

平成 23 年 4 月 1 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760138

研究課題名 (和文) 熱輸送デバイスによる固体高分子形燃料電池の高性能化

研究課題名 (英文) Improvement of Polymer Electrolyte Fuel Cell by Heat Transport Device

研究代表者

小糸 康志 (KOITO YASUSHI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号：70347003

研究成果の概要 (和文)：固体高分子形燃料電池(PEFC)の熱管理を目的とし、その効果を確認した上で、平板状薄型ヒートパイプと蒸気圧駆動型ヒートパイプに関する研究を実施した。いずれのヒートパイプについてもプロトタイプを設計・製作し、基礎実験を実施して、熱輸送特性を明らかにした。平板状薄型ヒートパイプにより温度分布を低減させ、蒸気圧駆動型ヒートパイプにより温度制御を行うことで、PEFC スタックの高性能化を図ることができると考えられる。

研究成果の概要 (英文)：Investigations are carried out on a flat-plate type heat pipe and a vapor-pressure-driven heat pipe for thermal management of a polymer electrolyte fuel cell (PEFC). Prototypes of these heat pipes are fabricated, and their heat transport characteristics are disclosed by fundamental experiments. It is expected that PEFC could be improved by spreading the heat with the flat-plate type heat pipe and controlling the temperature with the vapor-pressure-driven heat pipe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：燃料電池，熱輸送デバイス，ヒートパイプ，熱サイフォン，伝熱促進，熱拡散板
温度制御，蒸気圧駆動

1. 研究開始当初の背景

ヒートパイプは、熱輸送デバイスの代表例であり、作動液が封入された管である。受熱部と放熱部、その間の断熱部に分けることができ、ヒートパイプの管内壁にはウイックと呼ばれる毛細管構造が設けられている。受熱部で熱を受けると作動液が蒸発し、蒸気は放熱部へと流れて凝縮・放熱する。凝縮液は、ウイックの毛細管力によって受熱部へと還

流し、熱輸送が継続する機構となっている。ヒートパイプは外部動力を要しないパッシブ型の熱輸送デバイスであり、作動液の蒸発・凝縮潜熱を利用するため、多量の熱を小さな温度差で輸送することができる。最近では、発熱量ならびに発熱密度が増大しているパソコンやサーバー等のCPU(Central Processing Unit)の冷却促進に、ヒートパイプを実用する動きが目立っている。

一方、地球環境問題やエネルギー問題が叫ばれる中、新しいエネルギー変換手段として、固体高分子形燃料電池(Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC)が注目されており、電気化学、高分子化学、触媒化学、流体力学、熱工学などの諸分野において、研究開発競争が展開されている。PEFCは、自動車用動力源や携帯用・家庭用電源として期待されているが、その使用に当たっては、発電とともに生じる熱の処理、すなわち、適切な温度管理が必要とされている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が開発した平板状薄型ヒートパイプと蒸気圧駆動型ヒートパイプを発展させ、外部動力を要しない熱処理によって、PEFCの高性能化を図ることである。

3. 研究の方法

(1) まず、PEFC内部の伝熱特性を調べ、熱処理の効果について検討を行った。ここではPEFCのセルとスタックを対象とし、セルについては実験により、スタックについては数値解析により検討を行った。

実験では、図1に示したJARI(日本自動車研究所)標準セルを使用した。MEA(電極面積:25cm²)をカーボンセパレーターで挟み、燃料と酸化剤を供給して、集電板で電子を取り出す構造となっている。実験装置を図2に示した。実験では、燃料に水素を、酸化剤に空気を使用し、所定の温度・湿度まで加温・加湿した後、標準セルに供給した。このとき、電子負荷装置によりI-V特性を、熱電対により温度分布を測定し、各データはパソコン内に記録した。なお、PEFCセルの温度測定位置は図3に示した通りである。

数値解析では、図4に示したようにPEFCセルの数値モデルを構築し、定常解析を行った。数値モデルはMEA region, その両側のAnode gas-flow region, Cathode gas-flow region, さらにこれらを挟むSeparator regionから構成されており、MEA regionには一次元のエネルギー収支式を、Anode gas-flow regionとCathode gas-flow regionには一次元の連続の式、運動方程式、エネルギー収支式、物質収支式を、Separator regionには二次元のエネルギー収支式を与えた。なお、MEA regionのエネルギー収支式には発電に伴う発熱項が含まれる。ここでは事前に実験を実施して発熱項の実験式を導き、支配方程式と連立させた。支配方程式は、コントロール・ボリューム法を用いて離散化し、境界条件のもと、数値解析結果を得た。また、セルについての数値解析を終えた後、図4のセルをy方向に重ね合わせたスタックについても、定常解析を行った。



