

液体泡沫の円管内流動抵抗と熱伝達

建設・機械系（機械システム工学科）小川 徳哉

1 緒言

気体の小さな塊が、液体や固体またはそれらの薄膜によって取り囲まれた状態のものを気泡と呼ぶ。また、これらの気泡が多数集合し、互いに薄膜で隔てられ、密接したものを泡沫と呼ぶ¹⁾。

最近、液体泡沫を鉄鋼生産プロセスにおける、熱間圧延処理後の冷却媒体として利用することが計画されてきた。鋼材の品質は、熱間圧延処理後の熱処理に負うところが大きく、冷却速度や冷却の均一性は製品の機械的強度の均質性に大きく影響する。従来は、空冷や水冷を用いてきたが、その取り得る冷却速度は狭い範囲に限定されていた。そこで、液体泡沫を冷却媒体として利用することにより、空冷と水冷の間の広い範囲の領域で、冷却速度が制御でき、良好な冷却の均一性を得られる可能性が指摘されている²⁾。また、泡沫が燃焼においても優れた特性を示すことが明らかにされ³⁾、灯油を発泡させ燃焼させる新しい方式のストーブが開発され、実用化されている。

以上のように、泡沫は日常生活から工業分野まで広く関係しているが、その熱伝達や流動特性は、詳しく解明されていない。泡沫の熱的性質の一つとして熱伝達率がある。これは、熱伝達による熱移動の大小を表わす係数であり、物体の冷却速度に深く関係する物理量である。本研究は、液体泡沫の熱伝達と流動特性を明らかにするための基礎的な研究である。泡沫の性状の違いや加熱の有無によって、円管内を流動する泡沫の圧力降下と熱伝達率が、どのように変化するかを調べたものである。

2 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図 1 に示す。装置は泡沫の生成部、試験部および循環部から成っている。泡沫を生成するため、溶液タンクに溜められている界面活性剤（MX-968、花王株）水溶液（濃度 1%）がポンプにより発泡器へ圧送され、器内のノズルより円錐状に噴射される。また、空気はコンプレッサにより圧縮され、定圧を保つため空気タンクを介して発泡器へと送られる。発泡器内で水溶液と空気が混合され、ノズル前方に設置された金網（メッシュの大きさ 180 μm ）を通過することにより、泡沫が連続的に生成される。生成された泡沫は、試験部である円管（真鍮製、内径 20mm、肉厚 1mm、長さ 2m）内に圧送され、出口より流出して容器に回収される。循環部は、円管の外側に 2 インチの鋼管を同心円状に設置した二重構造となっている。泡沫の加熱または冷却は、循環水用タンク内の温度制御された水を、ポンプによって円管と鋼管の間に圧

1. Test Pipe
2. Circulation Pipe
3. Form Generator
4. Rotameter
5. Air Tank
6. Air Compressor
7. Pump
8. Liquid Tank
9. Flow meter
10. Pump
11. Water Tank
12. Reservoir1
13. Reservoir2
14. Manometer

