

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

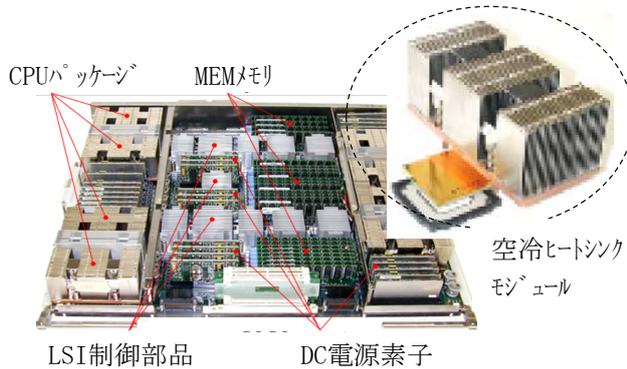
ISSN 1344-8692 Vol. 59, No. 249
2020. 10

Thermal Science and Engineering

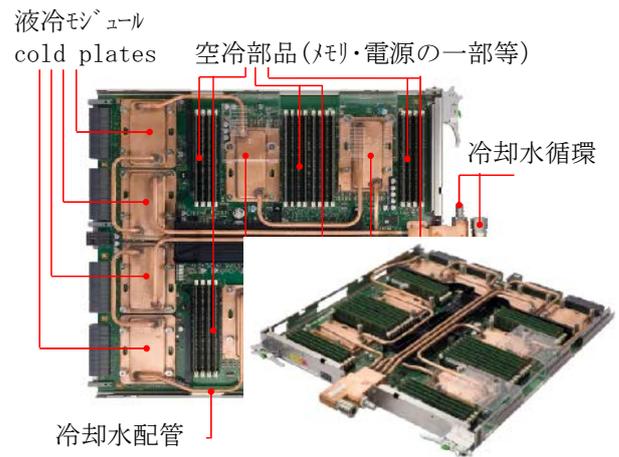
ISSN 0918-9963 Vol. 28, No. 4
2020. 10

HSTJ

◆特集：エレクトロニクス機器の熱設計



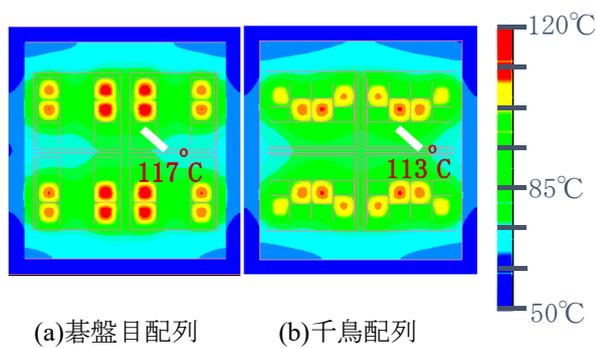
左：空冷方式システムボードの冷却



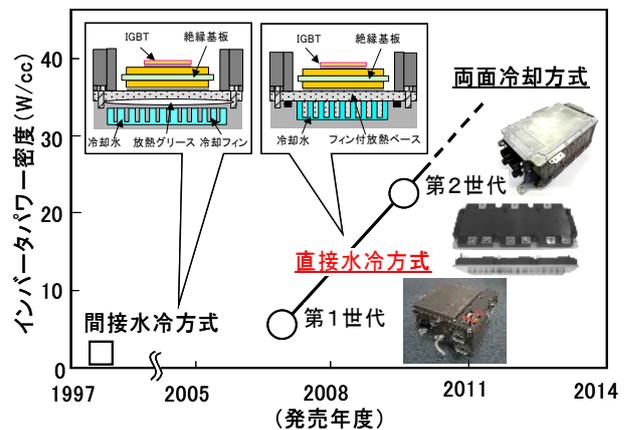
右：液冷方式システムボードの冷却

空冷方式は、冷却構造が単純で低コストであり、スパコンに対して今まで最も適用されている冷却方法である。液冷方式では、高い熱輸送特性を持つ液体冷媒（冷却水、不凍液、または不活性液体など）が電子部品と間接（液冷モジュールで）または直接（部品浸漬）に熱交換を行い、空冷方式のような空気を介する熱交換は行わない。そのため、高い熱交換能力と電力効率の改善が可能であり、非常に注目されている。

（特集記事「スパコンの熱設計（魏 杰）」より）



左：半導体レイアウト最適化による温度低減



右：インバータパワー密度増加トレンド

強電系のパワーモジュールでも鉄道用と自動車用は設計思想や冷却構造に違いがある。鉄道用は自動車用に比べるとモジュールあたりの電流が大きいいため、モジュール内のパワー半導体の数が多くパワーモジュールサイズも大きい。個々のパワー半導体への電流アンバランスが生じないように端子や半導体のレイアウトは各社で工夫されている。

（特集記事「鉄道および自動車駆動用パワーエレクトロニクス冷却技術（堀内 敬介，西原 淳夫，中津 欣也）」より）

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

魏 杰 (富士通アドバンステクノロジー株式会社)
堀内 敬介, 西原 淳夫, 中津 欣也 (日立製作所) …………… 表紙裏

〈特集: エレクトロニクス機器の熱設計〉

特集「エレクトロニクス機器の熱設計」にあたって …………… 西 剛伺 (足利大学) …………… 1
ノートブック型パーソナルコンピュータ向けマイクロプロセッサの熱設計と熱制御
…………… 西 剛伺 (足利大学) …………… 2
スパコンの熱設計 …………… 魏 杰 (富士通アドバンステクノロジー株式会社) …………… 9
パワーエレクトロニクス機器の熱設計 — スイッチング電源装置の熱モデル化手法 —
…………… 小泉 雄大 …………… 15
鉄道および自動車駆動用パワーエレクトロニクス冷却技術
…………… 堀内 敬介, 西原 淳夫, 中津 欣也 (日立製作所) …………… 21
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 株式会社) …………… 26

〈ヒストリーQ〉

人と熱との関わりの足跡 (その7) — 「日本刀」における伝熱技術とその研究 —
…………… 芹澤 良洋 (日本製鉄) …………… 34

〈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 花村 克悟 (委員長・東京工業大学),
高田 保之 (九州大学) …………… 37

〈海外レター〉

ロードアイランド大学滞在記 …………… 洪 定杓 (鹿児島大学) …………… 39

〈行事カレンダー〉 …………… 43

〈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研究発表論文募集 …………… 44
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 …………… 46
日本伝熱学会ロゴの募集 …………… 47
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～」受講者募集のご案内 …………… 48
・事務局からの連絡 …………… 49

〈編集出版部会ノート〉 …………… 53

Vol. 59, No. 249, October 2020

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Jie WEI (Fujitsu Advanced Technologies Limited)

Keisuke HORIUCHI, Atsuo NISHIHARA, Kinya NAKATSU (Hitachi, Ltd.) Opening Page

< Special Issue: Thermal Design of Electronics Equipment >

Preface to the Special Issue on “Thermal Design of Electronics Equipment”

Koji NISHI (Ashikaga University) 1

Thermal Design and Thermal Control of The Microprocessor for Notebook Personal Computer

Koji NISHI (Ashikaga University) 2

Thermal Design of Supercomputers

Jie WEI (Fujitsu Advanced Technologies Limited) 9

Thermal Management Technologies of Power Electronic Equipment

- Thermal Modeling Method for Switch Mode Power Supply -

Katsuhiko KOIZUMI 15

Cooling Technologies of Power Electronics for Railway System and Electric Vehicles

Keisuke HORIUCHI, Atsuo NISHIHARA, Kinya NAKATSU (Hitachi, Ltd.) 21

Thermal Design Approach for Small Surface Mount Components

- To Establish New Thermal Design Methodology for Electronic Devices -

Koichi HIRASAWA (KOA CORPORATION) 26

< History Q >

Footprints of the Relationship Between Humans and Heat (Part 7)

- Study of Heat Transfer in Making of the Japanese Sword -

Yoshihiro SERIZAWA (NIPPON STEEL CORPORATION) 34

< Committee Report >

Report of Specific Promotion Researches in Heat Transfer Society of Japan

Specific Promotion Research Planning Committee:

Katsunori Hanamura (Chairperson, Tokyo Inst. Tech.)

Yasuyuki TAKATA (Kyushu University) 37

< International Letter >

A Diary in University of Rhode Island

Chungpyo HONG (Kagoshima University) 39

< Calendar > 43

< Announcements > 44

< Note from the JHTSJ Editorial Board > 53

特集「エレクトロニクス機器の熱設計」にあたって
Preface to the Special Issue on “Thermal Design of Electronics Equipment”

西 剛伺 (足利大学)
Koji NISHI (Ashikaga University)
e-mail: nishi.koji@v90.ashitech.ac.jp

コロナ禍において、新たな生活リズムに慣れる必要性に迫られていることと思います。在宅勤務や遠隔教育が導入されるようになり、パーソナルコンピュータやタブレット端末といったコンピュータの需要が再び伸びています。また、感染者数の予測、飛沫感染防止のためのシミュレーションでは、スーパーコンピュータの存在は不可欠でしょう。一方、2010年代後半以降、クルマの電動化やEV (Electric Vehicle) の普及と相まって、パワーエレクトロニクスの重要性が日に日に増しています。このような中、電子機器の冷却や熱設計に関する特集を組む運びとなりました。電子機器をメインテーマとして本誌で特集が組まれるのは、2008年4月号「特集：電子機器の冷却」以来、12年ぶりです。

本特集では、電子機器の中でも、上述の背景からコンピュータとパワーエレクトロニクスの熱設計をメインテーマとすることと致しました。一つ一つの電子部品は大きいものでも手のひらに載るようなサイズですが、システムレベルになると、スーパーコンピュータのように建物丸ごとの大きさになるものもあります。そこで、①コンピュータとパワーエレクトロニクスという2つのアプリケーション、②電子部品レベルとシステムレベルという2つのスケール、の観点から5つの記事をそれぞれの分野の専門家にご執筆頂きました。

最初の2件は、コンピュータの熱設計に関するものです。電子部品レベルの熱設計に関する内容として、ノートブック型パーソナルコンピュータで使用されるマイクロプロセッサの熱設計・熱制御について小生が解説させて頂きました。続いて、システムレベルの熱設計に関する内容として、京を始めとするスーパーコンピュータの熱設計に携わっていらっしゃる富士通アドバンステクノロジー株式会社の魏杰氏に、スーパーコンピュータの熱設計について解説頂きました。

続く2件は、パワーエレクトロニクスの熱設計に関するものです。電子部品レベルの熱設計に関する内容として、長年電源メーカーで電源の熱設計に携わられてきた小泉雄大氏に、スイッチング電源と電子部品のモデル化手法について解説頂きました。続いて、システムレベルの熱設計に関する内容として、株式会社日立製作所の堀内敬介氏らに、鉄道および自動車駆動用パワーエレクトロニクス冷却技術について解説頂きました。

最後の1件は、電子部品の中でも、縁の下の力持ちである微小電子部品に関するものです。世界有数のチップ抵抗器メーカー KOA 株式会社でチップ抵抗器を中心に微小電子部品の熱設計に携わっていらっしゃる平沢浩一氏に、微小電子部品独特の課題や考え方等について解説頂きました。

いずれの記事もアプリケーションやサイズに起因する独特の要件や課題、熱設計の取り組みをご紹介頂いており、それぞれの熱設計の特長を感じて頂けるものと思います。

電子機器はさまざまな要素技術によって構成されていますが、本誌の過去の特集にも、電子機器の冷却、熱設計に関連するものが取り上げられています。直近のものでは、2020年1月号「特集：接触熱抵抗の評価と低減ー基礎研究と実用化の進展ー」、2020年7月号「特集：ポーラス体内における伝熱・流動・物質輸送現象と応用の最前線」があります。その他、2012年10月号「特集：古くて新しいヒートパイプ」、2013年7月号「特集：スーパーコンピュータと伝熱」、2015年7月号「特集：赤外線サーモグラフィによる熱計測」についても、併せてご覧頂くことで、近年の研究の傾向に関して、理解を深めることができると思います。

最後になりましたが、各稿の著者の皆様には、ご多忙にも関わらず原稿執筆をお引き受け頂きまして、誠にありがとうございます。この場を借りて感謝申し上げます。

ノートブック型パーソナルコンピュータ向けマイクロプロセッサの熱設計と熱制御 Thermal Design and Thermal Control of The Microprocessor for Notebook Personal Computer

西 剛伺 (足利大学)

Koji NISHI (Ashikaga University)

e-mail: nishi.koji@v90.ashitech.ac.jp

1. はじめに

コロナ禍において、企業では在宅勤務が中心に、教育現場では遠隔教育が増える等、以前にも増してパーソナルコンピュータ (Personal Computer, 以下、PC) の活躍の場が増えている。また、ウィルス飛散状況の把握や新薬開発において、コンピュータシミュレーションは今や不可欠であり、スーパーコンピュータを始めとする大規模計算機資源の重要性が再認識されている。

コンピュータの消費電力は、そのほとんどが熱となる。しかもコンピュータの心臓部であるマイクロプロセッサを始めとする半導体の消費電力には温度依存性がある。つまり、温度が高くなるほど消費電力が増え、その熱によってさらに温度が上がる、という悪循環を引き起こす。そのため、機器を安全に運用するという観点だけでなく、省エネ化を促進し、持続的社會を実現するためにもコンピュータの「伝熱」に関する取り組みが重要となっている。

筆者は過去約 10 年間、マイクロプロセッサメーカーに在籍し、主にノートブック型 PC (以下、ノート PC) の熱設計や熱制御に携わってきた。現在は電子機器の小型・省エネ化をテーマとして教育研究を実施している。本稿では、身近ではあるものの、意外と知られていない、ノート PC 向けマイクロプロセッサの熱設計と熱制御を直近の約 20 年間の歴史とともに解説する。

2. パッケージ構造と消費電力

2.1 マイクロプロセッサのパッケージ構造

近年のノート PC 向けマイクロプロセッサパッケージの構造を図 1 に示す。パッケージ上面中央に見えるのがシリコンダイである。CPU (Central Processing Unit) 等の集積回路は、シリコンダイ底面に形成されている。電源を含む電気信号は、シリコンダイ底面に形成された回路からフリップチ

ップと呼ばれる微小なはんだボールを介して、パッケージサブストレートに接続し、パッケージサブストレート内で再配線されて、BGA (Ball Grid Array) と呼ばれるはんだボールを介して、マザーボードに接続される。マイクロプロセッサに供給される電気エネルギーは、ほぼすべてがシリコンダイ底面に形成された回路で消費され、発熱する。後述するように、その発熱量は高負荷時には数十 W に至る。そのため、シリコンダイ上面にサーマルグリース等の TIM (Thermal Interface Material) を塗布して、その上に放熱機構を装着することで、シリコンダイ底面に形成された回路を冷却することになる。

シリコンダイは 0.8mm 程度の厚みのシリコンウェハから作られるが、近年では、厚み方向に削って薄くする加工がなされる。図 2 に近年のマイクロプロセッサパッケージの例を示す。図 1 には示していないが、シリコンダイの保護のため、パッケージサブストレート上面にメタルプレートがリング状に取り付けられている。

2.2 マイクロプロセッサの消費電力

1990 年代後半には、CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 技術が飛躍的に進歩し、現在に至るまでマイクロプロセッサは CMOS 技術を用いて実装されている。

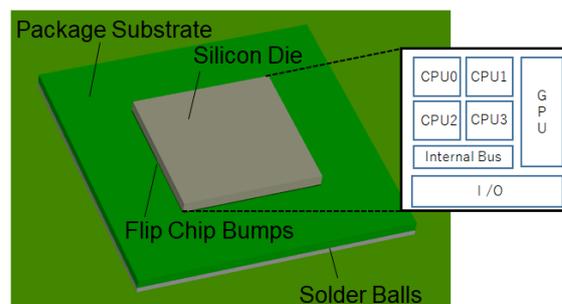


図 1 マイクロプロセッサパッケージの構造と回路のイメージ

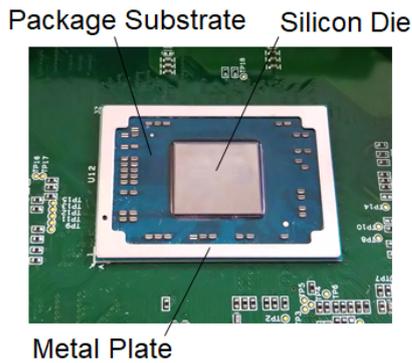


図2 マザーボードに実装された
マイクロプロセッサパッケージの例

CMOS回路はMOSトランジスタによるスイッチを介してコンデンサに電荷を充放電することで0と1という2種類の状態を作り出し、デジタル回路の機能を実現している。この充放電に要するエネルギーは極めて小さいが、近年のマイクロプロセッサには、7nmという半導体微細化技術が適用され、100~250mm²程度のシリコンダイに、数十億~100億個のトランジスタが集積される。一つ一つのMOSトランジスタは省エネな半導体素子であっても、シリコンダイに集積されるCMOS回路全体で考えると、その消費電力は大きい。

CMOS回路では電源から投入された電気エネルギーのほぼすべてが熱となる。CMOSデジタル回路の消費電力、つまり、発熱量 P_{CMOS} は、

$$P_{CMOS} = aC_{load}V_{DD}^2f_{op} + I_{leak}V_{DD} \quad (1)$$

で表される[1]。ここで、 a は動作率、 C_{load} はCMOS回路の負荷容量、 V_{DD} は電源電圧、 f_{op} は動作周波数、 I_{leak} はリーク電流である。

式(1)の第1項はコンデンサの充放電による消費電力であり、デジタル回路が動作する際に消費する。動作率 a は回路全体のうち、0と1の間で値が変わる、つまり、スイッチング動作している割合を示すパラメータで、この値が大きいアプリケーションソフトウェアほど、消費電力が大きい。また、CPUコアやグラフィックス処理を担うGPU(Graphics Processing Unit)は動作周波数が高いほど処理能力も高くなるが、動作周波数を上げるには電源電圧も上げる必要がある。そのため、CPUやGPUの性能を向上させようとする、消費電力は動作周波数に比例するだけでなく、電源電圧の

2乗にも比例して増えていくことになる。

式(1)の第2項はリーク電流による消費電力である。微細化が進む中で、リーク電流の影響は大きくなっており、また、リーク電流は温度依存性を有する。つまり、使用温度範囲において、温度が高くなるほど、リーク電流は大きくなり、消費電力が増えてしまう。

マイクロプロセッサには、CPUコアやGPU、内部バス、I/O(Input Output)等、異なる電源電圧で動作するCMOS回路が混載されており、各CMOS回路の消費電力の総和がマイクロプロセッサの消費電力、つまり、発熱量となる。

3. ノートPCの熱設計

3.1 従来の発熱量(TDP)の考え方

エンドユーザはPCを購入後、さまざまなアプリケーションソフトウェアをインストールして使用する。アプリケーションソフトウェアによって、式(1)で示したCMOS回路の動作率 a が異なるため、結果として、マイクロプロセッサの発熱量もアプリケーションソフトウェアによって異なる。PC向けのマイクロプロセッサでは、古くから熱設計用の消費電力値としてマイクロプロセッサメーカーがTDP(Thermal Design Power)を提供してきた。そして、PCメーカーはTDPを用いて、PCの熱設計を実施する。

TDPは、ジャンクション温度上限、定格電源電圧、定格動作周波数における消費電力値である。マイクロプロセッサメーカーは、マイクロプロセッサの設計情報、前世代のマイクロプロセッサで実測した消費電力データを基にTDPを見積もり、最終的には、実機でのテストを経て、TDPを仕様として定めてきた。

2000年代初頭は、マイクロプロセッサの性能とともに消費電力が増大した時期であった。装置として容積が大きく、ファン付きヒートシンクをマイクロプロセッサの直上に装着できるデスクトップPCと、筐体が比較的薄く容積の小さいノートPCでは、許容できる発熱量が大きく異なる。そこで、デスクトップPCとノートPCに使用されるマイクロプロセッサには異なるTDPが設定され、別々のカテゴリとして分類されるようになった。

デスクトップPC向けのマイクロプロセッサでは、2000年代中頃から一貫して、標準のTDPが

100W 前後に設定されている。一方、ノート PC 向けのマイクロプロセッサの TDP は 2000 年代中頃までに 35W が標準になった。ノート PC では、動作周波数、つまり、性能をある程度、犠牲にすることで、発熱量を抑えていると言える。

3.2 ノート PC の熱設計の基本的な考え方

マイクロプロセッサの動作温度上限は、半導体の信頼性の観点、電気的特性の観点から、通常、100°C 前後に設定されている。つまり、マイクロプロセッサが温度上限を超えないように、ノート PC の熱設計を行うことになる。

マイクロプロセッサのジャンクション温度 T_J は、

$$T_J = R_{th,JA} \times P + \Delta T_{rise} + T_A \quad (2)$$

で求められる。ここで、 $R_{th,JA}$ は PC 筐体内の熱抵抗、 P はマイクロプロセッサの発熱量、 ΔT_{rise} は筐体内の温度上昇、 T_A は環境温度で通常は室温である。

ノートパソコンの使用温度上限となる室温は、通常、35°C である。また、ノート PC のような薄型設計の筐体では、デザインにもよるが、筐体内の温度上昇は 10°C 前後である。ここで、 P を 35W、 T_A を 35°C、 ΔT_{rise} を 10°C とすると、 T_J を 100°C 以下に抑えるには、式 (2) より熱抵抗 $R_{th,JA}$ を 1.57°C/W 以内に抑える必要がある。ノート PC のような薄型筐体では、1.57°C/W を自然空冷で実現することは難しく、強制空冷が必須となる。ノート PC では、その薄い筐体内で効率的に強制空冷を行うため、RHE (Remote Heat Exchanger) が採用されるようになった (図 3)。

RHE は、マイクロプロセッサのシリコンダイの上部にヒートスプレッドを設置し、扁平型ヒートパイプを介して、マイクロプロセッサの熱をフィン側に伝え、そのフィンに横吹き出しのファンから空気を送り込むことで冷却する。

3.3 温度センサの搭載と温度制御

2000 年代に入ると、前述の通り、マイクロプロセッサの発熱量が大きくなり、PC を安全に運用する観点から、ジャンクション温度を監視する必要性が生じてきた。そして、ジャンクション温度を測定する手段として、サーマルダイオードがシリコンダイに埋め込まれるようになった。サーマルダイオードは、半導体の pn 接合部の順方向の電

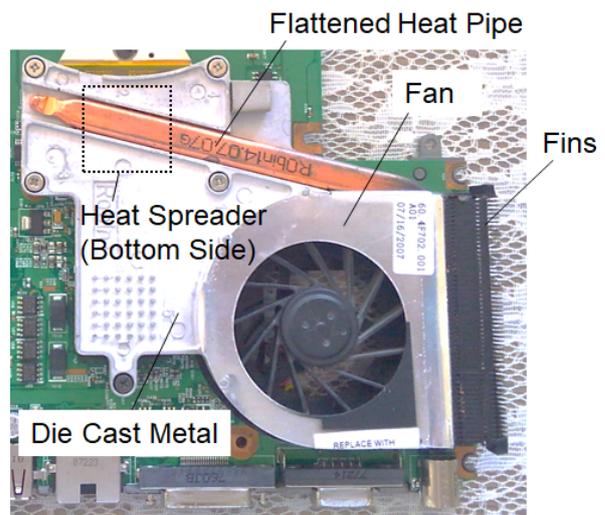


図 3 RHE の例

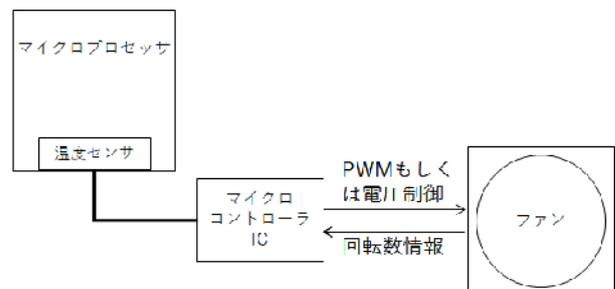


図 4 温度センサによるファン制御

圧降下が有する温度依存性を利用したもので、シリコンダイのジャンクション温度 (つまり、最高温度となる箇所) に近い位置にバルクで埋め込まれる。外部回路から定電流を流した際の電圧を、事前に取得しておいた電圧-温度特性のテーブルで温度に換算する。サーマルダイオードは高温時の温度を監視するだけでなく、取得した温度を用いて、マザーボードに搭載されたマイクロコントローラ IC (Integrated Circuit) から RHE のファン回転数を制御するのにも使用されるようになった (図 4) [2]。

