

(論文)

厚板仕上げ圧延機のロール挙動計測による板厚精度の改善

Improving Plate Thickness Accuracy by Measuring Roll-chock Displacement in Finisher-mill



風張晋啓*¹
Akihiro KAZAHARI



大西宏道*¹
Hiromichi ONISHI



小林 明*²
Akira KOBAYASHI



藤内秀人*¹
Hidehito FUJUCHI

Plate thickness after rolling is determined by the gap between the upper and lower work rolls (WRs). The rolls shifting from their predetermined positions during rolling may cause thickness errors. Conventionally, the displacement in the rolling direction of the roll chocks during rolling was measured using a laser distance meter, or the like, installed in the rolling mill, and was used in facility management. The conventional method, however, has problems in that, for example, it cannot be used for continuous measurement and cannot measure displacements in the thrust direction of the rolls. This paper describes a new method of measuring equipment displacement, which has improved and stabilized the plate thickness accuracy. A stereo camera system was adapted for the measurement. A method enabling three-dimensional, continuous roll-displacement measurement was developed to quantitatively grasp the behavior of the roll chocks during rolling. As a result, the cause of the displacement of WR chocks in the thrust direction was identified as the skew of WRs and buck-up roll (BURs), which was found to affect the thickness accuracy. These results were used to quantitatively estimate the skew angle from the thrust direction displacement of each WR chock and rolling conditions, which allowed the thickness of the side shim of each chock to be properly adjusted to improve the plate thickness accuracy.

まえがき = 当社加古川製鉄所厚板工場では、加熱炉で再加熱したスラブを粗・仕上げ2基の4重式可逆式圧延機で所定の寸法まで圧延している。仕上げ圧延機での板厚精度は歩留りの観点から重要な要素であり、その精度を高く維持するためには適正な設備管理が不可欠である。

板厚は上下ワークロール (WR) の間隙 (ロールギャップ) で決まる。しかし、圧延の際にロールが所定の位置から移動するとロールギャップが所定の値から変化して板厚誤差が生じる。そのため、これまでに圧延中のロール挙動の実態を種々の方法で把握し、その成果を板厚精度の改善に活用してきた。

そうしたなか、ロール挙動を計測する新たな方法を開発し、この手法を設備管理に活用することによって板厚精度の改善と歩留りの向上を実現させた。本稿ではその結果について報告する。

1. ロール挙動計測方法

1.1 ロール挙動の影響とこれまでの取り組み

当社では、圧延中のロール挙動が板厚精度に及ぼす影響を調査するため、ロール軸箱に設置した近接レーザ距離計などを用いて圧延中のハウジングとの距離を計測してきた。さらに、この計測によってロール軸箱の圧延方向の挙動を把握することができ、軸箱とハウジング間の隙間管理などの設備管理に活用してきた。

しかし、これまでの計測方法ではロール軸方向 (以下、スラスト方向という) の挙動は把握できないうえに、長期間のトレンドを把握できないという問題が残っていた。そこで、3次元の挙動を定常的に計測できる新たな計測方法の開発に取り組んだ。

1.2 計測方法の選定

ロール挙動の新たな計測方式として、画像解析を活用した非接触の計測方法を採用した。新たな計測方式は次の4点を特長とする。

- (1) 計測機器は圧延機周辺の熱・振動・水・水蒸気の影響を受けず、計測精度を確保できる
- (2) 圧下方向と圧延方向にくわえて、圧下方向およびスラスト方向のロール挙動も計測できる
- (3) ロール組み替え時にも圧延機本体や軸箱への取付け・取外し作業が不要であり、連続測定が可能である
- (4) 同時に複数箇所の計測が可能である

1.3 計測方法の概要

圧下・圧延方向にくわえて、圧下方向・スラスト方向を含めた3次元挙動の計測を行うため、2台のカメラを用いるステレオカメラ方式¹⁾を採用した。本方式では、計測ポイントにターゲットを設置し、2台のカメラで同時に撮影した画像をデータ処理することによって各ターゲットの座標を特定している。

