

# クレーンハンドリング順序最適化技術

## Optimization Technology for Crane Handling Scheduling in a Steel Manufacturing Process

久山 修司 KUYAMA Shuji JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (副課長)  
富山 伸司 TOMIYAMA Shinji JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (課長)

### 要旨

近年、計算機能力の飛躍的向上にともない、物流計画の策定において最適化技術の適用が広まっている。本稿では、中間製品であるスラブを搬送する天井クレーンのハンドリング計画に対して最適化技術を適用した研究開発事例について報告する。提案手法は、次工程の製造計画を考慮し、遺伝的アルゴリズムを使ったスケジューリング最適化と物流シミュレーションを組み合わせることで、効率的なクレーンハンドリング計画を実用的な時間で解けることが特徴である。実プラントを模擬した計算機シミュレーション実験によって、本手法で算出したクレーンハンドリングは、オペレータ操業と比較して、クレーンハンドリング数が30%少ないという結果を得た。鉄鋼業では、スラブという中間製品段階からお客様との紐付けを行なうため、スラブ搬送の効率化はリードタイム削減を通じてお客様満足度に貢献できる。

### Abstract:

Recently, optimization technologies are commonly applied in logistics scheduling owing to significantly advanced computing technologies. In this paper, a new system applied for scheduling of crane handling in a slab yard was presented. The proposed method consisted of scheduling optimization and logistics simulation. Computational simulation was conducted with operation data in JFE Steel, allowing a comparison to be made between actual and theoretical crane handling operations. The resulting data showed that this paper's proposal can reduce the number of handlings by 30%. The effective transportation of slabs contributes to an increase of the customer satisfaction.

## 1. はじめに

近年、鉄鋼製品は、お客様ニーズに合わせて高級化、多品種化し、その製造工程はより複雑化してきている。また、納期短縮のニーズも高くなっているため、物流計画・生産計画の策定は従来にもまして重要になってきている。製鉄所内の物流は、前プロセスから次プロセスへ最終製品や中間製品を納期どおりに運搬するだけでなく、次プロセスへスムーズな運搬ができるように、あらかじめ次プロセスの生産順序に製品を並び替える役割も担っている。そのため、効率的な物流計画の策定は難しい。

一方、昨今の計算機能力の向上に伴い、物流計画の策定において最適化技術の適用が広く試みられてきている<sup>1)</sup>。物流計画策定には、操業変動や生産計画の変更に応じてすばやい再計画が求められるため、最適性とあわせて、計算速度も求められる。

本報告では、スラブと呼ばれる中間製品を一時的に保持するヤード内物流の計画策定に対して最適化技術を適用し

た研究開発事例について報告する。本開発は、スラブヤード内における運搬手段である天井クレーンのハンドリング順序を最適化することで、ヤード内物流を効率化することを目的としている。

## 2. スラブヤード内物流

### 2.1 スラブヤード内物流の役割

図1は、スラブヤードとスラブ物流を表した概念図である。連続 casting プロセスにて casting された約 2 000 mm×10 000 mm×250 mm の直方体状の中間製品であるスラブは、貨車によってスラブ在庫置場であるスラブヤードに搬送される。搬送されたスラブは、スラブヤード内に敷設されている天井クレーンによって貨車から卸されヤード内に積み重ねられて保管される。スラブヤードは複数の棟に分かれており、貨車の乗り入れができるのは2棟のみである。スラブ置場は1棟あたり数百あり、1置場当たり数枚から20枚のスラブが積み重ねられる。棟内におけるスラブの置場間移動は数基の天井クレーンによって行なわれる。棟間移動は台車によって行なわれる。スラブヤードは次工程である熱間圧延プロセス

