

# 製鉄所における数理応用システム



企業レポート

茂森 弘 靖\*

Mathematical systems and applications in steel works

Key Words : steel works, steel products, process control, data mining, optimization

## 1 はじめに

計算機技術の発展により、製造業の現場においても、生産管理、品質管理、および、操業改善のために、大量の製造実績を収集し、データベースに蓄積されるようになってきた。鉄鋼製品の品質を高め、生産性を向上させ、また、製造コストやエネルギーを低減するために、そのデータを有効活用すると同時に数理学を応用したシステムを構築して、より効率的な生産を実現する取り組みが行われている。

本稿では、JFE スチール株式会社西日本製鉄所における、最適化、モデリングなどの数理科学的アプローチを用いたシステム化技術とその応用事例について解説する。

## 2 対象プロセス概要

### 2.1 鉄鋼製造プロセスの特徴

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。製造設備には、高炉、転炉、圧延機、熱処理設備などがある。

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 casting 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。

鉄鋼製品の製造プロセスの一例として、厚鋼板の製造プロセスについて説明する。

製鋼工程で化学成分を調整され、鑄造されたスラブは、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。

### 2.2 製鉄所の計算機システム

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、次に示す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 (Level 4)、操業管理用計算機 (Level 3)、主にモデルベース制御や最適化を行うプロセス計算機 (Level 2)、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 (Level 1) 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、モデルベース制御や最適化を行うためにプロセス計算機 (Level 2) に実装されてきたプロセスモデルや最適化ロジックの数



\* Hiroyasu SHIGEMORI

1966年9月生  
 京都大学大学院工学研究科電気工学先専攻修士課程修了  
 現在、JFEスチール株式会社 スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員  
 修士 プロセス制御、データ解析、最適化  
 TEL : 084-945-3093  
 FAX : 084-945-4059  
 E-mail : h-shigemori@jfe-steel.co.jp

も大幅に増加してきている。また、これらの計算機に蓄積されるデータの数も飛躍的に増加しており、この大量データを有効活用して高度なモデリング技術や最適化技術の開発が望まれている。

### 3 製鉄所での応用事例

本稿では、JFE スチール株式会社西日本製鉄所における、最適化、モデリングなどの数理科学的アプローチを用いたシステム化技術の応用事例について紹介する。

#### 3.1 最適圧延要領決定システム

本システムは、厚鋼板の生産性を向上させるための最適化システムである。

製品品質の造り込みのため、スラブの圧延を一旦中断して所定の温度になるまで冷却した後、再度圧延を行う場合が多数ある。その冷却中に圧延機がアイドル状態にならないように、他の素材の圧延を行うことで生産性を上げている。図1に示すように、それぞれのスラブで圧延時間、冷却時間が異なっている。そのため、どのような順番で圧延を行えば、すべてのスラブの圧延を完了する時間を最小にするかを判断することは困難である。従来は、経験豊富なオペレータの判断により決定していたが、最適解を得られる保証がなく、圧延機のアイドル時間が発生していた。

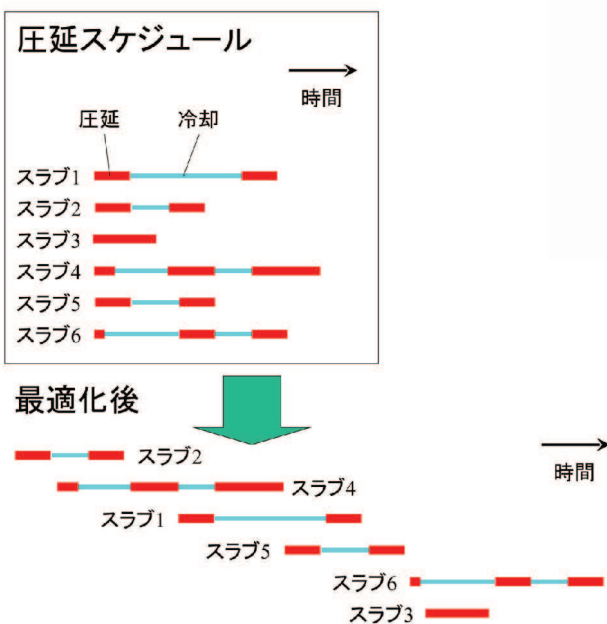


図1 圧延スケジュールと圧延要領  
(文献[1]から引用)

