

技術報告

UDC 621.785.616.062/.065 : 66.045.5

直交型気水ノズルから噴射される噴霧流の
広がりおよび水量分布*

三 塚 正 志**・福 田 敬 爾***

Fog Spread and Water Distribution Discharged from
a Crossflow Air-water Fog Nozzle

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

Synopsis:

As a forced-cooling method for hot steel products, air-atomized fog cooling is suitable for an intermediate cooling level between forced-air-cooling and water spray cooling. If conventional fog nozzles are used in steel processing lines, these nozzles will not be able to form proper fog for a long time, because small holes in these nozzles very often suffer clogging. Furthermore, there are serious problems of air economy and high level noise from high pressure atomizing.

A newly improved fog nozzle enables water to be atomized with air under a pressure as low as 300 to 1 000 mmH₂O. The feature of this nozzle is its simple design, a water pipe being attached to the end of a air pipe at right angles. One of the advantages of this nozzle is its capability of feeding water in a wide range of 0.1 to 10 l/min through a comparatively large water hole of inner diameter 3 to 6 mm.

This report describes the design of this nozzle. The characteristics of a single fog stream from this nozzle are also shown, including atomization behavior and condition, fog spread, water distribution in fog streams, influences of water and air pressures on atomization.

1. 緒 言

製鉄工程においては、鋼材の熱処理、冷却時間の短縮、熱応力の軽減およびスケール生成の軽減のため、高温鋼材を強制冷却することが多い。これらの冷却には、気体噴射冷却法、液体噴射冷却法および浸漬冷却法などが用いられている。各冷却法の冷却能力の概略範囲を Fig. 1 に示す。液体噴射法では、鋼材に噴射する液量の制御により、冷却能力を大幅に変えることができる。このため、噴出水量 0.5~200 l/min・個 (設計圧力の時) のスプレーノズルが市販され、広く用いられている。したがって、噴出流量範囲の異なる数種類のノズルを併置し、噴出圧力を制御すれば、噴射水流密度、換言すれば、冷却能力の可変範囲を広く取ることができる。

しかし、一つの冷却設備に数種類のヘツダおよびノズ

ルを併置することは、設置スペース、設備費および整備費などの点で不経済である。以上の理由から、噴出流量の可変範囲の広いノズルが要望されている (条件①)。

Methods	Heat transfer coefficient (Kcal/m ² ·hr·°C)				
	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
Air Jet	←→				
Water spray	←→				
Water multi-Jet	←→				
Water laminar	←→				
Air water mixture	←→				

Notes:

Surface temp. of steel : ←→ is 150 to 300°C, |—| is 600 to 800°C

Temp. of coolants : 20 to 30°C

Water laminar : Value at stagnation point

Fig. 1. Cooling capabilities of various impinging cooling methods.

* 昭和 52 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 9 月 4 日受付 (Received Sept. 9, 1978)

** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (現設備技術センター) (Process Technology R & D Laboratories, Now Plant Engineering and Technology Center, Nippon Steel Corp., 2-6-3 Ote-machi Chiyoda-ku Tokyo 100)

*** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

一方、Fig. 1 に示すように、気体の冷却能力と液体のそれとの差は大きい。すなわち、多量の気体を噴射しても、その冷却能力は、少量の水噴射のそれと等しいか、または小さい。もちろん、水孔の非常に小さいノズルを使用し、噴射水量を極端に少なくすれば、水冷でも強制空冷に近い冷却能力が得られる。しかし、小さい水孔は閉塞しやすいから、実用にはならない。以上の理由から、両冷却法の間をカバーする弱冷却法が要望されている(条件②)。

薬剤散布や塗装のように、少量の液体を微粒化し、均一に広く噴射することは可能である。それゆえ、この技術を用いれば、上記条件②を満足することはできる。ところが、製鉄所で用いられる水には、種々の物質(固体、油脂分、生物など)が混入している。したがって、ノズル孔が小さく、形状の複雑な薬剤散布用や塗装用ノズルを製鉄工程の冷却に用いることは、ノズル閉塞の点から、不可能である。以上の理由から、閉塞の少ないノズルが要望されている(条件③)。

