

© 1991 ISIJ

論 文

熱間圧延における高圧水脱スケール時の
鋼材の温度低下和田 忠義*・押見 正一*²・上田 正雄*³Temperature Drop of Steel by Hydraulic Descaling for a Hot Strip
Rolling Mill

Tadayoshi WADA, Masakazu OSHIMI and Masao UEDA

Synopsis :

When scale formed during reheating and continuous rolling of steel strips is commonly by hydraulic descaling, a temperature drop of the strips inevitably occurs.

On an experimental survey of parameters which had been expected to control the descaling behaviours, the temperature drop of steel strips on removing the secondary scale by hydraulic descaling was measured precisely on the basis of design of experiments. It was found that the temperature drop has correlations with the water consumption V at a pressure of 9.8 MPa, interaction between V and the distance H between the steel and the nozzle, water pressure P .

The temperature drop $\Delta T_D(^{\circ}\text{C})$ of steel strips by hydraulic descaling can be then expressed by the descaling parameters as follows;

$$\Delta T_D = 451.7 PV/H^2 + 9.54$$

It is concluded that H should be increased with V to keep the temperature drop small when a certain pressure impact pressure is required to remove the secondary scale.

Key words : hydraulic descaling; impact pressure; primary scale; secondary scale; temperature drop.

1. 緒 言

薄鋼板の製造に際し、鑄片を加熱および熱間圧延中に生成した酸化スケールは、高圧水噴射により脱スケールされる。

脱スケールの目的は、高温鋼材表面の酸化スケールを除去し、スケール疵を防止することを主眼としているが、鋼材の温度低下をできる限り小さくし、熱延仕上温度を A_3 点以上に確保することも重要である。さらに、適正な脱スケール条件を採用することにより、脱スケール時の鋼材の温度低下を小さくできれば、加熱温度を下げることも可能となり、省エネルギー面での効果も期待できる。

これまでに、高温鋼材を水スプレー冷却する時の水と鋼材間の熱伝導を測定した結果は多数報告されている^{1)~3)}。また、熱間圧延における脱スケール時の高圧水流の熱伝導率の値は、 $1163 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ が従来から経

験的に使用されている⁴⁾。

しかし、これらは 1 MPa 以下の低圧水による実験であり、かつ、高圧水にも適用できるかは不明である。しかも、高圧水での研究報告は見当たらない。

一方、高圧水を噴射時の高温鋼材の温度低下に及ぼす要因解析についての報告はほとんど見当たらない。H. HOJAS⁵⁾ らは、水圧力約 10~20 MPa、水流量 70~160 l/min で脱スケール直後の最低温度を測定しているが、復熱後の温度低下量や各種要因の影響については調査していない。そのため、これらの要因の影響を明らかにする必要がある。

そこで、今回、粗圧延および仕上圧延前の高圧水による二次スケールを除去する際、高温鋼材の温度低下に及ぼす要因を実験計画法⁶⁾に基づいてラボ実験し、それらの定量化を試みた。さらに、スケールを除去し、かつ、鋼材の温度低下を小さくするための適正高圧水噴射条件および高圧水での熱伝導率を検討した。

平成 2 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 4 月 5 日受付 (Received Apr. 5, 1990)

* 新日本製鉄(株)鉄鋼研究所 (現:新日本製鉄(株)人事部) (Steel Research Laboratories, Now Personnel Division, Nippon Steel Corp.)

*² 新日本製鉄(株)鉄鋼研究所 (Steel Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*³ 新日本製鉄(株)堺技術研究部 (現:ホタニ商事(株)) (Sakai R & D Lab., Nippon Steel Corp., Now Hotani Co., Ltd.)

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材は、厚さ 250 mm の連続鋳造の低炭素鋼鋳片から厚さ 30 × 幅 100 × 長さ 120 mm の寸法に切り出し、表面をフライス盤で仕上げたものを用いた。ここで、供試材の厚みは、仕上圧延機入り側での脱スケール (FSB) を行う際の鋼材の厚みに近くし、幅は高圧水の噴射幅の約 155 mm より小さくし、その全幅に当たるようにした。また、水のりの影響を少なくするため、長さも短くした。この化学成分を Table 1 に示す。

2.2 実験方法

実験に先だって、酸化開始温度 T_0 、酸化時間 t_0 および高圧水の噴射条件などは実機の各粗圧延工程における各スタンド間の距離、通板速度および鋼材の温度を想定して Table 2 のように設定した。

