

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

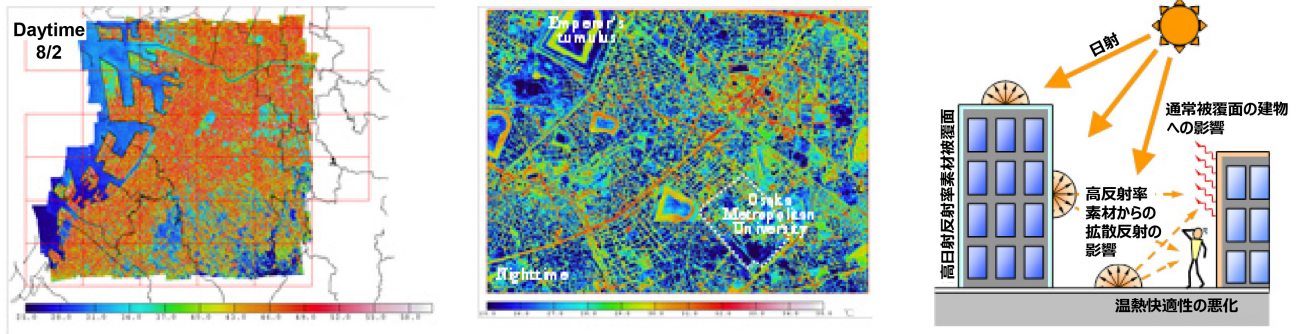
ISSN 1344-8692 Vol. 61, No. 256
2022. 7

Thermal Science and Engineering

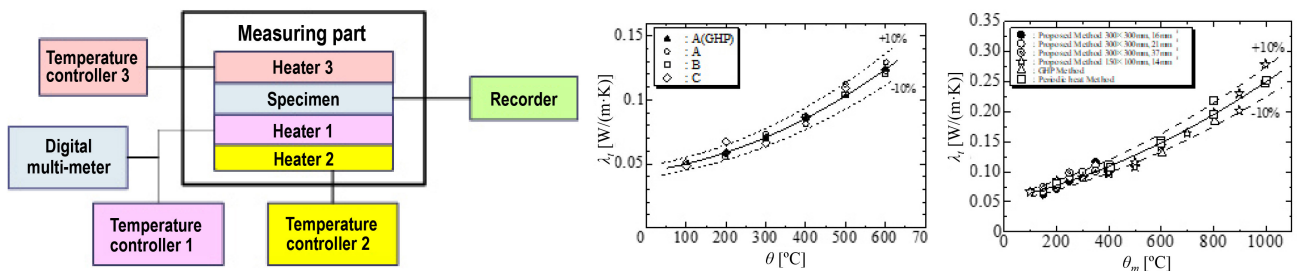
ISSN 0918-9963 Vol. 30, No. 3
2022. 7



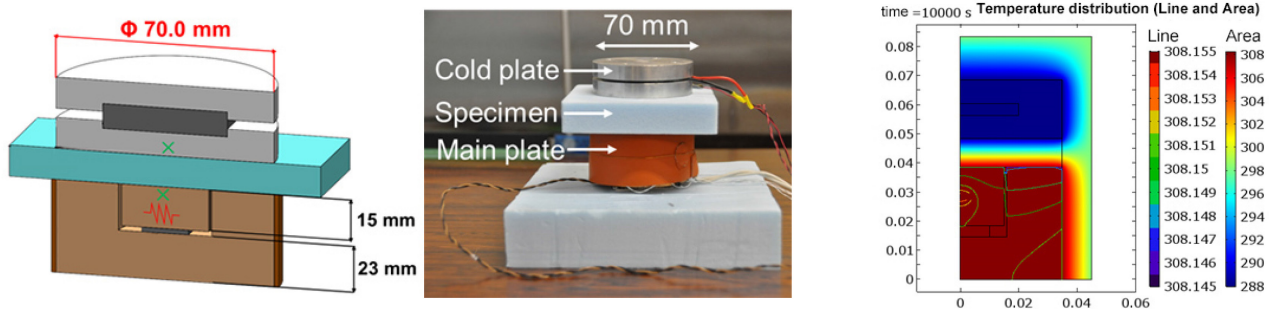
◆特集：断熱・遮熱 —熱流を抑える技術とその動向—



【左図・中央図】都市表面の主な構成要素であるコンクリートやアスファルトは表面の日射吸収率が高く、また熱容量も大きいことから、昼間（左図）は地表面温度の上昇に伴う顕熱輸送の増大により気温上昇を招き、夜間（中央図）は蓄えられた熱により熱帯夜の要因となっている。【右図】高日射反射率材料は、これまで屋根・屋上面、道路面において、その効果が評価されてきているが、壁面への適応は街路空間の熱的快適性の悪化、他の建物壁面への熱負荷の増大につながることから、控えられている。（特集記事「ヒートアイランド緩和のための遮熱技術（木下進一、吉田篤正）」より）



【左図】断熱材の熱伝導率測定において、熱流分離法という新しい測定方法が開発されており、その測定系の模式図を示している。測定部は下から順にヒータ 2、ヒータ 1、試験体、ヒータ 3 と重ねるだけの簡単な構造であり、周囲に囲いは無く、室温に曝されている状態で測定可能である。熱流分離法では室温付近から 1000°C 付近までの測定に成功している。【中央・右図】熱流分離法による熱伝導率測定結果。GHP 法による測定結果と非常によく一致していることがわかる。（特集記事「近年における断熱材の熱伝導率評価方法（大村高弘）」より）



【左図・中央図】保護熱板法（GHP 法）による断熱材の熱伝導率測定装置を小型化し、測定時間の短縮化と測定の高精度化が図られている。図はその概略図（左図）および写真（中央図）である。【右図】計算による小型熱伝導率測定装置の試料内および試料近傍の温度分布。試料内は、GHP 法の特徴であるほぼ一次元の温度分布が形成されているが、主熱板と保護熱板間においては、わずかであるが 2 mK 程度の温度差が生じていることがわかる。（特集記事「保護熱板法による断熱材の熱伝導率測定（小宮敦樹）」より）

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

木下 進一, 吉田 篤正 (大阪公立大学), 大村 高弘 (和歌山工業高等専門学校), 小宮 敦樹 (東北大学) ……………	表紙裏
---	-----

〈新旧会長挨拶〉

第 60 期を振り返って ……………	宗像 鉄雄 ((国研) 産業技術総合研究所) ……………	1
第 61 期会長就任にあたって ……………	高松 洋 (熊本高等専門学校) ……………	2

〈第 34 回日本伝熱学会賞〉

第 60 期 (令和 3 年度) 表彰選考委員会からの報告 ……………	表彰選考委員会 委員長 高松 洋 (九州大学) ……………	3
日本伝熱学会学術賞を受賞して ……………	シェン ビャオ (筑波大学), 高田 保之 (九州大学), 布村 順次, 戸次 洋一郎 (株式会社 UACJ) ……………	5
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ……………	池田 寛 (東京工業大学) ……………	6
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ……………	梅原 裕太郎 (九州大学) ……………	7
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ……………	古川 琢磨 (八戸高専) ……………	8
日本伝熱学会奨励賞を受賞して ……………	許 斌 (東京大学) ……………	9

〈第 59 回日本伝熱シンポジウム〉

第 59 回日本伝熱シンポジウムの報告 ……………	板谷 義紀, 中川 二彦, 小林 信介, 須網 暁 (岐阜大学), 服部 博文, 保浦 知也, 齋木 悠, (名古屋工業大学), 廣田 真史, 丸山 直樹 (三重大学), 中山 浩 (中部電力), 上野 藍 (名古屋大学), 川村 洋介 (名城大学), 佐野 吉彦 (静岡大学), 西川原 理仁 (豊橋技術科学大学), 朱 寧 (静岡理工科大学), 鹿園 直毅 (東京大学), 小宮 敦樹 (東北大学), 西山 貴史 (福岡大学), 近藤 義広 (日立アカデミー), 大久保 英敏 (玉川大学), 星 朗 (東北学院大学), 河村 洋 (公立諏訪東京理科大学) ……………	10
優秀プレゼンテーション賞 受賞者 — 第 59 回日本伝熱シンポジウム — ……………	学生会委員会幹事 西山 貴史 (福岡大学) ……………	23

〈特集：断熱・遮熱 ―熱流を抑える技術とその動向―〉

特集「断熱・遮熱 ―熱流を抑える技術とその動向―」にあたって

.....小宮 敦樹（東北大学）	24
ヒートアイランド緩和のための遮熱技術	木下 進一，吉田 篤正（大阪公立大学） 25
建築用断熱材の熱伝導率測定方法	田坂 太一（建材試験センター） 31
近年における断熱材の熱伝導率評価方法	大村 高弘（和歌山工業高等専門学校） 37
保護熱板法による断熱材の熱伝導率測定	小宮 敦樹（東北大学） 43

〈ヒストリーQ〉

人と熱との関わりの足跡（その10）―金箔製造技術の歴史的変遷と熱との関係―

.....高見 怜，永井 二郎（福井大学）	49
-----------------------	----

〈行事カレンダー〉 65

〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第60期（2021年度）総会議事録	66
2022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	68
編集出版部会からのお知らせ	69

〈編集出版部会ノート〉 73

Vol.61, No.256, July 2022

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Shinichi KINOSHITA, Atsumasa YOSHIDA (Osaka Metropolitan University)

Takahiro OHMURA (Wakayama College)

Atsuki KOMIYA (Tohoku University) Opening Page

< New and Former Presidents' Addresses >

The 60th Term in Retrospect

Tetsuo MUNAKATA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) 1

Inauguration Address as the 61st President

Hiroshi TAKAMATSU (National Institute of Technology, Kumamoto College) 2

< The 34rd Heat Transfer Society Awards >

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2021

Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University) 3

On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan

Biao SHEN (University of Tsukuba), Yasuyuki TAKATA (Kyushu University),

Junji NUNOMURA, Yoichiro BETSUKI (UACJ Corp.) 5

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

Yutaka IKEDA (Tokyo Institute of Technology) 6

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

Yutaro UMEHARA (Kyushu University) 7

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

Takuma KOGAWA (National Institute Technology Hachinohe College) 8

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

Bin XU (University of Tokyo) 9

<The 59th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Report on the 59th National Heat Transfer Symposium of Japan

Yoshinori ITAYA, Tsuguhiko NAKAGAWA, Nobusuke KOBAYASHI, Akira SUAMI (Gifu University), Hirofumi HATTORI, Tomoya HOURA, Yu SAIKI (Nagoya Institute of Technology), Masafumi HIROTA, Naoki MARUYAMA (Mie University), Hiroshi NAKAYAMA (Chubu Electric Power), Ai UENO (Nagoya University), Yosuke KAWAMURA (Meijo University), Yoshihiko SANO (Shizuoka University), Masahito NISHIKAWARA (Toyohashi University of Technology), Ning Zhu (Shizuoka Institute of Science and Technology), Naoki SHIKAZONO (The University of Tokyo), Atsuki KOMIYA (Tohoku University), Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Hidetoshi OHKUBO (Tamagawa University), Akira HOSHI (Tohoku Gakuin University), Hiroshi KAWAMURA (Suwa University of Science)	10
Best Presentation Award - 59th National Heat Transfer Symposium of Japan - Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University)	23

<Special Issue: Thermal insulation and shielding -Technologies and trends in thermal flow reduction->

Preface to "Thermal insulation and shielding -Technologies and trends in thermal flow reduction-" Atsuki KOMIYA (Tohoku University)	24
Technology of Cool Materials for Mitigation to Urban Heat Island Shinichi KINOSHITA, Atsumasa YOSHIDA (Osaka Metropolitan University)	25
Measurement Method for Thermal Insulation Materials for Buildings Taichi TASAKA (Japan Testing Center for Construction Materials)	31
Evaluation Methods for Thermal Conductivity of Thermal Insulation in Recent Years Takahiro OHMURA (Wakayama College)	37
Measurement of Thermal Conductivity for Insulation Materials by Guarded Hot Plate Method Atsuki KOMIYA (Tohoku University)	43

<History Q>

Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 10) -Historical Transition of Gold Leaf Manufacturing Technology and its Relations with Heat- Ryo TAKAMI, Niro NAGAI (University of Fukui)	49
---	----

<Calendar>	65
<Announcements>	66
<Note from the JHTSJ Editorial Board>	73

第 60 期を振り返って The 60th Term in Retrospect



宗像 鉄雄 ((国研) 産業技術総合研究所)
Tetsuo MUNAKATA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

5月19日の第60期総会をもちまして会長を退任いたしました。第59期と同様に、この1年間もコロナの影響で対面での会議の開催が難しく、理事会は全てオンラインでの開催となってしまいました。この1年間、例年通りの学会運営を支えて頂きました副会長、理事、監事等の皆様に深く感謝いたします。今期の学会の運営状況については、総会資料(5月19日の総会で配布した資料あるいは学会のホームページ <https://www.htsj.or.jp/about/151.html> 記載の「第60期(2021年度)総会議案書」)でご確認ください。

日本伝熱シンポジウムにつきましては、一昨年の金沢は中止(後日オンラインで開催)、昨年の郡山は完全オンラインでの開催でしたが、今回の岐阜では、コロナの様子を見ながらの手探りの状況ではありましたが、ハイブリッド(対面とオンライン)での開催と、少しずつ改善してきております。次回の福岡(2023年5月25日~27日)では通常の対面での会議スタイルに戻ることを期待しています。

なお、今期は、オンラインでの会議を行いやすくする機器(マイクやスピーカー等)を数セット学会で購入し、岐阜での日本伝熱シンポジウムでは、この機器を使用してハイブリッドで開催しました。オンラインでの会議が増えているためか最近のオンライン会議用の機器の性能向上はめざましく、PCだけでは難しいことも簡便に対応できるようです。初日の最初のセッションではハウリングが発生する等のトラブルも一部にはあったようですが、その後、機器の使用にも慣れ、問題なくオンラインでの配信もできたように思います。今後も、これらの機器を有効に活用しながらハイブリッドも含めた対面での会議も増えていくことが期待できます。別の会議の関係で移動時間が取れず学会の会議には参加が難しい方やコロナが完全に終息しない状況にセンシティブになっている方等の参加も期待できるためです。

今回の伝熱シンポジウムでの大きな前進は、学会2日目の意見交換会(懇親会)を200名以上の参加者で実施できたことと感じております。各セッションで話しをすることもあります。やはり伝熱シンポジウムの醍醐味は、日頃お会いすることのない方々と交流を深める懇親会にあると思います。着席での会食で従来の立食とは趣が若干異なりましたが落ち着いて会話ができました。今回実行委員長を務められました板谷先生(岐阜大)、服部先生(名工大)を始めとする実行委員会の皆様の運営に深く感謝いたします。

国際会議につきましては、ACTS2020が1年開催を延期し2021年10月にオンラインで開催され、11カ国から406名の参加を頂き、日本学術会議の梶田会長から冒頭のご挨拶を頂けるなど、格調高い会議となりました。また、2021年9月にSOLARISもオンラインで開催され119名の参加を頂きました。今後も国際的な研究協力の下、種々の国際会議を通して各国と学術の親交が深まればと願っております。

なお、通常2年毎に授賞される抜山記念国際賞ですが、ACTS2020および今年予定されていた国際伝熱がそれぞれ1年延期されたことに伴い、ACTS2020で2020年の授賞式を、また、2022年の受賞者が日本人(塩見先生(東大))であったため、今年の伝熱シンポで授賞式を行いました。1期の間に2名の方への贈賞と異例ですが、コロナ禍による国際会議の延長のためです。受賞講演につきましては、予定通り国際伝熱で行われる予定です。

最後に、これまで40年近くお世話になった学会の運営に十分な貢献ができたのか若干不安は残りますが、今期と次期の企画部会長の津島先生(阪大)を中心に学会運営上の問題点を検討しておりますので、次期の会長、副会長、理事、監事の皆様の今後の学会運営に期待して第60期の会長を退任したいと思います。第60期の1年間、学会を支えて頂いた皆様、大変ありがとうございました。

第 61 期会長就任にあたって
Inauguration Address as the 61st President



高松 洋 (熊本高等専門学校)

Hiroshi TAKAMATSU (National Institute of Technology, Kumamoto College)

第 59 回日本伝熱シンポジウムの中日、5 月 19 日に行われました本学会の総会で第 61 期会長を拝命いたしました。会員の皆様、どうぞよろしくお願い申し上げます。

まずは、3 年ぶりに対面で開催された伝熱シンポジウムに参加でき、大変うれしく思っております。ハイブリッド開催を実施していただいた板谷義紀先生、服部博文先生はじめ、実行委員会の皆様にこころより御礼申し上げます。伝熱シンポジウムと懇親会には修士 1 年時から出席を続け、多くの会員の皆様と同様、最も重要な年中行事だと思ってきました。1997 年に文部省在外研究で U.C. バークレーに行ってバイオ研究を始め伝熱研究から離れるかと思った時期もありましたが、結局は継続し、定年より早く九大を退職し研究生活そのものから引退して管理運営業務に専念しようとしていた矢先に会長を務めさせていただくのも、伝熱学会で知り合った多くの皆様のおかげだと思っております。自分にとって大事な学会の会長を務めさせていただくことになり、大変光栄に存じます。皆様に感謝申し上げます。

このところ、いつにも増していろんなことを考えさせられることが続いています。ひとつは、世界中が 2 年間苦しんできたコロナの影響とそれによる社会の変化です。パンデミックで多くの方が亡くなり、それを防ぐために人々の往来が大幅に制限されています。そういう環境下でも、我々はオンラインツールを駆使して授業を行い、遠くの人と会議を行って、技術の力で必要最低限の情報交換は行えています。コロナの心配がなくなっても、この変化が完全に元に戻ることはないでしょう。二つ目はロシアのウクライナ侵攻です。毎日、テレビで目にするのは、これが現代社会で行われているものかと目と疑うような光景ばかりです。にもかかわらず、ロシア国内での侵攻支持は 80% とのこと。これらのことは、自分が人類の長い歴

史の中の一コマを生きていることを痛感させてくれます。ペストの大流行、産業革命、太平洋戦争中の情報統制など、昔から知識として「勉強」してきたことを思い出し、改めてこれまで想像力が希薄だったことを思い知ります。

ウクライナで巨額の費用を費やして破壊活動が行われているのを見ると、SDGs なる目標はどうなったのかと思ってしまうのですが、2050 年までのカーボンニュートラル達成へ向けての技術開発の歩みを止めるわけにはいきません。AI の進化や DX など、社会は確実に不可逆に変化していきます。その技術革新に本学会の皆様が果たすべき役割は大きいと思います。「伝熱」そのものだけでなく、これまで「伝熱」で培ってきた移動現象の捉え方や制御手法などに新しい要素や学問を取り入れて、「拡大」した伝熱学会がますます盛んになれば嬉しいと思っています。

日本伝熱学会は 60 年の還暦を迎え、今期から二巡目に入ります。私は一昨年までの数年間、大学の業務のため学会運営から離れていたのに加え、昨年も、理事会等のすべての会議や行事がオンラインで開催されたため、まだ、学会の現状を把握しきれていない部分があると思います。しかし、やはり伝熱研究会創設から 60 年が経過し、公益社団法人になって 10 年も経つと、様々な課題が顕在化しつつあるように見えます。先輩の先生方が伝熱研究会を創られた思いと伝統を大切にしながら、一方で工夫をしながら変えたほうがいいところもある気がします。日本伝熱学会の見かけ上の発展のためではなく、「拡大」伝熱を担う皆様が、少しでも研究と教育に時間と労力をかけ、結果として日本さらには世界のためになること、そして日本伝熱学会会員の皆様が少しでも多くの幸福感を感じられることを目的として活動できればと思っています。会員の皆様のご協力をこころよりお願い申し上げます。

第 60 期（令和 3 年度）表彰選考委員会からの報告

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2021

表彰選考委員会 委員長

高松 洋（九州大学）

Hiroshi TAKAMATSU (Kyushu University)

e-mail:takamatsu.hiroshi.281@m.kyushu-u.ac.jp

1. 日本伝熱学会賞

2021 年度（令和 3 年度）日本伝熱学会賞 学術賞，技術賞，奨励賞および貢献賞の選考結果についてご報告いたします。第 60 期は 2021 年 12 月 17 日応募締切として募集を行い，最終的に学術賞 6 件，奨励賞 4 件，貢献賞 1 件の中から候補を決定しました。なお，残念ながら技術賞への応募はありませんでした。選考委員会において厳正なる審査を行った結果，学術賞 1 件，奨励賞 4 件，貢献賞 1 件を受賞候補者として 4 月の理事会に推薦しました。各賞の受賞者は以下のとおりです。授賞対象者の所属は申請書・推薦書受領時のものであり，順不同・敬称略で記載しています。

授賞式は，岐阜で開催された日本伝熱学会第 60 期総会の付帯行事として執り行いました。

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

- 1) 代表研究者：Shen Biao（筑波大学）
共同研究者：高田 保之（九州大学）
布村 順司（(株) UACJ）
戸次 洋一郎（(株) UACJ）
「濡れ性および表面構造制御によるエタノールの沸騰開始過熱度の低減化と伝熱促進」
第 57 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，G311，2020.

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

該当者はおられません。

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

- 1) 受賞者名：池田 寛（東京工業大学）
「熱電気化学発電と強制対流冷却を統合したフロー熱電発電の開拓と特性支配メカニズムの解明」
第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，K1406，2019.
第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，D122，2021.
- 2) 受賞者名：梅原 裕太郎（電気通信大学）
「高温固体の相変化冷却メカニズムの解明」
第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，A221，2021.
- 3) 受賞者名：古川 琢磨（八戸工業高等専門学校）
「ふく射影響下における大規模自然対流場のメカニズム解明に関する研究」
第 58 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，BPA1401，2021.
- 4) 受賞者名：許 斌（東京大学）
「マルチスケールの熱伝導制御による高性能放熱の実現」
第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，E113，2019.

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

- 1) 受賞者名：宮崎 康次（九州工業大学）
「第 2 回アジア熱科学会議実行委員会事務局幹事長」

2. 名誉会員の顕彰

第 60 期では名誉会員として以下の 2 名の方（順不同，敬称略）を上記付帯行事において顕彰いた

しました。お二人とも本会の発展に大きな貢献を
されております。

- 1) 高田 保之 (九州大学)
第 42-43 期理事, 第 48-49 期理事, 第 57 期理
事, 第 58 期会長, 抜山記念国際賞選考委員
2020.
- 2) 原村 嘉彦 (神奈川大学)
第 47-48 期理事 (公益社団法人認定時担当総
務部会長), 第 57-58 期監事.

3. 文部科学大臣表彰の推薦

令和 4 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰に
ついて、本会からは若手科学者賞 2 件を文部科学
省に推薦いたしましたが、残念ながら受賞には至
りませんでした。

4. 若手会員への内外の表彰制度について

日本伝熱学会賞の奨励賞の対象は、「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)」となっております。大学院における研究
を奨励する制度となっておりますので、この年数
制限を越えた方は本会と関連深い AUTSE の YSA
(AUSTE Young Scientist Award) への応募をお勧め
します。こちらは受賞時の年齢が 35 歳未満である
ことに加え、学位取得 5 年以内という条件が加わ
ります。なお、文部科学省の若手科学者賞の応募
資格は 40 歳未満です。年齢に応じてこれらの表彰
制度への積極的応募を期待します。

5. 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 60 期表彰選考委員会委員の皆様
の多大な協力を頂戴しました。会員の皆様から推
薦・応募をいただいたうえに、推薦にあたっては
特別推進研究企画委員会委員の皆様と幹事の小宮
敦樹教授にもご協力をいただきました。この場を
お借りして関係各位に深く御礼申し上げます。

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



シェン ビャオ* (筑波大学), 高田 保之 (九州大学), 布村 順次, 戸次 洋一郎 (株式会社 UACJ)
Biao SHEN (University of Tsukuba), Yasuyuki TAKATA (Kyushu University),
Junji NUNOMURA, Yoichiro BETSUKI (UACJ Corp.)
*e-mail:b.shen@kz.tsukuba.ac.jp

On behalf of my coworkers, it is my great pleasure and honor to accept the 2021 Scientific Contribution Awards of the Heat Transfer Society of Japan. We would like to extend our appreciation to the members of the selection committee for recognizing the scientific merit of our research, which began as little more than an experimental curiosity. Special thanks go to Prof. Koji Takahashi of Kyushu University for recommending it to be considered for this prestigious award.

This work, “the investigation of the role of the surface wettability and topographic features in reducing onset-of-nucleation superheat and enhancing heat transfer efficiency of boiling of ethanol” for which this award was received, was presented at the Heat Transfer Symposium in 2020. But the idea of employing wettability engineering to induce early onset of nucleate boiling was incubated more than a decade earlier. In the long history of boiling research, most effort was focused on understanding the critical heat flux (CHF). By comparison, the onset of nucleate boiling (ONB)—which marks the starting point of nucleate boiling—has attracted far less attention despite its equal, if not more vital, importance to practical applications of boiling heat transfer. In 2006 we first noted that boiling could be initiated at exceptionally low superheats on super-water-repellent surfaces [Takata et al., *Heat Transf. Eng.* 27, 2006]. Under subcooled conditions, ONB was later found to enter even *negative* territory on surfaces that were partially coated hydrophobic (namely, *biphilic*) (Shen et al., *App. Therm. Eng.* 88, 2015).

The puzzling experimental observations led us to suspect that an alternative mechanism of heterogeneous bubble nucleation could be at work. In Hsu’s classic vapor-trapping-cavity model, boiling incipience is highly sensitive to the presence of dissolved gas. In practice,

non-condensables in the liquid are amenable to degassing treatment, which adds to the unstable nature of nucleation events. For hydrophobic surfaces, however, we concluded from experiments and simulations that a hydrophobic surface can retain stubbornly high concentrations of gas content in its proximity—possibly in the form of nanobubbles/nanopancakes—which help keep the surface (partially) ‘dry’ throughout the process (Shen et al., *Sci. Rep.* 7, 2017; Shen et al., *Int. J. Heat Mass Transf.* 126, 2018). As a result, the threshold of bubble nucleation can be reliably lessened to allow usually early incipience of highly efficient nucleate boiling.

The concept of facilitated bubble nucleation via improved gas trapping turned out to be of great practical benefit to boiling of organic liquids. Ethanol, for example, is highly wetting due to its relatively low surface tension compared to water. While porous surface topography has been shown to be effective to enhance heat transfer rates of ethanol boiling, it often suffers from wildly unstable ONB behavior because of flooding of the porous structures. To solve the problem, we proposed a hybrid approach of combining porous texturing and wettability patterning. Boiling on the consequently *biphilic* micro/nanoporous surfaces showed consistently low ONB superheats in addition to significant rises of heat transfer efficiency (Shen et al., *App. Therm. Eng.* 149, 2019; Shen et al., *Int. J. Multiphase Flow* 142, 2021).

Finally, we are grateful to Dr. Wei Ma and Prof. Atsushi Takahara of Kyushu University for providing valuable technical support in preparing the amphiphobic coating for enhancement of ethanol boiling. This project is commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) (JPNP14004).

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*



池田 寛 (東京工業大学)

Yutaka IKEDA (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: ikeda.y.ao@m.titech.ac.jp

この度は栄えある日本伝熱学会賞（奨励賞）を賜り、大変光栄に感じております。ご推薦・ご選考下さった先生方及び学会事務局の皆様にご心より厚く御礼申し上げます。

受賞対象となりました「熱電気化学発電と強制対流冷却を統合したフロー熱電発電の開拓と特性支配メカニズムの解明」は、私が東京工業大学の村上陽一教授（当時、准教授）の指導のもとで 6 年間取り組んだ研究の成果となります。これは、現状、発熱面の冷却で喪失している熱エネルギーのエクセルギーの一部を電力として回収する技術の創出とその性能向上を達成した研究です。

熱機関、電子機器、蓄電池等は動作時に発熱するため、温度上昇による故障を防ぐために積極的な冷却を必要とします。このために多くの場面で液体を用いた強制対流冷却が行われていますが、このような比較的大温度差間で高レートな熱移動が行われている状況では、熱エネルギーのエクセルギーが高レートで散逸されています。しかし従来は冷却の高い緊急性に隠れ、この仕事（電力）発生機会の損失には対処がされてきませんでした。

そこで我々は発熱面上に生成する薄い温度境界層が高い熱伝達率と急峻な温度勾配を実現できることに注目し、冷却を主目的としつつ液体側で熱電変換を行う新技術に着想しました。具体的には、従来は閉じた系で行われていた熱電気化学発電（酸化還元対の溶液中に設置した温度の異なる二電極間で発電を行う技術）に着目し、その溶液を強制対流冷却の冷媒とすることで、従来独立に発展してきた熱電気化学発電と強制対流冷却とを統合した「フロー熱電発電」を創出しました。

本研究では、セル内の流れの最適化検討の結果、狭い間隔で対向配置した二平板間のマイクロチャンネル効果を利用することで、一方の電極と一致させた発熱面の効果的な冷却と、電極間の温度差及び物質輸送を用いた発電とを同時に実現できる

ことを実証しました。本系は伝熱学・流体力学・電気化学が連成し、そこに錯体化学と溶液化学が関わる熱工学の新しい学理領域となっています。

本技術の適用先としては、例えば脱炭素・低炭素社会の追求で重要となるパワー半導体や蓄電池等の液冷システムとの統合があります。また、孤立系で熱マネジメントと電力供給源が共に必要となる宇宙領域や IoT 機器での活用も考えられます。

研究の過程で実証した重要な点として、本技術では、作動流体を発電セルに通過させるのに必要な流体駆動仕事（理論ポンプ仕事）を上回る発電が可能であること、すなわち、ゲインが 1 を超えることを実験的に実証した点にあります。また、上記のような熱・流体・電気化学の複雑な連成系において、発電と冷却（熱伝達率）の支配要因を解明した上、それらを最大化するための指針を示したことも重要な学術的成果となっております。さらに、作動流体の改良により、切手サイズ程度の発熱面への強制対流冷却から有意義な発電が行えることも実証しています（成果を報告した原著論文：DOI: 10.1039/D1SE01264A）。

一方、本技術の実用化には、発電密度をさらに 1 桁以上増大させる必要があります。現在は、熱流体シミュレーションを駆使して流れと電極形状の最適化を進め、スケールアップと実装に向けた研究を展開しているところです。

最後に、本研究の遂行全般にわたり懇切なご指導賜りました村上陽一先生に心より感謝申し上げます。また、数年間の本研究の遂行を支えてくれた家族に感謝します。本年 4 月からは日本学術振興会特別研究員 PD として東京工業大学 科学技術創成研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所に勤務し、研究のさらなる進化と精進に取り組んでおります。微力ながら伝熱分野の発展に寄与できるよう精進しますので、今後ともご指導ご鞭撻のほど何卒宜しくお願い申し上げます。

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



梅原 裕太郎 (九州大学)
Yutaro UMEHARA (Kyushu University)
e-mail: umehara@mech.kyushu-u.ac.jp

この度、日本伝熱学会第 60 期総会におきまして、大変名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りましたこと心より光栄に存じます。この場をお借りして、ご指導いただいた先生方、推薦ならびに選考くださいました先生方・伝熱シンポジウムにて助言頂いた皆様に深く御礼申し上げます。

受賞対象となりました「高温固体の相変化冷却メカニズムの解明」は、私が電気通信大学博士課程在籍時に大川富雄教授のご指導のもと取り組んだ研究であります。高温物体の急速冷却は、原子力発電における安全性や経済性、鋼材の熱処理など工業的に大変重要な要素技術であります。

高温物体を冷却する際、その冷却速度は沸騰現象に支配され、2段階で進行することが知られています。冷却初期段階は、高温物体が蒸気膜で覆われ、高温面と冷却液との接触が絶たれることで冷却速度が遅くなります。その後、徐々に冷却が進行していくことで、高温面と冷却液との接触が開始し（固液の出会い）、急激に冷却速度が上昇します。この現象は「クエンチ現象」と呼ばれ、急速冷却の実現には大変重要な現象であります。従来研究では、そのメカニズムの解明に向けて、様々な研究が行われてきました。

その代表的な実験として、高温面流下液膜冷却実験があります。高温面に沿い、液膜を流下させ、液膜先端において生じるクエンチ現象を観察する実験です。従来研究では、クエンチ現象によって生じる短時間かつ局所的な温度変化をとらえることができませんでした。そのため、液膜の流下速度に合うように、クエンチ現象による熱伝達率分布（クエンチモデル）を仮定することで理解が進められてきました。しかし、既存モデルは、実現現象を反映していないモデルであるため、適用範囲は限定されていました。本研究では、上記の問題を解決するため、クエンチ現象による温度分布な

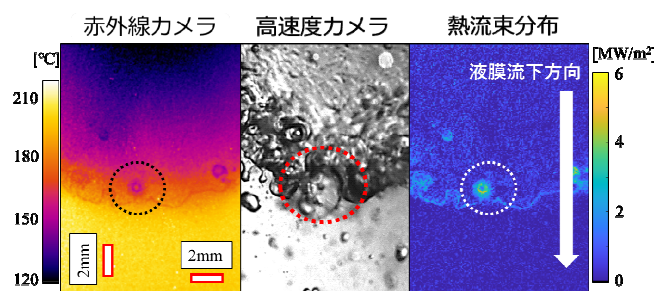


図 1 液膜先端で生じるクエンチ現象の詳細観察

らびに流動現象を同時に観察する実験を実施しました。伝熱面には、赤外線を透過するシリコンウエハを用いることで、液膜の裏側から赤外線 (IR) カメラにより、直接温度分布を観察することを実現しました。また、液膜の流下する側面を高速度カメラで同期撮影することで、クエンチ現象を伝熱・流動の両側面から直接観察することを実現しました (図 1)。同期撮影ならびに熱流束分布の算出には、大変苦勞いたしました...

