

技術資料

Technical Data

自発光を利用した熱間圧延材の材料幅および倒れ角の計測

高橋信幸*¹, 中尾祐介*², 湯藤隆夫*¹, 國枝祥司*²

Non-Contact Dimension and Tilt Measurement of Hot Rolled Materials Using Self-Radiation

Nobuyuki TAKAHASHI, Yusuke NAKAO, Takao YUTO and Shoji KUNIEDA

Synopsis

In the hot rolling process of steel bars, continuous monitoring of the material's dimensions and tilt as it passes between rolling stands is crucial for maintaining product quality and ensuring operational stability. Conventionally, these measurements have relied on manual methods or visual inspections, which pose significant challenges due to their high labor intensity and associated safety risks.

To overcome these issues, this paper proposes a non-contact measurement system that utilizes the thermal radiation from the hot material itself. The system incorporates two key technologies:

- (1) A measurement method for material width and tilt angle that leverages the thermal radiation of high-temperature materials.
- (2) An exposure time control method designed to maintain optimal image contrast, even under fluctuations in radiation intensity caused by temperature variations.

Experimental results demonstrate a measurement accuracy of $\pm 1\%$ full scale, confirming that the developed system demonstrates sufficient robustness and precision for automated monitoring in intermediate rolling stands.

1. 緒言

特殊鋼の熱間圧延工程は、粗圧延、中間圧延、および仕上げ圧延と複数段の圧延を経て成形される。それぞれの圧延機は、圧延中の材料寸法および材料姿勢などに応じて調整されるが、特に圧延形状が大きく変化する中間圧延工程では、孔型に対する充填率が低くなりやすく、材料が傾斜して圧延される姿勢異常（以下、倒れ）が発生しやすい。そのため、材料寸法や姿勢を測定し監視することが重要となる。

しかし現状では、作業者の目視監視と、Fig. 1 に示す熱間パスを用いた手作業による寸法測定に依存している。

こうした手作業による高温の圧延材（以下、熱間材）

の測定は、作業負荷が高く危険を伴うだけでなく、測定バラツキや常時監視の困難さが、品質の維持および操業安定化の課題となっている。



Fig. 1 Manual measurement using calipers on hot steel.

2026年4月21日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 大同特殊鋼(株)知多工場 (Chita Forging Plant, Daido Steel Co., Ltd.)

そこで、オペレータによる監視作業の代替および測定精度の向上を目的とし、熱間材自身が放射する光（以下、自発光）を用いた熱間材の材料幅および傾斜角度（以下、倒れ角）の非接触測定技術を開発する。

2. 測定装置検討

本章では、熱間材の材料幅および倒れ角を非接触測定するための、測定方法および装置仕様を検討する。

2. 1 測定方法の検討

熱間材の測定には、一般的にカメラなどの受光素子を用いた光学的手法が用いられる。これらは、外部照明を用いる「投受光方式」や「背光照明方式」^{1), 2)} と、外部照明を用いず自発光を利用する「自発光方式」³⁾ に大別される。

Fig. 2 に、外部照明を用いた一般的な手法として投受光方式の原理を示す。同手法は、レーザ（またはLED）を照射する投光器と受光器を対向配置し、材料によって遮光された範囲から材料幅を算出するものである。

投受光方式は、精密な平行光学系を用いた高精度な材料幅測定が可能であるが、倒れに伴い変動する「見かけの材料幅」と「真の材料幅」を原理的に区別できないため、倒れ角の定量評価には適していない。

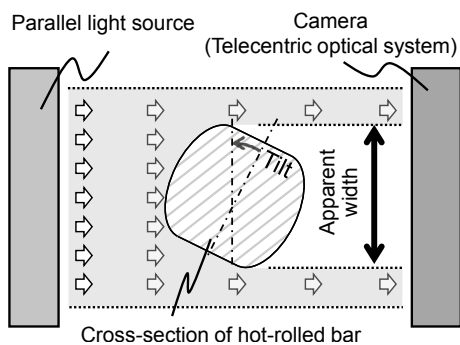


Fig. 2. Transmissive method.

一方、Fig. 3 に示す自発光方式は、熱間材の自発光をカメラにて直接撮像した画像（以下、自発光画像）を用いることで、材料幅および自発光強度の非対称性を利用した倒れ角の測定が可能である。さらに、外部照明や複雑な光学系を必要としないため、装置の低コスト化および小型化も期待できる。

以上より、自発光方式による材料幅および倒れ角の測定について、詳細な検討を行うこととした。

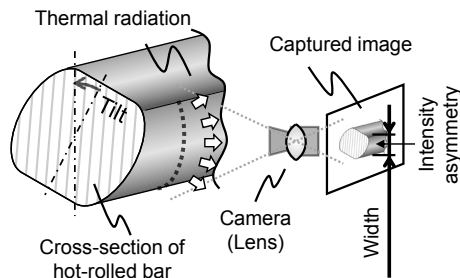


Fig. 3. Self-radiation method.