薄い鋼板や細い線材のように、“熱容量/表面積”の小さい鋼材の冷却に際しては、材質の均一性確保の点から、冷却効果を均一化することが重要である。このためには、冷媒の均一噴射や冷媒と鋼材の均一接触が必要である。以上の理由から、均一冷却法が要望されている(条件④)。

以上のように、鋼材製造工程の強制冷却については、

- i) 冷却制御範囲の広いノズル(条件①)
- ii) 強制空冷と水スプレー冷却の間の弱水冷法(条件②)
- iii) 閉塞の少ないノズル(条件③)
- iv) 均一冷却法(条件④)

が要望されている。加圧噴霧式ノズルは、上記4条件を同時に満足することはできない。これに対し、気体噴霧式ノズルは、上記4条件を同時に満足する可能性を有している。

条件②を満足するため、従来から、空気・水混合噴霧冷却法が研究され^{1~5)}、その一部は、実用化されている。国岡らは、高速空気流を用いる空気噴霧式ノズルを開発し、条件①、②および④を満足することができた⁴⁾。このノズルでは、空気圧を広く変えることによつて(0.1~2 kg/cm²-G)、10¹~10⁵ kcal/m²·h·°C オーダの熱伝達率 α を得ることができた。柳らは、低圧空気を用いる空気噴霧式ノズルを開発し、条件②および④を満足することができた³⁾。このノズルでは、ヘッダの軸方向に非常に均一な冷却が得られた。

筆者らは、棚沢⁶⁾の開発した空気噴霧式ノズルを、鋼

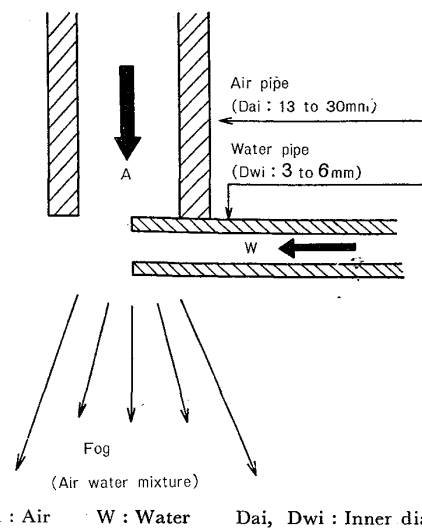


Fig. 2. Crossflow air-water fog nozzle.

材の冷却に適するように改良し(Fig. 2 参照)、条件①~③を満足することができた⁷⁾⁹⁾。このノズルを密に配置し、空気と水の質量流量比(空気/水)を大きくすると、条件④も満足することができた。このノズルを、直交型空気・水噴霧ノズル(以下直交型気水ノズルと略記する)と呼ぶことにする。

ただし、条件①については、強制空冷($\alpha: 10^1$ オーダ)から中程度の水スプレー冷却($\alpha: 10^3$ オーダ)を狙った。この理由は、大きな α を得るには、多量の空気または高圧の空気を必要とし、どちらも経済的でない。その上、高圧空気は、大きな騒音を発する欠点も有している。

なお、棚沢は、微細で均一な水滴を得ることが目的であつた⁶⁾。これに対し、筆者らは、騒音を低く抑え、その上、より低い空気コストで、鋼材の冷却に適する水滴を得ることが目的である(均一で微細な水滴は必ずしも必要でない)。したがって、両者の実験条件は、

研究者	水管内径	空気速度	W_a/W_w
棚沢 ⁶⁾	1.8 mm	15~350 m/s	5~20
筆者ら	3~6 "	30~100 "	0.2~2

W_a, W_w : 空気と水の質量流量 (kg/min) である。

ここでは、本ノズルによる水の微粒化状況および冷却にとつて重要な噴霧流の広がりおよび水量分布について、実験結果を報告する。

2. 直交型気水ノズルの特性

2.1 構造

直交型気水ノズルは、2本の直管を直交させるだけの単純な構造である(Fig. 2 参照)。水平の水管から所定の水量を噴出し、この水流を垂直の空気管から噴出する

空気流で微粒化する。ノズル閉塞軽減の点から、水管の内径 D_{wi} は、3~6 mm である。また、水管は、閉塞した場合でも容易に掃除ができるように、直管であり、空気の先端に直角に取り付けられる。なお、このノズルの原理(水圧で水押し出す方式)は、従来から家庭用に使用されている霧吹き(空気流の負圧で水を吸い出す方式)とは異なる。

