

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

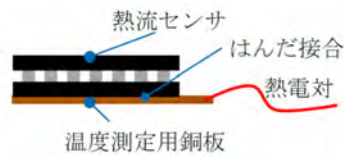
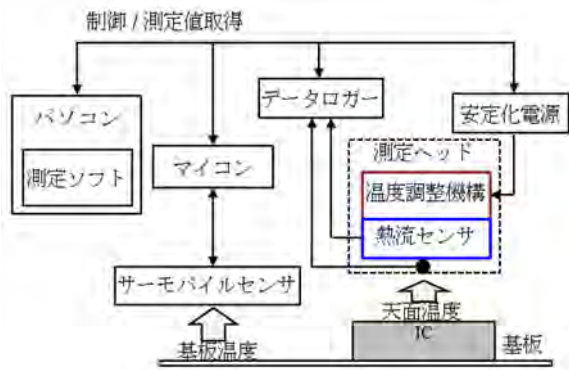
ISSN 1344-8692 Vol. 60, No. 250
2021. 1

Thermal Science and Engineering

ISSN 0918-9963 Vol. 29, No. 1
2021. 1

HETSJ

◆特集：製品設計に活用される伝熱工学

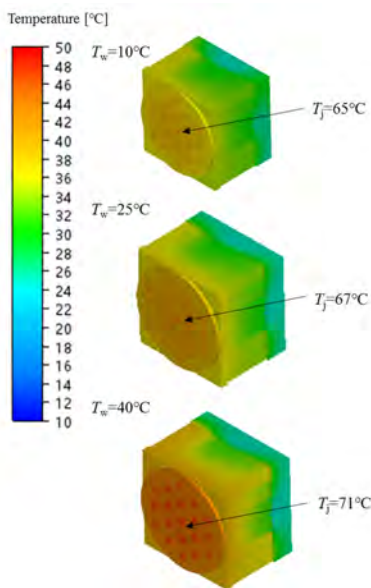


左：発熱量測定システムのブロック図

右：熱流センサの構造

従来品に比べセンサ素子を単位面積当たり 3 倍以上の高密度で実装し、デバイス面積当たりを得られる起電圧を向上させた高素子密度の熱流センサを開発した。このデバイスを電子部品の発熱量測定システムに利用している。

(特集記事「熱流センサを用いた電子部品の発熱量測定技術の開発
(沼本 竜彦, 伊豫田 真, 菊池 文孝, 志水 大助)」より)



(a) UVLED Unit



(b) Water sterilization reactor

左：CFD 解析によって求めた紫外線 LED ユニットの温度分布

右：熱回路網法, CFD 解析を経て開発された紫外線水処理装置の試作品

265nm の深紫外 LED を用いた通水型消毒装置の熱設計および試作検証を行った。目標仕様を決定し、理論に基づく概略設計 (熱回路網法を使用), 詳細設計 (CFD 解析を使用) を行い, 最後に試作検証を行って熱的な成立性を確認した。

(特集記事「深紫外 LED を用いた消毒用途向け製品に関する熱設計技術 (松本 尚子)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

沼本 竜彦, 伊豫田 真, 菊池 文孝 (パナソニック株式会社), 志水 大助 (パナソニックデバイスコンポーネント株式会社) 松本 尚子 (スタンレー電気株式会社) ……表紙裏	
---	--

〈特集：製品設計に活用される伝熱工学〉

特集「製品設計に活用される伝熱工学」にあたって ……梶田 欣 (名古屋市工業研究所) …… 1	
代表体積要素モデルを用いた粒子充てんポリマー系複合材料の熱伝導率評価 ……………真田 和昭 (富山県立大学) …… 2	
熱流センサを用いた電子部品の発熱量測定技術の開発 ……………沼本 竜彦, 伊豫田 真, 菊池 文孝 (パナソニック株式会社), 志水 大助 (パナソニックデバイスコンポーネント株式会社) …… 8	
トロイダルコイルの熱解析 ……壁谷 真人 (株式会社 豊田自動織機) …… 14	
深紫外 LED を用いた消毒用途向け製品に関する熱設計技術 ……………松本 尚子 (スタンレー電気株式会社) …… 21	
製品開発に活用する熱設計技術 ……畑 陽介, 野上 英和 (ブラザー工業株式会社) …… 26	
1DCAE を活用した熱設計 ……安井 良 (株式会社河合電器製作所) …… 32	

〈第 57 回日本伝熱シンポジウム〉

第 57 回日本伝熱シンポジウム特別オンラインセッションの報告 ……………桃木 悟 (長崎大学), 巽 和也 (京都大学), 近藤 義広 (日立アカデミー), 鹿園 直毅 (東京大学), 小宮 敦樹 (東北大学) …… 36	
優秀プレゼンテーション賞 受賞者 – 第 57 回日本伝熱シンポジウム – ……………学生会委員会 委員長 巽 和也 (京都大学), 幹事 西山 貴史 (福岡大学) …… 40	

〈特別寄稿〉

「熱伝導に基礎をおく熱電効果の解釈」 ……大杉 功 (株式会社テックスイージー) …… 41	
--	--

〈委員会報告〉

日本伝熱学会特定推進研究課題報告書 ……………特定推進研究企画委員会 鹿園 直毅 (委員長・東京大学), 加藤 之貴 (東京工業大学) …… 46	
---	--

〈報告〉

日本伝熱学会主催 オンライン講習会

「計測技術 ～測定的基础と最新の非接触計測技術～」開催報告

……………企画部会産学交流委員会：佐藤 航（日立），羽鳥 仁人（ベテル），
近藤 義広（日立アカデミー），西 剛伺（足利大学）…………… 48

〈行事カレンダー〉…………… 51

〈お知らせ〉

日本伝熱学会創立 60 周年記念 第 58 回日本伝熱シンポジウムのご案内…………… 52

優秀プレゼンテーション賞（第 58 回日本伝熱シンポジウム）について…………… 58

・事務局からの連絡…………… 59

〈編集出版部会ノート〉…………… 63

Vol.60, No.250, January 2021

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Tatsuhiko NUMOTO, Makoto IYODA, Fumitaka KIKUCHI (Panasonic Corporation), Daisuke SHIMIZU (Panasonic Device Component Co.,Ltd.) Naoko MATSUMOTO (Stanley Electric Co., Ltd.)	Opening Page
--	--------------

< Special Issue: Heat Transfer Engineering used for Product Design >

Preface to the Special Issue on “Heat Transfer Engineering used for Product Design” Yasushi KAJITA (Nagoya Municipal Industrial Research Institute)	1
Evaluation of Thermal Conductivity of Particle-Filled Polymer Composites Using Representative Volume Element Models Kazuaki SANADA (Toyama Prefectural University)	2
Development of Measurement Technology of Heat Generation for Electronic Components Using Heat Flow Sensor Tatsuhiko NUMOTO, Makoto IYODA, Fumitaka KIKUCHI (Panasonic Corporation), Daisuke SHIMIZU (Panasonic Device Component Co., Ltd.)	8
Thermal Simulation of Toroidal Coil Masato Kabetani (Toyota Industries cooperation)	14
Thermal Design Technology for Sterilization Products Using Deep UV LEDs Naoko MATSUMOTO (Stanley Electric Co., Ltd.)	21
Thermal Management Technology for the Product Development Yosuke HATA, Hidekazu NOGAMI (Brother Industries, Ltd.)	26
Thermal Design Using 1DCAE Ryo YASUI (KAWAI CORPORATION)	32

< The 57th National Heat Transfer Symposium of Japan >

Report on the Special Online Session at the 57th National Heat Transfer Symposium of Japan Satoru MOMOKI (Nagasaki University), Kazuya TATSUMI (Kyoto University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy, Ltd.), Naoki Shikazono (The University of Tokyo), Atsuki Komiya (Tohoku University)	36
Best Presentation Award Winner - 57th National Heat Transfer Symposium of Japan - Kazuya TATSUMI (Kyoto University), Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University)	40

< Contribution >

Interpretation of Thermoelectric Effects Based on Thermal Conduction Isao OHSUGI (TEXeg Co. Ltd.)	41
--	----

< Committee Report >

Report of Specific Promotion Researches in Heat Transfer Society of Japan

Specific Promotion Research Planning Committee:

Naoki SHIKAZONO (Chairperson, The Univ. of Tokyo)

Yukitaka KATO (Tokyo Inst. Tech) 46

< Report >

Report on The Lecture “Measurement Technology, Foundation of Temperature and Novel Contactless Measurement”

Wataru SATO (Hitachi), Kimihito HATORI (Bethel),

Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Koji NISHI (Ashikaga University) 48

< Calendar > 51

< Announcements > 52

< Note from the JHTSJ Editorial Board > 63

特集「製品設計に活用される伝熱工学」にあたって

Preface to the Special Issue on "Heat Transfer Engineering used for Product Design"

梶田 欣 (名古屋市工業研究所)

Yasushi KAJITA (Nagoya Municipal Industrial Research Institute)

e-mail: kajita.yasushi@nmiri.city.nagoya.jp

工学は実社会への有用性が重要視されますが、中でも伝熱工学は対象とする分野が広いと感じます。昨年はコロナウイルスが世界中に広がり、その感染拡大防止の手段として多くの施設の入口に赤外線サーモグラフが設置されました。また、外出前の体温測定が求められ、これほど多くの人々が熱測定を行ったことは初めてではないでしょうか。このように多くの人に利用されている伝熱技術は工業製品の設計においては特に深くかかわりがあります。製品が適切に動作するか評価するために行われる熱計測、製品設計時に利用される簡易的な熱計算や詳細な熱解析など利用方法も多岐にわたります。このように伝熱工学が広く深く利用される要因に計算機の高速度・大容量化が考えられます。これによって、熱計測や詳細な3次元解析が安価にできるようになり、熱設計を行いやすくなりました。そして、設計段階から製品稼働時の温度を精度よく予測する取り組みが行われるようになりました。それにともなって熱物性値などの入力値の重要性が増し、これらを計測するための技術開発が行われています。本特集では製品設計に必要な熱物性値、発熱量を求めるための技術、それらを利用して製品設計に活用されている技術を紹介し、製品設計では、発生してしまう熱によって温度が規定値を超えないための放熱に主眼をおく技術と、適切な高温を保つために熱を積極的に発生させて利用する技術を紹介し、

最初に富山県立大学真田和昭氏に複合材料の熱伝導率についてご紹介いただきました。熱解析には熱伝導率が重要な入力値ですが、特に複合材料では内部での熱的な挙動が明確になっていない場合が多いのが現状です。今回は複合材料内部での温度変化の測定とそれらのシミュレーションについて解説していただきました。

次にパナソニック株式会社の沼本竜彦氏らに電子部品の発熱量測定についてご紹介いただきまし

た。熱解析には熱物性値と同様に発熱量も重要な入力値であるにも関わらず、特に電子機器においては発熱量の求め方が定まっていません。先行研究が非常に少なく、重要な技術開発であると考えます。また、記事の中で紹介されている熱流センサは海外製も含めて同等の製品がほとんど見当たらず、熱計測には貴重なセンサといえます。

次の4件では伝熱工学を製品設計に直接利用している事例を紹介し、株式会社豊田自動織機の壁谷真人氏にはトロイダルコイルの熱解析についてご紹介いただきました。コイルは形状が複雑であり、現代の計算機でも詳細な形状の解析は困難であり、精度を保ちながら実用的な時間で計算できるよう簡易化されています。また、コイルは電気的な挙動の把握が難しく、発熱量を求めることが困難です。これを実測で確認しながら電磁界解析で求めています。スタンレー電気の松本尚子氏には深紫外LEDを用いた製品の熱設計についてご紹介いただきました。LEDの発熱は以前から課題になっていますが、熱設計にフロントローディングの考え方を取り入れて効率的な開発プロセスを構築されています。ブラザー工業株式会社の畑陽介氏らにはインクジェットプリンタ・複合機の熱設計についてご紹介いただきました。熱回路網とCFDの長所を組み合わせることで製品設計に有効活用されています。最後に株式会社河合電器製作所の安井良氏にIDCAEを活用したホットプレートの熱設計についてご紹介いただきました。任意の温度分布や均熱を実現して熱を有効に利用するため、実測とCFDを利用しながらIDCAEによる設計手法を開発されています。その結果、設計の短期化につながっています。

機密保持の観点から製品設計に関する内容については執筆に制限があったと思いますが、各稿の筆者の皆様には快く原稿執筆をお引き受け頂きました。心より感謝申し上げます。

代表体積要素モデルを用いた粒子充てんポリマー系複合材料の熱伝導率評価

Evaluation of Thermal Conductivity of Particle-Filled Polymer Composites Using Representative Volume Element Models

真田 和昭 (富山県立大学)

Kazuaki SANADA (Toyama Prefectural University)

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

1. はじめに

近年、電子機器は小型・高性能化が著しく、電子機器の信頼性確保には、放熱対策（サーマルマネジメント）が必須の技術となっている。現在、サーマルマネジメント材料として、高分子材料（ポリマー）に高い熱伝導率の無機粒子等を充てんした粒子充てんポリマー系複合材料が注目され、より一層の高熱伝導化が期待されている。粒子充てんポリマー系複合材料の高熱伝導化を実現するための従来技術として、ポリマー中に粒子を高充てんする技術がある。この技術は、粒子の粒度分布を制御することにより、最も粒子間の隙間が小さくなる最密充てん構造を形成することで、粒子の高充てんを達成し、高熱伝導化を図る技術である。また、最近の技術として、スケールの異なる多種多様な形状の粒子をハイブリッド化し、少量の粒子で材料内部に熱の伝わる経路を効率良く形成することで、高熱伝導化を図る技術が注目されている。

一方、最密充てん構造を形成したポリマー系複合材料や多種多様な形状の粒子をハイブリッド化したポリマー系複合材料の微視構造は、非常に複雑となり、熱伝導特性に影響を与える因子が多くなる。そのため、多くの実験により熱伝導特性を評価する必要があり、研究開発にコストと時間を費やしているのが現状である。そこで、数値シミュレーション技術を活用して、実験を補完することで、研究開発のコストと時間を削減しようとする取り組みが活発に行われている。現在、複合材料の微視構造を詳細に考慮して特性評価する数値シミュレーション技術として、代表体積要素 (Representative Volume Element, RVE) モデルを用いた有限要素解析が注目されている。RVE モデルでは、様々なスケールでの粒子の形状と配置を再現した微視構造が作成でき、粒子・ポリマーの特性、粒子・ポリマー間の界面特性等を詳細に考慮して複合材料特性を求めることが可能となる。本稿では、サーマルマネジメント

材料として期待されている粒子充てんポリマー系複合材料を対象に、RVE モデルを用いた有限要素解析による熱伝導特性評価事例について紹介する。

2. 熱伝導性粒子の種類と形状

2.1 種類

熱伝導性粒子は、絶縁性、導電性に大別される。絶縁性の熱伝導性粒子としては、アルミナ (Al_2O_3)、マグネシア (MgO)、結晶性・熔融シリカ (SiO_2) 等の酸化物系、窒化ホウ素 (BN)、窒化アルミニウム (AlN)、窒化ケイ素 (Si_3N_4) 等の窒化物系等に分類され、窒化物系の熱伝導率は、酸化物系の場合に比べて高い物質が多い。導電性の熱伝導性粒子としては、黒鉛、カーボンナノチューブ等の炭素系、金、銀、銅、アルミニウム等の金属系等に分類される。導電性の熱伝導性粒子の熱伝導率は、絶縁性の熱伝導性粒子の場合に比べて、非常に高い物質が多い。また、熱伝導性粒子の熱伝導率は、物質の純度に強く影響を受けたり、強い異方性を有していたりするので、選定には注意が必要である。

2.2 形状

熱伝導性粒子の形状は、無定形粒状・球状、繊維状、板状に大別できる。熱伝導性粒子の形状により複合材料の熱伝導率向上の効果が違いが現れ、繊維状が最も効果が高く、板状、球状の順に効果がある [1]。これは、熱の伝わる経路 (伝熱ネットワーク) を効率的に形成できるか否かに関連している。絶縁性の熱伝導性粒子としては、板状の六方晶窒化ホウ素 (h-BN) (図 1) が注目されている。h-BN の熱伝導率は、強い異方性を有し、面内方向の熱伝導率が 200W/mK 程度、厚さ方向の熱伝導率が 1W/mK 程度である。面内方向の熱伝導率を活用するために、h-BN の面内方向と熱の流れる方向を一致させるための配向制御技術が多数検討されている。また、h-BN を造粒して球状化し、熱伝導率の等方化を図った製品も開発されている。さらに、桑原ら [2] は窒化

ホウ素ナノチューブを開発している。窒化ホウ素ナノチューブは、直径 30~100nm, 長さ数 μm と CNT と同様な形状を有し、熱伝導率が約 3000W/mK と非常に高い。また、窒化ホウ素ナノチューブは、ポリマーとの界面親和性が高く、複合材料の熱伝導率の顕著な向上が期待される。

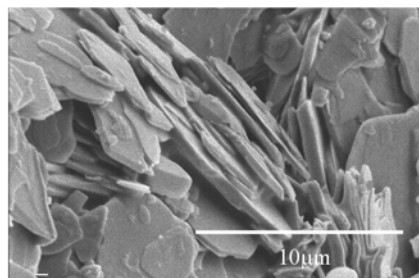


図 1 六方晶窒化ホウ素 (h-BN) の形状

3. RVE モデルを用いた熱伝導率に関する解析

3.1 粒子の高充てん

RVE モデルを用いることで、様々な粒子形状を考慮した粒子充てんポリマー系複合材料の熱伝導シミュレーションが可能となる。本研究室では、MSC ソフトウェア製の Digimat-FE を用いて RVE モデルを作成し、熱伝導特性に関する有限要素解析を行って、複合材料の熱伝導率を評価している。

図 2 は球状アルミナを高充てんした複合材料の RVE モデルを示したもので、アルミナ体積分率 75vol% の場合である。粒径の異なる球状アルミナを複数組み合わせることで粒度分布を制御することで高充てんが可能となる。

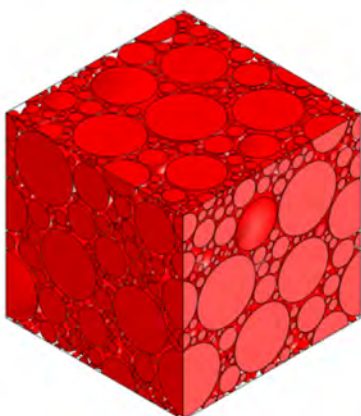


図 2 球状アルミナを高充てんした複合材料の RVE モデル

図 3 はアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率とアルミナ体積分率の関係を示したもので、RVE モデルを用いた有限要素解析結果と実験結果を比較している。解析では、アルミナの熱伝導率 30W/mK, エポキシ樹脂の熱伝導率 0.216W/mK とした。実験結果は、定常法およびホットディスク法を用いて測定された結果である。アルミナ体積分率 75vol% では、有限要素解析結果と定常法を用いて測定された結果がほぼ一致したが、アルミナ体積分率 77vol% では、有限要素解析結果に比べて、定常法を用いて得られた結果が高い値を示した。これは、アルミナ同士の接触によるパーコレーションに起因していると考えられる。また、ホットディスク法を用いて測定された結果は、定常法を用いて測定された結果に比べて高い値を示した。複合材料の熱伝導率は、測定方法により異なる値が得られており、測定方法が対象の複合材料に適用可能か否か測定原理を十分に検討する必要がある。

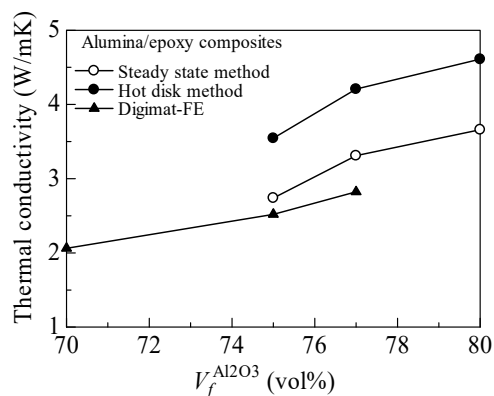


図 3 アルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率とアルミナ体積分率の関係

3.2 ボイドの存在

アルミナ体積分率が增大すると、複合材料の硬化前の粘度が上昇するため、空気を巻き込みやすくなり、内部にボイドが形成されやすくなる。図 4 にアルミナ体積分率 81vol% のアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の内部微視構造の観察結果を示す。粒子状のボイドやアルミナ・樹脂の界面付近のボイド等が観察された。そこで、図 5 に示す粒子状のボイドおよび界面付近のボイドを有するアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の RVE モデルを構築し、複合材料の熱伝導率とボイドの存在状態の関連性について検討した。

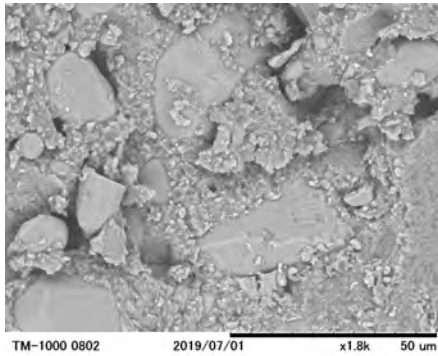


図 4 81vol%アルミナ/エポキシ樹脂複合材料の内部微視構造

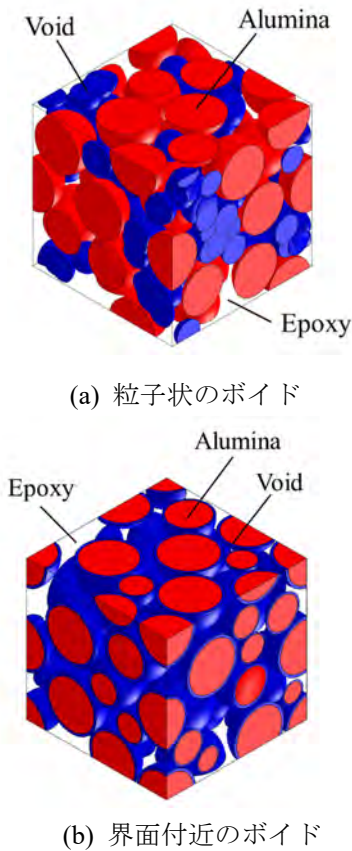


図 5 ボイドを有するアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の RVE モデル

図 6 は粒子状ボイドを有するアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率に及ぼすボイド体積率の影響を示したもので、アルミナ体積率を変化させた場合である。解析では、アルミナの熱伝導率 30W/mK、エポキシ樹脂の熱伝導率 0.216W/mK とし、ボイドの熱伝導率は、内部が空気で満たされていると仮定し、0.02W/mK とした。また、ボイド同

士は重なりを許可した。いずれのアルミナ体積率においても、複合材料の熱伝導率はボイド体積率の増大に伴い減少した。また、アルミナ体積率が增大すると複合材料の熱伝導率の減少割合が増大し、ボイドの影響を強く受けることが明らかとなった。図 7 は図 6 と同様なグラフであり、ボイド粒径を変化させた場合である。いずれのボイド粒径においても、複合材料の熱伝導率はボイド体積率の増大に伴い減少した。また、ボイド粒径の減少に伴い複合材料の熱伝導率の減少割合が増大した。従って、観察困難な小さなボイドほど複合材料の熱伝導率に強い影響を与えていることが明らかとなった。

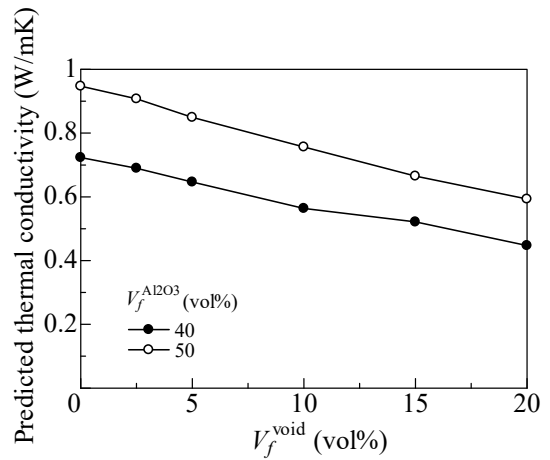


図 6 粒子状ボイドを有するアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率に及ぼすボイド体積率の影響 (アルミナ体積率変化)

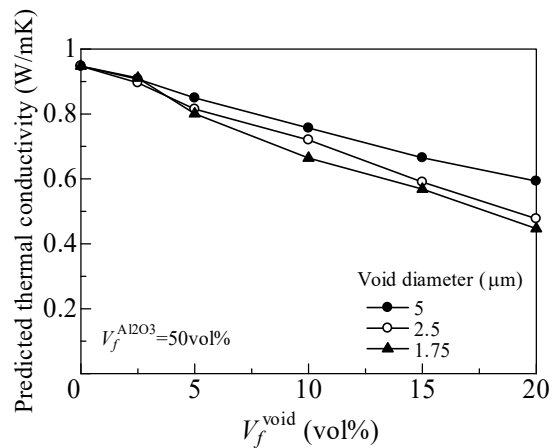


図 7 粒子状ボイドを有するアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率に及ぼすボイド体積率の影響 (ボイド粒径変化)

図 8 はボイドを有するアルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率を示したもので、粒子状のボイドの結果と界面付近のボイドの結果を比較している。なお、粒子状のボイドの場合は、ボイド同士の重なりを許可せず、粒径を 2.5, 1.75, 1.25 μm と変化させた。また、アルミナ体積分率は 50vol%, ボイド体積分率は 15vol%とした。ボイドの無い複合材料の熱伝導率と比較して、ボイドを有する複合材料の熱伝導率は低下したが、粒子状のボイドの場合に比べて、界面付近のボイドの場合は低下傾向が著しく強くなった。従って、複合材料の高熱伝導化には、熱伝導粒子と樹脂とのぬれ性を高めて、接着状態の良好な界面を形成することが重要である。

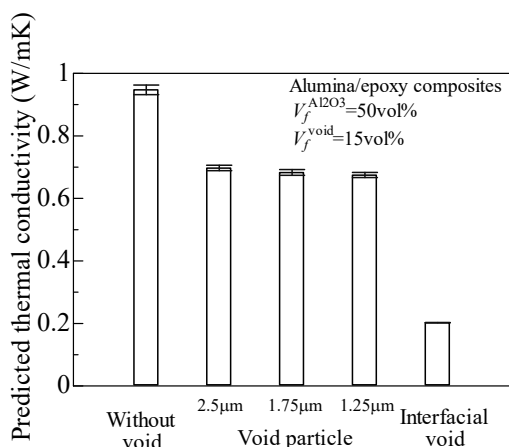


図 8 アルミナ/エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率とボイドの存在状態の関係

3.3 様々な粒子のハイブリッド

粒子のハイブリッド化により伝熱ネットワーク構造を形成する方法は、少量の粒子で効果的に熱伝導率を向上させる有効な手段である。図 9 は球状アルミナと炭素短繊維からなるハイブリッド粒子を想定した RVE モデルを示したもので、ランダム分散での最密充填構造を形成した場合である。様々な寸法の球状アルミナと炭素短繊維の組み合わせにおいて、最密充填構造を形成するための各粒子の充填条件を求めることができるとともに、複合材料の熱伝導率に対する粒子のハイブリッド効果を定量的に評価することが可能となる。図 10 は h-BN を想定した RVE モデルを示したもので、ランダム分散モデルと一方向配向モデルを示している。h-BN のような板状粒子を用いた場合、複合材料の

