

氏 名	古 川 敬
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 材料加工学専攻
学 位 論 文 題 目	力線の概念を用いた超音波探傷のシミュレーション
指 導 教 官	東北大学教授 伊達 和博
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 伊達 和博 東北大学教授 桑名 武 東北大学教授 進藤 裕英 東北大学教授 坂 真澄

論 文 内 容 要 旨

工業材料・工業製品の機械的強度を保証する上で、非破壊試験は重要な役割を持っており、従来より放射線透過試験、超音波探傷試験、磁粉探傷試験、電磁誘導試験、浸透探傷試験などの方法が適用されてきている。

この中で、超音波探傷試験は、超音波が液体や固体、特に、金属や樹脂中をよく伝わり、しかも無公害で、試験の手順が比較的簡便であるために広く用いられている方法である。

超音波探傷試験の原理は、物体内を伝搬する超音波の特性が光に似た点があり、均質な物体内では直進するが、異なった物体との境界面では反射や屈折などの現象が現れることを利用し、物体内を伝搬してきた超音波パルス（エコーと呼ぶ）を解析して物体内部の欠陥の存在と位置などを調べる方法である。

しかしながら、固体内を伝搬する超音波パルスの挙動は光の伝搬とは異なったところもあり、単純ではないことが知られている。これは、超音波の場合には反射の際にモード変換を伴うためである。

このような超音波のモード変換は、特に反射面が曲面形状を有する場合に、複雑に繰り返され、この影響で超音波の挙動が非常に複雑になることが知られている。

このため、曲面を有する試験体を超音波探傷する際に、欠陥とは関係のない妨害エコーが生じ、実際の探傷においてエコーを解析する上での大きな障害となっている。

以上のような背景から、任意の形状に対する超音波探傷の探傷図形をシミュレーションする研究

は、最適な探傷条件の検討や、欠陥エコーと妨害エコーの識別といった欠陥検出の信頼性の向上のためばかりでなく、欠陥の種類、位置、大きさ、形状などの欠陥の定量的な評価を行う上で不可欠になっている。

そのため従来より、超音波可視化法を用いて、試験片内を伝搬する超音波やその反射挙動を直接観察する研究が行われ、複雑な形状を有する試験体中の超音波の伝搬挙動が明らかにされつつある。

一方、実験的手法とは別に、コンピュータ・シミュレーションを用いた解析も行われており、有限要素モデルや、レイ・トレーシングモデルなどが、現在提案されている。

有限要素モデルは、波動方程式を解くことで超音波の伝搬を計算する手法で、基本的な超音波の伝搬挙動の解析や、欠陥からの散乱波の解析へ適用されている。しかしながら、超音波探傷のシミュレーションへ適用するためには、超音波パルスの送・受信のモデル化や、複雑形状のモデル化などといった多くの解決すべき問題が残っており、実際の探傷図形まで正確にシミュレーションできるまでには至っていないのが現状である。

レイ・トレーシングモデルは、超音波の伝搬を光線の伝搬のように幾何的に表すモデルで、反射・屈折といった伝搬の挙動を比較的簡便に表すことができる特徴がある。そのため、超音波探傷のシミュレーションのモデルとして有効であろうとの考えから、現在、多くの研究や開発プロジェクトが進行中である。

しかし、いずれの研究でも、反射・屈折の際のモード変換を十分考慮するには至っていない。これは、モード変換という現象は、レイ・トレーシングモデルでは、一本の入射波が反射・屈折ごとに枝分かれして、線の数が無数に増えて行く処理を行う必要があり、このような一筆書きで描くことができない処理は、コンピュータの最も苦手とするアルゴリズムの一つであるためである。

そのほかに、探触子から出る超音波パルスや受信をどの様にモデル化するか、など多くの要素が未解決となっている。そのため、実際の超音波探傷のシミュレーションへのモデルとしての有効性が多数報告されているにも関わらず、まだ最終的な探傷図形のシミュレーションを行うまでには至っていないのが現状である。

