



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 武田 颯

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作用する。故に歪みや応力を伝播する固体中の音響波には、様々な偏向状態の振動が許されている。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る。適切なモードを選択することにより様々な応用に柔軟に対応できる。音響波の制御や利活用は日常生活に関わる幅広い領域において進んでおり、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がこれに当たる。また最近では通信技術や通信機器の小型化、高集積化への寄与も認められる。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。以上のような応用においては、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大化が要求される。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、音響波制御の研究領域に置いて長らく議論されてきた課題である。

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る。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、六方格子状の力学模型における曲げ波の特異な伝播を実証するものである。トポロジ物理学は、特にグラフェンなどの2次元構造をはじめとする低次元材料において急速に発展している凝縮物理学の分野である。近年になってトポロジの概念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古典波動場において注目される局在現象である。数多のトポロジカル波動現象のうち量子バレーホール (Quantum Valley Hall, QVH) 系はフォノン結晶との親和性が高く、単位胞の空間反転 (P) 対称性を破ることで実現可能であることが知られている。kHz から GHz まで広く QVH フォノン結晶が検討されているが、高周波かつ微小振動であることが多く、実験による安定的な測定方法の要求が障害となっている。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のための知見を与えうる。よって本研究では、六方格子状に加工されたステンレス薄板、プラスチック製中空棒、真鍮円盤からなる力学模型を構築し、低周波の曲げ振動について QVH フォノン系に類似する境界モードの実証を行った。模型の着想は一次元波動現象の演示に用いられる Shive ウェーブマシンに得ており、提案模型は観測が容易な振幅と隣接格子点間の相互作用の大きさを確保した二次元版のウェーブマシンである。トポロジカル境界モードの低周波伝播は実験的に実証され、その挙動は数値シミュレーションにより分析された。本成果はトポロジカルフォノン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しうる。

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ー状の矩形断面梁を提案する。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。音響メタマテリアルは波の遮蔽をはじめ、負の屈折、クロッキング、超レンズ効果など特異な音響波現象を示す人工結晶として様々な構造が研究されてきた。棒状媒質については一部のモードを抑制する、もしくは複雑な構造の複合材料によって4モード制御を実現するといった提案が主であったが、その後当研究室におい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た。しかしその周波数幅は、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。また完全バンドギャップはフォノン結晶からなる棒状媒質でも認められるが、広帯域の遮断特性である一方で、同周波数で比較すれば音響メタマテリアルの小型の制振機構に比較すれば構造寸法は増大してしまう。そこで本研究では音響メタマテリアル梁をテーパー状に変形し、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。テーパー化することで各共振器構造が与える遮蔽周波数帯域を微小に変調し、その重ね合わせの結果として遮蔽周波数幅の拡大を図った。共振周波数が近接した複数の共振器からなる音響メタマテリアルはレインボーメタマテリアルとも呼ばれ、本構造は任意のメタマテリアル構造をテーパー状に変形することで実現された新たな形態のレインボーメタマテリアルである。この構造により、非テーパー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。

本論文の内容は以下の通りである。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する。次に一つ目の研究である「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る。続いて二つ目の研究である「kHz帯で完全バンドギャップを有するテーパー状の音響レインボーメタマテリアル梁」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す。最後に、各成果を踏まえた統括を述べる。