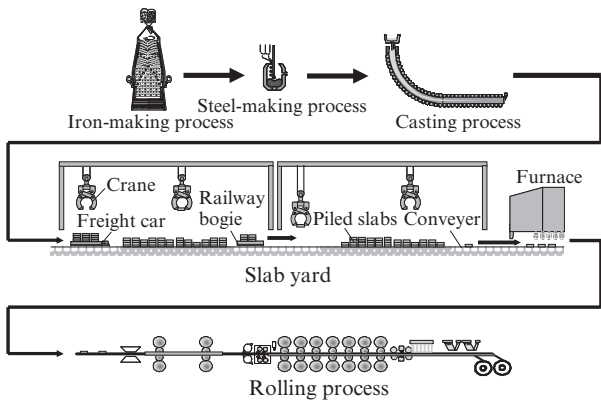


図1 スラブヤードにおけるスラブ物流  
Fig. 1 Slab logistics in slab yard

の加熱炉と直結しており、圧延計画に搬送路上に平積みされたスラブは、圧延計画に従ったピッチで熱間圧延プロセスの加熱炉に1枚ずつ装入される。

スラブ物流の目的は、貨車から運ばれてきたスラブをスラブヤードに保持しておくこと、加熱炉に適切なタイミングで適切なスラブを搬送できるように、あらかじめ加熱炉前の置場にスラブを圧延計画順序にならべておくことである。

## 2.2 天井クレーンの運用

スラブヤードに敷設されている天井クレーンの役割は、貨車からヤードへの積み下ろし、置場から別の置場への移動、台車への積み下ろし、搬送路への平積みである。

図2はある時間帯における4つのクレーンの移動軌跡とそのときの稼働率をクレーンごとに色分けして表したものである。No.3クレーンとNo.4クレーンの稼働率が8割に及び、クレーン作業が逼迫している。この原因は、前工程から移動してきたスラブをそのままの順序で積み重ねているために、次工程へ移動させる際に、下に埋まったスラブを掘り出す配替作業がハンドリングの半分も占めていたためである。

クレーンオペレータには、次にどのスラブをどこに運べば

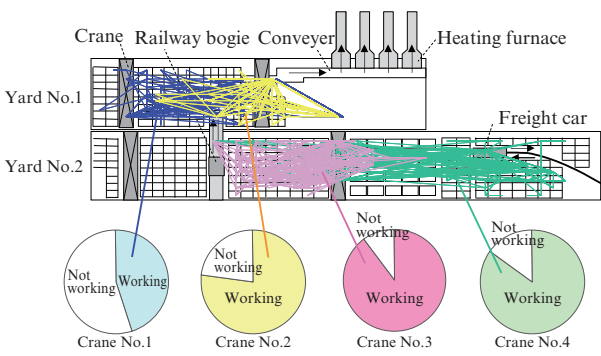


図2 天井クレーンの移動軌跡と稼働率

Fig. 2 Trajectory of 4 cranes in slab yard and the rate of operation

効率的か判断するのに十分な情報が提供されていなかったため、ヤード内在庫が増えて置場が占有されてくると目先の圧延順のスラブを揃えることに注力しなければならないため、長期的にみて効率的なスラブ山を作るのが難しかった。

鋳造から熱間圧延までの物流リードタイムの平均値やばらつきが増えてくると、次工程である熱間圧延工程へのスラブのデリバリーが遅れ、熱間圧延の製造が計画どおりにできなくなる懸念があり望ましくない。また、貨車おろし作業が遅延すると、貨車の回転率が下がるため、前工程からのデリバリーも遅れる懸念がある。鉄鋼製造は、中間製品であるスラブの段階から1品1品にお客様が紐付いていることが多いため、最終的なお客様への確実なデリバリーするためにも、スムーズなスラブ移動が望まれる。

