

高温鋼板のスプレ冷却に関する研究*

三 塚 正 志**

Study on the Water Spray Cooling of Steel Plate at High Temperature

Masashi MITSUTSUKA

Synopsis:

The cooling process of plain carbon steel plate was studied. A plate of $28 \times 220 \times 220$ mm³ size was heated up to 930°C and then cooled by water spray from both sides; the temperature of cooling water was 38°C. The results obtained are as follows;

1. The heat transfer coefficient α' decreases gradually as the temperature of cooled surface θ_s is raised when water flow rate of spray W is large, while in the case where W is small, the coefficient decreases abruptly with the elevation of θ_s over 300°C.

2. The relation between α' and W is described as " $\alpha' \propto W^n$ " in the case of $W > 5 \times 10^{-4}$ l/cm²·min, and values of n are divided into two groups according to the boiling condition of cooling water, i. e. groups of value having 0.3~0.5 and 0.5~0.8.

3. The relation between the mean heat transfer coefficient $\bar{\alpha}$ and W is described as " $\bar{\alpha} \propto W^{0.65 \sim 0.75}$ " in the case of $W > 5 \times 10^{-4}$ l/cm²·min.

4. The relation between $\bar{\alpha}$ and cooling water temperature θ_w (°C) is described as " $\bar{\alpha} \propto [1 - (5 \sim 8) \times 10^{-3} \theta_w]$ " in the case of $W = 0.060 \sim 0.062$ l/cm²·min.

5. When W is large, the cooling rate V' is hardly influenced by θ_s , but increases abruptly for θ_s lower than about 500°C when W is small. Furthermore, V' decreases regardless of W , in such a temperature region that the transformation heat is evolved.

6. The relation between the mean cooling rate $\bar{V}$ and W is described as " $\bar{V} \propto W^{0.6 \sim 0.7}$ " in the case of $W = 5 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-2}$ l/cm²·min.

7. The relation between $\bar{V}$ and θ_w (°C) is described as " $\bar{V} \propto [1 - (4.5 \sim 5.5) \times 10^{-3} \theta_w]$ " in the case of $W = 0.060 \sim 0.062$ l/cm²·min.

8. It is deduced that "spray cooling is a sort of turbulent flow cooling" from the quantitative relation between the water flow rate of spray W and heat transfer coefficient α , i. e. " $\alpha \propto W^n$ " where values of n is about 0.5~0.8.

(Received Aug. 3, 1968)

1. 緒 言

鋼材を強制冷却する目的を大別すると、i) 最適な熱処理による材質の向上、ii) スケールの発生防止や非破壊検査の強化による品質の向上、iii) 冷却床滞在時間の短縮による生産量の増強、iv) 低温鋼材の取り扱いによる作業環境や作業性の向上などが考えられる。通常、鋼材は、冷却水中に浸漬する方法や水を吹きつける方法などによつて強制冷却される。しかし、製造工程の自動化、複雑な熱処理、精度の高い伝熱計算、冷却水の節約などが要求されると、各種冷却法の冷却効果を定量化することが必要になる。

鋼材の強制水冷は、工場や研究室において、かなり行なわれているが、その効果を定量化する研究は、比較的少ない。中野ら¹⁾は、気水混合焼入れ法を研究し、その焼入れ強烈度(金属と流体間の相対的熱伝達率)を油中浸漬法と空中放冷法の間に制御できると報告している。福

田ら²⁾は実際のホット・ラン・テーブル全長について、スプレ冷却の平均熱伝達率を測定し、スプレの噴出圧力が 10 kg/cm² (本文中の圧力はゲージ圧力を示す) のとき 148 kcal/m²·hr·deg., 4.5 kg/cm² のとき 97 kcal/m²·hr·deg. を得た(鋼板の温度は 600~800°C)。田中ら³⁾は初期温度 800~900°C の 18-8 鋼板をスプレ冷却する実験を行ない、各種要因と熱伝達との関係を調べた。一方、基礎的な分野では、最近、小竹⁴⁾、戸田⁵⁾、長谷川ら⁶⁾が高温金属面上における水滴の挙動、特にライデンフロスト現象の研究を報告している。

筆者は、連続铸造 2 次冷却用スプレを用いて、40 ϕ $\times$ 150 mm の 18-8 鋼中実円筒や 40 $\times$ 156 $\times$ 156 mm の銅板、アルミ板、18-8 鋼板、炭素鋼板などを冷却する実験⁷⁾⁸⁾や 1.4~4.0 mm ϕ 水ジェットを用いて、28 $\times$ 200 $\times$ 200

* 昭和43年8月3日受付

** 八幡製鉄(株)技術研究所

mm³の炭素鋼板を冷却する実験⁹⁾¹⁰⁾を行なった。今回は、雰囲気制御しない電気炉で再加熱した 28×220×220 mm³ の炭素鋼板を水滴スプレで冷却する実験を行ない、各種要因と熱伝達率や冷却速度との関係を定量化した。

2. 実験装置および方法

2.1 実験装置

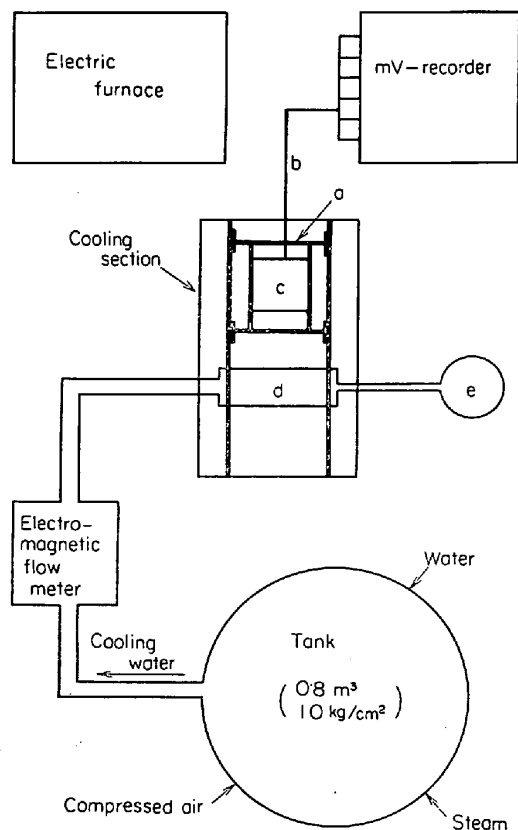
実験装置は Fig. 1(a) に示すように、試料加熱部、冷却水供給部、試料冷却部、試料温度測定部から構成されている。試料加熱部は、雰囲気制御しないカンタル電気炉で、試料は約 120 mm 間隔で水平に配置した 2 個の三角柱煉瓦の上に水平に置いて加熱した。冷却水供給部は、内容積 0.8 m³ の加圧タンクと電磁流量計で、タンクには水道水、加熱用蒸気、圧縮空気 (最高圧力 10 kg/cm²) が供給できる。試料冷却部は、Fig. 1(b) に示すように、試料を乗せる台車、スプレノズルおよびスプレをさえぎるシャッタから成る。試料が受ける水量分布を均一にするため、台車は手動によつて往復運動ができる構造になっており、ノズルは共立合金(株)製の中実円錐型でスプレの開き角度は 65~70 度、1 個当たりの噴出水量は、噴出圧力が 3 kg/cm² のとき、0.4~100 l/min である。試料温度測定部は、理化電機(株)製の 6 点連続自動平衡型 mV 記録計と自動温度補償器からなる。

2.2 試料と测温方法

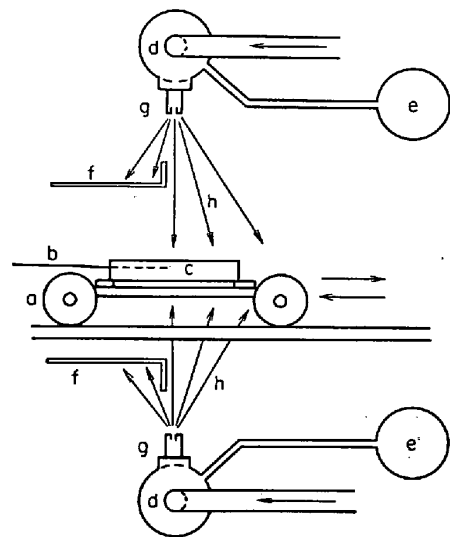
Fig. 2 に示すように、試料は、28×220×220 mm³ の炭素鋼で、加熱前と冷却直前に剝離するさびやスケールは機械的に除去した。試料の测温位置は、1 次元熱流 (厚さ方向)を得るため、試料中央半径 30 mm の円周上で、冷却面(冷却開始信号用)に 1 カ所、上下冷却面から 5 mm に各 1 カ所、厚さ方向中央(断熱面)に 3 カ所の計 6 カ所である。表面近傍に比べると、断熱面においては温度の変化が遅く、また、噴射水量やスケールの付着状態の不均一による温度分布の乱れが減少する利点を有するから、測定精度の向上が期待される。それゆえ、この面を主测温面を選んだ。熱電対挿入孔は、熱伝導誤差を除くため、冷却面に平行に穿孔し、一方、测温孔への冷却水の浸水を防止するため、孔の開放端側を 8 f × 10 mm にし、耐火物 (通称トロ) をつめた。熱電対には、0.65 mm f の CA 線を用い、応答をよくするため、温度接点を試料に電溶した。

2.3 実験方法

熱電対と試料間の機械的、電気的接触を確認した後、熱電対を所定の補償導線に接続し 930°C に保定してある電気炉に、試料を装入した。室温が 30°C の場合、試



(a) Outline of apparatus



(b) Cross section of cooling zone

a : Sample carrier, b : Thermocouples for sample, c : Sample, d : Spray header, e : Pressure gauge for cooling water, f : Shutter, g : Spray nozzle, h : Spray

Fig. 1. Arrangement of experimental apparatus.

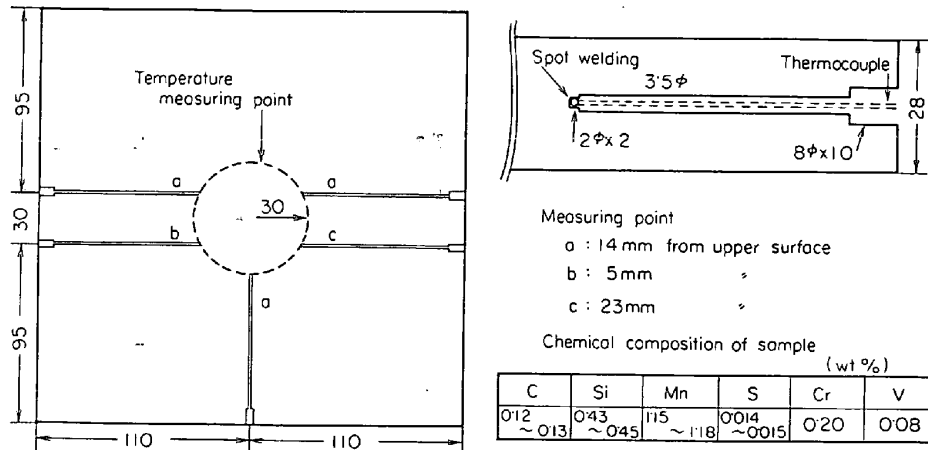


Fig. 2. Cooling sample (Unit : mm).

