

# 次世代鉄鋼材料創製技術の研究

推進グループ代表：門出政則（九州大学）

幹事：永井二郎（福井大学），芹澤良洋（新日鐵住金）

## 1. はじめに

鉄鋼業界では、高強度でかつ延性に優れた材料の生産が強く求められている。そのためには、圧延プロセスと熱処理技術を融合させて、金属結晶の成長を熱制御し、結晶の微粒子化を図ると同時に延性を持たせるための熱処理が欠かせない技術となる。図1は、金属工学の分野で広く知られている結晶の微細化と強度の関係を示す。この図から、結晶の微粒子化が高強度化を図る上で重要な因子であることが理解できる。一方、結晶の微粒子化は、延性が著しく低下し、圧延加工が困難になる。図2は、高温固体の冷却時間と結晶粒子径の関係を示す。図2から結晶粒子を微細化するためには冷却時間が非常に重要になる。一方、粒子径が微細化されると強度は増強されるが、加工性が劣化するという欠点がある。従って、強度と延性のバランスを取りながら加工するための技術開発が金属工学分野での長年の緊急課題となっている。

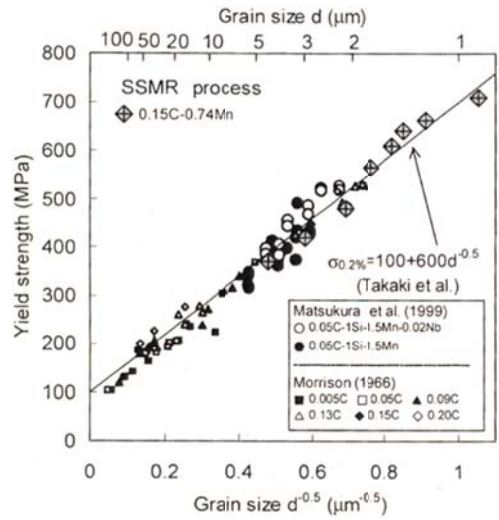


図1 結晶粒子微細化と強度—Hall-Petchの関係

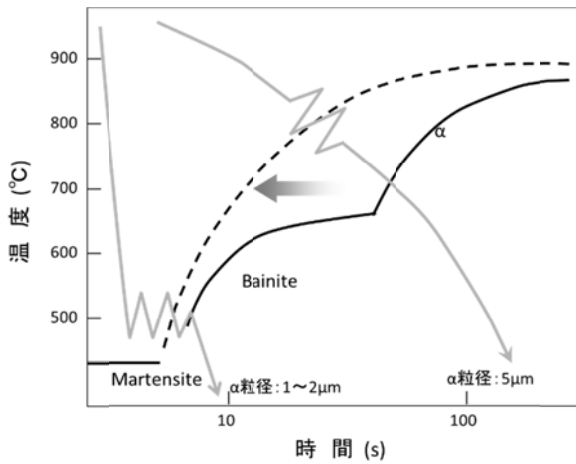


図2 低炭素鋼(Fe-0.8Mn-0.2C)における歪み誘起変態の模式図

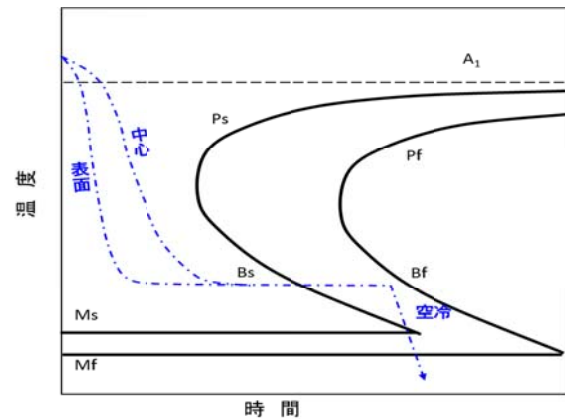


図3 残留オーステナイトの生成させる熱履歴

一方、金属結晶の相転移と冷却の関係は、図3に示されるように高温材料の冷却時間（速度）が非常に重要になる。この冷却については、伝熱工学の分野では古くから実験的研究が行われており、図4に示されるような冷却曲線、即ち冷却中の表面温度は高い温度から緩やかに温度低下し、ある温度に到達後、急に温度低下を開始することが定性的に示されている。しかし、緩やかな温度降下中の表面の状態は、実際には固液の接触を切り返しながら推移している。この固液の接触状態は、不安定な接触状態から安定な接触状態へ、更には安定な固液接触の拡がりへと連続的に推移している。しかしながら、安定な固液接触状態の推移点や固液接触の連続的な拡大開始点を支配する因子については、残念ながら未解決のままになっているのが実情である。特に、圧延プロセスでは、高温鋼板が不連続的にラミナー冷却されている状況下では、濡れと乾きが交互に連続的に現れながら冷却されている。図5は、高温加熱された回転円筒をラミナー冷却した時の冷却曲線の1例である。図5から、表面は濡れと乾きを繰り返しながら冷却されており、ある温度に到達すると急冷されていることが分かる。

