



特集記事・8

ここまで来た鉄鋼の計測・制御・システム技術

時間分割繰り返し型生産・物流最適化による原料一貫物流システム

The Raw Materials Consistency Distribution System by Receding Horizon Repetition Type Optimization Method for Production Planning and Physical Distribution

新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター 主任研究員
小林敬和
 Hirokazu Kobayashi

新日本製鐵(株) 製鉄技術部 マネジャー
斎藤元治
 Genji Saito

新日本製鐵(株) 環境・プロセス研究開発センター 主幹研究員
屋地靖人
 Yasuhito Yaji

新日本製鐵(株) 製鉄技術部 マネジャー
鈴木 豊
 Yutaka Suzuki

1 緒言

鉄鋼業において製鉄原料工程では、製造コスト削減に向けて効率化、省力化、高機能操業を推進¹⁾して来た。これらは主に製鉄原料設備能力の増強を中心に進められて来たのが実情である。

しかし、これら増強した設備をいかに有効に使用するかが、大きな課題であり、その使用方法いかにによって、製造コストに大きな影響を与える。このため、これらの使い方を改善すること、つまり生産計画および物流の計画を改善することが望まれている²⁾。

しかしながら、従来これら生産計画および物流計画に対しては、問題が複雑であるために、本来あるべき積地～揚地の一貫評価は言うに及ばず、各個別工程での計画に対しても人手での作業が主であった。

そこで、原料物流コスト改善を目的に、「原料一貫物流最適化」を最終目標として、抜本的改善に取り組んで来た。

以下に新日本製鐵(株)の取組み状況について報告する。

2 原料物流の課題について

原料物流は、図1に示すように、①全社での出銑量、製銑量を考慮して原料を輸送する船を確保する船財源計画、②確保した船を、購買量を勘案しながら、どの積地(鉱山)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、製銑量を勘案しながら配合する配合計画がある。また、決定された船、配合計画を元に、各製鉄所では日々の実操業に合うように、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ヤード計画で決定された受入れ場所に従い受入れ搬送設備の稼働時刻を決める受入れ計画、⑦ヤード計画で決定された払出し場所に従い払出し搬送設備の稼働時刻および入槽すべき槽を決める払出し計画、⑧本社機能で決定された配合計画を日々の

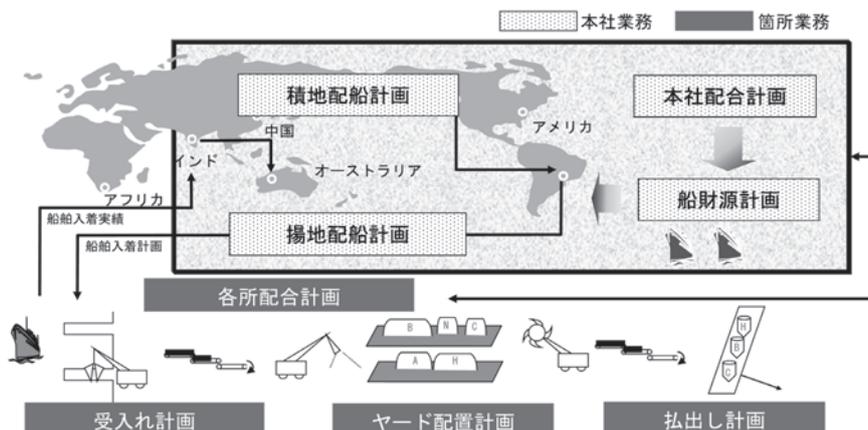


図1 製鉄原料部門に関連する物流計画

実操業に合うように調整する配合計画を決定する必要がある。

これら夫々の計画は、互いに関連性が強い。例えば、配船計画と配合計画を例とすると原料を荷揚げ（入荷）する船舶（荷揚げされる原料の銘柄と量）が決まっていないと、原料を荷揚げされた製鉄所（所）で、どの銘柄をどれだけの量使うかを具体的に決定出来ない、つまり配合計画を作成出来ない。一方、船舶の配船計画を作成するためには、原料を荷揚げする揚港である製鉄所で、どの銘柄をどれだけの量を使うかが決まっている必要がある。このように、配合計画、配船計画はお互いに強い関係にあり、一方のみを単独で決めることが出来ない。

