



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

プロセス制御の開発を通じて

小笠原知義

Tomoyoshi Ogasahara

JFEスチール(株) スチール研究所
計測制御研究部

主任研究員(係長)

私が所属する研究部では、主にプロセス制御開発、センサー開発、生産物流最適化に関連するテーマを扱っている。本稿では、私が携わった熱延プロセス制御の開発事例について紹介すると共に、普段から研究開発について感じていることを述べさせて頂く。

熱延プロセスでは、加熱炉で約1200度に加熱した約260mm厚のスラブを粗圧延機と仕上圧延機で1.0mm～25mm程度の目標厚になるように圧延し、その後はランナウトテーブル上で冷却して、最終的にコイラーで巻き取る。熱延鋼板の品質は形状や板厚といった寸法と機械的性質に大別できる。前者については圧延機により直接的に制御できるが、後者は鋼板の金属組織と対応するものであるため、規格毎の圧延条件の設定と鋼板温度の制御により間接的に造り込む必要がある。また、鋼板変形抵抗の温度依存性のため、圧延時の温度制御精度を向上させることが寸法精度向上に繋がることは明らかであり、熱延鋼板の品質に対して温度制御の果たす役割は非常に大きい¹⁻³⁾。近年、熱延プロセスにおいては品質や歩留まり改善に対する要求が益々高まっており、その中で重要な制御の一つである熱延仕上温度制御の研究開発

事例について示す。

1 熱延仕上温度制御の研究開発事例

熱延仕上温度制御の目的は、最終仕上圧延スタンド出側の鋼板板温である仕上出側温度(FDT: Finisher Delivery Temp.)を規格毎に設定した目標温度ないし温度公差範囲内に収めることである。これにより、寸法精度確保や機械的性質の安定化が実現できる。

図1に熱延仕上圧延設備を示す。FDT制御では、粗圧延出側の鋼板温度(RDT: Rough rolling mill Delivery Temp.)または、仕上圧延機入側での鋼板温度(FET: Finisher Entry Temp.)の測定値を制御の起点として、各圧延スタンド間に設置されたスタンド間スプレーによりFDT目標値まで冷却する。ここで、各スタンド間スプレーは、電磁弁への開閉指令により使用または不使用の設定が可能であるが、水量の調整はできない。そして、スケール性欠陥抑制の観点から規格毎にスタンド間スプレーの使用優先順と全長にわたり注水するスプレーが予め指定されている。

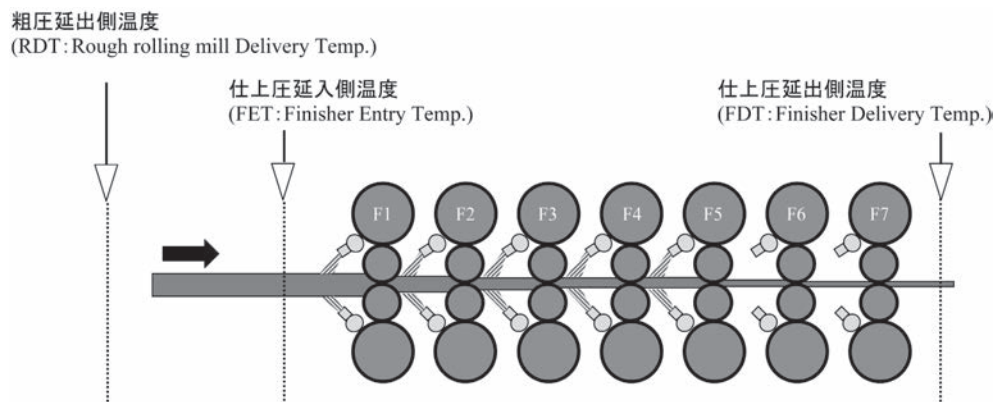


図1 熱延仕上圧延設備

この仕上圧延設備の構造上、FDT測定地点からスタンド間スプレーまでの距離が長いいためスタンド間スプレーによる冷却がFDTに現れるまでのむだ時間が大きく、それは通板速度や使用するスタンド間スプレーの設置位置の違いにより変動する。また、加熱炉のスキッドマークに起因するFETの周期変動とオペレータの手介入、自動板厚制御系、張力制御系、加速圧延設定等に起因する圧延条件の変動がFDTの外乱要因となっている。以上、“むだ時間”と“外乱”がFDT制御を困難にしている要因であり、対処すべき課題である。

