

技術報告

汎用型スケジューラ開発システムとその適用事例

Genetic Scheduler Development Systems and their Application

森 純 一*
Junichi MORI

小林 敬 和
Hirokazu KOBAYASHI

吾 郷 正 俊
Masatoshi AGO

古 川 昭 仁
Akihito FURUKAWA

抄 録

鉄鋼業では、品質・コスト・納期などの評価指標を考慮したうえで各製品を各工程で処理する順番・タイミングを決定するスケジューリング業務が数多く存在する。これらスケジューリング業務をシステム面から支援することを目的として、数理最適化モデルを実装したスケジューリングシステムをプログラミングフリーで開発できる“汎用型スケジューラ開発システム (FitOptimizer)”について述べた。

Abstract

In the steel industry, there are many scheduling tasks that determine the order of processes for each product and their timing in consideration of evaluation indicators such as quality, cost, and delivery. To assist with these scheduling tasks, we developed genetic scheduler development systems for developing schedulers without programming.

1. 緒 言

製造業では、様々な工程で様々なリソースを用いて、原料から製品を造り分けて製造することや、部品を組み立てて製品を製造すること等が行われている。これらのリソースを有効活用し、品質、コスト、納期などの評価指標を満足する生産を行うためには、各製品の各工程での処理タイミングと順序を適切に決定することが必須である。しかしながら、生産現場では、多数の原材料、中間製品、製品が存在し、かつそれらの加工や搬送などを行うためのリソースが複雑に関連し合っているため、考慮すべき制約条件が複雑となり、評価指標が最良となるスケジュールを立案することが困難であった。

そこで、日本製鉄(株)では、このようなスケジューリング問題を数学的に解決する手法として、数理最適化を用いて生産計画、スケジュールを作成する技術を開発してきた。数理最適化とは、様々な分野の課題に対して、対象となる問題を数式で記述し、数理的な計算手法で最適解を求める手法である。近年の計算機能力の向上に加えて、数理最適化ソルバーに代表される様々な計算アルゴリズムも著しく進歩しており、従来では立案が困難であったスケジューリング問題に対しても、品質、コスト、納期などの評価指標が最適となるスケジュールを立案することが可能

になってきている。

一方で、製造現場のスケジューリング問題に数理最適化を適用するためには、数学及びプログラミングの専門的知識を有している必要がある。鉄鋼生産プロセスでは、品種や工程が多岐に亘り、多種多様なスケジューリング業務が存在しているが、数理最適化の専門家がこれら全ての業務改善を担うことは現実的ではない。また、スケジューリングシステムの開発には高度なシステム実装技術を要するため、本番システム立上げ後も、操業・設備の変更の都度、専門家がシステムをメンテナンスする必要があった。このため、改善PDCAを迅速に回せず、スケジューリングシステムの陳腐化が進みやすかった。

このような背景のもと、数理最適化やプログラミングの専門知識を持たないユーザーが主体となって、生産現場のスケジューリング問題に対して数理最適化を適用して解決する、さらにはスケジューリングシステムを操業や設備変化にあわせて持続的に改善し続ける、ことを狙いとして、数理最適化モデルをプログラミングフリーにGUI (Graphical User Interface) 上で作成、実行/評価できる汎用型スケジューラ開発システムを日鉄テックスエンジ(株)と共同で開発した。2章では、汎用型スケジューラ開発システムの仕組みについて紹介する。3章では、製鋼工場を対象に、生産性とコスト(放熱による昇温コスト)のバランスを考慮

* プロセス研究所 インテリジェントアルゴリズム研究センター 生産マネジメント研究室 研究第一課 上席主幹研究員 Ph.D. 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

