

## 高温鋼板のラミナフロー冷却の冷却能に関する解析

八田 夏夫\*・小門 純一\*・花崎 紘一\*

Analysis of Cooling Effect of Laminar Water Flow  
for Steel Plate at High Temperature

Natsuo HATTA, Jun-ichi KOKADO, and Koichi HANASAKI

## Synopsis:

The cooling process of a hot steel plate in the forced cooling of the laminar water flow was experimentally and analytically discussed. The main results obtained in this paper are as follows:

1) The heat transfer coefficient  $\alpha$  of the forced cooling of the laminar water flow can be deduced as " $\alpha=500 \cdot (\theta_s - \theta_w)^{1/2}$ " where  $\theta_s$  and  $\theta_w$  are the temperature of the cooled surface and the cooling water, respectively.

2) The radius  $R_B$  of the circular black zone can be described as " $R_B=a\sqrt{t}$ " where  $t$  is the cooling time and  $a$  is the constant determined by the water flow rate and the vertical distance between a nozzle exit and cooled plate surface.

3) The cooling curve calculated at a given point in the steel plate using the heat transfer coefficient indicated in 1) agrees with the experimental cooling curve when the water cooling diameter  $R_W$  is assumed to be " $R_W=a\sqrt{t}+10$ ".

## 1. 結 言

高温域にある鋼材の水による強制冷却は使用目的や冷却温度範囲によつて種々の冷却方式が採用されている<sup>1)</sup>。

最終仕上げ圧延を出た熱延鋼板の温度は鋼種によつて決定されている  $A_3$  変態点温度以上に保たれ、この鋼板はホットランテーブル上で所定の巻き取り温度まで水冷却される。この場合の熱延鋼板の冷却は上面ではラミナフロー冷却によつて行われ、下面はテーブルローラのすきまからスプレーによつて冷却されている。このように上下面の冷却方式が異なつており、とりわけ鋼板もある速度で移動しているのであるから、上面では水のり現象も生じ、この場合の熱伝達率の詳細な解析はたいへん困難となる。したがつて、仕上げ出側温度を所定の時間で、決められた巻き取り温度まで低下させているわけであるから、熱伝達率を平均化して求め、現在操業中の冷却設備の熱伝達率は  $500 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$  としても差し支えないという報告もなされている<sup>2)</sup>。

上記2つの冷却方式を個別に分けると、スプレー冷却に関しては、HOOGENDOORNら<sup>3)</sup>、田中ら<sup>4)</sup>、三塚<sup>5)</sup>の詳細な実験によつて、工業的に十分その冷却能を見積ること

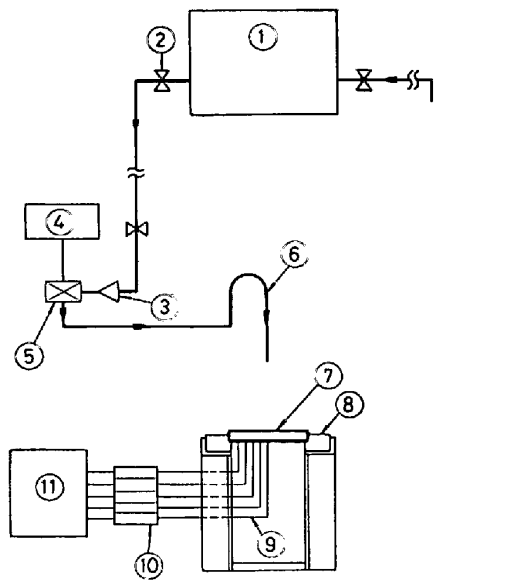
のできる熱伝達率の計算式が簡単な形で表されている<sup>6)</sup>。

一方、ラミナフロー冷却に関しても、白岩ら<sup>7)</sup>、平田ら<sup>8)</sup>の実験データに基づいて、衝突点近傍での熱伝達率を求める計算式が出ている<sup>9)</sup>。また、大友ら<sup>9)</sup>は  $400 \sim 800^\circ\text{C}$  の温度範囲でステンレス鋼板を加熱し、その上面に単一層状軸対称水流を落下させて、ブラックゾーン内の冷却速度とブラックゾーン形成に関する因子を列挙し、定性的な検討を行つている。

本研究は、大友らに準じて  $900^\circ\text{C}$  付近まで加熱されたステンレス鋼板のラミナフロー冷却実験を行い、ラミナフロー衝突点直下の鋼板の裏面における冷却曲線が、水量やノズル高さの違いによつてどのように変動するかを調査することを第一とし、つぎにこの冷却曲線に基づいて、温度に関する数値計算を、ある冷却モデルに従つて行い、実験結果と比較検討し、できる限り広範な温度領域に適用し、しかも簡単な形で表されるラミナフロー冷却の熱伝達率を知ることが第二の目的としている。また同時に鋼板の任意点における冷却中の温度-時間の関係を予知することのできる数式モデルを見出すことを第三の目的としている。

昭和 55 年 8 月 15 日受付 (Received Aug. 15, 1980)

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



①Water tank ②Cock ③Const. flow rate supplier ④Timer  
⑤Electro-magnetic valve ⑥Hair pin pipe ⑦Test piece  
⑧Adiabatic Brick ⑨CA-Thermocouples ⑩Amplifier  
⑪mV-Recorder

Fig. 1. Outline of experimental apparatus.

## 2. 実験装置とその方法

### 2.1 実験装置

Fig. 1 は実験装置の概略を示すものである。冷却水として用いたのは一般の水道水で、これは約 20m の水頭をもつ水タンクから、ある配管径路を径て、銅製のヘアピンノズルに達する。ヘアピンノズルは鉛直面内で曲率半径 70 mm で 180 度曲げられたもので、その内径は 10 mm である。このヘアピンノズルを使用したのは、普通のストレイトノズルに比べて、その出口部で気泡を混入せず、その水棒は層状で安定性もよく、平板上に落下させたときのよどみ点近傍の水の広がりも円形の良い層流領域をもっているからである。なお、電磁バルブとタイマーが接続されているのは、冷却時間の設定が容易にできることと、断続冷却の実験も可能であるようにしたためである。

試料の加熱は幅 380 mm × 高さ 300 mm × 奥行 400 mm の容量で 1300°C まで昇温できるガス炉で行った。これは還元性雰囲気中で加熱でき、試料表面のスケールの発生を極力防止できると考えたからである。

### 2.2 実験方法

試料は 18-8 ステンレス鋼である。試料の寸法は厚さ 10 mm、辺長 200 mm の正方形である。試料の測温はラミナフローの裏面で行われた。これはラミナフローサイド(表面)で行うと、冷却の実験途中で測温に用いた熱電対の先端に蒸気泡が付着して信頼できる値が得られな

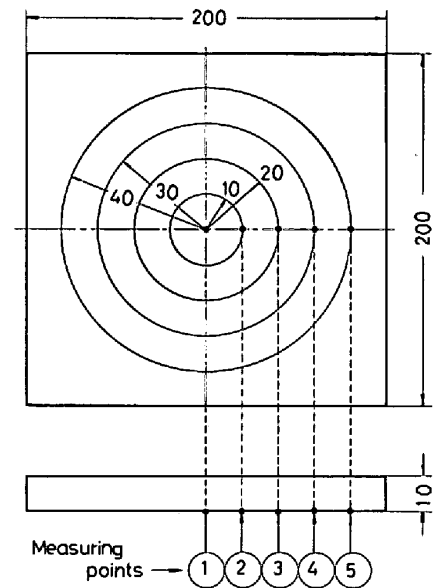


Fig. 2. Temperature measuring points.

