

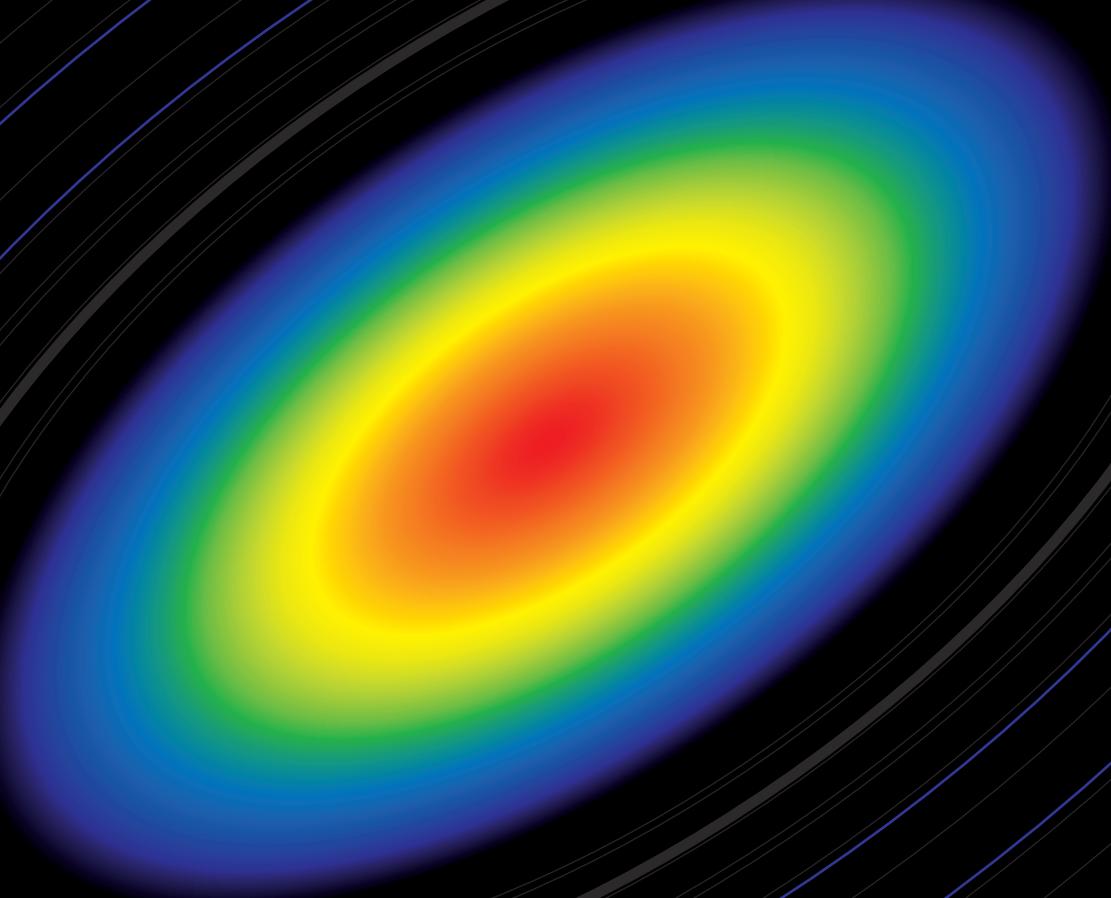
# 伝熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 **Vol. 59, No. 246**  
2020. 1

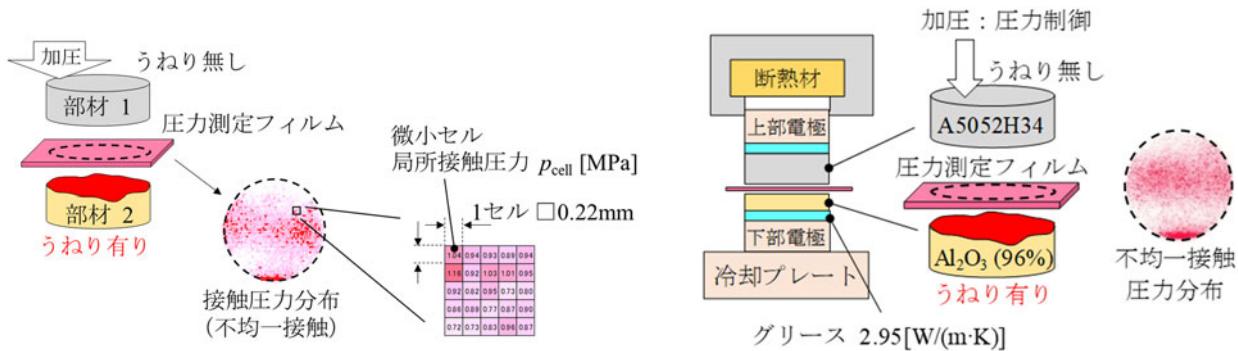
*Thermal Science and Engineering*

ISSN 0918-9963 **Vol. 28, No. 1**  
2020. 1

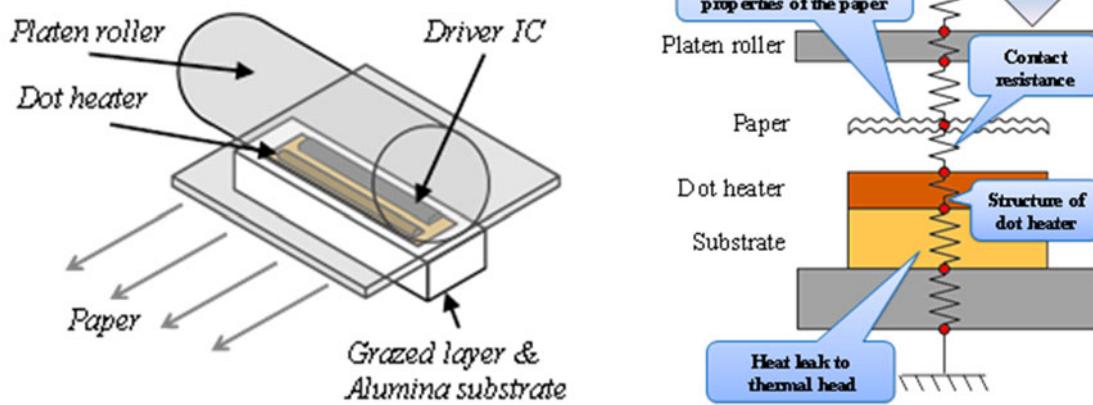


HJSJ

◆特集：接触熱抵抗の評価と低減－基礎研究と実用化の進展－



(特集記事「圧力測定フィルムを利用した接触熱抵抗の評価方法（青木 洋稔）」より)



左：感熱印刷のイメージ図 右：対応する熱回路網

ドットヒータ（微細な抵抗体）が多数実装されたサーマルヘッドと呼ばれる印刷機とプラテンローラの間を、色素を塗布した感熱紙が通過する。このとき、印刷する文字や画像に応じ、対応するドットヒータを通電加熱させ感熱紙に熱を加える。感熱紙に塗布された色素が熱により変色し、その結果、用紙に文字や画像が印刷される。

(特集記事「感熱印刷プロセスに影響する接触熱抵抗の評価（福江 高志）」より)

# 伝 熱

## 目 次

### 〈巻頭グラビア〉

青木 洋稔 (KOA 株式会社)・福江 高志 (金沢工業大学) ..... 表紙裏

### 〈特集：接触熱抵抗の評価と低減－基礎研究と実用化の進展－〉

電子機器における接触熱抵抗予測と接触面での熱縮流の影響	.....	畠山 友行, 兵藤 文紀 (富山県立大学)	1
非定常法による接触熱抵抗の測定と評価	.....	吉田 篤正, 加賀田 翔 (大阪府立大学)	7
高熱流束環境下における TIM 及び接触圧力印加による接触熱抵抗低減効果の検証	.....	木伏 理沙子 (山口東京理科大学)	14
電子機器における接触熱抵抗の低減技術	.....	篠田 卓也 (株式会社デンソー), 安井 龍太 (株式会社マイテック)	19
圧力測定フィルムを利用した接触熱抵抗の評価方法	.....	青木 洋稔 (KOA 株式会社)	25
感熱印刷プロセスに影響する接触熱抵抗の評価	.....	福江 高志 (金沢工業大学)	31

### 〈ヒストリーQ〉

人と熱との関わりの足跡 (その 6) －阿波藍の発展と藍染めの伝統技術における熱との関わり－	.....	河村 洋 (公立諏訪東京理科大学)	
	.....	船井 由美子 (三木文庫), 新居 修 (新居製藍所)	37

### 〈エデュケーション Q〉

ニュートンの冷却法則 (その 3) －強制対流実験－	.....	圓山 重直 (八戸高専), 守谷 修一 (東北大学)	46
----------------------------	-------	----------------------------	----

### 〈報告〉

The 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow -2019 開催報告	.....	須賀 一彦, 金田 昌之 (大阪府立大学)	52
日本伝熱学会主催講習会「計測技術～温度・熱流・熱伝導率測定の基礎と応用～」開催報告	.....	羽鳥 仁人 (ベテル), 近藤 義広 (日立アカデミー), 西 剛伺 (足利大学)	55

### 〈行事カレンダー〉 ..... 59

### 〈お知らせ〉

第 57 回日本伝熱シンポジウムのご案内	.....	60
優秀プレゼンテーション賞 (第 57 回日本伝熱シンポジウム) について	.....	66
・事務局からの連絡	.....	67

### 〈編集出版部会ノート〉 ..... 71

## **CONTENTS**

### **<Opening-page Gravure: heat-page>**

Hirotoshi AOKI (KOA Corporation)	
Takashi FUKUE (Kanazawa Institute of Technology) .....	Opening Page

### **<Special Issue: Evaluation and Reduction of Thermal Contact Resistance — Progress in Basic Research and Practical Application —>**

Prediction of Contact Thermal Resistance in Electronics and Constriction Heat Flow at Contact Surface Tomoyuki HATAKEYAMA, Yoshiki HYODO (Toyama Prefectural University) .....	1
Measurement and Evaluation of Thermal Contact Resistance by Unsteady-State Method Atsumasa YOSHIDA, Kakeru KAGATA (Osaka Prefecture University) .....	7
Verification of the Reduction Effect of Contact Thermal Resistance with TIM and Contact Pressure in High Heat Flux Risako KIBUSHI (Sanyo-Onoda City University) .....	14
Technique for Reducing Thermal Contact Resistance of Electronic Control Unit Takuya SHINODA (DENSO CORPORATION), Ryuta YASUI (MEITEC CORPORATION) .....	19
Evaluation method of contact thermal resistance using pressure measurement film Hirotoshi AOKI (KOA Corporation) .....	25
Evaluation of Effects of Contact Thermal Resistance on Direct Thermal Printing Process Takashi FUKUE (Kanazawa Institute of Technology) .....	31

### **<History Q>**

Footprints of the relationship between humans and heat (Part 6) -Development of Awa Indigo and the Relationship between Traditional Indigo Dyeing and Heat- Hiroshi KAWAMURA (Suwa Univ. of Science), Kumiko FUNAI (Miki Archives), Osamu NII (Nii Indigo Factory) .....	37
---	----

### **<Education Q>**

Newton's Law of Cooling, Part 3, Experiment on Forced Convection Shigenao MARUYAMA (INT, Hachinohe College), Syuichi MORIYA (Tohoku University) .....	46
---	----

### **<Conference Report>**

Report on the 7th Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2019 (ASCHT2019) Kazuhiro SUGA and Masayuki KANEDA* (Osaka Prefecture University) .....	52
Report on the Lecture "Measurement Technology, from Foundation and Application of Temperature, Heat Flux and Thermal Conductivity Measurement" Kimihito HATORI (Bethel), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Koji NISHI (Ashikaga University) .....	55

<Calendar> .....	59
------------------	----

<Announcements> .....	60
-----------------------	----

<Note from the JHTSJ Editorial Board> .....	71
---	----

## 電子機器における接触熱抵抗予測と接触面での熱縮流の影響

*Prediction of Contact Thermal Resistance in Electronics and Constriction Heat Flow  
at Contact Surface*

畠山 友行, 兵藤 文紀 (富山県立大学)

*Tomoyuki HATAKEYAMA, Yoshiki HYODO (Toyama Prefectural University)*

*e-mail: hatake@pu-toyama.ac.jp*

### 1. はじめに

電子機器の発熱密度の増大により、電子機器の熱管理が重要となっているのは周知の事実である。電子機器の放熱性を高くするためには、発熱部から外気までの熱抵抗を小さくすることが重要である。電子機器の内部の熱抵抗を小さくするためには、主に熱伝導の熱抵抗を小さくすると良い。そのため、高熱伝導性のフィラーを樹脂に混入するなど、熱伝導性の高い絶縁性材料の開発などが盛んに行われている。また、冷却部における外気への放熱に関しては、強制対流を用いた冷却を採用する機器では、対流熱伝達の熱抵抗を、自然空冷を行う機器では、対流熱伝達と輻射の熱抵抗を小さくする必要性が生じる。そのため、ヒートシンクによる表面積の増大や、ヒートシンクのフィン形状を工夫するなどして熱伝達率を高める研究・開発が必要となる。これらの熱抵抗を低減するための研究・開発が進むとともに、存在感を増してきた熱抵抗が、接触熱抵抗である。接触熱抵抗は、固体と固体を物理的に接触させることで発生する接触面において生じる熱抵抗である。固体の表面を微視的に観察すると、どれほどよく研磨した面でも微細な凹凸が存在する。<sup>[1, 2]</sup>この微細な凹凸によって、固体同士の物理的な接触面は、微細な凸部による多数の点接触で構成されている。そのため、接触面には多くの空隙部が存在し、空隙部の存在が熱の輸送を妨げる。その結果として、接触面に大きな熱抵抗が発生する。通常、我々が利用する電子機器は大気中で利用されるため、接触面の空隙部に存在する物質は空気となる。空気は熱伝導率が非常に小さいため、空気が接触面における熱輸送の大きな阻害要因となる。つまり、接触熱抵抗を小さくするためには、空隙部に存在する空気を他の熱伝導性の良い物質で置き換えればよく、接触面に塗布する熱伝導グリスなどの開発が行われている。しかしながら、近年はグリスを塗布した接触面における接触熱抵抗でも、電子機器の放熱において

問題視されるようになってきた。その要因は、主に二つ考えられる。一つは、機器全体の熱抵抗に対して、接触熱抵抗の占める割合が相対的に大きくなってきたためと考えられる。電子機器の熱管理のためには、機器全体の熱抵抗を小さくする必要がある。技術の進展に伴い、様々な熱抵抗を小さくした結果、これまで相対的に小さい値であった接触熱抵抗の占める割合が増大し、問題視されるようになってきたと考えられる。もう一つの要因は、高発熱機器の需要の増大である。自動車などに利用されるパワー・エレクトロニクス機器の需要の増大により、大きな発熱密度を有するデバイスからの放熱の必要性が増している。機器の温度上昇は、発熱量に熱抵抗を乗じることで計算できる。つまり、発熱量が大きくなると、小さな熱抵抗の部位で生じる温度上昇も大きくなる。例えば、ある発熱量の接触面で  $0.1^{\circ}\text{C}$  の温度上昇であったとしても、発熱量が 100 倍になると温度上昇は  $10^{\circ}\text{C}$  となる。電子機器の温度管理では、シリコンを材料とした半導体を用いる機器の場合、最も高温になる半導体デバイス部の許容温度が  $125^{\circ}\text{C}$  から  $175^{\circ}\text{C}$  程度であるため、 $10^{\circ}\text{C}$  の温度上昇は無視できない値となる。そのため、小さな熱抵抗であっても大きな問題となってしまい、接触熱抵抗が問題視されるようになってきたと考えられる。

[3]

以上のように、接触熱抵抗は電子機器の放熱における障害である一方で、電子機器を設計する際の温度予測においても大きな障害となっている。その理由は、接触熱抵抗が材料の表面粗さや接触圧力などの接触状態によって変化し、予め知ることのできない値であるからである。数値解析などを用いて機器の温度を予測する際、機器を構成する電子部品などの内部に関しては、熱伝導率などの物性値を入力することが可能である。しかし、接触熱抵抗は部品同士の接触状態によって変化してしまうため、実際に機器で利用する際と同じ接触状態を再現して計測

するなど、なんらかの形で計測する必要が生じる。つまり、接触熱抵抗は、設計の初期段階におけるコンピュータのみでの機器の温度予測の障害になっている。以上のように、接触熱抵抗は、その値自体を小さくする必要があるとともに、正確な値を予測することも求められている。本稿では、接触熱抵抗の予測に関する検討事例を紹介する。

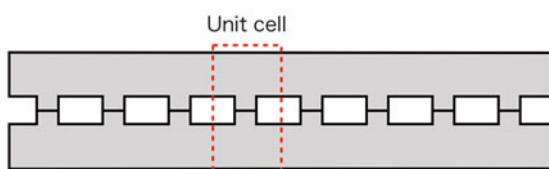
## 2. 接触熱抵抗の予測式

接触熱抵抗の予測に関しては、橋・佐野川によって古くから検討されている。橋・佐野川が提案している式は、接触面を簡易的にモデル化し、ユニットセルと呼ばれる簡易モデルにおける熱抵抗を定式化したものである。ただし、橋・佐野川の式は、原子力分野での応用を目的として検証されてきたため、接触圧力が 1 MPa 以上の場合での適用が推奨されている。<sup>[4, 5]</sup>一方で、電子機器においては、部品の接触圧力が 10~1000 kPa であると言われており、橋・佐野川の式での接触熱抵抗の予測精度が保証されていない。以下、橋・佐野川の式の導出を紹介するとともに、電子機器における接触圧力範囲での適用可能性を議論する。

図 1 に、接触面のモデル化のイメージ図を示す。接触面は、図 1(a)のように複雑でランダムな多数の点接触で構成されている。このような接触面を、図 1(b)に示すようなモデル化により、一定の高さの凸部が、一定のインターバルで繰り返し並んでいる構造であると仮定する。更に、繰り返し構造の一部のみを取り出し、これをユニットセルと呼ぶ。



(a) 接触面のイメージ図



(b) モデル化した接触面

図 1 接触面のモデル化

図 2 に、ユニットセルの詳細を示す。ここでは、

ユニットセル上側の材料を材料 1、下側の材料を材料 2 とする。材料 1 と材料 2 の接触部は、材料同士が直接接觸している真実接觸部と、空隙部によって構成される形となっている。真実接觸部の面積を  $a$  とし、空隙部も含むユニットセル全体の面積を  $A$  とする。材料 1 および 2 の真実接觸部の高さを  $z_1, z_2$  とする。また、材料 1, 2 および空気の熱伝導率を、それぞれ  $k_1, k_2, \lambda$  とする。

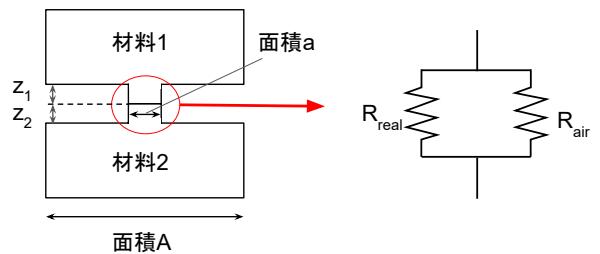


図 2 ユニットセルモデル

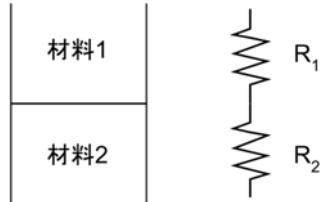


図 3 真実接觸部の熱抵抗

このユニットセルモデルにおける、真実接觸部と空隙部の合成熱抵抗を求める。まず、ユニットセルモデルの接觸部では、図 2 に示すように、真実接觸部と空隙部の並列の熱抵抗となっているため、合計の熱抵抗は式 1 のようになる。ここで、 $R_{real}$  は真実接觸部の熱抵抗、 $R_{air}$  は空隙部の熱抵抗である。

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{real}} + \frac{1}{R_{air}} \quad (1)$$

更に、真実接觸部の熱抵抗は、図 3 に示すように材料 1 と材料 2 の直列の熱抵抗となっているため、合計の熱抵抗は式 2 のようになる。

$$R_{real} = R_1 + R_2 \quad (2)$$

ここで、 $R_1$  と  $R_2$  は、それぞれ材料 1 と材料 2 の熱抵抗である。

$R_1$  と  $R_2$  は、式 3 および式 4 で算出できる。

$$R_1 = \frac{z_1}{k_1 \frac{a}{A}} \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{z_2}{k_2 \frac{a}{A}} \quad (4)$$

これらを式 2 に代入することにより、式 5 を得る。

$$R_{real} = \left( \frac{z_1}{k_1} + \frac{z_2}{k_2} \right) \frac{A}{a} \quad (5)$$

また、空隙部の熱抵抗は、式 6 で求めることができる。

$$R_{air} = \frac{z_1 + z_2}{\left(1 - \frac{a}{A}\right) \lambda} \quad (6)$$

式 5 と式 6 を、式 1 に代入することにより、式 7 を得る。

$$R = \frac{1}{\frac{1}{k_1} \frac{a}{z_1 + z_2 A} + \frac{\lambda}{z_1 + z_2} \left(1 - \frac{a}{A}\right)} \quad (7)$$

式 7 が、橋が提案した接触熱抵抗の予測式である。

しかし、この式を用いて算出した値は、実測した熱抵抗よりも小さな値を示す。その原因是、真実接触部に流れ込む熱の縮流と、真実接触部から流れ出す熱の急拡大の影響である。流体と同様に、熱流も縮流や急拡大（以下、急拡大も含めて縮流と呼ぶ）によって、抵抗が発生する。式 7 では、これらの影響が考慮されていないため、実測よりも小さな熱抵抗が算出されることとなる。そこで、式 7 をベースとして、熱縮流の影響を加味した式 8 が、佐野川によって提案された。

$$R = \frac{1}{\frac{1}{k_1} \frac{a}{\frac{1}{h_0} + \frac{z_2}{k_2} A} + \frac{\lambda}{z_1 + z_2} \left(1 - \frac{a}{A}\right)} \quad (8)$$

ここで、 $1/h_0$  が熱縮流の影響を表した項であり、 $1/h_0$  は、式 9 で表される。

$$\frac{1}{h_0} = 2.3 \times 10^{-5} \left( \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) \quad (9)$$

また、真実接触部とユニットセルの面積比は、次式で近似することができる。[1]

$$\frac{a}{A} = \frac{P}{H} \quad (10)$$

ここで、 $P$  は接触圧力、 $H$  はヴィッカーズ硬さである。 $(H$  はヴィカーズ硬さ、ブリネル硬さのうち、軟らかい方という考え方もある)

本稿では、式 7 を橋の式、式 8 を橋・佐野川の式と呼ぶ。

先にも記したとおり、これらの式は 1 MPa 以上の接触圧力を想定しており、電子機器の接触圧力範囲での適用性の検証が必要である。そこで、電子機器の接触圧力範囲で、接触熱抵抗を実測した結果と式 7 および式 8 から算出された値とを比較し、式の適用性を検証した。

### 3. 接触熱抵抗の計測

接触熱抵抗の計測には、富村らが考案した定常法の熱抵抗計測装置を用いた。[6] 図 4 に、計測装置全体図を示す。また、図 5 に、テストセクションの拡大図を示す。装置は天秤型になっており、重りの重さを変更することで、テストセクションに印加する接触圧力を変更することが可能である。テストセクションは、二本の真鍮製ロッドの間にサンプルを挟み、上部ロッドの上面をヒータで加熱し、下部ロッドの下面を循環冷却水によって冷却された銅ブロックで冷却する形になっている。上下ロッドそれぞれの、温度勾配を熱電対で計測する。計測された温度勾配を用いて、サンプル上下面の温度差を求めるとともに、フーリエの法則によってロッド内部を流れる熱流を求める。求められた温度差と熱流を用いて、式 11 より熱抵抗を求める。

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (11)$$

ここで、 $\Delta T$  はサンプル上下面の温度差、 $q$  はサンプルを流れる熱流束である。

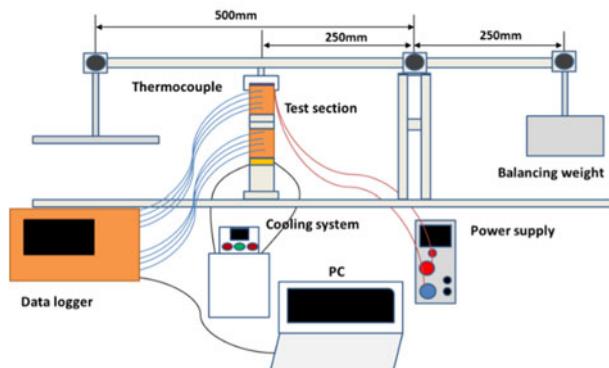


図 4 热抵抗計測装置

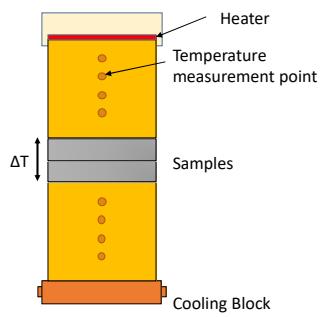


図 5 テストセクション

図 6 に、接触熱抵抗を計測したサンプルを示す。表面粗さの異なる 2 つの Al1010 同士の接触面 ( $R_a = 0.2 \mu\text{m}$  と  $R_a = 3.2 \mu\text{m}$  を接触させた接触面) における接触熱抵抗を計測した。

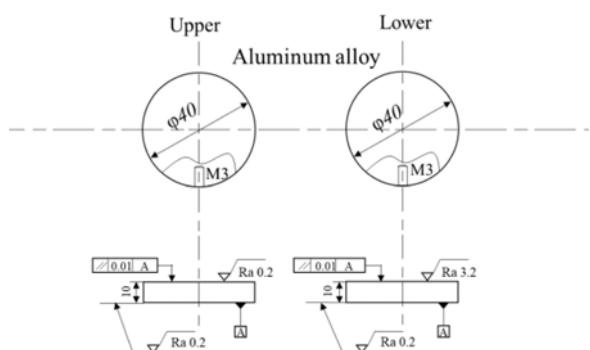


図 6 計測サンプル

図 7 に計測結果と、式 7 および式 8 から算出され

た接触熱抵抗を示す。図 5 に示す温度差を用いて式 11 より熱抵抗を求めるとき、サンプル自体の熱抵抗と接触熱抵抗の合計値が求められることから、式 11 より得られた値から、サンプル自体の熱抵抗を引くことによって、接触熱抵抗のみを算出している。図から明らかなように、計測された接触熱抵抗は、式 7(グラフ中 Tachibana) と式 8(グラフ中 Tachibana & Sanokawa) の間の値となっている。このことから、電子機器接触圧力においても熱縮流の影響があることがわかるとともに、式 8 では熱縮流の影響を過大評価していることがわかる。しかしながら、式 8 の結果と計測結果に大きな差はない、式 8 でも電子機器接触圧力の範囲において、接触熱抵抗の値を予測可能であるとも言える。

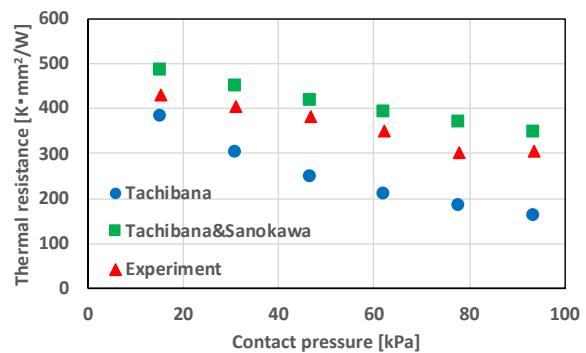


図 7 計測結果と予測式の比較

#### 4. 接触面における熱縮流の影響

接触熱抵抗の計測結果と式 7 および式 8 の結果を比較することで、熱縮流の影響を考慮しない場合は接触熱抵抗を小さく見積もることになり、式 8 の形で熱縮流の影響を考慮した場合は、接触熱抵抗を大きく見積もることになることがわかった。この結果より、電子機器接触圧力の範囲でのさらなる予測精度を求めるためには、式 8 における熱縮流の項を見直す必要がある。そこで、図 2 に示す単位セルモデルを解析ソフト上で再現し、熱伝導解析によって熱縮流の影響の考察を行った。解析には、ソフトウェアクレイドル製 Stream V14 を利用した。

ユニットセルモデルにおいて、接触圧力の影響は、式 10 より、接触圧力の変化に伴い真実接触部の割合が変化することを利用して、真実接触部の面積を変化させることによって表現した。また、実験と同様に、ユニットセルモデルの上面に熱流束を与える

ユニットセル内部を上部から下部に熱が通過する条件で接触熱抵抗を検証した。

作成したユニットセルモデルから得られた接触熱抵抗と実験結果の比較を、図8に示す。この結果から分かるように、ユニットセルモデルでの解析結果は、実験結果と良い一致を示し、モデルの妥当性が確認できる。

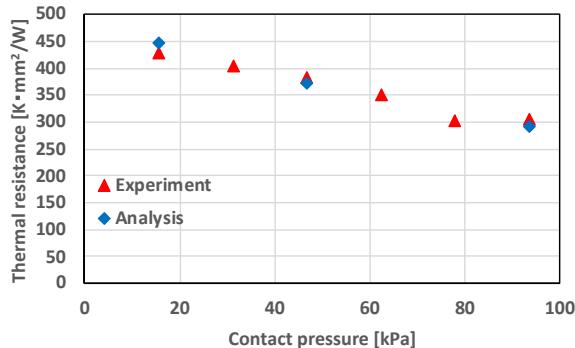


図8 解析と実験結果の比較

図9に、ユニットセルモデルにおける真実接触部を流れる熱流の割合を示す。このグラフでは、ユニットセルモデル中を上部から下部に通過する全熱流に対して、真実接触部を流れる熱流の割合を示している。グラフから明らかなように、接触圧力が大きくなるにつれて、真実接触部を流れる熱流の割合が大きくなることがわかる。また、接触圧力が大きくなるにつれて、真実接触部を流れる熱流の割合が飽和する傾向にあることが分かる。真実接触部に流れる熱流の割合が大きいほど、縮流の影響が大きくなると考えられるため、縮流による熱抵抗は、接触圧力が小さいほど小さく、接触圧力が大きくなるにつれて増大し、飽和する傾向になるとされる。式9を見ると、橘・佐野川の式では、接触面における熱縮流は、材料の熱伝導率のみに依存する形になっている。これは、橘・佐野川の式では、接触圧力が大きい場合をターゲットとしているためであり、図9で検証している接触圧力よりも大きな接触圧力の範囲で、真実接触部を流れる熱流が飽和する傾向になることから、合理的な式であると考えられる。一方で、電子機器を対象とした接触圧力の範囲では、図9に示すように熱縮流の影響が接触圧力に依存する形になるため、式9で表現される熱縮流による熱抵抗は、熱縮流の影響を過大評価してしまうと考えられる。つまり、電子機器における接触圧力の範

囲では、橘・佐野川の式をベースとして、熱縮流の項を修正することにより、より正確な接触熱抵抗の予測が可能となると考えられる。

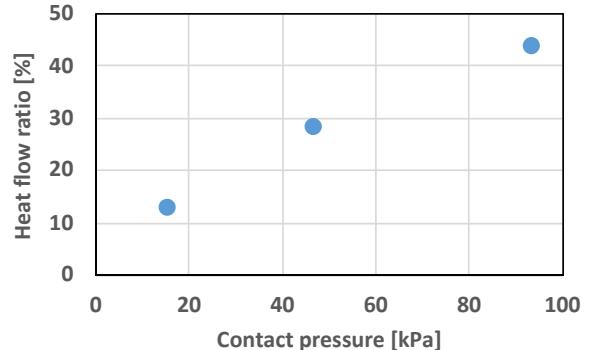


図9 真実接触部を流れる熱流の割合

## 5. おわりに

本稿では、電子機器の熱管理における接触熱抵抗の問題点を紹介するとともに、従来提案されている接触熱抵抗の予測式である橘・佐野川の式を紹介し、電子機器における適用可能性を議論した。橘・佐野川の式は、接触面の妥当なモデル化を行い、接触面での熱抵抗を理論的に考慮して式を構築していることから、非常に信頼性の高い式であると言える。つまり、橘・佐野川の式をベースとして、接触熱抵抗の値を議論することに疑問の余地はない。このことは、電子機器の接触圧力の範囲における接触熱抵抗の実測結果が、橘・佐野川の式と同じオーダーの値を示すことからも裏付けられた。電子機器の熱管理に対して、橘・佐野川の式を適用する際の唯一の問題点は、接触圧力が小さいことによる熱縮流の熱抵抗の影響である。本稿では、数値解析を用いて、熱縮流の影響を考察した結果の一例を紹介した。その結果、橘・佐野川の式が対象としている接触圧力の範囲では、熱縮流による熱抵抗が材料の熱伝導率のみに依存することが示唆された一方で、電子機器の接触圧力の範囲では、熱縮流による熱抵抗が接触圧力にも依存することが示された。このことから、橘・佐野川の式の熱縮流の項を修正することにより、橘・佐野川の式を用いて電子機器の熱管理における接触熱抵抗を高い精度で予測可能なことが示唆された。

