

鉄鋼製品の品質管理への統計的手法の応用

～Just-In-Time モデリングによる

品質設計と品質制御の実用化と全社展開～

JFE スチール株式会社

茂森 弘靖

1. はじめに

計算機技術の発展により、多くの製造業の現場において、品質管理や操業管理のために、大量の製造実績が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[1, 2]と呼ばれる手法に近年関心が集まっている。Just-In-Time モデリングは、モデルパラメータの値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[4]。

著者らは、Just-In-Time モデリングの一種の局所回帰 (Locally Weighted Regression) [3]を用いた、鉄鋼プラントにおける製品の品質設計および品質制御を実用化した[4]。

2. 品質予測モデルの開発

2.1 対象とする製造プロセスと品質指標

製鋼工程で成分調整され製造された半製品であるスラブを加熱工程で所定の温度まで加熱し、圧延工程により所定の寸法、形状に成形され、冷却工程で所定の温度まで冷却され、製品の材質が作りこまれるプロセスを対象とする[4]。

鉄鋼製品の品質指標には、寸法、形状、材質などがあるが、本稿では鉄鋼製品の品質の中で重要な指標の一つである材質を対象とする[4]。

2.2 局所回帰モデル

局所回帰は、要求点に近いデータを重視して局所的なモデルを作成する方法である。非線形な対象に対して、線形回帰では精度よくフィッティングすることはできない。一方、局所回帰では、要求点の値が変わる毎に、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。また、要求点近傍の傾きもうまく計算できる[5]。

2.3 品質予測精度の評価

局所回帰は、入出力間の因果関係を表現するための数式をあらかじめ決定する必要がないため、材質予測のような複雑かつ非線形な対象のモデリングに適している[4]。

厚板制御圧延材、厚板調質鋼、熱延パイプ素材の3つの品種について、従来から用いられてきた線形回帰モデルによる予測誤差と提案する局所回帰モデルによる予測誤差を評価した。局所回帰モデルによる引張強度および降伏点応力の予測誤差のRMSE (Root Mean Square Error, 根平均二乗誤差) は、線形回帰モデルに対し約40~60%低減することがわかった。このように、材質予測モデルに局所回帰を用いることで、従来の線形回帰よりも大幅に予測精度が向上することを確認した[6, 7]。

3. 品質設計システムの実用化

品質設計とは、顧客要求の材質に関わる製品仕様を満足する製造条件を決定する意思決定プロセスである。設計者は顧客要求の材質を満足するだけでなく、製造コストを最小化するための製造条件を決定する必要がある、一種の最適化問題を解いているといえる。この最適化を計算機により行うためには、製造条件から品質を精度良く予測する手段が必要となる[7]。

局所回帰モデルを用いると材質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品質設計システムを開発した。構築した品質設計システムの機能を以下に示す。まず、設計者が製造条件を入力する。そして、過去の蓄積された実績データをもとに、局所回帰モデルにより、その製造条件における材質を予測する。そして、その予測結果を設計者に対して可視化する[7]。

品質設計システムは、汎用データマイニングツールを活用して構築した。データマイニングツールを用いることで、複数の工程間のデータ結合を高速かつ容易に実行できるようになった。また、データマイニングツールのビジュアルプログラミング機能により、環境変化にともなうプロセス特性の変化などに対しても、迅速かつ柔軟にモデル作成用のデータを編集することができるようになった[7]。

線形回帰モデルを用いた従来の設計と、局所回帰モデルを用いた新システムでの設計において、材質設計精度を比較した。新システムの材質設計誤差の RMSE (Root Mean Square Error, 根平均二乗誤差) は、従来システムに対し約 50%低減することを確認した。このように、材質設計精度は従来と比べて大幅に向上することができた[7]。

4. 品質制御システムの実用化

鉄鋼製品の材質には、製鋼工程、加熱工程、圧延工程、冷却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、顧客の要求材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[6]。

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。その制御を高精度に行うためには、製造条件から品質を精度良く予測する手段が必要となる[6]。

局所回帰モデルを用いると材質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品質制御システムを開発した[6]。

プロセスコンピュータの中で、所定の材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[6].

新システムの材質制御誤差の RMSE (Root Mean Square Error, 根平均二乗誤差) は, 従来システムに対し約 20~40%低減することを確認した. このように, 材質制御精度は従来と比べて大幅に向上することができた[6].

5. 開発支援ツールと全社展開

Just-In-Time モデリングを用いたプロセス制御技術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拡大中である[5].

社内の研究者および技術者に対して, Just-In-Time モデリングにより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, 開発支援ツールを開発した. 開発支援ツールは, 主に 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. 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[5].

