がある。以上の条件を全て完璧に満たす PCM はほとんどなく、使用目的により様々な物質が PCM としての適合性を検討されている。

3.4 PCM の種類および特徴

潜熱蓄熱材 (PCM) としては、水、有機・無機水溶液、パラフィン、包接型水和物、水和塩、糖アルコール類、熔融塩、および金属など、多様なものが候補として上述の適合性が検討されている。代表的な物質を表 1 [4-8] に示す。氷は安価で環境負荷が小さく、融解凝固潜熱も大きい代表的な PCM である。パラフィンは、カプセルやマイクロカプセルなどに封入して用いられることが多く、表 1 に示すように、分子の種類 (炭素の数) によって融点を選定できるため、冷房から暖房用まで種々の温度帯で利用することができる。ただし、可燃物であることに留意が必要である。エリスリトールなどの糖アルコール類は 100°C から 170°C

程度の蓄熱に対し、大きな潜熱を有することから一部実用化されている。水和塩は安定しており PCM として使用されているが、過冷却を生じるものが多く対策が必要とされる。熔融塩は単一または他と混合させて 200°C 程度以上の高温用として用いられるが、金属を PCM として用いるときと同様に、セラミック材料の容器を用いるなど、腐食性には大きな注意が必要である。

0°C 近辺の冷房用では、水・水溶液、パラフィン、水和物等が検討され、40~60°C 程度の暖房用では、パラフィン、水和塩等が用いられることが多い。一方、温度が比較的高いが水を熱媒体として用いることができる水の大気圧での沸点以下の 90~80°C 程度や工場排熱等の 200°C 以上の PCM に関しては、候補はあるもののさらなる探究が必要と考えられる。図 2 に 100°C~250°C における代表的な潜熱蓄熱物質の融点 T_M と潜熱量 L の関係を糖アルコール (◇)、熔融塩 (□)、有機物 (○)、水和塩 (△) に分けて示す[9]。

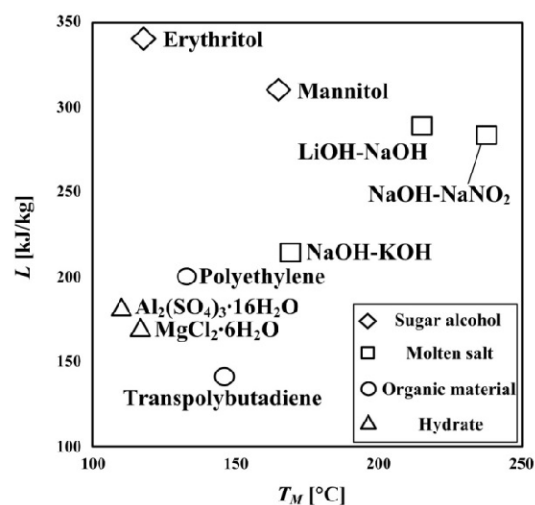


図 2 中高温帯 PCM の融点と潜熱[9]

4. 種々の潜熱蓄熱システムおよび PCM

本項では、現在用いられている氷蓄熱システムなどや多くの研究がなされている PCM スラリー等について説明する。

4.1 氷蓄熱システム

現在用いられている代表的な潜熱蓄熱システムの一つは、氷蓄 (冷) 熱システムである。純粋な氷は約 334 kJ/kg という高い融解・凝固潜熱を有している。例えば、蓄熱時に氷の割合が 30% の場

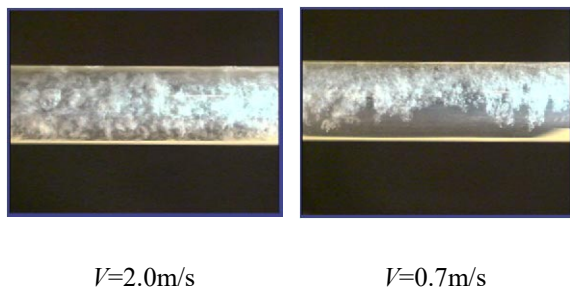


図3 氷スラリーの流動

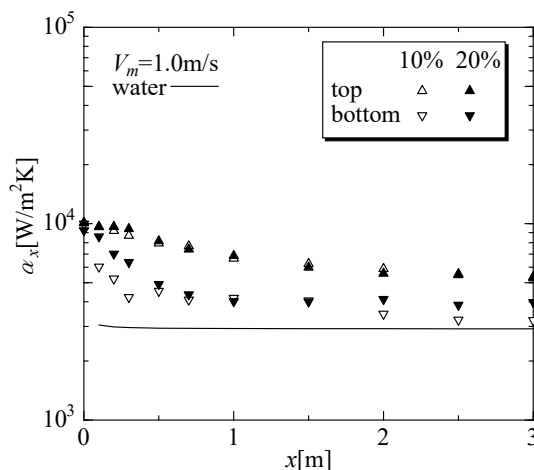


図4 氷スラリーの熱伝達[12]

合、潜熱蓄熱量は7℃の冷水を12℃まで温度変化させて利用する際の顕熱蓄熱量の5倍程度となる。具体的な利用方法の一つは、安価に設定された夜間電力を用いて製氷を行い、最も需要の大きい昼間の冷房などの空調システムに用いることである。

氷蓄熱にはスタティック型とダイナミック型とがある。従来は、冷却面に氷層を付着させて貯蔵する静的なスタティック型が主流であった。しかし、着氷による熱抵抗の増加などの問題から、生成した氷を冷却面から剥す、または微細な氷粒子を流動させて連続的に貯氷するダイナミック型の氷蓄熱システムが用いられている。ダイナミック型には、ある程度大きな固形氷を生成するハーベスト方式と氷スラリーを生成するシステムなどがある。さらに、氷スラリーに含まれる氷粒の生成には、冷却面に水を流して凍結させた氷を掻きとって水と混合する掻きとり方式や、管内で過冷却水をつくり管外で解消し氷粒を生成する過冷却解放方式などがある。なお、氷スラリーの輸送時には特に管閉塞に注意を払う必要があり、氷粒子の

凝集による管閉塞や蓄熱タンク内での凝集防止として一般的には水溶液の氷スラリーや凝集抑制の添加物を用いている。氷スラリーにおける凝集防止のための不凍タンパク質または代替物質の利用[10]や貯蔵・流動挙動や熱伝達に関しては多くの研究[11]が報告されている。

氷粒子の場合、浮力により図3に示すように流速に応じての氷粒子は管上部や管全体に分布して流れる。マイクロカプセルスラリーなどは、一様流とみなして流動を考える場合が多いが、氷スラリーの場合には粒子の独自の動きを考慮すべき場合が多い。図4は、氷スラリーの熱伝達特性の例を示したもの[12]であり、内径32mmの水平管内に氷充填率10%または20%の氷スラリーを流動させた場合の加熱部入口からの各距離における管上部と下部の局所熱伝達率を示している。実線で示された水の場合に比較して、氷が浮上して流れる管上部(top)は二倍以上の熱伝達となっている。

4.2 マイクロカプセルスラリー

潜熱蓄熱材粒子含有流体(PCMスラリー等)の一つに、膜材物質内部にパラフィンなどのPCMを芯物質として封入した直径が数μmから数百μmのマイクロカプセルを、水などに分散混合したマイクロカプセルスラリーがある。粒径の小さなカプセルは水中で安定した分散状態となり、界面活性剤等を利用して粒子の凝集や管閉塞が生じずにパイプ輸送が可能である。パラフィンなど内包するPCMの種類を変えることで利用可能な温度を任意に設定できることは、融点が固定されている氷スラリー等に比較して有利な点となる。また、一般的なエマルションに比較してコスト的には難があるものの長期保存性などに優れていると言われている。膜材には主にゼラチンやメラミン樹脂などの高分子材料が用いられる。図5は、テトラデカン含有マイクロカプセルスラリー(濃度40%)の外観を示している。

マイクロカプセルスラリーをパイプ輸送する場合には、流体の粘性が問題となる。一般に粒子の質量濃度の増加とともに非ニュートン流体(擬塑性流体)の挙動を示すことが多く、粒子径が小さいほどスラリーの粘性が大きくなる傾向がある。一方、カプセル径が増加するとせん断力によりカプセルが破断する可能性が大きくなり、水などの



図5 マイクロカプセルスラリー

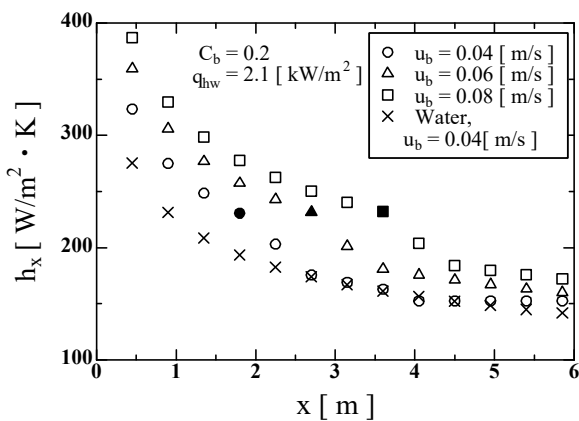


図6 マイクロカプセルスラリーの熱伝達[13]

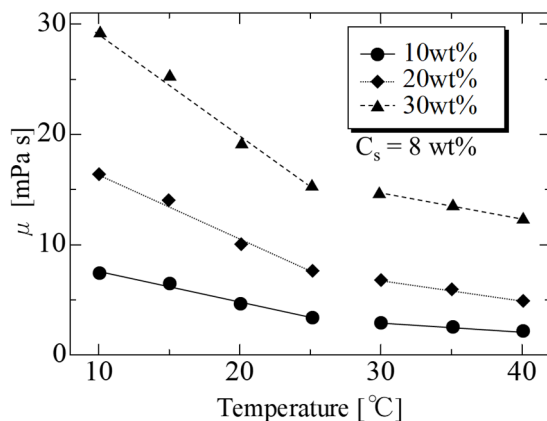


図7 ナノエマルジョンの粘性[14]

液体との分離も生じやすくなるため、システムに応じた粒径の選定が必要となる。図6は、直管内強制流動時における、等熱流束加熱でマイクロカプセルの質量濃度20%の場合の、各流速における入り口からの各距離の局所熱伝達率の例を示したものである[13]。いずれの平均流速に対しても、水の局所熱伝達率より高い値を示し、カプセル内

のPCMの相変化の影響により、液相単体に比べて熱伝達が増加し、熱輸送システムに使用する際に、伝熱特性が向上することがわかる。

なお、PCM含有マイクロカプセルは、スラリーとして用いるだけではなく、建材に添加して建物における蓄熱に用いることも検討されている。

4.3 マイクロ・ナノエマルジョン

潜熱蓄熱材粒子含有流体の一つに、エマルジョンがある。エマルジョンは、エマルジョンともいわれるが、水と油のように互いに溶解しない液体が界面活性剤等の添加により他方に微細な液滴として分散するものである。液体のうち連続しているものを連続相、液滴となっているものを分散相と呼ぶ。油と水の場合、連続相が水の場合はO/W型、連続相が油の場合はW/O型と言われており、エマルジョンを蓄熱材として用いる場合には一般にO/W型において油滴（パラフィンなど）を固液相変化させて用いる。マイクロカプセルスラリーと同様にPCMの種類を変えることにより必要とされる蓄熱温度に対応できる。例えば、水にテトラデカン（融点5.9°C）を分散させたエマルジョンを冷房用に用いると、氷より融点が高いため、冷凍機の効率向上が可能となる。代表的なエマルジョン生成方法は、ホモジナイザーによる機械的方法、および転相温度乳化法やD相乳化法などの物理化学的方法がある。

これまで、油滴の大きさはマイクロレベルが用いられていたが、現在、粒径をナノレベルまで小さくした安定性が良くかつ粘度が低いナノエマルジョンが注目されている。ホモジナイザーでエマルジョンを作成した場合、数日から数週間で相分離することが多い。しかし、水にオクタデカン（質量濃度20%）、界面活性材（質量濃度8%）を添加し、転相温度乳化法によって生成したナノエマルジョンでは、生成直後の粒子の平均径は120nmであり、1年経過時でも相分離が生じないことが、麓[14]によって報告されている。図7は、各質量濃度におけるナノエマルジョンの温度と粘性の関係を示している[14]。

4.4 水和物スラリー

水和物とは、水分子が他の分子と相互作用して形成される化合物であり、このうち、包接水和物は、水分子がかご状などの構造を形成し、なかに他の分子を入れ込む化合物である。蓄熱材として

は、融点が 30～60℃程度の塩化カルシウム 6 水和物、硫酸ナトリウム 10 水和物、酢酸ナトリウム 3 水和物などが暖房用に用いられている。

一方、冷房用としては、臭化テトラブチルアンモニウム (TBAB) やトリメチロールエタン (TME) の水和物スラリーなどが検討されている。4 級アンモニウム塩である TBAB の包接水和物は 5～12℃程度で相変化する蓄熱材として用いることができる。TBAB 水和物をスラリーとする際には、TBAB を水に溶解させた後、水溶液を攪拌しながら冷却して微細な水和物の結晶を生成させる。水和物スラリーの特徴は、水溶液の濃度や温度によってスラリーの状態が決まる点である。図 8 は、初期濃度が 10～30% の TBAB 水溶液を攪拌しながら冷却した際の、平衡状態の温度とスラリー液相の濃度の関係を、熊野[14]が報告したものである。それぞれの記号が TBAB 水溶液の初期濃度を示している。濃度と温度に 2 系列の平衡状態が存在し、2 種類の水和物が存在することが示されており、どちらの水和物も潜熱は 200kJ/kg 程度であることが報告されている。

4.5 糖アルコールを用いた直接接触蓄熱システム

工場や廃棄物処理場などから廃棄されている 100℃～200℃の中温度排熱を熱源として使う蓄熱システムが必要とされている。100℃以上など温度が高い蓄熱に対応する PCM スラリー等は実用化されておらず、一般的な隔壁式の蓄熱槽の場合、PCM 凝固時の熱媒体との伝熱が問題となる。そのため、PCM と熱媒体が直接熱交換することで熱交換効率が高い潜熱蓄熱システムが検討されている。例えば、蓄熱槽下部に熱媒体流入用のノズル付き板やパイプを設置することによって槽内全体に熱媒体を均一に流し、凝固・融解が進行する際の流路が確保できる蓄熱槽にて、PCM として高い潜熱量を有する糖アルコール類のエリスリトールやマンニトール、およびその混合物を用いたシステムの研究や実用化がされている[2, 15]。

図 9 は、エリスリトールを用いた直接接触蓄熱槽の凝固挙動の例を示している。ノズル板を通り PCM 層に流入した低温オイルが図 9 右に示すように滴状になり、油滴表面に薄膜凝固相が形成され、全体では多孔質状に凝固が進行して、伝熱面積が大きく凝固層の熱抵抗の影響が少ない熱移動となる。そのため、熱媒体を管内に流動させ PCM と

壁を介して熱交換した場合に比べて、迅速に熱交換ができる。

5. まとめ

エネルギーを有効利用するうえで膨大な量を使用する熱を無駄なく有効に使うことは今後ますます必要になる。上記以外にも新たな PCM の検討や実用化に向けた取り組みがなされている。潜熱蓄熱・輸送は、性能向上や選択肢を広げることでより社会全体のエネルギー使用量削減に役立つと考えられ、一層の発展が望まれる。

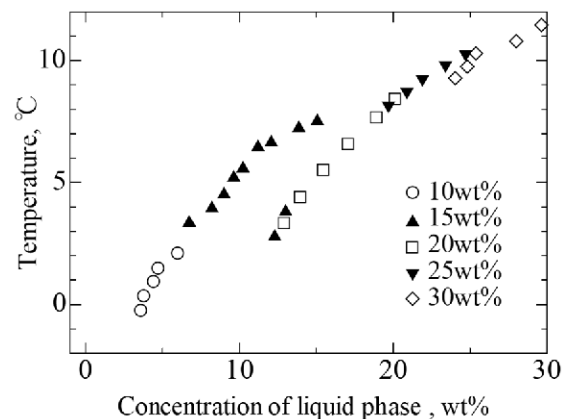


図 8 TBAB 水溶液の平衡図[14]

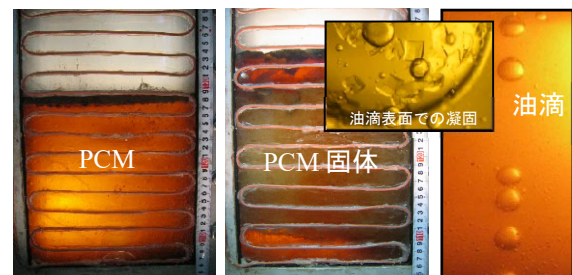


図 9 エリスリトールの直接接触凝固挙動

参考文献

- [1] 堀部明彦, 山田寛, 富山椋介, 長絵里奈, 丸山智弘, 前田信之介, 第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H232 (2018).
- [2] 三機工業株式会社 HP, <https://www.sanki.co.jp/product/thc/>
- [3] Akihiko Horibe et al., International Journal of Heat and Mass Transfer, 82(2014), 259-266.
- [4] 日本熱物性学会編, 新編熱物性ハンドブック, 養賢堂(2008), 119-124.

- [5] 稲葉英男他, 高効率蓄熱技術の開発, R&D 支援センター (2013), 35.
 - [6] 関信弘編, 蓄熱工学1 基礎編, 森北出版(1995), 44-54.
 - [7] 日高秀人, 山崎正典, 矢部昌義, 垣内博行, Erwin P. ONA, 小島義弘, 松田仁樹, 化学工学論文集, 30-4 (2004), 552-555.
 - [8] 星朗, 齋藤武雄, 日本機械学会論文集(B)編, 69-679(2003), 697-704.
 - [9] 堀部明彦, 劉植秀, 春木直人, 金田彰朗, 町田明登, 加藤雅士, 熱物性, 25-3 (2011), 136-142.
 - [10] T. Inada and P.R. Modak, Chemical Engineering Science, 61 (2006), 3149-3158.
 - [11] 熊野寛之, 浅岡龍徳, 日本冷凍空調学会論文集, 33-4(2016), 16-32.
 - [12] 堀部明彦, 冷凍, 80-928 (2005), 40-43.
 - [13] 稲葉英男, 金明俊, 堀部明彦, 日本冷凍空調学会論文集, 19-1 (2002), 13-22.
 - [14] 鈴木洋監修, 潜熱蓄熱・化学蓄熱・潜熱輸送の最前線, シーエムシー出版 (2016), 205-213, および 187-196.
 - [15] Than Tun Naing et al., Thermal Science and Engineering, 26-1(2018), 19-27.
-

未利用排熱の活用に向けた「熱バッテリー」の開発

Development of "Heat Battery" for Utilizing Unutilized Energy

小林 敬幸 (名古屋大学)

Noriyuki KOBAYASHI (Nagoya University)

e-mail: kobayashi@energy.gr.jp

1. はじめに

水を用いる蓄熱手法は安価で、短時間かつ容易に蓄放熱可能という優れた利点を有する。しかし貯湯槽に見られるように、蓄熱密度が小さく長期蓄熱に不向きのため、ますます高度化する自動車や工業プロセスへ適用するためには、さらに数倍の蓄熱密度を有し、より長時間に亘って蓄熱状態を保てる技術が求められている。化学反応を伴う手法を用いれば、原理的には材料そのものの蓄熱密度が大きく、反応物質を隔離すれば長時間に亘り蓄熱状態を保つことができる。この特長を活かして高い潜在的な需要が見込まれる車載用に供するためには、数リットルの容積の装置内に数MJの熱を20～40分間で蓄熱し、その熱をわずか数分で放熱するという、「電気バッテリー」並みの「熱バッテリー」と呼ぶべき性能が求められる。これを出力値で表わすとおよそ2～10kWとなりルームエアコン以上の出力となる。

一方、工業プロセスに視点を向けると、エネルギー需給間の質・量・時間・場所の不整合を解消するために必要な技術は、高いエネルギーの利用効率を得るために電気、熱の両エネルギー形態にも重要である。エネルギーを高密度に自在に輸送し、蓄え、希望の質で利用できることは、一次エネルギー転換段階から最終的なエネルギー便益を得るエンドユーザーまで全てに亘る段階において利用効率向上に貢献し、また相互供給し利用する形態に展開する場合にも重要な役割を果たす。電気エネルギーに対してはバッテリーがある、依然として技術開発が遅れているのが熱バッテリーの分野である。

温度に応じていくつかの利用技術が既に利用されているあるいは商用に近いが、全体を見渡すと、200～500℃程度の比較的温度が高い排熱はまだその比較的高い質を活かした技術が

開発されてはおらず、多くの開発の余地がある。

この温度帯は、化学の観点から見ると多くの化学的操作を加えられる可能性のある領域であり、熱と化学エネルギーを相互に変換しやすい。また、温度が比較的高いことによって反応速度も大きくなる場合が多く、デバイスとしても小型化を図ることが可能となるなど、機能を発現しやすい温度帯でもある。

このような化学的変換等を駆使して、「熱」を他のエネルギー形態を「加工」し、貯蔵あるいは輸送しやすいエネルギーに変換することによって、熱エネルギーを利用しやすくすることが排熱の利用を促進するために有効である。

そのためには、排熱を単に貯蔵（蓄熱）するだけでなく、それが有するエクセルギーを増大（回復）させ、質（温度、圧力、熱の密度）を高めることが求められる。さらには、他のエネルギー（例えば動力）を加えて、排熱を加工してエクセルギーを増大させることも、技術発展の方向として重要と考えられる。例としては、蒸気再圧縮、レドックス反応を用いて気体を自己圧縮させる技術や、吸熱反応による燃料の発熱量増大技術など、さまざまな例がある。今後このような考えに基づいた技術の進展によって、排熱利用技術の多様性が広がることを期待したい。

さて、平成25年より、経済産業省委託事業として、未利用熱エネルギー革新的活用技術研究開発[1]が開始された。本事業では、運輸分野、民生や産業分野における未利用熱エネルギーの革新的な活用技術研究開発に取り組まれており、特に、熱を集める技術（蓄熱材など）、熱を逃がさない技術、熱を電気エネルギーに変換する技術、熱を有効利用する技術などの要素技術やこれらの技術の組み合わせによる革新的熱マネジメント技術の開発、さらに、システムとしての革新的な排熱活用技術の構築が進められている。また、産業競争力懇談

会 (COCN) から平成 26 年 3 月に報告された、「エネルギーネットワークへの最先端技術適用」では、蓄熱、熱輸送、熱利用のネットワーク化の重要性について指摘されている[2].

これまで、化学蓄熱・ヒートポンプの開発のために、様々な材料を対象に多くの研究が進められてきた。例えば、上述のマグネシウム系が代表例の無機化学反応系では、無機物質と水、アンモニア、炭酸ガスの系が有力な系として研究されている。また、欧州を中心としては、化学反応のみでなく、吸着材と水系を用いた蓄熱についても、大型実証研究まで取り組まれている。その他、有機化学反応系、水素吸蔵合金系などもある。

化学反応を用いる蓄熱技術開発に関する大型プロジェクトは、過去に通商産業省の主導で実施された「ムーンライト計画」において「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム」プロジェクト（1984～1992 年度）で開発が進められた歴史がありその後技術的な進展が遅れていたが、ここ数年でようやく実用化に近づきつつある。工業用途としては、平成 26 年度からトヨタ自動車を中心となり工業団地全体で熱と電力の需給の最適化・最小化するシステム構築の手段の一つとして、酸化マグネシウム系の化学蓄熱剤を用いる熱輸送技術の実証事業が試みられ[3]、実用化への扉が開かれようとしている。

一方、いよいよ燃料電池自動車や電気自動車が本格的に普及するに至り、オランダでは 2025 年から段階的に、インドでは 2030 年までに、さらにはイギリス、フランスでは 2040 年までにガソリン車・ディーゼル車の販売を禁止する方針が次々に発表された。中国においては既に 2016 年よりガソリン／ディーゼル車の生産投資を抑制し電気自動車などのエコカー普及を加速する施策が取られ始めている。その背景には大気汚染の抑制や CO₂ 排出量の抑制があるのは言うまでもないが、モーター、パワー半導体、二次電池、センシング技術を駆使した自動運転や IoT 技術、VtoX などの多くの周辺技術の発展も電気自動車への期待を後押ししている。それに対し、ハイブリッド自動車、クリーンディーゼル自動車を含めてレシプロエンジンで走行する自動車は、2030 年でも 70～80%を占めるとも見込まれており[4]、エンジンの絶え間ない改良とともに、自動車の熱マネジメントによって燃

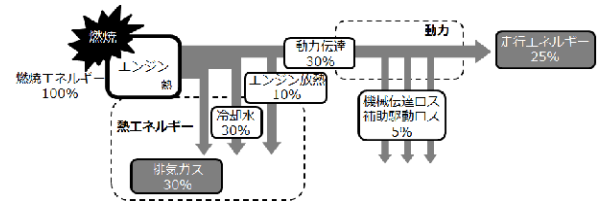


図1 自動車におけるエネルギーフロー

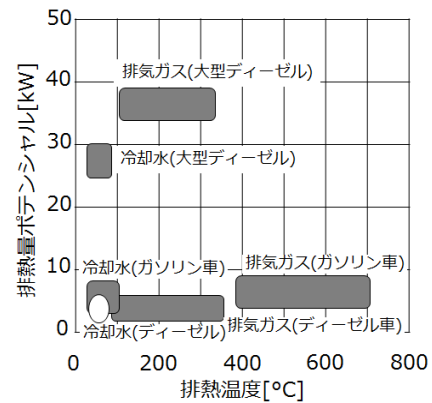


図2 エンジン排熱の温度と熱

費を改善する技術開発がこれまで以上に重要視されてきている。

自動車のエネルギーフローを図1に示す。熱効率 40%以上を達成する新型パワートレインの搭載をはじめ、最近“究極のエンジン”とも呼ばれる HCCI エンジンが 2018 年にも実用化されると報道発表され、また可変圧縮比 VCR エンジンの実用化が近いとも言われているなど、精力的に技術開発が続けられているが、おおよそ燃料のもつ燃焼エネルギーを 100%とすると、実際の仕事として有効なエンジン軸出力はおおよそ 25～35%程度であり、投入エネルギーに対し効率改善の余地が多く残されている。特に、冷却水損失、排気損失はそれぞれ 30%程度もあり、これらの廃熱を有効利用する事ができれば自動車の燃費向上につながる。また、図 2[5]に示すように、ディーゼル自動車では、100～300℃の低中温域、ガソリン車 400～650℃の中高温域の排ガスが多く存在するが、エンジンの高性能化とともに、その温度域は年々低下している。

ハイブリッド車では、エンジン効率の低い走行条件ではモーターのみで走行し、エンジン効率の高い条件ではエンジンによる走行や発電など、自動車トータル効率が高く保たれるような高効率運転

制御をとっている．このためエンジン冷却水への放熱が少なくなり，冬場の暖房熱源不足や暖気遅れが実際に生じている．また，エンジンのような高温排熱源を持たない電気自動車では，エネルギー負荷の小さな空調方式を初め，熱管理技術の重要度はさらに大きい．

このように，車両の各要素機器の熱需要は温度レベル，加熱・冷却を必要とする場所，必要とする時間が様々である．そのため，蓄熱技術，排熱回収技術や熱輸送技術を含めて熱を余すことなく使うための自動車トータルとしての熱マネジメント技術が重要になってきている．

エンジン冷間始動（いわゆるコールドスタート）直後の自動車は，エンジンやトランスミッションオイル，エンジン冷却水の温度が低いため，各部位の摩擦による損失が大きな割合を占めており，いかに早期にオイル，冷却水を暖気するかが課題となっている．これらの課題に対して，走行中に排熱を回収しオイルや冷却水を暖気する排熱回収技術はすでに実装されているが，走行中に排熱を蓄え冷間始動時に冷却水等を暖気する蓄熱技術については，かつて温水蓄熱方式を用いて実装されたことがあるものの，1～4MJ/L 必要とされる蓄熱量を実用的なコスト，体格と重量で構成し車載することが可能な蓄熱技術は，未だ開発途上にある．

一方で，電気バッテリーは容積あたりの蓄エネルギー量，すなわち蓄熱密度が飛躍的に大きくなってきており，その値は，市販車のカタログ⁵⁾を参考に試算すると，バッテリーパッケージを基準にすれば，約 500kJ/L が現状である．補器などの占有容積も必要であるが，蓄熱装置に求められている蓄熱密度は，偶然にも電気バッテリーとほぼ同じレベルである．

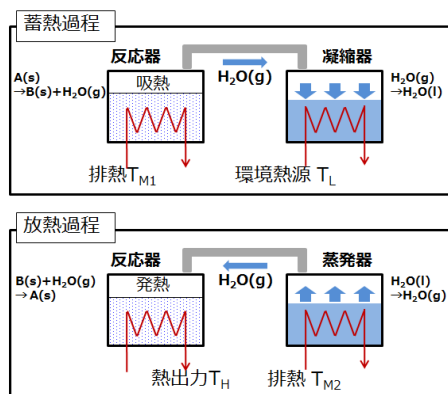
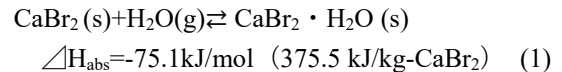


図3 化学蓄熱の蓄熱・放熱操作の動作原理

2. 化学蓄熱技術の開発状況

図3に化学蓄熱の動作原理を示す．図中は蓄熱材Aが加熱されて作動媒体の水を放出し，物質Bの状態では蓄熱させ，放熱時はBと水を反応させて物質Aに戻すと同時に反応熱を放熱させる．

臭化カルシウム（CaBr₂）の水和反応を例に，蓄熱・放熱操作を具体的に説明する．反応式ならびに反応熱は式(1)に示すとおりである．



温度－圧力化学平衡関係より，環境温度に相当する T_{Low} を 20℃ と想定した場合，155℃ にて脱水反応が進行することにより蓄熱される．また，容器内圧を大気圧以下の条件を想定した場合，1 気圧の H_2O 圧力下の水和反応により 245℃ の反応熱が出熱され 90℃ ($=T_{\text{H}} - T_{\text{M1}}$) の昇温がなされる．これらの放熱と蓄熱過程が連続的にサイクルされることにより，中低温排熱が高温熱へ変換されプロセスへ供給される．昇温させず，蓄えた熱を放出するだけならば，反応させる水の蒸気圧はもっと低くてよく，線図を用いれば蒸発器の温度（圧力）に対する放熱温度が推定できる[6]．

これまでに化学蓄熱の実用化への課題としていくつかの点が指摘されている．まず，蓄熱と放熱過程における熱回収時間が長く，入出力密度が低いことによる装置の大型化が挙げられる．この課題に対して吸収材充填層における伝熱性能の向上のために，吸収材と炭素ファイバーの混合材料の

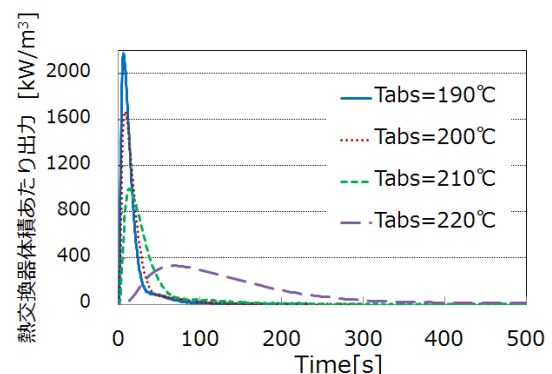


図4 $\text{CaBr}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CaBr}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$ 反応を用いた蓄熱装置の出力履歴（放熱過程）

開発や吸収材の圧縮ペレット化等の手法が検討されている[7, 8]. 上記の課題に加えて, 長期に亘る連続サイクル運転における安定的な出力が課題として指摘されてきた.

