

論文

ホットストリップミルにおける鋼板の 膜状ラミナ冷却特性

大友 朗紀*・安永 繁信*・石田 隆一*²

Cooling Characteristics of Steel Sheet by Water Film in Hot Strip Mill

Akinori OTOMO, Shigenobu YASUNAGA and Ryūichi ISHIDA

Synopsis:

For an examination of cooling characteristics of hot steel sheets cooled by water films, tests were conducted on a model cooling apparatus and an actual run-out table in the hot strip mill at Kobe Steel's Kakogawa Works and led to the following conclusions:

- (1) Cooling capacity along a "stagnation line" created by the water film is nearly constant at a water flow rate of 0.3 to 0.9 m³/min·m.
- (2) Cooling capacity of "stagnation region" is reduced by "mixing region" that exists near the water film.
- (3) At a steel temperature range of 750-800°C, the effects of nozzle height and slit gap on cooling capacity are negligible.
- (4) Cooling tests of high temperature steel (730-860°C) on the run-out table demonstrate no difference in cooling capacity between this method, which uses water films, and the conventional one which uses water bars.

Key words: cooling; hot strip mill; run out table; water film; heat transfer coefficient; heat flux.

1. 緒 言

鉄鋼材料の熱間圧延工程において、制御圧延や制御冷却のように、オンライン熱処理を利用した板製品の高付加価値化が急速に指向されるようになった。特に、1975年以後は制御冷却による材質改善の可能性が明確にされ、それを実現するための冷却設備には、冷却能力の制御範囲が広いことと温度制御精度が高いことが要求されている。

冷却能力を強化するための冷却方法の一つにスリットノズルからの膜状ラミナによる冷却（以後、膜状ラミナ冷却と略す。）があり、一部の熱延工場ランアウトテーブル冷却に使用されている^{1)~9)}。しかしながら、より冷却能力向上のために、適正な膜状ラミナ冷却がどのようなべきかを検討している報告は少なく、神尾ら⁸⁾の報告に見られる程度である。また、報告者により、従来から使用されているパイプノズルからの柱状ラミナによる冷却（以後、柱状ラミナ冷却と略す。）に対する膜状ラミナ冷却の冷却能力の向上量に差がある。それは冷却

条件の違いによるものと考えられる。R. BORSI ら¹⁾は水量 0.25~0.67 m³/min·m² の範囲で冷却能力の向上は約 30%、布川ら⁵⁾や本城ら⁴⁾は 50~100%、三塚ら⁷⁾は水量 1~2 m³/min·m² の範囲で約 15~20% と報告している。R. BORSI らの報告では冷却条件に整合性があるとは言いがたく、布川らや本城らは K 値 ($=\alpha \cdot L / (c \cdot \gamma) = h \cdot v \cdot \ln(\theta_0 / \theta)$ 、ここで α は平均熱伝達率、 L は温度測定区間距離、 c は平均比熱、 γ は比重量、 h および v は鋼板の厚さと走行速度、 θ_0 は入側温度、 θ は出側温度である。) を定義し、冷却能力を比較しているが水冷域が明確となっていない。また、三塚らのデータはばらつき範囲が大きい。従って、膜状ラミナ冷却が柱状ラミナ冷却と比較して常に冷却能力が高いとは、必ずしもこれらの報告のみでは判断できないと考える。

本報では、鋼板上面の冷却を対象とし、膜状ラミナの状態に影響を及ぼす因子と冷却能力との関係を明らかにし、これらの結果に基づいて、適正な膜状ラミナ冷却方法と従来より広く使用されている柱状ラミナ冷却との冷却能力を比較する。

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 3 月 19 日受付 (Received Mar. 19, 1986)

* (株)神戸製鋼所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel, Ltd.)

2. 膜状ラミナ冷却の基礎的検討

2.1 実験方法

Fig. 1 に示すように、膜状ラミナ冷却では水の運動形態が異なる3領域で冷却が行われるものと単純化して考えられる。Ⅰ領域は膜状ラミナが鋼板と衝突する膜衝突部、Ⅱ領域はその後冷却水が鋼板上面を流れる沿い流れ域、Ⅲ領域は沿い流れ水が衝突し攪拌している干涉流域である。なお、スリットノズルからの水量の単位はスリット長手方向の単位長および単位時間当たりの量とし、単位 $[m^3/min \cdot m]$ を用いる。

2.1.1 膜状ラミナの水膜調査

ノズル直下にアクリル板を置き、ノズルから流出して板に衝突するまでの水膜状態および板と衝突した時に生ずる飛散水の有無を目視と写真撮影で観察した。

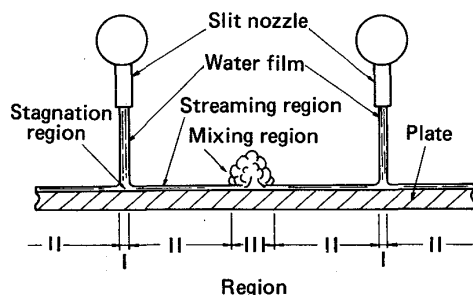


Fig. 1. Model of cooling region by laminar flow films.