上記の実験からクエンチ現象に関して、次の 3 つの知見を得ました。

- (1) 熱伝達の主要因は、核沸騰であること
- (2) 濡れと乾きが繰り返されること
- (3) その領域の長さが、核沸騰によって生じる気泡径と同程度であること

これらの知見をもとに、現象論的クエンチモデルを新たに提案しました。これにより、クエンチ現象による熱伝達を現象論に基づいて予測することが可能となりました。今後、クエンチ現象のより詳細な解明が進み、広く工業利用が進むことを期待しております。

最後になりましたが、2022 年 4 月から九州大学工学研究院機械工学部門の助教として着任しました。今後とも、伝熱工学の発展に寄与できるよう精進して参りますので、ご指導ご鞭撻よろしくお願い申し上げます。

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



古川 琢磨 (八戸高専)

Takuma KOGAWA (National Institute Technology Hachinohe College)

e-mail: kogawa-m@hachinohe.kosen-ac.jp

この度、日本伝熱学会第 60 期総会に置きまして
 栄誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜り、大変光栄に
 存じます。これまでご指導いただきました先生方、
 ご推薦、ご選考くださいました先生方、伝熱シン
 ポジウムにてご議論させていただきました皆様に
 改めて感謝申し上げます。

受賞対象となりました「ふく射影響下における
 大規模自然対流場のメカニズム解明に関する研
 究」は私が博士課程在籍時に東北大学流体科学研
 究所の圓山重直教授（現八戸工業高等専門学校校
 長）ご指導のもと実施してきたものです。本研究
 ではふく射性媒体の発熱・冷却効果が大規模系で
 生じる自然対流場の流動変化にもたらす影響を解
 析的、実験的に評価してきました。

大規模系で生じる自然対流場は建築物の自然換
 気システムや、使用済み燃料のキャスク冷却に使
 用されており、長期使用を見越したアプリケーシ
 ョンに積極的に利用されています。そのため、大
 規模系での自然対流場の熱伝達率を精緻に見積も
 り制御することは上記システムの安定化、高効率化
 にも不可欠です。自然対流場の熱伝達量は強制
 対流場と比較して低いいため、常温環境下でもふく
 射伝熱の影響を強く受けます。特に対流場の空間
 スケールが 1 m 以上と極めて大きくなる時、流体
 をふく射性媒体として考慮しなければなりません。
 また空間スケールが大きくなることから乱流場に
 よる非定常性も考慮しなければなりません。以上
 のことから大規模系での自然対流場は、非定常性
 の強いふく射性媒体効果との連成問題として評価
 することが求められます。

そこで本研究では、ふく射効果を加味した Large
 Eddy Simulation (LES) による非定常解析手法の
 構築に取り組みました。大気ガスといった非灰色
 ガス中のふく射伝熱現象を精緻に取り扱う場合、
 ガスの吸収係数の波長依存性を正確に取り扱う必
 要性があります。しかしながら、十分な波長分割

を行う際に、数百万程度の波長分割による光計算
 が必須となります。本問題を解決するために本研
 究では、Full Spectrum k-distribution (FSK) 法及び
 ふく射要素法 (REM²) を用いることで大規模な波
 長分割を必要としないつつも、精度が担保される
 ふく射連成解析手法の構築を行いました。

上述した手法を用いて、本研究では非灰色ガス
 を含有した矩形キャビティ内部の自然対流乱流場
 の数値解析を実施しました。解析の結果から、ふ
 く射生媒体の発熱・冷却効果によってキャビティ
 内部でのレイリー・ベナール不安定性が促進され、
 乱流生成が強化されることが明らかとなりました。

ふく射性媒体による発熱・冷却効果による乱流
 促進を実験的に検証するために、大型光干渉計に
 よる可視化測定実験も行いました。可視化実験で
 は 100 m 規模系でのふく射吸収を 0.1 m オーダー
 の実験系で模擬するために、フロンガスを利用し
 ました。可視化測定の結果から、ふく射性媒体の効
 果による温度境界層変動を実験的にも評価するこ
 とができました。

最後になりますが、私は 2017 年 12 月から八戸
 工業高等専門学校の助教に着任し、高専での研究
 教育活動を行っております。八戸市は銭湯が多く、
 地域密着型の研究としてサウナ入浴時のヒートシ
 ョック予防法に関する研究に取り組んでおります。
 近年その高いリラクゼーション効果からサウナでの温冷
 交代浴が注目されていますが、ヒートショック事
 故の危険性が高いことが指摘されています。ヒー
 トショック事故を未然に防止するために、効果的
 かつ安全なサウナ入浴方法の提案が求められてい
 ます。そこで最近では生体温熱モデルによる人体
 深部温度の予測手法を開発し、安全かつ適切なサ
 ウナ入浴法の科学的提言を目指して研究を行って
 おります。今後も微力ながら伝熱工学の進展に貢
 献できるよう精進する所存です。今後ともご指導
 ご鞭撻のほどよろしくお願い致します。

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



許 斌 (東京大学)

Bin XU (University of Tokyo)

e-mail: xubin@photon.t.u-tokyo.ac.jp

この度日本伝熱学会第 60 期総会におきまして、学会奨励賞にご選出いただき、誠に光栄に思います。この場をお借りして、表彰選考委員会の先生方、本研究を指導する先生方及び共同研究する研究者方に深く御礼を申し上げます。

今回受賞した研究「マルチスケールの熱伝導制御による高性能放熱の実現」は私が特任研究員として東京大学塩見研究室に在籍する時に行った研究となります。近年では、電子デバイスの性能向上に伴い益々増加している熱密度はデバイスの寿命及び性能に顕著な影響を与えるため、高性能放熱を実現する熱管理対策が非常に重要です。この目標を実現するための高熱伝導複合材料 (図 1 (a)) を作成する時、機械的コンプライアンスの良い金属母材と硬い高熱伝導フィラー材の複合材料はコストと材料実装の面で優れていますが、材料の性質、特に硬さの違いに伴う材料のフォノン特性のミスマッチは大きい界面熱伝抵抗を引き起こすため、界面の比面積の大きい複合材料の熱伝導率を大幅に低下させます。一方、ミスマッチ界面の熱伝導率を向上させる詳細な界面設計指針が未だに確立されていませんので、これまでの研究では界面の結合強度を向上する界面層を挿入することがほとんどです。

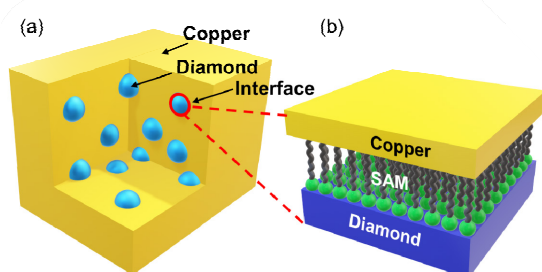


図 1 (a)複合材料と(b)モデル実験系の模式図。

本研究は複合材料の熱伝導率を極めて向上するために、スケーラブルな界面修飾手法を駆使して、

根本である伝熱機構の物理の解明をはじめ、複合材料の作製まで一連の研究に取り込みました。具体的に、フィラー粒子と平板状のフィラー材料の表面に同様に成膜可能な自己組織化単層膜の界面修飾手法を用いまして、膜の末端官能基と鎖長を制御し、平板状のモデル実験系でフォノンミスマッチの異なる界面で時間領域サーマルリフレクタンス法を用い界面熱伝導を網羅的に調べました (図 1 (b))。そこにフォノンミスマッチの大きい銅・ダイヤモンド界面では、強い共有結合より、弱いファンデルワールス力で結合する方がより高い界面熱伝導を実現するという直感に反する実験結果が得られました。そこに、自己組織化単層膜層の低周波数側のフォノンモードが結合強度に大きく依存することを分子動力学シミュレーション解析で示唆されています。界面のフォノンミスマッチの増加に伴い、界面の結合強度より、適切な中間層のフォノンモードが界面のフォノンミスマッチを架橋させることはより界面熱伝導を向上するという非常に興味深い結論が得られました[1]。モデル実験系で得られた知見に従い、最適の界面層構造を複合材料に適用することで高熱伝導率 (711 W/m-K) の銅・ダイヤモンド複合体を作製することに成功しました[2]。

末筆ではございますが、このたびの受賞は、今後の研究としても、大きな励みとなります。今後も、新規材料のナノ・マクロの伝熱物理の探索及び測定技術の開発、伝熱応用に関する研究に注力していきたいと思っております。微力ながら今後とも伝熱工学の発展のために精進していきたいと考えていますので、ご指導ご鞭撻のほど、お願い申し上げます。

参考文献

- [1] Xu, B. et al., Sci. Adv. 7 (2021) eabf8197.
- [2] Xu, B. et al., Carbon 175 (2021) 299–306.

第 59 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 59th National Heat Transfer Symposium of Japan

板谷 義紀, 中川 二彦, 小林 信介, 須網 暁 (岐阜大学),
服部 博文, 保浦 知也, 齋木 悠, (名古屋工業大学),
廣田 真史, 丸山 直樹 (三重大学), 中山 浩 (中部電力), 上野 藍 (名古屋大学), 川村 洋介 (名城大学),
佐野 吉彦 (静岡大学), 西川原 理仁 (豊橋技術科学大学), 朱 寧 (静岡理工科大学),
鹿園 直毅 (東京大学), 小宮 敦樹 (東北大学), 西山 貴史 (福岡大学), 近藤 義広 (日立アカデミー),
大久保 英敏 (玉川大学), 星 朗 (東北学院大学), 河村 洋 (公立諏訪東京理科大学),
Yoshinori ITAYA, Tsuguhiko NAKAGAWA, Nobusuke KOBAYASHI, Akira SUAMI (Gifu University),
Hirofumi HATTORI, Tomoya HOURA, Yu SAIKI (Nagoya Institute of Technology),
Masafumi HIROTA, Naoki MARUYAMA (Mie University), Hiroshi NAKAYAMA (Chubu Electric Power),
Ai UENO (Nagoya University), Yosuke KAWAMURA (Meijo University), Yoshihiko SANO (Shizuoka University),
Masahito NISHIKAWARA (Toyohashi University of Technology),
Ning Zhu (Shizuoka Institute of Science and Technology), Naoki SHIKAZONO (The University of Tokyo),
Atsuki KOMIYA (Tohoku University), Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University),
Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Hidetoshi OHKUBO (Tamagawa University),
Akira HOSHI (Tohoku Gakuin University), Hiroshi KAWAMURA (Suwa University of Science)

1. シンポジウム概要

第 59 回日本伝熱シンポジウムは, 5 月 18 日 (水) から 20 日 (金) の日程で, COVID-19 感染拡大防止に配慮して岐阜長良川国際会議場 (図 1) においてシンポジウムとしては初めてハイブリッド方式で開催されました. また, 意見交換会は会場に隣接する都ホテル岐阜長良川で, 対面のみでの開催とすることができました. 第 57 回は開催中止, 第 58 回は講演会と意見交換会ともにオンライン開催でしたので, 対面で開催できたのは実に 3 年ぶりとなります. 参加登録者数は 703 名, 講演数は特別講演 1 件を含んで 335 件に及び, 前回第 56 回の場合 [参加登録者数: 536 名, 講演数: 278 件] を大きく上回り, 従来通りの対面開催であった 3 年前の徳島市での第 56 回の場合 [参加登録者数: 741 名 (招待者を除く), 講演数: 370 件] に近い実績でした. また, 意見交換会への参加登録者数は 213 名であり, 第 56 回の 335 名に比べればやや少ない数字でしたが, 実行委員会での当初見込みよりはかなり多い人数でした. このようなデータからは, 会員の皆様も 3 年間の自粛からできるだけ早く解放され, 対面での開催実現を熱望されていたものと拝察されます.

今回の実行委員会立上げ時には, まだ 2 年前と言うこともあり, 新型コロナ感染症は収束して十分対

面で開催できるものと信じて, 準備を進めて参りましたが, 2021 年夏の東京オリンピック終了後の新型コロナ新規感染者拡大, 同年 10 月以降はほぼ沈静化するように見受けられたものの, 年末からのオミクロン変異株の出現以降の第 6 波は過去最高の感染者数の記録やまん延防止等重点措置期間が長引くなどにより, 全面的なオンラインへの計画変更も意識しつつ, 感染状況を静観することになりました. 幸い 3 月には重点措置が全国で解除されたものの, 新規感染者数が下げ止まりの状況が続く, ゴー



図 1 長良川国際会議場と意見交換会場 (都ホテル岐阜長良川)

ルデンウィーク後のリバウンドも気になりましたが、4 月 16 日にシンポジウム前に開催される最後の日本伝熱学会企画部会と理事会で、実行委員会側のシンポジウム開催の基本方針と方式についてご承認頂きました。一部追加検討要望はあったものの、重点措置が出た場合の対応だけ検討しておき、少なくとも対面方式を前提とすることにしました。その結果シンポジウム開催の約 10 日前にハイブリッド方式での開催を確定しました。それまでの期間、特に会場と意見交換会担当の幹事は、開催準備に向けての方針が決まらず、非常に心配であったことと思います。また、参加者も開催および講演発表方式の案内が直前まで届かず、所属先での出張手続き等が開始できずに、大変ご迷惑をおかけしたと思います。この場をお借りして改めてお詫び申し上げます。

今回のハイブリッド方式は、Zoom ミーティングを利用した 8 会場での並列同時開催となるため、実行委員の誰も経験やノウハウを持っていない中で、短期間での準備が必要となりました。しかし、日本伝熱学会より web 用のスピーカー、マイク、カメラ等の素晴らしい機材を 10 セット購入して頂き、事前に会場の主要な各部屋で実際にインターネットに接続したテストを兼ねたシンポジウム幹事会をハイブリッドで実施したところ（4 月 7 日）、思ったよりスムーズに接続できることが確認できました。しかし、開催当日は 10 会場（狭い部屋の 2 会場については会場参加者の密を避けるために、隣接する各 2 部屋をそれぞれのサブ会場として利用したために、全 10 会場での web 配信を実施）を同時に web 配信するだけでなく、会場参加者の多くが Wi-Fi 接続されることも想定されることから、インターネット回線の混雑も危惧されました。そこで、念のために会場で LAN の不具合が生じた際に、Zoom ミーティングがダウンしてしまうことを避けるために、メインの 8 会場に割当てた 8 ライセンスと並行して、さらに 8 ライセンスで名古屋工業大学と岐阜大学の PC で同時起動しておくことにしました。開催前日の会場準備は、会場アルバイト学生も不慣れなため、会場へ 13 時に集合の上、全ての会場で各部屋 2 台のデスクトップ型 PC（ホスト用と表示画面用）およびその他の web 機材設置、ならびに動作確認をして、夕方ようやく準備が終了しました。当日は 8 時の会場開館と同時に、全会場で PC と機材の web 接続を確認して、講演発表開始時

間までにスタンバイ状態にすることができました。参加者が会場に入室後には PC 間でのハウリングも危惧していましたが、こちらからの依頼事項を遵守して頂いたお陰で、講演発表も大過なく進行して頂けたのではないかと安堵しています。シンポジウム開催期間以外は、web 機材類を各支部で 1 セットずつ保管して、支部行事等で活用して頂くことになっています。今回の経験では、ハイブリッド開催される際には非常に便利なツールになると思います。

これまでに他の学協会ではハイブリッド開催の例はありましたが、筆者が経験した限りでは一部の特別セッションのみが現地開催で、ほとんどの講演発表を含めてオンラインを前提とするケースばかりでした。今回は思い切って対面を前提にしたいと思い、講演発表者と座長は原則的に会場で実施して頂く方式で、ご依頼させて頂きました。ただし、参加者所属先の基本方針ならびに陽性や濃厚接触、体調不良等による自主隔離の必要性等で参加できない場合もあることから、オンラインも併用することにしました。しかし、お陰様でほとんどの座長と発表者の方には、会場へ参加して頂くことができました。

以上、第 59 回日本伝熱シンポジウム開催に至る経緯とハイブリッド開催の概要を紹介させて頂きました。以降では、各担当者による報告がなされていますので、久しぶりでの現地開催の様子をご覧頂ければ幸いです。

対面開催へのこだわりとそれが原因となる新型コロナウイルス感染拡大のクラスターを出すわけにはいかないというジレンマを抱えた開催までの準備期間でしたが、大過なく開催を終えることができました。改めて皆様のご協力に感謝申し上げます。

（板谷 義紀・服部 博文）

2. ホームページ・論文、参加登録

ホームページは、シンポジウム開催のほぼ半年前の 2021 年 11 月 5 日に開設しました。ウェブサイト構築するサーバーとして学会契約のサーバーが用意され、またホームページのひな型も作られていたため、前回（第 51 回、2014 年）担当時にはすべてを実行委員会側で準備しなければならなかったことを考えると、ずいぶんとホームページ開設も楽になりました。ホームページを開設する際にまず考えなければならなかったことは、「色」と「開催地のシンボルの絵」をどうするかでした。「色」は、開

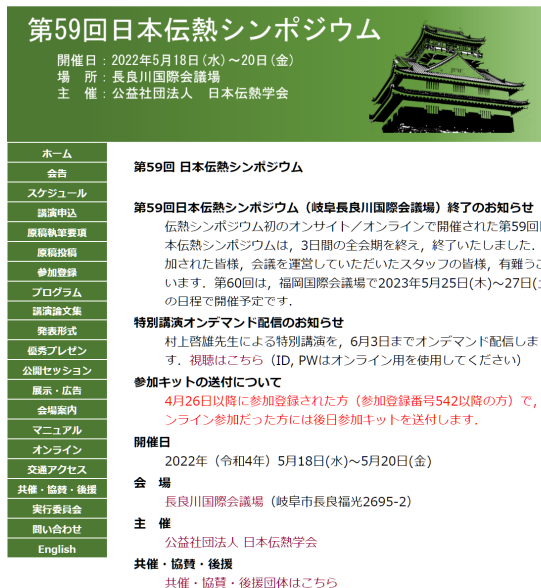


図 2 ウェブサイトトップページ

催地の岐阜県の県色の緑色を、「開催地のシンボルの絵」は、織田信長、鶉飼、合掌村などを候補にし、ずいぶんと悩みましたが、会場から一望できる岐阜城を選びました。これには余談があり、ホームページに貼る絵を探していたところ、手元に岐阜城を撮影した写真があったため、著作権フリーな画像を探さなくてもよかったという事情もありました。こうして出来上がったのが、図 1 に示すページです。ここに、シンポジウムに関する各種情報を逐次更新しながら掲示していきました。

さて、学会のウェブサイトには、講演プログラムも構築できる論文投稿システムと、参加費がクレジットカードもしくは銀行振込みが選択できる参加登録システムも用意されています。これらも前回は自作しましたので、登録に関するウェブシステムについてはずいぶんと準備が楽になりました。ただし、これらのシステムは、伝熱シンポジウムでは数年使用されているようですが、多くの問題点があり（あまりに多いため、ここではそれらを記しませんが）、手動によるリカバリー作業に多くの時間を割かれましたので、今後システムを使い続けるためには抜本的な改修が必要だと思えます。

(服部 博文)

3. ハイブリッド開催

今回の伝熱シンポジウム開催にあたり、対面（オンサイト）での開催を目指しつつ、コロナ対策としてオンライン開催も視野に入れていましたので、必然とオンサイト・オンラインのハイブリッド開催の準備を進めていました。ハイブリッド開催で問題となるのは、まず会場（長良川国際会議場）でオンラインでの開催ができるかということになります。オンラインのみであれば、大学のインフラが使用できますので、ネット環境における回線速度等の問題は出ません。しかしながら、ネット環境が脆弱な会場ではハイブリッド開催は難しいと考えていました。当初、会場での回線速度を聞いた時には、高速な光回線が使えるかどうか曖昧だったので、実際の会場でテストを行ってからハイブリッド開催を決定することとしていました。その間、概要にも記しましたが、学会で企画部会長の津島先生や、ハイブリッド開催の経験のある各支部の先生方のご尽力もあり、オンライン会議に最適なユニファイドコミュニケーションシステムを購入していただき、また、オンライン会議システムである Zoom をホストとしてコントロールする PC も講演室分をレンタルすることができ、ハード面でのハイブリッド開催に向けた準備は進んでいました。しかしながら、この準備した機器を会場に持ち込み、実際の配信テストを行おうと考えていた矢先、コロナの蔓延防止措置が発令され、会場に出向くこともままならず、時間ばかりが過ぎていきました。やっと蔓延防止措置が解除された 4 月 7 日に、長良川国際会議場へハイブリッド機器を持参して、テストをすることができました。会場と大学で待機していただいた実行委員との間でのテストは、特に問題もなく、またハイブリッド機器も会場のオーディオシステムと干渉することなく使用できることが分かったため、ハイブリッド開催を決めました（最終的に決定したのは、GW が明けた、シンポジウム開催日が 1 週間後に迫る 5 月 10 日でした）。

さて、会場で実際に運用した機器配置を図 2 に示します。Zoom システムを安定的にコントロールするため、1 講演室に PC を 2 台用意し、1 台は Zoom ホストとしてサインインした PC としました。また、その PC で講演タイマーを仮想カメラ上で動作させ

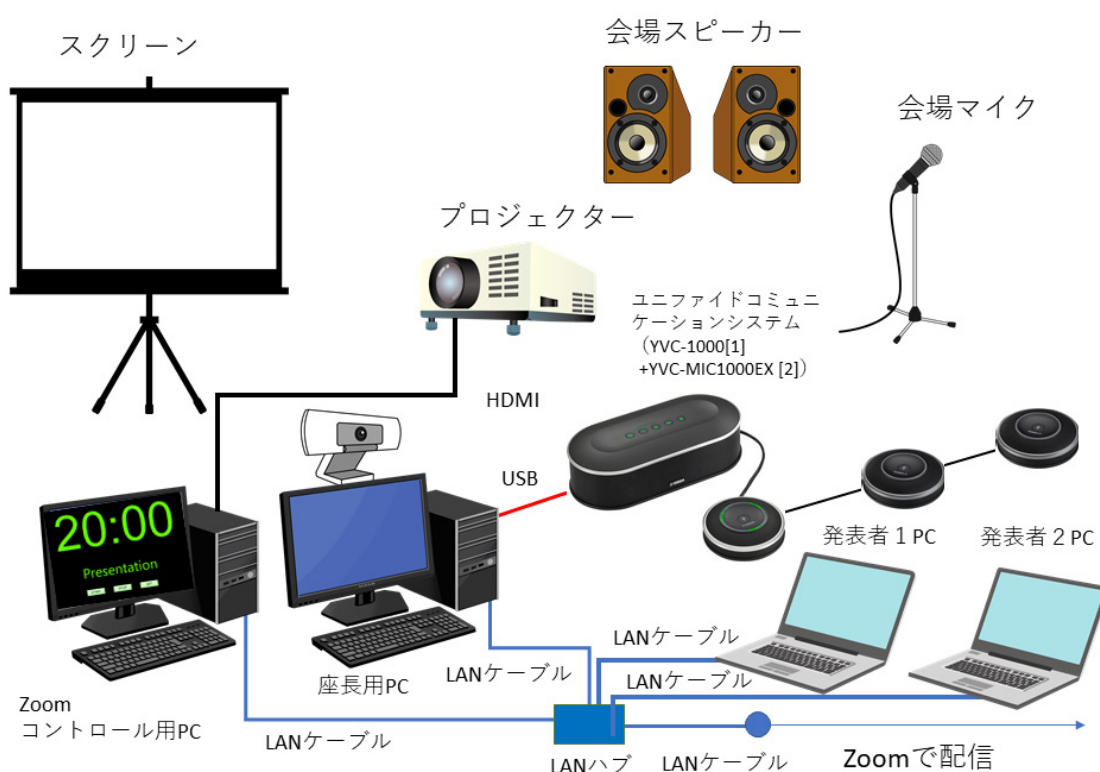


図 3 ハイブリッド開催における会場機器配置

[1] YVC-1000 (<https://sound-solution.yamaha.com/products/uc/yvc-1000/index>)[2] YVC-MIC1000EX (<https://sound-solution.yamaha.com/products/options/yvc-mic1000ex/index>)

ました。もう一台は座長用とし、ここにユニファイドコミュニケーションシステムを接続しました。このユニファイドコミュニケーションシステムは、オンラインでの発言者のスピーカーと、会場の発言者のマイクを兼ねています。少し広い会場では、会場備え付けのマイクとスピーカーを使用しましたが、これらは直接システムとは接続せず、ユニファイドコミュニケーションシステムがその音を拾うようにしましたが、特にハウリングが起きることもありませんでした。Zoom の運用では、概要にも記してありますが、会場の Zoom ホスト PC が何らかの事情で落ちた場合でも Zoom ミーティングが継続できるように、ホスト権限を与えたアカウントを大学（岐阜大学、名古屋工業大学）の PC で運用しました。ただし、このホスト権限を与えたアカウントは、会場のホスト PC と同じライセンスが必要とな

るため、Zoom ライセンス数は会場の講演室（8 室）の 2 倍用意する必要がありました。

講演者は、個人 PC を会場の有線 LAN に接続し、Zoom ミーティングに参加し、プレゼンテーションのスライドショーを画面共有することで発表していただきました。そのため、通常は VGA もしくは HDMI 等でプロジェクターにディスプレイ接続が必要となりますが、Zoom 接続ではそれが不要となります。そのため、切替器が不要となりました。伝熱シンポジウムでは、伝統的に個別講演の後に、講演者全員による総合討論がありましたので、LAN のハブは会場用 PC 台数（2 台）＋インターネット接続数（1 ポート）＋最大講演数（5 講演）の 8 ポート用を用意し、この総合討論時における全講演者の PC を繋げるようにしました。

このハイブリッド開催がほぼ問題なく行えたの

伝熱研究への MEMS の利用 (MEMS in Heat and Mass Transfer research)	8
液滴・濡れ現象の制御と理解 (Understanding and control of droplet/wetting phenomena)	22 (3)
燃焼伝熱研究の最前線 (Frontier of combustion heat transfer research)	18
乱流を伴う伝熱研究の進展 (Progress of research on heat transfer with turbulence)	11 (1)
水素・燃料電池・二次電池 (Hydrogen, Fuel cell, Secondary battery)	27 (2)
化学プロセスにおける熱工学 (Thermal engineering in chemical process)	10 (1)
熱エネルギー材料・システムのための熱・物質輸送促進 (Promotion of heat and mass transport for thermal energy materials and systems)	14
ふく射輸送とふく射性質 (Radiation transport and radiative properties)	8
宇宙機の熱制御 (Spacecraft thermal control)	10 (2)

(a) オーガナイズドセッションにおける講演数
(カッコ内はそのうちの基調講演数)

は、学会支部（特に関西支部）での経験、また、他の学会で、オンライン開催もしくはハイブリッド開催の経験がある先生方がいてくれたおかげであることは言うまでもありません。

（服部 博文，丸山 直樹，廣田 真史）

4. プログラム

本シンポジウムには、特別講演、基調講演を含むオーガナイズドセッション、一般セッション、優秀プレゼンテーション賞セッションならびに特定推進研究特別ワークショップを合わせて 335 件のご発表を戴きました（表 1 にその内訳を示します）。開催方法を開催日直前まで確定できない中、会場にお越し戴き多数のご発表を戴きましたこと、感謝致します。例年、講演室として 10 室を使用して開催されてきましたが、8 室で開催できるように編成しましたので、最終日も夕刻までセッションを設けることになりました。

プログラム編成では、先ず、総会、特別講演会、優秀プレゼンテーション賞セッションと特定推進研究特別ワークショップの開催時間を確保し、続いて一般セッション及び各オーガナイズドセッションのお申し込み数から、3 日間のセッションを設定

バイオ伝熱 (Bio Heat Transfer)	5
沸騰・凝縮 (Boiling and condensation)	27
電子機器の冷却 (Cooling of electronic equipment)	6
強制対流 (Forced convection)	8
ヒートパイプ (Heat pipe)・熱音響 (Thermoacoustic)	16
多孔体内の伝熱 (Heat transfer in the porous media)	5
物質移動 (Mass transfer)	7
計測技術 (Measurement technology)	9
融解・凝固 (Melting and solidification)	9
分子動力学 (Molecular dynamics)	13
混相流 (Multiphase flow)	4
自然対流 (Natural convection)	7
自然エネルギー (Natural energy)	4
空調・熱機器 (Air conditioning and Thermal equipment)	6
熱物性 (Thermophysical properties)	6
ナノ・マイクロ伝熱 (Nano and micro heat transfer)	21

(b) 一般セッションにおける講演数

優秀プレゼンテーション賞セッション (Best Presentation Award Session)	46
日本伝熱学会特定推進研究特別ワークショップ (Workshop on HTSJ Promoted Research)	4
東海地区企業による部品開発・技術開発の紹介 (Introduction of Component and Technology Development by Companies in Tokai district)	4
人と熱との関わりの足跡（その 5） (The footprints of the relationship between humans and heat (Part 5))	3
特別講演 (Invited special lecture)	1

(c) 企画セッションにおける講演数

表 1 各セッションにおける講演数

しました。一般セッションのプログラムは実行委員会で担当し、極力、関連テーマでセッションを構成できるように努めました。一部では、発表者と座長の重複により、テーマをまとめることができないところもありました。オーガナイズドセッションのプログラム編成と座長については、オーガナイザーの皆様へ企画をお願いしました。優秀プレゼンテーション賞セッションと特定推進研究特別ワークショ

ップのプログラムについては、それぞれ学生会委員会と特定推進企画委員会に編成をお願いしました。ご尽力をいただきましたオーガナイザーの皆様ならびに各委員会の皆様には、感謝申し上げます。

皆様のご協力の下、プログラムを編成することができました。厚くお礼申し上げます。

(丸山 直樹, 服部 博文, 保浦 知也)

5. 講演論文集・プログラム冊子

本シンポジウムの講演論文集は基本的に電子版のみとし、シンポジウム開始の1週間前よりホームページから公開しました。会員向けには会誌「伝熱」を通じて、参加者には登録されたメールを通じて閲覧のためのIDとパスワードをお知らせしました。また、CD-ROM版はシンポジウム終了後に販売することとし、これと同じものがホームページから一括でダウンロードできるようにしました。プログラム冊子は例年と同様に紙媒体を作成し、タイムテーブル、プログラム、著者索引、企業広告、会場案内図を掲載しました。

作成にあたり、プログラム編成およびシステム管理を担われた先生方には多くのご協力を頂きました。この場を借りて御礼申し上げます。

(保浦知也)

6. 会場

今回の第59回大会は、日本伝熱シンポジウムとして初のハイブリッド開催となりました。会場担当として、通常の会場の準備に加え、オンラインへの対応が必要で、また音声や画像トラブルなどこれまでのハイブリッド会議の苦い経験からハイブリッド開催が決まったときにはやることの多さに内心大変だなという思いがありました。ただ、本実行委員会においては会場部会とは別にハイブリッド部会を立ち上げていただいたこともあり、双方で綿密に連携しながら準備ができました。オンライン担当の先生方に選定していただいた機器を使用してはじめて広い会場で練習を行なったとき、Zoomとスピーカーフォンの組合せで比較的簡単にハイブリッド会議が実現できることがわかり胸をなで下したことをよく覚えています。個人的な思いですが、近年のスピーカーフォン進化はすごい！とつくづく感心させられています。

さて、ハイブリッド開催となったこともあり、会

場部会では講演者や座長、聴講者等のマニュアルに加え、ハイブリッド開催用のアルバイトマニュアルも新に作成し、スムーズに大会進行できるよう準備を進めてきました。大会中は座長や発表者にも大会が円滑に進むようにご協力いただくとともに、会場内外のアルバイト学生の活躍もあり、3日間大きなトラブルもなく会を無事終了できたことを非常にうれしく思っています。本大会では対面発表とオンライン配信を同時に行なったことから、発表者の皆様には自身のPCの前に座って発表をしていただきました。ただ、発表者や聴講者からは立って発表したほうが良かったのでは？などのご意見をいただいております。ハイブリッドならではの対応が必要であることも改めて認識させられました。

今回のシンポジウムにおいても一つ変わった点として、従来の10会場から8会場に減らしています。そのため、大会3日目の午後にも多くのセッションが開催されました。発表者と座長の皆様にはできる限り現地参加していただくようお願いしていたため、本当に多くの方が会場にお集まりいただき各セッションの間だけではなく、休憩時間、また3日目の最後のセッションが終わるまで活発にご議論いただいたものと思います。

初の大規模ハイブリッド会議であり、会場準備としては至らない点もいろいろとあったかと思いますが、盛大な大会が開催でき大会運営にご協力いただいた多くの皆様、そして参加していただきました皆様への感謝の思いでいっぱいです。

(小林信介, 上野藍, 川村洋介, 齋木悠, 佐野吉彦, 西川原理仁, 中川二彦)

7. 機器展示

今回のシンポジウムはハイブリッド開催でしたが、これまでのオンサイト開催と同様に、機器展示・カタログ展示・プログラム冊子への広告掲載を募集し、多くの企業から申し込みを頂きました。以下にご協力いただいた企業を紹介させていただきます(敬称は省略させていただきます)。

【機器展示】

- ・サイエンスエッジ株式会社
- ・日本カノマックス株式会社
- ・株式会社テクトロニクス&フルーク フルーク社
- ・明治電気工業株式会社

・株式会社ケン・オートメーション

・Maplesoft Japan 株式会社

・富山住友電工株式会社

【カタログ展示】

・赤田工業株式会社

・株式会社広島

・株式会社アドバンスドナレッジ研究所

【広告掲載】

・サイエンスエッジ株式会社

・株式会社ファンクショナル・フルイッド

・株式会社大西熱学

・スウェットジャパン株式会社

・公益財団法人不二科学技術振興財団

今回のシンポジウムでは、参加された方々の目に留まる機会を多くするために、機器展示ブースの場所を 1F の受付および優秀プレゼンテーション賞セッションと近い場所に致しました。その結果、特に初日のセッションの時間帯を中心に、多くの参加者にお立ち寄り頂きました。また、今回は初めての試みとして、セッション間に企業広告のスライドショーを実施しました。

ご協力いただいた企業の皆様に、この場を借りて心から御礼申し上げます。

(中山 浩)

8. 特定推進研究特別ワークショップ

本学会は 2011 年（平成 23 年）に特定推進研究企画委員会を設置し、本学会の分野を大局的な学術の振興の中に位置付け、より学際的な研究アクティビティを確保しながら、社会の期待に応えるための社会的課題と科学技術課題、あるいは我が国の今後の成長分野に特化した個別先鋭的な研究課題を客観的な根拠に基づいて設定し、活動を進めてきております。これを受けて毎年の伝熱シンポジウムにおいて特定推進研究特別ワークショップを開催しております。2021 年度（令和 3 年度）は、シンポジウムが Zoom Webinar によるオンラインで開催されたことから、本ワークショップもオンラインにて開催をいたしました。本学度はシンポジウムがハイブリッド開催となりましたので、これまでに倣いまして初日の午後に対面にてワークショップを開催し（図 4）、以下の 4 件の講演が行われました。（以下、敬称略）

