

## 技術論文

## 鉄鋼生産プロセスにおける生産計画, スケジューリング技術

## Production Planning and Scheduling Technology for Steel Manufacturing Process

伊藤 邦春*	黒川 哲明	塩谷 政典
Kuniharu ITO	Tetsuaki KUROKAWA	Masanori SHIOYA
小林 敬和	吾郷 正俊	森 純一
Hirokazu KOBAYASHI	Masatoshi AGO	Junichi MORI

## 抄 録

鉄鋼生産プロセスは、多品種小ロット注文を、各工程の大ロット生産を指向しつつ、注文一品単位の製品仕様と納期を満足するように天然原料から製品を作り分けるV型の生産プロセスである。大規模かつ複雑な生産工程のため、生産計画、スケジューリング業務の負荷は高く、システム技術による支援ニーズは大きい。新日鉄住金(株)における生産計画、スケジューリング業務での意思決定を支援する最適化アルゴリズムの開発状況と今後の展望について述べた。

## Abstract

The steel manufacturing process is a V-type production process that separates products from natural raw materials so as to satisfy product quality and delivery times of each order while orienting large lot variety of small lot orders, making large lot of each process. Because of the large-scale and complicated production process, the burden of production planning and scheduling work is high, and support needs by system technology are strong. In this paper, we describe the development status and future prospects of optimization algorithms to support decision making in our production planning and scheduling tasks.

## 1. 緒 言

鉄鋼生産プロセスは、鉄鉱石、石炭などの原料を海外から輸入し、自動車、造船、橋梁、家電など様々な顧客の要望に応じた鉄鋼製品を、高炉→転炉→連続鋳造→圧延→焼鈍→表面処理等の工程を経て作り分ける、いわゆるV型(分流型)フローショップの生産形態である。製品仕様は、強度、靱性などの材質、鋼材表面や内部の品位、厚みや幅などのサイズ等、製品用途に応じた様々な条件からなり、その数は品種にもよるが数千から数万種にも及ぶ。また、その製造条件は、溶鋼成分、圧延サイズ、焼鈍温度、めっき種などの組み合わせからなり、製品仕様に準ずる規模の多様性を持つ。

生産計画、スケジューリング業務は、このような各工程で製造条件や、納期を守りつつ、各注文の各工程での処理タイミングと順序を決定する業務である。品質、コスト、納期など様々な評価指標を考慮した総合的な判断が必要である。特に鉄鋼生産プロセスでは、同一製造条件の製品を

連続して製造する、いわゆる“大ロット生産”が品質とコスト(生産性含む)の面で有利であり、指向されてきた。しかし、前述したように、製品の製造条件は工程により異なり、納期も異なるため、品質、コスト、納期のバランスをとった工程一貫での生産計画を立てることは難しく、熟練者のノウハウに依存しているのが現状である。

一方、近年の熟練立案者の世代交代の進展、高級鋼シフトに伴う製造条件の難化、働き方改革に向けた業務負荷低減、などの面から、生産計画、スケジューリング業務をシステム面から支援する技術のニーズが高まっている。また、計算機技術面では、計算機本体の能力向上に加え、数理最適ソルバーに代表される様々な計算アルゴリズムも進歩しており、従来は実用化が困難であった領域のシステム支援が可能になってきている。

このような背景のもと、新日鉄住金(株)では、原料、製鋼、熱間圧延(以降、熱延)、物流等々、各工程の生産計画、スケジューリング業務を支援する技術を開発してきた。2章では、原料輸送から製鉄所内での物流計画までの一貫生

\* 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 所長 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

産、物流の最適化に取り組んだ事例を紹介する。3章では、製鋼工場を対象に、生産性とコスト（温度）のバランスを考慮したスケジューラの開発事例を紹介する。4章では、熱延工場を対象に、複雑な製造制約条件を持つ問題に対して数理計画法における厳密解法を適用した事例を紹介する。

近年では、個別工程だけでなく、複数工程一貫での生産計画立案を支援するニーズも高い。前述したように各工程の製造ロット条件が異なるため、各工程単独の大ロット化は上下工程間での生産タイミングの同期化を阻害し、仕掛の増大や製造工期のばらつきを招く。5章では、厚板工場を対象に、複数工程一貫での製造標準工期を機械学習により高精度に予測する技術を紹介する。6章では、この製造標準工期を用いて、納期にジャストインタイムで製造を開始することを指向しつつ、製鋼工場の大ロット化や圧延後の精整工程の負荷平準化とのバランスを考慮した厚板週間計画の立案支援技術を紹介する。

工程一貫での生産物流整流化のためには、工場内だけでなく、工程間の物流も整流化する必要がある。7章では、物流の予測と制御の基盤となる分散事象シミュレータの開発事例を、8章では、製鋼工場と熱延工場間のスラブ（半製品）物流指示に数理最適化手法を適用した事例を紹介する。

一方、適用対象によっては、全ての条件を計算機上でモデル化することが困難なケースや、計算機では容易に実現できない計画立案根拠の提示が重要なケースがある。2.2節及び9章では、複雑な業務調整を伴う鉄鋼生産計画、スケジューリング業務においてしばしば発生するこの問題に対する取り組みの1つとして、人との協調型スケジューラの開発事例を紹介する。

## 2. 原料一貫生産・物流最適化

日本の鉄鋼業全体で消費される鉄鉱石、石炭（原料）の

量は、年間数億トンにも達する。石炭はコークス炉と呼ばれる巨大な釜で蒸し焼きにされコークスとなる。コークスは鉄鉱石とともに高炉に投入され、高温で溶解、化学反応させ鉄鉱石に含まれる酸化鉄がコークスにより還元されることで、炭素を5%弱含んだ鉄（銑鉄）となる。この銑鉄は様々に成分調整され、薄板、厚板、ビレットといった最終製品に加工される。このように莫大な量の原料、銑鉄、半製品、製品を取り扱うために、日々大量の物流が発生し、そのコストは多大である<sup>2)</sup>。このため物流整流化による操業安定とコスト削減とともに、顧客からの品質要求に応え、高品質な製品の維持をするために、鋼材の成分調整は必須であり、これを実現するための原料の輸送、製造工程における生産計画と物流計画の立案が、重要な役割を担っている。

これらの背景のもと、新日鐵住金では、原料に関連する生産と物流を全社トータルとして適正化、高度化することを目指して、原料一貫生産・物流最適化に取り組んできた。取り組み対象は、本社と箇所（各所の製鉄所）に広がっている（図1）。本社の取り組み対象は、全社視点でメリットを考慮して、複数の製鉄所に対する年間計画、期計画を大枠として決定するものである。箇所では、これらの決定された計画を受けて、これら大枠の中で箇所が日々の業務を実行できるように、日々の計画を立案する構造となっている。具体的には、本社での対象は、①全社での出銑量（銑鉄の生産量）、コークス生産量を考慮して原料を輸送する船舶を確保する船財源計画、②購買量を勘案しながら、確保した船舶をどの積地（鉱山・炭鉱）に配船するかを決める積地配船計画、③積地で原料を積載した船舶をどの製鉄所に配船するかを決める揚地配船計画、④これら運ばれた原料と出銑量、コークス生産量を勘案しながら使用する原料の割合を決定する配合計画、が存在する。

また、箇所での対象は、本社にて決定されたこれら船舶、配合計画を元に、箇所の日々の実操業に対応できるように、

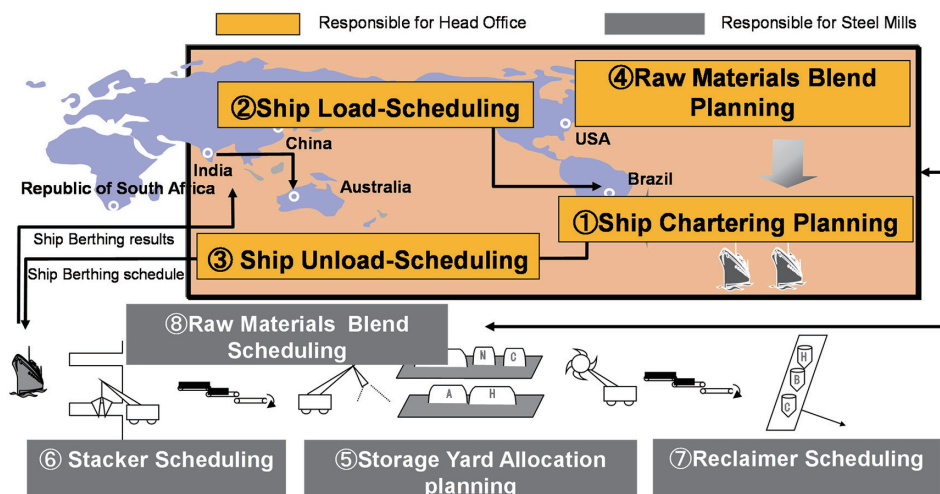


図1 原料に関連する生産・物流計画対象  
Target of planning, scheduling and logistics related to raw material

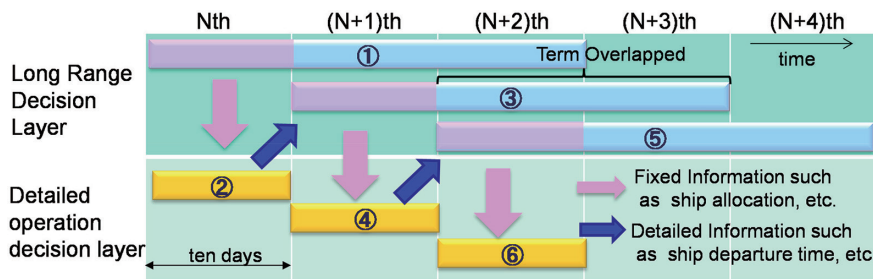


図2 階層型時間分割逐次予測型アルゴリズム概要<sup>4)</sup>  
Overview of the hierarchical dividing term and moving horizon algorithm

⑤原料のヤードへの受入れ場所、払出し場所を決めるヤード配置計画、⑥ヤード配置計画で決定された受入れ場所に受入れるための搬送設備の稼働時刻を決める受入れ計画、⑦ヤード配置計画で決定された払出し場所に払出すための搬送設備の稼働時刻及び払出した原料を一時貯蔵するサイロ状の貯蔵槽を決める払出し計画、⑧本社機能で決定された期計画、月次計画ベースの配合計画を日々の実操業に合うように調整する配合計画の作成、である。これらの対象に対して、原料需給の情報を本社と箇所一元管理できるシステムを開発するとともに、各対象に対して最適化技術を導入してきた<sup>3)</sup>。

ここでは、一例として、本社での業務である原料輸送配船最適化システム<sup>4)</sup>と、箇所業務である原料ヤード配置適正化システム<sup>5)</sup>を説明する。

## 2.1 原料輸送配船最適化システム

### 2.1.1 業務内容

本業務は、契約済の船舶の配船情報(船型、量、現在地)、契約可能船舶情報、契約購買量、各製鉄所での原料使用情報を元に、各製鉄所の在庫を確保する制約条件を守りながら、船財源と各船舶の積揚地での配船計画を決定するものである。船舶は契約する船型、契約形態、寄港パターンにより輸送費用が異なるため、船財源確保の構成、輸送ルートに適正化することで費用を抑えることが可能となる。

