

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14605

研究課題名(和文) 導体間接触熱抵抗に関する輸送現象論的アプローチ

研究課題名(英文) Research of thermal contact resistance between conductive materials from the view point of transport phenomena

研究代表者

畠山 友行 (Hatakeyama, Tomoyuki)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：60542363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、電子機器の熱設計の高精度化に寄与するべく、導体間接触面における熱輸送現象を解明するとともに、電子機器に用いられる圧力範囲(従来、接触熱抵抗が議論されてきた圧力よりも低い圧力領域)での接触熱抵抗の予測式を提案することを目的とした。その結果、接触面における熱輸送現象の詳細を解明するまでには至らなかったが、電子機器に用いられる圧力範囲で、接触熱抵抗を高精度に予測するための指針を示すことができた。具体的には、電子機器内部より高い圧力域での接触熱抵抗の予測式の熱縮流の項を変更し、表面粗さによって場合分けをすることで、電子機器における接触熱抵抗を高精度に予測できる可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子機器の熱設計は、機器の信頼性を確保するために非常に重要である。電子機器の熱設計の際に、大きな問題となるのが接触熱抵抗である。なぜなら、接触熱抵抗の値が未知であるため、温度予測精度が低くなってしまっているからである。従来提案されている接触熱抵抗の予測式は、物体同士の接触圧力が電子機器内部の圧力よりも高い範囲での精度しか保証されていない。本研究では、従来の式を基にして、電子機器の圧力範囲での接触熱抵抗の予測を、高精度に行うための指針を示した。本研究で得られた成果は、電子機器の温度予測精度を向上させることに貢献し、電子機器の信頼性を高めるばかりでなく、より高精度な機器の開発にもつながるものである。

研究成果の概要(英文)：In this research, in order to contribute to the improvement of the accuracy of the thermal design of electronics, we tried to elucidate the heat transport phenomenon at the contact surface between conductive materials and proposed prediction formulas for thermal contact resistance in the range of the contact pressure used in electronics. (The pressure discussed in this research is lower than conventionally discussed pressure range.) As a result, although the details of the heat transport phenomenon at the contact surface was still unknown, we provided a guideline for predicting the thermal contact resistance with high accuracy in the pressure range used for electronics. Specifically, by changing the heat contraction term in the conventional equation which can predict the thermal contact resistance in higher pressure region and classifying the cases according to the surface roughness, the contact thermal resistance in the electronics can be calculated with high accuracy.

研究分野：熱工学

キーワード：接触熱抵抗 電子機器 熱設計 予測式

1. 研究開始当初の背景

近年、電子機器の発熱密度の増加に伴い、発熱部から冷却部までの熱抵抗の低減が求められている。熱抵抗低減のために、熱伝導性の高い材料の開発などが進む一方で、部材間の接触面に生じる接触熱抵抗が放熱のための大きなボトルネックになっている。現在、接触面に塗布する高熱伝導性グリスの開発などが積極的に行われているが、開発が飽和状態になっている感が否めない。更なる接触熱抵抗の低減のためには、接触面で生じる熱輸送現象の詳細な解明が必要であると考えられる。また、電子機器の熱設計では、高精度な温度予測が求められるが、接触熱抵抗の値が未知であることが多く、接触熱抵抗が高精度な温度予測の妨げになる場合が散見される。そのため、接触熱抵抗のさらなる低減のみならず、接触熱抵抗を高精度に予測する方法も求められている。なお、接触熱抵抗の予測式が提案されている例はあるが、電子機器に適用される接触圧力よりも高い接触圧力領域の予測式であり、電子機器内部の接触圧力領域での検証はされていない。

2. 研究の目的

本研究では、導体間接触面における熱輸送現象の詳細を解明すべく、熱輸送の支配因子を明らかにするとともに、電子機器熱設計の高精度化に寄与すべく、電子機器に適用される圧力領域での接触熱抵抗の予測式を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

図1に示すような定常法熱抵抗計測装置を用いて、接触圧力を変化させながら導体間の接触熱抵抗の計測を行うと同時に、接触電気抵抗の計測も行う。接触熱抵抗および接触電気抵抗を計測するサンプルの例を図2に示す。サンプルには電極を取り付ける穴が設けられており、取り付けられた電極を利用した4端子法で接触面の電気抵抗を計測する。図2右に示すサンプル(Lower)の表面粗さRa BのBの値を0.2、3.2、12.5 μmと変化させ、Ra = 0.2 μmの表面との接触熱抵抗と接触電気抵抗を計測し、両者の比較を行うことにより、導体で成立するヴィーデマン・フランツ・ローレンツの法則が成立するか否かを議論する。計測結果が、ヴィーデマン・フランツ・ローレンツの法則と同等な性質を示すのであれば、接触面での熱輸送は導体内部と全く同様な現象であると判断できる。

