



光学式形状計測センサ (NS-TEX製光切断センサ)の開発

Development of an Optical Shape Measurement Sensor (NS-TEX Light Section Sensor)

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。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。

本稿では、2022年度より販売を開始した光学式形状計測センサ(NS-TEX製光切断センサ)を紹介する。鉄鋼分野で培った実績を元に、1000℃レベルの高温状態の計測対象でも安定した計測を可能とする筐体設計を実現した。また、他社差別化技術として、光切断センサ単体での断面形状と温度変化の複合計測機能を開発した。今後も、光切断センサのカスタム設計技術、付加機能開発を実現するニーズ対応技術を深化させ、広く顧客ニーズへ対応していきたい。

Our company manufactures and sells distance and shape measurement sensors that contribute to the automation and higher efficiency of manufacturing processes, focusing primarily on the steel industry. The roles of shape measurement sensors are expanding year by year, with the utilization of 3D shape data advancing in addition to traditional applications such as process feedback, trend monitoring, and quality assurance based on shape measurement results. This paper introduces the optical shape measurement sensor (NS-TEX light section sensor) we launched in FY2022. Based on our experience in the steel industry, we have achieved a housing design that enables stable measurement even for high-temperature objects at the 1,000°C level. As a differentiating technology, we have developed combined functionality that measures cross-sectional shape and temperature changes using one light section sensor. Going forward, we aim to further develop our custom design technology for light section sensors and our needs-based technology for developing additional functions to meet a wide range of customer needs.



谷口 敦史
TANIGUCHI Atsushi
電計事業本部
商品ソリューション事業部
計測検査2部
計測イノベーション推進グループ長



小宮 悟嗣
KOMIYA Satoshi
電計事業本部
商品ソリューション事業部
計測検査2部
光計測ソリューショングループ



伊藤 千空
ITO Chihiro
電計事業本部
商品ソリューション事業部
計測検査2部
画像計測ソリューショングループ



小林 昂平
KOBAYASHI Kohei
電計事業本部
商品ソリューション事業部
計測検査2部
画像計測ソリューショングループ



新井 玄太
ARAI Genta
電計事業本部
商品ソリューション事業部
計測検査2部
室蘭機械技術グループ



早坂 卓
HAYASAKA Takashi
電計事業本部
商品ソリューション事業部
計測検査2部
光計測ソリューショングループ



三浦 隆治
MIURA Takaharu
電計事業本部
商品ソリューション事業部
企画グループ
計測イノベーション推進グループ

1 はじめに

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、2022年度より販売を開始した光学式形状計測用のNS-TEX製光切断センサを紹介する。鉄鋼分野で培った経験をベースに、1000℃レベルの高温状態の計測対象でも安定した計測を実現すべく低膨張材料を組合せた筐体設計を実施した。初号機は、連続鋳造工程後の高温鋼材の幅計として納入、稼働中である。また、高温の計測対象をターゲットとすることから、温度変化計測の顧客ニーズもあり、光切断センサ単体での断面形状と温度変化の複合計測機能¹⁾を開発し、他社との差別化を図った。今後も、光切断センサのカスタム設計技術、付加機能開発を実現するニーズ対応技術を深化させ、広く顧客ニーズへ対応していく。

2 NS-TEX製光切断センサ

2-1 光切断法

光切断法は、レーザとカメラを用いた断面形状計測方法であり、産業応用をはじめ広く用いられている。その計測原理を図1を参照しながら説明する。ライン状に整形したレーザを計測対象に照射し、その反射光をレーザから距離 l 、傾き θ の位置に配置したカメラ(レンズの焦点距離 f)で撮像し画像を取得する。三角測量の原理より、画像中のレーザの位置 (u, v) から yz 平面の座標を、 l, θ, f の関数として、以下のように算出する²⁾。