したスケジューラの開発事例を紹介する。4章では、製鋼工場の耐火物工事計画を対象に、設備・置場・作業員の適切な割当を実現するスケジューラの開発事例を紹介する。

2. 汎用型スケジューラ開発システム

生産スケジューリングシステム開発では、実装や保守を容易化することが重要である。ところが、数理モデルの定式化には数学の知識が必要であり、またモデル実装負荷も高く（ソフト数万行）、人がプログラムを作成するためバグも発生しデバッグ作業に多大な時間がかかるため、(1)実機導入までに時間がかかる、(2)導入後メンテナンス負荷が高く、タイムリーな対応ができない、といった課題があった。そこで、日本製鉄は日鉄テックスエンジと共同で、典型的なスケジューリング問題に対して、最適化やプログラミングの専門知識を持たない人でもプログラミングフリーで簡単な画面入力のみで数理最適化モデルを自動生成できる独自の最適化技術を開発した²⁾。

当該技術を用いた最適化ツール (FitOptimizer) では、製品や中間製品といった処理の主体となる各オーダーに対して、搬送や処理の一連の流れをタスクとして定義し、その過程で利用される人・設備・置場などをリソースとして定義することによって、計画問題の一般化を図り、生産・物流工程フローのグラフィカルな登録を可能としている。図1はオーダー毎の一連のタスクとこれらタスクを実行するために必要なリソースを登録する画面を示している。登録された生産・物流工程フローは独自のデータベースへ格納され、その情報を元に数理最適化モデルを自動生成することで、数理最適化の知識を持たないユーザーも容易に計画立案を行うことができる。

簡単なケースを式(1)(2)に表す。各式は以下のような関係式を表している。

・式(1)は各オーダー $o \in O$ 、各タスク $p \in P$ の処理時間を

$PT_{o,p}$ としたときのタスクの開始時刻 $Ts_{o,p}$ と終了時刻 $Te_{o,p}$ の関係を表す。

・式(2)はタスク $p1$ の終了以降にタスク $p2$ の処理が開始することを表す。

$$Te_{o,p} - Ts_{o,p} = PT_{o,p} \quad \forall o \in O, \forall p \in P \quad (1)$$

$$Te_{o,p1} \leq Ts_{o,p2} \quad \forall o \in O \quad (2)$$

また、生産・物流工程における制約条件や目的関数を画面から登録することができ、その情報を元に数理最適化モデルを自動生成することができる。簡単なケースを式(3)(4)(5)に示す。

・式(3)(4)はオーダー $o1$ とオーダー $o2$ が同一リソース $r \in R$ を同時に使用することができない制約を表す。

・式(5)は、各オーダー $o \in O$ 、各タスク $p \in P$ の開始から終了までの滞留時間 (= $Te_{o,p} - Ts_{o,p}$) の総和の最小化と、終了時刻 $Te_{o,p}$ の総和の最小化を図る目的関数を表す。

$$Te_{o1,p} - M(1 - \delta_{o1,o2,p,r}) \leq Ts_{o2,p} \quad \forall p \in P, \forall r \in R \quad (3)$$

$$Ts_{o1,p} + M(1 - \delta_{o1,o2,p,r}) \geq Te_{o2,p} \quad \forall p \in P, \forall r \in R \quad (4)$$

$$\text{minimize } W_1 \sum_o \sum_p (Te_{o,p} - Ts_{o,p}) + W_2 \sum_o \sum_p Te_{o,p} \quad (5)$$

ここで、 $\delta_{o1,o2,p,r}$ は0-1の値しかとらないバイナリ変数である。また W_1 と W_2 は各評価指標の重みパラメータでありユーザーが画面から入力することができる(図2)。

これらにより、上述の生産・物流工程フローを含めデバッグ済みの洗練された最適化モデルが自動生成され、高生産・高品質なシステム構築が可能となる。また、設備の故障や生産トラブルなど、急な変更が必要になった場合にも、ユーザーが画面上で容易に計画修正を行うことができ、一部の解を固定して残りの部分を最適化モデルにより求解する機能を設けることによって、人とシステムが強調した