鋼材の厚みを実機に近い厚みに近づけるため、供試材を 2 枚重ねで加熱した。上側の供試材は表面中央部に、0.5 mm 深さの凹みをつけ、そこに 0.5 mm ϕ の R 熱電対を電着 (300 V) し、長辺側にコの字クギで取り付けた。

さらに、加熱中の酸化を防止するため、上記鋼材の上面に厚さ 2 × 幅 110 × 長さ 130 mm の酸洗鋼板 (幅方向中央から長辺方向に幅 10 mm、長さ 55 mm の切れ目を

Table 1. Chemical composition of the steel used (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Al	O	N
0.04	0.01	0.30	0.018	0.012	0.005	0.0035	0.0018

入れたもの) を乗せて、Ar 雰囲気のマッフル電気炉で加熱した。その後、加熱炉から抽出し、上面の薄鋼板を取り除き、実機の圧延工程における二次スケールの生成条件に近い条件で酸化させた後、高圧水を噴射した。ここで、実機の各粗圧延工程は後半にいくほど低温、長時間になっている。そこで、酸化条件の影響を調査するため、供試材の加熱温度は 1300、1200 および 1170°C とし、各 30 min 均熱後、酸化開始温度を 1200、1150 および 1100°C でそれぞれ 10~30 s、25~40 s および 40~80 s 酸化した。また、高圧水の噴射条件は、最大水圧力が 14.7 MPa、最大水流量が 167 l/min の高圧水噴射装置を使用し、ノズル型番 DNB-0830、1530、2330 を用いた。ノズル流量 V (l/s)、水圧力 P (MPa)、ノズル-試料間距離 (以下垂直距離と呼ぶ) H (cm) はそれぞれ 3 水準で、通板速度 v (cm/s) は 2 水準である。なお、高圧水噴射による鋼材の温度低下量は、供試材を各酸化開始温度から空冷した時の表面温度と高圧水噴射によって鋼材の表面温度が急低下した後、復熱し、極大に達した時の温度との差 ΔT_D (°C) で表示した。また、実験計画法⁶⁾ は直交表 $L_{27} (3^{13})$ を用いて解析した。

3. 結 果

3.1 高温鋼材の冷却曲線

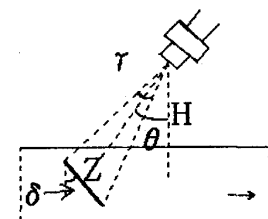
供試材を加熱後、前記の各酸化開始温度で、供試材の上面の薄板を取り除いて空冷した時の鋼材表面の冷却曲線を Fig. 1 に示す。各曲線とも上面の薄板を取り除いた直後は冷却速度がやや早くなっている。

3.2 高圧水を噴射時の鋼材表面温度

酸化開始温度からの酸化時間 t_0 とその直後の鋼材表

Table 2. Experimental conditions of hydraulic descaling.

Factor	Unit	Level	Remark
Oxidation temperature T_0	°C	1200 1150 1100	Water temp. 13°C
Oxidation time t_0	s	10, 20, 30; 25, 40, 55; 40, 60, 80	Room temp. 12°C
Water consumption at a pressure of 9.8 MPa	l/s	0.8 1.5 2.3	Normal descaling direction;
Water pressure P	MPa	2.0 5.9 9.8	↓ Nozzle
Distance between steel and nozzle H	cm	20 24 28	→ Rolling direction
Rolling speed v	cm/s	83 150 (150)	
Angle of torsion δ	°	15	
Gradient angle θ	°	15	
Spraying angle r	°	30 (at 1 MPa)	
Jet width Z	cm	$2H \tan(r/2) / \cos \theta$	
Descaling direction		normal	
Impact plane		upper plane	
Orthogonal table		$L_{27} 3^{13} = 27$	



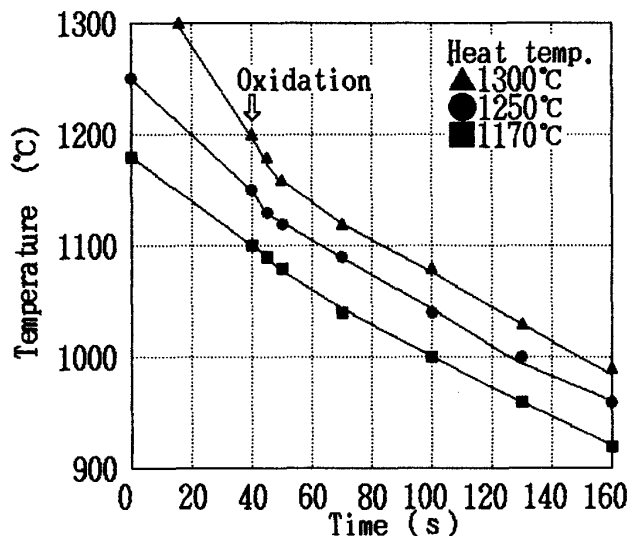


Fig. 1. Cooling curves for the surface of steel strips at high temperatures.