## 3. クレーンハンドリング手順の最適化

### 3.1 クレーンハンドリング手順ガイダンスの狙い

掘り出しによる配替作業が最小になることを目的に、効率的なクレーンハンドリング手順をクレーンオペレータに提示するガイダンスシステムを考案した。

図3はガイダンスシステムの概念図である。クレーンオペレータの判断に委ねていた在庫スラブの重ね方（以降、山立）の計画を選任で行なう山立計画者を新たにたてる。ガイダンスシステムは、掘り出しによる配替作業が最小になるようなクレーンハンドリングを計算し、山立計画者に対して計算したクレーン手順案と将来のスラブ山情報を提供する。山立計画者は計画を適宜微修正し、各クレーンにクレーンハンドリング手順を送る。送られる情報は、移動スラブ・移動元置場・移動先置場の情報を時系列に並べたクレーンハンドリング手順である。クレーンオペレータは、ハンド端末に表示されているクレーンハンドリング手順に従いスラブを搬送する。

操業変動がある際、ガイダンスシステムは次のクレーンハンドリング開始前に再計算する必要がある。1クレーンハンドリング時間は平均30秒程度であるため、ガイダンスシステムには、10秒程度のレスポンスが求められる。

なお、以上の機能をもつシステムを構成するためには、ス

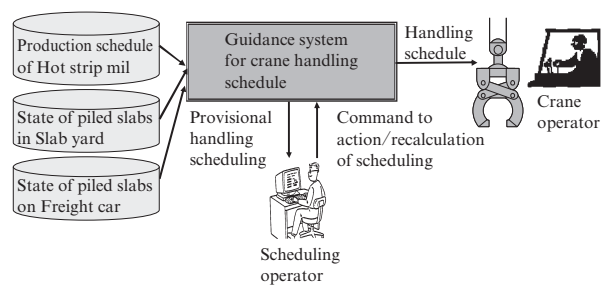


図3 天井クレーンハンドリング手順のガイダンス

Fig. 3 Guidance system for crane handling scheduling

ラブ山状態、クレーン搬送情報、熱間圧延の生産計画、貨車状態の各情報にリアルタイムにアクセスできる必要があるが、これらの情報インフラは薄板系生産管理再構築プロジェクトによってすでに整備されている<sup>2)</sup>。

### 3.2 クレーンハンドリング最適化問題

クレーンハンドリング手順を決める問題を次の最適化問題として定義する。

1回のクレーンハンドリングは、いつ、どのスラブを、どのクレーンによって、どの置場へ移動させるかで定義し、クレーンハンドリングを時系列に並べたものをクレーンハンドリング手順と呼び、クレーンハンドリング最適化問題の解とする。

クレーンハンドリング手順の良し悪しを判定するための評価関数は、各スラブの納期に対する余裕時間の和として定義する。納期遅れの場合は、遅れ時間の2乗のペナルティ(負値)として定義する。この定義によれば、できるだけ納期遅れが発生しない解がよい解であると評価されることになる。

クレーンハンドリングは、次の制約をもつ。

- ・1回のクレーンハンドリングでつかめる最大スラブ厚さ
- ・クレーンハンドリングのパイリングギャップ上限
- ・スラブ山立てにおいて、スラブがだれてくるのを防止するため、スラブ長が極端に異なる2つのスラブを積むことは禁止
- ・スラブ山の最大高さ
- ・台車と貨車の最大積載量

スラブヤードには、数百の置場、約千のスラブがあるため、考えられるハンドリング手順は無数にあり、そのまま全探索試みても現実的な時間内には解けない。特に、積み重ねたスラブの移動手順を決める問題は、人工知能の分野で Block world planning という最適化計算が困難な問題と知られている<sup>3)</sup>。

さらに、スラブヤードクレーンの場合には、パイリング制約などの多数の制約を勘案しなければならず、既存のアルゴリズムを単純に適用することはできない。そこで、スラブヤードハンドリング最適化のための新たなアルゴリズムが必要となる。

### 3.3 クレーンハンドリング最適化アルゴリズム

図4に、ハンドリング最適化アルゴリズムの処理手順を示す。アルゴリズムの目的は、ハンドリングの制約を満たしながら、加熱炉装入予定のスラブを加熱炉前置場まで搬送するための効率的なハンドリング手順を算出することである。

