

ミスト冷却による金属材料の熱処理に関する研究

Study on Mist Cooling for Heat Treatment of Metals

大久保 英 敏*・西 尾 茂 文*

Hidetoshi OHKUBO and Shigefumi NISHIO

1. はじめに

高温面のミスト冷却に関する研究は、主として材料の熱処理の問題に関連してこれまでに数多く報告されている¹⁾。したがって、従来の研究では、大気圧において水-空気系のミスト流を取り扱ったものが多く、ミスト流の構成因子である液滴流量密度、液滴直径および液滴速度とミスト冷却熱伝達特性との関係が検討されてきた。しかし、これらの因子の中では、液滴流量密度が主要因子であるとの認識は確立されたものの、液滴直径・液滴速度については定性的評価すら明確な結論が出ていないのが現状である。一方で、ミスト冷却による金属材料の熱処理技術は、鋼材のTMCP技術に代表されるように、高精度で冷却能力を制御することが要求される段階に達している。さらに、鋼材のTMCP技術においては、鋼材表面に付着する酸化膜(スケール)の影響が目され、酸化膜による表面性状の変化と冷却能力の関係が検討されている²⁾。

筆者らは、ミスト冷却の冷却能力を高精度に予測することを目的として、冷却媒体側因子に関連する素過程の検討と被冷却物体側因子の影響を統一的に把握するための一連の研究を行ってきた³⁾。これらの研究は、沸騰曲線の膜沸騰域に相当する高温域の熱伝達特性に主眼をおいたものである。これまでの研究によって、高温域熱伝達率に顕著な影響を及ぼす因子としては、冷却媒体側因子では液滴流量密度が、被冷却物体側因子では非定常性および姿勢の影響が挙げられることが明らかになった。しかし、これらの影響を考慮してもなお、高温域熱伝達率を定量的に評価することができないのが現状であり、定量的評価法を確立するためには、これまでの研究では考慮されていない新たな因子を見いだす必要がある。本研究はこの新たな因子として伝熱面(冷却面)寸法に着目し、水平上向き平面系の高温域ミスト冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面寸法の影響を検討したものである。なお、

*東京大学生産技術研究所 第2部

これまでに水平上向き平面系でこの影響を検討した研究は(筆者らの知る限りでは)見受けられない。唯一、鉛直平面系において島田⁴⁾が実験的に検討しているが、彼らの研究では、この影響に関する明確な結論は得られていない。

2. 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法は、伝熱面を除けば既報⁵⁾⁶⁾とほぼ同様である。したがって、ここでは本実験に使用した伝熱面と液滴流量密度分布の測定について説明する。実験に使用した伝熱面は、直径 $d=10, 20, 30\text{mm}$ の銀製伝熱面である。実験は非定常法で行い、伝熱面厚さ l を、非定常性の影響を考慮して決定した。すなわち、文献⁵⁾で定義した非定常域の伝熱面として厚さ 1.5mm を採用し、準定常域の伝熱面として厚さ 7mm を採用した。なお、直径 $d=20, 30\text{mm}$ の伝熱面の場合には、伝熱面裏面の中央部と端から 5mm の位置にCA熱電対(素線径 0.1mm)を取り付け、ミスト冷却中の温度履歴を測定した。これらの熱電対によって得られた冷却曲線は高温域では一致しており、半径方向に熱伝達率分布がある場合でも、冷却曲線から計算で求められる高温域熱伝達率は平均熱伝達率とみなせることを確認した。また、伝熱面上での液滴流量密度分布を測定するために、図1に示すように伝熱面位置に内径 3.35mm の液滴採集用ガラス管を13個配置した。測定は、ガラス管を通過する液滴を一定時間メスシリングに捕集し、捕集した液体の体積を求めることによって行った。なお、実験に使用した噴霧ノズルは、充円錐ノズル(full cone nozzle)である。実験条件は、液滴平均温度 $T_l=21^\circ\text{C}$ 、気流流速 $V_a=20\text{m/s}$ 、液滴流量密度 $D(=D_{max})=0.00043-0.00402\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ である。

