



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

鉄鋼業におけるシステム最適化技術の開発

Development of System Optimization Technology in Steel Industry

吾郷正俊

Masatoshi Ago

日本製鉄（株）

君津製鉄所 生産技術部

主幹

1 はじめに

鉄鋼会社に入社して14年目を迎えた。これまでの経歴を振り返ると、入社後に製鋼研究開発部に配属され、2012年の新日本製鉄（株）と住友金属工業（株）の統合を機に制御研究開発部へ異動となった。その後、計測・制御研究部を経て2018年4月に発足したインテリジェントアルゴリズム研究センターへ移り、基盤技術に重点を置いた技術開発に取り組んできた。このように所属の変遷はあったが、一貫して主に製鋼工場の計画業務を対象としたシステム開発に携わってきた。本稿では最適化技術に基づくシステム開発事例として製鋼スケジューリング技術について紹介する。

2 製鋼スケジューリング技術の開発

高炉の次工程に位置する製鋼工場は、高炉から供給される溶鉄に対して転炉、二次精錬工程において成分調整を施し、連続 casting 機において半製品である铸片を製造する工程である。転炉で処理を終えた溶鋼は取鍋と呼ばれる容器に注入されRH（Ruhrstahl-Heraeus）などの二次精錬工程を経て連

続 casting 機へ搬送される。この取鍋一杯分の溶鋼をチャージと呼ぶ。また、連続 casting 機において連続して casting する複数のチャージをキャストと呼ぶ。

製鋼スケジューリング問題はキャストの casting 順序、及び、構成チャージの製造条件を所与として、製鋼工場内の製造、及び物流上の制約条件を充足した上で目的関数を最適とするスケジュールを決定する問題である。具体的には設備における各チャージの処理順序、及び、処理開始、終了時刻を決める（図1）。また、同様の精錬処理が可能な設備が複数ある場合には、各チャージに対して処理を実施する設備の割り当てを決めなければならない。

制約条件としては、各チャージが定められた処理工程を順次進むための処理フローに関する制約条件と、各工程において異なるチャージの処理時刻が重複することを禁止する干渉制約がある。加えて同一キャストにおいては切れ目なく連続して複数のチャージを casting するためのキャスト連々制約がある。

目的関数を構成する代表的な評価指標として滞留時間と casting 完了時刻が用いられる。滞留時間は転炉を出鋼から casting を開始するまでの経過時間を表しており、溶鋼温度の低下を可能な限り抑制することで、溶鋼昇温に関するコストを最小化

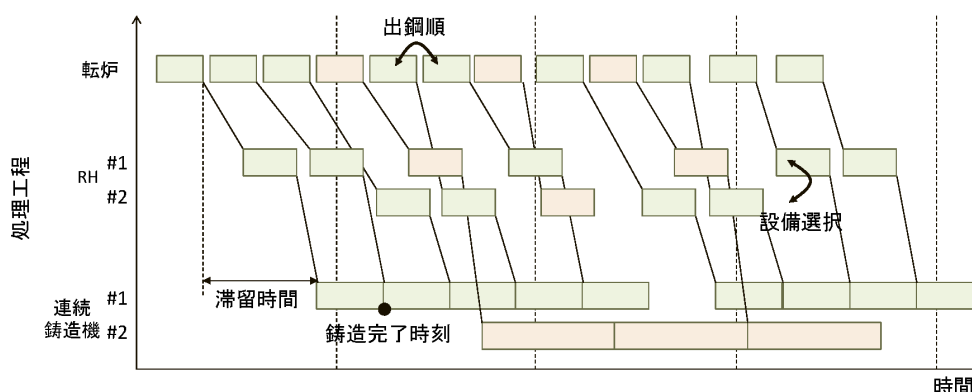


図1 製鋼スケジューリングの概要

することが狙いである。鑄造完了時刻は連続鑄造機の稼働率を最大化することを目的とした生産性を表す指標である。

このように出鋼順や設備選択などの組み合わせ要素を含むスケジュールを立案しようとするれば、考えるべき組み合わせや制約条件が複雑であり、人手によるスケジュール立案では十分に最適化されたスケジュールになっていないという課題がある。またスケジュールと操業進度に乖離が生じれば、最新の実績時刻を反映させてスケジュールの再調整をしなければならず、計画立案に多くの作業負荷を要する。

このような背景から、製鋼工場のスケジューリング業務を対象として、遺伝的アルゴリズムを用いた出鋼順最適化手法¹⁾、数理計画法を用いた手法²⁾などが開発されている。また複雑かつ多岐に亘る制約条件を持つ最適化問題に対して高速に実行可能解を求解することを指向した制約論理プログラミングを用いた手法³⁾などが研究されている。