これらの課題に対し, マイクロプレート熱交換器 (SUS316L, 120×135×10mm, 流路間隔 1mm ピッチ, カンドリ工業製) のフィン間に, 活性炭粒子 (粒径 100~200 μm) 中に CaBr_2 を含浸させた蓄熱剤を充填して作製した蓄熱器の入出力特性を評価した結果を図 4 に示す. なお, 放熱時の蓄熱器温度 T_{abs} は 200~220 $^{\circ}\text{C}$ の 3 条件, 蒸発器温度は 80 $^{\circ}\text{C}$ である. 結果から, 条件により変化するものの, 最も速い場合 30s 程で放熱を完了していることがわかる. また, 蓄熱時には, 放熱の場合よりも遅いものの, 最も速い場合には 70s 程度で反応が終わっている. これらの結果から, 伝熱, 水蒸気移動の条件を整えれば, 十分に速い化学蓄熱の速度を得られることがわかる.

3. 連続サイクル試験

蓄熱モジュールの出力の安定性と耐久性を評価するためサイクル試験を実施した. 実験では, 蓄熱と放熱を交互に 150s 毎に切り替えて 2000 回繰り返した. 蓄熱器に供給する熱交換流体温度は 170 $^{\circ}\text{C}$ で一定とし, 蒸発器温度 60 $^{\circ}\text{C}$, 凝縮器温度 20 $^{\circ}\text{C}$ の条件とした. その結果を図 5 に示す.

図からわかるように, 出力値の時間経過の挙動は非常に再現性が高く, 出力密度のピーク値の変動も 20W/L 以内に収まっていた. 出力密度の時間履歴と反応材料利用率は, 長期の繰返し操作に亘り, 反応材が劣化することなく再現性が高いことが確認された. また, 体積当たりの出力値は平均値 1kW 程度となり, 車載用に求められる出力をほぼ満たす動的な特性が得られる可能性があることがわかる.

図 6 に蓄熱剤を CaCl_2 とし, 一水和物と二水和物の間で蓄放熱する操作を 1000 回繰り返した結果を示す. なお, 蓄熱器に供給する熱交換流体温度 (蓄熱・放熱温度) は 110 $^{\circ}\text{C}$, 蒸発器温度 64 $^{\circ}\text{C}$, 凝縮器温度 30 $^{\circ}\text{C}$ とし, 蓄熱剤を充填した熱交換器はコルゲート型 (アルミニウム製, 250×200×20 mm, フィン間隔 1mm ピッチ) を用いた. 結果から, およそ 15 分程度で蓄放熱が完了し, さらに 1000 回に亘り安定して蓄放熱していることがわ

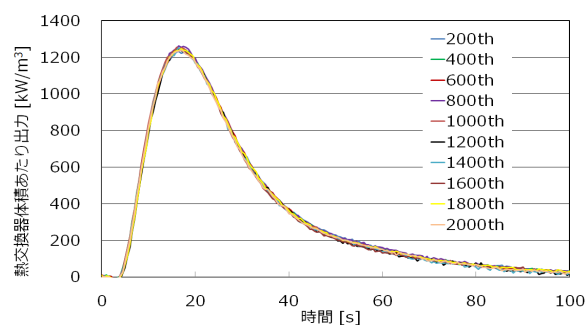


図 5 $\text{CaBr}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons \text{CaBr}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 反応を用いる蓄放熱繰返し試験結果 (2000 回繰返し. グラフは放熱過程)

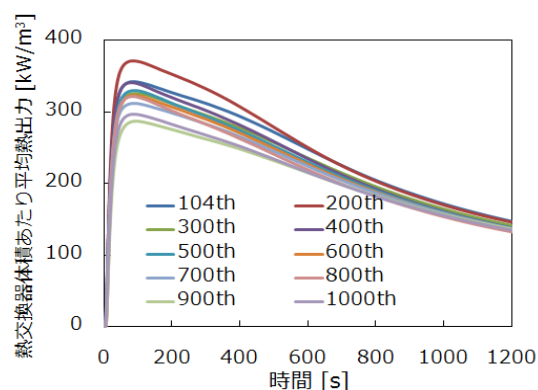


図 6 $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 反応を用いる蓄熱・放熱操作の耐久性評価 (1000 回繰返し)

かる. なお, 徐々に放熱量が減少したのは, 蓄熱剤が水の吸収・放出時に膨潤・収縮することに伴い, わずかながら熱交換器内から脱落したためである. この結果からも, 蓄熱剤などの劣化がほとんどなく, 装置が安定して稼働することがわかる.

4. 自動車への適用を想定した SiC 製ハニカム熱交換器を用いる塩化カルシウム水和反応系の蓄放熱性能

固体蓄熱材としてハロゲン化アルカリ塩を用いる場合, 何らかの原因で塩が溶解すると, 装置金属材料の腐食が進行する可能性がある. そこで, 表 1 に示す通り, 高熱伝導度, 耐食性のある SiC 蓄熱構造体を塩の充填部に用いる熱交換器を構築することによって, 実用的な蓄放熱速度を得る可能性を検討した. SiC は耐食性のある SUS と比較して体積当たりの熱容量が 40 % 小さく, アルミニウム熱交換器並みの蓄熱器の動作速度を得るため

表 1 熱交換器に適用可能な素材の熱物性値の比較

	SiC	SUS304	Al
熱伝導度 [W/(m・K)]	150	16.7	204
比熱 [J/(kg・K)]	670	590	900
密度 [kg/m ³]	3000	7900	2700

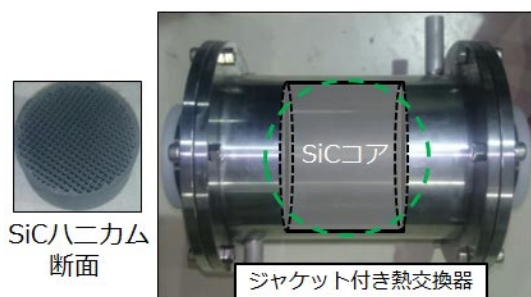


図7 SiC ハニカム製熱交換器の詳細

に最適な素材である。

充填層部分は高熱伝導度である図7に示す炭化ケイ素のハニカム構造体を用い、アルミ製コルゲートフィン型熱交換器の試験結果と比較した。

蓄熱、放熱温度はともに 150 °C、蒸発器温度 90 °C、凝縮器温度 30 °Cとした。なお、用いた SiC ハニカムは、ピッチ距離 1.5 mm、厚み 0.5 mm、空隙率 0.48 である。塩化カルシウムの充填量はアルミニウム製コルゲート熱交換器では 646 g、SiC ハニカム製熱交換器では 86 g(ともに無水物換算、充填密度 0.38)であった。

放熱時の実験結果をアルミニウム製熱交換器の結果とともに図8に示す。SiC ハニカム構造体の壁厚みが 0.5 mm と厚いため、反応器体積当たりの塩の充填量が 13 % しかないため、平均熱出力が得られなかった。また、500 s までの反応速度は、両者同様の挙動を示したが、それ以降は SiC ハニカムの方が遅くなった。これは、塩の充填層内の最大伝熱距離がアルミニウム製の 1.5 倍であるためであると考えられる。

そこで、SiC ハニカム製熱交換器内の反応挙動を、熱移動、物質移動、反応速度の3つの現象にモデル化し、数値解析を試み、蓄放熱挙動を促進する要因を探索した。

図9に放熱挙動の数値解析結果と実験結果との比較を示す。両者は良好に一致し、現象を精度よく再現した。この数値モデルを用いて、ハニカム

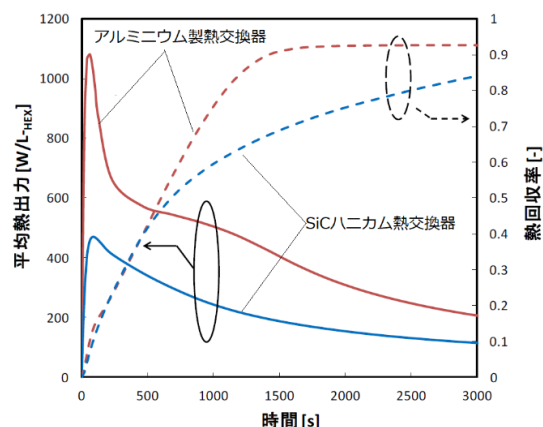


図8 SiC ハニカム熱交換器とアルミニウム製コルゲート式熱交換器を用いる蓄熱器の放熱挙動の比較

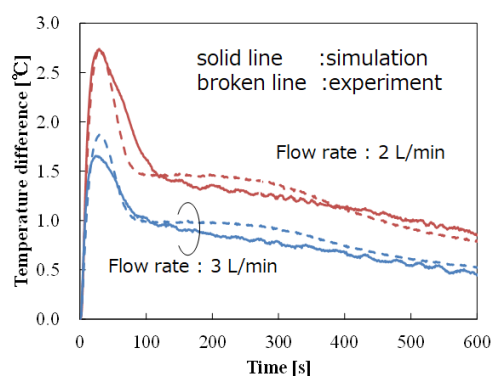


図9 SiC ハニカム製熱交換器を用いた放熱挙動の数値解析結果と実験結果との比較

壁の厚み、ハニカムピッチ等の最適化を図ることにより、SiC ハニカムを用いる際の蓄放熱出力をアルミニウム製熱交換器なみに向上させることが可能であることを見出している。

5. おわりに

化学蓄熱技術は、反応速度、長期安定性などの欠点を、化学的反応特性、伝熱速度、物質移動速度、反応速度を適切に制御することによって克服しつつあり、いよいよ実用化に向けた段階に到達しつつある。これを実用化するためには、熱源とのマッチング、装置の体格、装置の作動環境などの条件を満たしながら装置を合理的に設計する知見と実証研究をさらに積み上げていく必要がある。

参考文献

- [1] 柿沼重志, 東田慎平, 「自動車産業の現状と今後の課題 – T P P が我が国自動車産業に与える影響等も踏まえて – 」, 立法と調査, **378**, (2016) 135.
 - [2] 鈴木一義, ”自動車熱マネジメントの技術ロードマップ”, 「骨太のエネルギーロードマップ」, 化学工学会エネルギー部会編, 化学工業社, (2005) 106.
 - [3] J. Lee, H. Ogura, S. Sato, “Reaction control of CaSO₄ during hydration/dehydration repetition for chemical heat pump system”, Applied Thermal Engineering, **63**, (2014) 192.
 - [4] H. Zhang, H. Ogura, “Studies on Hydration Reaction Rates of Various Size CaO Particles for Chemical Heat Storage/Pump”, Journal of Chemical Engineering of Japan, **47**, (2014) 587.
 - [5] http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/150330/150330_2_5.pdf
 - [6] 鬼頭毅, 小林敬幸, “CaBr₂/H₂O ケミカルヒートポンプの昇温操作における入出力特性評価”, 資源・エネルギー学会論文集, **33**(3), (2012) 1.
 - [7] M. Zamengo, J. Tomaškovíc, J. Ryu, Y. Kato, “Thermal Conductivity Measurements of Expanded Graphite-Magnesium Hydroxide Composites for Packed Bed Reactors of Chemical Heat Storage/Pump Systems”, J. Chemical Engineering of Japan **49** (3), (2016) 261.
 - [8] O. Myagmarjav, M. Zamengo, J. Ryu, Y. Kato, “Energy density enhancement of chemical heat storage material for magnesium oxide/water chemical heat pump”, Applied Thermal Engineering **91**, (2015) 377.
-

高出力用途向け水冷リチウムイオン電池モジュールの開発

*Development of Water Cooled Lithium-ion Battery Module
for High Output Power Applications*

和田 怜 (東芝)

Satoshi WADA (Toshiba)

e-mail: satoshi7.wada@toshiba.co.jp

1. はじめに

2020 年以降の気候変動問題に関する国際的な枠組みである「パリ協定」が 2015 年に合意され、脱炭素社会に向けた取組みが近年加速している[1]。脱炭素社会の実現に向けて、エネルギー回生に代表される「効率良くエネルギーを使用する技術」や、太陽光発電や風力発電における電力変動抑制に代表される「再生エネルギーを上手に利用する技術」が益々重要となっていくと思われる。そのどちらにおいてもエネルギー貯蔵技術は最も重要なキーテクノロジーと言って過言ではない。

我々の身の周りにおいてもハイブリッド車 (HEV) や電気自動車 (EV) などの二次電池を搭載した電動車が普及し始めていることを実感することができる。回生エネルギーの利用によるエネルギー効率の向上や、EV においては走行時の CO₂ 排出が一切無いため、排出場所を集約した上で CO₂ 回収・貯留技術 (CCS) などの対策を効果的に講じられるといった効果が期待されている。車両に搭載される二次電池としては高いエネルギー密度と充放電効率を有したリチウムイオン電池が注目されている。他にもメモリー効果が無い、自己放電が小さい、長寿命など、他の二次電池と比較して多くのメリットがある。近年では鉄道においてもエネルギー効率の向上や架線レス化を目的にリチウムイオン電池を搭載した車両が普及しつつある[2]。このようにリチウムイオン電池は今後も大型機器への適用が拡大していくと推測しており、それに伴い要求仕様は高出力化・大容量化が進んでいくものと考えている。

高出力・大容量が要求される用途で用いられるリチウムイオン電池は温度上昇による容量劣化の懸念がある[3]。さらに温度が上昇すると電池内の発熱反応が制御不能となり、熱暴走に至る危険性も有している[4]。そのため高出力化・大容量化の流れに対応するには、発熱する電池を安定的に冷却

する技術が重要となっており、空冷システムや水冷システムを用いた温度管理について様々な研究がされている[5-7]。

図 1 にリチウムイオン電池の代表的な適用機器と冷却方式の範囲について例示的にまとめた図を示す。充放電レートが比較的低い用途であれば空冷で十分に冷却することが出来るが、例えば架線レス LRT (Light rail transit) のように電池を搭載するスペースの制約が厳しく、高い充放電レートで長時間運用する条件においては冷却効率の高い水冷が用いられる。東芝インフラシステムズ (株) が製造する SCiB™ は高温貯蔵時の容量劣化が非常に小さいことが報告されている[8]、一般的なリチウムイオン電池では有機電解液の反応を考慮すると 55℃以下で使用するのが望ましい[9]。

本稿では二次電池の冷却技術開発の一例として、高出力が要求される機器への適用を目的に、6C 連続充放電において温度上昇を 15K 以下 (40℃の環境下で電池温度 55℃以下を想定) に抑制する水冷電池モジュールの開発事例を紹介する。

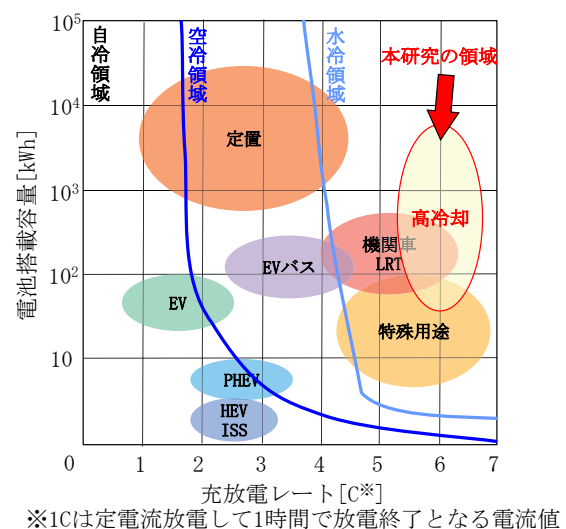


図 1 適用機器と冷却方式

2. 電池モジュールの冷却構造

SCiB™ は負極にチタン酸リチウムを採用することで、高い安全性を確保しながら、寿命、低温性能、急速充電性能、高入出力性能、実効 SOC (State of Charge) レンジにおいて優れた特性を持った二次電池である[10]。セルのラインナップは高入出力タイプ (2.9Ah, 10Ah) と大容量タイプ (20Ah, 23Ah) の全 4 種類を取り揃えている。今回は図 2 に示す 20Ah セル (W116×D22×H106mm) を用いた水冷電池モジュールについて検討した。



図 2 SCiB™ 20Ah セル[10]

図 3 に試作した水冷電池モジュールの構造を示す。アルミ製の下ケースに矩形のリチウムイオン電池 24 個 (2 並列 12 直列) を収容する構成で、冷却方法は下ケースの底面に水を流して冷却する底面水冷方式を適用した。セルの間に流路を設けるセル間水冷方式[11]に比べると体積を小さくできるメリットがあるが、伝熱面積が小さくなる課題がある。そこで、下ケースにセルを収容するための仕切りリブを設けることで、セルと下ケース間の伝熱面積を確保し、熱を底面側へ輸送するヒートシンクの役割を持つ構造とした。下ケースの裏面にはストレート流路を形成しており、パッキンを介して底面プレートをボルト締結にて取り付けることで水密を確保し、冷却水を流すことができる構成としている。

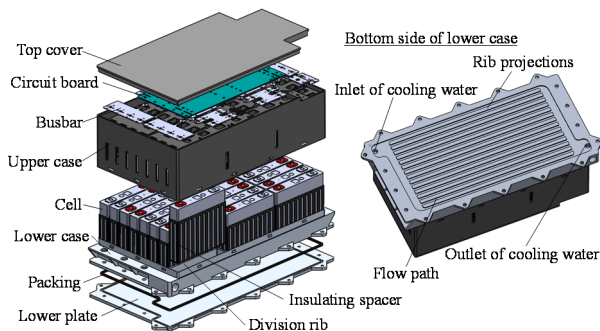


図 3 試作水冷電池モジュールの構造

仕切りリブの高さが冷却性能に与える影響について CFD (Computational Fluid Dynamics) にて検討した結果を図 4 に示す。解析は対称境界条件を適用し、1/2 モデルで行った。仕切りリブが高いほど伝熱面積が大きくなるため、冷却性能は高くなる傾向であるが、リブが高くなると冷却水が流れる底面までの距離が長くなるため、頭打ちになっていく傾向となった。下ケースは鋳造にて作成するため、成形性の観点から今回はリブ高さを 35mm としている。

セルと下ケースの間は絶縁が必要とされる一方で、セル内部からの発熱を下ケースへ効率良く逃がす必要がある。そこでスリット部を有したかご状の絶縁部品を取り付けたセルを、ゲル状の熱伝導材 (熱伝導率 2.0W/m・K) をあらかじめ注入した下ケースに挿入し、圧力で熱伝導材がスリット部に充填される構造とした。下ケースを透明な材料で作成し、充填状態を可視化した写真を図 5 に示す。熱伝導材はセルを固定する機能も有している。

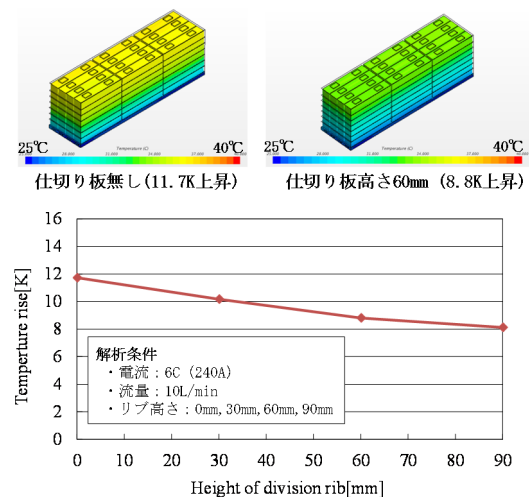


図 4 リブ高さが冷却性能に及ぼす影響

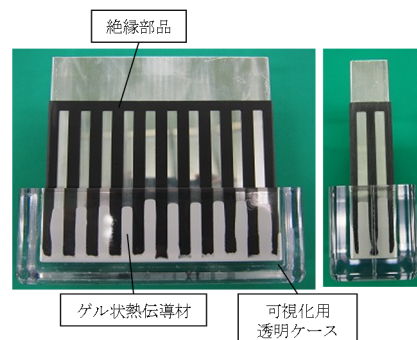


図 5 熱伝導材充填状態の確認

3. 試験方法

モジュールの冷却性能を評価するため、各セルに熱電対を取り付け、充放電時のセル温度を測定した。図6にモジュール内のセル配列を示す。短手方向に8個、長手方向に3個並べたセル配列としており、以降の説明のためA1～C8の番号を各セルにふった。B4セルには図7に示す点A～点Fに熱電対を取付け、セル内の温度分布を測定した。点Dはセルの底面、点Eは下ケースセル收容部の底面に取り付けている。その他のセルについては点Bの位置に熱電対を取り付けた。

図8に試験装置の概要を示す。チラーを用いて温度を25℃に調整した冷却水をポンプにてモジュールに送り込み、循環させる構成とした。モジュールは恒温槽内に收容し、25℃の一定温度で試験を実施した。一般的に温度が低いほど電池の内部抵抗が大きく、発熱量も大きくなる。つまり、環境温度25℃にて温度上昇15K以下であれば、環境温度40℃においても必ず温度上昇は15Kを下回る。よって安全側の条件である環境温度25℃にて試験を実施している。

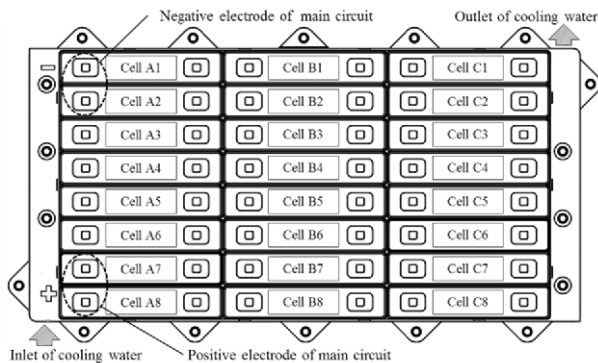


図6 モジュール内のセル配列

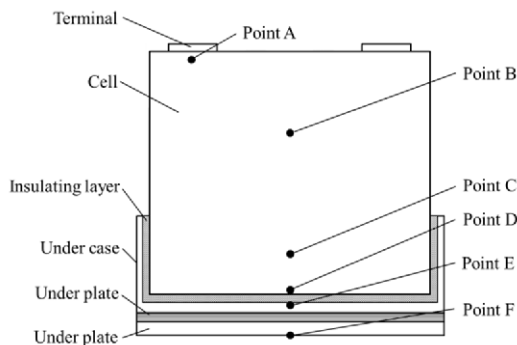


図7 B4セルの温度測定点

また、本試験は水冷の冷却性能評価が目的であることから、水冷以外の放熱要素、例えば恒温槽内の気流やモジュール設置面からの放熱を防ぐため、モジュールを断熱材で覆い、試験を行った。

充放電条件はモジュールの熱抵抗を求めることを目的とした一定のCレートにて繰り返し充放電を行う条件（定Cレート充放電試験）と、電池モジュールを適用するアプリケーションの一例としてLRTの運行パターンを模擬した充放電条件（LRT運行パターン充放電試験）の2種類を実施した。

表1に定Cレート充放電試験の条件を示す。試験はSOC50%の状態から開始し、10秒毎に充放電を切り替えるパルス波形にて電池に負荷を与えた。充放電レートは4C(160A)、6C(240A)、8C(320A)の3条件とした。冷却水の流量はバルブの開閉で調整し、1L/min、3L/min、5L/min、7L/min、13L/minの5条件で実施した。各条件において温度が定常状態になった時のモジュール温度を評価した。

LRT運行パターンでの充放電試験では冷却水を流さない条件と5L/minで冷却水を流した条件でモジュール温度の推移を比較した。

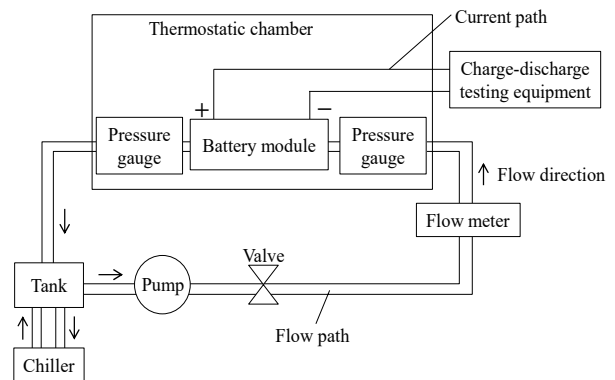


図8 試験装置概要

表1 定Cレート充放電試験の条件

Class	Experimental conditions
State Of Charge (SOC)	50%
Charge/discharge conditions	10s pulse
Ambient temperature(T_a)	25℃
C-Rate	4C, 6C, 8C
Temperature of water(T_w)	25℃
Volume flow rate	1L/min, 3L/min, 5L/min 7L/min, 13L/min

4. 試験結果

4.1 定Cレート充放電試験

図9に定Cレート充放電試験におけるモジュール内の温度分布を示す。モジュール短手方向については中央(B4セル)になるほど温度が高くなり、冷却水の流れ方向については下流(C8セル)になるほど温度が高くなるごく自然な分布となった。充放電レートが高く、流量が小さいほどその傾向は顕著に表れているが、充放電レート6Cにおける最大温度ばらつきは1L/minの条件で3.2Kに抑制することが出来ている。温度上昇については充放電レート6Cまでいずれの流量条件においても目標とする15K以下を満たす結果であった。

図10にB4セルの温度分布を示す。B4セルで最も温度が上昇した箇所は端子近傍(点A)であり、充放電レートが大きいほどその傾向は顕著となった。セル底面(点D)と下ケース(点E)間の温度差(熱伝導材部の熱勾配)をみると0.1℃程度と非常に小さい値となっており、熱伝導材を用いた絶縁構造の効果が良好に得られていることが確認できる。

横軸に各試験条件における発熱量を、縦軸にモジュールの最大温度上昇を取り、プロットした結果を図11に示す。流量を一定とした時の発熱量と温度上昇の関係は原点を通る一次関数でほぼ近似することができる。この一次関数の傾きを式(1)で定義するモジュールの熱抵抗と呼び、冷却性能を表す指標としている。 T_m はモジュール温度、 T_w は水温(25℃)、 R は熱抵抗、 Q は発熱量を示す。

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{T_m - T_w}{Q} \quad (1)$$

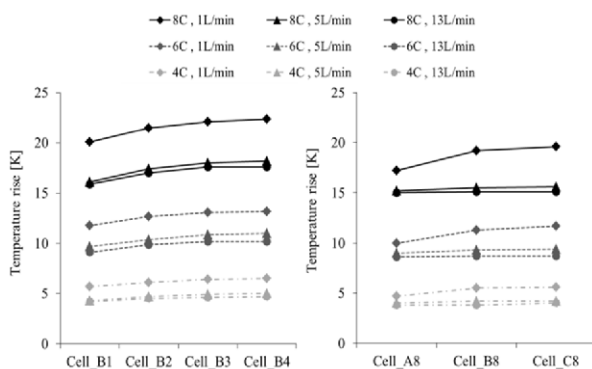


図9 モジュール内の温度分布

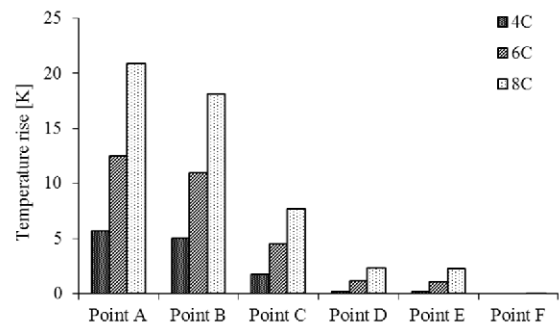


図10 B4セルの温度分布

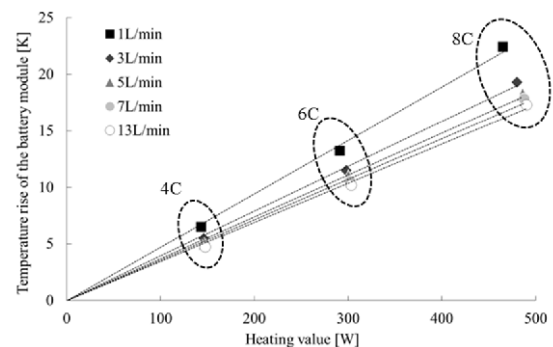


図11 発熱量-温度上昇プロット

横軸にレイノルズ数を、縦軸に各流量におけるモジュールの熱抵抗を取り、プロットした結果を図12に示す。レイノルズ数が高いほど熱抵抗は小さくなる傾向であるが、流量が大きくなると熱抵抗の変化率は小さくなる。円管内流れにおける臨界レイノルズ数は2300～4000であると知られており、本モジュールの流路形状においては流量6L/min～10L/minの範囲が遷移領域であると推測する。この領域での熱抵抗の変化に注目すると、臨界レイノルズ数周辺においても熱抵抗は連続的な傾向となっていることが確認できる。層流と乱流で熱伝達率は不連続に変化するはずであるが、熱抵抗にはその影響が見られない。これは流量がある程度大きくなると、モジュール全体の熱抵抗に占める割合で見て、冷却水による熱伝達の割合が小さくなるためと考える。この結果から、底面水冷方式においてさらに冷却性能を高めるためには、流路の工夫や、流量を多くすることによって水冷の熱伝達率を高めることよりも、セルからの発熱を効率良く熱交換部へ熱伝導させる構造を検討することが重要であると考えている。

