

Just-In-Time モデリングによる 高精度プロセス制御技術の実用化と全社展開

High-Precision Process Control Technology for Steel Plant through Just-In-Time Modeling: Recent Developments and Applications

茂森 弘靖 SHIGEMORI Hiroyasu JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員（副部長）・博士（工学）

要旨

JFE スチールは、Just-In-Time モデリングの一種の局所回帰モデルを用いたプロセス制御技術を実用化した。Just-In-Time モデリングは、大量実績データから要求点近傍のデータを重視した局所的なモデルを都度作成する手法である。本技術は製品品質のばらつき低減などに効果があり、JFE スチールのさまざまなプロセス、さまざまな事業所で展開されている。本稿では、本技術の概要、実用化例などを解説する。

Abstract:

JFE Steel has developed a new process control technology using locally weighted regression model, a type of Just-In-Time modeling. Just-In-Time modeling is the following method: A large volume of past input and output data is accumulated, and a local prediction model is constructed by prioritizing the past data near the query point each time a prediction is required. This technology can improve the quality control accuracy significantly, and has been used in various manufacturing processes and in various steel works in JFE Steel. This paper discusses the outline of this technology and examples in commercial plants.

1. はじめに

鉄鋼製品の品質に対する顧客要求はますます厳しく、かつ多様化してきている。それに応じて製造条件も精密化している。また、同一製品の生産においても、原材料の価格変動に応じ、品質を維持しつつ製造コストが上昇しないように製造条件を変更する必要がある。さらに、製造技術の進歩、製造設備の変更、設備特性の経年変化等により、品質と製造条件との関係が変化するため、その変化に応じて適切に製造条件を変更する必要がある。上記のような環境変化に迅速に対応しながら、多種多様な製品の品質を維持することができる技術、ならびに、さらなる品質向上を行うことができる技術の確立が求められている¹⁾。

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り、労働生産性の向上を目的に計算機による自動化を古くから推進してきた。1980 年以降、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な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¹⁾。

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^{2,3)}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¹⁾。

本稿では、まず、前述の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（Locally weighted regression）⁴⁾を用いた、鉄鋼プラントにおける製品の材質設計および材質制御の実用化研究について解説する。次に、本開発技術をさまざまなプロセスおよびさまざまな事業所へ展開するための工夫について述べる。

2. 鉄鋼製品の材質設計と材質制御

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¹⁾。

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に議論する¹⁾。

2.2 材質設計

材質設計とは、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。顧客要求の製品仕様には、製品のサイズ、強度(引張強度、降伏点、伸び)および靱性(吸収エネルギー、遷移温度)などがある。製造条件には、化学成分、加熱工程、圧延工程、冷却工程のそれぞれの温度などがある¹⁾。

材質設計はこれまで知識と経験が豊富な設計者により行なわれてきた。材質設計の自動化と精度向上を目的に、従来、If-Then ルールやファジー論理を用いた知識ベースシステムが提案されてきた⁵⁾。しかしながら、設計者の知識と経験を環境の変化に対応して迅速に知識ベースシステムに実装することが困難であるため、知識ベースシステムにより適切な製造条件を得ることが次第に困難になっていく。そのため、知識ベースに基づく材質設計システムが使われなくなるといえる課題があった。そこで、モデルベースの材質設計が求められるようになった¹⁾。

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には、製造条件から品質を精度よく予測する手段が必要となる¹⁾。

2.3 材質制御

製造前の材質設計の段階において、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、目標材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なわれるが、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¹⁾。

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なわれてきた¹⁾。

2.4 従来の材質予測手法と課題

材質予測モデルとして冶金現象を模倣した物理モデルの構築は従来から研究されてきた。しかし、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、冶金現象を厳

密に表現するモデルの構築が難しいなどの理由で実用的な物理モデルを構築し維持することが困難であった¹⁾。

そのため、製造現場においては、入力データと出力データから直接的に予測モデルを作成するブラックボックスモデリングが用いられてきた。その中でも最小二乗法による簡易なパラメータ同定方法が確立している線形回帰モデルが材質予測モデルとして多用されてきた¹⁾。

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¹⁾。

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なわれてきた。大量の製造実績データを蓄積した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。しかし、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課題があった。そして、このような精度の低いモデルを用いていたため、材質設計または材質制御精度の向上に限界があった¹⁾。