2. 2 装置仕様

Fig. 4 に、試作装置の設置位置を示す。本装置は、装置前面を通材する圧延材全長の、材料幅および倒れ角をリアルタイムに測定するものとする。

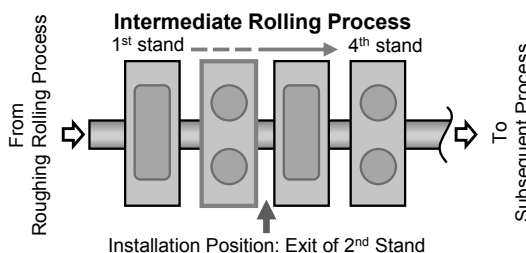


Fig. 4. Schematic layout and installation of the system.

Table 1 に測定対象の諸元、要求仕様、および使用機器の仕様を示す。

なお、使用するカメラには外乱光対策として近赤外透過フィルタを装着している。また、各機器の仕様やカメラの設置距離などは、アルゴリズム検討のための暫定値とした。

Table 1. System configurations and operating conditions.

Item	Value	
Line specifications		
Material width [mm]	80 - 100	
Line speed [m/s]	1.2	
Material temperature [°C]	800 - 900	
Required specifications		
Full scale [mm]	100	
Material temperature range [°C]	700 - 1000	
Width accuracy [% Full scale]	±1	
Tilt angle accuracy [°]	±2	
Sampling rate [points/s]	30	
Optical unit specifications		
Camera	Resolution [pixels]	2448 × 2048
	Working distance [m]	2
Lens	Focal length [mm]	50
	F-number [-]	1.4 - 16
Filter	Passband [nm]	800 (IR-Pass)

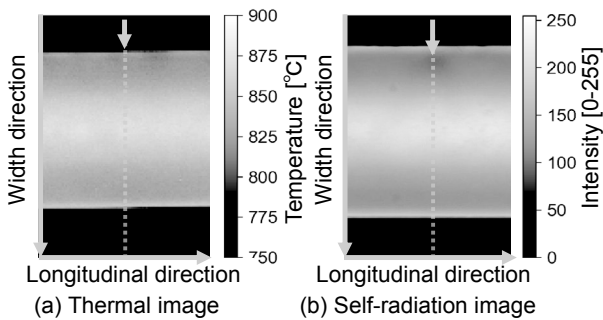
3. 基本測定原理

本章では、自発光画像から、材料幅および倒れ角を測定するための基本的原理について述べる。

3. 1 自発光の特性

熱間材から放射される自発光強度は、温度変化に対し敏感に反応することが知られており^{4), 5)}、材料表面の温度分布を輝度変化として高感度に撮像可能である。

Fig. 5 に、熱間材をサーモビューアとカメラで同時撮像した画像を示す。自発光画像では、熱間材表面の温度分布が高いコントラストで現れており、背景との輝度差も明確に確認できる。



Note: Profile extraction line at image center.

Fig. 5. Comparison of thermal and self-radiation images.

さらに、Fig. 6 に示す両画像中央部における幅方向プロファイル比較から、温度変化が急峻な輝度変化として反映されていることが分かる。

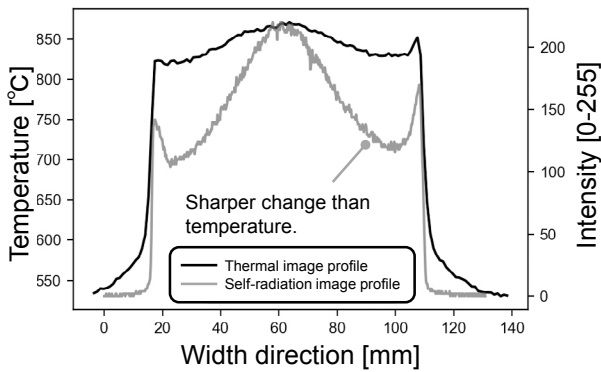


Fig. 6. Temperature and intensity profile at X-center.

3. 2 測定項目と輝度プロファイルの関係

Fig. 7 に、熱間材の表面温度分布と輝度プロファイルの関係を模式的に示す。

材料に倒れがない場合、輝度プロファイルの左右エッジ間距離は材料幅に、中央部の輝度ピーク位置（以下、凸部ピーク位置）は材料の中心位置にそれぞれ対応する (Fig. 7 (a)).

