

感温液晶シートを用いた半円筒内面の 衝突噴流熱伝達率の測定

長野工業高等専門学校

機械工学科 佐塚 光平

1 研究の目的

タービンの翼内冷却手段として衝突噴流が用いられており、ガスタービン前縁を想定した凹面への衝突噴流熱伝達に関する研究が行われてきている。これらの研究で用いられている噴流では、その出口形状が軸対称⁽¹⁾あるいは縦横比が大きい長方形⁽²⁾の場合が多い。

本研究では、凸型円弧面の円周方向に沿うように縦横比の大きい噴出口を設け、そこから噴出した噴流を半円筒内面に衝突させ、その面の熱伝達率の空間分布を明らかにすることを目的とする。

2 感温液晶シート

感温（コレステリック）液晶はある波長領域の光を選択的に反射する配列構造を持ち、これは特に温度変化に強く依存し、その他、電界、圧力、化学物質の蒸気の吸着、光の入射角、反射角などにより変化する。このような性質を持つ感温液晶を常温で発色する配列構造になるように数種類混合すると所望の温度範囲で発色する。

この混合液晶を化学汚染や物理的損傷から保護し、二次加工しやすくするため高分子膜で、10～20 ミクロンの大きさのマイクロカプセルにする。温度が上昇するにつれ、赤→緑→青と変色する。

マイクロカプセル化したものを紙やフィルムに印刷したものが感温液晶シートである。室温計、簡易体温計、冷蔵庫用温度計、発熱部センサーなどに活用されている⁽³⁾。

本研究での感温液晶シートは、約 30℃から約 40℃の間で色変化するものを使用した。後述するように *Hue* 値を用いると実際の温度測定範囲は 32℃～47℃にすることが可能である。

3 校正実験

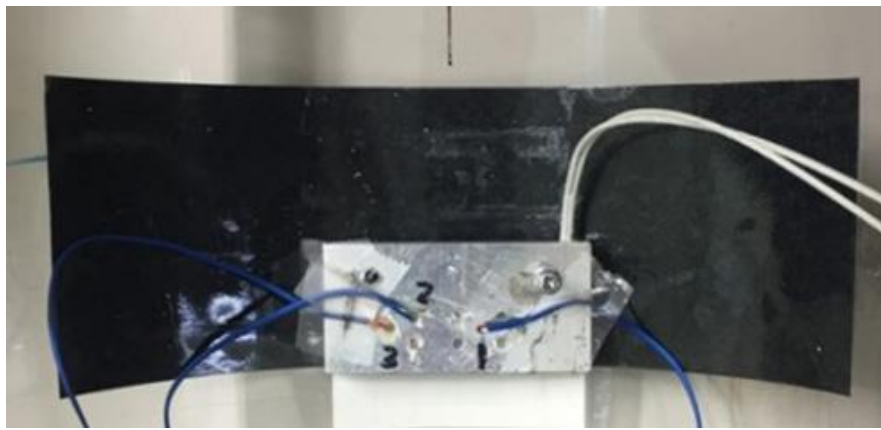
図 4 に示すように凹面に沿うようにアルミニウム板を加工し、その一方にカートリッジヒーター（八光電機製 HLW1044）を装着した。アルミニウム板の三箇所直径 0.1mm の熱電対を埋め込み、そのアルミニウム板を透明アクリル樹脂製の半円筒内面の感温液晶シートの裏面に図 1(a) のように取り付けた。ヒーターの印加電圧を調節することで発熱量を変え、それに伴う感温液晶シートの色を半円筒の外面側から、デジタルカメラで撮影し（図 1(b)）その時のアルミニウム板の温度を、データロガーを用いて測定した。感温液晶シートの校正実験は、熱伝達実験と同じ条件になるように、実験室に暗幕を施し 2 個の LED ランプを用いて行った。温度を測定した近傍の感温液晶シート画像を図 2 のように切り取り、MATLAB⁽⁴⁾ を用いて色画像の r.g.b. 値を規格化した *Hue* 値に変換する。

感温液晶シートの Hue 値(Hu)と温度 (T) の関係を図 3 に示す. その校正曲線は次式で表される.

