慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	温熱覚を制御するペルチェエレクトロニクス
Sub Title	Peltier electronics for controlling thermal sensation
Author	桂, 誠一郎(Katsura, Seiichiro) 藤井, 直孝(Fujii, Naotaka) 大澤, 友紀子(Osawa, Yukiko) 井上, 裕貴(Inoue, Yuki)
Publisher	
Publication year	2017
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2016.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究では, 遠隔地間でのヒューマンインタラクションを向上する上で重要となる温熱覚の双方向呈示に関してハードウェア, ソフトウェアの両面から研究を行った。具体的には, ビスマステルル半導体をフィルム上に蒸着することで, フレキシブルペルチェ素子の開発に成功した。また, 温度分布の制御システムの検討を行い, 「ペルチェエレクトロニクス」創成に資する研究成果を得ることができた。 This research was focused on bilateral rendering of thermal sensation which will be one of the important factors for improvement of human interaction from remote environments and it executed from both hardware and software points of view. We succeeded in development of flexible Peltier device by evaporating bismuth-tellurium semiconductor on a thin film. In addition, thermal distribution control was considered. As a result, we obtained research outcomes that contribute to the development of "Peltier electronics."
Notes	研究種目 : 挑戦的萌芽研究 研究期間 : 2015 ~ 2016 課題番号 : 15K12088 研究分野 : システムデザイン工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_15K12088seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成　２９　年　　５　月　２８　日現在

機関番号：　３２６１２
研究種目：　挑戦的萌芽研究
研究期間：　2015～2016
課題番号：　１５Ｋ１２０８８

研究課題名（和文）温熱覚を制御するペルチェエレクトロニクス

研究課題名（英文）Peltier Electronics for Controlling Thermal Sensation

研究代表者
桂　誠一郎（Katsura, Seiichiro）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：００４０１７７９

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　2,700,000円

研究成果の概要（和文）：　本研究では、遠隔地間でのヒューマンインタラクションを向上する上で重要となる温熱覚の双方向呈示に関してハードウェア、ソフトウェアの両面から研究を行った。具体的には、ビスマステルル半導体をフィルム上に蒸着することで、フレキシブルペルチェ素子の開発に成功した。また、温度分布の制御システムの検討を行い、「ペルチェエレクトロニクス」創成に資する研究成果を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：　This research was focused on bilateral rendering of thermal sensation which will be one of the important factors for improvement of human interaction from remote environments and it executed from both hardware and software points of view.　We succeeded in development of flexible Peltier device by evaporating bismuth-tellurium semiconductor on a thin film.　In addition, thermal distribution control was considered.　As a result, we obtained research outcomes that contribute to the development of "Peltier electronics."

研究分野：　システムデザイン工学

キーワード：　温熱覚　ペルチェエレクトロニクス　システムエネルギー変換　波動システム　抽象化理工学　Hand-to-Hand コミュニケーション

１．研究開始当初の背景

音声や映像情報に続き、人間の持つ触覚情報の遠隔呈示に対する研究が多く行われている。本研究は、触覚の中でも温もりや冷たさといった温熱覚に焦点を当て、ヒューマンインタラクションにおける臨場感の向上を図るものである。温熱覚の呈示に関する従来研究の多くは、温度あるいは熱流のみを制御するだけにとどまっており、また制御対象となる熱デバイスについても熱分布が一様であると仮定し、集中定数系によるモデル化に限られている。

研究代表者の桂は、これまでに温熱覚呈示においてデバイスー接触対象間でやり取りされる熱流とデバイス温度の関係性に着目し、温熱制御の特性に関する「制御熱コンダクタンス」の概念を世界で初めて提唱している（図 1）。本概念により、温度制御と熱流制御の特性が連続的に接続され、例えば両者の中間的な制御を行うなど、温熱覚呈示において必要なあらゆる温熱制御系を包括的に扱う基盤構築に成功している。

