

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600132

研究課題名(和文) 周期構造による超音波・表面弾性波の制御とエネルギー輸送・収穫デバイスの設計

研究課題名(英文) Ultrasonics/Surface Acoustic-Wave Control and Energy-Transport/Harvesting Devices using Phononic Structures

研究代表者

鶴田 健二 (TSURUTA, Kenji)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：00304329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、弾性波の伝播制御を可能にする周期構造体“フォノンニック結晶”の最適設計を行い、超音波・弾性波による新しいエネルギー輸送デバイス考案とテラヘルツ弾性波発振・制御法の確立と応用開拓を目指した。

具体的には、2次元GRIN型フォノンニック結晶の数値設計・プロトタイプ作製と負の屈折現象・焦点化実証、圧電体薄膜上周期構造によるテラヘルツ弾性波制御の分子動力学解析、ならびに圧電-誘電体周期構造による音響ダイオードの数値設計を行った。

研究成果の概要(英文)：Periodic structure called “Phononic Crystal”, which enables tailoring of elastic wave propagation, has been designed for new energy-transport/harvesting devices and for new THz wave generation/control.

Specifically, we have performed i) numerical design and proof-of-principle experiments of GRIN lenses consisting of a 2-dimensional phononic structure, ii) molecular-dynamics analysis of THz wave propagation on a piezoelectric thin film and its control by a periodic hole array, and iii) numerical design of an acoustic diode based on a piezoelectric-dielectric periodic structure.

研究分野：デバイス物理

キーワード：超音波 フォノンニック結晶 表面弾性波 テラヘルツ波 圧電性薄膜 分子動力学 音響ダイオード

## 1. 研究開始当初の背景

近年、弾性率が異なる複数の物質が周期構造をもったフォノン結晶が注目されており、その基礎特性、特にレンズ効果について様々な報告がなされている。フォノン結晶では、弾性波が負の群速度を持つような伝搬モードを生み出せることが理論的に示され、我々も本申請時までには2次元周期構造のフォノン結晶を計算機で設計し水中での超音波伝送・計測実験によってその現象を実証した。しかし、その時点での研究はまだ現象を確認する程度の基礎的なものが殆どで、デバイス応用を志向した研究はまだ行われていなかった。特に、音波をエネルギー輸送媒体として活用するためのフォノン結晶の研究はほぼ皆無である。一方、超音波はセンサなどの産業・医療分野で盛んに活用されているが、エネルギー輸送効率の低さから電力伝送に用いる試みは殆どなされていない。さらに、固体表面上を伝搬する表面弾性波(SAW)を制御し新しい電磁波発生源やエネルギー伝送に利用する研究は他に例がない。

## 2. 研究の目的

本研究では、弾性波の伝播制御を可能にする周期構造体“フォノン結晶”の最適設計と固体表面弾性波制御構造の設計を行い、レンズ効果や導波特性を利用して超音波・弾性波のエネルギー輸送効率を向上させ、超音波領域で無線電力伝送や環境発電(Energy Harvesting)の実現、ならびに新たなテラヘルツ波発生原理と制御法開発を目指す。具体的には以下の目標項目を達成すべく、計算機実験ならびにプロトタイプ作製と測定実験を目的とした。

- (1) 高効率のレンズ効果を示すフォノン結晶構造の設計とプロトタイプ作製
- (2) フォノン結晶による水中超音波無

## 線電力伝送実験

- (3) 半導体・圧電体表面・薄膜におけるナノスケール周期構造による新しいテラヘルツ波発生原理・デバイスの提案
- (4) 弾性波エネルギーの効率的収穫のための音響ダイオードの設計。

## 3. 研究の方法

上記の各研究目的に対して、それぞれ以下の研究手法を用いて実施した。

### (1) フォノン結晶レンズ

レンズ効果の発現原理と実証実験のための素材探索を、時間領域差分法に基づく数値シミュレーションによって実施した。また、音響レンズ効果の高効率化・広帯域化の実現のための網羅的設計、ならびに、より軽量で人体中での使用にも影響を及ぼさない素材を用いる必要から、CADソフトと3Dプリンタを用いて樹脂製フォノン結晶構造のプロトタイプを作製した。

