# 球形ヒートパイプによる LED 冷却

~LED 冷却面積の飛躍的拡大~

メンバー:加藤 巧海、田首 孝次朗

第1章 研究の背景と狙い

1.1 研究の背景

近年、生活水準の向上が著しく、特に家電などの電気の重要性が高まっている.そのため消費電力が少ない LED 電球が注目されている。しかし LED 素子は熱に弱く、約 80℃ を超えると素子が劣化して、輝度の低下や寿命の低下に繋がる。本研究では、LED の発熱を電球表面全体に伝えて放熱を増進する電球の実現性について実験的に調べる.

#### 1.2 実験の対象

従来、口金近くの金属部からの放熱に限定されていたものを、光を通す球殻まで熱を伝 えるものにする.それにヒートパイプの原理を応用する.LEDの放熱を担う口金付近の金 属部分で作動流体の水を蒸発させ、その潜熱で球殻を高温に維持する.ヒートパイプでは 非凝縮性気体が悪影響を及ぼすので、気密性の高いガラスの球殻を用いる.この球殻の内 部にウィックとなる樹脂成形体を装着させ、球形のヒートパイプとなる装置を製作する. 本実験では透明な樹脂製のウィックと、透明な樹脂で支えられた布の2種類のウィックを 用いることにした.なお、透明な樹脂の生成には3Dプリンタを用いた.

#### 1.3 測定項目

本実験では模擬発熱部を 60℃、80℃に温度コントロールし、電力をカートリッジヒータ に加え、模擬発熱部と球殻表面の温度分布とヒーターへの入力電力を測定する.測定の際 には凝縮液を入れた場合と入れない場合、ガラス球殻の頂点(北極点)を上向きにした場合 と下向きにした場合の温度分布を比較して球形ヒートパイプが機能したかを確認する.温 度測定にはサーモグラティを主に、熱電対を補助的に用いる.

第2章 実験装置

2.1 ウィックとする樹脂成形体

使用する透明な樹脂成形体のウィックの構成は以下のようになっている.

・4分割で作成し組み立てる.

- ・寸法は外径 58mm、内径 55mm、厚さ 1.5mm
- ・緯度により周長(緯線に沿った長さ)が変化するが、溝幅 0.3mm が一定となるようにする.
- ・溝は、北緯 40°以南で 2°おきに 45本.
- ・それ以北は経度 0°と 90°を通る大円に平行とした. (図 1)
- ・ウィックだけでは強度が低いので、ウィックの内側に桟を入れた. (図2)
- ・蒸発を促進するために模擬発熱部の上面までウィックを伸ばす. 実際に装着したものを図3に示す.



図 1.ウィック上部



図 2. ウィックの 3D モデル(1/4)



図 3. 樹脂製ウィックを装着したガラス球殻

2.2 布とそれを支える樹脂成形体

溝幅 50 μ m を狙ったが作ることが出来なかったので布をウィックとするものを作成した. 樹脂成形体の外側に布を糸で固定してガラス球殻の内側に組み立てた. 全体図を図4 に示す.



図4. 布と布を支える樹脂成形体を装着したガラス球殻

2.3 球殻とアルミベース

電球を模した球形ヒートパイプのうち、ガラス球殻は 100W の白熱電球を切断したもの を用いた. 直径は 60mm、厚さは 1mm であり、高さ 48.5mm になる.

LED 電球の LED 素子部を模擬的に再現する発熱部の設計図を図 5 に示す.素材は、温度分布を抑えるために熱伝導率の高い A1070 を用いた.内部中央は円形で 1mm 高くなっている.2本のカートリッジヒータ(外径 3.1mm、全長 250mm、発熱部長さ 31.8mm、定格電圧 120V 時に 25W)を挿入して加熱する.外径 1mm の K型シース熱電対を先端中心から 21mm の位置にくるように挿入して温度測定、制御に利用する.ガラス球殻に接着する際はシリコンシーラント(信越化学工業製 KE-44)を用いる.



図 5. 模擬発熱台 設計図

2.4 アルミベースと温度制御

模擬発熱部の温度は温度調節器(オムロン製 E5CC)を使って制御する. 直流電圧装置(高 砂製作所製 ZX-S-400LA)を使い、アナログ信号で制御する. PID 制御であり、オートチュ ーニングで制御パラメータを決定した.

2.5 水の注入方法と保温ブロック

水の注入は、針をゴム栓に通した注射器を用い、ガラス球殻の北極点を下向きの状態に して行う.まず、水に溶け込んだ空気を抜くために、使用する水の真空引きを行う.ここ では 40℃程度に温めた水を真空ポンプで真空引きを行う.

次に下記の理由でバルブなどを温めた状態でニードルバルブを少しずつ緩め、水を注入 する. 注入量は 5cm<sup>3</sup>注入する.

