

論 文

ラミナフロー冷却による高温鋼板の冷却能
に及ぼす水量効果八田 夏夫*・小門 純一*・花崎 紘一*
宅田 裕彦*²・中沢 政治*²Effect of Water Flow Rate on Cooling Capacity of Laminar Flow
for Hot Steel PlateNatsuo HATTA, Jun-ichi KOKADO, Koichi HANASAKI
Hirohiko TAKUDA, and Masaharu NAKAZAWA

Synopsis:

An experiment to examine the cooling process of a hot steel plate by the laminar water flow was carried out and the effect of the water flow rate on the cooling capacity was analytically discussed on the basis of the experimental results. The main points clarified here are as follows:

(1) The vertical distance between a nozzle exit and a cooled plate surface has almost no significant effect on the cooling capacity.

(2) The increase of the water flow rate results in the improvement of the cooling capacity. However, both the cooling capacity and the growth in black zone become saturated with the increase of the flow rate.

(3) The saturation of the cooling capacity is considered to be correlative to that of the growth in the black zone diameter.

1. 結 言

高温状態にある鋼材の水による冷却には、種々の方式が開発され、その目的に応じて冷却の方式の選定がなされている。

とくに最近では、制御圧延後の加速冷却によつて、鋼材の靱性、強度等の機械的性質を向上させることができるという報告も多くなされているように^{1)~9)}、圧延ラインにおける温度制御の重要性が認識されてきている。

一方では、省資源という立場から、できるだけ少ない水量で効果的な鋼材の冷却を実現するための努力も必要となつてきている。

水による強制冷却方式としては、ラミナフロー冷却、ジェット冷却、スプレイ冷却、ミスト冷却等に分類されている⁷⁾。これらの冷却方式のうち、ラミナフロー冷却は、局所的ではあるが、もつとも冷却速度が高い。このラミナフロー冷却方式は最終仕上げ圧延を終了した熱延鋼板を、ホットランテーブル上で冷却するのに採用されている。この場合のホットランテーブル上の冷却は熱延

鋼板自体がある決められた速度で走っているため、水のり現象が生じ、理論的な解析は困難となる。したがつて、冷却水量および循環動力の減少を目的として、ノズル配列等の詳細な検討も、おもに実験的に行われている⁹⁾。

また、400°Cから800°Cの温度範囲で加熱された3mm厚の鋼板を静止させ、その上から単一層状軸対称水流を落下させて、その冷却の挙動を実験的に調査した結果も報告されている⁹⁾。著者らも、それに準じて冷却中の温度と時間の関係を実測し、同時にブラックゾーンの成長過程をパラメータとして、その実測結果と一致するような数式モデルを見出している¹⁰⁾。

本研究では、900°Cに加熱されたステンレス鋼板を水のラミナフローによって冷却実験し、その鋼板の冷却能に及ぼす水量効果について論ずることを主題としたものである。それは冷却水量とブラックゾーン径の成長過程には何らかの関係があり、それが明確にならない限り、既報の数式モデルの使用に欠かを生じているからである。また、鋼板内部の熱輸送現象が非定常であるので、経過時間に対する鋼板内部の温度変化の様子を等温線モ

昭和 56 年 7 月 27 日受付 (Received July 27, 1981)

* 京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606)

*² 京都大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyoto University)



Photo. 1. Curvature of hot steel plate with 3 mm in thickness after laminar flow cooling.

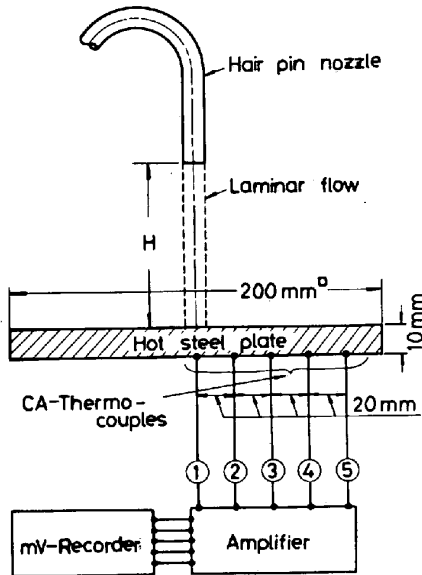


Fig. 1. Outline of the experimental apparatus and indication of temperature measuring points.

デルによつて示した。

2. 実験

2.1 実験概要

ラミナフロー冷却時の高温鋼板の温度変化の測定装置に関しては別紙¹⁰⁾で詳述しているの、ここでは簡単にその概要だけにとどめたい。

実験に使用した試料は厚さ 10 mm、一辺 200 mm の正方形の 18-8 ステンレス鋼板である。板厚を 10 mm と厚くしたのは、板厚があまりうすいと、冷却中に板がそつてしまい、衝突後の水の半径方向流れが時間的に一様でなくなるのを防ぐためである。Photo. 1 は板厚 3 mm のステンレス鋼板を 900°C に均一に加熱し、ラミナフロー冷却の実験を終了したときの板のそりの状態を、冷却前の板と対比して、示したものである。