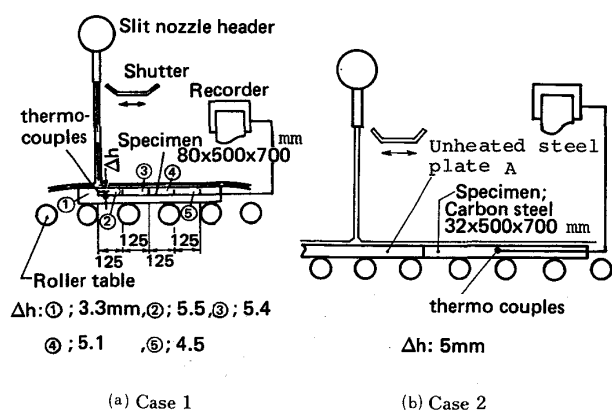


Fig. 2. Outline of experimental apparatus for water cooling test using the resting steel plate.

Table 1. Water cooling test conditions using the resting steel plate.

Slit gap	8 mm
Nozzle height	1.24 m
Water flow rate	0.3, 0.6, 0.9 $m^3/min \cdot m$
Initial temperature	800°C

2.1.2 静止鋼板の冷却実験

実験装置の概要を Fig. 2 に示す。また、Table 1 に実験条件を示す。Fig. 2 (a) は温度変化の状態を明らかにするための実験装置を示す。加熱炉から抽出した試験片を熱電対①が膜状ラミナの直下に位置するように配置し、種々の条件で冷却した。試験片の板幅方向中央、板厚方向上表面から約 5 mm、長手方向にノズル直下から 125 mm 間隔の位置に K 熱電対 (クロメル・アルメル) を 5 点溶接し、冷却中の鋼板温度を測定した。

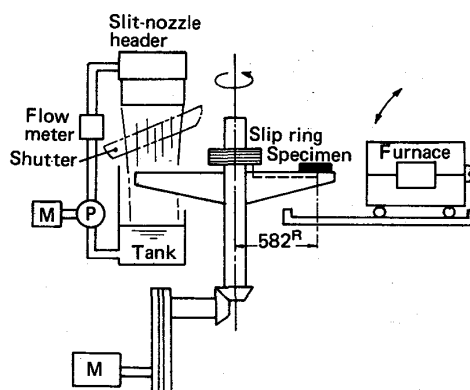
次に、Fig. 2 (b) に示すように、膜状ラミナ直下に加熱されていない鋼板 A を、その一端に加熱した試験片を密接した状態に配置し、鋼板と衝突した後の鋼板上面を流れる水の冷却能力を測定した。

2.1.3 移動鋼板の模擬干涉流による冷却実験

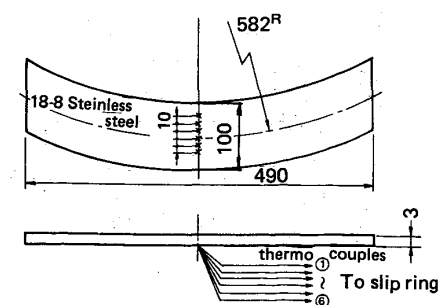
Fig. 2 に示す実験装置を用い、鋼板上面に別な薄板を垂直に設け、鋼板に衝突した後の沿い流れ水をその薄板によつて遮断した。このようにして模擬の干涉流を形成させ、この薄板の位置を変えることにより模擬干涉流の形成位置を変えた。

2.1.4 移動鋼板の冷却実験

実験装置の概要を Fig. 3 (a) に示す。Table 2 に実験条件を示す。なお、後記するパイプノズルを用いた冷



(a) Outline of experimental apparatus



(b) Specimen and positions for measuring temperature

Fig. 3. Water cooling test using the moving steel plate.

却実験も同装置を用いて行われた。ロータリテーブルの回転軸と試験片の中央までの回転半径は 0.582 m である。試験片形状は Fig. 3 (b) に示されているが、それは膜状ラミナ直下を通過するたびに水冷される。試験片の長手方向中央の裏面に幅方向に 5 箇所 10 mm 間隔に K 熱電対を溶接し、温度を測定した。熱電対出力は回転装置部からスリッピングを介して取り出された。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 膜状ラミナの水膜挙動

膜状ラミナを観察した結果、ノズルから流出した水膜は膜厚方向と幅方向に縮流する。この水膜挙動は水量、ノズル出口からの距離、スリットギャップ (Slit gap; 以下 SG と略す。) などによって変化する。

Table 2. Water cooling test conditions using the moving steel plate.

Slit gap	4, 8, 16, 24 mm
Nozzle height	0.5~1.5 m
Water flow rate	0.3~1.4 m ³ /min·m
Initial temperature	800°C
Velocity of plate	1~12 m/s

Photo. 1 は膜状ラミナがアクリル板に衝突した時の代表的な状況を板上面と下面から見たものである。本例は SG が 8 mm, 水量が 0.5 m³/min·m の場合である。ノズルの高さが 1 m の Photo. 1 (a) (b) では、衝突時に冷却水は飛散せず膜衝突部に激み線を形成し、その後滑らかに板面に沿って流れている。一方、ノズル高さが

