

# 製鋼・熱延同期操業における自動圧延順計画技術

## Automatic Rolling Scheduling for Synchronized Operation of Casting and Hot Rolling

式守 崇 SHIKIMORI Takashi JFE スチール 東日本製鉄所 制御部 制御技術室 主査  
武藤 清吾 MUTO Seigo JFE スチール 東日本製鉄所 制御部 制御技術室長

### 要旨

製鋼・熱延同期操業では、製鋼の連続鋳造プロセスで鋳込まれた高温スラブを、スラブヤードに仮置きすることなく熱延プロセスまで短時間で直送り圧延することで、放熱ロス抑制が図られている。しかし、直送材の圧延は圧延機のロール摩耗等に起因する複雑な圧延制約を考慮する必要があるため、ヤード材と直送材を混合した圧延順の決定はオペレータにより手動で実施され、直送材のチャンスロスが課題となっていた。そこで、JFE スチールでは直送材を含む自動圧延順計画システムを開発した。開発にあたっては、構文解析技術を導入し、圧延制約を満たしていることをリアルタイムにチェックできるようにした。本技術は東日本製鉄所（千葉地区）第3熱延工場に適用されその有効性が確認されている。

### Abstract:

In the synchronized operation of casting and hot rolling, rolling schedule is determined manually considering multiple complex constraints due to attrition of mill roll surface. It causes loss of an opportunity of hot direct rolling and increases fuel cost. Therefore, JFE Steel developed a new automatic system, which calculates rolling schedule including hot direct rolling. The parsing method is introduced to this system in order to check the satisfaction in the scheduling constraints in real time. Finally, the proposed technique is applied to Chiba No.3 Hot Strip Mill in JFE Steel and its availability has been confirmed.

## 1. はじめに

製鋼の連続鋳造設備で鋳込まれたスラブの大半は、一旦スラブヤードへ搬送され仮置きされた後、熱延工場へ運ばれて所望の寸法まで圧延加工される。圧延加工前には加熱炉に装入され、数時間かけて加工可能な温度まで再加熱される。一方、製鋼・熱延同期操業においては、鋳込まれた高温スラブをヤードに仮置きすることなく熱延工場まで直送することで放熱ロスを抑制し、加熱炉滞在時間の短縮による燃料原単位の向上が図られている。

しかし、圧延機には、圧延する材料の順番に経験的かつ複雑な制約（圧延制約、詳細は後述）が存在するため、すべてのスラブを直送して圧延することはできず、その可否はオペレータ判断に頼っている。すなわち、ヤードから運ばれるスラブ（ヤード材）を主体として圧延スケジュールを計画しておき、製鋼から直送されたスラブ（直送材）が到着したときに、それが制約を満たしているかどうかをオペレータが都度判断してスケジュールに組み込むという操業になっている。

結果として、手動であるがゆえに、少なからず直送材圧延チャンスの見逃しが発生している。また、見逃さずとも、到着したスラブが突発的に圧延スケジュールに組み込まれることで、それ以降のスラブの加熱炉滞在時間が延長し、過加熱が誘発されている。

この課題を解決するために、JFE スチールでは圧延制約を考慮した圧延順の自動計画システムを開発した<sup>1)</sup>。本システムでは、構文解析技術を用いて経験的かつ複雑な圧延制約を容易に調整可能な形で実装しつつ、制約を満たす圧延順のリアルタイム自動計算を実現した。これにより、直送材を含む圧延スケジュールを事前に計画することで、直送材の圧延チャンス見逃しおよび突発受入による過加熱を抑止して、燃料原単位の改善に寄与している。本システムは東日本製鉄所（千葉地区）第3熱延工場（以下、3HOT）に導入し、その有効性を確認している<sup>2)</sup>。

