ミスト冷却の冷却能力の高精度予測に関する研究*
(第2報, 伝熱面表面のぬれ性の影響)大久保英敏^{*1}, 西尾茂文^{*1}Study on Accurate Prediction of Characteristics of Mist Cooling
(2nd Report, Effects of Surface Wettability)

Hidetoshi OHKUBO and Shigefumi NISHIO

In the present work, a transient method is used to study the cooling characteristics of mist cooling. The effects of surface wettability on the heat transfer coefficient and the minimum temperature of the high temperature region, namely, the film boiling region, were experimentally investigated. The heat transfer surface was made of aluminum and was 15mm in diameter and 2mm in thickness. The wettability was varied by surface treatment to the heat transfer surface. The experimental conditions of mist flow were as follows: the air velocity was $V_a=20$ m/s, the temperature of the water droplet was $T_l=21^\circ\text{C}$, and the volumetric-droplet-flow-rate was $D=0.000\ 57-0.004\ 72$ m³/m²s. The minimum temperature of the high temperature region was found to increase when the wettability increased.

Key Words: Thermal Engineering, Heat Transfer, Mist Cooling, Cooling Curve, Heat Treatment, Surface Wettability

1. 緒 言

本研究では, 前報⁽¹⁾に引き続き鋼材の制御冷却システムへの応用を目的として, 酸化膜(スケール)の付着の影響を検討した。著者らは既にこれまでに, 伝熱面熱伝導性および伝熱面表面粗さの影響について検討を行ったが⁽¹⁾⁽²⁾, 本研究では, 伝熱面表面のぬれ性の影響を独立なパラメータとして扱い, 沸騰現象の膜沸騰領域に相当する高温域での熱伝達率および極小熱流束点温度に相当する高温域下限界温度について実験的に検討した。

相変化を伴う熱伝達において, ぬれ性は重要な役割を果たすが, ぬれ性の影響の度合については, プール沸騰においても遷移沸騰を中心としたいくつかの研究⁽³⁾⁻⁽⁵⁾があるにすぎず, またミスト冷却については見受けられず, (後述するように)ぬれ性の定量的表現法の問題を含めて, いまだ測定値の集積段階にあると考えている。そこで, 本研究では, 表面処理性に優れた金属であるアルミニウムを伝熱面としてその表面のぬれ性を変化させ, 高温域からの非定常熱伝達特性に対する

影響を検討した。

2. 実験装置および実験方法

本実験では, 前報と同様の実験方法により, 水-空気系のミスト流を対象とした実験を行った。分散媒体である水は十分脱気処理を施したイオン交換水を用いた。図1に伝熱部の概略図を示した。伝熱面は, 水平上向きに設置され, 側面はけいそう土により断熱されている。伝熱面の固定にはセラミック系接着剤を用いた。使用した伝熱面の材料は, アルミニウム (Al 050, 純度99.5%) であり, 寸法は直径 $d=15$ mm, 厚さ $t\approx 2$ mm である。伝熱面のぬれ性を変化させるために表1に示したような表面処理を施した面を伝熱面として用いた⁽⁶⁾(ぬれ性の評価法については後述する)。伝熱面裏面中央部に測温用の CA 熱電対 (素線径 0.1 mm) を取付けた。熱電対は, 幅および深さ約 0.2 mm のスリットにアルミニウム線とともに埋め込みセラミック系接着剤により固定した。伝熱面は赤外線ヒータによりアルゴン雰囲気中で加熱した。伝熱面の洗浄には, エチルアルコールを用いた。液滴流量密度 D の測定方法および伝熱特性の計算方法は前々報⁽²⁾と同様である。実験条件は, 液滴平均温度 $T_l=21^\circ\text{C}$, 気流流速 $V_a=20$ m/s, 液滴流量密度 $D=0.000\ 57-0.004\ 72$ m³/m²s

