

# 厚板生産計画における板取最適化システム

## An Optimization System for Plate Design in Production Planning of Steel Plates

吉原 孝次 YOSHIHARA Koji JFE スチール 西日本製鉄所(倉敷地区) 制御部制御技術室 主任部員(副課長)  
横山 賢治 YOKOYAMA Kenji JFE スチール 西日本製鉄所(倉敷地区) 厚板・鋳鍛部厚版・鋳鍛技術室

### 要旨

JFE スチールでは、厚板製品のリードタイム短縮を目的として、板取最適化システムを構築した。本システムでは、大規模な組み合わせ問題の解を求めるため、分枝限定法に多目的混合整数計画法を組み合わせた手法を採用し、またその実機化においては、汎用パソコンを複数台並列処理させることにより高速計算を可能とした。

### Abstract:

An optimization system for plate design was developed to shorten production time in the plate production in the JFE Steel. The technique for combining the branch-and-bound method with multi-objective mixed integer programming was adopted to solve a large-scale combinatorial problem. The system was built up with several personal computers, to realize high-speed calculation by processing at the same time.

### 1. はじめに

板取とは、各オーダーを厚板工場での圧延ロット(スラブ)にまとめる2次元カッティングストック問題であり、その良否はリードタイムに大きく影響する。2次元カッティングストック問題は、一般に、考えられる組み合わせ候補が膨大な数となるため、実用時間内で最適解を求めることが難しい問題とされている。また厚板製品は、Fig. 1 に示すように、スラブを目標の板厚に圧延した後、オーダーごとに剪断して製造されるため、厚板工場のリードタイムを表す評価指標は、圧延時間のみならず、剪断時間、組み込み率(組み込まれたオーダー重量のスラブ重量に占める割合)など多岐に渡る<sup>1)</sup>。さらにこれらの評価指標は互いにトレードオフの関係にある場合が多く、問題をいっそう難しくしている。

Fig. 2 は圧延時間と剪断時間の評価指標が互いにトレー

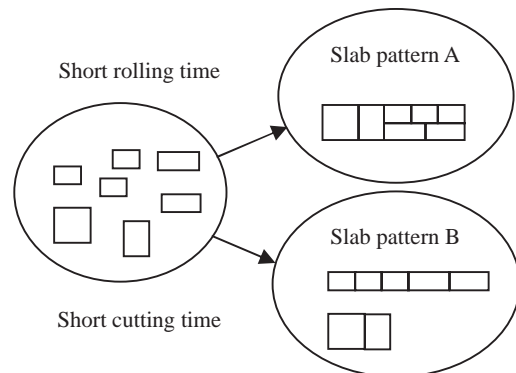


Fig. 2 Trade off between rolling time and cutting time

ドオフの関係にあることを示した図である。本図において、同じ7枚のオーダーで板取されたスラブパターンAとBを比較すると、圧延時間はAの方が短い、剪断時間はBの方が短くなる。板取最適化においては、その時点におけるオーダー構成や設備の状況に応じて柔軟にトレードオフを調整しなければならない。

今回開発した板取最適化システムでは、まず、前述の複数の評価指標を、板取段階でモデルおよびシミュレーションにより定量化した。次に、考えられる膨大な組み合わせの中から、分枝限定法により必要十分なスラブパターンを生成し、最後に多目的混合整数計画法により最適なスラブパターンを選択する手法を採用した<sup>2)</sup>。またその実機化においては、板取問題を複数の小問題に分割し、それぞれを別の汎用パソコンで並列処理させることにより、実用時間内で