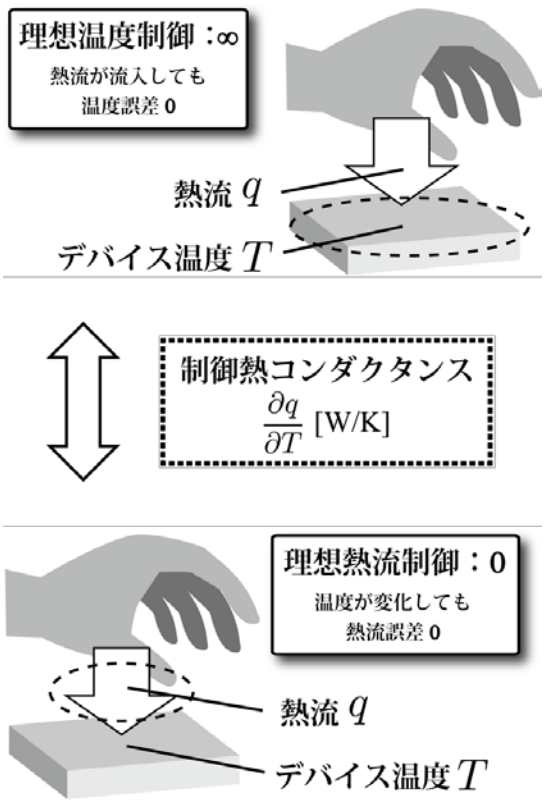


図 1　制御熱コンダクタンスの概念

温熱覚は人間の皮膚と接触物体の温度差に起因する熱流によって励起され、結果として生じる温度差により温熱覚の時間的な変化が決定される。温熱覚呈示においては、皮膚・デバイス間でやり取りされる熱流、およびデバイス温度の関係性の双方を同時に考慮することが必要である。ここで、指標となる制御熱コンダクタンスは熱流とデバイス温度変動の比によって定義されるが、理想的な温度制御ではどれだけ熱流が流入したとしても温度は変化しないため、無限大となる。一方、理想的な熱流制御では熱流が積極的に取り込まれ、どれだけデバイス温度が変化したとしても熱流変動が零となるため、制御熱コンダクタンスは零となる。したがって、温度制御と熱流制御は正反対の特徴を持つ「双対性」のある関係であるため、両者を同時に制御することが困難であった。従来の手法ではこの双対性による矛盾が解決できていないため、呈示される性能（特に周波数特性）に限界があった。

研究代表者はマスタースレーブ構造の 2 つのペルチェ素子の間で熱流の総和制御と温度を同期する制御を同時に達成し、温熱覚を遠隔地に双方向に伝送することに成功している。具体的には、2 つのデバイスの和と差で表現される仮想デバイスを定義し、直交化された和－差座標上において温度制御と熱流制御を実現することで、熱エネルギー保存則を遠隔地間での再現を可能にしている。

２．研究の目的

本研究では、温熱覚呈示に用いるペルチェ素子をフレキシブル化させ、デバイス形状の変化に伴う座標変化を考慮した制御熱コンダクタンスの多次元化に関する方法論を明らかにする。ペルチェ素子は P 型および N 型半導体の接合でペルチェ効果を発生させるものであるが、本研究により柔軟な材料上での実装に挑戦する。また、制御熱コンダクタンスの再現についても従来は点のみを考慮していたが、本研究では平面上において分布的に再現する制御手法を明らかにする。

３．研究の方法

(1) 平成 27 年度

① ペルチェ素子のフレキシブル化に関する基礎検討

ペルチェ素子内部では、P 型および N 型の 2 種の半導体が接合されており、電流を流すことでペルチェ効果に基づく熱流が発生する。市販されているペルチェ素子では機械的強度を保つためにセラミックプレートが用いられているため、フレキシブル性がほとんどなく、環境物体の形状に合わせて曲げることが困難である。

そこで本研究では、柔軟性を持つフレキシブルプレートを採用し、また半導体部分も厚みを少なくすることで、フレキシブルなペルチェ素子開発に向けた検討を行った。ペルチェ素子の機構・配線の設計や、半導体の蒸着といった工法の選定を具体的な課題として検討を行った（図 2）。

② 制御熱コンダクタンスの多次元化

一般的なペルチェ素子を用い、デバイスの変形がない場合に状況を限定した上で「制御熱コンダクタンスの多次元化」に関する検討を行った。空間分布のある温熱制御の理論構築については、熱伝導現象を支配する熱拡散

方程式の等価回路網を導出し、最終的に制御が可能なモデル化について検討を行った。研究の流れとしては温度分布あるいは熱流分布という、制御熱コンダクタンスが無限大および零であるケースを最初に取り扱い、続けて任意の値を持つ中間的な温熱分布制御系を構築した。