料の昇温状況は、

装入後の経過時間 (min) 6.4 10.4 14.4 20.8
27.0 39.0

試料の厚さ方向中央温度 (°C) 480 660 750 840
900 約 930

であり、930°C に約 30 min 保定した後、試料を抽出しそれから 11~13 sec 後に冷却を開始した。この間の温度降下量は約 10 deg. であるから、結果の解析にさいしては、初期温度を 920°C とした。試料を抽出する前から、スプレをシャッタに噴射しており、試料がノズルの直下にきたとき、シャッタを開いた。噴出直前の冷却水温度は、37~39°C である。スプレが試料に均一に噴射されるように、冷却期間中台車を、振幅約 50 mm、周期約 5 sec で往復運動させた。

3. 熱伝達率の算出方法

熱伝達率は、一般的に定常状態で測定されているが、この方法によると、高温状態における測定はかなり困難である。一方、実用面においては、高温状態における熱伝達率が強く要望されている。それゆえ筆者は、非定常状態において、高温鋼材と冷却水間の熱伝達率を測定することを試みた。

3.1 平均的熱伝達率の算出方法

Fig. 3 に示すような半無限平板を考えよう。この平板内において、熱の発生や吸収がなく、熱流を 1 次元 (厚さ方向のみ) と仮定すると、平板の温度は、(1) 式で示

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

される。なお、諸元は Fig. 3 を参照されたい。(2) 式

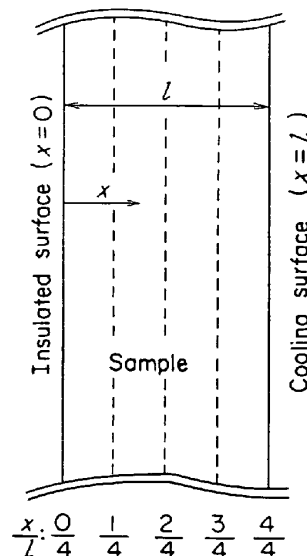
$$\begin{aligned} (a) \quad & t = 0 \text{ のときに, } \theta(x, t) - \theta_W = \theta_0 - \theta_W \\ (b) \quad & x = 0 \text{ の位置で, } \frac{\partial [\theta(x, t) - \theta_W]}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

$$(c) \quad x = l \text{ の位置で } -\lambda \frac{\partial [\theta(x, t) - \theta_W]}{\partial x} = \alpha [\theta(x, t) - \theta_W] \quad (2)$$

の境界条件を用いて、(1) 式を解くと、(3) 式が得られ

$$\frac{\theta(x, t) - \theta_W}{\theta_0 - \theta_W} = 2 \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{\sin(\delta_i \cdot l)}{[\delta_i \cdot l + \sin(\delta_i \cdot l) \cos(\delta_i \cdot l)]} \cdot [\exp(-\delta_i^2 a t)] \cdot [\sin(\delta_i \cdot l)] \right\} \quad (3)$$

る¹¹⁾。(3) 式の δ_i は、(4) 式の根である。無次元量



Notation :

$\theta(x, t)$: Temp. of sample at $x=x$ and $t=t$, °C

$\theta(x'/4, t)$: " at $x/l = x'/4$ and $t=t$, °C

θ_i : Temp. of insulated surface ($=\theta(0/4, t)$), °C

θ_s : " of cooling surface ($=\theta(4/4, t)$), °C

θ_W : " of cooling water, °C

t : Time from cooling start, sec

x : Distance from insulated surface, mm

α : Heat transfer coefficient between cooling surface and spray kcal/m²·hr·deg

λ, ρ, c, a : Thermal conductivity, density, heat capacity and thermal-diffusivity of sample c.g.s

Fig. 3. Model for calculating heat transfer coefficient.

$$\cot(\delta_i \cdot l) = \frac{\lambda}{\alpha} \delta_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

$at/l^2 (=F_0)$, $\alpha l/\lambda (=B_i)$, $x/l (=X)$ を導入すると, (3)式は(5)式のように表わせる. ここで, F_0 はフー

$$\frac{\theta(x,t) - \theta_w}{\theta_0 - \theta_w} = f(F_0, B_i, X) \quad \dots\dots\dots (5)$$

リエ数で平板内の温度伝播の大きさを, B_i はビオ数で平板表面と周囲との熱伝達の大きさを, X は位置比で平板内の位置を表わす. 筆者は, $X=0/4, 1/4, 2/4, 3/4, 4/4$ について, $B_i=0.01 \sim \infty$, $F_0=0.0 \sim 120$ の範囲の計算を, $i=8$ まで行ない, グラフを作成した. なお, グラフの形については, 文献¹¹⁾¹²⁾を参照されたい.

さて, (2)式の境界条件を満たす実験によって, t と $\theta(x,t)$ との関係を測定すれば, (5)式 (実際にはグラフ) を用いて, $t=0(\theta(x,t)=\theta_0)$ から $t=t(\theta(x,t)=\theta(x,t))$ までの平均の熱伝達率が得られる. この熱伝達率を, $x=x$ の温度が θ_0 から $\theta(x,t)$ まで降下する間の平均熱伝達率 $\bar{\alpha}$ と呼ぶことにする. 今回の実験においては, $x=0$, すなわち断熱面について “時間-温度” 曲線を測定したから, 得られる熱伝達率は, 断熱面が初期温度から任意温度まで降下する間の平均熱伝達率 (以下 $\bar{\alpha}_{0/4}$ と記述) である. また, 上記 $\bar{\alpha}_{0/4}$ を用いて冷却面温度 $\theta(4/4,t)$ を求め, この $\bar{\alpha}_{0/4}$ を, 冷却面が $\theta(4/4,0)$ から $\theta(4/4,t)$ まで降下する間の平均熱伝達率 (以下 $\bar{\alpha}_{4/4}$ と記述) とした.

3.2 熱伝達率の算出方法

平板の表面温度 [以下 $\theta(4/4,t)$ または θ_s と記述] と含熱量 $q(t)$ を時間の関数として求めれば, (6)式から

$$|dq| = \alpha [\theta(4/4,t) - \theta_w] \cdot |dt| \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし, $dq = q(t+dt/2) - q(t-dt/2)$

$$\theta(4/4,t) = [\theta(4/4,t+dt) + \theta(4/4,t-dt/2)]/2$$

熱伝達率が得られる. dt を小さくしたとき得られる熱伝達率 α は $\bar{\alpha}$ に対して微分的意味を有するから, α' と記述する.

各データについて, 実測した “ $t-\theta(0/4,t)$ ” から求めた $\bar{\alpha}_{0/4}$ を用いて, 平板内の温度分布, すなわち, $\theta(1/4,t)$, ..., $\theta(4/4,t)$ を求め, (7)式によつて, $t=t$ における平板の平均温度 $\bar{\theta}(t)$ を求める. 今回の計算に際しては, “温度-含熱量” の関係には, 文献¹³⁾の値を採用した (Fig. 4 参照).

$$\begin{aligned} \bar{\theta}(t) = & \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} \left\{ \theta(0/4,t) + \theta(1/4,t) \right\} + \dots \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \left\{ \theta(3/4,t) + \theta(4/4,t) \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

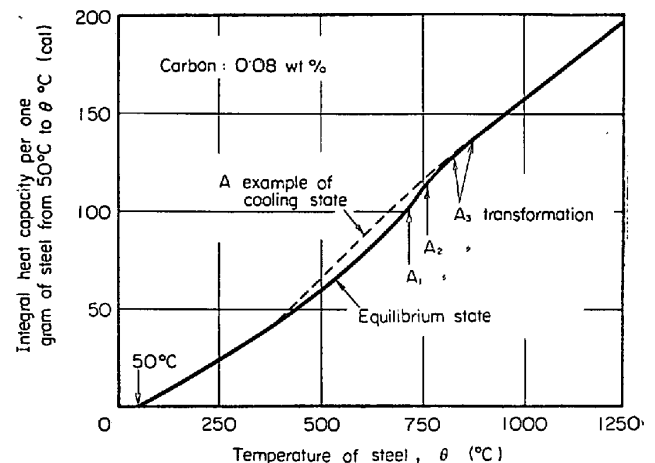


Fig. 4. Relation between steel temperature and heat capacity of steel.

4. 実験結果および考察 (I) ... 熱伝達率について

4.1 冷却面温度と熱伝達率との関係

4.1.1 冷却面温度と熱伝達率 α' との関係

実験によつて得られた冷却面温度 θ_s と熱伝達率 α' との関係を Fig. 5 に示す. この α' は, $|\theta(0/4, t_{i+1}) - \theta(0/4, t_i)| = 100^\circ\text{C}$, すなわち, $|\theta(4/4, t_{i+1}) - \theta(4/4, t_i)| = 80 \sim 130^\circ\text{C}$ として求めたから, 厳密な意味での微分値ではない. この図から, 一般的に, θ_s が高くなるにつれて, α' が減少することがわかる. この現象を詳細に調べると, 噴射水量 W が少ない範囲 (大体, $W < 5 \times 10^{-3} \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$) では, θ_s が約 250°C 以上になると, α' は急減している. これは, 水滴のライデンフロスト点^{*} (以下 L.P) が 250°C 付近にあるためと考えられる. ステンレス鋼板を用いた小竹の実験⁴⁾によると, 水滴の L.P は約 260°C , りん青銅板を用いた長谷川らの実験⁶⁾によると, L.P は $160 \sim 190^\circ\text{C}$ であるから, α' が約 250°C 以上で急減するのは, ライデンフロスト現象によるものと結論できる. しかし, スケールの付着した炭素鋼板についての L.P は報告されていないから, 今後測定する必要がある.

W が多い範囲では (大体, $W > 1 \times 10^{-1} \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$), θ_s が高くなつても, α' は急減せず, 漸減する傾向にある. これは, W が多く, その上, サブクール温度差^{**}

^{*} ライデンフロスト点: 金属面上の水滴は, 金属が高温のときには, 蒸気膜の上に乗っているが, 金属の温度が下がると, ある温度で急激に金属面をぬらすようになる. この臨界温度をライデンフロスト点と呼ぶ.

^{**} サブクール温度差: 水の飽和温度と水温との差をサブクール温度差またはサブクールと呼び, 飽和温度以下の温度の水をサブクールされた水と呼ぶ.

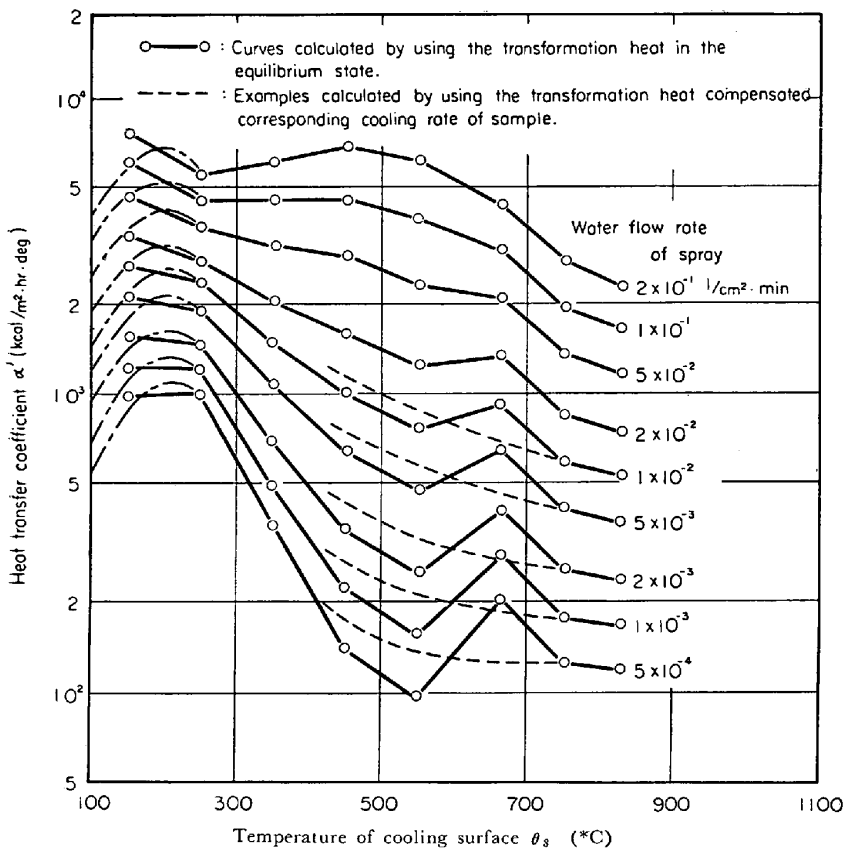


Fig. 5. Influence of cooling surface temperature on the heat transfer coefficient.