*¹ 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 厚板部 *² 技術開発本部 生産システム研究所

圧延嚙（か）み込みなどの急激な変動および微小な変位を計測するため、汎用（はんよう）の画像処理ソフトを導入した。このソフトは次の三つの機能を備える。

- ① テンプレートマッチング機能²⁾（ターゲット全体を特徴点として検出する）
- ② サブピクセル処理機能³⁾（カメラ画素分解能以下の分解能で検出を可能とする）
- ③ カメラキャリブレーション機能（レンズや遠近ひずみの除去、3次元補正をする）

本計測装置による計測点は任意の箇所および点数が指定可能である。そこで、圧延によって位置が変動することが想定される各ロール軸箱、ハウジング、油圧圧下装置など14箇所を選定して同時計測を行うこととした。計測装置の構成を図1に、カメラ視野およびターゲット設置位置を図2に示す。

1.4 計測精度

本計測方法の精度の検証を行った。圧下・圧延方向は圧下装置の位置検出器での計測値と比較した。またスラスト方向は、レーザ距離計を用いて下WR軸箱のスラスト方向位置を計測し、本方法での計測結果と比較した。検証の結果を表1に、理論分解能の概念図を図3に示す。カメラ設置場所の制約から仕上げ圧延機とカメラとの間の距離が11,000 mmであった。そこで、スラスト方向の計測精度を±1 mm程度とするために、2台のカメラ間距離を1,800 mmとした。

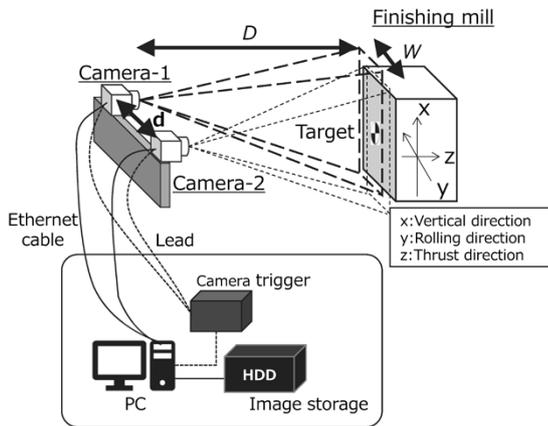


図1 ステレオカメラ方式による計測装置構成
Fig. 1 Configuration of measuring device with stereo vision

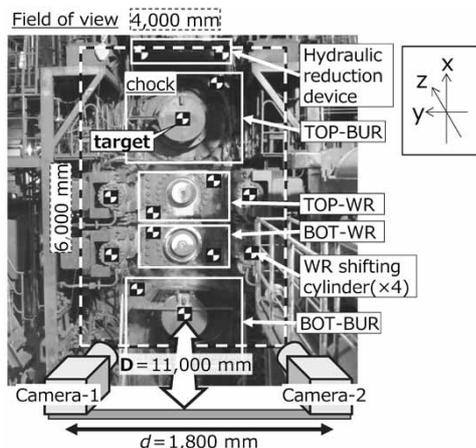


図2 カメラ視野およびターゲット設置位置
Fig. 2 Field of camera view and setting position of target

表1 計測精度の検証結果

Table 1 Verification results of measurement accuracy

	Field of view W (mm)	Number of pixels, N (pixel)	Theoretical resolution (mm/pixel)	Measurement accuracy (mm)
Vertical direction (x)	6,000	3,840	1.6	±0.1
Rolling direction (y)	4,000	2,560		
Thrust direction (z)	—	—	19.1	±1.0

Distance between finishing mill and cameras: $D=11,000$ mm
Distance between cameras: $d=1,800$ mm
Theoretical resolution: $\Delta x, \Delta y=W/N, \Delta z=2D \Delta x/d$

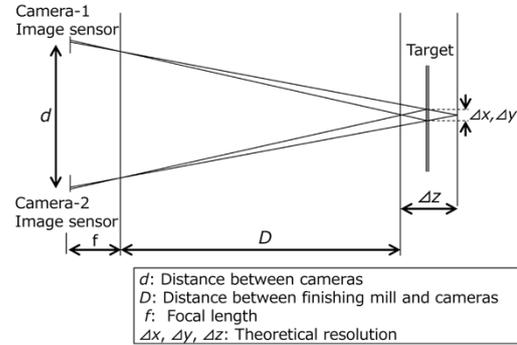


図3 計測装置の理論分解能

Fig. 3 Theoretical resolution of measuring device

2. ロール挙動の調査

2.1 圧延中の各ロールの挙動

仕上げ圧延機において10パスのリバース圧延を実施したときの下WR軸箱の挙動を計測した。その結果を図4に示す。ここでは、ドライブサイド（駆動側、以下DSという）方向のスラスト変位を正とする。圧延材の嚙み込みや板抜け時の急激な挙動を含めて計測できている。これらのデータに基づき、上下WRおよびバックアップロール（以下、BURという）それぞれの圧延中（嚙み込みから板抜け）の挙動をまとめると以下のとおりになる。

