

## 水-空気系泡沫の流れ内に置かれた加熱円筒の熱伝達 Forced Convection Heat Transfer from a Cylinder to Water-Air Foam

○正 戸倉 郁夫 (室蘭工大)

正 岸浪 紘機 (室蘭工大)

正 鈴木 淳 (室蘭工大)

小川 徳哉 (室蘭工大)

Ikuo TOKURA, Koki Kishinami, Jun Suzuki and Noriya OGAWA,

Muroran Institute of Technology, Mizumoto 27-1, Muroran

Forced convection heat transfer experiments of a liquid-gas foam were conducted by using a heated circular cylinder. In the temperature range around 373K, the heat flux for the foam flow is greater than that for water. In other temperature ranges, the heat flux for foam flow is lower than that of water. The heat transfer coefficient increases with increasing foam velocity and with decreasing the expansion ratio of the foam. It was indicated that the value of the coefficient greatly increases when the temperature of the heating surface approaches to 373K. Latent heat transfer by water vapor diffusion in the foam is the one of the important factors that increases the heat transfer coefficient near the boiling point of the foam.

**Key Words:** Liquid Foam, Non-Newtonian Fluid, Heated Cylinder, Heat Transfer Coefficient

### 1. はじめに

石鹸やシャンプーの泡のように、液膜を連続相とする多数の気泡の集合体を液体泡沫と呼ぶ。泡沫が気体の保持性に優れている点に注目した新しい利用法として、近年、液体燃料を泡沫にして燃焼する燃焼器の開発<sup>(1)</sup>や、鋼材の熱処理の冷却媒体として使用することが検討されている<sup>(2,3)</sup>。泡沫を冷却媒体として使用すると、空冷と水冷の中間の冷却速度を得ることができる。本研究では、円筒加熱面に直交する水-空気系泡沫流れの熱伝達実験を行ない、従来データの無かった 373K 以下の伝熱面温度領域（沸騰温度以下）、および、373K 付近の低過熱度域における泡沫の伝熱特性を調べた。

### 2. 実験装置および実験方法

実験装置は前報<sup>(4,5)</sup>と同様であり、泡沫発生装置、泡沫流路、および熱伝達測定装置より構成されている。発泡溶液（界面活性剤、花王 MX968 の 1%濃度水溶液）は、ポンプにより発泡器に送られ、ノズルから対向する金網に噴霧されて液膜が形成される。この液膜を、圧縮空気とともに

金網を通過させることにより、泡沫が連続的に生成される。生成された泡沫は、そのまま水平に設置された流路へと圧送される。また、泡沫は室温（約 293K）で生成した。

泡沫の性状を表すために、以下の式で定義される泡倍率  $E$  を用いる。

$$(\text{泡倍率 } E) = (\text{泡沫の体積}) / (\text{泡沫中の液体の体積}) \quad (1)$$

本実験で使用した泡沫の泡倍率の範囲は、約 10 から 50（密度で約 90 から 20 [kg/m<sup>3</sup>]）であり、泡沫の平均気泡直径は約 0.5 から 0.8 [mm]であった。

流路は、矩形断面（75mm×70mm）、長さ 1000mm のアルミニウム製の本体部分と、アクリル製の入り口部分から構成されている。流路入口から 600mm の位置に、円筒加熱面を挿入して、定常法により、熱伝達を測定した（Fig. 1）。流路出口端は大気に開放されており、排出された泡沫は出口容器（リザーバタンク）に流れ落ちるようになっている。伝熱面には、直径が 6.25mm、長さ 101mm の円筒状ヒーター（WATLOW 社製、AC100V 250~300W）を使用した。ヒーター表面温度は、表面の 4 箇所（互いに 90 度ずらした位置）にはんだ付けした熱電対（直径 0.1mm、銅-コンスタンタン線）によって測定した。

平均熱伝達率  $\alpha$  [W/(m<sup>2</sup>K)] は、次式で定義される。

$$q_w = \frac{Q}{S} = \alpha(T_w - T_F) \quad (2)$$

上式で  $Q$  [W] は泡沫への伝熱量、 $q_w$  [W/m<sup>2</sup>] は熱流束、 $T_w$  [K] は伝熱面表面温度、 $T_F$  [K] は泡沫の温度、 $S$  [m<sup>2</sup>] は伝熱面積である。

