

鋼材水冷時における低温度域での温度むら発生機構

東海林 成人*・播木 道春*・原口 洋一*・森田 昌孝*²

Mechanism of Uneven Thermal Distribution Formation during Water Cooling
at Low Temperature for a Moving Plate

Naruhito SHOJI, Michiharu HARIKI, Yoichi HARAGUCHI and Masataka MORITA

Synopsis : In order to investigate the basic mechanism of uneven thermal distribution formation at low temperature during water cooling for a moving plate, an experimental study with full cone spray cooling or flat spray cooling was carried out.

The results obtained under certain conditions are summarized as follows.

(1) The quench point was at a temperature range between 230°C and 240°C during full cone spray cooling, and it was almost constant for a stationary plate and a moving plate.

(2) The cooling curve varied with starting temperature of cooling, velocity of the plate and water flux during flat spray cooling. Three types of thermal distribution were formed in the following order, as starting temperature of cooling decreased.

Type I: Uneven thermal distribution was formed in the case where the temperature of the whole surface after cooling is higher than the saturation temperature of water (100°C).

Type II: Uneven thermal distribution was formed in the case where the surface was cooled partially to the saturation temperature of water.

Type III: Uniform thermal distribution was formed in the case where the temperature of the whole surface was cooled to the saturation temperature of water.

(3) Both quenching during full cone spray cooling and forming of type II-III during flat spray cooling could be explained by a boiling mechanism (i.e. film boiling, transition boiling and nucleate boiling) in a temperature range of 180°C to 200°C.

Key words: water cooling; quench point; spray cooling; boiling; transition.

1. 緒言

高温鋼材の冷却には、冷媒として冷却能力、経済性、取扱い易さ、安全性などの点から水が多用されている。しかし、水冷却は温度制御の安定性が悪く、特に500~300°C以下の低温度域では顕著な温度むらが発生しやすい。このことは水が沸騰型冷媒であり、低温度域では核沸騰が発生し冷却能力が大きく変化する上、その発生時期、場所の予測が困難なことに起因している¹⁾。

一方、鋼材の水冷却技術に関しては、これまで多くの研究がなされ、水冷方法ごとに冷却能力の整理がなされてきた²⁻⁴⁾。それらの多くは、被冷却材が静止した状態で冷却ノズル直下近傍の温度測定から導出されたものである。しかし実際の製造工程では鋼材は搬送されながら冷却される場合が多く、冷却水の流動や鋼材との固液接触状態は搬送の影響を受けて変動するため、既存の研究結果から温度むらの発生（水冷却の不安定現象）を推定することは容易ではない。

そこで本報では、低温度域で搬送される鋼材の温度むら発生機構を基礎的に明らかにすることを目的として、冷却

水噴射用ノズルにフルコーンスプレーノズルおよびフラットスプレーノズルを使用した移動冷却試験を行った。本試験条件ではフルコーンスプレーは液滴、フラットスプレーは連続流をなしていたため、それぞれの固液接触状態（冷却面と冷媒との接触状態）と冷却特性との関係について考察し、温度むらの発生機構の基本的検討を行った。また、これらの結果に基づいて温度むら防止法についての考察も行った。

2. 試験方法

Fig. 1 に冷却試験装置の概略図を示す。試験材を搬送する台車は水平面に対して35°の傾斜をなしており、この台車に電気炉で約400°Cに加熱した厚さ0.8mmの冷延鋼板を固定し、所定速度で上方から1パスだけ搬送した。その間に試験材に対して垂直、下方からフルコーンスプレーあるいはフラットスプレーによって1ヘッダのみの水冷却を行った。测温は Fig. 1 に示すように熱電対を冷却面の裏側の、①: 隣り合ったノズルの中間、②: ①と③の間、③: ノズル直下の3ヶ所に溶着して行った。なお本試験の加熱は

平成11年9月27日受付 平成12年2月28日受理 (Received on Sep. 27, 1999; Accepted on Feb. 28, 2000)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki-ken 314-0255)

* 2 住金マネジメント(株)鹿島省エネ事業部 (Kashima Energy Div., Sumikin Management Co., Ltd.)

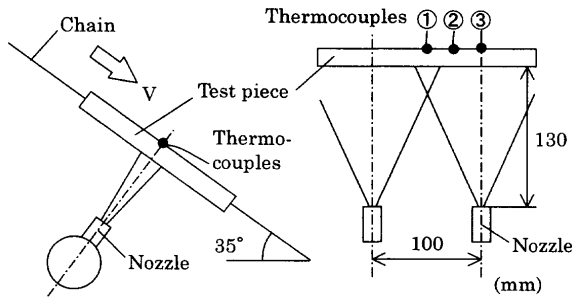


Fig. 1. Schematic diagram of cooling experiment.

