

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 10 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560199

研究課題名（和文）薄膜蒸発現象による省エネ型の高性能伝熱・熱輸送技術の研究

研究課題名（英文）STUDY ON HIGH PERFORMANCE HEAT TRANSFER AND HEAT TRANSPORT WITH LESS ENERGY USING THIN FILM EVAPORATION HEAT TRANSFER PHENOMENA

研究代表者

平澤 茂樹 (HIRASAWA SHIGEKI)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：70403300

研究成果の概要（和文）：加熱面上の薄膜蒸発伝熱現象を解明し蒸発伝熱特性を増大することを目的とする。基礎研究では、多層メッシュ付き面や交差溝付き面などの新型構造についてマイクロ構造や寸法を適正化し、泡による薄い液膜供給のモデル蒸発伝熱実験を行なった。応用技術開発では、電子機器冷却と太陽熱コレクター集熱について検討した。その結果、高い蒸発熱伝達率を得られる適正な伝熱面構造条件と液供給条件を見出した。

研究成果の概要（英文）：We studied to clarify thin-film evaporation heat transfer phenomena and to increase evaporation heat transfer performance. In basic research, we devised and optimized the new-type surface geometry of the multilayer-meshed surface and the cross-grooved surface. We measured evaporation heat transfer performance of the surfaces supplied with thin liquid film by bubbles. In application study, we studied the electronics cooling and the solar collector. As the results, we found the optimum conditions to increase the evaporation heat transfer performance.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：伝熱機器，蒸発伝熱

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 高発熱電子機器の冷却に、ファンによる空気冷却やヒートパイプによる熱輸送冷却などが実用されている。その中でヒートパイプは駆動動力が不要であり、熱輸送特性について多数の研究がなされている。ヒートパイプの使用において、ヒートパイプ内の蒸発伝熱面で液供給量を多くし液膜を厚くするとプール沸騰の伝熱現象になり伝熱特性は低くなる。また、ヒートパイプ内の蒸発伝熱面で液膜を薄くすると蒸発伝熱特性が大きく

なるが、一方で薄い液膜のために蒸発伝熱面全体への液供給量が不足して乾き面が生じてしまい伝熱特性は低くなるという相反する現象があり、その問題解決が望まれていた。このような液供給に関連した薄膜蒸発伝熱特性の向上が本研究の課題である。薄膜蒸発伝熱は分子レベルでの相変化現象と液膜流動現象の複合現象であり、まだ完全にはメカニズムが解明されていない。また、毛細管作用を利用した液供給方式では多孔質内部の液流動抵抗がシステム全体の熱輸送特性の

限界を決めており、液供給に関連して限界熱流束の増大が課題である。

(2) 太陽熱コレクター装置は、新エネルギー利用技術として、現在は家庭でのお風呂用の温水生成(集熱温度 40℃)に普及しているが、その集熱温度を高温化することや集熱効率向上が課題である。太陽熱コレクター装置の場合は、高発熱電子機器の冷却の場合と異なり、面積当たりの伝熱量が小さく、大面積の伝熱面となる。蒸発伝熱は相変化による熱輸送であり集熱温度の高温化や集熱効率向上が可能であるが、大面積への薄い液膜供給技術の開発が課題である。

## 2. 研究の目的

(1) 加熱面上の液膜蒸発現象に関して、蒸発伝熱特性と限界熱流束に及ぼす蒸発面構造や液供給条件の影響を検討して、薄膜蒸発伝熱現象の基礎的なメカニズムを解明し、蒸発面構造や液供給条件の最適化による蒸発伝熱特性の増大と限界熱流束の増大を実現すること。

(2) 研究成果を高発熱電子機器の冷却システムと太陽熱コレクター装置(集熱温度 90℃)に応用して、作動動力低減の省エネ型で、熱輸送特性や集熱効率の増大を実現すること。

## 3. 研究の方法

基礎研究と応用技術開発を平行して行った。

### (1) 基礎研究

モデル蒸発実験装置を製作し、薄膜蒸発伝熱特性に及ぼす液供給条件や蒸発面構造の影響について検討し、蒸発伝熱特性の増大のための基礎データを取得し、蒸発伝熱特性の増大と限界熱流束の増大に最適な薄膜蒸発伝熱技術を検討する。

### (2) 応用技術開発

薄膜蒸発伝熱を使った電子機器冷却システムや太陽熱コレクター装置のモデル実験装置を製作し、集熱温度 90℃にて、作動動力低減の省エネ型で、熱輸送特性や集熱効率の増大を検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 概要

