

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 51, No. 216
2012. 7

HTSJ

◆特集：プラズマと人間環境保全



図1 水プラズマトーチで発生したプラズマジェット（左から水，メタノール水溶液，エタノール水溶液）

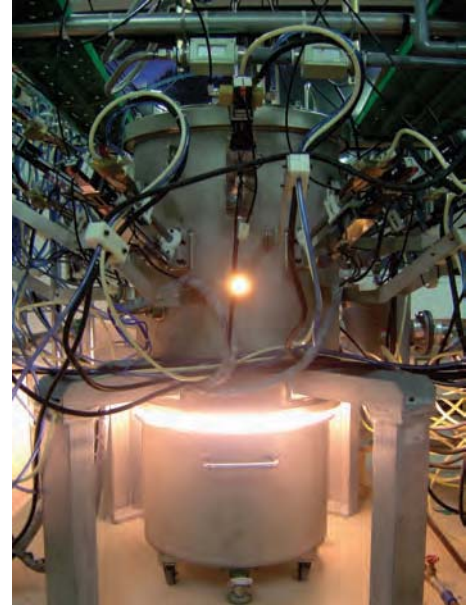


図2 多相交流放電による熱プラズマシステム

新しい熱プラズマシステムの開発

Development of Novel Thermal Plasma System

熱プラズマは通常はアルゴンや空気を用いて発生するが、水やアルコール水溶液を用いても発生することができる。図1に示すように水を用いて発生するプラズマには水素ラジカルが含まれているので、 $H\alpha$ の656.28 nmの発光によって赤く見える。メタノール水溶液やエタノール水溶液の場合には青緑色に見えるが、これは有機物から解離した炭素から発生した C_2 ラジカルが470 nm, 510 nm, 560 nm付近のバンドスペクトルを持つためである。水プラズマは水素ラジカル、酸素ラジカル、OHラジカルの発生源として廃棄物処理や材料合成への新しい展開ができるが、各種の水溶液としてプラズマを発生することにより美しい発光を楽しむこともできる。

また、熱プラズマを発生する電源から考えると、直流放電によるプラズマジェットやアーク、高周波放電による誘導結合型プラズマが広く用いられている。3相アーク放電も産業的に広く用いられているが、6相や12相などの多相交流アーク放電が新しい熱プラズマシステムとして開発されている(図2)。12本の電極に位相の異なる多相交流を印加することにより、高温領域が広く、かつ流速が遅い熱プラズマを発生させることができる。多相交流アークは、直流アークよりもプラズマ体積が大きく、高周波プラズマよりも低コストで高効率という利点がある。この方式では、放電空間にプラズマが連続的に発生しているので、放電状態が常に持続されており、安定した連続放電が得られる。

熱プラズマは溶射や溶接の分野で古くから使われているが、水プラズマがつくり出す新しい反応場としての魅力、多相交流放電による大型の熱プラズマプロセッシングへの展開など、最近では熱プラズマが益々注目されている。

渡辺 隆行 (東京工業大学)

Takayuki WATANABE (Tokyo Institute of Technology)

伝 熱

目 次

〈新旧会長挨拶〉

- 第 51 期会長就任に当たって……………第 51 期会長 門出 政則 (佐賀大学) …… 1
 日本伝熱学会第 50 期を振り返って
 ……………第 50 期会長 笠木 伸英 ((独) 科学技術振興機構) …… 2

〈将来検討委員会からの答申〉

- 将来検討委員会からの答申を受けて……………笠木 伸英 ((独) 科学技術振興機構) …… 3

〈第 24 回日本伝熱学会賞〉

- 平成 23 年度日本伝熱学会賞選考の報告
 ……………表彰選考委員会委員長 岡崎 健 (東京工業大学) …… 17
 日本伝熱学会学術賞を受賞して……………野村 信福, 向笠 忍, 豊田 洋通 (愛媛大学) …… 18
 日本伝熱学会学術賞を受賞して……………牧野 俊郎, 若林 英信 (京都大学) …… 19
 日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………上野 藍 (東京大学) …… 20
 日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………笹部 崇 (東北大学) …… 21
 日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………元祐 昌廣 (東京理科大学) …… 22

〈平成 24 年度文部科学大臣表彰〉

- 平成 24 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰
 ……………表彰選考委員会委員長 岡崎 健 (東京工業大学) …… 23

〈第 49 回日本伝熱シンポジウム〉

- 第 49 回日本伝熱シンポジウムの報告……………石塚 勝 (富山県立大学)
 坂村 芳孝 (富山県立大学), 小澤 守 (関西大学), 巽 和也 (京都大学)
 新 隆之 (日立プラントテクノロジー), 堀内 敬介 (日立製作所) …… 24
 優秀プレゼンテーション賞 受賞者 — 第 49 回日本伝熱シンポジウム —
 ……………学生会委員会幹事 巽 和也 (京都大学) …… 30
 パネルディスカッション 伝熱研究の過去・現在, そして, 私たちはどこへ行くのか
 ……………石塚 勝 (富山県立大学) …… 31

〈追悼 森康夫先生〉

- 森康夫先生のご逝去を悼む……………中山 恒 (名誉会員) …… 38
 森康夫先生を偲んで……………一色 尚次 (東京工業大学名誉教授) …… 40

〈特集：プラズマと人間環境保全〉

水プラズマによる有害物質の分解システム

……………渡辺 隆行（東京工業大学）…………… 42

低温プラズマを用いたバイオマテリアルの表面機能化

……………笹井 泰志，近藤 伸一（岐阜薬科大学）

山内 行則（松山大学），葛谷 昌之（中部学院大学）…………… 49

プラズマ複合処理によるスーパークリーンディーゼル・燃焼炉の開発

……………大久保 雅章，桑原 拓也（大阪府立大学），吉田 恵一郎（大阪工業大学）

藤島 英勝，黒木 智之（大阪府立大学）…………… 55

高電圧・プラズマ技術の農業・食品分野への応用……………高木 浩一（岩手大学）…………… 64

プラズマ医療：熱流体からバイオ・医療までを融合する新領域

……………佐藤 岳彦（東北大学）…………… 70

〈ネイチャーQ〉

ガスハイドレートの高圧物性と太陽系・宇宙における存在の可能性

……………平井 寿子（愛媛大学）…………… 78

〈特別寄稿〉

環境や運動に対するヒトの適応能……………河端 隆志（関西大学）…………… 82

〈国際活動・会議報告〉

第 22 回輸送現象に関する国際シンポジウム……………堀内 敬介（(株) 日立製作所）…………… 88

〈巻頭グラビア〉

新しい熱プラズマシステムの開発……………渡辺 隆行（東京工業大学）……………表紙裏

〈行事カレンダー〉

…………… 91

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 50 期（平成 23 年度）総会議事録…………… 93

編集出版部会からのお知らせ…………… 95

編集出版部会ノート……………100

Vol.51, No.216, July 2012

CONTENTS

<New and Former Presidents' Address >

Inauguration Address as the 51 st President Masanori MONDE (Saga University)	1
The HTSJ's 50 th Year in Retrospect Nobuhide KASAGI (Science and Technology Agency)	2

<A Report from the Committee >

Report from the Committee on the Future of the Heat Transfer Society of Japan Nobuhide KASAGI (Science and Technology Agency)	3
--	---

<The 24th Heat Transfer Society Awards >

On Selection of Awards of the Heat Transfer Society of Japan, 2011 Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology)	17
Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan Shinfuku NOMURA, Shinobu MUKASA and Hiromichi TOYOTA (Ehime University)	18
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan Toshiro MAKINO and Hidenobu WAKABAYASHI (Kyoto University)	19
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Ai UENO (The University of Tokyo)	20
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Takashi SASABE (Tohoku University)	21
Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan Masahiro MOTOSUKE (Tokyo University of Science)	22

<The Commendation for Science and Technology by MEXT 2012 >

The Commendation for Science and Technology by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology 2012 Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology)	23
--	----

<The 49th National Heat Transfer Symposium of Japan >

Report on the 49 th National Heat Transfer Symposium of Japan Masaru ISHIZUKA ¹ , Yoshitaka SAKAMURA ¹ , Mamoru OZAWA ² Kazuya TATSUMI ³ , Takayuki ATARASHI ⁴ , Keisuke HORIUCHI ⁵ (1 Toyama Prefectural University, 2 Kansai University, 3 Kyoto University 4 Hitachi Plant Technologies, Ltd., 5 Hitachi, Ltd.)	24
Best Presentation Awards Kazuya TATSUMI (Kyoto University)	30
The Past, Present and Future of Heat Transfer Research – Where are we going? – Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University)	31

<Memorial>

Professor Yasuo Mori (1923 – 2012): Memorial Tribute Wataru NAKAYAMA (Honorary Member)	38
My Recollections of Professor Yasuo Mori Naotsugu ISSHIKI (Professor Emeritus, Tokyo Institute of Technology)	40

<Special Issue>

Decomposition System of Hazardous Wastes by Water Plasmas Takayuki WATANABE (Tokyo Institute of Technology)	42
Surface Functionalization of Biomaterials Using Low-temperature Plasma Yasushi SASAI ¹ , Shin-ichi KONDO ¹ , Yukinori YAMAUCHI ² and Masayuki KUZUYA ³ (1 Gifu Pharmaceutical University, 2 Matsuyama University, 3 Chubu Gakuin University)	49
Super-Clean Diesel Engine and Combustor Using Nonthermal Plasma Hybrid Aftertreatment Masaaki OKUBO ¹ , Takuya KUWAHARA ¹ , Keiichiro YOSHIDA ² Hidekatsu FUJISHIMA ³ and Tomoyuki KUROKI ³ (1 Osaka Prefecture University, 2 Osaka Institute of Technology, 3 Osaka Prefecture University)	55
Agricultural and Food Processing Applications of High-Voltage and Plasma Technologies Koichi TAKAKI (Iwate University)	64
Plasma Medicine : A New Interdisciplinary Field Integrating from Thermofluid to Bio Medical Engineering Takehiko SATO (Tohoku University)	70

<Nature Q>

High Pressure Behaviors of Gas Hydrates and Ubiquitous Presence in the Universe Hisako HIRAI (Ehinme University)	78
---	----

<Contribution>

Thermal Regulation and Exercise Takashi KAWABATA (Kansai University)	82
---	----

<Report on International Conference>

Report on the 22nd International Symposium on Transport Phenomena Keisuke HORIUCHI (Hitachi Ltd.)	88
--	----

<Opening-page Gravure:heat-page>

Development of Novel Thermal Plasma System Takayuki WATANABE (Tokyo Institute of Technology)	Opening Page
---	--------------

<Calendar>	91
<Announcements>	93
<Note from the Editorial Board>	100

第 51 期会長就任に当たって
Inauguration Address as the 51st President



門出 政則 (佐賀大学)
Masanori MONDE (Saga University)

第 50 期会長の笠木伸英先生の後を受けて、第 51 期会長を務めることになりました。どうぞよろしくお願ひ申し上げます。

第 51 期は、新たな公益社団法人になった年であると同時に、過去 50 年間という長い歴史を見つめ、新たなベクトルを探し、それに向かって進む出発点でもある。幸い、学会創立 50 周年を機に、多くの記念行事が企画・実施された。例えば、創立 50 周年記念特別講演会では、第一線で活躍された先生が各伝熱分野のこれまでの研究活動と今後の展望を紹介し、そのことが「伝熱」記念特別号に掲載されている。更に、学会の将来に関する検討も前会長より諮問され、日本伝熱学会将来検討に関する貴重な答申が将来検討委員会からなされた。その答申の骨子は、詳細な現状分析と委員各位の真剣な議論の中から生まれ、これから進むべき貴重な 2 つの提言として示されている。それは、(1) 特定推進研究企画委員会の設置、(2) アジア地区委員会の設置である。その(1)では、特定の研究テーマを公募し、大学の枠を超えて、新規研究領域の開拓や社会のニーズにあった学術研究を通して、研究の一層の進展を図るというものである。(2)の提言では、熱工学の研究者の熱に関わる研究コミュニティの国際的な地位向上を図り、アジア地区、特に日中韓を中心とした国々と連携を深め、学術レベルの向上を図る活動を進展するとしています。詳細は、特別委員会から提出された答申を是非とも読んで頂きたい。そして、51 期では、この 2 つの提言の具体的な推進に取り組みたい。

3.11 の福島原発事故以来、日本のエネルギーのあり方について広範かつ活発な議論がなされているが、その方向は正しいとは言い難い状況で、混沌としている。熱に関する基礎・応用研究の成果

を社会にどのように還元していくかという点も学会としての重要な責務ではないかと確信している。研究環境がますます厳しくなっている中で、学術分野や大学という枠を乗り越えた研究活動や協力体制がこれからもっと重要になってくるだろう。その意味でも、提言(1)の具体化に取り組みたい。

50 周年記念事業の締め括りとして企画されたシンポジウムでのパネルディスカッション“伝熱研究の過去・現在、そして、私たちはどこへ行くのか”では、4 名のパネリストが、これまでの研究活動を紹介し、さらにこれから進むべき道を熱く語るという貴重な講演がなされ、若い研究者から非常に参考になったと好評であった。

学会として、若い研究者を含む多くの会員が大学の枠を超えて「熱」という共通の課題に取り組み、その成果を社会に還元する機会を与えることが出来ればと考えている。

個人的には、修士課程 2 年の時初めて第 10 回日本伝熱シンポジウムに参加し、それ以来 40 年間殆ど全て参加している。講演をした折りは、本質を突いた厳しい質問や暖かい助言を受け、駆け出し時の研究活動において、シンポでの発表が新たな研究心の高揚となったように記憶している。また、発表では集中砲火を浴び、本当に厳しい体験をした。しかし、懇親会での大先生からの優しい叱咤激励が懐かしく思い出される。伝熱シンポでの講演が若い研究者の登竜門であり続けることを今でも期待している。

おわりに、第 51 期の学会運営に当たっては、3 名の副会長をはじめ、理事、役員、事務局の協力を得ながら、日本伝熱学会の新たな出発点として前進したい所存です。会員諸兄姉のご理解とご協力をいただきますようお願い申し上げます。

日本伝熱学会第 50 期を振り返って

The HTSJ's 50th Year in Retrospect



笠木 伸英 ((独) 科学技術振興機構)
Nobuhide KASAGI (Science and Technology Agency)

昨年 5 月、日本伝熱学会の第 50 期会長をお引き受けしてから早一年が過ぎました。学会の次の半世紀を展望する時期を迎え、特に東日本大震災後の社会の中で本学会の役割と将来の活動を会員の皆様と共に模索する一年でありました。

前期から計画されておりました学会創立 50 周年記念の諸事業は、お陰様で全て順調に実施され、多大な成果を挙げたことは誠にご同慶の至りであります。一連の記念行事は、昨年 5 月岡山での伝熱シンポジウムでの記念講演に始まり、本年 5 月の富山での同シンポジウムでのパネル討論で終了しました。この間、昨年 11 月 25 日には文科省、経産省、日本学術会議、関連学協会から来賓のご出席を得て記念式典を挙行致しました。また、横浜での記念伝熱セミナー、各支部での記念行事、1 年間にわたる学会誌「伝熱」特集号など盛り沢山の事業が執り行われました。

さらに、世界の伝熱コミュニティとの連携協力を強め、学术交流に貢献することを目的として、国際賞を設立いたしました。沸騰現象の抜山カーブで知られる抜山四郎先生のご業績を讃えて、**The Shiro Nukiyama Memorial Award** と命名して世界にノミネーションをお願いしましたところ、優れた候補者が推薦されました。審査委員会の厳正な審査の結果、第 1 回の受賞者としてダルムシュタット工科大学の **Peter Stephan** 博士が選ばれ、来る 11 月 13 日長崎での国際伝熱フォーラムで授賞式が行われる予定です。

本学会の前身である日本伝熱研究会は 1991 年に日本伝熱学会という新名称に、1994 年に社団法人に生まれ変わりましたが、新法人制度の発足後の第 47 期には学会の在り方が改めて検討され、その後担当委員の継続的なご尽力で、本年 4 月 1 日によりやく公益社団法人として認可されました。

本学会とその活動が名実共に公共財と認められたわけで、誠に喜ばしい限りです。

こうした複数の学会の節目に、将来検討委員会の設置を理事会で承認いただき、21 世紀における次の 50 年に向けての本学会の将来構想について抜本的検討をお願い致しました。特に、歴史と伝統を有する本学会の新しい時代における使命は何か、そしてわが国が直面するさまざまな困難、すなわち、大震災、エネルギー問題、産業空洞化、少子高齢化、経済危機などの軽減、克服にどのように貢献していくか、会員が共有できる理念と方法を見出すことをお願いしました。これに対し、去る 4 月 21 日理事会にて、将来検討委員会宇高義郎委員長から答申を受けました。答申には、将来に向けて本会が意義ある活動を通じてさらに発展していくための貴重な提案が盛り込まれています。特に、本会が熱科学の振興を図る我が国の中心的学術団体としても、また直面するエネルギーや環境の課題に科学的な分析と対策オプションを提案する専門家集団としても十分な貢献をすべく、具体的方策が示されています。さらに、グローバル化する世界の中で、国際コミュニティとのより密な協力連携によって人類の平和と福祉に一層の寄与を成すための努力の必要性も指摘されています。今後、門出政則新会長のリーダーシップの下、会員各位が一丸となって、示された本会の使命を果たしていただきたいと切に願うところです。

最後に、森治嗣、岡崎健、飛原英治各副会長、理事・特命理事各位、第 48、49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会、創立 50 周年事業実行委員会、将来検討委員会をはじめとする各委員会の委員、支部役員の皆様、会員諸兄姉、事務局の皆様の絶大なご支援ご協力に心から御礼を申し上げ、退任の挨拶とさせていただきます。

将来検討委員会からの答申を受けて

*Report from the Committee on the Future of
the Heat Transfer Society of Japan*

笠木 伸英 ((独) 科学技術振興機構)
Nobuhide KASAGI (Science and Technology Agency)
e-mail: kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

日本伝熱学会は、昨年11月に創立50周年を迎え、また本年4月1日には公益社団法人として改めて認可されました。こうした学会の節目に、将来検討委員会の設置を理事会で承認いただき、21世紀における次の50年に向けての本学会の将来構想について諮問致しました。特に、歴史と伝統を有する本学会の新しい時代における使命は何か、そしてわが国が直面するさまざまな困難、すなわち、大震災、エネルギー問題、産業空洞化、少子高齢化、経済危機などの軽減克服にどのように貢献していくかについて、会員が共有できる理念と方法を見出すことを依頼しました。これに対し、去る平成24年4月21日開催の第50期第4回理事会にて、将来検討委員会宇高義郎委員長より下記の答申を受け、理事会として受領いたしました。答申には、将来に向けて本会が意義ある活動を通じてさらに発展していくための貴重な提案が盛り込まれています。会員諸兄にご報告すると共に、ご意見やご要望もいただきたいと考えております。また、次期会長には答申内容の実現に向けて取り組んでいただくよう申し送りしたいと存じます。

この場を借りて、委員長、各委員の皆様の献身的な検討に心より敬意を表すると共に、厚く御礼申し上げます。次第です。

日本伝熱学会将来検討に関する答申

答申の骨子

本学会の創立50周年と新公益法人化を機に、最近の学术界内外の変化に対応した新たな展開を目的として、笠木伸英第50期会長より本学会の将来構想について諮問され、以下の課題について検討を行った。

[検討課題] (1) 本学会の現状分析、(2) 学術的な守備範囲・活動内容の方向性；新規研究領域開拓や大型プロジェクトの立案、他分野との連携、(3) 社会からの要請の強い現代的課題、(4) 国際的な関係整理と今後の国際的活動の発展、(5) 学会名称。

[現状分析] 本学会では機械工学以外を専門とする会員数が減少し、日本機械学会熱工学部門との違いが明確ではなくなりつつある。研究内容は、他分野との境界領域に広がり、現象を取扱うスケールもミクロ・ナノスケールにまで及んでいる。一方、この約10年間の我が国の自然科学分野のジャーナルにおけるドキュメントシェアの大幅な低下と質の伸び悩みが指摘されており、世界の科学技術の中で日本の存在感が薄れる傾向が懸念される。伝熱分野においても顕著なドキュメントシェア低下が見られる。また、エネルギー技術の根幹を占めるなど、熱に関わる研究コミュニティの役割の社会的重要性は高いが、国内的にも国際的にもその位置付けは充分とはいえない。したがって、現在の社会的要請を考慮しながら、設立当初の趣旨に立ち返って分野横断的な熱分野の研究者集団を目指すとともに、我が国の伝熱工学の将来と本学会の国際展開の観点から、その集団が機能する学会のあり方を明らかにし、その実現に向けて具体的な対策を講じる必要がある。

[提言1: 特定推進研究企画委員会の設置] 検討課題 (2)、(3)項に対応して、新たな学会活動を指向するための特定推進研究企画委員会の設置を提案する。委員会においては、大局的な学術の振興の中に本学会の分野を位置付け、より学際的な研究アクティビティを確保し、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、客観的な根拠に

基づいて設定する。そして、それらを学会として取り組む主要課題と位置付けて学会員の研究課題設定に供すると共に、公的なファンディング機関などによる研究開発方策・大型研究プロジェクトの立案や推進に対して助言してゆくことを目標とする。

[提言2:アジア地区委員会の設置] 熱研究コミュニティの国際的な地位向上を図り、また発展しつつあるアジア地区の熱分野コミュニティを本学会が主導する形で組織化し、国際的課題の解決を目的とする委員会の設置を提案する。我が国の熱分野コミュニティ内での連携および国際的なコミュニティとの協力体制を進める。

[学会名称の検討] 本委員会での多角的な視点からの検討の結果、現在の学会名称を俄に変更すべきとする合意には至らなかった。しかし、将来にわたる伝熱学分野の深化と拡張、境界領域の進展、関連学協会との連携、さらに学会の活動に対する社会的な期待の変化などを考慮すると、今後とも学会名称の変更に関わる本質的議論を継続し、名称変更を行う柔軟性とダイナミズムを担保すべきである。

1. はじめに

日本伝熱学会（以下、本学会と呼ぶ）は、1961年11月の日本伝熱研究会の創立から50周年を迎え、新たな半世紀へ向けてスタートを切った。各学会を貫く日本の伝熱研究の中心組織として設立されて以来、伝熱をキーワードとする分野横断的な我が国の学術コミュニティとして、会員の活動により多くの優れた研究成果を蓄積してきた。また、伝熱シンポジウム、伝熱セミナー、会誌・論文誌の発行、国際伝熱会議の日本地区の担当・代表、国際伝熱フォーラムなど多様な学術的活動を展開してきた。伝熱研究会の設立当初は、学術団体としての伝熱グループの形成により、伝熱学・伝熱工学の基礎的分野の充実・体系化あるいは伝熱の相関式決定・機構解明・促進など、伝熱分野の発展に直接寄与する事柄が主な課題であった。その後、多様な進展を遂げ、現在では、マイクロ/ナノ物理に基礎をおく学問分野への深化、あるいは他の科学技術分野との境界にまたがる学際領域への拡充など、本学会の活動は、従来の伝熱学の体系に収まらない多方面の研究領域へ展開されている。

一方、世界科学者会議による1999年のブダペスト宣言（科学と科学的知識の利用に関する世界宣言）において「社会における科学と社会のための科学」が提唱されている。また、従来の知の営みとしての科学に加えて、社会のための科学が新しい学術の体系として日本学術会議から提案されており、学術研究者の意識改革が求められ、社会と科学の関わりには大きな変化が生じつつある。したがって、研究者には、研究の独立性・自律性が保証された状況の下で、知識の獲得を目的として基礎研究を遂行するだけでなく、広い意味で人類社会の持続的発展に資するための研究課題を自ら設定してそれらを基礎研究に組み込み、発展させることが求められている。また、我が国は大震災、産業の空洞化、エネルギー問題、少子高齢化、世界の経済危機など、多くの課題を抱えている。一方、国の財政は逼迫し、先行き不透明であるにもかかわらず、第4期科学技術基本計画ではGDPの1%が科学技術関係予算として確保されており、科学技術とそれに駆動されるイノベーションに大きな期待が寄せられている。公的ファンディングを使って研究開発をしている研究者・技術者にはその期待に応えることが求められており、そのような研究者集団としての学会も同様である。

このような背景のもと、笠木伸英第50期会長より、本学会の50周年と新公益法人化を機に、最近の学術界内外の変化に対応した新たな展開を目的として、本学会の守備範囲の再検討・再構築、あるいは今後の進むべき方向性の検討を諮問された。以下の2. (1)~(5)項に示される検討課題に焦点を絞り、平成23年7月から24年3月まで7回の委員会を開催し、今期理事会（笠木会長）に提出する運びとなった。

2. 検討課題

- (1) 日本伝熱研究会および本学会におけるこれまでの展開・発展を調査し、本学会の現状を分析する。
- (2) 現在および将来における本学会の学術的な守備範囲および活動内容の方向性について検討する。特に、

今後の学会を担う若手研究者の研究活動を活性化することが可能な新規重要研究領域の開拓や大型プロジェクトの立案に関して、他分野との連携も視野に入れながら検討する。

- (3) 社会からの要請の強い現代的課題への対応を検討する（グリーンイノベーション、ライフイノベーション、大震災からの復興再生、等々）。
- (4) 国際的な枠組みと本学会の関係を整理し、今後の国際展開の方向性を検討する。
- (5) 上記検討結果に基づき、現在あるいは将来の発展に相応しい学会名称について検討する。

3. 日本伝熱研究会・日本伝熱学会のこれまでの経過と現状分析

伝熱研究会設立の趣旨は、伝熱をキーワードとする分野横断的な研究者のコミュニティーを立ち上げて伝熱工学の進展を図ることにあつた。小林明初代会長は、「伝熱工学は非常に多方面の応用対象を持つところにその特色があり、それだけに、その進歩もまた多方面からの寄与によってはじめて可能となるのであって、個々の学会や協会などの局限された範囲にとどまるようでは充分ではありません⁽¹⁾」と会誌創刊号に記している。そして、設立初期には機械工学のほかにも、化学工学、原子力工学、建築学などを専門とする多くの研究者や技術者が参画し、伝熱工学研究の発展に寄与してきた。1974年には第5回国際伝熱会議が日本で開かれ、伝熱研究の分野での世界における日本の存在は大きくなっていった。しかし、伝熱研究会発足から50年経った今、本学会も岐路に立っていると思われる。資料1に本学会に関するデータの集計結果を示すとともに、その要点を以下に示す。

- (1) 会員数は設立から35年で約7倍に増加したが、1994年頃からほぼ一定であり、ここ数年はやや減少傾向を示している（図1(a)）。
- (2) 伝熱シンポジウムの参加者数および発表件数は2000年頃が最大であり、その後はやや減少傾向にある（図1(c), (d)）。
- (3) 大学・高専等の教育研究機関に所属する会員が約60%、企業の会員が約30%、国（独立行政法人）の研究所等の研究機関に所属する会員が約5%である（図2(e)）。大学・高専および企業の会員数の割合には年により多少の増減が認められるが、研究機関に所属する会員の割合は減少し続けている。
- (4) 設立初期は機械系の会員がおよそ3分の2、化学・物質系と原子力系の合計が4分の1程度であった（図4(a)）。それ以降、機械系の会員数が増加したのに対し、化学・物質系と原子力系の会員数は合計100名程度であった1967年よりも少なく、現在では60名にまで減少している（表1）。2002年以降、統計上は機械系の占める割合も減少し（図4）、会員数も2011年の方が2002年より少なくなっているが（表1、図3）、これは大学の学科や専攻の改組による名称変更によるものと推察される。また、不明の中にも機械系の会員が相当数いると予想され、化学・物質系・原子力系の減少を考慮すると機械系の割合は実質的には増加していると推測される。
- (5) 現在の会員年齢構成については、40歳代の会員が全体の約4分の1を占めており最も多い（図5(b)）。これに対して30歳代の会員数はそれより約4割も少ない。
- (6) 地域別会員数にもかなり差がある。全体の4割程度が関東地区に集中しているのに対し、北海道地区は3%未満である（図6）。
- (7) Elsevier 社によれば、中国をはじめとした東アジア諸国の国際誌掲載論文数がこの10年で急速に増加したのに対して、我が国の科学技術論文のドキュメントシェアは大きく減少している。また、論文の質（H-index）も上昇してはいるものの、その程度は非常に小さい。同様のことは伝熱工学分野でも認められ、代表的な国際誌である *International Journal of Heat and Mass Transfer* の日本人著者の掲載論文数は2004年をピークとして顕著な減少傾向を示しており（図7）、日本機械学会論文集（B編）の論文数も著しく減少している。

以上のように、現在では機械工学以外を専門とする会員数が減少し、学会員の専門分野別構成の点から

は日本機械学会熱工学部門との違いが明確ではなくなりつつある。研究内容は、電気化学、電磁気学、量子力学、材料工学、医学生物学など他分野との境界領域に広がり、現象を取扱うスケールもマイクロ・ナノスケールにまで及んでいる。一方、上記(7)は世界の科学技術の中で日本の存在感が薄れてきている傾向を表しているものと懸念される。特に、国際的な伝熱専門誌へ掲載される日本人論文数が激減している点は問題である。その要因の一つは、研究分野の多様化に起因して他分野のジャーナルへの投稿が増えていることと推測され、そのような傾向は欧米先進国においても同様であると考えられる。しかし、研究者の大多数が境界領域の研究に携わっているというわけではなく、またジャーナルにおけるドキュメントシェアの大幅な低下と質（引用）の伸び悩みは我が国の科学技術分野に共通しているものの、特に伝熱分野における我が国のシェア低下は顕著である。このような傾向が続けば、伝熱分野における日本の国際的影響力の低下を招くことになり、我が国の伝熱工学の将来と本学会の国際展開の観点から看過できない。これらの事実は、我が国全体の検討課題でもあるが、本学会としての対応の必要性を示していると言える。

また、熱技術がエネルギー技術の根幹を占めていることから、熱に関わる研究コミュニティが果たすべき役割の社会的重要性は高いが、国内的にも国際的にもその位置付けは現状では充分とはいえない。例えば、ICHMT (International Centre for Heat and Mass Transfer)が、国際的な学術団体を統轄する ICSU (International Council for Science) の中で正式メンバーとして相応のポジションに位置付けられていないなど、改善すべき事項も多い。学術団体としての社会的責任を果たすためにも、今後、熱研究コミュニティの地位向上を図る必要があると考えられる。

したがって、本学会としては、最近の学術界内外の変化に対応した新たな展開を目的として、設立当初の趣旨に立ち返って分野横断的な熱分野の研究者集団を目指すとともに、その集団が機能する学会のあり方を明らかにし、その実現に向けて具体的な対策を講じる必要がある。また、専門的に細分化された多くの他学会との連携や学会の効率的運営も検討を要する項目である。さらに会員の年齢は、40歳代が最も多く、それに比べて30歳代が非常に少ない（6割程度）事実も、学会の将来と継続性の面では大きな問題であり、早急な対応が必要と言える。

4. 提言

4.1 本学会の今後の方向性と研究企画のための特定推進研究企画委員会の設置

最近の学術界内外の変化および前述の2. (2)および(3)項に対応して本学会の新たな展開を指向するため、特定推進研究企画委員会の設置を提案する。その委員会を中心として、大局的な学術の振興の中に本学会の分野を位置付け、より学際的な研究アクティビティを確保し、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、客観的な根拠に基づいて設定する。さらにその課題に応じて、他分野との協調の基に、学際的な拡がりによる学術の発展を図り、また産官学の研究推進体制を進める。そして、それらを学会として取り組む主要課題と位置付けて学会員の研究課題設定に供すると共に、公的なファンディング機関などによる研究開発施策・大型研究プロジェクトの立案や推進に対して助言していくことを目標とする。

特定推進研究企画委員会には、特定推進研究課題を進める特定推進研究グループを置く。特定推進研究グループのコアメンバーは、自らが主導する領域の重要性に賛同する者で特定推進研究グループを構成する。そのグループを、日本として強い領域が形成できるように公的なファンディング機関などに予算措置を働きかけるための母体として位置づける。そして、研究費を確保して研究活動を活性化させる。

また、本学会以外からの識者や専門家の参加あるいは意見聴取などにより、特定推進研究企画委員会および特定推進研究グループによる提案の客観性を担保することが必要である。

以上のような体制により、研究企画機能を強化することが、今後の本学会の設立の趣旨でもある学際性を担保しつつ、熱分野の研究コミュニティとして今後の学術の発展を図っていく上で重要と考えられる。このような活動による学会の活性化は、近年の外国からの博士課程学生の減少や我が国からの国際誌への論文投稿数の減少といった問題に対しても有効であると考えられる。

4.1.1 特定推進研究企画委員会の目標

上記内容を具現化することを目標とする。すなわち、4.1.3 項の特定推進研究グループを公募選定するとともに、選定されたグループと協働して4.1.3 項 (1) ①～⑦の目的達成を図る。

4.1.2 特定推進研究企画委員会の概要

- (1) 日本伝熱学会特定推進研究企画委員会と称する。
- (2) 会長直属の委員会とする。
- (3) 委員長および10名程度の委員から構成される。
- (4) 下記の事項を掌理する。
 - ① 大局的な学術の振興の中に本学会の分野を位置付け、他分野との横断的協調、産官学の研究推進体制を考慮し、本学会として取り組むべき2. (2) (3)項の検討課題に合致する特定推進研究課題候補を探索・立案する。
 - ② 特定推進研究課題を公募する。
 - ③ 上記①の特定推進研究候補課題候補と公募による提案課題を併せて、重要性が高く見込みがあると考えられる課題の抽出あるいは調整等により特定推進研究課題を決定し、公的なファンディング機関などへの提案を推進するエンジンの役割を担う。
 - ④ 特定推進研究グループの進展内容をチェックし、調整するとともに、必要事項を決定する。(なお別途、特定推進研究グループに係る申請、中間報告および最終報告(A4用紙20ページ程度)の書式を準備する。)

4.1.3 特定推進研究グループの概要

- (1) 特定推進研究グループは、下記の①～⑦を推進する。
 - ① 新規研究領域(学術体系)の開拓・構築
 - ② 従来からの研究領域の深化・拡大展開・体系化
 - ③ 学際的研究開発:他の学術分野(多様な学協会)との研究交流・協力による守備範囲の拡大展開
 - ④ 産業界との連携:産業界からの委員、産業界における課題から、進むべき研究開発の方向性探求(幅広い領域にわたる先進的技術課題に係る学術展開)あるいは産業界や民生器機への応用展開(産学共同研究)
 - ⑤ 研究シーズの成果発信:外部組織(JST, JSPS, NEDOなど)への研究開発方策(国策)・大型研究プロジェクトの立案、推進
 - ⑥ 本学会の活性化、特に若手研究者への研究動機の涵養
 - ⑦ 社会への積極的な成果等の発信
- (2) 特定推進研究グループは、特定推進研究課題を実施するグループ員から構成され、その数に特に制限は置かないが、標準的には、数名から10名程度の員数とする。グループを代表するグループ長を置く。
- (3) 活動期間を2年以内とする。
- (4) 特定推進研究グループは下記の①～④を役割とする。
 - ① 特定推進研究課題を実施し、別に定める規定に基づき、研究進展の報告、委員会への説明、広報資料の作成などを行う。
 - ② 特定推進研究グループは課題申請時に、4.1.3項(1)に対応する具体的な成果目標を明確にする。
 - ③ 1年後に中間報告書、2年後に最終報告書を委員会に提出する。報告書においては、目標の達成度・成果を明確にする。
 - ④ 公的なファンディング機関などへ向けた研究課題を特定推進研究企画委員会に随時提案する。

4.2 国際展開の方向性と国際対応のためのアジア地区委員会の設置

熱分野はエネルギー技術の根幹を占めるなど、熱に関わる研究コミュニティーが果たすべき役割の社会

的重要性は非常に高いが、それに比して現状では熱研究コミュニティが満足できる国際的地位にあるとはいえない。その地位向上を図るとともに、近年台頭してきた一部のアジア諸国と連携を図ることの重要性が増してきている。本学会が主催する国際会議である IFHT (International Forum on Heat Transfer) の拡充強化も今後の国際展開には重要であると考えられる。ICHMT (International Centre for Heat and Mass Transfer) における活動などを通じて、以下の事項への対応を積極的に進めていく必要がある。

4.2.1 熱研究コミュニティの地位向上

国際的な観点から学術界における熱分野の研究コミュニティのポジションがその重要性に比べて低く、ファンディング機関への発信力も弱くなっている。学術団体としての社会的責任を果たすためにも、熱研究コミュニティの地位向上が必要である。ICHMT を ICSU (International Council for Science) の中で見える形に格上げするため、他の熱関係の国際学会と連合を組んで ICSU のユニオンメンバーを目指してゆく。また、国内においても、熱に関連する他学会との連合を日本学術会議の中に位置付けて検討することが必要である。

4.2.2 アジア地域への対応

主にアジアの一部の国の学術レベル向上にともなって、今後我が国へ留学生が集まりにくくなることが懸念される。また3項および資料1に記したように、中国をはじめ東アジア諸国に比べて、我が国からの国際ジャーナルへの論文掲載数の減傾向も顕著である。このような国際的な動向に影響され、我が国における国際学会の集客力低下、大学における熱分野の衰退等が懸念される。以上の事項は、早急に対応可能な問題ではなく、また、本学会に限ったものではないと思われるが、4.1項に記した特定推進研究企画委員会等を通じた研究活動の活性化は、国内の博士課程学生の減少、我が国からの国際誌への論文投稿数の減少傾向に歯止めをかける有効な方法と言える。

4.2.3 International Forum on Heat Transfer (IFHT)

本学会主催の国際会議として、IFHT が4年ごとに開催されているが、国際的に十分に認知されているとは言えない。我が国の国際的な貢献を図るためにも、その国際的な存在感の向上は欠かすことができない。また、本学会の創立50周年を記念して創設された Nukiyama 賞の授与の場でもあり、国際的に卓越した会議として発展させることが必要である。現システムを維持しつつ、引き続き知名度を高める努力を継続する方法もあるが、一つの方策として、本学会主催には拘らず、例えば、日本、中国、韓国、オーストラリアの4ヶ国などアジア・大洋州地域の共催とすることが考えられる。

4.2.4 アジア地区委員会の設置提案

上記の4.2.1～4.2.3項の課題解決のため、国際的課題への対応を目的として、近年急速に発展し、熱分野研究の中心となりつつあるアジア地区の熱分野コミュニティを本学会が主導する形で組織化するための委員会（仮称：アジア地区委員会）を本学会国際活動部に設置することを提案する。我が国から選出された ICHMT 理事などの国際組織代表との協力のもと、アジア地区委員会によりアジア地区を組織化するとともに、我が国の熱分野コミュニティ内での連携および国際的な熱分野コミュニティと協力しながら、諸課題解決への道を開いていく必要がある。今後京都、北京と国際伝熱会議がアジア地区で連続開催されるが、ネットワーク形成を固める好機である。

5. 学会名称の検討

前記3項および4項における検討あるいは提案の内容を基に、本学会の名称に関する多角的な視点からの検討を行った。すなわち、現在の本学会の名称につき、本学会の現状あるいは将来の方向との整合性、また「伝熱」という用語の対外的な通用性などの事項について検討した。その結果、改称に関しては、本委員会において一致する見解に至らなかった。しかし、本学会の守備範囲の変化、また将来にわたる守備領域および拡張領域を考慮すると、学会名称の変更に関わる議論を継続し、適切な時期に名称変更を行う柔軟性とダイナミズムを担保する必要性には賛意が多かった。以下に、改称に対する諸検討をまとめた。

5.1 学会名称の取り扱いに関する基本的留意事項

「名は体を表す」というように、学会にとってもその名称は最も重要な問題である。人間個人の場合に親等が名付けた名前を改名することは、名付け親の思いやこれまでの個人の人生の重みにも留意し安易には行えないように、学会の場合にも改称は極めて慎重に取り扱うべき問題であることはいままでもない。特に、本学会は多くの機械系の学部で教えている「伝熱工学」とも密接に関連し、学会の名称は其中で育った先達や現在「伝熱工学」を学んでいる学生にも親しまれている。この教育科目の名前を冠する学会として、歴史的な経緯と今後の発展を模索している学会員も多数存在すると考える。

しかし、その名が現在の体を表していなかったり、あるいは今後の進むべき方向と必ずしも一致しなかったりする場合には、改称も必要になる可能性があると考えられる。

5.2 「伝熱」という語の本質的重要性

伝熱工学は、熱力学や流体力学など他の学問領域と比べると歴史が新しく、以前は熱力学の一環として教えられていたこともあった。伝熱学は、輸送現象の一つとして捕らえると、平衡系の学問である熱力学より流体力学に近いと考えられる。また、伝熱工学 (Heat Transfer) が学部で教える講義となったのも、多くの先達たちの努力とエネルギー危機や熱関連の工学分野の発展による影響もある。これからも、環境やエネルギー問題などを解決する方策として、伝熱工学は有用な実学としても重要と考えられる。また、多くの本学会員にとって「伝熱」という語は長年寄りかかってきた学問の核ともいえるべきものであろう。したがって、この「伝熱」という語句をどうして変える必要などあろうかという意見が、純粋に学問的な点からもまた愛着の点からもあるに違いない。また、上述のように、「伝 (英語で transfer)」という語には、静 (平衡) 的な熱力学とは異なり、動 (非平衡) 的な輸送という意味が陽的に表現されているので、この語こそ本質的重要性があり、維持すべきという積極的な意見もあることは、当委員会の中でも十分に共有された事項であった。

5.3 「伝熱」以外の名称も考慮すべきとする立場からの諸検討

しかしながら、一方で5.1に指摘した事項も顕在化しているのではないかとこの立場もある。そのような立場から、以下のような検討を試みた。

(1) 現状の内容はどうか？ また、他学会とのアイデンティティーとの問題はないか？

本学会の黎明期では伝熱の相関式決定・機構解明・促進が主な研究対象であったが、最近では極めて多様化し、「熱」あるいは「物質」が関係する現象を、機械系の会員が科学的・工学的に研究しているという方が正確ではないだろうか。また、日本伝熱学会会員の多くが日本機械学会熱工学部門における伝熱分野の研究者・技術者と重複している現状から、伝熱研究会の創設時の理念である独自の学際的性格を強化するためには、機械系以外の会員をできる限り多数取り込み、本学会ならではのミッション設定を促進することは不可欠であろう。そのためには、とりわけ一般社会 (部外者) に向けて、学会名称をより理解しやすい適切なものに積極的に変えることも必要ではないだろうか。

(2) そこでまず適切な名称を考えるための出発点として、「学会内部」すなわち会員の立場から、現在あるいは将来へのキーワード・切口の整理を試みる。

- (a) 基本的分類：伝熱，熱，エネルギー，物質
- (b) 対象的分类：現象，素過程，システム，機器
- (c) 学問的分类：科学，工学，技術，理学，物理，化学，機械，環境，生命，医学，多 (複合) 物理
- (d) 性質的分类：輸送，反応，平衡，非平衡，ダイナミックス，カイネティックス，カオス
- (e) 形容的分类：基礎，応用，マクロ，ミクロ，マイクロ，ナノ，極限，複雑
- (f) 動機的分类：真理解明，性能把握，促進，変換，計測，制御，ものづくり
- (g) 方法的分类：解析，分析，総合，設計
- (h) 方向的分类：課題解決，課題発見，課題批判

(3) つぎに、「学会外部」すなわち一般社会に向けて、「伝熱」という名称が及ぼしているインパクトは以下のようなのではないかと推察される。

(a) 一般社会への見え方

「伝熱」という語が一般のマスコミに登場することはほとんどない。(その証拠に辞書にもワープロ変換にもまず存在しない。) 本学会はエネルギー技術の根幹を研究している最重要学会であるにもかかわらず、そのことは補足説明なしにはなかなか理解されない。

(b) 学生および他学術分野や境界領域にいる専門家への見え方

「熱力学」や「熱学」という用語は、物理学の根幹をなす領域として幅広く知られている。それに対し「伝熱学」は「燃焼学」と同様に熱力学の延長線上にある機械系の狭い学問領域・専門科目と映るのではないだろうか。

(c) 英語圏での見え方

英語での語感日本人には容易に理解できないが、学会名称とも強く関連するジャーナルの英文名称を調べてみることは示唆に富む。「熱」全般をスコープとする多数の英文ジャーナルを網羅的に調査した結果、それらは基本単語“heat”, “thermal”, “thermo”, “science”, “engineering”, “technology”のほとんどの組み合わせから構成されていることが判明した。そもそも本学会の論文集自体が“Thermal Science and Engineering”である。もちろん伝統のあるいくつかのジャーナルには“heat transfer”の語が残っているが、新たに創刊されたものでは“thermal”, “thermo”, “science”, “engineering”などの組み合わせが多い。英語圏でもやはり脱“heat transfer”の動きは顕著であると思われる。

5.4 「伝熱」の名称を維持すべきとする立場からの諸検討

5.1に指摘した事項も含めて、現在の名称にて対応可能との立場からは、以下のような検討を試みた。

(1) 本学会名称を維持することの意味

学会の名称はそのままにして、上記の問題点を実質的に解決してゆく方向が考えられる。また、日本の伝熱工学および伝熱学会は成熟期にあり、これから大きな発展が期待できるとは必ずしもいえない状態である。新しく発展している学術領域は名称や性格をダイナミックに変えて、時流に乗った発展が期待される。しかし、成熟した学会の名称をあえて変えることによって学会自体の存続も危うくするのではないかという危惧が無いわけではない。これをあえて「保守的思考」というが、成熟期にある技術や科学が保守的になるのはある意味で、それを長く存続させるための手段でもある。

(2) 新名称を考える上での問題点

下記の新名称案の「熱学」あるいは「熱科学」という名称を冠することも考えられるが、熱力学や熱学のように平衡状態の系を議論する学問と捕らえられる懸念もある。輸送現象である伝熱を的確に表す言葉を探すことも考えられるが、あまり一般的でない(「伝熱」も一般的ではないが)用語を使うとかえって訴求力を失うことになる。「熱学」あるいは「熱科学」とした場合、燃焼と熱物性をどのように差別化するかという問題もある。

また、欧米、特にヨーロッパでは、科学に比べて工学や技術の学術的評価が低い。そのため、伝熱工学の研究者も「われわれの研究対象は科学である」といっている場合が多い。しかし、日本では歴史的に科学と技術は同列に扱われ近年の経済発展をもたらした。このことは、東アジア諸国でも全く同じであり、工学や技術の重要性は益々増大している。その中で、工学としての伝熱が熱科学として工学的要素を消してしまうことが良いかどうかは検討の余地がある。また、熱学とすることに関しても類似であろうと思われる。

5.5 改称の新名称案

本章の冒頭でも述べたように、学会名改称に関しては、本委員会において一致する見解に至らなかった。今後の記録として残す意味もあり、改称すべきか否かに関する本委員会の議論の過程で提案された名称案を以下に示す。

和文名称：「日本熱学会」、「日本熱科学会」あるいは「日本熱科学工学会」

英文名称：“The Japanese Society of Thermal Science”あるいは“The Japanese Society of Thermal Science and Engineering”

5.6 今後の学会名称に係る方針

前項までに記したような本委員会での多角的な視点からの検討の結果、現在の学会名称を俄に変更すべきとする合意には至らなかった。しかし、将来にわたる伝熱学分野の深化と拡張、境界領域の進展、関連学協会との連携、さらに学会の活動に対する社会的な期待の変化などを考慮すると、今後とも学会名称の変更に関わる本質的議論を継続し、名称変更を行う柔軟性とダイナミズムを担保すべきである。

参考文献

(1) 小林明, 「伝熱研究」の発刊にあたりて, 伝熱研究, Vol.1, No.1 (1962) pp.1-2.