Fig. 1 に示すように、温度計測はラミナフローの衝突面の裏側で行われ、衝突点直下の中心点①と、その点から半径方向に 20 mm の間隔で②～⑤までの合計 5 点を選んだ。それらの 5 点にアルメル・クロメル熱電対をとりつけ、増幅器を介してオシログラフによつて温度推移を記録させるようにしている。その際、各測定チャンネルは、相互間に外来電位差をもたないように、確実に分

離されている。

熱電対のついたままの鋼板を炉内温度が 900°C のガス炉に入れ、約 90 min そのままに保持する。その後、鋼板をガス炉から取り出し、冷却台の上になせ、ヘアピンノズルから水を鉛直に流して、900°C に均一に加熱された鋼板を冷却する。

また、本実験ではノズル出口と鋼板表面の間の鉛直距離、すなわち Fig. 1 に示されている H は 100 mm から 500 mm の範囲、流量 Q は 1.0 l/min から 7.0 l/min の範囲で行われた。これはノズル高さ H と流量 Q が冷却能にどの程度の影響を与えるかを調べるためである。また、ヘアピンノズルは銅製で、その内径 D は 10 mm である。

2.2 実験結果

Fig. 2～Fig. 4 は冷却水量を 3.0 l/min、5.0 l/min および 7.0 l/min としたときの測温点①～⑤ (Fig. 1 参照) の温度-時間の関係の実測結果を示したものであ

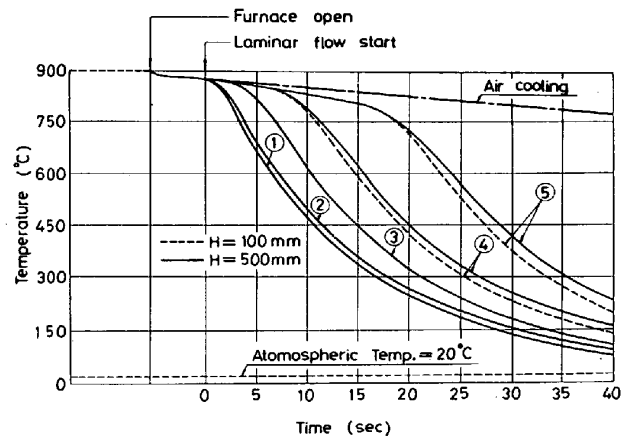


Fig. 2. Experimental result of temperature change at the points ①-⑤ shown in Fig. 1 for water flow rate 3.0 l/min.

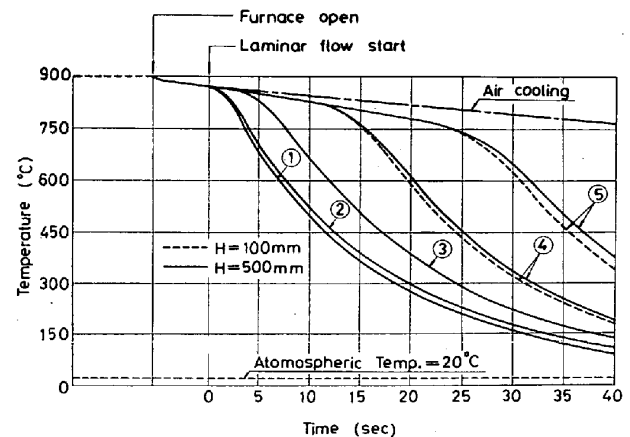


Fig. 3. Experimental result of temperature change at the points ①-⑤ shown in Fig. 1 for water flow rate 5.0 l/min.

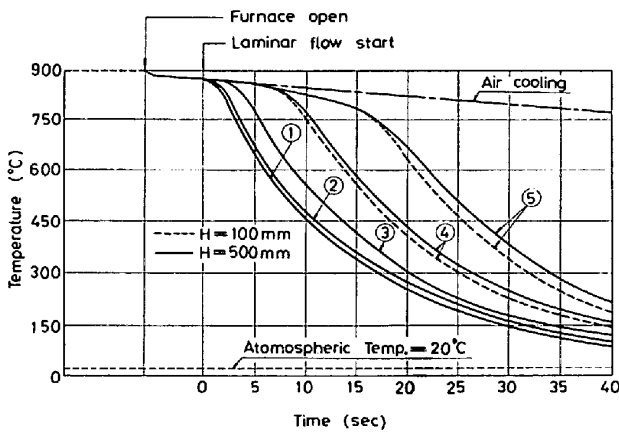


Fig. 4. Experimental result of temperature change at the points ①-⑤ shown in Fig. 1 for water flow rate 7.0 l/min.

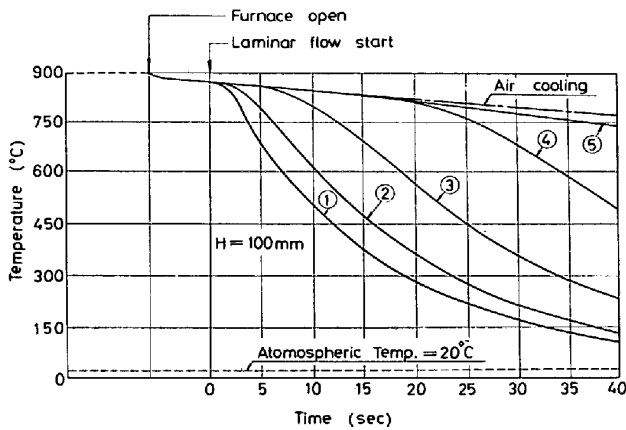


Fig. 5. Experimental result of temperature change at the points ①-⑤ shown in Fig. 1 for water flow rate 1.0 l/min.