① 基礎研究では、多層メッシュ付き面や交差溝付き面などの新型構造を考案し、それらのマイクロ構造や寸法を適正化した。薄い液膜供給方式として、泡による薄い液膜供給を使ったモデル蒸発伝熱実験の結果、適正な交差溝の寸法や構造を用いることにより蒸発熱伝達率を平滑面の約 8 倍に高くできる結果を得た。

② 応用技術開発では、電子機器冷却と太陽熱コレクター集熱について検討した。その結

果、実用条件でも基礎研究と同程度に高い蒸発熱伝達率を得られるという結果を得た。

### (2) モデル蒸発伝熱実験装置

図 1 に基礎研究に用いたモデル蒸発実験装置の外観写真を示す。図 2 に試験部の模式図を示す。ガラス窓のある密閉容器(直径 200 mm)の内部の半分ぐらい作動流体の水を入れ飽和温度  $T_{\text{sat}}=100^{\circ}\text{C}$  の飽和状態にする。蒸発伝熱面は銅製の直方体ブロック(長さ 30 mm)の下端面(20 mm×20 mm の正方形)に形成し、銅ブロックの上端面にセラミックヒータを接触させて加熱する。セラミックヒータの加熱量を変化させて測定する。伝熱面以外の銅ブロック周囲はベークライトで断熱する。定常状態の銅ブロックの温度勾配を測定して伝熱面の表面温度  $T_w$  及び熱流束  $q$  を求める。伝熱面は下向きにして液面から 10~22 mm の上方の位置に設置する。伝熱面直下の液中に泡発生用のヒータが設けてあり、発生した泡を円錐状の板で集めて先端の円筒部から、大きな泡を発生させて液膜供給を行う。泡発生用ヒータ発熱量や、伝熱面と液面との距離を変化させて伝熱面への液膜の供給量  $F$  を変化させた。

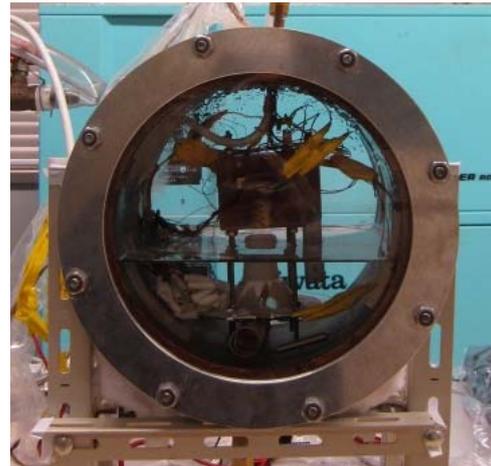


図 1 モデル蒸発伝熱実験

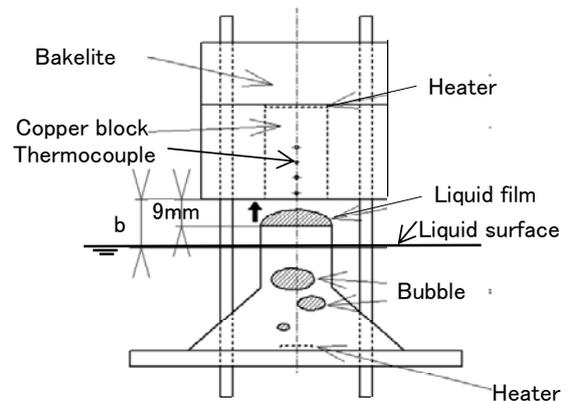


図 2 試験部の模式図

### (3) 蒸発伝熱面サンプル

基礎研究の蒸発伝熱面サンプルは、①交差溝付き面、②メッシュ板を積層した多孔構造面、③平滑面、を用いた。

① 交差溝付き面伝熱とは、伝熱面表面に2方向から直行するように複数の溝を刻んだものである。一方向の溝は液膜を広げる作用で他方向は薄い液膜をつくり高い蒸発伝熱を得る目的であり、交差する溝の深さを異なるようにした。ミクロな溝構造を変えるために、溝加工はメタルソー（角部を鋭角に加工できる）とワイヤー放電加工機（角部が丸く加工される）の2種類で行った。溝の深さや幅を0.2~1.0mmの範囲で変えた7種類の交差溝付き面のサンプルを用いて実験する。図3に交差溝付き面の1例の外観写真を示す（Groove-0.5-1.0と呼び、交差溝深さを0.5mmと1.0mm、溝幅0.5mm、角部を鋭角に加工したもの）。図3の上面が伝熱面であり、実験ではそれを下向きに設定する。