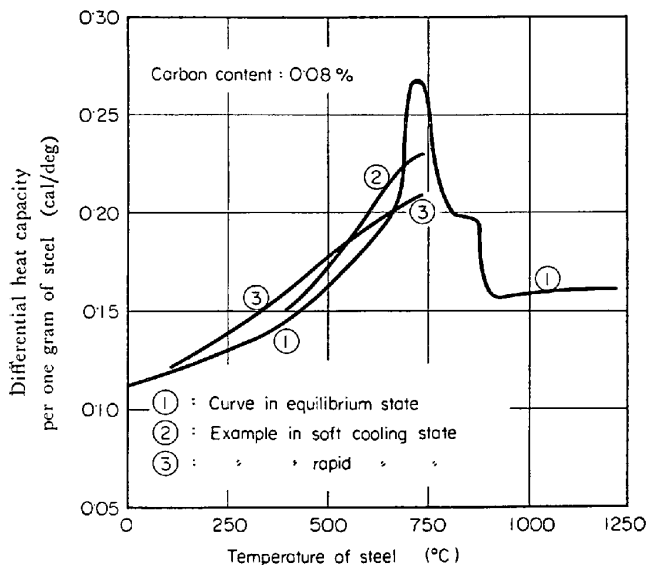


Fig. 6. Relation between steel temperature and heat capacity.

$\Delta\theta_{\text{sub}}$ が大きいから(約62°C), 各水滴が飽和温度 θ_{sat} に達する前か到達直後に伝熱面から追い払われてしまい, なかなか膜沸騰の状態にならないためと考えられる. 上記の現象は, W が多い場合, 冷却期間中蒸気の発生量が少ないことからもうなずける.

W が少ない場合には, $\theta_s > \text{約 } 500^\circ\text{C}$ の範囲では, ほぼ完全に膜沸騰の状態になっているものと考えられる. すなわち $W = 0.5 \sim 1 \times 10^{-3}$ のとき $\alpha' = 1 \sim 2 \times 10^2$ kcal/m²·hr·deg であり, プール膜沸騰の α' が $5 \sim 10 \times 10^2$ ¹⁴⁾ であるのに比べると小さいけれども, プールの場合には, 全伝熱面が水でおおわれているのに対しスプレの場合には, 伝熱面が局部的に水滴でおおわれているにすぎない. 大気中へのふく射伝熱の α' は, $\theta_s = 600^\circ\text{C}$ のとき $0.25 \sim 0.35 \times 10^2$ と小さいから, スプレの場合には, 全体としての α' が小さくなるものと考えられる.

W が少ない場合, α' が, $\theta_s = 500 \sim 600^\circ\text{C}$ で小さく, $\theta_s = 600 \sim 700^\circ\text{C}$ で大きいのは, 鋼の変態熱の取り扱い方によって生じた誤差である. すなわち, 変態熱を含めた鋼の熱容量は, Fig. 6 に示すように, 平衡状態においては, 750°C 付近で特に大きい, 鋼を冷却する場合には変態熱の放出温度は低温側にずれる. これに対し, 今回の計算には, 平衡状態の

“温度—熱容量”曲線を用いたため, θ_s が $600 \sim 700^\circ\text{C}$ の範囲では, 実際には放出していない変態熱を放出したものと処理したため, α' が大きくなり, 一方, θ_s が $500 \sim 600^\circ\text{C}$ の範囲では, 上記と逆の現象のため, α' が小さくなったものと考えられる.

一方, W が多い場合には, 鋼板内の温度勾配, すなわち, 内外の温度差が大きく, その上, 冷却速度も大きいから, 変態熱の放出温度がかなり低温側にずれるため, 全体として, 変態熱が θ_s の広い範囲にわたって放出される. それゆえ, W が小さい場合のように α' のピークが現われないものと考えられる. Fig. 5 の点線は, 変態熱の放出温度を実際に合うように補正して取り扱ったときに予想される曲線である.

次に, $\theta_s < \theta_{\text{sat}}$ の範囲では, 冷却水は沸騰しないから α' はかなり小さく, 一方, $\theta_s > \theta_{\text{sat}}$ の範囲(核沸騰領域)では, 一般的に, 鋼板から冷却水への伝達熱量 q は, $q \propto (\theta_s - \theta_{\text{sat}})^{2.5-4}$ だから, Fig. 5 の α' のカーブは, $\theta_s < 150 \sim 200^\circ\text{C}$ の範囲では, 鎖線のようなものと推測される.

4.1.2 噴射水量と熱伝達率との関係

噴射水量 W と熱伝達率 α' との関係は, かなりばらついているが, その代表値は, Fig. 7 のようになる. この

図から, i) $\theta_s > 400^\circ\text{C}$ の範囲では, $\alpha' \propto W^{0.5 \sim 0.7}$ であること, ii) $\theta_s < 400^\circ\text{C}$ の範囲では, $\alpha' \propto W^n$ であるが, $W = 4 \sim 7 \times 10^{-3} \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$ を境にして n の値が異なることがわかる。

i) の場合には, 噴射された水滴は, W が少ないときには, 噴射直後に蒸気膜に乗ってしまい, W が多いときには, 連続的に噴射される水滴のために, 蒸気膜はなかなか形成されない。したがって, 試料から水滴への伝達熱量の多くは, W が少ないときには, 水滴を昇温させ, 蒸気膜を形成するために, W が多い時には, 水滴を昇温させるために費やされる。それゆえ, α' は, W が多いときも少ないときも, W すなわち入射水滴の数に強く依存することになる。

ii) の場合には, $W < 4 \sim 7 \times 10^{-3}$ の範囲では, 噴射された水滴の多くは, 核沸騰するから α' は W に強く依存し, 一方, $W > 4 \sim 7 \times 10^{-3}$ の範囲では, すでに核沸騰に必要な水滴は存在しているから, それ以上の水滴が噴射されても, α' はあまり大きくならない。この現象は, 核沸騰がもつともはげしい $\theta_s = 200 \sim 300^\circ\text{C}$ の範囲において, W の指数がもつとも小さいことからもうなずける。

最後に, W と α' の間に, $\alpha' \propto W^n (0 < n < 1)$ の関係が存在することは, “スプレ冷却も乱流冷却の一種である” とみなしてよいと思われる。

4.1.3 噴射水量と平均熱伝達率との関係

鋼の物性値として, 比熱 0.18 , 熱伝導率 0.08 , 密度 7.8 (いずれも C.G.S 単位) を用いたときの噴射水量 W と冷却面温度に関する平均熱伝達率 $\overline{\alpha}_{4/4}$ との関係を Fig. 8 に示す。なお, 冷却面の温度範囲は 100°C ごとにまとめた。Fig. 8 に示したデータや他の温度範囲のデータから, $W = 5 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-1}$ の範囲内では, W と $\overline{\alpha}_{4/4}$ の間には, (10) 式の関係の存在することがわかる。この

$$\overline{\alpha}_{4/4} = CW^n \dots\dots\dots (10)$$

式を用いて実験データを整理した場合の温度範囲と n との関係を Fig. 9 に示す。Fig. 9 から, n の値は, $\theta_s < \text{約 } 600^\circ\text{C}$ の範囲では, $0.65 \sim 0.70$ であるが, $\theta_s > \text{約 } 600^\circ\text{C}$ の範囲では, θ_s が高くなるにつれて段々小さく

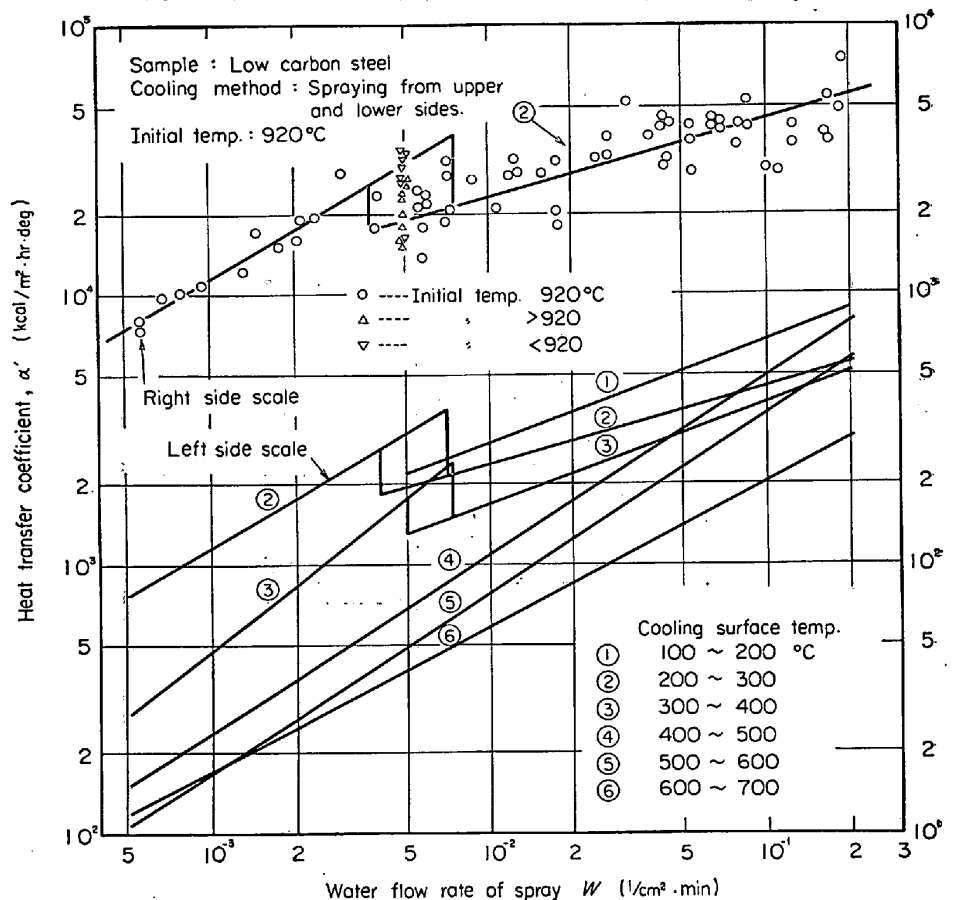


Fig. 7. Relation between water flow rate and heat transfer coefficient.

