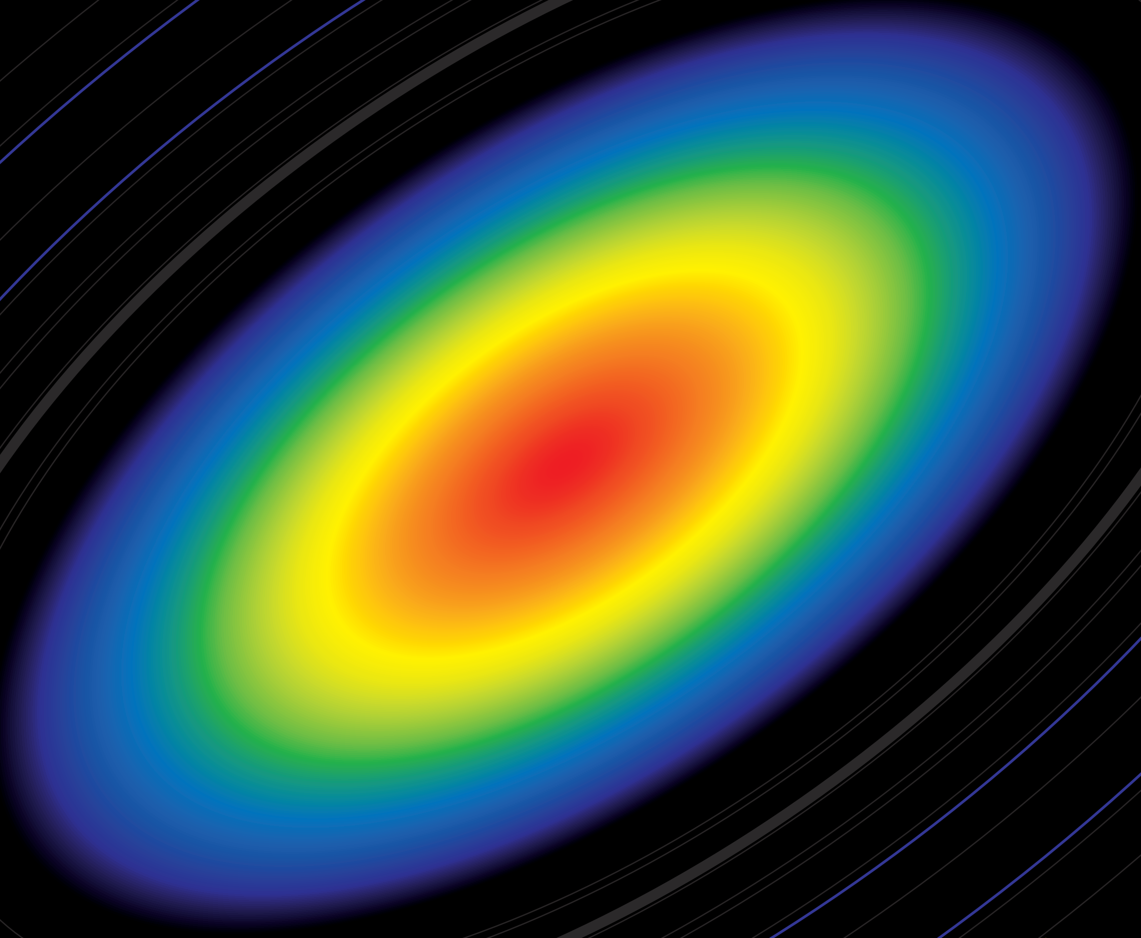
伝　　熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 56, No. 236
2017. 7

Thermal Science and Engineering

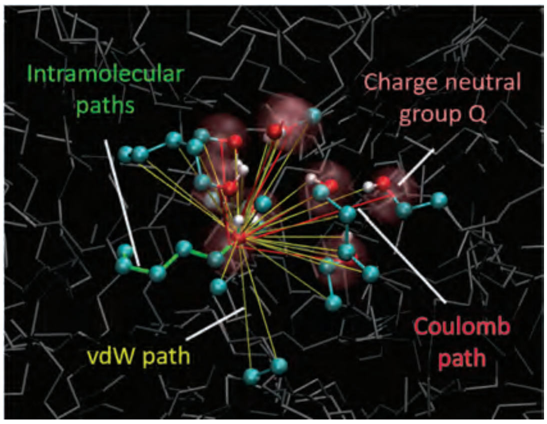
ISSN 0918-9963 Vol. 25, No. 3
2017. 7

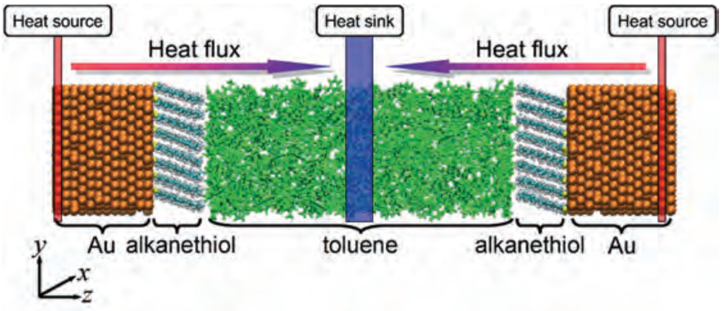


HTSJ

◆特集：分子が関わる伝熱・熱工学

http://www.htsj.or.jp/dennetsu/dennetsu56-j.html

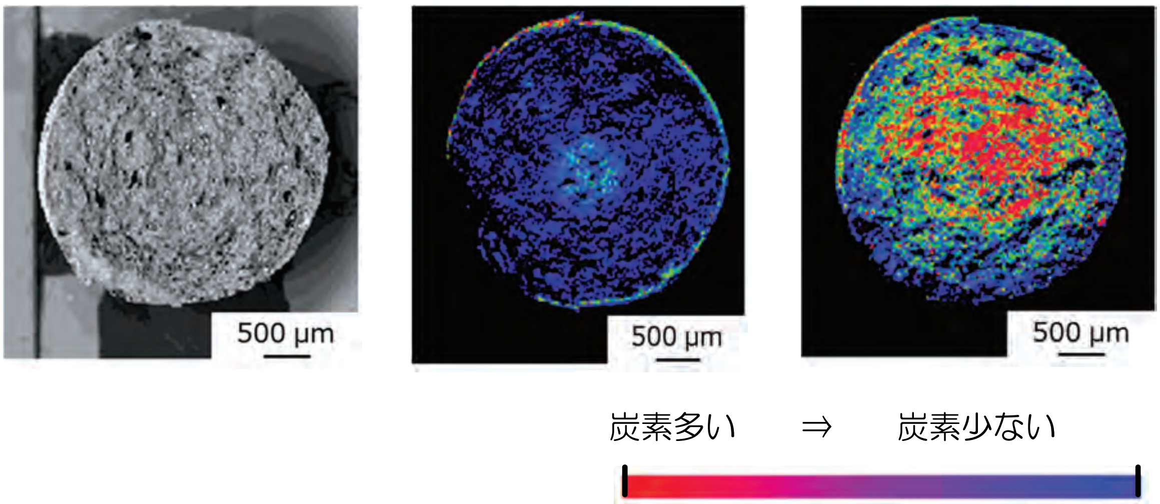




左：オクタノール液体中の各種原子間相互作用による熱伝搬パス（原子熱伝搬パス）．中心の O 原子に関するパスを示す．原子の色：赤=O，白=H，シアン=炭化水素基，灰=他の液体分子．これらのパスを分類し，それぞれについて単独での熱伝搬特性と空間中の数密度とを解析する．Copyright 2017, Elsevier

右：非平衡分子動力学法を用いた金基盤上の自己組織化単分子膜（SAM）とトルエン溶媒との界面を介した熱輸送特性の解析．Copyright 2009, AIP Publishing LLC

（特集記事「液体・界面の熱輸送特性発現機構－分子設計を志向して（松原裕樹，菊川豪太，小原拓）」より）



一般に，H_2O，CO_2 は不活性な分子と考えられるが，プラズマ中では電子衝突反応により種々の振動・電子状態に励起されるため反応活性が増大する．これを利用して，炭素質の表面酸化反応（デコーキング）を促進し，合成ガス（H_2，CO）の収量を増大できる．炭素のマッピングはプラズマによる反応促進効果を可視化した結果と解釈できる（本文図 7）．

（特集記事「非平衡プラズマと触媒の複合効果によるメタン転換（野崎智洋，亀島晟吾）」より）

Vol.56　　2017
No 236　　July

伝　　熱

目　次

〈巻頭グラビア〉
松原　裕樹，菊川　豪太，小原　拓（東北大学）·
野崎　智洋，亀島　晟吾（東京工業大学）…………表紙裏

〈新旧会長挨拶〉
第 56 期会長就任にあたって ……………………………………………菱田　公一（慶應義塾大学）………… 1
第 55 期を振り返って …………………………藤岡　惠子（ファンクショナル・フルイッド）………… 2

〈第 29 回日本伝熱学会賞〉
平成 28 年度日本伝熱学会賞選考の報告
…………………………………………表彰選考委員会委員長　長坂　雄次（慶應義塾大学）………… 3
日本伝熱学会学術賞を受賞して ………………………………キム・ビョンギ，飯田　亮一，
ドアン・ホン・ドク，伏信　一慶（東京工業大学）………… 5
日本伝熱学会学術賞を受賞して …………………………………………小宮　敦樹（東北大学）………… 6
日本伝熱学会技術賞を受賞して
…………………………佐藤　航（日立製作所），磯島　宣之（日立ハイテクノロジーズ）………… 7
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ………………………………………深谷　侑輝（(株) 東芝）………… 8
日本伝熱学会奨励賞を受賞して …………………………青山　祐介（日産自動車株式会社）………… 9
優秀プレゼンテーション賞 受賞者 － 第 54 回日本伝熱シンポジウム －
………………………………………………………学生会委員会幹事　櫻井　篤（新潟大学）………… 10

〈第 54 回日本伝熱シンポジウム〉
第 54 回日本伝熱シンポジウムの報告
……………………………飛原　英治，党　超鋲，鈴木　雄二，森本　賢一，白樫　了，
鹿園　直毅，千足　昇平（東京大学）
稲田　孝明（産業技術総合研究所），加藤　之貴（東京工業大学）
櫻井　篤（新潟大学），近藤　義広（日立製作所），芹澤　良洋（新日鉄住金）………… 11

〈特集：分子が関わる伝熱・熱工学〉
液体・界面の熱輸送特性発現機構－分子設計を志向して
………………………………………………松原　裕樹，菊川　豪太，小原　拓（東北大学）………… 17
ナノスケールの微細構造が流体－固体界面のエネルギー輸送機構に与える影響
…………………………………………………………………………芝原　正彦（大阪大学）………… 25

非平衡プラズマと触媒の複合効果によるメタン転換
……野崎　智洋，亀島　晟吾（東京工業大学）……… 31
ナノ空間材料を用いた調湿……大宮司　啓文（東京大学）……… 39
ナノ多孔質体に閉じ込められた物質の固液相転移現象と自己組織化現象
……金子　敏宏（東京理科大学），荒井　規允（近畿大学），
泰岡　顕治（慶應義塾大学）……… 45

〈国際活動〉

第 1 回アジア熱科学会議（ACTS2017）およびアジア熱科学工学連盟（AUTSE）報告
……高田　保之（九州大学）……… 51

〈行事カレンダー〉……… 55

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 55 期（平成 28 年度）総会議事録……… 57
日本伝熱学会主催講習会「省エネのための機器の熱設計」……… 59
日本伝熱学会 関西支部主催 第 15 回関西伝熱セミナー「エネルギー研究の最前線と伝熱」……… 60
日本伝熱学会 東海支部主催 第 28 回東海伝熱セミナー……… 61
平成 29 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ……… 62
事務局からの連絡
・編集出版部会からのお知らせ……… 63
・新入会員一覧……… 64

〈編集出版部会ノート〉……… 69

Vol.56, No. 236, July 2017

CONTENTS

＜Opening-page Gravure:heat-page＞

Hiroki MATSUBARA, Gota KIKUGAWA and Taku OHARA (Tohoku University)
Tomohiro NOZAKI, Seigo KAMESHIMA (Tokyo Institute of Technology) …… Opening Page

＜New and Former President's Addresses＞

Inauguration Address as the 56th President
Koichi HISHIDA (Keio University) …… 1

The 55th Term in Retrospect
Keiko FUJIOKA (Functional Fluids Ltd.) …… 2

＜The 29th Heat Transfer Society Awards＞

On Selection of Award of the Heat Transfer Society of Japan, 2016
Yuji NAGASAKA (Keio University) …… 3

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Byunggi KIM, Ryoichi IIDA,
Hong Duc DOAN, Kazuyoshi FUSHINOBU (Tokyo Institute of Technology) …… 5

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan
Atsuki KOMIYA (Tohoku University) …… 6

On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan
Wataru SATO (Hitachi, Ltd.), Nobuyuki ISOSHIMA (Hitachi High-Technologies Corp.) …… 7

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan
Yuki FUKATANI (Toshiba) …… 8

On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan
Yusuke AOYAMA (Nissan Motor Co., Ltd.) …… 9

Best Presentation Award
Atsushi SAKURAI (Niigata University) …… 10

＜The 54th National Heat Transfer Symposium of Japan＞

Report on the 54th National Heat Transfer Symposium of Japan
Eiji HIHARA, Chaobin DANG, Yuji SUZUKI, Kenichi MORIMOTO, Ryo SHIRAKASHI,
Naoki SHIKAZONO, Shohei CHIASHI (The University of Tokyo)
Takaaki INADA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)
Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology), Atsushi SAKURAI (Niigata University)
Yoshihiro KONDO (Hitachi, Ltd.), Yoshihiro SERIZAWA (Nippon Steel & Sumitomo Metal) … 11

＜Special Issue: Heat transfer and thermal engineering to which molecules are relevant＞

Mechanism of Thermal Transport Characteristics of Liquids and Interfaces
– Toward Molecular Design of Thermal Medium and Surface Modification –
Hiroki MATSUBARA, Gota KIKUGAWA and Taku OHARA (Tohoku University) ………… 17

Influence of Nanostructures on Energy Transfer Mechanism over a Fluid–Solid Interface
Masahiko SHIBAHARA (Osaka University) ………… 25

Plasma–Induced Catalysis for Methane Conversion
Tomohiro NOZAKI and Seigo KAMESHIMA (Tokyo Institute of Technology) ………… 31

Humidity Control using Nanospace Materials
Hirofumi DAIGUJI (The University of Tokyo) ………… 39

Liquid–Solid Phase Transition and Self-Assembly of Materials Confined to Nanopores
Toshihiro KANEKO (Tokyo University of Science), Noriyoshi ARAI (Kindai University)
Kenji YASUOKA (Keio University) ………… 45

＜International Activity＞

Report on The 1st Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2017) and Asian Union of Thermal Science and Engineering (AUTSE)
Yasuyuki TAKATA (Kyushu University) ………… 51

＜Calendar＞ ………… 55
＜Announcements＞ ………… 57
＜Note from the JHTSJ Editorial Board＞ ………… 69

第 56 期会長就任にあたって

Inauguration Address as the 56th President

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

5 月 25 日，大宮のソニックシティにて開催された伝熱シンポジウムの会場にて本年度の総会が行われ，臨時理事会おいて藤岡恵子会長の後を受けて 56 期の会長を務めさせていただくことになりました．1978 年の札幌での伝熱シンポジウムで私にとって初めての学会発表を行ってから早 40 年が経とうとしております．その当時から現在に至るまで伝熱学に対する熱い思いを抱きながら，この 1 年の会長の責務を果たしていきたいと考えています

当時，学会誌は伝熱研究，シンポでは最前列に歴代の重鎮の先生がおられ，若輩にも的確な指摘をしておられ，それに答えるべく研鑽を積もうと日々の研究にいそしんでいたのはつい昨日のように思えます．その後，1993 年に社団法人に移行する際に当時の総務担当副会長であった土方先生が定款作りを始め, 学会の基盤を作られていました．その作業を間近で見ながら，学会運営，学問の在り方など色々な事を学んだ時期でもありました．その当時を振り返り，伝熱学会の活動の原点は伝熱シンポジウムであり，各地区で行われて伝熱セミナーであると認識しております．

それから伝熱研究から論文誌として TSE（Thermal Science and Engineering）が発刊されました．当時のチーフエディターの小竹先生の思いが込められて論文誌名でありました. 伝熱研究は，工学と同時に，Science（科学）としてとらえる重要性を教えていただきました．社団法人になってからは，産学連携の委員会（FILGAP）ができ，企業との共同研究などの場も広がってきております. 現在では，藤岡前会長のご尽力により，賛助会員を増やすことができました．引き続き，この方針は継続して行くつもりであります

国際活動に関しては一昨年の国際伝熱会議が成功裏に終わり，国際伝熱フォーラムもその次の展開としてアジア圏での活動に中心な役割を果たすべく，積極的に活動することが重要です

伝熱学会は，法人法の改正に伴い，4 年前に公益社団法人として再スタートを切りました．この法人改正は，我が国の学術団体にとっては存在意義を問われる大きな改定で，5 年の歳月をかけて移行措置がとられてきたものです．公益法人の使命は，より広く一般社会に学術で得られた知見を還元し，公益に資することが求められます．このことは大変重く，学会運営上きわめて慎重にかつ適切に行わなければなりません．すなわち主管官庁の内閣府より適宜監査を受け, その指示に従い，財政に関しても適切は処理が求められています．この点に関しては，昨年度の内閣府からの指摘を受け，本学会としても今一度活動を見直すことが迫られています.

さて，このたびの会長の挨拶を執筆するにあたり，私が編集担当の理事をしていた頃の，鈴木健二郎先生の挨拶文の原稿を見つけました．その中に「どの学会にも展開すべき種々の課題がありますが, 共通する一つの課題は若い研究者, 技術者，大学院学生会員に刺激を与え，有益な情報を発信し，また学術上の交流の場を提供して，若い力の台頭を促すことであります」と述べておられます．この部分は時代を問わず，学会の根幹である事は言うまでもありません．学会設立からの伝統・原点を見失うことなく, 会員, 特に次世代の担う方々の切望する事業を根幹に据え，活動を再整理していく必要があります．この 1 年をかけて，将来の学会運営を見据えた方針を策定していこうと考えております．学会の存在とその活動を明確にする定款の変更も視野に入れ，検討していくつもりです．ただ，これは内閣府との交渉，総会決議などハードルは高いものですが，今後の学会運営の持続性に鑑み，しっかりと処理していく所存です.

会員皆様の温かいご理解とご協力をよろしくお願い申し上げます.

第 55 期を振り返って

The 55th Term in Retrospect

藤岡　恵子（ファンクショナル・フルイッド）
Keiko FUJIOKA (Functional Fluids Ltd.)

昨年の総会において小澤前会長の後を受けて第 55 期会長に就任してから 1 年が経ちました．この 1 年を振り返ると，活発な国際活動が展開された年であり，公益社団法人としての運営の在り方が問われた年でありました．

国際活動については，昨年 11 月に仙台において The Fourth International Forum on Heat Transfer（IFHT）が開催され，この場で第 3 回抜山賞が授与されました．今年 3 月には済州島で Asian Conference on Thermal Science（ACTS）2017 が東アジアの伝熱研究の拠点として設立された Asian Union of Thermal Science and Engineering（AUTSE）の第 1 回国際会議として開催され，多数の参加者による盛んな議論と交流でアジアの伝熱研究に新しい時代が始まったことを印象づけました．

公益社団法人としての運営については，昨年 6 月の内閣府の監査によって何点かの不備を指摘され，財務ならびに総務担当副会長を中心としてその対応に努めてきました．今後もさらに，公益社団法人としての規定を遵守する運営体制を確立して行く必要があります．

昨年の就任時に，多くの学問分野からの参集，産業界との連携強化，一般にも開かれた知識の共有を目的といたしました．多分野からの参集については，数年前から推進してきた化学工学出身者が主としてオーガナイザーを務めるセッションは，今年の伝熱シンポジウムでは全セッション中 12%を占めるようになり，僅かながら前進しつつあります．異分野連携は伝熱学会の存立基盤に係るとともに，魅力的な学会であるために不可欠です．分野を広げた継続的な努力を期待します．

産業界との連携については，法人会員増強を主な軸として展開してきました．特別賛助会員，賛助会員を合わせた法人会員数は，増強活動を開始する前の 2014 年に比べて約 1.5 倍，会員費収入は 2.0 倍に増加しました．会員費に占める法人会員費の比率は 11%から 17%に上昇し，財務の安定化にも寄与しています．また，昨年，今年と伝熱シンポジウムにおいて行われた地元企業のセッションは，産学連携強化の新たな試みです．開催には実行委員会のご尽力を要し，産業構造など地域的な適否もあるので，必ずしも常設でなくても産学の接点として続いて行ってほしいものです．

開かれた知の共有については，「伝熱工学の基礎」講習会とテーマ別講習会を実施しています．伝熱工学が工学系学部においても履修されなくなって来つつある状況の中で，価値ある社会貢献の役割を果たしています．数年前，最初に講習会企画を提案した際には賛同はほとんど得られず，担当する会員の負担や実施する意義についての危惧の声が耳に痛かったのを思い出します．多くの方のお力で継続して来たことで，高い評価を得る活動に育ってきました．伝熱シンポジウムの活性化についても，様々に検討されている運営方法改善と並んで，支部活動や若手育成を通じた熱い議論の土壌形成に，短期的な成否に左右されない長期的な視野で取り組むことが必要であると思います．

積年の懸案だった財務の健全化は，第 53 期よりの会費値上げ，賛助会員増強，講習会企画によって以前に比べると格段に改善してきました．長年の赤字体質に対する危機感が余剰金確保に向かわせ，ひいては内閣府からの不備の指摘に至った理由の一つになったと考えます．適切な資金投入でより活発な学会を目指すことによって，この指摘をチャンスに変えることも可能でしょう．幸いなことに，菱田第 56 期会長は公益社団法人の運営についても造詣が深く，この転機に相応しいリーダーシップを発揮されることと期待しております．

最後に，この 1 年間を支えてくださった花村，長坂，安田副会長，理事の方々，あたたかいご理解とご協力をいただいた会員の皆様に，心よりのお礼を申し上げて退任の挨拶といたします．

平成 28 年度日本伝熱学会賞選考の報告

On Selection of Award of the Heat Transfer Society of Japan, 2016

表彰選考委員会委員長
長坂　雄次（慶應義塾大学）
Yuji NAGASAKA (Keio University)
e-mail: nagasaka@sd.keio.ac.jp

平成 28 年度日本伝熱学会賞学術賞，技術賞，奨励賞および貢献賞について公募を行い，所定の手続きにより慎重に審査した結果，各賞の授賞対象者を以下のように決定した（なお，授賞対象の記載は順不同，申請当時の所属）．表彰式は，平成 29 年 5 月 25 日にさいたま市（大宮ソニックシティ）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： Kim Byunggi（東京工業大学）
共同研究者： 飯田　亮一（東京工業大学）
Doan Hong Duc
（Vietnam National University）
伏信　一慶（東京工業大学）
「薄膜レーザスクライビングの機構解明とパルス変調による高度化」
第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，C234，2016 年

2) 代表研究者： 小宮　敦樹（東北大学）
共同研究者： Juan Felipe Torres Alvarez
（The Australian National University）
圓山　重直（東北大学）
「直交型位相シフト干渉計を用いた多次元計測による濃度場・流動場同時計測手法開発と高精度物性評価」
第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，E331，2013 年

２．技術賞

Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

1) 代表研究者： 佐藤　航　（㈱日立製作所）
共同研究者： 磯島　宣之（㈱日立ハイテクノロジーズ）
「データ同化を活用したペルチェ素子の高速高精度熱解析技術」

３．奨励賞

Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

1) 研究者：深谷　侑輝（㈱東芝）
「蒸発液滴内の熱パターンに及ぼす周囲温度・湿度の影響に関する研究」
第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，I327，2015 年

2) 研究者：青山　祐介（日産自動車㈱）
「親水性 MPL を有する固体高分子形燃料電池の発電および生成水分布特性」
第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，A115，2015 年

４．貢献賞

Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

1) 受賞者：麓　耕二（弘前大学）
受賞理由：IFHT2016 における顕著な貢献

2) 受賞者：菊川　豪太（東北大学）

受賞理由：IFHT2016 における顕著な貢献

５．文部科学大臣表彰の受賞

平成 29 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰については，本学会からの推薦者はいなかった．

６．謝　辞

日本伝熱学会賞ならびに文部科学大臣表彰の選考には，本会第 55 期表彰選考委員会幹事と委員の皆様の多大な協力があった．また，これらの賞の募集に対して本会会員の多くの方々の推薦があった．この場をお借りして，賞の推薦ならびに選考に携わられた方々に深く御礼申し上げる．

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

キム・ビョンギ，飯田　亮一，ドアン・ホン・ドク，伏信　一慶（東京工業大学）
Byunggi KIM, Ryoichi IIDA, Hong Duc DOAN, Kazuyoshi FUSHINOBU (Tokyo Institute of Technology)

この度は第 54 回日本伝熱シンポジウムにおきまして，当研究グループの研究「薄膜レーザスクライビングの機構解明とパルス変調による高度化」で日本伝熱学会学術賞を受賞いたしました．ご推薦いただきました方々，慎重なご審査いただきました方々を始めとした日本伝熱学会関係者の皆様に心より感謝の意を表します．

近年，産業界の様々なところで短パルスまたは超短パルスレーザを用いた微細加工技術の研究・開発が盛んに行われています．このようなレーザは局所的な熱源として極めて優秀な道具であり，光学系構成の自由度が優れているため，応用技術のポテンシャルも非常に高いです．ここで，それぞれのアプリケーションと材料に対する最適な加工手法を提案するためには，広い温度範囲における材料とレーザ光との相互作用を理解することはもちろん，光学的なスキルおよび解析能力も極めて重要です．

本研究では産業的に最も広く用いられているナノ秒パルスレーザを用い，その代表的な応用例の一つである薄膜スクライビング加工の高度化を狙いました．特に，太陽電池パネルやオプトエレクトロニクスデバイスの急速な普及によりその需要が高くなってきている透明導電薄膜（Transparent Conductive Oxide thin film; TCO thin film）を材料と選定しました．まず，ガラス基板に透明導電薄膜が蒸着されているサンプルから透明導電薄膜が除去されるメカニズムを実験および解析的に解明いたしました．その知見を用いて，ビームの空間強度プロファイルをベッセルビームに変調し，加工の分解能とシステムのロバスト性の向上に資することに成功いたしました．本研究の成果により，透明導電薄膜のスクライビング加工に対するナノ秒パルスレーザベッセルビームの有用性が示されたと思います．

加工のメカニズムを解明するための実験では，レーザ光をサンプルの薄膜側と基板側から照射する二種類の手法に対し，加工中のレーザビームの時間プロファイルの時分解計測と加工結果の形状・成分分析を行いました．その結果，透明薄膜は蒸発により除去されることが分かり，薄膜側から照射するときはプラズマ遮蔽の影響でサブミクロンオーダの厚みを持つ透明導電薄膜は単パルス照射では除去が困難であることが分かりました．この加工現象は相変化とプラズマ遮蔽を考慮した熱伝導方程式の数値解析でも示されました．

ここで我々のグループではベッセルビームを用いることを試みました．ベッセルビームはスポットサイズが小さく，焦点深度が小さいことから当然加工の解像度と光軸方向におけるサンプル位置決めのロバスト性が向上しました．さらに，ベッセルビームは入射角が大きな平面波の干渉で集光されるため，障害物の後方でも強度が再構築される特性を持ちます．私たちは障害物がプラズマ遮蔽のときも同様な効果が得られると期待しました．前述の熱伝導方程式にビーム伝搬法をカップリングした数値モデルでは，サブミクロンオーダの厚さを持つ透明導電薄膜の場合でもベッセルビームの強度が再構築され，アブレーションに必要な温度上昇が得られることが分かりました．また，ガウシアンビームでは単パルス照射で除去できなかった条件でも薄膜が完全に除去されることが実験的にも明らかになりました．

これらの一連の研究では，レーザ微細加工現象のメカニズムを解明し，既存の手法を応用した提案をいたしました．レーザ微細加工では波長・スキャニング速度，パワー等の単なる加工条件の設定だけが課題ではありません．実は材料のアブレーション中の伝熱現象を理解することが非常に重要であり，さらに光学・材料工学的なアプローチが必須な分野であります．今後も，様々なアプリケーションに対してアブレーション現象に対する考察と新たな加工手法の提案に努めていきたいと考えております．

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

小宮　敦樹（東北大学）
Atsuki KOMIYA (Tohoku University)
e-mail: komiya@tohoku.ac.jp

平成 29 年 5 月 25 日，大宮ソニックシティで開催されました日本伝熱学会第 55 期総会において，平成 29 年度日本伝熱学会学術賞をいただき光栄に存じます．大変栄誉のある賞をいただき，ご推薦を賜りました先生方，ご審査いただいた選考委員会の先生方ならびに伝熱学会関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます．いただきました賞を励みとし，今後も伝熱工学分野の発展に貢献できるよう努めてまいります．

この度の受賞の対象となりました研究「直交型位相シフト干渉計を用いた多次元計測による濃度場・流動場同時計測手法開発と高精度物性評価」は，私が東北大学流体科学研究所で研究を開始したときからその基礎となる部分を取り組んできまして，ここ最近の 5 年間で発展をさせた研究であります．タンパク質という巨大分子の液相内物質移動現象を扱ったものであり，拡散による輸送と移流による輸送を定量評価すべく，これまでの濃度場計測用干渉計に改良を加え，流動場も同時計測可能な手法を確立した研究となります．併せまして, 二軸直交交差型の干渉計を組むことにより，タンパク質の物質拡散係数とソーレー係数を測定可能としたものであります．

タンパク質の物質拡散係数およびソーレー係数の測定では，その現象の時間スケールは大きく空間スケールは小さいため，測定法に多くの問題点があり，これまで測定が困難な物性値として挙げられてきました．このような背景の中，私どもの研究室ではこれまでに培ってきた位相シフト干渉法による微小領域の高精度濃度場計測技術を用いることで，これらの係数の短時間高精度計測に着目をし，研究を進めてまいりました．これまでの私どもの手法では，既にサブミリスケールの領域を高時間分解能で計測することは可能となっておりましたが, ソーレー係数を導出する際の問題は，液相中における屈折率の濃度依存性および温度依存性の違いでした．つまり，両者を干渉計で計測しますと, 一方が計測可能な干渉縞数であっても，他方が計測不可能なほどの密な干渉縞画像になり，またその逆で縞が生じないといった問題が生じてしまいます．そこで，観察セル内で生じる一つの現象を二軸で観察することを提案し，特殊な観察セルを用いた計測を行うことで，ソーレー係数の測定を可能としました．さらには，この干渉可視化システムに PIV システムも導入することで，移流を含む熱・物質移動現象を評価できる計測系に拡張いたしました．この計測技術の得意とするところは，同時計測の他にサブミリスケールの現象を高精度計測できる点です．今後，マルチスケールにおける複雑系熱・物質輸送の諸問題を実験的な観点から解明し，その原理を探求できることを期待しております．言うまでもなく，本研究を進めていく上では，日本伝熱シンポジウム等において，物質移動現象論の先生方および計測技術に関する会員の先生方から貴重なご助言をいただいてまいりました．ここに御礼を申し上げます．

最後に，今回の受賞に関しましては，共同研究者である Australian National University 博士研究員の Juan Felipe Torres 氏および八戸工業高等専門学校長　圓山重直先生のご協力に依るところが大きく，私独りでの力ではここまでの研究の進展はありませんでした．特に Torres 氏には，測定系の構築に関して細部に亘るまで深い議論を行い，多くの時間を費やして意見交換をし，本研究の進展に協力いただきました．共同研究者として受賞の報告をお伝えしたときには，ともに喜びあったことが忘れられません．また，本研究に携わりました東北大学流体科学研究所伝熱制御研究分野の関係者にも深く感謝いたします．今後も更なる研究の深化に努めてまいります．

日本伝熱学会技術賞を受賞して

On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan

佐藤　航（日立製作所），磯島　宣之（日立ハイテクノロジーズ）
Wataru SATO (Hitachi, Ltd.), Nobuyuki ISOSHIMA (Hitachi High-Technologies Corp.)
e-mail: wataru.sato.af@hitachi.com

この度は技術賞にご選考下さり誠にありがとうございました．表彰委員の方々，日本伝熱シンポジウムにおける発表に対して様々なアドバイスを下さった日本伝熱学会の皆さまに心よりお礼申し上げます．さらに，本技術を開発するに当たり，評価装置の設計や試作にご協力いただきました皆様に感謝いたします．

今回受賞させていただきました内容は「データ同化を活用したペルチェ素子の高速高精度熱解析技術」です．我々は，医用分析・診断装置（図 1）を開発しており，特に装置で使用する試薬の温度管理や，反応促進のための温度制御にペルチェ素子を用いた温度制御装置の熱設計を進めています．ペルチェ素子は電流によって吸発熱量を制御できるため，高精度な温度制御を求める装置に広く用いられています．一方で，ペルチェ素子は素子温度に依存して吸発熱量，電気抵抗，熱抵抗といった特性が変化します．そのため，素子を用いた装置の熱設計を適切に行うには，あらかじめこれらの特性について，温度依存性を含めて把握しておく必要があります．既存の 3 次元熱流体解析ソフトウェアも温度依存性を考慮した計算に対応していますが，非定常の温度変化を再現するシミュレーションを実施するにあたり，以下に示す 2 つの課題がありました．

図 1　医用分析・診断装置
（株）日立ハイテクノロジーズ

〈従来の課題〉

① 3 次元熱流体解析ソフトウェアで非定常の温度変化を詳細に再現するには, 細かい時間ステップによる多数回の時間進行が必要なため, 計算時間が膨大になってしまう．
② ペルチェ素子の温度依存特性は素子メーカやロットによってばらつきがあり, 文献で示されている代表的な温度特性を表す近似式の係数では実験結果を再現できない．