### 3. 熱伝達の実験結果および考察

#### 3.1 伝熱面温度が 373K 以下の熱伝達

平均熱伝達率と  $T_w - T_F$  ( $T_w$ : 伝熱面温度、 $T_F$ : 泡沫温度) の関係の一例を Fig. 2 に示してある。この図は、流速が一定の条件下で伝熱面温度の影響を示したものである。この図から、泡沫の熱伝達率の値は、水と空気の場合の中間の値となることが分かる。したがって、泡沫を冷却剤として使用することで、水冷と空冷の中間の冷却速度が得られる可能性がある。また、伝熱面温度が 373K (泡沫の沸騰温度) に近づくほど、熱伝達率の値が急激に大きくなる傾向に

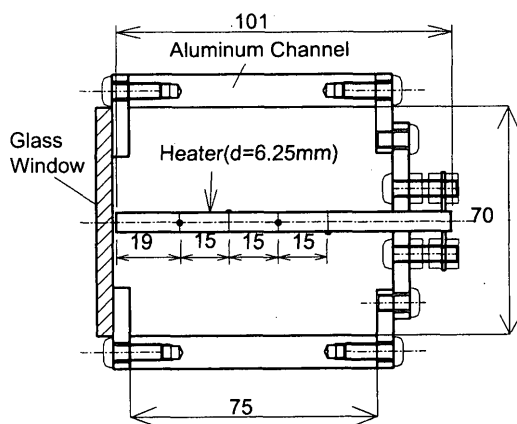


Fig. 1 Heater section (Front view).

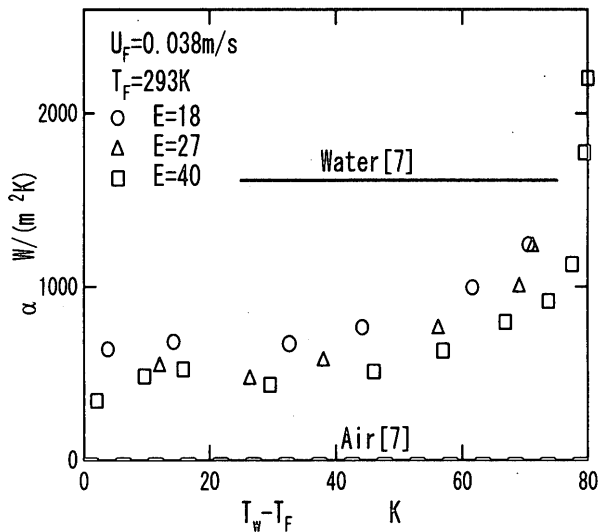


Fig. 2 Mean heat transfer coefficient versus  $T_w - T_f$ .

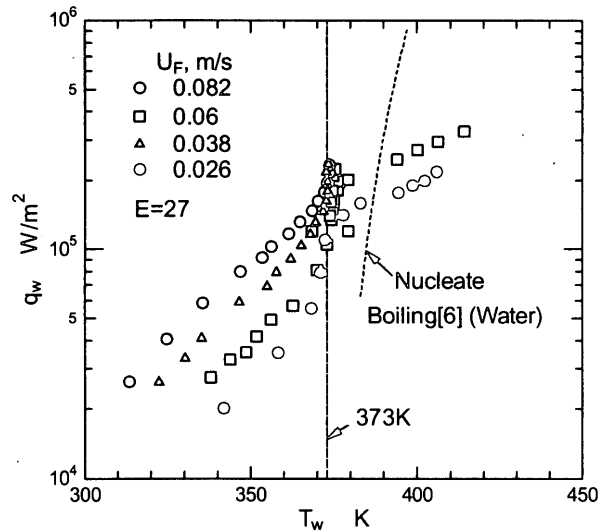


Fig. 3 Heat flux versus  $T_w$  ( $E=27$ ).