日本伝熱学会将来検討委員会構成

委員長	宇高 義郎 (横浜国立大学)	
幹 事	宗像 鉄雄 (産業技術総合研究所)	
委 員	飯山 明裕 (日産自動車)	小澤 守 (関西大学)
	黒坂 俊雄 (神鋼リサーチ)	鹿園 直毅 (東京大学)
	高松 洋 (九州大学)	中別府 修 (明治大学)
	花村 克悟 (東京工業大学)	円山 重直 (東北大学)
	吉田 英生 (京都大学)	
オブザーバー	笠木 伸英 (東京大学)	

【資料1】本学会に関するデータの集計結果

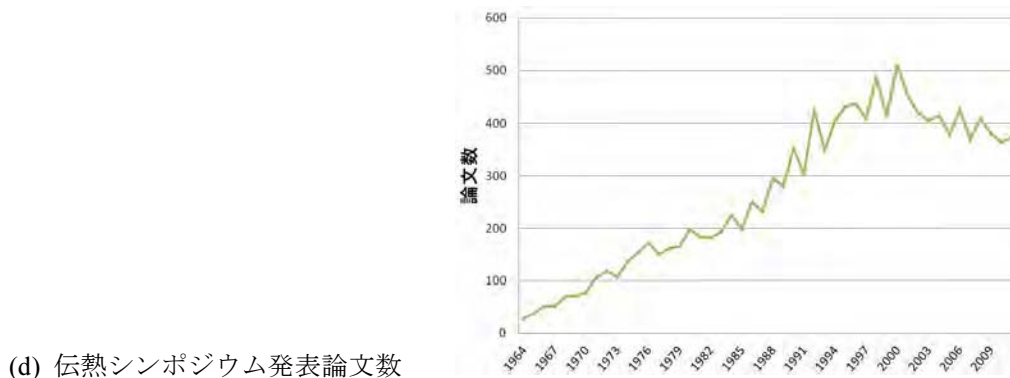
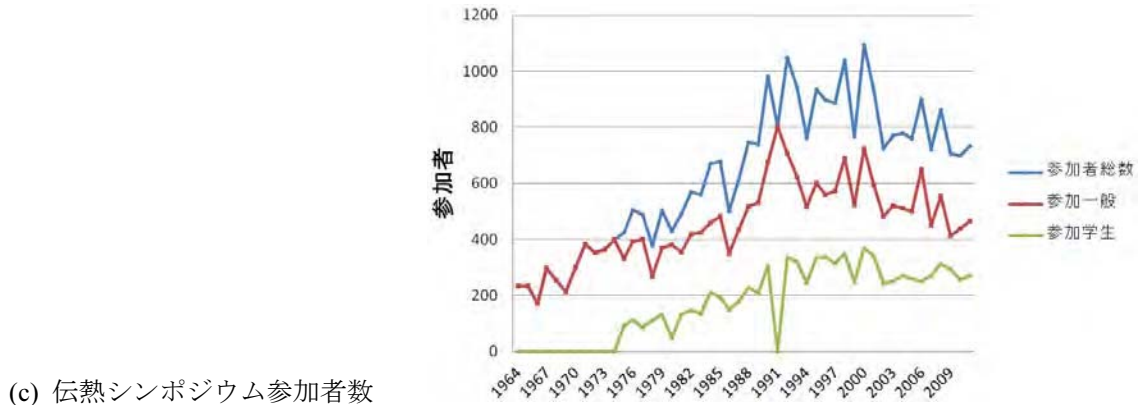
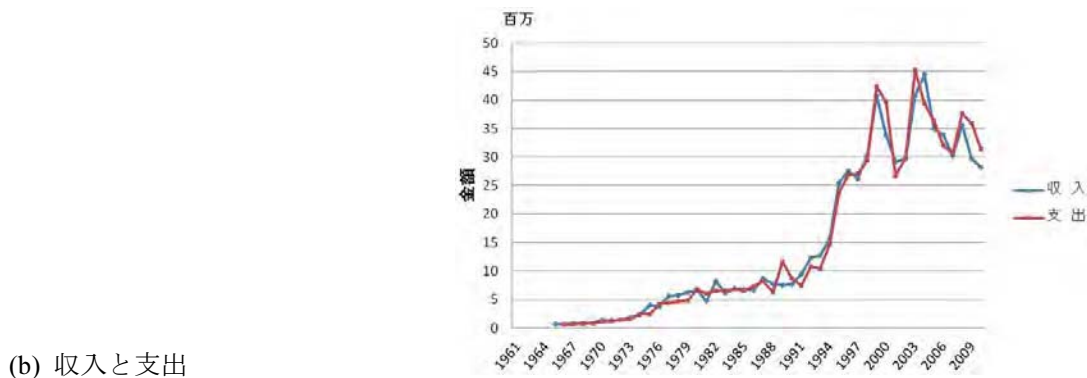
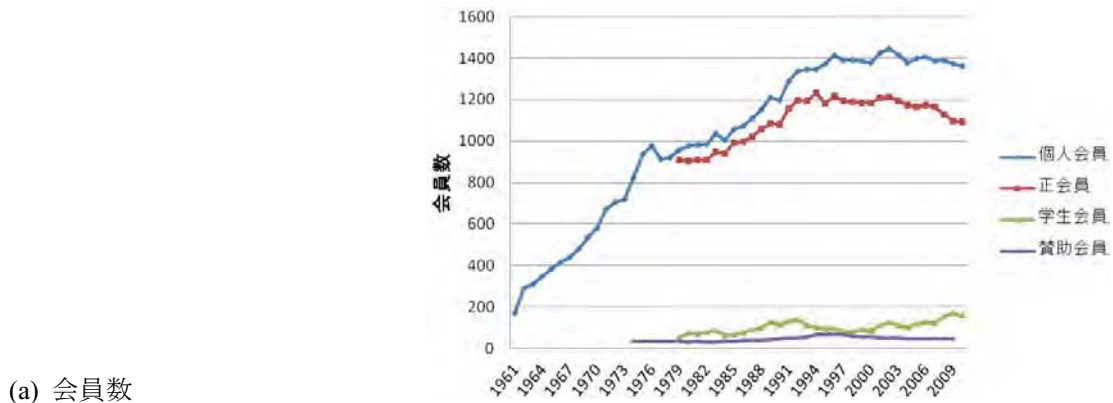


図1 日本伝熱研究会および本学会の変遷

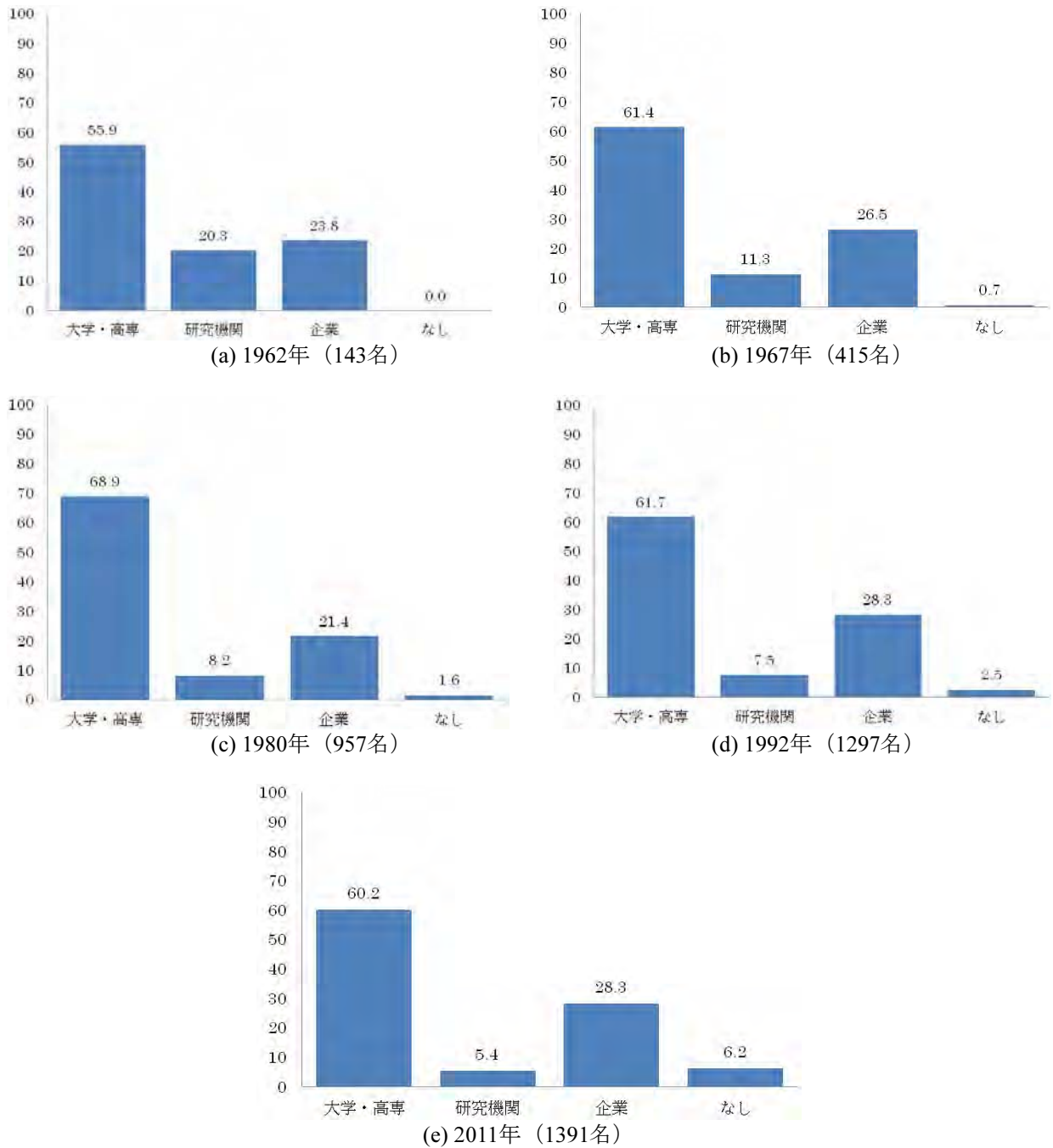


図2 会員の所属組織の構成割合 (%) (年別)

表1 会員の専門分野別人数の推移

	1967年	1980年	2002年	2011年
化学・物質系	62	38	52	38
原子力系	39	27	51	22
機械系	279	632	703	569
その他	33	16	614	397
不明	2	244	51	365

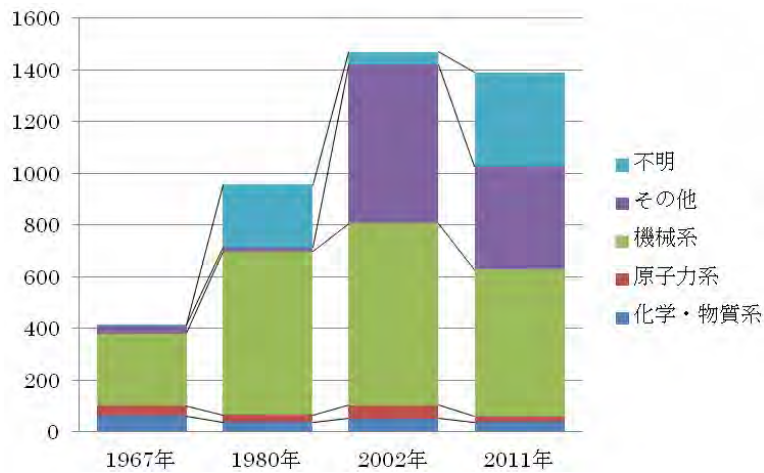


図3 会員の専門分野別人数の推移

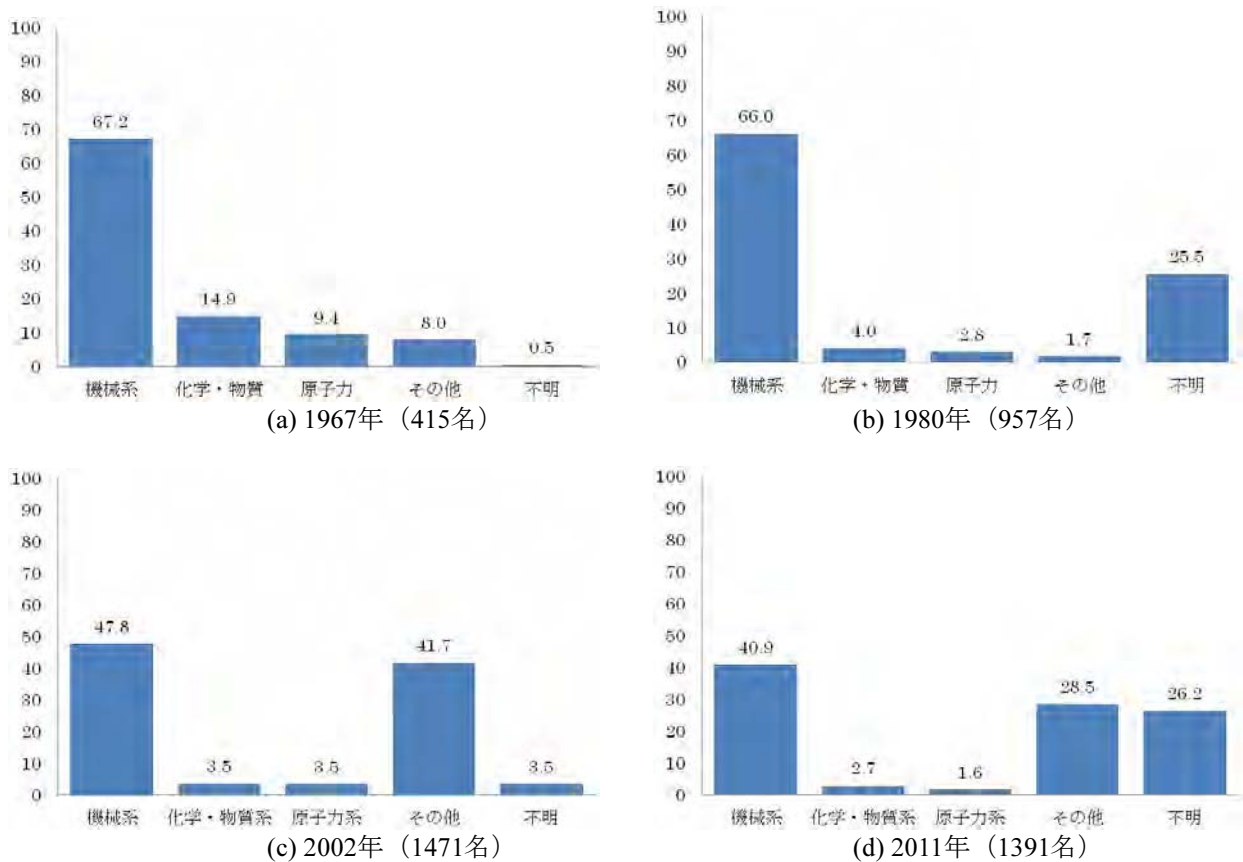


図4 会員の専門分野の構成割合 (%) (年別)

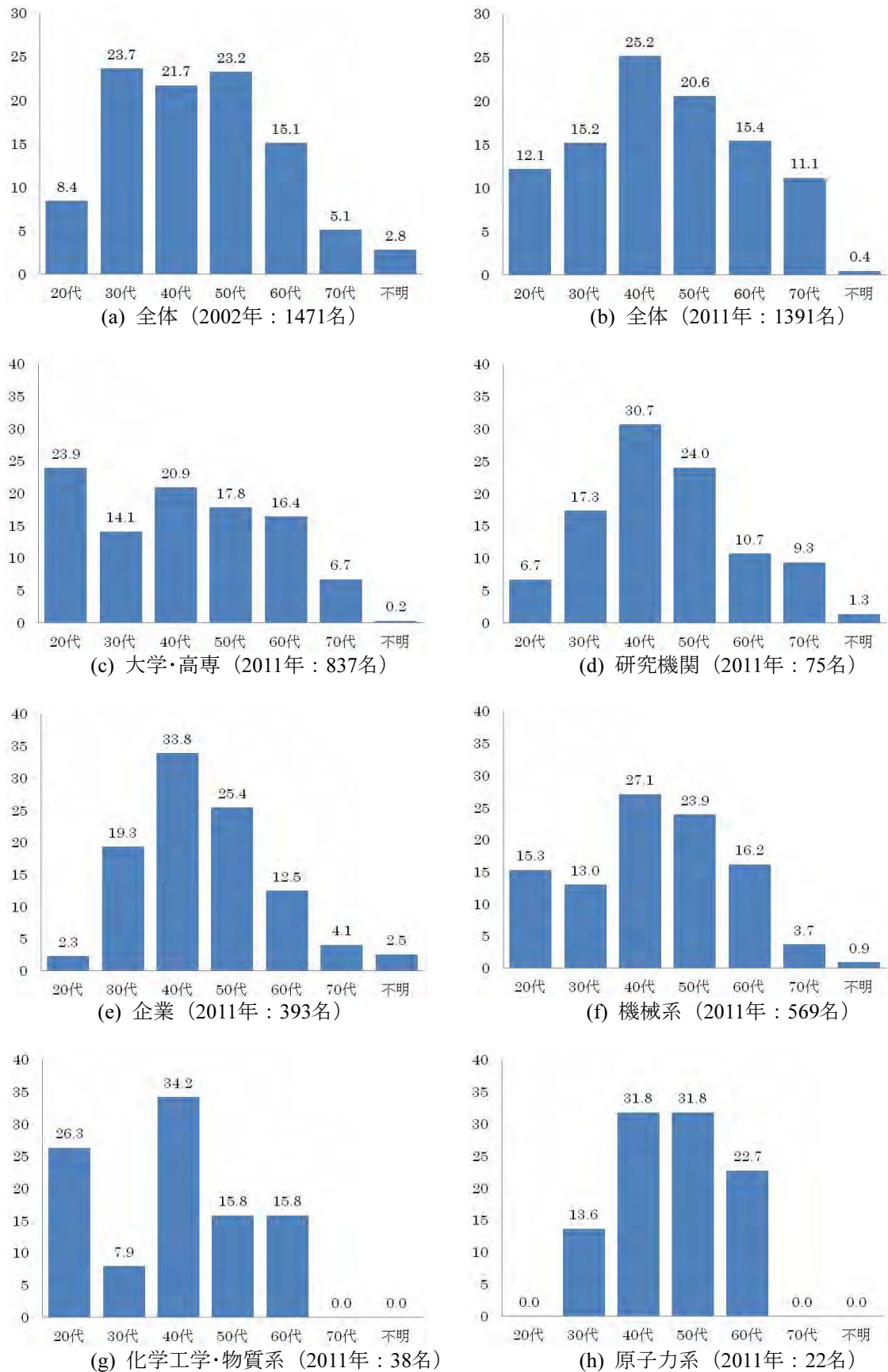


図5 会員の年齢構成割合 (%)

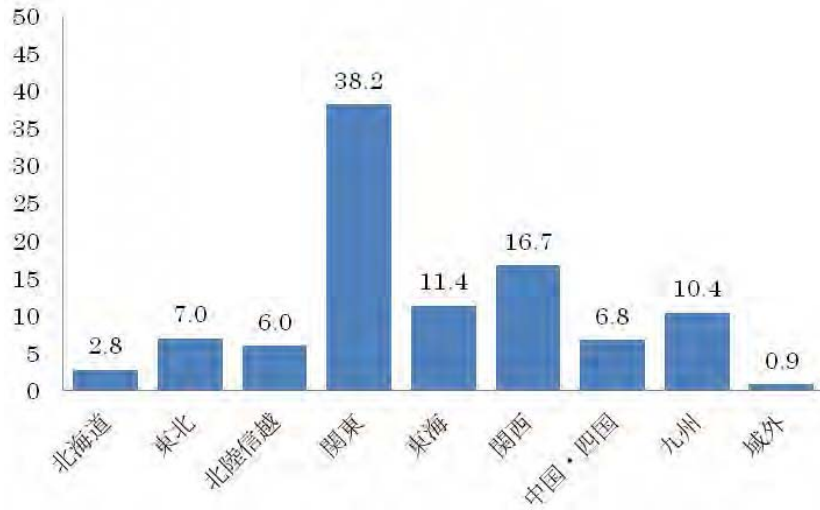


図6 地域別会員数の割合 (%) (2011年 : 1391名)

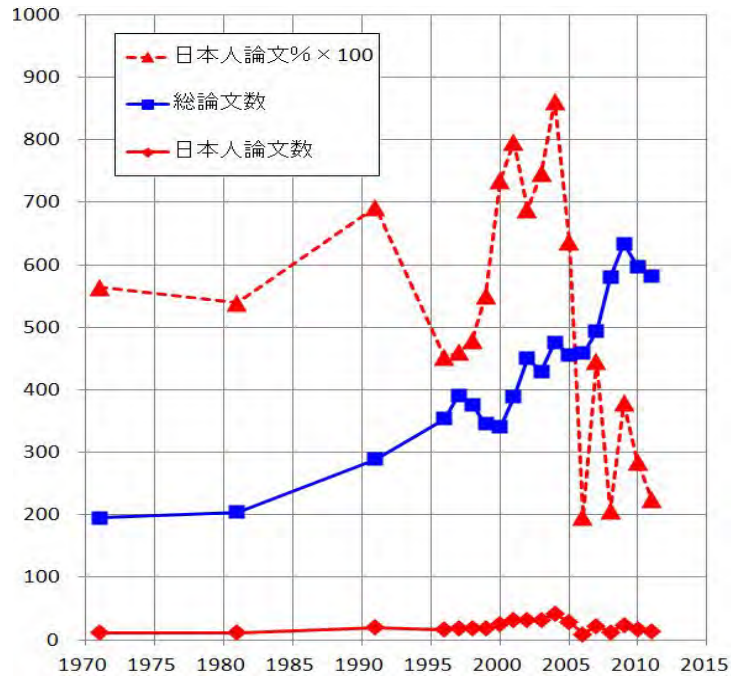


図7 International Journal of Heat and Mass Transfer 誌における我が国の論文数

平成 23 年度日本伝熱学会賞選考の報告

On Selection of Awards of the Heat Transfer Society of Japan, 2011

表彰選考委員会委員長

岡崎 健 (東京工業大学)

Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: okazakik@mech.titech.ac.jp

平成 23 年度日本伝熱学会賞学術賞, 技術賞および奨励賞について公募を行い, 所定の手続きにより慎重に審査した結果, 各賞の授賞者を下記のように決定した (授賞対象の記載は順不同). 表彰式は, 平成 24 年 5 月 31 日に富山市 (富山国際会議場) で開催された学会総会において行われた.

1. 学術賞

Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

- 1) 代表研究者: 野村 信福 (愛媛大学)
共同研究者: 向笠 忍 (愛媛大学)
豊田 洋通 (愛媛大学)
「プラズマ泡の挙動の解明と液中プラズマプロセス技術の開発」
第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 573-574, 2011
Plasma Sources Science & Technology, 20(3), pp. 034012, 2011
Plasma Sources Science & Technology, 20(3), pp. 034020, 2011
Diamond & Related Materials, 20(8), pp. 1255-1258, 2011
International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(15-16), pp. 3067-3074, 2010
Journal of Applied Physics, 106(7), pp. 073306, 2009
- 2) 代表研究者: 牧野 俊郎 (京都大学)
共同研究者: 若林 英信 (京都大学)
「室温の表面の全半球放射率測定装置の開発」
Thermal Science and Engineering, Vol.19, No.1, pp. 37-42, 2011
伝熱, 48(205), pp. 14-19, 2009

2. 技術賞

Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

(該当無し)

3. 奨励賞

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

- 1) 研究者: 上野 藍 (東京大学)
「近接場効果を利用した宇宙用静電駆動型 MEMS ラジエータの研究」
第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 477-478, 2011
- 2) 研究者: 笹部 崇 (日本学術振興会特別研究員, 米国コネチカット大学)
「PEFC 発電時液水挙動に及ぼす GDL ミクロ構造の影響」
第 48 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 555-556, 2011
- 3) 研究者: 元祐 昌廣 (東京理科大学)
「光誘起マランゴニ対流を利用したマイクロチャネル内気泡の操作」
第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II+III, pp. 653-654, 2009

日本伝熱学会学術賞を受賞して

Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan



野村 信福, 向笠 忍, 豊田 洋通 (愛媛大学)

Shinfuku NOMURA, Shinobu MUKASA, Hiromichi TOYOTA (Ehime University)

e-mail: nomura.shinfuku.mg@ehime-u.ac.jp

このたび、日本伝熱学会学術賞をいただき、大変光栄に存じております。受賞研究課題は「プラズマ泡の挙動の解明と液中プラズマプロセス技術の開発」です。液中プラズマとは液体中に高周波やマイクロ波を照射して、液体中の気泡中にプラズマを発生させる技術です。

メタンガスを使った気相プラズマ化学蒸着法によるダイヤモンド合成法は 1980 年代に開発されていましたが、成膜レートが非常に遅く、現実のダイヤモンド合成には限界があるという問題が露呈していました。一方、1990 年代、超音波音場中に置かれた気泡からの発光現象、ソノルミネッセンスの研究が注目され、気泡中の高温高圧場を反応炉として利用、新材料合成やエネルギー創出の研究が盛んに実施されました。気泡内部の温度は数千から数万°C以上に達するが、時間がピコ秒オーダーと非常に短いために反応炉として利用することは困難でした。

2000 年頃、「気相より密度の大きい液体中でプラズマが発生できないものか？液体中でプラズマが発生できればロックガラスの氷のようなダイヤモンドが作れるかもしれない。」超音波を使うと水中の気泡を光らせることができる。泡の中ならプラズマが発生できるのでは？専門の異なる研究者の雑談から、液体中でプラズマを発生させるためには液中の気泡内を化学反応場として利用すればいいという発想が生まれ、液中プラズマの研究が開始されました。液中での放電現象は古くから知られていましたが、それまではアーク放電やパルス放電を使った絶縁工学の観点から研究されてきました。

2003 年、マイクロ波を液体中に供給することで、途切れなく時間的に連続したプラズマの発生に成功 (Appl. Phys. Lett, 2003), 今日 **“液中プラズマ”**

という言葉が定着し広く用いられるようになってきました。この技術はこれまでのプラズマの発生は気相だけという観念を覆すだけでなく、低温高速成膜技術として、ダイヤモンドやナノ粒子、燃料ガスの合成法 (第 45 回伝熱シンポジウムで発表) として利用できる等の一定の成果をあげていました。その後、内部メカニズムの解明を目的として、プラズマによる水分分解反応とエネルギー収支を理論的に考察し、プラズマ内部の化学反応経路と発生する気体成量を明らかにし、第 47 回日本伝熱シンポジウムで発表しました。また、気泡の中にプラズマが発生する液中プラズマの特徴に着目、4 気圧までの高圧力条件下での液中プラズマを発生させ、その気泡挙動と分光測定から、電子温度、電子密度、ガス温度を明らかにし、第 48 回伝熱シンポジウムで発表しました。この研究は高圧力下での気液とプラズマの相互作用について初めて調べた研究であり、その成果は実機のプロセス技術に応用できると期待しています。

我々は伝熱工学の観点から、液中プラズマを沸騰現象として考察しました。液中プラズマは液体、気体、プラズマが混在する現象であり、プラズマを介して沸騰が維持されます。液中プラズマの電子密度から推測される電離度は 0.1% 程度ですが、この荷電粒子の運動によって気泡内に数千 K の化学反応場を提供すると同時に、数千 K の過熱度を持つ、通常では考えられないような高過熱度の沸騰現象を液体中に維持することができます。これらの研究成果は、Plasma Sources Science & Technology, 2011 や Int. J. Heat & Mass Transfer, 2009 等の雑誌で報告することができました。

最後になりましたが、伝熱学会の関係者各位ならびに本一連の研究に協力いただいた当時の愛媛大学の学生諸氏に心よりお礼申し上げます。

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*



牧野 俊郎, 若林 英信 (京都大学)

Toshiro MAKINO and Hidenobu WAKABAYASHI (Kyoto University)
e-mail: makino.toshiro.2a@kyoto-u.ac.jp

このたび日本伝熱学会学術賞をいただきました。たいへんうれしく光栄に存じます。ありがとうございました。

賞の対象は、「室温の表面の全半球放射率測定装置の開発」という研究[1]でした。私どもは、最近、われわれの生活空間の熱・ふく射環境にも関心を持ち始めましたが、ここで、ふく射伝熱の寄与は室温の空間においても、多くの伝熱研究者の想像を越えて大きく、それが「寒い暑い」の実感を左右することに気づきました[2]。ついては、ふく射環境の改善を図るには、生活空間をとりまく表面の温度と全半球放射率を知ることがまず重要であると思いました。しかし、室温の表面の温度の測定は難しく、また、同程度の温度域にある複数の表面に囲まれた特定の表面が半球的に放射するふく射だけを射度や照射に関する量から分離して測定するのは、さらに難しいことでした。

そこで、もとに戻って、表面の温度と全半球放射率を知ったら、生活空間でのふく射伝熱をどのように評価するのかを考えました。そのときに頼るのは、たぶん、どの伝熱の教科書にもある閉空間における複数の表面間のふく射エネルギー交換の計算法です。その計算では、多くの場合ふく射流束が未知量になりますが、(1) 全半球放射率を求める測定では、逆に、閉空間の一部をなす表面へのふく射流束を測定して、注目する試料表面の全半球放射率を未知量として求めるのはどうか、そう考えて、平板状の全ふく射流束計の購入に走りました。(2) 表面の温度の測定には、コルク栓と熱電対と Al 箔からなる温度測定プローブを自作して用いる古典的で優れた手法[3]を見つけ出すことができました。(3) さらに、実際には、未知量は試料表面の全半球放射率以外にも複数

あって、測定値の直接的な解析では得られないものでしたが、反復計算の手法を採ってこの問題を解決しました。装置開発のアイディアの要点は以上の(1)~(3)です。試作した装置はシンプルで小型のもので、多様な個々の表面の全半球放射率をその場的に測定できるものです。

この研究は、すでにあつたふく射計算法・温度測定法・解析手法に基づきながら、ふく射伝熱評価の対象を高温工学の表面から生活環境学の表面にまで拡張した優れたものであると自負しています。ただ、その装置は構造も外観も“ちゃち”なものです。“ちゃち”の先を評価して下さった先生方に御礼申し上げます。

最後に、この研究の動機の一つにもなった伝熱の記事[2]の表 1 に数字の誤記、式(1)に添字の誤記がありました。お詫びして、この機会に表 1 を下のよう訂正させていただきます。

- [1] 若林英信, 牧野俊郎: *Thermal Science and Engineering*, vol.19, no.1, pp.37-42, 2011.
- [2] 牧野俊郎: *伝熱*, vol.48, no.205, pp.14-19, 2009.
- [3] 武山斌郎・大谷茂盛・相原利雄: *大学講義 伝熱工学*, 丸善, pp.26-27, 1983.

Table 1 Radiation energy loss from a human body

“ぶちぶち”の設置がない場合					
〈湯張り前〉			〈湯張り後〉		
(壁)	(人体)	(空気)	(壁)	(人体)	(空気)
13°C	←	33°C	→	12.6°C	14°C ← 33°C → 18.7°C
140 W		120 W		134 W	84 W
(ふく射伝熱)		(対流伝熱)		(ふく射伝熱) (対流伝熱)	
“ぶちぶち”の設置がある場合					
〈湯張り前〉			〈湯張り後〉		
(壁)	(人体)	(空気)	(壁)	(人体)	(空気)
16°C	←	33°C	→	12.6°C	18°C ← 33°C → 18.7°C
116 W		120 W		101 W	84 W
(ふく射伝熱)		(対流伝熱)		(ふく射伝熱) (対流伝熱)	

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



上野 藍 (東京大学)

Ai UENO (The University of Tokyo)

e-mail: ueno@mesl.t.u-tokyo.ac.jp

この度、第 49 回日本伝熱学会 (富山) の総会におきまして、「近接場効果を利用した宇宙用静電駆動型 MEMS ラジエータの研究」にて、日本伝熱学会奨励賞を頂き大変光栄に思っております。

本研究は私が博士課程で取り組んでいる研究内容であります。私は、学部時代には理学部の応用物理学科に在籍し、外研先として ISAS/JAXA に派遣され、幸運にも今、話題の小惑星探査機「はやぶさ」の放射率可変素子 (SRD) の多層薄膜設計に従事しました。続いて、もう少し材料の中身を知りたいという理由から、修士課程では、マテリアル工学専攻に在籍し、太陽電池用透明導電膜の開発に従事しました。そして、いよいよ博士課程への進学となる時、尊敬する先輩方や欧米での短期留学、学会やワークショップを通じて、自分の中で博士とは、“一つの軸を持って裾野を広げられる人材” だなと感じておりました。そこで、博士課程では私の中の“軸”をしっかりと形成する時期だと思い、研究テーマ決めから取り組ませて頂きました。その際、今までの専門分野 (宇宙、熱ふく射制御) と笠木・鈴木研究室で出来ること

(伝熱、MEMS) を融合させ、本テーマを決定しました。しかし、その道のりは決して簡単なものではなく、テーマ決定までに半年以上の時間を要し、私の博士課程を振り返ってもなかなか研究が進んでいる気がしない“冬の時代”でした。こうしてようやく始動した本研究に対し、実現可能性の検証、設計、MEMS プロセス、そして、実験系の構築、評価までを一貫して行うことで、ようやく本研究が軌道に乗り始めたと感じております。

本研究テーマに関して、もう少し具体的に紹介させていただきますと、急激な温度変動が生じる宇宙空間において宇宙機の熱制御は非常に重要であり、特に内部からの発熱を宇宙空間に放出する“宇宙の窓”としてのラジエータでは高性能化が求められています。そこで、本研究では従来の放射制御

とは全く異なる近接場効果を利用し、2 つのダイアフラム面がばね構造により垂直に変化する低電圧駆動の放射率可変型 MEMS ラジエータを提案しました。

本研究における学術的な特色としては、近年、光の波長限界を超える近接場顕微鏡などで注目されている近接場効果を光分野のみならず熱エネルギー輸送に利用し、かつ、計算による報告が大半である近接場効果を実験により実証するというものです。伝熱解析では、ナノ・マイクロスケールにおけるデバイスの接触熱抵抗等の各種熱伝導を検討し、近接場効果の優位性を示すとともに、約 5 倍程度のデバイスの実効射率変化を示しました。

また、本研究はナノギャップを変化させることでデバイスの ON/OFF 制御を行います。この概念は、昨今の携帯機器の小型化および半導体業界の集積化により、従来の冷却技術では空間的、時定数的に対応が困難となる、ナノ・マイクロ領域における局所的な熱問題に対し、新たな熱スイッチ、熱ダイオードとしての利用も期待されます。

このような非常にチャレンジングであり、理論から解析、実験およびシステム構築までを一貫して取り組むことが出来、博士課程として大事な素養である 0 から 1 を生み出す貴重な経験を出来ていることに心より感謝致します。今回の受賞に至ることが出来たのも、いつも私の好奇心を寛容に受け入れて頂き、的確な研究指針を示して下さる鈴木雄二先生には心より感謝の意を評します。また、本研究に対し、日頃より学術的に見識の高いご助言をくださいます笠木伸英先生をはじめとする本学会の諸先生方に心よりお礼申し上げます。

今後も自分自身の“軸”をしっかりと形成し、伝熱分野の裾野を拓けるべく研究に精進して行きたいと考えておりますので、ご指導ご鞭撻を賜りますよう、宜しく願い申し上げます。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



笹部 崇 (東北大学)

Takashi SASABE (Tohoku University)

e-mail: sasabe@nanoint.ifs.tohoku.ac.jp

富山国際会議場にて開催されました日本伝熱学会第 50 期総会において、栄えある「日本伝熱学会奨励賞」を頂き、誠にありがとうございました。本奨励賞を賜りましたのも、これまでにご指導頂いた諸先生方、ご推挙下さいました先生、および全ての関係者の方々のお陰であると考えております。心より御礼申し上げます。また、日本伝熱シンポジウムにて受賞対象となりました研究成果を発表する機会を頂き、多くの方々より貴重なご意見、ご助言を頂きました。学会内外での議論を通じて研究指針や方向性を示して頂き、ありがとうございました。これまで関わってきた全ての方々に謝意を表し、受賞のご挨拶とさせていただきます。

受賞対象となりました「PEFC 発電時液水挙動に及ぼす GDL ミクロ構造の影響」は、私が東京工業大学の平井秀一郎教授、津島将司准教授のもとで行った研究であり、固体高分子形燃料電池 (PEFC) を構成するミクロスケールの多孔質層であるガス拡散層 (GDL) 内部の液水挙動を、新規に開発した軟 X 線顕微鏡システムにより可視化し、明らかにしたものです。

PEFC はクリーンかつ高効率な自動車用・定置用動力源として期待され、実用に供される段階となっておりますが、その大規模普及に向けては更なる低コスト化のため、高電流密度運転の実現が求められています。そのため、熱流体工学、電気化学、材料科学などの様々な分野およびスケールから研究開発が進められ、多くの知見が得られています。その一方で、発電反応による生成水が PEFC を構成するナノ・ミクロスケール多孔質層内部に滞留することで反応ガスの供給障害が生じる「フラッドイング」に関しては明らかになっていない点が多く、PEFC の適切な水分管理に向けては、より精緻な水分制御技術確立する必要があります。その際に、*in situ* (その場) 可視化技術は現象解明に向けた必須ツールであると考えます。

従来、X 線は水・カーボンの様な軽元素に対して計測感度が極めて低いと認識されてきましたが、これは X 線の波長に依存して変化するものです。X 線波長を制御し、軽元素に対してもコントラストを得る事ができる低エネルギー X 線 (軟 X 線) を利用することで、PEFC 内の液水挙動を高空間かつ高時間分解能で検出することが可能となります。近年、リチウムイオン電池などの軽元素を用いたエネルギーデバイスが多く提案され、活発な研究開発が進められておりますが、それらの内部輸送現象解明に向けても、この様な軽元素の検出を可能とする計測技術は非常に有効であり、その推進に貢献するものであると考えています。

本研究では軟 X 線計測技術を用い、ミクロ構造が大きく異なる 2 種類の GDL について発電時の液水挙動を可視化し、その気孔構造および液水ネットワークが液水発生時の発電性能に大きく影響する事を示しました。この事は、GDL 内の液水滞留量だけでなく、その分布状態を詳細に理解する事が高い発電性能を維持するために重要である事を示しており、気孔径に分布を持たせ、液水排出パスと反応ガス輸送パスを分離する事が有効である事が分かりました。

現在は、触媒層などのナノスケール多孔質における気孔構造と二相流挙動を放射光ナノ X 線 CT により可視化すると共に、分子動力学シミュレーションを用いた解析を行うことで、平均自由行程と同程度の狭小空間におけるナノスケール特有の輸送現象の詳細な理解を目指しており、徐々に詳細を明らかにしていく所存です。

今後も PEFC をはじめとしたナノ・マイクロスケールの微細構造を有する多孔質における輸送特性解明に尽力し、微力ながら伝熱工学の発展に貢献したいと考えております。今後とも引き続き皆様からのご指導ご鞭撻の程をよろしくお願い申し上げます。

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



元祐 昌廣 (東京理科大学)

Masahiro MOTOSUKE (Tokyo University of Science)

e-mail: mot@rs.tus.ac.jp

富山国際会議場にて開催された日本伝熱学会第 50 期総会にて、名誉ある日本伝熱学会奨励賞を頂きました。大変光栄に思います。今回、このような賞を賜りましたのも、これまでにご指導を頂きました諸先生・先輩方や、ご推薦、ご選考頂きました関係者の方々、日本伝熱シンポジウムにて討論、議論や助言を頂きました方々をはじめ、多くの方々のお陰だと思っております。この場を借りて心より御礼申し上げます。

今回の受賞対象となりました「光熱マランゴニ対流を用いたマイクロ流路内気泡操作」は、微小流路内の気泡に対し、光照射によってその気液界面近傍を加熱し、形成された温度勾配に伴う表面張力勾配によって発生する温度差マランゴニ対流を利用した気泡操作技術に関する研究成果をまとめたものです。マランゴニ対流は、温度差や濃度差により表面張力が不均一化し、この物性勾配を駆動力として生じる表面流動で、Lord Kelvin こと W. Thomson の兄である J. Thomson によって 1855 年に報告されており、昔からよく知られた現象です。また、最近では、国際宇宙ステーションの宇宙実験棟「きぼう」において、本学会の第 47 期会長の河村洋先生らの研究チームが微小重力下でのマランゴニ対流実験を行うなど、現在でも活発な研究対象となっています。

気泡は洗浄・発泡・化粧品・飲食品・水質浄化や反応器などに幅広く利用されている一方で、その発生や付着が好ましくない場合も多く、薬液塗布や反応の阻害、詰まりなどを引き起こすため、その制御は重要です。特に、系の長さスケールが小さくなると、比表面積が増大するため、界面現象の寄与が顕在化するため、微小気泡を制御するためには界面を精緻に制御する必要があります。本研究では、局所的な光照射によるマランゴニ対流の発生に着目し、光熱効果によって、トリガとなる温度勾配を対象とする気泡周囲に与え、局所

的なマランゴニ対流を誘起します。一般的に液体の表面張力は負の温度依存性を持つため、加熱部が低張力となり、高温部から低温部への流動が誘起され、結果として、高温部である光照射領域への駆動力が気泡に作用します。光の優れた操作性のため、気泡へはたらく力を適切に制御でき、原理的には狙った気泡のみを流路外からオンデマンドに操作することも可能なはずだ、と目論んで研究をスタートしました。開始当初は手探り状態で、ガラスキャピラリー中の気泡の近くに半田ごてを近づけて現象を観察することから始めました。しばらくしてようやく少し進み、光熱マランゴニ対流の制御によって、「壁面からの離脱」「液中での捕捉及び位置制御」「マイクロ流路内の輸送」の制御を同一の原理・装置で実現できることを示し、気泡や界面挙動の 3 次元計測などを通じて本手法の有効性を明らかにしました。そして、気泡の操作限界はマランゴニ数と気泡レイノルズ数の比で整理できることを見出しました。また、適切な条件下ではレーザポイント程度の微弱光でも気泡を操作できることを示し、実証することができました。

現在は気泡だけでなく液液界面の制御による微小液滴操作へ拡張しており、任意形状の光パターン照射による連続的捕捉や軌道制御、分離といった各種操作について、その特性の評価を進めています。また、界面張力の温度依存性が反転する系での制御にも取り組んでおります。

個人的な所感ではありますが、本学会は伝熱研究の最先端を追求する学術団体であるとともに、人を育てるコミュニティでもあると感じております。私自身、本学会に鍛えられ、育てて頂いたと実感しています。今後も伝熱研究の進展に、微力ではありますが貢献できるよう邁進し、若輩者ではございますが、後進の育成にも取り組んでいきたいと思っております。これからもご指導・ご鞭撻の程、よろしくお願い申し上げます。

平成 24 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰
The Commendation for Science and Technology by the Ministry of
Education, Culture, Sports, Science and Technology 2012

表彰選考委員会委員長
岡崎 健 (東京工業大学)
Ken OKAZAKI (Tokyo Institute of Technology)
e-mail: okazakik@mech.titech.ac.jp

平成 23 年 5 月に表記の大臣表彰候補者の公募があり、本学会は表彰選考委員会での選考をへて候補を推薦した。その結果、下記の若手科学者賞の 1 件について授賞が決定された。4 月 17 日に文部科学省において表彰式が執り行われ、本学会においては第 49 回日本伝熱シンポジウム(富山)の総会において、受賞者に登壇してもらい、受賞の披露を行った。以下に受賞対象に関連する業績概要を紹介する。なお受賞者一覧などは http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/24/04/1319413.htm をご参照いただきたい。



田口氏

【若手科学者賞】
Young Scientist' Prize

レーザーを用いた超高時空間分解熱物性センシング技術の研究

田口 良広 (慶應義塾大学)

業績内容

これまで、接触式の熱物性計測技術が多く開発されており、ナノ材料のダメージや計測の不確

かさが大きいのが現状であり、光学的にナノスケールで温度・熱物性をリアルタイムに計測する技術は存在しなかった。

そこで、受賞者は、オンサイト臨床診断や次世代電子デバイス創出に資する新しいシステムデザイン手法の確立を目指し、時空間分解能が極めて高い革新的温度・熱物性センシング技術を提案した。具体的には、近接場光ならびに光 MEMS 微細加工技術を用いた独自の光学的熱物性計測技術により、当該分野で類を見ない独創的なセンシング技術を提唱している。

ここでは、ナノ領域に局在する近接場光を用いて試料の光-熱相互作用を高感度に検知することに着目し、古典的計測技術を遥かに凌駕する空間分解能を実現しており、レーザー干渉により励起された試料の高速な緩和過程を測定することで、時間分解能を極限まで高めることに成功している。

本研究成果により、ナノスケールの熱物性センシング、熱物性コントロールやナノ機能性材料創出への貢献を通じ、今後の伝熱研究の進展に大きな貢献を果たすと期待される。

主要論文: "Micro Optical Viscosity Sensor for in situ Measurement Based on a Laser-Induced Capillary Wave", Journal of Thermal Science and Technology, Vol.4, p.98~108, 2009 年 4 月発表。

"Development of Near-field Fluorescence Lifetime Thermometry", Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, Vol.13, p.77 ~ 87, 2009 年 5 月発表。

第 49 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 49th National Heat Transfer Symposium of Japan

石塚 勝 (富山県立大学), 坂村 芳孝 (富山県立大学), 小澤 守 (関西大学)
巽 和也 (京都大学), 新 隆之 (日立プラントテクノロジー)
堀内 敬介 (日立製作所)

Masaru ISHIZUKA, Yoshitaka SAKAMURA (Toyama Prefectural University)
Mamoru OZAWA (Kansai University), Kazuya TATSUMI (Kyoto University)
Takayuki ATARASHI (Hitachi Plant Technologies, Ltd.)
Keisuke HORIUCHI (Hitachi, Ltd.)

