

LEDの更なる高効率化・省エネルギーを図る 新たな高放熱性セラミックス基板材料の開発 ～放熱性セラミックスの放射特性に関する基礎的検討～

窯業系チーム 高石 大吾, 稲田 博文, 荒川 裕也

要 旨

近年、LED照明が急速に普及しているが、その高輝度化、ハイパワー化に伴う放熱対策は喫緊の課題であり、セラミックスの放射による放熱効果が注目されるようになってきている。本研究では、セラミック製放射放熱部材・ヒートシンクの開発により、本課題を解決することを目的として基礎的検討を行った。セラミック、金属、樹脂の各材料の分光放射率測定を行い、物質による赤外放射特性の違いを評価した。また、アルミナセラミック試料を作製・加工して、物体の表面状態が放射率に及ぼす影響について評価を行った。セラミックスによる放射放熱の有効性を示唆する結果が得られた。

1. はじめに

近年、LED (Light Emitting Diode; 発光ダイオード) を用いた照明器具が広く普及している。2014年に「明るく省エネ型の白色光源を可能にした効率的な青色LEDの発明」により、赤崎、天野、中村氏にノーベル物理学賞が授与されたことは記憶に新しい。白色LED照明の特徴は、省エネルギー、高効率であり、高輝度、高演色性、調光性に優れ、熱線や紫外線が少ないこととされている。全固体照明であることから、長寿命かつ高信頼性であり、また視認性にも優れることから、信号等の屋外用途にも採用されている。このような優れた特性から、最近では自動車のヘッドランプやスタジアムの照明等に用いられる高輝度LEDも開発され、社会実装が進められている。LED光源が放射する光自体にはほとんど熱線が含まれていないが、LED素子自体は発熱し、投入した電力の70%程度は熱になるとされている。LED照明の高輝度化は、つまり発光体であるLED素子に流れる電流電圧の増大を意味し、発光効率の大幅な向上が望めない現状においては温度の上昇は避けられない。LED照明には様々な方式が存在するが、LEDパッケージ及びモジュール化されている照明は、樹脂で封止されたLED素子、電極及び電子部品等から構成されている。温度の上昇は発光強度の低下、封止材料や電子部品の劣化を招き、製品寿命が4万時間と設計されている場合でも、実際には低寿命化することが指摘されている。

熱の移動形態には、熱移動の3原則と言われる熱伝

導、対流、熱放射の3種類がある¹⁾。熱伝導は物質、対流は流体、熱放射は放射線(電磁波)によって熱がエネルギーの高いところから低いところへ運ばれる現象である。熱放射は電磁波によるエネルギーの移動であることから、物質を介さずに熱の移動が行われ、真空中でも熱を伝えることが可能である。

従来のLED照明の放熱対策としては、アルミニウム製の放熱フィンによる空冷が一般的であり、空冷ファンと組み合わせる場合も見られる。これは熱伝導と対流を利用した放熱方式であるが、高輝度化による温度上昇に対して冷却効率の限界が危惧されている。また構造が大きくなり、複雑化することも課題である。一方、セラミックスは遠赤外線ヒーターに使用されていることから理解されるように、赤外波長域の放射特性に優れている。この放射特性に着目し、放射放熱による冷却が提案され^{2,3)}、利用され始めている。遠赤外放射については、乾燥や加熱といったいわゆる遠赤効果についての研究は行われているが^{4,5)}、放熱性という観点からの評価はほとんど行われていない。この方式は、従来に比べてシンプルな構造で実現できること、密閉型で対流による熱移動が困難なパッケージでも冷却効果が期待できることなどの利点がある。そこで本研究では、セラミックスによる放熱部材・ヒートシンクの開発を目指して、各種材料について放射率測定を行い、材料、組成及び表面状態が及ぼす影響を評価することを目的として基礎的な検討を行った。

2. 実験方法

2.1 試料

各種材料の放射率を比較するため、金属材料（純アルミニウム、純銅）、樹脂（PTFE）、セラミックス（アルミナ、ジルコニア、AlN、Si₃N₄）を用意した。金属材料、樹脂、アルミナ、Si₃N₄は市販の部材を所定の寸法に切断加工し測定用試料とした。ジルコニアとAlNは、市販の顆粒を金型プレス成形後、所定の温度で焼結し測定用試料とした。