2000 年代後半になると、PC 向けのマイクロプロセッサの温度センサは、サーマルダイオードから半導体回路による温度センサ (On-die Thermal Sensor) に移行していった[3]。半導体の微細化が 90nm→65nm→45nm と進展していく中で、サーマルダイオードによる測定に大きな誤差が生じるようになったためである。ちょうどこの頃、PC 向け

マイクロプロセッサには、CPU コアが2つ以上搭載されるようになり、シリコンダイの端部近辺にしか埋め込むことができないサーマルダイオードでは、ジャンクション温度に近い位置で測定できないという課題も背景にあった。半導体回路による温度センサはマイクロプロセッサの CMOS 回路の一部として実装されている。そのため、マイクロプロセッサ「自身」がジャンクション温度を直接監視できるようになった。

4. マイクロプロセッサの温度予測

4.1 シリコンダイの発熱密度と温度分布

従来、マイクロプロセッサの発熱は、シリコンダイの回路面における均一面発熱として扱われ、ジャンクション温度は回路面中央とされてきた。ノート PC 向けのマイクロプロセッサのシリコンダイ面積は 2000 年代中頃以降、歩留まり等の観点から $100\text{mm}^2 \sim 250\text{mm}^2$ 程度で推移しており、この中に CPU コア、内部バス、I/O 等が集積されている。TDP に近い状態では、これらの各エリアの発熱密度は大きく異なり、シリコンダイ回路面に温度分布が生じる。2010 年代に入ると、1つのシリコンダイの中に複数の CPU コアが搭載され、GPU (Graphics Processing Unit) も混載されるようになった[4, 5]。

実用的な精度でマイクロプロセッサのジャンクション温度を予測する場合、3次元熱シミュレーションを実施するのが一般的である。回路のフロアプラン (CPU コアや GPU 等の配置情報) を基に、シリコンダイの回路面に発熱密度の異なるエリアを複数設定するとともに、回路面の複数箇所に温度モニタを設ける等、マイクロプロセッサパッケージは、詳細な3次元形状としてモデル化する必要がある。しかし、このような詳細なモデル化は結果として、マイクロプロセッサパッケージだけでも 1000 万を超えるメッシュ数が必要となり、シミュレーション実行時間及びメモリ使用量の観点からかなり高性能な計算機資源が必要となってしまう。一部を簡略化したモデルも存在するが、その場合には温度予測精度に影響が出てしまう。

4.2 コンパクト熱モデルの提案

3次元熱シミュレーションとは異なる温度予測の手法として、電子機器設計の現場では、以前から熱回路網による温度予測[6, 7]が行われてきた。

マイクロプロセッサを含む電子部品についても、パッケージ内部の伝熱構造を熱回路網による等価回路で表現するコンパクト熱モデル (Compact Thermal Model, 以下, CTM) [8]が定義され、使用されている。従来の CTM には、2抵抗モデル[9]や DELPHI モデル[10]があり、詳細なモデルと比べてはるかに少ない計算量で温度予測が可能である。しかし、いずれのモデルも CPU のマルチコア化や GPU を混載した場合のように、シリコンダイ回路面の発熱に大きな分布が生じる前に規格化されたモデルであり、発熱分布を有し、かつ複数の温度モニタポイントを設定できる構成にはなっていない。そこで、著者らは、複数の CPU コアや GPU が混載されるマイクロプロセッサの、シンプルかつ高精度な温度予測を目的として、図 8 に示す新たな CTM を提案した[11]。従来の CTM は、すべての熱抵抗が固定値だったのに対して、3つの熱抵抗のうち、2つを境界条件の変化により値が変化する可変熱抵抗としてモデル化している点に特徴がある。図 9 はシリコンダイ回路面の発熱分布が異なる3つのケース (A, B, C) について、パッケージ境界面の温度分布に相当する熱伝達率

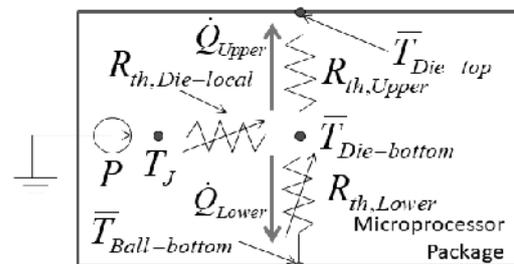


図 8 マイクロプロセッサのコンパクト熱モデル

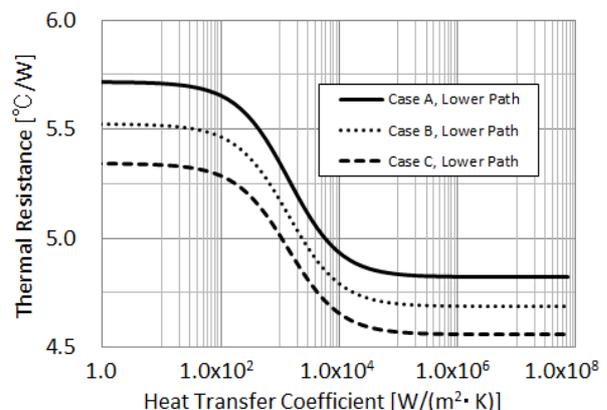


図 9 境界条件の違いによる熱抵抗の変動例

を変化させた際の熱抵抗の変化を示した例である。

5. マイクロプロセッサの電力・熱制御機能

5.1 P-state と初期の電力制御

PC では、1990 年代終わり頃に ACPI (Advanced Configuration and Power Interface) と呼ばれる電源管理の仕組みが取り入れられ、Windows 等の OS (Operating System) がシステムの電源管理を担うようになった。ACPI では、動作時のマイクロプロセッサの電力制御に P-state (Processor Performance State) を用いる。P-state は CPU コアの電源電圧 V_{DD} と動作周波数 f_{op} の組として定義されており、実行するアプリケーションソフトウェアの有無や負荷の状況によって、OS が各 CPU コアの P-state を変更する。定格が P0 で、動作周波数、つまり、性能が高い順に P1, P2, P3 と続く。表 1 に 3 つの P-state を有する場合のイメージを示す。各 P-state には、TDP も付記した。式 (1) より V_{DD} と f_{op} を変更することで、マイクロプロセッサの消費電力が変化する。P-state は、OS 管理の下、性能と消費電力、つまり、発熱量のトレードオフを採っている仕組みであると言える。

5.2 ノート PC の薄型化と消費電力制限

2000 年代のノート PC 向けマイクロプロセッサの TDP は、前述の通り、35W であり、熱設計や使用される部品の高さや配置の制約から、標準的なノート PC の筐体の厚みは、1 インチ (25.4mm) を超えていた。ここで、厚みとは、PC 本体底面から液晶ディスプレイを閉じた状態での液晶ディスプレイ背面 (上面) までの高さである。しかし、2010 年代に入ると、ノート PC の薄型化が急激に進化した。マイクロプロセッサメーカーが TDP を 17W (35W の約半分) から 35W まで設定変更できる製品[12, 13]や TDP を 15~20W に抑えた製品[14]をリリースしたためである。これと同時に、ノート PC が薄型化しやすくなるよう、マイクロプロセッサパッケージも、それまでの、ソケットを介してマザーボードに装着する、PGA (Pin Grid Array) からマザーボードに直接実装する BGA に主流が移った。また、この頃からシリコンダイも厚み方向に削って薄くするようになり、現在の図 2 のような外観となった。

以上により、1 インチを切るノート PC の実現が可能になったものの、薄型化にはもう一つ懸念が

残されていた。ノート PC 筐体の表面温度管理である。薄型化により、マイクロプロセッサの熱が筐体表面に伝わりやすくなってしまい、ノート PC の表面温度の管理が厳しくなったのである。これを解決する方法として、マイクロプロセッサに消費電力制限機能が付け加えられた。PC 表面温度が高くなった際に、使用できる P-state を、OS ではなく、マイクロプロセッサ自身が制限するもので、消費電力制限がかかると PC の性能も落ちてしまうことになる。薄型のデザインと性能及び表面温度管理の両立には、非定常熱シミュレーションによる熱設計及び熱制御の検証が必要となった。

図 10 は非定常熱シミュレーションと実測結果を比較した例である[15]。ノート PC には、表面温度計測用の温度センサが搭載されるとは限らない。そのため、マイクロプロセッサのジャンクション温度と表面温度の相関をとり、ジャンクション温度を基に、表面温度を管理する必要があった。図 10 では、ジャンクション温度が 70°C を超えた際に、65°C を下回るまでの間、消費電力制限がかかる設定となっている。100 秒付近で消費電力制限がかかり、数 10 秒間、ジャンクション温度だけでなく、ヒートシンクやマザーボードの温度も下がっていることが分かる。

表 1 P-state のイメージ

P-state	V_{DD} [V]	f_{op} [GHz]	TDP [W]
P0	1.20	2.50	35.0
P1	1.10	2.00	26.5
P2	1.00	1.00	17.0

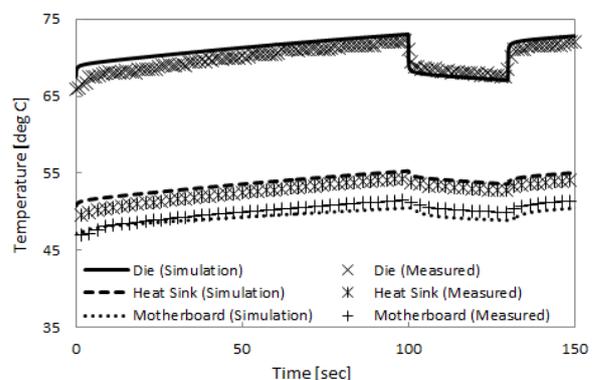


図 10 P2 による消費電力制限

5.3 ブーストによる性能向上と近年の TDP の概念

ノート PC 向けのマイクロプロセッサに、GPU が混載されるようになると、TDP の考え方に変化が生じてきた (図 11)。GPU が搭載されていないときは、CPU のみが性能と消費電力が大きく変動する要因であった (図 11 の「従来の TDP」)。一方、マイクロプロセッサに GPU が混載される場合、TDP は CPU コアと GPU の双方に一定の負荷がかかる状態を想定して設定される (図 11 の「GPU 混載時の TDP」)。そのため、グラフィックス機能をあまり使用していなければ、CPU に TDP 相当の負荷がかかっていたとしても、マイクロプロセッサの消費電力は TDP より小さくなる。このとき、「余った」電力を CPU コアに割り振ることができれば、CPU コアの性能を上げることができる。これを「ブースト」と呼ぶ。

CPU コアの消費電力は、アプリケーションソフトウェアによる負荷の状況で、急激に変動する可能性があり、ブーストの制御には即応性が求められる。そのため、従来の電力制御では、OS が P-state を変更していたのに対して、ブーストでは、マイクロプロセッサが OS を介さずに自律的に電力制御を行う必要がある。2010 年代に入ると、式 (1) に相当する計算を行うことで、消費電力を見積もる機能がマイクロプロセッサに内蔵されるようになり、その機能を用いることでブーストが可能になった [4, 5]。

当初のブーストは式 (1) の第 1 項による変動を加味して消費電力を求め、消費電力が TDP に収まる範囲で CPU コアの動作周波数と電源電圧を引き上げる機能であった (図 11 の「TDP 内の CPU ブースト」)。なお、電気的特性とは異なり、マイクロプロセッサのジャンクション温度は熱容量の影響から比較的ゆっくりと変動する。そのため、ジャンクション温度が十分低い場合には、発熱量が TDP を超えていたとしても即座にジャンクション温度上限に至ることはない。そこで、ジャンクション温度が十分低い場合には、TDP を超えて動作できるようにブーストが拡張された (図 11 の「ブースト上限内の消費電力」) [5]。この頃、すでに半導体の微細化技術と回路設計技術によって、ノート PC 向けマイクロプロセッサは 4GHz 程度まで動作周波数を上げて、電気的特性の観点からは十分機能するようになっていた。それを

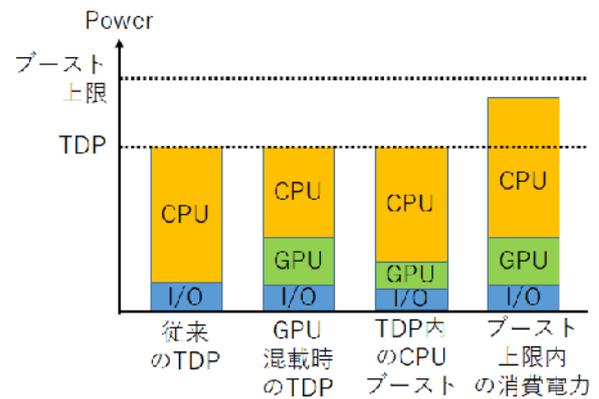


図 11 TDP とブースト時の消費電力のイメージ

条件付きで利用可能にする技術としてブーストが実装されたとも言える。そして、ブーストの導入は、TDP の概念も変えていった。最新のマイクロプロセッサにとって、TDP は、従来の絶対的な発熱量の指標から、ブースト可否を判定するための、しきい値の一つに過ぎなくなったわけである。

その後、GPU のブーストも可能になった [14]。また、ジャンクション温度を参照することで、式 (1) の第 2 項であるリーク電流の増減も精緻に見積もることができるようになった [16, 17]。これにより、より細かい粒度でのブーストの制御が可能になり、例えば、2018 年に発表された AMD 社の Raven Ridge APU (Ryzen Mobile 2000 シリーズ) では 25MHz 単位で性能と消費電力のバランスをとるようになった [17]。

現在に至るまで、ノート PC の熱設計は TDP を指標として実施されている。一方で、より長くブースト状態を保つには、非定常状態も考慮した熱設計・熱制御が必要となる。現在はまだその途上にあると言える。

6. まとめ

本稿では、ノート PC 向けマイクロプロセッサの熱設計と熱制御をその歴史とともに解説した。身近な存在であるノート PC に使用されているマイクロプロセッサは、約 20 年の間に大きく進化し、高性能化と薄型化の両立を図るブーストが実装されるようになった。本稿で紹介したマイクロプロセッサの機能は、エレクトロニクス分野全般に適用可能な要素技術であり、今後のエレクトロニクス機器の熱設計の益々の発展を期待したい。

参考文献

- [1] 西剛伺, マイクロプロセッサのダイ周りの非定常熱伝導シミュレーション, 日本伝熱学会論文集, 20-2 (2012) 27.
- [2] 国峯尚樹, 最新熱設計手法と放熱対策技術, シーエムシー出版 (2011).
- [3] Owen, J., Next-Generation Mobile Computing: Balancing Performance and Power Efficiency, Hot Chips 19 (2007).
- [4] Rotem, E. et al., Power management architecture of the 2nd generation Intel® Core™ microarchitecture, formerly codenamed Sandy Bridge, Hot Chips 23 (2011).
- [5] Foley, D. et al., AMD'S "LLANO" Fusion APU, Hot Chips 23 (2011).
- [6] 石塚勝, 福岡義孝, マルチチップパッケージ基板の過渡温度上昇, 日本機械学会論文集 B 編, 52-476 (1986) 1772.
- [7] 加賀邦彦, 山田賢一, 古藤悟, 大串哲朗, 熱回路網法による空気調和用熱交換器性能の予測 (冷媒側静圧分布の影響を考慮した修正有効比熱モデル), 日本機械学会論文集 B 編, 67-654 (2001) 189.
- [8] JEDEC Standard, Compact Thermal Model Overview, JESD15-1 (2008).
- [9] JEDEC Standard, Two-Resistor Compact Thermal Model Guideline, JESD15-3 (2008).
- [10] JEDEC Standard, DELPHI Compact Thermal Model Guideline, JESD15-4 (2008).
- [11] 西剛伺, 畠山友行, 中川慎二, 石塚勝, 1次元熱回路網によるマイクロプロセッサのコンパクト熱モデルの提案, エレクトロニクス実装学会誌, 22-4 (2019) 291.
- [12] Jahagirdar, S., Architecture and power management of the Third generation Intel Core micro architecture, Hot Chips 24 (2012).
- [13] Nussbaum, S., AMD "TRINITY" APU, Hot Chips 24 (2012).
- [14] Bouvier, D., AMD "Kabini" APU SOC, Hot Chips 25 (2013).
- [15] 西剛伺, 畠山友行, 石塚勝, 消費電力制限機能を有するマイクロプロセッサの非定常熱伝導シミュレーション, 電子情報通信学会論文誌 C, J96-C-11 (2013) 419.
- [16] Doweck, J. Kao, W., Inside 6th generation Intel Core Code Name Skylake, Hot Chips 28 (2016).
- [17] Bouvier, D., Gibney, J., Arora, S. and Branover, A., AMD Ryzen™ Processors with Radeon™ Vega Graphics 7, Hot Chips 30 (2018).

スパコンの熱設計

Thermal Design of Supercomputers

魏 杰 (富士通アドバンステクノロジー株式会社)
Jie WEI (Fujitsu Advanced Technologies Limited)
 e-mail: jwei@fujitsu.com

1. はじめに

近年、IoT や AI 関連技術の急速な発展と普及に伴い、スマートデバイスからスーパーコンピュータシステム（スパコン）まで、ICT（情報通信技術）機器の高性能化が求められ続けている。それぞれの高性能化を支えるのは電子装置における高密度実装技術の推進であり、中でも、最も進化しているのは最先端技術の結晶とも言われるスパコンに向けた実装技術だと考えられる。表 1-1 は、今年 6 月に世界一に輝いたスパコン「富岳」と約 9 年前に世界一だったスパコン「京」の計算性能と実装特性の比較である[1]。「富岳」の実行性能（High Performance LINPACK ベンチマーク）は「京」の 40 倍であり、実装密度を反映する半導体プロセス・テクノロジー（配線間隔・ゲット幅）は 45 から 7 nm（ナノメートル）に微細化され、システムが搭載する CPU コア数が 10 倍に増えた。同時に、システム消費電力は 2.2 倍、演算効率は約 20 倍の向上と予測されている。

一方、高密度実装の進展に伴い、半導体や電子部品の発熱密度も増大しつつあり、スパコンの安定稼働を保証する熱対策技術を実現するため、厳しいチャレンジに臨んでいる。高密度実装では、半導体だけではなく、装置を構成する様々な LSI パッケージと基板がより高密度に実装されるため、部品から装

置・システムまであらゆるレベルで、冷却性能と冷却能力の向上が求められている。また、高性能化と共に、スパコンを含む ICT 機器やシステムの消費電力、或いはエネルギー使用量の増大は既に世界的な問題となり、冷却を含む電力利用の効率化、並びに省エネ技術の革新や環境資源の有効利用が業界から強く求められている。

スパコンの熱設計において、高密度実装に向けた冷却能力の向上と省エネを求める冷却の効率化は最も重要な課題と言える。更に、熱設計の目的は、電子部品を冷やすことだけではなく、計算機装置と設置環境の温度管理により、安全稼働を保証した上で、冷却を超えてシステムの信頼性向上と消費電力削減、更なる保守性と運用性の改善にも大いに期待が寄せられている。

本稿では、スパコンにおける計算機装置の熱設計を中心に、装置の設置環境であるデータセンターの熱管理を含め、高密度実装に向けた冷却方式とそれぞれの技術的特徴を分析し、設計思想と適用事例を交えながら関連技術の方向性と実施効果を具体的に説明する。

2. 熱設計について

スパコンを設置する計算機ルームやデータセンター（DC : Data Center）での熱管理は、図 2-1 に示

表1-1 スパコン計算性能と実装特性の比較

スパコン	京	富岳
HPL性能 PF	10.5	415.5
CPUテクノロジー nm	45	7
CPUコア数 M	0.7	7.3
消費電力 MW	12.7	28.3
演算効率 GF/W	0.8	14.7

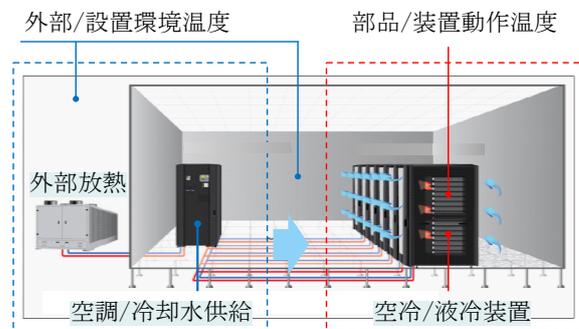


図2-1 スパコン冷却システムの基本構成

すように、計算機装置の冷却と設置環境（冷媒を供給する施設空調と冷凍設備を含む）における冷媒の熱交換により構成される[2]。電子部品からの発熱は、装置内の冷却構造から設置環境で循環する冷却空気または冷却水に吸収され、施設空調や冷凍設備での熱交換を経由して外部環境に排出される。

従って、電子部品の冷却は装置内で独立しているわけではなく、冷媒の流動と熱交換および温度要求により、設置環境と緊密に繋がって一体化している。冷却能力と効率化要求のため、システムの互いに強く影響し合っている。熱設計では、装置と環境を組み込んだ状態で温度要求を満たす電子部品の安全稼働を保証するために、部品間熱伝導と冷媒熱交換による最適な冷却構造と装置およびシステム構成を構築することによって、部品から外部環境までの高効率放熱プロセスの実現を目指している。

2.1 装置冷却の基本構成

図 2-2 に、電子部品を代表する LSI/CPU パッケージ冷却の基本構成を示す。CPU の発熱量の 90% 以上は、伝熱部材と接合層を介して、放熱部品である空冷ヒートシンク（HS：Heat Sink）または液冷コールドプレート（CP：Cold Plate）に伝わり、更に設置環境で循環する冷却空気または冷却液体に放熱される。通常、CPU から的高密度熱流は伝熱部材（Heat Spreader）にて拡散され、各部材接触面での熱抵抗は熱接合材（TIM：Thermal Interface Material）の埋め込みにより低減される仕組みを採っている。

装置の熱設計では、CPU など発熱部品からの吸熱能力と実装された基板や筐体から設置環境への放熱能力、及びそれぞれの部品や構造の適用性と効率を評価する。熱対策の鍵になるのは、冷却方式（空冷または液冷）の選択と関連冷却部品の効率化設計（機能性、実装性、適合性および保守性を含む）と考えられる。

設置環境との熱交換については、施設における空

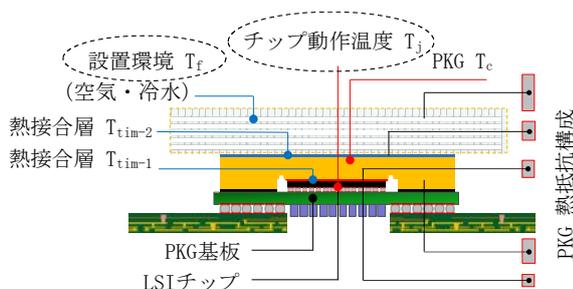


図2-2 LSI/CPUパッケージ冷却の基本構成

調と冷凍設備を含め、装置への冷却を十分に提供しながら、各設備間熱交換効率の向上と外部環境への自然冷却（Free Cooling）の利用により、冷却用消費電力を最大限に削減することを目標とする。