2.2 特長

直交型気水ノズルの特長は、次の通りである。

(i) 噴水孔が大きいから (3~6 mm ϕ)、噴出水量 Q_w の範囲が広い。

(ii) (i) と同じ理由から、水孔の閉塞が少ない。

(iii) 2本の直管を直角に交差させるだけだから、ノズルの構造が単純である。

(i) については、 Q_w の上限に必要な空気量を確保しておけば、それより少ない水量は、容易に微粒化される。ただし、ヘッド当りの噴出水量が少ない場合には、空気流の負圧による吸い出し効果が生ずるため、噴出水量分布は不均一になりやすい。

(ii) については、同じ噴出水量に対し、本ノズルの水孔を、他の形式のノズルより大きくすることができる。したがって、本ノズルの水孔の閉塞は、他の形式のノズルより少ないはずである。しかし、製鉄工程で使用されるノズルは、物理的原因だけではなく、化学的原因や生物的原因によっても閉塞する(スケールや油脂分の付着・堆積、藻の付着など)。一方、時々非水冷の操業が存在する場合には、水中の物質が蒸発後に残渣となり水孔に付着・堆積する。たとえば、熱延工場の冷却に用いられているラミナ冷却用ノズル(10~20 mm 管)においても、ノズル閉塞が多発している。以上のような理由から、水孔が大きいとはいえ、その閉塞防止には、物理的、化学的および生物的対策を講じなければならない。

(iii) については、本ノズルの構造は、他の空気噴霧式ノズルより単純だから、その製作は容易であり、価格も安い。Fig. 2 に示すノズルは、2本の直管の組合せ構造だが、これ以外の構造も存在する。たとえば、細長いブロック(断面は矩形)にドリルで穿孔し、これを空気孔に使用する構造や1本の空気管に複数の水管を取付ける構造なども考えられる。

上記(i)ないし(iii)の特長は、直交型気水ノズル以外のノズルでは、なかなか得にくいものである。

3. 単一噴霧流の特性

Fig. 2 に示す直交型気水ノズルから噴射される噴霧流の特性について記述する。

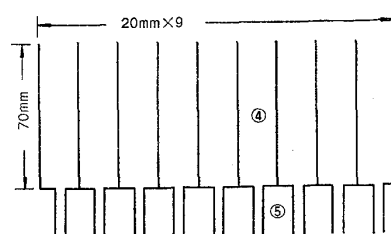
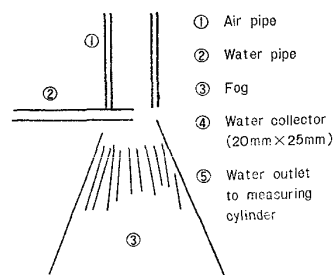
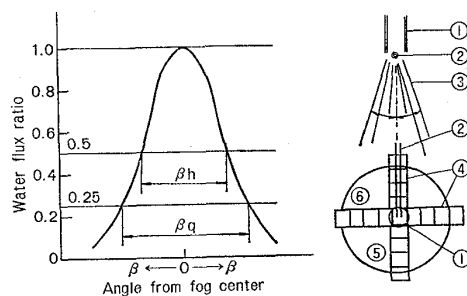


Fig. 3. The method for water distribution measurement of air-atomized fog.



(a) Fog angle (b) Spread direction
 β_h : Half value fog angle, β_q : Quarter value fog angle,
 ①: Air pipe, ②: Water pipe, ③: Fog, ④: Water collector, ⑤: Parallel direction, ⑥: Cross direction

Fig. 4. Definitions in order to represent water distribution in air-atomized fog.

