

特集記事・7

ここまで来た鉄鋼の計測・制御・システム技術

局所回帰モデルによる鋼材の品質制御の実用化

Realization of Quality Control for Steel Plates through Locally Weighted Regression Model

茂森弘靖

Hiroyasu Shigemori

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

1 はじめに

製鉄所には、さまざまな製造設備を動かすための多くの計算機がある。生産業務管理用計算機、操業管理用計算機、主にフィードフォワード制御や最適化を行うプロセス計算機、および、センサーやアクチュエータに直結し、フィードバック制御やシーケンス制御を行うデジタル制御装置がある。

鉄鋼産業は、労働生産性の向上を目的に計算機による自動化を最も古くから推進してきた産業の一つである。1980年以降、計算機ソフトウェア量が飛躍的に増大し、それに伴い、フィードフォワード制御や最適化を行うために実装されたプロセスモデルの数も飛躍的に増加している。現状、これらのモデルのメンテナンス負荷増大が課題となっており、高度制御技術の開発と同時に、その負荷を低減するための技術開発の必要性が増している。

計算機技術の発展により、製造業の現場においても、品質管理や操業改善のために、大量の製造実績がデータベースに蓄積されるようになってきた。そのデータを有効活用してより精密なモデルを構築する技術として、Just-In-Timeモデリングと呼ばれるモデリング手法に近年関心が集まっている。Just-In-Timeモデリングは、モデル式の構造をあらかじめ定めず、過去の大量の入出力データを蓄積し、予測の必要が生じる毎に、要求点に近い過去のデータを重視して局所的な予測モデルを構築する方法である。

鉄鋼プロセスおよび化学プロセスにおいて、近年、Just-In-Timeモデリングを応用する研究が活発に行われており、将来の推移の予測、ならびに、計測困難な指標の推定の精度向上に関する研究が行われてきた。

一方、著者らは、Just-In-Timeモデルによるプロセス自動制御の実用化を目的として、鉄鋼プロセスにおいて、Just-In-Timeモデリングの一種である局所回帰(Locally Weighted Regression)を用いた品質制御の実用化研究を行った。本稿

は、その局所回帰モデルを用いた鋼材の品質制御¹⁾について解説する。

2 対象プロセスと従来型制御手法

対象とするのは、図1に示す厚鋼板製造プロセスである。製鋼工程にて化学成分を調整され、鑄造されたスラブと呼ばれる中間製品が、加熱工程において所定の温度に加熱され、圧延工程においてリバース圧延により所定の寸法に加工される。そして、冷却工程において所定の温度に冷却されることにより、鋼材の組織および材質が作りこまれる。製品種類によっては、熱処理工程においてさらに鋼材の組織および材質が調整されるものもある。厚鋼板の製品品質の指標としては、強度・伸び・韌性などの材質、厚み・幅・長さの寸法、形状、および外観などがあるが、本稿では、厚鋼板の材質ならびに幅寸法の制御について述べる。

2.1 材質制御

鉄鋼製品の材質には、製鋼工程、加熱工程、圧延工程、

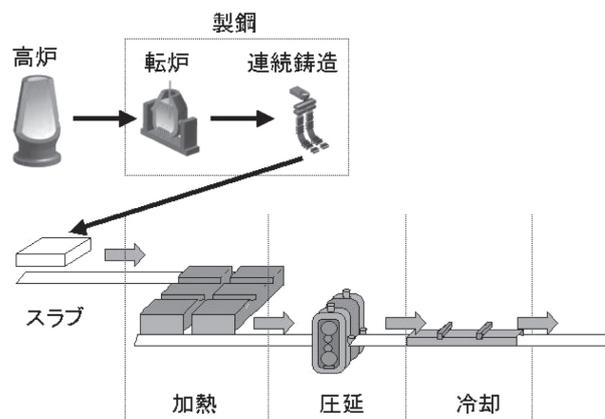


図1 製造プロセス

冷却工程および熱処理工程における製造条件が影響している。製造前の品質設計の段階において、対象プロセスに関する知識が豊富な熟練者により、顧客の要求品質を満足するように各製造条件の基準値が決定されている。しかしながら、製造条件から材質を高精度に予測する手段が確立されていないため、目標品質を得るための製造条件を精度よく求めることが困難である。設計者が決定した基準値の精度に限界があるため、製品の材質にずれが生じる。また、製造段階において、製造条件が基準値どおりに運転されるようにレギュレーション制御が行われるが、外乱により実績値が基準値から乖離するため、その結果として製品の材質にばらつきが生じる。

