

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246039

研究課題名(和文)：スペクトル機能性ふく射の制御技術開発をめざす熱工学の展開

研究課題名(英文)：Thermal Engineering Advanced Approach for Developing New Control Technology of Spectrally-Functional Thermal Radiation

研究代表者：

牧野 俊郎 (TOSHIRO MAKINO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

(研究者番号) 30111941

研究成果の概要(和文)：本研究は、スペクトル機能性ふく射の制御技術開発をめざす熱工学の研究の展開を図るものである。そのような技術は、とりわけ、熱光起電力発電(TPV)システムの開発において重要であり、また、わかりやすい。電磁波動論・分光学・固体物性論・伝熱工学を基礎として分光熱工学の実験・理論研究を行い、熱工学のシステム的な視野をもって、エネルギー工学と生活環境工学のために有効なハードシステムの実現をめざす。

研究成果の概要(英文)：The present research aims to expand thermal engineering advanced approach for developing new control technology of spectrally-functional thermal radiation. Such technology is important particularly in a thermophotovoltaic (TPV) power generation system. On the basis of electromagnetic wave theory, experimental spectroscopy, solid state physics and heat transfer engineering, experimental, calculational and theoretical studies are conducted, and in thermal engineering systematic points of view we try to realize a new effective hardware system for energy engineering and life environmental engineering.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|------------|
| 2008年度 | 23,600,000 | 7,080,000 | 30,680,000 |
| 2009年度 | 9,600,000 | 2,880,000 | 12,480,000 |
| 2010年度 | 5,500,000 | 1,650,000 | 7,150,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 38,700,000 | 11,610,000 | 50,310,000 |

系・分野・分科・細目：理工系・工学・機械工学・熱工学

キーワード：熱ふく射・放射・干渉・分光選択・機能性表面・薄膜・熱光起電力発電・球面波

1. 研究開始当初の背景

熱工学の実在表面は多様な複雑系であり、そのふく射性質はその表面構造に敏感に依存する。そのような表面について、可視～赤外の広い波長域で半球反射・放射にも注目し、さらにその推移を実験的に調べるには、独自の測定系が必要である。研究代表者の牧野らは、このような測定系の開発に携わり、いま歴史的に最高のレベルの装置を具備するにいたっている。本研究は、そのような分光実験の可能性を基にして企画された。

従来のふく射伝熱研究者たちは、おもにふく射をエネルギーの流れとして見るふく

射輸送方程式に基づいて、ふく射強度を厳密にとり扱う実数の数学を基礎としてきた。それに対して、本研究の代表研究者・共同研究者らは、ふく射を波長と振幅と位相で特徴づけられる電磁波として捉える波動論の視点をもって、複素ベクトル量の世界を指向してきた。本研究は、そのような理論的視野をもって企画された。

2. 研究の目的

熱ふく射(thermal radiation)は、物質における荷電粒子の熱振動に起因する電磁波であり、工業的にも得やすい身近なエネルギーで

あるが、そのままでは、Planck 分布の及ぶ広い波長域に分散し、また、指向性が弱いぼんやりしたふく射である。そのため、レーザーの場合のように、特定の波長と方向にそのエネルギーを集中して工学的な機能を発揮させるには有効でないが多かった。いま、この点を克服し、特定の波長帯域のふく射が強調されるスペクトル機能性をもつ熱ふく射を得るための技術が求められている。

そのような技術は、とりわけ、熱光起電力発電(TPV)システムの開発において重要であり、また、わかりやすい。このシステムは、[(熱エネルギー)→(ふく射エネルギー)→(電気エネルギー)] のエネルギー変換過程を経て、より直接的に電気エネルギーを得ようとするものである。そこでは、これまで有効に利用されることの少なかった 1000 K 以下のレベルの低質の熱エネルギーを原資として、赤外の長い波長の熱ふく射にも期待する。このシステムをさらに有効なものとするには、光電変換 [(ふく射エネルギー)→(電気エネルギー)] が有効になされるようなふく射を放射する赤外エミッター [(熱エネルギー)→(ふく射エネルギー)] の開発が望まれる。そのエミッターは、有効に機能する赤外の特定の波長帯域のふく射だけを強く放射するものである。それは、黒体や灰色体のように有効に使われることのないふく射エネルギーまでを放散することがないので、原資たる熱エネルギーの消費は格段に抑えられる。この TPV システム開発のキーは、スペクトル機能性ふく射を実現する熱工学の分光技術にある。