材料に倒れが生じた場合は、材料の傾きとともに材料幅が見かけ増加し、凸部ピーク位置は材料中心からシフトする。したがって、これらの変化から倒れを検出できる (Fig. 7 (b)).

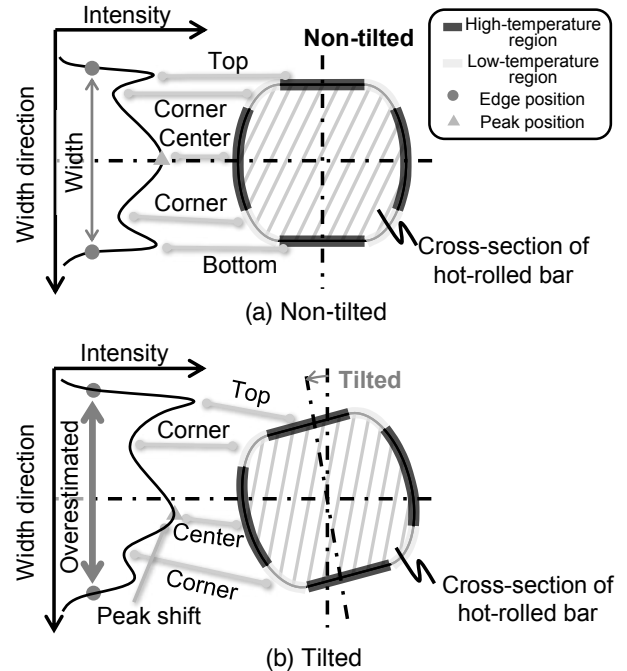


Fig. 7. Comparison of intensity profiles between (a) non-tilted and (b) tilted configurations.

なお、本稿で想定する温度分布および輝度プロファイルは、特定のスタンド間における材料形状、熱バランスおよび設備特性などに依存するため留意が必要である。

4. 測定方法詳細

本章では、自発光画像から材料幅および倒れを測定するための測定アルゴリズムについて述べる。

4. 1 材料幅測定

(1) エッジ位置の検出

Fig. 8 に示す輝度プロファイルの急峻な変化位置（以下、左右エッジ）は、圧延材の材料幅に相当する。

そこで、適切なエッジ検出しきい値 Th_{edge} と 1 次関数による内挿処理（サブピクセル処理）を用いて左右エッジ位置 x_R, x_L を特定する。

なお、 Th_{edge} は背景光の影響を確実に除去できる値とし、 $Th_{edge} = 50$ とした。

(2) 材料幅の算出

左右エッジの差分であるエッジ間距離 Δx に、画素分解能 S を乗じることで、式 (1) に示すように材料幅 W

を算出できる。

ここで S は、撮影環境によって異なる値であり、 $S = 0.212 \text{ mm/pixel}$ とした。

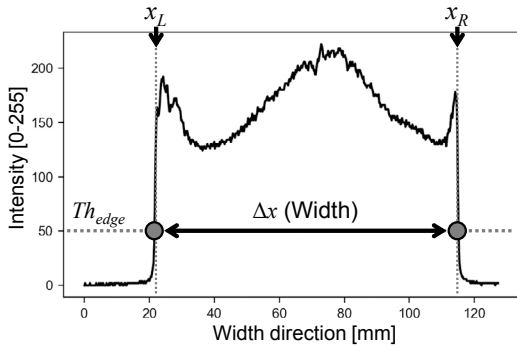


Fig. 8. Edge detection algorithm.

$$W = S \cdot \Delta x = S (x_R - x_L) \dots\dots\dots (1)$$

- W : 材料幅 [mm]
- S : 画素分解能 [mm / pixel]
- Δx : エッジ間距離 [pixel]
- x_L, x_R : 左右エッジ位置 [pixel]

4. 2 倒れ角測定

3.2 節にて述べた通り、凸部ピーク位置のシフト量は倒れ角と相関をもつ。そこで、倒れ角を直接算出する代わりに、材料幅に対する相対的な凸部ピーク位置を「倒れ率 ϕ 」と定義し、倒れの評価指標として用いる。

