

© 1989 ISIJ

 論文
 高温鋼材水冷時の冷却能力に及ぼす水温の影響

高温鋼材水冷時の冷却能力に及ぼす水温の影響

三 塚 正 志*・福 田 敬 爾*²

Effect of Water Temperature on Cooling Capacity in Water Cooling of Hot Steels

Masashi MITSUTSUKA and Keiji FUKUDA

Synopsis :

In water cooling of hot steels, a cooling capacity (H) is influenced by water temperature (θ_w). The authors analyzed the effect of water temperature on the cooling capacity by using the data of authors' and other researchers' experiments. The coefficient of water temperature Rb [$^{\circ}\text{C}^{-1}$], which is the contribution factor of water temperature to the cooling capacity, is defined as $Rb = [H(\theta_b + \Delta\theta) - H(\theta_b - \Delta\theta)] / [H(\theta_b) \times 2 \cdot \Delta\theta]$, where θ_b and $\Delta\theta$ are basic temperature and temperature difference from θ_b , respectively. By introducing the idea of Rb , the effect of θ_w on H in many experiments has been analysed systematically. The main results obtained are as follows :

1) The values of $R_{\theta_b, 5}$ ($\theta_b : 30, \Delta\theta : 5$), which correspond to the typical temperature of cooling water in production mills, exist within the range of -0.01 to $-0.02^{\circ}\text{C}^{-1}$. This result means that the values of H change $\pm(1$ to $2)\%$ with $\pm 1^{\circ}\text{C}$ variation of θ_w .

2) The absolute $R_{\theta_b, 5}$ -value of laminar coolings is larger than that of spray coolings.

3) It seems that the values of Rb are influenced by sizes and surface conditions of a steel to be cooled, flow conditions of cooling water on a cooled surface, and so on.

Key words : water cooling ; cooling capacity ; water temperature ; hot steel ; heat transfer ; laminar cooling ; spray cooling.

1. 緒 言

現在、鋼材熱処理プロセスは、圧延と圧延熱を利用する制御圧延・制御冷却 (TMCP) 化されつつあり、今後この傾向はますます拡大されるであろう。TMCP を安定かつ確実に実行するには、鋼材の冷却技術の点では、①高温域における冷却能力の制御、②中温域 (300-600 $^{\circ}\text{C}$ 、復熱後の値) における冷却停止とその温度での保定 (等温変態)、および③高温域冷却中の鋼材内温度分布の均一化 (平板 : 面方向, 円柱・筒 : 周方向) が重要である。

TMCP 用冷却に多用されている水冷の場合、冷却能力は冷媒側条件と鋼材側条件に影響される。冷媒側条件のうち水温の寄与割合は、噴射水量、冷却面における冷却水の流動状態などのそれと比べると相対的に小さいが、工場の冷却水温度は長期的 (季節変動) および短期的 (ミルの短期的休止や稼働率の変動) に変動する。したがって、ミルの冷却制御式には水温の影響が導入されている。

冷却能力に及ぼす水温の影響は、多くの研究者^{1)~10)}によつて実験的に調べられているが、それぞれの結果は大幅に相違している。著者らも昭和 30 年代から種々の目的の水冷実験に際し、水温の影響を測定している。

冷却能力に及ぼす水温の影響を表す水温係数を導入し、水温の影響を統一的に解析することを試みた。解析には、著者らの実験データと公開文献のデータを用いた。本報告では、水温係数の定義、値、特性などを記述する。

2. 解 析 方 法

2.1 解析対象範囲

解析では、TMCP 用水冷、特に熱延ランナウトテーブル (ROT) と厚板熱処理の水冷を主対象にしている。原則として、解析対象範囲を Table 1 のように限定した。

1) 水温の範囲 : TMCP 用水冷に用いられる冷却水の温度 θ_w の範囲は、だいたい 10-50 $^{\circ}\text{C}$ である。ただし、線材や冷延鋼板では温水や沸騰水も用いられているが、これらを解析の対象範囲から除いた。

昭和 63 年 11 月 本会講演大会にて発表 昭和 63 年 8 月 12 日 受付 (Received Aug. 12, 1988)

* 新日本製鉄(株)熱・エネルギー研究センター (現 : 日本文理大学工学部) 工博 (Heat & Energy Technology Lab., Nippon Steel Corp., Now Faculty of Engineering, Nippon Bunri University, 1727 Oaza-Ichigi Oita 870-03)

*2 新日本製鉄(株)熱・エネルギー研究センター (Heat & Energy Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

2) 噴射水量 W の範囲: 熱延 ROT 用水冷や厚板熱処理用水冷の W の範囲は, だいたい 300-1000 $l/m^2 \cdot min$ (片面) である. ただし, 超強冷却や緩冷却が必要な場合には, 上記以外の W も用いられているが, これらを解析の対象範囲から除いた.

3) 鋼材の表面温度 θ_s : TMCP 用水冷時の θ_s の範囲は, だいたい 900-750°C (自然冷却状態) から 600-300°C (復熱後の値) までである. 板厚が大きい場合, 水冷中の θ_s は 300°C 以下まで降下しているケースもあるが, 解析では, θ_s の対象範囲を 500-700°C に限定した.

4) 鋼材の内部温度: 鋼材の熱処理分野では, 冷却能力 H の表示法として, 板厚方向中央 (以下 $1/2 t$ と記述) の 800→500, 800→300°C 間などの平均冷却速度 V が多用されている. H が V や平均熱伝達係数 \bar{h} で表示されているデータについては, 初期温度→500°C 間 ($1/2 t$) を解析対象にした. この場合, 水冷中の θ_s は, 鋼材の厚さと冷却の強さに影響されるが, 450-200°C 程度まで降下している.

5) 鋼材の冷却面性状: 熱間圧延鋼材は, ホットストリップでは仕上げ圧延 FR の直前に 1 回, 厚板では FR の途中で数回デスクレーンされる. しかも, FR で新生面が出るので, FR 直後の鋼材表面の酸化度合いは小さいが, 水冷開始までの放冷期間中に酸化される. この放冷期間は, ホットストリップでは 1-2 s 程度だが, 厚板では, 鋼種, 板厚, 熱処理法などによつて異なり 20-100 s である. したがつて, 水冷ゾーン入側におけるスケール厚さは $10^0-10^1 \mu m$ のオーダーである. 上記の理由から, 解析に使用するデータを高温酸化された試料を用いて得られたものに限定した.