このスペクトル機能性ふく射の技術は、ふく射の放射のみならず反射のスペクトル特性を積極的に利用するエネルギー工学、あるいは生活環境工学・「いろつや」の工学への展開にも繋がるものである。そこでは、機能性表面の開発がもっとも重要な克服すべき課題となる。

このような課題に挑むには、従来のふく射をエネルギーの流れとして見るふく射輸送方程式ベースの方法に加えて、ふく射を波長と振幅と位相で特徴づけられる電磁波として捉える波動論の視点をもって、表面における電磁場の制御を図ることが重要である。

本研究は、スペクトル機能性ふく射の制御技術開発をめざす熱工学の研究の展開を図るものである。電磁波動論・分光学・固体物性論・伝熱工学を基礎として分光熱工学の実験・理論研究を行い、熱工学の体系的な視野をもって、エネルギー工学と生活環境工学のために有効なハードシステムの実現をめざす。

3. 研究の方法

§ 6 の組織の構成員が分担して次の研究

を実施する：(1)①広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の高性能化(牧野・若林)，②ふく射放射波の可干渉性の機構に関する仮説の提案とモデル計算(牧野・松本・若林)，③室温の表面の全半球放射率測定器の開発(牧野・若林)，(2)①赤外光起電力電池の試作(花村・深井)，②エバネッセント波を用いる発電システムの構築(花村・深井)，③希土類酸化膜における放射率の制御(熊野・花村)，(3)表面の放射強度と表面の放射ふく射の方向特性を測定する装置の開発(山田)，(4)スペクトル機能性のマイクロシリカ粒子の自己組織化微細構造の SEM 観察と反射・放射特性の測定(宮崎)。

(1)①牧野らは、実在表面のふく射特性研究のために、0.30~11 μm の波長域で垂直入射鏡面反射率 R_{NN} と垂直放射率 ϵ_N のスペクトルを同時に 1 台の装置上で 2 s ごとに連続測定する装置を開発し、また、垂直入射半球反射率 R_{NH} と放射率 ϵ_N のスペクトルを同時に 4 s ごとに連続測定するものを開発した(図 1)。本研究では、反射率 R_{NN} 、 R_{NH} と放射率 ϵ_N のスペクトルを同時連続測定できるように高性能化する。②金属の表面にふく射透過性の薄膜のある系(薄膜系)の垂直放射率 ϵ_N スペクトルに明瞭な干渉現象が見出された。また、熱ふく射に関する Kirchhoff の法則が非平衡系についても成立することが実験的に示唆された。この 2 点を単純に結びつけると、理想的に平滑な薄膜系については、球面波についての放射率 ϵ_N が平面波についての垂直入射鏡面反射率 R_{NN} の計算値から計算されることになる。これは不思議なことである。しかし、とすれば、金属から薄膜に放射される波はあるいは平面波-like なものであるのかもしれない。この課題に関して金属電子論と電磁波動論に基づく分子動力学的な計算を行い、金属から金属の外の真空領域にいかなる波(合成波)が放射されるのかを検討する。

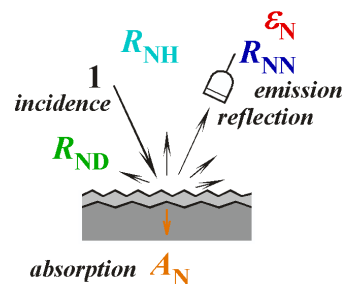


図 1 垂直入射半球反射率 R_{NH} ・垂直入射鏡面反射率 R_{NN} ・垂直入射拡散反射率 R_{ND} ・垂直入射吸収率 A_N ・垂直放射率 ϵ_N

(2)② 種類の光起電力電池を作製する。1 つは、p-n 接合電池であり、以下のように作製する。市販の研摩済のテルドープ n 型ガリウムアンチモン(GaSb)の表面処理を行い、