Table 1. Experimental conditions of cooling experiment.

Test piece size	w300mm × h250mm × t0.8mm	
Heating temp.	400 °C	
Starting temp. of cooling (Ts)	180 °C - 300 °C	
Water temp.	30 °C	
Cooling nozzle	Full cone spray	Flat spray
Nozzle angle	90°	45°
Water flow (at 1 Nozzle)	4 l/min	4 l/min
Nozzle pressure	0.036 MPa	0.024 MPa
Moving velocity (V)	0.50 m/s	0.37, 0.50 m/s

大気雰囲気下で行ったが、顕著なスケールの生成は観察されなかった。傾斜した試験材に対して下方から水冷却を行った理由は、水乗りを防止し、冷却水が試験材に衝突した後冷却面に生じる流動を下流方向に限定して、現象をできるだけ単純化するためである。

Table 1 に試験条件を示す。本試験では市販のフルコーンスプレーとフラットスプレーの2種類を使用した。フルコーンスプレーは90°の高噴霧角度のノズルを選択し、水量密度のむらや冷却面に形成される流動の影響を排除した条件で試験を行った。一方フラットスプレーは、本試験では連続流をなしており、測温点①では冷却水が干渉し、冷却水の衝突部下流には顕著な流動も形成される条件で試験を行った。

また、各冷却ノズルに対して試験材を静止した状態での冷却試験も行った。試験材の板厚が1.2 mm、冷却開始温度 (Ts) が320°Cであること以外は、Table 1 の条件と同一である。

3. 試験結果

3.1 噴射冷却水特性

Fig. 2 にフルコーンスプレーおよびフラットスプレーの試験材表面での水量分布の測定結果を示す。フルコーンスプレーについては噴射円の直径上の水量密度、フラットスプレーについては幅方向10 mmあたりの水量で評価している。

フルコーンスプレーの場合、本試験では水量密度のむらは小さいと判断される。冷却水は微細な個々の液滴として試験材に衝突しており、試験材が加熱された状態では、液

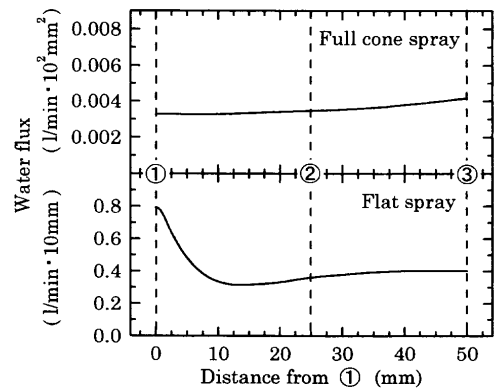


Fig. 2. Water flux distribution of full cone sprays and flat sprays.

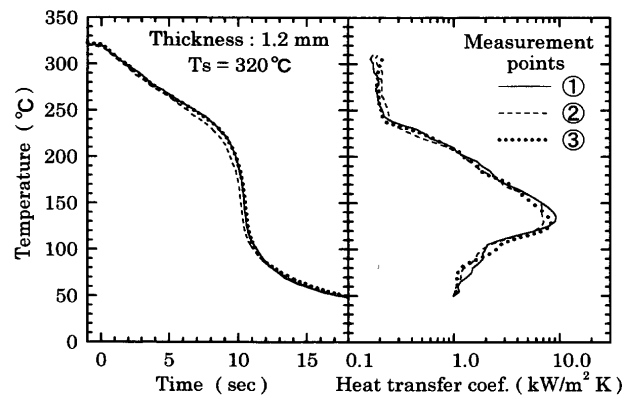


Fig. 3. Cooling curves and heat transfer coefficient curves during full cone spray cooling for a stationary steel plate.

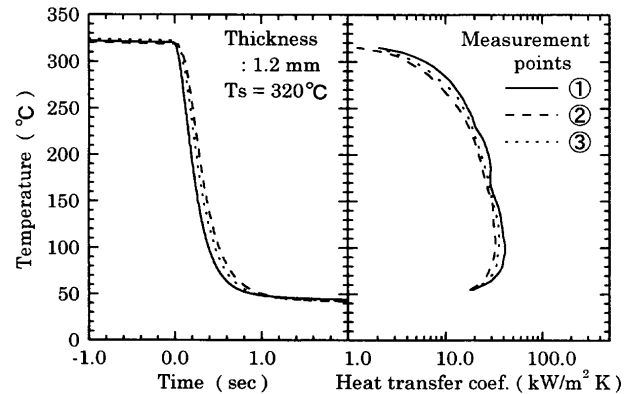


Fig. 4. Cooling curves and heat transfer coefficient curves during flat spray cooling for a stationary steel plate.