いためである。さて、裏面における測温位置は Fig. 2 に示すように、ラミナフロー衝突点から半径方向に 20 mm のピッチで 5 箇所①～⑤を選んだ。試料と熱電対の固定は、まず試料の測温位置に直径 2 mm、深さ 2 mm の孔をあけ、それに 0.65 mm 径のアルメル線とクロメル線を挿入し、そのごく周辺を自動ポンチでかしめて行つた。また、アルメル・クロメル線が固定された試料は、そのまま上記のガス炉で 900°C まで加熱された。試料の表面温度がオシログラフで 900°C を示してから、内部まで均熱されるように、約 1 h 炉内に保持した。加熱温度を 900°C としたのは、圧延の際最終仕上温度が  $A_1$  変態点以上に保たれ、大体どの鋼種も、800~900°C の範囲にあるとされているからである。

また、ラミナフローの冷却能は、大友ら<sup>9)</sup>も指摘しているように水量  $Q$ 、伝熱面とノズル出口間の鉛直距離  $H$ 、ノズル内径  $D_0$  によつて異なることが知られている。本実験では、 $Q=0.1\sim 7.0$  l/min、 $H=50\sim 600$  mm および  $D_0=10$  mm とした。なお、 $Q$  が非常に小さい場合には  $H$  を大きくするとノズルから出てくる水棒が途中で破断するので、そのときは  $H$  を小さくとりざるを得なかつた。

冷却水の温度は 18~21°C であり、実験結果を解析するときには 20°C としている。

## 3. 温度計算法の概略

ラミナフロー冷却の熱伝達率を見積るためには、その熱伝達率を用いて計算された経過時間に対する温度推移が、実験によつて測定された温度推移と概略一致するこ

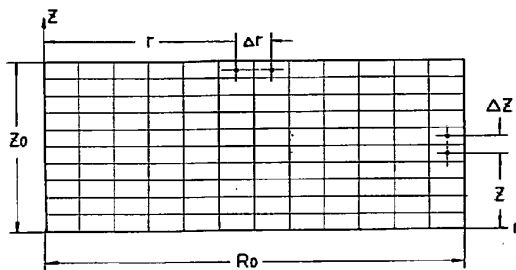


Fig. 3. Lattice model set up for numerical calculation of temperature.

とが重要である。ここでは、その温度計算法の概略を述べる。

実験に用いられた試料は、先述のように、厚さ10 mmで一辺の長さが200 mmの正方形であるが、計算ではその正方形に内接する円筒形として取り扱い、温度計算は軸対称円筒座標系を用いて行われる。

Fig. 3は中心軸をz軸、半径方向をr軸としたときの厚さ  $z_0 (= 10 \text{ mm})$  および半径  $R_0 (= 100 \text{ mm})$  の円筒形物体の半断面を  $\Delta z, \Delta r$  の長さをもつ微小格子要素に分割した様子を示したものである。熱の移動は相隣接する格子要素の境界線を介して行われ、温度は格子要素の中心座標点  $(r, z)$  および時間  $t$  の関数で  $\theta(r, z, t)$  とするが、一つの格子要素内では一定であるとする。いま、 $\lambda$  を熱伝導率とすると、r方向およびz方向へ単位時間に単位面積を通して流れる熱流束成分  $q_r, q_z$  は

$$q_r = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad q_z = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表すことができる。したがって、熱伝導方程式は、

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{1}{\gamma c} \left( \frac{\partial q_r}{\partial r} + \frac{q_r}{r} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで  $\gamma$  および  $c$  は熱媒体の比重量および比熱である。さて(1)式を差分形式に変換すると、

$$\left. \begin{aligned} q_r &= -\lambda \frac{\theta(r+\Delta r, z, t) - \theta(r, z, t)}{\Delta r} \\ q_z &= -\lambda \frac{\theta(r, z+\Delta z, t) - \theta(r, z, t)}{\Delta z} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。温度  $\theta(r, z, t)$  の初期条件および熱流束  $q_r, q_z$  の境界条件は次式のようなのである。

$$t = 0 \text{ で, } \theta(r, z, t) = \theta(r, z, 0) = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$r \leq R_w \text{ で, } q_z|_{z=z_0} = \alpha \{ \theta(r, Z_0, t) - \theta_w \} \quad \dots\dots (5)$$

$$r > R_w \text{ で, } q_z|_{z=z_0} = \alpha_0 \{ \theta(r, Z_0, t) - \theta_A \} \quad \dots\dots (6)$$

$$r = R_0 \text{ で, } q_r|_{r=R_0} = \alpha_0 \{ \theta(R_0, z, t) - \theta_A \} \quad \dots\dots (7)$$

$$r = 0 \text{ で, } q_r|_{r=0} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで  $R_w$  は次節で定義する水冷半径を、 $\theta_A, \theta_w$  は空気および冷却水の温度を意味し、 $\alpha_0$  はふく射による相当熱伝達率と自然対流による熱伝達率の和を表してい

る。また、 $\alpha$  は鋼板表面と冷却水との熱伝達率で、これに関しては後で詳しく述べる。

このように、熱媒体の内部では(3)式によつて、熱媒体表面では(5)~(8)式によつて、 $q_r$  および  $q_z$  をすべての格子要素に対して計算しておく。

つぎに、 $t=t$  における温度  $\theta(r, z, t)$  と先に計算された  $q_r$  と  $q_z$  を用いて、 $t=t+\Delta t$  における温度  $\theta(r, z, t+\Delta t)$  を、(2)式から得られる差分方程式、すなわち、

$$\begin{aligned} \theta(r, z, t+\Delta t) &= \theta(r, z, t) - \frac{1}{\gamma c} \\ &\left\{ \frac{q_r(r+\Delta r, z, t) - q_r(r, z, t)}{\Delta r} \right. \\ &+ \frac{q_r(r+\Delta r, z, t) + q_r(r, z, t)}{2r + \Delta r} \\ &\left. + \frac{q_z(r, z+\Delta z, t) - q_z(r, z, t)}{\Delta z} \right\} \Delta t \quad \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

によつて求めることができる。

さて、安定した解を得るためには、 $\Delta t$  が  $\Delta z$  と  $\Delta r$  によつて決まるつぎの条件式を満足しなければならない。

$$\Delta t \leq \frac{1}{2a} \left\{ \frac{1}{(1/\Delta z)^2 + (1/\Delta r)^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 $a$  は温度伝ばん率 ( $\text{m}^2/\text{h}$ ) である。

