

(論文)

スラブ物流シミュレーションによる生産ボトルネックの解析

Using a Simulation System for Slab Transportation Bottleneck Analysis



岩谷敏治*
Toshiharu Iwatani



江部宏典*
Tatsunori Ebe



有園徳美**
Noriyoshi Arizono



増田賢紀***
Yoshiki Masuta



齋藤玄人***
Haruto Saitoh

This paper describes the features of a slab flow simulator and its application to material flow bottleneck analysis. The first part of the paper deals with new devices that accelerate simulation algorithms. Since the simulator analyzes slab transportation more than 10,000 times in one execution, a fast and accurate algorithm was necessary. The last part of the paper deals with the bottleneck in the slab flow problem (by utilizing the developed simulator) and comparisons with existing material flow analysis methods.

まえがき = 連鑄工場で鑄造された薄板スラブは、次工程の熱延工場に搬送されるが、当社加古川製鉄所では、その搬送プロセスにおいて、複数のヤードと工場、そして搬送設備が関連する。また、連鑄でのスラブ生産量、熱延工場でのスラブ消費量は日々変動するといった特徴を持つ。そのため、スラブの搬送プロセスは複雑であり、熱延工場へのスラブ搬送能力定量化が容易ではなかった。特に、将来的な増産を考慮した搬送設備への投資を検討する場合、必要十分な投資内容を定量的に決定する手段が求められていた。

本論文では、スラブ搬送能力を定量的に検証するために構築した物流シミュレータと、それを用いたボトルネックの分析結果について述べる。1章では問題の背景であるスラブ物流の概要を示し、2章では開発したシミュレータの入出力と構成、そしてシミュレーション速度高

速化の要点を示す。3章ではシミュレータを活用した物流解析結果を示す。品質工学を用いて搬送能力の支配因子を機関車能力であると絞り込み、必要な設備投資を定量的に導出した。最後に4章では、過去の素材系生産現場におけるシミュレータ、スケジューラの開発事例と比較し、本開発でおこなった搬送能力評価手法の意義を考察する。

1. スラブ搬送問題の概要と特徴

1.1 概要

a) スラブの搬送経路

薄板用スラブは、鋼種と形状(厚さ、幅、長さ)により様々に分類されるが、搬送問題を考える場合には、HCR(Hot Charge Rolling)材、冷片、手入れ片の3種類への分類が重要となる。図1にスラブ物流に関連する

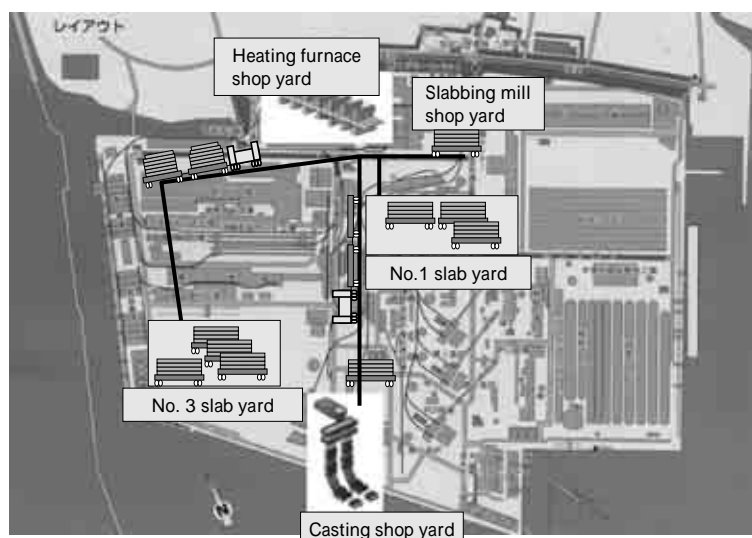


図1 設備配置
Fig. 1 Facility location

*技術開発本部 生産システム研究所 **鉄鋼部門 加古川製鉄所 計画室 ***鉄鋼部門 加古川製鉄所 薄板部

工場,ヤードを示す。HCR材は連鑄工場から熱延工場に直送される。これに対して,冷片はいったんNo.1スラブヤードかNo.3スラブヤードに保管されたのち熱延工場に搬送され,手入れ片は1分塊工場で表面手入れをされてからスラブヤードで保管され,その後,熱延工場に搬送される。なお,以下では表現簡略化のため,工場への(あるいは工場からの)搬送の場合でも,全てヤード間の搬送と表現する。そのため,連鑄工場は連鑄出側ヤード,第1分塊工場は分塊前ヤード,熱延工場は加熱炉前ヤードと呼ぶことにする。