そのため，これまではペルチェ素子の定常状態における温度特性を実験的に求め，その近似式の特性係数は設計者が手動で修正していました．しかし，幅広い使用温度帯全体について，正確に温度特性を定めることは極めて難易度が高く，1 つの素子の評価に 1 日程度要するなど，熱設計に時間がかかるという課題がありました．そこで，我々は以下に示す技術を開発しました．

〈開発技術〉

① データ同化技術＊の一つである粒子フィルタと，計算時間の短い熱回路網法を組み合わせることで，実測したペルチェ素子の温度変化から素子の温度依存特性を推定する手法を開発した．
② 推定した温度特性係数と熱回路モデルを用いることで, ペルチェ素子の非定常熱計算を高速かつ高精度に実現できることを確認した．

提案技術を適用した場合，計算時間も 10 分以下に抑えることができ，実用的な設計サイクルの期間内で熱設計に使用可能な高精度な熱解析技術とすることができました．

今後も基盤となる伝熱技術とデータ分析技術の融合を推進し，伝熱技術の発展及び社会へ貢献できるよう，微力ながら尽力させていただく所存です．（佐藤記）

*データ同化技術：ベイズ統計学に基づき，数値シミュレーションに実測データを取り込み，高精度化させる技術

日本伝熱学会奨励賞を受賞して

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

深谷　侑輝（(株) 東芝）
Yuki FUKATANI (Toshiba)
e-mail: yuki1.fukatani@toshiba.co.jp

このたび，大宮ソニックシティにて開催された日本伝熱学会第 55 期総会にて名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと，誠に光栄に存じます．この場をお借りしまして，これまでご指導いただきました諸先生，諸先輩方，ご推薦頂きました先生，ご選考くださいました先生方，ならびに関係者の方々，これまで伝熱シンポジウム等の学会の場を通じて議論させていただいた皆様に深く感謝の意を表します．

受賞対象となりました,「蒸発液滴内の熱パターンに及ぼす周囲温度・湿度の影響に関する研究」は私が学生時代に九州大学の高田保之教授のもとで行った研究であり，揮発性の蒸発液滴中に生じるマランゴニ対流の 1 種である Hydrothermal Waves（HTWs）と呼ばれる熱パターン（図 1）を対象として，赤外線カメラによる実験を行い，温度や湿度（水蒸気濃度）などのパラメータの HTWs への影響やこの現象の液滴蒸発やエネルギー輸送における役割を明らかにしたものです．

具体的には，赤外線のふく射と固体基板内の熱伝導の関係を組み合わせた手法により，蒸発中液滴の固体基板表面の温度・熱流束分布を測定する手法を確立しました．液滴蒸発は気体・液体・固体の 3 相が複雑に関係する現象で，小さな液滴に対して局所情報の計測が困難であるため，これまでに十分な実験データは得られておらず，蒸発モデルの検証や物理現象の解明には，特に界面における高速・高解像度な実験的な計測が不可欠とされていました．そこで，本研究では実験系における放射エネルギーの減衰や反射を考慮し，赤外線カメラで得られた実験結果から，固体基板表面の温度情報を導出しました．この結果から HTWs はバルク波であり，その影響は基板表面の温度・熱流束分布にまでおよぶことを実験的に初めて明らかにしました．

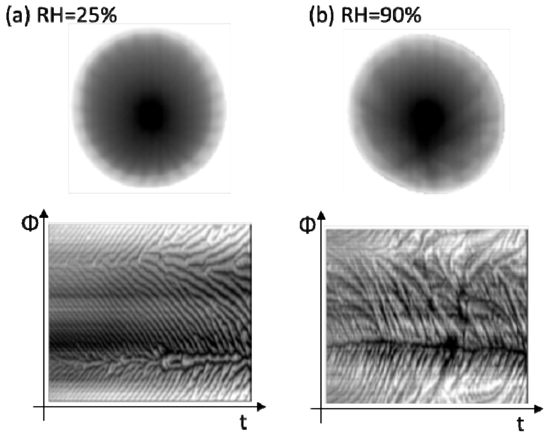


図 1　エタノール液滴中の HTWs の挙動（上図は赤外線カメラの観察結果，下図は波の角度方向の時間伝播）

また，赤外線カメラの実験データと仮定した液滴内の垂直方向の温度分布から液滴表面温度を算出する手法を確立しました．この手法を用いて，これまで HTWs の研究では考慮されていなかった周囲温度と湿度（水蒸気濃度）の影響を明らかにしました．周囲湿度が高い条件では，HTWs の規則的な波列が崩れ，より複雑な波形が確認をしました（図 1）．また，周囲湿度の上昇とともに，蒸発液滴の表面温度の上昇を確認し，周囲水蒸気の蒸発液滴への吸着・凝縮が起こっていることを示しました．周囲水蒸気の吸着・凝縮によって液滴表面の温度・濃度分布が変更され，温度パターンに大きく影響することを明らかにしました．

昨年四月より，(株) 東芝の電力・社会システム技術開発センターにて，発電機内の冷却技術の開発を中心とした回転機器内の熱流体の研究開発に従事しております．学生時代と立場は変わりますが，今後も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．今後ともご指導ご鞭撻のほど，よろしくお願いいたします．

日本伝熱学会奨励賞を受賞して
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan

青山　祐介（日産自動車株式会社）
Yusuke AOYAMA (Nissan Motor Co., Ltd.)
e-mail: yusuke-aoyama@mail.nissan.co.jp

この度は，大宮ソニックシティにて開催されました日本伝熱学会第 55 期総会において, 大変名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと，誠に光栄に存じます．この場をお借りしまして，これまでご指導，ご推薦くださいました諸先生方，ならびにご選考くださいました選考委員の皆様，これまで伝熱シンポジウムにおいて議論させていただきました皆様に厚く御礼申し上げます.

受賞対象となりました,「親水性 MPL を有する固体高分子形燃料電池の発電および生成水分布特性」は，私が北海道大学大学院工学院在籍時に近久武美教授のもとで行った研究であり，固体高分子形燃料電池（Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC）内部のガス拡散および排水促進を担う構成部材である MPL（Micro-Porous Layer）内の排水機構を,低温走査電子顕微鏡（Cryo-SEM）を用いて直接可視化観察するものです.

PEFC は自動車用動力源や定置用電源として利用した場合，発電時に CO_2 を一切排出しないことから，地球温暖化問題の解決に有用なデバイスのひとつとして本格的な普及が期待されております. しかし，本格普及のためには，コストの削減や単セルあたりの発電能力の更なる向上が必要です. そのための一つの方策として，セル内の水分管理能力の向上が挙げられます．発電時に副産物として触媒層で生成される水は，固体高分子膜のプロトン伝導性を維持するためにある程度電池内に留める必要があるものの，過剰な水の滞留は供給ガスの反応面への輸送を阻害して性能低下を招く「フラッディング」を引き起こすため，発電性能の向上にはセル内に保持する生成水を適切に管理することが求められております.

MPL は，生成水排出を促進して生成水が触媒層に滞留することを防ぐと言われており，通常はカーボンブラックと PTFE で作製される疎水性の多孔質層です．しかしながら近年，従来は疎水性であった MPL を炭素繊維と親水性のアイオノマーで作製することで，発電性能の向上や発電時間が長時間化したという報告があります. 親水性 MPL は疎水性 MPL より高性能で，疎水処理が不要であるため低コストでもある一方，濡れ性と構造が水輸送に与える影響は判明しておらず，特定の条件下での電池性能向上という事実しかわかっておりません.

この課題に対して本研究では，カソード MPL の構造と濡れ性を変えて発電特性と MPL 内の液水分布を取得，分析しました．また，発電性能の向上に触媒層内の酸素拡散が与える影響を，限界電流密度法を応用して解析いたしました．その結果，炭素繊維製の親水性 MPL は高電流密度域において濃度過電圧の増大を抑制することでセル性能を向上させることが示されました．また，この性能向上は，濡れ性，空孔径，MPL 厚さの三要素を適切に設計することで実現し，どれか一つでも欠けると発電性能が向上しないことが判明しました．さらに，限界電流密度法による酸素輸送抵抗の分離により，親水性 MPL は触媒層内の酸素輸送抵抗を軽減させることで濃度過電圧の増大を抑制する可能性が示されました.

最後になりましたが，私は昨年 4 月より日産自動車株式会社に就職し，今後は学生時代の燃料電池研究で培った，伝熱工学をはじめとする知識や経験を基に，自動車のゼロエミッション化推進に尽力する所存です．微力ではございますが，伝熱工学の発展に貢献できるよう一層の精進を重ねる所存でありますので，引き続き皆様方のご指導ご鞭撻を賜ります様，何卒よろしくお願い申し上げます.

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
－ 第 54 回日本伝熱シンポジウム －

Best Presentation Award

学生会委員会幹事
櫻井　篤（新潟大学）
Atsushi SAKURAI (Niigata University)
e-mail: sakurai@eng.niigata-u.ac.jp

平成 29 年 5 月 25 日にさいたま市（大宮ソニックシティ）で開催されました日本伝熱学会総会において, 第 54 回日本伝熱シンポジウム優秀プレゼンテーション賞セッションで発表を行い，優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました．受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介させていただきます.

2017 年度　受賞者

◆ 大塚　慶吾　【東京大学】
金属性カーボンナノチューブ全長燃焼後の純半導体性アレイを用いた複数のトランジスタ作製

◆ 小田切　公秀　【名古屋大学】
マイクロスケール赤外・可視観察に基づく多孔体気液熱流動モデルの構築

◆ 川端　洋佑　【東京理科大学】
界面活性剤水溶液流れにおける伝熱促進

◆ 田中　孝典　【九州工業大学】
プール沸騰熱伝達における潜熱輸送寄与の計測

◆ 小林　剛大　【慶應義塾大学】
パルスレーザー粘度計を用いた血液粘性率センシングに関する研究

（順不同）

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

優秀プレゼンテーション賞ポスター会場風景

表彰式の様子

飛原実行委員長との記念撮影

第 54 回日本伝熱シンポジウムの報告
Report on the 54th National Heat Transfer Symposium of Japan

飛原　英治，党　超鋲，鈴木　雄二，森本　賢一，白樫　了，鹿園　直毅，千足　昇平（東京大学），
稲田　孝明（産業技術総合研究所），加藤　之貴（東京工業大学），
櫻井　篤（新潟大学），近藤　義広（日立製作所），芹澤　良洋（新日鉄住金）
*Eiji HIHARA, Chaobin DANG, Yuji SUZUKI, Kenichi MORIMOTO, Ryo SHIRAKASHI,
Naoki SHIKAZONO, Shohei CHIASHI (The University of Tokyo),
Takaaki INADA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology),
Yukitaka KATO (Tokyo Institute of Technology), Atsushi SAKURAI (Niigata University),
Yoshihiro KONDO (Hitachi, Ltd.), Yoshihiro SERIZAWA (Nippon Steel & Sumitomo Metal)*

1．シンポジウム概要

第54回日本伝熱シンポジウムが，平成29年5月24日（水）から5月26日（金）にかけて，さいたま市大宮ソニックシティ（図1参照）で開催されました．

今回の講演会場ならびに懇親会会場である大宮ソニックシティは，JR，東武野田線の大宮駅から徒歩3分のところにあり，アクセスは便利でした．関東地区での開催は今回で8回目となりますが，大宮ソニックシティでは2回目の開催となります．

シンポジウムには323件の講演論文が寄せられ，参加者の総数は早期・通常登録を合わせて836名となりました．ここ数年のシンポジウムと比べて平均的な規模となりました．

今年のシンポジウムの形式は，例年通り，一般セッション，オーガナイズド・セッションと学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションが行われました．また，これと並行して特定推進研究特別ワークショップを開催いたしました．2日目の午後は，新エネルギー・産業技術総合開発機構　技術開発センター　ユニット長／産業技術総合研究所特別顧問・名誉リサーチャー　矢部彰氏による特別講演「技術戦略の視点から見た将来のエネルギー技術と伝熱研究の重要性」が開催されました（図 2）．

図 1　大宮ソニックシティ

特別講演・総会の後，大宮ソニックシティ市民ホールにおいて恒例の懇親会が開催され，総勢 329 名の方々にご参加いただきました．庄司正弘東大名誉教授の乾杯に始まり，講演会場の緊張した空気とは打って変わって，和やかな雰囲気の中で開宴することができました（図 3）．実行委員で選りすぐった全国の地酒 10 種はたいへん好評で，お開きの時間にはすべて空となっていました．料理も十分な量をご提供することができ，みなさまには楽しく有意義なひと時をお過ごしいただけたと思います．

今回の伝熱シンポジウムの運営にあたり，シンポジウムの活性化，伝熱学会会員のメリットの確保，機械学会の協賛規定に従い参加費を主催学会会員と同じにする，収支をほぼ均衡させるという要請を満足させるために，理事会の承認の下，いくつかの新しい試みを行いました．

（1）発表者は伝熱学会会員に限るとしました．学会員になってでも発表したいというやる気のある方に発表していただき，討論の活性化につながることを期待しました．伝熱学会の会員メリットにつながることと考えています．

（2）学生の発表が過度に減少をすることを防ぐために，学生の発表者には減額措置を講じました．また，一般の参加費を下げました．

（3）OSで他分野の研究者の講演を促すため，従来からある招待講演（参加費免除，理事会承認必要）に加えて，依頼講演（参加費非免除，非会員可，理事会承認不要）の種類を設けました．

（4）講演論文集の電子版をすべての参加者に提供することにしました．

（5）並列セッション数を少なくする方向でセッションを組み，7室で編成しました．

さらに，参加者と運営者の利便性を向上するための改革を実施しました．

（1） ウェブからの参加登録においてはクレジット決済のみとしました．従来の郵便振替よりも便利になったと思います．
（2） ウェブから登録した方には，事前に登録者キットを送付しました．参加者は当日，受付による必要がなく，運営者側は受付業務が大幅に軽減されることになりました．
（3） 協賛学会会員の方々も会員価格で参加できると明記しました．機械学会の協賛規定に対応しました．

例年と同様，今回のシンポジウムでも多くの企業から機器展示（8社），広告（14社）のお申し込みをいただきました．

以上，本シンポジウムの概要を簡単にまとめました．シンポジウムの運営状況や各行事の様子につきましては，担当者による以下の記事をご覧下さい．

図 2 矢部彰氏（NEDO／産総研）の特別講演

図 3 懇親会風景

（飛原英治，党超鋲，稲田孝明）

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，学会誌の会告とホームページ（http://htsj-conf.org/symp2017/）上で公開しました．今回のシンポジウムでも，講演申し込みから参加登録までをホームページから受け付け，印刷用プログラムや講演論文集（USB版，ウェブ版）を自動生成できるシステムを用い，これを改良しつつ進めました．内容や動作確認は村田委員，丹下委員，森本委員，長谷川委員をはじめとして委員全員の皆様にご協力いただきました．ここに御礼申し上げます．

今年は初めて参加費のクレジットカード決済を導入しました．ウェブ参加登録はクレジットカード決済のみとして，会場では現金とクレジットカード支払い両方可能としました．また，5月10日までにウェブから参加登録された方約600名に参加者キット（講演論文集電子版，講演プログラム，参加票など）を開催前に送付しました．さらに，講演者が日本伝熱学会会員でない場合，同サイトで入会申し込みと会費納付を行うことができるようにシステムを整備しました．

（党超鋲）

3．プログラム

今回のシンポジウムの発表件数の総数は 323 件でした．当初，「登壇者を学会員に限る」とした発表資格の変更による発表件数の大幅な減少が懸念されましたが，第 53 回の大阪（346 件），第 52 回の福岡（388 件）と比べ，比較的影響が小さかったものと推察されます．

今回のプログラム編成において，シンポジウムにおける討論のさらなる活性化を図る観点から，1）理事会からの要請を受け，オーガナイズド・セッションにおいて特別企画を取り入れたこと，2）同一時間帯のセッション数を減らし，講演室数を 7 室としたこと，の 2 点が特筆されます．

オーガナイズド・セッションにおいては，昨年に続く 5 件のセッション「燃焼研究の最前線」，「熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進」，「水素・燃料電池・二次電池」，「非線形熱流体現象と伝熱」，「化学プロセスにおける熱工学」に，新たに 1 件のセッション「乱流を伴う伝熱研究の進展」が加わり，合計 107 件の講演が寄せられました．「燃焼研究の最前線」，「非線形熱流体現象と伝熱」セッションでは各研究分野の俯瞰講演が企画され，「水素・燃料電池・二次電池」セッションではパネル討論が企画されました．

一般セッションにおいては，初日から最終日の午後にわたる時間編成とすることで，講演室 7 室（移動の利便性に配慮し，4 階，6 階のみを使用）での開催が可能になりました．プログラム編成では，講演申し

込み時に選択していただいたキーワードと希望セッションを尊重しつつ，セッション内でのテーマの関連性を重視いたしました．プログラム編成会議において，一部のセッション名の見直しを行い，発表テーマの共通性を示すセッション名として，新たに「ナノ・マイクロ伝熱」，「多孔体・表面構造」，「沸騰・凝縮」を用いることになりました．必ずしもご希望に沿えなかった講演者の皆様におかれましては，どうかご容赦ください．プログラム編成，座長選出の際には東京農工大学・岩本薫委員をはじめ，東京大学・塩見淳一郎氏，慶應義塾大学・田口良広氏，東海大学・福島直哉氏に多大なお力添えをいただきました．

優秀プレゼンテーション賞セッションには42件の講演が寄せられました．東京理科大学・上野一郎委員をはじめ，ご尽力いただきました学生会委員会の皆様に深謝申し上げます．

（森本賢一，鈴木雄二）

４．講演論文集 USB 版・プログラム冊子

本年度は，利便性を考えて，講演論文集の電子媒体をCD-ROMからUSBに変更いたしました．さらに，例年通り，紙媒体のプログラム冊子を制作いたしました．本年度の表紙の色は朱色と指定されていましたので，同色を用いて会場である大宮ソニックシティをデザインしました．講演論文集 USB 版は，会員向けに公開された講演論文集ウェブ版と同一の構成となっています．プログラム冊子は，タイムテーブル，概要，プログラム，索引の後に，企業広告（12 社）と機器展示マップ（6 社），会場案内図を掲載する構成となっています．表紙のデザイン，講演論文集 USB 版の編集・発注作業は，長谷川洋介委員が一手に引き受け，プログラム冊子のコンテンツの作成・校正については，担当する実行委員各位にご協力をいただきました．ご協力頂いた皆様に心より御礼申し上げます．

なお，伝熱学会会員に対しては，講演論文集を無料で提供しています．既にダウンロードできるサイトは閉じましたので，USB メモリを希望される方は学会事務局まで請求してください．

（白樫　了）

５．会場・受付

大宮ソニックシティビルの4階4室と6階3室を講演会場として，地下1階第2，3展示場をポスター発表会場と産学連携イベント会場として，小ホールを特別講演・総会会場として開催いたしました．参加者へのサービスとしては6階1室を企業展示（8社）として講演会場近くに設置し，集客用に休憩室を併設し，多くの方にご利用頂きました．

9階1室を受付とクロークとして，9階3室を附帯会議14件の会議室として，9階1室を実行委員会本部として，9階1室を休憩室としました．

講演会場の7室については，施設の防災管理上許される最大限の机とイスを配置し，各室100名以上の収容人数を確保しましたが，初日などは立見の状態が生じ，参加者の方にはご迷惑をお掛けしました．

WiFi環境が準備されていない会場でしたので，今回，実行委員会にて安価なWiFiルータを購入し，各講演会場と休憩室に最小限のWiFi環境を整え，ご利用頂きました．

さいたま観光国際協会より周辺地図，観光ガイドブック，グルメガイドなどの提供を受け，参加者に事前配布することが出来ました．JR大宮駅中央改札口前の観光案内所壁面ユニットへ開催歓迎ポスターを無料で3日間掲出頂きました．2日目には，さいたま観光国際協会スタッフにより参加者向けのアンケートが実施され助成の条件を達成しました．

今回，ウェブ参加登録された方には，参加者キットを事前に郵送しましたので，ウェブ参加登録された方は当日会場受付に立ち寄る必要がなく，直接講演会場等に行くことができるようになりました．お陰様で受付での混雑がなくなり，当日参加受付等の業務をスムーズに行うことが出来ました（図4）．

また，当日多くの研究室の学生に講演会場等でのアルバイトにご協力頂きました．重ねて御礼申し上げます．

図 4　受付風景（込み合うことがありませんでした）

（千足昇平）

６．機器展示・広告

これまでのシンポジウムと同様に，機器展示・

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頂きました．以下，ご協力頂いた企業を紹介させて頂きます．（敬称略・順不同）

【機器展示・広告掲載】

・コーンズテクノロジー株式会社
・株式会社 TFF フルーク社
・日本カノマックス株式会社
・株式会社モルシス
・株式会社ナックイメージテクノロジー
・株式会社 ヤマトレーディング
・メンター・グラフィックス・ジャパン株式会社
・株式会社フジキン

【広告掲載】

・京都電子工業株式会社
・日鉄住金テクノロジー株式会社
・株式会社ファンクショナル・フルイッド
・新日鐵住金株式会社
・計測エンジニアリングシステム株式会社
・株式会社ソフトウェアクレイドル

機器展示は会場の 6 階 604 会議室で行いました．休憩室を兼ねた会場で，多くの方に利用頂けたと思います．

機器展示や広告の取りまとめおよび設営手配は，新日鐵住金株式会社・芹澤良洋委員，IHI プラント建設株式会社・秋吉亮委員，東京大学・毛利美都代秘書，そして会場担当の東京大学・渡辺誠氏にご尽力を頂きました．

（鹿園直毅）

7．日本伝熱学会特定推進研究 特別ワークショップ

本学会はエネルギー利用に関する基幹学会として，社会的に重要な研究課題を成立させ，伝熱研究による社会への貢献を目的に特定推進研究を推進しています．本特別ワークショップでは以下の委員長および委員による 3 件の特定推進研究関連報告および特別講演 1 件が行なわれ，最後に総合討論が行われました．（以下，敬称略）

講演 1.「特定推進研究 研究活動報告およびふく射波長制御」 花村 克悟（東工大）

講演 2.「熱流体工学が創る医療のフロンティア」 圓山重直（八戸高専）

講演 3.「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」 加藤之貴（東工大）

講演 4.「【特別講演】社会の課題解決に貢献するための伝熱研究（学会）の役割」佐藤 順一（科学技術振興機構（JST））

講演 1 では花村委員長から本委員会の活動状況が報告されました，進行中の 4 研究課題の進捗状況が報告されました．

(1)「気候モデルにおける重要要素に関する基礎的検討と非専門家への翻訳，さらにその予測精度の評価に向けた検討会」吉田英生（京大）

(2)「次世代鉄鋼材料創製技術の研究」高田保之（九大）

(3)「将来世代コンピュータのための超長マイクロチャンネル冷却」中山恒（名誉会員）

(4)「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」加藤之貴（東工大）

さらに今後の新規研究課題にも言及され，本委員会のこれまでの成果，今後の展開について説明がされました．

さらに，終了した研究課題「波長選択ふく射輸送とエネルギー変換」について，研究課題活動を起点としたその後の研究の進展，社会への展開状況が報告されました．

講演 2 では研究課題「伝熱工学が作る医療機器の新展開」に関する取り組みと成果について報告がありました．特に"高精度表面温度計測による皮膚ガンの早期発見"，"ふく射伝播解析によるガン転移の未然防止"，"高速ミストロ内洗浄による入院期間短縮"の研究成果が報告されました．

講演 3 ではエネルギーシステムの低炭素化における熱エネルギーの貯蔵（蓄熱）の重要性が示され，これに応じて化学蓄熱の高出力密度をテーマとした本研究課題の活動が紹介されました．現在の技術目標 2 kW/L-reactor に向けての各組織の研究取り組みの状況が報告されました．また，産学協同による蓄熱の社会ニーズの抽出と市場創成に向けての検討事例として"熱の発生源・利用用途となるプロセス・製品"，最近改めて重要となってきた"蓄熱温度の低温化に対する化学蓄熱技術の実現可能性"への取り組みが紹介されました．

講演 4 の特別講演で JST 研究開発戦略センター（CRDS）の視点からのエネルギーを中心とした社会の現状，課題が俯瞰され，伝熱工学とエネルギー技術の密接な関連と伝熱工学の今後の社会貢献への期待について言及されました．同時に伝熱工学を含むエネルギー研究者はもっと広く，周囲に目を向ける

ことが指摘されました．とくに分野ごとのコミュニティーがあり，それぞれの言語体系が異なるため，知識・情報の交換が難しいことに留意することが喚起されました．また，学術分野間の高い壁を取り払った学協会活動が求められていることも指摘され，伝熱研究（学会）の役割を的確にご指摘頂き，聴衆にとって大変有意義な講演となりました．最後の総合討論では特別講演者を交え参加者と講演者の間で伝熱研究の将来展開について活発かつ有益な意見交換が行われました．

本ワークショップは 200 余部の資料が出回り盛況でした．企画した特定推進研究委員会としてご参加頂いた皆様に御礼を申し上げます．

図 5　特別ワークショップ会場風景

（特定研究推進委員会　幹事　加藤之貴）

８．優秀プレゼンテーション賞セッション

本セッションは，本学会の学生会員や 28 歳以下の若手研究者会員の研究を広く紹介し，研究意欲を高めるとともに発表技術を磨き上げる場として，毎年シンポジウムの初日に学生会委員会が企画・運営しているものです．今回は 42 件の発表があり，ここ数年の申込件数が 30～40 件で推移していることを考えますと，今回もこれまでと同規模の活発なセッションを開催できました．

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションでは，ポスターセッションによる討論の時間を長く設け，150 分間行いました．また，「アピールスライド」を今回も導入しました．これは，各発表の概要が一目で分かるように工夫し，研究内容を 1 枚のスライドに纏めるものです．限られた条件下で，如何に自身の研究をアピールできるかといった力量が問われることになります．合わせましてアピールスライドの冊子体も制作し，シンポジウム参加者に配布いたしました．

セッションの会場である H 室には多くのシンポジウム参加者が集まり，多くのポスターの前で活発な議論がなされていました（図 6）．150 分間を通して多くの方に参加いただき，発表者も参加者も納得のいくまで深い議論ができたのではないかと思います．

審査についてですが，アピールスライドおよびポスターの内容，質疑応答の様子や理解度といった多くの観点から審査を行い，各発表につき 5 名の審査員で審査を行いました．またポスター会場では参加者による優秀ポスターの投票も行い，審査員による審査結果を学生会委員会にて慎重かつ厳正に集計いたしました．その結果，大塚慶吾（東京大学），小田切公秀（名古屋大学），川端洋佑（東京理科大学），田中孝典（九州工業大学），小林剛大（慶應義塾大学）（敬称略/順不同）の 5 名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました．惜しくも受賞に至らなかった発表者におかれましても，非常にレベルの高い発表ばかりであったとの感想をいただいております．

末筆ながら，限られた時間内で多くの審査項目を懇篤ご丁寧に行っていただいた審査員の皆様，また多大なご協力をいただいたシンポジウム実行委員会に，この場を借りて篤く御礼申し上げます．

図 6　ポスターセッションの風景

（学生会委員会　櫻井　篤）

９．産学交流イベント

9.1　産学交流会

産学合同交流会は，伝熱シンポジウムの初日午後に，学生ポスターセッション会場に隣接して実施しました．本交流会は，産学の交流活性化を目的とし，学生と企業，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，17社が参加した企業ポスター展示による交流会を実施しました．

学会などでほとんど発表されることのない企業の実際の研究開発活動が見えるため，参加者の関心は高く，活発な質疑応答がなされ，盛況のうちに終了しました．

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，報告とさせて頂きます．

ご参加いただいた企業（敬称略）：（株）CD-adapco，JFEスチール（株），（株）IHI，（株）WELCON，（株）く

いんと，パナソニック（株），フューチャーファシリティーズ（株），ブラザー工業（株），（株）ベテルハドソン研究所，メンターグラフィックスジャパン（株），四国計測工業（株），住友電工（株），東亜電気工業（株），東邦ガス（株），日本電産（株），（株）日立製作所，日立化成（株）．

9.2　企業特別セッション

学会への企業の方の積極的参加ならびに大学の先生方とのコラボレーション探索を目的に，伝熱シンポジウムの二日目午前に，企業特別セッション「関東地区企業による部品開発・技術開発の紹介」を関東支部と産学交流委員会の合同で開催しました．講演頂いた企業（敬称略）は，（株）上島熱処理工業所，（有）安久工機，栄商金属（株）の大田区企業3社と，（株）前川製作所，東京ブレイズ（株），Future Facilities（株）の合計6社です．本セッションの内容は講演論文集に掲載せず，講演当日，会場に足を運ばないとわからないものとしました．事前アナウンスが効を奏して，会場は立ち見が出る盛況ぶりで，企業が今まさに抱えている伝熱技術の課題を提起頂き，大学の先生方から視点を変えた適切なアドバイス，質問が出され，セッション時間を超過するほどでした．次回以降の伝熱シンポジウムでも開催地区の企業の方々に講演頂き，開催地区ならではの伝熱技術の課題にフォーカスを当てた企業特別セッションを，開催地区の支部に協力を仰ぎながら，継続開催する予定です．今回講演頂いた企業の方々に深く感謝するとともに，次回の特別セッションへの皆様の参加を期待し，報告とさせて頂きます．

（産学交流委員会／近藤義広，芹澤良洋）

10. あとがき

第54回伝熱シンポジウムの開催にあたり，関東地区の先生方，ならびに多くの企業の方を交えて実行委員会を組織し，ホームページ作成，プログラム編成，論文集編集，講演会ならびに懇親会会場準備，受付対応，展示・広告の勧誘など，数多くの仕事を引き受けていただきました．実行委員の名簿をご覧ください．

今回の伝熱シンポジウムでは活性化を図るため，発表者の会員限定，並列セッションの減少，クレジットカード決済の導入と資料の事前送付などの試みを行いましたが，事前説明が不十分であったにもかかわらず，参加者の皆様にはご理解をいただき，ご協力いただきました．今回は，討論を活性化するために多くの変革を試みました．皆様はどのように感じられたでしょうか．

発表者の内訳からシンポジウムの実態を見てみると下表のようになります．学生の発表が半数を占め，若手研究員の育成に貢献していることが分かります．しかし，企業の方の発表が10%を満たないのは大きな問題で，大学での基礎研究と企業での開発研究の間のパイプが弱いことが伺えます．企業参加者を増やす努力が今後一層必要です．また，准教授などの若手大学研究者の発表が少なく，学生に発表を任せている傾向は，討論の活性化を阻害しているように見えます．大学教員は自ら発表を行い，討論を楽しんでいただきたいと思います．

身分	学生	助教・研究員	准教授・講師	教授	社会人
内訳	51%	16%	15%	12%	6%

最後に，本シンポジウムの運営にご協力いただいた実行委員会委員の皆様，シンポジウムに参加いただいた参加者各位にお礼申し上げるとともに，本学会のさらなる発展および会員各位のご活躍を祈念いたします．

（飛原　英治，党　超鋲）

第 54 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長	飛原　英治	東京大学
監　事	岡本　孝司	東京大学
幹　事	党　超鋲	東京大学
委　員	丸山　茂夫	東京大学
	鹿園　直毅	東京大学
	白樫　了	東京大学
	鈴木　雄二	東京大学
	大宮司　啓文	東京大学
	千足　昇平	東京大学
	森本　賢一	東京大学
	長谷川　洋介	東京大学
	原村　嘉彦	神奈川大学
	村田　章	東京農工大
	岩本　薫	東京農工大
	上野　一郎	東京理科大学
	丹下　学	芝浦工業大学
	小野　直樹	芝浦工業大学
	宗像　鉄雄	産業技術総合研究所
	竹村　文男	産業技術総合研究所
	稲田　孝明	産業技術総合研究所
	染矢　聡	産業技術総合研究所
	芹澤　良洋	新日鉄住金
	秋吉　亮	IHI

液体・界面の熱輸送特性発現機構－分子設計を志向して

Mechanism of Thermal Transport Characteristics of Liquids and Interfaces – Toward Molecular Design of Thermal Medium and Surface Modification–

松原　裕樹，菊川　豪太，小原　拓（東北大学）
Hiroki MATSUBARA, Gota KIKUGAWA and Taku OHARA (Tohoku University)
e-mail: ohara@ifs.tohoku.ac.jp

1．はじめに

伝熱研究において分子運動の解析が有効な対象として，(1)物体がバルクの性質を失う小さな系，(2)マクロな熱物性（特に液体の），(3)界面，などが挙げられる．(1)の例としては分子膜や微細な固体構造に拘束された液体の構造や状態，熱・運動量・物質輸送現象があるが，(3)の特性が大きく影響する．(2)は熱伝導率や粘性係数など輸送物性が代表的なものであるが，分子スケールのメカニズムがマクロな連続体の現象に与える影響を総括的に繰り込んだものであり,「この熱物性値はなぜこの値なのか」という問いに対する非経験的な解答を得るには，特に液体については，分子の動力学を考える他に方法はない．(3)は，例えば界面における温度・速度の接続条件や界面張力，物質の吸着などがこれにあたる．これらは固体・液体の連続体方程式にとっては先天的に与えられる境界条件であり，決定するメカニズムは連続体力学でなく分子スケール現象の中にある．

バルク液体や界面を分子動力学シミュレーションで再現し，その熱物性値を得ることは，極限的な温度・圧力や不純物のコントロールなど実測が困難な条件における物性値を知ることができるだけでなく，その値を決定しているメカニズムを直接観察し，様々な観点で整理できることに深い意義があるように思われる．各種の作動流体や充填剤，界面熱材料などとして利用される様々な種類の液体について，その熱物性を発現させている分子スケールの要因を特定して詳細なデータを積み上げることは，未知の分子についてその液体・界面が発現する熱物性を予測したり，さらには希望の熱物性をもつ液体・界面を実現する分子の構造を決定したりすることを可能にする．既に合金や複合材など固体材料では一般的になっている「分子設計」の概念が，近い将来には液体や界面の輸送特性に適用されることになるだろう．本稿では，これを志向して筆者らが行っている液体・界面の熱輸送特性に関する研究について述べる．

2．液体の熱伝導率

2.1　解析手法

液体の熱伝導率を決定する分子スケールメカニズムの解析について述べる．筆者らの解析の出発点である熱流束分解[1–4]については，ここでは詳しくは述べないが，マクロな熱流束の分子動力学表現として知られている式が個々の分子間あるいは分子内原子間の相互干渉による力学的エネルギーの伝搬の集積であることに基づいて，これらのエネルギー伝搬を，その描像の違いによって分類・集計し，それぞれの特徴を明らかにしようとするものである．

解析には，図 1 のような計算系を用いた非平衡分子動力学シミュレーション[5]を用いる．あらかじめ所望の温度･密度に調整した平衡状態に対し，エネルギーを一定速度で図の高温部に注入，低温部から抽出し続けることで，設定した熱流束 J を印加する．これによって検査体積内は温度勾配 $\partial T/\partial z$ が一定の非平衡定常状態となるので，この温度勾配を計測しフーリエ則 $J = -\lambda\partial T/\partial z$ を用いることによって熱伝導率 λ を決定することができる．印加した熱流束が十分小さければ，求められた λ はもとの平衡状態の温度・密度における値と考え

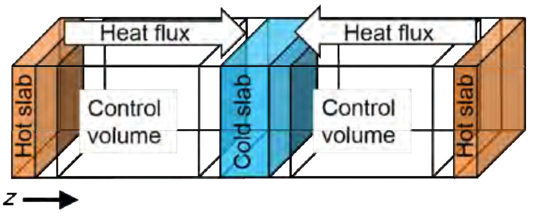


Fig. 1 Computational system of the heat conduction simulation. The 3-dimensional periodic boundary conditions are imposed.