3.1 各種表示法の定義

3.1.1 水量分布

噴霧冷却の冷却能力は、噴射水量にほぼ比例する。したがって、被冷却体に噴射される水量分布の特性は重要である。それゆえ、Fig. 3 に示す方法で噴霧流中の水量分布を測定した。 Q_w が少ない場合または噴出空気速度 V_a が大きい場合、水滴は非常に小さくなるため、受水器に噴射された水滴のすべてが、受水器内で凝縮し、秤量されるときは限らない。しかし、本報告で用いる水量分布は、上記方法で得られた値である。

3.1.2 噴霧流の広がり

ノズルの配列は、1個のノズルが受け持つ冷却面積を基準にして決められる。それゆえ、噴霧流の広がり、ノズル配列に際し、重要な要因である。したがって、Fig. 4(a) のように、受水量分布の値が、最大値の 1/2 およ

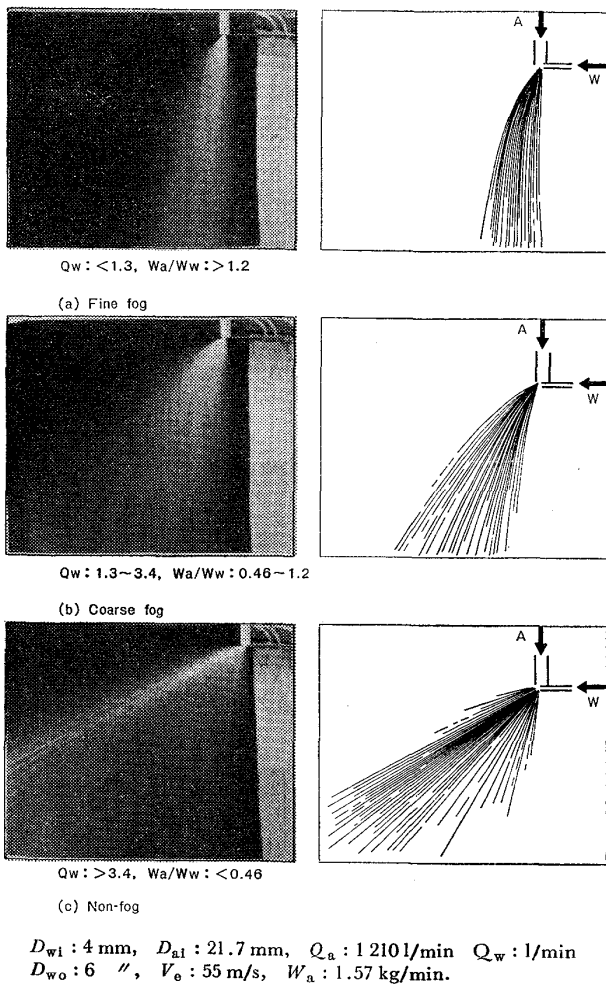


Photo. 1. Three atomization states of fog discharged from the crossflow air-water fog nozzle.

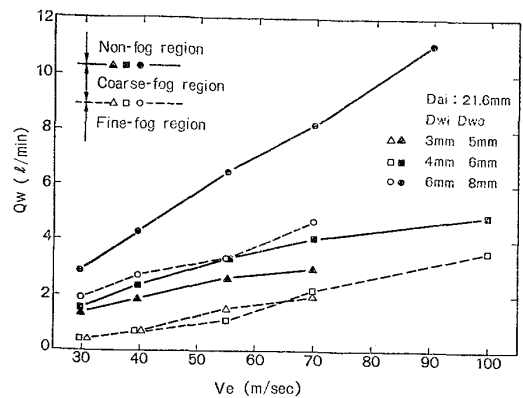
び 1/4 になる広がり角度を、それぞれ 1/2 値角 (β_h) および 1/4 値角 (β_q) と表示する。

3.1.3 噴霧流の広がり方向

直交型気水ノズルでは、空気流中に水管を差し込むため、それによつて空気流が乱され、その断面形状が変化する (Photo. 1 参照)。それゆえ、Fig. 4(b) に示すように、噴霧流の水量分布のうち、水管の軸方向を“平行方向”，水管の軸方向と直交する方向を“直交方向”と表示する。

3.2 水流の霧化特性

空気流量 Q_a を一定にしておいて、 Q_w を増してゆくと、Photo. 1 に示すように、3 種類の代表的な微粒化状態が得られる。すなわち、 Q_w の少ない範囲では、水滴は、微粒状態で空気流中に分散している (この状態を細噴霧と呼ぶ)。この状態から、さらに Q_w を増してゆくと、水滴径は段々大きくなるが、細噴霧の状態が続く。しかし、突然噴霧流の状態が変化し、平行方向の広がりが急増する (この状態を粗噴霧と呼ぶ)。さらに Q_w を増し



Notes: Solid lines show the boundary between non-fog and coarse-fog region. Broken lines show the boundary between coarse-fog and fine-fog region.