高真空に保持された分子線エピタキシャル装置にセットし、所定の条件により、アンドープ p 型 GaSb 層を成長させる。その n 型裏面には全面に、p 型表面にはグリッド状に金電極をスパッタリングにて作製する。もう 1 つは、上記の n 型ガリウムアンチモンの表面にナノオーダ(厚さ 5 nm)のニッケル薄膜をスパッタリングしたショットキー電池である。前者を発電特性評価に、後者をエバネッセント効果発電システムの実験に用いる。②電気ヒータを用いた黒体炉の開放面に金メッキされた光導波管を設置し、その開放面に近似黒体面(7×7 mm)を形成する。この面の指向性放射強度が Lambert の余弦則に従うことから、近似的に黒体面と仮定できることがわかった。そこで、作製された p-n 接合 GaSb 電池を用いて発電特性を評価する。いっぽう、ショットキー電池表面と、およそ 1000 K に加熱されたタングステンのふく射放射体表面を、真空下において向かい合わせ、その発電特性を明らかにする。

(3)周期的微細構造を有する表面から放射されるふく射の強度と指向性を調べるために、測定装置の開発を行う。この装置では、材料物性が、その放射ふく射に与える影響についても検討できるように、物性の異なるタングステン、炭化ケイ素(SiC)やタンタルを試料と想定して、装置の設計を行う。これらの表面から放射ふく射を測定するには、測定が容易な程度に、その表面温度を上げる必要があるが(目標 1300 K 程度)、試料はすべて金属であるため、酸化雰囲気中で高温に加熱することはできない。ここでは、真空において試料を加熱できるように、真空チャンバーの製作を行う。さらに、試料表面から放射されるふく射の指向性についても測定できるように、チャンバー内で試料の向きを変えることのできる装置を導入する。なお、広い波長域で測定を行うために、市販の FTIR 分光光度計を、放射ふく射の強度を測定できるように改造する。測定システムの概要と、試料加熱用チャンバーの写真を図 2 に示す。試料(直径 25×厚さ(1~2) mm)は、その背面から炭酸ガスレーザ(波長 10.6 μm)を用いて非接触に加熱される。放射されたふく射は、赤外透過窓を通して、2 個の軸外放物面鏡を介して FTIR 分光光度計に導入される。基準となる黒体のふく射強度との比較から、対象表面の放射率は導かれる。当初、図 2 に示すように、FTIR への導入経路を切り替えて、チャンバー内の試料と黒体炉からのふく射測定をしていた。しかし、このシステムでは、試料がチャンバーの赤外窓を通して観察されるために減衰する。それを補正するために、ここでは、試料と同じ大きさの基板表面に黒体塗料を塗布したものを作製し、そこからのふく射強度を基準とする。

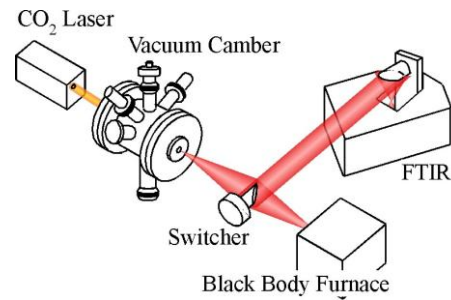


図 2 放射ふく射強度の測定システム

(4)宮崎らは、マイクロシリカ粒子の微細構造の構造周期のオーダを μm として赤外域の反射スペクトルを制御する研究を行い、修正した Bragg 反射の式で結果を説明できることを示した。しかし、自己組織化で作製した周期構造には、点欠陥や線欠陥が見られ、反射スペクトルにも本来ふく射が反射しないはずの近赤外域で反射率の増加が測定された。このような構造の欠陥の赤外域の光学特性に与える影響を調べる。構造の欠陥を定量的に示すため、作製したマイクロシリカ粒子の微細構造の試料の SEM 画像を 2 次元 Fourier 変換し、そのパターンから作製試料の周期に対する質を評価する。Bragg 反射の式で説明できない近赤外域の反射スペクトルの増加は拡散反射に起因するものと考え、2 個の回転放物面鏡から構成される測定装置を製作し、半球等強度入射垂直反射スペクトルを測定する。

