

# 単一および多段フラットスプレーノズルによる 高温鉛直面の冷却特性

播木 道春\*・大西 晶\*・森田 昌孝\*<sup>2</sup>

Heat Transfer Characteristics with Single and Multi-stage Flat  
Spray Nozzles on a Hot Vertical Surface Cooling

Michiharu HARIKI, Akira ONISHI and Masataka MORITA

**Synopsis :** In order to improve water cooling technique for flanges in rolled H-shapes for the prevention of cooling buckling on thin web, an experimental study on a hot vertical surface cooling with single and multi-stage spray nozzles was carried out.

First, the effects of nozzle pressure, nozzle angle and nozzle-plate distance on heat transfer coefficient of a hot vertical surface were investigated with a single spray nozzle. Next, with multi-stage spray nozzles the effect of flowing water from the upper area on heat transfer coefficients of the lower water strike zone and flowing water zone was investigated.

The results obtained are summarized as follows.

- (1) The heat transfer coefficient of water strike zone with a single spray nozzle was described by water flux which is functions of nozzle pressure, nozzle angle and nozzle-plate distance.
- (2) In the case of high temperature with a single spray nozzle, the heat transfer coefficient ratio between flowing water zone and water strike zone is not affected by the cooling conditions, such as nozzle pressure, nozzle angle and nozzle-plate distance.
- (3) However, in the case of low temperature, the ratio between flowing water zone and water strike zone on heat transfer coefficient strongly depends on the nozzle operating conditions.
- (4) On the other hand, in the case of multi-stage spray cooling, the existance of flowing water from the upper area enhances heat transfer coefficient of lower flowing zone. The maximum ratio of heat transfer coefficient between flowing water zone with water flowing down from above and without is from about 1.3 to 1.7.

**Key words :** water cooling ; H-shapes ; spray nozzle ; hot vertical surface ; heat transfer coefficient.

## 1. 緒言

H形鋼は厚肉のフランジ部と薄肉のウェブ部から成る形状の特殊性によって、熱間圧延後の放冷過程でウェブ座屈を起しやす<sup>1)</sup>。そのため、圧延加工中、または圧延終了後にフランジ部を強制的にスプレー冷却することにより、薄肉ウェブを有するH形鋼の製造が開始された<sup>2)</sup>。

ところで、スプレーノズルによってフランジ部を冷却するに際しては、ノズルから噴霧された液滴が直接フランジ部表面に当たる衝突域の冷却能力だけでなく、衝突後に表面に沿って流れる流水方向の冷却能力を精度良く把握しておく必要がある。前者の冷却能力、すなわち、衝突域の熱伝達率は日本鉄鋼協会が中心となってまとめられている<sup>3,4)</sup>。一方、後者の熱伝達率については、今村らが移動冷却実験によって、衝突域近傍の熱伝達率と衝突域の熱伝達率に及

ぼす流下水の影響を明らかにしている<sup>5,6)</sup>。しかしながら、今村らは、フラットノズルとスポットノズルの組み合わせで調査しており、汎用的な条件での冷却特性については、十分な説明がなされていない。

そこで、高温鉛直面をスプレー冷却する場合の基本的な伝熱現象を明らかにしておく必要があると考え、本研究では、まず単一フラットスプレーノズルを用いた場合について、鉛直面衝突域とその後の表面に沿って流れる流水方向の熱伝達率に及ぼすノズル圧力、ノズル角度および噴霧距離の影響を明らかにした。つぎに、鉛直方向に多段にフラットスプレーノズルを配置した場合について、鉛直面衝突域と流水域の熱伝達率を調査し、単一ノズルとの比較を行うとともに、上部からの流下水の影響を明らかにしたので報告する。

平成8年11月8日受付 平成9年1月14日受理 (Received on Nov. 8, 1996; Accepted on Jan. 14, 1997)

\* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-02)

\* 2 住金マネジメント(株)鹿島事業部 (Kashima Division, Sumikin Management Co., Ltd.)