いま、 $\Delta z \leq \Delta r$  とすると、(10)式は

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta z)^2}{a} \quad \dots\dots\dots (11)$$

と書き換えても解の安定条件は満足される。しかし、これは内部点に対してのものであり、本来の安定条件は冷却表面での熱伝達率  $\alpha$  も考慮しなければならないので、冷却初期には  $\Delta t$  は一層小さくなる。したがって、微小時間  $\Delta t$  の間の温度変化量が極めて大きくなる場合に対処するため、一つの計算サイクルにおいて全格子要素の中で最大の温度変化を起す要素に着目して、その温度変化量を一定値  $\theta_0$  に保つ。すなわち、

$$[\theta(r, z, t+\Delta t) - \theta(r, z, t)]_{\max} = \theta_0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

を満足するような  $\Delta t$  を(9)式から求め、この  $\Delta t$  と(11)式から得られる  $\Delta t$  を比較して小さい方を採用して計算する。したがって、 $\Delta t$  は必ずしも時間的に等間隔ではないが、短時間に急激な温度変化を起す要素に対して温度的に詳細な計算が可能となる。

以後における温度計算においては、 $\Delta r = 5 \text{ mm}$ 、 $\Delta z = 1 \text{ mm}$  としている。したがって、格子要素の数は板厚方向に10個、半径方向に20個ということになる。また(4)式の温度の初期値は全要素に対して  $900^\circ\text{C}$  としている。

#### 4. 温度実測値による熱伝達率の推定

##### 4.1 ラミナフロー衝突点直下の試料裏面の温度変化

ガス炉で 900°C に均一に加熱されたステンレス鋼板は炉を開けてから、約 18 s 後にラミナフロー水冷を開始した。

Fig. 4 はノズル高さ  $H$  および流量  $Q$  をいろいろ変動させたときのラミナフロー衝突点直下の試料裏面の温度変化の状態を、CA 熱伝対と低雑音増幅器を用い、オシログラフによつて実測した結果を示したものである。同図の破線で示されているように、冷却水の量が非常に少ないと、冷却開始後のある一定時間は、連続的に水が供給されても、供給水量と蒸発水量がバランスして、ブラックゾーンの径はきわめて小さい状態に保持され、沸騰してから半径方向に流れて行く水はほとんど無く、温度低下の速度は水量の多い場合に比べて大変ゆるやかである。それに対して、冷却水の量の増加に伴つて、ラミナフロー衝突点直下の試料裏面の温度と冷却時間の関係は、ノズル高さ  $H$  に関係なく、ある一定の冷却曲線に収束する傾向にある。これは冷却水量が極めて少ないときには水棒の衝突点近傍で直ぐにサブクール温度差が小さくなるのに対して、冷却水量がある一定値を越えると、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、ブラックゾーンの径も時間とともに増大し、衝突点における冷却水の温度は定常的に供給される新鮮な水の

温度に等しく、サブクール温度差も一定で大きいと考えられるからである。Fig. 4 に示されているように、冷却水量  $Q=0.98\text{ l/min}$  の場合と  $6.75\text{ l/min}$  の場合のラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面の冷却曲線を比較してみると、大差ではなく、斜線で示されている程度の差にすぎない。

以後において求めるべきラミナフローの熱伝達率の妥当性を、その熱伝達率で計算される冷却曲線が、この図の斜線領域内にあるか否かによつて判断することにした。

##### 4.2 数式モデルの設定と冷却曲線の数値計算

ノズルから鉛直に落下してくる棒状の冷却水は、水平面上に置かれた高温鋼板に衝突した後、その衝突点からうすい水膜を形成して半径方向の流れに変わる。その際、水膜は高温鋼板の表面から熱を吸収して、半径方向に進むに従つてその水温は上昇し、ある位置で飽和温度に達し沸騰する。鋼板の表面温度が高いときには、その沸騰水は蒸気膜の上によつて放射方向に流れ出る。したがつて、ラミナフローによる冷却能は衝突点の中心から、冷却水が飽和温度に達するまでの半径距離の大小によつて左右される。以後、この半径距離を水冷半径と呼び、 $R_w(\text{mm})$  で表すことにする。この水冷半径は表面温度が低下するにしたがつて大きくなる。

さて、ここで考える数式モデルは、以上述べた現実的な冷却機構とは全く異なり、水冷半径  $R_w$  は時間的に変化せず、水冷期間中一定であるものとする。また、ラミナフローサイドの衝突点からの任意の半径を  $r(\text{mm})$  としたとき、 $r \leq R_w$  の円形範囲の鋼板表面部分が水膜で覆われているものとする。この水膜の被覆はラミナフローサイドのみで、鋼板の表面温度の変化にかかわらず、水膜の温度は常に冷却水の初期温度  $\theta_w$  に保たれているものとする。また、水膜で被覆されていない部分、すなわち、ラミナフローサイドの裏面、 $r > R_w$  の範囲にあるラミナフローサイド表面および板側壁は空気に接し、これらの部分の熱の放散は、ふく射および自然対流によるものとする。

水膜で被覆された鋼板表面部分の熱放散は、上記のふく射および自然対流のほか、水膜で水冷されているので、強制冷却による外界への熱伝達を考えなければならない。その熱伝達量  $q(\text{kcal/m}^2\text{h})$  は、鋼板表面の温度  $\theta_s$ 、水温  $\theta_w$  および熱伝達率  $\alpha(\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$  として、

$$q = \alpha(\theta_s - \theta_w) \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。いま、熱伝達率  $\alpha$  が水膜と接した鋼板表面温度  $\theta_s$  と水温  $\theta_w$  の差の関数、すなわち、

$$\alpha \propto (\theta_s - \theta_w)^n \dots\dots\dots (14)$$

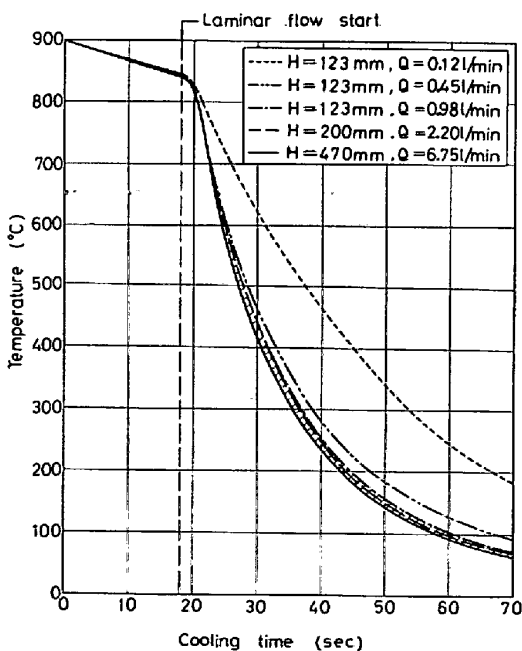


Fig. 4. Cooling curves on back surface at striking point of laminar flow for different water flow rates.

