

(論文)

冷間タンデム圧延機のパススケジュール最適化

Pass Schedule Optimization for a Tandem Cold Mill

村上 晃*
Akira Murakami中山万希志*(工博)
Dr. Makishi Nakayama岡本充央**
Mitsuo Okamoto安彦要次**
Yoji Abiko佐野研一***
Kenichi Sano土橋智也****
Tomoya Tsuchihashi

Pass schedules in a tandem cold mill affect productivity and rolled strip quality. This paper describes the optimization of pass schedules, using the Sequential Quadratic Programming method. Performance functions and constraint conditions were chosen to achieve the desired rolling conditions such as rolling force, motor electric currents and gage reduction. After optimization, strips with smaller gage tolerances were produced with increased productivity. The newly optimized pass schedules were applied to a 5-stand tandem cold mill. The results showed a 3% decrease in off-gage length and a 0.4% increase in productivity.

まえがき = 冷間タンデム圧延機におけるパススケジュールは、各スタンド出側板厚を定めるものである¹⁾。パススケジュールが不適切であると、圧延荷重が過大または過小となり、圧延材の蛇行や形状不良を生じる。また、モータ電流が過電流となり、最悪の場合には圧延停止となる。さらに、これらを防止するために手動介入を行うと、オフゲージの増加を招く。このように、生産性や品質への影響が大きいため、パススケジュールを適切に設定することが重要である。

近年、板厚精度の厳格化が進み、板厚公差外れ（オフゲージ）のさらなる低減や、形状品質の向上が必須となってきたため、パススケジュールをさらに適正化する必要があった。

また、当社の冷間タンデム圧延機においては、酸洗との連続化による圧延機入側張力の増加やロール粗度の変更などの操業条件の変更があったため、安定操業や生産性の観点から、パススケジュール修正のニーズがあった。

さらに、将来の操業条件の変化にも短期間で対応できるようにするため、パススケジュール設計技術を開発する必要があった。このようなパススケジュールの設定方法としては、従来、種々の方法が提案されている。

まず、良好な圧延状態が得られるようなパススケジュールを経験的に決定する方法²⁾がある。この方法では、年々厳格化する板厚精度や高生産性を達成するための多くの制約、例えば、圧延荷重やモータ電流などの制約を、同時に満たすパススケジュールを設計することは容易ではない。

また、ニューラルネットにより過去の圧延実績を学習しパススケジュールを決定する方法³⁾があるが、この方法では、操業条件が変更された場合は、操業条件変更後の実績データが蓄積された後でなければパススケジュー

ルを変更できない。このため、操業条件変更前にパススケジュールを設計することができない。また、少量生産材の場合には、実績データ蓄積に時間がかかり、結果として、パススケジュール決定に長期間を要するという不都合がある。

このため、他の方法として、評価関数を導入した設計法が提案されている^{4)~6)}。これは、形状や生産性を最適化する評価関数を決定し、離散的な変数に対して、ダイナミックプログラミングを用いて制約条件付きの最適化問題を解く手法である。この方法では、評価関数や制約条件を適切に設定することにより、制約を満たすパススケジュールの設計が可能となり、また、操業条件の変更後の実績データを用いることなく、短期間でパススケジュールを設計可能となる。

しかし、評価関数や制約条件の設定方法は、最適化の目的に応じて異なり一通りではなく、これら評価関数などの決定は困難である。また、評価関数などを定量的に決定することも困難であるため、実用例は極めて少なく⁶⁾、冷間タンデム圧延機においての実用例は見当たらない。

そこで本稿では、良好な板厚精度や高生産性を確保できる評価関数および制約条件を決定し、冷間タンデム圧延機に適したパススケジュール設計方法を開発した⁷⁾ので報告する。

最適化手法としては、連続的な変数に対する逐次2次計画法を採用し、制約付き非線形最適化問題とすることで、高精度のパススケジュール設計を可能とした。

本稿では、圧延モデル、逐次2次計画法による最適化、実機適用結果を述べる。

1. 圧延モデル

対象は、5スタンドの冷間圧延機（図1）である。

*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 制御部 ***鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター ****鉄鋼部門 加古川製鉄所 薄板部