このため、互いの計画の関連を考慮しながら、物流全体を一貫して計画立案することが求められる。つまり、各個別工程での計画の最適化だけでなく、出来るだけ計画間を連携する機能を構築することで、一貫物流としての最適化が期待される。

また、これら計画の出来、不出来は、輸送費用、滞船料（船が着岸出来ずに待つ場合にペナルティーとして支払う費用）は言うに及ばず製造コスト、更には溶銑の品質、コークス品質に多大の影響を与える重要な課題となっている。

3 原料一貫物流最適化に向けての全体構想

上述の原料物流の課題を解決し、互いの計画の関連を考慮しながら、物流全体を一貫して計画立案することで、原料物流コストの改善に取り組んで来た。また、これら取組みは最終的には、原料物流全体を一貫として最適化することを目指している。

3.1 具体的課題

図2に従来のシステム構成を示す。図2に示したように、

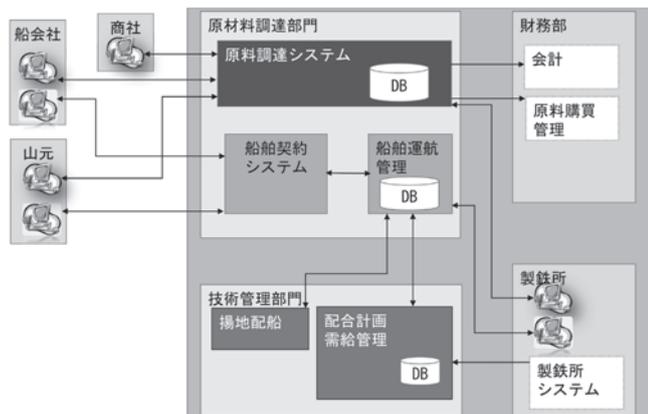


図2 従来のシステム構成

配合と配船とは従来別部門が行っていたため、互いにシステム構成がばらばらであり、かつ各製鉄所の機能との連携も不十分であったため、十分な連携が出来ていない状況であった。これらの状況に加えて、1) 配合・配船計画業務の連携機能がない、2) 性状を考慮した配合計画立案のための支援機能がなく、技術者の知見と試行錯誤に依存していた、3) 配船ポジション決定のためのツールがなく、人手で対応を行っていた、等の課題があった。

更に、これらの問題は配船計画のみを考えたとしても、例えば仮に積地選択7箇所、製鉄所7箇所、銘柄を積揚3銘柄選択可能、2ヶ月分の船舶120隻とした場合には、単純なアルゴリズムで選択問題として考えた場合、ある積地寄港先に寄港するかしないかを選択する場合に、各2通りの選択があると考えると $(2^7 \times 2^3 \times 2^7 \times 2^3)^{120}$ 通りとなる。これを計算すると約 10^{720} 通りと、とても通常的手法では問題を解くことが出来ない、大規模な物流問題であった。

3.2 現在までの取組みと成果

上記課題を解決するため、図3に示すように、需給管理情報を本社～積地～使用実績（製鉄所）まで一元管理出来る情報プラットフォームの構築を行い、十分な情報の連携を図れる機能を構築した。更に、本社機能と箇所機能も同一プラットフォーム上で実現することで、本社機能と箇所機能の連携の強化を実現した。

本社機能では、配合計画および配船計画（揚地配船）の立案システムの構築を行い、配合・配船最適化の機能を互いに連動させることで、配合・配船一貫での計画の最適化を可能としている。

更に、図4に示すように、立案された配合・配船計画は直ちに製鉄所と共有される。製鉄所ではこれらの計画を元に、受払い・ヤード配置計画を計画することが可能となった。また操業実績も直ちに全社で共有され、これら更新された最新