2.2 熱設計における温度管理

部品吸熱から環境放熱まで、高性能且つ効率の良い熱設計を実現する上で、各構成部品の温度管理は設計の基本であり、装置の安全稼働だけではなく、冷却能力と熱交換効率、更にシステムの信頼性や消費電力にも大きく影響する。中でも、最も重要なのは電子部品の動作温度 T_j （T-junction）と設置環境温度 T_f （T-fluid）、並びに外部環境温度 T_a （T-ambient）である。

動作温度 T_j は、部品および装置安全稼働を保証するものであり、CPU では、種類と動作特性にもよるが、通常は最高温度を 95°C 以下に抑え込むことが要求される。一方、半導体材料の特性により、部品の故障率は動作温度が 10°C 下がると半分に減少する傾向（アレニウス法則）があるため、一般には規格より低い動作温度を設定している。また、CPU の消費電力はダイナミック（Dynamic）の動作部分とスタティック（Static/Leakage）の損失部分から構成され、動作温度 T_j の低減により、高密度実装に伴う損失部分の増大が顕著に抑えられることも期待される。設計事例として、スパコン「京」に適用した低温水冷方式では、18 万個余の CPU と制御プロセッサの動作温度はすべて 30°C 以下に抑え込まれ、システムの信頼性向上と消費電力の削減効果が高く評価された[3]。

動作温度 T_j の低減は、装置および設置環境の熱設計にとって厳しいチャレンジとなっている。まず、設置環境 T_f に対して冷却に使用できる温度差（ $\Delta T = T_j - T_f$ ）が減少するため、装置内冷却部品の伝熱或いは熱交換能力が低下する。また、外部環境 T_a については、要求される T_f の低減や冷却能力の向上

表2-1 ASHRAE計算機設置環境温度ガイドライン

修正年代	推奨温度 $^{\circ}\text{C}$	許容温度 $^{\circ}\text{C}$
2004年	20～25	15～32
2008年	18～25	10～35
2011年以後	18～27	5～45

に伴う施設空調と冷凍設備の消費電力が大きく増大するため、システム冷却の電力効率は下がる。そのため、熱設計において、各温度に繋がる動作条件と信頼性要求、および電力効率に対する総合的な分析が必要になる。

表 2-1 に、省エネ技術の適用推進を促すため、国際専門機関 ASHRAE（アメリカ暖房冷凍空調学会）が提示したデータセンターにおける計算機設置環境温度 T_f のガイドラインを示す[4]。表中の推奨温度は装置の稼働と信頼性を保証する規格要求であり、許容温度は装置の機能を維持する基本 requirement であるが、故障率の上昇も予測されるので、設計への適用性を確認しなければならない。特に、2011 年以後の許容温度範囲は従来の $10\sim 35^{\circ}\text{C}$ から $5\sim 45^{\circ}\text{C}$ に拡張されており、熱設計における外部環境への自然冷却方式を強く推奨している。

3. 冷却方式と熱設計

スパコン装置の熱設計では、CPU などパッケージから基板や装置構成まで各部品の消費電力（発熱）と温度要求および実装構造に基づき、空冷または液冷の冷却方式を選択し、冷却構造と温度特性の適合性を検証することになる。熱設計では、まず冷却方式の選択が必要であり、今まで、空冷方式が最も適用されているが、次世代高密度実装に向けて、液冷方式の高い冷却能力と省エネ効果が期待されている。

3.1 冷却方式の選択

図3-1は、空冷方式スパコン・システムボードの熱設計事例であり、複数のCPUパッケージにそれぞれ設計された空冷ヒートシンク（フィン構造）を搭載し、冷却空気の強制対流によりパッケージからの発熱を設置環境に放出する。空冷方式は、冷却構造が単純で低コストであり、スパコンに対して今まで最

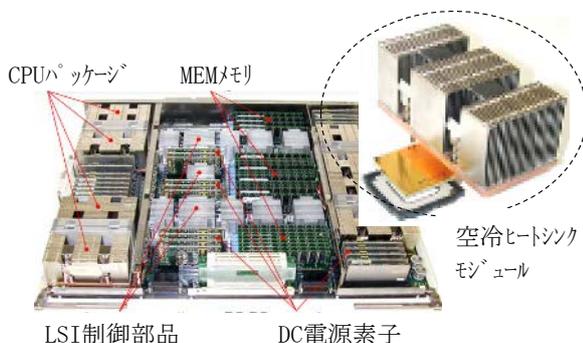


図3-1 空冷方式システムボードの冷却

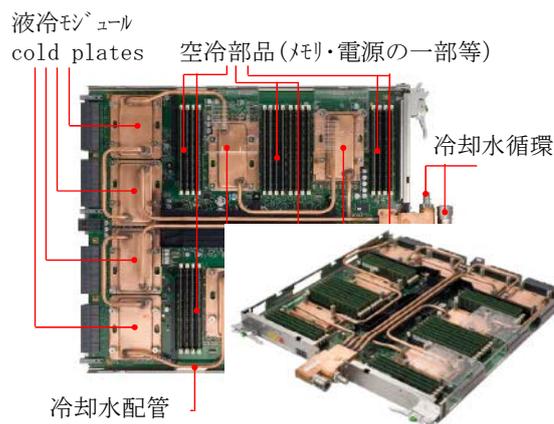


図3-2 液冷式システムボードの冷却

も適用されている冷却方法である。但し、高密度実装に伴う高発熱電子部品の冷却に対応するために、適用されるヒートシンクの大きさや重量は増大し続け、基板や装置の高密度実装に大きな支障が生じている。また、強力な冷却空気の供給（ヒートシンク前面風速 3m/s 以上など）が必要になるため、搭載される冷却ファン（Cooling Fan）により装置の信頼性と消費電力、更には設置環境での騒音と空調電力にも多大な影響を与える。

図3-2は、スパコン「京」に搭載された液冷方式システムボードである。8個のCPUと制御プロセッサ・パッケージにそれぞれ液冷モジュール（Cold Plate）が搭載され、その内部では液体冷媒（冷却水）の強制対流により各パッケージからの発熱を吸収し、施設における冷凍設備の循環冷水と熱交換する。また、システムボードに搭載されたメモリや一部の電源素子など低発熱部品に対しては、液冷構造を設けず、装置の保守性と実装効率を考慮して冷却空気の強制対流による空冷を適用している。すなわち、システムボードでは液冷と空冷を組み合わせたハイブリッド方式を採用している。

空冷方式と異なり、液冷方式では、高い熱輸送特性を持つ液体冷媒（冷却水、不凍液、または不活性液体など）が電子部品と間接（液冷モジュール）または直接（部品浸漬）に熱交換を行い、空冷方式のような空気を介する熱交換は行わない。そのため、高い熱交換能力と電力効率の改善が可能であり、非常に注目されている。同時に、小型液冷モジュール（体積は空冷ヒートシンクの $1/10$ 以下など）の適用は、高密度実装への冷却対応にも大いに期待される。

表3-1に、装置レベルでの熱設計について、空冷、

表3-1 20kW装置/ラックに対する冷却方式の比較

冷却方式	冷却要求	屋内空調/冷却水		ラック内	施設設備
		風量/水量 M ³ /min.	冷却電力 kW	冷却電力 kW	冷却電力 kW
空冷 100%	20 kW/Rack - 冷媒温度差 空冷10°C 水冷 5°C - 施設冷凍効率 COP=5	90-100	2.5-3.0	1.5-2.5	4.0
水冷 100%		0.06-0.1	0.1-0.2	--	4.0
空冷50%+水冷50%		50+0.05	1.5	1.0	4.0

水冷およびハイブリッド（空冷50%+水冷50%）方式の冷却要求と電力消費状況を予測した結果を示す。総電力（発熱量）20kWのラック装置に対して、冷却要求を満足する熱交換（屋内空調/冷却水+ラック内）に必要な消費電力は、それぞれ4.0-5.5kW, 0.1-0.2kW, 2.5kWと予測され、施設冷凍設備を加えた冷却関連総消費電力は約9kW, 4kW, 7kWに上る。相応する電力効率 [(装置電力+冷却電力)/装置電力] は、1.45, 1.20, 1.35となり、水冷方式は空冷より2倍以上の冷却効率を示している。

水冷方式では、屋内空調と装置内冷却ファンが大幅に削減されるため、熱交換に費やす電力は殆ど冷却水循環ポンプ用であり、冷凍設備の使用量を含む冷却用総消費電力は空冷方式の半分以下になる。また、空冷方式での約100m³/minの冷却空気の供給は、ほぼラック能力の限界となっており、それに伴う騒音問題や信頼性への懸念は熱設計にとって厳しい課題を残している。

3.2 冷却能力と効率化の両立

スパコンの熱設計では、冷却能力と効率化を両立する最適な組み合わせが求められている。設計例として、図3-3は、高密度実装に対応する薄型サーバ/CPUパッケージへの冷却要求を空冷と水冷方式の場合で比較したものである。基板に搭載されたCPUの発熱量を150Wと想定した場合、動作温度T_jを80°C以下に保つには、空冷方式では空気入口温度T_fを27°Cに、水冷方式では冷却水入口温度T_fを65°Cにする必要がある。冷却能力の観点から、水冷式熱交換の温度差(ΔT=T_j-T_f=15°C)は空冷式(53°C)の1/3以下であるので、水冷方式は空冷方式より3倍程度の冷却能力を持つと考えられる。更に、エネル

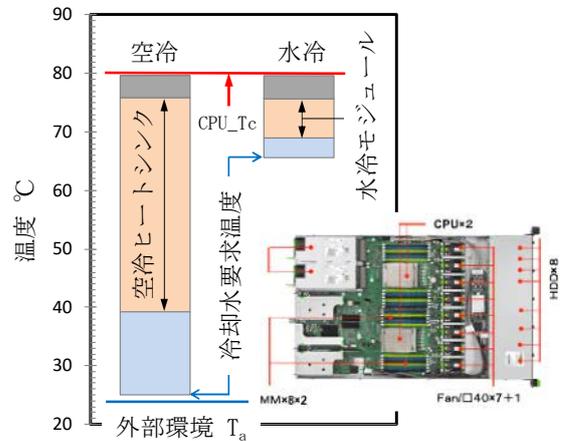


図3-3 冷却方式の能力と効率比較

ギ（電力）利用効率の観点から、空冷用27°Cの冷却空気を獲得するには施設側冷凍と空調設備の稼働が必要になるが、水冷用65°C冷却水の取得には冷凍と空調設備の稼働は必要とせず、環境温度の高い地域や季節でも、外部環境との自然冷却で実現できると考えられる。

空冷式データセンターにおいて、ICT関連装置の使用電力は総電力の約40~50%であり、施設冷凍

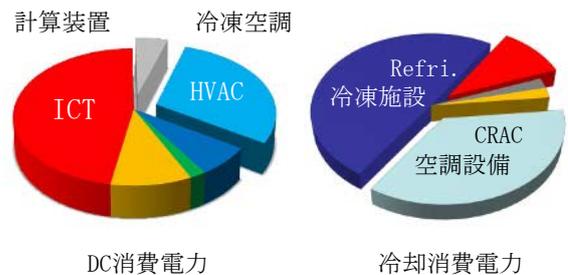


図3-4 スパコン冷却用消費電力の基本構成

と空調設備（HVAC）を含む冷却関連の消費電力は約30～40%となる。図3-4に示す冷却関連消費電力の内訳では、施設冷凍設備と屋内空調装置の消費電力は、それぞれ約50%と30%を占める。従って、上記設計例の場合、液冷方式に加えて外部環境との自然冷却（一部の駆動電力追加が必要になる）を実現できれば、空冷方式より70%以上の冷却用消費電力の削減を期待できる。

4. 高密度実装に向けた冷却技術の推進

前述のように、空冷方式の機能限界が近づいてきているため、次世代スパコンに向けた熱設計や対策技術の検討は、データセンターの熱管理方法と関連冷却技術の推進による新たなイノベーションを加えて再考しなければならないと考えられる。

4.1 冷却能力への挑戦

図4-1は、半導体プロセス・テクノロジーの微細化による高密度実装の進展に伴う、CPUなどプロセッサの発熱密度上昇の傾向を示している[6]。例えば、10年前の45nmに比べ、現在の7nmプロセスでは、プロセッサの発熱密度が4倍以上に高くなるとの予測である。熱設計に際して、スパコンや高性能サーバに搭載されるCPUの発熱密度は、現状の30-50W/cm²から、5年後には100-150W/cm²に上昇することが見込

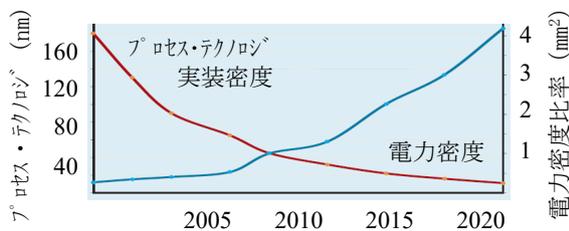


図4-1 半導体の実装と電力密度

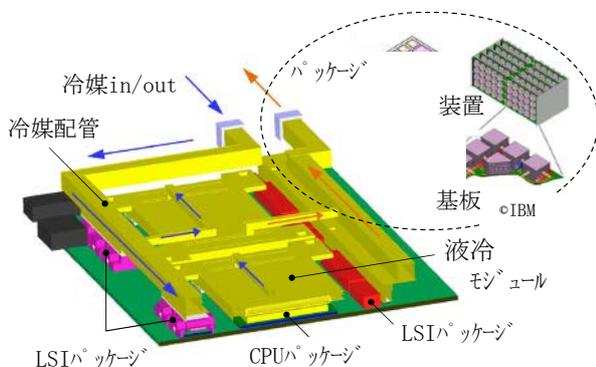


図4-2 基板・装置の高密度実装と冷却

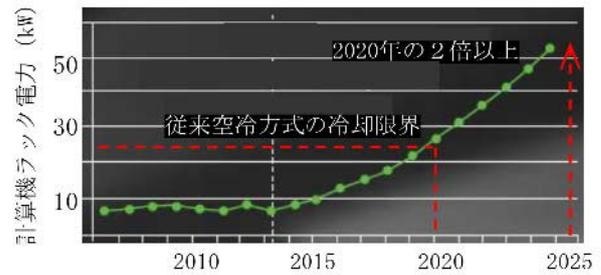


図4-3 計算機ラック消費電力の予測

まれる。

実装密度の増大は、半導体だけではなく、部品から装置までの各レベルで進んでおり、図4-2に示す設計事例のように、一つの液冷モジュールが、CPUを含む様々なLSIパッケージの冷却に兼用されている。また、装置全体の高密度実装により、各部品からの発熱は冷却対策の許容空間を含めて容積的（Volumetric）に考えなければならず、熱設計では、相応する容積的な冷却性能や能力の検討も必要になると考えられる。

図4-3[7]は、ラック装置あたりの消費電力の増加を示しており、5年後のラック消費電力或いは発熱量は現状の2倍以上になると予測されている。空冷ラックの冷却能力限界が約25kWであるのに対して、今後、液冷方式の導入を考えなければならないと予測される。

4.2 電力効率化への貢献

図3-4に示すように、スパコンを設置する空冷式データセンターでは消費電力の約40～50%がICT装置用、30～40%が冷却用であり、省エネは、冷却方式の再検討を含む関連技術の開発と適用推進の両方から進められている。

図4-4に示したのは、2015年に報告されたアメリカデータセンターの消費電力[8]であるが、IoTの発展に伴うICT機器消費電力の増大傾向を示している。特に注目すべき点は、2010年以後、ICT機器の適用が急増しているが、関連消費電力の増加率は2008年前後の年間15%から2%以下に下がりつつある。主な原因は、装置と設置環境の両方における電力利用効率の向上による大きな省エネ効果だと考えられる。

図に示すように、効率改善がなく2010年の電力利用率を維持する場合、2020年の消費電力は現状の2.5倍以上と試算される。この電力削減は、装置側と施設側両方の省エネ効果と考えられる。装置側では、

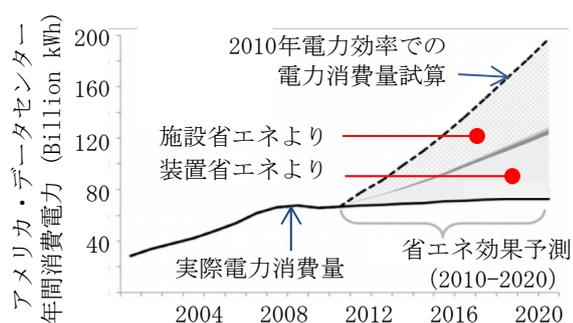


図4-4 アメリカ・データセンター消費電力

高密度実装によるスパコン演算効率の向上(消費電力当たり計算性能は、「京」は0.8,「富岳」は14.7 Giga-FLOPS/W[1]で「京」の18倍以上)および冷却技術の進展により,施設側では,水冷方式の適用を含む各伝熱プロセスでの熱交換効率の向上により,それぞれがデータセンター消費電力の大幅な増大を抑制している.また,上記液冷関連の省エネ技術とその効果を分析することにより,装置側における完全液冷化と施設側における環境への自然冷却を実現できれば,より高い省エネ効果,更には高温排熱の再利用も期待できる.

5. おわりに

高密度実装されたスパコンの熱設計において,冷却能力の向上と効率化の推進は最も重要な課題である.従来の空冷技術の対応限界が近づいてきているため,設置環境におけるデータセンターの熱管理を含め,冷却方式と対策技術の再考および革新が必要である.その際,伝熱工学における熱伝達能力と熱力学効率の分析に基づき,熱流体解析や構造検証を通じて,課題を切り拓く新たなイノベーションと技術革新が非常に重要である.

計算機装置の冷却において,現行技術や部品の整合と複合化,新規部材の組み込みにより,空冷方式の能力と効率は一定程度伸びているが,液冷を組み込んだ複合冷却方式の適用は,抜本的な改善効果が検証されており,今後の実装にとって必要不可欠な技術だと考えられる.液冷方式では,スパコンの安定稼働と信頼性強化と共に,エネルギー利用効率の向上および装置排熱の再生利用も期待される.

参考文献

- [1] Top 500 press release, June 2020
<https://www.top500.org/news/japan-captures-top500-crown-arm-powered-supercomputer>
- [2] Wei, J., Challenges in Cooling Design of CPU Packages for High-Performance Servers, Heat Transfer Engineering, Vol. 29, No. 2 (2008)
- [3] Wei, J., Hybrid Cooling Technology for Large Scale Computing Systems, ASME Proceedings of InterPACK2011, Oregon, USA (2011)
- [4] ASHRAE TC9.9, Thermal Guidelines for Data Processing Environments, Fourth Edition (2015)
- [5] Wei, J., Liquid Cooling, Opportunities & Challenges toward Effective and Efficient applications, Proceedings of ICSJ Symposium, Kyoto, Japan (2019)
- [6] Hennessy, J. L. et al., A New Golden Age for Computer Architecture, Communications of the ACM, Vol.62, No.2 (2019)
- [7] Emerson Network Power Report, Data Center 2025: Exploring the Possibilities (2014)
- [8] Shehabi, J. et al., United States Data Center Energy Usage Report, Lawrence Berkeley National Laboratory Document No. LBNL-1005775 (2015)

パワーエレクトロニクス機器の熱設計
—スイッチング電源装置の熱モデル化手法—

*Thermal Management Technologies of Power Electronic Equipment
- Thermal Modeling Method for Switch Mode Power Supply -*

小泉 雄大

Katsuhiko KOIZUMI

1. はじめに

電子機器の冷却研究分野は、大型計算機の開発が盛んになった1970~1980年台から、1980年台中盤に登場するラップトップ型と呼ばれるパソコンに代表される小型電子機器の増大する発熱密度に対応する冷却設計技術の研究開発にけん引されてきた[1][2]。これらの研究成果をもとにして、電子機器熱設計の研究分野は広がりを見せており、その一つにパワーエレクトロニクス機器がある[3]。これは、電力の「変換」と「制御」を行う機能を半導体電子回路と受動電子部品を駆使して開発された機器であり、具体的にはモータを駆動するインバータ装置や、IC (Integrated Circuit) などの電子部品を動作させるための直流安定化電源装置 (スイッチング電源装置) が挙げられる。

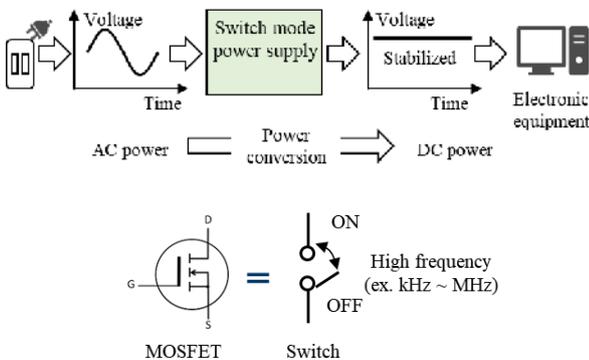


図1 スwitchング電源の電圧安定化動作

図1に、コンセントから供給される交流電圧(時間とともに電圧が変化する)を、電子機器が動作するために必要な直流電圧(12Vや5V、3.3Vなどの安定電圧)に変換するスイッチング動作の模式図を示す。スイッチング電源装置などのパワーエレクトロニクス機器の基本的な動作原理は、MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) に代表される半導体スイッチング素子

を用いて高周波(一般的な産業用電源装置で数十kHz~数百kHz)でON/OFFし、その時比率を可変することで電力の変換と制御を行う。

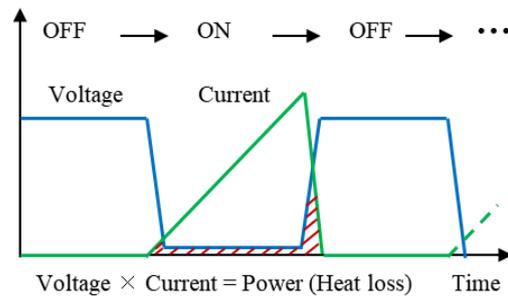


図2 スwitchング素子の発熱損失

MOSFETがスイッチング動作を行う際には、図2に模式的に示す電力損失(発熱)が発生する。ON状態においては、MOSFETのオン抵抗に流れる電流による発熱損失と、ONとOFFの切り替わりのタイミングではスイッチングスピードに依存するクロス損失が発生する(図2斜線部)。一般的に、スイッチング周波数を高周波化するほどチョークコイルなどの内部構成部品の小型化に有利となるが、MOSFETなどのスイッチング素子の発熱損失はスイッチング周波数に比例して増大するため[4]、部品ごとの発熱分担を考慮した装置全体としての熱設計が重要となる。

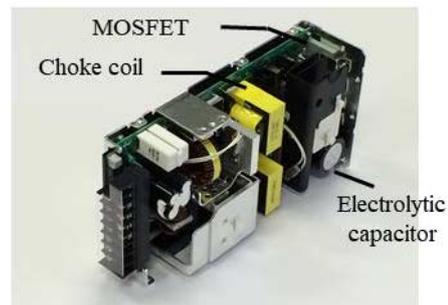


図3 スwitchング電源装置の部品実装例

図3に、一般的な産業用スイッチング電源装置における主要部品の実装状態を示す[5]。MOSFETやチョークコイル、アルミ電解コンデンサなどの部品が、規定の外形寸法に収まるようにヒートシンクなどの放熱部材とともに高密度に配置されている。この実装設計においては、前述した部品発熱を適切にマネジメントした熱設計が重要となる。チョークコイルやアルミ電解コンデンサには、半導体スイッチング動作による高周波電流（図2参照）が流れることによる発熱損失が発生するため、MOSFETなどの半導体部品と合わせてパワーエレクトロニクス機器における重要な熱設計対象部品である。