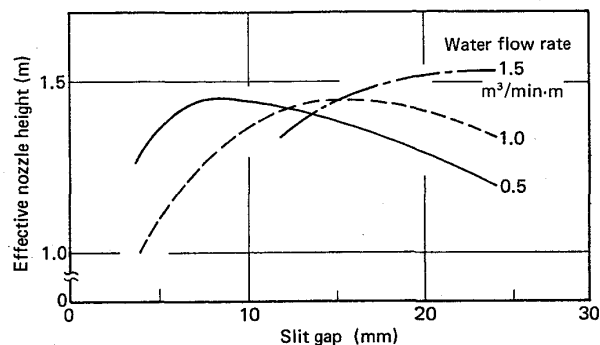
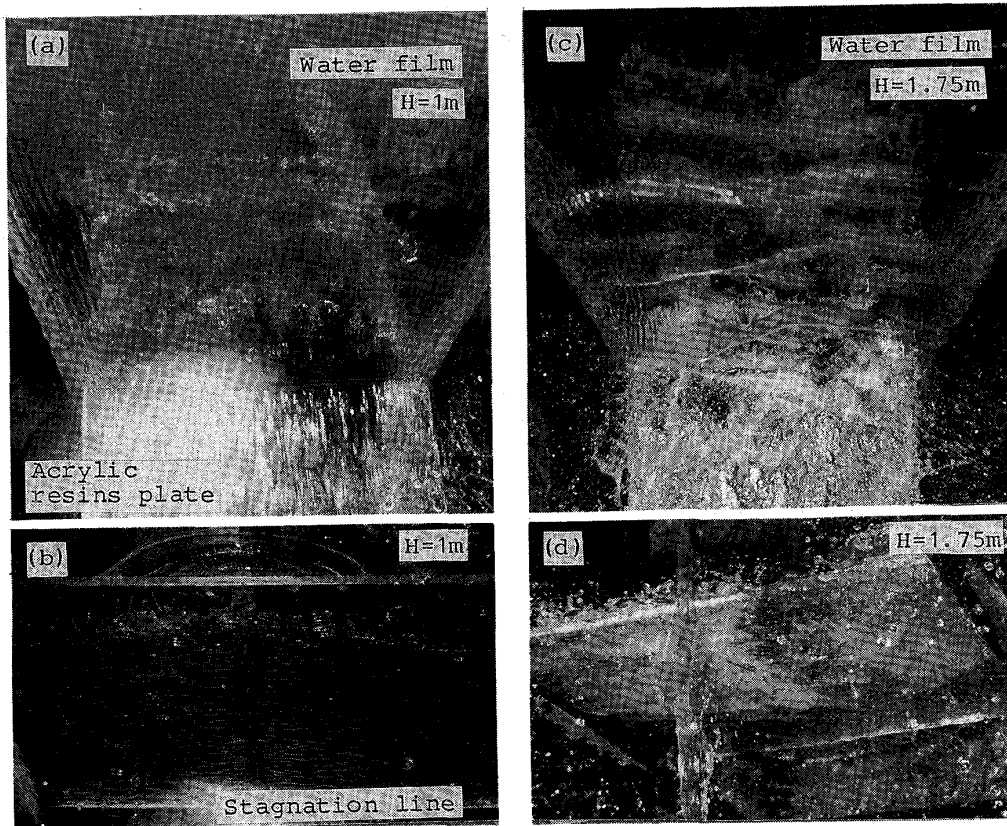


Fig. 4. Effect of slit gap and water flow rate on effective nozzle height defined as the maximum nozzle height without splashing at stagnation line.



Water flow rate; 0.5 m³/min·m Slit gap; 8×10⁻³ m

(a) (c) Upper side of acrylic resins plate

(b) (d) Lower side of acrylic resins plate

Photo. 1. Effect of nozzle height H on water film conditions.

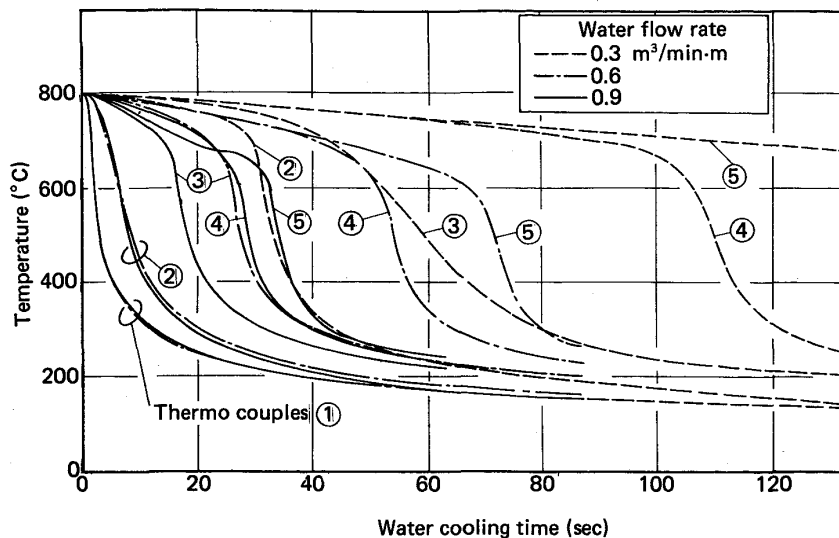


Fig. 5. Cooling curves obtained in cooling test using the resting plate at various water flow rates.