Table 3. Surface temperature T_D of steel strips on hydraulic descaling.

Oxidation temp. T_0 (°C)	Oxidation time t_0 (s)	T_D (°C)
1 200	10	1 165
	20	1 150
	30	1 135
1 150	25	1 100
	40	1 075
	55	1 050
1 100	40	1 035
	60	1 015
	80	990

面の温度 (脱スケール温度 T_D) を Table 3 に示す。脱スケール温度 T_D は 1 165~990°C で、粗 2 号スタンド (R_2) 直前の温度から FSB での温度に近い値であり、酸化開始温度および酸化時間ともほぼ実機に近い値と考えられる。

3.3 高圧水を噴射時の高温鋼材の温度低下

Fig. 2 に熱間圧延での高圧水を噴射時の鋼材表面の温度低下を示す。この時の高圧水の噴射条件を Table 4 に示す。たとえば、Fig. 2 の No. 3 の試験では、鋼材の表面温度が 1 140°C で高圧水が噴射され、その直後に鋼材の表面温度は 721°C まで低下し、その後最高 1 089°C まで復熱した。また、これと同じ条件で空冷した鋼材の表面温度は 1 102°C である。この時の両者の温度差から、No. 3 の試験での高圧水噴射による温度低下量は 13°C となる。

3.4 高圧水を噴射時の鋼材の温度低下に及ぼす要因の解析

Table 5 に高圧水を噴射時の各因子および水準のわりつけと鋼材の温度低下量を示す。また、Table 6 に

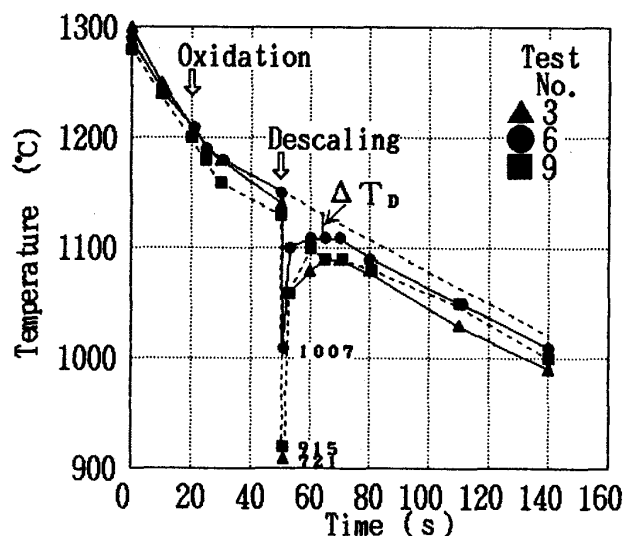


Fig. 2. Cooling curves of steel strips on hydraulic descaling at high temperatures.

Table 4. Descaling conditions of Fig. 2.

No.	T_0 (°C)	H (cm)	V (l/s)	t_0 (s)	P (MPa)	v (cm/s)
3	1 200	20	2.3	30	9.8	150
6	1 200	24	2.3	30	2.0	83
9	1 200	28	2.3	30	5.8	150

Table 5 のデータをもとに分散分析を行った結果を示す。ここで、酸化開始時間 t_0 および通板速度 v の変動が小さいので誤差にプールした。

Table 5 から、高圧水を噴射時の鋼材の温度低下量の平均値を求めると、17.1°C となる。また、Table 6 から、高圧水を噴射時の鋼材の温度低下に及ぼす要因の中でノズル流量 V 、ノズル流量と垂直距離との交互作用 VH および水圧力 P の寄与率が比較的に大きく、このうち、ノズル流量 V が 1% 有意、水圧力 P が 5% 有意であることがわかった。

さらに、Fig. 3 に高温鋼材の温度低下に及ぼす高圧水噴射条件の影響を示す。これから、高圧水を噴射した時の高温鋼材の温度低下量 ΔT_D は、ノズル流量 V および水圧力 P に比例し、垂直距離の 1 乗または 2 乗に反比例するようである。