参考文献

- [1] Holm, R., *Electric Contacts*, Springer (1999).
  - [2] 日本機械学会, 伝熱工学資料 改訂第5版, 日本機械学会 (2009) .
  - [3] Tokuyama, T. et al., A Novel Direct Water and Double-Sided Cooled Power Module for HEV/EV Inverter, Proc. of ICEP2014, WA1-2 (2014).
  - [4] 橘藤雄, 接触面の熱抵抗に関する研究, 日本機械学会誌, 102-107 (1952) 55-397.
  - [5] 佐野川好母, 金属接触面における伝熱に関する研究 : 第4報, 接触面の表面あらさの形状・うねりの影響と接触熱抵抗の近似計算法, 日本機械学会論文集, 1131-1137 (1967) 33-251.
  - [6] Tomimura, T. et al., Simple evaluation method for temperature drop at contact interface between rough surfaces under low contact pressure conditions, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 012040 (2014) 61.
-

## 非定常法による接触熱抵抗の測定と評価

*Measurement and Evaluation of Thermal Contact Resistance  
by Unsteady-State Method*

吉田 篤正, 加賀田 翔 (大阪府立大学)

*Atsumasa YOSHIDA, Kakeru KAGATA (Osaka Prefecture University)*

*e-mail: ayoshida@me.osakafu-u.ac.jp*

### 1. はじめに

一般に固体材料は接触面の凸凹により接触面は完全に密着せず、接触熱抵抗が生じる。接触熱抵抗とは接触面の凸凹による実質的な接触面積の減少や、隙間に熱伝導率の低い空気が介在することにより接触面で熱の流れが阻害される現象である。

これまで接触面の表面粗さや、接触圧力が接触熱抵抗に与える影響や、接触面間に金属箔やフィラーを挿入した場合の接触熱抵抗低減の効果に関する研究([1] - [9])などを行なわれている。それらの研究から接触圧力が高いほど、接触面が滑らかであるほど接触熱抵抗は低いことや、薄く柔らかい接触材を接触面に挟むと、接触熱抵抗は低減されることなど、定性的な部分は明らかとなっている。また表面粗さ、接触圧力、硬度などから接触熱抵抗を推定する実験式も多く提案されている。しかし、接触熱抵抗は現象が数多くの因子に支配される為、その時どきの接触状態に大きく左右される。実際の接触状況を数値的に正確に把握することは容易ではなく、ある実験結果がそのまま他の場合に適用できるとは限らない。したがって接触熱抵抗を推定する実験式が実際の設計に使用できることは多くない。

これまで接触熱抵抗の測定には、伝熱実験で定常状態における温度勾配を測定する定常法が多く用いられてきた。しかし定常法による測定は試料内の温度が一定になるまで長い時間を要する上、温度を測定するために熱電対などのセンサを試料に直接接触させる必要があり、例えばセンサを取りつけられないような微小なサイズの試料に対しての測定は困難である。近年、従来の定常法以外の方法による接触熱抵抗の評価も試みられている([10] - [13])。

本報では光音響法を用いた接触熱抵抗の測定について検討を行なう。二つの金属を接触させた試料に対して、接触圧力、接触面の表面粗さ、接触

面への接触材挿入の有無をパラメータとした測定を行ない、光音響法による接触熱抵抗の評価を試みた。また従来から用いられる定常法でも同様の条件で測定を行い、光音響法による測定結果との比較、評価を行なった。

### 2. 接触熱抵抗を考慮した測定理論

固体試料に関する光音響法の測定理論は RG 理論と呼ばれ、Rosenzwaig and Gersho[14]により定式化されている。RG 理論は、図 1 に示す気体(g)・試料(s)・基盤(b)の三つの層から成るモデルを用いて、各層における一次元熱伝導方程式を考えている。

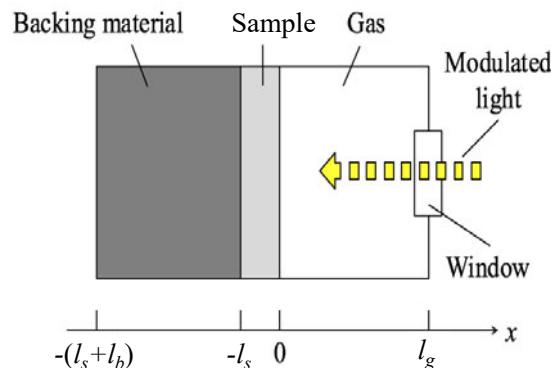


図 1 光音響法二層材料測定モデル

既述の RG 理論では、試料と基盤との境界面で温度は連続であるが、接触熱抵抗が存在する場合は図 2 のように境界面において見かけ上、温度は不連続となる。接触熱抵抗  $R$  [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] は接触面に生じる見かけの温度差  $\Delta T$  [K] と接触面を通る熱流束  $q_c$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] を用いて次のように定義される。

$$R = \frac{\Delta T}{q_c} \quad [\text{m}^2\text{K}/\text{W}] \quad (1)$$

ここで接触熱抵抗を考慮した光音響法測定モデルを考える。図 1 の 2 層モデルにおいて 1 層目と 2

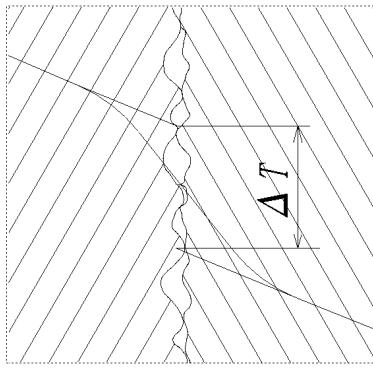


図 2 接触面近傍の温度分布

層目の間に接触熱抵抗が存在する場合を考える。両者の温度境界条件は接触熱抵抗の定義に従って次のように表わされる。

$$T_s(-l_s, t) - T_b(-l_s, t) = R k_b \frac{\partial T_b}{\partial x}(-l_s, t) \quad (2)$$

ここで、 $k$  は熱伝導率を表す。この関係を 1 層目と 2 層目の間の境界条件として各層の熱伝導方程式を解き、光音響信号を導くと、光音響信号の位相遅れ  $\phi$  は接触熱抵抗  $R$  を変数に含む関数として表わされる。

$$\phi = (f : \xi, b, R) \quad (3)$$

$$\xi = \frac{l_s}{\sqrt{\alpha_s}} \quad b = \frac{k_b \sqrt{\alpha_s}}{k_s \sqrt{\alpha_b}} \quad (4)$$

ここで、 $\alpha$  は熱拡散率を表す。 $b$  は試料と基盤の熱浸透率の比を意味する。

### 3. 測定理論に基づいた計算

前章の接触熱抵抗を考慮した理論モデルに基づいて変調周波数に対する光音響信号の位相遅れを計算し、接触熱抵抗が位相遅れに与える影響を調べた。一層目は厚さ 50 μm の Ti の薄板、二層目は Ti のバルク試料とし、接触熱抵抗  $R$  を種々変化させて位相遅れを計算した。計算に際して Ti の熱物性値は文献[15]の値を用いた。

計算結果を図 3 に示す。接触熱抵抗が小さいほど位相遅れのピーク値が小さくなることが分かる。吸光係数を  $K$ 、熱拡散長を  $\mu$  とすると、光学的に不透明で熱的に厚い試料( $l_s \geq I/K$ ,  $l_s \geq \mu_s$ )から得られる光音響信号の位相遅れは、熱物性値、変調周

波数に依存せず 45° 一定となる。つまり同じ材質の固体同士を接触させた試料において、接触面に接触熱抵抗が存在しなければ、それは熱的に厚い単一の材料と同じであり、位相遅れは 45° 一定となる。そして接触熱抵抗が存在する場合も接触熱抵抗が小さいほど、その熱的性質は単一の材料に近くなるため位相遅れは 45° に近づく。

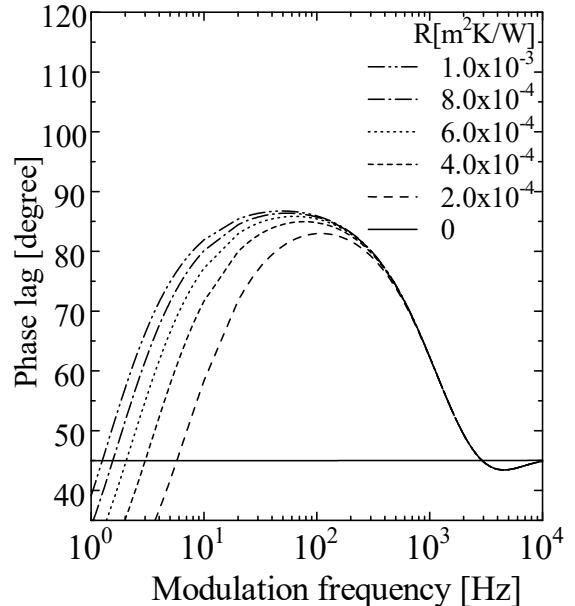


図 3 接触熱抵抗と位相遅れの関係

### 4. 実験方法および試料

光音響法で接触熱抵抗の測定を試みると共に、その測定結果の検証、評価のため従来から接触熱抵抗の評価に用いられる定常法でも同様の測定を行なった。どちらの測定においても接触熱抵抗に影響する要因である接触面の表面粗さ、接触圧力、接触材の有無をパラメータとし、各要因が接触熱抵抗に与える影響を調べた。いずれの測定においても試料として 2 つの Ti を接触させたものを用いた。測定装置は文献[16]を参照して下さい。

下記 2 つの材料 (A, B) を接触させたものを試料とし光音響信号の位相遅れを測定した。

A. 薄板 (Ti, 直径 12 mm, 厚さ 0.050 mm)

B. バルク材 (Ti, 直径 12 mm, 厚さ 13 mm)

接触面の表面粗さの影響を調べる為に三種類の表面粗さを持つバルク材を準備した。接触する端面をそれぞれ #120, #220, #1000 の砥石で磨き、表面粗さに差を持たせている。薄板と各バルク材の表面粗さを表 1 に示す。表面粗さは輪郭形状測

表1 各試料の表面粗さ(光音響法測定試料)

	A (Plate)	B-1 (Bulk)	B-2 (Bulk)	B-3 (Bulk)
$R_a$ [μm]	0.080	1.141	0.979	0.205
$R_t$ [μm]	0.627	7.603	6.535	1.530
$R_{max}$ [μm]	0.811	13.053	8.196	1.995

定機（ミツトヨ製 CS-5000）で測定した。なお接触状態の再現性を得る為に薄板は常に同じものを使用した。

これら3種類の粗さの試料について、それぞれ接触圧力を0.16～7.0 MPaの範囲で変化させて光音響信号の測定を行なった。また接触熱抵抗を低減させる効果のあるシート状の接触材（シリコン材料）を接触面に挟んだ場合についても測定を行ない、その効果を調べた。一回の測定に要する時間はおよそ5分間である。なお測定に用いたTiの耐力は一般的に200 MPa程度であり、本測定における接触圧力による材料の変形は弾性領域内である。

定常法では、試料には直径40[mm]、長さ45[mm]のTiの円柱2つを接触させたものを用いた。加熱側の試料（Sample2）の端面にシリコンラバーヒーター（直径40[mm]）を密着させて加熱し、冷却側の試料（Sample1）をサーモモジュール（ペルチェ素子、40[mm]×40[mm]）で冷却し試料長手方向に温度勾配を生じさせた。サーモモジュールには放熱のためにアルミ製のヒートシンクを設置し、そこへ冷却用ファンで風を送り冷却した。試料の側面は断熱のため発泡スチロールで覆った。

各試料には接触面から8, 16, 24, 32, 40[mm]の位置に直径0.6[mm]深さ10[mm]の温度測定用の穴を設け、そこへ直径約0.6[mm]のT型熱電対を挿入して温度を測定した。穴が熱伝導に与える影響を小さくするために、各穴は円周方向に60°ずつずらした位置に設けた。接触圧力は押し付けねじ（M8）1本を締め付けることによって得られ、押し付けねじとSample2との間に設置した小型コードセルにより接触荷重を測定した。

10分間あたりの温度変動が0.1[K]以下となった状態を定常状態としてその時の各測定点における温度を測定した。1条件につきおよそ1時間の測定時間を要した。表面粗さの異なる2種類の試料を用いた。それぞれ粗さの異なる2種類の湿式サ

ンドペーパー（#120,#2000）を使用して表面を磨いた。表面粗さの測定結果を表2に示す。

表2 各試料の表面粗さ（定常法測定試料）

	Sample1	Sample2-a	Sample2-b
$R_a$ [μm]	0.106	0.505	0.110
$R_t$ [μm]	0.935	3.346	0.910
$R_{max}$ [μm]	1.264	4.558	1.151

## 5. 測定結果および考察

定常法による測定結果の例を図4に示す。実線は測定値の一次式による最小二乗近似である。この実線より接触面における温度差 $\Delta T$  [K]を求め、実線の勾配とTiの熱伝導率[15]とを用いて平均熱流束 $q_c$  [W/m<sup>2</sup>]を算出し、接触熱抵抗の定義式(1)に従って接触熱抵抗 $R$  [m<sup>2</sup>K/W]を算出した。

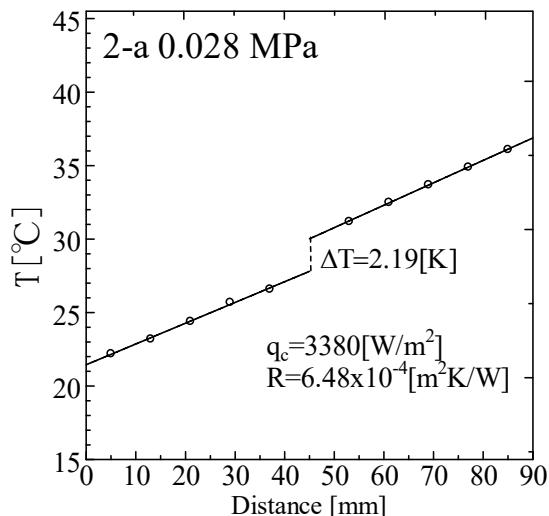


図4 定常法による温度分布測定例

各条件において求めた接触熱抵抗値を図5に示す。各値は同条件にて2～3回の測定から得られた値の平均値である。表面粗さの違いによる接触熱抵抗の差を見ると、表面が滑らかな試料2-bの方が、表面が粗い2-aに比べて接触熱抵抗が低いことが分かる。接触圧力の違いによる差を見ると、表面が粗い試料2-aにおいて圧力が高い領域で圧力の増加に伴って接触熱抵抗は低下する傾向が見られる。一方、表面が滑らかな試料2-bは圧力による変化が見られない。これは試料2-bは表面が滑らかであり接触面の凸凹が小さいため、接触圧

力が変化しても接触面積の変化が小さい為と考えられる。どちらの試料においても接触材を挿入した場合、接触熱抵抗は低くなり、接触材による接触熱抵抗の低減効果が確認された。

今回測定された接触熱抵抗は  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  [m<sup>2</sup>K/W]の範囲であった。接触熱抵抗に関する他の研究報告を見ると試料に黄銅を用いた場合ではあるが、接触面の中心線平均粗さが 1.0 [μm]程度で接触圧力 0.1~1.0[MPa]の時、接触熱抵抗は  $4 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$  [m<sup>2</sup>K/W]であるという実験結果が報告されている[8]。今回の測定で得られた値はそれらと同じオーダーであり、今回の測定によって得られた接触熱抵抗値は妥当な値であると言える。

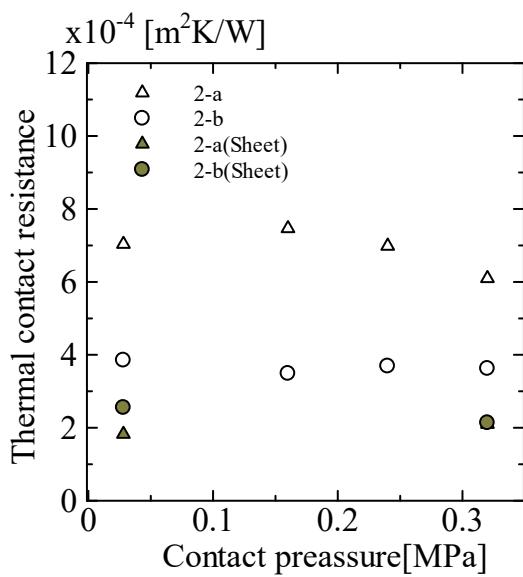


図 5 定常法による接触熱抵抗測定結果

光音響法による接触熱抵抗に関する測定結果を図 6 に示す。粗さの異なる各試料について、それぞれ接触圧力を変化させて測定した光音響信号の位相遅れである。いずれの試料においても接触圧力が高いほど、位相遅れのピーク値が低くなる傾向が見られる。

各測定結果から位相遅れのピーク値のみを抜粋した結果を図 7 に示す。接触圧力が高いほど位相遅れのピーク値が低い事が分かる。また表面粗さについては、表面が滑らかな試料ほど位相遅れのピーク値が低い傾向が見られる。

接触面の表面が滑らかであるほど、また接触圧力が高いほど、接触熱抵抗は低くなる。それら接触熱抵抗の変化の傾向と光音響法により測定され

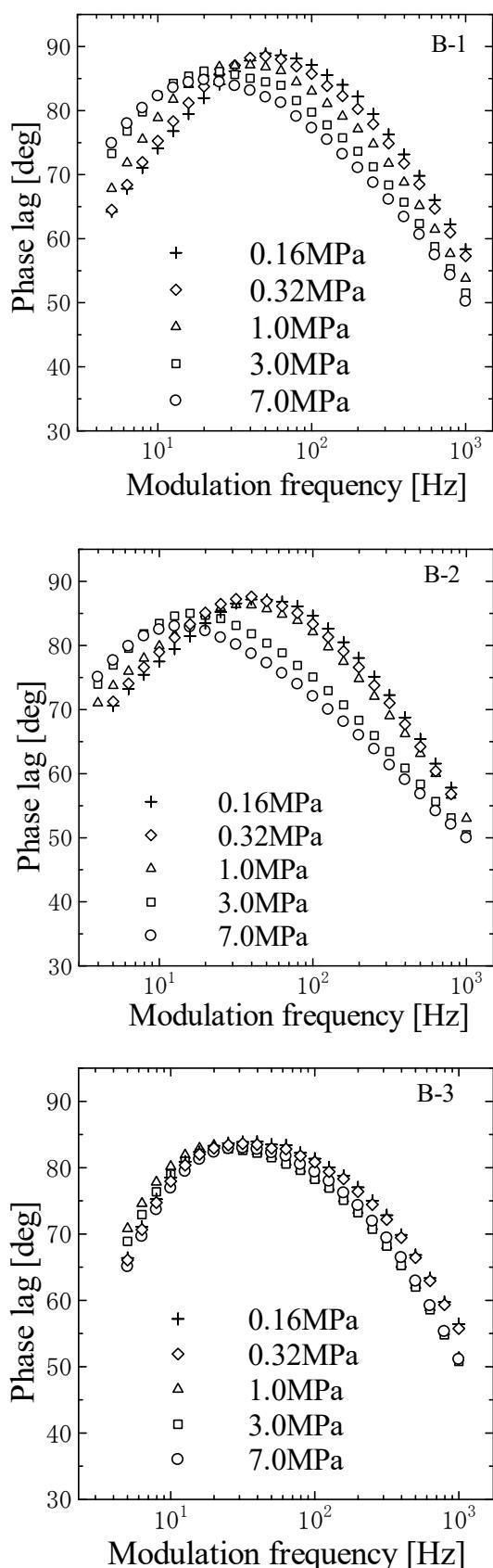


図 6 接触圧力と位相遅れ（試料 B-1, B-2, B-3）

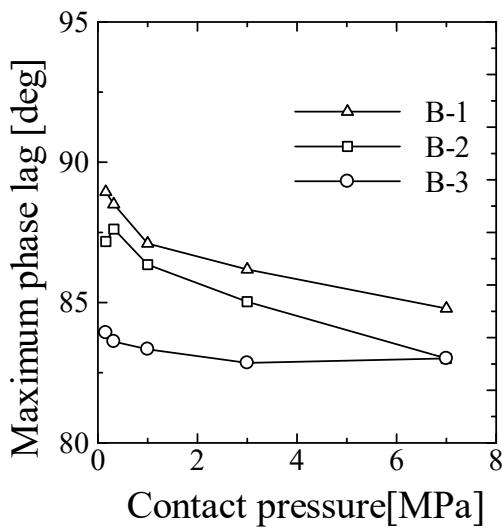


図 7 位相遅れのピーク値の比較

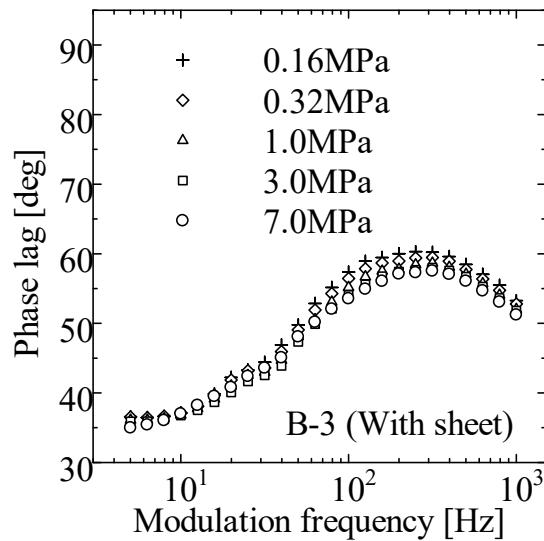
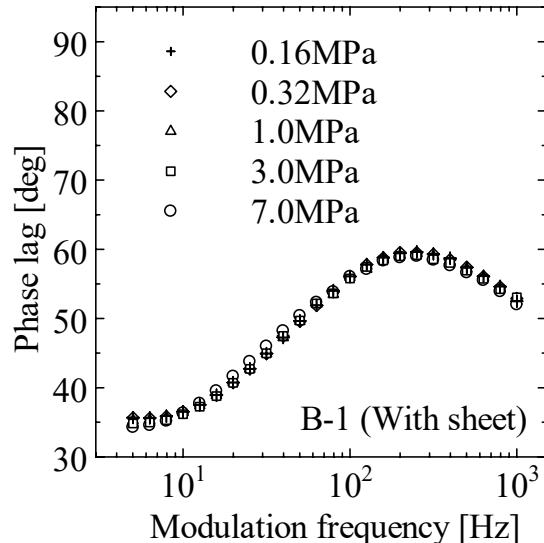
た位相遅れのピーク値の変化の傾向は一致している。

もう少し詳しく各測定結果を見みると、B-3 の試料の位相遅れは B-1, B-2 の場合に比べて特に小さい。それぞれの試料の表面粗さ（表 1）を比べると、B-1 の Ra 1.141  $\mu\text{m}$ , B-2 の Ra 0.979  $\mu\text{m}$  と比べて B-3 の試料の表面粗さは Ra 0.205  $\mu\text{m}$  であり他と比べて特に滑らかな面であることが分かる。したがって B-3 の位相遅れが他の試料と比べて特に小さいのは、表面が特に滑らかであるため接触熱抵抗が小さいからであると言える。また B-3 の試料は他の二つの場合と比べて接触圧力を変化させた際の位相遅れの変化が小さい。これも表面が滑らかであるため接触面の凸凹が小さく、接触圧力を増しても接触面積の変化が小さい為であると考えられる。これは定常法による接触熱抵抗の測定結果において見られた傾向と一致する。

接触面に接触材を挿入した場合の位相遅れの測定結果を図 8 に示す。直接接触させた場合（図 6）と比べると位相遅れのピーク値が低い。ここで用いた接触材による接触熱抵抗の低減効果は定常法による測定から確認されており、光音響法によつて接触材による接触熱抵抗の低減効果が確認されたと言える。また接触材を挿入した場合、接触面の粗さの違いによる位相遅れの差も見られない。接触材を挿入した場合、粗さによる差が見られない事も定常法による測定結果の傾向と同じである。

以上のように接触面粗さ、接触圧力、接触材の

影響による接触熱抵抗の変化に伴い、光音響信号の位相遅れのピークも同様に変化する事が確認された。これは 3 章で既述した理論値の傾向とも一致する。以上の事から光音響信号の位相遅れの、特にピーク値の大小を比較することで接触熱抵抗の変化を捉えることが可能であると言える。

図 8 接触材を挿入した場合の位相遅れ  
(試料 B-1, B-3)

## 6. 接触熱抵抗の定量的評価

位相遅れの測定結果と、接触熱抵抗を考慮した理論モデルによる理論曲線との比較から、接触熱抵抗の定量的評価を試みた。図 9 にその一例を示す。実線は理論曲線であり、接触熱抵抗  $R$  を変化させて計算を行なった結果である。測定結果と理

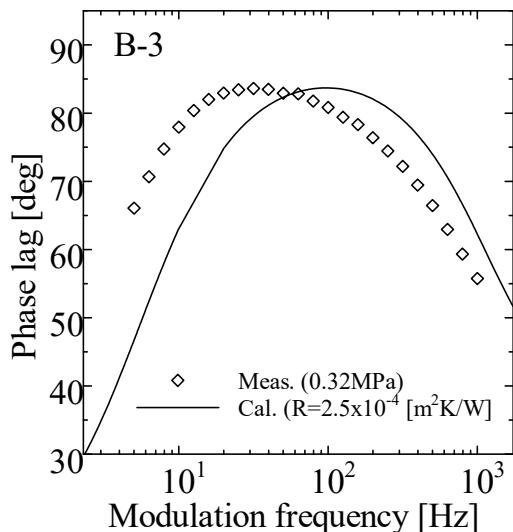


図9 位相遅れの測定値と理論値との比較

論曲線とは完全には一致しなかったが、位相遅れのピーク値の比較により接触熱抵抗の変化を捉えられることから、測定結果と理論曲線とでピーク値が一致する時の接触熱抵抗値を求めた。

その結果、例えば試料B-3（薄板  $R_a$ 0.080[μm]、バルク  $R_a$ 0.205[μm]）の接触圧力0.32[MPa]の測定結果から得られた接触熱抵抗値は  $2.5 \times 10^{-4}$  [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ]となった（図9）。それに対して定常法の測定結果の中で比較的同様の条件である試料2-b（試料1： $R_a$ 0.106[μm]、試料2-b： $R_a$ 0.110[μm]）、接触圧力0.32[MPa]の場合の接触熱抵抗は  $3.6 \times 10^{-4}$  [ $\text{m}^2 \text{K/W}$ ]である。両者のオーダーは一致しており、同様の条件下における測定結果から光音響法と定常法とで同じオーダーの接触熱抵抗値が得られた。

ただし既述の通り、測定結果と理論曲線とは完全には一致しない。本研究で用いた測定理論は熱の流れが一元的であるという仮定に基づいている。光音響法で一次元的な取り扱いが出来るのは、照射光のビーム径に対して熱拡散長が小さい時である。本研究で扱ったTiの場合、変調周波数が5[Hz]の時、熱拡散長は  $\mu=0.77$  [mm]である。レーザー径2[mm]に対して熱拡散長はそれよりも小さいが、十分小さいとは言えず、また実際にはどの程度レーザー径に対して熱拡散長が小さければ1次元的に熱の流れを取り扱えるかは不明である。今後、より正確な接触熱抵抗の定量的評価を行うためには3次元的な熱の流れを考慮した解析を行う必要があると考えられ、それは今後の課題である。

## 7. まとめ

光音響法により接触熱抵抗の存在する2層材料について位相遅れを測定し接触熱抵抗の評価方法を提案し、実験的、理論的な検討を行なった。その結果、特に位相遅れのピーク値を比較することによって接触熱抵抗の変化を捉えることが可能であることが分かった。接触面の粗さ、接触圧力、接触面への接触材挿入の有無による接触熱抵抗の変化を光音響法で捉える事ができ、それらの傾向は定常法による比較実験の結果と一致した。境界条件に接触熱抵抗を考慮した光音響法測定理論を用いて、測定結果から接触熱抵抗を算出した結果、定常法で測定された値と同じオーダーの接触熱抵抗値が得られた。測定値の精度の向上には3次元的な熱の流れを考慮した解析が必要である。

## 参考文献

- [1] 芦分範行, 大黒崇弘, 川村圭三, 頭士鎮夫, 発熱素子冷却用のマルチフィン形熱伝導体に関する研究（第2報, 発熱素子と熱伝導体間の接触熱抵抗の予測方法）, 日本機械学会論文集B編, **58-547**, (1992), 871.
- [2] 芦分範行, 発熱素子冷却用のマルチフィン形熱伝導体に関する研究（第3報, 発熱素子と熱伝導体間の接触熱抵抗への非等方性表面粗さの影響についての理論的考察）, 日本機械学会論文集B編, **58-554**, (1992), 3141.
- [3] Nishino, K., Yamashita, S. and Torii, K., *Thermal contact conductance under low applied load in a vacuum environment*, Experimental Thermal and Fluid Science, **10-2**, (1995), 258.
- [4] 大曾根靖夫, 久保貴, 中里典生, 固体接触面における接触熱コンダクタンスの金属薄膜による改善, 日本機械学会論文集B編, **71-710**, (2005), 2500.
- [5] 佐野川好母, 金属接触面における伝熱に関する研究第4報, 接触面の表面あらさの形状・うねりの影響と接触熱抵抗の近似計算法, 日本機械学会論文集, **33-251**, (1967), 1097.
- [6] Sridhar, M. R. and Yovanovich, M. M., *Thermal contact conductance of tool steel and comparison with model*, International Journal of Heat and Mass Transfer, **39-4**, (1996), 831.
- [7] 鈴木敦, 佐々木要, 桑原平吉, アルミ電解コ

- ンデンサにおけるエレメントとケース間の接触熱抵抗, 日本機械学会論文集B編, **66-645**, (2000), 1503.
- [8] Tomimura, T., *Experimental study of filler insertion effect on mean thermal contact conductance*, JSME International Journal. Series B, Fluids and thermal engineering **47-3**, (2004), 447.
- [9] 築添正, 久門輝正, 金属接触面の伝熱機構(第1報, 第2報), 日本機械学会論文集, **37-299**, (1971), 1361.
- [10] Cong, P. Z., Zhang, X. and Fujii, M., *Estimation of thermal contact resistance using ultrasonic waves*, International Journal of Thermophysics, **27-1**, (2006), 171.
- [11] 飯田嘉宏, 近藤昌弘, 金崎健, 渡辺裕之, 接触熱抵抗の非定常任意加熱による測定法, 日本機械学会論文集B編, **63-610**, (1997), 2154.
- [12] 高橋一郎, 富士原聰, 金属接触界面における熱コンダクタンスの非定常特性, 日本機械学会論文集B編, **65-639**, (1999), 3720.
- [13] Zhang, X., Cong, P. Z., Fujiwara, S. and Fujii, M., *A new method for numerical simulation of thermal contact resistance in cylindrical coordinates*, International Journal of Heat and Mass Transfer, **47**, (2004), 1091.
- [14] Rosencwaig, A. and Gersho, A., *Theory of the photoacoustic effect with solids*, Journal of Applied Physics, **47-1**, (1976), 64.
- [15] 日本熱物性学会編, 热物性ハンドブック, 養賢堂, (1990).
- [16] 加賀田翔, 山田哲也, 吉田篤正, 光音響法による固体接触面の熱抵抗の測定とその評価, 日本機械学会論文集, **81-823**, Paper No.14-00435 (Total 13pages), (2015).
-