しかし、輸送時間が短い中国と長いブラジル等、船舶の輸送条件が混在する中で、各製鉄所の在庫切れを回避しながら、揚地バースでは1時間単位精度の船舶動静を考慮した半年先までの配船計画を適正化することは容易ではない<sup>6,7)</sup>。

### 2.1.2 スケジューリング機能の構成

長期計画の組み合わせ要素と量決定要素とを同時に考慮することは計算規模・時間の観点から課題があった。開発システムでは、これら膨大な条件を考慮するため、長期的に大枠決定する階層と、この決定結果を固定情報として入出港タイミング等を詳細に最適化する階層に分割した。さらに各階層で立案期間を時間軸で分割し、各期間で数値計画法とシミュレータを連動させる階層型の時間分割を繰り返す。

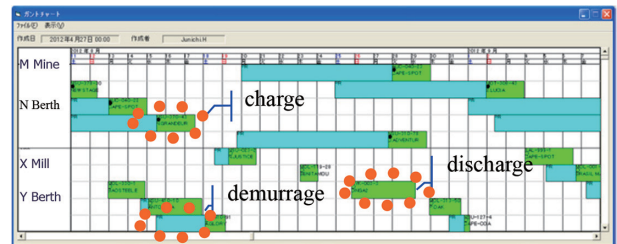


図3 立案結果のガントチャート  
Example Gantt chart of a scheduling result

返す独自開発技術により、従来求解が不可能であった問題に対して、実操業に耐えうる解を得ることを可能とした(図2)。

### 2.1.3 立案結果

立案例としてガントチャート(図3)を示す。揚地での船舶は滞船が少なく、スムーズな入港が可能となった(積地での滞船は所与条件)。また、ケーブサイズ船以上の大型船の1港揚比率が増加することで、多港揚げによるエクストラチャージ減による輸送費用削減が可能となった。

## 2.2 原料ヤード配置適正化システム

### 2.2.1 業務内容

本業務は、船舶によって運ばれてくる多種類(数十種)の原料を置場(ヤード)の空きスペースに山積し、その山から高炉やコークス炉等での使用計画に従い、原料を供給するための受入れ山位置、払出し山位置及び量を決定するものである。ここでは、1)小山を多く作るとデッドスペースが発生し、ヤード効率が悪くなるため小山の削減、2)予め広いヤード連続空きを確保しておくことで、船の入港から出港の時間を短縮させ、船舶の沖待ち費用を削減することで、効率的なヤード運用が可能となる。

しかし、ヤード長さや積量の関係は線形関係になく、複雑な計算が必要である。また同一銘柄の重ね置きや別銘柄との山間スペースの確保等による実質ヤード容量の大幅変動や銘柄毎に置場制約が異なる等、考慮すべき事項が多数ある。このためこれまでは、人が経験と勘に基づいて計画を立案しており、短時間で長期間の計画が作成できず、将来の入荷を見越した立案ができない等の問題があった。

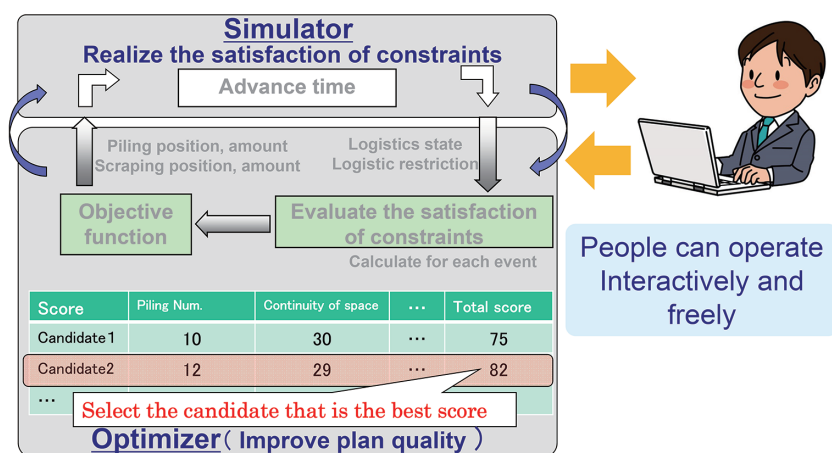


図4 人協調型アルゴリズム概要  
Human cooperative optimization algorithm

### 2.2.2 スケジューリング機能の構成

生産・物流計画への最適化技術の適用を進めるにあたり、計画の立案を数理計画問題として捉え、数学的に最適化或いは、ルールベース等の技術を用いて適正化する技術にフォーカスすることで、当該技術は新日鐵住金で著しく進歩した。一方で、数式にモデル化することが難しい人の高度な判断を必要とする場合や、明示化されていない暗黙知（ノウハウ）が熟練者に担保されている、或いは少しずつ操業制約が変化し続けることへの対応がシステムを実操業で使い続けてもらう上で課題であることが明らかになってきた<sup>8)</sup>。

そこで、本システムでは、人と協調したシステムを構築することで、人の知見を活かし、柔軟に操業に対応する仕組みを目指した。具体的には、1) 実操業を精緻に模擬したシミュレータと貪欲法を用いることで、制約を満足した初期計画を高速に立案する、2) インタラクティブに人が立案した結果を自由に変更可能とし、それを反映した内容でシミュレータを動作させることで制約を満足した立案を行う、3) 人が介入した内容は逐次保存され、各状態から自由に再度人が介入し直せる、4) 制約や能力等パラメータを人が自由に修正可能とするとともに、変更内容は逐次保存され、各状態から自由に再度人が介入し直せる、ことを可能とした（図4）。

### 2.2.3 立案結果

開発した原料ヤード配置適正化システムによって立案された船舶の動静結果を図5に示す。本社より与えられた着離岸目標よりも、早く離岸が可能となっており、沖待ち費用の削減が可能となった。

### 2.3 まとめ

本章では、原料一貫生産・物流最適化を目指した取り組みについて述べた。この中で、大枠決定と詳細決定からなる階層的分割と、時間的分割を組み合わせて実行することで、

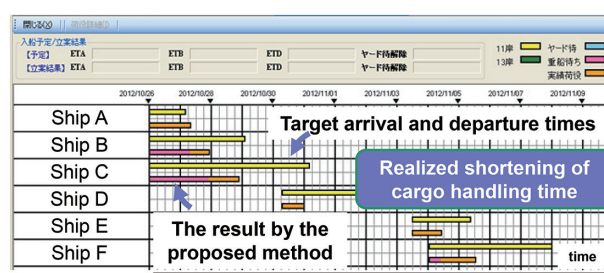


図5 船舶動静の立案結果  
Result example of ship scheduling

大規模計画問題に適用可能な最適化技術の開発に関して、記述した。本技術を用いることで、実操業に耐えうる精度の計画立案が可能な原料輸送配船最適化システムを開発し、成果を得た。さらに、開発を進める中で、操業の変化や要求変化への柔軟な対応が、システムの永続的な使用に必須であることが明らかとなった。そこで、初期計画立案、インタラクティブな計画変更、変更履歴保存等を実現することで、人との協調を意識した計画支援の仕組みを構築した。本技術は、船舶の沖待ち費用の削減に貢献している。

## 3. 製鋼スケジューリング技術の開発

製鋼プロセスは高炉から供給された溶銑に対して転炉、二次精錬設備において成分調整を施し、連続铸造機において半製品である铸片を製造する工程である。転炉で成分調整を終えた溶銑は取鍋と呼ばれる搬送容器に注入され二次精錬工程を経由して連続铸造機へ搬送される。この取鍋1杯分の溶銑をチャージと呼ぶ。また、連続铸造機におい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。製鋼プロセスの1つの特徴は高温液体である溶銑が生産対象であることである。溶銑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銑の凝固が進行して生産性を著しく阻害する。従って、予め溶銑を余分に製造してバッファに保管することは不可能であり、転炉、二次精錬工程は铸造タ

イミングに合わせて適切な溶鋼温度に調整した溶鋼を連続  
 鑄造機に供給しなければならない。

さらに近年では高品質な製品ニーズに応えるため精錬工  
 程の処理フローが複雑化している。例えば転炉を用いる溶  
 銑予備処理方式として、同時脱珪脱りんを実現する LD-  
 ORP (LD converter-Optimized Refining Process) 法や 1 基の  
 転炉で脱りんと脱炭とを中間廃滓を挟んで連続的に処理す  
 る MURC (Multi-Refining Converter) 法が開発され実機化さ  
 れている<sup>9)</sup>。また、二次精錬においても鋼種毎に異なる処  
 理フローや処理時間が設定されている。このため、各工程  
 の処理負荷のピークを抑えつつ製鋼プロセス全体として高  
 生産性、コスト最小化、納期厳守などの指標を満足化する  
 スケジュールを立案することが困難になってきている。

### 3.1 製鋼スケジューリング問題

製鋼スケジューリング問題は連続鑄造機におけるキャスト  
 のチャージ構成、鑄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上で目的関数が最  
 適となる転炉、二次精錬及び連続鑄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  
 を鑄造するためのキャスト連々鑄造制約がある。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鑄造完了  
 時刻が用いられる。滞留時間は転炉を出鋼してから鑄造を  
 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。このような製鋼スケジューリング問題に対して数理  
 最適化手法を適用したアルゴリズムを開発してきた。

### 3.2 製鋼スケジュール問題の最適化事例

人手による製鋼スケジュールの立案負荷が大きく、かつ  
 得られたスケジュールの最適性や操業可能性が必ずしも十  
 分ではないという課題から数理最適化手法に基づくアルゴ  
 リズムを開発した<sup>10)</sup>。全ての操業制約を考慮することは計  
 算時間の観点から課題があったため、主要な操業制約や評  
 価指標のみを数理最適化手法で考慮し、その他の詳細な制  
 約条件を物流シミュレータに記述し、両者を組み合わせる  
 ことで熟練者と同等以上の最適性を持つスケジュールを数  
 分で立案することを可能としている。また転炉操業方法の  
 変更や設備追加に伴い、転炉出鋼順の組み合わせ数の増  
 加、クレーン等の搬送機器能力ネックの発生、生産量増に  
 よる立案対象チャージの増加、などへの対応が必要となっ  
 たことから、前記手法に制約論理プログラミングを併用し

たアルゴリズムを開発した<sup>11)</sup>。操業制約条件を柔軟にモデ  
 ル化できるようにするとともに、立案時に解探索範囲を実  
 行可能解のみに絞り込むことで実行時間内(約 1 分/3 日  
 分)での立案を可能としている(図 6)。

また鑄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を開発している。従来、溶鋼  
 温度管理は立案された操業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、温度調整  
 に必要な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(図 7)<sup>12)</sup>。本手法により連続鑄  
 造機の到着時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。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鑄

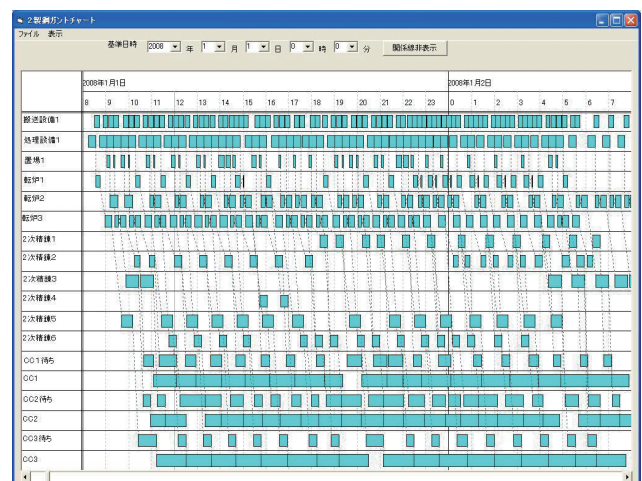


図 6 スケジューリング結果のガントチャート<sup>11)</sup>  
 Gantt chart of scheduling result

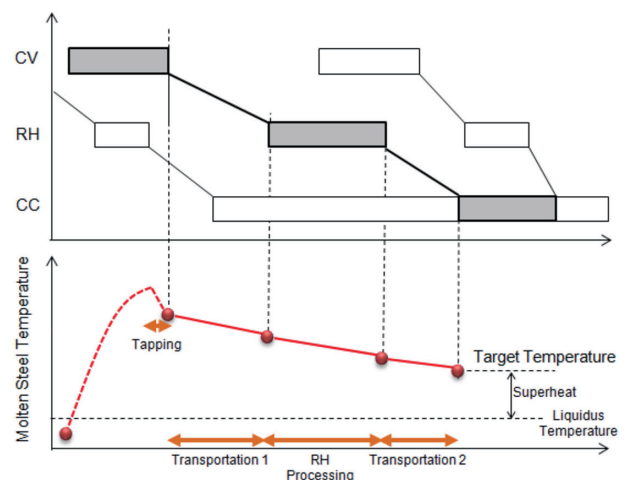


図 7 溶鋼温度スケジュール同時最適化モデル<sup>12)</sup>  
 Model for molten steel temperature and schedule

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の検討も進めている<sup>13)</sup>。

### 3.3 まとめ

高炉の次工程に位置する製鋼工場はほぼ全ての溶銑が通過して薄板、厚板などの各種最終製品に作り込まれるため、品質、コスト、納期いずれの観点からも重要なプロセスである。保有する各設備の稼働率を最大化して高い生産性を維持しつつ、高品質な製品を作り続けるためには一層高精度な製鋼スケジュールの立案が必要となる。そのため、製鋼工場における処理、搬送条件の詳細化に加えて、上下工程における生産・物流計画をも考慮した製鉄所全体としての一貫最適化が重要である。これを実現するため大規模最適化問題に対するモデリング技術、及びアルゴリズム開発や並列化による計算高速化などの技術開発が期待される。

## 4. 熱延スケジューリング技術の開発

### 4.1 熱延スケジューリング問題

熱延工程 (Hot Strip Mill) では、通常複数の加熱炉 (3～4基) で再加熱されたスラブを、予め定められた抽出炉順に従い1本ずつ抽出し、1基の圧延機で圧延する。従ってそのスケジューリング問題では、加熱制約を満たすように加熱炉への振り分け及び炉毎の装入順を定め、かつ圧延制約を満たすように、圧延順を適切に定めることが要請される。

加熱制約は、同一炉近傍 (3～5m) 内のスラブ間では、炉の熱慣性から同様の炉温制御が行われるので、装入温度や抽出目標温度及び加熱特性に隔たりがあってはならないという温度移行制約がある。圧延制約は、1回の圧延チャンス (1スケジュール) 内では、形状制御が容易な幅広から幅狭に移行させるいわゆるコフィン (棺桶) 制約や、圧延順が隣合う2つのスラブのコイルの厚み、幅などは、差が小さく移行がなめらかであることを要請する幅・厚移行制約が代表的である。

一方、熱延スケジューリング問題の評価指標は、制約とも重複するが、温度・幅・厚移行量をできるだけ小さくすること、加熱炉燃料消費量を少なくすること、スケジュール対象の最初の抽出から最後の抽出までの総抽出時間をできるだけ短くし生産性を高めることなどがある。また、後述するように、ヤードとの関連では、ヤード内の山積状態を前提に、積み替えができるだけ少なくなるよう装入順調整が要請されることもある。

数理計画法を応用した熱延スケジューリング問題求解法については、問題規模や制約の多さなどからGA (遺伝的アルゴリズム) を応用した手法<sup>14,15)</sup> や割当問題定式化と局所探索を組み合わせた手法<sup>16)</sup> などのヒューリスティックによる手法が研究されている。ここでは、厳密解法による求

解法を紹介する。

### 4.2 装入順・圧延順 (抽出順) 同時最適化技術<sup>17)</sup>

熱延加熱炉への高装入温度確保のため、熱延ヤードへの保温設備設置が定常化しつつある昨今では、加熱炉装入時の山積りをできるだけ避けるべく、装入スケジュールの面での配慮も必要となりつつある。これは、圧延順 (= 加熱炉抽出順) の適正化が本来要請であった熱延スケジュールに対し、装入順の考慮も要請するものである。

#### 4.2.1 圧延順 (抽出順) と装入順との関係

複数炉の抽出本数比が異なる場合、高比率炉では、低比率炉に比べ在炉時間が短い。従って、装入順が抽出順に対し相対的に遅くなる。また、装入事象は抽出事象に伴い装入側に空きスペースが発生することにより生起する。従って、抽出鋼材の幅サイズと装入鋼材の幅サイズとの関係で、1本の鋼材が抽出された際の装入は、①1本も装入できない場合 (抽出幅 < 装入幅)、②1本装入できる場合 (抽出幅 ≥ 装入幅)、③2本装入できる場合 (抽出幅 ≥ 2本分装入幅) の3通りがあり得、いずれのケースが起こるかにより装入順が変わる。つまり装入順は圧延順 (抽出順) に依存し、一意に決められるが、定式化は難しく決定には装入・抽出シミュレーションが必要となる。

#### 4.2.2 装入順・圧延順同時最適化

ヤードでの積み替えを考慮するには、圧延順のみならず、装入順もできるだけ山の上から順に装入できるように定める必要がある。圧延順と装入順との関数関係が定式化できれば、その関係を拘束条件として、圧延順、装入順の同時最適化は可能である。しかし、上記のように、圧延順と装入順との関数関係が、装入・抽出シミュレーションによってしか特定できないことから、シミュレーションによる圧延順・装入順関係導出と、それを拘束として解いた解の圧延順・装入順関係がその仮定に一致するまで繰り返す収束計算によって対応することとした。この際、圧延順・装入順決定は、鋼材を装入順、圧延順に割り当てる2重割当問題として0-1整数計画問題として定式化した。

#### 4.2.3 装入順・抽出順2重割当問題定式化方法

決定変数

$x_c[i][j_c]$  (装入順割当変数): 鋼材  $i$  を装入順  $j_c$  に装入する場合1, そうでない場合0, とする0-1変数

$x_r[i][j_r]$  (圧延順割当変数): 鋼材  $i$  を圧延順  $j_r$  に圧延する場合1, そうでない場合0, とする0-1変数

制約式

装入順制約: ヤード山積順制約, 圧延順・装入順関係制約

圧延順制約: 幅/厚/温度移行制約, 組込位置制約, 炉

表 1 最適化の効果  
Effect of optimization

	Load of pile (ave.)
Manual	112
Optimize	72 (-40)

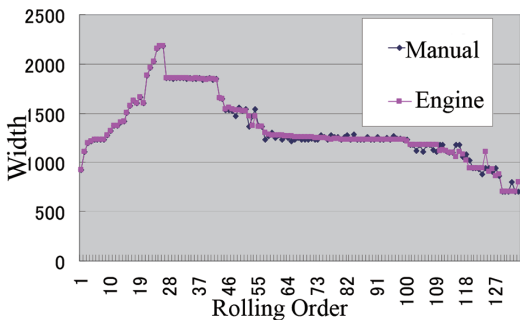


図 8 圧延幅移行<sup>17)</sup>  
Width change with rolling order

別装入規制制約等

目的関数

装入順に対する目的関数：山繰り数最小化

圧延順に対する目的関数：幅／厚／温度移行量最小化,  
加熱炉燃料最小化等

#### 4.2.4 装入順・圧延順（抽出順）同時最適化技術適用結果

装入順・圧延順同時最適化により表 1 に示すように 1 スケジュールあたりの総山繰り数が 3 割以上減らせることが判明した。また、その影響で幅移行、厚み移行などが崩れないことも判った。図 8 に幅移行の例を示す。

#### 4.3 今後の展望

ここでは、抽出炉順が固定された抽出比率一定条件での、スケジュール問題を扱ったが、本来抽出比率は、各炉に装入される鋼材に依存する変数として扱うのが理想であることから、そのような問題設定の解法が望まれる。

また、加熱炉の装入・抽出スケジュールは、加熱炉の燃焼制御とも密接に関連することから、スケジュールと燃焼制御を同時に最適化する問題への取り組み<sup>18-20)</sup>も行われており、今後の計算機技術の進展により、近い将来実現される可能性がある。さらに鋼圧一貫スケジューリングという

問題拡張への対応<sup>21)</sup>も報告されており、今後の実用化が期待される。

### 5. 厚板標準工期設計技術の開発

受注生産である鉄鋼業では、需要家から要求されたスペックの製品を指定された納期までに届ける必要があり、工程管理の担当者は、納期遅れを起こさないよう、各注文の製造進捗を常に監視している。工程管理において最も重要なことは、注文の製造着手日を適切に決定することである。なぜなら、製造着手日が遅れると納期に間に合わず、製造着手日が早過ぎると置場、倉庫が満杯になり、製造ラインが停止してしまうためである。しかし、鉄鋼製品は製造工期の変動が大きく、特に多くの精整ラインを有する品種ほど製造工期の変動は大きくなり、生産管理が難しい。

製造着手日を算出するための製造工期の標準値を標準工期と呼ぶ。工程管理の担当者は、注文のスペックから標準工期を算出し、納期から標準工期を差引いた日時に圧延できるような圧延スケジュールやキャスト編成を立案している。各工程に仕掛山が存在せず、通過工程も既知であれば、製造工期は各工程の処理時間と移動時間の合計値で求まる<sup>22)</sup>。しかし、厚板プロセスでは（薄板や鋼管と同様に）、各工程の前に大きな仕掛山が存在し、かつ、手入や矯正工程など、製造途中で通過有無が決まる（製造着手までには通過有無が定まらない）発生工程も存在するため、製造工期を正確に予測することは容易ではない。

本章では、製造工期の予測が難しい品種の 1 つである厚板の標準工期の算出方法に関して述べる。次節でまず厚板製造フローと従来の標準工期の算出方法に関して紹介したのち、新たに開発した決定木と最尤推定法を用いた標準工期の算出方法に関して述べ、最後に実機適用効果を示す。

#### 5.1 厚板製造プロセスと従来の標準工期算出方法

厚板製造フローを図 9 に示す。加熱炉で熱せられたスラブは、粗・仕上圧延機で所定のサイズへ成形された後、加速冷却装置で所定の結晶組織が得られるよう水冷され、冷却床にて自然放冷される。冷却床以降を精整工程と呼び、注文の製造仕様に依りて通過有無が決まる仕様工程（熱処理、塗装など）と、製造途中の品質に応じて通過有無が決

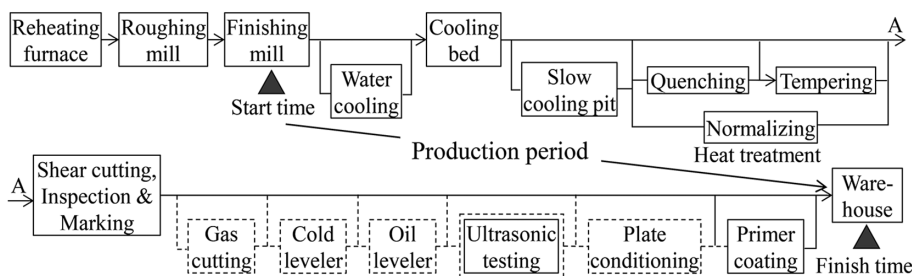


図 9 厚板製造プロセス（実線：仕様工程，破線：発生工程）<sup>23, 27)</sup>  
Manufacturing process of steel plate (solid line: normal processes, dash line: stochastic processes)

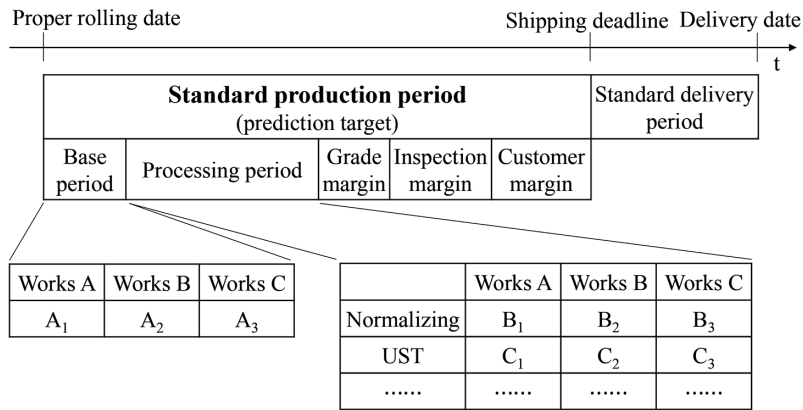


図 10 従来の標準工期テーブル<sup>27)</sup>  
Tables of old standard production period

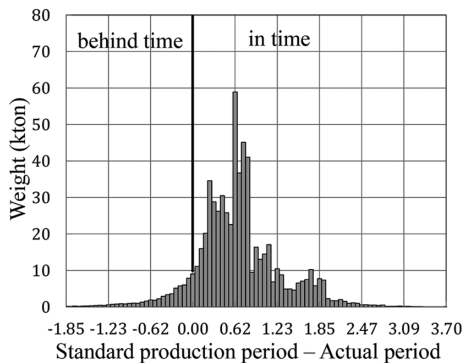


図 11 従来の標準工期の余裕日数<sup>27)</sup>  
Margin of old standard production period

まる発生工程 (矯正, 手入など) とがある。図 9 において, 実線で囲まれた工程は仕様工程, 破線が発生工程であり, UST (超音波探傷装置) は両方の側面を持つ工程である。本稿において, 製造工期とは圧延から出荷 (もしくは立合) 準備が整うまでの日数を意味し, 厚板工場内に滞在している期間を意味する。

従来の標準工期は図 10 のような構成のテーブルで管理されており, ベース工期, 精整工期, 規格余裕, 検査余裕, 需要家余裕に大別され, さらにそれらが細かく分類されていた。そして, 注文の品質仕様から各テーブルの値を参照し, それらを合計して標準工期としていた。ただし, 精整工期は注文仕様から判断可能な仕様工程の工期のみ考慮しており, 発生工程の工期は規格余裕などに組み入れていた。このため, 標準工期と実績工期の差である余裕日数のヒストグラムは図 11 のように, 横に広がった分布となっており, 標準工期以内に製造完了した割合 (“実績工期 ≤ 標準工期”の割合) で定義される荷揃達成率も 91.5% に留まっていた (工期はある値を基準に規格化している)。

### 5.2 新しい標準工期算出方法

実績工期を分析することで, 製造工期は通過工程との相関が高いことが判った。そこで, 通過工程を予測した後, 標準工期を算出する方法を考案した。新しい標準工期の算

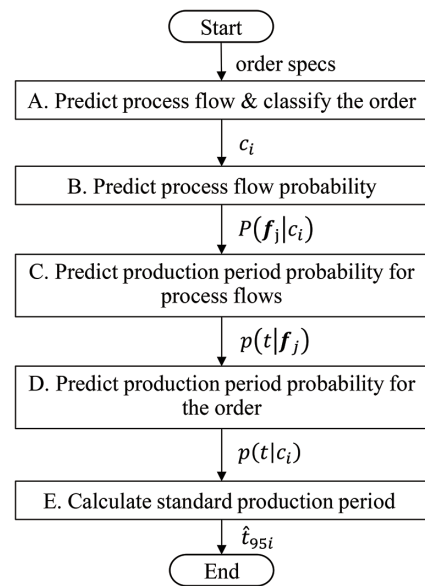


図 12 新しい標準工期の算出アルゴリズム<sup>23)</sup>  
Calculation algorithm of new standard production period

出アルゴリズムを図 12 に示す<sup>23)</sup>。以下, アルゴリズムの各ステップの処理内容を説明する。

#### A. 製造品種の決定

通過工程と品種が等しければ, 製造工期の確率分布が等しいと考えた。そこで, 図 13 のように注文の製造仕様から, 工程毎に通過有無を決定木<sup>24)</sup>で予測し, 通過有無を表す 0/1 の記号を 1 列に並べて通過パターンとし, 式(1)のように, その通過パターンの前に注文品種を付加した記号を求め, 製造品種  $c_i$  とする ( $i$  は製造品種の番号)<sup>25)</sup>。

$$\text{Production class } (c_i) \stackrel{\text{def}}{=} \text{order class\_process flow} \quad (1)$$

#### B. 通過工程の確率分布の算出

過去の製造実績データから当該注文の製造品種  $c_i$  と同じ製造品種のプレートを抽出し, 式(2)のように, 実績通過パターン  $f_j = (f_{j1}, f_{j2}, \dots, f_{jM})$  の発生率 (経験分布) を求め, 製造品種  $c_i$  の生起確率モデルとする。

$$P(f_j | c_i) = \frac{\text{Number of } c_i \text{ \& } f_j \text{ plates}}{\text{Number of } c_i \text{ plates}} \quad (2)$$



C. 通過パターン毎の製造工期の算出

注文がある通過パターン  $f_j$  で製造されるとき, その製造工期の確率分布は通過した工程の処理工期(仕掛待ちを含む)の重ね合わせで算出されると仮定し, 各工程の処理工期の確率密度関数を求める。具体的には, 処理工期は正規分布と仮定すると, 実績通過パターン  $f_j$  の製造工期  $t$  の確率密度関数は式(3)~(4)となるため, 式(5)で表される実績工期  $t_n$  の尤度関数を最大にするように, 平均  $\mu_m$  と分散  $v_m$  を求める(最尤推定法<sup>26)</sup>。ここで,  $f_n$  は  $n$  番目のプレートの実績通過パターン,  $\tilde{\mu}_n, \tilde{v}_n$  はその製造工期の平均と分散である。

$$p(t|f_j) = N(t|\tilde{\mu}_j, \tilde{v}_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tilde{v}_j}} \exp\left\{-\frac{(t-\tilde{\mu}_j)^2}{2\tilde{v}_j}\right\} \quad (3)$$

$$\tilde{\mu}_j = f_j \mu^T, \quad \tilde{v}_j = f_j v^T \quad (4)$$

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_M) \geq 0, \quad v = (v_1, v_2, \dots, v_M) \geq 0$$

$$J = \sum_{n=1}^N \ln p(t_n|\tilde{f}_n) = -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N \left[ \ln(2\pi) + \ln(\tilde{v}_n) + \frac{(t_n - \tilde{\mu}_n)^2}{\tilde{v}_n} \right] \rightarrow \text{Max} \quad (5)$$

式(5)の  $N$  は学習データのプレート数であり, 全ての品種が製造される半年から1年間のプレートから計算することが望ましく,  $N$  の値は数十万にもなる。このため, 式(5)のままでは, 大規模な最適化問題となってしまうが, 幸いなことに, 式(5)は通過パターンの種類毎にまとめることができ, その種類数  $L$  (数百個)の次元にまで下がるため, 容易に計算することができる<sup>27)</sup>。

D. 製造品種の製造工期の予測

ステップBで求めた製造品種に対する通過パターンの生起確率モデル  $P(f_j|c_i)$  と, ステップCで求めた通過パターンの製造工期の確率密度関数  $p(t|f_j)$  を, 式(6)に示すように組み合わせて, 製造品種の製造工期  $p(t|c_i)$  を求める。

$$p(t|c_i) = \sum_{j=1}^L p(t|f_j, c_i) P(f_j|c_i) \approx \sum_{j=1}^L p(t|f_j) P(f_j|c_i) \quad (6)$$

E. 標準工期の算出

式(6)の確率密度関数  $p(t|c_i)$  の累積分布関数を  $F(t|c_i)$  とすると, 標準工期  $\hat{t}_{.95}$  は式(7)のように計算される。ここで, 0.95 は荷揃達成率の計画値である。

$$\hat{t}_{.95} = F^{-1}(0.95|c_i) \quad (7)$$

5.3 新しい標準工期の効果

ある製鉄所のある期間に製造されたプレートの実績データを用いて標準工期を設計し, それとは異なる期間の余裕日数のヒストグラムを図14に示す。図11と比べると, 新しい標準工期の方が, ピークの高い急峻な分布となっている。新しい標準工期の平均値は従来とほぼ同じであるが, 荷揃達成率は3.2%改善(91.5→94.7%)させることができた。

次に, 従来の標準工期から新しい標準工期へ切り替えた前後の3つの製鉄所の荷揃達成率の実績値の推移を図15に示す。この荷揃達成率の実績値とは, “標準工期 ≥ 実績工期”ではなく, 出荷期限日までに製造完了した割合である。すなわち, 実績圧延日と適正圧延日との差異も含んだ生産管理現場の管理指標である。従来の標準工期を用いていたときは, 荷揃達成率が製鉄所毎にばらつきが大きく, 荷揃達成率が80%を切ってしまう場合もあったが, 新しい標準工期に切り替え以降, 荷揃達成率は高位安定した。本アルゴリズムで設計した新しい標準工期は, 従来と比べて平均で1~3日短縮しており, 製造工期の短縮と荷

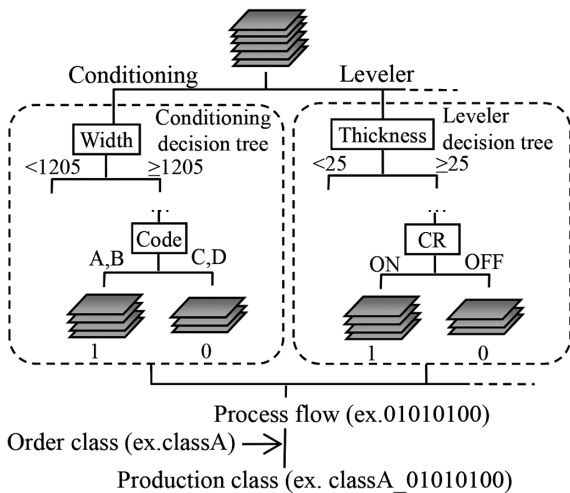


図13 製造品種を決定する決定木<sup>23, 27)</sup>  
Decision trees to decide production class

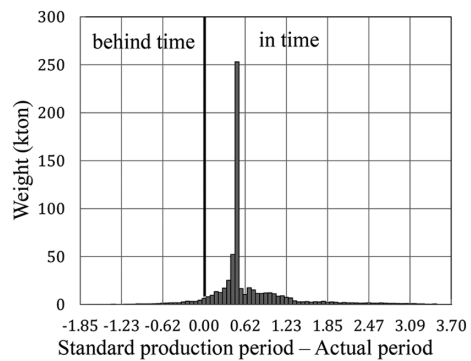


図14 新しい標準工期の余裕日数<sup>27)</sup>  
Margin of new standard production period

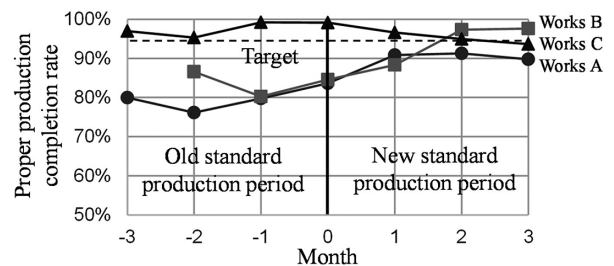


図15 荷揃達成率の変化<sup>30)</sup>  
Changes in proper production completion rate

揃達成率の改善を同時に達成した。さらに、提案手法で設計された標準工期は、製鉄所内のスケジューリングシステム<sup>28,29)</sup>で利用され、製鉄所内の製造スケジュールの精度向上にも役立っている。

#### 5.4 まとめ

本章では、厚板の標準工期の設計方法に関して述べた。提案手法は、製造工期が品種と通過工程に依存することを利用して、決定木で通過工程を予測した後、最尤推定法で製造工期の確率密度関数を予測して、指定した荷揃達成率を満たす製造工期を標準工期とする手法である。新しい標準工期設計手法は、受注した注文の製造指示を行うオーダーエントリーシステム(OES)で稼働中であり<sup>30)</sup>、各製鉄所の荷揃達成率の高位安定化と、在庫削減に貢献している。

### 6. 厚板週間出鋼計画最適化技術の開発<sup>28,29)</sup>

厚板週間出鋼計画では、製造能力や置場能力などの操業制約条件を満たしつつ、生産性向上(同鋼種連々数最大化)、精整負荷平準化、納期遵守等、様々な評価指標を考慮した適切な計画を迅速に立案することが求められる。本計画業務で用いる精整負荷や製造工期などの計画立案用パラメータは注文仕様や操業変動により変化する。また、大規模かつ複雑な最適化問題のため注文単位で直接モデル化すると実用時間内に解くことが難しい課題がある。そこで、実績学習によるパラメータ推定から計画立案まで一貫して使用可能な製造品種モデルと、複雑な制約条件や評価指標を考慮可能な最適化アルゴリズムを開発した。

#### 6.1 出鋼計画最適化問題

製鉄所に投入された注文を鋼種別精整通過パターン別にグルーピングした集約注文に対して、生産能力等の制約条件の下で出鋼ロット拡大、出鋼期限日遵守、精整負荷平準化の評価値(8)式が最良となるように、混合整数計画法を用いて集約注文単位の出鋼重量を決定する。なお、精整負荷の予測には、実績データを統計解析して得られる予測モデルを使用した。

定数

$\hat{x}_{j,t}$ : 集約注文 j, 出鋼期限日 t の注文重量

$\hat{y}_{k,t}$ : 工程 k, t 日の精整処理能力

決定変数

$x_{j,t}$ : 集約注文 j, 出鋼計画日 t の出鋼重量

中間変数

$\delta_{i,t}$ : 鋼種 i を出鋼計画日 t に出鋼すれば 1, そうでなければ 0 を取る 0-1 変数

$y_{k,t} = \sum_j f_k(\cdot) x_{j,t}$ : 工程 k, 出鋼計画日 t の精整負荷発生重量

※  $f_k(\cdot)$  は製造仕様から工程 k の精整負荷発生率を予測する関数

評価関数

$$\text{最小化 } J = W_1 J_1 + W_2 J_2 + W_3 J_3 \quad (8)$$

$J_1 = \sum_i \sum_t \delta_{i,t}$ : 異鋼種継目数

$J_2 = \sum_j \sum_p |\sum_{t=0}^p \hat{x}_{j,t} - \sum_{t=0}^p x_{j,t}|$ : 納期遅れ

$J_3 = \sum_k \sum_t |\hat{y}_{k,t} - y_{k,t}|$ : 精整処理能力超過量

ここで  $W_1, W_2, W_3$ : 重み係数

制約式

製鋼制約, 精整置場制約等

#### 6.2 最適化アルゴリズム

生産能力等の制約条件の下で生産性向上、精整負荷平準化、納期遵守等の評価指標が最良となるように数理最適化手法を用いて“製造品種”単位の出鋼重量(出鋼計画)を算出する。最適化手法は混合整数計画法を基本とするが、出鋼計画立案時に考慮すべきキャスト編成制約には、キャスト内のチャージ位置制約など複雑な制約があるため、混合整数計画法のみではモデル化しにくいという課題があった。そこで、線形制約のみを考慮した仮の出鋼計画を混合整数計画法で立案し、得られた連続铸造機毎の出鋼計画からチャージ枠を作成した後、非線形もしくは If-then ルールで表される制約も含めた全ての制約条件を考慮して探索手法によりチャージ枠を並べ替え、得られた全てのキャスト、チャージ枠に対して、線形計画法を用いて製造品種を割り当てる多段階解法を開発した(図16)。

#### 6.3 立案例

8日間の製造実績データを対象に、本手法による立案結果と人による立案結果を比較した結果を表2に示す。本手法では、制約条件を遵守しつつ、出鋼大ロット化と納期は

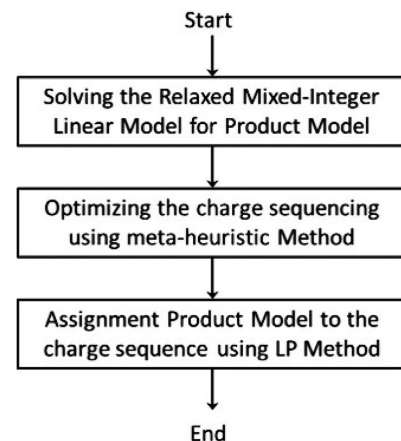


図16 最適化アルゴリズム<sup>29)</sup>  
Optimization algorithm

表2 本手法の効果  
Effect of optimization

	Proposal	Manual
Number of the violation of the restrictions [-]	0	0
Amount of the waste of the steel [-]	16	26
Standard deviation of the due date [day]	14.17	15.04

らつきの抑制を図れていることを確認した。ここで、継目長さは継目屑長さに関する評価関数値を、納期ばらつきは、出鋼期限日と出鋼計画日の差の標準偏差を表す。

#### 6.4 まとめ

本章では、厚板生産における出鋼大ロット生産、精整工程の負荷平準化、納期ばらつき抑制、のバランスをとった出鋼計画の立案を支援する最適化アルゴリズムについて述べた。大ロット生産と納期ばらつき抑制とのトレードオフ調整は、鉄鋼生産に共通の課題であり、厚板以外の品種への展開が期待される。

### 7. 汎用カラーペトリネットシミュレータの開発

製鉄所では重量物の搬送が多いため、物流コストの低減が重要な課題である。このため、搬送機器と搬送物とを適切に割付け、なるべく少ない搬送機器台数で多くの搬送物を搬送し、スケジュール通りに搬送先に届ける物流管制業務が重要となる。新日鐵住金では物流管制業務の効率化を目的に、物流の解析から管制まで一貫して対応可能な物流シミュレーションツールとして、複雑な物流条件を記述でき、計算速度に優れ、最適化アルゴリズムと連動したシミュレーションが可能なカラーペトリネットツール TrasCPN (Tool of Real-time Advanced Simulator for Colored Petri Net) を開発し、製鉄所の様々な物流課題の解決に役立てて来た<sup>31)</sup>。本章では、TrasCPN の機能について述べる。

#### 7.1 カラーペトリネットシミュレータの書式

本シミュレータで作成可能なカラーペトリネットの例を図 17 に示す。図 17 において、細長い長方形のブロックはトランジション、正方形の中に円が描かれているブロックはプレースであり、円の中の小さな丸がトークンを表す。また、プレースとトランジションを結ぶアークには発火条件を記述することができ、トランジションの入力アーク上には、発火に必要なトークンの条件 (入力アーク式と呼ぶ)、トランジションの出力アーク上には、発火後に発生するトークンの条件 (出力アーク式と呼ぶ) を記述することが可能である。この入力アーク式は、発火に必要な 1 つのトークンに関する条件であるが、複数のトークンの属性を組み合わせた発火条件はトランジションをダブルクリックして開か

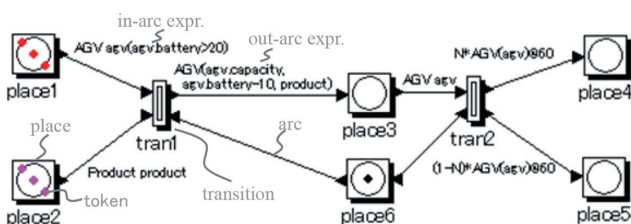


図 17 カラーペトリネットの例<sup>31)</sup>  
Example of colored Petri Net

れるダイアログ上に記述することが可能である。

本シミュレータでは、ペトリネットをマウスやキーボードを用いて入力した後、直ぐにシミュレーションを実行し、動作を確認することができる。シミュレーション開始時にバックグラウンドでコンパイルが行われ、直ぐに GUI (Graphical User Interface) 上でトークンの動きを確認できるため、シミュレータのデバッグが容易という特徴も持っている。

本カラーペトリネットシミュレータでは、トークンに属性を定義することができ、属性定義例をリスト 1 に示す。リスト 1 では、Product (製品) トークンと AGV (無人搬送台車) トークンが定義されており、Product トークンは weight (製品重量) と deadline (納期) の属性、AGV トークンは capacity (最大積載重量)、battery (バッテリー容量)、product (積載中の製品) の属性が定義されている。

リスト 1 トークン属性の定義例  
Examples of token definition

```
Product(double weight, double deadline);
AGV(double capacity, double battery, Product product);
```

シミュレーション開始時のトークン配置 (初期マーキング) は、プレースをダブルクリックして開かれるダイアログにリスト 2 のように記述する。このように、属性に具体的な値を設定することで、トークンのインスタンスを生成する。

リスト 2 初期マーキングの設定例  
Examples of initial marking

```
Product(20, 800);
AGV(50, 80, Product(0,0));
```

トランジションの入力アークには、トランジションが発火可能となるトークンの条件である入力アーク式を指定でき、その例をリスト 3 に示す。リスト 3 の上段は、product トークンがプレースに存在すれば発火可能であることを意味している。product はこのトークンのインスタンス変数名であり、後述のトランジションの発火条件や出力アーク式で参照する。一方、リスト 3 の下段は、バッテリー容量が 20% 以上残っている AGV トークンがプレースに存在すれば発火可能であることを意味している。

リスト 3 入力アーク式の設定例  
Examples of input arc expression

```
Product product
AGV agv(agv.battery>20)
```

入力アーク式には複数のトークンの属性を組み合わせた条件を記述できない。複数のトークンの属性を組み合わせた発火条件を指定する場合には、トランジションの設定ダイアログで指定する。発火条件の例をリスト 4 に示す。このように、発火条件は C++ 言語の書式で記述し、処理が最後まで実行されると発火可能となり、処理の途中でゼロを返すと、発火不可となる。リスト 4 では、AGV の最大積

載重量が製品の重量より小さければ発火不可としている。発火可能なトークンの組み合わせが複数存在する場合、キーワード `fire_priority` で発火の優先順位を指定することができ、リスト4では、納期が迫っているトークンの優先順位を高くしている。また、キーワード `fire_delay` を用いてトランジションが発火後に生成したトークンが次に発火可能となるまでの遅れ時間を指定することもできる。

リスト4 発火条件の設定例1  
Example1 of transition firing condition

```
if (agv.capacity < product.weight) return 0;
fire_priority = 1.0/product.deadline;
fire_delay = 60;
```

さらに、発火条件内でリスト5のように新たな変数を生成し、それを後述の出力アーク式で使用でき、トランジションが発火後に生成するトランジションの属性に、指定した関数の計算結果を設定するなど、複雑な物流現象も容易に記述することができる。

リスト5 発火条件の設定例2  
Example2 of transition firing condition

```
int N = agv.product.weight < 50 ? 1 : 0;
```

リスト6はトランジションが発火後に生成するトークンの条件である出力アーク式の設定例を示す。リスト6の上段では、リスト3の入力アーク式に記述した `agv` と `product` のトークンのインスタンス変数を用いて、最大積載重量は変わらず、バッテリー容量を10%減少させ、`product` を積載したAGVを生成している。一方、リスト6の下段は、リスト5に記載された変数 `N` を用いて、0個または1個のAGVトークンを生成しており、トークンの属性により出力プレースを選択する場合に便利である。また、“@60”はキーワード `fire_delay` と同様にトークン生成後、次に発火可能となるまでの遅れ時間を意味している。

リスト6 出力アーク式の設定例  
Examples of output arc expression

```
AGV(agv.capacity, agv.battery-10, product)
N*AGV(agv)@60
```

## 7.2 カラーペトリネットの GUI

大規模で複雑な物流シミュレータを構築する際には、使い易いGUIを有することも重要となる。本シミュレータでは、マウスとキーボードを用いてペトリネットを簡単に入力でき、複雑なペトリネットの可読性と再利用性を向上させるため、他のツール<sup>32)</sup>と同様、ペトリネットの一部をモジュール化し、階層的ペトリネットを構築することができる。ただし、本ツールでは、モジュールの再利用方法が2種類あり、ユーザは必要に応じて使い分けすることができる。図18は簡単な階層型ペトリネットの例であり、2重枠のブロックが下位ペトリネットを有するモジュールである。

モジュールを複製して再利用する方法として、完全な複

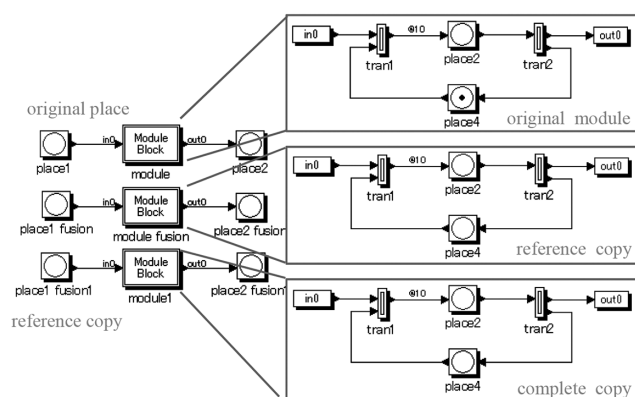


図18 階層型カラーペトリネットの例  
Example of hierarchical colored Petri Net

製と関係性の複製の2種類がある。完全な複製は複製元と複製先が別々のオブジェクトになり、下位ペトリネットも全て複製されるため、片方の下位ペトリネットの変更が、もう一方に影響を与えることはない。一方、関係性の複製は、下位ペトリネットの複製は行わず、複製元との関連情報のみを複製する。このため、片方を修正すると、もう一方も修正される。図18中央のモジュールは、上部のモジュールの関係性の複製を行ったモジュール、下部のモジュールは完全な複製を行ったモジュールである。関係性の複製を行ったモジュールの下位ペトリネットは、シミュレーション開始前は複製元と同じであるが、シミュレーション開始時に下位モジュールが複製され、複製元とは別のインスタンスとなり、複製元とはトークン配置の異なる下位ペトリネットとなる。

また、プレースも完全な複製と関係性の複製が存在する。完全な複製は複製元と別のインスタンスを作る操作であるが、関係性の複製は参照先のプレースと同一のプレースを別の場所に作成することを意味し、参照元と同じプレースを別の場所に表示させる機能である。この機能により、離れた位置のプレースとトランジションを接続する際に、長いアークを使用する必要がなくなり、複雑なペトリネットでも可読性良く作成できる。

## 7.3 まとめ

本章では、物流管制課題の解決のために開発したカラーペトリネットツールに関して述べた。本シミュレータは複雑な物流現象を自由に模擬できるよう、属性の異なる複数のトークンを定義でき、それらの属性を用いた複雑な発火ロジックを記述可能である。また、大規模な物流でも階層構造で再利用性が高く、ペトリネットを作成することが可能という特徴を持つ。

このカラーペトリネットツールは、AGVの配車制御<sup>33)</sup>、溶銑管制システム<sup>34)</sup>、出鋼スケジュール作成支援システム<sup>10,11)</sup>、ヤード管制スケジューラ<sup>35)</sup>など、鉄鋼プロセスにおける多くの物流管制課題の解決に活用している。

## 8. スラブヤード物流最適化技術の開発

### 8.1 スラブヤード管制最適化問題

製鋼工程から圧延工程へ鋼材(スラブと称する)を供給する際、鋼材は、一旦スラブヤード(以降“ヤード”)と呼ばれる一時保管場所に置かれた後、加熱炉の処理時刻に合わせて搬出される。ヤードとは工程間のバッファ的役割を担う中間置場である。つまり製鋼と圧延という異なる工程間の製造順を調整し、圧延工程への材料供給を滞りなく行う役割がある。昨今、CO<sub>2</sub>削減要請の高まりとも相まって、ヤードでの温度低下防止による加熱炉燃原削減効果への期待から管制最適化のニーズは高まっている。ヤード管制では、図19の①～④の決定機能が要請される。

①～④は、互いに関連しているため、独立に決定できないが、同時に全ての要素を決定することも規模が大きく困難なことから、通常、管制員は、この順に段階的に決定している。つまり対象スラブをまず、複数ある棟に振り分け(①)、棟では、10段程度の山状に積まれた状態で保管されるため、各棟に振り分けられたスラブをさらに山という単位に分ける(②)。そして、この山立てを天井クレーンなどの搬送機器により効率的に行うための搬送手順を定め(③)、各搬送を搬送機器に割り当てる(④)。

近年、これらの決定を、数理最適化手法やシミュレーション技術を利用して行う技術開発の動きがある。①については、フロー最適化問題として定式化し、適切な受入れルートを導出する技術<sup>36,37)</sup>が報告されている。③、④についても、GAとシミュレーション技術を組み合わせた手法<sup>38)</sup>が報告されている。また、②の山分けと③の、その山立てを行うための搬送順の決定問題(山分け問題)は、最も盛んに研究が行われている。これは、ヤードではスペース節約のため山状に保管されるので、払出しがすぐ行えるよう、受入れの際、上から払出し順となるよう積み替えを行っている。この積み替え作業をいかに効率化するかが、ヤード作業のポイントとなるからである。この問題については、類似した港湾のコンテナ積み替え作業低減化問題をはじめ、様々な先行研究がある<sup>39)</sup>。

この山分け問題は、スラブのヤード到着時に、次工程の加熱炉スケジュールが既決前提だが、到着時未定の場合は、

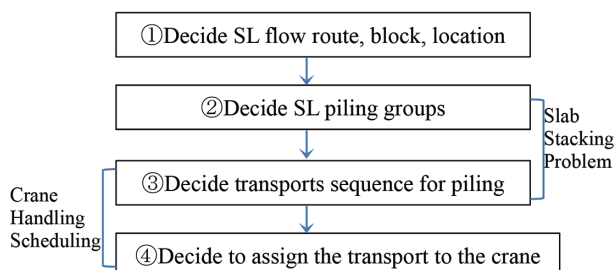


図19 ヤード管制決定事項  
Slab yard control decision flow

決定後、積み替える(山姿積み替え問題<sup>40,41)</sup>)か、装入スケジュール側で調整するなどの異なるアプローチとなる。

山分け問題は、積姿制約の下、できるだけ少作業負荷で、払出し順に積まれた高山を作成する組み合わせ最適化問題である。この問題をグルーピング問題と見なし、頂点彩色解法<sup>42,43)</sup>による定式化や集合分割解法<sup>35,44)</sup>に基づく定式化方法が提案されているが、ここでは、集合分割解法について簡単に紹介する。

### 8.2 山分け問題の集合分割問題としての定式化

山分け問題は、対象スラブ集合  $N$  を山という部分集合にグループ分けする問題と考えることができる。この問題は組み合わせ最適化問題の1つである集合分割問題(Set Partitioning Problem: SPP)<sup>45)</sup>で定式化できる。SPPは、任意の部分集合  $S_j$  が、そのコスト  $c_j$  を持つ前提で、 $N$  の要素を重複なくかつ漏れなく部分集合  $S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_m$  に、そのコスト和が最小となるように分割する問題である。

$$S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_p \cup \dots \cup S_m = N, S_{j_1} \cap S_{j_2} = \phi \quad \forall j_1, j_2 \quad (9)$$

式(9)における  $\phi$  は空集合を表す。SPPは、任意の部分集合  $S_j$  に対し、各  $S_j$  が全体集合  $N$  を分割するための最適な部分集合として採用するか否かを表す0-1決定変数  $x[j]$  を用意し、以下の0-1計画問題として、式(10)～(12)で定式化できる。この際、全体集合  $N$  に対する部分集合族  $M$  つまり、山分け問題の場合には積姿制約を満たす実行可能な山の集合  $M$  を予め列挙しておく必要がある。

$$\text{SPP: Min. } \sum_{j \in M} c_j \cdot x[j] \quad (10)$$

$M$ : 実行可能な山の集合

$$\text{Subject to } \sum_{j \in S(i)} x[j] = 1 \quad (i \in N) \quad (11)$$

$S(i)$ : スラブ  $i$  を含む部分集合  $j$  の集合

$$x[j] \in \{0, 1\} \quad (\forall j \in M)$$

$$c_j = k_1 \cdot 1 + k_2 \cdot c_{j2} = k_1 + k_2 \cdot c_{j2} \quad (\forall j \in M) \quad (12)$$

式(10)の  $c_j$  は、実行可能山  $j$  の評価値で、式(11)のように山数と積み替え数から評価される。山数はいずれの山も1であり、山積する際に発生する積み替え数を  $c_{j2}$  とし、それぞれの評価項の重み係数を  $k_1, k_2$  としている。

SPPでは、考察対象問題固有の制約である積姿制約や、目的関数となる積み替え数評価は、いずれも実行可能山を列挙する処理の中に含まれる。従って、0-1計画問題としての制約は任意の対象スラブが漏れなくかつ重複なくいずれかの山に属することを要請した式(11)のみとなる。このように定式化が容易でない制約式や評価式を列挙処理の中で扱える点が集合分割問題を実問題に適用する際の利点といえる。ただし、列挙処理の中で、積姿制約や仮置き数の評価をいかに高速に行うかが重要となる。この詳細は文献44)を参照されたい。

### 8.3 山分け問題への集合分割問題解法適用結果

この方法により山分けした結果と人が作成した山分け結

表3 最適化アルゴリズムの効果  
Effect of optimize (n: 3115)

	Number of Slab per one pile (piles)	Rate of temporary placed slabs
Manual	6.9 (451)	36%
Optimize	9.0 (346)	33%

果との比較を表3に示す。積み替え数の比率はほぼ同程度だが、山数は25%程度減らせることが判った。これにより保温ピットへの装入率が上がり装入温度の向上が期待できる。

#### 8.4 まとめ

ここでは、ヤード到着時点で、次工程への払出し予定が決まっている場合の、山分け問題をSPPで解く方法を紹介したが、この方法はメモリ消費量が多く、 $N$ が50を超えると計算困難となるケースがある。また、ヤードは時々刻々状況が変動するので、それに合わせたリアルタイムのリスケジュール方法も必須である。これを行うには、途中紹介した“山姿積み替え問題”への対応が必要となる。

### 9. 人との協調型スケジューラの開発

生産計画、スケジューリングシステムは、人の意思決定支援システムの1つである。通常の生産スケジューラは、立案結果に至る経緯を説明できる機能を持たない。適用対象によっては、このことがシステムによる立案結果にユーザが不満を持つ原因となることがある。

意思決定支援システムに関しては、多くの研究成果が公表されており、例えば、銭ら<sup>46)</sup>は製造計画を含む配置型問題では、画面の表示方法を工夫することで、問題を解く時間が短縮され、かつ、解の質も向上することを示している。

本章では、スケジューラを意思決定システムとして捉え、システムとして具備する機能や人との協調型アルゴリズムに関して検討した結果、及びそのキャスト編成への適用事例について述べる。

#### 9.1 協調型スケジューラ的设计指針

計画問題に関する具体的な設計指針を明らかにするため、簡易な計画問題を用いて、情報提示手段や機能配分が意思決定に及ぼす影響を調査した<sup>47)</sup>。その結果、次のような結果が得られた。

- (1) システムが最適化計算で利用していないユーザ属性を非表示にしたところ、システムの提案を判断するスピードが向上する場合があった。ただし、非表示項目を判断に利用しているユーザにとっては、システムに対する不満が増す場合もあった。
- (2) 最適化計算の途中結果を表示する機能や、最適化計算を途中で打ち切り、それ以降を人に任せる機能、人の計算結果を初期値として、それ以降を機械で計算する

機能、計画の微修正機能を付加するなど、人と機械の分担比率をユーザが自覚できる形式で変更可能とすることで、システム提案の受入れ度が向上した。

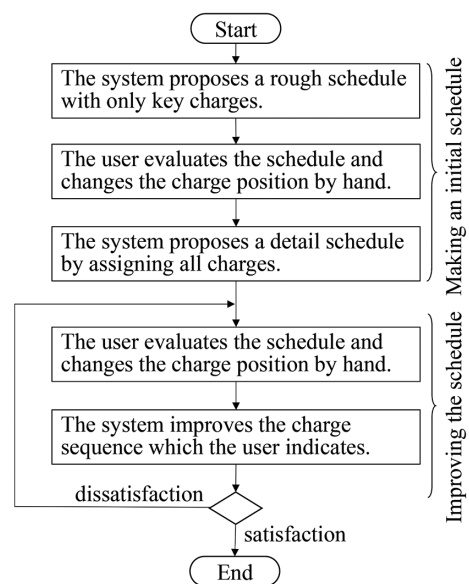
上記(1)は、人に提示する情報を多くしても、人の認知能力を低下させてしまうため、意思決定システムでは必要最低限の情報を提示することが望ましいという全ての意思決定システムに共通の項目である。鉄鋼の製造計画では、計画の良否判断に必要な情報は膨大であり、できる限り多くの情報を表示できる機能を備える必要があるが、主要項目のみ常に表示し、ユーザの要求に応じて必要情報を表示するユーザ I/F としなければならないと考える。

上記(2)は計算結果の判断だけでなく、計算の過程にも人の判断余地を残すことで、機械から押し付けられたのではなく、人と機械が共同で立案したという意識が生まれやすく、立案結果に対する納得性が向上したものと思われる。生産スケジューラにおいても、1回で最終的な立案結果を提示するのではなく、複数回に分けて徐々に計画を提示し、各段階で人の調整する余地を与えることが重要と考えた。

#### 9.2 人との協調型キャスト編成システム

前節の設計指針に基づいて、連続铸造機の製造計画を立案するキャスト編成システムを開発した<sup>48)</sup>。キャスト編成の担当者は編成対象の全てのチャージを平等に考えているのではなく、キャストの配置制約の厳しい難製造チャージの配置を先に決めた後、他のチャージの配置を計画していることが判った。また、1つのキャスト編成を立案した後、計画全体のバランスを見て、改善アイデアが尽きるまでキャスト編成を修正し、最終的な計画として確定している。

そこで、協調型キャスト編成システムの立案アルゴリズムを図20に示した。先ずシステムは計画対象のチャージを読み込み、配置制約の厳しい重点チャージのみを表示し

図20 協調型キャスト編成システムのアルゴリズム<sup>48)</sup>  
Scheduling algorithm for interactive cast scheduler

た粗計画をユーザに提示する。次にユーザは提示された粗計画を確認し、重点チャージの鑄造位置を修正する。この段階で、ユーザが特に気にする重点チャージの配置に関する合意は取れたため、残りのチャージの配置をシステムで決定し、ユーザに提示する。これにより、立案対象の全てのチャージを含んだ詳細計画の一次案がユーザに提示されたことになる。ユーザは詳細計画全体のバランスを確認し、修正箇所があれば、マニュアルで修正する。また、必要に応じてシステムの自動立案機能を用いて、指定した範囲の製造順を改善する。これらマニュアル修正と指定範囲のシステム改善をユーザが満足するまで繰り返し、最終結果として出力する。

このように、粗計画で合意を得てから詳細計画を提示する2段階とすることで、ユーザが受入れやすい詳細計画をシステムから提示することができる。

前記立案アルゴリズムが期待通りに機能するためには、使い易いユーザ I/F も重要である。協調型キャスト編成システムで実現した主要なユーザ I/F 機能を以下に示す。

- (1) 計画の評価値とその内訳の詳細表示機能 (提案根拠提示)
- (2) 制約違反等の色表示機能 (良否判断の容易化)
- (3) チャージのドラッグ&ドロップ機能 (協調的な計画の改善)
- (4) チャージの鑄造位置の固定機能 (協調的な計画の改善)
- (5) 複数チャージのグルーピング機能 (協調的な計画の改善)
- (6) 改善範囲指定機能 (協調的な計画の改善)
- (7) 制約有効/無効, 閾値変更, 評価関数重み修正機能 (立案性能の調整)
- (8) 改善履歴保存機能, 複数計画比較・差異表示機能 (複数計画の詳細な比較検討)
- (9) 立案対象の挿入位置ガイダンス機能 (ハンド立案支援, 新人教育用)

以上の機能を持つスケジューラ画面の例を図 21 に示す。

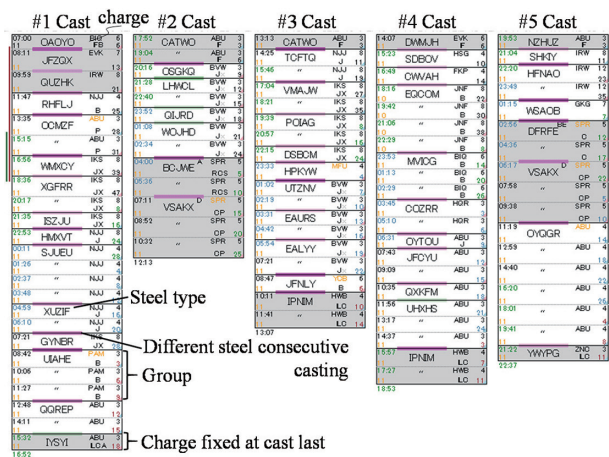


図 21 協調型キャスト編成システムのユーザ I/F<sup>48)</sup>  
User interface of interactive cast scheduler

### 9.3 まとめ

通常の生産スケジューラは立案結果を説明する機能を持たないため、適用対象によってはユーザの満足を得られないことがあった。そこで、本章では、スケジューラを意思決定支援システムとして捉え、人との協調型スケジューラ的设计指針を明らかにし、この設計指針をキャスト編成システムに適用して効果を検証した。開発したキャスト編成システムは現場で使用されており、ユーザ納得性が高く良質なキャスト編成が得られることを確認し、立案業務の負荷低減だけでなく、製造コスト低減や鑄造品質の向上に役立っている。また、協調型スケジューラが具備すべき条件は汎用性が高く、他の鉄鋼プロセスのスケジューリング問題へも応用され、成功を収めている<sup>49,50)</sup>。

## 10. 結 言

鉄鋼生産プロセスは、多品種小ロット注文を、各工程の大ロット化(生産性最大化)を指向しつつ、注文一品単位の製品仕様と納期を満足するように天然の原料から製品を作り分けるV型ジョブショップ型の生産プロセスである。また、各工程では製品品質やコストの観点から多くの製造制約条件や評価指標を考慮した生産スケジュールを立案する必要があり、工程毎であってもその立案には熟練ノウハウが必要である。本稿では、これらの計画立案業務を支援するための取り組みの事例として、原料、製鋼、熱延、物流問題に対する生産計画、スケジューリングアルゴリズムの開発状況について述べた。また、工程一貫での生産計画立案の観点で、厚板における取り組み事例を述べた。さらに、人とシステムが高度に連携することで、人だけ、或いはシステムだけではなし得ないレベルの生産計画を立案する試みについて述べた。

なお、開発したアルゴリズムの実装や保守を効率化することも重要な課題である。そのための取り組みの一例として、高度な数学的専門知識を必要とせず、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ツールの開発も進んでいる<sup>51)</sup>。

今後は、さらなる労働人口の減少が見込まれる中、原料～生産～出荷までの多段階工程一貫での生産計画、スケジューリングの支援、さらには複数製鉄所を見渡した全社一貫視点での計画支援技術の開発が必要になると考えられる。そのためには、さらに大規模な数理最適化問題の高速アルゴリズム開発はもとより、量子コンピュータのような次世代計算アーキテクチャの活用も必要になってくるであろう。

また、市場のニーズ変化に伴う注文構成変化や操業変動に迅速に対応できる再計画、再スケジューリングの能力も高めていく必要がある。早期に変化に気づき、迅速に対応するためには、注文データや操業実績データの分析技術もますます重要になる。さらには、人工知能に関する技術の

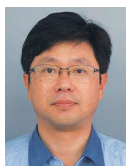
進展が目覚ましい中, 生産計画, スケジューリングを含む  
 工程管理業務を人とシステムがどのように分担することが  
 長期的に見て望ましいかも適切に判断することが重要であ  
 る。その上で, 人に気づきを与え, 直観的な操作が可能な  
 高度なユーザインターフェースの設計も重要である。これ  
 らを総合的なシステムソリューションとして提供し, 工程  
 管理だけでなく, 品質管理や操業管理とも連携した総合  
 的な生産マネジメント技術の確立に向けて引き続き取り組  
 んでいきたい。

### 参考文献

- 1) 新日本製鉄(株): 鉄と鉄鋼がわかる本. 日本実業出版社, 2004
- 2) 岩谷: 製鉄所における入出荷計画問題と最適化技術. オペレーションズ・リサーチ. 51 (3), 143-148 (2006)
- 3) 小林, 屋地, 斉藤, 鈴木: 鉄鋼原材料配合計画の最適化. オペレーションズ・リサーチ. 56 (11), 633-639 (2011)
- 4) 小林敬和, 鈴木豊, 佐野拓也, 潮田泰宏, 金澤典一, 屋地靖人: 原料輸送配船最適化システム. 材料とプロセス. 25 (2), 1029 (2012)
- 5) 小林敬和, 屋地靖人, 山田裕文, 岩見晋宏: 石炭ヤード配置最適化システム. 材料とプロセス. 22 (2), 345 (2009)
- 6) Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D.: Ship Routing and Scheduling in a New Millennium. *European Journal of Operational Research*. 228, 467-483 (2013)
- 7) Kobayashi, K., Kubo, M.: Optimization of Oil Tanker Schedules by Decomposition, Column Generation, and Time-space Network Techniques. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*. 27 (1), 161-173 (June 2010)
- 8) 岩谷: 鉄鋼業のスケジューリング業務における現場力. 鉄と鋼. 97 (6), 316-319 (2011)
- 9) 佐々木直人, 小川雄司, 務川進, 宮本健一郎: 溶銑脱りんの高効率化技術. 新日鉄技報. (394), 26-32 (2012)
- 10) 伊藤邦春, 屋地靖人, 小宮直人, 松村保, 大科正則: 出鋼スケジュール作成支援システム. 材料とプロセス. 20 (2), 299 (2007)
- 11) 伊藤邦春, 梅村純, 屋地靖人, 浦上武久, 松村保: 出鋼スケジュール作成支援システム-2. 材料とプロセス. 21 (2), 1145 (2008)
- 12) 吾郷正俊, 北田宏, 伊藤邦春: 製鋼工場における温度・スケジュール同時最適化モデル開発. *CAMP-ISIJ*. 28, 725 (2015)
- 13) 吾郷正俊, 北田宏, 伊藤邦春: 製鋼工場における溶鋼温度のばらつきを考慮したスケジュール最適化モデル開発. *CAMP-ISIJ*. 30, 783 (2017)
- 14) 蟹沢, 森脇, 梅田 ほか: 遺伝的アルゴリズムを用いた熱間圧延順スケジューリングに関する研究. 材料とプロセス. 14 (2), 16 (2001)
- 15) 三宮, 喜多, 玉置, 岩本: 遺伝アルゴリズムと最適化. 朝倉書店, 1998, p. 166-178
- 16) 濱, 吉住: 薄板熱延工程のためのスケジューリング手法. *スケジューリング・シンポジウム予稿集*. 2006
- 17) 黒川, 足立, 長坂: 加熱炉装入順・圧延順同時最適化技術に基づく熱延スケジューラの開発. *CAMP-ISIJ*. 27, 338 (2014)
- 18) 藤井, 裏山, 加嶋, 井村 ほか: 鋼材加熱炉の装入スケジューリングと燃焼制御の同時最適化. *鉄と鋼*. 96 (7), 434-442 (2010)
- 19) Suzuki, M., Katsuki, K., Imura, J., Nakagawa, J., Kurokawa, T., Aihara, K.: Modeling and Real-time Heating Control of a Reheating Furnace Using an Advection Equation. *IFAC*. 3M, 2012
- 20) Suzuki, M., Katsuki, K., Imura, J., Nakagawa, J., Kurokawa, T., Aihara, K.: Simultaneous Optimization of Slab Permutation Scheduling and Heating Control for a Reheating Furnace. *J. Process Control*. (2013)
- 21) 濱, 吉住: 製鋼・熱延スケジューラ連携による DHCR スケジュール作成方法. *オペレーションズ・リサーチ*. 56 (11), 646-653 (2011)
- 22) Ashayeri, J., Heuts, R.J.M., Lansdaal, H.G.L., Srijbosch, L.W.G.: Cyclic Production - Inventory Planning and Control in Pre-Deco Industry. *Int. J. Production Economics*. 103, 715-725 (2006)
- 23) Shioya, M., Uchida, K.: Prediction Model to Design Standard Production Period for Steel Plate Mills. 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR 2017). 2017, p. 346-351
- 24) Kohavi, R., Quinlan, J.R.: *Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery*. Oxford University Press, 2002, p. 267
- 25) 塩谷政典, 森純一, 伊藤邦春, 水谷泰, 鳥飼健司: 厚板製造標準工期算出技術の開発. 材料とプロセス. 26 (1), 238 (2013)
- 26) Bishop, C.M. 著, 元田浩, 栗田多喜夫, 樋口知之, 松本裕治, 村田昇 訳: *パターン認識と機械学習*. シュプリンガー・ジャパン, 東京, 2007, p. 138
- 27) 塩谷政典, 森純一, 伊藤邦春, 水谷泰, 鳥飼健司: 厚板製造工期の確率モデルと製造標準工期算出技術の開発. *鉄と鋼*. 101 (11), 574-583 (2015)
- 28) 森純一, 伊藤邦春, 水谷泰, 鳥飼健司, 千崎信, 屋地靖人: 厚板出鋼計画最適化技術の開発. 材料とプロセス. 25 (1), 355 (2012)
- 29) 伊藤邦春, 森純一, 塩谷政典, 西村亮一, 鳥飼健司, 水谷泰: 厚板出鋼計画最適化技術の開発(その2). 材料とプロセス. 30 (1), 288 (2017)
- 30) Shioya, M., Mori, J., Ito, K., Mizutani, Y., Torikai, K.: Development of New Order Entry System for Plate Mills. *Asia Steel 2015*. 2015, p. 546-547
- 31) 塩谷政典: 物流管制問題の解決に適したカラーペトリネットツール. *計測自動制御学会論文集*. 53 (8), 437-447 (2017)
- 32) Jensen, K., Kristensen, L.M., Wells, L.: Coloured Petri Nets and CPN Tools for Modelling and Validation of Concurrent Systems. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*.



- 9 (3), 213-254 (2007)
- 33) 塩谷政典, 定木淳, 杉山賢司, 藤井章, 西村伸哉, 榎並隆司, 福谷秀一: ベトリネットシミュレータを用いた AGV の自動配車システム. 材料とプロセス. 21 (1), 285 (2008)
- 34) 塩谷政典, 屋地靖人, 永田俊介, 浦上武久, 井口弘敏: 溶銑物流シミュレータと溶銑管制スケジューラ. 材料とプロセス. 22 (14), 346 (2009)
- 35) 黒川哲明, 中島裕文, 鈴木庸司: 集合分割解法によるスラブヤード山分け問題解法技術の開発. 材料とプロセス. 29 (2), 688 (2016)
- 36) 黒川, 屋地, 中島: 搬送制御方法, 装置, 及びコンピュータプログラム. 日本特許庁, 特許第 4987602 号公報
- 37) 黒川, 中島: 搬送制御方法, 装置, 及びコンピュータプログラム. 日本特許庁, 特許第 5332872 号公報
- 38) 久山, 富山: クレーンハンドリング順序最適化技術. JFE 技報. 35 (2), 43-47 (2015)
- 39) 田中俊二: 荷物の積替え作業低減化に関する研究動向. システム/制御/情報. 61 (3), 88-94 (2017)
- 40) 黒川哲明: ヤード管理装置, 方法, 及びコンピュータプログラム. 日本特許庁, 特許第 5365759 号公報
- 41) 黒川哲明: 搬送制御方法, 装置, 及びコンピュータプログラム. 日本特許庁, 特許第 5434267 号公報
- 42) 黒川, 松井, 高橋: 鋼材の山分け計画立案装置, 方法, 及びコンピュータプログラム. 日本特許庁, 特開 2017-39556
- 43) 黒川, 松井: 鋼材の山分け計画立案装置, 方法, 及びコンピュータプログラム. 日本特許庁, 特開 2017-40985
- 44) 黒川, 大貝: 集合分割問題解法によるスラブ山分け問題求解技術開発. 計測自動制御学会論文集. 54 (2), (2018)
- 45) 鈴木, 岩村: ナップザック問題および集合被覆(分割)問題. オペレーションズ・リサーチ. 24 (6), 359-368 (1979)
- 46) 銭彩霞, 伊藤謙治, 圓川隆夫, 秋葉雅夫: 人間-コンピュータ協調型問題における問題解決効率に関する画面表示要因. 人間工学. 26 (5), 233-242 (1990)
- 47) 塩瀬隆之, 吉野英知, 柳原正樹, 本吉達郎, 川上浩司, 片井修: 意思決定支援システムの説得性を増す信頼ある情報提示手法について. ヒューマンインタフェースシンポジウム論文集. 835-840 (2008)
- 48) 塩谷政典, 塩瀬隆之, 青野通匡: 人との協調型キャスト編成システムの開発. システム制御情報学会論文誌. 29 (9), 391-400 (2016)
- 49) 小林敬和, 屋地靖人, 山田裕文, 岩見晋宏: 石炭ヤード払出し最適化システム. 材料とプロセス. 21 (1), 127 (2008)
- 50) 小林敬和, 屋地靖人, 山田裕文, 岩見晋宏: 石炭ヤード配置最適化システム. 材料とプロセス. 22 (1), 138 (2009)
- 51) 古川昭仁, 稲富峰憲, 梅田公範: 生産・物流最適化技術の開発と今後の展開. TEXENG Report. 日鉄住金テックスエンジ(株)ホームページ内 ([http://www.tex.nssmc.com/pdf/report/texteng\\_tel\\_01.pdf](http://www.tex.nssmc.com/pdf/report/texteng_tel_01.pdf))



伊藤邦春 Kuniharu ITO  
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  
所長  
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  
主幹研究員



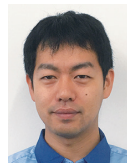
黒川哲明 Tetsuaki KUROKAWA  
プロセス研究所  
インテリジェントアルゴリズム研究センター  
主幹研究員



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  
主幹研究員



塩谷政典 Masanori SHIOYA  
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  
上席主幹研究員 博士(工学)



森 純一 Junichi MORI  
君津製鉄所 生産技術部 システム室  
主幹 Ph.D