(1) 領域の抽出と暫定ピーク位置の算出

Fig. 9 に示すように、左右エッジの干渉を避ける目的で、左右エッジから w_{offset} 内側の領域を抽出する。

次に、抽出した領域に対して、プロファイルの非線形性を考慮した4次多項式近似を用い、暫定ピーク位置 x'_{peak} を算出する。

なお w_{offset} は、左右エッジの影響を確実に除外できる値とすれば良く、 $w_{offset} = 50 \text{ pixel}$ とした。

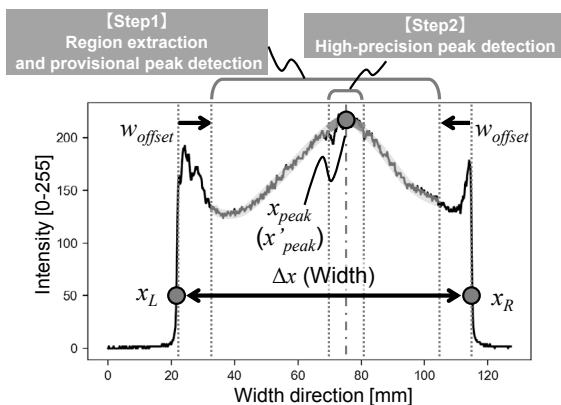


Fig. 9. Procedure for peak detection and width measurement.

(2) 局所近似による高精度ピーク位置検出

x'_{peak} 周辺 (材料幅の $\pm 8\%$) のデータに対し、重み付き2次多項式近似を適用することで、サブピクセル精度での凸部ピーク位置 x_{peak} を算出する。

ここで δ は、凸部ピーク位置周辺が2次関数と見なせる局所的な範囲に設定すれば良く、 $\delta = 10\%$ とした。

(3) 倒れ率の算出

x_{peak} を用い、式 (2) に示すようにエッジ間距離 Δx に対する相対値とすることで、倒れ率 ϕ を算出する。

$$\phi = \frac{x_{peak} - x_L}{\Delta x} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

- ϕ : 倒れ率 [%]
- x_{peak} : 凸部ピーク位置 [pixel]
- x_L : 左エッジ位置 [pixel]
- Δx : エッジ間距離 [pixel]

5. 実ライン適用に向けたロバスト化の検討

本章では、本装置を実ラインへ適用する際に懸念される以下の課題とその対策について、Fig. 10 に基づき説明する。

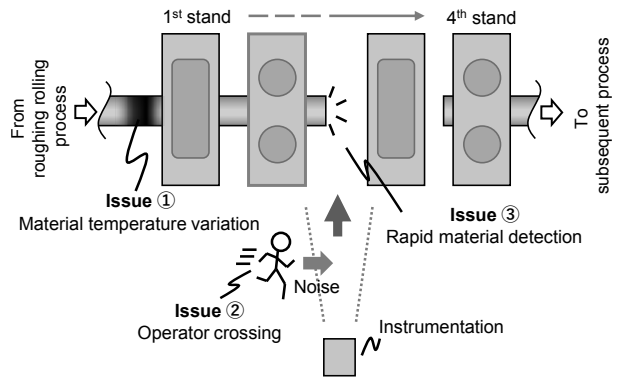


Fig. 10. Technical challenges for the measurement system.

(1) 自発光の輝度変動対策

対象とする材料温度範囲 $700 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ における自発光強度は、プランクの放射法則に基づき $40 \sim 50$ 倍程度変化する^{4), 6)}。したがって、自発光の輝度変動に追従するための露光制御が必要となる。

(2) 外乱対策

設置位置の制約により、作業者の装置前横断が避けられない。また、蒸気などに起因する急激な輝度変化も想定されたため、これら外乱に対する高いロバスト性が求められる。

(3) 通材検知と測定不能区間の低減

外部センサや信号等を用いずに、通材の開始ならびに終了を判定するため、通材開始判定の遅れが測定不能区間（以下、不感帯）の増加に直結する。よって、即応性に優れた通材検知が必要である。

5. 1 PID制御による画像輝度安定化

自発光の輝度変動および外乱対策として、フィードバック制御による露光時間の自動調整手法を検討した。具体的には、3.2節で述べた凸部ピーク位置の輝度（以下、凸部ピーク輝度）を実測値 PV とする微分先行型PID制御を採用する。ここで Fig. 11 に、使用した制御ブロック図を、式 (3) にステップ k における露光時間 u_k を示す。

本手法は、実測値の変化に基づく微分項により、偏差急変時のオーバーシュートを抑制できる特長を持つ。これにより、一般的なPID制御^{7), 8)}と比較して高いロバスト性（安定性）が得られる。

なお、各制御パラメータについては、目標値 $SV = 200$ とし、制御パラメータ b, K_p, K_i, K_d 、およびLPFの特性は予備テストにより最適化した。また、制御周期はカメラのフレームレート（30 fps）に同期しており、1フレームごとに露光時間の更新を行う。

