

## 論 文

## 高温鋼板水スプレー冷却時の冷却特性および熱伝達率

三 塚 正 志\*・福 田 敬 爾\*<sup>2</sup>

## Cooling Characteristics and Heat Transfer Coefficients during Water-spray Cooling of Hot Steel Plate

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

## Synopsis :

Water-spray cooling is widely applied to forced cooling of hot steel products. A number of problems, however, still remain to be solved, including heat transfer mechanism, cooling ability, the difference of heat transfer coefficient values between the upper and lower surfaces of a horizontally placed wide plate on which spray is impinged, the effect of scale deposit on heat transfer, and so on.

In order to investigate heat transfer phenomena and cooling abilities of water-spray cooling, plate specimens of carbon steels with dimension of 22.5 to 51mm×550mm×1000mm, heated at about 630°C, have been water-sprayed. The main results obtained are as follows :

- (1) In the water-spray cooling of the upper and lower surfaces of a horizontally placed specimen with the same water flux  $W$ , the value of the heat transfer coefficient  $\alpha$  on the upper surface is higher than that on the lower surface in the region of test conditions.
- (2) The maximum values of  $\alpha$  of the upper and lower surfaces exist in the surface temperature of about 200°C.
- (3) The following equation is applicable for describing the quantitative relation of specimen surface temperature  $\theta_s$  [°C] and  $W$  [l/m<sup>2</sup>·min] with  $\alpha$  [kcal/m<sup>2</sup>·h·°C].

$$\alpha = A \cdot W^{0.8} \cdot 10^{B \cdot \theta_s}$$

where,  $A$  and  $B$  are constant.

## 1. 緒 言

連铸二次冷却帯の铸片冷却, 各種圧延鋼材の熱処理用および冷却時間短縮用冷却などに水スプレー冷却は広く利用されている。これらの鋼材の多くは, 800~1100°C から 100°C 以下まで連続的に冷却されるため, 鋼材製造工程で使用されるスプレー冷却の熱伝達現象には, 膜沸騰, 遷移沸騰, 核沸騰および対流 (非沸騰) の各熱伝達現象が複雑に関与している。

水滴噴射冷却の熱伝達現象は, 冷却水側条件と被冷却体側条件に強く影響される。前者の条件には冷却水の量と噴射形態が, 後者の条件には被冷却体の表面温度, 表面性状, 寸法, 配置が含まれる。スプレー冷却の熱伝達機構の解明や冷却能力の定量化に関する実験研究は数多く行われているが<sup>1)~9)</sup>, 実験に際しては, 被冷却体側条件が熱伝達に及ぼす影響を除くため, 実験用試料として酸化されにくい金属 (銀, 白金, 銅, ステンレス鋼など) や小さい試料を用いるケースが多い。このような試料を用いた実験で得られたデータのばらつきは小さい

が, これらのデータを鋼材製造工程における熱伝達現象の解明や設備の設計に適用する場合, 実験用試料の表面性状や試料表面 (熱伝達面) 上の冷却水の挙動と実鋼材 (多くの場合スケールが付着している) のそれが大きく相違するという問題, 換言すれば, 熱伝達機構が相違するという問題が生ずる。

一方, 熱伝達現象を定量化するため, 炭素鋼試料を 900~1000°C から常温まで連続冷却する場合, 試料はオーステナイトからフェライトに変態するが, この変態に伴う放出熱量が組成, 冷却速度および温度の関数として精度良く定量化されていないから, 得られる熱流束や熱伝達率の精度は低い<sup>1)</sup>。

以上のような理由から, 今回は実鋼材の冷却条件をより正確にシミュレーションするため, 前報<sup>1)</sup>より寸法の大きい炭素鋼板 (22.5~51 mm×550 mm×1000 mm の圧延まま材) を試料に用いた。電気炉 (雰囲気制御なし) にて  $\gamma$ - $\alpha$  変態点以下の約 630°C に加熱された試料を冷却用台車に水平にセットし, 水スプレーで約 600°C から 100°C 以下まで連続的に冷却し, 噴射水流密度お

昭和 50 年 4 月 本会講演大会にて発表 昭和 56 年 12 月 28 日 受付 (Received Dec. 28, 1981)

