

補助事業番号 2024M-429

補助事業名 2024年度 熱耐性を持つメタ表面赤外線放射体の創成に関する 補助事業

補助事業者名 岡山大学 磯部 和真

1 研究の概要

高温に加熱された物体から放射される赤外線の波長や強度は物質により固有であるが、メタ表面と呼ばれるナノメートルスケールの微細構造を金属の表面に施すことで、これを制御することが可能となる。しかし、金属はたとえ高融点であっても大気中で数百°Cに加熱すると酸化等が生じ、微細構造の劣化が生じる。本事業では、高融点の金属とセラミックを組み合わせたメタ表面の設計や製作に取り組み、数百°Cの大気環境下であってもふく射の波長制御を可能とする放射体の実証に取り組んだ。

2 研究の目的と背景

高温の物体が放射するふく射(赤外線)を利用した加熱機器は暖房用途(オイルヒータなど)から食品加工用途(木炭など)まで幅広く用いられている。赤外線は空間中において減衰せず、熱源から加熱対象まで瞬時に熱を伝える。ふく射の強度は放射体(ヒータ)の温度の4乗に比例するため、放射体が高温となるほどふく射の影響は支配的となる。また、放射体からの熱エネルギーを加熱対象へと伝えるためには対象の化学種(水分子など)の吸収波長と赤外線の波長がよく一致する必要があり、吸収されない波長のふく射は周囲へと散逸しエネルギーの損失となる。近年では、遠赤外線による加熱効果を謳った加熱機器が多数市販されているが、一般的な家電に用いられる物質から放射されるふく射には不要なものも含め幅広い波長のものが含まれるため、十分な熱効率とは言いきれない。仮に、ヒータから放射されるふく射の波長帯を周囲の物質が吸収しやすい範囲に絞るため、メタ表面と呼ばれる微細構造により物質本来が放射するものには限定されない波長のふく射を放射することのできる放射体の開発が近年進められているが、ふく射がより支配的となる数百°Cまで放射体を加熱した際の耐久性が課題となっている。加熱物体の温度が上昇するほど、放射されるふく射の強度も高くなるため、メタ表面放射体の工業的な応用を進めるためには熱耐性の付与あるいは劣化を前提としたメタ表面の設計が不可欠である。金属を用いたメタ表面放射体を高温の大気環境下で使用可能とするため、酸化による劣化が生じず熱耐性の高いセラミック層で金属層を覆ったメタ表面の設計や製作に取り組む。幾通りかの模擬試料に対する加熱試験を通じて、最大で1000°C程度の高温度環境であっても繰り返し使用可能な放射体の設計指針や製作方法について知見を得ることを目的とする。

3 研究内容

(1) 金属-セラミック混合基板の加熱試験

https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/result_JKA.html

シリコン基板に金薄膜をスパッタリング(現有装置を使用)した試料を常温から400°Cま

で加熱したところ、図1(a), (b)のように基板表面で金が融解する現象が観察され、表面性状の劣化も生じた。金の融点は通常1064°Cである。しかし、金原子がシリコン原子と合金を作ると、融点が363°Cまで下がる（共晶熔融現象）ため、期待されていた程の熱耐性が得られないことが明らかとなった。一方タングステンの融点は3422°Cと極めて高く、共晶熔融現象が生じたとしても融点は十分に高い。しかし、シリコン-タングステン多層膜を400°C以上に加熱したところ、図1(c), (d)のように酸化に伴う変色が生じ、表面の反射率も大きく低下することが光学物性測定により確認された。これらの結果を踏まえ、図2(a)に示す、シリコン基板上にタングステンと金を順に積層した多層膜の熱耐性評価を行った。この形態は、シリコン-金間の共晶熔融とタングステンの酸化の両方を防ぐことを企図したものである。加熱実験の結果、510°Cまでであれば図2(b), (c)の通り表面の酸化や性状の劣化を防げることが明らかとなり、メタ表面の熱耐性向上へ向けて有用な基礎的知見となった。