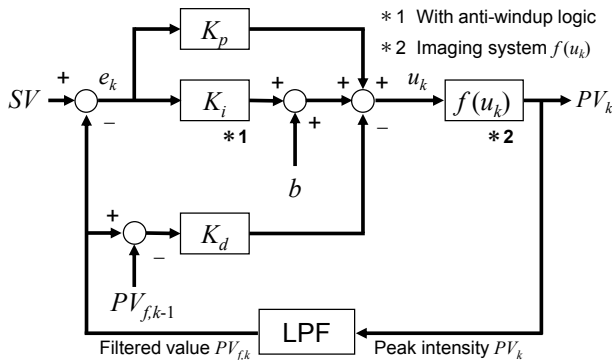


Fig. 11. Block diagram of the PI-D control system.

$$u_k = K_p \cdot e_k + \left(b + K_i \sum_{i=0}^k e_i \right) - K_d (PV_{f,k} - PV_{f,k-1}) \dots \dots \dots (3)$$

- e_k : ステップ k での露光時間 [sec]
- e_k : 偏差 [sec]
- PV_k : 凸部ピーク輝度
- $PV_{f,k}$: LPF フィルタ後の PV_k
- SV : 目標輝度
- K_p, K_i, K_d : 比例・積分・微分ゲイン
- b : 積分項のバイアス

5. 2 通材検知と不感帯の低減

本装置は、通材検知の応答遅延に起因する不感帯の発生が課題となる。この遅延は、低温の材料を想定して初期の露光時間を長く設定せざるを得ない点に由来する。このため、多くの場合で材料進入時の撮像画像が輝度飽和し制御不能となる。

そこで、制御可能な輝度範囲へ引き込むために、露光時間を初期調整する「導入フェーズ」と、定常的な「制御フェーズ (PID 制御)」の2段階のプロセスを構築した。これにより、速やかに制御を安定させ不感帯の低減を図る。

(1) 導入フェーズ

初期露光時間 E_0 にて待機し、材料進入時の画像平均輝度の急増を通材判定輝度しきい値 Th_{on} により検知する。ここで E_0 は、未通材時に Th_{on} 以下の平均輝度（撮像画像の平均輝度）が得られ、かつ通材時には Th_{on} を確実に超える値に設定する必要がある。本稿では、 $E_0 = 10$ ms, $Th_{on} = 200$ とした。

次に、通材検知後の導入フェーズにおける露光時間 E_{k+1} は、式 (4) に示す指数的減衰処理により、制御目標値近傍へ3~5フレーム程度（0.2 s程度）で迅速に引き込む。本稿では、減衰率 $\alpha = 0.5$ とした。

$$E_{k+1} = E_k \cdot \alpha \quad (0 < \alpha < 1) \dots \dots \dots (4)$$

- E_{k+1} : 次ステップの露光時間 [s]
- E_k : 現在の露光時間 [s]
- α : 減衰率 [-]

(2) 制御フェーズ (PID 制御)

凸部ピーク輝度が制御開始しきい値 Th_{set} 周辺となった段階で、定常的なPID制御へと移行する。いったんPID制御が安定すれば、通材中の温度変化は比較的緩やかに推移するため、常に最適な露光時間での撮像が可能となる。ここで Th_{set} は、カメラの輝度値範囲（ダイナミックレンジ）の2/3程度、例えば170に設定すれば良い。

なお、通材終了判定は、画像平均輝度が指定時間 T_{off} の間、通材終了判定しきい値 Th_{off} を下回り続けた場合とすれば良く、本稿では $T_{off} = 1$ s, $Th_{off} = 30$ とした。

6. 実ラインテスト

本章では、本手法の有効性を検証するため、実ラインにて実施した熱間材の材料幅および倒れ率の測定結果について述べる。

6. 1 テスト方法

操業中の実ラインにて任意の倒れを発生させることは困難であり、かつ製造トラブルを避ける必要がある。

そこで、Fig. 12 に示す、カメラ高さおよび視線角度を調整可能なカメラ設置治具（以下、試作機）を製作した。

この試作機を用いることで、Fig. 13 に示すようにカメラに対して相対的な倒れ角（以降、設定倒れ角 (Set tilt angle)）を模擬してテストが可能となる。

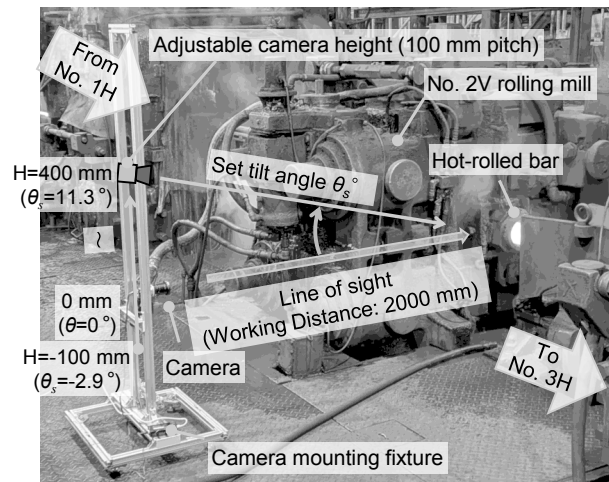


Fig. 12. Experimental setup for tilt-dependent measurement validation.