\* 新日本製鉄(株)生産技術研究所 工博 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

よび鋼板表面温度が熱伝達に及ぼす効果を定量的に調べた。

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

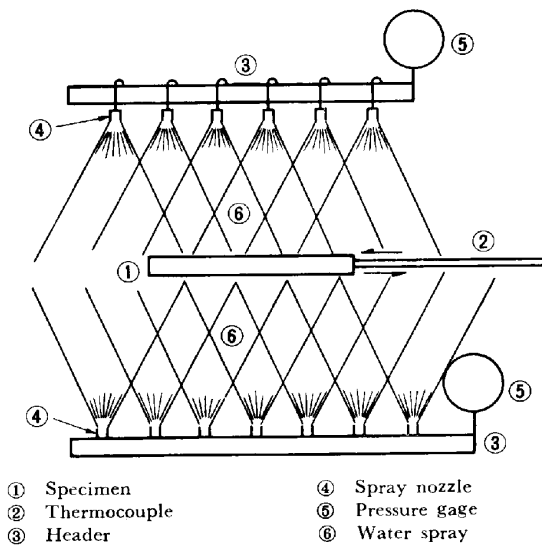
熱伝達率測定用装置は、試料加熱部、試料冷却部および試料温度測定部から構成されている。加熱部には台車式電気炉（雰囲気制御なし）を、冷却部には多数のフルコーンノズル（Fig. 1 参照）を、測温部には CA シース熱電対と多点連続 mV 記録計を用いた。

### 2.2 試料

熱伝達率測定用試料には、Table 1 に示す組成の炭素鋼板を用いた。試料の寸法は、22.5~51 mm×550 mm×1000 mm であり、試料の測温孔は、Fig. 2 に示すように、穿孔された。

### 2.3 実験方法

試料は、約 630°C に加熱された後冷却用台車に水平にセットされ、冷却部に送られる。長手方向に往復運動している試料の上面または下面にスプレーが噴射され、その反対側は自然冷却される。



Test conditions :

Water temperature : 11 to 33°C

Water pressure : 0.6 to 8 kg/cm<sup>2</sup>-G

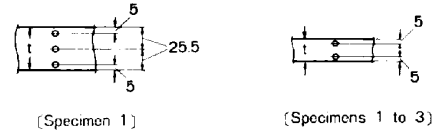
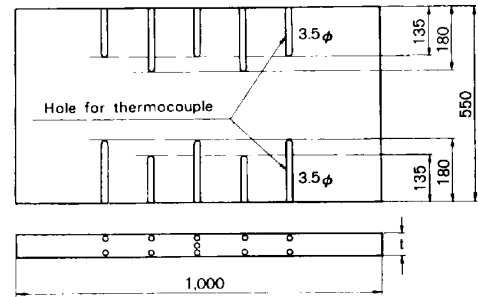
Fig. 1. Outline of test apparatus.

Table 1. Chemical composition of specimens. (wt%)

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Cu
Specimen 1	0.14	0.41	1.12	0.025	< 0.005	0.06
Specimen 2	0.22	0.05	1.03	0.021	0.018	0.05
Specimen 3	0.24	0.05	1.07	0.023	0.023	0.05

Ni	Cr	B	Al	Mo	Ti	V	Nb
0.39	0.23	0.001	0.1	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01
0.02	0.03	< 0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
0.02	0.03	< 0.001	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01



Specimen 1 : 51.0×550×1000  
 " 2 : 25.4×550×1000  
 " 3 : 22.5×550×1000 Unit : mm

Fig. 2. Specimens and thermocouple installation positions.

### 2.4 熱伝達率算出法

(1) 計算法および物性値

熱伝達率の計算法は前報<sup>10)</sup>と同じである。今回の実験では、試料の加熱温度が A<sub>1</sub> 変態点以下の約 630°C だから、試料の物性値にはフェライト領域の値を用いた。

(2) 自然冷却の熱伝達率

自然冷却時の熱伝達率は、(1)~(5)式から算出された<sup>11)</sup>。

$$\alpha_{nu} = \alpha_r + \alpha_{cu} \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_{n1} = \alpha_r + \alpha_{e1} \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha_r = \epsilon \sigma (T_h^2 + T_1^2) \cdot (T_h + T_1) \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_{cu} = 0.54 (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot (\lambda/B) \dots\dots\dots (4)$$

$$\alpha_{e1} = 0.25 (Gr \cdot Pr)^{0.25} \cdot (\lambda/B) \dots\dots\dots (5)$$

