

学 位 論 文 題 名

空間回路網法による固体内弾性波動の時間応答解析に関する研究

学位論文内容の要旨

固体の弾性振動・波動は超音波探傷やメカニカルフィルタなどとして盛んに応用の研究が行なわれている。さらに電磁気系と結び付いた圧電媒質や磁気ひずみ媒質は弾性波を発生するトランスジューサとして不可欠のものであり、最近、弾性表面波フィルタなどの電子デバイスとしての応用が数多く行なわれている。

固体の弾性波を利用したものには時間応答解析の重要な場合がある。例えば、超音波診断や超音波探傷など、計測を目的とした場合、パルス波を用いることが多いため波動の伝播特性や波形の変化を時間を追って把握する必要がある。また電子デバイスである超音波遅延線は出力波形のひずみが問題となるため、時間応答解析によって現象をとらえることが重要となる。

ところで固体の形状が1次元か単純なものでない限り、現在のところ弾性波を解析的に扱うのは難しい。従って、複雑な形状の固体の弾性波を解析するには数値解析が必要である。固体の弾性波の時間応答の数値解析法として古くは差分法が用いられ、最近では有限要素法や境界要素法も用いられる。現在行なわれている数値解析法はそれぞれに有効な手法であるが、複雑な境界に対応できない（差分法）、高度な数学的知識が必要（境界要素法）、大次元のマトリクスを解かなければならない（有限、境界要素法）などの不都合も有している。さらにいずれの手法も系に成立する偏微分方程式をそのまま数値的に解く手法であるため物理的見通しが悪い。

本論文は固体の弾性波動の時間応答数値解析法として空間回路網法（SNM）の提案とその妥当性を論じたものである。SNMはあらゆる形状の固体の時間応答を解析できる数値解法であるとともに等価回路を用いるため物理的見通しがよいという特徴を持っている。

本論文は大きく2編に分かれている。第I編では固体の弾性波へのSNMの適用を検討している。第II編ではSNMを電磁気系と結合を持つ固体の弾性波（以下、結合波動と呼ぶ）へ適用している。

第I編第1章では2次元等方弾性体の弾性波に対するSNMの適用について述べている。ここでは弾性波にSNMを適用する上での取り扱いの基本事項が述べられている。

その概念は (1)同じ長さ、同じ特性の1次元線路と、それらの接続点(節点)に負荷した集中定数素子で、弾性波を等価回路表示する、(2)定式化はBergeron法によって行なう、の2点である。Bergeron法は(a)1次元線路は節点の電圧・電流を隣の節点の電圧・電流の1離散時間(線路の速度と長さで決まる)前の値で表現したBergeron表示式で表す。(b)各節点の集中定数素子の電圧・電流は台形積分近似で時間離散化する。そのときの離散時間をBergeron表示式と同じにする。(c)各節点のキルヒホッフの法則、の3つを連立させて定式化を行なうことにより1離散時間ごとの逐次計算が可能となる手法である。この章では、SNMを用いて2次元等方弾性体の解析的に扱える例題を計算し、その妥当性を確認している。

第1編第2章ではSNMを3次元等方弾性体に適用し、基本的な例題を使って妥当性を確認している。更に、SNMの本質は差分法であり、その誤差は時間的、空間的にその離散間隔の2乗のオーダーであることを確認している。

第1編第3章では等方弾性体の等価回路の相互容量の値および粒子速度節点に新たに負荷された相互誘導の値を適当に設定することにより、弾性体の異方性を表現できることを示している。また、その場合の物理定数と等価回路定数との関係を明確にし、集中定数素子に要求される条件を示した。更に、基本的な例題によってその妥当性を確認した。

第1編第4章では自由境界の設定の方法について詳しく検討している。その結果、容量の負荷された応力節点をそのまま短絡すると容量の効果がなくなり計算結果に不都合の生じることがわかった。従って(1)応力節点の容量を取り去り、代わりに粒子速度節点にインダクタンスを負荷して、先の応力節点を短絡するか、(2)粒子速度節点のみを境界上に配置して境界条件を満足させる、2通りの方法が適切であることを示した。

第1編第5章では流体と固体が混在している場合のSNMによる解析について検討している。まず、流体の波動を固体と同じ形で等価回路表示する。次に2つの媒質の境界上では、その場所の連続条件に見合った節点同士をつなぎ合わせ、更にせんだん応力節点を短絡することで境界条件を満足させる。以上の取扱いの妥当性を基本的な例題を用いて確認した。

第II編第1章では1次元圧電トランスジューサにSNMを適用した。そして基本的例題により妥当性を確認した。ところで、1次元トランスジューサの時間応答解析は従来から、フーリエ変換法やZ変換法などにより行なわれている。そこで、それらの手法と比較して次の点で本手法の有効性が確認された。(1)等価回路解析手法を用いるので等価回路の持つ現象の把握しやすさをそのまま残している。(2)定式化や計算のアルゴリズムが簡単であ

