

# 高強度熱延鋼板のための冷却帯内鋼板温度計測技術と 高精度冷却制御技術

## Temperature Measurement Technology in Water Cooling Process and High Accuracy Cooling Control Technology for High Tensile Hot Rolled Strip

本田 達朗\*  
Tatsuro HONDA

植松 千尋  
Chihiro UEMATSU

中川 繁政  
Shigemasa NAKAGAWA

武衛 康彦  
Yasuhiko BUEI

橋 久好  
Hisayoshi TACHIBANA

阪上 浩一  
Koichi SAKAGAMI

### 抄 録

新日鉄住金(株)は、熱間薄板圧延(熱延)工程のランアウトテーブル冷却における鋼板温度計測技術とそれを用いた高精度冷却制御技術を開発した。二酸化炭素排出抑制等を目的として自動車向け高強度、高性能な鋼板の安定供給が求められている。熱間圧延工程での高強度鋼板製造においては、圧延後、巻き取るまでの冷却過程において鋼板温度を高精度に制御する必要がある。その際、低い温度まで冷却されるので高精度な冷却制御が困難であった。この問題を解決すべく、冷却帯内における鋼板の安定測温技術と、それを用いた高精度冷却制御技術を開発した。これらの技術は新日鉄住金鹿島製鉄所熱延工場にて開発、実用化され、各所に展開されている。

### Abstract

Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation (NSSMC) has developed Fountain pyrometer (FP) that makes it possible to measure strip temperature in a cooling bank, and high accuracy cooling control for hot rolled strip using FP, in order to meet increasing demand of high tensile steel due to car light-weighting for reduction of carbon dioxide emission. To produce high tensile strip in a hot strip mill, it is required to be cooled into low temperature in which cooling water tends to be transition boiling. Therefore accurate strip temperature control is difficult. To solve this problem, we developed FP and high accuracy cooling control technology using FP. We have developed these systems in Kashima hot strip mill and now have been applying them to other hot strip mills in NSSMC.

## 1. 緒 言

新日鉄住金(株)は、地球温暖化対策ニーズに応えるべく様々な取り組みを行っている。圧延プロセスの計測・制御技術分野においても二酸化炭素排出削減への貢献を目的とした研究開発を行ってきた。自動車では燃費向上が求められる一方、衝突時の安全性向上に対する社会ニーズも強まっている。これら要求に応えるため高強度な素材である高強度鋼(以下、ハイテン)の自動車用鋼板への適用が急速に進んでいる。

新日鉄住金における自動車向けの鋼材の大部分は、一旦、熱延工場にて圧延される。本研究開発が始まった2000年

当時、新日鉄住金鹿島製鉄所熱延工場におけるハイテンの製造割合は40%程度であったが、近年60%に達し、かつ、いっそうの高強度化が進んでいる。ハイテンは、種々の合金元素の添加と、熱処理によって、所望の機械特性を持つように造り込まれる。熱延ミルにて、ハイテンを高品質に安定製造する上では、鋼板の仕上圧延直後の温度の均一化とともに、その後の鋼板冷却を高精度に制御する必要がある。

鋼板は、仕上圧延からコイラーにて巻き取られるまでの間、100mを超えるランアウトテーブル(以下、ROT)と呼ばれる冷却工程を通過する。ハイテンを安定した品質で製造する上では、ROT冷却直後の鋼板温度(巻取温度、CT)

\* プロセス研究所 計測システム研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

の高精度一定制御が必要となる。さらに、より優れた機械特性を備えた鋼板を製造するためには金属組織を積極的に制御する必要があり、ROTでの温度履歴の精密な制御が求められている。そこで、これら課題に対処すべく、注水環境下においても鋼板温度を高精度に測定できる冷却帯内鋼板温度計測技術および、これを活用したROTにおける高精度冷却制御技術を開発した<sup>1-9)</sup>。

## 2. 熱延ミルランアウトテーブル冷却の概要

熱延ミルでは、スラブと呼ばれる鋼塊が加熱炉で1200℃程度に加熱され、粗圧延を経て仕上圧延機にて所定の板厚まで圧延される。仕上圧延後、板厚は薄いもので1mm程度、温度は800～900℃、速度は最速で時速100kmに及ぶ。仕上圧延後、ROTにて冷却されコイラーにて巻き取られ、熱延コイル（以下、コイル）となる。