3. 実験結果および考察

3.1 液滴流量密度分布の測定

液滴流量密度 D は、高温域熱伝達率に影響を及ぼす主

研究速報

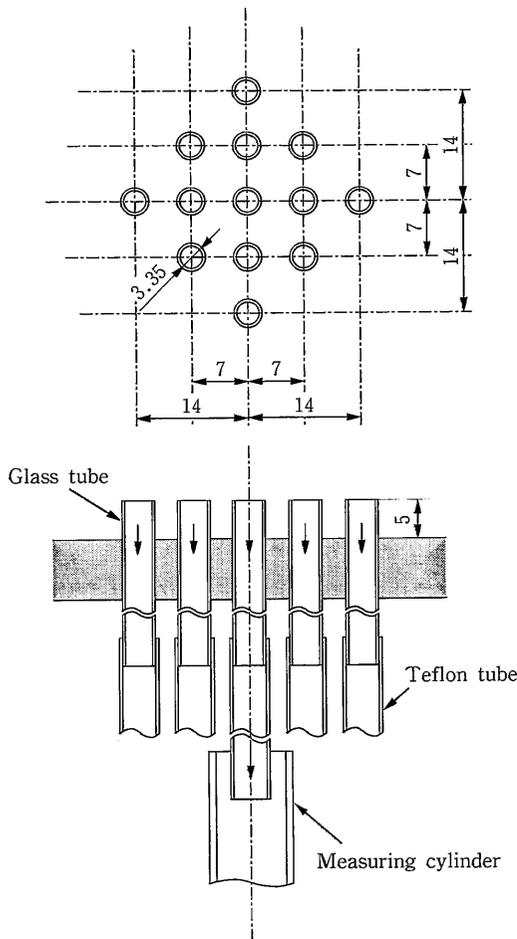


図1 液滴流量密度分布測定装置

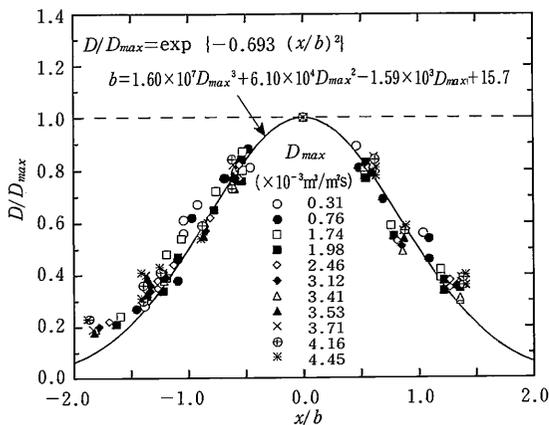


図2 液滴流量密度分布

要な因子であるが、この定義は、研究者によって必ずしも一致しているわけではない。これまでの研究では、伝熱面と同一寸法の内径の管によって液滴を捕集した場合と、内径の小さな捕集管を複数個使用し液滴流量密度分布を求めた場合などがある。さらに、液滴流量密度分布を求めた場合でも、液滴流量密度分布から求めた平均値を使用した場合と液滴流量密度が最大値となる中央値 D_{max} を使用した場合に分けられる。なお、平均値を使用している場合、この値の算出方法が明記されていない文献も見受けられる。本研究では、実験方法でも述べたように、液滴流量密度分布を測定し、液滴流量密度の尺度として液滴流量密度分布から求められる伝熱面面積平均の液滴流量密度 D_{mean} と中央値 D_{max} を採用する。

液滴流量密度分布の測定結果を図2に示した。液滴流量密度分布は、 D が大きくなるにつれて半値幅 b が小さくなる傾向を示すが、半値幅を最大液滴流量密度 D_{max} の関数として扱うことによってZijnenの式⁷⁾を適用した次式で良く整理できる。

$$D/D_{max} = \exp\{-0.693(x/b)^2\} \quad (1)$$

ここで、 x は伝熱面中心からの距離であり、

$$b = 1.60 \times 10^7 D_{max}^3 + 6.10 \times 10^4 D_{max}^2 - 1.59 \times 10^3 D_{max} + 15.7 \text{ である。}$$

ただし、 $0.00031 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s}) \leq D_{max} \leq 0.00445 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ 。

また、伝熱面面積平均の液滴流量密度 D_{mean} は、(1)式の分布式から導いた(2)式から計算で求める。

$$D_{mean} = D_{max} \cdot [\{ Y_R (1n Y_R - 1) + 1 \} / 0.693 R^2 + Y_R] \quad (2)$$