ることができる．

熱流束の分子動力学表現によると，分子系の微視的エネルギー伝搬は，分子移動に伴うエネルギー伝搬と原子・分子間相互作用による遠隔的なエネルギー伝搬に大別できる．後者は，性質の異なる複数種の相互作用の寄与から成っており，液体中の熱伝導の大部分（典型的には 8 割程度）を説明する．従って液体の熱伝導率を決定する分子メカニズムを理解するには，各種相互作用によるエネルギー伝搬の性質についての詳細な知識が不可欠となる．

近年筆者らが提案し開発を続けている原子熱伝搬パス解析[6–8]は，原子間あるいは原子グループ間相互作用一つ一つを熱エネルギーのパスとみて，その特性を評価する方法である．具体的には，熱伝導率に対する相互作用種 X の寄与（部分熱伝導率）λ_X をパスの密度 ρ_{path}^X とパス一本あたりの効率 Λ_X の積として表す．

$$\lambda_X = \Lambda_X \rho_{\mathrm{path}}^X \tag{1}$$

部分熱伝導率は，対応する部分熱流束 J_X を熱流束分解に従って計算し，フーリエ則 $J_X = -\lambda_X \, \partial T/\partial z$ を用いることで求める．パス密度は計算系内の相互作用の数を実際に数えて算出する．その際，熱伝導に重要な寄与をする相互作用のみをパスとして数えることにし，その基準は相互作用種ごとに設定する．一般的に，分子動力学シミュレーションでは共有結合に起因する分子内相互作用と，主に分子間相互作用として van der Waals（vdW）と Coulomb 相互作用が考慮される．それぞれに対応する熱伝搬パスとして，分子内パス，vdW パス，Coulomb パスを考える（図 2）．分子内相互作用は明確にエネルギー伝搬を行うので，すべてパスとして数える．vdW 相互作用に関しては，正味のエネルギー伝搬がほぼ第一近接殻内までしか到達しないことが過去の研究[9]から分かっているので，第一近接殻内の vdW 相互作用のみを vdW パスとして数える．一方，電荷を持った原子間の Coulomb 相互作用によるエネルギー伝搬は非常に遠距離まで到達する[7]ため，原子間の熱伝搬パスではなく，適当な電気的中性グループを設定し，その間のパスを考える．こうして求めた J_X と ρ_{path}^X から(1)式によって相互作用 X の効率 Λ_X を求める．マクロな熱伝導は，様々な効率を持つ熱伝搬パスによるミクロなエネルギー伝搬の集積として表現されることになる．各種熱伝搬パスの特性，およびそれが分子の構造的・化学的特徴によってどう影響を受けるのかを理解すれば，パスの集合体である液体・界面における熱輸送を，より原理的な立場から再構築できるはずである．筆者らは，上記の方法論および液体中の熱輸送の描像の双方に対する基盤づくりを目指し，典型的な液体種における分子スケール熱輸送を解析するところから着手している．以下では，アルカン・アルコールの解析を中心に，これまでに得られている結果について述べる．

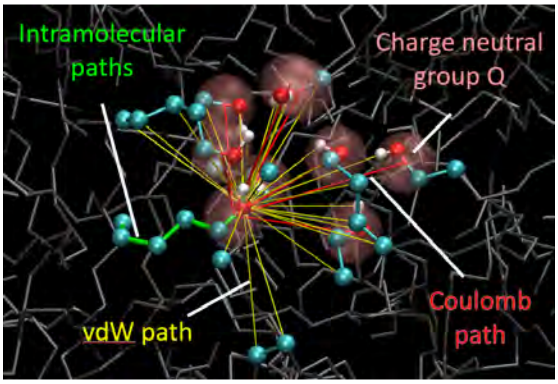


Fig. 2 Atomistic heat paths relevant to the centered atom (oxygen) in an octanol liquid [8]. Atom color means: red, O; white, H; cyan, CH_2 or CH_3 group; grey, irrelrevant molecules. Copyright 2017, Elsevier

2.2　直鎖・分岐アルカン

図 3 は直鎖アルカン（*n*-アルカン）[10]，2-メチルアルカン[6]，1 価・直鎖アルコール（1-アルコール）[7]の熱伝導率のシミュレーション結果を主鎖炭素数の関数として比較したものであり，すべて対臨界温度 T/T_c = 0.7 における飽和液体の熱伝導率である．すなわち，対応状態の原理のもとで等価な温度・密度の液体として比較していることになる．また，これらに対する分子モデルとして，United Atom（UA）モデル[11,12]を用いた．このモデルでは水酸基の O，H 原子は独立な相互作用サイトとして考える一方，炭化水素グループ（CH_x）はまとめて一つの相互作用サイトとして扱う．

まず，*n*-アルカンの曲線から見ていくと，鎖長が短いうちは熱伝導率は鎖長とともに低下するが，その傾向は次第に弱まり，長鎖長側では上昇に転

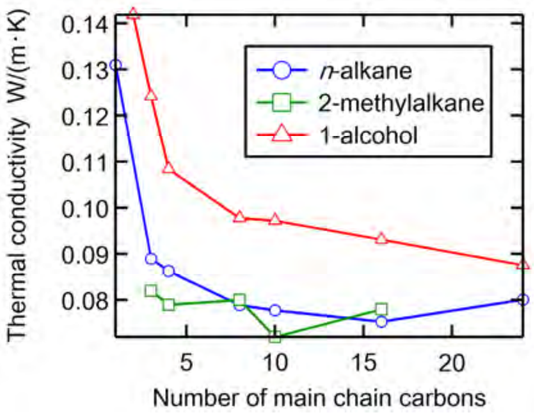


Fig. 3 Thermal conductivity for the saturated liquids of alkanes and alcohols at the scaled temperaure T/T_c = 0.7 as a function of main chain length [6,7,10].

じている．この変化を熱伝搬パスの観点から考察する．図 4 は *n*-アルカンに対する熱伝搬パス特性を示したものである．共有結合長，結合角，ねじれ角の振動に対応する 3 つの共有結合性相互作用のパス特性は類似しており，本稿ではそれらをまとめたものを分子内パス（Intra）と呼ぶ．パスの密度は vdW パスの方が分子内パスのものより 1 桁程度高く，鎖長とともに共有結合と分子内 vdW 相互作用サイトが増えることに対応して，常に鎖長の増加関数となっている．一方で，図 4(b)から，分子内パスのエネルギー伝搬効率は鎖長の短いものを除いて vdW パスのものより一桁程度高く，鎖長にそれほど依存しないのに比べて，vdW パスの効率は鎖長とともに急激に低下していることが分かる．結果として，これらの積で与えられる部分熱伝導率は図 4(c)のように鎖長に対して逆の依存性を示すことになる．鎖長が短いうちは vdW パスが支配的であるが，炭素数 15 以上では分子内パスの方が主要な寄与となっており，図 3 の熱伝導率の鎖長依存性は各鎖長において主要な寄与をするパスの鎖長依存性を反映したものであると考えることができる．

主要パスが vdW パスから分子内パスへと変化する大きな要因は，vdW パスの効率が鎖長とともに低下するところにある．図 5 のように，vdW パスの効率は同一分子由来の vdW パス（干渉性 vdW パス）の数に反比例しており，これは，同一分子内の原子は互いに干渉し合い，他の分子へのエネ

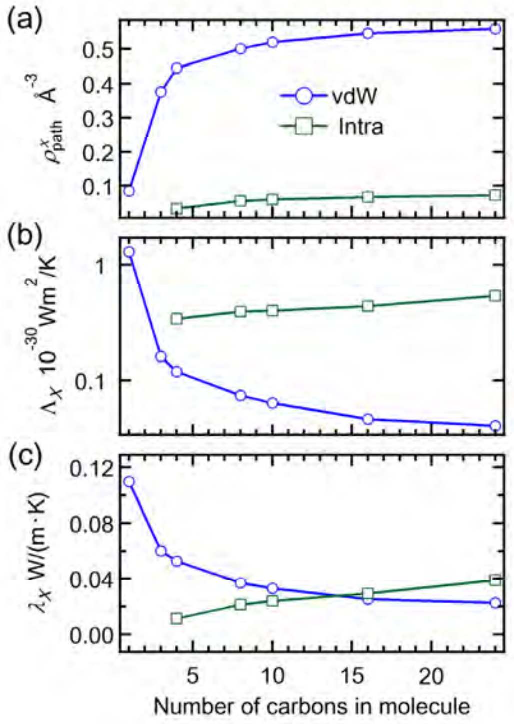


Fig. 4 Heat path properties of *n*-alkane [6]. (a) Path density, (b) efficiency, (c) partial thermal conductivity.

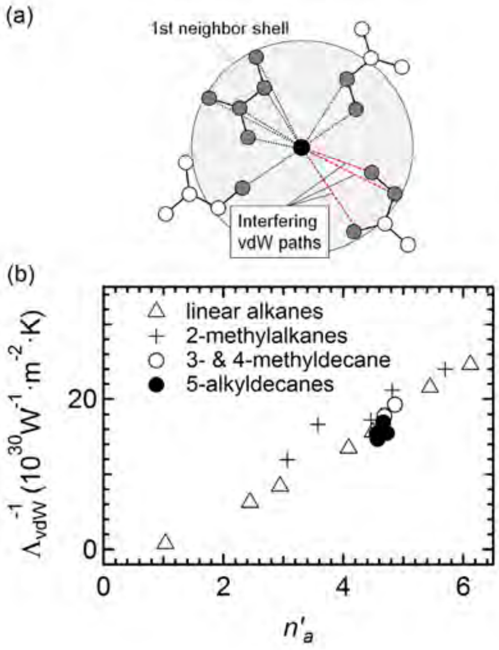


Fig. 5 Interferring vdW path [6] (a) Schematic. (b) Inverse relationship between the vdW path efficiency Λ_{vdW} and the number of the interferring vdW paths per molecule, n_a'. Copyright 2015, AIP Publishing LLC.

ルギー伝搬を独立に行えないことを意味する．鎖長（分子内原子数）とともにより多くの原子が干渉するようになるために，vdW パスの効率が低下することになる．

図 3 に戻ると，2-メチルアルカン（*n*-アルカンの 2 位の炭素位置の水素一つをメチル基で置換したもの）に対する熱伝導率の鎖長依存性も，炭素数 8 の場合のイレギュラーが見られること以外は，*n*-アルカンの場合と同様のメカニズムで説明される．同じ主鎖長で比べると，*n*-アルカンに比べて炭素数が 1 つ多い分，vdW パスの効率が低い．その分だけ熱伝導率も低く，*n*-アルカンのときより短い鎖長で主要パスが分子内パスにスイッチする．ここには示さないが，5 位の炭素位置の側鎖長がある程度長くなる場合には，上記の状況とは少し異なり，立体障害のために第一近接殻内に入れる分子が制限され，干渉性 vdW パスが増加しない．これによって vdW パス効率の低下が抑制されるため，熱伝導率は側鎖長にほとんど依存しなくなる[6]．このように，熱伝搬パスを考えることで，熱伝導率の変化を微視的な液体構造と関連させることが可能になる．

2.3　アルコール

次に，1 価アルコールに対する結果について述べる．アルコールのような会合性液体は液体の中でも高い熱伝導率を示すため，その分子スケールメカニズムの理解は液体のデザインの観点から非常に重要である．図 3 に示したように，アルコールの熱伝導率は同鎖長（同炭素数）のアルカンのものと比べて 10−30%程度高く，この差はアルカンにはない水酸基（–OH）とそれに起因する Coulomb 相互作用あるいは水素結合の効果であると解釈できる．図 6 はアルカンとアルコールについて系に課された熱流束（300MW/m^2）の内訳を比較したものであり，アルカンの末端 H を水酸基で置換すると，vdW 相互作用による熱輸送の一部が Coulomb および分子内相互作用によるものに切り替わることが読みとれる．また，一般に，Coulomb 相互作用あるいは水素結合は会合性液体の物性を決める上で支配的な役割をもつと理解されているのに対し，図 6 において Coulomb 相互作用の寄与は限定的であり，最も寄与の大きいエタノールの場合においても vdW の方が多くの熱を輸送していることは興味深い．

図 7 はアルコールに対する熱伝搬パス特性をアルカンのものと比較して示したものである．Coulomb パスは，水酸基の H および O 原子とそれに隣接するメチレン基（$-CH_2-$）からなる電気的中性グループに関する第 2 近接殻内の Coulomb 相互作用と定義した（定義とその妥当性の詳細は文献[7]を参照）．vdW パスと比べて Coulomb パスは 1 桁程度高効率であるが，パス密度が低いために，図 7(c)の部分熱伝導率あるいは図 6 における部分熱流束が低いことがわかる．分子内および vdW パスの特性は基本的にはアルカンのものと類似しているが，アルコールは水酸基の分多くのパスを持

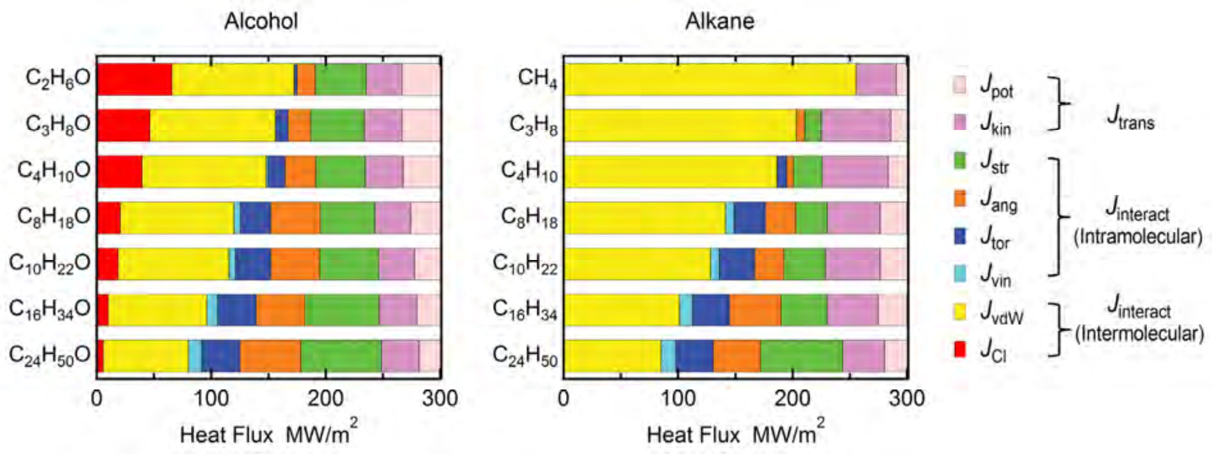


Fig. 6 Heat flux decomposition for 1-alcohol and *n*-alkane [7] into the contributions from the intramolecular bond stretching (J_{str}), angle bending (J_{ang}), torsion (J_{tor}), and non-bonded (J_{vin}) interactions; the intermolecular vdW (J_{vdW}) and Coulomb (J_{Cl}) interactions; and the migration of potential (J_{pot}) and kinetic (J_{kin}) energies. Note that the number of C atoms for the topmost molecules (C_2H_6O and CH_4) are different. Copyright 2017, Elsevier.

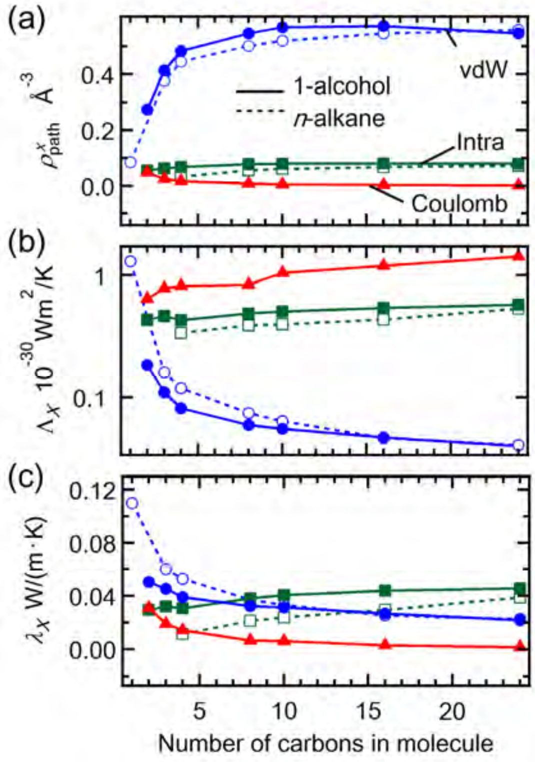


Fig. 7 Heat path properites of alcohol. (a) path density (b) efficiency (c) partial thermal conductivity [7].

つとともにCoulomb引力により液体密度が増加するため，すべてのパスの密度がアルカンのものより高い．従って，分子内パスの部分熱伝導率はアルコールの方が高くなる．一方，vdW パスに関しては，水酸基の追加により干渉性パスが増加し，効率が低下する．これがパス密度の増加を上回るため部分熱伝導率としての寄与は減少する．水酸基密度の低い長鎖長側ではこれらの効果は小さく，パス特性はアルカンのものに近づく．また，ここには示さないが，水素結合の寄与は Coulomb 相互作用全体の寄与の 4 割程度であり[7]，より長距離の相互作用からも無視できない寄与がある．

以上の解析から，水酸基とそれに付随する Coulomb 相互作用は，自身で積極的に熱輸送を行うというよりは，引力によって各種パスの密度を増加させ，それにより vdW パスによる輸送の一部をより高効率の分子内・Coulomb パスに切り替えることで熱伝導率を向上させている，という描像が成り立つ．ここでは示さないが，2 価のアルコールにも解析対象を拡大しており，エタノールに

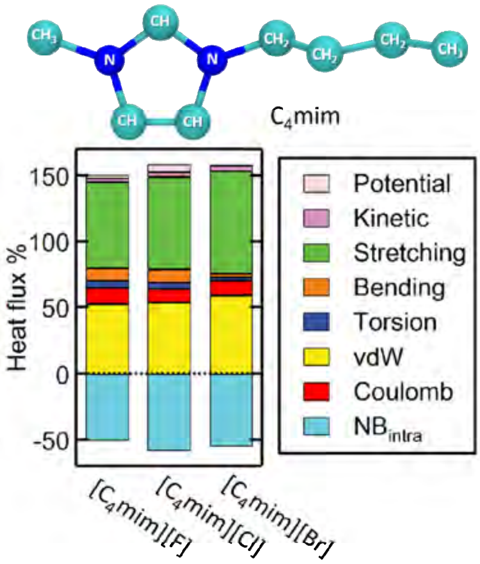


Fig. 8 Heat flux decomposition for ionic liquids. The top picture shows the united atom expression of a C_4mim molecule [13].

もう一つ水酸基を付加したエチレングリコール液体中では Coulomb パス不足が改善され，Coulomb 相互作用が最も多くの熱を輸送するようになることがわかっている．さらに，水の場合には，Coulomb 相互作用による熱輸送が熱伝導全体の約 7 割を占めるようになる．また，図 8 に示すように，電荷が分子全体に分散している C_4mim カチオンとハロゲンアニオンから成るイオン液体中の熱輸送[13]は，分子間 Coulomb 相互作用の寄与が小さく，分子内の非結合性相互作用による（NB_{intra}）寄与が負（逆方向の熱輸送）となるなど，興味深い結果が得られている．

これまでの解析により，分子動力学における標準的な相互作用種である，分子内パス，vdW パス，Coulomb パスについて基本的な性質が分かってきた．分子内パスのエネルギー伝搬効率は 10^{-30}–10^{-31} Wm^2/K のオーダーであり，分子構造による違いは比較的小さい．分子間の vdW パスは高密度である反面，相互干渉のため，ごく小さな分子を除いて分子内パスのものより 1 桁程度低い効率となる．Coulomb パスは分子内パスと同程度かやや高い効率を持つ．1 価アルコールの場合は，Coulomb パスと分子内パスは類似の性質を持つが，分子内水酸基が多くなるにつれ，vdW パス同様の干渉効果が発現すると考えられる．今後，他の液体種の解

析を通して，これらの性質をより定量的なものへと洗練していく．現在，アンモニアやフルオロカーボンに対する解析が進行中である．また，現実の熱媒/冷媒のほとんどは様々な液体の混合物であることから，2 成分 LJ 流体についての解析[14]を手始めとして混合液体の解析にも着手している．これと並行して，非平衡分子動力学シミュレーションを用いて複数温度における比熱を一斉に計算する手法の開発[15]なども行っており，熱伝導率以外の熱物性を含めた多角的な分子設計を視野に入れて研究を進めている．

3．固液界面の熱輸送特性

3.1　固液界面熱輸送の分子論的メカニズム

前節で述べたバルク液体における熱輸送モードに関する概念は界面での熱輸送においても適用可能であるが，一般に一様なバルクと界面近傍においては異なる熱輸送モードが支配している．例えば固液界面においては，熱流束のミクロな構成要素の割合にバルク領域と界面付近で大きな違いが見られる [2,16,17]．ここで，構成要素とは前節で述べた分子相互作用の種類による分子内・分子間エネルギー伝搬の分解のみならず，分子の並進エネルギーや回転エネルギーが分子相互作用によって変化することによる寄与へ分解することも考慮している．例えばある分子性液体では，液体中では回転運動によって支配的に輸送される熱エネルギーが，界面においてはより通過しやすい輸送形態である並進運動により支配的に輸送されることが明らかになっている[2,16]．このように，固液界面においては，両相の分子的な特性（固体表面においては，分子レベルの表面構造も含む）が強く影響し，固液間での熱輸送特性を決定している．すなわち，界面における熱輸送効率の指標である界面熱抵抗（Kapitza 抵抗）は，上述した輸送モードの不一致など，分子動力学的メカニズムによって，その大小が支配されると考えられる．したがって，固液界面の熱輸送特性を制御するためには，表面の“分子スケール設計”が重要となる．本節においては，筆者らが界面熱抵抗制御に有望な技術の 1 つと考えている自己組織化単分子膜（self-assembled monolayer, SAM）による分子界面修飾について述べる．

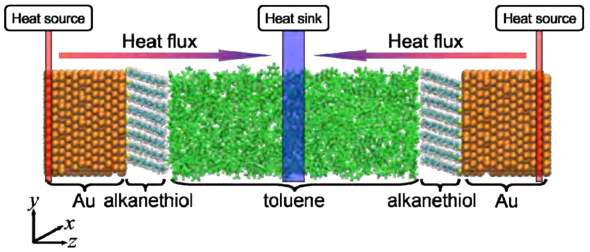


Fig. 9 Snapshot of the computational system and NEMD setup [20]. In the NEMD simulations, thermal energy is transferred in the direction as shown in this figure. Copyright 2009, AIP Publishing LLC

3.2　SAM 修飾による界面熱抵抗制御

SAM とは，一般に有機分子を固体表面に化学吸着させ，分子自身の自己組織化によって固体表面に形成される秩序性の高い分子膜である[18,19]．現在，様々な固体材料表面（金属，金属酸化物，シリコン系素材など），表面形状に形成できる適用性の高い界面修飾技術として幅広い分野において研究や応用が進んでいる．また，SAM 分子自身，特に分子末端をうまく設計することで，表面性状を柔軟に制御することができる．筆者らはこの点に着目し，SAM 修飾によって固液界面における熱輸送特性がどのように変化するか，分子動力学シミュレーションを用いて解析した[20]．図 9 に計算系のスナップショットを示す．本計算系においては，固体基盤に FCC 結晶構造を有する金，その（111）表面に SAM 分子であるアルカンチオールを吸着し，溶媒としてトルエンを用いた．非平衡分子動力学（NEMD）法を用いて，固体基盤側か

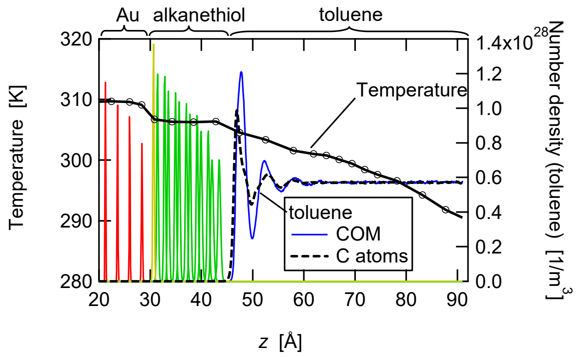


Fig. 10 Number density profiles of each constituent (thin solid line) and temperature distributions (marked solid line) perpendicular to the interface. Only half of the system is depicted because of system symmetry. Copyright 2009, AIP Publishing LLC

ら溶媒側に向かって 1 次元的な熱流束を発生させ，定常状態における 1 次元的な温度分布から界面熱抵抗を測定する．ここで，界面熱抵抗は界面における温度ジャンプ量ΔTと熱流束$\dot{q}$の比として，$R_{\mathrm{K}} = \Delta T/\dot{q}$と定義される．図 10 に NEMD 計算における温度分布を示す．金基盤側から SAM–溶媒界面に渡る温度ジャンプによって得られる界面全体の総括的熱抵抗は，14.9×10^{-9} $\mathrm{m^2KW^{-1}}$であり，SAM を修飾しない金–トルエン界面で同様に測定した界面熱抵抗66.7×10^{-9} $\mathrm{m^2KW^{-1}}$に比して，約 4.5 倍程度小さい．すなわち，SAM 修飾によって界面熱抵抗が大幅に低減できることを意味している．

上述した熱抵抗低減効果は，主に 3 つの要素による．すなわち，1）金と SAM 間の強固な化学吸着，2)SAM 内部の高い熱伝導率，3)SAM–溶媒界面の高い親和性によって，各相および界面での熱抵抗が低減し，全体として高い熱輸送効率を実現している．特に 2）については，高い構造秩序をもつ SAM の分子スケール構造に起因している．つまり，熱流方向に SAM の炭化水素鎖が配列することで，共有結合相互作用を介した分子内熱エネルギー伝搬が支配的となるため[21]（2 節も参照），SAM 内部の熱抵抗が大幅に小さくなっていると考えられる．また，上記 3）の要因に関連して，筆者らは様々な SAM 分子や溶媒種を用いて界面熱抵抗を測定し，その分子論的メカニズムを明らかにしてきた[21-23]．特に，水溶媒とヒドロキシル基（-OH）を有するアルカンチオール SAM 間では，著しく低い界面熱抵抗を示すが，熱エネルギーの輸送を主体的に担っているのは，クーロン相互作用ではなく，ファンデルワールス相互作用であることがわかっている[22]．このことは，界面における相互作用の強さのみならず，相乗効果的に形成される界面近傍の液体の構造（SAM 末端間の空隙に溶媒分子が入り込む）が極めて重要であることを示唆している．

これまでの研究によって，SAM 分子を適切に設計することで，溶媒に対する界面熱抵抗を柔軟に制御できることが明らかになってきた．現在，熱的・化学的により安定なフルオロカーボン系の SAM を用いた解析を行っており，ここでも SAM 末端の極性をうまく設計することが界面熱抵抗の低減に重要であることがわかってきている．

4．おわりに

マクロな熱輸送特性である熱伝導率や界面熱抵抗について，筆者らが行っている分子動力学解析を紹介した．「なぜこの値なのか」という疑問には，現象の捉え方により様々な解答があり得るが，その中でも分子の特徴との関連やその作用機序を明らかにすることにより，現象や物性値の自在な「設計」を可能にする技術の確立を志向している．また，熱輸送に際して発生する界面などヘテロな構造における強い非平衡性やピコ秒オーダーの時間応答など興味深い現象も，将来の使い道に備えて頭の片隅には置いておきたい．もとより，このような解析の適用は熱輸送現象にのみ留まるものではなく，多様な熱流体物性の発現が示す特徴と分子種との関連[24]など，様々な角度から研究を進めようとしている．

参考文献

[1] Ohara, T., Intermolecular energy transfer in liquid water and its contribution to heat conduction: A molecular dynamics study, *J. Chem. Phys.*, 111 (1999), 6492.

[2] 小原拓, 熱流束の「質」についての一考察, 熱物性, 19 (2005), 181.

[3] Torii, D. et al., Contribution of inter- and intra-molecular energy transfers to heat conduction in liquids, *J. Chem. Phys.*, 128 (2008), 044504.

[4] 小原拓, 液体中の熱伝導: 分子動力学による一描像, 伝熱, 50-211 (2011), 37.

[5] Jund, P. and Jullien, R., Molecular-dynamics calculation of the thermal conductivity of vitreous silica, *Phys. Rev. B*, 59 (1999), 13707.

[6] Matsubara, H. et al., Effects of molecular structure on microscopic heat transport in chain polymer liquids, *J. Chem. Phys.*, 142 (2015), 164509.

[7] Matsubara, H. et al., Molecular dynamics study on the role of hydroxyl groups in heat conduction in liquid alcohols, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 108, Part A (2017), 749.

[8] Matsubara, H. et al., Understanding the chain length dependence of thermal conductivity of liquid alcohols at 298 K on the basis of molecular-scale energy transfer, *Fluid Phase*

Equilib., 441 (2017), 24.
[9] Ohara, T., Contribution of intermolecular energy transfer to heat conduction in a simple liquid, *J. Chem. Phys.*, 111 (1999), 9667.
[10] Ohara, T. et al., Heat conduction in chain polymer liquids: Molecular dynamics study on the contributions of inter- and intramolecular energy transfer, *J. Chem. Phys.*, 135 (2011), 034507.
[11] Nath, S. K. and Khare, R., New forcefield parameters for branched hydrocarbons, *J. Chem. Phys.*, 115 (2001), 10837.
[12] Khare, R. et al., Simulation of vapor-liquid phase equilibria of primary alcohols and alcohol-alkane mixtures, *J. Phys. Chem. B*, 108 (2004), 10071.
[13] Haneda, J. et al., Molecular dynamics mechanism of heat conduction in 1-butyl-3- methylimidazolium ionic liquid, Proc. 11th Asian Thermophysical Properties Conference, 2016.
[14] Fang, Y. et al., Molecular thermal energy transfer in binary mixture of simple liquids, *Fluid Phase Equilib.*, 429 (2016), 293.
[15] Matsubara, H. et al., Non-equilibrium molecular dynamics simulation as a method of calculating thermodynamic coefficients, *Fluid Phase Equilib.*, 429 (2016), 293.
[16] Ohara, T. and Torii, D., Molecular dynamics study of thermal phenomena in an ultrathin liquid film sheared between solid surfaces: The influence of the crystal plane on energy and momentum transfer at solid-liquid interfaces, *J. Chem. Phys.*, 122 (2005), 214717.
[17] Torii, D. and Ohara, T., Molecular dynamics study on ultrathin liquid water film sheared between platinum solid walls: Liquid structure and energy and momentum transfer, *J. Chem. Phys.*, 126 (2007), 154706.
[18] Ulman, A., Formation and structure of self-assembled monolayers, *Chem. Rev.*, 96 (1996), 1533.
[19] Schreiber, F., Structure and growth of self-assembling monolayers, *Prog. Surf. Sci.*, 65 (2000), 151.
[20] Kikugawa, G. et al., A molecular dynamics study on heat transfer characteristics at the interfaces of alkanethiolate self-assembled monolayer and organic solvent, *J. Chem. Phys.*, 130 (2009), 074706.
[21] Kikugawa, G. et al., A molecular dynamics study on heat conduction characteristics inside the alkanethiolate SAM and alkane liquid, *Int. J. Heat Mass Trans.*, 78 (2014), 630.
[22] Kikugawa, G. et al., A molecular dynamics study on heat transfer characteristics over the interface of self-assembled monolayer and water solvent, *ASME J. Heat Trans.*, 136 (2014), 102401.
[23] Hung, S.-W. et al., Mechanism of temperature dependent thermal transport across the interface between self-assembled monolayer and water, *J. Phys. Chem. C*, 120 (2016), 26678.
[24] 菊川他, クラスタリング手法を用いた液体の多次元熱流体物性のデータ分析, 第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 2017.