#### (1) 入力データの読み込み

置場情報データ、圧延計画データ、貨車上のスラブ情報データを読み込む。

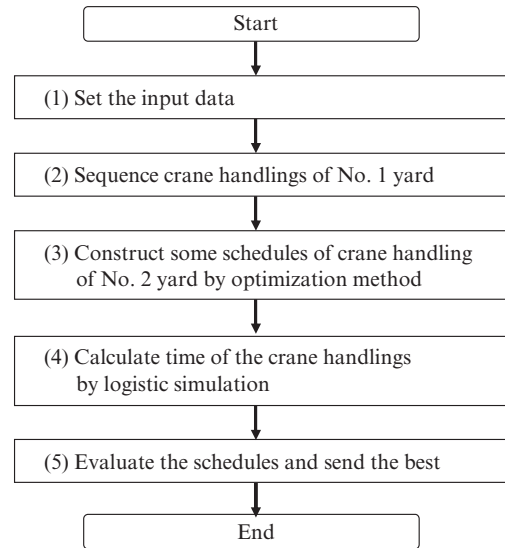


図4 クレーンハンドリング最適化アルゴリズム

Fig. 4 Proposed optimization algorithm of crane handling schedule

#### (2) 1棟のクレーンハンドリング計画

圧延計画の順序に従い、制約条件を考慮しながら No. 1 スラブヤードにおける台車から搬送路前置場へのスラブ移動と搬送路への移動を行なうクレーンハンドリング計画を作成する。

#### (3) 2棟のクレーンハンドリング粗スケジュール

2棟内のクレーンが圧延予定スラブを巡回して台車に乗せる順序候補を複数決める。圧延予定スラブがヤード内のあちこちにちらばって保管されている場合、圧延計画順序でスラブを運ぶクレーン巡回は、移動時間や移動手数の点で必ずしもよくない場合がある。そこで、遺伝的アルゴリズムによって、効率的でありそうな巡回候補を複数計算する。遺伝的アルゴリズムとは、生物の進化を模擬することで最適化問題を近似的に解くアルゴリズムの一種で、産業界において適用事例が多い<sup>4)</sup>。計算時間を短縮するため、下記の制約緩和を行なう。

- ・スラブ置場を図5のようにエリアという大きな括りに分類する。スラブ移動をエリア間の移動とみなす。エリア間移動が同じ場合、移動時間は同じだとみなす。
- ・移動させたいスラブがスラブ山の下に埋まっている場

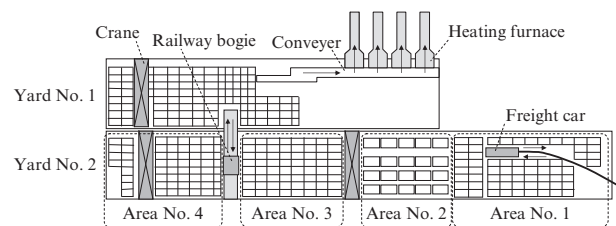


図5 エリアの定義

Fig. 5 "Area" of the slab yard

合、自分より圧延計画が遅いスラブの枚数に比例した配替作業がかかるとみなす。

3.2節の定義に従い、解の評価値を計算する。見積もった評価値の最もよいものから100個を解候補として選定する。

(4) 物流シミュレーション

解候補100個に対して、物流シミュレーションによって、クレーントングの上げ下げや移動の動きを模擬しながらクレーン作業時間をひとつひとつ見積もっていく。

もし、スラブが移動元で他のスラブの下に埋まっている場合、邪魔になるスラブをどかす配替ハンドリングをハンドリング計画に追加する。

また、各クレーンハンドリングが担当するクレーンを、あらかじめ決めておいた担当エリアにしたがって割り当てる。このときクレーン同士が干渉して待たされたり、デッドロックに陥ったりする懸念があるが、本アルゴリズムではクレーン干渉は考慮しない。これは、3つを超えるクレーンに対してクレーン非干渉問題は解くことが容易ではないことと、ガイダンスとしてクレーン干渉の懸念がある手順をその旨警告しクレーンオペレータにクレーン待ちを適宜判断してもらうことが可能であるためである。