滴は瞬時に跳ね返るため試験材表面に沿った流動は形成されなかった。

一方、フラットスプレーでは、測温点①付近で冷却水が干渉し水量が大きくなっており、冷却水の衝突部下流においても試験材表面に沿った顕著な流動が形成されていた。

3.2 静止冷却試験結果

Fig. 3 および Fig. 4 にフルコーンスプレーおよびフラットスプレーによる静止冷却試験における各点の測定温度とそれらより求めた熱伝達率曲線をそれぞれ示す。ただし、

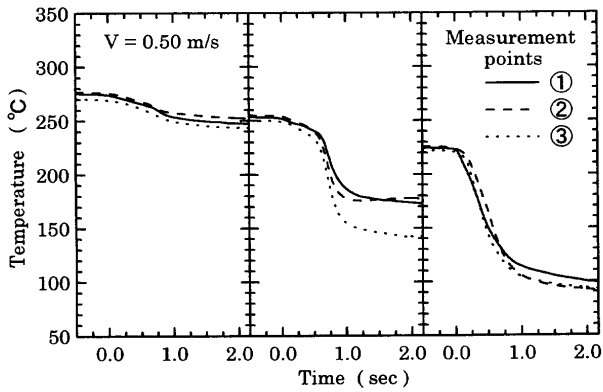


Fig. 5. Cooling curves during full cone spray cooling for a moving steel plate. (Velocity: 0.50 m/s)

Fig. 3 および Fig. 4 の左図の縦軸の温度は冷却面の反対側（測温点）の温度であり、右図の縦軸の温度は冷却面の温度である。なお、熱伝達率曲線は冷却曲線から板厚方向一次元の伝熱逆計算方法にて導出した⁵⁾。以後の熱伝達率曲線もすべてこの方法で導出している。

Fig. 3 より、フルコーンスプレーによる静止冷却では、水冷初期は熱伝達率が小さく、膜沸騰とみなせる伝熱状態にあることがわかる。そして230~240°Cの温度域からは冷却速度が飛躍的に増加し、遷移・核沸騰の伝熱状態に変化していることがわかる。したがって、急冷段階の開始点である「クエンチ点」⁶⁾は、この場合230~240°Cの温度域と判断され、各測温点での差異は小さかった。

一方、フラットスプレーによる静止冷却では、Fig. 4 より、各測温点は冷却開始直後に急冷されており、これらの冷却曲線は若干の時間差が生じているものの概ね同一であることがわかる。また、熱伝達率は極めて高いレベルで、各測温点での差異は比較的小さい。Fig. 4 のような冷却曲線は、静止ラミナ冷却における冷却ノズル直下での被冷却材温度が比較的高い場合(600~700°C)でも一般的に観測されるものであり、本試験でのフラットスプレー冷却が、ラミナ冷却のような連続流による冷却形態に類似していることがわかる。

3.3 フルコーンスプレーによる移動冷却試験結果

Fig. 5 に移動速度が0.50 m/sで、冷却開始温度(T_s)が270°C、250°Cおよび220°Cのときのフルコーンスプレーによる冷却曲線を示す。なお冷却特性は、本来冷却面の温度で考察されなければならないが、本試験では板厚の薄い(0.8 mm)試験材を使用しており、計算上は冷却面とその裏面(測定面)の温度差は T_s あるいはクエンチ点近傍で2°C未満であり、ほぼ同一と判断されたため、Fig. 5 および3.4節のフラットスプレーでの試験結果では補正を加えない測温面上の温度で取扱った。同図より、 T_s が270°Cの場合、冷却速度が小さく温度降下量も少ない。 T_s が250°Cの場合は、冷却初期の冷却速度は小さいが、230~240°Cの温度域から飛躍的に大きくなっている。また、

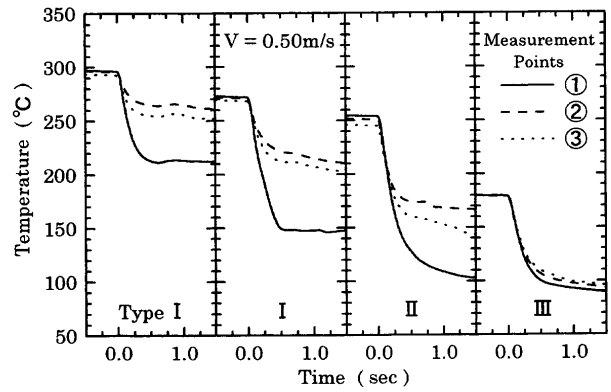


Fig. 6. Cooling curves during flat spray cooling for a moving steel plate. (Velocity: 0.50 m/s)