3. Just-In-Time モデリングを用いた材質設計および材質制御システム

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材質設計および材質制御システムを開発した。

3.1 局所回帰モデル

局所回帰は、図1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。

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

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2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

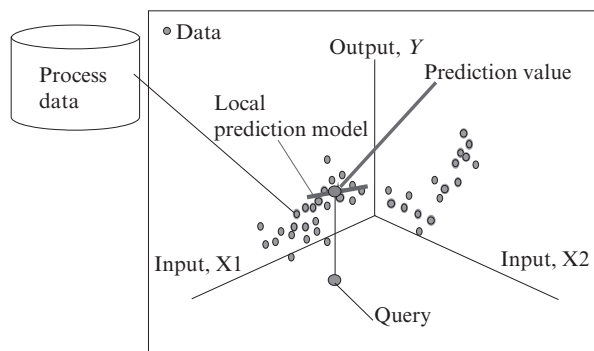


図1 局所回帰モデル（文献6）から引用

Fig. 1 Locally weighted regression model

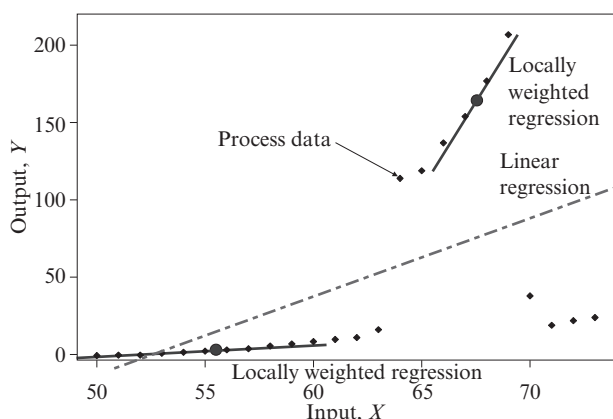


図2 線形回帰と局所回帰の比較（文献6）から引用

Fig. 2 Linear regression and locally weighted regression

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2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ごとに、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⁶⁾。

3.2 材質予測精度の評価

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¹⁾。

材質予測のためのデータセットの目的変数は、引張強度、降伏点、伸び、吸収エネルギーなどの機械試験特性値であり、説明変数は目的変数と物理的な因果関係が明白な製造条件で、化学成分、加熱条件、圧延条件、冷却条件から十数個を選択している。なお、これらの説明変数は、非常に多様な製品を製造するために、説明変数間の相関は小さいとみなすことができる¹⁾。

データセットに蓄積するサンプル数は、生産サイクルから

ほぼすべての製造条件のデータがデータセットの中にあるように選択した。また、最近のデータで予測モデルを構築できるように、FIFO（先入れ先出し法）にて、データセットを更新するようにした。データセットに蓄積されるデータは、センサーによる計測値であるが、異常なデータが蓄積されないように、各センサー値の許容範囲を設定し、許容範囲を超えるものは、データセットに蓄積しないようにしている。また、材質予測モデルにより予測値を計算し、実績値との差が管理範囲を超えるものは、データセットに蓄積しないようにしている。さらに欠損のあるデータは、データセットに蓄積しないようにしている¹⁾。

厚板制御圧延材、厚板調質鋼、熱間圧延パイプ素材の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%低減することが分かった。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^{7,8)}。

3.3 材質設計システムの実用化

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材質設計システムを構築した。

構築した材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。材質設計は、要求品質が満たされるだけでなく、材質不良発生などのリスクを低減させる必要がある。これらの2次的な評価指標を考慮しながら製造条件を決定する必要がある。これらを加味した設計者への可視化を行なう必要がある。そのため、リスク情報のデータベースにリンクさせる必要がある。設計者は、その可視化された結果を見て判断し、要求材質が満たされ、かつ製造コストやリスクが十分に低減され、設計者が満足するような製造条件が得られるまで、製造条件の変更入力を繰り返す⁷⁾。

局所回帰モデルにより材質を予測するには、過去の大量の製造実績データが必要である。その実績データを収集するにあたっては、次の点に留意する必要がある。まず、製品の製造工程は多岐にわたるため、複数の工程間のデータを結合する必要がある。次に、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、および原材料価格変動等の環境変化により、品質予測に必要なデータの項目が変化するので、そのような環境変化に対しても必要なデータを容易にかつ迅速に収集できるようにする必要がある。また、設計者は冶金現象や製造プロセスに関する