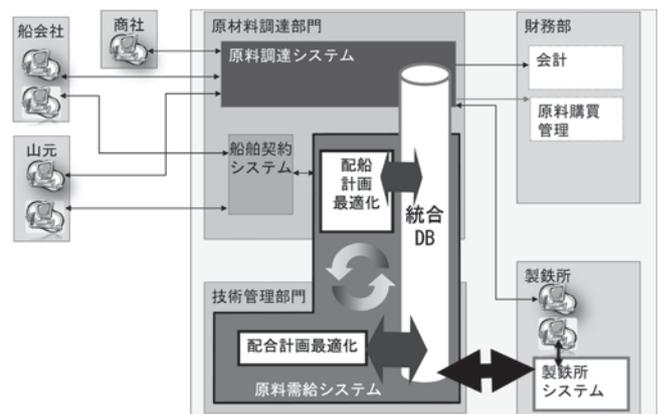


図3 対策後のシステム構成

の情報を元に、配合・配船計画を更新することが可能となった。

4 個別機能の詳細

4.1 揚地配船最適化

4.1.1 課題

原料の安価・安定供給は非常に重要な課題であり全社コストのミニマム化がポイントとなる。

これらの背景の下、揚地への船の最適配船計画を作成することで、全社としてのトータル輸送費用削減、ヤード在庫削減を目指すシステム³⁾を開発することが求められた。

4.1.2 取組みと成果

揚地配船計画業務は、積地での配船情報(船舶の積載銘柄/量・出港日)、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、揚地(=製鉄所)での配船計画を決定するものである。しかし、本問題は寄航する製鉄所を決定する組合せの要素と、原料の荷揚量等の量決定的要素が絡み合い、また荷揚周期が短い原料と、非常に長い原料が混在する等の時間的な要素が絡み合う複雑な問題である。そこで、原料輸送船のトータル輸送費用低減を目的に、適切な揚地、揚パス、荷揚銘柄、荷揚量、荷揚時刻を決定するシステムを構築した。

本システムでは、1.主要な操業制約や評価指標のみを考慮した数理最適化問題^{4,5)}を解く、2.上記決定内容を既知情報として、更に考慮すべき操業制約を追加して数理最適問題を解く、3.数理計画問題に組み込めなかった詳細な操業制約条件を組み込んだシミュレータでシミュレーションを実行することで、実用的に十分な最適性を持つスケジュールを作成する機能構成(図5、図6)とした。



図4 対策後の本社機能・箇所機能の連携

原料揚地配船計画立案に上記アルゴリズムを適用することにより、実運用に十分な最適性を有する揚地での配船計画を、高速に立案することが出来ることが分かった。

人手で立案した計画と開発したシステムを比較した結果、図7に示すように、人手では在庫切れが発生してしまう場合でも、システムでは在庫切れを発生させない立案が可能である。更に図8に示すように、人手では重船待ち(他の船が岸壁を使用しているため、着岸出来ずに待つこと)、ヤード待ち(ヤードが一杯であるため荷降ろし出来ずに待つこと)による滞船が発生していたが、システムではより少ない滞船待ちでの計画を立案することが可能となった。

4.2 石炭受入れ・ヤード配置・払出し工程一貫計画の最適化

4.2.1 石炭ヤード配置計画の最適化

4.2.1.1 課題

計画された配船を元に、各製鉄所では荷役輸送ラインを経由しヤードへ原料を受入れる必要がある。また、計画された配合計画を元に、ヤードから原料を払出す必要がある。

この受払いによる石炭ヤード内の置場への原料の配置方法により、受入れの効率に大きな影響が出る。ここで、受入れに際して、ヤードに小山を沢山作るような受入れをした場合には、ヤード効率を著しく低下させることとなり、船から受

