

## 論文の内容の要旨

論文題目 電磁気技術を用いた鉄鋼製造における品質保証・プロセス管理に関する研究

氏 名 四 辻 淳 一

被測定物を破壊せずその特性を測定する非破壊測定技術であるが、製造業においてプロセス監視及び製造物の検査に広く用いられており、その手法も様々である。大きく分類すると、目視（画像）・放射線・超音波・ひずみ・AE・サーモ・電磁気などである。また、用途としても品質管理およびプロセス管理に分類される。

製鉄所内には原料から各種製品出荷まで多くの測定対象が存在し、それぞれの対象に対して測定装置の開発が試みられてきた。上工程における重要項目は低コスト化であり、プロセス管理のために各種センサが活用される。下工程では品質保証も重要となるため、欠陥計のような品質管理用センサが多く利用される。

センサを用いた計測技術という視点から鉄鋼業における特徴を考えると、時代とともに鉄鋼製品に対する低コスト化・品質高度化の要求がますます厳しくなり、それに対応する製造プロセスの改善も必要となる中で、測定技術およびソフト技術の向上が強く要望されている。本論文ではこれらの課題に対して、特に電磁気応用技術を適用する提案について述べており、適用においてソフト的な技術を利用し且つハード的な課題を解決することを試行している。

電磁気応用技術に焦点を当てている理由としては、電磁気特性が金属において重要な特性である点が挙げられる。形状・寸法計測もしくは欠陥検出といった品質管理・プロセス管理においては、電磁気特性の異常・不連続性を検出することにより、対象の状態を知ることが出来るのである。当然のことながら、電磁気特性測定にも性能向上が求められる。具体的な項目としては、高速、省力、高精度、高効率、安価などが挙げられる。本論文では特に高精度化・高効率化・安価化について提案している。

品質管理分野においては、製造ラインの最終工程に近いことから、高速化および高精度化が求められる。製造ラインの高速化は製造効率にダイレクトにつながるが、必要な技術としてはセンサアレイ化技術や、高速化を効率化という点から見たときの一次スクリーニング技術が挙げられる。一方品質管理の高度化を達成するために必要な技術は検知可能な欠陥の種類を増やす技術、もしくは検知可能な欠陥のサイズを小さくする高精度化技術である。

高精度化については、物理現象として何が起きているかをより詳細に知るために欠陥周辺の電磁場分布のモデル化及びシミュレーションなどが重要技術であり、その知見から微小欠陥・内部欠陥などの難対象物に適したセンサおよびそのシステムが設計可能となる。

高速化については、電磁場分布に基づくセンサの配置最適化がポイントとなる。そのためにやはりシミュレーションは必須のアイテムであり、検証範囲を絞ることができる点で開発効率化に大いに有効である。

本論文では電磁気分野に焦点を絞り、前記高度化するニーズを解決するための研究開発について述べる。各章において提案する技術は次の通りである。

第2章から第4章は品質管理に関する技術、第5章および第6章ではプロセス管理に関する技術について述べており、具体的には第2章にて広範囲の一次スクリーニング探傷技術、第3章にて遠隔高精度探傷技術、第4章にて難対象物（内部欠陥）高精度探傷技術、第5章にて難対象物（微小変化、悪環境下）高精度評価技術、第6章にてプロセス改善開発効率化技術についてである。

第2章では金属表面調査のために表面波を利用した研究について述べた。電磁波が起こす表面との干渉について数値計算モデルを示し、表面波成分の特異な振る舞いについて報告した。鋼のような高導電率材における表面波強度の評価を行い、さらに表面波が測定可能な強度レベルにて広範囲を伝搬し得るこ

とを示した。実験結果からも広範囲の伝搬現象と、鋼板上に存在するスリット状欠陥からの拡散成分が確認され、表面検査に対して本技術の適用可能性が示された。

第3章では薄鋼板の探傷に音響誘起電磁波（ASEM：Acoustic Stimulated Electromagnetic wave）を用いることを検討した。予め磁化した鋼板に超音波振動が付加されると電磁波が発生する現象を利用する技術である。受信コイルの小型化により感度を向上させた結果、リフトオフ10mmにて $\phi 0.1\text{mm}$ の貫通人工欠陥を検出可能であることを確認した。本技術は、観測領域が超音波焦点径レベルという利点があるため、磁化分布の詳細解析を対象とすればオフラインでも有用であると考えられる。

第4章では熱延鋼板の内部欠陥を検出する技術について述べた。熱延鋼板という対象に対して、ノイズの発生原因を解析しその結果に基づき磁化差分方式を考案した。本方式を適用した熱延鋼板の内部介在物計のオンライン性能として、深さ0.45mm、 $\phi 160\mu\text{m}$ 以上の球状欠陥が検出できる見込みを得た。本装置はエアフローティングの適用により高速通板時も適用可能である。