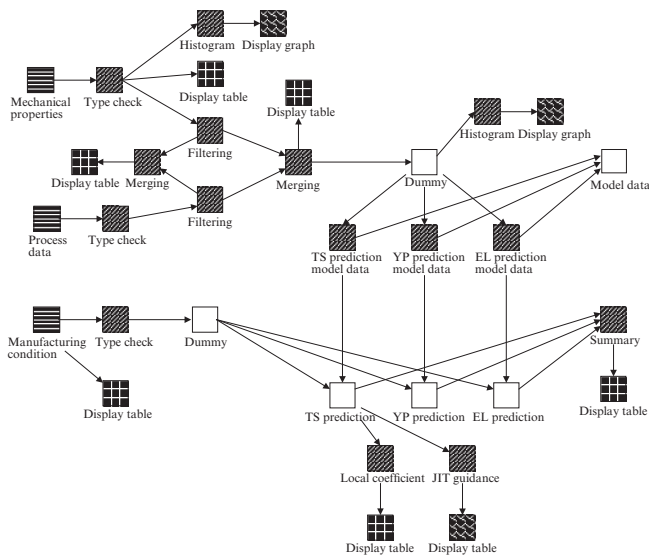


図3 ビジュアルプログラミングの利用
Fig. 3 Use of visual programming

熟練者であるが、計算機科学やプログラミングについての専門家ではないので、そのような計算機の初心者でもモデルの改造や維持が容易な仕組みを構築する必要がある。そこで、汎用データマイニングツールを活用して材質設計システムを構築した⁷⁾。

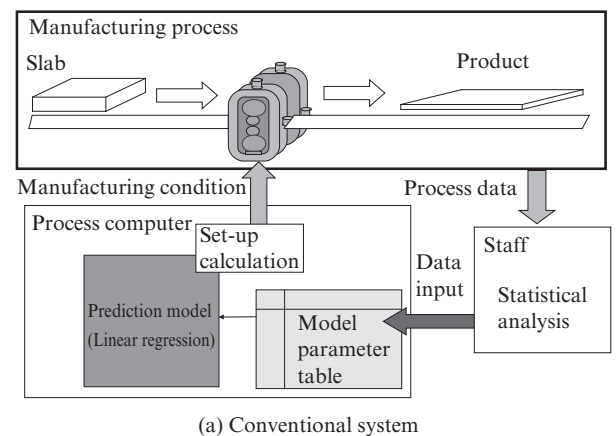
データマイニングツールを用いることで、複数の工程間のデータ結合を高速かつ容易に実行できるようになった。また、データマイニングツールのビジュアルプログラミング機能(図3)により、環境変化にともなうプロセス特性の変化などに対しても、迅速かつ柔軟にモデル作成用のデータを編集するプログラムを変更できるようになった⁷⁾。

さらに、局所回帰モデルの機能を様々な対象に対して汎用的に使えるようにプログラミングして、データマイニングツールの上のアイコンとして登録することにより、アイコンをコピー・ペーストするだけで、別の対象の予測モデルを作成することができる。製造条件の変化、品質特性値の変化などの環境変化があった場合は、従来では対象プロセスを熟知した経験者が時間をかけて予測モデルを作成していたが、これにより、迅速に予測モデルを構築することが可能になった⁷⁾。

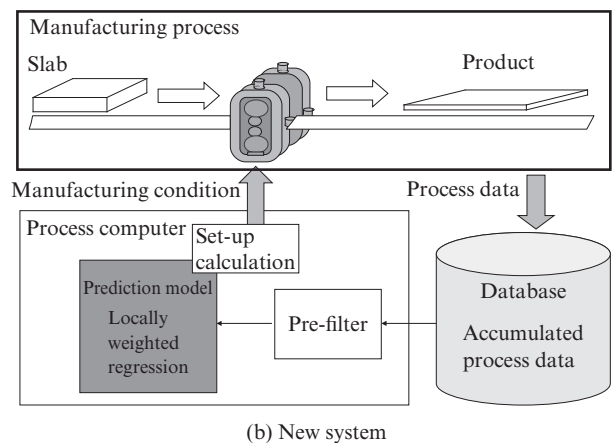
線形回帰モデルを用いた従来の設計と、局所回帰モデルを用いた新システムでの設計において、材質設計精度を比較した。新システムの材質設計誤差のRMSE (Root mean square error, 根平均二乗誤差) は、従来システムに対し約50%低減することを確認した。このように、材質設計精度は従来と比べて大幅に向上することができた⁷⁾。