スラブ毎の圧延スケジュールデータを基に、この問題を組合せ最適化問題に定式化して最適解を得て、オペレータにガイダンスするシステムを構築した。この問題は、混合整数計画問題としてモデル化することができる。モデリング言語SIMPLEを用いて記述し、ソフトウェア作成負荷を小さくし、モデルメンテナンスを容易にした。また、商用の数理計画ソフトウェアNUOPTを用いて解くようにすることで、解法のロジックの作成およびメンテナンスを不要とした。なお、使用している解法は分枝限定法である。本システムの適用実験により、約3.9%の圧延時間短縮効果を確認した。

#### 3.2 板取最適化システム

本システムは、厚鋼板の生産性および歩留まりを向上させるための最適化システムである。

板取設計とは、図2に示すように、注文を圧延ロット(スラブ)にまとめる2次元カッティングストック問題であり、その良否は生産性や歩留まりに大きく影響する。また、考えられる組み合わせ候補が膨大な数となるため、実用時間内で最適解を求めることが難しい問題である。さらに、生産性と歩留まりはトレードオフの関係にあり、問題をいっそう難しくしている。従来は、経験豊富な設計者の判断により決定していたが、最適解を得られる保証がなく、生産性または歩留まりの向上に限界があった。

注文データを基に、この問題を組み合わせ最適化問題に定式化して最適解を得て、オペレータにガイダンスするシステムを構築した。この問題は、圧延能率、剪断能率といった生産性、ならびに、歩留まりなどの複数の目的関数を持つ多目的混合整数計画問題としてモデリングすることができる。本システムの解法の説明を図3に示す。

本システムの特徴と適用結果は、次の通りである。

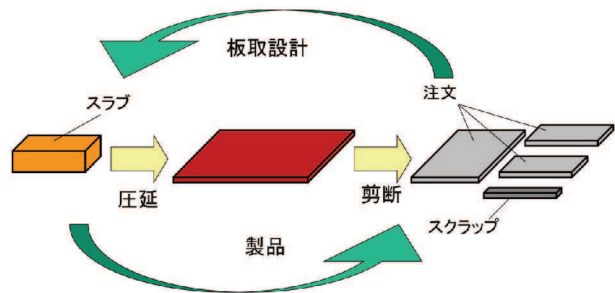


図2 板取設計  
(文献[3]から引用)

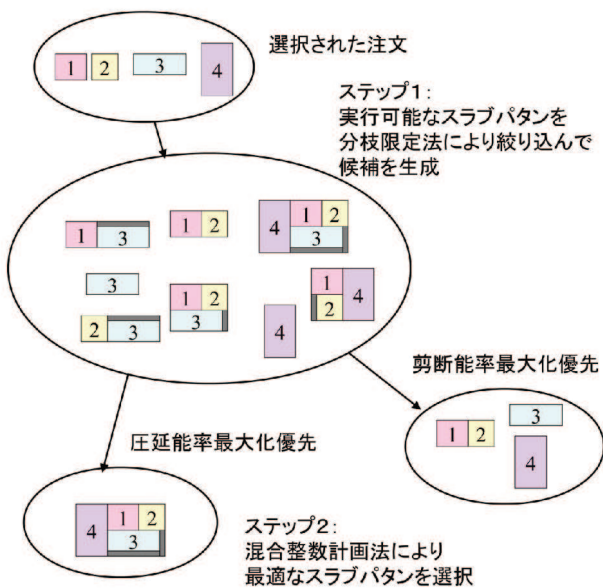


図3 分枝限定法および多目的混合整数計画法による最適化 (文献[3]から引用)

1. 分枝限定法に多目的混合整数計画法を組み合わせる手法を用いた。これにより実用時間内で大規模な組み合わせ最適化が可能となった。
2. 分枝限定法によるスラブパターン生成において、ヒューリスティクスを組み込むことにより高速なパターン生成が可能となった。また、そのヒューリスティクスの追加変更も容易なシステムとした。
3. 目的関数を複数の評価指標の加重平均とし、それぞれの重み係数を調整するようにした。これにより、オーダー構成や設備状況の変化に柔軟に対応できる板取が可能となった。
4. 汎用パソコンを複数台並列処理させることにより、高速な板取最適化システムを構築した。

### 3.3 エネルギーバランス最適化システム

本システムは、製鉄所におけるエネルギー変換設備の操業効率を高め、製鉄所全体のエネルギー使用量を削減するための最適化システムである。

図4に、エネルギーフローの概略図を示す。製鉄所の設備である高炉、コークス炉、転炉から発生する副生ガスをそれぞれ、Bガス、Cガス、LDガスと呼ぶ。また、BガスとCガス、LDガスとCガスを混合したガスをMガスと呼ぶ。これらの副生ガスにはガスホルダが設置されており、一部をバッファとして蓄積することが可能となっている。これら

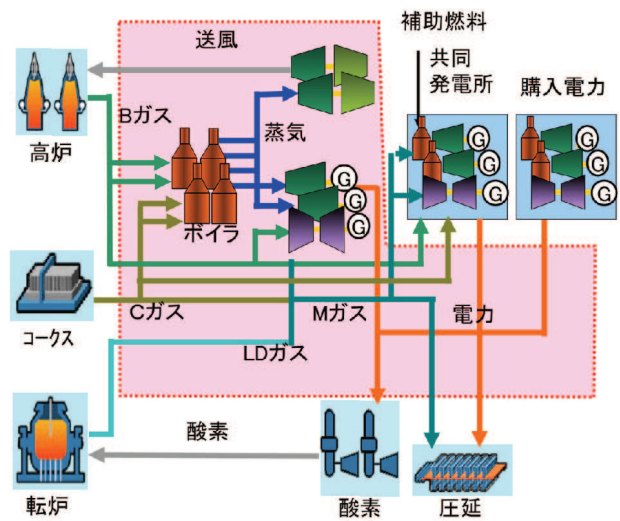


図4 製鉄所のエネルギーフロー (文献[5]から引用)

の副生ガスを送風発電所のボイラやタービンおよび共同発電所への外販にどう配分するかによって操業効率が大きく変化する。従来は、経験豊富なオペレータの判断により決定していたが、最適解を得られる保証がなく、エネルギー使用量の削減に限界があった。

ガス・蒸気・電力の使用量、ならびに、発生量および売買量の実績データと予測値を基に、この問題を組み合わせ最適化問題に定式化して最適解を得て、オペレータにガイダンスするシステムを構築した。この問題は、混合整数計画問題にモデリングすることができる。本システムの特徴は、次の通りである。

1. ガス・蒸気・電力全てのエネルギーを複数期間同時に最適化する全体最適化システムである。
2. ガスホルダの運用および操業安定性も同時に最適化している。
3. 15分周期で実績をフィードバックすることで需給変動の影響を抑えることができる。
4. 見える化やユーザビリティを考慮することで、利用する人のレスポンスを高めている。
5. 繰り返し型開発プロセスやコーチング活用、部品化により開発効率を高め、将来の拡張も容易にしている。

本システムを用いて最適化することにより、外部購入電力を抑制することができ、省エネルギーに貢献することができた。



#### 4 おわりに

本稿では、JFE スチール株式会社西日本製鉄所における、最適化、モデリングなどの数理科学的アプローチを用いたシステム化技術の応用事例として、最適圧延要領決定システム、板取最適化システム、および、エネルギーバランス最適化システムについて紹介した。

鉄鋼製造現場では、古くからモデルベースの最適化技術が数多く実装されており、現在も増え続けている。高精度なモデリング、数理応用システムの開発、ならびにそれらのメンテナンスと性能向上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。様々なプロセスの設計および計画、ならびに、最適化に対して、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。

#### 参考文献

- [1] 茂森弘靖, 岡村勇, 弓削佳徳: 厚板最適圧延要領決定システム, 自動制御連合講演会講演論文集, **46**, 523/525 (2003)
- [2] 茂森弘靖, 岡村勇, 弓削佳徳: 厚板最適圧延要領決定システム, 材料とプロセス, **17-2**, 178 (2004)
- [3] 吉原孝次, 水島成人: 厚板板取最適化システムの開発, 計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, **14**, 116/117 (2005)
- [4] 吉原孝次, 横山賢治: 厚板生産計画における板取最適化システム, JFE 技報, **15**, 18/22 (2007)
- [5] 吉原孝次, 林弘治: 製鉄所におけるエネルギーバランス最適化システムの開発, 計測自動制御学会中国支部計測制御シンポジウム論文集, 12/18 (2008)
- [6] 吉原孝次, 林弘治: 製鉄所におけるエネルギー全体最適化システムの開発, 日本鉄鋼協会第140回制御技術部会, 制技 140-1-4 (2008)

