

	しば た かつ ひさ
氏 名	柴 田 勝 久
授 与 学 位	博士(工学)
学位授与年月日	平成10年5月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最 終 学 位	昭和61年3月
	東北大学大学院工学研究科精密工学専攻前期課程 修了
学 位 論 文 題 目	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 加藤 正名 東北大学教授 長南 征二 東北大学教授 谷 順二 東北大学教授 伊藤 耿一

## 論文内容要旨

機械騒音は振動を励起している箇所が発生しているとは限らず、パネルのような振動しやすい箇所へ他の振動源から振動が固体音路を伝播してきて音になっている場合も多いと考えられる。そのため、騒音低減のためにはこの固体音路をどのように振動エネルギーが伝わっているかを把握することが必要である。また、振動騒音対策のために減衰材や動吸振器を付加することはよく行われるが、これらの最適な配置のためにもこの振動エネルギーの流れが重要な情報になると期待されている。このように振動インテンシティは従来のモード解析とは異なる視点からの機械振動に関する情報を与えるが、その計測法は1970年代の Noiseux, Pavić の論文によって基礎が与えられて以来さまざまなアプローチが提案されているが、音響問題における同種概念である音響インテンシティほどには一般に普及しておらず、まだ実験室段階にとどまっている。その原因は弾性体がせん断にも抵抗を示すため、取扱いがより複雑であるからである。

本論文は振動インテンシティ計測の実用化を目的とし、計測に伴う誤差を明らかにし、L型の棒、平板といった基礎的な対象についてその特性を明らかにし、平板について新たな実用的計測法を提案したものであり、今後の振動インテンシティ実用化への指針となるものである。

以下に全7章の要約をまとめる。

### 第1章 緒言

振動対策において広く使用され、効果を上げている解析手法は実験的にはモード解析、数値計算上では有限要素解析である。しかし、構造物中に減衰が集中して存在すればエネルギーの流れが生じるが、従来の手法はこれを考慮することが困難である。効果的に減衰を与える問題の解析に従来法は十分ではなく、それを補完する別の視点に立った構造体の動特性解析が求められている。この立場からはエネルギー伝播経路でこのフローを計測・評価することが必須技術となる。本論文では振動インテンシティ計測について、これを総合的、系統的に捉え、その問題点を明らかにするとともに、次の点を明らかにすることを目的とする。

1. 実用上重要な各センサーにおける計測誤差の振動インテンシティ評価値に及ぼす影響を明確にして、最適計測条件を示す。
2. 振動インテンシティの評価に差分を用いることに起因する欠点を改良した新しい原理に基づく振動インテンシティ計測法を提案する。

### 第2章 振動インテンシティの概念と定義

振動インテンシティの概念は音響の分野で確立している音響インテンシティの概念を弾性体に拡張したものと考えて理解することもできる。振動インテンシティは振動エネルギーの流れを表すベクトルであり、瞬時値  $I_i$  は

$$I_i = \sigma \cdot v$$

である。ここで $\sigma$ は応力テンソル、 $v$ は粒子速度である。気体の場合は体積変化にのみ抵抗を示し、「力」に相当するものはスカラーである圧力 $p$ であるが、弾性体の場合はせん断にも抵抗を示すため「力」に相当するものはテンソルになる。このため振動インテンシティの数式の取扱いや計測は音響インテンシティに比べてはるかに複雑になる。しかし、定式化の手順は音響インテンシティの場合と同様である。音響の場合はインテンシティは速度 $v$ に平行であるが、弾性体の場合はインテンシティは一般には速度と平行にはならない。振動インテンシティはある構造への入力振動パワーや減衰材の減衰能の評価、振動源探査に応用が可能である。

### 第3章 振動特性の評価量としての振動インテンシティ

基本的な一次元、二次元の固体音路について、振動インテンシティがどのようにふるまうかを明らかにした。

一次元的固体音路について行われている研究は多くが曲げ振動に関するものである。しかし、エネルギーの伝搬には曲げ振動のほかに縦振動、ねじり振動の寄与も無視できない。これら3つの波動による振動インテンシティを表現する式を与えた。また、それらの計測法を示した。L字型の棒ではこれら3つの波動が現れ、かつ、曲がりの部分でそれらの間の変換が起きる。そのためこのL字型の棒は一次元的固体音路の基本構造である。この構造に対して計測を行い、次の結論を得た。

1. 曲げ波のパワー計測に関しては、横変位とひずみの計測を組み合わせたハイブリッド法が優れていることを実験的に明らかにした。
2. 縦波とねじりのパワーに関して、ひずみゲージを用いる計測が有用であることを明らかにした。
3. 複合する一次元的固体音路における、縦波及びねじり波の振動インテンシティを、レーザードップラ振動計を用いて計測し、縦波の振動インテンシティも、ねじり波の振動インテンシティも、ひずみゲージを用いた計測法とほぼ同等の精度で計測することができることを示した。
4. 縦波、ねじりによる面内変位は小さい量であるが、パワーとしては無視できない量であり、曲げ、ねじり、縦波の振動インテンシティを総合して評価する必要がある。
5. 減衰を無視した振動系の振動解析により、縦振動が卓越する共振周波数では、パワーも主に縦振動成分で、ねじり振動が卓越する共振周波数では、パワーも主にねじり成分で、伝播することが明らかとなった。

二次元的固体音路についても振動インテンシティの基礎式を示し、二次元では一般には振動を解析的には表現できないので、有限要素法を用いて平板での振動インテンシティの解析を行った。平板へのパワーの入力の大きさを評価するためには、入力点に近い部分で閉曲線の積分経路をとる方が精度の上から望ましい。