## 高熱流束環境下における TIM 及び接触圧力印加による接触熱抵抗低減効果の検証

*Verification of the Reduction Effect of Contact Thermal Resistance  
with TIM and Contact Pressure in High Heat Flux*

木伏 理沙子（山口東京理科大学）

Risako KIBUSHI (Sanyo-Onoda City University)

kibushi@rs.sociu.ac.jp

### 1. はじめに

電子機器の中には多くの半導体素子が搭載されている。これらの半導体素子には、ロジック半導体やパワー半導体がある。特にパワー半導体は、大きな電圧や電流を取り扱う半導体で、鉄道車両や自動車、スマートフォンやノートパソコンの充電器としても使用されている。これらの半導体素子の素材は、従来はシリコン(Si)であったが、近年は省エネルギー化に貢献するとされる「次世代半導体」と呼ばれるシリコンカーバイド(SiC)やガリウムナイトライド(GaN)が注目されており、製品化が始まっている。半導体素子の素材が Si から SiC や GaN に置き換えられ、さらにはそれらの最大性能で使用されるようになると、素子には大電圧・大電流が印加される。これら素子の駆動時に起こる自己発熱により、非常に高い温度（場合によっては 200 °C から 250 °C）に到達すると予測される。<sup>[1, 2]</sup> このような、高温環境で使用される半導体素子の周辺には、多くの素材から構成される部品が存在し、それぞれの材料が異なった熱膨張係数を有するため、温度上昇に伴い部品・材料の境界に亀裂が生じ、故障の原因となり得る。そのため、耐熱性が高いとされる次世代半導体を採用した電子機器であっても、温度上昇を最小限に抑える冷却技術は重要である。冷却性能を向上させるためには、冷却システム（例えば、熱交換器、ヒートシンクなど）の性能の向上や、発熱を起こす半導体から冷却システムまでの熱の移動経路に存在する様々な部品や材料の接続部分に発生する接触熱抵抗の低減が課題である。<sup>[3]</sup> 部品の接続部を極めて平滑に仕上げることができれば、接触熱抵抗を低減することは可能であるが、実際は部品同士が接続している表面は「表面粗さ」と、粗さよりも大きな周期の起伏をもつ「うねり」が存在する。そのため、見かけ上接続している面積に対して、実際に部品同士が接続している真実接

触面積は非常に小さく、見かけの接触面積に対して 0.1 % を下回るとされている。<sup>[4]</sup> そのため、部品同士を単純に接続した場合、真実接觸部が主な熱経路となり、それ以外の空隙部では高温側から低温側に向けて空気を介して熱移動することになる。このように単純に部品同士を接觸させた場合、図 1 に示すようにその面積のほとんどが熱伝導率の低い空気を介しており、接触熱抵抗が大きくなる。実際の製品では、空気よりも熱伝導性が高い「熱伝導グリース」や、「熱伝導シート」などを挿むことで抵抗が低減される。<sup>[3, 5]</sup> これらの接触熱抵抗を低減させるために部品間に挿む材料のことを Thermal Interface Material (TIM) と呼ぶ。次世代パワー半導体を搭載した電子機器の場合に適用される TIM については、高い耐熱性が必要となるため、従来品とは異なる TIM を適用する必要がある。例えば、耐熱性も高く熱伝導性が良い TIM として、銅ペーストや銀ペーストが挙げられる。これらの適用により、次世代半導体デバイスの到達温度は最小限に抑えることが期待される。ものづくりの現場では、10 °C の温度上昇が材料の劣化スピードを 2 倍にするという経験値的法則の「10 °C 2 倍則」が指標とされている。電子機器の設計では、駆動時の正確な温度上昇値を捉えなければ、予想以上に短命な機器を生み出してしまうことも大いにあり得る。そこで、半導体素子の温度上昇を抑えるために使用される TIM であるが、その正確な接触熱抵抗低減効果を明らかにしなければ、省エネルギーかつ長寿命な機器を設計することは難しい。

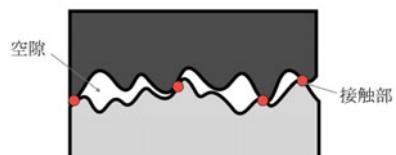


図 1 固体同士の接觸面

特に、次世代半導体では単位体積あたりの発熱(発熱密度)がより高くなることが予測されており、非常に高い熱流束環境でTIMが使用される。この高熱流束、かつ高温下での使用に適したTIMの選定や、高温・高熱流束での伝熱特性を正確に捉えなければ、次世代半導体の正確な熱設計は難しい。ここで、故障を避けたいがために過剰に安全な設計を施そうとする場合、必要以上に性能の高い冷却システムを搭載しなければならない。一方で、省エネルギー化のためには冷却システムに費やす電力を最小限に抑えなければならない。正確かつ安全な熱設計手法が求められる。

これまでに、橋[6]、佐野川[7]らによって接触圧力と接触熱抵抗の関係が示されているが、これらは電子機器で使用される接触圧力よりも高い領域で適用され、より低接触圧力下における接触熱抵抗を評価する必要がある。そこで、本研究では低接触圧力下において、従来使用されているTIMを含め、高温・高熱流束下での使用が期待される銀ペーストを採用した場合の接触熱抵抗低減効果を実験的に評価する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置と測定方法

図2に、熱抵抗測定装置を示す。本試験では、定常法により熱抵抗を計測する。図中の試験部は無酸素銅製で、2つのパーツ(以降、銅ブロックと称する。)を付き合わせ、その接触面間にTIMを挟み込み、熱抵抗を測定する。本試験では高熱流束試験を実現するため、銅ブロックのヒータおよび冷媒用流路近傍は断面積の大きいピラミット形状とし、試験部周辺は断面積の小さい円柱形状にすることで熱流を縮流させる。以降、この円柱部上面を伝熱面と呼ぶ。本試験の円形伝熱面の直径は $\phi 10\text{ mm}$ とした。上側の銅ブロックをカートリッジヒータにより加熱し、下側の銅ブロックを水道水により冷却することで上から下への熱流を発生させる。伝熱面間を通過する熱流束を算出するため、銅ブロック円柱部の温度勾配を取得する。上下銅ブロック円柱部の中心軸上に2.5 mm間隔で4箇所に熱電対を設置し、温度を測定する。耐熱性の問題により加熱側銅ブロックに設置する熱電対はK型クラス1とし、冷却側銅ブロックにはT型クラス1の熱電対を設置する。カートリッジ

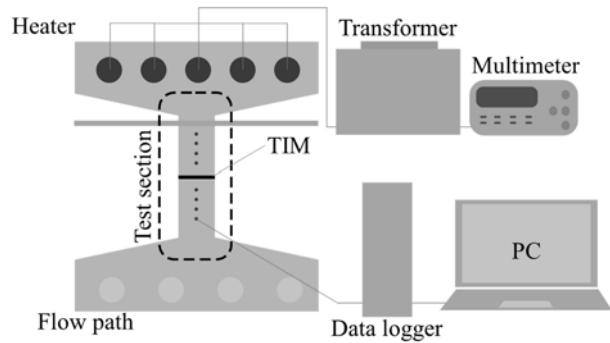


図2 热抵抗測定装置の概略

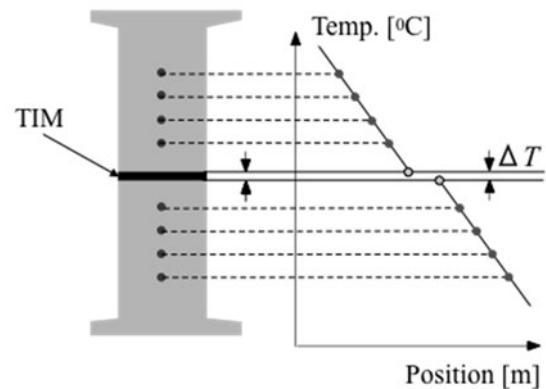


図3 接触熱抵抗の評価方法

ヒータへの印加電圧を5V間隔で上昇させ通電加熱し、各ボルトで定常状態の温度を測定する。

### 2.2 実験条件

本試験では、熱伝導率が非常に高い銀を素材とする銀ペーストを適応した場合の熱抵抗を計測する。また、従来使用されているTIMとしてサーマルグリース、熱伝導ゲル、はんだ、銅ペーストの場合の熱抵抗を計測し、それぞれのTIMの伝熱特性について評価を行う。また参考データとしてTIMを塗布しない場合の熱抵抗の計測結果も示す。本試験では伝熱面に接触圧力を与え、接触圧力による影響も評価する。接触圧力は0.33 MPa、1.71 MPa、3.08 MPaとした。はんだおよび銀ペーストにおいては、試験を開始する前に加熱し、固化させる。ここで、全てのTIMの厚みは接触圧力によって決定されるものとする。

表 1 実験条件

熱抵抗測定手法	定常法
TIM	(なし) サーマルグリース 熱伝導ゲル 銅ペースト はんだ 銀ペースト
接触圧力 $P_c$	0.33 / 1.71 / 3.08 MPa
実験終了条件	TIM 耐熱温度 / ヒータ耐熱温度

### 2.3 評価方法

図 2 に示すように、加熱側および冷却側の各 4 点の温度を測定し、これらの温度を外挿することで高温側の伝熱面温度  $T_H$  (°C) および低温側の伝熱面温度  $T_L$  (°C) を算出する。これらの温度差を(1) 式に表すように伝熱面間温度差  $\Delta T$  (°C) とする。

$$\Delta T = T_H - T_L \quad (1)$$

また、計測した温度から加熱側の熱流束  $q_H$  (W/cm<sup>2</sup>) および冷却側の熱流束  $q_L$  (W/cm<sup>2</sup>) を(2)式に示すフーリエの法則から求める。

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

ここで、 $\lambda$  は銅ブロックの熱伝導率 (W/(m · K))、 $x$  は温度測定位置の距離 (m) を示している。TIM 部の熱抵抗  $R$  (K/W) は、(3)式から求める。

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{\Delta T}{q_{ave} \times A} \quad (3)$$

本試験において、熱抵抗の評価で基準とする熱流束は、加熱側および冷却側の熱流束を平均した  $q_{ave}$  (W/cm<sup>2</sup>) とする。断面積  $A$  (cm<sup>2</sup>) は伝熱面の面積である。

## 3. 実験概要

### 3.1 TIM なしとサーマルグリースの比較

図 4 に、伝熱面の接触部に TIM を使用しない場合と、従来使用されているサーマルグリースを挟み込んだ場合の熱抵抗を示す。<sup>[8]</sup> TIM なしの接触圧力が 0.33 MPa の場合において、非常に高い熱抵抗を示した。熱流束の上昇に伴い熱抵抗が減少するが、これは空気の温度上昇に伴い熱伝導率が上昇したことや、銅ブロックの熱膨張により真実接触面積が増加したことが原因であると考えられる。また、接触面圧力の増加に伴い熱抵抗は減少する

が、印加圧力と比例関係ではない。1.71 MPa の場合は、電子機器における接触圧力よりも高い圧力ではあるが、TIM なしであっても熱伝導グリース ( $P_c = 0.33$  MPa) に近い熱抵抗を示している。注視すべきは、接触圧力が 0.33 MPa の場合のサーマルグリースで、熱流束が 250 W/cm<sup>2</sup> 付近で熱抵抗が上昇する傾向が確認されたことである。サーマルグリースは温度上昇に伴いちょうど上昇するため、TIM の厚みが変化することで徐々に熱抵抗が低減する傾向が見られるが、250 W/cm<sup>2</sup> 付近で抵抗値が急激に上昇している。これは、サーマルグリースが蒸発したことでの体積が減少し、内部に空隙が発生したために熱抵抗が上昇したと考えられる。本試験の真実接触面積の割合は、TIM を使用せず接触圧力を 0.33 MPa とした場合の熱抵抗値が高いことから、非常に少ないことが予想される。そのため、熱経路のほとんどがサーマルグリースを介した熱伝導となり、熱流束の上昇に伴いサーマルグリース内に空隙が生じ始めたことで急激に熱抵抗が上昇することが考えられる。一方の接触面圧力が高い場合は、低い場合と比較して真実接触面積が多く、真実接触部を熱経路とする箇所も多くなる。そのため、サーマルグリースの蒸発に伴う空隙の発生も、熱抵抗値としては大きく現れないと考えられる。以上のことから、従来品のサーマルグリースの場合は、高温・高熱流束で使用する場合に、蒸発により熱抵抗が急激に高くなる可能性があり、長期間の使用が困難であると示唆される。

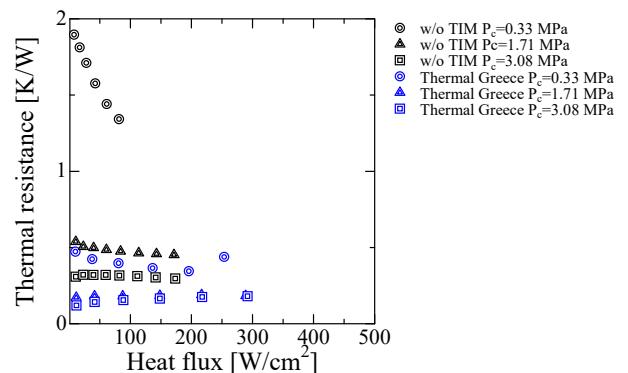


図 4 TIM 熱流束と熱抵抗の関係  
(TIM なしとサーマルグリース塗布の比較)

### 3.2 従来品のTIMにおける熱抵抗の比較

図5に、従来品のTIMである4種を採用した場合の熱流束と熱抵抗の関係を示す。<sup>[8]</sup>この中で、最も熱抵抗が大きいのは熱伝導ゲルである。熱伝導ゲルはサーマルグリースに対して熱伝導率が高いものの、ちよう度は1/6以下と小さく、同じ接触圧力を印加した場合のTIMの厚みは熱伝導ゲルが厚くなると予想され、その厚みにより大きな熱抵抗を示した可能性がある。また、熱伝導ゲルは低熱流束から熱流束の上昇に伴う熱抵抗の上昇が顕著である。耐熱温度の最も低い熱伝導ゲルは低熱流束から蒸発を開始し、空隙が発生しやすいことが考えられる。

次に熱抵抗の高いTIMは銅ペーストである。特に接触圧力が低い条件下で、熱流束の上昇に伴う熱抵抗の上昇が顕著であることがわかる。銅ペーストは樹脂中に銅粒子が添加されているため、接触圧力が大きい場合には伝熱面間距離が短くなり粒子が連なることで伝熱面間を繋ぐ場合がある(図6(a))。この場合、樹脂が蒸発して空隙を発生した場合も、パスが主な熱経路となり得るが、圧力が低い場合には、粒子の連結により伝熱面間を橋渡しする可能性は低く(図6(b))、熱流束の上昇に伴う空隙の発生は熱抵抗の上昇の原因となる。

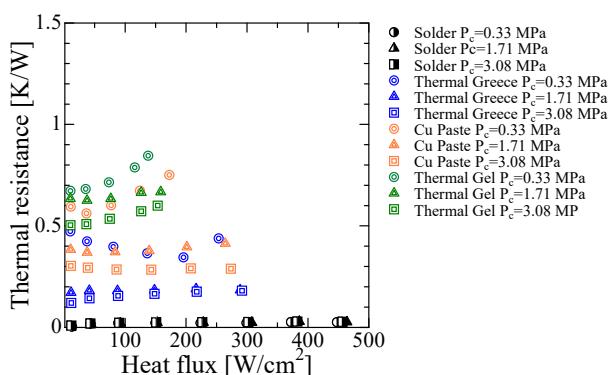
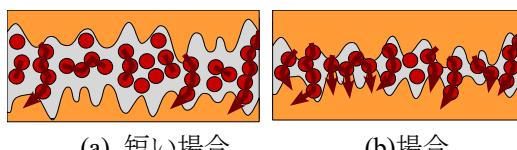


図5 TIM 热流束と热抵抗の関係  
(グリース・熱伝導ゲル・はんだ・銅ペースト)



(a) 短い場合 (b)場合  
図6 接触面間距離とパーコレーション

最も熱抵抗が低いはんだけは、熱流束の上昇に伴って熱抵抗が若干上昇しているが、他のTIMに比べると極わずかな変化で、ほぼ一定の熱抵抗を保っている。この抵抗の上昇は、はんだけの温度上昇による熱伝導率の低下が原因であると考えられる。はんだけの熱抵抗測定試験は、はんだけが耐熱温度を迎えたため試験を終了したが、450 W/cm<sup>2</sup>まで到達している。しかし、はんだけの耐熱温度は、次世代半導体の駆動最大温度とされる250 °Cと同等かそれ以下となるために耐熱性に課題が残る。

### 3.3 はんだと銀ペーストにおける熱抵抗の比較

図7に次世代半導体対応のTIMとして期待される高耐熱材料の銀ペーストの結果を示す。<sup>[9]</sup>銀ペーストは熱流束の上昇に伴い約200 W/cm<sup>2</sup>までは熱抵抗の上昇が見られ、約300 W/cm<sup>2</sup>を以上の熱流束では熱抵抗が低減するという特徴的な結果を示した。銀ペーストについては前述の通り、ペースト状態から固相にするため試験前に加熱しているが、本実験装置のΦ10 mmの円形伝熱面に挟み込んだ状態で加熱を行なったため、硬化させる工程において銀ペースト中の溶剤が完全に蒸発しなかったことが要因として考えられる。200 W/cm<sup>2</sup>までは溶剤が徐々に蒸発し、空隙が発生し始めたため抵抗が上昇したと考えられる。300 W/cm<sup>2</sup>を超えると銀粒子が高温に到達したことで軟化をはじめ、粒子同士の接触面積が増大したことや焼結を開始したことで抵抗が急激に低下したと予想される。そのため、高熱流束時にははんだけと同等の熱抵抗まで低減されたと考えられる。

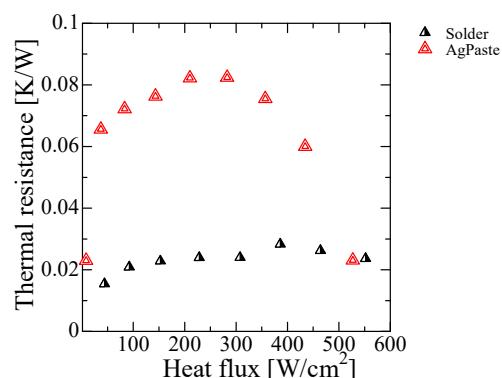


図7 TIM 热流束と热抵抗の関係  
(はんだ・銀ペースト, 接触圧力  $P_c = 1.71$  MPa)

### 3. まとめ

本研究では、低接触圧力かつ高熱流束環境下において、従来品を含め次世代半導体対応として期待されている TIM である銀ペーストを適用した場合の接触熱抵抗の低減効果について評価した。この結果、最も高い熱抵抗低減効果を示したのははんだであるが、耐熱性の問題から次世代半導体への使用は難しい。次に効果を示したのは銀ペーストであり、完全に銀粒子を焼結させることが可能であれば、はんだ以上の熱抵抗低減効果を示す可能性があり、次世代半導体の TIM として期待できる。ただし本試験のように、伝熱面が  $\phi 10\text{ mm}$  のように広い場合は銀ペーストに含まれる溶剤を十分に蒸発させ、銀粒子を焼結させなければ数倍もの熱抵抗を示す可能性がある。そのため、使用する面積に応じて十分に溶剤を蒸発させるための加熱を行わなければいけない。本稿で試験対象とした TIM において、低接触圧力・高熱流束における接触熱抵抗低減効果を得るために、高温時の TIM の蒸発による空隙発生が重要であると言える。

### 参考文献

- [1] 結城和久, 次世代車載用 SiC パワー半導体のクーリング技術, エレクトロニクス実装学会誌, **18-2** (2015) 94.
- [2] 結城和久, 高発熱密度パワーエレクトロニクスの沸騰浸漬冷却, エレクトロニクス実装学

会誌, **21-2** (2018) 122.

- [3] T. Tomimura, Experimental Study of Filler Insertion Effect on Mean Thermal Contact Conductance, *JSME International Journal, Series B*, **47-3** (2004) 447.
- [4] 鳥居薰, 表面微細構造に支配される個体接触伝熱-マクロとミクロの接点-, 日本機械学会誌, **96-892** (1993) 198.
- [5] 富村寿夫, 野村征爾, 奥山正明, 接触熱抵抗の低減に及ぼすグリース塗布効果(低平均接触圧力下での測定結果), 日本機械学会 2006 年度年次大会公演論文集, (2006) 197.
- [6] 橋藤雄, 接触面の熱抵抗に関する研究, 日本機械学会誌, **55-397** (1952) 102.
- [7] 佐野川母好, 金属接触面における伝熱に関する研究: 第 4 報, 接触面の表面あらさの形状・うねりの影響と接触熱抵抗の近似計算法, 日本機械学会論文集, **33-251** (1967) 1131.
- [8] 木伏理沙子, 結城光平, 結城和久, 海野徳幸, 高発熱機器の熱抵抗低減に関する研究, 日本機械学会 2017 年度年次大会公演論文集, (2017) J0330102.
- [9] 丹羽勇斗, 木伏理沙子, 結城和久, 海野徳幸, 高発熱密度環境における銀ペーストの接触熱抵抗評価, 日本機械学会 2019 年度年次大会公演論文集, (2019) J01104P29.

## 電子機器における接触熱抵抗の低減技術

*Technique for Reducing Thermal Contact Resistance of Electronic Control Unit*

篠田 卓也（株式会社デンソー），安井 龍太（株式会社メイテック）

Takuya SHINODA (DENSO CORPORATION), Ryuta YASUI (MEITEC CORPORATION)

e-mail: takuya.shinoda.j3w@jp.denso.com

### 1. はじめに

コンピュータの熱設計は、CAEを利用した伝熱解析がご多分に漏れず盛んである。このような仮想技術の発展によって、実験検証によるトライ&エラーは非常に少なくなってきた。

10数年前までは、電子部品が搭載されているプリント基板上の熱解析は、主要な発熱部品を大雑把にサラッと置き、大体の温度分布をチェックする程度であった。部品のモデルの多くは、3Dの立方体で熱伝導を等価にした一般的に言われる1ブロックモデルである。頑張って熱伝導率の異なる金属部分と樹脂部分に分けた2ブロックモデルで解析するくらいであった。それが、電子部品における内部構造の高詳細度モデルが登場してきた。半導体ICの一番温度が高いチップ温度(ジャンクション温度)を確度高く計算する時代になってきたのである。これはソフトウェアやパソコン能力の発達が大きい。そのため、現在は、数百の電子部品モデルを載せたプリント基板で、しかもそれを囲う筐体モデルも詳細な3Dデータでの計算である。ただし、簡単に実験と解析の数値が一致するわけではない。熱解析モデルの精度は、入力値の精度と言い換えられるくらいである。だが、まあいいかと、入力値は代表値を利用するなど、あまり根拠を持たない数値を用いるエンジニアは少なくない。

実はもっとエンジニアを悩ますのが、接触熱抵抗である。3Dを作成してアセンブリするが、理想通りの寸法で書かれた3Dは当然のごとく、接触面がピタッと接触する。放熱性能がすこぶるいい方向になって、設計の安全率が下がるのではと心配をしてしまう。熱の知識がないエンジニアでも、そこそこ感づくのだ。接触熱抵抗値はいくらなのだろうかとなんとなく、知りたくなってくるエンジニアも出てくるわけだ。

### 2. 車載電子製品熱設計のミソ

#### 2.1 電子機器の放熱課題

自動車にとって熱の問題は重要な課題の一つである。電子機器を配置するエンジンルームは100°C以上になり、その中で電子制御装置(Electronic Control Unit(以下ECU))は高速な電子制御による運転・走行性能の、緻密なコントロールを求められている。

ECU等の電子機器の放熱手段として、代表的な技術にプリント基板に実装された電子部品の発熱を、筐体を介してECUを支持するブラケットや自動車ボディ、そして空気へと熱伝導で放熱する技術がある。しかし、これらの部品を接続する箇所は、金属同士が多く、ねじで締めても、少しばかり空気を間に挟んでいる。このような熱抵抗を接触熱抵抗という。

接触熱抵抗への熱対策の中核をなすのが、TIM材(Thermal Interface Material)と呼ばれるゲル等の放熱材である。例えばプリント基板と筐体を接触させている部分に放熱材を挟むことで、僅かに生じる隙間に存在する熱が伝わりにくい空気が、熱が伝わりやすい放熱材に置き換わり、熱抵抗が低くなる。放熱材を利用すると、発熱量によるが半導体の温度は10~30°C程度低くなる。特に局所的に発熱するような半導体の放熱設計をするとき、接触熱抵抗が大事とわかる瞬間である。本当に助かる。

なら、気になるすべての接触部に塗布すればいいではないかと思うかもしれない。当然、コストの採算が合わなくなるのである。

信頼性の観点から見てみよう。一般的な品質保証の温度上限は、プリント基板では130°C前後で、半導体は150°C前後の限界が多い。パソコンやテレビなどの家電製品は、室内の約25°C環境で使用されるため、プリント基板で約100°C、半導体で約120°Cの温度余裕度がある。一方で、前述のように自動車のエンジンルームは約100°Cであるため余裕が少

ない。製品寿命等の信頼性を損なわないために、なるべく温度上昇を低減する必要がある。ECU の放熱形態として、筐体からのふく射、空気への対流熱伝達、部品間の熱伝導が挙げられる。対流放熱は効果的であるが、対流を定量的に企業間の要求仕様にすることは測定誤差が数十パーセントあるため、採用しにくい。ふく射による放熱ももちろん期待できるが、筐体の黒色化くらいしか手段がなく、放熱性の伸び代が少ない。そのため、熱伝導による放熱技術がミソとなる。

## 2.2 接触熱抵抗技術の現在

やはり、そうなると接触熱抵抗が気になる。少しでも接触状態を良くして放熱性を向上したい。そのため、各部品の接触面にある接触熱抵抗について、熱を妨げる要因を特定したい。接触熱抵抗の計算式は1950年代～1960年代にかけて橋・佐野川らにより研究され、理論式および実験式が提案された。この式において、接触熱抵抗に影響を与える因子に金属表面の粗さや接触圧力などが挙げられている[1]。今日までの接触熱抵抗の代表的な計算式を両者で確立したといえる。しかし、この論文には金属表面のうねり（図1参照）が接触熱抵抗に与える影響は大きいものの、うねりの様子を把握することは不可能であると結論づけられており、うねりの影響は未解明である[2]。また、多くの研究で用いられる測定系は、図2に示すようなASTM D5470[3]や大串らの熱伝導率測定法[4]に代表されるように、円柱同士の接触熱抵抗を評価するものであり、実際の電子機器のように二つの平面をねじ締結する場合（図3参照）とはうねりの発生原理が異なる。平面同士をねじ締結する際には、製造過程において発生するうねり以外に、締結により発生する応力で、平板が弾性変形・塑性変形したうねりが付加される。こちらのうねりのほうが支配的である。電子機器の筐体において、複数箇所をねじ締結することが一般的であり、2点以上のねじ間で発生するうねりを考慮した設計が必要である。

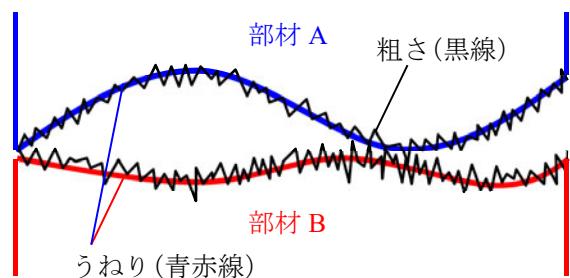
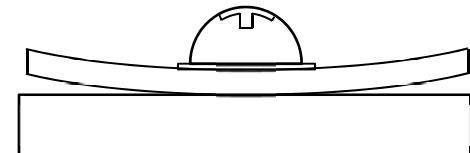


図1 粗さとうねりを伴う面の接触（概念図）



図2 円柱の接触熱抵抗測定（ASTM D5470）



(a)ねじ1本で固定する場合



(b)ねじ2本で固定する場合

図3 ねじ締結によるうねりの発生

## 2.3 代表的な橋・佐野川の式とその課題

接触熱抵抗値を算出するための代表的な式として、次式で与えられる橋・佐野川の式(1)を紹介する。

$$\alpha_c = \frac{1}{\gamma_c} = \frac{1}{\frac{\delta_1 + 23 \times 10^{-6}}{\lambda_1} + \frac{\delta_2 + 23 \times 10^{-6}}{\lambda_2}} \cdot \frac{p_m}{H} + \frac{\lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \left( 1 - \frac{p_m}{H} \right) \quad (1)$$

$H$  : 柔らかい方の固体のブリネル硬さ [kgf/mm<sup>2</sup>]

$p_m$  : 平均接触圧力 [MPa]

$\alpha_c$  : 接触熱コンダクタンス [W/(m<sup>2</sup>·K)]

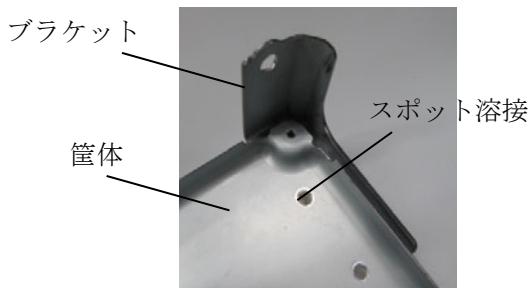
$\gamma_c$  : 接触熱抵抗 [(m<sup>2</sup>·K)/W]

$\lambda_1, \lambda_2$  : 接触固体の熱伝導率 [W/(m·K)]

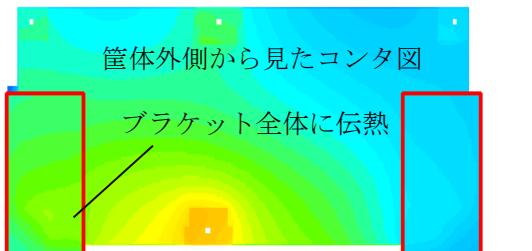
$\lambda_f$  : 空気などの介在物質の熱伝導率 [W/(m·K)]

$\delta_1, \delta_2$  : 粗さの最大高さ [m]

式(1)は二つの金属の接触面の接触熱抵抗を計算するものである。1章で示したように、図4(a)のような筐体で伝熱シミュレーションを行う場合、筐体とブラケット部間に接触熱抵抗が無い理想の接触として設定することが多い。例えば、本来ならばスポット溶接部以外は、接触熱抵抗が存在するべきであるが、図4(b)のように二つの部品間に接触熱抵抗が存在しないとして扱う。



(a) 筐体とブラケットの接続



(b) 理想接觸の伝熱シミュレーション結果

図4 伝熱シミュレーションにおける課題例

式(1)を導入して接触熱抵抗を入力すれば、正しく伝熱シミュレーションができる、課題は解決するかというとそうではない。式の項には、うねりが加味されていない。ねがわくば、部品を成型した後の部品間の接触熱抵抗が算出できるもしくは、計測できる技術が欲しい。

## 2.4 ネジ締めによる圧力分布の可視化

図5に示すECU筐体裏面の圧力分布を感圧紙で可視化すると、図6の結果となった。圧力が印加された部分は感圧紙が赤色になる。図6では赤色部はねじ周辺に限定され、筐体全面が放熱に活用されていないことがわかる。



図5 エンジン ECU の外観



図6 感圧紙による圧力分布の可視化結果

この理由として、図3で示したように、ねじ締結によって筐体が荷重と反対方向に反ってうねりが発生し、実際は接觸しないためと考えられる。

## 2.5 うねりが生じた応力の解析

では、うねりがどのように発生して接觸しなくなるか、簡単なモデルで応力解析を実施した。図7に示す幅90 mm×奥行9 mm×高さ5 mmのアルミ板および同じ寸法を有する銅板を対象にANSYS WB 17.1を用いて応力解析を行った。