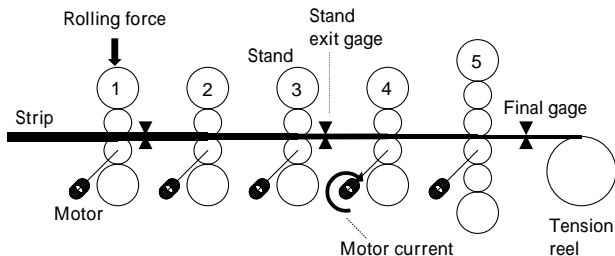


図1 冷間タンデム圧延機
Fig. 1 Tandem cold mill

冷間圧延機の場合、操業の安定性や形状品質の観点から、No.1およびNo.5スタンドの荷重や、各スタンドのモータ電流を最適化することが重要である。

各スタンドの荷重やモータ電流のモデル式は下記のとおりとなる³⁾。

$$P_i = F(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, k_i, \mu_i, w) \dots\dots\dots(1)$$

$$G_i = G(H_1, H_i, h_i, q_{fi}, q_{bi}, k_i, \mu_i, w) \dots\dots\dots(2)$$

ここで、添字の*i*は第*i*スタンドの値を示すものとする。
 P_i : 圧延荷重, G_i : モータ電流, H_1 : 原板板厚, H_i : スタンド入側板厚, h_i : スタンド出側板厚, q_{fi} : 前方張力, q_{bi} : 後方張力, k_i : 変形抵抗, μ_i : 摩擦係数, w : 板幅を示す。

2. 逐次2次計画法による最適化

2.1 最適化前の圧延状態

No.1 スタンドの荷重が過小または過大であると中伸びによる絞りや蛇行を生じ、安定操業の阻害要因となる。また近年、ロール粗度の変更される一方、形状品質の向上が要求されていることから、圧延材の表面品質や形状品質に影響を与える No.5 スタンドの圧延荷重もさらに適正化する必要があった。

最適化前の圧延実績の調査結果を図2に示す。なお、対象となるデータは、軟鋼の代表的な層別のものであり、最高圧延速度に達したときの実績データを示している。

図2(a),(b)は、それぞれ、No.1 スタンドの線荷重(圧延荷重/板幅)およびNo.5 スタンドの線荷重の実績を示す。なお、No.1 およびNo.5 スタンド線荷重のグラフ中の実線は、後述の線荷重の理想値と上下限值である。ここで、理想値とは、良好な圧延状態を実現するための圧延荷重などの値を意味し、過去の圧延実績、オペレータのノウハウ、圧延理論などを考慮して決定するものとする。上下限値は理想値から一定の幅を持つ値で、線荷重の望ましい許容範囲を示す。なお、図の線荷重はベンディング荷重を含んでおり、ベンディング荷重を除いた場合の図中の実線は、ほぼ一定線荷重となる設定となっている。

理想値と実績値の誤差の平均を平均誤差 (ME: Mean Error) とし、理想値と実績値との誤差の2乗平均の平方根を2乗平均平方根誤差 (RMSE: Root Mean Square Error) とすると、No.1 スタンドの平均誤差は0.40 (kN/mm)、2乗平均平方根誤差は1.10 (kN/mm) である。また、No.5 スタンドについては、それぞれ、1.22 (kN/mm)、1.46 (kN/mm) である。また、線荷重の望ましい上限を