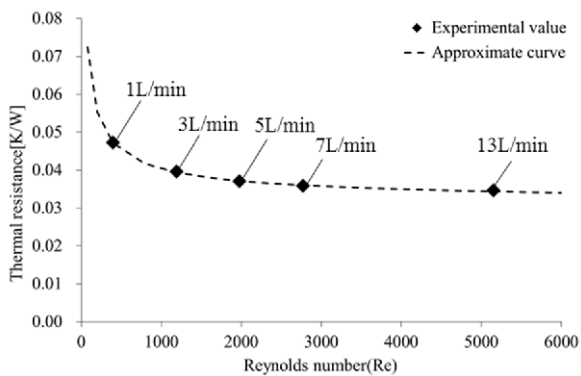
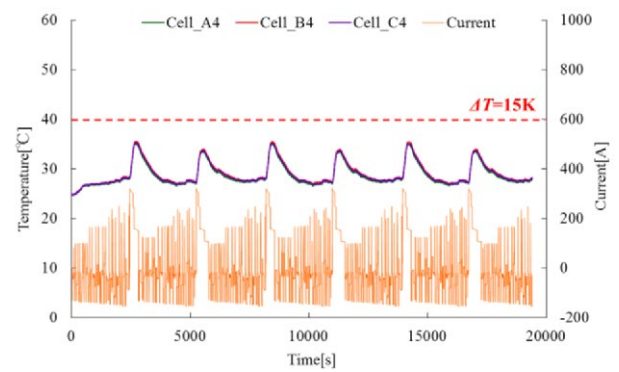


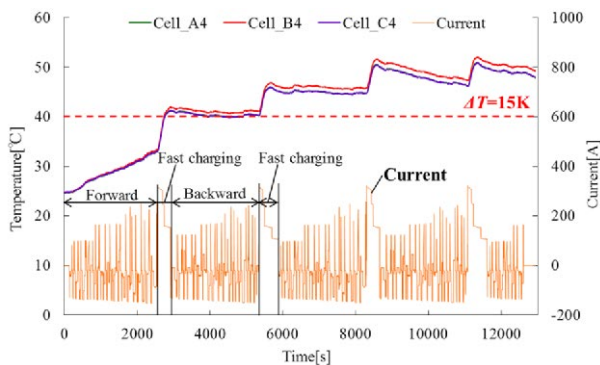
図 12 冷却水流量と熱抵抗の関係


 図 14 LRT 運行パターンにおける温度推移
(冷却水 5L/min)

4.2 LRT 運行パターン充放電試験

図 13 に冷却水を流さない場合の LRT 運行パターンにおける温度推移を示す。電流値はプラス側が充電、マイナス側が放電を表している。往路、復路では加速時の放電と回生による充電が短いタイムスパンで繰り返される波形となっている。ターミナル駅に到着すると、消費した電力を急速充電する。冷却しない場合、最初の急速充電終了時点で温度上昇はすでに 15K を超える結果となった。温度分布は A4 セルと C4 セルがほぼ同等、B4 セルが 2K 程度高い値で推移した。

図 14 に 5L/min の冷却水を流した場合の温度推移を示す。始めの急速充電で 10K 程度温度が上昇したが、その後は往路と復路で温度が低下するため、10K 以下の温度上昇で安定して推移する結果となった。加えてモジュール内の温度分布もほぼ均一となる良好な結果であった。本電池モジュールを適用することで電池の温度上昇を 15K 以下に管理し、LRT の運行が可能であることを確認した。


 図 13 LRT 運行パターンにおける温度推移
(冷却無し)

5. おわりに

高出力用途にリチウムイオン電池を適用するにあたって、冷却技術は安全性向上・劣化抑制の観点から非常に重要である。本稿では冷却技術開発の一例として水冷電池モジュールの開発について紹介させて頂いた。今回紹介できなかった製品化に向けての冷却技術に関わる課題としては、モジュールを多並列多直列にした時の温度差低減や冷却システム全体の省エネ化、結露対策などがある。今後、脱炭素社会に向けてリチウムイオン電池をはじめとする二次電池の需要は益々大きくなると予想されるため、熱輸送に関する技術はさらに重要となっていくと思われる。

一方で安全性向上・劣化抑制に関しては化学的なアプローチも進められている。例えば従来の有機電解液を不燃性の無機固体電解質に置き換えた全固体リチウムイオン電池の研究が以前から進められてきたが、近年では液体電解質を超えるイオン伝導率を有した固体電解質が開発され[12]、実用化に向けて研究開発が急速に活発化している。昨年の第58回電池討論会では全固体リチウムイオン電池に関するセッションにおいて約80件にも及ぶ報告があり、印象的であった。全固体リチウムイオン電池は電解液の揮発などが無いため、100℃を超える環境温度においても安定した性能を発揮できると言われている。しかし、常に電池性能の限界まで使い切ろうとする産業界の性質上、たとえ全固体リチウムイオン電池が実用化されても、おそらく冷却技術の需要は変わらないであろう。冷却技術が今後のリチウムイオン電池の普及、ひいては脱炭素社会の構築の一助となることを期待している。

謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業の結果得られたものである。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁，省エネルギー技術戦略，
http://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100628.html, (2016).
- [2] 小笠正道，”バッテリー電車の最近の動向” 鉄道総研報告 Vol.29, No.9, (2015).
- [3] Mejdoubi, E. A. et al., “Experimental investigation of calendar aging of lithium-ion batteries for vehicular applications”, The 4th International EMC Conference, (2017).
- [4] Wang, Q. et al., “Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery”, *Journal of Power Sources*, Vol.208, (2012), 210-224.
- [5] Padovani, M. T. et al., ”Optimal Energy Management Strategy including Battery Health through Thermal Management for Hybrid Vehicles”, *IFAC Proceedings Volumes*, Vol.46, No.21, (2013), 384-389.
- [6] Mousavi, M. et al., “Optimal design of an air-cooling system for a Li-Ion battery pack in Electric Vehicles with a genetic algorithm”, *Proc. 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation (CEC)*, (2011), 1848-1855.
- [7] He, F. et al., “Reduced-order thermal modeling of liquid-cooled lithium-ion battery pack for EVs and HEVs”, *Proc. 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, (2017), 507-511.
- [8] 高見則雄，小杉伸一郎，本多啓三，東芝レビュー，Vol.63, No.12 (2008)，54-57.
- [9] Anderson, M. A. et al., “Characterisation of the ambient and elevated temperature performance of a graphite electrode”, *Journal of Power Sources*, Vol.81-82, (1999), 8-12.
- [10] <http://www.scib.jp/about/index.htm>, [retrieved 23 Apr. 2018].
- [11] 和田怜，小池昇，首藤正志，黒川健也，第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2016)，B321.
- [12] Hayashi, A. et al., “Recent development of bulk-type solid-state rechargeable lithium batteries with sulfide glass-ceramic electrolytes”, *Electronic Materials Letters*, Vol.8, Issue 2, (2012), 199–207.

持続可能なエネルギーシステムのための電力貯蔵の役割とレドックスフロー電池

Future Role of Electric Power Storage and Redox Flow Battery for Sustainable Energy Systems

田部 豊, 近久 武美 (北海道大学)

Yutaka TABE, Takemi CHIKAHISA (Hokkaido University)

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

1. はじめに

レドックスフロー電池は、余剰電力を貯蔵し、出力調整を行うための大容量二次電池として、将来の普及が期待されている。本稿で対象とするバナジウム型レドックスフロー電池の概略図を図1に示す。バナジウム型レドックスフロー電池は、バナジウムイオンを活性物質として含む電解液が電池に供給され、電池内電極でのバナジウムイオンの価数変化により充放電を行う二次電池である。出力を決める反応部と容量を決めるタンクが独立しており、両極に同じ化学種を用いているため、出力/容量設計の柔軟性、電解液の再生特性、安全性などに優れるという特徴を有する。ここで、電解液の電極内流動や電極表面への活性物質輸送が電池の充放電性能に大きな影響を及ぼし、特に大容量・大出力化時の高性能化に向けて、これらの影響に関する詳細な知見がより一層重要となってくる。

レドックスフロー電池を取り巻く最近の状況、国内外の研究開発状況、および将来の展望については、すでに過去の特集号で最新の研究に基づくまとまった解説[1]があるため、詳細の説明はそ

ちらに譲りたい。そこで本稿では、将来の持続可能なエネルギーシステム構築のための電力貯蔵の役割、およびレドックスフロー電池の性能に支配的な要因評価について、筆者らが行ってきた研究を紹介しながら述べる。

2. 将来における電力貯蔵の役割

将来のエネルギーシステムにおいて、電力貯蔵の役割はますます重要となってくることは誰もが認めることだろう。しかし、将来とはいつか、電力貯蔵技術にどのぐらいの性能、コストが要求されるかを明確にイメージすることは難しいかもしれない。これらの疑問に答えるために、筆者らは、北海道全体のエネルギーシステムに関する研究を長年行ってきた。図2は、北海道において2015年から2050年までのCO₂排出量を削減するためのコストを評価した解析例[2]である。横軸はCO₂排出量に制約を与えないベースケースに対するCO₂積算量の削減割合（以後、積算削減率と呼ぶ）であり、縦軸はベースケースに対するコスト増加率である。CO₂積算削減率が20%のとき、コスト増加率は3%程度である。これは、本シナリオでは3%程度のコスト増で期間全体のCO₂を約20%削減できることを意味している。しかし、さらに

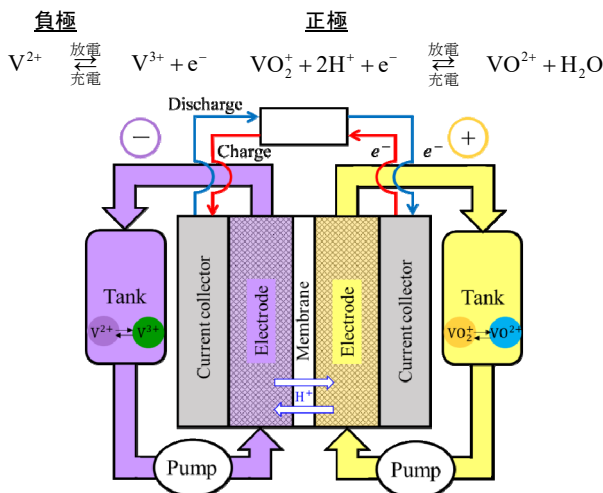


図1 バナジウム型レドックスフロー電池

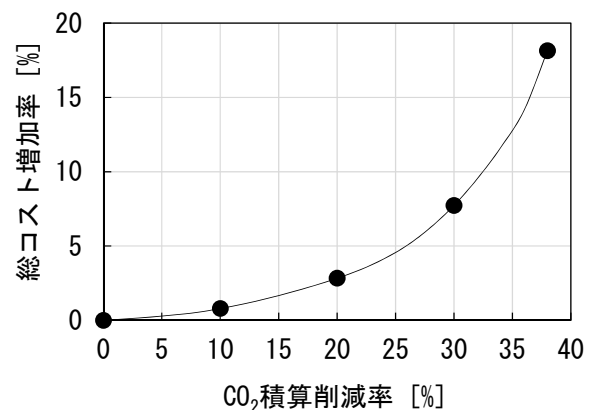


図2 CO₂積算削減率に対するコスト増加割合

CO₂ を削減するためにはコスト増加率が急上昇することに注目していただきたい。なお、グラフ右端の積算削減率 38%は、設定したモデルにおける CO₂ 削減の限界値である。これらのコスト増加率の急上昇、CO₂ 削減率の限界値の問題を解決するために、エネルギー貯蔵が重要な役割を果たすと考えられる。

図 2 の解析には、エネルギーシステム解析モデル MARKAL[3]をベースとし、必要なシステム、データを北海道に合わせて修正したモデルを用いている。MARKAL モデルは、特定の地域に供給される全ての 1 次エネルギーや利用可能な技術のコストおよび性能のほか、部門ごとの最終需要を入力し、需要を満たしながら特定の期間に亘る総コストが最小となるエネルギーシステム構成を線形計画モデルにより求める解析プログラムである。この際、解析期間中の CO₂ の総排出量などを制約条件として加えることができる。したがって、得られる結果は入力データなどのシナリオに大きく依存する。だからこそ、バランス感覚に優れ、実際のエネルギー技術にも詳しい、例えば伝熱研究者などがこのような解析を様々な視点から積極的に行い、意味のある知見を発信していくべきと筆者は考えている。

さて、上述した結果において、CO₂ 削減の限界は何に起因しているのだろうか。表 1 は、積算削減率が 0%、20%、38%の場合の、2050 年における CO₂ 削減割合（2015 年比）をまとめたもの[2]である。積算削減率が 38%の限界の場合でも、北海道全体としての削減割合は 64%程度に留まり、日本が目標として掲げている 80%削減（2013 年比）に達していないことがわかる。なお、排出量に制約を与えない積算削減率 0%のベースケースでも北海道全体で削減割合 16.2%と CO₂ 排出量が減少しているのは、人口減に伴うエネルギー消費の減少に加えて各種設備の効率向上によるものである。部門別に見ると、特に民生部門において CO₂

表 1 2050 年の部門別 CO₂ 削減割合(2015 年比)

CO ₂ 積算削減率	0%	20%	38%
北海道全体	16.2%	47.1%	63.5%
部門			
運輸	38.6%	41.1%	47.7%
民生（家庭）	32.0%	63.2%	79.5%
民生（業務）	-2.7%	56.7%	85.4%
産業	5.3%	40.1%	57.6%
農林水産業	13.4%	17.6%	17.6%

削減割合が高くなることがわかる。これは主に系統電力における CO₂ 排出量の減少が民生部門で大きく影響したことが要因である。一方、運輸部門、産業部門では北海道全体の削減割合を下回って限界に達しており、農林水産業部門では排出量制約による変化はほとんど見られない。これらの部門での低炭素技術が開発段階であり、十分にモデル化されていないことが原因である。よって、2050 年における CO₂ 排出量の 80%削減のためには、運輸部門、産業部門、農林水産業部門での低炭素技術の発展が必要不可欠であり、ここでもエネルギー貯蔵が重要となると考えられる。例えば、運輸部門における電気自動車や燃料電池自動車の大幅普及のための社会システムは 2050 年に向けて不透明な部分が多く、本解析でも十分にモデル化できていない。また、系統電力における CO₂ 排出量の減少は当然必要であり、この効率化のためにも電力貯蔵技術の発展が鍵となる。

図 3 は、電力系統内の発電種別ごとの年間発電量を、CO₂ 積算削減率 0%のベースケースと 38%について示したもの[2]である。原子力発電は再稼働しないシナリオである。また、赤破線は有効に

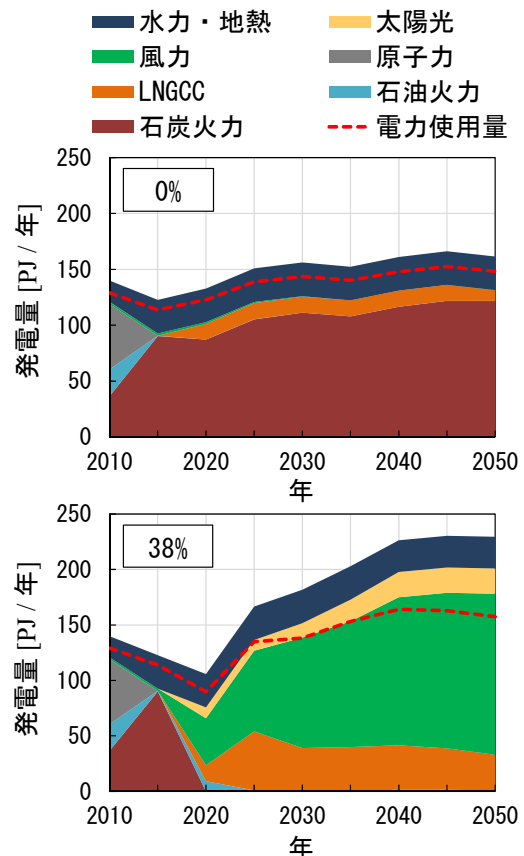


図 3 系統電力量の構成変化

消費された電力量であり、それを上回った発電は送電系統等におけるロスのほか、再生可能エネルギーにより過剰に発電した電力に相当している。ベースケースでは、電源計画などの制約を極力排除しているために割安な石炭火力が増大している。一方、積算削減率 38%では、風力ならびに太陽光発電が早期から大幅に増加し、かなりの割合の電力が再生可能エネルギーで賄われている。なお、LNG コンバインド発電は、自然変動電源である風力・太陽光発電の大量導入に対して、調整能力を保つためにバックアップ電力用の電源として運用される。ここで、実際に利用された電力量線（赤破線）を越えて発電量が増加しており、自然変動電源の大量導入によって余剰となる電力が顕著に増大していることがわかる。解析ではこの余剰電力に対する大容量蓄電池や水素変換して利用する等のシステムを導入できておらず、この余剰電力の増大が図 1 におけるコスト増加率の急上昇の大きな要因となっている。したがって、再生可能エネルギーによる系統電力の低炭素化において、発生する余剰電力を有効利用するための効率的な電力貯蔵技術が必要不可欠となる。また、系統電力のさらなる低炭素化を進める上でも、バックアップ電源からの CO₂ 排出を抑制するための電力貯蔵技術が重要となる。

再生可能エネルギーの変動対策技術の有効性を評価するために、筆者らは北海道を基幹送電線により電力融通が可能な 4 地域（道央、道南、道北、道東）に分割し、1 時間ごとの発電量および需要量を用いて、それぞれの地域において最適な（コスト最小となる）発電設備、対策技術設備量を求める解析も別途行っている。計算結果の一例[4]を図 4 に示す。これは、2050 年に自然変動電源である風力および太陽光発電によって年間に供給される電力の 80%を賄う場合を想定した際の 1 月における 2 つの地域の発電量変化を示したものであり、大容量バッテリーの導入も考慮している。先に紹介した解析とは異なり、系統電力システムのみを対象としていることにご注意いただきたい。実線がそれぞれの地域に電力需要量であり、図 4(a)の道央では風力・太陽光発電の発電量が少ない時間帯には、主に他地域からの送電電力や蓄電池の放電電力により電力需要を満たしている。また、太陽光発電は規則的な発電パターンを示し、蓄電池

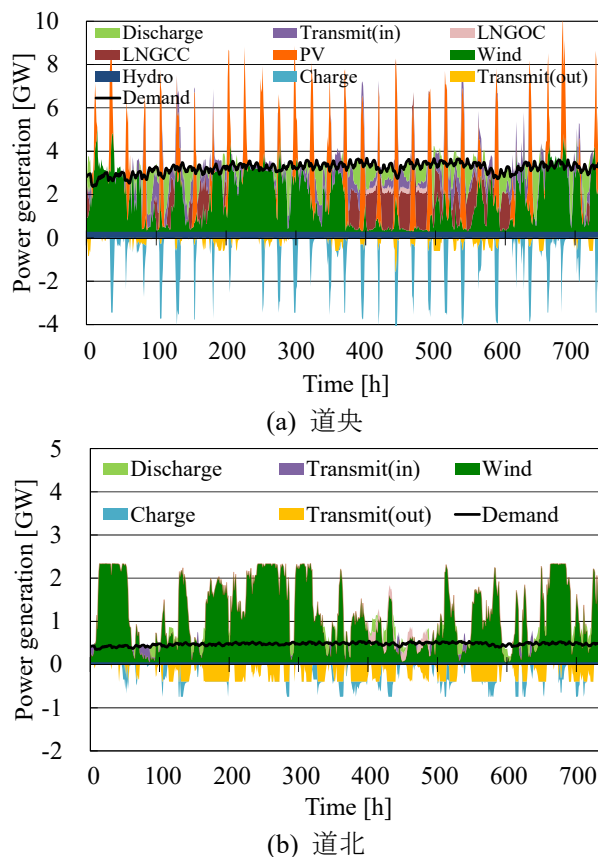


図 4 自然変動電源大量導入時の発電パターン(1 月)

との相性がよいことが蓄電池の充放電パターンからわかる。一方、図 4(b)の道北では、風況がよく設備利用率が高い風力発電が大量に導入されている。ここで、不規則に生じる風力発電による余剰電力は蓄電に向かず、大部分が道央への送電にまわされるか、送電容量による制限などから有効に利用されない結果となっている。この対策としては、送電網の強化の他に、余剰電力の水素製造への利用、熱利用などが考えられる。

図 5 は、2050 年における自然変動電源の需要への供給割合に対する年間の総発電コスト変化を示したもの[4]である。図 4 に示した大容量バッテリーを導入可能とした Case C に加え、送電線増強のみを可能とした Case B、これらの両対策が可能な Case D を、変動対策なしの Case A と比較している。対策なしの Case A では供給割合が 50%を超えるとコストが急激に増大しており、これは有効に利用されない余剰電力の増大に対応している。送電線増強のみの対策効果は限定的であるが (Case B)、大容量バッテリーを導入することにより大幅にコスト増加を抑制できることがわかる (Case C)。

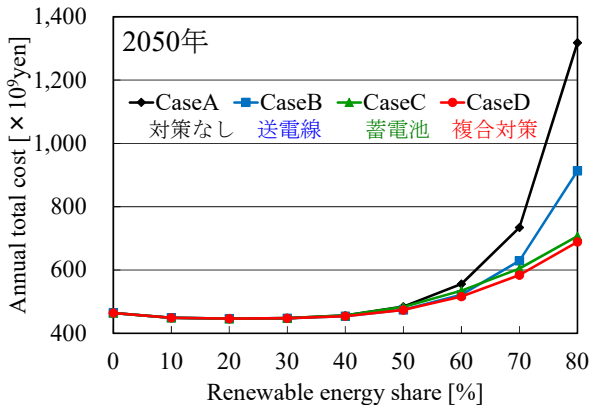


図5 北海道全体における自然変動電源の供給割合と総コスト変化

また、バッテリー導入と送電線増強の両者を可能とした Case D のコスト低減に対する効果は、Case C に比べて大きくない。ただし、解析結果の内訳では、道北の風力発電が顕著に増加し、その分道央の太陽光発電や蓄電池は減少しており、将来の技術進展により CO₂ 排出量削減のために有効な技術の組み合わせが複雑に変化することがわかる。

以上に示した例は再生可能エネルギーが大量導入された極端な例だと思われるが、それでもまだ、日本が目標として掲げている CO₂ 排出量の 80% 削減 (2013 年比) に達していないことを思い出していただきたい。この目標を、他人事ではなく当事者として受け止めたならば、電力貯蔵をはじめとするエネルギー貯蔵技術のさらなる発展が必要不可欠であることが明確に理解できる。さらに、これまでの延長線上ではない、低炭素技術と親和性の高い社会システムへの変革も必要とならざるを得ないだろう。

3. レドックスフロー電池

レドックスフロー電池は電力貯蔵用の大容量二次電池として期待されている電池の一つである。将来、再生可能エネルギーの変動対策として大量導入されるためには、さらなる性能向上、コスト低減が必要と考えられる。

レドックスフロー電池の起電力は、図 1 上部に示したような反応前後の活物質の自由エネルギー差により生じる。この駆動力により運転した際、電池の出力を上げ電流が大きくなるほど、各種損失により電圧が低下して性能損失となる。この電圧低下は過電圧と呼ばれ、反応を進めるために生

じる活性化過電圧 η_{act} 、イオン・電気抵抗により生じる抵抗過電圧 η_{ohm} 、および反応部での活物質濃度が低下することにより生じる濃度過電圧 η_{con} に大別される。本稿では、バナジウム型レドックスフロー電池の活性化過電圧 η_{act} 、濃度過電圧 η_{con} について、実験を基に解析した結果を紹介する。

3.1 電流密度分布測定と濃度過電圧の評価

まず、反応部での活物質濃度が低下することにより生じる濃度過電圧の評価を電流密度分布の測定結果を基に行った例[5]を紹介する。図 6 は電流密度分布を測定するために用いた実験装置の概略図である。中央に断面図で示した単セルは、イオン交換膜を電極、集電板、端板で挟む構造となっている。電極は厚さ 3.1 mm のカーボンフェルトであり、活物質を含む電解液をタンクからカーボンフェルト内へ流動させながらフェルト繊維表面で反応が進行する。図では重力方向を下側としており、電解液は両極ともに下側から上側へと並行流として流動する。このように、電解液が多孔質電極の空孔内だけ流れ、流動がほぼ一様と見なせる従来型の電極を、過電圧評価モデル構築のためにここでは採用している。

電流密度分布測定は、負極側の集電板は流路方向に 5 分割し、各々に接続されたシャント抵抗両端の電位差から各集電板を流れる電流値を求めることにより行った。本実験装置は、①各集電板を各々の可変抵抗により等電位に保つことで、実際には一体となっている通常集電板による運転を模擬、②各極につき配置した上下 2 つのタンク中の電解液のヘッド差により脈動の無い電解液の供

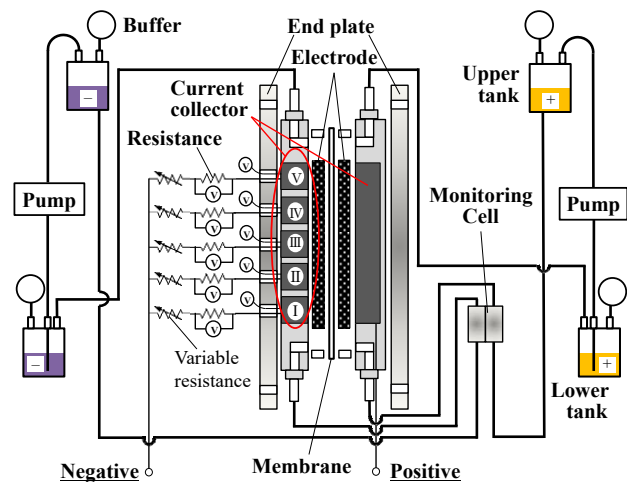


図6 電流密度測定用レドックスフロー電池

給を実現，③電解液の充電深度(SOC)をモニタリングセルにより随時確認，などの工夫を施している。

図7は放電時の電流密度分布の計測例[5]であり，横軸は上流から下流に渡る分割電極の番号，縦軸は各分割電極における電流密度のセル全体の平均値に対する割合である．図7(a)ではセル全体の平均電流密度の影響を比較しており，下流ほど電流密度が低くなり，その傾向は平均電流密度が高いほど顕著となっていることがわかる．これは下流ほど活物質濃度が低くなるためであり，測定結果の妥当性を示している．電解液の流量，流し方の影響を調べた図7(b)では，電解液の流量を大きくした場合（Co-flow 50 mL/min）に電流密度分布が小さくなることも確認できる．また，正極(+)のみを重力方向の上から下に供給する対向流（Counter-flow）とした場合，30, 50 mL/minの両流量ともに電流密度分布が小さくなることが確認でき，これは活物質濃度が下流ほど低くなる影響が正極と負極で反対となるためである．このとき，

負極の上流である電極Ⅰのほうが正極の上流である電極Ⅴよりも電流密度が高い傾向があり，負極反応の過電圧影響のほうが大きいことがわかる．

様々な条件で計測した電流密度分布と性能測定結果を用い，電流密度分布と性能の損失である過電圧の関係を考察する簡易モデルを構築した．簡易モデルによる電流密度分布の再現結果の例[5]を図8に示す．解析条件は図7の実験条件に対応しており，実験結果をよく再現できていることがわかる．ここで，解析モデルは面方向を分割集電板に対応した5つのみに分けた簡易的なものであるが，各損失の寄与度を決定する物質伝達係数，反応速度定数，有効反応表面積のキーパラメータを実験結果を基に推定していることが特徴的な点である．また，濃度過電圧を下流ほど主流の活物質濃度が低下することにより生じる濃度過電圧 $\eta_{\text{con,B}}$ （以後，主流濃度過電圧）と主流に比べて電極繊維表面の活物質濃度が低下することにより生じる濃度過電圧 $\eta_{\text{con,S}}$ （表面濃度過電圧）に分けて評価可能となっている．