本稿では、パワーエレクトロニクス分野における熱設計技術の研究開発が今後どのようなドライバーで進むかの事例として適用分野の社会・技術の最新動向を概観したのち、設計現場における熱設計のための熱モデル化研究の内容について、スイッチング電源装置を事例として紹介する。

2. パワーエレクトロニクス分野の社会・技術動向

2.1 スマートエネルギーシステムの普及

スマートエネルギーに関わる取り組みは、情報通信技術を活用した賢いエネルギーマネジメントを行うという意味合いで、実証事業や社会実装に向けた取り組みが行われている。スマートグリッドやスマートハウスなど、ビルや家庭などの需要家側と供給側（電力会社など）の間での電力需給制御や、太陽光発電などのグリーンエネルギーの利活用、さらにはスマートシティ・スマートコミュニティと呼ばれる交通システムや行政サービスと一体となった取り組みが行われている。国内では、2011年~2015年に行われた「次世代エネルギー・社会システム実証事業」[6]が代表的である。2016年度からは、バーチャルパワープラント（分散型エネルギーリソースを1つの発電所のように機能を提供するしくみ）[7]に関する実証事業が継続されており、当分野での活発な技術開発と社会実装検討が進められている。

図4に、スマートエネルギーシステムへのパワーエレクトロニクス機器の適用例を示す。直流（Direct current :DC）の太陽光発電電力を交流（Alternating Current :AC）電力に変換するDC-ACインバータや、電気自動車の充電器（AC-DCコン

バータ）が、HEMS（Home Energy Management System）と呼ばれる管理システムの制御のもとで用いられている。

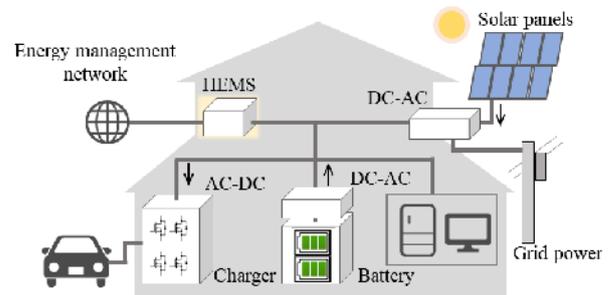


図4 スマートエネルギーシステムへのパワーエレクトロニクス機器の適用例

2.2 自動車の電動化

自動車業界では“CASE”（=ケース）と言われる重点項目がこれからの安全・安心対策や環境対応のために注目されている。これは、コネクテッド、自動運転、シェアリング&サービス、電動化（CASE: Connected, Autonomous, Shared & Service, Electric）を示しており、さまざまな取り組みが始まっている[8]。パワーエレクトロニクス分野と特に関連が深いのは電動化である。図5に、電気自動車のシステム構成の一例を示す。モータを駆動するインバータ、高圧バッテリーから12V補器バッテリーを充電するためのDC-DCコンバータ、車載充電器などの機器が多く使用されることから、パワーエレクトロニクス分野の市場のけん引役となる可能性が高いと考えられている[9]。

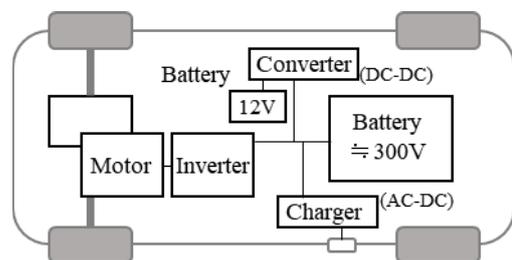


図5 電気自動車のシステム構成

2.3 半導体スイッチングデバイスの高性能化

現在、スイッチング用半導体素子としては、シリコン（Si）をもちいた素子が主流であるが、シリコンカーバイド（SiC）および窒化ガリウム（GaN）を用いた素子が次世代素子として期待されている

[10]. SiC は、SBD (Schottky Barrier Diode) 用途で最初に市場投入され、スイッチング電源装置では力率改善 (Power Factor Correction :PFC) 回路の整流ダイオード用途で既に実製品に適用されている。SiC-MOSFET や GaN デバイスのパワーエレクトロニクス機器への普及は、低コスト化や高速スイッチングの優位性を生かすためのデバイス周辺回路技術の開発とともに、今後の普及が期待される。

3. スwitching電源装置の熱モデル化手法

3.1 熱設計課題

機器の熱設計においては、大きく二つの課題がある。電子部品の熱モデリングの課題と、電子部品の発熱量の見積もりに関する課題である、著者らはスイッチング電源装置を対象として、電子部品の熱モデル化に関する研究、および消費電力推定誤差が解析結果に及ぼす影響の検討[4]を行ってきた。本稿では熱モデル化の取り組みに関して紹介する。電子部品は個々それぞれ特有の発熱特性や伝熱構造を持つため、解析対象機器内部の電子部品の熱モデル化の作業においては、電子部品の発熱特性や伝熱構造をふまえたコンパクトかつ実用的な熱モデル化が必要となる。本稿では、チョークコイルとアルミ電解コンデンサについて、具体的な熱モデル化手法の研究事例を紹介する[11][12]。

3.2 チョークコイルの熱モデル

図6に、チョークコイルの外観と断面構造を示す。これは層巻型と呼ばれるチョークコイルであり、構造の特徴は巻線を樹脂製のボビンに巻き付け、ボビンにフェライト製コアを取り付けた構造となっている。電子機器の熱設計においては、熱流体シミュレーションなどのCFD (Computational Fluid Dynamics) を基盤技術とした解析ツールが用いられている。ここで、熱モデル化における考慮点として巻線部の等価熱伝導率について説明する。巻線部の構造は図7に模式的に示すように細銅線が密に巻かれた状態になっている。各細銅線の表面には薄い絶縁コーティングが施されているが、この絶縁コーティングは導体部の銅に対して非常に低い熱伝導率であるため、巻線ブロックとしての等価熱伝導率は周方向と垂直方向、および半径方向で異方性がある。垂直方向と半径方向の等価熱伝導率は、解析的および実験的な検討の結果か

ら約 $2W/(m\cdot K)$ と見積もることができ、これは周方向の等価熱伝導率約 $352W/(m\cdot K)$ に対して 100 倍以上小さい値である。

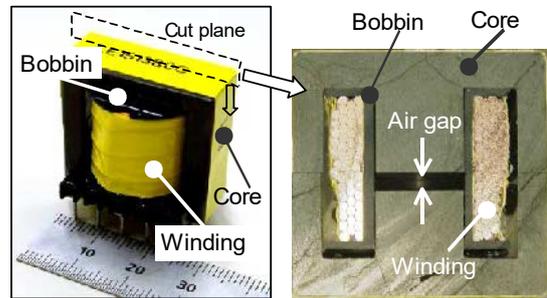


図6 層巻型チョークコイル

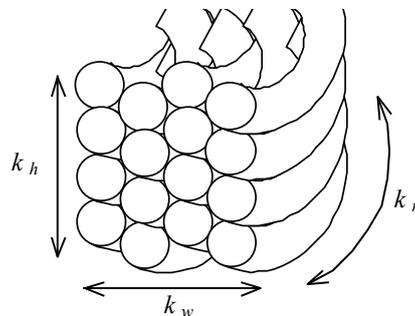


図7 巻線部断面 (模式図)

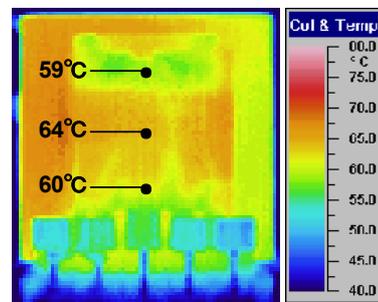
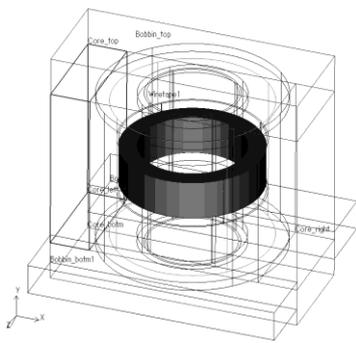
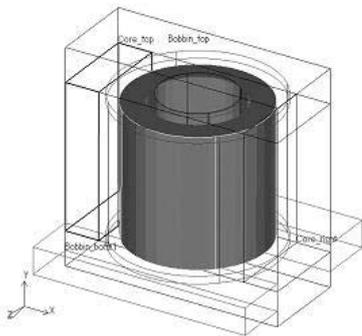


図8 チョークコイルの巻線表面温度分布

実際のチョークコイルの表面温度分布の特徴を見てみると、図8に示すように上下方向の中央部温度が上端部および下端部と比較して帯状に高くなっていることが確認できる。これはエアギャップ (図6参照) 近傍の漏えい磁束による近接効果の影響で、エアギャップ近傍の巻線に発熱密度の高い部分が発生していることが影響している。このチョークコイルの熱解析モデル構造を図9に示す。巻線部はエアギャップ近傍の高発熱密度部分と、巻線部全体の2つのブロックで構成している。



(a) ギャップ近傍部



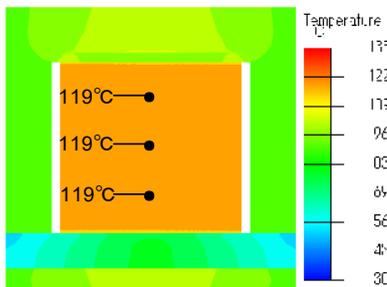
(b) 巻線全体部

図9 チョークコイルの熱モデル構造

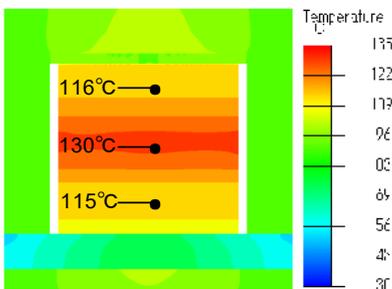
次に、シミュレーション結果を図10に示す。図10(a)は巻線ブロック部に等方性熱伝導率を設定した場合の巻線表面温度分布のシミュレーション結果である。巻線表面の温度分布は一様であり、実際の部品に見られる巻線中央の高温部分は再現されない。図10(b)は巻線ブロック部に異方性熱伝導率を設定した場合の巻線表面温度分布のシミュレーション結果である。実際の巻線表面にみられるような温度分布を確認することができる。機器の設計においては、部品温度は各種製品安全規格に定める温度や、材料の定格温度に対して評価される。この際、部品の最も高い温度となる部分で評価を行うため、チョークコイルなどの巻線部品の熱モデル化においては巻線部ブロックの異方性熱伝導率の考慮が必要となる。

3.3 アルミ電解コンデンサの熱モデル

アルミ電解コンデンサはパワーエレクトロニクス機器において整流平滑やノイズ除去用途などに用いられており、欠かすことができない構成部品の一つである。熱設計の視点では、アルミ電解コンデンサの温度は機器の寿命を決める設計要素の一つである。これは、アルミ電解コンデンサの寿命までの時間はアレニウス則に従い、温度が10℃上がると寿命はおおむね半分になる(10℃2倍則)ことによる。図11にアルミ電解コンデンサの内部構造の一例を示す。電極のアルミ箔と電解紙を合わせて同心円状に巻き回した本体素子(エレメント)に電解液を含浸させ、電極リードを引き出して円筒形状のアルミ製ケースに収めて封口ゴムで封止する構造となっている。外観は単純な円筒形であるが、内部は詳細をモデル化するには複雑すぎる構造である。



(a) 等方性熱伝導率



(b) 異方性熱伝導率

図10 表面温度分布シミュレーション結果

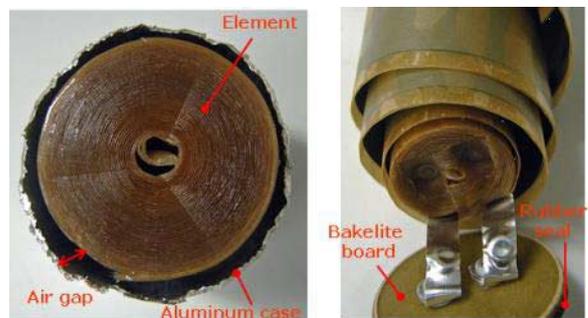


図11 アルミ電解コンデンサの内部構造

図 12 は、機器内部においてアルミ電解コンデンサの温度上昇に関わる伝熱経路を示したものである。アルミ電解コンデンサの熱モデル化の視点として、伝導、対流、放射の3形態を考慮できることが必要である。伝導伝熱経路としては、プリント基板に面実装されたICやチップ抵抗などの発熱が電解コンデンサのリードを伝わる経路を考慮する必要がある。アルミ電解コンデンサ近傍にヒートシンクなどの発熱部品が配置される実装形態を考慮して、周囲発熱部品からの対流による伝熱とふく射による伝熱を考慮する必要がある。

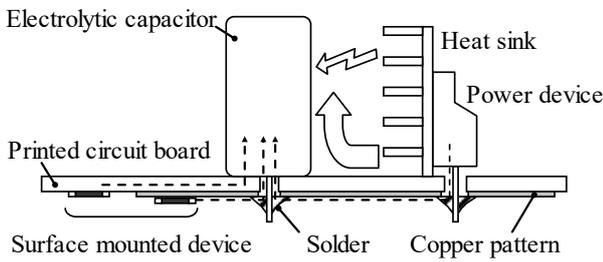
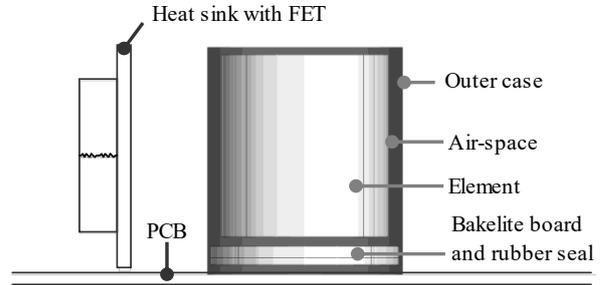


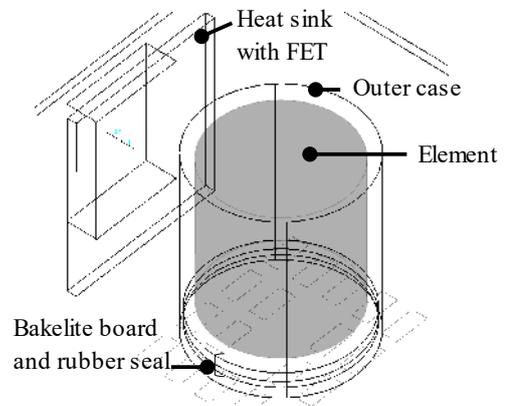
図 12 電解コンデンサまわりの伝熱経路

本稿では、アルミ電解コンデンサを3ブロック要素に分けてモデル化する方法[12]での熱モデルとシミュレーション結果を示す。図 13 にアルミ電解コンデンサの熱モデルを示す。アルミ電解コンデンサ温度は自己発熱の他に周囲部品の影響を受けるため、プリント基板 (Printed Circuit Board :PCB) とアルミ電解コンデンサの側面に配置される発熱体ヒートシンクを合わせてモデル化した。プリント基板は熱伝導率 $0.35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ の等方性熱伝導率を設定した。アルミ電解コンデンサは外装ケース、エレメント、および封口ゴム部の3要素で構成し、外装ケースとエレメント間には空気層 (熱伝導率 $0.024 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) を設定した。外装ケースは空気層を構成するオブジェクトの表面物性として厚み 0.52 mm の熱伝導率 $205 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ を設定することで等価的にモデル化し、表面放射率を 0.9 に設定した。エレメントは電極アルミ箔と電解紙を合わせて同心円状に巻き回した構造となっているため、熱伝導率の異方性を考慮し、高さ方向 $81.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 、面方向 $0.34 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ の熱伝導率を設定した。図 14 はこの熱モデル化手法を用いた場合の表面温度分布のシミュレーション結果である。電解コンデンサ表面温度分布における近

傍配置高温部品の影響をシミュレーションすることができている。



(a) 側面図



(b) 等角図

図 13 アルミ電解コンデンサの熱モデル

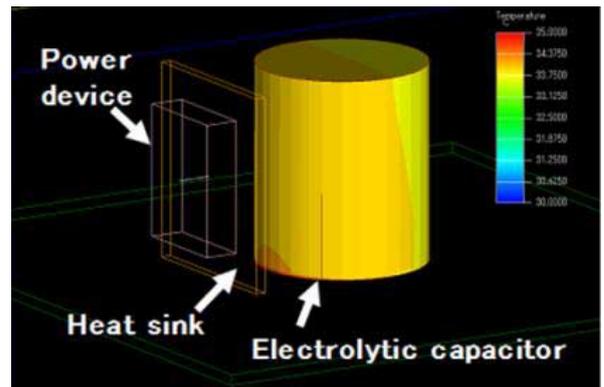


図 14 表面温度分布のシミュレーション結果

4. まとめ

パワーエレクトロニクス機器の熱設計に関して、電力変換動作に基づく電力損失 (部品発熱) の発生メカニズムを示し、機器設計における熱設計の

重要性を述べた。また、熱モデル化研究の事例としてチョークコイルとアルミ電解コンデンサの具体例をご紹介した。パワーエレクトロニクス分野の研究開発は、本稿で紹介したスマートエネルギーシステムの普及や自動車の電動化、および半導体スイッチングデバイスの高性能化をはじめとして多くの取り組みにけん引されていくものと考えられ、熱設計技術の研究開発もこの中で重要な役割を果たしていけるよう貢献したい。

参考文献

- [1] 石塚 勝, 電子機器の冷却技術: ここ10年の発展, 伝熱, Vol.41, No. 167 (2002) 1-9.
- [2] 中山 亘, 電子機器の熱解析: システムアプローチのすすめ, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.4 No.5 (2001) 392-397.
- [3] 石塚 勝, 電子機器の熱設計-基礎と実際-, 丸善 (2003).
- [4] 小泉雄大, 上坊寺明人, 長原邦明, 石塚 勝, 電気回路設計との統合によるスイッチング電源の熱設計手法の開発(自然空冷式電源の場合), 日本機械学会論文集(B編)70巻690号 (2004) 488-495.
- [5] 小泉雄大, パワーエレクトロニクス機器設計における熱シミュレーション技術, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 18, No. 2 (2015) 100-103.
- [6] 経済産業省, 次世代エネルギー・社会システム実証事業 ~総括と今後について~, <https://www.meti.go.jp/> (2016).
- [7] 経済産業省, バーチャルパワープラント・ダイヤモンドリスポンスについて, <https://www.meti.go.jp/> (2020).
- [8] カーエレクトロニクス研究会, 次世代通信システムと環境対応で切り拓く新たな自動車社会, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 22, No. 1 (2019) 67-71.
- [9] パワーエレクトロニクス研究会, パワーエレクトロニクスにおける実装技術の展望と現状, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 23, No. 1 (2020) 83-88.
- [10] 山本秀和, パワーエレクトロニクス産業の動向とパワーデバイス実装への要求, エレクトロニクス実装学会誌, Vol. 20, No. 7 (2017) 422-448.
- [11] K.Koizumi and M.Ishizuka, Thermal Modeling and Experimental Verification of High-Frequency Inductors, Thermal Science & Engineering, Vol.12, No.3 (2004) 19-26.
- [12] 小泉雄大, 石塚勝, 中川慎二, 畠山友行, 基板自立型アルミ電解コンデンサの熱解析モデル, Thermal Science & Engineering, Vol.18, No.2 (2010) 57-69.

鉄道および自動車駆動用パワーエレクトロニクス冷却技術

Cooling Technologies of Power Electronics for Railway System and Electric Vehicles

堀内 敬介, 西原 淳夫, 中津 欣也 (日立製作所 研究開発グループ)
 Keisuke HORIUCHI, Atsuo NISHIHARA, Kinya NAKATSU (Hitachi, Ltd. Research & Development Group)
 e-mail: keisuke.horiuchi.ou@hitachi.com

1. はじめに

低炭素社会実現のために移動体の電動化が進んでいる。特に、鉄道や自動車は生活の一部となっており、社会への影響が大きい。電化のために欠かせない部品はモータ・電池・インバータである。これら主要部品は、許容温度や発熱量が異なるため、別々に冷却設計をする必要がある。

本特集では弱電系（民生用電子機器）と強電系（パワーエレクトロニクス機器）の相違点にも触れる目的で、インバータの冷却に関する技術の進歩に特化して説明する。

2. 弱電系と強電系の相違点

2.1 半導体素子材料および製造技術の進歩

半導体と言えば、CPU（Central Processing Unit）などのLSI（Large Scale Integration）のイメージが強いが、インバータのような電力変換器向けの半導体はパワー半導体と呼ばれ、主な違いを表1に示す。最近ではシリコンだけでなく、SiCやGaNなどの新材料も高温対応材料として注目されているが、基本的にはLSIで培ったシリコンを原材料とした製造技術を基にしてパワー半導体は作られている。よって、ウェハの大口径化と微細加工化に対応する歩留まりやスループット向上に関する製造技術はLSIを追いかけるように日々進歩しておりコストダウンの要求に応じている。

表1 LSIとパワー半導体の相違点

	LSI	パワー半導体
機能	演算、記憶	電力制御
主な原材料	シリコン 12-18inch ウェハ	シリコン 6-8inch ウェハ
通電領域	片面の表面	厚さ方向貫通
実装方法	Ball Grid Array	ハンダ、焼結材
電圧	弱電 (48V 未満)	強電 (48V 以上)

2.2 電流および電圧の違いによる冷却課題

図1は、パワーエレクトロニクス機器（本論文では特に鉄道や自動車などの移動体の例）を対象とした電流や電圧の範囲を示す。パワー半導体はLSIと比較して、移動体の駆動用モータを動作させるために高電圧および大電流を必要とする。

高電圧に適した絶縁構造を実現するためには、表1に示したように、半導体の厚さ方向に貫通するように電流を流す構造となる。高電圧ほど半導体が厚くなり剛性が高くなるため、熱変形時に半導体ハンダ付け部の相当塑性ひずみが大きくなる。これが熱疲労寿命に対する製品課題の1つである。これを解決するために最近では焼結材を用いた寿命向上に関する研究も多い[1]。また、ベース金属が熱応力によって反ってしまうことによるグリースのポンプアウトもパワエレ特有の課題であり、現象解明に向けた研究もされている[2]。

大電流の要求に応えるためには、半導体素子面積を大きくすることが効果的だが、一方で面積を大きくするほど歩留まり悪化の課題がある。製造面で素子サイズ大型化には限界があるため、結果的に素子を複数並列に実装したパワーモジュールの広い床面積を均熱冷却することがLSIに比べ新たな課題となる。

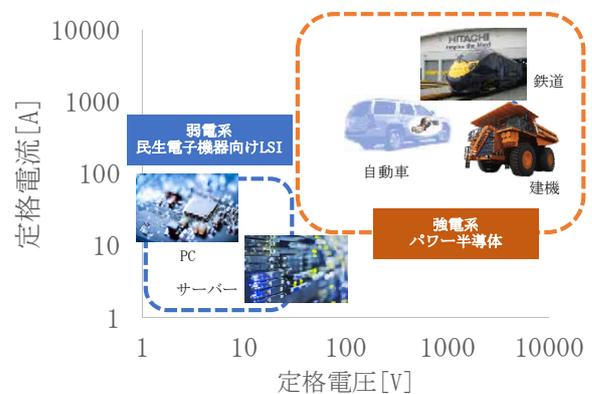


図1 アプリケーション毎の定格電圧と定格電流

3. パワーモジュールの冷却構造

3.1 パワーモジュール内部構造

強電系のパワーモジュールでも鉄道用と自動車用は設計思想や冷却構造に違いがある。本章では、その違いについて具体的に説明する。

まずパワーモジュールの一般的な構造を図2に示す。ワイヤで接続された複数のパワー半導体は、ハンダや焼結材などのダイボンドを介して絶縁基板上の表面金属パターンに実装されている。絶縁基板の裏面金属パターン側はベース金属に接続されており、半導体の熱はベース金属に放熱される。このパワーモジュールは、熱伝導グリスなどのTIM (Thermal Interface Material) を介して空冷フィンもしくは水冷ジャケットに搭載され放熱される。