1. シンポジウム概要

日本伝熱学会創立 50 周年記念第 49 回日本伝熱シンポジウムは、平成 24 年 5 月 30 日 (水) から 6 月 1 日 (金) にかけて富山市 (会場: 富山国際会議場および ANA クラウンプラザホテル富山, 図 1 参照) で開催されました。本シンポジウムの開催にあたっては、日本学術会議、富山市、(財)富山コンベンションビューローによる後援の他、25 学協会の共催・協賛を受けることができました。北陸信越地区で伝熱シンポジウムが開催されるのは、金沢市 (第 17 回, 第 25 回), 新潟市 (第 33 回), 富山市 (第 41 回) に続いて、5 回目となります。



図 1 会場の概観

富山市は、富山県の中央部から南東部に位置する県庁所在地であり、魚介類の宝庫である富山湾と雄大な北アルプス立山連峰に囲まれた自然豊かな地方都市です。平成 17 年 4 月の合併によって全国の都道府県庁所在地の中で 2 番目に広い総面積を有する市となり、富山県の面積の約 3 分の 1 を占めています。近年は公共交通を活かしたコンパクトなまちづくりを積極的に進め、環境モデル都

市にも選定されました。

本シンポジウムにおける講演論文数は最終的に 371 件となり、参加者総数は 750 名を超えました。初日 (5 月 30 日) の午後には、恒例となった優秀プレゼンテーション賞セッションが行われました。これに加え、今回は、産学交流委員会と学生会委員会との合同企画として産学合同交流会が催されました。これは、優秀プレゼンテーション賞セッションのポスター発表会場と同じフロアで開催され、当初の予想を超える 24 社から出展があり、およそ 200 名の参加者を得て盛会となりました。

2 日目 (5 月 31 日) には日本伝熱学会創立 50 周年記念特別パネル講演「伝熱研究の過去・現在、そして、私たちはどこへ行くのか」が開催され、将来構想検討委員会による答申内容と併せて、これからの伝熱学会の在り方について意見交換が行われました。また、同日の午前中には特別セッション「福島第 1 原発事故を受けてわが国のエネルギー問題を考える」が企画され、昨年度に引き続き、東日本大震災後のエネルギー問題について討論が行われました。

特別パネル講演の後には総会が開催されましたが、これは公益法人認可後初めての総会となりました。その後、ANA クラウンプラザホテル富山の大会場「鳳」で懇親会が催され、300 名を超える方々に参加いただきました。懇親会では、富山湾の新鮮な海の幸を使ったにぎり寿司コーナーや「富山ブラック」と呼ばれるラーメンコーナーも設けられ、参加いただいた皆様のお腹を充分満たすことができました。余興として富山県の伝統芸能である「こきりこ踊」が披露されました。

例年と同様に、本シンポジウムにおきましても

多くの企業から機器展示(9社), 広告掲載(7社), カタログ展示(1社)のお申し込みがありました。ご協力いただいた企業の皆様には改めてお礼申し上げます。また、前回(第48回)のシンポジウム実行委員会の皆様、特に、岡山大学の堀部明彦先生と春木直人先生には準備・運営に関して多くの貴重なご助言をいただきました。この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

以上、本シンポジウムの概要を簡単に纏めました。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、担当者による以下の記事をご覧ください。

(実行委員長 石塚勝, 幹事 坂村芳孝)

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、学会誌の会告に加え、ホームページ(<http://www.htsj.or.jp/nhts49/>)上で公開しました。ホームページのデザイン・運用は島山友行実行委員(富山県立大)にお願いし、できるだけシンプルで、管理しやすいものを作成していただきました。当初は自前でウェブサーバを準備し、運用していましたが、講演申込締切日間際になって動作が不安定になったため、急遽学会のサーバをお借りし、事なきを得ました。この際迅速にご対応いただいた企画部会長および広報委員長には心よりお礼申し上げます。

また、最近のシンポジウムでは講演申込や講演論文の公開にJ-STAGEを利用していましたが、新システムへの移行のため、今回はそれができませんでした。そのため、新たに講演および参加登録管理システムを外注し、運用することとしました。ほとんどゼロからの出発であったため、これまでのシンポジウム運営で蓄積されてきたノウハウを十分に活かすことができず、会員の皆様にはご不便をおかけしたものと思います。次回のシンポジウム実行委員会には今回の反省点をきちんとお伝えし、次回以降の運用に活かしていただきたいと考えています。

(坂村芳孝)

3. プログラム

本シンポジウムの発表件数(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)は371件で、前回の岡山(374

件)や前々回の札幌(363件)とほぼ同程度の件数となりましたが、特に今回はオーガナイズドセッションへの応募が多く、63件となりました。ご尽力いただきましたオーガナイザーの皆様には改めて感謝申し上げます。

オーガナイズドセッションおよび優秀プレゼンテーション賞セッションについては、オーガナイザーおよび学生会委員会にプログラム編成をお任せし、実行委員会では一般セッションのプログラム編成を行いました。基本的には申込時に選択していただいた研究分野区分に従って編成しましたが、多くの制約条件の下での作業は困難を極めました。また、各セッションの座長選出に際しましては、多くの皆様にご協力いただきました。ご多用中のところ座長をお引き受けくださいました皆様には厚くお礼申し上げます。

セッション毎の発表件数は以下の通りです。

- ・ 優秀プレゼンテーション賞セッション：
 - 「沸騰・熱機器」(9件), 「反応・燃焼・流動」(8件), 「熱輸送・物性」(9件), 「マイクロ・ナノスケール現象」(8件)
- ・ オーガナイズドセッション：
 - 「非線形熱流体現象と伝熱」(10件), 「燃焼研究の最前線」(25件), 「水素・燃料電池」(28件)
- ・ 一般セッション：「沸騰」(30件), 「バイオ伝熱」(38件), 「計測技術」(3件), 「混相流」(16件), 「輻射」(9件), 「凝縮」(4件), 「自然エネルギー」(12件), 「多孔質体の伝熱」(11件), 「分子動力学」(23件), 「電子機器の冷却」(18件), 「ヒートパイプ」(11件), 「強制対流」(24件), 「反応・燃焼」(7件), 「数値シミュレーション・その他」(3件), 「物質移動・加工技術」(6件), 「空調・熱機器」(17件), 「自然対流・複合対流」(17件), 「熱物性」(14件), 「融解・凝固」(15件)

(坂村芳孝)

4. 講演論文集・CD-ROM・プログラム冊子

講演論文集・CD-ROM・プログラム冊子につきましても基本的には従前の例に従って準備を進めました。表紙には、富山県のシンボルである立山連峰と雷鳥(富山県の県鳥)を採用したデザイン

としました。

プログラム編成の都合上、前回、前々回のシンポジウムの場合と比べて 3 日目の発表件数が増えたため、講演論文集の Vol. I と Vol. II を合本とし、Vol. III を独立した冊子としました。昨年度の報告にもありましたように、申込時の講演題目等の情報と投稿された論文の記載事項との不一致が数多くありましたので、目次の作成にあたっては投稿された論文の内容で統一させていただくことにしました。この際に生じた目次の校正では中川慎二実行委員（富山県立大）にご尽力いただきました。

CD-ROM の内容は、ウェブ上で公開する内容とほぼ同じものとし、HTML 形式で作成しました。こうすることで、準備する側の 2 度手間を防ぎ、作成期間を短縮させるとともに、OS 等使用環境に依存しないものを目指しました。なお、著者索引の作成や HTML 化の作業は全て畠山友行実行委員（富山県立大）によって行われました。

（坂村芳孝）

5. 会場・受付

今回に限らず地方都市で伝熱シンポジウムを開催する場合に問題となるのは会場の確保となります。富山市で最も大きな会場が今回使用した富山国際会議場となりますが、全館を使用しても部屋数が足りず、2 つの会場に分かれて実施せざるを得ません。前回富山市で開催した際には、富山国際会議場と富山県民会館とで実施しましたが、会場間の移動で参加者にはどうしてもご不便をおかけしてしまいますので、今回は隣接する ANA クラウンプラザホテル富山の会議室（2 室）を使うことにしました。2 室ではあっても会場使用料が高額となり、予算を圧迫することになりましたが、参加者の利便性を優先させることを理事会や企画部会で説明し、お認めいただきました。

富山国際会議場では、1 階エントランスホールに受付を設け、3 階メインホールを A 室、2 階特別会議室を B 室、2 階多目的会議室（4 室）を C から F 室、2 階会議室の一つを G 室としました。講演会場以外では、優秀プレゼンテーション賞セッションのポスター発表と産学合同交流会の会場として 3 階ホワイエを使用し、機器展示会場として 2 階ホワイエを使用しました。また、休憩室と

して 2 階会議室の 1 室を使用し、昼食をとっていただくスペースを 1 階交流ギャラリーと 3 階ホワイエ（2 日目以降）に準備しました。クロークは会場に備え付けのもの（3 階）を利用し、荷物の増加がみこまれた 3 日目には 3 階ホワイエに臨時クロークも設置しました。一方、ANA クラウンプラザホテル富山には H 室、I 室の 2 つの講演会場を設けました。さらに、理事会等の各種会議も同ホテルの会議室で開催しました。

（坂村芳孝）

6. 機器展示・カタログ展示・広告

従来のシンポジウムと同様に、機器展示・カタログ展示・プログラム冊子広告掲載に多くの企業からお申し込みをいただきました。以下に、ご協力いただいた企業をご紹介します。

（敬称略・順不同）

【機器展示】

- ・ メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社
- ・ 株式会社ソフトウェアクレイドル
- ・ 株式会社 IDAJ
- ・ 株式会社菱化システム
- ・ 株式会社フォトロン
- ・ 京都電子工業株式会社
- ・ 西華産業株式会社
- ・ 株式会社ナックイメーজテクノロジー
- ・ 株式会社ノビテック

【カタログ展示】

- ・ 昭和鉄工株式会社

【広告掲載】

- ・ アクティブレイ・サイエンティフィック株式会社
- ・ NUMECA ジャパン株式会社
- ・ 株式会社ファンクショナル・フルイッド
- ・ コーセル株式会社
- ・ 株式会社ソフトウェアクレイドル
- ・ カトウ光研株式会社
- ・ 三浦工業株式会社

なお、本件に係る渉外は宮本泰行実行委員（富山県立大）にご担当いただきました。

（坂村芳孝）

7. 特別セッション：福島第 1 原発事故を受け てわが国のエネルギー問題を考える

東日本大震災とそれに伴う大津波によって勃発した福島第 1 原発における炉心溶融を含むシビアアクシデントから 1 年以上経過しましたが、いまなお放射能レベルも高く、被害状況の把握も十分には行われていません。原発の安全性に対する社会の信頼が大きく損なわれ、泊原発の定期検査にともなって稼働原発 0 の状況が継続し、特に関西では大飯原発の再稼働や今年の夏の電力供給問題に大きな関心が寄せられており、福島第 1 原発事故の社会への影響は甚大であるといわざるをえません。

「福島第一原子力発電所災害に係る伝熱学会特別委員会」が事実上の活動を開始しましたのが昨年の伝熱シンポジウム（岡山）における特別セッションで、その後 4 回の委員会を開催し、今回、伝熱シンポジウムの実行委員会にお願いして、再度、題記の特別セッションを 5 月 31 日 9:30-11:30 の予定で開催させていただきました。今回の話題提供は以下のとおりです（敬称略）。

* 福島原発事故の経過

丸山 結（日本原子力研究開発機構）

* 大震災後の持続可能な電力需給に向けて

藤岡恵子（ファンクショナル・フルイッド）

* 伝熱学会の役割：現象の究明・検証のあり方を考える

円山重直（東北大学）

特別セッションの最後には上記講演者に門出政則（佐賀大）、高田保之（九大）のお二人にもご登壇いただき、企画担当者から原子力開発の経緯から原子力産業の位置付けなどについてコメントするとともに会場のみなさんとの討論や貴重なご意見をいただきました。今後の我が国のエネルギー問題を考えるには数年かけて冷静な検討が必要であること、また学会として一定の見解を出すことの重要性など貴重なご指摘をいただきました。

当日の資料はご講演の方々に事前に企画担当者にお送りいただき、コピーを当日配布する形態をとりました。他のセッションと並行して開催しましたので、配布資料は 160 部もあれば十分と思っておりましたが、セッションの終了後に資料がほしいとのご要望があったことから判断して 160 名以上の方がご参加いただいたこととなります。内

容的に統一感に欠けるのではと危惧しておりましたが、多くの方々からいいセッションであったとのお言葉をいただくことができましたことは、ご参加された方々の当該問題への関心が高かった証拠でしょう。企画担当者として、石塚先生を始めとするシンポジウム実行委員会の皆様ならびにご登壇いただいた方々に心よりお礼申し上げます。

（企画担当 小澤守）

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、本学会会員である学生や若手研究者をエンカレッジする場として、毎年、シンポジウムの場を借り、学生会委員会（第 50 期、齊藤卓志委員長）が企画・運営しているものです。今期の講演申込みは 34 件ありました。会員数のことを考えれば仕方が無いのかもしれませんが、一昨年は 43 件、昨年度は 38 件と減少傾向にあります。

ショートプレゼンテーションでは、発表者は 3 分の発表時間で熱心に発表を行いました。時間通りに終える発表者ばかりで、その準備と練習量を窺わせるものでした。会場のホワイエにて開催された 80 分のポスターセッションでは、工夫を凝らした素晴らしいポスターを使い、真摯かつ熱心に自分の研究を説明していました。構成や色合い、そして注意を引き付けるためのワンポイントの工夫など、審査も難しくなるほど、ポスターの技術水準が年々向上しています。また、今期は同じホワイエにて、産学合同交流会が開催されました。学生や若手研究者も、交流会で掲示された各ポスターの前で、企業の方々の話を熱心に聞き入っておりました。

発表について審査員スコアおよびポスター会場における投票により、学生会委員会にて慎重かつ厳正に検討した結果、高橋忠将（京都大学）、岩信太郎（慶應義塾大学）、濱口拓矢（明治大学）、瀬戸大地（慶應義塾大学）（以上敬称略/順不同）の 4 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も全体的に非常に良い発表をしていました。

末筆ながら、お忙しい中、困難な審査を長時間にわたりこなしていただいた審査員の皆さまに、いろいろとご準備頂いた産学交流委員会に、そして多大なご協力を頂いたシンポジウム実行委員会

に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

(学生会委員会 巽和也)

9. 産学合同交流会

この産学合同交流会は、第 49 回日本伝熱シンポジウム(富山)の初日 5 月 30 日の午後、富山国際会議場 3 階ホールにて実施しました。本交流会は、産学官の交流活性化を目的とし、特に学生と企業、若手教員と企業の交流・コネクションづくりを目指し、学生会委員会の協力の下、産学交流委員会が企画したものです。学生会委員会主催の優秀プレゼンテーション賞セッションに続いて、24 社が参加した企業ポスター展示と交流会を実施しました(図 2)。

約 180 名の参加者が集まり、フリードリンクと軽食を手に、各企業ブースにて伝熱技術の活用状況に関し活発な議論が行われました。学会発表では分からない企業の実際の活動が見えるため、参加者の関心は高く、活発な質疑応答がなされ、大盛況のうちに終了しました。

閉会後も、今回の交流会で親睦を深めた一部のグループは、富山の夜の町に繰り出すなど、学会初日から大変に盛り上がりました。

開催にご尽力頂いた企業出展者の皆様、伝熱シンポ事務局、理事会・企画部会、学生会委員会の先生方に深く感謝し、報告とさせていただきます。

(産学交流委員会 新隆之、堀内敬介)



図 2 産学合同交流会の様子

10. 特別パネル講演

日本伝熱学会創立 50 周年記念事業の一環として、2 日目(5 月 31 日 15:10~16:40)に特別パネル講演「伝熱研究の過去・現在、そして、私たちはどこへ行くのか」が行われました。司会は円山

重直先生(東北大)がお務めになり、パネリストとして門出政則先生(佐賀大)、高田保之先生(九大)、鹿園直毅先生(東大)、吉田英生先生(京大)が、さらに日本伝熱学会将来検討委員会委員長である宇高義郎先生(横浜国大)が登壇され、学会の将来について議論が行われました(図 3)。本企画の詳細については、石塚勝先生(富山県立大)による報告をご覧ください。

(坂村芳孝)



図 3 特別パネル講演の様子

11. 懇親会

日本伝熱シンポジウム恒例の懇親会は、2 日目(5 月 31 日)の 18 時 30 分から ANA クラウンプラザホテル富山 3 階大宴会場「鳳」で開催されました。参加者数は 300 名を超え、盛会となりました。

実行委員長による開会挨拶の後、第 51 期会長の門田先生にご挨拶をいただき、その後学会創立 50 周年記念を祝う鏡開きが行われました。前回のシンポジウムで特別講演をお引き受けいただいた中山恒先生、第 50 期・51 期会長、特別パネル講演登壇者のうち 4 名の先生方に登壇いただき、鏡開きをお願いしました(図 4)。樽酒には富山の地酒「立山」を準備させていただきました。鏡開きの後中山恒先生の御発声で乾杯し、和やかな雰囲気懇親会をスタートさせることができました。懇親会の途中には、日本最古の民謡と言われている「こきりこ踊」に合わせて踊る伝統芸能「こきりこ踊」をお楽しみいただきました。この行事に対しては(財)富山コンベンションビューローよりコンベンション開催支援(伝統芸能)事業補助金をいただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

閉会の前に、来年仙台で開催される第 50 回日本

伝熱シンポジウム実行委員会委員長の円山直重先生にご挨拶いただき、最後に第 50 期会長の笠木先生に閉会のお言葉をいただきました。

なお、懇親会の司会進行は畠山実行委員にお願いしました。

(坂村芳孝)



図 4 鏡開きの様子

12. あとがき

富山で伝熱シンポジウムをお引き受けするにあたっては当初より多くの懸念がありましたが、石塚実行委員長リーダーシップのもと、理事会や企画部会の皆様にもご指導いただきながら、またご参加いただいた皆様のご協力によって、なんとか無事に終えることができました。特に、日頃からお世話になっている北陸信越支部会員の皆様には実行委員会にご参加いただくとともに、座長選出に際しても多大なるご協力を賜りました。また、多数いただいたご助言や励ましのお言葉は非常に心強い後ろ盾となりました。この場をお借りしてお礼申し上げます。

予算的な懸念につきましては、富山県および富山市からのコンベンション開催補助金によって解決できるものと思われませんが、補助金申請のためには、参加者の皆様にご協力いただいた宿泊調査結果を整理し、のべ宿泊数を算出しなければなりません。この作業が終了するまでの間は、まだしばらくのんびりできそうにはありません。

シンポジウム期間中の富山県立大学の学生諸君による献身的な働きは、本当に頼もしく、ありがたいものでした。また、富山コンベンションビュ

ーローから派遣していただいたコンベンション・ボランティアの方々には、受付業務やクローク、袋詰め作業でご協力いただきました。裏方として本シンポジウムを支えて頂いた皆様にも心よりお礼申し上げます。

ちょうど一週間前に終了したシンポジウムの様子を思い出しながら、本報告を纏めました。開催期間中はあつという間に時間が過ぎ去り、まるで夢の中の出来事のようなでした。いや、もしかするとまだ夢の中にいるのかもしれない。この夢が覚めないことを祈りつつ筆を置きたいと思います。

(坂村芳孝)

日本伝熱シンポジウム創立 50 周年記念 第 49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会	
委員長	石塚 勝 (富山県立大学)
幹事	坂村芳孝 (富山県立大学)
委員	青木和夫 (長岡技術科学大学) 赤堀匡俊 (釧路工業高等専門学校) 太田淳一 (福井大学) 門脇 敏 (長岡技術科学大学) 川口清司 (富山大学) 経田僚昭 (富山高等専門学校) 熊野寛之 (青山学院大学) 小泉雄大 (コーセル株式会社) 小泉安郎 (信州大学) 瀬田 剛 (富山大学) 瀧本 昭 (金沢大学) 多田幸生 (金沢大学) 寺岡喜和 (金沢大学) 寺西恒宣 (富山高等専門学校) 中川慎二 (富山県立大学) 永井二郎 (福井大学) 畠山友行 (富山県立大学) 八賀正司 (富山高等専門学校) 羽田喜昭 (長野工業高等専門学校) 姫野修廣 (信州大学) 平澤良男 (富山大学) 平田哲夫 (信州大学) 舟渡裕一 (富山県立大学) 松原幸治 (新潟大学) 宮本泰行 (富山県立大学) 百生 登 (富山高等専門学校) 義岡秀晃 (石川工業高等専門学校)

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
— 第 49 回日本伝熱シンポジウム —
Best Presentation Award

学生会委員会幹事
巽 和也 (京都大学)
Kazuya TATSUMI (Kyoto University)

平成 24 年 5 月 31 日に富山市 (富山国際会議場) で開催されました学会総会において、第 49 回日本伝熱シンポジウム (富山) で開催されました優秀プレゼンテーション賞セッションにて発表を行い、見事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。

2012 年度 受賞者

- ◆ 高橋 忠将 (京都大学)
「SOFC 燃料極の表面温度分布にメタン改質反応が与える影響」
- ◆ 岩浅 信太郎 (慶應義塾大学)
「ソーラー強制レイリー散乱法を用いた油層内 2 成分溶液のソーラー係数及び相互拡散係数同時測定 - 新しい測定原理と方法の開発 - 」
- ◆ 濱口 拓矢 (明治大学)
「顕微高速干渉計法を用いた孤立気泡周りの液相温度場計測」
- ◆ 瀬戸 大地 (慶應義塾大学)
「近接場蛍光を用いたナノスケール温度センシング手法の開発 - 高感度温度計測を実現する新たな近接場プローブの検討 - 」

(順不同)



優秀プレゼンテーション賞ポスター会場風景



高橋さん 岩浅さん 濱口さん 瀬戸さん



優秀プレゼンテーション賞受賞者

パネルディスカッション
 伝熱研究の過去・現在，そして，私たちはどこへ行くのか
The Past, Present and Future of Heat Transfer Research
 - Where are we going? -

石塚 勝 (富山県立大学)

Masaru ISHIZUKA (Toyama Prefectural University)

e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp

1. はじめに 笠木伸英 (東京大学)

今回のパネルは，1 年前の岡山での伝熱シンポジウムに始まった一連の創立 50 周年記念行事の締めくくりであり，日本伝熱学会の将来展望について，新しい時代における使命や役割も含めて，大いに議論してほしい。



笠木先生

2. パネリストによる講演

2.1 研究活動における「過去の姿勢と現状」
 門出政則 (佐賀大学)

研究活動における「過去の姿勢と現状」ということで，曲がりなりにも研究活動と呼ばれる活動開始後の 40 年間に振り返ってみると，沸騰過程における限界現象への挑戦と水素貯蔵に関連する熱的問題の 2 つに大別できる。



門出先生

沸騰過程の限界現象では，衝突噴流沸騰系や制限流路内の自然対流沸騰系における限界熱流束の研究，更に最近では高温面の急速冷却中における濡れ開始や均一自発核生成の発生限界に興味を持

って取り組んでいる。共通点は，現象がある条件下でその状態が前後で「突然変化する」その変化を支配する状態量は何か？更にはそれらの関係はどのように与えられるのかという科学的な視点（興味）が研究の動機となっていた。しかし，動機は，いわゆる基礎研究と呼ばれるものであったが，限界熱流束は，熱交換器で広く利用されている沸騰熱伝達の上限を決定する値で，工学的にも非常に重要な研究である。例えば，熱サイフォンの限界熱流束は，500 系や 700 系新幹線の回生ブレーキに使用されている電気回路 (IGBT) の冷却限界と冷却方法の改善に利用されている。

また，高温面の非定常冷却過程は，一般に冷却曲線として知られているが，高温面の安定な濡れはどのような条件で決定されるのか？そのためには，急速冷却中の高温面の表面温度と表面熱流束をより正確に把握する必要がある。そして，この問題の解決なくして，冷却曲線の正しい理解はできない筈だという考えから，固体面の温度測定から非定常熱伝導の逆問題解の解析に取り組んだ。

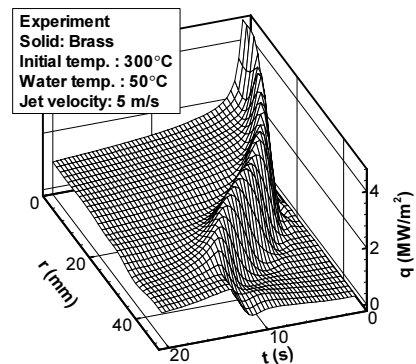


図 1 高温面が急冷されるときに濡れ面の移動と熱流束の関係

図 1 は，高温面が急冷されるときに濡れ面の移動と熱流束の関係を示す。逆問題解析によって，

熱流束の変化の様子が初めて正確に把握できるようになった。

水素貯蔵に関連する研究をあるきっかけから始めることになった。この研究は、最初から応用を目指した研究で、具体的には、①水素吸蔵合金 (MH) を利用して水素を急速吸蔵する機器開発、②水素を高圧容器に急速充填する時の熱的問題についてである。

水素吸蔵過程は、熱化学反応で、かつ伝熱律速であることから、MH の熱物性を把握し、その特性に適合した伝熱促進を考えれば、解決できる筈である。まず、MH の熱物性を逆問題解を利用して簡単に測定することからはじめ、最適なフィンを設計することによって解決できた。次に、急速充填の熱的問題であるが、容器内の熱流動をまず数値解析し、その結果を適用して解析しようとした研究が多く見られたが、水素充填中の容器内の流動は「十分攪拌されている」という大胆な仮説を立てると、この問題は半流れ系のエネルギー式と容器壁を通しての 1 次元非定常伝熱の連立方程式の問題に簡略化される。充填試験結果も非常に良く推定されることが検証されている。

エネルギー問題は、これからも多くの伝熱の知識が必要とされるだろう。基礎知識と全体を把握する力、さらにそれを遂行する忍耐力がこれからも求められるだろう。

終わりの高村光太郎の詩「道程」の一節「僕の前に道はない、僕の後ろに道は出来る」という気持ちを持って前進することが大切だと思って、これからも研究に立ち向かいたい。紙面の都合から、参考文献を割愛した。

2.2 研究のあな場を見つけること

高田保之 (九州大学)

私が九州大学工学部応用原子核工学科の長谷川修先生の研究室に配属された時、先生は 53 歳でありましたが、自分はもうその年齢をとうに過ぎてしまいました。長谷川研究室では高温ガス炉配管の環状断熱層内の対流に関連して、傾斜環状多孔質層内の 3 次元自然対流に関する実験と数値計算の研究を行いました。

1984 年に博士課程を修了した後、動力機械工学

科の伊藤猛宏先生の研究室にお世話になり、以来現在に至るまで沸騰に関連した研究に携わっています。着任当時は製鉄所の水冷却プロセスに関する研究で、噴霧冷却やサブクールプール沸騰の実験を行いました。当時はまだ沸騰に及ぼす伝熱面の濡れ性の影響には関心がありませんでしたが、

1995 年の 3 月に日本機械学会九州支部総会で、東陶の江副社長による超親水性光触媒に関する特別講演をお聞きする機会がありました。これが小生と光触媒の出会いとなりました。講演を聞いているうちに、この光触媒の超親水性を利用すれば限界熱流束を大きくすることができると直感しました。また紫外線で伝熱を制御できるのではないかと、など次々にアイデアが浮かんできました。早速、東陶の基礎研究所を訪ねて、伝熱面に光触媒をコーティングしてもらい、濡れ性の影響に関する研究を開始しました。その後、技術職員の日高さんが見つけてきた超撥水コーティング面での沸騰実験などにも濡れ性関連の研究を展開させ、現在に至っています。まさに相変化に及ぼす濡れ性の効果は小生のライフワークとなりました。

長谷川先生の恩師である山縣清先生は、ご自身の随筆の中で、研究のカギはテーマの選び方であって、魚 (=研究成果) がたくさん釣れるあな場 (=テーマ) を見つけることが重要であると述べておられます。山縣先生は西川先生とともに沸騰伝熱という非常に大きなあな場を見つけられました。小生もこの随筆を読んでからは、自分にとっての研究のあな場は何かということ、ずっと考えてきました。前述のように、気液相変化に及ぼす表面の濡れ性の影響に関するテーマが、ささやかながらも自分のあな場であると感じています。

伝熱研究も学会創設時は、熱伝導、自然対流、強制対流、沸騰・凝縮、ふく射といった現在の教科書の分類そのもので、取り扱う対象はボイラ、原子炉、熱交換器と日本の経済発展を支えた大型機器でありましたが、現在ではこれらに加えて、バイオ、MD、マイクロ、反応系などの新分野が



高田先生

研究の分類に加わり、対象も水素・燃料電池、電子機器など、マクロ→ミクロ→ナノとサイズ的にも細分化されています。震災以降、エネルギー有効利用の重要性が再認識されており、これに関連して、従来の手法で解決できる実用的な研究も依然として重要であります。ナノレベルにまで踏み込んだ基礎研究もますます発展しています。今後、伝熱研究において、実用と基礎の二極化が進むのではないかと予想します。伝熱学会の将来にとっては、この両者のギャップを埋めることと、伝熱学会としての非常に大きな研究のあな場を見つけることが重要なのではないのでしょうか。

2.3 エネルギーと伝熱研究

鹿園直毅（東京大学）

個人的には、常にエネルギーの観点から熱技術を考えるように心がけている。昨今は、再生可能エネルギーに大きな注目が集まっているが、一足飛びに再生可能エネルギーに偏重してしまうことは、やや無責任な飛躍した思考であると考え。

量的な貢献を考えれば、熱を中心とする省エネルギーこそが最優先の喫緊の最重要課題であろう。もしこの考えが間違っていなければ、熱技術に対する社会から期待も近い将来必ず高まってくるはずであり、そのときは熱技術者がエネルギー問題を解決するための中心的な役割を担っているはずである。

現在の、燃料を燃やしてその熱から熱機関を利用して動力を取り出す、あるいは給湯や乾燥等に直接利用するという熱技術の体系は、オイルショックのときに脱石油に転じて以降、1980年代半ばから約20年続いた燃料・素材価格の低位安定時代に不動の地位を確立したものである。これは疑ってかかること自体が無駄に思えるほどに確固としたものに見えるが、エネルギーを取り巻く状

況、特に燃料・素材価格の高騰と乱高下は、この技術体系にも大きな影響を与えるはずである。境界条件がこれだけ変化している中で、従来の仕組みが果たして将来的にも最適であるという保証はあるのだろうか？理論的には様々な熱利用のパスがあるはずであり、従来の価格ではコスト的にペイしなかった技術、周辺技術が未成熟だったためにお蔵入りせざるを得なかった技術、国内市場では受け入れられなかったけれども途上国や海外でブレイクする可能性のある技術など、大きな可能性を持つ技術が数多く隠れていると思われる。現在は、そのような新しい熱技術が登場する直前の転換期にあるような気がしてならない。

個人的には、これらの新しい可能性の中でも、特に固体酸化物形燃料電池(SOFC)と、熱交換温度差の低減が重要と考えて研究対象としている。SOFCは、理想的には可逆的に発熱することが可能となるので、燃焼熱を低温で利用してしまう際に発生する不可逆損失を大幅に低減できる。その電極反応は、複雑で微細な多孔体中のイオン電導と反応活性点での電気化学反応に主として依存するが、電極微構造と分極特性の関係を定量的に記述することは、複雑構造内の熱輸送とあまり変わらない。他の電池においても同様な課題があると思われる。一方、熱交換は、特に温度差が大きくなる気相伝熱促進が、コストおよび不可逆損失低減の上で非常に重要である。従来、空調の分野でいわゆる前縁効果による伝熱促進技術が発展してきたが、レイノルズ数範囲が上がって乱流との遷移域に近づくと、前縁効果も最適な手段とは限らない。最近、このようなレイノルズ数範囲のニーズを聞くことが結構多い。乱流は、層流よりも熱伝達率の絶対値が大きいばかりではなく、圧力損失との比である j/f 因子も大きい。層流においても乱流に近い疑似構造を実現できれば、高い熱伝達と低い圧力損失を両立できる可能性があるのではないかと考えている。このように新しいニーズでは、伝熱の従来からのアプローチが異分野で生きる場合もあれば、従来とは異なる手段が有効になってくる場合も多いのではないと思われる。

先に、新しい熱技術の登場する可能性について述べたが、これらは残念ながら新規ビジネスと密接に絡んでいる場合が多い。誰も進んで自らの手の内を見せる人はいないので、そのニーズは本質



鹿園先生

的に顕在化されにくい。つまり、伝熱研究会黎明期のように、原発やガスタービンのような明白なニーズが学会でも共有されるといった状況は考えにくい。研究者自らが五感を研ぎ澄ましてニーズを感じ取る、あるいは自らニーズを発掘した上で、研究テーマにブレークダウンして実行する、という姿勢が最も重要だと考える。そうすれば、再び伝熱研究がエネルギー技術の中で中心的な役割を担う時代がやってくると勝手に信じている。

2.4 「非当事者・傍観者的状態ではなく」と考えて 吉田英生（京都大学）

35 年前、卒業研究で東京工業大学の森康夫先生の研究室に所属したときに選択したテーマは、当時 30 年後ぐらいには実現するかもしれないと予想されていたトカマク型核融合炉（反応： $D+T \rightarrow He+n$ ）において、液体 Li ブラケットの内側壁面を He ガスの衝突気泡噴



吉田先生

流で冷却するという 21 歳の私をわくわくさせるものでした。その関係で気液二相流や乱流によるよどみ点まわりの伝熱促進を博士論文として、さらに越後亮三先生の研究室での助手・助教授時代には、固気二相流による衝突噴流冷却、多孔性媒体を用いた伝熱・燃焼促進、空気圧縮式エネルギー貯蔵などにかかわりました。京都大学に異動してからは MGT・SOFC などを用いた分散型エネルギーシステムが主です。エネルギーの有効利用という意味では一貫しているものの、そのときどきの対象をつまみ食いしているだけで、恥ずかしながらライフワークというべき一筋の研究はありません。

もし自分が若い当時に戻ることができ一途に取り組めるとするならば、迷うことなく、以前に夢見て——にもかかわらず難しさに屈してすぐ逃げてしまった熱の半導体あるいはダイオード実現に向けた基礎研究をやってみたいと思います。不勉

強でひょっとしたら不可能なことを幻想しているだけかもしれませんが。

一方で、現実的に今後なにを最優先にすべきかとなると、福島第一原子力発電所の事故をきっかけに意を強く決したことがあります。いかなる理由であれ、私たちはかけがえのない「国土」を汚染し「住民」が住み続ける土地を奪うという取り返しのつかないことをしてしまった——このことを痛切に感じる必要があると思います。震災後、日本人の心の原点として繰り返し歌われた「ふるさと」の結びは「水は清きふるさと」です。涙なしに歌えましょうか。しかし私自身をふりかえりますと、自分にとって原子力発電システムは専門とはいえないまでも専門の要素の一つであり極めて近い延長線上でした。しかしそのシステムは自分の責任外だし、かつ事故はまず起こらないだろうという希望的観測の下になんの行動も起こりませんでした。実に忸怩たる思いがあります。

現時点で同類の非当事者・傍観者的状態はないかと考えると、自分がまず取り組まなければならないと考える研究テーマは、二酸化炭素起源による地球温暖化説の科学的検証です。地球の気候は他でもなく熱・物質輸送現象の集大成であるので、そのスケールと複雑さはさておき、まさにわれわれの専門領域と合致するものです。しかし本会で、IPCC が分析の中核に位置づける気候モデル（数値シミュレーション）に関して徹底的な検討を加えたことはなく、たいいては IPCC の結論を受動的に受け止めてきました。私自身、10 年ほど前までは強い疑問も感じずに受け入れていました。

地球温暖化に関する議論や諸交渉は、2007 年のノーベル平和賞の強い影響もあり、今や政治や各国のおもわくとも密接に結びついています。そのような状況下で、震災後極度に追い込まれている日本の状況を見ると、予防原則や省エネルギー・省資源促進などの理由なども加えて後ろ盾とし、二酸化炭素が疑うことなき悪者であるかのように扱う「低炭素社会」という語を安易に繰り返してよいのだろうかという疑問を持ちます[1, 2]。皆様のご賛同を得ることができれば、本会で研究会を組織し気候モデルの妥当性につきメスを入れてみたいと思います。

さらに上記の件とも関連し、科学技術の役割が重要になった現在、理科系／文化系や専門家／素

人などと世の人々を二分化せず、可能な限り科学技術の啓蒙に努める必要があると思います。(本会創立 50 周年記念事業の一つとして立ち上げた“熱ペディア”もその一環です。)科学に重点をおいた“Newton”はその先駆者として貴重かつ巨人的存在ですが、ぜひ技術にも重点をおいた啓蒙メディアとして“Watt & Edison”(wattandedison.com)をエネルギー系・機械系・電気系などの学会連合で立ち上げたいと願います。本会の諸賢のご理解とご協力をいただければありがたく存じます。

参考文献

- [1] 吉田英生編, e-mail 討論 地球温暖化: その科学的真実を問う, エネルギー・資源, 30-1, 30-2 (2009), <http://www.jsr.gr.jp> からダウンロード可.
[2] 吉田英生, エンジニアから見た熱流体力学の数値シミュレーション, パリティ, 27-7 (2012) (2012) 52.

3. 「日本伝熱学会将来検討に関する答申」の趣旨と要約 宇高義郎 (横浜国立大学)

将来検討委員会による会長への答申を、本パネルにて概説した。その内容を以下に記す。詳細については、本号に掲載されている「将来検討委員会による答申」を参照願いたい。

3.1 将来検討の背景

本学会の創立 50 周年と公益社団法人化を機に、また、学術界内外における最近の変化に対応した新たな展開 (世界科学会議・ブダペスト宣言: 社会における、社会のための科学, 第 4 期科学技術基本計画, …) などへの対応のため、次の半世紀に向けた学会の将来構想を検討した。

3.2 検討課題

(1) 本学会の現状分析, (2) 学術的な守備範囲・活動内容の方向性; 新規研究領域の開拓や大型プロジェクトの立案, 他分野との連携, (3) 社会からの要請の強い現代的課題, (4) 今後の国際的活

動の発展, (5) 学会名称の検討について、会長から諮問された。

3.3 現状分析とこれからの方向性

伝熱研究会は、幅広い熱分野へ横串を通すような横断的組織として立ち上げられた。しかし、機械工学系以外の会員数の減少, 伝熱学の充実から、拡張・学際化傾向, ドキュメントシェアの低下, 国際的位置づけなどの検討すべき問題事項が存在している。今後は、最近の学術界内外の変化に対応すべく、新たな分野横断的な熱科学技術の研究者集団を目指し、その集団が機能する学会のあり方への具体的な対策を講ずるべきである。

3.4 提言

(1) 特定推進研究企画委員会の設置

本学会として取り組むべき特定推進研究課題を探索・立案する。図 2 に本委員会の構成を示したように、それぞれの専門的課題を設定する複数の特定推進研究グループを設け、それらと協働して進める。

大局的な学術の振興の中に本学会の分野を位置付け、他分野との横断的協調および産官学の研究推進体制を築く。社会の期待に応えるための社会的科学技術課題、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などを推進する。それらを学会として取り組む主要課題と位置付け、学会員の研究課題設定に供するとともに、公的なファンディング機関などによる研究開発方策・大型研究プロジェクトの立案や推進に対して助言してゆく。そのようなプロセスの骨子となるイメージを図 3 に示した。

(2) アジア地区委員会の設置

熱研究コミュニティの国際的な地位向上を図り、また、発展しつつあるアジア地区の熱分野コミュニティを本学会が主導する形での組織化を進める。

3.5 学会名称の検討

学会名称について、将来にわたる伝熱分野の深化と拡張, 境界領域の進展, 学会への社会的な期待の変化などの、種々の視点から検討を行った。その結果、本会議における現在の検討内容の到達点としては、現在の学会名称を俄に変更すべきとする合意には至らなかった。しかし、今後とも学会名称の変更に関わる本質的議論を継続し、名称変更を行う柔軟性とダイナミズムを担保すべきである。



宇高先生



図 2 特定推進研究構成



図 3 特定推進研究のイメージ

4. パネルディスカッション

要約 石塚 勝 (富山県立大学)

司会 円山重直 (東北大学)



司会の円山先生

円山 これまで、各パネラーの方々にご自身の研究動機や経緯、伝熱の将来像についてお話し頂きました。伝熱学会は討論を重んじる学会ですので、フロアからご意見を頂きたいと思います。特に「私

たちはどこへ行くのか」というテーマについてもコメントを頂けると有り難いです。

加藤之貴先生 (東工大)

将来構想検討委員会の意見に次世代を担う若い人の意見をできるだけ反映して頂けると良い。学会は若手育成の下地を作る環境にしてもらいたい。

高松洋先生 (九大)

今回のパネルでは、研究に対するそれぞれのパ

ネラーの異なったモチベーションが聞けてよかった。研究の方向には統一した結論はないと思う。将来検討委員会では、昔の科研費の特別研究のように、様々な研究者と交流できるような機会を作って若手に活かしてもらうためにはどうするかということを考えて議論してきた。

上野藍様 (東大 博士課程学生)

突然の指名で余り良い意見は思い浮かばないが、若い研究者や学生をあまり、がんじがらめにせず、比較的自由に研究ができる環境を作ってほしいと思う。

花村克悟先生 (東工大)

昔は、研究室がマクロサイズ (教授、助教授、助手 2 名、技官) のため、いい意味で上から下への影響があった。年々、研究単位がマイクロサイズやナノサイズ (教授のみ、あるいは准教授のみ) となり、そうした研究室内の切磋琢磨がなくなってきた。そこで、志を一つにした人が集まる研究の場を設ける研究会の設置も、学会としての役割の一つと考える。

宮崎康次先生 (九工大)

現在の自分は、マクロからマイクロ、ナノの流れで研究を行っているが、これはマクロでやってきたものの反省から生まれている。学会はこのような土壌を育てるミッションもあると思う。一方で、学会の社会的役割を考えると、ナノ一辺倒で進めてしまってよいのか、自分自身は悩んでいるところもある。

中別府修先生 (明治大)

伝熱シンポなど学会の活動からはモチベーションや活力をもらえている。大学教員や参加する学生にとって現状はうまく機能している。ただし、20 代、30 代の若い世代は着実に減っており、企業の若手人材に如何に学会へ参加してもらおうかが課題である。アジア地域との連携でも、学会内にどのように活力を取り入れるかが重要な課題だと思う。

藤岡恵子様 (ファンクショナル・フルイッド)

この学会は、「わたしたちはどこへ行くのか」と言うテーマで議論し学会のアイデンティティを自らに問う体質がある点が素晴らしい。テーマの

結論を出すことではなく、考えること自体に意義がある。日本伝熱シンポジウムの雰囲気がよい。この気風を守ってほしい。また、伝熱のテーマは企業の技術と直結しており、企業と伝熱研究を結びつけるのも伝熱学会の役割だと思う。

飯山明裕様（日産自動車）

エンジンや燃料電池などは、ナノレベルの熱現象の解析ができないと材料開発はできない。分子レベルの熱と物質の移動の解析などは、伝熱学会がリーダーになってほしい。

円山 これまで、パネラーと聴衆の皆さんから大変有意義な議論をしていただきました。特に、大先生も若者も遠慮しないで、親しく議論を深める伝熱シンポの懇親会が伝熱学会の良き風土ではないでしょうか。この伝統を大切にして、100 周年に向けたこれからの 50 年に、今回のパネルディスカッションを参考にさせていただけたらと思います。

5. まとめ 石塚 勝（富山県立大学）

今回、創立 50 周年記念事業の締めくくりとして「伝熱研究の過去・現在、そして、私たちはどこへ行くのか」というパネルディスカッションを企画しました。しかし、その落としどころは不明なままの状態でした。そこで、パネル関係者で 1 回某温泉で合宿を行い、まとめの方向性を討議しました。その際、お願いした 4 人のパネリストの豊

富な研究経験と意見をお聞きすれば、会場からの討論を含め、なんとか着地点が見いだせるのではないかという期待を持ちました。

はたして、会場での議論をきいているうちに、日本伝熱シンポジウムの真剣な討議と懇親会の和やかな雰囲気が学会の核であること、様々な人が広い間口で思い思いの研究をしている自由な土壌の提供こそが日本伝熱学会の存在意義であろうということ、さらに学会は「どこへいく」という問いかけ自体に意味があるということなど、認識あるいは再認識できたことは意義深いと思います。

最後に 4 名のパネリスト、司会の円山先生、宇高先生には、その発表準備を含め、多大の気苦労をおかけしました。パネルに参加された会員各位とともに深く感謝申し上げます。



パネル討論会風景

森 康夫 先生のご逝去を悼む
Professor Yasuo Mori (1923 – 2012): Memorial Tribute

中山 恒 (名誉会員)
Wataru NAKAYAMA (Honorary Member)
e-mail: watnakayama@aol.com

森 康夫先生が3月20日お亡くなりになった。私は昨年来、伝熱学会創立50周年記念事業のために様々な資料に目を通してきたが、その過程で森先生から賜った長い年月にわたるご指導を思い出していた。心から哀悼の意を込めて、この文を記します。

森 康夫先生は大正12年(1923年)2月24日、東京でお生まれになった。昭和20年10月、東京帝国大学第二工学部航空機体学科を卒業された。世に転変なければ東京帝大で研究を続けられたであろうところ、昭和21年4月、米国政府の指示により東大工学部航空機体学科が閉鎖となり、余儀なく東大を去る経験をされた。その後、昭和28年4月に東京工業大学に移られ、同年11月助教授、昭和36年5月工学部教授に任ぜられた。長年にわたる東京工業大学での奉職に加え、昭和57年には東京大学生産技術研究所教授を併任されることになった。昭和58年4月、東京工業大学を定年退官され、その後、昭和63年3月まで電気通信大学において研究と教育に携わられた。大学退官後は、平成2年2月～平成4年4月の間、米国ホノルルに所在した Pacific International Center for High Technology Research において Senior Scientist (外務省ODA専門家) を務められた。

学協会役員などの主な経歴は、日本機械学会理事(昭41, 43, 47, 48)、日本機械学会副会長(昭53)、日本伝熱学会会長(昭53)、日本機械学会監事(昭54)。

伝熱、燃焼、エネルギー工学、環境工学の広い範囲に及ぶ研究をされ、国内外に発表された研究論文は300篇を超える。また、共著を含め15冊の著書を著されている。国内における受賞歴は4度にわたる日本機械学会論文賞(昭38, 48, 55, 59)、東京都科学技術功労賞(昭57)、工業技術院大型工業技術開発貢献賞(昭61)、日本機械学会熱工学部門賞(平1)などである。平成11年には旭日



森 康夫 先生 (第17期伝熱学会会長)

中綬章を授与された。

森先生は国際伝熱研究界におけるリーダーとしてもご活躍された。International Journal of Heat and Mass Transfer など主要な論文誌の Editor を務められた。海外における森先生に対する声価は極めて高く、昭和59年 University of California, Berkeley 校における Springer Distinguished Professor を始め、海外から講演に招待されること多数回に及んでいる。著名な賞を授与された数少ない日本人の一人であり、ASME Heat Transfer Memorial Award (昭57)、ASME Max Jakob Memorial Award (昭63)、ICHMT A. V. Luikov Medal (昭63) を受賞されている。昭和61年2月には米国工学アカデミーの外国人会員に推挙された。

森先生は、我が国の伝熱研究と本学会の発展史のなかに大きな流れを作られた。先生が長年にわたり一貫して堅持してこられた原則を纏めてみると次のようになる。

- 独創的な基礎研究に裏付けされた包括的知識体系の構築が、大学における伝熱研究のミッションである。

- 我が国の工業技術環境に根差した研究を行い、しかも普遍性を兼ね備えた成果を出せば高い国際的評価が付いてくる。
- 時代とともに研究対象は多様化する。視野を広げれば魅力あるテーマが見えてくる。

森先生は学会の組織的整備に関して早くから構想を温めておられた。第 17 期会長に就任（昭和 53 年（1978））した際、構想の実現に向けて下記の提案をされている（伝熱研究, 18-69(1979)1）。

- 社団法人組織とし、国内外各種機関との交渉における立場を強化する。
- 会員の増強を図る。とりわけ学生員制度の開設を検討する。
- 予算の増強を図る。「伝熱研究」誌への企業製品広告による収入を検討する。
- 夏季セミナーの充実を図る。
- 伝熱スクール（仮称）を新設する。
- 発行誌にアカデミックな内容の記事をより多く掲載する。
- エネルギー問題の解決へ向けて、討論会を他学協会と共催する。

これらの提案の殆どが紆余曲折を経たもの今日では実現されている

森先生はさらに若い世代の研究者を励ますために学会賞の創設を提案され、拠金を申し出られた。これを基に平成元年、日本伝熱学会学術賞が設けられ今日に至っている。

森先生は 1974 年に東京で開催された第 5 回国際伝熱会議で論文査読委員長を務められ、先生ならではの纏めをされた。国際伝熱会議には米国コロラド州ボルダー市で開催された第 2 回国際伝熱会議から 1994 年英国ブライトン市での第 10 回会議に至るまで毎回参加され、我が国からの参加者の先頭に立っておられた。

（旧）ユーゴスラヴィアで始められた国際夏季セミナーは、その後 International Centre for Heat and Mass Transfer (ICHMT) に発展した。1971 年に設立された ICHMT の Scientific Council に、森先生は西脇仁一先生、水科篤郎先生らと共に日本を代表する初代メンバーになられた。ICHMT はその後、トルコに本拠を移し今日に至っている。森先生は 1990～1994 年の間、President を務められた。ICHMT がトルコへ移行した時期と重なり、新しい組織の整備に尽力された。ユーゴ時代の ICHMT

は運営基盤が弱かった。森先生はこれを Executive Committee が権限を持ち、規約 (By-Law) に基づいて運営する国際組織に変革するようリーダーシップをとられた。

森先生は米国に強い人的ネットワークを持たれていた。とりわけ森先生が培われた MIT の Warren Rohsenow 教授、UC Berkeley の C. L. Tien (田長霖) 教授、Michigan の W. J. Yang (楊文偕) 教授らとの親交は、伝熱研究界での日米交流を深めるのに大きな力になった。日米熱工学会議も含め、後にホノルルで開かれた会議に参加されるたび、ホテルのスイートに日本からの参加者をお招き頂いた。通称「森バー」は、当時の若手研究者にとって森先生と直接お話しを交わす得難い場であった。

森先生の研究業績を閲覧すると、研究課題の選択に際し永続性と発展性に深い考慮が払われていたことが分かる。森先生はご自身が取り組まれた研究課題を下記のように分類されている（機論—B, 49-444(1983)1567）。