なる。定常状態における管壁と管内流体間の熱伝達率が一般的に, レイノルズ数の指数 $0.7 \sim 0.9$ に比例することを考えると, 非沸騰領域, 核沸騰領域および水滴によつて強制的に蒸気膜が破壊される領域においては, 4.1.3 で記述したように, “スプレ冷却も一種の乱流冷却” とみなしてよいと考えられる。

また, $\theta_s > \text{約 } 600^\circ\text{C}$ の範囲において, θ_s が高くなるにつれて, n が小さくなる現象の理由は, 筆者らにはわからない。

さて各温度範囲によつて, (10) 式の n の値が異なるのでは, 使用にさいして不便であるから, n を定数 (0.65 と 0.70) として, 比例係数 C を求め, Table 1 に示す。この表から, θ_s が低くなるにつれて, C すなわち $\overline{\alpha}_{4/4}$ の増大することがわかる。これは, θ_s が低くなるにつれて, 熱伝達の大きい核沸騰の領域が加算されるためである。

なお, Fig. 8 や Table 1 の値を用いて, 伝熱計算を行なうときには, これらの値を算出するとき用いた物性値を使用することが望ましい。

4.2 断熱面温度と熱伝達率との関係

ビオ数 Bi が小さいときには, 鋼板内の温度勾配が小さく, 断熱面と冷却面との温度差も小さいから, 冷却面

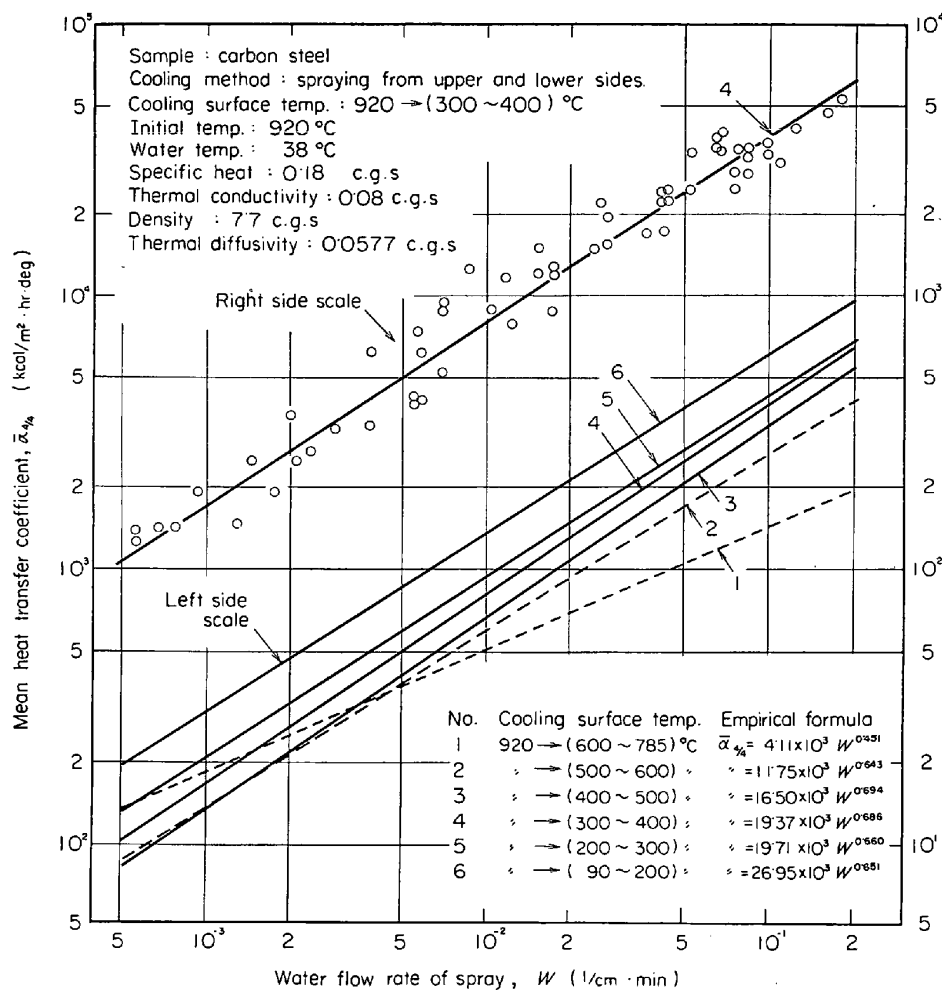


Fig. 8. Relation between water flow rate and heat transfer coefficient.

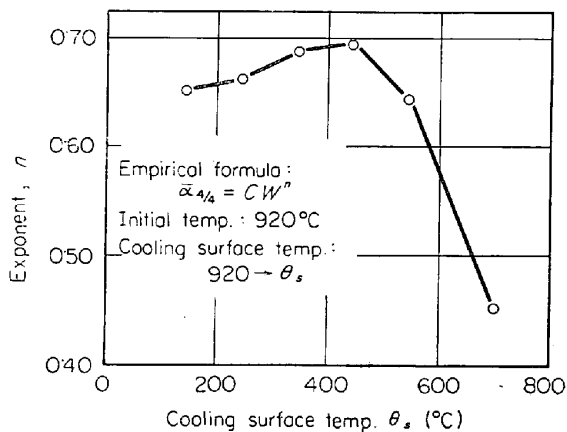


Fig. 9. Relation between temperature region and exponent of water flow rate of spray.

温度について求めた熱伝達率を用いて、断熱面温度の計算を行なつても、大きな誤差は生じない。しかし、 B_i が大きいときには、鋼板内の温度勾配が、数10~数100deg/cmにも達するから、任意位置の温度の計算には、その位置の温度に関して得られた熱伝達率を用いるのが望

Table 1. Constant C in empirical formula $\bar{\alpha}_{4/4} = CW^n$ when $n=0.65$ and 0.70 .

Cooling surface temperature (°C)	Most probable value of n	Value of C	
		$n=0.65$	$n=0.70$
920 → (90 ~ 200)	0.651	$2.68_5 \times 10^4$	$3.25_2 \times 10^4$
" → (200 ~ 300)	0.660	$1.89_0 \times "$	$2.31_8 \times "$
" → (300 ~ 400)	0.686	$1.66_8 \times "$	$2.05_9 \times "$
" → (400 ~ 500)	0.694	$1.34_8 \times "$	$1.69_4 \times "$
" → (500 ~ 600)	0.643	$1.21_5 \times "$	$1.53_5 \times "$
" → (600 ~ 785)	0.451	$1.19_6 \times "$	$1.56_5 \times "$

$\bar{\alpha}_{4/4}$: Mean heat transfer coefficient (kcal/m²·hr·deg)

W : Water flow rate of spray (l/cm²·min)

ましい。

一方、鋼板の熱処理にさいしては、冷却の強さを示す指標として、鋼板内（多くの場合断熱面）の冷却速度を用いることが多い。また、鋼の熱処理は、オーステナイト領域から、変態域を通して強制冷却することが多い。以上のような理由から、断熱面が、変態温度以上の初期

温度から変態温度以下の任意温度まで降下する間の平均熱伝達率を求めることは、実用上重要である。

4.2.1 噴射水量と平均熱伝達率との関係

4.1.3 に記述したように、スプレの噴射水量 W と熱伝

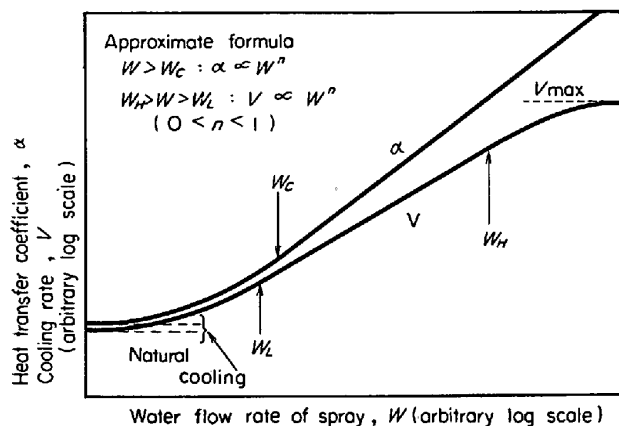


Fig. 10. General patterns between water flow rate and heat transfer coefficient and cooling rate.

達率 α との間には、Fig. 10 に示すように、 W がある一定値（以下臨界水量 W_c と記述）以上になると、 $\alpha \propto W^n$ の関係が存在し、 $W < W_c$ の範囲内では、 W が減少

するにつれて、 α は自然冷却時($W = 0$)の値に近づく。

一方、固体表面から周囲への伝達熱量 q_1 は、

$$q_1 \propto \alpha \cdot \Delta\theta \quad \text{.....(11-a)}$$

($\Delta\theta$ = (固体表面温度) - (周囲温度))

固体内の伝導熱量 q_2 は、

$$q_2 \propto \lambda \cdot \partial\theta/\partial x \quad \text{.....(11-b)}$$

($\partial\theta/\partial x$: 固体内の温度勾配)

である。冷却面近傍の $\partial\theta/\partial x$ を用いると、熱流の連続の式から、

$$q_1 = q_2 \quad \text{.....(11-c)}$$

となる。ここで λ と $\partial\theta/\partial x$ は有限であるから、 q_2 も q_1 も有限となる。それゆえ、 W がある大きさ以上になると W をふやすことによって、 α は大きくなるが、それにつれて $\Delta\theta$ が小さくなり、結局、周囲への伝達熱量は、あまり増加しないわけである。このことは、冷却速度 V に上限が存在することを示す。

断熱面（断熱面—冷却面間距離は14 mm）が、初期温度から任意温度まで降下する間の平均熱伝達率 $\bar{\alpha}_{0/4}$ の測定結果の一部を Fig. 11 に示す。この例や他のデータから、スプレ冷却においては、 W_c が約 $5 \times 10^{-4} \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$ であること、 $W_c < W$ の範囲内では $\bar{\alpha}_{0/4}$ (初期温度

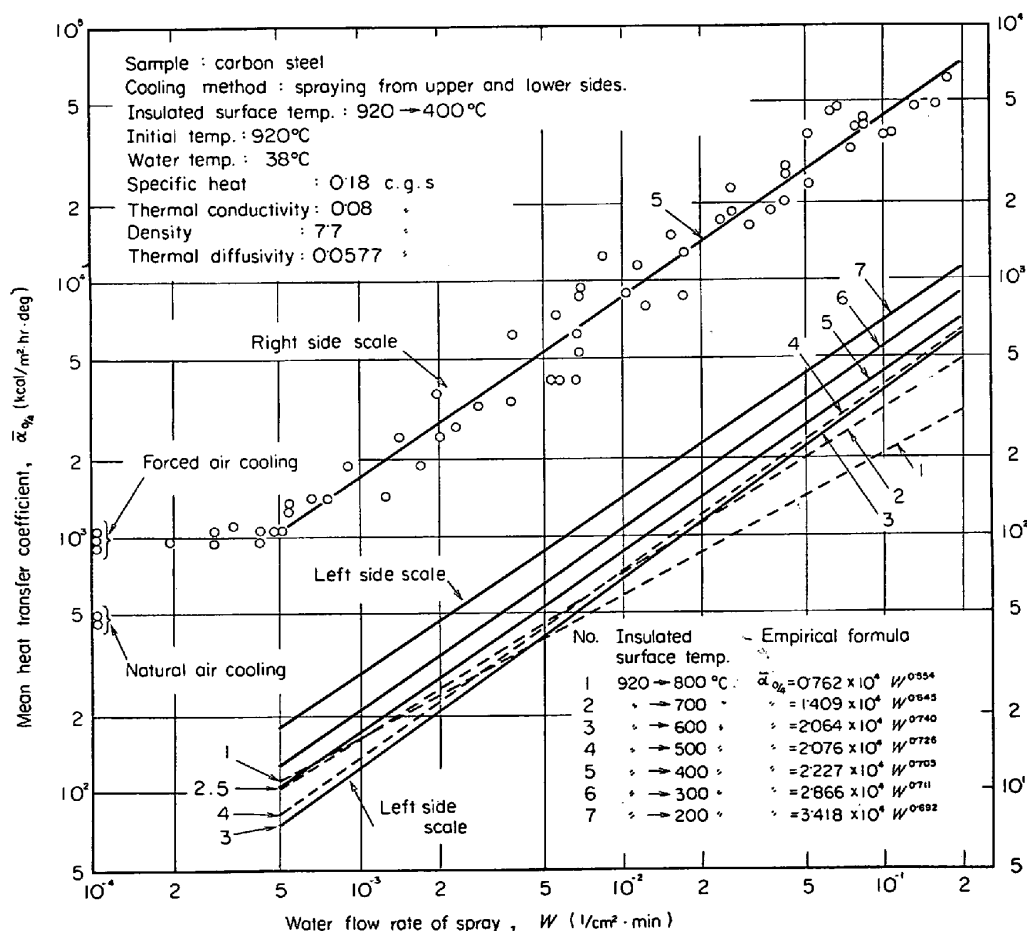


Fig. 11. Relation between water flow rate and heat transfer coefficient.