次に、これらの要因の効果を推定する。信頼限界は、信頼度を 95% として誤差の分散 $V_e = 24$ 、その自由度 8、各要因の分散の自由度 1 の F 表の 5% 値 5.32 および V 、 P 、 H の有効反復数 n_e に 9 を、同様に、 VH の有効反復数に 3 をそれぞれ代入すると、信頼限界は、

$$\pm\sqrt{FV_e/n_e} = \pm\sqrt{5.32 \times 24/9} = \pm 3.8 \text{ および } \pm\sqrt{5.32 \times 24/3} = \pm 6.5$$

となる。すなわち、Fig. 3 に示した各要因のうち、 V 、

Table 5. Plans L₂₇ (3¹³) and results.

No.	T ₀ 1	H 2	V 5	l ₀ 6	P 9	v 10	e 7	V _v 4,12	VH 8,11	PV 3,13	Temp. drop ΔT _D	Deviation ΔT _D -ΔT _D
1	1200	20	0.8	10	2.0	83	1	11	11	11	18°C	1°C
2	1200	20	1.5	20	5.9	150	2	12	22	12	24	7
3	1200	20	2.3	30	9.8	(150)	3	13	33	13	30	13
4	1200	24	0.8	10	5.9	150	1	23	23	23	13	-4
5	1200	24	1.5	20	9.8	(150)	2	21	31	21	24	7
6	1200	24	2.3	30	2.0	83	3	22	12	22	25	8
7	1200	28	0.8	10	9.8	(150)	1	32	32	32	12	-5
8	1200	28	1.5	20	2.0	83	2	33	13	33	18	1
9	1200	28	2.3	30	5.9	150	3	31	21	31	10	-7
10	1150	20	0.8	40	5.9	(150)	3	32	11	23	15	-2
11	1150	20	1.5	55	9.8	83	1	33	22	21	30	13
12	1150	20	2.3	25	2.0	150	2	31	33	22	16	-1
13	1150	24	0.8	40	9.8	83	3	11	23	32	6	-11
14	1150	24	1.5	55	2.0	150	1	12	31	33	9	-8
15	1150	24	2.3	25	5.9	(150)	2	13	12	31	44	27
16	1150	28	0.8	40	2.0	150	3	23	32	11	5	-12
17	1150	28	1.5	55	5.9	(150)	1	21	13	12	10	-7
18	1150	28	2.3	25	9.8	83	2	22	21	13	22	5
19	1100	20	0.8	80	9.8	150	2	23	11	32	14	-3
20	1100	20	1.5	40	2.0	(150)	3	21	22	33	6	-11
21	1100	20	2.3	60	5.9	83	1	22	33	31	18	1
22	1100	24	0.8	80	2.0	(150)	2	32	23	11	12	-5
23	1100	24	1.5	40	5.9	83	3	33	31	12	8	-9
24	1100	24	2.3	60	9.8	150	1	31	12	13	29	12
25	1100	28	0.8	80	5.9	83	2	11	32	23	10	-7
26	1100	28	1.5	40	9.8	150	3	12	13	21	24	7
27	1100	28	2.3	60	2.0	(150)	1	13	21	22	11	-6
Total											463	4

Table 6. Analysis table of variance.

Factor	Fluctuation of each unit S	Degree of free- dom f	Variance V	Vari- ance ratio F	Pure fluctua- tion S'	Contri- bution rate ρ
T ₀	99	2	49	2.0	51	2.3
H	174	2	87	3.6	126	5.6
V	550	2	275	11.5**	502	22.4
P	281	2	140	5.8*	233	10.4
V×v	208	2	104	4.3	160	7.1
V×H	481	4	120	5.0	385	17.2
P×V	256	4	64	2.7	160	7.1
e	195	8	24		627	27.9
Total	2244	26				100

*: Significant at 5% ** : Significant at 1%

P および H は ±3.8°C および VH は ±6.5°C の範囲が信頼度 95% である。

4. 考 察

4.1 高圧水を噴射時の鋼材の温度低下に及ぼすノズル流量、水圧力および垂直距離の影響

3.4 節で述べたように、高圧水を噴射時の高温鋼材の温度低下量 ΔT_D はノズル流量 V、水圧力 P およびノズル流量 V と垂直距離 H の交互作用の影響が大きいことがわかった。また、Fig. 3 より高圧水を噴射時の高温鋼材の温度低下量 ΔT_D は、ノズル流量 V および水圧力 P に比例し、垂直距離 H の 1 乗または 2 乗に反比例するようである。そこで、これらの実験式を求めてみる。