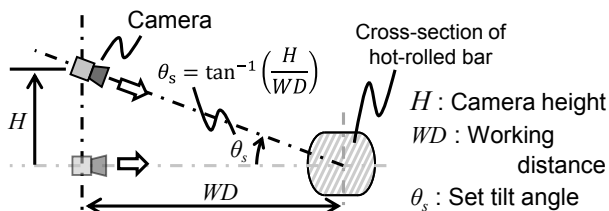


Fig. 13. Set tilt angle θ_s by camera position.

なお、テストには、実測材料幅（熱間パス測定値）93.5 mm、材料長約 50 m の材料を用いた。

6. 2 材料幅の評価方法

設定倒れ角を 0° とした条件下で測定された材料幅に対し、以下の2つの観点から評価を行った。

まず、測定安定性の評価として、単一材料の全長にわたる幅の推移を確認し、通材中の安定性を検証した。

次に、測定精度の評価として、同条件の材料 25 本を対象に、各材料の全長における測定幅の中央値を算出および比較し、そのバラツキを評価した。

6. 3 材料幅の評価結果

(1) 測定安定性の評価結果

Fig. 14 に、材料幅の推移を示す。移動平均後のデータ

より、 $3\sigma = 0.3 \text{ mm}$ と安定した材料幅測定が可能であることを確認した。

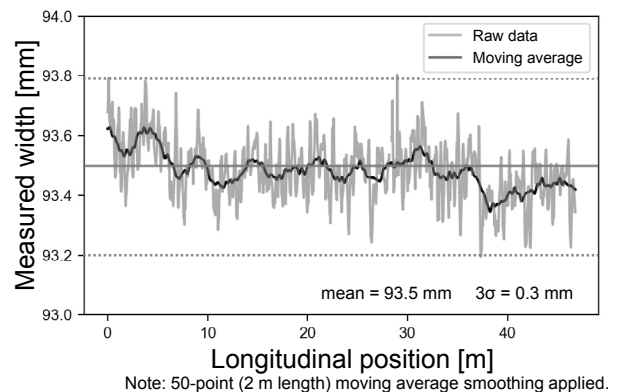


Fig. 14. Measured width profile. (Tilt angle: 0°)

(2) 測定精度の評価結果

Fig. 15 に、テスト材 25 本における材料幅の測定誤差を示す。検証の結果、 $3\sigma = 0.77\%$ であり、要求精度 $\pm 1\%$ を十分に満足することを確認した。

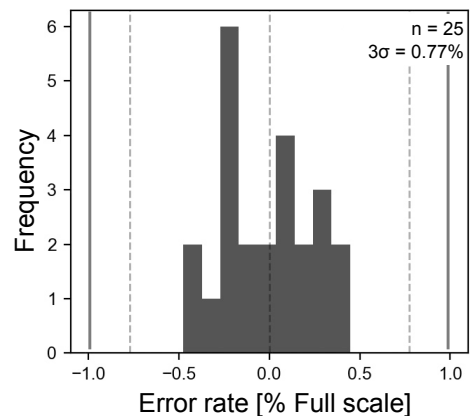


Fig. 15. Error rate distribution.

6. 4 倒れ率の評価

Fig. 16 に、同材料における倒れ率の推移を示す。図中に示す $\pm 2.4\%$ 程度の周期的変動は、加熱炉のスキッド（材料支持ビーム）による抜熱により生じた温度ムラ、およびそれに伴う輝度変動（以下、スキッドマーク）に起因するものと推察される。

実用上の観点からは、10 ~ 20 m 程度の長スパンにおける平均値や中央値を用いることで、本稿の目的である「倒れの傾向監視」においては、十分な実用性を有するものと判断する。

