

# 鉄鋼原材料配合計画の最適化 —原料一貫生産・物流最適化に向けて—

小林 敬和, 屋地 靖人, 斎藤 元治, 鈴木 豊

日本の鉄鋼業では、オペレーションズ・リサーチの技術がさまざまな工程において適用され、成果をあげてきた。近年の計算機能力の飛躍的な向上により、従来行われていた工程内の最適化から、工程間をつないだ形で一貫して生産計画、物流計画を最適化することが望まれるようになった。本稿では、上記一例として鉄鋼原材料に関する生産計画、物流計画の一貫最適化を目指した例について述べる。

キーワード：最適化、数理計画、混合整数計画、非線形

## 1. はじめに

日本の鉄鋼業全体で消費される鉄鉱石、石炭の量は、年間数億トンにも達する[1]。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。これら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、炭素5%弱を含んだ鉄（銑鉄）となる[2]。この銑鉄は、その後さまざまに成分調整され、固められてスラブと呼ばれる中間製品にされた後に、薄板、厚板、ビレットといった最終製品に加工される。鉄鋼業では原材料から溶解した鉄、半製品、最終製品に至るまでの各工程が、大まかに一つの工場を形成する形を取り、その間はベルトコンベア、機関車、クレーン、トラックなどで搬送されることとなる。

このように日々大量の物流が発生し、そのコストは多大である[3]ため、物流の最適化は重要な課題となる。さらに鉄鋼業では、高炉の安定操業のために鉄鉱石の配合による成分調整、コークスの品質安定化と、お客様からの品質要求に答えるための鋼材の成分調整が非常に重要視される。とりわけ連続運転が必須の高炉では操業を安定化するため、鉄鉱石、コークスの品質管理が最重要課題となる。

ここで、高炉に鉄鉱石、コークスを投入し銑鉄にす

るまでの工程は、製銑工程と呼ばれる。製銑工程では、製造にかかるコストを削減するため、制御システム導入と自動化、効率的な設備の導入、高炉の炉内容積の拡大による大型化等の効率化、省力化、高機能操業を推進してきた。これらの努力により労働生産性は1997年からの10年間に約2倍と飛躍的に向上した[4]。上述の改善は、製銑原料設備能力の増強、プロセスの改善、自動化といったハード面を中心に進められてきた。これら増強・自動化した設備、高機能化したプロセスを有効に運用し、鉄鉱石、コークスの品質を安定化するためのソフト面の改善が現在の大きな課題である。これら背景のもと、設備を有効に使用し、物流の流れを良くする、適正なタイミングで適正な量と品質を備えた製品を製造し、在庫量を適正化する生産計画および物流計画の立案技術の活用が強く望まれている[5][6]。大量の鉄鉱石、石炭を取扱う製銑工程では、生産計画、物流計画の精度が製造コストに大きな影響を与える。中でも、高炉を安定的に操業させるために、鉄鉱石、コークスを製造するための石炭の配合計画の立案は重要な業務となっている。

以下本稿では、鉄鋼業の中の生産計画、物流計画の一例として製銑工程について述べる。特に鉄鉱石、石炭の配合計画を立案する事例について示す。

## 2. 製銑工程での原料生産・物流の課題について

製銑工程では、図1に示すように広範囲にわたる種々の対象が生産・物流計画の基本を構成する。これらは、業務の性格に応じて本社業務と箇所業務に分かれて行われる。本社業務は、全社的な立場でメリット

こばやし ひろかず、やぢ やすひと  
新日本製鐵株式会社 環境・プロセス研究開発センター  
〒293-8511 富津市新富20番1号  
さいとう げんじ、すずき ゆたか  
新日本製鐵株式会社 製銑技術部  
〒100-8071 千代田区丸の内二丁目6番1号