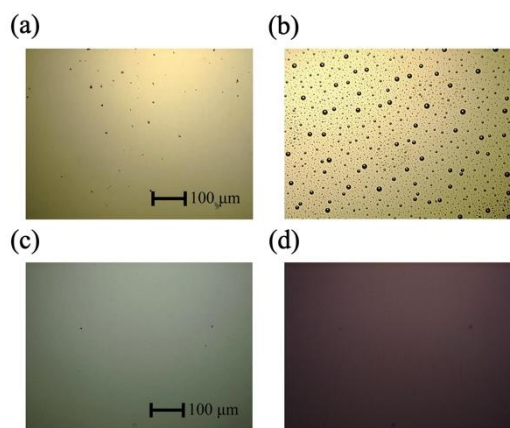


図1 Si基板上の(a), (b) Auあるいは(c), (d) W薄膜の加熱(a), (c)前あるいは(b), (d)後の顕微観察結果。

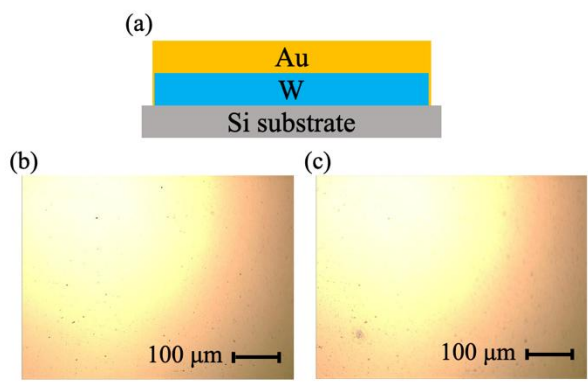


図2 (a) Si-W-Au多層膜. 加熱(b)前あるいは(c)後のSi-W-Au多層膜の顕微観察結果。

(2) 数値シミュレーションによる構造設計

https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/result_JKA.html

時間領域差分法 (finite difference time domain method: FDTD) を用いた電磁場に関する数値シミュレーションにより、メタ表面赤外線放射体の設計を行った。これまで、図3(a)に示す構造全体が金属で構成された矩形キャビティ放射体を加熱することにより、波長を限定した赤外線を放射できることがわかってきた。本事業では熱耐性の観点から金属の使用割合を減らすため、図3(b), (c)のようにシリコン基板で構成された矩形のキャビティ構造の表面に金属膜を施した構造を提案し、その放射特性をシミュレーションにより評価した。その結果、基板をセラミックとした場合であっても、表面に金属層をコーティングした上でキャビティの開口部サイズ (L_x , L_y , L_z) を統一すれば、図4に示す通り金属のみによって構成された矩形キャビティと同等の放射率スペクトルを発現することが明らかとな

った。

また放射体の製作に先駆けて、ベイズ最適化を用いたキャビティ構造の形状最適化を行った。本事業では、水や氷を放射体からのふく射により加熱することを想定して、波長 $2.9\mu\text{m}$ に放射率の極大値を持ち、かつその波長選択性が高くなる構造パラメータの探索を行った。その結果、当初想定通りの期間で最適なパラメータを導出することができた。

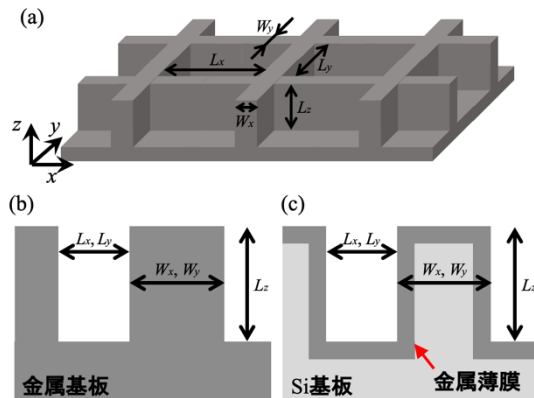


図3 (a) 周期的キャビティ構造。(b) 金属あるいは(c) Siを基板としたキャビティ断面の模式図。

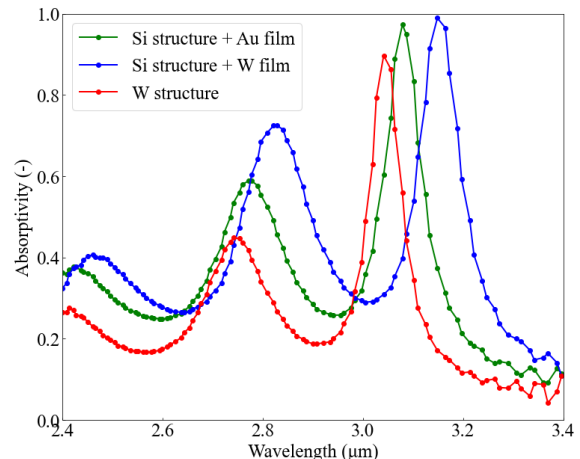


図4 数値シミュレーション結果。

(3) 金属-セラミック混合メタ表面放射体の製作

(https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/result_JKA.html)