- ① 圧下方向：圧延材の嚙み込み時に、上WRと上BURは上に、下WRと下BURは下に移動した。移動量は圧延荷重と対応するため、圧延反力によ

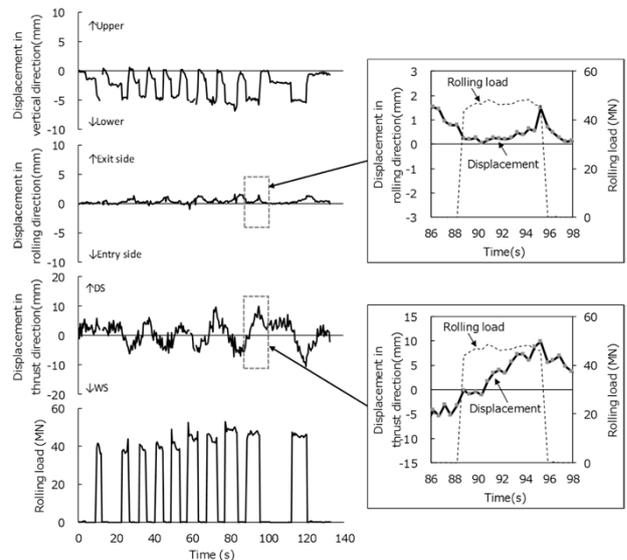


図4 下WR軸箱の変位および圧延荷重の計測結果

Fig. 4 Measurement results of displacement of bottom WR chock and rolling load

り上下の圧延ロール間隙が押し広げられるためと考えられる。

- ② 圧延方向：圧延中のロール位置を安定させる目的で、上下BURに対し上下WRは圧延機出側に所定量オフセットされている。上下WR軸箱は出側ハウジングポストに接しているが、圧延材の噛み込み時に入側に最大1 mm程度の変位が計測された。圧延荷重の増大に応じてその量が大きくなるため、ハウジング変形（ネッキング⁴⁾)により軸箱が移動したものと考えられる。
- ③ スラスト方向：上WRと上BURに大きな動きは見られなかった。いっぽうで下WRは、正転時にワークサイド（作業側、以下WSという）からDSへ、逆転時にはDSからWSへ最大10 mm程度移動した。微小ではあるが下BURは下WRと逆方向へ移動した。また、パスごとにスラスト方向変位（以下、スラスト量という）は変化しており、圧延時間が長く、圧延荷重が大きくなるに従ってスラスト量は大きくなった。

このスラスト挙動から、変位の原因として下WRと下BUR間のスキュー（交差）が考えられる⁵⁾。検証のために、図5に示すようにWR軸箱の側面ライナ厚さを3 mm変化させたときのスラスト量の変化を調べた。その結果、同サイズの圧延材を用いているにもかかわらずスラスト量が変わることが確認された（図6）。このことから、スラスト方向挙動の原因がスキューによるものであると確認できた。

従来、スキュー、ロールプロフィール、および圧延材の非対称性などによって生じるスラスト方向挙動を把握する手段として、スラスト力の計測^{6), 7)} やスキュー角を直接的に測定する方法⁸⁾ などが開発されている。しかしながら本調査により、ロール挙動の計測によってもスキューの検出が可能であることが明らかになった。

2.2 WRスラスト方向挙動の板厚への影響

スキューによってロールにスラスト力が生じる。このスラスト力に起因したDSとWSそれぞれで計測される圧延荷重の差（差荷重）や、ロールギャップの変化によって板厚が変化することが知られている⁹⁾。そこで、圧延中のロール挙動、差荷重および板厚差を調査した。さらに、WRシフト動作油圧シリンダに設置した圧力計