ここで、 $R = d/2b$ 、 $Y_R = \exp(-0.693R^2)$ である。

なお、伝熱面の代わりに捕集管を設置することによる誤差が無視できると仮定すれば、(2)式から計算によって求められる D_{mean} は、伝熱面と同一寸法の内径の管によって液滴を捕集した場合の測定値とほぼ同一のものであると考えられる。

3.2 非定常域の測定結果

伝熱面厚さ $l = 1.5 \text{ mm}$ の場合の高温域熱伝達率 h_f と液滴流量密度 D の関係を図3、4に示した。図中には、 D を最大液滴流量密度 D_{max} で評価した場合と平均液滴流量密度 D_{mean} で評価した場合の値を併記した。これらの図から明らかなように、 D_{max} で評価した場合には、高温域熱伝達率は、伝熱面寸法が大きくなるにつれて減少する傾向を示す。一方、 D_{mean} で評価した場合には、低過熱度で高流量密度の場合を除けば、伝熱面寸法の影響は現れないことがわかる。したがって、非定常域では、(低過熱度で高流量密度の場合を除けば)液滴流量密度を D_{mean} で評価すれば、高温域熱伝達率に及ぼす伝熱面寸法の影響は考慮しなくてもよいわけであり、液滴流量密度の尺度と

しては、 D_{max} よりも D_{mean} の方が有効である。なお、本実験条件範囲では、 $D > 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ の場合を除けば、 h_f はこれまでと同様、 D の0.6乗にほぼ比例する。

3.3 準定常域の測定結果

準定常域の測定結果として、伝熱面厚さ $l = 7 \text{ mm}$ 、過熱度 $\Delta T_{sat} = 300 \text{ K}$ の場合の高温域熱伝達率 h_f と平均液滴流量密度 D_{mean} の関係を●、▲、■、◆印で図5に示した。なお、前節の結果から、準定常域については、液滴流量密度の尺度として D_{mean} のみを用い、特に断らない限りは $D = D_{mean}$ として取り扱うことにする。図から明らかなように(準定常域においては)熱伝達率は、伝熱面寸

法が大きくなるにつれて減少する傾向を示す。この原因として、水平上向き平面系で起こっていると考えられるリバウンド液滴の伝熱面への再衝突が考えられる。

ミスト冷却に関するこれまでの研究では、単一の充円錐ノズルを使用している場合が多く、この場合、伝熱面は衝突噴流領域に設置されている。よどみ点近傍の領域では(壁噴流領域とは逆に)半径方向の距離の増大とともに壁面近傍での(半径方向の)速度は増大する。したがって、リバウンド液滴の再衝突には、壁面近傍での速度分布が影響を及ぼしているのではないと思われる。すなわち、リバウンド液滴が伝熱面に再衝突する確率が、(よどみ点からの)半径方向の距離の増大とともに減少し、この結果高温域熱伝達率は、伝熱面寸法が大きくなるにつれて減少するものと予測される。

さて、ミスト冷却の場合、高温域の熱流束 q_w は液滴群による伝熱 q_l 、空気噴流による強制対流伝熱 q_a 、および放射伝熱 q_r の和として表すことができる⁵⁾。すなわち、

$$q_w = q_l + q_a + q_r \quad (3)$$

さらに、高温域熱伝達率 h_f を $h_f = q_w / \Delta T_{sat}$ で定義することによって次式が得られる。

$$h_f = h_{fl} + h_a + h_r \quad (4)$$

ここで、 h_{fl} 、 h_a 、 h_r はそれぞれ、液滴群による伝熱に基づく熱伝達率、空気噴流による強制対流伝熱に基づく熱伝達率、および放射伝熱に基づく熱伝達率である。

そこで、(3)式に基づき液滴群による伝熱 q_l をミスト冷却熱伝達と空気噴流熱伝達の差として求め、 h_{fl} の液滴流量密度依存性を図5中に白抜き記号で併記した。また、図中の破線は、実線で評価した高温域熱伝達率の液滴流