6) 試料の寸法: 水冷の場合, 鋼材に噴射された冷却水の鋼材上での挙動, 換言すれば試料寸法も H に影響する¹¹⁾. 実用鋼材の寸法は大きいから (線材, 棒鋼, 小径管などを除く), 解析に使用するデータがある程度

以上大きい試料, すなわち約 50 mm 幅または径以上の試料を用いて得られたものに限定した.

2.2 解析に用いた実験と文献

解析に用いた各実験の主要条件を Table 2 に, 実験式を Table 3 に示す. 冷却法の記号は, S: スプレー, L: ラミナ, SL: S+L の複合冷却, I: 浸漬, および F: 流水を, その他の記号は, M: ミル実験を示す. 実験総数は 17 (ラボ実験: 13, M: 4) で, このうち著者らの実験は 11 である.

Table 2 の L2 と L4 の実験には銅試料が用いられているが, 加熱温度が高いから, 試料表面は高温酸化されているものと推定されるので, これらのデータを解析に採用した. 流水冷却 (F1) の実験では, SUS304 試料 (14 t × 154 w × 300 mm l, 表面仕上げ $R_{max}: 3 \mu m$) を電気炉 (窒素雰囲気) で約 980°C に加熱した後, 水平にセットし, この上面に冷却水を流した. ノズルの寸法は, ギャップ: 2 mm, 幅: 150 mm であり, ノズル出口

Table 2. Experimental conditions of the experiments used for this analysis.

No.	Researcher	Coolig method *1)	Water temp. [°C]	Specimen material *2)	Results used for work *3)
S1	Authors ¹⁾	FCS	10-35	SUS304	Fig. 1
S2	Authors ¹⁾	FCS	10-35	SUS304	Fig. 1
S3	Authors ²⁾	M-J	4-95	LC-steel	Fig. 20
S4	Authors ²⁾	M-J	4-95	LC-steel	Fig. 14
S5	Authors ²⁾³⁾	FS	20-80	SUS304	Fig. 13
S6	KOROTKOV ⁴⁾	Jet	20-80	C-steel	Fig. 37
S7M	Authors ¹⁾	FS	27-35	LC-steel	Fig. 3
S8M	Authors	FS	24-32	C-steel	Original
SL1M	Authors ¹⁾	CL+FCS	17-42	LC-steel	Fig. 4
L1	KUNIOKA ⁵⁾	RL	15-80	LC-steel	Table 2
L2	SHIRAIWA ⁶⁾	S-RL	20-61	Copper	Fig. 10, 13
L3	OTOMO ⁷⁾	S-RL	5-50	SUS	Eq. 1
L4	YANAGI ⁸⁾	S-CL	10-80	Copper	Fig. 15, 16
L5M	MIYAKE ⁹⁾	RL	45	LC-steel	Eq. 3
I1	Authors ¹⁰⁾	I	23-93	LC-steel	Fig. 4
I2	Authors ¹⁰⁾	I	23-93	LC-steel	Fig. 5
F1	Authors	WF	35-80	SUS304	Original

*1) FCS: Full Cone Spray, FS: Flat Spray, M-J: Multiple Jet, CL: Curtain Laminar, RL: Rod Laminar, S: Single, I: Immersion, WF: Water Flow

*2) LC: Low Carbon, C: Carbon

*3) The figure, table and equation number here denote that in the reference, which is used for this work, respectively

Table 1. The range of experimental conditions used for this analysis.

Item	Condition
Water temperature, θ_w (°C)	10 to 50
Water flux density, W ($l/m^2 \cdot min$)	300 to 1000
Cooled surface temperature, θ_s (°C)	500 to 700
Temperature range of cooling rate, V , and , mean heat transfer coefficient, \bar{h} (°C)	Initial temperature to 500 (at $1/2 t$)
Cooled surface condition	Oxidized surface
Specimen size (mm)	Approx. 50 (Width or diameter)

Table 3. Empirical equations used for this analysis.

Symbol	Equation	$R_{30.5}$
S1	$Wu: 200 \quad hu = 611 - 0.60 \theta_w$ $Wu: 400 \quad hu = 1240 - 6.0 \theta_w$ $Wu: 600 \quad hu = 1844 - 12.4 \theta_w$ $Wu: 800 \quad hu = 2504 - 20.4 \theta_w$ $Wu: 1000 \quad hu = 3166 - 27.6 \theta_w$	-0.0075 [°C ⁻¹] (\overline{Rb})
S2	$Wu: 200 \quad hu = 659 - 2.4 \theta_w$ $Wu: 400 \quad hu = 1374 - 10.4 \theta_w$ $Wu: 600 \quad hu = 2130 - 20.0 \theta_w$ $Wu: 800 \quad hu = 2914 - 30.4 \theta_w$ $Wu: 1000 \quad hu = 3724 - 42.4 \theta_w$	-0.0119 (\overline{Rb})
S3	$V = 18.43 - 0.0741 \theta_w - 1.32 \cdot 10^{-4} \theta_w^2$	-0.0051
S4	$h = 4967 - 44.0 \theta_w + 0.128 \theta_w^2$	-0.0096
S5	$Wu: 1880 \quad h = 3276 - 19.0 \theta_w - 0.070 \theta_w^2$ $Wu: 2280 \quad h = 3813 - 8.8 \theta_w - 0.217 \theta_w^2$ $Wu: 2640 \quad h = 3605 - 47.9 \theta_w - 0.893 \theta_w^2$ $Wu: 2640 \quad h = 4351 - 33.1 \theta_w - 0.746 \theta_w^2$	-0.0048 (\overline{Rb})
S6	$h = 1170 - 8.83 \theta_w$	-0.0098
S7M	$hu = 1740 - 21.2 \theta_w$	-0.0192
S8M	$hu + he = 1713 - 19.1 \theta_w$	-0.0168
SL1M	$V = 33.39 - 0.400 \theta_w$	-0.0187
L1	$\theta_s: 600 \quad h \propto (100 - \theta_w)^{0.565}$	-0.0063
L2	$r: 0, \theta_w: 20-40 \quad q = 6.67 \cdot 10^6 - 8.1 \cdot 10^4 \theta_w$ $r: 0, \theta_w: 40-60 \quad q = 5.79 \cdot 10^6 - 5.9 \cdot 10^4 \theta_w$ $r: 10, \theta_w: 21-38 \quad q = 9.38 \cdot 10^6 - 18.5 \cdot 10^4 \theta_w$ $r: 10, \theta_w: 38-61 \quad q = 4.61 \cdot 10^6 - 6.0 \cdot 10^4 \theta_w$	-0.0305 (\overline{Rb})
L3	$\theta_s: 600 \quad V \propto (100 - \theta_w)^{1.85}$	-0.0264
L4	$l = 0 \quad \log(q) = 6.9460 - 7.69 \cdot 10^{-3} \theta_w$ $l = 50 + 100 \quad \log(q) = 6.6234 - 7.95 \cdot 10^{-3} \theta_w$	-0.0180 (\overline{Rb})
L5M	$q \propto (2.50 - 1.15 \cdot \log(\theta_w))^{0.645}$	-0.0135
I1	$V = 27.77 - 0.168 \theta_w - 8.11 \cdot 10^{-4} \theta_w^2$	-0.0098
I2	$h = 8742 - 131.0 \theta_w + 0.484 \theta_w^2$	-0.0194
F1	$\log(h) = 3.8598 - 0.01612 \theta_w$	-0.0373 ($R_{40.5}$)

