



## カメラ式薄板幅計の開発

### Development of a Camera-Based Thin Strip Width Gauge

当社では、ものづくりの自動化、高効率化に貢献する測距/形状計測センサを製造、販売しており、鉄鋼分野を中心とした製造業向けに展開している。製造工程における形状計測センサの役割は、形状計測結果に基づくプロセスフィードバック、傾向監視、品質保証などの従来用途に加え、3D形状データの活用も進んでおり年々拡大している。それらのニーズに応えるべく、新技術、新製品の開発に取り組んでいる。

本稿では、当社が2005年より販売しているカメラ式薄板幅計の安定計測に向けた取り組みについて紹介する。当社製品に限らず、一般的にカメラ等を用いた光学的手法による計測機器は、温度変化にともない筐体等が熱膨張し、計測値が変化する。この課題を解決するため、線膨張係数の低い低膨張材を活用した筐体設計を実施した。また、熱による光学素子の位置変化や、幅計測値の変化をモニタリングする手法を確立し、新規設計した幅計の耐温度環境性を実証した。

Our company manufactures and sells distance/shape measurement sensors that contribute to automation and increased efficiency in manufacturing, primarily serving the steel industry and other manufacturing sectors. The role of shape measurement sensors in manufacturing processes continues to expand year by year, encompassing not only traditional applications such as process feedback based on measurement results, trend monitoring, and quality assurance, but also the growing use of 3D shape data. We are developing new technologies and products to meet these needs.

This paper introduces our efforts to achieve stable measurement with the camera-based thin strip width gauge we have sold since 2005. In general, not only our products but also all optical measurement instruments that use cameras and similar devices undergo thermal expansion of the housing and other components due to temperature changes, which causes measurement values to fluctuate. To address this challenge, we designed a housing made from low-expansion materials with a low coefficient of linear expansion. We also developed a method to monitor changes in optical element positions and width measurements due to heat, demonstrating the temperature resistance of our newly designed width gauge.



**伊藤 千空**  
ITO Chihiro

メカトロニクスイノベーション事業部  
企画管理グループ



**工藤 勝**  
KUDO Masaru

メカトロニクスイノベーション事業部  
計測検査ソリューション部  
光計測システムグループ



**荒井 秀樹**  
ARAI Hideki

メカトロニクスイノベーション事業部  
計測検査ソリューション部  
光計測システムグループ



**松田 雄**  
MATSUDA Yu

メカトロニクスイノベーション事業部  
計測検査ソリューション部  
プロダクトイノベーショングループ



**横田 龍一**  
YOKOTA Ryuichi

メカトロニクスイノベーション事業部  
計測検査ソリューション部  
センシングイノベーショングループ



**小林 昂平**  
KOBAYASHI Kohei

メカトロニクスイノベーション事業部  
計測検査ソリューション部  
プロダクトイノベーショングループ



**谷口 敦史**  
TANIGUCHI Atsushi

メカトロニクスイノベーション事業部  
計測検査ソリューション部  
センシングイノベーショングループ

## 1 はじめに

当社は、ものづくりの自動化、高効率化に貢献する測距/形状計測センサを製造、販売しており、鉄鋼分野を中心とした製造業向けに展開している。製造工程における形状計測センサの役割は、形状計測結果に基づくプロセスフィードバック、傾向監視、品質保証などの従来用途に加え、3D形状データの活用も進んでおり年々拡大している。それらのニーズに応えるべく、新技術、新製品の開発に取り組んでいる。

本稿では、当社が2005年より販売しているカメラ式薄板幅計の安定計測に向けた取り組みについて紹介する。薄板の幅計測は、製造工程の中で、製品品質の向上と歩留まり改善を目的とする重要な工程であり、 $\pm 0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ 程度の計測精度が求められる。当社製品に限らず、一般的にカメラ等を用いた光学的手法による計測機器は、温度変化にともない筐体等が熱膨張し、計測値が変化する。この課題を解決するため、線膨張係数の低い低膨張材を活用した筐体設計を実施した。また、熱による光学素子の位置変化や、幅計測値の変化をモニタリングする手法を確立し、新規設計した幅計の耐温度環境性を実証した。