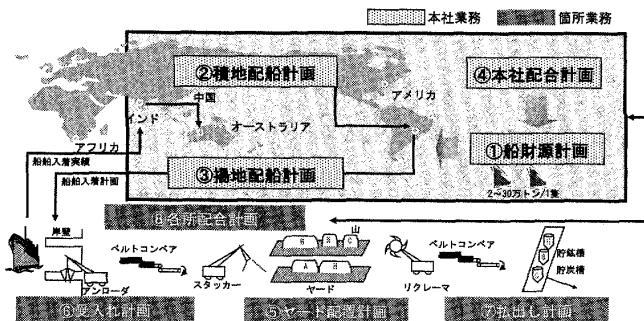


図1 製鉄工程に関する物流計画対象

を考慮して、複数の全製鉄所に対する年間計画、期計画を大枠として決定する。箇所業務は、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（各製鉄所）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、本社業務として、①全社での出銑量（銑鉄の生産量）、コークス生産量を考えて原料を輸送する船舶を確保する船財源計画、②確保した船舶を、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舶をどの製鉄所に配船するかを決める揚地配船計画[7]、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を立案する。また、これら本社にて決定された船舶、配合計画を元に、箇所業務として各製鉄所では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業に合うように調整する配合計画を決定する。

上述の計画は互いに強い関連性をもっている。例えば、配船計画と配合計画を例にすると、原料を荷降ろし（入荷）する船舶（荷降ろしされる原料の銘柄と量）が決まっていないと、原料を荷降ろしされた製鉄所で、どの銘柄をどれだけの量使うかを具体的に決定できない。つまり配合計画を作成できることとなる。一方、船舶の配船計画を作成するためには、原料を荷降ろし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連性があり、一方のみを単独で決めることができない特徴を有している。

このため、互いの計画の関連を考慮しながら、生産・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、できるだけ計画間を連携する機能を構築することで、積地での鉄鉱石、石炭の荷積みから高炉へ原料を投入するまでを一貫の生産・物流として最適化することが期待される。

上記計画の出来、不出来は、原料の輸送費用、滯船料（船舶が着岸できずに待つ場合にペナルティーとして支払う費用）、さらには製造コスト、銑鉄の品質、コークス品質に多大な影響を与えるため、高炉操業の安定の実現、キャッシュ・アウトの削減のため、原料生産・物流の適切な計画立案の技術を確立することが重要な課題となっている。

### 3. 原料一貫生産・物流最適化に向けて

#### 3.1 システム化に当たって課題

本社業務は全社でのコスト削減を目指し、大枠での計画を立案する一方、箇所業務では日々の操業を滞りなく実行するため、非常に綿密な計画の立案が必要とされる。また、これら業務は階層的で、互いの計画は関連が強い。このため関連を考慮しながら、大枠から綿密な計画までの生産、物流全体を一貫して整合性の取れた状態で計画立案することが求められる。

しかし、積地配船、揚地配船等の各計画の立案に限ったとしても、船舶ごとに積載できる原料の量が異なる、また喫水制約のため寄港できる港が制限される等の制約が存在し、問題は複雑である。このため、本来あるべき積地～高炉への原料の投入までの一貫しての評価は考慮されておらず、各計画の自動計画立案が行われるに留まっているのが実情であった。さらに、これら自動計画立案を行うシステム、人手で入力されたデータ、あるいはプロセス・コンピュータ（各種設備を制御し、設備からの情報を蓄積する）等は、個別のシステムとなっており、密な連携機能がない問題もあった。

#### 3.2 システム化の基本的な考え方

上述の原料生産・物流システムの課題を解決し、互いの計画の関連を考慮しながら、生産・物流全体を一貫して計画立案することで、原料生産・物流コストの改善に取組むことを基本方針としてシステム化を推進

