



## 躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

# 鉄鋼における冷却プロセスの研究を通じて

Through the Research of Water Cooling Process

福田啓之

Hiroyuki Fukuda

JFE スチール (株) スチール研究所

圧延・加工プロセス研究部

主任研究員

## 1 はじめに

近年、海外鉄鋼メーカーとの競争が激化する中で、価格競争力を維持するためにTMCP (Thermo Mechanical Control Process) 技術適用の重要性が増加している。筆者は2004年の入社以来、主に鋼材の制御冷却技術に関するプロセス研究開発に携わってきた。冷却特性を把握するには、冷却側と被冷却側の影響を明らかにする必要がある。冷却側とは水冷方式やその水量密度などであり、被冷却側とは鋼材の冷却姿勢や表面性状などである。表面性状にはスケール厚さや表面粗さなどが挙げられる。本稿では、筆者らがこれまでに実施してきた研究として、スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼす影響について紹介させていただく。

## 2 スケール厚さがスプレー冷却特性に及ぼす影響

### 2.1 スプレー冷却実験

鋼材の水冷において、沸騰現象や表面性状が及ぼす影響についての研究はこれまで数多くなされてきた<sup>1-5)</sup>。しかしながら、スケールの成長で厚さと粗さが同時に変化するため、表面性状としての個別の影響を評価された研究は多くない。そこで、SUS304鋼の母材に $\text{Al}_2\text{O}_3$ の粉末を溶射し、表面粗さを一定に調整した厚さの異なる擬似スケール層を付与させた試

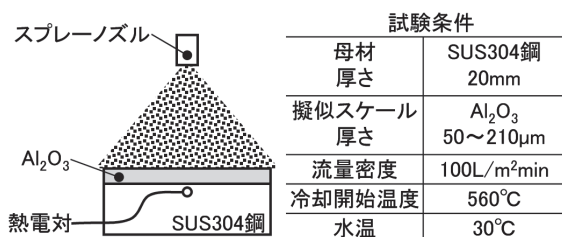


図1 スプレー冷却実験概要

料を用いて、図1に示すスプレー冷却を行った。

図2に実験結果の一例を示す。母材表面から2mm位置に設置した熱電対から得られる温度履歴からスケールと母材の界面での温度履歴を解析で求めた。スケール厚さが50 $\mu\text{m}$ の場合、冷却開始後36sの間は温度降下が緩やかな膜沸騰が発生し、その後遷移沸騰へ移行した。この膜沸騰から遷移沸騰へ移行する温度、すなわちスケールと母材の界面での見かけのクエンチ点温度は、スケールが厚いほど、その値が上昇した。この傾向は加藤らが行った鉄スケールの実験の結果<sup>5)</sup>と同じ傾向を示した。

これは「熱抵抗層のパラドクス」と呼ばれ、冷却面に比較的薄い熱抵抗層が存在すると逆に冷却が早く進行してしまう現象である。

### 2.2 衝風冷却実験

$\text{Al}_2\text{O}_3$ の焼結体の熱伝導率は32W/mK<sup>6)</sup>であり、SUS304鋼の17W/mK<sup>7)</sup>と比較して十分高いため熱抵抗層とはならない。一方、溶射した $\text{Al}_2\text{O}_3$ の熱伝導率が不明であったため、図3に示す衝風冷却実験により、熱伝導率の推定を行った。図4に実験結果を示す。母材表面から2mm位置に設置した熱電対での冷却速度はスケールが厚い210 $\mu\text{m}$ の方が若干低かった。スケールも含めた伝熱解析によりスケールの熱伝導率を逆算したところ、溶射での $\text{Al}_2\text{O}_3$ の熱伝導率は1.4W/mKであった。この値は、焼結材より非常に小さく、更に母材であるSUS304鋼よりも小さかった。これにより $\text{Al}_2\text{O}_3$ の擬似ス

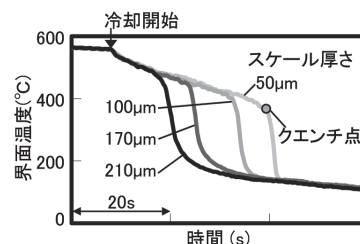


図2 スプレー冷却実験結果<sup>8)</sup>

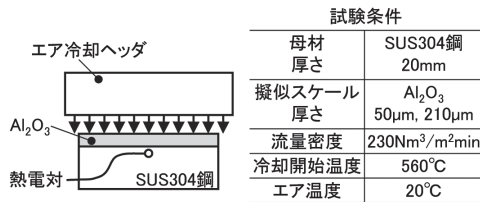
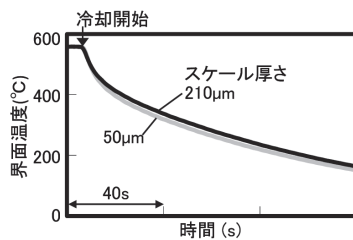