1.75 m の Photo. 1 (c) (d) では、衝突時に冷却水は激しく飛散し、膜衝突部は白濁し、澱み線は認められない。澱み線の形成条件は水量、ノズル高さ、SG によって決まる。

水量と SG を一定としてノズル高さを大きくすると、澱み線に白濁が現れ冷却水の飛散が発生する。そこで、この現象が現れる直前のノズル高さを有効ノズル高さとして、これを実験的に求めた。Fig. 4 は水量をパラメータとして SG と有効ノズル高さの関係を示す。水量によって最高の有効ノズル高さが得られる SG が存在することがわかる。

2.2.2 膜衝突部および沿い流れ域の冷却能力

膜状ラミナが有効ノズル高さ以下の条件で、静止鋼板の冷却実験により得られた冷却曲線の代表例を Fig. 5 に示す。図中の①～⑤の曲線は Fig. 2 (a) に示した熱電対①～⑤の温度推移をそれぞれ示している。

膜衝突部の曲線①は水量の影響を受けていない。これは、水量の変化に対し鋼板と衝突する時の膜状ラミナの流速の差が約 5% 以内であり、強制対流が支配的である膜衝突部ではそれによる熱伝達率がほとんど変わらないからである。一次元の直接差分法¹⁰⁾により温度解析を行い、曲線①に一致するような熱伝達率を求めた。計算で得られた熱伝達率と鋼板表面温度との関係を Fig. 6 に示す。鋼板表面温度が 400～800°C で 2×10^4 kcal/m²·h·°C の熱伝達率を得た。同図には、布川ら⁵⁾と神尾ら⁸⁾のデータも併記したが、本研究は布川らに近い。

一般的に、ラミナ直下点の冷却能力に影響を与える主な因子は鋼板と衝突する時の流速と水量（または、サブクール度）と考えられる。これは小門ら¹¹⁾や中西ら¹²⁾

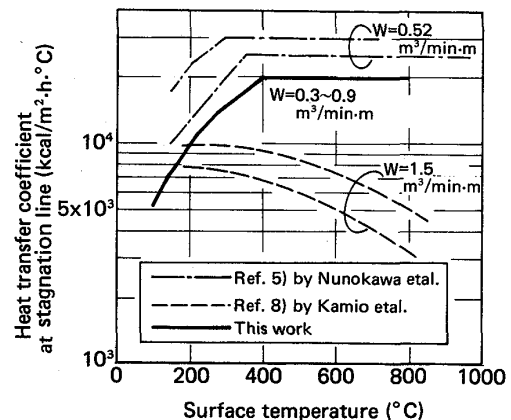


Fig. 6. Heat transfer coefficient at the stagnation line as a function of surface temperature of plate.

の報告にあるようにラミナ直下点での冷却形態に影響を与えるからである。

膜状ラミナの膜衝突部の冷却能力として、800°C の代表温度における熱伝達率を検討してみる。本研究と冷却条件（流速 $v_0 = 5.0 \sim 5.3$ m/s、水温 $T_w = 30^\circ\text{C}$ ）が類似している布川らの得た熱伝達率は 1.5×10^4 kcal/m²·h·°C 以上、神尾らのそれは 3.2×10^3 kcal/m²·h·°C である。また、中西ら¹²⁾は流速 $v_0 = 2.1$ m/s、水温 $T_w = 45^\circ\text{C}$ で本研究よりも定性的に熱伝達率が小さくなる条件にて、 8.4×10^3 kcal/m²·h·°C の値を得ている。これらのことから、神尾らの得た熱伝達率はやや小さいが、800°C 付近の表面温度に対する膜衝突部の熱伝達率は 10^4 kcal/m²·h·°C 程度の値であると考えてよい。

一方、柱状ラミナ冷却のラミナ衝突部の冷却能力につ

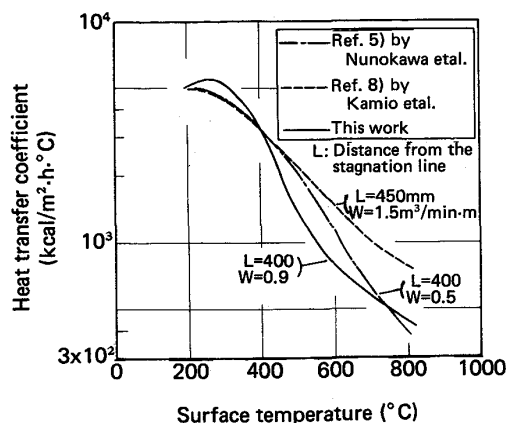


Fig. 7. Heat transfer coefficient at a distance from the stagnation line as a function of surface temperature of plate.