Fig. 5. Three atomization states of fog discharged from the crossflow air-water fog nozzles.

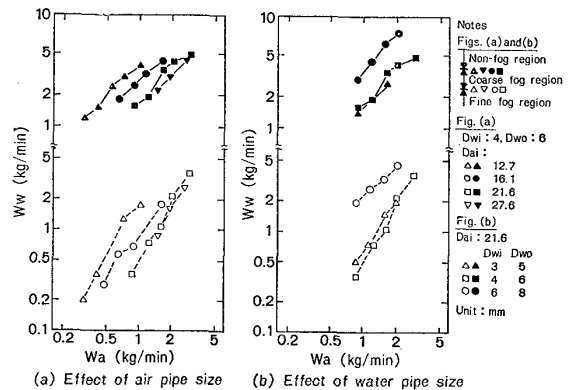
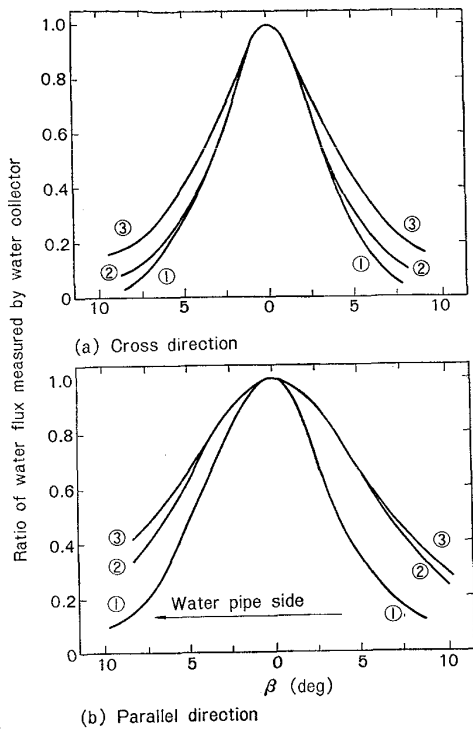


Fig. 6. Influence of air water weight ratios on the boundaries among three atomization states of fog (non-fog, coarse fog and fine fog).

てゆくと、水滴径は段々大きくなるが、粗噴霧の状態が続く。しかし、再び突然に、噴霧流の状態が変化し、もはや噴霧流とはみなせない状態になる (この状態を非噴霧と呼ぶ)。なお、本報告では、細噴霧流と粗噴霧流を噴霧流と呼ぶことにする。

上記各状態の境界に対応する水量の例を Fig. 5 に示す。この図から、空気管内径 D_{ai} と Q_w が同じ場合、水管外径 D_{wo} の大きい方が、微粒化されやすいことがわかる。これは、 D_{wo} が増すにつれて、空気流の乱れ度合が大きくなるため、と考えられる。各状態の境界に対応する W_a と W_w の関係を Fig. 6 に示す。この図から、

- (i) 両管の組合せが一定の場合、 W_a と W_w の間には、ほぼ直線的な関係が存在すること、
 - (ii) しかし、両管の組合せが異なると、(i) の関係は変動すること、
- がわかる。この原因は、上述のように、空気流の乱れ度合が、 D_{wo} に影響されているため、と考えられる。



Pipe size (mm) : D_{ai} 19, D_{wi} 3, D_{wo} 6
 Q_w (l/min) : ① 0.084, ② 0.2, ③ 0.4
 V_e (m/s) : 40, H (mm) : 500

Fig. 7. Water distribution in fog discharged from the crossflow air-water fog nozzle.