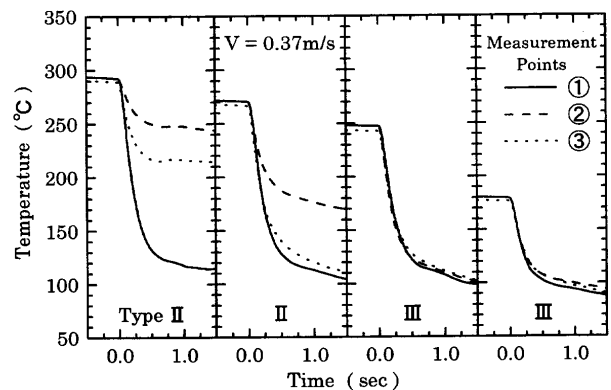


Fig. 7. Cooling curves during flat spray cooling for a moving steel plate. (Velocity: 0.37 m/s)

さらに T_s が220°Cに低下した場合は、冷却開始直後から冷却速度が大きくなっている。つまり、230~240°Cの温度域を境として冷却速度が変化しており、移動冷却の場合も静止冷却の場合と同様に、この230~240°Cの温度域がクエンチ点であると判断される。なお、 T_s が250°Cの場合のみ、測温点③の曲線が他の2点の曲線と大きく離れていることから、温度むらは、 T_s が270°Cと220°Cの場合は比較的小さいが、250°Cの場合は大きいことがわかる。

3.4 フラットスプレーによる移動冷却試験結果

Fig. 6 および Fig. 7 に移動速度が0.50 m/sおよび0.37 m/sで、冷却開始温度(T_s)が290°C、270°C、250°Cおよび180°Cのときのフラットスプレーによる冷却曲線を示す。これらのすべての曲線は、3測温点ともほぼ同時に強冷却が始まっていることより、衝突部上流での冷却はほとんどなかったものと推定することができる。

また温度むらとなる各測温点の冷却曲線の差異に関しては、Fig. 6 において T_s が290°Cの場合、測温点①で最も冷却が進行しており、これは①の位置の流量が最も多い(Fig. 2参照)ことに対応している。続いて測温点③で冷却が進行し、測温点②は最も冷却が小さい。 T_s が270°Cや250°Cにおいてもほぼ同様であったが、 T_s が低下するに従って温度降下量が増加しており、 T_s が250°Cでは測温点

①で水の飽和温度（大気圧下で蒸気が液相と平衡するときの温度：100°C）近くまで冷却が進行した。また、 T_s がさらに下がった180°Cの場合は3点とも飽和温度まで冷却されており、温度むらは生じていない。

移動速度が0.37 m/sのFig. 7においては、 T_s が290°Cの場合、0.50 m/sの場合と同様に測温点①で最も冷却が進行しているが、その温度低下量は大きく、飽和温度近くまで冷却が進行している。 T_s が270°Cになると、測温点③が①と同様に飽和温度近くまで冷却が進行しており、結果として②だけが取り残された状態となっている。更に T_s が250°C、180°Cに低下すると、3点とも飽和温度近くまで冷却され温度むらはなくなる。

以上のようにフラットスプレーによる冷却では、冷却開始温度、移動速度、水量分布などの違いが冷却曲線に影響し、温度分布に変化が現れた。3・3節で述べたように冷却面温度は測定面温度とほぼ同じであるから、これらの温度分布を以下の3つのタイプに分類することにする。

温度分布Ⅰ：温度むらが生じているが、冷却面には水の飽和温度まで冷却された部分がない状態。

温度分布Ⅱ：冷却面の一部が水の飽和温度まで冷却されており、他の部分と温度差を生じている状態。

温度分布Ⅲ：冷却面全面が水の飽和温度まで冷却され、温度むらがない状態。

Fig. 6 および Fig. 7 には、それぞれの温度分布の属するタイプを併記した。当然ながら、冷却開始時の鋼材温度が高温から低温になるに従って、順に温度分布Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの状態を呈している。なお、ここで特に注目すべきことは、温度分布Ⅱの状態は水の飽和温度まで冷却された低温部と他の部分（高温部）とに大きく二極化する特徴的な温度むらであり、また、後述するように沸騰型冷媒である水の性質として回避の困難な温度むらであるという点である。

4. 考察

4.1 フルコーンスプレーの冷却特性

Fig. 8 にフルコーンスプレー冷却における測温点③の冷却曲線より求めた熱伝達率曲線を示す。同図より、静止冷却の場合と同様に230~240°Cを境として高温側で熱伝達率は低く、低温側では高くなっており、この230~240°Cの温度域で沸騰状態が遷移しているものと考えられる。

この沸騰状態の遷移メカニズムに関して、菊地らはプール沸騰における沸騰状態の遷移に関する検討から、膜沸騰時にも蒸気膜を破って断続的に固液接触が生じており、この固液接触時に局所的に冷却面温度が低下して、この低下温度がある基準温度以下に達した時に沸騰状態が遷移・核沸騰に変化するというモデルを提案している⁷⁻¹⁰。本試験のフルコーンスプレー冷却は、液滴の衝突によって冷却面