シリコン基板上に、電子線描画（共用装置を使用）、反応性イオンエッチング（現有装置を使用）、スパッタリング（現有装置を使用）を行うことで、メタ表面赤外線放射体の製作を行った。本事業の上半期には、開口部幅が $6.0\mu\text{m}$ 、深さが $1.7\mu\text{m}$ である矩形のキャビティを周期的に付与したシリコン基板上にタングステンをスパッタリングしたメタ表面を製作し、加熱の前後における放射率スペクトルの変化度合いを評価した。メタ表面が引き起こす共鳴現象のため、加熱前には放射率スペクトルに赤外線の波長依存性が確認された一方で、加熱後には表面のタングステンの酸化により波長によらず放射率が一定となりメタ表面の機能が失われていることが確認された。

下半期には、項目①、②の実施結果を踏まえて、シリコン基板上へタングステンと金を順に積層することで熱耐性を付与したメタ表面の製作と評価を行った。図5は作成した矩形キャビティ構造の断面の電子顕微鏡写真である。本研究では、このキャビティ構造を一定温度まで昇温した後に冷却して観察するという工程を繰り返し、熱耐性を評価した。 260°C 付近までは、常温時と同じ構造が維持されているため、放射率スペクトルについても変化は確認されなかった。一方で 340°C 以上に昇温すると、徐々にキャビティ内部の壁面に堆積していた

金属層の融解が観察され、放射率スペクトルの波長依存性が失われていく様子が確認された。これは、スパッタリング工程で十分な厚さの金属層を壁面に堆積させることが出来なかったために、金属層の欠陥部分から酸化や共晶溶融が進行したことが原因であると考えられる。金属多層膜を微細構造の周囲に均一に堆積させる技術の確立が、メタ表面の熱耐性をさらに向上させるために不可欠であることが明らかとなった。

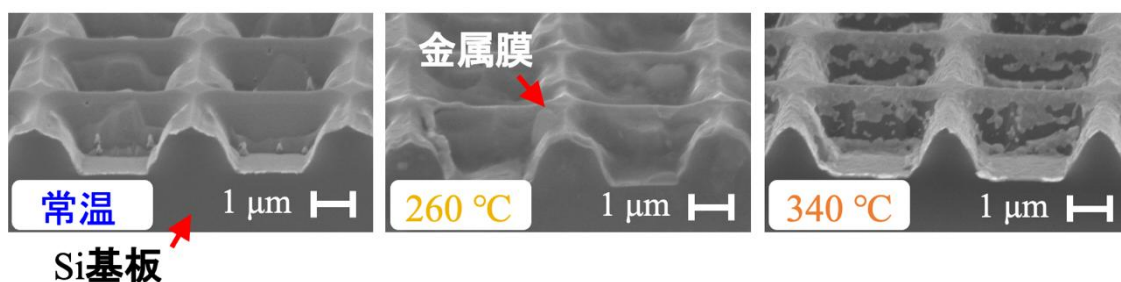


図5 加熱試験前後のキャビティ表面状態の変化。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

ナノ・マイクロ加工技術の進歩に伴い、特定の波長のふく射(赤外線)を選択的に放射する性質を持った赤外線ヒータの産業応用が進んでいくと予測される。応用例として、日本ガイシにより開発されている新しい乾燥装置などが挙げられる(https://www.ngk.co.jp/dryness_lp/)。本研究は、そのような製品の実現あるいは性能向上の上で不可欠となる、耐久性に関する課題の解決に資する基礎的な研究である。今後もメタ表面放射体の熱耐性を向上させるためのノウハウを継続して積み上げることで、加熱、乾燥装置への導入機会の増加を目指す。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