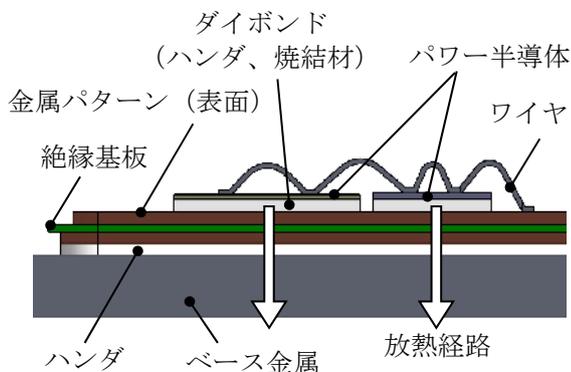


図2 パワーモジュール内部構造

パワーモジュール内の温度分布について、図3に示すように半導体素子レイアウトを基盤目から千鳥配列に変更することによって最大温度を4°C低くでき、熱抵抗に換算して20%低減するような検討もされている[3]。

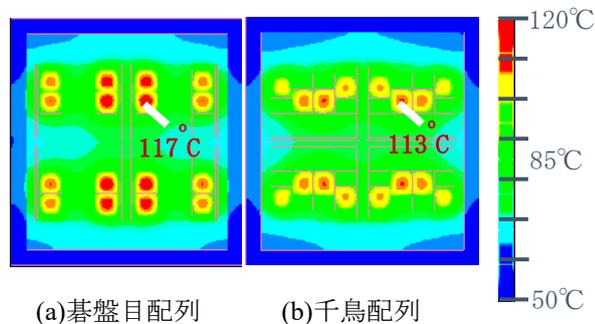


図3 半導体レイアウト最適化による温度低減[3]

3.2 鉄道用/自動車用のパワーモジュール相違点

表2に鉄道用/自動車用パワーモジュールの相違点を示す。図1でも示したが鉄道用は自動車用には比べるとモジュールあたりの電流が大きいので、モジュール内のパワー半導体の数が多くパワーモジュールサイズも大きい。個々のパワー半導体への電流アンバランスが生じないように端子や半導体のレイアウトは各社で工夫されている。モジュールの長寿命化は年々進んでいるが、メンテナンスや定期交換を頻繁にする文化があるか否かで、冷却手段は水冷か空冷に分かれる。また絶縁基板とベース金属の熱膨張係数差によって、ハンダにクラックが生じる懸念があるため、比較的大きなサイズの鉄道用パワーモジュールのベース金属材料は低熱膨張率の合金 (AlSiC や MoCu など) が使われることが多い。一方、自動車用のパワーモジュールは鉄道用には比べると小型化が可能のため、ベース金属は安価で高熱伝導のCuやAlを用いることが多い。鉄道用のモジュールは業界標準形状が存在し、車両メーカーから見て電気品はインターフェースが同じ複数社のモジュールでリスク分散をしている。一方で、自動車用のモジュールは量産台数が多いため、顧客の車種に応じたカスタム設計が可能で、各社独自形状を採用している。

表2 鉄道用/自動車用パワーモジュールの相違点

対象	鉄道[4]	自動車[5]
電圧 [kV]	1.2~6.5	0.6~1.2
電流 [A]	1200~ (4モータ@3.3kV)	300~
冷却手段	国内 空冷が主	海外 水冷が主
ベース金属材料	AlSiC, MoCu 低熱膨張材料	Cu, Al 高熱伝導材料
形状	業界共通形状	各社独自形状

3.3 鉄道用パワーモジュールの冷却構造

図4および図5に国内で主流の鉄道用空冷構造を示す。前述の通り、パワーモジュール均熱冷却の課題は鉄道用の大きなサイズで顕在化する。空冷は水冷に比べて、風温上昇の影響を大きく受けるため、沸騰冷却を用いた熱拡散による均熱化が有効と考えられている。図4は密閉二相サーモサイフォンによる冷却構造である。パワーモジュールは冷却器の下面に搭載され、サイフォン冷却器内の冷媒は、パワーモジュールの加熱によって気化し、蒸気になって上昇する。上昇した蒸気は、フィン部で冷却され凝縮し、再度液相に戻り、冷却器下面部に供給される。

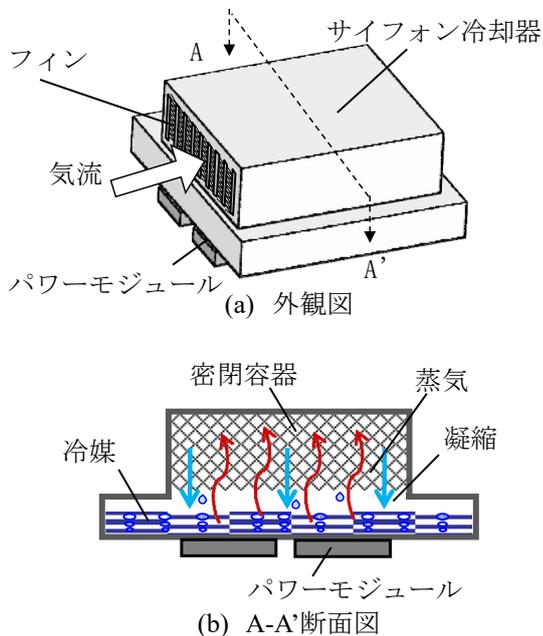


図4 密閉二相サーモサイフォンによる空冷構造

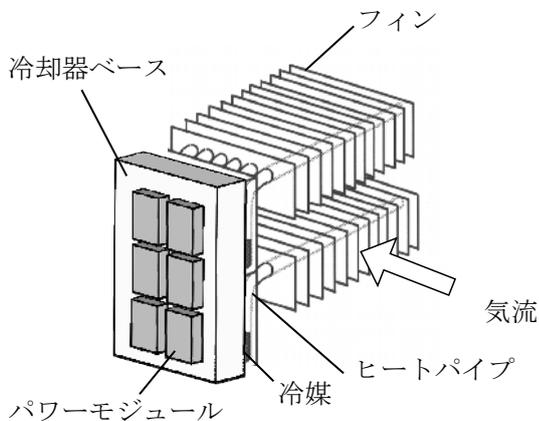


図5 フィン付きヒートパイプによる空冷構造

図6および図7に、海外で主流の冷却構造を示す。図6は平板フィンヒートシンク空冷構造である。この構造は、押出やカシメ加工で製造可能なため安価である一方、図4や図5で示した沸騰冷却は用いないため、均熱効果が小さい。よって、気流はブローを用いた強制空冷で大風量を確保することが求められる。海外ではブロー冷却は一般的だが、国内ではブローによる騒音を回避するために、ブローを用いず走行風で冷却することも多く、その結果として図5で示したヒートパイプ冷却器を採用している。

図7は循環水冷/液冷構造である。海外の場合は、特に長距離鉄道の場合は、大きな牽引力(=動力)が必要となり水冷構造が適用されることが多い。この構造ではパワーモジュールで発生した熱は冷媒でラジエータに輸送され、ラジエータで気流によって外気に放出される。ラジエータで冷媒は元の低温に戻り、ポンプによって水冷ジャケットに再供給され循環する。

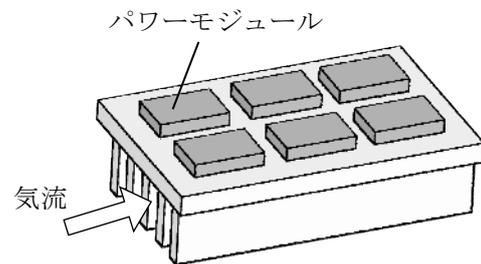


図6 平板フィンヒートシンクによる空冷構造

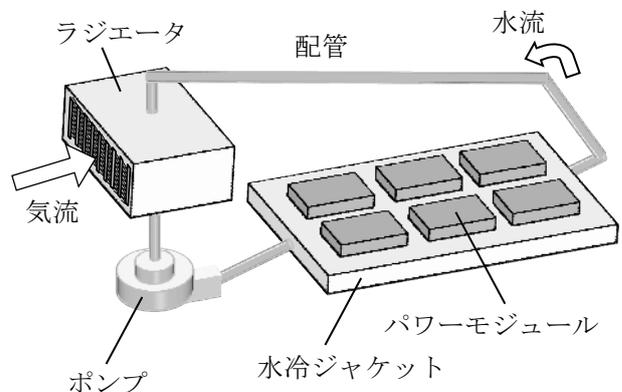


図7 循環水冷/液冷構造

3.4 自動車用パワーモジュール冷却構造の進化

自動車の分野では客室スペースを確保した上でエンジンルームの限られたスペースに実装しなければならないため、小型高密度実装が求められる。図8は、冷却構造の進化を示しており、毎年インバータパワー密度は増加する傾向にある。図内の間接水冷方式と直接水冷方式と両面冷却方式の詳しい構造は図9～13で説明する。

図9は鉄道用と同じ間接水冷型片面冷却方式の断面図である。パワーモジュールと水冷ジャケットは別体であり、両者は熱伝導グリスで熱的に接続されている。

図10は直接水冷型片面冷却方式の断面図である。図9に比べて熱伝導グリスを除去しており、フィン付きベースを有するパワーモジュール自体で、水冷ジャケットの開口部にフタをすることを特徴としている。

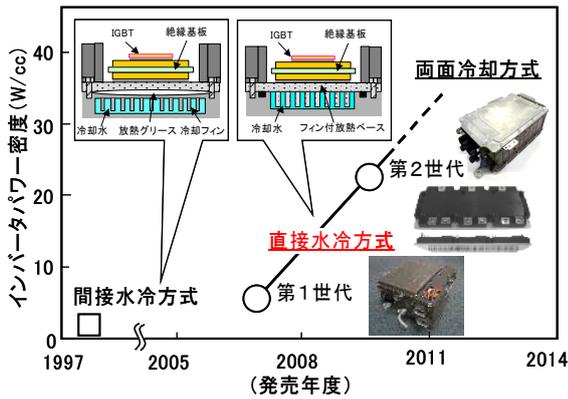


図8 インバータパワー密度増加トレンド[6]

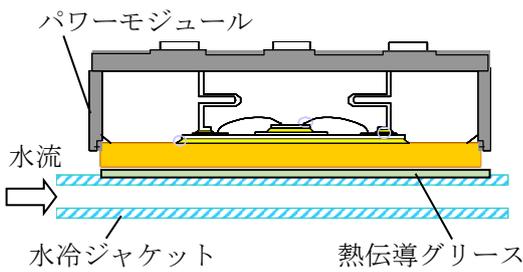


図9 間接水冷型片面冷却方式

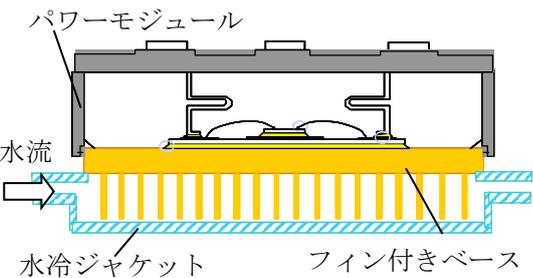


図10 直接水冷型片面冷却方式

図11に間接水冷に対する直接水冷の熱抵抗低減効果のイメージ図を示す。間接水冷構造のグリス部の熱抵抗は全体の約30%~50%を占めているため、グリスを削減することで冷却性能が増し、製品の更なる小型化もしくは出力電流増加が可能となる[7]。

図12に間接水冷型両面冷却方式の断面を示す。半導体両面にリードフレームと呼ばれる電極金属をダイボンド材で接合し、絶縁機能を有する樹脂でモールドする構造が一般的な形状である。

図13は直接水冷型両面冷却方式(水冷ジャケットは非図示)であり図10と似たような構成にしている。ただし、絶縁基板の代わりに絶縁シートが両面に実装される構造が異なる点である。

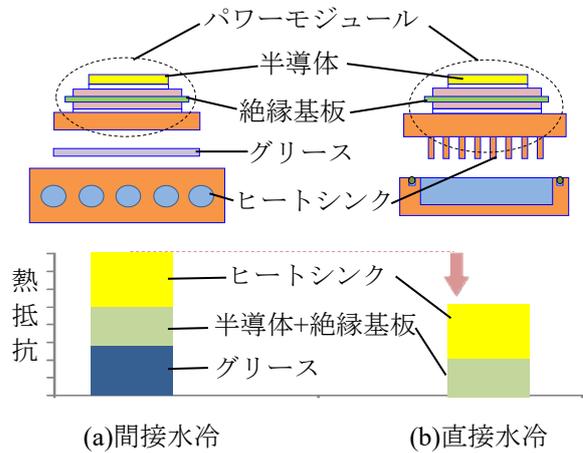


図11 間接水冷と直接水冷の熱抵抗の比較[7]

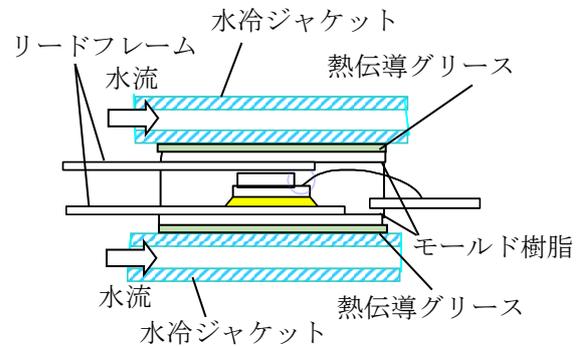


図12 間接水冷型両面冷却方式

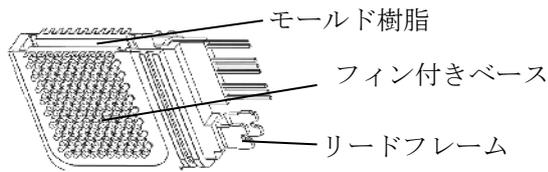
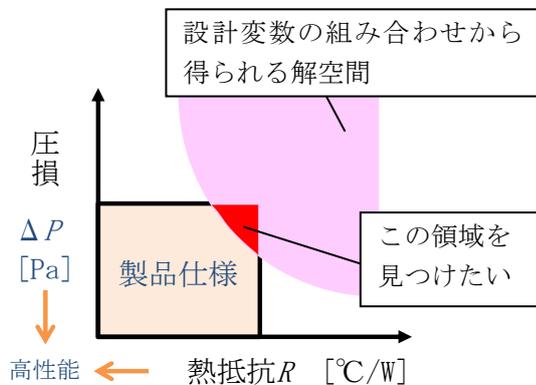


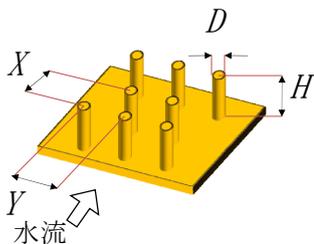
図 13 直接水冷型両面冷却方式[8]

直接水冷構造においては片面冷却方式でも両面冷却方式でもフィン付きベースのフィン形状は、製造性や組み立て性だけでなく冷却性能に直結する。例えば千鳥配列のピンフィンヒートシンクを対象に、2つの目的関数（熱伝達率と圧力損失＝圧損）のトレードオフ関係を、4つの設計変数（形状パラメータ）で整理し、製品仕様に入る設計変数の組み合わせを自動計算する多目的最適化手法に関する研究もされている[9]。

また、パワーモジュールと水冷ジャケットは別体のため、必ずピンフィン先端と水冷ジャケットの間に隙間が生じる。この隙間に、ある程度の冷媒がバイパスしてしまうため、直接水冷構造の冷却性能を正確に予測する目的で、熱伝達率や圧損の実験式を新たに構築する取り組みもある[10]。



(a) 2つの目的関数（冷却性能）



(b) 4つの設計変数（形状パラメータ）

図 14 ピンフィンの多目的最適化手法[9]

4. おわりに

鉄道用と自動車用それぞれのパワー半導体を製品として成立させるためには、冷却技術だけでなく、その周辺技術ある熱応力解析や熱疲労寿命予測、インダクタンス解析や電流アンバランス解析、グリースポンプアウトメカニズム分析など、多くの知識を必要とする。これらは、従来は無かった新しい課題であるため、古くて新しい伝熱技術が応用できる。

国内や海外の地域性や文化、事業者やメーカーの考え方によっても冷却採用方式が異なるため、顧客ニーズに応じた柔軟な設計変更対応力と総合設計力が今後期待される。

参考文献

- [1] Yasui, K. et al., A 3.3kV 1000A High Power Density SiC Power Module with Sintered Copper Die Attach Technology, PCIM Europe (2019).
- [2] 小西, 他 2 名, 熱サイクルにともなう熱伝導グリースのポンプアウト現象に関する可視化実験, 日本機械学会論文集, 83-845 (2017) 16-00243.
- [3] Azuma, K. et al., NEW 3.3kV IGBT Module with Low Power Loss and High Current Ratings, PCIM Europe (2013).
- [4] https://www.hitachi-power-semiconductor-device.co.jp/application/rail_inverter/index.html
- [5] <https://motor-fan.jp/tech/10009627>
- [6] 中津, 他 3 名, 環境対応自動車を支える次世代インバータ技術, 日立評論 2012 年 4 月号.
- [7] Kurosu, T., et al., Packaging Technologies of Direct-Cooled Power Module, IPEC (2010).
- [8] 堀内, 他 4 名, 電力変換装置, 特許第 5851372 号(2016).
- [9] Horiuchi, K., et al., Multi-objective optimization of water-cooled pinfin heatsinks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 81 (2015) 760-766.
- [10] Horiuchi, K. and Nishihara, A., Experimental Verification of Model for Liquid-Cooled Staggered Pin Fin Heat Sinks with Top Bypass Flow, Journal of Energy and Power Engineering 7 (2013) 1487-1495.

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 —

*Thermal Design Approach for Small Surface Mount Components
- To Establish New Thermal Design Methodology for Electronic Devices -*

平沢 浩一 (KOA 株式会社)

Koichi HIRASAWA (KOA CORPORATION)

e-mail: ko-hirasawa@koaglobal.com

1. はじめに

テレビなどの家庭用電化製品から、車載電装機器まで、電気・電子機器を構成する多くの電子部品の実装形態が、スルーホール実装から、表面実装に移行して、既に四半世紀以上が経過した。これだけ長い期間使用されている表面実装用部品であるが、実は未だに合理的な熱設計が行える状態には無いものがある。本稿では表面実装用抵抗器（以下チップ抵抗器と呼ぶ）を例に、その理由と解決のための取り組み、および熱設計のトレンドについて解説する。

2. 熱設計に関する部品の仕様

2.1 リード付き部品の放熱形態と熱的な仕様

まず、スルーホール実装部品の代表としてリード付き抵抗器を例に放熱形態と仕様の関係を検証してみる。リード付き抵抗器は図1のような外観を持ち、プリント配線板（以降、基板と呼ぶ）のスルーホールにリードを挿入し、基板裏面の銅箔パターンにはんだ付けにより固定して使用する。図2は図1の抵抗器が実装された基板を25℃の自然対流環境に置き、定格電力の50%である2.5Wを印加した場合の放熱割合を計算した結果である。定格電力とは、一定の温度環境（抵抗器の場合には一般的に70℃）において連続的に印加できる部品仕様に定められた電力である。計算には図3のモデルを用いた。詳細は割愛するが、モデルは単純化[1]し、抵抗器本体は水平に置かれた円柱、リードはピンフィンで近似し、基板を経由した大気への放熱は別途求めたパターン幅ごとの熱抵抗 $R_{th_{ptn}}$ [°C/W] で与え、各部温度や放熱量はCFD (Computational Fluid Dynamics) を用いずに伝熱工学の経験式および解析解を組み合わせで求めた。リードと基板の接続点に流入している P_{adj} [W] は、プリント基板を経由した隣接部品の影響を考察する際に利用するもので、単独部品におけ

る自己発熱による放熱割合を算出する場合は0Wである。

なお、印加電力を定格電力の50%とした理由は、一般的に、電子機器メーカーは、安全のためにその会社独自の設計基準（以降内規と呼ぶ）を定めており「抵抗器は定格電力の50%以下（値は会社によって異なるが、以降本稿では50%として説明する）で使用する」となどの制限を設けているからである。筆者は家電メーカーにおいて電子機器の設計経験がある。電子機器の設計になじみの薄い方も多いと思われる本稿の読者に、必ずしも理詰めとは言えない電子機器の設計現場での熱設計を紹介するとともに、この内規がチップ抵抗器の熱設計に混乱をもたらす一因となっていることを説明する。

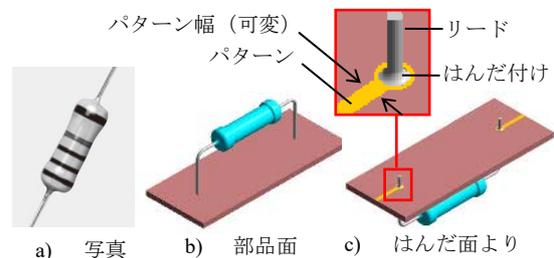


図1 リード付き抵抗器と実装形態

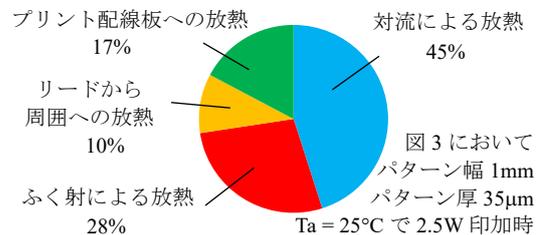


図2 リード付き抵抗器の放熱割合

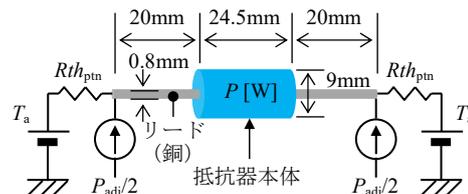


図3 リード付き抵抗器のモデル

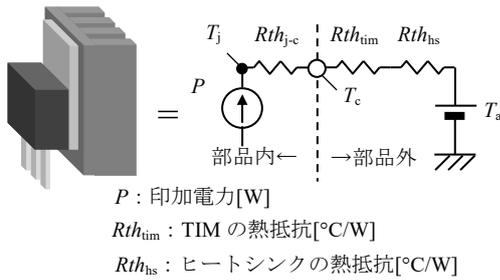


図4 トランジスタの放熱モデル

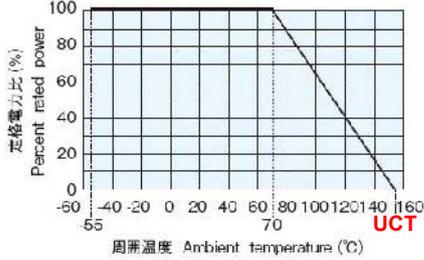


図5 抵抗器の負荷軽減曲線

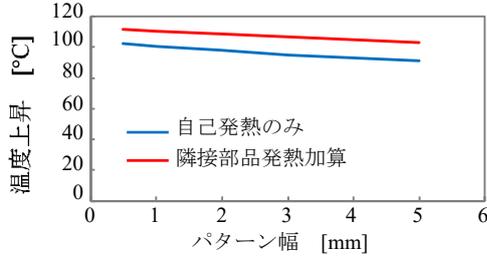


図6 リード付き抵抗器の温度上昇

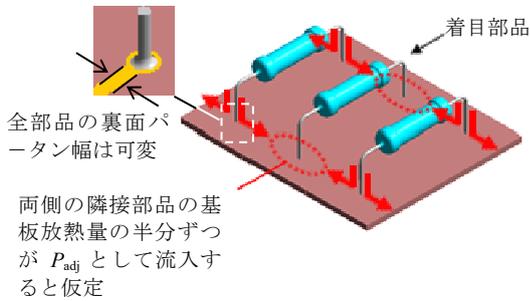


図7 隣接部品の発熱の影響

図2において、基板への熱伝導以外は大気への対流と周囲壁面（周囲空気と同じ温度と仮定）へのふく射による放熱である。本稿では、部品から基板への熱伝導による放熱を「基板放熱」と呼び、対流とふく射による放熱を「大気放熱」と呼ぶことにする。図2より、リード付き抵抗器は発生した熱の大部分を大気放熱によって放熱していることがわかる。このような放熱形態の部品を、本稿では「大気放熱型部品」と呼ぶことにする。