### 第4章 一次元固体音路における曲げ振動の振動インテンシティ計測に伴う誤差評価

差分誤差は波長定数 $k$ と差分間隔 $\Delta$ の積 $k\Delta$ の関数となり、 $k\Delta$ が大きくなるほど大きくなる。しかし、これは系統的誤差であるので、この誤差の逆数を補正係数と定義し、振動インテンシティの計算値にこの係数をかけて評価値とすることを提案した。

2点法と4点法を比較した場合、原理的には4点法の方が精密な計測であるが、数値的な検討の結果では4点法は $k\Delta$ が小さい範囲では2点法よりも誤差の影響を受けやすい。実験の結果、通常の計測における誤差の影響を小さくする計測条件として、4点法を採用し、 $k\Delta$ を1程度になるよう差分間隔 $\Delta$ を定め、補正係数を用いて差分誤差を補正するのが適当である。

### 第5章 二次元固体音路における曲げ振動の振動インテンシティ計測に伴う誤差評価

平板の曲げ振動によるインテンシティの差分法による計測における計測の諸条件と含まれる誤差について理論と実験の両面から検討し、次の結論を得た。

1. 9点の計測点を用いる方法を提案し、近接場を無視できる部分では、この方法により振動インテンシティを原理的に正しく計測できることを示した。
2. 差分誤差の補正法を提案し、その有効性を示した。
3. 計測誤差の影響を最小にする差分間隔があることを示した。
4. 4点法では振動インテンシティの絶対値を大きく評価する場合があることを明らかにした。

5. 16点法は原理的には正しいが、計測誤差の影響を大きく受け、実用的でないことを示した。
6. 以上により二次元曲げ振動インテンシティ計測のための計測法と計測条件として、提案した9点法を用い、 $k\Delta$ を1前後にとり、提案した補正係数で補正することを推奨する

## 第6章 波動合成法による平板上の振動インテンシティ計測

薄板構造における振動インテンシティを計測する手法として、波動合成法を提案した。これは振動インテンシティを評価する点の近傍の変位のみを局部的にフーリエ変換するものである。この計測法では計測点を評価点を中心とする円上に配置することができ、格子状に計測点を配置する従来の差分法よりも計測が容易である。また、計測点数の選択の自由度も高い。

基礎的な場合について計測精度のシミュレーションを行った。計測誤差がなければ計測径は小さいほど精度が高いが、実際の計測では不可避なこの計測誤差を考慮すると、ある程度計測径を大きくした方がよい。この点は差分法と同様であるが、精度が良好な範囲が差分法よりも広く、ロバストな計測法であるといえることができる。

センサー回転機構を試作し、基本的な振動場について振動インテンシティを実測した。振動インテンシティから推測されたパワーは計測した入力パワーとよく一致し、計測法の妥当性は証明された。近接場の項を考えず、分解する波動の数と計測点数を同一とする場合、その数  $n$  は4ではやや精度が悪いが、6以上では十分であると判断された。センサー回転機構は三脚の上に載るほどの小型のもので、計測に大がかりなXYテーブルやロボットは不要であり、かつ計測対象の大きさに制限がなくなる。よってこの方法は極めて実用的なものである。

## 第7章 結言

本論文は振動インテンシティ計測の実用化を目的とし、計測に伴う誤差を明らかにし、L型の棒、平板といった基礎的な対象についてその特性を明らかにし、平板について新たな実用的計測法を提案したものであり、今後の振動インテンシティ実用化への指針となるものである。

## 審査結果の要旨

機械装置の軽量化・高性能化は、ともすればその振動・騒音を増大させる。それ故、機械装置の低振動化のための合理的な工学手法の確立が求められている。振動インテンシティは単位断面積を流れる単位時間当たりの振動エネルギーであり、この計測・評価は、従来のモード解析法を補完する低振動化技術として注目されている。本論文は、振動形態に依存する多様な振動インテンシティの計測法を系統的に把握し、測定誤差をも考慮した適正な計測条件を提示するとともに、新しい計測原理に基づく計測法を提案したものであり、全文7章よりなる。

第1章は緒言であり、本論文の目的と立場とを述べている。

第2章では、弾性体での振動インテンシティベクトルを一般形で定義し、音響インテンシティとの対比においてその特徴を明らかにしている。

第3章では、機械構造物を構成する基本的な一次元と二次元の固体音路について、振動パワーフローの特性を実測と解析により調べている。振動パワーは構造物形状と周波数とに応じて波動モードを変えて伝播するので、引張圧縮・曲げ・ねじりの3つの波動モードを対等に評価する必要があることを明らかにしているが、これは実用上重要な指摘である。

第4章では、一次元曲げ振動による振動インテンシティを差分法により評価する際の測定誤差について解析と計測とを行い、測定誤差の影響を最小にする最適な計測条件を提示している。

第5章では、平板を伝播する曲げ振動インテンシティの差分法による計測法を解析と実験とにより論じ、9点の測定点を用いる新しい計測法を提案し、測定誤差の影響を最小にする最適な計測条件を提示しているが、これは差分計測法における優れた成果である。

第6章では、平板を伝播する曲げ振動インテンシティを計測する新しい方法を提案している。提案した方法は計測点のまわりで局所的にフーリエ変換を適用するもので、従来の差分法に基づく計測法に比べて、簡便かつロバストな計測であることを解析と実験とから明らかにしているが、これは独創的な成果である。

以上要するに本論文は、振動インテンシティ計測法について、差分計測法における最適計測条件を提示するとともに、新しい計測原理に基づく計測法を提案したものであり、振動工学ならびに機械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。