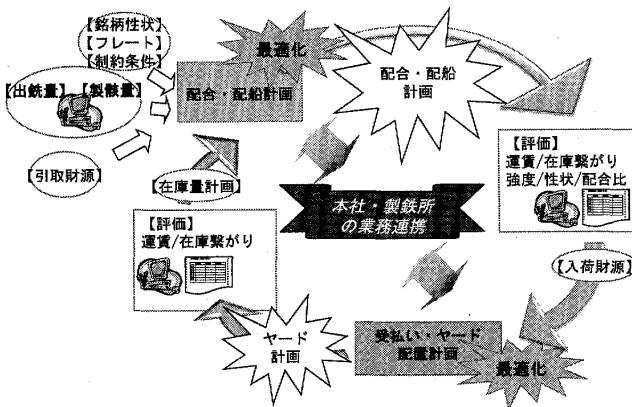


図2 本社業務・箇所業務の連携

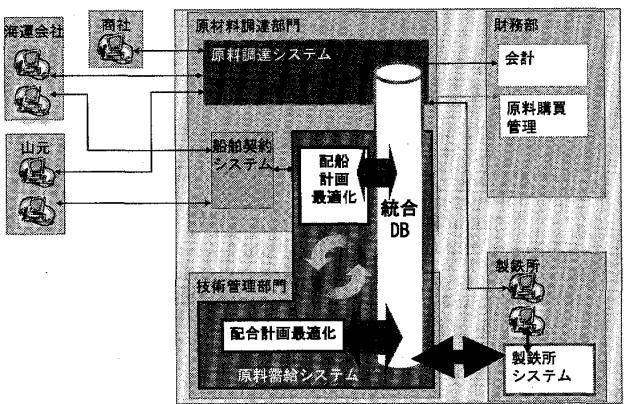


図3 システム構成

した。これら取組みは最終的な原料生産・物流全体の一貫最適化を実現するため、第一歩と考えている。

このため、本システムの推進に当たっては、本社業務、箇所業務は滞りなく連携され、1) 本社からも箇所からも同様に同じ情報をシームレスで呼び出せる、2) 本社にて作成した船財源、配船計画等は、箇所で簡単に参照でき、ヤード配置、受入れ計画等の箇所業務用のデータとして取り込み、そのデータを基に計画を立案でき、3) 立案した計画を複数人で共有、協議でき、本社計画へ反映する必要がある項目に関しては、容易に本社計画の再考を繰り返すサイクルを回すことができることを目指した(図2)。

### 3.3 具体的課題と取組み

本社業務において配船計画の立案は船舶の契約を伴うため事務系スタッフが担当し、配合計画は溶銑の品質、コークス品質を化学的に考慮する必要があるため、技術系スタッフにより実施されていた。

このため別部門での業務となり、システムも別々に構成されていた。また、各製鉄所のシステムとの連携も不十分であったため、十分に各製鉄所の操業状況が把握できていない状況となっていた。加えて、1) 配合後の性状がどうなるか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、2) 配船を決定する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。

上記課題を解決するため、図3に示すように、原料の需給管理に関する情報を本社～積地～使用実績(製鉄所)まで一元管理でき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。さらに、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。

これらの情報は一般的なウェブブラウザがインストールされているパソコンであれば、特別なソフトなしに閲覧、実行ができる仕組みとなっており、複数のユーザ間で直ちに情報の共有化が実現できる。

さらに本社機能として、配合計画および配船計画(揚地配船)の自動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。これら立案された配合・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・ヤード配置計画の立案が可能となった。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. 鉄鋼原材料配合計画の最適化

高炉の安定操業のため原材料の配合問題は、非常に重要な課題である。くわえて中国等の海外鉄鋼業の飛躍的な躍進により、原材料の値段が高騰しており[7]、購入コストをできる限り安くすることも大きな課題である。品質に対して割安な鉄鉱石、石炭を調達、配合することができれば、大幅なコスト削減を実現できる。仮にトン当たり少しでも削減を可能にできれば、鉄鉱石、石炭合わせて年間の消費量が多大であるため、年間では膨大なコスト削減が可能となる。以下、鉄鉱石配合、石炭配合に関して、述べる。