る。実線はノズル高さ $H=500\text{ mm}$ としたときの場合で、破線は $H=100\text{ mm}$ としたときのものである。なお、一点鎖線で示されているのは自然放冷の場合の実測結果である。これらの実測結果から明らかなことは、ノズル高さによつて冷却能を左右する有意な差は認められないことである。とくに、衝突点から測温点③に至るまでの温度降下の状態は H が変化しても流量が一定であれば、温度推移にまったく変化を与えない。衝突点から遠方にある測温点④と⑤では若干の影響を与えるが、ノズル高さが低い方が冷却速度が若干大きくなる傾向にある。

また、冷却水量の多少にかかわらず、温度推移の様子は勾配のゆるい略直線状の温度降下を示し、ある時点に達すると、冷却速度が急激に大きく肩状変化を示している。この現象がもつとも速く生ずるのは測温点①であり、もつとも遅く生ずるのは測温点⑤である。この肩状のなめらかさは衝突点から離れているものほどゆるやかである。Fig. 5 は冷却水量 $Q=1.0\text{ l/min}$ 、ノズル高さ

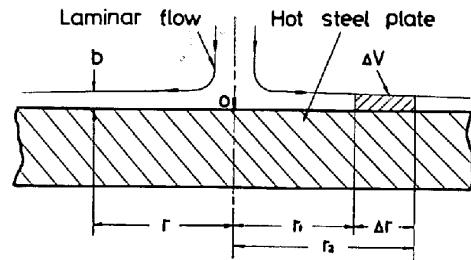


Fig. 6. Schematic view of cooling water for impinging of laminar flow with hot steel plate.

$H=100\text{ mm}$ の場合の冷却曲線であるが、その様子を非常によく表している。すなわち、測温点⑤の冷却曲線に沿つて、温度降下してきたほかの点の冷却曲線が、①、②、③、④の順に分岐している。そして、①～⑤の冷却曲線の間隔は水量が少ないほどへだたり、水量が増大するに伴つて、それぞれの冷却曲線は間隔を小さくしている。

3. 検 討

ヘアピンノズルから下方へ鉛直に落下してくるラミナフローは、水平面上に置かれた鋼板表面に衝突し、衝突点からうすい水膜を形成して半径方向に流れの向きを変える。そして、衝突点を中心とする円形のブラックゾーンが鋼板表面上に形成される。したがつて、水が鋼板表面に衝突した後も軸対称流であると考えられる。

一方、ブラックゾーン径は時間の経過とともに大きくなり、冷却水はブラックゾーン外周で沸騰する。このことから、ブラックゾーン内では水は沸点に達していないが、水温は衝突点から半径方向に進むに従つて上昇していると考えられる。ブラックゾーン径が時間の経過とともに大きくなるのは、時々刻々と冷却面が冷やされるに従つて、それだけ半径の大きい位置に来ないと水が沸点に達しないからである。

まず、ラミナフロー冷却の冷却能を考察する場合に、ノズル高さ H の影響の導入が必要であるのかどうかを検討する。Fig. 6 はラミナフローの衝突点近傍の水流の様子をモデル化したものである。いま、衝突点中心を原点 0 とし、半径 r での水流の膜厚を b 、半径方向の水流速度を v_r とする。したがつて、流量 Q は

$$Q = 2\pi r b v_r \dots\dots\dots (1)$$

で表すことができる。ここで、平田ら⁷⁾が実験的に明らかにしているように、衝突点近傍では半径方向の流速が一定であると考え、膜厚 b は半径 r のみの関数となり、つぎの式

$$b = B \frac{1}{r} \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。ここで、 B は $Q/(2\pi v_r)$ で定数と見なしてよい。Fig. 6 に示すように、半径 r_1 と r_2 の間にあるドーナツ形の部分の容積を ΔV とすると、

$$\Delta V = \frac{Q}{v_r} (r_2 - r_1) \dots\dots\dots (3)$$

となる。いま、この容積 ΔV の水が、高温鋼板から熱量 Δq をうばい、 $\Delta\theta_w$ だけ水温が上昇したとすると、

$$\Delta q = \Delta V \cdot \gamma_w \cdot \Delta\theta_w \cdot C_w \dots\dots\dots (4)$$

の関係が成り立つ。ここで、 γ_w および C_w は水の比重および比熱である。厳密には、水の膜厚方向に温度勾配ができ、鋼板と接触している部分の水温は高く、大気と接触している部分では低い。しかし、膜厚がきわめて小さいものであるとすれば、膜厚方向の温度勾配は小さく、近似的に(4)式が成り立つものとして考えてよいだろう。