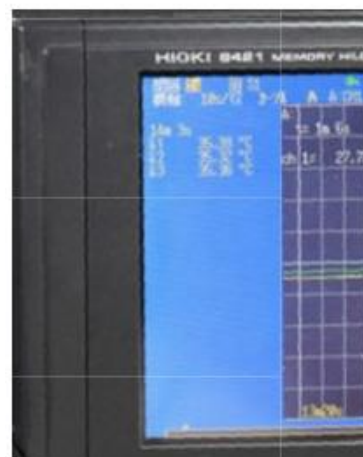
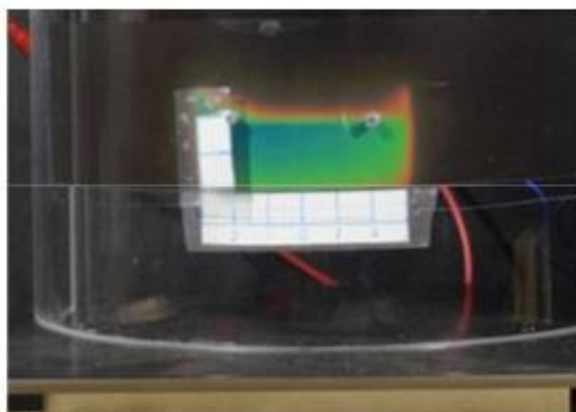
$$T = 17225Hu^6 - 36943Hu^5 + 31095Hu^4 - 12955Hu^3 + 2785.5Hu^2 - 282.16Hu + 42.111 \quad \text{-----(1)}$$

$$R^2 = 0.986$$

相関係数の 2 乗値は 0.986 であった. Hue 値が 0.13~0.68 で温度測定範囲は約 32°C ~47°Cとなる.