講演 1. 「マイクロセンサー・デバイスを援用した次世代伝熱研究」

中別府 修（明治大学）

講演 2. 「細胞内における熱・物理的環境」

白樫 了（東京大学）

講演 3. 「太陽光エネルギー利用における伝熱工学の新展開」

宮崎 康次（九州工業大学）

講演 4. 「未来型エネルギーシステムのための乱流伝熱/燃焼研究の新展開とさきがけ複雑流動」

店橋 護（東京工業大学）、

後藤 晋（大阪大学）



図 4 感染対策を施した対面開催の会場の様子

本年度のワークショップは、特定推進研究企画委員会が発足してからちょうど 10 年の節目にあたることもあり、若い世代の会員にも本委員会の活動を周知すべく、昨年度に終了した 1 課題、および現在進められている 3 課題の主査に活動内容を紹介いただきました。冒頭には、これまでに終了した 8 課題の課題名と主査名、およびキーワードの紹介があり、これまでの本委員会の活動内容紹介もありました。

講演 1 では、中別府主査より研究会メンバーのマイクロセンサーに関する研究内容を中心にご紹介いただきました。本推進研究課題のキーワードは「MEMS 技術、計測手法、センサ・デバイス」です。

MEMS の応用によりマイクロスケールにおける諸々の熱事象を時空間的かつ高精度に計測できる手法の紹介がありました。また、これまでの伝熱シンポジウムにおけるオーガナイズドセッションの開催など、研究会活動についても説明がありました。

講演 2 では、白樫主査より研究会構成およびワー

クショップの開催内容、メンバーの研究内容をご紹介いただきました。本推進研究課題のキーワードは「生体伝熱、ナノスケール伝熱、生体温度感受性」です。生体と熱現象という観点から課題内容を発展させ、他分野の研究者をメンバーに迎え入れての学際的な委員会活動が行われている旨の説明をいただきました。

講演 3 では、宮崎主査より研究会メンバーとその研究内容の紹介がありました。本推進研究課題のキーワードは「太陽光エネルギー、光物性、未利用エネルギー利用」です。本推進研究課題は昨年度末の委員会での議論を経て、活動が開始したばかりということもあり、主として今後どのように活動を展開させていくかの主査の展望を中心にご紹介いただきました。併せて、メンバーの研究の紹介もいただきました。

講演 4 では、昨年度末に終了した課題を、サマリを含めて店橋主査よりご紹介いただきました。本研究推進課題のキーワードは「燃焼技術、乱流、エネルギーシステム」です。店橋主査からは、本推進研究課題の立ち上げから提案型大規模予算の提言までを含めたご説明をいただきました。講演の後半には、本推進研究課題からの提言となった科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業「さきがけ」の“複雑な流動・輸送現象の解明・予測・制御に向けた新しい流体科学”研究領域に関して、研究総括の後藤晋大阪大学教授に研究領域のご紹介をいただきました。

本ワークショップにご参加いただきました皆様に、特定推進研究企画委員会として御礼を申し上げます。

(鹿園 直毅, 小宮 敦樹)

9. 企業特別セッション

企業会員活動の活性化及び産学官の垣根を超えた連携・協力を目指して、本年もシンポジウムの二日目午前に企業特別セッション「東海地区企業による部品開発・技術開発の紹介」を開催しました。企業特別セッションは、日本伝熱学会の公益性を重んじ、一般公開セッションです。

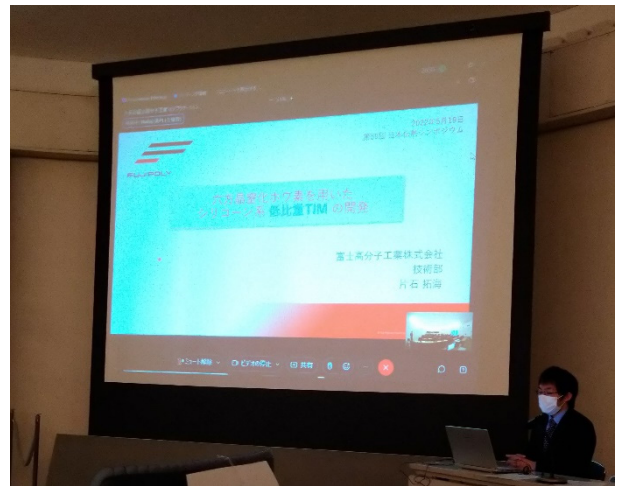
講演頂いた企業 (敬称略、講演順) は、富士高分子工業 (株)、ブラザー工業 (株)、(株) デンソー、(株) 河合電器製作所の合計4社です。オンライン (長良川国際会議場)、オンライン

(webEX meetings) のハイブリッドで同時開催しました。オンサイト、オンラインそれぞれ65名、45名、合計110名の方に参加いただきました。遠隔地からの参加利便性、コロナ禍での出張自粛を考慮して、オンラインの参加者数が昨年度 (30名弱) より多くなったものと考えます。

快くご講演を引き受けて頂いた企業の方々に深く感謝致します。ご講演の題目、ご講演の風景およびオンサイトでの質疑応答の風景は次の通りです。

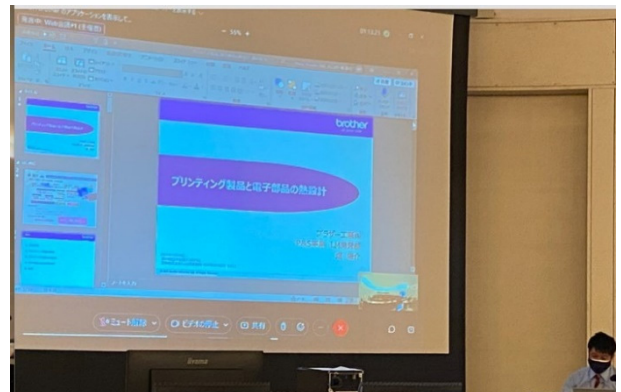
1. 六方晶窒化ホウ素を用いたシリコン系低比重TIMの開発

片石 拓海 氏 富士高分子工業 (株)



2. プリンティング製品と電子部品の熱設計技術

畑 陽介 氏 ブラザー工業 (株)



3. カーエアコン用熱交換器の小型軽量化の経緯と ニーズに対応する製品紹介

佐藤 英明 氏 (株) デンソー



4. 1DCAEを活用した熱設計

安井 良 氏 (株) 河合電器製作所



オンサイト（長良川国際会議場）での質疑応答の風景



来年以降もシンポジウム開催地区の支部にご協力を仰ぎながら、企業特別セッションを継続実施する予定です。次回の特別セッションへの皆様のご参加をお待ちしております。

(産学交流委員会 近藤義広)

10. 優秀プレゼンテーション

優秀プレゼンテーション賞 (Best Presentation Award: BPA) セッションは、伝熱シンポジウムの付帯イベントとして例年シンポジウムの初日にポスター形式で開催しております。28 歳以下の若手研究者や学生会員が伝熱シンポジウム参加者に自身の研究を紹介し、時間をかけた議論と発表技術に磨きをかける場を提供するセッションとして位置づけており、学生会委員会と実行委員会により企画・運営されております。過去の伝熱シンポジウム講演論文集を繙いてみますと、平成 15 年 (2003 年) 5 月に広島国際会議場で開催されました第 40 回日本伝熱シンポジウムにて初めて「学生プレゼンテーション賞セッション」がプログラムされており、ここから数えますと本年度で 20 回目の開催となります。学生プレゼンテーション賞セッションは、翌年の第 41 回日本伝熱シンポジウムでは、その名称を現在の「優秀プレゼンテーション賞セッション」に改称しており、対象を学生から若手研究者に拡げております。

本年度の伝熱シンポジウムがハイブリッド開催となりましたので、BPA セッションは学生会委員会幹事間で議論し、コロナウィルスの感染対策を十分に行った上での対面形式開催といたしました。これはハイブリッド形式で開催いたしますと、ポスター発表者が目の前の対面聴講者とオンライン上での聴講者に同時に対応しなければならなくなり、必然と負荷が増すこと、および発表者に質問を投げかけるタイミングが、対面参加者とオンライン参加者間でうまく取れないことが想定されること等、ネガティブな要素が多いことから、そのように判断いたしました。併せて本セッションは授賞審査を含んでおりますので、審査を公平に行うためにも発表者は全員現地での発表といたしました。オンライン参加聴講者に対しては、事前にポスターおよびアピールスライドをシンポジウムホームページ上に掲載し、質問事項を記入できる Google Form を作成いたしました。オンタイムでの議論はできませんでしたが、ポスターをホームページ上で閲覧しての質問・意見等を発表者に後日お伝えするようにいたしました。本年度の BPA セッションはこのような形式で臨み、実行委員会の多大なご協力をいただきまして、図 5 に示すような盛会なセッションとなりました。

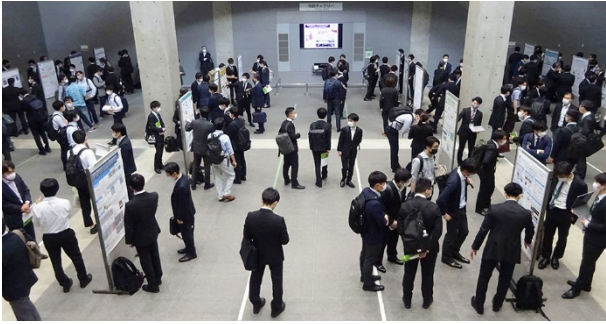


図 5 BPA セッション会場の様子

会場では、工夫を凝らしたポスターの数々が展示され、合わせて事前に発表者に作成依頼したアピールスライドを、会場の大型モニターにスライドショー形式で流し、多くの参加者に観ていただきました。講演申込数は 46 件となり、そのうち 1 件はオンラインでの参加希望となったことから、45 件が審査対象となり、1 発表につき 5 名の審査員による厳正の審査の結果、BPA1406 石橋 輝（八戸工業高等専門学校）、BPA1411 斎藤 高雅（東北大学）、BPA1414 月足 嶺（北海道大学）、BPA1426 榎本 陸（東京工業大学）、BPA1434 高萩 敦（名古屋大学）、BPA1439 谷口 智哉（神戸大学）の 6 名が優秀プレゼンテーション賞を受賞しました。（本誌の「優秀プレゼンテーション賞 受賞者」の記事をご覧ください。）受賞者 6 名は、シンポジウム 2 日目の総会時に受賞の紹介を受け、総会終了後には、賞状の授与とシンポジウム実行委員長の岐阜大学 板谷義紀 先生とともに記念撮影が行われました（図 6）。



図 6 板谷実行委員長との記念撮影

最後になりましたが、本セッションを開催するにあたり、優秀プレゼンテーション賞の審査員の先生方、福岡大学 西山貴史 先生学生会委員会幹事をはじめとする学生会委員会委員の先生方、伝熱シンポジウム実行委員会の先生方に大変お世話になりま

した。この場をお借りして篤く御礼を申し上げます。
（学生会委員会 小宮 敦樹）

11. 人と熱との関わりの足跡（その 5）

「熱の科学技術史研究会」では、「人と熱との関わり」をたどることを目的として、伝熱シンポジウムの開催地域における伝統技術や熱科学技術の発展を主な内容として、一般の方も参加できる公開セッションを開催している。今回、伝熱シンポジウムが開催された東海地方から、静岡県伊豆の国市に現存する葦山反射炉と飲料自動販売機の生産日本一の製造工場である富士電機・三重工場を舞台とした「人と熱との関わりの足跡」について講演をお願いした。さらに、ものづくりに欠かせない熱技術である熱処理に関する講演をお願いし、ものづくりを支える技術の一つである熱処理技術と過渡沸騰現象について議論を行った。セッションの内容および講演者は以下のとおりであった。

講演 1：

葦山反射炉における熱と温度に関わる
10 のミステリー

菅野利猛（㈱木村铸造所）

講演 2：

食品流通における“人と熱との関わり”

浅田規，土屋敏章（富士電機㈱）

講演 3：

熱処理における“熱科学・熱技術”

河野正道（九州大）

講演 1 では、世界で唯一現存する鑄鉄の溶解が行われた反射炉である葦山反射炉に関する 10 のミステリーについて、調査および研究結果を詳しく説明していただいた。“葦山反射炉で鑄鉄は溶けたのか？”，“鑄鉄製大砲の成分はどこまで解明されているのか？”等のミステリーは、熱放射や融解・凝固を伴う伝熱と深く関わっており、伝熱に関する謎解きとしても興味深い講演であった。

講演 2 では、食品流通分野で活躍している自動販売機とショーケースの開発の歴史と熱技術との関わりについて講演していただいた。これらの熱技術には、伝熱工学全般が関わっており、地球温暖化防止に関する課題を解決する重要な役割も存在する。重要課題の一つが、熱および物質の同時移動現象で

ある着霜現象であり、課題への取り組みについて議論を行うことができた。

講演 3 では、伝熱工学に関わる熱処理技術の多様性と熱処理に関わる科学について説明していただいた。沸騰冷却が利用される金属の熱処理だけではなく、代表的なナノ材料であるカーボンナノチューブやグラフェンの生成における熱処理や量子力学についても説明があり、ものづくりを支える技術の一つである熱処理技術の“現在・過去・未来”について議論を行うことができた。



図 7 講演会場の様子



図 8 講演発表の様子

今回の講演は、講演会場だけでも 40 名近くの参加があった（図 7）。また、オンラインでも 30 名近くの参加があった。司会者、講演者らがマスクをする講演発表風景は、伝熱シンポジウムの歴史でも貴

重な記録になると思われる（図 8）。

ご参加いただいた皆様、ご尽力いただいた皆様に深く感謝し、報告とさせていただきます。

なお、この公開セッション「人と熱との関わり」の足跡」シリーズは、“熱の科学技術史研究会”が主宰して今回 5 回目を迎えました。当該研究会は昨年度で終了し、今年度からは新たな研究会・“熱事象の科学知・技術知”として主査も交代しメンバーも補強して再発足いたしました。新研究会においても、伝熱シンポジウムの開催地に題材を取ったこの種のオーガナイズドセッションを、内容も再検討しつつ継続して開催してゆきたいと考えています。今後とも、皆様のご支援をお願い申し上げます。

（研究会“熱事象の科学知・技術知”

大久保 英敏，星 朗）

（熱の科学技術史研究会 河村 洋）

12. 特別講演

第 59 回日本伝熱シンポジウム特別講演会が 2 日目の日本伝熱学会第 60 期総会前に行われました。講師は、ぎふ総合健診センター所長・理事で岐阜大学名誉教授であり医学部附属地域医療医学センター特任教授の村上啓雄先生にお願いしました。村上先生は、国公立大学附属病院感染対策協議会会長や厚生労働省院内感染対策中央会議構成員などを歴任されており、現在は岐阜県新型コロナウイルス感染症調整本部座長を務めておられます。したがって感染症に関連して深い知見をお持ちなので、タイトルは「COVID-19: 2 年あまりの経験と、今後の課題」と題して、これまでに様々な情報が錯綜している中で、医学的な見地から新型コロナウイルスの特徴から治療の現状ならびに感染拡大防止法に至るまで科学的データに基づき、わかりやすく解説して頂きました。今回の特別講演では、特筆すべきエピソードがありました。講師の村上先生が 5 月上旬に大怪我を負われ緊急入院されることになりました。幸い順調に回復され、予定より早期退院されましたが、会場へお越し頂くことは困難だったため、講演スライドの Power Point に講演音声を入れたファイルを予め頂いていたので、それをハイブリッドで再生することにしました。ただし、講師本人はオンライン参加して頂けたので、質疑についてはリアルタイムで実施することができました。また、講演開始後しばらくは、オンライン参加者から音声聞こえない



図 9 特別講演

とのチャットが入りました。原因をすぐに特定できなかったもので、取り急ぎスタンドマイクを会場である講堂の大型スピーカー前に設置することで、応急的に対応することになりました。講演内容が大変好評だったこともあり、参加者からは再度音声入りで最初から聞きたいとの要望もあったため、講師の承諾を得て、後日視聴者を参加者限定のオンデマンドで配信致しました。村上先生には入院療養中にもかかわらず、音声付きの Power Point 資料を作成の上、事前を送付頂いただけではなく、オンデマンド配信にも快くご了承頂き、感謝申し上げます。このような事実から、特別講演についても異例の開催となりました。しかし、このような形で学会の特別講演が比較的容易にハイブリッドで急遽開催することができたのは、ポジティブに考えれば、新型コロナウイルス感染症に伴う不自由な活動を長期間強いられた中で得られた副産物（ノウハウ）であったと感じるところです。

（板谷 義紀）

13. 意見交換会

意見交換会は、本シンポジウム 2 日目の 18 時 30 分から 20 時 30 分まで「都ホテル 岐阜長良川」のボールルームで開催された。オンサイトによる意見交換会は、2 年ぶりの開催となり、また他の学会等を見渡してもオンサイトでの実施は久しい感となるものだったと思われる。これも日本伝熱学会会員、都ホテルのスタッフ、本実行委員の多大な協力があってこそ成し得たものと考え。意見交換会を開催するにあたり、現状のコロナ対策は必須事項であるため、これまでのような立食形式ではなく、ビュッフェ形式としながらも着座した形式での意見交換

会を実施することとした（図 10）。会場としては、1200 人規模の部屋を貸し切り、200 名程度の参加者を想定した料理、ドリンク、デール席を準備した。実際、当日までに受け付けた参加者の人数としては 213 名であった。意見交換会の流れとして、初めに日本伝熱学会会長の宗像 鉄雄 氏、実行委員長の板谷 義紀 氏からのご挨拶を頂き、歓談開始のご挨拶は、三浦工業株式会社の森田 昭生 氏（図 11）から頂いた。歓談は着座式ということもあり、立食形式に比べて人的な交流は少なくなるかと思われたが、時間が経過するにつれて席の移動が始まり、他の方との交流がなされ、全体的には多くの方々の深い交流があったものと考えている。

今回、新たな形式での意見交換会の試みということもあり、配慮が行き届かない部分が多々あったかと思われるが、本シンポジウムでの意見交換会は、今後のウィズコロナ時代の新たな開催モデルとなったのではないかと捉え、今後様々な学会等での参考となれば幸いである。最後に参加されました皆様のご協力により、意見交換会を無事に終えることができましたこと、心から感謝申し上げます。

（須網 暁，廣田 真史，朱 寧）



図 10 着座式意見交換会の様子



図 11 森田 昭生 氏からのご挨拶の様子

14. あとがき

第 59 回日本伝熱シンポジウムの開催にあたり、東海支部の実行委員会メンバーの皆様には、通常開催とは異なり密を避けるためあまり大勢集まっていた作業ができないだけでなく、慣れない準備を試行錯誤しつつ進めていく必要があり、大変なご苦勞をおかけすることになりました。それにもかかわらず、通常業務や研究活動でもご多忙な中、積極的に対応頂いたお陰で、初めての開催方式で大過なく円滑にシンポジウムを運営して無事に終えることができました。まずは、実行委員の皆様に深く感謝申し上げます。今後もいつまで COVID-19 の影響が継続するのかわかりませんが、まだ当分は「with コロナ」を前提とした学会活動を想定しておく必要があると思います。今回のハイブリッド開催が今後の一つのモデルケースとして参考にして頂ければ幸いに存じます。

最後に、会員の皆様には今回のシンポジウム運営で何かとご迷惑をおかけしたことと思いますが、有形無形の様々な形でご支援、ご協力頂き御礼申し上げますとともに、本学会の一層の発展と会員各位のご健勝とご活躍を祈念いたしています。

(板谷 義紀, 服部 博文)



実行委員とアルバイト学生の皆さん

第 59 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長	板谷義紀	岐阜大学
幹事	服部博文	名古屋工業大学
顧問	荒木信幸	静岡大学名誉教授
	大原敏夫	元デンソー, 夢双造研究所
	加藤征三	三重大学名誉教授
	北村健三	豊橋技術科学大学名誉教授
	中川勝文	元豊橋技術科学大学
	中山顕	静岡大学
	森田昭生	三浦工業
	山下博史	名古屋大学名誉教授
	渡邊激雄	名古屋大学
監査	佐藤英明	デンソー
	高野孝義	豊田工業大学
本部企画部会	長野方星*	名古屋大学
	田川正人	名古屋工業大学
	桑原不二朗	静岡大学
展示企画部会	中山浩*	中部電力
	塩谷篤	三菱重工業
	青木修一	東邦ガス
	村松憲志郎	デンソー
	山内崇史	豊田中央研究所
	丸山直樹*	三重大学
プログラム／ ハイブリッド 開催部会	近藤良夫	日本ガイシ
	土屋敏章	富士電機
	窪田光宏	名古屋大学
	小川信介*	岐阜大学
会場部会	川村洋介	名城大学
	上野藍	名古屋大学
	齋木悠	名古屋工業大学
	佐野吉彦	静岡大学
	中川二彦	岐阜大学
	西川原理仁	豊橋技術科学大学
	保浦知也*	名古屋工業大学
	柿本益志	静岡大学
論文集部会	西村顕	三重大学
	須網曉*	岐阜大学
	廣田真史	三重大学
懇親会部会	朱寧	静岡理工科大学

* 部会長

優秀プレゼンテーション賞 受賞者
ー 第 59 回日本伝熱シンポジウム ー
Best Presentation Award
- 59th National Heat Transfer Symposium of Japan -

学生会委員会幹事

西山 貴史 (福岡大学)

Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University)

e-mail: tnishiyama@fukuoka-u.ac.jp

令和 4 年 5 月 19 日に岐阜市(長良川国際会議場)で開催された日本伝熱学会総会において、第 59 回日本伝熱シンポジウム優秀プレゼンテーション賞セッションで発表を行い、優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々の表彰式が行われました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションと表彰式の様子をご紹介します。

2022 年度 受賞者

- ◆ 石橋 輝【八戸工業高等専門学校】
三次元伝熱解析と生体温熱プログラムを用いたサウナ入浴時における人体深部温度変化の予測
- ◆ 斎藤 高雅【東北大学】
表面修飾無機固体／ポリマー界面における分子構造と親和性の評価
- ◆ 月足 嶺【北海道大学】
高温用潜熱蓄熱ペレットの基礎伝熱特性調査
- ◆ 榎本 陸【東京工業大学】
熱力学安定・高効率・超低閾値なフォトン・アップコンバージョン固溶体結晶の創出と特性解明
- ◆ 高萩 敦【名古屋大学】
感温液晶の利用によるロックインサーモリフレクタンスの高感度化
- ◆ 谷口 智哉【神戸大学】
中性子ラジオグラフィによる流れの可視化に基づく自励振動ヒートパイプの熱輸送特性評価

(順不同)



優秀プレゼンテーション賞ポスター会場風景



板谷実行委員長との記念撮影

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションは 2019 年(徳島)以来、3 年ぶりの対面開催となりました。審査はアピールスライドの内容、対面ポスターセッションでの研究発表および質疑応答までを評価対象として行われました。また、ハイブリッド開催ということで、シンポジウムホームページにてポスター PDF を公開して、オンライン参加者からの質問・コメントも受け付けました。

参加された発表者の皆様は独自の工夫を凝らし、セッションに臨まれました。

特集「断熱・遮熱 — 熱流を抑える技術とその動向 —」にあたって

Preface to “Thermal insulation and shielding -Technologies and trends in thermal flow reduction-

小宮 敦樹 (東北大学)
Atsuki KOMIYA (Tohoku University)

1. はじめに

2015年の夏に国連本部において「国連持続可能な開発サミット」が開催され、持続可能な開発目標、いわゆるSDGs(Sustainable Development Goals)が採択されました。その後、国連の驚異的な啓発活動により、現在では街中やWeb空間の至る所にSDGsのロゴマークを見かけることができます。企業や大学も率先して、自身の活動が17の目標のどれに貢献できるかを積極的に示すようになってきており、我々の社会およびその活動の構造を多角的な視点から再考し、持続可能な社会に再編する機運が高まってきていると言えます。我々伝熱工学の研究者においても例外ではなく、17の目標の中でも特にエネルギーに関する項目について意識が高まっていると言えます。社会の関心は、エネルギーの生成法や利用法に注目が偏っておりますが、エネルギー(熱)を蓄えることや熱を逃がさないこともエネルギーの有効利用に大きく貢献すると考えることもできます。

そこで本特集では、伝熱促進とは真逆の“熱流を抑える技術”としての断熱材開発を中心に、その応用先である建築断熱材、また低熱伝導率を有する断熱材の熱伝導率の高精度計測法の紹介を中心に特集を組ませていただきました。

2. 日射反射による遮熱技術

大阪公立大学の木下進一氏および吉田篤正氏には、建築外壁材等に利用可能な高日射反射率材料および遮熱技術の紹介についてご寄稿いただきました。ヒートアイランドの観点から、都市の大部分を構成する建築物表面の日射面に話題の焦点をあて、そこに遮熱技術を適用することでヒートアイランド問題を解決することを提唱されております。ふく射特性という学術的な切り口から、遮熱技術の応用についてご紹介いただきました。

3. 建築断熱材の測定

一般財団法人建材試験センター(JTCCM)の田

坂太一氏には、建築用断熱材の熱伝導率測定方法とその関連規格についてご寄稿いただきました。使用環境によって大きく伝熱形態が変わる建築用断熱材の熱伝導率は、建物の熱設計を行う上で重要な数値情報となっており、不確かさ評価を含めた計測の重要性をご紹介いただきました。併せて建築用断熱材の高性能化に伴う今後の測定の課題についても紹介いただきました。

4. 断熱材の開発

国立高等専門学校機構和歌山工業高等専門学校の大村高弘氏には、近年における断熱材の熱伝導率評価方法について、その動向を含めたご寄稿を頂戴いたしました。定常法に見られる測定装置の問題点等をあげていただき、そこから新たな測定法の提案や、材料開発者が容易に測定可能な手法の紹介に至るまで、幅広い評価方法のご紹介をいただきました。特に高温条件下における断熱材熱伝導率の測定法は、炉をはじめとした工業分野の装置設計において重要な情報になると思われます。

5. GHP法による低熱伝導率物質の測定

4件目の話題として、筆者より低熱伝導率物質の計測に用いられている保護熱板法の改良利用法について話題提供をさせていただきました。低熱伝導率であるが故に、測定誤差が大きくなり、その評価が困難となることを装置改良によって高精度化を実現し、そこから断熱材の形状の違いによる圧力依存性の違い、温度依存性の違いについて測定結果を基に紹介させていただきました。

最後になりますが、各稿の著者の皆様には本業務でご多忙の中にも関わらず、本特集号にふさわしく、かつ伝熱学会会員の皆様が興味を抱いてくれるような内容のご寄稿を賜り、感謝申し上げます。末筆になりますが、御礼を申し上げますとともに、本特集号の内容が伝熱学会会員の皆様の研究の一助となれば幸甚に存じます。

ヒートアイランド緩和のための遮熱技術 Technology of Cool Materials for Mitigation to Urban Heat Island

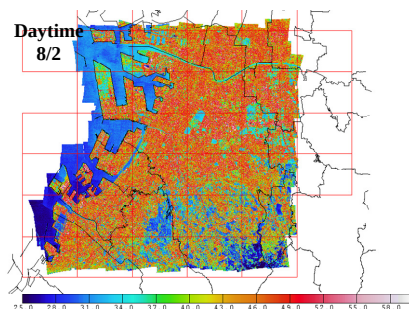
木下 進一, 吉田 篤正 (大阪公立大学)

Shinichi KINOSHITA, Atsumasa YOSHIDA (Osaka Metropolitan University)

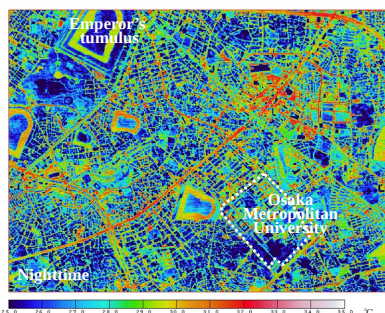
e-mail: kinosita@omu.ac.jp

1. はじめに

近年, 我が国のみならず世界各地の大都市域において, その中心部の気温が郊外と比べて高くなる現象, いわゆるヒートアイランドが大きな問題となっている. 地球温暖化は地球全体の気温が上昇する現象であるのに対し, ヒートアイランドは大都市特有の高温化現象であり, 地球温暖化よりも早く高温化が進んでいるのが特徴である[1]. ヒートアイランドの原因のひとつとして, 人工被覆面の拡大が挙げられる. 図1は昼間および夜間における都市表面の温度分布の一例である. 都市表面の主な構成要素であるコンクリートやアスファルトは表面の日射吸収率が高く, また熱容量も大きいことから, 昼間は地表面温度の上昇に伴う顕熱輸送の増大により気温上昇を招き, また地表に蓄えられた熱も熱帯夜の要因となっている.



(a) 昼間 (堺市周辺)



(b) 夜間 (大阪公立大学・中百舌鳥キャンパス周辺)

図1 地表面温度分布の測定例 (2006年8月)

この現象の緩和策のひとつとして, 昼間の日射吸収を抑制する意味での遮熱性能を有する「高日射反射率材料」を建築物外装等の都市表面に利用することが挙げられる. 本稿では, この高日射反射率材料の性能評価および予測について, 筆者らが取り組んできた内容を中心に紹介する.

2. 高日射反射率材料の基本原理

高日射反射率材料の性能を評価する上で, 入射する日射の分光特性が必要となる. 図2に快晴日の代表的な日射の分光特性を示す. 8月正午頃の大阪市を想定しており, Birdモデル[2]に基づく計算結果である. 水平面全天日射の内, 紫外域, 可視域, 近赤外域の占める割合は, それぞれ4%, 49%, 47%であり, 可視域と近赤外域でそれぞれ全天日射のほぼ半分ずつを占める. 全天日射から直達日射を差し引いた拡散日射は可視域に多く分布し, 全天日射の10%未満である.