## 2. 実験方法

### 2.1 単一スプレー実験

高温鉛直面に衝突したスプレー冷却水の衝突域から流水方向にかけての熱伝達率を測定するために用いた実験方法をFig. 1に示す。まず、試験材を電気炉で1100°Cに加熱・均熱後、裏面を溶着熱電対で測温しながら、片面を水冷した。試験材は、表面酸化スケールの影響を除くために、酸化されにくいステンレス材(SUS310S)を選択し、板幅300mm、厚み3mmの寸法のものを用いた。流水方向の測温位置は、ノズルから噴霧された冷却水が試験材と衝突する位置を基準に、上方向(-方向)には10mm、下方向(+方向)には10, 30, 50, 100mmとした。流水方向の熱伝達率に及ぼす諸因子としては、Table 1に示すように供試ノズル圧力Pは0.02から0.1MPa、ノズル先端から試験材までの水平距離としての噴霧距離lは50から250mm、水平面からの伏せ角としてのノズル角度 $\theta$ は0°から25°とした。なお供試ノズルは、圧力0.3MPaで噴霧角度80°、水量40l/min仕様の市販フラットノズルを用いた。

### 2.2 多段スプレー実験

高さ方向多段にスプレーノズルを配置した場合の熱伝達率を測定するにあたり、適正なノズル条件を設定するために、まずノズルから噴霧された冷却水の鉛直面上における流動挙動を調査した。実験方法はFig. 2に示すように、各段ノズルの設置角度(水平面からの伏せ角度 $\theta=10^\circ$ から25°、ノ

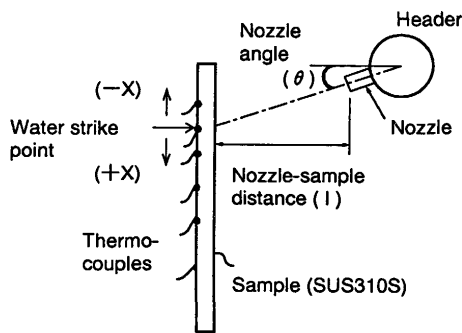


Fig. 1. Temperature measuring method.

Table 1. Experimental conditions of single spray cooling.

|                                      |  |  |
|--------------------------------------|--|--|
| Nozzle pressure (P)                  |  | 0.02 ~ 0.1 MPa   |
| Nozzle-sample distance (l)           |  | 50, 150, 250 mm  |
| Nozzle angle ( $\theta$ )            |  | 0, 10, 25°   |
| Distance from water strike point (X) |  | 0, $\pm 10$ , 30, 50, 100 mm   |
| Sample                               | Size<br>Material<br>Surface roughness<br>Scale thickness | 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 3 mm<br>SUS310S<br>$R_z = 2.45 \sim 3.96 \mu\text{m}$<br>3.0 $\mu\text{m}$ |
| Sample temp.                         |  | 1100°C   |
| Water temp.                          |  | 23 ~ 26°C  |

ズル軸周方向の捻れ角度 $\beta=5^\circ$ から20°)およびノズル圧力(P=0.02から0.1MPa)をパラメータとして、透明なアクリル板(高さ250mm $\times$ 幅800mm $\times$ 厚さ10mm)を用いて、片側に冷却水を衝突させ反対側から観察を行った。各段ノズルの幾何学的条件はFig. 2に示す通りで、紙面に鉛直な幅方向ノズルピッチは250mmとし、高さ方向に千鳥にノズルを、上中段は3個、下段は4個配置した。なお、供試ノズルの上段は圧力0.3MPaで噴霧角度40°、水量24l/minの斜方フラットノズル、中下段は前項の単一ノズル試験と同じ仕様のノズルを用いた。

つぎに、多段ノズルを用いた場合の高温鉛直面上における各段ノズルの冷却水衝突域と流水域の熱伝達率を測定するために、単一ノズル実験と同じ方法で測温実験を行った。その実験条件をTable 2に示す。ノズル設置角度は、冷間実験より、各段ノズルの衝突域が高さ方向に連続している条件を適正值として選択し、上部からの流下水の影響については、高さ方向のノズル圧力の組み合わせを変えて調査した。また、測温位置については、各段ノズルの高さ方向中央部で代表した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 単一スプレー時の冷却曲線

Fig. 3はノズルから噴霧された冷却水と試験材の衝突域にて得られた冷却曲線の代表例である。ノズル伏せ角度 $\theta$ は10°、ノズル圧力Pは0.05MPaの場合において、噴霧距離lをパラメータとしている。噴霧距離lが50mmでは、衝突中心部と高さ方向上下10mm離れた位置での冷却パターンの差は小さく、150mm以上離れると衝突中心より上10mmの位置の冷

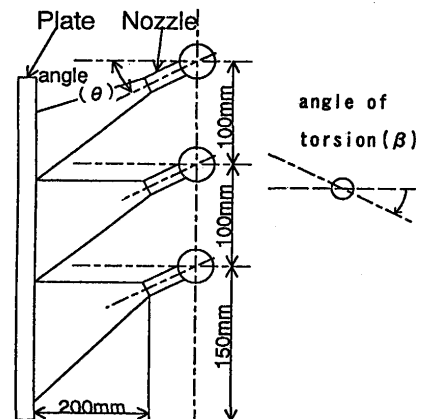


Fig. 2. Arrangement of multi-stage spray nozzles.