本稿では、鹿島製鉄所熱延工場における開発について述べる。鹿島製鉄所熱延工場のROTは図1に示すように、大きく2つの冷却帯（Cooling Zone 1, 2）に分かれている。従来から鋼板の温度管理のため、各冷却帯の入側、出側に、仕上出側温度計、中間温度計、巻取温度計と呼ばれる放射温度計が設置されており、制御にも用いられている（それぞれの出力をFT, IT, CT）。これら温度計では安定に測温するため、鋼板表面に滞留する冷却水や湯気を徹底的に排除する必要がある。そのスペース確保のため温度計は冷却帯からある程度離れた場所に設置されている。一方、開発した冷却帯内鋼板温度計（Fountain Pyrometer）は、冷却帯内での安定測温が可能なので、冷却帯1, 2に複数設置されている。これらは冷却帯内の鋼板下面、搬送用ロールの間に設置されており、本温度計の特長である水パーージ以外に、冷却水や湯気を排除する対策は行っていない。

冷却ゾーンの冷却装置は冷却水の供給系統で区分され、その1つの区分を冷却バンクと呼ぶが、冷却帯1と冷却帯2はそれぞれ6個と10個の冷却バンクから構成されてい

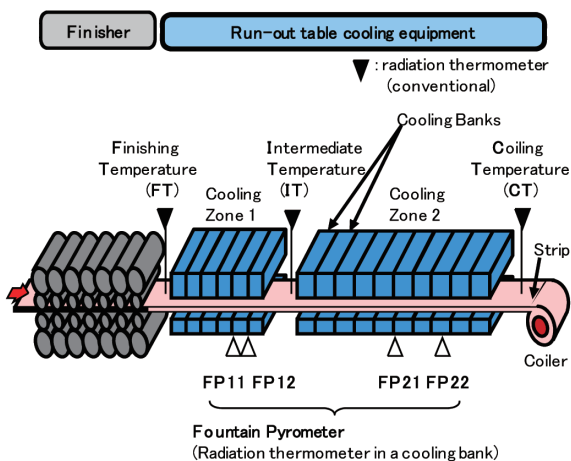


図1 鹿島製鉄所熱延工場ランアウトテーブル冷却設備の概要  
Run-out table cooling equipment of Kashima Works hot strip mill

る。冷却バンク内の鋼板上面にはパイプラミナーノズル、鋼板下面にはフルコーン型のスプレージノズルが備えられている。なお、流量制御は複数の冷却ノズルをまとめた上流側に設置されているOn/Offバルブの操作により行うが、バルブは冷却装置全体で300個以上もあり、これらは冷却制御モデルの指令により開閉される。

## 3. 冷却帯内鋼板温度計測技術<sup>1-4)</sup>

### 3.1 冷却帯内における鋼板温度計測の外乱

測定対象である鋼板は前述のように高温、高速である上に、鋼板先端では鋼板の上下変動が非常に大きい場合がある。そのため、鋼板温度測定には、鋼板との衝突を回避するため遠隔測定である放射温度計が用いられてきた（FT, CT, IT）。

冷却帯にて放射温度計測を行う上で主な外乱となる水の様子を図2に示す。図2(a)は鋼板上面のパイプラミナーノズルからの冷却水であるが、この冷却水は鋼板と衝突した後、一部は鋼板上に滞留する。この鋼板上の滞留水は沸騰した泡などを伴い白濁する場合がある。図2(b)は鋼板下面の搬送用ロール間の写真であるが、鋼板下面にも大量の水滴状の冷却水が存在する。図2(c)は下面スプレーから激しく冷却水が噴射されている状況で、吹き上げられた水滴状の冷却水が拡散し、赤熱鋼板でも冷却帯外側から観測することができない。このような状況は冷却条件によって刻々と変化し、工場内の温度、湿度などによっても変化する。鋼板温度制御に適用する温度計としては、このように多様でかつ厳しい測定環境の中で、低いメンテナンス頻

