

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2013

課題番号：21560253

研究課題名(和文) 差分法に基づくはりのインピーダンス整合制御

研究課題名(英文) Impedance matching control of beam based on finite difference approach

研究代表者

西郷 宗玄 (SAIGO, Muneharu)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：80357053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：差分制御則に基づくはりの境界近傍波動制御法の開発を行った。差分近似運動方程式から波動伝搬解を求め、境界節点方程式を内部節点方程式に一致させる条件より制御則を導出した。制御力を分布力として作用させる場合と近似的に曲げモーメントで作用させる場合について、はりの自由端と単純支持端に適用した。分布力制御については両境界近傍で理論的周波数応答に近い時間軸応答を確認し、曲げモーメント制御では自由端の高次固有振動数域(4次以上)で波動制御性を確認した。はり波動制御の計測応用についても検討した。

研究成果の概要(英文)：A new wave absorbing control method of beams near boundary has been developed based on the finite difference approach. The boundary node equation is compensated to be same as the interior node equation by using the wave solution of the interior node equation. The distributed force control and bending moment control have been investigated for both free boundary and simply-supported boundary. The distributed force control has been shown to be effective at any frequency for both boundaries and the moment control within the frequency range higher than the 4th natural frequency for free boundary. Application of wave control of beam to a measurement technique has been also investigated.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御

### 1. 研究開始当初の背景

機械構造物の基本要素である‘はり’は多くの研究者の対象とされ、制御技術の進展に伴って、振動制御の対象として種々の制振構造が研究されてきた。しかし、近年は研究の新規性に展開が少なくなってきた。原因の一つに新たな制御的アプローチがなされていないことがある。新現代制御の H 制御、 $\mu$  シンセシスなどは Matlab で容易に制御則を構築できるようになり研究としての価値が乏しくなった。一方、構造物の振動抑制の研究では、従来の振動制御の限界を突破する新たな視点として波動制御の研究が注目されてはじめている。波動として振動エネルギーの吸収制御を行うには伝搬経路を特定しなければならないので wave-guide としてはりが研究対象となることが多い。Southampton 大学、MIT や首都大学東京などで精力的に波動制御の研究がなされているが、これらははり構造を伝搬する解を進行波解と定在波解に分離して進行波解を吸収制御する手法である。このアプローチは波動解分離のためのハードウェアとその装着スペースが必要となるため構造的に不利である。進行波解と定在波解を分離せずにそれらの特性を同時に扱う簡便かつ効果的な制御則の構築が望まれる。

### 2. 研究の目的

波動制御則の新しいアプローチとして、差分モデルに基づくロープの固定境界近傍での波動吸収制御法が西郷（本研究代表者）らによって研究されている。ロープの運動方程式を差分法によって近似し、境界条件の影響を受ける節点（境界節点）の運動方程式と境界条件の影響を受けない節点（内部節点）の運動方程式の差の項を境界節点で制御力として波動伝搬解を用いて補償することで、あたかも境界が存在しない状態、すなわち、無限構造を作り出して無反射状態を生成することに成功している。

本研究では、ロープの差分近似アプローチによる境界近傍波動制御をはりに拡張することを課題とする。境界近傍の波動制御の特徴として、全周波数域で共振状態の全く存在しない応答を得ることができるが、内部節点が波動制御状態になると境界近傍までほぼ全節点が一定変位となるため、変位ゼロの固定境界では構造的に無理が生じる。その点、自由境界は全く制約がなく、単純支持境界も変形を許容できる。これらの境界条件をもつはりを対象とする。制御力として分布力を直接印可する方法と近似的に曲げモーメントを印可する方法を検討する。

### 3. 研究の方法

制御則は、差分化したラプラス変換運動方程式の内部節点の特性根を用いて、境界節点運動方程式で境界条件によって内部節点運動方程式から消失した仮想節点（境界と境界の外側）変位を算出して、制御項として補償す

ることで境界節点の運動方程式においても波動伝搬状態を実現するものである。時間領域の制御則は、ラプラス領域の特性根の逆ラプラス変換と計測する時間応答変位の畳み込み積分として隣接節点変位を演算することで実装できる。はりの制御則はロープの場合と同じ手法で求められるが、差分化したはり（差分はり）の特性根の波動伝搬特性を解明し、最適な波動伝搬解を構成しなければならない。ロープの場合は純粋に進行波と後退波のみであるのでラプラス領域の制御則をカーブフィットで数値的に求めることもできたが、はりでは定在波解成分も含むため理論的な解の特性解析から時間領域の制御則を確立する必要がある。

次に、境界節点での圧電素子を想定した曲げモーメントによる制御力の印可方法の確立が必要となる。はりの運動方程式は分布力のつり合いであり、境界節点で分布力を補償する必要がある。曲げモーメントの軸方向座標の二階微分が分布力となるはり理論を利用して、曲げモーメントのみを発生させる圧電素子を差分幅に座標方向に変化させることで分布力を近似的に発生させる方法を検討する。

