

論文名：メタサーフェスを用いた熱ふく射制御に関する研究（要約）

新潟大学大学院自然科学研究科

氏名 矢田 恭平

---

（以下要約を記入する）

すべての物体は、その内部エネルギーに応じて自発的かつ連続的に光子を放出しており、これを熱ふく射と呼ぶ。熱ふく射により放出されるエネルギーは温度によって異なり、温度が高ければ高いほどそのエネルギーは大きくなる。私たちの身の回りには、太陽などの自然の熱源や工業排熱などの人工の熱源が無数に存在する。そのため、さまざまな熱源を利用するための研究は非常に重要である。

熱ふく射の分光特性は物体の材料や形状に依存しており、その熱ふく射を制御するための方法の 1 つとして、メタサーフェスと呼ばれる材料が注目を集めている。メタサーフェスとは、メタ原子と呼ばれる金属・誘電体ナノ構造で構成された部品を、材料表面に実装したメタマテリアルの一種である。このメタサーフェスを用いることによる、熱光起電力（TPV）システム、赤外線ヒーター、放射冷却デバイス、バイオセンシング、マイクロボロメーター、イメージング、光通信などといった幅広い分野への熱ふく射の応用が期待されている。そこで本博士論文では、新たな視点から熱ふく射の学問を切り拓き、先進的な熱ふく射制御技術の基礎研究を行うことを目的としている。

第 3 章では、スリット型グラフェンメタサーフェスによるアクティブ熱ふく射制御について述べる。一般的なメタサーフェスでは、1つの形状につき1つの光学特性しか示さない。しかし、赤外線ヒーターなどを運用する際には、放射のピーク波長をアクティブに切り替えられることが望ましい。そこで、グラフェンに着目する。グラフェンは炭素原子が 2 次元にハニカム状に結合した構造を持ち、ゲート電圧を加えることによりそのフェルミエネルギーが変化する。これによってグラフェンの電気伝導率を調整することができるため、1つの形状で複数の光学特性を示すことが可能となる。本章では、Al 基板に KBr 層を堆積し、その上に溝を Si で満たした Al スリットを重ね、それをグラフェンで覆った構造を提案する。提案した構造について厳密結合波解析（RCWA）法を用いて解析したところ、フェルミエネルギーを変化させることにより放射のピーク波長がシフトした。また、この放射ピークは誘電体層における Fabry-Perot 共鳴とスリットにおける磁気共鳴によるものであることを示した。さらに、提案した構造における放射率のピーク波長は、LC 回路モデルを用いることにより予測することができた。

第 4 章では、グラフェンリボン型メタサーフェスによるアクティブ熱ふく射制御について述べる。熱光起電力システム、赤外線ヒーター、バイオセンシング、マイクロボロメーター、イメージング、光通信などを運用する際には、放射のアクティブオン/オフスイッチングが可能であることが望ましい。また、前述した通りグラフェンを用いることにより 1

つの形状で放射率を変化させることができる。そこで本章では、Ag 基板に KBr 層を堆積させ、その上にグラフェンリボンを載せた構造を提案する。この構造では、RLC 回路モデルを用いることにより放射率の予測および構造パラメーターの決定をすることができる。RLC 回路モデルを用いて設計した構造について RCWA 法により解析したところ、任意の目的波長においてアクティブオン/オフスイッチング可能な放射ピークが出現した。また、RCWA 法と RLC 回路モデルの計算結果が一致したことから、RLC 回路モデルの妥当性を示した。この放射ピークは、グラフェンプラズモンにより Fabry-Perot 共鳴が引き起こされるために生じる。さらに、提案した構造では狭帯域パラメーターによって放射率の Q 値 (Quality factor) が決定されるため、任意の帯域幅を示す構造を設計することができる。

第 5 章では、機械学習を用いた超狭帯域熱放射多層膜の開発について述べる。赤外線ヒーター、バイオセンシング、マイクロボロメーター、イメージング、光通信などには、狭帯域な放射ピークを持つエミッターが求められる。狭帯域放射を得るためには複雑な形状をもつメタサーフェスを作製する必要があるが、高コストである微細製造技術が要求される。また、比較的単純な構造である周期的な多層膜構造を用いて狭帯域放射を実証した研究もあるが、周期的な多層膜構造では Q 値に限界がある。そのため、非周期的な多層膜構造を用いることが望ましいが、計算候補数が膨大となるという問題がある。そこで本章では、機械学習に着目し、超狭帯域熱放射多層膜の設計および実証を行う。機械学習には、ベイジック最適化に基づいて機械学習を実装したプログラムである COMBO (COMmon Bayesian Optimization Library) を使用した。RCWA 法による電磁波解析と COMBO による構造の最適化を組み合わせることで実行することにより、任意の目的波長において超狭帯域熱放射を示す非周期的な多層膜構造を効率よく設計することができた。また、この放射ピークのメカニズムがフォトニック結晶における局在モードによるものだと示した。さらに、設計した構造を実際に作製してフーリエ変換赤外分光光度計で測定したところ、ピーク波長こそ少しずれるが、目的波長付近で高い Q 値を示す構造を作製することができた。このピーク波長のずれは、製造誤差や計算時と実験時の材料の物性の違いであると考えられる。本研究は、機械学習が熱ふく射デバイスの開発に有効であることを実験的に示した最初の研究である。

第 6 章では、スーパープランキアン熱ふく射デバイスの開発について述べる。一般的に、ふく射熱輸送はプランクの法則により制限される。しかし、熱波長以下の領域である近接場においては、エヴァネッセント波の存在のために、黒体放射よりも大きい熱ふく射エネルギーを輸送できる可能性があり、本論文ではこれをスーパープランキアン熱ふく射と呼ぶ。しかし、近接場光を用いた熱ふく射デバイスの基礎研究は未発達であり、さらに多くの研究を積み重ねる必要がある。そこで本章では、低温排熱用 TPV システムに対するスーパープランキアンデバイスの開発を行うことを目的とし、 $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$  (MCT) とグラフェンを組み合わせた構造を提案する。揺動電磁気学と RCWA 法を組み合わせた計算プログラムである MESH (Multilayer Electromagnetic Solver for Heat transfer) を用いて提案した構造におけるふく射伝熱を解析したところ、近接場領域において黒体放射を超える熱流束が得られた。また、グラフェンを用いることにより、近接場領域における熱流束を増強できることを示した。これはグラフェンプラズモンにより近接場放射が増強されたため

## 【別紙 2】

あると考えられる。さらに、計算した熱流束および光子フラックスに基づいて TPV の生成電力および発電効率を算出したところ、発電効率こそ少し低下するが、遠方場の場合と比較して  $10^4$  オーダーで高い生成電力を得られることを示した。

本論文では、新たな視点から熱ふく射の学問を切り拓くことを目的とし、先進的な熱ふく射制御技術の基礎研究を行った。これらの研究は、熱ふく射制御技術の更なる発展に役立つものと考えられる。