

主成分分析を適用した放射率変動の影響を受けにくい放射温度計と実機適用例

Emissivity-Free Thermometer Using Principal Component Analysis and Its Application

劔持 光俊 KEMMOCHI Mitsutoshi JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副課長)
大重 貴彦 OSHIGE Takahiko JFE テクノリサーチ 計測・プロセスソリューション本部 計測・可視化解析センター長
津田 和呂 TSUDA Kazuro JFE スチール データサイエンスプロジェクト部 主任部員 (部長)

要旨

冷延・表面処理プロセスでは、材質作り込みのため、焼鈍炉内の板温を計測している。一般的に知られている温度計測技術として、板がロールに巻き付いている部分で、板とロールとの隙間での多重反射を利用し、放射率1として精度良く放射測温する方法がある。しかし、水平パスや垂直パスでは放射率をあらかじめ設定して測定する必要があるが、放射率が変動するため、正確な板温が測定できないプロセスも多い。そこで、放射率変動の影響を受けない新たな手法として、多波長の輝度を測定し、放射率の統計的変動を主成分分析によりあらかじめ事前に把握し、それと直交する放射エネルギーの主成分のみを用いる温度計を開発した。ラボ試験、実機試験により有効性を確認した後、千葉ステンレス焼鈍酸洗ラインに本設備を設置した。

Abstract:

Various heating processes are used in a steel works. However, emissivity compensation is still one of the most difficult problems when radiation thermometers are applied to temperature measurements of heated sheets in steel manufacturing processes. JFE Steel proposes a new technique using spectral information of radiation from targets and principal component analysis (PCA). Temperatures are calculated from the principal component which is predetermined so that its scores change with temperature and are minimally affected by the deviation of spectral emissivity. The developed thermometer was installed at an annealing furnace in the stainless steel manufacturing process. As a result, it was found that the standard deviation and the maximum error of the developed radiation thermometer from the values measured by thermocouples were less than those of an ordinal single-wave thermometer.

1. はじめに

製鉄プロセスにおいて、温度は特性を定める重要なパラメータの一つであり、様々な箇所で温度計測が行われている。冷延・表面処理プロセスにおける鋼板の温度計測技術として、鋼板がロールに巻きついている箇所で測定する場合は、鋼板とロールの温度が等しくなっていることを利用した測温ロール¹⁾や、ロールと鋼板の間のくさびを利用した多重反射式放射計²⁾が用いられている。一方で、鋼板が水平パス、垂直パスを走行している場所で測定する場合は、前述の技術を適用できないため、放射率が変動しない場合は、放射率を設定した上で汎用の放射温度計を用いている。しかし、焼鈍炉内等放射率が変動する環境では、正確な板温を得ることができない。他にも、放射率が変動することで

温度を正確に計測できない鉄鋼プロセスは多いため、放射率変動の影響を受けない放射測温技術の開発が望まれていた。

このような背景の中、放射率が変動する環境での正確な温度計測を実現するため、新しい計測方法を提案、開発した³⁾。新しい計測方法は、測定対象から放出される放射光を測定し、これを分光して得られた分光スペクトルに対し、主成分分析 (PCA; principal component analysis) などの多変量解析を適用することが特徴である。具体的には、多変量解析により放射率変動の影響を受けにくい基底スペクトルをあらかじめ求めておき、測定対象の放射スペクトルに含まれるその基底スペクトルの大きさ (スコア) から、あらかじめ定めた検量線を用いて温度を算出する。放射率の変動を受けにくい基底スペクトルは、事前に主成分分析などで評価した放射率スペクトルの変動と直交する (内積、すなわち、各波長成分の積和がゼロ) 条件のベクトルとすること