ナノスケールの微細構造が流体－固体界面のエネルギー輸送機構に与える影響

Influence of Nanostructures on Energy Transfer Mechanism over a Fluid-Solid Interface

芝原　正彦（大阪大学）
Masahiko SHIBAHARA (Osaka University)
e-mail: siba@mech.eng.osaka-u.ac.jp

1．はじめに

近年の分子動力学解析を用いた研究において，固体と液体間の界面熱抵抗に対する表面状態や表面付着構造の影響が議論されている[1-11]．また，ナノメートルスケールの加工・観察技術の発展によりナノメートルスケールの構造（ナノ構造）を持つ表面特性の理解が進んでいる．伝熱分野においても，マイクロチャネル内の表面にナノワイヤを付着させた熱伝達実験により，流動沸騰において熱伝達が促進されるという実験結果[12]や微細構造物を凝縮面上に設けたことで凝縮熱伝達率が向上したという報告[13]がある．また，ナノ構造を設けると，液膜の蒸発速度が平面に比べて大きくなるという結果も報告されている．このように実験やシミュレーションによって伝熱面にナノ構造を設けることで，熱抵抗や相変化時の熱伝達が変化するというさまざまな結果が報告されているが，そのメカニズムの議論は十分であるとはいえない．

前述のような流体－固体間のエネルギー輸送に対してナノ構造が与える影響を原理から議論するには，流体－固体界面でのエネルギー輸送現象を高い時空間分解能で解析して理解することが可能な分子動力学シミュレーションが有効であると考えられる．何故なら，分子動力学シミュレーションは，実験では可視化することができない熱流束とその内訳，すなわち，分子スケールの空間解像度で瞬間的にどのような物理作用でエネルギーが運ばれているかを，直接的に可視化することができる唯一の方法であるためである．本稿では，ナノ構造（スリット構造，ナノ粒子）が固液界面熱抵抗に与える影響と，ナノ構造が凝縮時の界面熱抵抗に与える影響について，著者らが非平衡分子動力学解析と分子スケールのエネルギー輸送式を用いて行った例を概説する．

2．スリット状微細構造が固液界面熱抵抗に与える影響

本章ではナノメートルスケールのスリット状微細構造が固液界面熱抵抗に与える影響について非平衡分子動力学解析によって検討した例を述べる[14,15]．本研究では，液体領域を二つの固体壁面で挟んだ計算モデルを用い，下壁面に設けるスリット状微細構造の間隔 L を L = 0.0（フラット面），0.7, 1.4, 2.8 nm, 高さ h を 0.0（フラット面）, 0.7, 1.4, 2.1 nm とそれぞれ変化させた．固体壁面は上下面とも原子 4 層からなるとし, Langevin 法を用いて，流体領域側から 3 層目の固体 1 層を温度制御することで，上下壁面間に 50 K の温度差を設けた．流体分子は，並進の自由度のみを有する 12-6 Lennard-Jones 流体分子モデルを用い，水分子と同等の分子量 18.0 を有するとした．各物理量は 5 ns の平均値で示す．最終的な系内圧力は 5.6×10^4 - 4.2×10^6 Pa の範囲内とした．本研究では，界面熱抵抗の圧力依存性について調査し[14,15]，上記の圧力範囲内では，系内圧力の差が界面熱抵抗の変化に対して定性的には大きく影響しないことを確認した．固体（上下壁面および微細構造）原子は，鉄原子の原子量 55.8 を有する粒子とし，固体－固体間のポテンシャルには 12-6 Lennard-Jones ポテンシャルを用いた．また，固体－流体分子間のポテンシャルには，12-6 Lennard-Jones ポテンシャルにポテンシャルパラメータ α を挿入した式を用いた．ポテンシャルパラメータ α は微小液滴の接触角に対して一意な関係があることが知られており[16]，α を変化させることで，固液間相互作用強さの影響を調べた．なお, 本稿中のパラメータ α は，流体分子間ポテンシャルと固体原子間ポテンシャルの谷の深さから Lorentz- Berthelot 則により標準値を求めて，その標準値を用いて無次元化した値で示している．したがって，各章における流体分子と固体原子の組み合わせによって，α と濡れ性

の関係は変化する．

図 1 に，固液間相互作用強さを表すポテンシャルパラメータαをさまざまに変化させた際の，構造間隔 L = 1.4 nm の場合の構造高さ h と界面熱抵抗の関係を示す．ここでは，下壁面上部を z = 0.0 nm としたときの微細構造を含めた z = 0.0 - 2.1 nm の領域を固液界面領域と定義して，本領域における温度降下と z 方向に通過するエネルギー流束から界面熱抵抗を求めた．

図 1 より，αが比較的小さい場合（α = 0.1），スリット構造が付着する面では，フラット面に比べて界面熱抵抗は増加していることがわかる．また，αが 0.1 より大きい場合，微細構造を設けた壁面の界面熱抵抗はフラット面の界面熱抵抗に比べて減少しており，また界面熱抵抗と構造高さの間に負の相関が観察される．以上のことから，固液界面熱抵抗は構造高さ，構造間隔，および固液間相互作用強さによって変化し，それらの条件によって，フラット面に比べて界面熱抵抗が増加する場合と減少する場合が存在することがわかる．

スリット状微細構造が固液界面エネルギー輸送に及ぼす影響をより詳細に議論するために，界面領域を通過するエネルギー流束が分子スケールのどのような物理要因によって構成されているかを調べた．図 2(a)-(c)に，下壁面近接領域（z = 0.0 - 0.35 nm）における巨視的な熱伝導方向（z 方向）のエネルギー輸送の内訳を示す．

図 2(a)-(c)では，巨視的な熱伝導方向の全エネルギー流束を，以下の式(1)の右辺第 1 項の各粒子自身の運動による寄与および第 2 項の各粒子間の相互作用による寄与に分けて示している[3].

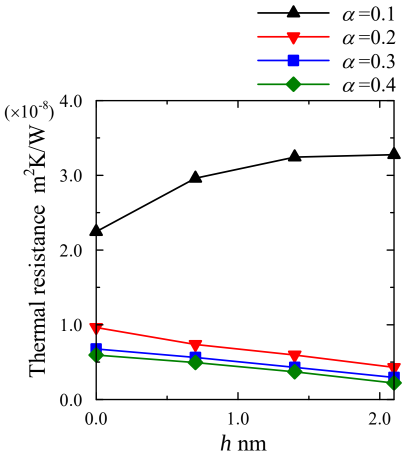
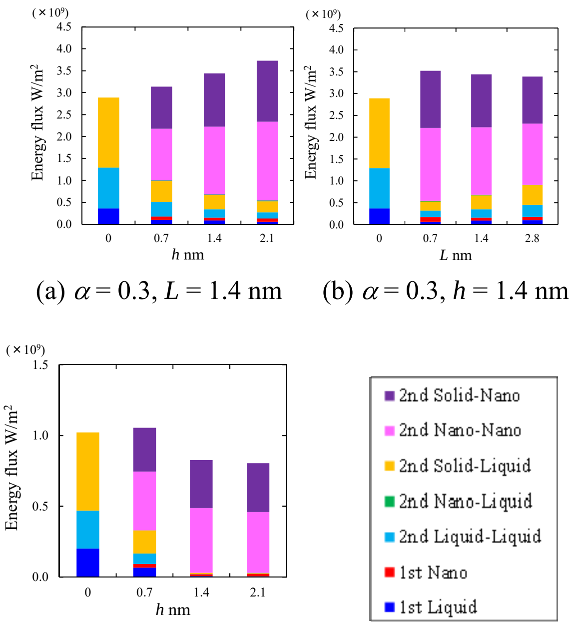


Fig.1 Effects of the height of slit structures and potential parameter α on the interfacial thermal resistance (L = 1.4nm).



(a) α = 0.3, L = 1.4 nm　(b) α = 0.3, h = 1.4 nm

(c) α = 0.1, L = 2.8 nm

Fig.2 Effects of the height or the width of slit structures on the energy flux components at the control volume (z = 0.0 - 0.35 nm).

$$Q_z = \frac{1}{V}\left[\sum_i E_i v_{z,i} + \frac{1}{2}\sum_i \sum_{j \neq i} z_{ij}^* \left(\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{F}_{ij}\right)\right] \qquad (1)$$

凡例中の“1st”，“2nd”はそれぞれ第 1 項，第 2 項の寄与を意味し，“Liquid”，“Solid”，“Nano”はそれぞれ流体分子，壁面原子，スリット構造を構成する原子の寄与を意味する．例えば，2nd Nano-Liquid は，式(1)の右辺第 2 項の構造原子－流体分子間の相互作用による寄与を示す．フラット面に比べて界面熱抵抗が減少するα = 0.3，L = 1.4 nm の場合，図 2(a)より，構造高さが大きくなると全エネルギー輸送量に対する流体分子の寄与が減少し，スリット構造を構成する原子の寄与がその減少分以上に増加し，全エネルギー流束が増加していることがわかる．また図 2(b)より，α = 0.3，h = 1.4 nm の場合，構造間隔が 2.8 nm から 1.4 nm，0.7 nm と小さくなる場合のエネルギー輸送の内訳の変化は，先に述べた構造高さが大きくなる場合と同様の傾向を示していることがわかる．

一方，図 2(c)より，フラット面に比べて界面熱

抵抗が増加する $\alpha = 0.1$, $L = 2.8$ nm, $h = 1.4$, 2.1 nm の場合，フラット面に比べて流体分子の寄与が著しく減少し，構造物の寄与が支配的となっており，全エネルギー流束が減少している．以上の結果より，フラット面に比べて界面熱抵抗が減少する場合と増加する場合でスリット構造を含む界面領域におけるエネルギー輸送メカニズムが大きく異なることがわかる．

３．ナノ粒子が固液界面熱抵抗に与える影響

本章では固液界面に付着したナノ粒子が固液界面熱抵抗に与える影響について非平衡分子動力学解析によって検討した例を述べる[11,17,18]．本研究では，ナノ粒子の構造やサイズによる影響を調べるために，二通りのナノ粒子モデル(a), (b)を用いた．model (a)は炭素原子 60 個からなるフラーレン構造のナノ粒子であり，model (b)は炭素原子 542 個からなるアモルファス構造の球状ナノ粒子であり，それぞれ粒子 1 層の厚みを有するナノ粒子付着層を形成している場合を考える．図 3 に計算系の一例を示す．

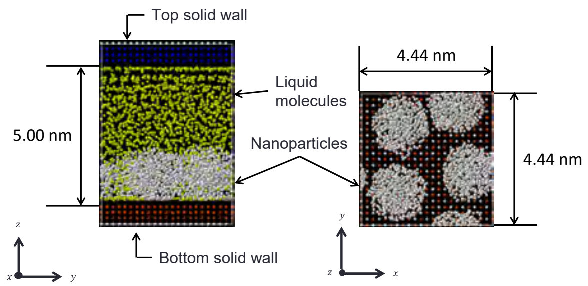
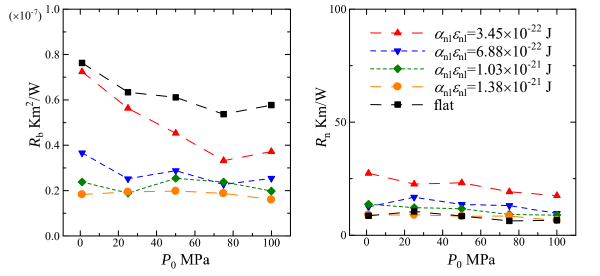


Fig. 3 An example of a calculation model (model (b)).

計算系は前章と同様に，上下を二つの平行な固体壁で挟まれた液体分子系を用いて，下壁面上にナノ粒子層が存在している状態を模擬した．上下の固体壁面は Langevin 法により下壁面は 115 K，上壁面は 85 K に温度制御した．液体分子，壁面原子，ナノ粒子にはそれぞれ Ar，Pt，C と同等の質量を有する粒子モデルを用いた．同一ナノ粒子内の原子間のポテンシャルには Brenner ポテンシャルを用いた．異分子間におけるポテンシャルの計算には前章と同様に 12-6 Lennard-Jones ポテンシャルの式にパラメータ α を挿入した式を用いた．この α を変化させることで壁面–液体間(α_{wl})，ナノ粒子－液体間(α_{nl})の相互作用強さによる影響を調べた．本研究では，$\alpha_{wl} = 0.0510, 0.128$，$\alpha_{nl} = 0.396, 0.790, 1.19, 1.58$ とし，全 8 通りのポテンシャルパラメータで計算を行ったが，本章では α_{wl} と α_{nl} の相対的な比較のため，α に Lennard-Jones ポテンシャルのエネルギーパラメータ ε を掛けた値で表記する．系内の設定圧力は 1.00-100 MPa とし，誤差は±1.0 MPa 以内に制御した．炭素ナノ粒子は下壁面上を動く可能性があるため，本章では，固液界面近傍における熱抵抗として，下壁面最上部における界面熱抵抗 R_b と単位長さあたりのナノ粒子層熱抵抗 R_n の二つを分離して考えた．すなわち，前章のようにナノ粒子層を含む固液界面熱抵抗を考える場合は $R_b+R_n\times\Delta z$（Δz はナノ粒子層厚さ）となる．

図 4 に，アモルファス炭素ナノ粒子層が固液界面に付着する場合の計算結果を示す．計算条件として，壁面－液体分子間相互作用強さが一定の場合に，ナノ粒子－液体間相互作用強さ $\alpha_{nl}\varepsilon_{nl}$ を変化させた際の，設定圧力 P_0 と固液界面近傍の熱抵抗 R_b，R_n の関係を示す．図 4 (1) は設定圧力 P_0 と界面熱抵抗 R_b の関係，図 4 (2) は設定圧力 P_0 と単位長さあたりのナノ粒子層熱抵抗 R_n の関係を示している．図 4 (1) より，設定圧力 P_0 の増加に伴い，界面熱抵抗 R_b は減少する傾向があることがわかるが，これは表面にスリット構造が付着する場合と同様の傾向である[15]．また，$\alpha_{nl}\varepsilon_{nl}$ の増加に伴い，界面熱抵抗 R_b の圧力依存性は小さくなる．



(1) R_b　　(2) R_n

Fig. 4 Relation between P_0 and the interfacial thermal resistances in the cases of surfaces with or without nanoparticles (model (b), $\alpha_{wl}\varepsilon_{wl} = 1.73\times10^{-21}$ J).

図 5 に，壁面－液体間相互作用強さ一定の条件におけるナノ粒子層内の液体密度 ρ_l と固液界面近傍における熱抵抗 R_b との関係を示す．図 5 中 flat surface(a),(b)は，計算領域の大きさを変化させた二

通りのフラット面の結果を示している．図 5 より，ナノ粒子層の有無，サイズ・構造に関係なく，ρ_t と界面熱抵抗 R_b には負の相関があることが分かる．また，ρ_t とナノ粒子層熱抵抗 R_n の相関も調べた結果より，ρ_t と界面熱抵抗 R_b との相関と比べて相関が弱いことがわかった．圧力や相互作用強さにより ρ_t は変化することから，ナノ粒子層内の液体密度が変化することが図 4 に示す界面熱抵抗の変化の一因となると考えられるが，図 5 より，ナノ粒子層が付着している場合はフラット面の相関曲線には一致せず，ナノ粒子内のエネルギー輸送が影響していることが分かる．

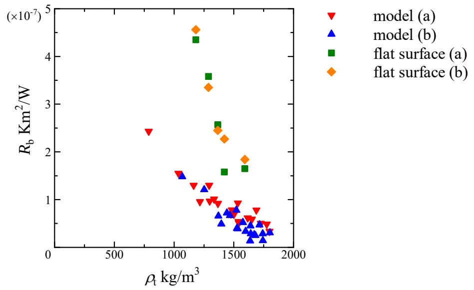
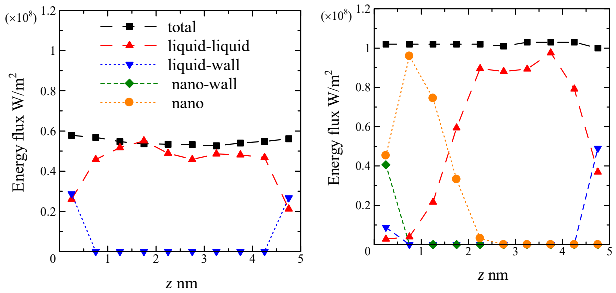


Fig. 5 Relations between ρ_t and the interfacial resistance R_b in the cases of surfaces with or without nanoparticles ($\alpha_{wl}\varepsilon_{wl} = 6.88 \times 10^{-22}$ J).

図 6 に，ナノ粒子層の付着による界面熱抵抗の減少量が大きい場合の巨視的な熱伝導方向のエネルギー流束分布の計算例を示す．凡例中の“liquid”, “wall”, “nano”はそれぞれ流体分子，壁面原子，ナノ粒子を構成する原子の式(1)の右辺第 2 項の寄与分を意味し，“total”は式(1)の右辺第 1 項の寄与を含めた全エネルギー流束を示している．なお，式(1)の右辺第 1 項は図中には示していない．図 6 (1) はナノ粒子の付着のないフラット面の場合，図 6 (2) はナノ粒子層（model(b)）が付着した固液界面の場合を示している．図 6 (1)と(2)を比較すると，ナノ粒子層が付着することで固液界面近傍において液体分子によるエネルギー輸送量は減少しているが，それ以上にナノ粒子を通過するエネルギー輸送量は増加していることがわかる．一方で，本稿では結果は割愛するが，ナノ粒子層の付着によって界面熱抵抗が増加する場合では，ナノ粒子層が付着することで，ナノ粒子を通過するエネルギー輸送量は増加するが，固液界面近傍において液体分子によるエネルギー輸送量がそれ以上に減少することが分かった．このような界面熱抵抗と界面エネルギー輸送機構の関係は前章のスリット構造が付着した場合の関係と類似している．



(1) flat surface (2) surface with nanoparticles

Fig. 6 Influence of nanoparticles on the profiles of energy flux components ($\alpha_{wl}\varepsilon_{wl} = 6.88\times10^{-22}$ J, $\alpha_{nl}\varepsilon_{nl} = 1.38\times 10^{-21}$ J).

4．スリット状微細構造が凝縮時の界面熱抵抗に与える影響

本章では，第 2 章で述べたスリット状構造が凝縮時の界面熱抵抗に与える影響について非平衡分子動力学解析によって検討した研究例を述べる [19-21]．本章では，気液二相からなる流体領域を二つの固体壁で挟んだ計算モデルを用いた．流体領域中の流体分子，壁面及びスリット状ナノ構造の構成原子にはそれぞれアルゴン分子，白金原子の質量を有する粒子モデルを用いた．下壁面に x 方向に無限に伸びたスリット状ナノ構造を y 方向に周期的に設け，構造の z 方向の高さ h を 0.0（フラット面），1.6 nm と変化させ，構造の y 方向の幅及び間隔 L は 1.6 nm で一定とした．ここで，下壁面の最上部を $z = 0$ nm と定義する．固体原子と流体分子間のポテンシャルには，前述したポテンシャルパラメータ α を挿入した式を用いた．α を 0.06，0.09 と変化させることで固体原子－流体分子間の相互作用強さの影響を調べた．また，100 K の壁面上に存在する 4000 個の Ar 分子からなる液柱の接触角は，ポテンシャルパラメータ α が 0.06, 0.09 のとき，それぞれおよそ 90 °, 0 °と変化することを確認した．

次にシミュレーションの手順について述べる．最初に上壁面近傍に液膜を設け，Langevin 法を用いて上下壁面を 130 K に制御して 10 ns 間の計算を行う．この手順により，流体領域全体を気液二相からなる温度 130 K の熱平衡状態とする．次に，

t = 0 ns において下壁面を 85 K に制御することで流体領域下部に過飽和状態を生じさせる．その後，下壁面への凝縮が生じていると考えられる 5 ns 間について計算し，各物理量を求めた．

本章では，z = 0 - 4 nm の区間を下壁面近傍領域と定義し，下壁面近傍における界面熱抵抗 R_{th} を求めることを考えた．下壁面近傍における系内温度分布から導かれた温度勾配$\Delta T/\Delta z$ 及び式(1)から算出した巨視的なエネルギー輸送方向（z 方向）に通過する下壁面近傍の熱流束 Q_z から，単位長さあたりの下壁面近傍の界面熱抵抗 R_{th} を求めた．温度については分子の運動エネルギー各方向成分に対してエネルギー等分配則が成立すると仮定し，時間平均することで温度に相当する物理量を求めた．

各スリット構造高さ h，ポテンシャルパラメータαの条件での t = 0 - 5 ns の時間平均ならびに z = 0 - 4 nm の空間平均を行った熱流束，温度勾配，界面熱抵抗の値を表 1 に示す．このとき，熱流束は z = 0 - 4 nm の下壁面近傍領域の値の算術平均を，温度勾配については T と z について最小二乗法を用いて得られた傾きを示す．表 1 より，同一αの比較では単位長さあたりの界面熱抵抗はスリット構造の存在によって小さくなっていることがわかる．また，スリット構造の有無によらず，α が増加すると単位長さあたりの界面熱抵抗は小さくなる．この理由について，熱流束，温度勾配に着目すると，熱流束，温度勾配はいずれもαの増加，スリット構造の存在によって大きくなることがわかる．

次に凝縮時の界面熱抵抗を高時空間分解することを考える．分子動力学解析で式(1)を適用するということは，運動方程式の数値積分の時間刻みの時間分解能で各分子が輸送するエネルギー成分を逐次算出することを意味している．表 1 に示す各 h, α の条件での 1 ns の平均時間毎の z =0 - 4 nm における単位長さあたりの界面熱抵抗の時間変化を図 7 に示す．また，そのときの凝縮の進行状態を図 8 に示す．界面熱抵抗はαの増加，スリット構造の存在によって小さくなり，5 ns 平均から得られた界面熱抵抗の場合と同様の傾向である．また，時間経過に応じて界面熱抵抗は小さくなる傾向がある．これは，下壁面への凝縮が進行するにしたがって熱流束は上昇し，温度勾配は小さくなることにより，熱流束，温度勾配のいずれも界面熱抵抗が小さくなる方へ変化することによる．また，下壁面近傍領域を 0.5nm の空間解像度で分解

Table 1 Simulation conditions and the averaged interfacial thermal resistance.

Case	h nm	α -	Q_z MW/m^2	$\Delta T/\Delta z$ K/nm	R_{th} mK/W
(1)	0.0	0.06	50.34	1.251	24.86
(2)	1.6	0.06	133.2	1.654	14.61
(3)	0.0	0.09	118.5	1.768	14.92
(4)	1.6	0.09	143.3	1.802	12.58

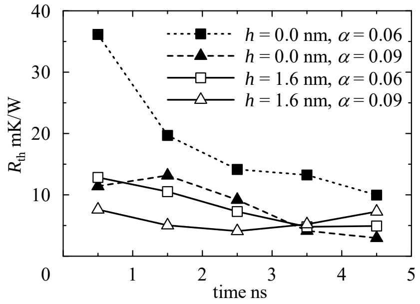
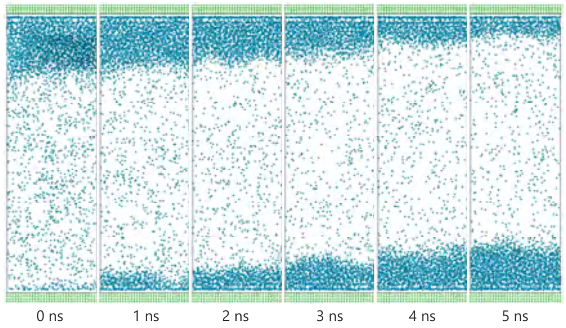
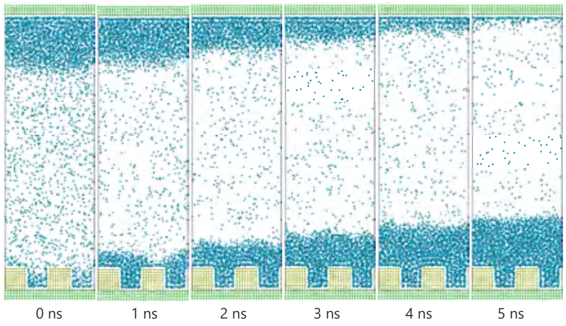


Fig.7 Influences of h and α on the time history of R_{th}.



(a) h = 0.0, α = 0.06



(a) h = 1.6, α = 0.06

Fig.8 Influences of h and α on the condensation process during 5ns.

した界面熱抵抗分布の変化を調べた結果より，各 h, α の条件での流体分子の初期吸着状態[21]や凝縮の進行速度の影響を強く受けることが分かった．現在，柱状ナノ構造の影響，局所的に濡れの異なる微細構造の影響，流体分子が水分子の場合について，同様の解析を行い，時空間分解した界面熱抵抗と微細構造の関係を調べている．

５．結　言

流体－固体間のエネルギー輸送に対してナノメートルスケールの微細構造が与える影響について，非平衡分子動力学解析と分子スケールのエネルギー輸送式を用いた研究例を挙げて概説した．具体的には，スリット状微細構造ならびにナノ粒子が固液界面熱抵抗に及ぼす影響，同様の微細構造が凝縮時の界面熱抵抗に及ぼす影響について，微細構造の特性が界面熱抵抗に与える影響を定量的に示し，その変化の機構について分子スケールのエネルギー輸送の観点から考察した．その方法として，式(1)から求めた界面領域の熱流束の構成成分を分析すること，または，式(1)から求めた界面領域の熱流束を高時空間分解して評価することで，相変化時を含めて微細構造が流体－固体界面熱抵抗に与える影響を議論した．今後，表面特性，特に濡れ性の変化やナノ・マイクロ微細構造の付加などを用いて，相変化を含む流体－固体間のエネルギー輸送を制御するための研究が増加していくと考えられるが，非平衡分子動力学解析を用いた熱流束の直接的可視化は，そのような場合の界面エネルギー輸送量変化の定量的予測を行うためだけでなく，界面近傍における高時空間分解したエネルギー輸送変化機構の議論，さらには，最適な界面熱輸送の設計予測に用いられていくものと考えている．

参考文献

[1] Maruyama, S. and Kimura, T., *Thermal Science & Engineering*, Vol. 7, No. 1 (1999), pp. 63-68.

[2] Xue, L., et al., *Journal of Chemical Physics*, Vol. 118, No. 1 (2003), pp. 337-339.

[3] Ohara, T. and Torii, D., *Journal of Chemical Physics*, Vol. 122, (2005), 214717-1-9.

[4] Kim, B.G., et al., *Journal of Chemical Physics*, Vol. 129, (2008), 174701-1-9.

[5] 長山暁子, 他 2 名, 日本機械学会論文集 B 編, 73 巻，728 号，(2007)，pp. 176-186.

[6] Nagayama, G., et al., *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.49, No.1, (2010), pp.59-66.

[7] Wang, Y. and Keblinski, P., *Applied Physics Letters*, 99, (2011), 073112-1-3.

[8] 芝原正彦，井上浩介，日本機械学会論文集 B 編，第 74 巻 737 号, (2008), pp.172-176.

[9] Shibahara, M. and Takeuchi, K., *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 12, No. 4, (2008), pp. 311-319.

[10] Shibahara, M. and Ohara, T., *Journal of Thermal Science & Technology*, Vol. 6, No. 2, (2011), pp. 247-255.

[11] Matsumoto, T., et al., *the Progress in Computational Fluid Dynamics*, Vol. 13, Nos. 3/4, (2013), pp.162-171.

[12] Youmin, H., et al., *ACS NANO*, Vol. 9, (2015), pp. 71-81.

[13] Li, D., et al., *Nano Lett*, 12 (2012), 3385.

[14] 芝原正彦，他 3 名，第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2015).

[15] Shibahara, M., et al., *Proc. of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference*, (2016) PRTEC-14385.

[16] Shi, B. and Dhir, V. K., *Journal of Chemical Physics*, Vol.130, (2009), 034705.

[17] Miyazaki, Y., et al., *Proc. of The 27th International Symposium on Transport Phenomena*, (2016).

[18] Shibahara, M., et al., *Proc. of 1st Asian Conference on Thermal Sciences*, (2017) ACTS-P00061.

[19] 諏訪孝典，芝原正彦，第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2016).

[20] Uno, G., et al., *Proc. of The 27th International Symposium on Transport Phenomena*, (2016).

[21] Suwa, T., et al., *Computers and Fluids*, (2017), in press.

非平衡プラズマと触媒の複合効果によるメタン転換
Plasma-Induced Catalysis for Methane Conversion

野崎　智洋，亀島　晟吾（東京工業大学）
Tomohiro NOZAKI, Seigo KAMESHIMA (Tokyo Institute of Technology)
e-mail: tnozaki@mech.titech.ac.jp

1．はじめに

我々の研究グループでは，非平衡プラズマを用いたメタン転換および有効利用を目的とした研究を行っている．

メタンを研究対象にしているのにはいくつかの理由がある．第一に，メタンは天然ガスの主成分であり１次エネルギーとして入手できること，またバイオガスなど再生可能エネルギーとしての側面も有している．メタノールなど加工された二次エネルギーではないため，総合的なエネルギーおよび炭素利用効率の点で，メタンを出発原料に用いるのは有利である．第二に，メタンは炭化水素の中で最も安定な化合物であり，安定な C-H 結合をいかに解離させるかが経済的なメタン転換において重要な研究テーマである．主に触媒化学の分野で研究されているが，昨今の CO_2 排出量削減，水素エネルギー社会を背景に，さらなる低炭素化・高効率利用が求められている[1]．メタン転換の律速過程（C-H 結合解離）を光や電子などを使い，熱エネルギー以外の方法で加速できれば，熱化学反応では対応できない新しい反応制御を実現できるうえ，産業応用にも大きなインパクトを与えることができる．第三に，メタンは C1 化学に代表される有機合成だけでなく，カーボンナノチューブ，グラフェン，ダイヤモンドや DLC (Diamond-like Carbon) など，炭素系機能材料の合成に使われる代表的なプロセスガスで，プラズマ CVD でも多用されている．特に，プラズマと接する基板が触媒機能を有している場合，触媒 CVD と呼ばれカーボンナノチューブ合成に端を発し，新しいプラズマ材料科学の研究が注目されるようになった．プラズマと触媒ナノ粒子の界面に形成されるプラズマシース（一種の境界層領域）における界面反応のダイナミクスを科学的に解明することが必須であり，新しい学術を拓く可能性を秘めた未踏領域の研究と位置付けられている[2]．

プラズマ反応場の形成には電力を消費するため，エネルギー分野への応用は限定的と考えられてきた．近年は，再生可能エネルギーの急速な普及にともない，電力を使った化学反応制御が広く認識されるようになった．プラズマを使ったメタン転換も，特に海外では注目を集め，レビュー論文[3,4]や国際会議におけるシンポジウムおよびその特集号[5]が広く配信されている．プラズマに期待されるのは，反応温度を低くできること，温度勾配に依存しないエネルギー授受が可能になること，電子を利用して低温で安定分子を活性化できること，などがあげられる．

本稿では，非平衡プラズマによるメタン活性化機構について述べた後，大気圧プラズマと触媒を複合させた反応場をメタンドライ改質（$CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2$）に適用した例を紹介する．

2．メタンの活性化

メタンは最も安定な炭化水素で，改質過程においてC-H結合をいかに解離させるかが総括反応速度を支配する．3 つの反応について図 1 に示したポテンシャル曲線および R1～R3 を対比させて，C-H 解離反応について考察する．粗い近似であるが，図 1(a)(b)の横軸は C-H 結合距離に，同図(c)の横軸は表面原子と吸着分子の距離に相当する．

$CH_4 + M = CH_3 + H + M$
$E_1 = 434$ kJ/mol $\Delta H = 440$ kJ/mol　　R1
$CH_4 (+ Ni) = CH_3^* + H^*$
$E_2 = 100$ kJ/mol　　R2
$CH_4 + e = CH_3 + H + e$
$E_3 = 868$ kJ/mol　　R3

ここで，E_1～E_3 は各反応の活性化エネルギーを示しており，R1 に対する反応熱は 300 K において$\Delta H = 440$ kJ/mol である．R2 で示した“*”は吸着種で

あることを示す．熱分解反応(R1)の場合，活性化エネルギーと反応熱はほぼ等しく[6]，この反応を生起するためには 1000°C を超える高温を必要とする（図 1(a)）．C-H の活性化において高温熱エネルギーから脱却することが重要な命題のひとつであり，熱分解反応がメタン活性化に利用される例は多くない．不均一反応(R2)では，メタンが固体表面に吸着することから反応が始まる[7]．物理吸着したメタンが化学吸着に移行すれば，C-H 結合は解離したとみなす（図 1(c)）．このとき，活性化エネルギー（E_2）を得る必要があり，800°C 相当の熱エネルギーが必要になる．解離吸着に至らない場合，物理吸着した分子は脱着し，ラングミュアの等温吸着式で表される吸着平衡が成立する．DFT (Density Functional Theory) による予測では，$CH_n{}^*$の脱水素反応に要する活性化エネルギーは，水素の数が少ないほど小さくなるため[8]，一旦脱水素が始まると炭素原子に至るまで逐次的に水素が脱離する．炭素原子は過渡的な吸着状態を経て触媒金属と固溶するため除去が難しく，改質反応

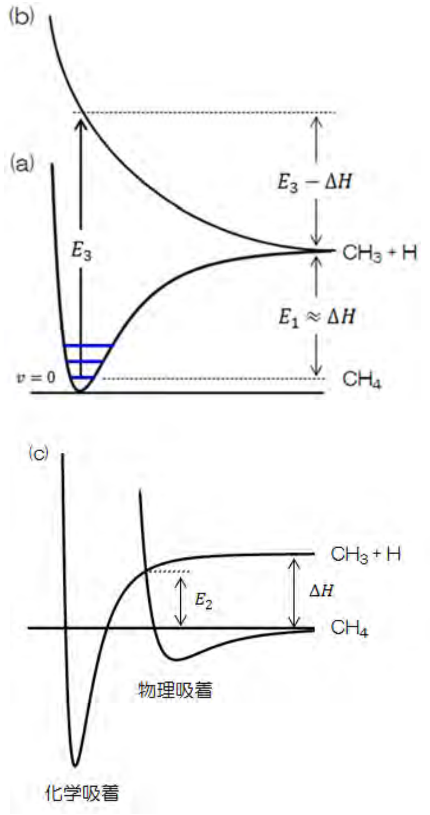


図 1 (a)メタンのポテンシャル曲線と(b)電子励起による解離曲線（気相均一反応），(c)吸着のポテンシャル曲線（不均一反応）

では炭素析出を抑制するための反応制御が必要になる．

電子反応の場合(R3)，メタンは電子励起状態に活性化され，熱反応では得られない高い励起状態に遷移する．見かけの活性化エネルギーとして 868 kJ/mol を要し，これは C-H 結合解離に必要なエネルギー（ΔH= 440 kJ/mol）の約 2 倍に相当する(図 1(b))[9]．メタンに与えられた余剰エネルギー（$E_3 - \Delta H$）は，分子間衝突を経て熱エネルギーとして散逸する．電子-分子衝突断面積と電子エネルギー分布関数の積を電子エネルギーに対して積分することで，電子非弾性衝突に対する反応速度定数を求めることができる[10]．この時，CH_3，CH_2，CH，C を生成する衝突断面積は大部分がオーバーラップしているため[9]，CH_3だけが選択的に生成されることはない．電子エネルギー分布関数に依存した割合で，CH_nが同時に生成されるため必然的に反応選択性は低くなる．エネルギー分布の広がりが小さい電子ビームを使っても，衝突断面積がオーバーラップしている以上，反応選択性を大幅に改善することは難しい.熱反応の場合，逐次的に脱水素反応が進行するため，反応時間の制御によって特定の活性種（CH_n）を選択的に生成できる．電子励起によるメタン活性化は，反応温度の制約を受けない反面，エネルギー効率，反応選択性の点で熱反応より不利になることが多い.