第5章では渦電流計測法において二周波数ベクトル解析を用いて、三層の中間層膜厚計測を検討した。具体的な対象例として製鋼工程の連続鑄造モールド内における計測を設定し、粉末パウダ層（第一層）厚、溶融パウダ層（第二層）厚、溶鋼（第三層）面までの距離の同時測定を目標とした。数値解析によるコイル設計により適当な周波数を選択し、計測が可能であることを模擬試験により示した。また連続鑄造ラインにてオンライン試験を実施し、管理値として優先順位の高い溶鋼面距離および溶融パウダ層測定に関してはその性能を確認した。

第6章では鋼材に残留するショット粒を除去するための磁石を用いた装置設計に対して、磁場シミュレーションを利用した方法について述べ、実験によりその効果を確認した。ショット材の形状や鋼材材質による残留磁化レベルが異なる場合は再検討が必要となるが、本稿で示されているステップに従って条件を導き、その条件を満たす装置設計を行えば良く、磁場シミュレーションによって傾向をつかむことは、設計に大いに役に立つことが本稿によって示された。昨今、大規模シミュレーション、動磁場および連成解析など磁場シミュレーション技術も進歩しているので、積極的に活用したい。

以上の研究開発結果をもとに、残された課題を整理し、それらに対する新たな提案を行った。一つはエンジニアリング上課題を解決する提案である。計測性能を確保しながら耐久性、保全性など運用面でも実現性を確保するという点が重要である。その解決策の一つは作業現場との会話である。

一方で測定原理の技術的な工夫を視点として、測定高性能化・安定化を目的とした以下三項目の案について提案した。

- ① 複数技術の組み合わせ
- ② AI・学習機能等の利用
- ③ 高性能の最新ハードウェアの導入

それぞれについて構成例を以降に示す。

①について、ASEMの電磁気特性計測性能をより高速・広範囲に行うことと、同時に欠陥検出も行うことを目的にASEMと磁化差分法の組み合わせを提案している。その特徴は次の通りである。

- ・超音波による歪印加は板幅方向のフェーズドアレイ集束型超音波探触子を用いる。
- ・超音波プローブの焦点が強磁化条件および弱磁化条件となる位置にプローブを設置する。
- ・それぞれの磁化条件からのASEM信号はコイルセンサアレイにて測定する。

このシステムにより次の効果および情報が得られる。

- ・超音波探触子としてアレイ型を用いての広範囲探傷
- ・ASEM法として表層電磁気特性、表層欠陥
- ・磁化差分漏えい磁束法として内部欠陥
- ・超音波信号を用いてより深い内部欠陥

①についてはもう一案、ASEMとレーザー超音波の組み合わせを提案した。その特徴は次の通りであ

る

- ・ガルバノミラーの角度を3次元的に制御することにより、鋼板上の任意の点に超音波を誘起する。
- ・それぞれの照射点からの ASEM 信号はコイルセンサアレイにて測定する。

このシステムにおいては次の効果および情報が得られる。

- ・ASEM 法として表層電磁気特性、表層欠陥
- ・表層の酸化膜厚みに対して差分効果最適化が可能となり、磁化差分漏えい磁束法としての内部欠陥検出能向上

②について、ASEM を用いた素材特性評価の提案をした。ASEM においては磁化条件が多ければ多いほど様々な素材特性が評価可能であるため、磁化をゼロから磁化飽和付近まで連続で変化させ、その ASEM 信号特性を、AI を用いて分析・学習させる案である。その特徴は次の通りである。

- ・交流磁化により連続的な磁化条件を生成する。
- ・対象鋼材の B-H 曲線に対応する H-ASEM 曲線を獲得する。
- ・H-ASEM 曲線のトレース形状と素材特性（機械特性、結晶分布、電磁気特性等）とを分析・学習させる。

このシステムにより次の効果・情報が得られる。

- ・製造途中で測定し、トレース形状から素材特性を推定し、より上工程にて評価可能
- ・任意の複数の磁化レベルに注目し ASEM 信号の差分をとることで、深い位置の情報を得る磁化差分方式が適用可能

また、交流周波数を可変にする測定系の工夫を加えることも提案している。

③について、第2章で示した鋼板表面探傷スクリーニングへの新技術応用を提案した。最新機器であるために現状費用は高いが、このような商用インフラ機器は価格の低下が期待できるため、探傷という分野でも積極的に活用することを考えたからである。具体的には送受信アンテナを広範囲カバータイプにして高速化に対応することを志向した案である。その特徴は以下の通りである。

- ・送信機としてH面扇形ホーンアンテナを使用する。
- ・受信機として多chのアレイ平面パッチアンテナを使用する。

本システムを用いることにより、次の効果・情報が得られる。

- ・より広範囲なスクリーニングが可能
- ・受信素子の受信パターンを学習することにより欠陥位置、鋼板のバタつき、鋼板形状などの弁別が可能となり、ロバスト性向上

また、フェーズドアレイ機能の追加することも提案した。

以上.