Table 2. Experimental conditions of multi-stage spray cooling.

|                           |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Nozzle angle ( $\theta$ ) | upper: 22°, middle: 20°, lower: 13° |
| Nozzle angle ( $\beta$ )  | upper: 11°, middle: 5°, lower: 16°  |

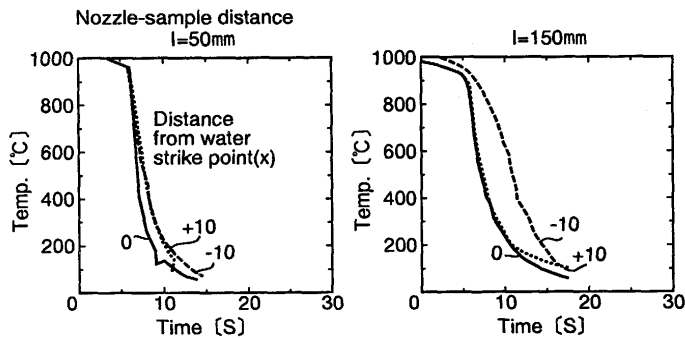


Fig. 3. Cooling curves on water strike zone of samples by a single nozzle. (Nozzle angle : 10°, pressure : 0.05MPa)

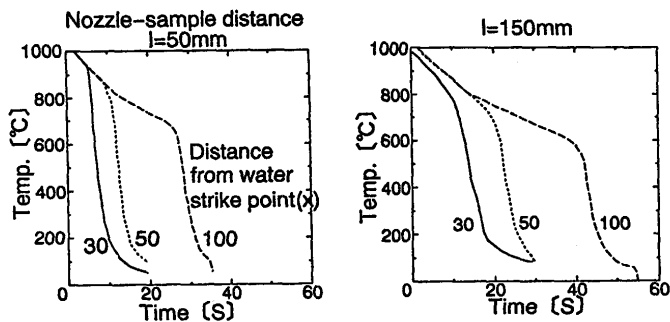


Fig. 4. Cooling curves on flowing water zone of samples by a single nozzle. (Nozzle angle : 10°, pressure : 0.05MPa)

却が遅れる傾向が見られた。

Fig. 4 は流水域における冷却曲線の代表例であり、条件は Fig. 3 と同じで衝突位置より流水方向に30mm, 50mm, 100mm離れた位置での挙動を示す。各位置での冷却パターンに及ぼす噴霧距離 $l$ の影響は、50mmと150mmでは冷却遅れの明確な差が認められるが、150mm以上では小さい。また、衝突位置から30mmと50mmの位置では冷却開始から急激な温度変化が見られるが、100mmの位置では裏面温度が600°Cまで比較的ゆるやかに変化している。

### 3・2 単一スプレー時の冷却特性

Fig. 5 は测温値の一次元伝熱逆計算法<sup>7)</sup>にて得られた冷却水衝突域から流水域にかけての熱伝達率と表面温度との関係を示す。実験条件は、ノズル伏せ角度 $\theta$ は10°, 噴霧距離 $l$ は150mm, ノズル圧力 $P$ は0.05MPaである。流水域では、表面温度が800°Cから700°Cあたりで、熱伝達率の急激な上昇が見られることから、蒸気膜の崩壊が生じていることがわかるが、衝突域では見られない。流水域の熱伝達率は、衝突域に比して高温域では、1000W/m<sup>2</sup>K以下と小さい。一方、表面温度が低温になるにつれて、その値は急激に大きくなる傾向を両者とも示す。なお、衝突域の熱伝達率としては、衝突域の水量密度との関係で、衝突中心と上下10mmの算術平均値を用いることにした。