あるいは、 $\alpha = \alpha^*(\theta_s - \theta_w)^n$  ..... (15)  
 であると仮定する。ここで、 $\alpha^*$  および  $n$  は定数とする。  
 この仮定が成立するかしないかは、ここでは論じることができない。しかし、この仮定が成立するとすれば、 $q$  はつぎのような簡単な形で表すことができる。

$$q = \alpha^*(\theta_s - \theta_w)^{n+1} \dots \dots \dots (16)$$

したがって、熱伝達率  $\alpha$  が (15) 式で示されるような形で表されるとすれば、その式に含まれている  $\alpha^*$  と  $n$  の決定が非常に重要となる。これに関しては後述する。

さて、一定温度の水膜がラミナフローサイドの鋼板表面に被覆されているとする数式モデルにおいて、冷却半径  $R_w$  の大きさによつてラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面に相当する点の温度がどのようになるかを、さきに述べられた温度計算法によつて求めたので、その結果について述べたい。この計算に際して用いられた 18-8 ステンレス鋼の熱伝導率  $\lambda$  (kcal/mh°C) および比熱  $c$  (kcal/kg°C) は温度によつて異なるので、日本鉄鋼協会によつて発行されている特別報告書に示されている数値を用いた<sup>10)</sup>。また、ふく射による熱損失を求めるのに必要なふく射率  $\epsilon$  は 0.8 とし、自然対流による熱損失を求めるのに必要な熱伝達率  $\alpha_n$  は 13.7 kcal/m<sup>2</sup>h°C とした。これらの  $\epsilon$  および  $\alpha_n$  の値は、空冷実験による冷却曲線と数値計算による冷却曲線を対比することによつて、その値が妥当であることを調べている。また、冷却

水および空気の温度はいずれも 20°C としている。

Fig. 5 は  $\alpha = 10\,000$  kcal/m<sup>2</sup>h°C、すなわち、(15) 式で  $n=0$  および  $\alpha^* = 10\,000$  としたときの熱伝達率を用いて、いま問題としている点の温度-時間の関係を計算したもので、水膜の水冷半径  $R_w$  を助変数として示したものである。これは実験において炉を開けてから約 18 s 後に水冷が開始されたので、その実験条件に合わせて計算されている。したがって、水冷開始時のその点の表面温度は 830°C 程度になつている。この図から明らかのように、ラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面に相当する点の温度-時間の関係は、 $R_w$  の大きさによつて異なるが、 $R_w$  が 50 mm 以上になると一定の冷却曲線に収束する。使用水量が少ない場合は  $R_w$  の寸法を小さくした場合に相当し、使用水量が多い場合には  $R_w$  を大きくした場合に相当するものと考えれば、その水量が増加すると、ラミナフロー衝突点直下の試料裏面の温度と冷却時間の関係は、ある一定の冷却曲線に収束するという実験事実と一致する (Fig. 4 参照)。

Fig. 6 は (15) 式で  $n=1/2$  および  $\alpha^* = 500$  として得られる熱伝達率を用いて計算された冷却曲線で、やはり  $R_w$  が 50 mm 以上になると一定の冷却曲線に収束している。

以上のことから、20°C の温度の水膜がラミナフローサイドの鋼板表面に被覆されたとする数式をモデルにおいて、ラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面に相当する点

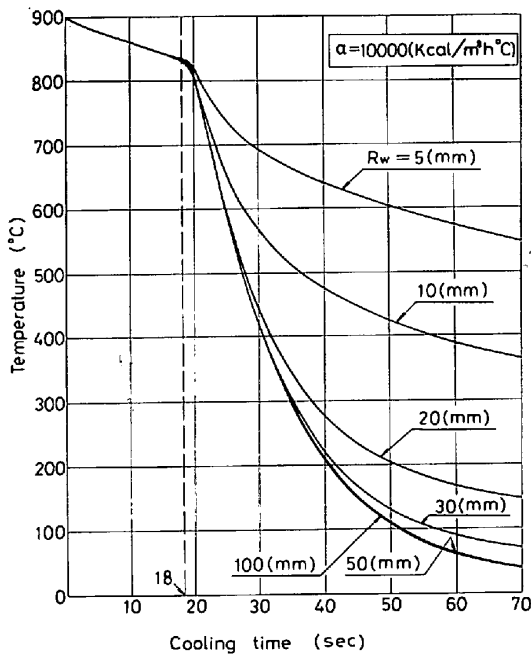


Fig. 5. Calculated cooling curves on back surface at center of circular water film with different radiuses ( $R_w = 5 \sim 100$  mm) for the case of heat transfer coefficient  $\alpha = 10\,000$  kcal/m<sup>2</sup>h°C.

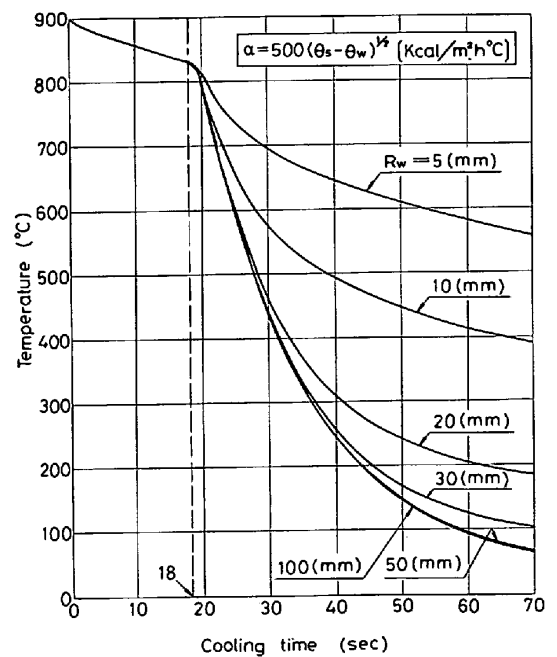


Fig. 6. Calculated cooling curves on back surface at center of circular water film with different radiuses for  $\alpha = 500(\theta_s - \theta_w)^{1/2}$ .

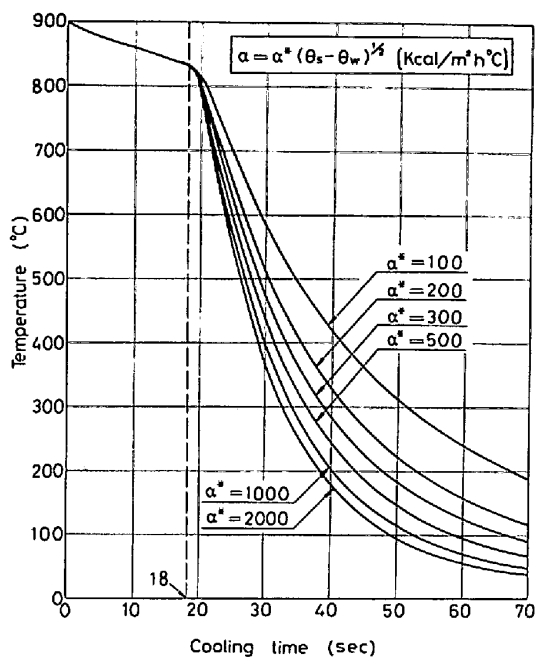


Fig. 7. Calculated cooling curves on back surface at center of circular water film with  $R_w = 50$  mm for different values of  $\alpha^*$ .