そこで本論文では、超音波パルスの発生と、反射や屈折およびモード変換といった超音波の伝搬、そして受信の各現象をモデル化し、実際の超音波探傷試験の探傷図形までシミュレーションする手法を確立することを目的として研究を行ったもので、全編6章よりなる。以下に得られた結果を要約して示す。

第1章では、本研究の背景と目的について述べた。

第2章「超音波可視化法を用いた超音波パルスの発生と伝搬の観察」では、超音波可視化法を用いて、探触子から発生する超音波パルスの挙動や、反射や屈折およびモード変換の挙動の観察と解析を行った結果について述べた。

ここでは、これまでの研究では検討されていなかった、探触子から発生する超音波パルスや、反射や屈折の際のモード変換等のモデル化を検討するため、光弾性画像合成法の原理に基づく超音波可視化装置を用いて、実際に探触子から出る超音波パルスの挙動や、界面で反射あるいは屈折する超音波の様子を詳細に解析した。

この結果、探触子から発生する超音波パルスの挙動は、中心付近の音圧が高くなっていると同時に、波面形状が扇形をしており、この扇形の曲率の中心は、超音波パルスの伝搬に伴って中心位置が変化しないことが分かった。斜角探触子、水浸探触子、線集束探触子など多くの探触子から出る超音波パルスが、このように一点を中心とした扇形に波面が形成されることを、可視化実験から確認した。

次に、反射面が曲面形状を有する試験片内を伝搬する超音波パルスを、超音波可視化法を用いて観察した結果、超音波の伝搬挙動は非常に複雑になることを確認した。これより、超音波探傷をシミュレーションするため、超音波の伝搬をモデル化する際に、モード変換をモデル化することは非常に重要であることを示した。

第3章「力線概念を用いた超音波探傷のモデル化」では、第2章での結果を基に、超音波の発生と伝搬および受信のモデル化を行った結果について述べた。

ここでは第2章で観察した、超音波パルスの発生の様子をモデル化するため、従来のレイ・トレーシングモデルに、力線概念を加えた「力線モデル」を新たに考案した。

本モデルでは、可視化実験で解析した結果を基に、超音波ビームをレイ・トレーシングモデルの線の束で表し、超音波の音場を力線概念を用いて線の密度で表した。すなわち、超音波の伝搬方向を線の向きで表し、音圧を線の密度に対応させた。

また、反射や屈折の際に音圧が変化するが、この音圧変化の情報を各々の線に含ませて表現するようにした。すなわち、線の向きが超音波の伝搬方向を、各々の線の持つ音圧と線の密度で、超音波の音圧を表することで、超音波の音場をモデル化したのが「力線モデル」である。

超音波の伝搬は、レイ・トレーシングモデルを基にし、従来法では考慮されていなかった、反射・屈折の際のモード変換のモデル化を検討した。

レイ・トレーシングモデルによって超音波のモード変換をモデル化するためには、反射や屈折ごとに線が分岐して、一本の線が無数に増加することを処理する必要がある。しかも、反射ごとに必ず分岐が起こるわけではなく、入射角の条件によってはモード変換した波が発生しないような非常に複雑な処理となる。

ここでは、反射や屈折を基本的には、二分木あるいは三分木、四分木のアルゴリズムと考え、再帰アルゴリズムを導入することでモード変換をモデル化することを検討した。このとき、入射波の条件によってはモード変換した波が存在しない場合を、再帰呼び出しの特別な脱出条件の一つと考えて、反射や屈折の際のモード変換をモデル化した。

次に、受信音圧のモデル化を検討した。探触子に戻った超音波を受信波とみなして、受信波の伝搬時間と音圧および受信の指向性から探傷図形を算出するものとした。

これらのモデル化を基に、超音波パルスの伝搬挙動や、探傷図形を予測するシミュレーション法を検討した。そして、探触子から出る超音波パルスの実際の指向性と、試験片の形状データを与えるだけで、超音波パルスの伝搬挙動や、探傷図形、エコーの伝搬経路が予測可能なシミュレーションコードを新たに開発した。

