

氏名（本籍）	おおよ 大家 哲朗（青森県）		
学位の種類	博士（情報科学）		
学位記番号	情博第310号		
学位授与年月日	平成17年3月25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	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）システム情報科学専攻		
学位論文題目	薄肉構造物の振動インテンシティ計測に関する研究		
論文審査委員	（主査）東北大学教授 鈴木 陽一		
	東北大学教授	曾根 秀昭	東北大学教授 中村 信良
			（工学研究科）
	東北大学名誉教授 伊藤 耿一		

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

本章では、研究の背景と関連研究および本研究の目的と課題について述べる。

機械構造物は近年ますます高速化、軽量化が進み、振動解析や防振技術の重要性が増している。また使用環境の改善のための低振動化や静粛性も強く求められている。しかし現実の機械においては振動源と騒音源が異なる場合が多く、対策を困難なものとしている。これは振動騒音の主因の一つである固体伝搬音が遠くまで損失が少なく伝わることにより、振動の伝搬経路が複雑になっているためである。

このような問題の解決のために、振動インテンシティという概念が注目されている。振動インテンシティは単位幅当りの振動エネルギーとして定義され、Noiseux と Pavić により計測法の研究が始められた。振動インテンシティ計測では、振動体の表面データから内部のエネルギーを評価する必要があるために、計測自体が非常に困難であり様々な計測法が提案されているが、実用化には至っていない。

これまでのところ、振動インテンシティ計測の研究は主に差分法の適用が行われてきた。Pavić がまず薄板において16点の計測点で1点の振動インテンシティベクトルを得る手法を提示して以降、様々な仮定による計測点数の削減や、差分間隔による誤差評価や基準に関する研究が精力的に行われてきた。特に1次元のはりにおける計測法や誤差の研究はほぼ出尽くした感がある。これは波の向きが決まっているために特徴を把握しやすいことによる。しかし実際の構造物はむしろ板やシェルなどの形状が多く、これらにおける振動インテンシティ計測法の確立が望まれてきた。だが、差分法による計測手法は原理的に誤差を伴い、計測点数が比較的多くなる傾向があった。また、多数の加速度ピックアップを用いる場合、振動体への影響も無視できないと考えられる。

Fourier 変換を用いた手法は微係数の評価の際に差分誤差と無縁である利点がある。この手法は振動インテンシティを直接得るのではなく、一旦振動場を復元してから計算して求めている。ゆえに一度に多数の計測点を用いる必要がなく、レーザドップラ振動計などでたわみ変位のみを計測すればよい点も利点である。しかし差分法の適用に比べると理論的にやや複雑で、高精度計測のための条件設定などはかなり高度な専門知識を必要とする。またやはり多数の計測点が必要となる場合がある。だが、先に述べた利点を考えると波数スペクトルを用いる原理自体は魅力的であり、実用化のためにも有効であると考えられる。

他の手法もどれも一長一短であり、それぞれ何らかの問題がある。また、提示されてきた手法のほとんどは平板に適用したものであり、一般のシェルに適用したものは少ない。実際の構造には曲率を持つシェル構

造が含まれる事が多いために、板の計測法や計測システムをそれほど変えることなくシェルへ適用可能な手法も望まれる。

このような問題点をふまえ、本研究では振動インテンシティ計測手法の実用化へ向けた新たな計測原理を提案することを目的とする。

## 第2章 振動インテンシティの定義と定式化

本章では振動インテンシティの定義、物理的性質およびその各座標系における定式化を示す。振動インテンシティ(Structural Intensity, SI)という呼称自体研究者によってまちまちであり、定義もそれぞれ差異がある場合がある。また振動インテンシティは変位や温度といった直感的に把握したり計測できたりする量と異なり、物体内部の量であるためにその物理的意味が把握しにくい。さらに、振動インテンシティはすべての構造(座標系)に対して定義できるために、その式は複雑で導出も場合によっては困難である。

