

氏 名	お だ ゆたか 小 田 豊
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2513 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 機 械 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Characteristics of Thermoelectric Power Generation with Rectangular -Fin Elements and Its Applicability in Micro Systems (矩形フィン形熱電素子による熱電発電の諸特性とマイクロシステムへの適 用性)
論文調査委員	(主 査) 教 授 吉 田 英 生 教 授 牧 野 俊 郎 教 授 小 森 悟

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、作動ガスとの熱伝達を利用して発電する熱電素子を対象とし、その最も基本的な形状である矩形フィン形素子の発電特性とそのマイクロシステムへの適用性を、申請者が独自に考案したマイクロ熱電モジュールの構造に基づいて、理論・数値解析の両面から検討した結果をまとめたものであり、6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の目的及びその必要性について述べるとともに、以下の各章で取り扱う内容を要約している。

第2章では、熱電素子の解析方法について述べたのち、従来型素子をスケールダウンしてマイクロシステムに適用した場合には、素子の短小化や熱伝達の低下によって素子接点間の温度差が減少して熱起電力の低下を招き、出力密度やエネルギー変換効率が著しく低下することを明らかにしている。また、この問題を克服するために、矩形フィン形素子を単位要素とした独自の構造を有するマイクロ熱電モジュールを提案している。

第3章では、提案したモジュールの単位要素である矩形フィン形素子について、その発電特性に関わる最重要支配因子を明らかにするため、第一次近似としての一次元モデルを導入して理論解析を行っている。その際、出力密度とエネルギー変換効率に関する理論式を導出して両者の支配因子を明らかにしている。また、出力密度とエネルギー変換効率を最大とする最適な素子アスペクト比が存在することなど、素子の出力特性やエネルギー変換効率を最適化する上で重要な知見を得ている。さらに、素子寸法が発電性能に与える影響を検討した結果、従来型素子では接点間温度差の低下が問題となり易い微小寸法域においても、矩形フィン形素子では各部寸法比を保ちつつ小形化することで、エネルギー変換効率の低下を伴わずに出力密度の増加が達成できることを示し、フィン形素子が特にマイクロシステムへの適用性に優れることを明らかにしている。

第4章では、3章で取り扱った矩形フィン形素子について、より高次の支配因子を考慮した詳細な発電特性の解析と形状最適化を行うため、素子間流路を流れる作動ガスやベルチェ吸・発熱が生じる電極部分を含む二次元詳細モデルを対象として、素子内の温度場と電位場、並びに作動流体の速度場と温度場を同時に解く熱・電気連成解析を行っている。その結果、先の一次元理論解析では予測困難な高素子アスペクト比での熱コンダクタンスの低下が、熱電発電においては熱起電力の上昇と入力熱量の低下につながり、エネルギー変換効率を増加させることを明らかにしている。また、素子の発生電力が作動ガスを駆動するポンプ動力を上回るとともに、小形化しても作動ガスの流量を調節することでその状態を維持できることを示している。さらに、電極位置の最適化によって、作動ガスのポンプ動力に殆ど影響を与えることなく、出力密度とエネルギー変換効率の増加が同時に達成可能であることを明らかにしている。

第5章では、解析対象を単位構造（矩形フィン形素子）からガス流方向も含めたシステム全体へと拡張、再熱循環を利用する熱電発電システムに矩形フィン形素子を応用したマイクロ熱電発電システムの総合性能を解析している。その際、矩形フィン形素子の配列を異方性のある多孔質体として近似することによって、素子高さ方向については二次元解析に近い精度で性能予測が可能な多孔質近似モデルを開発・導入し、計算負荷の小さな擬似三次元解析を可能としている。特に、熱収支

による出力密度やエネルギー変換効率の算出に重要となる流体セパレータ近傍での素子・セパレータ・作動ガス間の熱移動モデルの構築に際しては、実験結果との比較が可能な系に適用して妥当性の検証を行っている。これらの結果、矩形フィン形素子を適用した再熱循環式のマイクロ熱電発電システムでは、目標とした3%を超える熱効率が期待できること、並びに小形化によってエネルギー変換効率の大幅な低下を伴うことなく、出力密度を増加できることを明らかにしている。

第6章は結論であり、本研究を通して得られた知見を総括し、本研究の今後の進展と将来の研究課題について言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、作動ガスとの熱伝達を利用して発電する熱電素子を対象とし、その最も基本的な形状である矩形フィン形素子の発電特性とそのマイクロシステムへの適用性を、申請者が独自に考案したマイクロ熱電モジュールの構造に基づいて、理論・数値解析の両面から検討したものであり、主な成果は以下の通りである。

1. 第一次近似としての一次元モデルを提案して出力密度とエネルギー変換効率に関する理論式を導出し、両者の支配因子を明らかにした。その結果、従来型素子では温度差減少による性能低下が顕著な微小寸法域においても、矩形フィン形素子では各部寸法比を保ちつつ小形化することでエネルギー変換効率の低下を伴わずに出力密度の増加を達成し得ることを示し、本素子が特にマイクロシステムへの適用性に優れることを明らかにした。
2. より高次の支配因子を検討するため、二次元詳細モデルを対象として熱・電気連成解析を行った。その結果、先の一次元理論解析では予測困難な高素子アスペクト比における熱コンダクタンスの低下が、熱起電力の増加と入力熱量の減少につながり、エネルギー変換効率を増加させることを明らかにした。また、微小寸法域においても作動ガスの流量を調節することで、ガスのポンプ動力を上回る電力が得られることを示した。
3. システム総合性能の評価に不可欠な三次元解析を効率的に行うため、ガス流方向に垂直な断面内の現象を高い精度で評価できる多孔質近似モデルを開発した。また、これを用いて再熱循環式の矩形フィン型マイクロ熱電発電システムの擬似三次元解析を行い、同システムでは目標とした3%を超えるエネルギー変換効率が期待できること、並びに小形化によって高出力密度化が可能なことを示した。

以上、本論文は、矩形フィン形熱電素子による熱電発電の諸特性、並びにマイクロシステムへの適用性を検討したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成17年2月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。