b) 利用する搬送設備

スラブ物流に関係するヤードは,製鉄所内に分散配置されている。そのため,ヤード間のスラブ搬送には4種類の作業が発生する。すなわち,作業(i)搬送元のヤードに機関車で台車を移動し,作業(ii)搬送元ヤードからクレーンにより台車にスラブを荷積みし,作業(iii)機関車で台車を搬送先のヤードに移動し,作業(iv)搬送先ヤードでクレーンにより台車からスラブを荷降ろしする,ことなどが必要である(図2)。たとえば,手入れ片の場合ヤード間搬送が3回あるので, $4 \times 3 = 12$ 種類の作業が必要となる。

c) 搬送作業の原則

生産現場では,本問題のように台車に製品を積載して搬送する物流問題が多い。それらの問題では,1回の搬送における荷積み場所,荷降ろし場所の数に様々なパターンがある。本問題では,作業効率の面から複数ヤードからのスラブ荷積みや,複数ヤードでのスラブ荷降ろしはおこなわない。つまり,1箇所で荷積みし,それを全て1箇所で荷降ろしする。従って,1.1 b)で述べた作業(i)では必ず空台車が用意され,作業(iv)の荷降ろしでは台車は常に空となる。

1.2 物流シミュレータの必要性を示す本問題の特徴

本問題の特徴として,次の2点が挙げられる。

a) 検証範囲の広さと物流規模の大きさ

本問題の対象ヤードは5箇所,物流設備は機関車2台以上,台車とクレーンはそれぞれ10基以上にのぼり,それらの設備が製鉄所内に分散している。また,熱延工程は1カ月単位で品種構成が一巡するため,搬送能力の議

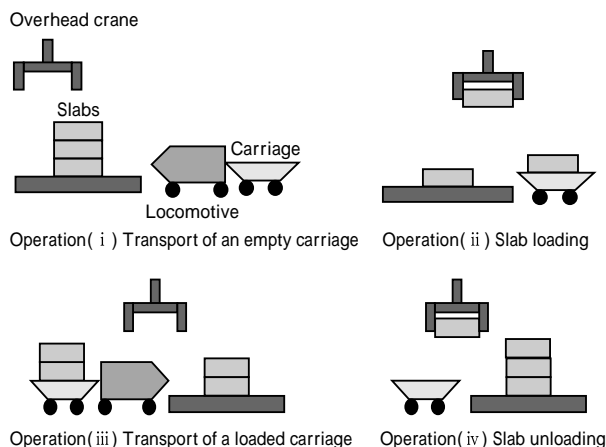


図2 スラブ搬送作業

Fig. 2 Slab transport operations

論には1カ月単位での検討が基本となる。そのため,在庫も考慮すると,数万本単位のスラブの動きをシミュレータで検証することになる。

b) 搬送設備間関係の複雑性

前節で示したように,スラブ搬送作業は常に搬送元クレーン,台車,機関車,搬送先クレーンの4設備の連携を必要とする。それらが同期しないと,設備に待ち時間が発生する。たとえば,機関車がスラブを積載した台車をヤードに搬送してきた場合,クレーンが他の作業中であれば機関車と台車に待ち時間が生じる。逆に台車が到着しないためクレーンが待つ場合もある。つまり,ある作業が遅れると,他の搬送設備に影響し,更にそれが別の作業遅れを生むという遅れの連鎖が発生する。このように,各搬送設備は互いに別設備の待ちの原因となっている。