熱伝導率は粒子配向の影響を強く受けるため、粒子配向を考慮した RVE モデルを用いた複合材料の熱伝導率評価は重要である。また、白い板状粒子はパーコレーションクラスター（接触している粒子の集合体）を表しているが、一方向配向した場合のクラスターは、ランダム分散の場合に比べて、大きく形成されていることが明らかになった。

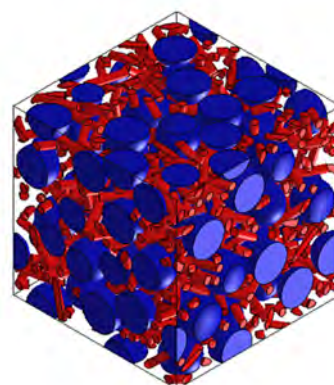
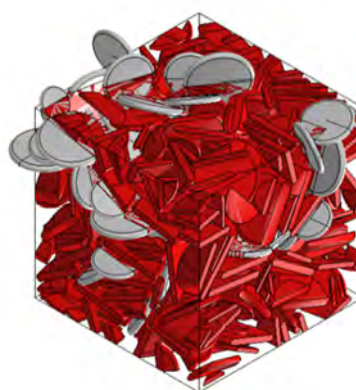
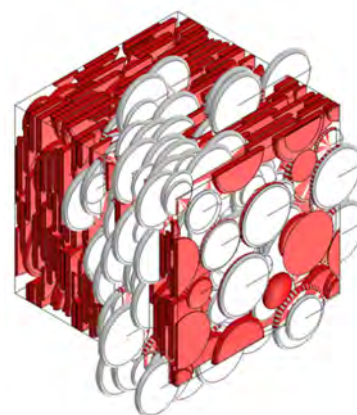


図 9 球状アルミナと炭素短繊維の RVE モデル



(a) ランダム分散



(b) 一方向配向

図 10 異なる分散状態の h-BN の RVE モデル

本研究室では、最密充てん構造を有するマイクロ粒子（球状アルミナおよび h-BN）の間隙にナノ粒子（CNT, アルミナナノワイヤー（ANW））を分散させ、ハイブリッド化によるマルチスケール伝熱ネットワークを形成することで、ポリマー系複合材料の高熱伝導化を図った[3, 4]。マイクロ粒子の最密充てん構造は Intelligensys 社製の MacroPac を用いて見出した。また、マイクロ粒子とナノ粒子をハイブリッド化したポリマー系複合材料の熱伝導率を MSC ソフトウェア製の Digimat-FE により評価した。図 11 にマイクロ粒子とナノ粒子をハイブリッド化した複合材料の RVE モデルを示す。ナノ粒子は、マイクロ粒子に比べて十分に微小であるため、マトリックスをナノ粒子が分散した複合材料として取り扱い、スケールの異なる 2 種類の RVE モデルを連成させた。また、解析に対応した実験を行い、解析モデルの妥当性とマルチスケール伝熱ネットワーク形成の有効性を検証した。

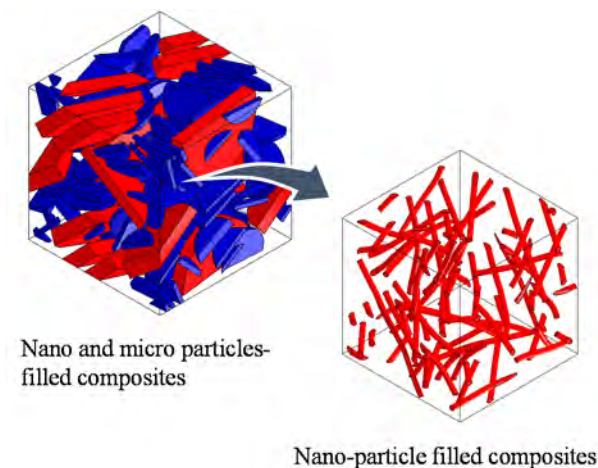


図 11 ナノ・マイクロ粒子をハイブリッド化した複合材料の RVE モデル

図 12 は実験で得られた球状アルミナ／エポキシ樹脂複合材料および h-BN／エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率に及ぼす ANW 添加の影響を示したもので、マイクロ粒子体積分率 30vol% の場合である。複合材料の熱伝導率は、ANW 添加により増大した。また、球状アルミナ／エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率の増大傾向は、h-BN／エポキシ樹脂複合材料の場合に比べて強くなった。これは、球状アルミナの間隙が h-BN の場合に比べて小さくなるため、

ANW の凝集効果が高まったと考えられる。

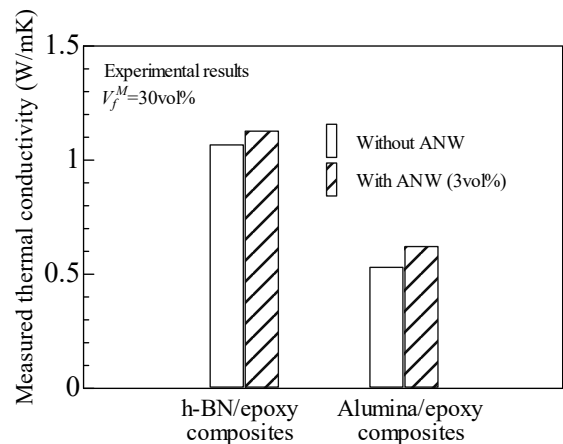


図 12 実験で得られた球状アルミナ／エポキシ樹脂複合材料および h-BN／エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率に及ぼす ANW 添加の影響

図 13 は図 12 と同様なグラフであり、有限要素解析結果を示したものである。有限要素解析では、h-BN の熱伝導率は 250W/mK（面内方向）および 1W/mK（厚さ方向）、球状アルミナの熱伝導率は 36W/mK, ANW の熱伝導率およびアスペクト比は、それぞれ 36W/mK および 25、エポキシ樹脂の熱伝導率は 0.163W/mK とした。スケールの異なる RVE モデルを組み合わせてナノ粒子の影響を考慮することで、有限要素解析でも複合材料の熱伝導率に及ぼす ANW 添加の影響を再現することができた。

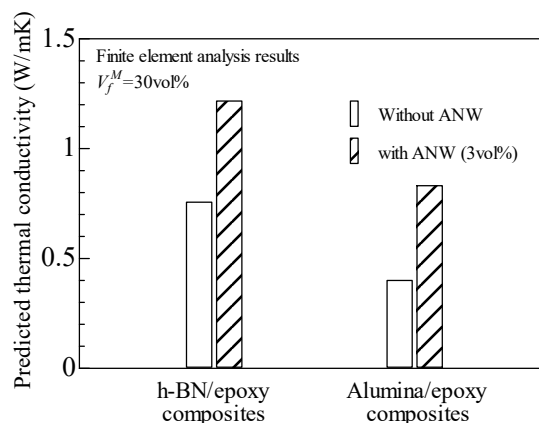


図 13 有限要素解析で得られた球状アルミナ／エポキシ樹脂複合材料および h-BN／エポキシ樹脂複合材料の熱伝導率に及ぼす ANW 添加の影響

4. おわりに

粒子を高充てんした RVE モデル、ボイドを有する RVE モデル、様々な粒子のハイブリッドを考慮した RVE モデルを用いた粒子充てんポリマー系複合材料の熱伝導率評価事例を紹介した。粒子充てんポリマー系複合材料の高熱伝導化のためには、熱伝導率と微視構造との関連性を明確にすることが非常に重要であり、有限要素解析等の数値シミュレーションの適用は有効である。特に、RVE モデルを用いた手法は、様々なスケールでの複合材料の微視構造をモデリングして熱伝導率が評価できるため、実験だけでは得ることのできない新しい微視構造設計指針を得ることが可能になると期待される。

謝辞

アルミナ高充てん複合材料の作製は、日本コークス工業株式会社にてオープンロール式連続混練機ニーデックスを用いて実施して頂きました。厚く御

礼申し上げます。

参考文献

- [1] 相馬勲, フィラーデータ活用ブック, 工業調査会, (2004).
- [2] 桑原広明, 窒化ホウ素系ナノチューブの創製と新規なナノ複合材料への応用可能性, 粉砕, 53(2010) 25-30.
- [3] K. Sanada, Y. Tada and Y. Shindo, Thermal conductivity of polymer composites with close-packed structure of nano and micro fillers, *Composites:Part A*, 40(2009) 724-730.
- [4] K. Sanada, K. Hase, Y. Nassho and K. Nagata, Synergetic enhancement of thermal conductivity by alumina nanowires in epoxy composites containing micro fillers, *Proceedings of Twenty-Second International Conference on Composite Materials (ICCM22)*, (2019).

熱流センサを用いた電子部品の発熱量測定技術の開発

*Development of Measurement Technology of Heat Generation
for Electronic Components Using Heat Flow Sensor*

沼本 竜彦, 伊豫田 真, 菊池 文孝 (パナソニック株式会社),
志水 大助 (パナソニックデバイスコンポーネント株式会社)
*Tatsuhiko NUMOTO, Makoto IYODA, Fumitaka KIKUCHI (Panasonic Corporation),
Daisuke SHIMIZU (Panasonic Device Component Co.,Ltd.)
e-mail: numoto.tatsuhiko@jp.panasonic.com*

1. はじめに

電子機器の小型化に伴い、放熱対策が重要な設計課題の一つとなっている。熱課題を効率的に解決するために有効な手段として、CFD (Computational Fluid Dynamics) があげられるが、高精度な CFD を実施するためには、インプットデータとして基板に実装された電子部品の正しい発熱量 (消費電力) の把握が不可欠である。しかし、現状それらの発熱量を測定するには、電子部品に印加される電圧値及び電流値から算出する電氣的測定手法以外の手段がない。また、それらの電子部品は動作設定によって発熱量が異なるが、一般的に仕様書には記載がないため、動作設定ごとの発熱量を知ることができない。スマートフォンやデジタルカメラのようなポータブル機器では、バッテリーによる動作時間が製品仕様に直結することから、電氣的な測定を実施し、発熱量を算出している場合もある。また、高速スイッチングする部品の場合、電圧と電流の波形変化を測定する必要がある。しかし、これらには多大な測定工数がかかり、正確な測定が困難なことが課題である。

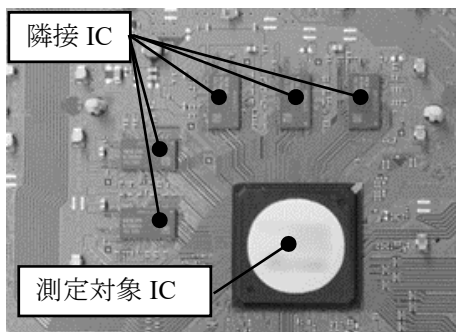


図 1 基板例

そこで今回、基板温度、及び熱流センサを用いて測定される熱流から発熱量を推定する新しい発熱

量測定システムを開発した。一般的に、ほとんどの基板では測定対象の電子部品の周囲に図 1 で示すように他の電子部品 (隣接 IC) が実装されており、これらの部品から熱の影響を受ける。しかし、従来の発熱量測定システムでは隣接 IC からの熱の影響が考慮されていないため、大きな測定誤差が生じる場合があり、電子機器の一般的な基板に実装された電子部品の発熱量の測定は困難であった。そこで我々は、隣接 IC からの発熱の影響をキャンセルし、測定対象の発熱量を測定することが可能な発熱量測定システムを開発した。本稿では開発した測定システムと実製品での検証結果を報告する。

2. 測定システム

2.1 発熱量測定原理

基板に実装された測定対象となる電子部品の発熱量を Q 、空気中への熱流を Q_a 、及び基板への熱流を Q_b としたとき、これらには次の関係式が成り立つ。(図 2 参照)

$$Q = Q_a + Q_b \quad (1)$$

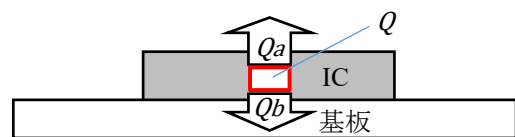


図 2 熱流の関係図

ここで、空気中への熱流 Q_a は、熱流センサを電子部品の天面に取り付けることで測定可能である。一方、基板への熱流 Q_b は、電子部品と基板の間に熱流センサを取り付けることが不可能であるため、容易に測定することができない。そこで基板への熱流 Q_b を算出するために、図 3 のように温度制御機構を熱流センサ上部に設置する。

測定手順として、まず測定対象となる電子部品の天面温度 T_{top} と基板の任意の温度 T_b を測定する。ここで一般的に基板に流れる熱流 Q_b は、 T_{top} と T_b の2点間の温度差、及び熱抵抗 R から式(2)のように求められる。

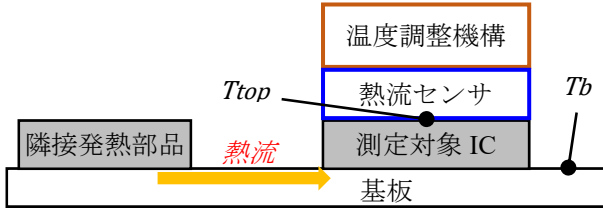


図3 測定ポイント

$$Q_b = \frac{T_{top} - T_b}{R} \quad (2)$$

式(1)から式(2)は、

$$Q - Q_a = \frac{T_{top} - T_b}{R} \quad (3)$$

となる。ここで式(3)中の未知数は、 Q と R の2値である。次に熱流センサ上部に設置した温度制御機構を動作させ、同様に式(4)を得る。

$$Q - Q_a' = \frac{T_{top}' - T_b'}{R} \quad (4)$$

式(3)と式(4)の連立方程式を解くことで対象物の発熱量 Q 及び2点間の熱抵抗 R が求められる。

ここで、測定対象となる電子部品の周囲に図3に示すように隣接発熱部品からの熱流が存在することが一般的であり、そのため図2における Q_b に誤差が生じる。本測定システムでは、これらの周囲に存在する隣接発熱部品の影響をキャンセルできることが特長である。

2.2 隣接発熱部品の影響を回避する原理

図4に隣接発熱部品が存在する場合の熱流の関係図を示す。測定対象のICによる発熱量を Q とし、 Q のうち天面を通過する熱流を Q_a 、基板の2ポイントへの熱流をそれぞれ Q_{b1} 、 Q_{b2} とする。また、隣接発熱部品からの熱流を Q_z とし、 Q_z により生じるIC天面方向への熱流を Q_x 、別の基板方向への

熱流を Q_y とする。

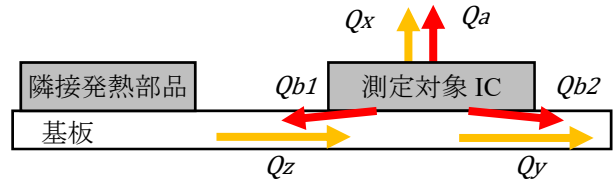


図4 隣接発熱部品を含めた熱流の関係

ここで、式(2)における Q_b は測定値であるため、図4において Q_{b1} と Q_z の合計（ただし Q_z は向きが異なる）、 Q_{b2} と Q_y の合計となる。それぞれを Q_{b1}' 、 Q_{b2}' とおき、熱流センサで測定されるIC天面方向の熱流の合計を Q_{top} とおくと、式(5)～式(7)が成立する。

$$Q_{top} = Q_a + Q_x \quad (5)$$

$$Q_{b1}' = Q_{b1} - Q_z \quad (6)$$

$$Q_{b2}' = Q_{b2} + Q_y \quad (7)$$

さらに、求める Q は、

$$Q = Q_a + Q_{b1} + Q_{b2} \quad (8)$$

であり、隣接発熱部品からの熱流について、

$$Q_z = Q_x + Q_y \quad (9)$$

が成立する。

式(5)～式(7)から式(10)～式(12)を得る。

$$Q_a = Q_{top} - Q_x \quad (10)$$

$$Q_{b1} = Q_{b1}' + Q_z \quad (11)$$

$$Q_{b2} = Q_{b2}' - Q_y \quad (12)$$

式(10)～(12)を式(8)に代入すると、

$$Q = Q_{top} + Q_{b1}' + Q_{b2}' - Q_x + Q_z - Q_y \quad (13)$$

となるが、式(9)より式(13)は、

$$Q = Q_{top} + Q_{b1}' + Q_{b2}' \quad (14)$$

となり、 Q_z と Q_x と Q_y が Q を求める式から削除される。熱流センサで測定される Q_{top} 、および式(2)に基づき測定される Q_b のみで Q を求める式(14)が構成される。

上記のように、隣接発熱部品からの熱流 Q_z の影響を回避し、測定対象のICの発熱量のみを測定することができる。

2.3 熱流センサの開発

発熱量測定システムの測定精度は、測定に用いる熱流センサの性能に大きく影響される。そこで、微弱な熱流も高い起電圧が得られるよう、従来品に比べセンサ素子を単位面積当たり 3 倍以上の高密度で実装し、デバイス面積当たりに得られる起電圧を向上させた高素子密度の熱流センサを本測定システム用に開発した[1,2]。また電子部品の天面温度を測定するため、図 5 のように熱流センサの片側に銅板を接合し、その銅板に熱電対を取り付けることで、熱流と同時に電子部品天面の平均温度を測定できる構成とした。

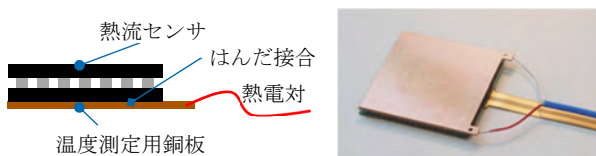


図 5 熱流センサの構造

図 6 に 5mm 角、10mm 角、15mm 角の 3 種類の熱流センサの通過熱流と出力電圧の関係を示す。図 6 に示す通り、直線近似の相関係数の 2 乗値が 0.999 以上となっており高い直線性を有する。これにより、出力電圧から通過熱流を高い精度で測定することが可能である。

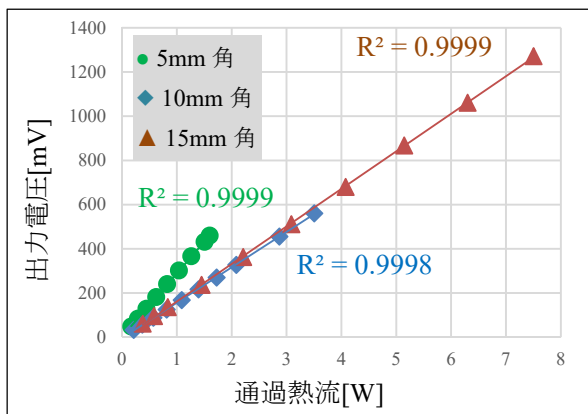


図 6 熱流センサの通過熱流と出力電圧

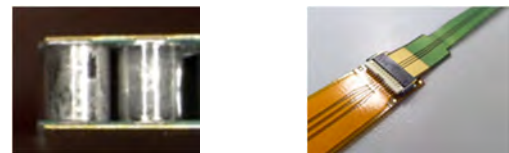
図 6 において、5mm 角のセンサは 10mm 角と 15mm 角のセンサと比較して同一通過熱流でより高い電圧が得られている。パッケージが小型であれば一般的に発熱量が少ない傾向となるため、5mm 角の場合は小型化した素子を高密度実装することで高い感度を有する設計としたためである。なお、サイズは 5mm 角、10mm 角、15mm 角、20mm 角、

25mm 角、40mm 角の開発を行っており、様々なサイズの IC の測定を可能としている。

なお、使用する熱流センサのサイズは、電子部品の天面サイズと同じであることが望ましいが、様々な形状やサイズの部品に合わせたセンサを用意することはあまり実用的ではない。そこで、電子部品から天面に放射される熱流をもれなく測定できるよう、IC の天面サイズよりも大きなサイズの熱流センサを使用することで、代用が可能である。このとき、電子部品の天面に対する熱流センサの位置は、熱流センサ内のどの位置であっても、通過熱量を高精度で測定可能である[3,4]。

その他の特長を示す写真を図 7 に示す。図 7(a) に示すようなガラス管で素子を覆う構造としたことにより厚み方向の押圧に強く、荷重試験で 90kgf まで破壊がないことを確認している。

また、図 7 (b) に示すようなフレキケーブルの採用により、配線の簡素化や容易な着脱を実現した。さらに、熱流センサの側面をシーリング加工することにより、測定時に測定対象の IC と熱流センサの間に塗布する放熱グリスの拭き取りを容易にしている。



(a)ガラス管構造 (b)接続フレキケーブル
図 7 その他の特長

2.4 測定システムの開発

図 8 に測定システムのブロック図を示す。測定対象の電子部品上に、電子部品天面の温度測定用の熱電対、電子部品天面を通過する熱流 Q_a を測定する熱流センサ、熱流を変化させるための温度制御機構で構成される測定ヘッドを設置する。温度制御機構は安定化電源の出力制御により動作する。また、基板温度を測定するためにサーモパイルセンサを用い、マイコンによってそれらの制御を行う。熱電対と熱流センサの測定にはデータロガーを用い、全体の制御と測定データの読み取りをパソコン上の測定ソフトにより行うことで、自動で計測を行う構成となっている。非接触であるサーモパイルセンサを用いることで、熱電対の場合に発生する可能性があ

る配線のショート回避でき、設置が容易となる利点を得られる。ただし、サーモパイルセンサを用いる場合は、放射率の設定により測定温度に誤差が生じる場合があるため、測定精度が必要な場合は熱電対を用いて基板の温度を測定することが望ましい。

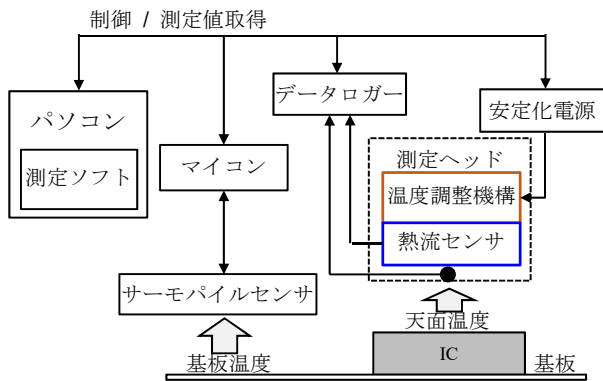


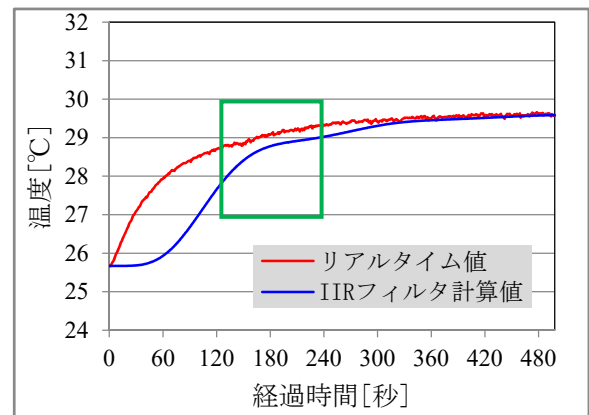
図8 測定システムのブロック図

発熱量の計算を行うためには、IC や基板の温度が定常状態となる必要がある。再現性の高い測定結果を得るためには、定常状態となったこと、すなわち温度の安定度の判断が重要となる。今回、測定ソフトにおいて温度の状態を正確に判定するために、IIR(Infinite Impulse Response)フィルタを実装した。表1にIIRフィルタのパラメータを示す。

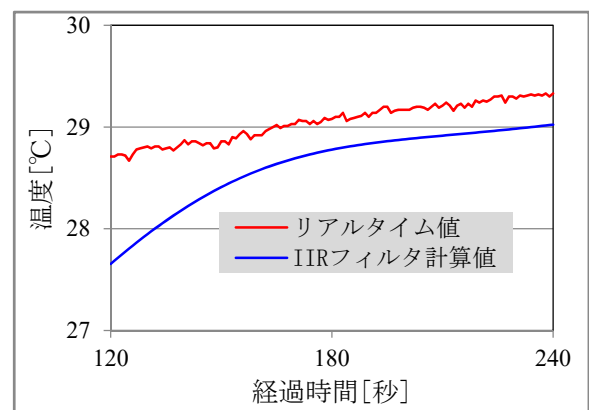
表1 IIRフィルタのパラメータ

項目	設定
サンプリング周波数 f_s	1Hz
カットオフ周波数 f_c	0.005Hz
特性	バターワース型
次数	4次 LPF

熱流により基板の温度が上昇した場合のリアルタイム値と、表1に示したIIRフィルタによるIIRフィルタ計算値の時間変化を表す一例のグラフを図9に示す。



(a) 測定時間全体における温度変化



(b) 120～240秒の拡大

図9 温度の時間変化

図9(b)は図9(a)の緑色の枠で囲われた部分を拡大したグラフである。図9(b)から明らかなように、リアルタイム値では時間的なゆらぎが生じており、温度の安定度を判断する尺度として温度の変化量(グラフの傾き)を用いることは難しいが、IIRフィルタ計算により時間的なゆらぎを除去することができ、温度の変化量を正確に判断することが可能である。なお、図9(a)のIIRフィルタ計算値において時間的な遅れが生じているが、バターワース特性としたために、位相特性のずれが大きいためである。ただし、温度の安定度の判断には時間的な遅れが生じても影響はなく、図9(a)で明らかなように、時間が十分経過した場合にはIIRフィルタ計算値とリアルタイム値が合致する。振幅特性のリップルが少ない利点を優先し、バターワース型特性を採用している。

3. 検証結果

3.1 基礎検証

測定対象となる電子部品の発熱量を任意に変えて検証可能なように、模擬基板を用いて基礎検証を行った。図 10 は基礎検証に用いた模擬基板である。

基板上に電子部品の模擬としてセラミックヒータ（以下、ヒータ）を接着する。本検証では、測定対象となる 25mm 角のヒータ A、及び隣接発熱部品を模擬した 10mm 角のヒータ B、C を配置し、それぞれのヒータに安定化電源から電圧を印加する。

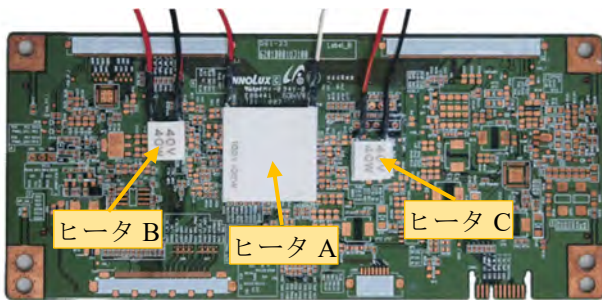


図 10 基礎検証用模擬基板

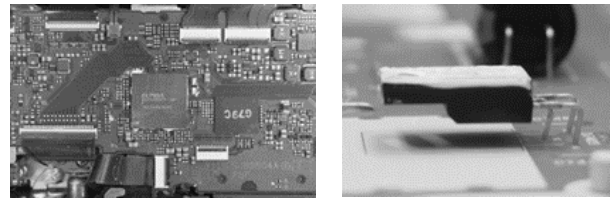
測定した結果を表 2 に示す。印加した電圧と電流の積をそれぞれのヒータの発熱量とし、本測定システムで測定した値を測定値とする。例えば Test 1 では、 $R=35.0^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 、 $Q_a=0.34\text{W}$ 、 $Q_b=0.74\text{W}$ であり、式 (1) よりヒータ A の発熱量は、 $Q=1.08\text{W}$ と算出される。また Test 3 では、測定対象が発熱していない場合を検証しているが、周囲の発熱部品の影響を受けることなく発熱量がほぼ 0W となり、表 2 のすべての条件で隣接発熱の影響を回避することで、誤差 $\pm 10\%$ 以内で測定できていることが確認できた。