またセラミックスについては、表面状態が放射率に与える影響を評価するため、焼結体に対して加工を行い未加工面と比較した。高純度アルミナDS-25（大明化学工業（株））の顆粒を用いて金型による一軸プレスで仮成形した後、冷間等方加圧成形（CIP）法により400MPaで成形体を得た。1600℃で1 h焼成し得られた焼結体について、研削・研磨加工として、焼結体上面に#250ダイヤモンド砥石による研削加工（砥石研削面）及び#1500で研磨（研磨面）して測定用試料とした。また、同焼結体に対する切削による溝加工として、焼結体上面に、幅1 mm、高さ2 mmの溝を、1 mm間隔で14本（溝数14）、あるいは、0.5mm間隔で18本（溝数18）、切削加工により付与した。

2.2 分光放射率測定

各試料の放射率は、日本工業規格JIS R1802に準拠した放射率測定システム（（株）島津製作所）を用いて測定した。本システムは、黒体炉、試料加熱炉、温度制御器、FT-IRを用いた光学系及び検出器から構成されている。測定手順は、黒体炉と試料加熱炉を測定温度に設定し、温度が安定したら、まず黒体炉の放射エネルギーを測定する。次に試料加熱炉側に光路を切り替え、設定温度に加熱した試料表面からの放射エネルギーを測定する。今回は200℃で測定した。試料加熱炉は試料下部からの加熱方式のため、試料表面温度は設定温度より低い可能性がある。表面温度を補正するため、測定試料と同一形状の試料をもう一つ用意し、その表面に放射率既知（0.94）の黒体スプレーを塗布して放射率を測定し、温度補正を行った。放射率は「放射体の放射発散度とその放射体と同温度の黒体の放射発散度との比」として定義されている⁶⁾。黒体から放射されるエネルギーはプランクの法則として知られるように波長と物体の温度の関数となる⁷⁾。図1に示すように、温度が高くなるに従い黒体の放射発散輝

度は大きくなる。測定で得られた各放射エネルギーから試料の分光放射率を求めた。また、試料の分光放射率に、プランクの式から得られる所定の温度の黒体の分光放射輝度を乗じることにより、その試料の分光放射輝度を求めた。さらに、試料の積分放射輝度をプランクの式から得られる分光放射輝度の積分値で割ることで、各試料の積分放射率を算出した。

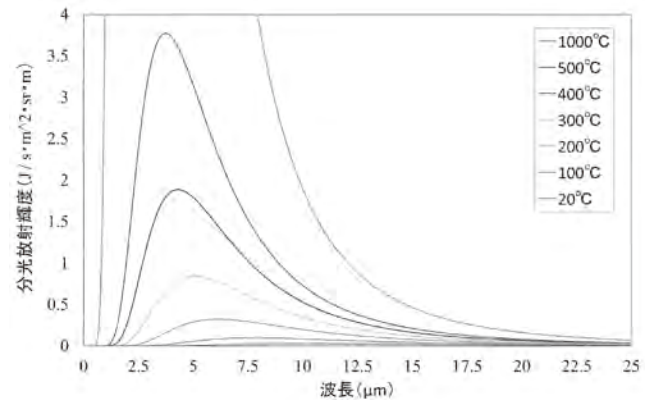


図1 各温度での黒体の分光放射輝度

3. 結果および考察

3.1 各種材料の放射率

セラミック、金属、樹脂の200℃での放射率測定結果を図2に示す。アルミナセラミックスは、5～12 μm程度の波長範囲において100%近い高い放射率を示す特徴的なスペクトルが観測された。純アルミニウム及び純銅は2.5～25 μmの全波長範囲にわたって20%以下であった。一方、PTFEは測定波長範囲においてはほぼ一定の80%以上の放射率を示した。図3に同じく分光放射輝度の結果を示す。プランクの式から計算した黒体放射のスペクトルのピークである7 μm付近では、アルミナセラミックスの放射が最も大きいことが分かる。10～20 μmの波長範囲では、アルミナセラミックスの放射が低下する一方、PTFEは黒体放射スペクトルに沿った一定の強度を示した。金属材料はいずれも極めて低い分光放射輝度を示すことが分かった。

黒体に電磁波が入射した場合すべて吸収される。温度が平衡状態にある場合、キルヒホッフの法則から放射率は吸収率と等しくなるので、黒体からの放射率は100%となる。しかし、黒体でない物質では吸収以外に反射と透過が生じ、吸収率+反射率+透過率=1の関係が成り立つ。ここで、図2の放射率測定結果をみ

ると、金属材料は表面光沢があり反射率が大きいことから吸収率が小さく、つまり放射率が小さいことが理解される。樹脂は遠赤外領域で幅広く吸収帯を持つことから、80%程度の一定の放射率を示したと考えられる。図3から分光放射輝度のスペクトルは5~12 μ mの波長範囲で大きくなっているが、この範囲で放射が大きいアルミナセラミックは、放射放熱の効果が大きいことが期待される。