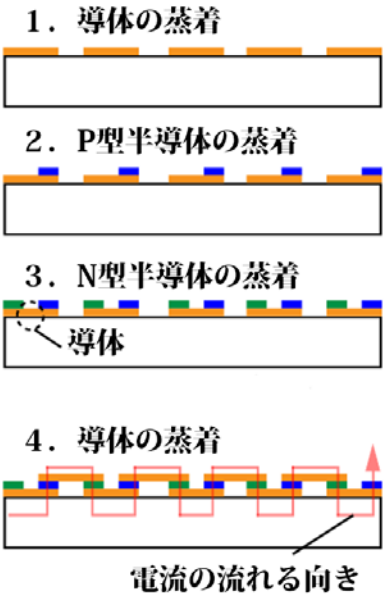


図 2　ビスマステルル半導体の蒸着

(2) 平成 28 年度

デバイスの大面積フレキシブル化に取り組んだ。具体的には、ヒューマンインタフェースへの導入を意識し、人間の手の平をカバーする程度の大きさのデバイスの実現を目指した。面積を増大させた場合においても機械的な強度を保つように、初年度の研究において得られた知見を踏まえた上でフレキシブルデバイスの設計、試作を行った。

さらにシステム面の研究として、変化する座標系上の制御熱コンダクタンスの多次元化に関して理論を拡張した。ペルチェ素子をフレキシブル化させた場合は、接触に伴って曲面がリアルタイムに変化し、座標系が変動することになる。このような状況下において温熱覚呈示の精度を維持するために、形状変化に伴う熱拡散モデルの変動を制御系に取り込むための制御方法論について検討を行った。

試作したフレキシブル熱デバイスの性能については、周波数応答等工学的な評価を実施した。

４．研究成果

(1) 平成 27 年度

本研究では、柔軟性を持つポリイミドを採用し、素子のフレキシブル化に向けた回路構成について検討を行った。さらに、ビスマステルル半導体を蒸着することで、フレキシブルなペルチェ素子である「サーモフィルム」（図 3）を試作した。

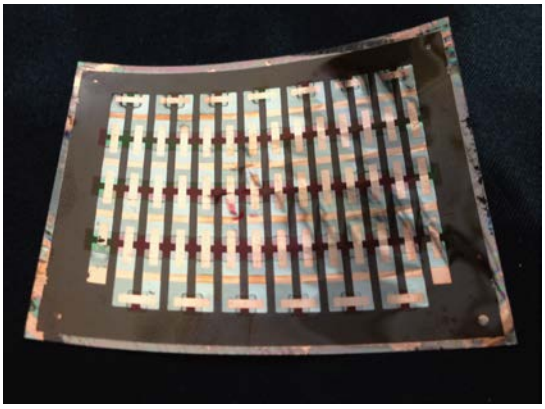


図 3　試作した「サーモフィルム」

ポリイミドの厚さは 50 μ m、蒸着された半導体は 2 μ m と薄膜になっており、フレキシブル性を保ちつつ断線しにくい構造となっている（図 4）。

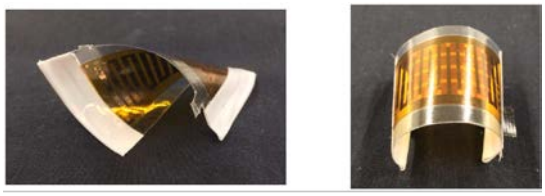


図 4　「サーモフィルム」のフレキシブル性

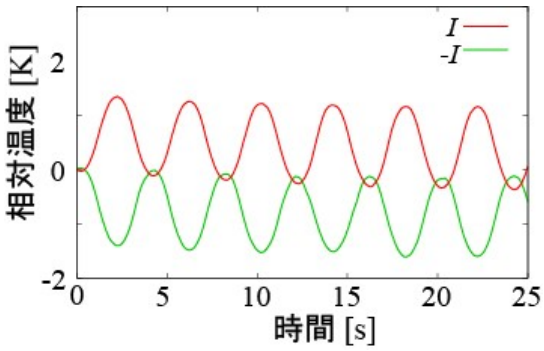
(2) 平成 28 年度

「サーモフィルム」の性能評価試験を行った。「サーモフィルム」に±2 A、±4 A の電流を流した際の温度応答値（片面）を図 5 に示す。これらの結果から、流す電流の大きさに比例して素子の表面が発熱していることが確認できる。

