



Title	媒質境界および共振構造における局在現象による固体音響波の制御 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	武田, 颯
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15837号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91934
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hayato_Takeda_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 武田 颯

審査担当者 主 査 教 授 松田 理
副 査 教 授 市村 晃一
副 査 准教授 小布施 秀明

学位論文題名

媒質境界および共振構造における局在現象による固体音響波の制御

(Control of elastic waves using localization phenomena on media boundaries and resonant structures)

固体媒質中には圧縮応力と剪断応力が存在し、それらの振動が伝播する固体中の音響波には、様々な偏向状態が許されている。このような空気中の音響波や電磁波には無い振動モードの選択性は、固体音響波の重要な特徴であり、適切なモードを選択することにより様々な応用に対応できる。音響波の制御や利活用は、環境音の抑制や建造物の制振、超音波による医療検査や物体の非破壊検査など、幅広い領域において進められている。また通信技術や通信機器の小型化、高集積化にも寄与している。これは電磁波に対して音響波は等周波数における波長が非常に小さく、固体中を伝播する際にジュール熱を伴わないことに起因する。これらの応用においては、制御の対象となる特定周波数の音響波に対して媒質の応答の最適化が要求される。特に音響波の導波における減衰の低減、音響波の遮蔽における遮蔽可能な周波数幅の拡大は、音響波制御の研究における重要な課題である。

本論文ではこれらの課題への提案として、媒質境界および共振器構造への音響波の局在現象を利用した二種の研究について述べた。第一の研究は媒質境界に沿った音響波の局在現象であるトポロジカル境界モードに着目した。トポロジカル絶縁体の発見に端を発するトポロジカル物理の諸概念は、近年では古典物理系にも適用され、フォノン結晶などの人工構造における波の伝播について研究が進められている。特にトポロジーが異なる媒質を接合した境界面に生じるトポロジカル境界モードは、その頑強性と低エネルギー損失から注目される局在現象である。数多のトポロジカル系の中でも量子バレーホール (Quantum Valley Hall, QVH) 系はフォノン結晶との親和性が高く、kHz から GHz までの広い周波数領域で研究が進められているが、高周波かつ微小振動であるために実験による安定的な測定が難しい。一方で目視でも観測可能な数 Hz 程度の低周波数域に関して、カイラルフォノンなどの期待される現象を十分に可視化した事例は認められない。一般に音響波は構造スケールの拡大縮小によって応答周波数の調整が可能であり、低周波数における構造探索もまた高周波数域に対する知見を与える。そこで、本研究では、ステンレス薄板などを用いてマクロスケールの六方格子状 QVH フォノン結晶力学モデルを構築し、低周波の曲げ振動測定によってトポロジカル境界モードの存在を実証し、その挙動を数値シミュレーションにより分析した。本成果はトポロジカルフォノンクスに基づく高度な波動伝播の知見を与えるに限らず、フォトンクスや凝縮物理学を含む多様な系における波動場の制御に貢献する。

第二に共振器構造への音響波の局在現象に着目し、従来構造より広い周波数幅の音響波を遮蔽するテーパ状の矩形断面梁を提案した。梁などの棒状媒質における音響波は、圧縮、面内せん断、

屈曲、およびねじれの4つの偏向状態を有する。一般にはこれらが同時に伝播することで棒状媒質が振動するため、棒状媒質における音響波の遮蔽にはこれら4モードの伝播の同時抑制が求められる。その手段として、制御対象の音響波長より小さな共振器構造の周期的配列からなる音響メタマテリアルがある。先行研究として矩形断面のアルミニウム梁、アクリル円柱棒において単一材料でかつ4モードの同時遮蔽する完全バンドギャップの形成が実証されているが、その周波数幅は、完全バンドギャップの平均周波数の約一割程度に留まった。そこで本研究では音響メタマテリアル梁をテーパ状に変形し、単位構造の共振周波数を一定の割合で変化させる構造を開発した。テーパ化することで各共振器構造の遮蔽周波数帯域を変化させ、その重ね合わせとして遮蔽周波数幅の拡大を図った。この構造により、非テーパ時に比較して平均で約3倍広い帯域において音響波の遮断が実現されることが実験と数値シミュレーションで示された。本成果は加工容易性と広帯域の振動遮蔽を両立する多様な構造物の開発に貢献する。

本論文では、まず各研究の関連分野の研究背景、先行研究について紹介した。次に「二次元六角格子ウェーブマシン上の曲げ波におけるトポロジカル境界モード」について、数値計算と実験の結果について述べた。続いて「kHz帯で完全バンドギャップを有するテーパ状の音響メタマテリアル梁」について、構造の詳細と併せて数値計算と実験の結果を示した。最後に、各成果を総括した。

これを要するに、著者は音響波の伝播を制御するふたつの方法、トポロジカルな媒質境界における局在現象、および媒質中に埋め込まれた共振器構造における局在現象について、理論的、数値計算的、および実験的研究を行い、音響波物理の新知見を得たものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。