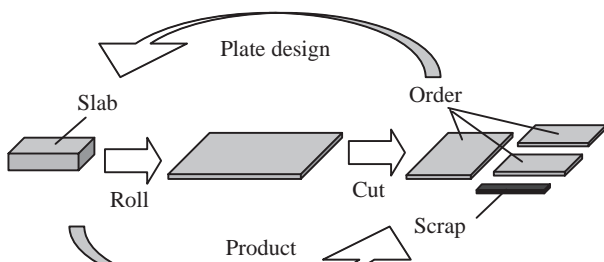


Fig. 1 Outline of plate design

の高速な板取最適化計算を可能とした。以下では、板取最適化システムのアルゴリズムおよび実機システムについて紹介する。

## 2. モデリング

### 2.1 制約条件

板取により決定されたスラブは、連続鋳造機をはじめ、加熱炉、圧延機、剪断装置、出荷クレーンなど、通過するすべての設備の制約を満たす必要があり、その制約条件式は数百に及ぶ。主な制約条件としては、鋳造可能スラブ寸法、圧延可能寸法、搬送設備上限重量、成分系組み合わせ制約などがある。板取問題においては、スラブパタンを生成した後に、これら制約条件を満たすものだけを残す方法もあるが、その場合には制約を満たさないパタンを生成するためにも計算時間を費やしてしまう。そこで、今回採用した分枝限定法によるスラブパタン生成時には、これらの制約条件をスラブパタン生成前にチェックすることで、必要なスラブパタンを効率的に生成する。

### 2.2 目的関数

板取における評価指標は先に述べた圧延時間、剪断時間、組み込み率の他、品質に関する指標など17項目の評価指標を定量化した。ここでは圧延予測時間、剪断予測時間、組み込みロス率の3指標のみを考える。組み合わせ最適化における目的関数Jを次のように評価指標の加重平均で表し、これを最小化する板取を最適な板取とする。

$$J = \sum_{i=1}^N (\omega_1 T_{ri} + \omega_2 T_{ci} + \omega_3 L_i)$$

ただし、 $T_{ri}$ ：スラブパタン*i*の圧延予測時間、  
 $T_{ci}$ ：スラブパタン*i*の剪断予測時間、  
 $L_i$ ：スラブパタン*i*の組み込みロス

ここで、 $\omega_1 \sim \omega_3$ は評価指標間のトレードオフを調整するための重み係数である。本手法は加重平均法と呼ばれ、多目的最適化問題でよく用いられる。

### 2.3 剪断予測時間

目的関数で使用する剪断予測時間を求めるにあたっては、シミュレーションにより圧延後のスラブが通過する剪断装置を決定し、それぞれに要する時間の最大値を計算する。**Fig. 3**に剪断装置の構成を模式的に示す。圧延後の板は、クロップシャーで長手方向に粗切りされた後、サイドシャー・スリッターで幅方向に剪断され、最後にエンドシャーで長手方向に仕上げ剪断されて製品となる。

**Fig. 4**はあるスラブパタンに対し、剪断予測時間を求め

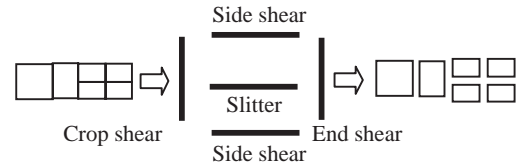


Fig. 3 Outline of cutting line

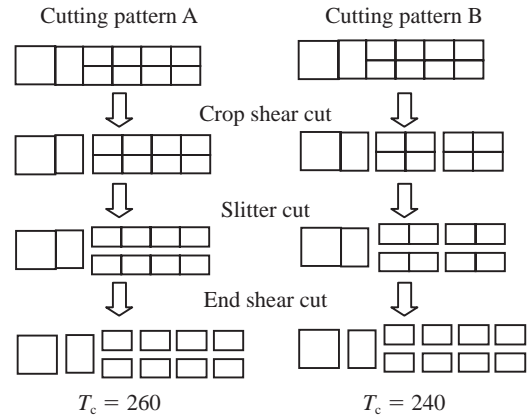


Fig. 4 Predicting cutting time with simulation method

た例である。この図のスラブパタンに対し、次の方法で剪断予測時間を求める。

- (1) 考えられるすべての剪断方法を列挙する。
- (2) 列挙したすべての剪断パタンに対してシミュレーションにより剪断時間を予測する。
- (3) 列挙したスラブパタンのうち、最も剪断予測時間の短くなる剪断パタンをそのスラブの剪断方法とする。