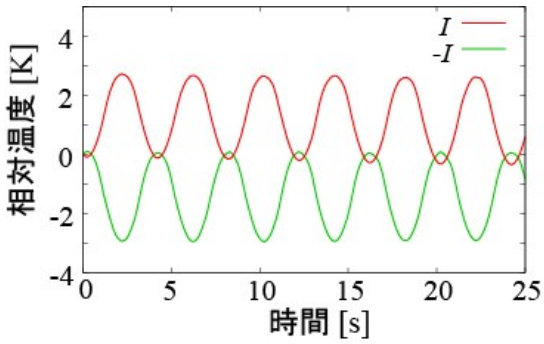
実験結果より、温熱覚呈示にあたって十分な熱電変換効果を確認することができた。一般的に用いられるペルチェ素子は固く曲げることができず、力覚や面触覚と統合したインタフェースへの応用に限界があり、また温度分布の再現も困難であった。したがって、本研究により得られた研究成果は、従来からの問題を解決へと導くものであり、温熱覚呈示を実用化する上で意義深い。

システム面の研究として、変化する座標系上の制御熱コンダクタンスの多次元化に関して理論の拡張を行った。具体的には、任意の複数の点において、接触対象から流入する熱量がどれだけデバイスの温度に影響するかを表す指標である制御コンダクタンスを空間的に変化させることに成功した。

システム コントロール フェアへの展示において奨励賞を受賞し、また電気学会より電気学術振興賞論文賞を受賞するに至り、客観的に本研究の持つ学術的な新規性が評価された。



(a) ±2 A の電流を流した際の温度応答値



(b) ±4 A の電流を流した際の温度応答値

図 5　「サーモフィルム」に電流を流した際の温度応答値

(3) まとめ

本研究はデバイスとシステムの統合により、空間的な温熱覚分布を呈示するための基盤を築くことに成功した。柔軟性のある熱デバイス上で制御熱コンダクタンスの分布再現に挑戦する本研究の成果は、ハードからソフトまで包括する「ペルチェエレクトロニクス」という新しい学問分野の創成につながるものである。

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 2 件）

[1] Hidetaka Morimitsu, Seiichiro Katsura: “Sensorless Control of Heat Inflow to a Thermal Display Using a Heat Inflow Observer,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 7, pp. 4288-4297, July, 2015.
（査読有り）
DOI: 10.1109/TIE.2014.2384474

[2] Yukiko Osawa, Hidetaka Morimitsu, Seiichiro Katsura: “Control of Thermal Conductance with Detection of Single Contacting Part for Rendering Thermal Sensation,” IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 5, No. 2, pp. 101-107, March, 2016.
（査読有り）
DOI: 10.1541/ieejjia.5.101

〔学会発表〕（計 5 件）

[1] Yukiko Osawa, Seiichiro Katsura: “Temperature Control for Thermal Sensation Based on Thermal Diffusion Equation,” 2016 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE2016-SANTA CLARA, pp. 1264-1269, June 8-10, 2016.
（サンタクララ（アメリカ））

[2] Yukiko Osawa, Seiichiro Katsura: “Multiple Temperature Control with Detection of Contacting Points for Rendering Thermal Sensation,” The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON ’15-YOKOHAMA, pp. 4748-4753, November 9-12, 2015.
パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市）

[3] Yukiko Osawa, Seiichiro Katsura: “Thermal Impedance Control for Thermal Rendering Technique,” The 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON ’15-YOKOHAMA, pp. 4015-4020, November 9-12, 2015.
パシフィコ横浜（神奈川県・横浜市）

〔図書〕（計 1 件）

[1] 「フレキシブル熱電変換材料の開発と応用」，シーエムシー出版, 2017.
（分担執筆）

〔その他〕

アウトリーチ活動情報

ひらめき☆ときめきサイエンスの実施

ホームページ

慶應義塾大学 理工学部 桂研究室

http://www.katsura.sd.keio.ac.jp/

研究者情報データベース

http://k-ris.keio.ac.jp/Profiles/172/0017141/profile.html

６．研究組織

(1) 研究代表者

桂　誠一郎（KATSURA, Seiichiro）

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：００４０１７７９

(2) 研究協力者

藤井　直孝（FUJII, Naotaka）

大澤　友紀子（OSAWA, Yukiko）

井上　裕貴（INOUE, Yuuki）