$$y = \frac{Bl}{\tan \theta - A} \quad (1)$$

$$z = \frac{(A \sin \theta + \cos \theta)l}{\tan \theta - A} \quad (2)$$

ここで、 A, B は画素位置 (u, v) と焦点距離 f で決まる係数である。

$$A = \frac{u - u_0}{f} \quad (3)$$

$$B = \frac{v - v_0}{f} \quad (4)$$

なお、レーザとカメラの距離 l 、レーザとカメラの角度 θ 、レンズ焦点距離 f は事前に校正しておく。

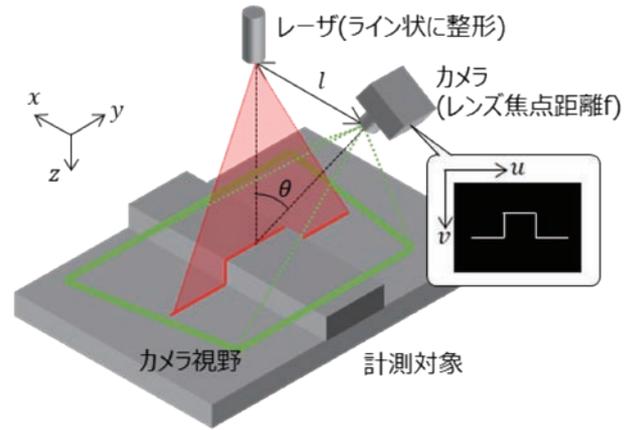


図 1: 光切断法の計測原理

2-2 誤差要因

前節に示したように、光切断法では、取得画像から距離を求める際、事前校正したレーザとカメラの距離 l 、レーザとカメラの角度 θ を用いる。一般にレーザとカメラは金属製治具を介して保持されているが、図2に示すように金属製治具が熱膨張することにより、レーザとカメラの距離 l 、レーザとカメラの角度 θ が変化する。その変化にともない、光切断センサで計測される断面形状に誤差が発生する。この計測誤差の起因となる温度変化は、レーザやカメラの自発熱、周辺温度の変化により生じる。また、計測対象が高温の場合、計測対象からの輻射熱により、温度変化が発生しやすく、計測への影響が無視できないことが多い。

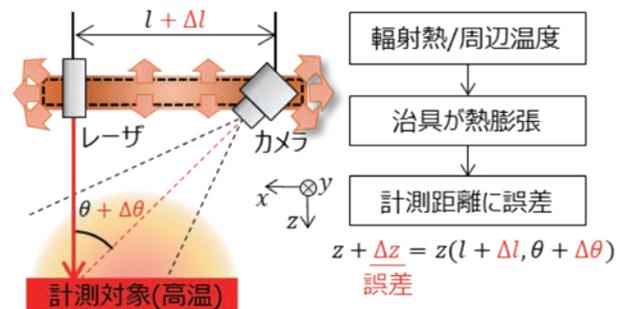


図 2: 温度によるカメラとレーザの位置変化

ここで、奥行方向 z の計測誤差 Δz は、式(2)にレーザとカメラ間距離の誤差 Δl 、カメラ角度誤差 $\Delta \theta$ を考慮することで以下のように定式化できる。

$$\Delta z = z - \frac{|A \sin(\theta + \Delta \theta) + \cos(\theta + \Delta \theta)|(l + \Delta l)}{\tan(\theta + \Delta \theta) - A} \quad (5)$$

さらに、 $\Delta l \ll 1, \Delta \theta \ll 1$ の近似を施しまとめると、

$$\Delta z = P\Delta l + Q\Delta\theta \quad (6)$$

となる。ここで、 P, Q は、レーザとカメラの初期相対位置を表す l, θ で決まる以下の定数である。

$$P = \frac{\cos\theta}{\tan\theta} \quad (7)$$

$$Q = -l \cos\theta \left(2 + \frac{1}{\tan^2\theta} \right) \quad (8)$$

式(6)は、断面形状の計測誤差 Δz は、 Δl および $\Delta\theta$ の変化量に対して線形に変化することを示している。

2-3 安定化対策

前節で示した治具膨張による計測誤差を抑えるには、治具の温度によらずレーザとカメラの相対位置姿勢を安定させることが求められる。そのため、弊社では、以下2つの対策を施し、センサ計測値の安定化を図った。