そこで、課題を解決すべくFDT制御の高精度化を検討した。一般的に、プラントがむだ時間を含む場合のフィードバック制御系の設計方法としてスミス補償⁴⁾が知られているが、速度外乱があるFDT制御の場合には、むだ時間の正確な推定は困難であるので適用が難しい。そして、フィードバック制御を導入したとしてもむだ時間により、系全体が不安定になる可能性があるため制御ゲインを上げることができず、応答性の観点からは不十分なものになってしまう。逆に応答性を上げるためには、FDTの外乱要因を捉えて、それを打ち消すようにフィードフォワード制御することが有効であるが、通常はフィードフォワード制御で使用する温度モデルの誤差が影響し、目標とするFDTに追従することができない。しかし、検討の結果、オンラインで制御誤差による温度モデル学習を周期的に実施すれば、追従性の観点で実用的なモデル精度を確保できるという知見が得られた。そこで、オンライン学習機能付のフィードフォワード制御を主体とする制御系を設計した。

本制御系の概要を図2に示す。特徴としては、鋼板を仮想的に定長ピッチ分割した制御単位毎に設定計算とフィード

フォワード制御とモデル学習を行う機能を有する。まず、初期設定計算では、制御単位がFET測定地点通過時にRDTの実績値を起点として計算したFET予測値またはFET実績値と現時点以降の圧延条件予測値と最新モデル学習値（先端部がFDT未到達の場合は、学習テーブルの格納値）を用いて、FDT目標値に最も近くなるスタンド間スプレーの使用パターンを温度モデルに基づき設定する。続いて、フィードフォワード制御では、各制御点が仕上圧延ミル内の指定地点到達時に、制御点のこれまでの圧延条件実績値とスタンド間スプレーの使用数の実績と現地点以降の圧延条件予測値と最新モデル学習値を用いて、スタンド間スプレーの使用パターンを温度モデルに基づきダイナミックに設定する。このように、制御点毎の圧延条件、スタンド間スプレーの実績履歴を取り込み、再計算することにより外乱要因を考慮したスタンド間スプレーの設定が可能となる。ただし、上記の制御では、モデル誤差の影響を受けるという問題があるため各制御単位がFDT測定時点でモデル学習を実施し、その学習係数を上流側の各制御単位にフィードバックする学習機能を設ける。これらにより、最新モデル学習値がフィードフォワード制御に反映されるまでのむだ時間の影響を軽減しつつ、外乱への対処を施した制御系を構築することができる。また、学習値をテーブルに保存して次の材料に適用することで、設定精度向上を図っている。

本制御を適用した際のFDTチャートの一例を図3に示す。この規格の公差範囲はFDT目標値に対して3.5%であるが、実績は公差範囲の1.5%以内に制御されており、精度良好である。また、図4に示す通り加速圧延しており搬送速度が先端から尾端にかけて上昇している。このように、速度が高くな