* 平成元年4月5日 第66期通常総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年11月4日。

*1 正員, 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

表 1 使用伝熱面

No	処理方法	接触角: θ
1	クロメート皮膜面 ($\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot \text{Cr}(\text{OH}) \cdot \text{CrO}_4$), 被膜厚さ $0.7 \mu\text{m}$ 以下	70
2	エッチング面 (5% NaOH , 50°C , 2min. 洗浄後 30% HNO_3 , 15°C , 1min. 中和), $R_a = 0.50 \mu\text{m}$	62
3	鏡面仕上げをした光沢面. ポリシングクロス + $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ($\phi 40\text{nm}$), $R_a = 0.01 \mu\text{m}$	60
4	バフ研磨を施したもの. 光沢無し, $R_a = 0.23 \mu\text{m}$	55
5	機械加工をした光沢面. $R_a = 0.45 \mu\text{m}$	48
6	陽極酸化面 (硫酸アルマイト) + 沸騰水封孔, 被膜厚さ $0.7 \mu\text{m}$ 以下	46
7	陽極酸化面 (磷酸アルマイト) + 沸騰水封孔, 被膜厚さ $0.7 \mu\text{m}$ 以下	37
8	陽極酸化面 (磷酸アルマイト), 被膜厚さ $0.7 \mu\text{m}$ 以下	37

図 1 伝熱部の概略図

である.

3. 実験結果および考察

3・1 めれ性の評価 一般にめれ性と言ってもその定義は必ずしも明確にはなっていないが、めれ性を評価する尺度として現在のところ最もよく用いられているのは接触角である。従来の沸騰現象の研究においても、測定方法の違いはあるがめれ性を評価する尺度として接触角を用いており、本研究においてもめれ性を評価する尺度として接触角 θ を用いた。

接触角は、室温 T_r を 25°C で一定とした実験小室内で液滴高さと付着径を市販の接触角計（FACE 接触角計 CA-P 形）により測定し、液滴を球の一部とみなして算出した。ビデオ観察によると、蒸発の影響で液滴高さは時間とともに減少するが付着径は変化しないことが認められた。したがって、測定は蒸発の影響を

図 2 加熱温度による接触角の変化

避けるために液滴高さの測定を速やかに行い、伝熱面表面の7箇所での測定値を平均して接触角を定めた。

本研究では高温域の熱伝達を主対象としているため、伝熱面加熱後のぬれ性の変化を検討しておく必要がある。図2に加熱温度による接触角の変化を示した(図中の番号は表1と対応)。図2の縦軸は、横軸の温度でアルゴン雰囲気中で5分間加熱し、アルゴン流で冷却した後の室温($T_r=25^{\circ}\text{C}$)での接触角である。測定は同一面を用いて低温側から繰返し行った。図2から明らかなように、いずれの面も加熱温度が約 400°C を越えると接触角は急激に減少する。これは、金属表面に吸着されている油性物質、水分子および酸素分子等のガスが分解および離脱したためであると考えられる。さて、このように接触角の減少した面は常温で空気中に放置しておくとも再吸着が起こる。この再吸着による表面の再汚染の影響に関する研究によれば、再汚染は汚染時間が長くなるに連れてほぼ飽和に近い状態になるが、汚染の程度は汚染物質の材質によって異なる⁽⁷⁾。

玉井ら⁽⁸⁾は、金属酸化面上での汚染に関する研究を行い、汚染の度合を接触角で評価し、これを表面エネルギーと比較している。

そこで、汚染による接触角の変化を調べるために、各試験面を600°Cで5分間アルゴン雰囲気中で加熱し、アルゴン流により冷却した後、室温で実験室内に放置した。結果を図3に示した。図に示されているように、接触角は再吸着により時間とともにそれぞれの飽和接触角 θ_s に接近する。本論文では、この θ_s と、加熱直後の室温での接触角(図3の時間0での値) θ_0 を接触角の代表値とする。なお、 θ_s は310 h後と240 h後の値の平均値を用いた。

3.2 熱伝達特性 まず、図4は、伝熱面 No.1 を用いて、aging の影響を調べたものである。図には遷移域および低温域の測定値をも示してあるが、この領域ではアルミニウム板を集中熱定数系⁽⁹⁾として扱うことに問題があり、定性的な評価として示したにすぎない。図中には飽和接触角 θ_s の値を示したが、実験を重ねるごとにぬれ性が良くなり(θ_s が小さくなり)、高温域下限界温度および下限界温度付近での熱伝達率が高くなる傾向があることがわかる。9回めの測定結果に対する θ_s の値は、9回めのミスト冷却実験を終えた伝熱面を用いて図3の方法で測定した値である。高温域での熱伝達率にぬれ性の影響があるとすれば、aging にともなうぬれ性の増大に伴って液滴衝突時の固液接触の時間的・空間的確率が大きくなることによるものと考えられるが、図4に見られるように若干の影響はあるもののそれほど大きくない。他の伝熱面においても程度および傾向の差はあるが、同様の aging の影響がみられた。