Table 2. C and n in empirical formula $\overline{\alpha_{0/4}} = CW^n$.

Group*)	Insulated surface temperature (°C)	Most probable value		C when n is constant	
		n	C	$n=0.65$	$n=0.70$
A	920 → 200	0.73 ₁	$4.85_0 \times 10^4$	$5.28_2 \times 10^4$	$4.23_5 \times 10^4$
	" → 300	0.74 ₀	$3.78_7 \times "$	$3.96_7 \times "$	$3.18_1 \times "$
	" → 400	0.74 ₀	$3.00_7 \times "$	$3.14_0 \times "$	$2.51_7 \times "$
	" → 500	0.75 ₁	$2.67_5 \times "$	$2.66_9 \times "$	$2.14_0 \times "$
	" → 600	0.76 ₇	$2.69_9 \times "$	$2.50_3 \times "$	$2.00_7 \times "$
	" → 700	0.66 ₈	$1.80_8 \times "$	$2.61_8 \times "$	$2.09_9 \times "$
	" → 800	0.57 ₉	$1.01_4 \times "$	$2.16_0 \times "$	$1.73_2 \times "$
B	920 → 200	0.69 ₂	$3.41_8 \times 10^4$	$4.42_1 \times 10^4$	$3.54_4 \times 10^4$
	" → 300	0.71 ₁	$2.86_6 \times "$	$3.39_9 \times "$	$2.72_5 \times "$
	" → 400	0.70 ₅	$2.22_7 \times "$	$2.71_4 \times "$	$2.17_6 \times "$
	" → 500	0.72 ₆	$2.07_6 \times "$	$2.31_1 \times "$	$1.85_3 \times "$
	" → 600	0.74 ₀	$2.06_4 \times "$	$2.16_2 \times "$	$1.73_4 \times "$
	" → 700	0.64 ₅	$1.40_9 \times "$	$2.24_2 \times "$	$1.79_8 \times "$
	" → 800	0.55 ₄	$0.76_2 \times "$	$1.81_5 \times "$	$1.45_5 \times "$
C	920 → 200	0.66 ₀	$2.47_6 \times 10^4$	$3.68_2 \times 10^4$	$2.95_2 \times 10^4$
	" → 300	0.67 ₈	$2.07_5 \times "$	$2.85_5 \times "$	$2.28_9 \times "$
	" → 400	0.68 ₈	$1.72_4 \times "$	$2.27_2 \times "$	$1.82_1 \times "$
	" → 500	0.70 ₄	$1.57_2 \times "$	$1.92_4 \times "$	$1.54_2 \times "$
	" → 600	0.71 ₄	$1.52_6 \times "$	$1.79_1 \times "$	$1.43_6 \times "$
	" → 700	0.60 ₉	$0.96_8 \times "$	$1.79_9 \times "$	$1.44_3 \times "$
	" → 800	0.53 ₃	$0.60_6 \times "$	$1.58_3 \times "$	$1.26_9 \times "$
D	920 → 200	0.66 ₇	$2.83_7 \times 10^4$	$4.10_3 \times 10^4$	$3.29_0 \times 10^4$
	" → 300	0.69 ₀	$2.56_3 \times "$	$3.34_4 \times "$	$2.68_1 \times "$
	" → 400	0.70 ₆	$2.31_6 \times "$	$2.81_5 \times "$	$2.25_7 \times "$
	" → 500	0.73 ₅	$2.43_2 \times "$	$2.59_3 \times "$	$2.07_9 \times "$
	" → 600	0.76 ₇	$2.81_1 \times "$	$2.60_9 \times "$	$2.09_2 \times "$
	" → 700	0.69 ₅	$2.33_5 \times "$	$2.97_4 \times "$	$2.38_5 \times "$
	" → 800	0.66 ₇	$1.83_5 \times "$	$2.64_9 \times "$	$2.12_4 \times "$

*) Group A : $C=0.20$, $\lambda=0.08$, $\rho=7.7$, $a=0.0519_5$ " B : $C=0.18$, $C=0.08$, $C=7.7$, $C=0.0577_2$ " C : $C=0.16$, $C=0.08$, $C=7.7$, $C=0.0649_4$

" D : Using temperature compensated values

[C]=cal/g·deg, [λ]=cal/cm·sec·deg, [ρ]=g/cm³, [a]=cm²/sec**) [$\alpha_{0/4}$]: kcal/m²·hr·deg, [$\overline{W}$]=l/cm²·minは 920°C) と W との間には, (12) 式の関係の存在する

$$\overline{\alpha_{0/4}} = CW^n \quad \dots\dots\dots (12)$$

ことがわかる. $W_C < W$ の範囲にある 50 個のデータを用いて, (12) 式の C と n を求め, Table 2 に示す. なお $\overline{\alpha_{0/4}}$ の算出に際しては, 鋼の物性値として,

方法	比熱	熱伝導率	密度	温度伝導率
A	0.20	0.08	7.7	0.0519 ₅
B	0.18	0.08	7.7	0.0577 ₂
C	0.16	0.08	7.7	0.0649 ₄

単位は
C.G.S

D 試料の温度に応じて補正した物性値を使用

の 4 通りを用いた. W の指数 n は, Fig. 12 に示すように, 0.65~0.75 であり, 断熱面温度が 600°C 以上では急減する. これは, 4.1.3 とほぼ同じ傾向であり, また, 同じ理由によるものと思われる.

次に, 冷却面と断熱面温度について求めた平均熱伝達

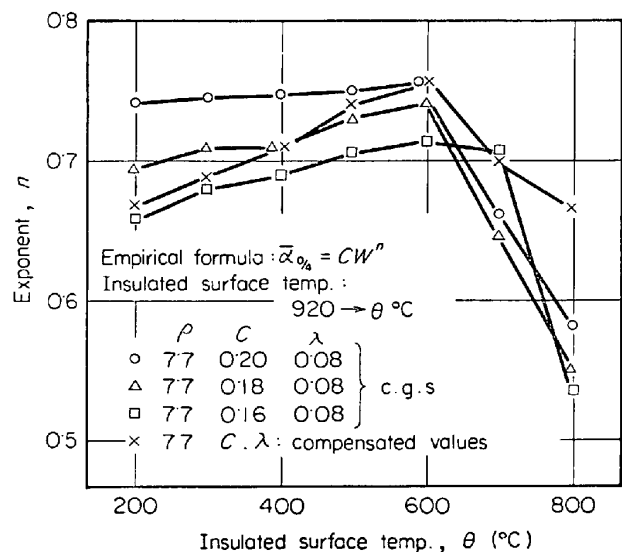


Fig. 12. Relation between temperature region and exponent of water flow rate of spray.

率 $\overline{\alpha}_{4/4}$ と $\overline{\alpha}_{0/4}$ を比較すると,

温度範囲	$W=1$ $\times 10^{-3}$	$W=1$ $\times 10^{-2}$	$W=1$ $\times 10^{-1}$
920 →(500~600)°C	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\alpha}_{0/4} \\ \overline{\alpha}_{4/4} \end{array} \right. \begin{array}{l} 130 \sim 140 \\ \text{約 } 140 \end{array}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{約 } 700 \\ \text{約 } 600 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{約 } 3700 \\ \text{約 } 2700 \end{array} \right.$
920 →(200~300)	$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\alpha}_{0/4} \\ \overline{\alpha}_{4/4} \end{array} \right. \begin{array}{l} 200 \sim 300 \\ \text{約 } 210 \end{array}$	$\left\{ \begin{array}{l} 1100 \\ \text{約 } 950 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5500 \\ \text{約 } 4000 \end{array} \right.$

であり, $\overline{\alpha}_{0/4}/\overline{\alpha}_{4/4}$ は, $W=1 \times 10^{-3}$ のときはほぼ 1.0 であるが, W が增大するにつれて, 1.0 より大きくなる. これは, W が增大するにつれて, 断熱面と冷却面の温度差が大きくなり, すなわち, $\overline{W}=1 \times 10^{-3}$ では 10~30, $\overline{W}=1 \times 10^{-2}$ では 50~80, $W=1 \times 10^{-1}$ では 100~300 deg となるから, 断熱面は高温でも冷却面は熱伝達の大きい温度範囲に達しているためである. それゆえ $\overline{\alpha}_{0/4}$ の使用に際しては, W の大きさに十分注意しなければならない.

次に, 温度範囲によって, (12) 式の W の指数 n が異なるのでは, 使用にさいして不便であるから, $n=0.65$ と 0.70 (一定値) について定数 C を求め, Table 2 に示す. この表から, 当然のことではあるが, 断熱面温度が低くなるにつれて, $\overline{\alpha}_{0/4}$ の増大することがわかる.

4.2.2 冷却水々温と熱伝達率との関係

スプレの水温と熱伝達率との関係は, 沸騰状態が関係するから, かなり複雑になることが予想される. すなわち, 沸騰するときの熱伝達率 α_{total} は, 近似的に (13)

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_{\text{subcool}} + \alpha_{\text{boil}} + \alpha_{\text{rad}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式で表わすことができる. ここで, α_{subcool} は水滴の昇温, α_{boil} は水滴の沸騰, α_{rad} は蒸気膜を通してのふく射による熱伝達率を表わす. (13) 式において, 水滴の温度は, α_{subcool} の項に影響するわけだから, α_{total} は, $\alpha_{\text{subcool}} \ll \alpha_{\text{boil}}$ または $\alpha_{\text{subcool}} \ll \alpha_{\text{rad}}$ なら, サブクール温度差の影響を受けず, $\alpha_{\text{subcool}} \approx \alpha_{\text{boil}} \approx \alpha_{\text{rad}}$ なら, サブクール温度差の影響を受ける.