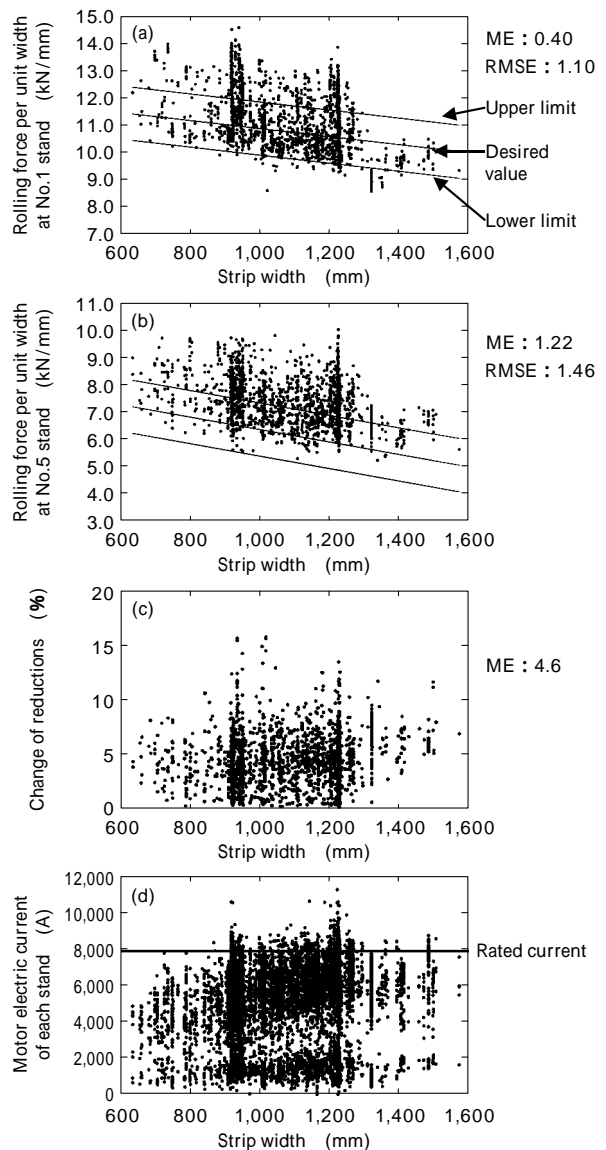


図2 最適化前の実績圧延データ
Fig. 2 Actual rolling data before optimization

大きく超える場合があることがわかる。

図2(c)は、 $\sum_{i=1}^5$ 第*i*スタンド設定圧下率-第*i*スタンド実績圧下率を示す。この値は、パススケジュールの設定後に手動介入などにより修正された量を示し、この値が小さいほど、パススケジュールが適切であることを意味する。誤差平均は4.6 (%)である。

したがって、図2(c)のように、手動介入などにより圧下率を変更しても、図2(a),(b)のように、線荷重が望ましい上下限を大きく外れる場合があることがわかる。

図2(d)は、各スタンドのモータ電流である。モータ電流の定格は8,000 (A)であるが、定格を大きく超える圧延材があることがわかる。

2.2 逐次2次計画法による最適化

最適化に際して、評価関数と制約条件を下記のように決定した。その一例を示す。

評価関数 (J)

$$J = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \times (r_i - r_{di})^2 + \sum_{i=1}^5 \beta_i \times (p_i - p_{di})^2 + \sum_{i=1}^5 \gamma_i \times (G_i - G_{di})^2 \dots(3)$$

$$p_1 \leq p_1 \leq \bar{p}_1 \dots\dots\dots(4)$$

$$p_1 \leq p_1 \leq \bar{p}_1 \dots\dots\dots(5)$$

$$p_1 \geq p_5 \dots \dots \dots (6)$$

$$G_i \leq G_i \leq \bar{G}_i \quad (i = 1, \dots, 5) \dots \dots \dots (7)$$

$$r_2 \geq r_3 \geq r_4 \geq r_5 \dots \dots \dots (8)$$

$$r_5 \geq r_5 \dots \dots \dots (9)$$

ここで、添字 i を第 i スタンド ($i = 1, \dots, 5$) を意味するものとして、 r_i : 圧下率、 r_{di} : 圧下率理想値、 \underline{r}_i : 圧下率下限値、 p_i : 線荷重、 p_{di} : 線荷重理想値、 \bar{p}_i : 線荷重上限値 1、 $\bar{\bar{p}}_i$: 線荷重上限値 2、 \underline{p}_i : 線荷重下限値 1、 $\underline{\underline{p}}_i$: 線荷重下限値 2、 G_{di} : 電流理想値、 \bar{G}_i : 電流上限値、 \underline{G}_i : 電流下限値、また w_i, i, i : 評価関数の重みである。