これらの特徴をまとめると,スラブ搬送能力の検証問題は,大規模で複雑な問題と言える。そのため,個人での全体把握が困難であり,ある設備増強が全体に与える影響の定量的判断が非常に難しかった。その課題解決のため,各ヤード,搬送設備の情報をまとめ上げ,スラブ搬送系全体の挙動を定量的に導出する物流シミュレータを構築する必要があった。

2. 構築したシミュレータの特徴

2.1 シミュレータの入出力

熱延工場(加熱炉前ヤード)への搬送能力増強のための手段としては,1)機関車速度の向上,2)機関車台数の増加,3)台車数の増加,4)クレーン作業速度の向上,5)各スラブヤードの在庫量上限拡張などが候補として上がっている。開発した物流シミュレータでは,それらを変動させた場合のスラブ搬送量を導出する必要がある。更に,シミュレーション結果を検証する上では,各ヤードのスラブ在庫変動量,各搬送設備の稼働率を記録する必要がある。図3に構築したシミュレータの入出力を示す。

2.2 搬送作業時間の計算方法

物流シミュレータの一般的構造を図4に示す。データベース,あるいはルールベースでモデルを記述すると,シミュレータは動作する。しかし,結果の正確性や計算速度の面から,モデル構築には多くの工夫が必要となる。本節では,その工夫のひとつであり,シミュレータ実用化に必須であった搬送作業時間計算の高速化手法を示す。

ヤードにあるスラブをクレーンで台車に搬送する場合

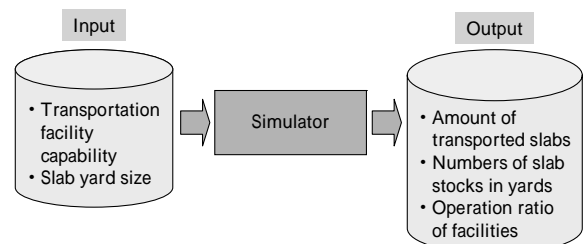


図3 シミュレータの入出力

Fig. 3 Input and output of simulator

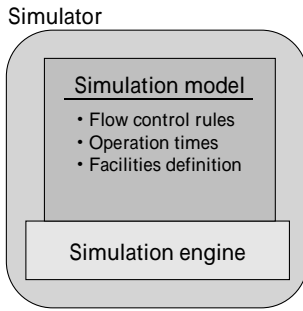


図4 シミュレータの構造
Fig. 4 Structure of simulator

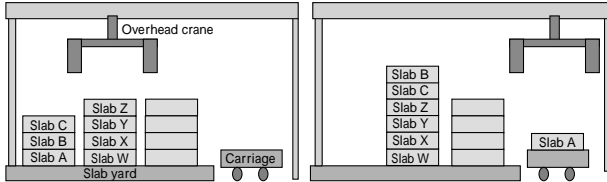


図5 天井クレーンによるスラブ搬送作業
Fig. 5 Slab transportation by overhead cranes

表1 スラブA 移動時の位置処理
Table 1 Necessary operations when moving slab A

Operation 1	Search slab A
Operation 2	Select slabs which are on slab A
Operation 3	Search and determine a place where slab B and C can be moved
Operation 4	Move slab B and C, and update their positional information
Operation 5	Update positional information of slab W, X, Y and Z
Operation 6	Move slab A and update its positional information

の作業時間を考える。台車1台には20~30本のスラブが積載されるので総作業時間は数十分となるが、その時間はヤード内のクレーン移動距離と、必要な配置替えスラブ数に影響される。配置替えスラブとは、移動するスラブの上に積み重ねられているスラブのことであり、それらを別の場所に移動させなければ目的のスラブは搬出できない。このように、クレーンによるスラブ搬送時間の正確なシミュレートには、スラブの位置情報の管理が必要となる。たとえば図5において、スラブAを台車に積込む場合に、シミュレータ内部での位置管理に必要な処理を表1に示す。スラブを段積保管するという本問題の特徴が、多くの処理を必要とする原因となっている。ヤードでは数千本のスラブの保管が可能のため、検索を含む処理は計算時間を多く費やす場合がある。このような処理が、スラブの移動回数、すなわち、数万×数回発生するので、合計計算時間が膨大となる。