2019年10月4日受付

で求める。

本論文では、新しい計測方法（以下、分光主成分放射温度計）の原理と、実際のラインへの適用事例について報告する。

2. 放射測温の課題と開発技術

従来の放射温度 T (K) を測定する放射温度計において得られる測定スペクトル $L(\lambda, T)$ は、(1) 式に示すように、黒体の分光放射輝度 (エネルギー) $L_B(\lambda, T)$ に放射率 $\varepsilon(\lambda)$ を乗じたものとなる。

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda) \cdot L_B(\lambda, T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 λ は波長、 $L_B(\lambda, T)$ は、プランクの放射則

$$L_B(\lambda, T) = \frac{2c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1\right)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ここで、 c_1, c_2 は物理定数である。

従来の放射測温では、例えば単色温度計では、 $\varepsilon(\lambda)$ を一定とし、2色温度計では、測定波長 λ_1, λ_2 における放射率について、 $\varepsilon(\lambda_1) = \varepsilon(\lambda_2)$ なる仮定をおき、(1) の方程式を解くことにより温度を求めている。しかしこれらの仮定は厳密には成立せず、温度誤差が生じることがある。

本論文では、放射率 $\varepsilon(\lambda)$ を、あらかじめ仮定された放射率仮定値 $\varepsilon_0(\lambda)$ と、操業条件等によって変化し得る放射率変動分を倍率 $g(\lambda)$ の形で分けて、

$$L(\lambda, T) \equiv \varepsilon_0(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot L_B(\lambda, T) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と記述することにする。(3) 式の両辺の \log を取って変形すると、

$$\log L_B(\lambda, T) = \log(L(\lambda, T) / \varepsilon_0(\lambda)) - \log g(\lambda) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

(4) 式の右辺より計算された $\log L_B(\lambda, T)$ には、 $g(\lambda)$ に起因する誤差が乗る可能性があるが、本来取りうる $\log L_B(\lambda, T)$ の形は (4) 式の通り決まっており、 $\log g(\lambda)$ の形がそれと異なることを利用すれば、 $L_B(\lambda, T)$ の真の形を推定できると考えた。

(3) 式では、 $\varepsilon_0(\lambda)$ は例えば変動する放射率の平均スペクトル、 $g(\lambda)$ はそれからの変動を想定しており、 $\varepsilon_0(\lambda) \equiv 1$ として放射率変動をすべて $g(\lambda)$ に含めることも可能であるが、 $\varepsilon_0(\lambda)$ に放射率の平均スペクトルを用いた方が、より放射率変動のスペクトルの特徴を捉えられ、 $L_B(\lambda, T)$

の真の形を推定できる。

従来の放射測温では、測定対象および温度に応じて適切な波長を選定していたが、より広い波長帯域を測定し、分光することでスペクトルの形を得ることとした。また、このスペクトルの形に着目する手法として、主成分分析を行うことを検討した。次章で主成分分析の適用の詳細を説明する。

3. 主成分分析の放射測温技術への適用³⁾

3.1 主成分分析

まず、主成分分析について説明する⁴⁾。

例えば図1に示すような、ある集団の構成員の身長と体重の散布図を考える。一般的には、身長の大きな人は体重も大きいと言えるので、この散布図は右上がりの分布を持つ。図1中に挿入した右上がりの線はこの分布の中心を通る線であり、いわば「体の大きさ」(body size) という尺度である。主成分分析とは、この身長と体重の組合せデータ (2次元) の本質的解釈が、「体の大きさ」という1次元の尺度で代表されることを統計的に導く手法である。図1の例は2次元のデータであるが、元々のデータの次元が多いときほど、次元の縮約という効果がある。

この「体の大きさ」は、数学的に表現すると第1主成分であり、この第1主成分と直交し、第1主成分の次に本質的な情報が第2主成分となる。図1のケースでは、第2主成分は物理的には「肥満度」(obesity index) という尺度と言える。