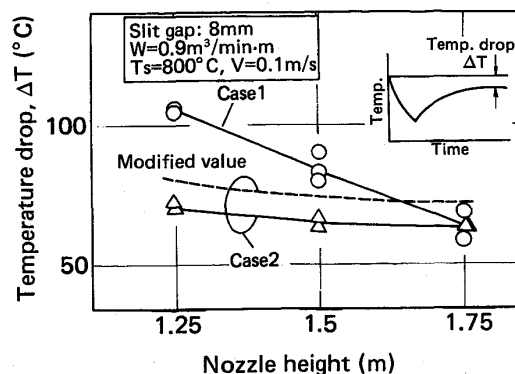
いては、八田ら¹³⁾が水温 $T_W = 20^\circ\text{C}$ 、流速 $v_0 = 1 \sim 5.6$ m/s の条件にて約 1.4×10^4 kcal/m²·h·°C の値の熱伝達率を得ており、柱状ラミナと膜状ラミナの衝突部における熱伝達率はほぼ同等であると考えてよい。

次に沿い流れ域の冷却曲線 Fig. 5 の②～⑤においては、水量が冷却能力に及ぼす影響が強いこと及び膜衝突部に近い距離にあるものほど冷却速度が早いことがわかる。これは主に沿い流れする冷却水が膜衝突部から離れるにしたがつて、その様子が銅板面を覆う膜状の流れから局所的なすじ状の流れに変化することに起因する。すなわち、膜衝突部から成長するブラックゾーン域に入るまで、沿い流れが膜状の領域では膜沸騰熱伝達が主体であるが、すじ状の領域では膜沸騰熱伝達とさらに弱い冷却能力の放射伝達のみとなる場合が混在するからである。

沿い流れ域の冷却能力を一次元モデルで解析を行うため、Fig. 2 (b) に示した装置を用い冷却実験を行い、熱伝達率を求めた。Fig. 7 は水量 $0.9 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}$ で膜状の流れの膜衝突部から 400 mm 位置における計算で得られた熱伝達率と銅板表面温度との関係を示す。布川ら⁵⁾と神尾ら⁸⁾のデータも併記した。本実験と布川ら、神尾らの実験条件は異なるが、銅板表面温度に対する熱伝達率の傾向は一致している。一方、Fig. 6 に示した膜衝突部の熱伝達率と比較すると沿い流れ域の熱伝達率は小さく、特に $700 \sim 800^\circ\text{C}$ の温度域におけるそれは数百 kcal/m²·h·°C である。

2.2.3 膜衝突部の冷却能力に及ぼす干渉流の効果

隣接するスリットノズルヘッダー間に形成される干渉流の位置は、ヘッダーへの供給水量や被冷却材の速度などにより変化する。干渉流が膜衝突部付近で起こらない



Case 1; There is no mixing region Case 2; There is a mixing region near stagnation line

Fig. 8. Effect of nozzle height on temperature drops.

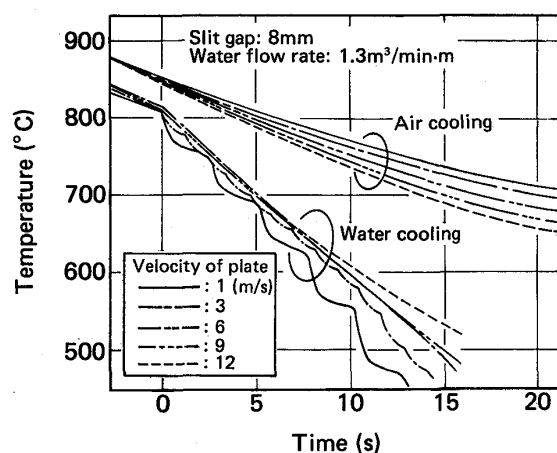


Fig. 9. Cooling curves obtained in cooling test using the moving steel plate at various velocities.

場合、干渉流の領域では沿い流れ域よりも冷却能力が向上することが考えられる¹⁴⁾。しかし、干渉流が膜衝突部近傍に形成する場合、それが冷却能力にどのような影響を及ぼすかは不明である。

膜衝突部近傍の干渉流の有無による冷却能力差を冷却終了後の温度回復 ΔT の大小により評価した。また、干渉流の強弱はノズル高さによつて変化すると考えられるので、それを 1.25, 1.5 及び 1.75 m の 3 ケースについて実験を行った。Fig. 8 はノズル高さと ΔT との関係を示す。実験条件の違いにより生ずる冷却長の差を考慮し、Fig. 7 に示した熱伝達率を用いて温度降下量を計算し修正を加えた結果も併記した。その結果によると、膜衝突部に干渉流が生じない方が ΔT が大きく、冷却能力が大きい。

2.2.4 膜状ラミナの冷却能力に影響を及ぼす因子

膜状ラミナ冷却の効率を向上させるためには、冷却能力が大きい膜衝突部でより多く冷却することが重要な点の一つとなる。Fig. 9 は移動鋼板の冷却実験で得られた代表的な冷却曲線を示す。鋼板速度の遅い冷却曲線には、試験片一回転ごとの水冷にともなう急激な温度降下が見られる。

冷却能力の評価には平均熱流束 $\bar{q}$ を用い、次式(1)で定義した。

$$\bar{q} = c \cdot \gamma \cdot h \cdot (\Delta T_i - \Delta T_a) / (l_w / v) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 c ；比熱 (kcal/kgf·°C)， γ ；比重量 (kgf/m³)， h ；板厚 (m)， ΔT_i ， ΔT_a ；試験片の全温度降下量及び空冷による温度降下量 (°C)， l_w ；試験片の冷却長 (m)， v ；鋼板速度 (m/h) である。以後、鋼板速度が 6 m/s の場合の 800°C から 750°C 及び 600°C から 550°C に下がる領域での平均熱流束を求めた。