## 2 カメラ式薄板幅計

### 2.1 装置概要

図1にカメラ式薄板幅計の外観を示す。搬送される薄板を上方から、ラインセンサ2台からなるステレオラインセンサ2セットで撮像する。薄板の下部には照明が置かれており、鋼板の両端部を各ステレオラインセンサで強調して撮像することで、高精度に端部座標を計測する。また、ステレオ方式で端部の高さを計測することで、パスライン変動による誤差を除去できる。ステレオラインセンサ対を保持するフレーム構造は、門型・Cフレームなど、顧客の製造ラインに合わせて設計を実施する。

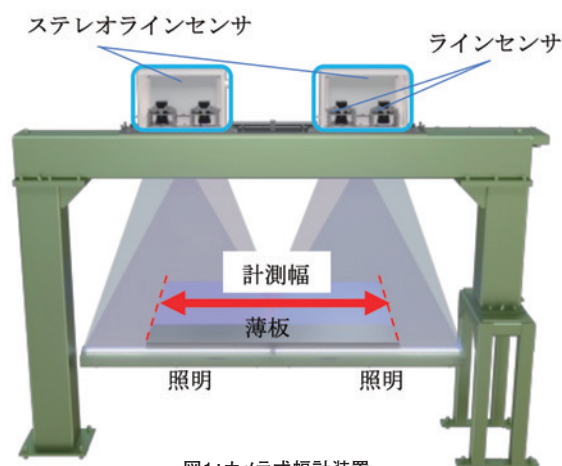


図1:カメラ式幅計装置

### 2.2 ステレオ方式の幅計測原理

ステレオ方式では、異なる位置にあるラインセンサ2台の視差から計測対象の座標を算出する。図2には、幅計を構成する2台のステレオラインセンサ、計4台のラインセンサの光学系を示す。各ステレオラインセンサは、2台のラインセンサを同じ高さと同じ向きに水平配置する。このとき、ラインセンサ間(レンズの主点間距離)の距離 $B$ を基線長と呼ぶ。ステレオの原理により、両カメラで取得した薄板端部(エッジ)の画素位置の差 $D$ (視差)、レンズ焦点距離 $f$ 、ラインセンサのピクセルサイズ $P$ を用いて、物体の座標 $(X, Z)$ は以下で求められる。

$$X = \frac{BP}{D} \quad (1)$$

$$Z = \frac{Bf}{D} \quad (2)$$

両端部の座標 $(X_1, Z_1)$ と $(X_2, Z_2)$ を求める、両者の距離から薄板の幅を計算する。この際、どちらかのステレオラインセンサの座標を基準とするため、ステレオラインセンサ間の距離はあらかじめ求めておく必要がある。

本方式では、高さ方向 $Z$ 座標も加味するため、パスライン変動による誤差の低減、薄板の厚みを考慮した計測が可能となる。

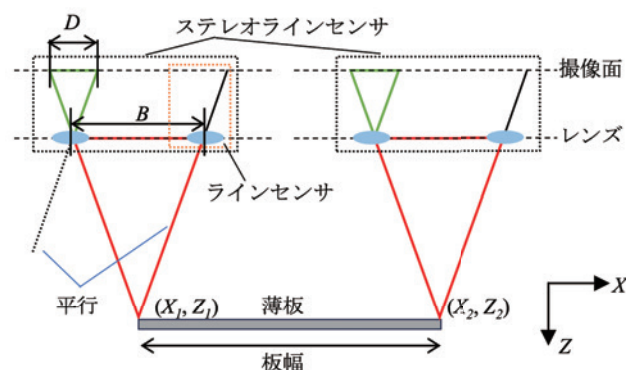


図2:ステレオ方式幅計測原理

## 3 熱耐性向上

前節に示したように、ステレオ方式の幅計では、各ステレオラインセンサで計測した薄板端部の座標位置から幅値を算出する。その際、ステレオラインセンサの基線長 $B$ 、ステレオラインセンサ2台間の距離が事前情報として必要となる。通常、ラインセンサ等の部品は、金属製の治具を介して保持される。この治具が熱膨張することで、ラインセンサ間の相対位置が変化し、幅計測値に誤差が生じる。熱膨張の主な原因は、ラインセンサの自発熱や、周囲温度の変化である。この計測誤差を抑えるため、以下の対策を実施した。