3.2 主成分分析の放射スペクトルへの適用

図1の例では、元々の2次元情報 (身長, 体重) は主成分分析により「体の大きさ」という1次元情報に縮約されるが、この本質を抜き出すという情報処理を温度推定におけるスペクトル波形に適用すれば、 n 個の波長情報から、放射スペクトルの温度変化に伴う本質的な変化を抽出できる。この場合、 n 個の波長情報 (スペクトル) は、図2のように測定波長と同じ n 次元の空間上の1点として表現される。例

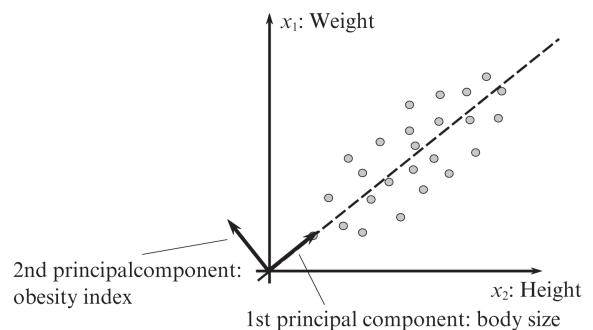


図1 身長体重の散布図と主成分

Fig. 1 Distribution map of the weight and the height and principal components

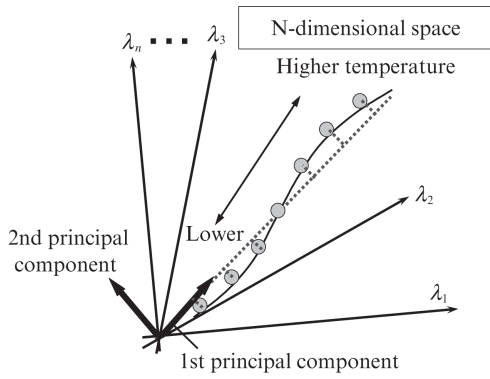


図2 n次元波長空間と主成分

Fig. 2 Schematic of n-dimensional description of spectral radiation and its principal components

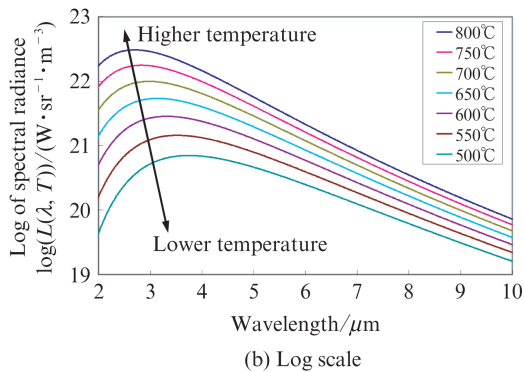
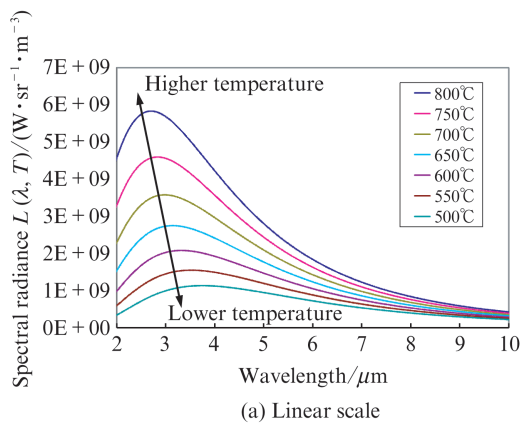


図3 黒体炉の分光放射

Fig. 3 Spectral radiance from black body

例えば7つの温度に対するn波長の分光スペクトルデータが与えられたとすると、n次元空間上の7つの点を与えられたことになる。この7つの点のn次元空間における分布の広がり方を考えて、最も広がり大きな方向が第1主成分の方向となり、これが前記7つの点を区別する、つまり温度を区別する最も本質的な情報となる。

次に、分光放射輝度データに実際に主成分分析を適用してみる。図3(a)に示す500°C~800°Cの7段階の温度に対する黒体分光放射輝度 $L_B(\lambda, T)$ (これは黒体炉を測定することにより得られる)にlog演算を施した結果(図3(b))