ここで、電気・電子機器設計者（以降単に機器設計者と呼ぶ）が部品を使用する際の熱設計とは

「決められた部分の温度を決められた値以下に保つこと」に他ならない。半導体であれば「ジャンクションの温度 T_j を $150\text{ }^\circ\text{C}$ 以下に保つこと」が熱設計の目標となる。図4がトランジスタの放熱経路を熱回路網で示したものである。上記の設計目標を達成するためには式(1)を満足するように筐体内部の温度 T_a [°C]を制御し、ヒートシンクやTIM（Thermal Interface Material）を適切に選定することが熱設計となる。

$$T_j = P(R_{thj-c} + R_{thim} + R_{thhs}) + T_a \leq 150 \dots (1)$$

ジャンクションとヒートシンクが接続されるケース背面間の熱抵抗 R_{thj-c} [°C/W]が明示されていなければ熱設計はできないので、部品側では R_{thj-c} が仕様として提供されており、システムティックな熱設計を可能にしている。また、ケース温度 T_c [°C]を測定することにより、式(2)を使用して直接実測できない T_j を確認することもできる。

$$T_j = R_{thj-c} P + T_c \dots (2)$$

これに対して、リード付き抵抗器の場合には、熱的な仕様は、定格電力と図5のような負荷軽減曲線[2]で提示されている。周囲温度に対して印加して良い電力が定められているだけである。図5をみると、抵抗器のどこかの温度が UCT（Upper Category Temperature：カテゴリ上限温度）を越えなければ良いと思われるかもしれないが、周囲温度 $70\text{ }^\circ\text{C}$ において定格電力を印加すると抵抗体の温度が UCT を超える抵抗器も多いため、UCT を半導体における T_j と同様に扱うことはできない[3]。図5は、供試抵抗器を恒温槽に入れて所定の電力を加えた場合に、一定時間経過後の抵抗値変化が一定範囲内に入っているかどうかを確認する試験によって求められた使用限界[4]である。リード付き抵抗器を使用する場合の熱設計の目標は、「周囲温度を負荷軽減曲線で示される温度以下に保つこと」ということになる。これが正しい目標であることを図3のモデルで確認する。図6は図1においてパターン幅を 0.5 mm から 5 mm まで変化した場合の抵抗器本体の温度変化を計算したものである。また、隣接部品の基板を介した放熱の影響を考察するために、隣接部品の基板放熱の熱量の 50% ずつが図7のように両側から P_{adj} としてリードとパターンの接合部に流入したと仮定した場合の温度変化も算出した。

図6より、リード付き抵抗器の場合にはパター

ン幅が変化しても抵抗器本体の温度はほとんど変わらず、隣接部品の有無による抵抗器本体の温度変化は10%程度であることがわかる。当然、抵抗器本体の温度は抵抗器への印加電力 P に概略比例すると考えられるし、周囲温度 T_a が変動すれば抵抗器本体の温度はその分シフトするが、それ以外に抵抗器本体温度を大きく変動させる要因はない。したがって、「周囲温度を負荷軽減曲線で示される温度以下に保つこと」は正しい熱設計の目標である。

ただし、ここで注意が必要なのは、図6からわかるとおり、印加電力が定格の50%であっても、抵抗器本体の温度が周囲温度に対して100℃も上昇することである。

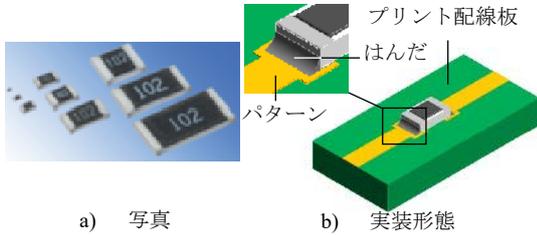


図8 チップ抵抗器と実装形態

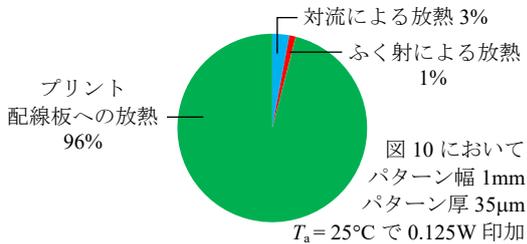


図9 チップ抵抗器の放熱割合

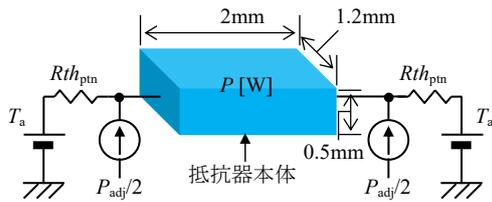


図10 チップ抵抗器のモデル

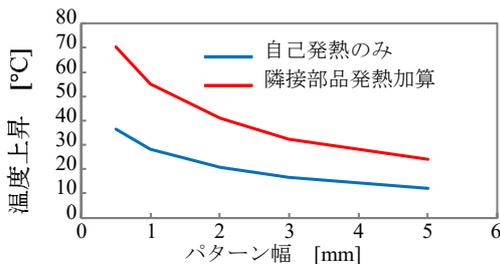


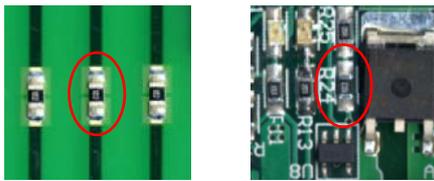
図11 チップ抵抗器の温度上昇

仮に $T_a = 50^\circ\text{C}$ の環境で定格電力を100%加えた場合には、抵抗器本体の温度は250℃にも達する。抵抗器は仕様内の使い方なので問題ないが、周囲部品が焼損する可能性が高い。これが、機器メーカーが、内規によって、抵抗器の印加電力を定格電力の50%に制限している理由の一つである。

2.2 表面実装部品の放熱形態と熱的な仕様

ここでは表面実装用部品の代表として、チップ抵抗器を例に、放熱形態と仕様の関係を検証してみる。チップ抵抗器は図8のような外観を持ち、基板の表面の銅箔パターンにはんだ付けにより固定して使用される。図9は図8の2012mmサイズ(長さ2mmで幅1.25mm)の抵抗器を基板に実装して25℃の自然対流環境に置き、定格電力の50%である0.125Wを印加した場合の放熱割合を計算した結果である。モデルはリード付き抵抗器同様、図10のような簡略化したものとした。リードは無く、抵抗器本体は単なる直方体とした。図9より、発生した熱のほとんどが基板放熱されることが分かる。このような部品を本稿では「基板放熱型部品」と呼ぶことにする。

現在、チップ抵抗器に対しても、熱的な仕様は図5のような負荷軽減曲線で提示されている場合が多い。これが正しいかどうか、図10のモデルで確認する。図11は、パターン幅の影響と隣接部品の発熱の影響を求めた、リード付き部品の図6に相当するグラフである。図11と図6は様相が大きく異なる。チップ抵抗器の場合には、パターン幅の変化や、隣接部品の有無によって抵抗器本体の温度は大きく変化する。すなわち周囲温度 T_a と印加電力 P のみならず、実装される基板の状況によって抵抗器本体の温度は大きく変化する。このような状況では、図5のような周囲温度と印加電力の関係のみの提示では設計目標にはなり得ない。しかしながら、設計目標になりうるリード付き部品の負荷軽減曲線と同じ形であるので、チップ抵抗器を使用して設計を行う機器設計者は図5の負荷軽減曲線を設計目標であると誤解していることが多い。チップ抵抗器においても、負荷軽減曲線は実験によって求められているが、実験は試験規格[4]に定められた推奨試験基板に実装した状態で実施されており、あえて設計目標という言葉を使うとすれば、図5は推奨試験基板と全く同じバ



a) 抵抗器メーカーの試験基板 b) 実装基板
図 12 試験基板と実装基板の比較

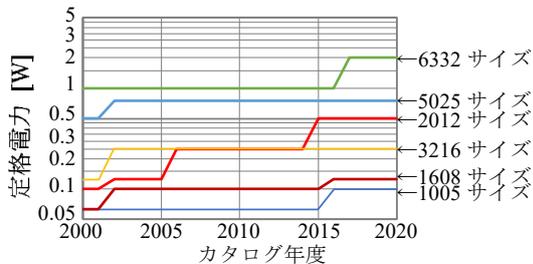


図 13 サイズ別最大定格電力の推移

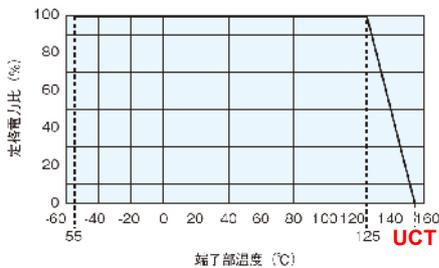


図 14 端子部温度による負荷軽減曲線

ターンを用いる場合のみに適用できる設計目標ということになる。図 12 は、推奨試験基板と電子機器内の実装基板を比較したイメージ図である。

チップ抵抗器に対して、図 5 の負荷軽減曲線は、一般には設計目標にはなり得ないにもかかわらず、機器設計者は設計目標として扱い、熱設計を行ってきた。これまでなぜ問題がおこらなかったのか、そしてなぜ、今後問題にしなければならないのかを次に解説する。

これまで問題にならなかった最大の理由は、内規の「抵抗器は定格電力の 50%以下で使用すること」だと考えられる。もともとチップ抵抗器は、温度上昇の観点からは定格電力が低く設定されていた。それゆえ、定格電力の半分で使用すれば、リード付き抵抗器のように高温になることは無く、図 5 が誤った設計目標であっても実害はなかった。

問題が顕在化してきた理由は、近年のチップ抵抗器の定格電力アップである。図 13 に同じ大きさのチップ抵抗器に与えられる定格電力の推移[5]を示す。抵抗器のサイズの 4 桁の数値 LLWW は、縦 L.L [mm]×横 W.W [mm]であることを示す。同

じサイズの定格電力は、2000 年以前と比較して、2020 年では倍以上になったものが多く、2012 サイズに至っては、5 倍にもなっている。特に部品の表面積が大きくなっているわけではないので、同じパターンに実装すれば温度上昇は 5 倍である。「定格電力の 50%以下で使用すれば大丈夫」などとは言えない状況にある。加えて、車載電装機器では、機器の周囲温度は 100°C を超える場合も珍しくなくなっており、正確な熱設計を行わなければ大きな事故につながる可能性がある。

図 14 は、チップ抵抗器に対する適切な熱設計指標として提案されている端子部温度を横軸とした負荷軽減曲線である。図 9 に示したとおり、チップ抵抗器の放熱先は基板である。端子部の温度と印加電力が決まれば抵抗器本体の温度はパターン幅や隣接部品の有無にかかわらず一様に決まる。抵抗器メーカーは規格試験時の端子部の温度を基に負荷軽減曲線を作成して提供すれば、機器設計者はそれを設計目標として使用できる。

以上はチップ抵抗器の例であるが、他の部品においても、特に表面実装部品は、その部品の放熱形態を見定めて、合理的な熱設計が行えるように熱的な製品仕様を確認する必要がある。

3. 部品の放熱形態を考慮した熱設計手法

前節では、チップ抵抗器において、熱設計の目標とする温度を周囲温度ではなく端子部温度、言い換えれば基板温度とすべきという理由を説明した。様々な部品を前項のように放熱形態から分類すると、チップ抵抗器に限らず表面実装部品のほとんどが基板放熱型部品となることが分かる。ここでは、基板放熱型部品を対象とした熱設計手法を紹介する。

3.1 熱設計のための部品の仕分け

発熱部品には、与えられた印加電力 P に対して、周囲温度 T_a において自己の温度を一定の目標値 T_{tgt} 以下にするための放熱能力を自ら備えているものと、自ら備えておらず、何らかの放熱対策が必要な部品に分けられる。熱設計に先立ち、まず、この仕分けを行わなければならない。以下は国峯によって提唱されている部品の仕分け方[6]である。

式(3)はニュートンの冷却法則である。

$$Q = hS(T_s - T_a) \quad \dots (3)$$

ここで、 Q ：放熱量[W]

h ：熱伝達率[W/(m²・K)]

S ：放熱面積[m²]

T_s ：部品本体の表面温度[°C]

この式を電子部品に適用する場合には、 S は部品の表面積となり、定常状態における放熱量は部品に与えた印加電力 P [W] と等しくなる。式(3)は、

$$\frac{T_s - T_a}{P} = \frac{1}{hS} \equiv Rth_{own} \quad \dots (4)$$

と変形できる。式(4)の $1/(hS)$ は部品単体で自己を冷却する能力を示すので、単体熱抵抗 Rth_{own} と定義する。この時、部品表面の熱伝導率は十分に高く、部品は一律の温度になると仮定している。一方、その部品を T_a の環境下に置き、電力 P を印加した場合に部品本体の表面温度を T_{tgt} とするためにその部品に要求される熱抵抗である目標熱抵抗 Rth_{tgt} は式(5)のようになる。

$$\frac{T_{tgt} - T_a}{P} \equiv Rth_{tgt} \quad \dots (5)$$

S は部品表面積で自明であり、 h は部品の大きさからおおよそ $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ とすると、 Rth_{own} は式

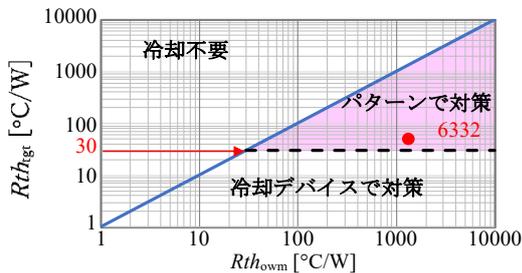


図 15 部品冷却要否の仕分けチャート

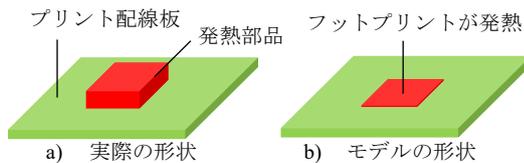


図 16 基板放熱型部品の簡易モデル

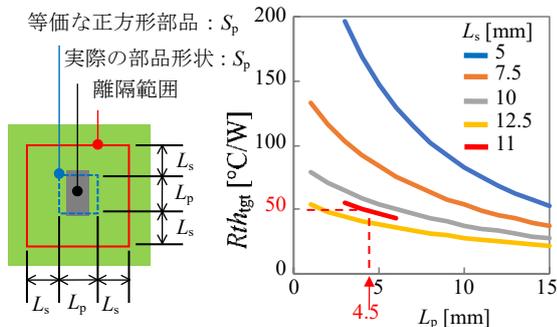


図 17 離隔距離を求めるグラフ

(4)から容易に求められる。また、 Rth_{tgt} は要求であり、これも式(5)から容易に計算できる。

個々の部品を図 15 に示すチャートにプロットした場合に、 $Rth_{own} \leq Rth_{tgt}$ となる部品については、自己の冷却能力の方が要求されている冷却能力よりも高いか等しいので、特に冷却のための対策は不要と考えられる（ただし、他部品からの受熱については別途確認が必要である）。これに対して $Rth_{own} > Rth_{tgt}$ となった部品については、自己冷却能力が要求よりも低いので、何らかの対策が必要である。

6332 サイズのチップ抵抗器を $T_a = 100^\circ\text{C}$ の自然対流環境において 0.5 W を印加し、部品の温度 125°C 以下で使用したいとする。チップ抵抗器の厚みはほぼ 0.5 mm 程度であるので $h = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と仮定し、式(4)に表面積とともに代入すると $Rth_{own} = 1338 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ となる。一方、 $Rth_{tgt} = (125-100)/0.5 = 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ なので、 $Rth_{own} \gg Rth_{tgt}$ であり、図 15 にプロットしたように要対策部品に仕分けされる。

前章にて、部品を放熱形態により大気放熱型部品と基板放熱型部品に分類した。これは部品が持っている特性である。ここで紹介した仕分け方法には印加電力、周囲温度および本体の上限温度など、部品を使用する際の条件が加わるが、様々な部品で仕分けを試行すると、対策が必要な部品の大半は基板放熱型部品が占め、特にチップ抵抗器が多い。基板放熱型部品は基板への放熱を期待して定格電力を決めていることが多いので、定格電力に近い電力を印加して使用しようとするれば、基板の熱設計が重要になることは想像に難くない。

なお、仕分けを行った際に、 $Rth_{own} \gg Rth_{tgt}$ であって $Rth_{tgt} \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ の場合には、基板による冷却以外に、放熱板を設けるなどの本格的な熱対策が必要な場合が多い。

3.2 基板を放熱板として使う熱設計

先述の 6332 サイズの抵抗器の例では $Rth_{tgt} = 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$ であったが、それを基板で実現するための設計手法としては、Gardner の式[7]や、Lee の式[8]など、放熱板の冷却能力に関する式が応用されることが多い。基板を放熱板に見立てて熱抵抗を求めるのである。基板放熱型部品は、一般的に低背であり、基板との熱的な結合が強固であるため、 Rth_{tgt} を求める際には、部品が発熱しているモデル

ではなくて、図 16 のように基板の、部品が実装されるフットプリントが発熱しているモデルに置き換えて考えることが多い。

図 17 は部品のフットプリント S_p [mm²] から、所望の Rth_{tgt} を得るために必要な離隔距離 L_s [mm] を見積もるグラフであり、Lee の式を元にして作られている。部品を、 $L_p^2=S_p$ となるような、一辺 L_p [mm] の正方形のフットプリントをもつ等価的な形状に置き換えてこのグラフを適用する。 L_s が重ならないように個々の部品を配置すれば、個々の部品の Rth_{tgt} を満足できる。6332 サイズの抵抗器の例では、 $L_p=4.5$ mm なので、 $Rth_{tgt}=50$ °C/W を得るには、11 mm 程度の L_s が必要であることがわかる。

学術的厳密性には欠けるが、機器設計現場ではこのような形で実用できそうな手法を探し出し、アレンジして使用しているのが現状である。

なお、有賀らにより部品同士の熱的な干渉がある場合の基板放熱を利用した熱設計の研究[9]もなされており、今後、基板放熱型部品に適した、基板を放熱板として利用する熱設計手法の発展に期待する。

4. 温度測定の問題

表面実装部品は、自らの表面からの大気放熱のみならず、基板放熱に依存できるために小形化が可能となった。しかし、部品の小形化は温度測定に新たな誤差要因を生じさせている。

4.1 熱電対の放熱による誤差

電子機器の熱設計で、最後に実施されるのが試作機の実測による温度の確認である。この時に用いられる温度測定手段は、多くの場合、熱電対であるが、部品の小形化により思わぬ誤差が生じていることに気づいていない機器設計者は多い。

小形の表面実装部品にとって、熱電対はピンフィンと同等の放熱効果をもたらすため、接続すれば被測定物から熱を奪う。図 18 は熱電対の素線直径 d と、熱電対の放熱の熱抵抗 Rth_{tc} の関係を、自然対流の条件で算出したものである。熱電対の長さは実使用状態を考慮し、無限大に近似している。

一方、例えば図 19 a) のように、2012 サイズのチップ抵抗器の熱的な等価回路は同図 b) のようになり、式(6,7)によりさらに単純化した同図 c) の形に変形できる。同図 c) より、熱電対を接続し

た場合の端子部温度 T_m と熱電対が無い場合の端子部温度 T_t の差を算出すると式(8)のようになる。詳細は割愛するが、同図 a) の場合には Rth_{out} は約 300 °C/W となる。

$$Rth_{out} = \frac{Rth_{ptn} (Rth_{ptn} + Rth_t)}{2Rth_{ptn} + Rth_t} \dots (6)$$

$$T_t = \frac{P}{2} Rth_{ptn} + T_a \dots (7)$$

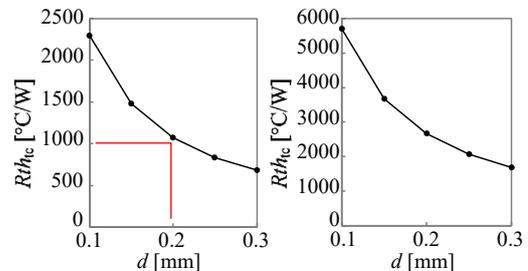
$$T_t - T_m = \frac{Rth_{out} (T_m - T_a)}{Rth_{tc}} \dots (8)$$

熱電対の接続による誤差の影響を以下のように比較してみる。図 19 a) の端子部に、タイプと素線直径の異なる熱電対をはんだ付けして温度を測定したところ、どちらも周囲温度 $T_a=25$ °C の環境で $T_m=70$ °C であったとする。熱電対が無い場合の温度 T_t を計算した結果が表 1 である。

素線直径 0.1 mm のタイプ K の熱電対であればそれほど大きな誤差は出ないが、素線直径 0.2 mm のタイプ T の熱電対を使用すると、非常に大きな誤差が生じることが分かる。線径とタイプが異なる

表 1 熱電対による測定誤差の比較

熱電対タイプ	素線径 d [mm]	Rth_{tc} [°C/W]	$T_t - T_m$ [°C]	T_t [°C]
T	0.2	1000	13.5	83.5
K	0.1	5600	2.4	72.4



a) タイプ T 熱電対 b) タイプ K 熱電対

図 18 熱電対熱抵抗 Rth_{tc}

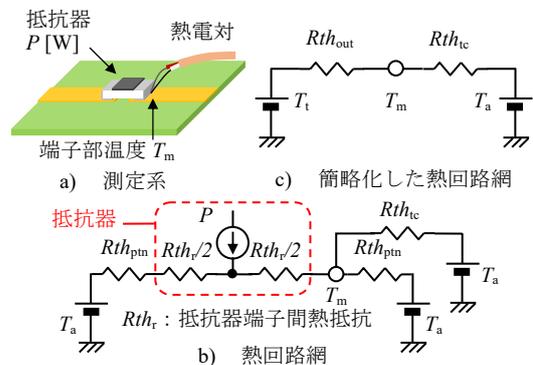


図 19 熱電対を用いた測定系の等価回路

る両者を比較した理由は、素線直径 0.2 mm のタイプ T の熱電対は現状で電子機器の温度測定に多用されているからであり、今後推奨したいのは素線直径 0.1 mm のタイプ K だからである。

絶対的な精度はタイプ T の方が高い。一方で、タイプ T 熱電対の素線の一方は熱伝導率が高い銅であり、ピンフィンとしての放熱能力が高い。 $R_{th_{out}}$ が大きい被測定物の場合には、タイプ T 熱電対では、放熱により大きな温度低下を招くので、必ずしも精度の良い測定ができるわけではない。

ちなみに、図 1 のリード付き抵抗器本体の $R_{th_{out}}$ は、抵抗器本体の熱伝導が良ければ式(4)の $R_{th_{own}}$ と同じであり、 $80\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ と算出される。式 (8) で計算すると、同じ熱電対を用いた場合の温度測定誤差は、図 1 の抵抗器の本体を測定した場合には、図 19 の 2012 サイズのチップ抵抗器の端子部温度を測定した場合と比較して 1/4 でしかない。