一定幅片持ちはりの自由端で波動制御が可能なことを検証した後、幅が長さ方向に対して一定でないはり、欠陥を有するはり、はり曲げ理論を適用できる平板などの波動制御性を検討する。一定幅でなければ解析解が存在しないので制御部分は一定幅とするが、インピーダンス整合制御である本制御法では、制御部分で波動吸収が実現すれば、はりや平板全体の振動エネルギーを波動伝搬特性によって吸収できる可能性がある。波動制御特性の制御目的以外への応用の可能性も検討する。

### 4. 研究成果

#### (1) 差分波動解特性解析

差分はりの運動方程式の実一般解をラプラス変換とラプラス逆変換によって導出した。差分間隔で隣接する節点間の変位伝播特性を表す解であり、一方向に伝播する解に対して 2 つの任意実定数を含む。一方の任意定数を含む項は減衰を伴う進行波成分のみを表現し、他方の任意定数を含む項は大きな減衰を伴う後退波に近い定在波成分を表現する。この任意定数の組み合わせによって分布定数はりの進行波解と定在波解の組み合わせに対応する解を表現できる。後退波特性の符号を逆にすることで定常状態では不完全な進行波特性を表現できる。任意定数の制御特性に及ぼす影響を解析した。その結果、境界制御に起因する境界変位の増加を抑制する任意定数の組み合わせが存在することを見出した。内部節点の制御応答周波数特性から定在波成分を発生させて境界変位を抑制していることが確認され、進行波制御と定在波制御のハイブリッド制御が実現していることが分かった。

#### (2) 分布力波動制御

### 自由端制御

図1に50自由度差分制御則を片持ちはり差分モデルと分布定数モデルの自由端制御応答を示す。差分モデル（:10 自由度近似モデル、:50 自由度近似モデル）では周波数応答（曲線）と時間軸応答は完全に一致しており制御則の妥当性が検証できる。分布定数モデル（+:12 固有モード、x:50 固有モード）の応答計算は固有モード展開した解を用いている。制御性は検証できるが時間軸応答は低固有振動数域で周波数応答と一致しない。時間軸応答は解の展開固有モード数、演算時間刻幅や2節点制御力の演算手順などの影響を非常に受け、自由端での波動制御はロバストでないことが分かった。図2に4次固有振動数加振の制御応答を示す。

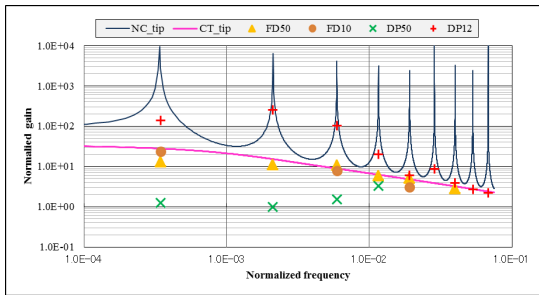


図1 片持ちはり波動制御応答

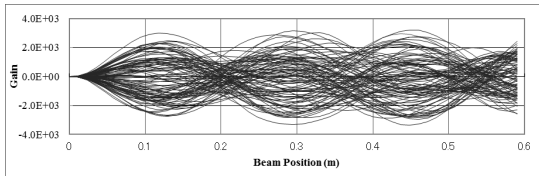


図2 片持ちはり4次制御モード

### 単純支持端制御

図3に50自由度差分制御則を両端単純支持はり分布定数モデルに適用した場合の周波数応答と時間軸応答を示す。時間軸応答計算は50固有モードで展開した解（サイン関数）を用いている。定量的には周波数応答と差異を有しているが定性的には全周波数域に亘って傾向が一致しており単純支持はり境界近傍での波動制御は自由端より実現し易いことが分かった。固定・単純支持境界の単純支持端近傍制御でも同様な応答を確認している。

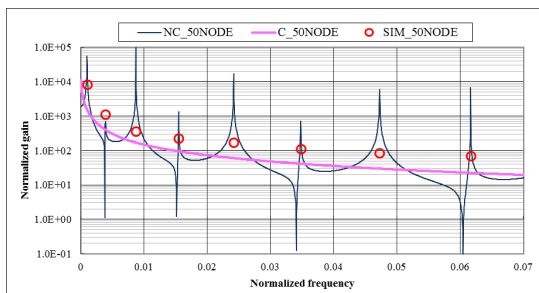


図3 単純支持はり波動制御応答

### (3) 曲げモーメント波動制御 片持ちはり自由端制御

はり自由端境界で曲げモーメントを検出・印可する波動制御法について、その制御性能を検証した。はりの横振動運動方程式は曲げモーメントのはり座標方向2階微分値と分布慣性力との釣り合いであるので、変位と分布慣性力の関係を直接制御するのではなく、曲げモーメントと分布慣性力の関係を制御する考え方に基づいている。曲げモーメントに相当する表面ひずみを圧電素子で実現すること想定して、1 差分間隔ずつはり座標方向にずらした3つの素子を重ねて使うことでモーメントのはり座標方向微分を近似的に実現する。第1素子を検出素子として、その出力と第2及び第3制御素子との伝達関数を求めた。何れの制御素子についても伝達関数のラプラス逆変換により得られる応答関数と第1素子出力との畳み込み積分で制御信号を生成できる。制御応答を数値シミュレーションにより検証した。その結果、比較的高次固有モード（3次固有モード近傍）以上の固有振動数域でははりスパン全体で波動伝搬特性が確認されたが、1次と2次の低次固有モード近傍では制振効果はあるものの振動モードが残留したままであった（図4）。5次固有振動数加振の制御応答結果を図5aに、8次固有振動数加振の制御応答を図5b示す。