(5) 解の決定

100個の解候補のうち、もっとも評価値が小さい解を選ぶ。なお、別途解析によって、評価値が小さい解は、クレーンハンドリング手数が少ない解であることが確認されている。

4. 効果シミュレーション

図6は、実際のオペレータ操業とアルゴリズムが算出した計画とを比較したシミュレーション結果である。搬送路前置場までに要したハンドリング数別にスラブ数をカウントしたヒストグラムである。横軸は搬送路前置場までに要したハンドリング数を表し、縦軸はスラブ数を表している。図の上グラフは実績オペレータによる結果を表し、下グラフは開発アルゴリズムの結果を表している。オペレータ操業は平均4.3手要していたのに対して、開発アルゴリズムは30%減の平均2.9手で目的置場まで搬送できる。また、最大手数は13手から8手に減少し、本手法がより効率的なクレーン手を示しているといえる。

オペレータより手数が少なくなった理由は、1回当たりのスラブ搬送枚数が増えたことと、配替作業が減ったこととの2つの要因が考えられる。そこで、それを裏付ける検証を行なった。

ひとつ目は、1ハンドリングで搬送するスラブ数の比較である。図7がその結果である。縦軸は1ハンドリングあたりに搬送したスラブ数、横軸は時刻である。上図は実績オ

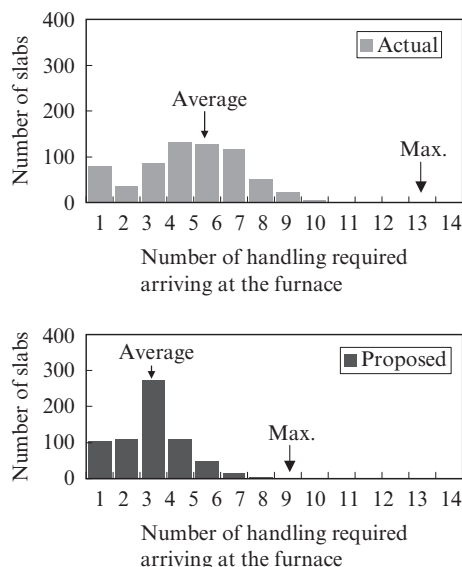


図6 提案アルゴリズムとオペレータによるハンドリング数の比較

Fig. 6 Comparison between the number of the actual handlings and the proposed handlings

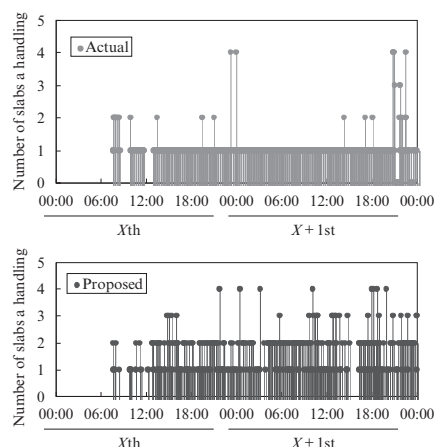


図7 提案アルゴリズムとオペレータによるハンドリングあたりのスラブ数の比較

Fig. 7 Comparison between the number of slabs with an actual handling and a proposed handling

ペレータ操業を表し、下図は提案アルゴリズムのシミュレーション結果である。X日7:30からシミュレーションは開始されている。実績の1ハンドリングあたりの平均スラブ枚数は1.1枚であり、提案手法は1.5枚である。提案手法は1ハンドリングあたり38%多くスラブを運ぶ。