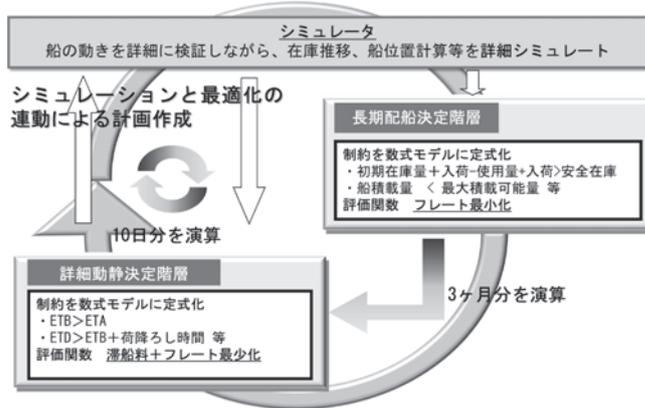


図5 揚地配船最適化アルゴリズム概念図(構成)

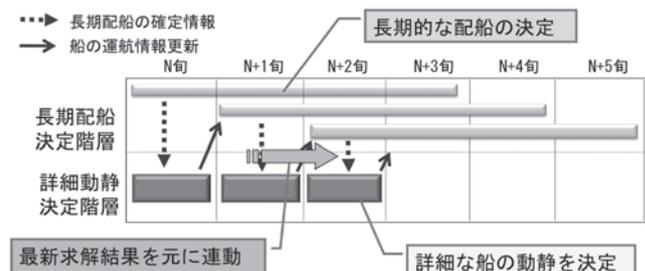


図6 揚地配船最適化アルゴリズム概念図(期間分割)

入れが出来ず、滞船が発生する要因となる。

しかし、従来この石炭ヤード管理業務は熟練担当者の経験に頼っていた。そこで、滞船料の削減を目的に、石炭ヤードへの適切な受入れ山位置・量、払出し山位置・量を決定するシステムを構築⁶⁾した。

4.2.1.2 取組みと成果

石炭ヤード配置業務は、船舶によって運ばれてくる多種類の石炭をヤードの空きスペースに山積みし、その山からコークス炉に使用計画に従い石炭を供給するための、受入れ山位置、払出し山位置および量を日精度で決定するものである。

本業務は、時間の推移で山、空地がダイナミックに変化するため、その変化を、変数として定義し、数理計画法に基づいて定式化することが困難であることが本問題の特徴であった(図9)。

この問題を解決するため、1) ヤード効率が悪くなる小山を削減し、2) 広いヤード連続空きスペースを確保することで船

舶の入港から出港の時間を短縮し、滞船料を削減するシステムを構築した。

本システムでは、上記定式化が困難な問題に対して、ヤード空間(長さ方向に1次元)を等間隔に分割し、時間との2次元座標を考慮することで、山の配置の変化を始点位置、終点位置を変数とし定義することを可能とした。この定義を元に、混合整数計画法を用いて最適化する手法を開発した。

具体的には、①立案対象の一定期間に対して、受入れ・払出しを山始点、終点で数式モデル化し、求解、②上記解に基づきシミュレータで時刻更新、③①に戻る、を立案期間が終了するまで繰り返すことで、実用的に十分な最適性を持つスケジュールを作成する機能構成(図10)とした。

本技術の適用により、1ヶ月分の計画に対して、2山程度の小山を削減するスケジュールを数分で高速に立案することが出来た。

本システムでのヤード配置計画の立案結果を図11に示す。図11に示すように、立案開始時点であった小山が、18日目には無くなり、ヤードの効率的な運用の可能性を確認することが出来た。