高日射反射率材料の性能を示す重要な特性は, 日射反射率および分光反射率である. 日射反射率は分光反射率に日射のスペクトルを重みとして日射が関与する波長域 (300~2500nm) にわたって積分することにより得られるので, 厳密には場所,

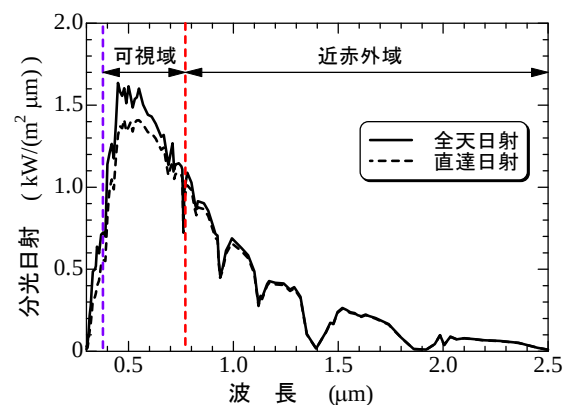


図2 入射日射の分光特性

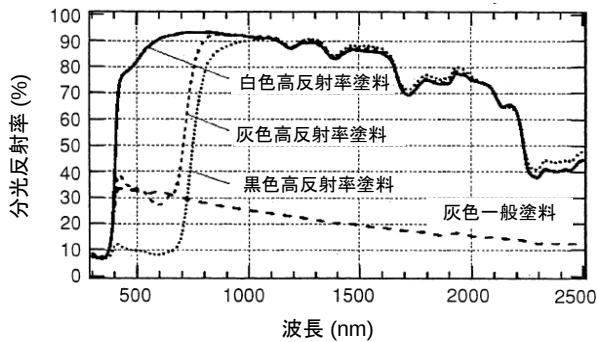


図3 色彩の異なる材料の分光反射率[3]

時刻、天候などが異なれば、同一の材料であってもその値に違いが生じることになる。

可視域の分光反射率は色彩に関連し、白色系の材料は黒色系と比べて可視域の分光反射率が高くなる。一方、可視域の分光反射率が同じで、視覚的に同じ材料でも、近赤外域の分光反射率が異なれば、日射反射率は異なる値となり、屋外でそれぞれ施工した場合、表面温度に差が生じることとなる。高日射反射率材料と称する材料は、色彩が同じであっても、一般の材料と比べて近赤外域の分光反射率を高くして、日射吸収率を下げた材料を一般に指すと考えられる。図3に塗膜材料の分光反射率を模式的に示す。高反射率の塗料についてはいずれの色彩でも800nmより長い近赤外域の分光反射率が高いことが特徴である。

3. 高日射反射率材料の性能評価

塗膜材料の日射反射特性は、通常実験室内に置いて分光光度計により分光反射率を測定し、基準太陽光の重係数を乗じて加重平均して求められ、JISにおいてもこの手法が規定されている[4]。一方、前述した通り、現場の日射スペクトルはこれと異なり、測定対象の周囲のふく射環境から受ける影響も多くあるため、現場で施工された状態での性能評価も、こうした材料の普及を促すうえで重要である。

水平面に施工された塗膜の日射反射率の現場測定方法として、日射反射率が既知の白色および黒色標準板を用いた二点校正法[5]が挙げられる。また筆者らは1枚の反射率既知の標準板と放射計から見た標準板の形態係数から測定対象面の測定を行っており、ここではその手法に基づく高日射反射率の塗膜および塩ビ系防水シートの日射反射率

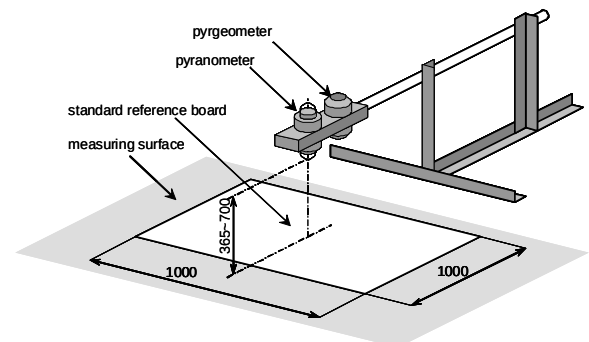


図4 日射反射率の現場測定における装置設置状況

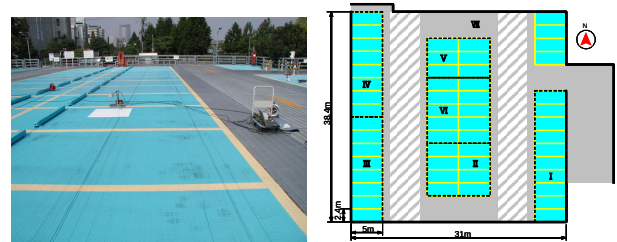


図5 立体駐車場の塗装面概略および測定点

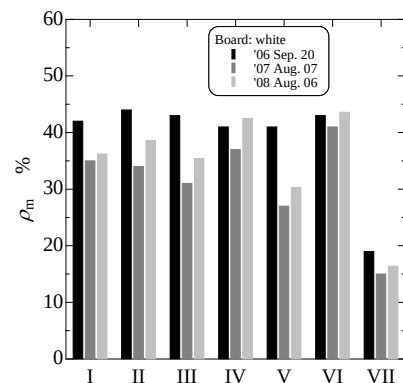


図6 各塗装面の日射反射率の経年変化

測定の実例[6-7]について説明する。

日射反射率の測定は、対象とする面が十分に広く一様である場合、単純に全天日射量 S_{down} に対する対象面からの反射日射量 S_{up} (W/m^2) の比で求めることができる。しかし、通常測定対象面は領域が限られており、この手法を適用した測定値は周囲表面からの日射の影響を受けることになる。その影響を取り除くために、まず測定面上で長短波放射計を用いて測定された全天日射量 S_{down} と反射日射量 S_{up} の比から見かけの反射率 ρ_{ma} を求める。

$$\rho_{\text{ma}} = \frac{S_{\text{up}}}{S_{\text{down}}} \quad (1)$$

次に長短波放射計の真下に反射率既知の標準板（反射率 ρ_s ）を置き、式(1)と同様に見かけの反射

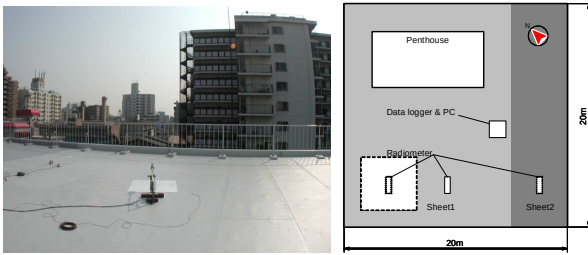


図7 屋上防水シート面概略および測定箇所

表1 防水シート面の日射反射率の測定結果

Object	Method	Solar reflectance (%)		
		1st Feb. 6 2007	2nd Aug. 9 2007	3rd Aug. 7 2008
Sheet1 (unwashed)	White	59.8	44.9	42.1
	Black	59.1	43.4	43.7
	2 point correction	59.3	---	42.9
Sheet1 (washed)	White	---	---	54.0
	Black	---	---	55.2
Sheet2 (unwashed)	White	40.3	24.9	25.8
	Black	37.4	27.1	27.2

率 ρ_{sa} を全天日射量 S_{down} と反射日射量 S'_{up} の比から求める。これらの見かけの反射率は、すべての面が完全拡散反射面であると仮定して、長短波放射計から見た標準板の形態係数 ϕ を用いて、測定対象面の真の反射率 ρ_m を次式で表すことができる。

$$\rho_m = \frac{\rho_{ma} - \rho_{sa}}{\phi} + \rho_s \quad (2)$$

図4に測定装置の設置状況を示す。

この測定法を用いて、図5に示す大阪市内某所の立体駐車場で数種類の高日射反射率塗料が塗装された面の日射反射率の測定を2006年から2008年まで約1年毎に行った。塗料の色彩は全て水色で、そのそれぞれにおいて1箇所ずつ（図中I～VI）と無塗装面（図中VII）の7箇所で測定を行い、各塗料の日射反射性能ならびにその経年変化について評価した。図6に測定結果を示す。一部の塗装面について日射反射率の低下が認められているが、これらは車の走行等による汚れや大気中の粒子の沈着による影響と考えられる。

別の事例として、図7に示す大阪市内某ビル屋上において施工された2種類の塩ビ系防水シートを対象とした測定を2007年から2008年にかけて同様の方法で日射反射率を3回実施した。図中のSheet1が高日射反射率仕様、Sheet2が従来仕様のシートであり、1回目測定の2007年2月は施工完了後すぐの時期である。表1に一連の測定結果を

示す。測定法として白色板、黒色板それぞれを用いた場合の結果と、それら両方を用いた二点校正法による結果も一部併記している。Sheet1については3回目の測定において一部（図7中の破線内の領域）を洗浄し、不洗浄の箇所とそれぞれ測定することで、表面の汚れの影響についても検討した。表の結果からわかるように、Sheet1の日射反射率は施工当初60%ほどで高い値を示していたが、その半年後には15%ほど低下し、その後はほぼ変化がないことから安定した状態となっている。3回目の測定での洗浄した箇所の測定結果から、日射反射率の低下はほぼ表面に付着した汚れによるものと考えられる。こうした高日射反射率材料の比較的早い時期での日射反射率の低下については、文献[8,9]でも指摘されており、その性能変化を把握するための暴露試験ならびに促進試験の実施・検討[10]がなされている。

4. 高日射反射率塗膜の性能予測

塗料の色彩や反射特性は、顧客からの要望や塗装しようとする建物表面の条件に応じてしばしば決められる。実際にその塗料が調合・施工される前にその反射特性を数値解析に基づいて精度よく予測することができれば、高日射反射率塗膜の性能の向上や条件に応じた最適化につながると考えられる。

一般に塗膜においては、その内部での散乱反射の効果が塗膜表面での鏡面反射と比べて強い。よってその光学的特性を評価するためには、塗膜に含まれる顔料の散乱特性を知ることが重要である。塗料の光学的特性を予測には古くからKubelka-Munkの理論[11]が利用されてきており、その改良モデル[12,13]も提案されている。また、ふく射輸送方程式を数値的に解くことによる塗膜の性能評価もなされている。特により詳細な特性

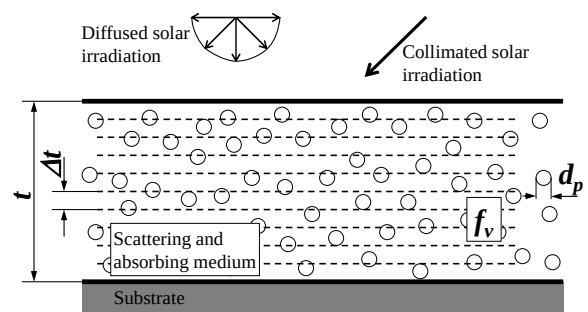


図8 塗膜のふく射解析モデルの概略

を再現するために、以前から数値解析モデルにおいて顔料粒子の散乱の非等方性が考慮されている[14-18].

筆者らは、解析時間が短く簡便で、様々な条件に柔軟に対応できるふく射要素法[19]を用い、塗膜の日射反射特性を評価した[20]. 解析において、顔料における非等方散乱を考慮し、分光光度計を用いた実際の塗膜の分光反射率との比較により、その適応性を評価した. 顔料を含む塗膜層の解析モデルとして、図8に示すような1次元平行平板系を考え、層は厚さ方向に任意の数の差分要素に分割される. 塗膜上面からは、Birdモデルに基づき求められたスペクトルを有する直達および散乱日射が入射する. 展色剤はアルキド樹脂、底部基板表面は黒体または測定で得られた基板材料の分光日射反射率と仮定した. 塗膜中の顔料粒子はTiO₂で、形状は球形（直径 d_p ）とし、媒質中の体積分率は f_v として与え、粒子による散乱はMie散乱で、また独立散乱を仮定して解析を行った.

図9は、白色の隠ぺい率試験紙に塗布した塗膜を分光光度計で測定した分光反射率と、上記の解析モデルによる予測結果とを比較した結果である. 顔料は平均粒径0.3 μm のTiO₂粒子である. 本条件に合わせた解析結果は比較的良好な一致を得ている. ただし、これと別にAl₂O₃粒子やZnO粒子を顔料とした場合についても行っているが、TiO₂ほど良い一致が見られず、粒子が非球形であることが予測精度に影響していると考えられる.

図10は顔料の粒径を変化させたときの分光反射率の解析結果である. 塗膜厚さおよび顔料の体積分率はそれぞれ1000 μm , 0.001で共通である. 粒径が大きくなるに従い、分布が短波長域から長波長域に向かって広がっていくことがわかる. 図11に、可視域（0.35~0.75 μm ）、近赤外域（0.75~2.5 μm ）および全波長域での日射反射率に対する顔料の粒径の影響を示す. 粒径が0.05 μm 以下の場合、塗膜内での散乱の効果は極めて小さく、日射反射率の値も低くなる. 可視域では0.3 μm 、近赤外域では0.5 μm でそれぞれ反射率が最大となり、粒径を変えることにより塗膜の日射反射特性の波長依存性を制御できることを示唆される結果となっている.

この解析モデルは、顔料や展色材などの素材の光学特性のデータがある限り適応可能であり、複

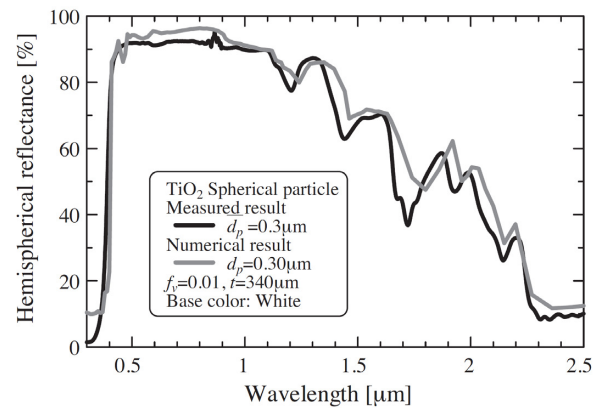


図9 隠ぺい率試験紙による分光反射率測定結果と数値解析結果との比較

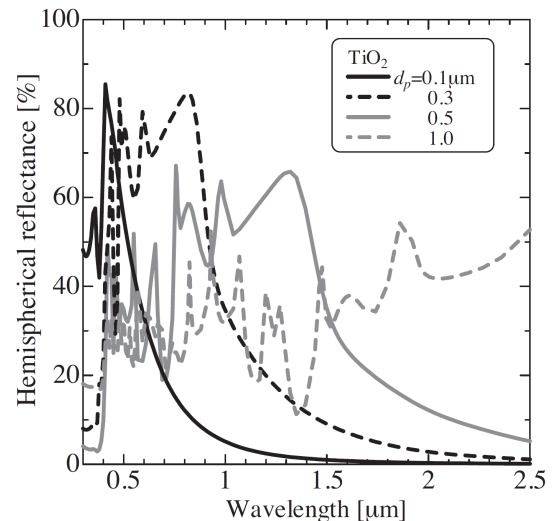


図10 分光反射率に対する顔料（TiO₂）粒径の影響（厚さ：1000 μm ，体積分率：0.001）

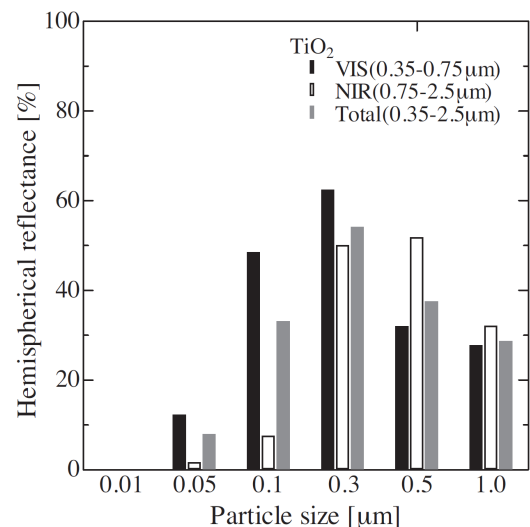


図11 日射反射率に対する粒径の影響.

数顔料が混在する、または多層構造の塗膜への適応も考えられる。さらに、これらの条件をパラメータとして、要求する光学特性を有する塗膜の最適設計に応用することも考えられる。今後は、非球形顔料や従属散乱が影響するような顔料体積分率の高い条件への対応などが課題として挙げられる。

5. 今後の展開

高日射反射率材料は、これまで屋根・屋上面、道路面において、その効果が評価されてきており、素材を対象とした技術認証も一部で行われている。一方、図 12 に示すように、この技術の壁面への適応は、街路空間の熱的快適性の悪化、他の建物壁面への熱負荷の増大につながることから、これまでのところ控えられている。

壁面からの大気への熱負荷を抑えるとともに反射日射の街路空間への影響を緩和するには、壁面での反射率を高めるだけでなく、日射の入射方向に反射できる再帰反射性を有する材料の導入が必要となる。これまで多くの研究[21-23]がなされてきている一方で再帰反射性を有する壁材ならびに窓材が開発され商品化も進められてきている。こうした材料の普及を図るうえで、材料の有する指向反射性の評価手法を開発すること、ならびに評価基準を明確することは重要なことである。近年、再帰反射性を有する外壁材ならびに窓材を対象として、その指向反射特性、ヒートアイランド緩和効果に関わる特性評価のための測定手法の開発、ならびにその手法に基づくヒートアイランド対策技術認証[24]と JIS 化[25]が進められてきた。

各地のヒートアイランドは年々厳しさを増す中、記述による現象の抑制に関する緩和策だけでなく、人の行動変化による影響の削減を図ろうとする適応策による対応も進められている。暑熱環境下での人体の生理応答の評価と併せて、日除け、クールスポット等の暑熱対策設備を効果的に設置すること、またそのための研究が今後求められている。

参考文献

[1] 環境省, ヒートアイランド対策ガイドライン改訂版 (2013).
[2] Bird, R.E. A Simple, Solar Spectral Model for Direct- Normal and Diffuse Horizontal Irradiance,

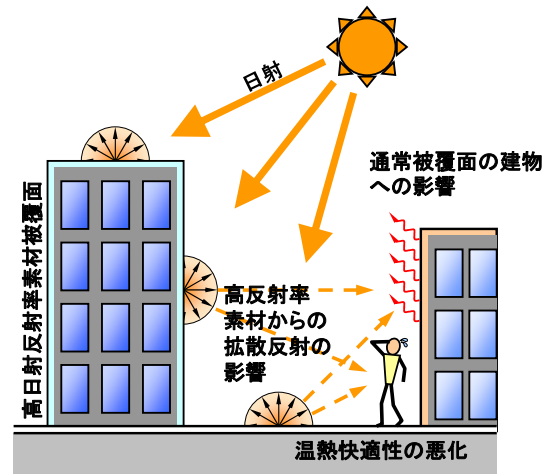


図 12 建物表面の高日射反射率化の弊害

Solar Energy, 32-4 (1984) 461-471.

- [3] 藤本哲夫, 岡田朋和, 近藤靖史, 高反射率塗料の日射反射性能に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 71-601 (2006) 35-41.
[4] JIS K5602, 塗膜の日射反射率の求め方 (2008).
[5] 村田泰孝, 酒井孝司, 他 11 名, 高反射率塗料施工面の日射反射率現場測定法に関する研究—標準二点校正法の提案および水平面における精度確認—, 日本建築学会環境系論文集, 73-632 (2008) 1209-1215.
[6] 木下進一, 吉田篤正, 屋外測定による高反射率素材施工面の日射反射特性評価, 日本建築学会技術報告集, 15-29 (2009) 159-162.
[7] Kinoshita, S., Yoshida, A., Kokawa, S., Evaluation of the Solar Reflectance of Cool Materials by On-site Measurement of Deterioration because to Aging, J. Heat Island Inst. Int'l, 7-2 (2012), 205-212.
[8] Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R., Miller, W.A., Weathering of roofing materials – An overview, Constr. Build. Mater., 22 (2008) 423-433.
[9] 伊藤大輔, 武田仁, 藤本哲夫, 近藤靖史, 足永靖信, 高反射率塗料の屋外暴露による性能変化に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 17-35 (2011) 217-220.
[10] 竹林英樹, 三木勝夫, 他 5 名, 高反射率塗料の日射反射率の経時変化に関する研究, 熱物性, 29-3 (2015) 122-128.
[11] Kubelka, P., New contribution to the optics of intensity light-scattering materials. Part I, J. Opt.

- Soc. Am. **38** (1948) 448-457.
- [12] Maheu, B., Letoulouzan, J.N., Gouesbet, G., Four-flux models to solve the scattering transfer equation in terms of Lorentz-Mie parameters, *Applied Optics*, **23** (1984) 3353-3362.
- [13] Yang, L., Kruse, B., Revised Kubelka-Munk theory. I. Theory and application, *J. Opt. Soc. Am. A*, **21** (2004) 1933-1941.
- [14] Shafey, H.M., Kunitomo, T., Theoretical study on radiative properties of a painted layer containing spherical pigment: case of normal incidence, *Bull. JSME*, **22** (1979) 1587-1594.
- [15] Shafey, H.M., Kunitomo, T., Theoretical study on radiative properties of a painted layer containing spherical pigment: cases of oblique and hemispherical incidence, *Bull. JSME*, **23** (1980) 1842-1848.
- [16] Shafey, H.M., Kunitomo, T., Theoretical study on radiative properties of an optically thick painted layer containing spherical pigment: case of normal incidence, *Bull. JSME*, **23** (1980) 1366-1373.
- [17] Shafey, H.M., Kunitomo, T., Theoretical study on radiative properties of doubly painted layer, *Bull. JSME* **25** (1982) 213-216.
- [18] Kunitomo, T., Tsuboi, Y., Shafey, H.M., Dependent scattering and dependent absorption of light in fine-particle dispersed medium, *Bull. JSME*, **25** (1985) 854-859.
- [19] Mehdi, B., Maruyama, S., Komiya, A., The Effects of Using Some Common White Pigments on Thermal and Aesthetic Performances of Pigmented Coatings, *J. Thermal Sci. Tech.*, **4-1** (2009) 131-145.
- [20] Kinoshita, S., Yoshida, A., Investigation performance prediction and optimization of spectral solar reflectance of cool painted layer, *Energy and Buildings*, **114** (2016) 214-220.
- [21] 酒井英樹, 永村一雄, 井川憲男, 再帰反射材の照り返し抑制効果, *日本建築学会構造系論文集*, **73-630** (2008) 1239-1244.
- [22] 酒井英樹, 伊與田浩志, 永村一雄, 井川憲男, 指向性を有する再帰反射材の試作および日射反射特性の測定—指向性再帰反射材によるヒートアイランド対策, *日本建築学会構造系論文集*, **76-665** (2011) 1229-1234.
- [23] 西岡真稔, 井上智, 酒井憲司, 中尾正喜, 鍋島美奈子, 再帰性反射体の基本特性に関する数値解析—再帰反射を用いた日射反射体の性能評価, *日本建築学会環境系論文集*, **73-630** (2008) 1013-1019.
- [24] 大阪ヒートアイランド対策コンソーシアム, 大阪ヒートアイランド対策技術認証制度, <http://www.osakahitec.com/cert/index.html>.
- [25] JIS A 1494, 建築窓ガラス用フィルムの再帰性日射反射性能の測定方法, (2021).
-

建築用断熱材の熱伝導率測定方法

Measurement Method for Thermal Insulation Materials for Buildings

田坂 太一（建材試験センター）

Taichi TASAKA (Japan Testing Center for Construction Materials)

e-mail: tasaka@jtccm.or.jp

1. はじめに

建築の分野では、最近の関心の高いテーマとして「省エネ義務化」、「カーボンニュートラル」などが挙げられる。また、建物における温熱環境という観点では、人が快適と感じる室内空間を形成し、維持・管理することも重要である。そのためには、温熱環境に影響を与える代謝量、着衣量、空気温度、放射温度、気流および湿度の6要素について考慮する必要がある。このうち代謝量と着衣量は人間側の要素であるが、空気温度、放射温度、気流および湿度は周囲の環境に関連した物理的な要素であり、これら要素を決定するものが建物の断熱性能である。この性能は建物を構成する各種材料の熱伝導率によって決まるが、材料の熱伝導率は温度や含水率などに依存するため、使用環境に応じた材料の性能を適切に把握し、建物の熱設計に反映させることが重要となる。本稿では、建物を熱設計する上で最も重要な指標の一つである建築用断熱材の熱伝導率の評価方法とその最近の動向を紹介する。

2. 材料の熱伝導率の測定方法

表1に示すように、熱伝導率の測定方法にはさまざまなものがある。それぞれ特徴や対象とする材料が異なるが、温度が時間的に変化しない状態で測定する「定常法」と温度が時間的に変化する状態で測定する「非定常法」の2種類に区分される。このうち定常法は熱伝導率が比較的低い材料に、非定常法は熱伝導率が比較的高い材料に適している。建築材料は熱伝導率が低いものが多いため、定常法で測定することがほとんどである。

式(1)からわかるように、熱伝導率は長さ（面積と厚さ）と温度と熱量の3つの物理量を組み合わせた値である。したがって、ある厚さの材料の両面に一定の温度差を付けて、そのときに流れる熱量をはかることができれば、熱伝導率を測定する

ことができる。定常法では、均質な平板状の材料の両面に温度を調節できる平板状のプレートを取り付け、一定の温度差を付けて、そのときに流れる熱量を測定する。

測定量のうち、長さや温度は比較的簡単に測定することができるが、熱量を正確に測定するのは簡単ではない。このため、熱量の測定方法の違いによって、さまざまな熱伝導率の測定方法が考案されてきた。表1ではさまざまな定常法による熱伝導率の測定方法を示しているが、このうち断熱材の測定方法として最も基本となるのが「保護熱板法」で、近年広く普及しているのが「熱流計法」である。ここでは、この2つの方法について紹介する。

表1 材料の熱伝導率の測定方法と関連規格

温度 状態	測定方式・測定方法			関連規格
定常	直接法	平板型	保護熱板法 試験体 1 枚方式	JIS A 1412-1 ISO8302
			保護熱板法 試験体 2 枚方式	
		円筒型	端部保護方式	JIS A 1412-3 ISO8497
			端部校正方式	
	端部補正方式			
	間接法	平板型	熱流計法	JIS A 1412-2 ISO8301
比較法			JIS A 1412-2 附属書 A	
保護熱板式 熱流計法			JIS A 1412-2 附属書 B	
非定常	熱線法			JIS R 2616 JIS R 2251-1 JIS R 2251-2 ISO8894-1
	プローブ法			—
	フラッシュ法			JIS R 1611
	周期加熱法			ISO21901
	示差熱法			—

$$\lambda = \frac{\Phi \times d}{A \times \Delta T} \quad \cdots (1)$$

ここに、

λ ：熱伝導率 [W/(m・K)]

Φ ：熱量 (W)

A ：面積 (m²)

d ：厚さ (m)

ΔT ：表面温度差 (K)

2.1 保護熱板法

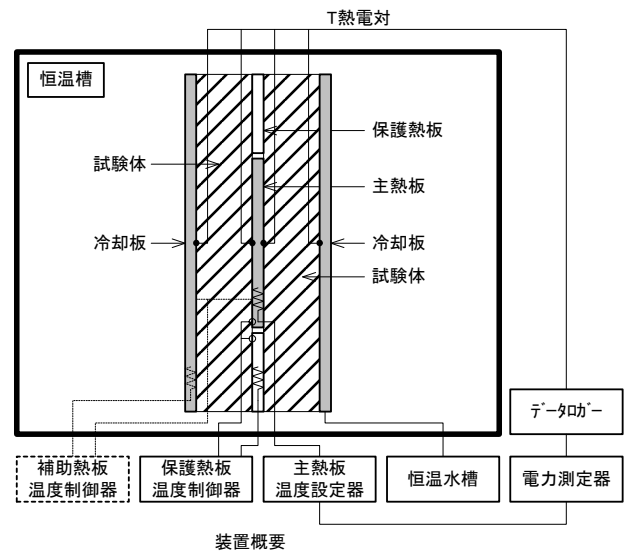
保護熱板法は、断熱材の熱伝導率の測定方法として最も歴史があり、そのほかの定常法の基礎となる方法である。保護熱板は“Guarded Hot Plate”ということから、その頭文字をとって GHP 法と呼ばれている。

装置は、材料の両面に温度差を付けるための加熱板と冷却熱板というヒータが入った金属プレートが主な部分となる（図 1）。この金属プレートの間に熱伝導率を調べたい材料を挟んで測定を行う。加熱板は 1 枚で、その両側に 2 枚の冷却熱板がある。同じ材質・同じ厚さの材料が 2 枚必要となる。加熱板は、幅 2mm 程度の GAP と呼ばれる断熱層を介して、中心部の主熱板とその周囲の保護熱板にわかれている。このうち主熱板の部分（正確には GAP の中心線の内側）が熱伝導率をはかる範囲となっている。

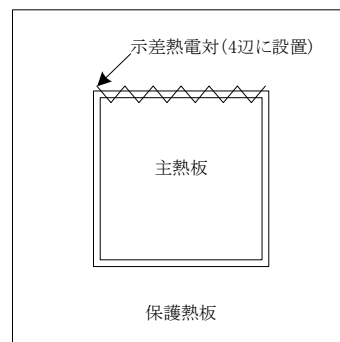
温度差は、JIS^[1]では 10K 以上付けることを推奨しており、一般に 20K 前後で測定が行われる。例えば、断熱材は製品規格などで平均温度 23℃の熱伝導率を測定することになっているが、この場合、主熱板を 33℃、冷却熱板を 13℃に設定し、一定の温度に保つ。熱は高温側から低温側へ流れるので、主熱板を 33℃に保つために主熱板内のヒータに一定の電力を供給する。ただし、これだけだと横方向にも熱が流れてしまうので、保護熱板も主熱板と同じ温度になるように、保護熱板内のヒータに供給する電力を調節する。これにより主熱板に供給した電力は熱としてすべて 2 枚の冷却熱板側に流れ、「主熱板に供給する電力＝材料を流れる熱量」となる。したがって、主熱板に供給した電力を測定すれば、式(1)から熱伝導率を求めることができる。

なお、主熱板と保護熱板の間には、示差熱電対が取り付けられている。示差熱電対は熱電対を直

列につなげたもので、温度差を検出するためのセンサである。このセンサの出力がゼロになると「主熱板と保護熱板に温度差がない＝横方向への熱の流れがない」ことを示す。



a) 装置概要（垂直断面）



b) 加熱板概要（平面断面）

図 1 熱伝導率試験装置概要（JIS A 1412-1，試験体 2 枚方式の例）

2.2 熱流計法

熱流計法は、装置が単純で誰でも簡単に測定できるものが多く、最近では保護熱板法よりも広く普及している。熱流計は“Heat Flow Meter”ということから、HFM 法とも呼ばれている。

熱流計法は、図 2 に示すように、加熱板と冷却熱板で材料に一定の温度差を付けるところは保護熱板法と同じだが、熱量を熱流計というセンサではかる点が大きく異なる。熱流計にはいくつかの種類があるが、JIS^[2]で規定されているのはこう配と呼ばれるものである。この熱流計は、基板に

薄く熱抵抗の小さい板材の両面に熱電対を直列につなげた熱電対列（示差熱電対の一種で、サーモパイルとも呼ばれる）を取り付けたものとなっている。基板（熱抵抗体）の両面に温度差が付くと、それに応じた電流が流れるので、その出力と熱量の関係がわかっていれば、熱量に変換することができる。このため、熱量に変換するための係数をあらかじめ調べておく校正が必要となる。

校正には、熱伝導率がわかっている校正用標準板を使う。通常のはかり方と同じように校正用標準板を装置に設置することで、熱流計の出力と熱量の関係から係数を求める。したがって、熱流計法の信頼性は、この校正の精度によって決まる。校正用標準板の熱伝導率は保護熱板法ではかるので、熱流計法の測定精度は保護熱板法の精度に依存することになる。校正用標準板には、熱伝導率がわかっていることのほかに、断熱性能が経時変化しないこと、および、測定対象の材料と同程度の断熱性能を持つことが求められる。

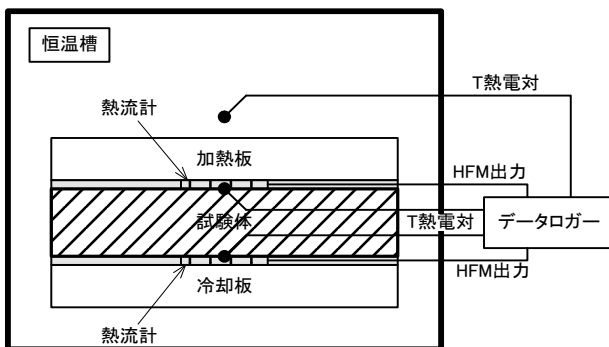


図2 熱伝導率試験装置概要（JIS A 1412-2、試験体1枚、熱流計2枚方式の例）

3. 建築用断熱材の高性能化と測定上の課題

前述したように、建築用断熱材の熱伝導率測定方法の歴史は古く、グラスウールやウレタンフォームなどの一般的な建築用断熱材の熱伝導率は高い精度で測定することができる。しかしながら、近年、断熱材の高性能化に関する検討も盛んに行われ、真空断熱材（VIP）やナノ粒子断熱材などの新しい断熱材が開発されている。これらの材料は、従来からある熱伝導率が $0.022 \sim 0.050 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 程度の建築用断熱材に比べ、熱伝導率が10分の1程度のものもあり、今後建築用断熱材としての活用・普及が期待される。

一方、新しい材料の開発や普及には、信頼性の高い測定が必要不可欠であるが、熱伝導率の低い材料ほど測定の不確かさは増大することが知られている^[3]。今後、低熱伝導率材料が開発された際、その熱伝導率を現在普及している断熱材と同程度の精度で測定することも重要な課題であり、低熱伝導率域における信頼性の高い標準的な測定方法の必要性が高まっている。ここでは、既存の保護熱板法装置により、真空断熱材の熱伝導率を精度良く測定するための手法を検討した事例^[4,5]を紹介する。

3.1 試験体および試験方法

ここで紹介するものは、保護熱板法の熱伝導率測定装置を所有する国内の3機関において、真空断熱材の熱伝導率のラウンドロビン試験を実施し、現行の測定方法や測定装置の信頼性を検証した事例である。ラウンドロビン試験に用いた試験体は、表2に示すように、2種類の一般的な熱伝導率を持つ断熱材と8種類の真空断熱材である。この8種類の真空断熱材は、芯材の種類や寸法、厚さなどが異なる。なお、表中のA寸法は芯材の寸法を、B寸法は被覆材を含む試験体全体の寸法を示す（図3参照）。

各試験体の温度と厚さの測定位置を図3に、装置への設置概要を図4に示す。温度と厚さの測定位置および装置への設置方法は各機関共通としている。

表2 試験体の概要

No.	種類	寸法 (mm)	呼び厚さ (mm)	熱伝導率 (設計値) [W/(m · K)]
No.1	高密度 GW	300×300	25	0.038
No.2	ボード状断熱材			0.025
No.3	真空断熱材 (芯材：PUF)	300×300 (A 寸法)	10	0.005
No.4			20	
No.5			10	
No.6			20	
No.7	真空断熱材 (芯材：GW)	300×300 (B 寸法)	10	0.003
No.8			20	
No.9			10	
No.10			20	

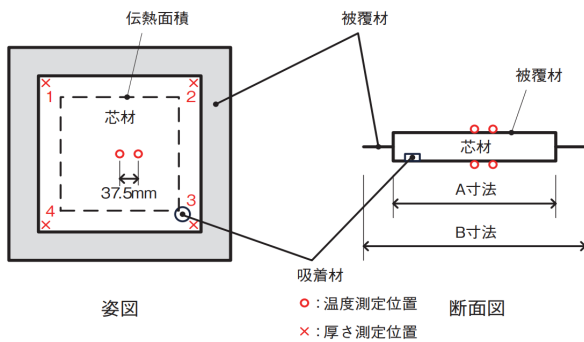


図3 試験体の概要と温度および厚さ測定位置

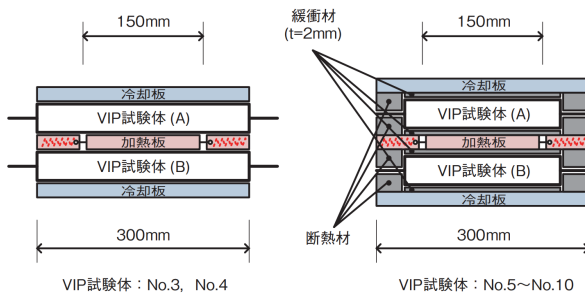


図4 試験体設置概要（装置断面図）

3.2 試験結果

3 機関の熱伝導率測定結果を図5に示す。この図は3機関の平均値に対する各機関の熱伝導率のばらつきを示したものであるが、図に示すように3機関の測定結果は比較的良く一致しており、真空断熱材の熱伝導率の大小や装置の差異による明確な傾向は認められていない。一方、厚さの不確かさを最小限に見積っても、熱伝導率の拡張不確かさは最大で18%程度に達しており（図6）、温度・熱量・長さのそれぞれの要素の測定精度向上の必要性が示唆される。特に、低熱伝導率材料は試験体を通する熱量が少ないため、熱量測定の精度向上が課題といえる。また、真空断熱材の場合、芯材の種類によっては表面に著しいしわや凹凸のある場合もある。このような試験体（No.7～No.10）は、試験機関により厚さ測定結果に顕著なばらつきが認められたものもあり、厚さの測定方法の検討が必要であることがわかる（図7）。

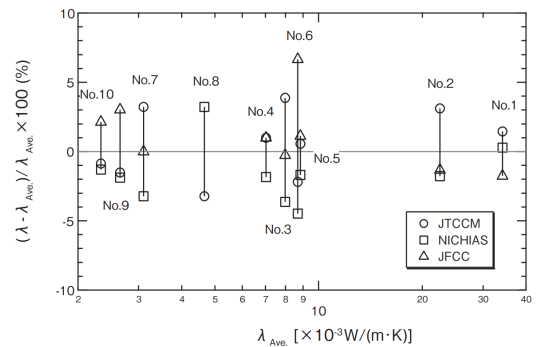


図5 3機関の平均値に対する各機関の熱伝導率のばらつき

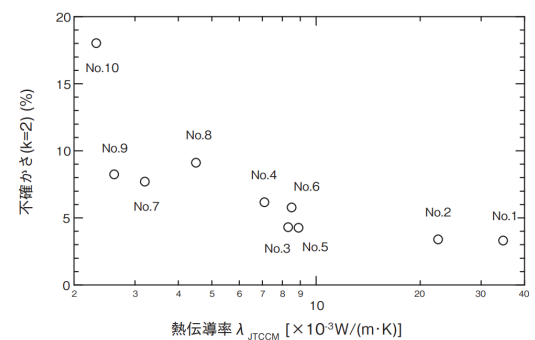


図6 熱伝導率測定の不確かさ推定結果

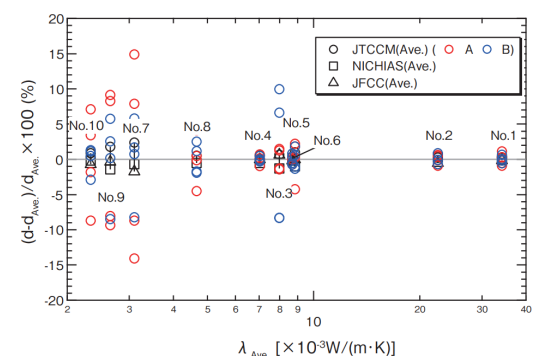


図7 3機関の平均値に対する各機関の厚さのばらつき

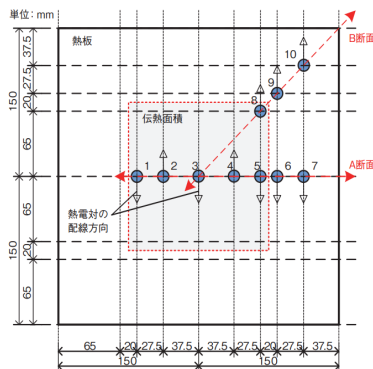
3.3 最適な測定条件の検討

熱量測定の不確かさ低減手法はいくつか考えられるが、一般的な20K程度よりも温度差を付け、熱流密度を増大させる測定が、最も容易かつ有効な手法である。しかしながら、保護熱板法では測定時の温度差を付けすぎると、側面方向（試験体端面方向）への熱移動量が増大するため、主熱板部分での一次元熱流の確保が難しくなる。特に真空断熱材は、芯材に比べ熱伝導率の大きい被覆材があるので、被覆材表面で側面方向への熱移動が