*1) $R_{30.5}$ denotes the value of Rb at $\theta_b: 30$ and $\Delta\theta: 5^\circ\text{C}$

*2) Suffix u and l denote the upper and lower surface, respectively

における冷却水の流速は 2-5 m/s である。試料は、炉内への浸入酸素と冷却装置への取付け作業中かなり酸化された。

2.3 冷却能力の表示法

各実験において、 H は熱伝達係数 h 、平均熱伝達係数 \bar{h} 、熱流束 q または冷却速度 V で表示されている。内訳は、 $h: 7$ 、 $\bar{h}: 3$ 、 $q: 3$ および $V: 4$ である。

データに θ_s が明示されている場合、 h と q との間には (1) 式の関係が、一方 V と q との間には、(2) 式の関係が存在する。

$$h = q / (\theta_s - \theta_w) \dots\dots\dots (1)$$

$$V = (\int_0^t q dt) / [Q \cdot t] \dots\dots\dots (2)$$

t : 水冷時間 [s]

Q : 面積当たりの熱容量 [kcal/m²·°C]

したがって、詳細な実験条件が記載されていれば、各表示法を統一することは可能である。しかし、今回用いた

データについては、実験条件の記述が不十分なため、この統一化はできなかつた。したがって、各実験結果の冷却能力表示法をそのまま解析に用いた。

2.4 数式化法

解析に用いる用語と式を次のように定義した。

1) 基準水温 θ_b [°C] と水温差 $\Delta\theta$ [°C]: ミルの冷却制御式において、水温 θ_w の影響は、① θ_w の値、② θ_b からの偏差、③ θ_w/θ_b の比などの形で導入されている。解析では、②のケースを対象にしたので θ_b を導入した。また、解析の容易さおよび解析結果のミルへの適用の容易さを考慮し、 θ_b の値として 20, 30 および 40 を、 θ_b からの温度差 $\Delta\theta$ の値として、各ミルの θ_w の変動範囲を考慮し ± 5 および ± 10 を採用した。

2) 冷却能力比 C_{θ_x/θ_b} [-]: 解析に用いた文献の中には、実験式の定数が記載されていないため、 H の値を算出できないものがある。また、解析に用いる文献数を多くするため、 H が h 、 \bar{h} 、 q または V で表示されている実験結果を採用した。解析に際しては、各実験の寄与率を同じにし、かつ各実験結果を同一条件で処理するため、 C_{θ_x/θ_b} を導入した。 C_{θ_x/θ_b} は、任意水温 θ_x と基準水温 θ_b のそれぞれに対応する $H(\theta_x)$ と $H(\theta_b)$ との比を示し、(3) 式のように定義した。

$$C_{\theta_x/\theta_b} = H(\theta_x) / H(\theta_b) \dots\dots\dots (3)$$

3) 水温係数 Rb [°C⁻¹]: Rb は θ_w の変動に対する H の変化割合を示し、(4) 式のように定義した。

$$Rb = \frac{[H(\theta_b + \Delta\theta) - H(\theta_b - \Delta\theta)]}{[H(\theta_b) \times 2 \cdot \Delta\theta]} \dots\dots\dots (4)$$

したがって、 Rb の単位は °C⁻¹ である。(4) 式に (3) 式を代入すると、 Rb は (5) 式ようになる。

$$Rb = [C_{(\theta_b + \Delta\theta)/\theta_b} - C_{(\theta_b - \Delta\theta)/\theta_b}] / [2 \cdot \Delta\theta] \dots\dots\dots (5)$$

Rb の値の表示法として、 $R_{30.5}$ や $R_{30.10}$ を用いるが、前者は $\theta_b: 30$ 、 $\Delta\theta: 5$ の Rb の値を、後者は $\theta_b: 30$ 、 $\Delta\theta: 10$ のそれを示す。

4) 水温係数 \overline{Rb} [°C⁻¹]: 1 実験において、2 条件以上のデータがある場合には、(6) 式を用いて各条件の Rb の平均値 \overline{Rb} を算出し、この値をこの実験の水温係数とした。

$$\overline{Rb} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Rb^{(i)} \dots\dots\dots (6)$$

5) 平均水温係数 Kb [°C⁻¹]: 各実験の Rb や \overline{Rb} の値はかなりばらついているので、類似条件の実験の結果をグルーピングして評価するため、(7) 式を用いて各グループの Kb を算出した。

$$Kb = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Rb^{(j)} \text{ or } \overline{Rb}^{(j)}) \dots\dots\dots (7)$$