3.4 材質制御システムの実用化

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材質制御シ



(a) Conventional system



(b) New system

図4 材質制御システム(文献6)から引用)

Fig. 4 Mechanical property control system

テムを構築した。

従来の制御システムを図4(a)、構築した新システムを図4(b)に示す。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ない、複数の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、製品が製造されるごとに、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、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、材質制御精度も従来と比べて大幅に向上することができた⁸⁾。

3.5 材質設計および材質制御システムのまとめ

局所回帰モデルを用いた材質設計および材質制御の実用的な手法およびシステムが開発された。すなわち、実プラン

トにおける材質設計および材質制御に対し本開発システムを適用することで、製品における材質の設計誤差および制御誤差が低減し、製品品質の向上に寄与している。また、従来、スタッフが多くの人件をかけて行っていたモデルメンテナンスの負荷低減にも貢献できた。これにより、開発した材質設計システムは2003年3月から、材質制御システムは2002年11月から、JFE スチールにおいて十年以上継続して使用されており、環境変化に対して対応できると考える。以上のように、提案手法および開発システムの有効性を実プラントで実証できた¹⁾。

4. Just-In-Time モデリングによる 高精度プロセス制御技術の全社展開

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⁶⁾。

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を得て、協力を得る必要がある。本章ではそのために行った工夫について述べる⁶⁾。

4.1 局所回帰モデルを選択した理由

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⁶⁾。

4.2 Just-In-Time モデル開発支援ツールの開発

4.2.1 開発支援ツールの機能概要

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、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5に示すように、開発支援ツ

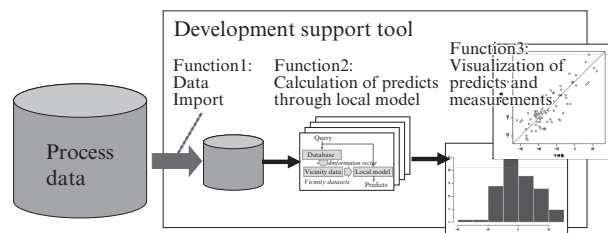


図5 開発支援ツールの機能 (文献6) から引用

Fig. 5 Functions of development support tool

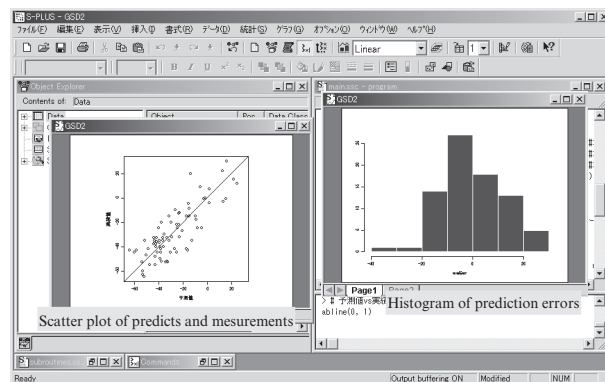


図6 予測精度の評価 (文献6) から引用

Fig. 6 Evaluation of prediction errors

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なう機能である。一つ抜き交差確認法 (Leave-one-out cross-validation)⁹⁾により繰り返し計算が行なわれる。最後に、予測精度評価結果を可視化する機能である。一つ抜き交差確認法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 (図6)⁶⁾。

4.2.2 Web ベースシステム化と社内教育

本開発支援ツールは、図7に示すように、Web ベースシステム化した。従来はユーザ毎にソフトウェアをインストールする必要があったので、ソフトウェアの管理にかかる工数が多かった。また、ユーザは解析ソフトウェアの利用知識と習熟が必要なため、設計手順が属人的となり、ユーザにより成果物の品質、すなわち、モデルの精度のばらつきが大きい問題があった。一方、Web ベースシステム化することにより、Web ブラウザを用いて社内 LAN (Local area network) 経由で誰でも簡単に利用可能であり、設計手順を標準化してユーザに提供しているので成果物の品質のばらつきは小さくなる。また、ユーザはソフトウェアのインストールが不要であり、ソフトウェアの管理にかかる工数が大幅に低減する。なお、本開発支援ツールの利用については、Just-In-Time モデリング技術の概要と実用化例とともに、若手技術

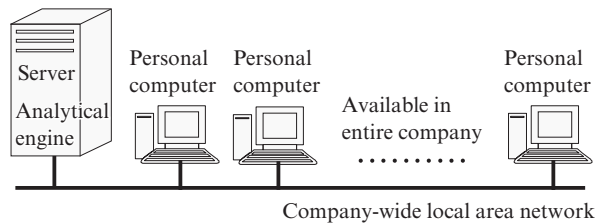


図7 Webベースの開発支援システム構成

Fig. 7 Development support system based on web service

者向けの社内技術講座において教育を実施し、本技術の社内普及に努めている。

4.3 Just-In-Time モデル標準ソフトウェアの開発

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設計と材質制御は、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⁶⁾。

4.4 Just-In-Time モデリングを用いた高精度プロセス制御技術の適用事例

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。製鉄、製鋼、熱間圧延、厚板、鋼管、冷間圧延などのさまざまなプロセスに対して展開されている。材質設計および材質制御の実用化例については前述したが、そ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¹⁰⁾、転炉における吹錬制御モデル^{11,12)}、連続鑄造におけるタンディッシュ溶鋼温度モデル¹³⁾、厚板の幅制御モデル¹⁴⁾、厚板の平面形状制御モデル¹⁵⁾、熱間圧延仕上げミルにおける圧延荷重モデル¹⁶⁾、冷間圧延鋼板の材質制御モデル¹⁷⁾、連続亜鉛めっきラインの合金化度制御モデル¹⁸⁾がある。

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ない、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⁶⁾。

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なうための技術の進展が、製品品質の向上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⁶⁾。

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、本研究結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¹⁾。

参考文献

- 1) 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, 2013, 博士学位論文.
- 2) Stenman, A.; Gustafsson, F.; Ljung, L. Just-In-Time models for dynamic systems, 35th IEEE Conference on Decision and Control. 1996, p. 1115-1120.
- 3) Zheng, Q.; Kimura, H. Just-In-Time modeling for function prediction and its applications, Asian Journal of Control. 2001, vol. 3, no. 1, p. 35-44.
- 4) Cleveland, W. S.; Delvin, S. J. Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting, Journal of the American Statistical Association. 1988, vol. 83, no. 403, p. 596-610.
- 5) Ishikawa, H.; Tsukamoto, H.; Tagane, A.; Wada, H.; Shibata, M.; Iwasa, K. Development of quality design expert system for steel plate. NKK Technical Review. 1993, no. 142, p. 32-37.
- 6) 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. 2010, vol. 49, no. 7, p. 439-443.
- 7) Shigemori, H.; Kano, M.; Hasebe, S. Optimum quality design system for steel products through locally weighted regression model. Journal of Process Control. 2011, vol. 21, issue 2, p. 293-301.
- 8) 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. 2008, vol. 44, no. 4, p. 325-332.
- 9) Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. Second Edition, Springer Series in Statistics, 2009.
- 10) Shigemori, H. Desulphurization control system through locally weighted regression model, Proceedings of 2012 IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries. 2012, p. 234-239.
- 11) 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. 2007, vol. 20, no. 5, p. 955.
- 12) Tomiyama, S. On new refining control system for dephosphorization using LD converter. Proceedings of 2012 IFAC Workshop on Automation in Mining, Mineral and Metal Industries. 2012, p. 226-227.
- 13) 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. 2007, vol. 20, no. 2, p. 304.
- 14) 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. 2007, no. 15, p. 1-6.
- 15) 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. 2010, vol. 46, no. 8, p. 472-479.
- 16) 久山修司, 八尋和広, 飯島慶次, 西浦伸夫. 熱延仕上げ圧延荷重モデルに対する学習制御. 材料とプロセス. 2014, vol. 27, p. 791.
- 17) Shigemori, H. Mechanical property control system for cold rolled steel sheet through locally weighted regression model. Proceedings of 2013 Asian Control Conference.
- 18) 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. 2009, 制技-142-1-2.



茂森 弘靖