ある。これには、泡沫中の空隙内の水蒸気拡散による潜熱移動の寄与が大きいと考えられる<sup>(5)</sup>。

### 3.2 伝熱面温度が 373K 付近の熱伝達

Fig. 3 は、泡倍率が一定の条件で、流速を変化させた場合の熱流束と伝熱面温度の関係を示したものである。図中の破線は、水の核沸騰の熱流束の値<sup>(6)</sup>である。流速が増加するほど、熱流束は全体的に高い値を示している。これは、流速が高いほど、単位時間に伝熱面に到達する液体の量も増加するので、予測される結果である。

Fig. 4 は、泡沫の流速を一定にして、泡倍率を変化させた場合の熱流束と伝熱面温度の関係を示したものである。泡倍率が増加するほど、熱流束の値は全体的に低下しており、特に沸騰域でその傾向が顕著である。これは、泡倍率が高いほど、泡沫の液含有量が少なくなるためである。

Fig. 4 には、比較のため、水に対する熱流束の値も示してある。図中の実線は、McAdams<sup>(7)</sup>による水の単相流に対する値であり、破線は水の核沸騰の熱流束の値<sup>(6)</sup>である。泡沫の熱流束の値は、全体的に水の場合より低いが、373K 付近では水の値を上まわる傾向を示している。したがって、この温度領域では、水よりも泡沫を使用した方が、高い冷却速度を得られることがわかる。これは、泡沫が気体を多く含む混合物質であるので熱容量が小さく、少ない熱量で大きな温度上昇を生じるために、単相の水よりも低温度で沸騰を開始できるからであると考えられる。

## 4. 結言

円筒伝熱面に直交する水-空気系泡沫流れの熱伝達実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 伝熱面温度が 373K 以下の場合、流動泡沫の熱伝達率の値は、水と空気の場合の中間の値となる。また、熱伝達率の値は、伝熱面温度が 373K に近づくほど急激に増加する。
- (2) 373K 付近の泡沫の熱流束は、水の単相流の場合よりも高い値となることがわかった。他の温度領域では、水よりも低い熱流束の値を示している。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会平成 11~12 年度科学研究費

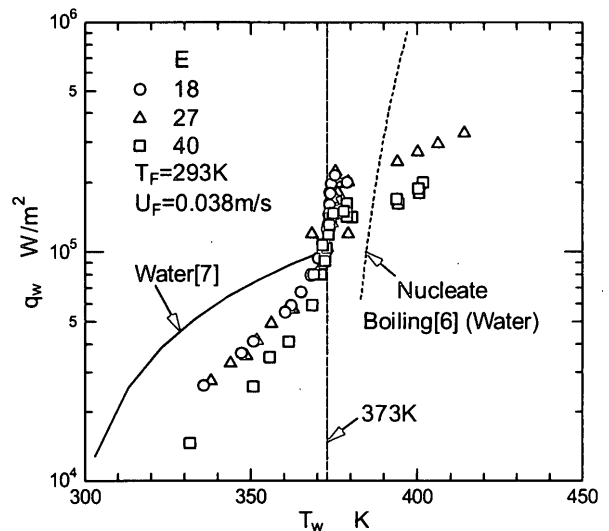


Fig. 4 Heat flux versus  $T_w$  ( $U_f=0.038\text{m/s}$ ).

補助金 (基盤研究 C(2)11650200) の助成を得て実施致しました。本研究の遂行にあたりご協力頂いた滝本雷太、茶家基彦、松田 喬の諸氏に感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 安沢, 安達, 工業加熱, 28(1991) 18.
- (2) 安沢ほか 2 名, 公開特許公報 61-206716.
- (3) 安沢ほか 3 名, 第 121 回日本鉄鋼協会春季大会, (1991) 497.
- (4) 戸倉ほか 3 名, 機講概要集, No. 002-1(2000), 142.
- (5) Tokura, I. et al, Proc. 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, 3(2000), 45.
- (6) 日本機械学会編, 「伝熱工学資料 (改訂 4 版)」 (1986), 129.
- (7) W. H. McAdams, W. H., Heat Transmission, 3rd ed. (1954), 259.