表 2 基礎検証の測定結果

No	ヒータ B	ヒータ C	ヒータ A	測定値	誤差
Test 1	5.00W	3.00W	1.00W	1.08W	+8%
Test 2	5.00W	3.00W	5.00W	4.87W	-3%
Test 3	5.00W	3.00W	0.00W	0.02W	-

3.1 実製品での検証

実製品での検証では、図 11 (a) に示すような BGA(Ball Grid Array)タイプの IC、及び図 11 (b) に示すような、端子が基板に挿入実装された TO220 タイプの IC について測定した。



(a) BGA タイプ (b) TO220 タイプ
図 11 実製品の基板

TO220 タイプの IC においては、測定誤差を低減させるため電子部品裏面からの放熱を考慮し、図 12 に示すように電子部品の裏面にも熱流センサを取り付けて測定した。

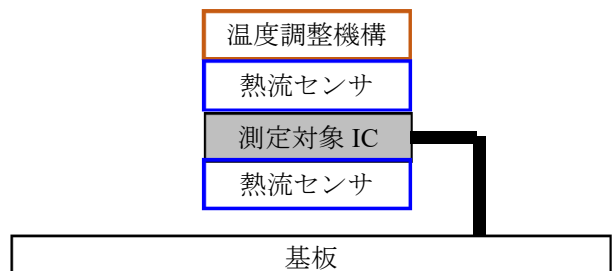






図 12 TO220 の測定

測定結果を表 3 に示す。BGA タイプの IC においては、測定が難しいとされる微小な発熱量 (0.029W) の電子部品に対しても、熱流センサの起電圧が高いため高精度で測定できることを確認した。その他の BGA タイプの IC においても、誤差 10% 以内と高い精度で測定できることを確認した。また、画像処理 LSI では動作状態が異なる 2 つの条件で測定しているが、動作状態に応じた測定値が得られている。また、TO220 タイプの FET においても真値に近い測定値が得られている。

表 3 実製品での測定結果

対象	画像処理 LSI	DCDC コンバータ	SoC	FET	
					
真値	2.13W	0.87W	0.029W	4.40W	0.90W
測定値	2.03W	0.80W	0.033W	4.58W	1.03W
誤差	-4.7%	-8.0%	14%	4.1%	14%

4. 制約事項

今回開発した発熱量測定システムでは、測定原理または基板状態に起因する理由により、制約事項が存在する。図 13 は 4 つの制約事項の概略を示す図である。

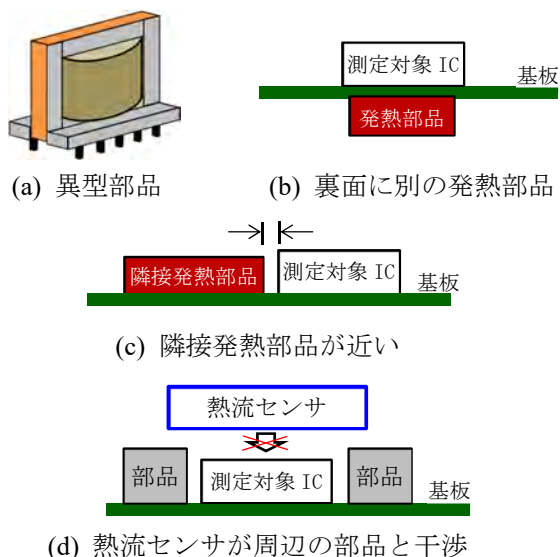


図 13 制約事項

まず、図 13 (a)は測定対象が異形部品の場合である。トランスやコイルのように単純な平面形状でない場合、熱流センサを設置することができないため本測定システムでは測定ができない。

次に図 13 (b)のように測定対象 IC の裏面に相当する位置に別の発熱部品が存在する場合である。この場合、測定対象 IC と裏面の発熱部品の発熱を分離することができないため、測定が不可能である。通常、放熱の点で不利な実装状態となるため、まれなケースである。

次に図 13 (c)のように隣接発熱部品が測定対象 IC に非常に近い場合である。本測定システムでは、隣接発熱部品と測定対象 IC の間の基板温度を測定する必要があるが、一般的なサーモパイルセンサでは分解能の点で測定ができない。熱電対を用いる場合であれば、熱電対を貼ることができる間隔としておおよそ 2mm 程度は必要である。

次に図 13 (d)のように熱流センサが周辺部品と干渉する場合である。測定対象 IC の天面を 100%カバーすることができるサイズの熱流センサを用い

ることで正確な測定を行うことができるが、熱流センサのサイズが測定対象 IC より大きく周辺部品と干渉する場合、熱流センサを設置することができないため、測定ができない。

5. まとめ

本開発では、電子機器の熱課題を効率的に解決するために有効な CFD の高精度化に向けた技術として、周囲の発熱部品の影響を受けずに測定が可能な発熱量測定システムを開発し、実用的なレベルの精度で測定可能であることを確認した。今回動作検証を行った測定システムでは、10W 程度までの発熱を想定しているが、特にパワーデバイスなどでは数 10W の発熱を持つケースもある。このようなより大きい発熱デバイスの測定を可能にするために、水冷による冷却機構を導入した手法も開発中である。また、コイルやコンデンサなどの様々な形状の電子部品に対しても測定が可能となるシステムの開発にも取り組む予定である。

謝辞

本開発において、原理検証や測定検証に対し多くの助言をいただきました、株式会社サーマルデザインラボ代表取締役の国峯尚樹氏、名古屋市工業研究所システム技術部生産システム研究室の梶田欣氏に感謝の意を申し上げます。

参考文献

- [1] S. Maeshima, J. Tanaka, H. Nasu, “High density thermoelectric device by small and low-cost crystallization technology” (2015)
- [2] S. Maeshima, K. Toyoda, H. Nasu, “Development of the Small Thermoelectric Device by Rapid Crystal Growth Technology” (2015)
- [3] Y. Kajita, Y. Iwama, N. Kunimine, “Measurement of Heat Production of Electronic component on a Circuit Board” Thermal Engineering Conference, Ehime(2016),A114
- [4] Y. Kajita, “Estimation Method for Heat Production of Electronic component on a Circuit Board” The 38th Japan Symposium on Thermophysical Properties(2017)

トロイダルコイルの熱解析 Thermal Simulation of Toroidal Coil

壁谷 真人 (株式会社 豊田自動織機)
Masato Kabetani (Toyota Industries cooperation)

1. はじめに

現在の製品開発では、熱流体シミュレーションを構想段階から活用し、伝熱経路を可視化しながら、設計案を作りこむことが必須となっている。

シミュレーションは、操作方法を習得すれば何らかの結果を出すことはできるが、伝熱現象を理解したうえでの部品のモデル化や、正確な発熱量の入力がなければ、間違っただけの結果を出すことになる。このため、実測との比較を通して、解析手法、形状モデリング、境界条件などシミュレーションの設定が実現象と合っているか検証作業を行うことが重要である。

弊社が参加している、中部エレクトロニクス振興会の第3分科会では、名古屋市工業研究所と企業が産官連携して、熱設計をテーマに共同研究をしており、これまで自然空冷機器における熱流体シミュレーションでの部品のモデリングをテーマに取り組んできた [1-4]。本稿では、そのうちのトロイダルコイルの熱解析モデリングの研究成果について紹介する。

2. トロイダルコイルの熱解析モデル

2.1 コイルの熱解析用モデリングの課題

コイルは、巻線と磁性体コアの両方が発熱し、互いに熱的に影響しあっている。

熱流体シミュレーションにおいて、層巻き型のコイルについては、巻線を一つのかたまりとみなして異方性等価熱伝導率に置き換える方法が提案されているが[5]、トロイダルコイルについては、モデリングの研究事例がなく、大概一つのブロックとしてモデル化される。

トロイダルコイルを断熱材の上に乗せて、直流電流を流した時の熱抵抗を実測と比較すると(図1)、コイルが小さくなるほど誤差が大きくなった(図2)。これは、コイルが小さくなるにつれて、コイルのリードから送電ケーブルに逃げる熱が、コイル

表面からの放熱に比べて大きくなるためである。巻線をモデル化してリードへの放熱を考慮することも可能だが、製品全体の解析ではメッシュ数が増えて実用的ではない。

このため、巻線とコアを一体化した円筒形状のままコイル内の熱回路を作成して等価熱伝導率を求め、リードへの放熱を考慮できる簡易化手法を検討した。



図1 実験写真と解析モデル

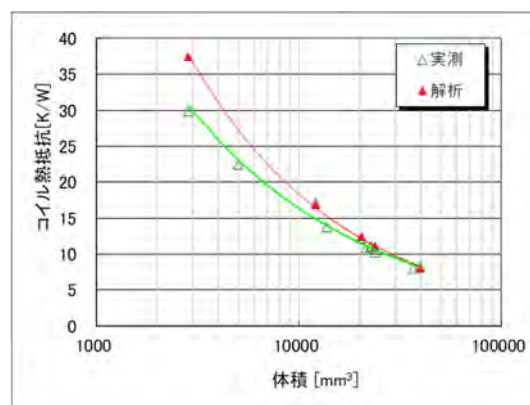


図2 熱伝達率の比較

2.2 トロイダルコイルの熱回路

コイル内の熱伝導は、①巻線内、②隣接する巻線間、③巻線-コア間、④コア内の4つの経路に分けて、図3の熱回路で表すことができる。

熱回路の妥当性については、基板接続部を0°Cで固定し、反対側の巻線1巻分に1W発熱を与えたとき(図4)の最高温度を、3種類の巻線径(実際に則

して細いほど巻き数が多い)のコイルで計算して評価した。

表1に熱回路計算, 表2にFEM解析の結果を示す。コイル巻線が違ってても, 熱回路計算の結果がFEM解析と10%以内で一致した。

4つの伝熱経路の熱抵抗を見ると, 40巻のコイルは, コア内の熱抵抗が小さく, 主に巻線→コア→巻線の経路で熱が伝わり, 12巻のコイルは, 巻線内の熱抵抗が小さく, 主に巻線内で熱が伝わる事が分かる。

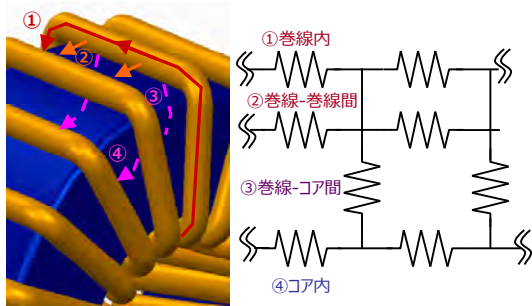


図3 コイルの熱回路

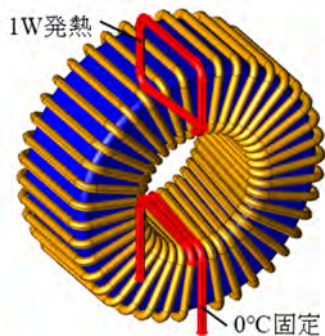


図4 コイル熱抵抗計算モデル

表1 熱回路による熱抵抗計算値[K/W]

巻数	40	24	12
巻線径	0.6mm	1.0mm	1.5mm
巻線内	236	89	42
巻線-巻線間	506	397	782
巻線-コア間	165	123	96
コア内	6.6	10.9	21.9
全体	158	108	64

※各要素の熱抵抗は1巻当り。巻数が少ないほど1巻当りの範囲が広がるので, 巻線-コア間の熱抵抗は小さくなり, コア内の熱抵抗は大きくなる。

表2 FEM解析結果 [K/W]

巻数	40	24	12
線径	0.6mm	1.0mm	1.5mm
温度分布			
熱抵抗	162	105	58

2.3 詳細モデルの熱解析

次に, 基板放熱の大小による差を評価するため, 配線面積が大小2種類の基板を製作し, 直流電流を印加したときの温度上昇を比較した(図5)。評価は実測だけでなく, 後で簡易モデルの評価をするため, 詳細モデル解析でも行った。

詳細モデル解析の結果は実測とよく一致し, 2つの基板によるコイル巻線の最高温度の違いは, コイル大(φ34×20)が2Kに対して, コイル小(φ23×13)では8Kだった(図6)。

なお2つの基板の差異は, 単純に熱的なものだけでなく, 基板配線のジュール発熱の影響も含まれる。直流電流によるジュール発熱を解析で求めるとコイルの発熱量が1Wに対して, 細い配線が0.6W, 太い配線が0.1Wだった。さらに配線発熱の有無によるコイル巻線の最高温度への影響を解析すると, コイル小で配線面積大の場合が0.6K, 配線面積小の場合が4.6Kであり, 配線面積と同じくらい配線発熱が影響していることが分かった。

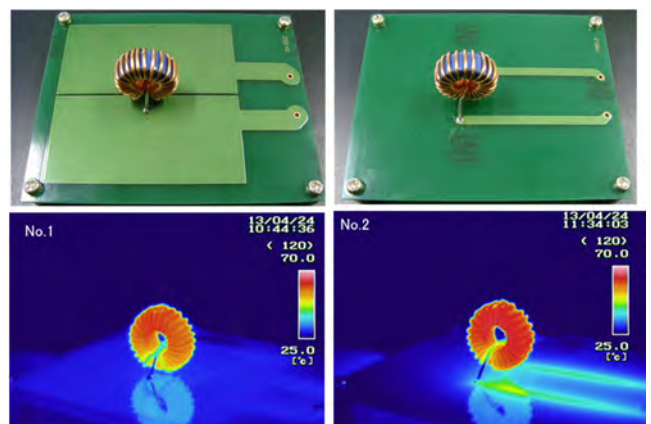


図5 コイル(小) 評価基板とサーモビューア画像

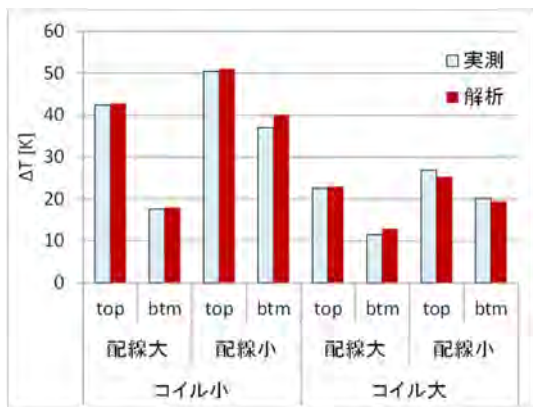


図6 詳細モデルと実測との比較

※top はコイル巻線が一番上, btm はリード付け根

2.4 簡易モデルの熱解析

コイルの簡易モデルは、巻線とコアを一つの円筒形状とし、リード部分は巻線と同じ幅の直方体ブロックに置き換えた。

円筒部分の熱伝導率は、図3の熱回路計算で求めた熱抵抗から逆算した。今回の実験に用いたコイルの熱抵抗は140K/Wで、巻線を含む外形の円筒（外径20mm、内径7.2mm、高さ7.4mm）に置き換えると、等価熱伝導率は1.28W/mKになった。

リード部分については、熱回路の端が巻線のリードのため、直方体ブロックを挟む形でコイル内の熱抵抗は一致するが、基板との接触面積が大きくなり、基板内の拡散熱抵抗が変わってくる。このため、円形のリード形状を四角に置き換えた時の拡散熱抵抗の差異を熱抵抗として追加した（図7）。

基板については、基板配線設計が出来ていない構想設計での使用を想定して、配線形状はモデル化せず、基板各層を等価熱伝導率に置き換えた積層板としてモデル化した。

簡易モデルと詳細モデルの差は、配線が細いモデルで2K、配線が太いモデルで1K程度と非常によく一致した（図8）。また、放射、対流、伝導の3形態の放熱の割合を比較すると、簡易モデルは伝導が少なく、放射が多いという差はあるが、概ね一致しており、簡易化の妥当性が確認できた（図9）。

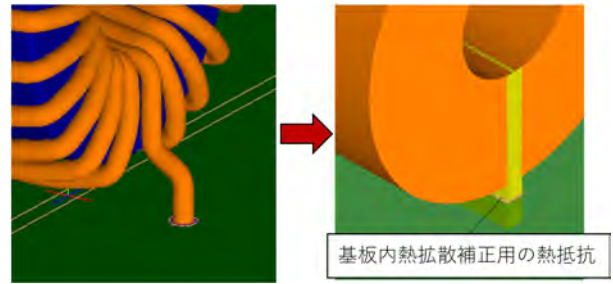


図7 コイルの簡易化

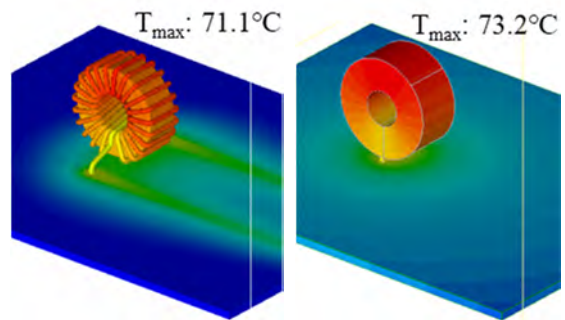


図8 温度分布（左：詳細，右：簡易）

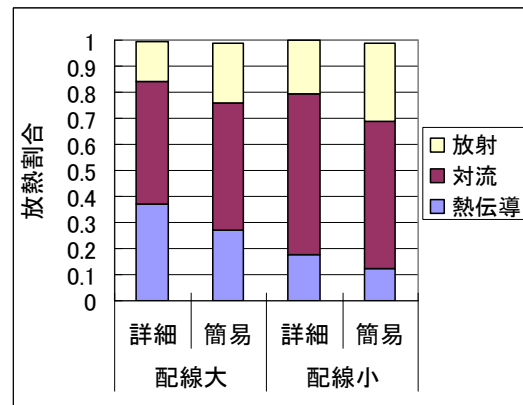


図9 コイルからの放熱割合

3. コイルの発熱量計算

3.1 昇圧チョッパ回路での損失

これまでは直流電流を流して熱解析モデルの妥当性について評価してきたが、製品と同じく、コイル基板をチョッパ回路（図10）に組み込んで、100kHzで動作させたときの温度上昇を評価した。

コイルに流れる電流は、図11に示すように三角波が直流分だけオフセットしたような形になる。このときの巻線損失 Q は、直流抵抗 (R_{dc}) と交流抵抗 (R_{ac}) を使って、次式で表される。

$$Q = R_{dc} I_{dc}^2 + R_{ac} (I_{ac} / \sqrt{3})^2 \quad (1)$$

ここで、交流電流は実効値に換算するため、 $\sqrt{3}$ で割っている。 R_{dc} と R_{ac} は、LCRメータで測定した値を使って計算すると、表3になる。

上記の損失計算方法は一般的に用いられているが、コイルの等価回路(図12)で鉄損抵抗(コア損失による抵抗)と巻線抵抗が直列に並んでいて区別が出来ず、部位ごとの損失が得られない。

一方、FEM解析では、巻線損失がジュール損失密度から直接求められる。図13は、電流密度分布である。コア側に電流が集中しており、高周波になるほど電流が表面に寄る表皮効果だけでなく、周りの巻線の影響を受けていることが分かる。

コア損失は、下記のスタインメッツの式[6]を使って磁束密度の関数として求められる。トロイダルコイルの場合、コア内の磁束密度の分布は小さいが、コア形状によっては手計算と差が大きくなる。

$$P_{cv} = K_h B_m^\alpha f + K_e B_m^\beta f^2 \quad (2)$$

K_h :ヒステリシス損失係数, K_e :渦電流損失係数, B_m :磁束密度の最大値, α :1.6~2.0程度, β :2.0程度

(2)式の係数は、コア材メーカー提供しているコアロス特性にフィッティングして求める。ところが直流が重畳してくると、動作点がずれてヒステリシスループの形状が変わるため、コアロス特性と合わなくなってくる。試験品のコアの特性を測定すると、5A直流が重畳することによって約3割コア損失が低下した。そこでメーカーのコアロス特性を使ってコア損失を求めた後、各条件における直流電流での低下率をかけた。

表4にFEM解析で求めた損失を記す。、巻線、コアともに発熱量が温度に依存して発熱量が変わるため、熱流体解析に発熱量を温度のテーブルで入力して求めた。

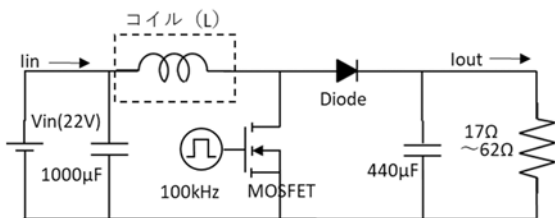


図10 昇圧チョッパ回路

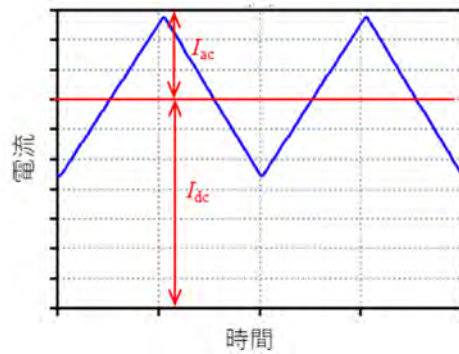


図11 コイル電流

表3 損失(手計算)

No.	f [kHz]	I(f) [A]	損失 [W]	全損失 [W]
1	0	2.26	0.08	0.61
	100	1.51	0.53	
2	0	1.36	0.03	0.52
	100	1.45	0.49	
3	0	4.77	0.34	1.02
	100	1.71	0.68	

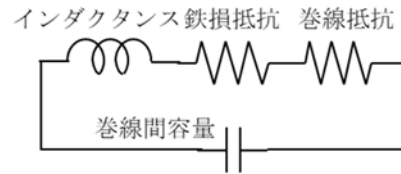


図12 コイルの等価回路

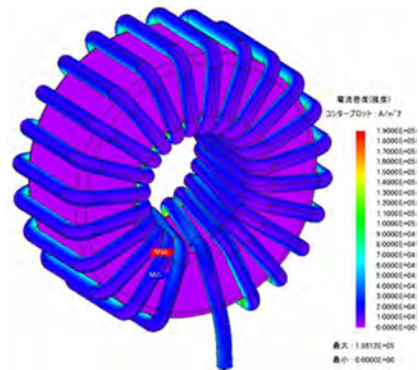


図13 電流密度分布

表4 損失(FEM解析)

No.	コア [W]	巻線 [W]	全損失 [W]
1	0.35	0.10	0.44
2	0.36	0.04	0.41
3	0.29	0.41	0.70

3.2 実測との検証

コイルの損失は、コイル前後の電圧と電流をオシロスコープで測定して求めた(図14, 表5)。コイル電圧が正のときはエネルギーを蓄え、コイル電圧が負のときはエネルギーを放出する。電力 P の正の領域と負の領域の差分、コイル電力の1%程度がコイルの損失になる。なお、巻線のコイル電圧は、コイル単体での電圧を求めるため、配線の電圧降下分を差し引いた。

図15にFEM解析の損失を使って熱流体解析をした温度結果と実測の比較を示す。FEM解析の損失は実測より2割弱低くなったが、温度は実測よりも高くなった。熱解析モデルの妥当性はDC発熱で確認しており、オシロスコープの波形から求めた損失が実際より小さかったと考えられる。

手計算の損失は、FEM解析とは逆に実測より大きいいため、さらに実測との温度差が広がる。直流成分が大きいほど損失の差が大きく、No.3では解析の ΔT が約1.5倍(=1.02W/0.7W)になることを考えると、設計で使えない。

簡易モデルについては、コアの発熱が支配的なNo.2と、巻線とコアの両方の発熱が大きいNo.3で評価したところ、詳細モデルとの差は2K以内となり、実製品のように交流電流が流れる場合でも、コアとコイルを一体化した簡易モデルが使えることが確認できた(図16)。

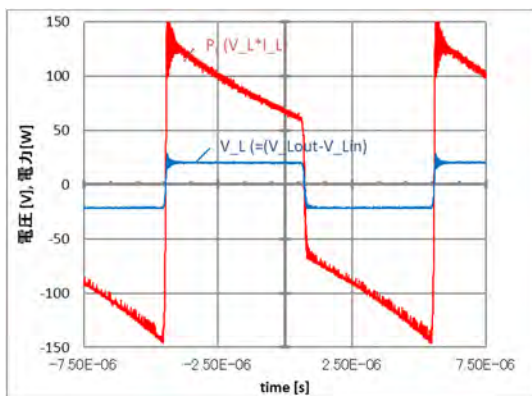


図14 No.3のコイル電圧, 電力波形

表5 損失 (実測)

No.	V _{in} [V]	V _{out} [V]	I _{in} [A]	電力 [W]	全損失 [W]
1	22.0	41.9	2.2	47.4	0.53
2	22.0	42.0	1.4	28.5	0.50
3	21.9	41.4	4.7	99.5	0.82

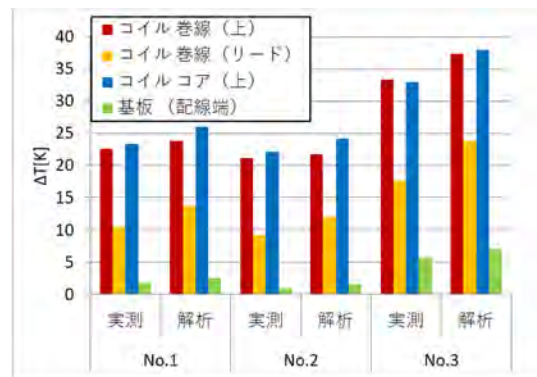


図15 実測との温度比較

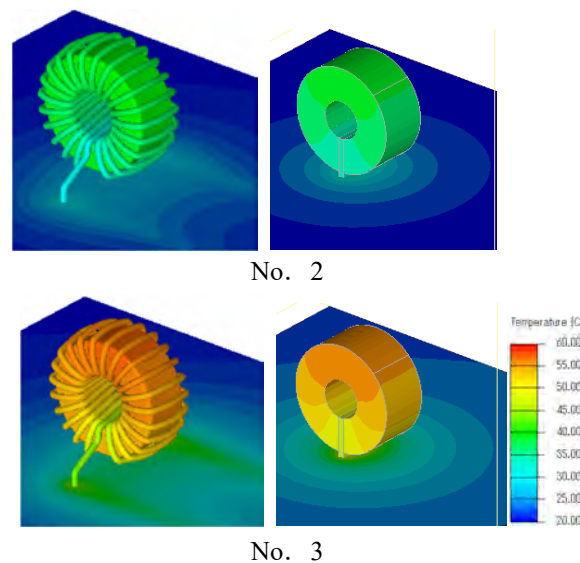


図16 詳細モデルと簡易モデルの温度分布

4. TIMによるコイル放熱

4.1 TIMの接触熱抵抗

密閉筐体下では、コイル表面からの対流伝達が小さい。そこで、放熱シートや樹脂でケースとの隙間を埋めて冷やす対策が取られる[7]。

放熱シートを使う場合の熱抵抗は、接触熱抵抗と、シート自体の熱抵抗がある。

シートの熱伝導率については、測定方法(定常法, 非定常法)によって違うという課題があり、様々な検討を行ってきたが[8], ここでは割愛する。

接触熱抵抗については、シート厚さと熱抵抗をグラフにして、y切片を取る方法が一般的に用いられる。柔らかい低硬度タイプのシートの場合、0.3Kcm²/W程度になる[9]。ただし、これは十分に圧力がかかった状態であって、圧力が小さいと接触熱抵抗が大きくなる。図17は、Simcenter DYNTIM