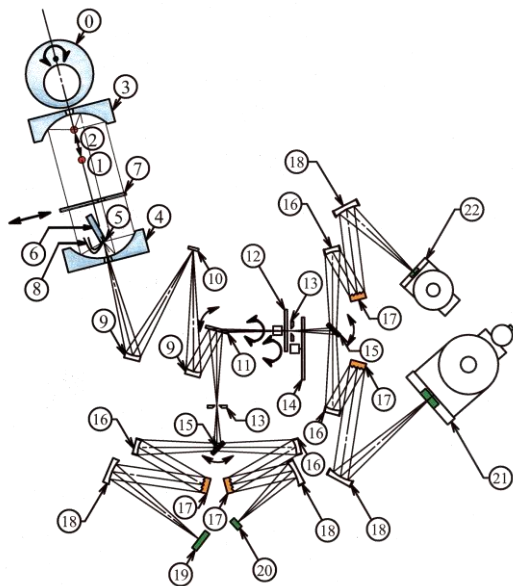
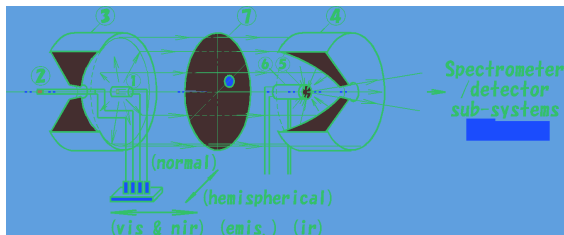
4. 研究成果

§ 3 の研究の方法によって次の研究成果を得た：

(1)①0.30~11 μm の波長域で表面の半球反射率 R_{NH} 、鏡面反射率 R_{NN} 、拡散反射率 R_{ND} 、吸収率 A_N 、放射率 ϵ_N のスペクトルを 6 s ごとに同時にくり返し測定するスペクトル測定装置を開発した(図 3)。その装置を用いて、高温大気酸化過程にある金属表面のスペクトルの推移を測定し、装置の有効性を例証した。

開発したスペクトル測定装置は、近紫外～赤外の広い波長域でふく射の干渉・回折現象の推移を定量的に把握するものであり、熱工学の多様な実在表面のふく射性質の全ぼうを多角的に明らかにするものであることが示された。理想的な表面から実在表面への変化の過程におけるいっけん複雑なふく射の反射・吸収・放射性質の推移は、被膜の厚さ、被膜の表面のあらさ、被膜のふく射吸収と、ふく射の波長の関係の変化にともなうものであることが明らかにされた。被膜の成長にともなう被膜系の吸収の増加は、被膜内におけるふく射吸収の増加のみならず、被膜表面におけるふく射散乱の増加にともなう界面反射の減少によるものであることが明

らかにされた。拡散反射されるふく射においても明瞭な干渉現象が起こることが見出された。その干渉は被膜内を斜めに進む光路長の長いふく射によって起こることが明らかにされた。②金属から放射される波が減衰しながら伝搬する平面波-like な波であることが明らかになった。しかし、実験で確認された Kirchhoff の法則を説明するには至っていない。今後の考察のためには、反射と放射、平面波と球面波、可干渉性(coherency)、実験と計算、要素波と合成波、広い場と局在場、近接場と遠方の場 などの Keywords が必要である。



- | | |
|--|--|
| 0. cam mechanics | 13. entrance slit |
| 1. tungsten-halogen lamp | 14. filter disk |
| 2. Si ₃ N ₄ light source | 15. rotational plane mirror |
| 3. paraboloidal mirror 1 | 16. collimator |
| 4. paraboloidal mirror 2 | 17. diffraction grating |
| 5. specimen | 18. camera mirror |
| 6. heater | 19. 35-Si photodiode array |
| 7. shutter disk | 20. 16-Ge photodiode array |
| 8. thermocouple | 21. 32-InSb photovoltaic detector array |
| 9. concave mirror | 22. 16-HgCdTe photoconductive detector array |
| 10. plane mirror | |
| 11. rotational plane mirror | |
| 12. optical chopper | |

図3 広波長域高速ふく射スペクトル測定装置

(2)①黒体温度を 1123 K として、p-n 接合 GaSb 電池の短絡電流と開放電圧を p 型層の厚さを変化させて測定したところ、開放電圧に大きな変化はなかったが、短絡電流は p 層の厚さが薄くなるにつれ、フォトンにより自由電子が形成される欠乏層までの厚みが薄くなるものの、薄くなりすぎるとその自由電子の電気抵抗が増大するため、ここでは 124 nm の場合に最も高い値を示した。また、黒体放射分率から、1.8 μm 以下の波長範囲に含まれる入射ふく射エネルギー量が容易に算出でき、その入射エネルギーに対する発電効率は 4 % であることが示された。この電池表面の反射率は、この波長 1.8 μm 以下においておよそ 0.5 と測定されており、窒化ケイ素 (Si₃N₄) など、反射防止膜を施すことによりおよそ 2 倍の発電量が得られることとなる。②GaSb-Ni ショットキー電池においては、厚さ 5 nm のニッケル薄膜をショットキーバリアと利用すると同時に電極の役割も果たしており、その電気抵抗が大きいために、発電効率は 0.4 % 程度であった。また、両面を近づけるピエゾアクチュエーターのストロークが足りず、エバネッセント効果の発現までには至らなかった。なお、放射ふく射の波長制御のため、タングステンふく射放射体表面に、ウェットエッチングによるマイクロキャビティの作製の可能性も明らかとなった。

