

データサイエンスによる鉄鋼製品の品質予測

JFE スチール株式会社

茂森 弘靖

鉄鋼業は巨大な装置産業であり、鉄鋼特有の製造設備により製品が作られる。採掘された鉄鉱石は高炉において還元反応により銑鉄が作られる。銑鉄は転炉において炭素など微量な化学成分を調整することにより溶鋼が作られる。溶鋼は、連続鋳造設備において冷却され、スラブ、ブルーム、ビームブランクなどと呼ばれる圧延向けの半製品が製造される。鉄鋼製品の製造工程はさまざまな種類があり、厚鋼板、熱延鋼板、冷延鋼板、電磁鋼板、表面処理鋼板、H形鋼、鋼矢板、棒鋼、線材などの鉄鋼製品が製造される。また、製品完成までに多くの製造工程を経由して製品が作られる。

鉄鋼製品は注文に基づく生産が基本であり、さまざまな顧客の要求に対応できるよう、多品種・小ロット生産への対応が可能な設備やシステムとなっている。製造にあたっては、製品仕様、および設備制約など様々な条件を考慮して、適切に各製造設備の運転条件を設定する必要がある。

製鋼工程で化学成分を調整され、鋳造されたスラブは、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および形状に加工される。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。製品の種類によっては、さらに熱処理工程において鋼材の組織および材質が調整されるものもある。

鉄鋼製品の品質指標としては、強度・伸び・靱性などの材質、厚み・幅・長さの寸法、形状、および、微量に含まれる鉄以外の化学成分の量などがある。

品質設計とは、顧客要求の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。製品仕様には、製品のサイズ、強度（引張強度、降伏点、伸び）、靱性（吸収エネルギー、遷移温度）、および、化学成分の含有量などがある。製造条件には、製鋼工程で調整される化学成分、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。品質設計はこれまで知識と経験が豊富な設計者により行われてきた。設計者は顧客要求の品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り、一種の最適化問題を解いている。この最適化を行うために、製造条件から品質を精度よく予測するモデルが必要となる。

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製造前に決定されている。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各製造設備で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品質に目標値からのずれ、すなわち、品質制御誤差が生じる。品質制御誤差を低減するために、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、品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。これを品質制御と呼んでいる。このフィードフォワード制御を行うために、製造条件から品質を精度よく予測するモデルが必要となる。

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、要求品質を満たさない製品が製造される確率が増加してきている。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。

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。これらの計算機は、次の4段階の計算機システムが階層状に結びついている。生産業務管理用計算機 (Level4)、操業管理用計算機 (Level3)、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 (Level2)、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 (Level1) 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、これらの計算機システムに実装される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プロセス計算機 (Level2) に実装されてきたプロセスモデルの数も大幅に増加してきている。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開発が求められている。

鉄鋼製品の品質と製造条件との関係は、複雑かつ非線形であるため、厳密に物理現象を表現するモデルの構築が困難である。また、物理モデルが作成できたとしても、測定できる変数が少ないため、環境変化に応じて物理モデルを迅速に合わせこむことが困難である。そのため、物理モデルに基づく精度の高い設計や制御の実現が困難である特徴をもつ。これを品質指標の一つの材質を例に説明する。

鉄は他の金属素材と比較して、変幻自在な素材であり、加える成分、熱処理の方法を変えることにより、フェライト、セメンタイト、パーライト、マルテンサイト、ベイナイトなどと呼ばれる金属組織が変化し、その材質は大きく変化する。引張強度は200~1500 [MPa]の範囲の素材が開発されており、現状でも新しい材質の開発が活発に行われている。

冶金現象を模倣した物理モデルを構築し、それを用いて材質予測を行う研究は従来から行われてきた。しかし、下記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る。まず、鉄鋼製品の材質は、中間製品のスラブの化学成分、加熱工程、圧延工程および冷却工程におけるそれぞれの製造条件により決定される。

鉄鋼製品の材質を予測するため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、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、各サブモデルをフィッティングするための実績データの収集が非常に困難である。次に、冶金現象を厳密に表現するモデルを構築することは困難である。そのため、調整パラメータをもつ非線形の簡易モデル式が物理モデルとして用いられてきた。この簡易モデル式の調整パラメータは実機での実験データを用いて合わせこむ必要がある。

簡易モデル式は、一種類のモデルパラメータだけでは、多様な製品の全てに対して予測精度が十分に良くない。そのため、製品の種類毎に複数の区分に分割して簡易モデル式のモデルパラメータを持つ必要がある。しかし、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、および原材料価格変動等の環境変化により、所定の材質を得るための製造条件を変更する必要が頻繁に生じる。このとき、過去に調整したパラメータではうまくモデルが合わなくなるので、再調整が必要になる。しかし、モデルパラメータの数が非常に多く、また、モデル式が非線形であるため、モデルパラメータの同定のための計算が難しい。そのため、モデル調整に非常に手間がかかってしまう。

以上の理由で、製造現場においては、物理モデルではなく、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予測モデルとして多用されてきた。

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。

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品質設計や品質制御を行っていたため、品質ばらつきの低減に限界があった。

鉄鋼製品の品質設計と品質制御を行うためには、製造条件と品質との間の因果関係を精度良く表現するモデルが必要であり、環境変化により生じる品質と製造条件との関係の変化に対応して、モデルを迅速に修正する必要があり、また同時に、そのメンテナンス負荷を低減する必要があることを述べた。しかしながら、従来から検討されてきた物理モデリングによる品質予測モデルも線形回帰による品質予測モデルも、その要求に十分に答えることができていない。

計算機技術の発展で大量データの蓄積と高速検索が可能となったことにより、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、近年データサイエンスに大幅な進展がみられ、関心が集まっている。著者らはデータサイエンスによる品質予測の高精度化、ならびに、データサイエンスを応用した鉄鋼製造プロセスの製造条件最適化手法、ならびに、オンライン自動制御手法を提案し、これらを実機プラントに適用した。そして、商用プラントでの品質のばらつ

きの低減結果により，有効性を実証した．

本講演では，上記の実用化例に加えて，**Visual Mining Studio**，ならびに，その**S-PLUS**連携および**R**連携機能を用いて，鉄鋼製品のさまざまな品質指標の予測を，データサイエンスの複数の手法により行った結果について解説する．

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，京都大学博士学位論文（2013）．