Fig. 6 は、表面温度800°Cと400°Cにおいて、衝突域の熱伝

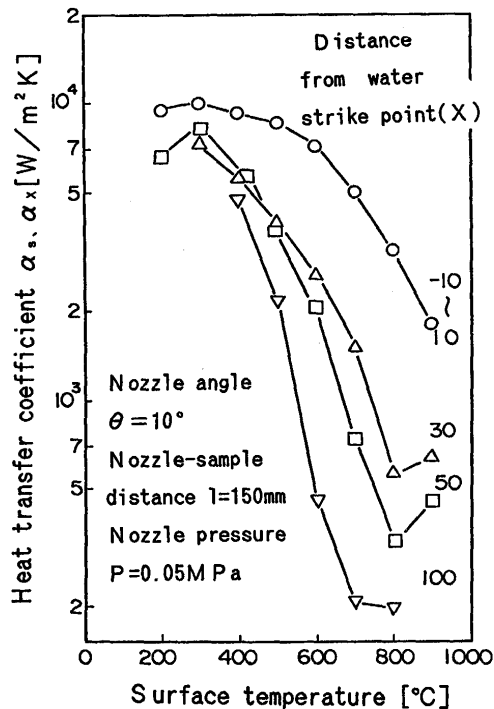


Fig. 5. Relation between surface temperature and heat transfer coefficient through the flowing water zone.

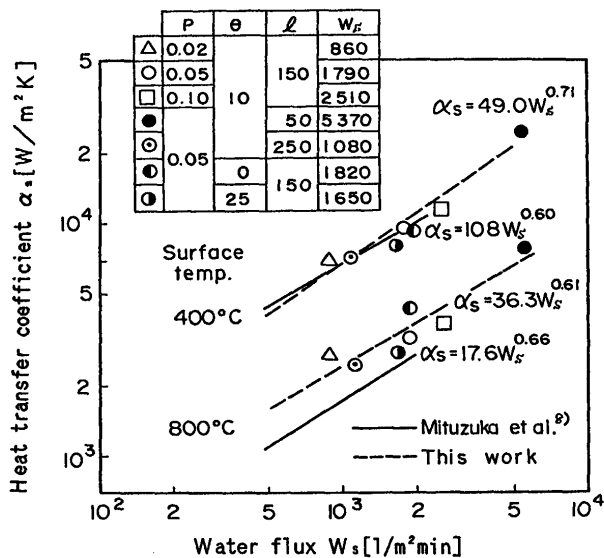


Fig. 6. Relation between water flux and heat transfer coefficient on water strike zone by a single nozzle.

達率 $\alpha_s$ を水量密度 $W_s$ で整理した結果を示す。なお、衝突域の水量密度の算出については、噴霧有効厚みを30mm一定とし、噴霧幅を幾何学的に、ノズル伏せ角度 $\theta$ と噴霧距離 $l$ から求めた。これからノズル圧力 $P$ , ノズル伏せ角度 $\theta$ 及び噴霧距離 $l$ を水量密度 $W_s$ に置き換えることにより衝突域の熱伝達率を記述できることがわかった。その値について水平上下面冷却主体の三塚らの式<sup>8)</sup>と比べてみると、低温域では比較的良く一致しているが、高温域ではやや大きい傾向になっ

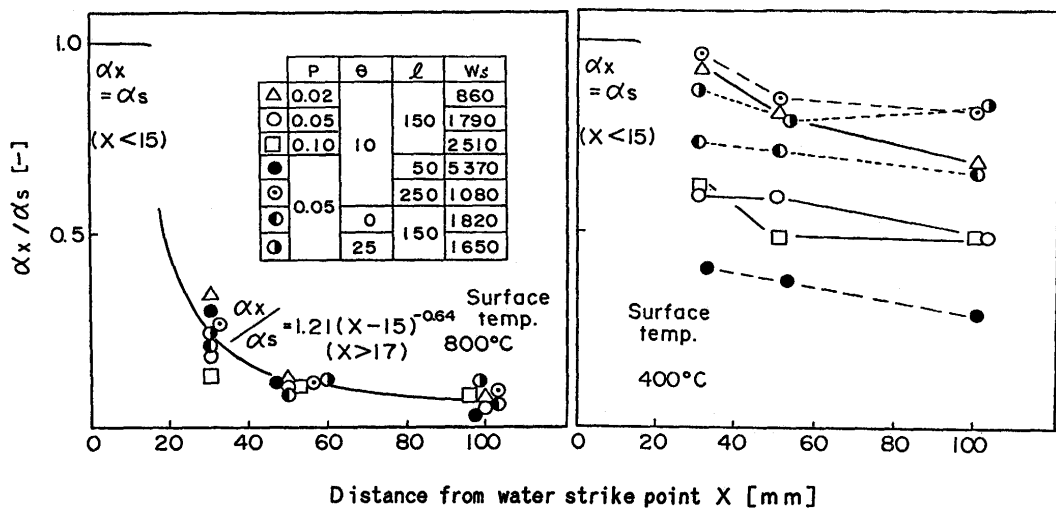


Fig. 7. Effect of distance from water strike point on heat transfer coefficient.