ここではまず、Poyntingの理論の音響場への適用に着目し、振動インテンシティの定義および物理的性質の把握を行う。Poyntingの理論は電磁学で用いられる概念であるが、同様な数学的取り扱いによって構造振動に適用可能である。電磁気学におけるPoyntingの理論を簡単に説明したあと、振動場におけるPoynting vectorについて説明する。次にこの概念を用いて、振動インテンシティの定義とその物理的意味について述べる。

実際の構造で振動インテンシティを計算するためには、それぞれの対象に対応した振動インテンシティ式が必要となる。本章ではPoynting vectorとしての振動インテンシティを、テンソルで表現することによって定式の一般化を行う。

## 第3章 新しい振動インテンシティ計測理論の提案

本章では新たな振動インテンシティ計測手法の提案および検討を行う。検討対象は代表的な薄肉構造物であるはり、板そして扁平シェルとする。

第1章で指摘したように、従来の振動インテンシティ計測手法の問題点の一つに計測の繁雑さがある。差分法を用いる場合、一点における振動インテンシティを得るために複数点の計測点が必要となる。このため、ある領域における振動インテンシティベクトル分布を取得するためには、膨大な計測点が必要になる。他の手法を用いる場合でも、やはり計測の手間や実験設備などの面を考えると必ずしも有効とは言えない。ゆえに、より実用的な計測手法であるためには、数点の計測によってある領域の振動インテンシティが得られる手法がより有効と考えられる。また、計測法としての汎用性の観点からは、なるべく適用場所の制限がないほうが望ましいが、最初から完全な場を扱えるような手法を考案して確認を行うのは困難が伴うと予想される。ゆえに、近距離場も含む完全な場への適用可能性を示しつつも、ここで提案を行う手法が扱う場は遠距離場とする。これは境界から1波長程度離れた場のことであり、近距離場の波(evanescent wave)の影響を無視できる。

必要な領域のみを知りたい場合には、全体からその部分を仮想的に切り出して考えることが必要となる。そのためには、有限要素法のように、節点変数を満たすことによって領域内部の場を得るという手順が有効と考えられる。第3.2節では、まず物体から仮想的に切り出して来た領域の境界に、無反射条件と呼ばれる境界条件を課して必要最小限の計測によって領域内部の場を内挿する手法を1次元の場を対象として検討する。次に第3.3節において、2次元への拡張としてSpectral Element Method(SEM)を用いた手法を提案し、その原理および定式化を示す。第3.4節では提案手法のシェルへの適用可能性を検討するため、扁平シェルを用いた解析と検討を行う。

## 第4章 薄板における提案手法の検討

本章では第3章で提案を行ったSEMによる計測手法の検証を行う。

まず4.2節において、提案手法が有効に機能するのかどうかを確認するために、板の解析解を参照データにした基本的なシミュレーションを行う。これは近距離場も含む板の完全な解の未知係数に任意の値を与

えて振動場を形成し，そこで提案手法による計測を行うものである．提案手法の原理に間違いがなければ，板モデルの変位場が復元でき，振動インテンシティの誤差も小さいはずである．

次に 4.3 節では，より実際の計測に近い場合として，有限要素法によるモデルを参照データとする計測シミュレーションを行う．ここでは実際に実験を行う場合を想定して，モデルに対する入力パワーと，提案手法によって計測された振動インテンシティから計算できるトータルパワーの比較を行うことによって精度の検証を行う．

次に 4.4 節において，実験による提案手法の検証を行う．実験装置がシェルに対応したものであるため，加振周波数を高くすることにより板に近い状態を作って，板としての計測実験を行う．精度の検証は入力パワーとトータルパワーの比較によって行い，従来の代表的な計測法として差分法を用いた計測結果との比較を行う．