$\alpha_n$  : 自然冷却の熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

$\alpha_r$  : 放射の熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

$\alpha_e$  : 対流の熱伝達率 (kcal/m<sup>2</sup>·h·°C)

$T_h$  : 試料の表面温度 (K)

$T_1$  : 試料の周囲温度 (K)

$Gr$  : グラスホッフ数 (-)

$Pr$  : プラントル数 (-)

$\epsilon$  : 試料の放射率 (0.8 を使用) (-)

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 (4.88×10<sup>-8</sup> kcal/m<sup>2</sup>·h·K<sup>4</sup>)

$\lambda$  : 空気の熱伝導率 (kcal/m·h·°C)

$B$  : 試料の幅 (m)

サフィックス : u...上面, l...下面

## 3. 実験結果

### 3.1 噴射水流密度と熱伝達率

試料表面温度  $\theta_s$  が 100~500°C の場合、水スプレー

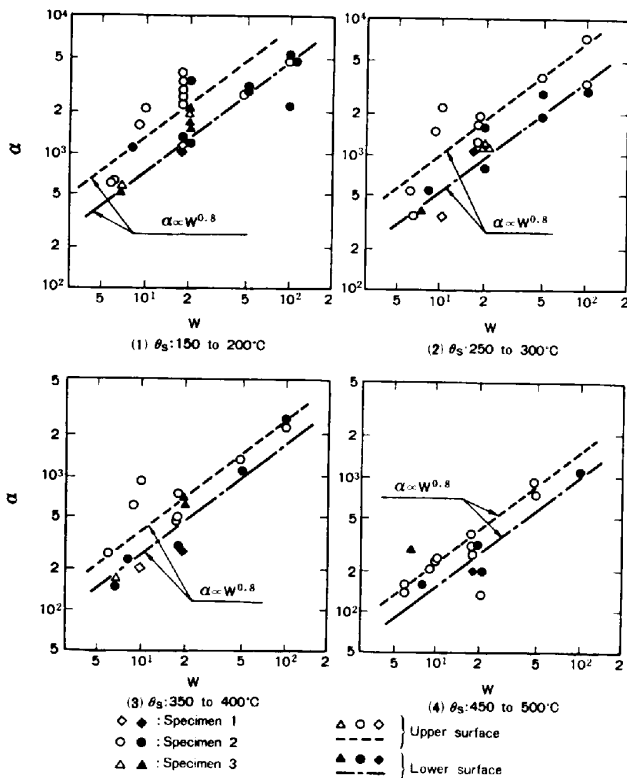


Fig. 3. Relation between impinging water flux and heat transfer coefficients during water spray cooling.

冷却の熱伝達率  $\alpha$  は、 $\theta_s$  に強く影響されるから、 $\theta_s$  を 50°C ごとに区切って、 $W$  と  $\alpha$  の関係を整理した (Fig. 3 参照)。これらの図から、

i) 実験範囲内では、 $W$  と  $\theta_s$  が同じ場合、すべての領域において、

$$\alpha_u > \alpha_l$$

であること (u: 上面, l: 下面)、

ii) データの数が少なく、そのうえデータのばらつきも大きい、各温度領域において、近似的に(6)式が成立すること、

$$\alpha_u, \alpha_l \propto W^{0.8} \dots \dots \dots (6)$$

がわかる。

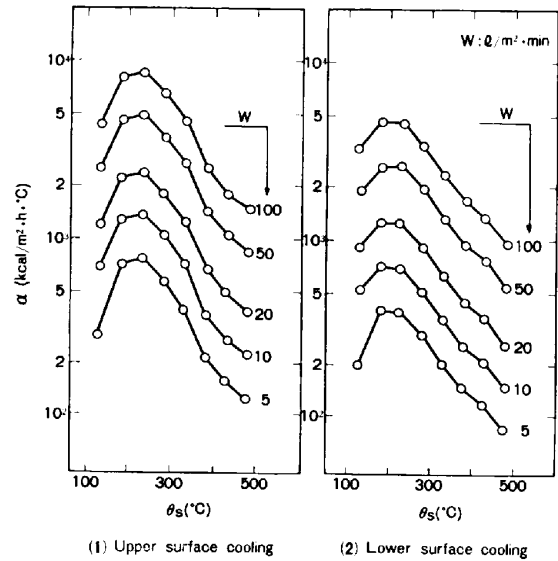


Fig. 4. Heat transfer coefficients during water spray cooling.