図3 衝風冷却実験概要

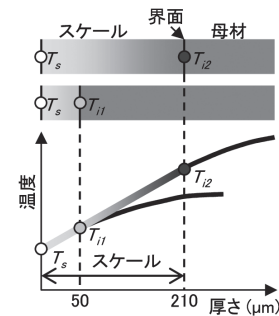
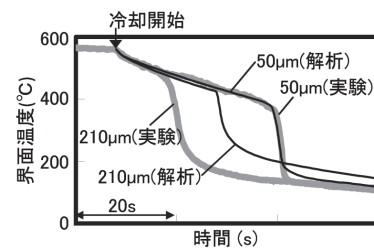
図4 衝風冷却実験結果<sup>8)</sup>

ケール層が熱抵抗層として作用していることを確認した。

### 2.3 伝熱解析

スプレー冷却において、比較的薄い熱抵抗層が存在する場合の見かけのクエンチ点温度が増加したメカニズムについて述べる。クエンチ開始時の厚さ方向の温度分布の模式を図5に示す。スケール表面でのクエンチ点温度は同じでも、スケールが熱抵抗層として作用することで、スケール厚さの増大とともにスケールと母材の界面において、見かけのクエンチ点温度が上昇したと考えた。このため、スケールも含めた伝熱解析を行った。スプレー冷却実験で得られたスケール厚さ50μmとした時の温度測定値をもとに、スケール表面温度と熱流束の関係を折線近似でモデル化し、厚さ50μmと210μmのスケール層を考慮して解析を行った。

図6に解析結果と実験で得られた界面での温度履歴の比較を示す。実験ではスケール厚さが50μmから210μmに増大することで、クエンチ開始時のスケールと母材の界面温度は365℃から485℃まで上昇した。解析でも365℃から410℃まで上昇した。熱抵抗層として作用するスケール層が厚いほど、クエンチ開始時のスケールと母材の界面温度が高くなるという前述の傾向を説明することができた。ただし、スケール厚さ210μmの場合には、実験結果と解析結果の間に大きな乖離があった。この乖離は、核沸騰時の熱流束のモデル化やスケールの熱伝導率の温度依存性などが影響していると考えており、今後の課題である。

図5 クエンチ時の温度分布の模式<sup>8)</sup>図6 温度履歴の比較<sup>8)</sup>

必要がある。さらに、実機での冷却側の詳細な調査も必要である。例えばスプレー冷却では、液滴衝突の挙動や衝突後の滞留水の流動状況などが挙げられる。これらの影響因子は地道に検証していくしかないと考えている。

最後になりますが、本稿で紹介させていただきました内容は、ご関係の皆様のご支援およびご助力によって得られたものです。深く感謝を申し上げます。今後ともご指導、ご鞭撻を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

### 参考文献

- 1) 三塚正志：鉄と鋼，54 (1968)，1457.
- 2) 大久保英敏，西尾茂文：日本機械学会論文集 (B編)，54 (1988)，934.
- 3) 村田杏坪，西尾茂文：鉄と鋼，79 (1993)，55.
- 4) 玉利孝徳，吉田博：材料とプロセス，8 (1995)，444.
- 5) 加藤徹，原口洋一，川本正幸，渡部忠男：鉄と鋼，83 (1997)，611.
- 6) 荒井正嗣，有働竜二郎，古瀬宗雄：日本機械学会論文集 (A編)，72 (2006)，691.
- 7) 連続鋼片加熱炉における伝熱実験と計算方法，日本鉄鋼協会，東京，(1971)，80.
- 8) 福田啓之，中田直樹，木島秀夫，黒木高志，藤林晃夫，高田保之，日高澄具：鉄と鋼，100 (2014)，1514.

(2018年3月8日受付)

## 3 おわりに

実機での冷却特性を把握し、最適な冷却設備仕様を検討する際には前節までに述べたような被冷却側の影響も考慮する

## 先輩研究者・技術者からのエール

福井大学 学術研究院工学系部門 機械工学講座 教授

永井 二郎

福田さんの「躍動」の記事についてエールコメントを、と依頼されましたが、私ではとてもコメントをできる「先輩」の役は務まらないので、「仲間」としてエールを送ります。

2017年度に立ち上がった日本鉄鋼協会の「熱延ROT冷却モデル構築Ⅱ」研究会では、ひょんなことから私は主査を務めることになり、福田さんは協力研究者として参加されています。本記事「鉄鋼における冷却プロセスの研究を通じて」の内容は、正にこの研究会の主要テーマと密接なつながりがあります。鋼材冷却も含めて広く沸騰研究開発の歴史の中で長年の課題とされているのは、「高温固体面を液体で沸騰冷却する際に、膜沸騰による徐冷状態から固液の濡れが開始され急冷が始まる条件とは何か？」です。私の生涯の研究テーマになっています。この「急冷が始まる条件」が、定量的に表現された被冷却固体側と冷却液体側の物性や設定条件で汎用的に定式化できるのかどうか（少なくとも経験パラメーター無しで数値計算できるのかどうか）に、現在の私は最も関心を持っております。