Fig. 4 および 5 に VP/H および VP/H² と ΔT_D との関係を示す。その結果、高圧水を噴射時の高温鋼材の温

度低下量 ΔT_D と各要因との相関は、式(1)および式(2)で表されることがわかった。

$$\Delta T_D = 21.0 VP/H + 9.11 (^{\circ}\text{C}) \quad \text{.....(1)}$$

$$\Delta T_D = 451.7 VP/H^2 + 9.54 (^{\circ}\text{C}) \quad \text{.....(2)}$$

式(1)および式(2)の重相関係数は、それぞれ 64.7% および 64.5% である。

次に、前報⁷⁾で水流量 Q は一般に、ノズル流量 V と水圧力 P と関係し、次式で表されることを報告した。

$$Q = 0.32 V \sqrt{P} \quad (\text{l/s}) \quad \text{.....(3)}$$

そこで、Q/H と ΔT_D との関係を Fig. 6 に示す。これから、実験式を求めた結果、式(4)が得られた。なお、重相関係数は 67.4% であった。

$$\Delta T_D = 238 Q/H + 5.76 (^{\circ}\text{C}) \quad \text{.....(4)}$$

以上のように、実験式(1)、(2)および(4)を求めたが、これらの重相関係数はいずれも 70% 弱で、大差はない。そこで、前報⁷⁾で求めた高圧水を噴射時の衝突圧の計算式と同じ要因の組合せの式(2)を採用するほうがよいと考えられる。

4.2 高圧水による脱スケールの適正条件の検討

高圧水による脱スケールの適正条件を推定するには、①高温鋼材の酸化スケールの除去と②温度低下の減少が必要である。この両者は相反する関係にあり、一方を向上させると他方は低下するので両者を満足する適正条件を検討する必要がある。