間接的なメタン活性化反応として，O や OH などの活性種を利用するルートがある(R4～R6)[11]．これらの反応の活性化エネルギーは，不均一反応(R2)と比較して格段に小さい．しかし，R4，R5 は吸熱反応であるため，十分な熱エネルギーを与えなければ(温度の閾値を越えなければ)，プラズマで O や H を与えても反応は自発的に進行しない.OH の場合（R6），活性化エネルギーが小さいことに加え発熱反応であるため，より低い温度で反応が進む可能性がある．大気圧プラズマによるメタン部分酸化反応に関して，気相ラジカル反応の詳細を論じているので興味のある方は参照されたい[12,13].

$CH_4 + O = CH_3 + OH$

E_4 = 31.8 kJ/mol, ΔH_4 = 11.7 kJ/mol　R4

$CH_4 + H = CH_3 + H_2$

E_5 = 36.6 kJ/mol, ΔH_5 = 3.35 kJ/mol　R5

$CH_4 + OH = CH_3 + H_2O$

$E_6 = 10.2$ kJ/mol, $\Delta H_6 = -60.9$kJ/mol　R6

3．大気圧プラズマと触媒の複合反応

低温でメタンを活性化できることは大変魅力的である．しかし，エネルギーコスト，反応選択性の点で不均一反応に及ばず，プラズマだけを使ったメタン転換は研究室レベルの検討に留まっている．しかし，非平衡プラズマと触媒を複合させると，低い温度で表面反応を促進できることが見いだされ注目を集めるようになった．これは触媒 CVD や PE-ALD（Plasma-enhanced Atomic Layer Deposition）の範疇で議論されるが，そのほとんどがナノカーボンなど付加価値の高い機能材料を合成する場合で，高真空を必須とするプラズマ理工学的手法に限定されている．近年注目を集めているのは，大気圧プラズマを用いて CH_4，CO_2 など安定分子を有用物質に転換する反応で，触媒（または触媒機能を有する固体壁）とプラズマの相互作用により実現される．

大気圧プラズマの定義は必ずしも明確でないが，大気圧から 1/10 気圧程度の比較的高い圧力で形成される非平衡プラズマを指す[14,15]．雰囲気圧力が高いために，気体の絶縁破壊機構や電子エネルギー緩和時間など，プラズマの特性パラメーターが従来のプラズマ（減圧下の非平衡プラズマおよび高温の熱プラズマ）の範疇から大きく外れているのが特徴で，電子温度と電子密度から計算されるデバイ長が 1－100 μm の範囲に収まることが多い．大気圧プラズマに関する基礎と応用は他の優れた成書を参照されたい[16-18]．

4．振動励起分子とプリカーサー吸着

一般に，非平衡プラズマによって生成されるラジカルが表面反応を促進すると考えられるが，分子の励起状態が複雑かつ多岐にわたるため，具体的にどのようなラジカルが生成され表面反応に関与しているか全容解明には至っていない．電子衝突による CH_4 活性化過程を 1 次元非定常でシミュレーションした結果，弱電離プラズマでは CH_3 などラジカル種の濃度は低く，常温常圧では約 1 μs で二量化（$CH_3 + CH_3 + M = C_2H_6 + M$）して消滅することが分かった[19]．気相で生成された CH_3 や OH などは反応性が高いため，大気圧環境では気相反応で消滅しやすく，そもそも表面反応に関与していない可能性が高い．最近の研究では，低エネルギー電子（0.1–0.5 eV）によって生成される振動励起分子が，触媒表面反応と深く関わっていることが示唆されている[19,20]．振動励起分子の寿命は比較的長く，触媒表面まで輸送され解離吸着を促進する可能性が高い．

触媒反応は，表面に吸着した分子同士が反応する Langmuir-Hinshelwood 機構（L-H 機構），あるいは吸着分子と気相分子の反応による Eley-Rideal 機構（E-R 機構）に大別される．励起された分子が表面反応に関与する場合，分子の吸着と脱着は熱平衡状態にないため，ラングミュアの等温吸着式を用いて定式化できない．このような吸着過程はプリカーサー吸着の範疇で説明されるが，活性種のエネルギー状態が多岐にわたり，測定の難しさも相まって定量的な説明を与えることが難しい．

図 2 はプリカーサー吸着を仮定して，振動励起されたメタンが解離吸着する時の状態を表している．振動励起メタンは弱い分子間力で表面に束縛され，一時的に物理吸着に至る．熱平衡なら再び脱着する条件でも，振動励起エネルギー有する "hot"な分子は，その内部エネルギーを利用してエネルギー障壁（E_a）を超える可能性が高まり，化学吸着へ移行し解離する．分子線を使った実験から，メタンが予め振動励起されると金属触媒表面で解離吸着速度が数桁大きくなり，低温で C-H 結合を解離する反応に絶大な効果を発揮することが示されている[20]．同様の反応機構は，振動励起状態を形成しやすい，CO_2 や H_2O に対しても適用できる．

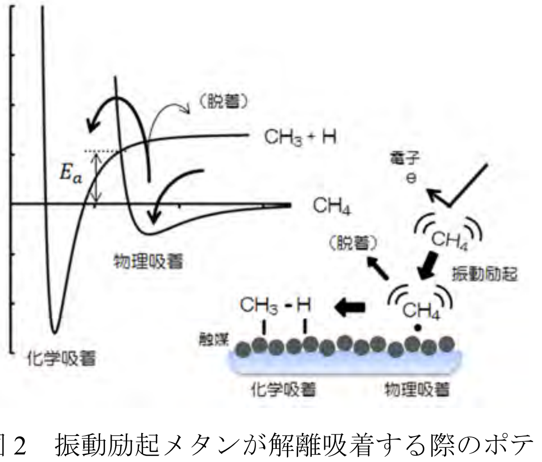


図 2　振動励起メタンが解離吸着する際のポテンシャルエネルギーを表した模式図

原子・分子の吸着は発熱現象であり，平衡的には低温であるほど有利に生じる．しかし，物理吸着から化学吸着に至るにはエネルギー障壁があるため，これを超えるためには高温の反応場を与えなければならない．一方，分子が予め励起されていれば，反応温度は低くてもエネルギー障壁を超える可能性が高まり，低温で反応速度を加速する効果が発現する．

５．CH_4/CO_2 改質への応用

非平衡プラズマを用いると，CH_nなどのラジカル種より，振動励起分子の方が効率よく，かつ多量に生成される[19]．大気圧プラズマのような高電圧・低電流プラズマより，マイクロ波プラズマなど低電圧・高電流プラズマの方が，振動励起分子の生成に好ましいことが示唆されている[21]．しかし，マイクロ波プラズマは高価な電源，真空設備を必要とすること，電源とプラズマのインピーダンスマッチングが難しくエネルギー効率が低くなりやすいこと，高真空環境は多量の物質処理に不向き，などの欠点がある．応用まで考えるなら，低コスト・低エネルギー消費の大気圧プラズマの利用が好ましい．

次節では, 大気圧プラズマと改質用 Ni 触媒を組み合わせた系を，メタンドライ改質（$CH_4 + CO_2 = 2H_2 + 2CO$）に適用した例を紹介する．この反応はバイオガス（主成分 $CH_4:CO_2 = 6:4$）の有効利用をはじめ，C1 化学では重要な基幹反応である．振動励起分子が関与したプリカーサー吸着過程は CH_4 に限定されず，CO_2 や H_2O にも適用できる．一般に，CH_4 だけを活性化することは少なく，CO_2, H_2O など共反応物が存在する場で改質を行うため，現象がより複雑になり理解を難しくしている．

5.1　転換率，選択率の比較

プラズマ・触媒ハイブリッド反応器の概略を図 3 に示す．内径 20 mm の石英管に工業用改質触媒ペレットを充填し（直径 3 mm, 12wt%Ni/ Al_2O_3），その間隙で誘電体バリア放電（Dielectric Barrier Discharge, DBD）を形成した．DBD は 1–10 ns で生成と消滅を繰り返す微細な過渡放電の集合体で，オゾン合成，エキシマランプ，高分子表面処理，空気清浄器など広く産業応用されている[22,23]．低温排熱を模擬するため，反応器は電気炉の中に設置しており，触媒層の温度分布は赤外線カメラで測定した．石英管は赤外線をほとんど透過しないため，測定結果は予め熱電対で校正している．プラズマの可視発光が赤外線カメラの測定結果に影響を及ぼさないことは別途確認している．

図 3(c)から触媒ペレットの形状が温度分布から確認でき，吸熱反応に伴う触媒層の温度変化が反映されている．プラズマ発光部分の気体温度を CO Ångström system (483.5 nm; $B^1\Sigma^+ \rightarrow A^1\Pi$) の回転温度から調べた[24]．回転エネルギーは数回の分子間衝突を経て熱平衡に達するため，回転温度と気体温度（並進温度）がほぼ等しいと仮定している．実験で求めた CO Ångström system の回転スペクトル微細構造はシミュレーション結果と良い一致を示し（図 4），DBD 発光領域における気体温度と触媒温度はほぼ等しいことが検証された．

図 3(c)より，反応器入口で吸熱反応によるコールドスポットの形成が確認できる．プラズマの消費電力の一部は熱エネルギーに変換され反応場に供給されるが，それでも熱エネルギーの供給が追

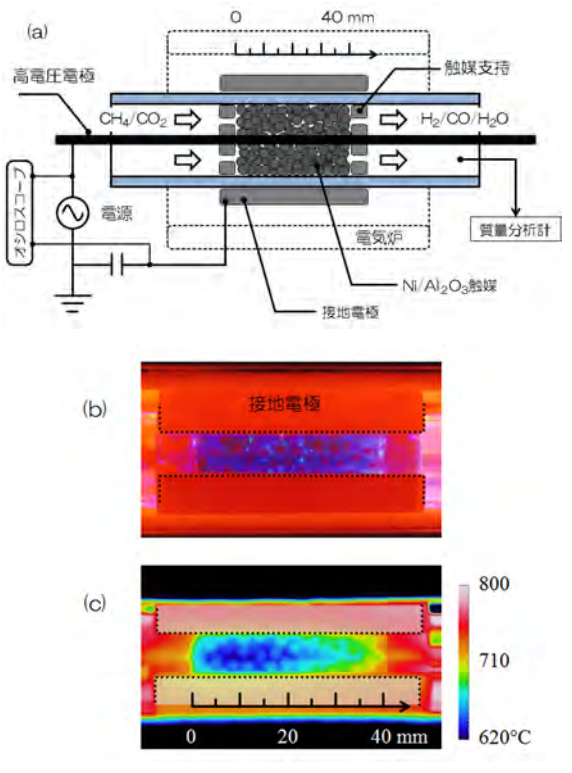


図 3　(a)プラズマ・触媒ハイブリッド反応器, (b) DBD の可視発光，(c)触媒層の温度分布：$CH_4/CO_2 = 1$，圧力 5 kPa，総ガス流量 2000 cm^3/min

いついておらず伝熱律速になっていることが示唆される．新規な触媒開発やプラズマによるプロセス革新は重要な研究テーマであるが，その機能を遺憾なく発揮するためには，多孔体における伝熱促進が必須の研究課題である．

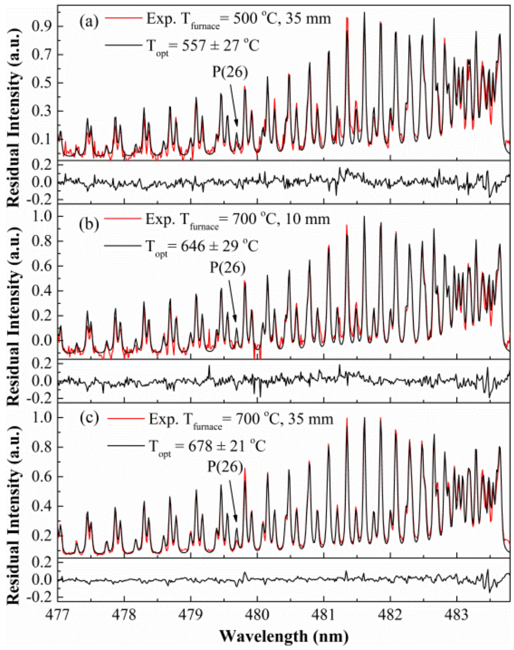


図4　CO発光スペクトルの微細構造：実験とシミュレーション結果の比較．(a) 500°C‐35 mm; (b) 700°C‐10 mm; (c) 700°C‐35 mm

供給する原料の総流量を一定に保ったまま CH_4/CO_2 比を変化させた場合の，CH_4, CO_2 転換率，H_2，CO，C（コーク）生成速度を図5に示す．横軸はメタン流量で，CH_4/CO_2 比を補助目盛で付記している．DBD を重畳させると H_2，CO の生成量が増大し，代わって炭素質の生成量が減少している．また，メタン転換率は DBD によってほとんど変化していないが，CO_2 転換率は DBD により増大した．H_2，CO 選択性が増大する理由として，逆水性シフト反応（$H_2 + CO_2 = CO + H_2O$）で生成した H_2O が振動励起され，触媒に吸着した$CH_n{}^*$を効果的に酸化・除去していることが考えられる[25]．炭素原子まで脱水素が進んでしまうと，炭素は Ni と容易に固溶し，炭素の固体内拡散が反応を律速するため，DBD を重畳させても脱炭素反応は効果的に生じない[26]．メタンドライ改質に微量 H_2O を添加することで炭素質の生成を効果的に抑制できることを示唆しており，現在，同位体トレースを用いて反応機構を調べている．CH_4，CO_2 転換率に関して，CO_2, H_2O の振動励起準位の数は CH_4 よりも多く，また寿命が長いことが知られている[27]．CO_2 や H_2O が共存すると，消費電力の大部分が選択的に CO_2，H_2O に分配されるため，プラズマによるメタン活性化の効果が明確に現れなかったと考えられる．

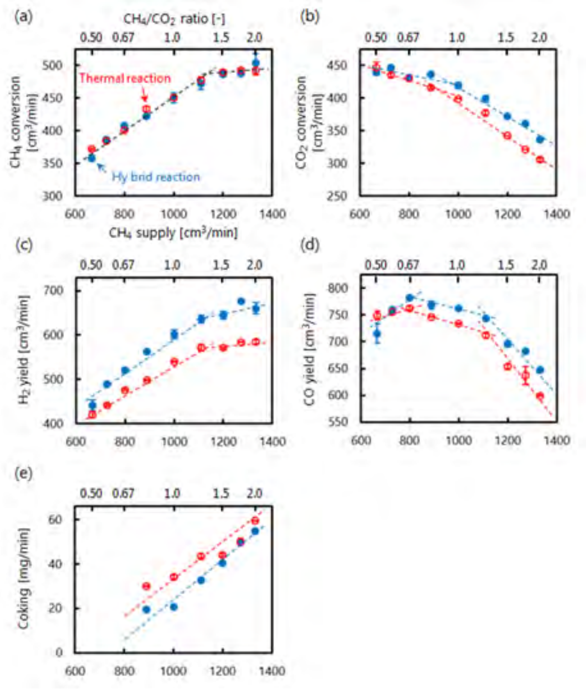


図 5　原料転換率と生成物収率の比較：総ガス流量 2000 cm³/min，電力 84–90 W，触媒温度：550°C（赤印：熱反応，青印：DBD ハイブリッド）

5.2　エネルギー効率

実用の観点からエネルギー効率は重要な評価項目になる．図6はメタンドライ改質反応による反応吸熱量とエネルギー効率を示す．エネルギー効率は反応吸熱量をプラズマの消費電力で割って算出した[26]．プラズマの反応促進効果により，温度一定（約 550°C）でも反応吸熱量は明らかに増加しており，CH_4/CO_2 比が 0.5–0.8 の範囲でエネルギー効率約 60%を達成した．CH_4/CO_2 比が 1 より大きくなると，反応吸熱量，エネルギー効率はいずれも単調に低下する．これは，CH_4 リッチになるほど炭素の析出が顕著になり触媒反応が阻害されること，さらに CO_2 の転換量が低下するためである．CO_2 を CO に還元する反応は大きな吸熱を

伴うため，エネルギー効率向上には CH_4 だけでなく CO_2 転換量を高めることが重要である．先に述べたように，伝熱律速を回避し，プラズマによる反応促進効果をさらに引き出すための工夫も必要である．

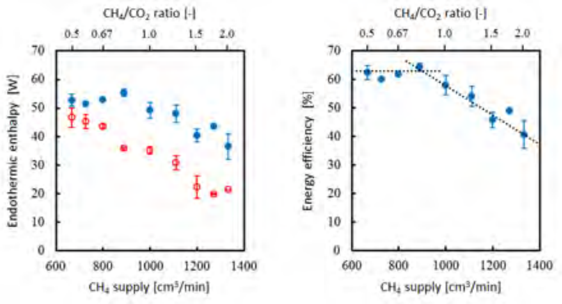


図 6　反応吸熱量とエネルギー効率の比較（実験条件は図 5 参照）

5.3　炭素析出振挙動

最後に，触媒ペレット内部に析出した炭素質の分布について考察する．炭素の析出はメタン脱水素反応が生じていたことの証し（foot print）であり，炭素生成挙動を調べることで改質反応をトレースできる．

図 7 はメタンドライ改質を行った後の触媒ペレットを半分に分割し，断面に析出した炭素を電子プローブマイクロアナライザでマッピングした結果である．反応器に充填したペレットを複数個サンプリングして再現性を確認しつつ分析した結果，ハイブリッド反応ではペレット内部に炭素がほとんど確認されなかったのに対し（図 7(b)），熱反応ではペレットの中心部まで炭素が析出していることが確認できた（同図(c)）．

炭素の析出量は，CH_4 および CO_2 の多孔体内拡散速度と反応速度のバランスで決まる．反応温度が高いほど，CH_4 のクラッキング（$CH_4 = C + 2H_2$）および CO_2 による脱炭素反応（$C + CO_2 = CO + CO$）がともに加速されるため，分子が多孔体内部へ拡散する前にペレット最表面で反応が完結する．つまりペレット内部に炭素が析出しにくくなる．一方，反応温度が低ければ反応速度に比して拡散の影響が無視できなくなり，ペレット内部まで分子が拡散するため炭素を析出しやすくなる．このような関係は触媒有効係数と定義され，多孔体内の反応速度と拡散速度の比で表されるシーレ数（無次元数）の関数として定式化される[28]．実験では，触媒温度はプラズマの有無にかかわらずほぼ一定になるよう制御している．すなわち，プラズマで生成された活性種により，触媒温度を低く保ったまま見かけの反応速度が増加したため，ペレット内部の炭素析出が抑制されたことを示唆している．図 5(b)より，CO_2 転換率は DBD により増大することから，炭素析出より脱炭素反応が促進されやすいことを支持している．このような効果は，メタン水蒸気改質でも確認されている[29]．

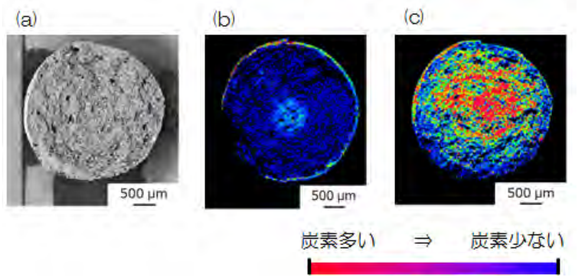


図 7　直径 3 mm の 12wt%Ni/Al_2O_3 触媒断面に析出した炭素の分布（反応温度 460°C）：(a)電子顕微鏡像，(b)ハイブリッド反応，(c)熱反応

6．おわりに

本稿では，プラズマによるメタン活性化について述べ，その応用としてメタンドライ改質に適用した例を紹介した．振動励起分子を測定するためには大掛かりな赤外吸収分光計測が必要なため，プラズマ・触媒複合反応場で in situ 計測された例は皆無である．しかし，分子線を使った励起メタンの表面反応に関する研究，およびプラズマ物理の分野で長年にわたり蓄積された電子の非弾性衝突反応に関する知見から，プリカーサー吸着の範疇で反応促進効果を間接的ではあるが説明できる．

図 7 に示すように，プラズマの影響は多孔体内部に及んでいないため，活性種を供給して触媒の最表面で反応を完結させればよい．一方，プラズマによって反応が促進されるほど吸熱反応が進み，結局はエネルギー供給律速になることが示唆された．反応に必要なエネルギーをすべて電力に頼るのではなく，低温排熱エネルギーを利用することは工学上重要である．二つの課題を同時に解決する方法として，触媒を反応器壁（伝熱面）に薄膜塗布したプレート型反応器の開発など，反応工学的アプローチも重要な研究課題である．

プリカーサー吸着以外に考えられる重要な反応促進機構として，プラズマによる触媒または吸着分子の非平衡加熱が考えられる．一般に，固体壁や微粒子は移動度の大きい電子によって負に帯電している．そのため電子-正イオン再結合により，10 eV（1 eV = 11,600 K）に相当する大きなエネルギーがプラズマと触媒の界面で選択的に放出される．このエネルギーは触媒微粒子の温度を局所的に上昇させるか，あるいは吸着種に対して潜熱的にエネルギーを与え表面反応を加速する可能性がある．そもそも吸熱反応では，エネルギー保存の制約から反応に必要なエネルギーを外部から与える必要があり，ラジカルを供給してもそれだけで反応は進まない．低温でエネルギー障壁を超えるために必要な内部エネルギーを分子に与えるとともに（例えば振動励起エネルギー），吸熱反応に必要なエネルギーを熱，電気，光エネルギーなどを利用して外部から供給しなければならない．プラズマによる非平衡加熱（エネルギー授受が温度勾配で決まらない系）は，気相微粒子合成では広く受け入れられている．粒子の大きさが 1 μm より大きくなると粒子温度を直接測定できるが[30]，10 nm 程度の大きさでは実測の例は皆無に等しい．数値解析によれば，荷電粒子によるナノ粒子の帯電は確率的に生じること，さらに熱容量が小さいためナノ粒子の温度は数 100℃の変動をもってパルス状に昇温と降温を繰り返すと予測されており，十分な時間が経過しても定常的な一定温度に達しない[31]．

バルク材に担持されたナノ粒子（すなわち触媒）とプラズマの相互作用に関する体系化された研究は例がなく，未開拓の研究領域である．一般に，プラズマと電極の界面にはシースと呼ばれるイオン濃度が高い境界層領域が形成される．減圧環境ではシースの厚さを実測し，シース内電位分布などを直接プローブ計測できる．一方，大気圧プラズマの多くは，ナノ秒で生成と消滅を繰り返す過渡的な現象であることから，シースの形成（プラズマの構造化）に十分な時間を確保できないこと，さらに大気圧環境では分子の平均自由行程が短いことに起因して，プラズマシースに相当する境界層領域が明確に区別できないなど，計測上の課題も多い．現象の科学的理解には，触媒機能を有する固体とプラズマが接する界面領域の同定，そこで生じる活性種の生成と輸送，そして表面反応のダイナミクスを知ることが必須である．

謝辞

本稿で紹介した研究は，科学研究費（20656038, 22110504, 16J09876）の助成を受けて行われた．赤外線カメラの使用にあたり，東京工業大学 伏信一慶准教授の支援を得た．本研究は学部・大学院生，博士研究員によって行われたことを付し，関係各位に謝意を表する．

参考文献

[1] CREST「多様な天然炭素資源の活用に資する革新的触媒と創出技術」 https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah27-3.html（2017 年 5 月参照）

[2] E.C. Neyts, K. Ostrikov, M.K. Sunkara, A. Bogaerts: Chem. Rev. **115** (2015) 13408.

[3] G. Petitpas, J.-D. Rollier, A. Darmon, J. Gonzalez-Aguilar, R. Metkemeijer, L. Fulcheri: Int. J. Hydrogen Energy **32** (2007) 2484.

[4] J.C. Whitehead: J. Phys. D **49** (2016) 243001.

[5] 例えば，T. Nozaki and A. Gutsol: J. Phys. D: Appli. Phys. **44** 270301 (2011); B. W.-L. Jang, C.J. Liu, F. Endres, T. Nozaki: Catalysis Today **211** 1 (2013); T. Nozaki, E.C. Neyts, M. Sankaran, K. Ostrikov, C.J. Liu: Catalysis Today **256** 1 (2015); T Nozaki, A Bogaerts, X Tu, R Sanden: Plasma Process Polym. **14** (6) e1790061 (2017).

[6] W. Tsang, R.F. Hampson, Journal of Physical and Chemical Reference Data **15** (1986) 1087.

[7] J. Wei, E. Iglesia, J. Catal. **224** (2004) 370.

[8] H. Burghgraef, A.P.J. Jansen, R.A. van Santen, Surf. Sci. **324** (1995) 345.

[9] D.K. Davies, L.E. Kline, W.E. Bies, J. Appl. Phys. **65** (1989) 3311.

[10] W.L. Morgan, B.M. Penetrante: Comp. Phys. Comm. **58** (1990) 127.

[11] http://webbook.nist.gov/chemistry/

[12] V. Goujard, T. Nozaki, S. Yuzawa, A. Agiral, K. Okazaki, J. Phys. D **44** (2011) 274011.

[13] T. Nozaki, S. Abe, S. Moriyama, S. Kameshima, K. Okazaki, V. Goujard, A. Ağıral: Jpn. J. Appl. Phys. **54** (2015) 01AG01.

[14] 板谷良平：プラズマ・核融合学会誌，**79**(10) (2003) 1029.
[15] 野崎智洋：プラズマ・核融合学会誌，**85**(3) (2009) 129.
[16] 日本学術振興会プラズマ材料科学 153 委員会編：大気圧プラズマの基礎と応用，オーム社 (2009).
[17] 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).
[18] 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 (2012).
[19] T. Nozaki, N. Muto, S. Kado, K. Okazaki: Catalysis Today **89**(1) (2004) 57.
[20] E. Dombrowski, E. Peterson, D.D. Sesto, A.L. Utz: Catalysis Today **244** (2015) 10.
[21] A. Bogaerts, T. Kozak, K. van Laer and R. Snoeckx: Faraday Discuss. **183** (2015) 217.
[22] U. Kogelschatz: Plasma Chemistry and Plasma Processing, **23**(1) (2003) 1.
[23] 八木重典：バリア放電，朝倉書店 (2012).
[24] Y. Du, K. Tamura, S. Moore, Z. Peng, T. Nozaki, P.J. Bruggeman: Plasma Chem. Plasma Process. **37** (2017) 29
[25]S. Kameshima, K. Tamura, R. Mizukami, T. Yamazaki, T. Nozaki: Plasma Process Polym. **14** (6) (2017) e1600096.
[26] S. Kameshima, K. Tamura, Y. Ishibashi, T. Nozaki: Catalysis Today **256** (2015) 67.
[27] A. Fridman and L.A. Kennedy: *Plasma Physics and Engineering*, Cambridge University Press (2008).
[28] H. Scott Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering 4th ed.*, Prentice Hall ptr (2006).
[29] T. Nozaki, W. Fukui, K. Okazaki: Energy & Fuels, **22**(6) (2008) 3600.
[30] H.R. Maurer and H. Kersten: J. Phys. D: Appl. Phys. **44** (2011) 174029.
[31] N.J. Kramer, R.J. Anthony, M. Mamunuru, E.S. Aydil and U.R. Kortshagen: J. Phys. D **47** (2014) 075202.

ナノ空間材料を用いた調湿
Humidity Control using Nanospace Materials

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

1．はじめに

ナノ空間材料はナノレベルの規則的細孔，高比表面積，大細孔容量などの特徴を有し，幅広い応用が期待されるナノテクノロジーの基幹材料の一つである[1]．多孔質材料は自然にも数多く存在しているが，近年の材料合成技術の進歩により，様々な性質をもつ多孔質材料を原子・分子レベルで設計したり，合成したりできるようになってきている．本稿では，ナノ空間材料に対する水蒸気の吸着・脱着現象，あるいはナノ空間内部の水の移動現象について最近の研究を紹介する．ここまで「熱」という言葉を一度も使っていないが，水蒸気がナノ空間材料へ吸着する際には，吸着熱を放出する．また，水がナノ空間材料内部を移動する際には，通常，分子拡散ではなく，表面拡散，あるいは凝縮水の移動であるため，いずれにしても，活性化過程（エネルギー障壁を越える過程）を含む．したがって，その移動特性は温度レベルによって大きく変わり，ナノ空間内部で物質移動を考えるときは，熱移動も同時に考える必要があることがわかる．また，ナノ空間内部の水の移動は様々な応用技術の基礎にあると思われる．ここでは主に調湿技術，湿度を制御する技術への応用を考えるが，他にも電池，センサーなど様々な応用技術へ繋がる．

2．分子シミュレーション

2.1　吸着の分子シミュレーション

吸着剤への水の吸着を評価する際には，吸着の平衡特性と移動特性を評価する必要がある．通常，平衡特性については，吸着等温線（平衡吸着量－相対湿度曲線）により評価し，移動特性については，吸着緩和曲線（吸着量－時間曲線）により評価する．実験的にこれらの特性を評価する際には，通常，あるまとまった量の吸着剤に対して水を吸着させ，平均的な吸着特性を求める．決して一つ一つのナノ細孔の吸着特性を評価しているわけではない．また，一般に，均一な細孔構造をもつ材料と呼ばれるものであっても，一部の材料を除いて，原子・分子のレベルで均一な構造をもつわけではない．そこで，細孔構造の僅かな違いが吸着等温線や吸着緩和曲線にどのような影響を与えるかを明らかにするために分子シミュレーションは有効な手法と考えらえる．

2.2　原子モデル

シリンダー型の細孔構造をもつシリカのナノ細孔をモデル化し，水の吸着・移動現象の分子シミュレーションを行い，吸着等温線や毛管上昇速度を評価した[2, 3]．さらに，細孔径が異なるシリンダー型の細孔を同軸上に繋げたシリカのナノ細孔をモデル化し，*NVT* 分子動力学計算により，水の毛管上昇速度を評価した[4]．例えば，図 1 に示されるように，細孔の総容積は等しいが，細孔入口が広く，中央部が狭い細孔（Model 1）と細孔入口が狭く，中央部が広い細孔（Model 2）の毛管上昇速度を比較すると，Model 1 の方が Model 2 よりも 4 倍程度速くポアフィリングの状態に達することがわかる．僅かな細孔径の違いが細孔内部の水の移動速度を大きく変えることがわかる．

2.3　粗視化モデル

シリンダー型の細孔構造をもつナノ細孔と水を粗視化分子でモデル化し，水の吸着・移動現象の分子シミュレーションを行い，吸着等温線や吸着緩和曲線を評価した[5, 6]．ここでは，十分に長い時間の計算を行うために，粗視化モデルを検討した．さらに，細孔表面の親水性に分布があるナノ細孔をモデル化し，グランドカノニカル・モンテカルロ法（μVT アンサンブル）を用いた計算により，水の吸着等温線を評価した[7]．例えば，図 2 に示されるように，細孔入口の表面が疎水的，中央部の表面が親水的な細孔（Model 1）と細孔入口の表面が親水的，中央部の表面が疎水的な細孔

（Model 2）の吸着等温線を比較すると，Model 2の方が，化学ポテンシャルが高く（相対湿度が高く），狭い範囲で吸着・脱着が起こることがわかる（吸着と脱着はヒステリシスをもつ）. 僅かな表面の親水性の違いが，水の吸着・脱着特性を大きく変えることがわかる．

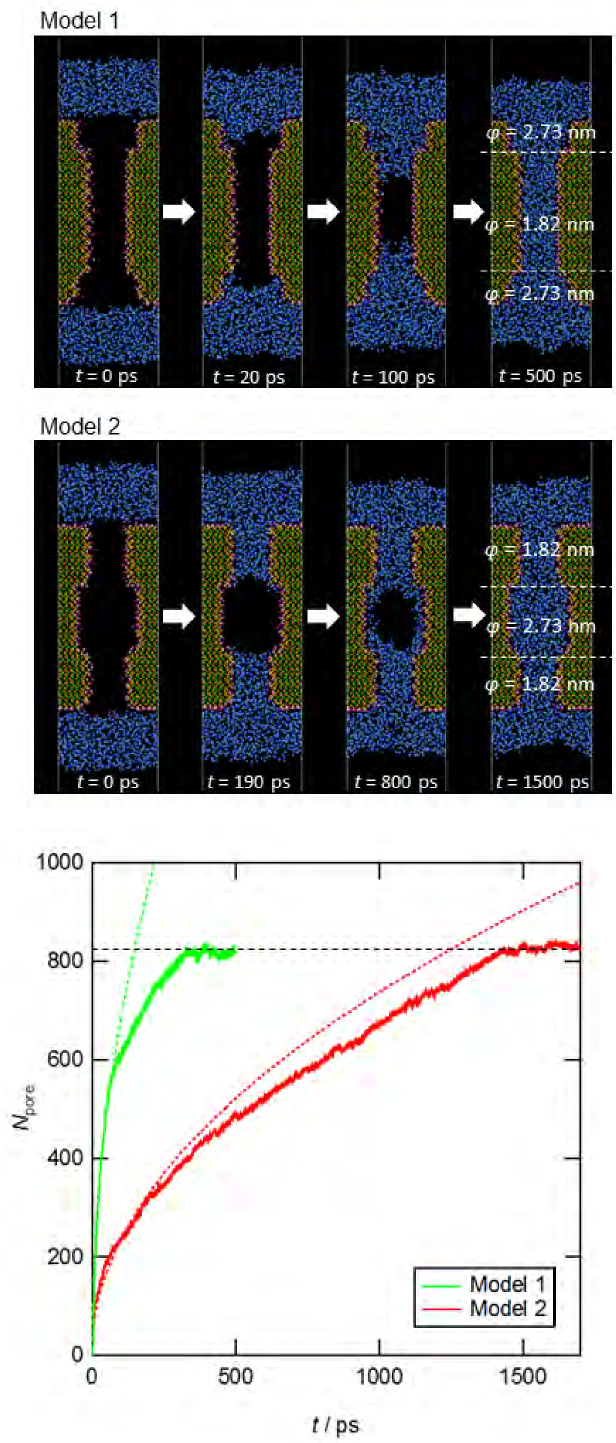


図 1　水の毛管上昇の分子シミュレーション：スナップショット（上図）と細孔内部の水分子の数の時間変化（下図）．温度は 300 K [4].