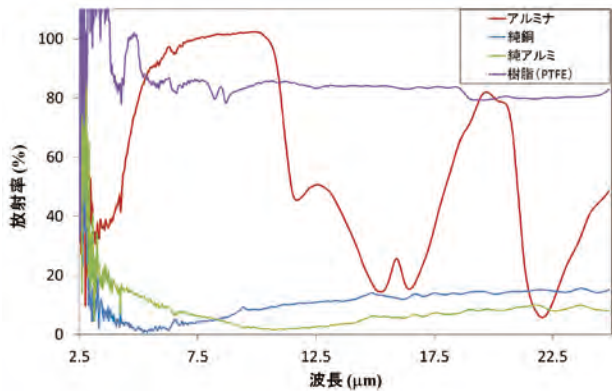


図2 アルミナセラミック、純銅、純アルミ、樹脂 (PTFE) の200°Cでの分光放射率スペクトル

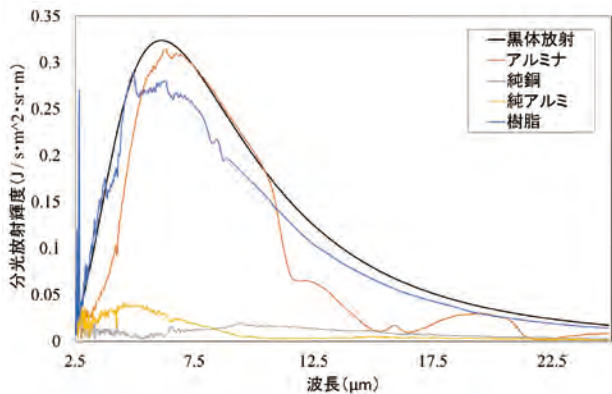


図3 アルミナセラミック、純銅、純アルミ、樹脂 (PTFE) の200°Cでの分光放射輝度

各種セラミックスの放射率測定結果を図4~7に示す。セラミック材料であっても成分が異なるものは放射率スペクトルの形状が異なることが分かる。100°C及び200°Cの分光放射輝度の結果を図8及び図9に示す。100°Cにおいて、黒体放射が最も高い5~10 μ m付近の波長範囲では、 Al_2O_3 のスペクトルが最も強い放射を示した。12 μ m以上では Si_3N_4 が強い放射を示した。一方、200°Cでは、黒体放射スペクトルのピークが低波長側にシフトし、同時に各種セラミックのピークもシフトした。