ノズル高さが平均熱流束に及ぼす影響を Fig. 10 に示す。鋼板温度が 600°C から 550°C に下がる過程においては、有効ノズル高さ以下では平均熱流束は幾分減少する傾向にある。これは、2・2・1 項の観察結果で示したように、ノズル高さが有効ノズル高さを越すと膜衝突部において冷却水の飛散が始まることに関連し、衝突直後の冷却水がブラックゾーン拡大に有効に活用されていないためと推定される。一方、800°C から 700°C に下がる過程においては、有効ノズル高さにかかわらず平均熱流束はほぼ一定である。しかもその値は、温度域が 600°C から 550°C でノズル高さが 1.5 m の場合とほぼ同一である。鋼板速度が 6 m/s の時、膜状ラミナ直下で SG の長さを通る時間は約 1 ms である。この間の冷却状態は膜沸騰が生じることなく遷移沸騰域となるが、完全な濡れ状態に至らないと考えられる。従つて、遷移沸騰にともなう冷却水の飛散が生じ、有効ノズル高さ以下

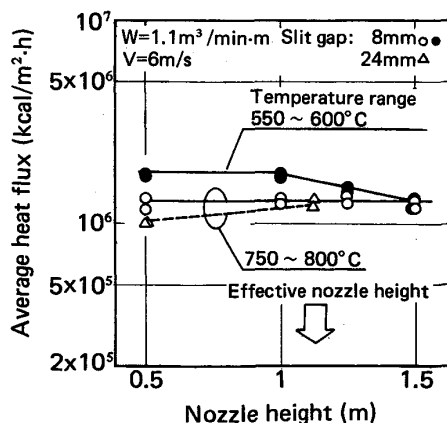


Fig. 10. Effect of nozzle height on average heat flux of water cooling by slit nozzle.

でも冷却能力の向上が得られなかったと推定される。

また、Fig. 10 に SG が 24 mm の例を併記したが、本実験範囲では SG が 8 mm と 24 mm との平均熱流束に大きな差はない。

Fig. 11 は水量と平均熱流束との関係を示す。同図にはパイプノズルの結果も示しているが、これについては後述する。水量が平均熱流束へ及ぼす影響は低水量側で大きく高水量側で小さい傾向にある。また平均熱流束は低い温度域の方が大きい値である。これは主に膜衝突部の冷却域が低温域でより拡大しているからと考えられる。次に冷却対象の温度域の低下に伴う冷却能力の向上は柱状ラミナ冷却より膜状ラミナ冷却の方が大きい。

3. 膜状ラミナ冷却と柱状ラミナ冷却の比較検討

3・1 基礎実験によるラミナ直下域の冷却能力の比較

柱状ラミナ冷却の結果を Fig. 11 に併記した。パイプノズルについても適正な条件が存在するはずであるが、実験に用いたノズルは(株)神戸製鋼所加古川製鉄所熱延工場ランアウトテーブル設備のものと同一である。800~750°C と 600~550°C の二つの温度域で水量に対する膜状ラミナと柱状ラミナの平均熱流束の関係は交差している。ノズル直下の冷却能力において、常に膜状ラミナ冷却が柱状ラミナ冷却よりも冷却能力が高いとは言い難い。

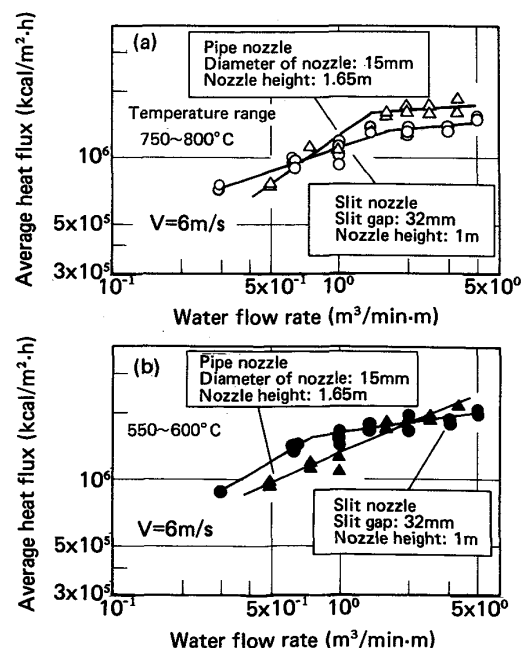


Fig. 11. Effect of water flow rate on average heat flux obtained in cooling test by slit nozzle and pipe nozzles.

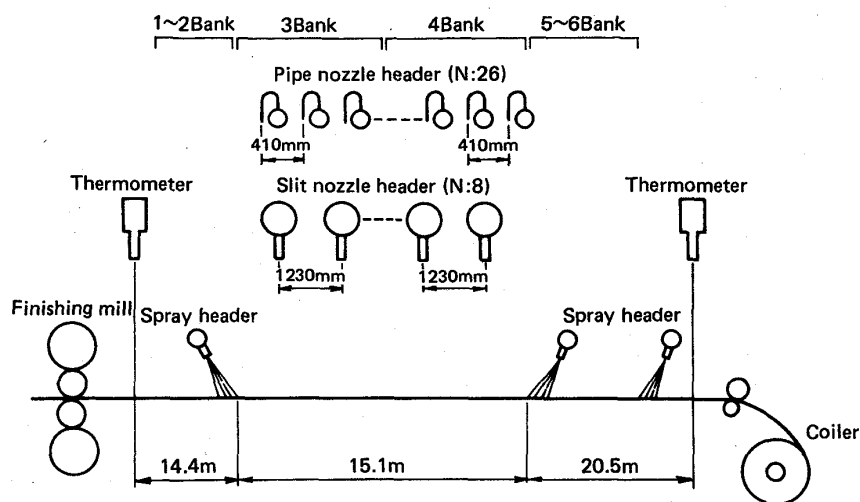


Fig. 12. Arrangement of headers in runout table at Kakogawa Works.