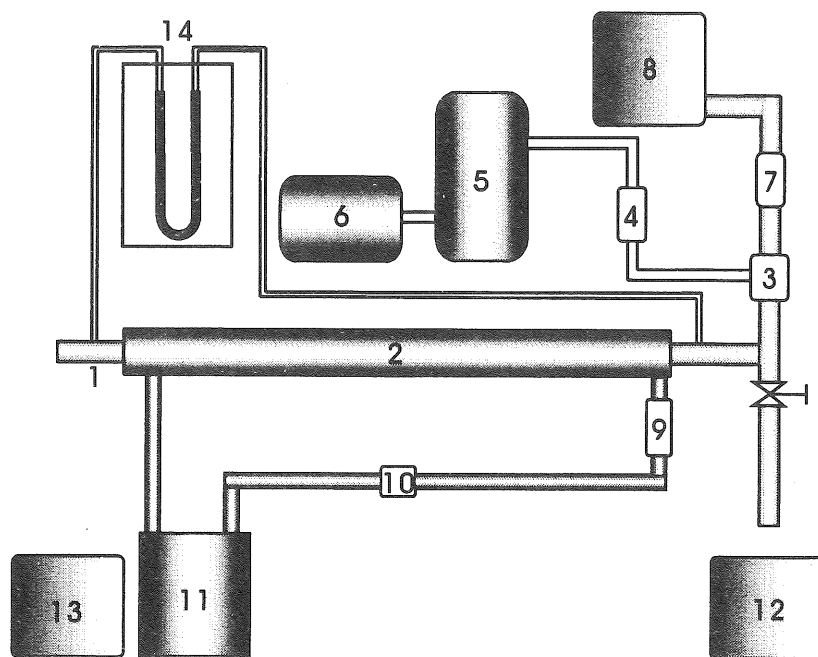


図 1 泡沫実験装置概略図

送ることにより行なわれる。なお、循環水の温度は、タンク内に設置されたパイプヒータによって制御される。泡沫の流動抵抗を調べるために、円管の入口と出口付近に静圧孔（間隔：1.884m）を設けて、水柱式 U 字管マノメータにより泡沫が通過する際の圧力差を測定した。また、円管外周の壁面温度（4箇所）と、円管の入口、出口での泡沫温度を、銅-コンスタンタン熱電対を用いて計測した。なお、泡沫の体積流量は、円管出口で泡沫を所定の容器に受け取り、その容器の内容積を満杯になるまでの所要時間で除して算出した。

本実験における円管入口の泡沫温度は約 293K で、循環水温度範囲は 283～333K であり、泡沫の体積流量範囲は約 60～300 ($\times 10^{-6}$) m^3/s であった。

3 泡倍率と熱伝達率

本研究では、泡沫の性状を示すため、泡倍率 E を用いる。泡倍率は、発泡液が空気で膨張した倍率（体積比）を表わし、この値が大きいほど空気量の多い泡沫となる。

$$\text{泡倍率 } E = \frac{\text{泡沫の体積}}{\text{泡沫中の液体の体積}} \quad [-] \quad (3 \cdot 1)$$

本実験における泡沫の泡倍率の範囲は、約 20～100（密度 9.7～51.9 kg/m^3 ）である。

また、平均熱伝達率 α_m は、以下の式⁴⁾で求められる。

$$\alpha_m = q \Big/ \left[\frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_w - t_1}{t_w - t_2}\right)} \right] \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (3 \cdot 2)$$

ここで、

$$q = Q_f \rho_f C_f (t_2 - t_1) \Big/ \pi D L \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (3 \cdot 3)$$

である。式中の記号は以下に示してある。

- C_f : 泡沫の比熱 [J/kg · K]
- D : 円管の直径 [m]
- L : 円管の加熱長さ [m]
- Q_f : 泡沫の体積流量 [m³/s]
- q : 円管壁面から移動する単位面積当たりの熱量 [W/m²]
- t_1 : 円管入口での泡沫の平均温度 [K]
- t_2 : 円管出口での泡沫の平均温度 [K]
- t_w : 円管壁面温度 [K]
- ρ_f : 泡沫の密度 [kg/m³]

4 結果と考察

4.1 泡沫の圧力降下

図2に圧力降下 dp/dx と泡沫の体積流量 Q_f の関係を示す。 dp/dx の値は、二つの静圧孔間の圧力差を孔間の距離で除して算出したものである。図中の細かい実線は、実験値の傾向を示したものである。このグラフを見ると泡沫流量が増大するにつれ、圧力降下も増えていることが分かる。これは、泡沫流量が増えると流速も増し、壁面でのせん断応力が高くなるので、圧力降下も大きくなるものと考えられる。また、円管壁面温度が高いほど、圧力降下が小さくなっていることも分か