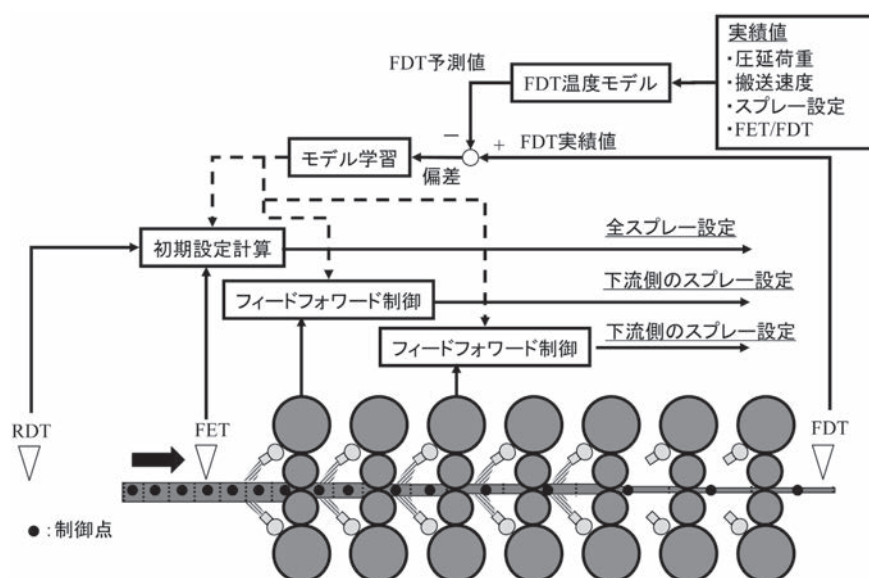


図2 FDT制御系の概要

ると仕上圧延ミル内での冷却能力が低くなるため、それを補償すべくスタンド間スプレーの注水本数を増加することでFDTの高め外れを防止している(図5)。また、尾端にかけてはFETが低下するため、注水本数を減少させている。

ここで示したFDT自動制御の導入により、従来に比較して制御精度が著しく向上し、熱延鋼板の品質安定化に寄与している。

2 プロセス制御の研究開発について 思うこと

普段、私がプロセス制御の開発について思うところは、まず制御対象の全体的なイメージを思い描けることが重要だということだ。制御対象やそれを制御する仕組みの中でリスクは何か、どの情報を信頼して、どういう方向で操作すれば、良い操業に繋がるのかをイメージできることで、実際の操業データが示す意味を考察できるようになり、制御の改善のヒ

ントが得られる。逆にそれがイメージできなければ、多くの現象が絡み合っている鉄鋼プロセスの操業データがあったとしても、因果関係が分からなくなり、良質な情報が抽出できないことになる。このようにデータに騙されないためにも、製造プロセスの勉強、オペレータへのヒアリング、世の中の

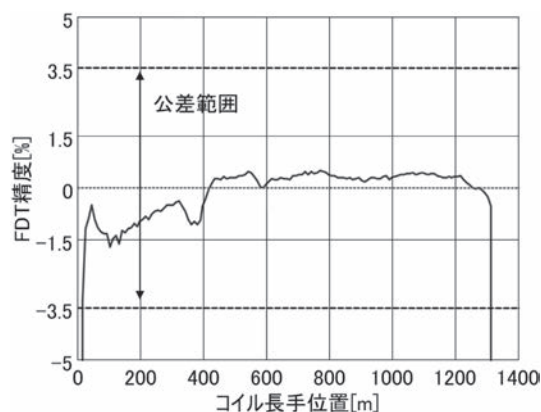


図3 FDTチャート

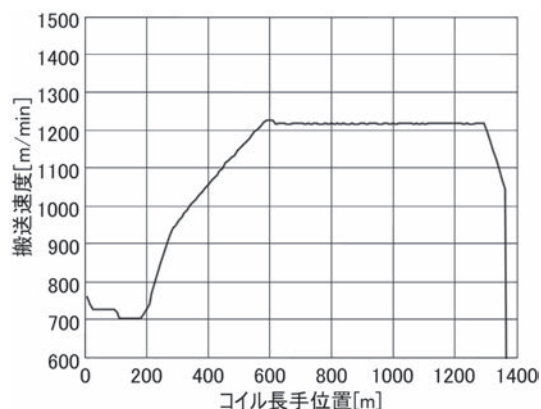


図4 搬送速度

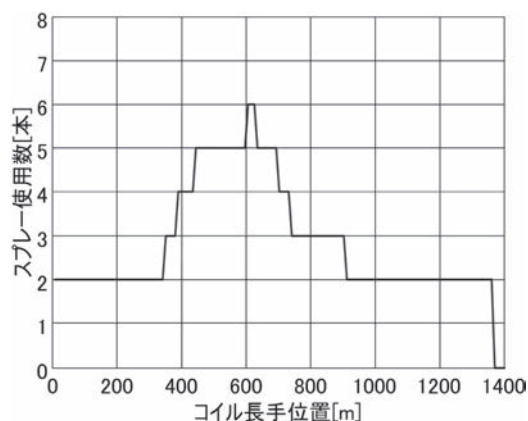


図5 スタンド間スプレー使用数



図6 産業技術総合研究所(つくばセンター)見学会のメンバー(2011年8月撮影、前列中腰の右から4人目が筆者)