次に、配替ハンドリングの比較を行なった。ここでいう配替ハンドリングとは、圧延順序が早いスラブの上に、圧延順序が遅いスラブを載せたハンドリング、つまり、後に積替えが必要なハンドリングのことをいう。図8は、実績オペレータ操業と開発アルゴリズムとを比較した結果である。縦軸は、非効率ハンドリング数が全ハンドリングに占める割合を表している。従来6.2%あったものが1/3の2.1%まで減少してい



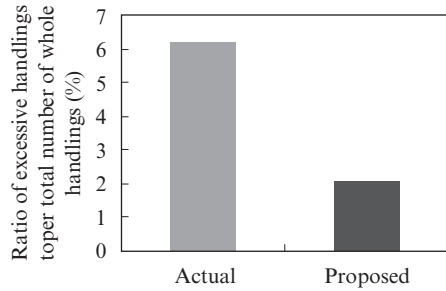


図8 提案アルゴリズムとオペレータによるハンドリングの効率ハンドリング数の比較

Fig. 8 Comparison between the ratio of actual handlings for reshuffling and the proposed handlings for reshuffling

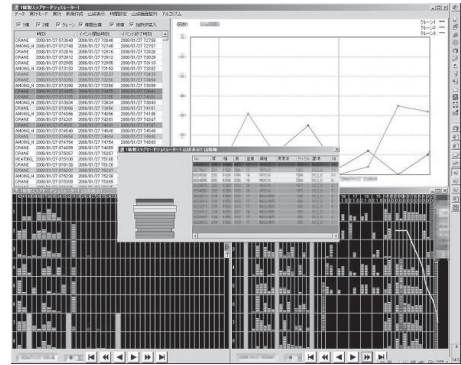


図9 ガイダンス画面例

Fig. 9 Guidance screen shot

る。本手法は製造順序を先まで見通した効率的なスラブ積を実現しているといえる。

## 5. ガイダンス画面

図9は、プロトタイプシステムのガイダンス画面の一例を示している。画面は大きく5つに分割されており、左上画面にはアルゴリズムが算出したクレーン計画が時刻順に表示されている。色ががついているものは、クレーン干渉の懸念があるなど注意喚起を促すためである。画面右上は、この計画に従ったときのクレーンの動きを示している。本アルゴリズムはクレーン干渉を考慮していないため、クレーン干渉の懸念があるクレーン移動を事前にクレーンオペレータに確認させておくためのものである。画面下2つは、ヤード内の各置場におけるスラブ山の高さを示している。画面中央のウィンドウは、ある置場のスラブ山状態を示しており、オペレータは各スラブのサイズや鋼種を確認することができる。

## 6. おわりに

スラブヤード内のクレーンハンドリング計画に対して最適化技術を適用した研究開発事例を紹介した。シミュレーショ

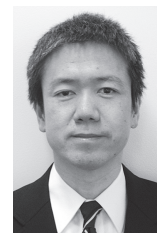
ンの結果、オペレータ操業と比較して、クレーンハンドリング数を30%少ないという結果を得た。本開発システムは、今後実用化する中で、スラブ搬送効率化によるリードタイム削減を通じてお客様満足度に貢献できる。

### 参考文献

- 1) 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. 2006, vol. 51, no. 3, p. 137-142.
- 2) 山口収, 渡辺敦, 笹井一志, 田野学, 天沼陽介, 古家辰弥. 薄板生産管理システムへの最適化・シミュレーション技術の適用. オペレーションズ・リサーチ. 2011, vol. 56, no. 11, p. 640-645.
- 3) Gupta, N.; Nau, D. S. On the Complexity of Blocks-World Planning. Artificial Intelligence. 1992, vol. 56, no. 2-3, p. 223-254.
- 4) Goldberg, D. E. Genetic Algorithm in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley Pub., 1990.



久山 修司



富山 伸司