図1 PEFCの標準セル

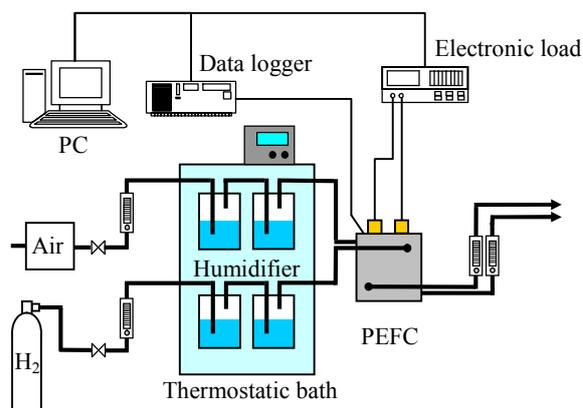


図2 PEFCセルの実験装置

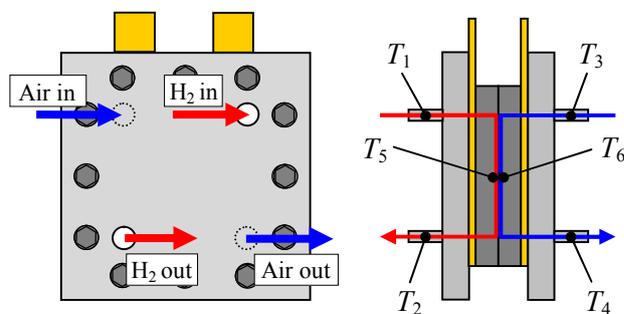


図3 PEFCセルの温度測定位置

実験結果および数値解析結果を踏まえ、以下の(2)、(3)でそれぞれ、平板状薄型ヒートパイプ、蒸気圧駆動型ヒートパイプに関する研究を実施した。

(2) 等温化を目的とする平板状薄型ヒートパイプに関する研究を実施した。ここでは、図5に示したヒートパイプを設計・製作した。2枚の金属平板とスペーサーで容器を構成し、内部には焼結体のウイックシートと補強のためのコラムを設け、作動液が封入されたも

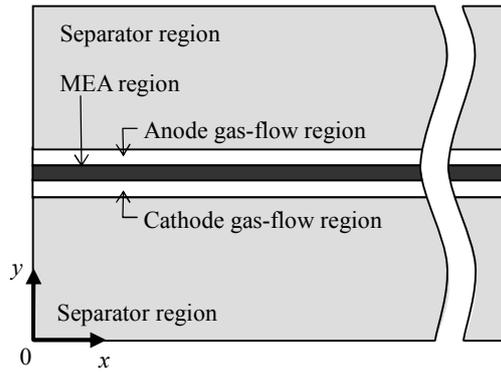


図4 PEMFCセルの解析モデル

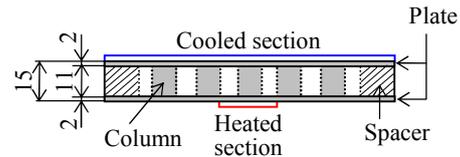
のである。ヒートパイプの製作後、熱輸送特性に関する基本的な実験を実施した。すなわち、PEFCのホットスポットを模擬した小型のヒーターとヒートシンクの間には平板状薄型ヒートパイプを設置し、加熱・冷却を行って、加熱面の温度 T_{hs} 、ヒートパイプ内の蒸気空間温度 T_v 、冷却面の温度分布 $T_{cs,1} \sim T_{cs,9}$ を熱電対により測定した。なお、ヒートシンクは空冷方式、冷却面の温度測定位置は図5に併記した通りである。