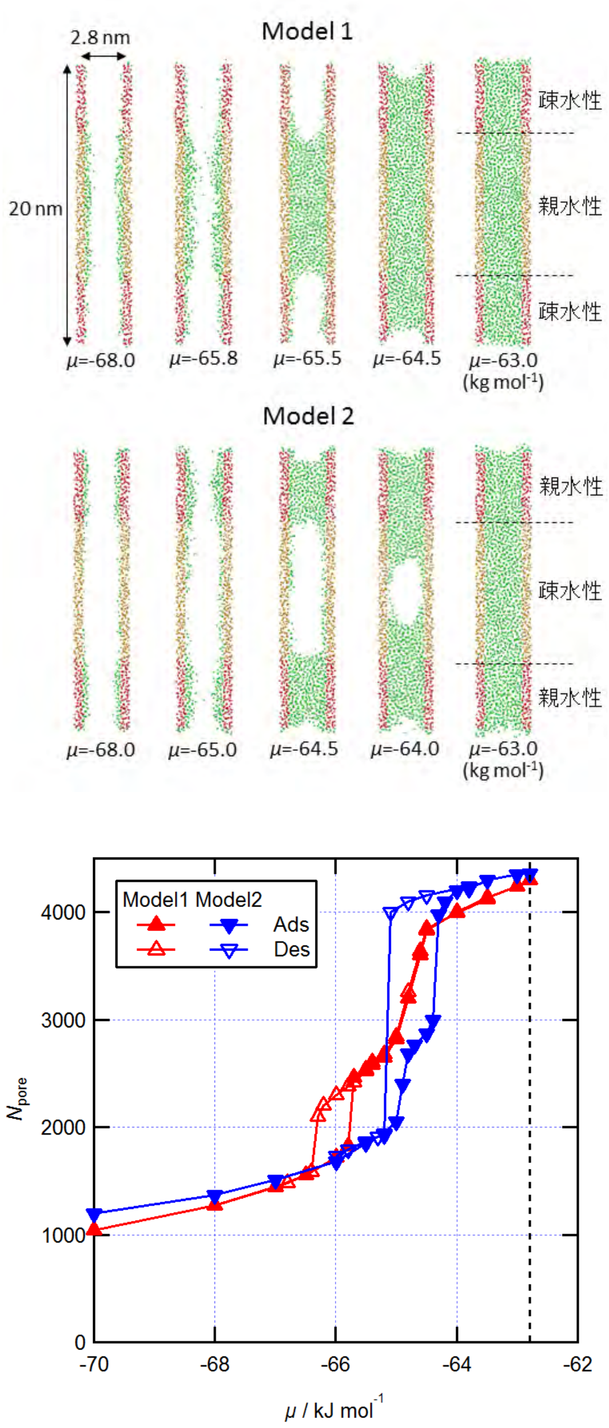


図 2　ナノ細孔の水の吸着・脱着の分子シミュレーション：スナップショット（上図）と吸着等温線（下図）．温度は 350 K [7].

これらの計算に示される通り，ナノ空間という極めて限定された空間で，吸着・移動現象のシミュレーションを行えば,様々な状況が再現できる．分子シミュレ―ションの研究においては，様々な状況を再現できることを示すのみならず，結果の解析から局所的な構造的・動的性質を評価し，モデル化し，吸着等温線や吸着緩和曲線の計算結果を解釈したり，あるいは，マクロスケールのモデル（毛管上昇における Lucas-Washburn 則[8]や吸着等温線における Kelvin 式[9]など）の適用範囲を議論したりすることが必要である．

また，これまでナノ細孔の一部分だけ細孔径を変えたり，一部だけ表面親水性を変えたりするためには，多孔質材料の表面改質，表面機能化などをする必要があった．しかし，最近は金属有機構造体（MOF: Metal Organic Frameworks）などのように，原子・分子のレベルで様々な構造，表面特性を創り出すことも可能になってきている[1]．MOF を水の吸着剤として評価したり[10,11]，あるいはマクロなシステムへ応用したりすることも試みられている[12,13]．

３．吸着測定実験

3.1　吸着等温線

前述の通り，実験的に水の吸着・移動特性を評価する際には，通常，あるまとまった量の吸着剤に対して水を吸着させ，平均的な特性を求める．しかし，仮に完全に均一な細孔をもつ材料が合成できたとしても，異なる材料間の吸着・移動特性を比較し，評価することは依然として難しい．例えば，シリンダー型の細孔をもつ材料に限定しても，細孔径，細孔長さ，細孔容積など様々な構造パラメータがある[14]．ここでは，細孔径（7.7 nm），細孔容積（1.09 cm^3/g）を揃えて，細孔長さのみが異なるメソポーラスシリカを合成し，水の吸着・移動特性を評価した[15]．材料合成の詳細は文献 15 を参考にされたい．

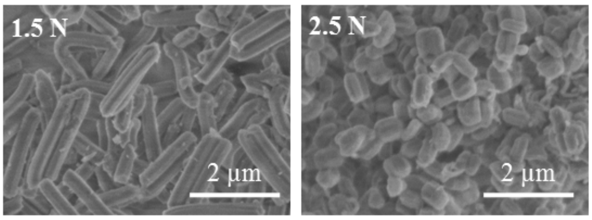


図 3　合成されたメソポーラスシリカの SEM 画像．

図 3 に示される通り，酸の濃度が高い条件で合成された試料（2.5N, Low pH）は平均細孔長さが 0.45 μm，酸の濃度が低い条件で合成された試料（1.5N, High pH）は平均細孔長さが 1.77 μm であった．

これらの試料の 298 K における水の吸着等温線を求めると，図 4 のようになった．吸着等温線の横軸は相対湿度（p は水蒸気分圧，p_0 はこの温度における飽和水蒸気圧），縦軸は試料 1 g 当たりの水の吸着量 g を表している．2 つの試料の吸着等温線がほぼ重なっていることから，2 つの試料の平衡吸着特性はほぼ等しいことがわかる．また同時に，吸着等温線は細孔長さに関するいかなる情報も示さないことがわかる．

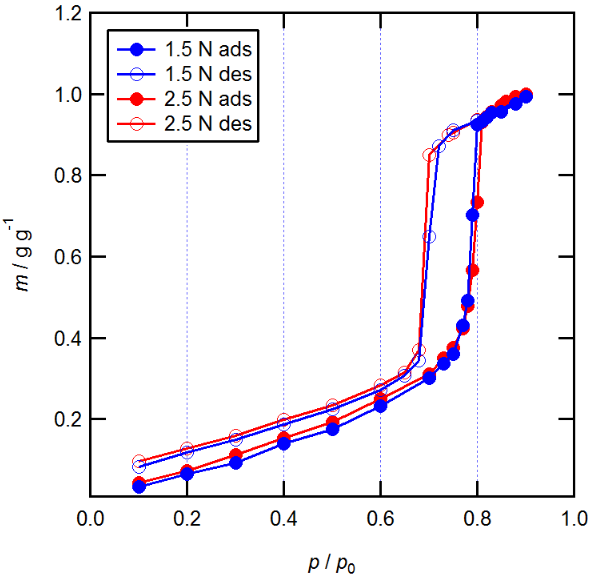


図 4　メソポーラスシリカの水吸着等温線．298 K.

3.2　吸着緩和曲線

次に，同じ 2 種類の試料の水の吸着緩和過程を評価した．ここでは，相対湿度を 0.73 から 0.90 にステップ状に変化させたときの吸着量の時間変化を重量法により計測した[15]．図 4 に示される吸着等温線より，相対湿度を 0.73 から 0.90 へ変化させると，水の吸着量が急激に増えることがわかる．このようなとき，細孔内部では毛管凝縮（細孔内部に凝縮水が満たされる過程）が起こると考えられる．また，ここでの重量法による計測は流通系で行った．具体的には，ヘリウムをキャリアガスとして，所定の相対湿度に調湿した後，一定流量（200 cc/min）で試料セルを通過させ，大気開

放した．図 5 は 2 種類の試料について試料重量をパラメータとして測定した結果を示している．ここでは水蒸気の供給量が一定であるから，試料重量を減らすほど，試料単位重量あたりの水蒸気供給量が増え，グラフの傾きが大きくなる．試料重量がある閾値以下になると，傾きが変化しなくなり，その時の値が緩和速度の最大値になる．試料重量を閾値まで減らさないと，水蒸気の供給が律速段階にあるため，吸着速度（試料全体の吸着量の時間変化）は試料重量に依らずに一定になる．しかし，このような条件においても，図 5 の緩和曲線が試料によって異なることからもわかるように，時間が経過すると，細孔内部の移動が律速段階になる．図 5 の緩和曲線を注意深く見ると，細孔長さの長い（1.5 N）試料の方が緩やかに平衡吸着量に漸近しており，細孔長さの短い（2.5 N）試料の方が直線的に平衡吸着量に至ることがわかる．

吸着緩和曲線には試料の構造的特徴と水の吸着・移動特性が反映されている．異なる試料間で吸着緩和曲線の違いを議論する場合には，試料の構造的特徴を十分に検討しないと，正しく比較することができない．原理的には，均一な細孔をもつ材料を仮定し，それぞれの細孔への水蒸気供給も等しいと仮定すれば，ナノ細孔への水蒸気流束を評価することができる．しかし，その実現のためには，より精度の高い実験が必要であろう．

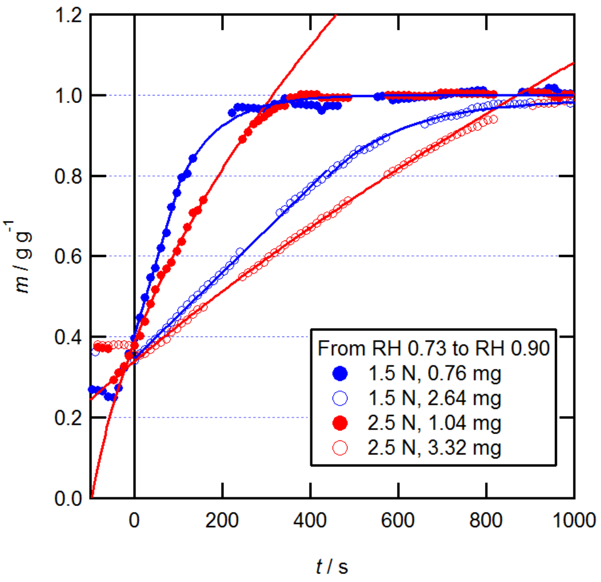


図 5　メソポーラスシリカの水の吸着緩和曲線．298 K.

4．除湿ユニットの設計

ナノ空間材料を用いた空調用の除湿ユニットを設計し，実験[16]と計算[17]によりその性能を評価した．空調への応用においては，一般に多量の空気を短時間で処理しなければならない．したがって，たとえ多量の水蒸気を除去できたとしても，除湿ユニットを通過する際の流体の圧力損失が大きい場合は，空気の搬送動力が大きくなり，効率的な装置とは言えない．様々な工学的な制約がある中で，ここでは図 6 に示されるような多層型デシカント除湿ユニットを設計した．

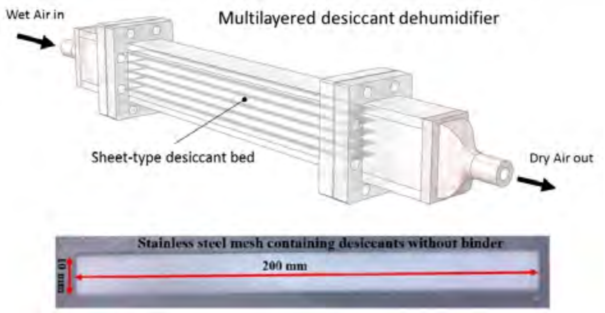


図 6　空調用多層型デシカント除湿ユニット．

吸着層は SUS の枠（10 mm × 200 mm × 1 mm）の中に多孔質シリカ粒子（M.S.GEL，AGC エスアイテック，粒径 100 μm，平均細孔径 2.7 nm）を詰め，上下面に SUS のメッシュを張ったものとした．この吸着層を 5 mm のピッチで 5 段重ねたものを除湿ユニットとした．この除湿ユニット全体で使用した多孔質シリカ粒子はおよそ 7.5 g である．この除湿ユニットに対して，断熱系で湿った空気と乾燥した空気を交互に流し，除湿，加湿を交互に行わせた．

実験においては，処理空気の条件を整え，吸着過程，脱着過程のそれぞれについて，除湿ユニット入口，出口の処理空気の温度，相対湿度，圧力の測定，および除湿ユニット内部の吸着層，空気流路の温度分布の測定を行った．

計算においては，図 7 に示されるような 2 次元の計算系について連続体計算を行った．吸着等温線，水蒸気の吸着，SUS 枠を通しての放熱などいくつか特徴のあるモデルを用いているが, 基本は,吸着層と空気流路のそれぞれについて，質量，運動量，エネルギーの保存式を解いた．

図 8 に吸着量の時間変化，圧力損失の実験と計算の比較を示す．吸着量の時間変化の計算においては, 処理空気の入口風速を 0.9 m/s, 温度を 300 K とし，その絶対湿度をパラメータとしているが，いずれもよく合っている．また，ここで使用している多孔質シリカ粒子は，試料 1 g 当たりの水の飽和吸着量はおよそ 0.6 g であるため, 除湿ユニット全体で（7.5 g の試料に対して）最大 4.5 g の水を吸うことができる．除湿ユニット全体の緩和速度は，試料のそのものの緩和速度と比べてかなり遅いが, それでも, 絶対湿度 23.19 g/kg$_{DA}$ のとき，10 分で 1.3 g 程度の水を吸着できる. 同じ構造で 1 kg の多孔質シリカ粒子を用いると（およそ一辺が 20 cm の立方体に層状の吸着層を多層化して配置すると），10 分でおよそ 170 cc の水を取り除くことができる．また，圧力損失については，標準的なロータ式のデシカントユニットと比べて，9 割以上小さい値である．

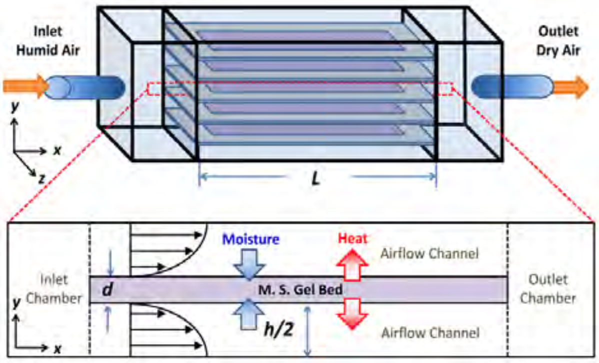


図 7　除湿ユニットの計算系．

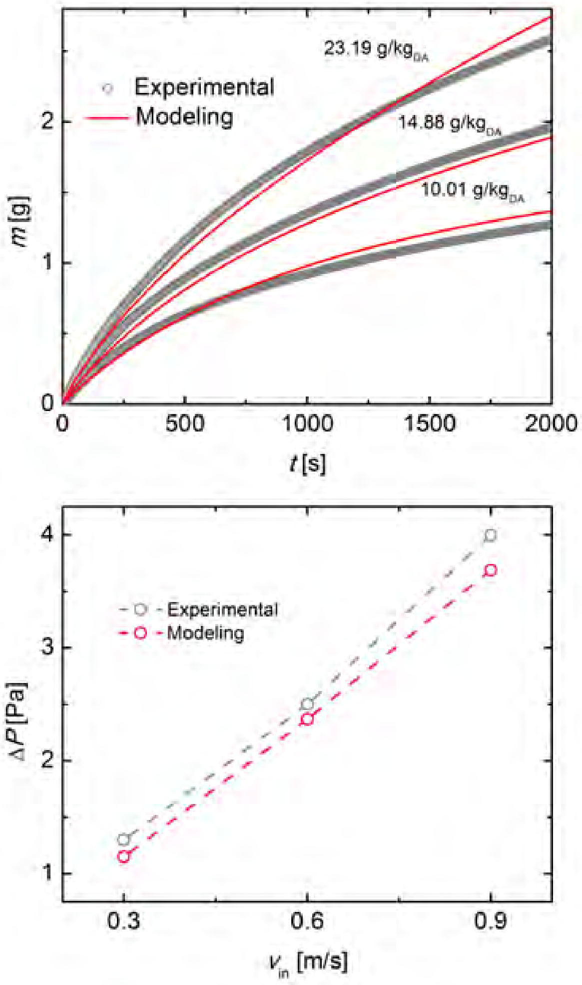


図 8　実験結果と計算結果の比較：吸着量の時間変化（上図），圧力損失（下図）．

図 9 は除湿ユニット内部の速度分布, 湿度分布, 温度分布を示している. 速度分布は入口速度が 0.6 m/s のときの状況を示している．吸着層があるところでは，空気の流路が狭くなるため，空気の流速が増している．湿度分布と温度分布は，入口速度が 0.3 m/s のとき，吸着開始から 500 s 後の分布図を示している．下流に向かって除湿が進むために，湿度は下流に行くほど減少するが，温度は，吸着熱を受けとるために，下流に向かって上昇する．

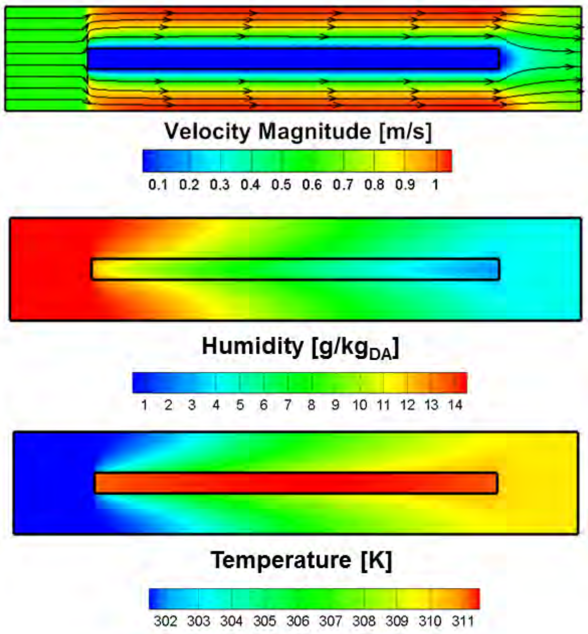


図 9　除湿ユニットの速度分布，湿度分布，温度分布．

一般に，吸着速度が大きい位置において，吸着層の温度が高くなり，その位置は時間とともに変化する．図 9 の計算例のように，吸着層がほぼ一様な温度となる瞬間もある．材料の高性能化のみならず，除湿ユニット構造の最適化により，さらなる除湿ユニットの性能向上が見込まれる．

５．おわりに

ナノ空間材料を用いた調湿技術について，最近の研究を紹介した．分子シミュレーションについては，優れた吸着・移動特性をもつ材料が設計できる可能性を述べた．吸着測定実験については，特に吸着緩和曲線の解釈が難しいことを指摘した．しかし，構造的特徴が明らかな材料を用いれば，吸着緩和曲線をある程度合理的に解釈することができることを例示した．また，除湿ユニットの設計においては，速度分布，湿度分布，温度分布の時間・空間変化を解析し，除湿ユニットの最適化により，性能向上が見込まれることを示した．ここでは調湿技術について述べたが，優れた先端材料をマクロスケールのシステムに適用する際には，同様に，様々なスケールの研究が必要になると考えられる．システムに依らない優れた材料の開発，材料に依らないシステムの最適化と切り分けるのではなく，それぞれの研究の繋がりを丁寧に考察していきたい．

参考文献

[1] 有賀克彦，ナノ空間材料ハンドブック，NTS (2016).

[2] Yamashita, K. and Daiguji, H., Molecular Simulations of Water Adsorbed on Mesoporous Silica Thin Films, J. Phys. Chem. C, 117-5 (2013) 2084.

[3] Yamashita, K. and Daiguji, H., Molecular Dynamics Simulations of Water Uptake into a Silica Nanopore, J. Phys. Chem. C, 119-6 (2015) 3012.

[4] 長津頌ら，ナノ細孔内部の水の吸着・移動現象の分子シミュレーション，第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2016) D223.

[5] Yamashita, K. and Daiguji, H., Coarse-grained Molecular Dynamics Simulations of Capillary Evaporation of Water Confined in Hydrophilic Mesopores, Mol. Phys. 114-6 (2016) 884.

[6] Yamashita, K. et al., Grand Canonical Monte Carlo and Molecular Dynamics Simulations of Capillary Condensation and Evaporation of Water in Hydrophilic Mesopores, Mol. Phys. 115-3 (2017) 328.

[7] 柏木健太朗，大宮司啓文，ナノ細孔内部の水の吸着，移動現象に関する分子シミュレーション，第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2017) F333.

[8] Washburn, E. W., The Dynamics of Capillary Flow, Phys. Rev. 17 (1921) 273.

[9] Endo, A. et al., Water Adsorption-Desorption Isotherms of Two-dimensional Hexagonal Mesoporous Silica around Freezing Point, J. Colloid Interface Sci., 367 (2012) 409.

[10] Canivet, J. et al., Water adsorption in MOFs: fundamentals and applications, Chem. Soc. Rev., 43-16 (2014) 5594.

[11] 柳田浩佑ら，金属有機構造体 MIL-101 の水の吸着特性，第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2017) G321.

[12] Kim, H. et al., Water Harvesting from Air with Metal-Organic Frameworks Powered by Natural Sunlight, Science, 10.1126/science.aam8743 (2017).

[13] Bareschino, P. et al., Numerical Study of a MIL101 Metal Organic Framework Based Desiccant Cooling System for Air Conditioning Applications, Appl. Therm. Eng. 124 (2017) 641.

[14] Hwang, J. et al., Adsorption and Desorption of Water in Two-dimensional Hexagonal Mesoporous Silica with Different Pore Simensions, J. Phys. Chem. C, 119-46 (2015) 26171.

[15] 坂本数貴ら，規則性シリンダー型ナノ細孔おける水の移動現象，第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2016) K322.

[16] Shamim, J.ら，空調用多層型デシカント除湿ユニットの性能評価，第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2017) F234.

[17] 徐偉倫ら，デシカント除湿ユニットの数値シミュレーション，第 54 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，(2017) F233.

ナノ多孔質体に閉じ込められた物質の固液相転移現象と自己組織化現象
Liquid –Solid Phase Transition and Self-Assembly of Materials Confined to Nanopores

金子　敏宏（東京理科大学），荒井　規允（近畿大学），泰岡　顕治（慶應義塾大学）
Toshihiro KANEKO (Tokyo University of Science), Noriyoshi ARAI (Kindai University)
Kenji YASUOKA (Keio University)
e-mail: tkaneko@rs.tus.ac.jp, arai@mech.kindai.ac.jp, yasuoka@mech.keio.ac.jp

１．はじめに

カーボンナノチューブや多孔質シリカに代表されるナノ細孔に閉じ込められた物質は，バルクの状態では見られない豊かな固液相転移や自己組織化の現象を示すことが知られている．これらを理解することで，ナノ細孔を利用した融点調整 [1]，バルクでは作成することの難しい結晶の作成 [2, 3]など幅広い応用につながると期待されている．ナノ細孔に閉じ込められた物質の固液相転移現象は実験的にさかんに研究されており，分子の粘性測定による固液相変化の検出，示差走査熱量測定による融点・凝固点の決定，X 線散乱パターンからの結晶構造の予測などが多数報告されている[4]．一方で，実験試料の作成上の困難により，ナノ細孔の特定のパラメータのみを抽出してその影響を考察したり，未知のナノ細孔内に予想される新たな相図・モルフォロジーを実験に先駆けて予測したりすることは難しい．これに対して分子シミュレーションは，理想的なナノ細孔を容易に作成できること，ナノ空間に閉じ込められた全ての分子の座標の時間発展を解析できることなどの長所があり，ナノ細孔中の固液相転移や自己組織化の現象を解析する上で有用な手法である．

著者らは分子動力学シミュレーションにより，ナノ細孔中の固液相転移温度を決定するための手法開発やナノ細孔のサイズが固液相転移温度に与える影響解明を目指した研究，ナノ細孔中の界面活性剤や Janus 粒子の自己組織化の研究を進めており，本稿では，それらの概要を紹介する．

２．ナノ多孔質体に閉じ込められた物質の固液相転移現象

2.1　平行平板間に閉じ込められた単純液体の相図

平行平板間（スリット型細孔）に Lennard-Jones（LJ）粒子でモデル化された単原子分子液体を閉じ込めた系は，ナノ細孔中の分子を表現する最も単純なモデルのひとつであり，閉じ込めに起因する豊かな物理現象を研究するために広く用いられている．先行研究においてスリット型細孔中では壁に平行な層状の固体が生成し，*n* 層かつ各層内に四角形を基調とした構造がみられる（*n*S 構造）と各層内に三角形を基調とした構造がみられる（*n*T 構造）の 2 種類が存在すること，スリット幅を広げるにしたがって，2S→2T→3S→3T のような一連の転移をすることが報告されている[5].

ナノ細孔の代表サイズが数 nm よりも大きい領域では Gibbs-Thomson 式が成立することが知られており [4]，バルクの固液平衡温度とナノ細孔中の固液平衡温度の差がナノ細孔の代表サイズに反比例する．一方で，ナノ細孔の代表サイズが数 nm よりも小さい場合には同式が成立せず，固液平衡温度がどのように決定されるかわかっていない．

そこで著者らは[7], [8]スリット幅 h がおおよそ分子 2〜10 個分となる範囲で, 一定のスリット幅と圧力のもとで温度を変化させ，固液相転移を研究した．そして，一定圧力のもとでの各スリット幅における結晶構造や固液平衡温度をまとめることで相図を提案した（図 1）.

まず, 温度 $T = 0.95\ \varepsilon/k_B$ における代表的なスナップショットを図 1 に示す．図 1(b)は 2S 構造，図 1(c)は 2T 構造に対応し，先行研究 [5]で報告された構造と同一である．

つぎに，一定のスリット幅 h と圧力のもとで温度を変化させ，冷却中に液体から固体への転移が観測された温度（凝固点）と加熱中に固体から液体への転移が観測された温度（融点）を測定した結果をまとめた．$2\sigma \le h \le 4\sigma$ の範囲において，4 つの凝固点・融点の極大値が観測された．これらは 2S，2T，3S，3T の 4 種類の結晶構造に対応していると考えられる．特定のスリット幅で凝固

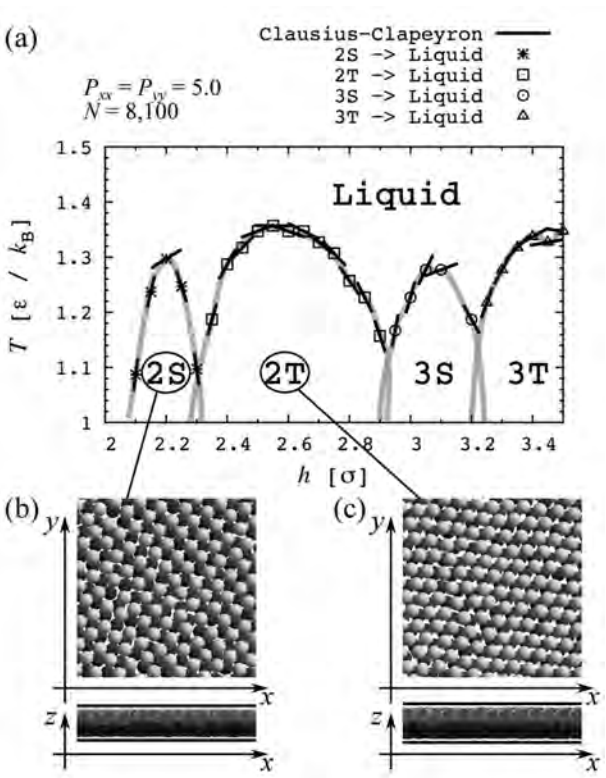


図 1　平行平板間に閉じ込められた単純液体の相図と代表的なスナップショット.

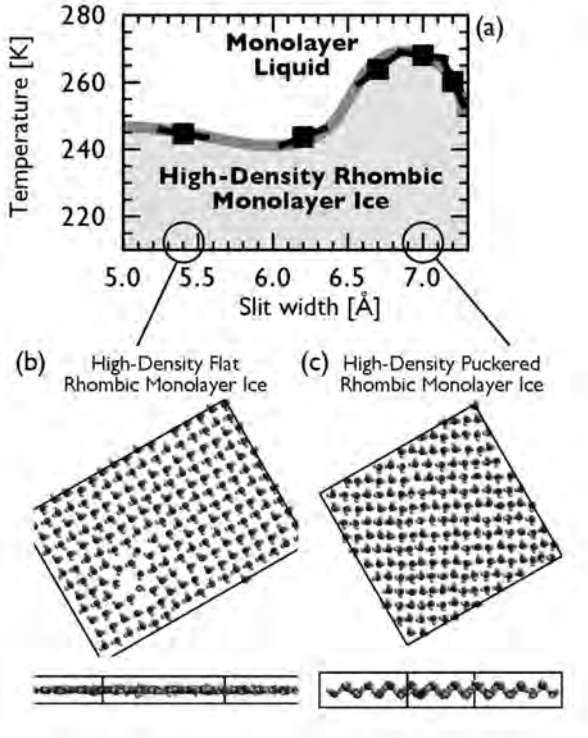


図 2　平行平板間に閉じ込められた水の相図と代表的なスナップショット.

点・融点が極大値を持つことは本研究で初めて観測した現象である.

特定のスリット幅で凝固点・融点の極小値や極大値がみられた原因を次のように考察している. 凝固点・融点の極大値がみられたスリット幅は結晶の格子定数にフィットしたスリット幅である. 例えば h = 2.2 σ や 2.6 σ は，それぞれ 2S 構造や 2T 構造にフィットしている. このようなスリット幅では結晶が容易に生成できると考えられ，実際に凝固点・融点が上昇している. 一方で h = 2.3 σ は 2S 構造には広すぎて，2T 構造には狭すぎるため，結晶が生成しにくいと考えられ，実際に凝固点・融点が低下している.

なお，文献[11]においてスリット型細孔中に閉じ込められた系での Clausius-Clapeyron の式が提案されており，同式が予測する結果は，図 1 にみられる融点・凝固点の極大値や極小値と整合している.

2.2　平行平板間に閉じ込められた水の相図

鉱物の隙間や生体内など，ナノ空間に閉じ込められた水は自然界のいたるところに存在するが，それらに特有の固液相転移現象はよく分かっていない. ナノ細孔内に閉じ込められた水と氷の典型例として，二次元スリット細孔内に存在する二次元高密度氷に注目した. この物質は実験的にも存在が確認されている [14].

計算機性能の限界により分子動力学シミュレーションでは短時間の物理現象（典型的には 1 マイクロ秒以下）しかシミュレーションすることができず，系の初期条件が結果に強く影響を与えてしまい，固液平衡温度を定量的に決定できない問題点がある. そこで，タンパク質の立体構造変化やスピングラスの相転移のような基礎的な物理現象のシミュレーションにおいて初期条件依存性を軽減するために利用されてきた拡張アンサンブルに注目した. これまで拡張アンサンブルを氷のように分子レベルで強い異方性をもった系に適用した例はない. 著者らは拡張アンサンブルの有用性をバルク単原子分子液体にて確認し[13]，異方的な圧力制御方法を取り込んだ拡張アンサンブルを開発し，支配方程式を提示した[9].