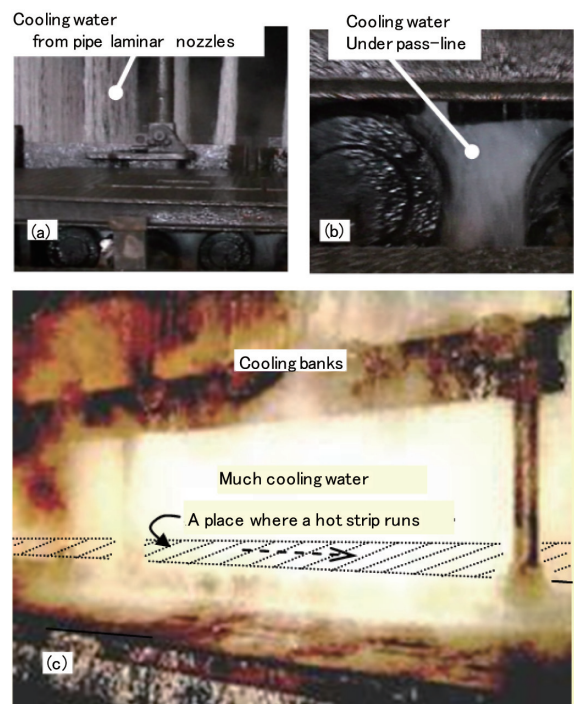


図2 冷却帯の温度測定環境  
Measurement condition of cooling banks

度と 100%に近い安定測温が求められる。

放射温度計は、測定対象からの熱放射を検出し、プランクの黒体放射の式などに基づき対象温度を求める。測定対象と放射温度計の間に水が存在すると、検出すべき熱放射が水により吸収され減衰し測定値は低下する（吸収誤差）。また、図2(b)(c)のような状況では、測定対象と放射温度計の間の水滴により熱放射が散乱され、放射温度計の出力は大きく低下する（散乱誤差）。強力なエアパージを用いて、これら水滴を放射温度計の視野から取り除く方法も考えられるが、強力パージが周囲の冷却状態に影響を与えるなど、測温値の代表性を損なう恐れがある（冷却誤差）。

このような外乱環境の下、安定的に温度測定する方法として後述の噴水状水パージを用いた冷却帯内鋼板温度計を開発した。

### 3.2 冷却帯内鋼板温度計 (Fountain Pyrometer)

図3に開発した冷却帯内鋼板温度計の構造を、表1に仕様を示す。この温度計は独自の噴水状水パージを用いることで、熱放射検出のための光路の安定化（散乱誤差抑制）と水による吸収誤差の抑制、パージによる測定面が冷却される影響（冷却誤差）の抑制を図っている。パージが周囲の冷却に影響を与えないことやパージにより鋼板表面が冷却されること（冷却誤差）を抑制するためには、パージ流体の流速が低い方が望ましい。低いパージ流速で外乱となる水滴を除くために、気体よりは密度の高い水を用いることが有効である。またパージ流体が水であれば、湯気や冷却水の小さな水滴等がパージに巻き込まれた後、熱放射に

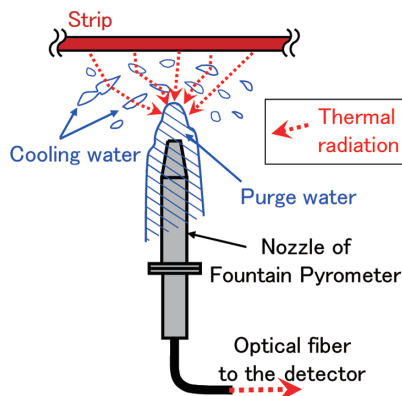


図3 冷却帯内鋼板温度計  
Fountain pyrometer  
(radiation thermometer in a cooling bank)

表1 冷却帯内鋼板温度計の仕様  
Specification of Fountain pyrometer

Type	FP1	FP2
Wavelength	~0.83 μm	1.1 μm
Temperature range	500 ~ 1200 °C	360 ~ 800 °C
Responsiveness	10 ms	20 ms
Setting position	Cooling zone 1	Cooling zone 2
Notation	FP11, FP12	FP21, FP22