さらなる高精度化には、スキッドマークのフィルタリングが有効であるが、これについては今後の課題とする。

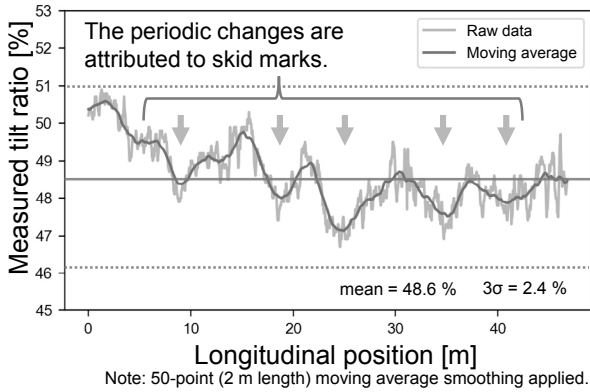


Fig. 16. Measured tilt ratio trend. (Tilt angle: 0°)

7. 妥当性の評価

本章では、設定倒れ角ごとの材料幅および倒れ率を用いて、実ラインテスト結果の妥当性および倒れ角の測定精度について、以下の観点から評価した。

• 見かけの材料幅の評価

倒れに伴い増加する材料幅（見かけの材料幅）に対し、幾何モデルから導出される理論値と測定値を比較することで妥当性を評価する。

• 倒れ角と倒れ率の相関関係の評価

設定倒れ角と測定された倒れ率に対し、理論値と測定値の相関性を評価した。また、実際の倒れ角への変換式を導出し、倒れ角の測定精度を評価する。

なお、傾向監視目的かつスキッドマークの影響を除くため、材料幅および倒れ率は全長における測定値の中央値を使用するものとする。

7. 1 見かけの材料幅の評価結果

材料-カメラ間距離に対し材料幅が十分小さく、かつ実際の倒れにより生じる輝度変化が同様であると仮定する。このとき、Fig. 17 に示す幾何的關係から、倒れ発生時の見かけの材料幅 W' は、2次までのマクローリン展開を用いることで、式 (5) のように近似できる。

Fig. 18 に、設定倒れ角 θ_s と測定された材料幅 W' の関係を示す。近似結果との誤差は $RMS = 0.1 \text{ mm}$ と十分に小さく、推定された材料幅 W_0 も実測値 93.5 mm に対し 93.2 mm と、高い精度で一致することを確認した。

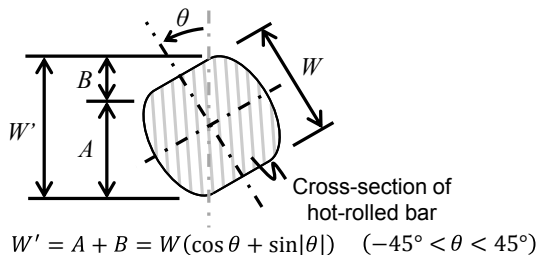


Fig. 17. Effect of tilt angle on apparent width.

$$W'(\theta) \approx \alpha(\theta - \theta_0)^2 + \beta|\theta - \theta_0| + W_0 \dots\dots\dots (5)$$

- W' : 倒れによる見かけの材料幅 [mm]
- θ : 倒れ角 [°]
- W_0 : 推定材料幅 ($\theta = 0^\circ$ における幅) [mm]
- θ_0 : 設定倒れ角 $\theta_s = 0^\circ$ における実際の倒れ角 [°]
- α : 側面による幅の減少係数
- β : 上下面による幅の増加係数

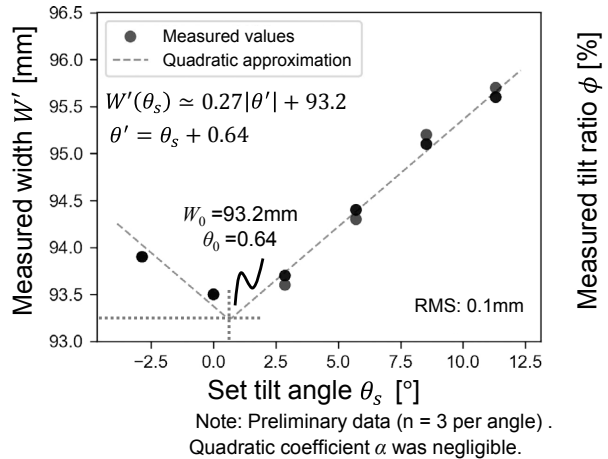


Fig. 18. Relationship between set tilt angle and measured width.

