

高水量密度冷却の制御圧延への適用

Applying Intensive Cooling with High Water Flow Rate for Controlled Rolling

上岡 悟史 UEOKA Satoshi JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)
中田 直樹 NAKATA Naoki JFE テクノリサーチ 取締役西日本ソリューション本部長・博士 (工学)
日野 善道 HINO Yoshimichi JFE テクノリサーチ 計測ソリューション本部 CAE センター 主査

要旨

厚鋼板の制御圧延では、低温圧延に起因して生産性の低下が発生する。従来は、シャワー状の冷却で低温圧延開始までの時間を短縮していたものの、水量密度の少なさゆえに冷却速度が限られかつ全体を均一に冷却することができなかった。そこで、高張力鋼の生産性向上のためにミル直近において高速で冷却する技術の可能性についてラボ実験で検討した。

Abstract:

In conventional controlled rolling, time loss is generated during controlled passes by shower cooling. The shower cooling caused less uniform cooling because of less amount of water flow. In order to quantify cooling performance of intensive inter-pass water cooling, which was introduced as effective method for increase of productivity of high strength steel plate, laboratory tests were conducted. Intensive inter-pass cooling, which has high cooling performance, is possible to achieve improved production in controlled rolling.

1. はじめに

造船, エネルギー, 建築などの分野で用いられる鋼板は, 需要家からの高強度化, 高靱性化などの要求がますます高まり, それに応えるべく, 高張力鋼の商品開発が進められている。鋼板を高強度化する方法の一つとして, Nb, V, Mo などの元素を添加して, 固溶強化, 析出強化を図る方法があるが, 近年は, これらの強化元素の価格上昇が著しく, 製造コストを押し上げるという問題がある。こうしたニーズから, 高強度化のもう一つの方法として, 制御圧延(Controlled Rolling) や制御冷却 (Controlled Cooling) などの TMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技術¹⁾ の開発, 適用が進められてきた。このうち, 制御冷却では, 鋼板に大量の冷却水を供給して高い冷却能力を得る方法などが実用化されている^{2,4)}。

一方, 制御圧延は, オーステナイトの未再結晶温度域で加工を加えることによって転位を蓄積し, 結晶粒界だけでなく結晶粒内にも変態の核生成サイトを発生させて組織を微細化させて強度の向上を図る技術であり, 制御冷却よりも早くから, 実機に適用された。未再結晶温度域で与える歪が大きいほど, そして加工温度が低いほど組織が強化される^{5,6)}。制御圧延材の製造では, 一般の圧延材よりも仕上圧延温度を低く設定しているため, 多くの場合, 圧延の途中

で温度調整のための冷却待ちの発生により生産能率が低下するという問題がある。制御圧延材の冷却待ちの時間を短縮する手段としては, 従来からシャワー状の水を供給して冷却する技術があるが⁷⁾, 水量密度が少ないゆえ冷却速度が限られ, しかも鋼板全体を均一に冷却することが難しい。高効率な冷却を行うためには, 水量密度の高い冷却を適用する必要があるが, 表面温度がより高い, 例えば 1000℃以上での冷却実験を行った研究は限られており, 水量密度も限られた範囲 (0.033 m³/m²s 以下) で行われていた⁸⁾。一方, 薄鋼板の仕上圧延が完了するよりも前に鋼材を冷却する技術として, 粗圧延最終スタンド出側での水冷や, 仕上スタンド間での水冷の実機への適用事例報告はある⁹⁻¹¹⁾。しかし, より高温で板厚が厚い薄鋼板の粗圧延のパス間や, 厚鋼板の圧延パス間での冷却の必要性や課題などについては, ほとんど議論されてこなかった。

本報では, このような背景に基づき, 板厚が比較的厚く高温の鋼板に圧延パス間での冷却によって生産能率の高い制御圧延を実現する可能性を探るべく, 基礎的な検討を行った結果を示す。高水量密度での水冷実験によって, 鋼板表面温度 850~1100℃という比較的高い温度域での冷却能力の定量化を行った。