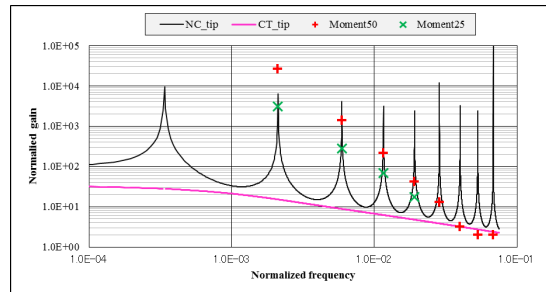


図4 片持ちはり波動制御応答

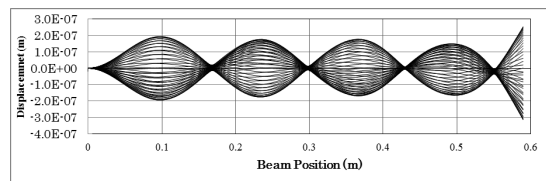


図5a 片持ちはり5次制御モード

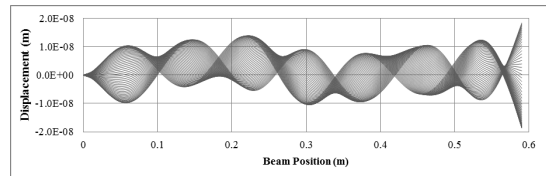


図5b 片持ちはり8次制御モード

分布力制御と曲げモーメント制御の制御応答の比較で特徴的なのは、曲げモーメント制御では自由端があたかも非制御応答に似た振動を呈し、せん断力制御では自由端も内部節点変位が連続しているのと同じ振動を呈していることである。曲げモーメント波動制御では制御素子の反自由端側ではモーメント変化

によるせん断力を発生できるが、真のはり自由端ではモーメントのみが作用するためせん断力を発生していないが確認された。それにもかかわらず波動伝搬性が高周波数域では実現している。制御則の差分分割数が少ない方が低次固有振動数域で制御性が良い。低次固有数同数域で波動伝搬が実現しにくい本質的な原因は未解明である。

#### (4) はり波動制御の応用

##### 矩形板の波動制御

自由端を含まない矩形板について本手法の適用可能性を調べた。矩形板も全周単純支持以外の境界条件では一組の対辺が単純支持の場合しか解析解がないため、単純支持・固定、単純支持・単純支持を対象に制御性を確認した。対向する単純支持方向の定在波を仮定すると、はりと同様の差分制御則による制振性が周波数応答として確認できた。

##### はりの損傷検出

波動制御された系は振動モードが消失して系全体が一樣な振幅となることを利用するものである。その結果、極めて微小な部材の剛性の低下でも損傷箇所を検出できることが分かった。任意の境界条件で加振点と波動制御点間の部材の損傷個所で振幅が変化し、加振周波数が高いほど損傷個所が明瞭に浮き上がることが分かった。固有振動情報からは損傷同定できない場合にも有効で、固有振動数0.1%程度の低下であっても十分検出できる。計測振動値に空間フィルタ処理を行うとより明瞭に損傷箇所を検出でき、複数個所の損傷箇所も同定できることが分かった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

##### [雑誌論文](計1件)

西郷宗玄、岩本宏之、はりの差分近似解を用いた境界近傍での振動制御、日本機械学会論文集(C)編、査読有、76巻、2010、pp.2536-2544、

##### [学会発表](計4件)

M. Saigo, H. Iwamoto, and D.H. Nam, Wave absorption control of beam based on finite difference approach, The 15<sup>th</sup> Asia-Pacific Vibration Conference, 2013, June, 5 Jeju, Korea

西郷宗玄、岩本宏之、はりの差分波動制御における差分幅の制振性に及ぼす影響、日本機械学会関東支部第19期総会講演会、2013年3月15日、首都大学東京

西郷宗玄、岩本宏之、片持ちはりの自由端モーメント波動制御、日本機械学会関東支部第18期総会講演会、2012年3月9日、日本大学

西郷宗玄、岩本宏之、近似差分はりの波

動特性に関する一考察、日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2009、2009年8月4日、北海道大学

##### [産業財産権]

出願状況(計1件)

名称：はりの波動制御による振動抑制

発明者：西郷宗玄

権利者：学校法人東洋大学

種類：特許

番号：2012-158688

出願年月日：24年7月17日

国内外の別：国内

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

西郷 宗玄 (SAIGO Muneharu)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：80357053

##### (2) 連携研究者

岩本 宏之 (IWAMOTO Hiroyuki)

成蹊大学・理工学部・准教授

研究者番号：90404938