(3) 温度制御を目的とする蒸気圧駆動型ヒートパイプに関する研究を実施した。ここでは、図6に示したヒートパイプを設計・製作した。受熱部と放熱部、貯槽、バルブ、逆止弁および配管系から構成されており、内部には作動液が封入されている。ヒートパイプの製作後、熱輸送特性に関する基本的な実験を実施した。まず、バルブ1とバルブ2を閉じた状態で、受熱部をヒーター加熱し、放熱部を恒温槽と冷却コイルで冷却した。受熱部では作動液が蒸発し、蒸気は放熱部へと流れて凝縮・放熱する。また、凝縮液は蒸気圧により貯槽へと押し入れ、貯液される。次に、受熱部の作動液が少なくなると、バルブ1とバルブ2を同時に開いた。すると、受熱部と貯槽の圧力が等しくなるため、ヘッド差により、貯槽の作動液が受熱部へと還流する。還流終了後、バルブ1とバルブ2を同時に閉じ、以上の手順を繰り返した。なお、温度制御を目的としてバルブ3を設置しており、実験ではその開閉量を変化させ、受熱部内温度 T_h 、放熱部内温度 T_c 、貯槽内温度 T_r を熱電対により、受熱部内圧力 P_h 、放熱部内圧力 P_c 、貯槽内圧力 P_r を圧力変換器により測定した。

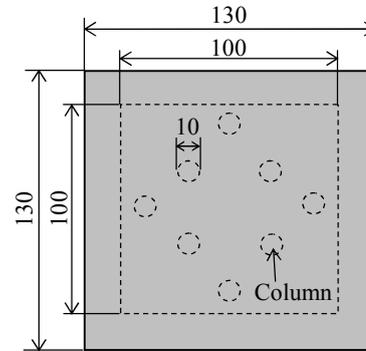
(4) 本研究を総括した。

4. 研究成果

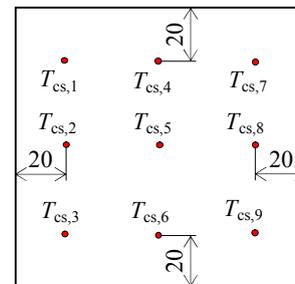
(1) PEMFCセルのI-V特性を図7に示した。水素流量 $V_{H_2} = 200 \text{ mL/min}$ 、空気流量 $V_{Air} = 800 \text{ mL/min}$ と設定し、セパレーターの温度 (T_5 と



(a) Side view



(b) Top view



(c) Measuring points at cooled section

図5 平板状薄型ヒートパイプ

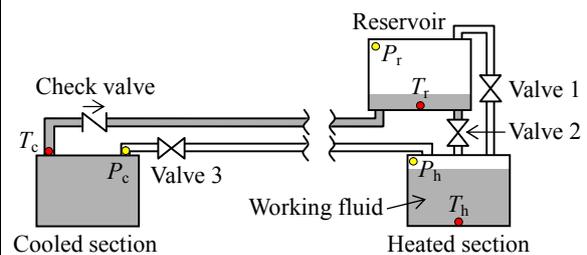


図6 蒸気圧駆動型ヒートパイプ

T_6 の算術平均値) を 70, 80, 90 °C に変化させたときの実験結果である。ここでは、温度設定を正確に行うために、PEFC にラバーヒーターを取り付けて温度制御を行った。図7から明らかなように、I-V 特性は温度に依存しており、PEFC の温度管理の重要性を確認することができる。

PEFC セル内の温度分布に関する実験結果を図8に示した。水素流量 $V_{H_2} = 200$ mL/min, 空気流量 $V_{Air} = 800$ mL/min と設定したときの実験結果であり, 横軸は図3に示した温度測定位置である。ここでは, ラバーヒーターを使用せず, PEFC の周囲に断熱材を施して温度管理を行った。実験結果から, 自己発熱を利用して PEFC の温度を高めることができること, そのときに多少の温度分布が生じることを確認した。

PEFC セル内とスタック内の温度分布に関する数値解析結果を図9に示した。スタックについてはセルを3枚重ね合わせたものを解析対象としており, いずれも水素流量 $V_{H_2} = 200$ mL/min, 空気流量 $V_{Air} = 800$ mL/min とし, y 方向に拡大して示した。なお図中の破線は, 各 region の境界を表す。また図8に, セルについての数値解析結果を加えた。数値解析では, PEFC への水素と空気の流入温度を境界条件として与えているため, T_1 と T_3 の実験結果と数値解析結果は一致するが, $T_2, T_4 \sim T_6$ についても実験結果と数値解析結果の対応がとれており, 本数値解析の妥当性を確認することができる。図9から, セル同士を重ねてスタック化すると温度分布が激しくなり, 局所的に温度が高いホットスポットが顕著になることがわかる。本数値解析では, 温度上昇に起因する MEA の性能劣化を考慮に入れていないため, スタック内の最高温度は 145.4 °C まで上昇するが, 実用時には熱処理が必要である。