材質の制御誤差を低減するために、製造条件と材質の因果関係をモデル化し、そのモデルとすでに処理が終了した工程の製造条件実績値をもとに、まだ処理が開始していない工程の適切な製造条件を導出し、そのように操作することで、材質を目標値に近づけるフィードフォワード制御が行われてきた。

材質予測モデルとして冶金現象を模倣した物理モデルを構築する研究は従来から行われてきた。この物理モデルを構築するためには、各工程での金属組織の状態を予測するためのサブモデルを構築する必要がある。しかしながら、各工程出側での金属組織をオンラインで計測する技術が確立されていないため、実用的な物理モデルを構築し維持することは難しい状況にある。

そこで、製造現場においては、物理モデルではなく、入出力データから直接的に予測モデルを構築するブラックボックスモデリングが行われてきた。その中でも最小自乗法による簡易なパラメータ同定法が確立している線形重回帰モデルが材質予測モデルとして多く用いられてきた。

2.2 幅寸法制御

厚鋼板の幅寸法は圧延工程において作りこまれる。圧延工程は、スラブを圧延機で塑性加工し、製品として所定の寸法に作りこむプロセスであり、図2に示すように、成形圧延、幅出し圧延、仕上げ圧延の3つの過程に分けられる。まず、第1段階の成形圧延においては、スラブの表面手入れによる凹凸の影響を除去し、所定のスラブ厚に整えられる。次に、第2段階の幅出し圧延において、スラブを平面内で90度転回し、圧延機でリバース圧延し、幅方向の寸法を製品幅に近づける。さらに、第3段階の仕上げ圧延において、再び材料を90度転回し、圧延機でリバース圧延し、長さ方向に所定の厚みまで圧延される。

幅寸法は、第2段階の幅出し圧延で作られこまれる。所定の幅寸法に制御するため、モデルを用いたフィードフォワード制御が行われる。それには、次に示す簡易的な物理モデル

が用いられてきた。幅出し圧延開始前の材料の幅寸法を W_{in} 、厚みを t_{in} 、長さを L_{in} とし、幅出し圧延終了後の材料の幅寸法を W_{out} 、厚みを t_{out} 、長さを L_{out} とすると、これらの変数の間には、体積一定則 ($W_{in} \times t_{in} \times L_{in} = W_{out} \times t_{out} \times L_{out}$) が成り立つ。円筒形状の上下ロールの間を、ロールを回転させながら鋼材を通過させ、厚みを減少させる金属加工においては、2次元圧延理論の仮定で、圧延ロールの幅方向には鋼材は伸びない ($L_{in} = L_{out}$) とされていることにより、次式が導かれる。

$$W_{out} = (W_{in} \times t_{in} + p_1) / (t_{out} + p_2) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p_1 および p_2 は調整パラメータであり、おもに第3段階の仕上げ圧延における2次元圧延理論で表現できない複雑かつ非線形な幅変動現象により生じるモデル化誤差を補正するためのものである。

2.3 従来型品質モデルの課題

前2節で示したように、品質制御を目的とした品質予測モデルとしては、これまで簡易な数式が用いられてきた。しかし、複雑かつ非線形なプロセスを対象に、多様な製造条件と製品品質の関係をモデルパラメータの固定された簡易式で表現することは困難であるため、十分な予測精度が得られなかった。

そこで、モデルの精度を確保するために、製造条件を複数の区分に分割し、区分ごとにモデルパラメータを持つことが一般的に行われてきた。材質予測および幅寸法予測についても、スラブや製品の寸法、材質、温度などにより区分されたモデルパラメータテーブルが利用されてきた。

製造プロセスでは、操業状況の解析やさまざまな品質管理・改善のため、大量の製造実績データをデータベースに蓄積している。従来からこのデータベースを用いて、上記予測モデルのパラメータテーブルの値が決められていた。しか

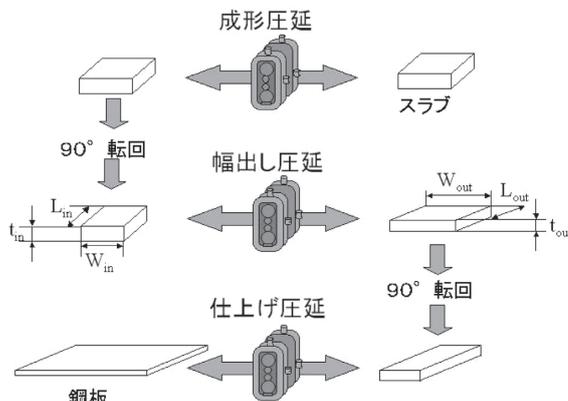


図2 圧延プロセス

し、製造技術の進歩、製造設備の変更、顧客要求特性の変化、設備特性の経年変化、ならびに原材料価格変動に対応した製造条件の変更などの環境変化が頻繁に生じる場合、過去のデータから構築したモデルでは対象をうまく表現できず、十分な予測精度を得ることができない。このような場合でも、新たなデータをもとに、一定期間ごとにモデルパラメータテーブルの値の調整や区分の見直しを行えば、経時変化に対応できる。しかしながら、この予測モデルの調整は人の手に頼らざるを得ず、その作業負荷が高いことから、頻繁な調整ができず精度の維持が困難という問題があった。そして、このような精度の低いモデルを用いてフィードフォワード制御を行っていたため、品質制御精度の向上に限界があった。

