

(第3号様式)(Form No. 3)

# 学位論文要旨 Dissertation Summary

氏名 (Name) 溝田 裕久

論文名: 時間反転法の超音波非破壊イメージングへの応用  
(Dissertation Title) Application of time-reversal method to ultrasonic nondestructive imaging

構造部材内部の欠陥諸量を推定するために、超音波を用いた非破壊検査が行われている。例えば、繊維強化樹脂は積層による異方性の発現によって超音波が屈曲する。また、溶接金属では粗大結晶粒によって超音波が散乱するため、現状の検査では、この屈曲と散乱が欠陥の評価精度を大きく低下させることが問題である。本研究は、不均質で異方性を有する構造部材を対象として、数値解析を援用した時間反転法に基づく欠陥映像化手法を提案し、計測実験によってこれを検証したものである。本論文は7章から構成されており、以下に各々の内容をまとめる。

## 第1章「序論」

本研究の背景と研究に至った目的を明らかにしている。また、非均質・異方性材料に対して、時間反転法を導入する理由を述べ、非破壊検査手法として確立するには欠陥の映像化の必要があることから、数値解析と組み合わせることの必要性和提案手法の新規性を述べている。

## 第2章「逆伝搬解析法による欠陥画像化の原理」

時間反転波が散乱体(欠陥)に集束することを理論的に定式化している。はじめに欠陥に対して入射波を送信し、アレイ状に配置した超音波センサで欠陥から散乱波を受信する。それを時間反転させてアレイセンサから再入射する(逆伝搬させる)。このとき、時間の経過とともに散乱波が欠陥に集束するが、構造部材中で集束状況が可視できないことが問題である。本研究では、数値解析の中で仮想的に逆伝搬を実現し、各時間の波動場を可視化することで欠陥像が把握できることを示している。さらに入射波との相関処理を提案し、この処理によって全時間の可視化結果を基に欠陥像を一意に定めることができることを述べている。

### 第3章「凝固材の数値モデル」

本論文で対象とする熔融金属の凝固材の数値モデルの作成方法を述べている。本研究では、2種類のモデルを作成している。1つは、金属結晶粒の分布形態を平均化した均質異方性モデルであり、これをマクロモデルと呼ぶ。マクロモデルでは、Wavefield計測や電磁超音波共鳴法によって弾性定数を決定する。もう一つは、金属結晶粒の形状や大きさをイメージベースモデリングによって取り込んだモデルであり、メゾモデルと呼んでいる。メゾモデルでは、電子線後方散乱回折によって結晶粒分布を計測し、マクロモデルで求めた弾性定数を元に結晶粒毎の弾性定数を決定している。

### 第4章「波動伝搬解析」

逆伝搬解析で用いる数値解析ツールとして陽的有限要素法を採用し、そのアルゴリズムについて述べている。ここでは、ボクセル要素を採用し、イメージベース処理に対応できるように有限要素法を独自にコーディングしている。また、計算を高速実行するために、陽的に解を更新しており、その際の解の安定条件についても示している。

### 第5章「数値シミュレーションによる検証」

前章までに示した時間反転法に基づく欠陥映像化をシミュレーションによって検証している。ここでは、実際のアレイ超音波検査を想定し、ウェッジを介して欠陥イメージングを行うシミュレーションを実施している。スリット状欠陥からの散乱波を受信し、それを時間反転して逆伝搬させた結果、欠陥に超音波が集束していくのを検証している。さらに、入射波との相関処理についてもシミュレーションを行い、スリット欠陥の位置と高さが映像化されることを明らかにした。

### 第6章「計測波形を用いた検証」

実検査を模擬した実験系で、本映像化法を検証している。被検体として、金属粒が一方方向に成長したステンレス鋼(SUS316L)に人工欠陥(スリット)を作成した。このスリットからの散乱波をアレイセンサで計測し、これを時間反転させたものを有限要素解析で逆伝搬させる。マクロモデルとメゾモデルで検証を行った結果、マクロモデルの方が、欠陥の再構成精度が高いことが明らかとなった。メゾモデルでは、局所的な結晶粒分布で超音波の伝搬面全体をモデル化したことと、使用した弾性定数の推定精度の低さのため、映像化が良好ではなかったと考える。マクロモデルは、メゾモデルよりも広域を均質化してモデル化したこと、さらには、今回用いた一方方向凝固材において金属粒の多重散乱による影響が少なかったことから、精度良く映像化が出来たと考察している。

### 第7章「結論」

各章の結果をまとめて本研究を総括し、今後の展望について述べている。