つぎに、鋼板表面から水に移動する熱量を求める。その際、 $r=r_1$ と $r=r_2$ の両半径の差 Δr を小さいものとする。なぜなら、水流が $r=r_1$ から $r=r_2$ に達するまでの所要時間 Δt が小さくなるので、その間の水温の変化が近似的に無視できること、同時に Δr が小さいので、その区間での鋼板表面の温度を一定と見なせることのためである。さて、半径 r_1 と r_2 の間にある鋼板と水の接触面積は $\pi(r_2^2 - r_1^2)$ であるので、 Δt 時間中に鋼板表面から水に移動する熱量 Δq は次式で与えられる。

$$\Delta q = \alpha \pi (r_2^2 - r_1^2) (\theta_s - \theta_w) \Delta t \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 α は鋼板と水との熱伝達率、 θ_s は鋼板の表面温度、 θ_w は水温である。

さて、鋼板が水に与えた熱量を示す(5)式と水が受け取った熱量を示す(4)式は等しいので、半径 r_1 にあつたときの温度から半径 r_2 の位置に来たときの温度の差 $\Delta\theta_w$ が求められる。すなわち、

$$\Delta\theta_w = \frac{\pi \alpha (r_2 + r_1) (\theta_s - \theta_w) v_r \Delta t}{Q \gamma_w C_w} \dots\dots\dots (6)$$

となる。

つぎに、 v_r は先述したように一定としているので、

$$v_r = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r_2 - r_1}{\Delta t} \dots\dots\dots (7)$$

となる。この関係を(6)式に適用すると、

$$\Delta\theta_w = \frac{\pi \alpha (r_2^2 - r_1^2) (\theta_s - \theta_w)}{Q \gamma_w C_w} \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。

この(8)式には、ノズル高さ H によつて支配される半径方向速度 v_r が含まれていない。すなわち、ノズル高さの変化が水温の上昇に影響しないとしても差し支えない

と考える。このことは、Fig. 2~Fig. 4 に示すように、温度推移の様子は冷却水量の多少によつて変化するが、ノズル出口と鋼板表面の距離 H の大小によつてはほとんど変化しないという実験結果と一致する。

ノズル出口での水流速度 V_N とノズル高さ H によつて、衝突点での流速 V_s は

$$V_s = \sqrt{V_N^2 + 2gH} \dots\dots\dots (9)$$

によつて計算される。したがつて、ノズル高さ H を大きくすると、(9)式によつて衝突点での冷却水の流速 V_s は大きくなる。平田ら⁷⁾ はノズル径 D と Fig. 6 に示す半径 r との比 r/D が5以内であれば $v_r = V_s$ となることを明らかにしている。したがつて、ノズル高さを大きくすることは v_r を大きくすることに寄与するが、同一冷却水量の場合には、ノズル高さを低くした場合に比べて、衝突後の半径方向の水流の水膜が小さい。いま、 $Q = 5 \text{ l/min}$ の場合で、 $H = 500 \text{ mm}$ と $H = 100 \text{ mm}$ としたときの半径方向の流速 v_r と膜厚 b を比較してみる。 $H = 500 \text{ mm}$ の場合には $v_r = 3.30 \text{ m/s}$ であるのに対して、 $H = 100 \text{ mm}$ の場合には $v_r = 1.76 \text{ m/s}$ となる。半径 r が 5 cm での膜厚 b は $H = 500 \text{ mm}$ としたときには $b = 0.08 \text{ mm}$ 、 $H = 100 \text{ mm}$ のときには $b = 0.15 \text{ mm}$ となる。その両者の半径方向の流速 v_r の比は $3.30/1.76 = 1.875$ で、膜厚比は $0.08/0.15 = 1/1.875$ となる。Fig. 3 に示すように、ノズル高さを変えても、冷却曲線にほとんど差が認められない。このことは半径方向速度 v_r と膜厚 b の積 $v_r \cdot b$ によつてラミナフロー冷却能が支配されるものと考えられる。

Fig. 7(a), (b), (c) は水冷開始時の温度から各測点の温度が 600°C 、 450°C および 300°C になるまでの所要時間を、種々の流量に対して示したものである。なお、試料を炉から抽出して、水冷開始までの所要時間が約 6 s であつたので、鋼板の表面温度はその間に約 40°C 降下している。これらの図によると、衝突点直下(測点①)の温度降下の状態は流量の多少にかかわらず不変であることがわかる。これはラミナフローの衝突点から半径方向に層状の流れが生じ、衝突点から遠くなればなるほどサブクール温度差が小さくなる。それに対して、衝突点では供給される新鮮な冷却水の温度は常に等しく、サブクール温度差に変化がないからであると考えられる。

また、冷却水量が増すに従つて、ある一定の温度に達するまでの冷却時間は短縮されるが、ある限界値以上になると、冷却能を促進する効果は弱められている。本実験の場合では、冷却水量を $4 \sim 5 \text{ l/min}$ 以上にしても冷却速度を大きくする効果はほとんど認められない。