### 3.1 低膨張材の活用

一般に、センサ筐体の材料には、価格や加工性からアルミ系、鉄系材料が使用されることが多い。しかしながら、温度変化が大きい場合には熱膨張が無視できず、計測誤差の原因となる。そこで、低膨張材であるインバー材を使用した筐体設計を検討した。表1に示すように、インバー材は金属系であり重い、強度が高く、線膨張率が1ppm/℃以下と非常に小さい。一方で、高価で靱性が高いため難削材として知られる。そこで、図3に示すように、4台のラインセンサの相対位置を保持するためにインバー材を用い、その他にアルミ系、鉄系材料を組合わせた構造とした。このような設計により、センサに求められる強度、重量、高い温度変化耐性の両立を可能とした。

表1:各材料の線膨張率

| 素材           | 線膨張率<br>[ppm/℃] | 密度<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | 特徴                  |
|--------------|-----------------|----------------------------|---------------------|
| 鉄<br>(SS400) | 11.80           | 7.85                       | 一般的な鉄。<br>強度高いが重い。  |
| Al           | 23.00           | 2.79                       | 軽量で加工しやすい           |
| インバー         | 0.15            | 8.00                       | 低熱膨張率だが重い。<br>難加工材。 |

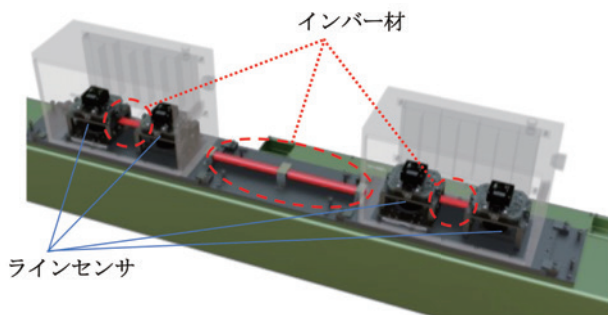


図3: インバー材使用箇所

### 3.2 バイメタル効果低減

新設計の幅計ではインバー材、アルミ系材料、鉄系材料を組合せた設計となっているため、各素材の膨張率の違いから発生する形状変化（バイメタル効果）を抑制することが求められる。

#### 1) バイメタル効果とは

バイメタル効果とは、図4に示すように、線膨張率の異なる素材を接合した場合に、温度変化によって素材が変形する現象である。バイメタル効果が顕著に発生する箇所は、図3に示すインバー材使用箇所であり、ラインセンサ間を保持する治具、ステレオラインセンサ間を保持する治具である。

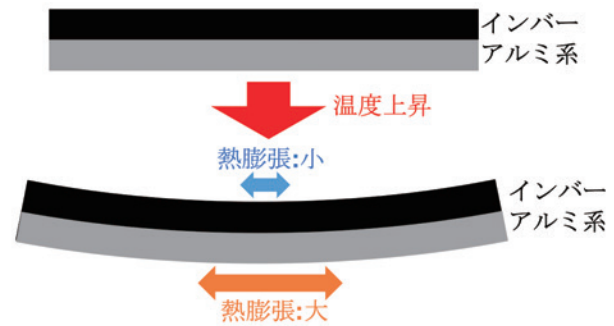


図4: バイメタル効果

#### 2) バイメタル効果低減対策

バイメタル効果の低減対策として、図5に示す2つの対策を施した。1つ目の対策は、線膨張率が異なる素材の固定箇所を、必要最低限としたことである。ラインセンサ2台は、熱変化の少ないインバー材の棒で接続されているが、フレームなどのベースは鉄材である。それらを強固に固定すると、バイメタル効果が発生しやすくなる。バイメタル効果を抑制するため、線膨張率が異なる素材の接合箇所を、最小限に抑えた。

2つ目の対策として、フローティング構造を採用した。フローティング構造により、熱膨張やバイメタル効果により鉄製フレームに熱変形が発生した際、片側のラインセンサの設置台下部に配置したLMガイドにより、熱変形による距離変化を防止する。つまり、ラインセンサ間距離は保持しているインバー材の長さで決まる構造とした。