- (1) ある分野の学問体系の確立のために行ったもの。
- (2) 学問的必要性・必然性から行ったもの。
- (3) 水平思考的考察により課題を選定したもの。

分類(1)に入るものは二次流れを伴う対流伝熱に関する研究であった。分類(2)に入る主要なテーマとしてプラズマ伝熱を上げられている。高温環境下における伝熱現象に関する研究は、高温熱交換器の設計に有用な知見を生み出した。分類(3)に入る課題の例として、垂直フィンの先端における凝縮熱伝達の問題を上げられている。「水平思考」とは、ある問題の解決に使われた理論なり実験の手法を、異なる研究対象に適用する着想を指している。

バイナリサイクルによる地熱発電、窒素酸化物生成過程の解明、炭酸ガス固定化などの課題にも取り組まれた。これらの研究においても、物理現象の基礎的理解を強調する姿勢を貫かれた。後年、分子動力学の応用に関しても強い関心を持たれていた。森先生のご逝去はたいへん悲しいことであるが、先生は存分にご自分の人生を歩まれ、天寿を全うされたと思う。追悼文を纏める過程で、先生の大きさをあらためて深く心に刻んだ次第である。（本稿は短縮版。全文ご希望の方は watnakayama@aol.com までご連絡ください。）

森 康夫 先生を偲んで

My Recollections of Professor Yasuo Mori

一色 尚次 (東京工業大学名誉教授)

Naotsugu ISSHIK (Professor Emeritus, Tokyo Institute of Technology)

私はこの二千十二年三月半ば、親友であり伝熱研究の泰斗であった森 康夫氏を失って、これは大へんなことになったぞと驚き、かつ、がっかりしていた時、色々の方から森先生と最近の伝熱研究について書いてくれという話があり、不十分であるが、筆を下すこととした。

森 康夫とは五十年以上の伝熱のつき合いがあり、常に友人であるとともにすべてのライバルであり、味方であり敵であるという不思議な関係を大っぴらに続けて来た。これは誰でも知っておられると思う。どんな会議でも二人は並んで座り、互いに反対の事を言いながら、しかも仲良くやってきた。誠に不思議な関係であった。例えば学生反乱時代、教授会で二人並んで森は学生を追い出せの右派、私はもっと話し合えの左派で、大声で言い合ったものである。私は当時船舶技研、彼は恐らく機技研から来たで似た者同志であっただけでなく、実は旧制一高、東大第二工学部の航空専攻以来の親友で、二人の友情と言い合いは工大名物となったくらいである。やがて学生紛争もすみ、二人は一緒に伝熱工学等で親交と友情を深めつつ、この前の彼の死まで仲良くすごし、同じ東工大にてたのしくさいごに定年をむかえられたのも本当に神の有難さを信じ、今は彼のめい福を祈るのみです。また日本機械学会の会長の選挙の時も二人でトップを争い、8対7くらいで私になったということで、不確かなことだがそんなこともあったのかも知れないと思っている。森 康夫は本当に実直でしかも怖い男で私もさんざんやられたが、それでも実に真面目で熱心正当で実にいい奴だったと今でもますます思っている。

また日本機械学会は会員四万人近くで日本最大の学会であり、私は六十期会長を務めたが本当に楽しい仲の良い学会で、名実ともに日本一の学会であると思っている。これからの一層の発展を祈る。当の学会では私は主として伝熱・熱力学の方面

の世話をしたが、森先生は熱と流体の両方で活躍され、さすがに航空機体出身と感ぜられた。彼が逝くなったのは惜しくてならない。私はどうせ同年時代だから、私もいずれ逝って天国でまた仲良くギ論をやろうと言っている。

さて私は千葉中(現千二中)出身、すぐ第一高等学校(一高)に入学して、旧一高時代のほぼ最後の旧時代の三年をあげわたった幸運の一高生である。まさに「ああ玉杯に花うけて」を身をもって感じた時代であり、不思議な幸運と誇りとしかも戦時青年の責任を痛感しつつ三年(ほんとうは戦時中のため二年半)を終えて東大航空に入った。東大は現役航空機と戦争訓練の二年半であったが二名の軍での事故戦死者及び病死者を出しつつ卒業と大戦終結の二年半を了えた。

東大のそれまでの卒業生とは全く異色の卒業であった。しかも卒業と同時に終戦となり親達の喜びはこの上もなかった。みんな陸海軍への入隊がきまっており、私は三重県の航空隊に終戦日の二十日には入隊ときまっていたのである。その後すぐに私は東大特別研究生(現大学院、しかも有給)となり平和な年に入った。森もまた同様であった。小中大学の友人の多くが戦死または戦病となって私はその世話で走り回った。我々の同年齢者が戦死戦病死が一番多いと統計が新聞に出た年齢であった(一九二二年生れ)。今は二〇一二年であるので、九十才の男性が前後の年の男性より少し少ない。それを年令別人口グラフに書くと曲線が一寸凹んでいる。そのように私も小学生同年が数十人死んでいる、誠に残念でならない。

しかも負戦で、日本は連合軍により東大航空学科を廃止させられたので、特別研究生だった二人は止まる学科がなくなり、教授達も散いつされるという前後未曾有事態が起った。二人は何とか他学科の特別研究生となり生きのびたが、その先の助手席はなくなり二人とも東大を去り、他の研究

所に入るしか道がなかった。やがて、二人は機械学会をはじめ諸学会の諸集会で顔を並べてはぶつかり合って大さわぎをやったのもよい思い出である。

日本伝熱学会でも同様であった。時々同学会創始者の橘 藤雄先生とともに三人で会談し、我々は言い争って先生をおじゃましたことがよくあった。しかし同研究会が学会に生長したこともよいことであった。よく他の人々から一色・森の二人はあんなに口げんかするのによくまとまるなど、よく言われたものであり、二人にとっては口げんか是一種の楽しみであったと思っていた。そのような騒ぎを経て日本伝熱学会が遂に成立成長したのは夢のようなめでたいことである。私は特に沸騰

熱伝達を中心として多くの論文を出し、森先生は得意な流体力学で特別乱流等でたくさんの論文を出されたのは現学会の基礎時代を造ったものとして大いに得意とする所である。そして森先生は後に同学会の会長をされ、大いに活躍された。二人とも多くの後継者を出し、大いに喜ぶべきであるが森先生には、河田治男、大竹一友、土方邦夫の三名の助教授もしくは助手の方がいずれも急死され、誠に残念かつ悲壮なことであった。誠におくやみにたえない。そこへ本人の死亡となり、森研は大活躍したが他に見ない壮烈な最後となった。これは何故であるか。私には遂にわからない。御四方の御冥福を祈りこの文を終えさせて頂きたい。

水プラズマによる有害物質の分解システム

Decomposition System of Hazardous Wastes by Water Plasmas

渡辺 隆行 (東京工業大学)

Takayuki WATANABE (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: watanabe@chemenv.titech.ac.jp

1. はじめに

熱プラズマは局所熱平衡状態 (LTE) に近く、高エネルギー密度および高温を有していることから、大量の廃棄物を処理することに適している。さらに高温の状態から急冷することによって、有害な副生成物の生成を阻止することもできる。

プロセスの迅速なスタートアップやシャットダウンが可能であることも廃棄物処理に適している理由である。また、他の廃棄物処理方法に比べてガスの使用量が少ないので、排ガスシステムへの負担が小さいことから考えても熱プラズマには廃棄物処理における優位性がある。

熱プラズマの優位性は廃棄物を処理するときの雰囲気を選択できることにもある。熱プラズマによる有機系廃棄物の処理では酸化反応によって分解を促進する場合が多いが、アルゴンを用いた不活性雰囲気、水素を用いた還元雰囲気なども自由を選択することができる。有機系廃棄物処理プロセスの可能性を広げることに於いて、熱プラズマは好都合である。

熱プラズマによる有機系廃棄物の処理では、分解が瞬時に行われる高温領域でのプロセスよりも、プラズマフレーム下流の低温領域で再結合反応を抑制するプロセスが重要となる。この点が非平衡プラズマによる有機系廃棄物の処理と異なる点である。また、燃焼反応も高温を利用するという点では熱プラズマと類似の有機物分解プロセスであるが、燃焼プロセスでは燃焼ガス中に生じる物質によって目的反応が阻害されてしまう。熱プラズマではそのような作用がないことが特長である。

2. 水プラズマの発生方法

2.1 直流アーク放電による水プラズマ

水は豊富に存在する常温で安定した化合物であるが、プラズマ状態では活性の強い O ラジカル、H ラジカル、OH ラジカルが発生する。これらの高活性

なラジカルを利用することによって新しい廃棄物処理プロセスの展開が可能となるが、もともと水を使ったプラズマプロセッシングとしては、水によるアークの安定化の作用を目指した研究が進められていた[1]。プラズマ溶射を目的として、チェコの Institute of Plasma Physics では水プラズマ溶射装置を開発し、多くの研究成果を発表している[2-7]。

水プラズマの発生方法として、電極をアークの熱から保護するための冷却水を放電領域に直接吹き込み、プラズマガスとして使用する方法が開発されている[8]。この水プラズマ発生装置 (図 1) では陰極にハフニウムを用いており、強い酸化性の高温の水蒸気でも長時間の耐久性を有している。陽極は銅製で、冷却水タンク上部まで伸びている。また、吸湿材によって冷却水がトーチ上部まで吸い上げられている。アークによって発生した熱は主に陽極を伝わって冷却水を加熱し、吸湿材を通して陽極に達した冷却水がそのままプラズマガスとなり、水プラズマ

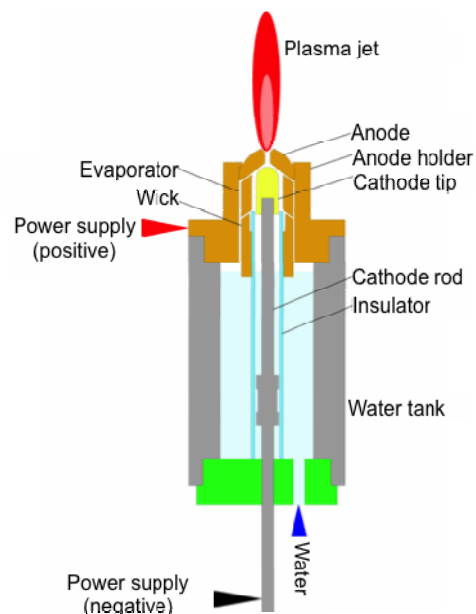


図 1 直流アーク放電による水プラズマトーチ

を定常的に発生する。この方式では冷却水による電極からの熱損失がなくなるため、90%以上の熱効率が得られる。さらにガスボンベなどの外部からの作動ガスの供給が不要となるので、通常の水だけでプラズマを発生することができ、可搬式の水プラズマ発生装置への展開も容易となる。

しかし、液体の水を放電領域近傍まで導入するため、通常のアーク放電とは異なった数 10 kHz の変動現象が確認されており[9]、アークの挙動が未解明であるという課題も残されている。このような数十 kHz のアークの変動はプロセッシングに影響を与えるが、溶射の分野では逆にアーク電圧や電流の変動現象を測定して電極変動を解析することにより、溶射被膜の特性を推測する研究も試みられている[10]。

2.2 直流アーク放電による水蒸気プラズマ

直流アーク放電のプラズマジェットに水蒸気を吹き込むことによって、Kim ら[11]、Glocker ら[12]は廃棄物処理への応用を検討した。通常、水蒸気を用いたプラズマを発生するには、このようにアルゴンプラズマなどに水蒸気を吹き込むが、高温の水蒸気によって陰極の金属が損耗するために、アルゴンや窒素を陰極の周囲にシールドガスとして流すことが必要となる。また、水蒸気を発生するための装置が別途必要となり、加えて水蒸気の凝縮防止のために装置全体を 100°C 以上に保つ必要があるなど、大掛かりな装置になってしまうといった問題点がある。

このように水蒸気をアルゴンなどで発生した熱プラズマの高温領域に吹き込み、水蒸気をプラズマ化する方法は「水蒸気プラズマ」と呼ばれる。一方、図 1 で示したように液体の水をプラズマの高温領域に供給し、瞬時に水素と酸素に分解する方法は「水プラズマ」と呼ばれ、「水蒸気プラズマ」とは原理的にも特性も異なるものである。

直流アーク放電を利用したプラズマは高出力化や高密度化が可能な実用的かつ工業的な高温熱源である。特に陽極部と陰極部の間でアークを発生させ、ノズル部分での熱的ピンチ効果を利用して高温の熱プラズマ流を得る非移行式アークは、その形状から処理する物質の制限が少なく、廃棄物処理のみならず各種の材料プロセッシングにも広く用いられているが、熱効率は 30% 程度と低い。

また、安定に見えるプラズマジェットも高速度カメラで観察すると、波を打つような不安定挙動を示していることがわかっている[13]。この現象は、陽

極におけるアークの付着点が軸方向や周方向に運動していることに起因する。このようなプラズマジェットの不安定現象が原因となって、プラズマの中心に供給した物質でさえ、アークの高温領域だけではなく、低温領域も通過することになる。これは処理物質の加熱履歴が均一にならず、廃棄物の分解効率が予想より悪くなる可能性があることを意味している。

2.3 高周波放電による水蒸気プラズマ

直流アーク放電によるプラズマシステムと比べると、高周波 (RF) プラズマシステムは装置が高価であるというデメリットがある。また、プラズマ中に供給する処理物質によってプラズマの安定性が失われることが本質的に避けられないことも留意すべき点である。しかし、RF プラズマは無電極放電によるプラズマ発生なので、電極の保護などの問題がないことから、水蒸気のみを利用したプラズマ発生が可能であり、新しい廃棄物処理プロセスの展開が期待できる[14]。

RF プラズマによる水蒸気プラズマシステムの成功例としては、北九州市のエコタウンにおいて西日本家電リサイクルが行っているフロン分解プラントがある。2000 年 4 月から実証試験が開始され、各種回収フロンの分解性能評価を行い、2004 年に商用プラントとして成立している。このプラントの特徴は、フロン回収事業所においてフロン分解までのすべてを行うことであり、フロンを移動する際のフロン拡散の危険性の低減や、輸送による CO₂ 排出量をなくすることができる。

2.4 マイクロ波放電による水蒸気プラズマ

大気圧マイクロ波加熱放電は、方形導波管を通じてマイクロ波 (2.45 GHz) を同軸導波管に伝播し、ノズルにより絞られたトーチ先端部においてマイクロ波の電場強度を強めることにより生成される。マイクロ波プラズマは他の熱プラズマほどの高温ではないが、マイクロ波独特の炎のようなプラズマを生成する。マイクロ波プラズマは、イオンや電子が支配的に存在している領域が比較的狭いこと、また下流に向かって解離した原子が支配的に存在する領域が広がっていることから、プラズマ源としてよりも反応性が極めて高い高密度ラジカル源としての利用が期待されている。

フロンと水蒸気の混合ガスをガラス管に引き込み、

そこにマイクロ波を当てて、フロンを分解する方法が検討されている[15,16]。しかしマイクロ波放電はRFプラズマや直流アーク放電プラズマと比べて高出力の電源が少なく、またプラズマのガス温度も低いことから、マイクロ波放電を用いた廃棄物処理プラズマの産業的な成功例はない。

3. 水プラズマの特長

有機系廃棄物処理において、水プラズマには2つの特長がある。1つ目はOラジカルとHラジカルによる副生成物の抑制である。2つ目はOHラジカルの強い酸化ポテンシャルを利用した有機物の分解である。

水プラズマが有機系廃棄物処理に適している理由を熱力学的観点から考えてみる。このような検討には、ギブスの自由エネルギー最小化法によって、プラズマの組成を平衡計算で求める方法が役に立つ。プラズマ中で反応物質の滞留時間が短い場合や、分解生成物を下流で急冷する場合には化学反応が熱力学的平衡に達しない場合があるが、プラズマ中の反応挙動や分解生成物を大まかに捉えるためには有効な方法である。

水プラズマの平衡組成を図2[17]に示す。水は2,000 K以上になると解離し、8,000 K以上になると電離したHイオンとOイオンが現れてくる。なお、OHラジカルは3,000 Kから4,000 Kの間で極大値を持つ。特に酸化反応においては、OラジカルよりもOHラジカルのほうが低温で安定であり、酸化ポテ

ンシャルが大きいことから、ほとんどの有機物はOHラジカルによってCO₂とH₂Oに分解することができる。

フロンを熱分解すると、分解後の低温領域で炭素とハロゲンの再結合反応を起こし、別のフロンであるCF₄などを再結合してしまうことになる。これを防ぐためには、フロンを水蒸気とともに分解することが有効である。つまり、水蒸気の添加によってOラジカルとHラジカルが発生するので、CF₄ではなくHFを合成し、副生成物ほどの温度域でも再結合されない。このように水蒸気を用いたプラズマをフロンなどのようにハロゲンを含む有機物の分解に用いることは理にかなっている方法である[17-19]。同様の方法はPCB分解にも適用できる[11]。

4. 水プラズマによる排水の処理

環境汚染物質の処理が重要な課題となっているなかで、最近では工場等から出る排水処理が特に問題となっている。微量でも極めて有害な環境汚染物質が含まれていることがあり、現在は有機物を含む排水処理には生物的処理方法や活性炭処理が広く利用されている。しかしフェノールやトルエンなどの芳香族化合物が高濃度で含まれている場合には従来の生物的処理方法では対応できない。

そこで最近ではAOP(Advanced Oxidation Process, 促進酸化処理)による排水処理が行われている。AOPはオゾンや過酸化水素などの化学種を添加し、UV照射などと組み合わせることによってOHラジカルを生成し、効率的に有機物を分解する方法である。AOPでは危険で高価な薬剤などを添加することが多いが、水プラズマによる排水処理は、薬品等を添加することなく、排水中の有機物を迅速に分解できることが特長である[20,21]。

直流アーク放電の水プラズマによってフェノール水溶液を分解し、処理後のフェノール水溶液のCOD(Chemical Oxygen Demand, 化学的酸素要求量)の値を計測した結果を図3[21]に示す。分解に有効な水プラズマの高温領域におけるフェノールの滞留時間は約1msであるが、このような短時間でもフェノール水溶液の分解前の10⁵ mg/LというCODを、アーク電流が6Aのときに99.1%、8Aのときに99.9%減少することができている。なお、分解後のフェノール水溶液のpHは4.5であり、さらに銀鏡反応を示していることから、副生成物としてギ酸が微量に含まれていると考えられる。このプラズマ処理後のわず

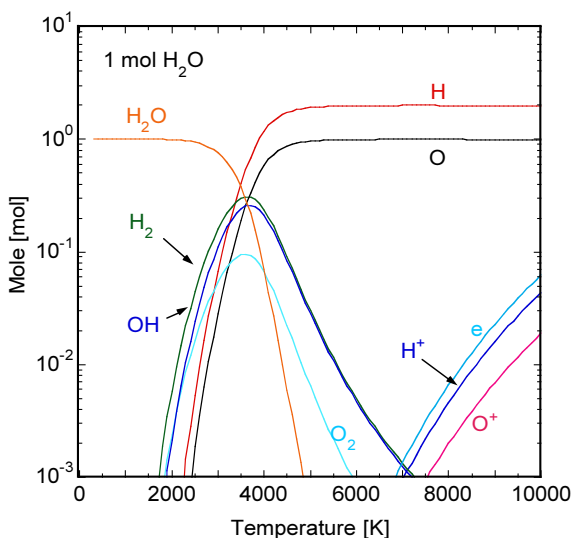


図2 水プラズマの平衡組成図

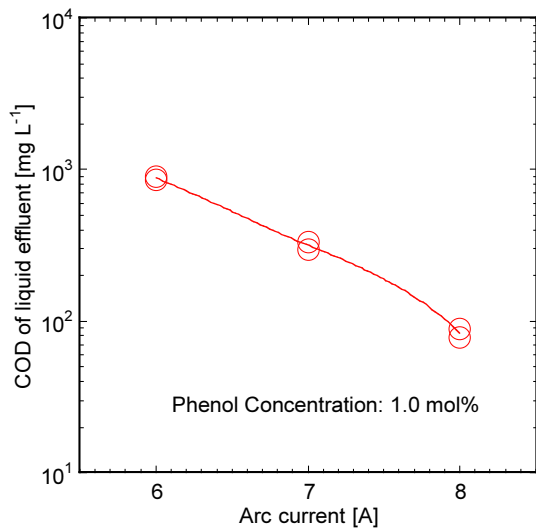


図3 水プラズマによる分解後のフェノール水溶液のTOCとTCの値の測定結果

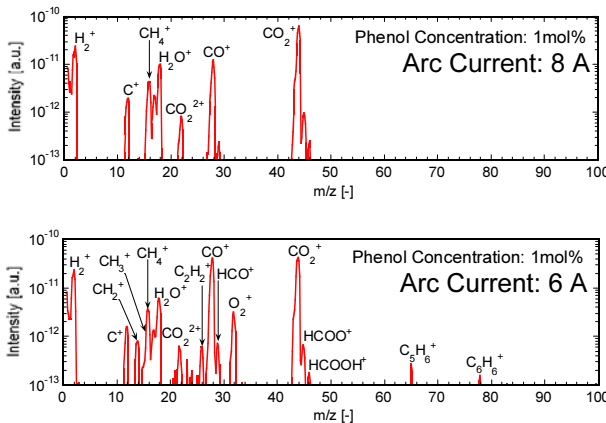


図4 水プラズマによるフェノール分解後の生成ガスの質量分析結果(上: アーク電流 8 A, 下: アーク電流 6 A)

かな COD は、この微量のギ酸が原因であると考えられる。

水プラズマによってフェノール水溶液を分解し、そのときに発生したガスを分析することによって、フェノールの分解機構を明らかにすることができる。フェノール水溶液の分解生成ガスの質量分析による結果を図4 [21]に示す。アーク電流が 8 A の場合には H_2 , CO_2 , CO , O_2 , CH_4 のピークのみが確認できることから、フェノールが完全に分解されていることがわかる。アーク電流を 6 A に低下させると C_2H_2 , C_5H_5 , C_6H_6 のピークも検出されるようになり、フェノールが十分に酸化されなかったことが示されている。

また、この生成ガスをガスクロマトグラフにより定量分析したところ、アーク電流の増加に伴って H_2 や CO_2 は増加したが、 CO は減少した。アーク電流の増加によってプラズマ中に存在する O ラジカルや OH ラジカルが増加し、酸化雰囲気が強くなっているためと考えられる。

以上の実験結果から考えると、プラズマ中では主に O ラジカルによってフェノールが酸化され、フェノキシラジカルを経由して分解されることが主な反応ルートであると考えられる。一部はベンゼンを経由してギ酸やホルムアルデヒドが生成される反応ルートもある。

フェノール排水処理における生物的処理、AOP、触媒、非平衡プラズマ、陽極酸化などの各種の方法に加えて、水プラズマによる分解における適用濃度と処理速度を図5 [22]に示す。通常の方法では分解が困難である高濃度フェノール水溶液を水プラズマで迅速に分解することができることから、水プラズマによる排水処理プロセスは実現の可能性があると考えられる。

また、実験値から推算した水プラズマによるフェノール分解におけるエネルギー効率は 8.1 g/kWh であった。なお、コロナ放電によるフェノール水溶液分解では $3.48\text{--}22.67 \text{ g/kWh}$ [23,24]、パルス放電では $0.74\text{--}2.27 \text{ g/kWh}$ [25]のエネルギー効率であることから、水プラズマのエネルギー効率は他の非平衡プラズマやAOPの値とほぼ同等かやや高い値である。

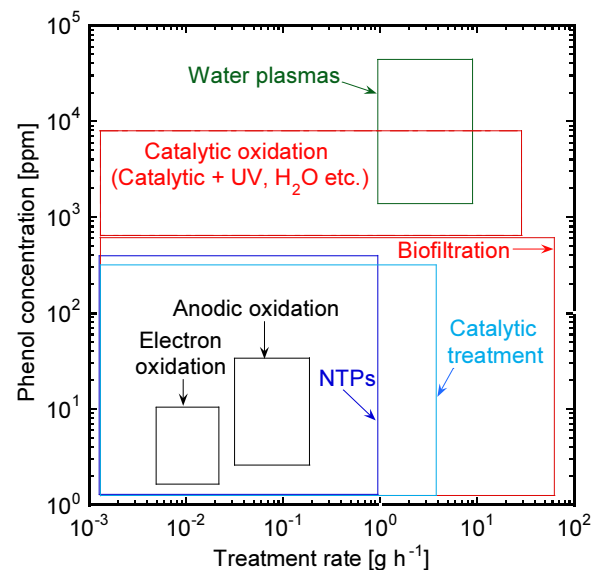


図5 フェノール含有排水処理の各種方法における適用可能濃度と処理速度

さらに水プラズマの場合には、分解後の副生成物の発生がほとんど見られず、分解による COD や TOC の除去率も 99.9%以上という高い値が得られているが、他の非平衡プラズマや AOP による分解では、ヒドロキノン、カテコール、ベンゾキノンなどの副生成物が発生しており、分解による COD や TOC の除去率が低い値となっている。完全なフェノールの分解を行うには水プラズマによる分解システムが適している。

5. 有機系廃棄物からの水素製造

プラズマによる廃棄物処理システムは、従来の方法では扱うことができなかった難処理廃棄物を分解できるという利点があるが、廃棄物を単に分解・無害化するだけでなく、廃棄物から有価なものを生み出すリサイクルプロセスを実現できるのも熱プラズマの特長である。現在、最も注目されている廃棄物処理プロセスは、ゴミをプラズマで分解することによって水素を取り出す技術である。

高温熱分解による廃棄物からの水素製造方法は数多く行われているが、水蒸気を用いてプラズマを発生し、そのプラズマを用いて廃棄物から水素を製造する方法は、プラズマの放電領域で有機物を高速で分解できるので、分解効率が高い方法である。特に水プラズマ自体からも水素を発生するので、廃棄物を処理して副生水素を製造するプロセスは実現の可能性がある。不要な厄介者であったゴミを、これからはプラズマ技術によって立派な資源とすることができる。

なお、一部の研究のなかには廃棄物ではなく有価の物質をプラズマで分解して水素を製造することを目的とした研究例があるが、有価の対象物質をプラズマで分解して水素を製造しても、システム全体としてのエネルギー収支はマイナスになるので全く意味がない。プラズマで水素を製造してシステム全体として意味があるのは、あくまでも廃棄物からの副生水素の製造に限られる。

直流アーク放電の水プラズマ発生方法では、エタノール、メタノール、アセトン、グリセリンなどの水溶液を用いてもプラズマを発生することができる。これらの水溶液を液体の有機系廃棄物のモデルとして、水プラズマによる水素製造の検討が行われている[26-29]。

対象物質のひとつであるアセトンは分子内に CH_3 基を 2 つ持っているため、分解機構における CH_3 基

の役割を調べることに適している。また、アセトンは工業や医学など領域に幅広く使用されているが、揮発性有機化合物 (VOC) と規定されているために、適切なアセトンの分解方法が必要となっている。VOC は浮遊粒子状物質や光化学オキシダントによる大気汚染の原因物質のひとつであることから、その排出抑制のみならず、分解技術の研究も重要である。

次に、グリセリンを有機系廃棄物の例として考える。グリセリンは分子内に OH 基を 3 つ持っていることから、分解機構における OH 基の役割を調べることに適している。さらにバイオディーゼル製造プロセスの副生成物としてグリセリンが生成されているが、このグリセリンには有効な用途がなく、その処分が困難な状況である。よってグリセリンの分解機構を調べることは、廃油等からの水素製造技術としても重要である。

直流アーク放電の水プラズマによってアセトン、グリセリン、エタノール、メタノールの水溶液を分解し、処理後の TOC の値を計測した結果を図 6 [29] に示す。通常は有機物の濃度が高くなると還元雰囲気が強くなるので分解率が下がり、TOC の値は高くなる。この図からわかるように、アセトン、エタノール、メタノールの濃度が高いほど TOC は大きくなるが、グリセリンだけは逆の傾向を示す。これはグリセリン濃度の増加によって、グリセリン由来の OH ラジカルが増加し、分解が進んでいるためであ

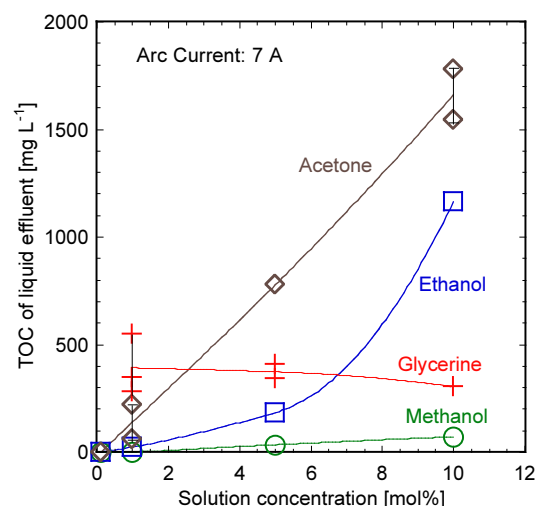


図 6 水プラズマによるアセトン、グリセリン、エタノール、メタノール水溶液の分解後の液体の TOC

る。このように、グリセリンの分解ではグリセリンから発生する OH ラジカルが重要な役割を果たしている。

アセトン水溶液の分解によって生成したガスをガスクロマトグラフィにより定量分析したところ、図 7 [28]に示すようにアセトン濃度の増加に伴い、 H_2 、 CO_2 は減少しているが、 CO 、 CH_4 、 C_2H_2 は増加している。グリセリン濃度の増加によって、プラズマ中に存在する炭素成分が増えるためである。水プラズマによる有機物の分解では、このように酸化性の生成物と還元性の生成物が共存していることが特徴である。

次に、グリセリン水溶液の分解によって生成したガスをガスクロマトグラフィにより定量分析した結果を図 8 [29]に示す。アセトンの分解と比べると、生成ガス中の CO_2/CO の値がグリセリンの分解のほうが高い値になっている。これは水プラズマ中におけるグリセリン分解の雰囲気、より強い酸化性になっているためであり、グリセリンから発生する OH ラジカルが分解において重要であることを示している。なお、アセトンの分解でもグリセリンの分解でも、生成ガスの 65%以上は H_2 であり、有機系廃棄物からの副生水素の製造が可能であることが示されている。

グリセリン水溶液の分解によって生成した液体を高速液体クロマトグラフィによって定量分析したところ、液体にはホルムアルデヒドやギ酸が含まれているが、グリセリン濃度の増加に伴い、ギ酸の濃度が増加し、ホルムアルデヒドの濃度が減少していることが示されている。この結果からもグリセリン由来の OH ラジカルによる分解が重要であることがわかる。

以上の実験結果をまとめると、水プラズマ中における有機物の分解機構が見えてくる。グリセリンは水プラズマ中の高温によって CH_2 ラジカルと OH ラジカルを生成する。水プラズマからの O ラジカルと OH ラジカルに加えて、グリセリン由来の OH ラジカルによる酸化によって CO や CO_2 を生成することが主な分解ルートである。

アセトンは水プラズマ中の熱分解によって CH_3 ラジカルを生成し、さらに水プラズマの O ラジカルによる酸化によって CO や CO_2 を生成することが主な分解ルートである。なお、メタノールの分解では煤は発生しないが、アセトン、エタノールの分解では顕著な煤の発生が観測されている。これは高温中で

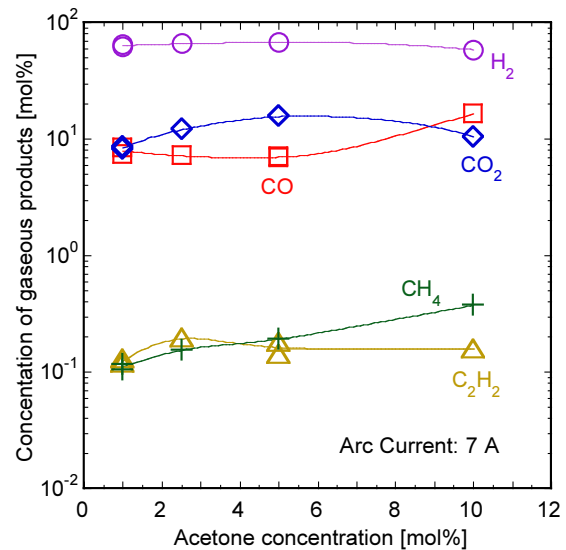


図 7 水プラズマによるアセトン水溶液分解後の生成ガスの組成

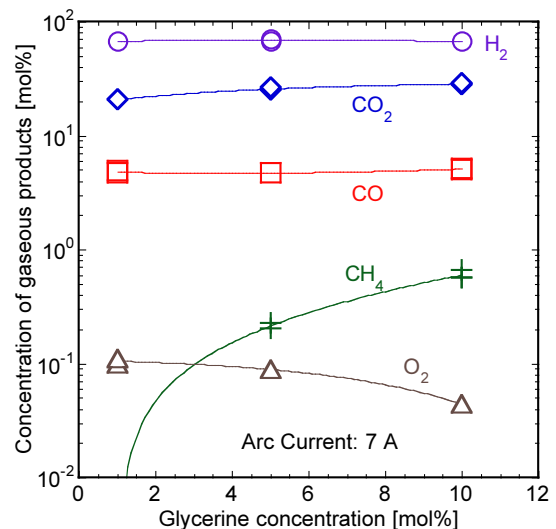


図 8 水プラズマによるグリセリン水溶液分解後の生成ガスの組成

生成した CH_3 が起点となって煤を生成するためである。

水プラズマ技術は、廃プラスチック等の有機系廃棄物から水素を製造する高温熱分解技術のひとつとして考えられる。水プラズマを用いる方法は、他の燃焼法よりも水素の製造量が多く、装置が小さくてもよいという利点がある。特に廃棄物処理を現地で分散型のシステムとして処理することも可能となるので、今後のプラズマ処理システムの新たな展開が期待できる。

6. まとめ

環境問題は大きな社会問題となっており、その解決のための先端基盤技術のひとつとして熱プラズマ技術開発が行われている。プラズマを用いた新しい廃棄物処理プロセスは、これからの資源循環型社会構築に対して一石を投じるものであると考えられる。

従来、熱プラズマはその高温という特長を利用しているものがほとんどであるが、熱プラズマには高化学活性という魅力的な特長もある。熱プラズマに存在している荷電粒子やラジカルを上手に利用して、高化学活性であるという特長を活用すれば、新しい廃棄物処理プロセスを開発することが可能である。

また、熱プラズマを廃棄物処理システムとして実用化するのに重要な点はコストである。熱プラズマプロセスは従来からコストが高いものと扱われてきたが、熱プラズマが有する高温と高化学活性という特長を活用すれば、廃棄物処理装置全体としてのコストを低減できる可能性がある。またコストの点だけではなく、熱プラズマにしか実現できないプロセスがあることも重要な点である。

参考文献

- [1] Kotalik, P., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39** (2006) 2522.
- [2] Hrabovsky, M., Konrad, M., Kopecky, V., and Sember, V., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25** (1997) 833.
- [3] Hrabovsky, M., *Pure Appl. Chem.*, **70** (1998) 1157.
- [4] Jenista, J., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32** (1999) 2777.
- [5] Hrabovsky, M., *Pure Appl. Chem.*, **74** (2002) 429.
- [6] Hrabovsky, M., Konrad, M., Kopecky, V., Hlina, M., Kavka, T., Chumak, O., Oost, G.V., Beeckman, E., and Defoort, B., *High Temp. Mater. Process.*, **10** (2006) 557.
- [7] Hrabovsky, M., Kopecky, V., Sember, V., Kavka, T., Chumak, O., and Konrad, M., *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **34** (2006) 1566.
- [8] Watanabe, T., *ASEAN J. Chem. Eng.*, **5** (2005) 30.
- [9] Li, T.M., Choi, S., and Watanabe, T., *Plasma Sci. Technol.*, in press.
- [10] Watanabe, T., Wang, X.C., Heberlein, J., and Pfender, E., *Thin Solid Films*, **316** (1998) 169.
- [11] Kim, S.W., Park, S.H., and Kim, J.H., *Vacuum*, **70** (2003) 59.
- [12] Glocker, B., Nentwig, G., and Messerchmid, E., *Vacuum*, **59** (2000) 35.
- [13] Pfender, E., *Plasma Chem. Plasma Process.*, **19** (1999) 1.
- [14] Tang, L. and Huang, H., *Fuel Process. Technol.*, **88** (2007) 549.
- [15] 別所正博, 日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会第57回研究会資料 (2002) 29.
- [16] Uhm, H.S., Kim, J.H., and Hong, Y.C., *Phys. Plasmas*, **14** (2007) 073502-1.
- [17] Watanabe, T. and Tsuru, T., *Thin Solid Films*, **516** (2008) 4391.
- [18] Narengerile, Saito, H., and Watanabe, T., *Thin Solid Films*, **518** (2009) 929.
- [19] Narengerile, Saito, H., and Watanabe, T., *Plasma Chem. Plasma Process.*, **30** (2010) 813.
- [20] Yuan, M.H., Narengerile, Watanabe, T., and Chang, C.Y., *Env. Sci. Technol.*, **44** (2010) 4710.
- [21] Narengerile, Yuan, M.H., and Watanabe, T., *Chem. Eng. J.*, **168** (2011) 985.
- [22] Narengerile, 博士論文, 東京工業大学 (2012).
- [23] Ognier, S., Iya-sou, D., Fourmond, C., and Cavadias, S., *Plasma Chem. Plasma Process.*, **29** (2009) 261.
- [24] Hoeben, W.F.L.M., van Veldhuizen, E.M., Rutgers, W.R., and Kroesen, G.M.W., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32** (1999) L133.
- [25] Hoeben, W.F.L.M., van Veldhuizen, E.M., Rutgers, W.R., Cramers, C.A.M.G., and Kroesen, G.M.W., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **9** (2000) 361.
- [26] Nishioka, H., Saito, H., and Watanabe, T., *Thin Solid Films*, **518** (2009) 924.
- [27] Narengerile, Nishioka, H., and Watanabe, T., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** (2011) 08JF13.
- [28] Narengerile and Watanabe, T., *Chem. Eng. Sci.*, **69** (2012) 296.
- [29] Watanabe, T., Narengerile and Nishioka, H., *Plasma Chem. Plasma Process.*, **32** (2012) 123.

低温プラズマを用いたバイオマテリアルの表面機能化

Surface Functionalization of Biomaterials Using Low-temperature Plasma

笹井 泰志, 近藤 伸一 (岐阜薬科大学)

山内 行則 (松山大学), 葛谷 昌之 (中部学院大学)

Yasushi SASAI, Shin-ichi KONDO (Gifu Pharmaceutical University)

Yukinori YAMAUCHI (Matsuyama University), Masayuki KUZUYA (Chubu Gakuin University)

1. はじめに

近年、低圧気体の放電特性を利用した低温プラズマ技術は、各種の機能性新材料創製や固体表面加工の基盤技術として、各種産業分野で応用展開されている。また、最近では、大気圧下における安定なグロー放電の発生法や液体など高密度媒質中におけるプラズマ発生法も開発されており、従来、プラズマによる処理が不可能であった水分を含む試料や真空中では形状が維持できない試料などに対してもプラズマ技術の適用が可能となっている。その結果、現在、プラズマ技術の応用範囲は飛躍的に拡大しており、医療分野におけるバイオアプリケーションも多方面にわたり試みられている[1,2]。低温プラズマ技術のうち、プラズマ表面処理は、高分子への低温プラズマ照射によって生成するラジカルの反応を利用したものであり、疎水性高分子表面の親水化や表面架橋層の形成など、高分子表面の改質に利用されている。このようなプラズマ表面処理による高分子材料の表面機能化においては、プラズマ照射によって高分子表面に生成するラジカルの構造とその反応を理解することが重要になってくる。

ところで、現在、様々な高分子基材が各種バイオマテリアルに利用されている。バイオマテリアルとは、一般に、生体やその構成要素と直接あるいは間接的に接触する材料をいい、タンパク質などの生体高分子や培養細胞と接触するような実験材料から、バイオセンサー、ドラッグデリバリーシステム (DDS)、および、人口臓器などのより高度な機能を持つものまで含む。それらに必要な基本特性には、強度、弾性、光透過性、溶解性などのような高分子バルク特性と、ぬれ性、電荷、タンパク吸着特性などの表面特性がある。そのうち、表面特性は、特に、生体成分と接触するバイオマテリアルの品質や機能性に大きく影響する。一方、高分子バイオマテリアルを見てみると、基本的に

化学的不活性で経時的な物理化学的変化のない高分子が基材として用いられているものが多く、十分な表面特性を具備していないものも含まれる。そのような場合、表面特性を制御するための表面修飾法はバイオマテリアルの設計において、大変重要な技術要素となる。

プラズマ表面処理法は、比較的低温の反応で、処理効果が材料の最表面層に限定されるため、バルク特性に影響を与えることなく、高分子基材の表面修飾が可能である。その点において、プラズマ表面処理は、バイオマテリアルの有用な表面処理法の一つである。

本稿では、我々が展開している低温プラズマ技術の医薬学応用研究のうち、バイオ分野での応用を指向した低温プラズマ技術を基盤とする高分子基板表面の機能化について紹介する。

2. 高分子のプラズマ反応特性

我々は、これまでに、高分子構造間の差異を含めたプラズマ表面処理の分子機構の確立とその体系化を目指し、種々の分子構造をもつ高分子へのプラズマ照射によって生成するラジカル種の定量、構造および反応特性を電子スピン共鳴 (ESR) スペクトル測定とその組織的なシミュレーションを駆使した詳細な速度論的解析によって明らかにしている[3-12]。その結果、各種高分子における成分ラジカル構造とその構成比が明らかとなり、高分子構造と主生成ラジカル構造との間に次のような一般的相関関係を確立している。

- A. プラズマ分解型高分子 — 1,1-二置換ビニルモノマーから合成される高分子であり、主鎖切断型ラジカルが主生成ラジカルとなるだけでなく、ジッピング (解重合) によりモノマーを再生しながら分解する。たとえば、メタクリル酸系高分子が該当する。
- B. プラズマ架橋型高分子 — 1-置換ビニルモノ

マーから合成される高分子であり、主鎖上のアルキルラジカルが主生成ラジカルとなり、転位反応を含めて高分子内と高分子間の架橋反応が容易に進行する。たとえば、アクリル酸系高分子やポリビニルピロリドンなどが該当する。

C. プラズマ側鎖架橋型高分子 — 一般に側鎖置換基に生成するラジカルは熱的にも不安定なため室温 ESR スペクトルでは観測されず、それらのラジカルカップリング反応が容易に進行するので、観測されるラジカルは側鎖由来の未結合手 (DBS ; Dangling Bond Sites) である。

D. 分解架橋両性高分子 — 一般に芳香族ポリエステルやポリアミドなどのような縮重合反応によって合成される高分子であり、高分子主鎖内のエステルやアミド基の分解による主鎖の切断と同時に、主鎖上の芳香環部位でのラジカル生成と架橋反応が進行する。したがって、室温で観測されるラジカルは主鎖由来の DBS である。

以上のような高分子構造とそのラジカル生成の関係では、1 つの反応のみが排他的に進行するのではなく、主反応によって分類されたものである。しかしながら、このような基礎的知見は、高分子へのプラズマ照射効果を予測する上で貴重な情報となるものであり、プラズマ表面処理による高分子の表面機能化のための有益な設計指針となるものである。

3. 高分子基板の持続的 surface 親水性化

生体と接触する医療材料には、生体内での安定性、機械的強度および成型加工性の観点から、疎水性の高分子基材が多く用いられている。しかしながら、そのような高分子表面は、生体から異物とみなされるため、その生体適合性を改善する目的で何らかの表面加工が必要となる。

生体適合性表面の重要な特性の一つに表面親水性がある。上述のように、プラズマ表面処理は、種々の高分子表面の親水化に広く利用されている。しかしながら、単純にプラズマ照射されて高分子表面に付与された親水性は、時間の経過とともに、徐々に失われていくことが知られている[13,14]。

我々は、医療分野で汎用されているポリエチレ

ンやポリスチレンなどの疎水性高分子表面への生体適合性付与を目的として、その表面層に、親水性前駆体高分子メチルビニルエーテル-無水マレイン酸共重合体 (VEMA) を収着させ、次いで、アルゴンプラズマ照射により疎水性高分子表面のプラズマ架橋反応を惹起し、VEMA を固定化後、VEMA の無水マレイン酸部位を加水分解し、VEMA をメチルビニルエーテル-マレイン酸共重合体 (VEMAC) に変換して、疎水性高分子表面に多量のカルボキシル基を発生させることによる表面親水化法を開発した[15]。図 1 は、その構築法を模式的に示している。図 2 は、プラズマ架橋型高分子である低密度ポリエチレン (LDPE) フィルムに本方法を適用し、調製した VEMAC 固定化 LDPE (LDPE/VEMAC) 表面のカルボキシル基密度を示している。図 2 に示すように、LDPE/VEMAC 表面では、高密度のカルボキシル基が認められ、また、その密度は、VEMA を固定化するときのプラズマ照射条件に依存している。この結果は、本方法では、プラズマ照射条件によって、表面カルボキシル基密度の制御ができることを示唆している[16]。

本方法は、プラズマ架橋型の疎水性高分子に適用可能であり、持続性及び耐久性に優れた親水性を付与することが可能である。また、化学修飾可能なカルボキシル基の導入が可能であることから、更なる表面機能化が可能になる。

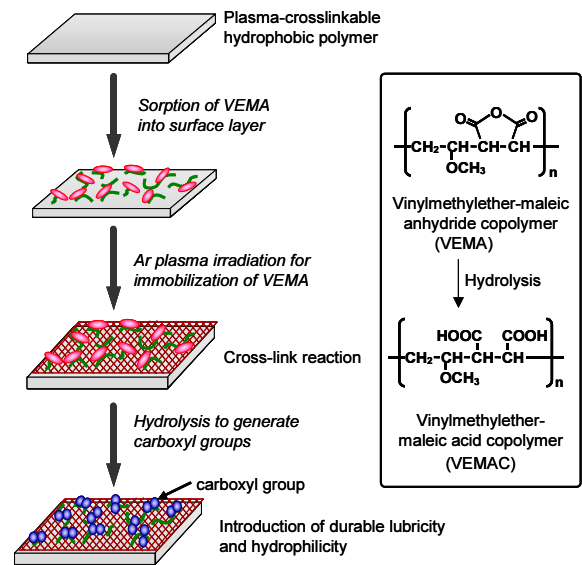


図 1 プラズマ技術を利用した持続的親水性表面の構築法

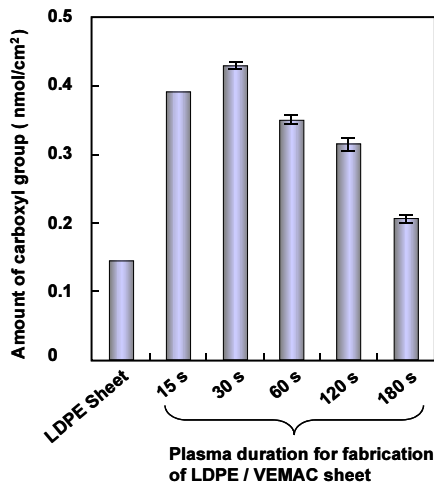


図 2 LDPE/VEMAC 表面のカルボキシル基密度におけるプラズマ照射条件の効果（カルボキシル基の定量は TBO 法 [17] を用いた）

4. バイオ分子固定化基板への応用

我々は、図 1 に示した方法に従い調製した表面カルボキシル基含有高分子を利用したバイオアプリケーションを展開している。その一つに、高分子表面へのペプチドやタンパクなどの生理活性分子の固定化によるバイオ機能化がある。

4.1 ペプチドの固定化と細胞培養への応用

現在、培養細胞を利用した実験システムが、創薬や環境評価の分野において欠かせないものになっている。また、現在、再生医療に大きな期待が寄せられており、関連する研究分野が大変注目されている。このような背景から、培養細胞を有効に利用するためのより機能的な培養器材の開発も重要な研究課題の一つとなっている。

