

## 論文の内容の要旨

論文題目 時間的・空間的に局在させた超音波による鉄鋼薄板製品および製造設備の非破壊検査  
氏名 高田 一

鉄鋼製品の製造技術は、高能率化によるコストダウン、製品品質の高度化（均一性の高度化、多機能化）、地球温暖化問題への対処をはじめとする環境配慮製造を強く志向してきた。

製品製造の高能率化は、内部品質を低下させることなく、生産設備のスループット（単位時間に製造できる製品、または、中間製品の量）を向上させる必要がある。鉄鋼製品のほとんどは溶けた鋼を連続的に铸込んで固められたスラブと称される巨大な铸鋼から製造される。この段階までに鋼内部に発生する内部欠陥として非金属介在物が挙げられるが、非金属介在物は連続铸造の速度を上げるほど、鋼内部にとどまりやすくなり、品質が低下する。即ち、連続铸造の生産のスループット向上には、製品内部品質を詳しく評価する手段が必須である。また、製品製造の高能率化には、生産設備の健全性が必要である。クラックによって生産設備が破損し、長時間にわたり生産が停止することは高能率化を大きく阻害する。設備の健全性評価を行うためにも信頼性の高い非破壊検査手段が必要である。

製品品質の高度化においても重要要素として非金属介在物等の内部欠陥が挙げられる。最終製品の軽量化のための鋼板薄肉化やユーザーにおける鋼板加工方法高度化によって、鉄鋼製品の内部欠陥に対する許容サイズは年々微小化してきた。品質高度化を図るには、まず有害欠陥を見つけ、ユーザーへの流出を防止すること、次に有害欠陥が発生する条件を突き止め、有害欠陥が発生しない製造方法を確立することが必要である。どちらにも、有害欠陥を確実に検出できる非破壊検査手段が必要である。

二酸化炭素排出問題等の環境問題への対処には、一つの方策として、二酸化炭素排出量ミニマ

ムでの生産が必要であり、無駄となる品質不適合品の発生防止が必要である。製造条件と内部品質との関係を詳しく把握することにより、常に適正条件で製品を製造できるようにし、品質不適合品が発生する確率を低下させる必要がある。

最近では製品の安心安全も一つのキーワードとして注目されている。例えば、鋼材を溶接した部材の寿命は溶接部の強度や耐久性に大きく依存している。このような溶接部の健全性の評価には非破壊検査が必須の手段である。

このような状況に鑑み、本研究では、非破壊検査技術を鉄鋼製品製造の高能率化、製品品質の高度化、および安心安全の確保へ大きく寄与させることを目的とし、薄板製品（薄板溶接製品の品質も含む）およびその製造に関わる鉄鋼製品や設備の品質評価を高精度に行うために超音波非破壊検査技術の開発を行った。これら技術は、超音波を時間的・空間的に局在させることにより、超音波計測の信号対雑音比（S/N）を向上させる原理（以下、S/N 向上原理）をベースとし、その上に、高速検査を実現するための技術や外乱の影響を受けにくいロバスト性の高い計測技術を考案・開発して積み上げたものである。

第1章では、鉄鋼製品の製造方法を概説したのち、超音波非破壊検査の対象となる欠陥（きず）について説明し、次に上記 S/N 向上原理を説明する。さらに、鉄鋼薄板製品やその製造設備の超音波測定における具体的課題と本論文の技術との関係を整理した上で、超音波測定を行う場合の一般課題と本論文の技術との関係を整理し、超音波測定全体にわたる課題に対する本研究の取り組みについて全体観を示す。

第2章では、生産設備である圧延ロールの健全性を正確に評価するために開発した広帯域表面波を用いた圧延ロールの表面クラック検出技術について述べる。従来から狭帯域表面波を用いた圧延ロールの表面クラック検出技術が現場適用されていたが、ノイズレベルが高いため有害な表面クラックを確実に検出できない、クラックがない部分から大きな散乱波が発生して誤検知が発生するなどの問題点があり、確実な検査手段となっていなかった。そこで、S/N 向上原理に基づき、パルス幅が小さく、かつ、現場使用に堪えうる高感度を有する広帯域表面波プローブを開発した。様々な試験の結果、表面きずを高い S/N で検出できること、および、大きな散乱波の発生を防止できることが確認され、圧延ロールの表面クラック検査に実用されている。この開発により表面波を用いた表面クラック検出技術を圧延ロールの確実な検査手段へと成長させた。