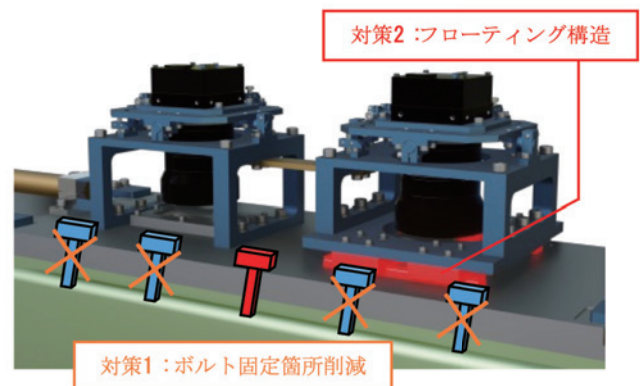


図5: バイメタル効果低減対策

ここで示したような熱耐性向上の思想と対策は、当社の各種装置に展開しており、製鉄ラインの過酷な温度環境での寸法計測精度の改善に寄与している。また、熱による形状変位をシミュレーションで予測することで、試作や試験の回数を削減した効率的な筐体設計を実施している。

## 4 ラインセンサ位置姿勢のモニタリング

### 4.1 従来課題

前節で説明したように、装置の温度変化により発生する幅計測値の誤差は、ラインセンサを保持する金属部品の熱膨張が主要因である。そこで、ラインセンサの位置姿勢をモニタリングする方法を新たに構築した。

### 4.2 モニタリング方法

#### 1) ラインセンサ位置姿勢の算出方法

ラインセンサの校正には複比を活用した手法<sup>1)</sup>を適用する。図6に示すように、2種の角度の直線列が刻印された校正片を用いる。校正片を複数の異なる位置に配置し、各位置にてラインセンサで撮像する。ラインセンサで撮像された複数枚の画像から、校正片の直線列座標を求め、複比の概念を活用して、ラインセンサの位置姿勢を表す外部パラメータ、レンズの焦点距離、中心位置を表す内部パラメータを算出する。一般的なカメラ位置姿勢の算出方法と同様に、校正片に刻印された模様と、校正片の位置姿勢をパラメータとして最適化を図る。その際、レンズ歪量も同時に求め、補正する。

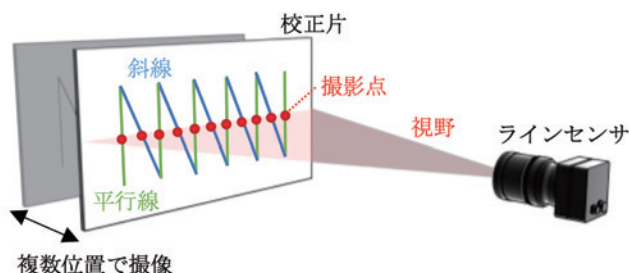


図6: ラインセンサの位置姿勢推定方法

#### 2) 試験環境

図7に示すように、幅計の片側（ステレオラインセンサ1台分）を模擬した試験環境を構築して精度評価を実施した。ステレオラインセンサは断熱ボックスで覆い、ボックス内温度を制御できるようにした。センサと計測対象との距離は実機想定約1700mmとした。その位置に校正片と薄板端面を模擬したナイフエッジを設置した。校正片により、ラインセンサ2台の位置姿勢を校正し、ナイフエッジ座標を算出する。なお校正片はZ軸ステージ上にあり、校正に必要な複数枚画像を、高さを変えながら取得できる構成とした。

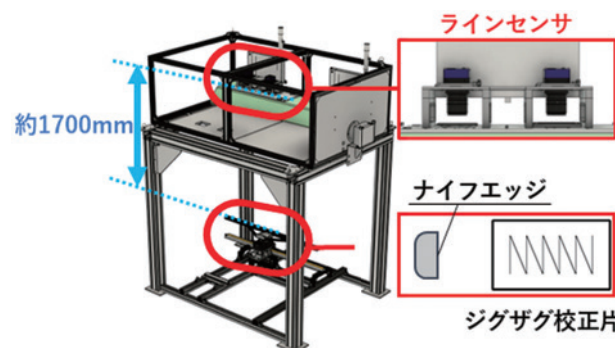


図7: 試験環境

## 5 測定結果

### 5.1 モニタリング試験

熱耐性向上対策の効果を確認するため、対策前後の2種のステレオラインセンサを用いて、それぞれ温度によるラインセンサ位置姿勢の変化をモニタリングした。温度条件は、現場での装置稼働条件を加味し、かつ試験環境で再現可能な範囲である17℃から33℃とした。