3 局所回帰モデルによる新制御システム

上記課題を解決するため、Just-In-Timeモデリングの一種である局所回帰モデルを用いた品質制御システムを開発した。

3.1 局所回帰

局所回帰は、図3に示すように、要求点に近い過去のデータを重視して局所的なモデルを構築する方法である。

局所的なモデルは、次に示す線形式とする。

$$\hat{y} = b + \sum_{m=1}^M a_m x_m \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 \hat{y} は出力の予測値であり、 x_m ($m=1, \dots, M$) は入力であり、 b および a_m は、モデルパラメータである。

線形回帰との比較のための数値例を図4に示す。説明の簡単のため、入力変数の数は1つとする。横軸は入力変数、縦軸は出力変数である。入出力の実績データをプロットしたのを見るとわかるように、入力と出力の間は非線形な関係

をもつ。この実績データを線形回帰によりフィッティングすると一点鎖線のようになり、精度良くフィッティングできない。一方、局所回帰では、要求点近傍の実績データを重視して局所的なモデルを作成する。図4においては要求点として55.5および67.5を与えたときの局所回帰モデルおよび予測値を示す。局所回帰では、要求点の値が変わる毎に、予測モデルを作り直す必要があるが、非線形な対象に対しても予測精度が良いことがわかる。また、要求点近傍の傾きもうまく計算できる。

局所回帰モデルを用いることで、幅寸法および材質の予測誤差は、従来と比較し大幅に低減することが、実機データで確認できた。

従来法の線形回帰モデルと提案法の局所回帰モデルについて、厚鋼板の調質鋼の製造実績データをもとにフルクロスバリデーションにより予測精度を評価した結果を示す。引張強度の予測誤差の根平均二乗誤差 (RMSE) は、従来法で24.3 [MPa]、提案法で11.6 [MPa] であった。

3.2 フィードフォワード制御システム

局所回帰モデルを用いると予測精度が大幅に向上することが確認できたので、そのモデルを用いたフィードフォワード制御システムを実機化した。従来の制御システムを図5 (a)、構築した新システムを図5 (b) に示す。

プロセスコンピュータの中で、所定の品質を得るための製造条件の値が計算され、製造プロセスの設備に設定される。従来はオフラインで製鉄所スタッフが統計解析を行い、複数に区分されたモデルパラメータテーブルをメンテナンスする必要があった。しかし、新システムでは、製品が製造される毎に、計測した入力変数および出力変数の実績データをデータベースに自動的に蓄積し、また、データベース内の古いデータを自動的に除去し、そのデータベースの実績データを用いて局所回帰モデルを自動的に構築するようにしたので、