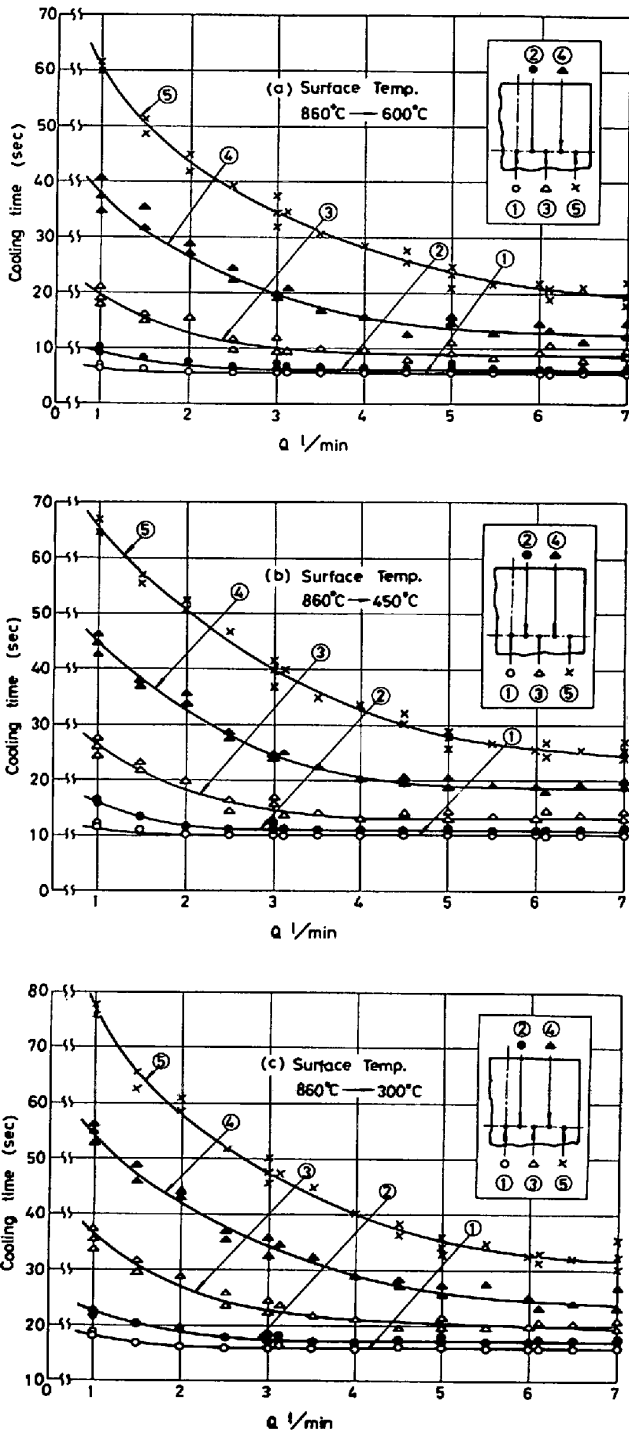


Fig. 7. Relation between water flow rate and the cooling time, during which the temperature in the measuring points ①-⑤ shown in Fig. 1 falls to 600°C (a), 450°C (b) and 300°C (c).

Fig. 8 は水冷開始後の経過時間 t とブラックゾーン半径 R_B の関係を写真撮影によつて測定した結果を点綴したものである。これによつてもわかるように、冷却水量の増大とともに、ブラックゾーン半径はより速く大きくなるが、大友⁹⁾も指摘しているように、限界がある。

Fig. 7(a), (b), (c) に示したように、ある程度の

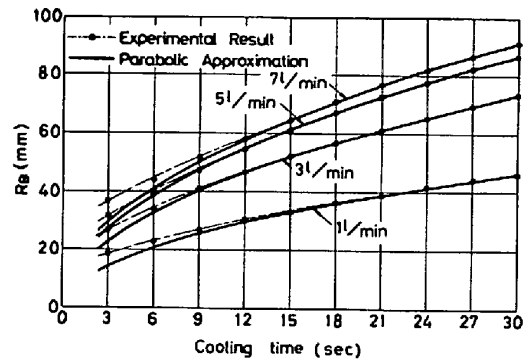


Fig. 8. Relation between the black zone radius and cooling time as parameter of flow rate.

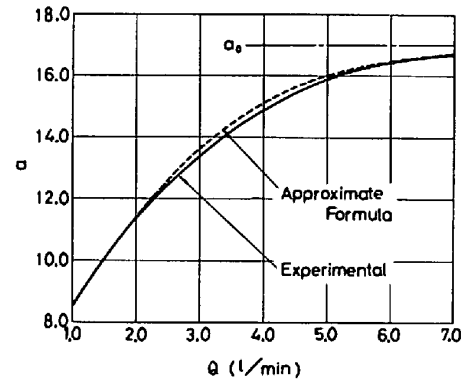


Fig. 9. Relation between flow rate and constant "a" determining growth of black zone radius.