したがって、一般論として、 Kb の値の確からしさは、 Rb や \overline{Rb} のそれより高いものと考えられる。

6) 水温補正式：製鉄所の冷却水の温度 θ_w は、特別なケースを除き、 $10-50^\circ\text{C}$ の範囲内にある。また、特定の製鉄所を対象にすると、 θ_w の変動範囲は、年間を通して（短期的変動を含めても）、 $10-20^\circ\text{C}$ 以内である。この程度の変動範囲内では、 θ_w と H との関係を1次式で近似してもよい。したがって、水温 $\theta_1 (= \theta_b - \Delta\theta)$ と $\theta_2 (= \theta_b + \Delta\theta)$ との範囲内で、 θ_x と $H(\theta_x)$ との関係を1次式で補完し、水温補正式を(8)式のように定義した。

$$H(\theta_x) = H(\theta_b) [1 + (Rb, \overline{Rb} \text{ or } Kb) \cdot (\theta_x - \theta_b)] \dots (8)$$

3. 解析結果

3.1 各実験の水温係数

水温係数 Rb の値を概観するため、各実験の実験範囲内の $R_{\theta_b,5}$ の値を Fig. 1 に示す。この図から、

- 1) すべての実験の $R_{\theta_b,5}$ の符号は負であること、すなわち、すべての実験において、 θ_w の上昇につれて H は減少すること、
- 2) すべての実験の $|R_{\theta_b,5}|$ の値は、 $0.005-0.04^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲内に存在すること、すなわち、 θ_w が $\pm 1^\circ\text{C}$ 変動すると、 H は $\pm (0.5-4)\%$ 変動すること、
- 3) 解析の全対象範囲である $\theta_b: 20-40$ に対応する $|R_{\theta_b,5}|$ の値は、 $0.005-0.03$ の範囲内に存在すること、
- 4) ミル実験の $|R_{\theta_b,5}|$ の値は、ラボ実験のそれよ

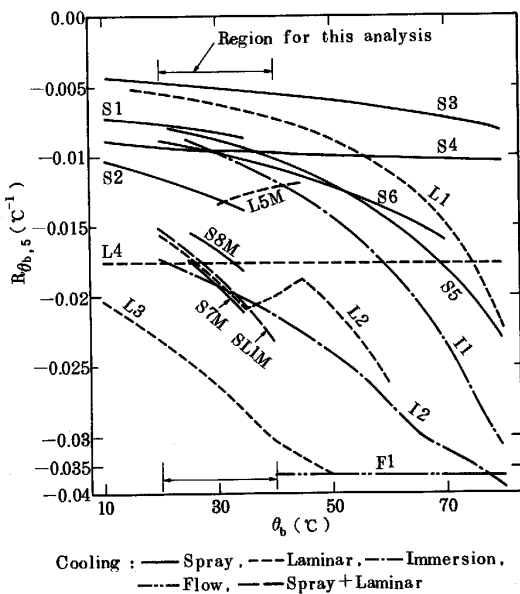


Fig. 1. Relation between basic water temperature, θ_b , and coefficient of water temperature, $R_{\theta_b,5}$, in several modes of water cooling.

り大きいこと ($\theta_b: 20-40$),

5) $|R_{\theta_b,5}|$ の値は θ_b の上昇につれて増大すること、すなわち、 θ_w の上昇につれて H の減少割合は増大すること、

6) $|R_{\theta_b,5}|$ の値は、同じ冷却法でも、各実験間で大幅に相違していること、
 がわかる。また、図示はしないが、 $|R_{\theta_b,10}|$ の値と特性は、上記1)ないし6)とほぼ同じである。

3.2 各実験の冷却能力比

各実験の冷却能力比 C_{θ_x/θ_b} の例として、 $C_{\theta_x/30}$ ($\theta_b: 30, \theta_x: 20-40$) の値を Fig. 2 に示す。この図から、

- 1) 各実験の $C_{\theta_x/30}$ の値は、 θ_x の上昇につれて単調に減少すること、すなわち、 H は θ_x の上昇につれて単調に減少すること、
- 2) $C_{\theta_x/30}$ の値は各実験間で大幅に相違していること、
 がわかる。また、図示はしないが、 $C_{\theta_x/20}$ と $C_{\theta_x/40}$ の値と特性は、上記1)と2)とほぼ同じである。
- Fig. 2 では、各種条件と $C_{\theta_x/30}$ との関係がわかりにくいので、各種条件ごとに $C_{\theta_x/30}$ の平均値 $\overline{C}_{\theta_x/30}$ を求め、Fig. 3 に示す。この図から、
- 3) $|\overline{C}_{\theta_x/30}|$ の変化量は、 $0.01-0.02/^\circ\text{C} - \theta_w$ であること、すなわち、 θ_w が $\pm 1^\circ\text{C}$ 変動すると、 H の値は $\pm (1-2)\%$ 変動すること、
- 4) ミル実験とラボ実験の $|\overline{C}_{\theta_x/30}|$ の値を比較すると、ミル>ラボであること、
- 5) ラミナ冷却とスプレー冷却の $|\overline{C}_{\theta_x/30}|$ の値を比較すると、ラミナ>スプレーであること、
 がわかる。すなわち、4)と5)は、 $\theta_w: 20-40$ の範囲

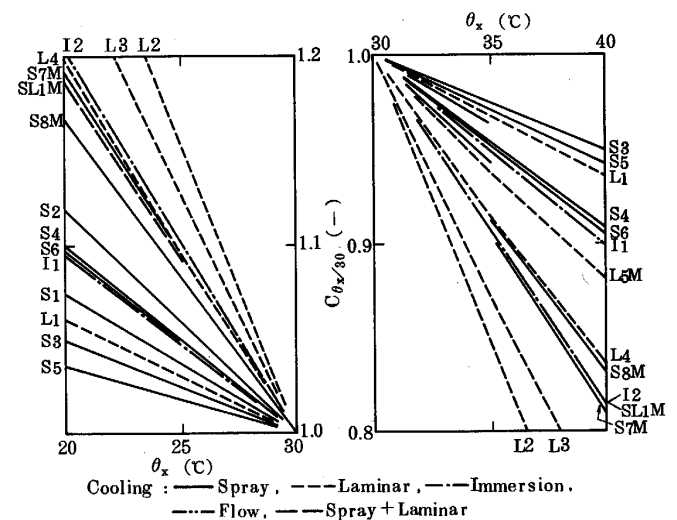


Fig. 2. Example of cooling capacity ratio, $C_{\theta_x/30}$, in several modes of water cooling, in which 30 and θ_x are basic and arbitrary water temperature.