で圧縮時のシート厚さと熱抵抗を示したものである。圧縮率が大きいところではシート素材の熱抵抗（点線）と同一直線上に載るが、圧縮率が小さいところでは差が大きくなる。

シート厚さ違いのデータを、圧力と接触熱抵抗（＝シート素材の熱抵抗との差異）で表すと、1本の曲線で整理でき、0.03MPa から接触熱抵抗が急激に増大することが分かった（図18）。

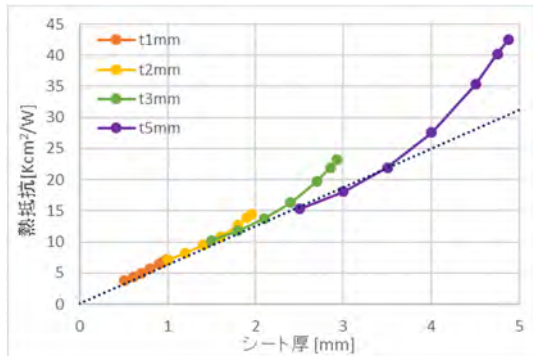


図17 圧縮時のシート厚さと熱抵抗

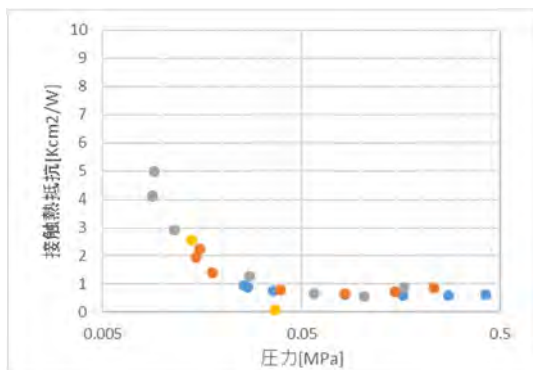


図18 接触圧力の傾き

4.2 コイル巻線とシート間の接触熱抵抗

コイルを放熱シートに押し付けた時のシートの圧力、変形形状を構造解析で求めた（図19）。接触圧力は、沈み量 0.5mm でも、接触面全域で閾値の 0.03MPa を超えており、接触熱抵抗は小さい（図20）。そこで、接触熱抵抗 0 として熱伝導解析をして、沈み量に対するシート前後の熱抵抗（コイル巻線とシート下の銅板間）を実測と比較したところ、よく一致した（図21）。

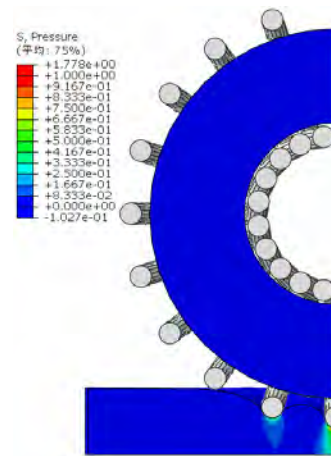


図19 シートの変形（沈み量 2mm）

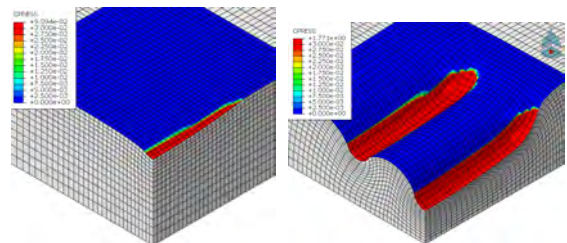


図20 接触圧力（沈み量：左 0.5mm、右 2mm）

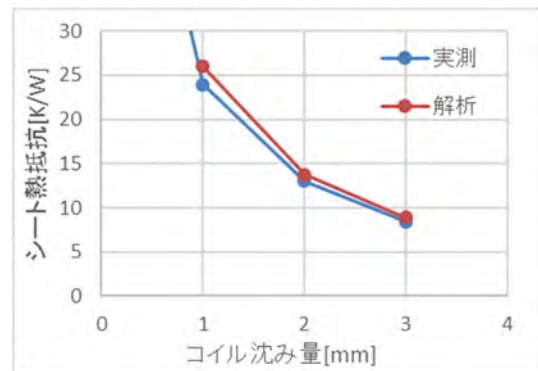


図21 コイル沈み量と熱抵抗

5. まとめ

本稿では、トロイダルコイルの熱解析モデリングについて、中部エレクトロニクス振興会の第3分科会での研究成果を紹介した。

コイルの熱解析の難しさは、熱だけでなく、回路、磁場や構造に関する知識や解析が必要になってくることにある。

熱流体解析用簡易モデリングについては、基板上のコイルを自然空冷する場合、巻線とコアを一体とした円筒モデルに、熱回路や FEM 解析で求め

た熱抵抗から逆算した等価熱伝導率を使えばよい。直流、交流どちらの場合も詳細モデルの結果と10%以下の精度で一致した。

コイルの損失計算では、交流抵抗から求める方法では、巻線とコアの損失を分離できず、直流重畳や温度特性を組み入れることが出来ない。正確に把握するには、磁場解析を行う必要がある。

また、放熱シートを使ってコイルを冷却する場合、コイルの形状ばらつきや組付け公差によってシートへの沈み量が変わる。沈み量が小さい場合は、コイルの接触熱抵抗に注意しなければならない。本研究で使用した放熱シートでは、接触圧が0.03MPa以上であれば、接触熱抵抗は無視できることが分かった。逆に沈み量が大きい場合は、コイルを固定する板ばねや基板の変形を確認すべきである。本研究でも、ジグが動いて、意図した沈み量になっていないことがあった。

第3分科会は、中部エレクトロニクス振興会の会員になれば参加できるオープンな研究会である。今後も電子機器の熱設計の実務に役立つ研究を行っていく予定なので、関心を持たれた方は、ぜひ中部エレクトロニクス振興会の事務局までお問い合わせ頂きたい。

謝 辞

第3分科会は、熱の専門家の集まりであり、回路評価では、社内の設計者に相談したほか、Sifoen の加藤博二氏にもコンサルをして頂きました。分科会のメンバーに加えて、力添えを頂いた方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 中部エレクトロニクス振興会, 電子機器の熱設計に関する研究～簡易温度予測式の検討～(2004).
- [2] 中部エレクトロニクス振興会, 電子機器の熱設計に関する研究～シミュレーションモデルの簡略化に関する検討～(2008).
- [3] 中部エレクトロニクス振興会, 電子機器の熱設計に関する研究～シミュレーションモデルの簡略化に関する検討Ⅱ～(2011).
- [4] 中部エレクトロニクス振興会, 電子機器の熱設計に関する研究～トロイダルコイルの熱解析モデル～(2017).
- [5] 小泉 雄大, スイッチング電源の熱設計における電子部品の数値シミュレーションモデルに関する研究, 富山県立大 博士論文 (2010)
- [6] JMAG スキルアップセミナー資料第6回 (2011)
- [7] 山本伸一郎, 小型・軽量昇圧コンバータ用リアクトル, SEI テクニカルレビュー第185号, **29-33** (2014)
- [8] 服部 真和, 定常, 非定常熱伝導率測定方法による Thermal Interface Material の熱特性評価, エレクトロニクス実装学会誌 22 巻 3 号, **184-189**, (2019)
- [9] 藤井健太, 熱伝導材料のプリント基板の伝導冷却への適用, 23rd Symposium on Microjoining and Assembly Technology in Electronics, **375-378** (2017)

深紫外 LED を用いた消毒用途向け製品に関する熱設計技術

Thermal Design Technology for Sterilization Products Using Deep UV LEDs

松本 尚子 (スタンレー電気株式会社)
 Naoko MATSUMOTO (Stanley Electric Co., Ltd.)
 e-mail: naoko_matsumoto@stanley.co.jp

1. はじめに

紫外線の中でも波長が 100~280nm の深紫外光は生物の遺伝子に損傷を与えることにより、ウィルスや菌などの病原性の微生物を不活化できるため、水や空気および固体表面の消毒用途として幅広い分野で注目されている[1-5].

近年、安全安心な「水」の確保は持続可能な社会の実現に向けた重要な課題として取り上げられており、紫外線を用いた水処理装置の開発が進められている。従来、紫外線水処理装置の光源には水銀ランプが用いられてきたが、環境負荷の少ない水銀フリー光源への代替が求められている。

このような背景から、当社では低環境負荷であり、かつ微生物の不活化効果が最大となる波長 265nm の深紫外 LED を用いた通水型消毒装置の開発を進めている[6]. 本稿では、紫外線水処理装置の熱設計技術と試作検証結果について報告する。

2. 製品開発における熱設計プロセス

開発を進める上で、目標となる製品の機能や品質に対して後戻りなく設計することは非常に重要である。LED の投入電力のうち光として出力されたエネルギー以外は熱損失となり、部品の温度上昇を引き起こす。LED の機能に寄与する光出力や品質に関わる寿命は温度に関連性を有するため、適切な温度に熱設計することが求められる。

一般的に LED の放熱には LED 実装基板や TIM (Thermal Interface Material)、ヒートシンク、ファンなどが用いられており、各部材の材料やサイズが放熱性能に大きく影響を及ぼすことが知られている。開発の初期段階から熱設計に着手することで、システム全体の目標仕様 (例えば、性能、寿命、サイズ、コストなど) に照らした検討ができる。

当社ではフロントローディングの考え方を取り入れた熱設計のプロセスを構築している。図 1 に熱設計プロセスの全体像を示す。まず初めに目標

仕様に対して製品全体の放熱経路を捉え、伝熱理論に基づいて部品の目標熱抵抗や放熱方式を概略設計する。設計自由度が比較的高い初期段階でパラメータスタディーを繰り返し、おおよその放熱構造を検討する。次に、理論設計で得られた結果をもとに、詳細な放熱構造やレイアウトを設計し、3DCAE を用いた解析を行い、熱的な成立性を確認する。一般的に 3DCAE は解析コストを要するが、初期段階で十分に検討することにより、詳細検討の工数が削減できるため、開発期間全体の短縮につながっている。

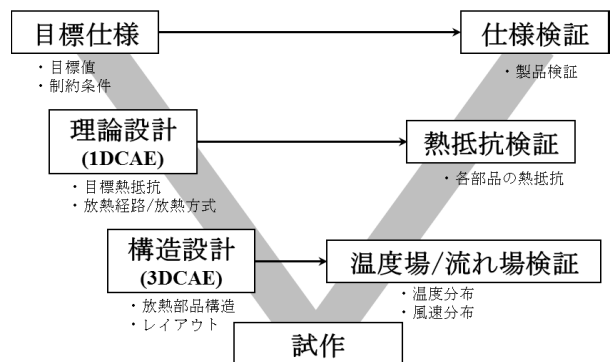


図 1 熱設計プロセスの全体像

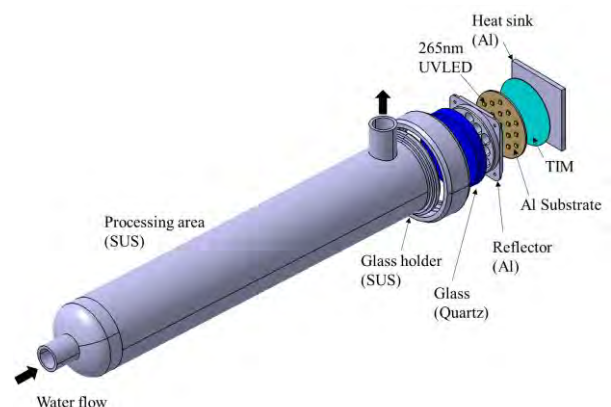


図 2 紫外線水処理装置の基本構造

3. 紫外線水処理装置の開発

3.1 紫外線水処理装置の基本構造

図2に家庭用水や工業用水などの浄水用に開発した紫外線水処理装置の基本構造を示す。SUS管内(φ72.3mm)に流入する処理用水に対して、265nmの深紫外LEDが照射されることにより、水中に存在する原虫、細菌やウイルスなどの微生物を不活化できる。

本開発品は目標の消毒性能を達成するために、265nmの深紫外LEDが19個搭載されている。これらのLEDには処理水に紫外線が均一照射されるよう配光設計されたリフレクタが取り付けられており、光の利用効率が高い構造になっている。一方、深紫外LEDから発生した熱は、アルミ基板からTIMを介して、ヒートシンクに伝わり外気へ放熱される。本開発品では、熱源直下のアルミ基板と処理室のSUS管を熱伝導で接続し、ヒートシンクだけでなく処理室の水にも放熱させることで、システム全体における放熱性能の向上を目論んだ。

3.2 紫外線水処理装置の放熱構造の理論設計

図3に紫外線水処理装置の熱回路網を示す。深紫外LEDから発生した熱が、ヒートシンク側と処理室側に分岐して、外気や処理水に放熱される経路をモデル化し、各部品間の熱抵抗 R と各部品温度 T を用いて表した。ここで、 R_{cond} は伝導熱抵抗、 R_{conv} は対流熱抵抗、 R_{rad} は放射熱抵抗である。

表1に紫外線水処理装置の設計条件を示す。深紫外LEDのジャンクション温度は $T_j < 80^\circ\text{C}$ 、パッケージ温度は $T_c < 56^\circ\text{C}$ とする。 T_j は深紫外LEDの消毒性能と寿命をもとに決定した。LED19個の総発熱量 $Q_{total} = 57\text{W}$ 、周囲空気温度 $T_a = 25^\circ\text{C}$ のとき、処理室内の水温 $T_w = 40^\circ\text{C}$ の条件で、 $T_j < 80^\circ\text{C}$ を達成しなければならない。処理室は水処理の性能に合わせて基本設計されているため、その制約の中でLEDから発生した熱が効率良く処理水に伝わるように、各部品間の熱抵抗を低減させた。本稿では、ヒートシンク側の放熱経路に関する熱設計手法について報告する。

初めに、ヒートシンクの目標熱抵抗を求める。深紫外LEDのジャンクション温度は式(1)で表される。LEDパッケージから外気までの温度差 $\Delta T_{jc} [^\circ\text{C}]$ と周囲空気温度 $T_a [^\circ\text{C}]$ は既知であるため、LEDパッケージから外気までの熱流量 $Q_{ca} [\text{W}]$ と熱抵抗 $R_{ca} [^\circ\text{C}/\text{W}]$ を算出した。

深紫外LEDのパッケージ温度 $T_c < 56^\circ\text{C}$ を達成するには、ヒートシンク側の許容温度上昇は $T_a = 25^\circ\text{C}$ との差から $\Delta T_{ca} = 31^\circ\text{C}$ 、処理室側の許容温度上昇は $T_w = 40^\circ\text{C}$ との差から $\Delta T_{cw} = 16^\circ\text{C}$ 以内でなければならない。許容温度上昇の比例計算の結果、LEDパッケージから周囲空気までの概算熱流量は $Q_{ca} = 38\text{W}$ となった。ヒートシンク側の許容温度上昇 $\Delta T_{ca} = 31^\circ\text{C}$ を $Q_{ca} = 38\text{W}$ で除することにより、深紫外LEDパッケージから周囲空気までの目標熱抵抗は $R_{ca} < 0.82^\circ\text{C}/\text{W}$ と算出された。ここで、深紫外LEDパッケージからヒートシンクまでの熱抵抗は $R_{ch} = 0.15^\circ\text{C}/\text{W}$ であるため、 $R_{ca} < 0.82^\circ\text{C}/\text{W}$ から差し引くことにより、ヒートシンクの目標熱抵抗は $R_{ha} < 0.67^\circ\text{C}/\text{W}$ と求められた。

$$T_j = \Delta T_{jc} + Q_{ca} \times R_{ca} + T_a \quad (1)$$

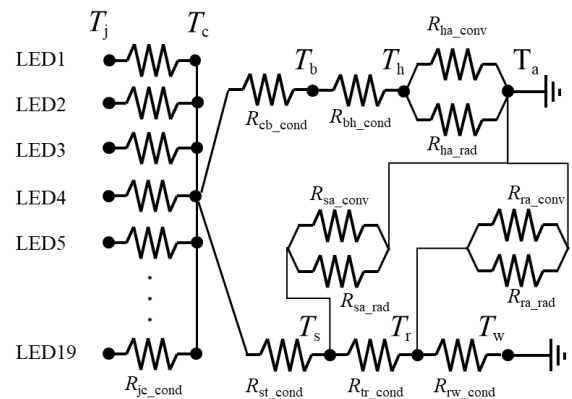


図3 紫外線水処理装置の熱回路網

表1 紫外線水処理装置の設計条件

T_j ($^\circ\text{C}$)	< 80
T_c ($^\circ\text{C}$)	< 56
T_a ($^\circ\text{C}$)	25
T_w ($^\circ\text{C}$)	10~40
Q_{total} (W)	57

次に、ヒートシンクの放熱方式と概略サイズを検討した。図4に自然空冷および強制空冷(風速2m/s)におけるヒートシンクの体積と熱抵抗の関係を示す[7]。ここで、ヒートシンクのベースサイズは処理室のSUS管内径と同等になるように70mm角以下を目標値とし、ファンの風速は市販品70mm角の特性から2m/sとした。

図4より、ヒートシンクの目標熱抵抗 $R_{ha}<0.67^{\circ}\text{C}/\text{W}$ を達成するには、自然空冷では約 $1,700,000\text{mm}^3$ 、強制空冷(2m/s)では約 $100,000\text{mm}^3$ の外形体積が必要であることがわかる。ヒートシンクのベースサイズを70mm角とすると、自然空冷ではフィン高さが約350mm必要であり、ヒートシンクの製造や紫外線水処理装置の全体サイズを勘案すると実現不可能である。一方、強制空冷(2m/s)ではフィン高さ約21mmとなるため、放熱方式は強制空冷とし、市販品から $R_{ha}<0.67^{\circ}\text{C}/\text{W}$ のヒートシンクを選定した。

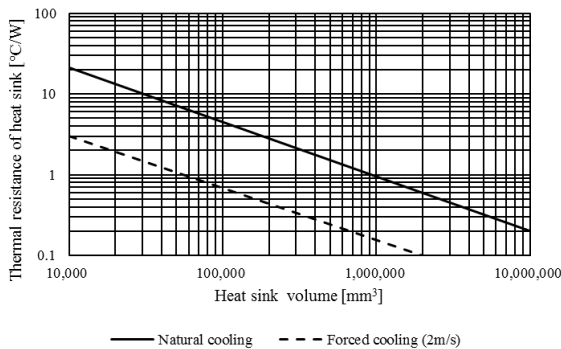


図4 ヒートシンクの体積と熱抵抗の関係

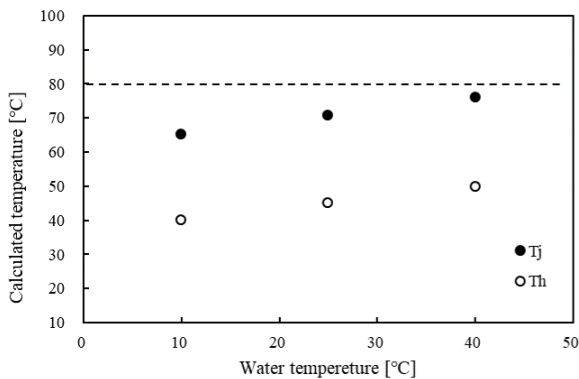


図5 熱回路網法を用いた温度計算結果

図5に紫外線水処理装置に流入する処理水の温度 $T_w = 10, 25, 40^{\circ}\text{C}$ の条件下における深紫外LEDのジャンクション温度 T_j とヒートシンク温度 T_h の計算結果を示す。図3で説明した各部品の熱抵抗をもとに熱回路網法を用いて温度を算出したところ、水温の上昇に伴って深紫外LEDのジャンクション温度 T_j とヒートシンク温度 T_h は上昇するが、すべての条件下において深紫外LEDの $T_j < 80^{\circ}\text{C}$ を満足することが確認できた。

3.3 紫外線水処理装置の放熱構造の詳細設計

前項で検討した概略設計をもとに、紫外線水処理装置を3DCADで詳細にモデリングし、3D熱流体解析(以下、CFD解析)を行った。CFD解析には非構造格子メッシュの商用コードを用いた。

図6に紫外線水処理装置の中心断面における温度分布を示す。深紫外LEDの熱は、主にアルミ基板からヒートシンクに伝わり、ファンから生じた風の流れて強制的に外気へ放熱されている。一方、水温で均熱化された処理室にも熱が伝わっており、理論設計の目論み通り、SUS管に流入する処理水への放熱も確認された。ここで、各水温条件下において、アルミ基板中央に搭載されたLEDが最も高い温度を示すことがわかった。これはファンの風速分布によるものと考えられる。本開発品では軸流ファンを用いており、ファン中央部付近には回転軸が設置されているため風が流れにくい。ヒートシンク中央部の風速低下で生じた温度分布がアルミ基板にも影響し、基板中央に配置された深紫外LEDの温度が上昇したと考えられる。

図7に紫外線LEDユニットの温度分布を示す。CFD解析では解析時間を短縮するために、深紫外LEDパッケージを熱抵抗モデルに簡易化し、ジャンクション温度 T_j を算出した。これは、当社において光源からアプリケーションまでを一貫で開発・製造しており、光源の詳細モデルを把握できるゆえに実現可能な手法である。一連のCFD解析結果から各水温の条件下において、目標温度 $T_j < 80^{\circ}\text{C}$ が見込まれることが確認できた。

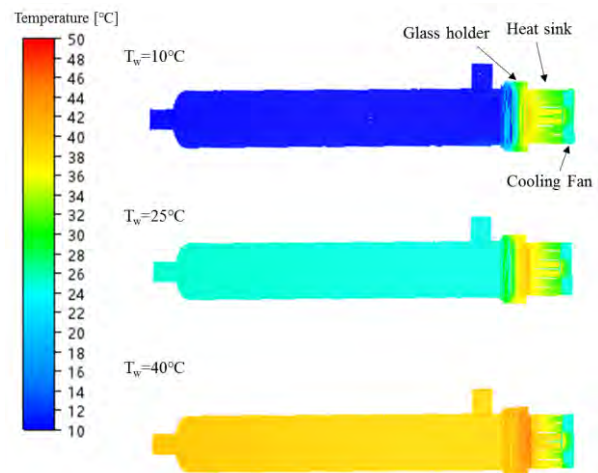


図6 紫外線水処理装置の温度分布

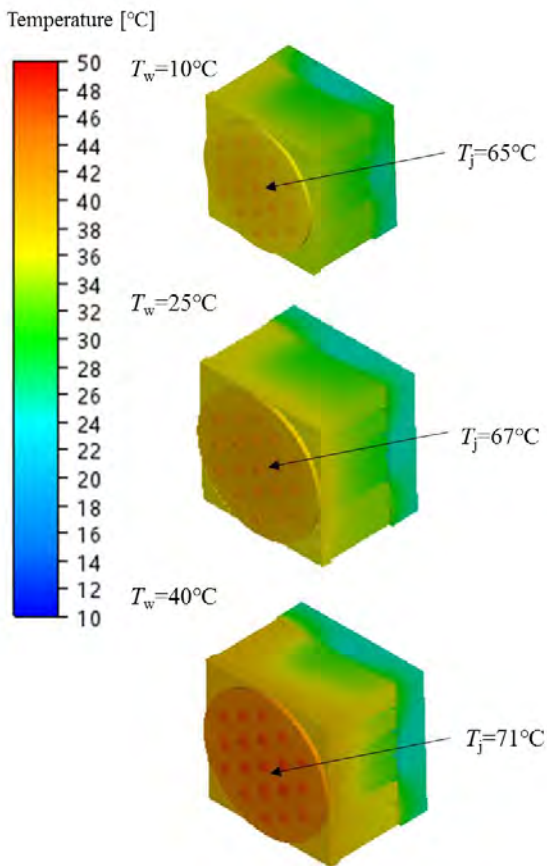


図7 紫外線 LED ユニットの温度分布

3.4 紫外線水処理装置の試作検証

図8に試作した紫外線水処理装置の写真を示す。ヒートシンクとファンは70mm角であり、処理室と同等のサイズにした。試作品について処理室内の水温 $T_w=10, 25, 40^\circ\text{C}$ の条件下における深紫外LEDの温度測定を実施した。LEDが実装されたアルミ基板にK型熱電対を取り付けて温度を測定し、深紫外LEDジャンクションと測定点との温度差から T_j を算出した。

図9に紫外線水処理装置の実験結果と熱回路網法を用いた理論計算(1DCAE)およびCFD解析の結果を示す。各シミュレーションと実験の結果において、処理室に流入する水温の上昇に伴い、LED温度は上昇しているが、いずれの水温条件下においても、目標値である深紫外LEDのジャンクション温度 $T_j < 80^\circ\text{C}$ を達成していることが確認できた。また、実験結果と熱回路網法を用いた理論計算結果(1DCAE)およびCFD解析結果との差異は、それぞれ約 5°C 以内であることが明らかになった。

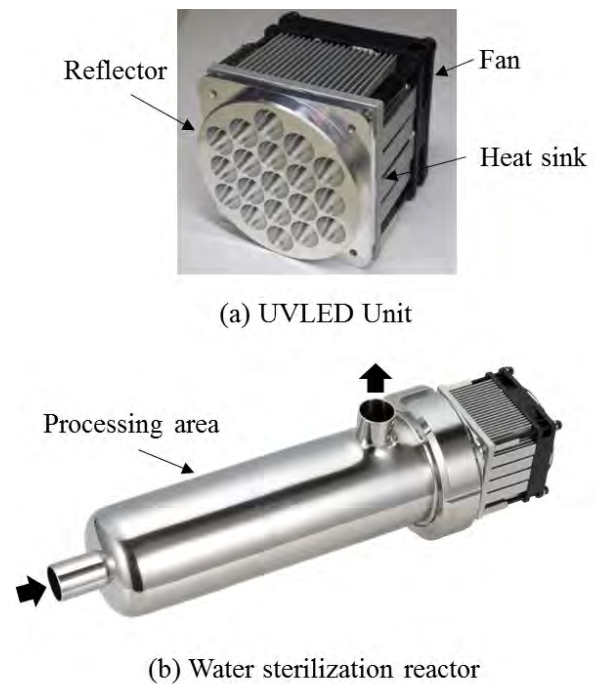


図8 紫外線水処理装置の試作品写真

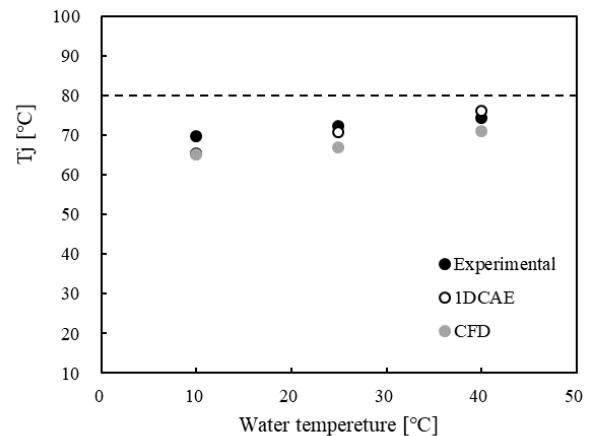


図9 シミュレーションと実験の結果

4. まとめ

265nmの深紫外LEDを用いた通水型消毒装置の熱設計および試作検証を行った。初めに目標仕様を決定し、熱設計に必要な条件を把握した。次に、理論に基づく概略設計を行い、ここでは熱回路網法を用いて紫外線水処理装置の全体性能を向上させる構造の検討と、ヒートシンクの熱設計を行った。理論設計の結果をもとに、3DCAEを用いた詳細設計を行い、最後に試作検証を行って熱的な成立性を確認した。

熱設計で想定した通り, 試作した紫外線水処理装置の LED は目標温度 $T_j < 80^\circ\text{C}$ を達成できた. また, 実験結果と熱回路網法と CFD 解析の結果の差異は約 5°C 以内であり, 前述の熱設計プロセスは製品開発に十分活用できることを確認した.