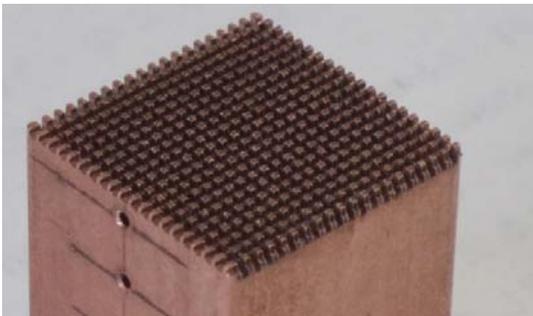


図3 交差溝付き面 (Groove-0.5-1.0)

② メッシュ板を積層した多孔構造伝熱面に用いる。各層のメッシュ板とは、厚さ0.5mmの銅板の両面に互いに直交するように溝加工（幅0.3mm、深さ0.3mm）した銅製の板で、表の溝と裏の溝の交差部に、一辺0.3mmの正方形の穴が開いている網状のものである。メッシュ板の積層枚数が1, 2, 4枚の3種類を用いて実験した。メッシュ板1層の多孔構造伝熱面（Mesh-1と呼ぶ）の外観写真を図4に示す。

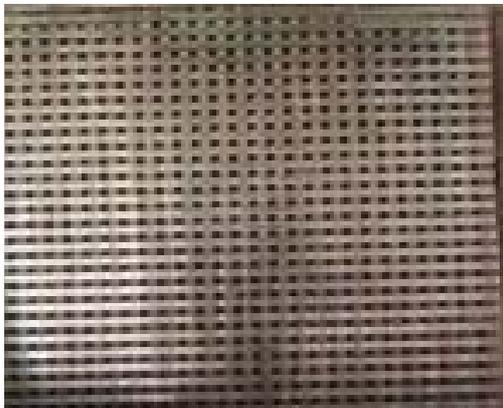


図4 メッシュ板1層の多孔構造伝熱面

### (4) 基礎研究の蒸発伝熱特性の実験結果

各種構造の伝熱面について液供給量 $F$ を変化させて蒸発伝熱特性を測定した。図5にメッシュ板1層の多孔構造伝熱面（Mesh-1）についての蒸発伝熱特性の表面温度差 $\Delta T_{\text{sat}} (=T_w - T_{\text{sat}})$ と熱流束 $q$ との関係の実験結果を示す。この場合には、液供給量が比較的小さい条件で蒸発伝熱特性が大きくなる。各種構造の実験結果を比較すると、蒸発伝熱面サンプルの構造ごとに最適な液供給量が異なる。図5に示した薄膜蒸発伝熱特性はプール沸騰伝熱特性（破線、本実験装置で伝熱面サンプルを液中に入れて測定した）の約5倍である。

図6と図7に、交差溝付き面とメッシュ付き面の蒸発伝熱特性を示す。すべての伝熱面について、それぞれ最大の熱伝達率となる液供給条件 $F$ での表面温度差 $\Delta T_{\text{sat}}$ と熱流束 $q$ との関係である。従来文献にある各種多孔質層表面での水のプール沸騰伝熱特性の上限値も赤色の破線の枠で示す。従来文献にある平滑面での水のプール沸騰伝熱特性の上限値も青色の破線の枠で示す。図6にGroove-0.5-1.0（交差溝深さを0.5mmと1.0mm、溝幅0.5mm、角部を鋭角に加工したもの）と示した交差溝付き面が最大の蒸発熱伝達率を示し（表面温度差 $\Delta T_{\text{sat}}=1\text{K}$ にて熱流束 $q=1 \times 10^5\text{ W/m}^2$ ）、メッシュ板1層の多孔構造伝熱面（Mesh-1）の蒸発伝熱特性よりも約1.5倍大きく、平滑面の約8倍にできるという結果を得た。その蒸発伝熱特性の結果は各種多孔質層表面でのプール沸騰伝熱特性（赤色の破線の枠）の上限値より大きいことがわかる。高い蒸発伝熱特性を得るために重要な点は、伝熱面に薄い膜を形成し、かつ蒸発した量の液を速やかに供給できる構造にすることである。さらに実用を考えると製作が容易であることも必要である。それらの観点で考案し、

