

補助事業番号 2023M-346

補助事業名 2023年度熱ふく射の放射波長制御による水の効率的な赤外線加熱に関する補助事業

補助事業者名 岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域 磯部 和真

## 1 研究の概要

高温の物体から放射される熱ふく射(赤外線)を用いた加熱機器が暖房用途から食品加工用途まで幅広く用いられている。ふく射は空間中で減衰せず、ヒータから受け手へと瞬時に熱が伝わる利点を有している。本研究では、加熱性能は維持しつつも省エネルギー化を達成する赤外線ヒータの実現へ向けて、放射されるふく射の波長帯を水や有機溶媒分子が吸収しやすい範囲に絞った赤外線放射体の開発や水や有機溶媒の加熱試験を行い、放射体から放射される熱ふく射の波長が被加熱対象の温度上昇速度に与える影響を評価した。

## 2 研究の目的と背景

赤外線ヒータから放射されるふく射の波長と、人体や食品に多く含まれる水分子の吸収波長とが一致しない場合、周囲に熱が散逸しエネルギー損失の原因となる。過去の研究により、数 $\mu\text{m}$ 角かつ深さも数 $\mu\text{m}$ 程度となる矩形キャビティが周期的に付与された金属板が高温に加熱されると、特定の波長の熱ふく射を強く放射するようになることがわかっているが、硬く化学的にも安定である金属を自在に加工することは容易ではない。本研究では、微細キャビティ構造を有する金属製赤外線放射体の製作手法を確立するとともに、波長帯が限定された赤外線が液体の温度変化に与える影響の大きさを実験的に解明することを目的とする。

## 3 研究内容

### (1) 金属板への微細キャビティ構造付与

([https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat\\_transfer/heattransferlab/result\\_JKA.html](https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/result_JKA.html))

金属(タングステン)基板に微細キャビティ構造を施すため、反応性イオンエッチングによる加工を行った。金属基板上に耐エッチング特性をもつ有機高分子膜(レジスト)を塗布した後に電子線を照射し、キャビティ開口部に対応する位置のレジストを除去する。次にエッチングを行うことで、図1に示すキャビティ構造を持つ金属板を得た。2.5 $\mu\text{m}$ 角の矩形キャビティの開口部近傍で電子の強い反射が観察され、周期的な微細構造の作製に成功していることが確認できる。一方で、この

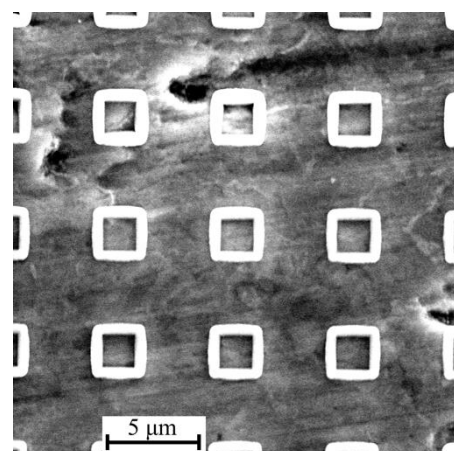


図1 金属基板に付与したキャビティ構造の電子顕微鏡写真

ときのキャビティの深さは数百nm程度に過ぎず、水やオレイン酸の加熱に効果を発揮する波長数 $\mu\text{m}$ の熱ふく射が強く放射されるものとはなっていない。キャビティの深さが現在の約10倍となれば目的の波長の熱ふく射が放射される一方で、加工を進めるにはよりエッチング耐性の高い無機物レジストを金属表面に堆積させる必要がある。しかし本事業の期間においては手法の改良が間に合わなかったため、代替となる加工手法の検討を行った。

次に、金属よりも加工が容易なシリコン基板上に微細キャビティ構造を付与し、後に金薄膜をスパッタリングによって付与することで、図2に示す微細構造を製作した。この構造は、金属とシリコンの線膨張係数の違いに起因する脆性を有するものの、金属基板上に直接構造を付与した場合と同様の放射特性を発揮することが数値シミュレーションにより確認されている。加工に必要な消耗品（エッチング用ガス、スパッタリングターゲット）が事業期間中に不足し、手配に期間を要する都合から本事業期間中には製作が完了しなかったが、2024年度の上半期中を目処に本手法を用いた赤外線放射体の性能評価を進めていく予定である。

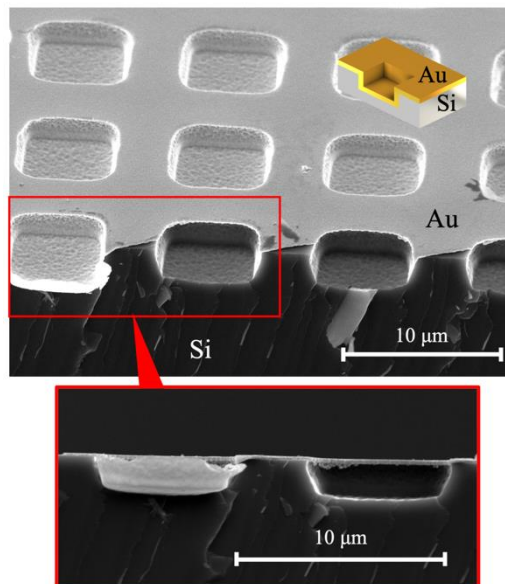


図2 シリコン基板に付与したキャビティ構造への金スパッタリング

## (2) 赤外線放射体を用いた加熱試験

([https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat\\_transfer/heattransferlab/result\\_JKA.html](https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/result_JKA.html))