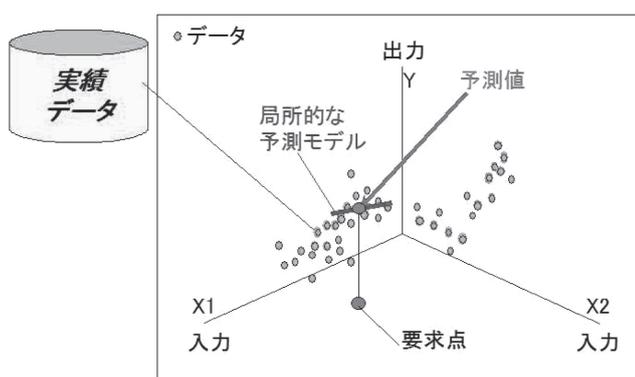


図3 局所回帰モデリング

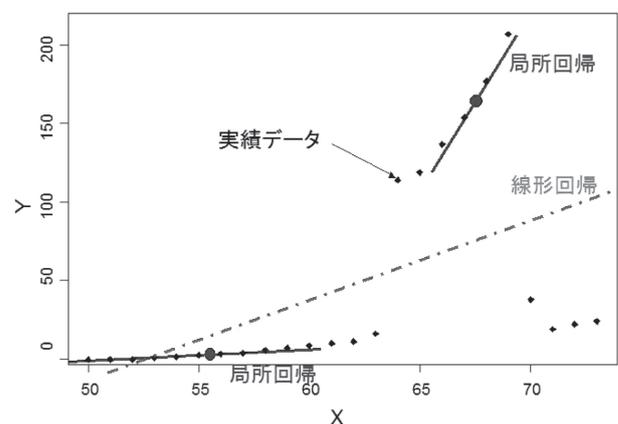


図4 線形回帰と局所回帰の比較の数値例

モデルのメンテナンスの負荷を大幅に低減することができた。また、品質制御精度も従来と比べて大幅に低減することができた。

従来法の線形回帰モデルによるフィードフォワード制御と提案法の局所回帰モデルによるフィードフォワード制御で、品質制御誤差(実績値-目標値)の比較を行った結果を示す。制御圧延材のある品種の引張強度制御誤差の根平均二乗誤差(RMSE)は、従来法で14.9 [MPa]、提案法で10.0 [MPa]であった。また、加速冷却材のある品種の引張強度制御誤差の根平均二乗誤差(RMSE)は、従来法で16.6 [MPa]、提案法で14.0 [MPa]であった。さらに、幅寸法制御誤差の根平均二乗誤差(RMSE)は、従来法で10.5 [mm]、提案法で6.3 [mm]であった。

本システムは、JFEスチール株式会社西日本製鉄所において2002年から製品の生産に使用されており、8年以上安定稼働している。製品の品質制御精度を向上でき、品質不良の発生リスクを低減できた。また、品質不良発生を防止するため余分に投入していた原材料・エネルギー・時間を削減でき、製造コストを低減できた。さらに、最適なモデルパラメータをリアルタイムに自動計算できる。従来、スタッフが行う必

要のあった膨大なモデルパラメータテーブルのメンテナンス作業の負荷を大幅に低減でき、従業員満足度の向上にも大きく貢献している。

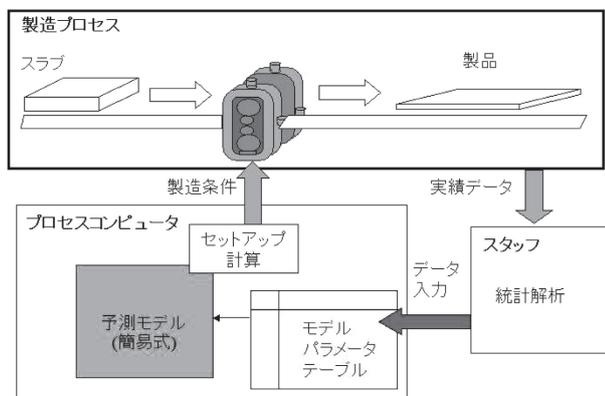
本手法は汎用性があるので、物理モデルの構築が困難、または環境変化によりモデルの精度の維持が困難な他のさまざまなプロセスの品質の自動制御に対して、本手法の適用範囲を全社的に拡大中である。社内他地区への技術移転のみならず、圧延プロセスから上工程プロセス制御への展開も行っている³⁾。

4 実用化のための工夫

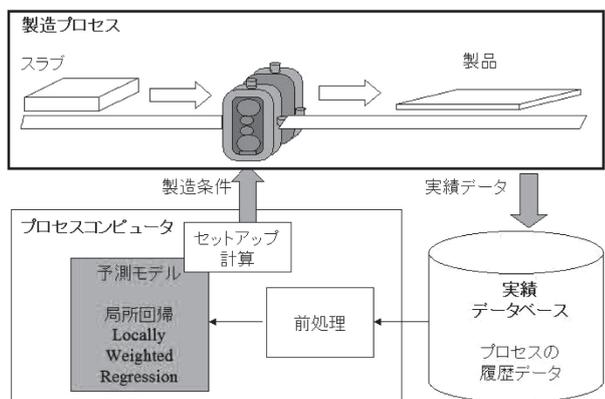
実用化にあたっては、製造現場関係者に提案手法の有効性を理解してもらい、協力してもらう必要がある。本節ではそのために行った工夫について述べる。