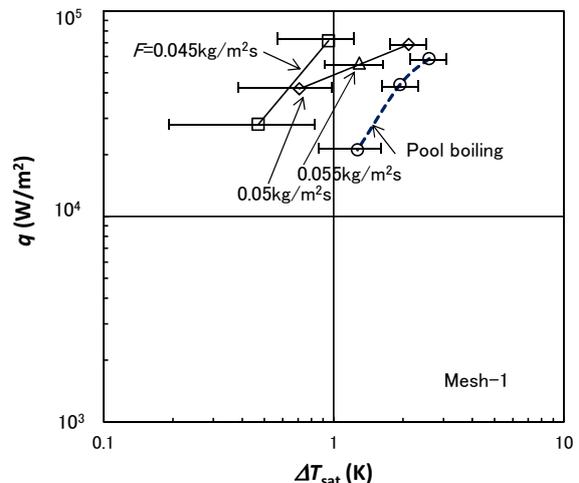


図5 蒸発伝熱特性に及ぼす液供給量の影響（メッシュ板1層の多孔構造伝熱面）

構造寸法を適正化した交差溝付き構造 Groove-0.5-1.0（交差溝深さを 0.5mm と 1.0mm, 溝幅 0.5mm, 角部を鋭角に加工したもの）は, 非常に高い蒸発熱伝達率を得られるという結果を得た.

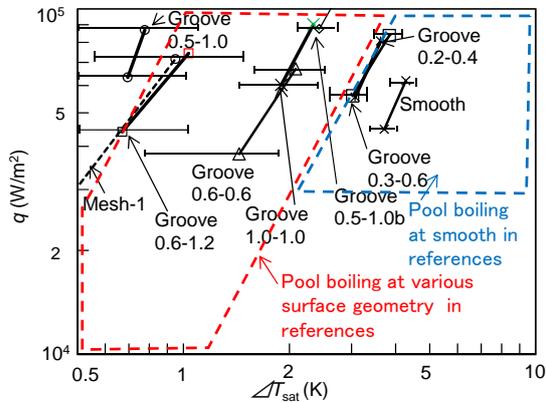


図 6 交差溝付き面の蒸発伝熱特性

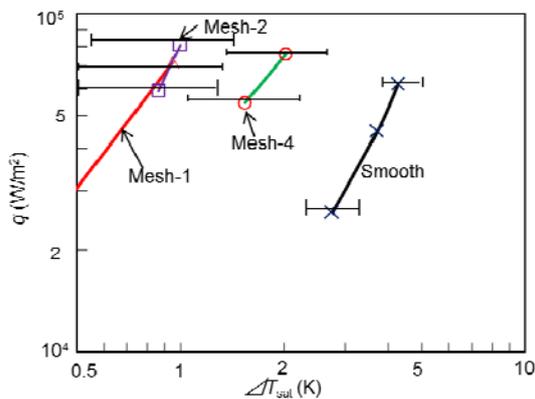
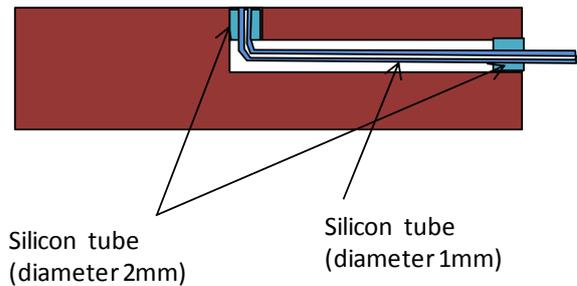


図 7 メッシュ付き面の蒸発伝熱特性

(5) 電子機器冷却への応用として, 局所的に熱流束が大きい伝熱面モデル (高熱部寸法が 100mm 角) について, 表面を交差溝付き構造とし, 伝熱面表面の濡れ性を良くし, さらに伝熱面の内部から液を染み出させて液供給する方法を検討した. 試験部の外観写真を図 8 に示す. 伝熱面の内部から液を染み出させて液供給する方法を検討した. 試験部の外観写真を図 8 に示す. 伝熱面の内部から液を染み出させて液供給する方法を検討した. 要素実験により, 伝熱面の内部で液を輸送する際に高温の伝熱面に液が触れると沸騰してしまい安定した少量の液輸送ができないことがわかったので, 入口と出口部分のみを固定する方法を考案した. 伝熱実験 (周囲条件は大気, 熱流束  $10^5 \text{ W/m}^2$ ) を行なった結果, この実用条件でも液が伝熱面全体に薄く広がり, 基礎研究のモデル蒸発伝熱実験と同程度に高い蒸発熱伝達率を実用条件でも得られるという実験結果を得た.