動物細胞のほとんどを占める足場依存性細胞は、生体内において、細胞外に存在する細胞外マトリックス (ECM) と様々な相互作用をしており、細胞骨格の維持や増殖など、生存に不可欠な生命活動を行っている。したがって、足場依存性細胞の培養には、器材表面に細胞接着の足場を提供する必要がある。現在、細胞培養器材にはポリスチレン (PS) が汎用されているが、PS そのものは疎水性が高く、ほとんどの細胞は接着できない。そこで、一般的な細胞培養においては、PS 表面にプラズマ表面処理を施し、親水性官能基を導入した組織培養用 PS (Tissue culture polystyrene: TCPS) が用いられる。TCPS 表面は、適度な親水性を有し、

その結果、培地中の動物血清に含まれる細胞接着に係わる成分の物理的な吸着とそれを足場にした細胞の接着が起こる。一方、TCPS にも接着しにくい細胞の培養やより高度な実験においては、コラーゲンなどの ECM を構成する動物由来のタンパク質をコーティングした器材が広く利用されている。しかしながら、ECM タンパクの使用は、感染など動物由来に伴う諸問題を無視できず、また、品質維持にも注意を必要とする。そこで、細胞培養器材表面に人工的な ECM を構築しようとする試みがある。アルギニン-グリシン-アスパラギン酸 (RGD) 配列を含むペプチドは、細胞表面の受容体タンパクと結合することが知られており、細胞培養器材に RGD ペプチドを固定化することにより細胞接着性を有する表面を構築することが可能である [18]。一方、低分子量のペプチドは、高分子量のタンパク質と異なり、器材表面に物理的に吸着させることは困難である。したがって、共有結合で固定化する必要がある。そのためには、器材表面に反応性官能基を導入する必要がある。そこで、我々は、VEMAC 固定化ポリスチレン (PS/VEMAC) を調製し、ペプチド固定化用基板として用いるとともに、細胞培養基板としての有用性を評価した [19]。

PS は典型的なプラズマ架橋性の高分子であり、図 1 に示す方法を適用したところ、約 0.4 nmol/cm² のカルボキシル基が認められ、高密度のカルボキシル基導入が可能であった [20]。この PS/VEMAC 表面で細胞培養実験を実施したところ、PS 表面に固定化された VEMAC の細胞に対する毒性は特に認められなかった。そこで、図 3 に示す反応スキームでグリシン-アルギニン-グリシン-アスパラギン酸-セリン (GRGDS) 配列のペプチドを固定化し、その細胞接着性を評価した。まず、GRGDS 固定化 VEMAC/PS (RGD-PS/VEMAC) 表面の X 線光電子分光スペクトル (XPS) の測定を実施したところ、表 1 に示すように、RGD-PS/VEMAC 表面においては、未処理 PS および PS/VEMAC では観測されない窒素原子に由来するピークが観測され、PS/VEMAC 表面への GRGDS 導入を確認することができた。次に、固定化 GRGDS の細胞表面による分子認識について評価した。図 4 は、無血清培養条件でマウス胎児由来 NIH3T3 細胞を RGD-PS/VEMAC 表面で培養した時の接着状態を

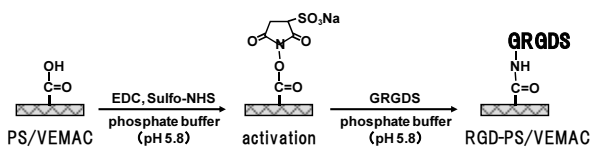


図 3 GRGDS 固定化のための反応スキーム

表 1 XPS 測定結果から算出された各基板表面の元素組成

Sample	[C _{1s}] atomic %	[O _{1s}] atomic %	[N _{1s}] atomic %
Non-treated PS	97.4	2.6	—
PS/VEMAC	82.5	17.5	—
RGD-PS/VEMAC	84.1	12.7	3.2

観察した結果である[21]。比較の目的で、GRGDSのアスパラギン酸をグルタミン酸に置換したGRGES ペプチドを導入した PS/VEMAC (RGE-PS/VEMAC) 表面における細胞接着の様子も示しているが、図 4 に示すように、RGD-PS/VEMAC 表面においては、細胞が接着し、大きく伸展しているのに対し、GRGES 固定化表面では、接着細胞は認められなかった。したがって、RGD-PS/VEMAC 表面では、RGD ペプチドと細胞表面との特異的な相互作用により、細胞の接着が起こっていると言える。

以上の結果は、RGD-PS/VEMAC 表面は人工的な ECM として機能していることを示唆するものである。また、PS/VEMAC 表面のカルボキシル基に特定のリガンドを導入することにより、その基板表面で固定化リガンドと細胞との特異的な相互作用を評価することが可能であることも示唆しており、PS/VEMAC を基板とする細胞機能評価システムの構築などへの応用展開も期待できる。

4.2 タンパク質固定化のための表面機能化

抗体や酵素などのタンパク質を固相に固定化した材料は、各種バイオセンサーや生体適合性材料に利用されている。一方で、多くのタンパク質は、固定化の際にその活性(基質の特異的分子認識能)が著しく低下するため、固定化材料への応用が困難となっている。前述のような低分子量ペプチドの固定化と異なり、高分子量のタンパク質では、分子の立体構造が活性発現に重要な役割を果たしており、固相への固定化により、活性発現部位の

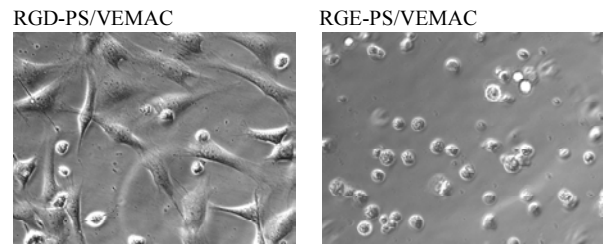


図 4 ペプチド固定化 PS/VEMAC 表面における NIH3T3 細胞の接着の様子(培養 48 時間後)

修飾、あるいは、固相表面との相互作用により、タンパク質の変性が生じ、その結果、活性の低下が起こると考えられている。したがって、タンパク質固定化材料の開発においては生体分子がその活性を保持した状態で固定化されるよう、生体分子と基板表面をつなぐインターフェイスの設計が重要となってくる。

我々は、図 5 に示す反応スキームで VEMAC 固定化 LDPE (LDPE/VEMAC) 表面のカルボキシル基を化学修飾し、原子移動ラジカル重合 (ATRP) の開始剤を固定化することにより、LDPE 表面にポリ GMA (pGMA) グラフト鎖を構築し、そのタンパク質固定化用インターフェイスとしての有用性を評価した[22-23]。ATRP は、リビングラジカル重合法の一つであり、高度に制御された分子量を持つ高分子を合成することが可能である[24]。図 6 は、ATRP による pGMA グラフト層の伸長を赤外線分光法 (IR) により測定にしたスペクトルを示している。c-e の比較により、ATRP 時間に伴い、GMA のカルボニル基に由来するピーク (1733 cm⁻¹) 強度の増加が認められた。この結果は、GMA の重合が ATRP により進行し、LDPE/VEMAC 表面に、鎖長の制御された pGMA グラフト層が構築されていることを示すものである。また、pGMA のグラフト密度は、LDPE/VEMAC 表面のカルボキシル基密度に相関すると考えられるので、LDPE/VEMAC を調製する際のプラズマ照射条件により制御可能である。すなわち、本方法では、LDPE 表面上における pGMA グラフト鎖の密度と長さを容易に制御可能である。

次に、モデルタンパク質として線溶活性酵素ウ

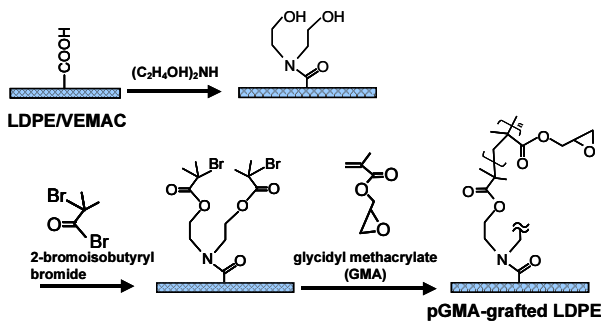


図5 ATRPによるLDPE/VEMAC表面におけるpGMAグラフト層構築の反応スキーム

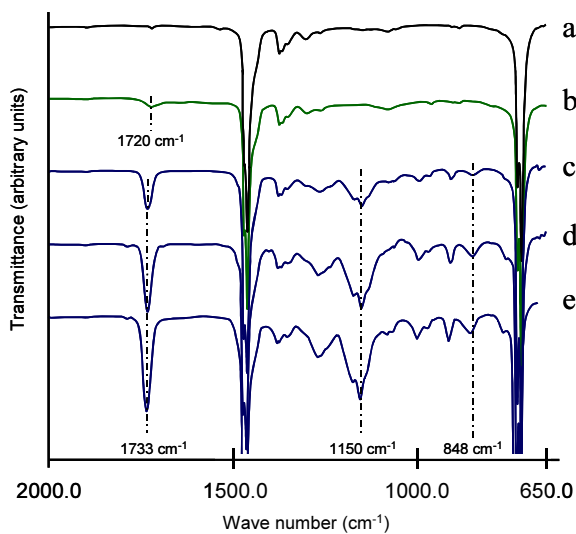


図6 pGMAグラフト化LDPE/VEMAC表面のIRスペクトル(a: 未処理LDPE, b: LDPE/VEMAC, c-e: pGMAグラフト化LDPE/VEMAC表面(重合時間: c-2h, d-4h, e-6h,))

ウロキナーゼを用い、pGMAグラフト層への固定化を行い、その酵素活性を評価した。GMAのエポキシ基は、アミノ基など求核性の官能基と穏和な条件で反応し、縮合試薬などを用いずに安定な結合を形成する。また、基板となる固相表面にpGMAグラフト層を構築することにより、固定化タンパク質と基板表面との直接的な相互作用を抑制することが可能である。したがって、pGMAグラフト層への固定化では、ウロキナーゼの固定化に伴う活性の低下を最小限にすることが期待される。

表2は、種々の重合時間で調製したpGMAグラ

表2 pGMAグラフト化LDPE/VEMACにおけるウロキナーゼ固定化量およびその酵素活性

Time for ATRP of GMA	Immobilized UK ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	Activity* (IU/cm^2)	Relative activity (%)
2 h	0.44 ± 0.08	35.66 ± 2.77	101.3
4 h	2.05 ± 0.08	31.34 ± 1.86	19.1
6 h	4.53 ± 0.15	32.96 ± 4.63	9.1

* Activity of immobilized urokinase (IU/cm^2) was assayed using Glu-Gly-L-Arg-MCA as the substrate.

フト層にウロキナーゼを固定化し、その固定化量および活性を評価した結果である。表2に示すように、固定化ウロキナーゼの活性発現率はpGMAグラフト鎖の鎖長に強く影響され、2時間のATRPで調製したpGMAグラフト層に固定化されたウロキナーゼでは、高い相対活性が認められ、pGMAグラフト層が固定化ウロキナーゼの機能発現に有利に作用していることを示している。また、最適条件にて調製したpGMAグラフト層に固定化したウロキナーゼは、その安定性が飛躍的に改善することも明らかにしている。

さらに、LDPE表面への血液適合性付与を目的として、ウロキナーゼと共にトリス（ヒドロキシメチル）アミノメタン（Tris）を固定化し、ウロキナーゼに由来する線溶系活性作用とTris固定化による親水性領域の構築による血漿タンパクの吸着抑制作用を併せ持つ表面を構築した[16]。

図7は、所定条件下、血液と接触させたウロキナーゼ/Tris固定化LDPE表面のSEM写真を比較の目的で未処理のLDPEのものと共に示している。図7から明らかなように、未処理のLDPE表面で認められる血小板や血漿タンパクの吸着は、ウロキナーゼ/Tris固定化LDPE表面では認められず、また、固定化ウロキナーゼの線溶系活性により、本方法により構築された表面では優れた血液適合

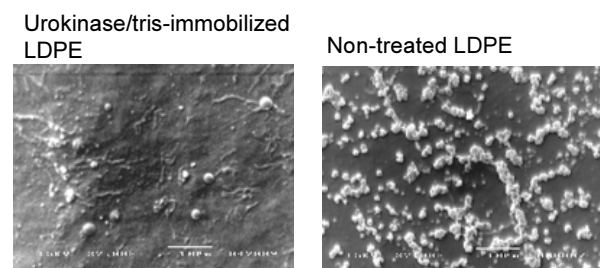


図7 血液成分の吸着の様子

性を示すと考えられる。プラズマ技術と ATRP を利用した本方法は、高分子材料表面と固定化生体分子とのインターフェイスを三次元で制御可能であることから、多種多様な生体分子の固定化に対応でき、バイオセンサー、生体適合性材料など各種生体分子固定化高分子材料設計への応用が期待できる。

5. まとめ

本稿では、高分子のプラズマ表面化学に関する基礎研究成果を基に発展させた低温プラズマ技術の医薬学的応用研究として、プラズマ架橋反応を利用した VEMAC 固定化による疎水性高分子表面の持続的な親水化法について紹介した。この VEMAC 固定化高分子の表面親水性は、耐久性にも優れることから、疎水性医用高分子表面の生体適合性改善に有効な方法である。また、高分子基板表面に多量のカルボキシル基の導入が可能であることから、生体分子固定化材料の基板調製法としても有用であり、現在、高感度バイオセンサーや機能性細胞培養器材の開発へ向けた応用研究を展開中である。

参考文献

- [1] Desmet, T., Morent, R., De Geyter, N., Leys, C., Schacht, E., Dubruel, P., *Biomacromolecules*, **10** (2009) 2351.
- [2] Fridman, A., *Plasma Chemistry*, Cambridge University Press (2008)
- [3] Kuzuya, M., Noguchi, A., Ishikawa, M., Koide, A., Sawada, K., Ito, A., Noda, N. *J. Phys. Chem.*, **95** (1991) 2398.
- [4] Kuzuya, M., Noguchi, A., Ito, H., Kondo, S., Noda N., *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, **29** (1991) 1.
- [5] Kuzuya, M., Ito, H., Kondo, S., Noda, N., Noguchi, A., *Macromolecules*, **24** (1991) 6612.
- [6] Kuzuya, M., Noda, N., Kondo, S., Washino, K., Noguchi, A., *J. Am. Chem. Soc.*, **114** (1992) 6505.
- [7] Kuzuya, M., Niwa, J., Ito, H., *Macromolecules*, **26** (1993) 1990.
- [8] Kuzuya, M., Morisaki, K., Niwa, J., Yamauchi, Y., Xu, K., *J. Phys. Chem.*, **98** (1994) 11301.
- [9] Kuzuya, M., Matsuno, Y., Yamashiro, T., Tsuiki, M., *Plasmas and Polymers*, **2** (1997) 79.
- [10] Kuzuya, M., Yamashiro, T., Kondo, S., Sugito, M., Mouri, M., *Macromolecules*, **31** (1998) 3225.
- [11] Kuzuya, M., Kondo, S., Sasai, Y., *Pure Appl. Chem.*, **77** (2005) 667.
- [12] Kuzuya, M., Sasai, Y., Kondo, S., *Curr. Drug. Discov. Tech.*, **6** (2009) 135.
- [13] Occhiello, E., Morra, M., Cinquina, P., Garbassi, F., *Polymer*, **33** (1992) 3007.
- [14] Dupont-Gillain, C. C., Adriaensen, Y., Derclaye, S., Rouxhet, P. G., *Langmuir*, **16** (2000) 8194.
- [15] Kuzuya, M., Yamashiro, T., Kondo, S., M. Tsuiki, *Plasmas and Polymers*, **2** (1997) 113.
- [16] Sasai, Y., Oikawa, M., Kondo, S., Kuzuya, M., *Proc. ISPC-18* (2007) 27P-130.
- [17] Sano, S., Kato, K., Ikada, Y., *Biomaterials*, **14** (1993) 817.
- [18] Hersel, U., Dahmen, C., Kessler, H., *Biomaterials*, **24** (2003) 4385.
- [19] Sasai, Y., Matsuzaki, N, Kondo, S., Yamauchi, Y., Kuzuya, M., *Surf. Coat. Technol.*, **202** (2008) 5724.
- [20] Sasai, Y., Matsuzaki, N, Kondo, S., Yamauchi, Y., Kuzuya, M., *Proc. ISPC-19* (2007) P3.13.11.
- [21] Sasai, Y., Kondo, S., Yamauchi, Y., Kuzuya, M., *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **23** (2010) 595.
- [22] Sasai, Y., Kondo, S., Yamauchi, Y., Kuzuya, M., *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **19** (2006) 265.
- [23] Sasai, Y., Oikawa, M., Kondo, S., Kuzuya, M., *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **20** (2007) 197.
- [24] Patten, T. E., Xia, J., Abernathy, T., Matyjaszewski, K., *Science*, **272** (1996) 866.

プラズマ複合処理によるスーパークリーンディーゼル・燃焼炉の開発 *Super-Clean Diesel Engine and Combustor Using Nonthermal Plasma Hybrid Aftreatment*

大久保 雅章, 桑原 拓也 (大阪府立大学), 吉田 恵一郎 (大阪工業大学)
藤島 英勝, 黒木 智之 (大阪府立大学)

Masaaki OKUBO, Takuya KUWAHARA (Osaka Prefecture University), Keiichiro YOSHIDA (Osaka Institute of Technology), Hidekatsu FUJISHIMA, Tomoyuki KUROKI (Osaka Prefecture University)
e-mail: mokubo@me.osakafu-u.ac.jp

1. はじめに

近年の地球環境改善や温暖化問題解決の要請を受けて、ディーゼルエンジン、燃焼機器などの化石燃料システムの排ガスの有害成分 ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ 及び PM, particulate matter をターゲットとする) の浄化および CO_2 を始めとする温室効果ガスの処理の要望がますます高まっている。一方、化石燃料システムの触媒を使用した排ガス後処理浄化技術においては、機器の燃費向上、極限的排熱回収、 CO_2 排出量低減策、電気モータとのハイブリッド化などに伴って、排ガス温度は低下の一途をたどっており困難が発生している。たとえば、自動車エンジン排ガスを例にとると、希薄燃焼、アイドルストップ、ハイブリッド等の進歩により排ガス温度が 100°C 前後になることも少なくない。そのため従来、高温領域で排ガスの浄化に利用されてきた触媒が低温で能力を失い、単独使用が近未来には困難となることも予想される。特にガソリン自動車の排ガス浄化の切り札として幅広く使用されている三元触媒でさえも将来の燃費向上のための直噴ガソリンエンジンに対し常使用できなくなる可能性がある。

以上の理由により、何らかの形で排ガス自身の活性を向上させる必要があるが、バーナや電気ヒータなどにより排ガス温度を上昇させることは折角向上した燃費の悪化につながり無意味である。そこで化学反応に主に寄与する電子温度のみが通常 1万 K 以上と高い、大気圧低温非熱プラズマ (大気圧、高温電子温度で低ガス温度のプラズマ、nonthermal plasma, NTP という。) [1] を印加し、活性を向上させるという発想は必然のものである。

特に電極間に立ち上がり 100 ns 以下、パルス幅数 100 ns 、振幅 $10\sim 100\text{ kV}$ 程度、周波数 1 kHz 程度の直流パルス高電圧を印加して大気圧で形成される、パルスコロナ放電による NTP は、排ガスの

温度を上昇させず電子温度のみ上昇させるため、省エネルギーで形成でき、常温で化学反応活性化を行えるため有効である。

一方、触媒成分として一般的な白金を代表とする貴金属はレアメタル (希少金属) の一種である。白金を例にとると自動車など排ガス浄化触媒 (需要全体の 50% 以上を占める) や近年急上昇している燃料電池向けの需要から近年価格が上昇しており、しかも産出が南アフリカやロシアなど特定国に偏っている。また白金の年間世界生産量は 186 トン (2008 年)、地球埋蔵量は $56,000\text{ トン}$ 程度と有限であり、リサイクルが進んでいるものの、今後は新規に排ガス浄化に大量に使用することが難しくなるものと予想される。よって貴金属触媒を大量に使用しない排ガス浄化技術が求められており、その意味でも、無触媒で環境浄化できるプラズマ処理が有力な手段として注目されている。

しかしながら、これまでのプラズマ排ガス処理の研究から、数百 ppm を被処理成分とする希薄で大流量の排ガスに、触媒との併用を行わずに低温大気圧プラズマを単独で印加するのみでは、反応の効率が悪く実用的なエネルギー効率 (単位プラズマエネルギーあたりの被処理成分の質量) の達成は不可能であることが判明している。例えば NO_x の還元浄化 (N_2 と O_2 に分解) を例にとると、エネルギー効率は、プラズマ単独印加では単位プラズマエネルギーあたりの NO_2 質量換算の NO_x 処理量が $10\text{ g}(\text{NO}_2)/\text{kWh}$ 程度であるが、実用化のためにはその 1 桁上の $100\text{ g}(\text{NO}_2)/\text{kWh}$ 以上の効率を達成することが不可欠である。

以上の背景の下、近年、著者らが提案するプラズマ複合プロセスは、プラズマを単独で用いるのではなく、フィルタによる PM 高濃度化 (捕集)、吸着剤によるガス成分高濃度化 (濃縮) や薬液と複合させ排ガス浄化を行なう方法で、触媒法の問

題点を回避し、プラズマエネルギーを格段に低減することができる新しい処理技術である。吸着剤を併用する乾式システム、薬液を併用する湿式システムの二種類の方式を提案しており、ディーゼル車、船舶ディーゼルエンジン、ディーゼル発電機、小型ボイラを対象にした革新的な地球環境保全システムを提供することが期待でき、産業界からも注目を集めてきた。

以上の背景の下、著者はこれまでに大阪府立大学大学院工学研究科、環境保全学研究室 (<http://www.m.osakafu-u.ac.jp/plasma/>) で実施されたプラズマ流を応用した環境保全技術に関する研究を総括する形での解説論文をいくつか発表してきた[2, 3]。その後、プラズマ研究の進展や社会情勢は相当変化したので、本稿では、その続編としての解説を行う。はじめに触媒を利用した従来技術と比較しながら筆者らが提案する二種類のプラズマ複合排ガス浄化技術の原理をその近年の改良点を含め解説し、船舶ディーゼル発電機及び小型ボイラの排気浄化 (PM と NO_x がターゲット) を対象とした最新の実験結果を、近年公表した重要な論文を引用しながら紹介する。

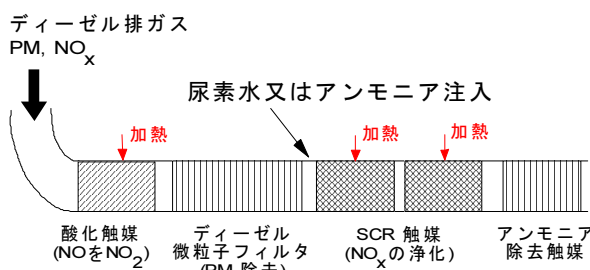


図1 触媒と尿素を使用した従来型 PM, NO_x の同時浄化システム (CRT+SCR)

2. 微粒子・NO_x 処理プロセスの原理

2.1 触媒を使用した従来プロセス

図1に触媒を使用した従来プロセスを示す。この方法では、酸化触媒でディーゼルエンジン排ガス NO_x の大部分を占める NO を NO₂ に酸化し、NO₂ が後段の DPF (diesel particulate filter) で捕集された PM を燃焼する。CRT (continuous regeneration trap) と呼ばれる方法である。しかしながら酸化触媒活性化のため温度 300°C 以上の高温を必要とするため、エンジン始動時、アイドリ

ング時の排ガス低温時には十分な性能が得られない。その場合にはバーナあるいは電気ヒータによる加熱で酸化触媒の活性を高める必要がある。

下流には V₂O₅ や CuO 等の重金属を主成分とする触媒が設置されており、その上流で尿素水溶液を吹き込み、発生するアンモニアで NO_x を還元浄化する。SCR (selective catalytic reduction) 法、あるいは選択触媒還元法と呼ばれる。残存したアンモニアは触媒で除去する。本方法は触媒活性のため 300°C 以上の排気温度維持が必要なこと、アンモニア及びアンモニアエアロゾルの有害性、貴金属触媒の枯渇、尿素スタンド設置、SCR 重金属触媒の有害性、燃料脱硫改質を必要とするなどの問題点を有する。

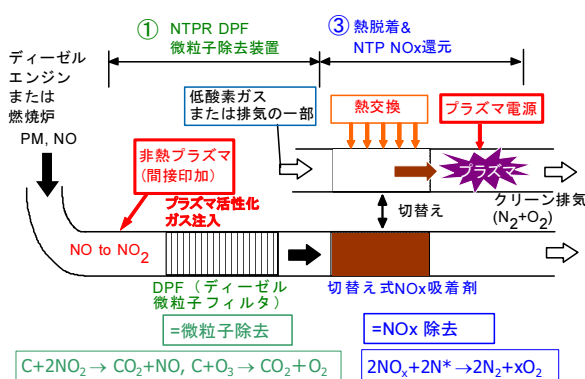
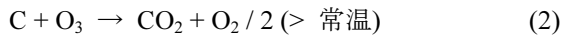


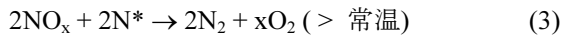
図2 プラズマ複合乾式 PM, NO_x 同時除去プロセス

2.2 乾式プラズマ複合プロセス

図2は我々が提案するプラズマ、DPF、吸着剤を複合させた方法である。常温で非平衡 (非熱) プラズマ (NTP) が高い NO 酸化能力をもつことは古くからよく知られている。これに着目し酸化触媒を間接非熱プラズマで処理した活性化ガス (主にオゾン O₃) 注入で置き換える。DPF を含む ①NTPR (nonthermal plasma regenerated) 微粒子除去装置で PM 除去を行う。この場合の NTP としては沿面放電励起プラズマが例示される。筆者らはこの方法により DPF が 250°C 以下の低温で NO₂ 及び O₃ で燃焼再生することを実験的に初めて確かめた。図中にも記載しているが PM のうち dry soot に関する反応式は以下の(1), (2)であり、250°C 程度の温度では、ほぼ平等に起こっていることが判明した。



下流のNO_x処理システムでは吸着剤を含む③熱脱着-NTP NO_x還元法を用いる。この場合のNTPとしてはパルスコロナ励起プラズマや沿面放電励起プラズマが例示される。一般にディーゼルエンジンの排気ガス中には、5~10%程度の体積濃度の酸素が含まれている。このようなガスをプラズマリアクタに流し、プラズマを印加するだけでは、燃焼ガス中に含まれるNOがNO₂へ酸化されるだけで、NO_x自体はほとんど減少せず、公害の処理にはならない。そこでエンジンの運転モード（燃料噴射モード）を切り替え、酸素リッチな状態ではNO_xを含む排ガスをプラズマ無しで一度吸着させ、その後、酸素量が少ない（O₂濃度5%以下）状態へエンジン運転モードを切り替え、プラズマ印加あるいは吸着剤にプラズマ印加あるいは廃熱加熱を行いNO_xを高濃度脱着（おおむね濃度~2%）し、Nラジカルで高効率に還元させる。反応式は以下の式(3)のようになる。



本方式は無触媒、無アンモニア、無尿素であり常温に近い低温で動作可能なシステムで、触媒方式の問題点を確実に回避できる。さらには、吸着を行っているときにはプラズマを印加する必要が無く、高濃度化されたNO_xを脱着する短時間の間にのみプラズマを印加すれば良いため、プラズマエネルギーを格段に小さくできる高エネルギー効率な方法であり、乾式プラズマ処理の切り札であると考えている。

2.3 湿式プラズマ複合プロセス

プラズマ複合プロセスのもうひとつの方式である湿式プロセスでは、図3に示すようにディーゼルエンジンまたは燃焼炉からの微粒子PMおよびNO_xを含む排気ガスを、乾式システムと同様の①NTPR DPF 微粒子除去装置でPM除去を行う。下流において、②NTP スクラバー-NO_x還元法により、プラズマでNOをNO₂に酸化して湿式にて安価で強力な還元剤亜硫酸ナトリウム Na₂SO₃を用いてNO_xを除去する。反応式は以下のようになる。

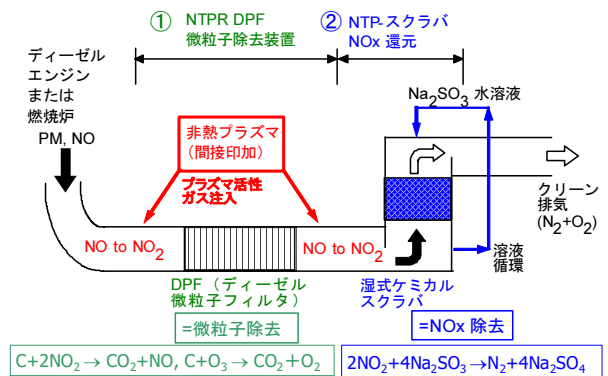
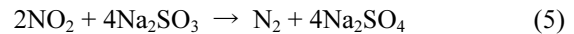


図3 プラズマ複合湿式PM, NO_x同時除去プロセス



本方式では、プラズマの電力コストが大きいという問題点を確実に回避できる。その理由は式(4)に示すようにプラズマをNOの酸化のみに用いているため、NO_xを還元浄化（N₂とO₂に分解）する場合に比べ電力を数分の1に小さくできるからである。Na₂SO₃は無害で水溶性のNa₂SO₄となり再使用せず廃水されるが、試算では運転コストもSCR法の25%である。燃焼炉、工業用ボイラ船舶ディーゼルエンジンなど比較的大型のエンジンに適している。

3. ディーゼルエンジン排ガス処理

ここでは、はじめに自動車ディーゼルエンジンの排ガス後処理に関する研究動向と図2のシステムの筆者らの適用例を述べ、次に近年重要な課題である船舶ディーゼルエンジンの研究の動向と筆者らの研究例を紹介する。

3.1 自動車ディーゼルエンジンに対する研究経緯

ディーゼルエンジンは低コストで熱効率が高く、低燃費であることから、CO₂排出量が少なく地球環境保全からも優位性は広く認識され、自動車、列車、建設機械、船舶、発電機など幅広く使用されている。特に自動車に関して、欧州では乗用車に占めるディーゼル車の比率は5割以上、フランスでは7~8割に達するとのデータもあり、世界的に見て市場の拡大は必然である。日本国内では排ガスが汚いというイメージが先行したためか、デ

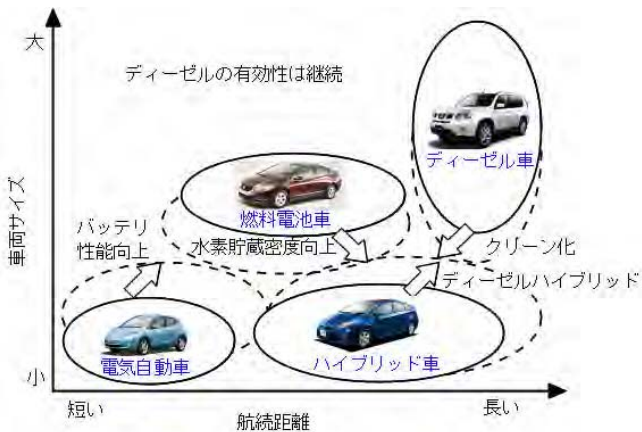


図4 ディーゼル車の今後の展開と推移

ディーゼル乗用車の普及は1%以下に留まっているが、近年何種類かの機種が発表され、DPFを搭載する乗用車も市販されている。またバスやトラックへの普及は普通のものとなっている。

図4に各種自動車の今後の展開の推移を示す。近年電気自動車の展開が華々しく、ディーゼル車の展開は影を潜めているように見えるが、航続距離と車両サイズの大きさでの優位性は揺るがず、電気自動車がそのバッテリー性能向上、燃料電池車が水素貯蔵密度を向上させるにつれ適用範囲を拡大するのと同様に、クリーン化、ハイブリッド化によって適用範囲を拡大していくと思われる。

このようなディーゼルエンジン自動車の普及につれて排ガス浄化規制は、近年、急速に厳しくなり、エンジンの改良のみでは規制クリアが困難になってきている。特に排ガスに含まれる dry soot や黒煙などの粒子状物質PM及びNO_xに関して効果的な後処理技術が必要とされている。

PMの後処理技術としてはハニカム流路をもつセラミックDPFがここ数年の間に事実上の標準となった。材質としては安価なコージュライト製のものよりも耐熱性に優れたSiCセラミックを用いたものが広く採用されてきている。排気管の内部に封入し、排ガスを通させPMを95%以上の効率で捕集する。捕集されたPM除去には、酸化触媒によるNO₂を用いた低温燃焼連続再生(CRT)が有効と言われてきたが、低速運転が連続する場合、触媒方式では再生量が不足するため外部電源ヒータやバーナを用いた直接燃焼(手動再生)装置を備えた自動車が多い。

一方、筆者らは非熱プラズマ応用の有望な技術

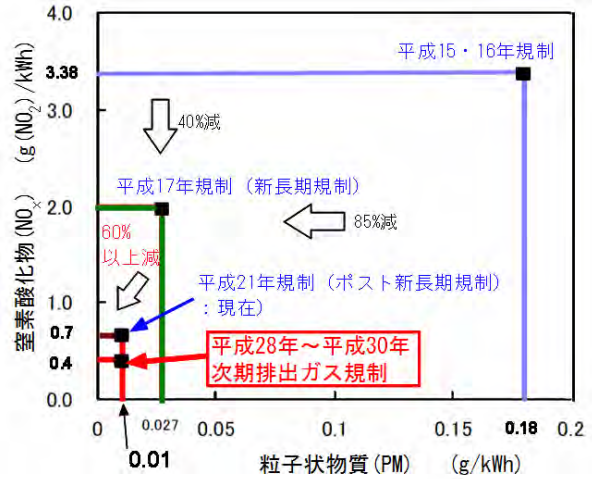


図5 ディーゼル車のNO_x排出規制の推移(ディーゼル重量車3.5トン以上、計測モードJE05モード)

として、低温(250°C以下)でのPM燃焼あるいはDPFのプラズマ・オゾン注入再生の研究に取り組んできた。実用上十分なエネルギー効率を達成しており、実用化に向けたエンジンベンチを利用した試験を繰り返している[4, 5]。さらに、近未来のPM捕集技術として、1μm以下のナノ微粒子に高い捕集性能をもち、通気圧力損失が極めて少ない電気集じん装置への期待も高まってきており、自動車各社での将来への適用に向けた検討がなされてきている。なお、DPF、プラズマ処理、電気集じん方式はPMを形成しやすい直噴型ガソリンエンジンの排気処理に適用される可能性がある。

NO_xの後処理技術に関しては、尿素水溶液を触媒に吹き込む尿素SCRと希薄吸蔵触媒還元LNT(lean NO_x trap)と呼ばれる方式が主流になってきた。しかし排ガス温度は200°C程度となり、触媒活性が効率よく作動する300°C以上の温度が得られない問題がある。そのため筆者らの方式を含め各種プラズマ方式が検討されてきている。なお、触媒とプラズマを複合させて排ガスを浄化する海外の既存の研究(アメリカ自動車技術会SAEなどで報告)のいくつかは既報[2, 3]で紹介したが実用化には至っていない。

図5は近年のディーゼル自動車国内規制の推移をトラックなど重量車3.5トン超に対して示したものである[6]。縦軸がNO_x(NO₂換算量)の排出規制値、横軸がPMの排出規制値であり、JE05と呼ばれるモード試験サイクルを実施した際のエンジンの出力あたりの排出質量g(NO₂)/kWh単位で

表されている。

我々の開発は当初世界で最も厳しい 2009 年規制（ポスト新長期規制と呼ばれる．PM = 0.01 g/kWh, NO_x = 0.7 g(NO₂)/kWh) のクリアを第一目標としていた．その結果，PM 浄化に関してはプラズマに必要な電力はエンジン出力の 0.3 %となる．NO_x に関しては 1.1%の性能をエンジンベンチ装置において達成した．

現在ではポスト新長期規制対応のディーゼル車は市場に出回っており，プラズマ方式の実用化は規制開始に間に合わなかった．今後さらに厳しい規制（平成 28～30 年規制）が実施されるが，研究は継続中であり今後公表していく．

3.2 船舶ディーゼルエンジンに対する研究背景と実施例

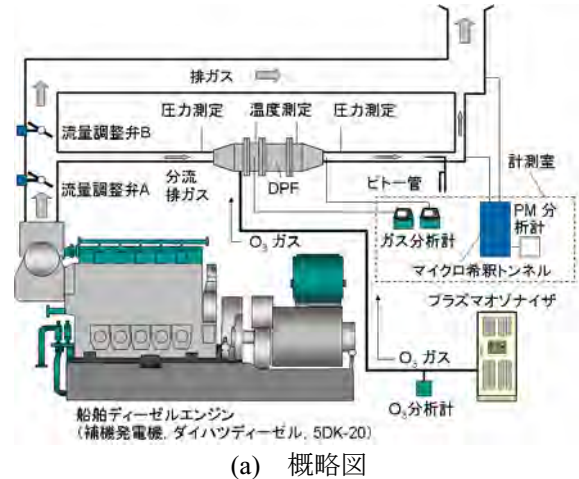
3.2.1 背景

ナノ粒子吸入の健康被害などの問題と関連して，船舶ディーゼルエンジンの排ガス中の微粒子状物質（PM）の効果的な浄化技術に対する期待が国際的に高まっている[7]．そこで自動車の排ガス規制が一段落した 2009 年頃，次期の大きな課題となっている船舶ディーゼルエンジンの排ガス浄化に研究対象をシフトした．船舶ディーゼルに関する排ガス後処理は始まったばかりで，ハニカムセラミック DPF は，ディーゼル車では実用化され，酸化触媒による連続再生方式（捕集 PM の燃焼除去をエンジンを運転しながら連続的に行なうこと）が実績をあげているが，含硫黄ディーゼル油を燃料とする船舶ディーゼルに対しては，酸化触媒が硫黄被毒のため使用困難であり，新しい方法を開発する必要がある．

本研究では，船舶ディーゼルのための硫黄被毒の無い DPF 再生方法を確立するため，我々が提案し実験室で検討してきた非熱プラズマラジカル注入法について，実機パイロット規模のエンジンベンチ試験を行った結果を紹介する[8, 9]．

3.2.2 実験装置ならびに実験方法

図 6 は試験装置の概略と外観である．供試エンジンは，船舶ディーゼル発電機（ダイハツディーゼル㈱，型式 5DK-20，最大出力 = 800 kW）であり，例えば自動車運搬船，客船，タンカー内に複数台設置され，船内電力を供給する補機である．船舶ディーゼル油（marine diesel oil, MDO，硫黄 = 0.075%，熱量 = 45.4 MJ/kg）を燃料とした．排ガ



(a) 概略図



(b) 実験装置外観

図 6 船舶ディーゼル排ガス浄化実験装置

ス流量は，エンジン負荷 25%の場合に 1,460 Nm³/h，エンジン負荷 50%の場合に 2,530 Nm³/h である．なお N は，0°C，1 気圧の標準状態を表す．排ガスは 2 配管に分流され，全流量の約 5%がハニカム型壁流動式（wall-flow type）セラミック DPF を通過し，残りはバイパスされる．DPF により PM の 95%以上が捕集される．

プラズマ装置としては無声放電式プラズマオゾンナイザ(O₃ = 90 g/h)を使用した．図 7 に装置内部のプラズマリアクタの概略を示す．高電界を形成するため内部ネジ状電極に交流高電圧が印加された 10 組のリアクタに PSA (pressure swing adsorption) 装置により空気から形成された O₂ を流すことにより O₃ を形成する．装置性能の詳細を表 1 に示す．濃度 4.7%の O₃ を DPF 上流に注入し，捕集 PM を O や NO₂ のような活性種により酸化し燃焼除去する．

3.2.3 実験結果

図 8 に DPF 再生中の，DPF 前後の圧力差および排気ガス流量の経時変化の例を示す．平均排ガス温度は 300～320°C である．排ガスの初期流量は

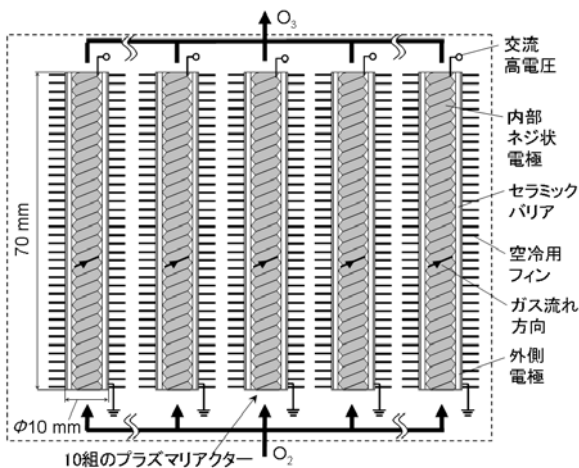


図7 プラズマリアクタの概略図

表1 プラズマ発生装置の性能

型式	EW-90Z
酸素発生方式	PSA 法 (酸素濃度 90%以上)
オゾン発生方式	空冷式円筒型プラズマ装置 (無声放電励起)
オゾン質量流量	0 - 90 g/h
オゾン濃度	0 - 100 g/Nm ³ =4.7%
オゾン体積流量	0.9 Nm ³ / h
消費電力	1.6 kW (PSA) 1.5 kW (プラズマ)
寸法	W740×D925×H1840 mm

80 Nm³/h に設定された。実験結果において、プラズマ OFF の PM 捕集プロセスでは、圧力差は増加し、流量は減少している。しかしプラズマを印加し、O₃ を注入することで、両者は回復している。

図9にO₃均一注入によりDPFの再生を行った結果の写真を示す。写真はDPFの横断面で(a)PM捕集後、(b)DPF再生後である。DPF再生時間は230 min、エンジン負荷は始めの40 minは25%、その後190 minは50%であり、排ガス温度は300~320°Cである。図9(a)と(b)を比較すると、白い部分が多く見られることから、DPFが再生されたことがわかる。

以上、船舶ディーゼルエンジンに対しDPFの連続再生に初めて成功し、各種基本的再生特性を明らかにした。全量処理のためのオゾナイザ消費電力は現状ではエンジン出力の約5%である。

3.2.4 船舶NO_xに関する規制

図10はIMO(国際海事機関)による船舶ディ

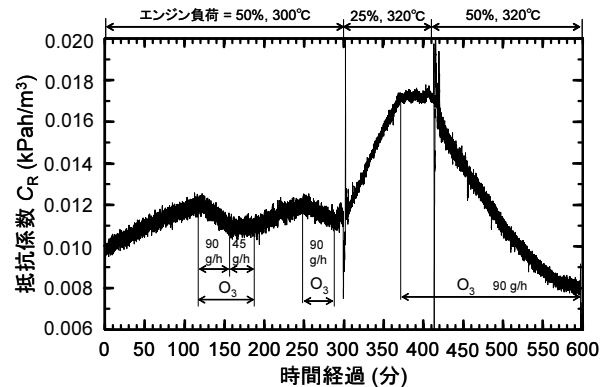
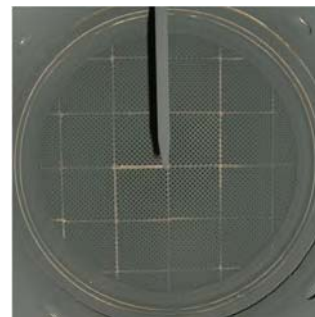
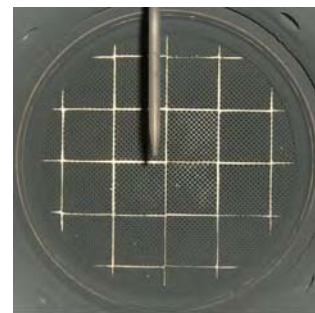


図8 船舶ディーゼルエンジンDPFの再生結果 (圧力損失の経時変化)



(a)再生前



(b)再生後

図9 船舶ディーゼルエンジンDPF再生結果 (DPF内径190.5 mm)

ーゼルエンジンのNO_x排出国際規制の今後の推移を表している。横軸はエンジンの定格回転数、縦軸は単位がg/kWhと記載されているが、エンジン単位出力エネルギー1 kWhあたりのNO₂換算のNO_x排出規制質量流量 g(NO₂)/kWhを意味する。図に示しているように2016年に実施される第三次規制は現行の第二次規制に対し6.9 g/kWhすなわち6.9/9.2×100=75%の大幅な削減となる(エンジン定格回転数900 rpmの場合)。これを達成するためにはエンジンの燃焼改善だけでは困難で、後処理

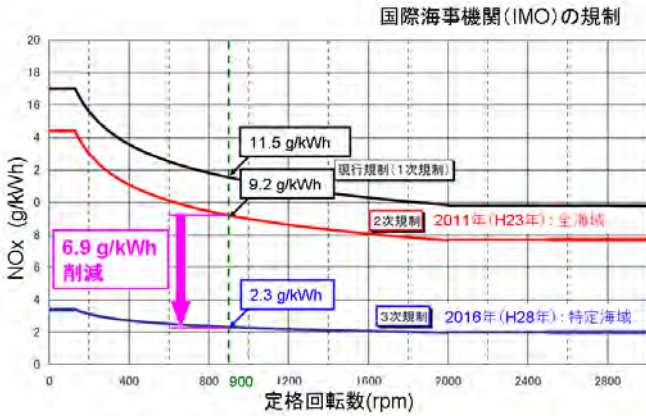


図 10 船舶ディーゼルエンジンの NO_x 排出国際規制の今後の推移

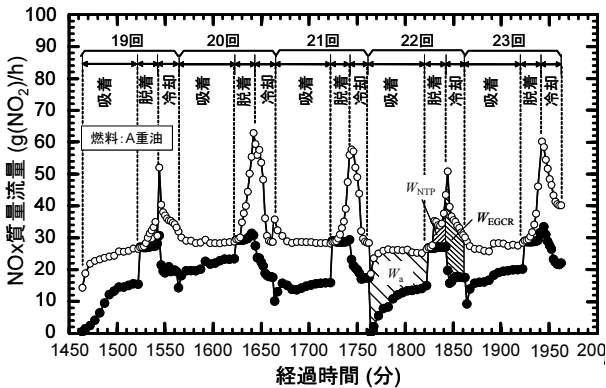


図 11 重油を燃料とした場合の NO_x 処理試験結果 (白丸：処理前，黒丸：処理後 NO_x)

を行うことが必須となる．そこで近年は企業との共同研究により，図 2 の方法による乾式プラズマ NO_x 処理に取り組んでいる．

図 11 は A 重油を燃料とした場合の図 2 の方式によるディーゼル NO_x 処理試験結果の一例[10]であり，横軸は経過時間，縦軸は単位が g(NO₂)/h で NO_x 排出質量流量を意味する．未処理の排ガス中の NO_x を白丸で，処理後の NO_x を黒丸で表している．吸着－脱着プラズマ処理－冷却排ガス循環処理を組み合わせ繰り返し処理を行っている．A 重油燃料ディーゼル排ガスは軽油燃料に比べ NO_x 濃度が高く，非熱プラズマ処理が効果的に作用し，図の 22 回目処理過程においては，エネルギー効率 437 g(NO₂)/kWh を記録した．

図 10 の規制にこの性能を当てはめてみると，6.9 g/kWh の削減のためにエンジン出力のわずか $(6.9/11.5) \times 100 = 60\%$ のプラズマ電力で浄化が可能となる．なお，今後の進展は，今年度からプラズマ環境や船舶関連の学術論文に発表していく計