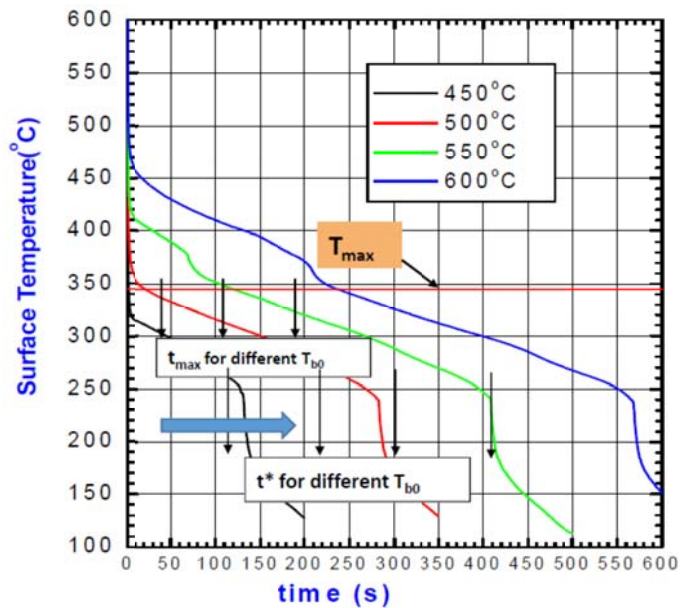


図4 急速冷却中の冷却曲線の1例

ながら、安定な固液接触状態の推移点や固液接触の連続的な拡大開始点を支配する因子については、残念ながら未解決のままになっているのが実情である。特に、圧延プロセスでは、高温鋼板が不連続的にラミナー冷却されている状況下では、濡れと乾きが交互に連続的に現れながら冷却されている。図5は、高温加熱された回転円筒をラミナー冷却した時の冷却曲線の1例である。図5から、表面は濡れと乾きを繰り返しながら冷却されており、ある温度に到達すると急冷されていることが分かる。

図1-3で述べたように金属結晶の微粒子化で求められている温度領域は、丁度安定な固液接触開始温度や固液接触面の拡大温度付近に対応している。従って、冷却過程の正確な理解を通して冷却技術を進展させることによって結晶粒子の微細化とその成長を制御することが可能となると言っても過言ではない。

そこで、金属組成学分野と冷却分野の研究者が相互連携することによって冷却材料の結晶成長を制御し、必要な工業製品を効率的に製造することは、伝熱工学の進展のみならず、産業分野においても大いに期待される。

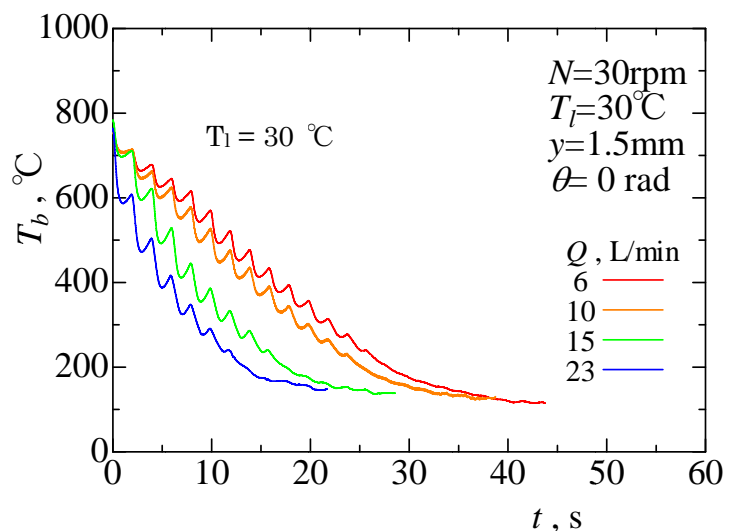


図5 間欠的冷却中の冷却曲線

## 2. 研究目的

本研究の目的は、具体的には、鉄鋼業における材料組織制御技術の抜本的向上により、製品レベルを大きく飛躍させることである。そのためには、金属組成学を専門にした研究者と連携しながら、高温材料を急速冷却するときの金属組織の変態や結晶の成長を正確に理解し、それを活かした冷却技術の開発をすることが必要である。しかしながら、冷却技術の分野にも未解決な問題、即ち急速冷却中の非定常温度の進展や冷却速度を支配するメカニズムの解明が残されたままになっている。そこで、

急速冷却及びその制御を行う上で大きなポイントとなる強サブクール沸騰時の濡れ開始メカニズムに関する研究により、その原理を明らかにする。また、濡れの現象を複雑にしている実材料における表面性状の影響についても研究を深め、濡れに関する実用領域における包括的な原理の追求を行う。その結果、材料組織制御を可能とした実用的な冷却技術の開発を展開することが可能になる。

