

高温鋼材の冷却技術

三塚 正志
Masashi MITSUTSUKA

Cooling Techniques for Hot Steel Products

1 緒言

鋼材製造工程（連続鋳造を含む）では、高温鋼材（以下、鋼材と略記）は種々の目的で強制冷却（以下、冷却と略記）される。冷却の主要目的は、熱処理、冷却時間短縮、凝固促進、変形・残留応力低減である。近年、オンライン熱処理が実用化され、これに伴う形状問題が多発している。

冷媒には、安価、取扱いの容易さ、安全性などの点から水が多用されている。水は鋼材の冷却温度範囲内で沸騰するから、鋼材の表面温度が中・高温の場合（400～600℃以上）、蒸気膜が鋼材表面を覆い熱伝達が低減し、一方低温の場合（500～300℃以下）、鋼材表面で核沸騰が発生し熱伝達が急増する。すなわち、鋼材の水冷には、全ての沸騰現象が複雑に関与することになる。

水の沸騰現象は、水側と鋼材側の両方の条件に強く影響される。熱間圧延鋼材の表面性状は、鋼材の組成、加熱条件、圧延条件、圧延後の冷却条件などに強く影響される。オンライン熱処理では、高温域を急冷し、中・低温域で冷却を停止して、その温度に保定する冷却パターンが多用されている。この冷却に水冷を用いる場合、「膜沸騰温度減：急冷、核沸騰温度減：保定・弱冷」という自然現象に相反する冷却を行うことになる。この結果、オンライン熱処理に水冷を採用する場合、難しい課題が発生することになる。

この課題を回避するため、鋼材の熱処理温度範囲内で沸騰しない冷媒が採用されつつある。この冷媒は、「高温域：急冷、低温域：保定・弱冷」の冷却パターンには適しているが、価格、設備、取扱い、安全性などに多くの課題を有している。

鋼材の冷却技術に関する解説^{1)～5)}は多いので、この解説では、鋼材の冷却に沸騰型冷媒（水系冷媒）や非沸騰型冷媒（気体、溶融塩など）を用いる場合の熱伝達現象と冷却特性、課題とその解決策などについて説明する。なお、鋼材

製造工程では、生産設備（圧延ロール、連铸ローラなど）の冷却も重要だが、紙数の関係で割愛する。

2 鋼材冷却の目的

鋼材製造工程における鋼材冷却の目的は、次のとおりである。

(1) 熱処理用冷却

従来から熱処理のため、鋼材は、オンラインまたはオフラインで冷却されている。これまでは、冷却によって変形し易い鋼材は、オフライン熱処理されていた。しかし、近年、省エネルギー、省工程、新材質の付与などのため、多くの工程でオンライン熱処理が実用化されつつある。

(2) 凝固促進用冷却

この冷却は、連続鋳造（以下、連铸と略記）用冷却であり、1次冷却（金属接触冷却）と2次冷却（水噴射冷却）に大別される。この冷却の目的は、铸片に割れを発生させないで範囲内で急冷し、凝固を促進することである。近年、省エネルギーと省工程のため（連铸-圧延の直結化）、凝固促進と高温出片を同時に達成する冷却技術が要求されている。

(3) 冷却時間短縮用冷却

従来から圧延の高速化、圧延ラインの短縮、冷却床の小形化、精整作業環境の改善などのため、圧延鋼材の冷却が広く行われている。この冷却では、鋼材に変形や割れを生じさせないことが条件であり、変形し易い鋼材は自然冷却されていた。しかし、近年、圧延ラインにおける物流の高速化や単純化のため、変形し易い鋼材にもこの冷却が採用されつつある。

(4) 変形防止・残留応力低減用冷却

形鋼や条鋼では、断面内の肉厚が不均一なため、自然冷却すると断面内に大きな温度差が生じ、この結果、変形や

平成4年8月21日受付 平成4年11月6日受理 (Received on Aug. 21, 1992; Accepted on Nov. 6, 1992) (依頼解説)

* 日本文理大学工学部教授 (Faculty of Engineering, Nippon Bunri University, 1727 Ichigi Oita 870-03)

Key words: cooling; quenching; heat treatment; hot-steel; steel product.

残留応力が発生する。この対策として、断面内温度分布を均一化するため、厚肉部が冷却されている。現在、形鋼や条鋼にもオンライン熱処理が採用されつつあるので、熱処理と変形防止・残留応力低減を兼ねた冷却が要求されている。

3 冷媒と冷却特性

鋼材の冷却には、気体、液体、固体など種々の冷媒が利用されている。鋼材の熱処理温度範囲内で沸騰する冷媒を沸騰型冷媒、沸騰しない冷媒を非沸騰型冷媒と呼ぶことにする。両冷媒の諸特性の比較を表1に示す。

表1 沸騰型冷媒と非沸騰型冷媒の各種特性の比較(三塚ら⁶⁾)

	冷媒 名称	熱伝達特性			その他の特性		
		冷却能力	冷却安定性	急冷停止性	取扱い 易さ	安全性 (人体)	総合 コスト
沸騰型冷媒	水	◎	×～○	×～○	◎	◎	◎
	ミスト	◎	△～○	×～○	○～◎	◎	○
	沸騰水	×～△	△～○	△～○	○～◎	○～◎	○～◎
	油	○	×～○	×～○	○	×～○	△～○
非沸騰型冷媒	ガス	×～○	◎	◎	◎	◎	△～○
	溶融塩	○～◎	◎	◎	△～○	△～○	△～○
	溶融金属	○～◎	◎	◎	×～△	×～△	△～○

注1) 有利: ◎ ～ ○ ～ △ ～ ×: 不利

注2) コスト: 設備費、冷媒費、電力費、後処理費、人件費

注3) 非沸騰型冷媒: 鋼材の熱処理温度範囲内で沸騰しない冷媒

3・1 沸騰型冷媒の冷却特性

沸騰型冷媒には水系冷媒や油が含まれる。水は100℃で沸騰するから(大気中冷却)、水の冷却能力は、図1に示すように、鋼材表面温度 θ_s : 200～300℃の範囲内(核沸騰域)で非常に大きく、 θ_s : 400～600℃以上の範囲内(膜沸騰域)では小さい。もちろん、この温度範囲は、後述するように、水の噴射状態や鋼材の表面性状によって大幅に変動する。

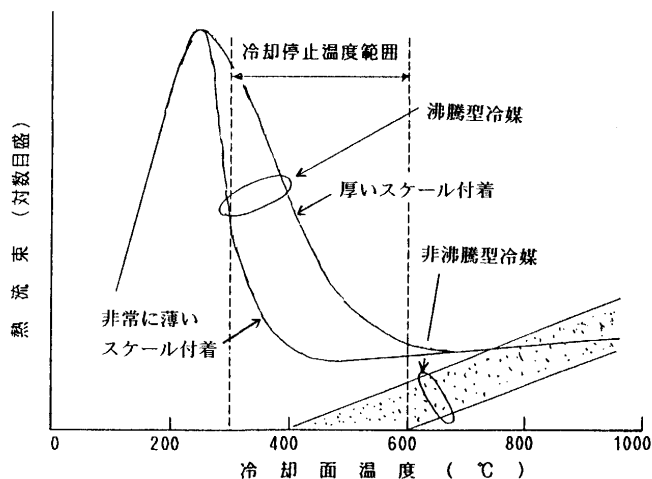


図1 冷却面温度と伝達熱量との関係(説明図、三塚ら⁶⁾)
(縦破線は急冷-保定熱処理の急冷停止温度範囲を示す)

したがって、鋼材を噴射水流(スプレー、ミスト流、ラミナ流など)で冷却する場合には、鋼材の表面温度と表面性状および水の噴射方法に十分に注意せねばならない。

鋼材を水溶性焼入れ液や熱処理油で冷却する場合には、焼入れ液の添加剤の種類、油の種類、冷媒の攪拌状態などによって、表面温度と冷却能力との関係は相違するが、本質的には水冷のそれとほぼ同じである。

3・2 非沸騰型冷媒の冷却特性

非沸騰型冷媒には、気体、溶融塩、溶融金属、固気噴流、固気流動層などが含まれる。鋼材をこれらの冷媒に浸漬冷却する場合、伝達熱量(熱流束 q)は、両者の温度差と冷媒の流動状態に依存し、鋼材の表面性状にはほとんど影響されない。すなわち、冷媒の流動状態が同じ場合、熱伝達係数 h が鋼材温度表面 θ_s にかかわらずほぼ一定だから、 q は θ_s に比例して単調に変動する(図1参照)。したがって、非沸騰型冷媒を用いる冷却では、熱伝達現象が非常に単純であり、この結果冷却プロセスが安定化する。

4 鋼材の表面性状と水冷の特性

熱処理のため鋼材を水冷する場合、鋼材の初期温度は700～900℃だから、この冷却過程には、膜沸騰・遷移沸騰・核沸騰伝熱と非沸騰伝熱が複雑に関与する。水の沸騰現象は、水側条件(噴射水量、攪拌状態、水温など)と鋼材側条件(スケールの付着状態、表面粗さなど)の両方に強く影響される。したがって、水側条件が同じ場合、図2と図3に示すように、熱伝達は鋼材の表面性状に強く影響される。図2で水滴寿命が短いこと、図3で冷却曲線が短時間側に寄っていることは、ともに熱伝達が大きいことに対応している。日本刀の水焼入れに際し、刀面にトノコを付着するのは、この伝熱促進作用を利用しているわけである。

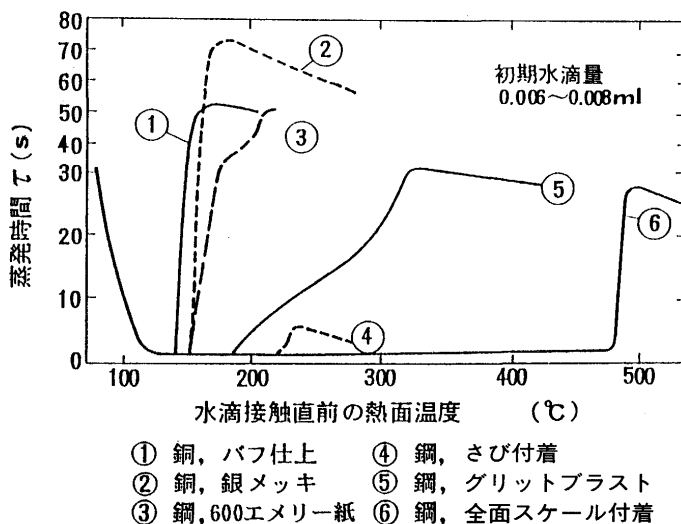


図2 試料の表面性状と水滴蒸発時間との関係(三塚ら⁷⁾)

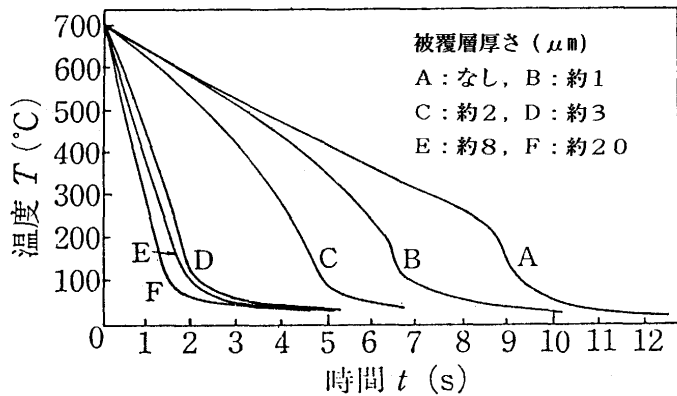


図3 けいそう土被覆層厚さと冷却能力との関係（ミスト冷却、淵澤ら⁸⁾）

例えば、付着スケールが厚い場合、スケールの表面温度は鋼材のそれより低く、また表面が粗い場合、突起の先端温度は鋼材本体のそれより低くなる。この結果、これらの部分で蒸気膜が崩壊し、熱伝達が加速される（菊地の論文⁹⁾参照）。したがって、鋼材の水冷に際しては、水側条件を均一にしても、鋼材の表面性状（特にスケールの付着状態）が不均一な場合には、鋼材は不均一に冷却されることになる（村田の論文¹⁰⁾参照）。

5 鋼材冷却の課題とその解決策

本章では、鋼材冷却の課題とこれに対する基本的解決策を説明する。

(1) ノズル閉塞

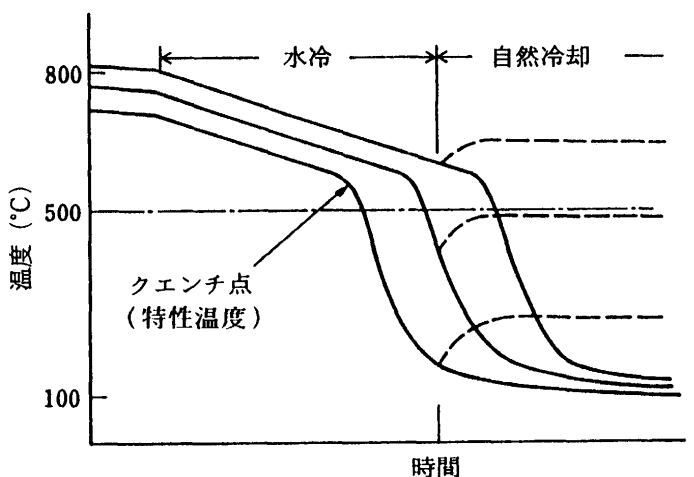
水冷の場合、各種ノズルを用いて水を鋼材に噴射することが多い。製鉄所の冷却水には固形物、油脂分、カルシウムイオンなどが含まれているため、ノズル孔は閉塞しやすい。ノズル配置を適正に設計しても、ノズルが閉塞すると、噴射される水量分布が不均一になり、この結果冷却も不均一になる。したがって、水噴射冷却の場合、ノズル閉塞を防止することは最も重要である。

ノズル閉塞の防止対策には、①ノズル孔の拡大、②冷却水の浄化、③ノズル保守の強化などがある。①については、噴出水量の関係からノズル孔の拡大には限界がある。この解決策の一つとして、水に空気を混入すると、噴出水量は不変のままでノズル孔のみを拡大することができる。具体的には、低圧空気を利用するミスト冷却である。②の冷却水の浄化は、特定の冷却装置内で水を循環使用する場合には可能だが、製鉄所全体で水を循環使用する場合には困難である。③のノズル保守の強化は、保守費用との兼ね合いから判断されるべきである。この解決策の一つとして、ヘッダをワンタッチ交換方式にし、定期的にヘッダを交換し、

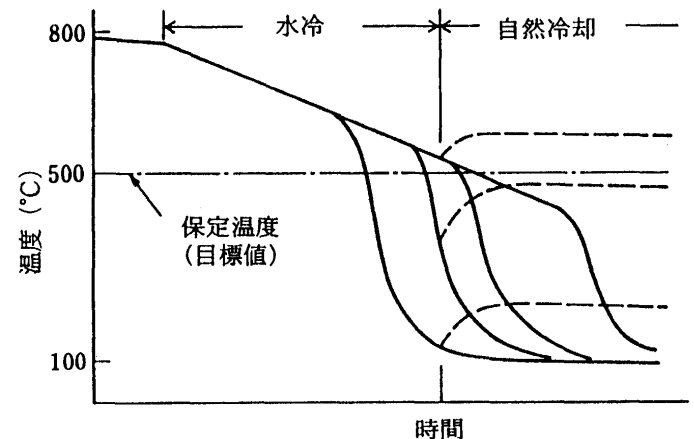
ヘッダ単位で保守することが考えられる。この場合、保守専用工場で、使用済みヘッダとノズルを洗浄・修理するわけである。

(2) オンライン熱処理

オンライン熱処理では、鋼材を初期温度から600～400℃まで急冷し、600～400℃の温度域で冷却を停止し、この温度域に保たせる冷却パターンが多い。ところが、水冷の場合、この冷却停止温度域から冷却能力が急増するため（図1参照）、局部的に過冷却が発生する。すなわち、熱間圧延された鋼材の断面内や長手方向の温度分布は不均一であるから、鋼材の表面性状が一定でも、図4（1）に示すように、鋼材内各部の冷却パターンは相違する。一方、冷却開始時の鋼材内温度分布が均一でも、表面性状が不均一な場合には、図4（2）に示すように、鋼材内各部の冷却パターンは相違する。いずれの場合にも、図に示す時間で冷却を停止すると、鋼材内温度分布は不均一になる。



(1) 初期温度：不均一、クエンチ点：一定



(2) 初期温度：一定、クエンチ点：不均一

実線：連続水冷時の表面温度 破線：水冷停止後の表面温度

図4 熱間圧延鋼材水冷における冷却曲線と水冷停止後の表面復熱状況（説明図）

これに対する解決策として、①熱間圧延過程で鋼材内温度分布を均一化すること、②冷却過程で高温部を強冷し、低温部を弱冷すること、などが考えられる。①の例としては、板材の粗圧延工程における端部の保温や加熱、形鋼の圧延工程における厚肉部の強冷などがある。②の例としては、板材のエッジマスクング(端部への水噴射の防止)、形鋼の厚肉部の強冷、連続圧延(線材、熱延)における鋼材長手方向の冷却制御などがある。

上記の「急冷-保定」パターンを採用するオンライン熱処理の最大の課題は、中温域での冷却の停止技術である。水冷を採用する限り、この課題の解決は原理的に難しい。したがって、解決策として、③非沸騰型冷媒の採用、④冶金学的改善(成分設計と熱処理温度の見直し)などがある。③の例としては、線材の溶融塩冷却¹¹⁾、空気噴射冷却(ステルモア)、固気流動層冷却¹²⁾などがある。④の例としては、厚板、軌条などの成分設計の見直しがある。

なお、冷延鋼板の連続焼鈍の場合には、加熱後の鋼板の表面性状が良好だから(粗さ:小、スケール付着:少)、ライデンフロスト温度が低く(図2参照)、水冷でも約400℃で強冷を停止することができる¹³⁾。

(3) 連続製造

近年、連続製造では、①操業の安定化、②全鋼種の連続化、③連铸-圧延直結化のため無欠陥かつ高温の鋳片が要求されている。これらの条件を同時に満足するには、転炉から連铸までの全工程にわたる技術開発が必要である。ここでは、2次冷却についてのみ説明する。

①については、スプレーノズルの閉塞防止が、②については、2次冷却帯全長にわたる冷却能力制御範囲の大幅な拡大が、③については、長手方向と幅方向の冷却能力の精密な制御が要求される。ノズル閉塞防止と冷却能力制御範囲の拡大に対しては、5(1)に記述したように、ミスト冷却が適している。ミスト冷却では、ノズル孔の拡大が可能だから、ノズル閉塞防止と噴出水量制御範囲の拡大を同時に満たすことができる。無欠陥鋳片の製造に対しては、各鋼種の高温強度(温度と強度との関係)を考慮して、冷却を制御することが必要である。高温出片に対しては、既凝固部分を弱冷し、未凝固部分を強冷すれば、凝固終了時の断面内平均温度を上昇させることができる。

鋳片は、スプレー衝突部、溜り水部およびローラ接触部で急冷される。前二者の回避には、ミスト冷却が適している。すなわち、ミスト冷却ではミスト流が広範囲に噴射され、その上鋳片に衝突したミスト流はローラ間で激しく流動するため、溜り水が減少する。この結果、ミスト冷却を用いると、ローラ間での鋳片冷却の不均一性は、フラットスプレー冷却のそれより改善される¹⁴⁾¹⁵⁾。

ローラ接触部の熱伝達は、鋳片とローラ間の温度差と接触面積に比例し、熱抵抗に逆比例する。したがって、ロー

ラ接触部の急冷防止には、ローラ的高温化、ローラと鋳片の接触面積の低減¹⁵⁾、ローラと鋳片間の熱抵抗の増大などが必要である。

2次冷却帯における鋳片は高温だから、水噴射の停止と同時に水冷も停止する。この点は、5(2)のオンライン熱処理の水冷現象と異なっている。将来、圧延負荷の低減のため、鋳片のニアネットシェープ化が志向されるであろう。この場合には、鋳片の比表面積と引抜き速度が増大するから、冷却に関する多くの課題が発生するであろう。

(4) 冷却時間短縮用冷却

この冷却は、従来から広く行われており、水冷が多用されている。この冷却では、①鋳片や鋼材の割れと変形の防止、および②冷却コストの低減が課題である。

図5に示すように、放射による放熱量は鋼材の絶対温度の4乗に、自然対流のそれは鋼材温度のほぼ1乗に比例して増大する。これに対し、水冷のそれは鋼材温度400~500℃以下で急増する(図1参照)。一方、鋼材の強度は400~500℃以下で急増し、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態は600~500℃で終了する。これらの条件を全て考慮すると、約500℃以上の温度範囲では自然冷却させ、それ以下の温度範囲で水冷すると、①と②の条件を同時に満たすことができる。もちろん、水冷に際しては、割れ防止のため鋼材の組成を十分に考慮せねばならない。

圧延工場の小形化と物流の単純化のため、冷却床を廃止する場合には、圧延直後の高温域から冷却せねばならない。この場合には、上記①と②の課題が発生するから、冷却技術の検討と同時に詳細なメリット計算が必要である。

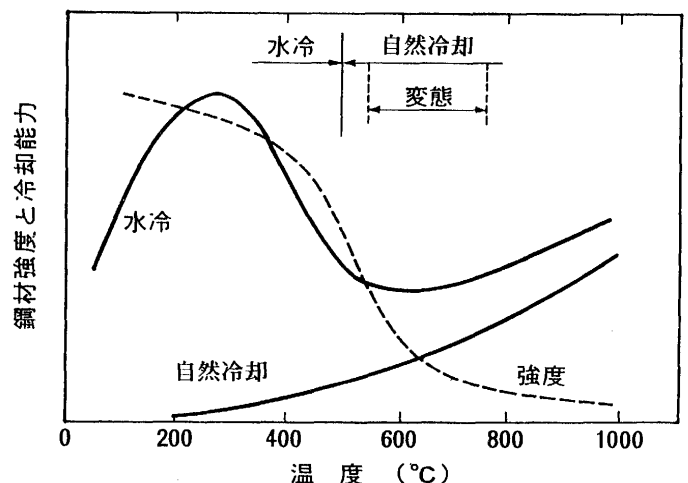


図5 鋼材温度が鋼材強度と冷却能力に及ぼす影響(説明図、三塚ら¹⁶⁾)

6 各冷却法の冷却能力

鋼材製造工程では、多くの冷却法が採用されている。特に、線材の熱処理では、変形問題と質量効果が少なく、その上成分範囲が広いと、種々の冷却法が採用されている。したがって、鋼材の冷却を検討する場合には、線材の冷却法を調査することが望ましい。

6・1 冷却能力の表示法

(1) 冷却速度

金属工学の分野では、従来から、冷却能力の表示法として冷却速度 V が採用されている。 V は、直観的であり、寸法と組成が同じ条件の鋼材を冷却する場合の冷却能力の表示法には適している。しかし、 V には客観性がなく、伝熱計算の境界条件に V を使用することはできない。

(2) 熱伝達係数と熱流束

機械工学や化学工学の分野では、従来から、冷却能力の表示法として熱伝達係数 h や熱流束 q が採用されている。 h や q には客観性があり、これらを伝熱計算の境界条件に使用することができる。 h と q との間には、(1)式の

$$q = h \times (\text{鋼材表面温度 } \theta_s - \text{冷媒温度 } \theta_c) \quad \cdots \cdots (1)$$

関係があるから、冷却能力の表示法としてどちらを用いてもよい。本解説では、主に h を用いる。

6・2 熱伝達係数の測定法

被冷却体と冷媒間の熱伝達係数 h の測定には、定常状態による方法と非定常状態による方法が用いられている。

(1) 定常状態による方法

この方法では、被冷却体と冷媒間の熱伝達状態を定常状態にして、伝達熱量(熱流束 q)、被冷却面温度 θ_s および冷媒温度 θ_c を測定する。これらの間には、(1)式の関係があるから、 h は(2)式から算出される。この方法

$$h = q / (\theta_s - \theta_c) \quad \cdots \cdots (2)$$

で得られる h の精度は高く、この方法は従来から多用されている。しかし、この方法では、遷移沸騰域や膜沸騰域の h を測定することは非常に難しい。

(2) 非定常状態による方法

この方法では、連続的に冷却される被冷却体の冷却曲線から h を逆算する。鋼材を水冷する場合には、全ての沸騰形態が複雑に関与するが、この方法を用いると、全ての沸騰形態を含む状態での h を得ることができる。すなわち、実際の冷却過程の h をマクロ的に把握することが可能になる。

しかし、 h の逆算に際しては、①冷却曲線測定の課題と②伝熱計算の課題が存在する。①については、試料内部を熱電対で測定する場合には、測定場所、時間遅れ(総合的時定数¹⁷⁾、熱電対孔への浸水などが、試料表面を放射测温す

る場合には、冷媒の除去、採用する放射率の値、試料表面の復熱などが課題となる。

②については、試料に炭素鋼を用いる場合、鋼材の物性値(比熱、熱伝導率)、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態温度、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態熱の放出状態などが課題である。すなわち、物性値は γ 域と α 域で異なり、 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態温度は組成、結晶粒度、冷却速度などに影響され、その上変態熱の放出量は冷却速度にも影響される。 $\gamma \rightarrow \alpha$ 変態熱量は顕熱量に比べて大きいから、この放出状態の数式化の仕方により計算結果は大幅に変動する。したがって、試料にオーステナイト系ステンレス鋼を用いるのが望ましい。もちろん、炭素鋼とステンレス鋼の表面性状は相違するから、この点には注意が必要である。

6・3 各冷却法の冷却能力

鋼材の冷却に利用される代表的な冷却法の熱伝達係数 h の概略値を表2に示す。 h は、噴射冷却では冷媒の噴射量に、浸漬冷却では冷媒の流動状態に強く影響され、その上沸騰型冷媒の場合には、鋼材の表面温度と表面性状にも強く影響される。したがって、表2の水冷の h は、種々の条件によって大幅に変動することを付記する。種々の制約条件のもとで、各冷却法の冷却能力を大雑把に比較すると、「水冷 $\geq$ 溶融塩 $>$ 沸騰水 $>$ ガスジェット $>$ 放射 $>$ 自然対流」の順になる。

溶融塩や沸騰水の場合には、浸漬冷却だから、 h は、冷媒の流動状態に影響されるが、その変動範囲は狭い。ガスジェット冷却の h は、ジェットの衝突エネルギー(噴射流量 $\times$

表2 各種冷却法の冷却能力の概略値

冷却法	熱伝達係数 (kcal/m ² ・h・℃)			
	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴
自然放冷	-----			
冷却管	-----			
気体噴射	-----			
気液混合	-----			
固気流動層	-----			
水スプレー	-----			
水シャワー	-----			
水ジェット	-----			
ラミナー	-----			
液体浸漬	-----			
溶融塩	-----			

衝突速度)と衝突後のジェットの流れ状態に影響されるが、その変動範囲は狭い。放射の h は、鋼材の表面温度(絶対温度) T_s の3乗と鋼材の放射率 ϵ の1乗に比例する。したがって、 T_s が同じでも、 h は、「熱延鋼板>冷延鋼板」である。自然対流の h は、非常に小さい。

水冷の h は、3・1節に記述したように、鋼材の表面温度と表面性状、水の噴射量(噴射冷却)と流動状態(浸漬冷却)、水温などに複雑に影響される。基本的には、蒸気膜の崩壊状態が熱伝達を支配するわけであり、蒸気膜の破壊方法が冷却能力に強く影響することになる。特に、幅広鋼板の水冷の場合、鋼板上に蒸気膜を介して冷却水が存在するが、この状態では鋼板から冷却水への熱伝達は小さい。したがって、冷たい水を直接鋼板に接触させるため、冷却水を太い整流状態で垂下し、鋼板上の水層を貫通して鋼板に直接衝突させるラミナ冷却法(ホットランテーブル)、ノズルを鋼材に接近して配置し、冷却水を加圧して高速で噴射する水ジェット冷却法(厚板ローラクエンチ、線材クーリングトラフ)などが採用されている。

6・4 沸騰型冷媒の冷却能力

沸騰型冷媒には、水系冷媒や油系冷媒が含まれ、これらの冷媒は、高温域で沸騰するため鋼材表面に蒸気膜が存在し、この蒸気膜の崩壊状態が熱伝達に強く影響する。蒸気膜の崩壊は、冷媒側条件と鋼材側条件の両方に強く影響されるため、冷却能力(熱伝達係数 h)は、種々の条件によって大幅に変動する。多くの条件を一定にして、特定の条件と h との関係を実験的に調べた研究は多い。しかし、熱間圧延鋼材の冷却では、冷媒側と鋼材側の全ての条件が複雑に関与するから、上記のような理想的条件のもとで得られた h を、実機の鋼材冷却の境界条件に適用することはできない。したがって、ここでは実機の冷却状態に近い条件のもとで測定された h について説明する。

(1) 水浸漬冷却

浸漬冷却では複雑な装置が不要なため、この冷却は、従来から実機や実験室で多用されている。静止水浸漬冷却では、蒸気膜の離脱と崩壊が鋼材の寸法・形状・姿勢や水温に強く影響され、冷却が不均一になり易い。この対策として、浸漬冷却では、冷却水を強制攪拌することが多い。そこで、攪拌の影響をみるため、28mm $\times$ 500mm $\times$ 1000mmhの低炭素鋼板を水槽に垂直に浸漬した場合の h を図6に示す。 h は、水の攪拌条件と鋼板の表面温度 θ_s に強く影響されることがわかる。どの θ_s においても、 h は「水流攪拌>空気攪拌>静止水(無攪拌)」である。

次に、水温 θ_w の影響をみるため、28mm $\times$ 220mm $\times$ 220mmhの低炭素鋼板を垂直に静止水に浸漬した場合の冷却速度 V を図7に示す。 V は、 θ_w の上昇につれて減少している。図6と図7から明らかなように、水浸漬冷却の冷却能力は非常に大きい。しかし、この冷却では、冷却能力の制

御が難しいことが欠点である。

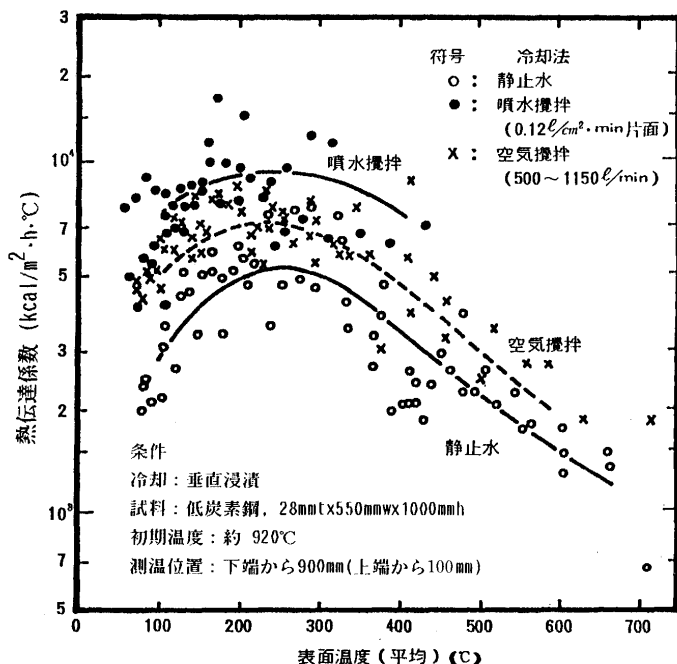


図6 冷却水の攪拌が浸漬冷却の冷却能力に及ぼす影響(三塚ら¹⁸⁾)

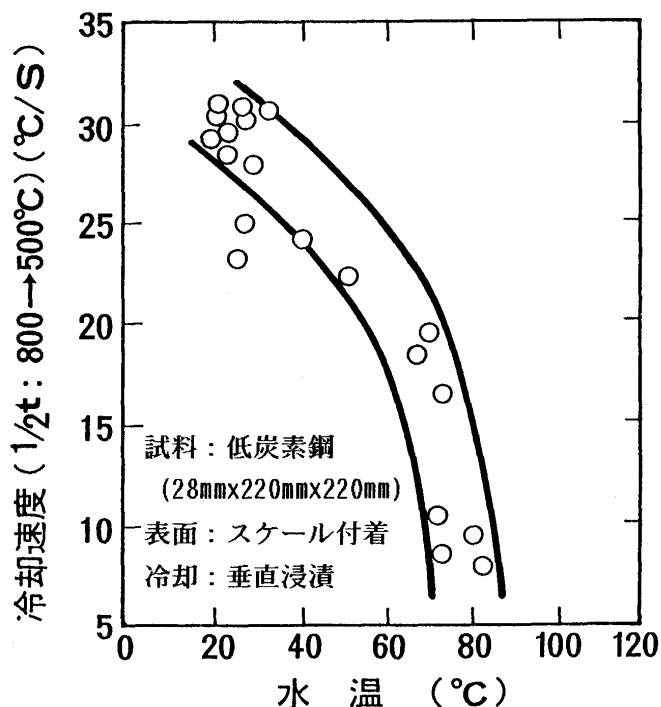


図7 水温が浸漬冷却の冷却能力に及ぼす影響(三塚ら¹⁹⁾)

上記のように、水浸漬冷却の h は大きいですが、鋼材の寸法と姿勢、鋼材の表面温度、水の攪拌状態などに強く影響されるから、この冷却の採用に際しては、これらの条件を考慮しなければならない。

(2) 水スプレー冷却

スプレー冷却では、冷却したい部位にスプレーの噴射ができ、しかもノズル配置、ノズル孔寸法、水圧などによって噴射水量（冷却能力）の制御ができるため、この冷却は従来から実機や実験室で多用されている。ノズルには、フラットノズル（扇状スプレー）と中子付フルコーンノズル（充円錐スプレー）が多用されているが、ノズル孔が小さい場合ノズル閉塞の多発が欠点である。近年、ノズル閉塞回避のため、中子なしフルコーンノズルやミストノズルが開発され、実用化されつつある。

噴射水量 W と h との関係の例を図8に示す。この図において、 θ_s が約 800°C 以下のデータは、炭素鋼試料を常温のスプレーで冷却して得られたものである。 h は、 θ_s に強く影響されるが、これは水の沸騰状態に依存している。すなわち、 h が、約 400°C 以下で大きいのは核沸騰に、約 600°C 以上で小さいのは膜沸騰に対応している。一方、全ての θ_s において、 h は、 W に比例して増大し、両者の間には(3)式の関係がある。 n の値は、 $0.5 \sim 0.8$

$$h \propto W^n \dots \dots \dots (3)$$

であり、この値は強制対流の流速の指数とほぼ同じである。

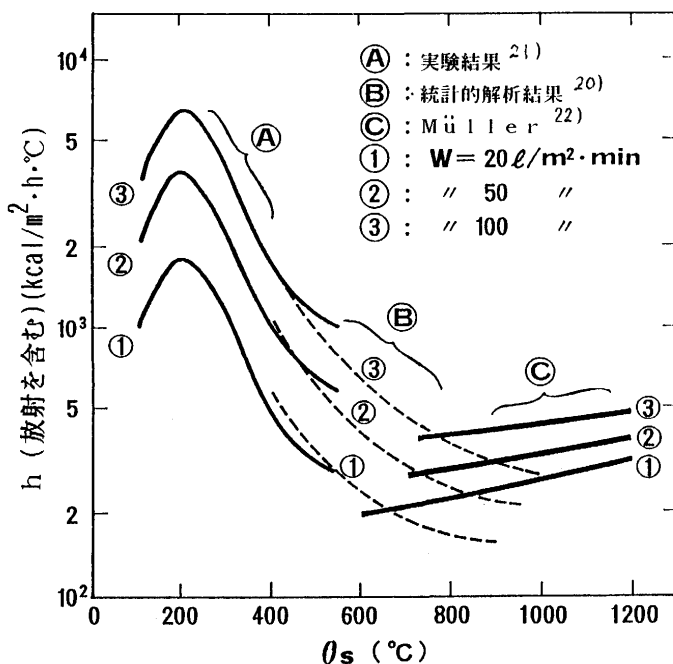


図8 スプレー冷却の冷却能力（三塚ら²⁰⁾）

多くの測定結果を用いて、スプレー冷却の「 W - θ_s - h 」の関係性を推定すると、図9のようになるものと考えられる。この図から、①全ての θ_s の範囲内において、 h は W に比例して増大すること、② h の極大値と極小値は W に比例して高温側に移動することがわかる。

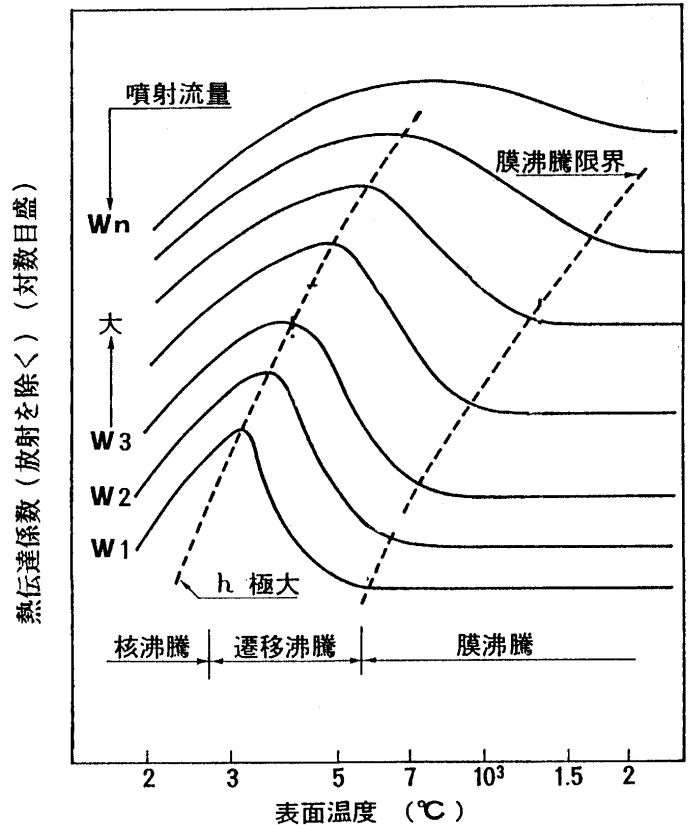


図9 スプレー冷却における噴射水量と冷却能力との関係（説明図）

(3) 水ミスト冷却

スプレーでは水圧によって水が微粒化されるが、ミストでは気体流によって水が微粒化される。低圧気体による微粒化の場合、気体流は熱伝達にはほとんど関与しないから、ミスト冷却の冷却特性はスプレー冷却のそれとほぼ同じであることが予想される。28mm $\times$ 400mm $\times$ 800mmの低炭素鋼板を水平に配置し、上面と下面を低圧気体を用いるミスト流で冷却した場合の h を図10に示す。この結果によると、ミスト冷却の「 W - θ_s - h 」の関係はスプレー冷却のそれとほぼ同じである。また、上面の h は、下面の h より若干大きく、これもスプレー冷却のそれとほぼ同じである。次に、ミスト冷却とスプレー冷却の冷却速度 V の比較を図11に示す。この図からも、 W が同じ場合、両冷却法の V はほぼ同じであることがわかる。

なお、連鑄の二次冷却帯では、ノズルの設置スペースが狭いため、高圧空気型ミストノズルが使用されている¹⁴⁾¹⁵⁾。この場合、高速空気流が水滴と鑄片との接触を均一化し、かつローラと鑄片との間の溜り水を排除するため、鑄片冷却の不均一性が改善される（5(3)参照）。

(4) 水ラミナ冷却

昭和30年代までは、熱延ランアウトテーブル (ROT) の上面冷却用にスプレー冷却が用いられていた。ROTでは、鋼板の先端が浮上するため、スプレーノズルはテーブル上

1.5～2mの位置に設置されていた。図12に示すように、ROT上を高速で移動する鋼板上には蒸気膜を介して厚い水層が存在しており、水圧を高くしてもスプレーが水層を貫通して直接鋼板に衝突することはほとんど不可能である。そこ

で、パイプノズルから低速の整流された水流（ラミナ流）を垂下し、水層を貫通して直接鋼板に接触させるラミナ冷却法が開発され²⁴⁾、広く利用されるようになった。

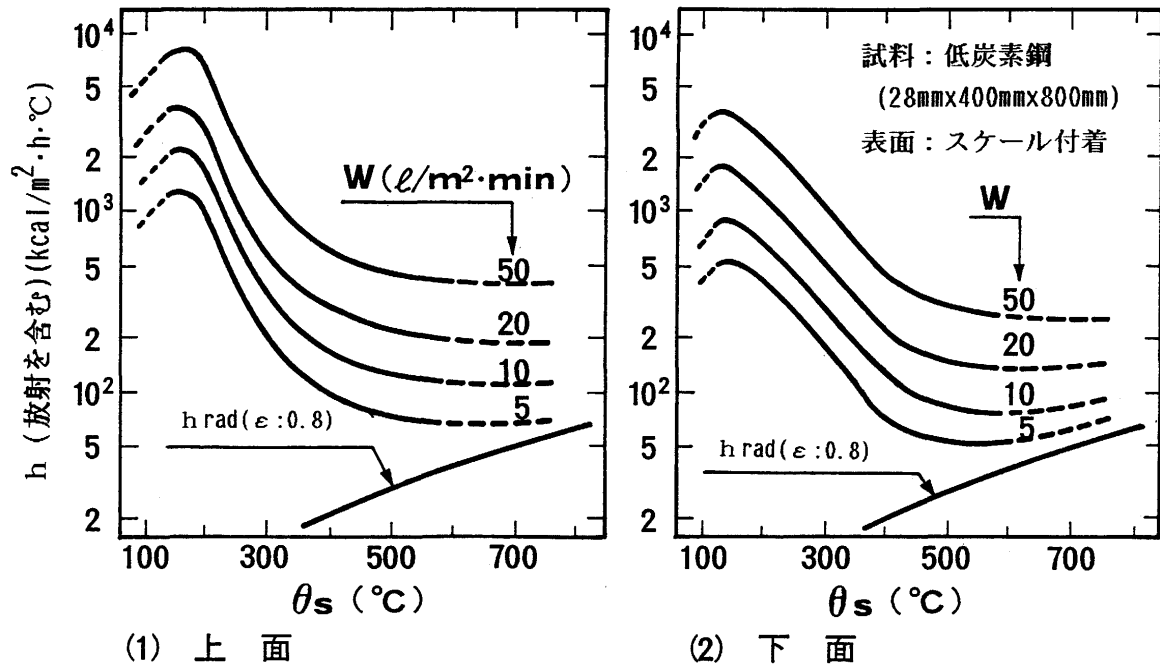


図10 ミスト冷却の冷却能力（三塚ら²³⁾）

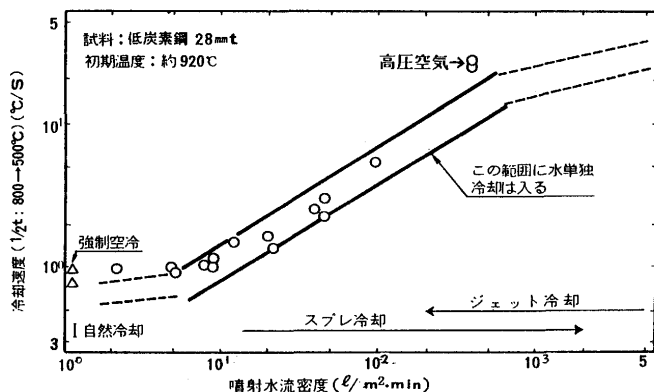


図11 ミスト冷却とスプレー冷却の冷却能力比較（三塚ら²³⁾）

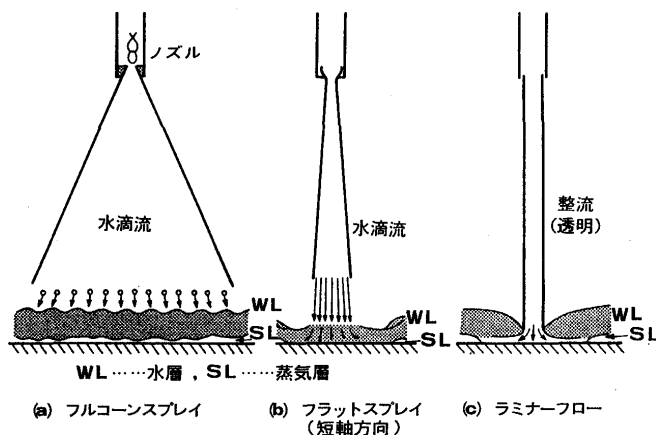


図12 幅広鋼板の噴射水冷における蒸気膜の破壊状況（説明図）

鋼板が静止している場合には、ラミナ水流の衝突部の表面は瞬間的に急冷され（ブラックゾーンの発生）、核沸騰がおこり、この核沸騰ゾーンが半径方向に拡大する。この結果、ラミナ水流の冷却能力は非常に大きい。しかし、ROTでは、鋼板は高速で移動するから、一本のラミナ流と鋼板との直接接触時間は非常に短い。また、鋼板の通板性を確保するため、水流をテーブルローラの最上部に垂下するから、ROT長手方向のノズル間隔は300～500mmと広い。したがって、実機のラミナ冷却の熱伝達現象は、静止鋼板のそれと大きく相違している。

実機ROTの入側で測定したラミナ冷却（上面）の h を図13（1）に示す。 W と h の間には、（4）式の関係がある（ θ_w ：34℃）。

$$h = 189W^{0.263} \dots\dots\dots (4)$$

h : kcal/m² · h · °C W : l/m² · min

（4）式によると、実用範囲である W ：500と1000に対する h は970と1160である。この値は、板温800℃、 θ_w ：34℃を考慮しても、かなり小さい。

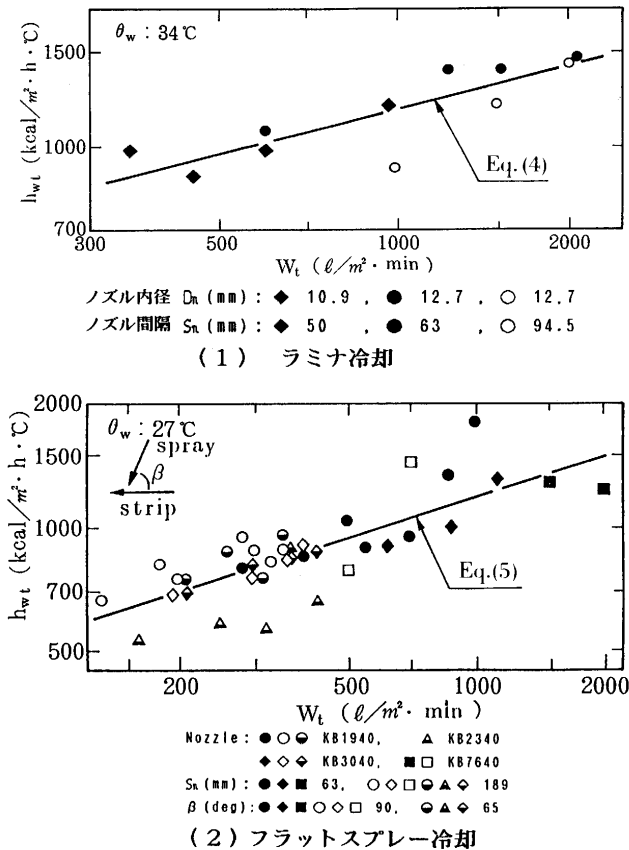


図13 熱延ランナウトテーブル（入側ゾーン）における冷却能力（三塚ら²⁵⁾）

一方、フラットスプレーノズルをテーブルローラ上1mの位置に設置して測定した結果を図13(2)に示す。 W と h の間には、(5)式の関係がある ($\theta_w: 27^\circ\text{C}$)。

$$h = 123W^{0.327} \dots\dots\dots (5)$$

(5)式によると、 $W: 500$ と 1000 に対応する h は 940 と 1180 であり、 θ_w を 34°C に補正すると、これらの値はそれぞれ 840 と 1060 になる。したがって、 W と θ_w が同じ場合、実機ROTのラミナ冷却の h は、フラットスプレー冷却のそれより10%程度大きいようである。

(5)水ジェット冷却

この冷却の定義は曖昧だが、厚板ローラクエンチ (RQ) 前段や線材クーリングトラフの高圧水流のように、ノズルと鋼材との間隔を狭くし(ノズルは水中に存在)、かつヘッド内水压を高くし(数 $\text{kgf/cm}^2\text{-G}$ 程度)、高速水流(水ジェット)を鋼材に衝突する冷却と理解してほしい。水ジェットは、質量と速度の両方が大きいから、水ジェットの衝突部には蒸気膜がほとんど発生せず、水ジェット衝突部の鋼材表面温度 θ_s は瞬間的に核沸騰域まで降下するものと推定される。したがって、水冷ゾーンの入側にこの冷却を用いると、このゾーンの出口では鋼材の θ_s が核沸騰域まで降下しているため、その後のゾーンでは鋼材の全面に水が確実に

接触していれば核沸騰が継続し、冷却が促進されることになる。

水ジェット冷却の h を測定することは、鋼材測温の点から実験室でも実機でも不可能に近い。すなわち、鋼材内部に熱電対を取付けて測温する方法では、時間遅れが、鋼材表面を放射測温する方法では、水除去と鋼材表面の復熱が障害になり、いずれの方法を用いても鋼材温度を精度よく測定することはできない。

厚板RQにおいて、厚板内部に熱電対を取り付けて加熱炉入口からRQ出口まで連続測温したデータを用いて、各水冷ゾーンの h を逆算した。この伝熱解析には、多くの仮定を用いているが、逆算結果によると、水ジェット冷却ゾーンの h は、 $(1 \sim 3) \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ であった。この値は、他の水冷法の値より非常に大きいことがわかる。

(6)沸騰水浸漬冷却

この冷却は線材の熱処理 (パテンティング処理) 用に開発された²⁶⁾。沸騰水中に高温線材を連続的に浸漬すれば、線材の表面には安定した蒸気膜が形成され、しかも水温は 100°C 一定だから、熱伝達は安定している。また、蒸気膜を介しての熱伝達の場合、線材の表面性状は熱伝達にほとんど影響しない。この結果、熱処理プロセスが安定化するため、線材の材質変動は小さい。沸騰水浸漬冷却の h は、実験的にも理論的にも求められており、 $200 \sim 300 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ である。

(7)水温と冷却能力との関係

高温鋼材を水冷する場合、水温 θ_w が上昇すると冷却能力は低下する。製鉄所の冷却水温度は、季節によって変動し、また特定の冷却設備内で冷却水を循環使用する場合には、 θ_w は操業度合によっても変動する。特に、後者の場合、操業を長期間停止すると θ_w は大幅に低下する。したがって、冷却プロセスを安定化するには、 θ_w と冷却能力との関係を定量的に把握することが必要である。

17の測定データ (実験室: 13、実機: 4) を用いて、 θ_w と冷却能力との関係を解析した結果を図14に示す。この結果によると、 θ_w が $20 \sim 40^\circ\text{C}$ の範囲内では、 θ_w の $\pm 1^\circ\text{C}$ の変動に対し、冷却能力は $\pm 1 \sim 2\%$ 変動する。

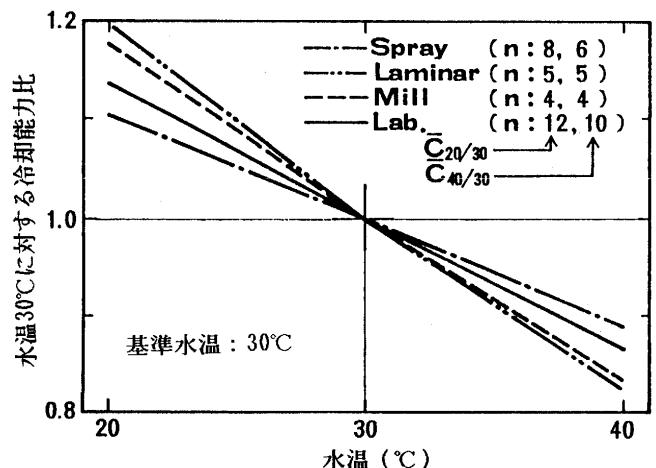


図14 水温が冷却能力に及ぼす影響 (三塚ら²⁷⁾)

(8) 水溶性焼入液浸漬冷却

この冷媒は、水に特殊な物質（高分子）を添加した水溶液である²⁸⁾。高温鋼材を静止液に浸漬する場合（膜沸騰域）、添加剤が鋼材表面に析出（油膜）して蒸気膜の崩壊を促進する（スケールと類似の効果と推定される）。この結果、特性温度が上昇し、高温域の熱伝達が促進される。著者の実験によると、水溶液を強力に攪拌する場合や水溶液を噴射する場合には、この作用は認められず、この水溶液の冷却能力は、水のそれとほぼ同じである。しかし、この冷媒は、多くの長所を有しているから、冷却目的によっては採用を検討すべきである。

6・5 非沸騰型冷媒の冷却能力

非沸騰型冷媒を用いる冷却には、気体噴射（ガスジェット）冷却、熔融塩浸漬冷却、固気流噴射冷却、固気流動層冷却などが含まれる。これらの冷媒は鋼材冷却の温度範囲内で沸騰しないから、熱伝達現象は安定している。したがって、これらの冷却は、「高温域：強冷、中低温域：保定（弱冷）」の冷却パターンを採用する熱処理において、水冷プロセスの冷却不安定性の回避対策として採用されるケースが多い。

(1) ガスジェット冷却

この冷却は、手軽に実施できるので、従来から実機や実験室で多用されている。冷媒には、空気（大気中冷却）や窒素（無酸化雰囲気冷却）が多用されている。この冷却では、冷却すべき部位にガスを噴射し、その上ノズル配置、ノズル孔寸法、ガス圧力などによって冷却能力を制御できる。

この冷却では、熱伝達は鋼材に噴射されるガス量と衝突速度に影響され、鋼材の表面性状にはほとんど影響されない。ただし、鋼材に衝突した後のガスの流動状態と排出状態が熱伝達に影響することに注意せねばならない。幅広鋼板の冷却では、多くのノズルから噴射されるマルチジェットが用いられるので、このような条件のもとで測定されたhの例を図15に示す。円状ノズルの場合、レイノルズ数Reと

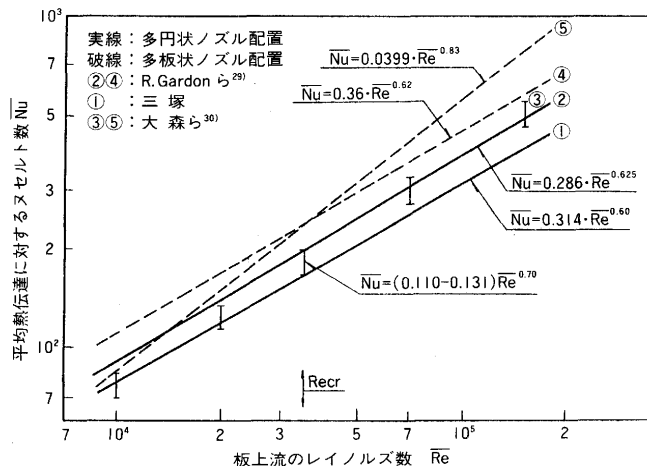


図15 マルチガスジェット冷却の冷却能力¹⁾

ヌセルト数Nuとの間には(6)式の関係があり、nの値は0.6~0.7である。

$$Nu \propto Re^n \dots\dots\dots (6)$$

なお、NuとReの代表寸法にはノズル間隔を、代表速度には衝突速度を用いる。

この冷却では、熱伝達の点から鋼材への衝突速度を増大させること、送風機の電力消費の点から吐出圧力を低下させることが必要である。この二つの条件は相反するから、送風流路の構造、ノズルの構造と配置、衝突後のガス排出流路などに細心の注意が必要である。

(2) 熔融塩浸漬冷却

この冷却は、従来から機械部品の熱処理（マルテンパー、オーステンパーなど）に多用されている。熔融塩は、加熱にも冷却にも利用されている。この冷却では、熔融塩温度を設定すれば、鋼材は設定温度まで冷却され、この温度に確実に保定されるから、この冷却は、「急冷-保定熱処理」に適している。この冷却では、冷却能力は水冷より小さいが、過冷却は発生せず、鋼材の表面性状も冷却にはほとんど影響しないから、冷却プロセスが安定化する。したがって、この冷却は、過冷却によってマルテンサイトが発生し易い鋼材の熱処理に適している。このような理由から、熔融塩浸漬冷却は、高炭素線材のオンライン熱処理に実用化されている¹¹⁾。

熔融塩浸漬冷却のhは、図16に示すように、(500~5000) kcal/m²h²であり、塩浴の攪拌状態に影響される。この冷却の冷却能力に関するデータは少ないから、塩の種類と組成、塩浴の温度と攪拌状態、鋼材温度などがhに及ぼす効果を定量化することが必要である。

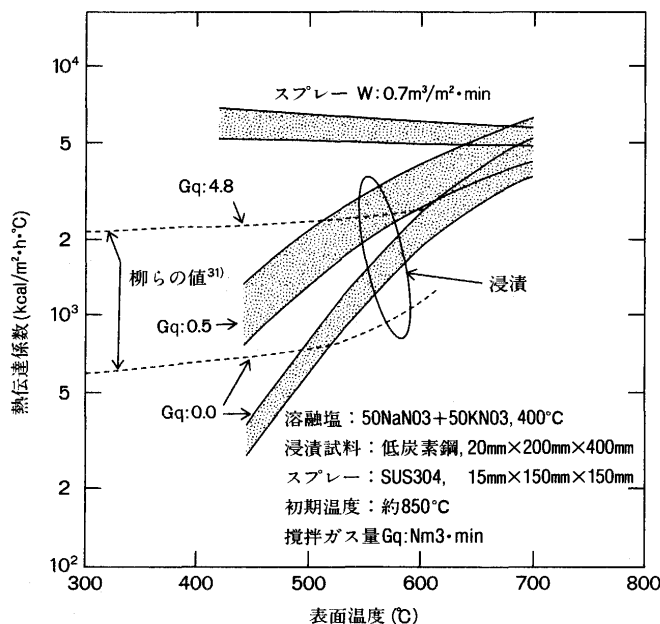


図16 熔融塩冷却の冷却能力（三塚ら⁹⁾）

7 鋼材冷却の研究開発の進め方

鋼材製造工程では、種々の目的から高温鋼材の強制冷却が多用されている。しかし、冷却工程では、他の工程に比べると、設備技術と操業技術の両面で遅れている。本章では、鋼材冷却の課題と研究開発への取り組み方に関する私見を説明する。

(1) 鋼材冷却と鋼材の変形・割れ

従来は、冷却によって鋼材の変形や割れが懸念される工程では、鋼材の冷却は回避されていた(2(1)参照)。しかし、現在これらの工程でも、種々の目的から鋼材の冷却が行われている。

鋼材の変形(残留応力を含む)と割れの発生は、応力の問題であり、近年、鋼材の応力解析は精力的に行われている^{32)~34)}。応力解析には、鋼材の変態現象と物性値(熱物性と機械物性)、および伝熱の境界条件(冷却の熱伝達係数)が必要である。したがって、冷却による鋼材の変形と割れの研究に際しては、第一に変態・物性値・境界条件の定量化・モデル化の精度向上が、第二に応力解析結果と冷却実験結果(実機の操業結果も含む)との有機的結合が必要である。応力解析は、多くの仮定のもとで行われるから、使用する数値によって結果が大幅に変わる。このため、応力解析結果と冷却実験結果との対応関係から修正係数を導入し、応力解析の総合的精度を向上させることが重要である。応力解析の精度が向上すれば、応力解析によって鋼材の変形と割れの発生を事前に予測すること、およびこれに対する対策を検討することが可能になるはずである。

(2) メタラジー研究と冷却技術との結合

鋼材熱処理の研究では、メタラジーの研究が先行し、この研究成果を実用化する段階で冷却技術者が参加するケースが多いようである。メタラジーの研究では、成分設計の範囲が非常に広く、これに対応して熱処理方法(冷却パターン)も多岐にわたる。これに比べると、既述のように、実機に採用可能な冷却法は非常に少ない。したがって、メタラジー研究の成果を実用化する場合、冷却技術がネックになることが多い。

この問題の解決には、メタラジー研究の途中段階において、メタラジー研究者と冷却技術者が詳細に打ち合せ、実機に採用可能な冷却法の候補を選定することが必要である。その後は、選定された冷却法に対応するようにメタラジーの研究を実施することが望ましい。

(3) 冷却プロセスの安定化技術の開発

鋼材の製造工程では、生産計画どおりに、所定の材質と品質を満たす製品を安定して生産することが要求される。鋼材製造工程の一つである熱処理工程は、他の工程に比べるとプロセス自体が不安定である。この結果、製品の材質

と品質(主に形状)に欠陥が発生し易い。特に、水冷を採用しているオンライン熱処理工程で形状欠陥が多発する傾向にある。

冷却プロセスの安定化のためには、ノズル閉塞が少なく、かつ熱伝達現象の安定している冷却法を採用することが必要である。前者に対しては、設備技術とメンテナンス技術の両面から対処すべきである(5(1)参照。)後者に対しては、非沸騰型冷媒を用いる冷却法の採用が望ましいが、この冷却法では、冷却能力、コスト、設備技術、操業技術などに多くの課題がある。ガスジェット冷却法では、冷却能力と電力消費量のみが課題だから、弱冷却でもよい工程には、この冷却法を積極的に採用すべきである。

一方、沸騰型冷媒の代表である水冷の欠点は、熱伝達現象の不安定性、換言すればプロセスの不安定性のみである。したがって、この課題を解決するため、水側と鋼材側の両面から熱伝達現象を安定化する研究開発が必要である。

上記のように、冷却プロセスを安定化させるためには、冷媒の利用技術、設備技術、メンテナンス技術などを含む総合的な研究開発が必要である。

(4) 冷却設備の小形化・単純化

熱間圧延工程(熱処理工程も含む)における物流の単純化と高速化のためには、全鋼材を強制冷却し、冷却時間を大幅に短縮することが不可欠の条件である。また、設備費低減のためにも、冷却設備の小形化と単純化は必要である。これらに対処するためには、冷却による鋼材の変形と割れの発生防止が最重要課題である。高炭素鋼や低合金鋼を冷却すると割れが発生し易い。したがって、上記の目的を達成するためには、全鋼材に対する変形防止技術と高炭素鋼や低合金鋼に対する割れ防止技術、具体的には、冷却能力の大幅な可変技術と鋼材側からみた冷却の均一化技術の研究開発が必要である。

(5) 冷却の省エネルギー

冷却設備では、冷媒を加圧しノズルから噴射するケースが多く、多量の電力を消費している。したがって、吐出圧力と吐出流量の最適化、配管抵抗の低減などにより電力消費量を低減することが必要である。

一方、冷却開始時の鋼材温度は700~900℃だから、鋼材の保有熱の温度レベルは高い。したがって、この熱を有効に回収すべきである。水冷の場合には、温度レベルは非常に低下するが、非沸騰型冷媒の場合には、温度レベルを高く保持できる。現在、大気開放状態で鋼材を冷却しているので、熱回収は難しい。今後は、電力消費量の低減と熱回収を同時に満たす冷却技術を研究開発すべきである。

(6) 実験室データと実機データとの結合

オンライン熱処理では熱間圧延直後の鋼材が、オフライン熱処理では再加熱された鋼材が冷却される。後者の場合、鋼材は無酸化雰囲気や弱酸化雰囲気中で再加熱されるケース

が多く、この条件を実験室で再現することは可能である。

オンライン熱処理の場合、鋼材は熱間圧延された直後に冷却される。したがって、実機の鋼材と実験室の鋼材では、表面性状、結晶粒度などが基本的に相違している。すなわち、鋼材を再加熱する実験室では、実機の鋼材の条件を満たすことはできない。また、ホットストリップや線材の圧延では鋼材は高速で移動し、厚板や薄板では板幅が広い。したがって、実機と実験室では鋼材と冷媒の接触状態が大幅に相違している。このように、オンライン熱処理に対しては、実機の現象を実験室でシミュレーションすることは不可能に近い。

したがって、実験室と実機の両方でデータを採取し、両者の関係に対応させ、総合的な補正方法を確立すべきである。少ないデータの対応では、精度上問題があるから、データをシステマティックに蓄積する方法を講ずることが必要である。

8 おわりに

鋼材製造工程における鋼材の強制冷却では、800～1000℃の鋼材が600℃～常温まで連続的に冷却される。これらの冷却に多用されている水冷の場合、全ての沸騰形態が複雑に関与するため、熱伝達現象は水側と鋼材側の両方の条件に強く影響される。したがって、両方の条件を取り込んだ研究が必要である。

「高温域：急冷、中温域：保定」の冷却パターンを採用するオンライン熱処理に水冷を採用すると、急冷停止時に鋼材内温度分布が不均一になり易く、この結果鋼材が変形する。この解決には、応力の理論解析、実験室と実機の冷却実験、実機の操業データなどを有機的に組み合わせる研究が必要である。一方、この熱処理用冷却に非沸騰型冷媒を用いることは、冷却の不均一性を回避する有力な手段である。したがって、この冷媒の研究も必要である。

いずれにしても、実用可能な冷却法は少ないから、各冷却法の冷却特性に合わせるようなメタラジの研究が必要である。

各冷却法の冷却能力については、著者らのデータを多用したが、多くの研究者の測定結果が本誌に掲載されているので是非参照されたい。最後に、本稿に参照させていただいた文献の著者に感謝致します。

記号

θ_s : 鋼材表面温度 (°C)
 T_s : 鋼材表面温度 (K)
 θ_c : 冷媒温度 (°C)
 θ_w : 水温 (°C)
 W : 噴射水量 (l/m²min)
 q : 熱流束 (kcal/m²h)
 h : 熱伝達係数 (kcal/m²h°C)
 V : 冷却速度 (°C/s)

文 献

- 1) 鋼材の強制冷却 (日本鉄鋼協会熱経済技術部会編) (1978)
- 2) 鋼材製造プロセスにおける冷却技術 (日本鉄鋼協会熱経済技術部会編) (1988)
- 3) 第35回西山記念技術講座テキスト (日本鉄鋼協会編) (1975)
- 4) 沸騰熱伝達と冷却 (日本機械学会編)、(1989)、〔日本工業出版〕
- 5) 西尾茂文：鉄と鋼、74 (1988)、p.1895
- 6) 三塚正志、福田敬爾、鈴木孟文：日本伝熱研究会九州グループ講演会資料、(1987)
- 7) 三塚正志、福田敬爾：鉄と鋼、57 (1971)、S584
- 8) 淵澤定克、奈良崎道治、山下勇二郎、武田信男：精密機械、46 (1980)、p.842
- 9) Y.Kikuchi, T.Hori, H.Yanagawa and I.Michiyoshi : Irans. ISIJ., 26 (1986)、p.576
- 10) 村田杏坪：東京大学工学部学位論文、(1991年1月)
- 11) 松岡京一郎、富永治朗、井上哲、佐野正義、佐田野豊、本田三津夫、田嶋欣太郎、柳謙一：製鉄研究、(1984) 315、p.94
- 12) 山腰登、金田次雄、鈴木昭男、新名英司、柳義親、初岡延泰：鉄と鋼、58 (1972)、p.1969
- 13) 藤本剛、坂東英明、藤原俊朗、桜井紘一：製鉄研究、(1984) 315、p.103
- 14) 三塚正志、福久陽三、和気誠、岡島正樹、宮下永、武田安夫：鉄と鋼、70 (1984)、p.694
- 15) 手嶋俊雄、北川融、宮原忍、舟之川洋、小沢宏一、沖本一生：鉄と鋼、74 (1988)、p.1282
- 16) 三塚正志、森瀬兵治、小椋徹也、中村修：鉄と鋼、69 (1983)、p.2002
- 17) 三塚正志：学振製鋼19委2分科会第107回会議資料、(昭和49年7月)
- 18) 三塚正志、福田敬爾：鉄と鋼、64 (1978)、p.70
- 19) 三塚正志、福田敬爾：鉄と鋼、63 (1977)、p.1008
- 20) 三塚正志：鉄と鋼、69 (1983)、p.268
- 21) 三塚正志、福田敬爾：鉄と鋼、69 (1983)、p.262
- 22) H.Muller and R.Jeschke : Arch. Eisenhüttenwes., 44 (1973)、p.589
- 23) 三塚正志、福田敬爾：鉄と鋼、65 (1979)、p.608
- 24) A.Sigalla : JISI, 186 (1957) 5、p.90
- 25) 三塚正志、福田敬爾、横倉照夫：鉄と鋼、投稿中
- 26) 武尾敬之助、前田閑一、上瀬忠典、岩田斉、里見祥明、中田秀一：鉄と鋼、60 (1974)、p.2135
- 27) 三塚正志、福田敬爾：鉄と鋼、75 (1989)、p.1154
- 28) 鳴海孝雄：熱処理、21 (1981)、p.82
- 29) R.Gardon and J.Cobonque : Int. Develop. Heat Transfer Cont Part II, (1962)、p.454
- 30) 大森舜二、柳謙一、槇原克己：三菱重工技報、9 (1972)、p.380
- 31) 柳謙一、三原一正、瀬瀬新二、花咲幹：三菱重工技報、21 (1984)、p.420
- 32) 有吉敏彦：九州大学工学部学位論文、(1991年12月)
- 33) 吉原直武：鉄と鋼、76 (1990)、p.886
- 34) 吉田博、佐々木徹、近藤信行、田中智夫、橋本隆文：鉄と鋼、69 (1983)、p.412