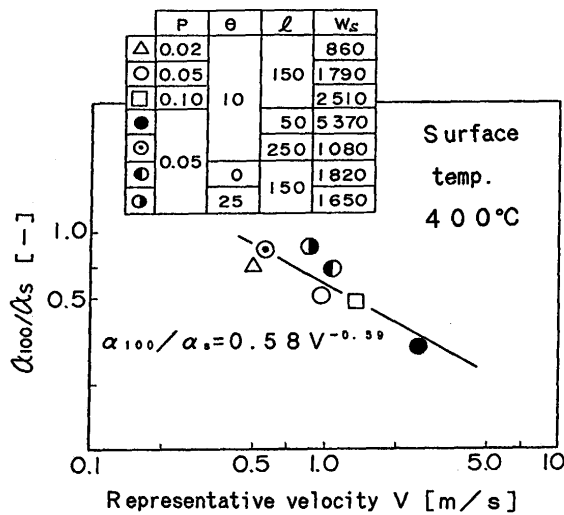


Fig. 8. Relation between representative velocity and heat transfer coefficient ratio ( $\alpha_{100}/\alpha_s$ ).

ている。その理由としては、本実験のような低圧力の噴霧では液滴が十分分散されず、連続流的な噴霧による運動量の増大効果のためと考えられる。

Fig. 7は表面温度800°Cと400°Cにおいて、衝突位置から流水方向にかけての熱伝達率の減衰比率( $\alpha_x/\alpha_s$ )を示す。流水方向の熱伝達率 $\alpha_x$ は、衝突中心から50mmにかけて大きく変化する。高温域では、衝突域の熱伝達率 $\alpha_s$ に対する比率は10%まで小さくなりノズル圧力P、ノズル伏せ角度 $\theta$ および噴霧距離 $l$ の影響は小さい。今村らの実験<sup>9)</sup>によると、鋼板表面温度が900°Cから700°Cにかけての衝突域と50mm離れた位置での熱伝達率は30%程度の値が得られており、今回の結果とはほぼ一致した傾向を示している。一方、表面温度400°Cでは衝突位置から流水方向にかけての減衰比率( $\alpha_x/\alpha_s$ )は、冷却条件によって大きく異なる。すなわち衝突域において、冷却水の飛散が少ない条件であるノズル圧力Pが低い、ノズル伏せ角度 $\theta$ が大きい、または噴霧距離 $l$ が長い程、減衰比率( $\alpha_x/\alpha_s$ )は小さい。

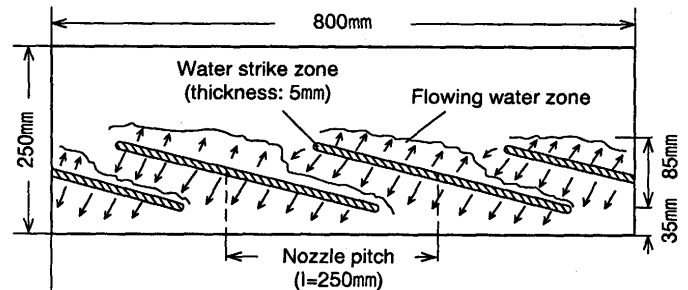


Fig. 9. Water flowing pattern for lower nozzles.

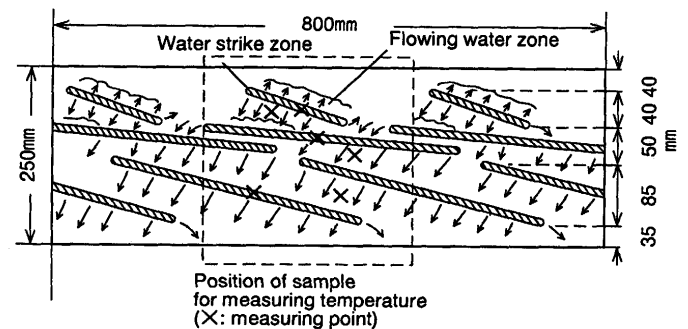


Fig. 10. Water flowing pattern for multi-stage nozzles.