5. おわりに

本稿では, 家庭用水や工業用水向けの紫外線水処理装置の熱設計について報告したが, 当社では図 10 に示す様に, 水処理の用途に応じた様々な深紫外 LED の放熱ユニットを開発している. 処理水の流量増加に伴い, 搭載される LED の数が増えるため, 放熱構造は強制空冷では不十分となり水冷が必要な場合もある. 放熱方式の選定は製品の全体構成に大きな影響を及ぼすため, 開発初期段階で理論設計することが重要である. 熱設計プロセスにおける設計と検証の蓄積により開発の後戻りを削減し, 開発コストの低減につなげている.

現在, 265nm の深紫外 LED は新型コロナウイルス (SARS-CoV-2) に対しても不活化効果が確認されているため, 今後は深紫外 LED を用いた各種製品群の熱設計に本技術を展開していく.

参考文献

- [1] Rattanukul, S., Oguma, K., *Inactivation kinetics and efficiencies of UV-LEDs against Pseudomonas aeruginosa, Legionella pneumophila, and surrogate microorganisms*, *Water Research*, **130**, (2018) 31.
- [2] 大滝雅寛, 紫外線による水処理技術の現状と課題, *用水と廃水*, **59-4** (2017) 42.
- [3] 石川智明, UV-LED を用いた大水量処理装置, 設計上のポイント, *環境浄化技術*, **16-6** (2017) 41.
- [4] 櫻井公人, 加藤剛雄, 田内亮彦, 安心・安全な UV-LED を光源とした流水殺菌装置, *東芝レビュー*, **74-4** (2019) 54.
- [5] 松田純司, 渡邊真也, 志賀淳一, 紫外線を利用した水処理技術～最新の動向～, *水環境学会誌*, **42-12** (2019) 426.
- [6] 木下亨, 深紫外 LED の水処理への応用, 一般社団法人日本紫外線水処理技術協会 ニュースレター, **11** (2018) 16.
- [7] 国峯尚樹, エレクトロニクスのための熱設計完全制覇, 日刊工業新聞社 (2018).

Wavelength	265nm			
LED pcs/unit	7p	19p	37p	55p
Image				
LED placement				
Light source diameter	ca. $\phi 42\text{mm}$	ca. $\phi 80\text{mm}$	ca. $\phi 100\text{mm}$	ca. $\phi 120\text{mm}$
UV output	0.35W	0.95W	1.85W	2.75W
Flow rate	3~10 L/min	12~40 L/min	30~100 L/min	50~160 L/min
Estimated RED	16~40 mJ/cm^2			

図 10 紫外線水処理装置の特性一覧

製品開発に活用する熱設計技術

Thermal Management Technology for the Product Development

畑 陽介, 野上 英和 (ブラザー工業株式会社)
Yosuke HATA, Hidekazu NOGAMI (Brother Industries, Ltd.)
e-mail: yosuke.hata@brother.co.jp

1. はじめに

電子機器の小型化・高機能化が進み、製品開発における熱設計の重要性はますます高まっている。

半世紀前までの電子機器は、筐体サイズも大きく、内部に実装する電子部品のサイズも大きかったため、部品で発生した熱の多くが筐体内の空気に放熱されていた。そのため、当時は筐体内の空気温度を管理する熱設計で製品の信頼性を保証することができていた。

しかし、この数十年の間に部品と基板の技術は進化を続け、あらゆる部品が小型化し、基板は多層化した。部品が小型化すると表面積が減少し表面から空気への放熱量が減る。基板が多層化して残銅率が増えると基板への放熱量が増える。

このように基板と部品の技術革新によって、部品で発生した熱の大半が基板に流れるようになり、空気ではなく基板温度を管理する熱設計が重要になってきた。[1]

製品開発の現場においては、伝熱工学の基礎式を土台として、熱回路網法、数値流体力学ソフトウェア (Computational Fluid Dynamics 以下、CFD) などの設計ツールを目的と用途に応じて、使い分けながら熱設計に取り組んでいる。

CFDにおいては、近年、高性能な計算処理能力をもつ計算機環境が普及したことで、大規模なモデルでも高速に計算できるようになり、モデルの詳細度も飛躍的に向上した。

設計が進み、各部の詳細形状が出来上がったタイミングでCFDを適用することで、実験では測定できない部品内部の温度や機器内部の温度を詳細に把握することができる。

一方、設計上流段階では、各部の詳細形状はなく、製品の外形と主要部品のレイアウト案、おおよその電力から熱設計の成立性を検討する。

このような概念設計の場面では、流れ場や温度場を電気回路の形に置き換えて簡易的に計算する熱

回路網法が有効な設計手段の1つである。[2]

また、設計上流段階から適用できる設計支援のプラットフォームとして、IDCAEを大富氏が提唱している。[3]IDCAEは、製品の機能を支配する物理現象の本質を的確に捉え、見通しの良い形式でシンプルに表現することを意味する。

設計上流段階で様々な視点から設計検討を行い、より良い設計解を設定した上で詳細設計に進み、各種設計ツールを連携し、部品レベルと製品レベルの設計を連動させることで、革新的な製品の創出が期待できる。

このように、設計の環境変化を把握しつつ、新しいものづくりの考え方や手法を取り入れ、部門・分野を超えた協調設計を実現することが、今後の製品開発において熱設計を成功させるカギとなると考える。

本稿では、インクジェットプリンター・複合機におけるメイン制御基板を中心に、半導体部品の温度推定方法を含めて、製品開発における熱設計事例を説明し、昨今注目されている基板放熱主体の熱設計に関する業界団体の取組みを紹介する。

2. 半導体部品の温度予測

電子機器の中にはメイン制御基板が搭載されており、その上に実装されているのが半導体部品である。さらにその中に製品の心臓部であり発熱源である半導体素子がある。

製品を正常に動作させるためには、この半導体素子の温度（以下、ジャンクション温度）が許容温度以下に収まるように熱設計をしなければならない。[4]

完成品メーカーでは、温度センサーを搭載した部品以外はジャンクション温度を直接測定することはできない。そこで、半導体部品メーカーから提供される熱抵抗データを使って、部品表面温度からジャンクション温度を間接的に推定する。

熱抵抗の定義や測定方法にはいくつかの規格があるため、どの規格に準拠したものかを確認して使用する必要がある。

本稿では、JEDEC 規格を例に半導体部品のケース温度 T_c からジャンクション温度 T_j を推定する方法と設計使用時の注意点を説明する。

2.1 熱抵抗 θ_{jc} と熱パラメータ ψ_{jt}

半導体部品の各部の温度 T と熱抵抗 θ は図 1 のように規定されている。

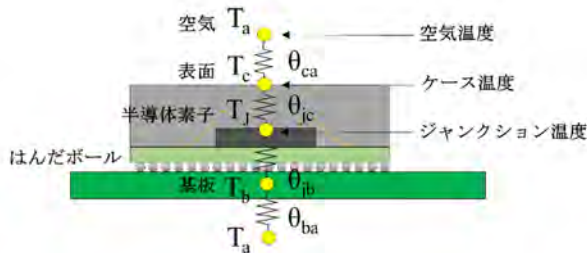


図 1 半導体部品の温度と熱抵抗 (JEDEC 規格)

そして、ジャンクション温度 T_j を推定する際に使用する熱抵抗データの定義は次の通り。

熱抵抗 θ は、2 点間の温度差をその間を通過する熱流量で割った値。

熱パラメータ ψ は、2 点間の温度差を総熱流量で割った値。

図 1 のように、ヒートシンクを取り付けない状態 (以下、オープントップ状態) で部品を放熱させた場合、熱は部品の上側 (空気側) と下側 (基板側) に分かれて放熱する。そのため、熱抵抗 θ を測定する際は、部品の片側にコールドプレートを設置して、温度差を決めている熱流量 W を測定する。

θ_{jc} と ψ_{jt} それぞれの測定方法を図 2 に示す。 [5]

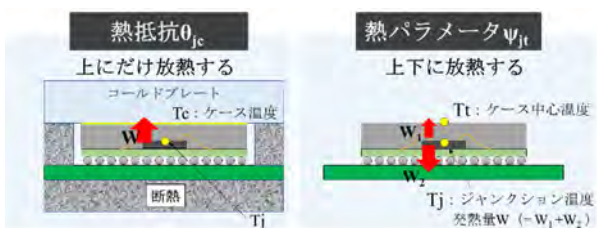


図 2 θ_{jc} と ψ_{jt} の測定方法

熱抵抗の定義は、“2 点間の温度差をその間を通過する熱流量で割った値”なので、熱パラメータ ψ_{jt} は本来の熱抵抗ではない。そのため、熱抵抗 θ_{jc} と区

別するために熱パラメータ ψ_{jt} と表現される。ジャンクション温度 T_j を推定するときは、半導体部品の実装環境と熱抵抗データの測定環境を一致させて使うことが重要である。

具体的には、ヒートシンクを取りつけた状態では熱抵抗 θ_{jc} を適用し、ヒートシンクを取りつけない状態では熱パラメータ ψ_{jt} を適用する。 [1][6]

2.2 ジャンクション温度の推定

半導体部品のジャンクション温度 T_j は

$$T_j = R \times W + T_c \quad (1)$$

で求められる。

ここで、 W は半導体素子の発熱量、 T_c はケース温度 (部品表面温度)、 R はジャンクション温度 T_j からケース温度 T_c までの熱抵抗である。

オープントップ状態で実装する半導体部品のジャンクション温度 T_j を熱抵抗 θ_{jc} と熱パラメータ ψ_{jt} で推定し、温度推定誤差を確認する。

半導体部品の熱抵抗 $\theta_{jc}=10.0^\circ\text{C}/\text{W}$ 、ジャンクション部の許容温度上限 $T_{\max}=110.0^\circ\text{C}$ 、設計上の最大発熱量 $W=2.0\text{W}$ とする。

半導体部品で発生した熱の大半が基板に放熱される場合 ψ_{jt} は小さくなる。今回は $\psi_{jt}=2.0^\circ\text{C}/\text{W}$ とした。製品動作時の T_c を測定したところ $T_c=100.0^\circ\text{C}$ になったとする。

(1) 式より T_j を推定した結果を表 1 にまとめた。

表 1 T_j の推定結果 (オープントップ状態)

パラメータ・指標		$\theta_{jc}=10.0 [^\circ\text{C}/\text{W}]$ 適用	$\psi_{jt}=2.0 [^\circ\text{C}/\text{W}]$ 適用
発熱量	W [W]	2.0	
許容温度上限	T_{\max} [$^\circ\text{C}$]	110.0	
ケース温度	T_c [$^\circ\text{C}$]	100.0	
ジャンクション温度 (推定)	T_j [$^\circ\text{C}$]	120.0	104.0
判定		要対策 $T_j > T_{\max}$	成立 $T_j < T_{\max}$

今回はオープントップ状態で使用しているので ψ_{jt} の適用が正しい。しかし、 θ_{jc} を適用してしまった場合、許容温度 110°C を超えるため追加の放熱対策を検討しなければならない。

このように熱抵抗データを正しく適用しないと、


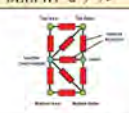
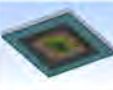
過剰な放熱対策を検討して無駄な開発コストがかかかったり、逆に温度を過小に評価して設計後期の熱問題の要因となったりする恐れもあるため、使用時の取り扱いに注意が必要である。[6]

2.3 半導体部品のシミュレーションモデル

設計が進み、各部の詳細形状案が出来上がると CFD を活用した半導体部品の温度予測ができる。

半導体部品のシミュレーションモデルには、半導体内部の熱経路を熱回路網法の等価回路で表現するコンパクト熱モデル（Compact Thermal Model, 以下 CTM）と、部品形状をモデル化する詳細モデルがある。表 2 に半導体部品のシミュレーションモデルの特徴を説明する。[7][8][9]

表 2 半導体部品のシミュレーションモデル[7]

種類	コンパクト熱モデル (CTM)		詳細モデル
	2抵抗モデル	DELPHIモデル	
モデル			
概説	3つのノードと2つの抵抗で構成される簡単なモデル	2抵抗モデルよりもノードが多く、サイドからの放熱も考慮できるモデル	内部の詳細構造、材料物性を考慮したモデル
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 最も単純 過渡応答解析不可 ケースとボトムは一定温度 計算コスト低 	<ul style="list-style-type: none"> 過渡応答解析不可 	<ul style="list-style-type: none"> 最も複雑詳細 規格がないため品質のばらつく 計算コスト高
精度	△	○	◎
規格	JESD15-3	JESD15-4	なし

CTMには2抵抗モデルと DELPHI モデルがあり、詳細モデルと比べてはるかに少ない計算量で温度予測ができる。

そのため、設計上流段階で基板サイズや部品のレイアウトを検討するのに適している。

一方、詳細モデルは、計算量が多くなるが CTM に比べて温度予測精度良く、部品表面の温度分布をある程度予測することができる。

しかし、完成品メーカーが詳細モデルを作成するためには、半導体部品メーカーとの秘密保持契約の締結が必要になるなど、モデル作成に時間がかかることもある。

製品開発の現場では、製品開発段階で求められる精度と設計検討時間に合わせて、これらのシミュレーションモデルを使い分けて熱設計を行う。

3. 複合機における基板の熱設計

民生用のインクジェットプリンターの場合、主な発熱源はインクジェットヘッド・モーター・電源基板・メイン制御基板（以下、メイン基板）である。各々の発熱量は、比較的小さいため、自然空冷を採用している製品が多い。

インクジェットプリンターは、世界各国で使用されている製品で、特に海外の一部地域では、屋外に近い環境に設置されることもあるため、製品内部への砂塵や水の侵入を防ぐ構造になっている。

プリンターという製品の特性上、給排紙をするための大きな開口部が設計されるが、その他の筐体カバーの隙間は埋められている。

また、製品を小型化するため、部品の実装密度は高く、内部空気の移動はほとんど期待できない。

そのため、内部空気に逃げた熱は再び筐体に伝わり、筐体表面から外気へ熱が運ばれる構造になっている。

本稿では、プリント、コピー、スキャン、PC ファクスなどの複数の機能を備えたインクジェットプリンター・複合機（以下、複合機）を取り上げ、メイン基板に搭載された半導体部品の熱設計事例を紹介する。

図 3 に示す通り、複合機（MFC-J6583CDW）のメイン基板は筐体左側に水平に実装されている。



図 3 メイン基板の搭載位置 (MFC-J6583CDW)

製品上部には原稿を読み取る読取機構を搭載している。

そのため、メイン基板は多数の樹脂板と空気層に囲まれた位置に搭載されている。

そして、このメイン基板には、製品動作を司る ASIC（Application Specific Integrated Circuit：特定用途向け集積回路）が実装されている。

近年、製品の高性能化、高機能化に伴って、ASIC の

発熱量は年々増加しており、さらに、放熱し難い位置にレイアウトされる傾向にあることから、設計上流段階で熱設計に取り組み、放熱経路を確保することが重要になってきている。

ここでは、熱回路網法を使った ASIC の熱設計の検討内容について説明する。

3.1 熱回路網モデル

はじめに、ASIC から外気までの放熱経路を想定する。ASIC および基板の間の空間の熱輸送に関しては、上下面の自然対流と輻射が生じていると考える。このとき、基板を冷却し周辺部品を加熱する内部空気については、温度分布を無視して一定温度とする簡略化をした。

樹脂製カバーやフレーム、読取機構のガラス板に挟まれた狭い空間における熱輸送に関しては、主に空気の熱伝導が生じていると考えてモデル化した。

また、メイン基板上の発熱部品は ASIC のみとし、基板は等価熱伝導率を与えた。

ASIC で発生した熱は基板に広がった後、基板の上下方向に内部空気と筐体を介して伝熱することを想定し、熱回路網モデルを作成した。(図4)



図4 メイン基板周りの熱回路網モデル

3.2 熱回路網法の計算結果

図5に熱回路網法の計算結果と製品試作後に実施した温度実測結果を比較したグラフを示す。

ASIC の温度を最高温度として、メイン基板上部と下部に熱が伝わる定性的な傾向が一致を示している。ASIC 周囲の温度が一致していないが、この原因は基板と基板上の発熱部品のモデルの簡略化が影響していると考えられる。

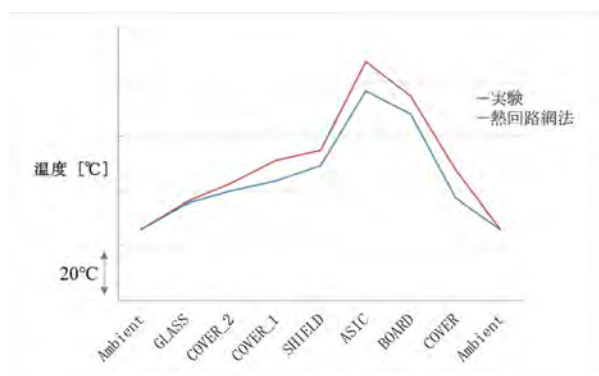


図5 実験と熱回路網法の結果比較

また、メイン基板の下部にある COVER の温度は、実測よりも計算結果が高くなっている。

この原因としては、実機では媒体搬送経路に面したカバー周りに想定外の流れが発生し、自然対流よりも放熱効果が高まっていると考えられる。

このように実測結果と計算結果の比較をすることで、製品内部の現象理解を深めながら熱回路網モデルを精緻化することができる。

一方、製品開発の現場においては、計算精度を追求してモデルを複雑にすれば良いというものではなく、目的に合わせてモデル化することが重要である。

3.3 放熱経路の設計検討

今回の複合機のように筐体の開口部が少ない状況下で部品の発熱量が増大した場合、空気ではなく筐体への放熱促進を考える。

ヒートシンクを取り付けるという手段もあるが、空気の流入流出が少ない筐体内で放熱すると内部空気の温度が上昇するため、冷却効果は期待できない。

設計上流段階の熱設計手段としては、部品の発熱量低減、基板の高熱伝導化も考えられる。

今回は図5の計算結果において、ASIC および基板 (BOARD) と周辺部品の温度差が大きくなっている点に着眼し、この経路の熱抵抗を低減させるべく、部品の熱を板金 (筐体) に放熱させる設計案を検討した。(図6)



図6 板金（筐体）に熱を逃がす対策

部品と板金を直接接触させて放熱する場合、部品に大きな荷重が加わり、部品と基板の接続部が故障しないように設計しなければならない。

このとき、部品と板金の接触部にはTIM (Thermal Interface Material) を使用する。

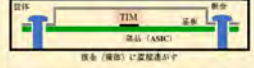

部品寸法のばらつきによって、部品と基板が接触しない状態を回避し、部品に加わる力を低減させるため、硬度が低く厚みのあるTIMを選定することが重要である。

一方、基板を経由して放熱する場合、部品の熱を基板の裏側に伝える必要があるため、基板にサーマルビアを設けるなどの対策を同時に検討しなければならない。

今回作成した熱回路網モデルを使って、各設計案の温度低減効果を予測した。

表3に熱回路網法による温度予測結果と、製品試作後に実施した実測結果を示す。

表3 板金への放熱効果の予測と実測

設計案	熱回路網法 [°C]	実測 [°C]
①板金に直接放熱（表） 	-8.1	-10.0
②基板経由で板金に放熱（裏） 	-2.1	-6.4

熱回路網法による予測では、設計案①は②よりも6.0°C高い放熱効果が期待できる。

これに対して製品試作後の実測結果を確認すると、その差は小さく3.6°Cになる。

熱回路網法による予測結果の差が大きくなった

原因としては、基板のモデルの簡略化が影響していると考えられる。(今回はASIC直下のサーマルビアを簡略化して等価熱伝導率を与えている)

しかしながら、設計上流段階で設計案①と②のどちらを採用するか、判断するための指針を示すことができているため、今回の熱回路網モデルは実用的な精度だと考える。

今回の設計検討結果より、放熱効果としては設計案①が優位だが、最終的には製品構造や製造などの要件を考慮して設計案を決定する。

3.4 製品開発と熱設計ツール

1D CAE でもある熱回路網法は、熱設計の勘所を見つける有用な設計ツールの1つである。

しかし、平面的な熱の広がりや、3次元の熱や流れの動きを予測する場合には向かない。設計が進めば部品の詳細形状が出来あがり、2D CADモデルや3D CADモデルが扱えるようになる。

従って、詳細設計以降は、各CADモデルを活用してCFDを実施することで、熱回路網法で予測できなかった詳細な熱や流れの予測が可能になり、具体的に製品構造を設計する際に役立つ。

表4にIDCAEと3DCAEの特徴を整理した。

表4 1DCAEと3DCAEの特徴

	1DCAE	3DCAE
目的	機能の設計	試作実験の代替
主効果	技術品質の向上、価値創出、現状分析と理解 (リバースIDCAE)	開発設計コストの低減 設計および評価時間の短縮
活用場所	要素技術開発 構想設計、機能設計	詳細設計 (CADモデル作成後)
対象	技術の構築、機能の検証	設計の検証
手段	機能、現象、メカニズム抽出	形状、構造を含んだ現実を模擬
モデル	集中定数系モデル	有限要素法モデル
計算結果	時間変化 (挙動) のみ (空間の概念が扱いにくい)	時間変化と空間分布
要求精度	機能評価・相対評価重視	実機再現性重視

4. 基板放熱主体の熱設計に関する取り組み

前章では、密閉状態に近い複合機内部に実装されたメイン基板の熱設計事例を紹介した。

ASICで発生した熱は基板や筐体を介して最終的に機外に排出される。これまでの製品開発は、筐体内の空気温度を指標とした熱設計が主流だったが、今回のように基板や筐体の温度管理が重要になる製

品が増えてきている。先に述べた通り、基板と電子部品の技術革新に伴って、部品で発生した熱の大半が基板に放熱されるようになり、基板の温度管理をする熱設計が重要になってきている。

こうした背景から、従来は筐体設計を担当する“機械系設計者”が熱設計を担ってきたケースが多かったが、今後は回路パターンを設計する“電気系設計者”が熱設計に参画することが重要になってくる。

しかしながら、一般的な“電気系技術者”にとっては機械系の科目である伝熱工学は縁遠いことなどもあり、この変化対応は容易ではない。

こうした熱設計の環境変化に対応すべく、JEITA実装技術標準化専門委員会の傘下に“サーマルマネジメント標準化G”が設立され、企業・大学・研究機関からメンバーが参画し、現状の設計に見合った熱設計インフラの整備を進めている。[10][11]

ここでは主な課題として、“部品の使用環境温度の規定”、“基板放熱設計のガイドライン化”、“温度測定方法の提案”の3つを定め、熱設計技術の標準化と共有のための活動をしており、現在は、各サブグループテーマの技術レポート発行に向けて準備を進めている。

表5に本活動の概要を示す。

表5 サーマルマネジメント標準化Gの概要

主査	KOA(株) 平沢 浩一
副主査	金沢工業大学 福江 高志
サブグループ名	活動内容
部品使用環境温度規定SG	部品に適した使用温度環境の規定方法の検討と仕様の推進
基板放熱ガイドライン検討SG	基板放熱を主体とした熱設計手法の提案
温度測定SG	微小部品や基板上の温度測定手法の提案

5. おわりに

製品開発に活用する熱設計技術の事例として、複合機のメイン制御基板を中心に、半導体部品の温度推定方法を含め、熱回路網法を使った熱設計事例を紹介した。

そして、各種熱設計ツールを使い分け、設計上流段階から熱設計取り組むことの重要性を述べた。

さいごに、昨今注目されている基板放熱主体の熱設計に関する業界団体の取組みを紹介した。

部品と基板の技術革新は電子機器の熱設計手法だけでなく熱設計担当者にも変化をもたらす。

部品や基板の温度管理が必要となる今後の熱設計技術としては、基板の熱モデリング技術や部品の発熱量推定・測定技術も重要になると考える。

こうした変化への対応は、ものづくり全体にも求められている。熱設計技術がものづくりを支える基盤技術として重要な役割を果たしていけるよう、企業組織や専門分野の枠組みを超えて知見を結集し、技術開発に取り組み、延いては日本のものづくりの発展に貢献していきたい。

参考文献

- [1] 国峰尚樹, エレクトロニクスのための熱設計完全制覇, 日刊工業新聞社 (2018), 2-6, 102-106
- [2] 渡邊一充, 石塚勝, 中川慎二, “パワーエレクトロニクス基板の実用的熱設計手法の開発”, 日本機械学会北陸信越支部 第46期総会・講演会講演論文集 (2009), 171-172.
- [3] 大富浩一, “IDCAE・MBDの目指すところ, 現状, 課題, そして今後”, 日本機械学会 IDCAE・MBD シンポジウム 2019 講演論文, (2019), keynote1
- [4] 石塚勝, 半導体・電子機器の熱設計と解析, 科学情報出版株式会社 (2015), 39-48
- [5] JESD51, Methodology for the Thermal Measurement of Component Packages, (1995)
- [6] 電子情報技術産業協会(JEITA) 技術レポート (EDR-7336)[半導体製品におけるパッケージ熱特性ガイドライン](2010)
- [7] ローム株式会社, SiC パワーデバイスアプリケーションガイド熱シミュレーション用2抵抗モデル
- [8] JESD15-1, Compact Thermal Modeling Overview, (2008)
- [9] JESD15-3, Two-Resistor Compact Thermal Model Guideline, (2008)
- [10] 福江高志, 他, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 21, No. 2, (2018), 130-136
- [11] 有賀善紀, “小型チップ部品の熱問題と基板放熱を利用した熱設計”, セラミック誌, 第54巻, 12月号, (2019), 832-835

1DCAE を活用した熱設計 Thermal Design Using 1DCAE

安井 良 (株式会社河合電器製作所)
Ryo YASUI (KAWAI CORPORATION)
e-mail: yasui.ryo@kawaidenki.co.jp

1. はじめに

1.1 ホットプレートの昨今の概況

近年、産業用機器などで用いられるホットプレート（主に金属体で構成された六面体加熱構造物）やホットステージには、製品の出来栄え・歩留まりに影響を及ぼすことから、任意の温度分布、温度ばらつき制限（均熱と呼ばれる）を必要とするケースが増えており、更に温度分布精度も高くなりつつある（図 1）。一般的に温度分布の実現には「使用環境・装置構成・制御方式」など様々な要素が複合的に関係するため、目的達成には多くの時間と費用を要する場合がある。更に従来は、最適な温度分布を満たす熱量決めが根拠の無い経験則や過去の実績に頼るケースが少なくない。

そこで、最近では熱源製作メーカーでは数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics (以下 CFD)) を積極的に導入して解析により事前検証から製品製作へ繋げて、製作付加価値創造を目指す動きがある。しかしながら、一般的に熱設計における CFD は熱設計の下流（製品仕様の終盤）で有効的なツールである。CFD による解析の場合、1 解析あたりに必要な解析時間が長い為、複数回解析を実施する本ケースの場合、試作製作を短縮できる CFD の優位性が損なわれる課題がある。また、3DCAD モデルを一から製作する必要がある事、メッシュを切る作業なども時間を要すプロセスである。現場では試作して評価の方が結果的には早いといった声まで聴くこともある。こうした課題に対して、本報では 1DCAE (Computer Aided Engineering) を有効活用する事で、解析時間短縮による装置の価値向上を目指す。具体的には先ず、1D モデルの有効性を基礎モデルで CFD と比較する。その後、開発した 1D モデルと実験モデルの両者の誤差及び解析時間を比較し、1DCAE の有効性を評価する。

