スプレー冷却におよぼす固体微粒子濃度・比表面積の影響に関する研究

Study on effects of density and specific surface area of solid particle with water mist on the spray cooling.

○学 文 珠 杏平 (大分大院) 正 岩本 光生 (大分大) 正 齋藤 晋一 (大分大)

Kyohei MONJU, Oita University, 700 Dannoharu, Oita-shi, 870-1192, Oita
Mitsuo IWAMOTO, Oita University
Shinichi SAITO, Oita University

Key Words: Spray cooling, Solid particle, Leidenfrost phenomena

1. 緒言

物体表面の伝熱促進のためには、ファンを使用する強制対流や、ノズルを用いて流体を伝熱面に衝突させる衝突噴流が知られている。衝突噴流冷却は強制対流冷却と比較して高い冷却性能を有しているため広い分野で用いられているが、噴流に水ミストを加えることにより、高い蒸発潜熱、液滴の伝熱面への衝突による境界層破壊などの特徴を加えることが出来る。さらに、液滴流量や数密度の制御により広い範囲で冷却能力を変化させることが可能である。衝突噴流冷却に水ミストを加えたスプレー冷却の使用例としては、鉄鋼業の熱処理、原子炉の緊急冷却、半導体素子の冷却などが小坂ら[1]によって報告されている。中川ら[2]はスプレー冷却を使用し、ガス流量、ミスト量がスプレー冷却におよぼす影響について実験を行い、冷却速度および表面熱流速は噴射ガス流量、ミスト量の増加とともに増加し、ミスト径が小さい方が伝熱性能は向上することを示した。

しかしながら冷却対象物が高温の場合、液滴が伝熱面上でライデンフロスト現象を起こし、冷却性能が低下することが知られている。ライデンフロスト現象は水滴の場合、伝熱面温度が約 200～300℃で発生し、この条件下では液滴と伝熱面の間で蒸気層が発生し熱伝導が抑制され、蒸発時間が増加する。このため高温領域での熱伝達促進のためにはライデンフロスト現象の発生を回避する必要がある。

一方、高温面上における単一液滴の蒸発挙動に関して、液滴に固体微粒子を混入させることによりライデンフロスト点を高温に移動させ、核沸騰領域を広げることにより伝熱促進ができることが報告されている。添加する固体微粒子として酸化チタン(Subhrakanti ら)[3]、炭酸カルシウム(Saito ら)[4]による伝熱促進効果が確認されている。

そこで本研究ではスプレー冷却の水ミスト内に固体微粒子を分散させ、この固体微粒子の混合濃度、比表面積の変化が冷却性能におよぼす影響について実験を行った。

2. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を Fig.1 に示す。本実験では、加熱面として 50×10mm、厚さ 30μm のステンレス箔を用い、その裏面中央に直径 0.1mm の K 型熱電対を設置した。実験ではステンレス箔を 100W で直流通電加熱し、上方に設置された内径 0.5 mm の 2 流体ノズル (樹いけうち SETO0405S303) から水ミストを圧縮空気とともに箔に衝突させた。なお水は蒸留水を用いている。ここでノズル-加熱面間距離 30 mm、ミスト及び噴射空気温度 25℃、空気流量 40 Nl/min、ミスト量 2.0 ml/min である。

測定では、固体微粒子濃度・比表面積を変化させ、加熱面温度の時間変化を設置した K 型熱電対を用いて 0.1 秒毎に測定した。粒子の材質は炭酸カルシウムであり、Unica、Uniflex (米庄石灰工業株式会社) および Viscul (樹ニューライム) の比表面積の異なる 3 種類の粒子を用いた。各固体微粒子の物性値を Table 1 に、粒子形状を Fig.2 に示す。また、本実験では濃度を 0.5、1.0、2.0 wt% で変化させた。

Fig.1 Schematic drawing of the experimental apparatus.

Table 1 Physical property of particles.

Particle	Average particle size [μm]	Specific surface area [m ² /g]	Material
Unica	0.2~0.5	40	CaCO ₃
Uniflex	0.15	28	
Viscul	0.08	18

Fig.2 Shape of solid particles.