また、接触熱抵抗の計測結果と、電子機器の圧力範囲よりも高い圧力範囲において検証されている接触熱抵抗予測式の予測結果とを比較し、従来の式が電子機器の圧力範囲にも適用可能かどうかを検証する。さらに、接触面をモデル化した数値流体力学(CFD)解析モデルを作成し解析を行い、接触面付近の熱の輸送経路を可視化する。可視化結果を基に、接触面付近における熱の輸送経路の詳細を検証し、従来の予測式で用いられる仮定が、電子機器の圧力範囲でも適用可能かどうかを議論するとともに、より高精度に接触熱抵抗を予測するための予測手法の提案を行う。

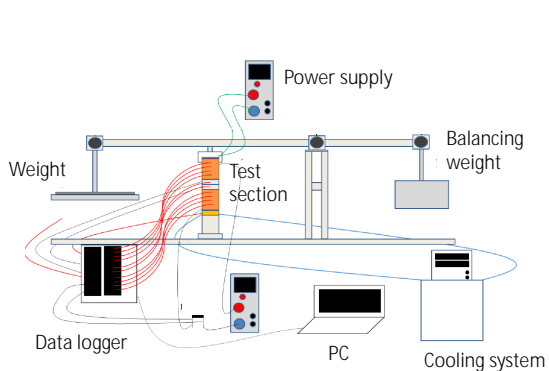


Fig.1 Experimental apparatus

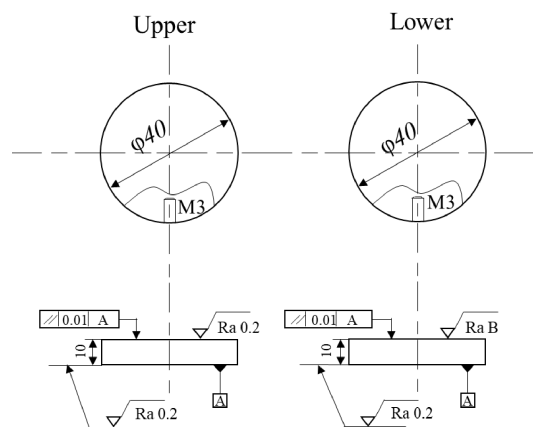


Fig.2 Measuring samples

#### 4. 研究成果

図3に、Al1070の $Ra = 0.2 \mu\text{m}$ と $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ を接触させた場合の接触熱抵抗の計測結果を示す。接触熱抵抗の計測結果は、接触圧力の増加とともに接触熱抵抗が減少する傾向になり、既存の文献の結果と比較しても同等な値を示すことから、信頼性の高い計測ができたと言える。一方で、接触電気抵抗の計測では安定した結果を得ることができず、計測装置や手法の見直しを繰り返したが、研究期間中に安定したデータを取るには至らなかった。そのため、熱輸送の支配因子を明らかにすることはできなかった。熱輸送の支配因子の特定は、今後の課題として、検証を継続中である。

次に、接触熱抵抗の予測精度の高精度化に関する検討を示す。電子機器より高い接触圧力領域での接触熱抵抗の予測式として、橋の式と佐野川の式が有名である。橋の式、佐野川の式ともに、図4に示すような接触面のモデル化を行い、接触熱抵抗を予測している。図4のモデルは、接触面の一部が真実接触として接触しており、それ以外の部分は空隙になっている単位セルモデルである。橋の式では、真実接触部の面積と高さ、材料の熱伝導率を考慮して接触熱抵抗を予測する。佐野川の式では、橋の式に加えて、真実接触部に流れ込む熱の縮流の影響を考慮して接触熱抵抗を予測する。ただし、熱縮流の影響は材料の熱伝導率のみに影響され、それ以外の要因では変化しないとされている。熱縮流が生じることは既知の事実であるため、佐野川の式の予測精度が高いと考えられる。本研究では、図4と同様なCFD解析モデルを作成し、まず解析結果と実験結果の比較を行った。真実接触部の面積は、材料硬さと接触圧力の関係から求めた。解析結果の一例として、接触面粗さ $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ の場合の結果を図5に示す。グラフ中、実験結果(Experiment)と解析結果(Analysis result)を比較すると、両者がよい一致を示していることから、解析モデルは接触面状態をよく模擬できていると判断できる。そのため、解析結果から得られる情報を利用して、予測式の高精度化を議論する。図5には、橋の式(Tachibana)佐野川の式(Sanokawa)から得られた接触熱抵抗の値も示している。実験結果は、二つの予測式の間には挟まれる形になっており、接触面では熱縮流が起こることから、佐野川の式は、より実際に近い値を示すと考えられるが、佐野川の式から得られた結果は、実測値より高い値となっている。その理由として、接触圧力が高い領域と異なり、電子機器の接触圧力の範囲では、熱縮流の項が接触圧力にも依存する可能性を考え、熱縮流の影響を考察した。図6に、CFD解析結果から得られた真実接触部に流れ込む熱流の割合と、圧力の関係を示す。この結果から、電子機器の接触圧力範囲では、真実接触部に流れ込む熱流が圧力に依存することが確認された。この結果を受けて、Holmの接触理論を参考に、佐野川の式の熱縮流の項に圧力の依存性をとり入れた。その結果を、図7に示す。圧力依存性を考慮する前の結果(Sanokawa)は、実験値より大きな接触熱抵抗となっているが、熱縮流の圧力依存性を考慮した結果(Sanokawa-Holm)を見ると、一部が実験値と一致、一部は実験値より小さな結果となった。実験値との相対誤差は、Sanokawaと実験値との間が6.8 - 18.3%であったのに対し、Sanokawa-Holmと実験値との間は5.1 - 14.9%となり、予測精度の改善が見られた。