提案する手法自体が理解しやすい必要がある。製造現場関係者は、必ずしもモデリングや計算機科学について理解がある人ばかりではない。複雑かつ非線形な対象のモデル作成にはさまざまな方法があるが、その中で局所回帰を選択したのは、本手法は製造現場でよく用いられている線形回帰の延長線上にあるからである。線形回帰は予測誤差の2乗和が最も小さくなるように線を引いている。一方、局所回帰は要求点に近い事例の重みを大きくして、遠い事例の重みを小さくして重み付き2乗和を計算し、その値が最も小さくなるように線を引いている。線形回帰は、すべてのサンプルの重みを同じにして計算しているが、局所回帰は要求点からの距離に応じて重みを変えているところが違うだけである。製造現場関係者がモデルとして線形回帰をよく用いるのは、偏回帰係数の値をもとに、対象の物理的特性に関する先見知識と一致していることを確認するためである。対象の物理的特性と一致しているモデルは安心して使用される傾向がある。局所回帰は線形回帰と同様に、偏回帰係数の値が計算され、製造現場関係者が確認することができる。

モデルの精度が従来と比較して向上することを直感的に理解してもらうために、商用の汎用データ解析ツールを利用した開発支援ツールを作成した。図6に示すように、開発支援



(a) 従来の制御システム



(b) 新しい制御システム²⁾

図5 品質制御システム

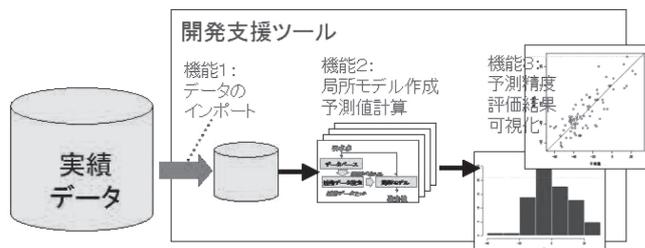


図6 開発支援ツール

ツールは、3つの機能から構成される。まず、実績データベースから入力変数および出力変数の実績データをインポートする機能である。次に、インポートしたデータから局所回帰モデルの作成と予測値の計算を行う機能である。フルクロスバリデーションにより繰り返し計算が行われる。最後に、予測精度評価結果を可視化する機能である。図7に示すように、フルクロスバリデーションにより計算した予測値と実績値の散布図、および予測誤差ヒストグラムを描画し、予測誤差の平均値や標準偏差などの統計量を計算する。

他のシステムに移植しやすくするために、局所回帰モデルの計算モジュールを標準化した。本稿で紹介した材質制御と幅寸法制御は、同じプログラムを使って実装されている。また、他のプロセスの自動制御への実機化展開する場合においても、開発コストを抑えることが可能である。

5 おわりに

本稿では、鉄鋼製造現場において自動的に収集され大量に蓄積されている製造実績データを有効活用して、モデリングと制御システム開発およびメンテナンスを効率的に行い、鉄鋼製品の品質ばらつきを低減につなげることができた成功事例を紹介した。

鉄鋼製造現場では、古くからモデルベース制御が数多く実装されており、現在も増え続けている。高精度な制御対象モ

デリング、制御システムの開発、ならびにそれらのメンテナンスとレベルアップを効率的に行うための技術の進展が、製品品質の向上と製造コスト低減、ひいては競争力の強化のために必要不可欠であり、今後もますます重要になっていくと予想される。

プラントモデリングに多くの研究者および技術者が携わり、この分野の研究がますます発展することで、製造現場の改善に貢献していくことを期待している。

本稿は、計測と制御 Vol.49, No.7, pp.439-443. に加筆修正したものであり、著作権は公益社団法人計測自動制御学会にあります。

参考文献

- 1) 茂森弘靖, 長尾亮, 平田直人, 南部康司, 池田展也, 水島成人, 加納学, 長谷部伸治: 計測自動制御学会論文集, 44 (2008) 4, 325-332.
- 2) 茂森弘靖, 長尾亮, 池田展也, 水島成人: 材料とプロセス, 19 (2006) 5, 945.
- 3) 茂森弘靖, 荒木義, 大山智史: 材料とプロセス, 22 (2009) , 1057.

(2010年11月30日受付)

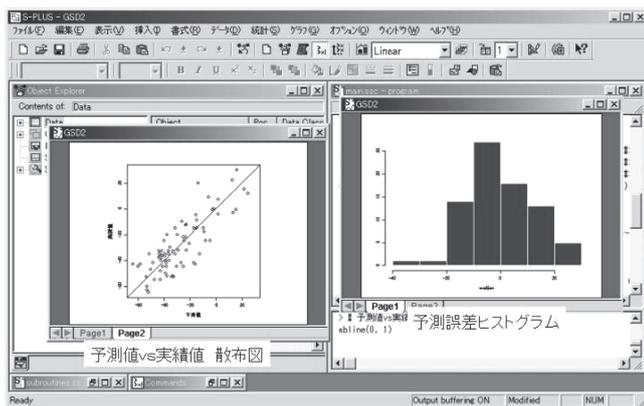


図7 予測精度評価結果