以下に、評価関数および制約条件の意味を説明する。

(3) 式の第 1 項は、従来のパススケジュールの近傍で新しいパススケジュールを求めるための項である。すなわち、従来のパススケジュールは最適ではなくとも、安定操業や品質の観点から良好な圧延を確保できるパススケジュールとなっていると考えられることから、従来のパススケジュールに近いパススケジュールを求めようとするものである。これにより、評価関数や制約条件に組込むことが難しい条件、例えば、ヒートスクラッチを発生しにくい条件を考慮することができる。

(3) 式の第 2 項、第 3 項は荷重理想値、モータ電流理想値に近づけるための項である。

(4)~(6) 式は、線荷重を適正化するための制約条件であり、(7) 式は各スタンドのモータの設備制約である。

(8) 式は、過去の経験から良好な圧延状態が得られることが知られている圧下率バランスを保持するための条件である。(9) 式は、No.5 スタンドの最小圧下率を保証するための条件である。

最適化手法としては、制約条件をもつ非線形計画問題に対して最も有効とされている方法の一つである逐次 2 次計画法^{9) 10)}を用いた。

ここで、パススケジュールは、板幅、板厚により分けられた層別ごとにテーブル値として設けられているため、このテーブル値をオフラインで計算し書込んでおくこととした。

設計手順を、図 3 に示す。まず、高精度なパススケジュールを求めるため、(3)~(7) 式において最適化に用いる (1)、(2) 式の圧延荷重およびモータ電流のモデル式を高精度化する。具体的には、過去の圧延データを用い、原板厚や板幅などの圧延条件を入力し、計算される圧延荷重およびモータ電流と、実績の圧延荷重およびモータ電流とを比較して圧延モデルの誤差を計算する。そして、モデルにその誤差分を補償する。今回は単純に、圧延荷重、モータ電流ともに、(実績値 / 計算値) を求め、(1)、(2) 式にその値を乗じることでモデルの誤差を補正した。これにより、圧延荷重などのモデル式が精確となり、最適化の結果得られるパススケジュールも精確となる。

次に、オペレータの経験から良好と予想されるパススケジュール r_{di} ($i = 1, \dots, 5$) を決定する。No.1~4 スタンドの圧下率 $r_{d1} \sim r_{d4}$ は従来どおりの値とし、No.5 スタンドの圧下率 r_{d5} は、従来から圧下率が高い傾向があったため小さくし、従来の設定値の 0.8 倍とした。