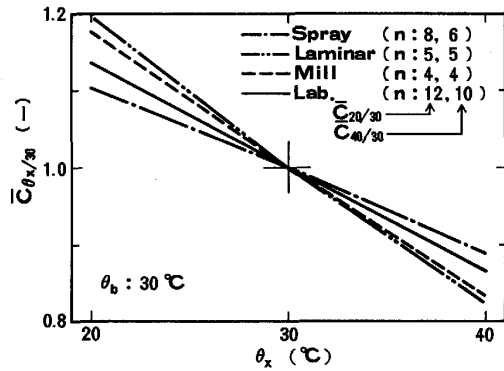
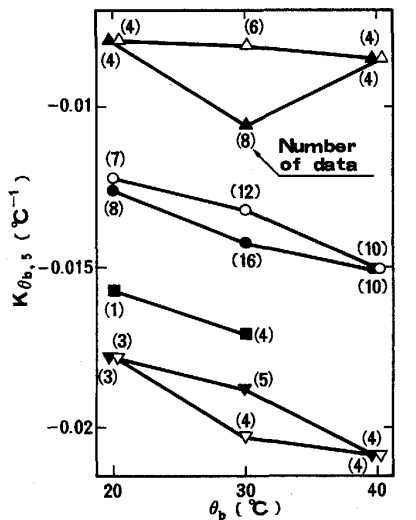


Fig. 3. Values of average cooling capacity ratio, $\bar{C}_{\theta_x/30}$, in which 30 and θ_x are basic arbitrary water temperature, and n is a number of data.



△: Spray cooling (L) ■: Total of M
 ▲: Spray cooling (L+M) ○: Total of L
 ▽: Laminar cooling (L) ●: Total of L+M
 ▼: Laminar cooling (L+M)
 M: Mill test L: Lab. test

Fig. 4. Relation between basic water temperature, θ_b , and average coefficient of water temperature, $K_{\theta_b,5}$.

内では、 θ_w の変動に対する H の変動割合が、それぞれミル>ラボ、およびラミナ>スプレーであることを示している。

3.3 平均水温係数の値

Fig. 2 に示すように、各実験の冷却能力比 $C_{\theta_x/30}$ の値は、大きくばらついている (4.1 参照)。これらのデータから算出した Kb の値を Fig. 4 に示す。この図から、

- 1) $K_{\theta_b,5}$ の値は、 θ_b : 20-40 の範囲内では、 $-0.008 \sim -0.021^\circ\text{C}^{-1}$ であること、
- 2) ミルの標準的水温である θ_b : 30 に対応する $|K_{30,5}|$ の値は、 $0.013 \sim 0.017$ であること、すなわち、 θ_w が $\pm 1^\circ\text{C}$ 変動すると、 H が $\pm (1.3 \sim 1.7)\%$ 変動する

こと、

- 3) $|K_{\theta_b,5}|$ の値は、 θ_b の上昇につれて漸増すること、
 - 4) ラミナ冷却とスプレー冷却の $|K_{\theta_b,5}|$ の値を比較すると、ラミナ>スプレーであること、
 - 5) ラボ実験とミル実験の $|K_{\theta_b,5}|$ の値を比較すると、ミル>ラボであること、
- がわかる。なお、3) の現象は 3.1 節の 5) と、4) と 5) の現象は、それぞれ 3.2 節の 4) と 5) のそれと同じであることを示している。

4. 考 察

4.1 水温係数のばらつき

Fig. 1 と 2 に示すように、水温係数 Rb や冷却能力比 C の値は、同じ冷却法でも各実験間で大きく相違している。 C と Rb は、それぞれ (3) 式と (5) 式に示すように、基準水温 θ_b と任意水温 θ_x に対応する冷却能力 $H(\theta_b)$ と $H(\theta_x)$ の比として定義しているから、各実験の H の変動の影響はほとんど受けないものと考えられる。しかし、解析結果によると、 H の変動が Rb や C の値に影響しているようなので、 H の変動について検討する。

H の変動の主要原因として、①試料表面のスケール(鉄酸化物)厚み、②試料の表面温度、③噴射水量などの変動が考えられる。

1) スケールについて: 表面に断熱層(熱伝導率 λ が試料のそれより小さい物質)が付着している高温試料を水冷する場合、最小膜沸騰過熱度(クエンチ点) Tq が上昇すること、すなわち H が増大することは、多くの研究者によつて明らかにされている^{12)~14)}。鋼材とスケールの λ の比(鋼材/スケール)は 10 程度なので、スケールは断熱層として作用する(λ は鋼材: 約 $30 (600^\circ\text{C})$, スケール: $1 \sim 4 \text{ kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}$)。各実験のスケール厚みは不明であるが、著者らの経験によると、スケール厚みは $10^0 \sim 10^2 \mu\text{m}$ オーダーと考えられる。

KIKUCHI ら¹²⁾の間欠性固液接触モデルによる計算によると(飽和プール水浸漬冷却, 銀試料), 断熱層厚みと Tq (銀表面)との関係は、断熱層厚みが 20, 50, 100 μm の場合、それぞれテフロン: 410, 560, 730, 耐熱塗料: 300, 340, 380°C である(λ はテフロン: 約 0.22, 耐熱塗料: 約 1.03)。このように、断熱層厚みが増大すると、 Tq が上昇するから、冷却は促進される。したがって、スケール厚みの変動は、 H の変動に強く影響しているものと考えられる。

2) 試料表面温度 θ_s について: θ_s で表示されている実験については、 θ_s : $500 \sim 700^\circ\text{C}$ 間のデータを、試料内

部温度のそれについては、初期温度 (800-1000°C) → 500°C (1/2 t) 間のデータを解析に採用した。したがって、後者の θ_s には、初期温度から 200-450°C までの範囲が含まれているものと推定される。水冷の場合、 θ_s が熱伝達に強く影響するから、 θ_s の範囲の差は H の値に強く影響しているものと考えられる。

3) 噴射水量 W について: W : 300-1000 の範囲のデータを解析に採用したが、熱伝達量は W に比例するから、 W の差は H の値に強く影響しているものと考えられる。