1.2 1DCAE について

近年、3DCAE の技術進化が著しく、目標パラメータと可変パラメータを決める事で、最適値を決める技術も一般的に活用されつつある（トポロジー最適化など）。しかしながら、3DCAE（構造設計）では限界があり、更なる付加価値創造に限界が来たと言われている。新たな価値創造の為に、価値の蒸留が必要不可欠であり、「機能設計 (1D)」段階に設計の比重をフロントロードする必要があるといわれる[1]。しかし、必要なパラメータ枠を広げることは、伝熱分野以外の専門性に特化した技術者にとって容易な事ではない。また、1DCAE は 3DCAE の様に汎用性のあるソフトは少なく、一般的には専用ソフトの開発が必要となり、高いハードルとなっている。

こうした課題に対して本報では、1DCAE ツールとして熱回路網法[2]を用いた専用モデル設計を試みた。1D モデル構築から応用までを紹介する事で少しでも似た課題を持つ技術者へのご参考になれば幸いである。

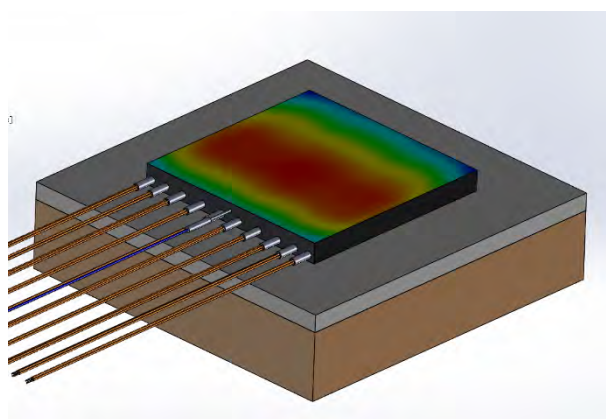


図 1 ホットプレートの均熱課題

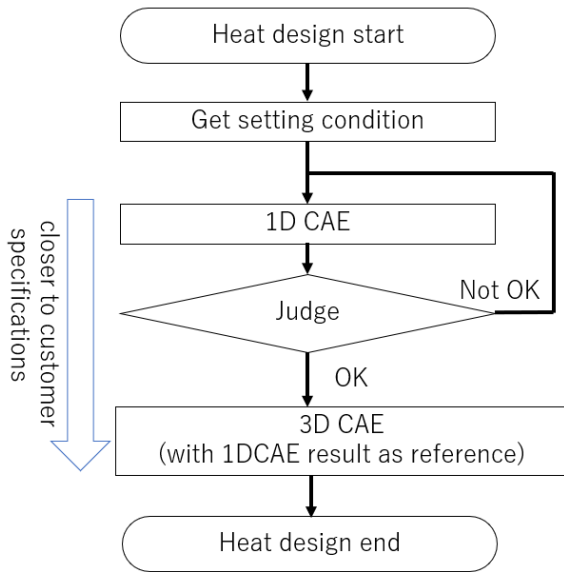


図2 熱設計フロー

2. 1Dモデルの有効性

2.1 1Dモデル化

1Dモデル化では、モデルの再現性(回路網設計)や作成した熱回路の各熱抵抗に与える計算式の選定などが誤差原因として大きい。本報では、下記の式を用いた[3]。

熱盤の各面の無次元熱伝達率 Nu (ヌッセルト数) を下記式で求める。乱流時には、 Gr (グラスホフ数) と Pr (プラントル数) の積算値により計算式を変動させている。

上面の式

層流：

$$Nu = 0.54(Gr Pr)^{1/4} \quad (10^4 < Gr Pr < 10^7)$$

乱流：

$$Nu = 0.15(Gr Pr)^{1/3} \quad (10^7 < Gr Pr < 10^{11}) \quad (1)$$

側面の式

$$Nu = \begin{cases} 0.59(Gr Pr)^{1/4}, & (10^4 < Gr Pr < 10^9) \\ 0.10(Gr Pr)^{1/3} & (10^9 < Gr Pr < 10^{13}) \end{cases} \quad (2)$$

底面の式

$$Nu = 0.27(Gr Pr)^{1/4} \quad (10^5 < Gr Pr < 10^{11}) \quad (3)$$

熱伝達率の無次元数 Nu (ヌッセルト数)

$$Nu = \frac{h \cdot l}{\lambda}$$

(4)

h : 熱伝達率 [W/(m²·K)]

l : 代表長 [m]

λ : 熱伝導率 [W/(m·K)]

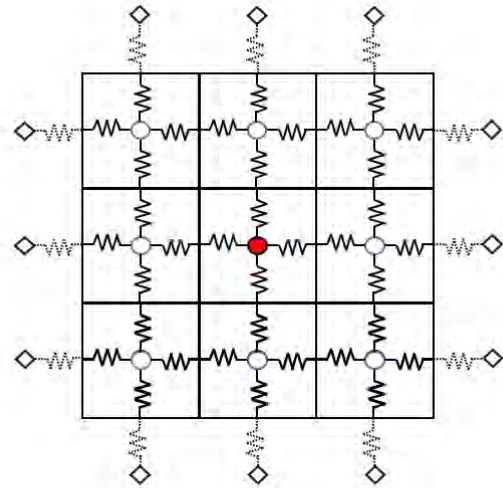


図3 1D (熱回路網) 概念モデル

2.2 定常解析

1Dモデルの有効性を確認する為に、簡易モデルを用いて1Dモデルと3DCAEモデルでの解析結果の比較を行う。図4に示す幅30mm×奥行300mm×高さ30mmのS53C材にφ10mm×330mm 200Wのカートリッジヒータを挿入したモデルを対象として、1DCAEは独自開発したソフトを用い、3DCAEは市販CFDツールを用いて定常熱流体解析を行った。比較する温度位置はモデル上面の3か所とした(図5; top:先端部, middle:中央部, bottom:底部)

図6の解析結果より、本モデルではリード線部からの放熱の影響により、温度勾配が面Aに対して非対称になることが確認できる。また、図7の解析結果より、3点において3DCAEと1DCAE結果の誤差(=(計算値-実験値 / 実験値))が3%以下であった。

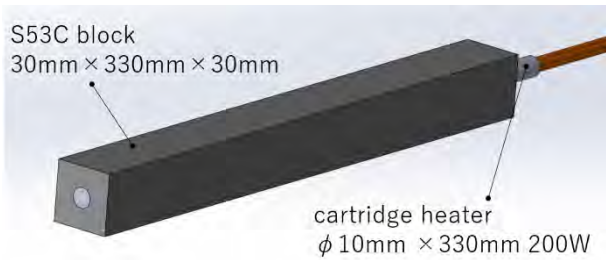


図4 3DCAE モデル

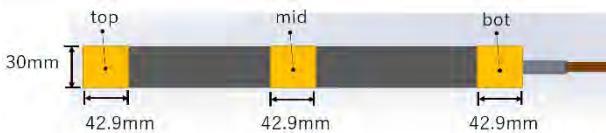


図5 温度測定位置

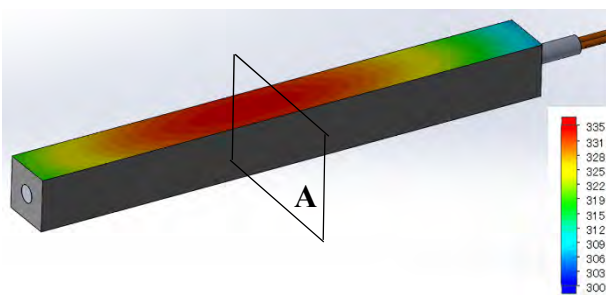


図6 3DCAE 定常解析コンター図

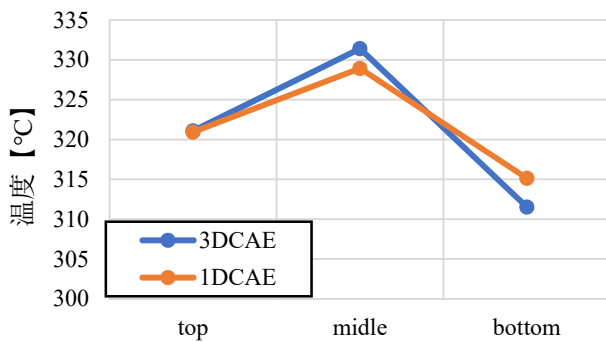


図7 定常解析結果

2.3 非定常解析

次に2.1節同様条件で非定常解析を実施した。ヒータは通電開始から3000秒までとした。

図8の3000秒時の解析結果を確認すると、非定常解析も定常解析同様に3点において3DCAEと1DCAE結果の誤差が3%以下であった。

これらより、1DCAEでも十分3DCAE同様に結果を得る事が出来た。

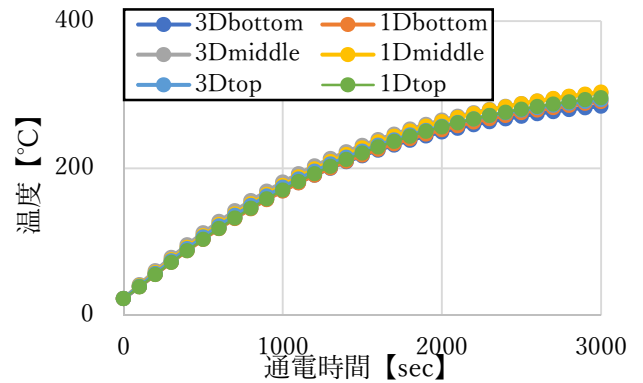


図8 非定常解析結果

3. ホットプレートでの評価

3.1 評価条件

1Dモデルによる解析の有効性の確認が出来たので、実験と1DCAEを比較する。ホットプレートの形状は装置構造によって多種多様であるが、本報では基本的な六面体構造を対象とする。実験モデルは、図9に示す幅300mm×奥行300mm×高さ30mmのS53C材にφ10mm×330mmのカートリッジヒータを挿入したモデルを対象とする。金属ブロックの下にはケイ酸カルシウム系断熱材、耐火煉瓦の順に設置する。表面には黒体テープ ($\epsilon = 0.94$) を貼付した。ヒータ通電温度安定後の表面温度分布について温度制御ありで比較する。

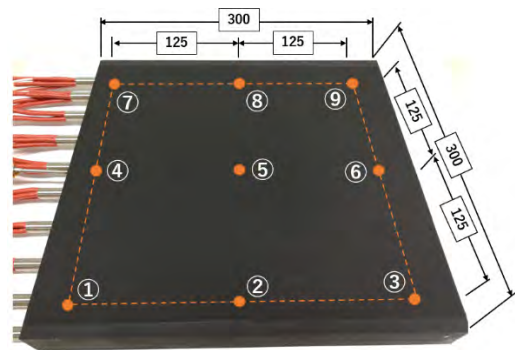


図9 ホットプレート試験モデル

3.2 実験結果

通電30分後の各温度を比較する。尚、温度制御はON-OFF制御(200diff 2°C)とする。

図10の結果を比較すると、各温度共に実測値と1DCAEの誤差が1.5%以下の結果を得る事が出来た。また、サーモビューワ測定結果(図11)を確認すると、リード線側の放熱による温度低下を確認出来る。

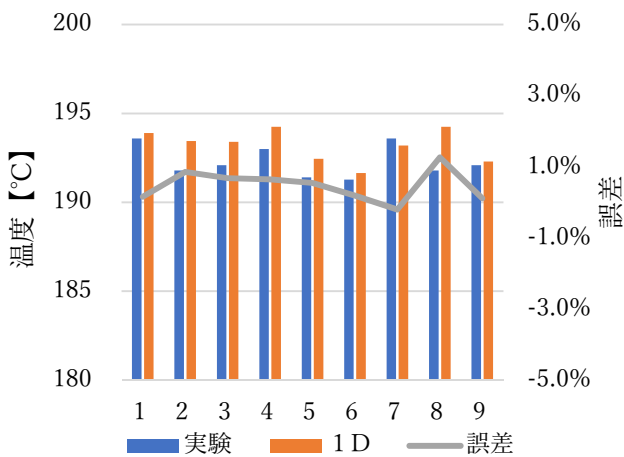


図 10 温度の比較

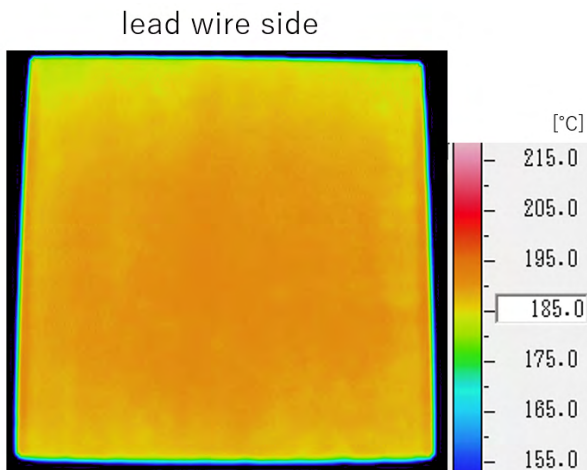


図 11 サーモビューアー画像

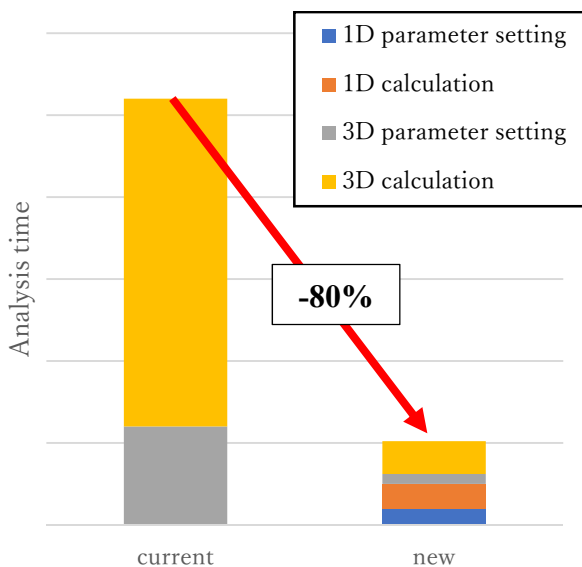


図 12 解析時間の比較

4. 解析時間削減効果

一連のフローにおいて、今回開発した 1DCAE を活用した場合 (図 12 の new) と従来通り 3DCAE のみの場合 (図 12 の current) について、解析設計時間を比較した。1DCAE を活用する事で約 80% の計算時間削減が可能になった。

5. まとめ

本報では CFD 活用に伴い、時間コストを要する課題に対して、熱回路網法を活用した 1DCAE を開発し、性能及び時間コストの有効性について紹介した。実験との比較においても温度差異が少ない事及び解析時間の 80%削減効果が確認出来た。これにより早期結果が求められる現場において、直ちに解析結果を得る事が出来る。特に本 1DCAE ツールでは特殊な専用設備を必要としないことやオペレーターは手順に沿って入力するだけで解を得る事が出来ること (IT マニュアル化) のメリットによる波及効果に期待したい。1DCAE のモデル化では、温度表示分解能と計算時間の天秤が鍵となった。

今後は、1DCAE ツールに最適化を視野にした改良を加えたい。例えば、最適化による材料の軽量化やヒータ本数の削減などに貢献していきたい。また、構造解析などの連成も視野に入れ、更なる付加価値創造に注力したい。

謝辞

本報の 1DCAE 開発及び温度測定に関しては、株式会社サーマルデザインラボ 国峯氏および名古屋工業研究所 梶田氏に多大にご指導、ご支援を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- [1] 手塚明, 1DCAE と計算工学, 1DCAE 公開シンポジウム資料, 日本計算工学会, (2011).
- [2] 国峯尚樹, エレクトロニクスのための熱設計完全入門, 日刊工業新聞社, (1997).
- [3] 甲藤好朗, 伝熱概論, 養賢堂, (1964).

第 57 回日本伝熱シンポジウム特別オンラインセッションの報告

Report on the Special Online Session at the 57th National Heat Transfer Symposium of Japan

桃木 悟 (長崎大学), 巽 和也 (京都大学), 近藤 義広 (日立アカデミー),
鹿園 直毅 (東京大学), 小宮 敦樹 (東北大学)

Satoru MOMOKI (Nagasaki University), Kazuya TATSUMI (Kyoto University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy, Ltd.), Naoki Shikazono (The University of Tokyo), Atsuki Komiya (Tohoku University)

1. 特別オンラインセッション概要

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) 拡大の影響を受け、6 月に予定していた金沢での第 57 回日本伝熱シンポジウムは中止を余儀なくされました。また、伝熱学会として年内は対面型の集会を実施しない事も決定されました。そのような状況下でも、本学会が社会への発信を行って活動を維持していくためのシステムを模索し構築するために、企画部会と第 57 回伝熱シンポジウム実行委員会で、シンポジウム中止によって失われた発表の機会をオンラインでかつ有料で提供する事が決まりました。ここでは、本企画の実施について概要を簡単に説明します。

この企画を第 57 回伝熱シンポジウムとして実施するために、シンポジウム実行委員会の許可と協力を頂きました。それから、実務の全体を管理する幹事を京都大学の巽和也氏に引き受けて頂き、企画が始動しました。

最初に、今回の伝熱シンポジウムで実施される予定であった 2 つの特別企画「北陸・上信越地区企業による部品開発・技術開発の紹介」「特定推進研究特別ワークショップ」、さらに、今年も継続して若手研究者の表彰を行うための、「優秀プレゼンテーション賞 (BPA) セッション」の 3 つのセッションをオンラインで実施する事を決めました。それぞれのセッションの実施は、産学交流委員会、特定推進研究企画委員会、および学生会委員会に担当して頂きました。なお、最初の 2 つのセッションには Cisco Webex Meetings を、BPA セッションではポスターセッションを実施するために Remo Conference を使用しました。

次に、実施体制の構築、講演者の確定等には多少時間を要する事を踏まえたうえで講演者の都合を考慮し、9 月 28 日～10 月 8 日にセッション毎に分散して開催する事を決定しました。この時点で、既に多くの学会や大学より無料のオンラインセミ

ナーが開催されており、また、9 月以降には、日本機械学会年次大会や熱工学コンファレンス等の定常的に開催されている大規模な学術シンポジウムのオンライン開催が決定していました。有料で実施する今回の企画にどれだけ多くの方が参加して頂けるか少々不安を抱きながらの開催でしたが、最終的に 139 名の方に参加頂きました。協力頂いた方、参加して頂いた方に厚く御礼申し上げます。

参加費については、使用したオンライン会議システムの一か月当たりのライセンス料を踏まえて、参加して頂けると予測される金額等を担当委員で議論し、最後は“経験的”に判断して、今回は、会員 4000 円、非会員 6000 円、BPA 講演者 2000 円、学生 1000 円としました。結果として、想定したように僅かな黒字の状態となりましたが、前例がない中で経験的に決めた事ですので、オンラインシンポジウムの参加費の問題は引き続き検討すべき課題であると思っています。急遽実施が決まった企画でしたので、他にも予算に関する雑多な問題があったのですが、財務部会の協力を得て、予算については問題無くこの企画を遂行することができました。また、研究集会用 WEB システム管理委員会には、伝熱シンポジウムで使用する予定であった参加登録システムを、非常に短い準備期間の中で修正して頂きました。

以下では、実施した 3 つのセッションの運営の状況や実施の様子について、開催日時の順番に沿って、担当者より報告してもらいます。

(特別オンラインセッション担当 代表

桃木 悟)

2. 優秀プレゼンテーション賞 (BPA) オンラインセッション

第 57 回日本伝熱シンポジウム (金沢) にて令和 2 年 6 月 3 日 (水) に開催される予定だった優秀プレゼンテーション賞セッションは、日本伝熱シンポジウムの特別オンラインセッション企画の一環として、9 月 28 日 (月) 13:00~16:00 にオンラインで開催されました。

優秀プレゼンテーション賞セッションは講演者がポスターを用いて発表し、その前で参加者と活発に議論することが重要です。そこでオンラインでそのような環境を実現するために、Remo (<https://remo.co/>) システムを使用しました。Remo は、図 1 と図 2 に示すように、フロアに設置されたテーブルごとにオンライン会議を開催することができます。テーブルをマウスでクリックすることでテーブル間を簡単に移動できることから、各



図 1 Remo のフロア画面

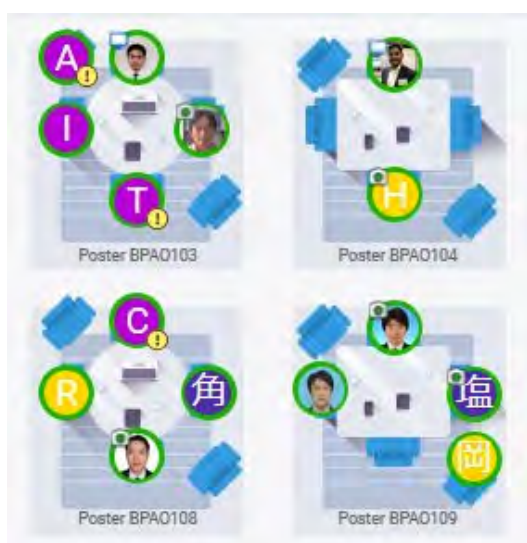


図 2 各テーブルに着席している講演者と参加者の様子。1つのテーブルに 6 名まで着席可能。

会議 (テーブル) の入退室が気軽に行えます。講演者に各テーブルにて参加者に対して発表と議論してもらうことで、オンラインにおけるポスターセッションとして企画いたしました。セッション時間は 180 分とし、講演番号が奇数と偶数の発表者が、それぞれセッションの前半と後半 90 分ずつに分かれて発表しました。

本セッションでは 26 件の発表がありました。その中には伝熱シンポジウムへの申込時には一般セッションにて口頭発表の予定だった講演 6 件も含まれます。COVID19 により減りました口頭での発表および他の人と議論する機会を少しでも多くの講演者に持ってもらえるように、資格を持つ一般セッションの講演者も応募できるようにしました。

発表では、画面共有機能によりパワーポイントを用いて説明したり、ホワイトボードにポスターを 1 枚もしくは複数のスライドを貼り付けて研究を紹介していました。またオンラインで自由に使える動画を活用する等、講演者は工夫を凝らして発表を行っていました。

ホワイトボードにポスターを貼り付けた場合、各自で自由に画像を拡大、縮小、移動することが可能であり、聴衆が自由に閲覧できる形は、実際のポスターセッションに近いものを感じました。

優秀プレゼンテーション賞は、審査員に厳正に審査いただきました結果、玉井莞爾 (京都大学)、杉本真 (大阪府立大学)、廣瀬幸一郎 (東京理科大学)、早川千紘 (東京農工大学) (敬称略/順不同) の 4 名が受賞しました。色合いを新たにした賞状 (図 3) は、多田実行委員長から受賞者に授与されました。(本誌の「優秀プレゼンテーション賞 受賞者」の記事もご覧ください。)

Remo システムへの参加登録者数は 108 名であ



図 3 優秀プレゼンテーション賞の賞状

り、当日、会場には常に 80 名以上の参加者がいました。各テーブルで最後まで活発に議論が行われ、本セッションは盛況のうちに終了いたしました。

新型コロナウイルス (COVID-19) により研究活動が一部制限され、発表や対面による話し合いの機会も減り、厳しい状況にあります。一方、オンラインで用いる様々なシステムやソフトも開発され、普及し始めています。これらを活用して会議や発表を新たな形式で行うことに挑戦する機会であるとも言えます。対面の必要性を痛感する一方、オンライン環境を活かして学生等これまで参加と視聴が難しかった方々への対応も大事であるとも今回の活動を通して感じました。

最後になりましたが、優秀プレゼンテーション賞の審査員の方々、参加登録システムを準備いただいた菊川豪太氏、学生会幹事の春木直人氏と西山貴史氏、学生会委員会、伝熱シンポジウム実行委員会、に大変お世話になりました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

(学生会委員会 巽 和也)

3. 北陸・上信越地区企業による 部品開発・技術開発の紹介

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、本年も企業特別セッション「北陸・上信越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。例年と異なり、今回はオンラインでの開催となり、距離的、時間的制約がなくなり、40名弱の方に参加いただきました。

開催地区ならではの伝熱に関するご講演を頂くセッションで、本年は北陸・上信越地区からご講演頂きました。講演頂いた企業(敬称略、講演順)は、(株)WELCON、(株)羽生田鉄工所、(株)ジェム・デザイン・テクノロジーズ、高松機械工業(株)、KOA(株)の合計5社です。講演内容は工業関連から教育分野まで多岐に亘っております。

当初5月に開催予定で講演者にお願ひし、準備をしまいましたが、四ヶ月遅れでの開催に対しても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。ご講演の題目およびご講演の風景は次の通りです。

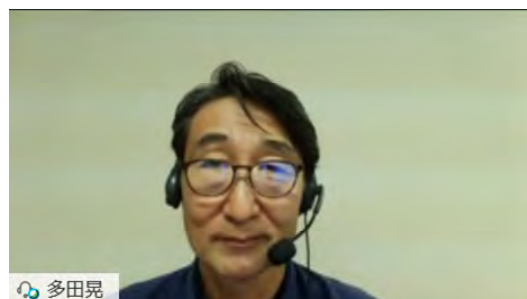
1. 拡散接合によるマイクロチャネル構造への取り組み

鈴木 裕 (株)WELCON



2. 熱と圧力と材料から見た製品開発

多田 晃 (株)羽生田鉄工所



3. 大学研究と産業応用～EDAベンチャーの場合～

村田 洋 (株)ジェム・デザイン・テクノロジーズ

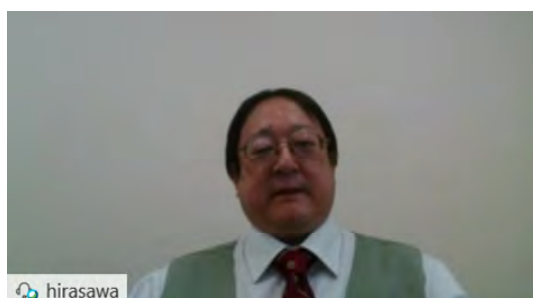


4. 工作機械における熱変位問題と熱変位補正システムの紹介

鈴木 直彦 高松機械工業 (株)



5. 小形表面実装部品のための熱設計への取り組み
— 電子機器の熱設計手法の確立のために —
平沢 浩一 KOA (株)



来年以降もオンライン講演会、現地集合の講演会の両方で検討を行い、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。次回の企業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)

4. 特定推進研究特別ワークショップ

企画部会主催の特別オンラインセッション3部の最終企画として、10月8日(木)の15:00~17:00に「特定推進研究特別ワークショップ」を開催しました。Cisco Webex によるオンラインでの初の試みによる開催でしたが、当日は48名の聴講者があり、盛会となりました。本来であれば、本ワークショップは日本伝熱シンポジウムの初日に開催するはずでありましたが、新型コロナウイルスの影響によりシンポジウムが中止となってしまう、ワークショップ自体も中止となりました。伝熱学会特定推進研究企画委員会の活動を陽に紹介できる機会は数少なく、この貴重な機会が失われることは委員会としては大きな痛手となっておりますが、理事会と企画部会のご配慮により、企画部会主催の特別オンラインセッションとして開催の機会を得ることができ、開催に至りました。企画部会の長崎大学桃木悟先生、京都大学巽和也先生、東北大学菊川豪太先生をはじめとする関係各位に感謝申し上げます。