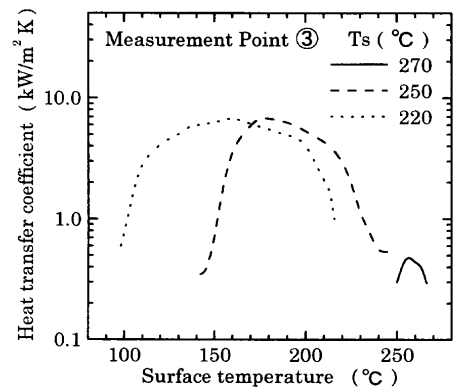


Fig. 8. Heat transfer coefficient curves during full cone spray cooling for a moving steel plate.

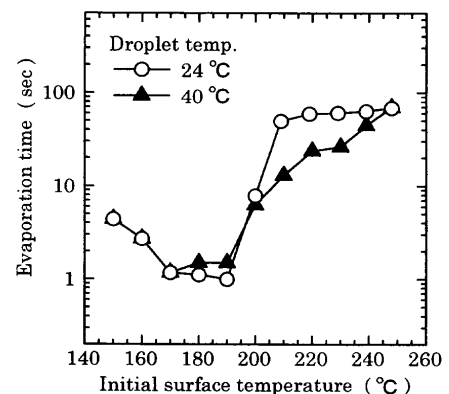


Fig. 9. Evaporation curves of a water droplet on steel surface.

には瞬間的・局所的な温度降下が生じており、これが時間的・空間的に繰り返されることによって、全体として冷却が進行している。ここに菊地らの考え方を援用すれば、液滴衝突時の瞬間的・局所的な冷却面の低下温度がある基準温度に達した時に継続した固液接触が発生して沸騰状態が遷移するというメカニズムを想定することができる。

そこで、その基準温度を明らかにするため、移動冷却試験と同一の鋼板を使用して蒸発曲線の調査を行った。試験は鋼板を水平に置き所定温度に均熱後、その上面に直径約3 mmの水温24°Cおよび40°Cの水滴を静かに垂らして、その水滴が蒸発し消失するまでの時間を測定し、得られた蒸発曲線をFig. 9に示す。同図より約210°C以上の高温域では蒸発時間が著しく長く、約190°C以下の低温域では蒸発時間が短いことがわかる。したがって、約210°C以上の高温域では、瞬時に水滴-鋼板間に蒸気膜が形成されるため熱移動の効率が悪く、また、鋼板温度が約190°C以下の低温域では、水滴-鋼板間には蒸気がほとんど発生せず、いったん鋼板表面に接触した水滴は遊離せずそのまま接触し続けるため熱移動の効率が良く、瞬時に水滴は沸騰・気化したものと考えられる。これらの考察より、両温度域の境である180~200°Cの温度域が、水滴が鋼板に直接接触を継続できるか否かの基準となる温度域である

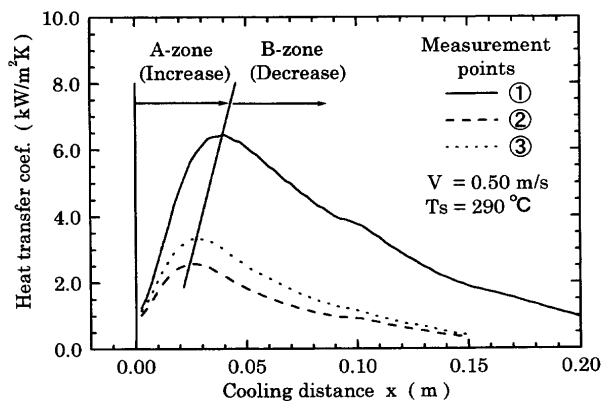


Fig. 10. Heat transfer coefficient changes in the direction of motion during flat spray cooling. (Type I)

と判断される。さらに、フルコーンスプレー冷却における沸騰状態の遷移は、液滴衝突時の瞬間的・局所的な冷却面低下温度が180~200°Cの温度域に達した時になされ、本試験では試験材の平均温度が230~240°Cのときにこの条件が満たされているものと想定することができる。

以上のようなメカニズムを想定すると、フルコーンスプレー冷却における沸騰状態の遷移は、液滴衝突時の温度降下量、すなわち液滴の衝突時の表面温度に依存することとなる。なお、本試験では試験材の移動速度は液滴の噴出速度に比べて遅いので、液滴の衝突状態は移動速度の影響をあまり受けず、クエンチ点も影響をあまり受けなかったものと考えられる。

なお、冷却開始温度が250°Cの場合の温度むらに関しては、遷移後の冷却速度が著しく大きいために、遷移の開始時期、クエンチ点、水冷終了時期の僅かな差異が比較的大きな温度差となって現れているものと考えられる。