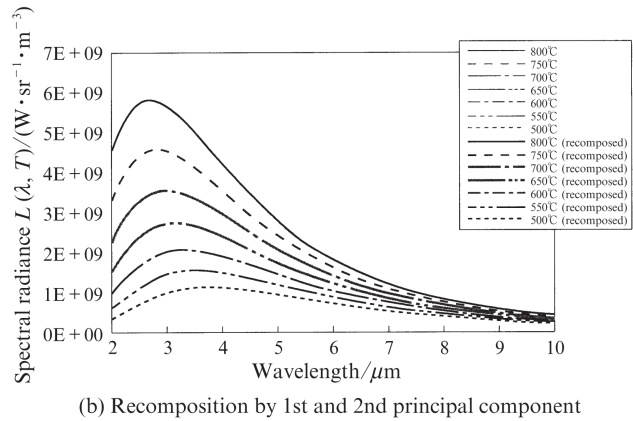
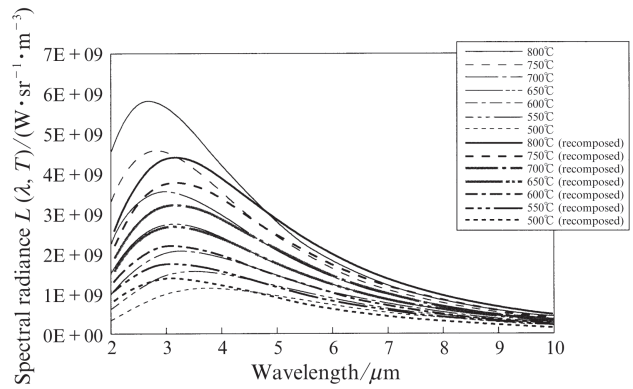


図4 主成分による黒体放射の再構成

Fig. 4 Recomposition of spectral radiation using principal components

に対して、主成分分析を適用し、例えば第1及び第2主成分を求める。これら低次の主成分情報は、元の7つの黒体放射エネルギースペクトル情報の本質的なスペクトル情報(基底スペクトル)である。

これら低次の主成分情報が元の7つのスペクトル情報の本質的なスペクトル情報(基底スペクトル)であることを検証するため、基底スペクトルから、元の7つのスペクトル情報を再構成した際の当てはまり度合を図4に示す。再構成とは基底ベクトルを定数倍し、さらに基底ベクトルが複数ある場合には定数倍した基底ベクトルを足し合わせるという積和演算、つまり線形操作を行ったものである。その係数は、スコアと呼ばれ、元の波形とそれぞれの基底ベクトルの内積を計算する(波長ごとに積算して積分する)ことにより得られる。

元の7つの分光スペクトルに、低次の基底ベクトル情報がどの程度含まれているかにより、再構成した際の当てはまり度合が変化する。図4(a)では第1主成分のみで再構成、図4(b)では第2主成分までで再構成した場合の結果を示しており、この場合、第2主成分までを使用すれば、7つの分光スペクトルのどれもが、非常に良く再構成されていることがわかる。換言すると、1つ1つの分光スペクトルはn点

の波長情報、つまり n 次元の各座標で表現する必要はなく、2つの基底ベクトルをあらかじめ決めておけば、その線形和のための2つの係数(スコア)分の2点の情報(スカラー量)だけで表現できることを意味している。さらに言い換えると、 n 次元データが2次元データに圧縮されたとも言える。この際、次元数は大幅に圧縮されているが、「基底ベクトル」という本質的なスペクトル波形で再構成されていることが重要である。