(1) 低膨張材を組合せた筐体設計

他社製の光切断センサには軽くて安価なアルミ系材料が使用されることが多いが、熱膨張率は鉄の2倍大きく、温度安定性に課題がある。そこで、低膨張材であるインバー材とCFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)を組合せた筐体設計を実施した。表1に示すように、どちらも1ppm/°C以下の非常に小さい線膨張率を持つが、そのほかの特性が異なる。インバー材は金属系であり重いが、強度が高い。一方、CFRPは非常に軽いが強度に課題がある。弊社では、これらを適切に組合せた構造とすることで、センサに求められる強度、重量、高い温度変化耐性を満足する設計を実現した。

表1 各材料の線膨張率

素材	線膨張率 [ppm/°C]	密度 [g/cm ³]	特徴
鉄 (SS400)	11.80	7.85	一般的な鉄。強度高いが重い。
Al	23.00	2.79	安価で加工しやすい
インバー	0.15	8.00	低熱膨張率だが重い。難加工材。
CFRP	0.30	1.50	低熱膨張率で軽いが、強度が低い。難加工材。

(2) 熱伝導シミュレーションの活用

筐体設計は3D-CADで実施し、熱伝導シミュレーション、および熱による変位シミュレーションを活用した。一例として、レーザとカメラを保持する部品の熱伝導および熱による

変位計算の結果を図3に示す。図3(a)はレーザとカメラを保持する部品と筐体とを接続する部品を熱源とした際の熱伝導シミュレーション結果を示す。また、図3(b)には熱により生じる形状変位をシミュレーションした結果を示す。これらシミュレーションを活用することで、より熱変形の影響が少ない部品形状、構造、材料を設計段階で検討した。それにより、試作および試験回数を減らし、効率的な筐体設計を実現した。

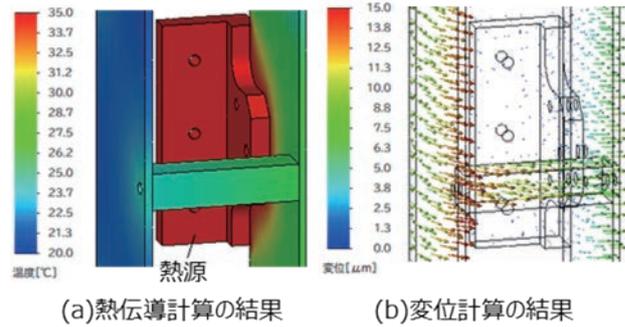


図3: 熱伝導、変位計算

2-4 精度評価試験

図4に弊社独自に光学/機械設計、製造/校正したNS-TEX製光切断センサの仕様例を示す。光切断センサは断熱BOX内に載置しており、上部にカメラ、下部にレーザを配置している。断熱BOXには、レーザの照射、カメラによる撮像を実施するためのガラス窓を設けており、赤外カット膜を施したフィルタを用いる。図5(a)にセラミック製の板を直角に配置して作成したサンプル、図5(b)に断面形状の計測結果を示す。セラミック板による直角形状が計測できていることがわかる。