### 4.1 鉄鉱石配合計画問題

#### (i) 問題概要

輸入された鉄鉱石は、塊鉱・粉鉱に分類される。これらの鉄鉱石は、産出される鉱山により含有される鉄

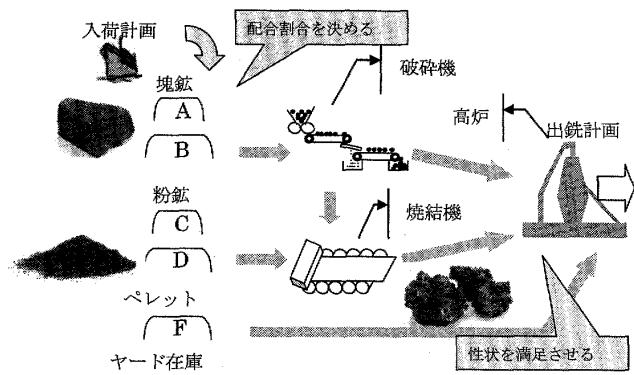


図4 鉄鉱石配合計画問題概要

分、燐等の成分が大きく異なるため、产出される鉱山、成分により銘柄として区別される。この銘柄は100銘柄にもなる。粉鉱は高炉内で空気の流れが確保できるように、銘柄をブレンドすることで成分を調整し、多孔質の塊である焼結鉱に焼き固められる。この焼結鉱は塊鉱とともに高炉に投入される。この際には、焼結鉱の硬度等の品質、高炉に投入される全鉄鉱石の性状指標とともに、コストも含めた要因を考慮した銘柄の配合が求められる。

鉄鉱石の配合問題の概要は以下となる。

- (1) 鉄鉱石を積載した船舶の入船予定、ヤード上に存在する在庫量情報、出銑計画、およびコークス配合計画が与えられた状況下で、
- (2) 各製鉄所の各鉄鉱石が在庫切れを起こさず、ヤードを溢れさせない等の需給制約と、溶銑中の燐、硫黄等の上下限、および焼結のシリカ、アルミナの上下限、強度の下限等の性状制約を守り、
- (3) コスト Min (スラグボリューム、購入費用、輸送費用) と品質 Best (強度 Max) のバランスを取りながら、
- (4) 製鉄所ごとの日単位の配合計画 (購入量と使用量) を立案する

原料の配合では、各製鉄所の制約を満たした中で、全社トータルのコストミニマム化がポイントとなる。

#### (ii) 問題の特徴

製銑工程は鉄鋼業の他の工程と異なり、バラものと呼ばれる塊状あるいは粉状の鉄鉱石、石炭を取り扱う。このため、鋼板一枚、コイル一本という個数単位 (離散量) での取扱いではなく、量を連続量として取扱う特徴がある。また、船舶からヤードに荷揚げされた鉄鉱石は各銘柄別に山状に一時保管されるが、異なる銘

柄同士を混在させないように、山間が10m程度空けられる。このため、効率的にヤードを運用するためには、同じ銘柄ができるだけ集約して荷揚げし、銘柄数を減らす必要がある。このため製鉄所ごとに使用するかしないかの銘柄の判断 (離散量) が、重要な事項となる。最適化問題としては、連続量と離散量を同時に取り扱う必要が発生する。

また、これらの計画は年度の大まかな予測を立てる年度計画、もう少し細かく精度が向上した期計画、日々の操業に使用する月次計画と、目的に応じて計画期間を異にした計画を作成する必要が生じ、日別の配合割合の計画を最長1年分立案する必要がある。

これらの要求に応える必要があるが、ルールベースでの決定は、連続量の決定には不向きである。また連続量と離散量を同時に決定する必要があるため、GA等の組合せ最適化手法を使うには、相当の工夫が必要となる。

近年のコンピュータパワーの劇的な増加により、従来不可能であった規模の問題を数学的に解決できる状況となってきたため、本システムでは数学的な手法を使い問題を解決することを目標とした。ここで、本問題では入荷量、使用量の連続量と、製鉄所への入荷銘柄の選択等の離散量を同時に解決するため、両方を扱える混合整数計画問題[9][10]として取扱うことを基本とした。混合整数計画問題として定式化したモデルは、分枝限定法[11]を基本手法とした商用コードを用いて、解を求めるものとした。

混合整数計画問題は、一般にNP困難な問題 (多项式時間で解くことの困難な問題) であり、変数が増加するに従い解が求まるまでの時間が指数的に増大する。大規模問題を解く方法として離散値を連続変数に一部緩和し、決まったところの固定を繰り返す緩和固定法[12]が提案されている。しかし、立案期間が最長1年分と長いため、例え問題の一部を緩和したとしても問題規模が膨大となり、実用に供する時間で解を得ることは不可能であった。また、実操業に適用するにあたっては、混合整数計画問題に定式化できない制約が存在するため、本手法を直接適用することはできない。そこで、実操業に耐えうる性能を得ながら、実時間で解が求まる手法の開発が必要であった。