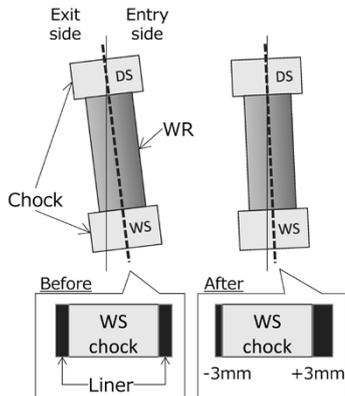


図5 軸箱のライナ厚さ調整
Fig. 5 Adjustment of chock liner thickness

（図7）によりスラスト反力を計測した。なお、スラスト反力は圧延開始時点を0とし、WSのヘッド側圧力が増加する場合を正とした。結果を図8に示す。

ロールの移動に伴ってスラスト反力を検出しており、この挙動は石井らの報告¹⁰⁾とも一致する。また、差荷重および板厚差の変化が観察された。この結果を図9に基づいて考察する。下WRと下BUR間にスラスト力

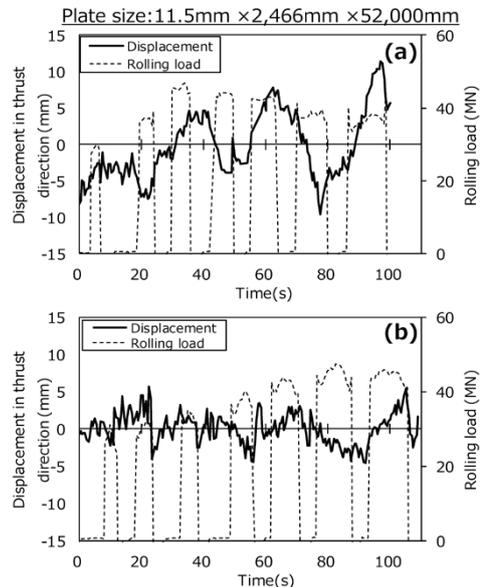


図6 スラスト量の変化 (a) 調整前、(b) 調整後
Fig. 6 Changes of displacement in thrust direction (a) before adjustment, (b) after adjustment

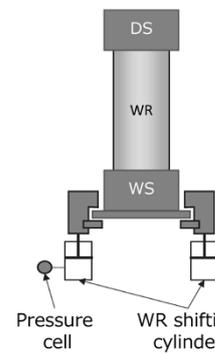


図7 WRシフト装置の概要
Fig. 7 Schematic of WR shifting device

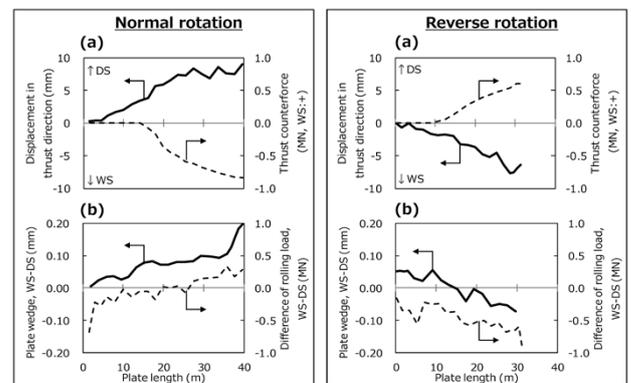


図8 圧延の正・逆転時の (a)スラスト量とスラスト反力、(b)DS、WSの板厚差と差荷重の違い
Fig. 8 Differences between normal and reverse rotation in (a) Displacement in thrust direction and thrust counterforce and (b) Plate wedge and difference of rolling load

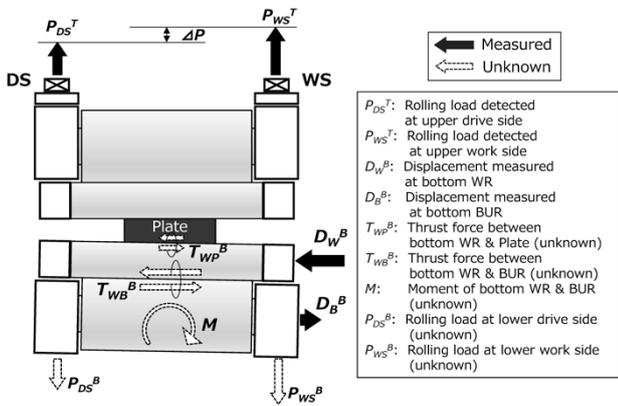


図9 正転時のロール挙動とロールに作用する力の概念図

Fig.9 Schematic view of roll behavior and forces acting on rolls in normal rotation

