

令和元年6月16日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13736

研究課題名（和文）熱輻射を対象としたトポロジー最適化

研究課題名（英文）Topology optimization for thermal radiation systems

研究代表者

泉井 一浩 (Izui, Kazuhiro)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90314228

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：高温の物体から発せられる熱エネルギーである熱輻射は、一般には非常に幅広いスペクトル分布をもっている。そのスペクトルを自在に制御することができれば、熱エネルギーをより高効率に利用することが可能となる。本研究では、熱物体の表面に微細形状を設けることで、限定的なスペクトル分布をもった熱輻射を行うことのできるメタサーフェイスの設計の方法論を、構造最適化の考えに基づいて構築した。この設計手法を確立することで、数学的および力学的見地に基づき、極めて高性能な熱輻射デバイスの構造の自在な設計を可能にすることができるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽電池で用いられる光起電力セルの感度は、波長依存性が高く、特定の波長の光のみに対して高い感度を示す。本研究の成果により、光起電力セルに応じた熱輻射の波長を放射するメタサーフェイスを設計することが可能とする高効率な熱光起電力発電システムの開発に応用できる期待が高まった。また、熱エネルギーの移動を対象とした構造最適化法として、これまで熱伝導と熱伝達を対象としてトポロジー最適化法の構築を行った例はこれまで幾つかの報告がなされていた。しかしながら、熱輻射を対象とした方法は世界的に見ても全く議論が行われておらず、全く未踏の領域となっていたため、本研究の成果は学術界へのインパクトが極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a non-parametric design method of the wavelength selective emitters, which utilize a shape optimization technique. The proposed method provided a design example of 1D grating wavelength selective emitter that shows near unity emissivity at target wavelength. The obtained optimal configuration utilizes two physical mechanisms for the emissivity improvement, the excitation of the surface plasmon polarization and the cavity resonance. Furthermore, by considering multiple wavelengths, the proposed method can also provide emitter configuration which has higher wavelength selectivity performance.

研究分野：最適設計

キーワード：熱輻射 トポロジー最適化 設計工学 熱光起電力発電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

太陽のように高温の物体から発せられる熱エネルギーである熱輻射は、通常、幅広いスペクトル分布を持つ。一方で、太陽電池で用いられる光起電力セルの感度は、波長依存性が高く、特定の波長の光のみに対して高い感度を示すことが知られている。したがって、通常の太陽電池は、幅広いスペクトルの熱輻射エネルギーを受けてはいるが、実際にはそのわずか一部分のエネルギーのみを電気エネルギーに変換することしかできておらず、これが太陽電池のエネルギー変換効率の向上を妨げている大きな原因となっている。そこで、太陽光のエネルギーを一点に集中させることで高温物体をつくり、その高温物体から太陽電池の高感度領域の波長に限定された輻射光を発生させることでエネルギー変換効率を大幅に向上させる、熱光起電力発電システムが注目を集めている。このシステムでは、高温物体の表面に光の波長程度の大きさの特殊な周期的微細構造をもったメタサーフェスを設け、これによって光と構造の相互作用に変化を与え、輻射光の波長の制御を実現するものである。しかしながら、このような特殊な熱輻射特性をもつメタサーフェスの形状の設計は試行錯誤に基づいて行われており、現状の性能には限界がある。その系統的な設計法の構築は全く未踏の課題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、上述の課題を解決し、熱放射を極めて高いレベルで制御可能なメタサーフェスの設計を実現可能な、トポロジー最適化に基づいた新しい構造設計法を構築する。トポロジー最適化は、あらかじめ特定の初期構造を与えることなく、数学的および力学的見地から性能を最大化する最適な構造を得ることができるので、従来の試行錯誤では到達できなかった抜本的な性能向上を期待することができる。本研究では、そのため電磁場解析モデルの構築と、最適化問題の適切な定式化法を検討した。さらに、目的関数の感度解析法を構築するとともに、トポロジー最適化法の実装を行い、波長スペクトルを制御可能な熱輻射デバイスの設計案を導出することを目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示すような2次元の解析領域を考えた。ここでは、設計する波長選択構造が周期構造を持っていることとしている。また、エミッタ構造の境界は、以下のレベルセット関数 ψ の0等位線で表現することとする。

$$\psi = \begin{cases} C \tanh(d(\mathbf{x})/C) & \text{for } \mathbf{x} \in \Omega \\ 0 & \text{for } \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -C \tanh(d(\mathbf{x})/C) & \text{for } \mathbf{x} \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (1)$$

ここで C は ψ の上下限を決める正のパラメータであり、 $d(\mathbf{x})$ 座標 \mathbf{x} からエミッタ構造境界までの最短距離である。

また入力波はこの解析領域の上方の境界 Γ_1 から入射され、境界 Γ_2 は散乱境界である。支配方程式は以下の通りとなる。

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \varepsilon_{rc} \mathbf{E} &= 0 \\ \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) - jk_0 (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \mathbf{n} &= -2jk_0 \mathbf{E}_i \quad \text{on } \Gamma_1 \\ \mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{E}) - jk_0 (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \mathbf{n} &= 0 \quad \text{on } \Gamma_2 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで ε_{rc} は複素比誘電率、ヘビサイド関数 $H(\psi)$ を用いて以下のように表される。

$$\varepsilon_{rc} = (\varepsilon_{\text{Emitter}} - \varepsilon_{\text{Air}}) H(\psi) + \varepsilon_{\text{Air}} \quad (3)$$