図8の応力解析の結果をみると、感圧紙を用いた測定と同様に、荷重印加箇所近傍にのみ応力が

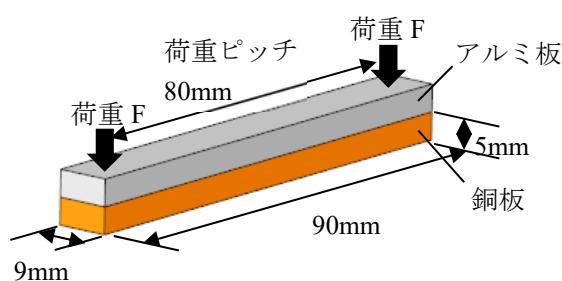


図7 応力解析のモデル

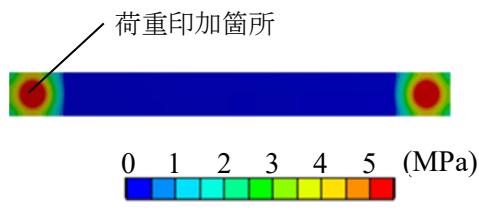


図8 接触面の応力分布

発生し、その他の領域の応力はほぼゼロである。

図9に示すように、印加荷重に応じてアルミ板が荷重と反対方向に変形しており、接触していないことを裏付ける結果が得られた。

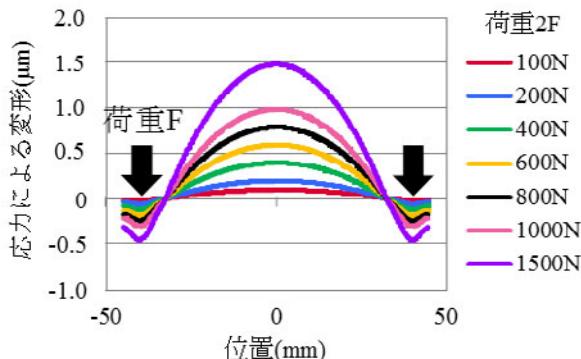


図9 荷重によるアルミ板の変形

このように、実際の製品をねじ締結する際には、うねりによって局所的に接触面積が変化し、接触面全体でみると接触熱抵抗に分布が生じる。

## 2.6 課題解決の意義

接触熱抵抗の低減手法に目を向けたい。電子機器分野において、大串ら[5]や鈴木ら[6]の研究のように、接触面に熱伝導性が高く柔軟性をもつ材質を挟むのが一般的である。これらの対策では、構成部材が増えることになり、電子機器製造におけるコスト

の増加が必然的に課題となる。この課題を解決するため、ねじ締結によるうねりを利用して、筐体形状に工夫することで接触熱抵抗を低減できないか検証した。

また、接触面の熱抵抗を計測する新たな手法として、レーザ加熱を用いた方法[7]や、電気抵抗を利用した方法[8]、光音響を利用した方法[9]が提案されているが、いずれの場合も、うねりの影響を排除して測定をしている。うねりを有する接触面の熱抵抗を測定する装置が存在しないことも課題となる。

うねりを意図的に利用した放熱性能の向上は、従来の製品に対して部品を追加する必要がないため低コストでの実現が可能ではないかと考える。理由は、成形品であれば、金型の形状を工夫することで、うねりに似た表面を製作できる。余分なコストがかからないことがポイントである。

うねりを伴う広い面に分布する接触熱抵抗の局所的な測定が可能となれば、構造物の内部で生じる発熱量の放熱伝热量を定量化できるようになる。

近年の自動車の課題の一つとして省エネがあり、効率よくエネルギーを使用し、放熱しなければならない。これにかかる放熱コストは、製品全体のコスト割合でみると少なくない。また、うねりを伴う面の接触熱抵抗低減は、伝熱工学の分野で解明されにくかった技術の一つであり、車載の電子機器に限らず、機械の構造接触に伴う全ての工業製品に波及、適用が可能な技術である。未確定な接触熱抵抗の存在を定量的に明らかにしていくことで、さらに放熱性能を上げる重要な技術である。

## 3. 接触熱抵抗分布の測定

### 3.1 装置の概要・特徴

製品の熱設計のためには、うねりによる接触熱抵抗分布を把握しなければならない。そのため、測定装置を開発し、うねりをもつ接触面の熱抵抗分布の測定を実現することにした。

うねりが接触熱抵抗に及ぼす影響を評価するために、測定装置は図7の平板を測定可能なよう設計した。板材がうねることで接触熱抵抗に分布ができる。うねりによる接触熱抵抗の変化を明らかにするため、全体の接触熱抵抗ではなく、局所的な熱抵抗を測定したい。そこで、板材の長辺側を、図10のように熱流束センサで通過伝熱量を10 mm間隔で9のエリアに分けて測定する。図11に示す本装置

では、M6ねじを締めることで、筐体のボルト締結のごとくアルミ板に荷重が印加され、荷重によるうねりが発生する構造である。アルミ板と銅板の接触熱抵抗を測定するためには、各板材の温度と通過伝热量の測定が必要である。詳細は、温度の測定について、板材の中心部分に熱電対を挿入して測定し、通過伝热量は、銅板の下面に熱流束センサを配置して測定した。熱流束センサは、接触面の通過熱量を単位W/m<sup>2</sup>で測定するセンサであり、この測定値に面積を乗算することで各測定エリアの通過伝热量Q<sub>th(i)</sub>が算出できる。

今回、熱電対挿入部からアルミ板の下面および銅板の上面までの熱抵抗は十分小さいとみなして無視した。これにより、接触面上下の温度差ΔT<sub>(i)</sub>が求められる。

この装置は、測定エリア*i*=1~9の局所接触熱抵抗R<sub>th(i)</sub>は式(2)で計算し、板材全体の並列接触熱抵抗R<sub>tot</sub>は式(3)で評価できるようになっている。

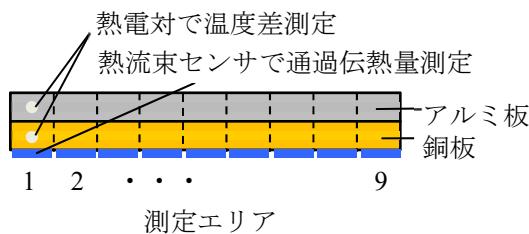


図10 測定サンプル

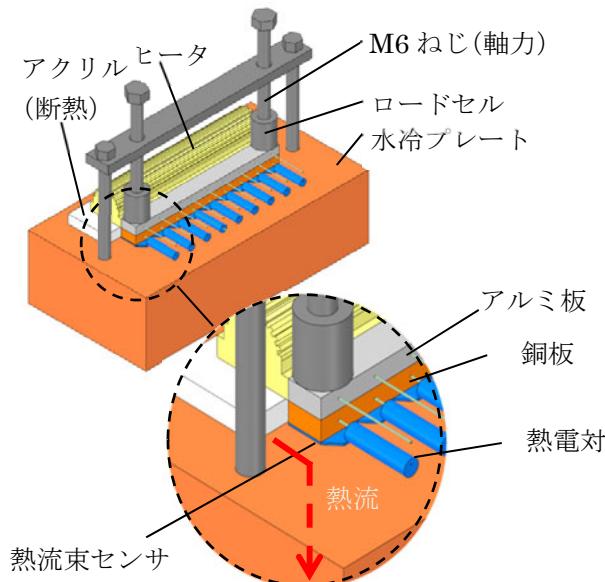


図11 接触熱抵抗測定装置

$$R_{th(i)} = \frac{\Delta T_{(i)}}{Q_{th(i)}} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{th(1)}} + \frac{1}{R_{th(2)}} + \cdots + \frac{1}{R_{th(9)}} \quad (3)$$

### 3.2 接触熱抵抗装置による分布測定結果

図12に、アルミ板と銅板との接触面が平面の場合について、荷重2Fを0.1kN~4kNまで変化させた場合の、接触熱抵抗測定結果を示す。

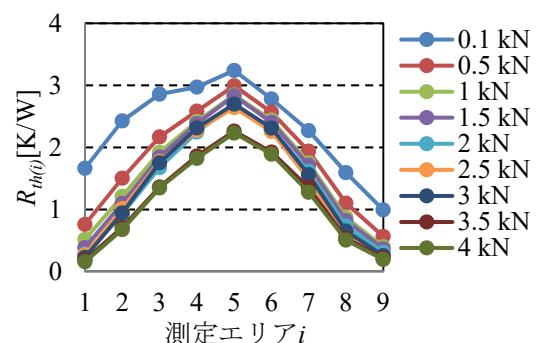


図12 接触熱抵抗分布の測定結果

これまでの検討結果を裏付けるように、中央部の測定エリア5は接触熱抵抗が高く、荷重が印加される両端部は接触熱抵抗が低い結果となった。

### 3.3 うねりを利用した接触熱抵抗の低減

ねじ締結によってうねりが発生し、接触熱抵抗が増加することがわかった。そこで、接触熱抵抗を低減するために、図13のように、図10のアルミ板を下に凸の円弧形状としてうねりを与えることで、接触熱抵抗の低減を接触面積の拡がりで確認する。

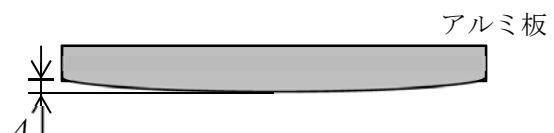


図13 アルミ板の円弧形状

うねり高さ△=0 μmと△=1000 μmのアルミ板に、印加荷重2F=1kNを与えた場合の、感圧紙による接触状態の可視化結果を図14に示す。うねりを

形成した  $1000\mu\text{m}$  の場合は、印加荷重の増加に伴つてアルミ板が弾性変形し、頂点付近の接触熱抵抗が下がり、2.6 節で提案した低コストでの放熱性向上に向け、有益な結果が得られた。



図 14 うねり有無による接触状態の相違

#### 4. おわりに

橋・佐野川の式では対応不可能な、板材を 2 点で締結した際の接触熱抵抗分布に及ぼす印加荷重  $2F$  およびそれに伴う変形の影響、うねりの大きさ  $\Delta$  が接触熱抵抗に及ぼす影響があることを説明した。今回、ねじのピッチや板材の材質・粗さ等は同一としたが、今後、これらの因子が接触熱抵抗に及ぼす影響を明らかにし、従来の橋・佐野川の式にうねりの因子などを導入することで、有用な整理式を得ることを目指す。

本稿にかかる測定は東工大伏信研究室との共同研究で、同研究室学生の karim karjadi 君、ウ・ウォンソブ君と共に実施した。また、サーマルデザインラボ株式会社 国峯氏および元熊本大学 富村教授にご教示いただいた。ここに謝意を示す次第である。

#### 参考文献

- [1] 橋藤雄, 接触面の熱抵抗に関する研究, 日本機械学会誌, 55-397 (1952) 102.
- [2] 佐野川好母, 金属接触面における伝熱に関する研究(第 4 報, 接触面の表面あらさの形状・うねりの影響と接触熱抵抗の近似計算法), 日本機械学会論文集(第 2 部), 33-251 (1967) 1134.
- [3] ASTM, Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thermally Conductive Electrical Insulation Materials, D5470-17.
- [4] 大串哲朗, 低接触圧領域における接触熱コンダクタンスに及ぼす接触圧力と接触界面空隙厚さの影響, 第 46 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2009).
- [5] 大串哲朗, 柳浦聰, 渡邊聰, 平田拓哉, 導電性接着剤の熱伝導率測定法の研究, 热物性, 28-1 (2015) 22.
- [6] 鈴木敦, 佐々木要, 桑原平吉, アルミ電解コンデンサにおけるエレメントとケース間の接触熱抵抗, 日本機械学会論文集(B 編), 66-645 (2000) 1503.
- [7] 大曾根靖夫, レーザ周期加熱及び反射率温度測定を用いたウェハ状固体試料間の接触熱コンダクタンスの光学的測定, 日本機械学会論文集(B 編), 67-655 (2001) 767.
- [8] 吉瀬幸司, 金属接触部における熱抵抗と電気抵抗の温度依存性, 日本機械学会論文集(B 編), 79-798 (2013) 176.
- [9] 加賀田翔, 山田哲也, 吉田篤正, 光音響法による固体接触面の熱抵抗の測定とその評価, 日本機械学会論文集, 81-823 (2015)

## 圧力測定フィルムを利用した接触熱抵抗の評価方法

*Evaluation method of contact thermal resistance using pressure measurement film*

青木 洋稔 (KOA 株式会社)

Hirotoshi AOKI (KOA Corporation)

e-mail: hi-aoki@koaglobal.com

### 1. はじめに

近年、電子機器の小型化や電子部品の高密度実装化に伴って基板上の発熱密度が増加している。これにより電子部品や基板の温度が上昇しやすくなるため、電子機器には適切な熱設計が求められる。電子部品の温度は、その発熱量と放熱経路の熱抵抗によって決まる。例えば、図1に示す密閉筐体の機器では、発熱部品や基板が持つ熱抵抗と、それら部材間の接触熱抵抗などが温度に影響する。特に接触熱抵抗については、接触面に放熱グリースなどの Thermal Interface Material (TIM) を塗布することで、通常その値の低減が図られるが、コスト削減やグリースの経年劣化などの理由から放熱グリースを使わない設計の要望も出てきている。このグリースレス接触における熱抵抗は、部材の表面粗さやうねり、接触圧力などの影響を受けるため、その定量化は難しく、熱設計を行う際の課題になっている。

本研究では、グリースレス接触面の熱抵抗を定量化するために、圧力測定フィルムを利用した評価手法の開発を試みた。具体的にはうねりが有るアルミナ基板とうねりが無いアルミニウム合金板の接触を対象とし、本検討内容は材質や表面性状が異なる材料の評価にも応用可能と考えている。本稿では開発した手法と、得られた接触熱抵抗の妥当性について報告する。

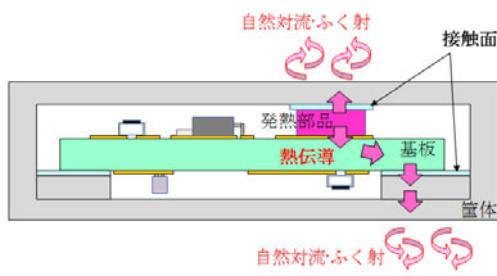


図1 密閉筐体の電子機器における放熱

### 2. うねりを有する部材の接触熱抵抗評価

#### 2.1 従来の予測式と適用時の課題

うねりが無い金属部材の接触熱抵抗の予測には、式(1)に示す橋・佐野川の式[1]がよく用いられている。この式は、粗さを有する部材表面間の真実接触部をモデル化した単位セルに基づく理論式に、熱流の縮小と拡大の影響を導入したものであり、平均接触熱抵抗  $r_m$  と平均接触圧力  $p_m$  の関係を表している。ここで、 $h_m$  は平均接触熱コンダクタンスであり、 $r_m$  と逆数の関係にある。また、 $p_m$  は与えられた荷重を接触面全体の投影面積  $S$  で除した値で定義される。式中には、部材の表面粗さ  $\delta$  や熱伝導率  $\lambda$ 、ビックカース硬さ  $H_{min}$ 、接触面における熱流の縮小と拡大による付加熱抵抗  $1/h_0$  なども含まれ、 $1/h_0$  は一連の理論解析と実験結果に基づく式(2)で与えられる。接触面全体の熱抵抗  $R$  の予測には、式(3)が用いられる。

$$\frac{1}{r_m} = h_m = \frac{1}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_0} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \cdot \frac{p_m}{H_{min}} + \frac{\lambda_f}{\delta_1 + \delta_2} \cdot \left( 1 - \frac{p_m}{H_{min}} \right) \quad (1)$$

$$\frac{1}{h_0} = 23 \times 10^{-6} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (2)$$

$$R = \frac{r_m}{S} = \frac{1}{h_m \cdot S} \quad (3)$$

$H_{min}$  軟らかい方の部材のブリネル硬さ  
またはビックカース硬さ [MPa]

$h_m$  平均接触熱コンダクタンス [W/(m<sup>2</sup>·K)]  
 $1/h_0$  縮小・拡大による付加熱抵抗 [m<sup>2</sup>·K/W]

$p_m$  平均接触圧力 [MPa]  
 $R$  接触面全体の接触熱抵抗 [K/W]

$r_m$	平均接触熱抵抗	[m <sup>2</sup> ·K/W]
$S$	接触面全体の投影面積	[m <sup>2</sup> ]
ギリシャ文字		
$\delta$	部材の表面粗さ	[m]
$\lambda$	熱伝導率	[W/(m·K)]
添字		
$f$	介在物質	
1, 2	部材 1, 2	

しかし部品表面には、図 2 に例示するうねりが存在する。この表面を他部材に接触させると、接触面には図 3 のような非接触部と不均一な圧力分布を持つ接触部ができる。したがって、部材表面にうねりが無い均一接触を前提とした式 (1) に、うねりが有る接触面の平均接触圧力  $p_m$  を代入すると、式 (3) から予測される接触熱抵抗  $R$  に大きな誤差が生じる課題があった。

この課題を解決するために本検討では、図 2 中に示したように、大きなうねりが有る接触面をうねりが十分小さいと見なせる微小領域（以降、微小セルと記す）に分割し、各微小セルの局所接触圧力  $p_{cell}$  から局所接触熱抵抗  $r_{cell}$  の分布と接触面全体の熱抵抗  $R$  を算出する方法を考えた。以下、2.2～2.4 節には、本開発手法を具体的に説明する。

## 2.2 圧力測定フィルムを利用した接触熱抵抗評価

うねりが有る部材の接触熱抵抗を評価する方法を図 4、及び、手順 1-1～1-4 に示す。

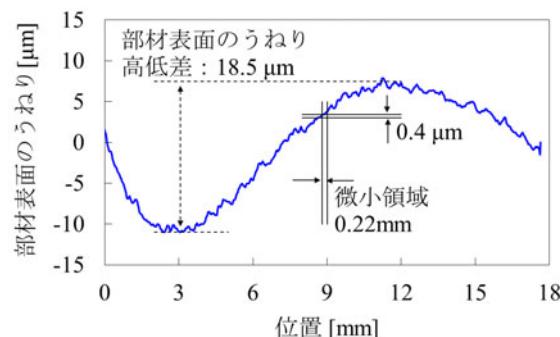


図 2 部材表面に存在するうねり

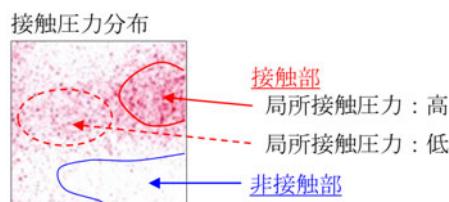


図 3 うねりを有する部材の不均一接触

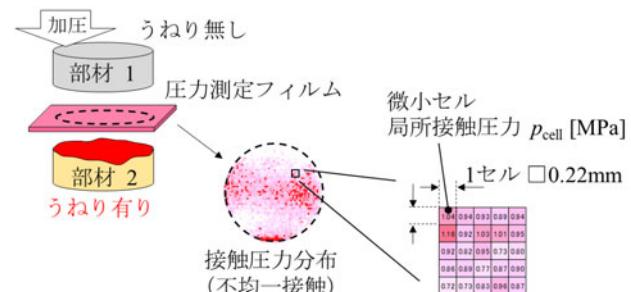
**手順 1-1** 図 4(a) のように、接触面における局所接触圧力  $p_{cell}$  の分布を測定する。

**手順 1-2**  $p_{cell}$  を  $r_{cell}$  に変換するため、2.3 節の方法を利用し、図 4(b) に示す基準  $p_{cell} - r_{cell}$  データを取得する。データ取得には、評価対象部材と同じ材質で同等の表面粗さを持ち、接触面のうねりが無い試験片を用いる。また、接触面に介在する物質も同じにする。

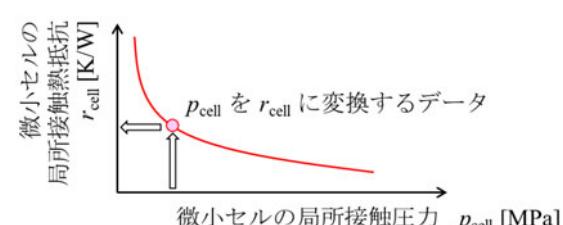
**手順 1-3** 基準  $p_{cell} - r_{cell}$  データを用いて、手順 1-1 で求めた  $p_{cell}$  を  $r_{cell}$  に変換し、図 4(c) に示す微小セルの  $r_{cell}$  で構成された接触熱抵抗分布を求める。

**手順 1-4** 各微小セルの  $r_{cell}$  を式 (4) に代入して合成し、接触面全体の接触熱抵抗  $R$  を求める。

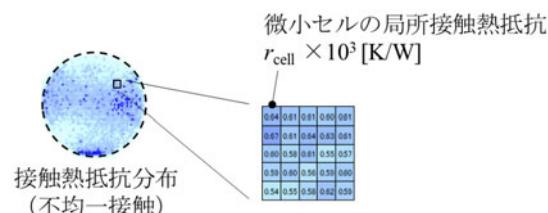
$$R = \frac{1}{\sum \frac{1}{r_{cell}}} \quad (4)$$



(a) 圧力測定フィルムによる接触圧力分布評価



(b) 基準  $p_{cell} - r_{cell}$  データ



(c) 接触熱抵抗分布への変換

図 4 うねり面の接触熱抵抗の評価手順

### 2.3 基準 $p_{cell}$ - $r_{cell}$ データの取得方法

図 5 に示す過渡熱抵抗測定装置を用いて  $p_{cell}$  と  $r_{cell}$  の関係を取得する方法を説明する。本検討では、共にうねりが無い純度 96% アルミナ基板（以降、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) と記す）とアルミニウム合金板 A5052H34（以降、A5052H34 と記す）を均一な圧力でグリースレス接触させ、基準  $p_{cell}$ - $r_{cell}$  データを取得した。過渡熱抵抗測定では、図 5 に示す内部ヒーターから冷却プレートに至るまでの全熱抵抗が図 7 の構造関数と呼ばれるグラフで出力される。この結果に含まれる  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) と A5052H34 の接触面全体の熱抵抗  $R_{air}$  を抽出して微小セルあたりの  $r_{cell}$  に面積換算する。 $R_{air}$  と  $r_{cell}$  の具体的な評価方法を手順 2-1～2-3 に記載する。

$R_g$	うねりが無い $\text{Al}_2\text{O}_3$ (96%) と A5052H34 を均一な圧力でグリース塗布接触させたときの接触熱抵抗	[K/W]
$R_{A5052}$	A5052H34 の熱抵抗	[K/W]
$R_{\text{Al}2\text{O}3}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (96%) の熱抵抗	[K/W]

**手順 2-1** 表 1 に示す組み合わせの試験片を用いて、図 7 の条件 1 と 2 の全熱抵抗を測定する。条件 1 は、均一な圧力での  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) と A5052H34 のグリースレス接触、条件 2 は、均一な圧力でのグリース塗布接触である。それぞれの全熱抵抗の差から  $R_{air} - R_g$  を求める。図 8 に測定例を示す。

**手順 2-2** 手順 2-1 と同じ試験片を用いて、図 9 の条件 3 と 4 の全熱抵抗を測定し、各条件の全熱抵抗の差から  $2R_g + R_{A5052} + R_{\text{Al}2\text{O}3}$  を求める。図 10 は、測定の一例である。ここで  $R_{A5052}$  と  $R_{\text{Al}2\text{O}3}$  は試験片の寸法と熱伝導率から既知であるため、 $R_g$  を特定できる。

**手順 2-3** 手順 2-1 と 2-2 で求めた  $R_{air} - R_g$  と  $R_g$  を合計して  $R_{air}$  を算出し、その後、 $R_{air}$  を微小セルあたりの局所接触熱抵抗  $r_{cell}$  に面積換算する。

手順 2-1～2-3 は、装置の加圧機構によって  $p_m$  を一定に制御しながら実施する。試験片が均一接触している状態では  $p_m = p_{cell}$  と見なせるため、 $p_{cell}$  を調節しながら  $r_{cell}$  を取得できる。上記の手順を圧力と試験片の組み合わせを変えて繰り返すことで、 $p_{cell} = 0.3 \sim 8.0 \text{ MPa}$  のときの  $r_{cell}$  を取得した。

過渡熱抵抗測定装置：測定部

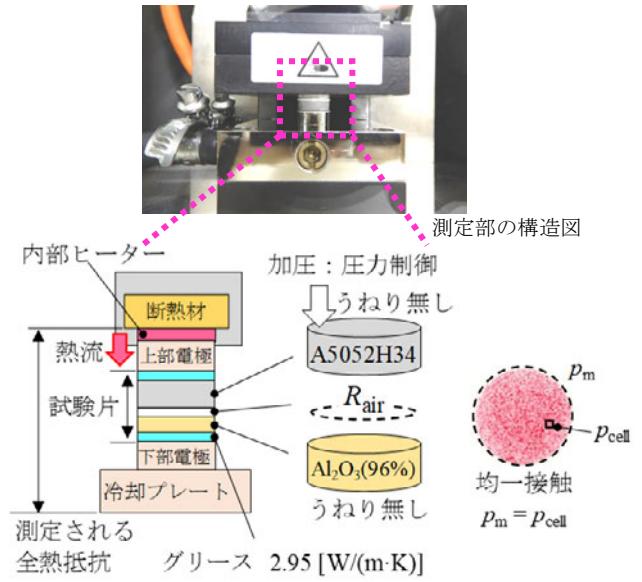


図 5 過渡熱抵抗測定装置

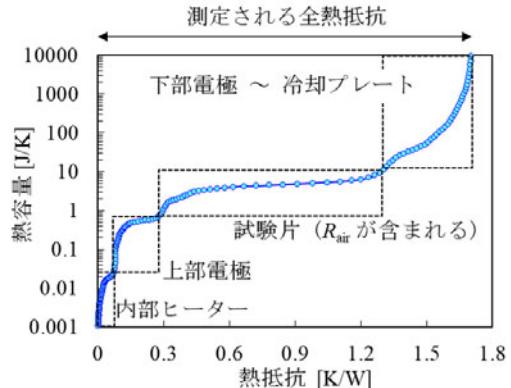


図 6 過渡熱抵抗測定により求めた構造関数

表 1 基準  $p_{cell}$ - $r_{cell}$  データの取得に使用した試験片

	試験片の組み合わせ					
	A		B		C	
平均接觸圧力 $p_m$ [MPa]	0.3～1.0			1.0～3.4		4.0～8.0
材質	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (96%)	A5052 H34	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (96%)	A5052 H34	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (96%)	A5052 H34
熱伝導率 $\lambda$ [W/(m·K)]	22.6	140	22.6	140	22.6	140
熱抵抗 [K/W] $R_{\text{Al}2\text{O}3}$ , $R_{A5052}$	0.074	0.094	0.220	0.278	0.736	0.928
ビッカース 硬さ $H_v$ [MPa]	—	76	—	76	—	76
外形 寸法 [mm]	直径 $d$	22	22	12.8	12.8	7
	厚み $t$	0.64	5	0.64	5	0.64
表面 形状 [μm]	粗さ $S_a$	0.66 ～ 0.69	0.86 ～ 0.95	0.46 ～ 0.66	0.78 ～ 1.01	0.46 ～ 0.61
	うねり 高低差 $h$	2.5 ～ 2.7	1.6 ～ 2.4	1.0 ～ 1.9	1.8 ～ 2.8	0.9 ～ 1.8
	試験片の組数	2		3		2

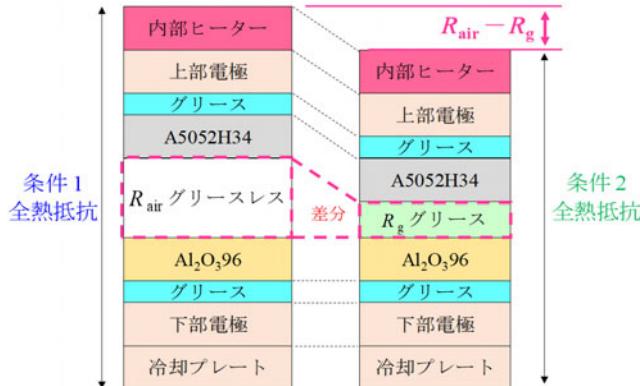


図7 手順2-1の測定条件

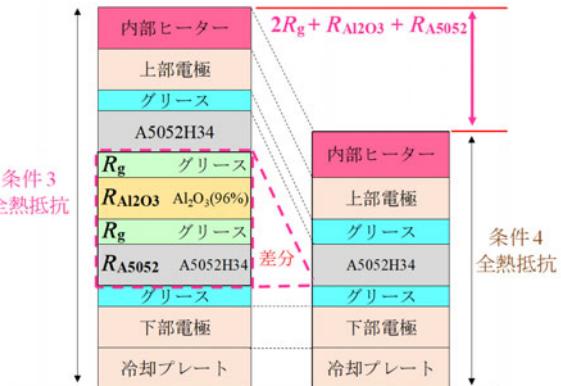
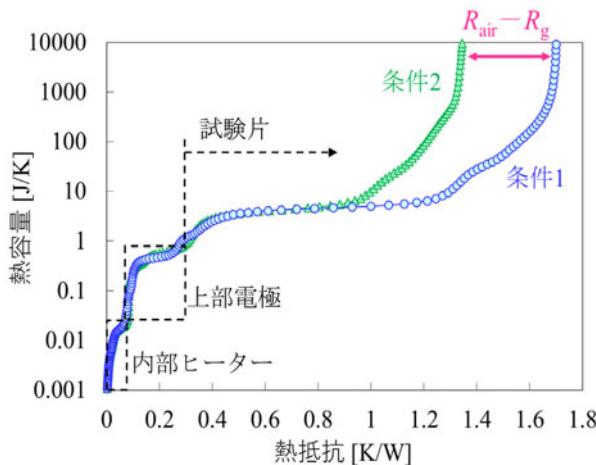
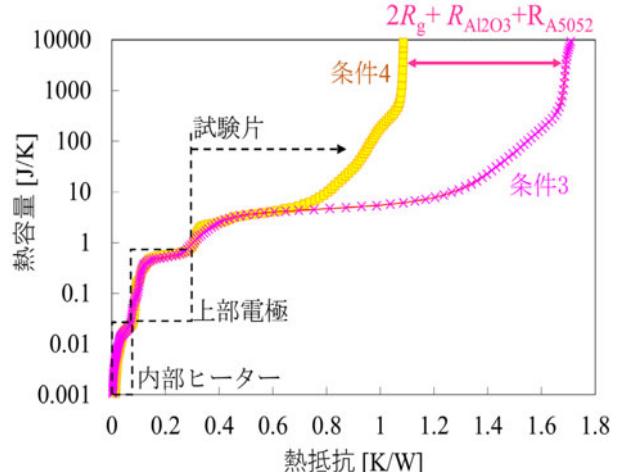


図9 手順2-2の測定条件

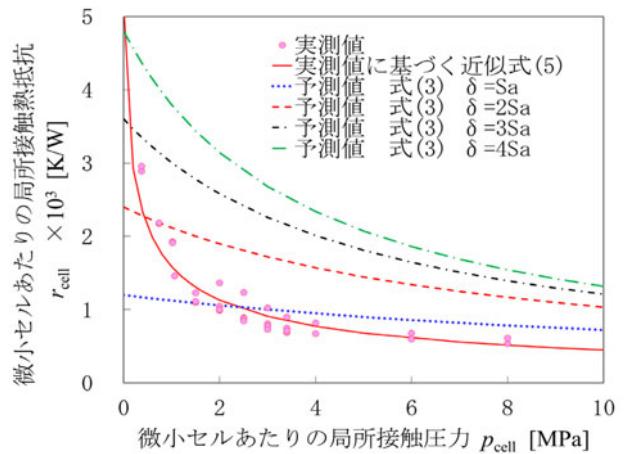
図8 手順2-1の測定例 ( $p_m = p_{cell} = 1.5\text{ MPa}$ )図10 手順2-2の測定例 ( $p_m = p_{cell} = 1.5\text{ MPa}$ )