の冷却速度は  $R_w = 50$  mm で一定の冷却曲線に収束すると考えても差し支えない。Fig. 7は  $R_w = 50$  mm の水膜が鋼板表面を被覆したとし、その裏面中心の冷却曲線を、(15)式において、 $n = 1/2$  として  $\alpha^*$  を種々変動させたときの熱伝達率を用いて求めたものである。

#### 4.3 熱伝達率の推定

ラミナフロー衝突点直下の試料裏面の温度-時間の関係は、冷却水の増加とともに、ある一定の状態に収束することが実験によつて明らかにされた。そして、Fig. 4において斜線で示されているように、冷却水量が  $0.98$  l/min の場合と  $6.75$  l/min の場合とのラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面の温度-時間の関係は非常に近接している。したがつて、冷却水量が  $1$  l/min 以上の場合、この点の冷却曲線は常に一定であると考えても差し支えない。また、さきに述べた水膜の数値モデルでは水冷半径  $R_w = 50$  mm になると、いまここで問題にしている点の温度-時間の関係がある一定の曲線に収束することがわかっている。そこで、 $R_w = 50$  mm として、(15)式の熱伝達率を用いて計算される冷却曲線を、Fig. 4に示されている冷却曲線群のうち、冷却水量が  $0.98$  l/min 以上の斜線領域内に属するそれらと比較することによつて、その熱伝達率の適用性を検討することにした。

さて、(15)式において、 $n = 0$  の場合から調べてみる。すなわち、この場合熱伝達率は温度と無関係に常に一定とする場合に相当する。Fig. 8は  $\alpha = 6000$  および

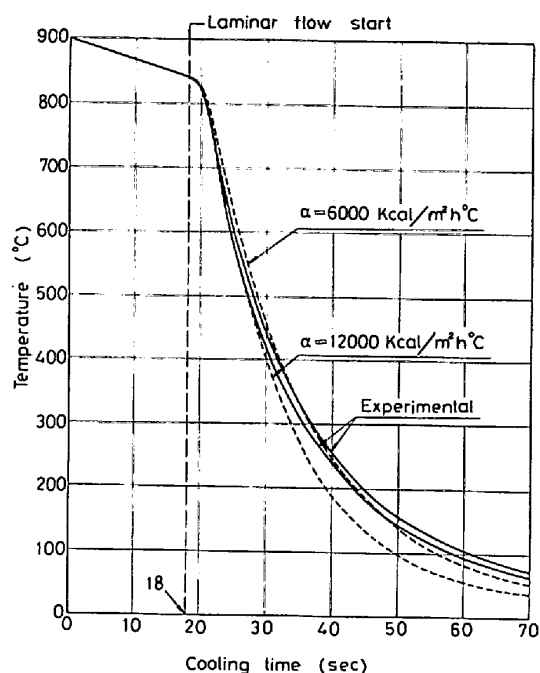


Fig. 8. Comparison of experimental cooling curves with calculated cooling curves for the case of  $\alpha = 6000$  kcal/m<sup>2</sup>h<sup>°C</sup> and  $12000$  kcal/m<sup>2</sup>h<sup>°C</sup>.

$12000$  kcal/m<sup>2</sup>h<sup>°C</sup> の場合の冷却曲線と先に述べた実験による冷却曲線を比較したものである。これによると、 $\alpha = 12000$  にすると、冷却速度がすべての温度領域で実験値より速い。したがつて、 $\alpha > 12000$  の場合は実験値と合わない。 $\alpha = 6000$  の場合には水冷直後の冷却速度が実験値より遅く、温度が低くなるにしたがつて冷却速度が実験値より速くなつていく。すなわち、 $\alpha = 6000$  の場合の冷却曲線は実験による二本の冷却曲線とそれぞれ交わつていく。したがつて(15)式で  $n = 0$  とすること、すなわち、熱伝達率を常に一定とする考え方は妥当ではないと考えねばならない。

Fig. 9は(15)式で  $n = 1$  とし、 $\alpha^* = 100$  および  $30$  としたときの熱伝達率の式を用いて計算された冷却曲線と実験値とを比較したものである。 $\alpha = 100(\theta_s - \theta_w)$  とした場合の冷却曲線は実験値と合っていない。また、温度が高いときには冷却速度が実験値のそれより大きい、温度が低くなるにつれて冷却速度は遅くなつていく。つぎに、 $\alpha = 30(\theta_s - \theta_w)$  としたときの冷却曲線は実験によつて得られたそれと比較的よく合つていくように見えるが、厳密には温度が低下するにしたがつて実験値より冷却速度が遅くなつていく。

Fig. 8および Fig. 9の結果から総合的に判断すると、 $\alpha^*$  の値にもよるが、 $n = 0$  の場合には温度が低下するにしたがつて実験値より冷却速度が速くなつており、 $n =$

1 の場合には逆に遅くなる傾向にある。

したがって、(15)式の熱伝達率の式に含まれる  $n$  の値は  $0 < n < 1$  と考えた方がよいようである。  $n = 1/2$  で  $\alpha^*$  を種々変動させたときの温度-時間の関係はすでに

Fig. 7 に示されているが、 $\alpha^* = 500$  としたときの冷却曲線が実験値ともつともよく合うようである。 Fig. 10 は  $n = 1/2$  および  $\alpha^* = 500$  とした場合の熱伝達率の式を用いて計算された冷却曲線と実験値とを比較したものである。水冷直後の温度の高いときには、計算によつて得

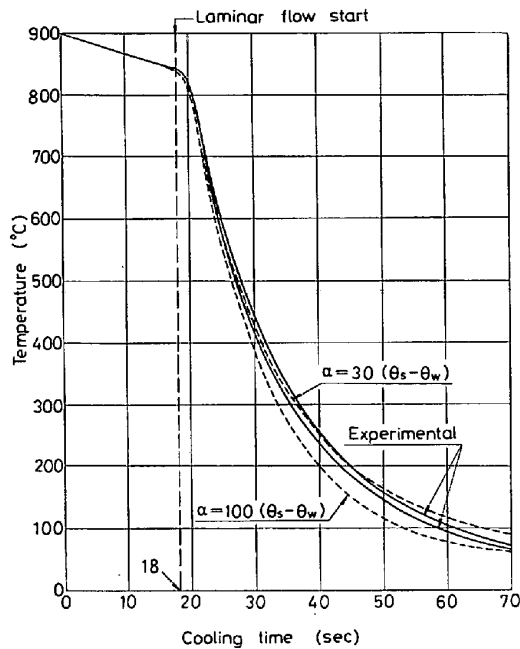


Fig. 9. Comparison of experimental with calculated for  $\alpha = 30 \cdot (\theta_s - \theta_w)$  and  $\alpha = 100 \cdot (\theta_s - \theta_w)$ .