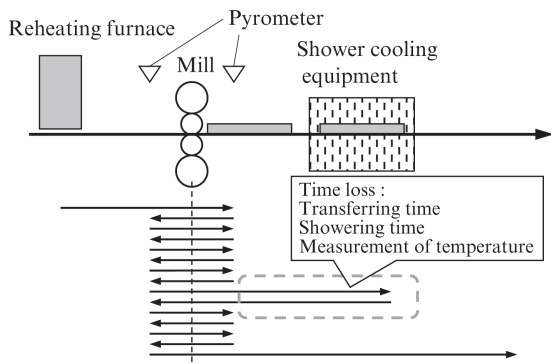


図1 従来の制御圧延の搬送方法

Fig. 1 Plate transfer in conventional controlled rolling

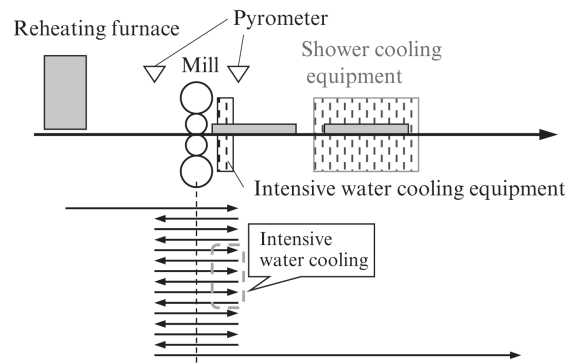


図2 強冷却制御圧延の搬送方法

Fig. 2 Plate transfer in controlled rolling with intensive water cooling

2. 制御圧延での生産能率向上の課題

2.1 制御圧延での生産能率低下の問題

図1に、厚鋼板の制御圧延材の搬送パターンを模式的に示す。リバー式の圧延機で成形、幅出しを行い、さらに所定の板厚まで粗圧延を行った後に、放射温度計で鋼板の表面温度 T_s を測定する。この時、測定値が制御圧延開始の目標温度 T_1 よりも高ければ、冷却待ちが発生する。制御圧延開始までに必要な温度降下 $\Delta T (=T_s - T_1)$ が小さければ、そのまま空冷待機するが、ある程度以上大きければ、搬送方向下流側にある温度調整用の冷却設備まで搬送して、水冷を行う場合がある。

この冷却設備は、圧延中の鋼板に反りなどが発生した場合、衝突して破損するおそれがあるので、通常、圧延機から数十 m 離れた位置に設置されている。冷却待ちの時間とは、鋼板を圧延機と冷却設備の間を搬送する時間、水冷を行う時間、復熱させて目標の温度まで冷却できたことを放射温度計で確認するまでの時間の合計のことを言い、一般の圧延材に比べて生産能率を低下させている原因でもある。

鋼板の反り発生の問題に対処したうえで、圧延機から冷却設備までの距離を短くして搬送時間を短縮すること、水冷を強化して冷却時間を短縮すること、さらには水冷の精度を上げて復熱の確認を不要とすることなどが、生産能率向上のためには有効である。

2.2 圧延機直近での冷却の課題

図2に、制御圧延材で温度調整する際の待ち時間を短縮して、生産能率を向上させる圧延方法の概念を示す。圧延機の直近に冷却設備を設置し、圧延パス間で鋼板に冷却水を供給して、その搬送中に大きな温度降下を得られるような強冷却を行えば効果的である。

この冷却を複数のパスで適用すると、制御圧延開始までに必要な温度降下 ΔT を小さくすることができる。その結果、温度調整のための待ち時間を大幅に短縮でき、場合によっては遠方のシャワー冷却設備への搬送も省略でき、生産能

率の大幅な向上を図ることができる。図2に示すようなプロセスを実現するためには、水冷、圧延、材質など多くの課題がある。水冷に関しては、鋼板全体を急速かつ均一に冷却する技術を確認することが第一である。しかも、その冷却能力を正確に把握し、精度のよい温度制御を行うことが重要である。また、圧延で反りが発生しないよう、鋼板上下面の温度差は適正な範囲内に抑える必要がある¹²⁾。この冷却方式では、鋼板表面近傍で温度の急降下と上昇（復熱）が繰り返され、従来とは大幅に異なる温度履歴となる。制御圧延を行う様々な鋼種に対して、特に表面近傍で材質上の問題がないかを確認することもまた重要である。