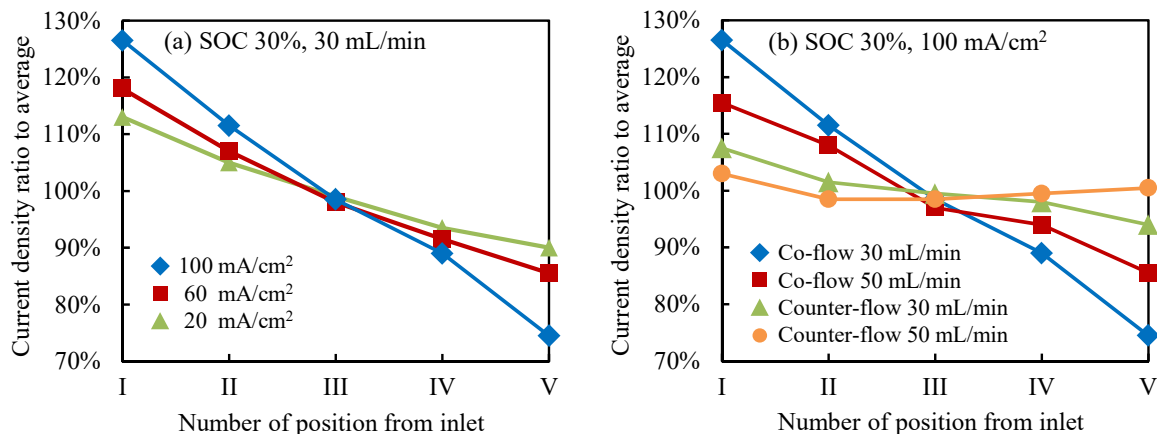


図7 電流密度分布の計測結果：(a) 平均電流密度の影響，(b) 電解液流量・流し方の影響

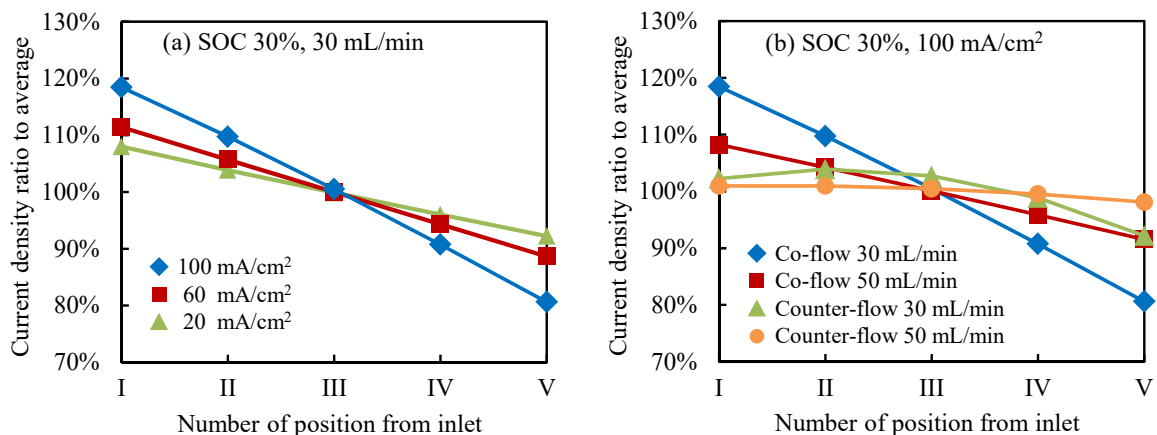


図8 電流密度分布の解析結果：(a) 平均電流密度の影響，(b) 電解液流量・流し方の影響

実験より決定したパラメータを用い、構築した解析モデルにより、種々の過電圧が電流密度分布に及ぼす影響を調べた例[5]が図9である。各分割集電板は等電位としているため、それぞれの領域において過電圧の和は等しくなっている。濃度過電圧に着目すると、下流側ほど活物質濃度の低下に伴う主流濃度過電圧 $\eta_{\text{con,B}}$ が増大している。この損失により下流の電流密度が低下することが、抵抗過電圧の減少からもわかる。流量が大きい場合の図9(b)では、下流における $\eta_{\text{con,B}}$ の増加が抑制され、流路方向分布および性能損失への寄与が小さくなっている。電極表面の活物質濃度低下の影響を表す表面濃度過電圧 $\eta_{\text{con,S}}$ に注目すると、主流方向の分布は小さいが、過電圧の大きさ自体は $\eta_{\text{con,B}}$ よりも大きく、濃度過電圧による性能低下に対して支配的であることがわかる。

以上の解析より、本研究の比較的低い電流密度運転でも表面濃度過電圧の影響が現れることが、実験を基に確認できた。これは、電解液中の活物質の拡散が比較的遅いためであり、レドックスフロー電池では、多孔質電極内の電解液中の対流物

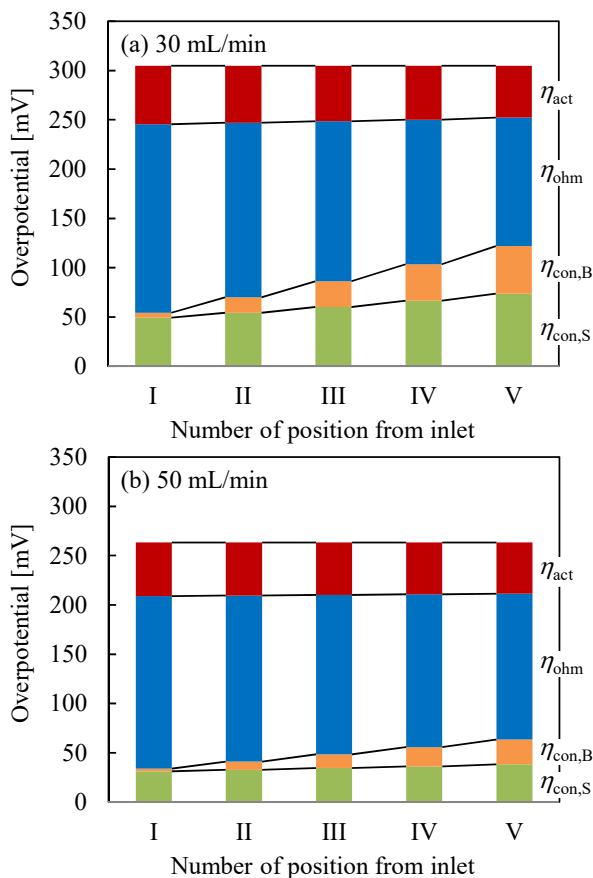


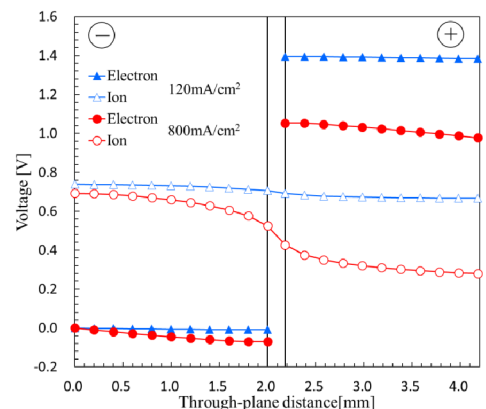
図9 過電圧の評価結果 (100 mA/cm², SOC 30%)

質伝達の促進が重要となることがわかる。また、活物質濃度が低下する下流に比べて余力のある上流で放電が活発となる運転は、大きな電流密度分布が生じるもののセル全体として高い電流密度運転のために有効であることも示し[5]、大容量化に向けてのシステム設計への応用も検討中である。

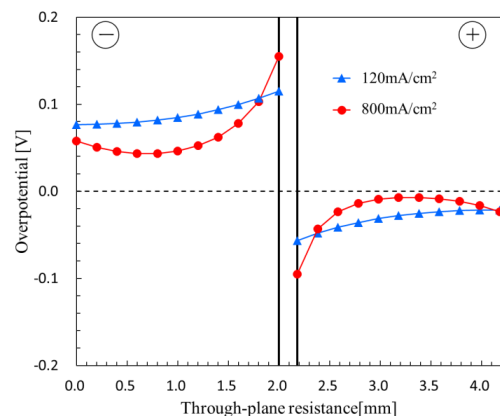
3.2 活性化過電圧の電極厚み方向分布の評価

レドックスフロー電池では、3 mm 程度のカーボンフェルト電極や、流路つきの場合は 0.3 mm 程度のカーボンペーパー電極が用いられる。多孔質電極の全表面が充放電に寄与するため、反応部が比較的厚くなることも特徴である。これにより、電極内厚み方向において、カーボン部を移動する電子および電解液内を移動するイオンの電位に分布が生じ、結果として反応に寄与できる活性化過電圧に分布が生じることになる。

電子およびイオンの電位および過電圧の厚み方向分布を調べたモデル解析例[6]が図10である。なお、この厚み方向分布の解析モデルは、濃度過



(a) 電子およびイオンの電位分布



(b) 過電圧分布

図10 電極内の電位分布と過電圧分布

電圧の影響は含んでおらず、性能を決定する各種パラメータは前述した流路方向モデルと同様、実験により推定している。図 10 において、横軸はセル内の厚み方向位置を表しており、左から負極の電極、イオン交換膜、正極の電極を表している。800 mA/cm² の高電流密度での放電条件で、特にイオン電位に大きな変化が見られ（図 10(a)）、より非線形的な電位分布が確認できる。また、図 10(b) では、イオン交換膜付近での過電圧の絶対値が、特に 800 mA/cm² の際に大きくなっており、膜付近の活発な放電反応に対応している。

以上の解析より、電極厚み方向に大きな反応分布が生じることが確認できた。これは、比較的厚い反応部と電解液のイオン電導度が低いことが原因であり、レドックスフロー電池では、電極内のイオンおよび電気抵抗による電位損失の低減も重要となることがわかる。なお、これら電位損失の影響は、高周波インピーダンスなどで測定されるセル抵抗に電流を乗じることにより求められる抵抗過電圧では正確に評価できないことに注意が必要である。

3.3 集約主要因子による過電圧評価

上述した通り、レドックスフロー電池の性能は、流路方向に分布を持つ濃度過電圧、電極厚み方向に分布を持つ活性化過電圧の影響を受け、それらの効果は電池構造や運転条件に大きく依存する。これらの影響を集約して評価する筆者らの試みについて最後に紹介する。

まず、線形近似を用いやすい低電流密度域において、いくつかの仮定を用いて簡易性能評価式を導出した[7]。さらにこのモデルより、非線形効果が強くなる高電流密度域までも適用可能な性能に対する構造・運転条件影響の集約主要因子を抽出した。電極内厚み方向のイオン・電気抵抗を考慮した活性化過電圧について、集約主要因子を用いて整理した結果[8]を図 11 に示す。横軸、縦軸、NRA が簡易性能評価式から抽出した無次元数である。なお、ここでは電極内イオン・電気抵抗を 0 とした場合の活性化過電圧を η_{act} とし、抵抗を考慮した際の増加分を η_{ohm}^E としている。 i_{cell} , i_0 [mA/cm²] はそれぞれ平均電流密度、交換電流密度、 A_c , A_f [m²] はそれぞれ反応面積、電極繊維表面積である。横軸は平均電流密度の無次元数、縦軸は電

極内抵抗を考慮した活性化過電圧の無次元数であり、NRA は η_{ohm}^E と η_{act} の影響比として次式で定義した。

$$NRA = \frac{\frac{2}{3}t\left(\frac{1}{\sigma_e} + \frac{1}{\sigma_i}\right)}{\frac{RT}{zF} \frac{A_c}{A_f} \left(\frac{1}{i_0} + \frac{1}{i_0^*}\right)}$$

ここで、 t [m] は電極厚さ、 σ_e , σ_i [S/m] はそれぞれ電極の電気伝導率、電解液のイオン伝導率であり、 η_{ohm}^E に相当する右辺の分子中では電極内抵抗の影響を近似的に電気抵抗とイオン抵抗の和として表せている。NRA = 0 は電極内抵抗が 0 で厚み方向分布が生じない場合の η_{act} のみの影響を表し、NRA が高いほど η_{ohm}^E の影響が大きいことを表す。このように横軸、縦軸、NRA を設定し、各条件のパラメータを様々に振って性能解析モデルの計算結果をプロットしたところ、図 11 のような近似曲線上にほぼ整理できることがわかった。

次に、主流濃度過電圧 η_{con}^B と表面濃度過電圧 η_{con}^S に対する構造・運転条件影響の集約主要因子を抽出、整理した結果[8]が図 12 である。 Q [mL/min] は電解液流量、 C_V^{in} [mol/m³] はセル入口のバナジウム濃度である。横軸、縦軸、NSB は簡易性能評価式から抽出した無次元数であり、横軸はストイキ比の逆数、縦軸は $\eta_{con}^B + \eta_{con}^S$ の無次元数、

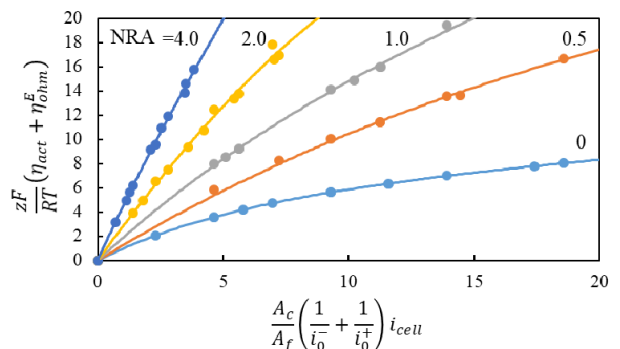


図 11 活性化過電圧の集約評価

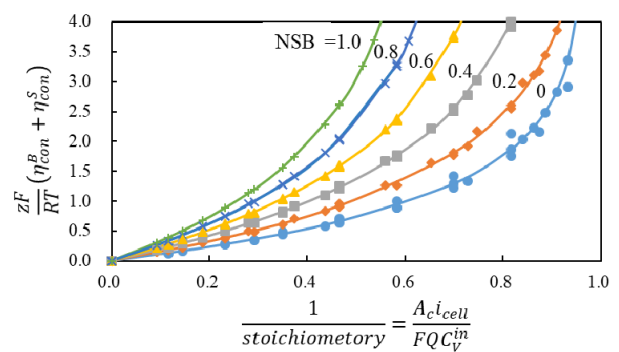


図 12 濃度過電圧の集約評価

NSB は $\eta_{\text{con}}^{\text{S}}$ と $\eta_{\text{con}}^{\text{B}}$ の影響比として次式で定義した。

$$\text{NSB} = \frac{zKA_f}{Q}$$

ここで、 K [m/s]は物質移動係数である。NSB = 0 は $\eta_{\text{con}}^{\text{B}}$ のみの影響を表し、NSB が高いほど $\eta_{\text{con}}^{\text{S}}$ の影響が大きいことを表す。このように横軸、縦軸、NSB を設定し、各条件のパラメータを様々に振って性能解析モデルの計算結果をプロットしたところ、図 12 のような近似曲線上にほぼ整理できることがわかった。

以上のように、レドックスフロー電池の構造および運転条件から、集約主要因子を用いることにより、電池の各過電圧を 2 枚の図に整理して評価可能であることを示した。これにより、多くのパラメータが複雑に関係するレドックスフローの性能損失を集約的に評価可能であり、効率的な性能改善への指針を示すことができると考えている。

4. おわりに

本稿では、まず電力貯蔵の役割に関して、持続可能なエネルギーシステムの構築という視点からの研究を紹介した。この視点は、将来ますます重要となってくるエネルギー貯蔵の役割の一つにすぎず、また得られた指針は技術進展により随時変化していく内容も含んでいる。したがって、種々の目的、対象に対して、正当な定量的な社会システム解析が様々な視点でなされることが重要である。さらに、既存のシステムにとらわれず、目的達成のために有効な、発展した技術と親和性の高い社会システムを柔軟に設計していくことも、我々技術者の役割と考える。

後半に紹介したレドックスフロー電池は、将来の持続可能なエネルギーシステム構築のための有力な電力貯蔵技術の一つである。再生可能エネルギー主体の社会を実現するためには、膨大な量の電力貯蔵が必要となると考えられる。そのため、レドックスフロー電池の特徴の一つである安全性が、特に重要な利点であると筆者は考えている。将来の社会実装を視野に入れた大容量蓄電池の技

術開発が、今後ますます重要となってくるであろう。

謝辞

バナジウム型レドックスフロー電池の研究をはじめに当たり、平井秀一郎先生(東京工業大学)、津島将司先生(大阪大学)には多くの貴重なご助言をいただいた。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- [1] 津島将司, 鈴木 崇弘, 電極相界面極限利用を実現するレドックスフロー電池, 伝熱, **55-230** (2016) 41.
- [2] 藤原貴弘, 他 2 名, 北海道における温室効果ガス排出削減目標に対する長期的な最適導入技術解析, 日本機械学会論文集, **84-859** (2018) 17-00449.
- [3] 佐藤治, 我が国の長期エネルギーシステム需給シナリオに関する検討, JAERI-Research 2005-12 (2005).
- [4] 高橋尚也, 他 3 名, 北海道における風力・太陽光発電の大量導入に向けた変動対策の効果と長期導入シナリオ解析, 第 33 回エネルギー・資源学会エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集 (2017), 23-2.
- [5] 田部豊, 他 4 名, レドックスフロー電池内の活物質輸送が電流密度分布と性能に及ぼす影響解析, 日本機械学会論文集, **83-849** (2017) 16-00458.
- [6] 坂本篤, 他 2 名, レドックスフロー電池における電極厚み方向の電気・イオン抵抗と性能特性, 第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2017), H143.
- [7] 善当哲也, 他 3 名, レドックスフロー電池における流れ・厚み方向の電流密度分布を考慮した性能評価モデル, 第 22 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 (2017), D114.
- [8] 善当哲也, 他 2 名, レドックスフロー電池性能に対する構造・運転条件影響の集約主要因子, 日本機械学会 2018 年度年次大会講演論文集 (発表予定).

再エネ時代の PEEC の課題

Issues of PEEC in Use of Renewable Energy

伊藤 衡平, 李 海文, 林 灯, 立川 雄也, 分山 達也 (九州大学)

Kohei ITO, Haiwen LI, Akari HAHASHI, Yuya Tachikawa, Tatsuya WAKAYAMA (Kyushu University)

e-mail: kohei@mech.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

水電解についての記事を、と依頼された。読者は若手研究者や学生かな？などと想像しながら、再生可能エネルギー（再エネ）時代の固体高分子形水電解 PEEC の課題をリストしてみた。エネルギー問題を簡単におさらいし、再エネの性質、電力貯蔵の必要性、水素エネルギーシステム、PEEC の概要、そして再エネと PEEC の接続時の課題をリストした。

2. 従来型エネルギーと再生エネの高利活用、そして水電解

再生可能エネルギー（以下再エネ）の高利活用が謳われている。エネルギー・環境問題、すなわち化石燃料の枯渇、環境汚染の問題を克服するには、再エネを一次エネルギーとしたエネルギーシステムに徐々に移行するのが唯一の解であろう。再エネのうち太陽光、風力においては少しずつ低コスト化が進んで[1]導入が進む一方で、最近では再エネの電力系統への連結において協議、調整に時間を要する状況である [2]。更なる抜本的な再エネの導入にはルール改定や供給と需要をバランスさせる技術が必要である。

エネルギーシステムには、3E+S、すなわち安定供給(E)、経済性(E)、環境性(E)、安全性(S)が問われる[3]。従来型エネルギーは培ってきた技術や運用法により一定の安全性(S)を有する。他方で、従来型エネルギーすなわち化石燃料は継続的な安定供給が難しく、採掘が徐々に困難ともなっていて高コストとなり、大気汚染や地球温暖化を招いていることから 3E の適合が難しくなりつつある。採掘技術や環境浄化技術、CCS 等の動向、原子力に対する議論なども 3E+S 評価を左右するが、永続的には従来型一次エネルギーに頼れない。

再エネを 3E+S から評価するとどうであろうか。従来型一次エネルギーと相対比較すると、再エネ

は安定供給の点で優れ、環境負荷が小さく、エネルギー密度が薄いこともあって一般には安全と整理できる。逆に再エネはエネルギー密度が薄いがゆえに原理的に高コストとなるが、技術革新、市場導入によりコストは克服できる問題となりつつある。

このように再エネは従来型エネルギーと比較して 3E+S の観点から優位である。しかし再エネの高利活用においては更なる考察、対応が必要である。再エネは全体的、平均的に見れば安定供給可能であるが、詳細に見れば安定供給にこそ問題がある。再エネは秒、分、時間、日の単位あるいは季節によって変動し、またその変動予測も一般には難しい。また再エネは化石燃料ほどでないが偏在する。総括すると再エネのエネルギーシステムでは電力の供給・需要の間にギャップが生じうる。従って、再エネの高利活用にはギャップを解消する仕組みが必要である。なお、再エネを系統連結することを前提にすれば季節や日単位など長期的変動であれば供給側、需要側の間で事前協議、契約調整も可能である[4]。また、台数や場所など設置方法や、発電機の慣性、エンジニアリングにより極端に短い時間での出力変動を回避できる可能性もある[5, 6]。潮流など予測可能な再エネもある[7]。今、系統連結を前提といったが、そのスケール、接続方法は多様である[8]。連結しない場合もある。このように多様に想定可能であるが、いずれにしても再エネを高利活用するには電力の供給と需要のギャップは程度の差はあれ存在し、また解決する必要があると認識すべきである。

ギャップを解消する一候補として水素エネルギーシステムが提案される。再エネ起源電力による水電解で水素ガスを製造し、貯蔵し、電力需要に応じて燃料電池発電する電力貯蔵システムである。水素システムに加えて電力貯蔵には、水素と同じ範疇の電気化学貯蔵法として二次電池、キャパシ

ター、物理的貯蔵法として水力、圧縮空気、フライホイール、超伝導などもあり[9]、それぞれに優劣がある。小規模なものであれば二次電池であるが、中規模以上であれば水素システムが電力貯蔵の一候補になりうる。電力貯蔵法は今後の技術動向、また電力運用、地域性などさまざまな要素を勘案しながら決まると考えられる。ここでは電気化学貯蔵法に着目し、水素システムが二次電池と比べて[7]充放電出力と貯蔵容量を独立調整しやすいこと、自己放電が小さいこと、また輸送性にもすぐれていることから水素システムに着目する。水素の輸送性とは、水電解で製造した水素ガスを輸送することであるが、水素ガスそのもの、あるいは水素ガスからアンモニアやメタンなどを製造し、貯蔵し、ローリーやタンカ、あるいはパイプラインで輸送[7]することを意図している。

水素システムのうち、すなわち再エネ起源電力からの水素製造には水電解を用いる。水電解方法には、実績の高いアルカリ、徐々に導入の進む固体高分子形、さらには開発中の固体酸化物形などが上げられる。自然任せの再エネ起源電力を水電解セルに接続した場合、上でのべたように水電解セルスタックには頻繁な電力変動、起動停止にさらされる。このときアルカリ水電解セルでは溶液管理などシステム上の慣性が大きく、 800°C などと高温動作する固体酸化物形では熱的な慣性が大きいことに注意が必要である。他方、固体高分子形水電解セル (PEEC) は比較的構造が簡易で、 60°C などと低温作動できる。ここでは再エネ起源電力に接続する水電解方法を PEEC に絞る。

以上を踏まえて本解説では再エネ起源電力を PEEC に接続した場合の問題点を整理する。「再エネ起源電力を PEEC に接続する」場合には、太陽光パネルなど再エネ発電機に比較的隣接した場所で水電解して水素ガスを貯蔵し、燃料電池発電する方法が先ず想定される。上述したように、電力グリッドを介して再エネ起源電力と PEEC を接続する方法、PEEC により製造した水素をガスパイプラインに供給する方法も想定できる。PEEC システム内に補機を組み込みラボレベルのような整流された一定の直流電力を PEEC に接続できる場合もあろう。現在、時代 (時期)、地域性、運用方法を睨みながら様々な方法が比較検討されつつある。しかしいずれの方法においても、再エネの高

利活用に資する PEEC には電力変動や起動停止が、一般的な水素製造工場の PEEC に比べて頻繁に、数多く課せられる。以下では、先ず簡単に PEEC の構造、性質を説明し、電力変動、起動停止の PEEC への影響を解説する。

3. PEEC の構造、性質

PEEC の構造、性質、とくに効率の考え方について簡単に説明する。詳細についてはレビューや書籍を参照してほしい[10], [11]。

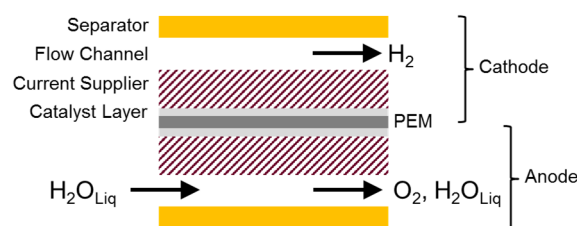


Fig. 1 Schema of PEEC

図 1 に PEEC の代表的な構造を示す。上から、カソードセパレータ、カソード流路、カソード給電体、カソード触媒層、電解質膜、アノード触媒層、アノード給電体、アノード流路、アノードセパレータである。PEFC と比較すると、PEEC の電解質膜は PEFC と同様 Nafion 膜等の高分子電解質膜が使用されるが、水電解の場を想定して機械的強度、寸法安定性、ガスバリア性を考慮した仕様のものが選択されるようである。4 章で触れるように電解質膜の機械的強度やガスバリア性は再エネ接続とも相俟って重要である。カソード触媒層は PEFC と同様の白金カーボンであるアノードでは触媒活性を考慮して酸化イリジウムが使われることが多いが、これを担持する材料も確立されておらず、継続してアノード触媒層は研究開発課題である[11]。カソード給電体には PEFC と同様のカーボン多孔質体を使うことができるが、アノード給電体にはチタン焼結体に白金鍍金した多孔体が使われる。セパレータにはチタン材料が使われる。

PEEC ではアノードに水を供給して、外部から直流電圧を印加して、アノードから酸素ガス、カソードから水素ガスが発生する。アノードに供給する水量は、セルスタックの冷却も兼ねて電解される水量より桁違いに大量に流す。更なる冷却や

水素ガスのセル外への排出を助けるためにカソードにも水を供給する場合がある。PEEC システム内にはアノード側、カソード側ともに水循環のループがあることが多い。セルスタックで生成したガスは気液分離器や圧力調整器、ガス乾燥器等を介してシステム外のタンクに貯蔵される。PEEC システム内には水を浄化するフィルターが設置され、水の品質が注意深く監視されている。水の汚れ、特に配管から溶出したイオンが電解電圧を上げるなど不純物が PEEC の性能を低下するため、水の品質に注意が払われている。

PEEC の性能は、まず、電圧効率 ε_V により評価される。電圧効率は理論的な電解電圧 U_{theory} を実際の電解電圧 U_{cell} で除した値である。

$$\varepsilon_V = U_{\text{theory}} / U_{\text{cell}} \quad (1)$$

理論的な電圧は水電解のギブス自由エネルギー変化 ΔG 、あるいはエンタルピー変化 ΔH から求まる。

$$U_{\text{theory}} = U_{\Delta G} = \Delta G / (nF) = 1.233 \text{ V at } 25^\circ\text{C, } 1 \text{ atm} \quad (2)$$

$$U_{\text{theory}} = U_{\Delta H} = \Delta H / (nF) = 1.481 \text{ V at } 25^\circ\text{C, } 1 \text{ atm} \quad (3)$$

ここで F はファラデー定数、 n は反応に関わる電子数で 2 である。水電解では、現状、両方の理論電解電圧が使われる。 $U_{\Delta G}$ を基準にすると電圧効率が 1 以下となる。 $U_{\Delta H}$ を基準にすると 1 以上もありうる。電圧効率を議論する場合には、どちらを基準にしたか明記する必要がある。この辺の事情は HHV, LHV と同じである。なお本解説で取り上げる水素システム、すなわち水電解と燃料電池発電をシリーズに組み込むシステムでは、燃料電池の電圧効率を $U_{\text{cell}}/U_{\Delta H}$ とすることから、水電解にはエンタルピー基準の電圧効率 $U_{\Delta H}/U_{\text{cell}}$ を使う。このように定義することで水電解と燃料電池を組み合わせた往復効率 (round trip efficiency) が最大で 1 となり合理的である。なお $U_{\Delta H}$ を理論稼動電圧、あるいは熱中性電圧と呼ぶこともある。

PEEC においては電流効率 ε_I も性能評価の指標となる。電流効率は、発生した水素ガス流量から換算した電流 (理論電流) I_{product} を、実際に印加した電流 I_{imposed} で除したものである。

$$\varepsilon_I = I_{\text{product}} / I_{\text{imposed}} \quad (4)$$

ファラデーの電気分解の法則から理想的には電流効率 ε_I は 1 となる。実際には電解質膜での短絡電流やクロスオーバーによりガス生成に寄与しない

電流成分が発生する。このため ε_I は 1 より小さくなり、特に PEEC ではクロスオーバーに起因して電流効率が低下する。

PEEC の効率を全体的に評価する場合には、電圧効率と電流効率を乗じたエネルギー変換効率を利用する。これは理想的に水電解が進んだ場合の負荷電力 P_{theory} を実際の電力 P_{cell} で除した値で、式(1), (4)も使って、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{total}} &= P_{\text{theory}} / P_{\text{cell}} = (U_{\text{theory}} I_{\text{product}}) / (U_{\text{cell}} I_{\text{imposed}}) \\ &= (U_{\text{theory}} / U_{\text{cell}}) (I_{\text{product}} / I_{\text{imposed}}) \\ &= \varepsilon_V \varepsilon_I \end{aligned} \quad (5)$$

となる。エンタルピー基準の電圧効率を使うと総合効率は 80% 程度である[12]。再エネを PEEC に接続すると、これら電圧効率、電流効率、総合効率が定格運転時に比べて以下のように低下する恐れがある。

4. 再エネ接続 PEEC の課題

再エネと接続された PEEC では、急激に変動する電力が供給されたり、頻繁な起動停止がおきる。このときの PEEC スタックへの影響、あるいは PEEC スタックを含むシステムへの影響をリストする。

4.1 部分負荷運転

再エネが接続された PEEC には変動する電力が供給される。従って PEEC は定格でなく部分負荷運転されることになる。部分負荷運転は PEEC システムの効率低下を招くことが知られている。PEEC システムには一般に電力変換コンバータが組み込まれ、部分負荷時にこれが効率低下を招く。コンバータは 100% 負荷時に 90% の変換効率であっても、20% 負荷時には 70% に変換効率が低下する[7]。PEEC システムには更に水ポンプ等さまざまな補機類が組み込まれている。補機類は定格、すなわち 100% 負荷時に適切な補機が一般に選択されるが、部分負荷運転時にはコンバータと同様に補機の効率は低下する[13]。従って部分負荷時のコンバータ、補機の効率低下によって、PEEC システムの効率も部分負荷時に低下する。再エネ接続する PEEC システムに組み込まれる補機には、部分負荷運転時の効率低下が緩やかな機器を選ぶ必要がある。