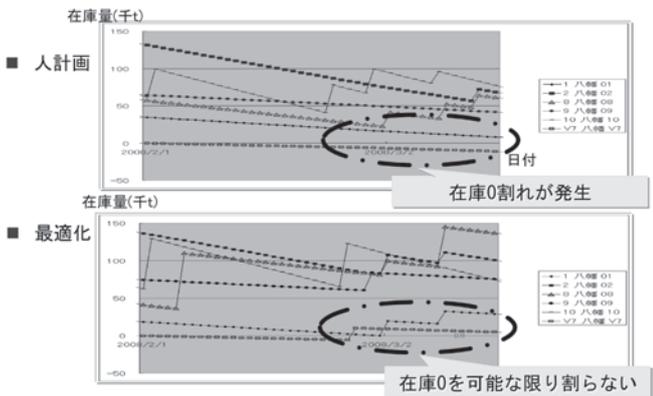


図7 人手立案と最適化立案での在庫推移結果比較例

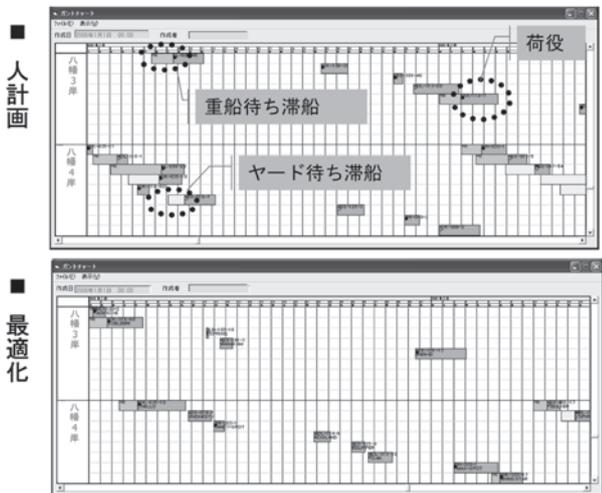


図8 人手立案と最適化立案での配船結果比較例

4.2.2 石炭ヤード払出し計画の最適化

4.2.2.1 課題

ヤード配置計画により作成された受払い計画を元に、ヤードからの受払いの操業指示を行う必要がある。この場合には、

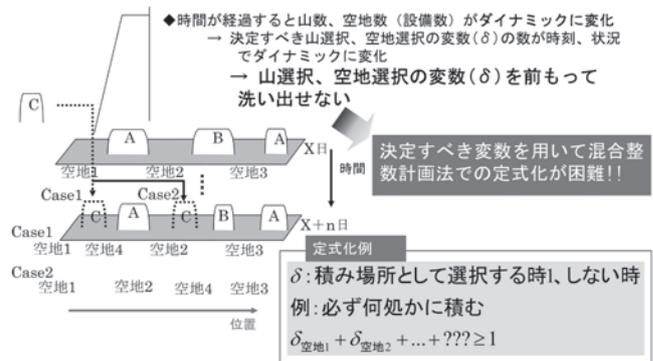


図9 ヤード配置問題の特徴

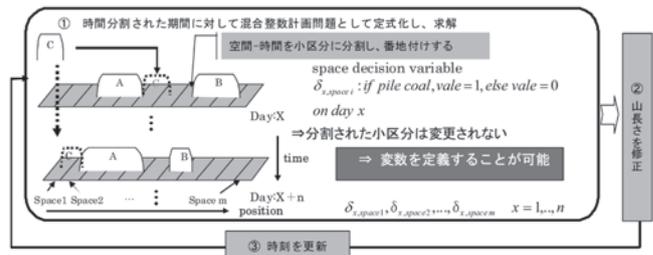


図10 ヤード配置最適化アルゴリズム概念図

計画されたヤード配置計画を出来るだけ遵守するように、アンローダ、スタッカー、リクレーマといった設備を使う受払い計画を高い精度で立案する必要がある。

ここで、高炉、コークス炉の操業安定にとって、高炉、焼結機に鉄鉱石を供給、あるいはコークス炉に石炭を供給するための貯炭槽の在庫が切れな計画を適切に決定することは極めて重要である。

しかし、本問題は鉱石、石炭銘柄数および貯炭槽の数が多い一方で、払出し用のリクレーマは非常に高価なこともあり、数台と少ない。また、入槽間隔も短いため高速な計画の立案が望まれる。

そこで、安定操業を目的に、石炭ヤードへ払出し計画を高精度で、高速に立案するシステムを構築⁷⁾した。

4.2.2.2 取組みと成果

石炭ヤード払出し業務は、ヤードに山積された多種類の銘柄から、コークス炉に石炭を供給するための貯炭槽の在庫が切れないように、石炭を払出す計画を決定するものである。ここでは、使用するスタッカー、ベルトコンベアー、入槽する槽および設備を稼働させる時刻、入槽量を高精度で決定するものである。