(a) 半円筒の内側



(b) 半円筒の外側とデータローガー

図 1 校正実験装置

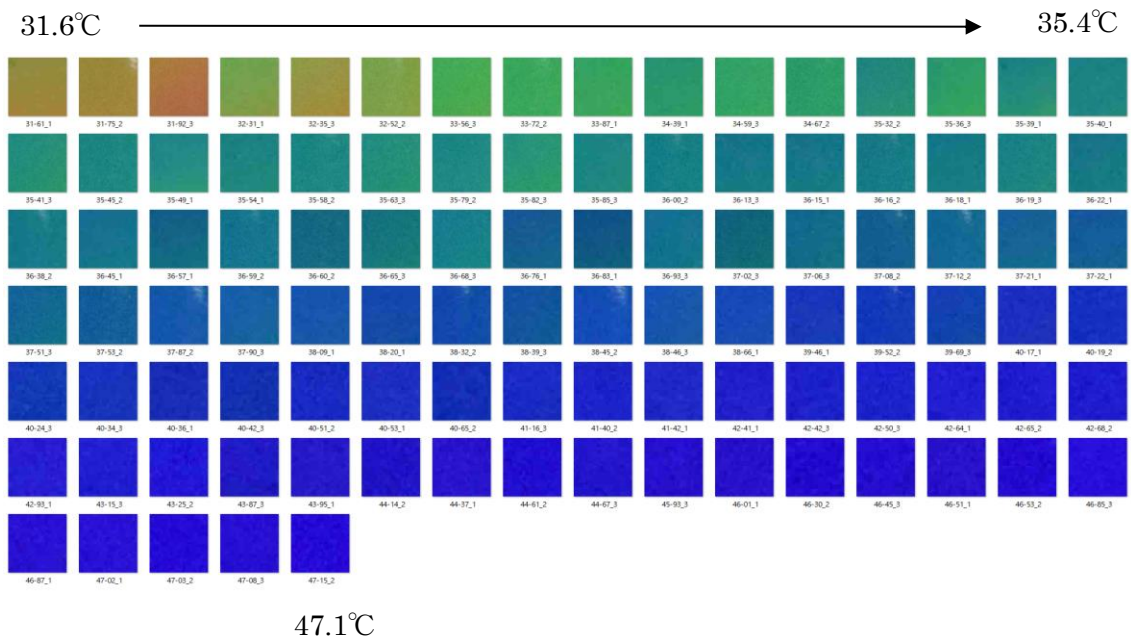


図2 感温液晶シートの温度による色の違い

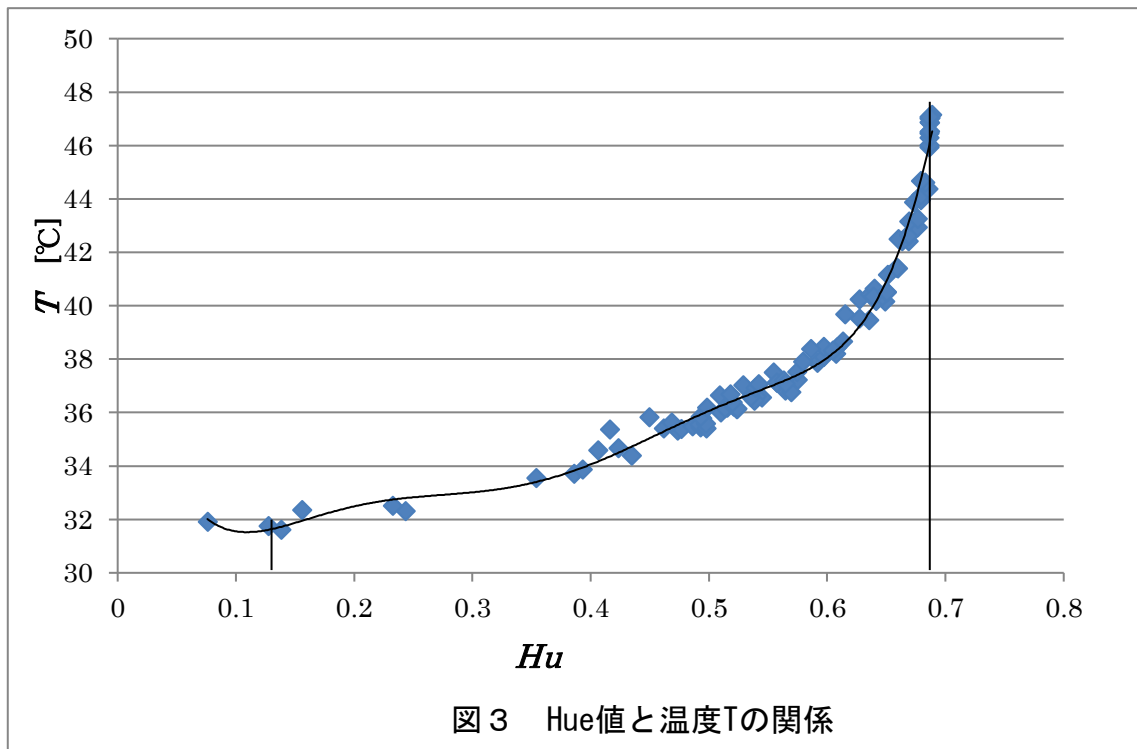


図3 Hue値と温度Tの関係

4 熱伝達率測定

4.1 実験装置

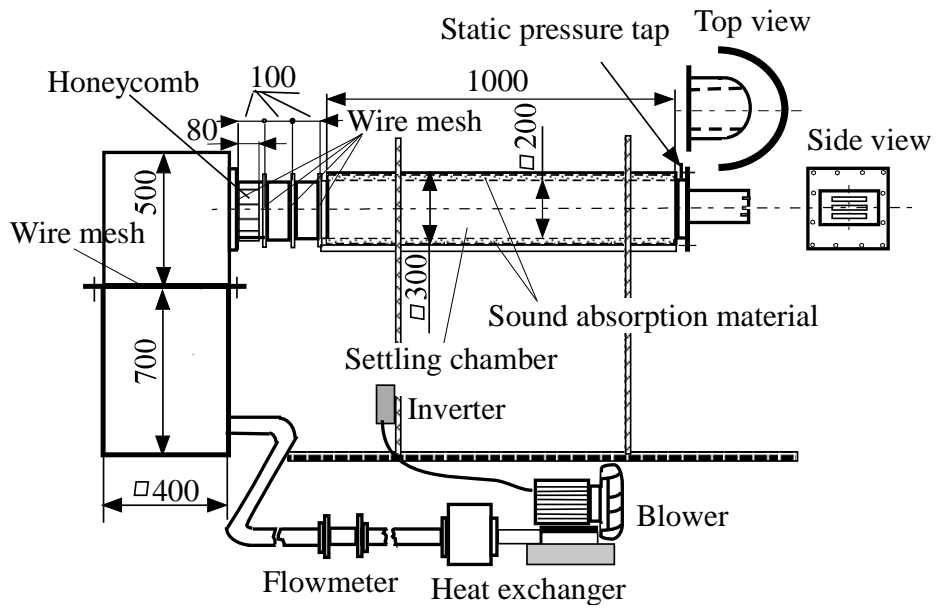


図4 噴流装置

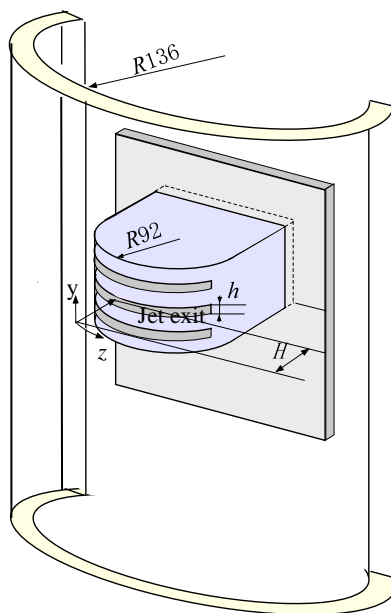


図5 座標系

図4に噴流装置概要を示す。空気の流量はインバーターで送風機の回転数を変えることによって調節した。送風機からの空気は、熱交換器でほぼ室温まで冷却され、超音波流量計を通り正方形断面ダクトに流入する。空気流は、ハニカムと金網で整流され、厚さ50mmの吸音材が施された内寸200mm×200mm、長さ1mの風洞を通り、その下流端に取り付けたノズルより水平に噴出する。

図5に座標系を示す。噴出口先端と半円筒内面との距離を H とし、噴流の中心軸との交点を座標原点とし、垂直方向を y 軸、また内面に沿う円周方向を z 軸とした。