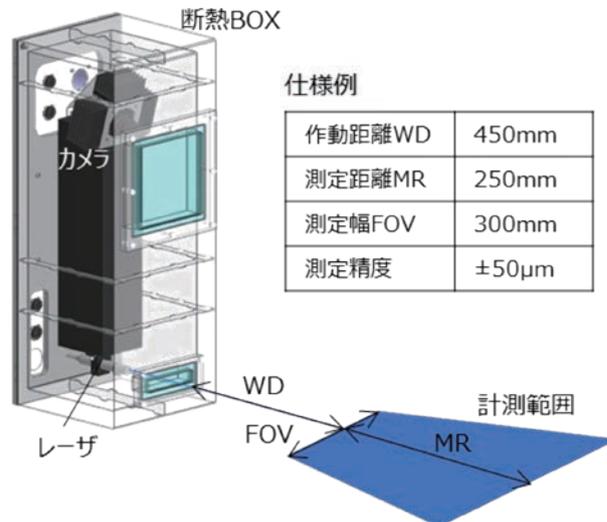


図4: NS-TEX製光切断センサの仕様例

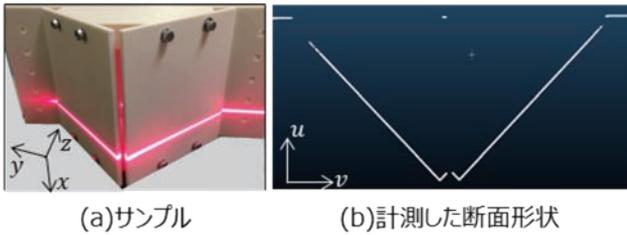


図5: サンプル計測結果

次に、図6に示す環境で実施した温度変化試験の結果を示す。ライン状に整形したレーザの長手方向yに沿って平板サンプルを置き、奥行方向zに1軸ステージで移動できる構成とした。室温は20°Cで一定とし、断熱BOX内にチラーで温風を送り込むことで、光切断センサ単体の温度を変えることができるようにした。

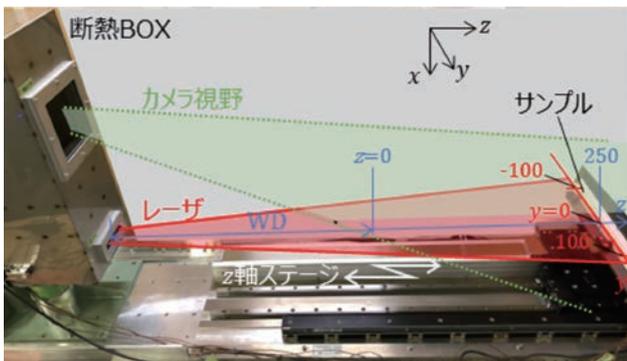


図6 温度試験の試験環境

はじめに断熱BOX内温度を室温と同じ20°Cと固定した状態で、直線性の評価を行った。結果を図7に示す。横軸に奥行z、縦軸に理想的な計測点からの誤差を示す。各線はラインレーザ長手方向yの5カ所(y=0, ±50, ±100mm)を示す。測定範囲250mm内において測定精度±50μm以下となっていることがわかる。次に、断熱BOX内に温風を送り、センサ温度のみを変化させた場合の計測値変化を温度特性として評価した。結果を図8に示す。20-35°Cの範囲で5°C刻みの温度変化をさせ、距離値を計測した。各距離値は図6の平坦サンプルの計測結果をy方向に計測範囲内で平均した値である。温度による距離値変化は、ほぼ線形に変化している。直線フィッティングの傾きより、1°Cあたりの誤差量は-1.7μm/°Cと算出した。なお、温度変化により、距離計測結果が線形に変化することは、式(6)で得られた結果と一致する。

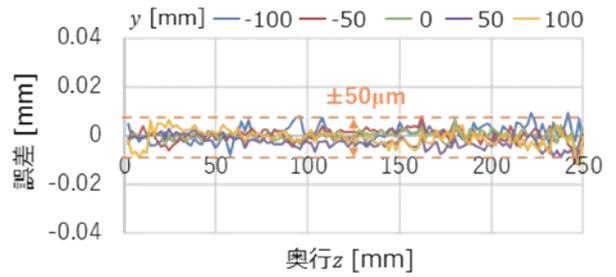


図7: 直線性の評価結果

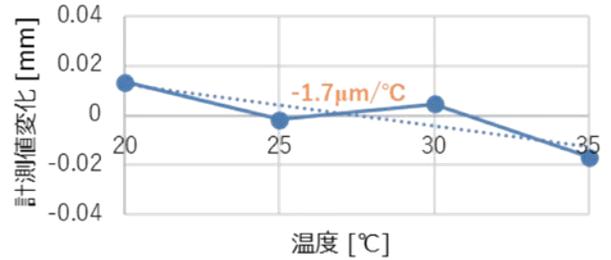


図8: 温度特性の評価結果

直線性、および温度特性の評価結果と競合他社の光切断センサとの比較を図9に示す。カメラとレーザの相対位置、レンズ焦点距離の校正は独自の高精度化を施し、かつ低膨張材の活用による温度耐性の向上を図ることで、他社センサに比べて精度を表す指標である直線性は1/3.5、温度変化による直線性の変化を表す温度特性は1/20の結果が得られた。以上の結果は、NS-TEX製光切断センサは、市販の汎用センサを上回る精度、温度特性を持つことを示している。今後、過酷な環境での計測が求められる鉄鋼業界を始め、種々の製造工程への適用を進める。