4.2 フラットスプレーによる温度分布Iの発生機構

移動冷却時の冷却水と鋼板との接触状態を観察することは困難であるため、本報では、搬送方向の冷却面の熱伝達率変化から固液の接触状態を推定することにした。Fig.10に、移動速度0.50 m/s、冷却開始温度290°Cのフラットスプレー冷却における搬送方向の熱伝達率変化を示す。図の横軸は、測定された冷却曲線から板厚方向一次元の伝熱逆計算方法によって、冷却面での温度と熱伝達率の経時変化を導出し、その時間軸を、試験材の移動速度を考慮して搬送方向の長さに変換したものである。同図に示すように本試験で得られた熱伝達率曲線はいずれもはじめは熱伝達率が増加し（A領域）、ある最大値を示した後に緩やかに減少する（B領域）曲線であった。冷却開始は3測温点ともほぼ同時である一方、熱伝達率の最大を示す位置が各測温点で異なっていることから、A領域は冷却水の衝突部と冷却面に沿った流水部の両方に対応しているものと考えられる。したがって、冷却水の衝突部で3測温点同時に熱伝達率が増加し始め、以後の流水部においても冷却が継続し、熱伝達率曲線の最大値以降で冷却水が冷却面から離脱して

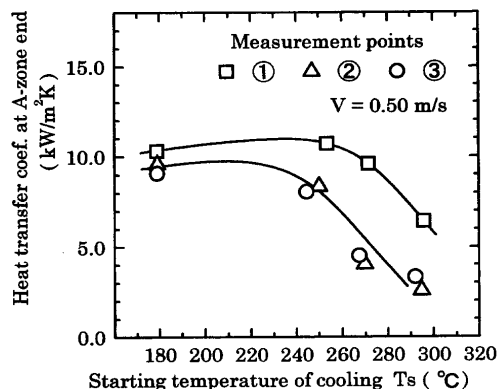


Fig. 11. Relation between starting temperature of cooling and heat transfer coefficient at A-zone end.

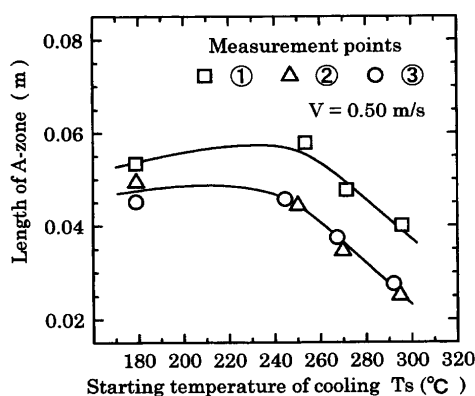


Fig. 12. Relation between starting temperature of cooling and length of A-zone.

いるものと推定される。そして各測温点の最大熱伝達率の位置は、冷却に有効に寄与する流水部の長さの差異に対応しているものと考えられる。本報では熱伝達率曲線から導かれるこのA領域を「冷却水の準衝突域」として定義することにする。本試験条件では各測温点の最大熱伝達率は常に数1000 W/m²K以上であり、一般的な遷移・核沸騰の熱伝達レベルであった。したがってA領域では冷却面に部分的な固液接触が生じているものと考えられ、B領域はその冷却面に接触した冷却水の蒸発・乾燥過程に対応するものと考えられる。なお本報では、A領域の熱伝達率曲線の勾配から外挿により、冷却長さの基準（A領域の開始位置）を設定した。実際の熱伝達率曲線はこれより僅かに上流から熱伝達率の増加が始まっており、搬送方向の伝導伝熱や衝突部上流の流水冷却の影響が生じているものと考えられるが、これらの影響は小さい上、A領域の冷却と異なるために除外した。

Fig.11に冷却開始温度 (T_s) と最大熱伝達率との関係を、Fig.12に冷却開始温度 (T_s) とA領域の長さとの関係を移動速度が0.5 m/sの場合について示す。いずれの測温点においても、 T_s が低下するに従って最大熱伝達率およびA領域の長さが共に増加し、ある水準に到達してからはその水準で推移するという傾向を示しているが、この傾向は移動速

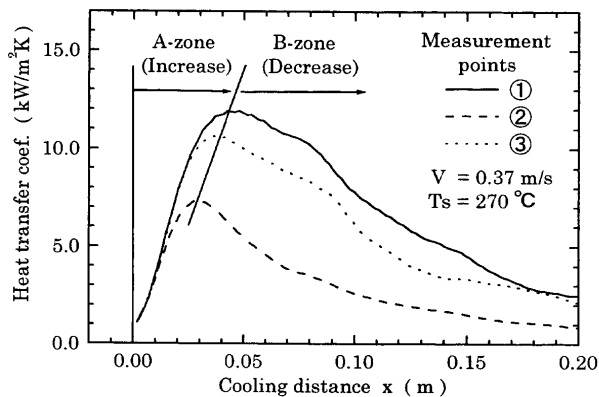


Fig. 13. Heat transfer coefficient changes in the direction of motion during flat spray cooling. (Type II)