Fig. 8は、表面温度400°Cの時に、衝突位置において岡村<sup>9)</sup>が提唱した代表速度Vで衝突域から100mmの位置における熱伝達率 $\alpha_{100}$ の減衰比率( $\alpha_{100}/\alpha_s$ )を整理した結果を示す。

これから、液滴の運動量を連続流体のごとく扱い、衝突速度 $v_s$ と水量密度Wの積の平方根で定義され、速さの次元を持つ代表速度Vから低温域における流水方向の熱伝達率の減衰比率( $\alpha_{100}/\alpha_s$ )を予測できることがわかった。

### 3.3 多段スプレー時の流動挙動

高さ方向多段に設置されたフラットスプレーノズルから噴霧された冷却水の流動挙動について、その代表例をFig. 9およびFig.10に示す。Fig. 9は下段ノズル単独の場合であり、

実験条件は、ノズル圧力Pは0.02MPa、ノズル伏せ角度 $\theta=13^\circ$ 、ノズル捻れ角度 $\beta=16^\circ$ である。冷却表面(この場合は、アクリル板)に形成される衝突域の高さ方向の長さは約85mm、厚みは5mm程度で、その値はノズル圧力に比例して変化する。冷却水は衝突後、高さ方向上向きには30mmの流水域が形成され、下向きの流れの半分は隣の上向き流水域と干渉し、残りの半分はそのまま下に流れ、最下面35mmは流水域のみとなる。

Fig.10は3段すべてのノズルから冷却水を噴霧した場合であり、ノズル圧力Pは上下段が0.05MPa、中段は0.1MPa、ノズル設置角度はTable 2に示す通りである。冷却水衝突域での挙動は、単段ノズルの場合と同じであるが、流水域では、高さ方向上向きの流れは上段以外、すべて下向き流れに変わる。Table 2で示した設置条件は高さ方向に衝突域が重なったり、離れたりしない基準より求めた条件であり、高温鉛直面が紙面の左右方向に移動する際において、多段ノズルを適用する場合の適正ノズル条件の一つと言える。

### 3.4 多段スプレー時の冷却特性

Fig.11は各段ノズルから噴霧された冷却水の衝突域における水量密度Wと熱伝達率 $\alpha_s$ の関係を示す。冷却面温度が900°Cから800°Cにかけては、多段ノズルの熱伝達率は、単一ノズルの値と比較的良好な対応を示している。一方、700°Cから300°Cにかけては、多段ノズルの方が単一ノズルよりも値が小さい傾向にある。その理由としては、上部ノズルからの流下水が衝突域に流れ込んでくるため、液滴の衝突圧が減衰するとともに、新しい液滴と高温面の接触が時間的、空間的にも小さくなったためと考えられる。

Fig.12は、上部から流下水のない場合の水量密度 $W_{f0}$ と熱伝達率 $\alpha_{f0}$ の関係を示す。この場合、上段ノズルの方が中下段ノズルに比べて熱伝達率が小さい傾向にある。その理由としては、ノズルピッチが同じであるにも係わらず、ノズル

噴霧角が半分なために、流水域の形成が中下段に比較して十分ではないためと考えられる。中下段ノズルの熱伝達率 $\alpha_{f0}$ に及ぼす水量密度 $W_{f0}$ の影響は、高温域では小さく、低温域になるにつれて大きくなる傾向を示す。また、図中の破線は、三塚らの式<sup>8)</sup>を示しており、今回得られたデータはその周囲に位置している。このことは、流水域を便宜的に噴霧域の一部として扱える可能性を示唆している。

Fig.13は上部から流下水がある場合について、その影響を整理した結果を示す。図中の横軸は、各段ノズルから噴霧された冷却水に対する上部からの流下水の割合を各段の水量密度に換算した値であり、ここでは、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )と定義する。図中の縦軸は、上部流下水のない場合の