最後に 4.5 節において本章のまとめを行う．本章で行った解析と実験の結果は以下の通りである．

板の近距離場も含めた解析解を参照データとした計測シミュレーションでは，SEM による内挿関数は遠距離場の仮定を用いられており，適用された場が遠距離場であれば良い精度を示し，近距離場の影響が大きい場であれば誤差は拡大するはずである．ここで得られた結果はこの考察を裏付ける結果であり，提案手法の遠距離場での有効性が示された．次に有限要素法によるモデルを用いた検討結果を述べる．計測をシミュレートする部分は前節の板の場合と同じであるが，この解析では振動インテンシティの精度の確認のために入力パワーと，モデル上の波が通過してゆく部位におけるトータルパワーがバランスするはずであるというエネルギー保存則を利用している．ここでも誤差の小さい結果が得られ，前節のシミュレーションと合わせて遠距離場であれば精度よく本手法が適用できることが明らかとなった．さらに第 4.4 節において行った実験的検討の結果を述べる．これはシェルを高い周波数で加振することによって近似的に板として扱って検討を行ったもので，他にも存在する様々な誤差要因に対しても十分に対策を講じたわけではない．そのため数値的な面ではそれほど信頼性の高い実験ではなかった．しかし得られたフローパターンは概ね妥当と言えるものであり，採用点を増やしたトータルパワーの比較では入力パワーに近づくことができた．ゆえに精密で詳細な実験を行えばかなりの精度の向上が期待できる．また差分法を用いた手法との比較でも悪くとも同程度の精度であり，必要な計測点の数や，得られるのが 1 点ではなくて場であるという点を考えると遥かに本手法の方が優れていると言える．

## 第 5 章 結論

最後に本章では結論を述べる．

本論文では，振動インテンシティ計測を少しでも実用的な手法たらしめるために，従来よりも簡便な計測手法の提案およびその検討を行った．Spectral Element の内挿関数によって波動の性質を持つ内挿関数を定式し，従来より少ない計測数で要素の内部の領域の振動インテンシティ場が得られる手法を提示した．さらに提案手法はシミュレーションと実験によって検証され，遠距離場において良好な結果を得た．本計測手法によって振動インテンシティ計測を実用利用に向けて前進させることができたと考えられる．

## 論文審査の結果の要旨

機械や構造物における振動や騒音問題の問題解決のためには、エネルギー伝搬経路の把握が不可欠である。このため、振動エネルギーの流れを示す振動インテンシティの計測手法が注目されてきた。しかし、これまでの差分法を中心とした計測手法では、精度や計測の手間などの点で実用化からは遠く、新たな計測法の提案が望まれてきた。著者は、振動インテンシティ計測手法の実用化に向けて、波動性に関する内挿関数を計測に用いることに着目して研究を行ってきた。本論文は、その結果をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は、序論である。

第2章では、振動インテンシティの定義や定式の曖昧さを排除するため、Poyntingの理論による定義の厳密化と、テンソル表現による一般化を行った。これにより、シェルのような複雑な構造でも、座標系に依存せず振動インテンシティを正確に定式化することが可能となった。これは、重要な成果である。

第3章では、第2章の定式化に基づき、新たな振動インテンシティ計測手法について検討している。波動の性質を含んだ内挿関数の利用が有効と着想し、これを、未知数を満たすための変位計測と組み合わせた計測手法を提案した。これは、比較的少ない計測点数によって、構造体中の知りたい領域のみの振動インテンシティ場を得ることができる手法であり、従来の研究に比べて実用性が高い手法である。また、シェル構造における計測のための定式も示しており、振動インテンシティ計測法の今後の発展の可能性を示した点でも、高く評価できる。

第4章では、計算機シミュレーションと実験によって、提案手法の有効性を検証している。計算機シミュレーションによる結果から、提案手法により、波の遠距離場において高精度の計測が行えることを明らかにした。また、薄肉構造物を用いた実験の結果から、提案手法が従来の代表的手法である差分法を用いた手法に比べて良い精度を持っていることを示した。これらは、提案法の実用化の可能性を示した成果として評価できる。

第5章は、結論である。

以上要するに本論文は、新たな振動インテンシティ計測手法を提案し、その有効性を明らかにしたもので、音情報工学およびシステム情報科学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(情報科学)の学位論文として合格と認める。