

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	高電力抵抗器のサーマルマネジメントのための熱抵抗予測・測定技術
Title(English)	
著者(和文)	青木洋稔
Author(English)	Hirotooshi Aoki
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第260号, 授与年月日:2025年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:伏信 一慶,末包 哲也,高橋 秀治,兒玉 学,長澤 剛
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第260号, Conferred date:2025/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	（工学）
学生氏名： Student's Name	青木 洋稔		審査員主査： Chief Examiner	伏信 一慶 教授	

要旨（和文 2000 字程度）

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

本研究では、小型・軽量化が進む電子機器および電子部品の設計品質の維持・改善に活用される伝熱解析の温度予測精度の向上に貢献する技術を提供することを目的として、電子部品およびその周辺における主たる放熱経路の熱抵抗を予測・測定する技術を研究した。本論文の第2章から第4章では、橘と佐野川が提案したユニットセルモデルに基づく接触熱抵抗（以降、TCR と呼ぶ）の予測式を修正し、さらに、修正式を粗さがある均一接触面の TCR 予測に適用する方法と、粗さとうねりが混在した不均一接触面の TCR 分布予測に適用する方法を示している。また、第5章では、数 μm ～数十 μm の厚みをもった膜材料の熱抵抗測定技術として、通電加熱型サーモフレクタンス法と構造関数を併用した熱物性測定法を示す。主な内容は、以下の通りである。

第1章では、題材としたセメント抵抗器およびチップ抵抗器の概要に触れ、それらの温度予測に必要な主たる放熱経路の熱抵抗を整理した。具体的には、セメント抵抗器に対しては、粗さとうねりが混在した不均一接触面の TCR、チップ抵抗器に対しては、厚膜材料の熱抵抗の2つである。さらに、各パラメータを予測、測定するための手法を構築する際の研究方針を従来研究の特徴を鑑みて整理している。

第2章では、橘と佐野川が提案したユニットセルモデルに基づく均一接触面の TCR の予測式を修正し、TCR の新規予測式を導いた。この予測式では、真実接触部における熱の流入および流出に起因して付加される熱抵抗が真実接触部の直径に応じて変化するように修正した。これによって予測式の適用範囲が拡大し、予測精度も向上した。なお、本予測式の適用範囲は、ユニットセルの直径 $d_u[\text{m}]$ と真実接触部の直径 $d_{rc}[\text{m}]$ の比率 d_u/d_{rc} によって整理しており、予測誤差を+8.9%まで許容できる場合における予測式の適用範囲は $d_u/d_{rc} \geq 7.5$ 、予測誤差を+14.5%まで許容できる場合は $d_u/d_{rc} \geq 6.0$ 、予測誤差を+22.4%まで許容できる場合は $d_u/d_{rc} \geq 5.0$ となる。

第3章では、第2章で述べた修正ユニットセルモデルに基づく TCR の予測式を多数の真実接触部を持つ均一接触面に適用できるように応用した。さらに、共焦点レーザー顕微鏡で観察した部材の表面形状から真実接触部の直径などのパラメータを簡易的に予測し、予測した各種パラメータを応用式に与えることで、粗さを持つ部材を実際に均一に接触させたときの TCR を予測している。本予測結果は、新規開発したテストヘッド式熱抵抗測定装置で測定した TCR と概ね一致しており、第2章で述べた修正ユニットセルモデルに基づく TCR の予測理論と共焦点レーザー顕微鏡による局所的な表面形状測定の2つを併用した TCR 予測方法の有効性が示された。また、TCR の予測精度をさらに高めるには、TCR の予測において考慮していない真実接触部の密集も考える必要がある。さらに、予測結果の妥当性検証に使用したテストヘッド式熱抵抗測定装置による熱抵抗の測定ばらつきを低減することも必要と考える。

第4章では、うねりと粗さがある不均一接触面に生じる TCR 分布を予測する方法として、第2章と第3章で述べた局所的な均一接触面の TCR 予測方法と、部品全体のうねりを再現した接触解析を併用した手

法を検討した。一連の検討によって、接触面にうねりと粗さがある 20×10^{-3} m の抵抗器を冷却プレートに不均一接触させたときの TCR 分布を可視化できた。さらに、抵抗器と冷却プレートの接触面に予測した TCR 分布を境界条件として与えた熱伝導解析モデルをつくり、このモデルによって抵抗器を自己発熱させたときの部品表面の温度を予測した。温度の予測結果は、赤外線サーモグラフィで測定した温度を良好に再現できており、予測した不均一接触面の TCR 分布と、TCR 分布を考慮して予測した抵抗器の温度の妥当性が示された。なお、この手法では接触面における伝熱として、接触箇所を介した熱伝導および接触面の空気を介した熱伝導の 2 つを考慮して TCR 分布を求めている。そのため、TCR 予測において考慮していない接触面に介在する空気の対流による伝熱量 Q_{c_con} と、接触表面間の熱ふく射による伝熱量 Q_{c_rad} を無視できない場合には、本予測手法を適用できない。本論文では手法の適用可否を判断する指標として、空気の熱伝導による伝熱量 Q_{c_cd} と Q_{c_con} との比率 Q_{c_con}/Q_{c_cd} と、 Q_{c_rad} との比率 Q_{c_rad}/Q_{c_cd} を定式化し、適用範囲を概算可能にした。適用範囲内であれば、抵抗器の接触に限らず、電子機器などで想定される様々なグリースレス接触面に対して本 TCR 予測手法を適用できると考える。