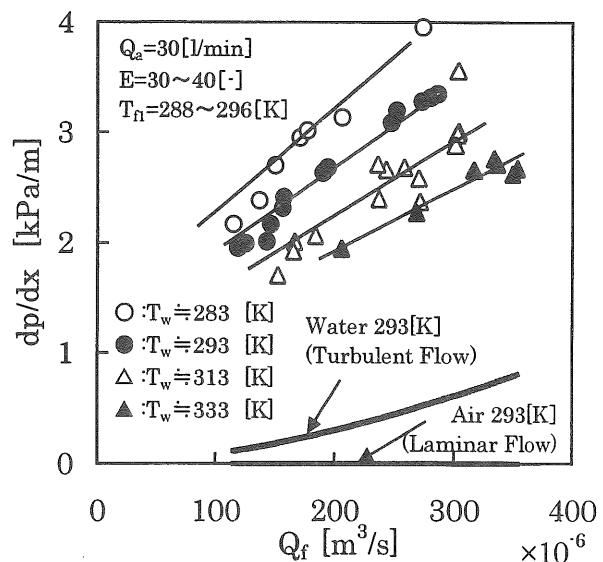


図2 圧力降下と泡沫流量の関係

る。これは、泡沫が循環水からの熱を受けて温度が上昇し、粘度が低くなり流動抵抗が減少したものと考えられる。参考のため水または空気のみを流した場合の予測値⁵⁾を図中に示した。泡沫は、水や空気に比べると、大きな圧力降下を示すことが分かる。

図3に圧力降下 dp/dx と円管壁面温度 T_w の関係を示す。図から明らかなように、温度が上昇するにつれ、圧力降下は小さくなる傾向にある。圧力降下は、流体の粘度に比例するので、温度が上昇すると粘度は低くなり、その結果、圧力降下が小さくなると思われる。

図4に圧力降下 dp/dx と泡倍率 E の関係を示す。泡倍率が増加すると、わずかではあるが圧力降下も増加している。泡倍率が大きくなるということは、空気の割合が多くなって、平均的に気泡径は大きくなり、気泡の液膜厚さが薄くなると思われる。よって、気泡間のせん断が起こりにくくなり、結果的に圧力降下を増加させていると考えられる。また、円管壁面温度が上昇するにつれ、圧力降下が小さくなっていることも分かる。これは、図2、図3の説明と同じ理由によると思われる。図2と図4に共通して言えることは、壁面温度が低いほど、圧力降下の勾配がきつくなっている。すなわち、温度が低くなることにより、泡沫の粘度が高くなり、流動抵抗の増大に結びついていると思われる。以上の図から判断して、圧力降下の増加は、流量の変化による要因が大きく、泡倍率の増加によるものは、わずかであると思われる。

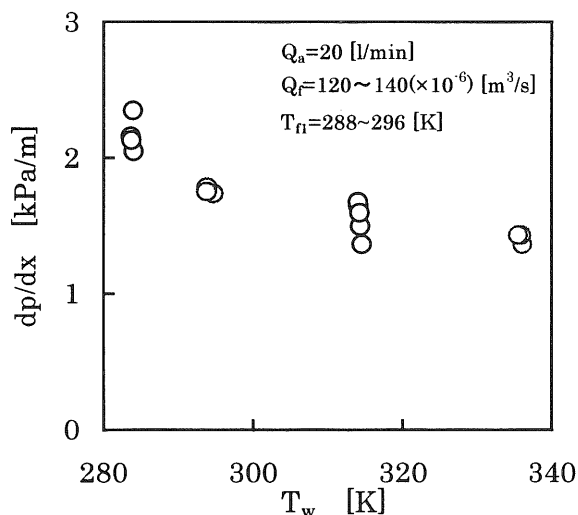


図3 圧力降下と壁面温度の関係

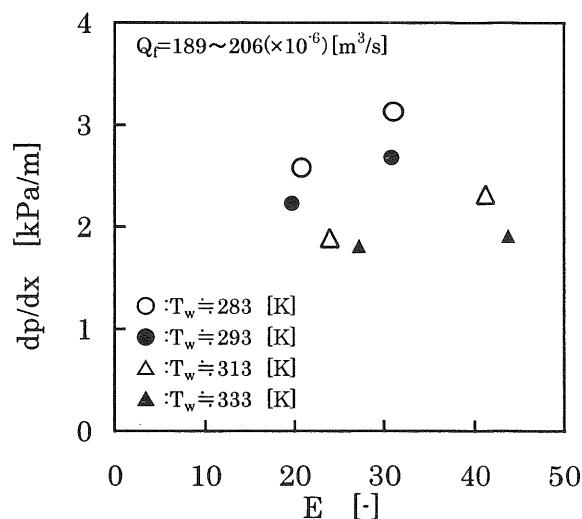


図4 圧力降下と泡倍率の関係

4.2 泡沫の熱伝達

図5に熱伝達率 α_m と泡沫の体積流量 Q_f の関係を示す。流量の増大にともない、熱伝達率は増加傾向にある。よって、同じ温度条件では、流速が速いほど熱移動量が大きくなる。しかし、加熱温度差による熱伝達率の差異はほとんど見られない。図中の実線は、水または空気のみを流した場合の予測値⁴⁾を示したものである。空気流動時の