第4章「斜角探傷のシミュレーションへの適用」は、第3章で考案した力線概念を用いた超音

波探傷のシミュレーションを、斜角探傷へ適用した結果について述べたものである。

斜角探傷法は、主に溶接部の超音波探傷に用いられる手法である。溶接部は、余盛りなどの影響で、超音波の伝搬挙動が非常に複雑になり、そのため、溶接部の超音波探傷をシミュレーションすることは、実用上非常に重要なことである。

ここでは、突合せ溶接部を模擬したガラス試験片を用い、余盛り部に開口したスリット欠陥からの超音波パルスの反射の挙動や、探傷図形をシミュレーションした。これらのシミュレーション結果を、実際の探傷図形、および可視化法の結果と比較したところ、いずれも実験結果とよく一致していた。これより、考案した「力線モデル」が、斜角探傷のシミュレーションに有効であることを示した。

第5章「水浸探傷のシミュレーションへの適用」では、第3章で考案した力線概念を用いた超音波探傷のシミュレーションの有効性を検討するため、実用上多くの問題が存在する管材の探傷へ適用した結果を述べた。

水浸法では、試験片の界面へ入射する超音波パルスの挙動を、あらかじめ十分に把握しておくことが重要である。したがって、界面へ入射する超音波の挙動をシミュレーションし、この結果を可視化実験の結果と比較し、考案した「力線モデル」の有効性を確認した。

次に、鋼管を模擬したガラス試験片を用い、スリット欠陥から反射した超音波パルスの伝搬挙動や、探傷図形をシミュレーションした。この結果を実際の超音波探傷試験結果および可視化実験の結果と比較したところ、これらはいずれも実験結果とよく一致していた。

続いて、実際の厚肉小径鋼管およびステンレス管の超音波探傷シミュレーションへ適用し、シミュレーション結果と実際の超音波探傷試験結果とを比較したところ十分な精度でシミュレーションが可能であることを示した。

第6章「総括」では、本研究の結論を示した。

審査結果の要旨

各種の素材・機器・構造物の健全性を保証するために、超音波探傷試験は欠かせない重要なものである。超音波探傷試験は、試験体内に超音波パルスを放射し、その反射波を解析することで、欠陥の有無や欠陥形状、材料組織などを評価しようとするものである。しかし、これまでは任意形状物体に超音波パルスを入射させた時の、試験体内での超音波パルスの伝搬挙動をシミュレーションすることが出来なかったため、探傷結果の信頼性を向上させる上での大きな妨げになっていた。

本論文は、固体内超音波可視化法を用いて、固体内を伝搬する超音波を詳細に観察・解析することで、伝搬挙動をモデル化し、それに基づいて任意形状物体に対する超音波探傷のシミュレーション法の研究を行なった成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は緒論であり、研究の背景と目的を述べている。

第2章では、超音波可視化法を用いて、超音波探触子から発生する超音波パルスの挙動や、反射、屈折、モード変換の挙動の観察結果と、それを定量的に解析した結果について示し、シミュレーションのモデル化に必要な挙動をまとめている。

第3章では、第2章の結果をもとに作成した超音波探傷のシミュレーションモデルについて述べている。モデル化は、従来コンピュータ・グラフィックスで用いられるレイ・トレーシング法に力線概念を加えた、独自の手法を考案し、超音波の伝搬方向とその音圧に、反射や屈折の際のモード変換の影響を取り入れることに成功している。これは、重要な成果である。

第4章では、このモデルを溶接部の斜角探傷試験に適用し、シミュレーション結果と超音波の可視化試験を比較することで、その有効性を確かめたものである。

第5章では、管材の水浸探傷試験に適用したもので、ガラス試験片と実際の鋼試験片の両者で、可視化試験と超音波探傷試験を行ない、その有効性を確認した。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、可視化法を用いて固体内超音波パルスの伝搬挙動をモデル化し、その結果に基づいて超音波探傷のシミュレーション法を考案したもので、材料加工学および非破壊評価工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。