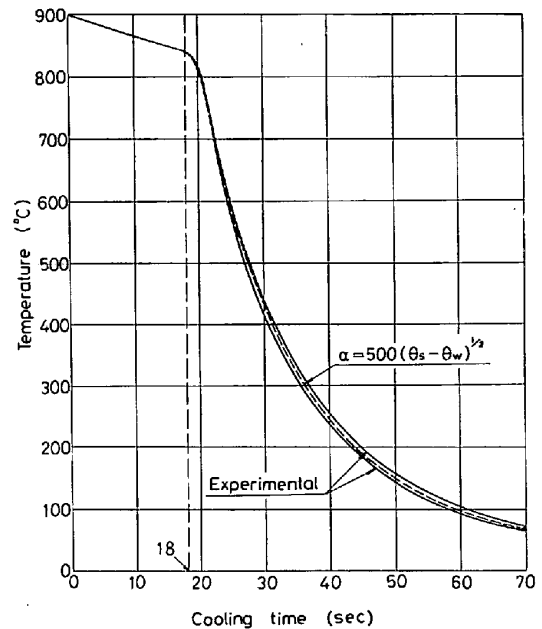


Fig. 10. Comparison of experimental with calculated for  $\alpha = 500 \cdot (\theta_s - \theta_w)^{1/2}$ .

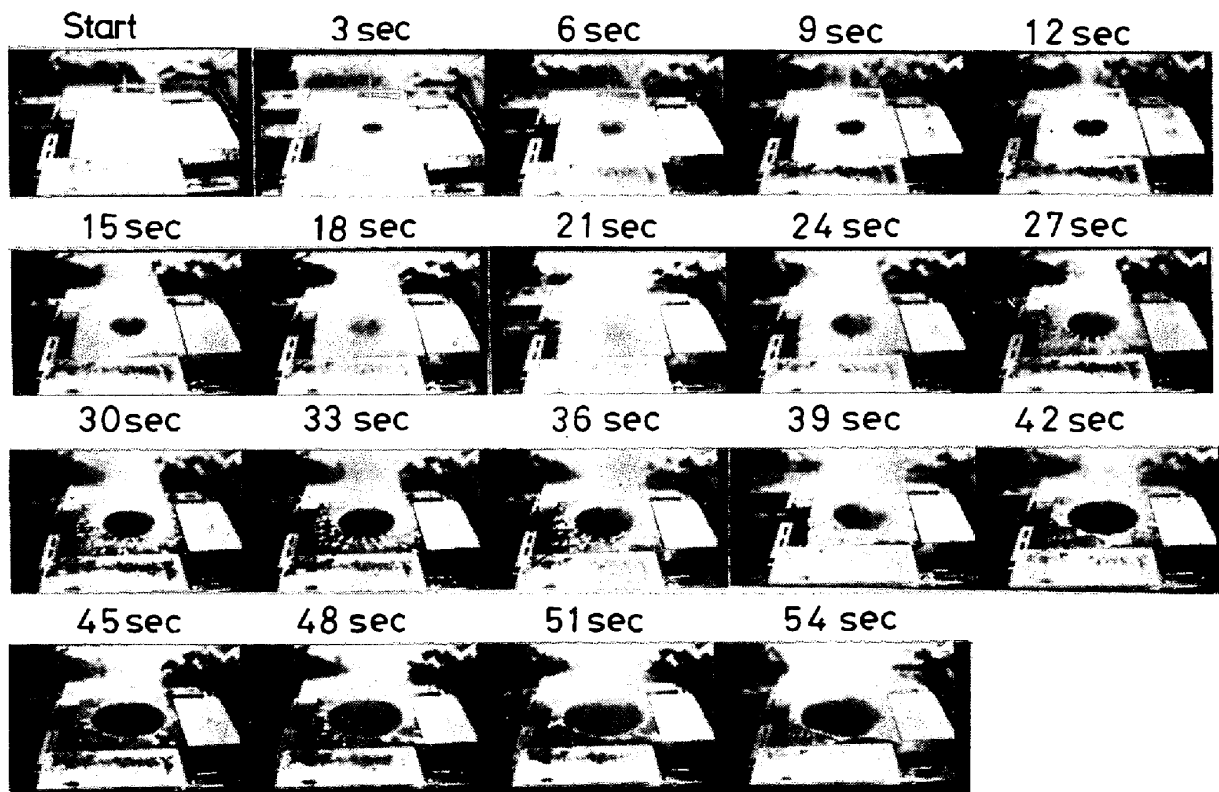


Photo. 1. Growing process of circular black zone in case of water flow rate 2.2 l/min and nozzle height 200 mm.

られた冷却曲線から判断すると、冷却速度は若干速いが広い温度域で実験による二本の冷却曲線の中に入っている。したがって、熱伝達率  $\alpha$  を

$$\alpha = 500(\theta_s - \theta_w)^{1/2} \dots\dots\dots (17)$$

とした場合が実験値ともつともよく合うと考えられる。

この熱伝達率  $\alpha$  はラミナフロー直下の鋼板裏面の温度に対して成立つものであるから、いわゆるよどみ点熱伝達率と呼ばれるものに相当するかも知れないが、次節ではブラックゾーン内外の実験による冷却曲線とこの熱伝達率を用いて計算した冷却曲線を対比した例について述べたい。

### 5. 実験結果と数値解析

いままではラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面の温度すなわち、Fig. 2 の測点①の温度変化のみについて論じてきた。ここでは測点①のほか②、③、④および⑤の点の温度変化について述べたい。

ノズルから鉛直に落下してくるラミナフローと呼ばれる棒状の冷却水は水平面上に置かれた高温鋼板に衝突した後、その衝突点からうすい水膜を形成して半径方向の流れに変わり、鮮明な円形のブラックゾーンを形成する。このブラックゾーンの半径は表面温度が低下するにつれて、すなわち、時間の経過とともに大きくなる。

Photo. 1 は冷却水量  $Q = 2.2 \text{ l/min}$  およびノズル高さ  $H = 200 \text{ mm}$  の場合のブラックゾーンの変化の状態を、水冷開始時から 3 s ごとに写真撮影されたものである。円形のブラックゾーンの径は時間の経過とともに大きくなり、同時にブラックゾーン外の周辺も赤熱の状態から黒ずんだ色に変化してくる。

Fig. 11 の実線はブラックゾーンの径  $R_B$  (mm) と時間  $t$  (s) との関係を示したものである。これによると、この実験条件の場合、水冷開始後 60 s 以内では、 $R_B$  は近似的に  $\sqrt{t}$  に比例している。

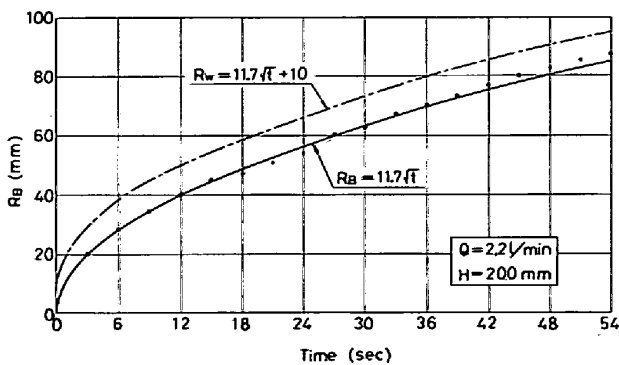


Fig. 11. Relation between radius of circular black zone and cooling time in case of water flow rate 2.2 l/min.