一方、冷却と復熱を繰り返していると、鋼板内部の温度の把握がしにくくなる。圧延温度を従来と同じように放射温度計による表面温度の測定値で管理することの是非についても議論する必要がある。このうち、本研究では、リバー式圧延のパス間で高温の鋼材を効率よく水冷するための条件を明らかにすることを目的として、高水量密度での冷却実験を行った。

3. 水冷実験による冷却能力の確認

3.1 実験装置および実験条件

図3に冷却実験装置を、表1に実験条件を示す。試料は、冷却時の変態やスケールの生成・剥離による不安定要素を排除するため、SUS304の鋼板とした。寸法は、板厚 30 mm、板幅 280 mm、長さ 600 mm とし、加熱温度や冷却時の温度変化を測定するために、外径 1.6 mm、素線径 0.25 mm のシース型 K 熱電対を表面から 2.5 mm の深さに埋め込んだ。

冷却水は、水温を 30°C に調節した貯水槽からポンプでヘッドに供給した後、300 mm 四方のヘッド噴射面に多数設けたノズルから放出した。ノズル型式としては、直径 $\phi 3$ の孔型ノズルのほか、内径 $\phi 3$ 、 $\phi 6$ の円管ノズルを用いた。そのピッチは鋼板の搬送方向 25 mm、幅方向 30 mm の密配置を基本

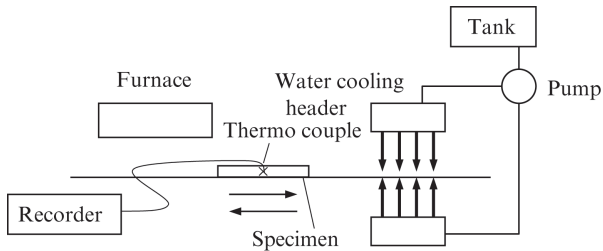


図3 強冷却実験装置

Fig. 3 Schematic illustration of laboratorial intensive cooling test

表1 強冷却実験条件

Table 1 Water cooling condition in laboratory tests

Specimen	SUS304 30 ^t × 280 ^w × 600 ^L
Cooling area	300 mm × 300 mm
Nozzle type	φ3 hole-type φ3 circular-pipe φ6 circular-pipe
Reheating temperature	1 200°C
Cooling start temperature	1 100°C
Water temperature	30°C
Water flow rate	0.17~0.39 m ³ /m ² s
Injection distance	50~300 mm
Transfer speed	1.0 m/s

とし、φ6ノズルでは搬送方向50mm、幅方向60mmとした粗配置でも実験を行った。冷却水の水量密度は、冷却面に投入される単位面積単位時間あたりの水量と定義し、0.17 m³/m²sを基本とした。φ3ノズルよりも圧力損失の小さいφ6ノズルについては、0.17~0.39 m³/m²sの範囲で冷却能力を調査した。

ノズル先端と鋼板の被冷却面との距離は50mmを基準とし、上面冷却では300mm、下面冷却では100mmまで離れた条件まで確認した。冷却実験は、上下面それぞれ別々に行い、冷却能力を評価した。電気炉で1200°Cに加熱した鋼板を取り出して搬送台車にセットした後、熱電対温度が1100°Cとなった時に搬送を開始し、冷却ゾーンを4回(2往復)通過させた。各搬送の間は、復熱のために30s以上の待機を行った。搬送速度は1.0m/sとして、水冷時間0.3sを確保した。2~4回目の冷却開始温度は、1000°C、900°C、800~850°C程度であった。冷却水は、ヘッダから高速で噴射されるため、鋼板に衝突した後は大きく跳ね返り、搬送ラインから外へ飛散した。上面冷却では、その後、液滴となっていくらか残る滞留水や、外部で跳ね返って再び鋼板上に降りかかる飛散水がいくらかあったが、冷却水噴射領域の入出側でのエアスプレー噴射によって完全に排除した。