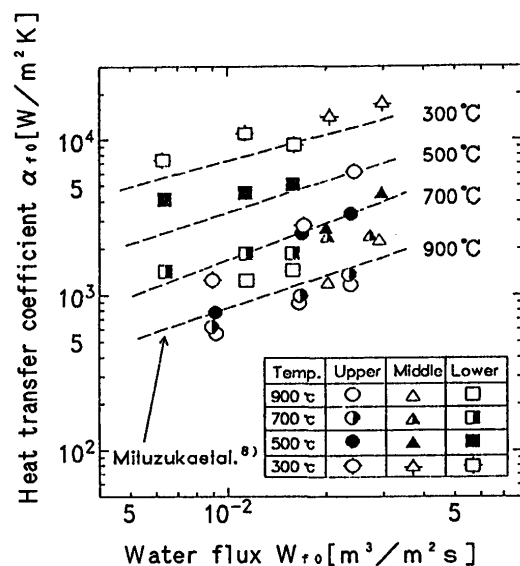


Fig. 12. Relation between water flux and heat transfer coefficient on flowing water zone without flowing water from upper area.

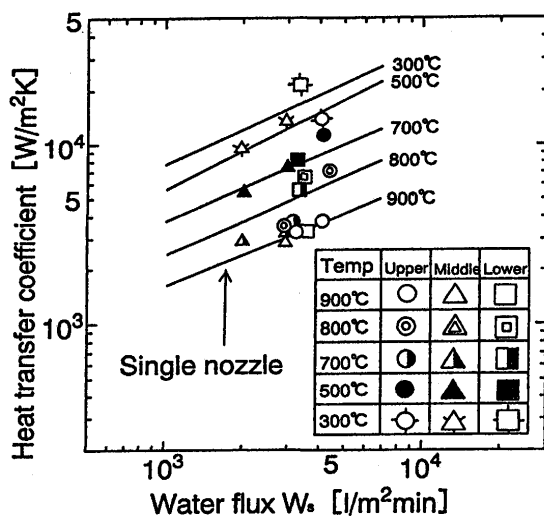


Fig. 11. Relation between water flux and heat transfer coefficient on water strike zone by multi-stage nozzles.

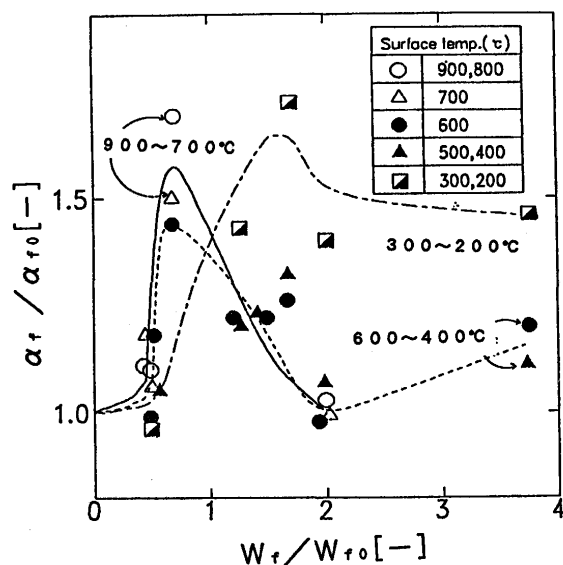


Fig. 13. Relation between water flux ratio ( $W_f/W_{f0}$ ) and heat transfer coefficient ratio ( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ ).

熱伝達率 $\alpha_{f0}$ に対する上部流下水のある場合の熱伝達率比率( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ )である。これから、流水域の熱伝達率は上部からの流下水により増加し、その挙動は冷却面温度域によって異なることが明らかになった。すなわち、900°Cから400°Cの温度域の場合、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )が1以下の範囲では流下水の増加の伴い、熱伝達率比率( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ )は大きくなる。しかし、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )が1以上では、熱伝達率比率( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ )は減少し、1.0に近くなる傾向を示す。一方、300°Cから200°Cの温度域の場合、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )の増加とともに熱伝達率比率( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ )は大きくなり、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )が2を越えると飽和する傾向を示す。ところで、各温度域における熱伝達率比率( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ )の最大値は、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )が2以下で存在し、それらの最大値は1.3から1.7の範囲であった。この点に関しては、今村らの実験<sup>9)</sup>においても、ノズルを多段化した場合には流下水の影響により、下段ノズル部は低水量の場合に1.5倍程度の熱伝達率の増加が確認されている。