## 2. 背景

### 2.1 設備概要

製鋼・熱延同期操業を実施可能な鋳造プロセスおよび熱延プロセスの代表的な設備概要を図1に示す。

2025年3月13日受付

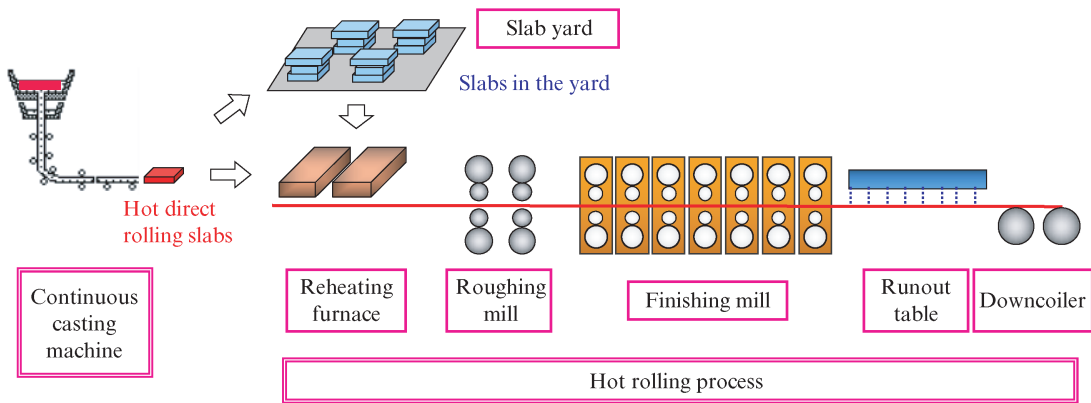


図1 鋳造プロセスおよび熱延プロセスの設備概要

Fig. 1 Overview of casting and hot rolling process

連続鋳造設備から到着したスラブの大半にあたるヤード材は、スラブヤードに一旦搬送された後、加熱炉で再加熱される。一方、直送材は高温のまま熱延プロセスに搬送され、加熱炉で短時間加熱される。

スラブは圧延加工するのに十分な温度まで加熱された後加熱炉から抽出され、粗圧延機、仕上圧延機の順で圧延される。前者ではスラブのおよそ1/10の厚みまで、後者では熱延工場での目標厚（製品厚または次工程の要求厚）まで圧延され、ランナウトテーブルで水冷された後、コイラーで巻き取られる。

## 2.2 圧延制約

圧延制約とは、前記の熱延プロセスで圧延する材料の順番に関する制約であり、製品表面の品質や圧延機内の通板安定性を確保するために経験的に設定される。具体的には、同一幅のスラブを連続して圧延することを規制する同一幅基準、前材と後材の幅差を規制する幅接続基準、組成の異なるスラブを連続させることを規制する材質接続基準といったものがあり、スラブ組成や製品寸法に応じて多数の条件が設けられている。

制約が設定される理由の一つに圧延機のロール摩耗がある。そのメカニズムを図2に示す。圧延機には、鋼板を直接挟み込む2段のワークロールとそれらを外側から支える2段のバックアップロールから成る4段圧延機が一般に用いられており、これらロール、特に仕上圧延機のワークロールは、圧延とともに段差状に摩耗していく。たとえば、最初にスラブAを圧延すると、ワークロール表面のプロフィールはスラブAと同じ幅だけ削られる。その後に圧延するスラブがBのようにAよりも広幅だと、Aによってできたロールの段差部分がBの表面に接触し、Bの表面形状を悪化させてしまう。これを防止するため、続いて圧延されるスラブはAよりも狭幅であることが望ましく、Aより狭幅のCであればスラブが圧延機に真っ直ぐ進入している限り、ロール