画である．

4. 燃烧炉ボイラ排ガス処理

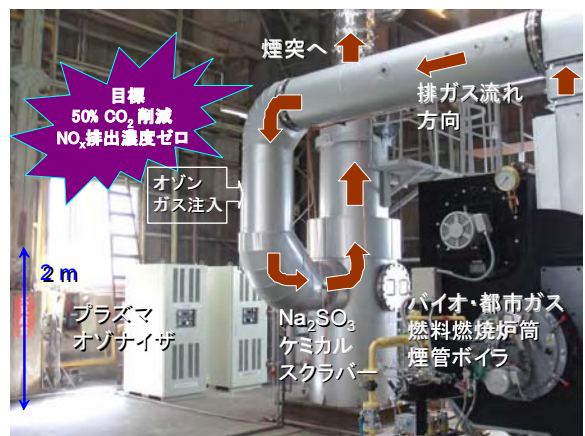
次に図 3 のプラズマ複合湿式 PM, NO_x 同時除去システムを実機暖房－蒸気形成用工業用ボイラの排ガス浄化に適用したパイロット試験実施例を紹介する．前試作機（第一世代および第二世代プラント）に関しては前報告[2, 3]で紹介しているが，ここでは種々の改良を施した最新のパイロット機の試験実施例を紹介する[11]．プラズマ複合プロセスを利用しているので「プラズマハイブリッドクリーンボイラ（登録商標）」または第三世代プラントと呼んでいる．燃料は都市ガス，A 重油，バイオ油（植物油など）のいずれも使用できる，工場や病院，ホテルなど向けのボイラに対する実証プラントを用いた結果である．

4.1 実験装置

図 12(a)にシステムの全体外観，図 12(b)に各部



(a) 全体外観



(b) 各部の詳細

図 12 プラズマハイブリッドクリーンボイラ™システム（第三世代）の外観と各部詳細

詳細を示す。装置は、炉筒煙管ボイラ、プラズマオゾンナイザ、 Na_2SO_3 ケミカルスクラバー、煙突から成り、その順番で排ガスが処理され、 NO_x が浄化される。燃料として廃棄植物油を使用することができるので、このシステムはカーボン・ニュートラルを達成することができる。システムのデモンストレーション試験が、都市ガス、A重油および廃植物油の混合油で実行された。安定燃焼は混合油(廃食油割合 20~80%)で確認された。

燃焼排ガスの特性 (O_2 , CO_2 , NO_x) に廃植物油の混合率はほとんど影響を及ぼさないことが確かめられた。また排ガスの最大流量は $2,250 \text{ Nm}^3/\text{h}$ であった。プラズマ装置としては前述の船舶ディーゼルエンジン排ガス PM 浄化処理でも使用した図 7、表 1 に示したリアクタを使用した。

4.2 実験結果

図 13 に NO_x 処理の経時変化の一例を示す。20%の混合油を燃料とし、燃焼排ガス流量が $870 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の低負荷の条件の場合である。なお、 NO_x 濃度は大気汚染防止法の規制に基づき O_2 濃度 4%換算値としている。図からわかるようにボイラ出口での未処理 NO_x 濃度は $90\sim 100 \text{ ppm}$ であり、300 min の連続処理において、処理後排出 NO_x は 11 ppm 以下に保たれている。すなわち約 90%の脱硝率が確認されている。

図 14 に都市ガス 13A を燃料とした場合の NO_x 処理の経時変化の一例を示す。燃焼排ガス流量が $690 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の低負荷の条件の場合である。なお、 NO_x 濃度は大気汚染防止法の規制に基づき O_2 濃度 5%換算値としている。図からわかるようにボイラ出口での未処理 NO_x 濃度は油燃料の場合に比較して低く $50\sim 58 \text{ ppm}$ であり、330 min の連続処理において、排出 NO_x は 5 ppm 以下に保たれている。この場合も約 90%の脱硝率が確認されている。

さらに、様々なプラズマ特性が詳細に調べられた。例えば、NO 酸化量のガス温度依存性が明らかにされ、排ガス温度が 150°C 以下で、排ガス浄化特性が特に顕著であることが確認された。さらに、重油の代わりに廃植物油燃料を使用した場合、蒸気発生量 2.5 ton/h のボイラに対し、年間 CO_2 削減量は約 700 ton、2,000 万円の燃料費削減になると試算された。従って、このシステムが大量の廃棄食用油を排出する食品工場等に非常に適しており、厳しい NO_x 規制が存在する都市エリアにおい

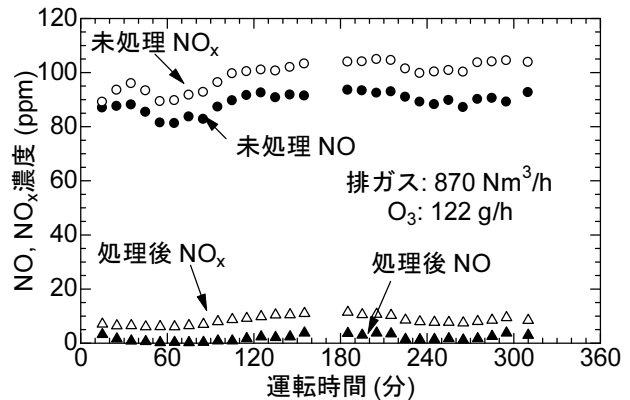


図 13 重油-20%廃植物油混合燃料の場合の排ガス中の NO_x 及び NO 濃度 (プラズマハイブリッドクリーン処理後 $\text{NO}_x = 11 \text{ ppm}$ 以下を達成、ただし縦軸は $\text{O}_2 = 4\%$ 換算値)

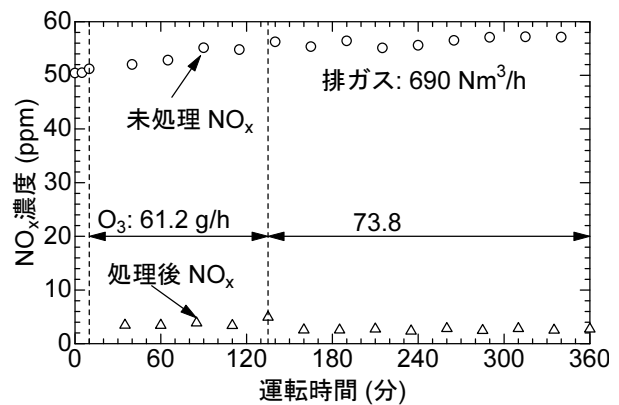


図 14 都市ガス燃料の排ガス中の NO_x 濃度 (プラズマハイブリッドクリーン処理後 $\text{NO}_x = 5 \text{ ppm}$ 以下を達成、ただし縦軸は $\text{O}_2 = 5\%$ 換算値)

て、プラズマ排ガス処理システムとの併用が極めて効果的であると結論付けられる。

4.3 規制との関係

表 2 に排ガス流量 $4 \text{ 万 Nm}^3/\text{h}$ 未満の小型ボイラに対する大気汚染防止法の NO_x 排出規制をまとめた。現状では最も厳しい上乗せ基準値がガス燃料の場合に 30 ppm 、液体燃料の場合に 50 ppm であり、本システムで達成したそれぞれの値 5 ppm 、 11 ppm に比べてかなり緩やかである。しかしながら例えばガスタービンコンバインドサイクル発電所の NO_x 規制値は現状で 10 ppm である。近い将来的には小型ボイラに対しても NO_x 規制値がさらに厳しくなることが予想され、本システムの有用性が発揮されるものと期待される。

表2 大気汚染防止法 NO_x 排出規制 (単位:ppm, 排ガス流量4万Nm³/h未満の小型ボイラ排ガス)

	全国	大都市部 (東京都、 大阪市)	上乗せ 基準 注1
ガス燃料 (O ₂ =5% 換算値)	130	45	30
液体燃料 (O ₂ =4%換 算値)	150	64	50

注1 例として地域冷暖房プラントに対する値

5. おわりに

著者らが開発したプラズマ複合排ガス処理技術の成果を解説した。主な結果を以下に要約する。

- (1) ラジカル注入と吸着プラズマ還元を用いたディーゼルエンジン排ガス処理を実証した。このシステムの実用化は国際的な環境保全問題解決策(自動車, 船舶)としてインパクトは非常に大きく, 重点的研究を進めてゆく。
- (2) ボイラ排ガス処理に関しては, 湿式ハイブリッド法で高いエネルギー効率でNO_xの90%連続処理に成功した。また, 更に, 重油の代わりに廃植物油燃料を使用した場合, NO_x排出を minimumに抑えながら, 大幅なCO₂削減と燃料費削減可能を実証した。

なお, 完成した図12のクリーンボイラシステムは「プラズマハイブリッドクリーンボイラ™」として, (株)高尾鉄工所から2012年に商品化[12]され販売中であることを付記する。

謝辞

試験研究に協力いただいた共同研究企業の研究員, 学生の熱心な取り組み, および種々のアドバイスを頂いた豊田政男 大阪大学名誉教授, 山本俊昭 東京都市大教授に深く感謝します。なお, 本研究の基礎的成果は科学研究費補助金, 実用的成果は科学技術振興機構の育成研究, 研究開発資源活用型の補助を受けていることを付記します。

参考文献

[1] チャング ジェン シー, 大気圧プラズマの物理と化学, プラズマ・核融合学会誌, **82**, 10 (2006) 682-692.

[2] 大久保雅章, 大気圧低温プラズマ複合プロセスを利用した大気・水環境保全技術, プラズマ・核融合学会誌, **84**, 2 (2008) 121-134.

[3] 大久保雅章, 山本俊昭, プラズマ複合プロセスに基づくディーゼル排気微粒子・NO_xの浄化技術, エアロゾル研究, **21**, 3 (2006) 220-225.

[4] M. Okubo, N. Arita, T. Kuroki, K. Yoshida, and T. Yamamoto, "Total Diesel Emission Control Technology Using Ozone Injection and Plasma Desorption", Plasma Chem. Plasma P., **28**, 2, (2008) 173-187.

[5] M. Okubo, T. Kuroki, S. Kawasaki, K. Yoshida, and T. Yamamoto, "Continuous Regeneration of Ceramic Particulate Filter in Stationary Diesel Engine by Nonthermal-plasma-induced Ozone Injection", IEEE Trans. Ind. Appl., **45**, 5 (2009) 1568-1574.

[6] 環境省ホームページ http://www.env.go.jp/air/car/gas_kisei/kisei.pdf

[7] T. Kato, S. Ibaragi, K. Matsuoka, K. Imai, and K. Sato, J. Japan Institute of Marine Engineering, **45**, (2010) 962-967.

[8] T. Kuwahara, K. Yoshida, K. Hanamoto, K. Sato, T. Kuroki, T. Yamamoto, and M. Okubo, "Continuous Regeneration Characteristics of Ceramic Particulate Filter in Marine Diesel Engine Using Nonthermal Plasma-induced Ozone Injection", 日本マリンエンジニアリング学会誌, **47**, 3 (2012) 80-85.

[9] T. Kuwahara, K. Yoshida, K. Hanamoto, K. Sato, T. Kuroki, T. Yamamoto, and M. Okubo, IEEE Trans. Ind. Appl., 印刷中 (2012).

[10] 桑原拓也, 西本昌文, 吉田恵一郎, 黒木智之, 大久保雅章, クリーンディーゼルのためのプラズマ複合 NO_x 処理装置の開発 (A 重油燃料を用いた実験), 日本 AEM 学会誌, **20**, 1 (2012) 21-27.

[11] H. Fujishima, Y. Yoshioka, T. Kuroki, A. Tanaka, K. Otsuka, and M. Okubo, "Development of Low-emission Bio-fuel Boiler System with Plasma-Chemical Hybrid NO_x Reduction", IEEE Trans. Ind. Appl., **47**, 5 (2011) pp. 2210-2217.

[12] 株式会社高尾鉄工所, プラズマハイブリッドクリーンボイラシステム, カタログ

高電圧・プラズマ技術の農業・食品分野への応用

*Agricultural and Food Processing Applications
of High-Voltage and Plasma Technologies*

高木 浩一 (岩手大学)

Koichi TAKAKI (Iwate University)

e-mail: takaki@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

高電圧や放電プラズマは、古くから農業分野でも利用されてきた。すでに 1746 年には Mainbray がモモ科の低木に電流を流し、成長の促進や、開花が早まることを報告している。1748 年には Nellet が帯電した電極上に植物を置き、発芽や生育が早まることを報告している[1]。日本でも、1920 年頃、電気栽培の試みがなされ、適度な電界で成長が促進されることなど報告されている[2]。

近年、電気の農学への利用は多岐にわたっている。例として、品種改良における電気泳動や細胞融合[3]，電気穿孔法による DNA の注入[4]，植物の発芽制御[5,6]，担子菌（きのこ類）での子実体形成促進[7-15]，液肥や固定培地の雑菌不活性化[16-19]，消毒液や農薬の静電散布[20]，長期保存[21-26]，有用成分の抽出[27-30]，などがあげられる。特に、成長促進のための植物の電気処理は、特許の分類番号が割り振られており（A01G 7/04 成長促進のための植物の電気または磁気処理；A 電気処理），多くの特許情報が開示されている。

本記事では、高電圧の農業・食品応用として、電気刺激によるキノコの収量改善や種子の発芽制御や、電界やプラズマを用いた植物の生育促進、果実等からの有用成分抽出、食品の鮮度保持などについて述べる。

2. 電気刺激でのキノコ収量の改善

「カミナリが鳴るとキノコが生える」といった言い伝えや報告は、古くはギリシャ時代の文献の中に記載されるなど、世界中で枚挙にいとまがない[31]。パルス電圧を加えた場合の変化の一例として、図 1 に、電圧印加前後の、きのこ菌糸の変化の様子を示す。菌糸に電界が加わると、菌糸の内部が負電位を持つためクーロン力や、誘電分極等による力がかかる。このため、菌糸が動き、その一部は木の繊維との間のせん断応力等により、

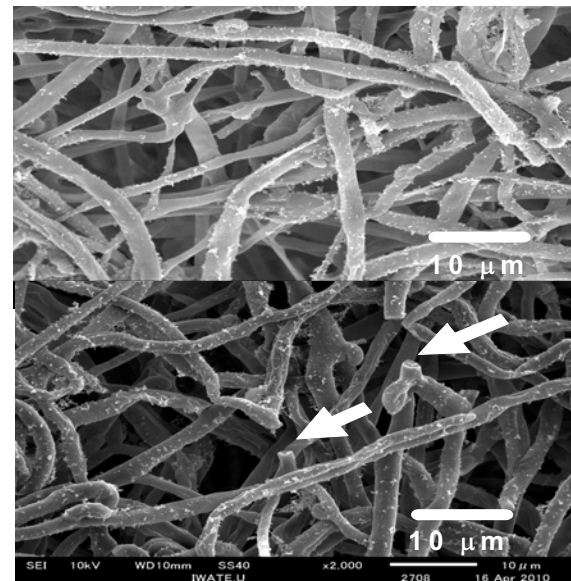


図 1 電圧印加前後の菌糸の電子顕微鏡写真
(上：電圧印加なし，下：あり)

断裂など損傷を受ける（矢印部）。これらはキノコへの刺激として働き、膜状菌糸やキノコ原基の形成などを引き起こす[12]。このメカニズムについては、菌糸が分泌する疎水性たんぱく質（ヒドロホビン）を、ポリマーゼ連鎖反応（PCR）を用いた解析などで確認できる[14]。

キノコ菌糸が十分に成長したホダ木や菌床（おが粉を固めたもの）にパルス電圧を印加することで、上記のメカニズムで子実体（キノコのかさ）形成を促進できる。図 2 に、シイタケのホダ木にパルス高電圧を加え、子実体形成の違いを観察した結果を示す[14]。写真より、電気刺激を施したホダ木に、数多くのシイタケが確認できる。図 3 に、ホダ木一本当たりのシイタケの収穫量の比較を示す。ホダ木は長さ 90 cm であり、ホダ木の木口面に釘を約 7 cm 打ち込み、一方をパルス電源の出力に接続して、一方を接地した。パルス電圧の印加条件は、電圧印加なし（図中 control と表示）、50, 90, 125 kV×1 回、50kV×50 回印加とした。



図2 電気刺激の有無によるシイタケ生育の比較 (上：電圧印加なし，下：あり)

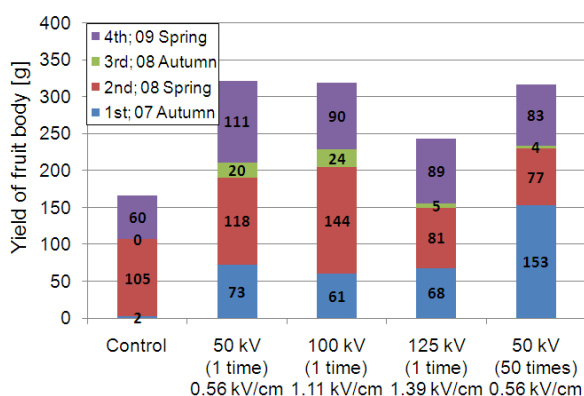


図3 印加電圧条件によるシイタケ収量変化

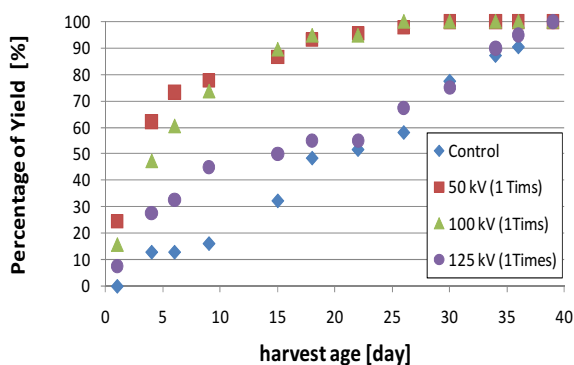
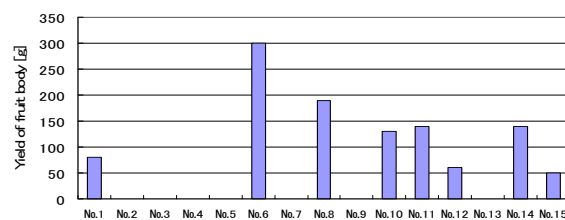


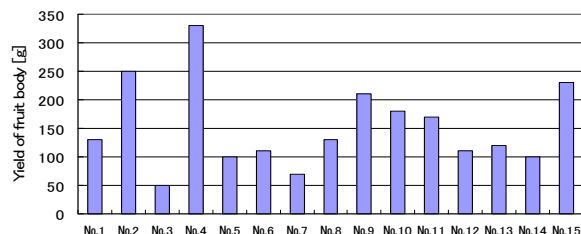
図4 印加電圧条件による総収量の時間変化

縦軸は各条件におけるホダ木一本あたりの収穫量を表し、4シーズン分の収量の合計である。全体をみると50 kV×50回印加条件において最も収穫量が多く、印加なしの条件の約1.9倍の収穫となる。電圧印加の条件中では125 kVで収穫量が最も少なく、電気刺激に適した電圧の大きさがあることがわかる。

図4に、4シーズン目の子実体収穫の時間変化を示す。0日は収穫開始日を示す。縦軸は、図3に示す4シーズン目の総収量を100%として、各



(a) 50 kV X 1 time



(b) 50 kV X 50 times

図5 各ホダ木の収量の刺激回数による比較

日数における収量の総収量に対する割合になる。4シーズン目の総収量は、印加なし、50、100、125 kVの条件でホダ木1本当たり60、111、90、89gである。図より、50 kVおよび100 kVの電圧を印加したホダ木は、電圧を印加しないものより早い時期で多くの割合を収穫できていることがわかる。15日目の収穫は、controlで50%に対して50 kV印加では86%となっている。

図5に、50 kVを1回印加と50回印加かけた場合の、15本のそれぞれのホダ木より収穫されたシイタケの重量を示す。印加なしの場合、15本のホダ木のなかで、子実体は1本のみ収穫となったが、1回の印加で8本から収穫でき、50回の印加ですべてのホダ木から収穫できるようになる。そのほか、ナメコ、クリタケ、タモギダケ、マンネンタケ、はたけシメジなど、いろんなキノコで効果がみられること[13]、浸水刺激など別の刺激との組み合わせで、さらに大きな効果が得られることなども、明らかになっている。

3. 高電圧による発芽制御

電磁界と植物の発芽・成長との関係は、古くから調べられており、書籍などで紹介されている[32]。電気刺激に対する植物の反応は、1) 電流の方向と無関係に植物固有の運動をする傾電性、2) 電流に対して一定方向に屈曲が起こる屈電性や、3) 電界や荷電粒子により発芽時期や生育速度が変わるなどがある[1]。一例として、図6に、水を含ませた脱脂綿上のカイワレ大根(アブラナ科)種子に、

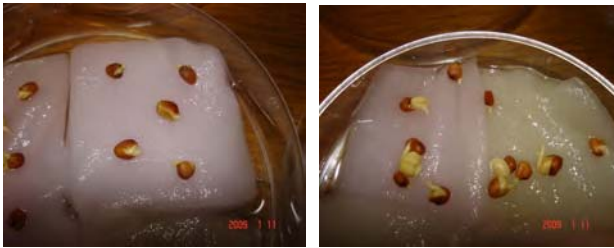


図6 電気刺激の有無によるカイワレ大根の発芽の比較（左：電圧印加なし，右：あり）

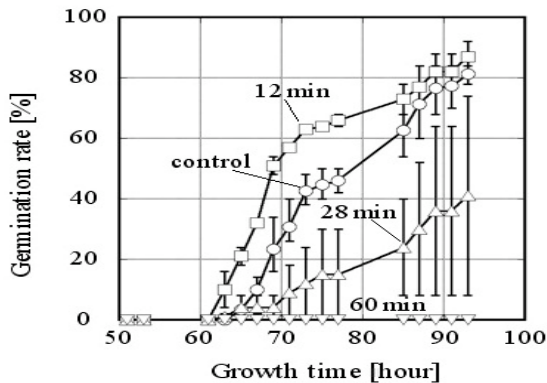


図7 パルス放電処理時間を変化させたときの栽培時間と発芽率の関係[33]

数秒程度放電印加による刺激を行い，1日放置した後の発芽の様子を，刺激なしのものと比較したものを示す．電気刺激により，発芽が早まっている様子が写真からもわかる．図7に，シロイヌナズナ（アブラナ科）種子に対するパルス放電印加による発芽率の変化を示す[33]．電極間隔を2mmとして5kVで充電したケーブルで放電を生成し，空気雰囲気中の湿潤状態で12, 28, 60分処理したときの栽培時間と発芽率の関係になる．ここでcontrolは放電処理をしていない未処理の種子を示している．75時間の結果を見ると，controlに比べて放電時間12分の発芽率は高く，放電時間28分の発芽率は低くなっている．また，放電時間60分では種子が発芽することはなかった．このことから，植物種子に放電を適度な時間曝露すれば発芽は促進され，放電を過度な時間曝露すれば発芽は抑制されることがわかる．これらの効果は，グラジオラスなど，多くの種類での報告がある[34]．メカニズムについては，雰囲気ガスを変えると効果に大きな開きが出ることから，放電で生じた硝酸イオン（NO₂⁻, NO₃⁻）などが発芽を促進すると考えられている[1, 32, 35]．

4. プラズマを用いた成長促進・減肥効果

植物の成長促進への高電圧・パルスパワーの利用は，大気環境への高電圧印加，土壌や液肥などの培地への高電圧印加に分けられる．高電圧の作用として，培地や大気環境中の病原菌や成長阻害菌の不活性化や，植物そのものに作用して成長速度を変えるものがある．成長阻害菌や植物に作用するものも，電界や電流，高電圧によって生じたイオン（O₂⁻, NO₂⁻, NO₃⁻など）や化学的活性な粒子（OH, O, N, O₃, H₂O₂など）などがある[1]．

植物が伸びている環境に高電圧を印加すると，植物の先端などにコロナ放電が発生し，電流が流れる．これらは電流の大きさによって，植物の成長に異なる影響を与える．一般に，10 μA以上では植物体および葉の破壊が起こる．10 nA～1 μAでは，イオンによる乾燥等の影響で，葉の障害や生育の抑制などの負の効果が表れる．10⁻¹⁵ A～1 nAでは，成長促進や青果物の収量増加などの正の効果が表れ，10⁻¹⁶ A以下では効果は表れない[35]．日本でも，澁澤らによって1920年頃，トウモロコシ，ソバ，えんどう，小麦，ごぼう，大豆，ネギ，大根などに，21 kVの交流電圧を，植物の先端から25cm離して，1日4時間程度印加して，1～8割程度の増収を報告している[2]．電気栽培に関する様々な試みがなされ，適度な電界で成長が促進されることなどが報告されている．白らは，トマトの成長点付近に，+18 kVの直流高電圧を印加し，イオン濃度を14×10⁶ cm⁻³とすることで，比較区の収量49 kgに対して，139.4 kgと，285%の増収となることを報告している[36]．

液肥や土壌などの培地にプラズマを印加することで，イオン（O₂⁻, NO₂⁻, NO₃⁻など）や化学的活性種（OH, O, N, O₃, H₂O₂など）が発生し，培地に入りこむ．これらの一部は，植物の生育を促進または抑制する働きを有する．一例として，コマツナの栽培で散布する水（蒸留水）にパルス高電圧で，毎日30分ほど放電を発生させ，コマツナの生育を比較したものを，図8に示す．栽培期間は，45日になる．栽培はポットでの赤玉土壌で，肥料は鶏糞である．図より，水中放電により，生育が促進されていることがわかる．乾燥重量の比較では，比較区の0.146 gに対して，0.934 gと6.4倍の収量増加になっている．放電で水中に発生するイオンは，NO₂⁻で0.68 ppm，NO₃⁻で7.17 ppmであった．



図8 液中放電の有無によるコマツナの生育の比較 (左：比較区，中央：バブリングのみ，右：バブリング+放電)

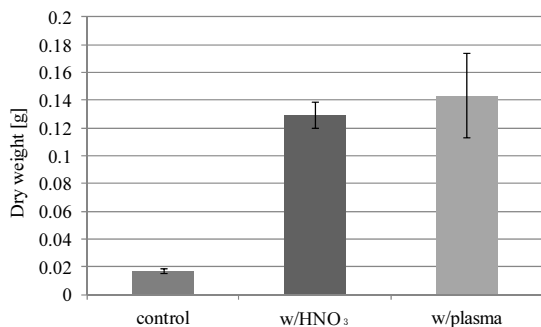


図9 液中放電の有無および硝酸添加によるコマツナの乾燥重量の比較 (左：比較区，中央：硝酸添加，右：放電)

図9は、硝酸イオンを放電で発生する量と等量の濃度で水に混ぜ込み、プラズマを印加したものと同様に栽培し、収量を乾燥重量で比較したものである。等量の硝酸を混ぜ込むことで成長がおおよそ等しくなっていることから、プラズマで生成された硝酸イオンが成長促進の理由となっていることがわかる。プラズマを印加することで、水中の一般生菌数も、対数値で5.72 CFU/mLから、1.85 CFU/mLと大きく減少した。これは植物の病気のリスクを軽減することにつながる。

5. 高電圧による鮮度保持や成分抽出

青果物や食品を長時間放置すると、腐敗細菌、真菌、酵母など微生物によって、有機物が分解される、腐敗が起こる。このため、青果物や食品の鮮度を長時間にわたり保つためには、腐敗菌の不活性化および殺菌が必要になる。一般的な保存法に、冷蔵・冷凍保存や、凍結乾燥(レトルト処理)、煮沸殺菌、薬剤殺菌、燻製・発酵処理などがある。高電圧を用いた腐敗菌の不活性化や殺菌の場合、一般には、パルス高電界により、腐食菌の細胞膜に穴をあける(電気穿孔法)などを利用する。例えば、果汁など液状食品では、数十 kV/cm の電界

を、パルス幅は数十～数百 μ s のパルス幅で、数 kHz の繰り返し周波数で印加することで、一般生菌数は減少する[37]。これらは、加熱など他の手法との併用で、格段に殺菌効果が高まることなども報告されている(ハードル効果)[38]。

食品加工時のみではなく、一般生鮮食品の冷蔵保存時でも、交流電場による鮮度保持技術が用いられている。図10は、いちごの保存状態を交流電場の有無で比較したものになる。保存温度は、電場なしを5 $^{\circ}$ Cで、電場有りを9 $^{\circ}$ Cと、電場なしより温度としては不利な状況での試験とした。実験には、あらかじめ交流50Hz、10kV出力のトランスを組んでいる市販品の保存庫(氷感庫；(株)フィールテクノロジー)を用いている。図より、電場なしのいちごは、5日後よりカビが発生し、写真のように10日後だと、かなりカビが広がっている。比較して、交流電場ありの保存のいちごでは、カビの発生は確認できない。詳しいメカニズムは、まだ明らかにされていないが、電界分布の計算や、イオン計測、寒天培地を用いた計測などで、メカニズムの解明が進められている。

パルス電圧は、食品加工時の果汁抽出効率の改善や、抽出時の成分制御にも利用される[27-30, 39, 40]。一例として、ワイン醸造過程を模擬してブドウ表皮にパルス電界をかけた場合のポリフェノール抽出量の変化を図11に示す。印加電圧は10, 20kVであり、電極間隔は1cm、ブドウ品種は山梨県産の巨峰である[30]。総投入エネルギーを5kJ一定として、パルス幅を変化させた。パルスの繰り返しは20pps(pulses per second)としている。いずれの印加電圧においても、ポリフェノールの



図10 交流電場の有無によるいちごの保存状態の差異

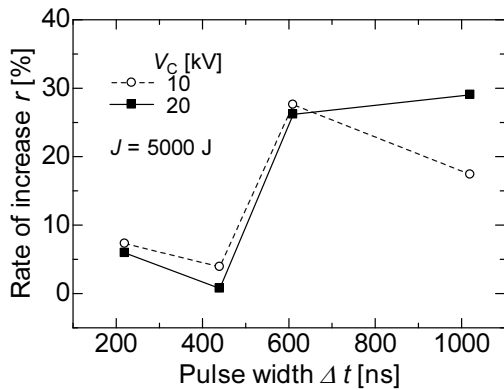


図 11 パルス幅とブドウ表皮からのポリフェノール抽出量の増加率との関係

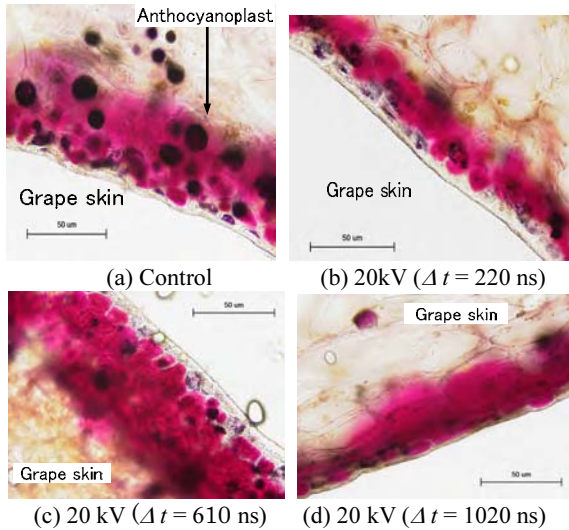


図 12 印加電圧のパルス幅とブドウ表皮細胞の状態変化の様子

抽出量は増加しており、同じエネルギーの場合、パルス幅を増加させることで抽出量を増やせることがわかる。図 12 に、各パルス幅におけるブドウ表皮の細胞内写真を示す。電圧印加で細胞内のポリフェノールを含む色素が外へ流出し、その割合はパルス幅の増加に対して増えていることが確認できる。メカニズムは電気穿孔が主となる[30]。

6. おわりに

農業・食品加工分野への高電圧放電の利用として、植物の発芽・成長への直接刺激による制御、植物の生育を取り巻く環境制御による生育改善、また得られた農作物の食品加工の観点からまとめた。各応用とも、多くの研究報告がなされており、また近年の半導体素子技術の進歩から、電源もコンパクトになり、適用事例も増えている。データは蓄積されているが、バイオメカニズムに対する

パルス電界の関わりについては、不明な点が多い。今後、分野を超えた連携により、メカニズムの解明が望まれる。

参考文献

- [1] 重光司, 電界・空気イオン・放電の植物影響, プラズマ・核融合学会誌, **75-6** (1999) 659.
- [2] 澁澤元治他, 植物の生長に対する電氣の影響に関する研究, **47** (1927) 1259.
- [3] Zimmermann, U, Electric Field-Mediated Fusion and Related Electrical Phenomena, *Biochimica et Biophysica Acta*, **64** (1982) 227.
- [4] 静電気学会編, 静電気学会ハンドブック, オーム社 (1998)
- [5] Wang, G. et al., The effect of high-voltage electrostatic field (HVEF) on aged rice (*Oryza sativa L.*) seeds vigor and lipid peroxidation of seedlings, *J. Electrostatics*, **67** (2009) 759.
- [6] Eing, C. et al., Effects of nanosecond pulsed electric field exposure on *arabidopsis thaliana*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16-5** (2009) 1322.
- [7] 金子周平他, シイタケほだ木の電氣刺激に関する研究, 福岡県林業試験場時報, **335** (1987)
- [8] 實淵喜康他, シイタケ栽培技術の改良に関する研究 (電氣刺激のキノコ栽培への応用, 九州電力総合研究所研究報告, **87004** (1987)
- [9] 出井利長他, 電氣等の刺激によるシイタケ子実体の発生, 宇都宮大学農学部演習林報告, **24** (1988) 23.
- [10] 塚本俊介他, きのこと栽培へのパルス高電圧の利用, **79-1** (2003) 39.
- [11] Ohga, S. et al., Utilization of Pulsed Power to Stimulate Fructification of Edible Mushrooms, *Mushroom Sci.*, **16** (2004) 343.
- [12] Ohga, S., Iida, S., Effect of Electric Impulse on *Sporocarp Eormation of Ectomycorrhizal Fungus Laccaria Laccata* in Japanese Red Pine Plantation, *J. For. Res.*, **6** (2001) 37.
- [13] Takaki, K. et al., Effect of Pulsed High-Voltage Stimulation on *Pholiota Nameko* Mushroom Yield, *Acta Physica Polonica A*, **115-6** (2009) 1062.
- [14] Takaki, K. et al., Effects of Pulse Voltage Stimulation on Fruit Body Formation in *Lentimula*

- Edodes* Cultivation, *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.*, **4-2** (2010) 109.
- [15] 工藤行蔵他, *Lentinus edodes* に与える交流定電圧の作用, *静電気学会誌*, **23-4** (1999) 186.
- [16] 高木浩一, パルスパワー・プラズマの農業・食品分野への応用, *電学論 A*, **130-10** (2010) 963.
- [17] 大嶋孝之他, 高電圧パルス処理による水中および土壌中の線虫不活性化, *静電気学会誌*, **30-5** (2006) 236.
- [18] 水上幸治他, 養液栽培における植物有害菌の大気圧コロナ放電処理, *電学論 A*, **126-7** (2006) 688.
- [19] Ebihara, K. et al., Development of agricultural soil sterilization using ozone generated by high frequency dielectric barrier discharge, *J. Adv. Oxid. Technol.*, **9-2** (2006) 170.
- [20] Law, S.E., Agricultural electrostatic spray application: a review of significant research and development during the 20th century, *J. Electrostatics*, **25** (2001) 25.
- [21] 植村邦彦, 交流電界処理による食品の殺菌とその効果, *静電気学会誌*, **31-2** (2007) 57.
- [22] Liang, Z. et al., Inactivation of spoilage microorganisms in apple cider using continuous flow pulsed electric field, *LWT*, **39** (2006) 350.
- [23] Min, S. et al., Pulsed electric fields: processing system, microbial and enzyme inhibition, and shelf life extension of foods, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **35-1** (2007) 59.
- [24] 笹川秋彦, 食品工業, 光琳 (2007)
- [25] Mosqueda-Melgar, J. et al., Non-thermal pasteurization of fruit juices by combining high-intensity pulsed electric fields with natural antimicrobials, *Innovative Food Sci. Eng. Technol.*, **9** (2008) 328.
- [26] Heinz, V. et al., Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric field treatment, *Innovative Food Sci. Eng. Technol.*, **4** (2003) 167.
- [27] Praporscic, I. et al., Pulsed electric field enhanced expression and juice quality of white grapes, *Separation and Purification Technol.*, **52** (2007) 520.
- [28] Corrales, M. et al., Extraction of anthocyanins from grape by-products assisted by ultrasonic, high hydrostatic pressure or pulsed electric field: A comparison, *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, **9** (2008) 85.
- [29] Lopez, N. et al., Effects of pulsed electric fields on the extraction of phenolic compounds during the fermentation of must of Tempranillo grapes, *Innovative Food Sci. Emerging Technol.*, **9** (2008) 477.
- [30] 畑山仁他, ナノ秒パルス高電界が農産物に与える効果—高電界印加後のブドウ表皮の細胞形態と漏出ポリフェノール総量—, *農業機械学会誌*, **73-2** (2011) 135.
- [31] 特産情報きのこ年鑑編集部, きのこ年鑑〈2010年度版〉, プランツワールド (2010)
- [32] 岩本睦夫編著, 生物・環境産業のための非熱プロセス辞典, サイエンスフォーラム (1997)
- [33] 神子沢隆志他, 極性反転パルス放電の高速繰り返し曝露による植物種子の不活性化, *電気学会パルスパワー研究会資料*, PPT-09-31, (2009) 53.
- [34] 高木浩一他, パルスパワー技術の農業・食品分野への応用, *電学論 A*, **129-7** (2009) 439.
- [35] Murr, L.E., Plant Growth Response in an Electrokinetic Field, *Nature*, **207** (1969) 1177.
- [36] 白希堯他, 静電界・イオンによる農作物の成長促進効果に関する実験, *静電気学会誌*, **8-5** (1984) 339.
- [37] Min, S. et al., Pulsed electric fields: processing system, microbial and enzyme inhibition, and shelf life extension of foods, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **35-1** (2007) 59.
- [38] 清水潮, 食品微生物 I 基礎編; 食品微生物の科学, 幸書房 (2005)
- [39] Sack, M. et al., Electric measurement of the electroporation efficiency of mash from wine grapes, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **16-5** (2009) 1329.
- [40] 斎藤司他, パルス電界を利用した大豆食品生産における加工時間短縮化の研究, *電学論 A*, **129-3** (2009) 155.

プラズマ医療：熱流体からバイオ・医療までを融合する新領域

Plasma Medicine: A New Interdisciplinary Field Integrating from Thermofluid to Bio Medical Engineering

佐藤 岳彦 (東北大学)

Takehiko SATO (Tohoku University)

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

1. はじめに

近年、プラズマを利用した新しい滅菌法や治療法、材料の生体適合性向上の研究開発が進められている。また、プラズマのバイオ・医療分野への応用について国際的な討論の場を設けるために2007年に第1回プラズマ医療国際会議(ICPM)が開催され、2009年にプラズマ医療国際学会(ISPM)が設立された。ICPMの第1回における発表は59件であったが、第4回では227件と大きく増加している。参加者は、工学から医学まで幅広い分野からなり、新しい異分野融合領域として、「プラズマ医療」への関心は急速に高まっている。

2. 大気圧プラズマ流

2.1 特徴

大気圧プラズマが注目されているのは、大気圧下で低温かつ簡便に熱、化学的活性種、荷電粒子、光、電界、衝撃波などを生成できることによる[1]。また、多種多様な作動ガスの利用が可能であり、滅菌容器内や水中などにおいても生成が可能など、適用範囲が非常に広いことも大きな魅力である。さらに、プラズマ下流域において、生成した熱や化学種を利用することができる大気圧プラズマ流は、実用化の上で大きな利点を有している[2]。

2.2 プラズマ流の発生法

大気圧プラズマの発生法には、主に直流(DC)放電、交流(AC)・パルス放電、高周波(RF)放電、マイクロ波放電が利用されている[1,3]。印加電圧の形状や電圧・周波数、電極間の絶縁物の有無、電極形状(針-平板や平行平板など)、ガスの種類や圧力などの放電条件を最適化することで、コロナ放電、火花放電、グロー放電、アーク放電などに放電形態を制御することができる。特に大気圧における、誘電体バリア放電(DBD)は、コロナ放電から火花放電への移行を制限できるため温度上昇が抑えられること、放電ガスの種類や電極形状

の制約が少ないことからよく利用されている。さらに、DBDの原理を利用して、対象物を対向電極として直接放電させる手法は生成したイオンや活性種を有効に利用できる利点がある。一方、放電で生成した化学種を流れて輸送して利用する手法は、プラズマ生成法を自由に選択できること、電気回路がプラズマ生成部で閉じているので直接放電する手法に比べ安全であることなどの利点がある。

その他のプラズマ発生法については、低圧下で酸素や水蒸気など大気圧では放電しにくいガスを利用しRF放電やマイクロ波放電を発生させる方法は、大容積で均一なプラズマを生成できる利点がある。水中におけるプラズマ発生方法は、水中の電極に高電圧を印加してストリーマ放電を発生させる方法や水中に気泡を導入し気泡内で放電をさせる方法などを挙げることができるが、水の状態や放電形態に大きく依存する。水面と電極との間にプラズマを生成する方法は、水面を誘電体バリアとして利用する方法や、電解質を用いて電極として利用する方法がある。気相中に生成した化学種を効率よく溶解させることができる利点を有する。

3. プラズマ滅菌

3.1 既存の滅菌法

古来、微生物を死滅させる方法は生活に直結する重要な問題であり、食塩による食品保存や煮沸消毒は身近な手法であった。滅菌とはすべての微生物を死滅させることを指すが、医療現場において要求される水準は、滅菌後の微生物汚染の水準を 10^{-6} としている[4]。これは、100万個の器具のうち一つ滅菌できていない器具がある状態、もしくは100万個の細菌が1個まで減少している状態と考えて良い。微生物を殺滅する度合いが低くなると、殺菌、消毒、静菌、抗菌などの言葉を程度に応じて使い分ける[5]。

医療分野の滅菌法[4]には、高圧水蒸気滅菌、酸化エチレンガス滅菌、過酸化水素ガスプラズマ滅菌、濾過滅菌、乾熱滅菌、放射線滅菌、電子線滅菌などがある。その他にも、殺菌法[6]として、高圧殺菌、オゾン殺菌、天然抗菌剤による殺菌、超高温短時間殺菌、紫外線殺菌、マイクロ波加熱殺菌などが挙げられる。また、身近なものとしてアルコール消毒などの化学薬品を用いる湿式手法が使われている。

高圧水蒸気滅菌法は、有毒な化学物質を利用せず安全であるが、121℃、2気圧もしくは135℃、3気圧の条件に曝されるため、ポリマーなどの耐熱性の低い材料が使われている医療機器は滅菌できない。酸化エチレンガス滅菌法は、低温で滅菌できる利点はあるが、被滅菌物への残留ガスによるアレルギーや長時間のエアレーションが必要であること、有毒ガスの大気排出問題、可燃性を有するため不活性ガスとの併用が必要であることなどの問題があり、代替低温滅菌法の開発が望まれている。酸化エチレンガス滅菌の代替滅菌法として開発された過酸化水素ガスプラズマ滅菌法[4,7]は、高濃度過酸化水素を利用するため危険性が指摘されていることや装置が複雑で高価であるという問題を有している。また、これらの滅菌装置では、近年社会問題化しているプリオンへの対応や現在でもその不活化が難しいエンドトキシンなどへの対応が困難である。

3.2 細菌の死滅機構

従来の滅菌手法である、加熱、化学反応、加圧、紫外線等による死滅機構は、タンパク質や生体構造の変性、生体膜の損傷や酵素の不活化、DNAなどの核酸の損傷などによることが知られている[6]。

例えば、加熱法は、熱により細菌のタンパク質を変性し殺滅させる方法であり、高圧蒸気滅菌、乾熱滅菌、超高温短時間殺菌法（UHT 殺菌）、マイクロ波加熱法などが該当する。高圧蒸気滅菌の特徴は水を介在させることでより低温で滅菌が可能なことであり、例えば卵蛋白（アルブミン）の凝固温度は、湿度が高いほど凝固温度が低下し、湿度 0%で 160～170℃であるのに対し、50%では 56℃とタンパク質変性効果をより低温で実現できる[4]。

化学反応法は、酸化エチレンガスへの暴露や、

気液中のオゾンへの暴露などが該当する。酸化エチレンガス法は、酸化エチレンが細胞質のタンパク質や核酸酵素分子の末端基（アミノ基、カルボキシル基、水酸基、スルホン基）に対して、強い反応性を有しヒドロキシメチル化するため、不活性化する。滅菌効果は化学反応促進因子である、濃度、温度、湿度、時間の影響を受ける[4]。オゾンによる殺菌作用は、その酸化作用による溶菌と考えられ、主として、リン脂質中の長鎖不飽和脂肪酸の分解などによる細胞壁や細胞膜の損傷が挙げられる。これに伴う、細胞膜透過率の変化による細胞内成分の変化、RNA やリボソームの分解、DNA の損傷、酵素の不活性化なども報告されている。但し、オゾン殺菌はグラム陽性菌や耐熱性芽胞菌に対して効果が低く、高濃度長時間の処理が必要となる[6,8]。

加圧法であるが、数十 MPa の高圧下で、リボソームの減少、細胞膜の細胞質への陥入、分裂や増殖の阻害、鞭毛の消失、タンパク質合成の誘導や翻訳の阻害、酵素活性の変化が起こることが報告されている。こうした変化の多くは可逆的であるが、数百 MPa 程度の高圧下で数分～数時間処理されることで、タンパク質の変性が起こるなど、不可逆的な変化となり微生物は死滅する[6]。

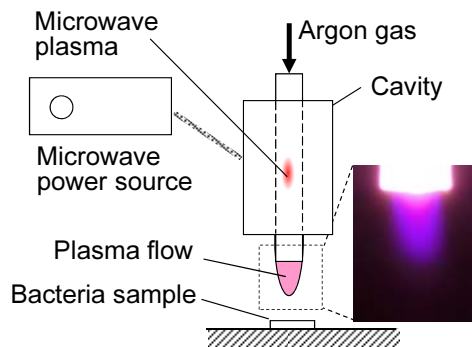
3.3 プラズマ滅菌の歴史

プラズマは、1857年にジーメンス型オゾン管[8]が開発されオゾン殺菌法に応用されている。また、1936年には紫外線殺菌法が開発されている。オゾンも紫外線もプラズマにより生成される。このようにプラズマ殺菌は既に半世紀以上の歴史を有し、世界中で現在でも幅広く利用されている。このようにプラズマは微生物の殺滅には適した手法であり、用途に応じて適切にプラズマを生成制御することができれば、次世代の殺菌装置に替わる可能性を秘めている。

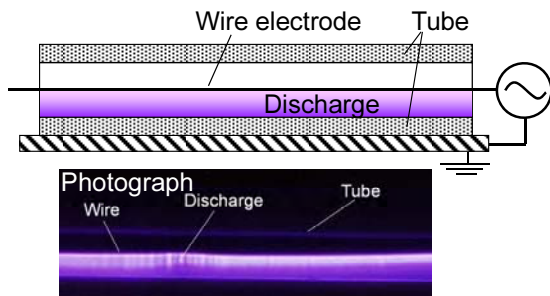
近年のプラズマ滅菌は、プラズマが生成する反応性化学種を利用する方法が主として研究されている。その研究分野は、物理、工学、材料、バイオ・医療、食品・農業と他の研究では見られないほど広範で、異分野が融合する学際領域である。プラズマ滅菌に関する研究は、1972年、1974年に水中放電による微生物の殺菌に関する研究が報告され、その後1983年にマイクロ波による細菌の芽胞の不活化についての報告がある。米国で酸化エ

チレンガス排出規制が取り上げられた 1998 年頃から多くなり、2006 年から急速に増え始めるなど、本格的に始まってから 10 年程度の分野である。米国、日本、中国、フランス、ドイツ、韓国をはじめ世界中で偏り無く研究が進められている[9]。

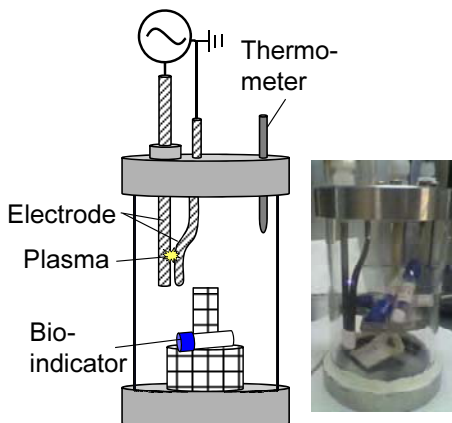
研究されているプラズマ発生法は、マイクロ波、高周波、交流・パルス、直流いずれも利用されている。また、プラズマ生成雰囲気は、大気圧、低圧、水中のいずれにおいても、プラズマ生成用の