図3 汚染による接触角の変化(実験室内放置)

次に、ぬれ性をパラメータとした実験結果(初期温度=約600°C)の代表例を図5、6に示した。測定値の代表例としては、agingの影響の無視できるもの(実験回数の少ない面)を採用した。図5、6より、図4と同様にぬれ性の増大とともに高温域下限界温度が顕著に増大することがわかる。また、定性的評価ではあるが、限界熱流束点過熱度はぬれ性の増大とともに高温化すること、低温域ではぬれ性の影響は見られないことがわかる。これらの結果は、大気圧水-鉛直円柱系における飽和プール沸騰実験でChowdhury-Winterton⁽⁴⁾が得た結果と定性的にはほぼ一致する。

図4 ミスト冷却熱伝達特性に及ぼす aging の影響

図5 ミスト冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面表面のぬれ性の影響 ($D=0.00057 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$)

さて、以上の結果が伝熱面ぬれ性の独自の効果であることを結論づけるためには、本研究でぬれ性を変化させるために一部の伝熱面で使用した酸化膜による伝熱面表面熱抵抗層の影響を考慮しておく必要がある。そこで、伝熱面 No.6 で用いた陽極酸化面の被膜厚さを $0.7\mu\text{m}$ ~ $21.0\mu\text{m}$ の間で変化させ、ミスト冷却熱伝達特性に対する陽極酸化膜の膜厚さ δ の影響を調べた。結果を図7に示した。表面処理の性質上、酸化膜はアルミニウム表面を100%覆っていると考えてよいが、酸化膜層の熱伝導率は膜厚さの増加とともに小さくなる。図7より、高温域熱伝達率には酸化膜の影響は見られないが、高温域下限温度は δ の増大とともに増大する傾向を示すことがわかる。また、定性的評価ではあるが、限界熱流束点過熱度は δ の増大とともに高温化すること、限界熱流束は δ の増大とともに若干増大すること、および低温域では δ の影響は見られないことがわかる(ただし、低温域では、酸化膜の主成分である Al_2O_3 の熱伝導率は顕著に増大するため、低熱伝導性被覆層とは言い難い)。これらの結果は、従来のプール沸騰実験で得られている結果^{(10)~(11)}と一致する。図8に高温域下限温度に関する実験結果を膜厚さ δ をパラメータとして示した(図中には最小二乗曲線を併記した)。図7, 8よりわかるように、本研究でぬれ性を変化させるために一部の伝熱面で使用した酸化膜は、その厚さ(すなわち熱抵抗)の増加とともに、ミスト冷却に対してあたかもぬれ性を良くしたかのごとき影響を及ぼすが、本研究で用いた酸化膜厚さは、表1に示したように $0.7\mu\text{m}$ 以下と薄く熱抵抗層とし

ての効果は無視できると考えてよい。

そこで、図9に表1に示した伝熱面の高温域下限温度と接触角 θ_s , θ_0 との関係を $D=0.00057\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$ の条件について示した。 θ_s が小さくなるにしたがって高温域下限温度が高温化する傾向が現れている(なお、高温域下限温度が定め難いものについては、その不確かさを図中に示した)。一方、 θ_0 でぬれ性を評価した場合の結果は系統的依存性を示しておらず、ぬれの尺度としては θ_s が適当と思われる。また、図中には Chowdhury-Winterton⁽⁴⁾ のジュラルミンとアルミニウムによる実験結果を併記した(ただし、彼らの用い

図7 ミスト冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面表面熱抵抗層(陽極酸化膜)の影響

図6 ミスト冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面表面のぬれ性の影響 ($D=0.00472\text{m}^3/\text{m}^2\text{s}$)

図8 高温域下限温度に及ぼす伝熱面表面熱抵抗層(陽極酸化膜)厚さの影響

た接触角の値は各実験前と実験後の測定値の平均値である)。また図10には、高温域下限界温度 T_w と接触角 θ_s との関係を液滴流量密度 D をパラメータとして示した。液滴流量密度の増大とともに下限界温度のぬれ性依存性が增大することがわかる。