3.2 実験結果

冷却能力は、水冷開始時から水冷後の復熱がほぼ終了す

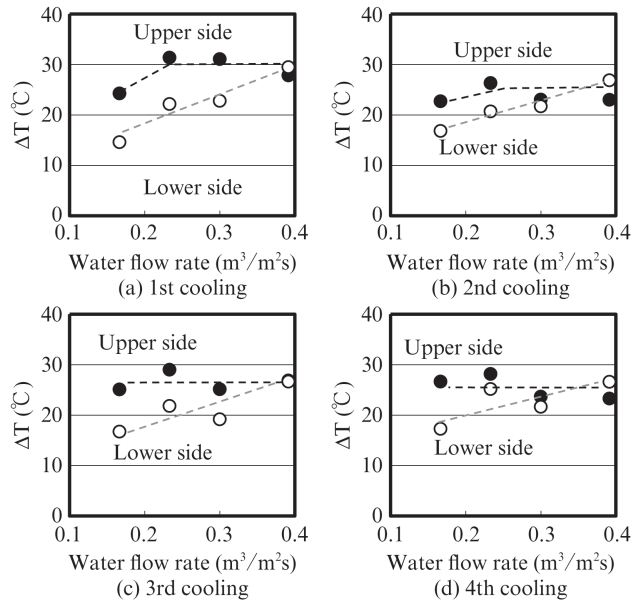


図4 流量密度の影響 (φ6パイプノズル, 近接配置)

Fig. 4 Effect of water flow rate on cooling performance (φ6 circular-pipe, closely arrangement)

るまでの30秒間の温度降下と、同じ時間空冷が続いたとして計算される温度降下との差ΔTとして求め、評価した。本実験の温度範囲では、鋼板の熱物性値はほぼ一定と見なすことができ、水冷開始時と30秒後の温度分布のかたちがほぼ同じであるから、水冷による熱移送量はΔTに比例して求められる。したがって、ΔTは冷却能力評価の実用的な指標である。以下に各種冷却条件がΔTに及ぼす影響を示すが、ΔTは概ね15~30°Cの範囲内で変化した。φ6ノズル密配置の噴射面でより高い水量密度まで条件を拡げて実験を行った結果を図4に示す。上面冷却では、流量が増えるにつれて水膜の抵抗が増すので冷却能力の向上効果はだんだんと小さくなり、0.25 m³/m²s以上では温度降下ΔTがほとんど変わらなくなった。

一方、下面冷却では冷却水の滞留がないため、冷却水の新陳代謝は円滑に行われたと考えられ、今回の実験条件の範囲では温度降下増大の限界は確認されなかった。

図5に、冷却水の噴射距離が温度降下ΔTに及ぼす影響を示す。ΔTは、噴射距離が長くなるほど小さくなり、その傾向は高温域の方が強い。上面冷却では、噴射距離が200mmを超えるとΔTの減少傾向は弱まる。一方、下面冷却では、鋼板へ到達した後の落下冷却水が新たに供給される冷却水を干渉して、鋼板への到達を阻害する。この傾向は噴射距離が長いほど大きく、噴射距離を50mmから100mmに伸ばした時、下面冷却での温度降下ΔTは、上面冷却よりも大きな比率で低下した。

図6に、ノズル型式およびその設置密度による冷却能力の違いを示す。まず、上下面に共通した傾向としては、温度降下ΔTは、ノズルの総数が少ないφ6ノズル粗配置とし

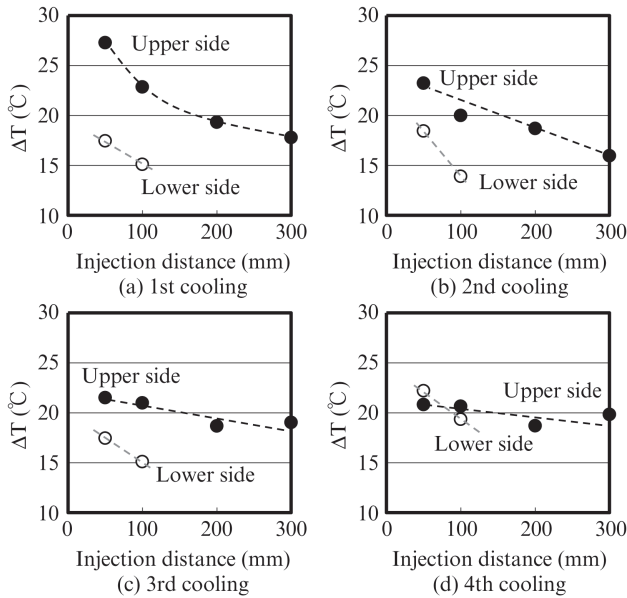


図5 噴射距離の影響 (φ3孔型ノズル, 流量密度 0.17 m³/m²s)
 Fig. 5 Effect of injection distance on cooling performance (φ3 hole-type, water flow rate 0.17 m³/m²s)