流量に達すると、冷却速度を上げる効果がほとんどなくなり、Fig. 8 に示すように、ブラックゾーン径の大きさにも限界を生じている。すなわち、ブラックゾーン径の成長速度の遅速は、ラミナフロー冷却の冷却能の評価を決定する大きな要素の一つであると考えることができる。

さて、著者らは別報¹⁰⁾によつてブラックゾーン半径 R_B が

$$R_B = a\sqrt{t} \dots\dots\dots (10)$$

によつて近似できることを示した。ここで、 a は比例定数であるが、流量によつて異なる。Fig. 8 に示されている実線は測定結果を(10)式に示されている形に放物近似したときのブラックゾーン半径と冷却時間の関係を図に示したものである。その際、種々の流量に対して、比例定数 a が得られる。

Fig. 9 は流量 Q と比例定数 a の関係を示すものである。これからわかるように、流量が増加するに従つて、 a の値も大きくなるが、 $Q=4\sim 5$ l/min 以上になると、その増加率はさほど顕著でなくなる。

いま、Fig. 9 において、 Q の増分に対する a の増分、すなわち da/dQ の様子を調べてみる。流量 Q が 1~2 l/min 程度の少ない場合には、 Q の増加に伴つて、 a

の増加は略直線的である。しかし、流量が充分大きいと考えられるときには（極端に $Q \rightarrow \infty$ と考えると）、 a の増加はほとんどなく、 a_0 (=一定値) に飽和している。きわめて概念的ではあるが、このような現象をつぎのようなもつとも簡単と思われるロジスティック方程式 (Logistic equation)¹¹⁾ を利用して、検討してみたい。この方程式はある物量（生物でもよい）の増加率が、初期の状態から、時間経過とともに飽和してしまう現象を予測するのに用いられるものである。したがって、 Q の増加にしたがつて、 a がある一定値 a_0 に飽和する現象と類似していると考えられる。そのとき、ロジスティック方程式は簡単な微分方程式で表され、

$$\frac{da}{dQ} = ca(a_0 - a) \dots\dots\dots(11)$$

と書ける。ここで、 c は定数である。この式で相対的に小さい流量 Q が Q_1 のとき、 $a = a_1$ であるとする、

$$\left. \frac{da}{dQ} \right|_{Q=Q_1} = ca_1(a_0 - a_1) = \text{一定} (\neq 0) \dots\dots(12)$$

となる。つぎに、 Q が相対的に十分大きいとき、 $a \rightarrow a_0$ となるので、

$$\frac{da}{dQ} \rightarrow 0 \dots\dots\dots(13)$$

となる。したがって、(11)式は Q と a の関係をだまかに表現しているものと考え、(11)式の解は容易に得られ、

$$Q = \frac{1}{ca_0} \ln \frac{a}{a_0 - a} + A \dots\dots\dots(14)$$

となる。ここで、 A は積分定数であるので、 $Q = Q_1$ のとき $a = a_1$ であるとする、(14)式は次式のように書ける。

$$Q - Q_1 = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{Ka}{a_0 - a_1} \dots\dots\dots(15)$$

ここで、 $K = (a_0 - a_1)/a_1$ 、 $\alpha = ca_0$ で定数である。これから a を陽に表示すると、

$$a = a_0 \frac{\exp\{\alpha(Q - Q_1)\}}{K + \exp\{\alpha(Q - Q_1)\}} \dots\dots\dots(16)$$

となる。

いま、Fig. 9 から $a_0 = 17.0$ とする。また、 $Q = 1.0$ l/min のとき、 $a_1 = 8.5$ となるので $K = 1$ となる。Fig. 9 の破線で表示された曲線は $\alpha = 0.7$ (この値は $Q = 1.5$ l/min のとき、 $a = 10$ になるように決定) としたときの Q と a の関係である。これからわかるように、流量の多い飽和域にあるときの a と、流量の少ない増加域にあるときの a とから、中間域の Q と a の関係を見積も

つたことになっているので、幾分誤差はあるが、少なくともこの場合の誤差は無視できる程度と考える。だからといって、(16)式によつて表現された Q と a の関係式の妥当性を論証したことにはならないが、一つの目安にはなると考える。

したがって、(10)式に示されるブラックゾーン半径 R_B の一般的な表現形式は近似的に、

$$R_B = a_0 \frac{\exp\{\alpha(Q - Q_1)\}}{K + \exp\{\alpha(Q - Q_1)\}} \sqrt{t} \dots\dots\dots(17)$$

で与えられてもいいと思う。

著者らが行つた実験は、先述したように、冷却水量 Q が 1.0 l/min 以上について行つたもので、その場合の R_B は

$$R_B = 17 \frac{\exp\{0.7(Q - 1)\}}{1 + \exp\{0.7(Q - 1)\}} \sqrt{t} \dots\dots\dots(18)$$

として差し支えない。

また、(8)式において、流量 Q を無限大にすると、水温の上昇がなくなるので、水の沸騰半径で示されるブラックゾーン領域は無領域になる。このことは現象と矛盾する。その意味において、(17)式あるいは(18)式は冷却水量をいくら増加しても、冷却領域はさほど拡大されないことを示すためのものである。

4. 鋼板内部の温度推移の計算結果

ここでは、900°C に均一に加熱された 10 mm 厚のステンレス鋼板を、その上面に冷却媒体である単一層状軸対称水流を落下させることによつて冷却し、その冷却過程を鋼板の裏面で温度-時間の関係を用いて実測している。その際、鋼板裏面の温度-時間の実測結果と一致するような数式モデルを見出し、その詳細については別紙¹⁰⁾で述べている。すなわち、