福田さんは、鋼材の水冷却時の「急冷が始まる条件」について、スケールを模擬した $Al_2O_3$ の焼結体を付与さ

せた固体面を用いて、クエンチ時の母材とスケール界面温度の実測や解析結果を報告しています。私は研究室の学生さんと一緒に、スケールがついた純鉄のスプレー冷却の実験データを取得していますが、なかなかきれいな結果が得られず、福田さんの整合性のある実験・解析結果を見て、心底敬意を表します。本記事には表されてはいませんが、おそらくは、模擬スケールの空隙率、浸透率、比熱、密度、濡れ性といった物性も解析に考慮されているのでしょう。伝熱解析の部分で、「スケール表面でのクエンチ点温度は同じ」と考えて解析をしたとありますが、前述の研究会メンバーの中には同じ考えの方もいれば、「いやクエンチは温度だけでは決まらず、固体・液体側双方での伝熱と熱容量が関係するはずだ」という考えの方もいて、私の認識では未だ決定版の結論は出ていないように思っています。今後の研究会でも、「模擬スケール表面にスプレー液滴が連続的に衝突した際に、スケールと液体の接触界面でどのような物理現象（例えば、非定常熱伝導と液相中の自発核生成）が起き、それに伴い、スケール側と液体側の温度分布がどのように変化し、それらの結果、クエンチが起るのか起きないのか」をぜひ一緒に議論致しましょう。

新日鐵住金(株) 技術開発本部 プロセス研究所 プロセス技術部 熱プロセス技術応用開発室 主幹研究員 芹澤 良洋

福田さん、そして筆者が関わっている冷却プロセスは最近の鉄鋼材料の軽量化に伴う高張力化、さまざまな適用先に対応した種々の材料特性を実現するための鋼材組織の作りこみに深く関わっており、その重要性も高まっている。特に、冷却時の温度均一性、冷却履歴における主要な通過点での温度精度向上など課題は山積している。

本稿で紹介いただいたのは、冷却における制御性向上のための冷却特性に関する基礎的な研究成果であり、そこには福田さんの優れた点が垣間見える。たとえば、これまでにない、断熱性のある表層物質を鋼材表面に配置した精緻な実験、さらに、実験結果の解析及び考察は秀逸で、基礎的な研究能力の高さを示したものと推察され、本人の努力と先輩方の教育の賜物であろう。特に、生産プロセスの研究開発で忙しい中、基礎的な研究開発にまで気を配り、実行していくことは難しいことであり、その努力にはエールを送りたい。

現在、冷却プロセスの課題解決の活動の一つとして、鉄鋼協会で「熱延ROT冷却モデル構築Ⅱ」研究会が行われている。メンバーは筆者、福田さんをはじめとした企業メンバーと今回のコメントの福井大学、永井教授を主査とした大学の先生方である。日本の伝熱研究、特に沸騰研究は世界的に見ても優れており、そうした先生方

に参画いただいている企業メンバーとしては、多くの刺激を受けることのできる研究会ではあるが、残念なことに、福田さんのような若手の研究者はおらず、今後の課題となっている。

このような背景から、福田さんへの期待とお願いについていくつか記したい。一つは、鉄鋼業界の冷却プロセスの課題と重要性を広くPRしていただき、大学の若手研究者の方々を引き込んでいただきたい。その際には、高度計測、計算工学など異分野の方々をも巻き込み、研究内容を深く、広くして行けることも期待したい。また、中国、インドなど鉄鋼業が主要産業として発展しつつある国では多くの研究開発が行われており、日本での研究の繰り返しの内容もあるが、最近開発された新しい手法を用いた研究開発もあるので、参考にするだけでなく、できれば、積極的に議論して日本の存在感を高めるとともにリードしていただきたい。

今一つは、冷却現象のメカニズム追求である。沸騰はいまだ数値シミュレーションが困難な現象であり、これも、実プロセス開発での経験を大学の先生方と分かち合って、様々な視点から研究を進めていただきたい。

次世代の鉄鋼業を担っていく若手としてますますの活躍を期待しています。