とって区別がなくなるなどの利点が考えられる。

水による吸収誤差を抑制するためには、水の透過率の高い波長を用いる必要がある。図4に市水の分光透過率を示す。1.0 μmあるいは1.2 μmより長い波長において強い吸収が見られる。水による熱放射の吸収を抑制し、十分な検出光量を得るため透過率の高い0.83 μmより短い波長帯の熱放射を検出するタイプ (FP1) と1.1 μm近傍の熱放射を検出するタイプ (FP2) を開発した。これらは対象温度範囲により使い分け、表1に示すように、FP1は冷却帯1に、FP2は冷却帯2に設置している。

前述のように冷却水は多数の水滴として鋼板近傍に存在する場合がある。この水滴環境下において、熱放射の安定検出光路の確保と、パージ水の接触による鋼板冷却を抑制することを両立させるため、鋼板直下近傍までの水パージを用いることとした。図5は水パージを行いつつ、外乱水による散乱誤差を実験室試験にて評価した結果である。外乱水による散乱の影響により温度計の出力ばらつきが増大

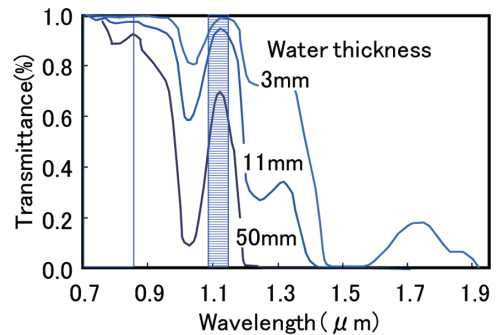


図4 水の分光透過率  
Spectral transmittance of city water

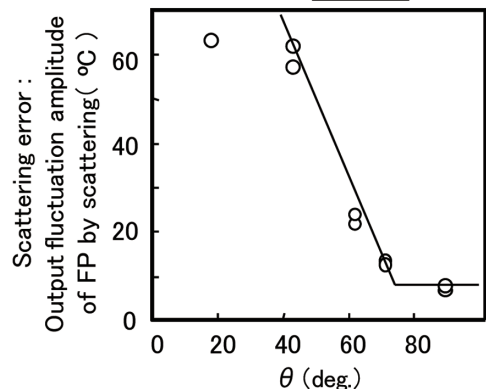
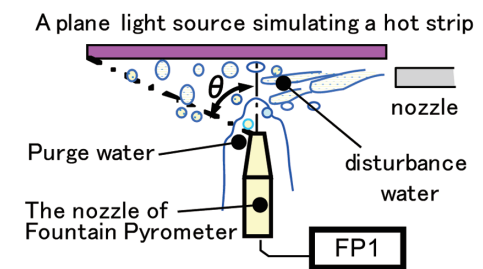


図5 外乱水による散乱誤差の影響  
Scattering error versus θ

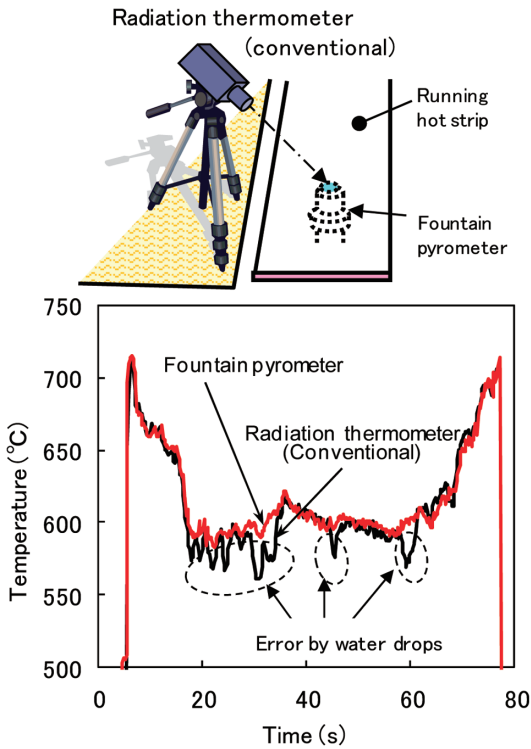


図6 オンライン評価の例  
Comparison between Fountain pyrometer and a conventional radiation thermometer