この問題を回避するため開発したシミュレータでは、スラブの位置情報管理を大幅に省略した。搬送指令が発生した時点の、ヤード内のスラブ属性(品種、幅、長さなど)別の本数と、搬送するスラブの属性から、その場で位置を推定することとした。これは、ヤードの管理上、スラブは図6(a)に示すように品種、幅により分類されるため、ヤード内平面位置が推定でき、また、スラブの山の安定のため、長いスラブはなるべく山の下端に置かれる(図6(b))ことを利用したものである。つまり、搬送するスラブの品種、幅、長さからスラブが存在

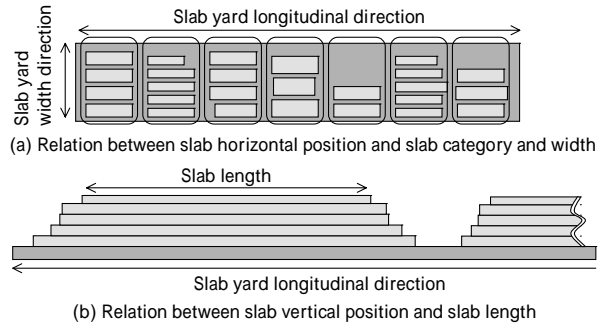


図6 スラブヤードにおける位置管理
Fig. 6 Relations between position and slab specification

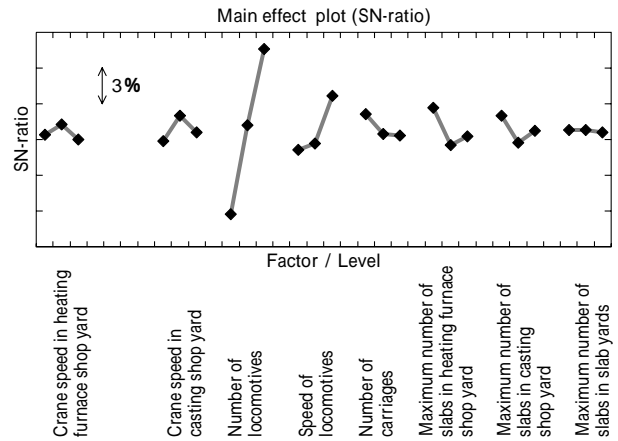


図7 SN分析結果
Fig. 7 SN-ratio analysis

する山を決定し、スラブの長さ全スラブの長さ分布から、山の何段目にあるかを決定した。当然、推定には誤差があるので、それに基づいて計算された1本当たりの搬送作業時間にも誤差が生じる。しかし、1台当たりのスラブ本数が多いため、合計時間は誤差が平均化されるため数%の誤差に入る。この手法により、クレーンの搬送時間計算時間を約100分の1に短縮することができた。

3. シミュレータの活用によるスラブ搬送問題の解析

3.1 品質工学による感度分析の適用

前章で示したように、今回の増設検討では対象設備が多く、また、各設備の増設案も複数ある。それらの全組み合わせを検証するにはシミュレーション回数が膨大となる。そのため、まず搬送能力への影響が大きい設備を、品質工学におけるSN比分析¹⁾を活用して導出した。

生産量を、現状の約10%増の水準に設定し、8項目(加熱炉前クレーン速度、連铸前クレーン速度、機関車台数、機関車速度、台車数、加熱炉前スラブ在庫上限数、連铸前スラブ上限数、スラブヤードスラブ上限数)に関して求めた感度分析結果を図7に示す。各項目を変化させた場合に搬送量の変化が大きい項目が、全体に与える影響が大きいことを図7は示している。これより、設備の中では機関車関連の2項目の影響が最も大きいと判断した。