T_{WP}^B および T_{WB}^B が発生したとき、下BURに作用するスラスト力 T_{WB}^B は下BUR軸箱によって支持される。このとき、スラスト力の作用線（下WRと下BURのロール間）と支持点（下BUR軸箱下面）に垂直距離があることから、下BURには転倒モーメント M が作用する。下WRは下BURの転倒モーメントを受けるため、DSとWSとの間にロールギャップ差が生じ、板厚差が発生すると考えられる。

いっぽうで、上WRと上BURは移動していないことから、下WRのスラスト力は圧延材を介して上WRには伝わっていないか、伝わっていたとしても非常に小さいと考えられる。しかし、上BUR軸箱の支持点上にあるロードセルでは差荷重が検出された。この要因として、次の2点が考えられる。

- ① 圧延材を介して下WRの転倒モーメントを受けるため、下WRからの転倒モーメントとバランスするように上WRと上BURには反モーメントが働く
- ② 板厚差の発生に伴って鋼板が蛇行することによる影響である。

ただし、転倒モーメントおよび鋼板の蛇行は計測できていないため、明確な切り分けはできていない。また、スラスト反力は噛み込み直後には計測されず、スラスト量がおおよそ3～5mm以上で計測された。これは、圧延時の軸箱の上下動作を妨げないように、WR軸箱とWRシフト装置のクランプ部との間に隙間が設けられているためと考えられる。

2.3 実操業におけるスラスト挙動の調査

前節において、スキューによると推察されるスラスト量を計測できることを確認した。いっぽう、厚板工場の操業においてはさまざまな条件で圧延が行われるため、同一角度のスキューであってもスラスト量はパスごとに変化する。そこで、さまざまな圧延状況下においてもスキュー角をスラスト量から評価できる方法が必要になる。

WRとBURとの間に働くスラスト力 T は、圧延荷重 P およびスキュー角 θ に依存するスラスト係数 μ_T により式(1)で表現される¹¹⁾。

$$T = \mu_T P \dots\dots\dots (1)$$

スラスト力 T を受けるWRのスラスト量と圧延時間との関係を図10に示す。圧延材の噛み込み直後からスラスト量が急激に増加する挙動が見られることから、ロールのスラスト方向の加速度を α 、仮の質量を M_R とすると、スラスト量 S は式(2)のとおり表される。

$$S = \alpha t^2 = \left(\frac{Pt^2}{M_R}\right) \mu_T \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 t は圧延時間（噛み込みから板抜けまでの時間）を表す。すなわちスラスト量は、スラスト係数（スキュー角 θ ）、圧延荷重 P 、および圧延時間 t に依存する。これについて、連続計測を行った結果を用いて検証を行った。

圧延時間の影響は図10により明らかである。圧延荷重の影響を確認するため、スキュー角が変わらないと考えられる同一ロールを使用した連続圧延を行い、一定の圧延時間における圧延荷重 P とスラスト量 S の関係を調べた。その結果を図11に示す。圧延荷重が大きいほど、スラスト量が増加することが確認できた。この結果よりスキュー角は、圧延荷重と圧延時間の二乗の積 ($P \times t^2$) が一定となる条件で規格化したスラスト量で評価できることがわかった。

上記を踏まえ、実操業において連続計測を行ってスラスト量の変化を調べた。スラスト量は規格化し、WR軸箱別に集計を行った。なお、軸箱は3セットをローテーションさせて使用している。WR軸箱セット別のスラスト量の推移を図12に示す。いずれの軸箱においてもス