図 8 伝熱面の内部から液を染み出させて液供給する試験部



Silicon tube (diameter 2mm) Silicon tube (diameter 1mm)

図 9 伝熱面の内部から液を染み出させて液供給する模式図

(6) 太陽熱コレクターへの応用として, 熱流束が小さく広い伝熱面積の伝熱面モデルについて, 伝熱面 (寸法が 250mm 角) に薄い粒子層を付着させた場合の蒸発実験を行った. 試験部の外観写真を図 10 に示す. 太陽熱コレクター装置は広い伝熱面積の伝熱面であるために装置の安全強度上の観点で蒸発部の圧力は大気圧であることが望ましい. 大気圧条件にて, 蒸発伝熱面近くの周囲空間の水蒸気濃度, 粒子層の厚さ  $B$ , 熱流束  $q$  などを変化させて蒸発熱伝達率  $\alpha$  を測定した. 図 11 に蒸発伝熱面近くの水蒸気濃度を高くした場合の実験結果を示す. 粒子層厚さの熱伝導の熱コンダクタンスの計算結果も黒線で示す. 実験結果は計算結果の 2 倍程度の値となった. この差は, 実験で粒子層内の液膜の厚さが粒子層厚さより薄くなり蒸発熱伝達率が増したと思われる. さらに薄い粒子層内での液膜の流動速度の基礎データも得た. それらの検討より, 広い伝熱面積の伝熱面で蒸発部の圧力を大気圧にした場合, 粒子層厚さを薄くし, 蒸発伝熱面近くの水蒸気濃度を高くすることが高い蒸発熱伝達率を得られるという実験結果を得た.

また, 粒子多孔質内の液の流動現象および対流伝熱特性について, 数値シミュレーションを行った. 計算メッシュを図 12 に示す. 粒子と液との対流伝熱特性のヌセルト数  $Nu$  とレイノルズ数  $Re$  との関係の計算結果を図 13 に示す. それらの検討より, 流れ場の中に最密充填構造に近い状態で球状物体が多数並んだ場合の対流熱伝達について, 表面の局所熱