以上のように、高温鋼材を水冷する場合、 H の値は種々の要因に影響されるから、これらの要因が Rb や C の値の変動に影響している可能性がある。

4.2 水温係数の特性

高温鋼材を水冷する場合、 θ_w の上昇につれて H が減少する理由について検討する。

(1) 冷却水の顕熱減少の効果

高温試料に噴射された水は、試料から熱を奪って昇温し、その一部は気化する。水温上昇の場合、伝達熱量 qa と θ_w との間には (9) 式の関係がある。

$$qa = h \cdot (\theta_s - \theta_w) \quad \dots\dots\dots (9)$$

h と θ_s が一定の場合、 qa は θ_w の上昇につれて減少し、その減少割合、すなわち Rb の値は、 θ_s : 600 および θ_w : 30°C とすると、 $-1/570$ ($Rb = -0.00175$) である。一方、気化する場合、伝達熱量 qv と θ_w との間には (10) 式の関係がある。

$$qV = c \cdot (Tb - \theta_w) + HL \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、水の比熱 c : 1 kcal/kg·°C、水の沸点 Tb : 100°C および水の気化潜熱 HL : 540 kcal/kg とすると、(10)式は (11)式になる。

$$qV = (100 - \theta_w) + 540 \quad \dots\dots\dots (11)$$

したがって、 qv は θ_w の上昇につれて減少し、その減少割合は $-1/610$ ($Rb = -0.00164$) である。

上記の結果によると、どちらの場合にも、 $R_{30.5}$ の値は、約 -0.0017 となり、Fig. 1 や 4 に示す $R_{30.5}$ の値 (-0.01 - -0.02) より 1 桁小さい。したがって、 θ_w の上昇による水の顕熱減少だけでは、 Rb の値を説明することはできない。

(2) 蒸気膜カバー率の効果

広幅試料を W : 300-1000 の水量で冷却する場合、試料のはほぼ全面が冷却水でおおわれる。試料表面に形成される蒸気膜の状態は各種条件に影響されるが、マクロ的に見れば、試料表面をおおう蒸気膜の面積割合 (蒸気膜カバー率 FC) は、他の条件が同じであれば、 θ_w の上昇につれて増大するはずである。固液接触部 (伝導伝熱

と核沸騰伝熱) の熱流束 qc は、膜沸騰部の熱流束 qf より 1 桁程度大きい (θ_s : 約 600°C の場合、 qc : 1.3×10^6 , qf : 1.2×10^5 kcal/m²·h)¹²。試料から冷却水へ伝達する全熱流束 qt は、(12)式のようになる。

$$qt = qf \cdot FC + qc \cdot (1 - FC) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $qc/qf \approx 10$ とすると、(12)式は (13)式になる。

$$qt = qc \cdot [FC/10 + (1 - FC)] = qc \cdot (1 - 0.9 \cdot FC) \quad \dots\dots\dots (13)$$

したがって、 FC が 1% 変動すると、 qt は 0.9% 変動する。 θ_w と FC との対応関係は不明だが、 θ_w の $\pm 1\%$ の変動によつて、 FC が $\pm(1-2)\%$ 変動するものと仮定すると、 Rb の値は -0.009 - $-0.018^\circ\text{C}^{-1}$ となる。この値は、Fig. 1 や Fig. 2 の値とほぼ同じである。

以上の検討結果から、 Rb の値への FC 変動の寄与率は、水の顕熱変動のそれより大きいことがわかる。たとえば、 θ_w : 30°C の場合、前者の寄与率は 80-90%、後者のそれは 10-20% と推定される。

4.3 水温係数の値の特性

(1) 水温係数の計算値

Table 3 に示すように、各実験の実験式は、(14)、(15) または (16)式で表されている。

$$H(\theta_x) = a + b \cdot \theta_x \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$H(\theta_x) = a + b \cdot \theta_x + c \cdot \theta_x^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$\log[H(\theta_x)] = a + b \cdot \theta_x \quad \dots\dots\dots (16)$$

a, b, c : 定数、 θ_x : 任意水温

(14)式と (16)式について、 θ_x : 10 と 50°C に対応する H をそれぞれ $H10$ および $H50$ とすると、 $Rb [= (dH/d\theta_x)/H]$ は、(17) または (18)式になる。

(14)式

$$: Rb = [1 - k] / [40(1.25k - 0.25) + (1 - k)\theta_x] \quad \dots\dots\dots (17)$$

(16)式

$$: Rb = -[\ln(10)] \cdot (\log(k)) / 40 \quad \dots\dots\dots (18)$$

これらの式中の k は、 $H10$ と $H50$ の比 ($H10/H50$) である。(17) と (18)式から計算した Rb の値を Fig. 5 に示す。この図から、

- 1) (14)式の場合、 $|Rb|$ の値は、 θ_x の上昇につれて増大すること、すなわち、 θ_x の上昇につれて $dH/d\theta_x$ は一定だが、 H が減少するため $|Rb|$ は増大すること、
- 2) (16)式の場合、 $|Rb|$ の値は、 θ_x の影響を受けず一定値であること、
- 3) $|Rb|$ の値は、 k に比例して増大すること、すなわち、 θ_x の上昇に対応する H の減少割合が大きいほど、 $|Rb|$ の値は大きいこと、
- 4) k : 1.5-2.0 の場合、 θ_x : 30 に対応する $|Rb|$ の

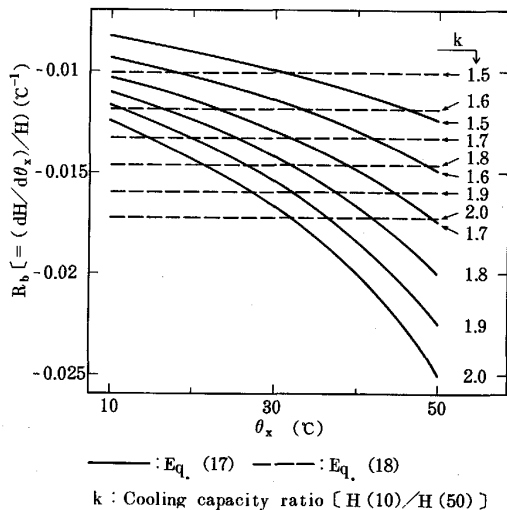


Fig. 5. Relation between water temperature, θ_x , and coefficient of water temperature, R_b , which is calculated from the equation (17) and (18).

