

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 郭 江

本論文は、「Optimal design of spectrally selective photonic structures for thermal radiation applications (熱輻射応用のための波長選択的フォトニック構造の最適デザイン)」と題し、電磁場解析と機械学習と組み合わせた最適化手法を開発し、スカイラジエータや熱光起電力発電の吸収体とエミッターなどの熱輻射応用のフォトニック構造を設計したものである。熱輻射スペクトルの制御は、建物などの放射冷却、輻射伝熱による乾燥プロセスの省エネ化、熱光起電力発電の高効率化などにおいて重要である。近年、物体表面の材料またはマイクロ/ナノ構造を通じて、熱輻射スペクトルを人工的に制御する研究が盛んに行われている。一方で、所望の熱輻射スペクトルを評価関数としたマイクロ/ナノ構造の逆問題的な設計は、非線形な電磁場解析と膨大な構造自由度により、容易ではない。そこで本研究では、マイクロ/ナノ構造の電磁場解析と機械学習を組み合わせたマテリアル・インフォマティクス (MI) 手法を確立し、複数の応用をターゲットとしたメタマテリアルを最適設計してその性能を評価することで、高い熱輻射性能を有するメタマテリアルを効率的に設計することへの MI 手法の有用性を示すことを目的とした。

本論文は、全 6 章から構成されており、第 1 章の「Introduction」では、熱輻射現象やその応用、および必要とされる材料や構造、特に本研究の主題であるメタマテリアルについて、具体的な例を挙げながら説明している。次に、メタマテリアルを設計するアプローチについて従来技術を議論し、現状の課題を説明することを通じて、本研究の動機づけをしている。

第 2 章は、「Methodology」であり、電磁場解析や機械学習の手法の説明を行っている。電磁場解析手法としては、多層膜系の解析に用いる転送行列法やグレーティング系に用いる Rigorous coupled-wave analysis について、導出過程およびそれらを用いた輻射熱の射出、吸収、透過スペクトルの計算手法について説明している。機械学習手法については、ベイズ最適化手法、モンテカルロ木探索、ファクタライゼーションマシン、量子アニーリング、デジタルアニーリングについて説明している。

第 3 章は「Thermal Photonics Design for Radiative Cooling Application」であり、熱輻射冷却に資するフォトニック構造の設計を行っている。はじめに、太陽光を反射しながら宇宙空間に熱を放射するスカイラジエータを対象として、波長 8~13  $\mu$

m の大気窓で放射率が高く、可視光領域で反射率の高い構造を設計した。多層膜とグレーティング構造を組み合わせたハイブリッド構造の幾何学と組成を、電磁場解析とベイズ最適化を交互に実施するアルゴリズムによって最適化することで、従来のスカイラジエータの性能を上回る構造が設計でき、全体の候補構造数の 1%未満を計算するだけで大域最適化を達成している。さらに、ポリマー内に無機物のワイヤーを配置した自由度がさらに大きいモデル系において、機械学習にファクタライゼーションマシンと量子アニーラを用いることで高い効率で構造最適化ができることを示した。さらに、デジタルアニーラを用いることで、これまでで最高レベルの狭帯域を有する波長選択熱輻射膜を設計することに成功している。このような MI への量子アニーラやデジタルアニーラの適用は本研究がはじめてである。また、ベイズ最適化を用いた手法により、熱輻射性能と色の両立という観点においても構造最適化を行っている。透過および反射による色彩に対して熱輻射膜によって色が変調しないように、特定の色あるいは可視光領域全体を透過しながら、放射冷却性能を高める多層膜構造を設計している。

第 4 章は、「Spectral Matching Thermophotovoltaic Nanophotonic Design for Concentrated Solar Energy Harvesting」であり、熱光起電力発電の吸収体とエミッターを対象として、酸化ハフニウムをコーティングしたモリブデンフォトリック結晶の最適設計を行っている。これにより、黒体の倍程度の太陽光の吸収効率を有する吸収体と、代表的な半導体のバンドギャップ以上のエネルギーの輻射熱のみの選択的な射出および  $60^\circ$  程度の角度公差を有するエミッターを設計した。

第 5 章は、「Dynamic Control of Ultra-narrowband Thermal Radiation Through Phase Change Material」であり、動的光学応答を備えたエミッター構造の設計を行っている。温度によって金属・絶縁体相転移が生じる二酸化バナジウムを含んだ多層膜を、ベイズ最適化よりも多くの候補構造数が扱える非大域最適化手法であるモンテカルロ木探索を用いて最適化し、電磁波の局所モードによって 99%を超える放射率で超狭帯域の熱放射が温度応答を示すメタマテリアルを設計した。

第 6 章は、「Conclusion」であり、論文全体の結論を述べている。

以上の通り、本論文は熱輻射メタマテリアルに MI 手法を適用することによって、放射冷却や熱光起電力発電に資する構造を効率的に設計することに成功している。アニーラを用いた MI 手法など世界に先駆けた手法を開発しながら、高性能構造を提案するに至った研究成果によって、熱工学の進展への有意な寄与が認められる。よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。