Fig. 12 は冷却水量  $Q = 2.2 \text{ l/min}$  およびノズル高さ  $H = 200 \text{ mm}$  としたときの鋼板裏面における Fig. 2 に示された測温点①、②、③、④および⑤の各点の温度と時間の関係をオシログラフによつて実測した結果を示したものである。これによると、ラミナフローの強制冷却による影響の時間的順序は、ラミナフロー衝突点①から②、③、④、⑤の順となつている。

さて、ここでは先に定義した水冷半径  $R_w$  が時期とともに大きくなる場合について考えてみる。 $Q = 2.2 \text{ l/min}$  および  $H = 200 \text{ mm}$  の場合には、ブラックゾーンの半径  $R_B$  は時間の経過とともに  $\sqrt{t}$  に比例して大きくなる。すなわち、Fig. 11 から、

$$R_B = 11.7\sqrt{t} \dots\dots\dots (18)$$

と近似できることがわかつている。いま、水冷半径  $R_w$  がブラックゾーンの半径  $R_B$  に等しいものとする。このことは、水冷半径  $R_w$  が時間の関数として、(18)式に従つて成長するとした場合に相当する。また、水冷半径内の水膜の温度は  $20^\circ\text{C}$  一定であるとし、水冷半径内の強制冷却の熱伝達率は(17)式で与えられるものとする。言い換えると、(17)式で表される熱伝達率をもつ強制冷却領域は円形で、その半径が  $\sqrt{t}$  に比例して大きくなるものと仮定する。Fig. 13 の破線で示された5本の曲線は、このような仮定の下で、測点①から⑤までに相当する点の温度-時間の関係を数値計算した結果を示している。これからわかるように、水冷半径  $R_w$  がブラックゾーン半径  $R_B$  の時間的成長と全く同じであるとして計算した場合には、測点①から⑤までの冷却速度が実験によつて得られたものよりも遅い結果になつている。したがって、ここで述べているブラックゾーン半径  $R_B$  は先に定義した水冷半径  $R_w$  と必ずしも同じものであると考えない方がよい。すなわち、 $R_w > R_B$  と考えた方が妥当である。したがって、ブラックゾーンの半径  $R_B$  が、

$$R_B = a\sqrt{t} \dots\dots\dots (19)$$

であるとしたとき、水冷半径  $R_w$  が

$$R_w = a\sqrt{t} + b \quad (a, b \text{ は定数}) \dots\dots\dots (20)$$

と与えられると考えてみた。Fig. 13 の実線で示されている5本の冷却曲線は  $a = 11.7$  および  $b = 10$  として計算されたものであるが、実験結果と非常に近い冷却曲線を示している。すなわち、ラミナフロー衝突点からある距離に位置する任意点の温度推移を数値計算によつて推定しようとする場合は(20)式に従う水冷半径(例えば、Fig. 11 の一点鎖線)を用いた方がよい。

Fig. 14 は冷却水量  $Q = 6.75 \text{ l/min}$  およびノズル高さ  $H = 470 \text{ mm}$  としたときの測温点①～⑤の温度-時間の関係の実測結果を示したものである。この実験条件の



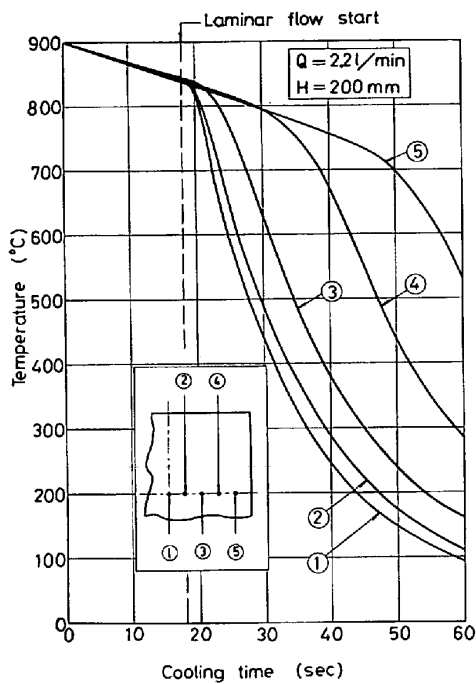


Fig. 12. Experimental cooling curves at the points ①~⑤ shown in Fig. 2 for water flow rate 2.2 l/min.

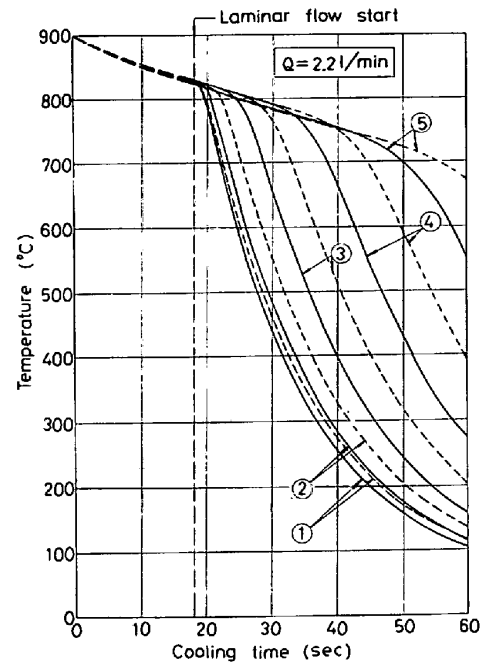


Fig. 13. Calculated cooling curves for water flow rate 2.2 l/min (solid lines :  $R_w = 1.17$ , dotted lines :  $R_w = 1.17\sqrt{T}$ ).