値は、 $0.010\text{--}0.018^\circ\text{C}^{-1}$ の範囲内に存在すること、がわかる。

Fig. 4 の $K_{\theta_{b,5}}$ の値と Fig. 5 の R_b の値を比較すると、各実験の k の値は $1.5\text{--}2.0$ の範囲内に存在すること、すなわち、 θ_x が 10 から 50°C まで上昇すると、 H の値は $33\text{--}50\%$ 程度減少することがわかる。

(2) 水温係数の測定値

θ_b が 30 の場合、Fig. 1 によると、各実験の $R_{\theta_{b,5}}$ の値は、 $-0.005\text{--}0.026$ であり、Fig. 4 によると、全実験、ミル実験およびラボ実験の $K_{30,5}$ の値は、それぞれ -0.014 ($n:16$)、 -0.017 ($n:4$) および -0.013 ($n:12$) である。Fig. 5 によると、これらに対応する k の値は、全実験: 約 1.8 、ミル実験: 約 1.9 およびラボ実験: 約 1.7 ある。

著者らは、従来から $K_{30,5}$ や $K_{30,10}$ の値として、 -0.015 を用いてきたが ($\theta_w \pm 1^\circ\text{C}$ の変動に対し、 H は $\pm 1.5\%$ 変動)、この値は、全実験の $K_{30,5}$ の値に近い。解析結果によると、冷却条件によつて、 R_b の値は相違するようだが、熱間圧延鋼材を水冷する場合、 $\theta_s > 500$ で、かつ $W: 300\text{--}1000$ の場合、 $K_{30,5}$ の値は、 $-0.014\text{--}0.017$ の範囲内に存在するものと考えられる。

$|R_{30,10}|$ と $|K_{30,10}|$ の値は、それぞれ $|R_{30,5}|$ と $|K_{30,5}|$ のそれより若干大きい、実用上両者の値はほぼ同じである、とみなしてよい。

(3) 水温係数の水温依存性

Fig. 1 によると、各実験の $|R_{\theta_{b,5}}|$ の値は、 θ_b の上昇につれて、① $\theta_b: 20\text{--}40$ の範囲内では漸増し、② $\theta_b > 50^\circ\text{C}$ の範囲では増大している。②の場合、 θ_b が沸点

Table 4. Comparison of coefficient of water temperature, $R_{\theta_{b,5}}$, at stagnation zone with water flow zone in laminar and water flow cooling.

θ_b ($^\circ\text{C}$)	Exp. No.	$R_{\theta_{b,5}}$ ($^\circ\text{C}^{-1}$)	
		Stagnation zone	Water flow zone
30	L2(Rod)	$-0.0191(r=0)$	$-0.0418(r=10)$
	L4(Curtain)	$-0.0177(l=0)$	$-0.0183(l=50)$
40	L2	-0.0201	-0.0319
	L4	-0.0177	-0.0183
	F1	—	$-0.0373(l=100+200)$

*) r and l denote the distance from a stagnation point and line, respectively [mm]

に近づくと、蒸気膜が生成されやすくなるため、 H が急減する現象に対応しているものと考えられる。

Fig. 1 によると、S4、L4 および F1 の $|R_{\theta_{b,5}}|$ の値は、 θ_b の影響を受けない。L4 と F1 の場合、実験式が (16) 式の形のため、 $(dH/d\theta_w)/H$ は一定となる ((18) 式参照)。また、L5M の $|R_{\theta_{b,5}}|$ の値は、 θ_b の上昇につれて漸減しているが、これは、実験の θ_w 範囲が狭いため現れた現象と考えられる (原論文によると $\theta_w: 45^\circ\text{C}$ で実験)。実験式が (14) 式の形の場合、 $|R_{\theta_{b,5}}|$ の値は、 θ_b の上昇につれて増大することになる ((17) 式参照)。

(4) 冷却法と水温係数

Fig. 4 によると、ラミナ冷却の $|K_{\theta_{b,5}}|$ の値は、スプレー冷却のそれより大きい。両冷却法の噴射水流の状態は大きく相違している。すなわち、スプレーでは、冷却水は微小水滴に分散され、広範囲にほぼ均一に噴射されるのに対し、ラミナでは、冷却水の分散は抑えられたい整流状態のまま特定の場所に集中的に噴射される。ラミナの場合、試料へ衝突した冷却水は試料上を流れるから、このゾーンでは流水冷却になる。静止試料を用い、水流衝突ゾーンと流水ゾーンの両方で H を測定した L2 (ロッドラミナ) と L4 (カーテンラミナ)、および流水冷却 (F1) の $R_{\theta_{b,5}}$ の値を Table 4 に示す。この表によると、ラミナ冷却の $|R_{\theta_{b,5}}|$ の値は、流水ゾーン > 衝突ゾーンであり、また流水冷却の $|R_{40,5}|$ の値は 0.0373 と大きい。したがって、流水ゾーンの $|R_b|$ の値は、衝突ゾーンのそれより相対的に大きいものと考えられる (著者らにはこの現象の理由は不明である)。

ラミナ冷却の全熱伝達には、衝突ゾーンと流水ゾーンのそれぞれの熱伝達が含まれている。これに対し、スプレー冷却では水滴が冷却面全面に衝突する。したがって、ラミナ冷却の $|R_b|$ の値がスプレー冷却のそれより相対的に大きくなるものと考えられる。

(5) ミル実験の水温係数

Fig. 4 に示すように、 $|K_{30.5}|$ の値は、ミル実験 > ラボ実験である。解析に用いた冷却法の内訳は、ミル実験 (上面冷却): スプレー 50%, ラミナ 50%, これに対し、ラボ実験 (一部下面冷却を含む): スプレー 50%, ラミナ 33%, 浸漬 17% である。したがって、両者の K_b に対する冷却法の寄与率はほぼ等しいものと考えられる。