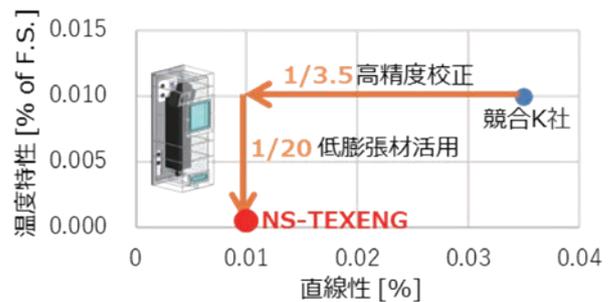


図9: 競合他社との性能比較

3 形状と温度変化の複合計測機能の開発

3-1 高温材料の計測

NS-TEX製光切断センサを用いて約1000°Cの高温材料を計測対象にプロファイル計測を実施した。図10に実験系を示す。計測対象は搬送ロールライン上の製品で一定方向に搬送されている。また、搬送ラインの都合上、1mほど離れた地点に光切断センサを配置し、計測対象である高温材料に向けてレーザを照射し、その反射光を計測した。

ここで、WD=1mを確保するため、図4に示すセンサ構成からカメラとレーザの相対位置姿勢を変更した。

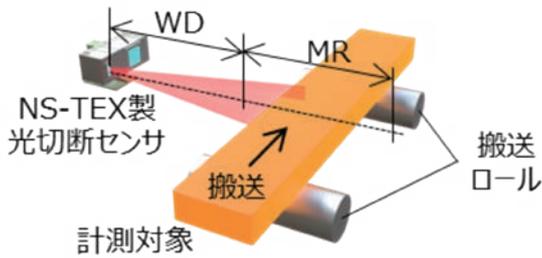


図10:高温材料計測の実験系

図11に計測結果を示す。図11(a)は取得画像を示しており、計測対象の断面はほぼ平坦であるため、レーザが直線状に撮像されていることがわかる。カメラレンズの前にはレーザの波長を主に透過するよう波長フィルタを配置しており、高温である計測対象からの赤外放射はカットされている。図11(b)は取得画像から計算した断面形状である。図11(c)には一定速度で搬送されている計測対象の断面形状を連続的に計測することで取得した表面凹凸を示す。色は凹凸の量を表す。なお、搬送速度とカメラのフレームレートで決まる搬送方向の分解能は約0.5mmである。この結果より、試作した光切断センサは1000℃の計測対象の表面凹凸をサブミリオーダーで計測できることが確認された。

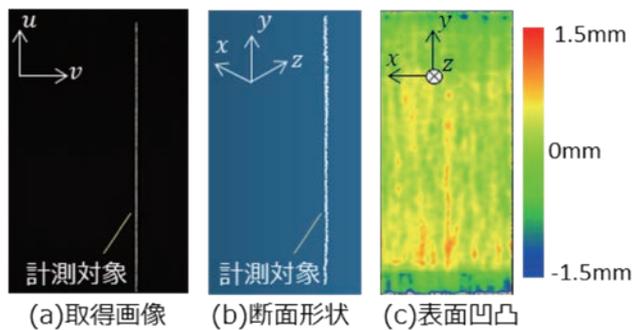


図11:高温材料の計測結果

3-2 形状と温度変化の複合計測機能

計測対象が高温の場合、形状計測と同時に温度変化モニタリングをしたいとの顧客ニーズがあった。このニーズに対応するため、光切断センサによる断面形状と温度変化の複合計測機能を開発した。一般に、物体は温度上昇と共に赤熱放射が強くなる。この温度による放射輝度の変化を利用した放射温度計が広く普及している3)。同原理を光切断センサに組み込み、形状計測のために取得する画像の輝度値から温度変化を検知する複合計測機能を開発した。

図12に開発した複合計測機能の概要を示す。光切断センサ内のカメラにて取得した画像は、波長フィルタによりレーザ反射光のみが撮像されているように見える。しかしながら、