#### (iii) 開発手法

立案対象となる全期間を対象とすると、問題規模が膨大になる。この問題の発生を抑制するため、立案期間を時間分割する。また、実際操業に適用する上で必

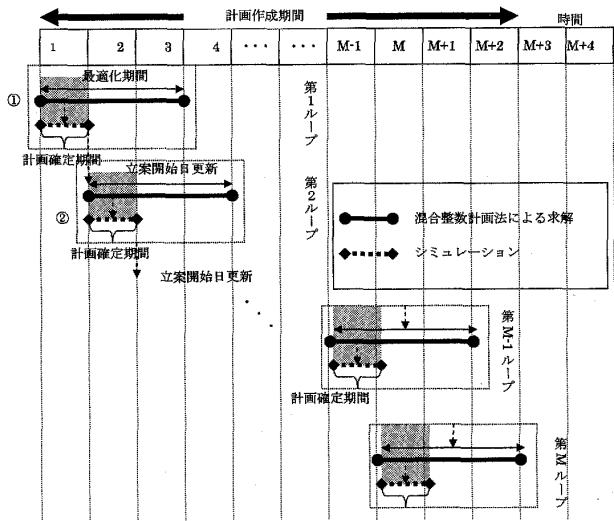


図5 アルゴリズム概念図

要であるが、混合整数計画問題に定式化できない制約を取り扱うために、最適化にて立案された結果をシミュレーションにより、補正することとした（図5）。

ここで、立案期間を時間軸にて分割した場合、分割された各期間の後半では本来考慮すべき次の期間が考慮されていないため、立案された計画の精度が悪くなることが懸念される。このため、時間軸上で重なりを持った状態で時間分割し、期間の早い区分から解を求め、期間の前の部分のみを確定させる。その後に、確定情報を元に、次の期間のモデルを構築し、解を求めるなどを繰り返すことで、精度を極力落とさず解を得ることを可能とした。また、この際には、混合整数計画問題に定式化できない制約はシミュレータに組み込み、補正計算を行わせることで、実際の操業に必要な細々した条件も考慮することを可能とした。

以下に開発したアルゴリズムを示す（図6）。本アルゴリズムにより、実用的に十分な性能を持つスケジュールを立案することが可能となった。

- (1) 立案期間の初日から3ヶ月分を今回ループの最適化の対象期間とする。
- (2) 上記最適化の対象期間に対して、主要な操業制約や評価指標のみを考慮し、混合整数計画問題として定式化し、分枝限定法を用いて解を求める。
- (3) 上記の最適化の対象期間の早い部分、ここでは1ヶ月の解を既知情報として、混合整数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

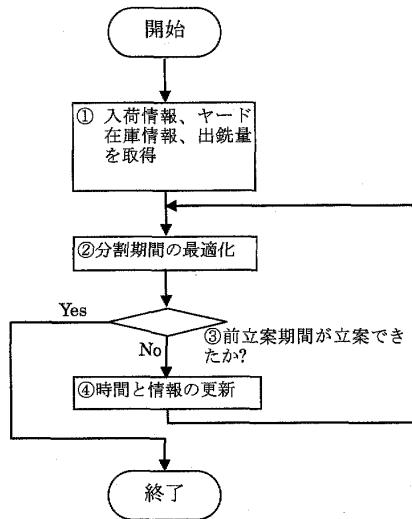


図6 鉱石用アルゴリズム

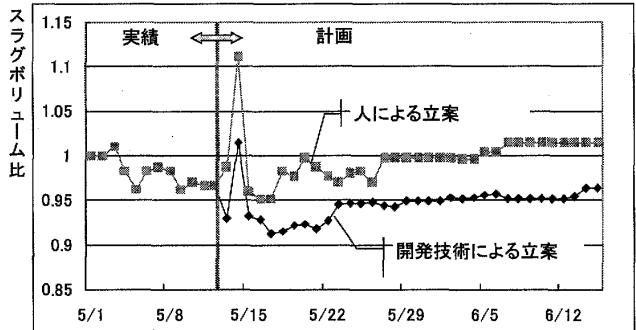


図7 立案結果（スラグボリューム）比較例

行し、計画を確定する。

- (4) シミュレーションにより確定された直後の3カ月を新たな最適化の対象期間とし、シミュレーションにより更新された情報を初期情報として、(1)からの操作を繰り返す。
- (5) 上記手順を立案期間の全ての立案ができるまで繰り返す。