機器メーカーでは温度測定の方法も、内規により定められている場合がある。内規が大気放熱型部品全盛期に作られたものだとすれば、基板放熱型部品の測定のために見直しが必要と思われる。

なお、熱電対を被測定場所へ直接はんだ付けできない場合には、被測定場所への固定方法によって大きな誤差が出ることがある。固定に起因する誤差については中村が詳細に考察を行っている [10]。

4.2 赤外線サーモグラフィの微小領域の温度測定

筆者は抵抗器メーカーに勤務しているが、時折顧客より「抵抗器の表面ホットスポット温度（最も高温になる部分）が、ある一定値以下であれば使用できる、というような熱的な仕様の決め方できないか」と問い合わせを受けることがある。チップ抵抗器は、もともとそういった設計はなされていないので、そのような仕様の取り決めは不可能なのだが、顧客には図 20 の異なる分解能のレンズで同一のチップ抵抗器の表面温度分布を測定したデータを見ていただき、本当のピーク温度を測定することはそもそも困難であり、仕様化しても、測定の面から意味がないことを説明している。

図 20 の $100\mu\text{m}$ レンズの $200\mu\text{m}$ というのは、赤外線サーモグラフィの受光素子 1 ピクセル当たりの被測定物の長さのことである。25 μm レンズであれば、ほぼ真値が測定できている可能性があるが、100 μm レンズや 200 μm レンズではまづピー

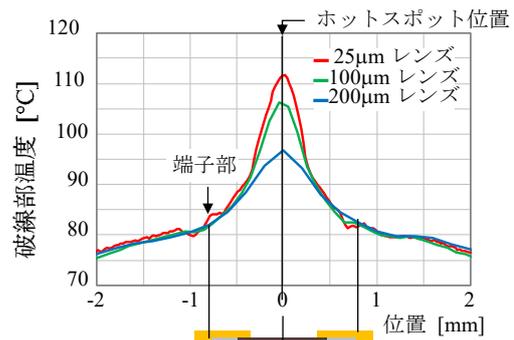


図 20 1608 抵抗器の温度測定

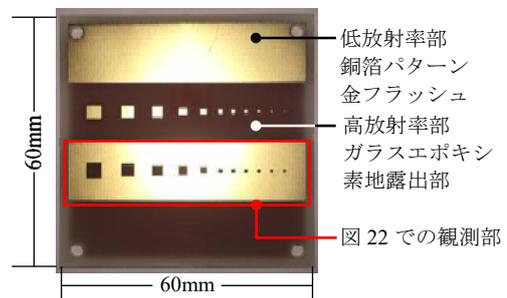


図 21 ピーク温度検出能力の測定ジグ

ク温度は測定できない。では 25 μm レンズを使えばよいのではないと思われるかもしれないが、通常機器メーカーが温度測定に使用する赤外線サーモグラフィの全画素数は、多くが、横方向 640 ピクセル×縦方向 480 ピクセルである。25 μm レンズを使用した場合の全視野は、わずか横 16 mm×縦 12 mm でしかなく、被測定物にフォーカスを合わせながら動作中の基板全体を走査することなどほぼ不可能である。これに対して、端子部の温度であれば、温度勾配が小さいため、図 20 よりあまり分解能の高くないレンズであっても測定できることが分かる。

低温部分の中に微小な正方形形状の高温部分がある場合に、その高温部分のピーク温度を測定するためには、正方形の 1 辺の長さが、赤外線サーモグラフィの受光素子のピクセル数に換算して 5~6 ピクセル分以上なければならないことは既報 [11] のとおりである。近年は図 21 に示すような基板で製作したジグ基板を用いて、ピーク温度の検出能力を確認している。

原理は単純で、このジグ基板をホットプレートで昇温し、赤外線サーモグラフィで温度分布を測定すると、図 22 のように FR4 基板の素地が露出し

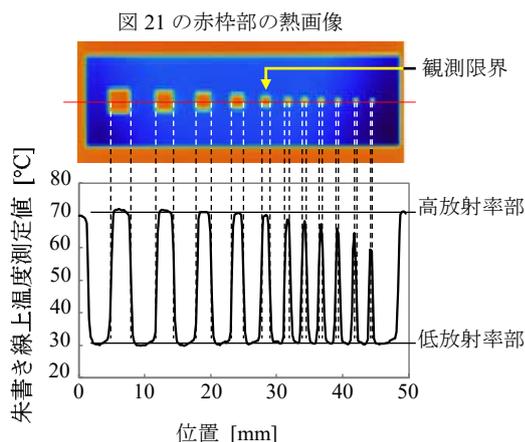


図 22 ピーク温度検出能力の簡易測定

た高放射率部分は一様な高温に、金属パターンの低放射率部分は一様な低温に測定されるが、高放射率部分の面積が小さくなりすぎると、面積が十分に広い高放射率部分よりも低温に観測されるようになる。高放射率部分よりも低温に見えない最小の面積が、そのサーモグラフでピーク温度が検出できる最小の面積である。

5. まとめ

- ① 規格により定められた熱的な仕様を設計目標としても、必ずしも合理的な熱設計が行えないことをチップ抵抗器を例に示し、合理的な熱設計を行うために、新たな仕様を模索する動きがあることを紹介した。
- ② 基板放熱型部品に適した、基板を放熱板として使用する熱設計手法を紹介した。
- ③ 表面実装化は部品の小形化をもたらしたが、同時に、温度測定が困難になっていることを例示し、測定誤差の低減方法を紹介した。

6. おわりに

リード付き抵抗器などの大気放熱型部品を使った機器の熱設計は、極論すれば筐体内の空気の温度制御である。一方、チップ抵抗器など、基板放熱型部品を使った機器の熱設計は、基板の放熱板としての利用が重要になる。前者は、筐体の大きさや通風孔の設計が主であるため、機構設計者（メカ屋）の担当であるが、後者は基板のパターン設計が主となるため回路設計者（エレキ屋）が主体とならざるを得ない。大気放熱型部品から基板放熱型部品への移行は、熱設計の担当者をも変えてしまったのである。

筆者は修士課程までの6年間で電気・電子系の学科で過ごしたが、熱設計に関する授業は電子回路の講座の中でわずか3コマ（270分）しかなかった記憶がある。本稿では、あえてCFDなどを用いずに、伝熱のさわめて基本的な考え方のみを用いて、チップ抵抗器という最もベーシックな電子部品の熱的な仕様に問題があり、それゆえ合理的な熱設計が出来なくなっている現状を解説した。しかしこれはチップ抵抗器だけの問題ではない。

今後、電気・電子系の高等教育の中で伝熱工学の基礎が重視されるようになり、電気・電子機器の熱設計のレベルが底上げされることを期待する。

参考文献

- [1] 平沢浩一, 内田昌宏, 福江高志, 小形表面実装部品の温度使用に関する考察, 1DCAE MBD シンポジウム 2019 講演論文集, No.-13-334(2019)99-100.
- [2] KOA 株式会社, 総合カタログ(2020).
- [3] JEITA 標準化専門委員会受動部品標準化 WG, 表面実装用固定抵抗器の負荷軽減曲線に関する考察(2014).
- [4] IEC TC40 WG41, IEC60115-8 Fixed resistors for use in electronic equipment - Part 8-1(2014).
- [5] KOA 株式会社, 総合カタログ(2000-2020).
- [6] 国峯尚樹, 熱設計完全制覇, 日刊工業新聞社 (2018)209-210.
- [7] K.A.Gardner, Efficiency of Extended Surface, Journal of Heat Transfer, 67(1945) 621-631.
- [8] Lee, S. et al., CONSTRICTION/SPREADING RESISTANCE MODEL FOR ELECTRONICS PACKAGING, ASME/JSME Thermal Engineering Conference, volume 4(1995)199-206.
- [9] Aruga, Y. et al., Proposal of a temperature rise estimation method for densely mounted components, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 11(2018) E18-005-1 - E18-005-13.
- [10] 中村元, 熱電対による表面温度測定の誤差解析, 日本機械学会論文集, 84 巻, 867 号 (2018) [DOI:10.1299/transjsme.18-00216]
- [11] 平沢浩一, 赤外線サーモグラフの空間分解能を簡易的に推定する方法の提案, 伝熱, Vol.54, No.228(2015)33-38.

人と熱との関わりの足跡（その7）
 — 「日本刀」における伝熱技術とその研究 —
Footprints of the Relationship Between Humans and Heat (Part 7)
- Study of Heat Transfer in Making of the Japanese Sword -

芹澤 良洋（日本製鉄）
 Yoshihiro SERIZAWA (NIPPON STEEL CORPORATION)
 e-mail: serizawa.sb5.yoshihiro@jp.nipponsteel.com

1. はじめに

日本刀は、日本固有の武器として約 1000 年の歴史があり、鋭い切れ味を保持するための硬さと容易に折れないための高い靱性を有する高機能製品である。また、高機能製品を作る匠たちの技術が生んだ美しさは、日本を代表する伝統工芸品として、その美術的価値は高く評価されている。加えて、最近では、その美しさと歴史的エピソードがデジタルゲーム化され、若い層にもその人気は広まり、多くの関連書籍が出されるとともに、改めて製造技術が注目されている。

本報では、まず、日本刀の製造技術に関して工学の他分野からその特徴を示す。そして、その特徴を起点とした伝熱研究の展開について概観し、現代の技術研究の発展にもつながっていることを示す。

2. 「日本刀」高度製造技術の特徴とその解明

日本刀は、その機能性の高さと美しさから、製品とその製造プロセスに関して、近代以降多くの研究がなされてきている。金属工学における研究の初期[1]では、ドイツ留学した俵、本多により製造工程の調査、日本刀金属組織の観察、成分・硬度の測定[2]、西洋刀との切れ味比較[3]がなされており、西洋刀との比較では、日本刀の刃の硬度が高いことが示されている。昭和に入ってから谷村の研究[4]により、次の 2 点が明らかにされた。すなわち、①日本刀の鉄では炭素以外の微量金属、燐、硫黄などの不純物含有が現代の工業用鋼に比較して極めて低く、介在物が少ないために鍛錬が可能なこと、②日本刀は図 1[5]に示すように炭素量の異なる鋼を組み合わせているために、武器として刃が硬く切れ味が鋭いにも関わらず、刀身としては脆性がなく折れない特性を持つことの 2 点である。

表 1 に日本刀の製造工程を示す[6]。日本刀は「た

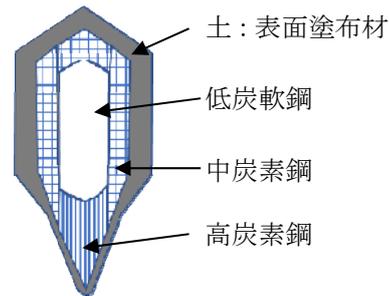


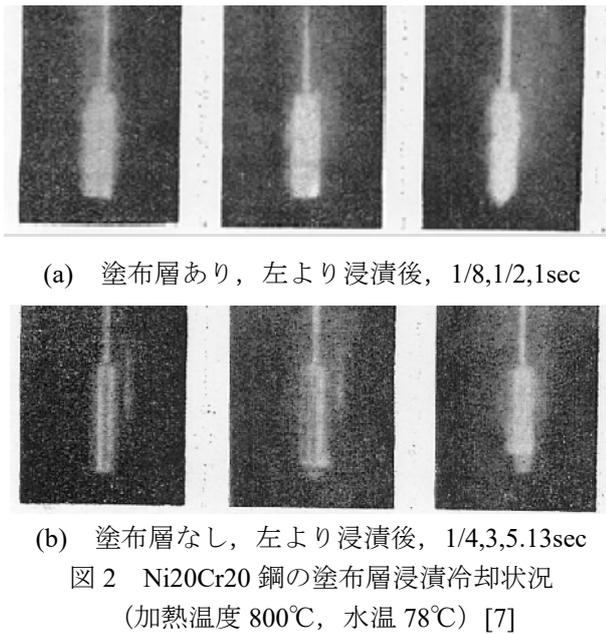
図 1 刀身断面鋼材組合せと焼き入れ時の「土」塗布状況

表 1 日本刀の製造工程

工程	製造内容
たたら製鉄	玉鋼製造, 部位別素材分別
鍛錬	部位ごとに折り返し鍛錬
造り込み	素材組合, 刀身形状作成
焼き入れ	土置き(表面調整), 焼き入れ
研磨・仕上	鍛冶研ぎ, 銘切り

たら製鉄」工程で高純度の鉄が造られ、炭素量により異なる硬さの素材をそれぞれ繰り返し折り返しては鍛え延ばす「鍛錬」を行ったのち、刀身を組み立て再度加熱して「造り込み」を行い、形状を整えてから「焼き入れ」、「研磨・仕上」を行う。

先に述べた初期の研究では、伝熱工学の研究対象である焼き入れについて、刀身の表面に図 1[5]のように厚さの異なる「土」を塗布したのち、加熱して水温を調整した水槽で焼き入れる技術が秘伝とされて、刀の切れ味、刀身の折れない強さ、さらには刃文の美しさに寄与していることは一般の刃物業者にも知られていたが、技術的意味合いについては未解明であった。焼き入れに関して、筆者が把握している最初の研究は、1933 年の金属工学に携わる佐藤による金属面への塗布材有無時の冷却速度測定及び撮影[7]である。この研究では、塗布材の配合も高温加熱後水冷されるという大きい温度衝撃下でも剥離しない困難な条件を満たす必要があること、図 2 に示すように塗布材により



冷却初期の金属裸面で発生する「蒸気の袋」(膜沸騰)が発生しないために冷却速度が速くなることを示している。

3. 伝熱工学における表面塗布層関連研究

佐藤の研究ののち，伝熱工学における表面層による沸騰冷却時の速度制御に関する成果は奈良崎[8]，Kikuchi[9]，西尾[10]の研究で知られているように，海外で始まっている．Cowley (1960) ら[11]の液体窒素での研究，Butler (1970) ら[12]の液体ヘリウムにおける超電導での伝熱向上，Moreaux (1975) ら[13]の冷却速度制御を狙った研究である．図3にMoreaux らの結果を示すが，表面層厚みにより冷却速度が変化し，ある厚みを超えると表面

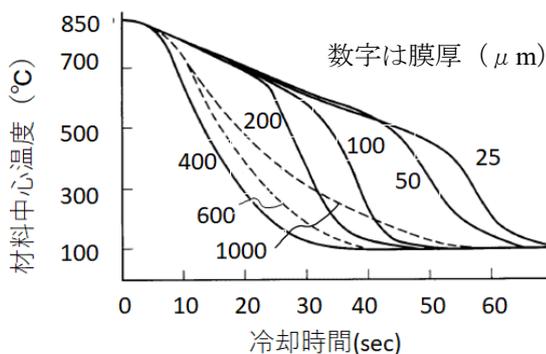


図3 ニッケル円柱の酸化ジルコニウム塗布時の冷却曲線 (加熱温度 850℃，水温 100℃)

層が断熱層として冷却速度を低下させることが示されている．その後，菊池，西尾，の研究では，表面層による極小熱流束点変化の研究が極小熱流束点そのものの発生現象の研究へとつながり，さらに，測定技術，観察技術の発展も伴って，最近の永井[14]，門出・光武[15]，酒井ら[16]の研究に続いている．なお，これらの研究は近年，CO₂削減を意図した薄肉高強度化が進む工業用鋼材の製造における冷却技術において，表面に発生する鉄酸化層の影響による温度予測技術として貢献している。

以上のように，日本刀における焼き入れ時の秘伝の技術の効果は明らかにされてきたと考える．すなわち，刃の部分は塗布層を薄くして冷却速度を高めて硬度を上げて切れ味を鋭くし，刀身部は塗布層を厚くして冷却速度を低下させて柔らかく粘り強い，折れない刀としているのである．因みに，刃の部分の炭素含有量が 0.6%の場合[17]に，その 90%以上を硬度の高いマルテンサイト組織にするための冷却速度は刃部分が 300℃に到達するまで約 300℃/sec となる[18]．刃部分がいかに肉厚が薄いとはいえ，焼き入れ槽が噴流を使えないプール沸騰であることを考えると，必要冷却速度の達成は非常に難しいと推定される．このように，日本刀の匠たちの製造技術は，西洋刀，あるいは現代の知識と比較しても世界でも類を見ない高いレベルであることが示されている。

4. おわりに

近年では，刀匠でもある佐々木ら[17]により，刃断面の硬度分布，鍛錬工程における鋼材内炭素量制御と鍛錬回数との関係が明らかにされ，製造工程の合理性が示されている．また，上原ら[19]は塗布層の伝熱条件を実験的に求め，焼き入れ時の鋼材の組織変態，刀身の反り変形と温度を錬成させたシミュレーションに導入して，刀身の焼き入れ時の変形挙動，組織分布などを解析して刀身の反り形状の発生について理論的に示している．このように長い伝統を持つ日本刀の製造技術の詳細については不明な部分も多く，その解明は現代の汎用鋼材の高度化のヒントになることも，また，他産業の発展に役立つこともあるであろう．

古来の伝承技術の中には，その未解明な伝承の奥に合理的かつ高度な技術が潜んでいる事例があ

ると思われ、今は研究が難しくても次代に役立たせることを期待して、確実に保存していきたい。

参考文献

- [1] Notis, M. R., *Mater Char.*, 45 (2000) 253.
 [2] 俵國一, 鉄と鋼, 6 (1920) 337.
 [3] 本多光太郎, 高橋金之助, 奈良七三郎, 金属の研究, 3 (1940) 10.
 [4] 谷村熙, 鉄と鋼, 67 (1981) 497.
 [5] Takaishi, S., *Steel Res.*, 72 (2001) 380.
 [6] 臺丸谷政志, 日本刀の科学, SB クリエイティブ, (2016).
 [7] 佐藤清吉, 金属の研究, 10 (1933) 63.
 [8] 奈良崎道治, 淵澤定克, 第 18 回伝熱シンポジウム, (1981) 421.
 [9] Kikuchi, Y., Hori, T. and Michiyoshi, I., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28 (1985) 1105.
 [10] 西尾茂文, 第 17 回伝熱シンポジウム, (1980) 223.
 [11] Cowley, C. W., Timson, W. J. and Sawdye, J. A., *Adv. Cryogen. Engng.*, 7 (1962) 385.
 [12] Butler, A. P., James, G. B., Maddock, B. J. and Norris, W. T., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 13 (1970) 105.
 [13] Moreaux, F., Chevrier, J. C. and Beck, G., *Int. J. Multiphase Flow*, 2 (1975) 183.
 [14] 永井二郎, 第 57 回伝熱シンポジウム, G214 (2020).
 [15] 門出政則, 光武雄一, 第 57 回伝熱シンポジウム, G221 (2020).
 [16] 酒井涼太, 河野正道, 高田保之, 第 57 回伝熱シンポジウム, G213 (2020).
 [17] 佐々木胤成, 堀井胤匡, 桃野正, 日本製鋼所技報, 60 (2009) 60.
 [18] 上野正勝, 伊藤亀太郎, 鉄と鋼, 74 (1988) 1073.
 [19] 上原拓也, 井上達雄, 材料, 44 (1995) 309.

【謝 辞】

本稿は本学会“熱の科学技術史研究会”から、かねてよりこの方面にご造詣の深い芹澤良洋氏にお願いしてご執筆頂いたものである。我が国の日本刀の製造工程における伝熱技術の関わりについて、このように興味深い記事をご執筆頂いたことに心から感謝する。(熱の科学技術研究会)

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

花村 克悟 (委員長・東京工業大学)

高田 保之 (九州大学)

Specific Promotion Research Planning Committee

Katsunori Hanamura (Chairperson, Tokyo Inst. Tech.)

Yasuyuki TAKATA (Kyushu University)

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 10 件の課題が選定されています。このたび「次世代鉄鋼材料創製技術の研究」(主査:高田保之(九州大学),門出政則(佐賀大学))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 5 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. 「次世代鉄鋼材料創製技術の研究」

HTSJ-FY2017-06

主査 高田保之 (H27.10-H29.9, 九州大学),

門出政則 (H25.10-H27.9, 佐賀大学)

幹事 永井二郎 (福井大学), 芹澤良洋 (日本製鉄)

takata@mech.kyushu-u.ac.jp

本研究の目的は、金属組成学分野と冷却分野の研究者が相互連携することによって冷却材料の結晶成長を制御し、必要な工業製品を効率的に製造することであり、具体的には、鉄鋼業における材料組織制御技術の抜本的向上により、製品レベルを大きく飛躍させることである。そのためには、高温材料を急速冷却するときの金属組織の変態や

結晶の成長を正確に理解した冷却技術の開発が必要である。

本研究では冷却プロセスに潜む未解決の問題の一つである、高温面の濡れ開始のメカニズムを中心に、多方面からの研究を行った。金属組織・塑性加工分野の研究者との情報交換による技術課題の抽出を行った。金属組織・塑性加工分野の研究者との対話で改めて認識したことは、最終的な金属組織を決定づける冷却速度を支配するものは、高温面における「固液の濡れ」であり、濡れ開始のメカニズムを解明することの重要性である。表面科学・熱科学・金属組織学等を横断する階層複合型熱移動現象の理解と制御のための新しい学理として図 1 に示すような「マルチフィジクス熱制御科学」として位置づけ、重要な研究課題として、①高温面の噴霧/直接(沸騰)冷却時の「濡れ性」に対する表面および各種流体因子の影響、②沸騰現象が内在する階層構造の物理シミュレーション技術の構築を抽出した。

これに対して伝熱研究者側が実施した主な研究内容は、(1)高温面の濡れを決定する因子の特定、(2)濡れ開始時の現象研究、(3)固液界面の冷却を考慮した連成熱伝導解析、である。(1)では、鋼材の表面酸化を制御しながら噴霧冷却試験を実施し、酸化膜(スケール)の厚みと急冷開始点(MHF点)との関係を調べた。その結果、酸化膜が厚くなるとMHF点が高温度化することを定量的に把握し、液体と酸化膜表面が接触した際の固体内熱伝導と表面熱伝達の連成現象として説明することができた。

また、酸化膜の熱拡散率をレーザーフラッシュ法で、比熱をTG-DSCで高い温度範囲まで測定することにより、半無限固体の非定常熱伝導

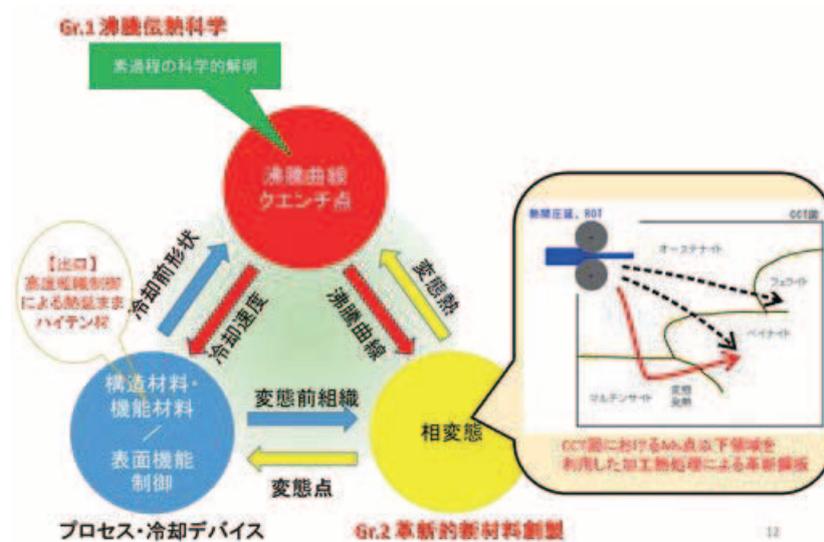


図1 革新的材料創製のためのマルチフィジックス熱制御科学の構築。

問題の解から計算される液体と酸化層の接触時の界面温度が熱学的過熱限界温度に近い値になるということが明らかになった。

(2)においては、800℃レベルの高温の中空円筒鋼材を回転させながらラミナー冷却実験を実施することで、実際のランナウトテーブルでの冷却に近い状態で、表面温度の計測と濡れ開始現象を観察した。この結果、周期的に冷却水が衝突する場合の鋼材の表面温度の時間変化を初めて計測するとともに、濡れ開始温度に及ぼす冷却水温および流量の影響を把握することができた。