第 5 章では、チップ抵抗器内部の放熱経路上にある保護膜や抵抗体膜などの厚膜材料を題材として、温度測定時間が μs , ms オーダーの通電加熱式サーモリフレクタンス法と構造関数を併用した熱物性測定手法を提案した。通電加熱型サーモリフレクタンス法によって測定したサンプル表面の温度上昇の妥当性は、半無限固体表面の温度上昇を計算できる解析解との比較によって示され、 μs , ms オーダーの温度測定技術として有効であることが確認された。さらに、測定した温度上昇を構造関数に変換し、その構造関数に基づいてテストサンプルとして準備したガラス膜がもつ熱伝導率および体積比熱を測定した。構造関数から得られたガラス膜の熱伝導率の測定誤差は、テストヘッド式熱抵抗測定装置によって測定した Ref. データを基準として $-10\% \sim 0\%$ であり、良好な精度が得られた。一方で体積比熱は、示差走査熱量測定などで取得した Ref. データに対して $-35.9\% \sim +7.6\%$ の測定誤差であり、概ね近い結果を示したものの測定精度を向上させる必要があることがわかった。今後、この測定誤差の要因調査を進めることで、本手法を厚膜材料の熱物性測定方法として確立する必要がある。この構造関数を併用した手法を用いることで、熱物性値が異なる複数の膜が積層された材料の各層がもつ熱物性値を同時に分析できる可能性がある。

第 6 章は本論文全体を通じての結論を述べている。

第 1 章から第 5 章に示した抵抗器を題材とした熱抵抗の予測、測定技術に関する研究を通じて、部品内部からその周囲に至るまでの放熱経路のうち、部材同士が均一、不均一に接触したときの TCR を予測する手法を構築し、さらに、その適用範囲を見積もる指標を示すことで電子機器および電子部品全般におけるグリースレス接触面への手法展開の可能性を示した。また、抵抗器や他の電子部品に使用される厚みが有る膜材料の熱抵抗の測定も可能にした。今後、構築した TCR の予測手法を実製品の設計に展開し、膜材料の熱物性測定法については測定精度を改善しつつ各種材料の特性評価への適用を進める予定である。そして、本研究の最終到達目標である電子機器および電子部品の伝熱解析の精度向上に貢献する。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位（専攻分野）： Academic Degree Requested	博士 Doctor of	(工学)
学生氏名： Student's Name	青木 洋稔		審査員主査： Chief Examiner	伏信 一慶 教授	

要旨（英文 300 語程度）

Thesis Summary (approx.300 English Words)

To improve the design quality of electronic devices and components, which are becoming smaller and lighter, it is necessary to enhance the accuracy of temperature predictions in thermal analysis. This study investigated a prediction method for a thermal contact resistance (TCR) both of uniform and non-uniform contact surface, and a measurement method for the thermal resistance of thick film materials used in the electronic components, in order to improve temperature prediction accuracy.

In the study of TCR prediction, firstly, we proposed a new TCR prediction equation for the local uniform contact surface derived by modifying the conventional equation based on a unit cell model representing a uniform contact surface with roughness proposed by Tachibana and Sanokawa. The new TCR prediction equation has a wider applicable range and higher accuracy in TCR prediction compared to the previous equation. The applicable range and accuracy of the new TCR prediction equation was organized based on the ratio between the diameter of the unit cell model, d_u and the diameter of the real contact point, d_{rc} , denoted as d_u/d_{rc} . When allowing prediction errors of +8.9%, +14.5%, and +22.4%, the applicable range of the prediction equation requires the diameter ratio to satisfy the conditions of $d_u/d_{rc} \geq 7.5$, $d_u/d_{rc} \geq 6.0$ and $d_u/d_{rc} \geq 5.0$, respectively. Secondly, the relation between a mean contact pressure and TCR across the local uniform contact surface with roughness was predicted based on the new TCR prediction equation and a rough surface topology observed by using confocal laser microscopy. This prediction result is in good agreement with the measured TCR obtained by using a test head style thermal resistance measurement system developed. Finally, by combining the contact analysis model reproducing the waviness of the resistor and the relationship between the mean contact pressure and the local TCR, visualized the non-uniform TCR distribution on the contact surface between the resistor and the cooling plate. Moreover, it was found that a heat transfer analysis model with TCR distribution as a boundary condition for the contact surface between the resistor and the cooling plate can accurately predict the temperature of the self-heating resistor. Additionally, the prediction method for the above-mentioned TCR distribution may also be applicable to greaseless contact surfaces, which are commonly found in electronic devices and components. In the future, the developed TCR prediction method will be used for the thermal design of electronic equipment and components.

In the study on measurement methods for the thermal resistance of thick film materials, we proposed the method that combines the structure function with the electrical-heat/pump-probe thermo-reflectance method achieving temperature measurements on the order of μ s to ms. The measurement error of the thermal conductivity of the glass film obtained from the structure function ranged from -10 % to 0 % compared to the Ref. data measured by the test head style thermal resistance measurement system, demonstrating good accuracy. On the other hand, the measurement error of the volumetric specific heat ranged from -35.9 % to +7.6 % relative to the Ref. data obtained by the DSC method, indicating the need to improve the measurement accuracy. Going forward, we will engage in improving the accuracy of the measurement and evaluating the thermophysical properties of the thick film materials used in electronic components.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東京科学大学リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Science Tokyo Research Repository Website (T2R2).