ミルで製造される鋼板の幅は、1-5 m と広いため、上面冷却の場合、ラミナでもスプレーでも全熱伝達に対する流水冷却の寄与率は、ミル実験 > ラボ実験である。この現象が、 $|K_b|$ の値が、ミル実験 > ラボ実験になる原因の一つと考えられる。ROT 冷却の場合 (ミル実験のうち 75% は ROT)、鋼材は仕上げ圧延の直後に水冷されるため、スケールの付着量は、ラボ試料のそれより少ない。スケールの付着量が R_b に及ぼす影響は不明だが (4.1 参照)、この現象もミルの $|K_b|$ の値の増大原因の一つになっているのかも知れない。

著者らは、長い間種々のミル (主に ROT と厚板) の冷却制御式に $K_{30.5}$ や $K_{30.10}$ の値として、 $-0.015^{\circ}\text{C}^{-1}$ を使用してきた。この値を採用した結果、ミルの短期的休止などによつて θ_w が急変した場合でも、ROT では巻取り温度的中率の低下を、厚板では変形 (C 反り) の増大を防止することができた。この事実を考慮すると、解析で得られたミル ($n:4$) の $K_{30.5}$ と $K_{30.10}$ の値 -0.0171 は真実に近いものと考えられる。以上のような理由から、高温の圧延鋼材を対象にする場合 (主に ROT と厚板)、 $K_{30.5}$ と $K_{30.10}$ の値は、 $-0.015 - -0.018$ の範囲内に存在するものと考えられる。

5. 結 言

鋼材の TMCP 用水冷を対象にして、水温 θ_w が冷却能力 H に及ぼす影響を、著者らのデータと公開文献のデータを用いて解析した。解析に際しては、 H に及ぼす θ_w の影響を表す水温係数 $R_b [^{\circ}\text{C}^{-1}]$ を、 $R_b = [H(\theta_b + \Delta\theta) - H(\theta_b - \Delta\theta)] / [H(\theta_b) \times 2 \cdot \Delta\theta]$ のように、水温補正式を、 $H(\theta_x) = H(\theta_b) [1 + R_b \cdot (\theta_x - \theta_b)]$ のように定義した (θ_b : 基準水温, θ_x : 任意水温, $\Delta\theta$: θ_b からの水温差 [$^{\circ}\text{C}$], K_b : 平均水温係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$])。主要結果は次のとおりである。

1) R_b の値は各実験の間で大幅に異なるが、 $R_{30.5}$ ($\theta_b: 30, \Delta\theta: 5$) の値は、 $-0.005 - -0.03$ の範囲内に存在する。すなわち、水温が $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 変動すると、冷却能力は干 (0.5-3)% 変動する。

2) $R_{30.5}$ の平均値は、全実験: -0.0143 ($n: 16$),

ラボ実験: -0.0133 ($n: 12$), およびミル実験: -0.0171 ($n: 4$) である (n : 実験数)。

3) ミル (熱延 ROT, 厚板熱処理設備など) の $R_{30.5}$ の値は、 $-0.015 - -0.018$ と推定される。

4) 各冷却法の $R_{30.5}$ の値を平均値で比較すると、ラミナ > スプレーである。

5) $|R_{\theta_b,5}|$ の値の多くは、 θ_b の上昇につれて漸増する。すなわち、 θ_b が上昇すると、 H の減少割合は漸増する。

本解析に際し、貴重なデータを利用させていただいた各文献の著者に感謝致します。

記 号

$\theta_w, \theta_b, \theta_x$: 一般的, 基準および任意水温 [$^{\circ}\text{C}$]

$\Delta\theta$: θ_b からの水温差 [$^{\circ}\text{C}$]

W : 噴射水流密度 [$1/\text{m}^2 \cdot \text{min}$]

H : 冷却能力 [-]

q : 熱流束 [$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$]

h, \bar{h} : 熱伝達係数 [$\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$]

V : 冷却速度 [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]

C_{θ_x/θ_b} : 冷却能力比 [-]

$C_{20/30}$: $\theta_x: 20, \theta_b: 30^{\circ}\text{C}$ の冷却能力比の値 [-]

$R_b, \bar{R}_b, K_b, R_{\theta_b, \Delta\theta}$: 水温係数 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

$R_{30.5}$: $\theta_b: 30, \Delta\theta: 5^{\circ}\text{C}$ の水温係数の値 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

$K_{30.5}$: $\theta_b: 30, \Delta\theta: 5^{\circ}\text{C}$ の平均水温係数の値 [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

k : $\theta_w: 10$ と 50°C に対応する H の比 ($H(10)/H(50)$)

S, L, I, F: スプレー, ラミナ, 浸漬および流水冷却

文 献

- 1) 福田敬爾, 三塚正志, 横倉照夫, 梅野正紀: 材料とプロセス, 1 (1988), p. 1491
- 2) 三塚正志: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1457
- 3) 吉田秋登, 島田道彦, 清水 亮, 三塚正志: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 631
- 4) K. P. KOROTKOV, H. P. MAYOROV, A. A. SKVORTSOV and A. D. AKIMENKO: The Continuous Casting of Steel in Commercial Use (1960), p. 59 [Pergamon Press]
- 5) 国岡計夫, 杉山俊一, 神尾 寛: 鉄と鋼, 64 (1978) S255
- 6) 白岩俊夫, 小林純夫: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 485
- 7) 大友朗紀, 山口喜弘, 中尾正和, 水田篤男, 大砂 寛, 柚垣英則: 鉄と鋼, 66 (1980), S955
- 8) 柳 謙一, 橋本律男, 楨原克己, 中村義満, 江口章介, 坂本 潤, 平井慎二: 三菱重工技報, 20 (1983) 3, p. 352
- 9) 三宅祐史, 西出輝幸, 守谷正一, 池永孝雄, 井上利夫, 高木 清: 川崎製鉄技報, 10 (1978) 1, p. 58
- 10) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1008
- 11) 三塚正志, 福田敬爾: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 70
- 12) Y. KIKUCHI, T. HORI, H. YANAGAWA and I. MICHYOSHI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 26 (1986), p. 576
- 13) 淵沢定克, 奈良崎道治, 下山勇二郎, 武田信男: 精密機械, 46 (1980), p. 842
- 14) 西尾茂文: 日本機械学会論文集 (B 編), 51 (1985) 462, p. 582