前報⁷⁾で、高圧水を噴射時の衝突圧 p は次式で表されることを報告した。

$$p = 5.64 VP/H^2 \quad (\text{MPa}) \quad \text{.....(5)}$$

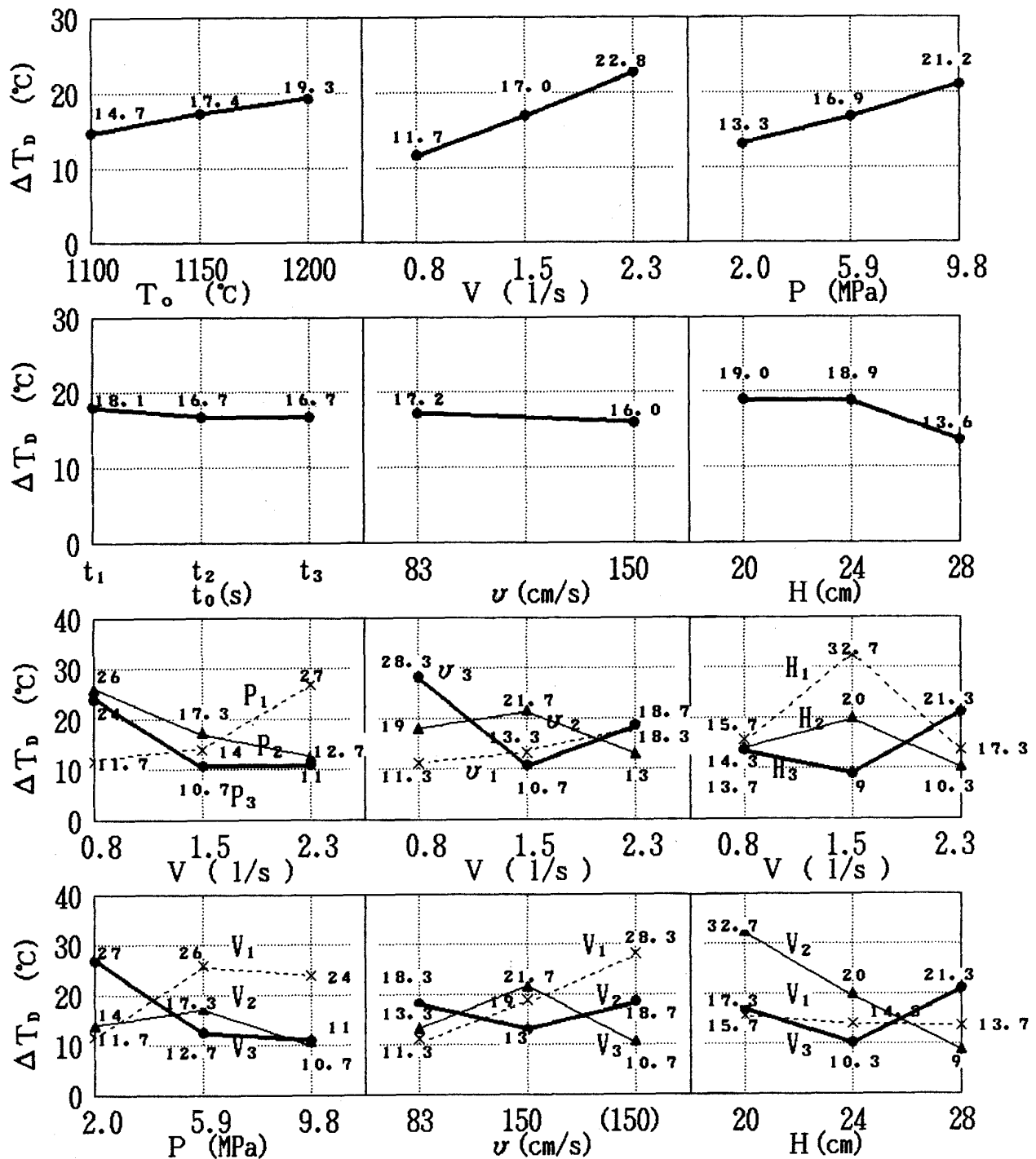


Fig. 3. Effects of hydraulic descaling conditions at high temperature on the temperature drop of steel strips.

一方, O. HENNIG ら⁸⁾によれば, 普通鋼および低合金鋼の脱スケールに必要な最低衝突圧は, 一次スケールの場合 200~250 kPa および二次スケールの場合 50~80 kPa である。したがって, スケール疵を発生させないためには, 式(5)の衝突圧 p を最低衝突圧 p_{min} より大きくする必要がある。

以下に, 今回得られた高圧水を噴射時の高温鋼材の温

度低下量の計算式(2)および前報⁷⁾で得られた衝突圧の計算式(5)から, 一次および二次スケール別に適正条件を検討する。

4.2.1 一次スケールの適正脱スケール条件の検討

加熱炉から抽出した鋳片の一次スケールを脱スケールする場合, 一般に, 水圧力 P は 14.7 MPa で, ノズル流量 V は 2.31 l/s がよく用いられている⁹⁾。この条

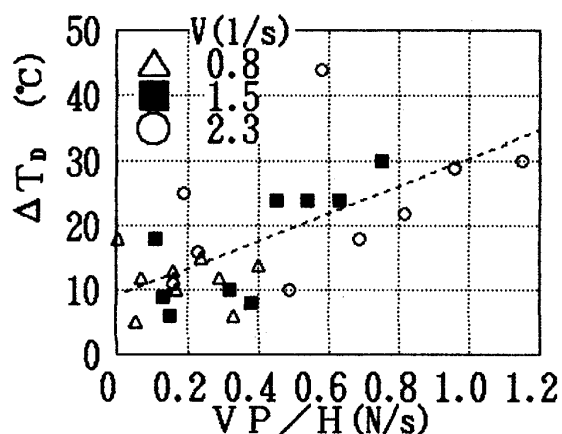


Fig. 4. Relation between a descaling factor and the temperature drop of steels.

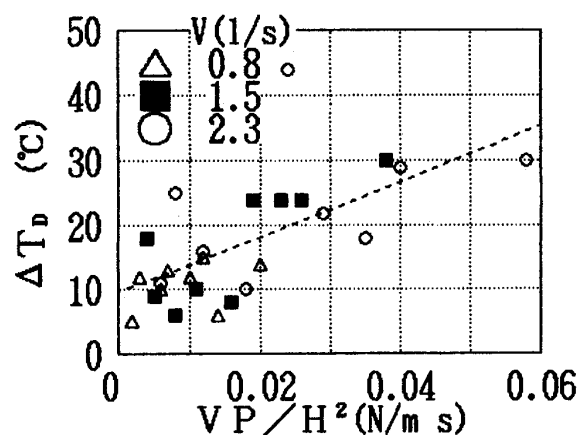


Fig. 5. Relation between a descaling factor and the temperature drop of steels.