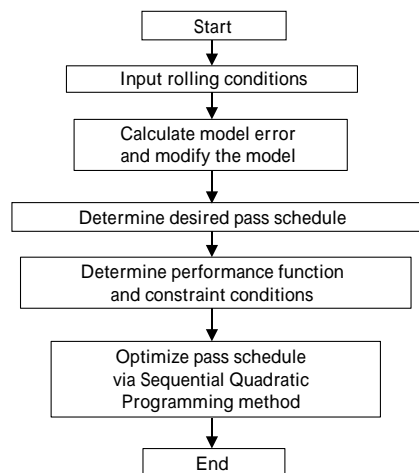


図 3 パススケジュールの設計手順
Fig. 3 Design procedure of pass schedules

そして、(3)~(9) 式の評価関数と制約条件中のパラメータは、圧延荷重とモータ電流の理想値を含めて下記のように決定した。

$$w_i = 0.5 \quad (i = 1, \dots, 5)$$

$$i = 1.0 \quad (i = 1, 5)$$

$$i = 0.0 \quad (i = 2, 3, 4)$$

$$i = 0.01 \quad (i = 1, \dots, 5)$$

$$r_5 = 0.02$$

$$p_{d1} = -0.00148 \cdot w + 12.3 \text{ [kN/mm]}$$

$$\bar{p}_1 = -0.00148 \cdot w + 13.3 \text{ [kN/mm]}$$

$$\underline{p}_1 = -0.00148 \cdot w + 11.4 \text{ [kN/mm]}$$

$$\bar{\bar{p}}_1 = 11.8 \text{ [kN/mm]}$$

$$\underline{\underline{p}}_1 = 8.8 \text{ [kN/mm]}$$

$$p_{d5} = -0.00229 \cdot w + 8.64 \text{ [kN/mm]}$$

$$\bar{p}_5 = -0.00229 \cdot w + 9.62 \text{ [kN/mm]}$$

$$\underline{p}_5 = -0.00229 \cdot w + 7.66 \text{ [kN/mm]}$$

$$G_{d1} = 3,000 \text{ [A]}$$

$$G_{di} = 5,000 \quad (i = 2, \dots, 5) \text{ [A]}$$

$$\bar{G}_1 = 5,400 \text{ [A]}$$

$$\bar{G}_i = 8,000 \quad (i = 2, \dots, 5) \text{ [A]}$$

$$\underline{G}_i = 0.0 \quad (i = 1, \dots, 5) \text{ [A]}$$

評価関数の重み w_i, i, i は、線荷重 > 圧下率 > モータ電流の優先順で評価されるように、 $w_1, w_5 > w_i > i$ ($i = 1, \dots, 5$) と設定した。重みの具体的な数値は、オフラインでのシミュレーション結果に対するオペレータの評価に基づき、調整した。

線荷重制約のそれぞれの上下限値は、オペレータの経験から決定した。

モータ電流の上下限値は設備制約であり、モータ電流の理想値は上限値を考慮して決定した。

最後に、圧延機入側の張力変化などの操業条件の変化を (1)、(2) 式のモデルに反映させた上で、逐次 2 次計画法により、最適なパススケジュールを求める。そして、各層別内の圧延材に対するパススケジュールの平均値をテーブル値として設定した。