### 3.2 表面温度と熱伝達率

Fig. 3 およびここに図示していないグラフから、同じ  $W$  に対応する  $\alpha$  (代表値) を読み取り、 $\theta_s$  と  $\alpha$  の関係を求めた (Fig. 4 参照)。これらの図から、

i)  $\alpha$  は、上下面とも、 $\theta_s$  : 150~250°C の範囲内で極大になること、

ii)  $\theta_s$  : 250~500°C の範囲内では、 $\alpha$  は、 $\theta_s$  の上昇につれて単調に減少すること、がわかる。

## 4. 考 察

### 4.1 文献データとの比較

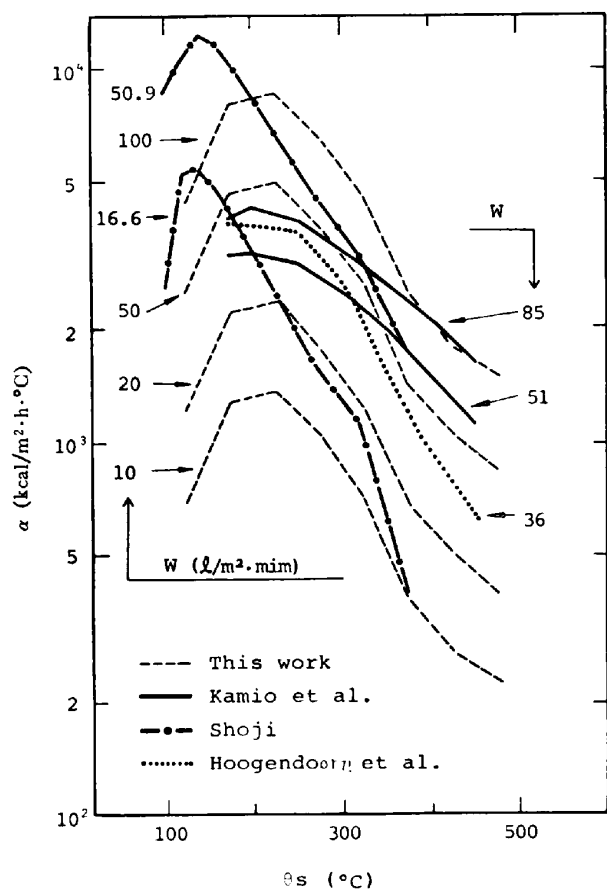
今回測定された熱伝達率  $\alpha$  の測定精度を調べるため、Fig. 4(1) の上面の  $\alpha$  の値と、本実験とはほぼ同じ条件で測定された神尾ら<sup>6)</sup>および HOOGENDOORN ら<sup>6)</sup>の値を比較した結果を Fig. 5 に示す。各研究者が用いた実験条件を Table 2 に示す。

Fig. 5 によると、 $\alpha$  は試料表面温度  $\theta_s$  が約 200°C 近傍で極大になること、および  $\theta_s > 250^\circ\text{C}$  の範囲においては、 $\theta_s$  の上昇につれて、 $\alpha$  が単調に減少するこ

Table 2. Comparison of this work's test conditions with other researchers' one.

Item		This work	KAMIO et al. <sup>6)</sup>	HOOGENDOORN et al. <sup>6)</sup>
Specimen	Material Size (mm) Initial temp. (°C)	Carbon steel 22.5 to 51×550×1000 About 630	Carbon steel 40×60×130 1100	18Cr-8Ni steel 25×185φ 1000
Spray distance (mm)		600	300	170 to 550
Atomization pressure (kg/cm <sup>2</sup> -G)		2 to 5	1 to 3	1 to 10

Note: Common test conditions of each researcher are nozzle: full cone type, water temperature: 20 to 30°C, specimen: horizontal arrangement, and cooling: upper surface.



$W, \theta_s, \alpha$ : Same as in Fig. 3

Fig. 5. Comparison between heat transfer coefficients obtained by this work and others' one.