#### 1) 従来設計（熱対策前）のモニタリング結果

温度試験結果を図8に示す。(a)は温度推移を示しており、断熱ボックス内温度を室温25℃からスタートし、17℃、33℃と変化させた。(b)は視野中央に置いたエッジを左右カメラで撮像した際に生じる視差、(c)はラインセンサのY軸回転、(d)はXZ平面の平行移動を示す。温度の上下にともない、各値が変化している様子が確認できる。位置姿勢変化を視覚的に確認するため、(a)に示す温度がある程度安定している低温域と高温域で生じたラインセンサのXZ平面内での位置姿勢変化を図9に図示した。左右センサで回転量と移動量が異なることがわかる。図10に示すように、2台のラインセンサを固定する下部鋼材の熱変形が影響すると考えられる。中央に配置されたラインセンサは熱変形に伴う移動量が大きくなる一方、回転量は小さくなると予測され、熱変形の影響差が可視化された。以上より、バイメタル効果の発生をモニタリングにより特定可能であることが示された。

#### 2) 熱対策後のモニタリング結果

同様の試験を、熱耐性向上策を施した後にも実施した。結果を図11に示す。対策前の図8に比べ、(b)視差、(c)回転、(d)平行移動といずれも温度にともなう変化が大幅に抑制されていることが確認できる。図12に示す低温域と高温域の位置姿勢変化では、左右のセンサ間の回転量および移動量が、大幅に改善した。以上より、温度変化による計測誤差に対する対策として、バイメタル効果低減対策が有効であることが示された。