#### 4. 結言

高温鉛直面のスプレー冷却実験を行い、単一フラットスプレーノズルを用いた場合と、高さ方向多段にフラットスプレーノズルを配置した場合について、冷却水の鉛直面衝突域およびその後の表面に沿って流れる流水方向の熱伝達率に及ぼす諸因子の影響を検討した結果は、つぎの通りである。

(1) 単一フラットノズルの場合、冷却水衝突域の熱伝達率に及ぼすノズル圧力、ノズル角度および噴霧距離の影響は、水量密度に置き換えることにより記述できる。

(2) 流水方向の熱伝達率は、衝突中心から50mmにかけて大きく変化し、高温域ではノズル圧力、ノズル角度および噴霧距離の影響は比較的小さい。

(3) 一方、低温域での流水方向の熱伝達率の減衰比率は衝突域における冷却条件によって大きく異なり、ノズル圧力、ノズル角度および噴霧距離を衝突位置での代表速度に

置き換えることにより予測できる。

(4) 多段フラットノズルの場合、各段ノズルから噴霧された冷却水は冷却表面衝突後、最上段のみ上向きに流れ、あとはすべて下向き流れに変わる。

(5) 多段ノズルの熱伝達率は、上部流下水の影響を受けて、衝突域では単一ノズルに比べて低く、流水域で増加し、その挙動は冷却面温度域によって異なる。

(6) すなわち、上部流下水のない場合の熱伝達率 $\alpha_{f0}$ に対する上部流下水のある場合の熱伝達率比率( $\alpha_f/\alpha_{f0}$ )の最大値は、流下水量密度比( $W_f/W_{f0}$ )が2以下で存在し、それらの最大値は1.3から1.7の範囲であった。

#### 記号

|                |   |
|----------------|---|
| P              | : ノズル圧力 [MPa]                           |
| l              | : 噴霧距離 [mm]                             |
| $\theta$       | : ノズル伏せ角度 [°]                           |
| $\beta$        | : ノズル軸周方向の捻れ角度 [°]                      |
| X              | : 衝突中心から流水方向の距離 [mm]                    |
| $\alpha_s$     | : 衝突域の熱伝達率 [ $W/m^2K$ ]                 |
| $\alpha_x$     | : 衝突中心からXmm離れた流水域の熱伝達率 [ $W/m^2K$ ]     |
| $\alpha_{100}$ | : 衝突中心から100mm離れた流水域の熱伝達率 [ $W/m^2K$ ]   |
| $\alpha_f$     | : 上部流下水のある場合における流水域の熱伝達率 [ $W/m^2K$ ]   |
| $\alpha_{f0}$  | : 上部流下水のない場合における流水域の熱伝達率 [ $W/m^2K$ ]   |
| W              | : 水量密度 [ $l/m^2min$ ] [ $m^3/m^2s$ ]    |
| $W_s$          | : 衝突域の水量密度 [ $l/m^2min$ ]               |
| $W_f$          | : 上部流下水の水量密度 [ $l/m^2min$ ]             |
| $W_{f0}$       | : 上部流下水のない場合における流水域の水量密度 [ $l/m^2min$ ] |
| V              | : 代表速度 [ $m/s$ ]                        |
| $v_s$          | : 衝突速度 [ $m/s$ ]                        |

#### 文献

- 1) 黒川征男, 藤本 武, 稲垣 彰, 尾野 均, 安河内醇, 寺前 昭, 板橋義則: 材料とプロセス, 3 (1990), 497.
- 2) 安河内醇, 長谷川博行, 稲垣 彰, 黒川征男, 石橋俊弘: 材料とプロセス, 3 (1990), 1343.
- 3) 日本鉄鋼協会: 鋼材の強制冷却, (1978), 4.
- 4) 日本鉄鋼協会: 鉄鋼製造プロセスにおける冷却技術, (1988), 59.
- 5) 今村巨城, 瀬戸恒雄, 畠中 淳, 藤本洋二, 河野幹夫, 吉田 博: 材料とプロセス, 5 (1992), 1578.
- 6) 今村巨城, 瀬戸恒雄, 畠中 淳, 藤本洋二, 河野幹夫, 吉田 博: 材料とプロセス, 6 (1993), 486.
- 7) J.V.Beck: Int.J.Heat Mass Transf., 13 (1970), 703.
- 8) 日本鉄鋼協会: 鋼材の強制冷却, (1978), 16.
- 9) 国岡計夫, 平田 賢, 杉山峻一, 神尾 寛: 日本機械学会論文集, 45-390 (1979), 282.