### 3. 活動計画と方法

高温材料の急速冷却中に形成される結晶成長を制御するための基礎的な知見を集積するとともに、異分野交流により次世代材料創製技術の開発に関する研究を行う。具体的には、

- (1) 金属組織の成長と温度(熱)との関連を連携によって明確にするための検討から開始する。従来は、今回参加いただく、塑性加工分野、メタラジー分野での共同活動は多くみられたが、次世代の加工組織制御のためには高度な伝熱制御がキー技術の一つとなる。本研究会では、塑性加工分野、メタラジー分野の従来国プロなどの活動に深く携わってきた研究者との情報交換を通じ、次世代に向けた技術課題を明示する。
- (2) 高温面急速冷却を制御するために必要となる基礎研究は、(1)高温面が安定な固液の濡れ状態が達成できるかどうかによって冷却速度が大きく変化することが経験的に分かっている。しかし、安定な固液の濡れ状態を決定する巨視的な因子については未解明のままになっている。そのため、高温面に冷却中に得られる冷却曲線についても正しい認識が得られていない。
- (3) 冷却側と高温面側の間の熱移動は、固液の連成問題となる。特に、安定な濡れの形成前後では伝熱量が 2 桁程度異なってくる。従って、安定な濡れ条件を決定する因子の解明が本研究の最も重要な課題である。
- (4) 濡れ開始時の現象研究：沸騰現象における、膜沸騰から遷移沸騰に至る際の濡れ開始条件は、温度あるいは熱流束の条件のいずれか一方ではなく、それらが複合しているとともに、それらの条件を左右する伝熱面側の表面条件(表面性状などを含む)も関わっていると推定される。例えば、表面に関しては濡れ開始時の重要な因子である各物質の界面エネルギーについて、その高温の濡れ開始条件近傍での定量化が不十分である。ここでは、濡れ現象解明のアプローチ(数値解析を含む)を深化させ、濡れ開始条件を提示する。また、産業界において特有な大容量冷媒使用時の冷却における MHF 点高温化などの現象解明、制御の高度化に寄与することのできる冷却特性の特性解明のためのアプローチに関しても議論していく。
- (5) 固液界面間の伝熱量を基に、高温面冷却プロセス中に生じる結晶構造の相変化を考慮した熱伝導解析を行い、結晶成長と固容体相の関係を検討する。
- (6) 高温材料の冷却プロセスは、産業界においては殆どの場合移動体冷却となっている。移動体における冷却は、間欠的、極短時間冷却、冷却領域の時間的変化や冷却冷媒の流れの影響など移動体ゆえの多くの影響因子を有する複雑現象である。従って、移動体冷却の実験的研究や数値解析研究や短時間冷却における基礎現象研究などを通して、有機的融合検討を各分野の研究者の議論を通して行っていく。こうした異分野研究者の融合により、従来の課題との差異などについて明確にし、次世代材料創成に向けた新たな高度冷却システムを検討する。

### 4. 意義と特色

材料組織制御技術の確立によって、より高品位の鉄鋼製品を安定的に製造することが可能となる。また、伝熱工学の分野では、所謂冷却曲線と呼ばれていた相変化を伴う複雑な非定常冷却特性を明らかにすることが出来る。具体的には、鉄鋼製品製造分野では、結晶成長の制御により高張力鋼と呼ば

れる高品位の製品を安定的に製造できるようになる。また、従来の製造技術の改善によって、飛躍的にコストを低減できる技術開発となることが期待される。伝熱工学の分野では、沸騰曲線の特徴（核沸騰、膜沸騰および核沸騰と膜沸騰の遷移領域）を完全に理解すること期待され、学術的にも高く評価されることになる。

従来、沸騰研究では、基礎的な系での研究事例が多かったが、ここでは、産業界の現象に近い系での研究、すなわち、移動体の系、大容量冷媒を使用した系、および表面性状に応じた濡れ現象の研究を行うことにより見出される現象を通じて、分野研究全体の理解を深めるとともに、研究に必要な新たな研究手法を作り出していく。さらに、鉄鋼の塑性加工分野の研究者との協力によって、次世代材料創製技術の研究に展開していくことに特色がある。

#### 5. 研究推進の構成

沸騰冷却の研究者と金属組成・加工の研究者が連携しながら研究を推進し、その構成は、表 1 となっている。

伝熱分野		金属組成・加工分野	
門出 政則	九州大学	芹澤 良洋	新日鐵住金
永井 二郎	福井大学	柳本 潤	東京大学
大久保 英敏	玉川大学	上路 林太郎	大阪大学
白樫 了	東京大学	土山 聡宏	九州大学
宇高 義郎	横浜国大	中田 直樹	JFE スチール
高田 保之	九州大学	西村 真	神鋼
藤本 仁	京都大学		
光武 雄一	佐賀大学		
鶴田 隆治	九州工大		
大竹 浩靖	工学院大学		