る。(3)回路内の全ての変数が一度に計算でき繰り返し計算の手間が省ける。(4)振動子が不均一な場合にも適用が可能である。

第Ⅱ編第2章では2次元以上の結合波動の基本的な例として面内振動をする圧電トランジスタ平板を取り上げ、SNMの適用を検討した。すなわち平面応力場の等価回路に電気的性質を表現する回路網を重ね合わせ、その間に結合を持たせた圧電トランジスタ平板の等価回路を提案し、Bergeron法による定式化を行なった。そして基本的な問題に適用し、その妥当性を確認した。

以上、本論文では、SNMを固体の弾性波へ適用し、その妥当性を確認した。その結果から、SNMの特徴を次のようにまとめることができる。(1)多くの場合、離散点ごと離散時間ごとに定式化でき、マトリクス計算を必要としない。(2)等価回路表示を利用するため、(a)微分式を直接扱うよりも現象をとらえやすく、(b)等価回路解析の知識をそのまま活用でき、(c)異なる媒質(流体、固体、圧電体など)の混在した系でも、おのおのの等価回路がわかれば、それらを境界条件を考慮して簡単に結合できる。しかも定式化は回路解析手法を用いるので微分方程式の違いを意識する必要がない。

学 位 論 文 審 査 の 要 旨

主 査 教 授 深 井 一 郎

副 査 教 授 小 柴 正 則

副 査 教 授 山 田 元

副 査 助 教 授 吉 田 則 信

近年、固体の弾性波は探傷、医療診断などの計測や弾性表面波フィルタなどの電子デバイスとして盛んに利用されている。パルス状の弾性波を利用する超音波探傷や、信号のひずみが問題となる超音波遅延線では、波形の詳しい情報が必要であり、そのためには時間応答解析が重要となる。本論文は、固体の弾性波の時間応答解析に対して、空間回路網法(spatial network method : SNM)の適用を提案し、その妥当性と有効性を検討したものであり、2編にわかれている。第I編では、固体の弾性波動へのSNMの適用について、基礎的検討を行っており、第II編では、圧電媒質のような電磁気系と結合した弾性波(以下結合波動と呼ぶ)のSNMによる取り扱いについて考察している。

第I編第1章では、弾性波にSNMを適用する上での取り扱いの基本事項が示されている。その概念は次の2点に集約される。(1)同じ長さ、同じ特性の1次元線路により立方(正方)格子網を構成することで、対象とする弾性波を等価回路表示する。そして、それらの格子点(節点)に負荷した集中定数素子で、固体の弾性定数などの媒質条件を調整する。(2)時間応答解析の定式化には、Bergeron法を適用する。

この章では、弾性波問題において最も基本的な、2次元等方弾性体を取り上げ、SNMを適用して、その妥当性を確認している。その結果、SNMは次のような特徴を持つことが明らかにされている。(a)等価回路表示することにより、物理的見通しがよくなり、境界条件を含めた波動の空間離散化が容易となる。(b)Bergeron法の適用により、節点ごと、離散時間ごとの逐次計算が可能となり、大規模なマトリクス計算の必要がない。

第I編第2章では、SNMによって、3次元等方弾性体の弾性波を解析している。その結果、SNMは3次元の解析にも問題なく拡張できることが示されている。更に、SNMにおける計算誤差を明確にしている。すなわち、SNMの定式化は、空間的、時間的に自乗の誤差オーダーの中心差分による陽公式化に近いことが示されている。

第I編第3章では、節点に負荷した集中定数素子の値を適当に選ぶことにより、弾

性体の異方性を表現できることを示している。そして、その場合の物理定数と等価回路定数との関係を明確にしている。

第I編第4章では、境界条件にあわせて、節点を短絡、開放する場合について詳しく検討している。その結果、容量の負荷された節点をそのまま短絡すると、容量の効果がなくなり、計算結果に不都合の生じることが明らかにされている。従って、(1)節点の容量を取り去り、代わりに隣の節点にインダクタンスを負荷して、先の節点を短絡するか、(2)容量の負荷されていない節点のみを境界上に配置して、境界条件を満足させる2通りの方法が適切であることを示されている。

第I編第5章では、流体と固体が混在している場合の、SNMによる解析について検討している。その結果、SNMの特徴である回路図による視覚化のため、2つの媒質の結合が容易に行なわれることが示されている。更に、定式化が等価回路素子に対して行なわれるため、物理的に異なる弾性系の波動方程式の違いを意識しなくてすむ利点のあることが示されている。

第II編第1章では、1次元圧電トランスジューサにSNMを適用している。その結果、等価回路表示による視覚化の有効性と、Bergeron法による計算の高速性が改めて確認され、従来の解析法と比較して、有効性の高いことが示されている。

第II編第2章では、2次元以上の結合波動の基本的な例として、面内振動をする圧電セラミック平板を取り上げ、SNMの適用を検討している。すなわち、平面応力場の等価回路に、電気的性質を表現する回路網を重ね合わせ、その間に結合を持たせた圧電セラミック平板の等価回路を新しく提案し、Bergeron法による定式化を行なっている。その結果、結合波動に対しても、容易にSNMが適用できることが示されている。

これを要するに、本論文は、空間回路網法を固体の弾性波に適用することで、物理的見通しのよい、効率的な時間応答解析法を実現したもので、マイクロ波工学、計測工学など、弾性波動・振動を応用した工学の諸分野に寄与するところが大である。

よって、著者は工学博士の学位を授与される資格のあるものと認める。