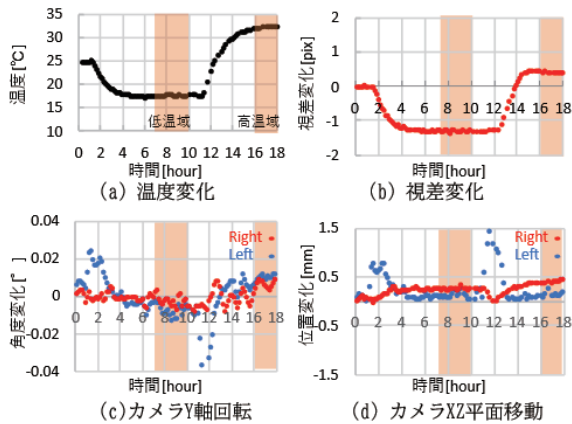


図8:従来設計のモニタリング結果

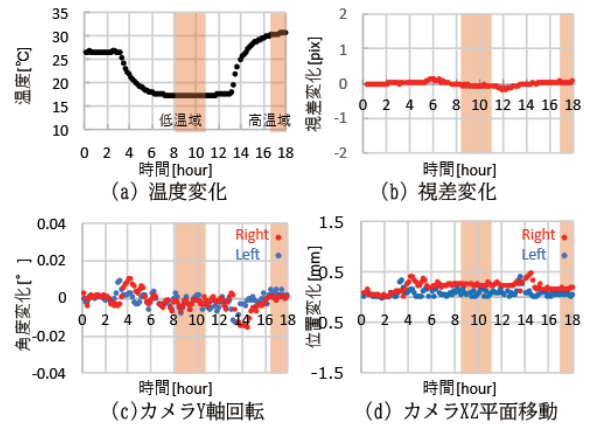


図11:熱対策後のモニタリング結果

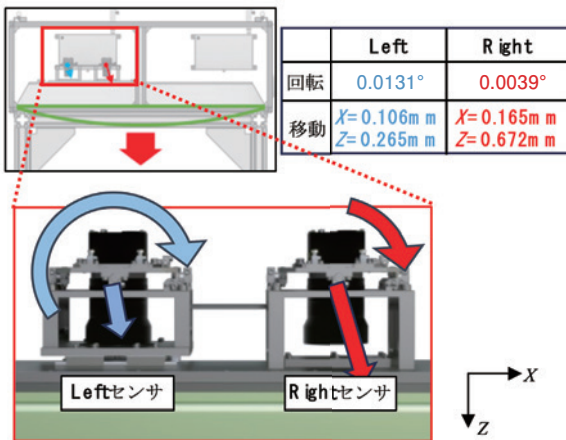


図9:従来設計のラインセンサ位置姿勢

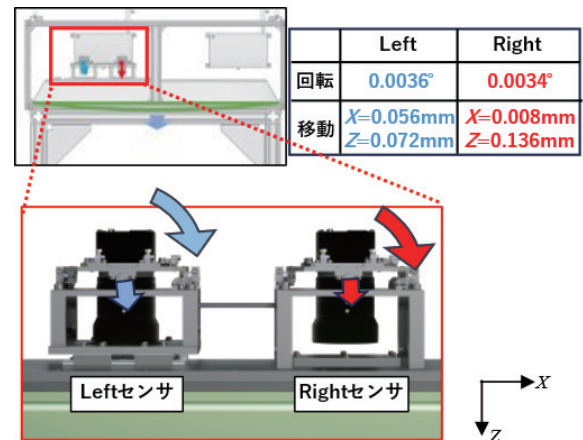


図12:熱対策後のラインセンサ位置姿勢

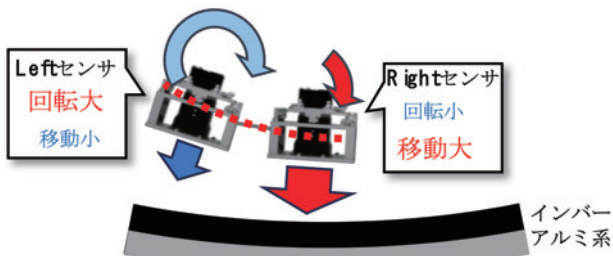


図10:バイメタル効果による回転・移動

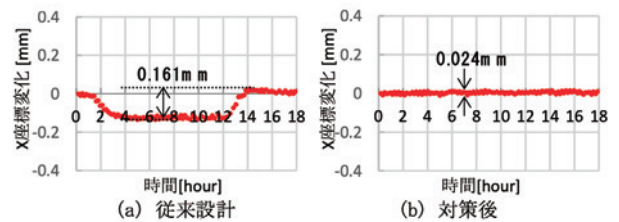


図13:温度変化の試験結果

### 3) エッジの位置変化

図11(b)に示したように、本試験では校正片とエッジを同時に撮像している。温度試験中における、熱対策前後のエッジX座標の変化を図13に示す。温度条件は、それぞれ図8(a)、図11(a)に示した通りである。図13(a)の従来設計においては温度変化とともに、X座標変化が顕著に発生し、最大最小で0.161 mmであった。一方、図13(b)対策後は、温度による変動が大きく抑制されており、最大最小で0.024 mmとなった。本方式に求められる幅計測精度 $\pm 0.3 \sim 0.5$  mmに対して高い計測安定性を確認した。

## 5.2 今後の展望

本開発の熱耐性向上対策を施したカメラ式薄板幅計は、2025年度に初号機を納入、現場稼働を開始した。現場環境におけるセンサ温度変化に対し、良好な性能を示し、薄板製造ラインの安定稼働、品質確保に貢献している。今後は、計測精度、温度耐性など基本性能の向上を引き続き進めるとともに、装置設置環境における定期校正、オンライン校正の効率化など機能強化を図り、広い顧客ニーズに対応していく。

## 6 おわりに

当社で扱う検査計測機器は、鉄鋼業界で多く活用されており、高温の鉄鋼材や製鉄所の過酷な環境に耐えうる高い製品力が強みである。計測環境に応じて、センサや装置フレームを構成する材料、構造に工夫を加えた設計<sup>2)</sup>、安定稼働のため校正方法の開発などを行う。本稿で紹介したカメラ式幅計の熱耐性向上対策も、その一例である。

また、センサ単体だけでなく装置やシステムの設計・製作から施工、運用、メンテナンスまで一貫対応可能であることも当社の強みである。

### 参考文献

- 1) R. Horaud, et al, " On single-scanline camera calibration," IEEE Trans. Robot. Autom., 9, p71 (1993).
- 2) 谷口他, "NS-TEX製光切断センサの開発," TEXENG REPORT, 7, p20(2024).

お問い合わせ先 \_\_\_\_\_

**メカトロニクスイノベーション事業部**

more\_information-mi@tex.nipponsteel.com