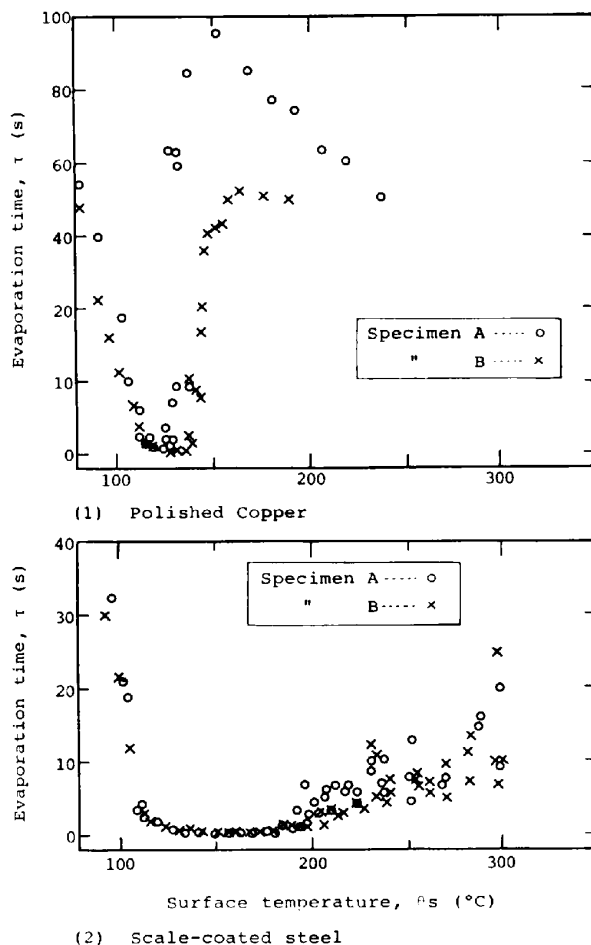
との二点に関しては、各研究者の結果はほぼ一致している。しかし、 $\alpha$ の絶対値については、各研究者の結果は必ずしも一致してなく、たとえば神尾らの値は、本実験および HOOGENDOORN らの値より、約  $350^{\circ}\text{C}$  以下では小さく、それ以上では大きい。

異なる条件の鋼材を空气中で加熱し、その後の水冷過程で得られる冷却曲線から $\alpha$ を算出する方法（非定常状態測定法）においては、上記程度の差は、試料の表面性状の差や試料測温の精度の点から許容されるべきであろう。

以上の理由から、今回測定された $\alpha$ の値は、十分実用できるものと考えられる。

#### 4.2 表面温度と極大熱伝達率

高温物体を液滴噴射冷却する場合の被冷却体表面温度 $\theta_s$ と熱伝達の関係は、多くの研究によつて、定性的には明らかにされている。しかし、前報<sup>12)</sup>に記述したように、水滴噴射冷却時の熱伝達は、被冷却体の表面性状（酸化状態、塗布状態、粗さなど）や噴射水量に強く影響されるため、鋼材水冷時の $\theta_s$ と熱伝達率 $\alpha$ との定量的関係は一義的には決らない。



Note:

Water droplet volume: 0.006 to 0.008 ml

Specimen surface conditions:

Copper A, B and steel B were polished with #600 emery papers. Steel A was finished with sand-blast.

Steel A and B were heated up to about  $950^{\circ}\text{C}$  in air, then water-spray-cooled to  $350^{\circ}\text{C}$  and natural-cooled to room temp.

Fig. 6. Influence of metal surface conditions on water droplet evaporation.

Fig. 5 によると、 $\alpha$ の極大値 $\alpha_{\text{max}}$ に対応する表面温度 $\theta_{\text{smax}}$ は、

鋼試料（圧延材、スケール付着）：約  $200^{\circ}\text{C}$

銅試料（エメリー紙仕上げ）：約  $140^{\circ}\text{C}$

である。また、銀試料（鏡面仕上げ）を用いた島田ら<sup>13)</sup>の実験においても $\theta_{\text{smax}}$ は約  $140^{\circ}\text{C}$ である。試料の表面性状が $\theta_{\text{smax}}$ に及ぼす影響は、Fig. 6の蒸発曲線によつて定性的には説明される（前報<sup>12)</sup>参照）。すなわち、Fig. 6において、水滴蒸発時間 $\tau$ の極小値 $\tau_{\text{min}}$ 、換言すれば熱流束の極大値 $q_{\text{max}}$ に対応する表面温度は、

鋼試料（スケール付着）： $150\sim 180^{\circ}\text{C}$

銅試料（バフ仕上げ）： $120\sim 140^{\circ}\text{C}$

である。 $\theta_{\text{smax}}$ は、 $q_{\text{max}}$ に対応する $\theta_s$ の近傍に存在するから、上記データ（Fig. 6）によつて、Fig. 5の鋼試料（圧延材、スケール付着）と銅試料（エメリー紙仕