度が0.37m/sの場合についても同様であった。また、冷却水が干渉して流量密度の大きい測温点①の最大熱伝達率およびA領域の長さは、他の測温点に比べて大きく、このことが温度むらの原因になっていると考えられる。したがって、前述した温度分布Iは、A領域における冷却水の流動状態や固液接触状態に応じた冷却能の差異によって生じる温度むらと言うことができる。また、Fig.11およびFig.12の傾向から、Tsがさらに高くなった場合は最大熱伝達率およびA領域の長さ共に減少し、各測温点間の差異も少なくなつて温度むらが小さくなることが予想される。以上の考察により、温度分布Iは、冷却水の衝突部から流水部にかけての冷却能（ノズル近傍の冷却能）が、低温度域になつて急激に増加することによって顕在化する温度むらであると考えられる。

なお、Fig. 4の静止冷却試験結果から鋼材搬送時の冷却能を予測しようとする、搬送方向の有効冷却長さを設定する必要がある。しかしFig.12に示すように、冷却長さは温度域により大きく変動するため、その予測精度は著しく低下することが予想される。また連続流による冷却の場合、搬送に伴う流動の変化も考えられる。したがって、特に温度むらの検討を行う場合は、実際に移動冷却を行う必要があると思われる。

4.3 フラットスプレーによる温度分布IIおよびIIIの発生機構

Fig.13に温度分布IIを呈した移動速度0.37m/s、冷却開始温度270°Cのフラットスプレー冷却における搬送方向の熱伝達率変化を示す。この冷却条件では測温点①と③が水の飽和温度近くまで冷却され、A領域通過後の熱伝達率が比較的大きいレベルを保ち、減少が緩やかであることがわかる。本試験では、冷却開始温度が250°C以上で水の飽和温度近くまで冷却されたすべての条件でこのような傾向が観察された。

Fig.14にA領域後端での冷却面温度とA領域通過後0.1秒の熱伝達率との関係を示す。同図に示すように、200°C付近で、水の飽和温度まで冷却された条件(a)と、そうで

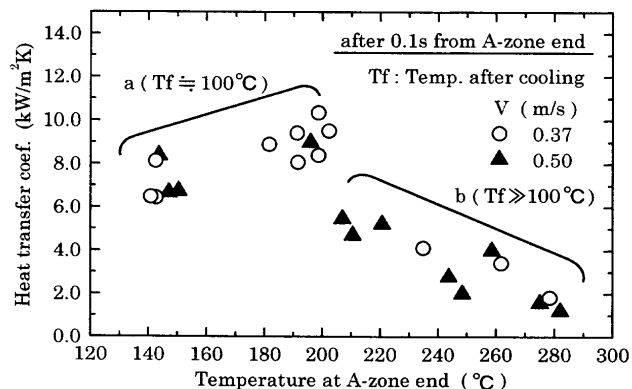


Fig. 14. Effect of temperature at A-zone end on heat transfer coefficient right after A-zone.

ない条件(b)の熱伝達レベルに大きな差がある。このことから、A領域で200°C以下に達した場合はそれ以降もしばらく熱伝達率が高く保持されるが、A領域通過時に200°Cより高温であった場合は熱伝達率が低下していることがわかる。この現象は、前述した水の固液接触の特性を反映したものと推定される。すなわち、A領域では冷却水が噴射時の運動量により固液接触が強制的に実現しているが、A領域を通過した後の固液接触状態は冷却面温度の影響を大きく受け、200°C以下に達した場合は以降も固液接触が継続して水の飽和温度近くまで冷却が進行するのに対し、200°C以上の場合は接触していた水が急速に蒸発・乾燥して熱伝達率が急速に低下したものと推定することができる。フルコーンスプレー冷却の液滴の衝突に相当するのが、フラットスプレー冷却では準衝突域にあたるが、フラットスプレー冷却では、準衝突域での流動および固液接触状態は、移動速度や冷却面温度の影響を大きく受けるため、フルコーンスプレーと異なり、冷却曲線もそれらの影響を受けて変動しているものと考えられる。この現象はラミナ冷却などの冷却水が連続流をなす冷却方法に共通するものと考えられる。

なお温度分布IIIの場合は、冷却面全面で上述の継続した固液接触が成立したために、いずれの測温点も水の飽和温度近くまで冷却され、温度むらが発生しなかったものと考えられる。