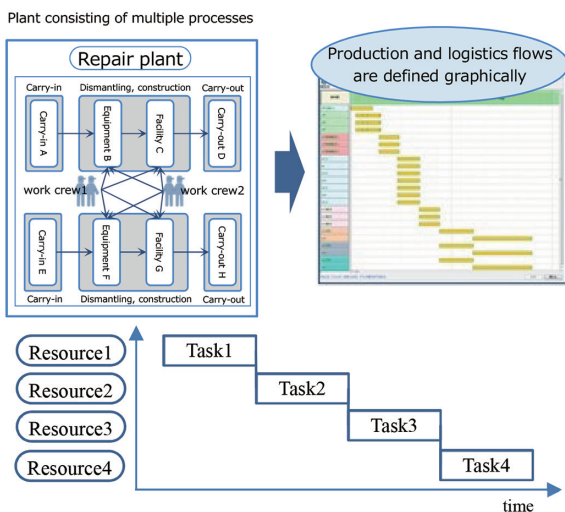


図1 生産・物流工程フローの定義
Definition of production and logistics flows

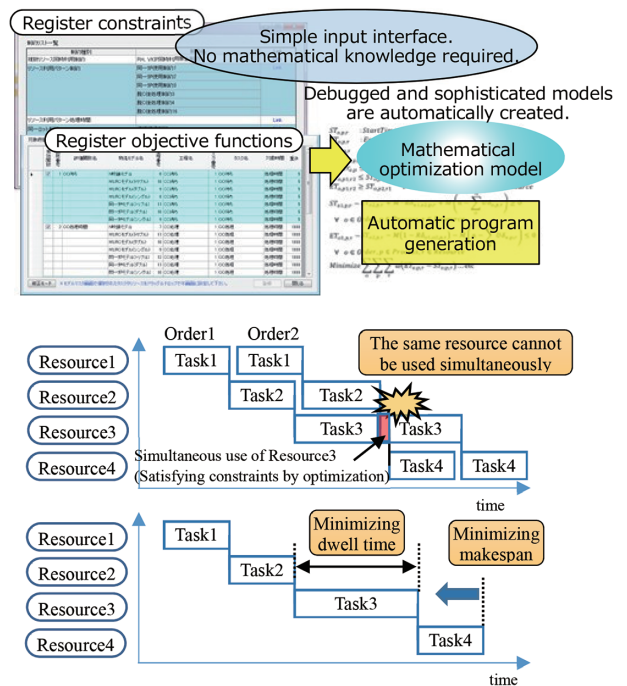


図2 制約条件、目的関数の定義
Definition of constraints and objective functions

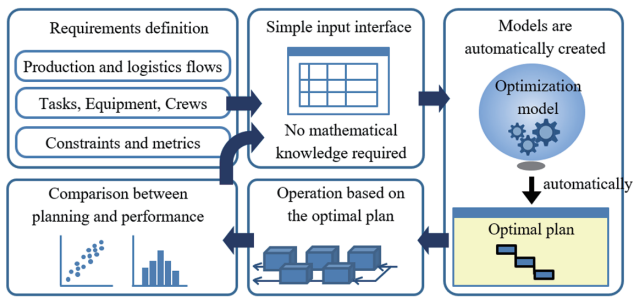


図3 一貫最適化システム
Consistent optimization system

スケジュールを立案することができる。さらに計画対実績差異の自動抽出・定量評価が可能な仕組みも構築し、操業環境変化を迅速に次のアクションに反映することで、継続的な現場力向上が可能な一貫最適化システムとして実現している(図3)。次章以降では上述の最適化ツールを用いた適用事例を示す。

3. 適用事例1：製鋼スケジューラ

製鋼プロセスは、高炉で製造された銑鉄に対して、転炉(CV)、二次精錬設備(RH)にて不純物の除去と成分調整を行い、連続铸造機(CC)において中間素材である铸片を製造する工程である。転炉工程で成分調整を終えた溶鋼は取鍋と呼ばれる容器に注がれ、二次精錬設備を経由して連続铸造機に搬送されたのち、固体の鋼に連続的に冷却し固められる。この取鍋一杯分の溶鋼をチャージと呼び、連続铸造機にて連続して铸造する複数チャージのまとまりをキャストと呼ぶ。製鋼プロセスにおいては、生産性の観点からは設備のアイドル時間を短くするとともに、待ち時間による溶鋼の放熱を抑制して転炉吹止温度を低減することにより昇温コストの削減や耐火物の長寿命化を狙うことが重要である。この生産性向上と昇温コスト低減を鑑みたるスケジュールを作成する技術に関して日本製鉄での取り組みを述べる。

製鋼スケジューリング問題は連続铸造機におけるキャストのチャージ構成、铸込順序を所与として、製鋼工場内の製造、及び物流上の制約条件を充足したうえで目的関数が最適となる転炉、二次精錬及び連続铸造機の操業スケジュールを決定する問題である。制約条件としては、各チャージが定められた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複数チャージを铸造するためのキャスト連々铸制約がある。また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铸造完了時刻が用いられる。滞留時間は転炉を出鋼してから铸造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するこ

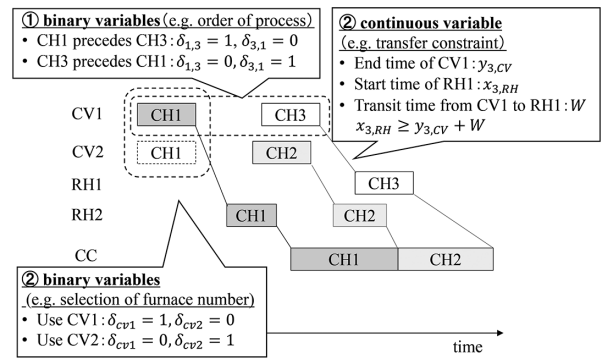


図4 制約条件の定式化の例
Example of constraints formulation

とが狙いである。铸造完了時刻は連続铸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。

本事例では、このような製鋼スケジューリング問題に対してFitOptimizerを用いたスケジューリングシステムを開発した。FitOptimizerでは、製鋼スケジューリング問題における上述の制約条件や目的関数を登録することで、製造設備(炉号)選択を表す0-1変数と、製造時刻を表す連続変数を含む数理最適化モデルを自動的に生成し、最適なスケジュールを作成することができる(図4)。

ところが、転炉出鋼パターンの増加、二次精錬工程の複雑化、生産量増による立案対象チャージの増加、などに伴う0-1変数の組合せ数の増加が課題であり、例えば60チャージを転炉2基で処理する場合、チャージ処理順と転炉へのチャージ割り当ては約 10^{100} 通り存在する。そこで、CC処理開始時刻が早いものから順に立案対象チャージを抽出し、抽出したチャージに対してスケジューリング問題を解くことを繰り返す手法を開発することで実行時間内(約5分/1日分)での立案を可能にした。

铸造時における溶鋼温度を適切に制御するため、溶鋼温度を考慮した最適化手法も開発している。従来、溶鋼温度管理は立案された製鋼スケジュールにおける各チャージの処理時刻を前提として、各工程における目標温度が算出されてきた。しかしながら目標温度を達成するために必要な温度調整時間をスケジュール上に確保しようとする製鋼スケジュールを見直す必要がある。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(図5)。本手法により溶鋼温度が各工程で定められた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った。

開発したスケジューリングシステムを導入した結果、表1に示す通り導入前と比較してCC前待ち時間を6%減少することができた。これにより、転炉吹止温度を低減することができ、昇温コストの削減や耐火物の長寿命化が期待でき年間数千円のコスト改善を実現している。

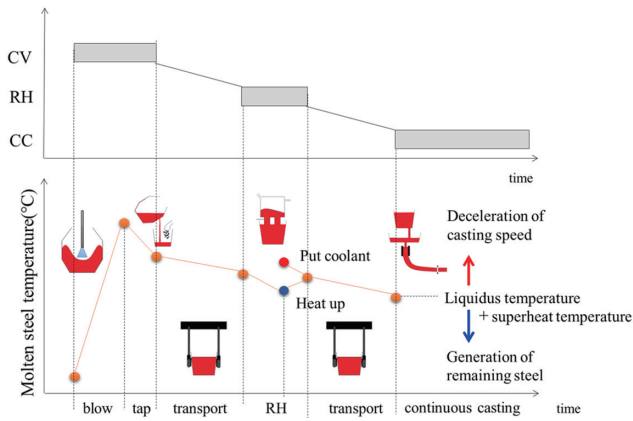


図5 溶鋼温度スケジュール同時最適化モデル
Model for molten steel temperature and schedule

表1 最適化の効果
Effect of optimization

	Manual	Optimize
Waiting time at CC	1.00	0.94

4. 適用事例2：耐火物補修スケジューラ

鉄鋼における耐火物は、溶銑・溶鋼と直接触れるため損耗が早く、定期的な修理・交換によって安定稼働させている。この修理を効率的、円滑に行うには、精度の良い計画の立案が重要である。耐火物修理場では、複数の炉設備を共通のリソース（場所、人、修理設備）で修理しており、計画作成精度向上には担当設備の枠を越えた計画立案が必要となる。また、突発での緊急修理時には、最適な計画を即時に立案することが必要となる。しかし、リソース制約を考慮した計画の全体調整には、高度な技能を要し熟練の計画担当者であっても、施工クルーの休日対応や残業対応を発生させてしまう場合がある。

本事例では耐火物を有する設備の中で、図6に示すRH（Ruhrstahl-Heraeus）の工事計画における適用事例について述べる。RHは、転炉での一次精錬完了後の溶鋼を、真空槽を使い脱炭、脱ガス（水素・窒素）、脱酸する。また、真空槽と取鍋の間で溶鋼を還流させることで、脱ガス処理の高効率化を実現している二次精錬設備である。

RHの工事計画における目的関数と制約条件は、以下に示す通りである。

(1) 目的関数

- ① 残業時間の最小化、② 施工クルー増員の最小化、③ 搬送の手間（場所の移動）の最小化

(2) 制約条件

- ① 修繕の種別毎に、要求される修繕の内容に沿った所要時間の確保が必要
- ② 修繕の種別毎に、要求される作業場所の確保が必要（図7）
- ③ 修繕の種別毎に、要求される能力を持った施工クルー

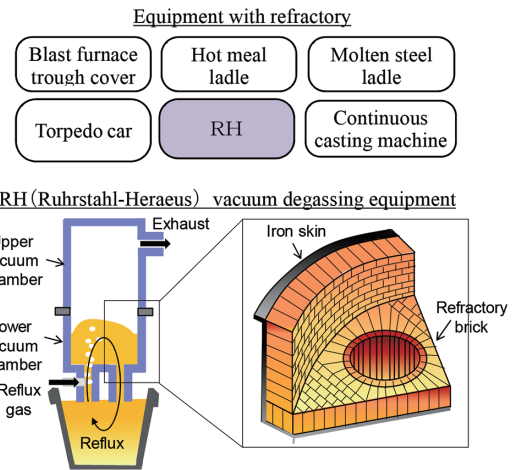


図6 耐火物対象と今回取り組み RH
Equipment with refractory and the target of this scheduler

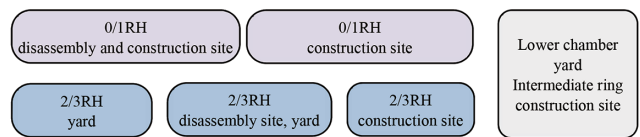


図7 RH 下部槽修理場レイアウト例
Example of RH lower vacuum chamber repair place

表2 作業スキル例
Example of work skills

Repair target	Work skills			
	Loading and unloading	Disassembly	Construction	Inspection
Refractory	2 persons	2 persons	4 persons	1 person
Iron skin	2 persons		3 persons	1 person

が必要（表2）

④ 納期は絶対遵守が必要

FitOptimizer を用いて工事計画における制約条件や目的関数を登録して、数理最適化モデルを自動生成し最適な計画を自動作成する。これを使って、設備・置場・施工クルーの適切な割当を実現することができた。その結果、納期遵守率 100%、施工クルーの休日対応削減など、熟練者と同等以上の良好な結果を得ることができた（図8）。

5. 結 言

本稿では、生産・物流スケジューリング問題を対象とした数理最適化モデルをプログラミングフリーに GUI 上で作成、実行/評価できる汎用型スケジューラ開発システムである FitOptimizer と、その適用事例について紹介した。1つ目の適用事例では、熱バランスと生産性を考慮した製鋼スケジューラを開発し、製鋼プロセスにおける転炉吹止温度を低減することで省エネに貢献している。また2つ目の適用事例では、耐火物の補修計画に FitOptimizer を適用することによって、納期を 100% 順守しつつ施工クルーの休

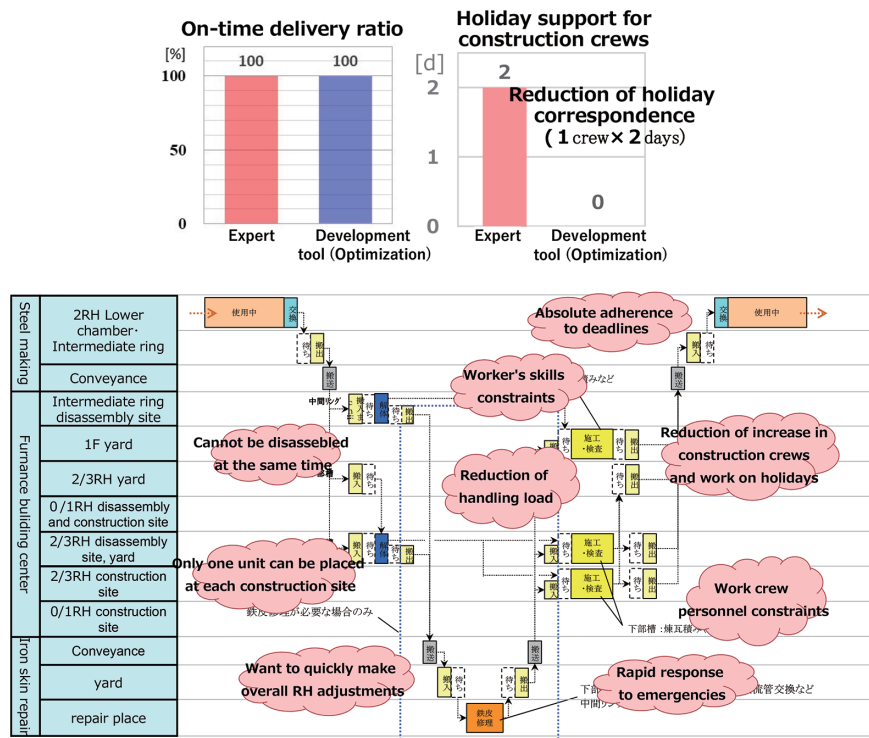
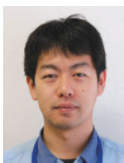


図8 工事計画結果例
Example of construction plan result

日対応時間を0にする計画を自動立案できることを確認した。また、FitOptimizerで実装されたこれらスケジューラは実機システムとして日本製鉄の各製鉄所で稼働中である。実機システム化後も操業・設備変更起因するシステム改造要望は多数発生しているが、FitOptimizerの導入により保守性が高まったことで、短期間・低コストにシステムメンテナンスを実現できている。

参考文献

- 1) 中川繁政, 伊藤邦春, 小林敬和, 吾郷正俊, 鷲北芳郎, 古川昭仁: 鉄鋼生産プロセスにおけるOR手法の適用事例, 日本オペレーションズ・リサーチ学会シンポジウム, 2019
- 2) 古川昭仁, 稲富峰憲, 杉下聡史, 梅田公範, 片岡俊貴, 小島正義, 小林敬和: 生産・物流最適化技術の開発と今後の展開, TEXENG Report. (4), 15-19 (2021)



森 純一 Junichi MORI
プロセス研究所
インテリジェントアルゴリズム研究センター
生産マネジメント研究室 研究第一課
首席主幹研究員 Ph.D.
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



小林敬和 Hirokazu KOBAYASHI
プロセス研究所
インテリジェントアルゴリズム研究センター
生産マネジメント研究室 研究第一課長
博士(システム情報学)



吾郷正俊 Masatoshi AGO
プロセス研究所
インテリジェントアルゴリズム研究センター
生産マネジメント研究室 研究第一課
首席主幹研究員



古川昭仁 Akihito FURUKAWA
日鉄テックスエンジ(株)
電計事業本部 システムソリューション事業部
CX推進部 オペレーションズリサーチグループ
グループ長