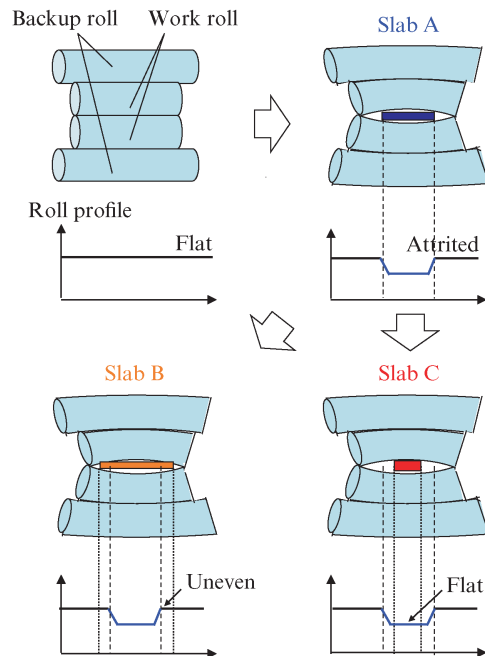


図2 仕上ワークロールの摩耗

Fig. 2 Finishing mill work roll attrition

の段差部分の間にある平らな面で圧延でき、鋼板の表面品質を確保できる。これが、圧延順の制約となり、後材は前材より狭幅が望ましいとされている。

熱延工場には、このような制約が経験的に多様に設定されている。長時間の圧延により摩耗が顕著となったロールは交換されるが、同一ロール使用中は、これら制約に違反しないよう注意して圧延順を計画する必要がある。

## 2.3 現状の圧延順決定フローと問題点

現状の圧延順決定と加熱炉温度設定のフローを図3に示す。

前述したとおり、まずヤード材を対象として圧延順を決め

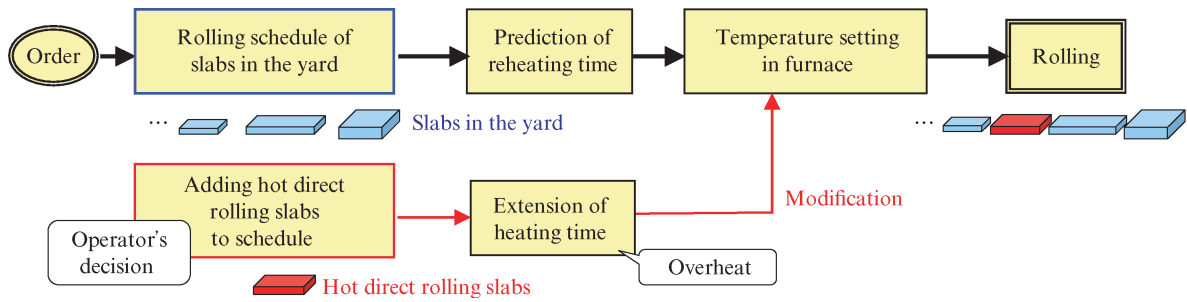


図3 現状の圧延順決定フロー  
Fig. 3 Traditional flow of rolling scheduling

る。これにより、その順番でスラブを加熱炉に装入・抽出したときに各スラブが加熱炉に滞在する時間が予測できることから、その時間で圧延に必要な温度まで昇温できるように、炉温が設定される。一方、直送材は到着の都度、圧延制約をオペレータが判断して圧延順に組み込まれる。

この際、オペレータが判断して手動で組み込むため、組み込みチャンスの見逃しにより放熱ロスが発生したり、一方で直前に組み込まれることでヤード材の圧延順が繰り下げになり、加熱時間が延長し必要温度以上に昇温（過加熱）されることが発生する。すなわち、直送材の組み込みが突発的に発生することで炉温設定を適正化できず、加熱炉全体としての燃料コストを悪化させてしまう。

### 2.4 改善の方向

前記課題を解決するため、直送材組み込みも含めた圧延順を事前にスケジューリングする自動計画機能を開発することとした。開発にあたり、経験的に設定される圧延制約を容易に調整できる形で実装する必要があるため、構文解析技術を導入してこれを実現する。本機能により、過加熱抑止による燃料原単位の改善が期待できる。

## 3. 自動圧延順計画システム

### 3.1 機能概要

自動圧延順計画システムの処理フローを図4に示す。

本システムは、ヤード材情報と直送材情報の双方を必要とする。前者は、ヤード材のスラブ寸法、圧延時間、目標加熱温度、そしてヤード材のみからなる圧延スケジュールを含んでいる。一方、後者は、直送材の寸法などに加え、連続鋳造設備からの到着予定時刻とそのときの予測温度を含む。