第3章では、鉄鋼薄板製品の内部品質を詳細に評価するために開発したリニアアレイプローブを用いた薄板内部微小欠陥のオンライン検出技術について述べる。従来は薄板製品の品質保証手段として板波探傷や漏洩磁束探傷が用いられていた。しかし、板波探傷には欠陥検出能がきわめて低い問題点、漏洩磁束探傷には有害欠陥の微小化により検出能不足に陥っている問題点、誤検出が多い問題点、および冷間圧延後の鋼板にしか適用できないため、内部品質情報を製造へ迅速にフィードバックできない問題点があった。また、欠陥検出能向上に有効と考えられる超音波点集束ビームを用いた探傷方法や超音波フェイズドアレイを用いる方法もそれぞれ解決困難な問題を有し、実用には程遠かった。このような状況に鑑み、スラブ製造からさほど時間遅れなく内部品質評価が可能な対象として熱間圧延直後の鋼板を選び、リニアアレイプローブを、鋼板を挟

んで向かい合わせて配置し、前方に反射する欠陥反射波を検出する新しい欠陥検出方法を開発し、これとパラレル信号処理とを組み合わせ、走行する鋼板の全長・全断面にわたり微小欠陥を検出可能な探傷装置を開発・実用化した。上記欠陥検出法は、ラインフォーカスビームを用いているにもかかわらず、ポイントフォーカスビームを用いた集束ビーム法と同等の高い欠陥検出能を有しており、開発した探傷装置を用いて体積  $5 \times 10^{-5} \text{mm}^3$  の微小な介在物欠陥をオンラインで約 10dB の S/N にて検出できることが確認された。さらに、探傷装置からの介在物欠陥情報を欠陥発生源である製鋼工程へ迅速にフィードバック可能な情報システムが構築され、製鋼操業条件の改良を行なわれた結果、ユーザーで発見される有害欠陥の数が激減し、大きな品質高度化を達成することができた。

第4章では、微小欠陥のさらなる検出能向上および高速検査を目的とした高周波振動子アレイを用いたパラレル受波ニードルビーム技術について述べる。振動子アレイを用いる探傷技術として、超音波ビームの電子的な集束法と電子的送受波素子切り替え（電子走査）とを組み合わせた電子スキャン法が実用されているが、この方法はビーム集束域以外では欠陥検出能が大きく低下する問題や、電子走査に一定の時間（超音波送受波周期の数十倍以上）がかかる問題を有しているため、鉄鋼製品のような大きな被検体の高速検査には適していなかった。この問題を改善のため、Dynamic Depth Focusing (DDF)や「ボリュームフォーカシング」と称される技術が提案されているが、検査高速化には不十分な性能であった。そこで、1回の超音波送受波周期で一断面全体を検査可能な技術として、振動子アレイ全素子から同時に超音波を送波し、きずエコーを焦点を連続化させた受波ビームをパラレル形成して受波する技術を開発し、0.1msで一断面を検査可能な測定システムを製作した。周波数 50MHz の振動子アレイを測定システムに接続した実験の結果、直径  $20 \mu\text{m}$  の超微小きずを振動子アレイ配列方向に直交する方向への走査速度 1000mm/s の条件で検出できることが証明された。加えて、従来の点集束送受波ビーム形成と比べて、形成される集束領域が極めて長いことも判明した。これらから、開発した測定システムは超微小きずまでを対象とした高速検査に適していることが判明した。

第5章では、薄板を加工した製品のスポット溶接部の品質検査への取り組みを述べる。例えば、自動車は数千箇所のスポット溶接により車体が組み立てられるが、その溶接部の正確な品質評価手段は存在しなかった。過去に超音波垂直法や電磁気法を用いた非破壊検査装置が開発され、最近では超音波画像法を用いた非破壊検査装置も開発されているが、どの装置も溶接金属がなく、鋼板同士が弱い結合力で融着しているだけの圧接と呼ばれる不良を正確に検出することができない。そこで、振動子アレイから板波を送波し、透過した板波を別の振動子アレイを用いて検出して、その振幅と透過時間の空間的な広がりやプロファイルから、上記圧接を判別し、溶接金属の大きさ（ナゲット径）を測定する方法を考案して測定システムを開発した。開発測定システムを用いて、様々な条件で製作されたスポット溶接サンプルを用いた評価試験を行ったところ、ナゲット径を  $\pm 0.5\text{mm}$  の精度にて測定可能なこと、および、圧接を正確に判別できることが明らかになった。このように圧接検出の決め手となる技術を開発できたと結論される。

第6章では、本論文の技術の超音波計測における位置づけや具体的な数値による従来技術との

比較について述べることにより、本論文のまとめを行い、さらに本論文に示した技術開発から生み出されたシーズ技術を明確化し、その発展性や応用展開について示す。また、これからのものづくりやものづくりにおける非破壊検査技術開発の仕組みについて1つのモデルを提案する。

以上、鉄鋼製品製造における高能率化によるコストダウン、品質高度化、環境配慮製造、および安心安全などに有効な超音波非破壊検査技術の開発およびその結果について示した。今後、益々高度化するであろう鉄鋼製造プロセス分野や他の生産分野において、これら技術やその発展技術が活用されることを期待する。