ここで, 数値解析結果から PEFC セルの発熱量を求めると 2.83 W となる。すなわち, セル数十枚のスタックには数十 W の熱輸送が, セル数百枚のスタックには数百 W の熱輸送が要求される。以下の(2)では, スタック(セル数十枚)のホットスポットを対象とし, 等温化を目的とする平板状薄型ヒートパイプに関する研究を実施した。また, (3)ではスタック(セル:数百枚)を対象とし, その自己発熱を利用して温度制御を行う蒸気圧駆動型ヒートパイプに関する研究を実施した。なお, ヒートパイプは外部動力を要しない熱輸送デバイスであり, 温度管理の効果は図7から明らかである。

(2) 平板状薄型ヒートパイプによる等温化に関する実験結果を図10に示した。加熱量 $Q = 18, 30, 42$ W のときの実験結果を示しており, 横軸は図5に示した温度測定位置, 縦軸は冷却空気との温度差である。 Q の増加とともに, 全体的に温度差は大きくなるが, 冷却面での温度差はほぼ等しくなっており, 平板状薄型ヒートパイプにより熱が拡散され, 等温化されていることが確認できる。また, 加熱面での温度差が比較的大きくなっており, 熱抵抗が大きいといえるが, これは気泡核を供給するなどして作動液の蒸発促進を図る

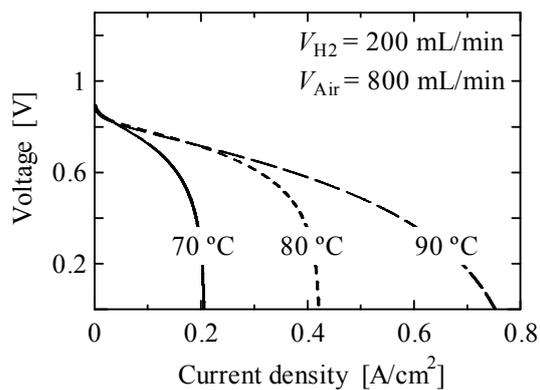


図7 PEFCセルの発電特性(実験結果)

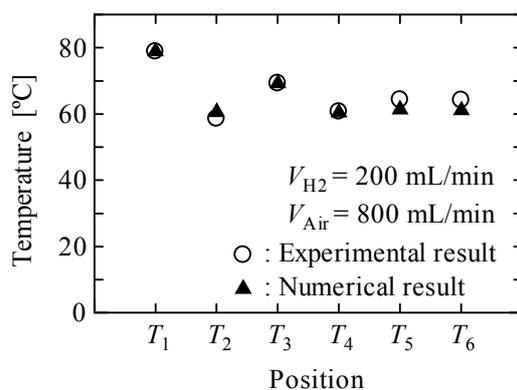


図8 PEFCセル内の温度分布(実験結果)

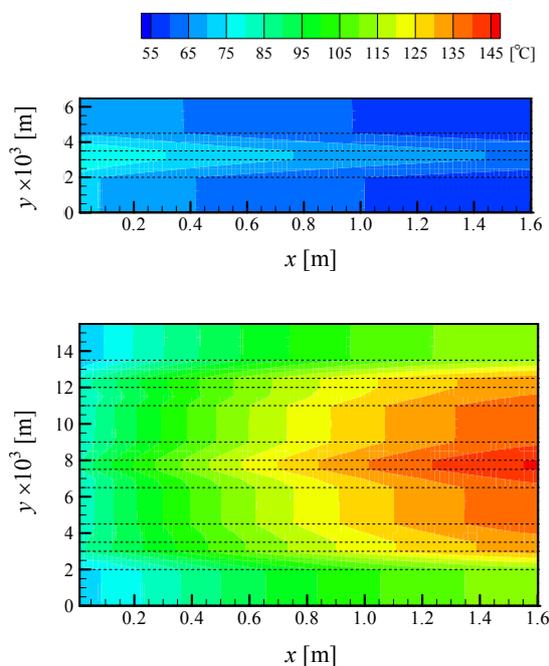


図9 PEFCセル(上段)とスタック(下段)内の温度分布(数値解析結果)