Just-In-Time モデリングを用いたプロセス制御技術は, JFE スチールの東日本製鉄所 (千葉地区, 京浜地区), 西日本製鉄所 (倉敷地区, 福山地区), および, 知多製造所において適用されている. 製銑, 製鋼, 熱延, 厚板, 鋼管, 冷延などのさまざまなプロセスに対して展開されている. 前述の実用化例の他に, これまでに公表されている具体的な適用事例としては, インペラー脱硫設備における溶銑脱硫制御モデル[8], 転炉における吹錬制御モデル[9, 10], 連続鋳造におけるタンディッシュ溶鋼温度モデル[11], 厚鋼板の幅制御モデル[12], 厚鋼板の平面形状制御モデル[13], 熱延仕上ミルにおける圧延荷重モデル[14], 冷延鋼板の材質制御モデル[15], 連続亜鉛メッキラインにおける合金化度制御モデル[16]がある.

6. 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, 鉄鋼製品の品質ばらつきの低減につなげることができた成功事例を紹介した[5].

さまざまなプロセスならびに品質における設計および自動制御に対して, 本研究成果を継続して適用拡大していくことで, 製造現場の改善に寄与すると同時に, 本技術分野の発展に今後も貢献していきたい[4].

本講演では, S-PLUS を用いて開発した品質予測モデル, Visual Mining Studio および S-PLUS 連携機能を用いて実装した品質設計システム, S-PLUS の外部プログラム連携機能を用いて実装した品質制御システム, ならびに, S-PLUS Enterprise Server を用いて実装した開発支援ツールについて解説する.

参考文献

- [1] A. Stenman, F. Gustafsson and L. Ljung: Just-In-Time Models for Dynamic Systems, 35th IEEE Conference on Decision and Control, pp.1115-1120 (1996).
- [2] Q. Zheng and H. Kimura: Just-In-Time Modeling for Function Prediction and its application, Asian Journal of Control, Vol.3, No.1, pp.35-44 (2001).
- [3] W. S. Cleveland and S. J. Delvin: Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting, Journal of the American Statistical Association, Vol.83, No.403, pp.596-610 (1988).
- [4] 茂森弘靖: 局所回帰モデルを用いた鉄鋼製品の品質設計と品質制御, 京都大学博士学位論文 (2013).
- [5] 茂森弘靖: 局所回帰モデルによる鋼材の品質制御の実用化, 計測と制御, Vol.49, No.7, pp.439-443 (2010).
- [6] 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: 局所回帰モデルを用いた鋼材の品質制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.44, No.4, pp.325-332 (2008).
- [7] H. Shigemori, M. Kano and S. Hasebe: Optimum Quality Design System for Steel Products through Locally Weighted Regression Model, Journal of Process Control, Vol.21, Issue 2, pp.293-301 (2011)
- [8] H. Shigemori: Desulphurization Control System through Locally Weighted Regression Model, Proceedings of 2012 IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries, pp.234-239 (2012).
- [9] 水野浩, 秋生賢吾, 前田孝彦: 転炉吹錬制御モデルへの Just-In-Time モデル適用, 材料とプロセス, Vol.20, No.5, pp.955 (2007).
- [10] S. Tomiyama: On New Refining Control System for Dephosphorization Using LD Converter, Proceedings of 2012 IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries, pp.226-227 (2012).
- [11] 大元知則, 若槻裕司, 宮田淳, 後藤貴敏: 連铸タンディッシュ溶鋼温度モデルの開発, 材料とプロセス, Vol.20, No.2, pp.304 (2007).
- [12] 茂森弘靖, 平田直人, 南部康司: Just-In-Time モデリングを用いた厚板の幅制御, JFE 技報, No.15, pp.1-6 (2007).
- [13] 茂森弘靖, 南部康司, 長尾亮, 荒木義, 水島成人, 加納学, 長谷部伸治, 制約付き局所回帰モデルを用いた鋼材の平面形状制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.46, No.8, pp.472-479 (2010).
- [14] 久山修司, 八尋和広, 飯島慶次, 西浦伸夫: 熱延仕上圧延荷重モデルに対する学習制御, 材料とプロセス, No.27, pp.791 (2014).
- [15] H. Shigemori: Mechanical Property Control System for Cold Rolled Steel Sheet through Locally Weighted Regression Model, Proceedings of 9th Asian Control Conference pp.1-6 (2013).
- [16] 金澤真一: CGLデータベース型モデルを用いた合金化度制御の開発, 日本鉄鋼協会第142回制御技術部会資料, 制技 142-1-2 (2009).