噴出口高さは $h=6\text{mm}$ とし、流路幅は 96mm である。3個の噴出口の中心間距離は 16mm とした。また、上下の2個の噴出口をふさぎ中央の噴出口のみの場合も含めて、噴流の出口平均速度 U_{av} は 15m/s にした。レイノルズ数 ($Re=U_{av} \cdot h/\nu$) は約 5800 となった。

ニクロム箔の低温部に対応する感温液晶シートの色が、緑色に発色する領域が現れるようにニクロム箔両端の印加電圧を調節し、半円筒の外面側から感温液晶シートの画像をデジタルカメラで撮影した。撮影した画像を $-13.3 \leq z/h \leq 13.3$, $-6.7 \leq y/h \leq 6.7$ の領域で切り取り、感温液晶シートの色 Hue 値より式(1)により半円筒内面の温度 $T_w[\text{K}]$ に変換した。

半円筒内面の局所ヌッセルト数 Nu は次式で定義した。

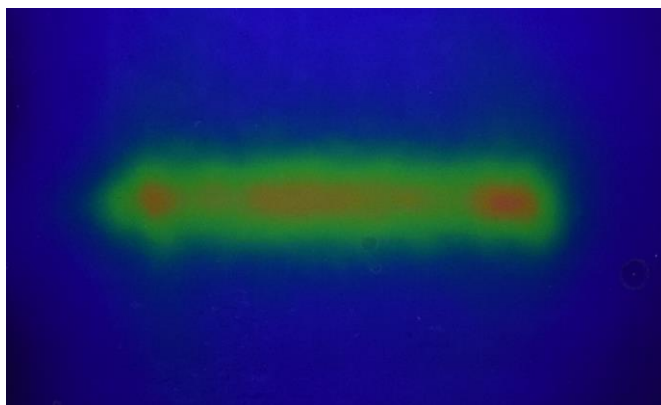
$$q_{net} = \frac{Q}{S} - \varepsilon\sigma(T_w^4 - T_\infty^4) \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$Nu = \frac{h}{\lambda} \frac{q_{net}}{(T_w - T_o)} \quad \text{-----} \quad (3)$$

