■特集資料■ LED 照明を支える要素技術

LED 素子を冷やす：電磁放射体の応用

LED Elements : Application of Electro-Magnetic Radiant Materials

◀キー・ワード：LED, 放射冷却, 電磁放射, 熱抵抗, レゾナンス波長, 分光放射率

◀KEYWORDS : Light Emitting Diode, radiation cooling, radiant materials, thermal resistance, resonance frequency, spectrum emissivity

1940年生, 1967年法政大学工学研究科修士課程修了, 1975年工学博士(東京大学), 日本機械学会フェロー, 法政大学名誉教授, 現在, (株)APロウマテリアルズにて電磁波研究に従事, 受賞: 日本機械学会・日本燃焼学会論文賞等.

岡 島 敏
Satoshi Okajima

ABSTRACT

Light Emitting Diode (LED) is very weak in the case when it is exposed to the hot environments. It may be predicted that the deterioration of diode may occur in atmosphere more than 80 °C and the performance and lifetime of LED considerably go down under such high temperature atmosphere. So, it will be strongly requested that the diode temperature always has to maintain less than 80 °C. As the one of provision for the heat release problem of LED, the author has developed the radiation cooling technique for releasing much quantities of heat generated from LED using radiation materials having with 0.94 and 180 W/mK in spectrum emissivity and thermal conductivity, respectively. The radiation materials developed for the study also involve the resonance frequency with the wave number emitting from diode elements. At least, the radiation cooling effect of radiant materials makes it possible to decrease the diode temperature within the range of approximately 10%, comparing with that in the case without radiant materials. This fact indicates that the radiant materials are very useful for releasing much quantities of heat generated from diode.

1. はじめに

原子力発電所の事故により大幅な節電が求められている現在, 通常の15分の1~5分の1程度の節電可能なLED (Light Emitting Diode) が注目を浴びている. しかしLEDは, 熱に弱く, おおよそ80°C前後でダイオードの著しい劣化が起り, 性能が低下するとともに, その寿命も極端に短くなる. このようなことからLEDの冷却は必須の条件である.

一般に, 冷却法には対流(自然・強制)熱伝達によるもの, および放射冷却によるものに区別される. 前者は温度境界層を介しての熱伝達であり, ヌセルト数(Nu)が重要な役割を演じる. これに対して後者は物体(放射体)から電磁波を放射することで温度を降下させる方法で, これは放射体の波長特性と熱抵抗値が重要な役割を演じ, 前者に比べて極めて効果的な冷却法である.

そこで本研究では, 電磁波による放射冷却に注目し, (I) 被写体(LED) 周囲温度に対して共鳴波長帯を有し, (II) 分光放射率(ϵ)が極めて高く($0.9 < \epsilon < 1.0$), (III) 熱抵抗が小さく(熱伝導率 $\lambda \approx 180 \text{ W/mK}$, Feの約2倍), (IV) 衝撃に対して強く(鉛筆硬度評価テスト: 9H), (V) 耐熱温度も高く($\approx 700^\circ\text{C}$), かつ(VI)放射線量は 0.35 mSv/year (密着測定)以下の塗料化された電磁放射体(Aprm電磁放射体という)を開発し¹⁾, LEDの構成要素であるダイオードの温度低減に対する放射冷却効果についての実験を行ったものである.

2. 電磁放射体の波長特性および性能について

図1にはFT-IR法によって測定された電磁放射体の波長分布を, 図2にはその電磁放射体の特性を把握するための実験装置を, および図3にはその放射特性を示す. 図1から, 電磁放射体はLEDが醸し出す周囲温度との共鳴波長である遠赤外線振動領域の波長帯を包含しており, その波長帯での分光放射率 $\epsilon \approx 0.94$ で, かつその波長帯全域にわたってほぼ一様に分布していることがわかる. 図2においては熱源としてクリプトン電球が用いられ, 放射冷却に関する温度計測は銅板(100×100×2

図1 電磁放射体の波長分布 (FT-IR 法)
Fig.1 The spectrum emissivity and wave profile of Aprm radiant materials (FT-IR Method).

