

冷間タンデム圧延機のパススケジュール最適化

村上 晃*・中山 万希志*・岡本 充央*²・安彦 要次*²
佐野 研一*²・土橋 智也*²

Optimization of Pass Schedules for a Tandem Cold Mill

Akira MURAKAMI, Makishi NAKAYAMA, Mitsuo OKAMOTO, Yoji ABIKO,
Kenichi SANO and Tomoya TSUCHIHASHI

Synopsis : Pass schedules for a tandem cold mill affect the productivity and quality of rolled strips. This paper describes optimization of pass schedules, which are optimized via Sequential Quadratic Programming method. Performance functions and constraint conditions are chosen to achieve desired rolling conditions such as rolling forces, motor electric currents and reductions in thickness. Consequently, strips with small gage tolerance can be produced at higher productivity.

The newly optimized pass schedules are applied to a 5-stand tandem cold mill. The results showed 3% decrease in off-gage length and 0.4% increase in productivity.

Key words: tandem cold mill; pass schedule; optimization; sequential quadratic programming.

1. 緒言

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得る。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り得る。さらに、これらを防止するために手介入を行う場合には、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)長さのさらなる低減や、形状品質の向上が必要となってきたため、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ミル入側張力の増加やロール粗度の変更等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、パススケジュールの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に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等の制約を、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では、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、決定が困難である。また、評価関数等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⁾、冷間タンデムミルにおいての実用例は見当たらない。

そこで、本論文では、良好な板厚精度や高生産性を確保

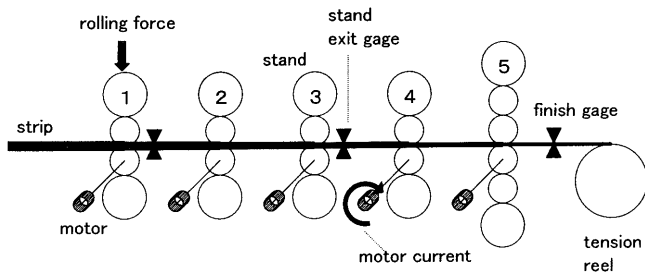


Fig. 1. Tandem cold mill.

できる評価関数及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。

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。

本論文では、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。

2. 圧延モデル

対象は、5スタンドの冷間圧延機 (Fig. 1) である。

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, 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通りとなる⁷⁾。

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

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

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。

3. 逐次2次計画法による最適化

3.1 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 Fig. 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。

Fig. 2(a), (b) は、それぞれ、No. 1 スタンドの線荷重 (圧

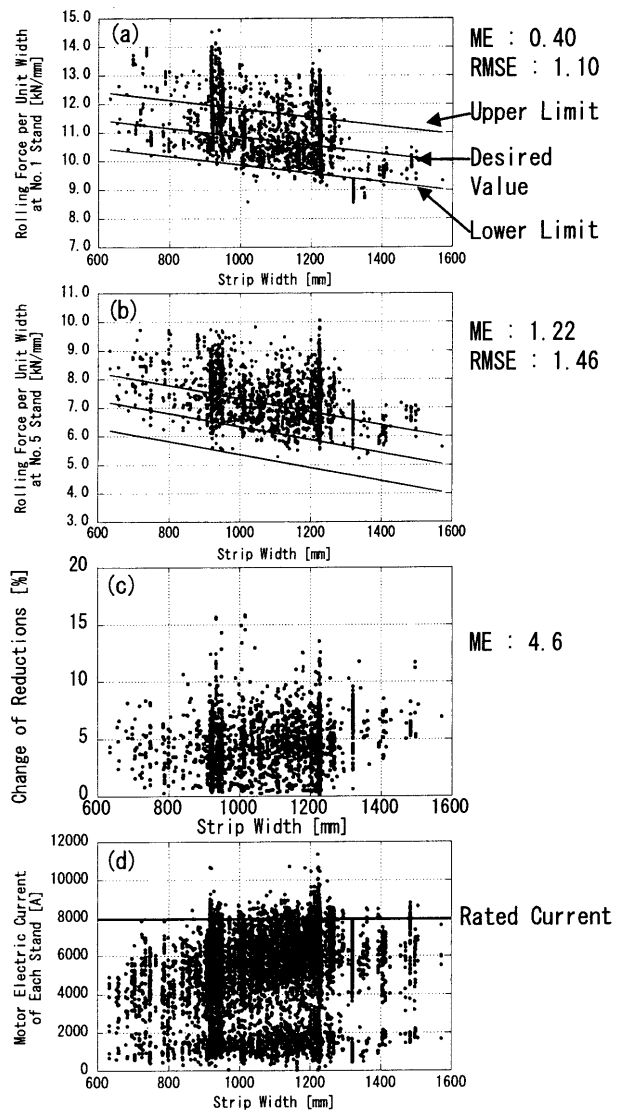


Fig. 2. Actual rolling data before optimization.