する。この温度計出力ばらつきを最大振幅を散乱誤差として評価した結果、 $\theta \geq 75$  度の場合に出力ばらつきを 10°C 程度と実用可能なレベルに抑制できることを見出した<sup>2)</sup>。

### 3.3 冷却帯内鋼板温度計のオンライン測定

冷却帯内鋼板温度計を冷却バンク内に設置し、近傍冷却バンクを非水冷条件（冷却水用バルブ Off、ロール冷却水 On）において、冷却帯内鋼板温度計ノズルの直上位置を別の放射温度計（上面温度計）により測定し両者出力を比較した（図6）。鋼板厚み方向の温度分布が無視できる条件として約 1mm の厚みの鋼板にて評価した。図6のチャートはコイル1本の測定例であるが、上面温度計出力は、一部で測温値が突然低下し、冷却帯内鋼板温度計より低い値を示している。これは、上面温度計視野中の水が原因である。

一方、冷却帯内鋼板温度計に、そのような、測温値の急激な降下はみられなかった。なお、上面温度計の測温値が降下している部位を除いて両者を評価すると、上面測温値に対して冷却帯内鋼板温度計は平均偏差 2.0°C、 $\sigma = 2.8$ °C と良好に一致した結果であった。また、冷却帯内鋼板温度計を設置した冷却バンクが水冷条件（冷却水用バルブ On）の場合においても良好な精度で測定できることを確認した<sup>2)</sup>。

## 4. 冷却帯内鋼板温度計を活用した冷却制御技術

ROT 冷却制御では、コイラーで巻き取られる際の鋼板温

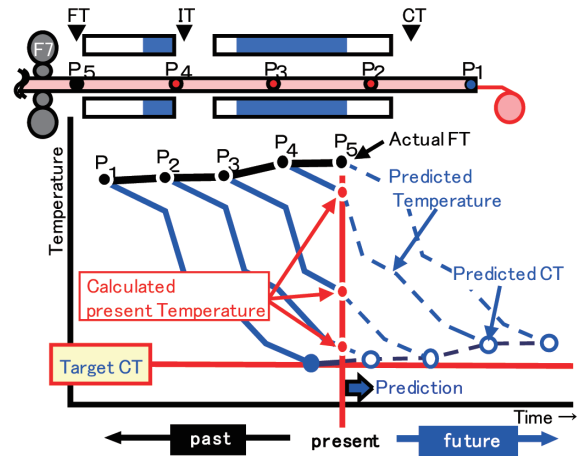


図7 制御点に対する巻取温度の予測計算  
Prediction of coiling temperature for control points

度（巻取温度 CT）を目標値に制御し、所定の機械特性を備えた鋼板を作り込む、いわゆる巻取温度制御が主流である。巻取温度制御の動作は、一定間隔で仮想的に設定された鋼板上の制御点に対し鋼板の温度計算モデルを用い巻取温度を予測し（図7）、この予測巻取温度が目標温度と一致するように冷却装置の設定計算を行う。制御点の位置をトラッキングしつつ、冷却開始前の鋼板温度（FT）や鋼板速度変化に応じて各制御点毎の設定を行っており、例えば 1 秒未満の周期で時々刻々と冷却装置のバルブ操作設定を行う。この制御方法は冷却装置の設定を連続的に行うことから、ダイナミック制御と呼ばれている<sup>10)</sup>。

### 4.1 冷却帯内鋼板温度計を活用したフィードフォワード制御（FP-FF 制御）<sup>5,6)</sup>

実操業では、外乱等により鋼板の計算温度と実績温度には誤差が発生する。計算温度と実績温度の誤差が大きい場合には、ダイナミック制御を行っても巻取温度を精度良く制御することができない。このため、巻取温度偏差を抑制するフィードバック制御が用いられてきた。しかし、鋼板速度が変化している先端部分等に対しては有効ではなく、また、冷却水 On / Off 切り替え応答性の悪さや温度測定位置から冷却帯までの距離が長くむだ時間が大きいなど、十分な制御効果を得ることが難しい。