3.2 シミュレーション結果

設備投資検討対象を、機関車速度と機関車台数に絞り込み、それらを変動させた場合の加熱炉前ヤードへの搬

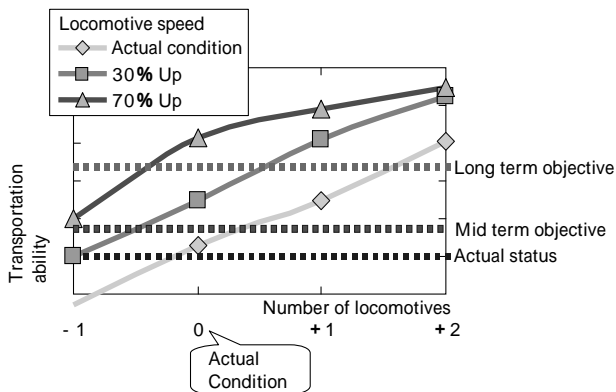


図8 機関車台数と速度の搬送能力への影響
Fig. 8 Effects of number and speed of locomotives

送量を図8に示す。この図から、近未来の目標の達成には30%の機関車速度増加が必要であり、長期的目標の達成には速度増加に加え、機関車1台の増車が必要であるという結論に達した。

4. 過去の開発事例との比較

4.1 大規模な系を対象としたシミュレーション

素材系工場，特に鉄鋼関係では過去に多くの物流シミュレーション，スケジューリング技術が活用されている。たとえば，同じスラブ物流では鉄鋼他社の事例²⁾があり，他の工程，例えば溶鋼物流³⁾⁴⁾，溶銑物流⁵⁾への適用事例もある。これら既存適用例に共通する特徴は，対象とする物流の数が約1,000以下と考えられる点にある。これに対して，本開発では最高約3万本のスラブを対象とし，約5分程度で計算が完了するシミュレータを実現した。参考文献2)~5)は，用いられた手法が異なり一概に比較できないが，生産設備や搬送設備の競合を考慮する必要がある物流問題に対して，有意義な計算結果を実用時間内で導出するシステムとしては，本シミュレータが対応できる物流規模は大きいと考える。この実現には，2.2節で示した搬送作業時間導出の計算時間高速化が貢献している。

4.2 物流問題と意思決定手法

シミュレータ，スケジューラの構築目的は，操業上，

設備投資上の意思決定支援のためである。前節で示した参考文献2),3)は，数理計画法やモダンヒューリスティクスを用いて大域的最適解を導出し，基本的には1回の計算で操業上の意思決定を実現している。これに対して本課題では，まず，シミュレーションを十数回実施して品質工学による感度分析を適用して検討対象を絞り込み，その後詳細なシミュレーションを数とおり実施し，結果を人間が比較することで設備投資案を決定した。

スラブ物流のように物流規模が万単位と大きい問題に対し，設備投資を決定変数として大域的最適解を求める手法を採ることは，計算時間を考えると実用上不可能である。逆に，参考文献2),3)のような作業順序決定問題や作業への設備割付問題は，品質工学が適用可能な規模のパラメータ決定問題として記述することは難しい。このように意思決定を支援する技術としては，シミュレーション，数理計画法，探索アルゴリズム，そして品質工学などがあるが，問題の規模と特徴を見極めた使い分けが重要と言える。

むすび=本論文では，連鑄工場において鑄造されたスラブを熱延工場へ搬送するプロセスをシミュレーションする，スラブ物流シミュレータの内容を示し，次にシミュレーション結果と品質工学による，搬送設備の課題抽出結果を示した。また最後に，素材系産業における物流問題に対する既存のアプローチとの比較をおこなった。

今後は，本システム開発によって得られたスラブ物流に関する知見を操業改善に活用することを試みる予定である。

参考文献

- 1) 立林和夫：入門タグチメソッド(2004),p.9,日科技連.
- 2) 石井義人：日本鉄鋼協会 132 回制御技術部会, 制技 132 -[2] -[1](2004).
- 3) 藤井 聡ほか：鉄と鋼, Vol.89 (2003),p.1220.
- 4) 岩谷敏治ほか：CAMP-ISIJ, Vol.17 (2004),p.176.
- 5) T. Iwatani et al. : International Symposium on Scheduling 2004 (2004) p.22.