今回のスプレ実験では, 水温と熱伝達率との関係を求めなかつたから, 以前行なつた実験結果を用いて, 両者の関係を調べる. 40φ×150 mm の 18-8 鋼を扁平スプレ (連続鑄造二次冷却用) で冷却した実験⁹⁾によると噴出直前の水温と熱伝達率との関係は, Fig. 13 で示される. この実験の条件は, 試料の初期温度が 1000±20°C, 噴出圧力が 2~5 kg/cm², ノズル-試料間距離が 100 mm, 熱伝達率は冷却開始から 9 sec 間の平均値である. 9 sec 後の試料中心温度は, 870~950°C あつたから冷却面温度は 500~700°C であつたと推定される. それゆえ, 冷却面における水滴の状態は, 水温が低いときには, 水滴が飽和温度まで昇温しないうちに冷却面から追

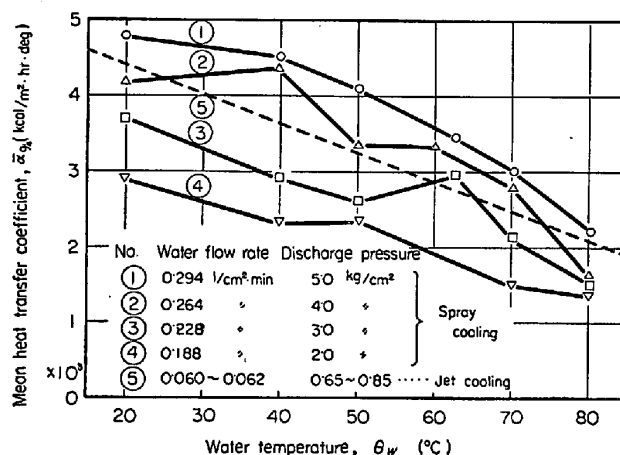


Fig. 13. Relation between water temperature in spraying nozzle and heat transfer coefficient.

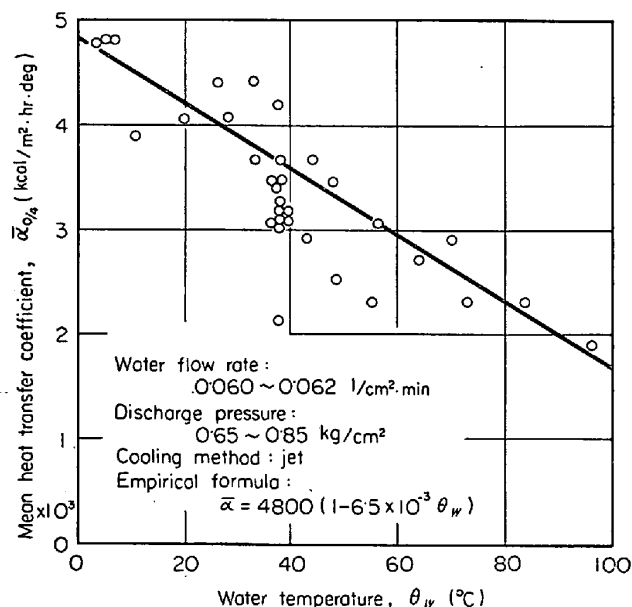


Fig. 14. Relation between water temperature and heat transfer coefficient.

い払われたり, 水温が高いときには, 飽和温度には達しても, 次々に噴射される水滴によって安定な蒸気膜がなかなか形成されない状態にあつたものと考えられる. Fig. 13 によると, 水温が上昇 (サブクール温度差が減少) するにつれて, 熱伝達率が小さくなっているが, これは (13) 式の α_{subcool} が減少するためと考えられる.

つぎに, 今回と同じ試料をジェット冷却したときの水温と熱伝達率との関係を Fig. 14 に示す⁹⁾¹⁰⁾. この実験の条件は, 初期温度が 920°C, 噴出圧力が 0.5~0.9 kg/cm², ノズル-試料間距離が 100 mm, 熱伝達率は断熱面温度 (両面冷却) が初期温度から 500°C まで降下する間の平均値である. 断熱面が 500°C まで降下する所要時間は 25~31 sec, そのときの表面温度は 170~280

°C であつたから、この熱伝達率には、ジェットが直接当たる部分と当たらない部分、核沸騰と膜沸騰の状態などがすべて含まれている。それゆえ、 $W=0.060\sim0.062$ l/cm²·min のジェット冷却の熱伝達率が、 $W=0.23\sim0.26$ l/cm²·min のスプレ冷却（冷却面温度は 1000→(500~700)°C）の値とほぼ等しくなつたものと考えられる。

さて、水温 θ_w と熱伝達率 α との関係は、Fig. 13 と Fig. 14 から、近似的に(14)式で表わせる。 K の値は、

$$\alpha \propto (1 - K\theta_w) \quad (14)$$

スプレ冷却： $K=5\sim8\times10^{-3}$ °C⁻¹

ジェット冷却： $K=6\sim8\times10^{-3}$ °C⁻¹

である。(14)式から、 α_{subcool} , α_{boil} , α_{rad} の大きさを比較することはできないが、水温の影響がかなり大きいことから、 α_{total} に対する α_{subcool} の貢献割合が大きいことは推定できる。(14)式は、冷却面が上記の状態のときに得られた式だから、これを使用するに際しては、条件を十分吟味しなければならない。

4.3 物性値と熱伝達率との関係

ある温度範囲の平均熱伝達率 $\bar{\alpha}$ を求めるとき、試料の物性値の選び方によつて、得られる値が異なることはすでに記述した。たとえば、計算に用いる物性値の値と得られる $\bar{\alpha}$ との関係は、Fig. 15 のようになる。この図において、計算に用いる平均比熱と平均熱伝導率を $\bar{C}_c$ と $\bar{\lambda}_c$ 、得られる $\bar{\alpha}$ を $\bar{\alpha}_c$ とし、真実の値を $\bar{C}_r$, $\bar{\lambda}_r$, $\bar{\alpha}_r$ とすると、Fig. 15 から、

$$\begin{aligned} \text{A: } \bar{\lambda}_c = \bar{\lambda}_r \text{ のときには } & \begin{cases} \text{a: } \bar{C}_c > \bar{C}_r \text{ なら } \bar{\alpha}_c > \bar{\alpha}_r \\ \text{b: } \bar{C}_c < \bar{C}_r \text{ なら } \bar{\alpha}_c < \bar{\alpha}_r \end{cases} \\ \text{B: } \bar{C}_c = \bar{C}_r \text{ のときには } & \begin{cases} \text{a: } \bar{\lambda}_c > \bar{\lambda}_r \text{ なら } \bar{\alpha}_c < \bar{\alpha}_r \\ \text{b: } \bar{\lambda}_c < \bar{\lambda}_r \text{ なら } \bar{\alpha}_c > \bar{\alpha}_r \end{cases} \end{aligned}$$

となる。この理由としては、A-a の場合には、熱容量すなわち一定時間内の流出熱量が実際以上に大きいとみなすのだから、 $\bar{\alpha}_c > \bar{\alpha}_r$ となり、B-a の場合には、試料内の熱抵抗を実際以上小さく、すなわち、冷却面温度を実際以上高くみなすのだから、 $\bar{\alpha}_c < \bar{\alpha}_r$ となる。

炭素鋼を冷却する場合、変態熱を放出する温度範囲では、一般的に、 $\bar{C}_c < \bar{C}_r$ となるから、 $\bar{\alpha}_c < \bar{\alpha}_r$ となる。鋼の温度に対応する鋼の熱容量は、鋼の成分や冷却速度によつて複雑に変わり、その上、これらの関係は定量化されていないから $\bar{\alpha}$ を求めるにさいして、熱容量の取り扱い方による誤差はさけられない。それゆえ、 $\bar{\alpha}$ を用いる場合には、算出時に用いた仮定や物性値の値に十分注意しなければならない。

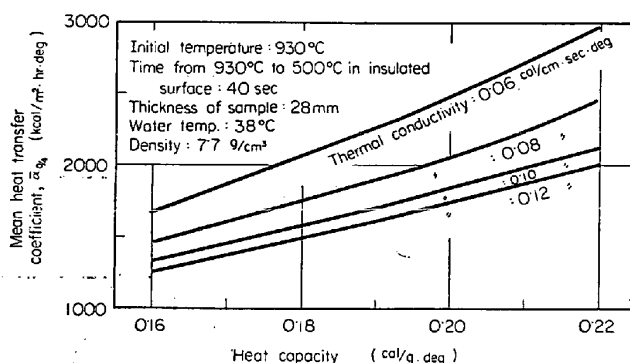


Fig. 15. Relation between heat capacity and thermal conductivity of sample and mean heat transfer coefficient.

5. 実験結果および考察(II)… 冷却速度について

熱伝達率の算出に用いた実験データを使つて、噴射水量 W 、試料中央温度 θ_i （試料厚さ 28 mm、両面冷却）、冷却水・水温 θ_w が鋼板の冷却速度 V に与える影響を調べた。 V は(15)式から求め、 $\Delta\theta_i \leq 50^\circ\text{C}$ のときの V

$$V = \frac{\theta_i(t + \Delta t/2) - \theta_i(t - \Delta t/2)}{(t + \Delta t/2) - (t - \Delta t/2)} = \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} \quad (15)$$

を微分冷却速度 V' 、 $\Delta\theta_i \geq 100^\circ\text{C}$ のときの V を平均冷却速度 $\bar{V}$ と呼ぶことにした。

5.1 微分冷却速度について

5.1.1 鋼板温度と微分冷却速度との関係

スプレの噴射水量 W が 5.9×10^{-3} l/cm²·min で、初期温度が異なるときの θ_i と V' との関係を Fig. 16 に示す。この図から、i) V' は $\theta_i = 200 \sim 450^\circ\text{C}$ の範囲で特に大きいこと、ii) V' は $\theta_i = 550 \sim 700^\circ\text{C}$ の範囲で小さいこと、iii) V' と θ_i との関係は、初期温度にほとんど関係しないこと、iv) $W = 0$ 、すなわち自然冷却や強制空冷の V' は、 θ_i が低くなるにつれて、単調に減少することなどがわかる。i) については、 θ_i と θ_s との関係が、

θ_i (°C)	200	300	400	500
θ_s (°C)	170~180	260~270	360~370	460~475

であるから、 $\theta_i = 200 \sim 450^\circ\text{C}$ のときには、 $\theta_s = 170 \sim 420^\circ\text{C}$ であり、水滴が核沸騰や不安定な膜沸騰の状態にあるため V' が大きく、ii) については、この温度範囲では、水滴が膜沸騰の状態にあり、その上、変態熱が放出されるため、 V' が小さいものと考えられる。iii) については、試料から周囲への伝達熱量が、水滴の沸騰状態に強く影響されるため、初期温度の影響はほとんど現われないものと考えられる。iv) については、 $W = 0$ の場合には、水滴の沸騰による熱伝達がなく、ふく射と対流