真空に引いた状態で水を注入すると内部は飽和状態になるので、低温の部分に凝縮して そこに水が集まり、バルブの温度が低いと水がガラス球殻までいかず、そこに溜まってし まう.そこで図 6、図 7 に示す保温ブロックと断熱装置を用いてバルブ全体を温める.断 熱装置にはヒートパイプと A1070 を使用しており、保温ブロックには A5052 を使用して いる.水を注入する前に 1 時間ほど 60°Cに温めておく.更に水を入れる前にガラス球殻を 氷水で冷やす.



図 6.保温ブロック

図 7.断熱装置

**2.6** 温度と加熱量の測定

ヒートパイプの表面温度は熱電対とサーモグラフィー(アビオニクス社製 TVS-500)によ って測定する. 熱電対はワイヤ外径 0.125mm の熱電対素線(OMEGA 製 CHAL-005)を被 覆熱電対(CHINO 製 JK3)の素線(外径 0.32mm)に溶接したものである. これをガラス球殻 表面にプラスチックテープ(Scotch 製 CCP1820-R5PN)で接着した. 熱電対の配置は、ガ ラス球殻上に経線に沿って 5 か所(北極点、北緯 60°、北緯 30°、赤道、南緯 30°)、赤 道上に4点(60°おき前記のものも含む)を配置した. 模擬発熱部の温度、保温ブロックの 温度の測定には外径1mmのシース熱電対で用い、気温の測定には溶接した被覆熱電対 (CHINO 製 JK3)を使用している. 熱電対はすべてK型である.

直流電流で模擬発熱部のカートリッジヒータを通電加熱する.通電の電圧と電流(0.16Ω の端子電圧)は、熱電対の信号とともにデータ収集装置で2秒毎に測定する.さらに、電圧 と電流の積をアナログ乗算器で生成し、マルチメータで0.4秒毎に測定する.

2.7 実験手順

実験装置の全体図を図8に示す.

スタンドにガラス球殻とバルブをセットし、真空ポンプでガラス球殻内部を真空引きする.水を注入する場合は真空引き後に2.5の手順で行う.データ収集装置とマルチメータ、サーモカメラの測定ソフトを起動する.

最初は 60℃でカートリッジヒーターを加熱する.温度が定常になり、電流と電圧が 15 秒ほど定常になったところで測定を停止する.データが保存出来たら 80℃で測定を行い以 上の状態になったところで測定を停止.これを各 2 回ずつ繰り返す.なお、1 回目以降の 真空引きは空気の漏れ込みがあるため、測定後に約 1 分行う.



図 8.実験装置、全体の線図

第3章 実験結果

3.1 温度変化

図 9,10 に布型ウィックの上向きの場合の赤外線画像と温度変化を示す.図 11,12 に 樹脂製ウィックを上向きの場合の赤外線画像と温度変化を示す.図 13,14 に布型ウィッ クの下向きの場合の赤外線画像と温度変化を示す.図 15,16 に布型ウィックの上向きで 内部が真空の場合の赤外線画像と温度変化を示す.これは球殻内部に水を注入せず、ヒー トパイプの効果が全くない場合である.

グラフから、どの測定においてもおよそ5分を過ぎれば温度は一定になることが分かる.

上向きで布型ウィックを使用した場合はほぼ一様な温度になることが分かる.しかし球 殻は模擬発熱部に比べかなり温度が低い.その一因としてウィックと球殻を貫く熱流にお ける熱抵抗が考えられる.

熱抵抗  $\Delta T$ は qを熱流束(430W/m<sup>2</sup>)、  $\lambda$ を熱伝導率(ここでは樹脂成形体のエポキシ樹脂の熱伝導率 0.3[1]を用いる)、  $\Delta x$ を樹脂成形体の厚さ(1.5mm)として

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{1}$$

で与えられる.よって温度差は2.15℃となる.これより熱抵抗による表面温度の低下は考 えにくいので非凝縮性気体の影響ではないかと考えられる.

下向きで行った場合、すべての測定において図 13 のように球殻内部がヒートパイプと して機能せず、球面に温度が広がらなかった.水はウィックを通ってある程度は上昇した が、模擬発熱部近くでは完全に乾燥していた.特に樹脂製のウィックでは溝が広く、染み 込む力が不足していた結果と考えられる



図 9.布型ウィック(上向き 80℃水有)の赤外線画像



図 10. 布型ウィック(上向き 80°C水有)のの温度変化



図 11.樹脂製ウィック(上向き 80℃水有)の赤外線画像



図 12. 樹脂製ウィック(上向き 80°C水有)のの温度変化



図 13.布型ウィック(下向き 80°C水有)の赤外線画像



図 14. 布型ウィック(下向き 80℃水有)の温度変化



図 15 布型ウィック(上向き 80°C真空)の赤外線画像



図 16. 布型ウィック(上向き 80℃真空)の温度変化

3.2 伝熱量と伝熱整理式

表面温度がほぼ一定になった時点の加熱電力(マルチメータで測定した値の5分間の平均)は、模擬発熱部なども含めた表面から放熱されるので、これを伝熱量とする.上向きと下向きに分け、それぞれを図17,18に示す.真空の場合の伝熱量から増加した分をガラス球殻からの伝熱量と考える.自然対流の伝熱量は温度差  $T_B$ - $T_{air}$ の5/4 乗に比例する[2]ので、模擬発熱部  $T_B$ =80°Cの点を通る  $T_B$ - $T_{air}$ の5/4 に比例する関数を定め、それをプロットしたのが図中の破線である. $T_B$ =60°Cの点がこの直線上にあり、自然対流の特性となっている.