(a) Microwave argon plasma flow



(b) Dielectric barrier discharge in tube



(c) Arc-like discharge in vessel

図 1 当研究室で開発した滅菌装置。(a) マイクロ波アルゴンプラズマ流、(b) 細管内誘電体バリア放電、(c) アーク状放電。

作動ガスの種類は、空気、酸素、窒素、アルゴン、ヘリウム、水蒸気、過酸化水素である。一般に、大気圧下で空気、酸素、窒素、水蒸気を用いる場合は、交流・パルスによりコロナ放電を、マイクロ波や高周波を利用する場合はアルゴンやヘリウムを主ガスとし酸素や窒素、水蒸気をわずかに混合することで滅菌効果を高めている。低圧下では、高周波放電による酸素や水蒸気を主ガスとしたグロー放電による大容量のプラズマ生成が可能であり、実用化の研究が一番進められている。

3.4 プラズマ流を利用した滅菌装置の開発

今までに様々なプラズマ殺菌・滅菌装置が開発されているが、筆者の研究室において開発したプラズマ殺菌・滅菌装置を紹介する。

3.4.1 大気圧マイクロ波アルゴンプラズマ流

図 1 (a) に大気圧マイクロ波アルゴンプラズマ流による殺菌装置を示す。本装置は、同軸ケーブルで 2.45 GHz のマイクロ波をキャビティ内に導入し、キャビティ内の石英管内にアルゴン

Sterilization Conditions	Time			
	10 min	20 min	30 min	40 min
Ar14L/min(383K) AH=1-5 mg/L	--	/	/	/
Ar14L/min(383K) AH=6-20 mg/L	-----+	-----	-----	-----
Ar14L/min(383K) AH=25 mg/L- 32mg/L	-----++	-----++	-----	-----
Ar14L/minO ₂ 0.5L/min (383K)AH=6-20 mg/L	+	+	-	-
Ar3L/min(383K) AH=6-20 mg/L	-	-	-	-

(a) Microwave argon plasma flow

	Time					
	8	10	12	13	14	15
1	/	/	/	/	/	/
2	+++	++-	---	---	---	---
3	/	/	/	/	/	/
4	++-	+-	---	---	---	---
5	/	/	/	/	/	/
6	+++	---	---	---	---	---
8	+++	---	---	---	---	---
10	++-	---	---	---	---	---
15	+-	---	---	---	---	---

(b) Dielectric barrier discharge in tube

Discharge time (min)	0	5	10	15	20
Sterilization results	+++	+-	---	---	---

(c) Arc-like discharge in vessel

図 2 滅菌結果。(a) マイクロ波アルゴンプラズマ流、(b) 細管内誘電体バリア放電、(c) アーク状放電。滅菌対象は *G. stearotherophilus* の芽胞である。(ー) は 10⁻⁵ で滅菌可。(+) は 10⁻⁵ のレベルで滅菌不可を表わしている。

ラズマを発生させ大気中に噴出させる装置（アドラックプラズマテクノロジー製）である。作動ガスをアルゴンとしているため、オゾンや二酸化窒素などの副生成物の発生を抑えることができる。また、ガス流量を制御することで、低温で被殺菌物を照射することが可能である[10-13]。

3.4.2 誘電体バリア放電による細管内プラズマ流

図1(b)に細管内プラズマ滅菌装置を示す。本装置は、内径3 mmの塩化ビニル製の細管内にポリアミドで絶縁被覆した0.2 mm径の銅ワイヤ電極を挿入し、塩化ビニル管を平板接地電極の上に置いて、銅ワイヤ電極に高電圧を印加しプラズマを細管内に発生させる装置である。細管内にはワイヤ電極から下に向けカーテン状にプラズマが形成される。この時、細管内には滅菌因子となる高濃度のオゾンや窒素酸化物が生成される[14,15]。

3.4.3 金属電極間のアーク状のプラズマ流

図1(c)に金属電極間のアーク状プラズマ流を利用したプラズマ滅菌装置を示す。本装置は、実用化を目指し、より大きな空間において滅菌を行うための装置である。容器の内径は70 mmで高さは120 mmである。電極はステンレススチールを利用している。電極間に誘電体バリアが無いため、放電はアーク放電に速やかに移行し、比較的湿度の高い放電が形成される。この時、容器内を空気で満たしておく、二酸化窒素が大量に発生し、滅菌ガスとして作用する。

3.5 滅菌結果

本節では滅菌結果を示すが、滅菌検証にはバイオインジケータ（3M Healthcare, Attest 1291）を用いている。これは、一定数の芽胞菌を付着させた紙片を容器内に入れ、この芽胞菌の数が5桁数減少すれば陰性(-)で、減少していない場合は陽性(+)で表されるため、簡便に滅菌の有無を検出できる。病院でも滅菌確認用に利用されている方法である。なお、(-), (+)は1つのサンプルに対応する。

3.5.1 大気圧マイクロ波アルゴンプラズマ流

図2(a)に、大気圧マイクロ波アルゴンプラズマジェットによる滅菌結果を示す。照射温度が383 Kの時、乾燥している場合は10分の照射時間で、湿潤の場合でも30分以上で滅菌が可能であることを示している。また、353 Kにおいても乾燥している場合は、30分程度での滅菌が可能である

ことが得られたが、323 Kでは滅菌効果が得られなかった。一方、加熱アルゴンガスでは、383 Kにおいても滅菌効果は十分に得られなかった。また、アルゴンプラズマ光のみの照射によっても滅菌効果が得られなかった。これらの結果より、アルゴンガスを用いた場合は、353 K以上でプラズマによる細菌の殺滅作用があることが明らかになった。この作用は、アルゴンガスが空気中に噴出する際に酸素や窒素とのエネルギー交換を通して生成される活性酸素や窒素酸化物が原因であると考えられる[11]。

3.5.2 誘電体バリア放電による細管内プラズマ流

図2(b)に正弦波の電圧を印加した場合の滅菌結果を示す。空欄の条件では実験を行っていない。14 kV_{pp}および15 kV_{pp}ではプラズマ照射時間1分以内で滅菌可能であり、極めて滅菌効果が高いことが示された。一方、印加電圧8 kV_{pp}では15分の処理を施しても滅菌出来ないサンプルが見られた。10 kV_{pp}では照射時間5分で滅菌が完了しているが、この時の細管内壁の温度は70℃以下であり、低温滅菌装置としての要件を備えている。また、放電電力も13 Wと低く抑えることが可能である。

作動ガスの種類が滅菌特性に及ぼす影響は、空気、酸素、窒素、アルゴンを比較すると、空気を用いた場合のみ顕著な滅菌効果が確認され、その他の気体を用いた場合は十分な滅菌効果が確認されなかった。これは、芽細胞に効果的に作用する因子が、窒素酸化物であることを意味している。酸素のみを用いた場合に滅菌効果が確認されない理由は、放電が起こりにくいため、十分な酸素ラジカルが生成されなかったことが考えられる。

滅菌特性への流量の影響については、空気の流量を0.2 l/minおよび1.0 l/minとした場合、チューブ内の流速はそれぞれ0.4 m/sおよび2.0 m/sに相

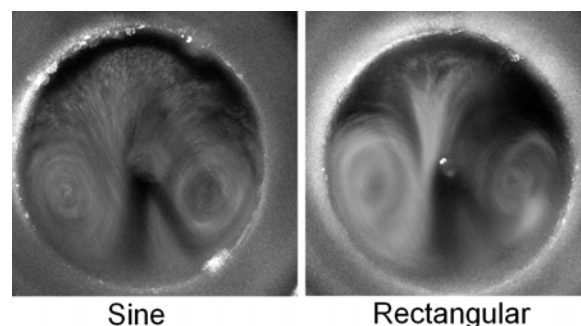


図3 細管内誘電体バリア放電により誘起された、管断面流動場の可視化写真。管内径は3 mmである。

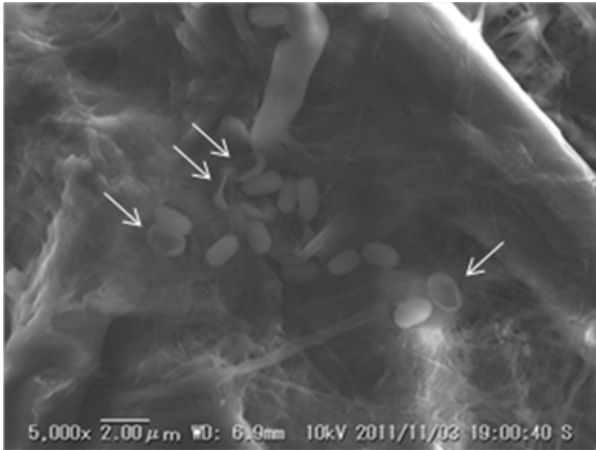


図4 アーク状放電を利用して滅菌した後の *G. stearothermophilus* 芽胞菌の SEM 画像。

当するが、いずれの場合も 15 分以内に滅菌が完了しなかった。これは、放電により発生したラジカルなどの活性物質が下流へ輸送されてしまうために、管壁付近にある滅菌対象へ十分に作用しなかったと考えられる。

これらの結果より、プラズマにより生成された化学種が滅菌因子となっていることが明らかであるが、これらの化学種は図3に示すようにプラズマが誘起する双子渦状の流れにより管内全体に輸送されていることも明らかにした。なお、左図は正弦波の電圧を印加した場合、右図は矩形波の電圧を印加した場合であり、矩形波を印加した場合の方が同じ印加電圧では、より速度が速く滅菌効果も高い[14,15]。

3.5.3 金属電極間のアーク状のプラズマ流

図2(c)に金属電極間のアーク状プラズマ流を利用したプラズマ滅菌装置による滅菌結果を示す。本装置は、アーク状放電が発生するため比較的プラズマの温度が高くなり、二酸化窒素ガスを高濃度で発生させることが可能なため、空気放電により10分間で滅菌が完了できる。この時、滅菌容器内の温度は15分間の放電において57.7℃であり、60℃以下で滅菌が可能である。放電後の容器内におけるNO+NO₂濃度は、放電時間に比例し10分間の放電で20,000 ppmと高濃度になることが明らかになった。一方、15,000 ppmの二酸化窒素ガス入りアルゴンガスに暴露すると、5分間で滅菌できることから、二酸化窒素ガスが滅菌因子であると考えられる。また、図4に滅菌後の芽胞菌のSEM画像を示すが、矢印で示した芽胞菌の芽胞殻

が大きく損傷を受けている。これは、プラズマにより生成された窒素化合物や反応性化学種と反応したためと考えられる。

3.6 プラズマ滅菌装置のまとめ

これらの結果より、大気圧空気を利用したプラズマ滅菌は70℃以下で10分程度の暴露で滅菌できることから実用化への高いポテンシャルを有していると考えている。実用化における問題点は、生成した二酸化窒素などの副生成物を無害化して排出する方法であり、いかに小型で簡便に無害化するかが実用化し普及する上で重要な鍵を握っている。

4. プラズマ医療

4.1 概要

大気圧低温プラズマ流は、低温にも関わらず化学反応性を有するため、医療分野でも幅広く研究が進められている。医療分野では非接触で治療ができるという特徴を生かし、止血や生体凝固などで既に実用化されている。例えば、Argon Plasma Coagulation (APC)[16,17]と呼ばれる止血装置は、1994年に内視鏡と組み合わせる[18]ことで適用範囲が飛躍的に拡大し、消化管の止血、食道腫瘍に対する凝固手術、鼻アレルギーに対する治療などに利用され、現在では世界中に広く普及している。また、体内でプラズマを発生させ、生体組織の切断に利用する装置も開発されている。

近年では、皮膚病の治療に応用する研究が進められている。特に、慢性創傷をプラズマで治療する臨床試験が、ドイツで進められている[19,20]。開口部が広く、より広い面積を治療するためのマイクロ波アルゴンプラズマ発生装置が用いられている。治癒の因子は、プラズマが生成する紫外線や化学的活性種などによる殺菌作用や成長促進作用によると考えられている。

しかしながら、プラズマ流がどのような影響を生体に与えるのかについては、十分に解明されていない。これは、プラズマ流が生成する刺激が多岐にわたるためであり、プラズマの因子と生体の関係を明らかにしていくことが、今後のプラズマ医療の発展において重要な課題である。

4.2 気液プラズマ流の解析

プラズマ医療においては、治療対象である人体に照射する場合は、生体を覆う液体が存在することから、大気圧プラズマ流と液体との相互作用に

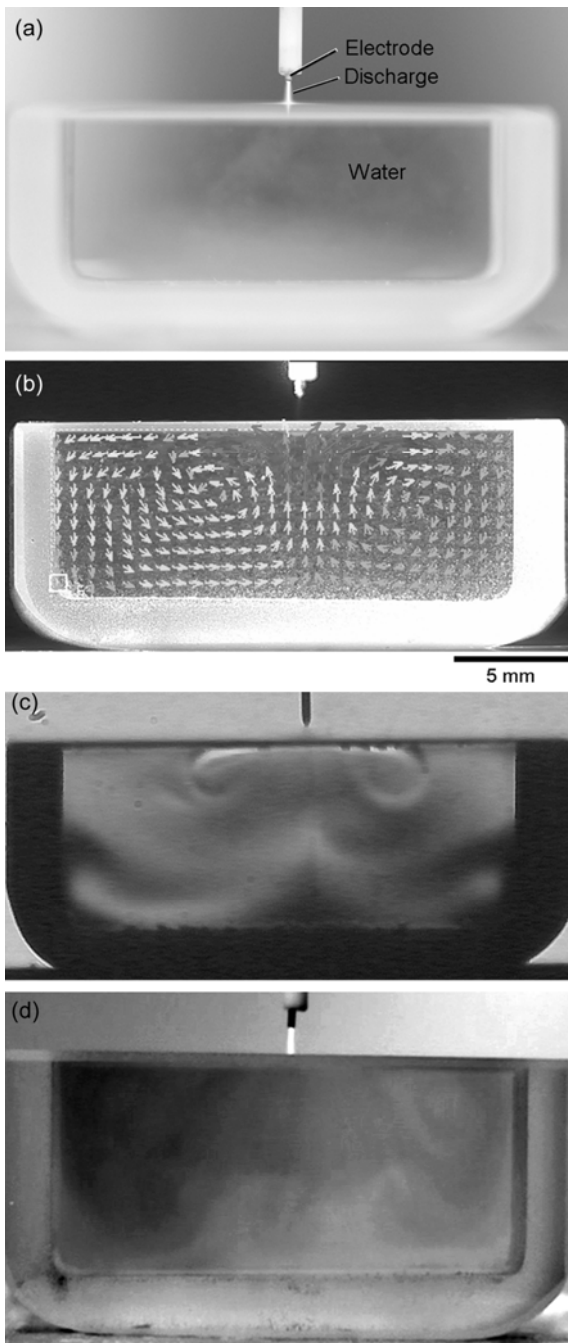


図5 気液プラズマ流の熱流動場と化学輸送現象. (a) 水面上に設置した針電極と水面の間にプラズマ流が形成されている様子, (b) 水中に誘起された流動場の速度ベクトル分布, (c) シュリーレン法による可視化画像, (d) 水の酸性化の様子. 濃いほど pH が低い.

ついて理解する必要がある. 特に, プラズマが生成する化学的反応種がどのように細胞に輸送され

るのかはプラズマ医療の基盤となる知見である. しかしながら, 液体, 気体, プラズマが物理的・化学的に相互に深く関わる複雑な系であるため, 未だ十分に解明されていない. そこで, 大気圧空气中での気液界面における放電について, 熱流動場や反応場の解析を通し, 化学種の輸送機構について検証した.

図5に水面上に生成したプラズマ流による水中の熱流動場と酸性化している様子を示す[21,22]. (a)はプラズマが水面上に形成されている様子である. 針電極に高電圧を印加すると, ストリーマ放電が形成され, 電極先端部から水面に向かう 15 m/s 程度の流れが形成される. この流れが水面上で広がることで, 水面が気流との摩擦により外側に向かって流れ始め, 最終的に放電位置を中心とした循環流れが形成される. 速度ベクトル分布を (b)に, シュリーレン写真を(c)に示す. 流動場と温度場は同じ傾向を示している. (d)は, メチルレッド試薬がプラズマ照射により変色し酸性化している様子である. 変色の過程は, 流動場の形成過程と傾向が一致するため, 気相中で形成された窒素酸化物が水面から溶解し, 主として水中に形成された流れにより輸送され広がっていると考えられる.

4.3 プラズマ流による細胞応答

気液プラズマ流の解析や過去の研究より, 生成された化学種は短い時間で安定した化学種に変化することが知られている. 図6に示すように空气中で放電を発生させた場合は, 水中に溶解する安定化学種として, H_2O_2 , HNO_3 , HNO_2 等が報告されているため, どの化学種が細胞の不活化に重要な役割を担っているのかを検証した. ここでは, H_2O_2 の役割について説明する.

図7に通常培地 (Control), プラズマ処理培地, 過酸化水素添加培地に暴露した時の, 異なる暴露時間に対する吸光度の変化を示す. 吸光度は細胞数と読み替えて良い. 暴露時間は 10, 30, 60, 120 min とした. プラズマ処理培地と過酸化水素添加培地では, 暴露時間が長くなると共に吸光度は生存している減少し, 120 min では細胞は死滅することが明らかになった. また, プラズマ処理培地と過酸化水素培地では, 概ね同じ傾向を示すことが示された[23]. しかし, 過酸化水素分解酵素であるカタラーゼを添加した場合, コントロールとプラズマ処理培地, 過酸化水素添加培地の条件間

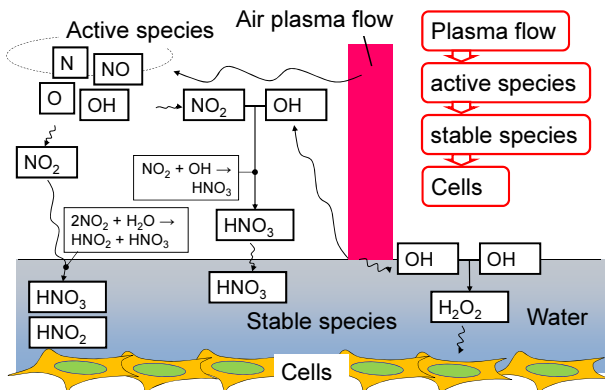


図 6 気液プラズマ流による化学種の生成輸送の模式図.

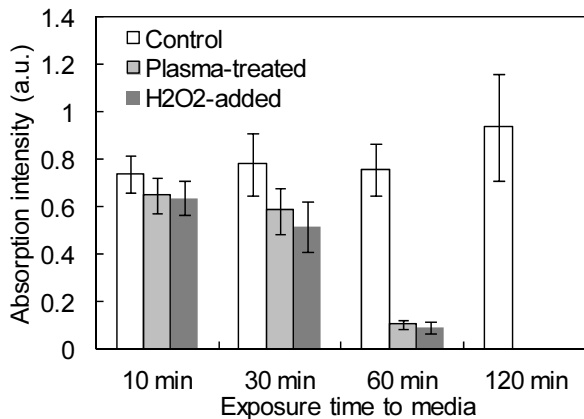


図 7 通常、プラズマ処理、過酸化水素添加の各培地への暴露時間に対する細胞生存率.

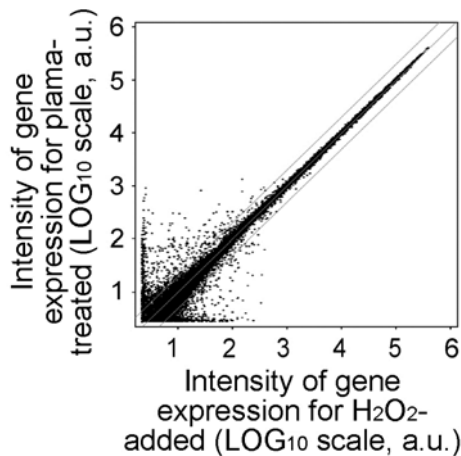


図 8 網羅的遺伝子解析によるスクアッタープロット. 過酸化水素添加培地とプラズマ処理培地の比較.

で、ほとんど違いは得られなかった[23].

図 8 にプラズマ処理培地と過酸化水素添加培地に対する遺伝子発現強度のスクアッタープロットを示す. これは、網羅的遺伝子発現解析 (Whole Human Genome Microarray Kit, Agilent Technologies) により得られた結果をまとめたものである. この解析は、異なる暴露条件の細胞群を比較することで、ヒト遺伝子の発現の全体的な変化を把握することが可能である. 図より、発現強度が高い領域で、全ての遺伝子発現が対角線上に位置していることから、プラズマ処理培地と過酸化水素添加培地への暴露に対する細胞の遺伝子発現応答が一致していることが示された.

これらの結果は、プラズマ流が生成する安定化学種において、過酸化水素が主たる細胞毒性を発現する因子になっていることを示している.

5. まとめ

本稿では、新しい融合領域である「プラズマ医療」について、その概要と筆者の研究グループの取り組みを紹介した. 今後、プラズマ医療が発展するためには、その基礎的な学理を固めることのみならず、副生成物の問題の解決による実用化促進を加速する必要がある. 世界的にも注目されている分野であり、本分野の確立を目指して研究を進めたい.

最後にプラズマのバイオ・医療への応用について、感じていることに触れたい. 大気圧プラズマを利用した滅菌法の開発に取り組み始めて 10 年目、細胞への干渉機構についての研究も 4 年目を迎える. 研究を進めるほど、そのあまりに複雑で精緻な生命の躍動的な営みに感動を覚えている. プラズマ流を軸足として研究してきた身にとって、太古より稲妻として自然界に存在したプラズマは、生命と何らかのつながりがあるように思えてならない. プラズマと生命のつながりの糸口を見つめることができれば、と期待に胸を高鳴らせて研究に精進する日々である.

謝辞

共同研究者である静岡大学宮原高志教授、マックスプランク地球圏外物理研究所 Gregor Morfill 教授、清水鉄司博士研究員、信州大学城倉浩平准教授、トーヨーエイテック (株) 中谷達行博士、

(株) アドテックプラズマテクノロジー浦山卓也氏, (株) 平山製作所五十嵐敬氏, 東北大学横山茉代氏を始め, 実験を担当した学生の辻田章子さん(旧姓土井), 古屋修君, 落合史朗君, 古居剛君, 岩渕豊君, 石田将之君, そして実験支援を得た東北大学流体科学研究所片桐一成氏, 中嶋智樹氏に謝意を表す。

参考文献

- [1] 日本学術振興会プラズマ材料科学第 153 委員会編, 大気圧プラズマ, オーム社 (2009).
- [2] 日本機械学会環境工学部門「大気圧プラズマ流による人間環境保全技術に関する研究分科会」編, 同分科会報告書(2009).
- [3] 沖野晃俊 (監修), 大気圧プラズマの技術とプロセス開発, シーエムシー出版(2011).
- [4] 日本医科器械学会 (監修), 医療現場の滅菌, へるす出版 (2000).
- [5] エヌ・ティー・エス, 抗菌・抗カビ剤の検査・評価法と製品設計, エヌ・ティー・エス (1997).
- [6] 高野光男, 横山理雄, 新殺菌工学実用ハンドブック, サイエンスフォーラム(1991).
- [7] 永津雅章, プラズマ・核融合学会誌, 83 (2007), 601.
- [8] オゾン年鑑編修委員会, オゾン年鑑, リアライズ社 (1992).
- [9] 佐藤, 静電気学会誌, 第 33 卷, (2009), 137-141.
- [10] T. Sato, T. Miyahara, A. Doi, S. Ochiai, T. Urayama and T. Nakatani, *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006), 073902.
- [11] T. Sato, K. Fujioka, R. Ramasamy, T. Urayama and S. Fujii, *IEEE Trans. Industry Applications*, **42** (2006), 399.
- [12] T. Miyahara, S. Ochiai and T. Sato, *Europhysics Letters*, **86** (2009), 45001.
- [13] T. Sato, S. Ochiai and T. Urayama, *New Journal of Physics*, **11** (2009), 115018.
- [14] T. Sato, A. Doi, T. Urayama, T. Nakatani and T. Miyahara, *IEEE Trans. Industry Applications*, **43** (2007), 1159.
- [15] T. Sato, O. Furuya, K. Ikeda and T. Nakatani, *Plasma Processes and Polymers*, **5** (2008) 606.
- [16] 小駒益弘 (監修), “大気圧プラズマの生成制御と応用技術,”サイエンス&テクノロジー, (2006) .
- [17] J. Raiser and M. Zenker, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39** (2006), 3520-3523
- [18] G. Farin and K. E. Grund, *Endosc. Surg. Allied Technol.*, **2** (1994), 71-77.
- [19] G. Isbary, G. Morfill, H. U. Schmidt, M. Georgi, K. Ramrath, J. Heinlin, S. Karrer, M. Landthaler, T. Shimizu, B. Steffes, W. Bunk, R. Monetti, J. L. Zimmermann, R. Pompl and W. Stolz, *Brit. J. Dermatol.* **163** (2010), 78.
- [20] J. Heinlin, G. Isbary, W. Stolz, G. Morfill, M. Landthaler, T. Shimizu, B. Steffes, T. Nosenko, J. L. Zimmermann and S. Karrer, *J. Eur., Acad. Dermat. Venere.* **25**, (2010), 1.
- [21] T. Shimizu, Y. Iwafuchi, G. E. Morfill and T. Sato, *New Journal of Physics*, **13** (2011), 053025.
- [22] T. Shimizu, Y. Iwafuchi, G. E. Morfill and T. Sato, *J. Photopolym. Sci. Tech.*, **24** (2011), 421-427.
- [23] Takehiko Sato, Mayo Yokoyama and Kohei Johkura, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (2011), 372001.

ガスハイドレートの超高压物性と太陽系・宇宙における存在の可能性

High Pressure Behaviors of Gas Hydrates and Ubiquitous Presence in the Universe

平井 寿子 (愛媛大学)

Hisako HIRAI (Ehime University)

e-mail: hirai@sci.ehime-u.ac.jp

1. はじめに

ガスハイドレートでよく知られたハイドレートにはメタン、水素及び二酸化炭素ハイドレートがある。メタンハイドレートは燃える氷として次世代のエネルギー資源として注目される(図1)一方、メタンは二酸化炭素より高い温室効果を持つことから、地球温暖化物質となる危険性も備えている[1]。実際、メタンハイドレートは地球46億年の歴史のなかで、劇的な環境変動(たとえば、太古代の全地球凍結(仮説)からの回復、生物の大量絶滅をもたらした古生代と中生代境界の温暖化の加速、氷期-間氷期変動のトリガーなど)に関与したことが最近明らかにされつつある。水素ハイドレートは水素結合物質の代表として物質科学的興味ばかりでなく、主要構成成分として惑星科学的にも、水素貯蔵媒体として水素利用技術においても注目される物質である。また、二酸化炭素ハイドレートは大気中に増加しつつある二酸化炭素の海底固定媒体として注目されている。これらのハイドレートに関しては基礎研究から資源掘削技術、利用技術開発など多岐に渡る実用的研究が行われていることは周知の通りである。地球の外に目を向けると、これらのガスハイドレートが氷惑星・氷衛星の主要な構成成分となっていることが探査機のプローブや分光学的測定から示されて、惑星科学的な重要性が増してきている。従って、ガスハイドレートの広範な条件下での相変化や物性を解明することは、現代の地球環境問題やエネルギー資源問題に寄与する課題であるとともに、太陽系惑星・衛星の進化の理解のために重要な課題である。

宇宙におけるガスハイドレートの存在の可能性というと奇異に聞こえるかもしれないが、宇宙における元素の存在度をみると、水素がもっとも存在度が高く、ヘリウム、炭素、酸素と続く。これらは氷やガス、またそれらのハイドレートを構成する元素であり、宇宙においては氷やガスハイドレートがメジャーな成分といっても過言ではない。



図1 燃える氷と土星衛星タイタン

地球上では岩石や金属が主成分であり、ガスハイドレートはマイナーな物質と考えられがちであるが、宇宙全体から見ればこれらはメジャーな物質である。本稿では、実用化研究とはいささかかけ離れるが、これらのガスハイドレートの超高压(ギガパスカルオーダー)下での物性を示し、これらの実験結果を基にハイドレートが太陽系や宇宙に存在する可能性を示し、氷惑星や衛星の内部構造の推定に寄与することを紹介する(図1)。

2. ガスハイドレートの高压相変化の概観

ガスハイドレートは低圧では水分子が水素結合

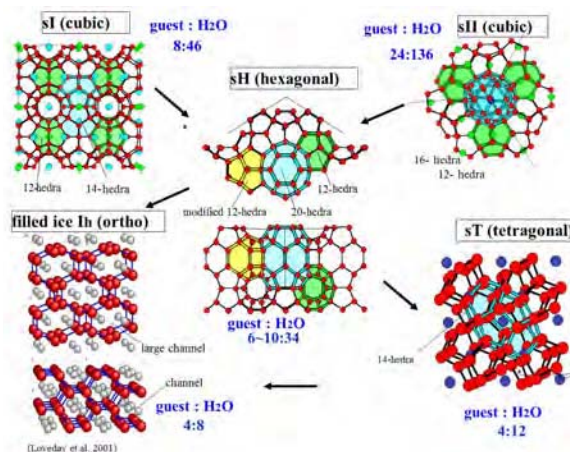


図2 ガスハイドレートの構造変化

したケージを形成し、その中にゲスト分子や原子が内包されたクラスレート構造を取る。ゲスト分子のサイズや圧力により異なる構造が選択される。一般的にはゲストが小さいほうから、構造 I (sI) 構造 II (sII), そして構造 sH が選択され、もっと小さいゲストはケージを2個以上で占めることにより(多重占有) sII をとる。高圧になるとさらに多様な構造が現れる。図2はメタン水素ドレートのような sI が高圧下で sH に変わり、さらに、Filled ice Ih 構造(下記参照)に変わることを、また、窒素水素ドレートのような sII が sH に変わり、sT という別のケージ構造に変わり、最後には、上と同じ filled ice Ih に変化することを示したものである。

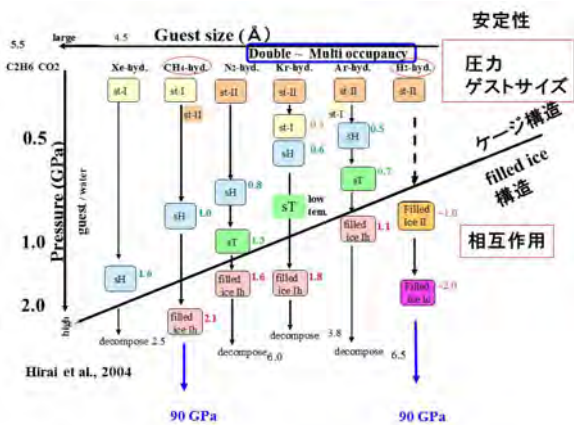


図3 ゲストサイズ-圧力依存の相変化の概観

多くのガス水素ドレート構造変化をゲストサイズと圧力をパラメータとして整理すると図3のようになる [2]。ここ示したゲスト種は疎水性であり、親水性のゲスト分子やCO₂分子のような親水性の酸素原子を含むものは含まれていない。ケージ構造をとっている領域では、ゲストサイズと圧力に依存した構造変化をすることが明瞭に示されている。ケージ構造は高圧下ではfilled ice構造(充填氷)と呼ばれる、氷の多形構造中にゲスト種が満たされたような構造に変化する。メタン水素ドレートの場合、低圧下ではよく知られたsI構造をとり、約1 GPaではsH構造に転移し、約2 GPaではfilled ice Ih構造という充填氷に転移する。そしてこの相は室温下では少なくとも90 GPaという超高圧まで存続する[3, 4]。水素水素ドレートは低温低圧下でsII構造をとり、大ケージに4つの水素分子が、小ケージに1つの水素分子が内包されることが報告された[5, 6]。sIIは低温領域でし

か存在しないが、室温高圧下では充填氷のfilled ice IIおよびfilled Ic構造が存在する。このfilled Ic構造も室温下では少なくとも90GPa以上の高圧まで存続することが示された [7]。他の水素ドレートは、窒素水素ドレートを除き6GPa付近で分解して高圧氷とゲスト種の氷になるが、メタン水素ドレートと水素水素ドレートだけが卓抜した高圧安定性を示す。なぜこの2つの水素ドレートだけが超高圧まで存続できるか、その原因をX線回折によって構造変化を、ラマン分光によってゲストの振動モードの測定することにより検討したので以下に概略を述べる。

3. メタン, 水素, 二酸化炭素 水素ドレートの高圧物性

3.1 メタン水素ドレートの高圧挙動

メタン水素ドレートのFilled ice Ih構造は15-20GPaで、ゲストメタン分子が構造内でそれまで自由回転していたものが方位の秩序化を起こすことが示された。メタン分子はこの圧力以下では構造内で自由回転しているが、氷のフレームワークが圧縮されてくると、メタン分子間距離が自由回転が許されないところまで短くなり、定方位化が生じると考えられる。この定方位化により、メタン分子間及びメタン-水分子間に付加的な引力的相互作用が働き、より安定化すると考えられる。さらに35 - 40 GPa付近で、今度は氷のフレームワークに水素結合の対称化が生じると考えられる。水素結合の対称化とは、圧縮により水分子間の距離が近づいてくると、水素結合をした水素が隣り合う酸素原子の中間地点に達し、もはや水分子という概念がなくなってしまう状態となる。すなわち、水素と酸素が等間隔にイオン結的に結合された状態となり、フレームワークは水素結合の場合より堅固になる。このような状態はゲスト-ホスト間に更なる相互作用を誘発すると考えられる。このように、メタン水素ドレートの際立った高圧安定性は、ゲスト分子の定方位秩序化とフレームワークの水素結合対称化により保障されていると説明することができる。

3.2 水素水素ドレートの高圧挙動

水素水素ドレートには現在3つの相が知られている(図4)。一つはクラスレート構造でsIIである。このsIIでは大ケージに4個の水素分子がクラスターをなして取り込まれている。他の二つの構造はfilled ice構造で、一つが氷IIをホストとし、

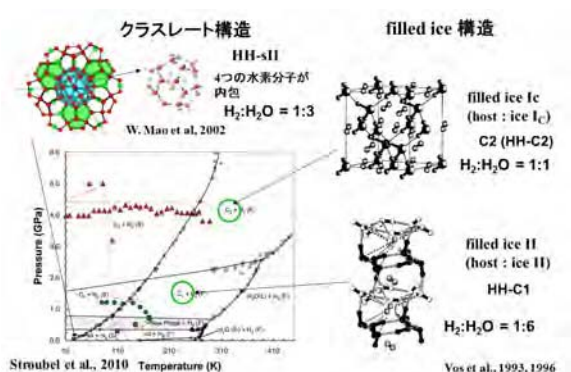


図4 水素ハイドレートの構造

もう一つは氷 I_c をホストとして、それぞれの氷構造の空隙に水素分子が取り込まれた構造を取る。水素ハイドレートの高压安定性もおおむねメタンハイドレートと同様に考えることができる。すなわち、20GPa 付近で一旦水素分子の回転が抑制され、35 - 40GPa でメタンハイドレートと同様に水素結合の対称化が起き、これによるフレームワークの堅固化と誘発された相互作用で高压安定性が図られていると考えられる。

3.3 CO₂ハイドレートの高压挙動

CO₂ハイドレートはメタンハイドレート同様に sI 構造をとるが、他のハイドレートとは異なる性質を示すことが知られている。例えば、ハイドレートとガス+水の相境界線の傾きが正から負に転じ、低温領域でしか存在できない。図1にCO₂ハイドレートを示していないのはこのためである。この特異的な安定領域や物性は、CO₂分子が両端に親水性の酸素原子を持つため、ホスト水分子との相互作用が顕著であるためと考えられる。ガスハイドレートに関しては低温高压領域の相変化や物性についての実験的研究はほとんどなされていなかったが、最近、筆者らの実験によってCO₂ハイドレートの低温高压領域の相変化が明らかにされた。すなわち、sI 構造は低温領域で0.6GPa以上で新たな高压相に転移することがわかった(図5)。この構造は未だ解析されていないが、相互作用を反映したような新たな構造と推測される。さらに、低温下で圧縮していくと、210K付近で格子定数が急に増加し、体積が膨張(1%程度)することが示された。この膨張に伴って構造からH₂O分子が氷I_hとして放出される。このことはケージ占有率が増加することを意味する。ケージ占有率を上げることにより、すなわち密度の高い構造になることにより、低温による圧縮に対して安

定化を図っていると考えられる。高压下においても、ガスハイドレートは共通してH₂O分子を高压氷として放出しながら、ゲスト占有率の高い高密度の構造に変わっていくことを示し、筆者らはこれを高压下安定化メカニズムとして示していた。CO₂ハイドレートの低温実験により、低温下でも同様のメカニズムが働くことが明らかとなった[8]。

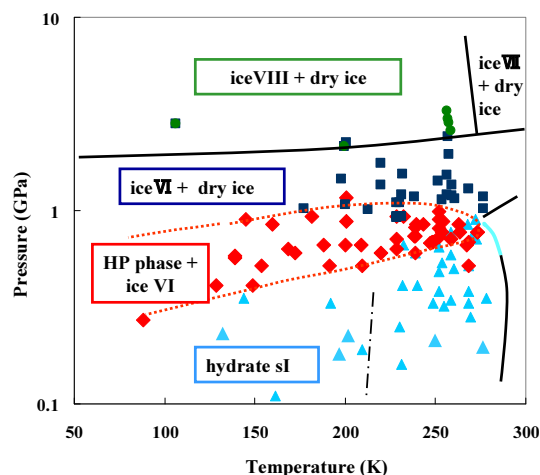


図5 CO₂ハイドレートの相変化

4. 宇宙における存在の可能性

以上述べたように、高压実験によってメタンハイドレートや水素ハイドレートは広い温度圧力条件で、また、CO₂ハイドレートも特異的な環境下で安定に存在することが示された。最後に、これらの実験結果を基に、また、最近の探査機や理論計算の結果も含めて、これらのガスハイドレートの太陽系や宇宙での存在の可能性を述べる。土星最大の衛星であるタイタンは唯一大気を持つ衛星として知られている。この大気は大量のメタンを含むことがわかっており、そのため生命の存在の可能性も議論されている。メタンは紫外線で光分解するため、内部に何らかの供給源がなければ衛星形成後消滅してしまうはずである。また、メタンハイドレートは1GPa以上の高压で存続できない、つまりタイタンの内部では存在できないだろうという前提があり、従来の衛星の形成史では、現在のメタンの存在量を説明することができず謎であった。タイタンの中心圧力は4-6 GPaであるが、高压実験の結果から、タイタンの氷マントル中にメタンがfilled ice I_h構造として貯蔵され、それがメタン大気の供給源となっていることが提案された(図6)。実際、2004年に探査機ホイヘンス

が着陸し、氷マントルからの供給通路と考えられる低温火山も発見された。このほか、土星衛星エンケラダスでは大量の炭化水素の放出が観測されており、内部にはメタンハイドレートなどの炭化水素ハイドレートが存在すると予測されている（図6）。また、よく知られたハレー彗星などの彗星もメタンハイドレートが内部に存在すると報告されている。

CO₂ハイドレートは火星の永久凍土の下に存在すると推測されている。地球のお隣の惑星である火星はかつて温暖な時代があり、大量の水やCO₂が存在していたと推定されている。地球より小さく、太陽より少し遠かったため冷却が早く進み、水やCO₂が永久凍土の下に氷やCO₂ハイドレートとしてとどめられていると推定されてきたが、実験的にも存在領域は内部条件に合致している。

宇宙においては水素や氷が最も多量に存在することは前に述べたとおりである。水素ハイドレートの sII 構造は低温下で安定に存在するが、近年 IR 吸収スペクトルの類似性から、この水素ハイドレートが恒星の形成初期、すなわちプロトスター（太陽などの誕生の場）に存在する可能性が報告された（図 6）。水素がそれだけで凝縮するためには 3K という低温でなければならず、原始星になる前の分子雲では 30K という“高温”に耐える水素の担体が必要である。水素ハイドレート sII は一旦生成すると大気圧以下でも 150K まで安定に存在できプロトスターが生成する過程では重要な構成物質となっている可能性がある。恒星形成の初期に存在するとなれば、宇宙において水素ハイドレートは広範に存在することになる。また、sII だけでなく充填氷の合成条件は、氷小天体内部の条件にも匹敵するため、これらの小天体の構成成分となっていることが推測される。また、近年太陽系外で、多くの系外惑星の発見が相次いでいる。これらの構成成分は主に氷や水素であるため、水素ハイドレートは宇宙に広範囲に存在していると推定されている。

以上述べてきたように、ガスハイドレートの高温高圧、低温高圧実験によって、ガスハイドレートの新たな物性が明らかになってきており、これらの実験データや理論計算によって氷惑星や衛星の内部構造や形成史が解き明かされつつある。

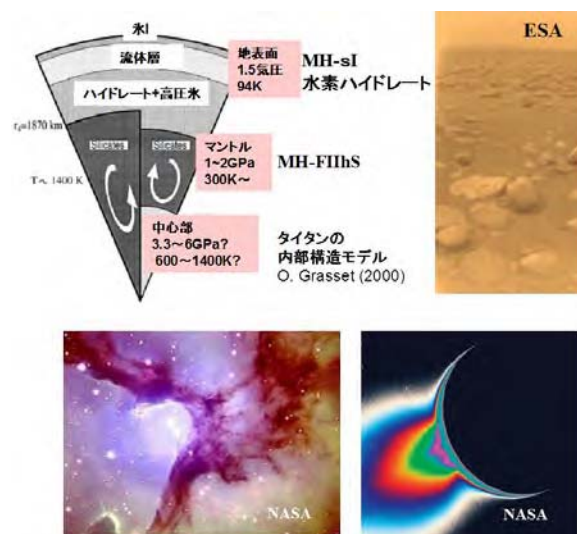


図 6 タイタンにおける内部構造モデル（上左）と表面地形（上右）プロトスターWL5（下左）エンケラダス（下右）

参考文献

- [1] Sloan, E. D. and Koh, K. A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. 3rd ed (Taylor & Francis London New York 2008)
- [2] Hirai, H. Tanaka, T. Kawamura, T. Yamamoto, Y. and Yagi, T. *J. Phys. Chem. Solid* **65** (2004) 1555.
- [3] Hirai, H. Tanaka, T. Kawamura, T., Yamamoto, Y., and Yagi, T., *Phys. Rev. B* **68** (2003) 172102.
- [4] Machida, S., Hirai, H., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Yagi, T., *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **155** (2006) 170.
- [5] Mao, W. L., Mao, Ho-k., Goncharov, A. F., Struzhkin, V. V., Guo, Q., Hu, J., Shu, J., Hemley, R. J., Somayazulu, M. and Zhao, Y., *Science* **297** (2002) 2247.
- [6] Lokshin, K. A. Zhao, Y. He, D. Mao, W. L. Mao, Ho-K., Hemley, R. J., Lobanov, M. V. and Greenblatt, M. *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 125503.
- [7] Hirai, H., Machida, S., Kawamura, T., Yamamoto, Y., and Yagi, T. *Amer. Mineralogist* **91** (2006) 826.
- [8] Hirai, H., Komatsu, K., Honda, M., Kawamura, T., Yamamoto, Y., Yagi, T., *J Chem. Phys.* **133** (2010) 124511.