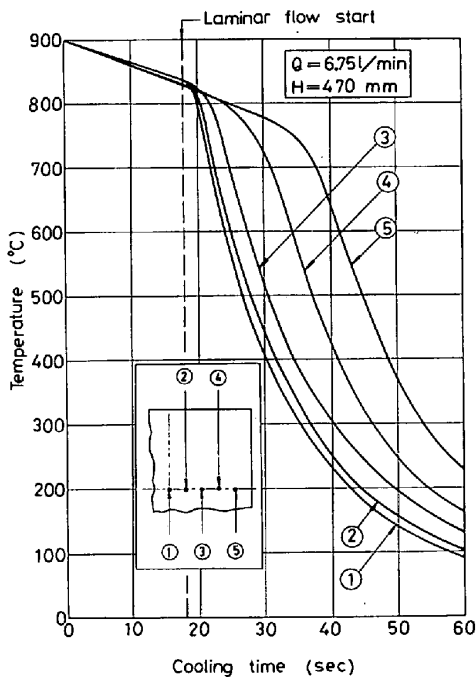


Fig. 14. Experimental cooling curves at the points ①~⑤ shown in Fig. 2 for water flow rate 6.75 l/min.

場合のブラックゾーンの半径  $R_B$  は、先と同様に、写真撮影によつて実測した結果、近似的に  $16.7\sqrt{T}$  で表してもよいことがわかっている。

Fig. 15 の実線で示されている5本の冷却曲線は(17)式で示される熱伝達率の式を用いて、(20)式で  $a = 16.7$

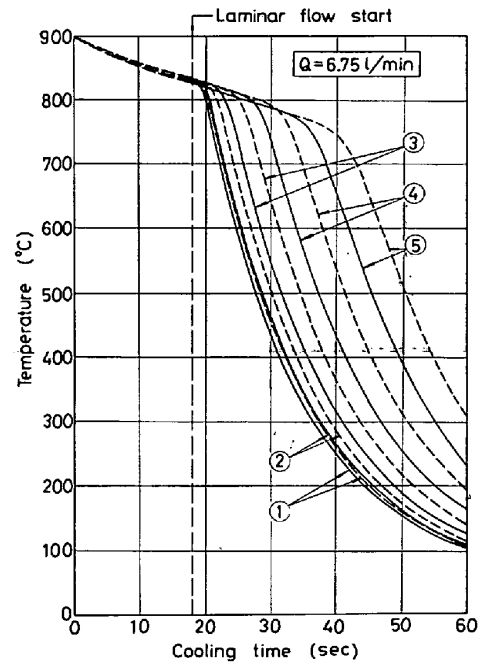


Fig. 15. Calculated cooling curves for water flow rate 6.75 l/min.

および  $b = 10$  として計算されたものである。これらの冷却曲線を Fig. 14 のものと比較すると、非常によく合っていることがわかる。同図の破線で示されているものは  $a = 16.7$  および  $b = 0$  として計算されたものである。これは水冷半径  $R_w$  とブラックゾーンの半径  $R_B$  が同じであると考えた場合に相当するが、測点①から⑤ま

での冷却速度が実験によつて得られたものよりやはり遅くなつてゐる。

ここでは(17)式で示される熱伝達率を用いて、Fig. 2に示されている5点の温度-時間の関係を、2つの実験例に対応させて数値計算を行つた。その際、強制冷却の影響域はラミナフロー衝突点を中心とする円形領域で、その水冷半径がブラックゾーンの半径よりも10mmだけ大きいとして計算すれば、実験値に対して非常に良好な近似が得られることがわかつた。すなわち、水冷半径をブラックゾーンの半径より10mmだけ大きくすれば、冷却曲線の計算値は実験値とよく合うが、(20)式において $b=10$ が常に成り立つのか、或いはこの実験の場合に対してのみ成り立つのかは現在のところ著者には明言できない。低温領域と考えられるブラックゾーンの中心に向かつて、ブラックゾーン外周に熱流が生じ、間接的に強制冷却の影響が、ブラックゾーン近辺に及ぶのかもわからない。また、本計算で用いた(17)式は水量 $1\text{ l/min}$ 以上の実験結果に従うように誘導されているので、冷却水量がそれ以上の場合には適用されてもよいと考えるが、この点に関してはさらに検討していきたいと思う。

ラミナフロー衝突点から半径方向に流れる水膜は高温鋼板の表面から熱を吸収して、半径方向に進むに従つてその水膜の温度は上昇し、ある位置で飽和温度に達し沸騰する。この現実的な冷却機構に従つて、ラミナフローの冷却能を評価するためには、水膜の流速や膜厚が流量やノズル高さによつてどのようになるかを知らねばならない。現在、著者らはこれらに対して検討中である。いずれこれらの検討結果も報告したいと思つてゐる。

## 6. 結 言

本論文では、 $900^\circ\text{C}$ に均一に加熱されたステンレス鋼板の上面に単一層状軸対称水流を落下させて、冷却中の温度と時間の関係を実測し、その実測結果と一致するような数式モデルを見出し、数値計算によつて検討がなされている。本論文によつて明らかにされた点を要約すると下記のようなものである。

(1) ラミナフロー衝突点直下の鋼板裏面の温度を実

測した結果、水量が増すに従つて、ノズル高さに関係なく、一つの冷却曲線に収束する。

(2) 鋼板表面上に、冷却中水冷半径が不変である円形の水膜ができたと仮定して、その水膜中心の鋼板裏面の温度と時間の関係を、種々の熱伝達率を用いて数値計算によつて求めると、水冷半径50mm以上の場合には一つの冷却曲線に収束する。

(3) (1)で得られた温度-時間の収束曲線と(2)で得られた収束曲線を一致させるためには、水の強制冷却による熱伝達率 $\alpha$ が鋼板表面の温度 $\theta_s$ と水温 $\theta_w$ の差の関数となり次式に従うものを採用することができる。

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

(4) 円形のブラックゾーンの半径は経過時間の0.5乗に比例して大きくなる。

(5) (3)で示される熱伝達率 $\alpha$ を用いて、鋼板裏面の任意点の温度と時間の関係を数値計算し、実験によつて得られたその関係と一致させるためには、(4)で示されるブラックゾーンの半径より幾分大きいものを水冷半径とすればよい。本研究においては水冷半径とブラックゾーン半径の差は10mmとなつた。

## 文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編：第3版，鉄鋼便覧，第III巻，(1)，圧延基礎・鋼板，(昭55)，p. 25 [丸善]
- 2) 小門純一，八田夏夫：塑性と加工，20(1980-5) 220，p. 429
- 3) C. J. HOOGENDOORN：5th International Heat Transfer Conference, IV (1974)，p. 135
- 4) 田中重雄，大森舜二，杉森正明：三菱重工技報，2 (1965) 2，p. 48
- 5) 三塚正志：鉄と鋼，54 (1968) 14，p. 1457
- 6) 日本鉄鋼協会編：特別報告書 No. 29，(昭 53)，p. 4
- 7) 白岩俊男，小林純夫：鉄と鋼，57 (1971) 3，p. 485
- 8) 平田 賢，森岡 茂：機論(第2部)，42 (1976) 353，p. 236
- 9) 大友朗紀，山口喜引，水田篤男，大砂 寛，柚垣英則：鉄と鋼，11 (1978) 64，S 707
- 10) 日本鉄鋼協会編：特別報告書 No. 11 (昭46)