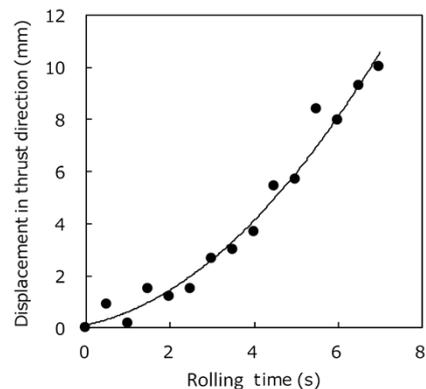


図10 スラスト量と圧延時間の関係

Fig.10 Relationship between displacement in thrust direction and rolling time

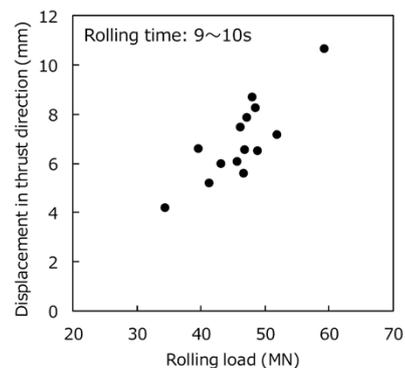


図11 圧延荷重とスラスト量の関係

Fig.11 Relationship between rolling load and displacement of thrust direction

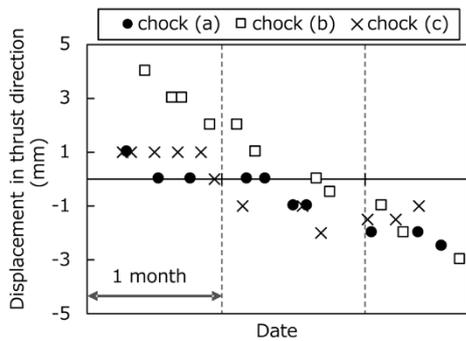


図12 WR軸箱セット別のスラスト量の推移

Fig.12 Changes of displacement in thrust direction of each WR chock set

スラスト量は経時的に変化し、その変化の傾向はいずれのセットでも同様であることが判明した。その原因の一つとして、軸箱側面ライナあるいはハウジングライナの摩耗により、DSとWSとでは不均等な摩耗が進行してスキュー角が変化していることが挙げられる。

また、WR軸箱セット別のスラスト量が異なることも判明した。これは、長期間にわたる使用状況の違いから、WR軸箱に寸法上の個体差が生じていたためと推察される。

以上の連続計測結果より、定常的に実施した計測結果に基づいてロールスキューを調整することが板厚精度の維持向上に有効であると考えられる。

3. スラスト量の設備管理への活用

3.1 スラスト量を活用したスキューの管理方法

スラスト量を連続計測し、その量に応じてスキューの修正を行った。スキュー角の修正量は、あらかじめ調査した種々の条件でのスラスト量との関係から算出した。圧延荷重および圧延時間より規格化して算出したスラスト量とスキュー角との関係を図13に示す。また、スキュー角の修正はWR軸箱ライナ厚さの調整によって行った。ライナ厚さの調整量は、DSとWSとの間のWR軸箱間距離とスキュー角との幾何学形状から算出した(図14)。