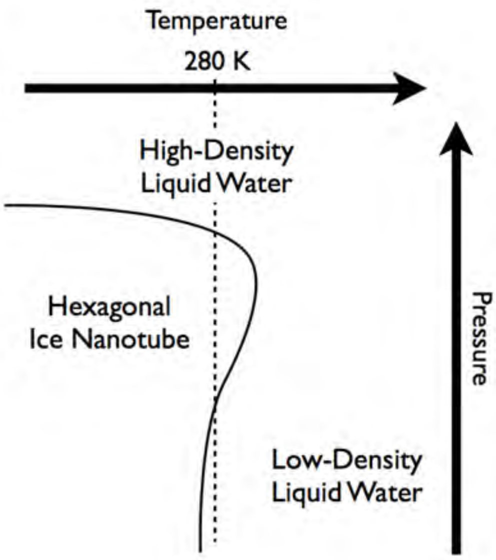


図3　カーボンナノチューブに閉じ込められた水の模式的な相図．

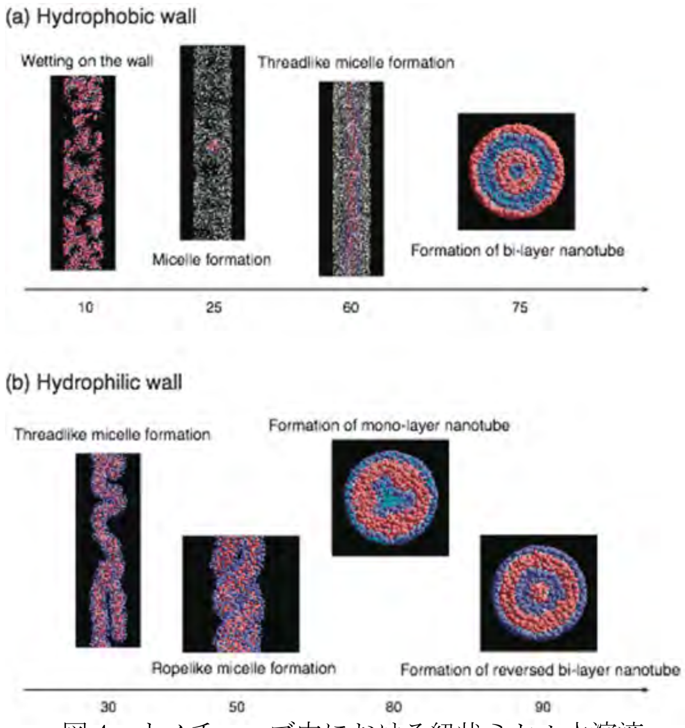


図4　ナノチューブ内における紐状ミセル水溶液の自己集合構造

代表的な結果を図2に示す．スリット幅 h にたいして固液平衡温度は複雑な変化を示しているものの Clausius-Clapeyron の式と整合する結果が得られている．またスリット幅 h によって二次元高密度氷の中でも壁面垂直方向にジグザグ構造をもつ Puckered 型と，そのような構造をもたない Flat 型の二種類に分類されることを明らかにした．

また，ナノ細孔のサイズが固液平衡温度と結晶化のための自由エネルギー障壁の大きさに与える影響を研究した．その結果，$h = 7.0$ Å において自由エネルギー障壁が小さくなることを明らかにした[10]．以上をふまえて適切なナノ細孔のサイズを選択することでエネルギー障壁が低く，固液平衡温度が高いナノ細孔をデザインできる可能性があることを示した．

2.3　カーボンナノチューブに閉じ込められた水の相図

過冷却状態のバルクの水には低密度液体と高密度液体があるといわれている．密度の違いに加えて分子レベルの液体構造の違いをもっており，この違いがイオン性化合物の溶解度や冷却したときに生成される氷の結晶構造に影響するといわれている．一方で，固液界面や気液界面のように不均一な環境下での液体の水がどのような分子構造で存在するかは十分に分かっていない．このようなバルクではない状況において，高密度液体と低密度液体が存在しているかどうかはっきりさせることは，界面の水の熱物性を予測する上で重要である．そこで，不均一な環境のひとつとして，準1次元と準2次元のナノ細孔に閉じ込められた過冷却液体の相図を描くという研究テーマに取り組んだ．準1次元と準2次元の両方で，温度と圧力をパラメータとした相図を提案し，低密度液体と高密度液体が存在することを予測した．常温付近で，圧力を大気圧から数 GPa までに徐々に変化させることで，低密度液体→Hexagonal Ice Nanotube→高密度液体という一連の相転移が存在することをあきらかにした[12].

3．ナノ空間内におけるソフトマターの自己集合と粘性挙動

3.1　ナノチューブ内における紐状ミセル水溶液の自己集合

紐状ミセルは界面活性剤の自己集合体の一形態で，球状ミセルの輪切りが紐のように長く連なった形状をしている．紐状ミセル水溶液が示すダイナミクスが特異なことから，洗剤や高性能セメン

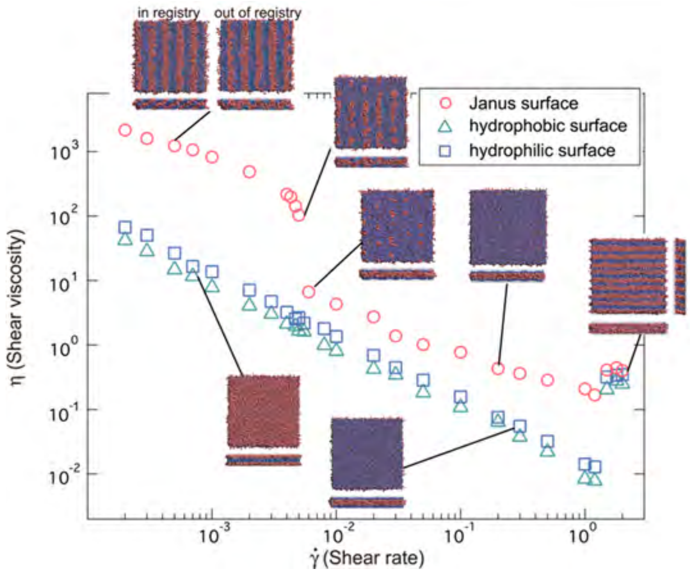


図 5　ナノスリット表面によるせん断粘度挙動の違い

ト，搬送動力の低減（トムズ効果）などの応用が検討されており，一部実用化されている．筆者らは紐状ミセル水溶液を異なる化学表面（疎水壁・親水壁）を持つナノチューブに閉じ込め，形成される自己集合構造を分子シミュレーションによって調べた[15]．その結果を図 4 に示す．疎水壁ナノチューブでは，低濃度で界面活性剤が壁面へ吸着する．その後濃度が上昇すると共に，ナノチューブ内部で形成されたミセルが軸方向へ長くなり，高濃度では円筒状の二分子膜が形成された．一方，親水壁ナノチューブでは，低濃度でもミセルが形成される．濃度が上昇すると，空間的な拘束力の影響で縄状のミセルが形成され，さらに濃度を上昇させるとそれらが融合し，円筒状の単分子膜や逆二分子膜が形成された．

3.2　ナノスリット内における界面活性剤水溶液のせん断流れ挙動

次に，表面に親水・疎水の装飾を施したナノスリット内に界面活性剤水溶液を閉じ込め，自己集合構造およびせん断流れを与えたときのせん断粘度を測定し，それらの関係性を調べた[16]．図 5 は縦軸にせん断粘度，横軸にせん断速度を取ったときの，それぞれの表面によるせん断粘度挙動の違いである．全ての表面でずり流動化現象が観察されたが，親水・疎水をストライプ状に装飾した表面（Janus 表面）では，$\dot{\gamma}$ = 0.005 付近で粘度の急激な低下現象が観察された．この時のせん断速度の逆数は，界面活性剤分子がストライプ状に整列する特徴的な緩和時間に相当しており，それより速いせん断速度では構造が破壊されることに起因している．装飾のない均一な疎水壁・親水壁ではそのような構造破壊が観察されないため，一般的なずり流動化が観察される．さらに速いせん断速度（$\dot{\gamma}$ ~ 1）では，流れに垂直な方向に界面活性剤のストライプが形成され，全ての壁面でずり粘稠化が起こった．このような系ではスリット壁面に装飾を施すことで，ミセル形成の緩和時間とせん断速度のバランスによって粘度が急激に（100 倍近く）スイッチするため，新規ナノデバイスの可能性を秘めていると言える．

3.3　ナノチューブ内における Janus 粒子の自己集合

最後にコロイド流体をナノチューブに閉じ込めたときの自己集合構造と得られる物性について紹介する．ナノ粒子の自己集合を制御するための一般的な方法として，粒子の形状や化学的な相互作用をデザインすることが挙げられる．そのようにデザインされた異方的な粒子の系では，熱力学的状態に依存して規則的な相と不規則な相の相変化が起こり，それに伴い物性の急激な変化が観察される[17]．Janus 粒子は 1 つの粒子の中に 2 つ以上の異なる表面を持つ異方性粒子である．Janus 粒子系では，異なる表面によって，等方的な粒子に比べ複雑な性質や機能をもたせることが可能となる．したがって，これまでにない新しい機能を持った材料が期待できる一方で，自己集合形態は表面の数の分だけ複雑になる[18, 19]．筆者は 2 ブロック，3 ブロック Janus ナノ粒子モデルを作成し，それらをナノチューブ内に閉じ込めたときの自己集合構造に関する相図を描いた[20, 21]．図 6 はナノチューブ半径を横軸に，軸方向圧力を縦軸に取ったときの代表的な相図である．ナノ粒子の表面の赤い部分が疎水性，青い部分が親水性の表面で，実験で合成された Janus 粒子と同様に親水性同士が反発し，疎水性同士が引き合うような相互作用が働く．ナノチューブの半径がナノ粒子の半径に比べ，2 倍以下では軸方向に並んだだけの比較的単純な構造が現れるのに対し，2 倍より大きくなるとナノ粒子同士が規則的に並んだ結晶構造が現れるよ

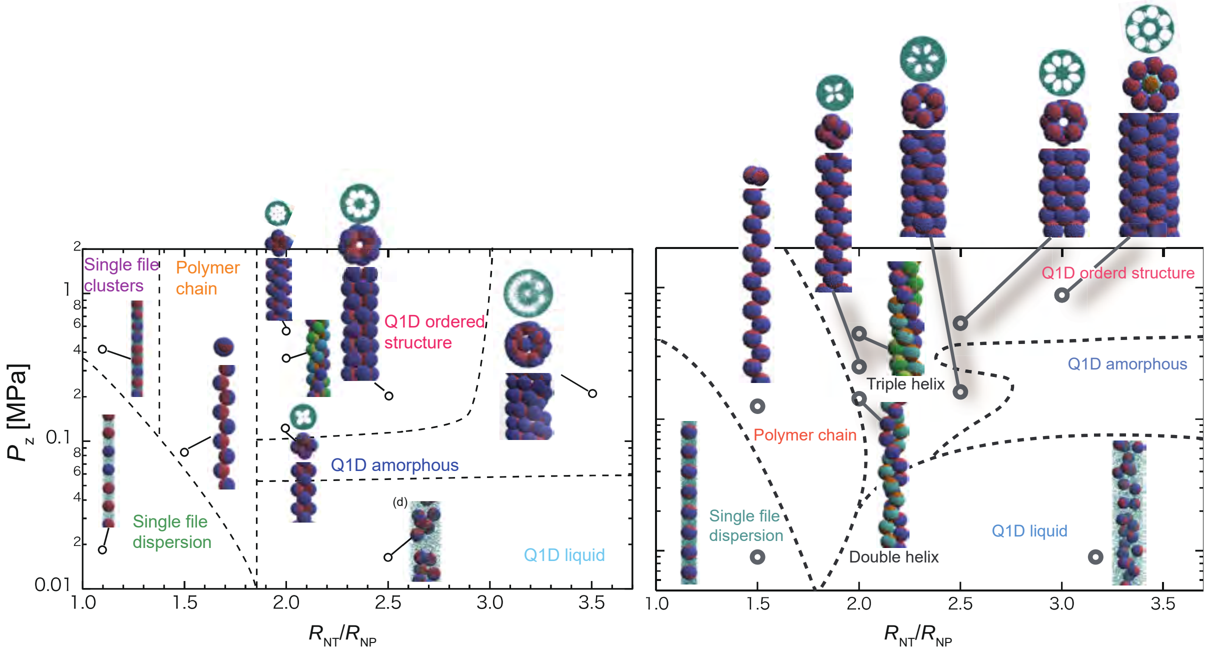


図 6　ナノチューブ内の Janus 粒子の自己集合構造（左：2 ブロック，右：3 ブロック）

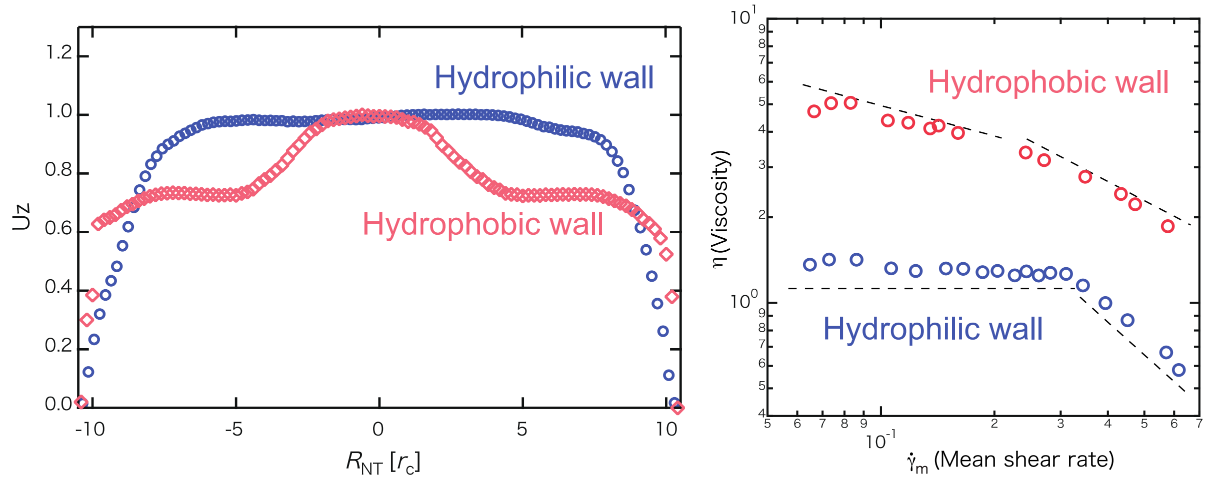


図 7　Janus 粒子の速度分布と粘度の振る舞い（左：速度分布，右：粘度挙動）

うになる．3 ブロックでは，高圧になるとナノチューブ半径が大きい条件，つまり閉じ込め効果が弱い条件でも結晶構造が観察されるのに対し，2 ブロックでは閉じ込め効果が強いときのみ結晶構造が観察された．これは 3 ブロックでは引力の働く表面が 2 つあり，ナノ粒子同士が無限につながることができる一方で，2 ブロックでは，引力表面は 1 つのみであり有限サイズのクラスターが形成されるためである．つまり，Janus 粒子の引力表面の数は，原子の価数とよく似ており，規則的な構造の発現しやすさに影響する．

さらに得られた自己集合に円管流れを与えて，速度分布や粘度の測定を行った[22]．図 7 左に管内の速度分布，右に平均せん断速度を変えたときの粘度挙動を示した．Janus 粒子流体では，親水壁の時に高分子メルトでよく見られるようなパイプ流れの分布が得られたが，疎水壁では特徴的な速度分布が得られた．これは，Janus 粒子の疎水部分が壁に吸着することによって，壁面近傍の流れが阻害され，ロスが生じていると考えられる．また粘度を計算したところ，全体的にずり流動化が観察された．親水壁ではある程度の速さまではせん

断速度に粘度が依存しないニュートン流体のような挙動で，さらに速いせん断速度では，ずり流動化が観察される．疎水壁では，2 つの傾きをもったずり流動化が観察された．これらの挙動の変化は Janus 粒子のクラスターがずりによって破壊されることが原因であることを発見した．

４．おわりに

分子シミュレーションでは，実験ではまだ実施困難な系や条件について，新たな相図・モルフォロジーやそれに伴う機能の発見を目的とした研究を行うことが可能である．そしてそれらが，実際の実験や設計のモチベーションとなることが期待されている．例えば，Bharti ら[23]によって，界面活性剤水溶液をナノチューブに閉じ込めた実験が実施され，その実験結果は著者らのシミュレーション結果と良い一致を示している．現在，様々な分野の設計開発で連続体シミュレーションが用いられているように，今後化学や薬学，医学製品の開発で分子シミュレーションが容易に用いることができるようになると考えられる．近年の計算機の発達により，分子シミュレーションが工学に利用される日がすぐそこまで来ていると期待できる．

参考文献

[1] Sagara, A., Nomura, T., Tsubota, M., Okinaka, N., and Akiyama, T., *Materials Chemistry and Physics*, **146** (2014) 253–260.

[2] Zhu, S., Zhou, H., Hibino, M., Honma, and I., Ichihara, M., *Adv. Funct. Mater.*, 15 (2005) 381–386.

[3] Urita, K., Shiga, Y., Fujimori, T., Iiyama, T., Hattori, Y., Kanoh, H., Ohba, T., Tanaka, H., Yudasaka, M., Iijima, S., Moriguchi, I., Okino, F., Endo, M., and Kaneko, K., *J. Am. Chem. Soc.*, **133** (2011) 10344–10347.

[4] Alba-Simionesco, C., Coasne, B., Dosseh, G., Dudziak, G.,Gubbins, K. E., Radhakrishnan, R., and Sliwinska-Bartkowiak, M., *J. Phys.: Condens. Matter*, **18** (2006) R15.

[5] Ayappa, K. G., and Ghatak, C., *J. Chem. Phys.*, **117** (2002) 5373–5383.

[6] Vishnyakov, A., and Neimark, A., *J. Chem. Phys.*, **118** (2003) 7585–7598.

[7] Kaneko, T., Mima, T., and Yasuoka, K., *Chem. Phys. Lett.*, **490** (2010) 165–171.

[8] Kaneko, T., Yasuoka, K., and Zeng, X. C., *Molec. Simul.*, **38** (2012) 373–377.

[9] Kaneko, T., Bai, J., Yasuoka, K., Mitsutake, A., and Zeng, X. C., *J. Chem. Theory Comput.*, **9** (2013) 3299–3310.

[10] Kaneko, T., Bai, J., Yasuoka, K., Mitsutake, A., and Zeng, X. C., *J. Chem. Phys.*, **140** (2014) 184507.

[11] Koga, K., and Tanaka, H., *J. Chem. Phys.*, **122** (2005) 104711.

[12] Nomura, K., Kaneko, T., Bai, J., Francisco, J. S., Yasuoka, K., and Zeng X. C., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **114** (2017) 4066–4071

[13] Kaneko, T., Mitsutake, A., and Yasuoka, K., *J. Phys. Soc. Jpn.*, **81** (2012) Supplement A SA014.

[14] Algara-Siller, G., Lehtinen, O., Wang, F. C., Nair, R. R., Kaiser, U., Wu, H. A., Geim, A. K., and Grigorieva, I., V., *Nature*, **519** (2015) 443–445.

[15] N. Arai, K. Yasuoka, and X. C. Zeng, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 7916-7920 (2008).

[16] N. Arai, K. Yasuoka, and X. C. Zeng, *Langmuir*, **28**, 2866-2872 (2012).

[17] P. F. Damasceno, M. Engel, S. C. Glotzer, *Science*, **337**, 453-457 (2012).

[18] D. J. Cole-Hamilton, *Science*, **327**, 41-42 (2010).

[19] Q. Chen, S. C. Bae, and S. Granick, *Nature*, **469**, 381-384 (2011).

[20] N. Arai, K. Yasuoka, and X. C. Zeng, *J. Chem. Theory Comput.*, **9**, 179-187 (2013).

[21] Y. Kobayashi and N. Arai, *Soft Matter*, **12**, 378-385 (2016).

[22] Y. Kobayashi and N. Arai, *Langmuir*, **33**, 736-743 (2017).

[23] B. Bharti, M. Xue, J. Meissner, V. Cristiglio and G. H. Findenegg, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 14756-14759 (2012).

第 1 回アジア熱科学会議（ACTS2017）およびアジア熱科学工学連盟（AUTSE）報告

Report on The 1st Asian Conference on Thermal Sciences (ACTS2017) and Asian Union of Thermal Science and Engineering (AUTSE)

高田　保之（九州大学）
Yasuyuki TAKATA (Kyushu University)
e-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp

1．はじめに

2017 年 3 月 26 日~30 日，韓国済州島において，第 1 回アジア熱科学会議（The First Asian Conference on Thermal Sciences, ACTS2017）が開催されました．本会議は，2015 年 11 月に設立した「アジア熱科学工学連盟（Asian Union of Thermal Science and Engineering, 略称 AUTSE）」が開催する最初の国際会議であります．主催は韓国機械学会熱工学部門，共催は本会および中国工程熱物理学会伝熱伝質分会です．本稿では，本会議の概要および会期中に開催された AUTSE の Executive Board Meeting（EB Meeting）について概略をご報告いたします．

2．ACTS2017

2.1　会議の概要

会場は，済州島南部の International Convention Center（ICC）でした．以前は福岡から済州島まで直行便があったのですが，このルートは数年前に閉鎖されたので，プサン経由かソウル（仁川→金浦）経由で行かなければなりません．距離的には近いのですが，時間は結構かかります．一方，成田と関空からは直行便があるようです．済州島の空港から会場までは，バスでさらに 50 分ほどかかります．この会場は大規模な国際会議に向いており，大小多数の部屋でのパラレルセッションが可能です．付近はリゾートエリアで，会場から数分も歩けば大浦柱状節理帯（チュサンジョルリ）があり，柱状の溶岩石を見ることができます．済州島全体が非常に風光明媚なところであり，今回は天候にも恵まれて参加者の皆さんは観光でも満足されたと思います．

まず 26 日夕方に Welcome Reception（写真 1）が行われました．会議中の料理や飲み物は非常にクオリティが高く，韓国側のホスピタリティの質の高さを実感した次第です．英国の友人はかつて小生に，「国際会議で何が討論されたのかは覚えていないが，食べ物が良かったどうかは覚えている.」と言ったことがあります. これは蓋し名言で，そういう意味でも第 1 回の ACTS は印象に残る会議となりました.

写真 1　Welcome Reception（3 月 26 日夕方）

写真 2　Opening Ceremony（Sang Yong Lee, AUTSE 会長の挨拶）

27 日の朝はオープニングで，AUTSE の Sang Yong Lee 会長（KAIST, 写真 2）, ACTS 議長の Sung Jin Kim 氏（KAIST），副議長の Xing Zhang 氏（清

華大）および小生が挨拶を行いました．会議の構成は，午前中に2件のプレナリー講演，その後パラレルセッションで一般講演やポスターセッション，午後にキーノート講演が行われました．日本からは大阪府立大学の須賀一彦先生が，多孔質内乱流のモデリングと数値シミュレーションに関して，すばらしいプレナリー講演（写真 3）をされました．

一般講演のオーラルセッション（写真4）やポスターセッション（写真5）でも活発な質疑や討論が行われていました．部屋によっては入りきれないくらいの盛況ぶりで，その反面聴講者の少ない部屋も散見されました．こういう大きな会議では，聴講者の数の予想が外れることも多く，適切なサイズの講演室を設定するのは難しいと感じました．

会議の4日目の夜Banquetが，ICC5階の大ホールで開催されました．乾杯の前に本会藤岡惠子会長（写真 6）を含めて，会議の主催者側代表の挨拶が行われました．アトラクションとして，Cookin' Nantaというグループの非常に興味深いショーがありました．ダイナミックな演技だったので参加者のほぼ全員がショーに見惚れていたのが印象的でした．

写真3　須賀一彦先生のプレナリー講演

写真4　オーラルセッションの様子

観客の注意力を長続きさせるコツは，大音量とダイナミズムであるということがよく分かりました．懇親会の最中に個人的にお恥ずかしいところを見せてしまったので写真は割愛させていただきます．

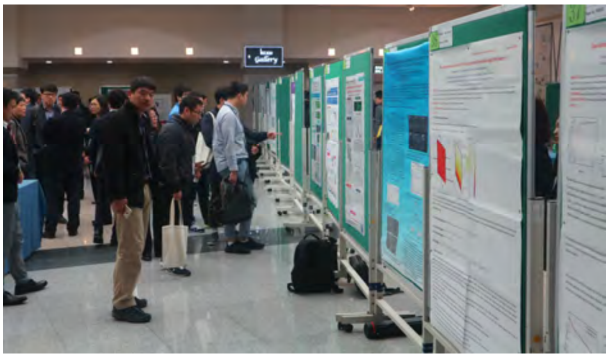


写真5　ポスターセッションの様子

写真6　藤岡惠子本会会長による懇親会での挨拶

ACTS の参加者数，発表件数などの統計は以下の通りでした．

参加登録者：719名

内訳：韓国273，中国269，日本126，
　　その他51（19か国）

発表：Plenary 8，Keynote 25, Oral 379，Poster 138
　　27 Topics，101 sessions

2.2　贈賞関係

会議4日目の懇親会開始前にAUTSEのAward Ceremonyが開催されました．今回は第1回目の授賞式であり，各章の受賞者は以下の通りです．

Outstanding Achievement Award(OAA):
　Prof. Zeng-Yuan Guo, Tsinghua University (China)

Young Scientist Award(YSA):
　Prof. Haidong Wang, Kyushu University (Japan)
　Prof. Li Chen, Xi'an Jiao Tong University (China)

授賞式の後OAA受賞者のZ.-Y. Guo先生の受賞講

演がありました．今回の受賞者は，OAA は 1 名，YSA は 2 名でしたが, 会期中に開催された AUTSE の EB ミーティングで修正案が提案され，OAA は 2 名以内で 4 年毎に贈賞，YSA は 3 名以内で 2 年毎に贈賞ということになりました. 次回 YSA はそう遠くない時期に募集が開始されることになると思いますので，適齢期の若手研究者の方はぜひチャレンジしてほしいと思います.

写真 7　Sang Yong Lee AUTSE 会長から Young Scientist Award を受ける Haidong Wang 氏（九大）

3．AUTSE Executive Board Meeting

3 月 27 日の午後に, AUTSE の EB ミーティングが開催されました．日本からは EB メンバーとして小原先生（東北大）および小生，オブザーバーとして店橋先生（東工大）と宮崎先生（九工大）が出席しました．日中韓 3 か国の他に，オブザーバーとして，台湾から C.-H. Chen 氏（国立成功大学）およびインドから K.Muralidhar 氏（IIT Kanpour），Eurotherm Committee の P. Di Marco 会長（University of Pisa），J. Szmyd 幹事（AGH UST）が出席しました．

EB ミーティングで討論され，決定された主な事項は以下の通りです．

（1）AUTSE President および EB メンバーの交代

Sang Yong Lee 氏から Sung Jin Kim 氏に会長が交代となりました．任期は次回 ACTS までです．これに伴い，韓国側 EB メンバーの交代が提案され了承されました．すなわち Sang Yong Lee 氏，Jin Taek Chung 氏が退任し，後任に Min Soo Kim 氏（Seoul National University）, Ji Hwan Jeong 氏（Pusan National University）が選定されました．日本および中国のメンバーは留任することになりました．

（2）次回 ACTS

2020 年 11 月に宮崎シーガイアで開催予定の第 2 回 ACTS（議長 花村克悟氏（東工大））の準備状況について，宮崎康次実行委員長が説明を行いました．また，第 3 回 ACTS は 2024 年に中国で開催することが決まりました．Chang-Ying Zhao 氏（上海交通大）がホストをする予定です．第 2 回は 3 年半後という変則開催ですが，第 3 回以降は 4 年毎という定常モードに移行します．

（3）新メンバー

AUTSE は現在，韓国，中国，日本の 3 か国で運営されていますが，今後参加国・地域を順次拡大していく予定です．今回，オブザーバーとして台湾とインドが EB ミーティングに参加しました．両代表とも AUTSE のメンバーになる方向で，ディスカッションを開始いたしました．済州島での会議以降もメール審議が続いています．

（4）Eurotherm Commttee との連携

AUTSE を立ち上げる際のモデルとなったのが，欧州の Eurotherm Committee です．今回，ACTS に参加された P. Di Marico 会長，J. Szmyd 幹事と両団体の連携について議論を行い，友好関係を深めていくことで合意いたしました. 具体例としては，Eurotherm Committee が主催する European Thermal-Sciences Conference（ETSC）と AUTSE の ACTS に双方の団体からプレナリーやキーノート講演者を相互に派遣することなどであります．2020 年は夏に ETSC が 11 月に ACTS が開催予定であり，Eurotherm 側からバッティングの懸念が示されましたが, AUTSE 側としては開催の季節や参加対象者が異なっており，そのような懸念は無いとの認識です．むしろ相互の交流が活発になるとプラスの効果を確信しています．

4．終わりに

AUTSE が 2015 年 11 月に設立されて, あっという間に 1 年半が経ってしまいました．この間，日中韓の連携は深まり，第 1 回の ACTS も成功裏に開催することができました．近々に AUTSE の新メンバーも加わり，このアジアのネットワークは順調に広がっていくものと確信しています．年度末の極めて多忙な時期に ACTS にご参加いただきました本会会員の皆様に厚くお礼申し上げます．

本会主催行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2017 年						
7 月	21(金)	第 4 回「伝熱工学の基礎」講習会 —熱プロセスを習得したい人のための初級入門— （開催場所：関西大学 東京センター（サピアタワー9 階））	2017.6.26		日本伝熱学会(担当 大澤) E-mail: office@htsj.or.jp TEL: 03-3259-7919 / FAX: 03-5280-1616	
2018 年						
3 月	12(月) ～ 15(木)	The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (ICBCHT10) （開催場所：長崎ブリックホール）	2017.8.31	2017.11.30	Secretary General: Prof. Ichiro Ueno（上野 一郎） Dept. Mechanical Engineering, Fac. Science & Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan E-mail: ich@rs.tus.ac.jp TEL: +81-4-7124-1501 ext.3912 (office) / 3952 (student office) FAX: +81-4-7123-9814	
5 月	29(火) ～ 31(木)	第 55 回日本伝熱シンポジウム （開催場所：札幌コンベンションセンターSORA）			実行委員会委員長　大島 伸行 北海道大学大学院工学研究院 機械宇宙工学部門	

本会共催，協賛，後援行事

開催日		行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2017 年						
7 月	10(日) ～ 2019 年 12 月 末日	EU Green Gateway to Japan （開催場所：東京）			日本能率協会　産業振興センター Tel: (03)3434-0998,　Fax:(03)3434-8076 E-mail: noriyasu_kamioki@jma.or.jp	
7 月	18(火) ～ 19(水)	第 45 回可視化情報シンポジウム （開催場所：工学院大学新宿キャンパス）	2019.3.10	2017.5.12	実行委員会 幹事 窪田佳寛（東洋大学 理工学部） E-mail: sympo2017@vsj.or.jp	
8 月	21(月) ～ 24(木)	4th Symposium on Fluid-Structure-Sound Interactions and Control (FSSIC2017) （開催場所：日本大学理工学部（駿河台校舎））	2017.1.15	2017.4.1	実行委員長　木村 元昭（日大） Tel: (03)3259-0750,　Fax:(03)3293-8254 E-mail: kimura@mech.cst.nihon-u.ac.jp	
8 月	19(土) ～ 21(月)	日本混相流学会混相流シンポジウム 2017 （開催場所：電気通信大学）	2017.3.17	2017.6.12	混相流シンポジウム 2017 実行委員会 E-mail: konsosymp@jsmf.gr.jp	
8 月	22(火) ～ 24(木)	理論応用力学講演会（第 64 回） （開催場所：日本学術会議（東京都港区六本木））	2017.6.23	2017.7.28	幹事学会：日本機械学会 担当：小阪 雅裕 TEL: 03-5360-3505　FAX: 03-5360-3509 E-mail : kosaka@jsme.or.jp	
8 月	27(日) ～ 31(木)	2nd Asian Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy（ASLIBS2017） （開催場所：Tokushima Community Center, Tokugin Tomony Plaza（徳島市））	2017.6.26		Chairperson 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 エネルギー工学部門エネルギー変換工学大講座　出口 祥啓 〒770-8506 徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地 Tel: 088-656-7375(直通)　Fax: 088-656-9082	
8 月 9 月	27(日) ～ 1(金)	2017 年 国際水・蒸気性質協会　年会（京都）（2017 IAPWS Meeting in Kyoto） （開催場所：京都リサーチパーク）			E-mail: info@iapws2017.org URL: http://www.iapws2017.org	
8 月	28(月) ～ 30(水)	日本実験力学会 2017 年度年次講演会 （開催場所：岡山理科大学）	2017.5.8	2017.6.30	〒700-0005　岡山県岡山市北区理大町 1-1 岡山理科大学工学部　清水 一郎，中井 賢治 Tel: 086-256-9614/ Fax: 086-256-9614 E-mail: shimizu@mech.ous.ac.jp E-mail: nakai@mech.ous.ac.jp	
8 月	30(水) ～ 9/1 (金)	日本流体学会 年会 2017 （開催場所：東京理科大学葛飾キャンパス）	2017.6.2	2017.7.14	日本流体学会年会 2017 実行委員会 E-mail : nenkai2017-ml@tusml.tus.ac.jp	
9 月	16(土) ～ 18(月・祝)	日本機械学会　第 30 回計算力学講演会（CMD2017） （開催場所：近畿大学東大阪キャンパス）	2017.6.9	2017.8.1	日本機械学会　第 30 回計算力学講演会実行委員会 E-mail: cmdconf17@jsme.or.jp	
9 月	27(水) ～ 29(金)	2017 年度日本冷凍空調学会年次大会 （開催場所:玉川大学(東京都町田市)）	2017.5.25	2017.7.24	日本冷凍空調学会　年次大会実行委員 E-mail: jsrae17@jsrae.or.jp	
9 月 10 月	29(金) ～ 1(日)	The Institute of Materials and Systems for Sustainability 2017, IMaSS（持続型社会のための材料とシステムに関する国際	2017.4.15	2017.6.15	ICMaSS2017 Office c/o Inter Group Corp. TEL: +81-52-581-3241	

		会議 2017） （開催場所：名古屋大学）			Fax: +81-52-581-5585 E-mail: icmass2017@intergroup.co.jp	
10 月	9(月) ～ 12(木)	The 6th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flow (ICJWSF-2017) （開催場所： 米国シンシナチ大学）	2017.3.24	2017.6.30	ICJWSF-2017 組織委員会 副議長 内山 知実 （名古屋大学 未来材料・システム研究所） E-mail : uchiyama@is.nagoya-u.ac.jp	
10 月	18(水) ～ 19(木)	第 45 回日本ガスタービン学会定期講演会 （開催場所：松山市総合コミュニティセンター）	2017.6.23	2017.9.1	公益社団法人 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	
10 月 11 月	31(火) ～ 2(木)	第 8 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム （開催場所：広島国際会議場）	2017.7.14	2017.9.8	第 8 回マイクロ・ナノ工学シンポジウム 実行委員会 実行委員長：三木 則尚（慶應義塾大学） E-mail: miki@mech.keio.ac.jp プログラム委員長：宮崎 康次（九州工業大学） E-mail: miyazaki@mech.kyutech.ac.jp 実行委員会事務局：日本機械学会 担当職員 熊谷理香 E-mail: kumagai@jsme.or.jp	
11 月	1(水) ～ 4(土)	The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (12th ISEM'17-Kanazawa, Japan) （開催場所：金沢歌劇座）	2017.5.12	2017.7.14	〒951-8518 新潟市中央区旭町通 2-746／新潟大学医学部保健学科内 日本実験力学会事務局／担当：小林 TEL:025-368-9310　FAX:025-368-9309 E-mail : office-jsem@clg.nigata-u.ac.jp	
11 月	7(火) ～ 9(木)	第 38 回日本熱物性シンポジウム （開催場所：産業技術総合研究所つくばセンター 共用講堂）	2017.6.30	2017.8.18	実行委員会 国立研究開発法人　産業技術総合研究所 　物質計測標準研究部門 熱物性標準研究グループ　山田 修史 〒305-8563　茨城県つくば市梅園１－１－１ つくば中央第 3 E-mail: info_38thJSTP_ml@aist.go.jp Tel: 029-861-4166　Fax: 029-861-4039	
11 月	13(月) ～ 15(水)	第 55 回燃焼シンポジウム （開催場所：富山国際会議場）	2017.7.14	2017.9.8	第 55 回燃焼シンポジウム事務局 〒930-8555　富山県富山市五福 3190 富山大学　工学部機械知能システム工学科 熱工学研究室内 実行委員長　手崎　衆 E-mail：sympo55@combustionsociety.jp	
11 月	25(土)	第 20 回スターリングサイクルシンポジウム （開催場所：明星大学日野校（東京都日野市））	2017.7.7	2017.10.13	実行委員長　齊藤 剛 明星大学 TEL: 042-591-9614　FAX: 042-591-9594 E-mail: tsaito@me.meisei-u.ac.jp	
12 月	1(金) ～ 3(日)	The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11) （開催場所：熊本大学）	2017.4.30.	2017.8.15.	E-mail : info@psfvip11.jp	
12 月	7(木) ～ 8(金)	第 7 回潜熱工学シンポジウム （開催場所：岡山大学自然科学研究科）	2017.9.16	2017.10.21	〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1 岡山大学大学院自然科学研究科 　実行委員長　堀部　明彦 　連絡先：幹事　山田　寛 TEL: 086-251-8046 E-mail : y.yamada@okayama-u.ac.jp	

公益社団法人日本伝熱学会第 55 期（平成 28 年度）総会議事録

1. 日 時　平成 29 年 5 月 25 日（木）16 時 20 分～16 時 50 分

2. 場 所　ソニックシティ 小ホール
〒330-8669 埼玉県さいたま市大宮区桜木町 1-7-5

3. 正会員数　1,049 名

4. 出席者　584 名（うち委任状出席 448 名）. 定款第 29 条の定めるところにより, これは定足数である正会員数の過半数（525 名）を上回り, 総会は成立した.