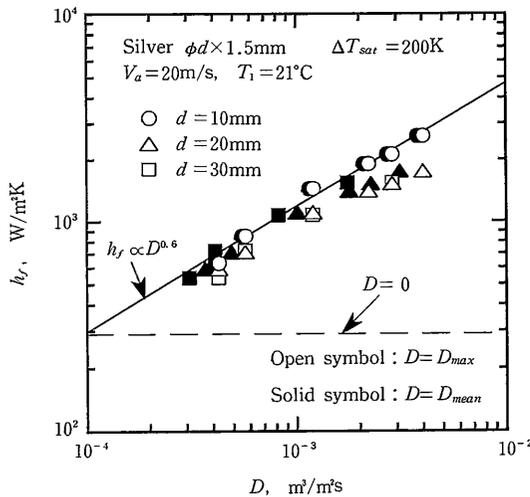


図3 高温域熱伝達率と液滴流量密度の関係 (非常域, $\Delta T_{sat} = 200 \text{ K}$)

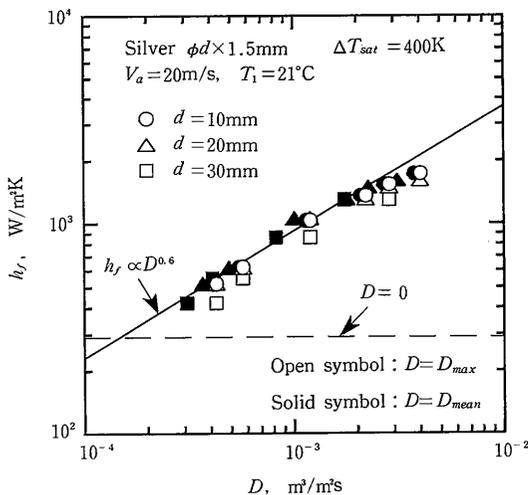


図4 高温域熱伝達率と液滴流量密度の関係 (非常域, $\Delta T_{sat} = 400 \text{ K}$)

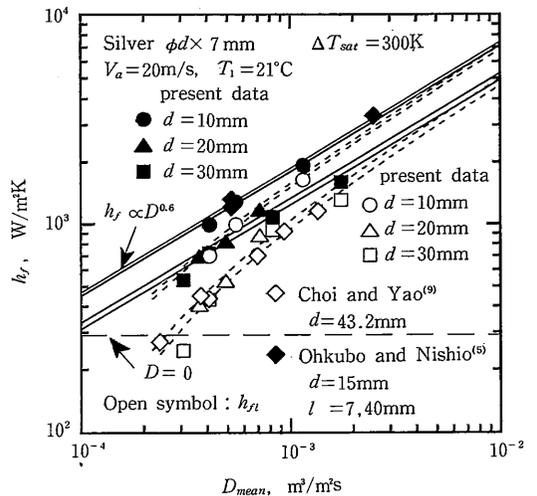


図5 高温域熱伝達率と液滴流量密度の関係 (準定常域, $\Delta T_{sat} = 300 \text{ K}$)

研究 速 報

量密度依存性の式から空気噴流熱伝達率 h_{aj} ($\equiv h_a + h_r$) を差し引いて求めたものである。さらに、図中の実線は、上から $d=15\text{mm}$ ⁹⁾, 10mm , 20mm , 30mm の測定値に基づいて得たものである。図 6 は、図 5 中の破線の値から $D_{mean}=0.00057\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ の場合の各伝熱面寸法における h_{rl} を求め、伝熱面代表寸法との関係を示したものである。図中には、既存測定値⁹⁻¹⁰⁾から同様の手法で得られる h_{rl} の値を併記したが、液滴直径、液滴速度などの影響を無視していることを考慮すれば、比較的良好な傾向を示している。なお、既存測定値は、すべて熱伝導性の良い伝熱面を用いた定常および準定常実験によって得られたものである。