さらに考察を進めることで、最終的に次のような、接触熱抵抗予測の指針を示した。

- ・表面粗さの値が小さい場合、佐野川の式に、材料表面のうねりの影響を考慮し、さらに熱縮流の圧力依存性を考慮する。
- ・表面粗さの値がある程度大きい場合、熱縮流の圧力依存性を考慮する。
- ・表面粗さの値がさらに大きい場合、真実接触部の高さの値が小さくなる影響を考慮し、さらに熱縮流の圧力依存性を考慮する。

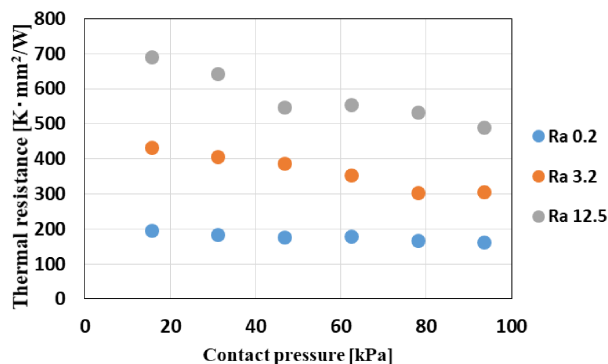


Fig.3 Measured thermal resistance

Unit cell model



Fig.4 Model for computational analysis

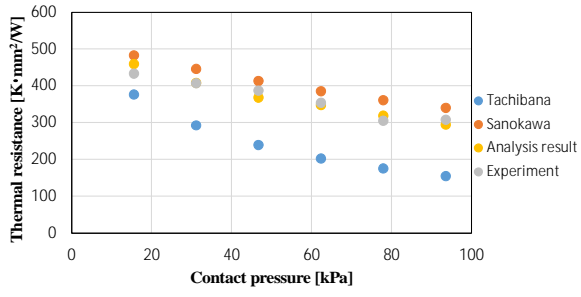


Fig.5 Results of predictive formula, CFD analysis and experiment

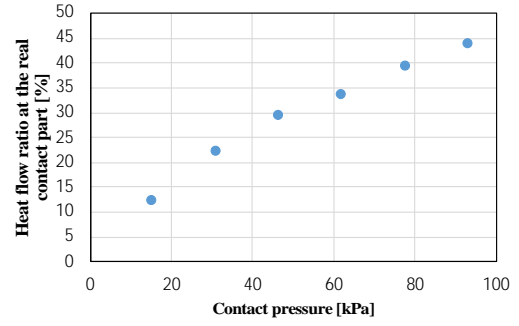


Fig.6 Pressure dependence of contraction heat flow

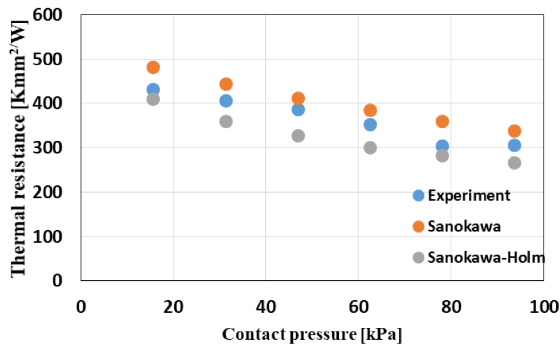


Fig.7 Results of modified predictive formula

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Hyodo, T. Hatakeyama <sup>1</sup> , R. Kibushi, M. Ishizuka
2. 発表標題 Measurement of Thermal and Electrical Contact Resistance Between Conductive Materials
3. 学会等名 ICEP-IAAC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵藤文紀, 畠山友行, 石塚勝
2. 発表標題 工業用材料の接触熱抵抗評価
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵藤文紀, 畠山友行, 木伏理沙子, 石塚勝
2. 発表標題 数値解析を用いた接触熱抵抗評価
3. 学会等名 日本機械学会熱工学コンファレンス2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵藤文紀, 畠山友行, 木伏理沙子, 石塚勝
2. 発表標題 数値解析を用いた接触熱抵抗評価 - 接触状態 と表面粗さの関係について -
3. 学会等名 第39回日本熱物性シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Hatakeyama, R. Kibushi, M. Ishizuka
2. 発表標題 Effect of Contraction Heat Flow on Thermal Resistance Around Contact Surface
3. 学会等名 IMPACT2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yoshiki Hyodo, Tomoyuki Hatakeyama, Risako Kibushi, Masaru Ishizuka
2. 発表標題 Measurement of Thermal and Electrical Contact Resistance Between Conductive Materials
3. 学会等名 ICEP-IAAC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 兵藤 文紀, 畠山 友行, 石塚 勝
2. 発表標題 工業用材料の接触熱抵抗評価
3. 学会等名 第55回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----