このことを利用して、先に述べた放射率変動といった外乱に影響をされにくい方式を考える。

3.3 主成分を用いた放射率変動影響を受けない分光放射温度計測法の提案

3.2節で、分光スペクトルデータに対して主成分分析を行う際の基本的な考え方を述べた。ここでは、更に、被測定体の放射率変動の影響を受けないための、主成分分析の適用方法について考える。前述の(2)式で、被測定体の放射率変動 $g(\lambda)$ の挙動があらかじめわかっているものとし、その放射率変動データに対して主成分分析を行い、放射率変動の主成分を求める。ここで、求めた放射率変動の主成分は、被測定体の放射率変動の統計的挙動を表現している。逆に言えば、この放射率変動の主成分ベクトルと直交するベクトルは、全て放射率変動をほとんど受けないベクトルと言える。

そこで、この放射率変動の主成分に必ず直交するという制約の下で分光放射輝度の主成分分析を行うことにより、放射率変動の影響をほとんど受けない、放射エネルギーの本質的な情報を取り出すことができる。具体的な手順としては、分光放射輝度スペクトルから、あらかじめ放射率変動の主成分を除いた上で、通常通りの主成分分析を行う。通常通り主成分分析を行えば、求められる主成分は、いずれも放射率変動の主成分と直交するものとなる。

従って、放射率変動の主成分と直交する放射エネルギーの主成分に着目し、分光放射輝度スペクトルとその主成分とのスコアを用いることにより、放射率変動影響を受けにくい温度測定が実現できる。

これを図5を用いて説明する。プランクの放射則は、図5に示すような n 次元空間では、1本の曲線として表現される。そして、測定スペクトル $L(\lambda, T)$ 及び放射率スペクトル $\epsilon_0(\lambda)$ が正確に求められれば、 $L(\lambda, T)/\epsilon_0(\lambda)$ はその曲線上に位置するはずである。ところが、実際には、放射率の変動 $g(\lambda)$ のために曲線からはずれた位置として測定され、温度誤差が生じる。そこで、放射率の変動 $g(\lambda)$ の主成分を求め(図5中の①)、それと直交する放射エネルギーの主成分(図5中の②)が測定データに含まれることが多いほど、放射率変動の影響を受けにくい温度測定が可能になる。

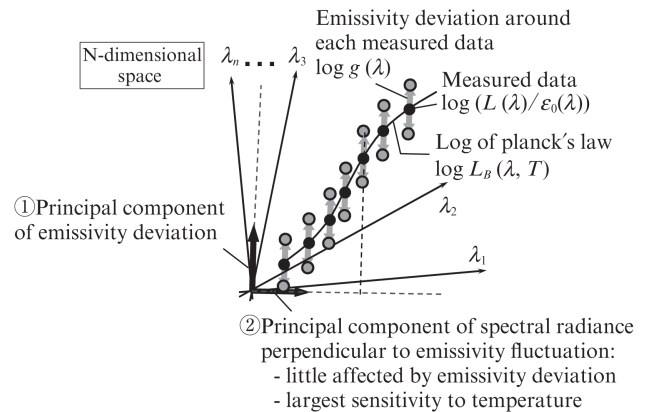


図5 温度測定概念図

Fig. 5 Schematic concept of new thermometry technique using principal components

4. 実機への適用例

4.1 ステンレス焼鈍酸洗ラインにおける板温測定

ステンレス焼鈍酸洗ラインは、ステンレス冷延鋼板の焼鈍および酸洗を行うラインである。材質造り込みのためには板温の制御が重要であるが、焼鈍中の酸化膜の成長により放射率が変動するため、従来の放射温度計では板温を精度良く測定できなかった。

そのため、以前は伝熱モデル計算による推定板温を用いて焼鈍サイクル設計(炉温パターン設計)を行っていた。従って、板厚や炉温パターンを変更する過渡状態においては板温が外れる可能性が高いため、板厚変更や炉温パターン変更の許容範囲を安全側に設定していた。さらに、上記の許容範囲を外れる場合には通板材を装入することによって材質不良を回避したが、通板材装入による生産能力の低下が課題であった。

そこで、分光主成分放射温度計のステンレス酸洗焼鈍ラインへの適用を検討した。シミュレーション、サンプル試験、実機実験で有効性を検証し、本設化することとした^{3,5-7)}。