本業務は、上述のように銘柄数が多く、払出しリクレーマが少ない、かつ槽も多い中で高速に計画を立案する必要がある。

全てのスケジュール期間を一括で計算することは計算の規模/時間の観点から課題があった。このため、1.立案期間を期間分割し、2.在庫の切れそうな貯炭槽のみを抽出し、3.抽出した貯炭槽に対して数理最適化問題として定式化/求解し、4.上記決定内容を元に、決定した期間の次の期間まで時間を推移させ、1~4を立案期間の全ての期間で立案が終了

するまで繰り返すことで、高速で最適性を持つスケジュールを作成する機能構成(図12)とした。

本技術の適用により、熟練者と同等以上の性能を持つスケジュールを高速(1日分を1分程度)に立案することが出来た。

システムでの石炭払出し計画を立案結果(図13)に示す。設定した目標レベルに近い形で、高位安定な在庫推移を得ることが出来た。この結果、図14に示すように平均在庫レベルを15%程度上昇させることが可能であることが分かった。

4.2.3 工程一貫として最適化

構築した石炭ヤード配置計画最適化システムと石炭ヤード払出しは、単独での最適化ではなく一貫としての評価機能を実現するため、図15に示すように互いを連携し、連動して動作する仕組みとして構築した。加えて、一貫での最適化を目指すため本社システムとも情報伝達をスムーズに行える構造として構築した。

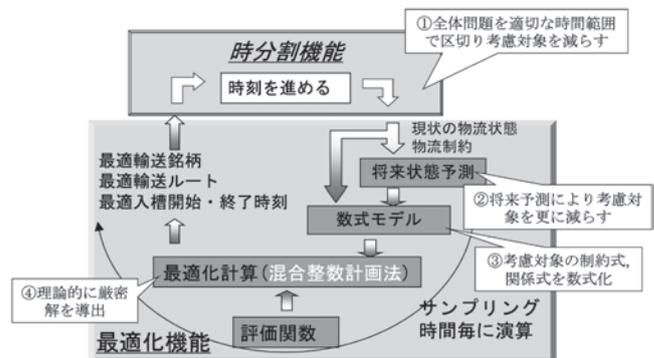


図12 石炭払出し計画最適化アルゴリズム概念図

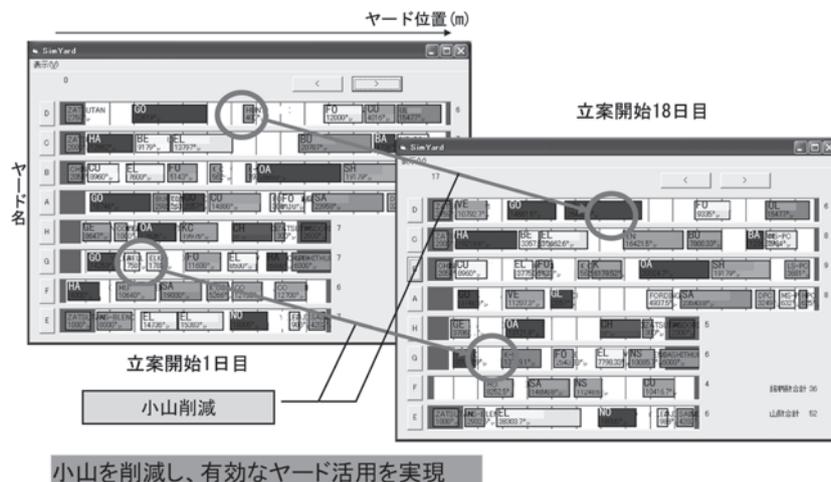


図11 システムによるヤード配置結果例

5 結言

原料一貫物流最適化技術の開発に向け、現在まで各工程を協調、階層化させ、工程一貫で最適化する技術を開発して来た。

これら開発により、本社と各製鉄所を協調、連携させることを可能とし、フレート、滞船料を削減しながら、要求される溶銑品質、コークス品質を満足する仕組みを構築することが出来た。

これらの成果により、鉱石を運搬するケーブサイズ以上の一港揚比率を従来比で24%アップすることが出来た。これにより、複数港に寄港することによるエクストラとして発生する費用(多港揚チャージ)の削減が可能となり、輸送費用の削減を実現した(図16)。