3.3 噴霧流の広がり

噴霧冷却の場合、ノズル・鋼材間距離が一定ならば、1個のノズルがカバーする面積は、噴霧流の広がりによって比例する。それゆえ、噴霧流の広がり、噴霧流の重要な特性の一つである。

3.3.1 空気流の広がり

直管から静止空気中に噴出する空気流は、周囲の空気を巻き込みながら広がる。ノズルからの距離 x が大きい場合、空気流の広がり幅 B は、(1)式で表わされる⁹⁾。

円孔ノズル : $B = 0.43 \cdot x$ (1-1)

スロットノズル : $B = 0.39 \cdot x$ (1-2)

(1)式から、空気流の広がり角 2β は、約 23 度である。一方、空気流の速度分布は空気流の中心が最大で、中心から離れるにつれて急減する。

直交型気水ノズルから噴出する空気流は、水管によって乱されるから、(1-1)式から計算される値より広がることが予想される。また、水量が少ない場合、噴霧流の広がり、空気流の広がりとはほぼ同じと考えられる。

3.3.2 噴出水量の効果

Photo. 1 に示すように、噴霧流の広がり、 Q_w に強く影響される。細噴霧の条件のもとで ($W_a/W_w : 2 \sim 10$)、 Q_w が広がりに及ぼす効果を Fig. 7 に示す。この図か

ら、次のことがわかる。

(i) 直交方向の広がり、 Q_w を 0.08 から 0.41/min まで変動させても、ほとんど変わらない。また、直交方向の水量分布は、ほぼ対称である。

(ii) 平行方向の広がり、 Q_w が多くなるにつれて、直交方向より大きくなる。また、平行方向の水量分布は、 Q_w が多くなるにつれて、水ノズルの反対側が多くなる。これは、水の噴出速度が増大するため、と考えられる。

(iii) β_q 以内を冷却の有効範囲と仮定すると、噴霧流の有効幅は、平行方向が約 20 度、直交方向が約 15 度である。この値は、 Q_w の値によっても変わる。また、有効幅は、被冷却体の冷却条件にも影響されるから、上記の値は、大雑把な目安と考えるべきである。

3.3.3 水管挿入の効果

水冷回避鋼材 (非水冷鋼材) が生産される場合、冷却設備は使用されない。この時、冷却設備 (特に、ヘッダとノズル) は、鋼材から多量の熱を受ける。そして、空気ヘッダと水ヘッダの熱膨張量に差が存在する場合、ノズルを構成する両管の間にずれが発生する。それゆえ、両管の取り付け位置関係は、このずれを考慮して決められなければならない。

水管の挿入位置 L/D_{ai} (L : 水管の挿入深さ) を 1/4, 1/2 および 3/4 にし、噴霧流の水量分布を測定した (ただし、細噴霧の状態)。この結果、Fig. 8 に示すように、水量分布には、ほとんど変化が認められない。したがって、稼働後の両管のずれを考慮すると、 L/D_{ai} の設計値は、2/5 ~ 1/2 が望ましい。

なお、棚沢の実験によると、微細で均一な水滴を得るには、 L/D_{ai} の値は、1/2 ~ 3/5 程度が望ましい⁶⁾。しかし、水流は L/D_{ai} の値が 0 になっても微粒化されるが、1 になると微粒化されない。したがって、 L/D_{ai} の設計値としては、より安全な 2/5 ~ 1/2 を選ぶのが望ましい。

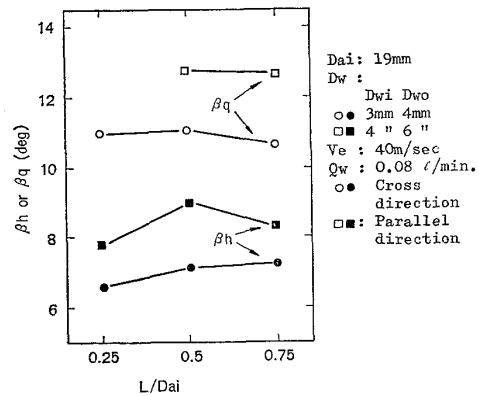
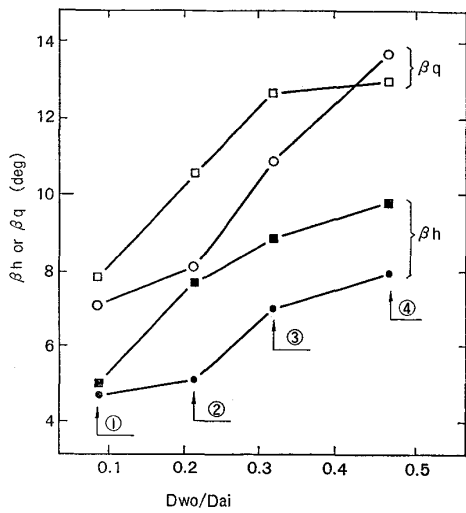
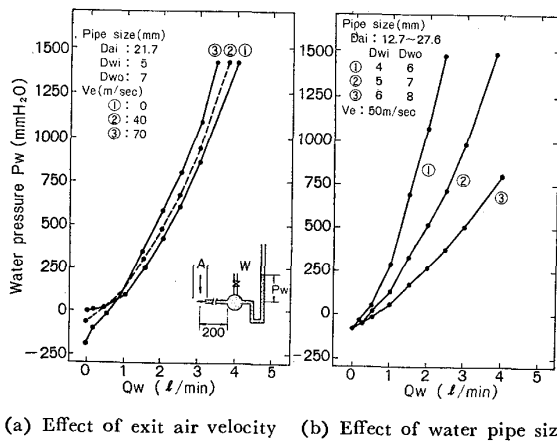