部分負荷運転時の問題として、温度低下にともなう電圧効率の低下を指摘できる。水電解は温度

が高いほど過電圧が小さくなり[14]，従って高温ほど電圧効率が低い．この指針に沿って最近ではPEECでも高温化がPEFCと同様に進められている．筆者らの研究室でも高温化と同時に加圧運転する，セル構成材料の最適化などにより120℃などと高温運転を達成している[15]．ただし実際のPEECシステムでは水循環，フィルターの耐熱性，更には放熱と過電圧発熱の熱収支に配慮しながら60から80℃程度で運転されている．実際のPEECシステムはこのような状況であるが，この時，部分負荷運転すると発熱が低下し，スタック温度下がって電圧効率が低下する．極端な部分負荷，すなわちシステムが停止し，スタックが室温となるような状況であれば，水の熱容量が大きいこともあって次の起動時のスタック昇温に時間やエネルギーを要する．以上から，部分負荷，起動停止が繰り返される状況であれば，スタック温度が下がり，過電圧が上がってPEECシステムの効率低下を招く．再エネ接続するPEECシステムには，以上を考慮した熱設計が必要であろう．

部分負荷運転では電解質膜をクロスオーバーする生成ガスの割合が相対的に顕著となり，燃焼事故リスクを高める問題もある．PEECはPEFCと同様，Nafion膜などの電解質膜を用いる．Nafion膜はイオン伝導度が高く，ガスバリア性も高く優れた電解質膜である．PEFCの場合には供給した水素ガスが電解質膜の透過率に従ってクロスオーバーしても大きな問題に直ぐにならない．他方PEECでは加圧運転する場合も多く，この場合ガス差圧が電解質膜に負荷され，無視できないクロスオーバーが生じる．例えば0.8 MPaの運転時には電解質膜にこの分差圧が印加され，Nafion膜の透過率[16]（膜厚100 μm，50℃，RH100%湿潤時）に従って，水素ガスが $2.68 \times 10^{-2} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ だけクロスオーバーする．電流密度換算すると水素クロスオーバー流量は $5.2 \text{ mA}/\text{cm}^2$ となる．通常PEECは2 A/cm²程度の比較的高電流で運転される．水素ガスがクロスオーバーするとアノード側では水素-酸素の混合気形成される．この時，酸素ガス中の水素濃度はクロスオーバー相当電流密度，負荷電流密度から $5.17 \text{ mA}/(5.17 \text{ mA}/\text{cm}^2 + 1/2 \times 2 \text{ A}/\text{cm}^2) = 0.514\%$ となり可燃範囲からみて安全である．しかしPEECが部分負荷の $0.5 \text{ A}/\text{cm}^2$ で運転されると水素濃度は $5.17 \text{ mA}/\text{cm}^2 / (5.17 \text{ mA}/\text{cm}^2 + 0.5 \times 0.5 \text{ A}/\text{cm}^2)$

$= 2.03\%$ となり可燃範囲に近くなる．対策としてガスバリア性の高い炭化水素系の電解質膜を組み込むなどが考えられる．

PEECを高圧運転する場合には，燃焼事故リスクに加えて，部分負荷運転時に電流効率が低下する問題が生じる．PEECは他の水電解に比べて機械的に堅牢であり，高圧運転より40 MPaなどと高圧水素ガスを直接製造可能[17]である．高圧運転時には，上記の0.8 MPaの運転に比べて約50倍の差圧がNafion膜に印加され，したがって水素ガスが50倍の $1.34 \times 10^{-6} \text{ mol}/(\text{cm}^2 \text{ s})$ ，電流密度換算で $0.259 \text{ A}/\text{cm}^2$ だけクロスオーバーする．従って部分負荷運転時 $0.5 \text{ A}/\text{cm}^2$ では製造した水素ガスの半分がクロスオーバーして無駄になると理論的には予想され，このとき電流効率が50%以下となる．ガスバリア性の高い電解質膜の組み込みや，対流効果でクロスオーバーを抑制する研究[18]などの取り組みもあるが，部分負荷運転時の電流効率の低下には一定の注意を要する．

4.2 変動の問題

上記4.1節では部分負荷を視点に解説したが，ここでは起動停止も含む電力の「変動」がPEECシステムに及ぼす影響について触れる．

電力変動によるPEECのセル構成材料の劣化が懸念されるが，系統的，本格的な理解は今後の報告を待つ必要がある．逆プロセスのPEFCでは，電力，正確には電圧変動に対する劣化メカニズムはよく整理され，電圧変動すると劣化が加速されることが知られている．触媒劣化（カーボン担持体の構造変化，燃焼，白金粒子の欠落，白金の溶出，再析出による比表面積の低下など）やPEMの化学劣化が加速されることが良く知られている[19]．定常条件下のPEECにおいては，触媒金属の浸食，PEM化学劣化，配管から溶出したイオンによるカソード触媒活性の低下，チタンバイポーラ板の脆化[20]などが知られているが，電圧変動に対してこれらの劣化が加速されるか未明である．

電力変動が及ぼす劣化への影響が十分整理されていないのは，標準プロトコルが未整備であるためだと考察される．PEFCの場合には自動車等での利用を想定しながら，電圧を矩形波，あるいは三角波にしてPEFCに印加し，上限・下限の電圧，周波数も規定しながら実験的に劣化を検証するプロトコルが整備されている[21]．PEECにおいては，

印加する波形のみならず、電流制御か電圧制御かも定まっていない[22]。PEEC はガス生成が目的であるので電流制御による変動をスタックに与えて劣化を検証する考え方がある。PEFC の劣化メカニズムが電圧で整理されるので、PEEC も電圧制御で劣化検証すべきとの考え方もある。

電力変動や、頻繁な起動停止は PEEC の生成ガス流量、スタック内の圧力変動を招き、次のような機械工学的問題が懸念される。PEEC を停止状態から起動する場合、一般に生成ガス自身でスタック内の圧力を所定の圧力まで上昇させる。その間スタック内は低圧で、発生ガス気泡は大きくなり、水供給を妨げ、触媒層における水不足、そして過電圧上昇を招き、電圧効率を低下する。起動時のみならず電力変動にともなう生成ガス流量の変化、内圧の変化が生成ガスの排出を妨げ、ガス蓄積を招き、ピンホール発生、混合気形成、燃焼破損を招く場合も想定される[23]。更には、特に高圧水電解時、圧力変動の繰り返しはスタック構成材料に力を及ぼし、特に、電解質膜やシール材の機械劣化を加速すると考えられる。これらの機械工学的な課題は流路設計や、システム配管内の圧力調整、セルスタック構造の適正化などで緩和できると考えられるが、詳細は今後の実験的検証にゆだねられる。

5. おわりに

著者のひとり伊藤は燃料電池、水電解の「要素」研究に従事してきた。本文中にも触れたように、今後はエネルギーシステムが徐々に変わる。しかし、その確たる像（地域、時代に応じた最適システム、その計画）が見えない。見えないながらもエネルギーアナリスト屋と日々交流しながら、自身の「要素」研究を進める必要がある。でないとその「要素」研究が陳腐となる。もちろん、逆に、優れた「要素」技術を開発してエネルギーシステムを変革する！との気概も重要であろう。エネルギー事情から出発して、再エネ時代の PEEC の課題を整理した。不明瞭な点もある。質問いただければ幸いである。

参考文献

[1] 自然エネルギー発電コスト低減への制度的課題, 自然エネルギー財団 編集, 2018 年 6 月,

https://www.renewable-ei.org/activities/reports/img/20180611/20180611_InstitutionalBarriersRevisedFIT_JP.pdf (accessed 20 June 2018)

- [2] 中間整理, 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会 編集, 2018 年 5 月, http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20180522001_01.pdf (accessed 20 June 2018)
- [3] 政策の視座, 経済産業省, http://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/energy_policy/energy2014/seisaku/index.html (accessed 20 June 2018)
- [4] P.P. Kritharas and S. j. Watson, A comparison of long-term wind speed forecasting models, J. Sol. Energy Eng., Vol. 132, pp. 041008-041015, 2010
- [5] J. Feng and W. Z. She, Wind farm power production in the changing wind: Robustness quantification and layout optimization, Energy Conversion and Management, Vol.148, pp. 905–914, 2017
- [6] E. Muljadi and C. Butterfield, Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation, National Renewable Energy Laboratory, 2000
- [7] Hydrogen Production, Agata Godula-Jopek Ed., Wiley-VCH, 2015
- [8] 再生可能エネルギーにおけるコンバータ原理と設計法, 合田 忠弘, 庄山 正仁 監修, 科学情報出版, 2016
- [9] 再生可能エネルギーと大規模電力貯蔵, 太田 健一郎監修, 日刊工業新聞社, 2012
- [10] Hydrogen Energy Engineering: A Japanese Perspective (Green Energy and Technology), K. Sasaki et. al. Ed., Springer, 2016 9 月
- [11] M. Carmo, DL Fritz, J Mergel, D Stolten, A comprehensive review on PEM water electrolysis, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 12, 4901-4934, 2013
- [12] 電気化学便覧 第 6 版, 電気化学会編, 丸善, 2013
- [13] J. Larminie, and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, Second Ed., Wiley, 2003
- [14] V. Antonucci, et. al., High temperature operation of a composite membrane-based solid polymer electrolyte water electrolyzer, Electrochimica

-
- Acta, Vol. 53, pp.7350-7356, 2008
- [15] Hua Li et. al., Effects of operating conditions on performance of high-temperature polymer electrolyte water electrolyzer, J. Power Sources, Vol. 318, pp. 192-199, 2016
- [16] T. Sakai et. al, Gas Permeation Properties of Solid Polymer Electrolyte (SPE) Membranes, J. Electrochem. Soc., Vol. 132, pp. 1328-1332, 1985
- [17] 針生 栄次, 中沢 孝治, 樽家 憲司, 石川 博之, 岡部 昌規, 差圧式高圧水電解セルの構造とその性能評価, Honda R&D Technical Review, Vol.25, 2013
- [18] K. Ito et. al., Analysis and visualization of water flow impact on hydrogen production efficiency in solid polymer water electrolyzer under high-pressure condition, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 40, pp.5995-6003, 2015
- [19] F. A. de Bruijn et. al., Review: Durability and Degradation Issues of PEM Fuel Cell Components, FUEL CELLS 08, pp. 3–22, 2008
- [20] P. Millet et. al., Electrochemical performance of PEM water electrolysis cells and perspectives, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 36, pp. 4134-4142, 2011
- [21] 固体高分子形燃料電池の目標・研究開発課題と評価方法の提案, 燃料電池実用化推進協議会, H23 年 1 月, http://fccj.jp/pdf/23_01_kt.pdf (accessed 20 June, 2018)
- [22] Qi Feng et. al., A review of proton exchange membrane water electrolysis on degradation mechanisms and mitigation strategies, J. Power Sources, Vol. 366, pp.33-35, 2017
- [23] P. Millet et. al., Cell failure mechanisms in PEM water electrolyzers, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 37, pp. 17478-17487, 2012
-

安全・大容量な電力貯蔵を目指して：固体酸化物形鉄-空気二次電池

Towards Safe and Large-capacity Electric Power Storage: Solid Oxide Iron-Air Battery

岩井 裕（京都大学），塚本 壽（CONNEX SYSTEMS 株式会社）

Hiroshi IWAI (Kyoto University), Hisashi TSUKAMOTO (CONNEX SYSTEMS Corp.)

e-mail: iwai.hiroshi.4x@kyoto-u.ac.jp, hisashi@connexsys.com

1. はじめに

再生可能エネルギーの導入が進められている．国内でも固定価格買取制度に関して“再生可能エネルギー特別措置法の一部を改定する法律”（改定 FIT 法）が施行され，再生可能エネルギー導入は今後さらに進んでいくと予想される．太陽光発電や風力発電は時間変動が大きいので，システムの安定化のためにも大容量の電力貯蔵システムが必要である．それにともない従来の蓄電池よりもエネルギー密度，エネルギー効率，コスト，安全性などについて飛躍的に向上した次世代の蓄電技術がもてめられている．NEDO 二次電池技術開発ロードマップ 2013 では，リチウムイオン電池を含む既存の電池系を超えるエネルギー密度を有する“革新電池”の例として，金属-空気電池，リチウム硫黄電池，金属負極電池等を挙げている．

本稿で取り上げる固体酸化物形鉄-空気電池（Solid Oxide Iron-air Battery: SOIAB）は，可逆作動が可能な固体酸化物形電気化学セル（Solid Oxide Electrochemical Cell: SOEC）と鉄の酸化還元反応を組み合わせる二次電池で，鉄-空気電池の一種と考えられる．従来の鉄-空気電池と比べ，構造，動作原理，作動温度などが大きく異なる新しい二次電池である．以下ではまず SOIAB の概要を説明したうえで，著者らの取り組みを中心に紹介する．

2. 固体酸化物形鉄-空気二次電池

2.1 金属（鉄）-空気電池

金属-空気電池は，金属の活物質を負極とし，正極では空気中の酸素を活物質として利用する電池である．負極側活物質としては亜鉛，アルミニウム，マグネシウム，鉄，リチウム等が挙げられる．空気中の酸素を利用するため正極側活物質を容器内に貯蔵する必要がなく，電池のエネルギー密度を大きくすることができる．理論エネルギー

密度がリチウムイオン電池のそれより高いため注目を集めている．

負極活物質として鉄を使用するのが鉄-空気電池である．通常は KOH などのアルカリ電解質を用いる．歴史は古く，1968 年ごろに NASA およびスウェーデンで関連研究が始まったとされている[1, 2]．すでに半世紀の検討を経たうえで，近年，再注目されているのは，鉄ナノ粒子を利用したナノ構造電極の性能向上と，コスト面での優位性への期待からである．

2.2 SOIAB：新型鉄-空気二次電池

SOIAB は可逆作動が可能な SOEC と鉄の酸化還元反応を組み合わせる[3-5]．確認できた範囲では 1996 年ウェスチングハウス・エレクトリック社による特許[6]がもっとも古い．学術誌への掲載としては，実験的な概念実証を行った 2011 年の Xu ら[3]の報告が初出である．

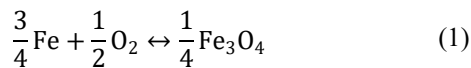
最もシンプルな SOIAB の構成を図 1 に示し，その作動原理を以下に説明する．充放電反応をになう SOEC（セル）と，充電時の水蒸気生成または放電時の水素生成をになう鉄（酸化鉄）の 2 つが主な構成要素であり，両者の間を水素-水蒸気混合ガスが満たす．鉄は表面積拡大のため，多孔質体を想定することが多い．図 2 のポテンシャル図のとおり，鉄は温度と酸素分圧に応じて Fe, FeO (wustite), Fe₃O₄ (magnetite)または Fe₂O₃ (hematite) となりうる．図中には参考のため 600℃の水素-水蒸気系において水蒸気が 15%, 40%の時の平衡酸素分圧も示した．作動条件によって FeO 生成の可能性もあるが，以下では簡単のため主反応として Fe-Fe₃O₄ 間の酸化還元反応を考える．

図 1 (a)の放電時にはセルは燃料電池モードで作動する．図中の反応式のとおり，空気極と燃料極ではそれぞれ酸素と水素が消費される．燃料極側

では水蒸気が生成される結果、容器内の水蒸気分圧が上昇する。これにより鉄側の平衡が動き、鉄が水蒸気により酸化される過程で水素が生成される。生成した水素はさらなる発電反応に供される。すべての鉄が酸化されると完全放電の状態である。セルでの発電反応、鉄の酸化反応ともに発熱反応である。

図 1 (b)の充電時にはセルは電解モードで作動し、反応は放電時と逆方向へ進行する。水蒸気の電気分解により容器内の水素分圧が上昇し、これにより酸化鉄が還元され、その過程で水蒸気が生成される。生成された水蒸気はさらなる電気分解に供される。すべての鉄が還元され切ると完全充電状態である。セルでの水蒸気電解、鉄の還元反応ともに吸熱反応である。

SOEC だけに注目すると水素燃料での発電ないし水蒸気電解であるが、系全体での反応は式(1)に示す鉄の酸化還元反応である。



従来の鉄-空気電池とは様々な点で異なるが、筆者らは次の 2 点が特に重要と考える。まず、作動温度が高い（600～800℃）。そのため電極反応の活性も高いが、あまりに高温だと鉄多孔質体の焼結が進み劣化につながる恐れがある。SOEC の性能を犠牲にせずに作動温度を低下させることができれば望ましい。反応による熱の出入りも大きいので、熱管理・温度管理が重要な電池である。次に、エネルギー貯蔵をになう鉄は電極ではなく、物理的にも電極から切り離されている。そのため鉄の酸化還元に伴う体積変化によって、電極が破壊される恐れがないうえ、単位面積の電極がになう鉄の量は任意に設計ができる。またこの特徴により、電池構成としては図 1 のような一体型構成のほかに、図 3 のように鉄多孔質を含む容器と SOEC を別置きとするフロー型も可能である。水素-水蒸気混合ガスを循環させる機構が必要となりシステムは複雑化するが、SOEC での電気化学反応と鉄の酸化還元反応それぞれに適した作動温度を設定できることが利点である。

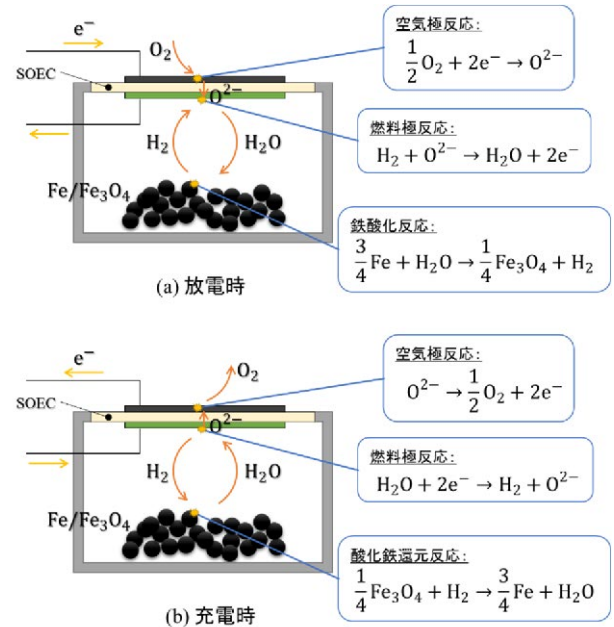


図 1 SOIAB の動作原理。

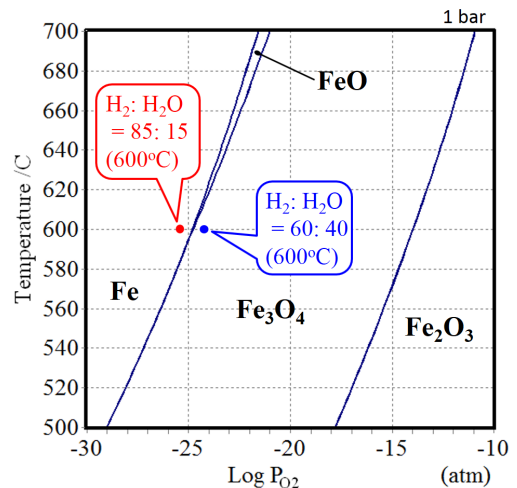


図 2 酸化鉄のポテンシャル図。

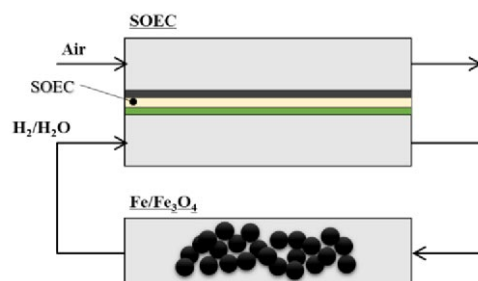


図 3 フロー型 SOIAB。

3. 基礎特性の解明へ向けて

SOIAB は新しい二次電池であり、その特性の理解や課題の明確化がここ数年で進んでいる。以下では、エネルギー密度と効率、単セル充放電、要素研究の順に紹介する。

3.1 エネルギー密度と効率

図4にリチウムイオン電池、従来型金属-空気電池としてリチウム-空気電池と鉄-空気電池、さらに SOIAB の重量あたりおよび体積あたりの理論容量を示す。ここで理論容量は活物質のみを考慮し、電解質・セパレータ・容器等による容量低下は無視した理論限界値であることに注意されたい。なおリチウムイオン電池は正極活物質にコバルト酸リチウム (LiCoO_2)、負極に黒鉛をもちいた場合の理論性能をあらわしている。金属-空気電池は酸化還元反応によって生じる金属酸化物（または水酸化物）の物性値をもとに理論性能を計算した。ここでリチウム-空気電池は過酸化リチウム (Li_2O_2)、鉄-空気電池は水酸化鉄 ($\text{Fe}(\text{OH})_2$)、SOIAB は四酸化三鉄 (Fe_3O_4) を金属酸化物または水酸化物とした。図からリチウムイオン電池は二つの図において左上に位置し理論エネルギー密度はそれぞれ 388 Wh/kg , 1010 Wh/L である[8]。それに比して金属-空気電池のエネルギー密度は重量比、体積比ともに高いことがわかる。SOIAB の理論エネルギー密度はそれぞれ 926 Wh/kg , 4780 Wh/L であり、リチウムイオン電池に比して重量あたりで 2.4 倍、体積あたりで 4.7 倍、従来型の鉄-空気電池と比べると重量あたりで 1.2 倍、体積あたりで 1.8 倍である。

二次電池の一義的な目的は電力貯蔵なので、効率評価としては放電電力量 W_d と充電電力量 W_c の比である次の充放電効率が重要である。

$$\eta_b = \frac{W_d}{W_c} \quad (2)$$

SOIAB の主な損失は SOEC での過電圧や IR 損失である。Xu らはマイクロチューブ型 SOEC 単セルを使用し、20 回の安定した充放電サイクルで平均充放電効率 91.5% を報告した[3]。

SOEC での電気化学反応と、鉄の酸化還元反応はともに大きな熱の出入りをともなう。充電時

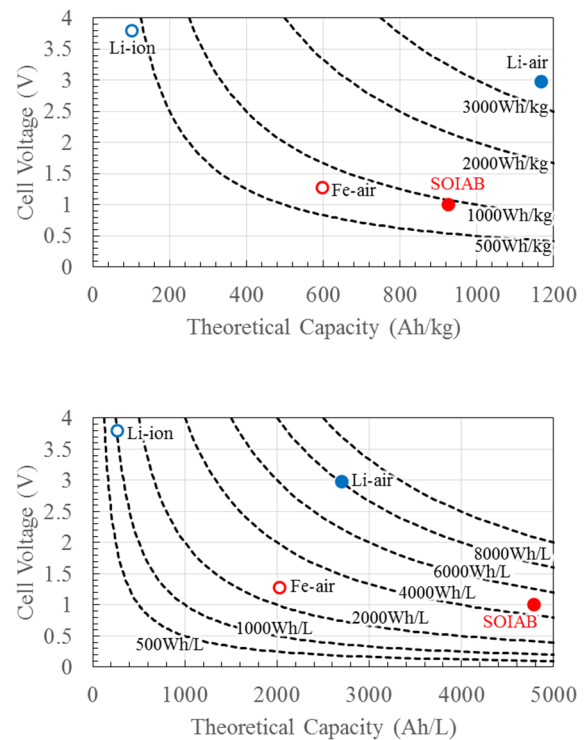


図4 金属-空気電池の理論性能（林ら[7]と Bruce ら[8]を参考に著者らが作成）。

はともに吸熱、発電時はともに発熱である。損失のない理想的な SOEC ($\eta_b = 1$) を仮定すると、作動温度 600°C として、両反応による吸(発)熱は充(放)電量の 38% にも達する。適切な作動温度を維持するため、放電時には除熱が、充電時には熱供給がそれぞれ必要である。システムへの熱供給を考慮してエネルギー効率を次式で考えると

$$\eta_{sb} = \frac{W_d}{W_c + Q_{\text{input}}} \quad (3)$$

損失のない理想的な SOEC を仮定しても η_{sb} は 73% にとどまる[9]。システムから排出された熱を再利用することでエネルギー効率向上を図ることは自然な発想であろう。Jin らは蓄熱型熱交換器を組み込み、放電時の排出熱を充電時に利用する場合のシステム解析から 80% を超えるエネルギー効率を予測した[10]。電力に比して熱のインプットの割合が高くなることは、高温水蒸気電解の利点として説明されることも多いが、熱源の確保が

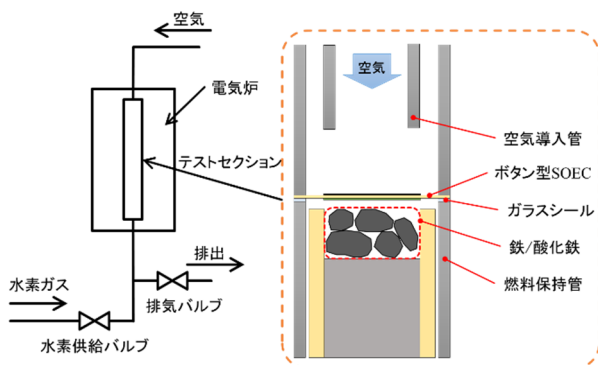


図5 ボタンセル試験装置.

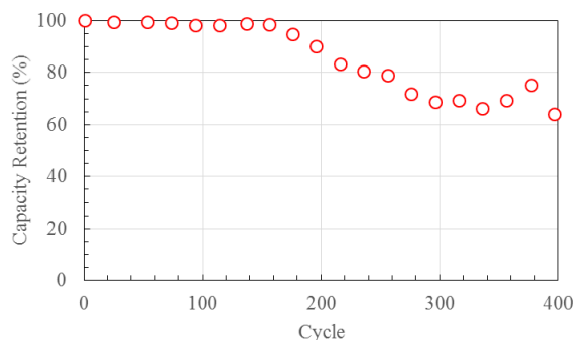


図6 サイクル実験結果: 容量維持率の推移.

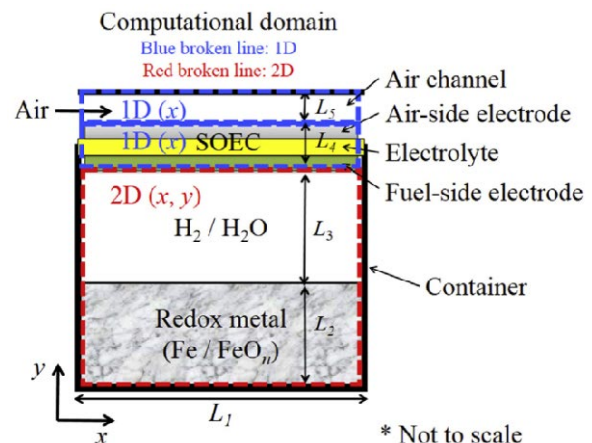
前提となる. Jin らの解析は, SOIAB における高温熱源への要求が, 高温蓄熱器と組み合わせることと無理なく緩和できることを示している.

3.2 単セル充放電特性

3.2.1 小型セル実験

直径 2cm の小型 SOEC を用いて SOIAB を構築し充放電性能を評価する試験を実施した. 図 5 に試験装置の概略図をしめす. SOEC 燃料極側には鉄/酸化鉄を配置し, ガラスシールによって封止した. 水素ガスを外部から供給して, SOEC 燃料極と鉄/酸化鉄を還元したうえでバルブを閉じ初期状態とした. 電気炉により温度を一定に保持した.

図 6 は 700℃, 電流密度 81 mA/cm², 平均 50% 程度の放電深度 (初期容量と放電量の比) で充放電サイクルをおこなったときの約 20 サイクル毎の容量維持率である. 容量維持率は初期容量を基


 図7 SOIAB 単セル解析モデル
($L_1 = 100, L_3 = 10, L_4 = 1.0, L_5 = 2.0$ mm).

準とした放電容量をあらわしている. 20 サイクル毎の容量確認放電は電流密度 41 mA/cm² で実施した. 160 サイクルまではほぼ 100%であった容量維持率は, その後徐々に低下し, 400 サイクルで 64%となった. Leonide ら[11]は平板型 SOEC 単セルによるさらに長期の充放電サイクル試験をおこなっており, 10000 サイクルにて初期容量の 40%以上の放電容量を維持したと報告している. 容量低下の詳細な原因は明らかにされていないが, セル, 鉄/酸化鉄, セパレータの劣化を挙げている. 図 6 の実験は約 2 ヶ月にわたり実施されたが, 実験前後で SOEC の性能にはほとんど変化がなかった. 容量低下の要因としては, 鉄/酸化鉄の酸化還元を繰り返すによる構造変化や, 高温雰囲気での焼結が疑われる. しかし 160 サイクル前後の傾向の変化など詳細は不明であり, 内部現象の解明が必要である.