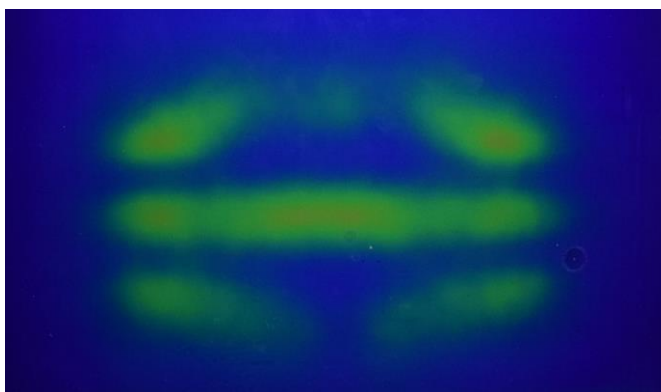
ここで、 Q はニクロム箔の発熱量であり、 S はニクロム箔の表面積、 σ はステファン・ボルツマン定数、 ε はニクロム箔の放射率である。また、 $T_o[\text{K}]$, $T_\infty[\text{K}]$ はそれぞれ噴流出口温度と室温である。なお、発熱面から半円筒の外面への熱伝導による損失は無視した。

噴流衝突距離比 H/h は、4, 5, 6, 7の4種類であり、噴出口が3個の場合と上下の噴出口をテープで塞ぎ、単一噴流にした場合のそれぞれについて熱伝達率分布の違いを検討した。

5. 実験結果



(a) 噴出口 1個 ($H/h=4$)



(b) 噴出口 3個 ($H/h=4$)

図6 感温液晶シートの色変化した画像例

図6(a)(b)に温度変化により発色した感温液晶シートの画像例を示す.噴流衝突領域の色が緑色でありその領域以外は青色を示していることから, 温度の低い領域は噴流衝突領域に限られていることが分かる.これらの画像から Hue 値を求め, 各画素における表面温度 T_w を式(1)によって求め, 式(3)から各画素の局所ヌッセルト数 Nu を求め, その等値分布を求めた結果を次に示す.