これらを用いて、まず最初に到着する直送材をヤード材スケジュールの先頭に追加し、以下の3つの判定を実施する。

#### (A) スラブ温度チェック

直送材の昇温を待つことでヤード材の圧延が遅滞することを防ぐため、直送材が目標加熱温度に達する時刻が、組

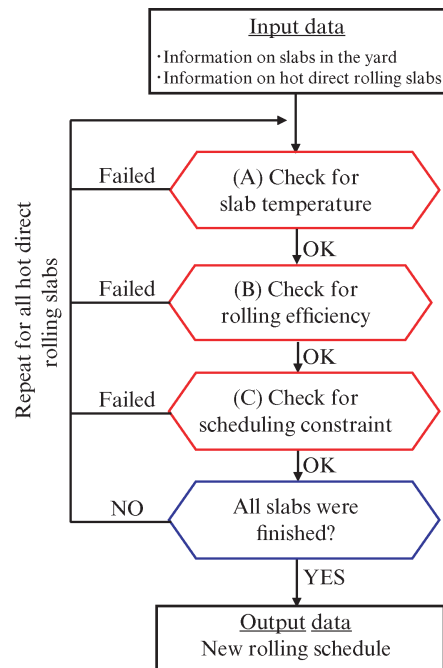


図4 自動圧延順計画システムの計算フロー  
Fig. 4 Calculation flow of proposed system

み込み位置直後のヤード材の抽出時刻よりも早いかを判定する。直送材の温度到達時刻は、以下の熱伝導方程式を用いて推定する。

$$\rho c \frac{\partial \theta(x,t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta(x,t)}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\theta(x,t)$  は時刻  $t$  における厚み方向温度分布を示し、初期値は連続鋳造設備からの到着予測温度で与えられる。 $\rho$  は密度、 $c$  は比熱、 $\lambda$  は熱伝導率である。

#### (B) 圧延能率チェック

組み込み位置前後のヤード材の抽出間隔に、直送材の圧延時間が収まるか判定する。収まらない場合、熱延プロセスライン上の渋滞によりヤード材の圧延が遅滞する。

(C) 圧延制約チェック

組み込んだ後の新しい圧延順が、圧延制約を満足しているか確認する。構文解析を用いるため、詳細は後述する。

すべての判定に合格すると、直送材の組み込み位置を確定し、続いて、次に到着する直送材の判定を実施する。不合格の場合、当該材の組み込み位置をヤード材スケジュールの後方にずらしながら、判定合格となる位置を探索する。これらの処理をすべての直送材について行い組み込み位置を決定し、圧延スケジュールを出力する。なお、判定に合格する位置が存在しない直送材は、スラブヤードへと搬送される。

3.2 構文解析

圧延制約は、材質・寸法など多種多様な項目にわたる複雑な条件であるが、経験的に調整するため、容易にメンテナンスできる形で実装しなければならない。また、時々刻々と変化する連続鋳造設備やスラブヤードの状況に合わせて常に最新の圧延順を計算するため、制約チェックは常に最新の圧延制約を用いて実行する必要がある。そのため、本検討では、構文解析技術を導入することとした。

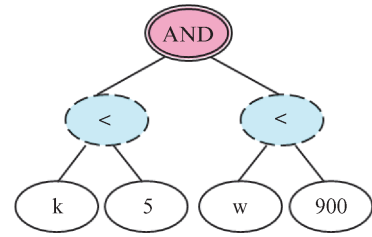
構文解析とは、あらかじめ定義しておいた演算子で記述された文章を、計算機に認識させる技術である<sup>4)</sup>。一般的には、プログラム言語で記述されたソースコードを認識するコンパイラや、ある言語で書かれた文章を計算機で自動翻訳する機械翻訳システムなどで用いられている。今回、この技術を圧延制約を記述・認識するために用いた。

まず、“連続本数上限k”、“仕上幅w”、“前材との偏差Δw”などといった圧延制約を記述するために必要となる語句を演算子として定義する。さらに、“=”，“<”，“>”を関係演算子，“AND”や“OR”を論理演算子とする。すると、多様な圧延制約が、これら演算子と任意の数値だけを用いて、以下のように演算式として表現できる。