## 2.4 基準 $p_{cell}$ - $r_{cell}$ データの評価結果

2.3節の方法によって得られた局所接触圧力  $p_{cell}$  と局所接触熱抵抗  $r_{cell}$  の関係を、図11の実測値に示す。実測結果から式(5)の近似式が得られた。この式を図4(b)の基準  $p_{cell}$ - $r_{cell}$  データとして利用する。

$$r_{cell} = \frac{1}{0.436 \cdot p_{cell}^{\frac{2}{3}} + 0.194} \quad (5)$$

また図11には、橋・佐野川の式に基づく予測式(3)を微小セルに適用した結果も示す。この予測値は、式中の  $\delta$  に試験片表面内の算術平均高さ  $Sa$  の1~4倍の値、 $p_m$  に微小セルの局所接触圧力  $p_{cell}$ 、 $S$  に微小セルの面積を代入して得た結果である。 $p_{cell}$  が2MPa以上では、従来の予測式(3)に  $\delta = Sa$  を代入した予測値と実測値が概ね近い値を示し、2MPa以下では実測に比べて予測値が低くなつた。

図11 基準  $p_{cell}$ - $r_{cell}$  データ

予測式中の  $1/h_0$  には式(2)に示す一定値を与えたが、過去の研究によると低圧領域では  $h_0$  が急激に増加すると考察されている[2]。 $h_0$  の急激な変化により、実測値と予測値が乖離したと推測される。

### 3. 開発手法の妥当性検証

#### 3.1 検証方法

本開発手法により求めた接触熱抵抗の妥当性を過渡熱抵抗測定の結果との比較により検証した。接触熱抵抗の測定対象は、うねりが有る  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) とうねりが無い A5052H34 のグリースレス接触面とした。なお、本開発手法で利用する基準  $p_{\text{cell}} - r_{\text{cell}}$  データには、図 11 に示す実測結果に基づく近似式 (5) から求めた値と、橘・佐野川の式に基づく予測式 (3) を微小セルに適用し  $\delta = Sa$  を代入して求めた値の、2通りを適用した。各手法から得られた接触面全体の熱抵抗は、下記の記号  $R_{\text{wpm}}$ ,  $R_{\text{wpn}}$ ,  $R_{\text{wair}}$  を用いて表す。 $R_{\text{wpm}}$  と  $R_{\text{wpn}}$ ,  $R_{\text{wair}}$  の具体的な評価条件を以下に述べる。

$R_{\text{wpm}}$	開発手法で評価した接触熱抵抗 [K/W] 基準データ：図 11 近似式 (5)
$R_{\text{wpn}}$	開発手法で評価した接触熱抵抗 [K/W] 基準データ：図 11 予測値・式 (3) $\delta$
$=Sa$	
$R_{\text{wair}}$	過渡熱抵抗測定で評価した接触熱抵抗 [K/W]

#### $R_{\text{wpm}}$ と $R_{\text{wpn}}$ の評価条件

図 12 に示すように、うねりが有る  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) とうねりが無い A5052H34 をグリースレス接触させたときの不均一接触圧力を圧力測定フィルムで評価した。過渡熱抵抗測定装置の加圧機構を利用してことで  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) と A5052H34 の接触面全体の平均接触圧力  $p_m$  を 0.5, 0.75, 1.0, 2.5, 3.4MPa に制御し、各圧力条件での接触圧力分布を測定した。その後、2.2 節の手順 1-1～1-4 に沿って微小セルの  $p_{\text{cell}}$ ,  $r_{\text{cell}}$  を求め、 $R_{\text{wpm}}$  と  $R_{\text{wpn}}$  を得た。検証には、表 2 に示す試験片を使用した。なお、圧力分布測定の際は、装置の内部ヒーターによる加熱はせず、過渡熱抵抗測定も行わない。

#### $R_{\text{wair}}$ の評価条件

$R_{\text{wpm}}$  と  $R_{\text{wpn}}$  の評価と同じ試験片を使用し、過渡熱抵抗測定によって  $R_{\text{wair}}$  を取得した。 $R_{\text{wair}}$  の測定は、2.3 節と同様の手順により行った。このとき 2.3 節中の記号  $R_{\text{air}}$  は、うねりが有る試験片を接触させた場合の接触熱抵抗  $R_{\text{wair}}$  に置き換えて考える。また平均接触圧力  $p_m$  は、 $R_{\text{wpm}}$  と  $R_{\text{wpn}}$  の評価と同じ条件とした。

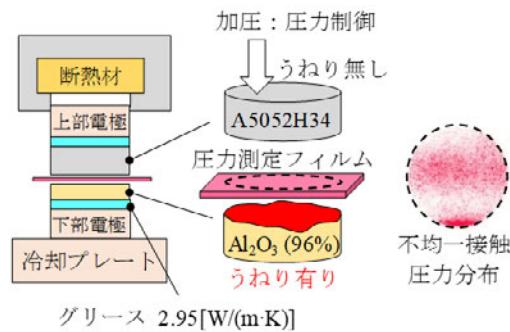


図 12 不均一接触圧力の評価

表 2 妥当性検証に使用した試験片

		試験片の組合せ				
平均接触圧力 $p_m$ [MPa]		0.5 0.75 1.0 2.5 3.4				
材質		$\text{Al}_2\text{O}_3$ (96%) A5052H34				
熱伝導率 $\lambda$ [W/(m·K)]		22.6 140				
熱抵抗 $R_{\text{Al}2\text{O}3}$ $R_{\text{A}5052}$ [K/W]		0.220 0.278				
ピッカース硬さ $Hv$ [MPa]		— 76				
外形寸法 [mm]	直径 $d$	12.8 12.8				
	厚み $t$	0.64 5.0				
表面形状 [μm]	粗さ $Sa$	0.33 ~ 0.63 0.78				
	うねり高低差 $h$	16.1 ~ 19.3 2.8				
試験片の組数		3				

#### 3.2 評価結果

$R_{\text{wpm}}$  と  $R_{\text{wpn}}$ ,  $R_{\text{wair}}$  の結果を図 13 に示す。開発手法により得られた  $R_{\text{wpm}}$  は、平均接触圧力  $p_m$  が 0.5～3.4MPa の全ての範囲において、過渡熱抵抗測定で評価した接触熱抵抗  $R_{\text{wair}}$  と概ね値が一致した。このことから  $R_{\text{wpm}}$  は妥当と考えられる。

次に  $R_{\text{wair}}$  と  $R_{\text{wpn}}$  を比較すると、 $p_m$  が 2.5～3.4MPa の範囲では値が概ね一致したが、1MPa 以下の圧力範囲では結果が乖離した。先述の通り、 $R_{\text{wpn}}$  の基準データには、橘・佐野川の式に基づく予測式(3)を微小セルに適用し  $\delta = Sa$  を代入して得た値を使用している。したがって、1MPa 以下の圧力範囲における  $R_{\text{wair}}$  と  $R_{\text{wpn}}$  の乖離は、図 11 の 2MPa 以下の圧力で  $r_{\text{cell}}$  の予測値と実測値が一致していないことに起因していると推察される。

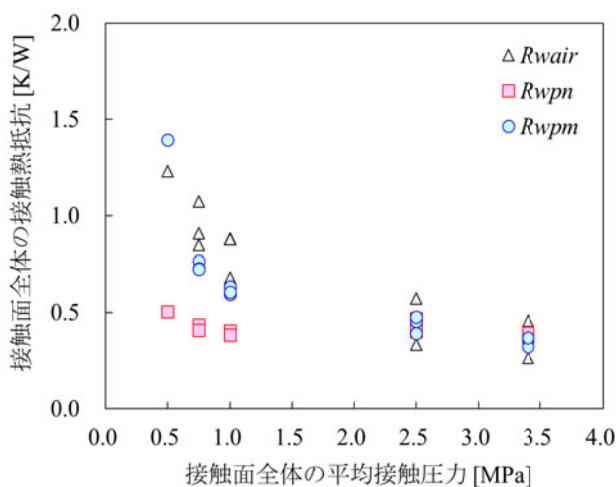


図 13 開発手法と過渡熱抵抗測定の比較

#### 4. 結言

- (1) 圧力測定フィルムにより求めた接觸圧力分布を用い、うねりを有する部材の接觸熱抵抗を評価する新しい手法を開発した。本手法では、部材同士の接觸面をうねりが無視できる程度の微小セルに分割し、この部分に微小セルの局所接觸圧力  $p_{cell}$  と局所接觸熱抵抗  $r_{cell}$  の関係を適用することにより、接觸面全体の接觸熱抵抗  $R$  を求めることを可能とした。
- (2) 本手法を、うねりを有する  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (96%) 材と

うねりが無い A5052H34 材とをグリースレス接觸させた場合の接觸面全体の熱抵抗の評価に適用した結果、過渡熱抵抗測定と同等の値が得られ、本手法の妥当性を確認した。うねりを有する部材の接觸熱抵抗の評価手法として有効な手段であるが、 $p_{cell}$  を  $r_{cell}$  に変換するための基準  $p_{cell} - r_{cell}$  データは、評価対象部材の材質や表面粗さ、介在物質の条件に対応した  $p_{cell}$  と  $r_{cell}$  の関係を使用する必要がある。

- (3) 今後、接觸面にできる圧痕などの観察から真実接觸面積や接点における伝熱現象を分析し、実際の接觸状態を考慮した熱抵抗の予測式の構築を試みる。これにより、様々な材質や表面粗さに応じた基準データを推定できるようにしていく。

#### 参考文献

- [1] 佐野川好母 “金属接觸面における伝熱に関する研究（第 4 報、接觸面の表面あらさの形状・うねりの影響と接觸熱抵抗の近似計算法）”日本機械学会論文集（第 2 部）
- [2] 富村寿夫、小糸康志 “接觸熱抵抗の評価法に関する検討（低圧下での粗さを有する平面間の接觸）” 日本機械学会講演論文集 No.138-3 [13-9-28, 鹿児島講演会]

## 感熱印刷プロセスに影響する接触熱抵抗の評価

*Evaluation of Effects of Contact Thermal Resistance  
on Direct Thermal Printing Process*

福江 高志（金沢工業大学）

Takashi FUKUE (Kanazawa Institute of Technology)

e-mail: fukue@neptune.kanazawa-it.ac.jp

### 1. はじめに

#### 1.1 感熱印刷の昨今の概況

様々なものづくりにおいて接触熱抵抗の問題が散見され、製品の最終的な品質を左右することが少なくない。熱的な不具合を避けるための温度管理の観点でも、熱を使ったアプリケーションの質向上に向けても、熱設計において接触熱抵抗の影響を評価することは変わらず重要である。

接触熱抵抗が使用者の満足度に直接的に影響するアプリケーションの事例として、感熱印刷 (Direct Thermal Printing : DTP) がある。感熱印刷は、サーマルヘッドと呼ばれる加熱体を用い、印刷用紙（以下、用紙）に塗布された色素を熱で変色させ、文字や画像を印刷するプリンタである。昨今の動向[1]として、ポータブル PoS (Point of Sale) 端末に実装されるレシート用プリンタや物流管理用のバーコードプリンタの需要が、ネット通販の拡大により急速に増加し、小型化できてインクが不要というメリットから感熱印刷が使われている。また海外を中心に「その場プリント」が可能なポータブル・フルカラープリンタが人気を集め、ZINK™[2]などの新しい感熱印刷技術が見られる。感熱印刷は身近な印刷技術として伝熱分野での研究事例も多く、石塚[3]、望月ら[4]の伝熱プロセスの研究、江頭らの熱転写プロセスの研究[5]、大原らの用紙が吸湿することによるカールの評価[6]や、新田らの熱転写を応用した用紙の熱伝導率評価法[7]など多数報告がある。

#### 1.2 感熱印刷と伝熱

昨今のポータブル・フルカラープリンタの隆盛も鑑み、印刷技術の新しい魅力品質の創成に向け、感熱印刷のクオリティ向上のための基礎研究が求められる。感熱印刷を端的にイメージ図と熱回路網で表すと図1および図2のようになる。ドットヒータ（微細な抵抗体）が多数実装されたサーマルヘッドと呼ばれる印刷機と、プラテンローラーの

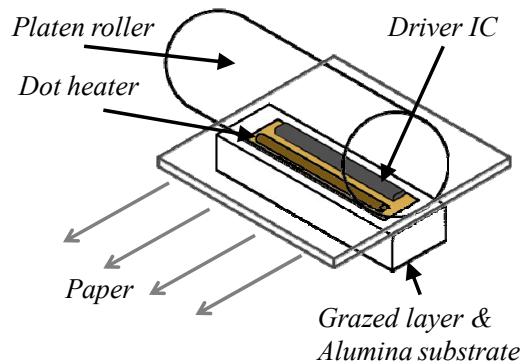


図1 感熱印刷機構のイメージ

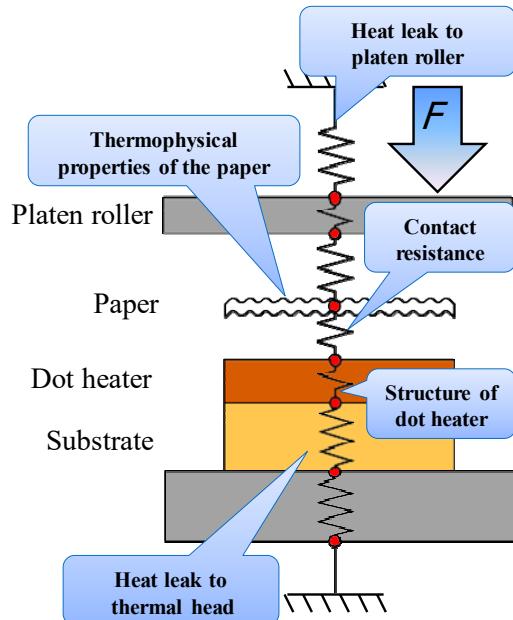


図2 感熱印刷プロセスの熱回路網

間を、色素を塗布した感熱紙が通過する。このとき、印刷する文字や画像に応じ、対応するドットヒータを通電加熱させ、感熱紙に熱を加える。感熱紙に塗布された色素が熱により変色し、その結果、用紙に文字や画像が印刷される、というのが基本的な原理である。レシート用の感熱紙であれば、加熱により黒色に変色するロイコ色素が塗布

されており、ドットヒータによる加熱で黒が印刷される。レシートの印刷面を爪で擦ると黒く変色するが、これは爪とレシートの間で発生する摩擦熱により、ロイコ色素が変色するためである。昨今のフルカラー感熱印刷で、例えば熱転写型のプリンタでは、シアン・マゼンタ・イエローの三色のインクリボンを順番に加熱し、印刷用紙に塗料を転写することで印刷する。ZINK™技術では、ドットヒータからの加熱履歴により、用紙に塗布されたシアン・マゼンタ・イエロー各層の色素が発色しフルカラー印刷を達成する。よって、ドットヒータから用紙に加熱される際の伝熱プロセスが、文字や画像の鮮明さや色の綺麗さに直結する。

### 1.3 感熱印刷における接触熱抵抗の評価

以上の背景から、感熱印刷の魅力品質を獲得するキーの1つが、サーマルヘッドと用紙の間で発生する接触熱抵抗の影響である。感熱印刷の厳密な熱設計には、接触熱抵抗の定量的な評価を何かしらの形で織り込むことが肝要である。しかしながら、最終製品そのもので発生する接触熱抵抗の様相を、熱設計の過程で、定量的にかつ厳密に織り込むことは難しい。しかし熱設計の出戻りの回避[8]や、魅力品質の創成[9]を目指した構想設計段階での熱設計の作り込みを考えた際に、製品における接触熱抵抗の影響を簡易に評価できる指標があることは、最終製品の競争力向上に有益である。さらに、プリンタの設計においても、機能レベルで複合的な設計要素を一元的に設計するモデルベース開発（Model-Based Development : MBD）の適用事例が散見されている[10]中で、接触熱抵抗の簡易的な機能モデルの構築にも繋げられる。

そこで本稿では、特に感熱印刷において発生する接触熱抵抗の影響度を、構想設計段階において機能レベルで評価・判断できる設計指標の獲得を目指した2つの研究事例について紹介する。

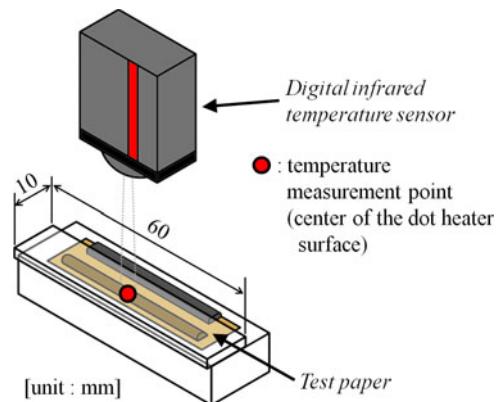
## 2. サーマルヘッド実機における 熱回路網法を併用した接触熱抵抗の予測

### 2.1 課題の気づきのきっかけ

感熱印刷における接触熱抵抗の課題を考えるきっかけになったのは、感熱印刷の印字品質向上と印刷時の消費電力低減のための加熱プロセスを考えるうえで、サーマルヘッドで用紙を加熱した際の温度応答特性が用紙の種類によって極端に異なる

表1 実験に供した印刷用紙の断面図

Type of paper	Thickness [mm]
Thermal paper (TH)	0.05
Xerographic paper (XG)	0.065
High grade paper (HG)	0.1
Thermal transfer paper (TT)	0.2
Inkjet paper (IP)	0.3



(a) 実験系の概略図

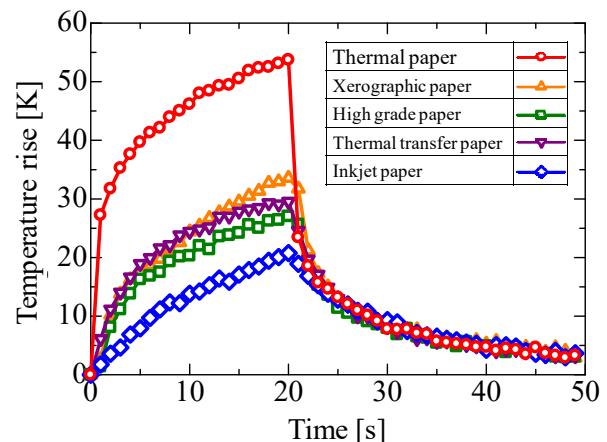
(b) 加熱開始後の印刷用紙の温度応答の違い  
(1.80 W の加熱をヘッド中央部から印加)

図3 サーマルヘッド上の印刷用紙の温度応答

る、という問題であった[11]。一例として、サーマルヘッド上に載せた5種類の用紙（表1）をそれぞれサーマルヘッド実機上に設置し、1.80 Wの熱をサーマルヘッド中央部の幅3.75 mmに実装されたドットヒータから加えた場合に、裏面から放射温度センサで温度履歴の違いを計測してみると、図3のようになった。用紙の種類による温度上昇の違いが明確にみえた。感熱印刷用の感熱紙が一番高い温度上昇を示しており、紙の厚みが薄く柔らかいこと、表面のロイコ色素により紙がサーマルヘッドに密着しやすい傾向があったことが原因であると考えられる。そのほかの用紙については、もちろん紙が厚くなればなるほど、加熱面と温度を測った裏面の間の熱抵抗は大きくなるため、裏面の温度上昇は抑えられる傾向にある。しかし、一方で単純に用紙の厚みだけでは温度上昇の度合が決まらなかった。

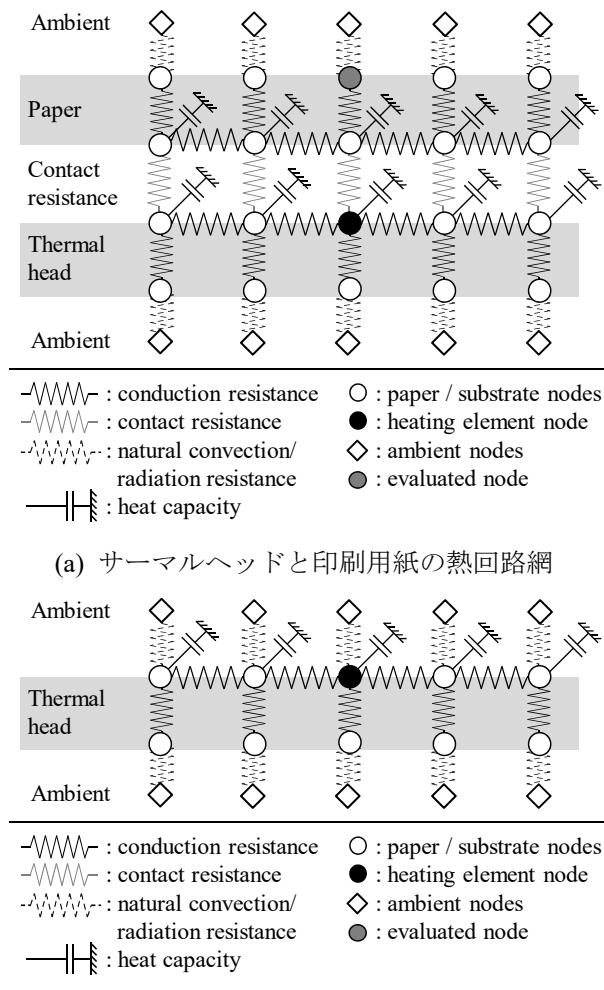


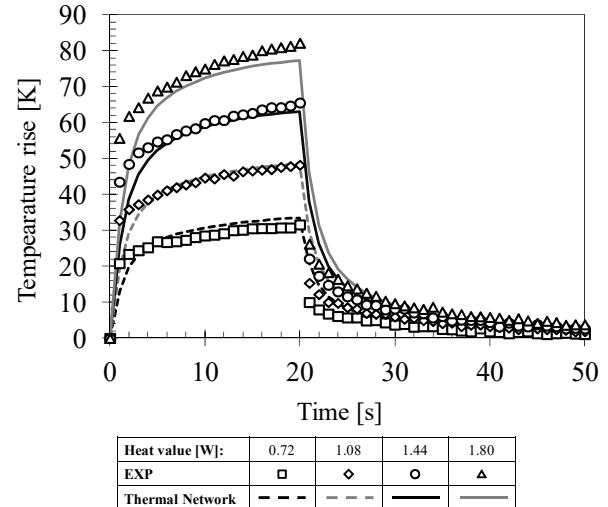
図4 接触熱抵抗評価用の熱回路網モデル

## 2.2 热回路網法による接触熱抵抗の推定

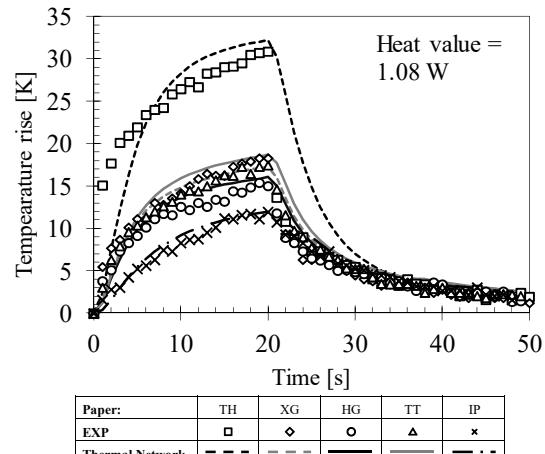
ここで着目したのが、紙の熱物性値と、サーマルヘッドと用紙の間の接触熱抵抗であった。

紙の熱物性値については、代表的な値についてはデータベースに掲載されている[12]が、使用用途やニーズに応えた様々な種類を網羅するには至っていない。そこで、密度（精密天秤）、比熱（示差走査熱量測定）、熱伝導率（1次元定常熱伝導率測定、後述）をそれぞれ直接計測した。結果、5種類の用紙の間で最大2割程度のばらつきがあり、加熱時の用紙の温度応答に影響を与えていたことがわかった[13]。

一方で、接触熱抵抗については、実験で直接的に評価するのは難しい。そこで実験系を、計測した紙の熱物性値も用いながら図4に示す熱回路網に置き換え、非定常熱回路網法[14]による間接的



(a) サーマルヘッド単体の温度上昇予測結果



(b) 印刷用紙の温度上昇予測結果

図5 热回路網モデルによる温度予測結果

な予測を試みた。なお、(a) は用紙あり、(b) は用紙なしのモデルである。

手順としては、用紙とサーマルヘッドの間の接触熱抵抗を変化させながら熱回路網法による温度予測を行う。予測結果と実験結果を比較することで、接触熱抵抗の値を推定する。しかしここで問題になったのは、複雑な構造を持つサーマルヘッド本体への熱漏れの度合が不明なことであり、この構造を直接的に熱回路網に再現することが不可能であったことである。そこで、サーマルヘッドが壊れない範囲で、あえて用紙を載せずに熱を発生させ、このときに放射温度センサで計測されたサーマルヘッドの温度履歴が予測できるよう、サーマルヘッド側の熱伝導熱抵抗の推定をあらかじめ行った。結果、用紙無しの場合のサーマルヘッド表面温度の温度予測結果は図 5 (a) に示すように実験結果とほぼ一致し、サーマルヘッド側のモデルの信頼性が確かめられたことから、用紙ありの解析を進めた。得られた裏面温度の予測結果が図 5 (b) である。熱回路網法の解析は実験でみられた用紙毎の温度応答の違いを予測できた。このとき得られた接触熱抵抗が図 6 に示すものであり、用紙間の差異が極めて大きい。とりわけ感熱印刷用の感熱紙は、接触熱抵抗の値が低く、このことからも、前述した密着性の高さが温度応答性に繋がっているといえる。このとき、接触熱抵抗を全ての用紙でゼロと仮定した場合の温度予測結果を図 7 に示す。用紙を問わず、接触熱抵抗の有無で温度応答特性に大きな差が出てしまうこと、すなわち、感熱印刷の熱設計における接触熱抵抗の重要性が確認できた。推定した接触熱抵抗が小さかった感熱紙が、むしろ最も大きい温度差を示したことでも興味深い。これは、厚い用紙は内部の熱伝導熱抵抗も大きく、接触熱抵抗の影響が相対的に小さくなるためと考える。

### 3. 接触熱抵抗と荷重の関係の評価

一方で、実際の感熱印刷機構では、印刷用紙はサーマルヘッドとプラテンローラに挟まれることから、直接の温度場や接触度の計測や評価は困難が多い。よって、より普遍的な影響度の情報、例えばプラテンローラからの印加荷重が、用紙の接触熱抵抗に影響を与える閾値が事前に明らかになっていれば、設計ノウハウとして利用できる。そ

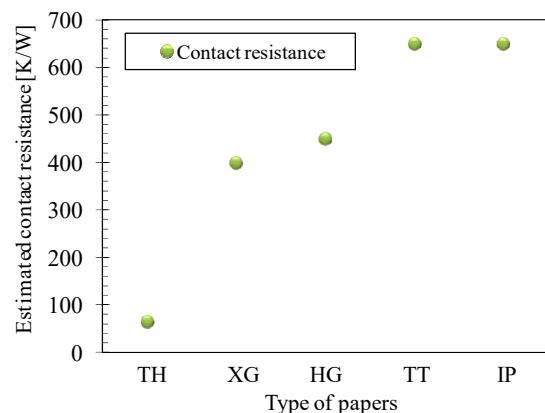


図 6 热回路網法で推定した接触熱抵抗

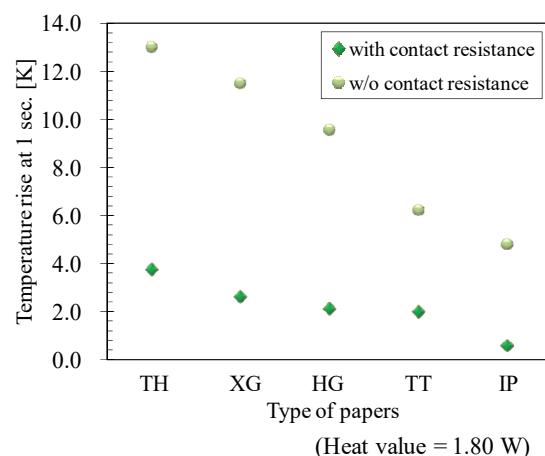
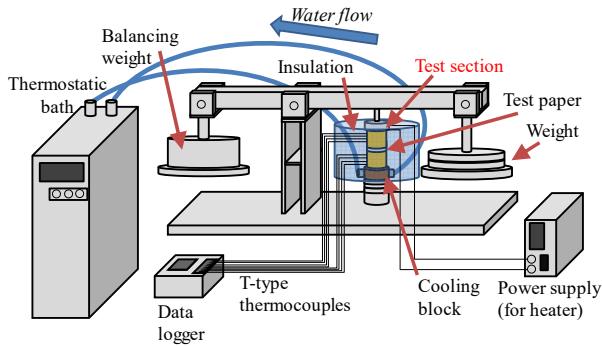
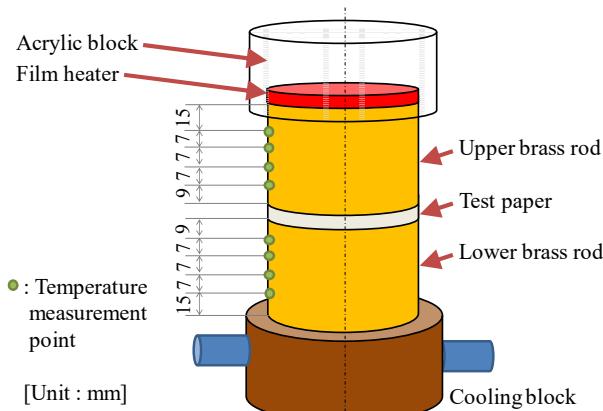


図 7 接触熱抵抗の有無で生じる裏面温度の差

こで、富村ら[15] が開発した、試料への印加荷重が容易に変更できる天秤型一次元熱伝導率計測システム（図 8）を用いて、用紙表面の接触熱抵抗と印加荷重の関係を評価した[16]。ここでは 5 種類の用紙をそれぞれ黄銅製のロッドで挟み、片側のロッドを加熱、もう片側のロッドを冷却することで用紙の厚み方向へ熱通過を発生させる。このとき現れるロッドの温度勾配から、用紙の表裏両面の接触熱抵抗も含めた等価熱伝導率を求めた。この等価熱伝導率の変化から、印加荷重と接触熱抵抗の関係を評価した。計測結果を図 9 に示す。印加荷重が高いほど等価熱伝導率が高くなる、すなわち接触熱抵抗の影響が小さくなっていることがわかる。別の言い方をすれば、印加荷重が小さい場合には、接触熱抵抗の影響により等価熱伝導率が小さくなる傾向がみてとれる。この等価熱伝導率の変化は、印加荷重に基づく接触圧力が 30 kPa を超えた場合には小さくなり、60 kPa 以上で



(a) 実験系の概略図



(b) テストセクション周り

図 7 一次元熱伝導率計測システム

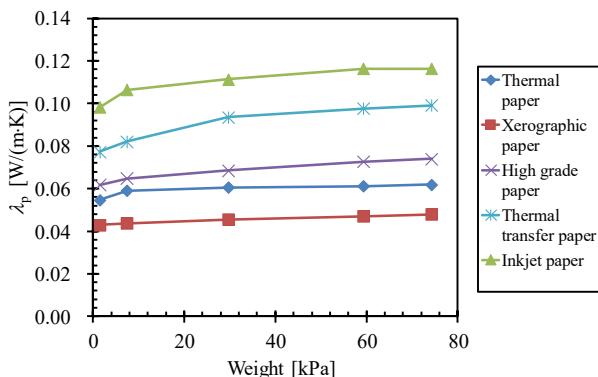


図 8 (等価)熱伝導率に対する荷重の影響

はほとんど飽和する。よって、これまで評価した範囲では、用紙を押しつけるプラテンローラからの圧力が 60 kPa 以上確保できれば、接触熱抵抗の影響は最小化できるといえる。実際の感熱印刷機構では、この範囲より高い接触圧力を加えているということであり、実設計におけるプラテンローラの設計値との整合性も確認することが出来た。



図 9 モバイルフォトプリンタの狩野モデルに基づく品質設計マップ (2019 年現在)

#### 4. まとめ

製品内部において発生する接触熱抵抗が、製品の魅力に直結する事例として、感熱印刷における用紙とサーマルヘッドの間の熱抵抗について取り上げた。特に本研究では、設計の上流段階で適用可能な、熱回路網法や MBD などの機能レベルの熱設計へ展開するための接触熱抵抗の情報を取得するための取り組みを、2 つの方向性から実施した事例を紹介した。