図3に示す加熱試験装置を用いて、オレイン酸や水の加熱実験を行った。放射体としては、微細キャビティ構造を有する放射体の代わりに $\text{SiO}_2$ 及び $\text{CaF}_2$ ガラス放射体を用い、液面から5mm程度の間隔を空けて設置した。

$\text{SiO}_2$ ガラス放射体は水やオレイン酸がよく吸収する波長 $6\mu\text{m}$ の赤外線をよく放射する一方で、 $\text{CaF}_2$ ガラス放射体はあまり放射しない。そのため、放射体温度が同じ場合、 $\text{SiO}_2$ ガラス放射体を用いた場合の方が水やオレイン酸の表面温度の上昇が速いことが確認された。また、被加熱対象周りの温度の経時測定により、加熱された放射体と被加熱対象が近接して

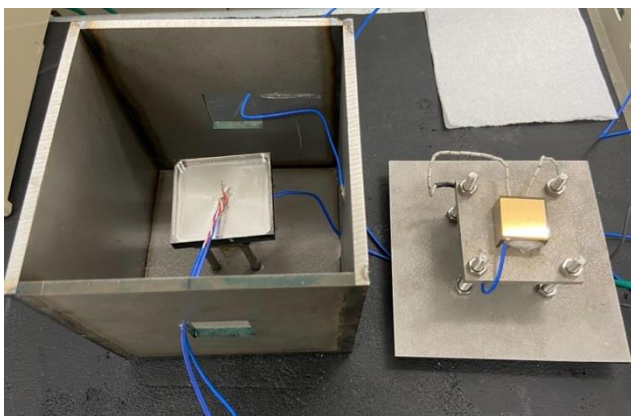


図3 製作した加熱試験装置。(左) 試料皿 (右) ガラス放射体

いる場合であっても熱伝導や対流の影響は比較的小さく、ふく射による伝熱が被加熱対象の温度上昇に強く影響していることが明らかとなった。

実験結果の妥当性を理論的に評価するため、実験で用いたオレイン酸や純水試料の熱伝導率及び赤外線透過率を測定した。更に、測定した物性値を用いて格子ボルツマン法による数値シミュレーションを行い、ふく射伝熱が熱伝導よりも速い時間スケールにて被加熱対象の温度上昇に寄与するといった、実験結果を保証する結果が得られた。

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

本研究により、赤外線を利用したヒータ（放射体）の有する、水や有機溶媒に対する高い伝熱能力が確認された。また、本研究ではあくまで液体の加熱を念頭においた実験を遂行したが、今回確認された熱ふく射の高い加熱能力は、固体として存在する水（氷）の融解をはじめとする、物質の相変化の促進への応用も視野に入ってくる。本研究で得られた知見を踏まえた、従来品よりも高いエネルギー効率や加熱速度を発揮する、新しい赤外線ヒータの開発や実用化が期待される。

#### 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

微細な構造を用いて放射体から放射される赤外線の波長を制御する理論に関する議論が、物理学あるいは工学分野にて過去20年間に進められてきた。並行して、実証実験も進められており、実施責任者もその一端を担っている。ただし、放射体から放射される赤外線の応用先については狭バンドギャップ光電池を用いた発電用途が多くを占めており、物質の加熱用途としての応用は数少ないものであった。この状況を踏まえ、実施責任者は2021年度より食品含有物質に対する赤外線加熱に焦点を当てた研究を進めている。今回の研究はその基礎部分の確立に関するものであり、おおよそ事前の目論見通りの実験結果を得ることができた。

#### 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

##### 【特許】

特になし。

##### 【国際学術論文】

本報告時点では未掲載、未投稿であるが、2024年度以降の論文投稿を検討している。

##### 【口頭発表】

- (1) 磯部和真, 内山雄介, 山田寛, 堀部明彦, “脂肪酸のふく射加熱と格子ボルツマン法による温度分布解析,” 第60回日本伝熱シンポジウム, J222, 福岡, 2023.
- (2) 森重翔太, 磯部和真, 山田寛, 堀部明彦, “選択波長赤外線加熱へ向けたマイクロキャビティ放射体の設計および作製,” 第35回中国四国伝熱セミナー, C-12, 高松, 2023.

## 7 補助事業に係る成果物

### (1)補助事業により作成したもの

加熱装置(図3)

([https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat\\_transfer/heattransferlab/result\\_JKA.html](https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/result_JKA.html))

### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 岡山大学 学術研究院 環境生命自然科学学域

(オカヤマダイガク ガクジュツケンキュウイン カンキョウセイメイシゼンカガクガクイキ)

住 所: 〒700-8530

岡山県北区津島中3-1-1

担 当 者: 助教 磯部 和真(イソベ カズマ)

担 当 部 署: 伝熱工学研究室(デンネツコウガクケンキュウシツ)

E - m a i l: [isobe.k.ad@okayama-u.ac.jp](mailto:isobe.k.ad@okayama-u.ac.jp)

U R L: [https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat\\_transfer/heattransferlab/](https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/)