3.2 板厚精度の改善効果

実操業におけるスラスト量の推移を図15に示す。新

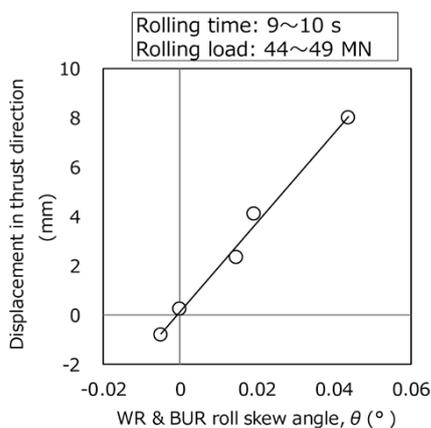


図13 スキュー角とスラスト量の関係

Fig.13 Relationship between skew angle and displacement in thrust direction

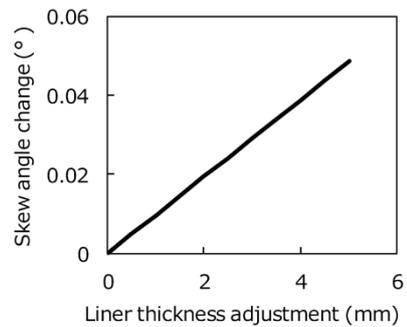


図14 ライナ厚さ調整量とスキュー角変化の関係

Fig.14 Relationship between liner thickness adjustment and skew angle change

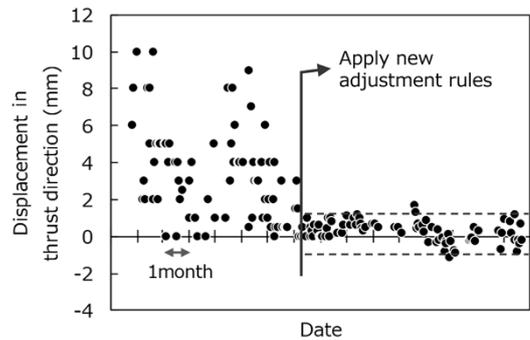


図15 実操業におけるスラスト量の推移

Fig.15 Changes of displacement in thrust direction in actual operation

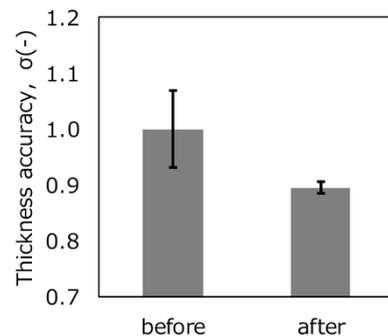


図16 新たなロールスキュー管理手法導入前後の板厚精度比較

Fig.16 Comparison of thickness accuracy before and after applying new scheme to roll skew management

たなスキュー管理方法の導入前はスラスト量のばらつきが大きく、最大で10 mm程度発生していた。いっぽう導入後は、スラスト量を連続計測しながらスキュー角を調整することにより、設備変化点や経時的なライナ摩耗の進行に対してもスラスト量を管理値に設定した ± 1 mm程度に抑制できた。その結果、板厚精度(目標板厚からの差異)を約10%改善することができた(図16)。

現在、本計測手法を用いた常時計測・監視システムを構築し、スラスト量を含む設備状態の監視およびスキュー角の修正を行っている。

むすび=板厚精度の改善を目的に、仕上げ圧延機の動的挙動の計測手法を確立し、それを活用した設備管理方法を具体化した。その結果、スラスト量を抑制し、板厚精度を改善・安定化させることができた。実施した内容と得られた効果を(1)~(4)にまとめる。今後は、この測定手法をほかの設備にも適用し、品質向上および設備

不良の早期発見に活用していく考えである。

- (1) ステレオカメラ方式による画像解析手法を活用することにより、圧延機各位置の3次元動的挙動の常時計測を実現した。
- (2) (1) の手法を用いて圧延中のロール軸箱などの挙動を把握し、WRのスラスト方向挙動が板厚に影響を及ぼすことを明確にした。
- (3) スラスト量は経時変化しており、その原因の一つは軸箱あるいはハウジングのライナの摩耗と考えられる。
- (4) スラスト量からスキュー角を推定できた。連続測定の結果に基づき、軸箱ライナの厚さを定量的に調整することによって板厚精度が改善した。

参 考 文 献

- 1) 吉澤 徹. 最新 光三次元計測. 朝倉書店, 2006, p.32-37.
- 2) 末松良一ほか. 画像処理工学 (改訂版). コロナ社, 2000, p.172-174.
- 3) 菅野純一. 精密工学会誌. 2012, Vol.78, No.7, p.589
- 4) 馬場 充ほか. 石川島播磨技報. 1977, Vol.17, No.1, p.68.
- 5) 鈴木 弘. 圧延百話. 第1版, 養賢堂, 2000, p.131.
- 6) 株式会社オリエンテックほか. 圧延機作業ロールのスラスト力検出装置. 特公平06-004167. 1994-01-19.
- 7) JFEスチール株式会社. 圧延機. 特許第4650156号. 2010-12-24.
- 8) JFEスチール株式会社. 蛇行制御方法および蛇行制御装置. 特許第6212732号. 2017-9-29.
- 9) H. Furumoto et al. Procedia Engineering. 2017, Vol.207, p.1373-1387.
- 10) 石井篤ほか. 日本鉄鋼協会第146回圧延理論部会. 2017, p.146-03.
- 11) 尾野 博ほか. 日立評論. 1996, Vol.78, No.6, p.9-16.