3.2.2 数値モデルによる単セル特性予測

単セルを図 7 のようにモデル化し非定常 2 次元数値解析を行った[12]. 空気流と SOEC は x 方向 1 次元で, 容器内は 2 次元でそれぞれ扱った. 容器底部には鉄多孔質体が設置されている. SOEC において電流はセル厚さ方向のみに流れるものとし, 局所の温度・ガス分圧から Nernst の式で起電力を見積もり, 繰り返し計算により電流密度や各種損失の分布を得る. 鉄の粉末に対して熱重量測定 (TG) による予備的な酸化還元実験を行い, 鉄反応速度の実験式を得て使用した. 酸化還元

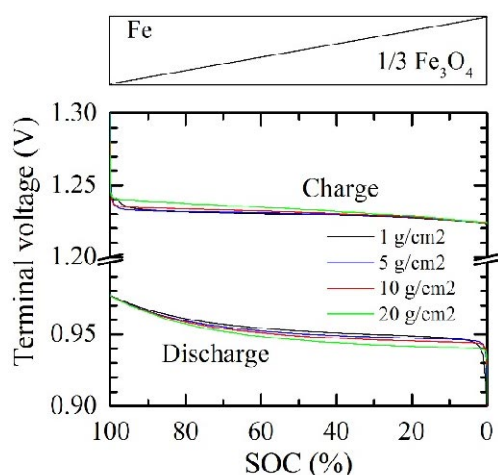


図8 充放電曲線の例，温度変化の影響含む。

よる鉄の体積変化の影響を空隙率の変化として考慮した．空隙の屈曲度ファクターも簡易的ではあるが空隙率の逆数としてモデル化した．充放電の過程で平均電流密度を 200 mA/cm^2 で一定とした．電極単位面積当たりの鉄量を $1 \sim 20 \text{ g/cm}^2$ で変更した． 1 g/cm^2 は鉄の深さ L_4 が 4.2 mm に相当する．

完全充電 (State of charge: SOC = 100 %) の状態からの放電過程と，完全放電 (SOC = 0 %) の状態からの充電過程の端子電圧の推移を図8に示す．平均電流密度は一定なので，鉄の量に応じて絶対値は異なるものの横軸は経過時間に比例する． 1 g/cm^2 の発電時間は約 6.5 時間であった (0.15 C) ．

図8中の条件では，端子電圧は充放電それぞれの過程の最終盤で急激な変化を示すものの，

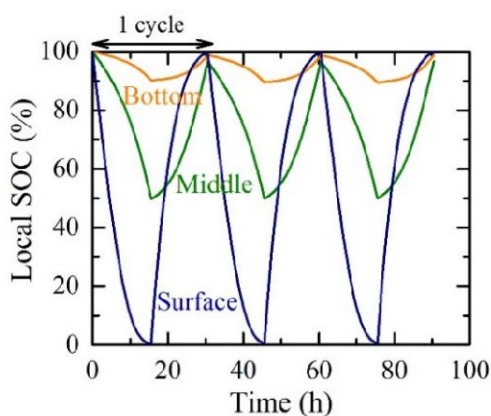


図9 局所 SOC の時間変化，
(5 g/cm^2 ， $L_2 = 21 \text{ mm}$) ．

それ以外ではおおむね一定であり，鉄の酸化還元反応が SOEC での充電・放電反応に十分追従している．ただし鉄の反応は一樣に進行しているわけではない．

SOC = 100% を初期状態とし，その後 SOC = 50% と 98% の間で 3 回の充放電サイクルを行った場合の，鉄多孔質部内の局所 SOC の変化を図9に示す．モニター点はセル中央位置 ($x/L_1 = 0.5$) での鉄多孔質表面，中央，底部の 3 点である．局所 SOC の y 方向非均一の程度は著しく，底部付近の鉄はほとんど貢献していない一方で，表面の鉄は酷使されている．計算では考慮していないが，鉄の劣化が局所で進行する恐れがある．

解析精度の向上には，実際の多孔質微構造およびその変化を評価して反映することや，予想される実システムに合わせて，ペレット状態の鉄の酸化還元反応の評価が必要である．

3.3 要素研究

3.3.1 酸化鉄ペレットの還元実験

鉄の形態としては鉄粉やスチールウール等の選択肢もあるが，高密度と高比表面積の両立や扱いやすさの点で，ペレットは有力な候補である．反応性向上のためには小粒子径で比表面積を大きくしたいが，それは同時にガス拡散を阻害する．酸化還元時の体積変化が多孔質構造にも影響を与える複雑な系でもある．以下は鉄多孔質体の設計法の確立をめざした，酸化鉄ペレット還元の基本実験の結果である[13]．

粒子呼び径がそれぞれ $90, 700 \text{ nm}$ の 2 種類の Fe_2O_3 粉末 (BAYFERROX 110M, 180M, LANXESS 社) を 500°C に保ちつつ水素を供給していったん Fe まで還元したのち，水蒸気で酸化させることで Fe_3O_4 粉末を得た．これをプレス成形して直径 10 mm ，厚さ 3 mm のペレットとした (図10参照)．管状電気炉内に作ったテストセクション流路に，ペレット片側表面のみが供給ガスに曝されるように設置した．電気炉温度と水素濃度を変更して還元実験を行い，排出ガス組成の時間変化を質量分析計で取得した．

ペレットの還元過程が準定常 1 次元でかつ圧力も一樣と仮定し，反応領域が厚さ方向に移動するものとしてモデル化した．表面から深さ X の位置

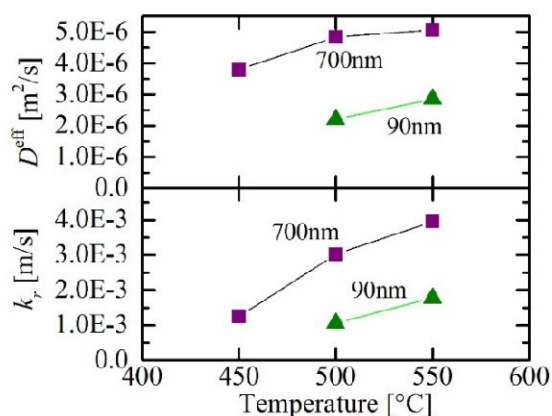

 図 10 Fe_2O_3 粉末と Fe_3O_4 ペレット.


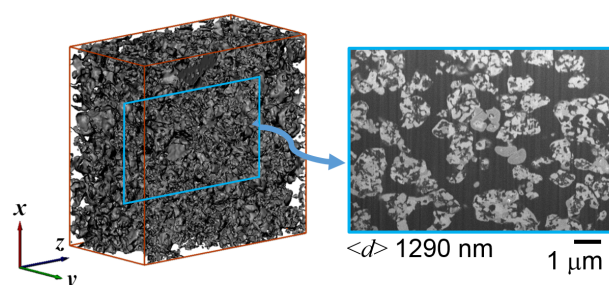
図 11 鉄多孔質の有効拡散係数と反応速度定数.

にある反応部での水素濃度を $C_{\text{H}_2, x}$, 反応速度定数を k_r として面積当たりの水素消費率を $\dot{n}_{\text{H}_2} = k_r C_{\text{H}_2, x}$ で表し, さらに酸化鉄消費, ガス拡散, および水素と酸化鉄の消費量の関係を考慮すると次式が得られる.

$$t = \frac{2\rho_M X}{C_{\text{H}_2}} \left(\frac{X}{D^{\text{eff}}} + \frac{2}{k_r} \right) \quad (4)$$

ρ_M , D^{eff} , C_{H_2} はそれぞれ Fe_3O_4 のモル密度, 有効拡散係数, ペレット表面での水素濃度である. これを排出ガスの時系列データにフィットすることで有効拡散係数と反応速度定数を見積もったのが図 11 である. 粒子径が大きい場合に有効拡散係数も反応速度定数も値が大きくなる傾向が見られる.

実験後に鉄多孔質体を取り出し, 空気によって再酸化しないように直ちに樹脂を真空含浸したうえで, その微構造を FIB-SEM を用いて観察し


 図 12 FIB-SEM による再構築構造と断面 SEM 画像 (500°C 還元後の粒子呼び径 700 nm のペレット, 左図: $11.9 \times 6.7 \times 12.5 \mu\text{m}$) .

再構築した例を図 12 に示す. 2 次元断面画像も抽出し併せて示した. 再構築構造から Line-intercept 法で平均空隙径を評価したところ, 粒子呼び径 90 nm, 700 nm についてそれぞれ 276 nm, 1290 nm であった. 前者のペレットで Kn 拡散の影響が強く, 図 11 中の有効拡散係数の値が比較的低いことに影響していると考えられる. 2 次元画像を見ると, 酸化状態ではほとんど見られない粒子内部の微細空隙が多数観察される. 内部に樹脂が含浸されていることから, これらは孤立相ではなく連結相である. 同様の微細空隙は 90 nm のペレットでは観察されなかった. 粒子内微細空隙のような 100 nm 程度以下の構造についてはこれまでの FIB-SEM 観察で捉え切れておらず, 空間解像度への要求が高い微構造パラメータ (例えば屈曲度ファクター) [14]については今のところ十分な評価に至っていない.

反応速度定数については, 比表面積が大きくなる小粒子径で高くなると予想されたが, 逆の結果が得られた. 上述の粒子内微細空隙の形成により比表面積が増大したことは, 粒子呼び径が大きいペレットで高い反応速度定数が得られた一因と考えられる. 構造及びその変化の過程, 構造と拡散・反応性との相関, Kn 拡散による全圧勾配の形成とその影響などの現象解明を進めることが必要である. 同時に, 鉄粒子のコーティングや酸化物との複合化[15], ガス拡散パスを有するペレットの設計といった工業的な工夫も可能であろう.

3.3.2 SOEC の高出力密度化あるいは低温化

作動温度の低下は鉄および SOEC の耐久性の向上につながる. SOIAB に限らず, 低コスト化・高耐久化をめざす SOFC にとっても重要な課題であ

り、従来から活発な検討が行われてきた。低温化のためには電解質の薄膜化は必須であり、近年では $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の極薄電解質も広まってきた。相対的に電極での損失抑制が重要度を増している。電極反応が電解質-電極界面で生じると仮定して電解質と電極の比面積抵抗の比を計算すると、1 より大幅に小さくなる条件は珍しくない[16]。伝熱問題でのピオ数と同じで、このような条件では界面面積拡大が有効である。ただし多孔質電極の場合は反応領域が電極厚さ方向に非一様に広がり、現象はより複雑である。ヘテロな多孔質中のイオン、電子、ガス輸送および反応といったさらなる詳細の理解が必要である。

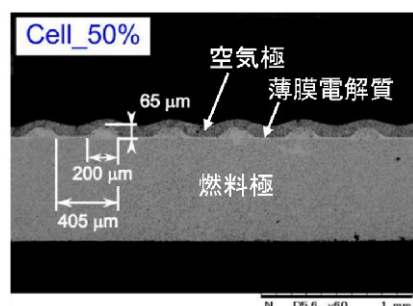


図 13 薄膜電解質の形状制御で反応領域を拡大した燃料極支持型セル。

図 13 は燃料極支持型セルにおいて厚さ約 $6\text{ }\mu\text{m}$ の薄膜電解質に凹凸形状を与え、両電極との界面を拡大した例である。通常の平坦セルに比して出力密度が 65%増加した[17]。同一出力密度で比較すれば、平坦セルよりも作動温度を低くすることができる。

4. おわりに

鉄の酸化（錆・腐食）は抑制すべき問題として負のイメージも強いが、積極的な利用は少くない。酸化時の熱エネルギーを利用する使い切りタイプのカイロは最も身近な例であろう[18]。水蒸気で酸化することで水素供給が可能であることから、水素キャリアとしても注目されている[19]。さらに反応の可逆性に注目して、水素圧縮への応用の検討などもある[20]。本稿で紹介した SOIAB は酸素イオン伝導体を電解質とする SOEC と鉄の酸化還元を組み合わせることで電力貯蔵を可能としたものである。反応熱に注目すれば蓄熱装置

にもなっている。現状では SOEC 側の高出力密度化・低温化といった固体酸化物形燃料電池(SOFC)と共通する課題のほか、体積変化と大きな吸発熱を伴う鉄の酸化還元反応については、鉄多孔質の微構造・内部拡散・反応速度の相関といった特有の課題もある。電極・鉄いずれも反応を伴う多孔質内の熱・物質・電荷輸送が肝であり、性能向上や劣化抑制のための様々な提案がなされているが、適切な作動温度、鉄粒子径および設置方法など不明な点が多々あり、今後の知見の蓄積が必要である。

謝辞

本稿の一部は JST 研究成果展開事業研究成果最適展開プログラム(A-STEP)戦略テーマ重点タイプにおける成果である。

参考文献

- [1] Carlsson, L., and Ojefors, L., Bifunctional air electrode for metal-air batteries, *J. Electrochem. Soc.* **127** (1980) 525.
- [2] McKerracher, R. D., de Leon, C. P., Wills, R. G. A., Shah, A. A., Walsh, F. C., A Review of the Iron-Air Secondary Battery for Energy Storage, *ChemPlusChem*, **80** (2015) 323.
- [3] Xu, N., Li, X., Zhao, X., Goodenough, J. B., Huang, K., A novel solid oxide redox flow battery for grid energy storage, *Energy Environ. Sci.* **4** (2011) 4942.
- [4] Ohmori, H., Uratani, S., Iwai, H., Numerical Simulation of Gas Diffusion Effects on Charge/Discharge Characteristics of a Solid Oxide Redox Flow Battery, *J. Power Sources*, **208** (2012) 383.
- [5] Inoishi, A., Ida, S., Uratani, S., Okano, T., Ishihara, T., High capacity of an Fe-air rechargeable battery using LaGaO_3 -based oxide ion conductor as an electrolyte, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **14** (2012) 12818.
- [6] Isenberg, A. O. and Ruka, R. J., Electrochemical energy conversion and storage system (米国特許 US5492777 (A)) (1996).
- [7] 林政彦, 正代尊久, 金属-空気二次電池の現状と展望, 電気化学および工業物理化学,

- 78-6 (2010) 529.
- [8] Bruce, P. G., Freunberger, S. A., Hardwick, L. J., Tarascon, J.-M., Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage, *Nat. Mater.* **11** (2011) 19.
- [9] Ohmori, H., Iwai, H., Itakura, K., Saito, M., Yoshida, H., Numerical prediction of system round-trip efficiency and feasible operation conditions of small-scale solid oxide iron-air battery, *J. Power Sources* **309** (2016) 160.
- [10] Jin, X., Zhao, X., Tong, J., Yasmeen, F., White, R. E., Huang, K., Energy efficiency of an intermediate-temperature solid oxide iron-air redox battery, *J. Energy Storage*. **3** (2015) 1–9.
- [11] Leonide, A., Drenckhahn, W., Greiner, H., Landes, H., Long term operation of rechargeable high temperature solid oxide batteries, *J. Electrochem. Soc.* **161** (2014) A1297.
- [12] Ohmori, H. and Iwai, H., Simulation of solid oxide iron-air battery: effects of heat and mass transfer on charge/discharge characteristics, *J. Power Sources* **286** (2015) 264.
- [13] Iwai, H., Itakura, K., Saito, M., Kishimoto, M., Yoshida, H., Experimental Study on Reduction of Porous Iron Oxide for Solid Oxide Iron-Air Battery, 1st Asian Conference on Thermal Sciences (2017) P00358.
- [14] Iwai, H., Shikazono, N., Matsui, T., Teshima, T., Kishimoto, M., Kishida, R., Hayashi, D., Matsuzaki, K., Kanno, D., Saito, M., Muroyama, H., Eguchi, K., Kasagi, N., Yoshida, H., Quantification of SOFC Anode Microstructure Based on Dual Beam FIB-SEM Technique, *J. Power Sources* **195** (2010) 955.
- [15] Berger, C. M., Tokariev, O., Orzessek, P., Hospach, A., Fang, Q., Bram, M., Quadackers, W. J., Menzler, N. H., Buchkremer, H. P., Development of storage materials for high-temperature rechargeable oxide batteries, *J. Energy Storage*. **1** (2015) 54–64.
- [16] Konno, A., Iwai, H., Inuyama, K., Kuroyanagi, A., Saito, M., Yoshida, H., Kodani, K., Yoshikata, K., Mesoscale-structure control at anode/electrolyte interface in solid oxide fuel cell, *J. Power Sources* **196** (2011) 98.
- [17] 徐海元, 岩井裕, 岸本将史, 齋藤元浩, 吉田英生, Fundamental study on micro-extrusion printing for enlarging anode/electrolyte interface in anode-supported solid oxide fuel cells, 第55回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2018), P1426.
- [18] 村田圭治, 荒賀浩一, 小松幸雄, 鉄粉酸化反応層の熱特性に関する研究, 日本機械学会論文集 **82-844** (2016).
- [19] Otsuka, K., Kaburagi, T., Yamada, C., Takenaka, S., Chemical storage of hydrogen by modified iron oxides, *J. Power Sources* **122** (2003) 111.
- [20] 鬼頭毅, 大坂侑吾, 横田剛志, 小林敬幸, 盛興昌勝, 梅田良人, 水素の化学的圧縮技術における酸化鉄の水素還元プロセスの速度論的評価, エネルギー・資源学会論文誌 **33-2** (2012) 10.

ニュートンの冷却法則（その 2）ニュートンの温度スケールについての考察

Newton's Law of Cooling, Part 2, Consideration on Newton's Temperature Scale

圓山 重直（八戸高専）、守谷 修一、岡島 淳之介（東北大）

*Shigenao MARUYAMA (Hachinohe College, NIT), Shuichi MORIYA, Junnosuke OKAJIMA (Tohoku Univ.)**e-mail: maruyama-o@hachinohe-ct.ac.jp*

1. はじめに

前報[1]では、アイザック・ニュートン（1642-1727）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)」[2]と当時の熱科学の実情について述べました。ニュートンの 6 頁のラテン語論文は、半分が温度と物理現象を記述した表で占められています。伝熱学会の諸氏になじみ深いニュートンの冷却法則は、ほんの一部で触れられているにすぎません。

前報[1]では、金属の融点など 100°C より高温の温度記述について考察しましたが、ニュートンは 100°C 以下の温度についても詳細に観察しています。本報では、100°C 以下の低温領域の温度スケールについて考察し、当時の気象と現在の地球温暖化にも触れてみたいと思います。

2. ニュートンの温度スケール

18 世紀では、温度を測ること自体が重要な科学でした。華氏温度を確立したファーレンハイト（1684-1736）[3] や 摂氏温度のセルシウス（1701-1744）以前に、ニュートンも温度計測に興味を持ち、この論文[2]を書いたようです。

表 1 は、水の沸騰温度以下の温度と物理現象についての英語訳[4]を転載したものです。表中にはニュートンの温度（°N）と共に、2 種類の推定温度（°C）も記してあります。

温度計測には基準となる温度定点が必要ですが、ニュートンは、当時比較的良好に使われた水が凍る温度（0°N）と体温（12°N）を基準として温度目盛りを作っています。ニュートンの論文では、この温度を等分温度（Equal Part of Heat）としか記述していませんが、本報では、ニュートン度（°N）として定義します。Grigull は、この基準点を 0°C と 37°C とし、ニュートン温度を次式で定義し

ました[5]。他の研究者も、体温を 37°C とし、ニュートンの温度を評価しています[6]。その定義でニュートン温度を評価すると、ニュートン度は次式で定義できます。

$$T [^{\circ}\text{C}] = \frac{37}{12} T [^{\circ}\text{N}] \quad (1)$$

この定義の換算温度（°C）を表 1 に示しています。いくつかの矛盾点が見いだされます。

まず、表の記述では 33°N で水が沸騰し始めると記述されています。式(1)による評価温度は 101.7°C で水の沸騰点とあまり矛盾しないように思われます。しかし、鍋に水を入れて沸騰させるとき、鍋底から気泡が出て、他の水はサブクール状態で 100°C 以下の場合が多いのです。水が 100°C となる場合は、1 気圧下で鍋の水が激しく沸騰し、蒸気と水が平衡状態に達したときに限ります。

表 1 中 No.13 では水が激しく沸騰していますが、この温度は 34°N で、式(1)の換算温度では 104.8°C となり、メモリ間隔が約 3°C のニュートン温度でも誤差が大きすぎます。

もし温度基準がずれているとすると、どの基準温度が異なっているのでしょうか。まず、水が凍る温度ですが、「雪を砕いて温度計を入れ、雪が溶ける」温度としていますので、空気と氷、水が共存する温度である 0°C をある程度正確に計っていると考えられます。当時、空気汚染はあまりなかったと考えられますから、ニュートンがこの実験を行ったケンブリッジでは、雪はほぼ純水と考えても良いのではないのでしょうか。現在、都市部に降る雪は、空気中の汚染物質を吸着してとても汚いので、都市部の雪を直接食べないことを勧めます。

次の温度定点は、「ヒトが温度計に触れたときに示す最高温度」です。ヒトの最高温度は体内の

表1 ニュートンの温度(°N)とその記述[4]

表中*のついているものは、No.13 より引用した温度とその記述を示す。

No.	Descriptions and Degrees of Heats [4]	Equal parts of heat, Newton's Temperature (°N)	Equivalent Celcius' Temperature Eq(1), (°C)	Equivalent Celcius' Temperature Eq(2), (°C)
1	Heat of the air in winter when water begins to freeze. This heat is determined accurately by placing the thermometer in crushed snow when it is thawing.	0	0.0	0.0
2	Heats of the air in winter.	0, 1, 2	0, 3.1, 6.2	0.0, 2.9, 5.9
3	Heats of the air in spring and in autumn.	2, 3, 4	6.2, 9.3, 12.3	5.9, 8.8, 11.8
4	Heats of the air in summer.	4, 5, 6	12.3, 15.4, 18.5	11.8, 14.7, 17.6
5	Heats of the air at midday about the month of July.	6	18.5	17.6
6	Greatest heat which the thermometer reaches in contact with the human body. This is approximately the same as the heat of a bird hatching its eggs.	12	37.0	35.3
7	Heat of a bath near the maximum which one can bear for a considerable time with the hand immersed and constantly moving. This is about the same as that of blood freshly drawn.	14.27	44.0	42.0
8	Greatest heat of a bath which one can bear for a long time with the hand immersed and remaining immobile.	17	52.4	50.0
9	Heat of a bath at which molten wax floating on it begins to solidify and lose its transparency.	20.18	62.2	59.4
10	Heat of a bath in which floating wax, on becoming hot, melts, and is kept liquid continuously without boiling.	24	74.0	70.6
11	Heat intermediate between that at which wax melts and that at which water boils.	28.55	88.0	84.0
12*	Water begins to boil at a heat of 33 degrees	33	101.8	97.1
13	Heat at which water boils vigorously, and a mixture of two parts of lead, three parts of tin and five parts of bismuth on cooling solidifies. Water begins to boil at a heat of 33 degrees and on boiling barely reaches more than 34 1/2 degrees. Iron, as it cools to 35 or 36 degrees of heat, ceases to cause any boiling when hot water is dropped upon it; the same if the iron is of 37 degrees of heat and cold water is dropped upon it.	34	104.8	100.0
14*	and (water) on boiling barely reaches more than 34 1/2 degrees.	34.5	106.4	101.5
15*	Iron, as it cools to 35 or 36 degrees of heat, ceases to cause any boiling when hot water is dropped upon it; the same if the iron is of 37 degrees of heat and cold water is dropped upon it.	35, 36, 37.	107.9, 111.0, 114.1	102.9, 105.9, 108.8

深部温度で、一日の内に変動しますが、ほぼ 37°C で一定とされています。この温度を測るときには、直腸温度で計測することが多いので、当時の温度計を直腸に入れることは考えにくいと思われます。口腔内温度では 35.2°C~37.3°C の値となると言われています[7]。現在の体温は脇の下に体温計を挟み測定することが多いですが、亜麻仁油を使った

ニュートンの温度計は、温度を測る油溜の直径が 38~51 mm だと言われているので[8]、これを脇の下に挟むことが出来たかどうかはかなり疑問です。

表1中のNo.13にある34°Nを水の沸点と仮定すると、ニュートンの温度定点である、12°Nは35.3°Cとなり、一般の体温に比べかなり低くなりますが、温度計を手で触り、一定温度にした温度

と考えると納得もいきます。34 °N を 100°C とすると、後で記述するように、その他の温度も比較的矛盾なく説明できます。

体温を修正した新たな温度定義は次式で表され、その値も表 1 に示しています。

$$T[^\circ\text{C}] = \frac{100}{34} T[^\circ\text{N}] \quad (2)$$

次項で述べるように、筆者らは、ガス加熱による水の沸騰実験を行いました。水が激しく沸騰した時は、温度計はほぼ 100°C を示しましたが、鍋の底から蒸気気泡が出始めるときの温度は、97°C 程度で、式(2)の温度定義と矛盾しませんでした。

ここで注意したいのは No.12~14 の温度は、液体の水の温度であり、沸騰実験で計測される壁面温度ではないことです。

壁面温度の実験は、熱した鉄塊に水を滴下した No.15 の温度で示されています。滴下した水の温度は大まかな記述しか在りませんが、後述するように、この温度も式(2)の定義で矛盾しません。

3. ニュートン温度と物理現象

筆者は、テフロン加工したアルミ製鍋に 1 リットルの水道水を入れ、ガスコンロ加熱により十分沸騰させた後で、水温を下げてから沸騰実験を行いました。鍋底に気泡が出始めるのは、加熱速度にもよりますが、97~98°C で沸騰を開始しました。更に加熱を続け、気泡が激しく放出される状態の水温は、実験時の気圧の飽和蒸気圧と比較した温度差は +0.3°C であり、温度計の誤差範囲内で一致しました。

ニュートンの実験では、33 °N で沸騰が始まり、34 °N で激しく沸騰したとしています。式(2)による温度評価では、33 °N は 97.1°C であり、上記の観察結果と一致します。イギリスの水は一般的に硬水で、沸点が不純物で変化しているとも考えられますが、この変動は無視できるほど小さいと考えられます。

ニュートンは沸点が変動することを知っており [8]、No.14 で沸点は 34.5 °N 以上になることがあると記述しています。0.5 °N に相当する 1.5°C は沸点の変化は気圧変動で約 56hPa に相当し、気圧変動による沸点の変化とも矛盾しません。

以上の結果から、本報では式(2)によって評価し

た温度で、ニュートンの温度計測を評価します。

ニュートンは、高温計測に使用した、鉄ブロックに各種温度の水滴を垂らして沸騰実験を行い、No.15 の観察をしています。著者らも、ニュートンが使用したものと推定される鉄ブロックと同じ大きさの鋳鉄板に水滴を垂らして実験を行いました。鉄ブロックの表面温度は 102°C, 107°C, 114°C と設定し、滴下する水の温度は約 7°C の冷水および約 90°C の温水としました。

冷水を滴下したとき、鉄ブロックの表面温度が 102°C の時は、沸騰せず液滴を形成し、徐々に蒸発することが観察されました。107°C では、冷水温水共に核沸騰が確認されました。鉄ブロックが 114°C の場合、冷水温水にかかわらず 107°C の場合よりも激しく核沸騰が生じました。このことから、式(2)の温度評価の方が、実験結果を比較的良く記述している可能性があります。

No.7 では風呂の温度の記述があります。式(2)の評価では 42°C であり、日本の風呂の温度程度です。一般にヨーロッパ人は熱い風呂に入らないので、42°C でもかなり熱く感じたのではないのでしょうか。式(1)の評価だと、44°C となり、日本人でもかなりの高温です。No.7 の温度は、血が流れ出る温度とされています。これは、人間の血の温度と言うより、家畜の血の温度と考えられます。馬や羊の血液温度は、40 (牛) ~44°C (羊) とされており、血液流出時の温度低下を考慮すると、羊の血液温度と考えると矛盾しません。

No.8 は、腕をお湯に入れて動かさずに耐えられる最高温度としています。式(1)の評価による 52.4°C は、我慢できる温度より高いと考えられます。Silverman [5]は、日本の草津温泉は温度が高く最高で 57.8°C だとしています。現在、草津温泉の温度は湯もみにより湯温を 48°C に下げている、17 °N を 50°C と評価した方が妥当と考えられます。

因みに、1990 年代にテレビのバラエティ番組で使用された熱湯は、50°C 程度だったと言われています。式(1)の評価による 52.4°C は、我慢できる温度より高いと考えられるので、17°N は 52.4°C より 50°C と評価した方が良いのかもしれませんが、どちらにしても、50°C のお湯はとても熱く感じるもので、ニュートンは、この実験を召使いにさせたのではないのでしょうか。この召使いは、かなり我

慢強い人だったと想像されます。

次に No.9 と No.10 のワックス（蜜蝋）の融解実験を検証します。著者らは、ニュートンと同様にビーカー内に水と攪拌機を入れ、加熱しながら水に浮いた蜜蝋の融解を測定しました。しかし、条件により一定のデータが得られませんでした。

そこで、DSC (Differential Scanning Calorimetry, 島津製作所製 DSC-60Plus) を用い、国内で入手可能な 3 種類の精製蜜蝋の相変化を測定しました。その結果、平均 65.0°C で完全に融解し、61.2°C で凝固を開始しました。ワックスは多種の成分で構成され、成分もニュートン当時のものと異なると考えられます。しかし、ニュートンの実験でワックスの凝固が始まる温度 20.18 °N (59.4°C) と、著者らのデータが比較的良く一致していることは興味深いです。

4. ニュートン時代の気温と地球温暖化

ニュートンは、季節の温度を No.2~5 に記述しています。近年の月別最高・最低温度の 10 年間の平均と表 1 に示すニュートンの温度による季節の温度指標を図 1 に示します。

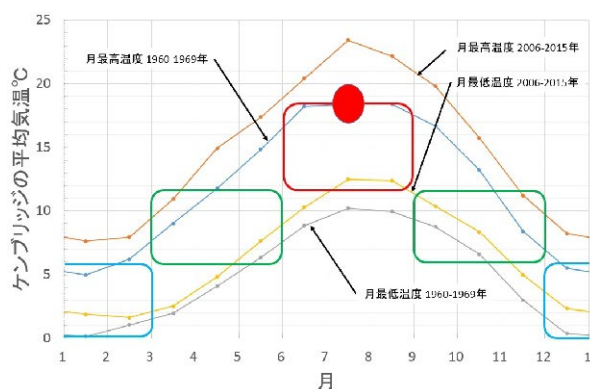


図 1 ケンブリッジにおける月別温度[9]とニュートンの四季温度の比較

図 1 は、英国ケンブリッジにおける気象データ[8]から作成した、近年（2006-2015 年）の月別平均最高温度と最低温度および、1990-1999 年の同様なデータを示しています。図中には、表 1 にニュートンが記述した四季の温度範囲と真夏の最高温度を示しています。ニュートンの記述では、四季に応じて温度範囲が示されているので、図 1 では、その範囲を四角で示しました。ニュートンの

夏季最高温度は、誤差を考慮して示しています。

ニュートンの時代は、産業革命による石炭の消費が始まっておらず、化石燃料の使用による人類起源の地球温暖化はなかったと考えられます。

1990 年代のケンブリッジの気温はニュートン時代と大きく変化がないようにも思われます。

一方、近年の月別最高・最低気温の平均は、明らかにニュートン時代に比べて高くなっていることがわかります。

ケンブリッジの高温化は、地球温暖化の影響なのか、都市部のヒートアイランドの影響なのかは、このデータのみでは確定的な結論は導くことができません。

しかし、ニュートンの時代に比べてケンブリッジ地域の温度が上昇していることが、ニュートンの論文から推定できることは、興味深いことだと思われま

5. おわりに

伝熱工学でなじみ深いニュートンの冷却法則が記載されている、ニュートンの論文について、ニュートンの温度尺度を検証してみました。0°C から水の沸点までの温度域では、34 °N を 100°C とすると、他の物理現象がほぼ説明できると考えられます。また、2006~2015 年の英国ケンブリッジの平均気温は、産業革命が始まる前のニュートンの時代より高かったと推定されます。