生じやすくなると考えられる。言い換えれば、真空断熱材の熱伝導率測定には、温度差を付けることで不確かさを低減しつつ、一次元方向以外への熱移動の影響がさほど生じない条件（以下、最適な温度差条件という）が存在するといえる。そこで、この条件を検討するため、複数の真空断熱材試験体を対象に、温度差の異なる条件における試験体表面の温度分布の検証を行った。さらに、一部の真空断熱材試験体については、温度差の異なる条件における熱伝導率および熱抵抗の測定を行った。

真空断熱材の被覆材の影響を把握するため、表 2 に示す全試験体を対象に、熱伝導率測定時の表面温度分布を測定した。温度測定は、熱電対を伝わる熱移動の影響をできるだけ小さくするため、素線径 $\phi 0.06\text{mm}$ の T 熱電対を用いた。測定位置は各面 10 点とし、T 熱電対は厚さ 1mm のシリコンゴム製の緩衝材に貼り付けた。温度測定位置を図 8 に示す。

測定時の温度条件は、平均温度 23°C 、温度差 10K, 20K, 30K, 40K の 4 条件（ただし、試験体 No.2, No.3, No.5 は 20K のみ）とした。試験機関は JTCCM の 1 機関とし、測定方式は試験体 1 枚方式（熱流方向：下向き）とした。



●は温度測定位置を示す。

図 8 温度測定位置

また、測定時の温度差が測定結果に与える影響を把握するため、表 2 の試験体を対象に、温度差が異なる複数の条件で熱伝導率を測定した。測定方法は、3.1 の検討と同様に 3 機関のラウンドロビン試験とした。温度条件は、いずれも平均温度 30°C 、温度差 10K, 20K, 30K, 40K の 4 条件とし、

それ以外の条件は、3.1 の検討と同様とした。

3.4 試験結果および考察

3.4.1 表面温度分布の検証

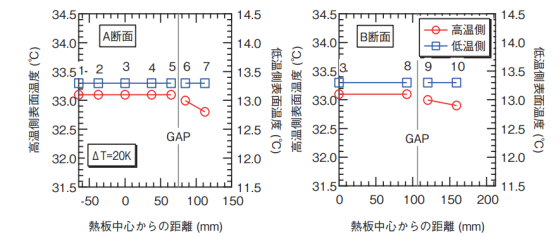
表面温度測定結果の一例を図 9 に示す。いずれの条件においても、主熱板部分の温度は 0.1°C 以内で一致しており、試験体や温度差条件の違いによる明確な傾向は示されていない。熱板全体で見ると、保護熱板部分の端部に近い位置ほど周囲温度に近づく傾向は見られるが、寸法 $300\times 300\text{mm}$ の基準板の試験体 No.2 と真空断熱材の試験体 No.3 はほぼ同様の傾向を示している。これらの結果より、芯材寸法が加熱板・冷却板と同程度であれば、被覆材の影響はさほど大きくならないことがわかる。一方、芯材寸法が小さく、かつ、温度差が大きいほど、主熱板と保護熱板部分で顕著な温度差が生じる結果が示されている（図 9 c, d）。このような試験体および試験条件では、主熱板部分での一次元熱流の確保が難しくなり、温度差を付けるほど測定精度が低下することが懸念されるといえる。

3.4.2 最適な温度差条件の検討

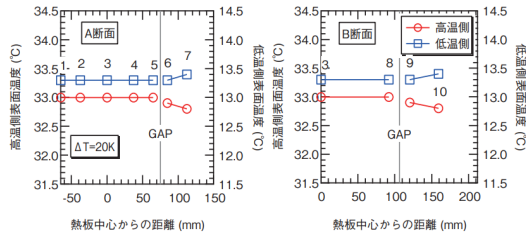
一般に、側面方向への熱移動量は温度差が小さくなるほど減少するから、熱伝導率測定結果（図 10）をもとに、温度差と側面方向への熱移動量の関係（以下、感度という）を求めた。また、これに熱伝導率の不確かさを加味した結果から、最適な温度差条件の推定を試みた。

3 機関の平均値で見ると、熱伝導率は温度差の増加に伴いほぼ直線的に増大していることから、感度は測定結果を直線回帰して求めた（図 10）。また、この感度に熱伝導率の標準不確かさを加えた結果を図 11 に示す。最適な温度差は、感度と標準不確かさの合計値が最小となる条件といえるので、真空断熱材の試験体 No.4 は 20～30K 程度とするのが妥当といえる。

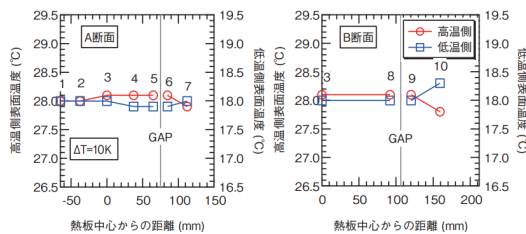
なお、ここで紹介した事例は 1 仕様の検討結果であり、最適な温度差条件は試験体や装置の仕様によっても異なると考えられ、今後より詳細な検討が必要である。また、図 11 に示す標準不確かさは、標準形状の保護熱板法（試験体 1 枚方式）の装置において評価した一例であり、被覆材や表面のしわや凹凸の影響は加味していない。



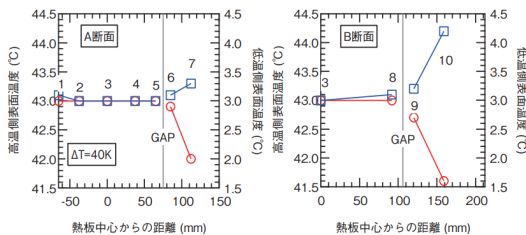
a) 試験体 No.2 (ボード系断熱材), 温度差 20K



b) 試験体 No.3 (真空断熱材), 温度差 20K



c) 試験体 No.7 (真空断熱材), 温度差 20K



d) 試験体 No.7 (真空断熱材), 温度差 40K

図 9 各試験体の表面温度分布測定結果

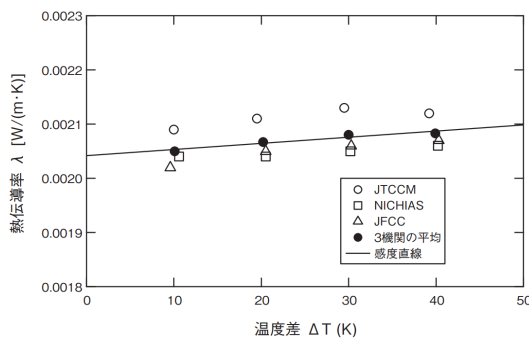


図 10 温度差を変化させたときの各測定機関の熱伝導率の測定結果 (試験体 No. 4)

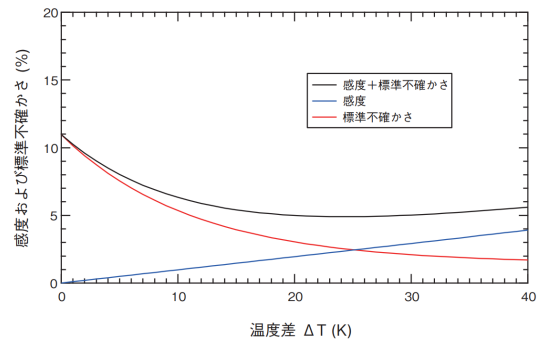


図 11 表面温度差と感度および標準不確かさの関係

4. おわりに

本稿では、建築用断熱材の熱伝導率の測定方法として、保護熱板法と熱流計法を紹介するとともに、断熱材の高性能化に伴う測定上の課題を紹介した。本稿が熱伝導率測定に携わる方々の参考になれば幸いである。

参考文献

- [1] JIS A 1412-1, 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第 1 部：保護熱板法 (GHP 法)
- [2] JIS A 1412-2, 熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法—第 2 部：熱流計法 (HFM 法)
- [3] 田坂太一ほか, 熱伝導率のトレーサビリティについて, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.107-108, 2005.
- [4] 経済産業省委託平成 24 年度国際標準開発事業, 低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法の標準化成果報告書, 2013.
- [5] 経済産業省委託平成 25 年度社会ニーズ (安全・安心)・国際幹事等輩出分野に係る国際標準化活動, 低熱伝導率材料の熱伝導率測定方法の標準化成果報告書, 2014.

近年における断熱材の熱伝導率評価方法 Evaluation Methods for Thermal Conductivity of Thermal Insulation in Recent Years

大村 高弘 (和歌山工業高等専門学校)
Takahiro OHMURA (Wakayama College)
e-mail: oomura@wakayama-nct.ac.jp

1. はじめに

断熱材の熱伝導率測定には、古くから主に保護熱板法 (GHP 法) [1]が使用されており、比較法や熱流計法 (HFM 法) [2], さらに一部では熱線法[3]なども使用されている。断熱材は様々な素材を基に製造されているため、多くの種類が存在することになるが、基本的には繊維質断熱材や粉末質断熱材、発泡質断熱材などに大別できる[4]。そして、それらの熱伝導率は、断熱材の温度とかさ密度により大きく影響を受けるが、大雑把に $0.02 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \sim 0.5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 程度である。金属やプラスチックなどの熱伝導率に比べて桁違いに小さいのは、断熱材が繊維や粒子などの素材とそれらが作り出す空隙から構成されているためと考えられる。素材同士も完全には結合しておらず、お互いに接触しているだけであったり、有機あるいは無機のバインダーで結合されている程度であるなど、素材自身の熱抵抗よりも遥かに大きな接触熱抵抗を有している。そして、さらに熱伝導率を非常に小さくしているのが空隙の存在である。この空間には気体しか存在していないため、静止気体による伝熱とふく射による伝熱となる。自然対流による伝熱の可能性もあるが、空隙が非常に小さいことと、その小さな空隙に生じる温度差も小さいことから、よほどの条件でない限りは、対流による影響はほとんど無いと考えられる[5]。また、ふく射による伝熱が熱伝導率に与える影響は、絶対温度の3乗にほぼ比例しており、高温領域になればなるほど顕著になる[5]。

この様な、非常に複雑な内部構造を持つ断熱材の熱伝導率を高精度に評価することは、実は極めて難しいと考えられる。断熱材を構成している繊維や粒子の熱伝導率は数十 $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$, 空隙内の空気熱伝導率は温度にもよるが $0.02 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} \sim 0.05 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, 素材同士の接触点における熱抵抗に至っては、ほとんど把握できていない状況である。また、繊維や粒子、空隙の分散状況が、断熱材の均一性に

大きく影響するため、断熱材内で温度の不均一性が存在する場合は、熱伝導率の測定ばらつきを非常に大きくしてしまう。

したがって、断熱材の熱伝導率を評価する場合、どの測定方法によるものなのか、試験体の厚さや大きさ、測定回数、試験体平均温度、試験体にかかる温度差など、様々な条件を考慮する必要がある。例えば熱線法は、熱線周縁の数 mm 付近の熱伝導の情報に基づく熱伝導率であり、繊維質断熱材のような特定の方向に配向性がある場合は適用できず[6], また、GHP 法では装置間のばらつきが非常に大きく、そのばらつきは条件によっては $\pm 15 \% \sim 20 \%$ にも達してしまうことが報告されている[7]。

このような問題に対して、近年、断熱材の熱伝導率を正確に決定する手段の一つとして、異なる測定方法による比較が検討されている[7]。科学の世界では当たり前と考える方も多いと思うが、断熱材の熱伝導率測定では、ISO や JIS として認められている標準測定方法は GHP 法と HFM 法であり、しかも HFM 法は標準物質を使用しているため、それが存在しない熱伝導率領域や温度領域では十分な精度を得られないという問題を抱えている。そのため、異なる測定法による比較が非常に難しかったと考えられる。このような問題に対して、近年、新たに周期加熱法[8]が ISO として確立され、GHP 法と周期加熱法、さらには試験体が限定されるが熱線法などとの比較が行われるようになった。その結果、異なる測定方法であっても、全く同じ試験体であれば $-170^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 付近の温度範囲で、 $\pm 10 \%$ 以内で一致することが示された[7]。さらに、筆者の主観が含まれてしまうかもしれないが、温度と熱伝導率の近似式を比較すれば、ほぼ $\pm 5 \%$ 程度で一致する傾向にあると思われる。

しかしながら、GHP 法と周期加熱法だけでは測定精度を高めるほどの十分な比較とは言えず、両者の差を明らかにしたというだけになってしまう可

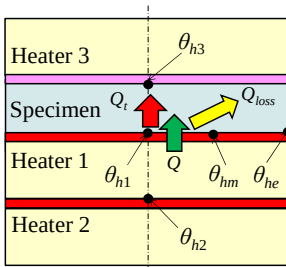


Fig. 1 Schematic diagram of measuring part.

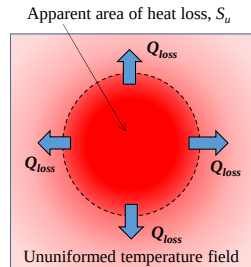


Fig. 2 Temperature field at the high temperature surface of the specimen.

能性もある。さらに両測定方法に基づく装置は非常に高価であり、多くの技術者が簡便に測定できないという問題もある。断熱材の開発・製造現場で簡単かつ正確に熱伝導率を測定することが出来てこそ、より高性能な断熱材の開発および普及につながると考えられる。そこで、新たに熱流分離法という測定方法を開発した。現在、室温付近から 1000℃ 付近までの測定に成功しており、ここでは、その研究内容の一部について簡単に紹介することにする。

2. 熱流分離法

2.1 測定原理

図 1 に測定部の概念図を示す。下からヒータ 2、ヒータ 1、試験体、ヒータ 3 を重ねただけの単純な構造となっている。試験体の低温面は自然放冷ではなく、適度な放熱を維持しつつ、出来るだけ均一な面内温度分布を持たせるためにヒータ 3 を設置して温度を制御している。また、ヒータ 2 の温度をヒータ 1 のそれと等温 ($\theta_{h1}=\theta_{h2}$) になるように温度制御することで、ヒータ 1 で発生した熱流 Q の大部分が試験体に流入できるような構造とした。したがって、熱流 Q は試験体内で厚さ方向へ伝播する熱流 Q_t と、それ以外の方向への熱流 Q_{loss} の和であると仮定でき、

$$Q = Q_t + Q_{loss} \quad (1)$$

と表すことができる。さらに、 Q_t はフーリエ則に従い、 Q はフーリエ則と同じ形で表せると仮定すれば、

$$Q = \lambda_c \frac{\Delta\theta}{d} S \quad (2), \quad Q_t = \lambda_t \frac{\Delta\theta}{d} S \quad (3)$$

となる。ここで、 λ_c を比例係数、 λ_t を試験体の厚さ方向の熱伝導率、 $\Delta\theta$ を試験体の厚さ方向の温度差、 S を熱流通過面積、 d を試験体厚さとした。

一方、熱損失 Q_{loss} はヒータ 1 から試験体に流入

する熱流 Q の一部であり、 Q は S に比例すると見なすことが出来るから、 Q の一部である Q_{loss} は、図 2 に示すような見かけの面積 S_u で表すことが可能である。 S_u は面の中心からの距離の自乗で表すことができ、さらにその距離が、面内温度分布から求まる温度差 $\Delta\theta_{loss}$ ($=\theta_{h1}-\theta_{hm}$) と一対一で対応するとすれば、 Q_{loss} は比例係数を H として、

$$Q_{loss} = H \Delta\theta_{loss}^2 \quad (4)$$

と置ける。ここで、 θ_{hm} は試験体加熱面内における温度分布から得られる積分平均温度であり、 $\Delta\theta_{loss}$ で見かけの面積を表現できる程度の比較的なだらかな面内温度分布を仮定している。式(2)から式(4)を式(1)に代入すると、

$$\lambda_c = \lambda_t + a \Delta\theta \Theta^2 \quad (5)$$

を得る[9]。ここで、係数 a 、変数 Θ はそれぞれ

$$a = \frac{H \cdot d}{S} \quad (6), \quad \Theta = \frac{\Delta\theta_{loss}}{\Delta\theta} \quad (7)$$

である。さらに

$$x = \Delta\theta \Theta^2 \quad (8)$$

と置くと、

$$\lambda_c = \lambda_t + ax \quad (9)$$

となる。よって、試験体側面付近の雰囲気温度に影響される $\Delta\theta_{loss}$ あるいは試験体の厚さ方向における温度差 $\Delta\theta$ を変化させることで、 x が変数となって λ_c との直線関係が得られ、その切片が試験体の厚さ方向の熱伝導率 λ_t となる。したがって、この測定方法では、 Q_{loss} を測定して Q から差し引いて Q_t を求めているのではなく、 Q_{loss} がゼロとなる $\Delta\theta_{loss}$ を推定することで厚さ方向の熱伝導率を求めていることになる。

図 3 に、試験体平均温度 500℃ における測定例（加熱パターン）の模式図を示す。高温側ヒータと低温側ヒータの温度を 3 段階にして $\Delta\theta$ を変化させ、それぞれの段階で熱的定常状態に達した領域の温度データから係数 λ_c と変数 x を求め、図 4 に示すようにプロットすることで導かれる近似直線から厚さ方向の熱伝導率 λ_t を得る。

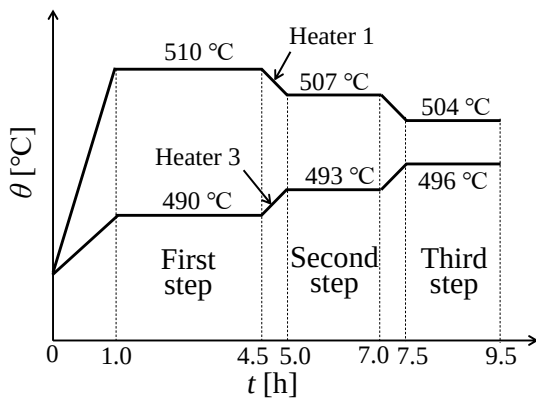


Fig. 3 Heating pattern.

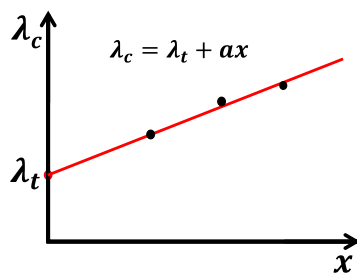


Fig. 4 Thermal conductivity measurement image.

2.2 測定装置

図5に測定系の模式図を示し、図6に測定部の模式図を示す[9, 10]. 両図に示すように下から順にヒータ2、ヒータ1、試験体、ヒータ3と重ねだけの構造であり、周囲に囲いは無く、室温に曝されている状態である. 3つのヒータは全て同じセラミックスヒータであり、その厚さは、内部に埋め込まれたヒータ線と断熱部分を含めて約50 mmである. 試験体のサイズは約300 mm×300 mmであるが、既に、約150 mm×150 mmと150 mm×100 mmの2種類も検討しており、試験体の大きさに大きく影響しないことを確かめている[9-11]. ただし、150 mm×100 mmの装置では、最高温度が1000℃であったため、試験体及びヒータ1~3の周囲の雰囲気温度を制御するためのヒータを設置した[9]. ここでは、300 mm×300 mmの装置について主に説明し、測定例で異なるサイズの結果も併せて示す.

試験体の表面温度測定には、素線径0.32 mmのKタイプ熱電対（シースではなく素線の状態）を使用した. 設置した位置を図7に×印で示す. 図7のA面では中心に1つ、B面では中心からx軸方向とy軸方向に約37.5 mm間隔で3つずつ、これらとは逆方向の約75 mmの位置に1つずつ、計9つの熱

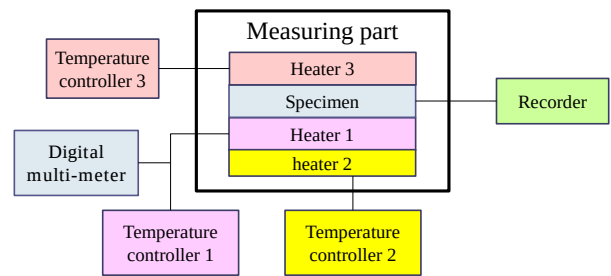


Fig. 5 Schematic diagram of measurement system.

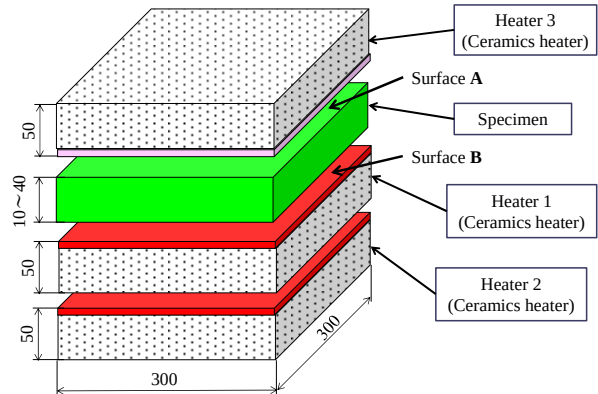


Fig. 6 Schematic diagram of measurement part.

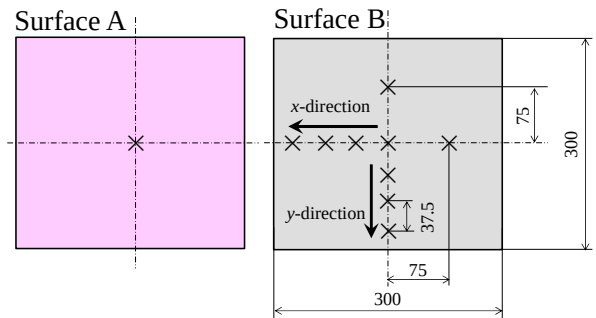


Fig. 7 Position of thermocouples.

電対を配置した. 熱電対は、試験体の表面に接触できるように直接配置したが、その設置によりヒータと試験体の間に隙間が生じる可能性があるため、ヒータの表面側に厚さ2 mm程度のセラミックスブランケットを敷いて、クッション材の役割を担わせた. ヒータ1で発生する電力 Q は、あらかじめヒータの抵抗を測定しておき、測定中にヒータにかかる電圧を測定することで求めた.

各ヒータの温度制御装置はチノー製 SY2111-00、各部の温度を測定するデータロガーは GRAPHTEC midi LOGGER GL900 をそれぞれ使用した.

3. 測定例

3.1 ケイ酸カルシウム保温材

配合がほぼ同じで、かさ密度が異なる3種類のケ

Table 1 Calcium silicate insulation

Specimen	Size [mm ³]	ρ [kg/m ³]
A	300.0×300.2×20.0	129
B	300.0×300.0×20.1	135
C	300.0×300.0×20.1	133

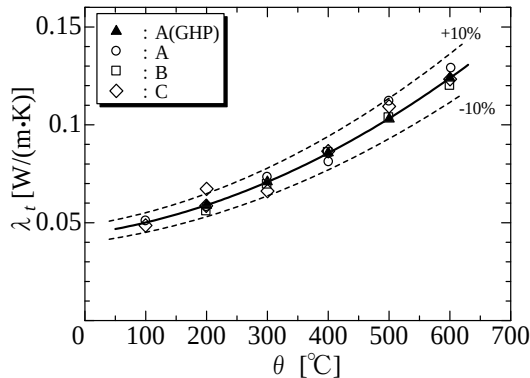


Fig. 8 Thermal conductivity of Calcium silicate. (300 mm×300 mm) [12].

イ酸カルシウム保温材を試験体とした。それぞれの試験体を A, B, C とし、それらの寸法とかさ密度を表 1 に示した。これらの内、試験体 A のみが、保護熱板法 (GHP 法) により別途測定されている。ただし、今回の測定で使用した試験体 A は、GHP 法で測定したものではなく、それと同ロットで製造されたものから切り出した試験体である。

図 8 に、ケイ酸カルシウム保温材の熱伝導率測定結果を示す[12]。黒三角印は GHP 法により得られた試験体 A の結果であり、白丸印、白四角印、白ひし形印は、それぞれ熱流分離法による試験体 A, B, C の結果である。また、実線は、GHP 法により測定した試験体 A の結果から最小二乗法によって得られた二次近似曲線であり、破線は実線に対して±10%の値を示している。

図 8 より、熱流分離法による試験体 A の熱伝導率が、GHP 法による結果と非常によく一致しているのが分かり、100～600℃の温度範囲で安定して測定できることが示された。

3.2 セラミックスブランケット

試験体は、149.6[mm]×99.2[mm]、厚さ 14.23[mm]、かさ密度 180[kg/m³]のセラミックスファイバー断熱材である。

図9に、100℃～1000℃の温度範囲におけるセラミックスファイバー断熱材の熱伝導率を示す[13]。●印が熱流分離法で、その試験体サイズが約300mm×

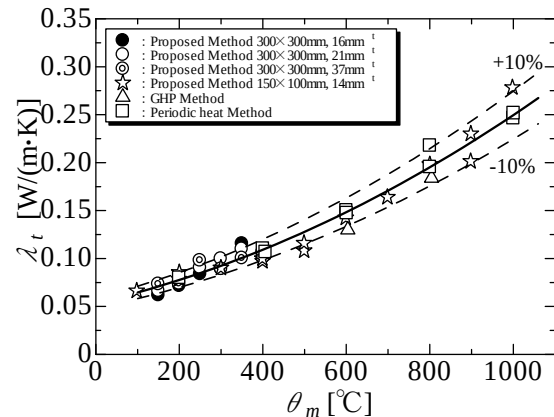


Fig. 9 Thermal conductivity of thickness direction of Ceramics fiber insulation [13].

300mm、厚さが約16mm、○印が同方法、同サイズで厚さ約21mm、◎印が同じく厚さ37mm、☆印が同方法で試験体サイズ約150mm×100mm、厚さ約14mmの測定結果である。さらに、△印と□印が、それぞれGHP法および周期加熱法による測定結果である。実線は、☆印の結果を除いた全ての測定結果を基に導いた近似二次曲線であり、破線は、実線に対して±10%を表している。図9から、試験体サイズが大きく異なってもその測定結果(☆印)が、他の測定方法とほぼ±10%以内で一致していることが示された。

3.3 衣服 (機能性シャツ)

市販の T シャツ (黒 T シャツ) と機能性シャツ (黒色) の熱伝導率を測定した。市販の T シャツのサイズと密度を表 2 に示す。ここでは、11 枚を一

Table 2 Black T-shirt

Position	Quantity	Size [mm ³]	ρ [kg/m ³]
High temperature side	11	150×150×4.79	261
Low temperature side	11	150×150×4.80	253

Table 3 Black functional T-shirt

Position	Quantity	Size [mm ³]	ρ [kg/m ³]
High temperature side	5	150×150×3.27	352
Low temperature side	5	150×150×3.30	349

組にして、ヒータ 1 の上に重ねた測定であり、布一枚の厚さは、約 0.436 mm である。また、機能性シャツ（黒色）のサイズと密度を表 3 に示す。布一枚の厚さは約 0.656 mm である。

図10に、45 °C～90 °Cの温度範囲における布の厚さ方向の熱伝導率 λ_t と λ_p をそれぞれ示す[14]。ここでは詳細を割愛するが、面内方向の熱伝導率測定は、試験体側面からの放熱を静止空気の熱伝導率で推定することで求めている[15]。○印が黒Tシャツの厚さ方向の熱伝導率、●印が機能性シャツの厚さ方向の熱伝導率、△印が黒Tシャツの面内方向の熱伝導率、▲印が機能性シャツの面内方向の熱伝導率である。図10より、機能性シャツの面内方向の熱伝導率が、黒Tシャツのその約3倍であり、温度とともに減少していくのが分かる。

図11に、熱伝導率が0.6 W/(m・K)以下の拡大グラフを示す。実線は黒Tシャツの厚さ方向の熱伝導率の平均値（0.122 W/(m・K)）、一点鎖線は機能性シャツの厚さ方向の熱伝導率の平均値（0.0777 W/(m・K)）、破線は黒Tシャツの面内方向の熱伝導率の平均値（0.318 W/(m・K)）である。図8より、三者ともばらつきはあるものの、温度に対してほぼ一定の値を示していることが分かる。

黒Tシャツの厚さ方向の熱伝導率に対する面内方向のそれは約2.7倍であるが、機能性シャツのそれは約15倍にも達していた。したがって、機能性シャツは、体の一部が発熱すると面内を伝って温度の低い方へ放熱し、逆に低温部分があると周囲から熱流が集まりやすく、体全体を平均的な温度にする役割を担っている可能性が考えられる。

4. まとめ

一般的に、定常法による熱伝導率測定では、試験体内部に一次元熱流を実現することが必要条件とされている。そのため、非常に複雑で高価な測定装置が必要となり、測定最高温度も500°Cから800°C程度が限界となっている。しかしながら、ここで紹介した熱流分離法では、測定しようとしている伝熱方向と、それ以外の方向に熱流を分離するため、試験体内部の温度場が不均一であっても定常法としての測定が可能となる。そのため、試験体とヒータを重ねるだけの簡単な構造の装置となり、試験体サイズも、150 mm×100 mmの長方形から300 mm×300 mmの正方形のものまで測定可能であり、測定温度

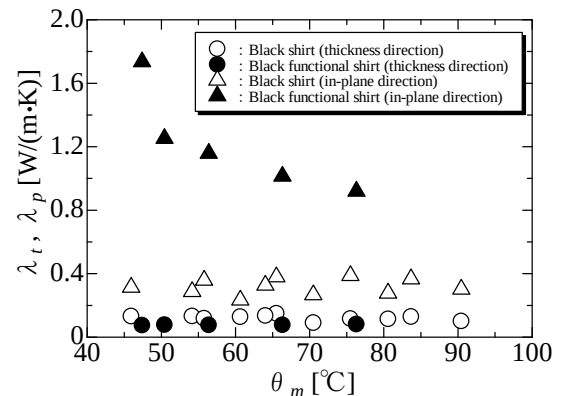


Fig. 10 Thermal conductivities of two kinds of shirts in thickness and in-plane directions [14].

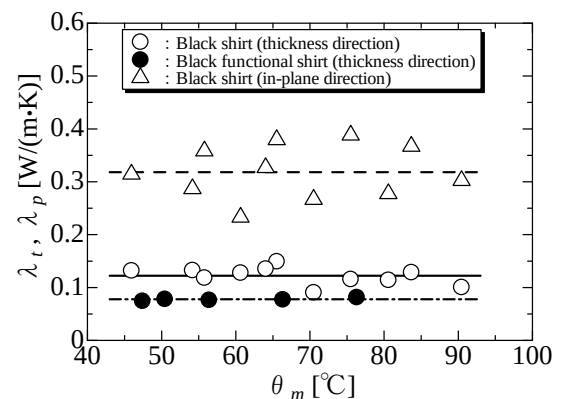


Fig. 11 Enlarged view of Figure 10 [14].