キルヒホッフの法則に基けば、熱輻射の最大化は、透過波と反射波の最小化と考えることができる。反射波と透過波は、以下のポインティング・ベクトルで評価する。

$$R_\lambda = \frac{\int_{\Gamma_1} \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}_r \times \mathbf{H}_r^*) \cdot \mathbf{n}_y d\Gamma}{\int_{\Gamma_2} \frac{1}{2} \text{Re}(\mathbf{E}_t \times \mathbf{H}_t^*) \cdot \mathbf{n}_y d\Gamma} \quad (4s) \quad (4)$$

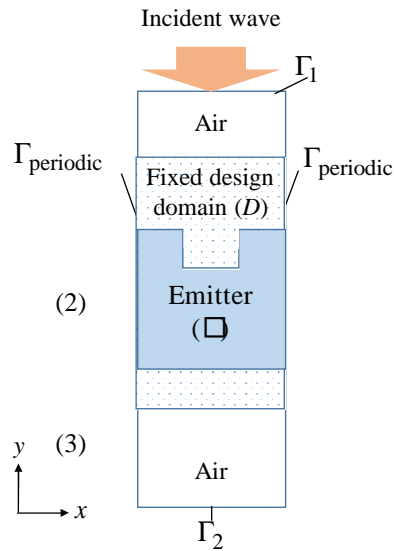


図1 解析領域

ここで n_y は y 方向の単位ベクトルであり，添字 i, r, t は入力波，反射波，透過波を表している．

本研究では，最適なエミッタ構造を得るために，双曲線正接関数を用いたレベルセット法に基づく構造最適化法を構築した．この方法では，エミッタ構造の境界を表すレベルセット関数 ψ を更新するために，以下の時間発展方程式を解く．

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} - v |\nabla \psi| + \alpha \text{sign}(\psi) \left(|\nabla \psi| - \left(1 - \left(\frac{\psi}{E} \right)^2 \right) \right) = 0 \quad (6)$$

ここで v は境界の移動速度， α はレベルセット関数の再初期化を促進する度合いを示している．この時間発展方程式を用いることで，数値的に安定に構造境界を移動させることができる．

4．研究成果

本研究で構築した構造最適化手法の有効性について，数値例により検証を行った． $1.0\mu\text{m}$ の波長の輻射率を最大化するよう目的関数を設定した最適構造を図2に， $1.0\mu\text{m}$ の輻射率を最大化しつつ， $1.4\mu\text{m}$ ， $1.5\mu\text{m}$ ， $1.6\mu\text{m}$ の波長の輻射率を最小化するよう設定した最適構造を図3に示す．

それぞれの構造の波長特性を図4に示すように，図2に示す最適構造1は， $1.0\mu\text{m}$ の波長において，平坦な表面をもつ金属よりも輻射率を大幅に向上させることに成功していることがわかる．さらに図3の構造である最適構造2は， $1.0\mu\text{m}$ の波長において，良好な輻射率を示しているだけでなく， $1.5\mu\text{m}$ 付近の波長については逆に大幅に輻射率を低減することができている．このことにより，構築した構造最適化手法によって，特定の波長の輻射光を選択的に出力が可能な表面構造を設計することができることを示した．



図2 最適構造1



図3 最適構造2

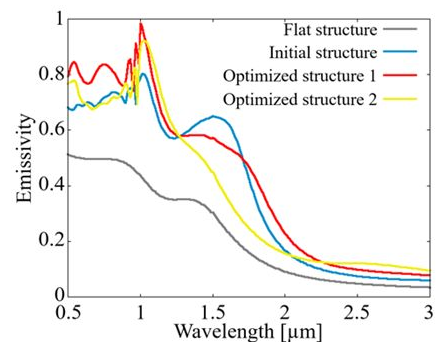


図4 波長特性

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 2 件)

(1) 折井将彦，矢地謙太郎，泉井一浩，山田崇恭，西脇眞二，安田英紀，鈴木基史，形状最適化に基づく波長選択放射体設計法，第29回計算力学講演会，日本機械学会，2016年9月22日-24日，名古屋，No.113．

(2) Masahiko Orii, Kentaro Yaji, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki, A shape optimization method based on the convected level set method and its application for the design of a spectrally selective emitter for thermophotovoltaic generation, Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016 (ACSMO 2016), May 22-26, 2016, Nagasaki, Japan, 2A3-2.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：西脇眞二

ローマ字氏名：NISHIWAKI, Shinji

所属研究機関名：京都大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：90314228

研究分担者氏名：山田崇恭

ローマ字氏名：YAMADA, Takayuki

所属研究機関名：京都大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：30598222

研究分担者氏名：鈴木基史

ローマ字氏名：SUZUKI, Motofumi

所属研究機関名：京都大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：00346040

(2)研究協力者

該当なし