3. 実験結果と考察

Figure 3 に空気のみ、水スプレーのみ、固体微粒子(Unica, 濃度 1.0wt%)含有スプレー時の加熱面温度の経時変化を示す。空気のみと比べて水スプレーのみの場合では温度が低くなっている。さらに固体微粒子を加えた場合では、初期温度は水スプレーのみの場合と同じだが、噴射時間とともに温度は減少し約 250s で最小値に達する。その後、温度は増加に転じ水スプレーの場合とほぼ同じ温度になる。これは以下のメカニズムによるものと考えられる。加熱面上に堆積した微粒子層は、加熱面であるステンレスより熱伝導率が低いいため、層の成長とともにその表面温度は低下し、ライデンフロスト点以下では液滴の核沸騰によって冷却速度は向上する。しかしながら、さらに微粒子層が成長すると粒子層が熱抵抗となり温度は再び増加する。

Figure 4 に最低加熱面温度におよぼす固体微粒子濃度の影響を示す。固体微粒子を分散させた場合、水スプレーのみのより温度が低くなり、濃度が増加するにつれて最低温度は低下する。Unica の場合、濃度 2.0wt%で温度が最も低くなっており、水スプレーのみと比較して半分程度になっている。

Figure 5 に加熱面冷却速度におよぼす固体微粒子濃度の影響を示す。ここで冷却速度は最低加熱面温度に達するまでの温度変化をそれに要した時間で割ったものである。本図において、冷却速度は固体微粒子濃度の増加につれて上昇している。この原因は加熱面の表面に堆積する粒子層の成長速度の差によるものと考えられ、2.0wt%の冷却速度は 1.0wt%のそれのほぼ倍の値となっている。しかしながら濃度が最も低い 0.5wt%の場合には冷却速度は急激に低下しているが、これは液滴が加熱面に衝突した際に発生する蒸気膜によって固体微粒子が加熱面に定着しにくくなり、微粒子層の成長が阻害されるためであると思われる。

Figure 6 および Fig.7 に最低加熱面温度および冷却速度におよぼす固体微粒子の比表面積の効果を示す。Figure 6 において、比表面積が小さい Visucul に対して温度が最も低くなっている。これは、比表面積が最も小さい幾何学形状は球形であり、冷却性能を向上させるには球形が最適であることを示している。冷却速度も Fig.7 に示されるように、比表面積が小さい、すなわち球形粒子の場合に最も大きくなっている。これらの原因は微粒子のサイズ、形状に起因する堆積層表面の凹凸の差による液滴に対するぬれ性の違い、また粒子層の有効熱伝導率の違いによるものと考えられる。

4. 結言

1. スプレー冷却においてミスト内に固体微粒子を分散させる事により冷却性能は向上した。
2. 本実験の範囲内では、スプレー冷却において固体微粒子濃度の増加につれて冷却性能は向上した。
3. 固体微粒子の比表面積が最も小さい球状の粒子を用いた際、最も冷却性能が向上した。

参考文献

- [1] Kosaka A., Shimizu K., Takimoto, A., Hayashi, Y.
Study on Mist Cooling of a Superheated Surface : Effects of Surface Position, Size and Structure on Heat Transfer Enhancement and Control Report of Japan Society of Mechanical Engineers, 63, 2825-2831 (1997)
- [2] Keisuke Nakagawa, Atsusi Endo, Mitsuo Iwamoto and Shinichi Saito.
Experimental study of the impinging air jet cooling with water mist, 25th ISChE
- [3] Subhrakanti CHAKRABORTY, Anirban CHAKRABORTY, Sumitesh DAS, Tridibesh MUKHERJEE, Debashish BHATTACHARJEE and Ranjit Kumar RAY : Application of Water Based-TiO₂ Nano-fluid for Cooling of Hot Steel Plate ISIJ International, Vol.50 (2010)
- [4] Shinichi Saitoh, Kouichi Kamiuto. : Evaporation of a Slurry Droplet Contacting with a Hot Surface : The 7th JSME-KSME Thermal and fluids Engineering conference (2008)

Fig.3 Transient response of heating surface temperature.

Fig.4 Minimum heating surface temperature versus concentration of solid particles.

Fig.5 Cooling speed versus concentration of solid particles.

Fig.6 Minimum heating surface temperature versus specific surface area.

Fig.7 Cooling speed versus the particle size.