Fig. 8. Influence of insertion of water pipe in air flow on fog spread.



$D_{ai} : 19 \text{ mm}$
 D_{wi} D_{wo}
 ① 1.2 mm 1.5 mm
 ② 3 " 4 "
 ③ 3 " 6 "
 ④ 3 " 9 "
 $V_e : 40 \text{ m/s}$
 $Q_w : 0.081 \text{ l/min}$
 $L/D_{ai} : 0.5$
 ○● : Cross direction
 □■ : Parallel direction

Fig. 9. Influence of water pipe size on fog spread.



(a) Effect of exit air velocity (b) Effect of water pipe size

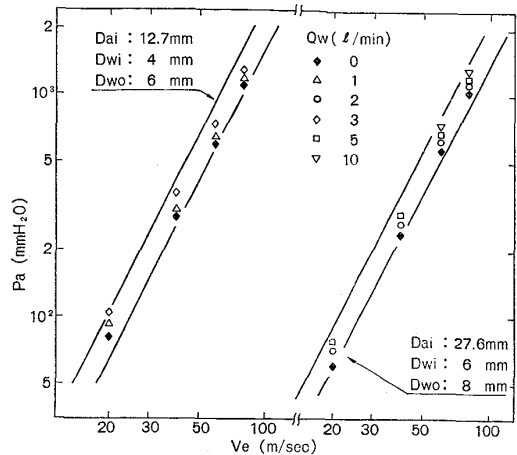
Fig. 10. Relationship between water pressure and water flow rate in the crossflow air-water fog nozzle.

3.3.4 水管の効果

空気管から噴出する空気流は、水管と水管から噴出する水流によつて乱される。したがつて、噴霧流中の水量分布は、 D_{wo} と Q_w に影響されるはずである。この現象を調べるため、 D_{wi} (3 mm) と Q_w (0.081/min) を一定にし、 D_{wo} だけを 4, 6 および 9 mm に変えて、水量分布を測定した。この結果、水量分布は、 D_{wo} に比例して、広がることわかる (Fig. 9 参照)。すなわち、水量分布、換言すれば、噴霧流の広がり、 D_{wo} に強く影響されることがわかる。

3.4 水圧と噴出水量

直交型気水ノズルでは、水管から所定の水量を噴出し、



Note:
 Solid lines : $V_e \propto \sqrt{P_a}$

Fig. 11. Relation between exit air velocity and air pressure in the header in the crossflow air-water fog nozzle.

これを空気流で微粒化する。したがつて、流量計を用いて、 Q_w を制御することが必要である。一方、給水系統の設計に際しては、ヘッド内水圧 P_w と Q_w の関係が必要である。それゆえ、両者の関係を測定した (Fig. 10 参照)。測定に際しては、 P_w を一定に保ちながら給水した (Fig. 10(a) 参照)。この図から、次のことがわかる。

(i) 同じノズルの場合、一定の水量を噴出するに要する P_w は、 V_e にほぼ比例して増大する (Fig. 10(a) 参照)。

(ii) V_e が同じ場合、一定の水量を噴出するに要する P_w は、 D_{wi} が大きくなるにつれて減少する (Fig. 10(b) 参照)。

(iii) 外径 6~8 mm の水管が、内径 12~28 mm の空気管に取り付けられている場合、 P_w と Q_w の関係は、 D_{ai} にほとんど影響されない (Fig. 10(b) 参照)。