環境や運動に対するヒトの適応能

Thermal Regulation and Exercise

河端 隆志 (関西大学)

Takashi KAWABATA (Kansai University)

takakaw@kansai-u.ac.jp

1. はじめに

ここでは、ヒトを中心とした生体に対する運動・トレーニングや自然環境の影響を生理学の観点からみた運動・環境生理学について考えてみます。

われわれは「動く」という宿命故にその存在があります。地球という重力の下、人類は直立二足歩行の獲得とそのための構造設計の変更を繰り返してきました。また、生体はさまざまに変化する環境の中にありながら、からだにとって重要な機能（例えば体温、体液の浸透圧など）をほぼ一定レベルに維持する（恒常性、ホメオスタシス）ことにより、環境の変化に対処して生きているといえます。特に長期に及ぶ環境の変化に対する生体の適応は環境によって変化させられたホメオスタシスといえるでしょう。昔の人々は経験的に環境とうまく折り合いをつけて生活を営んできたようです。一方、日常生活の場面では、過酷な環境下での身体活動時のからだの制御あるいは生活習慣による影響と置き換えて考えると判りやすいでしょう。運動・環境生理学の目的は特に適応メカニズムの解明、それにより健康のための諸条件を明らかにさせることといえます。つまり、「からだは合目的適応能を有している」という全機性を理解することです。運動や環境の変化に良い塩梅にからだは適応してくれています。この塩加減のメカニズムを知ることは、言い換えると効果的なトレーニングを行うことができると言えるでしょう。

2. 日本人の生活感

この絵は、久隈守景作『夕顔棚納涼図屏風』です。夏の夕暮れに瓢箪棚の下で家族が夕涼みをしている情景が描かれています。裕福な家庭とはみうけられませんが、なんとも幸せそうな家族愛のひとつが醸しだされています。私の愛する絵のひとつです。この絵をよく観ますと面白いことが

見受けられます。瓢箪棚は家の南側にあります。つまり、夏の強い日差しから、自然の日陰を作っています。これは環境温度の上昇を抑えていることになり、今でいうところのエコロジカルな生活といえるでしょう。



図1 久隈守景作『夕顔棚納涼図屏風』

私たち日本人は、四季折々の環境の変化に様々な工夫を施し「涼」を愉しめる生活を営んできました。

さて、「夏」と「冬」どちらが凌ぎ易い季節なのでしょうか。

彼の兼行法師は、「徒然草」の一説で「家の作りやうは夏を旨とすべし 冬はいかなる所にもすまる 暑き比わろき住居は たへがたきことなり」と、このように謳っています。どうも、夏の暑さは生活を営む上で耐え難いものといえます。実際、環境生理学を学んでいる人はすぐに解るのですが、暑熱環境ではヒトが生きていくことはとても困難なことといえます。

2.1 日本の暑熱環境

日本の気候を月別平均値で見ると、日最高気温は大阪の8月の33.0℃、日最低気温は帯広の1月

の -13.9°C です。気温の最高・最低記録は、熊谷および多治見の 40.9°C （2007年8月16日）および旭川での -41.0°C （1902年1月25日）が記録されています。また、日最高気温の月平均値の平年値をみると近畿から九州にかけての西日本の地域が上位を占めるが、最高気温については、関東・中部・東北南部の内陸が占める傾向にあります[1]。特に暑熱環境下の運動は、様々なストレスが生体の恒常性維持に影響を及ぼし、生体の適応能力を超えたストレスがかかると、パフォーマンスの低下のみならず、熱射病、熱虚脱、熱疲労、熱痙攣などの障害が生じます[2]。

それでは、ヒトのからだについて考えてみます。

3. 健康やスポーツ現場に役立つ運動・環境生理学という学問領域

まず学問分野としての生理学について考えてみます。生理学とは、生体にみることのできる現象を研究することにより、その意義、発現機序を究明することにより生体機能の法則性を定量化しようとする学問です。特に運動や環境との相互関係に着目して、生体機能とそのメカニズムを研究する生理学の分野を運動生理学(Exercise Physiology)あるいは環境生理学(Environmental Physiology)といいます。スポーツ選手や指導者あるいは人間と携わる仕事に就くものにとってはとても重要な知識のひとつといえます。

われわれのからだは、自動的調節機能により、絶えず環境の変化や運動の強度に対して生体機能を定常状態に維持することができます。この定常状態が保たれなくなることは、運動継続が困難になることといえます。また、スポーツ場面では、過酷な環境条件でのパフォーマンスを維持・改善するためにトレーニングと称して特異的なストレスを生体に負担させてその効果を求めています。こうした自動的調節機能を明らかにして生体生存の条件を知ることは、加齢に伴う健康なからだを維持するために、さらにはスポーツ選手や指導者にとって安全で効率的なトレーニングを構築していくために重要な知識といえます。

4. 運動・環境生理学の原理

生体が運動や環境条件の変化に対応していくための、生体に備わっている基本的な能力とはどの

ようなものが考えられるでしょうか。それは次に挙げる二つの原理にまとめられます。運動・スポーツ場面やトレーニングを思い浮かべながら考えてみましょう。

4.1 恒常性

環境ストレス（暑熱、寒冷、高所、水中など）や運動ストレスに暴露されたなかで、生体の定常状態を維持して相互に協調されている生理反応は非常に複雑なものであり、ヒトの生体に特有のものといえます。このように、生体が定常状態にあることを恒常性あるいはホメオスタシス(homeostasis)といいます。そして生体の恒常性を維持するはたらきを恒常性維持反応(homeostatic reaction)といいます。トップ・アスリートなどは運動や環境に対する恒常性維持が優れていると考えてよいでしょう。

4.1.1 生体の内部環境の恒常性と器官機能

生体にはさまざまな器官、組織があり、それらを構成しているのが生体の機能的構造単位である細胞です。器官は単独で機能を営んでいるのではなく、他の組織や器官とともにまとまった系をなして働いています。生体内の系としては次のようなものがあります。(表1)

表1 生体器官の系

1.循環(器)系	2.呼吸(器)系	3.消化(器)系	4.排泄(器)系
5.内分泌系	6.生殖(器)系	7.神経系	8.筋系
9.感覚系	10.骨格系		

以上のうち植物性機能である1から4までの系は、生体が生きていくうえで必要となる基本的条件を維持する機構であり、5と6は種族の保存機構といえます。これに対して、動物特有の機能として7から10までの系の機構を動物性機能と称しています。生体内ではどの系も独立して働くことはできず、自律的に相互に依存し合っており、なおかつ協同して働いて(全機性)はじめて健全な生命活動を営むことができるのです。

生命の機能的構造単位である細胞は、その周囲を細胞外液(Extracellular fluid: ECF, 血漿, 組織液, リンパ液)に浸って必要な物質や情報(神経の興奮の液性伝達もある)を与えられ、さらに代謝や老廃物を運びだして生活しているのです。体内の細胞外液は細胞の働きに必要な条件を与えている細胞の直接的環境であるため、これを生体

の内部環境 (internal environment, Claude Bernard) といい、体外の環境を外部環境 (external environment) として区別しています。つまり、外部環境が変化しても、細胞が正常に生きていくためには内部環境が常に最適な状態に一定に維持されなければなりません。すなわち、内部環境の恒常性 (homeostasis, W.B. Cannon)こそ生存の必要条件であり、生体恒常性を維持する手段として恒常性維持反応 (homeostasis reaction) がはたらいっているのです。スポーツ選手のからだの中では、環境ストレスや運動ストレスに対してより高次の恒常性維持反応がはたらいっていることが理解できると思います。

4.2 生理的適応

生理的適応 (physiological adaptation) は、環境の長期的変化に対応して固体である生体が生存していくために、その機能を変化させて新たなホメオスタシスを獲得していく過程を指します。つまり、生体機能を攪乱させるような環境因子(暑熱, 寒冷, 低酸素など)による刺激(ストレス)が連続的に、あるいは繰り返し作用するようときには、本質的生体機能(体温, 血圧, 血液量, 血中酸素濃度など)を生理的限界内に維持するために、他の生体機能因子の変数を変化させて恒常性を維持しようとしします。これを適応といいます。したがって、生体の適応はさまざまな因子と関連する複雑なものといえるでしょう。また、生理的適応は時間的因子の理解も重要となります。つまり、環境変化の初期段階では、その適応に過大な代償性調節反応を生ずるでしょうが、適応作因の刺激(ストレス)が持続すると、その初期反応は経済的な効率のよい適応性反応となります。夏を前にした梅雨時の発汗作用やスポーツにおけるトレーニングは正にこのことだといえます。

表 2 適応の分類と定義

<p>適 応</p> <p>1. 生理的適応; physiological adaptation</p> <ul style="list-style-type: none"> ・順応 acclimatization 自然の複合環境条件(気象、地理環境など)に対する適応 ・順化 acclimation 単一の環境条件に対する適応 ・馴れ habituation 反復的環境刺激に対する反応、感覚の徐々に弱まる減少 <p>2. 生物的(遺伝的)適応; biological (genetic) adaptation</p> <p>適応能力が先天的に決定されている現象</p>
--

ヒトを含む高等動物の特徴は、幅広い適応作用に対して耐えうることのできる調節性生体 (regulating organism) にあるといえるでしょう。生活を営む上で、われわれは調節性生体として、その生体機能を如何に維持できるかということが重要なこととなります。なお、適応についての分類と定義は表 1 に示すものです。

5. 制限因子としての体温について考える

ヒトが運動を開始し、その運動時間や強度が増していきますと生体は運動停止を余儀なくされます。いわゆる「バテタ」ということです。では、何故にヒトは運動停止をしなくてはならないのでしょうか。それは生体が存続していくための危機管理としての運動抑制の指令といえます。その指令とは何でしょうか。それが運動の制限因子であり、競技力向上あるいは健康の維持・増進といったときにトレーニングの目的となるものです。ヒトの制限因子として「体温」が挙げられます。つまり、体温(中核温)が 42℃以上に上昇していきますと、生体の生存が危ぶまれます。

図 2 はヒトのからだを、呼吸器系—心循環系—骨格筋系と分けて表したものです。

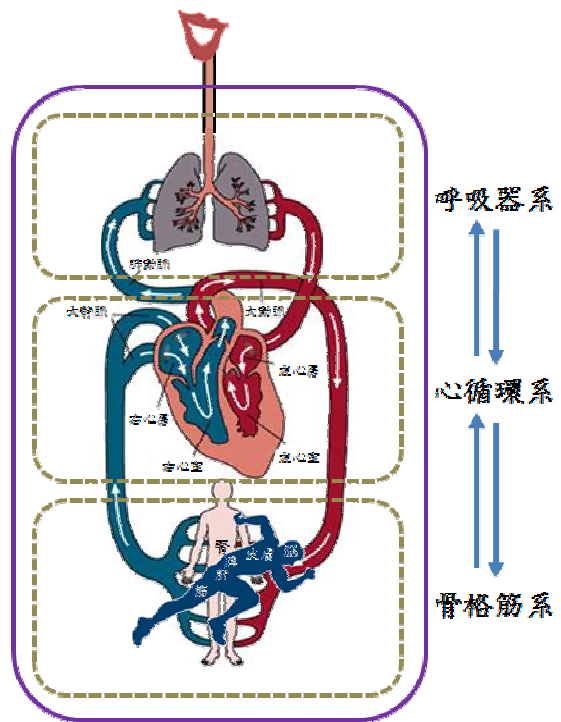


図 2 運動とからだのしくみ

呼吸器系ではガス交換がなされ、新鮮な酸素が血液に取り込まれますね。心循環系では新鮮な酸素を充分に取り込んだ血液（動脈血）が心臓を介して各組織に送りだされます。また、熱を伝えるはたらきもあります。運動場面では、骨格筋が運動継続に必要な酸素を取り込むために運動強度に見合った血流量を要求します。そして、骨格筋の収縮により産生された熱は筋組織の血液に伝わり中枢へと情報が運ばれます。骨格筋系では筋組織への酸素の取り込みが、液層から組織層へとなされます。特に、運動時の体温調節について考えるときには呼吸器系—心循環系—骨格筋系相互の機能的な作用について理解する必要があります。

5.1 ヒトの体温とその調節機構

5.1.1 体温

生体は、その独自性を維持するために、常にエネルギーを消費し、それゆえに自己の衰えを迎えることとなります。このエネルギーは食物として摂取した栄養素を体内で分解することによって産生されるものであり、その分解の際に熱が産生されます。したがって、生体が生きつづけるかぎり、熱は産生され、体内に蓄積されるが、その熱は体の表面や呼吸器を通して絶えず放散されて体温は一定に維持されています。いわゆる体温の熱平衡です。こうした熱平衡の調節は、環境温度の変化に対しても巧みに調節機能が働いています。また、暑熱環境下での運動を行うと骨格筋の収縮に伴う熱産生量が安静時の10倍から20倍にも増加して体温の上昇がみられる。

5.1.2 体熱の放散

熱放散のほとんどは、呼吸器を含む体表面からの放射（輻射）（radiation）、伝導（conduction）、対流（convection）、蒸発（evaporation）および水分の蒸発などの物理的機序によりなされている。

・放射（輻射）

放射は電磁波による熱移動といえます。熱放散（heat dissipation）の場合の波長は赤外線（750-5000nm（可視光線：380-750nm））に及びます。ヒトの皮膚からの放射エネルギーは5000-20000nmであり、この範囲内では皮膚の色（反射：白色30-45%、黒色19%以下）は完全な吸収体といえます。からだと環境の間での放熱による熱交換は、有効体表面積、平均皮膚温度、皮膚・衣服の放射吸収とその放射率、環境平均放射温度に依存しています。

つぎに、屋外での太陽の位置と放射体表面積の関係をみましょう。太陽が地平線上にあるときは立位で体表面積のおよそ25%が直接の放射を受けます。しかし、太陽が頭上にあるときではわずかに4%程度しか放射を受けません。つまり、加温のための体表面積は、朝夕に大きく日中は少ないことがわかります。

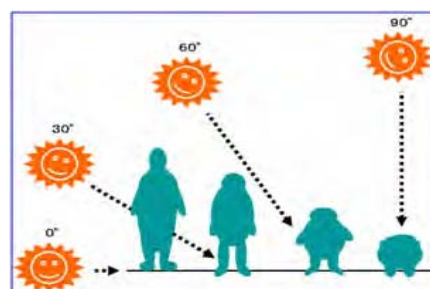


図3 太陽の位置と立位姿勢時の放射体表面積の関係[3]

・伝導

伝導とは直接の物理的接触による熱の移動です。からだの内部では組織から組織への伝導がみられますが、この熱の伝導は体熱の分配や平均化に大変重要です（内部伝導）。また皮膚が外部と直接の物理的接触によって起こるものを外部伝導といいます。暑いときに冷たいものを摂取するとからだの熱が奪われ涼しく感じることができます。

・対流

分子の流れを伴う熱の移動を対流といいます。からだに接する空気に熱が伝導されると、空気は温められ対流が起きます。熱せられた空気は膨張し、密度が小さくなるため熱を伴って上昇します。このときに熱の放散が生じます。

以上の3項目の機序により、熱の移動は環境温度が体温（皮膚温）より低いときに熱の放散となり、逆に体温を上回る環境温の時には、体に熱は吸収されることとなります。

・蒸発

蒸発による熱交換は常に熱放散に働きます。体内の水分は皮膚、口腔、起動粘膜表面から蒸発していきます。水が蒸発するときの気化熱として、水1gにつき0.58kcalが失われます。気道や体表面からの水分の蒸発は気温に関係なく常に起きています。その量は皮膚角質層の拡散によって700ml/day、気道から300ml/dayの水分が1日に失われ、体温維持に働いているのです（不感蒸散；

insensible perspiration). 気温が上昇すると、発汗 (sweating) と気道からの蒸発の増大が起こります。ヒトの全身の皮膚には汗腺が分布しており、高体温になると体温中枢からの刺激により水分の分泌 (発汗) が起こり、この水分 (汗) の蒸発により体熱の放散が起こります。これを有効発汗といいます。

スポーツ場面では、環境温度はもとより太陽の日差し (輻射) も充分に考慮してパフォーマンスの維持を図りたいものです。

5.2 体温調節

ヒトのからだは体熱平衡を保つために、体温調節系が常に営まれています。図4には体温調節のしくみが示されています。この系は 1) 中枢と皮膚における温度受容器, 2) 視床下部における温度情報の比較, 分析, 統合, 3) 制御対象である体温を、熱産生器官 (骨格筋, 内臓器官) あるいは熱放散器官 (皮膚血管, 汗腺) により調節する三つの要素からなる自律反射系であり、負のフィードバック (negative feedback control) 系で調節されています。いわゆる自律性体温調節反応 (autonomic thermoregulatory response) といいます。もうひとつの体温調節反応としては行動性体温調節反応 (behavioral thermoregulatory response) があります。暑いときに日陰を探すことや、冷房の利いたコンビニエンス・ストアに行くことを考えてみてください。

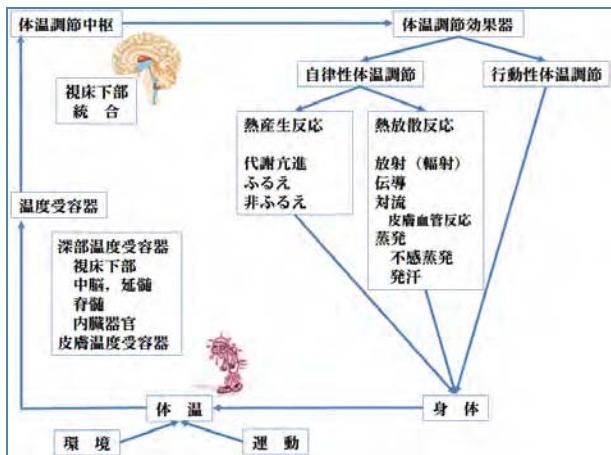


図4 体温調節のしくみ

6. 運動時の循環・体温調節反応

6.1 運動時の血流配分

運動時のヒトの循環系機能には、運動継続に必

要な活動筋への筋血流の維持と活動筋の代謝性産熱の熱放散による体温調節に必要な皮膚血流の維持という役割を考える必要があります。運動強度や仕事量が増加すると、それにとまなう活動筋への酸素運搬のための血流の補給や皮膚血流の維持のために血流量の増加が求められ、心臓はこの要求にこたえるべく心拍出量を増加させるのです。心拍出量は、酸素摂取量の増加との間に正の直線関係がみられ、最大運動時で心拍出量は安静時の4-5倍に、酸素摂取量は安静時の10-15倍にまで増加します。このときの活動筋への血流量は著しく増大し、その値は安静時の20倍にまでも達します。そして、脳を除くその他の臓器では、血液の再分配により血流量の低下を示す。つまり、図5にみられるように、必要に応じた血液の再分配が行われているのです。運動時の心拍出量を維持するためには、循環血流量を維持して心臓への静脈還流量を保つことが重要です。静脈還流量の増加・減少は、一回心拍出量の増加・減少に影響をあたえます。静脈還流量の減少にもっとも影響を及ぼすもののひとつに血流量の減少があります。このことが維持できなくなると有酸素的なレベルでの筋収縮が抑制され、運動を継続することが困難になります。

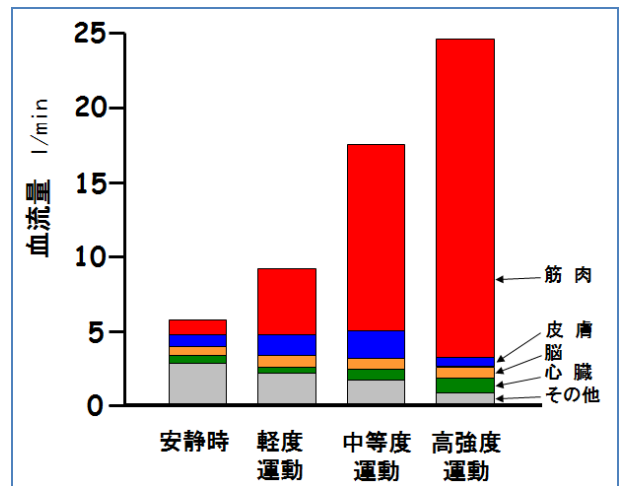


図5 運動時の血流分布[2]

Starling E.H. and Evans L.より筆者改変

6.2 体温調節機構

運動をはじめると、活動筋での代謝量が増加し、これにより体温が上昇します。運動時の活動筋への血流量の増加は、酸素運搬のためのみならず筋

での代謝性産熱を放散し、活動筋の温度を維持もしくは下げるためにも重要な働きをします。血流によって熱が運ばれると、深部体温が上昇し、温熱受容器を介して視床下部の体温調節中枢がはたらき、体温調節の反応が起こります。ヒトにおける体温上昇時の体温調節反応としては発汗および皮膚血流量の増加がみられます。したがって、運動時の環境が特に高温環境であると、活動筋への血流の供給に加えて皮膚への血流の配分が要求され、同程度の運動強度と比較して循環系への負担は大きいものとなります。そして、運動を継続すると深部体温が上昇し、同時に皮膚血流量の増加に伴う血管拡張により末梢循環に血液が貯留し、さらには発汗による体液の喪失が生じてしまいます。生体の調節系では間質液や細胞内液からの水分移動により血液量を維持し、活動筋や皮膚への血液循環の維持を図りますが、これらの調節機能には限界があります。こうした血液量の相対的・絶対的低下は中心静脈環流を低下させ、併せて一回心拍出量をも低下させてしまうことから、活動筋への十分な血液供給がなされなくなることがあり、その場合、運動の継続は困難をきたすことになるわけです。暑熱環境下での激しい運動時には、このような静脈環流量の低下が顕著に見られます。生体内での調節機構を越えて体液を喪失した場合には、単に運動能力が低下するにとどまらず、各種の熱中症が発生する場合があります。したがって、運動時には、生体は循環系だけでなく体液調節系の機構をも働かせているのです。

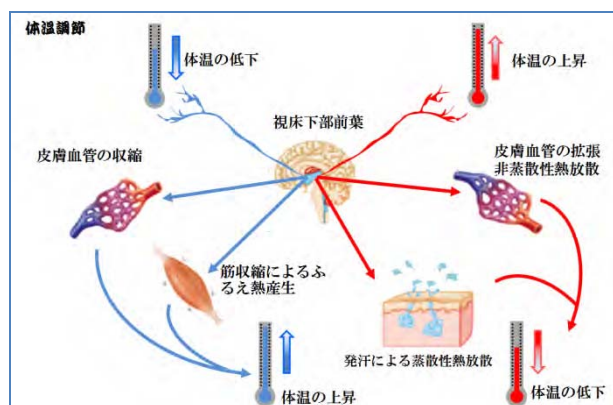


図6 体温調節のしくみ

7. おわりに

ヒートアイランド現象など、都会における夏はとて暑い環境となってきています。こうしたなか、体温調節のしくみを知ることは積極的な生活を営む上でとても役に立つ知識であるといえます。クーラーなどの人工的な環境に頼るだけでなく、「汗をかく生活」とうまく付き合うことも、実は生体にはとても重要なものといえるでしょう。うっとりしい梅雨も、実は次に来る夏に向けての発汗のウォーミング・アップといえます。冒頭の絵にもあるように、いくなれば行動性体温調節のともなう精神的にもリラックスした「涼」を感じ取れる感性を豊かにした生活をわれわれもゆしみたいものです。

謝辞

今回は伝熱学会という初めての研究領域の先生方と話をする機会を頂きました。「熱」というキーワードで、ヒトを対象とした研究領域の話をさせて頂き、私自身も多くの知識を得る機会を頂きました。先生方の御研究の今後益々のご発展とご活躍を祈願いたします。

参考文献

- Guyton, A. G (1992) Human Physiology and Mechanisms of Disease, W. D. Saunders, Philadelphia, London, Toronto.
 中山昭雄 編, 温熱生理学, 理工学社, 東京, (1981).
 岩瀬善彦, 森本武利 編, やさしい生理学, 南江堂, 東京, (1995).
 黒田晨汎, 環境生理学, 理工学社, 東京, (1993).

引用文献

- [1] 理科年表平成 21 年度, 丸善株式会社出版部, 東京, 気象部 (1-16) : 171-186, 2009
 [2] スポーツの百科時典, 田口貞善 編, 丸善株式会社出版部, 東京, 熱中症, 577-586, 2007
 [3] Frisncho, A. R., Human adaptation, Lange Med. Pub., Los Altos, (1969).
 [4] Starling, E. H. and Evans, L., Principles of Human Physiology, Philadelphia, Lea & Febiger, (1968).

第 22 回輸送現象に関する国際シンポジウム

Report on the 22nd International Symposium on Transport Phenomena

堀内 敬介 ((株)日立製作所)

Keisuke HORIUCHI (Hitachi Ltd.)

e-mail: keisuke.horiuchi.ou@hitachi.com

2011年11月8日(火)から11日(金)までの4日間にわたり、オランダのデルフト工科大学(Delft University of Technology, The Netherlands)にて22nd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-22)が開催された。今回の国際シンポジウムの会場都市となったデルフト市は、オランダ南西にあり、玄関口のスキポール空港からは電車で約40-50分、首都アムステルダムからは約1時間の場所に位置する。17世紀の大火事、1842年大学設立後の学生街としての発展、観光都市化の推進にも関わらず、歴史あるゴシックやルネッサンス調の建物が未だに健在している街並みは、まるで絵ハガキを見ているようで必見である(写真1)。オランダの友人によると、歴史的な外観を維持するために、自動車が普及した今でも道はあえて広くせず、その結果、自転車を使用する人々が多いとのこと。たしかに、何度か自転車にぶつかりそうになったのは、現地の自転車事情を予習していかなかったせいかもしれない。この町は、青彩色の「デルフト焼き」で知られる陶器発祥の街、またヨハネス・フェルメールが生涯を過ごし「デルフト眺望」として有名な風景画を残した街であるため、大学関係者だけでなく芸術家が多いことも、この街の特徴の一つである。東京大学の横野先生と立ち寄ったRoyal Delft(デルフト焼の唯一の窯元)は、昼食休憩時間内で見学含め往復可能くらい大学に隣接しているため、正に芸術と工学の世界が体験でき、まるでタイムマシンに乗ったかのように感慨深かった(写真2)。

本学会(ISTP)は、1985年に設立されたPCTFE(Pacific Center of Thermal-Fluids Engineering)が主催する5つの学会の中の1つである。PCTFE主催の他の学会は、ISROMAC(International Symposium on Rotating Machinery), PSFVIP(Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing), ICMMB(International Conference on Mechanics in

Medicine and Biology), ISMNT(International Symposium on Micro and Nanotechnology)である。

本学会は、運営委員やセッションチェアに多くの日本人が携わっているため、比較的日本人が多く参加する国際学会としても有名である。日本人で投稿数規模が決まる様子なので開催場所は数年に1回日本国内に設定される。2012年度はニュージーランド、2013年度は日本(山口県)で開催予定である。普段ゆっくりとお話する機会が持てない先生方と、異国の地で思い出を共有することによって、関係を深めることができるため、単にグローバルな視点での研究成果報告だけでなく、国内外の先生方や企業の方々との人脈形成という意味でも実りのある学会である。発表は勿論英語だが、日本人が話す英語は比較的聞き取りやすいので、国際学会に初めて参加される学生さんには特に勧めである。

さて、4日間にわたる会期のプログラムは、1日目が17時からのRegistrationとReception、2日目が8時30から始まるConference Opening、それに続くKeynote Speech、そしてパラレルに進行する4つのSession、3日目が9時から始まる3つのSession、それに続くKeynote Speechと大学内のLaboratories/Workshop見学および3つのSession、そして18時からのConference Dinner、最終日の4日目は、同じく、9時から始まる3つのSession、そして14時30分からのMusical FinaleおよびConference Closureで構成されていた。2日目のKeynote SpeakerはDirector of the Delft Energy Initiative at Delft University of TechnologyのProf. Hester Bijl、3日目のKeynote SpeakerはHead of Technology Department at Conseil Europeen pour la Recherche NucleaireのDr.Frédéric Bordryであり、全体運営はDelft University of TechnologyのProf. Christos Spitas、東京農工大学名誉教授の望月先生、富山県立大学工学部長の石塚先生によって実施さ

表1 セッション名と発表件数

#	セッション名	セッションチェア(「Prof.」「Dr.」略)	発表件数
A01	Heat and Mass Transfer I	Masaru Ishizuka	6
A02	Experimental/Computational Fluid Dynamics I	Kenichiro Takeishi	6
A03	Electronic Equipment Cooling I	Sadanari Mochizuki	6
A04	Sustainable & Renewable Energy	Kenji YOSHIDA	6
B01	Fuel Cells Technology	Nikolay Vinnichenko	3
B02	Experimental/Computational Fluid Dynamics II	Kenichiro Takeishi	3
B03	Electronic Equipment Cooling II	Sadanari Mochizuki	2
B04	Transport in Porous Media I	Shigeki Hirasawa	3
C01	Heat and Mass Transfer II	Koichi Suzuki	5
C02	Transport Phenomena in Multi-Phase Systems I	I.N.G. Wardana	5
C03	Micro- and Nano-Scale Transport I	Kazuyoshi Nakabe	5
D01	Combustion and Reacting Flows I	Gordon Mallinson	3
D02	Transport in Porous Media II	Nail Khabeev	3
D03	Industrial Aerodynamics & Wind Energy	Jurriaan Gillissen	3
E01	Combustion and Reacting Flows II	Gordon Mallinson	3
E02	Transport Phenomena in Multi-Phase Systems II	Sasa Kenjeres	3
E03	Thermal-Fluids Machinery	Christos Spitas	2
F01	Heat and Mass Transfer III	Peter Kelly-Zion	5
F02	Transport Phenomena in Multi-Phase Systems III	Sasa Kenjeres	5
F03	Micro- and Nano-Scale Transport I	Michel Cervantes	5
G01	Turbulence and Flow Instabilities	Chris Kleijn	5
G02	Manufacturing and Materials Processing	Toshio Tomimura	4
G03	Thermal Hydraulics of Nuclear Reactors	Christophe T'Joen	4
H01	Visualization/Imaging Techniques	Sergey Boronin	5
H02	Heat Exchangers	Tresna Priyana Soemardi	5
H03	Micro- and Nano-Scale Transport II	Luis Velazquez-Araque	5

れた。2日目の Conference Dinner はバスにてロッテルダム港まで移動し、「スピード」遊覧船上で懇親会を開いた。

最終プログラムによると、今回の国際シンポジウムでは、表1に示すように、A01～A04, B01～B04, C01～C03, D01～D03, E01～E03, F01～F03, そして G01～G03 の計26セッションが設けられ、110件の発表があった。いずれのセッションも聴講者数は20～50名程度であった。昨年の台湾でのISTP-21では、直前に発表者のセッション変更などがあったようだが、今年のISTP-22では、予定通り進行していたと思う。セッション毎の発表件数に差が出てしまった点は反省すべきところかもしれない。しかし、制約された時間の中、聴講者のために類似専門分野がパラレルに進行しないよう均等に発表者を配置することは難しい。プログ

ラム作成時のオーガナイザの方々の苦勞が見受けられる。私は発表件数6件のセッション(A03)と発表件数2件のセッション(B03)の両方を聴講したが、どちらもセッションチェアの方が時間通りまとめてくださり、余った時間で聴講者の共通の興味(電子機器冷却)に対して議論していただいたため、今回のプログラム構成は満足している。

このように大規模な国際シンポジウムが大きな問題もなく終了したのも、現地のデルフト工科大学を始め、多くの大学・企業の研究者・技術者の方々の献身的なご努力の賜物であり、改めて感謝申し上げたい。

さて、冒頭で説明したとおり、今回学会が開催されたデルフトの町は、アムステルダムまで僅か約1時間の距離である。私はヨーロッパ出張が初の体験であったため、学会後の休憩時間で、アム



写真1 デルフト市内中央広場



写真2 デルフト焼の窯元 Royal Delft にて



写真3 アムステルダム市内散策の様子
[写真提供：東大 横野先生； 山口東京理科大



写真4 マウリッツハウス王立美術館前にて
鈴木先生，結城先生； 東工大 伏信先生]

ステルダムには一度足を運んで見ようと考えていた。幸いにも、今回電子機器冷却のセッションでお世話になった先生方や学生の方々（富山県立大学の石塚先生，畠山先生，福江さん；山口東京理科大の鈴木先生，結城先生；熊本大学の富村先生；東京工業大学の伏信先生，Doan さん，大石さん；東京農工大学の浦野さん）と意気投合し，アムステルダムにあるゴッホ美術館とデルフトの隣町であるハーグにあるマウリッツハウス王立美術館を巡る「芸術満喫の旅」に合流させていただいた。

（写真3～4）。また，帰りの便のタイミングと宿泊ホテルが同じだった東京工業大学の店橋先生と東京農工大学の岩本先生からは，別途中華街周辺を散策する「社会勉強の旅」のご指導をいただいた。

ゴッホ美術館は，思った以上に多くのギャラリーがあり広がったため，集合時間を決めずに，個

性あふれるメンバが一斉にバラバラになってしまったことを後悔した。一方，マウリッツハウス王立美術館は，17世紀の宮殿を思わせる優雅な雰囲気であり，フェルメール以外にレンブラントやポッテルなど少数だが質の高い巨匠たちの作品に感銘を受けた。現地では，予想以上の寒さと日本人には馴染みのない料理に少しだけ苦戦したが，その苦い思い出も含め，関係者の皆さまと多くの貴重な経験を共有できたことに感謝したい。

次回のISTP-23は，11月19日(月)から23日(金)にわたり，ニュージーランドのThe University of Aucklandで開催される。Organizing CommitteeのChairはProf. Gordon Mallinson, Co-Chairは大阪大学の武石先生が務められる。日本から数多くの方々が参加され，再び会場でお会いできるのを楽しみにしている。

行事カレンダー

本会主催行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年						
11月	13(火) ～ 15(木)	第3回 国際伝熱フォーラム 3rd International Forum on Heat Transfer	事前参加 申込締切 2012.8.31	2012.7.31	〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学 研究系 IFHT2012 実行委員会事務局 宮崎康次 Tel/Fax:093-884-3168 E-mail:miyazaki@mech.kyutech.ac.jp	Vol.50, No.213 2011.10

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年						
7月	5(木) ～6(金)	第4回「イノベーション基盤シミュレーションソフトウェアの研究開発」シンポジウム (開催場所: 東京大学生産技術研究所 コンベンションホール)			東京大学生産技術研究所 革新的シミュレーション研究センター 〒153-0041 東京都目黒区駒場 4-6-1 Tel: 03-5452-6661 Fax: 03-5452-6662 E-mail: office@ciss.iis.u-tokyo.ac.jp URL: http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/riss/	
7月	11(水) ～13(金)	【第12回】2012 熱設計・対策技術シンポジウム (開催場所: 東京ビッグサイト)			社団法人 日本能率協会 ものづくり支援事業ユニット TECHNO-FRONTIER2012 事務局 担当 佐藤・和田・藤澤・安江・米倉・中澤 〒105-8522 東京都港区芝公園 3-1-22 Tel: 03-3434-1410(直通) Fax: 03-3434-3593 E-mail: tech-con@jma.or.jp	
7月	14(土) ～15(日)	日本実験力学学会 2012 年度年次講演会 (開催場所: 豊橋技術科学大学)	2012.3.30	2012.5.25	〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1 豊橋技術科学大学 機械工学系 鈴木新一・足立忠晴 Tel: 0532-44-6678 0532-44-6664 Fax: 0532-44-6661 E-mail: jikken@rm.me.tut.ac.jp	
7月	24(火) ～25(水)	第40回可視化情報シンポジウム (開催場所: 工学院大学 新宿校舎)	2012.3.9	2012.5.18	実行委員会 幹事:東京理科大学 工学部機械工学科 元祐昌廣 〒102-0013 東京都千代田区九段北 1-14-6 Tel: 03-5228-8361 Fax: 03-5213-0977 E-mail: mot@rs.tus.ac.jp	
8月	9(木) ～11(土)	日本混相流学会年次講演会 2012 (開催場所: 東京大学 柏キャンパス)	事前参加 申込締切 2012.7.6	2012.6.4	実行委員事務局 幹事 大宮司 啓文・陳 昱 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 日本混相流学会年次講演会 2012・第31回混相流シンポジウム実行委員会事務局 Tel: 04-7136-4658, 04-7136-4603 Fax: 04-7136-4603 E-mail: nenkai@jsmf.gr.jp	
8月	9(木)	第31回混相流シンポジウム (開催場所: 東京大学 柏キャンパス)	事前参加 申込締切 2012.7.6	2012.6.4	実行委員事務局 幹事 大宮司 啓文・陳 昱 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5 東京大学新領域創成科学研究科人間環境学専攻 日本混相流学会年次講演会 2012・第31回混相流シンポジウム実行委員会事務局 Tel: 04-7136-4658, 04-7136-4603 Fax: 04-7136-4603 E-mail: nenkai@jsmf.gr.jp	
9月	16(日) ～18(火)	日本流体力学学会年次会 2012 (開催場所: 高知大学 朝倉キャンパス)	2012.6.11	2012.7.23	日本流体力学学会年次会 2012 実行委員会 E-mail:nenkai2012@mlsv.kochi-tech.ac.jp	
9月	19(水) ～21(金)	The Twelfth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2012) (開催場所: ホテルメトロポリタン仙台)			東北大学流体科学研究所 AFI/TFI-2012 実行委員会 流体科学研究所研究支援室 増田 Tel: 022-217-5883 Fax: 022-217-5311 E-mail:shien-staff@fmail.ifs.tohoku.ac.jp	
9月	20(木) ～21(金)	No.12-67 講習会『『伝熱工学資料(改定第5版)』の内容を教材にした熱設計の基礎と応用』 (開催場所: 東京大学生産技術研究所 An棟)			日本機械学会熱工学部門 担当職員 大通千晴 Tel: 03-5360-3500	

行事カレンダー

10月	3(水) ～5(金)	第33回日本熱物性シンポジウム (開催場所:大阪市立大学 杉本キャンパス)	事前参加 申込締切 2012.9.7	2012.8.10	〒599-8531 大阪府堺市千中区学園町 1-1 大阪府立大学大学院工学研究科機械工学分野 環境工学研究室 木下進一 Tel/ Fax: 072-254-9231 E-mail: jstp2012@me.osakafu-u.ac.jp URL: http://www.jstp2012.me.osakafu-u.ac.jp
10月	4(木) ～5(金)	可視化情報全国講演会(姫路 2012) (開催場所:姫路商工会議所)	2012.6.25	2012.7.30	実行委員幹事 伊藤和宏 兵庫県立大学 大学院工学研究科 〒671-2280 兵庫県姫路市書写 2167 Tel: 079-266-1661 (代表) Fax: 079-267-4830 (代表) E-mail: kashika@eng.u-hyogo.ac.jp 実行委員幹事 木村文義 兵庫県立大学 大学院工学研究科 E-mail: vsj@eng.u-hyogo.ac.jp
10月	17(水) ～18(木)	第40回日本ガスタービン学会定期講演会 (開催場所: 釧路市観光国際交流センター)	2012.6.18	2012.8.27	社団法人 日本ガスタービン学会事務局 Tel: 03-3365-0095 Fax: 03-3365-0387 E-mail: gtsj-office@gtsj.org
11月	17(土)	日本機械学会No.12-45 講演会「第15回 スターリングサイクルシンポジウム」 (開催場所: 明星大学 日野キャンパス)	2012.6.29	2012.9.28	実行委員長 濱口和洋(明星大学) 幹事 齊藤剛(明星大学) Tel: 042-591-9614 Fax: 042-591-9594 E-mail: tsaito@me.meisei-u.ac.jp 上田祐樹(農工大) Tel/ Fax: 042-388-7853 E-mail: uedayuki@cc.tuat.ac.jp
11月	17(土) ～18(日)	熱工学コンファレンス 2012 (開催場所: 熊本大学 黒髪南地区)	2012.7.13	2012.9.28	熱工学コンファレンス 2012 実行委員会事務局 〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2 丁目 39-1 熊本大学 工学部機械システム工学科内 幹事 小糸康志 Tel/ Fax: 096-342-3760 E-mail: tedconf12@jsme.or.jp
12月	5(水) ～7(金)	第50回燃焼シンポジウム (開催場所: 愛知県産業労働センター ウイックあいち)	2012.7.20	2012.9.14	第50回燃焼シンポジウム事務局 〒458-0015 愛知県名古屋市中種区不老町 名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻 内 Tel:052-789-2710 Fax:052-789-5123 E-mail:sympo50@combustionsociety.jp URL: http://www.combustionsociety.jp/sympo50/

公益社団法人日本伝熱学会第50期(平成23年度)総会議事録

1. 日時 平成24年5月31日(木)16時50分～18時20分
2. 場所 富山国際会議場メインホール(富山県富山市大手町1番2号)
3. 正会員数 1,094名
4. 出席者 603名(うち委任状出席455名). これは定足数(正会員数の過半数)を上回り, 総会は成立した.
5. 議事経過
定款第27条により笠木伸英会長が議長となり, 以下の議案について逐次審議した.

第1号議案 第50期事業報告の件

議長より, 公益社団法人日本伝熱学会第50期(平成23年度)総会議案(以下, 「総会議案」と呼ぶ.)の第1号議案第50期事業報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第2号議案 第50期会務報告の件

議長より, 総会議案の第2号議案第50期会務報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第3号議案 平成23年度収支決算の件

議長より, 総会議案の第3号議案平成23年度収支決算について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第4号議案 平成24年度事業計画の件

議長より, 総会議案の第4号議案平成24年度事業計画について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第5号議案 平成24年度収支予算案の件

議長より, 総会議案の第5号議案平成23年度収支予算について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第6号議案 公益社団法人移行に伴う定款改訂の件

議長より, 総会議案第6号議案公益社団法人移行に伴う定款改訂について諮られた. しかし, 定款第43条によれば定款変更には正会員の議決権の3分の2以上の多数が必要であるが, 委任状を含む出席者が正会員の3分の2に満たなかったため, 決議は見送られた. 議長により, 第51期通常総会における決議を目指すことが説明された.

第7号議案 第51期役員を選出の件

議長より, 総会議案の第7号議案第50期役員を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2項により退任する役員

代表理事(会長)	笠木 伸英	理事(副会長)	岡崎 健
理事(副会長)	森 治嗣		

定款第17条第1項により退任する役員

理事	坂下 弘人	理事	廣瀬 宏一
理事	大久保 英敏	理事	西村 伸也

理事	加藤 泰生	理事	秋吉 亮
理事	青木 修一	監事	小泉 安郎

定款第17条第1項ただし書きにより退任する役員
理事 石塚 勝 理事 宇高 義郎

第51期に新たに選任される役員
定款第17条第2項により選任される役員
理事(会長・代表理事候補) 門出 政則
理事(副会長候補) 石塚 勝
理事(副会長候補) 秋吉 亮

定款第17条第1項により選任される役員
理事 黒田 明慈 理事 小原 拓
理事 宗像 鉄雄 理事 功刀 資彰
理事 堀部 明彦 理事 芹澤 良洋
理事 丸本 隆弘 監事 姫野 修廣

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 圓山 重直 理事 宇高 義郎

第8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、森治嗣氏、飛原英治氏の2名を選任した。

以上により、本日の議事を終了した。

平成24年5月31日
公益社団法人日本伝熱学会第50期(平成23年度)総会

議長 笠木 伸英 _____ 印

議事録署名人 森 治嗣 _____ 印

議事録署名人 飛原 英治 _____ 印

註) 伝熱に掲載する総会議事録への署名は省略しております



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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、総務部会長・編集出版部会長・広報委員会委員長・総務担当副会長補佐評議員に記事を同時送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による 国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料） 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評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評議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関する分野に限る）	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評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評議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載 （バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長又は広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：大久保英敏（玉川大学）：ohkubo@eng.tamagawa.ac.jp
- ・編集出版部会長：高松洋（九州大学）：takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：津島将司（東京工業大学）：tsushima@mech.titech.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：党超鋌（東京大学）：dangcb@k.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：倉水裕子：office@htsj.or.jp

【注意】

- ・原稿はWordファイルまたはTextファイルをお願いします。
- ・HPはメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承ください。
- ・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

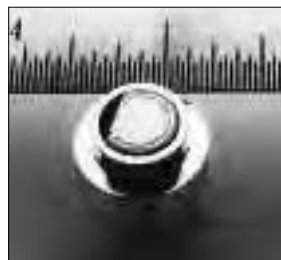
第 51 期入会 (2012.4.1~2012.6.14) 正 22 名 学生 38 名

資	氏名	所属	資	氏名	所属
正	平野 宗弘	トヨタ自動車(株)	学	一色 俊洋	茨城大学院理工学研究科
学	田中 千歳	東京大学大学院 新領域創成科学研究科	学	石田 卓也	弘前大学大学院理工学研究科
学	井ノ上 泰輝	東京大学 大学院機械工学専攻	学	諸隅 崇幸	横浜国立大学 大学院工学府
学	高野 晋	東京理科大学 大学院理工学研究科	学	小澤 孝太	慶応義塾大学 理工学研究科
正	中村 拓海	日本軽金属(株)	学	西川原 理仁	名古屋大学大学院
正	前田 祐	国産部品工業(株)	学	瀬戸 大地	慶応義塾大学 理工学部
正	伊藤 大介	京都大学 原子炉実験所	学	堀内 悠平	横浜国立大学大学院工学府
正	白井 克明	神戸大学 工学部機械工学科	学	畑迫 芳佳	九州工業大学 大学院工学府
正	豊田 浩之	(株)日立製作所	学	塚田 圭祐	東京工業大学 大学院理工学研究科
正	三戸 利行	核融合科学研究所	正	西川 泰生	ブラザー工業(株)
正	飯山 明裕	日産自動車(株) 総合研究所	正	市倉 優太	(株)東芝
正	肥塚 洋輔	日産自動車(株)	学	三浦 正義	東京工業大学大学院総合理工学研究科
正	田渕 雄一郎	日産自動車(株)	学	阿部 堯	東京工業大学大学院理工学研究科
正	野村 政宏	東京大学 生産技術研究所	正	関 光雄	(株)NATOMICS
学	佐藤 正一郎	岡山県立大学大学院情報系工学研究科	学	菊池 肇	金沢大学 大学院自然科学研究科
学	吉田 洋平	金沢大学大学院	正	齋藤 泰洋	東北大学 大学院工学研究科
学	加藤 洋平	長岡技術科学大学	正	岩城 智香子	(株)東芝 電力・社会システム技術開発センター
学	平岩 雄一	信州大学大学院	学	李 承珪	京都大学 大学院工学研究科
学	松井 彰良	信州大学大学院	学	花島 梨沙	慶応義塾大学大学院
学	古谷 幸二	中央大学大学院理工学研究科	学	坂元 秀行	大阪大学 大学院工学研究科
学	白井 大介	中央大学大学院理工学研究科	学	鶴見 大誓	東京理科大学 大学院理工学研究科
学	山田 陸	東京工業大学 大学院理工学研究科	正	梅澤 修一	東京電力(株)
学	ZAMENGO MASSIMILIANO	東京工業大学 大学院理工学研究科	正	金子 暁子	筑波大学
学	下村 聖実	東京工業大学 大学院理工学研究科	学	小澤 卓也	大阪府立大学 大学院工学研究科
学	岩浅 信太郎	慶応義塾大学 理工学部	学	濱口 拓矢	明治大学 大学院理工学研究科
学	齊藤 優輔	慶応義塾大学大学院	正	黒澤 卓也	新光電気工業(株)
学	西村 航	大阪府立大学 大学院工学研究科	学	大堀 哲矢	工学院大学 大学院工学研究科
学	高橋 忠将	京都大学 大学院	正	関 忠聖	東京エレクトロン(株)
学	永坂 亘	京都大学 大学院工学研究科	正	熊野 豊	パナソニック(株)
学	下西 国治	筑波大学 大学院システム情報工学研究科	正	平沢 太郎	中部大学

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。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、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



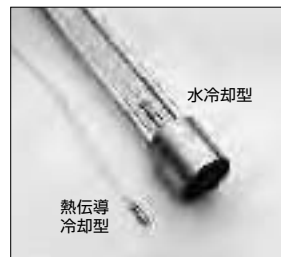
特徴

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

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- 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

ガードン型円形フォイルセンサー



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

シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いので、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

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

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

〒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

URL www.senstech.jp

E-mail senstech@td6.so-net.ne.jp



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

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

CAPTEC 社(フランス)

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

熱流束センサー



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

輻射センサー



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

MEDTHERM 社(アメリカ)

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

熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/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°C(水冷なし)/1500°C(水冷)
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

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

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



【主な用途】
表面温度及び表面熱流束計測
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等

【最小プローブ径】
0.015インチ(約0.39mm)

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

ITI 社(アメリカ)

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

高温用熱流板



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

水冷式 火災強度熱流計



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

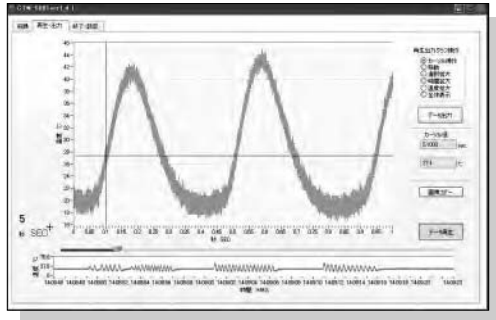
有限会社 テクノオフィス

〒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>

高速温度測定装置 CTM-5001K

冷接点補償を確実にする熱電対と同じ素材で製作された
脱着容易なコネクタを採用。

測定データは USB 接続された PC に保存されます。



<主な用途>

- ・内燃機関測定
- ・射出成型、鑄造温度測定
- ・急冷、急加熱想定



<主な仕様>

- ・サンプリングレート 0.1msec~1min
- ・-200~1250℃測定
- ・温度測定数 1ch
- ・K型熱電対接続
- ・USBにて電源供給
- ・温度分解能 約0.5℃
- ・寸法：82(W)×130(D)×24(H)mm

販売価格 税込み 136,500円(送料別途)

国内総販売元



株式会社

新興精機

〒812-0054 福岡市東区馬出一丁目18番3号

TEL：092-641-8451 FAX：092-641-8786 担当：SAM課・堀ノ内

Email:horinouchi@shinkouseiki.co.jp <http://www.shinkouseiki.co.jp>

編集出版部会ノート *Note from the Editorial Board*

今年はトリプル「金」と言われている天体ショーの年だそうです。5月21日朝には日本の太平洋地域で金環日食が観察されました。各局のテレビ映像からは神秘的な映像が送られてくるのに、残念ながら小職が住んでいる松山市は曇り空で、ほとんど見ることは叶いませんでした。次回日本で見るができるのは北海道で2030年だとか。宇宙の時間スケールでみればあっという間でしょうが、その頃の日本のエネルギー事情はどうなっているのかなど、昨今の原発再稼働問題とあわせて考えていました。日本独自のエネルギー資源として、今年、日本近海に存在するメタンハイドレートの発掘試験が渥美半島沖で開始されました。その量は日本の天然ガス使用量の約100年分に相当するとか。今回ネイチャーQに執筆頂いた平井先生の話によれば、土星の衛星タイタンは衛星としては珍しく大気のある衛星で、その内部にはメタンハイドレートが大量に存在しているようです。タイタンに存在するメタンの量は天文学的数字になると思いますが、地球のエネルギー資源が枯渇した後、人類は将来、資源を地球外に求めていくことになるのでしょうか。いやいやそんなことは経済的に成立するわけがないと思いつつ、宇宙の話は考えるだけでわくわくしてきます。今月号の特集記事は「プラズマと人間環境保全」です。宇宙でのプラズマ現象は物理学者の研究対象ですが、プラズマ研究は蛍光灯やテレビなどの身近な製品から、加工技術、医療、核融合など、非常に多岐に及んでいます。伝熱シンポジウムではまだまだマイナー感のある分野ですが、この特集がプラズマに対する再認識と利用技術の理解の一助となれば幸いです。

野村 信福 (愛媛大学)
Shinfuku Nomura (Ehime University)
e-mail: nomura.shinfuku.mg@ehime-u.ac.jp

副会長 石塚 勝 (富山県立大学)	部会長 高松 洋 (九州大学)
委員	
(理事) 小原 拓 (東北大学)	田川 正人 (名古屋工業大学)
堀部 明彦 (岡山大学)	安田 俊彦 (日立造船)
(協議員) 上野 一郎 (東京理科大学)	梅川 尚嗣 (関西大学)
奥山 正明 (山形大学)	佐々木直栄 (日本大学)
佐藤 恒之 (秋田工業高専)	芝原 正彦 (大阪大学)
瀬名波 出 (琉球大学)	野村 信福 (愛媛大学)
森 昌司 (横浜国立大学)	
TSE チーフエディター 花村克悟 (東京工業大学)	
編集幹事 伏信一慶 (東京工業大学)	

編集出版事務局：
九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 高松 洋
〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地
Tel&Fax: 092-802-3123, takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp