

鉄鋼TMCPにおける冷却制御

Cooling Control in TMCP of Steel

大久保 英 敏*・西 尾 茂 文*

Hidetoshi OHKUBO and Shigefumi NISHIO

高品位の鋼材を省合金、省工程で製造することができるTMCP(加工熱処理プロセス)では、鋼材水冷ゾーン通過直後の鋼材温度を高精度で制御することが重要となる。この冷却制御の高精度化のためには、TMCPの制御冷却工程で使用される噴霧冷却の熱伝達特性を把握する必要がある。本解説では、この熱伝達特性を中心として、鋼材水冷ゾーン通過直後の鋼材温度にばらつきが生じる、冷却不安定現象について述べる。

1. はじめに

鉄鋼材料のTMCP(Thermo-Mechanical Control Process)技術は、オイルショック以後のエネルギーコストの高騰に伴って生じた省エネルギーの必要性を背景として発達し、実用化されてきた。表1に実際に操業されている設備仕様の概要¹⁾を示す。従来より、熱間圧延工程において加熱および圧延条件を制御することによって靱性の高い鋼材を得ることが可能であることが知られていたが、高強度の鋼材を得るには至っていなかった。TMCP技術とは、熱間圧延における制御圧延技術をさらに発展させ、圧延ライン上で圧延後の冷却過程を制御する制御冷却技術を組み入れることにより、オーステナイト→フェライト変態をコントロールする技術である²⁾。一例として、制御圧延によって材料の靱性を高め、制御冷却によって(制御圧延だけでは不十分であった)材料の強度をより増大させる技術が挙げられる。この技術の開発により、これまで合金添加と熱処理によって製造されていた高張力鋼、低温高靱鋼などの高品位の鋼材を省合金、省工程で製造することが可能となった³⁾。

金属学的な立場での説明はここでは省略するが、TMCPは、制御圧延によって得られていた微細なフェライト・パーライト組織を、制御冷却によってより微細化すること、および硬化させることを目的としており、場合によってはベイナイトやマルテンサイトの低温変態生成物を生成させることもある。この場合、鋼材温度が400°C程度になった時点で水冷を停止する必要性が生じる。しかし、この停止温度の設定が、TMCPの特長の一つであるオンライン化にとって大きな障害となっている。

制御冷却では、冷却媒体として水が用いられており、鋼材は、初期温度一定の条件下で鋼材水冷ゾーンを通過

する過程で、主としてスプレインゾルにより微細化された噴霧によって所定の温度まで冷却される。この水冷ゾーン通過直後の鋼材温度の時間的・空間的均一性は、鋼材の強度・形状等の品質の安定化に顕著な影響を及ぼすことから、その許容温度範囲は±数10度程度と考えられている。しかし、水冷ゾーン通過直後の鋼材温度は、現段階では数100度のばらつきが生じることがある。この原因としては、工程中に発生した鋼材表面の酸化膜(スケール)の発生に伴う表面性状の不均一さが、大きな影響を及ぼしていることが明らかになっている⁴⁾。このような冷却のばらつきは、鋼材の品質としてのばらつきや、歪を発生することによる形状の変化となって現れる。

本解説は、この冷却にばらつきが生じる現象(ここでは、この現象を冷却不安定現象と呼ぶこととする)を引き起こす要因を検討し、主として筆者らがこれまでに得た成果を中心に紹介する。

表1 TMCP設備仕様の概要¹⁾

- ①熱間矯正機
- 1)型式 : 4段可逆式
 - 2)矯正荷重 : 最大2700トン
 - 3)通板速度 : 15~150m/分
 - 4)ワークロール : 260mmφ×長さ4800mm 11本
 - 5)主電動機 : 300kw 2台
 - 6)設置場所 : 仕上圧延機後面約80mの位置
- ②制御冷却装置
- 1)型式 : 走間拘束型(ロール径 400mmφ)
 - 2)機長 : 20m
 - 3)通板速度 : 15~150m/分
 - 4)冷却水量 : 最大190m³/分
 - 5)ノズル型式 : スリットジェットスプレーおよびフラットスプレー
 - 6)冷却制御 : 6ゾーン分割制御および上下独立制御
 - 7)設置場所 : 熱間矯正機後面
 - 8)冷却速度 : 板厚25mmの場合、10~35°C/秒
(800°C→500°C)

*東京大学生産技術研究所 第2部

2. 噴霧冷却熱伝達特性

ここで取り扱う高温面の噴霧冷却熱伝達特性は、図1に示すような沸騰曲線と類似のN字曲線で表されることが知られている。ここでは噴霧冷却熱伝達特性を、主として戸田の用語⁶⁾に従い沸騰曲線の各領域と次のような対応付けを行う。

沸騰曲線	噴霧冷却熱伝達特性
膜沸騰	高温域
遷移沸騰	遷移域
核沸騰	低温域
極小熱流束点温度	高温域下限界温度

さて、前述したように、鋼材の制御冷却においては鋼材温度が400°C程度になった時点で水冷を停止する必要性が生じる。現実の水冷システムでは、この温度は図1に示す遷移域に存在することが多い。また、TMCPにおける冷却制御では、鋼材は高温域を経て冷却されるので、水冷ゾーン通過直後の温度は、高温域熱伝達特性と温度域下限界温度によりほぼ決定されるといっても過言ではない。したがって、これらを解明することが冷却不安定現象の解明に結び付くと考えられる。この立場から、次章では主として高温域熱伝達特性について検討する。

3. 高温域熱伝達特性に及ぼす諸因子の影響

噴霧冷却の高温域熱伝達特性に影響を及ぼす因子としては、以下のものが考えられる。

- | | |
|-------------|-------------------|
| (1) 冷却媒体側要因 | (2) 被冷却物体側要因 |
| a. 液滴流量密度 | a. 冷却面熱伝導性 |
| b. 液滴温度 | b. 冷却面表面粗さ |
| c. 液滴速度 | c. 冷却面表面のぬれ性 |
| d. 液滴直径 | d. 冷却面表面層の多孔性 |
| e. 気流流速 | e. 非定常性 |
| | f. 冷却面姿勢 g. 冷却面寸法 |

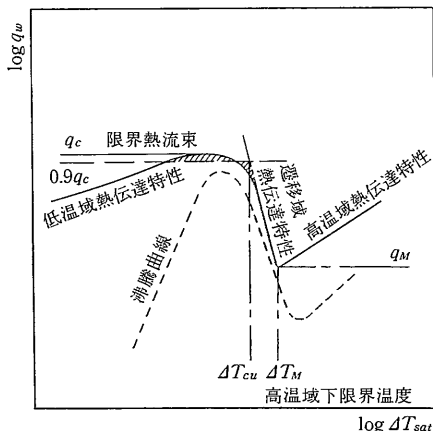


図1 噴霧冷却熱伝達特性

実際のTMCP技術においては、複数個のスプレインズルが使用されており、冷却される鋼材の寸法も大きいことから、ノズルの配列や、上向き面側に未蒸発のまま滞留する板上水の発生をも考慮に入れる必要がある。実際にこれらの影響に関する研究も見受けられ、檜崎ら⁶⁾は、ノズル群を八の字型に配置するなどの工夫を施すことにより板幅方向の温度分布が均一化することなどの知見を報告している。しかし、上に挙げた個々の要因を独立に検討するうえでは現象が複雑化しすぎる嫌いがあるため、ここでは操業規模の研究に関してはこれ以上は述べないこととし、制御冷却における最も本質的問題と考えられる鋼材表面の酸化膜の影響を中心として高温域熱伝達特性に及ぼす諸因子の影響について解説する。

3.1 冷却面表面粗さの影響

酸化膜の付着によって変化する表面性状には、粗さ、ぬれ性、熱伝導性および多孔性が考えられる。この中で、筆者らはまず、冷却面表面粗さの影響を取り上げ、金属面表面(銀およびSUS303)に人工的な規則正しい粗さを付加することによって以下のことを明らかにした⁷⁾。

(1) 冷却面表面粗さが噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす影響は顕著ではない。しかし、噴霧冷却熱伝達特性のわずかな差が累積する冷却曲線については、高温域においても冷却速度に及ぼす冷却面表面粗さの影響は顕著に認められ、制御冷却の場合には無視できないものである。

(2) 冷却面表面粗さが高温域下限界温度に及ぼす影響は顕著ではないが、冷却面熱伝導性および表面粗さの条件によっては高温域下限界温度が変化する場合がある。

図2は、冷却時間と粗さ高さHの関係を示したものであるが、この図からH>30μmの大規模粗さでは冷却時間との関係は依拠性が弱くなり、この領域の粗さを冷却開始前にあらかじめ付加することが効果的であることがわかる。ちなみに、あらかじめ圧延時において、鋼板表面に粗さを転写する方法が一部採用されているが、これ

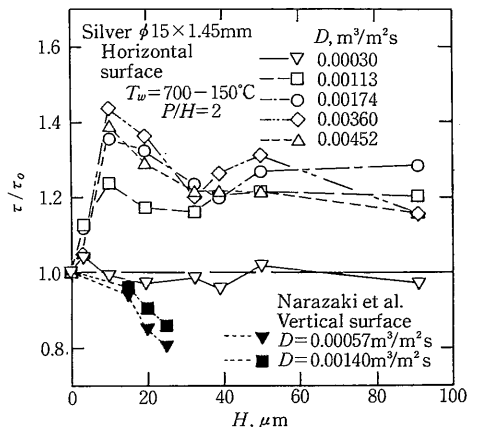


図2 冷却時間と粗さ高さの関係

は、この効果を経験的に応用したものと思われる。

3.2 冷却面表面のぬれ性の影響

相変化を伴う熱伝達において、ぬれ性は重要な役割を果たすが、ぬれ性の影響の度合については、ぬれ性の定量的表現法の問題を含めて、いまだ測定値の集積段階にあるのが現状であると思われる。そこで、筆者らは、表面処理性に優れたアルミニウムを伝熱面としてその表面のぬれ性を変化させ、噴霧冷却実験を行った⁹⁾。その結果を図3に示したが、この図より以下のことがわかる。

(1) 高温域下限界温度は冷却面表面のぬれ性の増大(すなわち、接触角の減少)とともに顕著に高温化する。

(2) 冷却面表面のぬれ性は高温域熱伝達率に影響を及ぼさないが、高温域下限界温度付近での高温域熱伝達率は冷却面表面のぬれ性の増大とともに若干増加する。

さて、TMCP技術のように鋼材をいったん1000°C以上の高温でまで加熱した場合、常温まで冷却した後に測

定される接触角の値は10°前後の低い値となることが知られている。これは、金属表面に吸着されている油性物質、および水分子、酸素分子等のガスが分解および離脱したためであると考えられるが、このようにして測定した接触角は、噴霧冷却におけるぬれ性の評価尺度としては適切ではない⁹⁾。図4は、各試験面を600°Cまで加熱した後、空中で常温までアルゴン流により冷却し、そのまま実験室内に放置した場合の接触角の経時変化を示したものである。この図に示されているように、加熱により接触角がいったん減少した面は、常温で空気中に放置しておくとも再吸着現象が起こり、この再吸着により各試験面の接触角は時間とともにそれぞれの飽和接触角 θ_s に接近する。図3に示されている接触角は、この飽和接触角であるが、この値をぬれ性を評価する尺度として用いた結果、上述の系統的な結論が得られている。

3.3 冷却面表面熱抵抗層の影響

プール沸騰においては、膜沸騰領域を経て沸騰冷却される物体の表面に、テフロンなどの熱抵抗層を付加することによって冷却時間が短縮される、いわゆる「断熱材のパラドクス」と呼ばれる現象が確認されており¹⁰⁾、超電導磁石の冷却安定化への応用¹⁰⁾などが提案されている。図5は、陽極酸化処理を施したアルミニウム板を用いて陽極酸化膜(厚さ δ)を表面熱抵抗層として、噴霧冷却についてこの現象の確認を行ったものである⁹⁾。この図より、「断熱材のパラドクス」現象と同様の以下の結果が確認できた。

(1) 冷却面表面熱抵抗層の膜厚さの増大とともに高温域下限界温度は顕著に高温化する。

(2) 冷却面表面熱抵抗層は高温域熱伝達率に影響を及ぼさない。

3.4 冷却面表面層の多孔性の影響

冷却面表面層の多孔性の影響に関する研究は、噴霧冷

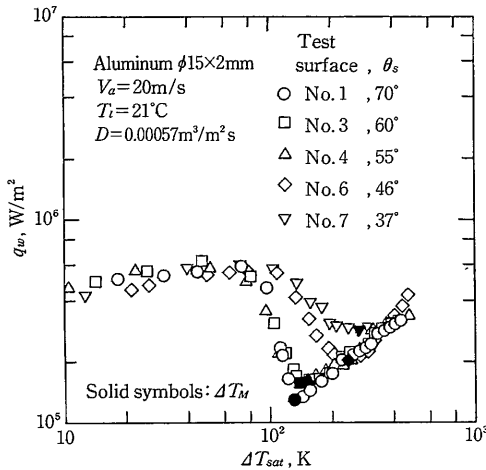


図3 噴霧冷却熱伝達特性に及ぼすぬれ性の影響

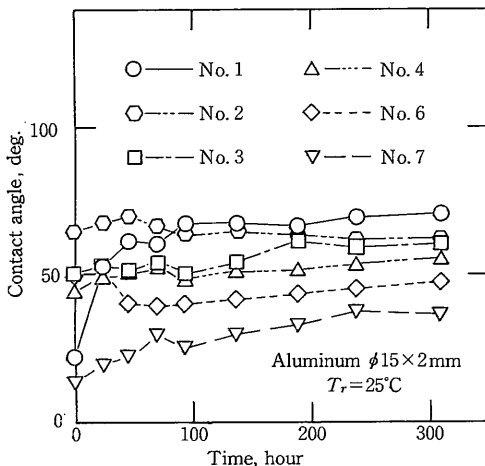


図4 汚染による接触角の変化(実験室内放置)

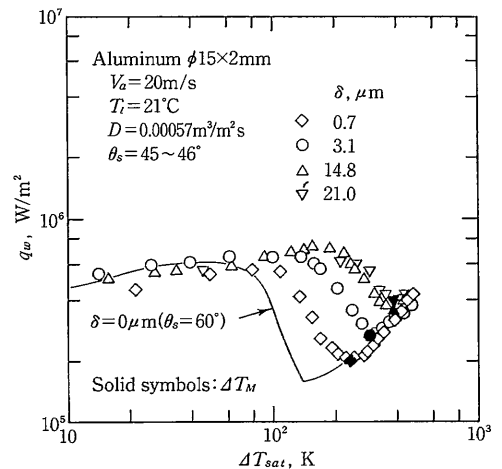


図5 噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす表面熱抵抗層の影響

却では行われていないが、現在のTMCP技術においては、制御冷却を行う前にマクロな酸化膜は除去されている場合が多いことから、多孔性自体の問題は少なく、空孔は表面粗さおよび表面熱抵抗の変化となって現れるものと考えられる。

3.5 冷却面の非定常性の影響

制御冷却などの熱処理の場合、当然のことながら材料は時間とともに冷却される。このような非定常実験を水平上向き平面系プール沸騰で行った場合、伝熱面の厚さの差異によって沸騰曲線が異なるいわゆる非定常性の影響が存在することが確認されている¹¹⁾¹²⁾。図6は、銀製伝熱面を用いて水平上向き平面系で噴霧冷却実験を行った結果である¹³⁾が、この図より以下のことがわかる。

- (1) 冷却面厚さが薄い場合、高温域熱伝達率は冷却面厚さの減少とともに低下する。
- (2) 高温域下限界温度は冷却面の非定常性の影響をほとんど受けない。

図7は、図6に示された過熱度200Kでの熱伝達率の値を冷却面厚さ40mmのそれで無次元化したものを冷却面

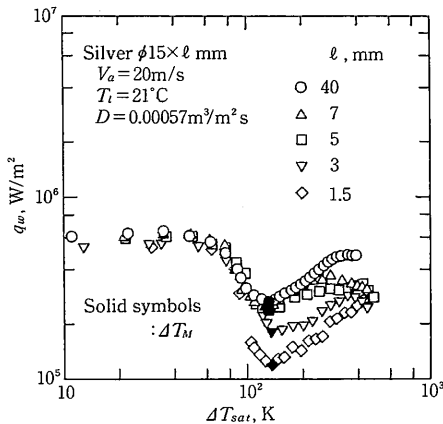


図6 噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす非定常性の影響

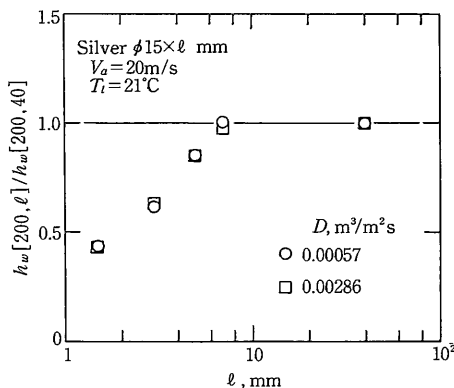


図7 高温域熱伝達率と冷却面厚さの関係

厚さに対して示したものである。図からわかるように、非定常性の影響には厚さの増加とともに熱伝達率が增大する領域と、ほぼ一定値となる領域の2領域が存在する。ただし、以上の結果は片面のみの冷却による実験結果であるので、両面均一冷却の場合には冷却面厚さは図に示された値の2倍にする必要があることを注意しておく。

3.6 冷却面熱伝導性の影響

高温域熱伝達率と温度伝導率の関係を図8¹⁴⁾に、高温域下限界温度と熱慣性比の関係を図9¹⁵⁾にそれぞれ示したが、これらの図より以下の事が示される。

- (1) 高温域熱伝達率は冷却面材料の熱伝導性の低下(温度伝導率の減少)とともに増加する。
- (2) 高温域下限界温度は冷却面材料の熱伝導性の低下(熱慣性比の増加)とともに高温化する。

ただし、結果(1)に関しては鉛直平面系で得られた結果であり、水平上向き平面系においては、文献7)で得られている銀製伝熱面とSUS303製伝熱面での高温域熱伝達率には、差はみられないことを付記しておく。

3.7 冷却面姿勢の影響

高温域熱伝達率は冷却面の姿勢によっても変化し、被

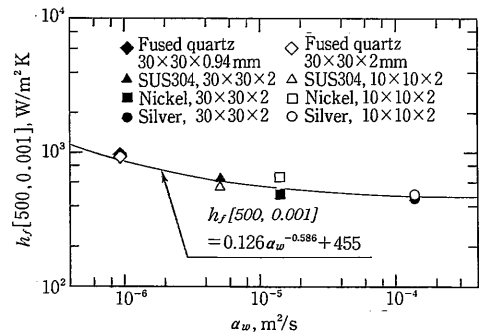


図8 高温域熱伝達率と冷却面材料熱伝導性の関係

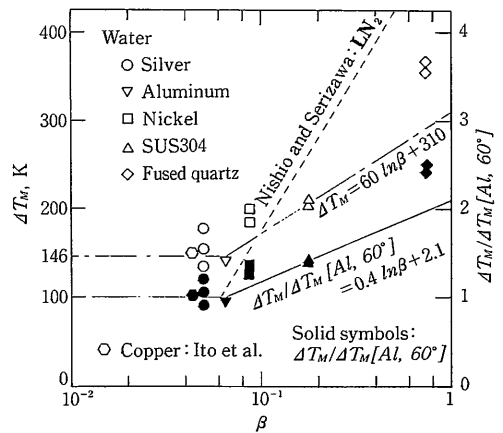


図9 高温域下限界温度と冷却面材料熱伝導性の関係

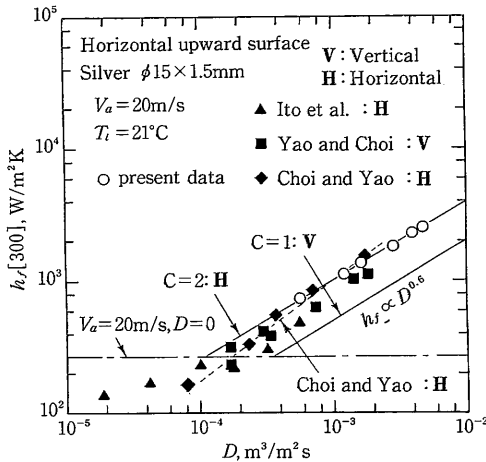


図10 高温域熱伝達率と液滴流量密度の関係

冷却面が水平上向き面の場合には、図10に示したように鉛直面の場合よりも熱伝達率が高くなる傾向にあることが知られている¹⁵⁾。

3.8 冷却媒体側の影響

ここでいう冷却媒体側のパラメータとは、液滴流量密度、液滴温度、気流流速、液滴直径、および液滴速度である。通常の方法で得られる噴霧流は、不均一な液滴の集まりであり、上述のパラメータの中の液滴直径および液滴速度を均一にできないために、それぞれを独立には変化できないことから、これらの影響は必ずしも明らかになっていないのが現状である。したがって、これまでの研究では、主として液滴流量密度を中心とした整理が行われており、図10に示すように、高温域熱伝達率は液滴流量密度の増大とともに増加することがわかっている。ただし、熱伝達率の定量的な評価は、測定者によって異なっており、いまだ十分な成果は得られていない。

液滴温度の影響に関しては、プール沸騰等の研究成果から考えて高温域熱伝達率に顕著な影響を及ぼすものと考えられる。藤林ら¹⁶⁾は、排熱利用を目的として開発した過熱液体噴流ノズルと二相流噴射ノズル（ミスト噴流ノズル）を使用して普通鋼を冷却した場合の熱伝達特性を比較しているが、液滴温度がほぼ飽和温度に近い前者と、

サブクール度の大きい後者とは、後者のほうが熱伝達率が高くなることを示している。また、檜崎ら¹⁶⁾も水温の変化に対しては十分な注意を払うことが必要であることを指摘している。

液滴直径、および液滴速度の影響に関しては、現段階では、Choi and Yao¹⁷⁾が液滴流量密度、液滴直径、および液滴速度を独立に変化させることによってこれらの影響を検討した結果から（彼らの測定条件範囲内では）以下の事がわかっている。

- (1) 高温域熱伝達率は液滴速度の増大とともに増加する。
- (2) 高温域熱伝達率は液滴直径にはあまり依存しない。ただし、彼らは、液滴の微粒化法として加振法を用いているので液滴流量密度および液滴速度が低く、液滴直径が500μm程度の大きい領域での実験しか行っていない。したがって、測定条件範囲を広げた場合、上述の結果が適用できるか否かは不明である。

以上、これまで述べてきた結果をふまえて、高温域熱伝達特性に及ぼす諸因子の影響を表2にまとめて示してみた。また、ここでは詳細は述べないが、熱伝達特性を図1中の長破線で示した形に近似し、これを模式化することによって冷却曲線を予測する試みも筆者らが行っている¹⁵⁾。

4. 冷却不安定現象

さて、前章の結果に基づき冷却不安定現象について考えてみよう。図11は鋼材の制御冷却における冷却不安定の概念図である。図中のτ₁は、鋼材水冷ゾーン通過時間であり、冷却曲線1が、低ぬれ性で熱抵抗層のない比較的なめらかな面での冷却曲線である。前述したように、鋼材の酸化スケールは、表面粗さ、ぬれ性、熱伝導性および多孔性を変化させる。たとえば、粗さの増大は図11のDのように高温域での冷却速度に影響を及ぼすが、Aに示したように高温域下限界温度には影響を及ぼさないことから、冷却曲線を1→3のように変化させ、水冷終了温度にT_{m1}とT_{m3}の差を生じさせる。一方、ぬれ性および熱抵抗層厚さの増大は、高温域下限界温度を図11のBのように変化させ、冷却曲線を1→2と変化させる。こ

表2 噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす各因子の影響

	被冷却物体側パラメータ					冷却媒体側パラメータ				
	冷却面材料 熱伝導性→低	表面粗さ →大	ぬれ性 →良	非定常性 →大	姿勢	液滴流量密度 →大	液滴温度 →低	液滴速度 →大	液滴直径 →大	気流流速 →大
高温域下限界温度 [ΔT _M]	→大 顕著	影響小	→大 顕著	影響無	影響無	一定 →大	→大 (?)	影響小	影響無	影響小
高温域熱伝達率 [h _w]	→高	影響小	影響無	→低 顕著	影響有	→大 顕著	→大 顕著	影響有	影響小	影響有

の結果、粗さ、ぬれ、表面熱抵抗の変化により高温域での冷却速度は図11のDのように変化し、高温域下限温度はCのように変化するため、冷却曲線は1→4となると同時に、水冷終了温度に T_{w1} と T_{w4} の差を生じさせる。したがって、酸化の程度が場所的に異なれば、水冷終了温度も場所的に T_{w1} から T_{w4} の間で分散することになり、これが冷却不安定現象の原因と考えられる。この中で粗さについては大規模粗さにすると粗さの変化による冷却曲線の変化は小さくなるので問題は小さいが、ぬれ性、表面熱抵抗についてはお互いに連結している場合が多く、これをコントロールすることが制御冷却安定化の重要因子であると言える。ちなみに、実際の鋼材のTMCPの場合、加熱炉内雰囲気酸素濃度を極力低濃度にしたり、制御冷却を行う前の工程でデスケリングを行うことによって、酸化膜の付着を防止する努力がなされている。しかし、それにもかかわらず完全な酸化膜の除去はできないことと、デスケリング後の酸化膜の発生は防ぎよ

うがないのが現状である。これらの残留スケールの影響については、村田による解説¹⁸⁾があるが、初期温度が900°Cもの高温度であるにもかかわらず、高温域が見られないような測定結果も示されており、このような結果は高ぬれ性で表面熱抵抗層の熱伝導性が低く、かつ粗さを伴った面によるものと推定される。

5. おわりに

鉄鋼TMCPにおける冷却制御という観点から筆者らの研究成果を中心に噴霧冷却熱伝達特性に影響を及ぼす諸因子について述べた。本解説のような研究課題は多分に表面科学との境界領域的な性格を持っているように思われる。実際の鋼材に付着する酸化膜に関しても今後、表面科学からのアプローチをも含めた展開が行われていくことを期待したい。
(1990年3月12日受理)

参考文献

- 1) 新日本製鉄株式会社君津製作所：君津CLC設備の概要
- 2) 邦武：熱処理, 29-2 (1989), 58.
- 3) 尾上ら：製鉄研究, 309 (1982), 18.
- 4) 村田：伝熱研究, 25-97 (1986), 47.
- 5) 戸田：日本機械学会論文集, 38-307 (1972-3), 581.
- 6) 檜崎ら：第948回日本機械学会講演概要集, (1987-11), 33.
- 7) 大久保, 西尾：日本機械学会論文集 (B編), 54-500 (1988), 934.
- 8) 大久保, 西尾：日本機械学会論文集 (B編), 55-517 (1989), 2846.
- 9) 西尾, 芹沢：日本機械学会論文集 (B編), 53-487 (1987), 1061.
- 10) Chandratilleke, G.R., 西尾：低温工学, 23-3 (1988), 12.
- 11) Peyayopanakul, W. and Westwater, J.W.: Int. J. Heat Mass Transf., 21-8 (1978), 1437.
- 12) 西尾：日本機械学会論文集 (B編), 51-462 (1985), 582.
- 13) 大久保, 西尾：第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集, II (1989), 487.
- 14) Ohkubo, H. and S. Nishio: Proc. 1987 ASME-JSME Thermal Engng. Conf., 5 (1987), 71.
- 15) 大久保, 西尾：日本機械学会講演概要集, 890-63 (1989-11), 93.
- 16) 藤林ら：第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1985), 70.
- 17) Choi, K.J. and Yao, S.C.: Int. J. Heat Mass Transf., 30-2 (1987) 331.
- 18) 村田：化学工学協会「伝熱促進と周辺技術」研究会研究講演会「伝熱面の汚れとその対策」, (1987-2).

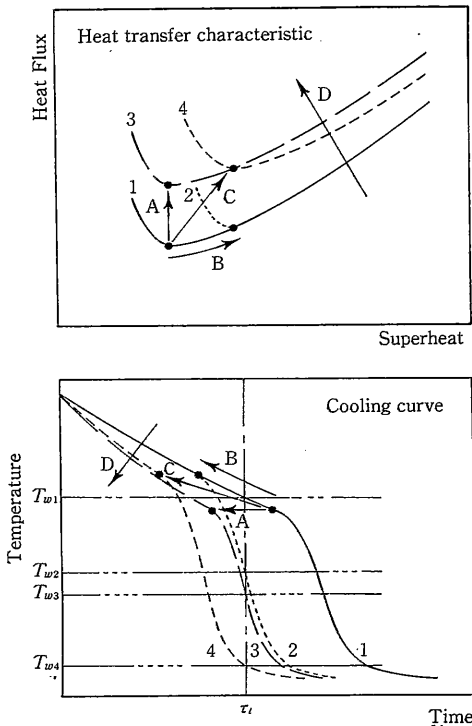


図11 冷却不安定現象の概念図