

博士論文（要約）

光の性質の多元的利用による  
高精度自動鋼板計測技術の開発

大重 貴彦

## 1. 緒言 ～鉄鋼プロセスと光応用計測技術～

本章では、鉄鋼プロセスとそこで用いられる光応用計測技術（表面検査技術、放射温度計測技術）について概観した。

## 2. 鋼板表面欠陥の光学モデルと検出光学系

### ～表面欠陥に対する光学系を工夫により、コントラストを上げて感度良く検出する～

本章では、まず、錫めっき鋼板の表面検査の事例において、欠陥サンプルの顕微鏡観察から対象とする欠陥の性状を把握し、それを検出するためには、特に新しい計測手法ではないが、カメラで正反射光・拡散反射光を受光する光学系が適していることを明らかにし、実験結果からその条件を導いた。この提案光学系を用いた装置は、実設備として稼働中である。

次に、熱間圧延工程で発生するロール性欠陥においては、上記と同様にサンプルの顕微鏡観察を行ったが、熱間圧延工程終了後にコイル状に巻き取られた段階で、表面の凸部が平らに潰れて性状が変化してしまうため、巻き取られた後で採取したサンプルでの試験では全く意味がないことを明らかにした。巻き取られる前の欠陥の表面性状を直接観察してモデル化することができなかつたため、苦肉の策ではあるが、想定した欠陥形状に対し有効と考えられる複数の光学条件を操業中のオンライン試験により試し、統計的な結果をもとに光学系を決定した。この提案光学系を用いた装置は、実設備として稼働中である。

また、以上の知見をもとに、次章以降で使用される光学モデルの基本的な考え方について述べた。このモデルは、鋼板表面が微小なミラー面にて構成され、入射光は、入射した位置のミラー面の傾きに対応してその鏡面反射方向に反射されるというモデルである。このモデルによると、反射光の角度特性は、微小なミラー面の傾きの分布に対応する。

## 3. 鋼板表面凹凸欠陥の低角入射魔鏡法による検出

### ～見えない欠陥を可視化して検出する～

本章では、鋼板の表面粗さに埋もれて目視では見ることができない微小凹凸欠陥を検出する方法の検討に際し、まず、表面粗さのモデル化を行った。その結果、入射角を  $90^\circ$  近くの大きな角度にすることにより、表面粗さによらず鏡面性を確保することができる

ことを示し、鏡面体に対して適用できる魔鏡の原理を利用することができるようにした。そして、板幅方向に移動しながら周期性凹凸欠陥を検出する装置を設計・製作し、薄鋼板の製造ラインで実証を行った。光の性質として、表面の反射状態を左右する入射角として特異的な条件を選定するとともに、さらに光の鏡面反射・直進性を利用し、光の集束・発散による明暗パターンにより凹凸欠陥の検査を実現している。

#### 4. 鋼板表面検査における過検出の抑止に向けた光学的アプローチと製造プロセスへの適用 ～コントラストが高い無害模様を光学的に見えなくして欠陥のみを検出する～

本章では、第3章とは逆に、検出する必要がないのにもかかわらず、明瞭に見えてしまう過検出要因である光沢むらを検出しないための光学系の検討を行った。光沢むらの顕微鏡観察からモデル化を行い、受光角を正反射からわずかにずらし、さらに偏光を利用することにより、光沢むらは検出せず、対象欠陥は検出可能な光学系を創出した。この提案光学系を用いた装置は、実設備として稼働中である。この開発においては、通常、拡散反射光では状態が保持されないため用いられることのない偏光が、正反射からわずかにずれた反射角でも利用できることを光学モデルによって示し、正反射からわずかにずれた反射角と偏光をともに活用することにより、非常にコントラストが高い無害の光沢むらを光学的に見えなくした上で検査を行うことを可能にしている。

#### 5. 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测温技術

本章では、焼鈍炉内で酸化膜が成長する中で温度測定を行うニーズを取り上げたが、実際の製造工程でどのように酸化膜が成長しているかの情報を得ることができず、光学モデル化が困難な対象であった。そこで、膜厚変化による放射率変動を主成分分析により少ない情報の基底スペクトル（主成分）で数学的に表現することにより、放射率変動が起こってもそれに影響されない、放射率変動の主成分に直交する黒体放射スペクトルの主成分を用いて温度計測を行う手法を提案し、まず、実験室にてサンプル実験により検証した。光の性質として、従来、単数もしくは少数の複数波長のみを用いていたのに対し、多数の波長をスペクトル情報として用い、黒体放射と放射率変動の分光スペクトルの挙動がそれぞれ異なることを利用した手法となっている。