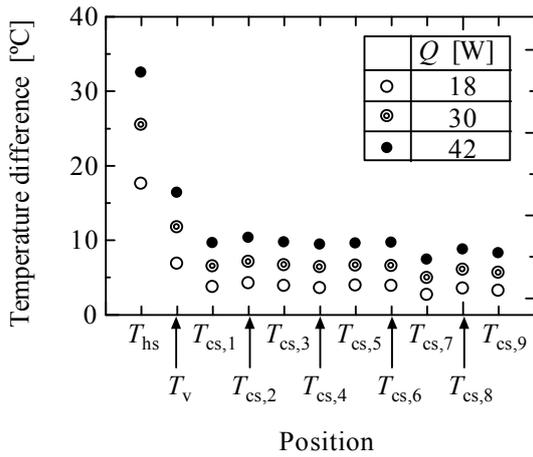


図 10 平板状薄型ヒートパイプ内の温度分布

ことにより、容易に低減できるものと考えられる。

以上より、平板状薄型ヒートパイプを組み込むことによって、スタックの等温化を図ることができるといえる。なお、金属板を組み込んでも等温化を図ることができるが、平板状薄型ヒートパイプは内部が蒸気相であるため軽く、同寸法の金属板と比較して、重量が半分以下である。

(3) 蒸気圧駆動型ヒートパイプ内の温度および圧力の経時変化に関する実験結果を図 11 に示した。バルブ 3 を全開し、加熱量 $Q_{in} = 500 \text{ W}$ と設定したときの実験結果であり、放熱部内温度 $T_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ に保たれている。また、図中にはバルブ 1 およびバルブ 2 が開いている時間を矢印で併記した。実験結果より、温度および圧力の周期的な変化とともに本ヒートパイプが連続的に作動すること、バルブ 1 とバルブ 2 が閉じているときの温度および圧力の経時変化は緩やかで潜熱利用の効果が現れていることが確認できる。

バルブ 3 を絞ったときの、温度および圧力の経時変化に関する実験結果を図 12 に示した。本実験では、バルブ 1 とバルブ 2 が閉じているときの圧力差 $\Delta P = P_h - P_c$ によりバルブ 3 の開閉量を定量化しており、ここでは $\Delta P = 10 \text{ kPa}$ である。実験結果より、受熱部と放熱部の温度差ならびに熱抵抗は、この間に設けたバルブによって簡単に制御できることを確認した。

加熱量と冷却量の割合 η を次式で表し、 η に関する実験結果を図 13 に示した。

$$\eta = \frac{mc \int_{t_{\text{cycle}}} (T_{\text{HEX,out}} - T_{\text{HEX,in}}) dt}{\int_{t_{\text{cycle}}} Q_{\text{in}} dt} \quad (1)$$

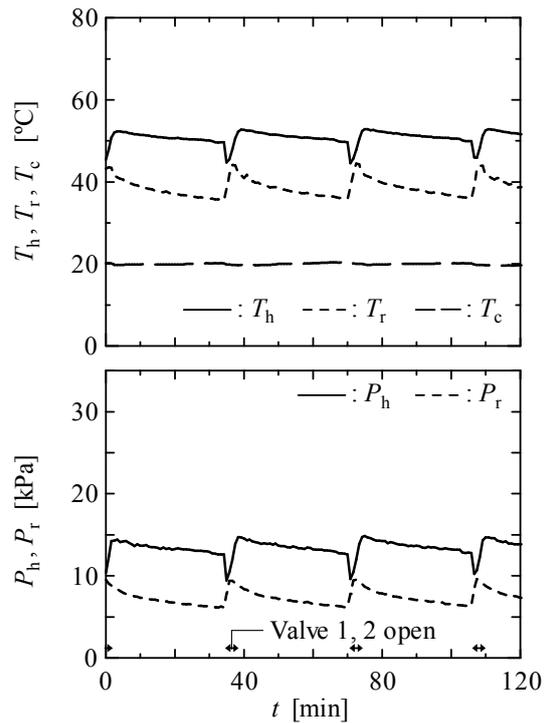


図 11 蒸気圧駆動型ヒートパイプの作動特性 (温度制御なし)