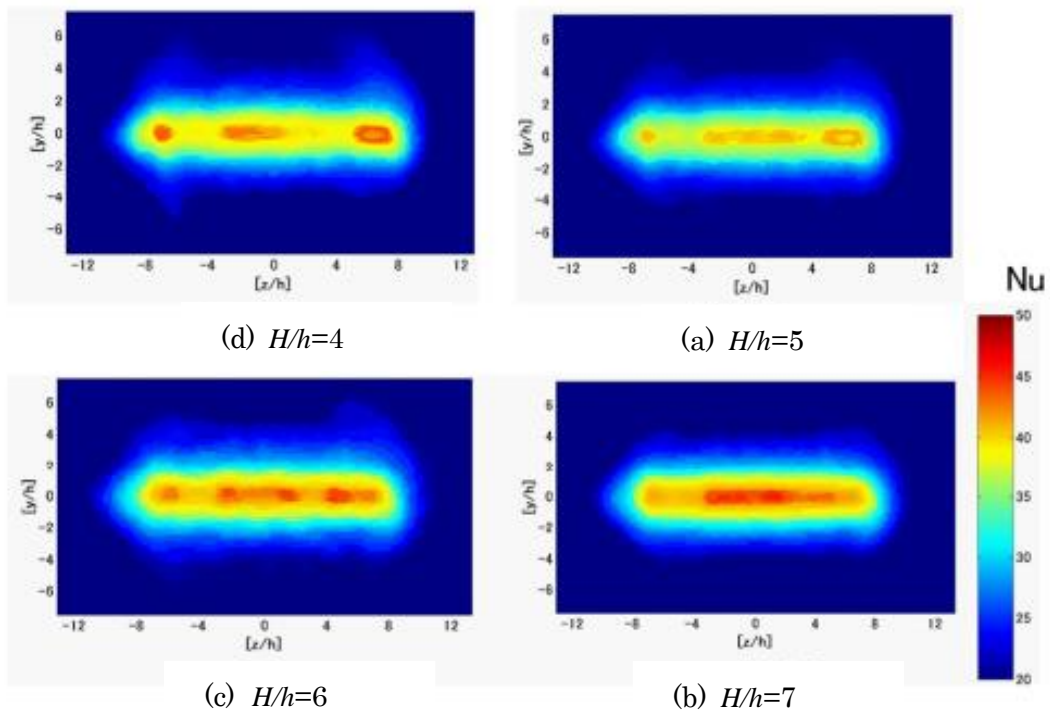


図 7 噴出口 1 個の場合の局所ヌッセルト数の等値分布

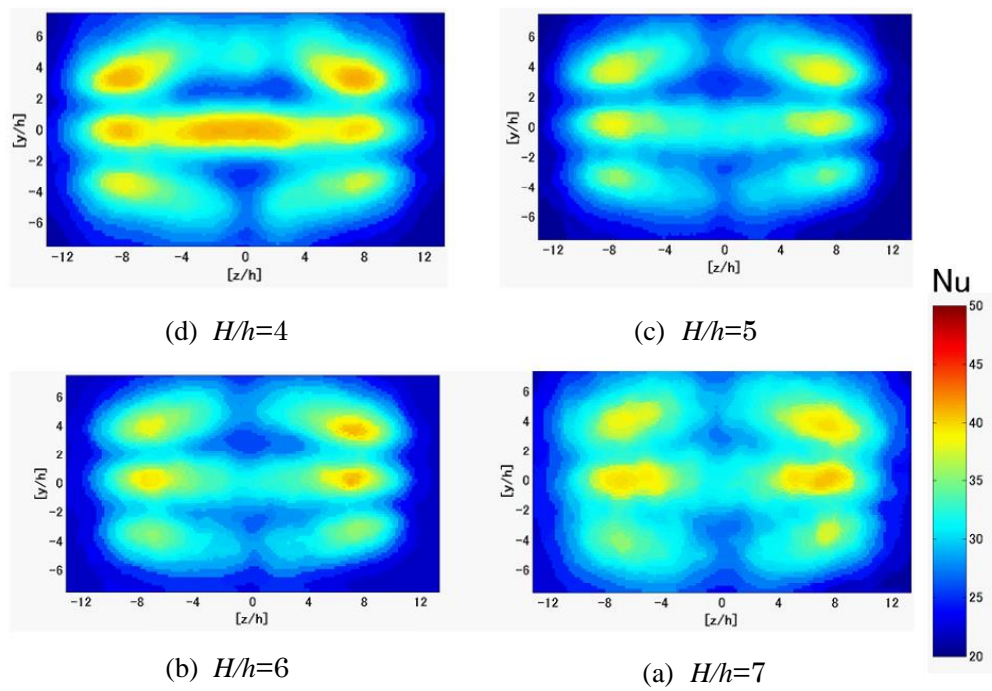


図 8 噴出口 3 個の場合の局所ヌッセルト数の等値分布

図7に1個の噴出口の場合に衝突距離比 H/h を変えた場合の局所ヌッセルト数の等値分布を示す。いずれの H/h 値でも噴出口に沿って横長の等値分布である。 $H/h=4$ の場合は $z/h=0$ および $z/h=\pm 7$ の $y/h=0$ 付近に明確な Nu 値の極大領域がみられるが、 $H/h=7$ ではその領域に極大が見られず、 $-4 < z/h < 4$ の領域で Nu 値が大きくなっており、 H/h 値によって Nu 値の分布が異なる。

図8に3個の噴出口の場合に衝突距離比 H/h を変えた場合の局所ヌッセルト数の等値分布を示す。噴流出口が3個の場合には、中央の噴流が衝突した領域では横長の Nu 等値分布であるが、上下の噴流が衝突した領域の Nu 等値分布は $y/h > 0$ の領域では八の字 ($y/h < 0$ では、逆八の字) 形状になっている。 $H/h=4$ では、 $y/h=0$ 上の $z/h=\pm 8$ と $-4 < z/h < 4$ の3箇所に Nu の極大領域が存在するが、噴流衝突距離比 H/h 値が大きくなると $z/h=0$ 付近の極大値は存在しない。噴流の衝突距離比によって凹面上の流れが異なることが示唆される。

5 結論

感温液晶シートを用いて半円筒内面の衝突噴流熱伝達率の等値分布を求めた。その結果、噴出口が1個および3個の場合のその等値分布は噴流の衝突距離比によって異なることが明らかになった。

参考文献

- (1) Imbriale, M., Ianiro, A., Meola, C., and Cardone, G., "Convective Heat Transfer by a Row of Jets Impinging on a Concave Surface" *Int. J. of Thermal Sciences*, Vol. 75 (2014), pp. 153-163.
- (2) Sharif, M.A.R., Mothe, K. K., "Parametric Study of Turbulent Slot-Jet Impingement Heat Transfer from Concave Cylindrical Surfaces" *Int. J. of Thermal Sciences*, Vol. 49 (2010), pp. 428-442.
- (3) 日本カプセルプロダクツ <http://www.japancapsular.com/products/01mr.html>
- (4) MATLAB, R2008b, Mathworks Inc, 2016.