(3)においては、ラミナー冷却に対して PLIC-VOF 法と Level Set 法を併用した3次元数値

シミュレーションを実施し、実機に近い条件での熱間圧延後の鋼材の温度履歴を忠実に再現することに成功した。

本特定推進研究で、未解決の問題がすべて解明された訳ではないが、得られた新たな知見は確実に解明への大きな前進であると位置づけることができる。

なお、本特定推進研究のテーマは、2019年度のNEDO先導研究プログラム「熱制御科学による革新的省エネ材料創製プロセスの研究開発」(代表柳本潤(東大))に採択され、現在、研究開発を実施中である。

ロードアイランド大学滞在記 *A Diary in University of Rhode Island*

洪 定杓 (鹿児島大学)
Chungpyo HONG (Kagoshima University)
e-mail: hong@mech.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

2019年5月より2020年3月まで11ヶ月間、学生時代からお世話になっている米国のロードアイランド大学 (University of Rhode Island) の Mohammad Faghri 教授の研究室に滞在しました。本稿では、米国ロードアイランド大学での研究生生活についてエッセイという形で簡単に紹介させていただきます。

2. ロードアイランドでの研究生生活

2.1 ロードアイランド

ロードアイランド州はアメリカの東北のニューイングランド地方にあり、独立時の13州の1つで一番最初に独立宣言をした歴史のある州であります。面積は全米の州の中で一番小さい州で州の面積と共に人口も100万人位で少ないですが、人口密度はニュージャージー州に次いで第2位だそうです。繊維と貴金属産業の中心地であり、美しい大西洋の休養地として有名でもあります。ロードアイランド州の西はコネチカット州に、北と東はマサチューセッツ州に、南西はニューヨーク州のロングアイランドに接しています。また、東は大西洋に面しており、Ocean State と呼ばれています。



Fig. 1 アパートから見た雪の風景



Fig. 2 URI の中央 Quadrangle の前景

夏は暑くて雨が多いですが、冬は寒く雪が降る気候であります。鹿児島に住んでいた私にとっては降ってくる雪が非常に嬉しかったです (図 1)。

2.2 ロードアイランド大学[1]

ロードアイランド大学 (University of Rhode Island, 以下 URI) (図 2) はロードアイランド州の南部海岸のキングストン市 (Kingston) に位置しており、URI と呼ばれる州立大学です。URI は1890年代、農業学校として創立され、1932年、工学、科学とビジネス、農業と家庭、三つの学部で再編成されました。機械工学科はその頃に設立され、今は、機械・産業・システム工学科 (Department of Mechanical, Industrial and Systems Engineering) となりました。

URI は80以上の学部・博士前後期プログラムなどがある総合大学であり、海洋分野とメディカル分野はアメリカ最高レベルだそうです。

海洋分野はキングストンのメインキャンパス以外に、メインキャンパスから東に10kmほどのところに Narragansett Bay のキャンパスがあり、海の一部が大学専用地であるおかげで、アメリカ最高

レベルの海洋学教育・研究センターを作る決定的なきっかけとなったそうです。

また、ロードアイランド州の Woonsocket には CVS Health の本部があります。CVS はアメリカ全地域でほぼ一万に達するドラッグストアを持っています。CVS の COO が URI の薬学部出身であることから、CVS はロードアイランド大学のメディカル分野に、これまで 50 億円以上を支援し、非常に良い研究環境が整えられています。そのため、薬学、工学などの全分野にかけてメディカル関連の研究が盛んになっています。

工学部にも Biomedical 工学科があり、バイオ・医療関連の研究が活発であります。私が所属した Faghri 教授の研究室も Biomedical 工学科と共同研究をしています。私はその一部「紙ベースの医療用分析チップのマイクロ流体バルブ (Paper-based Microfluidic Valve) 技術」の研究をすることになりました。

URI は、ボストンから車で 1 時間半、ニューヨークから 2 時間半、州庁所在地のプロビデンスから 30 分の距離であり、大都市へ行きやすいところも魅力です。また米国で最も安全なキャンパスの 5 番目、最も美しい海岸キャンパスを誇っています。

2.3 研究室

Mohammad Faghri 先生は 1973 年に Oregon State University で学位を取得されその後、University of Minnesota で Postdoctoral research を経て 1983 年から URI の教授に就任されました。「マイクロスケールにおける熱伝達特性に関する研究」について 20 年以上研究を行ってきており、10 年前からは「マイクロ流路を用いた紙ベースの医療用分析チップ」についても研究を行っています。

私が学生の時、Faghri 先生との共同研究成果を発表するために参加した 2006 年シカゴで開催された国際会議 International Mechanical Engineering Congress & Exposition (IMECE2006) で初めてお会いしました。その後は数回 URI に短期滞在し、また国際会議に共に参加しながら共同研究を続けてきました。昨年、鹿児島大学の「若手教員海外研修支援事業」へ応募する機会があり、これまでの研究をしながら新たな研究分野を学べる最適な研究室として Faghri 先生の研究室を海外研修先に決めました。「若手教員海外研修支援事業」は 3 ヶ月の支援でしたが、学科の同分野の先生(木

下英二教授)のご了承を得て期間を延長し、2019 年 5 月～2020 年 3 月の 11 ヶ月間、「紙ベースの医療用分析チップのマイクロ流体バルブ (Paper-based Microfluidic Valve) 技術」を学びながら「マイクロチャンネルガス流の熱伝達特性」についても共同研究をしました。

私が所属した Faghri 先生の研究室は、Constantine Anagnostopoulos 教授、Nasim Rahmani 講師、Winfield Smith 研究員、3 名の Ph. D 学生で構成されています。2 週間毎に研究ミーティングをしていて、Winfield 研究員と 3 名の Ph. D 学生が 30 分程度 2 週間の間に研究した内容について発表・討論をしました。現在もオンラインによりミーティングに参加しています。



Fig. 3 2020 年 8 月新築された工学部建物



Fig. 4. 訪問研究者の研究室

同年、新たに新築された立派な建物(図 3)に工学部が拡張移転したおかげで自分の研究室(図 4)をいただき、また実験室も他の実験室とドアなしで繋がっていて、共同研究をしやすい環境になっています。隣には Faghri 先生と Constantine 先生の研究室があったため、いつも二人の先生が

通りかかりに「Hello Dr. Hong !」という声かけをして下さり寂しいと感じることはありませんでした。

3. 研究について

3.1 Bi-Material Cantilever (B-MaC)

URI では、以前からの Faghri 先生との共同研究「マイクロチャンネルガス流の熱伝達特性」を行いつつ、「紙ベースの医療用分析チップのマイクロ流体バルブ (Paper-based Microfluidic Valve) 技術」の研究をいろいろ教えてもらいながら行いました。その一部成果を国際会議 [2] で発表をしましたので、本稿で紹介させていただきます。

複雑な多段階のイムノアッセイ (Multistep Immunoassays) を行うには、正確な時間と複数の試薬を順次運ぶ過程が必要です。現在の紙ベースのラテラルフローデバイス (Lateral Flow Devices) には、試薬の扱いのためのバルブやアクチュエーターなどの重要な要素がありません。

そこで、片持ちばりの原理を用いた紙ベースのバイマテリアルアクチュエータ (Bi-material Actuator) の開発について簡単に紹介します。これは作成が簡単で低コストの紙ベースの流路を用いて、複数の試薬を検体検出の領域に順次運ぶことができます。

片持ちばりバイマテリアルアクチュエータ (Bi-Material Cantilever actuator, 以下 B-MaC) は、片側にスコッチテープが部分的にラミネートされたフィルターペーパーのストリップから作成します。フィルターペーパーが液体を吸収すると、セルロース繊維は湿度膨張を起こし、紙の寸法が変化しますが、隣接するテープ層 (スコッチテープ) の長さは一定のままです。紙とテープのこのよう

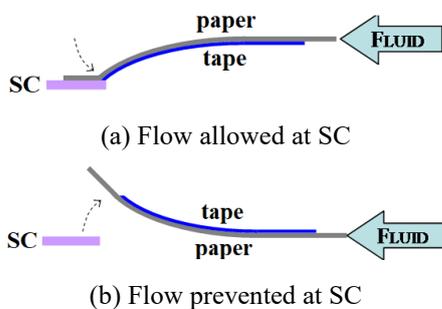


Fig. 5 Schematic diagram of bi-material cantilever actuator operational in two configurations

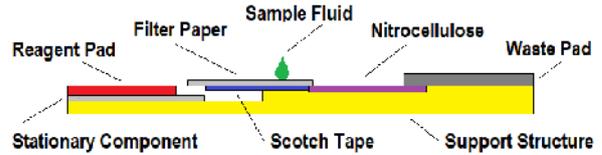


Fig. 6 Schematic diagram of a bi-material cantilever actuator in a 1-D lateral flow device

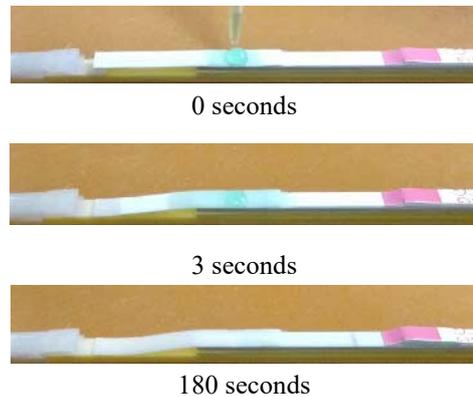


Fig. 7 Actual 1-D single B-MaC lateral flow device

な動作の違いにより、片持ちばりの先端はテープ層のある側に曲がり、固定コンポーネント (Stationary component) に設けられた流路を開閉します。図 5 (a) に示したように、テープ層が下側にある場合、B-MaC は濡れると下向きに曲がりますが、図 5 (b) に示したように、テープ層が上側にある場合、B-MaC は上向きに曲がります。

複雑なイムノアッセイを行い、サンプル流体に加えて 2 つ以上の試薬を順次運ぶためには、流路を構築する必要があります。B-MaC に構成物 (試薬液用のガラス繊維パッド、試薬パッドの下フィルターペーパーストリップ、ニトロセルロース検出ゾーン、廃棄物パッド) を加えた 1-D ラテラルフローデバイスの例を図 6 に示します。先ほど述べたように、フィルターペーパーの片側にスコッチテープが部分的にラミネートされています (図 6 中の青色の部分)。

図 6 と同じ構造を用いて実際に 1-D ラテラルフローデバイスを作成し、その流れ実験の結果を図 7 に示します。まず、約 75 μL の試薬液を試薬パッド (赤色) に濡らします。次に、少量 (12 μL) のサンプル液 (緑色) をサンプルエリアにピペットで滴下します。サンプル液はテスト領域と片持ちばりの両方に流れます。セルロース繊維の湿度膨張により、片持ちばりは下方に曲がり始め、数

秒以内に固定コンポーネント (Stationary Component) に接触します。図 7 の中央に示すように、片持ちばりが固定コンポーネントに接触し、試薬液をテストゾーンに向けて吸い上げ始めます。数分後、ニトロセルロース検出ゾーンのラインで強い信号が形成され始めます。180 秒後の写真を見るとピンク色のテープの左側に、紫ラインの信号が表示されています。この研究で開発された B-MaC は、さまざまなマイクロ流体診断システムに適用が可能であり、複数の試薬液を順次運ぶ必要のあるまたはタイミング遅延が必要な複雑なシステムに応用できます。今後はこの研究成果を基に Faghri 先生と共同で研究を続けようと考えております。

4. おわりに

アメリカでの長期滞在にあたり、多くの方々に大変お世話になりました。渡米するにあって貴重なアドバイスをして下さいました浅古豊先生、鈴木康一先生、片野田洋先生に深く御礼を申し上げ

ます。また不在期間中の講義を代わりに引き受けて下さった木下英二先生を始め、私の長期滞在を許可して下さいました鹿児島大学の先生方にこの場をお借りして御礼を申し上げます。一人一人お名前を挙げる事が出来ず残念ですが、皆様のおかげでほぼ 1 年間無事に過ごすことができました。最後に、URI の Faghri 先生のご家族には、研究だけではなく、様々なところでお世話になりました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] <http://www.uri.edu>
- [2] Smith, W. et al., A Fluidically Controlled BI-Material Actuator For Automation Of Paper-Based Assays, Proceedings of the International Symposium on Thermal Effects in Gas flows In Microscale, Germany, October (2019)

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					
未定 (延期)	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
2020年					
10月	6(火) 20-173 講習会「再エネとの強調技術」			(一社) 日本機械学会総合企画 G 森本あかね morimoto@jsme.or.jp	
10月	13(火) ~ 16(金) 31st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP31)	9月1日	9月1日	ISTP31 実行委員会委員長 横野泰之 yokono@mech.t.u-tokyo.ac.jp	
10月	14(水) ~ 15(木) 第48回日本ガスタービン学会定期講演会	6月19日	8月28日	(公社) 日本ガスタービン学会 gtsj-office@gtsj.org	
10月	21(水) ~ 23(金) 「研究者、技術者のための応用数学」コース			神奈川県立産業技術総合研究所 事務担当 教育研修グループ 北川光子 ed@newkast.or.jp	
10月	26(月) ~ 28(水) 第11回マイクロ・ナノ工学シンポジウム			(一社) 日本機械学会マイクロ・ナノ工学部門 担当 大通千晴 daitsu@jsme.or.jp	
10月	28(水) ~ 30(金) 第41回日本熱物性シンポジウム	9月30日	7月31日	事務局 jstp@okayama-u.ac.jp 086-251-8046/FAX 086-251-8266	
11月	4(水) ~ 5(木) 日本機械学会関西支部第370回講習会 実務者のための流体解析技術の基礎と応用			日本機械学会関西支部 Tel:06-6443-2073 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
11月	22(日) 日本機械学会関東支部山梨講演会			日本機械学会関東支部 Tel:03-5360-3508 E-mail: kt-staff@jsme.or.jp	
11月 ~ 12月	30(月) ~ 1(火) 第10回潜熱工学シンポジウム	11月15日	10月18日	日本潜熱工学研究会 会長 鈴木洋 hero@kobe-u.ac.jp	
12月	2(水) ~ 4(金) 第58回燃焼シンポジウム			(一社) 日本燃焼学会 office@combustionsociety.jp	
12月	21(月) ~ 23(水) 第33回数値流体力学シンポジウム			(一社) 日本流体力学会 03-3714-0427/FAX: 03-3714-0434 E-mail: info@nagare.or.jp	

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研究発表論文募集

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：ホテルハマツ (<https://www.hotel-hamatsu.co.jp>) ※状況によっては WEB 開催の可能性がります

所在地 〒963-8578 福島県郡山市虎丸町 3-18 電話 024-935-1111

アクセス タクシー：JR 東北新幹線郡山駅西口より約 5 分

バス：JR 東北新幹線郡山駅西口発→虎丸バス停 約 5 分

徒歩：JR 東北新幹線郡山駅西口より約 20 分

飛行機：福島空港より JR 東北新幹線郡山駅までバスで約 40 分

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】※状況によっては WEB 開催の可能性がります

- 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。

【講演申込方法】

- 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、各セッション募集に従って下さい。）
- 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。
- 講演発表申込みは、講演者 1 名につき 1 題目とさせて頂きます。
- 講演の採否およびセッションへの振分けは、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。講演論文はウェブ上で一定期間公開します。日本伝熱学会会員は講演論文集電子版を事前にウェブから読むことができます。
- 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。
- 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を提出して頂きます。講演論文はA4サイズで2～6ページ、講演アブストラクトはA4サイズで1ページとします。
- 講演論文原稿の執筆要綱は会誌1月号の「お知らせ」と本シンポジウムのホームページに掲載します。
- 講演論文原稿は、原則としてPDFファイルで提出して頂きます。
- 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集電子版およびウェブに掲載されません。

【参加費等】※状況によってはWEB開催の可能性あります

- 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】※状況によってはWEB開催の可能性あります

- 開催日：令和3年5月26日（水）
- 会場：ホテルハマツ（〒963-8578 福島県郡山市虎丸町3-18）
- 参加費：一般（早期申込：8,000円、通常申込：10,000円 同伴配偶者無料）
学 生（早期申込：4,000円、通常申込：5,000円）

【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。
- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクトのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- 参加費、意見交換会費等は参加取消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（共通）

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。アピールスライドは冊子体として配布されると共にスライドショーとして会場にて案内される予定です。
なお、伝熱シンポジウムの開催状況により、優秀プレゼンテーション賞セッションをオンラインにて開催する場合があります。発表形式の詳細については、決定し次第、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。

新たな学会ロゴを募集します！

→

2021年からの学会ロゴを
デザインするのはあなたです！

デザイン条件：「H」、「T」、「S」、「J」の
4文字（大文字）がはいった、学会ロゴを
つくってください

現在の学会ロゴ（～2021年まで）

日本伝熱学会ロゴの募集

日本伝熱学会 60周年記念担当特命理事
東京工業大学 平井秀一郎

日本伝熱学会は、1961年11月に日本伝熱研究会として発足し、2021年11月に創立60周年を迎えます。我が国の伝熱分野の学術と技術は、幾多の困難を乗り越えながら大きく進展し、社会に貢献してきました。先達が築いてきた本会の活動は我が国にとどまらず、アジア太平洋地域から全世界へと広がっています。六十周年といえますと、暦でいえば一巡りということにもなり、ここに、本会としての未来を見つめ、新たに学会ロゴを募集することとなりました。つきましては、下記の要領に従って日本伝熱学会ロゴを募集します。本会の将来をともにつくる皆様からの多数のご応募をお待ちしています。

1. 募集要項

- (1) 応募対象者：公益社団法人日本伝熱学会（以下、本会とする）の会員（正員）、名誉会員とします。
- (2) ロゴデザインの規定：「H」、「T」、「S」、「J」の4文字（大文字）が含まれ、応募者本人がつくったオリジナルのものであり、未発表、かつ、類例のないものとします。本会との協議にもとづいてロゴデザインが改変される場合があることを、あらかじめ了承しているものとします。
- (3) 著作権：最優秀賞に選ばれたロゴデザインの著作権は本会に帰属することとします。
- (4) 贈賞：最優秀賞（1件）本会公式ロゴとして採用します。賞金10万円を授与します。

2. 選考方法

- (1) 最優秀賞の候補となるロゴデザイン3件を本会委員会にて選定します。その上で、第58回日本伝熱シンポジウム総会における出席者の投票にもとづき最優秀賞（1件）を決定します。

3. 応募の様式と方法

- (1) 様式：デジタルデータ（jpeg, png, psなどの一般的な形式であれば可とします。不明な場合には、担当委員へお問い合わせください）として、カラーと白黒（グレースケール可）の2パターンを提出して下さい。
- (2) 方法：提出するロゴデザインを考案・作成した応募者本人により、本会ホームページに記載の要領にて提出して下さい。応募は一人につき一件を上限とします。

4. 提出期限

2020年12月25日（金）

5. 提出先および問い合わせ先

本会ホームページ：<https://www.htsj.or.jp/announcement/2078.html>

大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻 津島将司

TEL 06-6879-7304, FAX 06-6879-7305

Email: tsushima@mech.eng.osaka-u.ac.jp

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～」受講者募集のご案内

産学交流委員会
委員長 近藤 義広

開催日 2020年11月27日 金曜日 12:50～17:00
開催方法 オンライン (WebEx を予定)

要旨 『計測技術』を基礎から学ぶ必要がある方や、最新の計測技術を学びたい方を対象に、計測分野で著名な方々とディスカッションをすることで、より広い知見を得られるオンライン講習会を開催する運びとなりました。昨年開催し、ご好評頂いた『計測技術』について、本年は計測技術の基礎となる各種センサーおよび、多くの場面で需要が高まっている非接触計測技術に関する専門家を講師陣にお招きし、計測の基礎から非接触計測の最新技術まで幅広くご講演頂きます。本講習会では、講演者と聴講者が一体となった参加型イベントにするため、設計業務や研究で悩んでいることを共有する総合討論の時間を設けております。また本年はオンライン講習会ですので、これまで会場に足を運ぶことが難しかった方でもご参加いただきやすくなっております。

題目・講師 (敬称略)

- (1) 開会のあいさつ (12:50 – 13:00) 日立アカデミー 近藤 義広
- (2) 講演 (13:00 – 16:30)
- ・放射温度計の正しい使い方 防衛大学校 中村 元
 - ・熱電対の正しい使い方 名古屋工業大学 田川 正人
 - ・最新のサーモカメラ活用技術 日本アビオニクス 柴田 浩樹
 - ・3次元 X線サーモグラフィー 日立製作所 米山 明男
 - ・超音波サーモメトリの開発とその応用 長岡技術科学大学 井原 郁夫
- (3) 総合討論 (16:30 – 17:00) 講演講師、司会：近藤 義広

定員 先着 40 名

資料集 本セミナーに参加された方に、資料集をメール配信いたします。資料集のみの販売はいたしません。

申込方法 伝熱学会ホームページ上の申込フォームからお申し込みください。

問合せ先 (公社) 日本伝熱学会 (担当 大澤) / 電話 (03) 3259-7919 / FAX (03) 5577-7939

/ E-mail : office@htsj.or.jp



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）：ichiyonagi@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

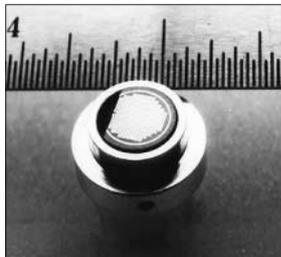
【注意】

- ・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



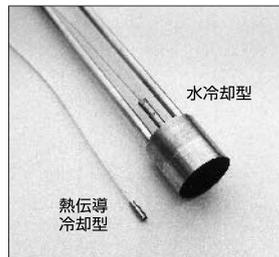
特徴

- 最高速の応答 (約 6 μ 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

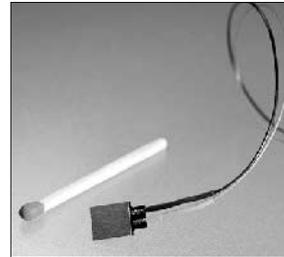


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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

gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、72 m^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)

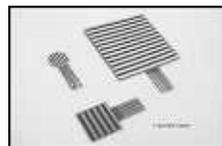
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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

新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の影響で、様々な行事やイベントのオンライン化が進められています。日本伝熱学会においても、この春に中止となった伝熱シンポジウムの再チャレンジとして、優秀プレゼンテーション賞セッションをはじめとした特別オンラインセッションが9月から10月にかけて実施されます。また、講習会や各支部の総会やセミナーなどもオンラインによる開催が進められています。コロナ禍で否応なしに迫られた対応ではありますが、場所を問わずに参加できるなどオンラインならではのメリットも多く、コロナ後においても積極的に活用されていくのではないかと思います。同時に、一堂に会する集会についても、その良さを改めて実感しているところです。

さて、本号では「エレクトロニクス機器の熱設計」の特集を西剛伺先生に組んでいただきました。電子機器の冷却は数十年前からのテーマですが、機器の小型化・高性能化とともに熱設計は進化しており、本特集では熱設計の現状についてご理解いただけるのではないかと思います。また、「ヒストリーQ」では日本刀における伝熱技術とその研究を、「委員会報告」では特定推進研究として行われた次世代鉄鋼材料創製技術の研究報告を、「海外レター」ではロードアイランド大学滞在記をご寄稿いただきました。ご多用にもかかわらずご寄稿くださった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

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