(3)図3の測定システムの妥当性を検証するために、表面の放射率が既知であるステンレス鋼 SUS304 について、放射率の測定を行った。試料は、同一のものを3枚作製し、バフ研磨により表面を光学鏡面仕上げし、測定の安定性の確認を行った。試料の測定を始める前に、まず、使用した疑似黒体(黒体塗料を表面に塗布した基板)の機能を検証した。疑似黒体から放射されるふく射強度と、黒体炉から放射されるふく射の強度を比較した。試料との比較には疑似黒体を利用できることが確認できた。図4は SUS304 の放射率のスペクトル測定結果を示す。測定時の表面温度は、1273 K である。試料によって放射率が異なっているが、本来、まったく同じに仕上げた表面であるので、放射率の値は一致しなければならない。3枚の試料の放射率が異なった原因は、試料表面の温度分布と考えられる。測定している FTIR の視野内の温度が、正しく測定されていないことが考えられる。この点に関して、さらに検討を要する。

(4)作製した試料の SEM 画像を 2 次元 Fourier 変換した結果、SEM 画像からは周期に対する質の判断が難しい試料であっても、Fourier 変換後の画像では、多結晶的なリング状の模様と単結晶的な斑点上の模様として明確に違いが表れ、評価が容易となった。このような試料の質の評価を反射率へ結びつけるために、直径 2 μm のシリカ粒子によ

って作製した周期構造試料の拡散反射スペクトルの測定結果を図5に示す。実験は半球入射垂直反射を測定しているが、ここでは垂直入射半球反射と等しいと仮定した。鏡面反射測定では測定しきれなかった拡散反射に起因する反射率の増加が短い波長側で測定された。測定装置の特性のため、さらに短波長側を測定できておらず、反射スペクトルが鋭いピークが測定できるかが今後の課題である。また反射率だけでなく、放射率の制御技術の確立を進めることで本微細構造の応用を広げることが課題として挙げられる。

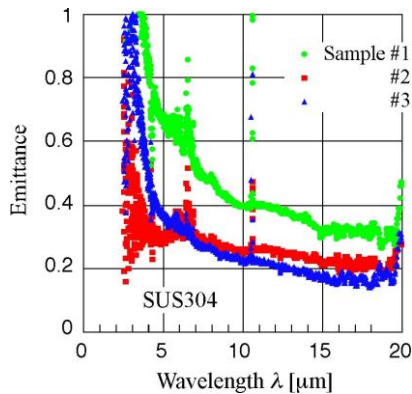


図4 SUS304の放射率スペクトル

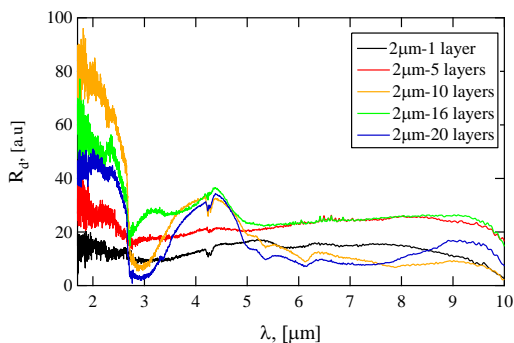


図5 マイクロシリカ粒子の微細構造の試料の半球反射率スペクトル

5. 学術論文・解説記事・その他

[学術論文] (査読あり計 20 件)

