

鋼材加工熱処理におけるミスト冷却特性の整理

Evaluation of Mist Colling Characteristics in Thermo-Mechanical Control of Steel

大久保 英 敏*・西 尾 茂 文*
Hidetoshi OHKUBO and Shigefumi NISHIO

1. はじめに

微粒化した液滴群を噴霧二相流の状態高温面に衝突させ、顕熱および潜熱移動によりこれを冷却するミスト冷却は、均一性および制御性に優れた冷却方法として、材料の熱処理などに広く利用されている。しかし、鋼材加工熱処理技術の進歩とともにミスト冷却の冷却速度をより高精度に制御することが要求されるようになってきたことから、より正確にミスト冷却特性を把握する必要が生じてきた¹⁾。

鋼材加工熱処理では、被冷却物体である各種の材料は、水滴を分散させた噴霧二相流により700°C以上の高温状態から冷却されることが多く、一般には沸騰現象の膜沸騰域に相当する高温域を経て冷却される。このため、ミスト冷却特性を把握・制御するためには、高温域における熱伝達特性および急冷開始点を支配する高温域下限界条件の解明が特に重要な問題であることを考慮して、本研究では高温域を中心とした検討を行う。

ミスト冷却に関する研究においては、大気圧における水-空気系のミスト流を対象として、液滴流量密度 D 、液滴直径 d_l および液滴速度 V_d (または気流速度 V_a) などのミスト流構成因子と冷却特性との関係を検討したものが多いが、われわれは特に冷却面側因子に注目して大気圧、水-空気系ミスト冷却の高温域熱伝達特性に対する冷却面材料の熱物性²⁾、表面粗度³⁾、ぬれ性⁴⁾、熱容量⁵⁾、冷却面の大きさ⁶⁾の影響を検討してきた。本報告は、既報⁶⁾で示唆した水-空気系ミスト冷却の高温域熱伝達特性の定量化を検討し、これらを総合したミスト冷却特性の整理法について報告する。

2. ミスト冷却熱伝達特性の模式化

筆者らは、既報⁷⁾においてミスト冷却を図1に示す3つの領域に分けて、それぞれの領域を模式化し、鋼材加工熱処理に利用可能な冷却曲線を予測する方法を示した。

*東京大学生産技術研究所 第2部

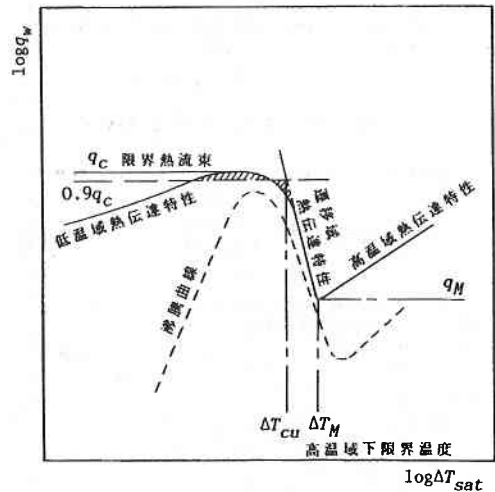


図1 ミスト冷却熱伝達特性の模式化

しかし、この模式化の中には、その後の研究で明らかになった高温域熱伝達率と冷却面熱容量の関係などが考慮されていないことから、ここでは諸因子の影響を考慮した新たな模式化を検討する。

2.1 高温域熱伝達率に及ぼす諸因子の影響

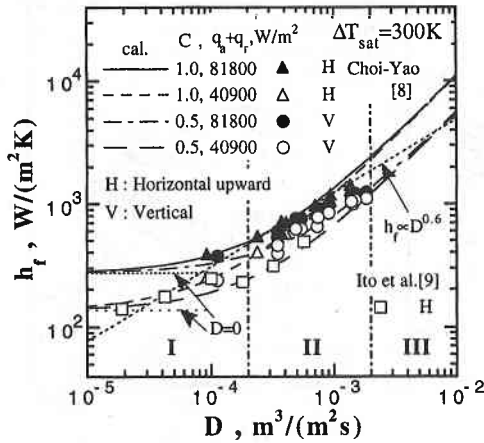
2.1.1 冷却媒体側因子の影響

筆者らは、高温域ミスト冷却における熱流束が、液滴への熱流束 q_l と (放射熱流束を含む) 気流への熱流束 q_{aj} との和であり、単一液滴列に関する既存報告をもとに、前者が液体顕熱変化と関連しているとする次式を報告した⁵⁾。

$$h_f = (C \cdot \rho \cdot C_p \cdot D \Delta T_{sub} + q_{aj}) / \Delta T_{sat} \quad (1)$$