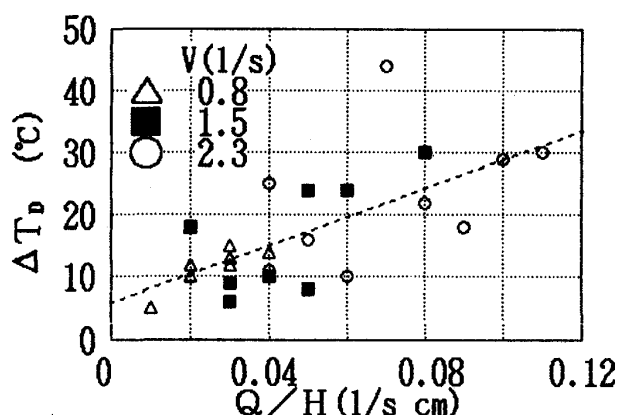


Fig. 6. Relation between the ratio of the steel-nozzle distance and temperature drop of steels.

件で O. HENNIG ら⁸⁾ の最低衝突圧 p_{min} 250 kPa 以上を確保するための垂直距離 H を式(5)から計算すると、28 cm 以下となる。次に、垂直距離 H を 28 cm とした時の

温度低下量を式(2)から求めると 29°C となり、大きい。

しかし、一次スケールの脱スケールにおける鑄片の厚みは、仕上げスタンド入口直前の FSB における板厚に比べ約 5~10 倍も厚い。そのため、高圧水による鋼材の温度低下は表面部が主体であり、内部からの復熱によって鋼材の温度低下は比較的にな小さくなると考えられる。

したがって、一次スケールを脱スケールする場合には、脱スケールに必要な最低衝突圧が高いが、スケール疵を防止するためにも最低衝突圧の確保を優先すべきであると考えられる。

4・2・2 二次スケールの適正脱スケール条件の検討

現状の熱間圧延設備における二次スケールの脱スケールには、水圧力 P 14.7 MPa、ノズル流量 V 0.8~1.5 l/s がよく使用されている⁹⁾。

今回の測定で得られた高圧水を噴射時の高温鋼材の温度低下量の平均値は約 17°C であった。この値は、O. HENNIG ら⁸⁾ が求めた低炭素鋼および低合金鋼のスケールの脱スケールに必要な衝突圧の 50~80 kPa から温度低下量を計算した結果の約 11~17°C に近い値である。

したがって、低炭素鋼における二次スケールの脱スケールには前記の衝突圧および鋼材の温度低下量が適正であると考えられる。そこで、鋼材の温度低下量を 17°C 以下とするための垂直距離 H を求めると、水圧力が 14.7 MPa で、ノズル流量が 0.8 l/s の場合に約 29 cm 以下および 1.5 l/s の場合には約 39 cm 以下となる。

同様に、各ノズル流量で垂直距離 H を変えて衝突圧 p と温度低下量 ΔT_D を求めたものを Table 7 に示す。また、 $p \leq p_{min}$ と $\Delta T_D \leq 17^\circ\text{C}$ を同時に満足するものが適正条件と考えられるので、これを太字で示した。ノズル流量を増加するほど垂直距離を大きくする必要がある。

さらに、前報⁷⁾ で現状の熱間圧延設備における二次スケールの脱スケールを行う際の衝突圧を検討した結果、とくに、仕上圧延機の入り側 (FSB) での衝突圧が 100

Table 7. Effect of the steel-nozzle distance on the temperature drop of steels and the impact pressure required to remove the secondary scale.

	V (l/s)	H (cm)					
		10	20	25	30	35	40
p (kPa)	1.5	1 250	310	199	138	102	77
ΔT_D		109	34.5	25.5	20.6	17.7	15.8
p (kPa)	1.03	854	214	136	95	70	53
ΔT_D		78.0	26.7	20.5	17.1	15.1	13.8
p (kPa)	0.8	664	166	106	74	55	41
ΔT_D		62.7	22.8	18.0	15.4	13.9	12.9

Note : $P = 14.7$ MPa

～400 kPa と高いことを報告した。そこで、この衝突圧における鋼材の温度低下量を計算した結果、衝突圧が 100 kPa の場合に約 17°C および 400 kPa の場合には約 40°C となり大きい。したがって、低炭素鋼を熱間圧延する際の FSB での衝突圧は 100 kPa 以下およびこの時の鋼材の温度低下量は 17°C 以下とし、かつ、スケール疵を発生させないことが必要である。