さらに、冷却中に鋼板温度が一定以下に低下すると、鋼板表面における冷却水の沸騰状態が変化し、鋼板温度が急速に低下する沸騰領域（遷移沸騰領域）となり、巻取温度精度が劣化する。ハイテンは巻取温度が一般材に比べ低いことから、このような沸騰状態の変化による悪影響を受け、巻取温度の管理公差外れ（巻取温度外れ）が発生しやすく、巻取温度制御の精度改善が大きな課題であった。そこで、冷却帯内鋼板温度計を用いて、冷却帯途中の鋼板温度を測定しフィードフォワード制御（FP-FF 制御）を行う技術を開発した。

FP-FF 制御は、ROT 冷却制御のダイナミック制御機能に冷却帯2での鋼板冷却途中の测温結果 (FP21, FP22) をリアルタイムに取り込み、フィードフォワード制御を多段階に適用する。図8は、鋼板上のある制御点に対するFP-FF制御の概念を示す。ある制御点が、FP21の位置に達した際、その制御点のFP21测温値と計算温度を比較し、その差に応じて、FP21以後の冷却バンクの設定を修正する。さらにFP22において同様の処置を行う。鋼板上の各制御点に対し同様の処理を行い、巻取温度精度の向上を図るものである。

このFP-FF制御の適用例として、図9に目標巻取温度450℃とする1本のコイルの温度チャート (IT, FP21, CT) およびFP21からCT間の冷却水量の推移を示す。ITでは観測されなかった大きな温度外乱が冷却帯2で発生した例で、約30℃の急激な温度低下がFP21にて検出されたものである。この急激な温度変化に対して、FP21を用いたFF制御によりFP21以降の冷却バンクの冷却水量をフィードフォワード的に約600m<sup>3</sup>/h減少させることで、巻取温度の

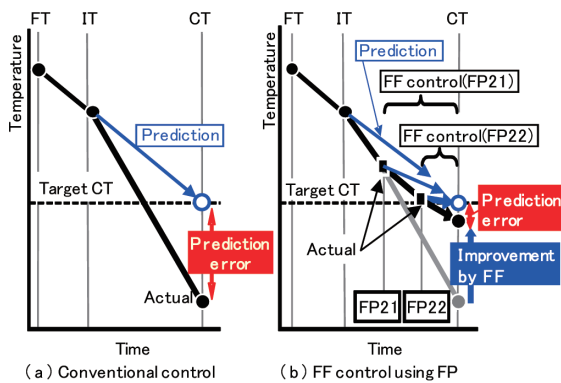


図8 冷却帯内鋼板温度計を用いた巻取温度制御  
Coiling temperature control using Fountain pyrometers (FP-FF control)

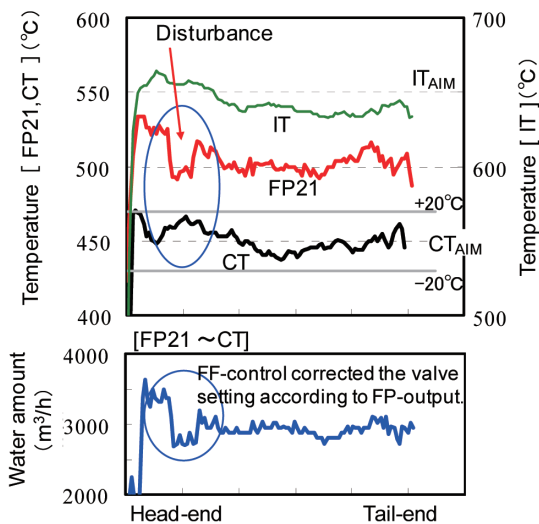


図9 冷却帯内温度計を用いた巻取温度制御の例  
Example of the new coiling temperature control using FP (FP-FF control)

変動を効果的に抑制していることが分かる。その結果、コイル全長で実測巻取温度 (CT) が目標温度 (CT<sub>AIM</sub>) ±20℃の範囲に制御されている。

FP-FF 制御は、ハイテンを中心とした低温巻取材を対象に重点的に適用している。表2に大量評価試験を行った結果を示す。評価期間中、圧延した対象材のコイルの合計長さを母数として、巻取温度が目標温度の±20℃以内に入った鋼板長さの割合 (±20℃適中率) として評価した。FP-FF 制御の導入により、ハイテンの±20℃適中率が、440MPa 鋼において5.8%、550MPa 鋼において9.7%改善し、また低温巻取材全体では6.4%改善した<sup>5,6)</sup>。