今後は、これらを更に改善、発展させることで、上位から全ての工程を統括管理し、各工程間の連携、協調を図らせることで、更に高度な一貫最適化を実現させる技術の開発に取り組むべく開発に努めて行きたい。

参考文献

- 1) 内藤誠章：新日鉄技報，第384号(2006)，2-13.
- 2) 木村亮介：オペレーションズ・リサーチ，51(2006)，9-14.
- 3) 小林敬和，屋地靖人，斎藤元治，松岡純一，岡西和也：材料とプロセス，20(2007)5,957.
- 4) H.P.ウィリアムス：数理計画モデルの作成法，産業図書，(1995)
- 5) 一森哲男：数理計画法―最適化の手法―，共立出版，(1994)
- 6) 小林敬和，屋地靖人，山田裕文，岩見晋宏：材料とプロセス，22(2009)1,345.
- 7) 小林敬和，屋地靖人，山田裕文，岩見晋宏：材料とプロセス，21(2008)1,283.

(2010年11月29日受付)

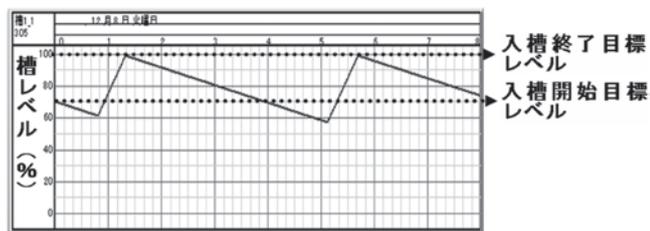


図13 最適化による在庫レベル推移結果例

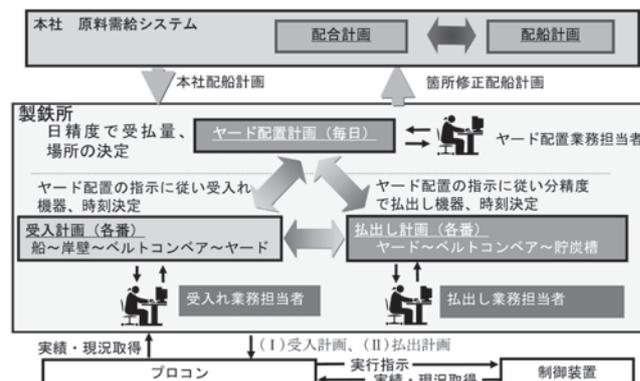


図15 一貫最適化アルゴリズム概念図

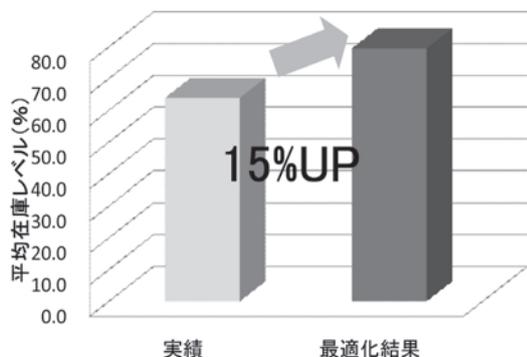


図14 平均在庫レベル比較

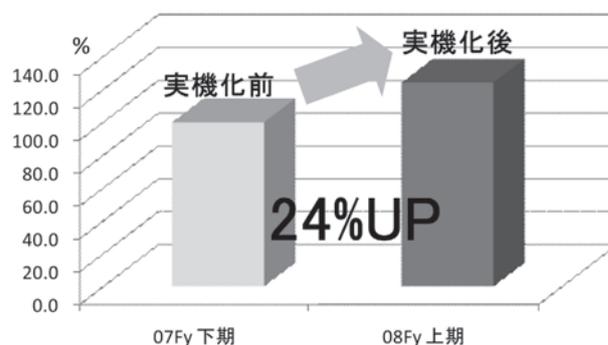


図16 ケーブサイズ以上の1港揚比率比較