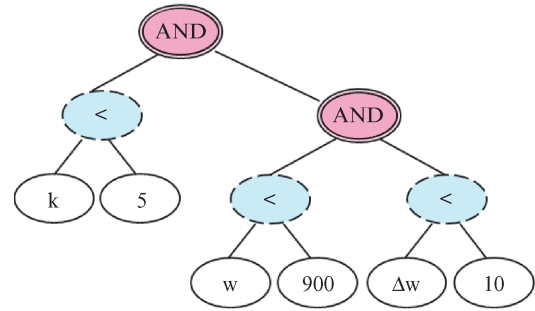
$$k < 5 \text{ AND } w < 900 \dots\dots\dots (2)$$

次に、本システムでは、演算式より図5(a)に示すような構文木を構築する。構文木構造は、与えられた演算式から論理演算子を見つけてその前後で演算式を複数の式に分割し、さらに、それぞれの式を関係演算子の部分で演算子と数値に分割することで構築される。このような演算式の設定と構文木の構築は、経験的に定められた圧延制約を元に圧延前に実施する。

自動圧延順計画システムを起動すると、圧延制約チェックの中で、このような構文木を用いて、直送材を加えた仮のスケジュールが制約を満足するか判定される。このとき、構文木の末端部から判定が開始され、上方向に探索しながら、全ての枝がチェックされる。この方法により、複雑な制約で



(a) Equation (2)



(b) Equation (3)

図5 構文木構造

Fig. 5 Tree structures in the parsing method: upper is based on equation (2), lower is based on (3)

も、それが演算子で記述されていれば、リアルタイムで判定可能となる。

もし経験的な知見により圧延制約の修正が必要となった場合、式(2)はたとえば以下の式(3)ように変更され、構文木も図5(b)のように再構築される。

$$k < 5 \text{ AND } (w < 900 \text{ AND } \Delta w < 10) \dots\dots\dots (3)$$

このとき、ユーザは計算機に保存された演算式情報を修正するだけでよく、本システムのプログラムを改変する必要はない。つまり、演算式を編集するだけで、常に最新の圧延制約を認識させて、圧延スケジュールに反映できる。

4. 適用事例

自動圧延順計画システムの有効性を確認するために行った、シミュレーションおよび実機適用の結果を示す。

4.1 シミュレーション結果

3HOTの待機系プロコンに自動圧延順計画システムを構築しておき、本番系プロコンと同一のスラブ情報を元に圧延スケジュールを計画させ、オペレータが手動で計画した実操業のスケジュールと比較した。結果を図6に示す。上段は本番系でのオペレータによる圧延順、下段は本システムが計算した圧延順である。横軸は時間、縦軸は製品幅を示す。

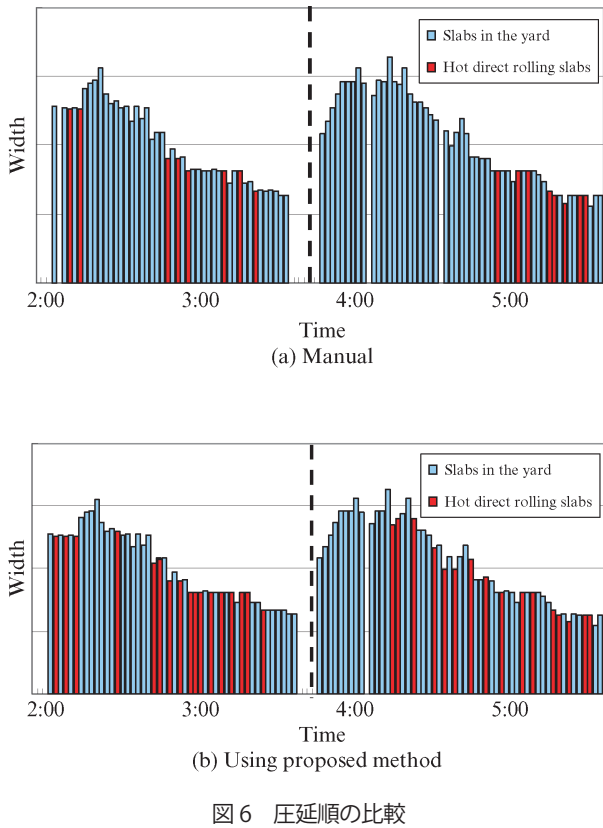


Fig. 6 Comparison of schedules: upper is scheduled manually, lower is scheduled by proposed method