2.3 パススケジュール設計例

1 個の圧延材について、シミュレーションにより設計した例を、図 4 に示す。図 4 (b) より、最適化前には

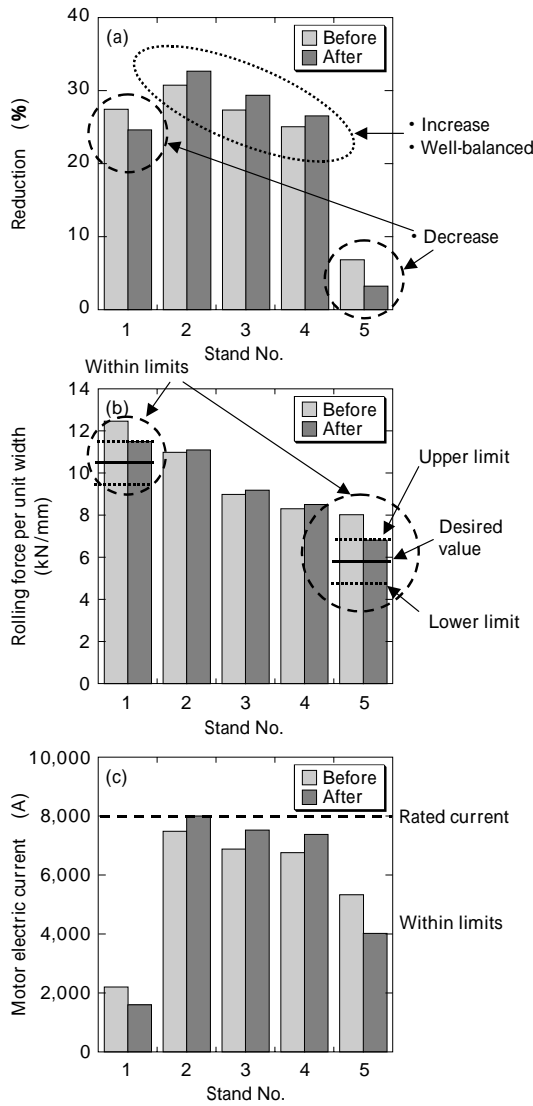


図4 最適パススケジュールのシミュレーション結果1
Fig. 4 Simulation result 1 of optimized pass schedule

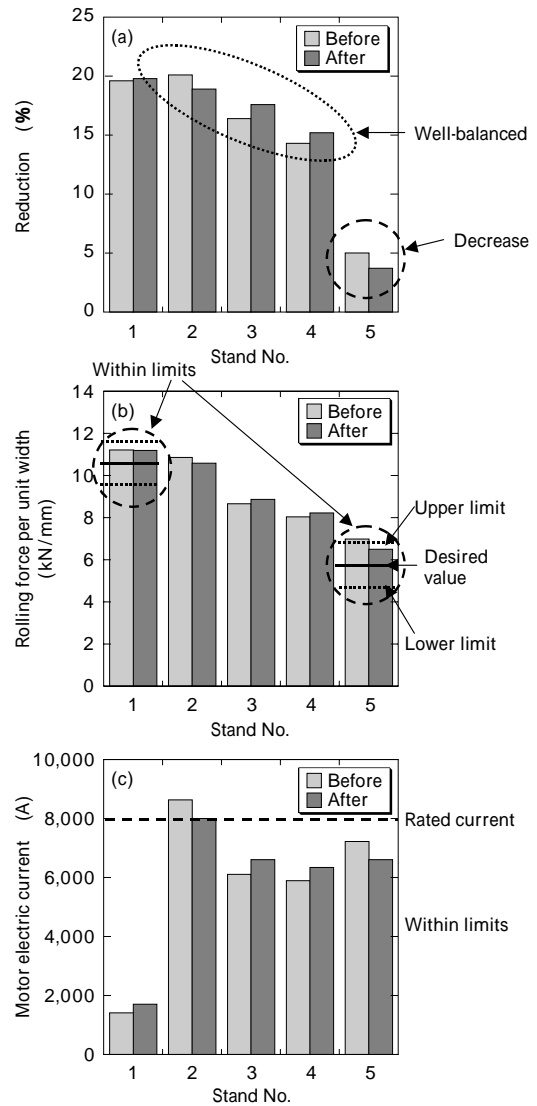


図5 最適パススケジュールのシミュレーション結果2
Fig. 5 Simulation result 2 of optimized pass schedule

No.1, No.5 スタンドの線荷重は上限値を超えているが、最適化後には上限値以下になっている。これは、図4(a)に示すように、No.1, No.5 スタンドの圧下率を低減させることにより実現され、このとき、中間スタンドの圧下率バランスは満足され、また、図4(c)に示すように、モータ電流の制限も満足されている。

他の圧延材についてのシミュレーションによる設計例を、図5に示す。図5(b),(c)に示すように、最適化前には、No.5 スタンドの線荷重が上限値を超えており、また No.2 スタンドのモータ電流が定格電流を超えているが、最適化後には、それぞれ制約内の値となっている。また、図5(a)に示すように、圧下率のバランスも保たれている。

3. 実機適用結果

2章で設計されたパススケジュールを冷間タンデム圧延機に適用した。結果を図6に示す。

まず、図6(c)より、 $\sum_{i=1}^5$ 第*i*スタンド設定圧下率 - 第*i*スタンド実績圧下率 の値は、2.8(%)へと減少し、手動介入などの量が減少し、パススケジュールが適正化されていることが確認できる。

線荷重については、図6(a)より、No.1 スタンドの平均誤差は0.23 (kN/mm)、2乗平均平方根誤差は0.77 (kN/mm)へと減少していることがわかる。

また、図6(b)より、No.5 スタンドについても、それぞれ、0.43 (kN/mm)、0.93 (kN/mm)へと減少していることがわかる。

さらに、図6(d)より、最高圧延速度でのモータ電流が、定格の8,000 (A)を超える場合が減少していることがわかる。

このようにパススケジュールが適正化された結果、軟鋼の対象材ではオフゲージが3%低減された。また、加速までの時間が短縮されることなどにより、生産性が0.4%向上した。

むすび= 逐次2次計画法を用いて、冷間タンデム圧延機のパススケジュールの最適化を行った。圧延荷重、モータ電流や圧下率を適正化することで、品質や生産性を向上させるパススケジュールを求めることを可能とした。また、圧延条件の変更に対しても、短期間でパススケジュール設計が可能となった。

実機適用の結果、オフゲージを3%低減し、生産性を

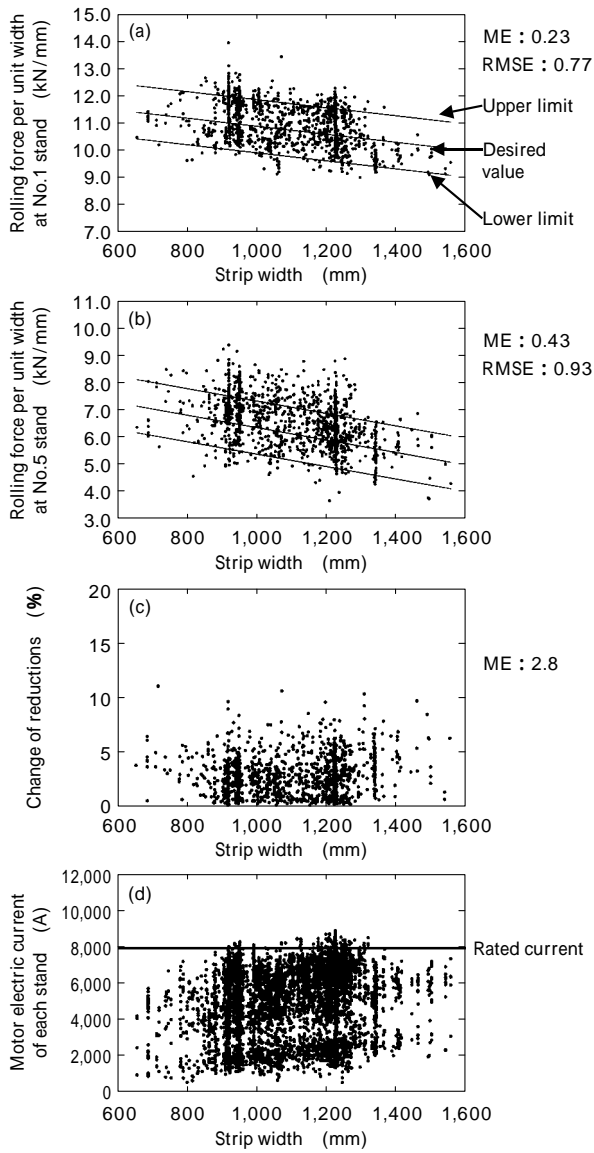


図6 最適化後の実績圧延データ
Fig. 6 Actual rolling data after optimization

0.4%向上させることができた。

今後、制約条件の改善などにより、さらにパススケジュールの適正化を図っていく。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会編：板圧延の理論と実際，(1984) p.293，日本鉄鋼協会。
- 2) 日本鉄鋼協会編：第3版鉄鋼便覧(1)，(1980) p.568，丸善。
- 3) 豊福達生ほか：CAMP-ISIJ，Vol.4(1991) p.1496。
- 4) 岡戸克ほか：塑性と加工，Vol.10，No.106(1969) p.808。
- 5) 岡戸 克ほか：塑性と加工，Vol.10，No.106(1969) p.817。
- 6) 小川 茂ほか：塑性加工春季講演会，(1984) p.25。
- 7) 村上 晃ほか：鉄と鋼，Vol.90，No.11(2004) p.953。
- 8) 日本鉄鋼協会：板圧延の理論と実際，(1984) p.112。
- 9) 茨木俊秀ほか：FORTRAN77 最適化プログラミング，(1991) p.167，岩波書店。
- 10) 山川 宏編：最適設計ハンドブック，(2003) Vol.30，朝倉書店。