上げ) の  $\theta_{smax}$  の差は説明される。

蒸発曲線 (Fig. 6 および前報<sup>12)</sup> の Fig. 8) の  $\tau_{min}$  に対応する  $\theta_s$  の値から、水滴噴射冷却時の  $\theta_{smax}$  は、被冷却面へのスケール、錆、低熱伝導物質の付着量および被冷却面の粗さの増大につれて、高温側に移行するものと推測される。

4.3 上下面熱伝達の差

熱伝達率  $\alpha$  が、すべての温度範囲にわたり  $W$  に比例して増大すること、および  $W < 約 500 l/m^2 \cdot min$  の範囲において  $\alpha$  の極大値が  $\theta_s : 150 \sim 300^\circ C$  の範囲内に存在すること、は多くの研究者によつてすでに明らかにされている。しかし、これまでのスプレー冷却の研究において、水平に配置された平板試料の上下面の  $\alpha$  を独立に測定した実験は見当たらないようである。それゆえ、本実験においては、 $W : 5 \sim 100 l/m^2 \cdot min$  かつ  $\theta_s : 125 \sim 475^\circ C$  の範囲内の  $\alpha$  を、上下面独立に  $W$  と  $\theta_s$  の関数として測定した。

鋼材の圧延ラインや熱処理ラインにおいては、幅広鋼板やストリップが水平状態で水冷される工程が多い。この場合、鋼材の上下面の冷却速度が異なると、鋼材が変形したり、鋼材の材質が厚さ方向で非対称になつたりする。したがつて、水平に配置された鋼板や厚手ストリップを冷却する場合には、上下面の冷却速度を等しくすること、換言すれば、板厚方向の温度分布を面対称にすることは重要な条件となる。この条件を満たすには、上下面の  $\alpha$  を独立に定量化することが必要である。

Fig. 3 と Fig. 4 によると、 $W : 5 \sim 100 l/m^2 \cdot min$  かつ  $\theta_s : 125 \sim 475^\circ C$  の範囲内では、

$$\alpha_u > \alpha_l$$

である。この現象は、前報<sup>12)</sup> の噴霧冷却の結果ともよく一致し、また実ラインでの経験的事実ともよく一致する。この理由は、前報<sup>12)</sup> に詳述したように、下面に噴射された水滴は試料に衝突後直ちに落下するが、上面の水滴は試料の端部まで移動してから落下するため、この移動期間中 (板上滞在中) の冷却が加算されるため、 $\alpha_u > \alpha_l$  になるものと考えられる。一方、この現象から、 $\alpha_u / \alpha_l$  の比は、鋼板が広くなるにつれて増大するものと推測される。

4.4  $\alpha = f(W, \theta_s)$  の数式化

Fig. 4 の  $\alpha$  を伝熱計算に用いるためには、 $\alpha$  を (7) 式のように数式化することが必要である。

$$\alpha = f(W, \theta_s) \dots\dots\dots (7)$$

数式化に際しては、

- i)  $\alpha_u$  および  $\alpha_l$  を独立に数式化すること、
- ii)  $\theta_s$  を  $50^\circ C$  ごとに区切り ( $100 \sim 150^\circ C$ ,  $150 \sim$