このように、冷却帯内鋼板温度計を活用したフィードフォワード制御機能が冷却途中の鋼板温度に即応し、冷却装置を適切に操作することで巻取温度を精度良く制御することが可能になった。

#### 4.2 冷却履歴制御<sup>7-9)</sup>

冷却履歴制御の概念を図10に示す。機械特性がより優れた鋼板を製造するには、金属組織を積極的に制御する必要がある。図10では、圧延後鋼板を急冷しフェライト相の生成する温度に達するや急冷を停止し、フェライト生成時間を確保する。一定時間フェライト生成時間を保った後、再び急冷し所定の巻取温度に制御する。このように鋼板の冷却履歴を制御することにより熱延鋼板の金属組織を制御し、ハイテンの強度ばらつき低減や加工性などの機械特性の向上を図っている。速度が変化する鋼板において、冷却履歴を一定化するためには、全ての制御点で温度降下履歴を精密に制御する必要がある。即ち、前述の新巻取温度制御に加え、圧延直後の急冷停止温度と中間空冷時間を同時

表2 FP-FF 制御による巻取温度制御精度の向上  
Improvement of coiling temperature by FP-FF control

Hot coils	Improved percentage of strip length within ±20℃	
High tensile steel 440 MPa	5.8 %	
High tensile steel 590 MPa	9.7 %	
Low temperature coiling steel	6.4 %	