実ラインへの適用に際しては、サンプルが実ラインでの状態を適切に模擬できているかどうかは不明であったため、改めて実ラインで放射率の温度依存性も含めて放射率変

動を評価できるよう、分光カメラを用いた提案温度計とともに接触式熱電対を設置して検証を行った。この考え方に基づく温度計は、実設備として稼働中である。

## 6. 結言

鉄鋼プロセスにおける計測技術開発は、古くから難課題として解決されずに残っているものも多い。本論文における第3章、第5章で扱った課題がその典型である。そのような課題に対応する場合、まず、どのような切り口で取り組んでいくかが最も重要である。特に、光を利用した計測の場合、本論文における第3章、第4章のように現象を目視で確認できることも多いので、起こっている現象を完全に説明できるように理解することが重要である。

現象を理解するということは、モデル化を行うことに他ならない。測定対象・測定手法のモデル化を行うということは、本来、計測手法の開発においては基本中の基本ではあるが、これまで鉄鋼プロセスでは、明確なモデルおよび設計指針がないままに、実験結果のみを評価基準として計測装置の設計製作が行われることも少なくなかった。そのようなアプローチは、解決課題が比較的容易な場合は成功することもあるが、難課題の解決を目指す場合には難しい。難課題の解決のためには、きちんとモデル化がなされ、現象の説明ができ、何をどうすればどのような結果になるということが手に取るようにわかるようになって初めて、計測手法の設計ができることになる。

ただし、鉄鋼プロセスの場合、対象としている状況を実験室で再現できないことも多く、また、再現できたとしても、表面粗さの取り扱いを中心にして光学モデル化がしにくいことも多い。本論文では、このようなモデル化が難しい対象に対するいくつかのアプローチを示し、何らかのモデルに基づいて装置設計を行う事例を示した。

また、鉄鋼プロセスで実用化に至るためには、その計測手法が成立するための条件がどれだけクリティカルで、マージンがあるかも重要である。難課題の場合、いくつも計測手法が想定されるわけではなく、想定した計測手法以外には選択肢が存在しないこともあるが、想定した計測手法について客観的に評価をすることも極めて重要である。

さらに、鉄鋼プロセスは、粉塵・熱など計測装置が使用される周囲の環境が過酷で、それに対する備えも当然のことながら非常に重要である。

今回、本論文で取り上げた開発事例の多くは、実設備として鉄鋼プロセスで使用されており、このようなアプローチは、難課題であればあるほど重要であることを改めて感

じた。今後とも、このような考え方を忘れずに、難課題に向き合っていく所存である。

なお、本博士論文の一部は、以下の雑誌掲載の形で刊行されている。

#### 第 1 章

- ・ 大重貴彦：鉄鋼製品の品質評価のための自動検査技術，計測と制御，**55**-3，  
228/233 (2016)
- ・ 大重貴彦：鉄鋼材料を作り込む計測技術(1)表面品質の計測技術，ふえらむ，  
**23**-4,164/168 (2018)

#### 第 3 章

- ・ 大重貴彦，腰原敬弘：鋼板表面凹凸欠陥の低角入射条件における光学的特性と欠  
陥検査への応用，計測自動制御学会論文集，**50**-9，640/645 (2014)

#### 第 4 章

- ・ 大重貴彦，大野紘明，腰原敬弘，橋向智弘，杉浦寛幸：表面検査における過検出  
の抑止に向けた光学的アプローチ，鉄と鋼，**108**-1，22/28 (2022)

#### 第 5 章

- ・ 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，**53**-7，377/384 (2017)
- ・ T. Oshige, T. Koshihara, S. Hirota, T. Isobe and M. Kemmochi : Emissivity-  
free radiation thermometry based on multivariate analysis of spectral  
radiance applied to steel making process, Measurement Science and  
Technology, **32**-9, 095101 (2021)