

氏名	よし かわ ひとし 吉 川 仁
学位の種類	博士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2316 号
学位授与の日付	平成 15 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科環境地球工学専攻
学位論文題目	時間域境界積分方程式法の超音波-レーザ非破壊評価への適用に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教授 西村直志 教授 松本 勝 教授 田村 武

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、3次元時間域動弾性問題の境界積分方程式法に種々の改良を加えて実用性を高めた上で、レーザ速度計測を用いた超音波計測法と組み合わせる事により、構造物中の欠陥検出と、その形状決定のための新しい非破壊評価法を提案しようとするものである。

序章である第1章に続き、第2章では3次元時間域動弾性問題の境界積分方程式法における直接積分の方法が示されている。従来の研究でもとり上げられてきた題材ではあるが、種々の極限に関する詳細な検討が行なわれ、最終結果も明確に示されている点で、従来の研究と異なっている。一方、得られたコードは十分に高精度ではあるが、最終目的である超音波非破壊評価に関係する大規模問題に適用するには、解析効率が不十分である事が指摘され、本論文の以下の展開に対するモチベーションを提供している。

第3章は前章で得られたコードの解析効率の向上を、時間に関する畳み込み積分のアルゴリズムの改良の観点から検討したものである。特に、全ての積分計算結果を記憶できない現実的な計算機環境において、いかに積分の再計算を防ぐかが追求されている。まず、従来法において離散化された積分方程式に現れる既知項を時々刻々評価していた点を改め、積分評価が行なわれた時点で既知となっている履歴の影響を事前評価する事で、積分の再計算の回数を大幅に減少し得る事が示されている。更に、時間形状関数が区分線形のと看、記憶される積分計算結果の時間関数を素朴に形状関数とするのではなく、線形関数とする事によって、計算時間が従来の1/3程度となる事が示されている。更に、これらの改良を実装し、数値実験を行なう事により、素朴な算法に比べて計算時間を1/10以下に短縮する事が可能である事を数値的に示している。

第4章では前章のアルゴリズムの並列化が検討され、分散メモリ型並列計算機におけるマスター-スレーブ方式の実装が行なわれている。まず、有限要素法や差分法とは異なり、領域分割に基づく並列化が必須ではない事、静的問題や周波数領域の境界積分方程式法とは異なって、単に同程度の数の境界要素をCPUに割り当てただけでは良好なロードバランスを実現する事ができない事などが指摘されている。更に、境界積分方程式法では機械的なサイクリック分割が有効である事が示され、良好なロードバランスが実現できる事が示されている。次に提案されたアルゴリズムのMPIを用いた実装が行なわれ、良好なスケラビリティが得られる事が示されている。特に、分散メモリ環境では使用可能なメモリが増えると記憶可能な計算結果の量が増えるため、スーパーリニアなスピードアップが観測される事が指摘されている。こうして、前章のアルゴリズム改良と並列計算を併用する事により、超音波非破壊検査の実問題に現れる空間自由度数万円以上の大規模な3次元時間域動弾性問題が十分に現実的な計算時間で解ける事が結論されている。

第5章は本論文の核心部であり、前章までで得られた解析手法とレーザ速度計測を用いた超音波計測技術を組み合わせた非破壊評価法が述べられている。この非破壊評価法の特徴は超音波トランスデューサから発生し、欠陥で散乱された超音波を、レーザ計測によって速度波形として少数の点で計測した上で、逆解析を用いて欠陥の幾何学的情報を同定しようとする点にある。本章では、まず、トランスデューサから発生する超音波の波形は、既知の電気パルスで駆動したとしても不明で

ある事に注目し、この波形を決定する逆問題を解いている。具体的には、トランスデューサの作用を等価力としてモデル化し、その挙動をレーザ速度計測結果と Tikhonov の方法論によって同定した上で、境界積分方程式を用いてトランスデューサ出力を求めている。その際、等価力の空間分布は比較的一様であり、低次の近似が有効である事、レーザ速度計測を行なう点の分布は、レーザ波によって運ばれる情報をできるだけ多く受信する事を意識して決定されるべきである事などが示されている。次に、こうして同定されたトランスデューサの特性と、前 2 章において改良された境界積分法定式法、及び、放電加工によって作成した人工欠陥を有するアルミ合金製の供試体を用いて得られた実データを使って、実験と解析の比較を行ない、人工欠陥からの散乱波の実測値と計算値がよく一致する事が示されている。最後に、非線形計画法を用いたパラメータ推定法により、人工欠陥を用いて得た実データのインバージョンを行ない、空洞、ないしは亀裂状の形状パラメータが良好な精度で復元できる事を示している。

最後に第 6 章では全体を通した結論が述べられているとともに、今後の研究課題が記されている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、3次元時間域動弾性問題の境界積分方程式法の種々の改良と、構造物中の欠陥検出のためのレーザ・超音波非破壊評価法への応用に関する研究成果をまとめたものである。得られた主な結果は次の通りである。

(1) 3次元時間域弾性波動問題の境界積分方程式は、時間に関する畳み込み積分のアルゴリズムの改良によって、その解析効率を大幅に改善し得る事を示した。特に、現実的な計算機環境において、離散化された積分方程式に現れる既知項を事前評価する事で、積分の再計算の回数を大幅に減らし得る事、及び、時間積分に現れる時間関数を合理的に選択する事によって、計算効率を向上し得る事を示した。また、これらの改良をコード化し、実用的な弾性波動問題において計算時間を従来法の1/10以下に短縮する事が可能である事を示した。

(2) 3次元時間域弾性波動問題の改良された境界積分方程式法を分散メモリ型並列計算機を想定してマスター-スレーブ方式でコード化し、良好なロードバランスとスピードアップを得た。

(3) 超音波トランスデューサから発生して、未知欠陥で散乱された超音波を少数の測定点でレーザ速度計により計測し、得られた波形データから未知欠陥の幾何情報を決定する非破壊評価法を考察した。まず、超音波トランスデューサから発生した超音波の波形は一般には未知である事に注目し、これをトランスデューサの作用の等価力によるモデル化と、レーザ計測によって得られた速度波形のインバージョンによって決定する事が可能である事を示した。また、その同定精度が良好である事を実験と数値結果の比較により実証した。

(4) 未知の欠陥によって散乱された超音波の波形をレーザ速度計により計測し、得られたデータから未知欠陥の幾何形状を決定する逆問題はパラメータ推定の問題に帰着される。この問題の実データを用いた解析は、従来の境界積分方程式法では膨大な計算時間を要するが、改良された境界積分方程式を用いると実際の計算時間で実行可能である事が結論された。

以上要するに、本論文は、3次元時間域動弾性問題の境界積分方程式法において時間積分アルゴリズムの改良と並列化を行ない、レーザ速度計測と組み合わせる事によって構造物中の欠陥を検出・決定する実用的な超音波非破壊評価法が得られる事を示したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成15年7月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認められた。