伝達率および平均熱伝達率の設計計算式を導いた。

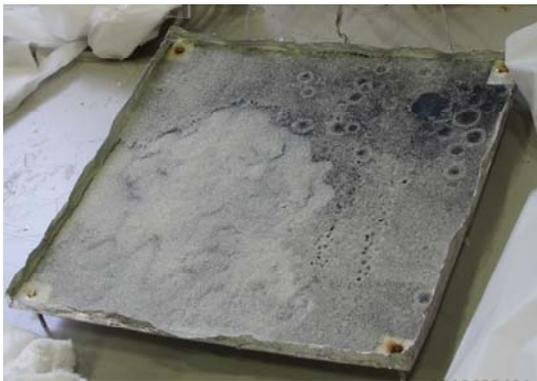


図10 薄い粒子層を付着させた蒸発伝熱面の試験部

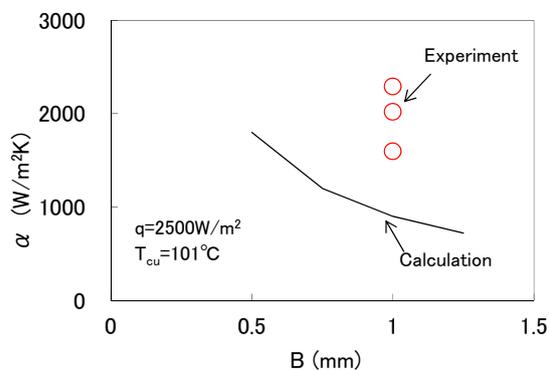


図11 粒子多孔質内の液流動の計算メッシュ



図12 粒子多孔質内の液流動の計算メッシュ

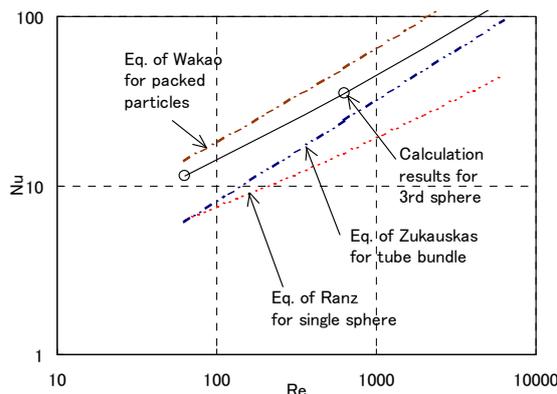


図13 粒子多孔質の対流伝熱特性

(7) まとめ

本研究では、加熱面上の薄膜蒸発伝熱現象を解明し蒸発伝熱特性を増大することを目的として、実験と解析により検討した。基礎

研究と応用技術開発を平行して行った。基礎研究では、多層メッシュ付き面や交差溝付き面などの新型構造についてマイクロ構造や寸法を適正化し、泡による薄い液膜供給のモデル蒸発伝熱実験を行なった。応用技術開発では、電子機器冷却と太陽熱コレクター集熱について検討した。その結果、高い蒸発伝達率を得られる適正な伝熱面構造条件と液供給条件を見出した。

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 7 件)

① Hirasawa, S., Nakajima, T., Urimoto, T., Kawanami, T., Shirai, K., Toyoda H., Kondo, Y., Evaporation Heat Transfer Characteristics of a Porous Surface Supplied with a Water Thin Film, International Journal of Transport Phenomena, 査読有, (掲載決定)

② Hirasawa, S., Kawanami, T., Kinoshita, T., Watanabe, T., Atarashi, T., Numerical Analysis of Forced Convection Heat Transfer around Spherical Particles Packed in Fluid Flow, Journal of Physics, Conference Series, 査読有, No. 395-012143, 2012, 1-8,

DOI:10.1088/1742-6596/395/1/012143

③ 平澤茂樹, 川南 剛, 平野 繁樹, 木下 智晴, 流れ場に充填された球状物体の強制対流熱伝達の数値解析, 神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要, 査読有, Vol. 2, 2010, pp.1-7,

DOI:10.5047/gseku.j.2010.001

④ 平澤茂樹, 川南剛, 谷口昌弘, 大河祐樹, 中内俊作, 田中忠良, 真空平板式沸騰集熱方式による 90°C 温水生成用の太陽熱コレクターの集熱特性に及ぼす運転制御の影響, 太陽エネルギー, 査読有, Vol. 36, No. 4, 2010, pp. 75-81,

<http://www.jses-solar.jp/ecsv/>

〔学会発表〕(計 24 件)

① Hirasawa, S., Kawanami, T., Shirai, K., Toyoda H., Kondo, Y., Evaporation Heat Transfer Performance of Cross-Grooved Surface Supplied with Water Thin Film, 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, 2013. 6. 16, ポルトガル, リスボン

② 竹内佑介, 平澤茂樹, 川南剛, 白井克明, 薄い粒子層が付着した伝熱面における水膜蒸発伝熱特性, 50 回日本伝熱シンポジウム, 2013. 5. 29, 仙台

③ Hirasawa, S., Urimoto, T., Kawanami, T., Toyoda H., Kondo, Y., Evaporation Heat Transfer Characteristics of Porous Surface Supplied with Water Thin Film, 23th International Symposium on Transport Phenomena, 2012.11.19, ニュージーランド, オークランド

④ Hirasawa, S., Kawanami, T., Kinoshita, T., Watanabe, T., Atarashi, T., Numerical Analysis of Forced Convection Heat Transfer around Spherical Particles Packed in Fluid Flow, 6th European Thermal Sciences Conference, 2012.9.4, フランス, ポアチエ

⑤ 平澤茂樹, 中島拓弥, 瓜本哲也, 川南剛, 豊田浩之, 近藤義広, 多孔構造面の水液膜蒸発伝熱特性, 49 回日本伝熱シンポジウム, 2012.5.30, 富山

⑥ Hirasawa, S., Kawanami, T., Okawa, Y., Shirai, A., Effect of Operation-Control Methods on Collector Thermal Performance of Flat-Plate-Type Evacuated Solar Collector System to Get Hot Water near 100° C, 22th International Symposium on Transport Phenomena, 2011.11.9, オランダ, デルフト

⑦ Hirasawa, S., Kawanami, T., Study on Collector Efficiency of Flat-Plate-type Evacuated Solar Collector to Get Hot Water near 100° C, 14th International Heat Transfer Conference, 2010.8.12, アメリカ, ワシントン DC

[その他]

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-en/e/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平澤 茂樹 (HIRASAWA SHIGEKI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70403300

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし