

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適用事例

伊藤 邦春, 小林 敬和, 塩谷 政典, 森 純一

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ブレイクダウン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。本稿では、本業務への OR 技術適用に際し特に課題となる、(1) 大規模問題への対応、(2) 生産ばらつきへの対応、(3) 立案結果に対する説明性への対応、に関する取り組み事例を紹介する。

キーワード：生産計画、スケジューリング、数理最適化、製造工期、協調システム

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、家電などさまざまな顧客の要望に応じた鉄鋼製品を、高炉→転炉→連続鑄造→圧延→焼鈍→表面処理などの工程を経て作り分ける、ブレイクダウン型の生産形態をもつ。製品仕様は、強度、靱性などの材質、鋼材表面や内部の品位、厚みや巾などのサイズなど、製品用途に応じたさまざまな条件から成り、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、メッキ種などの組み合わせから成り、製品仕様に準ずる規模の多様性をもつ。

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、納期などさまざま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）の両面で有利であり、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

いとう くにはる, こばやし ひろかず, しおや まさのり,
もり じゅんいち

日本製鉄株式会社技術開発本部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

〒 293-8511 千葉県富津市新富 20-1

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さまざま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、われわれは、原料、製鋼、熱間圧延、物流など、鉄鋼生産プロセスの各工程の生産計画、スケジューリング業務への OR 技術の適用を進めてきた。2 節では、大規模なスケジューリング問題を実用的な時間内で解くための取り組みとして、原料輸送配船計画最適化システムの開発事例を紹介する。3 節では、生産途中で発生する操業上のさまざまなばらつきを取り扱った事例として、厚板製造工程における製造標準工期を機械学習を用いて高精度に予測する技術の開発事例を紹介する。

なお、適用対象によっては、すべ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、システムの立案結果に対する説明性が強く求められるケースがある。4 節では、複雑な業務調整を伴う対象においてしばしば発生するこの問題に対する取り組みとして、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（鉄

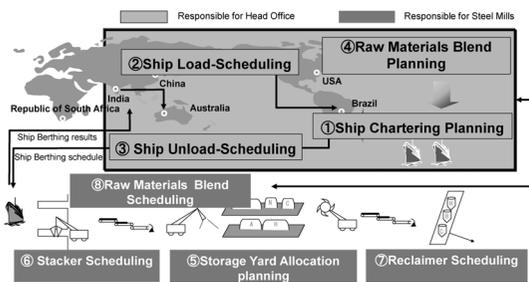


図1 原料に関連する生産・物流計画対象

鉄)となる。この銑鉄はさまざまに成分調整され、薄板、厚板、ピレットといった最終製品に加工される [1]。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。顧客からの品質要求、納期要求に応えつつ、操業を安定化しコストを削減するためには、原料の輸送計画、製造工程の生産計画、および製造工程間の物流計画の立案が、重要な役割を担っている。

これら背景のもとわれわれは、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・物流の最適化に取り組んできた。取組み対象は、本社と箇所（各所の製鉄所）に広がっている（図1）。本社の取組み対象は、全社視点でのメリットを考慮して、複数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詳細な操業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、配合計画をもとに、箇所の日々の実操業に対応できるように、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動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動時刻およ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

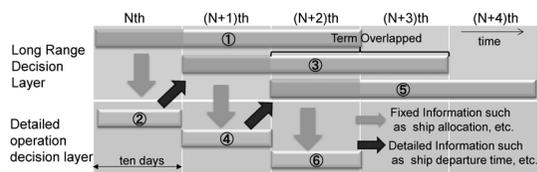


図2 階層型時間分割逐次予測型アルゴリズム概要 [2]

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で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 [2, 3]。

ここでは、一例として、本社での業務である原料輸送配船計画最適化システム [2] の開発事例を紹介する。

2.1 原料輸送配船計画業務概要

原料輸送配船計画業務は、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もとに、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、輸送ルートを適正化することで費用を抑えることが可能となる。

2.2 スケジューリング機能の構成

船の積地、揚地と寄港時期を離散変数、船への荷積量や荷揚量を連続変数とする混合整数計画問題として定式化した。決定変数、制約条件の一例、目的関数を以下に示す。

決定変数

- δ 船, 積港, 揚港, 寄港順, 旬 : 積港, 揚港に対象旬に寄港する 1, しない 0
- load 船, 積港, 銘柄, 旬 : 当該船への荷積量
- unload 船, 揚港, 銘柄, 旬 : 当該船からの荷揚量

制約条件（一例）

原料契約量制約, 原料使用量制約, 使用可能船舶条件, 在庫推移制約, パース荷役制約など

目的関数

輸送費用と荷揚残量の重み付き線形和の最小化

$$\min w_1 \sum_{\text{船}} \sum_{\text{積地}} \sum_{\text{揚地}} \sum_{\text{寄港順}} \sum_{\text{旬}} (\text{フレート}_{\text{船, 積地, 揚地}} \times \delta_{\text{船, 積港, 揚港, 寄港順, 旬}}) + w_2 \sum_{\text{揚地}} \sum_{\text{寄港順}} \sum_{\text{旬}} \text{荷揚残量}_{\text{揚地, 銘柄, 旬}}$$

ここで、荷揚残量とは、当該揚地で荷揚すべき量（荷揚量の総和）と当該旬までに荷揚が完了した量（荷揚

能力と旬で定まる定数)との差である。荷揚残量が多いと船舶に荷揚げ待ちが発生しペナルティー費用が発生することから、船舶の渋滞の指標となる。

なお、本問題では輸送時間が短い中国と長いブラジルがあるなど、船舶のさまざまな輸送条件が混在する。そのため、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長期の配船計画を適正化することは容易ではない[4, 5]。このように長期計画の組合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。

そこで、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などを詳細に最適化する階層に問題を分割した。さらに、各階層で立案期間を時間軸で分割し、各期間で数理最適化手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)。

2.3 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、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。

3. 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る。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、

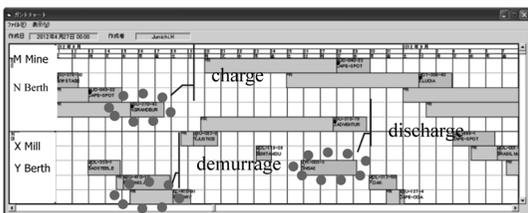


図3 立案結果のガントチャート [2]

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。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。

本節では、製造工期の予測が難しい品種の一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。

3.1 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4に示す。加熱炉で熱せられたスラブは、粗・仕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、注文の製造仕様に応じ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

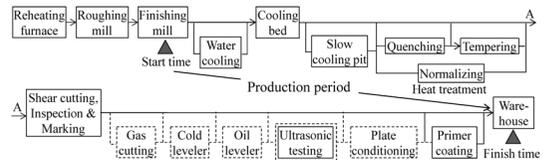


図4 厚板製造プロセス(実線:仕様工程,破線:発生工程) [10]

Proper rolling date	Shipping deadline			Delivery date		
Standard production period (prediction target)						
Base period	Processing period	Grade margin	Inspection margin	Customer margin		
Works A	Works B	Works C	Works A	Works B	Works C	
A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂	B ₃	
			UST	C ₁	C ₂	C ₃
		

図5 従来の標準工期テーブル [10]

質に応じて通過有無が決まる発生工程（矯正，手入など）とがある。図4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）は両方の側面をもつ工程である。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5のような構成のテーブルで管

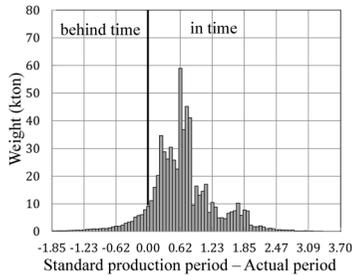


図6 従来の標準工期の余裕日数 [10]

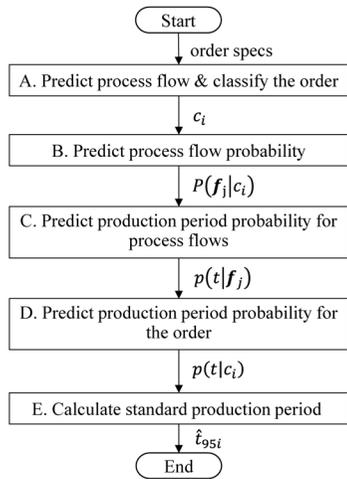


図7 新しい標準工期の算出アルゴリズム [6]

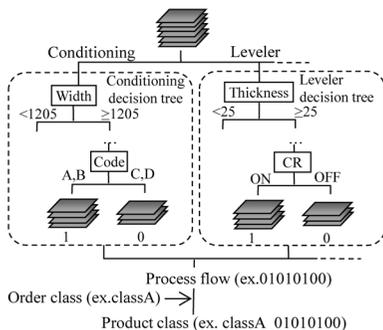


図8 製造品種を決定する決定木 [10]

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6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）。

3.2 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わかった。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出アルゴリズムを図7に示す [6]。以下，アルゴリズムの各ステップの処理内容を説明する。

3.2.1 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8のように注文の製造仕様から，工程ごとに通過有無を決定木 [7] で予測し，通過有無を表す 0/1 の記号を一行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) [8]。

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

3.2.2 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 ($f_j = (f_1, f_2, \dots, f_M)$) 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。

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

3.2.3 通過パターンごとの製造工期の算出

注文がある通過パターン f_j で製造される時，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 (μ_m) と分散 (v_m) を求める (最尤推定法 [9])。ここで、 \mathbf{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。

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

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

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

$$J = \sum_{n=1}^N \ln p(t_n|\tilde{\mathbf{f}}_n)$$

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

式 (5) の N は学習データのプレート数であり、すべての品種が製造される半年から一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 [10]。

3.2.4 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 $P(\mathbf{f}_j|c_i)$ 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 $p(t|\mathbf{f}_j)$ を、式 (6) に示すように組み合わせ、製造品種の製造工期 $p(t|c_i)$ を求める。

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

3.2.5 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}_{95i} 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。

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

3.3 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 9 に示す。図 6 と比

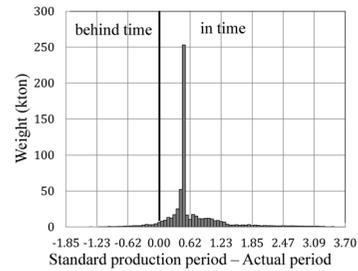


図 9 新しい標準工期の余裕日数 [10]

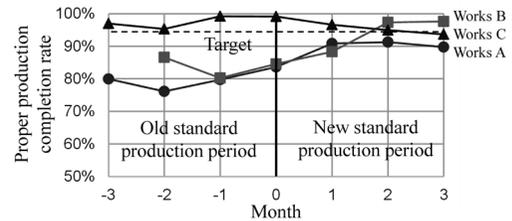


図 10 新しい標準工期の余裕日数 [13]

べると、新しい標準工期のほうが、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三つの製鉄所の荷揃達成率の実績値の推移を図 10 に示す。この荷揃達成率の実績値とは、「標準工期 \geq 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ごとにばらつきが大きく、荷揃達成率が 80% を切っていた場合もあったが、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 [11-13] 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。

4. 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一つである。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もたない。適用対象によっては、このことがシステムによる

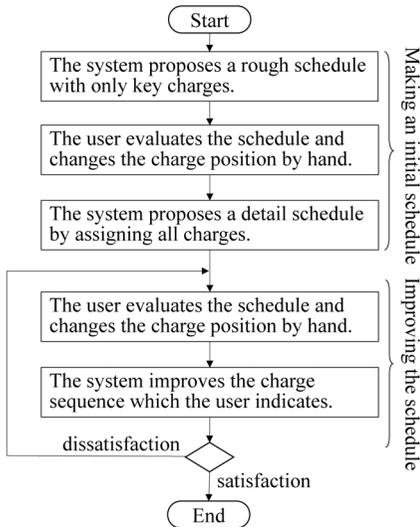


図 11 協調型キャスト編成システムのアルゴリズム [16]

立案結果にユーザが不満をも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、たとえば、銭ら [14] 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。

本節では、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、およびそのキャスト編成への適用事例について述べる。

4.1 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 [15]。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、システム提案の受け入れ度が向上した。

上記 (1) は、人に提示する情報を多くしても、人の

#1 Cast	charge	#2 Cast	#3 Cast	#4 Cast	#5 Cast
0708 GAGIO					
0841 JFZXK					
0748 OLCHK					
0748 RHFLJ					
0835 OCMGF					
0835 WJLHD					
0835 WMOYD					
0835 XGFRF					
0835 SZJJI					
0835 HMVAT					
0835 SUJEU					
0835 NNAJ					
0835 XGFRF					
0841 LANHE					
0841 OGREP					
0841 DSVI					
0708 CATWO					
0708 TCFTO					
0708 OSGHO					
0708 LHMCL					
0708 CLRD					
0708 PCJAG					
0708 WJLHD					
0708 OSBOM					
0708 BQME					
0708 HPIOW					
0708 VSAKH					
0708 EALRS					
0708 EALYY					
0708 JNPLY					
0708 IPRM					
0708 UHKS					
0708 IPRM					
0708 WYPG					
0708 SHRY					
0708 HFNAD					
0708 VSACB					
0708 OFRFE					
0708 VSAKH					
0708 CZRR					
0708 JFOYU					
0708 IPRM					
0708 WYPG					

図 12 協調型キャスト編成システムのユーザ I/F [16]

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すべ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。

4.2 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 [16]。キャスト編成の担当者は編成対象のすべ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わかった。また、一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 11 とした。ま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、重点チャージの铸造位置を修正する。この段階で、ユーザが特に気にする重点チャ

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、立案対象のすべ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、ユーザが受け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どおりに機能するためには、使いやすいユーザ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) チャージの铸造位置の固定機能(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)

以上の機能をもつスケジューラ画面の例を図12に示す。

4.3 適用効果

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、製造コスト低減や铸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、ほか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 [3, 17]。

5. 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ブレイクダウン型の生産プロセスである。大規模かつ複雑な生産工程であること、天然原料に由来する成分ばらつきなどへの対応が不可避であること、生産プロセス内の各工程の生産計画を調整する必要であることなどから、鉄鋼生産プロセスにおける生産計画立案業務の支援技術の開発にはさまざまな工夫が必要となる。本稿では、これらの課題に対する取り組み事例を述べた。

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めている [18]。

今後も工程管理技術のさらなる高度化に向けた取り組みを継続していきたい。

参考文献

- [1] 新日本製鉄、『鉄と鉄鋼がわかる本』, 日本実業出版社, 2004.
- [2] 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), p. 1029, 2012.
- [3] 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), p. 345, 2009.
- [4] M. Christiansen, K. Fagerholt, B. Nygreen and D. Ronen, “Ship routing and scheduling in a new millennium,” *European Journal of Operational Research*, **228**, pp. 467–483, 2013.
- [5] K. Kobayashi and M. Kubo, “Optimization of oil tanker schedules by decomposition, column generation, and time-space network techniques,” *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, **27**, pp. 161–173, 2010.
- [6] M. Shioya and K. Uchida, “Prediction model to design standard production period for steel plate mills,” In *Proceedings of 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics*, pp. 346–351, 2017.
- [7] R. Kohavi, J. R. Quinlan, *Handbook of Data Mining and Knowledge Discovery*, Oxford University Press, p. 267, 2002.
- [8] 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), p. 238, 2013.
- [9] C. M. Bishop (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』, シュブリンガー・ジャパン, p. 138, 2007.
- [10] 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**, pp. 574–583, 2015.
- [11] 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), p. 355, 2012.
- [12] 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), p. 288, 2017.
- [13] M. Shioya, J. Mori, K. Ito, Y. Mizutani and K. Torikai, “Development of new order entry system for plate mills,” *Asia Steel*, **2015**, pp. 546–547, 2015.
- [14] 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**, pp. 233~242, 1990.
- [15] 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, pp. 835–840, 2008.
- [16] 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**, pp. 391–400, 2016.
- [17] 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), p. 127, 2008.
- [18] 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, https://www.tex.nipponsteel.com/pdf/report/texeng_te1_01.pdf (2019 年 11 月 12 日閲覧)