延荷重/板幅)、No. 5 スタンドの線荷重の実績を示す。なお、No. 1, 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等の値を意味し、過去の圧延実績や、オペレータのノウハウや、圧延理論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み、図中の実線はベンディング荷重を除いた場合には、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) 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大きく超える場合があることがわかる。

Fig. 2(c) は、 $\sum_{i=1}^5 | \text{第} i \text{スタンド設定圧下率} - \text{第} i \text{スタンド実績圧下率} |$ を示す。この値は、パススケジュールの設定後に手介入等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、Fig. 2(c)のように、手介入等により線荷重を変更しても、Fig. 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。

Fig. 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8000[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。

3.2 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。一例を示す。

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

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

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

$$p_5 \leq p_5 \leq \bar{p}_5 \quad (6)$$

$$p_1 \geq p_5 \quad (7)$$

$$\underline{G}_i \leq G_i \leq \bar{G}_i \quad (i=1, \dots, 5) \quad (8)$$

$$r_2 \geq r_3 \geq r_4 \geq r_5 \quad (9)$$

$$r_5 \geq \underline{r}_5 \quad (10)$$

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、 \underline{p}_i : 線荷重上限値2、 \underline{p}_i : 線荷重下限値1、 \underline{p}_i : 線荷重下限値2、 G_{di} : 線荷重理想値、 \bar{G}_i : 電流上限値、 \underline{G}_i : 電流下限値である。

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み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)~(7) 式は、線荷重を適正化するための制約条件であり、(8) 式は各スタンドのモータの設備制約である。

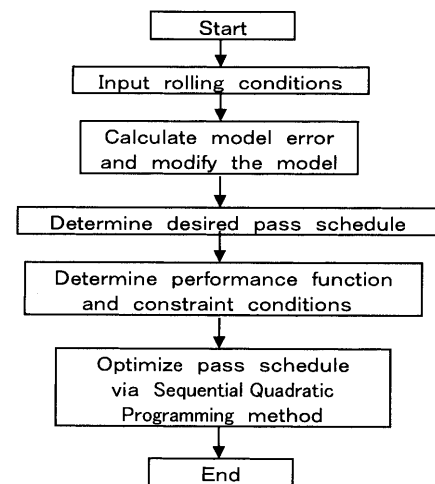


Fig. 3. Design procedure of pass schedules.

(9) 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。(10) 式は、ダル目の生成のため、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^{8,9)}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き込んでおくこととした。

設計手順を、Fig. 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)~(8) 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、原板厚や板幅等の圧延条件を入力し、計算される圧延荷重、モータ電流と、実績の圧延荷重、モータ電流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、圧延荷重等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。

そして、(3)~(10) 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。

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

$$\beta_1 = 1.0 \quad (i=1, 5)$$

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

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

$$r_5 = 0.02$$

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

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

$$p_1 = -0.00148 \cdot w + 11.4 \quad [\text{kN/mm}]$$

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

$$p_1 = 8.8 \quad [\text{kN/mm}]$$

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

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

$$p_5 = -0.00229 \cdot w + 7.66 \quad [\text{kN/mm}]$$

$$G_{d1} = 3000 \quad [\text{A}]$$

$$G_{di} = 5000 \quad (i=2, \dots, 5) \quad [\text{A}]$$

$$\bar{G}_1 = 5400 \quad [\text{A}]$$

$$\bar{G}_i = 8000 \quad (i=2, \dots, 5) \quad [\text{A}]$$

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

評価関数の重み $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 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 $\beta_1, \beta_5 > \alpha_i > \gamma_i$ ($i=1, \dots, 5$) 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、ミル入側の張力変化等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。

3.3 パススケジュール設計例

1つの圧延材について、シミュレーションにより設計した例を、Fig. 4に示す。Fig. 4(b)より、最適化前にはNo. 1, No. 5 スタンドの線荷重は上限を超えているが、最適化後には上限以下になっている。これは、Fig. 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、Fig. 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

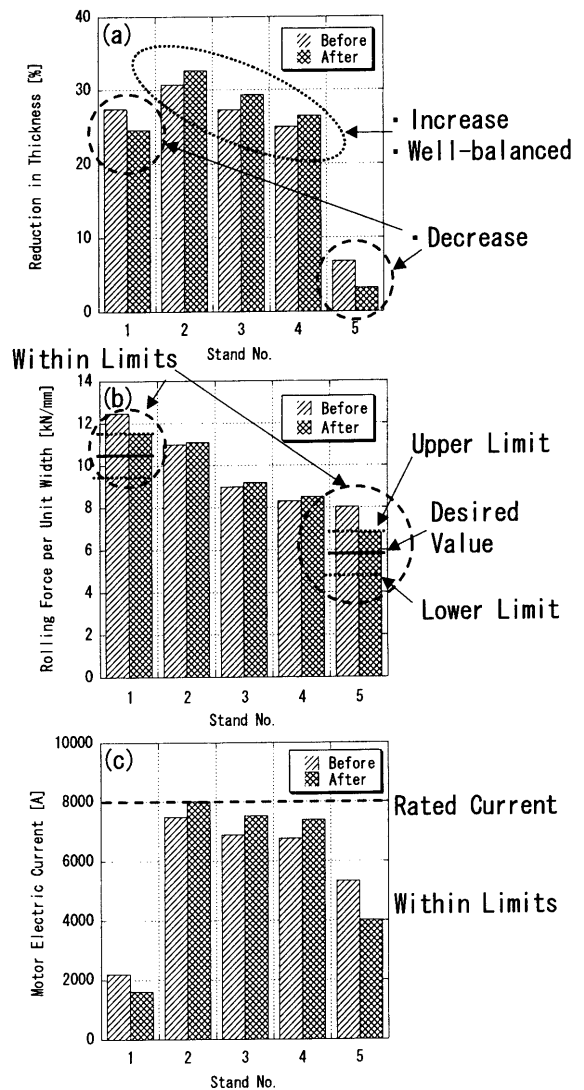


Fig. 4. Simulation result 1 of an optimized pass schedule.

を、Fig. 5に示す。Fig. 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を超えており、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、Fig. 5(a)に示すように、圧下率のバランスも保たれている。

4. 実機適用結果

3.で設計されたパススケジュールを冷間タンデムミルに適用した。結果をFig. 6に示す。

まず、Fig. 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、手介入等の量が減少し、パススケジュールが適正化されることが確認できる。

線荷重については、Fig. 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、Fig. 6(b)より、No. 5 スタンドについても、それぞ

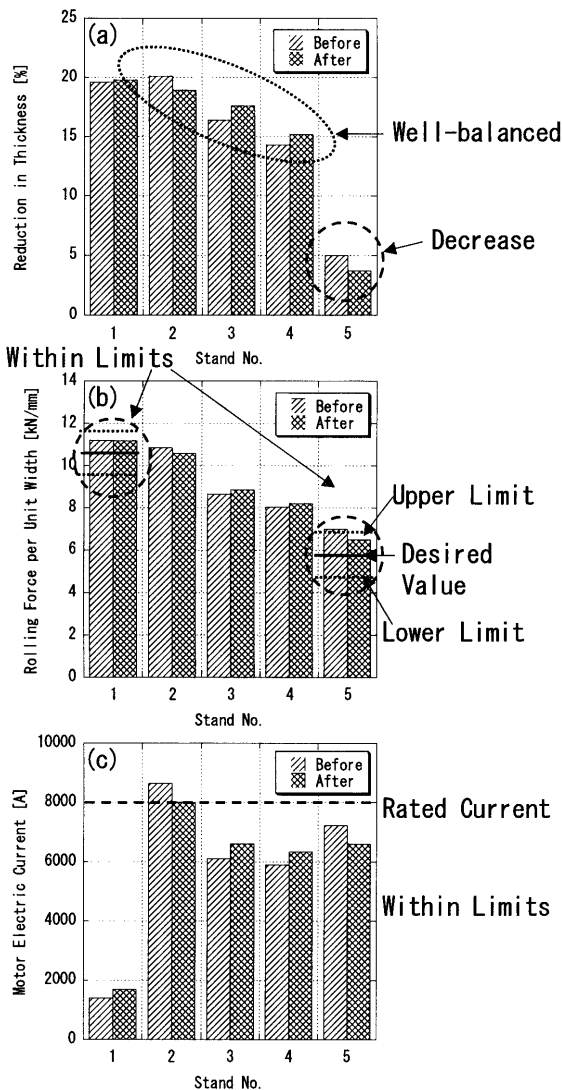


Fig. 5. Simulation result 2 of an optimized pass schedule.

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、Fig. 6(d) より、最高圧延速度でのモータ電流が、定格の8000 [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等により、生産性が0.4%増加した。

5. 結言

逐次2次計画法を用いて、冷間タンDEMミル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、短期間でのパススケジュール設計が可能となった。

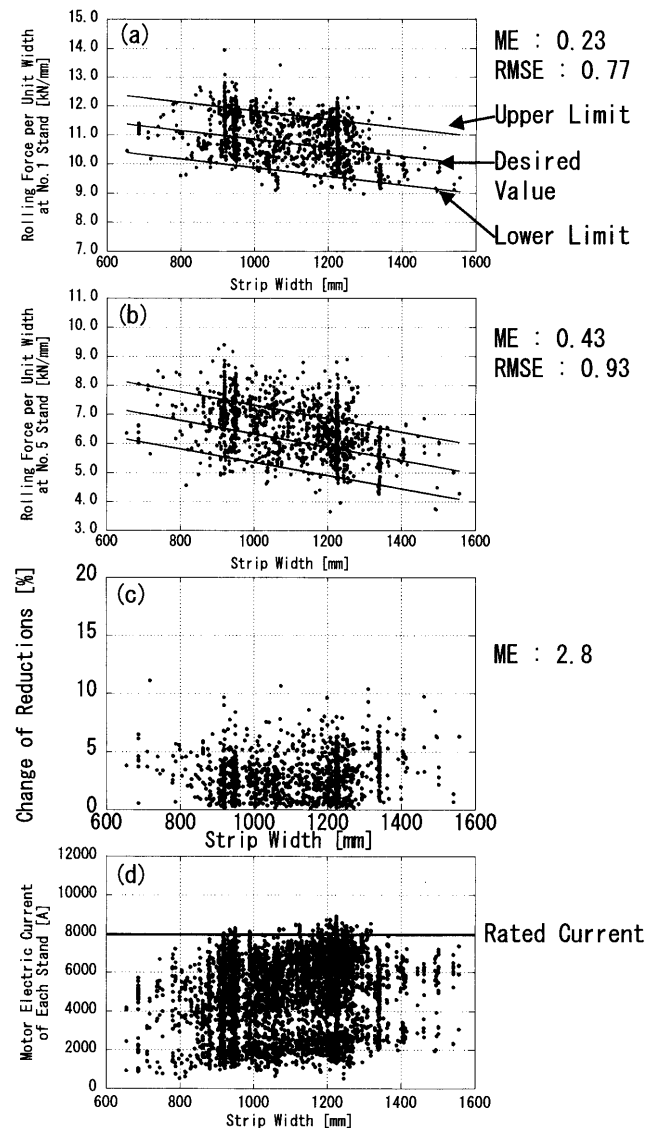


Fig. 6. Actual rolling data after optimization.

実機適用の結果、オフゲージを3%低減し、生産性を0.4%増加させることができた。

今後、制約条件の改善等により、さらにパススケジュールの適正化を図っていく。

文 献

- 1) 板圧延の理論と実際、日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会編、日本鉄鋼協会、東京、(1984)、293。
- 2) 第3版鉄鋼便覧III (1)、日本鉄鋼協会編、丸善、東京、(1980)、568。
- 3) T.Toyofuku, A.Takegoshi, M.Yamamoto and H.Tanaka: *CAMP-ISIJ*, **4** (1991), 1496。
- 4) M.Okado and H.Suzuki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **10** (1969), 808。
- 5) M.Okado and H.Suzuki: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **10** (1969), 817。
- 6) S.Ogawa, M.Yoneda, S.Hamauzu, T.Yabuta, A.Tanaka and T.Kikuma: Proc. of 1984 Jpn. Spring Conf. for Technol. of Plast., Jpn. Soc. Technol. Plast., Tokyo, (1984), 25。
- 7) 板圧延の理論と実際、日本鉄鋼協会共同研究会圧延理論部会編、日本鉄鋼協会、東京、(1984)、112。
- 8) 茨木俊秀、福島雅夫: *FORTRAN77最適化プログラミング*、岩波書店、東京、(1991)、167。
- 9) 最適設計ハンドブック、山川宏編、朝倉書店、東京、(2003)、30。