筆者も製鋼スケジュール問題を数理計画問題として定式化した最適化モデルを構築して実機化した。また操業課題を抽出して改善活動へと繋げるためのツールとして、スケジュールと操業実績を列記した可視化システムを導入して、日々の操業管理に活用されている。

製鋼工場におけるスケジュール管理の特徴は、生産対象が高温溶鋼であることである。溶鋼温度は時間経過とともに徐々に低下するため、工程間の待ち時間が長くなり過ぎると取鍋内において溶鋼の凝固が進行して生産性が著しく劣化する。これを防止するため、溶鋼温度を高く設定すれば、取鍋内耐火物の溶損が進行することにより製造コストが悪化する。したがって、予め溶鋼を余分に製造してパufferに蓄積しておくことは不可能であり、転炉、二次精錬工程は鑄造タイミングに合わせて溶鋼を連続鑄造機に供給する必要がある。さらに、連続鑄造機における操業を安定化させるためには、到着時の溶鋼温度が凝固に適した温度となるよう、鑄造に至るまでの経過時間や操業条件から逆算して転炉、二次精

錬設備は温度調整を施さなければならない(図2)。

このようにスケジュールと密接に関連する溶鋼温度を管理するために、立案されたスケジュールを前提条件として、各工程における目標温度が別途算出されてきた。しかし、溶鋼温度が時間経過につれて低下すること、及び、温度調整に必要な昇温等の処理時間をスケジュール上に確保しようとする処理時間が変わることからスケジュールを再調整する必要がある。そこで、搬送や処理中における溶鋼温度の変化量をモデル化して、溶鋼温度の変化とスケジュールを連立した同時最適化モデルを開発した⁴⁾。

開発モデルは各工程における処理開始、終了時刻を表す変数と、溶鋼温度を表す変数を関連付け、スケジュール変動による影響を反映した溶鋼温度を算出する温度スケジュール最適化モデルとして定式化した。ただし、溶鋼温度の推移は非線形の挙動であるため、そのまま数理計画問題として組み込むと最適化計算が長時間化するおそれがある。そこで、搬送や処理などの期間ごとに区分して、実績データから統計的に時間経過に対する溶鋼温度の低下量を求め、制約条件式に組み込むことで温度推移をモデル化した(図3)。