4.2 設備概要⁸⁾

焼鈍炉内の加熱帯出側に、分光主成分放射温度計および接触式温度計を設置した。分光主成分放射温度計の構成を図6に、設備の概要を図7に示す。分光主成分放射温度計のハードは、主に CCD カメラ、分光器、レンズから構成される。分光器は内部にスリットとプリズム・グレーティング・プリズムによる分光素子を有し、それらを通して分光を行う。CCD カメラは、一方の次元を鋼板の板幅方向とし、もう一方の次元で波長情報を測定する仕組みである。板幅方向は平均化し、1点のみを分光スペクトルとして出力する。

接触式温度計は、シリンダーで間欠的に熱電対を鋼板に押し付けて温度を測定し、使用する主成分の決定のためのデータを取得し、定期校正に使用する。

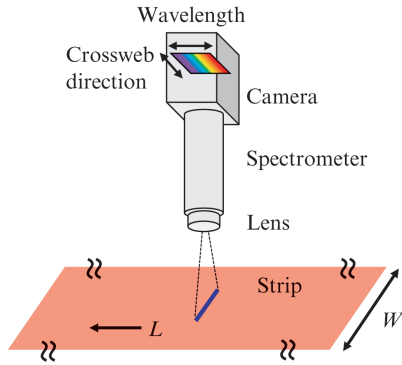


図6 温度計構成図

Fig. 6 Configuration of developed thermometer

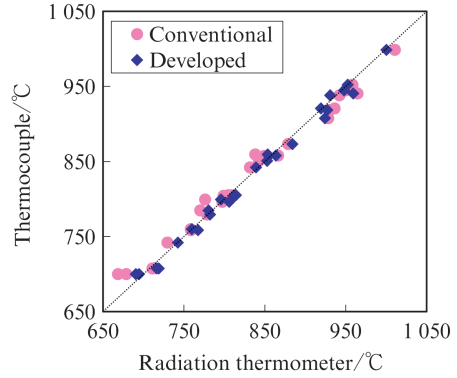


図8 接触式温度計との比較結果

Fig. 8 Comparison of temperatures measured by developed and conventional thermometers

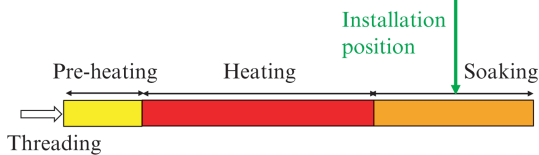
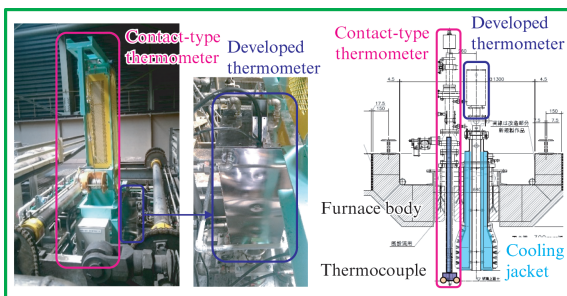


図7 設備概要図

Fig. 7 Actual equipment of manufacturing line

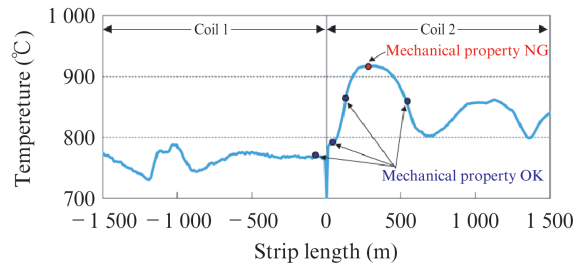


図9 焼鈍条件変更時の板温測定結果

Fig. 9 Change of annealing conditions in test of developed thermometer

実際の温度測定の手順を以下に述べる。まず、オフラインであらかじめ複数の温度に対応する黒体炉の分光スペクトルを計測しておく。次に、接触式温度計を使用し、温度とそれに対応する分光スペクトルのデータをできるだけ多く取得する。取得したデータから平均的な放射率、放射率変動およびその主成分を計算する。その後、黒体炉の分光スペクトルに対して、放射率変動の主成分を除いて再度主成分分析を行い、測温に用いる主成分を決定し、主成分スコアと温度の関係より検量線を作成する。以上の手順により、分光主成分放射温度計による板温の連続測定が可能となる。