ここで、 ρ 、 C_p は、それぞれ液滴の密度および比熱であり、 C は定数である。

図2は、高温域熱伝達率について(1)式と既存実験結果^{8),9)}とを液滴流量密度に対して比較して示したもので



I : Dilute mist region II: Intermediate mist region
III: Dense mist region

図2 高温域熱伝達率と液滴流量密度の関係

ある。ミスト冷却は、スプレー冷却などとも呼ばれているが、本論文ではすべての液滴流量密度領域の呼称として「ミスト冷却」を用い、図2の領域Iを「希薄ミスト域」、領域IIを「遷移ミスト域」、領域IIIを「濃厚ミスト域」と呼んでおく。本研究では、(1)式がほぼ成立する $D < 2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ の領域を対象としたが、(1)式が成立することは、液滴群への熱流束 q_l については、衝突液滴同士の干渉が無視できることと、サブクール液滴からの顕熱移動が支配的であることを意味している。一方、(1)式には冷却媒体側因子としては液滴流量密度 D のみが考慮されており、液滴直径・速度などの因子が考慮されていないが、従来の報告^{9), 10)}を見ると、これらの因子も影響を及ぼすと考えられている。これらを考慮した整理式は多くの場合 $q_w \propto D^j d_l^m V_d^n$ と書けるが、報告者により m や n の符号自体すら食い違っており、また庄司ら¹¹⁾の単一液滴列の実験によると $j \approx 1$ であり、 d_l 、 V_d は二次的因子と考えられる。これらのことから、本研究では、液滴流量密度以外の冷却媒体側因子の影響を二次的因子として無視している。

また、液滴温度については、筆者らがこれまでの研究で使用してきた二流体ノズルの場合、乾き空気中で水の微粒化を行っていることから、衝突直前の液滴温度はノズル入口部での液温と異なり、室温に近い温度になる²⁾。したがって、本研究では、液滴温度は室温とし、液滴温度の影響も考慮しない。

2.1.2 被冷却物体側因子の影響

高温域熱伝達率に影響を及ぼす被冷却物体側因子は、鉛直平面系では冷却面材料の熱伝導性であり、水平上向き平面系では非定常性および冷却面寸法であることがこ

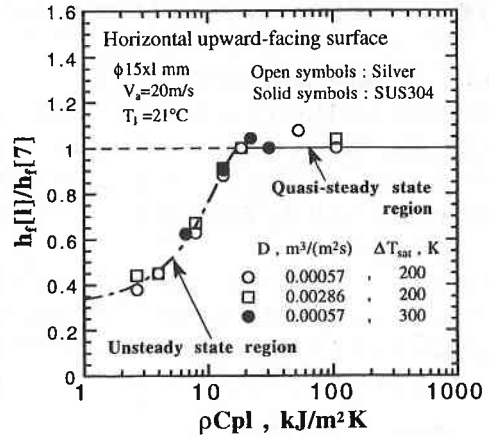


図3 高温域熱伝達率に及ぼす非定常性の影響

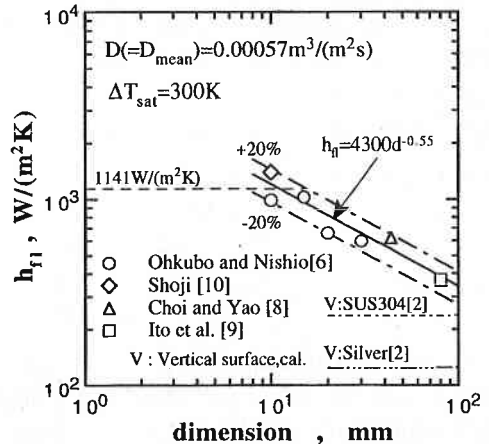


図4 高温域熱伝達率に及ぼす冷却面寸法の影響

れまでの研究で明らかになっている。図3は、水平上向き平面系において高温域熱伝達率に及ぼす非定常性の影響を示したものであるが、図から明らかなように、冷却面熱容量の大きさにより、その影響が顕著な非定常域とその影響が無視できる準定常域の二領域に分けられる。図4は、液滴群による伝熱に基づく熱伝達率と冷却面寸法の関係を示したものであり、この影響が従来の研究において同一液滴流量密度でも測定値に大きな分散がみられた原因の一つであると考えられる。図中には、熱伝達率の上限値と下限値の目安を併記した。上限値としては、 $d = 10 \text{ mm}$ および 15 mm の条件での値に有為な差異がみられなかったことを考慮して両条件での測定値の平均値を示した。また、下限値としては、再衝突液滴の影響のない条件として、後述する鉛直平面系での整理式から求められる高温域熱伝達率と既報⁶⁾で示した空気噴流によ

研究速報

る伝熱に基づく熱伝達率との差として求めた h_f を示した。

2.1.3 高温域熱伝達特性の評価

高温域熱伝達特性に関する冷却面側因子の影響を考慮した整理式は、筆者らの提案した式を除いては見受けられないことから、水-空気系ミスト冷却の高温域熱伝達特性の定量化のためには、筆者らの式を用いるのが現段階では適切であると考えられる。