新しい技術の習得を通じて視点を広げていく努力が必要である。私がそのようなことを十分できているかという反省すべき点も多々あるのだが、日々、色々なことにチャレンジしていきたいと考えている。そのような中、2011年度には、計測・制御・システム工学部会若手フォーラムの代表幹事という役回りを務めさせて頂き、座長の京都大学 東俊一先生、鉄鋼会社各社の幹事の方々とセミナーや製鉄所見学会等のイベントを企画した。普段の実務では関わりのない大学の先生方や企業の若手研究員・技術者との交流を通じて、今後の研究開発のモチベーションに良い刺激となった。後輩たちのためにも今後もこのような場を継続して設けて欲しいと思う。最後にこのような情報発信の機会を与えて頂いたことに対して

感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 中川繁政, 橘久好: 計測自動制御学会論文集, 4 (2009), 233.
- 2) 佃岳洋, 白坂貴成, 西田吉晴, 長谷川裕之, 小林正宜, 土肥広大: 神戸製鋼技報, 2 (2001)
- 3) 関口邦男: 電気学会論文誌D, 2 (2004), 190.
- 4) 片山徹: 新版フィードバック制御の基礎, 朝倉書店, (2002)

(2013年1月22日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 知能システム制御研究室 准教授

平田 健太郎

早いもので小笠原くんが社会に出てから6年が過ぎました。その技術者としての活躍ぶりは今回の記事を拝見しても十分にうかがえますが、大学院の2年間に研究したよしみで、蛇足ながら彼のこれまでを振り返り、またこれからへのエールを送らせていただきます。

彼は、電気・情報系で制御を学び、現在の職に就きました。したがって材料工学や圧延理論とはほぼ無縁の状態からスタートしたことになります。その彼が、今では最前線で製鉄プロセスに密着した計測制御技術の研究開発に従事しています。歳月のなせる業とはいえ、まずはそのことを非常に素晴らしく、また頼もしく思います。横断型の学問領域である制御の出身者にとって、対象の理解において後塵を拝することは、なかば宿命です。業務をこなしながら専門分野を広げていくのは容易ではありませんから、持ち前の飄々たる雰囲気とは裏腹に、陰ながらの努力を重ねたことでしょう。それを克服して第一線に立っている彼のあり方は、制御技術者のひとつのロールモデルといえると思います。彼の修士論文を改めて読み返してみると、補間理論を用いたある種のネットワーク制御系設計という理論的課題に加えて、RT-Linuxと実ネットワークを用いた制御実験にまで取り組んでおり、その充実度には驚かされます。一方で彼が音を上げていたような記憶は全くないので、常に淡々と着実に物事に取り組む資質は天性のものなのでしょう。

今回の記事で触れられている仕上げ圧延時の温度制御に

ついて、本人から直接ご説明いただく機会を得ました。偶然ながら、私もランナウトテーブルの冷却制御に関して他の鉄鋼メーカーと共同研究をさせていただいていることもあり、温度計測できる場所が限られている、加工熱、ロール伝熱、摩擦熱など水冷以外の要因があるなど、また違った難しさがあるということがよく分かりました。技術的にたいへん興味深いと感じる一方で、(私自身はまだその経験がありませんが) 成長した子供と大人の会話をしているようなある種の感慨も持ちました。

横断型学問分野を論じる際には、しばしば、機械・電気・化学など基幹産業と結びついた工学分野が縦糸に、ORや制御などの数理システム工学分野が横糸にたとえられます。彼の場合、上述のように製鉄プロセスという縦糸と制御という横糸を組み合わせることで本領発揮の余地があるのだと思います。そして、そこから生まれるスタンス、つまり縦方向の深みだけでなく、横方向の広がりも意識した視野の持ち方は、本文中で彼が述べている「全体のイメージを思い描くこと」とどこかで繋がっているような気がします。

ふと難問をぶつけてみようという気になって、鉄鋼業の今後の展望を尋ねてみたところ、社会／世界情勢に即した明快な答えが返ってきました。イメージの大切さを説く彼は、同時にさらにその奥にあるビジョンをもちょうんと持っているのだな、と感じ入りました。彼のような若手技術者が多く育ってくれることを願ってやみません。