メタ表面を用いて放射体(赤外線ヒータ)から放射される赤外線を特定の波長のものに制限するため、物理学あるいは工学分野にて20年間程度議論が継続されており、筆者もその一端を担っている。ただし、放射体そのものの熱、化学的安定性に関する議論や検証は十分に行われておらず、真空あるいは窒素雰囲気下のような不活性環境であれば問題は生じない、という安易な見解が広がっていた。その流れの中、本事業ではメタ表面を構成する材料の大気雰囲気下における熱や化学的耐性に向き合った基礎研究を行い、酸化現象のみならずメタ表面を構成する材料同士の共晶溶融現象が微細構造に悪影響を及ぼすことを突き止めることができた。本事業で得られた知見は、今後もメタ表面を有する放射体の設計を継続するにあたって不可欠なものとなったといえる。

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，成果をまとめた論文を執筆中である。

【口頭発表】

(1) 磯部和真, 森重翔太, 山田寛, 堀部明彦, “大気環境下における金属放射体の加熱による分光放射率変化,” 第45回日本熱物性シンポジウム, B123, 長岡, 2024.

【ポスター発表】

(1) Shota Morishige, Kazuma Isobe, Yutaka Yamada, Akihiko Horibe, “Investigation of structural stability of high temperature microcavity emitter,” 5th International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (NanoRad2024), PS11, Sapporo, 2024

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

- ・高温in-situ可視化装置 (図6)

(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

- ・事業成果周知のためのポスター(図7)

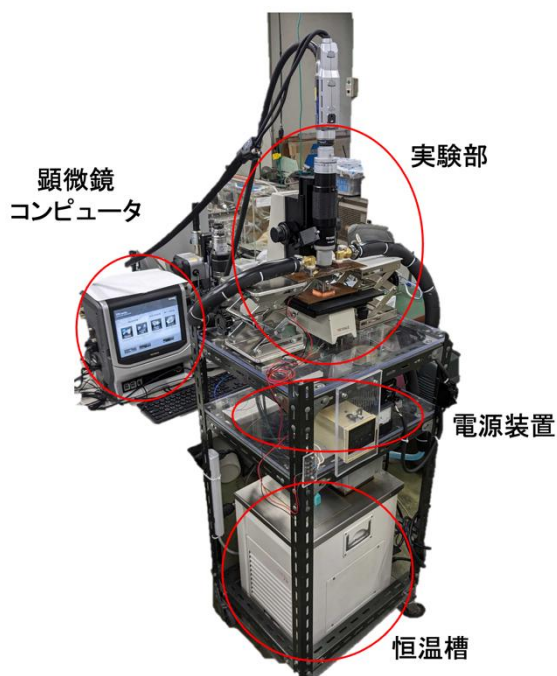


図6 高温 in-situ 可視化装置.

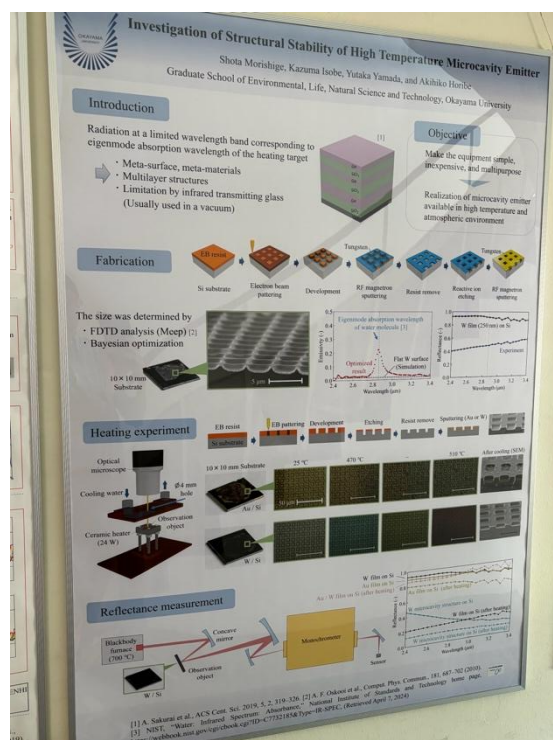


図7 学内掲示用 A0 サイズポスター.

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

U R L: https://www.cc.okayama-u.ac.jp/heat_transfer/heattransferlab/