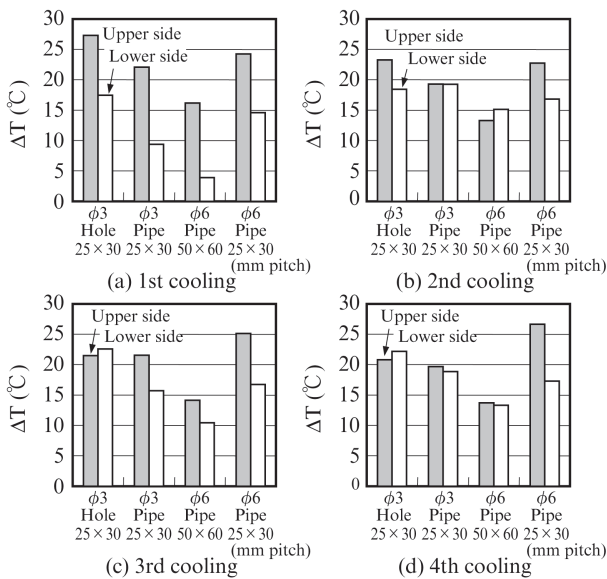


図6 各ノズル形式の冷却能力の比較 (流量密度 0.17 m³/m²s)
 Fig. 6 Comparison of cooling performance in nozzle types (Water flow rate 0.17 m³/m²s)

た場合が最も小さい。残りの3種類のノズルでのΔTは、上面冷却では全てほぼ同等であり、下面冷却ではφ3孔型ノズルが最もよく冷え、φ3円管ノズルとφ6円管ノズル密配置がほぼ同等であった。ΔTを温度域毎に比較すると、上下の冷却能力には大差が見られないが、1回目の1100℃での下面冷却でのみ他の条件と比べて冷え難いことが明らかになった。

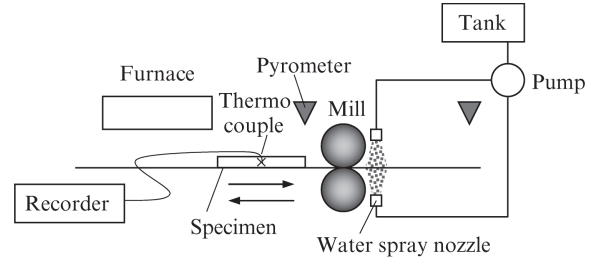


図7 圧延・冷却実験の概要

Fig. 7 Schematic illustration of laboratorial rolling and water cooling test

表2 圧延・冷却実験条件

Table 2 Rolling and cooling conditions in laboratory tests

Size of specimen	70 ^t × 120 ^w × 320 ^l
Reheating temperature	1 200°C
Rolling schedule	70 → 50 → 43 → 34 → 24 → 17 mm
Rolling speed	0.5 m/s
Rolling temperature	1st pass at 1 080°C, 4th pass at 900°C
Water cooling	Before 3rd pass (optional)
Water supply	Upper side 2.0 litter/s Lower side 2.3 litter/s

4. 圧延と冷却を組み合わせた実験

4.1 実験装置および実験条件

ミルの入出側で強冷却を行うと、表層付近の温度が急激に降下し、従来と異なる温度履歴となり、目的とする材質が得られなくなることが懸念される。ミル直近冷却が材質に及ぼす影響を調査するため、熱間圧延機を用いて制御圧延を模擬した実験を行った。

図7に冷却実験装置を、表2に実験条件を示す。供試材には、C 0.145%, Si 0.25%, Mn 1.10%を含有する降伏強度 320 MPaクラスの汎用造船用鋼材のスラブから切り出したものを用いた。寸法は、板厚 70 mm, 板幅 120 mm, 長さ 320 mmとし、板幅中央かつ板厚中央に加熱温度や、圧延中の温度変化を測定するための熱電対を埋め込んだ。