製品の内部で発生する接触熱抵抗に関する問題で難しいのは、接触する部材の表面の様相、材料そのものの弾性など、接触面の状況に直結する要素が千差万別で、かつ直接的には評価出来ない点である。月山[17]が、熱転写プリンタをモデル化した実験系で、サーマルヘッドと熱転写ベルトおよびゴムローラの間の接触の様子を高視野レーザ顕微鏡で計測し、接触面の伝熱との関係を評価した内容を報告している。製品における接触熱抵抗の正確な把握に向け、実際の接触の様相と伝熱の相関を密に評価する視点と、熱設計へ応用するための機能レベルでのモデル化の、両方の視点からの基礎研究の必要性を強く感じている。

最後に、現在の段階でモバイルフォトプリンタに期待する（と筆者が予想する）狩野モデル[18]に基づく品質設計指標の一例を図 9 に示す。プリンタが「持ち運べ」「写真を撮ったその場で印刷し」「コードレス」という、筆者が学生の頃は想像もしなかったことが、今や「当たり前品質」になってしまった。次にヒットするアイディアが何か、消費者の価値観が多様化した状況の中で想像する

ことは難しい。だからこそ、どのようなニーズに対しても対応できるような構想設計プロセスでの作り込みが重要になり、感熱印刷において「印刷する」という機能そのものを司る伝熱の本質を追求することが必要不可欠である。このことを踏まえ、自身の今後の研究も推進していきたい。

### 謝辞

本研究の推進に際し、アルプスアルパイン（株）寺尾博年氏、和宇慶知子氏、星野久氏、岩手大学 廣瀬宏一先生、富山県立大学 石塚勝先生、熊本大学 富村寿夫先生、小糸康志先生のご指導、ご支援を賜りました。記して謝意を表します。

### 参考文献

- [1] 寺尾博年，“サーマルプリンタ状況と昇華型フォトプリンタ動向”，日本画像学会研究会 2019 年度第3回『モバイルフォトプリンタの最新動向』(2019), 1-5.
- [2] 阿部栄文，“Zink プリンタ動向”，日本画像学会研究会 2019 年度第3回『モバイルフォトプリンタの最新動向』(2019), 19-23.
- [3] Ishizuka, M., “APPLICATION OF A NETWORK METHOD TO THE THERMAL ANALYSIS OF HIGH SPEED THERMAL PRINTER HEADS”, *ASME Advances in Electronic Packaging* (1992), 457-462.
- [4] Mochizuki, S., Kudoh, Y. and Tsukada, T., “The Effect of Heat Transfer Process on the Print Quality in Thermal Printers”, *JSME International Journal, Series II*, 31-3 (1988), 553-558.
- [5] 江頭典孝, 望月貞成, 森本泰正, “フルカラーサーマルプリンタにおける染料転写機構の研究”, 日本機械学会論文集B編, 59-560 (1993), 1236-1243.
- [6] 大原俊一, 羽山祐子, 谷川洋文, 鶴田隆治, “紙種の差を考慮した定着過程のカール予測”, 熱工学シンファレンス 2014 講演論文集 (2014), Paper No., B125.
- [7] 新田勇, 寺尾博年, 濑下卓弥, “熱転写プリンタを利用した印刷用紙の簡易熱伝導率評価法”, 精密工学会誌, 70-4 (2004), 522-527.
- [8] 石塚勝, 図解入門 よくわかる電子機器の熱設計 (2009), 秀和システム.
- [9] 大富浩一, よくわかるデライト設計入門 (2016), 日刊工業新聞社.
- [10] 中山高司, 及川研, 山科亮太, “プリンタ・複合機のモデリングと制御”, *計測と制御*, 53-4 (2014), 328-334.
- [11] Fukue, T., Terao, H., Hirose, K., Wauke, T., Hoshino, H., Ito, R. and Nakagawa, F., “Investigation of Transient Temperature Response of Papers in a Thermal Transfer Printer”, *Proceedings of IS&T NIP29* (2013), 124-129.
- [12] 日本熱物性学会編, 新編熱物性ハンドブック (2008), 養賢堂.
- [13] Fukue, T., Terao, H., Hirose, K., Wauke, T. and Hoshino, H., “Analytical Investigation of Effects of Thermophysical Properties on Transient Temperature Response of Papers in Thermal Printer”, *Proceedings of IS&T NIP30* (2014), 69-72.
- [14] 高乘貞一, 藤井則之, 石塚勝, 中川慎二, 高木寛二, “相変化現象を伴う電子機器の熱解析への熱回路網法の応用”, *Thermal Science & Engineering*, 17-3 (2009), 105-112.
- [15] Tomimura, T., Nomura, S. and Okuyama, M., “Simple Measuring Method of Thermal Conductivity of Silicone Grease and Effect of Carbon Nanomaterials on Its Thermal Conductivity”, *Proceedings of the ASME/JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference; HT 2007* (2007), Paper No., 32649.
- [16] Fukue, T., Terao, H., Hirose, K., Sasaki, Y., Wauke, T., Hoshino, H., Tomimura, T. and Koito, Y., “Basic Study on Evaluation Method of Thermal Conduction through Printing Papers using 1-Dimensional Thermal Conductivity Measurement”, *Proceedings of IS&T NIP32* (2016), 112-115.
- [17] 月山陽介, “フォトプリンタ基礎: 「給紙ローラと用紙の接触と摩擦」”, 日本画像学会研究会 2019 年度第3回『モバイルフォトプリンタの最新動向』(2019), 14-18.
- [18] 芝本秀徳, プロジェクトマネジャーのためのプロセスデザイン入門 (2014), 日経 BP.

人と熱との関わりの足跡（その6）  
 －阿波藍の発展と藍染めの伝統技術における熱との関わり－  
*Footprints of the relationship between humans and heat (Part 6)  
 -Development of Awa Indigo and the Relationship between Traditional Indigo Dyeing and Heat-*

河村 洋（公立諏訪理科大 名誉教授、熱の科学技術史研究会 主査），

船井 由美子（三木文庫 学芸員），新居 修（新居製藍所 藍師 現代の名工）

*Hiroshi KAWAMURA (Suwa Univ. of Science), Yumiko FUNAI (Miki Archives), Osamu NII (Nii Indigo Factory)*

*e-mail: kawanif@nifty.com*

### 1. はじめに

我が国の代表的な染色家かつ研究者の一人である吉岡常雄氏(故人)は、その著書[1]の冒頭部分に、古代の彩色画としては、数万年前にフランスのラスコーやスペインのアルタミラの洞窟の壁画が描かれているのであるから、「そのような見事な色の形を把握した人たちが、自然界の色鮮やかに見える植物の花や葉を、身にまとっている衣類の色付けに使わなかつたはずはないであろう。」と述べている。

これらの古くから伝わる様々な天然染色の中でも、本稿では“藍染め”を取り上げている。これは、2019年日本伝熱シンポジウムが徳島で開催された際に、阿波の代表的な伝統産業である藍染めの伝統技術が「熱」と大きくかかわっていることに着目して、「熱の科学技術史研究会」が主宰し、地元の技能者の方々のご協力を得て「阿波藍の発展と藍染めと熱との関わり」のご講演を頂いたことがきっかけとなったものである。

まず藍で染められた布地について世界的に見ると、現在までに発見されている世界で最も古い例は、ペルーの Huaca Prieta 遺跡から見つかった布片(図1)である[2]。右側が染色された布、左がその復元図

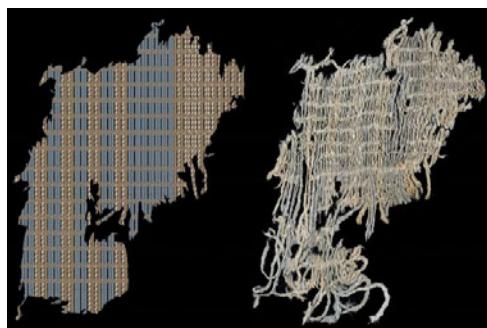


図1 現在発見されている最古の藍染め（右）。約6,200年前、ペルーのHuaca Prieta遺跡から出土。左はその復元図[2]。

で、布には明らかに藍色が残っており、化学分析の結果でも藍(Indigo)であることが確認されている。時代は、炭素同位体の年代測定から、約6,200年前と推定されている。この発見までは、古代エジプトの約4,400年前の布地が最古とされていた[3]。これらから、地球上に拡散した人類がそれぞれの地域で独自に藍染めの技術を発展させていたことがわかり、たいへん興味深い。また約5,000年前頃のインドのハラッパ遺跡からは藍染めの槽跡が発見されており、インディゴ(Indigo)の語源もインドに由来するといわれている[3]。

地球上には、藍を含む植物は広く生育している。たとえば、インド等の東南アジア諸国ではマメ科の印度藍、ヨーロッパではアブラナ科のウオード、我が国の場合には本州や四国九州ではタデ科の蓼藍(たあい)（後出図）、沖縄ではキツネノマゴ科の琉球藍などである。これらの植物は分類学上は全く異なる“種”であるにもかかわらず、いずれも同一の物質インディカン(Indican)を含んでおり、含藍植物とよんでいる[4]。このIndican自体は無色であるが一定の化学反応を経て藍色を発色するIndigoに変化する。すなわち、藍は、世界各地で全く異なる“種”的植物から一見異なる手法で染められているが、化学的には同一の反応を生起させる技術が独立に開発してきた点が興味深い[3, 4]。

### 2. 我が国における藍染めの発達

日本では正倉院や法隆寺御物の中に藍染めの布が残っており、3~4世紀に藍草(蓼藍)が西方から渡來した際に藍染の技法も一緒に伝わったものと考えられている。図2は正倉院御物として伝わる藍染めの「縹樓(はなだる)」である[5]。縹(はなだ)とは、藍で染めた薄い青色のこと、縷(る)とは細い糸の意味で、天平勝宝4年(753年)の大仏開眼会で用いられた由緒ある品である。大仏に眼睛を点

じた筆に結び付け、参集者はこの長い紐を手にして功徳に与ったもので、我が国に現存する藍染めの最古の品であるとされている[4]。



図 2 正倉院に伝わる縹樓（はなだる）。天平勝宝4年（752年）の大仏開眼会で用いられた。我が国に現存する藍染めの最古の品[5]。

藍は平安時代までは主に宮廷や上流貴族が身に着ける色とされていたが、鎌倉時代以降には武士が藍の染料で染めた黒に近い濃い青色「搗色（かぢいろ）」を身に着ける習慣が定着した [6]。

その後織田信長の時代頃から、庶民の衣服や寝具の素材が麻から木綿に変わると、藍染めは庶民の生活に根付いていったが、このとき木綿布を染めるのには、藍の建て染め（後述）が一番適した染色法であった。

江戸時代の厳格な身分制度（士農工商）のもとでは、百姓や町人が日常的に着る生活衣服は木綿に限定され華美な染色も禁止された。そのため藍で染められた木綿は、江戸の町人の浴衣や職人の法被（はっぴ）から商店の暖簾などに用いられ、また農民・職人など数の多い身分層でも野良着・労働着・法被などの多くは藍で染められていて、歌川（安藤）広重が藍色の濃淡と墨で描いた風景（図 3）にも象徴



図 3 歌川広重の東海道五拾三次、三島。人物の衣服は藍色で、風呂敷も藍で染められている。国会図書館ディジタルコレクション[7]

されるように、藍は庶民の生活を彩る重要なアクセントであった。

このように、江戸末期から明治初期にかけて日本中に藍が溢れており、我が国に招聘された外国人教師達も藍のあふれる街の光景に目を見張り、化学者のアトキンソンは、この光景を「ジャパンブルー」と呼んだと言われる[8]。

その後、1883年にドイツの化学者バイヤーが Indigotin の分子配列構造を解明してその合成に成功した。彼はその他の業績も含めて 1905 年のノーベル化学賞を受賞している。その後さらに BASF 社が 14 年の歳月と多額の投資によって Indigo の工業的な合成に成功して “Indigo pure” という商品名で発売を開始し、その後は急速に合成藍が普及していった[3]。とくに、アメリカ西部開拓に伴って考案されたと言われる機能的な「ブルージーンズ」は、若者に好まれて世界中に広まった。吉岡幸雄[6]は、「藍は、世界の人がみな愛した色であり」、「藍という色が人間の目にやさしい自然な色だと言うことが、（中略）世界中で受け入れられた最大の要因といつていよいだろう。」と述べている。

### 3. 阿波における藍産業の発展

藍草は古くから日本全国で栽培されていたが、豊臣秀吉の家来であった蜂須賀家政が阿波徳島の城主となると（1586年），温暖な気候と年ごとに洪水を繰り返す吉野川によって上流から泥砂が流れ込む自然の施肥と客土の恩恵を受けて、この地が藍の栽培に適していることに着目し、藍栽培と関連事業を保護・奨励した結果、質・量ともに優れた藍玉を産出するようになった[4]。

当初の 1600 年代は阿波藍の品質はまだ他藩に劣るものであったが、1700 年代には全国の藍市場を支配するほどになった。その原因のひとつに、藍の色の濃度や色相を客観的に調べる「手板法」と名付けられた品質検査の方法がある。これは、和紙に藍を塗り、透かしてその濃度を見たもので（図 4 左），このような客観的評価が適正な製造条件を導き出し製造技術を向上させた[4]。

阿波藍の品質を向上させたもう一つの要因に干鰯（ほしか）と呼ばれる窒素肥料の導入・普及がある。これらによって、収穫される藍葉中の藍成分の濃度が向上し、阿波の藍を「本藍」、その他の地方の产品を「地藍」と言われるようになった。

さらに明和4年（1767年）から徳島で開かれた「藍大市」も、阿波藍の発展に大きな寄与をした。藍大市では、江戸・京都・徳島などから藍仲買人たちが集まり、藍玉の品定めと取引を行い、その品質を「手板法」により評価して「瑞一」「准一」「天上」の三等級が付けられ賞牌板が贈られた（図4右）[4]。



図4 左：手板法による藍の鑑定[9]

右：藍大市の賑わい[10]

阿波藩主蜂須賀家による藍事業の保護・奨励策の元に、商人として実際にこれを推進した代表的な事業家が三木家である。三木家第一世となる別所規治は、播州の三木城の城主で羽柴秀吉との戦いに敗れた別所長治の従弟であるが、落城によって家来と共に阿波に逃げ延び、天正8年（1580年）に現在の徳島近郊の中喜来（なかきらい）に居を構え、帰農して三木與吉郎と名乗った。中喜来は徳島から鳴門へ行く途中にあり、三木家は今切川や吉野川の流域水運の便を利用して、漁具、米穀、雑品などの幅広い商いを始めたが、阿波藍が盛んになるにしたがい延宝2年（1674年）に第二世高治が阿波藍の取扱いを始めた。その後、寛政元年（1789年）には、江戸日本橋にも店舗を構え、以降、幕末・明治へと阿波を代表する「関東売り藍商」となった[4]。

このような来歴から、三木家は阿波藍にかかわる史料・標本・絵画のみならず、江戸から国元（中喜来）へ送られた錦絵・かわら版・書籍類などの幕末の文化・世情を伝える史料や、阿波地方の行政や民俗に関する史料など数多くを収集・所蔵してきた。これらについて、三木家第13代三木與吉郎真治は、昭和29年（1954年）に三木産業（株）創業280周年記念事業の一つとして三木文庫を創設し、上記の諸資料を多数収蔵して閲覧、学術調査などに提供している（図5）。このほか史料集や解説書も多く出版しており（[4], [9], [10]など）、本稿でも多くを参照している。

阿波藍の生産は、明治時代の後期ごろまで生産量が拡大し、明治36年には最高の生産規模となった。しかし、明治中期からより安価で早く濃く染まるインドからの沈殿藍（インド藍）や、後期にはヨーロッパより前述の合成染料が登場して、国内生産量は激減し、「植物染料」はほとんど忘れ去られていった。

このように衰退の一途をたどっていた藍栽培であったが、大戦中にも密かに蓼藍の栽培が続けられ、また後に述べる「糞（すくも）」の製造技術も保存されたことから、昭和50年頃から郷土の伝統ある産業として見直されるようになった。また、伝統工芸品や手作り作品の人気の高まりなどもあって、天然藍による藍染め作品が注目されるようになって、藍栽培の面積も徐々に回復してきている。



図5 三木文庫所蔵資料の例©三木文庫  
左：藍染めの装飾品，中上：賞牌板(瑞一)，  
右上：藍染めの法被（三木商店屋号入），  
中下：藍粉成し道具(後出)，右下：藍玉の俵

#### 4. 藍染めの伝統技術とその化学

##### 4.1 藍染めの化学

Cardon[3]は天然染料による染色の方法を次の3種類に分類している。

- (1)直接法(Direct dyeing)：植物染料と纖維などの染色対象の分子構造に親和性のある場合で、植物を浸すかあるいは煮込んだ水溶液に纖維などを浸すことによって染色する。
- (2)媒染法(Mordant dyeing)：植物染料と染色対象との間に直接の親和性がないときでも、明礬（みょうべん）や錫塩、鉄塩などの媒染剤（金属塩）によって発色させ、様々に変化する色を染め出す方法。天然染料による染色は、この方法が種類が多くむしろ一般的である[8]。
- (3)建て染め法(Vat dyeing)：水に溶けないが還元すると水溶性になる染料で、一旦還元した状態を作

ってここに纖維等を浸した後、空気中に引き上げることにより酸化させて発色かつ定着させる染色法、還元状態になると染料を含む泡が表面に立ちあがってくるため“藍が建つ”という。還元法ともいう。このとき一般に大きな甕（Vat）を用いるので英語では Vat dyeing といっている。この方法の代表的な例がこの藍染めと、ある種の貝を使って紫色を染める「貝紫」である[8]。

なお、藍染めの場合も(1)直接法でも染めることが出来て「生葉（なまば）染め」と呼ばれるが、藍葉の収穫後直ちに作業をする必要があるために時期と場所が限られる。藍染めが世界規模で普及したのは、後に述べる「葉（すぐも）」あるいは「藍澱（らんでん）」等を一旦作って運搬・保存しそれを用いて任意の時と場所で染める「(3)建て染め法」が開発されたことに依る[4]。

藍染めの基本となる工程の大きな流れを説明するにあたり、まず藍染めにかかる化学物質について説明させて頂きたい。それぞれの化学構造式は図6に記載している。

- (1)インディゴ(Indigo)：纖維等に定着することによって青系統色に染める染料。発色させる主要な化学成分は Indigotin と呼ばれ、2 個の Indoxyl が点対称に結合した構造である[3]。水に溶けないため、染色には一旦(2)のロイコ体を介する必要がある。
- (2)ロイコ体インディゴ(Leuco-Indigo) : Indigo を還元することによって得られる。無～薄い黄色になるが水に溶けるのでこの状態で纖維等に付着させ、後に空气中で酸化することにより Indigotin に戻す。

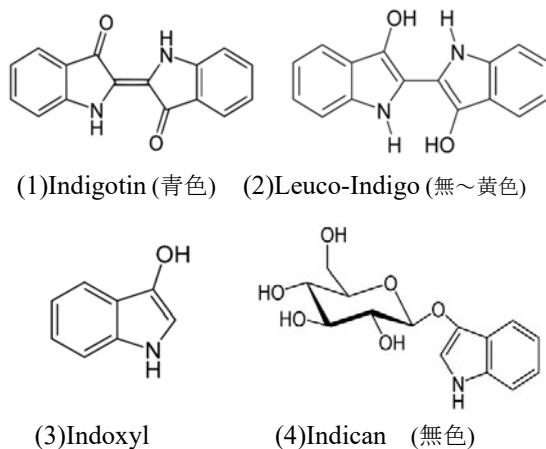


図 6 Indigo 関連分子の構造式[3]

して藍色に発色させかつ定着させる。

- (3)インドキシル(Indoxyl) : Indigotin の構成要素。含藍植物の中には次の Indican の形で存在する。
- (4)インディカン(Indican) : Indigo が含藍植物の中で自然界に広く存在する形。グルコース（一種の糖分）と結合した形であるが、この状態では無色で、葉の組織中に分離して存在する酵素が作用すると結合が離れて Indoxyl を生成する[3]。

図 7 は、含藍植物のうち我が国で一般的な蓼藍（タデアイ）である。正常な葉は鮮明な緑色であるが、痛んだ葉（中央付近）は通常の枯れ葉のような茶色ではなく、特徴的な黒ずんだ青色になっているのがわかる。これは、葉の組織が破壊されたために、含まれている酵素が作用して Indican から Indigotin が生成されたためである。なお、藍染め染料の製造のためには開花前に葉を採集するが、ここでは観察のために開花させている。



図 7 蓼藍（タデアイ）。通常のタデによく似た花が咲く。傷ついた葉の部分は濃紺色を呈しているのが特徴的。

#### 4.2 藍の栽培・収穫・乾燥

現在阿波地方で行われている藍染めの工程を、簡単化して図 8 に示す。本項については、新居（筆者の一人）の新居製藍所のウェブサイト[11]にわかりやすい動画による解説がある。

- ①藍葉の栽培と収穫:** 3月上旬にまず苗床に種をまき苗を育て、4月下旬から5月上旬に施肥した本畑に移植する。本畑では、灌水、施肥、害虫駆除などの作業をし7月から8月に藍葉を刈り取る。
- ②藍粉成し:** 収穫した藍葉は裁断機で細かく裁断した後、風によって葉と茎を分ける。これを「藍粉成し（あいこなし）」という。その後は天日で乾燥する（図 8②）。乾燥した葉を「葉藍（はあい）」と呼ん

でいる。この段階で Indigotin の生成が始まつており葉藍は図 7 の痛んだ葉のような濃紺色を呈する。

#### 4.3 葉の醸酵・薟（すくも）の製造

**③寝せ込み、切り返し：**葉藍を醸酵させることにより、内部にインディゴ（厳密にはインディゴテイン）を生成させる。そのために、乾燥した葉藍を 10 月頃から“寝床”と呼ばれる大きな倉庫のような建物内で醸酵させる。図 9 は、寝床の写真と断面図である。薟の醸酵過程に於いて重要なことは、水分、空気供給、温度の適切な管理である。そのため、寝床の床は水分の通過をよくするために、下から砂利、砂、モミガラ、粘土の積層にし、かつ側壁には空気の取り入れ口を設けている。

作業にあたっては、藍葉をいくつかの台形の山（床（とこ）と呼ばれる）に分けて積み上げ、この“床”に水をかける（図 10 左上）と醸酵が始まりこれに伴い内部の温度が上昇する。葉藍の温度や酸素の供給を均一にするために、図 10（右下）のように、葉藍を攪拌しながら“床”を 1~2 m ずつ移動・往復させる。この作業を切り返しと言い、各“床”に対して、週に一回ずつ行う。

切り返し作業時以外は床に“ふとん”と呼ばれる筵（むしろ）をかけて保温し（図 11），醸酵の状態を見ながら床の上にかける筵の枚数や水打ちの量などを調節する。中心付近の温度は 60~70°C に達す

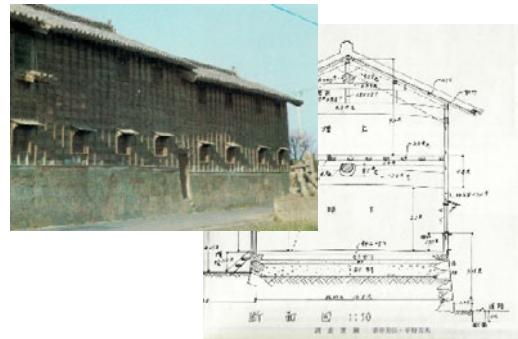


図 9 寝床（作業場）とその断面図。換気窓と積層の床に特徴がある（石井町武知家）[10]。

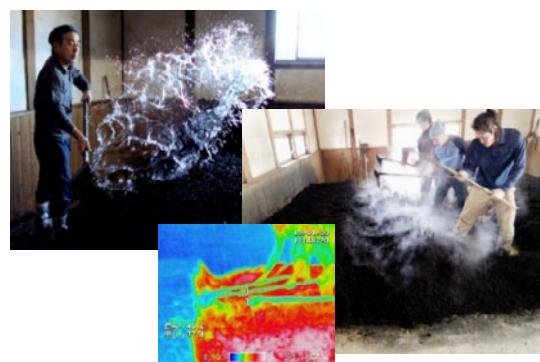


図 10 左上：水打ち（筆者の一人新居）、右下：切り返し、中央：切り返し時の表面の葉の温度（約 30°C~50°C）。（新居製藍所）



図 8 阿波地方における藍染めの伝統技術  
(写真は新居製藍所及び松茂町歴史民俗資料館提供)

るが、これ以上に上げないことが重要である。

この作業を 2 月頃まで約 20 回行うと、醸酵が收まつて葉が崩れた堆肥のような状態になる（図 8④）。この状態を「薟（すくも）」と呼んでいる。“薟”という文字は、草で染めるという意味の和製漢字である。薟中には Indoxyl が生成しており、残存する葉の組織や茎も同時に含まれているため、Indoxyl の濃度は、3~8% であると言われている。薟中には有機物や微生物を多く含むため、次の作業の藍建てには有利である[3]。この状態で、それぞれの藍師の屋号を記した俵に詰めて保存し、出荷する。



図 11 左上：藍葉の床（とこ）。内部温度が均一になるように中央部を低くしている。右下：“ふとん”をかけて保温した状態

なお、藍を保存する方法について世界的に見ると、本報で取り上げた「薬法」は、日本など東アジアの中緯度地帯で行われているほか、ヨーロッパのウォードでも類似の方法が見られる[3]。

この他には、インドや中国南部など気温の高い地域で行われる「沈殿法」がある[1,3,4,6]。この方法は、大きな水槽（多くは屋外に設置）に含藍植物を浸し、石灰などを入れ加熱することなく攪拌して、溶け出して生成した色素（Indigotin）が水に不溶性であるために沈殿するのを取り出すもので、そのまま「泥藍」として利用する場合や、乾燥させて「藍澱（らんでん）」とする場合がある。（本報では阿波藍を主題としているので詳述はしない。）

#### 4.4 藍を建てる

すでに述べたとおり、染色成分である Indigotin は水に溶けないため、これを還元して水溶性のロイコ体にする。この還元過程と次の染色過程は、図 8 の⑤と⑥や次の図 12 に見られるような大きな陶器製の甕を使って、液を移し替えることなく連続して行われる。この還元過程でもやはり細菌による醸酵を



図 12 藍染めの温度管理の変遷。左：（室町時代）甕は大気中に設置。中央：（元禄年間）土中に埋めて保温。右：（文政年間）火壺と呼ばれる加熱装置（矢印）が加えられている[10]。

利用している。還元が進むと無色から黄色のロイコ体インディゴが生成される。このとき液面付近では酸化するために発色して濃い青から紫色の泡が建ちあがる（図 8⑤）ので、これを「藍の華（はな）」と呼んでいる。

この手法は、経験的に取得してきたものであるが、ここで作用する還元菌は、1960 年代の高原・田辺による一連の研究[12]の結果見出されている。この細菌は、強いアルカリ性（pH=10~11.5）を好み、夏期の常温に近い温度領域（20~30°C）で最も活発となる[12]。最近では DNA 解析が出来るようになったこともあり、類似の還元菌を発見したとの複数の報告もある[13, 14]。この温度範囲は春から夏にかけては適温であるが、冬期には気温が低くなつて過ぎるため、古くは藍染めは夏前後にのみ行われていた[10]。

図 12 に、藍染めにおける温度管理の発達を示す。室町時代の絵（左）では、甕は大気中に置かれているが、江戸時代には、土中に埋めて保温している（中）。さらに江戸時代後期（右）になると、火壺と呼ばれる加熱装置が設けられるようになり、年間を通しての染色作業が可能となった。火壺は、甕 4 個に一つ設けられ、おが屑などをいぶして温度を保持した[10]。下からの空気の取り入れ口はなく、火力は火壺の蓋の開度で調節している。

19 世紀初期ヨーロッパのウォードによる藍染め工場に於いては、巨大な藍甕（約 6000ℓ）を用いて、大きな熱源を上から出し入れすることによって温度を調節していたこともあることが、[3]に絵入りで紹介されている。

藍建てにはいろいろな手法があるが[1]、ここでは著者の一人（船井）が松茂町歴史民俗資料館で実施している手法をもとに簡潔に紹介する。図 13（左）は、ほぐした薬を藍甕（容積 2700）にいれ、そこに温

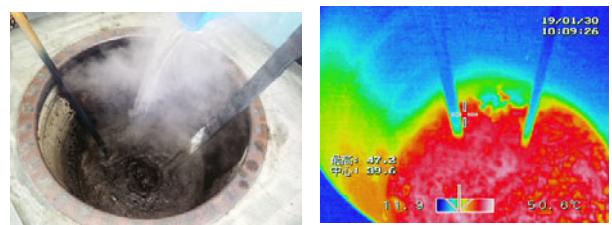


図 13 左：薬をいれた藍甕に加熱した灰汁（灰汁）を投入しつつ攪拌。右：攪拌中の温度分布。表面は約 50°C、左側に火壺があるため甕の左側の温度が高い。（両者の撮影時点は異なる。）

度約75°C、pH約12の灰汁を注ぎ入れながら攪拌している模様である。同(右)は、約10~15分経過後の藍甕内の温度分布である。液面の表面温度は約50°Cで、左側に火壺(電気ヒーター)があるため、壁温が上昇している。

その後、灰汁を加えて容積を増やし攪拌も続けると、3日目頃に液面にポツポツと紫金色の斑点が現れるので、中石と呼ばれる消石灰を加えてpHを調節する。還元が進むとCO<sub>2</sub>や水素ガスが発生するためにpHが下がってくるためである。さらに還元菌の“栄養(賦活化)”のために、フスマ(糊化した小麦の表皮)や清酒を加える。pHが下がるたびにこれらを数回繰り返すと、5~7日目頃には表面に緑の濃い泡ができる青色に変わり、醸酵が頂点に達した感があるので、さらに石灰(止石と呼ばれる)を入れる。この頃には図8⑤のように「藍の華」が浮かぶ。その後はpH=10.5~11.0の範囲を保持するよう灰汁、石灰等で調整しながら維持する。

図14は、栃木県益子町の染織工房日下田(ひげた)紺屋[15]に並ぶ藍染め甕である。現在も日下田正氏が、伝統的な手法で綿の栽培、木綿の糸づくり、藍の糸染めや手織りを継承しておられる。藍甕には藍の華が美しく建っており、使用しておられる薬はやはり徳島産の阿波藍であるとのことであった。たしかに甕4個に一つずつ火釜の蓋が見え、現在もおが屑を燃やしておられる。陶器の町益子らしく、蓋が陶器製であるのも印象深い。



図14 現在も操業する栃木県益子町の染織工房日下田紺屋。藍甕には藍華が建っており、藍甕4個当たりに一つの火釜の蓋が見える。

#### 4.5 藍を染める

こうして還元された染色液が準備できると、同じ藍甕を使って染色する。染めたいもの(布や糸)を準備し、まず水にくぐらせて湿潤し、その後脱水する。次に布や糸を染料液中に入れ、全体に均一に染

料液をいきわたらせ、その後ゆっくり染料液から出すと、空気に触れることにより酸化して青色に発色する。図15は、松茂町歴史民俗資料館で行っている子ども達への藍染め体験からの画像である。

このような浸染および空気酸化を一工程とし、この行程を繰り返すことによって次第に濃い色に染めていく。目標の色になったら、十分に水洗いをし乾燥して仕上げる。



図15 染色：空気に触ると酸化して発色する。(松茂町歴史民俗資料館提供)

このように、藍染めは最初から濃く染まるのではなく、何度も染料液に浸けて酸化する工程を繰り返すことによって濃淡を調整している。

日本人は、単なる薄い藍色、濃い藍色という区別ではなく、それぞれに色の名前をつけて楽しんできた。図16にその例を示している[16]。このように藍は、藍色だけでなく微妙に違った幅広い色を染めることができる。

最後に、天然染料と合成染料は分子構造が同じであるにもかかわらず、仕上がった作品には差があるのであろうか。これについて、イギリスで合成藍での染色を行い日本に滞在して日下田紺屋で阿波の薬を使った天然藍の染色を体験したリンダ・ブラントンは、「合成藍では極めて濃い藍色や淡い藍色



図16 藍染めでは幅広い濃淡の色が表現でき、それぞれに名前がつけられている。([16]を参考に、[17, 18]を利用して作成。)