熱伝達率は非常に小さく、水の場合は、空気や泡沫に比べかなり大きな値を示している。泡沫の熱伝達率は、図から明らかなように、水と空気の間位置している。

図6に熱伝達率 α_m と泡倍率 E の関係を示す。泡沫の流量がほぼ一定の場合、泡倍率が増えるにつれ、熱伝達率が減少しているのが分かる。これは泡倍率が大きくなると、泡沫中の空気の割合が多くなり、気体の方が液体に比べ断熱効果が大きいため、熱伝達率が低下するものと考えられる。

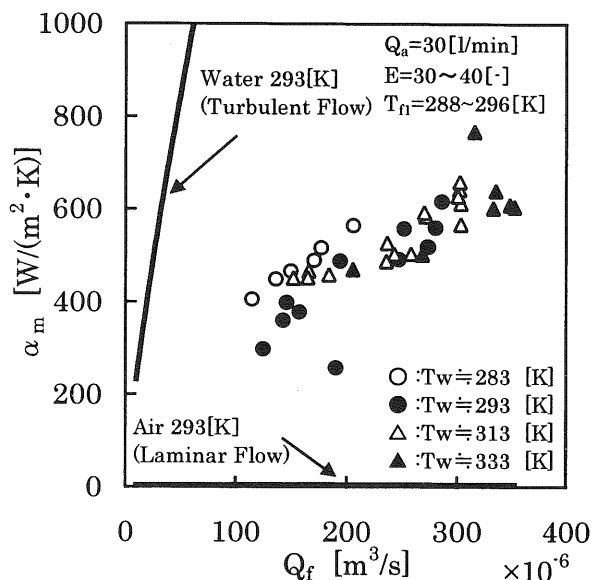


図5 熱伝達率と泡沫流量の関係

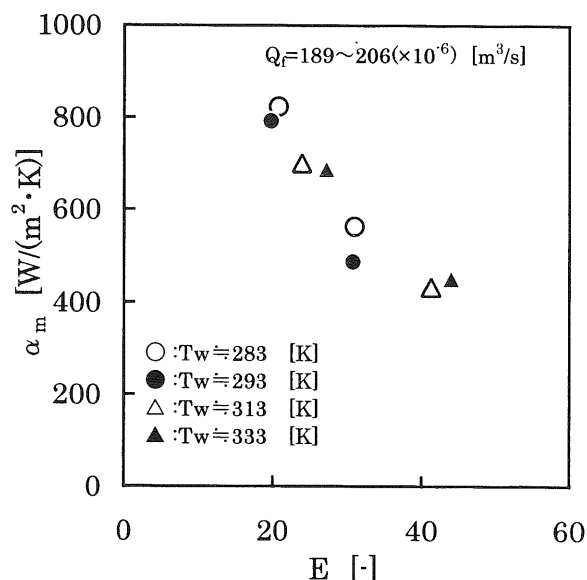


図6 熱伝達率と泡倍率の関係

5 結言

- 1) 泡沫は、水や空気に比べると大きな圧力降下を示す。また、圧力降下は流量によって大きく変化し、泡倍率による変化はわずかである。
- 2) 泡沫を加熱すると圧力降下は低下するが、熱伝達率はあまり変化しない。
- 3) 泡沫の熱伝達率は、水と空気の間位置していることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本化学会編，実験化学講座7界面科学，丸善(株)，(1956)，181.
- 2) 安沢・安達・矢崎・西田，気泡分散系流体による鋼材冷却技術について，北海道伝熱グループ講演会資料，(1990).
- 3) 安沢・矢崎・北澤，圧延素材の熱処理方法，公開特許公報，61-206716.
- 4) 関 信弘，伝熱工学，森北出版(株)，(1988).
- 5) 中山泰喜，新版流体の力学，(株)養賢堂，(1992).