筆者らは、既報²⁾において鉛直平面系に適用できる整理式として、液滴流量密度と冷却面材料の熱伝導性の影響を考慮した次式を提案し、実験値と±30%程度の分散で一致することを示している。

$$h_f = 2.28 \times 10^5 (1 + 2.77 \times 10^{-4} \alpha_w^{-0.586}) \times D_{max}^{0.6} \cdot \Delta T_{sat}^{-1/3} \quad (2)$$

また、水平上向き平面系では非定常性の影響が顕著に表れることから、準定常域と非定常域の二領域に分けて整理を行い、準定常域に関しては次式を提案している。

「遷移ミスト域」:

$$h_f = 592 (4300 \cdot d^{-0.55} + h_{aj}) D_{mean}^{0.6} \cdot \Delta T_{sat}^{-1/3} \quad (3)$$

「希薄ミスト域」および「遷移ミスト域」:

$$h_f = 1.4 \times 10^8 \cdot d^{-0.55} \cdot D_{mean} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.5} + h_{aj} \quad ; D_{mean} \leq D' \quad (4)$$

$$h_f = 1.51 \times 10^7 \cdot d^{-0.55} \cdot D_{mean}^{0.7} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.5} + h_{aj} \quad ; D_{mean} > D' \quad (5)$$

ここで、 $D' = 0.0006 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ である。

図5(a), (b)は、(4), (5)式と水平上向き平面系での既存実験値とを併記して比較したものである¹²⁾。測定値によって過熱度依存性に関するばらつきがあるものの、この場合も計算値と測定値との対応は良好であることから、ここで提案した整理式は、これまで定量的評価ができなかった既存測定値のばらつきを評価し得るものであると考える。

また「濃厚ミスト域」については、今後の研究課題として残されているが、この領域では液滴同士の干渉の割合が増加することから、(3)~(5)式は熱伝達率を高めに見積ることが予測される。この領域における高温域の測定値は、これまでの研究ではあまり見受けられず今後の研究課題であるが、整理式としては、 D の指数をさらに低くする必要があるだろう。また、過熱度依存性の評価についても今後の課題であると考えられる。

非定常域に関しては、冷却面の熱容量を考慮した次の高温域熱伝達率の整理式を提案する。

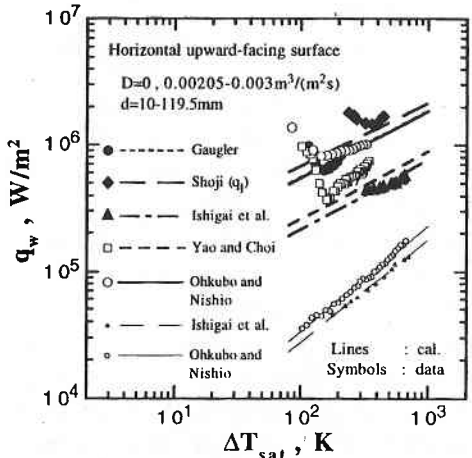
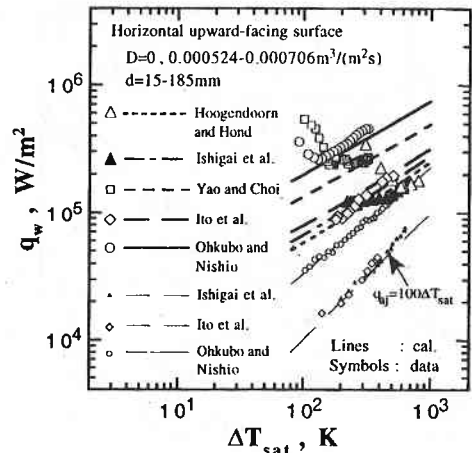


図5(a), (b) 高温域熱伝達率の測定値と計算値との対応

$$h_f[l] = B \cdot h_f[\text{steady}, d = 15] = B (1.4 \times 10^8 \cdot 15^{-0.55} \cdot D_{mean} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.5} + h_{aj}) \quad ; D_{mean} \leq D'$$

$$h_f[l] = B (1.51 \times 10^7 \cdot 15^{-0.55} \cdot D_{mean}^{0.7} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.5} + h_{aj}) \quad ; D_{mean} > D'$$

ここで、 $D' = 0.0006 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$

$$B = -1.33 \times 10^{-4} (\rho C_p l)_w^{-3} + 2.88 \times 10^{-3} (\rho C_p l)_w^{-2} + 2.98 \times 10^{-2} (\rho C_p l)_w + 3.07 \times 10^{-1} \quad (6)$$