3・3 冷却曲線 図11に $D=0.00057 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ における各伝熱面の冷却曲線を示した。また図12に、各伝熱面の冷却時間(600~150°C)を伝熱面 No. 1 のそれで無次元化して示した。ただし、冷却曲線に対しては粗さによる高温域熱伝達の微妙な変化が累積して表れる⁽¹⁾のでぬれ性の効果のみを検討するため平滑面とみなせない伝熱面 No. 2, 5 は除外した。図11よりわかるように冷却時間に対するぬれ性の影響は、高温域では

小さく、主に下限界温度の変化を介して現れ、図12に示したように下限界温度以下までの無次元冷却時間はぬれ性の増加とともに顕著に減少する。

さて、図13は鋼材の制御冷却における冷却不安定の概念図である。図中の τ_1 は、鋼材冷却ゾーン通過時間であり、冷却曲線1が、低ぬれ性で熱抵抗層のない比較的滑らかな面での冷却曲線である。前報で述べたように、鋼材の酸化スケールは、表面粗さ、ぬれ性、熱伝導性および多孔性を変化させる。例えば前報で示したように、粗さの増大は図13のDのように高温域での冷却速度に影響を及ぼすが、Aに示したように高温域下限界温度には影響を及ぼさないことから、冷却曲線を1→3のように変化させ、冷却終了温度に T_{w1} と

図9 高温域下限界温度と接触角 θ_s , θ_o の関係

図11 冷却曲線

図10 高温域下限界温度と接触角 θ_s の関係

図12 冷却時間と接触角 θ_s の関係

図 13 鋼材の制御冷却における冷却不安定概念図

T_{w3} の差を生じさせる (これが冷却不安定現象と呼ばれている)。一方、図 5～8 で示したように、ぬれ性および熱抵抗層厚さの増大は、高温域下限界温度を図 13 の B のように変化させ、冷却曲線を 1→2 と変化させる。この結果、粗さ、ぬれ、表面熱抵抗の変化により高温域での冷却速度は図 13 の D のように変化し、高温域下限界温度は C のように変化するため、冷却曲線は 1→4 となる。この中で粗さについては大規模粗さにすると粗さの変化による冷却曲線の変化は小さくなるので問題は小さいが、ぬれ性、表面熱抵抗についてはお互いに連結している場合が多く、これをコントロールすることが制御冷却安定化の重要因子であると言える。

4. 結 言

鋼材の制御冷却システムへの応用を目的として、ミスト冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面表面のぬれ性の影響を、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 $D=0.00057-0.00472\text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ の条件で実験的に検討し、以下の結論を得た。

(1) ぬれ性の増大とともに高温域下限界温度は顕著に増大する。また、定性的評価ではあるが、限界熱流束点過熱度はぬれ性の増大とともに高温化し、低温域ではぬれ性の影響は見られない。

(2) 冷却時間に対するぬれ性の影響は、高温域では小さく、主に下限界温度の変化を介して現れ、下限界温度以下までの冷却時間はぬれ性の増加とともに顕著に減少する。

終わりに、本研究を行うにあたり、昭和アルミニウム(株)より実験に使用した伝熱面試料を提供して戴いたこと、研究費の一部が文部省昭和 62 年度科学研究費補助金奨励研究(A) (62750162) によっていることを記し、謝意を表する。

文 献

- (1) 大久保・西尾, 機論, 54-500, B (1988), 934.
- (2) Ohkubo, H. and Nishio, S., *Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Engng. Conf.*, 5 (1987), 71; 大久保・西尾, 機論, 54-501, B (1988), 1163.
- (3) 西川・ほか 2 名, 機論, 37-297 (1971), 1018.
- (4) Chowdhury, S. K. R. and Winterton, R. J. S., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 28-10 (1985), 1881.
- (5) Liaw, S. P. and Dhir, V. K., *Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf.*, 4 (1986), 2031.
- (6) 内山・ほか 2 名, 軽金属, 30-10 (1980), 592.
- (7) 大場, ガラス表面設計, (1983), 265-269, 近代編集社.
- (8) Tamai, Y., ほか 2 名, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 50 (1977), 1881.
- (9) Stolz, G. Jr., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 82-1 (1960), 20.
- (10) 西尾・芹沢, 機論, 53-487, B (1987), 1061.
- (11) Chandratilleke, G. R.・西尾, 低温工学, 23-3 (1988), 12.