コントラスト調整を施すと高温材料からの赤熱放射光も微弱ながら撮像されていることがわかる。この画像に対して、レーザ反射光位置から光切断の原理から断面形状を算出するとともに、レーザが照射されていない領域の輝度値を活用して温度変化を算出する。このとき、輝度値を算出する測定範囲(点線で囲まれた領域)を設定し、その範囲の輝度値平均を用いる。ここで、計測対象の表面状態により局所的に温度が低い箇所(画素)がある場合は、マスク処理により、平均値計算から除外する処理を施す。事前に輝度値と温度の相関関係を校正しておけば、時間を置いて取得した画像2枚から算出した輝度値の差から、その時間間隔における温度変化を検出することができる。図13に計測対象と同質なサンプルを電気炉で200-1000℃まで熱した場合の輝度値の実測結果を示す。800℃付近より赤熱発光し、急激に輝度が上昇していることが確認できる。この輝度差から、温度変化量を算出する。

なお、1枚の画像からの輝度平均値を用いて絶対温度の算出も原理的には可能だが、計測対象の表面状態、レーザ出力、波長フィルタの汚れなど輝度変動要因が大きく、現場での適用は難しい。

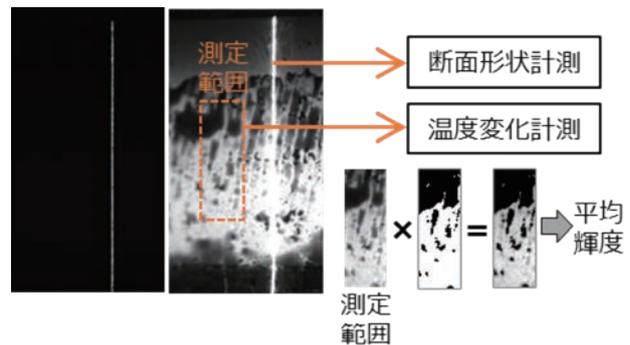


図12:形状と温度変化の複合計測機能

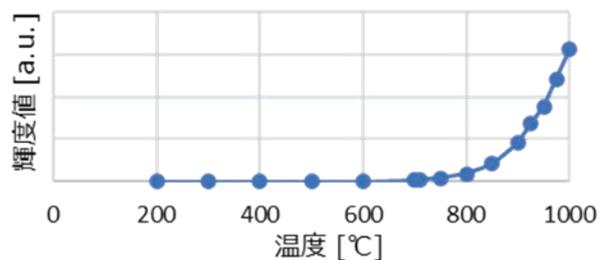


図13:温度による輝度値の変化

本機能における温度変化検知の温度分解能の定義を図16を参照しながら説明する。画像から算出する輝度値Iは、特定の温度領域では、温度Tに比例すると近似することができ、係数a,bを用いて以下のように表すことができる。

$$I = aT + b \quad (9)$$

今回の温度変化検知手法においては、複数画素の平均値で輝度値Iを算出しており、そのときの標準偏差をσとする。ここで、2点の温度T₁, T₂において、両者の輝度差ΔIを区別可能な温度差ΔTを温度分解能と定義する。各温度での輝度値算出のバラつきを2σ以内とすると、以下式となる。