$200^\circ C$ , ...)、各温度領域ごとに数式化すること、とした。

Fig. 3 によると、各温度領域において  $W$  と  $\alpha$  の間には、

$$\alpha \propto W^n \dots\dots\dots (8)$$

(8) 式が存在し、 $n$  の値は約 0.8 である。前報<sup>1)</sup> の実験結果では、

$$\theta_s : 200 \sim 300^\circ C \text{ の範囲内では、 } n : 0.65$$

$$\theta_s : 300 \sim 400^\circ C \text{ の範囲内では、 } n : 0.80$$

であつた。一方、神尾ら<sup>8)</sup> の実験結果では、

$$\theta_s : 300 \sim 600^\circ C \text{ の範囲内では、 } n : 0.68$$

であり、大中<sup>14)</sup> の解析によると、限界水量を  $W_c$  とすると、

$$W \ll W_c \text{ の範囲内では、 } n : 約 1.0$$

$$W \gg W_c \text{ の範囲内では、 } n : 約 0.5$$

であり、 $W_c$  の値は約  $200 l/m^2 \cdot min$  である。

Fig. 3 に示すように、データ数が少なく、そのうえデータのばらつきも大きい、本実験の  $n$  の値を全温度範囲にわたつて 0.8 とする。

一方、Fig. 4 によると、各温度領域内においては、近似的に (9) 式が成立する。したがつて、(7) 式は (10) 式

$$\log \alpha \propto \theta_s \dots\dots\dots (9)$$

$$\alpha = A \cdot W^{0.8} \cdot 10^{B \cdot \theta_s} \dots\dots\dots (10)$$

$A, B$  : 定数

のように書き表される。 $A$  および  $B$  は、各温度領域ごとに決められる定数であり、その値を Table 3 に示す。なお、(10) 式の  $\alpha$  には、放射および対流による熱伝達分が含まれており、また、(10) 式の適用範囲は、 $W : 5 \sim 100 l/m^2 \cdot min$  かつ  $\theta_s : 125 \sim 475^\circ C$  である。

5. 結 言

圧延ままの炭素鋼板 ( $22.5 \sim 51 \text{ mm} \times 550 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ ) を電気炉内で約  $630^\circ C$  に加熱した後、水平状態に配置し、上面または下面を水スプレー冷却する実験を行

Table 3. Values of constants in Eq.(10).

Surface temperature (°C)	Values of constants			
	Upper surface		Lower surface	
	A	B × 10 <sup>-3</sup>	A	B × 10 <sup>-3</sup>
125~175	22.69	+5.460	36.76	+2.784
175~225	163.5	+0.560	119.5	-0.141
225~275	797.0	-2.498	405.5	-2.500
275~325	1273	-3.238	648.5	-3.241
325~375	5603	-5.218	510.6	-2.922
375~425	621.1	-2.671	177.8	-1.700
425~475	303.5	-1.939	675.8	-3.065

Experimental equation :  $\alpha = A \cdot W^{0.8} \cdot 10^{B \cdot \theta_s}$   
 $[\alpha] : \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ C$   $[W] : l/m^2 \cdot \text{min}$   $[\theta_s] : ^\circ C$

い、次の結果を得た。

(1) 鋼板表面温度  $\theta_s$  と噴射水流密度  $W$  が同じ場合、実験範囲内 ( $\theta_s: 100 \sim 500^\circ\text{C}$ ,  $W: 5 \sim 100 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$ ) では、上面の熱伝達率  $\alpha_u$  は下面の熱伝達率  $\alpha_l$  より大きい。

(2) 実験の範囲内では、 $\alpha_u$  および  $\alpha_l$  の極大値は、 $\theta_s: 200^\circ\text{C}$  近傍に存在する。

(3)  $W$  と  $\theta_s$  が  $\alpha_u$  および  $\alpha_l$  に及ぼす効果は、 $\alpha_u, \alpha_l = A \cdot W^{0.8} \cdot 10^{B \cdot \theta_s}$  ( $A, B$ : 定数) のように数式化される。

#### 文 献

- 1) 三塚正志: 鉄と鋼, 54 (1968) 14, p. 1457
- 2) E. A. MIZIKAR: Iron Steel Eng., (1970) June, p. 53
- 3) H. JUNK: Neue Hütte, 17 (1972) 1, S 13
- 4) 戸田三郎: 日本機械学会論文集(第2部), 38 (1972) 307, p. 581
- 5) H. MÜLLER and R. JESCHAR: Arch. Eisenhüttenwes., 44 (1973) 8, S 589
- 6) C. J. HOOGENDOORN and R. den HOND: 5th Int. Heat Transfer Conf., Vol. IV (1974), p. 135
- 7) 庄司正弘, 第12回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1975), p. 213
- 8) 神尾 寛, 国岡計夫, 杉山峻一: 鉄と鋼, 63 (1977), S 184
- 9) 佐々木寛太郎, 杉谷泰夫, 川崎守夫: 鉄と鋼, 65 (1979) 1, p. 90
- 10) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 63 (1977) 6, p. 1008
- 11) W. H. GIEDT(横堀, 久我訳): 基礎伝熱工学(1960), p. 260 [丸善]
- 12) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 65 (1979) 6, p. 608
- 13) 島田 実, 武田信男, 赤羽 晋: 鉄と鋼, 62 (1976) 3, p. 372
- 14) 大中逸雄: 鉄鋼の凝固(凝固部会編)(1978), p. 243 [日本鉄鋼協会]