5. 議事経過
定款第 27 条により藤岡惠子会長が議長となり, 以下の議案について逐次審議した.

第 1 号議案　第 55 期（平成 28 年度）事業報告の件
議長より, 公益社団法人日本伝熱学会第 55 期（平成 28 年度）総会議案（以下,「総会議案」と呼ぶ.）の第 1 号議案第 55 期（平成 28 年度）事業報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第 2 号議案　第 55 期（平成 28 年度）会務報告の件
議長より, 総会議案の第 2 号議案第 55 期（平成 28 年度）会務報告について諮り, 満場一致でこれを可決した.

第 3 号議案　第 55 期（平成 28 年度）収支決算の件
議長より, 総会議案の第 3 号議案第 55 期（平成 28 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　第 56 期（平成 29 年度）役員・協議員選出の件
議長より, 総会議案の第 4 号議案第 56 期（平成 29 年度）役員の選出について以下のとおり次期役員の提案がなされ, 満場一致でこれを可決した.

定款第 17 条第 1 項により退任する役員

理事（副会長）	花村 克悟	理事	小原 拓
理事	廣田 真史	理事	髙田 保之
理事	桑原 不二朗	理事	太田 淳一
理事	宮良 明男	理事	木戸 長生
監事	黒坂 俊雄		

定款第 17 条第 1 項ただし書きにより退任する役員

代表理事（会長）	藤岡 惠子	理事（副会長）	長坂 雄次
理事（副会長）	安田 俊彦	理事	飛原 英治

第 56 期に新たに選任される役員

定款第 17 条第 1 項により選任される役員

理事	平井 秀一郎	理事	鈴木 洋
理事	田川 正人	理事	花村 克悟
理事	服部 博文	理事	永井 二郎
理事	桃木 悟	理事	緒方 寛
監事	秋吉 亮		

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	菱田 公一	理事	中部 主敬
理事	木戸 長生		

第 5 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, 長坂雄次氏, 花村克悟氏の 2 名を選任した.

第 6 号議案　第 56 期（平成 29 年度）事業計画の件

議長より, 総会議案の第 6 号議案第 56 期（平成 29 年度）事業計画について報告を行った.

第 7 号議案　第 56 期（平成 29 年度）収支予算の件

議長より, 総会議案の第 7 号議案第 56 期（平成 29 年度）収支予算について報告を行った.

以上により, 本日の議事を終了した.

平成 29 年 5 月 25 日

公益社団法人日本伝熱学会第 55 期（平成 28 年度）総会

議長　藤岡 恵子 ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿ 印

議事録署名人　長坂 雄次 ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿ 印

議事録署名人　花村 克悟 ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿ 印

日本伝熱学会主催講習会「省エネのための機器の熱設計」

開催日　2017 年 11 月 17 日（金）10.00～17.10（その後，意見交換会～19.30）
会　場　東京八重洲ホール　B2 ホール
　地図（http://yaesuhall.co.jp/halldetail/hall_n/,　http://yaesuhall.co.jp/accessmap/）

要旨　人間を取り巻く環境の中で，機器の『省エネ』は持続的な社会を実現する上で必要不可欠です．そのため，各家庭で使用されるヒートポンプ，家電といった機器，データセンタを構成する情報機器等の熱設計の重要性が増しています．本講習会では，『省エネのための機器の熱設計』をキーワードに，上記の機器を対象とした熱設計，熱交換器とヒートポンプ，沸騰冷却装置，及び接触熱抵抗の基礎を学びます．これを機に『省エネのための機器の熱設計』を基礎から学んでみませんか？

題目・講師

10.00 ～ 10.10／開催の挨拶
日本伝熱学会/産学交流委員長　近藤 義広（日立製作所）

10.10 ～ 11.20／①機器の熱設計　松島 均 教授（日本大学）

11.30 ～ 12.40／②熱交換器とヒートポンプ基礎　飛原 英治 教授（東京大学）

12.40 ～ 13.40／昼食休憩（お弁当をご用意しています）

13.40 ～ 14.00／①及び②の Q&A セッション

14.10 ～ 15.20／③沸騰冷却と熱輸送デバイス基礎　永井 二郎 教授（福井大学）

15.30 ～ 16.40／④接触熱抵抗の基礎と熱抵抗低減　富村 寿夫 教授（熊本大学）

16.50 ～ 17.10／③及び④の Q&A セッション

17.40 ～ 19.30／講師，参加者間の意見交換会

定　員　先着 40 名

参加費　（資料集 1 冊，技術交流会参加費込み）
学会員 25,000 円，非会員 35,000 円，特別賛助会員企業の方 20,000 円，学生 15,000 円

資料集　本セミナーに下記方法で申し込まれた方 1 名につき 1 冊準備します.
資料集のみの販売はいたしません.

申込方法　伝熱学会ホームページ上の申込フォームからお申し込みください.（現在準備中）
また，参加費はクレジットカード決済（口座振込の場合は下記問合せ先へ要相談）となります.
申し込み期限 2017 年 10 月 31 日

問合せ先　（公社）日本伝熱学会（担当 大澤）／電話（03）3259-7919／FAX（03）5577-7939
／E-mail：office@htsj.or.jp

日本伝熱学会 関西支部 主催
第15回関西伝熱セミナー
「エネルギー研究の最前線と伝熱」

日本伝熱学会 関西支部では，2年に1度宿泊付の「関西伝熱セミナー」を開催してまいりました．今回は第15回目となり，大阪府東大阪市の石切温泉を会場として「エネルギー研究の最前線と伝熱」について考えるセミナーを企画いたしました．講師にはエネルギーシステム，エネルギー変換技術，ならびに最新の伝熱技術に関しそれぞれの分野で深い造詣を持たれたエキスパートの方々をお招きし，話題提供していただきます．参加者の皆様とともに，楽しく討論できれば幸いです．多数の方々のご参加をお待ちしております．

開催日時　2017年9月1日（金） 13:00 ～ 2日（土） 12:00
会　　場　東大阪石切温泉ホテルセイリュウ 東大阪市上石切町1-11-12（http://www.hotelseiryu.com/）
参加定員　70名
ホームページ　http://www.htsj.or.jp/branch/kansai/seminar2017/
参 加 費　一般 25,000円，学生 15,000円　（講演資料，1日夕食・宿泊，2日朝食 込）
支払方法　銀行振込（振込口座をお知らせいたしますので，申込締切日までにご送金下さい.）
申込方法　氏名・所属・参加種別（一般・学生）・連絡先（電話・メールアドレス）をご記載の上，下記アドレスまで電子メールでお申し込みください.
申込先・問合先　oda.y@kansai-u.ac.jp（第15回関西伝熱セミナー事務局）
申込締切　2017年8月4日（金）

プログラム
第1日目：9月1日（金）
13:00-13:10　挨拶
13:10-14:10　「超スマート社会と先進エネルギーシステム」
　　柏木　孝夫　氏（東京工業大学）
14:20-15:00　「水素エネルギー研究の最前線　～エネルギーキャリアの研究開発～」
　　上殿　紀夫　氏（KRI）
15:00-15:40　「水素ガスタービン・水素エンジンの開発」
　　餝　雅英　氏（川崎重工業）
15:50-16:30　「ガスタービンの最新技術動向」
　　羽田　哲　氏（三菱日立パワーシステムズ）
16:30-17:10　「原子力発電所の新規制基準及び運転延長にかかる対応について」
　　津山　和信　氏（関西電力）
18:00-20:00　意見交換会

第2日目：9月2日（土）
7:30-9:00　朝食・チェックアウト
9:00-9:40　「熱エネルギーの狭帯域な熱輻射への変換」
　　浅野　卓　氏，野田　進　氏（京都大学）
9:40-10:20　「海洋インバースダムを用いた電力貯蔵によるグリッド安定化と未来エネルギーシステム」
　　小西　哲之　氏（京都大学）
10:30-11:10　「SOFC研究の最前線 －適用拡大へ向けて－」
　　岩井　裕　氏（京都大学）
11:10-11:50　「家庭用燃料電池コージェネレーションシステムの最新開発状況」
　　岩田　伸　氏（大阪ガス）
11:50-12:00　挨拶，解散

協賛（予定を含む）：日本機械学会関西支部，日本機械学会動力エネルギーシステム部門，化学工学会エネルギー部会，化学工学会熱工学部会，日本冷凍空調学会，日本混相流学会，日本熱物性学会，エネルギー・資源学会，日本太陽エネルギー学会

日本伝熱学会東海支部 主催
第28回東海伝熱セミナー

日本伝熱学会東海支部では標記の東海伝熱セミナーを下記の通り開催いたします. 今年は, 冷凍サイクル, 燃料電池, 熱伝導, 二相流の最新の研究について話題を提供して頂きます. ご参加の皆様と楽しく討論して頂けるよう企画しております. 多数参加して頂けますようお願い申し上げます.

【日 時】 平成29年9月22日（金）午後～9月23（土）午前
【会 場】 蒲郡荘 〒443-0034 愛知県蒲郡市港町21-4 （JR蒲郡駅下車徒歩5分）
TEL 0533-68-2188 ホームページ http://www.kourituyasuragi.jp/gamagori/
【参加費】 一般：会員 15,000 円, 非会員 20,000 円（宿泊費, 意見交換会, 資料代等を含む）
学生：会員 8,000 円, 非会員 10,000 円（宿泊費, 意見交換会, 資料代等を含む）
※セミナーのみ（意見交換会を除く）参加は, 一般会員：4,000 円, 非会員：9,000 円, 学生：無料（参加費は当日受付にて徴収します）
【定員】 約50名（先着順に受付）

プログラム
【9月22日（金）】

13:30	受付開始
14:00-14:05	支部長挨拶　高野孝義（豊田工業大学）
14:05-14:45	『固体高分子型燃料電池内の熱物質輸送現象とその計測法』 荒木　拓人　氏（横浜国立大学）
14:50-15:30	『水を冷媒としたターボ冷凍機（KAWASAKI MizTurbo）の開発』 阪井　直人　氏（川崎重工業株式会社）
15:35-16:15	『原子力に関する意識の変遷と教育』 梅川尚嗣　氏（関西大学）
16:20-17:00	『管内気液二相流における支配力について』 浅野　等　氏（神戸大学）
17:00-18:30	休憩・入浴
18:30-20:30	意見交換会

【9月23日（土）】

9:00-9:40	『固体酸化物形燃料電池（SOFC）の高度熱利用に向けた取り組み』 馬場　宗明　氏（産業技術総合研究所）
9:45-10:25	『直交異方性傾斜機能材料の非定常熱伝導』 大道　学　氏（愛知工科大学）
10:30-11:10	『二相流衝撃波の形態と圧力変動』 西嶋　春幸　氏（豊橋技術科学大学）
11:15	閉会

【申込・問合先】平成29年8月31日までに「東海伝熱セミナー参加申込」と明記の上, お名前, ご所属, ご連絡先電話番号, e-mail アドレス, 会員資格（正会員・非会員・学生）, 参加の別（両日参加, セミナーのみ）をご記入いただき, 下記までメールでお申込みください.

豊橋技術科学大学機械工学系　中川勝文　email:nakagawa@me.tut.ac.jp

平成 29 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

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

１. 対象となる業績

（１） **学術賞**の対象は, 原則として, 最近 3 年間の Thermal Science and Engineering 誌または Journal of Thermal Science and Technology 誌に掲載された, あるいは, 最近 5 回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表され, 国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究を主体的に行った研究者とその共同研究者とします. なお, 受賞対象研究課題名は, 必ずしも論文題目と厳密に一致する必要はありません.

（２） **技術賞**の対象は, 公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします.

（３） **貢献賞**の対象は, 本学会が主催する事業の実施において, 顕著な貢献を行った会員とします.

（４） **奨励賞**の対象は, 原則として, 最近 2 回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若手研究者で, 発表時に大学院生, またはこれに準じる者（大学卒業後 5 年以内の者）とします.

（５） 学術賞および奨励賞の対象資格は, 原則として本学会会員に限ります.

（６） 贈賞数は, 学術賞 2 件程度, 技術賞 1 件程度, 貢献賞 2 名程度, 奨励賞 4 件程度とします.

２. 選考方法

（１） 「学会賞に関する内規」に定める賞の内, 上項に記載の各賞は, 「表彰選考委員会」が「学会賞の審査・選考方法内規」に基づいて選考します.

（２） 表彰選考委員会は, 公募の他に, 各賞の候補を推薦することが出来るものとします.

３. 提出書類

（１） 申請書・推薦書　1 通

- 申請書・推薦書の書式は, 本学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい.
- 学術賞, 技術賞, 貢献賞, 奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので, ご注意下さい.

（２） 論文抜刷または技術内容参考資料　　6 部　（貢献賞以外の賞）

（３） 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷　6 部　（学術賞, 奨励賞のみ）

４. 提出期限

平成 29 年 12 月 15 日（金）

５. 提出先および問い合わせ先

〒615-8540　京都市西京区京都大学桂 C3
京都大学大学院工学研究科 機械理工学専攻　中部 主敬　宛
E-mail: nakabe@me.kyoto-u.ac.jp
Phone & Fax: 075-383-3605

編集出版部会からのお知らせ
ー各種行事・広告などの掲載についてー

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

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

対 象	対 応	具体的な手続き （電子メールでの連絡を前提としています）
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を，会誌とHPに掲載，MLでも配信	申込者は，記事を総務担当副会長補佐協議員（ML担当），広報委員会委員長（HP担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください．
関係学会や本会会員が関係する組織による国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載してリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は，まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください．審議の結果，掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので，申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください．
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は，公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください．審議の結果，掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので，申込者は記事を広報委員会委員長（HP担当）に送信してください．
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載 （バナー広告のみ，有料）	申込者は，編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください．掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので，申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください．掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします．バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf をご参照下さい．

【連絡先】

・総務部会長：大竹浩靖（工学院大学）：ohtake@cc.kogakuin.ac.jp
・編集出版部会長：田川正人（名古屋工業大学）：tagawa.masato@nitech.ac.jp
・広報委員会委員長：元祐昌廣（東京理科大学）：mot@rs.tus.ac.jp
・総務担当副会長補佐協議員：志村祐康（東京工業大学）：general-affairs@htsj.or.jp
・事務局：大澤毅士・村松佳子：office@htsj.or.jp

【注意】

・原稿はWordファイルまたはTextファイルでお願いします．
・HPはメンテナンスの都合上，掲載は申込月の翌月，また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います．
・MLでは，原則としてテキスト文の送信となります．pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合 はご相談ください．

56 期入会（2017.2.22～2017.6.13）正 39 名，学生 149 名，賛助 2 件

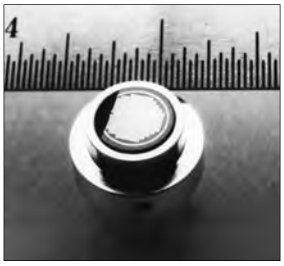
資	氏　名	所　属	資	氏　名	所　属
正	Saha Bidyut Baran	九州大学	学生	山際　幸士郎	東北大学大学院 工学研究科
正	孫　基碩	韓吉 Hightechpia	学生	小林　剛大	慶應義塾大学理工学部
学生	小坂　梨奈	九州大学 大学院 工学府	学生	茂木　孝介	東京理科大学大学院
学生	矢野　政孝	山形大学 大学院 理工学研究科	学生	野崎　涼	北海道大学大学院工学院
学生	大瀧　琢馬	東京工業大学 大学院	学生	中倉　明義	九州工業大学大学院 工学府
正	モベディ モクタダ	静岡大学 グローバル企画推進室	学生	林　伴哉	北海道大学工学院
学生	太田　智	日本大学 工学部 機械工学科	学生	嶋田　泰三	北海道大学大学院 工学院
正	田和　貴純	第一工業製薬株式会社	学生	坂本　篤	北海道大学大学院 工学院
学生	真鍋　優	日本大学 工学部 機械工学科	学生	岡　東洋	金沢大学大学院　自然科学研究科
学生	光山　聖賢	日本大学 工学部 機械工学科	学生	伊森　大記	大阪大学大学院・工学研究科
学生	山田　英樹	日本大学 工学部 機械工学科	学生	高木　健吾	東京理科大学大学院
学生	大浦　一樹	名古屋工業大学 大学院 工学部	学生	中川　友貴	京都大学 工学部 物理工学科
正	李　秦宜	九州大学 航空宇宙工学部門	正	亀谷　幸憲	東京大学生産技術研究所
学生	森下　大夢	同志社大学 大学院 理工学研究科	学生	中内　峻河	京都工芸繊維大学
学生	明賀　新	東京理科大学 大学院 基礎工学研究科	学生	川口　奈月	東京大学大学院 新領域創成科学研究科
学生	竹内　啓	工学院大学 大学院 工学研究科	正	久門　義史	株式会社精研
学生	矢田　恭平	新潟大学 大学院 自然科学研究科	学生	亀島　晟吾	東京工業大学
学生	河野　裕毅	九州大学 大学院 工学研究院	学生	酒井　大輝	東京理科大学大学院
学生	大塚　慶吾	東京大学 大学院 機械工学専攻	学生	富田　圭裕	広島大学・工学部
学生	橋本　達也	東京理科大学 工学部 機械工学科	学生	西島　圭祐	首都大学東京大学院
学生	村山　聖悟	東京理科大学 工学部 機械工学科	正	赤田　拡丈	秋田大学 理工学研究科
学生	馬　驍	筑波大学 システム情報工学研究科	学生	栗山　洸	九州工業大学・工学部
学生	川端　洋佑	東京理科大学 理工学部 機械工学科	正	黄　晙浩	東京大学
正	SHEN BIAO	九州大学	学生	高木　秀隆	広島大学工学部
学生	谷口　祐司	東京工業大学	学生	加藤　大貴	宇都宮大学大学院
正	村田　達哉	株式会社 豊田自動織機	学生	大槻　直輝	兵庫県立大学大学院・工学研究科
正	石井　慶子	青山学院大学	学生	蔭山　匡平	大阪府立大学工学域
正	下山　英司	オムロン株式会社	学生	坂井　浩紀	北海道大学大学院工学院
正	蜂谷　孝治	オムロン株式会社	学生	児玉　理人	同志社大学大学院 理工学研究科
正	原　人志	株式会社ノーリツ	学生	玉根　正貴	茨城大学大学院・理工学研究科
正	本澤　尚史	東京ガス株式会社	学生	榎本　陸	東京工業大学
学生	上木　壮大	九州大学工学府	学生	上田　純	中央大学大学院理工学研究科
学生	竹内　大二郎	九州大学大学院工学府	学生	岩倉　夕希子	産総研東事業所、東京大学大学院
正	清家　美帆	富山県立大学	学生	坂本　純樹	中央大学大学院理工学研究科
学生	兪　涵如	東京大学 大学院新領域創成科学研究科	学生	竹田　那美	九州大学工学部
正	松原　裕樹	東北大学	学生	波入　拓	茨城大学工学部
学生	坂本　飛鳥	茨城大学 工学部	学生	山田　裕也	豊橋技術科学大学 工学部
学生	太田　アウン	東京大学 機械工学専攻	学生	松尾　知哉	大阪府立大学大学院・工学研究科
学生	橋村　蒼太	横浜国立大学大学院	学生	金子　完治	中央大学大学院・理工学部
学生	濱田　高志	横浜国立大学大学院 工学府	学生	柏木　健太朗	東京大学大学院・工学研究科
正	陳　林	東北大学	学生	柳田　浩佑	東京大学大学院工学系研究科
学生	鈴木　信昭	岩手大学大学院工学研究科	学生	石川　利行	慶應義塾大学大学院・理工学研究科
学生	石母田　健悟	東北大学　工学部	学生	チュララク ユーラード	北海道大学大学院
学生	相馬　秀	京都大学大学院工学研究科	学生	楢谷　友輔	慶應義塾大学大学院
学生	池田　寛	東京工業大学 工学院	正	高木　洋平	大阪大学大学院
正	深尾　総史	三菱重工業株式会社	学生	大瀧　琢馬	東京工業大学
学生	永田　大昂	岐阜大学院・工学研究科	学生	田中　志尚	宇都宮大学 工学研究科
学生	竹山　真央	京都大学工学研究科	学生	石川　裕太郎	神奈川大学 工学研究科
学生	吉田　修平	日本大学・工学部・機械工学科	学生	山﨑　匠	名古屋大学大学院工学研究科
学生	平田　光樹	米子工業高等専門学校　専攻科	学生	今立　呼南	大阪大学
学生	清水　奨万	愛知工業大学大学院・工学研究科	学生	寺原　健司	九州大学大学院
学生	平塚　わかな	岩手大学	学生	三井　郁矢	北海道大学大学院工学院
学生	前田　聡	東京工業大学機械系	学生	冨田　柊人	名古屋大学 工学部
学生	沖津　俊太	慶應義塾大学大学院・理工学研究科	学生	会田　裕樹	北海道大学 工学院
学生	佐々木　優太	東北大学工学研究科	学生	香西　祐輔	広島大学・工学部
学生	高橋　伸太郎	東北大学流体科学研究所	学生	万　遂	東京大学 機械工学
学生	中川　拓也	慶應義塾大学院	学生	大塚　慶吾	東京大学 工学系研究科
学生	三浦　浩明	慶應義塾大学大学院	学生	田中　孝典	九州工業大学大学院 工学府
正	有賀　善紀	KOA 株式会社	正	斎藤　静雄	東京大学 工学部
学生	小田切　公秀	名古屋大学大学院	学生	角南　翔大	京都工芸繊維大学
学生	風間　弘槻	信州大学 繊維学部 機械ロボット学科	学生	田邊　祐馬	東京工業大学
学生	上木　壮大	九州大学	学生	松下　涼	東京大学 工学部
学生	新井　雄太	芝浦工業大学・工学部・機械工学科	学生	葉　承翰	東京大学 工学系研究科
学生	高橋　克征	長岡技術科学大学 大学院工学研究科	学生	冨岡　孝太	慶應義塾大学大学院
学生	吉田　修平	日本大学・工学部・機械工学科	学生	山田　眞平	広島大学大学院工学研究科

資	氏　名	所　属	資	氏　名	所　属
学生	沈　啓杰	早稲田大学	正	丸岡　伸洋	東北大学
学生	村上　雄紀	東北大学	正	陳　作舟	ダイキン工業株式会社
学生	ノ　ゾンハン	東京大学 工学系研究科	正	上澤　伸一郎	日本原子力研究開発機構
学生	藤田　晴彦	広島大学 工学部	学生	太田　憲吾	静岡大学大学院・総合科学技術研究科
学生	中野内　実典	東京工業大学・工学部	正	Okafor Ekenechukwu Chijioke	東北大学
学生	手嶋　秀彰	九州大学大学院 工学府	学生	曹　啓偉	東京大学
学生	塘　陽子	九州大学 工学府	学生	津守　悟	早稲田大学大学院 創造理工学研究科
学生	西田　圭佑	大阪大学基礎工学部	学生	樋口　智紀	慶應義塾大学大学院 理工学研究科
学生	Miksik Frantisek	九州大学 大学院 総合理工学府	学生	松嶋　直人	東京大学 工学系研究科
学生	清川　春矢	東京工業大学工学院	学生	手島　健志	東京大学大学院 工学系研究科
学生	檜崎　将弘	九州大学	正	項　栄	東京大学大学院 工学系研究科
学生	山崎　龍朗	関西大学大学院理工学研究科	学生	門宮　龍馬	京都大学大学院工学研究科
学生	西山　賢	北海道大学大学院・工学院	正	児玉　高志	東京大学大学院 工学系研究科
学生	磯部　和真	東京工業大学 工学院	正	沈　秀中	京都大学原子炉実験所
学生	奥野　友哉	東北大学大学院	正	緒方　寛	三菱重工業株式会社 総合研究所
学生	梅原　大輔	東京工業大学 工学院	正	畑迫　芳佳	ヤンマー株式会社
学生	小塩　和弥	京都工芸繊維大学大学院 機械工学課程	正	弘中　秀至	九州大学
学生	黒瀬　築	九州大学 大学院工学研究院	学生	斎藤　寛之	名古屋工業大学大学院 工学研究科
学生	加藤　靖	日本大学工学部	学生	竹内　大二郎	九州大学大学院工学府
学生	小西　翔太	東京大学大学院	学生	後藤　凌平	北海道大学大学院工学院
学生	岩本　壮太郎	東京大学大学院	学生	巽　遼太	東北大学大学院　工学研究科
学生	山根　諒介	愛媛大学大学院・理工学研究科	学生	青木　虹造	東京工業大学大学院
学生	馮　磊	東京大学	正	田　日	東京大学
学生	Li Jiyang	東京大学大学院	学生	辻　利佳子	山口東京理科大学・工学部・機械工学科
正	Shenghong Ju	東京大学	学生	中内　将隆	東北大学大学院　工学研究科
学生	小林　拓矢	東京大学大学院工学系研究科	正	饒　庭竹	東京工業大学
正	多田　晴菜	三菱電機株式会社	正	伊藤　啓	京都大学
正	何　嘉誠	東京大学	学生	西山　悠大	大阪府立大学大学院 工学研究科
学生	新行　将也	東京大学 工学系研究科	賛助	岡崎　多加志	三菱電機株式会社
学生	北尾　忠良	明治大学大学院・理工学研究科	賛助	千葉　広幸	株式会社ケーヒン

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/cm²）に比例した直流電圧を出力します。
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、
熱流束マイクロセンサー（HFM）では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束マイクロセンサー



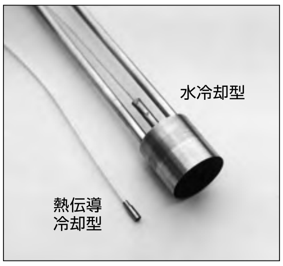
特徴

- 最高速の応答（約 6μ秒）
- 850℃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
- 自動車用エアーバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ

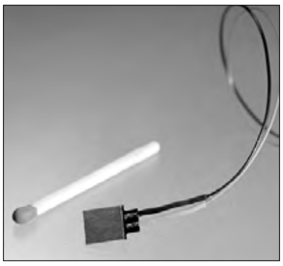


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとなっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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

gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、72㎟の広さを持ち、厚さは0.4㎜です。レベル-0パッケージングの最適化ポリマーと1-レベルパッケージングの金属の構造になっています。

使用例

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

熱流束センサー 校正サービス

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

センサテクノス株式会社
〒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 info@senstech.jp

TECHNO

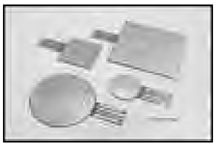
■ CAPTEC 社日本総代理店　■ MEDTHERM 社輸入販売店　■ ITI 社輸入販売店

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

CAPTEC 社（フランス）

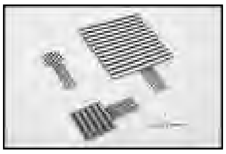
CAPTEC（キャプテック）社は，独自の高度技術により，低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で，熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは，輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



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

輻射センサー



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

MEDTHERM 社（アメリカ）

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

熱流計／輻射計

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

応答速度：50ms 以下*
再現性：±0.5%
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】	【温度範囲】
T 型（銅／コンスタンタン）	－270℃〜＋400℃
J 型（鉄／コンスタンタン）	－210℃〜＋1200℃
E 型（クロメル／コンスタンタン）	－270℃〜＋1000℃
K 型（クロメル／アルメル）	－270℃〜＋1372℃
S 型（白金 10%ロジウム／白金）	＋200℃〜＋1700℃

ITI 社（アメリカ）

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

高温用熱流板

最高温度：980℃
応答速度：0.1s
直径：8mm〜25.5mm　厚み：2.5mm

水冷式 火炎強度熱流計

最高温度：1900℃
応答速度：0.1s
最大熱流束レンジ：0〜3000W/cm^2

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

本広告に掲載されている内容は 2010 年 9 月現在のもので、製品の仕様は予告なく変更される場合があります。

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

今月号では,「分子が関わる伝熱・熱工学」というテーマで特集を行いました.分子は物質をなす基本ブロック単位であるとともに,巨視的な物性と機能およびそれらのメカニズムを支配する,最も根本的な階層といえます.このことは,結果的には巨視的な事象を成果とする伝熱工学・熱工学においても同様であり,分子レベルの取り扱いや考究は,計測技術と材料科学・材料化学の継続的な発展にともない,今後益々重要となるように思われます.具体的に,分子には,基本ブロック単位の集合として (i) 熱や運動量を運ぶ・伝える,(ii) それ自体がエネルギーを蓄え,かつ物質変換の対象となる,(iii) 条件の選択により相変化や自己組織化を行い,異なる性質と機能をもつ多彩な相を発現しうる,などの特徴があるため,工学分野において広く研究開発の対象となっていると考えられます.

本号では,このような観点から,関連領域の研究者から計５件の寄稿を頂きました.いずれもきわめて質の高い解説であり,これらが当分野の将来の一方向性について有益な示唆となれば幸いです.

最後に,本特集の趣旨にご賛同頂き,多忙にも関わらずご寄稿を頂きました執筆者の皆様に重ねて厚く御礼申し上げます.

村上 陽一（東京工業大学）
Yoichi Murakami (Tokyo Institute of Technology)
e-mail: murakami.y.af@m.titech.ac.jp

第 54 回日本伝熱シンポジウム（大宮）の期間に開催されました総会を以って,廣田真史部会長から編集出版部会の取り纏め役を引き継ぎました.これから二年間,下記の方々と一緒に会誌「伝熱」の編集出版を担当いたします.何卒よろしくお願い申し上げます.会員皆様からのご寄稿も歓迎いたします.話題を提供くださる方は下記の連絡先までぜひご一報ください.

田川 正人（名古屋工業大学）
Masato Tagawa (Nagoya Institute of Technology)

企画・編集出版担当副会長　中部 主敬（京都大学）
編集出版部会長　田川 正人（名古屋工業大学）
委員
（理事）　梅川 尚嗣（関西大学）,永井 二郎（福井大学）,星 朗（東北学院大学）
（協議員）　青木 修一（東邦ガス）,岩井 裕（京都大学）,巽 和也（京都大学）
長野 方星（名古屋大学）,西村 伸也（大阪市立大学）,服部 康男（電力中央研究所）
保浦 知也（名古屋工業大学）,村上 陽一（東京工業大学）
TSE チーフエディター　花村 克悟（東京工業大学）
TSE 編集幹事　伏信 一慶（東京工業大学）
編集出版部会 連絡先：　〒466-8555　名古屋市昭和区御器所町
名古屋工業大学大学院電気・機械工学専攻（しくみ領域）
田川 正人
Phone & Fax: 052-735-5343 / E-mail: tagawa.masato@nitech.ac.jp