- ① Makino, T. and Wakabayashi, H., New Spectrophotometer System for Measuring Thermal Radiation Characteristics of Real Surfaces of Thermal Engineering Entirely, *Journal of Thermal Science and Technology*, vol.6, no.1, pp.80-92, (2011-03).
- ② 若林英信・牧野俊郎, 生活空間を構成する表面の垂直入射吸収率スペクトルの測定, 熱物性, 第 25 巻, 1 号, pp.8-14, (2011-02).
- ③ 花村克悟・谷口祐司・パチャムス ジャヤベル・エライヤラジュ スリニバサン・深井尋史・山田 明, 近似黒体面を用いた熱光起電力電池の発電特性, 熱物性, 第 25 巻, 1 号, pp.15-20, (2011-02).
- ④ 若林英信・牧野俊郎, 室温の表面の半球放射率測定器の開発, *Thermal Science and Engineering*, (日本伝熱学会論文集), vol.19, no.1, pp.37-42, (2011-01).
- ⑤ Masao, Y., Okano, M. and Matsumoto, M., DSMC Scheme to Study Phonon Dynamics, *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol.25, no.1, pp.21-26, (2011-01).
- ⑥ Makino, T. and Wakabayashi, H., A New Spectrophotometer System for Measuring Hemispherical Reflectance and Normal Emittance of Real Surfaces Simultaneously, *International Journal of Thermophysics*, vol.31, nos.11-12, pp.2283-2294, (2010-12).
- ⑦ 牧野俊郎・若林英信, 熱工学の実在表面の熱ふく射性質の全ぼうを測定するスペクトル装置の開発, 日本機械学会論文集, B 編, 第 76 巻, 770 号, pp.1571-1578, (2010-10).
- ⑧ 牧野俊郎・若林英信, 熱ふく射に関する Kirchhoff の法則の実験的検証, 日本機械学会論文集, B 編, 第 76 巻, 769 号, pp.1406-1411, (2010-09).
- ⑨ 若林英信・牧野俊郎, 高温環境下におけるクロムとパラジウムの表面の熱ふく射現象, 日本機械学会論文集, B 編, 第 76 巻, 768 号, pp.1258-1264, (2010-08).
- ⑩ Kumano, T. and Hanamura, K., Control of Spectral Emittance Using a Rare-Earth Oxide Film Coated on a Ceramic Plate, *Heat Transfer - Asian Research*, vol.39, no.4, pp.209-221, (2010-06).
- ⑪ 内藤一夫・山田 純・小川達弥・高田定樹, 人の皮膚の散乱位相関数の計測, 熱物性, 第 24 巻, 2 号, pp.101-108, (2010-05).
- ⑫ 宮本泰治・鴨志田隼司・山田 純, マランゴニ乾燥におけるウェーハ上残留液滴の乾燥過程とその制御, *Thermal Science and Engineering*, (日本伝熱学会論文集), vol.18, no.2, pp.83-91, (2010-04).
- ⑬ Sangklinhom, M. and Yamada, J., A Study on Radiative Transfer in a TiO₂ Photoelectrode for Improvement of Dye-Sensitized Solar Cell Performance, *Journal of Thermal Science and Technology*, vol.4, no.2, pp.248-259, (2009-08).
- ⑭ 牧野俊郎・若林英信, 表面の半球反射率と垂直放射率の同時測定のための広波長域高速ふく射スペクトル測定装置の開発, 日本機械学会論文集, B 編, 第 75 巻, 754 号, pp.1329-1335, (2009-06).
- ⑮ 熊野智之・花村克悟, 希土類酸化膜における放射率の制御に関する研究, 熱物性,

- 第 23 卷, 2 号, pp.105-110, (2009-05).
- ⑩ Kihara, M., Miyazaki, K. and Tsukamoto, H., Spectral Reflectance of the Close-Packed Structure of Silica Microspheres, *International Journal of Thermophysics*, vol.19, no.6, pp.2136-2148, (2008-12).
- ⑪ 宮本泰治・鴨志田隼司・山田 純, マランゴニ乾燥における三相界線挙動と残留液膜・液滴生成, *Thermal Science and Engineering*, (日本伝熱学会論文集), vol.16, no.4, pp.113-120, (2008-10).
- ⑫ 山田 純・有田悠一・安 炳弘・三浦由将・高田定樹, 空間分解反射光計測に基づく皮膚のふく射物性の推定, 日本機械学会論文集, B 編, 第 74 巻, 745 号, pp.2034-2039, (2008-09).
- ⑬ Wakabayashi, H. and Makino, T., Interference of Spherical Wave of Thermal Radiation Emitted by a Film System, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol.51, nos.11-12, pp.2762-2771, (2008-06).
- ⑭ Matsumoto, M., Kunisawa, T. and Xiao, P., Relaxation of Phonons in Classical MD Simulation, *Journal of Thermal Science and Technology*, vol.3, no.1, pp.159-166, (2008-02).