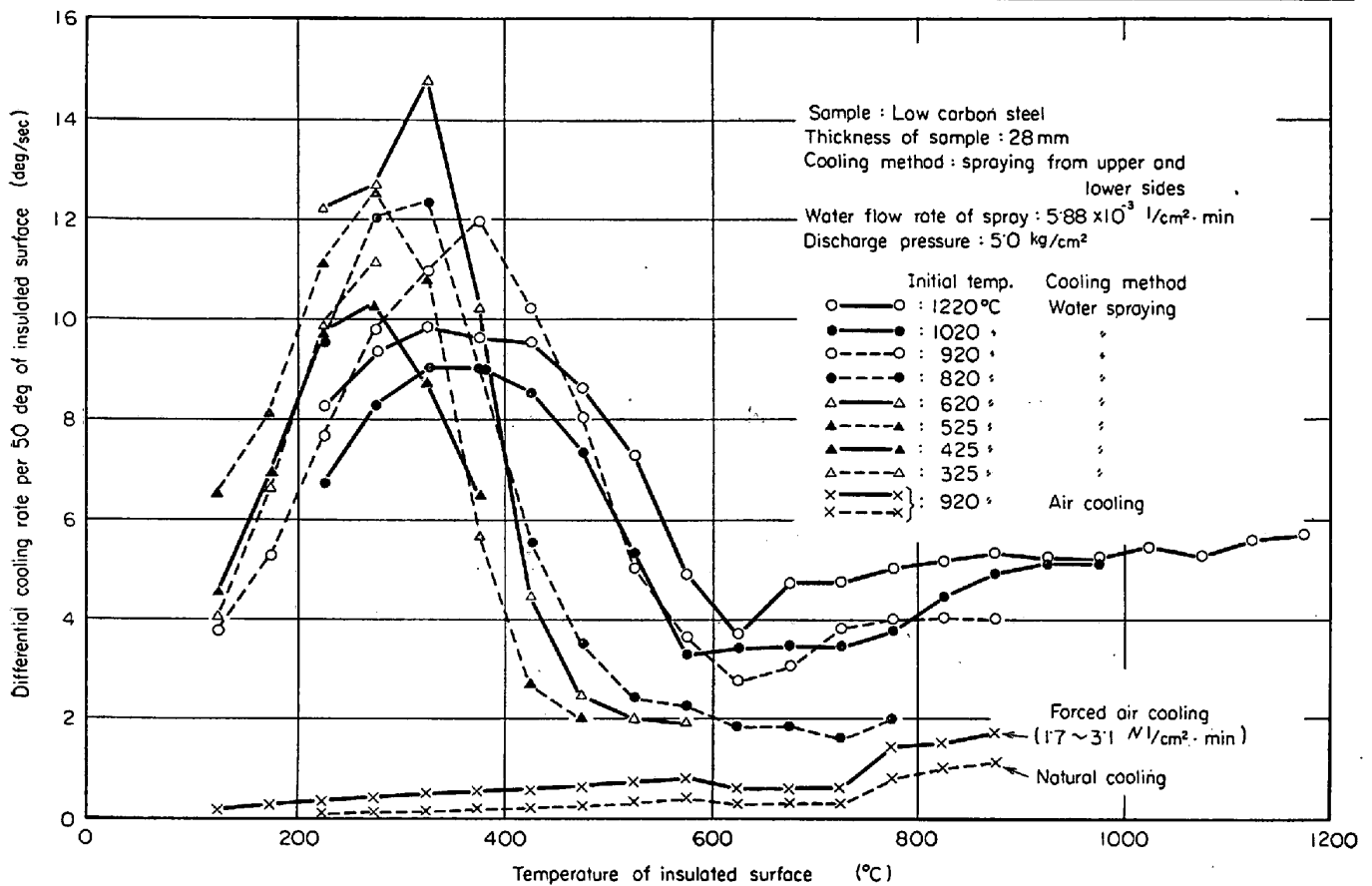


Fig. 16. Effect of sample temperature on the cooling rate.

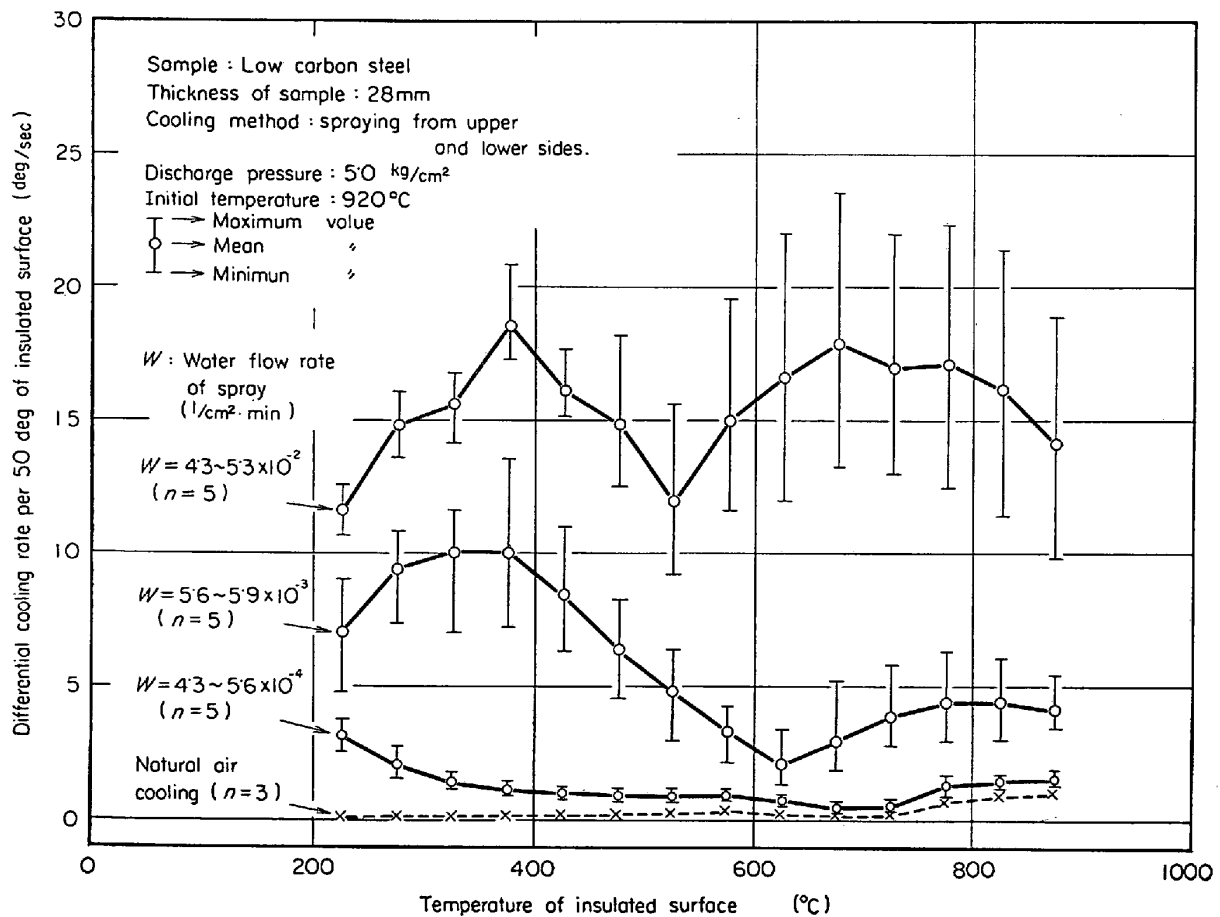


Fig. 17. Influence of water boiling and transformation heat of steel on the cooling rate.

によつて、周囲への熱伝達が行なわれるから、 θ_i が降下するにつれて V' も小さくなるわけである。以上の結果から、鋼を水冷するときには、鋼の温度が $400\sim 500^\circ\text{C}$ に達してから行なうのがもつとも効率のよいことがわかる。

5.1.2 噴射水量と微分冷却速度との関係

Fig. 17 に示す噴射水量 W と微分冷却速度 V' との関係から、 V' は W と試料温度に強く影響されることがわかる。これは熱伝達率 (Fig. 5) と試料の熱容量 (Fig. 6) から推測できる。すなわち、試料からの放散熱量 q は、近似的に (11-a) 式で表わされ、 $W=43\sim 53\times 10^{-3} \text{ l/cm}^2\cdot\text{min}$ の場合には、冷却面の温度 θ_s が高くなるにつれて、 α' が単調に減少するから q もある温度範囲で特異な変化をすることはない。それゆえ、 V' は変態熱の放出温度範囲で急減するわけである。 $W=5.6\sim 5.9\times 10^{-3}$ の場合には、 θ_s が 400°C 以下になると、 θ_s が降下するにつれて α' が急増するから V' も断熱面温度 θ_i が降下するにつれて急増するわけである。このときも、変態熱の放出温度範囲で V' は小さくなる。 $W=0.43\sim 0.56\times 10^{-3}$ の場合には、核沸騰域において、気化する能力より W が少ないため、 θ_i が 300°C 以下になつても、 V' は若干増加するにすぎない。

次に V' が特に小さくなる温度範囲、すなわち変態熱の放出温度範囲と W との関係は

$W(\text{l/cm}^2\cdot\text{min})$	0	4.3~	5.6~	4.3~
		5.6×10^{-4}	5.9×10^{-3}	5.3×10^{-2}

$\theta_i(^{\circ}\text{C})$ 650~750 650~750 600~650 500~550

$\theta_s(^{\circ}\text{C})$ 630~740 620~720 530~600 300~370

であり、 W が大きくなるにつれて、すなわち V' の増大につれて、変態熱放出温度は低温側にずれることが認められる。

5.2 平均冷却速度について

5.2.1 噴射水量と平均冷却速度との関係

Fig. 10 に示したように、噴射水量 W が多くなると、冷却速度 V は増大するが、 $W\rightarrow\infty$ と $W\rightarrow 0$ の場合には、板厚に応じた一定値に近づく。一方、 W と熱伝達率との関係から、 $W=W_i\sim W_H$ の範囲内では、近似的に V は

$$V = CW^n \dots\dots\dots (16)$$

$$(0 < n < 1)$$

(16) 式で表わせることが推測できる。

厚さ 28 mm の炭素鋼板を、 920°C からスプレ冷却したときの W と平均冷却速度 $\bar{V}_{800\rightarrow 300}$ (断熱面が 800°C から 300°C まで降下する間の平均冷却速度) との関係を図 18 に示す。この図や他のデータから、 $W_L=$