4.3 結果

接触式温度計を用いてデータを採取し、そのデータより使用する主成分の調整を行った。主成分を用いて演算した温度測定値と $0.9 \mu\text{m}$ の波長のみを用いて検量線を作成し、誤差が最も小さくなるように放射率を設定した従来の単色放射温度計と、同様に演算した分光主成分放射温度計の、それぞれの測定値の比較を行った。その結果を図8に示す。分光主成分放射温度計は、最大誤差 18.6°C 、 $\sigma=7.2^\circ\text{C}$ であ

たが、従来の単色放射温度計は最大誤差 31.6°C 、 $\sigma=13.1^\circ\text{C}$ であり、分光主成分放射温度計が従来の単色放射温度計よりも最大誤差、ばらつきともに小さいことを確認した。

この結果を受けて、工程使用を開始した。あるサイクル変更時の板温と材料試験の結果を図9に示す。材料変更後、板温が高くなっている箇所材料試験の結果が不合格となっており、これにより板温と材料試験結果との関係が確認できた。これらの実験を通して管理基準を設定し、サイクル変更時にも実板温による品質管理ができるようになった。

5. おわりに

分光放射スペクトルと多変量解析を用いて、放射率変動の影響を受けにくい新しい温度計測手法を提案した。また、開発した温度計をステンレス焼鈍酸洗ラインに適用し、誤差およびばらつきが従来の単色放射温度計よりも小さいことを確認した。今後、本技術を他の鉄鋼プロセスにおいても展開していく予定である。

参考文献

- 1) 芹生浩之, 増野彦彦, 中島康久, 小川博之. 測温ロールによる連続焼鈍炉の板温計測. 鉄と鋼. 1993, vol. 79, no. 7, p. 765-771.

- 2) 山田健夫, 真壁英一, 原田直樹, 今井清隆. 多重反射を利用した放射測温法の開発. 日本鋼管技報. 1984, no. 103, p. 92-100.
- 3) 大重貴彦, 津田和呂. 分光スペクトルと多変量解析を用いた放射率変動影響を受けない新放射測温技術の提案. 計測自動制御学会論文集. 2017, vol. 53, no. 7, p. 377-384.
- 4) 奥野忠一, 芳賀敏郎, 矢島敬二, 奥野千恵子, 橋本茂司, 古河陽子. 続 多変量解析法. 8版, 日科技連出版社, 1976, 299 p.
- 5) 大重貴彦, 津田和呂. 分光スペクトルと多変量解析を用いた放射率変動影響を受けない新放射測温技術の提案. 第33回センシングフォーラム. 2016, 1A1-1.
- 6) 大重貴彦. 分光スペクトルと多変量解析を用いた放射率変動影響を受けない放射測温技術～その基本特性～. 第34回センシングフォーラム. 2017, 1C2-4.
- 7) Oshige, T.; Asakura, S.; Isobe, T.; Koshihara, T. Temperature measurement technique using hyperspectral camera and multivariate analysis and its application to steel manufacturing processes.

TEMPMEKO2016. 2016, P4.11.

- 8) 剣持光俊, 大重貴彦, 廣田詩乃, 秦野直樹. 放射率変動影響を受けない分光主成分放射温度計によるステンレス焼鈍酸洗ライン板温計. 鉄鋼協会第176回秋季講演大会. 2018, 112.



剣持 光俊



大重 貴彦



津田 和呂