図2 電磁放射体性能把握のための実験装置
Fig.2 Experimental equipment for evaluating the radiant cooling effect of Aprm radiant materials.

図3 電磁放射体による放射冷却性能
Fig.3 Performance of radiation cooling by Aprm radiant materials.

mm)の中央裏側に微小k-型熱電対を張り付けることによって行われる。したがって、電磁放射体を銅板に塗布した場合(塗布厚さ $b < 0.2\text{mm}$)と未塗布の場合($b = 0$)との温度差の比較によって放射冷却の効果を評価・検討することができる。図3は、電磁放射体の銅板への塗布の有無において、両者のエネルギー投入からの時間に対する温度変化を示したものである。この図から両者ともほぼ20分後には温度平衡状態に達し、このとき両者の間には約 23°C の温度差が生じていることがわかる(温度降下率:9.3%)。実験は温度 24°C 、大気圧、湿度40%の下

図4 電磁放射体の電球形LEDランプへの塗布位置
Fig.4 Application to LED of Aprm radiant materials.

で行われる。

3. 電球形LEDランプの電磁放射体による冷却効果について

電磁放射体は、図4に示すように電球形LEDランプのアルミ・放熱部全体にわたって一様に 0.2mm 程度の厚

- 1 Aprm 放射体が塗布されている場合の電球表面温度分布
- 2 Aprm 放射体が未塗布の場合の電球表面温度分布
- 3 Aprm 放射体が塗布されている場合の電球内中心温度分布
- 4 Aprm 放射体が未塗布の場合の電球内中心温度分布

図5(a) 某社製電球形LEDランプの上向き照明における温度分布

Fig.5(a) Temperature profile at upward lighting of LED lamp produced by some companies.

図5(b) 某社製電球形LEDランプの下向き照明における温度分布

Fig.5(b) Temperature profile at downward lighting of LED lamp produced by some companies.

図6 電球形LEDランプの上向き照明におけるAprm放射体によるダイオードおよび基板温度の降下

Fig.6 Temperature drop of diode and foundation plate by Aprm radiant materials for upward lighting of LED produced by some companies.

さで塗布される。この場合の電磁放射体の塗料としての24時間室温乾燥の鉛筆硬度評価は9Hである。電磁放射体の色は黒色以外に、灰色、薄灰色、銀色、白色などが開発されている。

図5(a)および図5(b)は、直径60mmの某社製電球形LEDランプ(消費電力:7.7W, ダイオード数:18個, 580 ml)において、それぞれ上向きおよび下向き照明での電球内部および電球表面温度分布を示したものである。温度分布の計測は照明開始時から2時間経過し、十分に定常状態に達した後に行われる。これらの図から、電磁放射体が塗布されている場合と未塗布の場合との温度分布の比較において上向きおよび下向き照明とも電磁放射体の放射冷却の効果が明確に表れていることがわかる。たとえばその表面温度はLED基板部分では、電磁放射体の未塗布の場合には90°C近くまで達するが、電磁放射体の塗布によって約10%その温度を低下させることができる。また、電球形LEDランプの表面温度は、電球材料(材質:ポリカーボネイト, 熱伝導率 $\lambda = 0.19\text{W/mK}$, 耐熱温度120°C)²⁾の熱伝導率の低下によって電球先端部に近づくにつれて温度は降下を続ける。これは高温のアルミ・放熱部から熱伝導によって電球に伝えられた熱がその先端に近づくにしたがって徐々に大気中に放出されていくためである。

一方、電磁放射体が塗布されていないLEDにおける放熱は、もちろん、若干の放射冷却も存在するが、主に温度境界層を介しての自然対流熱伝達によるものである。図5(a)および図5(b)からもわかるように、上向きおよび下向き照明ともアルミ・放熱部の温度が80°Cを大きく超えている。また電球中心内部の温度は、当然、その表面温度よりも高く、かつその表面温度と対応して変化するが、自然対流の影響により電球先端の温度は上