参考文献

- [1] 円山重直, ニュートンの冷却法則(その 1), 伝熱, Vol. 54, No.229, pp.31-34, (2015).
- [2] “Scala graduum Caloris (A Scale of the Degrees of Heat)”, Philosophical Transactions, No. 270, pp. 824-829, (April 1701).
- [3] Grigull, U., Fahrenheit a Pioneer of Exact Thermometry, Proc. The Eighth International Heat Transfer Conference, San Francisco, Vol. 1, pp. 9-18, (1986).
- [4] “The Correspondence of Isaac Newton, Volume IV, 1664-1709”, Edited by J.F. Scott, Cambridge University Press, PP.357-365, (1967).
- [5] Grigull, U., “Newton’s Temperature Scale and the Law of Cooling,” Waerme und Stoffuebertrag, Vol. 18, pp.195-199, (1984).
- [6] Siliverman, M.P., Radiation, Conduction, and the

- Way Objects Cool: Newton's 'Hot Block' Experiment 300 Years Later, in A universe of Atoms, Springer, (2002).
- [7] Harmon, F.L., Evaluation of Oral Temperature Readings, Science, Vol. 118, pp. 719-720, (1953).
- [8] Simms, D. L., "Newton's Contribution to the Science of Heat", Annals of Science, Vol. 61, pp.33-77, (2004).
- [9] <https://www.metoffice.gov.uk/pub/data/weather/uk/climate/stationdata/cambridgedata.txt> (March 20, 2018).
-

人と熱の関わりの足跡（その2） ボイラ技術の展開 －高効率化への挑戦と破裂との戦い－

*Footprints of the relationship between humans and heat (Part 2):
Development in Boiler Technologies
-Towards High-Efficiency Boiler and Prevention of Explosion-*

小澤 守 (関西大学)

Mamoru OZAWA (Kansai University)

e-mail: ozawa@kansai-u.ac.jp

1. はじめに

ボイラの原型はおそらくブランデーやウィスキーの蒸留釜であったと思う。これらの蒸留釜では当然ながら発生する蒸気を用いて動力を発生するといった用途ではなかった。したがって作動圧力も大気圧近傍で、熱負荷もそう高いものではなかった。周知のように Heron の蒸気タービンは丸釜で発生した蒸気を回転体に取り付けたノズルから噴出して回転する反動タービンであるが、動力発生を目的として産業応用するには千数百年の歳月が必要であった。その間を支えた原動機は風車や水車で、1600 年代初頭の Giovanni Branca の考案した装置にしてもボイラは Heron のそれとは大差はなかった。ボイラによる発生蒸気を利用した最初のものは、揚水機関、つまりポンプであった。著名な Thomas Savery よりも少なくとも数年前に Edward Somerset の Water commanding engine[1]など幾つかの試みはあるが、実用面からは Thomas Savery の機関に帰着するといって間違いないだろう。Savery の蒸気による揚水機関[2] (1698 年特許 No. 356) を図 1 に示す。ボイラからの蒸気を凝縮させそれによって水を吸い上げ、さらにボイラの蒸気圧を用いて高所へ水を押し上げる機関であったため、記録に残る最初のボイラ破裂 (1716 年) を引き起こした[3]。破裂の原因は性能向上を目論んで、安全弁のバーに過剰な錘を取り付けたことによるとされており、当初の Savery のボイラには Denis Papin 式の安全弁が設置されていなかったことから判断して、破裂したのは J. T. Desaguliers による改良版[3]であったと推測する。

具体的にボイラ技術が進展し始めたのは、シリンダ、ピストンを用いて動力を取り出した Thomas Newcomen からであろう。Newcomen は Somerset や Savery の蒸気発生部としてのボイラと動力発生部、さらに負荷としてのポンプを分離した。さらに James Watt は周知のように大気圧機関として

の必須の真空を作るための復水器をシリンダから分離したことによって Newcomen 機関に比べて飛躍的に機関効率が上昇した。Watt はその後、遊星歯車による回転運動の導入（後にクランク機構を採用）とガバナーによる回転数制御、水面制御、圧力制御などを導入し、現在の動力機関の主要構造を作り上げたのである。ただしこのような Newcomen や Watt 機関の出現が直ちに産業を牽引したかどうか、より一般的には新規技術の出現が直ちに旧技術を駆逐したかどうかといった視点は、技術の展開を理解する上で非常に重要である。

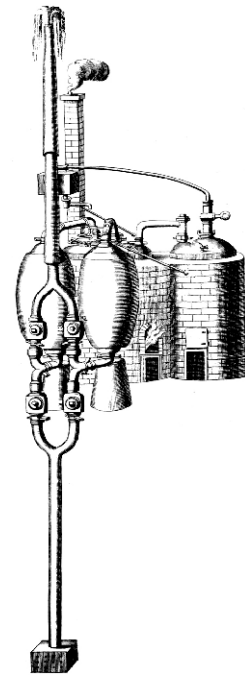


Fig. 1 Savery's engine [2].

2. 科学技術と社会状況の推移

図2は1600年頃から現在に至る科学技術の流れを簡単に示したものである。16世紀までの英国はヨーロッパにおいて後発国であった。宗教戦争やその他様々な社会的要因によるオランダやフランスからの移住者によって、各種の技術がもたらされ、結果的に17世紀から19世紀に至る産業革命期を中心として、西欧の科学技術の中心的存在として君臨することになった。英国産業進展については葉師寺の著書を参照されたい[4]。英国における典型的な動力技術として、Papin（フランス人、英国移住）の構想や上記の Savery の揚水機関があ

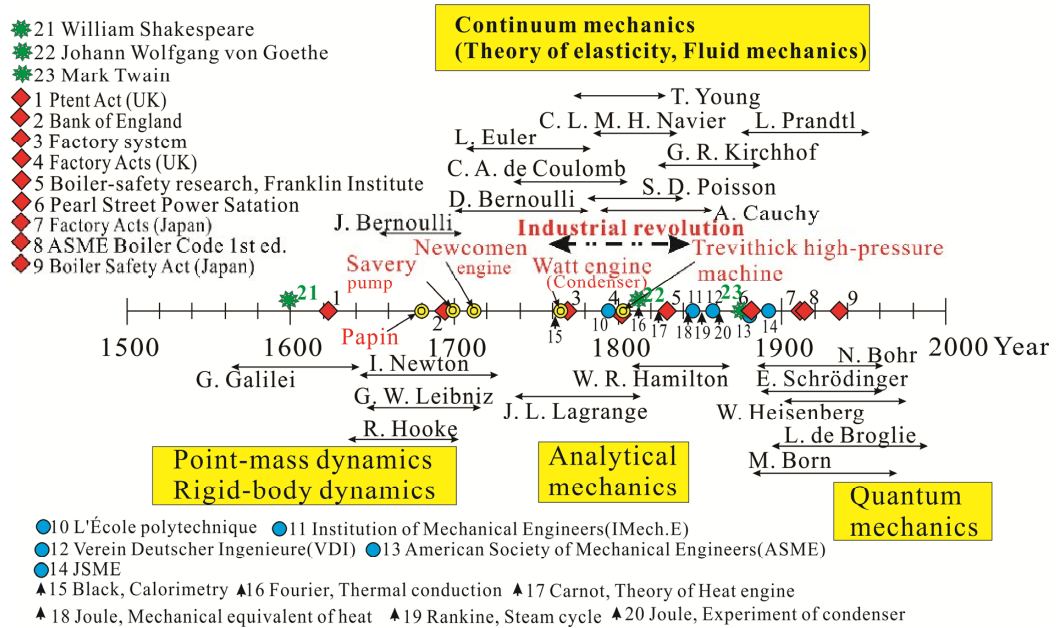


Fig. 2 Development of science and technology.

り、引続く Newcomen, Watt の蒸気機関の出現、その後の R. Trevithick の高圧機関が挙げられる。初期のボイラは銅板をロウ付けしたものや小さな鉄板をリベットで繋いだものが主流であった。国力の増大は現在で言う GDP の増大であり、同時に科学技術の進歩でもあった。典型が 1600 年代初頭の特許法であり、中盤の Royal Society の設立である。経済発展は 1600 年代末の England 銀行の設立に繋がり、それまでの毛織物に替わって綿製品の生産が増加していった。当初は家内工業であったが、生産効率や品質向上には工場生産方式が有利であり、1700 年代後半には工場生産方式が出現した。その背景には農業における技術革新によって、農村から都市への労働者の流入がある。工場生産方式を採用すると、紡績機、織機などには比較的大出力の動力源が当然必要であるが、Newcomen や Watt の機関が直ちに英国を席巻したわけではない。

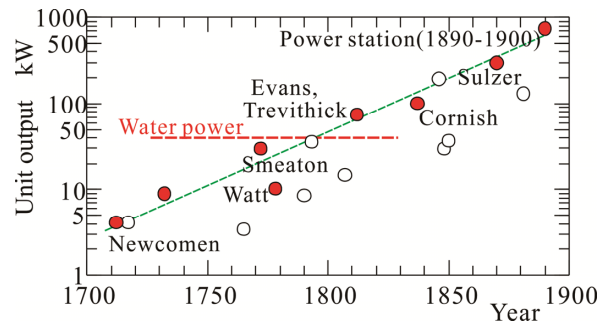


Fig. 3 Unit output (data from Singer et al. [5]).

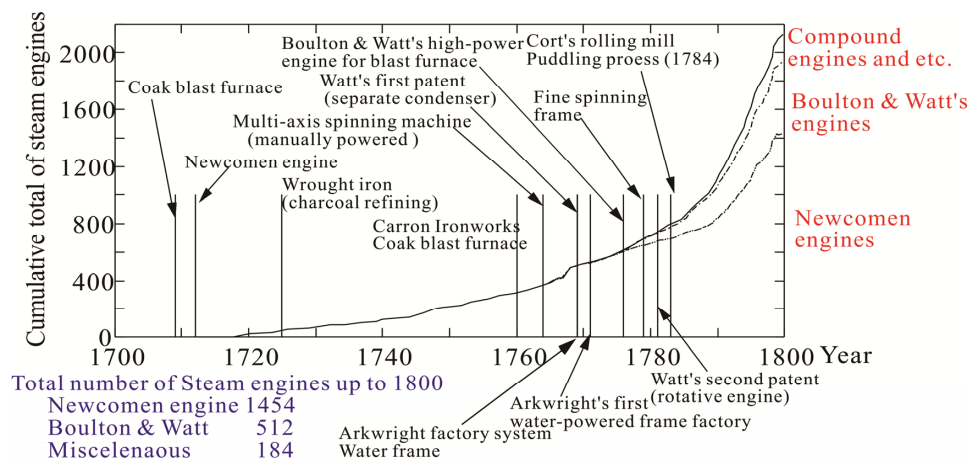


Fig. 4 Cumulative number of steam engines (data from Rolt & Allen [6]).

図3は1700～1900年における蒸気動力の単機出力の変遷を示している[5]。Newcomen 機関は当初はわずかに 4 kW であり、Watt 機関も 10 kW 程度

であった。それに対して当時の水車動力の最大は 40 kW であり、これを凌駕する機関は Watt の特許が切れた 1800 年頃になって漸く出現した。その後の単機出力は指数関数的に増大したのである。

図 4 には Newcomen 機関、Watt 機関の累積基数と関連技術を示している[6]。Watt 機関の出現は 1760 年代初めで、当初の機関効率は Newcomen 機関に比べて遙かに高かったが、1780～1800 年においても Newcomen 機関は製造され続けたのである。勿論、様々な改良がなされ続けたのはいうまでもないが、高価な動力源を工場に設置するには、技術の安定性、製品の信頼性、低コストなどの条件を克服する必要もあった。Newcomen 機関は当初から炭鉱の揚水機関として用いられており、粗悪炭を燃料とすることができたため、炭鉱主は燃費についてほとんど配慮しなかったのだろう。これが工場用動力となると、効率が大きな選択要因になってくる。いずれにしても技術の転換はこのようなして行われ、特に基盤となるインフラは社会情勢や他産業の状況に大きく左右される。

3. ボイラ技術の展開

本節では Newcomen や Watt のボイラから出発して、ボイラ技術の全体的な展開について述べる。

まずボイラにおける技術的課題について説明しておこう。日本ではボイラに対して「汽罐」（さら

に古くは水蒸鐘）の文字が当てられ、蒸気を発生する金属製容器であった。熱エネルギーを与えて蒸気を発生するとすれば、電気ボイラも蒸缶（蒸し器）も含まれるが、ここでは化石燃料を燃焼させ、壁を通じて熱を水に伝え、蒸気を発生するものをボイラと限定しておく。ボイラの分類と開発課題を表 1 に列記しておく。赤字の形式のボイラは現在におけるボイラである。

ボイラは当初、煉瓦積み of 燃焼室に置かれていたが、燃焼ガスの熱エネルギーを有効利用するために、ボイラ周囲をめぐる燃焼ガスをボイラ胴内に設置した煙管に導いた煙管ボイラ、燃焼室を胴内に設置した炉筒ボイラなどが開発された。Cornish や Lancashire ボイラなどはこれに該当する。その後、炉筒と煙管の両方を組み込んだ炉筒煙管ボイラが誕生した。Scotch ボイラがその典型で、Titanic 号には 29 缶搭載され、2 機のレシプロエンジンと 1 基の蒸気タービンによって 46,000 HP の出力をだした。

燃料としては当初から石炭が中心であった。石炭塊を手で火格子上に散布する方法から、給炭機を導入したストーカ燃焼、さらには微粉炭を空気に搬送させて噴き込む微粉炭燃焼、或いはまた微粉碎する動力が大きいことから石炭の粗粒をそのまま燃焼させるサイクロンバーナが順次開発された。石炭は基本的にチャー、揮発成分、灰成分か

Table 1 Boiler classification and problems to be solved

Category	Type of boiler	Water circulation	Gas circulation	Furnace	Common problems	Safety measures
Cylindrical	Simple cylindrical boiler	Submerged	Outside shell	Brick-walled	Construction Materials Incrustation Inside corrosion Outside corrosion Priming Superheat & burnout Creep Deterioration Explosion Water treatment Flue-gas treatment	Water-level control Pressure control Safety valve Registration & inspection Insurance Boiler code
	Tubular (smoke tube) boiler		Outside shell & smoke tube	Brick-walled		
	Flue (furnace)-tube boiler		Single and multiple flue tubes	Flue tube		
	Flue- and smoke-tube boiler		Flue tube & smoke tube	Flue tube		
Watertube	Submerged watertube boiler	Submerged	Outsie of tube	Brick-walled		
	Natural circulation boiler	Inclined watertube	Outsie of tube	Brick-walled		
		Vertical watertube	Outsie of tube	Brick-walled		
			Outsie of tube	Water-wall		
	Forced circulation boiler	Natural & Forced	Outsie of tube	Water-wall		
Once-through	Once-through boiler	Forced-flow	Outsie of tube	Water-wall		

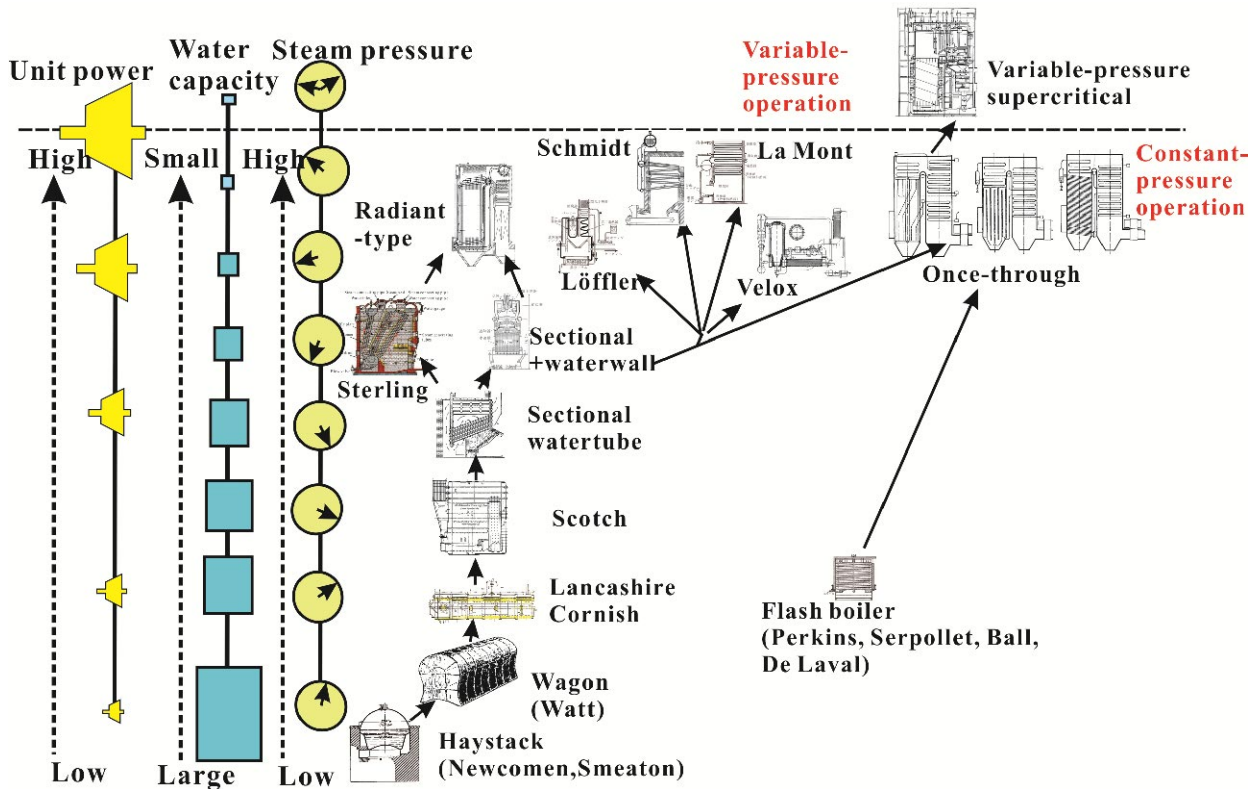


Fig. 5 Development of boilers (based on literatures [7-9].

らなるが、灰の融点が低いと、水管に付着して伝熱を阻害するし、場合によってはクリンカを形成して運転を不能にすることもある。融点が高いとフライアッシュとして適切な排ガス処理がなければ環境中に放出される。低融点灰を含む石炭に対しては積極的に炉内で熔融させ、炉底から排出するスラグタップ炉なども開発された。その後、石油の利用が広がると、扱いにくい石炭が変わって油焚きボイラが席巻することになるが、これは事業用や産業用などを中心に第二次世界大戦後の状況である。

このようなボイラに係る各種課題を解決しながら、より高性能、大出力のボイラが追求されてきた。図5はF. Ohlmüllerの示したボイラの発達過程[7]、さらにはC. Matschoß[8]やH. W. Dickinson[9]を参考にして作成した図で、下から斜め上方向に順次ボイラの形式や保有水量、圧力、単機出力の変遷を模式的に表している。最下段はNewcomenのボイラで、ついでWattのワゴンボイラが出現した。ボイラの高圧化に伴ってボイラは円筒形に変わり、CornishやLancashireボイラが開発され、これが炉筒煙管ボイラの初期の形式であるScotchボイラに繋がる。更なる出力、つまりボ

イラ蒸発量の増大は、伝熱面積増大によって解決され、水とガスの配置を入れ替えた水管ボイラの時代となる。当初は水が水管内を行きつ戻りつするHowardのボイラやRootボイラなど、水が水管とドラムをめぐって循環しないボイラが出現した。中にはFieldボイラのように2重管構造のボイラもあった。本格的な水循環を確保したボイラの典型はBabcock & Wilcoxのセクショナルボイラである。水管は緩傾斜の直管で、両端には掃除用のプラグが設置されていた。これは水処理技術が十分に確立していなかったことによる。自然循環力は垂直管のほうが優れているのは明らかで、後にStirlingボイラがこれを実現した。火炉壁は当初は煉瓦積みであったが、様々な形式の水壁構造が開発され、これが現在に繋がる放射式水管ボイラとなる。ボイラ蒸発量の増加は燃焼量の増加に繋がり、水循環量にも大きく影響する。自然循環ボイラでは水循環の安定性の面から循環量には限界があり、これをカバーするために強制循環ボイラが開発された。La Montボイラはこの典型である。

W. J. M. Rankine [10]の著名な論文がPhilosophical Magazineを通じて公表されたのは1854年であるが、それ以前から高圧高温化は性能

向上の必須要件であった。高压化は気液密度差を小さくし、自然循環による水循環は不適當となる。従って超臨界圧ボイラは必然的に貫流ボイラの形態をとる。その先駆者ともいべき Mark Benson が、水単相部を超臨界圧で実現し、フラッシュさせて任意の圧力の蒸気を発生させる形式の貫流ボイラのドイツ特許を取得したのは 1920 年である。1924 年には Siemens 社は Benson ボイラの特許を取得し、ベルリンの自社工場用として設置し、これによって Benson ボイラの実用化が始まった。しかし本格的な超臨界圧ボイラの出現はおおよそ 30 年後の 1956 年であった[11]。現在では発電用大型ボイラは、超臨界圧変圧運転になっている。定圧運転から変圧運転への移行には、材料技術のみならず制御技術、特にコンピュータの導入が大きく寄与している。

4. 破裂との戦い

ボイラの高圧化、高性能化は必然的に破裂の頻発につながった。ボイラの破裂は火薬の爆発にも例えられ、ドラム内保有水の有する内部エネルギーが急激な蒸発・膨張となって缶板やバルブなどの部品を広範囲にわたって飛散させ、それによって多数の死傷者を発生した。図 6 に示すものは、大阪電灯安治川発電所西発電所において 1920 年



Fig. 6 Boiler explosion at Ajikawa Steam Power Station (1920) [12] (Courtesy of the family of Seiichi Ishigai).

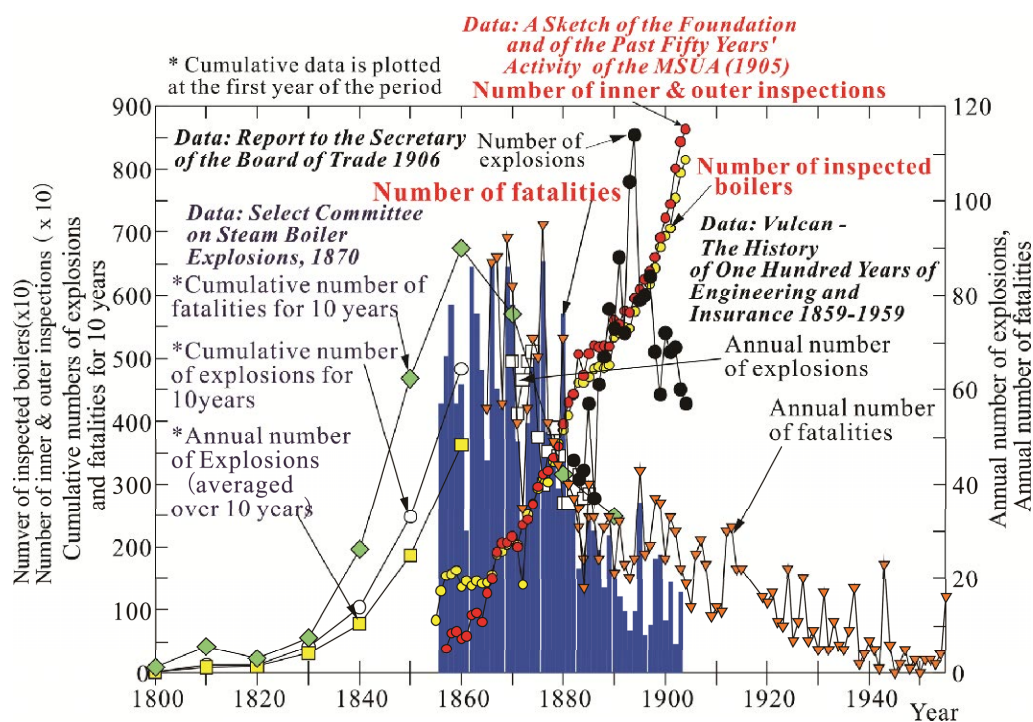


Fig. 7 Boiler explosion statistics in the UK [14-16].

に発生した Babcock & Wilcox 社製ボイラの破裂現場の写真である[12]。このボイラは運開から 10 年経過したボイラで、定格圧力 1.1 MPa, 蒸発量 8.5 t/h, 蒸気温度 254℃であった。死傷者は 7 名にも達した。ボイラ破裂による最も悲惨な事故はミシシッピ川における Sultana 号で、ボイラ破裂によって 1600 人を超える死者を出した[13]。

図 7 に 1800 年以降の英国におけるボイラ破裂事故と死者数の推移を示している[14-16]。ボイラ設置台数の増加は当然ながら、特に 1820 年頃から急激な勢いで破裂件数と死者数が増加している。しかしながら 1860 年頃を境にして、破裂件数、死者数ともに急速に減少していった。これには同図に示すボイラ検査台数の急激な増加が大きく影響している。このようなボイラ検査の有効性は米国においても顕著である。

図 8 は 1780～1940 年頃のボイラ圧力と蒸気温度の推移をプロットしている[13, 15-17]。Watt の特許の満了後、1800 年代初めに Richard Trevithick は鋳鉄製の高圧機関を製造した。しかし 1803 年にこれが破裂するにおよんで[18], Trevithick は鋅鉄製のボイラに変更した。製鉄技術そのものはそれ以前から進んでいたとはいえ、圧延機の出現までは十分な大きさの鉄板は望めなかったのはいうまでもない。鉄板があったからといって溶接技術が完備していたわけでもない。Newcomen ボイラや Watt のボイラでは当初はろう付や手打ちのリベット接合が行われていたが、1835 年前後には機械打ちのリベット接合が広く用いられるようになった[19]。このようにボイラ製造技術は製鉄技術や工作技術に大きく依存し、またそれが製鉄技術に新たな展開を促すのである。ボイラ技術の展開や安全に関してもそのような流れの中で見ることがある。図 8 には圧力上昇過程について、出典ごとに着目点が異なることによって大きな分散があるため、ここでは曲線を 2 本引いているが、1900 年の段階では最大で 2 MPa 程度にまで圧力が上昇して

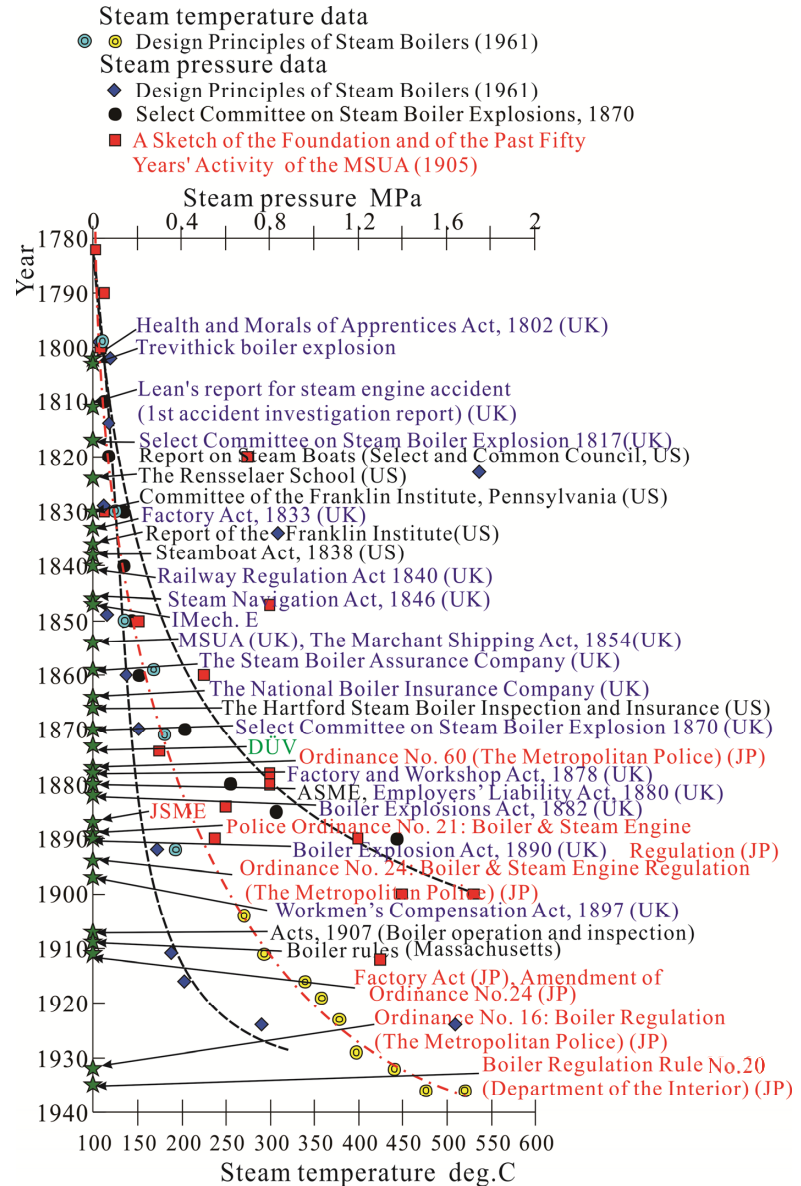


Fig. 8 History of steam pressure & temperature with various acts and events (based on literatures [14-17] and [22-27].