これを電気炉で1200℃まで加熱した後、粗圧延を想定した3パスで計51%の圧下を加え、板厚34mmとした。熱電対は圧延が進むと途中で破断する場合があるので、4パス目の開始タイミングは放射温度計でのモニターにより判断した。

実験では放冷中の鋼板表面が900℃を示した時点で板厚全体が未再結晶温度域に入ったとみなし、制御圧延を想定した2パスの圧延を行い、計50%の圧下を加えた。3パス目と4パス目の間で空冷待機する場合を従来の冷却待ちをする条件、3パス目直前で水冷を行って4パス目までの待機が大幅に短縮される場合を、パス間冷却を行う条件として模擬した。そのパス間冷却は、水温を30℃に調節した冷却水を貯水槽からポンプで供給し、市販の角吹きノズルより鋼

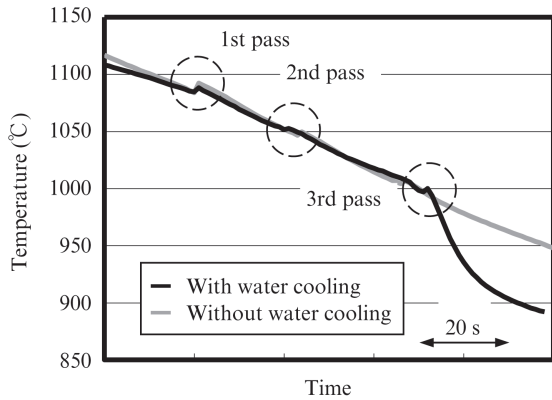


図8 圧延・冷却実験時のサンプル中心部の温度履歴

Fig. 8 Measured temperature in laboratorial rolling tests (Center in thickness)

板上下面に向けてスプレー噴射して行った。両者とも、5パス目が終了した後は放冷した。なお、リバース圧延の圧下設定は手動で行ったので、待機を行わない場合でも圧延パス間の時間は30秒程度かかった。

4.2 実験結果

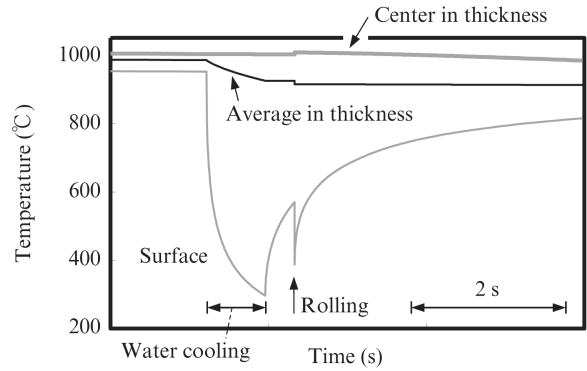
図8に、1～3パス目の圧延における鋼板の板厚中央での熱電対指示温度の変化を示す。圧延時に、加工発熱による若干の温度上昇が確認できる。3パス目入側での水冷による温度降下は、板厚中央では圧延後の15秒程度の間に見ることが確認できた。水冷による板厚平均の温度降下は、50℃程度である。一方、水冷を行わなかった場合は、3パス目の圧延後に40秒の空冷待機を行って、4パス目の圧延を開始した。圧延による反りの発生は、パス間水冷の有無に関わらずほとんどなかった。また、表面外観の差は見られず、疵も発生していなかった。

4.3 水冷および圧延中の鋼板温度解析

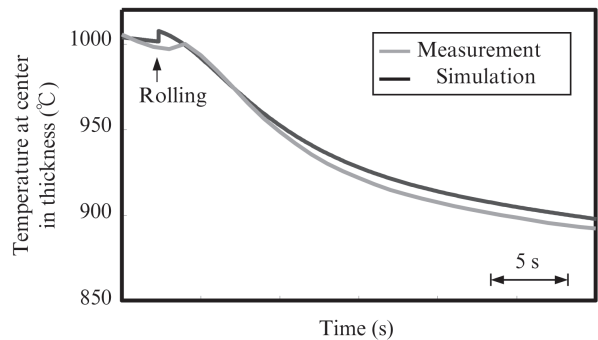
本実験の結果をもとに温度解析を行い、水冷および圧延中の鋼板温度履歴を明らかにするとともに、水冷の効果が発現する時間遅れについて定量評価する。