本特別ワークショップでは、3名の講師をお招きし、以下の内容で開催いたしました(敬称略)。

1. 再エネ普及により世界で顕在化する蓄熱発電と、鍵を握る伝熱技術
岡崎 徹 (エネルギー総合工学研究所)

2. 未来が望む熱エネルギー貯蔵技術
加藤 之貴 (東京工業大学)
3. 細胞内における熱・物理的環境
白樫 了 (東京大学)

岡崎先生のご発表は、伝熱シンポジウムでの特別ワークショップでは特別講演としてプログラムさせていただいておりましたので、60分のご講演をお願いし、加藤先生および白樫先生のご講演は、特定推進研究企画委員会で進めていただいている内容を30分のご講演でご紹介いただきました。岡崎先生からは、変動型再生可能エネルギー余剰電力の「蓄熱」による需給調整の観点から、当該研究の現状と今後の発展についてご講演いただきました。加藤先生からは岡崎先生のご講演に呼応する形で、特定推進研究企画委員会にて進めてこられた科学蓄熱技術の課題と期待をご紹介いただきました。第3講演の白樫先生からは、2020年6月に発足した新たな特定推進研究テーマである生体伝熱工学に関する今後の研究計画と研究体制等についてご紹介いただきました。

オンラインでの開催ではありましたが、活発な質疑応答もあり、特定推進研究企画委員会の活動をアピールできたのではないかと考えております。今後も、特定推進研究企画委員会の設置趣旨にあるように、社会の期待に応えるための社会的課題と科学技術課題、あるいは我が国の今後の成長分野に特化した個別先鋭的な研究課題を設定していく所存です。

(特定推進研究企画委員会)

鹿園 直毅, 小宮 敦樹)

第 57 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 多田 幸生 (金沢大学)

特別オンラインセッション担当

代表 桃木 悟 (長崎大学)

幹事 巽 和也 (京都大学)

委員 菊川 豪太 (東北大学)

近藤 義広 (株式会社日立アカデミー)

鹿園 直毅 (東京大学)

服部 博文 (名古屋工業大学)

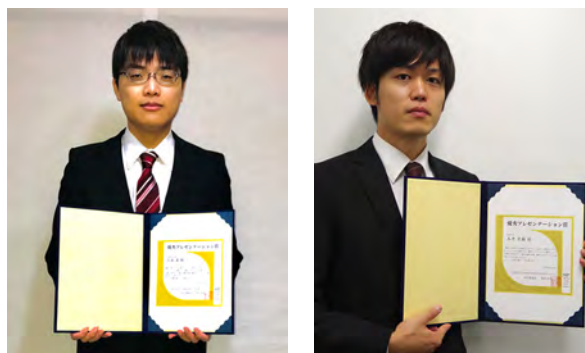
優秀プレゼンテーション賞 受賞者
 - 第 57 回日本伝熱シンポジウム -

Best Presentation Award Winner
 - 57th National Heat Transfer Symposium of Japan -

学生会委員会

委員長 巽 和也 (京都大学), 幹事 西山 貴史 (福岡大学)
 Kazuya TATSUMI (Kyoto University), Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University)
 e-mail: tatsumi@me.kyoto-u.ac.jp, tnishiyama@fukuoka-u.ac.jp

令和 2 年 9 月 28 日 13:00~16:00 に第 57 回日本伝熱シンポジウム (金沢) の優秀プレゼンテーション賞オンラインセッションが Remo システムを使って開催されました。審査員の厳正なる審査により優秀プレゼンテーション賞を受賞された方々が決定いたしました。受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッションの様子をご紹介します。



受賞者と賞状

2020 年度 受賞者

- ◆ 玉井 莞爾 【京都大学】
2次元サーモリフレクタンス法によるナノワイヤ構造体の温度計測
- ◆ 杉本 真 【大阪府立大学】
Phase-Field LBM への蒸発モデルの実装
- ◆ 廣瀬 幸一郎 【東京理科大学】
軸流ファン流れにおけるアイスクリスタルの軌道および状態変化の数値シミュレーション
- ◆ 早川 千紘 【東京農工大学】
ガスタービン翼後縁部脈動フィルム冷却流の多断面 3 成分 PTV 計測による位相平均統計量



玉井 莞爾 杉本 真 廣瀬 幸一郎 早川 千紘

(順不同)



オンライン会場の様子 (Remo システム)。各テーブルが講演者のポスター発表場所である。

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションは、Remo を用いたオンラインでの研究発表として行われました。ポスターでの質疑応答を含めた研究発表が審査対象となりました。受賞者をはじめと

して、講演者は皆、Remo の画面共有やホワイトボードをうまく活用しながら、独自の工夫を凝らした発表を行い、セッション終了の時間になっても参加者と活発に議論をしていました。

「熱伝導に基礎をおく熱電効果の解釈」

Interpretation of Thermoelectric Effects Based on Thermal Conduction

大杉 功 (株式会社テックスイージー)
Isao OHSUGI (TEXeg Co. Ltd.)
e-mail: ohsugii@texeg.co.jp

1. はじめに

熱電効果は、電流によって熱流を運ぶペルチェ効果や温度差によって電位差を生じるゼーベック効果といった熱エネルギーと電気エネルギーとの可逆的な変換を表す効果として知られている[1]。熱電効果を利用する部品は一般に「熱電モジュール」と呼ばれ、とくに冷却用に使用される場合は「ペルチェ・モジュール」と呼ばれ、局所冷却や精密温度制御用に重宝されている。一方最近では、「熱電モジュール」により排熱を電気エネルギーとして回収して地球温暖化防止に役立てようとする動きがあり、国内では日本熱電学会 (www.thermoelectrics.jp)、海外では International Conference on Thermoelectrics (www.its.org) のほか European Conference on Thermoelectrics, Asian Conference on Thermoelectrics が毎年開催されて活況を呈している。熱電効果の発見は 1821 年のゼーベックによる実験が最初とされる[1]。彼はビスマスとアンチモンを接合して閉回路をつくり、二つの接続端に温度差を与えたときに回路内に電流が流れることを発見した (図 1)。今日「ゼーベック効果」と呼ばれるものは、この閉回路を開放したときに現れる電位差が接合端の温度差に比例するという形で知られている。このように古くから知られている効果で長年研究され、とりわけ近年ではとくに精力的に研究されているにも関わらず、熱電エネルギー変換効率の向上は思うように進まず、一部の特殊用途を除いて実用化は期待されているほどには行われていない。

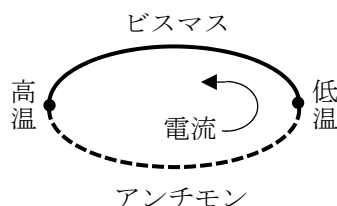


図 1 ゼーベックの実験 (1821)

1929 年、当時のソ連 (現在のウクライナ) のアブラム・ヨッフエは半導体を使うことで熱電発電効率を飛躍的に向上させることができるという理論を提唱し、熱電変換技術の研究が本格化した。ヨッフエの理論によると、熱電材料のエネルギー変換効率はゼーベック係数 α 、導電率 σ 、熱伝導率 κ 、温度 T に対して計算される

$$ZT = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa} \quad (1)$$

という無次元量が大きいほど高くなるとされており、これは「無次元性能指数」と呼ばれ、熱電材料のエネルギー変換性能を評価するための指標として広く使われている[1]。そのため現在の研究は、ゼーベック係数と導電率の向上、および熱伝導率の低減を目指して行われている。しかしゼーベック係数と導電率とは互いにトレードオフの関係にあって両者を同時に向上させることが困難であることが実験的に知られている。また熱電材料は一般に高いキャリア (自由電子, 正孔) 密度をもつため熱伝導率へのキャリアの寄与が大きく、導電率を向上させつつ熱伝導率を減少させるのは容易ではない。この状況を打開するべく新奇材料の開発も試みられ、近年ではトポロジカル絶縁体[2]のような精緻な理論を用いた研究も行われているが、ブレークスルーを達成するには至っていない。

本稿では、熱伝導を基軸として、熱電効果とは何かについて理解するための現象論的アプローチを試みる。

2. 熱電モジュールの動作原理

現在、「ペルチェ・モジュール」の名で知られている熱電モジュールの動作原理を図 2 に示す[1]。p 型と n 型 2 種類の半導体素子が導体でつながれ使用されるのが一般的である。発電モジュールとして使用するときは通常 p 型と n 型の接合部を熱源に接触させ、他端にヒートシンクを接続するのが

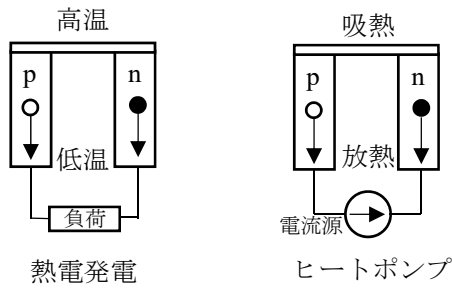


図2 熱電モジュールの動作原理

一般的である。キャリア (p 型の正孔と n 型の自由電子) は熱拡散により移動して電流が流れる。ヒートポンプとして使用する場合は、電流を流すことで熱を移動させ、一方の接合部から吸熱し他端から放熱させる。このように動作原理は単純である。

3. 熱電素子の基礎方程式

図2の熱電モジュールを構成する p 型および n 型の部材は「熱電素子」と呼ばれている。熱電素子は通常 p 型または n 型でキャリア密度が高い半導体であるが、より一般的にはどのような電気伝導体であってもよい。そこで、図3のような一般的な熱電素子における電流密度*i*と熱流密度*q*について考える。

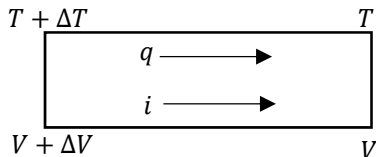


図3 熱電素子中の熱流密度*q*と電流密度*i*

温度差 ΔT 、電位差 ΔV の条件下で電荷 e と熱 h をもつキャリアが速度 v で運動しているというモデルを考えると、 q と i は以下のように表される。

$$q = hnv \quad (2)$$

$$i = env \quad (3)$$

ペルチェ係数 Π の定義は“ $\nabla T = 0$ における電流に対する熱流の比”であるから[1]

$$\Pi = \left[\frac{q}{i} \right]_{\nabla T=0} = \frac{h}{e} \quad (4)$$

が得られる。下付き添え字 $\nabla T = 0$ は温度勾配が無いという条件を意味する。

つぎに熱流密度と電流密度を電位勾配と温度勾

配を駆動力とする式で表すことを考える。熱流 Q は電流を I 、温度差を ΔT とすると次式で表される。ただし K は熱コンダクタンスである。

$$Q = \Pi I + K \Delta T \quad (5)$$

この式の第1項はペルチェ効果を表し、第2項は熱伝導を表している。いま(電氣的)コンダクタンスを G とし、電位差を ΔV とすると、オームの法則は

$$I = G \Delta V \quad (6)$$

で表される。この関係を Q の式の I に代入すると、電位差 ΔV と温度差 ΔT を駆動力とする次式が得られる。

$$Q = \Pi G \Delta V + K \Delta T \quad (7)$$

一方電流については次式が得られる。

$$I = G \Delta V + \frac{K_C}{\Pi} \Delta T \quad (8)$$

第1項はオームの法則を表し、第2項はキャリアが運ぶ熱流に伴う電流を表している。 K_C は熱伝導係数のキャリア成分つまり「キャリア熱伝導率」である。この電流と熱流の式を電流密度と熱流密度の式に書き換えることで、以下の「熱電素子の基礎方程式」が得られる。

$$q = -\Pi \sigma \nabla V - \kappa \nabla T \quad (9)$$

$$i = -\sigma \nabla V - \frac{\kappa_C}{\Pi} \nabla T \quad (10)$$

これらの式は通常、オンサーガーの相反定理に基づく議論によって導かれるが[3]、このような素朴な考察によっても得ることができる。以下では、この基礎方程式をもとに議論することにする。

4. キャリア熱伝導率の式

電流密度の式

$$i = -\sigma \nabla V - \frac{\kappa_C}{\Pi} \nabla T \quad (11)$$

の第二項はゼーベック効果を表しており、ゼーベック係数 α を使って表すと

$$i = -\sigma \nabla V - \sigma \alpha \nabla T \quad (12)$$

である。したがって、これら二式の第二項を比較することにより

$$\frac{\kappa_C}{\Pi} = \sigma \alpha \quad (13)$$

$$\kappa_C = \Pi \sigma \alpha \quad (14)$$

が得られ、熱電気に関する第二ケルビン式[3]

$$\Pi = \alpha T \quad (15)$$

を用いることで次式が得られる。

$$\kappa_C = \alpha^2 \sigma T \quad (16)$$

つぎにペルチェ効果の逆効果つまり“熱流が電流を生じる効果”を評価するために以下の式で新しいパラメータ S を定義する。

$$S = \left[\frac{i}{q} \right]_{\nabla V=0} \quad (17)$$

これはいわば「逆ペルチェ係数」とも呼ぶべき量である。これは熱流と電流の方程式で $\nabla V = 0$ とおくことで以下のように得られる。

$$[i]_{\nabla V=0} = -\frac{\kappa_C}{\Pi} \nabla T \quad (18)$$

$$[q]_{\nabla V=0} = -\kappa \nabla T \quad (19)$$

$$S = \left[\frac{i}{q} \right]_{\nabla V=0} = \frac{\kappa_C}{\kappa \Pi} = \frac{\kappa_C}{\kappa_C + \kappa_L} \frac{1}{\Pi} \quad (20)$$

ただし κ_L は格子熱伝導率である。この S の式に(16)の関係を代入して整理すると

$$S = \left[\frac{i}{q} \right]_{\nabla V=0} = \frac{1}{\Pi} \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa_L + \alpha^2 \sigma T} = \frac{1}{\Pi} \frac{X}{1+X} \quad (21)$$

ただし、 X は無次元性能指数(1)とよく似た以下の式で定義される無次元数である。

$$X = \frac{\alpha^2 \sigma T}{\kappa_L} \quad (22)$$

無次元性能指数の分母が

$$\kappa = \kappa_C + \kappa_L \quad (23)$$

であるのに対して X の分母は κ_L である点が異なる。とくに $\kappa_C \gg \kappa_L$ で $X \rightarrow \infty$ となる極限では

$$\lim_{X \rightarrow \infty} S = \lim_{X \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{\Pi} \frac{X}{1+X} \right] = \frac{1}{\Pi} \quad (24)$$

となることがわかる。

5. ゼーベック係数の理論値

このように、基礎方程式を用いることで熱電効果に関する様々な情報を得ることができる。ゼーベック係数 α は“温度差を与えたときの、温度差 ∇T に対する開放電圧 ($i = 0$ の時の電位差) ∇V の比”として定義されるので

$$0 = -\sigma \nabla V - \frac{\kappa_C}{\Pi} \nabla T \quad (25)$$

$$\sigma \nabla V = -\frac{\kappa_C}{\Pi} \nabla T \quad (26)$$

したがって

$$\alpha = -\frac{\nabla V}{\nabla T} = \frac{\kappa_C}{\Pi \sigma} \quad (27)$$

となる。負号がついているのは、ゼーベック係数の

実用的定義が素子から出力される電圧についてのものであるのに対し、基礎方程式の ∇V が素子の内部電圧を表すからである。これに第二ケルビン式の関係式を代入すると

$$\alpha = \frac{\kappa_C}{\Pi \sigma} = \frac{\kappa_C}{\alpha T \sigma} \quad (28)$$

$$\alpha^2 = \frac{\kappa_C}{T \sigma} \quad (29)$$

したがって、次式が得られる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\kappa_C}{T \sigma}} = \sqrt{L} \quad (30)$$

ただし L はヴィーデマン・フランツ係数[4]である。

$$L = \frac{\kappa_C}{T \sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e} \right)^2 \quad (31)$$

である。ここで k_B はボルツマン定数である。これはゼーベック係数が普遍定数で表される定数

$$\alpha = \frac{k_B}{e} \sqrt{\frac{\pi^2}{3}} \cong 156 \mu\text{V/K} \quad (32)$$

であることを意味し、実験事実とは異なる。つまり、古典電子論の範囲内ではゼーベック係数の材料による違いを説明することができない。実験事実を説明するためには、古典論では考慮されていない量子力学的な効果を考慮する必要がある。それはキャリアとフォノン、つまり量子化された格子振動との相互作用を考慮するということである。

6. キャリアとフォノンの相互作用

上述のように、古典電子論に基礎を置くボルツマン方程式から計算したゼーベック係数は普遍定数で表され材料の種類には関係しないことになり、実験事実と矛盾してしまう。したがって、他の要素が関わっていることが示唆される。候補として有力なのはキャリア・フォノン相互作用である。真空中の電子・光子系では電子と光子の衝突による運動量移動がおり、コンプトン効果のような現象が観察されている。この電子・光子系との類推により、物質中のキャリア・フォノン系でも衝突による運動量移動が起こることが推察される。

格子振動のフォノンがキャリアに衝突することにより生じる“フォノンからキャリアへの運動量移動”によるキャリア流の増加を表すパラメータを Δ_C とし、また“この衝突によって生じる運動量移動”による格子振動フォノン流の減少を表すパラメー

タを Δ_L とすると、これらの効果は次式で表すことができる。

$$\sigma = \sigma_0(1 + \Delta_C) \quad (33)$$

$$\kappa_C = \kappa_{C0}(1 + r\Delta_C) \quad (34)$$

$$\kappa_L = \kappa_{L0}(1 - \Delta_L) \quad (35)$$

ただし r は、キャリアが運ぶ熱に及ぼすキャリア流増加の影響を表すパラメータである。これらをゼーベック係数の式に代入すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{\kappa_C}{\sigma T}} = \sqrt{\frac{\kappa_{C0}(1 + r\Delta_C)}{\sigma_0(1 + \Delta_C)T}} = \sqrt{\frac{\kappa_{C0}}{\sigma_0 T}} \sqrt{\frac{(1 + r\Delta_C)}{(1 + \Delta_C)}} \\ &= L \sqrt{\frac{(1 + r\Delta_C)}{(1 + \Delta_C)}} \end{aligned} \quad (36)$$

“キャリアが運ぶ熱に対するキャリア流増加の影響”と“キャリアが運ぶ電荷に対するキャリア流増加の影響”が等しいとすると $r = 1$ となり、ゼーベック係数の値は相互作用のない場合と等しく、実験結果を説明することができない。

この式をさらに変形して、実験結果と比較しやすくする。そのために、 $\Delta_C \ll 1$ を仮定して一次の近似を利用して以下のように変形する。

$$\begin{aligned} \alpha &= L \sqrt{\frac{(1 + r\Delta_C)}{(1 + \Delta_C)}} \cong L \sqrt{(1 + r\Delta_C - \Delta_C)} \\ &= L \left(1 + \frac{r-1}{2} \Delta_C\right) = L(1 + \beta) \end{aligned} \quad (37)$$

したがって

$$\alpha \cong L(1 + \beta) \quad (38)$$

が得られる。ただし

$$\beta = \frac{r-1}{2} \Delta_C \quad (39)$$

である。このパラメータ β は“キャリアとフォノンとの相互作用”を表し、“キャリア流の増加が熱流に及ぼす影響の方が（電流に及ぼす影響よりも）大きいときに $\beta > 0$ ”，逆に熱流に及ぼす影響の方が小さいときに $\beta < 0$ となり、 β の正負によってこれを判定することができる。つまり

- $\beta > 0$: キャリア・フォノン相互作用が
ペルチェ係数の“増加”に寄与する
- $\beta < 0$: キャリア・フォノン相互作用が
ペルチェ係数の“減少”に寄与する

ということである。

7. 熱電発電のエネルギー変換効率

熱電材料のエネルギー変換効率 η_M は全熱流に対する“発電に利用した熱流”の比で評価され、“発電に利用した熱流”はキャリア熱伝導率 κ_C に比例するので

$$\eta_M = \frac{\kappa_C}{\kappa} = \frac{\kappa_C}{\kappa_C + \kappa_L} = \frac{\frac{\kappa_C}{\kappa_L}}{1 + \frac{\kappa_C}{\kappa_L}} = \frac{X}{1 + X} \quad (40)$$

である。したがって熱電素子を定温熱源 T_1 と T_2 ($T_1 > T_2$) に対して使用したときの素子効率 η_E は

$$\eta_E = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \cdot \eta_M = \frac{T_1 - T_2}{T_2} \cdot \frac{X}{1 + X} \quad (41)$$

で表される。熱電モジュールを用いて発電した場合、モジュールから外部負荷へ取り出すことのできる電力はモジュールの内部抵抗と負荷抵抗が等しいときに最大となり、それは発電電力の1/2であることは「最大電力伝達定理」として周知である。したがって、熱電モジュールの最大発電効率 η_{max} は以下の式で表されることがわかる。

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \eta_E = \frac{1}{2} \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_2} \cdot \frac{X}{1 + X} \quad (42)$$

8. 実験結果との比較

以上の考察結果を実験結果と比較してみる。比較対象は熱電モジュールに広く使用されている代表的な半導体材料のビスマス・テルルと、測温用熱電対として広く使われている金属材料のニッケルを選ぶことにする。

(例1) ビスマス・テルルの場合[1]

室温 (300K) の値は $\alpha \cong 200 \mu V/K$ であるから

$$1 + \beta = \frac{\alpha}{L} \cong \frac{200}{156} \cong 1.28 \quad (43)$$

したがって、 $\beta \cong 0.28$ つまり $\beta > 0$ でキャリア・フォノン相互作用はペルチェ係数の増加に寄与しており、ヒートポンプ動作に向いていることがわかる。

また室温における導電率 $\sigma \cong 5.0 \times 10^4 S/m$ とヴィーデマン・フランツ係数 $L \cong 2.44 \times 10^{-8} W\Omega/K^2$ からキャリア熱伝導率は

$$\begin{aligned} \kappa_C &\cong L\sigma T \cong 2.44 \times 10^{-8} \times 5.0 \times 10^4 \times 300 \\ &\cong 0.37 W/(Km) \end{aligned} \quad (44)$$

と見積もられ、格子熱伝導率は

$$\kappa_L \cong \kappa - \kappa_C \cong 1.0 - 0.37 \cong 0.63 \text{ W/(Km)} \quad (45)$$

となり、材料効率

$$\eta_M = \frac{\kappa_C}{\kappa_C + \kappa_L} \cong 0.37 = 37\% \quad (46)$$

と見積もることができる。仮に熱源の温度を 300K と 400K とすると、整合負荷に対して以下の素子効率を得られる。

$$\begin{aligned} \eta_E = \eta_C \cdot \eta_M &= \frac{T_H - T_L}{T_H} \cdot \frac{\kappa_C}{\kappa_C + \kappa_L} \\ &\cong \frac{400 - 300}{400} \times \frac{0.37}{0.37 + 0.63} \\ &\cong 0.0925 \cong 9.3\% \quad (47) \end{aligned}$$

対流と放射による熱損失が十分小さくなるようにモジュールを設計し、負荷抵抗とモジュール内部抵抗が等しくなるように整合させたと仮定したときに得られる最大効率 η_{max} は

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \eta_E \cong \frac{1}{2} \times 9.3 \cong 4.7\% \quad (48)$$

となる。これは実測値と整合している。

(例 2) ニッケルの場合

ゼーベック係数の実測値は[1]

$$\alpha = 20 \mu\text{V/K} \quad (49)$$

であるから

$$1 + \beta = \frac{\alpha}{L} \cong \frac{20}{156} \cong 0.128 \quad (50)$$

したがって

$$\beta \cong 0.128 - 1 \cong -0.87 \quad (51)$$

つまり $\beta < 0$ でキャリア・フォノン相互作用はペルチェ係数の減少に寄与している。言い換えれば熱流に対する電流の比

$$\left[\frac{i}{q} \right]_{\Delta V=0}$$

つまり“逆ペルチェ効果”が大きいということの意味している。また一般に金属の熱伝導率はほとんどがキャリアからの寄与とされているので、前述のビスマス・テルルの場合と同じ熱源を使ったときの効率は以下のように計算される。

$$\begin{aligned} \eta_E = \eta_C \cdot \eta_M &= \frac{T_H - T_L}{T_H} \cdot \frac{\kappa_C}{\kappa_C + \kappa_L} \cong \frac{400 - 300}{400} \times 1 \\ &= 0.25 = 25\% \quad (52) \end{aligned}$$

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \eta_E \cong \frac{1}{2} \times 0.25 \cong 0.125 \cong 13\% \quad (53)$$

これは、“現行のペルチェ・モジュールで用いられている半導体よりも測温用熱電対に用いられている金属の方が、熱電発電効率が高い”ということを示唆している。

9. 結論

熱伝導を基軸として熱電効果、とりわけ熱電発電の効率について考察を行い、以下のような結果が得られた。

- (1) キャリア熱伝導率 κ_C はゼーベック係数を α 、導電率を σ 、温度を T とすると、以下の式で表される。

$$\kappa_C = \alpha^2 \sigma T$$

- (2) 熱電材料のエネルギー変換効率 η_M は格子熱伝導率 κ_L に対するキャリア熱伝導率 κ_C を用いて以下の式で表される。

$$\eta_M = \frac{\kappa_C}{\kappa_C + \kappa_L}$$

- (3) 熱電材料の物性、とりわけゼーベック係数のバラエティはキャリア・フォノン相互作用の存在を示唆している。

「熱電のカギは伝熱にあり」というのが、この考察を通して得られた教訓と言えよう。

参考文献

- [1] 上村欣一, 西田勲夫, 熱電半導体とその応用, 日刊工業新聞社 (1988).
- [2] 安藤陽一, トポロジカル絶縁体入門, 講談社 (2014) 228.
- [3] キャレン (山本常信, 小田垣孝共訳), 熱力学 (下), 吉岡書店 (1979).
- [4] 新楽和夫, 田辺行人, 権平健一郎, 共立物理学公式, 共立出版 (1970).