図 17 の布型ウィックの場合が唯一ずれている. これは以下のように放射伝熱が顕著で あったためと考えられる

(2)

球殻からの放射伝熱 Qrは A を表面積、  $\sigma$ をステファン・ボルツマン定数として

$$Q_r = A \varepsilon \sigma (T^4 - T_{air}^4)$$

で与えられる. 球殻の温度上昇がはっきりしていた布ウィックの上向きの2つの場合について Qrを見積もると表1のようになる. (A=904.7cm<sup>2</sup>)、2つの Qrの差は1.1W であり、図17の水ありと真空の伝熱量  $Q_V$ の差を同表に示すが、 $Q_W-Q_V$ の伝熱量  $Q_W$ との $T_B=60$ °Cと80°Cの差は1.3W あり、布ウィックの上向きの場合に伝熱量が $T_B-T_{air}$ の5/4 乗より強い変化を示しているのは、熱放射の影響であると判断できる.また、球殻上では熱放射による伝熱のほうが対流による伝熱より大きいと推定できる.

また、球面からの自然対流熱伝達は式(3)で与えられる. [3]

 $Nu_d=2+0.760C_T(Pr)Ra_d^m$ 

 $C_{T}(Pr) = \frac{3}{4} \{ \frac{Pr}{2.4 + 4.9\sqrt{Pr} + 5Pr} \}^{1/4}$ (3)  $m = \frac{1}{4} + \frac{1}{4 + 8.2Ra_{d}^{0.095}}$  $Nu_{d} = hd/\lambda, \quad Ra_{d} = g\beta \,\Delta \, Td^{3}/(\nu \,\alpha)$ 

大気圧における空気の物性値(プラントル数 Pr=0.71,動粘度v=19mm<sup>2</sup>/s,熱伝導率  $\lambda$ =0.029W/(Mk)[4],気体定数 R=287J/(kgK))と d=60mm を用いて熱伝達率 hを計算する. 雰囲気温度として実験の平均値 20°Cを用いる.結果を図 17,18 に実線で示す.前述の放 射伝熱を考慮すると、球殻からの対流伝熱は整理式が与える対流伝熱に比べて、温度が十 分上がってないことを考えてもかなり小さい.



図 17.実験時の発生熱量(上向き)



図 18.実験時の発生熱量(下向き)

表 1.表面からの伝熱(布ウィックの場合)

T <sub>B</sub> [°C]	T[°C]	Qr	Qw-Qv
60	40	2.22	0.90
80	56	1.14	2.25

第4章 まとめ

4.1 保温効果

保温ブロックなしで実験を行っていた時、目で見えるほどの水が注入口(ニードルバルブ の手前)に溜まっていたのだが、保温ブロックを付けて水の注入を行った結果、注入口の水 はほとんど見られなくなった.温度の低いところに水が溜まって、球殻内部まで水が十分 に入らなくなることが、保温ブロックを設置することで改善された.

4.2 ヒートパイプの効果

北極点が上向きの場合はヒートパイプの効果は一定程度得られた.一方北極点を下向き にした場合、水の還流が模擬発熱部に届かずにヒートパイプとしての効果を得ることが出 来なかった. 測定中に温度が減少していくことが度々見られた.これは非凝縮ガスによる熱抵抗と考 えられるが、空気の漏れ込みと樹脂成形体のガスの放出のいずれかが原因であろう.現在 のところそのどちらかを特定するには至っていない.-

## 4.3 結論

LED 冷却を目的として可視光を透過する球殻を放熱面とし、球殻内部にウィックとなる 樹脂成形体と布を装着した球形ヒートパイプを試作して伝熱特性を測定した結果、以下の 点が明らかとなった.

- (1) 球殻表面の温度は北極点が上向きの場合、温度が一様になっているのでヒートパイプ として機能しているが、非凝縮性気体の影響と思われるかなり大きな熱抵抗が存在し た.
- (2) 可視光を透過する球形ヒートパイプが LED 冷却に十分な性能を持つ可能性がある.北 極点が下向きの場合は、浸透力がある細かい構造のウィックが必要だが、布のように 極端に細かい構造も悪影響を及ぼす.

### 参考文献

- [1] 日本機械学会編、伝熱工学資料(改訂第5版)、(2009)、288、丸善.
- [2] 伝熱学特論(1984)、62、株式会社養賢堂.
- [3]日本機械学会編、伝熱工学資料(改訂第5版)、(2009)、56、丸善.
- [4]日本機械学会編、伝熱工学資料(改訂第5版)、(2009)、295、丸善.