**Fig. 4**では、そのうちの2種類の剪断方法を比較している。同図左の剪断パタンAでは、クロップシャーで1ヶ所のみ剪断するのにに対し、同図右の剪断パタンBではクロップシャーで2回剪断する。この2つの剪断方法それぞれに対して、シミュレーションにより剪断時間を予測すると、パタンBの方が短くなり、こちらをこのスラブパタンの剪断方法および剪断予測時間として採用する。

## 3. 最適化アルゴリズム

板取最適化アルゴリズムのおおまかな流れを**Fig. 5**に示す。本アルゴリズムでは、まず納期から逆算してその日に板取すべきオーダー群の中から、同一スラブに組み込み可能なオーダーを選択する。次に分枝限定法によるスラブパタン生成を行い、最後に、目的関数が最小となるようなスラブパタンの選択を、多目的混合整数計画法を用いて行う。このとき $\omega_1 \sim \omega_3$ を調整することにより、環境変化に応じた柔軟な板取が可能となる。

次節以降では、分枝限定法によるスラブパタン生成と多目的混合整数計画法によるスラブパタン選択それぞれについてそのアルゴリズムを説明する。

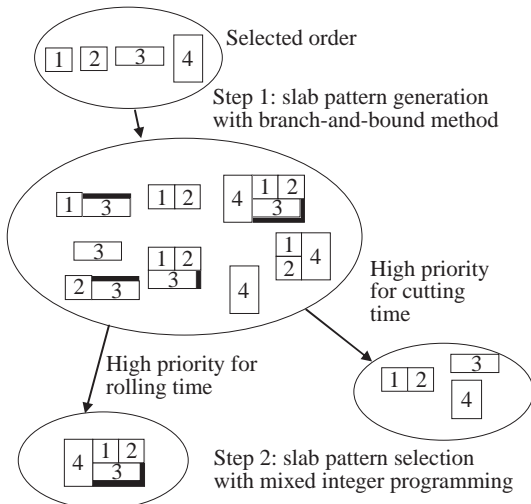


Fig.5 Optimization algorithm with branch-and-bound method and multi-objective mixed integer programming

### 3.1 分枝限定法によるスラブパタン生成

分枝限定法とは、ほとんどすべての組み合わせ最適化問題に適用できる応用範囲の広い手法で、解くことが難しい原問題をいくつかの部分問題に分解し、その部分問題を解くことによって間接的に原問題の解を得ようとするものである。今回のような板取問題の場合、基点となるオーダーを1枚選択し、それと別のオーダーを組み合わせたスラブパタンを分枝操作により作成する。次にそれぞれのスラブパタンが2.1節で示した制約条件を満たすかどうかを判定し、制約を満たさないスラブパタンに関してはそれ以降の探索を行わないとする（限定操作）ことで、必要なスラブパタンのみを生成し、計算時間を短縮することができる。

幅方向に2枚以上のオーダーを含むスラブパタンについては、Fig. 6に示すようにFig. 7で生成したスラブパタンを基点として、それらを幅方向に組み合わせることで生成する。また幅方向に組み合わせたパタンを長手方向に組み合わせることでさらに大きなスラブパタンの生成も行う。

制約条件に関しては、2.1節の設備制約上必要な制約条件とは別に、組み合わせるオーダーの幅差が大きい場合はそれ以降探索を行わないなど、冗長な制約条件を追加している。これは、製鉄所でこれまでに培われてきた探索を効率的に行うためのヒューリスティクスを有効に活用することで、計算時間を短縮するためである。分枝限定法における探索方向に関しては、基本的に幅優先探索を行うが、オーダー数が多いときなど、探索が収束しない場合を想定して、探索ノード数にも制約を設け、幅優先探索から深さ優先探索への切り替えを行っている。

これら冗長な制約条件に関しては、板取作業者が容易に追加・変更できるシステムとしており、オーダー構成の変化などに迅速に対応することが可能となっている。また、板取に起因する品質異常が発生した場合にも、ここで制約条