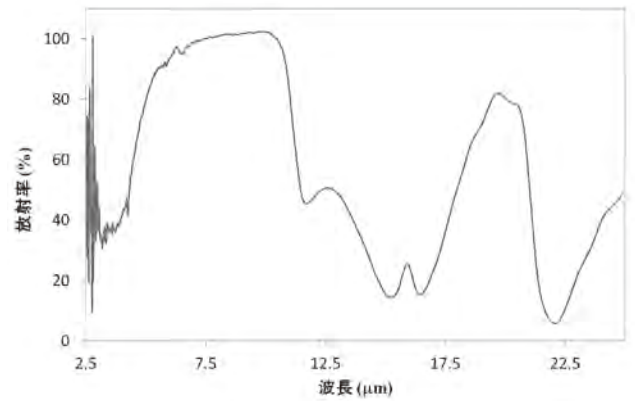


図4 アルミナセラミックの200°Cでの分光放射率スペクトル

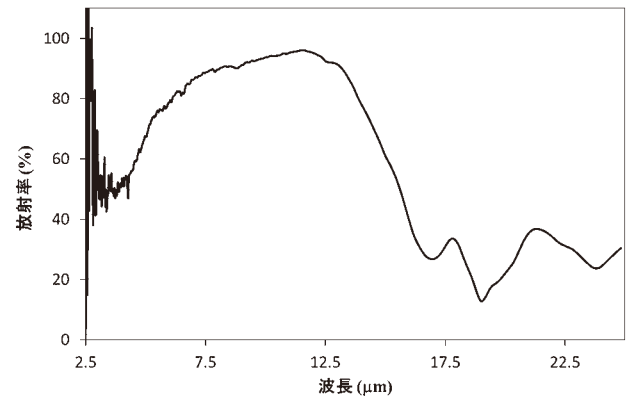


図5 ジルコニアセラミックの200°Cでの分光放射率スペクトル

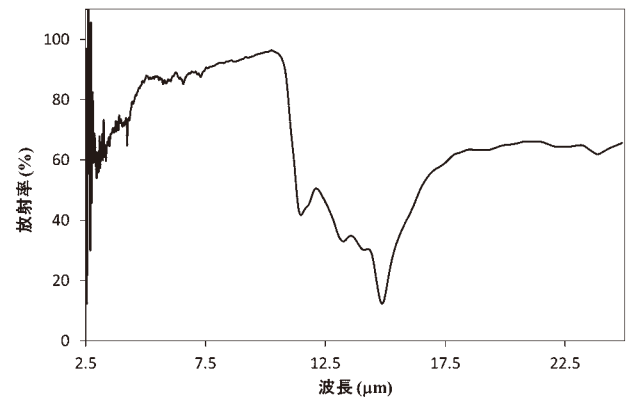


図6 AlNセラミックの200°Cでの分光放射率スペクトル

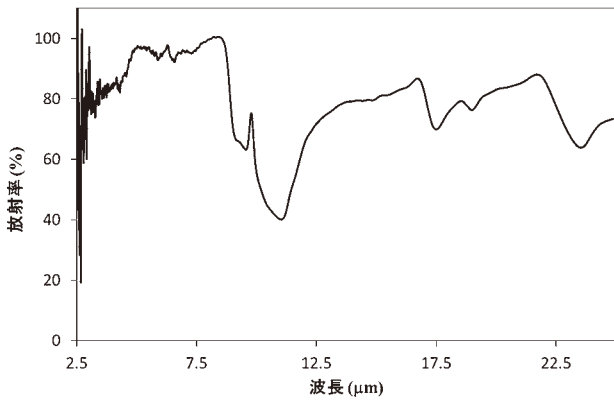


図7 Si₃N₄セラミックの200℃での分光放射率スペクトル

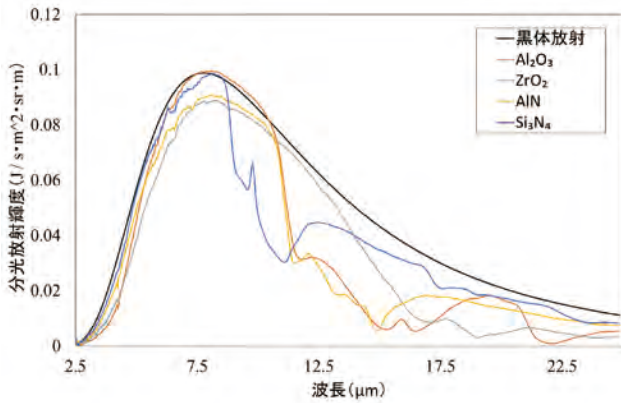


図8 各種セラミック（アルミナ、ジルコニア、AlN、Si₃N₄）の100℃での分光放射輝度

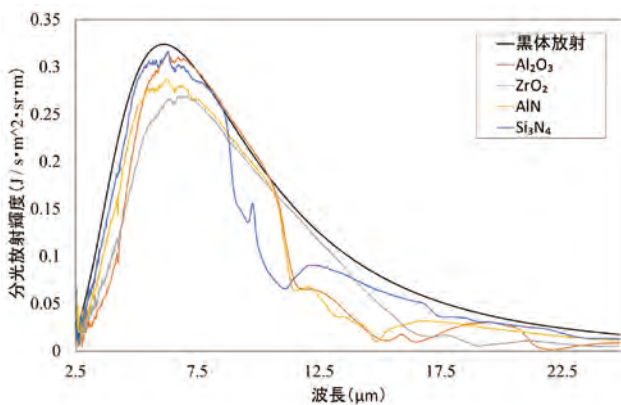


図9 各種セラミック（アルミナ、ジルコニア、AlN、Si₃N₄）の200℃での分光放射輝度

表1に100℃及び200℃における積分放射率の算出結果をまとめた。セラミック材料は0.71~0.86、金属は0.1未満、樹脂（PTFE）は約0.85であった。この結果から、金属材料はそのままでは放射による放熱は望めないことが明らかである。一方、樹脂について、積分放射率は大きいものの熱伝導率がセラミックの1/100以下と著しく小さく、断熱材として働くため、放熱材料としては有効でないと考えられる。セラミックを比較した場合、200℃の積分放射率は0.74~0.82と10%程度の差と見積もられる。この差が放熱性にどれだけ影響するか、定量的な評価が今後の課題となる。また、分光放射輝度の100℃と200℃を比較すると、スペクトルがシフトしており、放射による放熱特性も温度により変化することが推察される。放射放熱材料としてセラミックを用いる場合、どのような温度域で効果を発揮するのか、機械的特性や電気的特性と併せて、詳細な検討が必要と考えられる。