日本伝熱学会特定推進研究課題報告書
Report of Specific Promotion Researches in Heat Transfer Society of Japan

特定推進研究企画委員会

鹿園 直毅 (委員長・東京大学)

加藤 之貴 (東京工業大学)

Specific Promotion Research Planning Committee

Naoki SHIKAZONO (Chairperson, The Univ. of Tokyo)

Yukitaka KATO (Tokyo Inst. Tech)

1. はじめに

特定推進研究企画委員会は2012年に日本伝熱学会に設置され、我が国の抱える科学技術的課題への対応や今後の発展に寄与すると考えられる研究開発課題を選定し、課題ごとに研究グループを設置して検討を進めていただいています。現在までに特定推進研究課題として11件の課題が選定されています。このたび「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」(主査:加藤之貴(東京工業大学))の課題につきまして最終報告が提出されました。報告書作成に向けて3年あまりにわたってご尽力いただきました委員各位に心より敬意を表します。以下にこの課題のエグゼクティブサマリーを記載し、会員の皆様に検討結果の概要をご紹介します。

なお、過去に終了した課題

(<http://www.htsj.or.jp/announcement/1010.html>)

も含め、報告書の詳細につきましては、それぞれの主査までお問い合わせください。

2. 「熱エネルギーシステムのための化学蓄熱の高出力密度化」

HTSJ-FY2018-08

主査 加藤 之貴 (東京工業大学)
副主査 藤岡 恵子 (ファンクショナル・フルイッド)
幹事 窪田 光宏 (名古屋大学)
kato.y.ac@m.titech.ac.jp

本研究は熱エネルギー有効利用のための、実装可能な高出力密度を有した化学蓄熱技術の検討を目的とした。現在、日本は最終エネルギー消費(13.5

EJ)の中で電力割合は26%であり残りは化石燃料を用いた熱プロセスなどで消費されている(エネルギー白書, 2019)。日本が真に2030年に二酸化炭素(CO₂)排出削減目標26%, 2050年同80%の低炭素化を目指すとするれば、熱の有効利用を避けての目標の達成は困難であろう。熱利用技術の進化によって、利用可能な排熱量を増やすことが日本のCO₂排出削減の一選択肢と考えられる。熱利用においては熱源側と需要側の時空間の不一致を接続するために蓄熱機能が必要である。本提案はこの蓄熱の強化に注目した。

化学蓄熱は熱利用の時間的ミスマッチを解決する蓄熱機能、質的ミスマッチを解決するヒートポンプ機能を有しており、他の蓄熱材料より高密度の蓄熱が可能で、次世代の熱利用技術として期待できる。化学蓄熱は気固反応が有力であり、その出力は吸着/化学反応速度が理論上の性能限界となる。しかし、実システムでは、熱の授受のために反応粒子が熱交換器に充填、塗布されて反応器が構成されるため、その出力性能は複合的な熱・物質同時輸送現象の総括速度として決定される。また、気固反応では反応の進行に伴い固体粒子の密度、熱伝導率などの熱物性値や反応気体の透過係数などの非定常変化を伴う。以上のように、化学蓄熱は非常に複雑な熱・物質輸送同時現象を伴い、ナノメートルからメートルまでの整合性ある気固熱・物質輸送の現象理解と促進が必要である。

蓄熱対象としては低温熱(50~100℃)程度が量的に、中温熱(100~300℃)が質的に重要である。また、利用においては例えば移動体向けであれば熱出力密度1kW/L、蓄熱密度1MJ/L程度が目安である。特に起動時など極めて短時間に放熱を行うサーマルキャパシターとして、出力密度2kW/Lの達成

は化学蓄熱の社会実装に重要な目標と考えられる。そこで、本研究では利用側が求める高い出力密度実現のための、要素技術のボトルネックの抽出と解決方法を検討した。このため本研究では熱エネルギーシステムの熱需要を把握し、これに応じた化学蓄熱技術の設計要件を定量的に検討し、技術の律速段階を明らかにした。そして課題解決のための要素技術の開発とシステム最適化によって高出力密度化への道程を示すこととした。

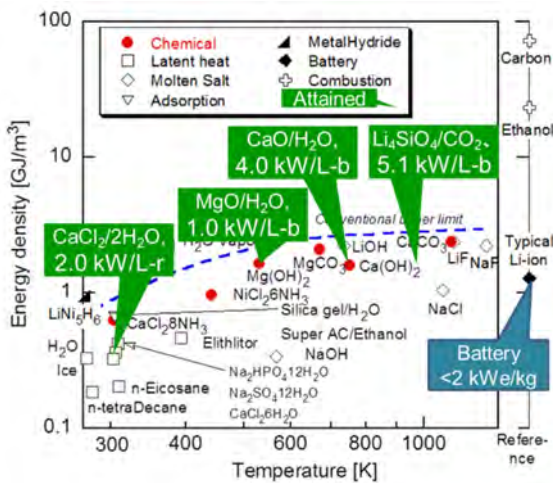


Fig. 1 横軸蓄熱操作温度，縦軸体積蓄熱密度で示した各蓄熱方法の蓄熱密度分布を示し、吹き出しで、各蓄熱材料について、本研究において達成された体積熱出力密度の最大値(kW/L-bは単位材料充填層あたり，kW/L-r 単位反応器あたり)を示す。

研究成果の概要を Fig. 1 に示す。本図は横軸に蓄熱操作温度 [K]，縦軸に体積蓄熱密度 [GJ/m³] で示した各蓄熱方法の蓄熱密度分布を示し、吹き出しで、各蓄熱材料について、本研究において達成された体積熱出力密度の最大値 (kW/L-b は単位材料充填層あたり，kW/L-r は単位反応器あたり) を示す。吹き出しの先端が実際の測定に基づくおよその代表的な出力温度と蓄熱密度を示す。蓄熱材料は他材料と複合化されているため、蓄熱密度は純蓄熱材料の値より小さい。従来の 1 kW/L に対して材料また装置の高熱伝導度化により 5 kW/L-b 程度まで数倍に向上できる見通しが示されている。

本研究より、熱出力密度 [kW/L] は伝熱条件、反応操作条件 (温度、圧力) に依存し、充填層反応器あたりの熱出力密度 2 kW/L-r は伝熱設計によって達成可能である。接触熱抵抗 $1/h$ の低減、材料の熱伝導度 λ の向上は技術的に可能である。一方で、さらなる反応速度定数 k 、反応層内物質拡散係数 D の向上が必要である。特に、蓄熱材料のペレット化、複合化、固定化により、充填密度、接触熱抵抗、材料の熱伝導度、拡散係数の向上が可能であり、従来 1 kW/L-b 未満であった性能が数倍オーダーで向上できることが示された。今後は、反応器の伝熱面-反応層を一体化した熱交換パッケージ技術を統合したシステムの最適設計が重要であると判断された。

なお、日本伝熱学会に研究会「蓄熱技術社会実装研究会 (2019-2020FY)」が後継として設置された。引き続きの課題への対応、大型予算獲得による研究加速、化学蓄熱の低炭素化への貢献を目指すことが期待される。

日本伝熱学会主催 オンライン講習会
「計測技術 ～測定の基礎と最新の非接触計測技術～」開催報告
Report on The Lecture "Measurement Technology, Foundation of Temperature and Novel Contactless Measurement"

企画部会産学交流委員会：佐藤 航(日立), 羽鳥 仁人 (ベテル),
 近藤 義広 (日立アカデミー), 西 剛伺 (足利大学)
*Wataru SATO (Hitachi), Kimihito HATORI (Bethel),
 Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy) and Koji NISHI (Ashikaga University)*

1. はじめに

毎年、日本伝熱学会の産学交流事業の一環として、企業技術者等の実務に直結したテーマを選択し、日本伝熱学会主催の講習会を開催しています。

今年度はオンライン講習会とし、「計測技術 ～測定の基礎と最新の非接触計測技術～」をテーマに開催いたしました。11月27日に以下の題目でWebExを用いて実施し、37名にご参加頂き、盛況のうちに終えることができました(図1)。

一題目一

- ① 開催の挨拶 (10分)
- ② 放射温度計の正しい使い方 (40分)
- ③ 熱電対の正しい使い方 (40分)
- ④ 最新のサーモカメラ活用技術 (40分)
- ⑤ 3次元X線サーモグラフィー (40分)
- ⑥ 超音波サーモメトリの開発とその応用(40分)
- ⑦ 総合討論 (30分)

2. 各題目について

②の「放射温度計の正しい使い方」の講義では、中村元教授(防衛大学校)より、放射温度計の基礎として測定原理と測定方式及び素子による分類などについてご説明いただきました(図2)。測定誤差要因については、周囲環境放射の影響及び対策、素子の時定数の影響については実験結果を示していただき具体的に影響を紹介頂きました。

③の「熱電対の正しい使い方」の講義では田川正人教授(名古屋工業大学)より、熱電対の測定原理と取り扱いの基礎、誤差要因各種規格別のそれぞれの熱電対の特長についてわかりやすくご説明いただきました(図3)。熱電対回路について、チャートを用いることで、多点計測やサーモパイルなど複雑な構成についても、熱起電力がどのように発生しているのか評価できる手法を説明いた

できました。また、実際に測定することが多い条件である、固体表面温度の測定方法についてご説明いただきました。

④の「最新のサーモカメラ活用技術」の講義では、松本 昂大氏(日本アビオニクス)より、サーモカメラの原理、構成、測定方法について解説いただきました(図4)。また、COVID-19対策として発熱者スクリーニングにおける赤外線カメラの活用方法及び正しく検温するための注意点などを解説いただきました。

⑤の「3次元X線サーモグラフィー」の講義では、米山 明男氏(日立製作所)より、開発された



図1 オンライン講演の様子(事務局)

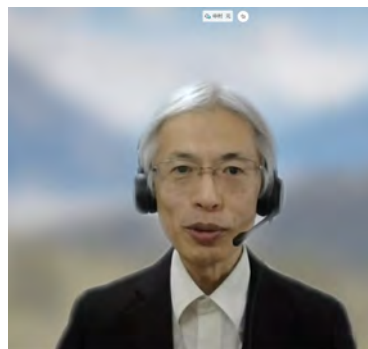


図2 講義風景1
(放射温度計の正しい使い方, 中村先生)

3次元 X線サーモグラフィーについて、測定原理となる X線位相イメージング技術から、サーモグラフィとしての適用例について解説頂きました(図5)。赤外線サーモグラフィとの違い、3次元化する技術を開発し、内部温度を3次元で可視化できる手法についてご説明いただきました。物体内部温度分布の可視化は産業界で期待が大きい技術であり、幅広い応用が期待されます。

⑥の「超音波サーモメトリの開発とその応用」の講義では、井原 郁夫教授(長岡技術科学大学大学院)より、超音波サーモメトリ技術についてご説明いただきました(図6)。超音波を用いた温度の計測原理及び装置の構成を実際に測定されている例の動画を用いて解説いただきました。また、摩擦接触界面や回転円柱の温度測定例など、一般的な熱電対やサーモカメラでは測定が容易でない条件での測定が可能であることを実例を交えてご紹介いただきました。

⑦の総合討論では、講義と同時に受講者が質問を投稿できるようにフォームを設置し、その内容を講師の先生方から回答いただくという形式で行われました。従来と同様、基本的な温度計測に関する質問が多数ありましたが、それに加えて、非接触計測の適用範囲や、具体的な事例に対して適用が可能かどうかといった質問も多数あり、非接触計測の適用が期待される課題が多くあることが確認できました。

3. 全体の印象、アンケート結果

参加者の内訳は、67%が企業の方、23%が大学関係の方、10%が官公庁の方でした。オンライン開催のため、幅広い層、地域の方にご参加いただき、産学交流委員会の活動目的である産学官交流の活性化の一助になったものと思います。

今回は温度測定の基礎だけでなく、近年注目を集めている非接触計測に関する最新の研究事例をご紹介いただきました。そのため、多くの受講者にとって有益であったと考えています。アンケート結果についても多くが肯定的なご評価でした。

今後の講習会の企画については、流体、燃焼、電気自動車、非接触温度計測技術、材料物性を中心とした計測等多岐にわたるご意見があり、今後の企画の参考にさせていただきます。



図3 講義風景2
(熱電対の正しい使い方, 田川先生)



図4 講義風景3
(最新のサーモカメラ活用技術, 松本氏)



図5 講義風景4
(3次元 X線サーモグラフィー, 米山氏)



図6 講義風景5
(超音波サーモメトリの開発とその応用, 井原先生)

4. おわりに

産学交流委員会では、産学交流を促進するため、引き続きさまざまなイベントを検討中です。本講習会は、その中のアイテムの1つとして、本年も開催に向け、準備を進めて参ります。詳細が決まり次第、別途ご案内します。講習会を含む産学交流イベントへの皆様のご参加をお待ちしています。

最後に、講師の皆様にはご多忙のところ、またオンライン講習という例年と異なる講習会である状況下で、資料作成含め、ご協力を頂きありがとうございました。紙面をお借りして、改めて感謝申し上げます。

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
2021年					
9月	太陽エネルギー国際シンポジウム (11 th SOLARIS)			第11回太陽エネルギー国際シンポジウム実行委員会 matsu@eng.niigata-u.ac.jp	
10月	3(日) ～ 7(木)	アジア熱科学会議 (2 nd ACTS)		ACTS2020 実行委員会 secretary@acts2020jp.org	

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2021年					
1月	29(金)	第49回ガスタービンセミナー		(公社) 日本ガスタービン学会 03-3365-0095 gtsj-office@gtsj.org	

日本伝熱学会創立 60 周年記念 第 58 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 58 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 佐々木 直 栄

幹 事 田 中 三 郎

開催日：令和 3 年 5 月 25 日（火）～5 月 27 日（木）

会 場：オンライン開催（現地では実施いたしません。ご注意ください。）

講演申込締切： 令和 3 年 1 月 15 日（金）

講演論文原稿提出締切： 令和 3 年 3 月 5 日（金）

早期参加申込締切： 令和 3 年 4 月 2 日（金）

ホームページ URL： <http://htsj-conf.org/symp2021/>

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - a) 通常の一般セッション（口頭発表）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 58 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

【参加費等】

- シンポジウム参加費
会員一般（早期申込：12,000 円、通常申込：15,000 円）
非会員一般（早期申込：15,000 円、通常申込：18,000 円）
会員学生（早期申込：6,000 円、通常申込：7,000 円）
非会員学生（早期申込：7,000 円、通常申込：8,000 円）
※ 特別賛助会員は 1 口につき 3 名、賛助会員は 1 口につき 1 名、参加費が無料になります。
※ 会員とは、日本伝熱学会会員のほか、共催・協賛学協会の会員を含みます。
※ 講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。
- 講演論文集電子版
講演論文集電子版のみの販売：5,000 円（シンポジウム後の販売になります）

【意見交換会】

オンライン開催を検討中（詳細はシンポジウムホームページに掲載します）。

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- 参加登録は本シンポジウムのホームページから行ってください。
- 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- 5 月中旬までに参加登録を完了された方には事前に参加者キット（講演論文集電子版、講演プログラム、参加票、領収書など）をお送りする予定です。
- 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します（詳細はシンポジウムホームページに掲載）

します)。

講演申込方法, 講演論文集, 執筆要綱

【研究発表申込方法】

- 一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者(登壇者)は, 日本伝熱学会会員(学生会員, 賛助会員, 特別賛助会員, 推薦会員を含む)に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は, 会員申込と会費納付を行って下さい。(オーガナイズドセッションについては, 各セッションのオーガナイザーの指示に従って下さい。)
- 原則としてウェブによる申込みに限らせて頂きます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい。ウェブによる申込みができない場合には, 実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- 申込みの際に, 一般セッション, オーガナイズドセッション, 優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には, 本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞(第58回日本伝熱シンポジウム)について」をご参照下さい。
- 発表申込み時に, 論文要旨(日本語で200~250字)を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構(JST)のデータベースに登録します。
- 講演発表申込は, 講演者1名につき1題目とさせていただきます。
- 講演の採否およびセッションへの振り分けは, 実行委員会にご一任下さい。

【講演論文集電子版】

- 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を, PDFファイルで本シンポジウムのホームページから提出して下さい。
- 従来の講演論文とは別に, 当該講演内容を後日原著論文としてTSE以外の学術雑誌等に投稿する場合は, 二重投稿にならないように配慮して1ページの講演アブストラクトを提出することができます。
- 講演アブストラクトはA4サイズで1ページ, 講演論文はA4サイズで2~6ページとします。
- 講演論文と講演アブストラクトは講演論文集として電子版のみを発行し, 冊子版は発行しません。
- 講演論文集電子版を参加者に配布します。なお, 講演論文集電子版は参加できなかった日本伝熱学会会員にも希望があれば配布しますので, シンポジウム終了後に日本伝熱学会事務局にお申込み下さい。
- 講演論文集は会員を対象にパスワードを配布し, シンポジウム開催日の1週間程前からホームページ上で公開します。従って, 特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。
- シンポジウム終了後, 一定期間を経て講演論文集のホームページ上での公開を終了します。
- 原稿提出締切日までに提出されなかった場合は, 講演論文集に掲載されません。十分にご注意下さい。

【執筆要綱】

- 以下の4つの原稿のうちから選択して執筆して下さい。
 - ① 講演論文(一般セッション, オーガナイズドセッション, 優秀プレゼンテーション賞セッション)
 - ② 講演アブストラクト(一般セッション, オーガナイズドセッション, 優秀プレゼンテーション賞セッション)
 - ③ Full size manuscript
 - ④ Abstract manuscript
- 各原稿の書式の詳細ならびにテンプレートは, シンポジウムのホームページをご参照ください。
- 論文表題および著者名は, 講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いてください。講演申込時のデータと異なる場合には, 目次や索引に反映されないことがあります。

- PDF ファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」を設定してください。提出前に必ず、変換後の PDF 原稿を印刷して確認して下さい。

① 講演論文（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）

表題部分の書式：原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、幅 140mm に収まるようにレイアウトしてください。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別してください。

本文の書式：本文は表題部分に続けて、10 ポイント明朝体の 1 段組み（1 行 50 字程度）、1 ページ当たり 46 行を目安として作成してください。

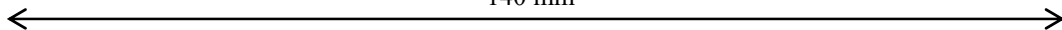
図表：図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください。カラー表示が可能です。

参考文献：参考文献は本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のようにまとめて列記してください。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例：(1) 伝熱・他 2 名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

140 mm



原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）

MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）

Guide for the manuscripts（英文表題：Times New Roman 12pt）

The case of MS-Word（英文副題：Times New Roman 12pt）

（1 行あける）

伝正 *伝熱 太郎（伝熱大）（会員資格 著者名[講演者には*印]（所属略称）：明朝体 12pt）

（1 行あける）

Taro DENNETSU（英文著者名：Times New Roman 10pt）

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563

（1 行あける）

（文頭に半角スペース 5 つを挿入する）English abstract（英文アブストラクト：Times New Roman 10pt, 100 語程度）

（1 行あける）

Key Words: Heat Transfer（英文キーワード：Times New Roman 10pt, 3~5 個程度）

（1 行あける）

1. 大見出し

1.1 中見出し 講演論文原稿は A4 サイズで原則 2~6 ページです。講演論文の作成様式は、1 段組×50 字×46 行とし、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で 2MB までとし、アニメーションは含まないものとします。

① 講演論文の冒頭部分（表題部分および本文書き出し部分）の書式

② 講演アブストラクト（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）

表題部分の書式：原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地の順に、幅 140mm に収まるようにレイアウトしてください。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在

地についても上付き数字で区別してください。

アブストラクトの書式： アブストラクトは表題部分に続けて、10ポイント明朝体の1段組み（1行50字程度）、1ページ46行を目安として作成してください。

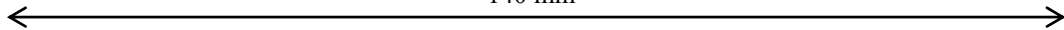
図表： 図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください。カラー表示が可能です。掲載にあたり、他の学術雑誌等との二重投稿にならないように十分に配慮して下さい。

参考文献： 参考文献は本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し、本文の末尾に次のようにまとめて列記してください。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

例：(1) 伝熱・他2名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

140 mm



原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）

MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）

Guide for the manuscripts（英文表題：Times New Roman 12pt）

The case of MS-Word（英文副題：Times New Roman 12pt）

（1行あける）

伝正 *伝熱 太郎（伝熱大）（会員資格 著者名[講演者には*印]（所属略称）：明朝体 12pt）

（1行あける）

Taro DENNETSU（英文著者名：Times New Roman 10pt）

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563

（1行あける）

Key Words: Heat Transfer（英文キーワード：Times New Roman 10pt, 3～5 個程度）

（1行あける）

講演アブストラクト原稿はA4サイズで1ページです。講演論文の作成様式は、1段組×50字×46行とし、原則として章で分ける必要はありません。カラーの使用が可能です。ファイルの容量は最大で2MBとし、アニメーションは含まないものとします。

② 講演アブストラクトの冒頭部分（表題部分および本文書き出し部分）の書式

③ Full Size Manuscript

As shown in the square enclosure below, the manuscript is composed of a title, a subtitle, author names, affiliation institutions, locations, abstract and keywords in order, lay out so that it fits within the width of 140 mm. If there are multiple authors, please mark * in front of the speaker and distinguish the affiliation institution and address with superscripted numbers. Following the title part, please prepare the body as a guide with a single column of 10 point Times New Roman, 46 lines per one page. Color display is possible. References should be indicated by numbers with brackets (1) on the right shoulder of cited parts in the text, and should be listed together at the end of the text as follows.

Example: (1) T. Dennetsu et al, J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

④ Abstract Manuscript

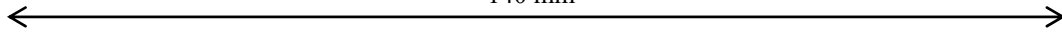
As shown in the square enclosure below, the manuscript is composed of a title, a subtitle, author names, affiliation institutions, locations and keywords in order, lay out so that it fits within the width of 140 mm. If there are multiple authors, please mark * in front of the speaker and distinguish the affiliation institution and address with superscripted

numbers. Following the title part, please prepare the abstract as a guide with a single column of 10 point Times New Roman, 46 lines per one page. Color display is possible. References should be indicated by numbers with brackets (1) on the right shoulder of cited parts in the text, and should be listed together at the end of the text as follows.

Example: (1) T. Dennetsu et al, J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

140 mm



Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt)

The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt)

(blank line)

Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark “” at the head of speaker’s name)

(blank line)

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations: Times New Roman 10pt)

(blank line)

Abstract of approximate 100 words is written by Times New Roman 10pt. Five blank characters are inserted as the indent.

(blank line)

Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words)

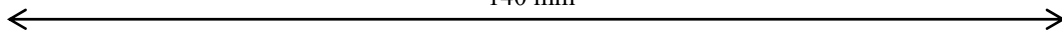
(blank line)

1. Headline

1.1 Crosshead The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 2 to 6 pages of A4 size. The manuscript forms 1 column × 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the maximum, and animations cannot be included.

③ Format of English full size manuscript (title part and text export part).

140 mm



Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt)

The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt)

(blank line)

Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark “” at the head of speaker’s name)

(blank line)

Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations: Times New Roman 10pt)

(blank line)

Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words)

(blank line)

The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 1 page of A4 size. Chapters are not necessary. The manuscript forms 1 column × 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the maximum, and animations cannot be included.

④ Format of English abstract manuscript (title part and text export part).

【ご注意】

- 講演申込みの取消および講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。

- 講演申込みは共著者の許可を得てから行って下さい。
- 論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- 参加費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

第 58 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局

日本大学 工学部 機械工学科 内

E-mail : symp2021@htsj-conf.org, FAX : 024-956-8860

優秀プレゼンテーション賞（第 58 回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 巽 和也

第 58 回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、若手研究者および学生を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日： 令和 3 年 5 月 25 日（火） シンポジウム第 1 日
- 発 表 形 式： 発表者 1 名あたり、発表内容をまとめた 1 枚のアピールスライド提出とポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。アピールスライド集は参加者に配布されると共にスライドショーとして案内される予定です。
なお、伝熱シンポジウムがオンラインにて開催されることに合わせて、優秀プレゼンテーション賞セッションはオンラインにて開催いたします。システムと発表形式の詳細についてはシンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象： 企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、令和 3 年 3 月 31 日現在で 28 歳以下の方、または、申込当日に学生である方。
- 応 募 資 格： 発表者は日本伝熱学会の会員（正員・学生員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、講演論文原稿提出までに、会員申し込みを行ってください。なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。
- 応 募 件 数： 大学に所属する学生の場合：指導教員あたり 1 名（1 件）
大学以外の研究機関、企業に所属する場合：研究グループあたり 1 名（1 件）
とします。
- 応 募 方 法： 第 58 回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法： 複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰： 受賞者はシンポジウム第 2 日の学会総会で表彰されます。



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

対象	対応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載，MLでも配信	申込者は、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：稲田孝明（東京電機大学）：t-inada@mail.dendai.ac.jp
- ・編集出版部会長：中村 元（防衛大学校）：nhajime@nda.ac.jp
- ・広報委員会委員長：一柳満久（上智大学）：ichiyanagi@sophia.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：村上陽一（東京工業大学）：general-affairs@htsj.or.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：office@htsj.or.jp

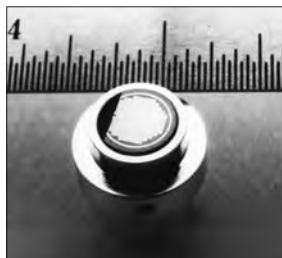
【注意】

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

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



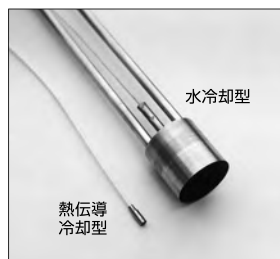
特徴

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

使用例

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

サーモゲージ



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

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国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。



センサテクノ株式会社

URL

www.senstech.jp

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

E-mail

info@senstech.jp



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

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

CAPTEC 社(フランス)

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

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

熱流束センサー



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

輻射センサー



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

MEDTHERM 社(アメリカ)

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

熱流計/輻射計



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

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

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



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

【最小プローブ径】
 0.015インチ(約0.39mm)

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

ITI 社(アメリカ)

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

高温用熱流板



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

水冷式 火災強度熱流計



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

当社取扱製品の適用分野

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

有限会社 テクノオフィス

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

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

学会誌「伝熱」は本号から Vol.60 となります。すなわち、本学会の前身である日本伝熱研究会が 1961 年に設立され、1962 年に会誌「伝熱研究」の創刊号が発刊された年から数えて、本年で 60 年目を迎えます。J-STAGE や学会 HP に掲載されている学会誌の目次を見ながらいくつかの記事を読んでみると、本学会誌には、我が国における伝熱研究の貴重な歴史が刻まれていることがわかりました。伝熱研究会設立当初は、原子力や宇宙時代の幕開けに伴う社会的要請により伝熱研究者間の情報交換が真に必要となり、その手段として学会誌が重要な役割を果たしてきたことがうかがわれます。また、1994 年に日本伝熱学会へ名称変更した頃には、例えば日本伝熱学会社団法人化記念放談会「次世代の伝熱を探る」(Vol.34, No.132) や、小特集「伝熱工学・熱工学の将来」(Vol.35, No.137) において、これからの熱科学・伝熱工学について盛んに議論されています。2002 年には創立 40 周年を記念して「歴代会長からのメッセージ」(Vol.41, No.168) が特集されており、第 1 期から第 40 期会長からのメッセージや思い出話に加え、伝熱に対する各先生の思いや個性的な名言集もまとめられています。2011 年から 2012 年にかけて (Vol.50, No.212~Vol.51, No.215) は、「日本伝熱学会創立 50 周年記念特別号」となっており、日本伝熱学会 50 年の歴史が記録されているとともに、伝熱の各分野における 50 年の研究の進展や今後の展望がまとめられています。諸先輩方の伝熱に対する思いや熱科学・伝熱工学の将来展望は今現在に通じるものも多く、研究や教育を行う上で大いに参考になると思います。皆さまも是非一読されてはいかがでしょうか。

中村 元 (防衛大学校)

Hajime NAKAMURA (National Defense Academy)

e-mail: nhajime@nda.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 鶴田 隆治 (九州工業大学)

編集出版部会長 中村 元 (防衛大学校)

委員

(理事) 光武 雄一 (佐賀大学), 中原 真也 (愛媛大学)

(協議員) 小田 豊 (関西大学), 梶田 欣 (名古屋市工業研究所), 武田 哲明 (山梨大学),

富村 寿夫 (元熊本大学), 中川 慎二 (富山県立大学), 西 剛伺 (足利大学),

元祐 昌廣 (東京理科大学), 結城 和久 (山口東京理科大学)

TSE チーフエディター 鈴木 雄二 (東京大学)

TSE 編集幹事 福島 直哉 (東海大学)

編集出版部会 連絡先: 〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20

防衛大学校 システム工学群 機械工学科

中村 元

Phone: 046-841-3810 内線 3419

E-mail: nhajime@nda.ac.jp