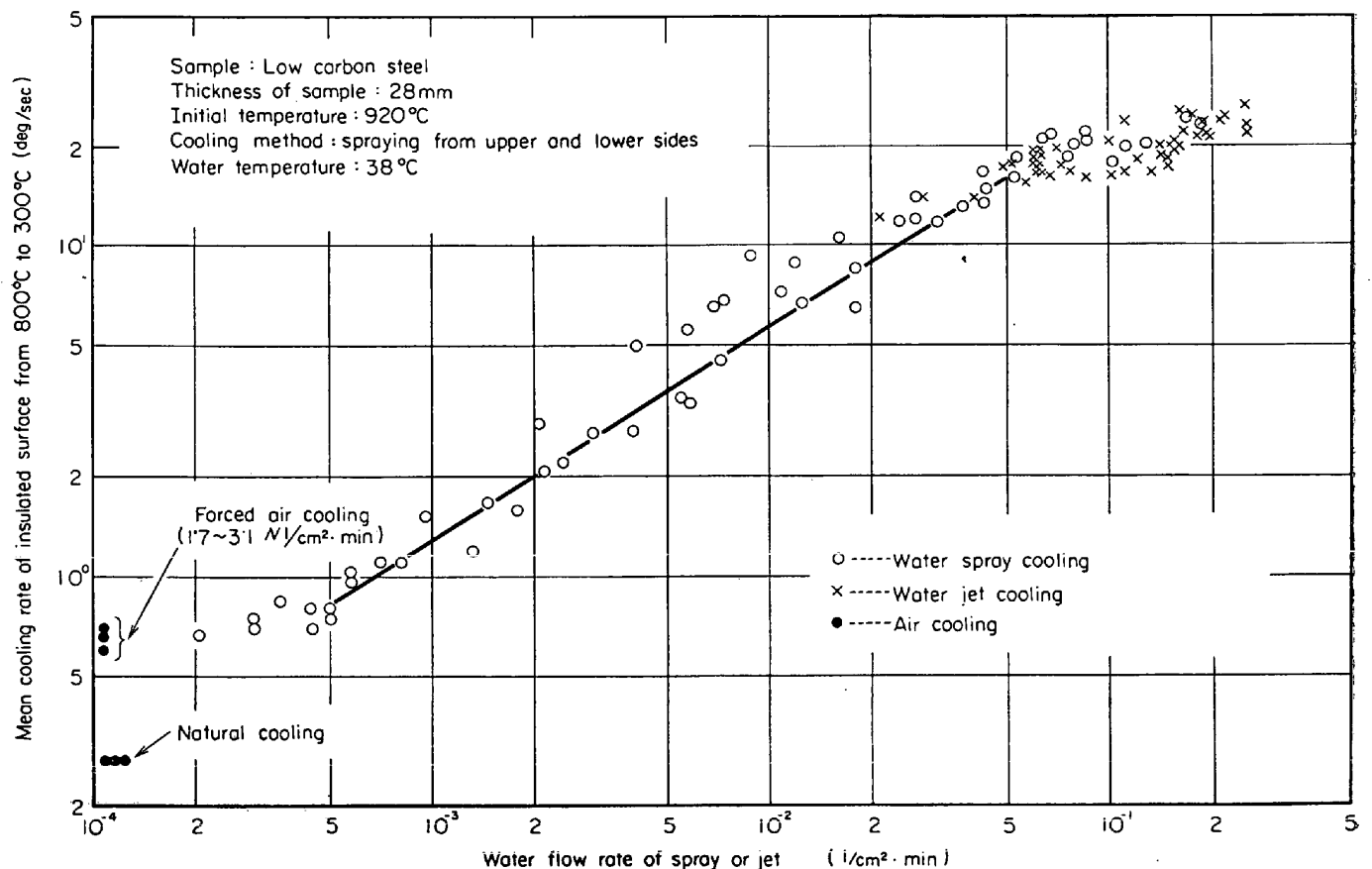


Fig. 18. Experimental result of spray and jet cooling.

Table 3. Most probable C and n values in empirical formula $\bar{V}_{800 \rightarrow \theta} = CW^n$.

Insulated surface temp. ($^{\circ}\text{C}$)	C	n
800 $\rightarrow$ 200	$0.76_9 \times 10^2$	0.55_2
" $\rightarrow$ 300	$0.93_2 \times "$	0.59_9
" $\rightarrow$ 400	$0.97_9 \times "$	0.62_7
" $\rightarrow$ 500	$1.11_3 \times "$	0.66_7
" $\rightarrow$ 600	$1.37_5 \times "$	0.71_3
" $\rightarrow$ 700	$1.09_7 \times "$	0.62_1

* Thickness of carbon steel plate : 28 mm

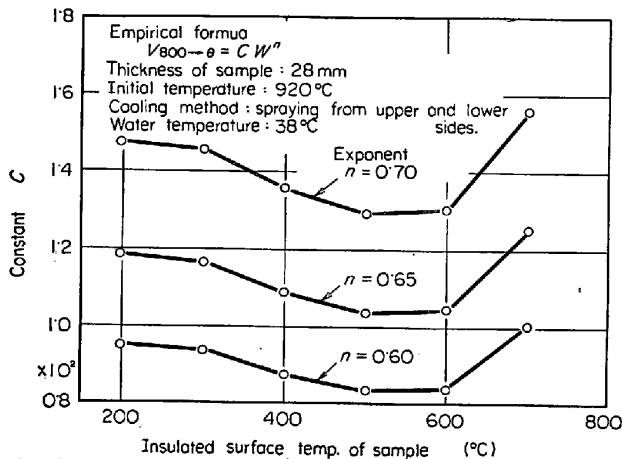


Fig. 19. Relation between exponent and constant in empirical formula.

5×10^{-4} , $W_H = 8 \times 10^{-2} \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$ であることがわかる. $W = W_L \sim W_H$ の範囲について, (16) 式の C と n を求め, Table 3 に示す. この表から, n は $0.55 \sim 0.70$ であること, θ_i と n との関係は Fig. 9 とほぼ同じであること, また, それらの理由も, 熱伝達率の場合と同じであることがわかる. n を一定にした場合の C の値を Fig. 19 に示す. この図によると $\bar{V}_{800 \rightarrow \theta_i}$ は $\theta_i = 450 \sim 600^{\circ}\text{C}$ の範囲で小さく, これは変態熱の放出と熱伝達率の影響と考えられる.

$W > W_H$ における $\bar{W}$ と $\bar{V}$ との関係を調べるため, ジェット冷却⁹⁾のデータを, Fig. 18 に加えた. Fig. 18 から, 冷却方法の異なる場合の $\bar{V}$ を $\bar{W}$ についてプロットすると, 同じ線上に乗ること, $\bar{V}_{800 \rightarrow 300}$ は, $W > W_H$ においては, 最大値 $32 \sim 38^{\circ}\text{C/sec}$ に, $W < W_L$ においては, 自然冷却時の値 0.28°C/sec に近づくことがわかる.

5.2.2 冷却水々温と平均冷却速度との関係

今回のスプレ冷却実験では, 冷却水々温 θ_W と平均冷却速度 $\bar{V}$ との関係は測定しなかつたので, 厚さ 28 mm の鋼板を上下面からジェット冷却⁹⁾したときの結果 (Fig. 20) を用いて検討する. なお, 実験条件については, 4.2.2 を参照されたい. Fig. 20 によると, θ_W と $\bar{V}$ と

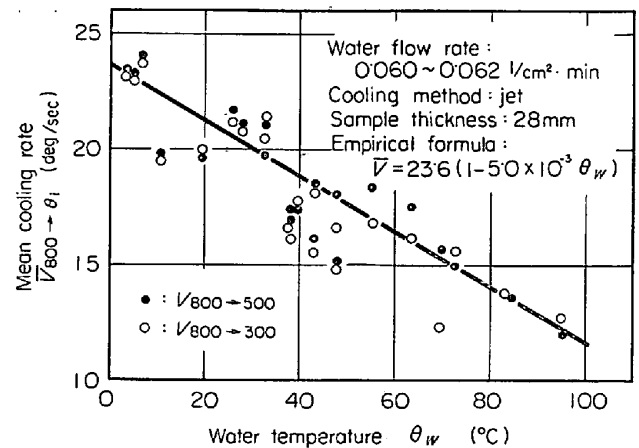


Fig. 20. Relation between water temperature and cooling rate.

の関係は, θ_W と $\bar{\alpha}$ とのそれと類似しており, 定量的に

$$\bar{V} \propto (1 - K\theta_W) \quad (17)$$

は, (17) 式で表わすことができ, K の値は $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$ である. スプレ冷却においても, W が多いときには, (17) 式のようなものと考えられるが, W が少ないときには (17) 式の形そのものが異なることも考えられる.

6. む す び

初期温度 920°C , 寸法 $28 \times 220 \times 220 \text{ mm}$ の炭素鋼板を水平に保持して, 水温 38°C , 噴出圧力 $2.0 \sim 5.5 \text{ kg/cm}^2$ のスプレ (一部ジェット) で上下面から冷却した結果, つぎのことがわかった.

6.1 熱伝達率について

i) 噴射水量 W と熱伝達率 α' との間には, $\alpha' \propto W^n$ の関係があり, n は $0.5 \sim 0.8$ と $0.3 \sim 0.4$ のグループに分かれること.

ii) i) の関係は, スプレ冷却も乱流冷却の一種とみなせること.

iii) 冷却面温度 θ_s と α' の関係は, プール沸騰の沸騰曲線に類似していること. すなわち, α' は θ_s が 200°C 付近で極大, 600°C 以上で極小になり, 極小値は W が大きくなるにつれて, 高温側にずれること.

iv) W が少ない場合には, α' は, $\theta_s < 300 \sim 400^{\circ}\text{C}$ の範囲で特に大きいから, この温度範囲で水冷するのが非常に効果的なこと.

6.2 平均熱伝達率について

i) 噴射水量 W と平均熱伝達率 $\bar{\alpha}$ との間には, $\bar{\alpha} \propto W^n$ の関係があり, n の値は, $0.65 \sim 0.75$ であること.

ii) 冷却水々温 θ_W と $\bar{\alpha}$ との間には, $\bar{\alpha} \propto (1 - K\theta_W)$ の関係があり, W が多いときには, K の値は $5 \sim 8 \times 10^{-3}$

$^{\circ}\text{C}^{-1}$ であること.

iii) θ_w が 38°C の場合について, i) の関係を定量化したこと.

iv) $\bar{\alpha}$ を求める場合には, その算出に用いる物性値の値によつて得られる値が異なること.

v) $\bar{\alpha}$ は, 温度範囲が低温まで広がるにつれて, 大きくなること.

6.3 冷却速度について

i) 試料温度 θ と微分冷却速度 V' との関係は, W の大きさに影響されること, すなわち, V' は W が多いときには, θ の影響をあまり受けないが, W が少ないときには, $\theta < 400^{\circ}\text{C}$ の範囲で大きくなること, また $W = 0$ のときには, θ が低くなるにつれて, 単調に減少すること.

ii) W と平均冷却速度 $\bar{V}$ との間には, $W = 5 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-2} \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$ の範囲内において, $\bar{V} \propto W^n$ の関係があり, n の値は $0.6 \sim 0.7$ であること,

iii) 厚さ 28 mm の鋼板について, ii) の関係を定量化したこと.

iv) θ_w と $\bar{V}$ との間には $\bar{V} \propto (1 - K\theta_w)$ の関係がありジェット冷却の場合 ($W = 0.060 \sim 0.062 \text{ l/cm}^2 \cdot \text{min}$), K の値は $4.5 \sim 5.5 \times 10^{-3} ^{\circ}\text{C}^{-1}$ であること.

v) 冷却速度は $W \rightarrow 0$ と $W \rightarrow \infty$ の場合には, 試料の厚さに応じた一定値に近づくこと.

おわりに本研究を遂行するにあたり, 有益な助言をい

ただいた八幡製鉄所技術研究所吉田秋登, 島田道彦の両氏, 実験作業を担当していただいた福田敬爾氏および発表を許可された八幡製鉄(株)に感謝の意を表します.

文 献

- 1) 中野, 高田, 後藤, 岡: 鉄と鋼, 50 (1964) 5, p. 21
- 2) 福田, 木村, 和田: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, p. 232
- 3) 田中, 大森, 杉森: 三菱重工技報, 2 (1965) 2, p. 48
- 4) 小竹: 第5回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (1968) 5, p. 253
- 5) 戸田: ibid, p. 265
- 6) 長谷川, 越後, 竹川: 日本機械学会九州支部講演会論文集 No 68-3 (1968), p. 57
- 7) 吉田, 島田, 清水, 三塚: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, p. 631
- 8) 吉田, 島田, 三塚: 日本伝熱研究会九州グループ研究会資料 (1965. 10. 1)
- 9) 島田, 三塚: 鉄と鋼, 52 (1966) 10, p. 1640
- 10) 島田, 三塚: 鉄と鋼, 52 (1966) 10, p. 1643
- 11) WARREN, H. GIEDT (横堀, 久我訳): 基礎伝熱工学, (1960), p. 260, 丸善
- 12) M. MIKHEYEV (内田, 鎌田訳): 基礎伝熱工学, (1966), p. 229, 東京図書
- 13) 日本学術振興会編: 鉄鋼熱計算用数値, (1966), p. 20, 日刊工業
- 14) 橋: 熱伝達論(応用力学講座20), (1964), p. 40, 共立出版