表1 各種材料の積分放射率

材質	積分放射率	
	100℃	200℃
アルミナ	0.71	0.74
純銅	0.09	0.07
純アルミ	0.06	0.08
樹脂（PTFE）	0.84	0.86
ジルコニア	0.74	0.75
窒化アルミ	0.71	0.75
窒化珪素	0.79	0.82
黒体	1.00	1.00

3.2 表面状態の影響

研削・研磨加工試料の放射率測定結果を図10に示す。未加工面を基準にすると、10~15μmの波長範囲で研磨面の放射率は低下し、砥石研削面は増大した。それ以外の波長範囲では大きな違いは観測されなかった。表面積の増加に伴い放射率は増大し、表面積の減少に伴い放射率も減少することが示された。また、切削による溝加工試料の放射率測定結果を図11に示す。未加工面に比べ、いずれの試料も放射率は増大し、溝数の多い方が若干高くなった。本システムでは垂直方向の放射成分のみを検出しており、角度依存性については考慮されていないが、今回の測定結果は表面積の増大が放射放熱に効果的であることを示唆するものといえる。

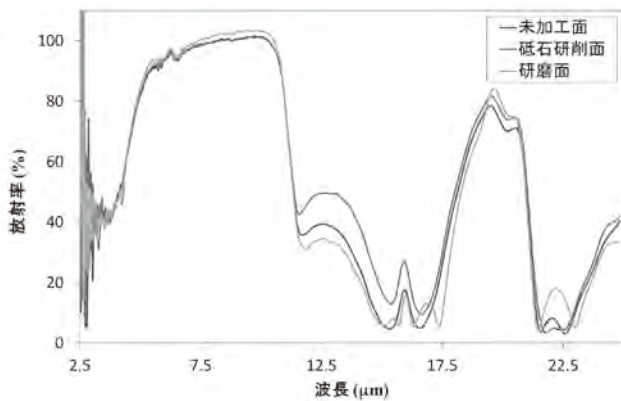


図10 研削・研磨加工試料の200°Cでの分光放射率スペクトル

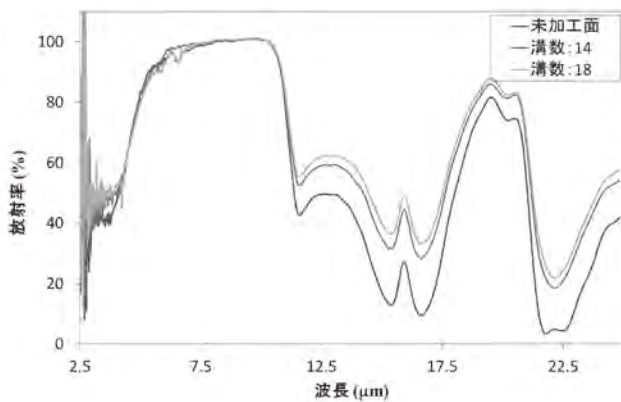


図11 切削による溝加工試料の200°Cでの分光放射率スペクトル

4. まとめ

セラミック製放射放熱部材・ヒートシンクの開発により、高密度化、ハイパワー化するLED照明や電子デバイスの課題である熱を解決することを目的として基礎的検討を行った。セラミック、金属、樹脂の各材料の分光放射率測定を行い、物質による赤外放射特性の違いを評価した。また、アルミナセラミック試料を作製・加工して、物体の表面状態が放射率に及ぼす影響について評価を行った。セラミックスによる放射放熱の有効性を示唆する結果が得られた。

セラミックの放射放熱特性の向上のためには、その組成や微構造、表面状態等が分光放射率に及ぼす影響をより詳細に検討することが重要であり、今後の課題といえる。また、ヒートシンク等の放熱材料の開発の観点から、放射による放熱特性の定量的評価や、熱伝導及び対流による熱移動と組み合わせた冷却効果を、

総合的に考える必要がある。

引用文献

- 1) 伝熱工学 一般社団法人 日本機械学会, 2005 (丸善出版株式会社)
- 2) 特開2012-180275
- 3) 特開2017-45979
- 4) 遠赤外線セラミックス産業対策調査研究 (平成3年度 無機新素材産業対策調査委託調査結果報告書), 平成4年, 遠赤外線産業協会
- 5) 非加熱部会測定分会活動報告書, 平成5年, 社団法人遠赤外線協会
- 6) 日本工業規格 JIS Z 8117 (2002)
- 7) 光放射の基礎 社団法人 照明学会, 2005年 (ウシオ電機株式会社)