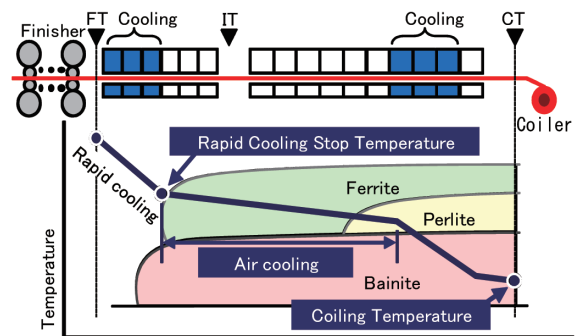


図10 冷却履歴制御  
Schematic diagram of cooling pattern control

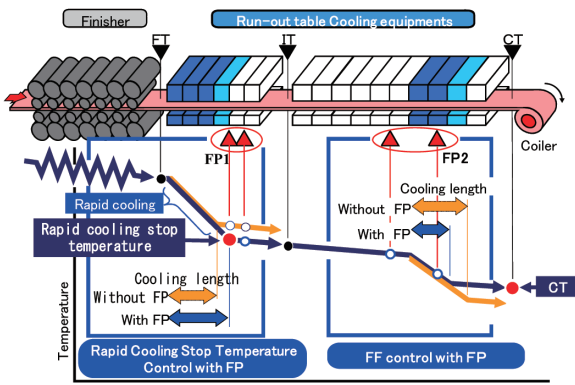


図 11 冷却帯内鋼板温度計を用いた冷却履歴制御  
Cooling pattern control using Fountain pyrometers

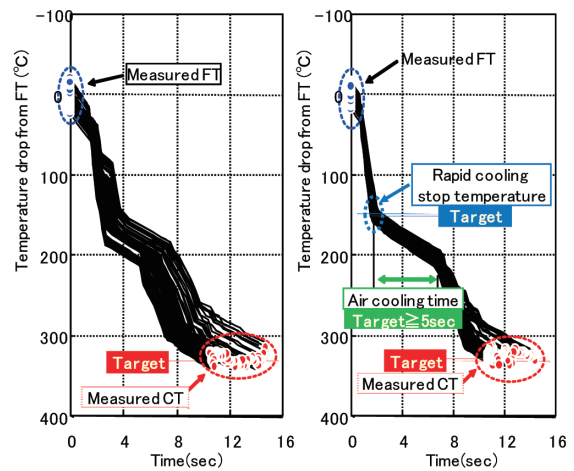
に所定の値に制御することが求められる。

先に記したように、ROT 冷却制御のダイナミック制御において、各制御点の温度降履歴予測を短周期で実施しているが、冷却履歴制御では、この結果を用いて急冷停止温度、中間空冷時間、巻取温度が目標値と一致するように各冷却バンクを操作する。しかしながら、この温度降履歴は温度計算モデルによって算出されたもので、計算誤差が含まれており、この誤差が制御精度に反映されてしまう。その対策として、ROT 冷却装置内に複数設置した冷却帯内鋼板温度計 (FP11, FP12, FP21, FP22) を活用し、冷却履歴制御の精度向上を図っている。ダイナミック制御に加えて、図 11 に示すように、急冷停止温度と巻取温度に関する 2 つの制御機能が追加されており、それぞれが急冷停止温度、巻取温度の高精度化に寄与している。

冷却履歴制御の実機制御例を、巻取温度 FF 制御と比較して、図 12 に示す。図 12 は左右それぞれコイル 1 本の全制御点 (P1, P2, P3, ...) に対する仕上圧延後から巻取までの温度計測定値と温度降履歴の計算結果を示しており、FT の目標値を基準とした温度降下量に換算して表示している。巻取温度制御では、各制御点の温度降履歴がばらついている (例えば 200℃ 降下に要する時間がばらついている)。一方、冷却履歴制御の実施例では、圧延中、鋼板速度が変化しているにも関わらず、急冷停止温度、中間空冷時間までの温度降履歴にばらつきは小さく、また、巻取温度も全長に渡り、目標温度に制御できている。このような冷却履歴制御によりハイテンの機械特性の改善も確認されている<sup>8-9)</sup>。

## 5. 結 言

本稿では、冷却帯内の多様で厳しい測定環境下でも高精



(a) Coiling Temperature Control (b) Cooling Pattern Control

図 12 巻取温度制御と冷却履歴制御  
Coiling temperature control and cooling pattern control using Fountain pyrometers

度安定に测温できる鋼板温度計測技術とこの温度計を活用した高精度な ROT 冷却制御技術について紹介した。これらにより、従来の冷却制御技術だけでは解決が難しかった遷移沸騰領域に及ぶ鋼板温度において高精度温度制御が可能になった。その結果、ハイテンの巻取温度精度が向上し、安定製造が可能となった。加えて、ROT 冷却工程における鋼板温度降履歴を緻密に制御することが可能になったため、金属組織を制御することが必要な、優れた材料特性を付与した鋼板を製造することができるようになった。鹿島製鉄所熱延工場が開発した本技術は、他所に展開中である。

## 参考文献

- 1) Honda, T. et al.: ICCAS-SICE2009 Proceedings. 2009, p. 2774
- 2) 本田達朗 ほか: 鉄と鋼. 96 (10), 592 (2010)
- 3) 植松千尋 ほか: CAMP-ISIJ. 22, 1054 (2009)
- 4) Honda, T. et al.: ISIJ International. 53 (5), 841 (2012)
- 5) Nakagawa, S. et al.: ICCAS-SICE2009 Proceedings. 2009, p. 2778
- 6) 中川繁政 ほか: 計測自動制御学会論文集. 46 (8), 463 (2010)
- 7) 橘久好 ほか: CAMP-ISIJ. 23, 1054 (2010)
- 8) 橘久好 ほか: 平成 23 年度塑性加工春季講演会講演論文集. 2011, p. 119
- 9) 橘久好 ほか: CAMP-ISIJ. 25, 1026 (2012)
- 10) 高橋亮一: 鉄鋼業における制御. コロナ社, 2002



本田達朗 Tatsuro HONDA  
プロセス研究所 計測システム研究部  
主幹研究員  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



植松千尋 Chihiro UEMATSU  
日鉄住金テクノロジー(株)  
計測・検査事業部 主幹



中川繁政 Shigemasa NAKAGAWA  
大分製鉄所 設備部 制御技術室長  
博士(工学)



武衛康彦 Yasuhiko BUEI  
鹿島製鉄所 薄板部 薄板企画室 主幹



橘 久好 Hisayoshi TACHIBANA  
鹿島製鉄所 設備部 制御開発室 主幹



阪上浩一 Koichi SAKAGAMI  
鹿島製鉄所 薄板部 薄板企画室長