1) ラミナフローによる強制冷却領域は円形で、その半径 R_w (mm) は、

$$R_w = a\sqrt{t} + b (b: \text{定数}) \dots\dots\dots(19)$$

で与えられると考えた。ここで、 $a\sqrt{t}$ は水冷開始後の時刻 t におけるブラックゾーン半径 R_B である。

2) 半径 R_w の強制冷却領域での冷却水と鋼板表面との熱伝達率 α (kcal/m²h°C) は鋼板表面温度 θ_s と水温 θ_w の差の関数とし、

$$\alpha = 500(\theta_s - \theta_w)^{1/2} \dots\dots\dots(20)$$

で与えられると考えた。なお、この数式モデルの詳細は文献(10)を参照願いたい。

さて、(19)式に示される強制冷却半径 R_w を支配する比例定数 a は、すでに述べたように、冷却水量 Q によつ

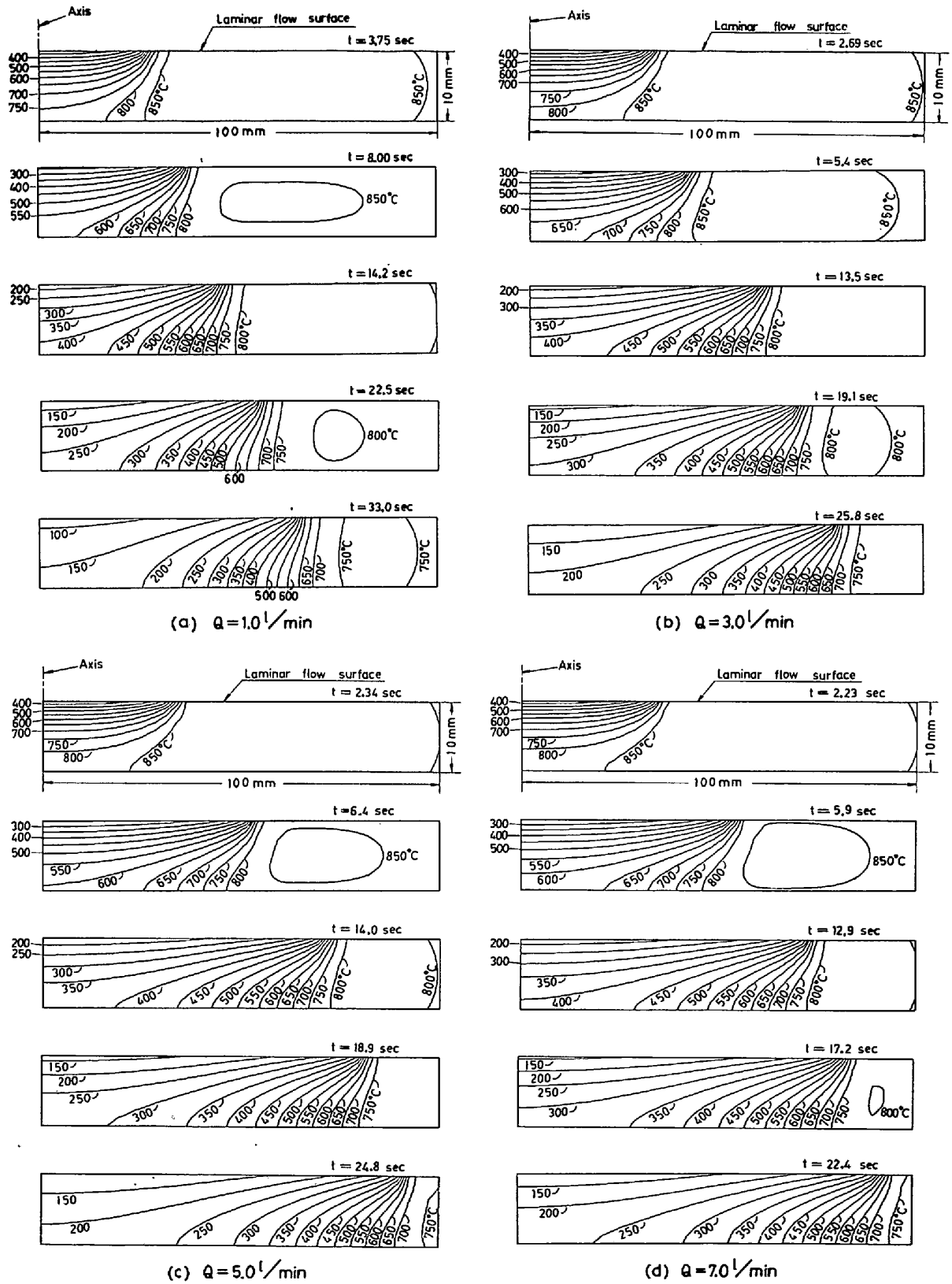


Fig. 10. Change of temperature distribution indicated by isothermal lines with elapsed time.

