

氏名	角間孝一			
学位の種類	博士(工学)			
学位記番号	博甲第 7937 号			
学位授与年月日	平成 28年 9月 23日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	システム情報工学研究科			
学位論文題目	超音波による角鋼片内部の欠陥可視化における計測コストの低減に関する研究			
主査	筑波大学 教授	工学博士	水谷孝一	
副査	筑波大学 教授	工学博士	藪野浩司	
副査	筑波大学 教授	工学博士	京藤敏達	
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻尚斗	
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	海老原 格	
副査	筑波大学 助教	博士(工学)	善甫啓一	

## 論文の要旨

この論文の目的は、鋼板や H 形鋼などの鉄鋼製品を製造する過程において製鉄所内で製造される中間製品である角鋼片の内部欠陥を超音波による可視化法について述べたものである。縦波超音波の伝搬時間 (TOF : time-of-flight) を用いる超音波計算機トモグラフィー (CT : computerized tomography) 法を基として、長時間必要とされる計測コストの低減を図ることにある。この目的を達成するため、直径数 mm の欠陥 (ピンホールやブローホール) を含む 100 mm 角のビレット内部の可視化シミュレーション、および、試験片を用いる可視化実験が行われている。本研究では、欠陥像に関連するパラメータ間の関係性が明らかにされ、球状欠陥の近傍領域の可視化から超音波トランスデューサアレイの走査間隔の最適化が成され、時間反転波を利用することによる超音波トランスデューサ間の送受信回数の低減が図られている。論文は全 5 章で構成されており、概要は次に示す通りである。

第 1 章では、本論文の背景として、鉄鋼業における連続鋳造の重要性が示され、連続鋳造の一次製品である角鋼片の種類、角鋼片内部に生じる欠陥の種類がまとめられている。また、角鋼片の内部欠陥が鉄鋼製品に与える再生産コストの問題、最終製品に与える故障・事故リスクの問題を挙げ、角鋼片の内部欠陥の非破壊検査の必要性が示されている。角鋼片の内部欠陥の非破壊検査に用いられる超音波探傷試験に関して、現行利用されている超音波パルスエコー法、および、近年提案された TOF を用いる超音波 CT 法の特徴が示され、後者が同時送信による計測高速化・形状ひずみに対する対応・高減衰角鋼片に対する対応が成されている等、発展してきている背景が述べられている。TOF を用いる超音波 CT 法において、トランスデューサアレイの走査間隔の最適化、トランスデューサ間の送受

(博甲)

信回数の少数化を図る必要があることが示され、本研究の目的である計測コストの低減に対する動機付けがなされている。

第2章では、TOFを用いる超音波CT法の原理、シミュレーションにおいて用いる波動伝搬の計算手法が示され、2次元の波動伝搬シミュレーションを用いて、欠陥像に関連するパラメータ間の関係性が明らかにされている。シミュレーションにおいては、欠陥径・送信信号の中心周波数を変えた波動伝搬計算が行われ、各条件における可視化像が出力された。可視化像の比較から、欠陥径に対して可視化像における疑似音速の低下量が、送信信号の中心周波数に対して可視化像における欠陥像の幅が対応していることが示されている。関係を持つパラメータ間の対応を表すグラフが示され、中心周波数と縦波音速に依存する角鋼片内部の縦波波長が、欠陥像の幅と線形関係を持ち、欠陥径が、疑似音速の変動量と線形関係を持つことが明らかにされている。また、これら線形関係より、疑似音速の低下量から欠陥径を逆推定できること、および、中心周波数と材料の音速から欠陥像の幅を任意に定められると述べられている。

第3章では、欠陥近傍の断面における可視化像を実験とシミュレーションにより出力し、球状欠陥近傍の複数の断面における可視化シミュレーションから、トランスデューサアレイの走査間隔の最適化を図っている。TOFを用いる超音波CT法でこれまで検討されてこなかった、試験片に空いている深穴の先端近傍の可視化実験、および、3次元の波動伝搬計算による、深穴先端近傍と球状欠陥近傍の可視化シミュレーションが行われ、欠陥を通らない断面の可視化像に欠陥像が写ることを実証している。球状欠陥と検査断面の距離を変えた可視化結果から、3次元2値化像が生成され、球状欠陥が球状に可視化されることが示されている。また、球状欠陥を可視化した際に、欠陥を通る検査断面の可視化像に写る欠陥像の幅と、欠陥を通る縦断面の可視化像に写る欠陥像の幅が等しいことが示されている。検査断面から離れた欠陥の影響を捉えられる最大距離として、トランスデューサアレイの走査間隔の最適化が図られ、走査間隔の最適値を欠陥像の幅で定められることを明らかにしている。さらに第2章の結果も踏まえ、中心周波数と縦波音速に依存する角鋼片内部の縦波波長から欠陥像の幅を決定し、決定された欠陥像の幅から、計測面の走査間隔の最適値を決定できることを明らかにしている。

第4章では、欠陥情報である欠陥からの散乱波に関する考察がなされ、時間反転波を利用するメリット、および、利用方法が示されている。受信信号の包絡線に着目した信号処理の方法が考案されており、受信信号に含まれている欠陥からの散乱波の強調から、強調された信号の時間反転波の計算機上における伝搬、エネルギー分布の生成と合成による可視化像の取得までの原理が示されている。また、複数の深穴が空けられた試験片を用いて、上記手法の実証、および、他手法との比較のための実験が行われている。実験データを用いて得られた可視化像は、閾値に対する適合率・再現率・F値により定量的に評価され、上記手法が、時間反転波を利用する基本的な手法に比べ優れていることが示されている。また、送波器数・受波器数を変えた可視化像の比較から、送波器数・受波器数ともに少数化できることが示されている。減衰のある試験片を用いた実験結果から、減衰材においても欠陥を可視化できることが示されている。送受波器数・送受信回数・送信回数に関して、TOFを用いる超音波CT法と時間反転波を利用する可視化手法の比較が行われ、前者から後者に向けて、送受波器数は200個から170個、送受信回数は15,000回から3,000回、送信回数は150回から20回に少数化されている。送信回数は1断面あたりの計測時間を左右するパラメータであり、計測時間は1/10以

(博甲)

下に低減され、計測は 10 倍以上速く行えるようになったことを意味している。すなわち、送受信に関する計測コストの大幅な低減が図られたことを示している。

第 5 章では、得られた成果をまとめるとともに、本研究において達成された計測コストの低減が与える影響について、述べられている。

## 審 査 の 要 旨

### 【批評】

本論文は、現行の角鋼片の非破壊検査手法の代替手法として提案されている、TOF を用いる超音波 CT 法における計測コストの問題の解決を図ったものである。計測コストは、角鋼片の非破壊検査において重要となる検査時間を左右するものであり、計測コストの更なる低減を図る必要があった。本研究によるトランスデューサレイの走査間隔の最適化により、断面間に存在しうる欠陥を見落とさない範囲で最大の走査間隔を、送信信号と材料のパラメータから決定できるようになっている。また、本研究で構築された時間反転波を利用する可視化手法では、送信回数や送受信回数等の計測コストが TOF を用いる超音波 CT 法に比べて大幅に低減され、その上で、同程度の欠陥可視化を行うことが可能となっている。本手法における計測コストの低減は、現行の手法に代わる手法の実用化に向けた大きな進歩だと言える。以上の事より、本研究の成果は、鉄鋼材料製造分野のみならず、高分子材料、精密光学材料、食品等の製造分野の発展への寄与が期待できることから高く評価できる。

### 【最終試験の結果】

平成 28 年 7 月 25 日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士（工学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。