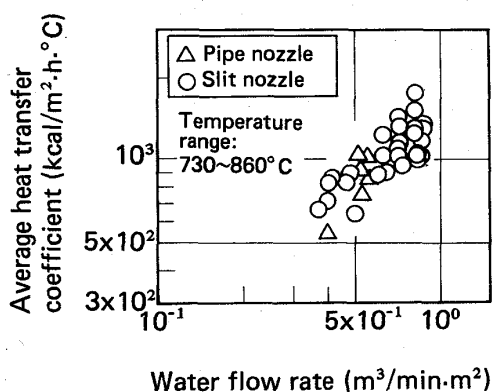


Fig. 13. Effect of water flow rate on average heat transfer coefficient obtained in cooling test by slit nozzles and pipe nozzles in runout table.

3・2 工業実験による総合的な冷却能力の比較

実験設備の概要を Fig. 12 に示す。柱状ラミナ冷却設備と膜状ラミナ冷却設備を併設し、その前後にはスプレイ水による水切り装置を設け、鋼板上面の冷却水がラインの上流側や下流側に自由に移動するのを防止し、冷却能力を評価するための冷却長を固定した。冷却前後の鋼板温度測定には、仕上圧延機出側及び巻取機前に設置されている放射温度計を用いた。実験では板厚 2.35～2.40 mm の低炭素鋼を用い、板速度を 13～15 m/s、圧延仕上温度を約 860°C に条件を限定した。この時、巻取機前の温度計は 735～790°C を示した。

Fig. 13 は膜状ラミナ冷却と柱状ラミナ冷却における水量密度と平均熱伝達率との関係を示す。平均熱伝達率は冷却前の測温値を初期値とし、冷却後の測温値と計算値が一致するように求めた。水冷以外の空冷部分では、空冷操作を実施し、すべて放射熱伝達による冷却と仮定

Table 3. Experimental conditions.

	This work	Ref. 1) by R. BORSI <i>et al.</i>	Ref. 7) by MITUZUKA <i>et al.</i>
Slit gap (mm)	8	—	4
Space between headers (m)	1.23	3.15	0.457
Nozzle height (m)	1.45	1.8	1.0
Water flow rate (m³/min·m²)	0.4～0.9	0.1～0.5	1～3
Temperature (°C)	730～860	800	860

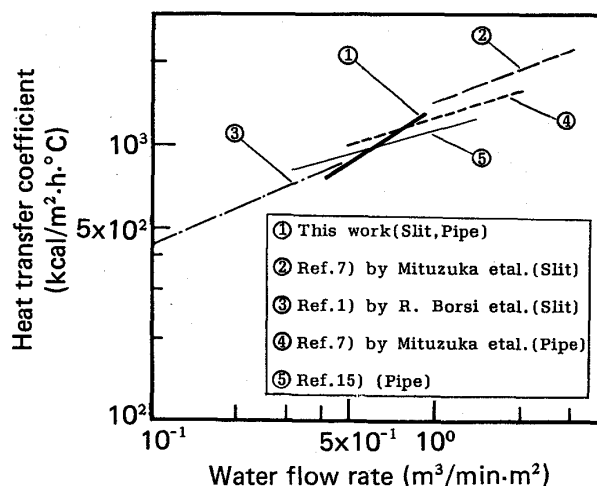


Fig. 14. Relationship between water flow rate and heat transfer coefficient in about 800°C steel sheet.

した解析より得た放射率 0.9 を用いた。800°C 前後の温度域を対象とした時水量密度 0.4～0.9 m³/min·m² の範囲において、膜状ラミナ冷却設備と柱状ラミナ冷却設備の冷却能力はほぼ同じである。

本研究、三塚ら⁷⁾及び R. BORSI ら¹⁾の主な設備、冷却条件を Table 3 に示す。また鋼板温度が約 800°C における熱伝達率と水量密度との関係を Fig. 14 に示す。本研究の水量密度範囲は R. BORSI らと三塚らの間であ

り、熱伝達率と水量密度との関係においては、本研究は両研究の結果の間を補うものとなっている。Fig. 14には日本鉄鋼協会報告書¹⁵⁾及び三塚ら⁷⁾の得た柱状ラミナの値も示した。約 800°C の温度域を対象とした時水量密度 0.4~0.9 m³/min・m² において、膜状ラミナ冷却と柱状ラミナ冷却との冷却能力はほぼ同じと考えてよい。本研究よりも水量密度が大きい三塚らの範囲においては、膜状ラミナ冷却の冷却能力が柱状ラミナ冷却のそれよりやや大きくなることが、一方水量密度が小さい R. BORSI らの範囲においては小さくなることが予想される。