(i) の現象は、空気流が噴水の抵抗になるためである。(ii) の現象は、 Q_w が一定の場合、水管内の流水抵抗が、 D_{wi} の増大について減少するため、と考えられる。

3.5 空気圧力と噴出速度

直交型気水ノズルの場合、水管と水管から噴出する水流が、空気流の抵抗になる。したがつて、空気管が同じ場合、一定の空気量を噴出するに必要なヘッド内空気圧 P_a は、 $D_{wo} \times L$ と Q_w に影響されるはずである。

空気配管系統の設計に際しては、 P_a と V_e の関係が必要である。それゆえ、これらの関係を測定した (Fig. 11 参照)。この図から、次のことがわかる。

(i) ノズルが同じ場合、一定の V_e を得るに必要な

P_a は, Q_w に比例して増大する.

(ii) V_e と P_a の間には, (2) 式の関係が存在する.

$$P_a = C_1 \cdot V_e^{2.0} \dots\dots\dots (2-1)$$

すなわち,

$$V_e = C_2 \cdot \sqrt{P_a} \dots\dots\dots (2-2)$$

C_1 と C_2 は, ノズルの構造と Q_a に依存する定数である. 特に, C_1 は, 空気流に対する抵抗を表わす.

(iii) 本ノズルの実用範囲である $40 \sim 50$ m/s の V_e を得るには, $300 \sim 600$ mmH₂O の P_a が必要である.

4. 結 言

強制空冷と水スプレー冷却の間の弱冷領域の冷却には, 噴霧冷却が適している. 噴霧冷却を実用化するには, 長期間安定した噴霧流の得られるノズルが必要である. 以上の理由から, 棚沢の開発した直交型気水ノズルを, 噴霧冷却に適するように改良した. このノズルの構造とこのノズルから噴射される噴霧流の特性は, 次の通りである.

(1) 直交型気水ノズルの特性

本ノズルでは, 空気用直管(内径: $13 \sim 30$ mm)の先端に, 水用直管(内径: $3 \sim 6$ mm)を直交状態に取り付ける. したがって, 本ノズルは, 単純な構造, 低い噴出空気圧, 広い噴出水量範囲, 水孔閉塞の軽減および水孔掃除の容易さなどの長所を有している. しかし, 本ノズルを使用する設備は, 大きな空気配管, ヘッダの厳しい水平度管理および複雑な水量制御などの欠点も有している.

(2) 噴霧流の特性

噴霧流は, 空気と水の質量流量比に応じて, 三つの状態にわかれる(細噴霧, 粗噴霧および非噴霧). 噴霧流の広がり, $10 \sim 20$ 度と小さく, 平行方向(水管の軸方向)が直交方向より大きい. また, 噴霧流の広がり, 水管の外径と噴出水量に比例して若干増大するが, 水管の挿入深さにはほとんど影響されない.

(3) 水と空気の噴出圧力

水管が太いから, 水の噴出圧力は小さい($0 \sim 1500$ mm H₂O). 空気の噴出速度が $40 \sim 70$ m/s だから, 空気の噴出圧力は, $300 \sim 1000$ mmH₂O である. したがって, 低圧ブロワの使用が可能である.

文 献

- 1) 武山斌郎: 日本機械学会論文集(第2部), 27 (1961) 180, p. 1319
- 2) 中野 平, 高田 寿, 後藤督高, 岡 勇: 鉄と鋼, 50 (1964) 5, p. 761
- 3) 柳 謙一, 瀬戸口賢, 林 寛治: 三菱重工技報, 9 (1972) 6, p. 792
- 4) 国岡計夫, 野口孝男, 宅見正雄, 八子一了, 菅克之: 鉄と鋼, 62 (1976) 2, A45
- 5) 島田 実, 武田信男, 赤羽 晋: 鉄と鋼, 62 (1976) 3, p. 372
- 6) 棚沢 泰: 日本機械学会論文集, 6 (1940) 23, p. 11
- 7) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 63 (1977) 4, S 185
- 8) 藤本武助: 水力学概論, (1957), p. 139 [養賢堂]
- 9) 三塚正志, 原 久典, 松尾正輝, 武田安夫: 製鉄研究, 293 (1978), p. 12392