#### (iv) 結果

開発した技術を適用することで、(ア)人による立案では、満足することができなかつた制約（スラグアルミナ（%）制約等）を、満足する計画が可能となった、(イ)人による立案と比較し、5%（立案期間平均）の低スラグボリュームを実現できる鉱石配合計画を瞬時に試算可能となった（図7）。

#### 4.2 石炭配合計画問題

##### (i) 問題概要

石炭も鉱石同様に産出場所、成分により銘柄として区別される。石炭銘柄も鉱石同様に100銘柄にもなる。

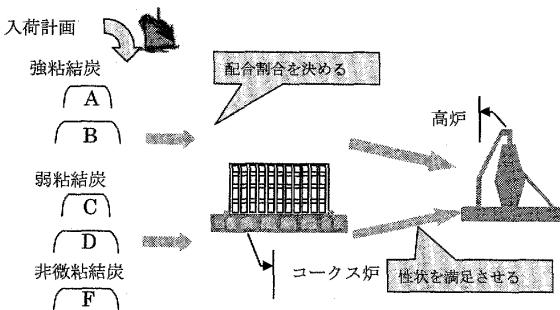


図 8 石炭配合計画問題概要

石炭は、高炉での要求品質（コークス冷間強度、膨張圧等）に対応して配合された後、コークス炉でコークスにされる。この際の配合技術が重要であるが、強固なコークスを製造できる強粘結炭はコストが高く、品質とコストを考慮した配合が求められる（図 8）。

石炭の配合問題の概要は以下となる。

- (1) 石炭を積載した船舶の入船予定、ヤード上に存在する在庫量情報、コークス生産計画を所与として、
- (2) 各製鉄所の各石炭が在庫切れを起こさず、ヤードを溢れさせない等の需給制約と、コークス強度等複数性状制約が一定基準内にあるように性状制約を守り、
- (3) コスト Min（購入費用、輸送費用）と品質 Best（冷間強度 Max）のバランスを取りながら、
- (4) 製鉄所ごとの日単位の配合計画（購入量と使用量）を立案する

鉱石同様に安価・安定供給は非常に重要な課題であり全社トータルとしてのコストのミニマム化がポイントとなる。

#### (ii) 問題の特徴

石炭に関しても、問題の特徴は鉱石の場合とほぼ同じである。このため、鉄鉱石にて開発した「時間分割」と「シミュレーション」を組み合わせた手法の適用が必要となった。鉄鉱石における性状制約は、各銘柄に含まれる成分の加重平均にて与えられるため、線形計画法が適用できた。しかし、コークス強度等の性状は、各石炭の配合比率の1次式では計算できず、実験データから得られる非線形な回帰式となる。このため、通常の線形計画法での求解はできない。また、各製鉄所でのヤード有効活用のため、各製鉄所で使用銘柄を集約する必要があり、銘柄使用有無の判断を変数として組み込む必要がある。このため、制約に線形で