ただし、 $h_f[\text{steady}, d = 15]$ は、冷却面直径 $d = 15 \text{ mm}$ の場合の準定常域での熱伝達率である。また、定常域と非定常域の境界は(3)~(5)式と(6)式が等しくなる時の $(\rho C_p l)_w$ を求めることによって得られる。

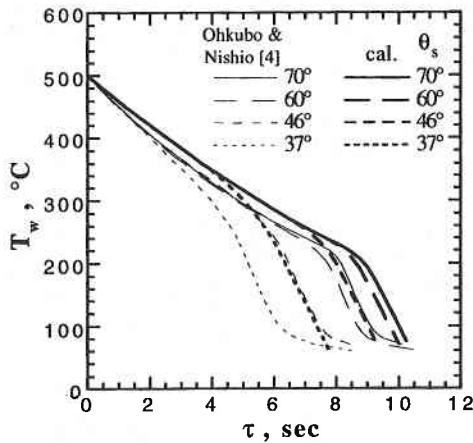


図6 冷却曲線の測定値と計算値との対応

2.2 冷却曲線

図1に示した熱伝達特性の模式化に基づいて冷却曲線を計算するためには、高温域熱伝達率の他に高温域下限温度、限界熱流束および遷移域熱伝達特性を評価する必要がある。これらの中で、高温域下限温度 T_M の評価法については、既報⁷⁾で $D = D_{max}$ とした場合の整理式を提案しており、既存測定値は、前報¹³⁾で示したように計算値と+30%、-15%程度の分散で一致している。

また、限界熱流束および遷移域熱伝達特性に関しては、現段階ではこれらの模式化を定量的に行えるだけの研究成果が得られていないものと理解している。しかし、これらの領域は冷却曲線でみれば急冷過程にあることから、冷却時間全体に及ぼす影響はあまり大きくない。したがって、ここでは既報⁶⁾で提案した整理式に基づく次式を提案する。

限界熱流束：

$$q_c = \{0.332 \cdot (\rho C_p l)_w^{0.084}\} \times q_{max} \quad : D_{max} \leq D_c' \quad (7)$$

$$q_c = 11.3 \times 10^6 \cdot (\rho C_p l)_w^{0.174} D_{max}^{0.33} \quad : D_{max} > D_c' \quad (8)$$

ここで、 D_c' は両式を等しくした場合の値とする。

遷移域熱伝達特性：

$$\Delta T_{cu} = 0.35 \Delta T_M + 35 \quad (9)$$

$$q_{wt} = n \Delta T_{sat}^p \quad (10)$$

$$p = [\ln\{q_M(\Delta T_M)/0.9q_c\}] / [\ln(\Delta T_M/\Delta T_{cu})] \quad (11)$$

$$n = q_M(\Delta T_M) / \Delta T_M^p \quad (12)$$

以上の整理式を用いて予測される冷却曲線と既存測定値との対応を図6に示す。予測値は測定値よりも冷却時間が長くなる傾向を示すが、この傾向は、高温域の熱流束の予測値が測定値よりも若干低いことに起因する。ただし、これまでの研究では熱伝達特性の定量化が十分でなかったことを考慮した場合、熱伝達特性のわずかな差が累積する冷却曲線の予測結果としては、おおむね傾向を把握しているものと思われる。

3. おわりに

筆者らのこれまでの研究に基づき、ミスト冷却特性の整理を行った。本研究で提案した諸式は、現段階では最も多くの影響因子を取り込んだものであるが、適用範囲には限界があり、今後の研究によってさらに適用範囲を広げて行く必要がある。(1993年3月10日受理)

参考文献

- 1) S. Nishio and H. Ohkubo, Heat and Mass Transfer in Materials Processing (Edited by I. Tanasawa and N. Lior), (1992), 477, Hemisphere Pub. Co.
- 2) 大久保・西尾, 機論, 54-501, B (1988), 1163.
- 3) 大久保・西尾, 機論, 54-500, B (1988), 934.
- 4) 大久保・西尾, 機論, 55-517, B (1989), 2846.
- 5) 大久保・西尾, 機論, 57-539, B (1991), 2349.
- 6) 大久保・西尾, 生産研究, 43-11 (1991), 576.
- 7) 大久保・西尾, 機講論, 890-63 (1989), 93.
- 8) K. J. Choi and S. C. Yao, Int. J. Heat Mass Transf., 30-2 (1987), 311.
- 9) 伊藤猛宏ほか2名, 機論, 55-511, B (1989), 805.
- 10) 庄司正弘, 第15回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1978), 187.
- 11) 庄司正弘ほか2名, 機論, 50-451, B (1984), 716.
- 12) H. Ohkubo and S. Nishio, Proceedings of 1st Intern. Conf. on Transport Phenomena in Processing, (1992), 663.
- 13) 大久保・西尾, 生産研究, 45-6 (1993), 掲載予定.