いたことが分かる。しかも 1900 年以前には蒸気温度はほぼ飽和蒸気温度であったが、以降は過熱蒸気となっていて、1935 年頃には蒸気温度はすでに 520℃にも達していた。当然ながらそれには材料技術に関する大きな進展があったのは間違いない。

ボイラ破裂に対して、公的な取り組みで最も初期に行われたのは英国における特別委員会である。この当時、すでに蒸気船が出現しており、機関出力は定置用と同程度で、1830 年頃には船用機関の出力は定置用を凌駕した。

大量の貨物輸送や乗客輸送を求められたのは英

国に限らない。米国においても一般に Western rivers と呼ばれたミシシッピ川やオハイオ川ではボイラ破裂が頻発した[20,21]。破裂事故の多発を受けて、米国では1830年にフィラデルフィアにおいて Franklin Institute がボイラ研究を開始した[22]。実際に米国や英国で舶用ボイラに関する規制がはじまったのが1830～40年頃である。Franklin Institute の研究成果が公表されたのは1836年が最初で、材料技術のみならず沸騰の観察や実際に破裂実験も行った[23]。

1854年に英国マンチェスターにおいてボイラ利用者、保有者、製造者などが Lancashire ボイラの開発者でもあった Willian Fairbairn の提案を受けて、The Association for the Prevention of Steam Boiler Explosions, and for Effecting Economy in the Raising and Use of Steam (後に The Manchester Steam Users' Association for the Prevention of Boiler Explosions and for the Attainment of Economy in the Application of Steam, MSUA)を組織した[14, 27]。これは自ら使用するあるいは製造するボイラの運転や技術の基準を設定し、それに基づいて定期検査を行うものであった。登録されたボイラは定期検査を受け、良好であれば認証が与えられ、不都合があれば改善や運転停止が求められた。英国では1833年には Factory Act が制定されている。すでに工場労働者の安全管理が問題となっており、ボイラ破裂が工場主や労働者にとっても大きな損害に繋がることが認識されていた。MSUA の設立以降、損害保険会社が設立され、ボイラ検査が行われるようになった。英国では、政府官庁による検査・規制は規則を厳しくする方向に向うとの考えから、できるだけ民間で規制したいとの Fairbairn の考え方が浸透していたこともあり、定置ボイラに関する法制化はどちらかといえば遅れ、Boiler Explosion Act の制定は MSUA の設立から約30年後の1882年であった[14]。なお舶用では Lloyd's Register of British and Foreign Shipping (1834年、船級規則発行)も重要な第三者検査機関であった[21]。

米国においては Franklin Institute よる組織的な研究は早かったが、ボイラ検査を行う Hartford などの損害保険会社は1860年代に設立された。マサチューセッツ州における法的枠組みについては、1907年のボイラ破裂防止法の施行まで待たねば

ならなかった。また同州では1909年にボイラの構造運転規則が制定された。オハイオ州でも同様の規則が制定され、各保険会社の検査とあいまって1900年頃をピークとして急速に破裂事故は減少して行ったのである[22]。マサチューセッツ州では州警察にボイラ検査部門を設置していた。このような形態はドイツや後の日本の状況と同じである。なお舶用ボイラに関しては財務省の所管として始まり、後に商務省、最後には沿岸警備隊へと移行した。

図8中には日本の状況についても示している。明治期には殖産興業の掛声と共に西欧から蒸気機関が急速に導入された。石炭燃焼に伴う煤塵に対する規制とも言える1877(明治10)年の東京警視本署第60号布達がおそらく最初のボイラ規制であろう[24, 25]。1889(明治22)年には汽罐及汽機取締規則(警察令第21号)、1911(明治44)年に当時の第一機関汽罐保険による代行検査が認められ、漸く民間による検査業務が始まった[24]。日本におけるボイラ規制は府県単位の警察本部が担当していた[25]。従って規制条例も個々に発令されていた。これが全国共通の「汽罐取締令(内務省令第20号)」及び「汽罐構造規格(内務省告示第204号)」になるのは1935(昭和10)年であった[26]。

5. おわりに

本稿ではボイラ技術の展開とボイラ破裂問題について概説した。技術の発展は、当該技術だけでは閉じず、周辺分野の技術発展にも大きく影響される。さらにはその技術を利用し、支えるあるいは場合によっては規制する社会制度の成熟が、技術そのものを育てる上で非常に重要である。ボイラそのものには約300年の歴史が有り、その安全性については200年の歴史を踏まえて現在の状況があることを忘れてはならない。

ボイラも含めた蒸気動力技術の展開については文献[9]の翻訳本として山川敏夫訳『蒸気機関発達史』(伊藤書店, 1944)、磯田浩訳『蒸気動力の歴史』(平凡社, 1994)がある。さらにはドイツ語ではあるが文献[8]は好書である。

著者がこのような分野に入り込んだのは師匠である石谷清幹、赤川浩爾両先生(共に故人)の影響が強い。これらの先生方と共に著した Steam

Power Engineering (Cambridge University Press) は On demand で手に入る。なお著者は日本ボイラ協会の会誌「ボイラ研究」に 2013 年以来「ボイラー技術の史的展開」のタイトルで連載している。ご興味があればご一読、ご意見などいただければ幸いです。

参考文献

- [1] Edward Somerset, A Century of the Names and Scantlings of such Inventions, F. Grismond, London (1663).
- [2] Thomas Savery, The Miner's Friend, or an Engine to Raise Water by Fire, S. Crouch, London (1702).
- [3] J. T. Desaguliers, A Course of Experimental Philosophy, Vo. II, Section XV, Printed for W. Innys and 2 Persons in London (1744), pp. 484-490.
- [4] 薬師寺泰蔵, テクノヘゲモニー, 中公新書, (1989).
- [5] C. Singer, E. J. Holmyard, A. R. Hall, T. I. Williams eds., A History of Technology, Vol. IV, Oxford University Press, Oxford (1958), pp. 148-198.
- [6] L. T. C. Rolt, J. S. Allen, The Steam Engine of Thomas Newcomen, Landmark Pub., Ashbourne (1997), p. 145.
- [7] F. Ohlmüller, The Influence of the Benson Boiler on the Development of Power Stations, J. of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 75, Issue 452 (1934), pp. 161-184.
- [8] C. Matschoß, Die Entwicklung der Dampfmaschine, VDI Verlag, Düsseldorf (1987).
- [9] H. W. Dickinson, A Short History of the Steam Engine, Cambridge University Press, Cambridge (1938).
- [10] W. J. M. Rankine, On the Mechanical Action of Heat, Philosophical Magazine and Journal of Science, Vol. VII, 4th Series, (January - June 1854), pp. 1-21, 111-122, 172-185, 239-254.
- [11] 宮岡貞隆, 超臨界圧ユニットの現状とその経済性, 火力発電, Vol. 1, No. 11 (1965), pp. 902-916.
- [12] 石谷精一, 三ツノ汽缶爆発ノ研究 (原題: 私の調査した三つの汽缶爆発の鑑定) (1923 年頃の執筆と思われる) .
- [13] C. Hocking ed., Dictionary of Disasters at Sea during the Age of Steam, Vol. II, Lloyd's Register of Shipping, London (1969).
- [14] Manchester Steam Users' Association (MSUA), A Sketch of the Foundation and of the Past Fifty Years' Activity of the Manchester Steam Users' Association for the Prevention of Steam Boiler Explosions and for the Attainment of Economy in the Application of Steam, Taylor, Granett, Evans, & Co., Manchester (1905).
- [15] Report to the Secretary of the Board of Trade upon the Working of the Boiler Explosions Acts, 1882 and 1890 (1906).
- [16] W. H. Chaloner, Vulcan - The History of One Hundred Years of Engineering and Insurance 1859-1959, (1959).
- [17] 石谷清幹, ボイラ要論, 山海堂 (1961).
- [18] Alexander Tilloch ed., Dreadful Accident, Philosophical Magazine, Vol. 16 (1803), pp. 372-373.
- [19] R. L. Hills, Power from Steam, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [20] L. C. Hunter, Steamboats on the Western Rivers, Harvard University Press, Cambridge (1949).
- [21] J. T. Lloyd, Lloyd's Steamboat Directory and Disasters on the Western Waters, James T. Lloyd & Co., Cincinnati (1856).
- [22] A. M. Greene, Jr., History of the ASME Boiler Code, ASME, New York ((1953).
- [23] Report of the Committee of the Franklin Institute on the Explosions of Steam-Boilers, Part I (1836), Part II (1837).
- [24] 安田火災海上保険, 安田火災百年史 (1990), pp. 288-290.
- [25] 日本科学者会議編, 環境問題資料集成, 第 9 巻, pp. 8-31.
- [26] 吉武恵市, 武田晴爾, 上野民治, 汽罐取締令解説, 汽罐協会 (1936).
- [27] William Fairbairn, Useful Information for Engineers, 4th ed., Green, Longman, Roberts, & Green, London (1864).

北海道地区企業の工場見学会報告

Report on the Factory Tour in the Hokkaido Area.

企画部会 産学交流委員会
福島 直哉（東海大学），佐藤 航（日立製作所）
Naoya FUKUSHIMA (Tokai University), Wataru SATO (Hitachi, Ltd.)
Email wataru.sato.af@hitachi.com

第 55 回伝熱シンポジウムの開催前日である，平成 30 年 5 月 28 日に北海道支部と産学交流委員会の合同開催にて，北海道地区企業の工場見学会を行いました．13 名の方にご参加いただき，札幌近郊の企業を訪問いたしました．快く見学にご対応いただきました企業の皆様，開催にご尽力いただいた北海道支部の皆様，またご参加いただきました皆様に深く感謝し，報告させていただきます．

見学しました企業は以下の通りです．

1. （株）北海道熱供給公社

地下空間に配置された熱電併給システムを構成する大型のガスタービン発電機や吸収式冷凍機を見学し，札幌における地域熱供給の歴史および重要性について学ぶことができました．（図 1）

2. （株）池田熱処理工業

高周波焼入装置に代表される大型の熱処理装置や高度な機械加工技術，さらには工夫を凝らした様々な治具を見学させていただきました．（図 2）

3. 北海道電力（株） 総合研究所

天井放射冷暖房，低温に対応する空調評価設備，木質バイオマス発電，ジャガイモの発芽抑制など幅広い研究テーマ，実験設備を見学させていただきました．（図 3）

（見学順）

また見学会の最後にはサッポロビール園にて意見交換会を行い，今後の産学交流の在り方について意見交換を行うとともに，参加者同士の懇親を深めることができました．

いずれの企業においても熱に関する先端の技術開発および研究用，製造用の装置を間近で見学させていただきました．また，開発を担当されている方からは北海道地区ならではの苦労や工夫に関してお話しいただき，新たな研究のヒントを得ることもできたのではないかと思います．今後も産学の交流が活発になるようなイベント開催に取り組んで参ります．



図 1 （株）北海道熱供給公社



図 2 （株）池田熱処理工業

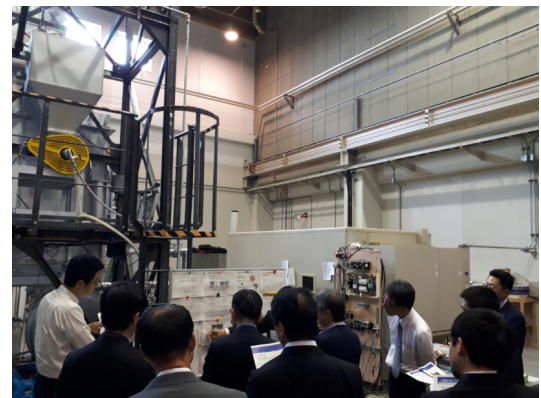


図 3 北海道電力（株） 総合研究所

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	問合先	掲載号
2018 年					
5 月	29(火) ～ 31(木)	第 55 回日本伝熱シンポジウム (開催場所：札幌コンベンションセン ター-SORA)	2018.1.19	2018.3.16	第 55 回日本伝熱シンポジウム実行委員会 事 務局 北海道大学 大学院工学研究院 機械宇宙工学 専攻内 E-mail: symp2018@htsj-conf.org

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2018 年					
7 月	2(月) ～ 4(水)	The 2nd International Symposium on Fuel and Energy (会場：東広島芸術文化ホール)	2018.6.1		井上 修平 (広島大学) E-mail: shu18@hiroshima-u.ac.jp
7 月	11(水)	No.18-68 講習会 CFD の基礎とノウ ハウ (開催場所：日本機械学会会議室)			日本機械学会 流体工学部門 担当：関根郁夫 Tel: 03-5360-3504 E-mail: sekine@jsme.or.jp
7 月	22(日) ～ 26(木)	第 26 回原子力工学国際会議 (ICONE26) (開催場所：Novotel London West, London, England)	2017.11.30	2018.1.12	ICONE26 技術委員会 幹事：高橋秀治 (東京 工業大学) E-mail: htakahashi@lane.iir.titech.ac.jp
7 月	25(水) ～ 27(金)	Water on Materials Surface 2018 (WMS2018) (会場：東京理科大学葛飾図書館ホ ール)	2018.6.15	2018.6.15	E-mail: wms_2018@rs.tus.ac.jp
8 月	8(水) ～ 10(金)	日本混相流学会混相流シンポジウム 2018 (開催場所：東北大学、仙台市)	2018.3.16	2018.6.11	日本混相流学会 混相流シンポジウム 2018 実 行委員会事務局 石本 淳 (東北大学流体科学 研究所) E-mail: konsosymp@jsmf.gr.jp
8 月	1(水) ～ 7(火)	機械の日・機械週間			日本機械学会 総合企画 G：佐藤彩乃 Tel: 03-5360-3505 E-mail: sato@jsme.or.jp
8 月	27(月) ～ 29(水)	日本実験力学学会 2018 年度年次講演会 (開催場所：山梨大学)	2018.5.7	2018.6.29	伊藤安海 (山梨大学工学部) E-mail: yasumii@yamanashi.ac.jp 鍵山善之 (山梨大学工学部) E-mail: ykagiyama@yamanashi.ac.jp
9 月	3(月), 5(水), 6(木), 4(火)	日本流体力学会 年会 2018(9/3, 5, 6)・ 日本流体力学会創立 50 周年記念シ ンポジウム(9/4) (開催場所：大阪大学豊中キャンパス)	2018.6.1	2018.7.31	年会：日本流体力学会 年会 2018 実行委員会 E-mail: nenkai2018-ml@me.es.osaka-u.ac.jp 記念シンポジウム：矢野 猛 (大阪大学) E-mail: yano@mech.eng.osaka-u.ac.jp
9 月	5(水) ～ 7(金)	2018 年度日本冷凍空調学会年次大会 (開催場所：日本大学工学部)	2018.5.18	2018.7.13	日本冷凍空調学会 年次大会協賛担当：宇田 Tel: 03-5623-3223 E-mail: y.uda.pa@jsrae.or.jp
9 月	13(木) ～ 15(土)	第 15 回日本熱電学会学術講演会 (開催場所：東北大学 青葉山キャン パス)	2018.6.30	2018.7.21	日本熱電学会講演会委員会 事務局 Tel: 052-809-1806 E-mail: t_takeuchi@toyota-ti.ac.jp
9 月	14(金) ～ 16(日)	第 46 回可視化情報シンポジウム (会場：明治大学 駿河台キャンパス リバティタワー)	2018.5.18	2018.6.29	実行委員会 幹事：元祐昌廣 (東京理科大学) E-mail: sympo2018@vsj.or.jp
10 月	10(水) ～ 11(木)	第 46 回日本ガスタービン学会定期講 演会 (会場：かごしま県民交流センター)	2018.7.2	2018.8.27	日本ガスタービン学会 事務局 Tel: 03-3365-0095 E-mail: gtsj-desk@gtsj.org
10 月	30(火) ～ 31(水)	第 358 回講習会 実務者のための熱流 体解析技術の基礎と応用 (会場：大阪科学技術センター)			日本機械学会 関西支部 Tel: 06-6443-2073 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp
10 月 11 月	30(火) ～ 1(木)	第 9 回マイクロ・ナノ工学シンポジウ ム (会場：札幌市民交流プラザ)	2018.7.15	2018.9.9	日本機械学会 担当：熊谷理香 Tel: 03-5360-3505 E-mail: kumagai@jsme.or.jp
10 月 11 月	30(火) ～ 2(金)	The 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29) (会 場：Hawaii Convention Center, Honolulu HI, U.S.A.)	2018.5.1	2018.7.1	ISTP29 実行委員長：伏信一慶 (東京工業大学 工学院 機械系) E-mail: fushinobu.k.aa@m.titech.ac.jp
10 月 11 月	30(火) ～ 2(金)	The 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (13th ISEM) (会場：85 Sky Tower Hotel, Kaohsiung City, Taiwan)	2018.5.12	2018.7.26	日本実験力学学会 事務局 担当：小林 Tel: 025-368-9310, Fax: 025-368-9308 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp
11 月	13(火) ～ 15(木)	第 39 回日本熱物性シンポジウム (開催場所：名古屋)	2018.7.6	2018.8.24	実行委員会 幹事：上野 藍 (名古屋大学) Tel/Fax: 052-789-4470 E-mail: info2018@jstp-symp.org

行事カレンダー

11 月	14(水) ～ 16(金)	第 56 回燃焼シンポジウム (会場：堺市産業振興センター)	2018.7.18	2018.9.19	第 56 回燃焼シンポジウム実行委員会 大阪府立大学 工学研究科 機械工学分野 内 Tel: 072-254-9222 (動力工学研究室) E-mail: sympo56@combustionsociety.jp	
12 月	1(土)	No.18-63 第 21 回スターリングサイ クルシンポジウム (会場：国士舘大学世田谷キャンパス 梅ヶ丘校舎 (34 号館))	2018.7.30	2018.10.12	実行委員長：大高敏男 (国士舘大学) Tel/Fax: (03)5481-3334 E-mail: otaka@kokushikan.ac.jp	
12 月	3(月) ～ 4(火)	第 8 回潜熱工学シンポジウム (会場：尾張一宮駅前ビル，愛知県)	2018.9.21	2018.10.19	幹事：窪田光宏 (名古屋大学工学研究科) E-mail: kubota.mitsuhiro@material.nagoya-u.ac.jp	
12 月	11(火) ～ 13(木)	第 32 回数値流体力学シンポジウム (会場：機械振興会館)	2018.9.21	2018.10.22	日本流体力学会 事務局 Tel: 03-3714-0427 E-mail: jsfm@fr7.so-net.ne.jp	
12 月	15(土)	2018 年度計算力学技術者(CAE 技術 者) 資格認定事業 (開催場所：慶応義塾大学理工学部矢 上キャンパス)			日本機械学会 事業企画 G：石澤 Tel: 03-5360-3506 E-mail: caenintei@jsme.or.jp	
12 月	17(月) ～ 18(火)	第 27 回微粒化シンポジウム (会場：岡山大学創立五十周年記念館)	2018.8.31	2018.10.22	日本液体微粒化学会 事務局 近藤 健 Tel: 06-6466-1588 E-mail: information_atmz@ilass-japan.gr.jp	

公益社団法人日本伝熱学会第 56 期（平成 29 年度）総会議事録

1. 日 時 平成 30 年 5 月 30 日（木）16 時 20 分～16 時 50 分
2. 場 所 札幌コンベンションセンター 大ホール A
北海道札幌市白石区東札幌 6 条 1 丁目 1-1
3. 正会員数 1,040 名
4. 出席者 728 名（うち委任状出席 596 名）. 定款第 29 条の定めるところにより、これは定足数である正会員数の過半数（521 名）を上回り、総会は成立した. また定款第 43 条に定められている、定款の改定に必用な正会員数の 3 分の 2（694 名）を上回り、第 4 号議案定款の改定が可能である.

5. 議事経過

定款第 27 条により菱田公一会長が議長となり、以下の議案について逐次審議した.

第 1 号議案 第 56 期（平成 29 年度）事業報告の件

議長より、公益社団法人日本伝熱学会第 56 期（平成 29 年度）総会議案（以下、「総会議案」と呼ぶ.）の第 1 号議案第 56 期（平成 29 年度）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 56 期（平成 29 年度）会務報告の件

議長より、総会議案の第 2 号議案第 56 期（平成 29 年度）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 第 56 期（平成 29 年度）収支決算の件

議長より、総会議案の第 3 号議案第 56 期（平成 29 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 定款の改定

議長より、総会議案の第 4 号議案定款の改定について諮り、満場一致でこれを可決した.

第 5 号議案 理事、監事及び協議員の報酬並びに費用に関する規程の改定

議長より、総会議案の第 4 号議案理事、監事及び協議員の報酬並びに費用に関する規程の改定について諮り、満場一致でこれを可決した.

第 6 号議案 第 57 期（平成 30 年度）役員・協議員選出の件

議長より、総会議案の第 6 号議案第 57 期（平成 30 年度）役員・協議員の選出について以下のとおり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 17 条第 1 項により退任する役員

理事	大島 伸行	理事	星 朗
理事	大竹 浩靖	理事	梅川 尚嗣
理事	松村 幸彦	理事	上堀 徹
理事	鈴木 裕	監事	加藤 泰生

定款第 17 条第 1 項ただし書きにより退任する役員

代表理事（会長）	菱田 公一	理事（副会長）	中部 主敬
理事（副会長）	木戸 長生		

第 57 期に新たに選任される役員

定款第 17 条第 1 項により選任される役員

理事	戸谷 剛	理事	佐々木 直栄
理事	村田 章	理事	塩見 洋一
理事	春木 直人	理事	梅澤 修一
理事	田坂 誠均	理事	土屋 敏章
監事	原村 嘉彦		

定款第 17 条第 1 項ただし書きにより選任される役員

理事	近久 武美	理事	高田 保之
理事	出口 祥啓		

第 7 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、中部主敬氏、平井秀一郎氏の 2 名を選任した。

第 8 号議案 第 57 期（平成 30 年度）事業計画の件

議長より、総会議案の第 6 号議案第 57 期（平成 30 年度）事業計画について報告を行った。

第 9 号議案 第 57 期（平成 30 年度）収支予算の件

議長より、総会議案の第 7 号議案第 57 期（平成 30 年度）収支予算について報告を行った。

以上により、本日の議事を終了した。

平成 30 年 5 月 30 日

公益社団法人日本伝熱学会第 56 期（平成 29 年度）総会

議長 菱田 公一 _____ 印

議事録署名人 中部 主敬 _____ 印

議事録署名人 平井 秀一郎 _____ 印

平成 30 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を募集しますので、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され、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、本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、原則として本学会会員に限ります。
- (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) 「学会賞に関する内規」に定める賞の内、上項に記載の各賞は、「表彰選考委員会」が「学会賞の審査・選考方法内規」に基づいて選考します。
- (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、本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 30 年 12 月 14 日 (金)

5. 提出先および問い合わせ先

〒819-0395 福岡市西区元岡 744
九州大学大学院工学研究院 機械工学部門 高田 保之 宛
E-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp
TEL +81-92-802-3100, FAX +81-92-802-3098

日本伝熱学会主催講習会「計測技術 ～理論から最新研究まで～」

開催日 2018年11月9日(金) 10.00～17.30

会場 東京八重洲ホール ホール B2

地図 (http://yaesuhall.co.jp/halldetail/hall_n/, <http://yaesuhall.co.jp/accessmap/>)

要旨 『計測技術』を基礎から学ぶ必要がある方々、計測分野で著名な専門家の方々とディスカッションをすることでより広い知見を得たい方々を対象に講習会を開催する運びとなりました。一昨年開催し、ご好評頂いた『計測技術』について、本年は大学の先生方による理論のご講演に加え、産官で活躍している研究者、技術者を講師陣にお招きし、最新技術についてご講演頂きます。計測の基礎知識(原理や不確かさ)を習得せずに、実測結果を見誤ってしまうことで、設計検証に時間を要することはありませんか? 計測技術の最先端に触れることで、現場での推定から実把握ができるようになったこと知っていますか? 本講習会では、講演者と聴講者が一体となった参加型イベントにするため、設計業務や研究で悩んでいることを共有するディスカッションの時間を設けております。

題目・講師

- 10.00 ～ 10.10 / 開催の挨拶 日本伝熱学会/産学交流委員長 近藤 義広 ((株) 日立製作所)
- 10.10 ～ 11.20 / (1) 放射温度計の正しい使い方 中村 元 (防衛大学校)
- 11.30 ～ 12.10 / (2) 局所温度計測 (微小電子部品を例に) 平沢 浩一 (KOA (株))
- 12.10 ～ 12.50 / 昼食休憩 (お弁当をご用意しています)
- 12.50 ～ 14.00 / (3) 微小領域及び異方性材料の熱伝導率測定 羽鳥 仁人 ((株) ベテル)
- 14.10 ～ 15.20 / (4) 熱電対の正しい使い方 田川 正人 (名古屋工業大学)
- 15.30 ～ 16.10 / (5) 空間温度分布計測 染矢 聡 (産業技術総合研究所 (省エネルギー研究部門))
- 16.10 ～ 16.50 / (6) 計測と数値シミュレーションの融合 -データ同化の活用事例- 高木 亮治 (宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所)
- 17.00 ～ 17.30 / パネルディスカッション パネラー: 講演講師, 司会: 近藤 義広
- 18.00 ～ 19.00 / 講師との技術交流会

定員 先着40名

参加費 (資料集1冊, 技術交流会参加費込み)

学会員 25,000 円, 非会員 35,000 円, 特別賛助会員企業の方 20,000 円, 学生 15,000 円

資料集 本セミナーに参加された方1名につき1冊準備します。資料集のみの販売はいたしません。

申込方法 伝熱学会ホームページ上の申込フォームからお申し込みください。

<http://www.htsj.or.jp/committee/lecture/20181109keisokugijutsu/>

また、参加費はクレジットカード決済(口座振込の場合は下記問合せ先へ要相談)となります。

申し込み期限 2018年10月20日(定員に達した場合には期限より早く締め切らせて頂きます。)

問合せ先 (公社) 日本伝熱学会 (担当 大澤) / 電話 (03) 3259-7919 / FAX (03) 5280-1616

/ E-mail : office@htsj.or.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/wp/media/36banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：村田 章（東京農工大学）：murata@mmlab.mech.tuat.ac.jp
- ・編集出版部会長：田川正人（名古屋工業大学）：tagawa.masato@nitech.ac.jp
- ・広報委員会委員長：畠山友行（富山県立大学）：hatake@pu-toyama.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：志村祐康（東京工業大学）：general-affairs@htsj.or.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：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

57 期入会（2018.4.1～2018.6.5）正 29 名 学生 116 名 賛助 3 件

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
---	-----	-----	---	-----	-----

事務局からの連絡

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
---	-----	-----	---	-----	-----

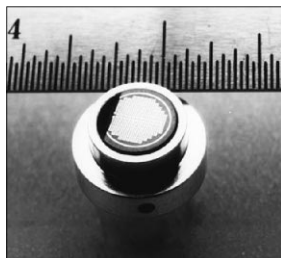
熱流束センサー

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



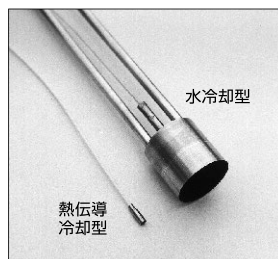
特徴

- 最高速の応答 (約 $6\mu s$)
- $850^{\circ}C$ 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シューティング
- タービンブレード熱風洞試験
- 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

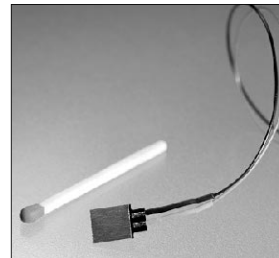


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

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)
- 米国連邦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/放熱の即時応答測定

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

〒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



■ 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。

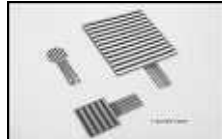
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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℃
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℃
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/ft²sec(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℃(水冷なし)／1500℃(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%
校正精度: ±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℃～+400℃
J 型(鉄／コンスタンタン) -210℃～+1200℃
E 型(クロメル／コンスタンタン) -270℃～+1000℃
K 型(クロメル／アルメル) -270℃～+1372℃
S 型(白金 10%ロジウム／白金) +200℃～+1700℃

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℃
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℃
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm²

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

今月号の特集は、岩井 裕先生（京都大学、編集出版部会委員）のお世話により、「エネルギー貯蔵」をテーマとして 6 件の記事をご寄稿いただきました。いずれも最前線でご活躍の研究者による大変な力作です。ご多忙のなかご寄稿くださいました執筆者の皆様に厚くお礼申し上げます。

本誌には特集記事のほか以下のジャンルの記事があります。話題を提供くださる場合には下記連絡先までぜひご一報ください。会員皆様からのご寄稿をお待ちしています。

- ・特別寄稿：興味深い研究の紹介や提言，ミニレクチャーなど
- ・会議報告：「熱」に関する国内外の講演会，シンポジウム，セミナーなどの報告記事
- ・海外レター：海外の研究機関に滞在，赴任している会員からの現地レポート，体験記など
- ・その他：
 - (a) プロジェクト Q：「熱」に関する苦労話や秘話などの記事
 - (b) ネイチャー Q：科学や自然に関する話題
 - (c) エデュケーション Q：理論・実験・教育・技術開発に関する逸話など
 - (d) ヒストリー Q：過去の偉人や物事の歴史に関する話題
 - (e) Hea'r't Transfer：コーヒーブレイクのようなほっとするコラム記事
 - (f) 博物館めぐり：国内外の様々な博物館や施設への訪問記事

田川 正人（名古屋工業大学）

Masato Tagawa (Nagoya Institute of Technology)

e-mail: tagawa.masato@nitech.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 高田 保之（九州大学）

編集出版部会長 田川 正人（名古屋工業大学）

委員

（理事） 永井 二郎（福井大学），佐々木 直栄（日本大学），戸谷 剛（北海道大学）

（協議員） 青木 修一（東邦ガス），岩井 裕（京都大学），後藤田 浩（東京理科大学），

巽 和也（京都大学），長野 方星（名古屋大学），二宮 尚（宇都宮大学），

服部 康男（電力中央研究所），保浦 知也（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）

TSE 編集幹事 伏信 一慶（東京工業大学）

編集出版部会 連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

名古屋工業大学大学院電気・機械工学専攻（しくみ領域）

田川 正人

Phone & Fax: 052-735-5343 / E-mail: tagawa.masato@nitech.ac.jp