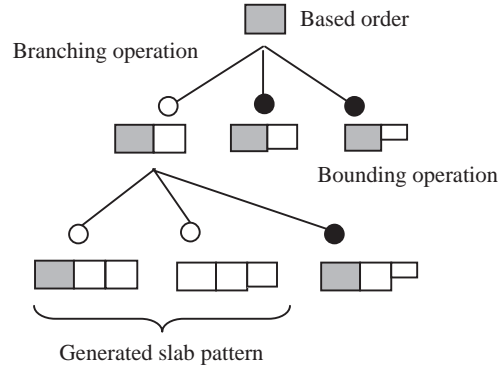
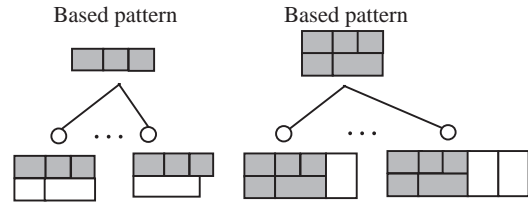


Fig.7 Slab pattern generation with branch-and-bound method

件を追加することで対応可能であり、品質制御能力の向上にも本システムが役立っている。

### 3.2 多目的混合整数計画法によるスラブパタン選択

前節で生成したスラブパタンは、圧延時間や剪断時間の異なる多数のスラブパタンを生成することを目的としているため、同一オーダーを重複して使用することを許している。先に示したFig.5の例で、選択された1~4のオーダーは1枚ずつであるのに対し、生成されたスラブパタンでは、同一オーダーが複数枚使用されていることがそれにあたる。そこで生成されたスラブパタンの中から、受注したオーダーの枚数を制約として、最適なスラブを選択する。このときの手法としては目的関数をJとした多目的混合整数計画法を用いている。すなわち、次の最小化問題を解く。

$$J = \sum_{i=1}^N (\omega_1 T_{ri} + \omega_2 T_{ci} + \omega_3 L_i) \rightarrow \min$$

$$\text{ここで、} \sum_{i=1}^N a_{ij} x_i \leq n_j, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

ただし、 $a_{ij}$ : スラブパタン*i*に使われているオーダー*j*の枚数,

$n_j$ : オーダー*j*の受注枚数,

$x_i$ : スラブパタン*i*の採用枚数

この多目的混合整数計画問題の解を求めるため、汎用高速演算ツールとして ILOG, Co., Ltd. 製の CPLEX<sup>3)</sup> を採用

	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$
● High priority for rolling time	100	1	1
▲ High priority for cutting time	1	100	1
■ High priority for combination loss	1	1	100

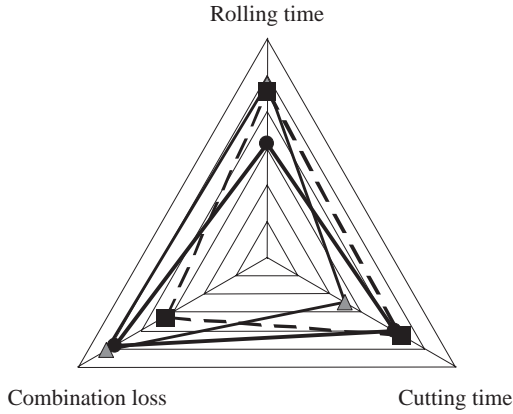


Fig. 8 Flexibility of plate design optimization

した。仮に 100 枚のオーダーから板取を行う場合、3.1 節の分枝限定法により約 5 000 パタンのスラブパタンを生成し、その中から多目的混合整数計画法により約 10 本のスラブを選択するという大規模な組み合わせ問題となるが、次節で示す実機システムでは、最長でも 5 min 以内で解を求めることができる。

Fig. 8 は、目的関数  $J$  の評価指標重み  $\omega_1 \sim \omega_3$  を変化させたときの圧延時間、剪断時間および組み込みロスの変化をグラフ化したものである。このグラフで分かるように、評価指標重み  $\omega$  を変更することで、評価指標間のトレードオフを調整することが可能である。この重みに関しては、冗長な制約条件と同様、板取作業者がそのときのオーダー構成や設備状況に応じて容易に変更可能なシステムとしており、例えば剪断工程がネックとなる場合には剪断予測時間にかかる重み  $\omega_2$  を大きくすることで、剪断工程ネックを回避した板取が可能となる。