$$\Delta I = a\Delta T - 2(\sigma_2 + \sigma_1) \quad (10)$$

ここで、輝度差ΔI=0の場合を、温度変化検知の分解能とし、以下条件を得る。

$$\Delta T = \frac{2(\sigma_2 + \sigma_1)}{a} \quad (11)$$

このとき、温度による輝度値の上昇を表す係数a、各温度で算出する輝度値のバラつきσ₁, σ₂を事前校正しておくことで温度分解能を算出することができる。

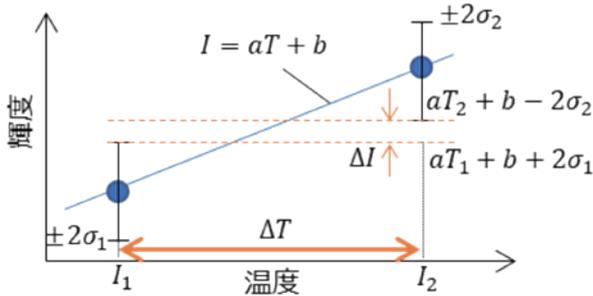


図14: 温度変化検知の分解能

式(11)の温度分解能を図13の電気炉での鋼片加熱試験の結果から算出した例を示す。図15は、温度による輝度変化を900℃で規格化(全温度の輝度値を900℃における輝度値で割算)した結果を示す。上図は規格化輝度、下図は画像から輝度値を算出した際のバラつき2σである。各温度における2σの平均値2σを用いると、式(11)より温度分解能ΔT=27.7℃となる。これは、レーザ光検出用に波長フィルタを搭載したカメラで取得した画像によるものであり、フィルタ透過特性を適正化することで、ΔT=5℃程度まで改善可能である。なお、同様の結果が、3-1節の実材料の試験で取得した画像からも得られている。

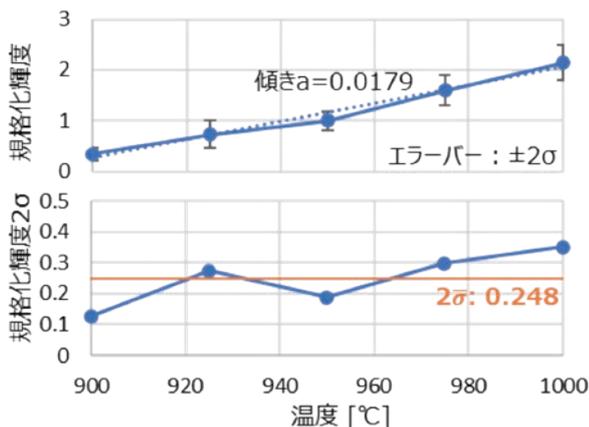


図15: 温度による輝度値変化の実例

3-3 連続鋳造工程への展開

NS-TEXENG製光切断センサの初号機は、連続鋳造工程におけるスラブ幅計として適用している。図16に示すように2台の光切断センサで計測対象の高温スラブを挟み込み、両センサで計測したプロファイルと事前校正したセンサ間距離の情報からスラブの幅を計測する装置である。1000℃程度のスラブを計測するため、本稿で紹介した各種対策を施したNS-TEXENG製光切断センサを搭載している。

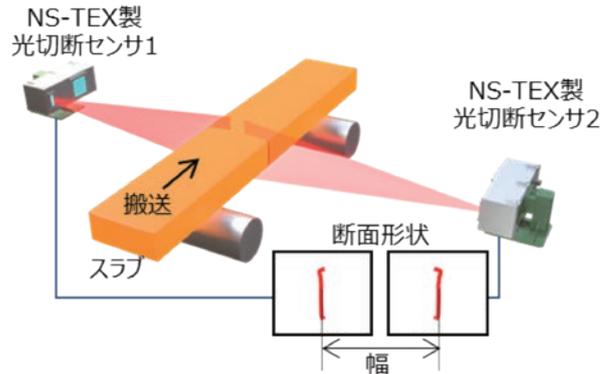


図16: 光切断センサ応用の幅計

4 おわりに

本稿では、低膨張材を活用した高い温度耐性、形状と温度変化検知を同時に実現する複合計測機能を有するNS-TEXENG製光切断センサを紹介した。引き続き、光切断センサのカスタム設計技術、付加機能開発を実現するニーズ対応技術を深化させ、製品力強化に努める。

また、弊社では、センサを含めたシステムの設計製作、運用、メンテナンスまで含めた一貫対応が可能である。

参考文献

- 1) 特許出願中
- 2) 山内, 斎藤, 佐藤, “基準平面を用いたスリット光投影式レンジファインダの校正,” 電学論C, NO.129, vol.6, p1162-1168 (2002).
- 3) 青山, “放射温度計則と放射率,” 日本赤外線学会誌, NO.4, vol.2, 96-105 (1994).

お問い合わせ先

電計事業本部 商品ソリューション事業部
計測検査2部

TEL. 0143-47-6970

[メールの場合]:

more_information-denkei@tex.nipponsteel.com