向き照明の方が下向き照明よりも若干高くなる。

図6は、某社製の出力7.7Wの電球形LEDランプにおいて、電磁放射体による放射冷却効果について、上向き照明での最終温度(平衡温度)に達した後のダイオードおよび基板の温度降下の変化を示したものである。この場合のダイオードおよび基板の温度計測は、電球先端中心部に直径0.5mmの孔を開け、そこから微小k-型熱電対を挿入し、ダイオードおよび基板に軽く接触させることによって行われる。この図によれば、上向き照明では電磁放射体の塗布による放射冷却でのダイオードの温度降下は11.7°Cで、温度降下率は9.82%であり、また基板における温度降下は16.5°Cで、温度降下率は17.9%である。これらのことから電磁放射体の放射冷却による効果は、比較的大きな効果を有することが理解できる。

4. 電磁放射体の評価

図7は、電磁放射体の放射冷却効果を評価するための一例として、100×100×2mmの平板(自然・強制)熱伝達に対する放射冷却の効果を示したものである。ここで、強制対流熱伝達(層流)におけるヌセルト数(Nu)として、下記の式が用いられる³⁾。

$$Nu = 0.664Pr^{1/3}Re^{1/2}$$

ここで、 Pr はプラント数、 Re はレイノルズ数である。この図7から、電磁放射体の放射による熱放出量は、空気流速が5 m/s以下では強制対流熱伝達による熱放出量を上回り、自然対流熱伝達のそれと比較すると電磁放射体の方が約3倍大きい熱放出量を示していることがわかる。

図8は、電磁放射体の放射冷却性能を、ほかの代表的な電磁放射体であるアルマイトおよび某社製熱放射塗料との性能比較を示したものである(表1)。この図から、

図7 電磁放射体および自然・強制対流熱伝達における熱放出量の比較

Fig.7 Comparison among the heat quantities by Aprm radiant cooling, natural and forced convection.

図8 各放射塗料における放射性能（熱放出量）の比較
Fig.8 Performance comparison of radiant cooling of aluminate and thermal radiation paint against Aprm radiant materials.

電磁放射体の冷却効果はアルマイトに対しては18%増、熱放射塗料に対しては39.0%増であり、電磁放射体の放射冷却効果の大きさが理解できる。

5. おわりに

本報告は、LED 素子の放射冷却に関し、LED が醸し出す周囲温度との共鳴波長を含み、分光放射率が高く、

表1 各放射体における熱伝導率、放射率、熱抵抗値の比較（熱抵抗値はFe基準）

Table 1 Comparison of thermal conductivity, emissivity and ratio of thermal resistance for several kinds of materials under Fe standard.

放射体	熱伝導率	放射率	熱抵抗値
鉄	83.5 W/mk	$0.6 < \varepsilon < 0.8$	1 (Reference)
銅	400	0.03	0.21
アルミ	236	0.04	0.35
ステンレス	20	$0.2 < \varepsilon < 0.3$	4.18
珪素	10	0.83	8.4
熱放射塗料	15	0.92	5.6
アルマイト	80~230	0.6~0.7	0.36~0.98
Aprm	180	0.94	0.46

熱抵抗が小さく、衝撃に強く、かつ耐熱温度が高い電磁放射体を開発し、その優位性を検討したものである。

この結果、電磁放射体の LED 素子に対する冷却効果は、通常の未塗布の場合と比べて、およそ10%以上その素子の温度を低下させることが可能であることが判明した。このことは電磁放射体の冷却効果は LED 素子の発熱に対する温度降下に大きく貢献できることを示すものである。

参考文献

- 1) Okajima, S. and Zushi, O. : Experimental Observation on Single Fuel Droplets Burning in the Fields of a Specific Wave Number at Far Infrared Ray, Journal of the Combustion Society of Japan, 50-154, pp.52-56 (2008).
- 2) 小平圭一ほか：理化学年表, 丸善(株), pp.473-476 (1995).
- 3) 斎藤, 岡田, 一宮：伝熱工学, 産業図書 (1997).

連絡先

〒180-0002 東京都武蔵野市吉祥寺東町4-11-14
180-0002 4-11-14 Higashi-Machi Kichijoji Musashino-City Tokyo Japan
TEL : 0422-21-6851 FAX : 0422-21-6851
E-Mail : sofireuperg@yahoo.co.jp