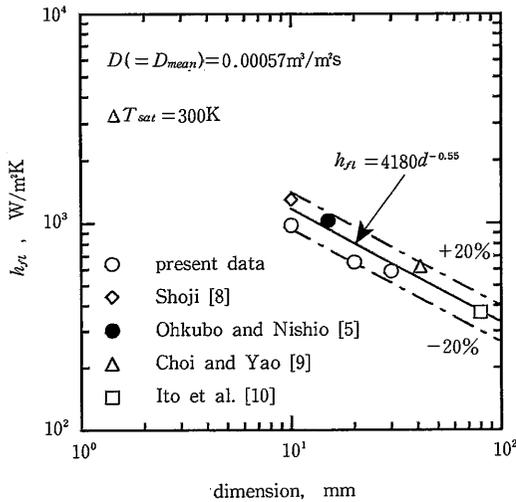


図 6 液滴群による伝熱と伝熱面寸法の関係

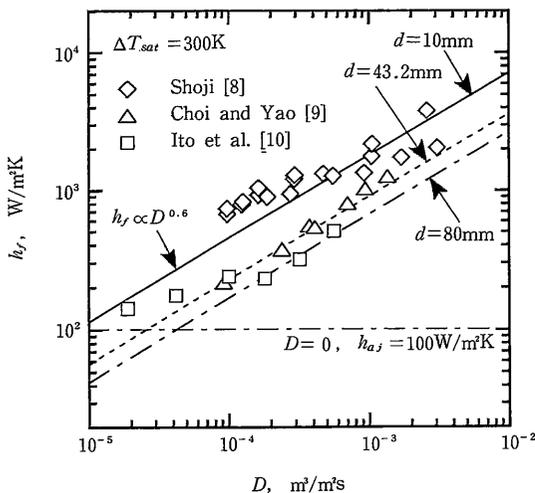


図 7 既存測定値と計算値の対応

そこで、限られた条件での結果ではあるが、これらの結果を整理式の形でまとめることによって高温域ミスト冷却熱伝達特性の定量的評価が可能となるものと考えられる。図 6 中には、次式から求めた計算値を実線で示した。

$$h_{rl} = 4180 \cdot d^{-0.55} \quad (5)$$

さらに(5)式から得られる h_{rl} に空気噴流熱伝達率 h_{aj} を加え、以下に示す(6)式の定数を決めることによって準定常域の高温域熱伝達率を(7)式のように評価することができる。

$$h_f = \text{const.} \cdot D^{0.6} \quad (6)$$

$$h_f = 88.4(4180 \cdot d^{-0.55} + h_{aj}) D^{0.6} \quad (7)$$

図 7 は、(7)式から求めた計算値と既存測定値⁹⁻¹⁰⁾とを比較したものである。なお、空気噴流熱伝達率は、伊藤らの実験結果¹⁰⁾に基づき $h_{aj}=100\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ とした。また、庄司⁹⁾および Choi and Yao⁹⁾の図 7 中の値は、彼らが求めた h_{rl} の測定値に $h_{aj}=100\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ を加えたものである。図 7 から明らかなように、液滴流量密度を変化させた場合でも、測定結果と計算値との対応は良好である。

4. お わ り に

ミスト冷却熱伝達特性の定量的評価と金属材料の熱処理への応用を目的として、水平上向き平面系における高温域熱伝達特性に及ぼす伝熱面寸法の影響を検討し、次のような結論を得た。

- (1). 非定常域では、(低過熱度で高流量密度の場合を除けば)液滴流量密度を伝熱面面積平均の液滴流量密度 D_{mean} で評価すれば、高温域熱伝達率に及ぼす伝熱面寸法の影響は考慮しなくてもよい。
- (2). 準定常域では、伝熱面寸法の増大とともに高温域熱伝達率は低下する傾向を示す。
- (3). 伝熱面寸法の影響を評価することによって、高温域熱伝達特性を定量的に評価する可能性が見いだされた。

(1991年 8 月 5 日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編, 沸騰と冷却, (1989), 211-233, 日本工業出版.
- 2) 村田, 伝熱研究, 25-97 (1986), 47.
- 3) 大久保・西尾, 生産研究, 42-6 (1990), 341.
- 4) 島田ほか 2 名, 鉄と鋼, 62-3 (1976), 372.
- 5) 大久保・西尾, 機論, 57-539, B (1991), 2349.
- 6) 大久保・西尾, 機論, 54-501, B (1988), 1163.
- 7) B.G. Zijnen, Appl. Sci. Res., Sect. A, 7 (1958), 256.
- 8) 庄司, 第15回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1978), 187.
- 9) K.J. Choi and S.C. Yao, Int. J. Heat Mass Transf., 30-2 (1987), 311.
- 10) 伊藤ほか 2 名, 機論, 55-511, B (1989), 805.