を出すのがむずかしいが、天然藍は水色のような淡い色からとても濃い藍色まで染められ、表現できる色の幅がとても広い」と印象を述べている[19]。

より微細な観点からは、川人ら[20]は、天然藍の染色布では主に纖維表面で染料が集まっているためにより鮮やかな色になり、かつ正規分布を示す微細な「滲（にじみ）」があつてこれが自然な「色むら」を感じさせていると述べている。

## 5. おわりに

以上から、本稿の主題である伝統的藍染め技術と「熱」との関わりについて考えると、大きくは次の3点にまとめられる。

第一は、まず「薬法」か「沈殿法」かの選択である。インドや中国南部などの気温の高い低緯度地帯においては、含藍植物中の含藍量も多く、屋外の水槽で特別な加熱ではなく藍成分を沈殿させる「沈殿法」が発達した[1]。これに対し、中緯度地帯に位置する日本やヨーロッパにおいては、屋内で醸酵時の発熱を利用して温度を維持しつつ醸酵させる「薬法」が発達してきた。このようにこの二つの選択は、含藍植物の成長及び収穫時期における気温の差が主たる要因であると考えられる。（温度と熱は異なる概念であるが、ここでは簡単のためにこの記述に留める。）

第二は薬の製造における温度管理である。藍葉の醸酵のための適温は50°C前後と常温よりも高いため[3]、何らかの熱源が必要である。これについては、醸酵に伴う発熱自体を熱源として利用し、均一かつ適切な温度になるように、断続的に攪拌しつつ“床（とこ）”の厚さや“筵”（ふとんと呼ばれる）の量を調節して適温を得ている。かつては、過度の温度上昇を防ぎ、かつ付加的な燃料を用いないためであったろうが、現代的な観点からは、環境の保全にも配慮した方法となっている。

第三には、藍建てにおける温度管理である。このときに働く還元菌にとっての最適温度は20~30°Cであるため[13]、冬期を含めて年間を通して染色を行うために200年ほど前から熱源が導入されるようになった。それ以前から藍甕を土中に埋没させて保温するようになっており、熱源はおが屑をいぶす程度のものである。染色場全体の規模が大きくなると、藍甕の数を増やしてこれらを碁盤の目のマトリックス状に配置し、その中に規則的に熱源を分散

して配置する方式が開発された（図14）。これは、染色の作業性からも、少量の熱源で均一な温度分布を得る上からも、理にかなった方法であると言える。

本稿の成立過程は冒頭にも述べたが、2019年の徳島における日本伝熱シンポジウムに於いて、阿波藍の伝統技術と「熱」との関わりに関するオーガナイズドセッションを開催した際に、藍の栽培から伝統的な薬づくりや後進の育成にもあたっておられる藍師の新居修氏（現代の名工）と、阿波藍に関する歴史的資料を収集保存する三木文庫の学芸員でありかつ藍染めの指導者でもある船井由美子氏にご講演をお願いした。お二人からは阿波藍への熱いお気持ちのこもったご講演をいただいたことに心から感謝したい。本報は、このときのご講演原稿及び資料を基に、河村が多少の調査と考察を加え、お二人のご校閲を得つつまとめたもので、全体の文責は河村にある。

以下は、お二人からいただいたコメントである。  
◎この講演会のあった数日前に阿波藍が日本文化遺産に認定されました。関係者の方々の努力が認められましたのは大変喜ばしいことです。ちょうどこのような機会に、熱に関する研究をしておられる貴学会のシンポジウムで阿波藍についてのご紹介ができたことは大変うれしいことでしたし、藍染めの伝統技術が熱に深く関わっていることを改めて認識することが出来て、大変有意義でもございました。

わたくしが勤務します三木文庫が所在する松茂町では、この阿波藍の伝統を後に伝えて発展させてゆくために、町内の幼稚園児には親子での藍染め体験を、また小学6年生には小学校の思い出を卒業記念として藍染め作品を制作してもらっています。わたくしもお手伝いをさせて頂いておりますが、藍甕から作品を引き上げて藍色に変わっていくときの子ども達の歓声を聞きその日の輝きを見るのは、とてもうれしくまた心づよいことです。

三木文庫においては、本文中にも述べましたように、当家が江戸時代に藍商として栄えた時代の阿波藍関係資料、さらにこの地方の阿波人形淨瑠璃芝居関係資料や地方の各種の古文書などを数多く収蔵しています。阿波藍関係資料は、地方史や流通経済史などの研究者に数多く利用され、三木家の経営や阿波藍の流通について論じられるのに役立っております。しかし大福帳など多くの史料は、江戸時代

に作成されたものであるため、未だ大部分が解明されておりません。今後も少しでも多くの史料を解読し整理して提供することにより、阿波における藍の歴史のみならず全国に拡がる阿波藍史を後世に伝えていけるよう取り組んで参りたいと存じております。（船井由美子）

◎今回の講演会では、ご依頼を受けて伝統的な藍の栽培から染づくりについてお話をさせて頂いた。家業を継いで染づくりに携っている藍師であるが、現在では染づくりのほかに、藍の栽培や製品である藍の活用も含めて、総合的に阿波藍の伝統技術の保存とその発展に努めている。阿波藍を取り巻く環境は変化しており、その中で、伝統技術の重要な部分は維持しつつも時代に応じた改良を加え、新たな活用分野を開拓し、かつ次世代に伝えていくことが重要であると考えている。

本稿に収録されている染づくりの写真（図8,10）で共に作業をしている人たちは県内外からの研修者で、このようにして藍づくりを身につけてもらっている。すでにこれらの修了者たちの何人もが、地元に戻って藍の栽培、染づくりから藍染め作品の製作頒布までの拠点を作りつつあることは大変よろこばしいことである。これらを通じて、今後も阿波藍の伝統の保存と発展、さらには次世代への継承に一層の力を尽くして行きたい。（新居修）

本稿の作成にあたっては、三木文庫、新居製藍所、松茂町歴史民俗資料館から資料のご提供を頂いた。また、徳島伝熱シンポジウムにおけるオーガナイズドセッションの開催については、出口祥啓先生（徳島大学）をはじめとする実行委員会にご支援を頂いた。ここに記して感謝する。（河村洋）

### 参考文献

- [1] 吉岡常雄，“天然染料の研究、理論と実際染色法”，(1974)，光村推古書院。
- [2] J. C. Splitstoser, et al., “Early pre-Hispanic use of indigo blue in Peru”, *Science Advances*, (2016), 2,

e1501623.

- [3] D. Cardon, “Natural Dyes; Sources, Tradition, Technology and Science”, 2007, Archetype Publications.
- [4] 三木産業(株)技術室(編), “藍染めの歴史と科学”, (1992), 裳華房.
- [5] 宮内序：正倉院御物検索，<http://shosoin.kunaicho.go.jp/jaJP/Treasure?id=0000014723>
- [6] 吉岡幸雄，“日本人の愛した色”，新潮選書，(2008)，新潮社。
- [7] 国会図書館ディジタルコレクション：歌川広重 東海道五拾参次 戸塚・元町別道, <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/1309894>
- [8] 青木正明，“天然染料の科学”，(2019)，日刊工業新聞社。
- [9] 三木産業(編), “出藍録”, (1955), 三木産業(株).
- [10] 三木文庫(編), “天半藍色”, (1974) 三木産業(株).
- [11] 新居製藍所, “阿波藍をつくる、藍師 新居修の技術”(ビデオ), <https://nii-seiaisyo.jimdo.com/> ホーム /video/
- [12] 高原, 田辺, 酿酵学会雑誌, 38-6, p.293, p.297, 38-7, p.329, 40-2, p.77.
- [13] 大島, 新居, 本多, 公開特許公報(A), インジゴ還元酵素及びその製造法, 出願番号 2005035889, (2006).
- [14] 湯本勲, 科研費研究成果報告書, 課題番号 23570128, (2015).
- [15] 日下田藍染め工房 益子町観光協会, <http://www.mashiko-kankou.org/shop/?shop=00493>
- [16] 野田, 新谷, 月刊「染織α」, No.193, (1997), pp. 18-19, 染織と生活社.
- [17] 和色大辞典, <https://www.colordic.org/w>
- [18] カラーサイト.com, <https://www.color-site.com/>
- [19] リンダブライトン, 水の文化 55 号, (2017), pp.28-31, ミツカン水の文化センター.
- [20] 川人美洋子ら, 学振, 繊維・高分子機能加工第120 委員会年次報告, Vol.53, pp.28-31, (2002).

## ニュートンの冷却法則（その3） －強制対流実験－

*Newton's Law of Cooling, Part 3,  
Experiment on Forced Convection*

圓山 重直（八戸高専），守谷 修一（東北大学）

Shigenao MARUYAMA (INT, Hachinohe College), Syuichi MORIYA (Tohoku University)

e-mail: maruyama-o@hachinohe-ct.ac.jp

### 1. はじめに

アイザック・ニュートン（1642-1727）の冷却法則についての論文「Scala graduum Caloris. (A Scale of the Degree of Heat, 温度の尺度)」[1][2]について、前報（その1）[3]では、高温物体の温度計測について議論しました。前報（その2）[4]では、水の沸点以下の温度について、ニュートン温度の精度や、当時のイギリスの気温について議論しました。

伝熱工学の教科書で、対流熱伝達の基礎式として使われているニュートンの冷却法則は、熱流束  $q$ 、流体と物体の温度差  $T - T_{\infty}$ 、熱伝達率  $h$ としたとき、

$$q = h(T - T_{\infty}) \quad (1)$$

で記述されています。ニュートンの論文[1]では、物体の温度計測が中心で、式(1)は論文中には出てきません。

ニュートンは、物体が冷却する速さは物体と周囲

の空気温度の差に比例するとしました。また、物体は風が吹いている状態で冷やしたという記述があります。この2つの文章が「ニュートンの冷却法則」の起源と考えられます。

私たちは、ニュートンの論文を強制対流熱伝達のよりどころとしていますが、論文では風の速度は明示されていません。本報では、ニュートンがこの実験をしたとき、どの様な風が吹いていたのかを解明するために、風洞実験を行いました。その結果から、ニュートンの実験を再現することを試みました。

### 2. ニュートンの実験結果

ニュートンは独自に温度計を作り色々な現象の温度を計測しました。低温の温度計測は前報（その2）[4]に、高温の現象は前報（その1）[3]に記載しています。それらを纏めたものを本報の最後に記している表1に示します。表には、ニュートンの論文

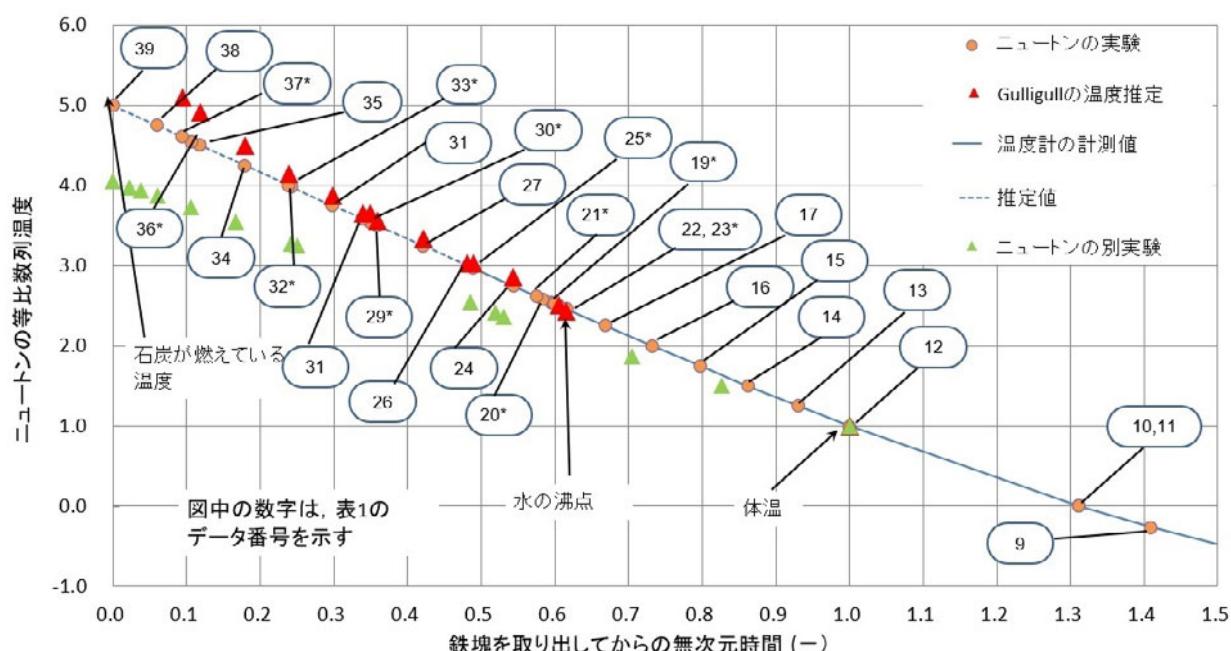


図1 等比数列温度（表1）を無次元時間で表したニュートンの実験結果。

図中の番号は表1のデータ番号を示します。

中の表で示された値に加えて、文章で記述された温度も記載しています。

ニュートンは、重さ 4.25 lb の厚い板状の鉄塊を台所のコンロで燃えている石炭の中に投入し赤く加熱しました。その赤熱した鉄塊を取り出して、冷たい場所に置きました。鉄塊の上には種々の金属や合金の粒を置き、それが凝固する時間を測定しました[2]。このようにして測定した温度を表 1 に示しています。

ニュートンは 2 つの温度表記を用いています。一つは、 $T$  (N) で記載する通常の温度(Equal part of heat)[2]で、式(2)で表記します[4]。

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{N}) \times 100/34 \quad (2)$$

もう一つは対数温度に相当する等比数列温度(degree of heat in geometrical progression)[2]で、ニュートン温度を  $T$  (N) として次式で定義します。

$$T' = \log_2(T/12) + 1 \quad (3)$$

表 1 中には、ニュートン温度、セルシウス温度、等比数列温度を示しています。さらに、Grigull が推定した温度[5]も示しています。Grigull の温度は、高温部分では冶金学的に推定した温度であり、ニュートンの温度より高くなっています。

図 1 は、表 1 の値を等比数列温度で表しています。ニュートンの論文では冷却時間が記載されていないので、図 1 は表 1 の温度を実験開始から体温に相当する 12 N になるまでの時間で無次元化しています。

ニュートンの実験では、鉄塊の大きさと、等価平均熱伝達率  $\bar{h}$  から推定されるビオ数は 0.005~0.011 と小さいので、集中熱容量系が適用できて冷却曲線は次式で表されます。

$$c\rho V \frac{dT}{dt} = -\bar{h}S(T - T_{\infty}) \quad (4)$$

ここで、 $c$  は鉄塊の比熱、 $\rho$  密度、 $V$  体積、 $S$  底面を除いた表面積、 $t$  時間です。初期温度が  $T_i$  で、対流熱伝達率とふく射熱伝達率を合わせた等価平均熱伝達率が物体温度によらず一定の時、式(4)は次式で表されます。

$$\frac{\bar{h}S}{c\rho V} t = \ln(T_i - T_{\infty}) - \ln(T - T_{\infty}) \quad (5)$$

$T_{\infty} = 0$  として、式(2)を式(5)に代入すると、

$$T' = T'_1 - \frac{\bar{h}S}{c\rho V \ln 2} t \quad (6)$$

となります。つまり、等比数列温度  $T'$  を時間  $t$  で表すと、図 1 に示すように直線となり、前報（その 1）[3]で示したように、温度計で測れない温度を推定することができるのです。そこが、ニュートン論文の重要なところであり、ニュートンの冷却法則はそれをサポートする仮定にすぎないのです。

ただし、集中熱容量系を反映させるためには、式(3)の温度は、周囲空気との温度差であるべきです。ニュートンが実験したときの環境温度は 2 N(5.9°C) と推定され [6]、ニュートンが目指した高温物体の温度の推定には環境温度を 0 N としても大差ありませんでした。

前述したように、ニュートンの論文では、実験時に風が吹いていたという記述はありますが、その風の強さについては言及していません。物体の冷却速度は、ふく射伝熱も考慮した等価熱伝達率に依存するので、冷却時間が分からないと風速の推定ができません。Ruffner は冷却時間を 60 分と仮定し [7]、Grigull は 77 分と推定しました[8]。どちらも明確な根拠はありません。

ニュートンはこの実験の他にも、鉄塊の冷却実験を行っています。その時 100N から 12N に冷却するまでの時間は 132 分でした[6]。しかし、その実験がこの実験[1]と同じ風速下で行われたという証拠はありません。

そこで、ニュートンの実験を再現するために、簡易風洞を製作し、鉄塊の冷却実験を行いました。

### 3. 実験装置および実験方法

3.1 簡易風洞の製作 ニュートンの実験を再現するために吹き出し型の簡易風洞を製作しました。図 2 は、その簡易風洞と実験装置の概略を示しています。風洞は設置スペースを小さくするために、遠心ファンから放出された空気を L 字型に偏向して吹き出しノズルから噴出させました。L 字型風路にはアルミ製ハニカムを入れて整流し、角部には直径 120mm のビニールパイプを切断した円弧翼で構成される偏流板を設置しました。風路部の断面積は 450×450 mm、ノズル出口断面積は 200×200 mm でした。

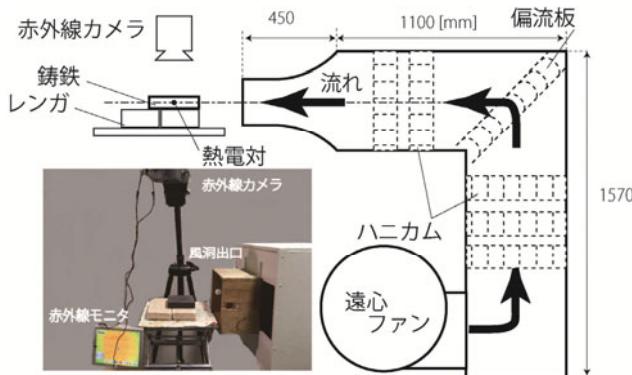


図2 簡易風洞による実験装置

計測部における風速分布は横方向 2%, 縦方向 4%であり、ノズル中央近傍では一定でした。ノズル中央部の測定部での流れの乱れ強さは 1~2%でした。本風洞は遠心ファンの回転数をインバータで制御することにより、2~25 m/s の風速を得ることができました。

**3.2 表面放射率の測定** 高温物体の伝熱にはふく射が大きく寄与します。赤熱した鉄塊を取り出した直後は、ふく射伝熱量は対流熱伝達量に比べて 50 倍以上となります。

そこで、図2に示すように、実験中は放射率  $\varepsilon$  を 1 に設定した赤外線カメラを設置して放射率の変化をモニターしました。赤外線カメラの測定温度を  $T_{IR}$ (K) とすると、物体表面の放射率は次式で表さ

れます。

$$\varepsilon = (T_{IR}^4 - T_\infty^4) / (T^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

赤外線カメラの測定によると、風洞実験中の表面温度分布は鉄板角の一部以外はほぼ一様であることが確認されました。

**3.3 実験方法** 大きさ  $103 \times 107 \times 27$  mm (約  $4 \times 4 \times 1$  inch), 質量 1.93 kg (4.25 lb) の鉄板を設定温度  $800^\circ\text{C}$  の加熱炉に入れ加熱しました。

風速を設定速度に調整した風洞の測定部にコモンペーパレンガを敷き、その上に鉄板を置いて、鉄板中央に設置された直径 1.5mm の K型熱電対により冷却温度を測定しました。その時、鉄板上部に設置された赤外線カメラで表面温度をモニターしています。

鉄板のビオ数が小さいので、内部に設置された熱電対の温度は、表面温度に近い値と推定されます。

#### 4. 結果と考察

図3は、風洞実験とニュートンの実験による鉄塊温度を対数温度目盛りで示しています。表1に示すニュートン論文の実験は、時間が掲載されているニュートンの別実験[6]で体温となった時間(132分)となるように表示しました。

図中には、本報で作製した簡易風洞の測定部に

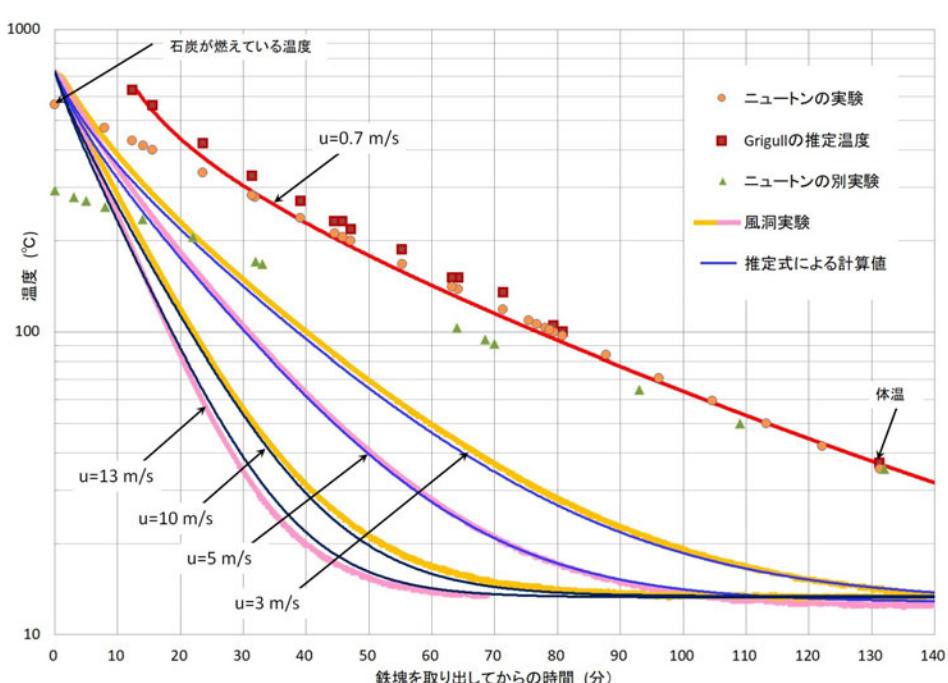


図3 風洞実験でニュートンの実験を再現した実験値と推定式の比較、および、ニュートンの実験データを再現する風速の推定

加熱した鉄塊をレンガ上に置いた場合の実験値を示しています。実験データは1秒ごとに取得し、鉄塊温度が空気流温度とほぼ一致するまで実験を継続しました。

鉄塊の冷却温度は次式で表されます。

$$c\rho V \frac{dT}{dt} = -S\{\bar{h}_c(T - T_\infty) + \varepsilon(T^4 - T_\infty^4)\} \quad (8)$$

1辺  $D$  の正方形断面角柱の対流平均熱伝達率  $\bar{h}_c$  の推定は、Hilpert の経験式[9]

$$Nu_D = \bar{h}_c D / k = C Re_D^m Pr^{1/3},$$

ここで  $C = 0.102, m = 0.675$  (9)

を用いました。ただし、板状鉄塊は角柱とは形状が異なるので、 $D$  を鉄塊の水力直径とし、定数  $C$  を調整して実験値に合わせた結果、式(9)の  $C$  を 0.26 とすることで、実験値と良く一致しました。

鉄塊の放射率  $\varepsilon$  は、赤外線カメラから式(7)で求め、100°C～500°Cのデータを平均して使用しました。

図 3 には各風速の風洞実験と式(9)の推定値を示していますが良く一致していることがわかります。

次に、この実験式を使って、ニュートン論文の実験結果を模擬する風速を推定しました。初期温度は Grigull の推定温度から始まり、ニュートンの実験の条件[6]と考えられる気温 5.9°C の環境下での鉄塊の温度低下を推定しました。この時、放射率は実験データから 0.75 と設定しました。

もし、鉄塊が体温 (12 N) まで、冷却するのに 132 分を要する場合、風速は 0.7 m/s となります。また、Ruffner[7]が仮定したように 60 分で冷却すると仮定すると、その時の風速は 5.0 m/s と推定されます。ニュートン論文の実験は、ニュートンの別実験と全く異なる条件で行ったことは考えにくいので、余り強い風は吹いていなかった可能性が考えられます。また、風速によって冷却時間が異なることを予備実験すでに知っていて、ニュートンの論文[1]では、敢えて論文では時間を書かなかつたのかかもしれません。

もし、風速が小さい場合、自然対流熱伝達は無視できません。風が全くない場合でも同様な冷却曲線を得ることができます。

## 5. おわりに

簡易風洞を製作し、ニュートンと同様な実験を行

い、ニュートンが実験したときの風の速度を推定しました。

推定される風速は冷却時間で異なりますが、ニュートンの別実験と同じ時間を要した場合、推定風速は 0.7m/s となり、この領域では自然対流が無視できない範囲となります。また、自然対流のみによる冷却が起きていたことも否定できません。

ニュートンはなぜ、風が吹いていたことを敢えて記述したのでしょうか。また、どのようにして、等比数列温度を用いると高温が推定できることを思いついたのでしょうか。等比数列温度については、ニュートンの名著「プリンシピア」が関わっている可能性があります。

これらの疑問については、次報で議論したいと思います。

## 参考文献

- [1] “Scala graduum Caloris (A Scale of the Degrees of Heat)”, Philosophical Transactions, No. 270, pp. 824-829, (April 1701).
- [2] “The Correspondence of Isaac Newton, Volume IV, 1664-1709”, Edited by J.F. Scott, Cambridge University Press, PP.357-365, (1967).
- [3] 円山重直, ニュートンの冷却法則 (その 1), 伝熱, Vol. 54, No. 229, pp.31-34, (2015).
- [4] 圓山重直, 守谷修一, 岡島淳之介, ニュートンの冷却法則 (その 2) ニュートンの温度スケールについての考察, 伝熱, Vol. 57, No. 240, pp.65-69, (2018).
- [5] Grigull, U., “Newton’s Temperature Scale and the Law of Cooling,” Waerme und Stoffuebertrag, Vol. 18, pp.195-199, (1984).
- [6] Simms, D. L., “Newton’s Contribution to the Science of Heat”, Annals of Science, Vol. 61, pp.33-77, (2004).
- [7] Ruffner, J. A., “Reinterpretation of the Genesis of Newton’s Law of Cooling,” Archives of History of Exact Science, Vol. 2, pp. 138-152, (1964).
- [8] Grigull, U., Das Newtonshe Abkühlungsgesetz, Abh. Braunschweig. Wiss. Ges. 29, pp.7-31, (1978).
- [9] Incropera, F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L. and Lavine, A.S., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 6th Ed., John Wiley & Sons, pp.426-427, (2007).

表 1 ニュートン温度とその記述（番号は後で付けたもの、\*は文章による温度記述を示します。等比数列温度に†がついているものは筆者の計算値を示しています。）

データ番号	現象の記述と温度	ニュートン温度 (N)	等比数列温度式(3)	摂氏温度 (°C)	Grigull の推定温度 (°C)
1	水が凍り始める冬の気温。この温度は、温度計を碎いた雪の中に置き、それが溶ける時に正確に計測される。	0		0.00	0
2	冬の気温	0		0.00	
3		1	-2.58 †	2.94	
4		2	-1.58 †	5.88	
5	春と秋の気温	2	-1.58 †	5.88	
6		3	-1.00 †	8.82	
7		4	-0.58 †	11.76	
8	夏の気温	4	-0.58 †	11.76	
9		5	-0.26 †	14.71	
10		6	0.00 †	17.65	
11	7月の昼頃の気温	6	0.00 †	17.65	
12	温度計が人体に接触して達する最大温度。これは、鳥の卵が孵化する温度とほぼ同じである。	12	1	35.29	37
13	風呂のお湯に手を浸して、絶えず動いている状態で、かなりの時間耐えることができる最大温度。これは採血したばかりの血液とほぼ同じである。	14.27	1.25	41.97	
14	風呂に手を動かさず浸して長時間耐えることができる最高温度。	17	1.5	50.00	
15	お湯の上に浮かぶ溶融ワックスが凝固し始めてその透明度を失う時の温度。	20.18	1.75	59.35	
16	ワックスが浮遊しているお湯が加熱され、沸騰せずに液体を保つお湯の温度。	24	2	70.59	
17	ワックスが溶ける温度と水が沸騰する温度の中間の温度。	28.55	2.25	83.97	
18*	水は33度の温度で沸騰し始める。	33	2.46 †	97.06	100
19*	鉄が35または36度に冷えた時、お湯が上に落ちると沸騰が起きなくなる。鉄の温度が37度で、冷たい水が滴った場合も同じである。	35	2.54 †	102.94	
20*		36	2.58 †	105.88	
21*		37	2.62 †	108.82	
22	水が激しく沸騰する温度、および、鉛2、錫3、ビスマス5の合金が冷却時に固化する温度。	34	2.5	100.00	105

23*	沸騰するお湯は、34.5 度以上にはほとんど達しない。	34.5	2.52 †	101.47	
24	鉛 1, 錫 4, ビスマス 5 の合金が加熱され融解し、液体を保つ最低温度。	40.36	2.75	118.71	135
25*	この合金(錫 1, ビスマス 1 の合金)は冷却すると 47 度で凝固する。	47	2.97 †	138.24	151
26	錫 1, ビスマス 1 の合金が融解する最低温度。	48	3	141.18	151
27	錫 2, ビスマス 1 の合金、または錫 3, 鉛 2 の合金が融解する温度。しかし、錫 5, ビスマス 2 の合金が冷却時にこの温度で固化する。鉛 1, ビスマス 1 の合金も同様である。	57	3.25	167.65	187
28	ビスマス 1, 錫 8 の合金が融解する最低温度。	68	3.5	200.00	218
29*	錫は冷却すると 70 度で凝固する。	70	3.54	205.88	232
30*	錫は 72 度で融解する。	72	3.58	211.76	232
31	ビスマスの融解温度、鉛 4, 錫 1 の合金でも同じである。しかし、溶けている鉛 5, 錫 1 の合金が冷却時にこの温度で凝固する。	81	3.75	238.24	271
32*	そして、鉛は冷却時に 95 度で凝固する。	95	3.98 †	279.41	
33*	鉛が融解する最低温度。加熱された鉛は 96 または 97 度で融解する。	96	4	282.35	327
34	冷却しつつある高温の物体が、暗闇の中でまったく光らなくなる温度。または、逆に、熱せられている場合には、同様の暗闇の中で、非常にかすかに光が知覚されるようになる温度。この温度で、錫 1, アンチモン 1 の合金が融解し、ビスマス 7, アンチモン 4 の合金が冷却時に凝固する。	114	4.25	335.29	420
35	高温に加熱された体が夜間には光って見えるが、薄やみではまったく目では確認できない温度。この温度で、アンチモン 2, ビスマス 1 の合金、ならびにアンチモン 5, 錫 1 の合金が冷却時に凝固する。	136	4.5	400.00	561
36*	そして、アンチモン 2, 銅 1 の合金は 140.5 度で凝固する。	140.5	4.55 †	413.24	
37*	アンチモンは 146 度で凝固する。	146	4.60 †	429.41	631
38	高温に加熱された物体が薄やみの中、つまり日の出の直前や日の入りの直後に、はっきり光って見えるが、日中の晴天の光の中では全く見えないか、またはごくかすかにしか目視できない温度。	161	4.75 †	473.53	
39	ふいごを使わずに瀝青炭が燃える小さなコンロの石炭の温度。そのような火の中で、強く輝く鉄は同じ温度である。木を燃やした小さなコンロの火の温度はもう少し高く、つまり 200 度か 210 度である。大規模な火の温度は、特に、ふいごによって(燃焼が)促進される場合は、更に高温になる。	192	5	564.71	

## The 7th Asian Symposium on Computational Heat

## Transfer and Fluid Flow - 2019 開催報告

Report on the 7<sup>th</sup> Asian Symposium on Computational Heat  
Transfer and Fluid Flow-2019 (ASCHT2019)

須賀 一彦, 金田 昌之 (大阪府立大学)

Kazuhiko SUGA and Masayuki KANEDA\* (Osaka Prefecture University)

e-mail: mkaneda@me.osakafu-u.ac.jp

### 1. 会議概要

2019年9月3日から7日の5日間にわたり、東京理科大学葛飾キャンパス（東京都）にて、第7回アジア数値熱流体シンポジウム 2019 (The 7<sup>th</sup> Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow-2019, ASCHT2019) を開催いたしました。ご参加いただいた皆様、また運営にご協力いただいた方々に改めて心より御礼申し上げます。