#### 4. 実機システム構成

システム構成に関しては、板取最適化における計算時間を短縮するため、汎用パソコンを複数台用いた分散処理システムを採用した (Fig. 9)。その日に板取対象となるオーダーをホスト計算機から受け取ったエンジニアリングワークステーション (EWS) では、同一スラブに組まれる可能性の少ないオーダー群に分割、それらオーダー群を汎用パソコンの稼働状況に応じて分散して伝送し、そこで板取最適化を行う。

また、板取された結果のスラブパタンは、マンマシンインターフェイス (MMI) によりビジュアルに板取作業者に

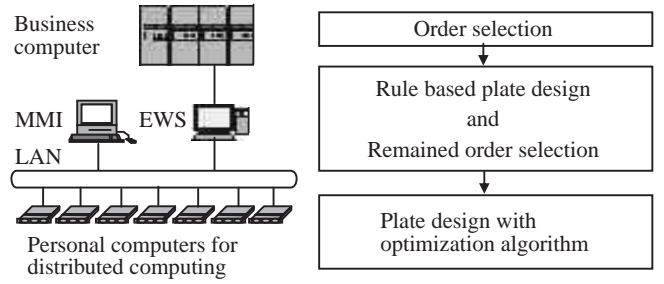


Fig. 9 System architecture

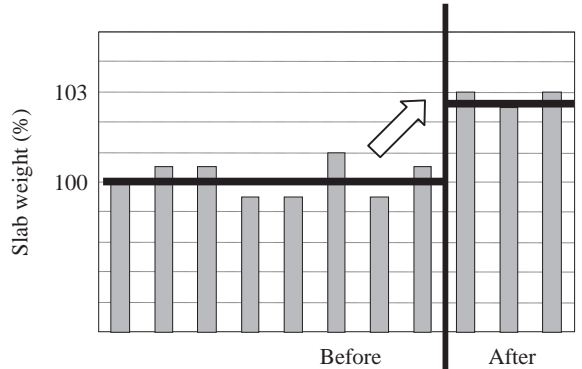


Fig. 10 Result of plate design optimization

提供しており、板取作業者の意思決定が必要な場合でも迅速に対応可能なシステムとしている。

#### 5. 実機適用結果

Fig. 10 に本システムを実機適用した結果を示す。対象とした厚板工場では、その時点で圧延工程がネックとなっていたため、圧延時間を優先した調整を行い、その結果、本システムを稼働させた前後でスラブ重量が増加（すなわち単位重量あたりの圧延時間が短縮）していることが分かる。また前述の  $\omega_1 \sim \omega_3$  を操作することにより、各評価指標を制御可能であることも合わせて実機で確認した。

#### 6. おわりに

分枝限定法に多目的混合整数計画法を組み合わせた厚板板取最適化システムについて紹介した。本システムの特長としては、以下の 4 つがあげられる。

- (1) 分枝限定法に多目的混合整数計画法を組み合わせることにより実用時間内で大規模な組み合わせ最適化が可能となった。
- (2) 分枝限定法によるスラブパタン生成において、ヒューリスティクスを組み込むことにより高速なパタン生成が可能となり、そのヒューリスティクスの追加・変更も容易なシステムとした。
- (3) 目的関数を複数の評価指標の加重平均とし、それぞれ

の重み係数を調整することで、オーダー構成や設備状況の変化に柔軟に対応できる板取が可能となった。

- (4) 汎用パソコンを複数台並列処理させることにより、高速な板取最適化システムを構築した。

本システムは2004年7月より、JFE スチール 西日本製鉄所において順調に稼働中であり、厚板工場のリードタイム短縮に大きく貢献している。

#### 参考文献

- 1) 西田俊一ほか. JFE 技報. No. 5, 2004, p.1-7.
- 2) Wang, P.Y. Two algorithms for constrained two-dimensional cutting stock problems.

- 3) <<http://www.ilog.co.jp/>>



吉原 孝次



横山 賢治