て異なつた値を持つ。Fig. 9 に示すように、 $Q=1.0$ l/min のとき $a=8.5$ 、 $Q=3.0$ l/min のとき $a=13.3$ 、 $Q=5.0$ l/min のとき $a=15.8$ および $Q=7.0$ l/min のとき $a=16.8$ とし、いずれの Q に対しても、(19)式における b を 10.0 とし、鋼板内部の温度が時間的にどのように変化するかを計算してみた。

Fig. 10(a), (b), (c), (d) は冷却水量がそれぞれ 1.0 l/min, 3.0 l/min, 5.0 l/min および 7.0 l/min の場合の温度状態を等位線 (等温線) プログラムを用いて、鋼板の半断面にプリンター・プロッターで描かせたものである。等温線は温度差 50°C ごとに描かれている。また、図中に記された t は水冷開始直後からの時刻である。Fig. 2~Fig. 5 に示されているラミナフロー衝突面の反対面での実測結果と上記の数式モデルによつて得られた計算結果はだいたい一致している。

さて、内部の温度変化の様子については、水冷開始初期にはラミナフローの衝突点近傍で板厚方向に著しい温度勾配が生じている。しかし、時間経過とともに板厚方向の温度勾配は緩和される反面、半径方向の温度勾配が顕著となる。

また、当然のことであるが、冷却水量が多い場合には半径方向の冷却領域が大きく、少ない場合には冷却領域は小さい。例えば、 $Q=7.0$ l/min の場合で $t=12.9$ s のときと、 $Q=1.0$ l/min の場合で $t=14.2$ s とを比較すると、ラミナフロー衝突点直下の板厚方向の温度勾配はだいたい同じであるが、前者の方が冷却領域の半径は 1.6 倍程度大きい。したがつて、水量比が 7 倍に対して、冷却面積比が 2.6 倍程度ということになる。

つぎに、冷却開始後の時間経過に伴う鋼板の上面と下面の温度差は冷却水量が多いものほど著しい。

なお、これらの図の中で等温線が閉曲線になつているのは、強制冷却による熱伝導と側壁からの熱ふく射による熱伝導によつて形成されたものであると考える。したがつて、閉曲線内部の温度は閉曲等温線上に記された温度より高い。

5. 結 論

本研究は単一層状軸対称水流によつて高温鋼板の冷却実験を行い、その結果に基づいて、ラミナフロー冷却能に関与すると考えられる因子、すなわちノズル高さ効果および水量効果について検討を加えたものである。これらの検討によつて明らかとなつた事項を要約すると以下のようである。

1) 流量が一定でも、ノズル高さを変えると、ラミナ

フローが鋼板に衝突して以後の半径方向速度 v_r が変化するが、 v_r の大小によつてラミナフロー冷却能に及ぼす影響は、ここで行われた実験範囲内では、ほとんど認められなかつた。

2) 冷却能を左右する主要因子は半径方向速度 v_r と膜厚 b の積 $v_r \cdot b$ 、すなわち冷却水量 Q である。ただし、 Q がある程度以上になると冷却能は飽和状態に達する。ここで行われた実験では $Q=5$ l/min で冷却限界があるようである。

3) その冷却限界はブラックゾーン半径 R_B の成長限界によつて知ることができる。

4) 経過時間 t (s) における R_B (mm) は近似的に

$$R_B = a_0 \frac{\exp\{\alpha(Q - Q_1)\}}{K + \exp\{\alpha(Q - Q_1)\}} \sqrt{t}$$

で表すことができよう。ここで a_0 、 K および α は定数であり、ここで行われた実験範囲では $a_0=17.0$ 、 $K=1.0$ 、 $\alpha=0.7$ となつた。

5) 既報¹⁰⁾によつて示された冷却の数式モデルによつて内部の温度変化の様子を計算してみると、水冷開始初期にはラミナフローの衝突点近傍で板厚方向に著しい温度勾配が生じている。しかし、時間経過とともに板厚方向の温度勾配が緩和される反面、半径方向の温度勾配が顕著となる。

おわりに本実験に協力して貰つた本学修士課程の西村恵次君 (現: 川崎製鉄(株)) および原田淳君に感謝します。

文 献

- 1) 大内千秋, 大北智良, 山本定弘: 鉄と鋼, 67 (1981) 7, p. 129
- 2) 大北智良, 大内千秋, 小指軍夫: 鉄と鋼, 63 (1977) 11, S 798
- 3) 東田幸四郎, 山崎喜崇, 松本和明, 長嶺多加志, 平部謙二, 有方和義: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 340
- 4) 山本定弘, 大内千秋, 大北智良: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 635
- 5) 町田正弘, 勝亦正昭: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 636
- 6) 志賀千晃, 天野虔一, 波戸村根生, 鎌田晃郎: 鉄と鋼, 67 (1981) 4, S 637
- 7) 平田 賢, 森岡 茂: 日本機会学会論文集 (第 2 部), 42 (1976) 353, p. 236
- 8) 杉山峻一, 野口孝男, 神尾 寛, 国岡計夫: 日本鋼管技報, 88 (1981), p. 39
- 9) 大友朗紀, 山口喜弘, 水田篤男, 大砂 寛, 柚垣英則: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 707
- 10) 八田夏夫, 小門純一, 花崎紘一: 鉄と鋼, 67 (1981) 7, p. 959
- 11) J. M. SMITH: Mathematical Ideas in Biology, Cambridge at the Univ. Press, (1968), p. 40