〔解説記事〕 (計 15 件)

- ① 牧野俊郎・若林英信, (薄膜-金属基板)系から放射されるふく射の干渉 - 実験室での考察 -, 伝熱, 第 50 巻, 210 号, pp.37-44, (2011-01).
- ② 花村克悟・平島大輔, ふく射の放射は“表面”から?, 伝熱, 第 50 巻, 210 号, pp.31-35, (2011-01).
- ③ 花村克悟, マイクロキャビティによるふく射の放射波長制御熱, 伝熱, 第 50 巻, 210 号, p.(表紙裏), (2011-01).
- ④ 宮崎康次, フォトニック結晶による波長選択放射, 伝熱, 第 50 巻, 210 号, pp.13-17, (2011-01).
- ⑤ 牧野俊郎, 室温の測定・暑い・寒い・ふく射伝熱, 伝熱, 第 48 巻, 205 号, pp.14-19, (2009-10).
- ⑥ 牧野俊郎, 熱ふく射物性研究のための分光実験装置, 伝熱, 第 48 巻, 205 号, p.(表紙裏), (2009-10).
- ⑦ 花村克悟, マックス・プランク (1858-1947)の功績, 伝熱, 第 48 巻, 205 号, pp.32-19, (2009-10).
- ⑧ 若林英信, (特集 機械工学年鑑), 8.1.2 熱力学・熱物性, 日本機械学会誌, 第 113 巻, 1101 号, pp.612-613, (2009-08).
- ⑨ 山田 純, ふく射と化粧, 伝熱, 第 48 巻, 204 号, pp.53-57, (2009-07).

- ⑩ 山田 純, 微細構造をもつ表面から放射される熱ふく射の干渉, 日本機械学会誌, 第 112 巻, 1086 号, pp.382-385, (2009-05).
- ⑪ 山田 純, 構造色の代表, モルフォ蝶(レテノール), 伝熱, 第 47 巻, 201 号, p.(表紙裏), (2008-10).
- ⑫ 牧野俊郎, ふく射伝熱と熱ふく射表面診断, 高温学会誌, 第 34 巻, 5 号, pp.196-201, (2008-09).
- ⑬ 牧野俊郎, 表面のふく射診断の正確さ, トライボロジスト, 第 53 巻, 5 号, pp.301-306, (2008-05).
- ⑭ Matsumoto, M., How Can Molecular Simulation Contribute to Thermal Engineering ? - Topics from Microbubbles and Microscale Heat Conduction -, *Journal of Thermal Science and Technology*, vol.3, no.2, pp.309-318, (2008-05).
- ⑮ 山田 純, 化粧品で肌の見え方はどう変わるの?, 日本機械学会熱工学部門ニュースレター, TED Newsletter No.54, http://www.jsme.or.jp/ted/NL54/TED-Plaza_yamada.htm, (2008-05).

〔その他〕 (HP 計 3 件)

- ① 花村克悟, (東京工業大学), <http://www.mep.titech.ac.jp/~TANSO/hanamura/index-j.html>
- ② 山田 純, (芝浦工業大学), <http://www.mme.shibaura-it.ac.jp/yamada/>
- ③ 宮崎康次, (九州工業大学), <http://www.mech.kyutech.ac.jp/tidl/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
牧野俊郎 (Toshiro MAKINO)
 京都大学・大学院工学研究科・教授
 (研究者番号) 30111941
- (2) 研究分担者 (計 3 名)
花村克悟 (Katsunori HANAMURA)
 東京工業大学・炭素循環エネルギー研究センター・教授
 (研究者番号) 20172950
山田 純 (Jun YAMADA)
 芝浦工業大学・工学部・教授
 (研究者番号) 40210455
宮崎康次 (Koji MIYAZAKI)
 九州工業大学・大学院工学研究院・准教授
 (研究者番号) 70315159
- (3) 連携研究者 (計 2 名)
松本充弘 (Mitsuhiro MATSUMOTO)
 京都大学・大学院工学研究科・准教授
 (研究者番号) 10229578
若林英信 (Hidenobu WAKABAYASHI)
 京都大学・大学院工学研究科・助教
 (研究者番号) 00273467