以上述べたように、二次スケールの適正脱スケール条件を選定するには、とくに、FSB において必要な最低衝突圧を確保し、鋼材の温度低下を抑制することが重要である。

4.3 高圧水による脱スケール時の熱伝達率の予測

次に、本研究における高圧水を噴射時の熱伝達率を検討する。ここで、高圧水を噴射時の鋼材の温度は 1000°C、水温は 13°C、通板速度は 1 m/s および鋼材の抜熱量は温度低下量の平均値の 17°C に相当する熱量とみなす。これから高圧水を噴射時の熱伝達率を概算すると約 18000 W/(m²・°C) となる。

一方、小門⁴⁾によれば、熱間圧延における鋼材の温度変化を予測する際、脱スケール時の水流の熱伝達率 α_w は経験的に 1163 W/(m²・°C) として計算しているが、本研究における熱伝達率はこれに比べて約 1 桁大きい。

また、高温鋼材から水流への熱伝達から高圧水による温度低下を計算で求める方法もあるが、それには高圧水での正確な熱伝達率を求める必要がある。これについて以下に簡単に触れてみる。

三塚³⁾は約 1 MPa 以下の低圧水スプレーでの実験で次式を求めている。

$$\alpha_w = 2.3595 \times 10^8 W^{0.616} / \theta^{2.445} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 W は噴射水流密度で 10～2000 l/m²・min、 θ は鋼材の表面温度で 400～800°C である。本研究に比べて鋼材の温度が低い、式(6)を用いて 1000°C の鋼材に高圧水を噴射時の熱伝達率を求めると、約 10650 W/(m²・°C) となり、本研究における計算値に近い値である。

高圧水を噴射時の熱伝達率が低圧水スプレーの場合に比べて大きくなった理由は、噴射水流密度が大きくなったためと考えられる。すなわち、水圧力 14.7 MPa、ノズル流量 1.5 l/s の時の噴射水流密度 W は 58600

l/m²・min になり、約 30 倍以上も大きい。そのため、熱伝達率は約 10 倍も大きくなる。

一方、H. MÜLLER ら⁸⁾の 800～1200°C に適正できる式を用いて計算すると、 $\alpha_w \approx 209300 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ となる。

これらは、推定していた熱伝達率の約 9～180 倍も大きい値になる。したがって、今後、高圧水を噴射時の正確な熱伝達率を測定する必要がある。

5. 結 言

熱間圧延時に高圧水で二次スケールを除去する際、高温鋼材の温度低下におよぼす要因について、実験計画法をもとにラボ実験を行い、以下の結果を得た。

(1) 高圧水を噴射時の高温鋼材の温度低下量は、ノズル流量 V 、ノズル流量と垂直距離との交互作用 VH および水圧力 P との相関関係が強い。

(2) 上記温度低下量 ΔT_D (°C) は各要因と次の実験式が成り立つ。

$$\Delta T_D = 451.7 VP/H^2 + 9.54 \text{ (重相関係数 65\%)} \quad (3)$$

(3) 水圧力を一定で二次スケールを脱スケールするために必要な最低衝突圧を確保し、かつ、上記温度低下量を小さくするためにはノズル流量を増加するほど垂直距離を大きくする必要がある。

(4) 高圧水を噴射時の熱伝達率は従来経験的に用いられている値より 1～2 桁大きいと考えられる。

最後に、本研究にあたって適切な御助言をいただいた近畿大学理工学部教授合田進博士、新日本製鉄(株)第二技術研究所薄板研究センター所長加藤弘博士および主幹研究員秋末治博士に感謝いたします。

文 献

- 1) 島田道彦, 三塚正志: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 1640
- 2) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 268
- 3) 三塚正志: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 263
- 4) 小門純一: 塑性と加工, **11** (1970), p. 816
- 5) H. HOJAS and R. RHEINDT: Berg Hüttenmann Monatsh., **112** (1967) 11, p. 372
- 6) 田口玄一: 実験計画法上 (1975), p. 104 [丸善]
- 7) 和田忠義, 上田正雄, 押見正一: 鉄と鋼, **77** (1991), p. 1450
- 8) O. HENNIG and G. ZWANZIG: Neue Hütte, **9** (1964), p. 361
- 9) わが国における最近のホットストリップ製造技術 (日本鉄鋼協会編) (1987), p. 397
- 10) H. MÜLLER and R. JESCHAR: Arch. Eisenhüttenwes., **44** (1973), p. 589