

論文名：エネルギー有効利用のためのサーマルフォトンクスに関する研究（要約）
Title of Doctoral Thesis: A study of thermal photonics for effective energy utilization

新潟大学大学院自然科学研究科

氏名 松野 優樹

（以下要約を記入する）

近年、地球温暖化や化石燃料の枯渇により、エネルギー資源の再利用や再生可能エネルギーの効率的な利用方法の確立が急がれている。本論文では、エネルギー有効利用のためのサーマルフォトンクス技術についての研究成果を報告する。ここでサーマルフォトンクスとは、熱工学と光工学の融合研究分野を指す。本論文では、太陽熱起電力発電（STPV）、スカイラジエーター、サーモフォトンクス（TPX）の3つの技術に焦点を当て、その可能性について議論した。

太陽光発電は太陽エネルギーの利用技術としてよく知られている。しかし、従来の太陽光の下に太陽電池を設置するだけの方法では、高い発電効率を得ることは困難である。これは、太陽光の照射強度の高い波長域と太陽電池の内部量子効率（IQE）の高い波長域との不一致に起因している。一方、STPVでは、太陽電池の高照度波長域で高い吸収率を持つ吸収材と太陽電池の高IQE波長域で高い放射率を持つ放射材を適用することで、太陽光からより効率的に電力を生成することが可能となる。第3章および第4章にて、STPVシステム用のMetal-Insulator-Metal（MIM）構造メタサーフェス吸収材および放射材を提案し、その性能を議論した。第3章では、タングステンとSiO₂をベースとしたMIM構造メタサーフェス太陽光吸収材の設計と考察を行い、提案した構造が可視-近赤外領域において高い吸収率と優れた波長選択性を有していることを示した。加えて、FDTDシミュレーション及び理論式を活用することで、提案した吸収材料の光吸収メカニズムを明らかにした。第4章では、タングステンおよびSiO₂を用いたMIM構造メタサーフェス放射材を提案し、作製した。設計したメタサーフェス放射材は、太陽電池の高IQE波長領域で高い放射ピークを持つことを示した。設計したメタサーフェスはフォトリソグラフィ法を用いて作製され、製作したメタサーフェスが可視光から近赤外光の領域で高い放射率と優れた波長選択性を示し、その放射率はFDTDシミュレーションの結果と非常によく一致していた。また、FDTDシミュレーションを用いることにより、その電磁波共鳴のメカニズムを明らかにした。

第5章では、スカイラジエーター用途のMIM構造メタサーフェスを提案、製作し、そのメカニズムに関して考察を行った。通常、人間の日常的な活動から発生する熱は、再利用されることなく外気に捨てられ吸収される。一方、スカイラジエーターは、建築物の壁面に適用可能な次世代の省エネルギー材料である。大気の窓の波長域に調整された熱を放射することで、不要な熱を大気圏外に放出することを可能とする。本論文では、Al-CeO₂を用いたMIMメタサーフェス放射/吸収材を設計し作製した。設計されたメタサーフェス放射/吸収材は、大気窓の範囲である9.8 μm付近で100%に近い放射率を示した。さらに、ウェ

ットエッチング法を適用することで、設計したメタサーフェスの実用レベルでの大面積加工が可能であることを示した。製作されたメタサーフェスは、赤外領域 (9.8 μm 付近) に高い放射率のピークを持ち、FDTD シミュレーションの結果とも非常によく一致、電磁場解析によりそのメカニズムを解明した。

第 6 章では、TPX システムのための黒リン (BP) を用いた中赤外領域における非平衡放射材の検討と、そのふく射輸送メカニズム、及び近接場から遠方場までの低熱エネルギー回収に向けた TPX システムとしての可能性を検討した。低温なエネルギー源 (500 K 以下) からの排熱は、産業活動による廃熱のうちの大部分を占めている。しかし、低温なエネルギー源からのエネルギー抽出は技術的に困難であり、そのほとんどは再利用されることなく周囲環境に放出されている。低温なエネルギーの回収を目指した発電方法として、TPX 発電が注目されている。本研究では、比較的安価に作製でき、かつ特異な光学特性を有することから注目を集めている BP に着目し、その TPX 応用に向けた検討を行った。化学ポテンシャルを印加することにより、BP 放射材からのエネルギーフラックスは大幅に上昇し、BP のバンドギャップより短い波長域で、遠方場であっても黒体放射限界を超えることを示した。また、光輸送メカニズムについて揺動電磁気学シミュレーションを適用することで明らかにし、BP 吸収材と放射材の化学ポテンシャルを変化させることで、近接場と遠方場の両条件で BP を用いた TPX システムが正の電力と効率を発生することを示した。

本研究の成果は、サーマルフォトンクスが効率的なエネルギー利用のための有望な手段になり得ることを示した。これらの研究は、エネルギーの有効活用という社会課題の解決とサーマルフォトンクス技術の更なる発展に役立つことが期待される。