7. 2 倒れ率と倒れ角の相関関係の評価結果

同様に、Fig. 19 に示す幾何的關係から、倒れ率 ϕ は式 (6) のように記述できる。

Fig. 20 に設定倒れ角 θ_s と測定した倒れ率 ϕ の関係を示す。近似曲線との誤差は $RMS = 0.5 \%$ と十分に小さく、推定倒れ率 ϕ_0 も 50% (0°) に対し 48.6% であった。これは、試作機の調整精度を鑑みれば、十分に妥当な結果であるといえる。

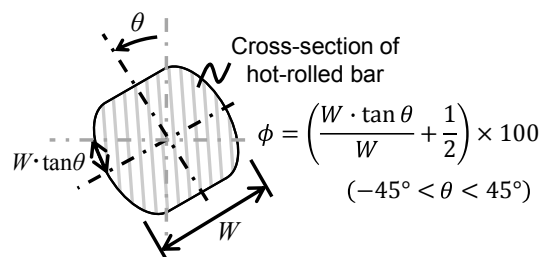


Fig. 19. Effect of tilt angle on tilt ratio.

$$\phi(\theta) \approx slope \cdot \theta + \phi_0 \dots\dots\dots (6)$$

- ϕ : 倒れ率 [%]
- θ : 倒れ角 [°]
- slope : 変換係数 [%/°]
- ϕ_0 : 推定倒れ率 ($\theta = 0^\circ$ における倒れ率) [%]

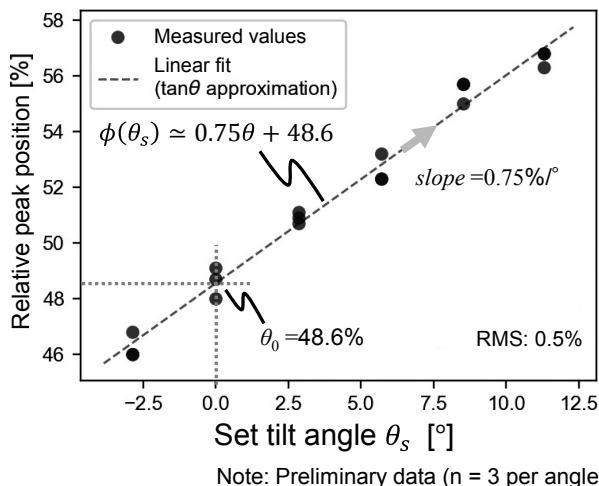


Fig. 20. Relationship between set tilt angle and measured tilt ratio.

これら幾何モデルを用いた検証結果に基づき、式 (7) に示す倒れ率 ϕ から倒れ角 θ への変換式を導出した。

$$\theta = \frac{\phi - \phi_0}{slope} \dots\dots\dots (7)$$

また、近似誤差 $\Delta\phi = 0.5\%$ および変換係数 $slope = 0.75\%/^\circ$ より、倒れ角の測定誤差は $\Delta\theta = \pm 0.67^\circ$ と、要求精度 $\pm 2^\circ$ を十分に満足することを確認した。

以上の結果より、本装置の設計および測定手法の妥当性を示すことができた。

8. 結 言

オペレータによる監視作業の代替および測定精度の向上を目的として、自発光を用いた圧延材の材料幅および倒れ角の非接触測定技術を開発し、以下の結論を得た。

(1) 自発光方式非接触測定の検討

自発光輝度プロファイルから、材料幅および倒れ角をリアルタイム測定する手法を確立した。

(2) 実ライン適用に向けたロバスト化の検討

外部センサを用いないPID制御によって、不感帯を最小化しつつ、ロバストな露光制御を実現した。

(3) 実ラインテストおよび妥当性の検証

実ラインにてテストを実施し、その結果と幾何モデル(理論値)との比較により、本手法の精度およびテスト結果の妥当性を証明した。

(文 献)

- 1) 田口芳男, 船生豊: 鉄と鋼, 15(1981), 40.
- 2) オムロン(株)ホームページ: <https://www.fa.omron.co.jp/>

data_pdf/commentary/displacemente_linewidth_tg_j_1_1.pdf.

- 3) 田中雄翔: JFE技報, 56(2025), 41.
- 4) 今野雄介, 伊世居良仁, 杉浦雅人: 日本製鉄技報, 411(2018), 64.
- 5) 岐美格, 奥野順平, 牧野洲秀: 工業熱力学, 森北出版, 1972, 155.
- 6) 下間照男, 立花種則, 菅野猛, 滝谷信昭, 高田誠二, 二木尉久夫, 豊田弘道, 大野二郎, 石井一字, 服部晋, 小川実吉, 菱刈功, 河野充, 大手明, 柏瀬安史, 山田健夫, 木村惇: 温度計測, 計測自動制御学会, 1981, 179.
- 7) 電気学会通信協会: 制御工学, (社)電気学会, 1979, 223.
- 8) 神本武征: デジタル計測制御, (株)オーム社, 1990, 49.



高橋信幸



中尾祐介



湯藤隆夫



國枝祥司