解析は、板厚方向の熱の流れのみを考慮した1次元差分モデルで行った。解析では、温度降下量が測定値と一致するように、熱伝達係数や冷却時間などの境界条件を与えた。水冷ゾーン長さを0.3m、水冷熱伝達係数を20kW/m²K、その後、0.15mを空冷の状態で行き、圧延される条件とした。なお、実験ではスプレー噴射後の水の飛散が激しく、必ずしも解析で仮定したように水冷と空冷の区間を明確に分けることができたとはいえない。

図9に、水冷後すぐに3パス目の圧延を行った時の温度変化を示す。図9(a)に、鋼板表面と内部の温度変化を解析した結果を示す。0.7秒の水冷で表面温度は300℃近くまで低下していると計算された。表面での温度変化は非常に



(a) 計算温度履歴
(a) Simulated thermal histories



(b) 計算値と実測値の比較
(b) Comparison of measurement and simulation

図9 冷却後の温度変化

Fig. 9 Change in temperature after water cooling

激しいが、鋼板内部、例えば表面から0.5mmの深さでは、400℃程度までしか降下しない。図9(b)に、板厚中心温度の解析結果を実験結果と比較して示す。両者とも圧延後10～15秒かけてゆっくりと温度降下する傾向を示しており、温度履歴も良好な一致を示している。表面で冷却した効果が熱拡散により板厚中心まで伝わるのは圧延10秒後程度であって、その間の温度降下速度は解析では最大8.6℃/sであった。熱拡散がほぼ終了すると、温度降下は鈍化し、空冷の状態に移行した。4パス目の制御圧延は、3パス目の圧延後から30秒程度経過して開始したが、数値解析によれば、その時の板厚方向の温度分布は、4パス目の圧延前に空冷で60秒程度待機した条件とほぼ同じ状態であった。

5. 冷却の諸因子が冷却能力に及ぼす影響

今回の実験でノズルの型式や配置によって異なる冷却能力を、定量的に比較できるデータとして採取することができた。

図4に示すように、上面冷却では水量密度が0.25m³/m²sを超える範囲では、温度降下ΔTの上昇が見られなくなる。上面冷却では、鋼板に供給した後の冷却水は、滞留して水膜を形成する。水量密度を増やすと噴流の速度が上昇する

ので、滞留水膜の攪拌が強化される一方、水膜が厚くなって、鋼板に到達しようとする水流に対して抵抗力が大きくなる。それぞれが冷却能力を増大させる効果、減少させる効果として相殺され、温度降下 ΔT の上昇が飽和したと考えられる。

一方、下面冷却での温度降下 ΔT は、水量密度を上げるのにもなって上昇した。これは、冷却後に落下してくる水が円管ノズルの隙間を通して円滑に排出され、新たな冷却水を鋼板にほとんど障害なく供給できるためと考えられる。水量密度をさらに上げて冷却を行う場合は、円管ノズルを長くして、先端が水没しないようにすることが重要である。

図5に示すように、 $\phi 3$ 孔型ノズルを用いた場合、噴射距離が長くなると温度降下 ΔT は大幅に減少し、その減少傾向は上面冷却よりも下面冷却の方が強い。上面冷却では、噴射距離が長くなるほど周辺の空気との接触により冷却水の束の外周が少しずつ乱れ、水束が滞留水膜を貫通する力が弱くなって、冷却能力が低下すると考えられる。一方、下面冷却では、鋼板に衝突した後に落下する水が、新たな水が鋼板に供給されるのを阻害する。特に孔型ノズルを用いた場合は、冷却水が噴射面上に滞留する水を巻き込んで鋼板に供給されるため、見かけの供給水量は増えるが、その分、減速も大きいので、噴射距離が長くなるほど落下する水の干渉を受けやすいと考えられる。下面冷却では鋼板に衝突した後の水流に重力がはたらくため、蒸気泡が発生しやすく、冷却水と冷却面の実質的な接触面積が縮小して、上面よりも冷却能力が小さくなるなどの考察を行った。図6に示すように、円管ノズルを用いて行った実験でも、冷却開始温度が 1100°C 程度と高い1回目の冷却において、同様な結果が得られた。