範囲は室温から1000°C付近に至ることが示されている。また、この測定原理に基づく装置は、簡単に自作が可能であり、断熱材開発者のみならず、様々な材料開発者が、自ら開発した材料の熱伝導率を容易に測定できると考えられる。今後、益々活発化すると予想される省エネ活動の現場で、熱流分離法がその一助になることを願っている。

参考文献

- [1] ISO 8302, Thermal Insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Guarded hot plate apparatus.
- [2] ISO 8301, Thermal Insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties - Heat flow meter apparatus.
- [3] JIS R 2251-1, 耐火物の熱伝導率の試験方法, 第1部：熱線法（直行法）
- [4] 宗宮重行, 大野留治, 金野正幸, 木村脩七, 角岡勉, 松尾陽太郎編, セラミックスの機能と応用, pp.212-216, 技報堂出版 (2002)

- [5] 大村高弘, 坪井幹憲, 富村寿夫, 繊維質断熱材の有効熱伝導率に関する研究, 九州大学機能物質科学研究所報告 **16** (2002) 13.
- [6] Ohmura, T. et al., Estimation of the Mean Thermal Conductivity of Anisotropic Materials, Int. J. Thermophysics, **23-3** (2002) 843.
- [7] 大村高弘, 異なる測定法による断熱材の熱伝導率比較, 熱物性, **21-2** (2007) 86.
- [8] ISO 21901, Thermal Insulation – Test method for thermal diffusivity – Periodic heat method.
- [9] 大村高弘, 石井健登, 田坂太一, 近藤光, 内藤牧男, 不均一温度場における高温下での熱伝導率測定, 熱物性, **34-4** (2020) 137.
- [10] 大村高弘, Tseng-Wen Lian, 近藤 光, 早坂 良, 内藤牧男, 不均一温度場における熱伝導率測定方法, 熱物性, **31-4** (2017) 166.
- [11] 大村高弘, 田坂太一, 石井健登, 辻大河, 南出瑞穂, 早坂良, 近藤光, 内藤牧男, 断熱材の簡便な熱伝導率測定技術の開発, 粉体工学会誌, **56-2** (2019) 74.
- [12] 石井健登, 辻 大河, 南出瑞穂, 早坂 良, 大村高弘, 不均一な温度勾配を持った測定系における熱伝導率測定方法に関する研究, 第 39 回 日本熱物性シンポジウム, E142 (2018).
- [13] 石井健登, 辻大河, 南出瑞穂, 早坂良, 田邊大貴, 大村高弘, 小試験体の不均一温度場における熱伝導率測定方法に関する研究, 第 40 回日本熱物性シンポジウム講演論文集 B153 (2019)
- [14] 近藤海斗, 平野有基, 辻大河, 南出瑞穂, 大村高弘, 布の熱伝導率測定, 第 41 回日本熱物性シンポジウム講演論文集 A315 (2020).
- [15] 辻 大河, 近藤海斗, 平野有基, 大村高弘, 断熱紙の熱伝導率測定に関する研究, 日本伝熱学会論文集 Thermal Science & Engineering **30-2** (2022) 45.
-

保護熱板法による断熱材の熱伝導率測定

Measurement of Thermal Conductivity for Insulation Materials by Guarded Hot Plate Method

小宮 敦樹 (東北大学)

Atsuki KOMIYA (Tohoku University)

1. はじめに

産業革命以降の人類の社会活動が地球環境にもたらした影響は、ここ数十年間に集中して多くのところで議論されており、エネルギー資源の枯渇問題、地球温暖化、人口爆発、環境破壊などがその議論の中心となっている。これらのキーワードは互いに連携しており、例えば、人口増加や発展途上国の近代化に伴う一次エネルギー消費量の増加が原因となり、温室効果ガスの排出増加が地球温暖化などの環境問題を加速させている。この環境破壊という地球規模の問題に対しては、電力使用の抑制の他に代替燃料や再生可能エネルギーによる電力の確保などが解決策の主軸として、その活動は地球規模で大きな動きへと変わりつつある。

このような背景の中、エネルギーの生成・確保・利用・フローについて俯瞰的にもう一度考えてみると、環境問題解決のためにはエネルギーの生成方法や利用方法以外にも様々な観点から解決に貢献できることがわかる。その一つが伝熱を抑制する断熱技術の開発であろう。必要な熱量を必要な分だけ必要な時間にわたって特定の場所に留めておく、という技術はエネルギーの無駄な利用や未利用エネルギーの廃棄といった問題を解決し、そこに必要な技術としては蓄熱技術や断熱技術を挙げることができる。現在では上述のような背景に基づき、断熱性能向上に向けて多種にわたる断熱材の開発が進んでいる。既存断熱材は、多孔質断熱材、繊維系断熱材や粉末状断熱材などに大きく分類できる[1]が、近年ではシリカエアロゲル等の新たな材料による断熱材の研究が進んできている[2][3]。これら技術開発において、新素材の熱伝導率測定を高精度に行うことは、素材性能評価において最も重要なことであるが、田坂らは試料の熱伝導率が低いことによる測定時の誤差の影響が相対的に大きくなり、性能評価に影響が出ること指摘している[4]。

そこで本稿では、既存の熱伝導率測定法である保護熱板法(GHP法)に焦点をあて、ペルチェモジュールを用いた改良 GHP 法による断熱材熱伝導率測定の高精度化を行った研究について紹介をする。

2. 小型 GHP 装置の開発

熱伝導率測定法はこれまでに多くの手法が開発されており、試料が有する想定される熱伝導率の値により図1に示すように適用可能な手法が概ね決まってくる[5]。断熱材の熱伝導率は主として $\sim 10^{-3} \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 程度であることから、本研究では GHP 法を採用した。また、GHP 法は定常法であり、測定に要する時間が長時間になることから、装置の小型化を行うことで測定時間の短縮化を試みた。

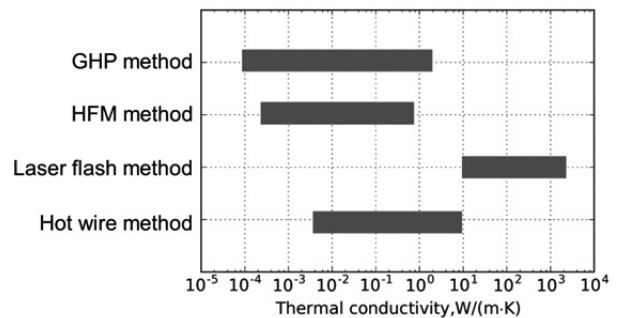


Fig. 1 Measurement method for thermal conductivity.

2.1 小型 GHP 装置の設計に向けた数値実験

小針らはペルチェモジュールを主熱ヒータと保護熱板間の温度差計測に用いた保護熱板装置を提案し、断熱材の高精度熱伝導率計測を実現した[6]。本装置では、主熱板と保護熱板間の温度差を $\pm 20 \mu\text{K}$ で制御することが可能であることを報告している。その一方で、計測装置の温度制御手法の問題や装置自体の大きさにより、計測に長時間を要することが問題となっていた。そこで新たに装置を小型化し、またペルチェモジュールを計測だけ

ではなく温度調節に用いることで短時間での温度制御を行った。装置製作に先立ち、数値計算を援用して小型化における温度制御の影響について数値実験を行い、設計に向けた指針を検討した。本計算で用いた熱伝導数値解析モデルを図 2 に示す。主熱板および保護熱板は高熱伝導率が望ましいため、純銅とした。冷却板は高熱伝導率と試料の変形を抑制するため、軽量であることが望ましいという観点から純アルミニウムとした。主熱ヒータは金属箔抵抗を利用し、保護熱ヒータは保護熱板周囲からの境界熱源で再現した。試料表面温度計測には、実験と同様にサーミスタを金属ブロック内に挿入する構造を想定し、試料から 2 mm の位置の温度を代表温度とした。支配方程式は熱拡散方程式を用いた。また、表 1 に熱伝導解析に用いた物性値を示す。

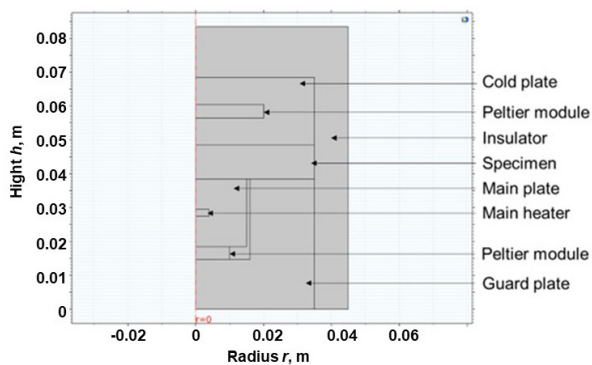


Fig. 2 Axisymmetric numerical model.

Table1 Thermophysical properties of each component

	Cu	Al	Insulator	Peltier module
k [W/(m·K)]	398	225	0.028	1.18
c_p [J/(kg·K)]	3.86	900	15.9	1
ρ [kg/m ³]	8880	2688	1900	1.23

主熱板と冷却板の温度が定常になるまでに要する時間および定常時に装置内に生じる温度分布の結果をそれぞれ図 3,4 に示す。主熱板および冷却板の温度は概ね 3600 秒程度で目標温度に達することが示された。また、図 4 内の色線に示されるように主熱板と保護熱板間において 2 mK 程度生じることが示されたが、試料内には一次元温度分布の形成が十分に可能であり、計測精度は十分に担保できているものだと考えられる。以上の結果

より、本研究では数値解析を行った寸法と同サイズを実験において採用することとした。

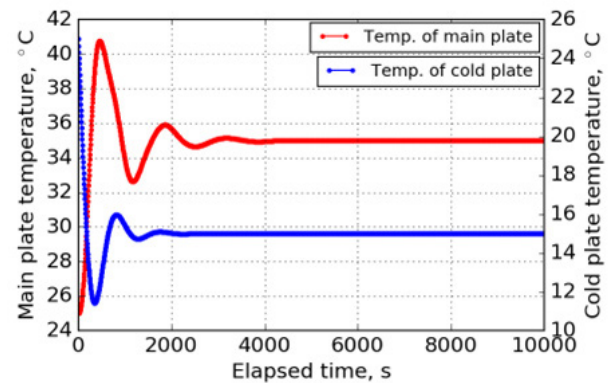


Fig. 3 Numerical simulation result of temperature variations of main and cold plates.

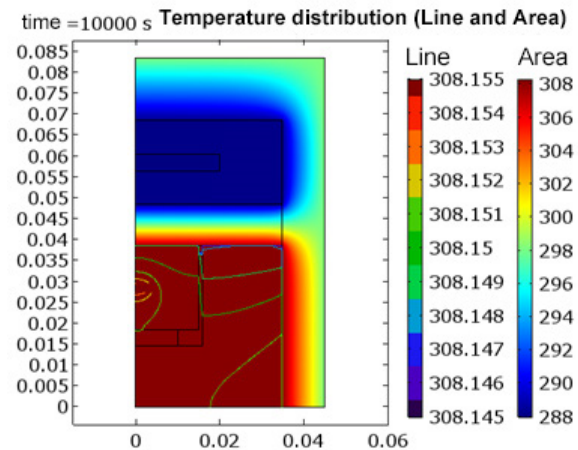


Fig. 4 Temperature distribution in GHP apparatus.

2.2 小型 GHP 装置の製作

前述した数値実験の寸法に基づき、小型 GHP 装置を製作した。概略図および写真を図 5 に示す。主熱板は、厚さ 15 mm、半径が 15 mm の純銅製で、主熱板の中心に主熱ヒータとして超精密抵抗器を配置し、主熱ヒータの印加電圧は直流電源を用いて制御した。保護熱板は、厚さ 42 mm、半径 35 mm の純銅製で、保護熱板周囲は、シリコンラバーヒータで覆い加熱を行った。保護熱板上面中央部に深さ 19 mm、半径 16 mm の穴を加工し、穴底に、厚さ 4 mm、10×10 mm のペルチェモジュールを設置し、その上に主熱板を設置した。このとき、接触熱抵抗を低減するためにペルチェモジュールの両面に真空用グリスを塗布した。主熱板と保護熱板間の温度差によりペルチェモジュールに生じる

微小な熱起電力はデジタルマルチメータで測定した。また、多孔質断熱材で装置周囲を覆い、熱損失を防ぐ構造とした。

冷却板は、厚さ 20 mm、半径 35 mm の純アルミニウム製で、ペルチェモジュールを用いて温度を一定とし、上部アルミニウム円盤および恒温槽の空気はペルチェモジュールの排熱側として機能している。また、測定試料と接する面上の NTC サーミスタの抵抗はデジタルマルチメータを用いて測定した。

主熱ヒータは、主熱板・保護熱板間の温度差がゼロとなるように調節する必要がある。本装置では、主熱板と保護熱板の間に配置したペルチェモジュールの熱起電力を測定することで当該温度差を求めた。求めた温度差を出力値、主熱ヒータの印加電圧を入力値として、次式で表される PID 制御を行い、主熱板・保護熱板間の熱損失の低減を図った。

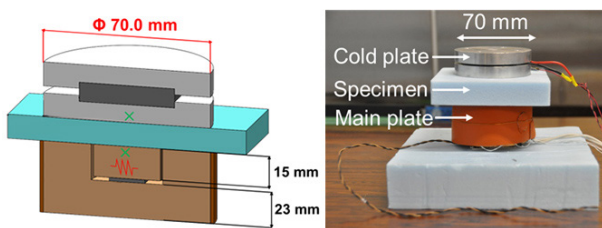


Fig. 5 Schematic and photo of developed small GHP apparatus.

2.3 精度評価

上記製作した GHP 装置の信頼性を評価するために、市販されている多孔質断熱材（Styrofoam）の計測を行った。このとき、様々な厚さの Styrofoam の熱伝導率計測を行うことで、熱抵抗増加に伴う計測精度の評価を行った。室温および試料平均温度は 25°C、主熱板温度は 35°C、冷却板温度は 15°C とした。

図 6 にペルチェモジュールによって測定された主熱板・保護熱板間の温度差を示す。本測定装置では、 ± 0.04 mK で制御可能であることが示され、従来のサーモパイルを用いた測定より高感度な温度差の測定が可能であることが示された。

また、表 2 に試料の厚さ、熱伝導率のカatalog 値から算出した熱抵抗、測定した熱抵抗および両者の差異を示す。この結果より、試料厚さの増加に伴い、熱伝導率計測の差異が増加傾向にあるこ

とが示された。試料厚さの増加に伴い差異が増加する傾向にあるのは、定常状態において温度分布の一次元性が低下することが原因として考えられる。試料端部からの熱損失を考慮すると、試料の厚さ増加に伴い計測による差異は増加すると考えられる。そこで、計測による際を 5%程度にするには試料の厚さは 30 mm 程度にする必要があると考えられる。

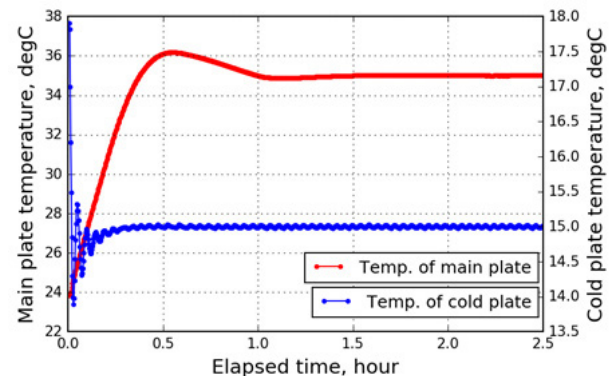


Fig. 6 Measurement result of temperature variation of main and cold plates.

Table 2 Thermal resistances and measurement error.

Thickness , mm	Thermal resistance, m ² ·K/W		Difference , %
	reference	measured	
10	0.357	0.351	1.74
20	0.714	0.735	-2.94
30	1.071	1.128	-5.26
40	1.429	1.569	-8.06
50	1.786	1.934	-8.30

3. GHP 法を用いた断熱材の有効熱伝導率測定

構築した小型 GHP 装置を用いて、諸種断熱材の有効熱伝導率測定を行った。断熱材の熱伝導率はおおよそ 30 mW/(m·K)程度であり、空気とほぼ同じ熱伝導率である。近年ではエアロゲルやフュームドシリカといったナノ多孔質断熱材の開発も進んでおり、大気圧下においても 15 mW/(m·K)という空気よりも低い熱伝導率を実現している[7]。断熱材の広い空隙率範囲において、断熱材の正味の熱伝導率は気体による熱輸送が無視できないことが知られている[8]。また、空隙率の減少に伴い固体熱伝導率は増加し、ふく射熱伝導率は減少していくといった傾向が見られる。そこで、小型 GHP 装置を真空チャンバ内に配置し、大気圧から低圧状態 (10⁻³ Pa) まで調整することで、有効熱伝導

率の圧力依存性の評価を行った[9]。また、ふく射による熱伝導の寄与を評価するために、有効熱伝導率の温度依存性についても計測を行った。

3.1 有効熱伝導率圧力依存性

実験装置の概略図を図7に示す。装置は主として、測定試料、測定試料に対して下部に位置する加熱板、上部に位置する冷却板によって構成される。加熱板と冷却板はともに円筒形で、加熱板は主熱板、保護熱板、主熱板と保護熱板の間に配置したペルチェモジュールにより構成される。また、チャンバの壁面温度を調整するために、チャンバ外壁にヒータを配置した。真空チャンバは、外径305 mmのステンレス鋼製である。大気圧から高真空まで圧力計測が可能である真空計を接続し、チャンバ内部の圧力を計測した。ターボ分子ポンプを真空チャンバに接続し、真空計の圧力が所望の圧力になるように手動でバルブを調整した。

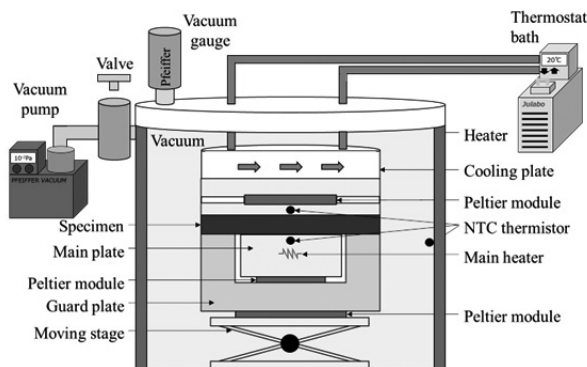


Fig. 7 Cross-sectional diagram of GHP apparatus in vacuum chamber.

ここでは、グラスウール、パーライト、シリカエアロゲルの熱伝導率の圧力依存性を計測した結果を紹介する。グラスウールは1枚が1.5 mm程度のシート状の試料を3層積層した構造となっている。パーライト層の厚さは4 mm、樹脂の厚さは4 mmのものをを用いた。計測に用いた試料の写真を図8に示す。試料寸法は110 mm×110 mm×11 mm, 100 mm×100 mm×5.1 mmおよび100 mm×100 mm×8 mmとした。真空チャンバ内の圧力を 10^{-3} ~ 10^5 Paまで制御することで、熱伝導率の圧力依存性の評価を行った。室温および試料平均温度は25 °C、主熱板温度は40 °C、冷却板温度は10 °Cとした。

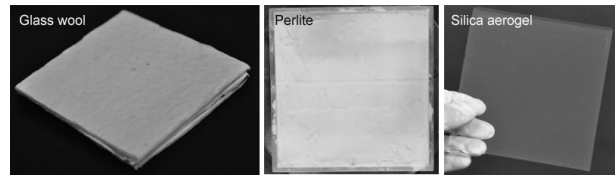


Fig. 8 Photos of several insulation materials.

計測したグラスウールとパーライトの有効熱伝導率の圧力依存性の結果を図9に示す。いずれの試料も有効熱伝導率が圧力に対して大きく変化する結果が得られた。パーライトの有効熱伝導率は大気圧状態において、高い値を示しており、これは試料内で対流が起こっている可能性が示唆される。また有効熱伝導率はそれぞれの伝熱形態に相互作用がないことを仮定していた。しかしながら、パーライト等のマイクロスケールの粉体系断熱材において、気体による熱輸送と固体による熱輸送の相互作用が生じていることが報告されている[10]。理想的に球状の粉体が接触している場合を考えると、固体同士の接触面を介する熱輸送、気体領域を介する熱輸送および固体部分と気体部分の双方を通過する相互作用による熱輸送が挙げられる。パーライトはこの相互作用の影響が大きく生じたため、大気圧において、空気よりも高い有効熱伝導率となったと考えられる。また、これらの断熱材を真空断熱材の芯材に用いる場合、内部圧力の低圧・真空維持が重要であると考えられる。

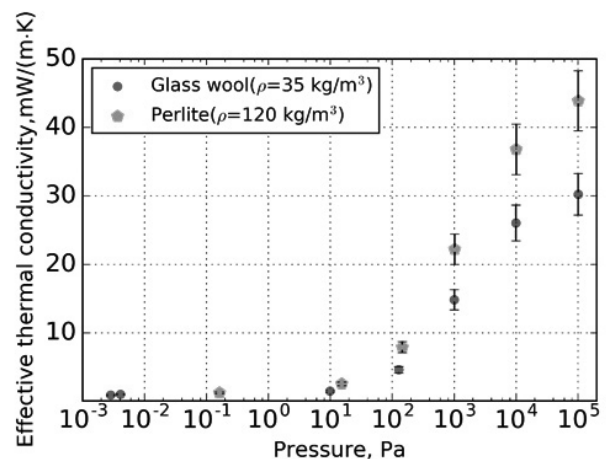


Fig. 9 Pressure dependence of thermal conductivity of glass wool and perlite.

次に計測した各密度のシリカエアロゲルの有効熱伝導率の圧力依存性を図10に示す。190 kg/m³

のシリカエアロゲルを除いて、有効熱伝導率は 10^4 Pa 以下において、概ね一定の値となった。これは、低真空領域においても、分子流領域となり気体による熱伝導が抑制されていることが原因であると考えられる。一方で密度が 190 kg/m^3 の場合、圧力に対する有効熱伝導率の変化は圧力が 5Pa 付近を境に 2 領域に分けられる。これは試料内の空隙径に分布があり、分子流領域になる圧力が異なることが原因であると考えられる。本計測装置を用いることで、密度の違いによる有効熱伝導率の圧力依存性の差異を計測することが可能であることが示された。

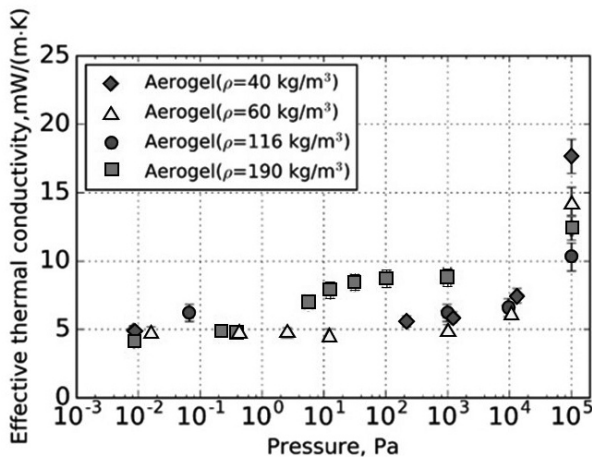


Fig. 10 Pressure dependence of thermal conductivity of aerogel with various density.

3.2 有効熱伝導率温度依存性

熱伝導率の圧力依存性計測を行った小型 GHP 装置を用いて、グラスウール、パーライト、シリカエアロゲルの熱伝導率の温度依存性を計測した。試料の条件は圧力依存性計測時と同様とし、圧力条件においてはチャンバ内の圧力を気体の熱輸送が抑制される 10^{-2} Pa で維持した。試料間の温度差は 30 K で一定とした。また、チャンバ壁面温度および試料の平均温度を $25 \sim 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ まで変化させ有効熱伝導率の温度依存性の評価を行った。この温度依存性評価を用いて、有効熱伝導率のふく射熱伝導率の寄与を評価する手法が提案されている [11][12]。気体熱伝導率の寄与が無視できる低真空条件下では、有効熱伝導率は次式で示されるように、固体熱伝導率とふく射熱伝導率の和として考えることが可能である。

$$k_{\text{eff}} = k_s + k_r \quad (1)$$

ここで、 $k_{\text{eff}} [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ は有効熱伝導率、 $k_r [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ はふく射熱伝導率、 $k_s [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ は固体熱伝導率をそれぞれ表している。有効熱伝導率の温度依存性は、ふく射熱伝導率の温度依存性に起因し、有効熱伝導率の温度依存性は次式(2)で表される。そこで低圧状態の試料における有効熱伝導率の温度依存性を計測し、最小二乗法により得られる傾き A および切片の値 B からふく射熱伝導率と固体熱伝導率の分離を行うことができる。

$$k_{\text{eff}} = B + AT^3 \quad \left(B = k_s, A = \frac{16n^2\sigma}{3E_R} \right) \quad (2)$$

ここで、 n は気体の屈折率、 σ は Stefan-Boltzmann 係数、 E_R は Rosseland の減衰係数を表す。有効熱伝導率の温度依存性の結果より、式(2)を用いて、有効熱伝導率をふく射熱伝導率および固体熱伝導率への分離評価を行った。グラスウールおよびパーライトの有効熱伝導率の温度依存性の計測結果を図 11 に示す。各プロットは計測データ、エラーバーは拡張不確かさを示している。また実線は各試料に対して最小二乗法を用いて、線形近似を行った直線である。パーライトは、有効熱伝導率に占める固体熱伝導率の割合がグラスウールと比べて大きい結果が得られた。グラスウールの繊維は熱流方向に対して垂直方向に配向しているため、固体による熱伝導を抑制していると考えられる。一方でパーライトは、粉体同士の接触面がグラスウールに比して多いため固体熱伝導率の割合が増加したと考えられる。線形近似によって得られたグラフの傾きは後述するシリカエアロゲルよりも小さくなっている。これは Rosseland の減衰係数が大きいこと示しており、ナノオーダーの構造を有するシリカエアロゲルは常温域のふく射に対して、ふく射抑制に有効ではないことが原因として考えられる。その結果、パーライトとグラスウールは、シリカエアロゲルよりもふく射抑制に有効であると考えられる。

次にシリカエアロゲルの有効熱伝導率の温度依存性の計測結果を図 12 に示す。各プロットは計測データ、エラーバーは拡張不確かさを示している。また実線は各密度に対して最小二乗法を用いて、線形近似を行った直線である。シリカエアロゲル

は密度増加に伴い、ふく射の寄与の割合が減衰していくといった結果が得られた。これは密度増加に伴い、ふく射を抑制する媒体が増加したことが原因であると考えられる。さらに高性能を検討する場合は、ふく射伝熱が支配的である低密度のシリカエアロゲルに対してふく射抑制媒体を用いることで更なる高断熱が期待できる。

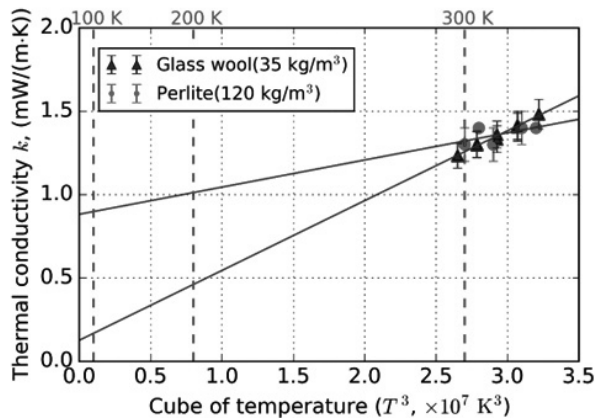


Fig. 11 Variations of effective thermal conductivity of glass wool and perlite against cube of average temperature with approximate lines.

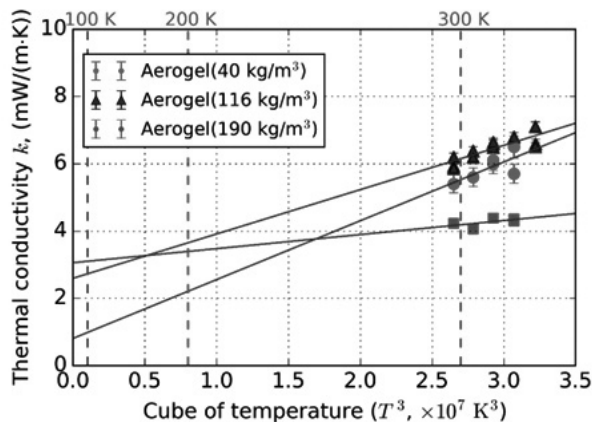


Fig. 12 Variations of effective thermal conductivity of silica aerogels against cube of average temperature with approximate lines.

4. おわりに

本稿では、従来の GHP 法にペルチェモジュールを付加することで測定誤差の低減を図り、また小型化することで測定時間の短縮化を図った測定法について紹介をしてきた。製作した小型 GHP 装置を用い、諸種断熱材の熱伝導率計測を行うことで、断熱材の構造の違いによる圧力依存性の違いや、有効熱伝導率の成分寄与についても議論を行って

きた。本稿で紹介した内容が、これから開発されるであろう多くの断熱材の性能評価に利用できれば幸いである。

参考文献

- [1] 明星工業, 第 5 回 断熱材研究会.pdf, (2017).
- [2] tiemfactory, (2017) <https://www.tiem.jp/>
- [3] JFCC aerogel, (2017) http://www.jfcc.or.jp/23_develop/13t20.html.
- [4] 田坂太一, 阿子島めぐみ, 大村高弘, 小川光恵, 藤本哲夫, 菊地裕介, 低熱伝導率材の熱伝導率測定法に関する検討, 第 33 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, D106 (2012).
- [5] ISO 8302:1991(en), Thermal insulation - Determination of steady-state thermal resistance and related properties -Guarded hot plate apparatus, (1991).
- [6] T. Kobari, J. Okajima A. Komiya, S. Maruyama Development of guarded hot plate apparatus utilizing Peltier module for precise thermal conductivity measurement of insulation materials, Int. J. Heat Mass Transf. 91 (2015), 1157-1166.
- [7] M. Koebel, A. Rigacci, P. Achard, Aerogel-based thermal superinsulation: An overview, J. Sol-Gel Sci. Technol. 63 (2012), 315-339.
- [8] S. Hans, B. et al, Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), HiPTI - High Perform. Therm. Insul. - IEA/ECBCS Annex 39 (2005).
- [9] 高橋篤史, 岡島淳之介, 小宮敦樹, 円山重直, 小型保護熱板装置を用いた断熱材の熱伝導率圧力依存性の評価, 第 38 回日本熱物性シンポジウム講演論文集, B323 (2017).
- [10] J. Fricke, U. Heinemann, H.P. Ebert, Vacuum insulation panels-From research to market, Vacuum. 82 (2008), 680-690.
- [11] G.K. Mikhail, Thermal Insulation in Cryogenic Engineering, (1969).
- [12] T. Kobari, J. Okajima, A. Komiya, S. Maruyama, Development of guarded hot plate apparatus utilizing Peltier module for precise thermal conductivity measurement of insulation materials, Int. J. Heat Mass Transf. 91 (2015), 1157-1166.

人と熱との関わりの足跡（その10） －金箔製造技術の歴史的変遷と熱との関係－

Footprints of the Relationship between Humans and Heat (Part 10)
-Historical Transition of Gold Leaf Manufacturing Technology and its Relations with Heat-

高見 怜, 永井 二郎 (福井大学)

Ryo TAKAMI, Niro NAGAI (University of Fukui)
e-mail: ms210142@u-fukui.ac.jp, nagai@u-fukui.ac.jp

1. はじめに

2019年度、日本伝熱学会に「熱の科学技術史研究会」が設置され、著者の1人（永井）も委員として参加した。この研究会は、その名の通り、伝統的な生活・技術や近代産業技術における人と熱の関わりを調査研究し、伝統技術への新たな提案を探索することを目的の1つとしていた。翌年2020年の日本伝熱シンポジウムが金沢で開催されることから、金沢の伝統技術と熱の関わりを調査することになった。永井と旧知の仲である（株）今井金箔の社長・今井康弘氏に、金箔製造と熱の関わりについて相談したところ、想像以上に深い関わりがあることが分かり、（株）今井金箔の協力を得て調査研究した概要を伝熱シンポ発表論文としてまとめた^[1]。残念ながら、コロナ禍のため伝熱シンポ自体が中止となったが、その後も本稿の著者2人は、金箔箔打工程の熱工学的検討^[2]と金箔製造工程の歴史的変遷調査^[3]を継続した。

金箔は日本の伝統工芸の一つである。神社や仏像、工芸品の装飾には欠かせないものであり、金を持つ独特な色合いや永久に失われることのない美しさは多くの人々を魅了してきた。金箔の歴史は古く、紀元前にまでさかのぼると言われている。日本では金沢での生産が盛んであり、国内の生産量の約98%を占めている。ここで、「なぜ金箔製造が金沢で盛んなのか？ どのような経緯があったのか？」という疑問も生まれた。また、金箔は0.1μmほどの厚みしかなく、光を透過してしまうほどである。これは卓越した職人の技術によって実現されており、職人の経験や勘に基づいた部分も多いため、製造技術についての原理や理論付けが明白でない箇所がある。そこで本稿では、既発表内容^{[1]-[3]}も含めて、金箔製造技術の国内外の歴史的変遷と、特に熱との関係について紹介する。

2. 金箔とは

金箔とは金と銀や銅を混ぜ合わせたものを極めて薄く延ばしたものである。図1に、金箔の主な種類と合金の配合比率について示す^[4]。銀や銅の配合比率により金箔の色は変わり、銀が少ないほど赤みを帯びた黄色になり、銀が増すほど青みがかかっていく。銀は延びが極めて良くなるため金箔には必ず配合されている。一般的に作られているのは純金4号色という名称の金箔で、延びが良く用途也多岐にわたる。主な用途は、宗教工芸の主な資材として、神社・仏閣や仏壇、仏具等に使われる。また、屏風や襖絵、工芸品の漆器や陶磁器、蒔絵等に使用される。その他の種類の純金5毛色、1号色、2号色、3号色は延びが悪く、製品が厚手となるため高価である。したがって、用途も化粧まわしや緞帳などの特殊なものや上質な美術工芸品などである。近年は金箔がお酒、料理、お菓子などの食料品やエステ、フェイスパックなどの美容分野でも活用されるようになり、使用方法が多様化している。

組成 種類	金 (g) (%)	銀 (g) (%)	銅 (g) (%)
純金5毛色	100	2	1
	97.087	1.942	0.971
同1号色	100	1.39	1
	97.666	1.358	0.976
同2号色	100	2.49	0.9
	96.721	2.408	0.870
本焼色 (3号色)	100	3.49	0.9
	95.795	3.343	0.862
純金4号色	100	5.19	0.7
	94.438	4.901	0.661
中色	100	10	0
	90.909	9.091	0
3分色	100	32.3	0
	75.586	24.414	0

図1 金箔の種類と配合比率^[4]

金箔は日本だけでなく世界中の国々で使用されている。主な地域は、ヨーロッパでは、ドイツ、フランスやイタリア。アジアでは、中国、韓国、タイ、ミャンマー、インドやトルコ。そして、アメリカやメキシコ、ペルー、エジプトなどである。金箔はこの世とあの世を結ぶ仏壇や祭壇、イコン（聖画像）などにも見られ、各国においても宗教との関係が深い。仏教では、仏像を永遠の輝きを持つ黄金で装飾することで、永遠の豊かさや過去と未来の幸せを願い、祈る心を強く表現していると考えられている。

3. 金箔の歴史の変遷

3.1 海外の金箔の歴史

金箔の製造はエジプトで始まったと言われており、その歴史は紀元前 4000 年までさかのぼる^[5]。金箔は、金の優れた展性を利用して、非常に薄い箔に叩き延ばされていた。そして、美しさと耐久性に優れていたため、美術品等の装飾や保護を目的として使用されていた。例えば、ルーヴル美術館に展示されていた紀元前 4000 年のエジプトの陶製の花瓶の取っ手は、非常に厚い 2 枚の金箔で装飾されている（図 2）。



図 2 紀元前 4000 年のエジプトの陶製の花瓶^[5]

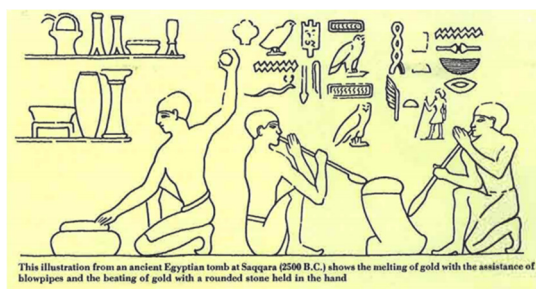


図 3 紀元前 2500 年頃金箔製造の様子^[6]