4.4 低温度域での温度むら防止方法に関する一考察

前述したようにフラットスプレー冷却の場合、冷却開始温度が高温から低温へ下がるにしたがい、順に冷却後の冷却面が全面乾いた状態の温度分布I、部分的に水が付着した状態の温度分布IIおよび全面に水が付着した状態の温度分布IIIとなる。温度分布Iは、温度むらの原因がノズル近傍の冷却能むらにあるので、この均一化を図ればある程度改善することが可能であると考えられる。しかし温度分布IIは、水が沸騰型冷媒であるために、冷却中に必ず固液が非接触から接触状態に局所的に遷移することによるものであるから、水冷却を行う以上回避が困難な温度むらである

と考えられる。したがって、可能であれば、温度分布IIを生じる危険がある冷却開始温度を避ける〔具体的にはフラットスプレー（連続流）冷却の場合、ノズル近傍の冷却で180~200°Cを含む温度域の水冷をしないようにする〕ことが一防止策であると考えられる。ただしフラットスプレー（連続流）冷却は、ノズル近傍の冷却能が移動速度や冷却面温度などの影響を受けるため、上述の条件を満足するか否かをあらかじめ判定することは難しく、その意味で低温域の冷却には不向きであると考えられる。

フルコーン（液滴）冷却の場合も、温度むらを防止するためにはクエンチ点を避けて冷却することがポイントである。ただしフルコーン（液滴）冷却の場合、クエンチ点が比較的安定しているため、遷移後鋼材を常温まで冷却させるような場合には、低温域での冷却方法としてフルコーンスプレー（液滴）冷却を採用することは妥当であると考えられる。

5. 結言

低温度域においてフルコーンスプレーおよびフラットスプレーを使用した移動冷却試験を行い、温度むらの発生機構を基礎的に検討し、本試験条件において以下の結果を得た。

(1) フルコーンスプレー冷却では、230~240°Cの温度域にクエンチ点があり、この温度域は移動の有無に関わらずほぼ一定であった。また、温度むらは冷却温度範囲にクエンチ点が含まれる冷却をしたときに発生した。

(2) フラットスプレー冷却では、冷却開始温度、移動速度、水量の違いなどにより冷却曲線が変化し、鋼材の冷却開始温度が高温から低温になるに従って、以下の順に3つのタイプの温度分布を呈した。

温度分布 I : 温度むらを生じているが、冷却面には水の飽和温度(100°C)まで冷却された部分がない状態。

温度分布 II : 冷却面の一部が水の飽和温度まで冷却され、

他の部分と温度差を生じている状態。

温度分布 III : 冷却面全面が水の飽和温度まで冷却され、温度むらがない状態。

(3) フラットスプレーにおける温度分布Iは、ノズル近傍の冷却能むらによって生じ、特に低温度域になって冷却能が増加することによって顕在化する。

(4) フルコーンスプレーにおけるクエンチおよびフラットスプレーにおける温度分布IIおよびIIIは、冷却面温度が180~200°Cの温度域以下に低下した部分で継続した固液接触が生じ、伝熱状態が膜沸騰から遷移・核沸騰に変化するというメカニズムによって発生するものと推察される。ただし、温度分布IIは冷却面が部分的に、温度分布IIIは全面が遷移した状態にあると考えられる。

最後に、本試験条件は比較的低流量であり、本報に示したクエンチ点および温度分布IIあるいはIIIに移行する冷却温度は、試験の諸条件により変動すると思われる。しかし、水の接触状態が冷却面のある温度を境に遷移し、その遷移状態が温度むらに影響するという考え方は共通であり、そのような冷却水の流動や固液接触状態を考慮した統一的な冷却能のモデル化が今後の課題であると考えられる。

文 献

- 1) M.Mitsutsuka: *Tetsu-to-Hagané*, **79** (1993), N405.
- 2) 鋼材の強制冷却, 日本鉄鋼協会, 東京, (1978).
- 3) 鉄鋼製造プロセスにおける冷却技術, 日本鉄鋼協会, 東京, (1988).
- 4) 沸騰熱伝達と冷却, 日本機械学会編, 日本工業出版, 東京, (1989).
- 5) J.V.Beck: *Int. J. Heat Mass Transf.*, **13** (1970), 703.
- 6) H.Ohkubo and S.Nishio: *Seisan-Kenkyu*, **45** (1993), 474.
- 7) Y.Kikuchi, T.Hori and I.Michiyoshi: *Int. J. Heat Mass Transf.*, **28** (1985), 1105.
- 8) Y.Kikuchi, T.Hori, H.Yanagawa and I.Michiyoshi: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **26** (1986), 576.
- 9) Y.Kikuchi, T.Ebisu and I.Michiyoshi: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **55** (1989) 515, 1989.
- 10) Y.Kikuchi, T.Nogaki and R.Matsumoto: *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **56** (1990) 527, 2038.