次に、ノズルの内径が冷却能力に及ぼす影響について考察する。 $25\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ ピッチのノズル配列で $\phi 3$ 円管ノズルと $\phi 6$ 円管ノズルの温度降下 ΔT を比較した場合、上面冷却、下面冷却のどちらもほぼ同等であった。上面冷却では、冷却水の噴射速度が速い場合は、滞留水膜を貫通する時の抵抗力が大きくなる。下面冷却では、冷却水は鋼板下面に衝突した後、鋼板下面に沿って流れる。冷却水の噴射には抵抗力がはたらくため、ノズル径が異なり、冷却水の噴射速度が変わっても、上下面ともに冷却能力に大きな変化が見られなかった。

図6に示す下面冷却実験の結果では、 $\phi 3$ 孔型ノズルの温度降下 ΔT は、 $\phi 3$ 、 $\phi 6$ の円管ノズルよりも大きい値であった。前述のように、孔型ノズルの噴射面には滞留水があり、これが新たに噴射される冷却水に巻き込まれて上昇する随伴流が発生した。鋼板下面まで到達する冷却水の見かけの量が増えたので、噴射距離が 50 mm と短い条件では、より効率

的な冷却が行われたと考えられる。ただし、噴射距離が長くなると、図5に示すように冷却能力が急激に低下するので、例えば噴射距離が 100 mm 以上ある場合では、逆に円管ノズルの冷却能力が高くなるのが十分に考えられる。

6. おわりに

高張力鋼を効率的に生産するための鋼材の冷却技術としてリバース圧延におけるパス間冷却について、基礎的な検討を行った。

$\phi 6$ 円管ノズルを用いた場合の上面冷却能力は、流量密度が高くなるほど上昇したが、 $0.25\text{ m}^3/\text{m}^2\text{ s}$ 以上ではほぼ一定となった。一方、下面冷却能力は、 $0.39\text{ m}^3/\text{m}^2\text{ s}$ でも上昇傾向を維持した。また、汎用的な鋼種を用いて、再結晶温度域で3パス、未再結晶温度域で2パスの合計5回の圧延を行い、途中、3パス目直前に強水冷を適用する実験を行った。圧延温度の調整を空冷のみで行う場合と比べて、より短い時間で圧延を終了できた。本研究で提案した圧延パス間の強水冷は、冷却の効果が板厚全体に及ぶまでにはある程度の時間を要するので、制御圧延開始前の複数パスで適用することが有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 小指軍夫. 制御圧延・制御冷却. 地人書館, 東京, 1997, p. 17.
- 2) Evans, J. F.; Clark, M. T. AIST Steel Technol. 2002, Vol. 79, No. 6, p. 49.
- 3) 芹澤良洋. 伝熱. 2007, vol. 46, no. 195, p. 1-5.
- 4) 藤林晃夫, 小俣一夫. JFE 技報. 2004, vol. 5, p. 8-12.
- 5) 松原博義, 大須賀立美, 小指軍夫, 東田幸四郎. 鉄と鋼. 1972, vol. 58, p. 1848-1860.
- 6) 田畑純久, 志賀千晃, 鎌田晃朗, 田中智夫, 広瀬圭介, 三沢啓典. 鉄と鋼. 1977, vol. 63, S797.
- 7) 鋼材の強制冷却. 日本鉄鋼協会編. 東京, 1978, p. 245.
- 8) 三塚正志. 鉄と鋼. 1968, vol. 54, p. 1457-1471.
- 9) De Paepe, A.; Herman, J. C.; Simon, P.; Cornet, X.; Noville, J. F.; Moerkerke, J.; Bos, B.; Van Poecke, P.; De Zutter, G.; De Clercq, F. EUR ISBN 92-894-4386-3. 2002, p. 3.
- 10) Hugo, U.; Bart, V.; Griet, L.; Jean-Claude, H.; Dirk, V.; Patrick, V. Proc of the 10th International Conference on Steel Rolling. 2010, p. 48-57.
- 11) 角野康治, 倉橋隆朗, 竹土伊地朗, 高橋昌範, 足立明夫, 高岡真司. 材料とプロセス. 2002, vol. 15, p. 285-288.
- 12) 大江憲一, 上田太次, 須藤正樹. 鉄と鋼. 1999, vol. 85, p. 599-604.



上岡 悟史



中田 直樹



日野 善道