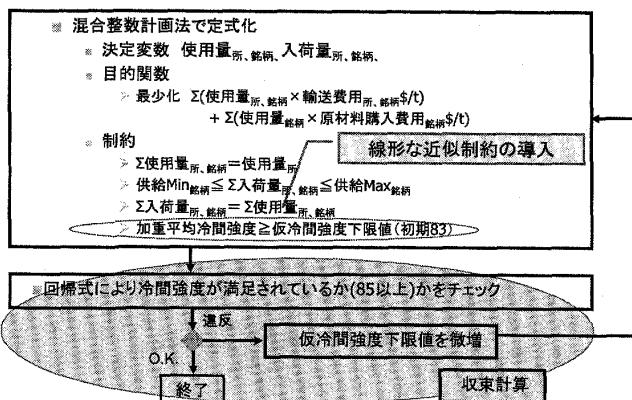


図 9 石炭用アルゴリズム

表 1 立案結果（性状）比較例

揮発分	製鉄所 A		製鉄所 B		製鉄所 C	
	開発システム結果	人立案結果	開発システム結果	人立案結果	開発システム結果	人立案結果
上限	27.0	26.5	26.0	29.0	24.5	26.9
下限	-	-	-	26.0	-	24.5
コークス熱間強度	63.1	59.7	66.4	65.8	64.4	63.6
上限	-	-	-	-	-	-
下限	59.0	-	59.0	-	59.0	-
コークス冷間強度	85.7	84.1	85.2	84.8	86.9	84.4
上限	-	-	-	-	-	-
下限	85.0	-	85.2	-	86.5	-

ない項、整数制約が存在する問題を解く必要があり、石炭配合設計問題を複雑にしている。このため、鉱石配合で開発した手法を直接適用することはできない。

#### (iii) 開発手法

配合割合から性状を得るために物理特性を考慮した回帰式から得られる値をもとに、配合割合の加重平均（線形）を、性状制約の代わりの近似制約式として組み込むことで混合整数計画問題として求解した。この結果を回帰式にて性状が満足しているかを確かめ、満たさまで近似制約式の補正を繰り返すことにより、実操業に適用できるレベルの解を得る手法を開発した（図 9）。

具体的には、①回帰式から性状の近似式を構築、②立案対象期間の船舶の到着情報とコークス生産計画を取得、③在庫制約、近似性状制約を満たすように混合整数計画法を求解、④回帰式にて性状をチェックし、性状を満たしていれば終了、⑤満たしていないければ、近似性状制約の下限制約値、あるいは上限制約値を微小変更し、③に戻り、性状制約が満足するまで処理を繰り返す。

#### (iv) 結果

立案例を表 1 に示す。本技術の適用により、人による立案では満足することができなかつた性状制約を、

満足する計画の立案が可能となった。

## 5. 結言

日本の鉄鋼業におけるオペレーションズ・リサーチの適用分野の例として、鉄鋼原材料の一貫生産・物流最適化技術開発を示した。本開発により要求される溶銑品質、コークス品質を満足させながら、購買費用の大幅な削減を実現した。しかし、本開発は工程を全て含んだ最適化という観点では、まだまだ発展途上であり、今後さらなる高度化への期待が大きい。鉄鋼原材料が銑鉄にされ鋼材にされた以降の工程においても、オペレーションズ・リサーチが適用できる分野は幅広く、技術適用が期待される。本稿により鉄鋼分野への興味が増し、オペレーションズ・リサーチを適用した技術開発が活発になる一助となれば幸いである。

## 参考文献

- [1] 社団法人 日本鉄鋼連盟、鉄鋼需給の動き 2011 年 2 月。
- [2] 新日本製鉄㈱：「鉄と鉄鋼がわかる本」、日本実業出版社（2004）。
- [3] 岩谷敏治：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 (2006), 15-20.
- [4] 内藤誠章：製銑技術の開発概要と今後の課題、新日鉄技報、384 (2006), 2-13.
- [5] 木村亮介：鉄鋼物流における最適化およびシミュレーション技術の活用、オペレーションズ・リサーチ、51, 3 (2006), 9-14.
- [6] 小西正躬：鉄鋼における生産管理技術の開発と展開、鉄と鋼、90, 11 (2004), 964-969.
- [7] 小林敬和、屋地靖人、斎藤元治、松岡純一、岡西和也：原燃料揚地配船最適化システム、材料とプロセス、20, 5 (2007), 957.
- [8] 経済産業省 資源エネルギー庁：エネルギー白書 2010.
- [9] H.P. ウィリアムス：「数理計画モデルの作成法」、産業図書（1995）。
- [10] 一森哲男：「数理計画法—最適化の手法一」、共立出版（1994）。
- [11] 伊理正夫、今野浩、刀根薰：「最適化ハンドブック」、朝倉書店（1998）。
- [12] 久保幹雄、村岡秀紀：数理計画ソルバーを用いたメタ解法、システム/制御/情報、6, 13 (2005), 1-6。