次に干渉流の冷却能力へ及ぼす効果について述べる。本研究における干渉流は膜衝突部近傍に形成された。このことからヘッダー間隔が 0.457 m と狭い三塚らの場合には、本研究と同様に干渉流は膜衝突部近傍ないしは直下に形成されたと推定される。一方、ヘッダー間隔が 3.15 m の R. BORSI らの場合には本研究の場合より膜衝突部から離れた位置に干渉流が形成されたことも考えられる。

R. BORSI らと三塚らの得た結果を互いに外挿し、熱伝達率を比較すると、干渉流が膜衝突部からより離れていると推定される R. BORSI らの得た熱伝達率は三塚らのそれよりも小さい。本研究の Fig. 8 と Fig. 10 から推察して、これは、鋼板温度が約 800°C の領域では水膜の乱れによる鋼板と衝突時に生じる冷却水の飛散現象と膜衝突後に生じる沸騰に伴う飛散現象とがほぼ同じ位置で生じ、これが膜衝突部の冷却を支配しているためと考えられる。もし、この考え方が成立するならば、約 800°C の温度域における冷却では、干渉流が冷却能力に及ぼす影響は小さいと考えてよい。

なお、本研究の工場実験では 800°C 付近の温度域を対象としたが、ホットランアウトテーブル冷却で対象となる温度範囲は主に約 860~500°C である。コイルとして巻き取られる前の 600°C 以下の温度域を考えた場合、Fig. 11 に示したように膜状ラミナ冷却の能力向上の大きいことが期待される。熱伝達率による比較検討ができなかつた布川ら⁵⁾の報告では対象とした鋼板温度域が 700°C 以下であり、そのことが膜状ラミナ冷却に期待する冷却効果として顕著に現れたとも考えられる。

4. 結 言

鋼板上面を冷却するための膜状ラミナ冷却について、基礎実験により設備及び操業条件と水膜挙動及び冷却能力との関係を検討した。次に、基礎実験及び工場実験に

より、膜状ラミナ冷却と柱状ラミナ冷却の冷却能力について検討した。本研究により得られた知見を要約すれば以下のとおりである。

(1) 膜状ラミナが鋼板と衝突する部分の冷却能力はノズル高さが 1.24 m の時水量が 0.3~0.9 m³/min・m の範囲において水量によって変わらない。

(2) 膜状ラミナの落下位置近傍に干渉流が形成されると、衝突部での水膜が乱され、冷却能力は低下する。この傾向はノズル高さが低い時に著しい。

(3) 表面温度が 800~750°C の移動する鋼板を膜状ラミナ冷却する場合、ノズル高さとスリットギャップが冷却能力に及ぼす影響はほとんどないと考えてよい。

(4) 鋼板温度が約 860~730°C の範囲で工場実験した結果、水量密度が 0.4~0.9 m³/min・m² の範囲において膜状ラミナ冷却と柱状ラミナ冷却との間に特に大きな冷却能力の差は認められなかつた。

本研究について有益なご検討を賜りました京都大学八田夏夫助教授、(株)神戸製鋼所中尾正和室長及び高塚公郎博士に深謝いたします。

文 献

- 1) R. BORSI, E. BOTTACHI, S. FINOCCHIARO, D. FRANCORI, M. GHERSI, F. GIRALDI, M. MELLINA and A. PORTA: International Conf. on Steel Rolling, Japan (1980), p. 1333
- 2) M. MELLINA, E. BOTTACHI and F. GIRALDI: Iron Steel Int. (1981), Aug., p. 193
- 3) T. HOPE: World Steel & Metalworking, 6 84/85 p. 111
- 4) 本城 厚, 布川 剛, 八木沢繁, 浜松茂喜, 真子 孝, 八木英則: 鉄と鋼, 71 (1985), S1151
- 5) 布川 剛, 竹本 裕, 岩波紀夫, 加藤平二, 樋口均一, 高見 章: 石川島播磨技報, 21 (1981) 4, p. 1
- 6) 柳 謙一, 橋本律男, 横原克己, 中村義満, 江口章介, 坂本 潤, 平井慎二: 三菱重工技報, 20 (1983-5) 3, p. 352
- 7) 三塚正志, 福田敬爾, 横倉照夫, 若子敦弘, 久保清和: 鉄と鋼, 69 (1983), S1190
- 8) 神尾 寛, 田頭基司, 上野 康, 国岡計夫, 野口孝男, 藪内捷文: 鉄と鋼, 70 (1984), S376
- 9) F. C. KOHRING: Iron Steel Eng. (1985) 13, p. 30
- 10) 例えば, 大中逸雄: コンピュータ伝熱・凝固解析入門 [丸善]
- 11) J. KOKADO, N. HATTA, H. TAKUDA, J. HARADA and N. YASUHIRA: Arch. Eisenhüttenwes., 55 (1984) 3, p. 113
- 12) 中西重康, 石谷清幹, 越智敏明, 森田五生: 日本機械学会論文集 (B編) 46 (1980 年, 4) 404, p. 714
- 13) 八田夏夫, 小門純一, 花崎紘一: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 959
- 14) 大友朗紀, 高塚公郎, 小林洋一郎: 鉄と鋼, 72 (1986), S347
- 15) 特別報告書 No. 29, 鋼材の強制冷却 (日本鉄鋼協会編) (1978), p. 206