エジプトのサッカラには、古代エジプトの広大な埋葬地があり、多数のピラミッドが存在する。図 3 は、紀元前 2500 年頃のエジプトの遺跡で発見された壁画の写し絵であり、金の融解と薄化の過程を描

いた最も古い記録である。この図では送風管で空気を送り込むことで金の融解を促し、丸い石を手にとって金の鋳塊を叩く様子が示されている。また、右上の象形文字が当時の一般的な使用方法を表している。

当時から、職人によって装飾が施された金は極めて貴重な富であった。装飾性と希少性を兼ねた金箔は所有者の権威や富を誇示するには最適であったため、部屋の壁や天井を金箔で覆い、さらに棺にも金箔を使用した。歴代ファラオの墳墓であるピラミッドから金箔で装飾された多くの遺品が発見されている^[7]。

エジプト第 6 王朝から第 13 王朝までの期間（BC2340～BC1785 頃）における、金箔の組成と厚さについての比較したものを図 4 に示す。

Dynasty	VIth	XIIth	XIIth	XIIIth	XIIIth
Gold, %	92.3	85.92	90.5	78.7	92.7
Silver, %	3.2	13.78	4.5	20.9	4.9
Copper, %	-	0.30	-	-	-
Others, %	4.5	-	5.0	0.4	2.4
Thickness [μm]	-	-	-	1	1

図 4 第 6～13 王朝の間の金箔の組成と厚さ^[6]

金箔は金と少量の銀や銅で構成されていることがわかる。また、この時代にはすでに金箔を 1μm の薄さにする技術があったと考えられる。

金箔製造の技術は地中海貿易で栄えたフェニキア人（紀元前 1500～800 年）によって、ヨーロッパに広まったと考えられ、ローマ人はフェニキア人の捕虜をローマに連れてきた際に金を打つ技術を習得したとされる。当時、金箔が教会や城の石細工の装飾やオーク材の家具に金メッキを施すなどの需要があった。製箔技術は世界に広まるにつれて、知識が蓄積され、技術が向上していった。したがって、金箔は世界に広まることで、より薄くなっていったと考えられる。

時代ごとに使用する道具は変化していった。一方で、金を融解し、銀や銅を混ぜ、鋳塊を叩いて展延させるという基本的な製箔プロセスは紀元前から現代に至るまで大きな変化はないと思われる。金箔製造の包括的な説明で最古のものは 12 世紀にテオフィラスによって書かれた「De Diversis Artibus」である^[8]。これは「キリスト教芸術百科事典」の一部

であり、種々の絵画技法、モザイク技法、金工細工などの当時の技術や芸術技法についても言及されている。金箔の製法についても、使用する材料と道具と工程の詳細が説明されている。概要のみ記すと、12世紀の金箔製造では、金と羊皮紙を交互に重ねて束にしたものを、皮製の袋で包み、既定の大きさまでハンマーだけを使って展延させていた。

1200年頃の金箔利用は、ヨーロッパの写本制作において急激に拡大した。なぜなら、アフリカとの金貿易の高まりや1204年の第4回十字軍によるコンスタンティノープル攻略に伴って、ヨーロッパでの金の供給量が増加したためである。この時代の写本家たちは、金箔をレタリング、欄外飾りや模様、人物像など背景やハイライトとして用いるようになった。写本の中で最も一般的なのは時禱書（キリスト教の信者のために書かれた、祈教会の諸儀式執行のため、規準として定められた式順序、式辞、聖句、祈祷文などが記載された書物）である。図5は1470年代頃にベルギーのブリュージュで制作された時禱書である^[9]。



図5 黒の時禱書^[9]

さらに、絵画にも金箔は用いられるようになった。ビザンティンの画家たちは、薄く延ばされた金箔をアイコンのハイライトに用いることで、安心感や躍動感を生み出し、重要な視覚的要素の強調や聖人像への敬意を表現していた。図6は1333年にシモーネ・マルティーニが制作した絵であり、金や金箔を使用して描かれている^[9]。

15世紀には、本の装丁においての金箔の利用がヨーロッパに広まった。イスラムで古くから行われていた皮革への金箔押しの技術が、イタリアへ紹介されたためである^[9]。図7は、1600年頃にファリドゥッディーン・アッターールによりサファヴィーで制作された写本の装丁である^[9]。



図6 受胎告知^[9]



図7 金の型押しがされた写本の装丁^[9]

また、イタリアのヴェネツィアでは、ガラスに金箔を張り付けたり、金箔の粉を振りかけ、ガラスを吹いたりするなどして、器に金メッキを施していた。図8は15世紀後半ヴェネツィア製の金箔で装飾されたエメラルドのゴブレットである^[9]。



図8 金メッキが施されたゴブレット^[9]

このように、金箔は他にはない装飾性で多くの人々を魅了し、王族や貴族だけでなく大衆の間でも

利用されるようになった。そして、写本や絵画をはじめとする美術品の装飾に活用されていった。

18 世紀頃になると、用途が拡大した金箔は、多くの道具を使用し製造されるようになり、製造プロセスの複雑さが増していく。図 9 はその頃のフランスの金箔製造の作業場の様子であり、(a)金の融解、(b)冷却、(c)圧延、(d)金の展延、(e)金箔の型抜きと梱包を表している^[10]。



図 9 18 世紀フランスの金箔製造作業場の様子^[10]

18 世紀の金箔製造工程の概要を示す^[10]。まず、炉で金を融かし、合金元素である銀や銅を加えた後、質量約 220g、厚さ約 5mm のインゴット（合金塊）を鑄造する。鏡面研磨され、十分に滑らかな表面を持つ可逆圧延機に連続して通過させることにより、厚さは約 17 μ m まで薄くなる。圧延機が発明される前は、この工程はハンマーで行われていた。ここで、展延を中断し、金の延性を回復するために中間焼鈍を行う。その後、箔打ちの工程に移行する。この工程は極めて複雑で時間がかかる。なぜなら、インサートと呼ばれる金箔を挟むシート表面の処理、インサートと金箔の束（スタック）の作成、スタックを開き、金箔の移し替えや裁断するという工程を行い、さらに目的の大きさまで金箔を展延させるために、上記の箔打ちの工程を 4 回繰り返す必要があったためである。

圧延機で薄くなった金箔は正方形に裁断され、ベラムから成るカッチに挟んでいく。これを何十枚も重ねて束にし、羊皮紙の帯で包んだものを 30 分ほど叩いていく。この際、金箔が破れないように所定のパターンで均等に叩かれる。叩き続けると、金はカッチの端まで伸びるため、100mm の正方形は 4 等分され、2 番目のカッチに移し替えられる。さらに 30 分間叩いた後、かなり薄くなった 100 mm の正方形は再び 1/4 の大きさに整形し、これらの 800 枚がゴールドビーターズスキンで作られたショダ

ーと呼ばれる羊皮紙に挟み込まれる。そして、1 時間ハンマーで叩き、50mm から 100mm まで延ばした後、さらに 1/4 に裁断して、叩いて延ばしていく。ショダーのために金箔を 4 等分する工程はスキューニングと呼ばれ、スチール製のスキューナイフを使用する。金箔は 6 μ m と極めて薄いため、力加減を間違えると破れてしまう。さらに、金箔は静電気の影響を受けやすいため、金箔は静電気が発生しにくいツゲの木から作られたピンセットで丁寧に扱われる。このように、金箔を処理するために専用の道具と繊細な技術を必要とする。

その後、130mm 四方の非常に薄い金箔をショダーから 1200 枚のゴールドビーターズスキンで構成される型へ移す作業を行う。これまでの工程の中で最も繊細で丁寧な扱いが必要となる。鋼のスキューナイフを使ってショダーから金を 1/4 の大きさにする工程にはワゴンと呼ばれる独創的な道具が使用される。これを使うことで、最小の圧力で切り口がギザギザになることなく、金箔を裁断することが可能である。最終的な打箔の前に金箔を受け取るための冊子の準備は最も重要である。うさぎの後ろ足を使用して、ブライムと呼ばれる焼成石膏粉末を革の両側に散布する。型内のスキンをホットプレスに入れ、箔職人が冊子を本のページをめくるような要領でフライングという作業を行う。これは、工程全体で蓄積された湿気を取り除くために行われる。箔を受け取るための冊子の良否は、職人の技術に完全に依存しており、さらに最終的な打撃の成否は彼らの判断に依存される。約 4 時間半の打撃を受け、その後、型からそれらを取り外した後、箔を 80mm 四方に裁断する作業に移る。この作業はカーフレザーのクッションの上で行われる。最終的に切り取られた箔は、25 枚の金の箔を保持できる粗い組織の冊子に入れられ、作業は終了する。

このように、18 世紀になると、金箔製造の知識や技術の向上により、多くの技術変化がみられる。道具の種類が多くなり、金箔を延ばすために、ハンマー以外に圧延機が使用されるようになった。また、金箔の延びが良くなるように加工されたシートの使用も確認できる。金箔を扱う際の道具も生まれ、静電気対策のためのツゲの木からできた道具や、ワゴンやウサギの足などの専用の道具も使用されるようになっていく。さらに工程数が増加し、複雑化していった。延びた金箔は中心に向かうほど薄く。

全体的に厚みに差があるため、1/4 に切り分け、裁断と展延を繰り返すという工程を行うことで、金箔の品質につながる箔の均一性や薄さを向上させていたと考えられる

1763 年には、フランスのウィリアムルイス博士による「CommerciumPhilosophico-Technicum」において、湿気と温度が金箔製造に悪影響を与えることが明らかとなった。この時代から金箔製造では熱の制御が課題となっており、熱は現在に至るまで、金箔の品質を左右する重要な要素となっている。

19 世紀以降は、図 10 のような手順で金箔製造が行われていく^[5]。さらに、安価に大量生産することを目的として、挟み込み紙や金箔を延ばすための機械である箔打ち機が開発された。

以前まで使用されていたゴールドビーターズキン、いわゆる羊皮紙は非常に高価であったため、非静電カーボンブラックで覆われた紙や金との摩擦を低減しようと、有機ニスと石膏、石鹼の微粉末で表面処理された高分子フィルムなどが使われ始めた^[5]。

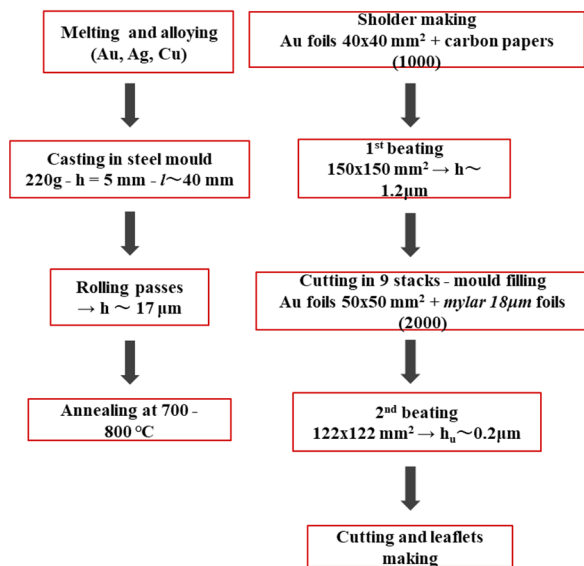


図 10 現代の金箔製造の主な工程^[5]

また、箔打ち機の効率を上げるために、箔打ち機が考案された。箔打ち機の開発は 1837 年にドイツのクリスチャン・ライヒにより試みが始まった。しかし、彼が設計したハンマーは目立った成果がなかった。彼に続いて、ドイツのマイケル・ホフマンも箔打ち機を設計したものの、商業化には至らなかった。1851 年にアメリカの企業 Vine&Ashmead がロンドン万

博で自動ハンマーのデモを行ったという記録があるが、プロセスの中で多くの手動介入を必要としていた。このように、多くの人々が良い成果を出せない中、1928 年にセシル・ホワイリーが熟練の職人の動きを詳細に撮影し、研究することで商業的にも利用可能な精度の高い箔打ち機の開発に成功した(図 11)^[6]。ホワイリーが熟練した職人のハンマー、腕、手首の動きをそれに取り付けられた一連のライトで記録し、これらを写真でプロットする方法で可能な限り職人の動きを正確に再現した。このように、機械による箔打ちは生産性の向上には貢献したが、機械で延ばすと 0.1μm、熟練した職人が手動で延ばすと 0.05μm であったことから、金箔の品質の観点では職人の熟練の技術には及ばなかった^[6]。

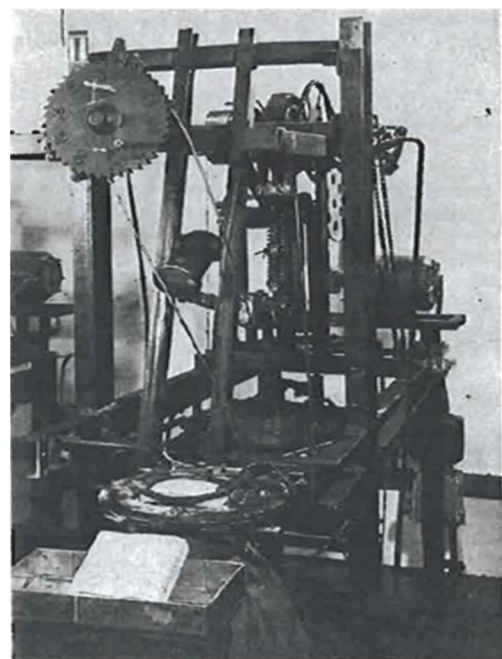


図 11 セシル・ホワイリーが開発した箔打ち機^[6]

3.2 国内（特に金沢）の金箔の歴史

日本では、金箔は仏教との関係が深い。仏教が誕生したインドで金箔が使用され始めたのは紀元前 5 世紀頃であり、その後、金箔製造の技術は仏教とともにアジアの多くの国に広まり、日本には 8 世紀初頭に伝わったとされる。奈良のキトラ古墳（7 世紀末～8 世紀初め）の石室の天井に描かれている天文図は、星々が金箔で表現されていたことが確認されている。平安時代には、岩手や秋田の山脈に良質な金が採れる金山があったことから、奥州を握った

藤原氏はこの一帯を管理し、平泉に中尊寺金色堂を建てるなど、黄金文化を築いた。また、天喜1(1053)年に京都の宇治に建てられた平等院方法堂の阿弥陀仏如来坐像には坐像、光背、光背を固定する吊り金具にも金箔が施されている^[11]。したがって、この時代には箔製造の技術や装飾の技法がすでに発達していたと考えられている。

一方、平安時代末期から鎌倉時代にかけて、金沢では白山信仰が盛んになり、白山文化が広まる。この白山文化には多くの金箔が使用されているが、金沢の地で作られたものかはわかっていない。金箔は卓越した技術が必要で専門の職人にとって作られるが、主に装飾にしか使用しないために、わざわざ職人を常駐させるはずがないことから、地元で作られたものではなかったと考えられる。

中世になると金沢には曹洞宗や日蓮宗、浄土真宗が興隆し、金箔の需要は高まるばかりであった。戦国時代の天正9(1581)年に前田利家は織田信長に能登を与えられると、その翌年には能登羽咋郡宝達山の金鉱が開かれた。さらに、文禄の役で豊臣秀吉が朝鮮半島に出兵した際には、国元の能登で金箔、加賀で銀箔の製造を命じられた。これを契機として京都の箔打ちの技術を金沢に移入し、金箔の製造が始まったと考えられている^[12]。

江戸時代に入り、寛文7(1667)年に幕府が各藩に貨幣の铸造を禁止し、金銀銅の地金を幕府が集中的に管理した。2年後の寛文9(1669)年、加賀藩に銀貨铸造を厳禁する処置が出されたことで、このときに金沢での箔打ちは一旦完全に消滅し、江戸に箔座が設けられた。しかし、金沢でも潜在的な箔の需要があり、密造密売(隠し打ち)が行われていた。

明治2(1869)年、江戸幕府の滅亡と新政府成立後に、江戸の箔打ちを担っていた金座・銀座が廃止された。そのため、江戸での製造は徐々に衰退していった。販売の自由化に伴い、全国で金箔の製造販売が可能となり、金沢の金箔は隠し打ちで蓄積された経験と試行錯誤によって極めて薄く打つ技術が卓越していたことで、全国に評判が知れ渡っていった。そして、全国への販路を拡大することに成功し、金沢箔の地位が全国的に高まり、金沢における生産は右肩上がりが増えていくこととなる。

明治中期には、金沢の製箔業は日本の金箔市場を独占するほどに成長し、1880年頃には箔打職人の数が1500人に達していた。しかし、このような製

箔業の規模の拡大や幕府の統制がなくなったことによる販売の自由化は、販売競争と品質の劣った粗悪品の増加をもたらした。金沢箔の評価を落とす事態を招いた。さらに、明治10(1877)年の西南戦争の際の不換紙幣の大量発行はインフレーションを誘発し、これによる不況がさらなる追い打ちをかけ、金沢の製箔業は大きな打撃を受けた。そのため、明治21(1888)年に箔の品質と価格を管理し、生産調整を行うことを目的として同業組合を組織した^[12]。その結果、徐々に状況は良くなり、明治34(1901)年には羽二重に次ぐ金沢を代表する産業に成長を遂げ、職工数800人を超え、明治38(1905)年には箔問屋が26軒にまで回復した。

大正3(1914)年に、第一次世界大戦が勃発したことで製箔の機械化が実現された。これはドイツでの箔生産が困難になり、製箔技術のあった金沢に需要が集中し、需要の多さに手作業の生産では対応できなくなったことが要因とされている。

昭和16(1941)年、太平洋戦争の影響で金を含む金属類は統制され、奢侈品等の製造・販売が制限されたことで、金箔の生産が低迷し、箔産業の危機的状況が続いた。昭和28(1953)年、戦争が終わると金地金の使用制限が解かれ、金箔の製造が再開された。昭和36(1961)年には、親鸞上人の遠忌があり、金箔の需要が増加した^[12]。また、同年から昭和48(1973)年までは高度経済成長期であり、仏壇・仏具の需要増加に伴い、金箔の需要も急激に増加したことで、生産量は飛躍的に増加していった。昭和50(1975)年にはオイルショックに伴う景気の悪化で、生産量が一時的に減少する。その後、現代製法による金箔の需要が増えたことで、生産量は再び増加していく。昭和61(1986)年から始まったバブル経済において仏壇・仏具の需要がさらに高まり、箔産業は全盛期を迎える^[14]。しかし、バブル経済崩壊後の平成3(1991)年以降は、金箔の需要の減少と金の価格の高騰が相まって、金箔の生産量が大幅に減少している。平成19(2007)年にはピーク時の1/5まで減少している。生産量の減少と共に製箔産業は縮小を続け、職人の高齢化や後継者不足、海外の安価な金箔の台頭により、現在も厳しい状態が続いている。

このように、金沢では戦国時代に始められた金箔製造が途切れた時期はあったが、現代まで続けられている。この要因はいくつか考えられる。

1つ目は、金沢は古くから浄土宗・浄土真宗の信

仰が厚く、金箔をふんだんに使用した豪華絢爛な仏壇の需要が多かったためである^[13]。

2つ目は、気候条件である。金沢は日本海に面しており、北西からの季節風の影響で1年を通して降水量が多く、湿度が高い。金箔は極めて薄く、空調の風や静電気の影響を受けてしまうほど繊細で、扱いが難しい。そのため、静電気が発生しにくい環境が好ましく、多湿な金沢は条件を満たしていた。

3つ目は、金箔製造に必要な資源に恵まれていたためである。箔打紙と呼ばれる箔打ちの際に金箔を挟む和紙は、金箔の品質を決める重要な役割を果たす。箔打紙の製造には良質な水が必要不可欠で、紙の品質は水によっても左右される。金沢は山に囲まれており、霊峰白山から湧き出してくる水は全国屈指の清流とも呼ばれ、この清流が金沢に流れていた。

4つ目は、歴史的背景である。金沢は戦争時に軍需品として真鍮箔や錫箔の製造を行うために3000人ほどの職人が全国から集められていた。多くの職人が戦後も金沢に残ったとされる。

すなわち、金沢は豊かな水資源に恵まれた土地であり、箔打ちや箔打紙の製造に適した環境であった。さらに、宗教や文化がもたらす金箔の需要が多いことや歴史的背景などを理由として、金箔製造が盛んな土地となったと考えられる。

3.3 技術的変遷

日本では江戸時代まですべて手作業で製箔が行われていた。手打ちでは約109種類の道具を使用していた^[4]。金箔を延ばすために必要不可欠な槌は多くの種類が存在する。箔の生産工程は大きく、小間打ち、中打ち、仕上げ打ちの3段階に分かれており、それぞれの工程で異なる大きさの箔打紙を使用する。槌も和紙の大きさが変わるとともに異なるものを使用し、鉄製の槌の大きさや重量、木の柄の長さや大きさも異なる(図12)。仕上げの工程に近づくほど、軽い槌が使用されていた。さらに箔打ちには、1人で打つ1本打ち、2人で打つ2本打ちと3本打ちがある(図13)。1本打ちでは主槌を使い、2本打ちでは対面の人が向槌を使う。向槌を両手に持って打つと3本打ちになる。

このように一つの工程で使われる槌には主槌と向槌があり、寸法や大きさ以外にも、槌の頭部と柄のなす角が微妙に異なる。さらに金箔、銀箔、銅箔などの箔の種類や工程ごとに異なる槌を使用して

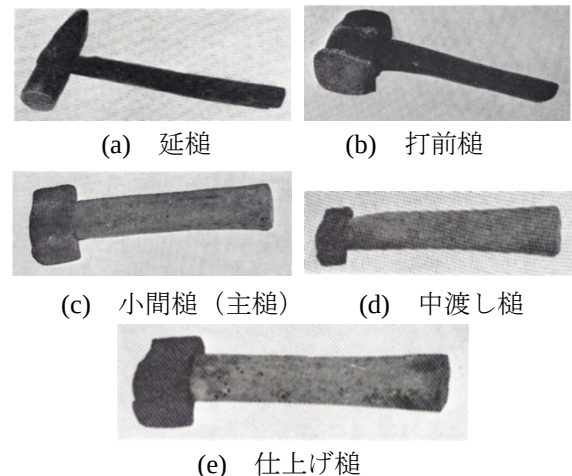


図12 様々なタイプの槌^[4]



図13 3本打ちの様子^[4]

いた。これらは金銀銅による展延の違いや、1人打ちや2人以上で打つ際の違いによる変化を感知し、経験からそのように変化していったと考えられる。製箔では機械化される以前は多くの槌を使い分けて箔打ちを行っていた。また、箔打紙を製作する過程でも専用の槌を使用していた。

明治以降、金箔産業にも機械化の波が押し寄せ、技術革新が起こる。金沢の箔職人である三浦彦太郎が手打ちのままでは箔産業の発展は見込めないと考え、明治35(1902)年に箔打ち工程の機械化を着想した。試作機を数回製作するもののどれも失敗に終わった。ドイツの機械に改良を加えるなど試行錯誤を重ね、13年費やし、大正4(1915)年に毎分約700回の垂直上下運動をする箔打機を完成させた(図14)^[15]。これにより、生産効率は飛躍的に向上した。大正の末期までに、ほとんどの作業場に箔打機が導入され、人力による槌での箔打ちは完全に姿を消してしまった。しかし、箔打ち以外の工程は江戸時代から続く技法が踏襲されている。



図 14 三浦彦太郎が製作した箔打機^[15]

技術的な変化を遂げたのは箔打ちだけでない。世界の金箔製造工程において、挟み込み紙が動物の皮を原料とする羊皮紙から高分子フィルムに変化したように、日本では植物を原料とする挟み込み紙からグラシン紙と呼ばれる表面にカーボンが塗布された紙（図 15）が主流となっていく。転機となったのは真鍮箔、アルミ箔、銀箔の職人らがそれらと同じ製法を用いた金箔の製作の要請を受けたことである。和紙は灰汁を何度も施し 1 年間使用し続けると金箔に品質の差が現れてしまう。新たな和紙を作るのも費用や時間がかかってしまい、製造枚数も限られるため、同じ紙を繰り返し使うしかなかった。そこで、改善策としてアルミ箔や銀箔で使われることがあったグラシン紙を使用するようになった。グラシン紙は箔の延びが良く、簡単に作ることができる、さらに箔打紙に比べ安価であった。一方で、劣化しやすく、1 か月しか使用することができなかった。ゆえに、1 か月ごとに新たなグラシン紙で金箔を作ることで、安価に品質を維持することが可能となり、費用や品質を考慮した結果、グラシン紙が製箔に使われるようになっていった。



図 15 グラシン紙

ところが、銀・真鍮箔用のグラシン紙は金箔には適したものではなかった。そこで、金箔を打つことができるグラシン紙を生み出すためにカーボンやアルミ、界面活性剤、カゼインから成る顔料の最適な配合や量を編み出した。金箔用のグラシン紙が開発されたことで、1960 年頃はグラシン紙を使用した断切工程と呼ばれる現代標準的に行われている手法が確立された。この手法は高度経済成長期で金箔の需要が急激に増加したという状況において、扱いの難しい金箔を銀・真鍮箔の職人でも製作を可能とすることを目指して考案された。断切工程によって作られた金箔は、品質が伝統的な製法には劣るものの、大量かつ低価格で生産が可能となった。

断切工程の確立で金箔の市場が拡大した結果、伝統的な縁付箔の需要が衰退するように思われたが、縁付は付加価値の高い金箔として、断切箔は高い品質を求められない用途に縁付の代わりに用いられるようになった。

4. 金箔製造方法

金箔の製造工程は澄工程、箔工程、仕込みに大別される。澄工程では純金と少量の銀と銅を配合した合金から地金を作り、それを $1\mu\text{m}$ ほどの薄さまで叩いて延ばし、上澄（うわずみ）を作る。この工程は澄屋と呼ばれる職人が担当する。箔工程は上澄を $0.1\mu\text{m}$ に延ばし、金箔に仕上げる。この工程は薄屋が担う。この二つが金箔製造に関する工程である。紙仕込みでは、金箔を延ばす際に挟む和紙に灰汁処理という特殊な加工を施した紙を作る。金箔の品質を左右する重要な工程であるため、紙仕込み専門の職人が行う。これらが伝統的な製法の概要である^[16]。一方、現代製法も存在し、箔打紙の代わりにグラシン紙を使用する。さらに、いくつかの工程を短縮することで大量生産が可能であり、伝統製法に比べ、生産性が高い製法となっている。

4.1 伝統製法^[16]

伝統製法の澄工程では、まず金合わせを行う。これは金、銀、銅を炉茶碗と呼ばれる容器で約 1300°C まで加熱して融解する工程である。金の融解の途中に硝酸カリウムを入れ、合金に混入した不純物を取り除く。炭素棒で混ぜ合わせ、完全に溶けたことを確認したのちに型へ流し入れて成型する。成型されたものの寸法は長さ 170mm、幅 90mm、厚さ 50mm

である。そして水で冷却し、合金が出来上がる。この合金を帯状に伸ばしたものを延金（のべがね）と呼ぶ。ロール圧延機で繰り返し延ばして0.05mmの薄さにする。そして延金の伸びをよくするために熱を加えるなましと呼ばれる作業を行う。ここまでの工程におよそ半日かかる。帯状の延金は5cm角の大きさに切り揃えられる。その延金を1枚ずつ澄打紙である西の内紙（金沢市二俣産の和紙）に挟み込み、叩くための準備作業をする。これは引入れと呼ばれる。図16に示すように、延金と澄打紙を約200枚重ね、その上下をふるやと呼ばれる、使い古して打ち紙として使えなくなった紙を30枚ほど重ね合わせる。それを袋革で覆い、乳革でしっかりと固定し束ねる（図16）。そして、澄打機で延金をまんべんなく叩いていく。しばらく叩くと熱が発生するため、切り返しを行う。これは200枚の束をばらして小分けにし、上下を入れかえて冷ますという作業である。紙と同じ大きさになるまで槌打ちと切り返しを繰り返し、延ばしていく。こうして、13cm角になった延金は小兵（こっぺ）と呼ばれる。これを新たな澄打紙に挟みこみ、同様に束ねる。

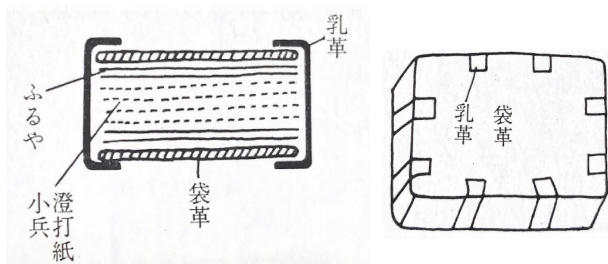


図16 澄打ちの束の構造^[4]

切り返しを行いながら30分ほど打ち延ばし、18cm角になったものは荒金（あらがね）と呼ばれる。現在は荒金までの澄打紙は西の内紙ではなく、ハترون紙を使用している。荒金を断ち包丁で4等分にし、澄打和紙に移し替えていく。澄打和紙は上澄を作るための専用の和紙であり、澄屋がこの和紙の仕込みを行う。四等分された荒金を和紙に移し替えるときの澄打和紙の大きさを小重（こじゅう）といい、大きさは19cm角である。これを三味線皮で包み、小重の大きさになるまで3時間かけて打ち延ばす。延ばしていくと和紙から金箔がはみ出てくるため、その部分を刃物で削り（図17）、形を整えながら薄くしていく。



図17 端落とし^[4]

この後、大重（おおじゅう）と呼ばれる大きさの澄打和紙に移し替える。この束を牛革で包み、それを大重の大きさになるまで打ち延ばす。打ち続けていると熱が発生するため、いくつかに分けて放熱を行う。4時間ほど打ち込みと放熱を繰り返し、大重からはみ出る21.6cm角の大きさにする。大重の大きさまで延ばされると、さらに打ち紙を交換し、化粧打ちを行う。化粧打ちを施すと柔らかく粘り気のある表面がさらさらした状態になり、扱いやすくなる。さらに、均一な光沢面も得られ、質の向上につながる。このようにして合金を1μmまで延ばした上澄が出来上がる。仕上げは上澄を一枚ずつ抜き取り、それを150枚ずつ20cm角に裁断する。これは澄切りと呼ばれる。そして裁断された上澄は三つ折りにされ澄工程は終了する。これらの金合わせ→延金→小兵→荒金→小重→大重→化粧→仕上げという工程には2週間ほど要する。

これ以降が箔工程となる。まず、20cm角の上澄を9枚から12枚に切り分ける澄切（ずみきり）を行う。これには最終的に出来上がる金箔の重さを均一にするという目的がある。切り分けた上澄を形や重さをそろえながら小間紙と呼ばれる箔打紙に挟み込む（図18）。

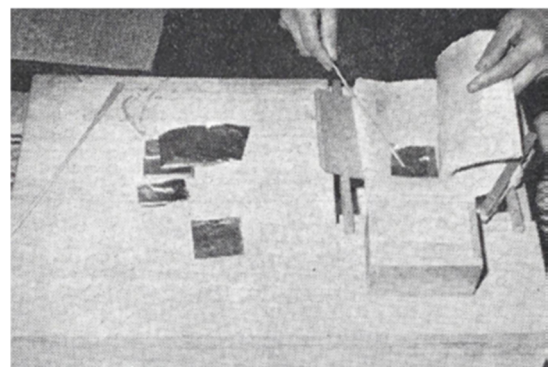


図18 上澄の仕入れ^[4]

これは仕入れ（しきいれ）とよばれる。箔を扱う際に直接手で触れるのは上澄を切って小間を作る作業のこの時のみで、それ以外は竹製の用具を使う。手の脂が付くと箔の伸びが悪くなるだけでなく、傷もつきやすくなる。さらに静電気の影響も受けやすいため、絶縁性のある竹の道具が使われる。ここで使用される箔打紙は手漉き雁皮紙に加工を施し、箔打紙用に仕立てたものである。引き入れの済んだ小間紙を 1800 枚ほど重ね、（手打ちでは 500 枚ほど）その上下に約 50 枚の女紙を加え、さらにその上下に約 50 枚の白蓋を重ねる。白蓋の上に当革をあてて、6 本の巻革でしっかり巻きしめて糊付けする。その上下をさらに袋革で覆い、それを糊付けしてある乳革でとめる（図 19）。

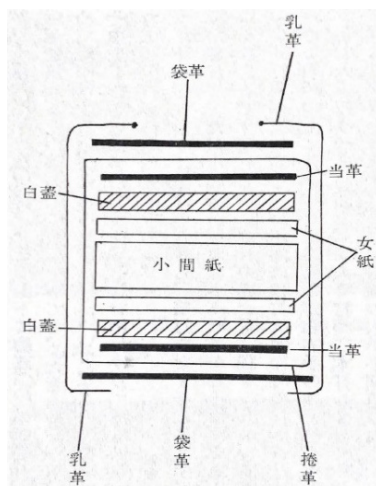


図 19 束の構造^[4]

そして、箔打機で 10～15 分叩いていく。この工程でも打撃によって発生した熱を冷ますために束を開いてしばらく放置する。この作業を 5～6 回繰り返すと、上澄をそれ以上打っても伸びない状態になる。その大きさは 10cm 角ほどで、これは小間紙の滑らかさがなくなり、打紙としての機能が失われるためである。小間打ちが終了した後の大きさの紙を小間といい、小間を主紙あるいは、まま紙と呼ばれる箔打ち紙に移す。これを渡し仕事という 1800 枚をすべて渡し終えると、火の間という作業に移る。電熱器で主紙を温めることで渡し仕事で生じた湿気を取り除くことができる。さらに金をなまし、伸びをよくすることもできる。火の間が終わると上澄を 0.1 μ m まで延ばす打ち前という工程に入る。1 日かけて 15 分間の打ち延ばしと放熱を 10～15 回繰り返す。

途中で伸びをよくするために火の間を何度か行う。仕上がりの大きさは 16.8 cm 角ほどである。そして抜き仕事で広物帳という紙の束に移していく。図 20 のように、箔を挟んだ主紙の束を左手の人差し指に天狗爪をつけ、右手に仕事箸を持って左手の親指と中指で主紙をめくって仕事箸で箔を取り出す。広物帳に乗せた箔の中央を天狗爪で軽く押さえ、箔を広物帳に落ち着かせるために右手で箔の真上から風を少し送る。