図6より、自動圧延順計画システムは、オペレータよりも多くの直送材の受け入れを計画できていることがわかる。これは、直送材の見逃しによる放熱ロスを低減できることを示している。また、本システムは将来の圧延順を事前に計画できていることから、突発的な直送材の組み込みによる過加熱の抑止にも寄与でき、燃料コストの削減効果が期待される。さらに、この結果から、本システムが提供する圧延スケジュールが圧延制約を満足していることも確認できる。図中の破線は仕上ワークロール交換タイミングを表しており、その前後、すなわち同一ロール使用中は、製品幅が徐々に狭まっていることが確認でき、2.2節で示した圧延制約を満たしている。

次に、本システムの過加熱抑止効果をより詳しく検証するため、本システムを用いた場合の、加熱炉内スラブ昇温パターンを計算した。このシミュレーションでは、直送材組み込み位置の直後・直前のヤード材それぞれについて実施し、実際の昇温パターンと比較した。結果を図7に示す。上段が直後、下段が直前のヤード材のパターンであり、横軸は時間、縦軸はスラブ温度を示す。

図7(a)から、本システムを用いない場合の方が、スラブ温度が目標加熱温度まで達するのが早いことが確認できる。これは、目標温度まで昇温し終えてから急な組み込みが発生して加熱炉滞在時間が延長したため、加熱炉抽出時

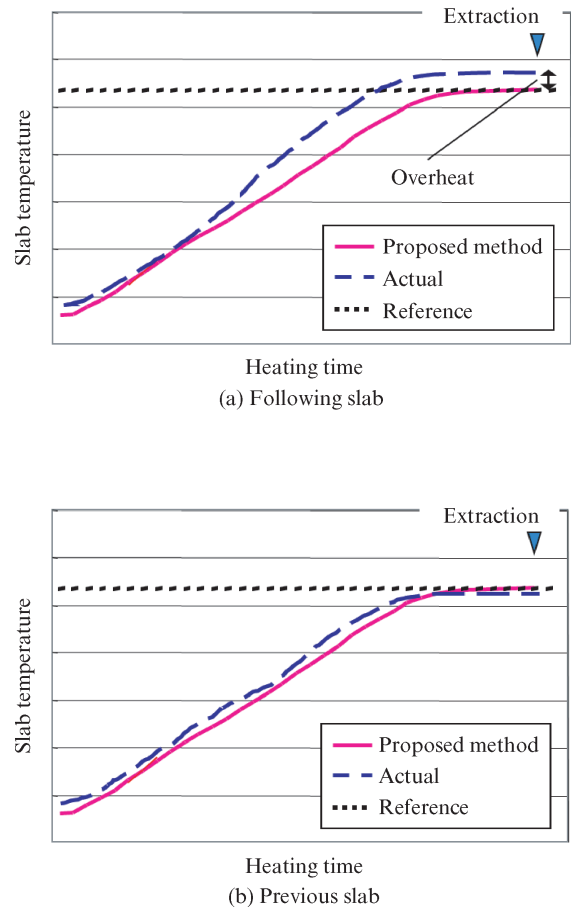


Fig. 7 Comparison of slab temperature: upper is next of the added slab, lower is previous of the added slab

にはその分だけ過加熱が生じている。一方、本システムを用いた場合の昇温パターンでは、直送材組み込みが計画済みのため延長する加熱時間に合わせた昇温ができており、過加熱は少ないことがわかる。なお、図7(b)に示すとおり、直前のスラブに関しては、本システムを用いた場合と用いない場合の過加熱の差異は少ない。

以上より、本システムは突発的な組み込みで圧延順が繰り下げられるスラブの過加熱抑止に有効であり、加熱時間の延長も見込んだ炉温設定の適正化による、燃料コスト低減に寄与できると考えられる。

## 4.2 実操業における評価結果

最後に、自動圧延順計画システムを3HOT実操業に適用した結果について述べる。

3HOTプロコン本番系に本機能を投入して試運転を実施し、圧延制約演算式や計算パラメータなどを調整して、約1ヶ月後にオンラインとした。本システムの効果を評価するため、スラブを加熱炉から抽出したときの実績温度と目標加熱温度の偏差を過加熱度と定義し、その平均値と標準偏差を求めて機能オンライン前後で比較した。評価結果を図8、

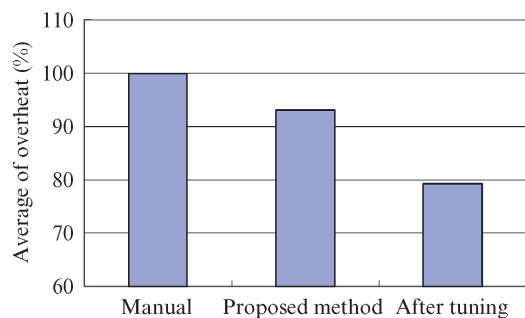


図8 過加熱度の平均値の比較

Fig. 8 Comparison of the average overhear

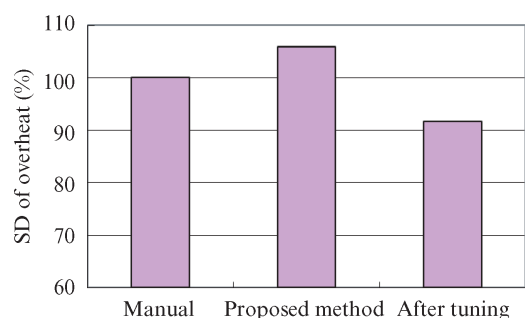


図9 過加熱度の標準偏差の比較

Fig. 9 Comparison of the standard deviation of overhear

図9に示す。両図は、オンライン前の値を100として百分率で示している。

図8より、本システムにより約20%の過加熱抑制効果が確認できる。また、効果を最大限享受するためにはパラメータチューニングが不可欠であることもわかる。制約演算式を過剰に追加すると、制約チェックに不合格となる直送材が増加し、組み込める本数が少なくなるため、制約は慎重に調整

しなければならない。また、図9を見ると、過加熱度の標準偏差もおおよそ10%低減できている。従来、圧延順決定はオペレータ判断に頼っており、個人の能力の差が過加熱度のバラつきを拡大させていた。今回、自動化することでこれを抑制し、燃料コストの最小化に寄与した。

## 5. おわりに

3HOTでは、直送材を含む圧延スケジュールの決定をオペレータ判断に頼っており、直送材の見逃しや、突発的な直送材受け入れによるヤード材の過加熱が発生していた。これを抑止するため、自動圧延順計画システムを開発し、オンライン運用を開始した。その中で、構文解析技術の導入により、従来、オペレータが実施していた圧延制約判定の自動化を実現した。

シミュレーションおよび実機適用の結果、加熱炉の過加熱を約20%低減でき、燃料原単位の改善効果が確認された。本システムは、千葉3HOTで工程運用中である。

### 参考文献

- 1) Yamaguchi, O.; Watanabe, A.; Kamiyama, K. Development of interactive scheduling system for steel sheet manufacturing. IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries. 2012, p. 200-201.
- 2) Shikimori, T.; Muto, S.; Yamaguchi, O. Development of automatic rolling scheduling system for synchronized operation of casting and hot rolling. IFAC Symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. 2016.
- 3) 式守崇, 武藤清吾, 山口収. 熱延加熱プロコン自動差し合い機能導入. 電気学会研究会資料, 産業応用部門ものづくり研究会. 2016, MZK 16 001, p. 1-6.
- 4) Maj, S.; Jacek, M. Describing Constraint-Based Assembly Tasks in Unstructured Natural Language. 19th IFAC World Congress. 2014, p. 3056-3061.

本稿は、主執筆者が同じく執筆した参考文献3)の論文の一部表現を変更して記載しております。