このシンポジウムは、アジア地区の熱流体シミュレーション関連の最新の研究発表と研究者間の交流を促進するものとして、2007年に中国西安で第1回目が開催され、以来2年ごとにアジア各地で開催されています。2009年・濟州（韓国）、2011年・京都（日本）、2013年・香港（中国）、2015年・釜山（韓国）、2017年・チェンナイ（インド）に引き続き、今回は日本での2度目の開催でした。開催地として、都心からのアクセスも良好な東京理科大学葛飾キャンパスで行いました。会議議長として須賀（大阪府立大学）、共同議長としてWen-Quan Tao 教授 (Xi'an Jiaotong Univ., China), Nahmkeon Hur 教授 (Sogang University, Korea) を迎え、日本伝熱学会主催国際行事として運営をい

たしました。

期間中、2件のプレナリ、10件のキーノートに加えて、216件の一般講演を展開しました。一般発表はすべて口頭発表で、これまで開催されてきた中では最大規模を誇る人数となりました。そのため9つのパラレルセッションで構成し、その中から9件の発表に対して Best Paper Award を授賞しました。

今回は、海外からの参加者185名（12か国、地域）を含む総参加人数287名を迎えてのシンポジウムとなりました。その中で学生参加者は138名を数え、若手を多く迎えてのシンポジウムとなりました。

### 2. プログラム

本シンポジウムでは一般セッションに対して、計14のセッションを組みました。セッションの主要な課題は以下の通りです。カッコ内の数字は発表件数を表しています。

- Heat Transfer and Fluid Dynamics (64)
- Flow and Heat Transfer Control (6)

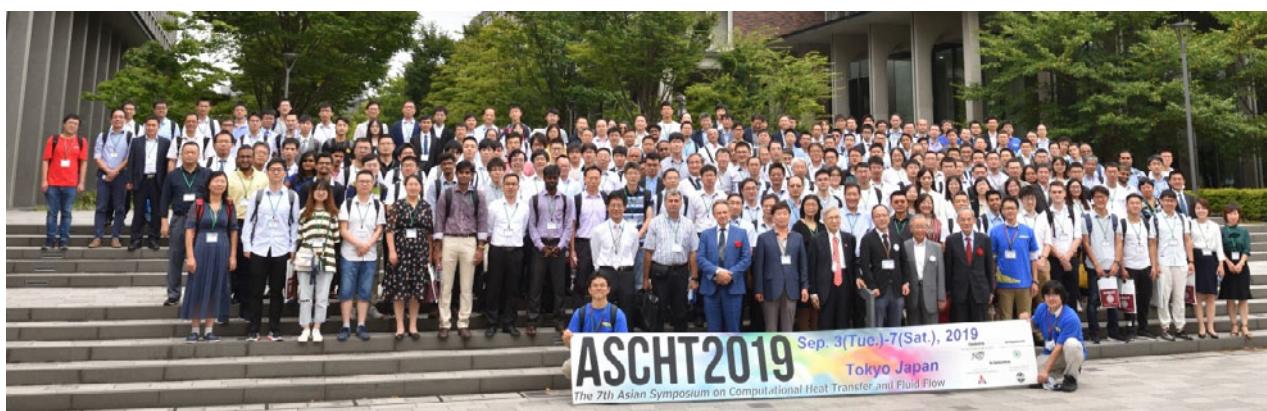


図1 ASCHT2019 集合写真

- Multiphase and Multi-Component Flows (36)
- Micro/Nano Fluid Dynamics and Heat Transfer (22)
- Bio-Fluid Dynamics and Heat Transfer (3)
- Turbulence (21)
- Reacting Fluid Flows (3)
- Radiative Heat Transfer (6)
- Heat Exchangers (20)
- Industrial Heat Transfer (8)
- Energy and Environmental Systems (8)
- Multi-Scale and Multi-Physics Modeling (11)
- Surrogate Modeling and Optimization (4)
- Uncertainty Analysis, Parameter Estimation, and Inverse Problems (4)



図1 学会会場

給のために会場の随所にペットボトル「理科大の水」を配置しました。参加者の交流促進のためにも、一般講演会場を講義棟の3階に集約できたことは良かったと思います。3日目の夜に会場から送迎バスを用意して、東京ディズニーシー・ホテルミラコスタにて Banquet を開催しました。会場



河村 洋 先生



Prof. J. Szmyd

図2 Plenary session

初日の Registration と Welcome reception で参加者をお迎えしました。2日目の Opening ceremony では松本洋一郎・東京理科大学学長にご挨拶を頂き、続く Plenary session では河村洋・東京理科大学名誉教授、Janusz Szmyd・AGH University of Science and Technology 教授（ポーランド）にご講演いただきました。10件のキーノートは2ないし3つのパラレルセッションで展開しました。昼食には会場内の生協食堂のチケットを配布し、ベジタリアンメニューにも対応しました。セッションの合間のコーヒーブレイクではコーヒー、ジュースと菓子を用意しました。また、こまめな水分補



図3 Keynote session の様子

の美しさもさることながら、おもてなしの作法を熟知している会場ならではの接客や出し物は大変好評でした。すべての口頭発表終了後に閉会式を行い、BPA の表彰と次回開催国の告知を行いました。

### 3. 参加者

本シンポジウムは主にアジア各国・地域からの数値熱流体研究者にお声がけをしています。今回、日本からの参加者 102 名、海外からの参加者 185 名を迎えました。国・地域別の参加者は以下の通りです（順不同）。

日本(102), 中国(146), 韓国(15), インド(11), 台湾(2), タイ(2), ポーランド(1), 英国(1), シンガポール(3), ロシア(2), オーストリア(1), カナダ(1)：計 12か国・地域

### 4. Best Paper Award

芝原正彦先生（大阪大学）に審査委員長をお願いし、BPA 9 件を決定いたしました。なお審査にあたってはランダムに選出・依頼した原稿査読者ならびに講演時の座長に選出していただき、セッション終了後に上位者を選出しました。受賞者は以下の通りです（順不同）。

Yusuke Kuwata, Takuya Sugiyama and Yasuo Kawaguchi, Scaling of Transitional Rough Wall Turbulent Flow Over Irregular Rough Surface

Jiang Guo, Shenghong Ju and Junichiro Shiomi, Spectral-Selective Sky Radiator Designed via Bayesian Optimization

Kosuke Osawa, Yuki Minamoto, Masayasu Shimura and Mamoru Tanahashi, Role of Fine Scale Eddy Cluster on Turbulent Dissipation

Yusi Zhou and Min Chen, Molecular Dynamics Simulation on Miscible CO<sub>2</sub> Enhanced Oil Recovery in Nanopores

Ayato Takii, Masashi Yamakawa, Shinichi Asao and Kyohei Tajiri, Circular Flight Simulation of Tilt-Rotor Plane

Yi-nan Nie, Lei Chen and Wen-Quan Tao, Study on Thermal Conductivity of Nafion Molecular Chain Based on First Principle Calculation

Xing-Jie Ren, Yan-Jun Dai and Wen-Quan Tao, Numerical Study of Thermal Contact Resistance of 8-Harness Satin Woven Pierced Composites

Yukinori Kametani and Yosuke Hasegawa, Adjoint-Based Shape Optimization of Heat Transfer Surfaces in Turbulent Flows with DNS-RANS Hybrid Approach

Arjun Pradeep, Anil Kumar Sharma, D Ponraj, B K Nashine and P Selvaraj, Aerosol Penetration in Submerged Gravel Bed Scrubber

### 5. さいごに

今回、2 度目の日本での開催になりました。準備から開催まで無事にこぎつけたのは Organizing Committee の皆様のご尽力のおかげです。この場を借りて御礼申し上げます。関西 Gr と関東 Gr でタッグを組んで進めていくことで、お互いの役割分担を明確にしつつ進めましたが、皆様のご協力なしではこのような成功を収めることはできませんでした。

Paper and Program 委員長・芝原正彦先生（阪大）、web システム・巽和也先生（京大）、現地実行委員長・塙原隆弘先生（東京理科大）には改めて御礼申し上げます。また、現地会場準備、運営に従事してくださった東京理科大学のスタッフ、学生の皆さんにも心よりお礼を申し上げます。本シンポジウムを実施するにあたり、東京理科大学との共催行事とさせていただきました。自然が豊富で開放感溢れる葛飾キャンパスで実施できたことに感謝申し上げます。

なお次の開催地については International Advisory Committee で協議した結果、2021 年にシンガポール国立大学での開催が決定となりました。開催時期の詳細は追ってご連絡できればと思います。

## 日本伝熱学会主催講習会 「計測技術～温度・熱流・熱伝導率測定の基礎と応用～」開催報告

*Report on the Lecture “Measurement Technology, from Foundation and Application of Temperature, Heat Flux and Thermal Conductivity Measurement”*

企画部会産学交流委員会：羽鳥 仁人（ベテル）、近藤 義広（日立アカデミー）、西 剛伺（足利大学）  
 Kimihito HATORI (Bethel), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy) and Koji NISHI (Ashikaga University),  
 e-mail: k-hatori@btl-hrd.jp

### 1. はじめに

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

今年度は「計測技術～温度・熱流・熱伝導率測定の基礎と応用～」をテーマに開催することになりました。JR 東京駅から徒歩圏内の東京八重洲ホールにて、11月22日、以下の題目で開催し、34名にご参加頂き、盛況のうちに終えることができました（図1）。

#### 一題目一

- ① 開催の挨拶（10分）
- ② 放射温度計の正しい使い方（40分）
- ③ 熱流センサーの基礎と校正技術（70分）
- 一昼食休憩一
- ④ 熱電対の正しい使い方および測定誤差の支配的要因（70分）
- ⑤ 定常法による熱伝導率測定（70分）
- ⑥ フラッシュ法による熱拡散率測定（40分）
- ⑦ 融体の熱物性（熱伝導率、粘性）（40分）
- ⑧ 総合討論（30分）
- ⑨ 講師との技術交流会

### 2. 各題目について

②の「放射温度計の正しい使い方」の講義では、中村元教授（防衛大学校）より、放射温度計の基礎として測定原理と測定方式及び素子による分類などについてご説明いただきました（図2）。測定誤差要因については、放射率の校正方法や周囲環境により受光する赤外線放射量に大きく影響を受けることをご説明いただき、各種の誤差要因に対する具体的な対処方法を解説頂きました。

③の「熱流センサーの基礎と校正技術」の講義

では、阿子島めぐみ氏（産業技術総合研究所）より、熱流センサーの原理及び熱流センサーを校正するための、熱流密度評価装置をご説明いただきました（図3）。校正時の誤差要因については不確かさ評価方法の説明を交えながら詳しく解説頂きました。また、現在データ収集中の熱流センサーの実用評価技術につきましては、空気中や真空中における熱流センサーの挙動も解説頂き、今後のデータの集積が期待されます。

④の「熱電対の正しい使い方および測定誤差の支配的要因」の講義では田川正人教授（名古屋工業大学）より、熱電対の測定原理と取り扱いの基礎、各種規格別のそれぞれの熱電対の特長についてわかりやすくご説明いただきました（図4）。複雑な熱電対回路についてもチャートを用いることで、熱起電力がどのように発生しているのか評価できる手法を説明いただき、例えば熱電対の劣化や不均質な場合にどのような影響が発生するのか等をわかりやすく理解できました。また、熱電対の誤差要因として熱伝導誤差や応答遅れ誤差等を詳しく解説頂き、今後の現場での応用につながるような問題を提供していただきました。



図1 会場全体風景

⑤の「定常法による熱伝導率測定」の講義では、梶田欣氏（名古屋市工業研究所）より、新規開発された定常法熱伝導率測定装置の原理、構成、誤差評価結果について解説頂きました（図5）。誤差評価については、モデルによる解析により、周囲の断熱材の影響は軽微で、むしろ大気中のほうが良い場合があること、側面からの熱リリークの影響の評価をご説明いただきました。今回ご紹介いただいた装置は、構造や解析方法の工夫により測定時間の大幅な短縮に成功し、産業界での幅広い応用が期待されます。

⑥の「フラッシュ法による熱拡散率測定」の講義では、太田弘道教授（茨城大学大学院）より、非定常法熱拡散率／熱伝導率測定装置として最も普及している、フラッシュ法についてご説明いただきました（図6）。フラッシュ法の原理及び構成を実際の装置の写真及び動画を交えながらわかりやすく解説頂きました。複合材料の測定で問題になる、温度上昇や解析についてインターネット、規格書、教科書には載っていない対処方法を具体的にご紹介いただき、実際の測定現場で役立つ情報が得られました。

⑦の「融体の熱物性（熱伝導率、粘性）」の講義では、西剛史准教授（茨城大学大学院）より、金属ガラスやケイ酸塩融体のフラッシュ法による熱拡散率測定の具体例と、その結果から導き出される材料構造の知見等を解説頂きました（図7）。また、各種の粘性率測定装置（細管法、回転法、るっぽ回転振動法）と解析手法をご説明いただき、はんだや溶融ニッケルの粘性率測定の具体例を学習しました。

⑧の総合討論では、受講者にあらかじめ配布したシートに質問を記入してもらい、その内容を講



図2 講義風景  
(放射温度計の正しい  
使い方、中村先生)

師の先生方が確認、質問事項を抽出していただき、説明するという形式で行われました。従来と同様温度計測に関する質問が多数ありましたが、それに加えて、熱流センサーに関する質問も多数あり、熱流センサーに関する潜在的なニーズも多くあることが確認できました。

⑨の講師との技術交流会は、同会場を立食パーティ形式に模様替えした形で行われ、講師の先生方への個別の質問の場、受講者間の交流の場となりました。各分野で知見のある先生方に直接お話を伺える絶好の機会であることから、会場の各所で活発に先生方に質問する参加者の姿が多く見られました。参加者同士に先生方を加えて、現在の課題について意見交換する様子も多く見られました。有意義な問題解決や情報交換の場となったのではないかと思われます。

### 3. 全体の印象、アンケート結果

参加者の内訳は、65%が企業の方で、26%が大学関係の方で、9%が官公庁の方でした。昼間の各講義、夕刻の技術交流会含め、産学交流委員会の活動目的である産学官交流の活性化の一助になったものと思います。

熱関連計測で代表的なセンサーである、熱電対、放射温度計、熱流センサーを網羅し、熱伝導率計測では定常法と非定常法の事例を紹介し、熱に関して基本的な計測技術を概観できるため、多くの受講者にとって有益であったと考えています。アンケート結果についてもほとんどすべてが肯定的なご評価でした。

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



図3 講義風景  
(熱流センサーの基礎  
と校正技術、阿子島氏)

#### 4. おわりに

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

最後に、講師の皆様には、ご多忙のところ、資料作成含め、ご協力を頂きまして、ありがとうございました。紙面をお借りして、改めて感謝申し上げます。



図4 講義風景  
(熱電対の正しい使い方および測定誤差の支配的要因, 田川先生)



図6 講義風景  
(フラッシュ法による熱拡散率測定,  
太田先生)



図7 講義風景  
(融体の熱物性 (熱伝導率, 粘性),  
西先生)



図5 講義風景  
(定常法による熱伝導率測定, 梶田氏)

## 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	問合先	掲載号
<b>2020年</b>						
1月	10(金) ～ 11(土)	International Seminar in Fukui -Japan-China Heat Transfer Symposium 2020- (日中伝熱シンポジウム 2020)			実行委員長：永井二郎（福井大学） E-mail: nagai@u-fukui.ac.jp	
6月	3(水) ～ 5(金)	第 57 回日本伝熱シンポジウム (石川県地場産業振興センター)	2020.1.17	2020.3.13	実行委員長：多田幸生（金沢大学）	
11月	15(日) ～ 19(木)	アジア熱科学会議 2020 (2 <sup>nd</sup> ACTS)	2020.3.27	2020.5.30	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	問合先	掲載号
<b>2020年</b>						
1月	23(木) ～ 24(祝)	第 48 回ガススタービンセミナー			(公社) 日本ガススタービン学会事務局 Tel:03-3365-0095 E-mail:gtsj-desk@gtsj.org	
3月	5(木)	第 1 回世界エンジニアリングデイ記念 シンポジウム			(公社) 日本工学会 eng@jfes.or.jp	
6月	18(木) ～ 19(祝)	20-19 講習会「第 25 回動力・エネルギー技術シンポジウム」	2020.2.21	2020.4.24	(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)			ISTP31 実行委員会委員長 横野泰之 yokono@mech.t.u-tokyo.ac.jp	

## 第 57 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 57 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 多田 幸生

幹事 寺岡 喜和

開催日：令和 2 年 6 月 3 日（水）～6 月 5 日（金）

会 場：石川県地場産業振興センター (<https://www.isico.or.jp/site/jibasan/>)

所在地 〒920-8203 石川県金沢市鞍月 2 丁目 1 番地 電話 076-268-2010

アクセス 北陸新幹線/北陸本線 「JR 金沢駅 港口（西口）」より学会専用シャトルバスまたは  
北陸鉄道バスで 20 分、タクシーで 15 分

飛行機をご利用の場合「小松空港」より JR 金沢駅まで空港連絡バスで 40 分

講演申込締切： 令和 2 年 1 月 17 日（金）

講演論文原稿提出締切： 令和 2 年 3 月 13 日（金）

早期参加申込締切： 令和 2 年 4 月 17 日（金）

ホームページ： URL : <https://htsj-conf.org/symp2020/>

### 【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として

a) 通常の一般セッション（口頭発表）

b) オーガナイズドセッション（口頭発表）

c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッション  
を実施します。

- 1 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 57 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

### 【参加費等】

- 参加申込の時期

早期申込：4 月 17 日（金）まで

通常申込：4 月 18 日（土）以降（5 月中旬までに参加登録を完了された方には、事前に参加者キットをお送りします）

- シンポジウム参加費

会員一般	早期申込：14,000 円	通常申込：17,000 円
非会員一般	早期申込：17,000 円	通常申込：20,000 円
会員学生	早期申込：8,000 円	通常申込：9,000 円
非会員学生	早期申込：9,000 円	通常申込：10,000 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となります。）

**【意見交換会】**

- 開催日：令和 2 年 6 月 4 日（木）
- 会 場：金沢城五十間長屋（〒920-0937 石川県金沢市丸の内 1 番 1 号）
- 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

**【参加登録と参加費等の支払い方法】**

- 参加登録は本シンポジウムのウェブページから行ってください。
- 参加費等の支払いは、参加登録のページからのクレジットカード決済、もしくは銀行振込になります。  
参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- 銀行振込による早期申込みをされる場合は、4 月 17 日までに振込をお済ませください。
- 銀行振込による支払では振込用紙等は用意いたしません。振込手数料は各自でご負担願います。
- 4 月 18 日以降もウェブページからの参加登録が可能です。参加費は通常申込扱いとなります。
- 5 月中旬までに参加登録を完了された方には事前に参加者キット（講演論文集電子版、講演プログラム、  
参加票、領収書など）をお送りします。
- シンポジウム当日も参加登録と参加費等の支払いができます。

**講演申込方法、講演論文集、執筆要綱**

**【研究発表申込方法】**

- 一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者（登壇者）は、日本伝熱学会会員（学生会員、賛助会員、特別賛助会員、推薦会員を含む）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は、会員申込と会費納付を行って下さい。（オーガナイズドセッションについては、各セッションのオーガナイザーの指示に従って下さい。）
- 原則としてウェブによる申込みに限らせて頂きます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい。ウェブによる申込みができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- 申込みの際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 57 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。
- 発表申込み時に、論文要旨（日本語で 200～250 字）を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- 講演発表申込は、講演者 1 名につき 1 題目とさせて頂きます。
- 講演の採否およびセッションへの振り分けは、実行委員会にご一任下さい。

**【講演論文集電子版】**

- 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を、PDF ファイルで本シンポジウムのホームページから提出して下さい。
- 従来の講演論文とは別に、当該講演内容を後日原著論文として TSE 以外の学術雑誌等に投稿する場合は、二重投稿にならないように配慮して 1 ページの講演アブストラクトを提出することができます。
- 講演アブストラクトは A4 サイズで 1 ページ、講演論文は A4 サイズで 2～6 ページとします。

- 講演論文と講演アブストラクトは講演論文集として電子版のみを発行し、冊子版は発行しません。
- 講演論文集電子版を参加者に配布します。なお、講演論文集電子版は参加できなかった日本伝熱学会会員にも希望があれば配布しますので、シンポジウム終了後に日本伝熱学会事務局にお申込み下さい。
- 講演論文集は会員を対象にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の2週間程前からウェブ上で公開します。従って、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。
- シンポジウム終了後、一定期間を経て講演論文集のウェブ上での公開を終了します。
- 原稿提出締切日までに提出されなかった場合は、講演論文集に掲載されません。十分にご注意下さい。

#### 【執筆要綱】

- 以下の4つの原稿のうちから選択して執筆して下さい。
  - ① 講演論文（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）
  - ② 講演アブストラクト（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション）
  - ③ Full size manuscript
  - ④ Abstract manuscript
- 各原稿の書式の詳細ならびにテンプレートは、シンポジウムのホームページをご参照ください。
- 論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いてください。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。
- PDFファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」を設定してください。提出前に必ず、変換後のPDF原稿を印刷して確認して下さい。

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

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

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

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

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

（番号）著者名、雑誌略称、巻-号(発行年)、先頭ページ番号。

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

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

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

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

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

← 140 mm →

### 原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）

MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）

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

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

(1 行あける)

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

(1 行あける)

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

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

(1 行あける)

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

(1 行あける)

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

(1 行あける)

#### 1. 大見出し

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

① 講演論文の冒頭部分（表題部分および本文書き出し部分）の書式

← 140 mm →

### 原稿の書き方（和文表題：Gothic 14pt）

MS-Word の場合（和文副題：Gothic 12pt）

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

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

(1 行あける)

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

(1 行あける)

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

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

(1 行あける)

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

(1 行あける)

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

② 講演アブストラクトの冒頭部分（表題部分および本文書き出し部分）の書式

他の学術雑誌等との二重投稿にならないよう十分に配慮して下さい。

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

(番号) 著者名、雑誌略称、巻-号(発行年)、先頭ページ番号。

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

### ③ Full Size Manuscript

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

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

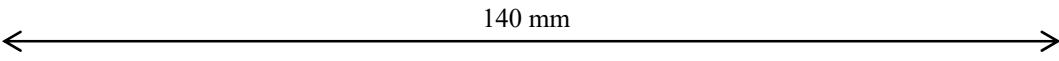
The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

### ④ Abstract Manuscript

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

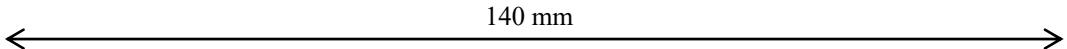
Example: (1) T. Dennetsu et al, J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

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

 <p style="text-align: center;">140 mm</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; background-color: white;"> <p style="text-align: center;"><b>Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt)</b></p> <p style="text-align: center;">The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt)</p> <p style="text-align: center;">(blank line)</p> <p style="text-align: center;">*Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark “*” at the head of speaker’s name)</p> <p style="text-align: center;">(blank line)</p> <p style="text-align: center;">Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations: Times New Roman 10pt)</p> <p style="text-align: center;">(blank line)</p> <p style="text-align: center;">Abstract of approximate 100 words is written by Times New Roman 10pt. Five blank characters are inserted as the indent.</p> <p style="text-align: center;">(blank line)</p> <p style="text-align: center;">Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words)</p> <p style="text-align: center;">(blank line)</p> <p><b>1. Headline</b></p> <p><b>1.1 Crosshead</b> The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 2 to 6 pages of A4 size. The manuscript forms 1 column × 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the maximum, and animations cannot be included.</p> </div>
---

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

140 mm



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

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

(blank line)

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

(blank line)

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

(blank line)

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

(blank line)

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

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

【ご注意】

- 講演申込みの取消および講演論文原稿の差し替えは、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タのみとさせていただきます。パソコン用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。
- その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会事務局までEmailまたはFAXでお問い合わせ下さい。

【お問い合わせ先】

第 57 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局

金沢大学 理工研究域 機械工学系内

E-mail : symp2020@htsj-conf.org, FAX : 076-234-4743

ホームページ URL: <https://htsj-conf.org/symp2020/>

## 優秀プレゼンテーション賞（第57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 異 和也

第57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2年6月3日（水）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。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2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57回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。

審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。

表彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。



## 編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

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 <a href="http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf</a> をご参照下さい。

## 【連絡先】

- ・総務部会長：村田 章（東京農工大学）：[murata@mmlab.mech.tuat.ac.jp](mailto:murata@mmlab.mech.tuat.ac.jp)
- ・編集出版部会長：中村 元（防衛大学校）：[nhajime@nda.ac.jp](mailto:nhajime@nda.ac.jp)
- ・広報委員会委員長：畠山友行（富山県立大学）：[hatake@pu-toyama.ac.jp](mailto:hatake@pu-toyama.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](mailto:general-affairs@htsj.or.jp)
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子・山田麻子：[office@htsj.or.jp](mailto:office@htsj.or.jp)

## 【注意】

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

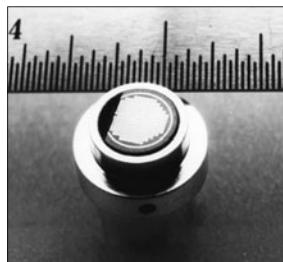
# 熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度( $\text{W}/\text{cm}^2$ )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することができます。

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

## 熱流束 マイクロセンサー



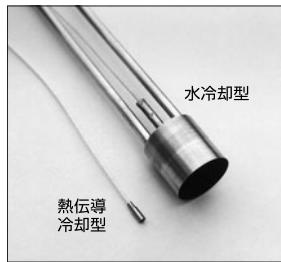
### 特徴

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

### 使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- ターピングレード熱風洞試験
- 自動車用エアーバッグ安全性試験
- ジェットエンジンパックファイバー試験

## サーモゲージ

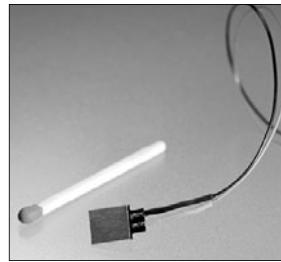


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

### 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・スモーケテスト

## 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、 $72\text{mm}^2$ の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0パッケージングの最適化ポリマーと1-レベルパッケージングの金属の構造になっています。

### 使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 热交換器の効率測定
- 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
- 热移動／热放出の即時応答測定

## 熱流束センサー 校正サービス

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



センサテクノス株式会社

URL

[www.senstech.jp](http://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](mailto:info@senstech.jp)

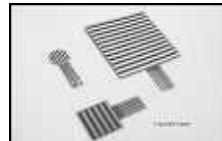
**CAPTEC 社(フランス)**

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

**熱流計／輻射計**

熱流束範囲: 0.2～4000Btu/ft<sup>2</sup>/sec (フルスケール)  
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)  
最高温度: 200°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/コニスタンタン)  
J型(鉄/コニスタンタン)  
E型(クロメル/コニスタンタン)  
K型(クロメル/アルメル)  
S型(白金 10%ロジウム/白金)

**【温度範囲】**

-270°C～+400°C  
-210°C～+1200°C  
-270°C～+1000°C  
-270°C～+1372°C  
+200°C～+1700°C

**ITI 社(アメリカ)**

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

**高温用熱流板**

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

**水冷式 火炎強度熱流計**

最高温度: 1900°C  
応答速度: 0.1s  
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm<sup>2</sup>

**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*

本特集では「接触熱抵抗の評価と低減 —基礎研究と実用化の進展— (Evaluation and Reduction of Thermal Contact Resistance — Progress in Basic Research and Practical Application —)」をテーマに、6件のトピックスについてご寄稿いただきました。

富山県立大学の畠山友行氏と兵藤文紀氏には、電子機器における接触熱抵抗の予測と接触面での熱縮流の影響についてご紹介いただきました。接触熱抵抗は電子機器の放熱における障害である一方で、電子機器を設計する際の温度予測においても大きな障害となっています。数値解析などを用いて機器の温度を予測する際、機器を構成する電子部品などの内部に関しては、熱伝導率などの物性値を入力することが可能ですが、接触熱抵抗は部品同士の接触状態によって変化してしまうため、実際に機器で利用する際と同じ接触状態を再現して計測するなど、なんらかの形で計測する必要があります。ここでは、接触熱抵抗の予測に関する検討事例が示されています。

大阪府立大学の吉田篤正氏と加賀田翔氏には、非定常法による接触熱抵抗の測定と評価についてご紹介いただきました。ここでは、低接触圧力下において、従来使用されている TIM を含め、高温・高熱流束下での使用が期待される銀ペーストを採用した場合の接触熱抵抗低減効果を実験的に評価されています。特に、二つの金属を接触させた試料に対して、接触圧力、接触面の表面粗さ、接触面への接触材挿入の有無をパラメータとした測定が行われ、光音響法による接触熱抵抗の評価が試みられています。

山口東京理科大学の木伏理沙子氏には、高熱流束環境下における TIM 及び接触圧力印加による接触熱抵抗低減効果の検証についてご紹介いただきました。次世代パワー半導体を搭載した電子機器に適用される Thermal Interface Material (TIM) については、高い耐熱性が必要となるため、従来品とは異なる TIM を適用することが必要になります。ここでは、低接触圧力下において、従来使用されている TIM を含め、高温・高熱流束下での使用が期待される銀ペーストを採用した場合の接触熱抵抗低減効果が実験的に評価されています。

株式会社デンソーの篠田卓也氏と株式会社マイテックの安井龍太氏には、電子機器における接触熱抵抗の低減技術についてご紹介いただきました。電子機器の筐体においては、複数の箇所をねじ締結することが一般的であり、2点以上のねじ間で発生するうねりを考慮した設計が必要となってきます。ここでは、必然的に発生するねじ締結によるうねりを巧く利用し、筐体形状に工夫を凝らすことで接触熱抵抗を低減する能動的な手法について検証されています。

KOA 株式会社の青木洋穏には、圧力測定フィルムを利用した接触熱抵抗の評価方法についてご紹介いただきました。接触熱抵抗については、接触面に放熱グリースなどの Thermal Interface Material (TIM) を塗布することで、通常その値の低減が図られますが、コスト削減やグリースの経年劣化などの理由から放熱グリースを使わない設計の要望も出てきています。このグリースレス接触における熱抵抗は、部材の表面粗さやうねり、接触圧力などの影響を受けるため、その定量化は難しく、熱設計を行う際の課題になっています。ここでは、グリースレス接触面の熱抵抗を定量化するために、圧力測定フィルムを利用した新しい評価手法の開発が試みられています。

金沢工業大学の福江高志氏には、感熱印刷プロセスに影響する接触熱抵抗の評価についてご紹介いただきました。接触熱抵抗が使用者の満足度に直接的に影響するアプリケーションの事例として、感熱印刷 (Direct Thermal Printing : DTP) があります。ここでは、特に感熱印刷において発生する接触熱抵抗の影響度を、構想設計段階において機能レベルで評価・判断できる設計指標の獲得を目指した研究事例が示されています。

以上、これらの6件のトピックスを通じて、我が国における最新の接触熱抵抗の評価と低減に関する基礎研究と実用化の進展が読者の皆様に味わっていただけるのではないかと思います。ご多忙のなか、ご寄稿いただきました執筆者の皆様に厚くお礼申し上げます。

富村 寿夫（元熊本大学）

*Toshio TOMIMURA (Ex Kumamoto University)*

*e-mail: tomi.sapporo65@gmail.com*

企画・編集出版担当副会長 須賀 一彦（大阪府立大学）

編集出版部会長 中村 元（防衛大学校）

委員

（理事） 佐々木 直栄（日本大学）、戸谷 剛（北海道大学）、光武 雄一（佐賀大学）

（協議員） 梶田 欣（名古屋市工業研究所）、後藤田 浩（東京理科大学）、富村 寿夫（元熊本大学）、  
西 剛伺（足利大学）、二宮 尚（宇都宮大学）、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 花村 克悟（東京工業大学）

TSE 編集幹事 伏信 一慶（東京工業大学）

編集出版部会 連絡先： 〒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, Fax: 046-844-5900

E-mail: nhajime@nda.ac.jp