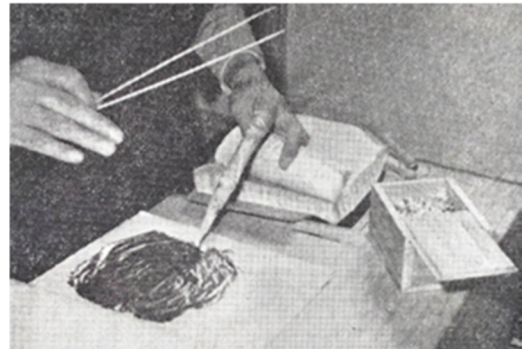


図 20 抜き仕事（箔移し）^[4]

抜き仕事の時には箔の屑が出る、これらは格子掃きや兎の手、鳥の羽根で丁寧にこすり落とされる。それでも取れない場合は水銀棒で拾い集められる。これらの一連の作業を格子掃きという。箔打ちで使用した主紙は金粉を払い落とし、再び使用される。格子掃きを怠ると、後ほど説明する灰汁漬けと呼ばれる作業の際に、箔片が付着している部分に灰汁がしみこまず、箔の伸びを妨げる。よって、箔が破れたり、穴が開いたりするため、箔の仕上がりが悪くなってしまう。

最後の工程は広物帳の箔を切り揃える移し仕事である。鹿革を張った皮板の上で竹枠を押し当て上下に動かして切る。そして、革板を 90 度回転させて同様に切り、正方形に仕上げる。規定の大きさに整形された金箔は箔の寸法と同じ大きさの切紙に乗せる。箔が移された切紙が百枚に達すると「からげそ」と呼ばれる糸で十文字に縛る。その束が 5 もしくは 10 束ごとに、「らんし」と呼ばれる紐でくくり、箔箱に納める。完成した金箔を挟む切紙（箔合紙）は岡山県津山市特産の楮で作られた手漉き和紙である。これに挟むことで紙に箔が付着することを防ぎ、湿気を除去することができる。このような多くの工程を経て作られるのが縁付箔と呼ばれる伝統的な金箔である。

切紙が完成した金箔を縁取るように見えることから、この名称がついたと言われている。縁付箔の表面には和紙による凹凸がみられ、独特な光沢と風合いがある。さらに、膜厚は薄く、均一であることから、複雑な形状に対してしわを作ることなく貼ることができるため非常に扱いやすい^[14]。したがって、縁付箔は品質が高いと言われているが、その一方で工程数が多く、完成までに数週間かかるため、価格が高い。

4.2 現代製法



図 21 グラシン紙と金箔の束

3.3 で述べたように、グラシン紙の開発によって考案された断切工程が現在標準的に行われている金箔の製法である。断切工程の製法は、澄切りして切り分けた上澄をグラシン紙に挟み 1800 枚の束を牛革で包んだもの（図 21）を図 22 の箔打機にかける。



図 22 箔打ちの様子

ここで、この機械の一打は縁付箔用の箔打機より重く強い。箔打ち工程では、箔打機による鍛造加工や摩擦によって発熱が生じる。この熱は、金箔とグラシン紙を密着させるため、展延の妨げや破損の原因となる。ゆえに、途中で束をばらして放熱・冷却を行う工程（図 23）が必要になる。放熱を行う温度やタイミングは職人が手触り・頬触りで温度を確認し、経験と勘で判断される。箔打ち前の温度は 23℃程度であるが、打ち続けていくと図 24 のように温度上昇がみられる。また、最高温度が 100℃付近まで達することもある^[2]。このような放熱の工程を数回行うが、伝統製法のように途中で打ち紙を交換することなく既定の大きさまで一気に打ち延ばされる。そして、箔を箔合紙に移し、基準の大きさの木型または、アクリルのブロックを当て、それに合わせて薄刃と呼ばれる道具で裁断する（図 25）。この作業は型の押さえ具合、薄刃にかかる力の加減など職人に熟練した技術が要求される。束を押し付ける力が強すぎると金箔に箔合紙の模様が写ってしまう。また、力まかせに切ると金箔の端と箔合紙の端が貼りつき、破れてしまうことがある。したがって、ずれを生じさせることなく精度良く垂直に切る必要がある^[13]。



図 23 放熱・冷却過程

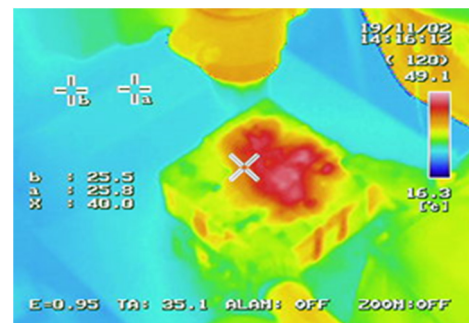


図 24 束の発熱の様子^[2]
(サーモグラフィーによる温度計測結果)

図 25 金箔とグラシン紙の束の裁断^[18]

現代製法で作られた金箔は一気に裁断することから、断切箔と呼ばれている。グラシン紙には和紙の様な凹凸が存在しないことから、断切箔の表面は平坦で、艶のある光沢がみられる。断切箔はわずかに厚みがあり、放射状の模様がみられ、膜厚が均一ではないことから、質は縁付箔よりも劣る。その一方で、工程数が少なく2～3日で作ることができるため、価格が安くなっている。

4.3 箔打紙とグラシン紙

伝統的な金箔製造工程には、もう一つ重要な工程がある。それは紙仕込みという箔打紙を製作する工程である。縁付箔と断切箔の間には品質に差があり、これは挟み込み紙の違いや箔打紙自体の出来が品質の良し悪しに影響すると言われている。したがって、紙仕込みは金箔の品質を左右する必要な工程といえる。

箔打紙は良質な和紙を使用し、江戸時代に名声を高めた摂津の名塩村の名塩紙が江戸・京都をはじめとした金箔の主要な産地で使われた^[11]。雁皮を主として三桎や楮も含まれ、漉きこむときに名塩村特有の粘土を混入する。箔打紙は箔を延ばすための柔軟性と弾力性、ハンマーの打撃に耐えうる強度が必要である。強度と柔軟性の相反する性質を持たせるためにこのように様々な繊維を混ぜ合わせている。箔打紙用の和紙は手漉きで作られたものを使用している。漉桁を前後左右に動かすことにより何層にも繊維が絡むことで強度が上がる。楮のような繊維が長く、漉きにくい繊維の紙を漉くことも可能である。さらに手漉きでは職人の卓越した技術により繊維に方向性が生まれ、和紙の美しい模様や滑らかさが現れる。このように、強度や模様、滑らかさなどで

優れているため、時間をかけて丁寧に作られた手漉き和紙が用いられている。

石川には手漉き和紙を製作しているところがある。1つは能美郡川北村字中島で、天明3(1783)年から加賀雁皮紙を製作し続けている。昭和初期以降に金糸・銀糸の台紙用だけでなく、金箔・銀箔の打紙用の手漉き雁皮紙も生産するようになった。もう1つは、金沢市二俣町での加賀二俣和紙である。現在も7戸で紙漉きが続けられている。これらの手漉き和紙が名塩の紙と併用されている。名塩の紙と二俣和紙は箔打紙の材料であるため下地紙と呼ばれている。

次に箔打紙の製法について述べる。箔打紙専用に作られた泥入り手漉き雁皮紙を18cm角に裁断し、1800枚ごとに不純物を取り除く。枚数を数えて菊の花びらのように重ね合わせていく(図26)。その後、あらかじめ水分を含ませておいた白蓋と呼ばれる手漉き和紙に下地紙を挟んでいく。白蓋1枚に

図 26 菊づくり^[4]

対し下地紙は10枚から20枚で、白蓋の水分を下地紙に含ませる。重石を載せ、3時間から一晩かけゆっくり浸透させていく。箔打紙が水分を吸収した後に箔打紙を作る工程に入る。まず白蓋から下地紙を抜いていく。下地紙を600～900枚に分ける。そしてアク打ち機で水分が均等になるように叩いていく。ある程度叩くと紙がくっつくようになるので一枚一枚はがしていく。紙から水分が抜けてくっつかなくなるまでこの作業を20回ほど繰り返す。ここまでのちり掃き→菊ちがい→白蓋→アク打ち→手数の一連の工程をのべ仕込みという。この工程が終わったら灰汁と呼ばれる工程に移る。

和紙本来の機械的性質だけでは箔打ちに不十分である。そこで性質のさらなる向上を目的として行われる処理が灰汁工程である。この工程には良質な

水が必要となる。金沢の水質は軟水でカルシウムやマグネシウムが少ない。ミネラル分が過剰に含まれていると灰汁の原料と意図しない化学反応を起こす可能性がある^[20]。しかし、金沢の水は軟水であり、ミネラルの含有量が少ないため、灰汁づくりに適している。そして、この灰汁を使うと箔の伸びがよく、製品の艶も栄えてくる。

灰汁工程では、まず灰汁を作るために稲の藁（藁束）を燃やす。燃えかすに水もしくはお湯をいれて灰汁を作る。この作業を灰汁焚きという。紙を強くするために柿渋、箔打紙を滑らかにするために卵の黄身や白身を灰汁に混ぜ合わせる。灰汁や柿渋などが均一になるようによく攪拌する。この灰汁に菊ちがいにした下地紙を漬け込んでいく。この作業を灰汁漬けという。一枚ずつ灰汁で濡らし灰汁が全体に均一にいきわたるように慎重に作業する。十分に灰汁を吸い込んだら、絞り棒で灰汁を硬く絞り出す。絞ったものを取り出し、ござに並べて挟むぬれぼしを行う。ぬれぼしが終わったら手数によって一枚ずつはがす。打紙を上下 50 枚くらいの女紙で覆い、さらに白蓋を重ねて図 27 左のように束を作る。そして、灰汁替石と呼ばれる台の上を滑らせながら一番上の案内の野線を引いた白蓋（図 27 右）に従って灰汁替槌で叩く。まず斜線の右部を横線に挟まれた部分を順々に打つ。次に横線のうえを一段ずつ横に打ち終わったら上下を入れかえて打ち、さらに裏返して反対側も同様に打つ。のべ仕込みと同じように叩くのは灰汁の分子を紙の目に均一に並べるため、この均一具合が打紙の品質を分け、金箔の仕上がりに影響する。

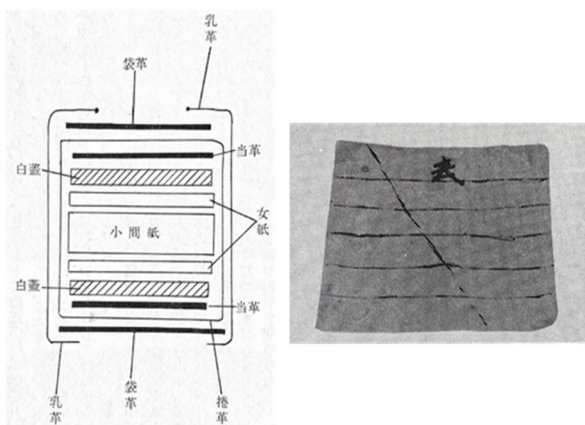


図 27 束の構造（左）と槌打ちの案内線（右）^[4]

ここまでの灰汁漬け→ぬれぼし→手数→アク打ちの工程は一灰汁という。二灰汁済んだ紙は箔の打ち立ての初期段階である上澄の小間を打つ際にしか用いられない。この紙を小間紙という。小間紙を 3, 4 回箔打ちに用いると箔の伸びが著しく悪くなる。そこで、小間紙の機能を回復させるために 3 回目の灰汁漬けを行う。まず、兎の手で小間紙についている箔片をきれいに落とす。これは格子はきと呼ばれ、箔片が残っているとその部分だけ灰汁がしみこまないため、これを防ぐために行う。3 灰汁以降は灰汁に混合する柿渋や卵の量を少しずつ多くする。その量は経験と勘に基づく。4 灰汁までは小間打ち立て専用の紙であるが、5 灰汁済ませた後の紙からようやく一人前の働きをする箔打紙となり、名称が変わる。打紙は箔打ちで 15 回繰り返し使われると寿命を迎える。5 灰汁から 10 灰汁の間の打紙が最も伸びの良い働きのある段階である。この段階の紙を主紙もしくはまみがみと呼ぶ。灰汁の加減の良否、職人の打ち方の上手い下手のよっておもがみの使用期間は変わる。したがって、初灰汁からの加工の良否が仕上がりに直結するため、打紙づくりには細心の注意が払われる。紙によっては 10 灰汁以上繰り返すこともあるため大変な労力と手間を要する。

これらの工程が終わると粗ぞろえ・間ぞろえという和紙の縦目と横目を交互に組んでいく作業を行う。そして、1 枚ごとに熱を加え、湿気を飛ばす火あげを行い、再び叩いて紙を締める。火あげを 3 回行ってようやく箔打紙を作る工程は終了する。図 28 は完成した箔打紙である。

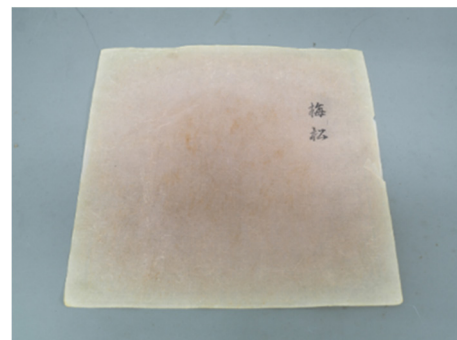


図 28 箔打紙

この工程で和紙に粘土や柿渋、卵などを含浸させる。柿渋と卵で架橋を起し強度と耐熱性を向上させ、粘土は表面の潤滑性と帯電防止作用を施すとい

われている。灰汁処理は箔打紙を再利用するためにも行われる。主な理由として箔打紙は箔打機で何度も打たれることで紙の使用回数が多くなるにつれて繊維間の結合強度が弱まり、それに伴い弾性的伸縮能力は低下することが挙げられる。藁灰の主成分は図29が示すように、炭酸カリウム (K_2CO_3)、炭酸カルシウム ($CaCO_3$)、炭酸マグネシウム ($MgCO_3$) などの炭酸塩であるため、灰汁の中にはこれらの水酸化物が生じる^[21]。水酸化物は卵に含まれる脂肪と結合してアルカリ金属石鹸を形成する。これは潤滑剤としての役割を果たす。また、卵にはタンパク質が含まれる。タンパク質は和紙の繊維同士をくっつける接着剤の役割を担い、さらに柿渋に含まれるタンニンと結合して沈殿物を形成する。これが繊維間に充填されることで表面の平滑化と紙の密度が

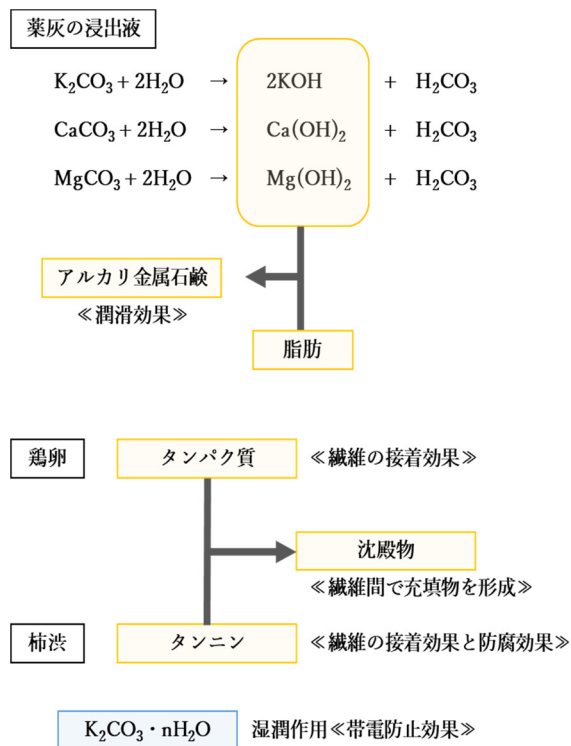


図29 灰汁の成分とその効果^[22]

向上すると考えらる。柿渋にも接着効果があり、炭酸カリウムは吸湿性があるので帯電性を付与する。このように灰汁工程では箔打ちに必要な弾性的伸縮能力の高さ、強靱で疲労強度が高いこと、表面が滑らかで適当な摩擦係数を有することや帯電しないなどの特性を維持または向上するという効果がある。

現代的な製法の断切工程では和紙の代わりにグ

ラシン紙を用いる。グラシン紙とは、亜硫酸パルプなどの化学パルプを長時間かけてどろどろとした状態にする叩解（こうかい）を施し、さらにスーパーカレンダーと呼ばれるローラーを用いて熱と圧力をかけ繊維間の隙間がなくなるまで潰し、平滑度と密度を高めた紙である。グラシン紙は半透明の紙で光沢を有し、加えて高密度であるため耐油性や耐湿性に優れる。優れた性質を持つものの和紙同様単体では性能が充分でない。そこで、金箔製造においてはグラシン紙にカーボン塗布する。カーボンは3000℃に耐える耐熱性を持ち、熱をよく通す。さらに導電性や強度が高く、摩擦が少ない、弾性が低いなど多くの性質を持つ。これらの性質は灰汁処理を施された和紙には及ばないが、箔打紙に必要な特性である、強度、表面の平滑度や帯電性などの条件を満たしているため、カーボン塗布されたグラシン紙が使用されるようになったと考えられる。グラシン紙は経年劣化しやすく、繰り返しの使用に適さないが箔打紙に比べて製作に手間がかからず、大量に作ることが可能である。

現在も金箔製造は全世界で行われている。ヨーロッパではドイツ、フランス、イタリアで生産されており、アジアでは日本、中国、韓国、タイ、ミャンマー、インド等である。さらにアメリカでも製造されている。どの国でも金箔製造のプロセスはほとんど同じである。ところが、箔を延ばす際に使用する箔打紙は国によって大きく異なる。

アジアでは紙漉きの技術を用いて、繊維が非常に細く、強靱な繊維を持つ植物を原料とした紙を製造していた。中国では竹から作られた毛辺紙に油煙を紙表面に塗布した紙が使われている。日本は楮（こうぞ）や三桠（みつまた）、雁皮（がんび）を原料とした和紙を使用している。一方、ヨーロッパの箔打紙は、動物の皮から作られている。なぜなら、ヨーロッパは古くから畜産が盛んであり、羊皮紙などが発達したためである。箔打ちの序盤では羊皮紙を使い、仕上げには盲腸の様な獣皮を使用していた。また、時代が進むにつれて安価で平滑性に優れたプラスチックフィルムを使用した製箔に移行していく。

このように、それぞれの気候や植生による紙自体の原料の違いが箔打紙に地域性をもたらしたと考えられる。

5. まとめ

金箔の製造はエジプトで始まったと言われており、その歴史は紀元前 4000 年までさかのぼる。当時は主に美術品の装飾に用いられていた。金箔や製箔技術は、エジプトからフランスやイギリスをはじめとするヨーロッパや、インドや中国を含むアジアを中心に世界中へ広まり、日本には 8 世紀初頭に仏教文化と共に伝わってきた。日本においては、金箔は仏壇の用途が多く、神社仏閣や工芸品に使用されている。現在、金箔製造は金沢市の製造がほとんどである。16 世紀末に金沢での製造が始まった。歴史的背景や製造に適した環境、信仰されている宗教がもたらした需要等の多くの条件を満たした土地であったことが金沢で金箔製造が盛んな要因であると考えられる。製箔技術は紀元前から現代に至るまで大きな変化はないが、挟み込み紙は地域ごとに異なるものを使用している。一方で打箔の道具は変化が見られ、石から木柄の鋳鉄製のハンマーに変化し、19 世紀からは打箔の機械化の試みも始まった。20 世紀には世界的に機械化が確立された。日本においては、伝統的な製法に比べ、生産効率が高い現代的製法が考案されるなどの技術革新を経て、現在まで製箔技術が伝承されている。

金箔は日本の建築、美術、工芸など多くの分野で活用されている。特に国宝や重要文化財の修復・修繕には必要不可欠である。しかし、江戸時代から途絶えることなく受け継がれてきた金箔製造技術は現在、苦境に立たされている。バブル崩壊を機に金箔の需要は減少し続け、さらに金箔職人の減少・高齢化も進んでいる。後継者不足も顕著であるため、日本の素晴らしい伝統文化が途絶えることも懸念されている。後世にも金箔製造の技術を継承していくためには金箔や製造技術について解明し、多くの人々に知ってもらうことが重要である。金箔・箔打紙の製造技術は経験に基づくものが多く、原理や作業工程の物理化学的意味が明らかとなっていない部分も多い。特に、放熱・冷却工程の熱管理には職人の経験と勘に頼る部分が多い。本稿著者 2 名は、今後、箔打ち工程の伝熱工学的解明を試み、将来的には、箔打ち工程の熱制御に関する改良の提案を目指している。

今回、金箔製造に関する歴史を紐解き、製造技術を見直すことで、新たな価値の創出や技術のさらなる発展にわずかでも寄与できたら幸いである。

謝辞

本調査研究において、打箔工程の取材や計測等に協力していただいた(株)今井金箔の代表取締役社長・今井康弘氏並びに箔打職人の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 今井康弘, 永井二郎, 金沢金箔の製造における「熱」との関わり, 第 57 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, H232 (2020).
- [2] 高見怜, 永井二郎, 金箔製造技術の歴史的変遷調査と箔打工程の熱工学的検討, 日本機械学会北陸信越支部第 58 期総会・講演会講演論文集, B031 (2021), pp.1-2.
- [3] 高見怜, 永井二郎, 金箔製造技術の歴史的変遷, 日本機械学会北陸信越支部 2022 年合同講演会講演論文集, A042 (2022), pp.1-2.
- [4] 下出穂興, 加賀金沢の金箔, 北国出版社, (1972)
- [5] Darque-Ceretti, E., Aucouturier, M., "Gilding for matter decoration and sublimation. A brief history of the artisanal technical know-how", 1st International Conference on Innovation in Art Research and Technology, 4 (2013), pp.647-660.
- [6] Nicholson, E.D., "The ancient craft of gold beating", Gold Bulletin, 12 (1979), pp.161-166.
- [7] Fauskolb, F.W., "History of gold leaf and its uses", Smithsonian Institution Libraries, (1861).
- [8] Theophilus, 'De Diversis Artibus', Book I, Chapter 23, translated into English by J. G. Hawthorne and C. S. Smith, 'On Divers Arts: The Treatise of Theophilus', The Chicago University Press, Chicago, (1963), pp.39-41.
- [9] レベッカ・ブラック, マイケル・W・フィリップス・ジュニア, 図解 金の文化史, 原書房, (2016).
- [10] D.Diderot, J.L.R.D'Alembert, Encyclopédie, ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers, (1751 -1772).
- [11] 北國新聞社出版局, 日本の金箔は 99%が金沢産, 時鐘舎, (2006).
- [12] 川上明孝, 金箔の歴史,製造工程,応用技法, 表面技術, 70-5 (2019), pp.248-254.
- [13] NHK 放送文化研究所, 現代の県民気質—全国県民意識調査一, 日本放送出版協会, (1996).

- [14] 加藤明, 金箔の変遷: 断切技術出現過程を中心とした予備的考察, 北陸地域研究, 1-1 (2009), pp.44-45.
- [15] 金沢市安江金箔工芸館, 金沢と金箔 大正以降～戦後,
<https://www.kanazawa-museum.jp/kinpaku/history/index.htm> (参照 2022/06/24)
- [16] 金箔金箔伝統技術保存会, 金箔伝統箔の技法 [DVD], (2009).
- [17] 大角富康, 金箔の物性に関する基礎研究—光学的手法を用いた金箔の形状計測—, 金箔箔技術振興研究所, (2011).
- [18] 箔座株式会社, 「伝統金箔・縁付の製法」と「現代金箔・断切の製法」,
<https://www.hakuza.co.jp/haku/process.html> (参照 2022/06/24)
- [19] 金箔箔技術振興研究所ニュースレター, 17 (2017), pp.1-4.
- [20] ウォーターサーバー研究室, 日本の天然水パワー再発見! 和紙作りを支えてきた水の力とは?
<https://www.news-postseven.com/lab/waterserver/column/natural-water-supported-making-japanese-paper/> (参照 2022/06/24)
- [21] 北川和夫, 伝統産業としての金箔製造技術, まてりあ, 33-10 (1994), pp.1299-1308.
- [22] 金箔箔技術振興研究所ニュースレター, 6 (2012), pp.1-4.
-

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2022 年					
7 月	1(金)	第 9 回「伝熱工学の基礎」講習会		第 9 回「伝熱工学の基礎」講習会運営事務局 basic-lecture2022@pacmice.jp	

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2022 年					
8 月	7(日) ～ 10(水)	The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP13)		PSFVIP13 実行委員長 横野 泰之 TEL: 03-5841-0616 E-mail: yokono@mech.t.u-tokyo.ac.jp	
	8(月) ～ 10(水)	第 19 回日本熱電学会学術講演会		九州工業大学 宮崎康次 miyazaki.koji055@mail.kyutech.jp	
	8(月) ～ 10(水)	第 50 回可視化情報シンポジウム		一般社団法人可視化情報学会事務局 FAX : 03-5993-5026 e-mail : office@vsj.jp	
	19(金) ～ 21(日)	日本混相流学会混相流シンポジウム 2022		日本混相流学会 office@jsmf.gr.jp	
	24(水) ～ 26(金)	日本実験力学会 2022 年度年次講演会		新潟大学医学部保健学科内 日本実験力学会事務局 担当 : 高木由紀子 / Tel: 025-368-9310 / Fax: 025-368-9309 / E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
	26(金) ～ 28(日)	流体若手夏の学校 2022		実行委員代表幹事 神山一貴 E-mail: ryutaiwakate2022@gmail.com	
9 月	7(水) ～ 9(金)	2022 年度日本冷凍空調学会年次大会		日本冷凍空調学会 年次大会協賛担当 : 宇田 Tel: 03-5623-3223 E-mail: y.uda.pa@jsrae.or.jp	
	8(木) ～ 9(金)	No.22-68 講習会「伝熱工学資料(改訂第 5 版)の内容を教材にした熱設計の基礎と応用		(一社)日本機械学会出版販売グループ熱工学部門担当 小倉	
	17(土) 25(日)	2022 年度計算力学技術者(CAE 技術者)資格認定事業		(一社)日本機械学会事業企画グループ 金子 caenintei@jsme.or.jp	
	27(火) ～ 29(木)	日本流体力学会 年会 2022		(一社)流体力学会事務局 Tel:03-3714-0427 E-mail: jsfm@fr7.so-net.ne.jp	
10 月	12(水) ～ 13(木)	第 50 回日本ガスタービン学会定期講演会		(公社)日本ガスタービン学会 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
	25(火) ～ 27(木)	第 43 回日本熱物性シンポジウム		日本熱物性学会事務局 jstp@okayama-u.ac.jp	
	29(土)	日本機械学会関東支部山梨講演会		(一社)日本機械学会関東支部 E-mail: kt-staff@jsme.or.jp	
11 月	16(水) ～ 18(金)	日本機械学会第 34 回計算力学講演会		(一社)日本機械学会 計算力学部門 石澤 E-mail: m.kondo@jsme.or.jp	
	21(月) ～ 24(木)	第 60 回燃焼シンポジウム		(一社)日本燃焼学会 office@combustionsociety.jp	
12 月	3(土)	22-75 第 24 回スターリングサイクルシンポジウム		(一社)日本機械学会エンジンシステム部門事務担当 渡邊 watanabe@jsme.or.jp	
2023 年					
4 月	2(日) ～ 7(金)	日本混相流学会混相流国際会議 2023		日本混相流学会 office@jsmf.gr.jp	
9 月	24(日) ～ 27(水)	33rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-33)		ISTP-33 実行委員会幹事 渡邊則彦 nwatanabe@mec.sojo-u.ac.jp	

公益社団法人日本伝熱学会第60期（2021年度）総会議事録

1. 日 時 2022年5月19日（木）16:40～17:40
2. 場 所 長良川国際会議場A室およびオンライン（Cisco Webex）
3. 正会員数 990名
4. 出席者 499名（出席者148名、委任状出席351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（496名）を上回り、総会は成立した。

5. 議事経過

定款第27条により宗像鉄雄会長が議長となり、以下の議案について逐次審議した。

第1号議案 第60期（2021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60期（2021年度）総会議案（以下、「総会議案」と呼ぶ）の第1号議案第60期（2021年度）事業報告について諮り、全会一致でこれを可決した。

第2号議案 第60期（2021年度）会務報告の件

議長より、総会議案の第2号議案第60期（2021年度）会務報告について諮り、全会一致でこれを可決した。

第3号議案 第60期（2021年度）収支決算の件

議長より、総会議案の第3号議案第60期（2021年度）収支決算について諮り、全会一致でこれを可決した。

第4号議案 第61期（2022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61期（2022年度）役員・協議員の選出について、以下のとおり次期役員・協議員の提案がなされ、全会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	佐藤 英明	理事	店橋 護
理事	田部 豊	理事	埜上 洋
理事	稲田 孝明	理事	浅野 等
理事	中原 真也	理事	近藤 義広
理事	富永 健一	理事	藤野 宏和
監事	大久保 英敏		

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）	宗像 鉄雄	理事（副会長）	高松 洋
理事	板谷 義紀		

第61期（2022年度）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	近藤 義広	理事	店橋 護
----	-------	----	------

理事	植村 豪	理事	鹿野 一郎
理事	白樫 了	理事	芝原 正彦
理事	田之上 健一郎	理事	近藤 良夫
理事	矢嵩 健史	監事	井上 剛良

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	高松 洋	理事	小原 拓
理事	高橋 厚史		

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、高松洋氏、鹿園直毅氏の 2 名を選任し、全会一致でこれを可決した。

第 6 号議案 第 61 期（2022 年度）事業計画の件

議長より、総会議案の第 6 号議案第 61 期（2022 年度）事業計画について報告を行った。

第 7 号議案 第 61 期（2022 年度）収支予算の件

議長より、総会議案の第 7 号議案第 61 期（2022 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。

2022 年 5 月 19 日

公益社団法人日本伝熱学会第 60 期（2021 年度）総会

議長 宗像 鉄雄 _____ 印

議事録署名人 高松 洋 _____ 印

議事録署名人 鹿園 直毅 _____ 印

2022 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
 - ・ 申請書・推薦書の書式は、本学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい。
 - ・ 学術賞、技術賞、貢献賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので、ご注意ください。
- (2) 論文抜刷または技術内容参考資料（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（学術賞、奨励賞のみ）

4. 提出期限

2022 年 12 月 16 日（金）

5. 提出先および問い合わせ先

いずれの書類も PDF 化し、下記電子メールアドレス宛にお送り下さい。

東北大学 流体科学研究所 小原 拓

E-mail: ohara@ifs.tohoku.ac.jp

TEL 022-217-5277

(〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)



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：白樫 了（東京大学）：aa21150@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長：永井二郎（福井大学）：nagai@u-fukui.ac.jp
- ・広報委員会委員長：櫻井 篤（新潟大学）：sakurai@eng.niigata-u.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：長谷川洋介（東京大学）：ysk@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：office@htsj.or.jp

【注意】

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

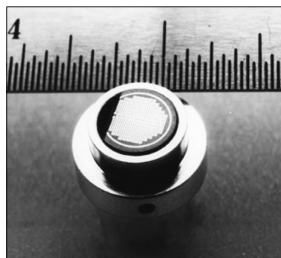
熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。

弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。

特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束 マイクロセンサー



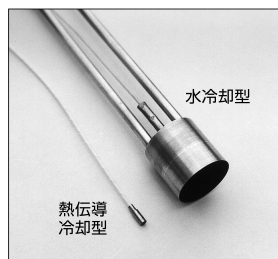
特徴

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

使用例

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

サーモゲージ

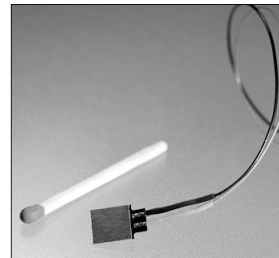


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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

gSKIN® 熱流束センサー



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

使用例

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



センサテクス株式会社

URL

www.senstech.jp

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

E-mail

info@senstech.jp



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

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

CAPTEC 社(フランス)

CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。

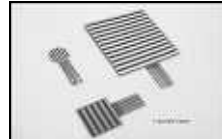
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



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

輻射センサー



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

MEDTHERM 社(アメリカ)

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

熱流計／輻射計



熱流束範囲: 0.2〜4000Btu/ft²sec(フルスケール)
サイズ: 1/16 インチ(約 1.6mm)〜1 インチ(約 25.4mm)
最高温度: 200℃(水冷なし)／1500℃(水冷)
出力信号: 0〜10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

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

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



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

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

ITI 社(アメリカ)

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

高温用熱流板



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

水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900℃
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0〜3000W/cm²

当社取扱製品の適用分野

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

有限会社 テクノオフィス

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

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

昨年の6月に編集出版部会長に就任し、はや1年が経ちました。自分の非力さと歴代の部会長の努力・工夫を思い知らされる1年でした。こんな頼りない部会長ですが、部会委員の皆様と学会事務局に支えて頂き、何とかやってこれました。篤く御礼申し上げます。

さて、本号では「断熱・遮熱－熱流を抑える技術とその動向－」の特集を小宮敦樹先生（東北大学）に組んでいただきました。小宮先生が執筆された特集 preface にも書かれている通り、断熱の重要性は一段と高まっております。カーボンニュートラル達成のため、再生可能エネルギー利活用研究開発ももちろん大切ですが、まずは省エネ、そのための一丁目一番地が断熱です。一般的には見過ごされがちと感じており、大学院の授業では強調して説明しているつもりです。大変タイムリーで重要な断熱に関して、素材や測定技術における代表的な研究者の皆様からご寄稿をいただきました。ご多用にも関わらずご寄稿くださった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

永井 二郎（福井大学）

Niro NAGAI (University of Fukui)

e-mail: nagai@u-fukui.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 小原 拓（東北大学）

編集出版部会長 永井 二郎（福井大学）

委員

（理事） 丸山 直樹（三重大学）、坂村 芳孝（富山県立大学）、田之上 健一郎（山口大学）、矢島 健史（東京電力）

（協議員） 浅岡 龍徳（信州大学）、小針 達也（日立製作所）、小宮 敦樹（東北大学）、塚原 隆裕（東京理科大学）、矢吹 智英（九州工業大学）、田中 三郎（日本大学）、櫻井 篤（新潟大学）、小川 邦康（慶應義塾大学）

TSE チーフエディター 鈴木 雄二（東京大学）

TSE 編集幹事 李 敏赫（東京大学）

編集出版部会 連絡先： 〒910-8507 福井市文京 3-9-1
福井大学 学術研究院工学系部門
永井 二郎
Phone: 0776-27-8537
E-mail: nagai@u-fukui.ac.jp