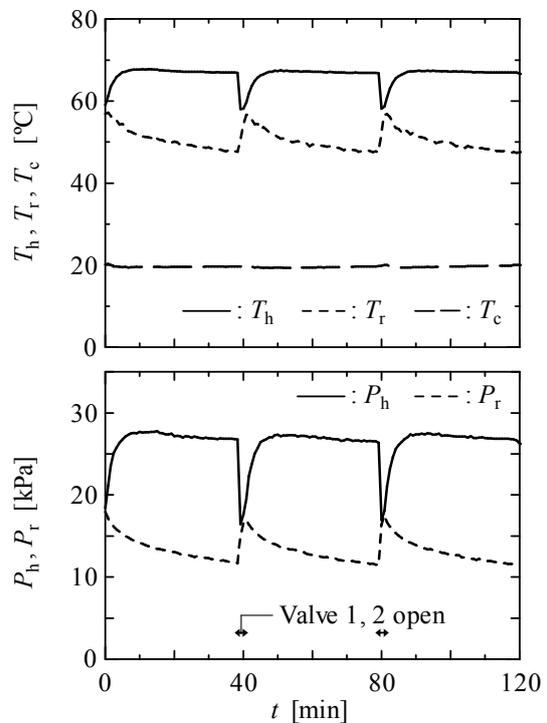


図 12 蒸気圧駆動型ヒートパイプの作動特性 (温度制御あり)

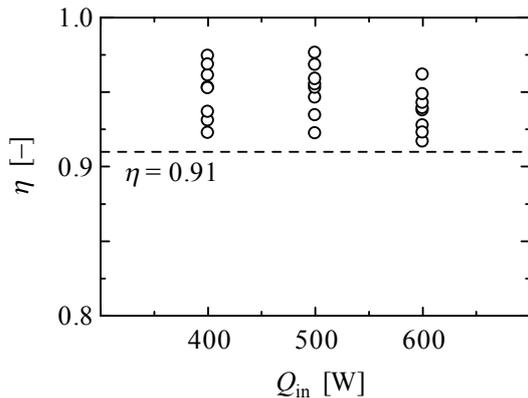


図 13 蒸気圧駆動型ヒートパイプにおける加熱量と冷却量の関係

ここで、 m と c は冷却コイル内を流れる冷媒の質量流量と比熱、 $T_{\text{HEX},\text{in}}$ と $T_{\text{HEX},\text{out}}$ は冷媒の冷却コイル流入温度と流出温度である。また t_{cycle} は本ヒートパイプの作動周期である。図 13 より、実験結果はいずれも $\eta > 0.91$ の範囲にあり、本ヒートパイプが問題無く作動し、受熱部から放熱部へと熱を輸送していることが確認できる。

以上より、自己発熱を利用して温度を高め、蒸気圧駆動型ヒートパイプを利用して除熱を行うことで、PEFC スタックの温度を制御できるといえる。

(4) 以上の結果から、平板状薄型ヒートパイプにより温度分布を低減させ、蒸気圧駆動型ヒートパイプにより温度制御を行うことで、PEFC スタックの高性能化を図ることができると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yasushi Koito, Yoshitake Ikemizu, Shuichi Torii, Toshio Tomimura, Masataka Mochizuki, Heat Transport Utilizing Vapor Pressure of Working Fluid, Proceedings of the 15th International Heat Pipe Conference, 査読有 (印刷中)
- ② Yasushi Koito, Yoshitake Ikemizu, Toshio Tomimura, Masataka Mochizuki, A Vapor-pressure-driven Heat Pipe for Sideward Long-distance Heat Transport, Frontiers in Heat Pipes, 査読有, Vol. 1, No. 1, 2010

[学会発表] (計 3 件)

- ① 小糸康志, 蒸気圧を利用した長距離熱輸送に関する研究, 日本機械学会熱工学コ

ンファレンス 2010, 2010 年 10 月 30 日, 長岡技術科学大学

- ② 小糸康志, 平板型熱サイフオンの熱輸送特性に関する実験的研究, 日本機械学会 2010 年度年次大会, 2010 年 9 月 8 日, 名古屋工業大学
- ③ 小糸康志, 平板型熱サイフオンの作動特性, 第 38 回可視化情報シンポジウム, 2010 年 7 月 20 日, 工学院大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小糸 康志 (KOITO YASUSHI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 70347003

(2) 研究分担者

無

(3) 連携研究者

無

(4) 研究協力者

池水 敬勇 (IKEMIZU YOSHITAKE)

熊本大学・大学院自然科学研究科・学生

栗原 豊明 (KURIHARA TOYOAKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・学生

財前 智章 (ZAIZEN TOMOAKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・学生

志岐 有太 (SHIKI YUTA)

熊本大学・大学院自然科学研究科・学生