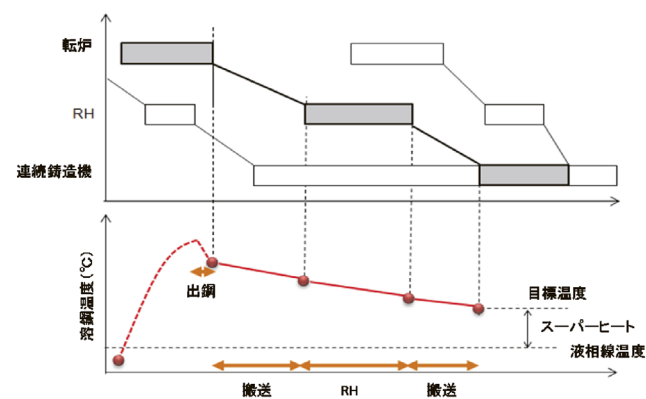


図3 溶鋼温度スケジュール同時最適化モデル概要

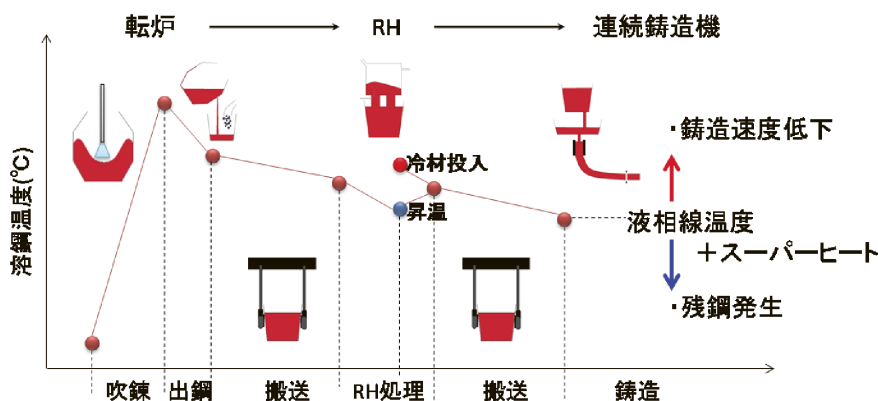


図2 製鋼工場における溶鋼温度管理

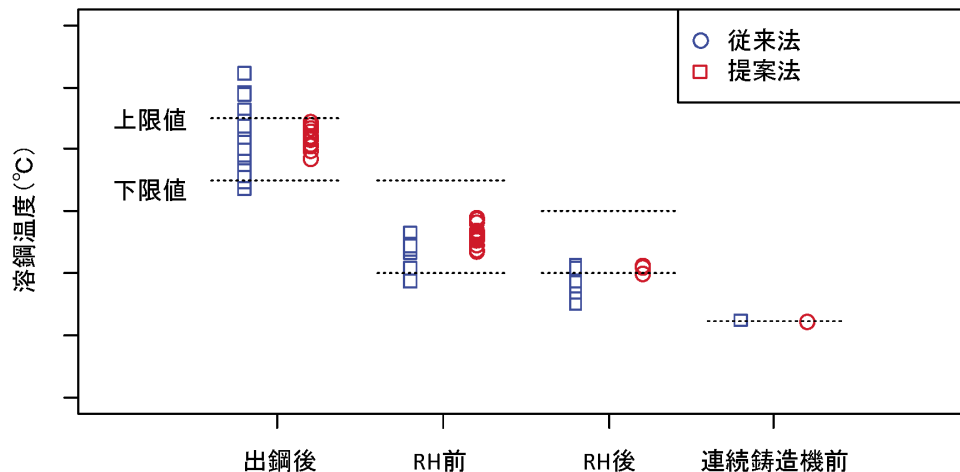


図4 溶鋼温度の目標値分布の比較

本手法により連続鋳造機に到着した時点における溶鋼温度を目標値に一致させ、かつ各工程における溶鋼温度の上下限範囲内となるような操業スケジュールを算出することが可能となる(図4)。

また、操業条件の変動に起因する溶鋼温度のばらつきを抑制して安定鋳造を支援するため、二次精錬工程に適切な温度調整時間を含むロバストスケジューリング技術を開発した⁵⁾。

3 終わりに

計画立案業務を支援するシステムを実機化しようとすれば、即応性、操作性、保守性など最適化アルゴリズムが出力する解の良否以外にも解決すべき課題が存在する。特にこの分野において難しさを感じるのは、モデル化対象が対象工場の複数工程に跨り、各工程において操業方法が日々の改善活動により変化し続けるため、システムの陳腐化が避けられない点である。筆者も現場へのヒアリングを重ねモデルを構築している期間中に操業変化が生じてモデル修正が必要になったことがある。したがって、操業とモデルに差異が生じた場合には、モデルを修正する機構が必要であり、これを実現させる手段として機械学習などの統計的手法や、高度GUI(グラフィカルユーザーインターフェース)による柔軟なモデル修正機能の開発が期待される。また最適化問題として数式モデルで表現できているのは操業の一部であるのに対して、実際の操業には多くの関係者が携わり多様な価値観で操業方針

を合意決定する。したがって、意思決定における人とシステムの役割分担を明確に定義して、モデル化の範囲外に及ぶ事象については人が負荷なくシステムに取り込み所望の結果を導き、立案結果を迅速に関係者間で共有する仕組みを構築しなければならない。

本稿執筆の依頼を頂戴したのちに異動となり現在は製鉄所に勤務している。これまでのアルゴリズム開発の立場から実機適用する側へと移り、より操業現場に近い位置で人とシステムの関わり方を見極めながら、システム化を推進していく所存である。

参考文献

- 1) 藤井聡, 宮原弘明, 藤川浩一: CAMP-ISIJ, 14 (2001), 1000.
- 2) 伊藤邦春, 屋地靖人, 小宮直人, 松村保, 大科正則, 永田俊介: CAMP-ISIJ, 20 (2007), 299.
- 3) 伊藤邦春, 梅村純, 屋地靖人, 浦上武久, 松村保: CAMP-ISIJ, 21 (2008), 1145, CD-ROM.
- 4) 吾郷正俊, 北田宏, 伊藤邦春: CAMP-ISIJ, 28 (2015), 725, CD-ROM.
- 5) 吾郷正俊, 北田宏, 伊藤邦春: CAMP-ISIJ, 30 (2017), 783, CD-ROM.

(2019年3月20日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

近畿大学 工学部 情報学科 教授

谷崎 隆士

私が吾郷さんと出会ったのは、吾郷さんが住友金属工業（現日本製鉄）に入社された年であったと記憶しています。当時、住友金属小倉に勤務していた私は、吾郷さんが緊張しながら自己紹介されていたことを昨日のように思い出します。吾郷さんは、熱心に製造現場に足を運び、精力的に情報を収集されていました。その後、しばらくして、私は今の勤務先に転職しましたので、仕事上の直接のつながりはなくなりましたが、学会などでお会いする度に成長されている姿を頼もしく思っていました。今回の躍動の原稿を拝読し、吾郷さんがこの分野の第一人者となられている事をOBとして嬉しく思うと共に、製鋼工場のスケジューリング問題の新しい展開に研究者としてますます興味を持った次第です。

私は、35年ほど前に住友金属工業に入社し、オペレーションズ・リサーチの研究部門に配属されました。以後、研究部門・製鉄所の勤務を経て、現在に至ります。入社当時のオペレーションズ・リサーチの製鉄プロセスへの適用研究は、一貫操業計画と呼ばれる複数工程に関わる操業に関するスケジューリング問題のアルゴリズム開発が最重要課題でした。鉄鋼各社は、この課題に精力的に取り組んでおり、私は、主に製鋼・熱延に関わるスケジューリング問題を担当していました。吾郷さんが述べ

られているように、この問題は非常に多くの制約条件を有する問題です。さらに、納期遅れ最小化、下工程の設備負荷平準化、製鋼ロット編成充足率最大化、高品質維持などの目的関数を有する多目的最適化問題です。最も難しい点は、制約条件の緩和レベルと各目的関数の優先度が計画担当者および計画立案のタイミングで変動することに対するモデリングです。この問題に対し、数理計画的アプローチ、マンマシンインターフェースを含む機能分割的アプローチなど、様々なアプローチを試みしました。鉄鋼業のスケジューリング問題は、いずれの生産工程においても同様の問題があり、永遠の課題ではないかと思っています。この問題について、岡山大学の小西教授（故人、元神戸製鋼所）が主査を務められた鉄鋼協会の研究会で鉄鋼各社の研究者や大学の先生と議論したことも楽しい思い出です。大学教員となってから、鉄鋼業以外の企業から最適化問題について、共同研究や技術相談を受けることがあります。鉄鋼業での知識・経験を応用できることが多くあります。改めて、鉄鋼業の最適化研究のレベルの高さと裾野の広さを実感しています。

最後に、製鉄所に勤務されることで、研究面でも人間面でもさらに大きく成長されることを確信し、ペンを置きます。がんばれ吾郷！

JFEスチール（株） スチール研究所 主任研究員

吉成 有介

吾郷さんとは鉄鋼協会学術部会の会合でお会いしたのが初めてだったと思いますが、以前から製鋼スケジュール最適化に関する技術開発を行っていることは存じておりました。

部会や講演大会でお会いした折には、大学の先生方を交えてシステム、最適化技術分野に関して、鉄鋼協会の方々含めもっと理解してもらうにはどのようにしたら良いか、部会活動の今後の方向性に関する議論や情報交換をさせて頂いていました。

吾郷さんが一貫して技術開発に取り組んでこられた製鋼スケジュール問題は鉄鋼の生産計画において生産性、品質安定性を求められる重要な領域で、以前より各社が色々と取り組んできました。

この問題はいわゆる組合せ最適化問題と呼ばれるもので鑄造順、各チャージの通過工程が与えられた上で、二次精錬設備の占有制約や連々鑄制約等を満たし、与えられた期間での転炉チャージ数や連々鑄数最大化等を目的に最適なスケジュールを求めます。

解法としては制約条件と目的関数を定式化してGA（遺伝的アルゴリズム）等のメタヒューリスティクス手法や数理計画ソルバを用いて解いていきます。

前述した手法によりスケジュールを作成する事はできますが、本稿で触れられているように、実操業では適切な溶鋼温度管理の必要性や操業変動による温度ばらつきが発生します。

これらの課題に対してスケジュールと溶鋼温度の変化を連立させた同時最適化モデルと操業変動による外乱に対応したロバストスケジューリング技術等、吾郷さんがやられた技術開発は製鋼スケジュール問題の1つの到達点ではないかと思っています。

最後に触れられているように、機械学習、統計手法による操業変更への対応、使いやすさを考えたGUIやシステムと人役割分担の明確化等、今後の方向性に関しても明確なビジョンをお持ちで、これらに関して筆者も大きく共感します。

今回、基盤技術の技術開発部署からから製鉄所勤務になられ、学術部会からも離れてしまうとの事で個人的に非常に残念です。

今後、実操業に近い位置で技術開発の視点を持ちつつ、所のシステム企画、実機化、運用を進めていってください。今後のご活躍を期待しております。