### (2) 水中超音波無線電力伝送実験

水中超音波実験においては、自作のトランスデューサならびに市販のハイドロフォンを用いて音圧分布測定を行った。さらに、音圧分布可視化のためにシュリーレン装置を構築し、超音波伝送の指向性およびフォノン結晶による透過特性・伝搬方向観測を行った。

### (3) 半導体・圧電体の表面・薄膜中のナノスケール周期構造による THz 弾性波制御

高効率の並列計算アルゴリズムを駆使して、経験的原子間相互作用モデルに基づくフォノンバンド計算ならびに弾性波伝搬の大規模分子動力学法シミュレーションを実施し、半導体・圧電体の表面・薄膜における THz 弾性波の伝搬と、そのナノスケール周期構造による制御効率解析を行った。

### (4) 音響ダイオード

圧電-誘電体周期構造に基づく音響ダイオードのフォノンバンド計算を、弾性体方程式

と圧電方程式との連成によるマルチフィジクスシミュレータを主に用いて実施した。

#### 4. 研究成果

##### (1) フォノンレンズの設計と超音波伝搬実験・伝送効率評価

2次元 GRIN 型フォノン結晶による水中超音波伝搬と焦点化を数値シミュレーションで設計した後に炭化タングステン棒を周期的に配置した GRIN レンズ構造のプロトタイプを作製し、負の屈折現象と焦点化の実証実験を行った(図1)。実験には、我々が独自に設計・作製した高効率トランスデューサを用い、測定系として水中超音波分布を測定するためのハイドロフォンを購入、上記特性の検証を実施した。図1(b)は周波数1MHz の超音波をフォノンレンズ左側から入射した場合に右側に現れるレンズ効果を示す。

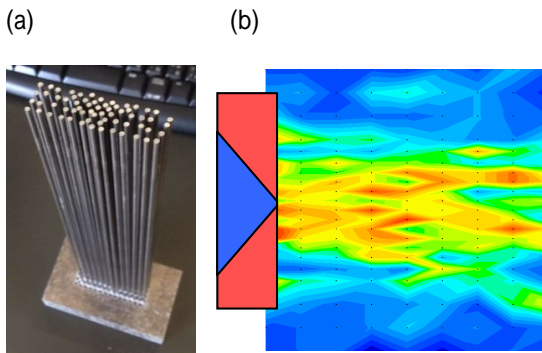


図1 (a)金属棒の周期配置による擬2次元フォノンレンズ;(b)超音波伝送実験における音圧分布。

また、音響レンズ効果の高効率化・広帯域化の実現のための網羅的設計、ならびにデバイス化に向けてより軽量で人体にも影響を及ぼさない素材を用いることを目的として、CAD ソフトと3D プリンタにより樹脂製のプロトタイプを作製し、水中超音波実験による負の屈折現象の確認を行った。

さらに、超音波伝搬の可視化のためのシュリーレン装置を構築し、超音波伝送の指向性およ

びフォノン結晶による透過特性・伝搬方向確認までを可能とした。更にその技術を援用して、水中パイプ内を超音波が高効率で伝送するためのパイプ構造の数値設計と伝送効率の評価、および伝搬の可視化解析を行った。

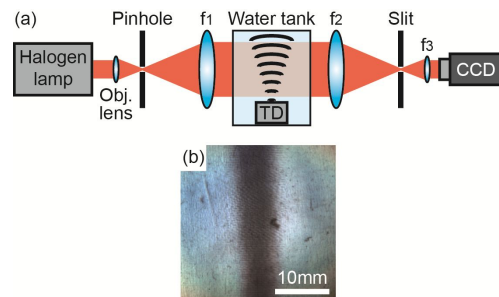


図2 (a)水中超音波伝送の可視化実験(シュリーレン)系の模式図、および(b)伝搬経路像。

##### (2) 半導体・圧電体の表面・薄膜中のナノスケール周期構造による THz 弾性波制御

固体表面の周期構造によるテラヘルツ波制御実現に向け、大規模分子動力学シミュレーションによる構造・材料探索を実施した。圧電性薄膜として既に使用実績のある窒化アルミニウム (AlN) についての原子レベル解析を行った。

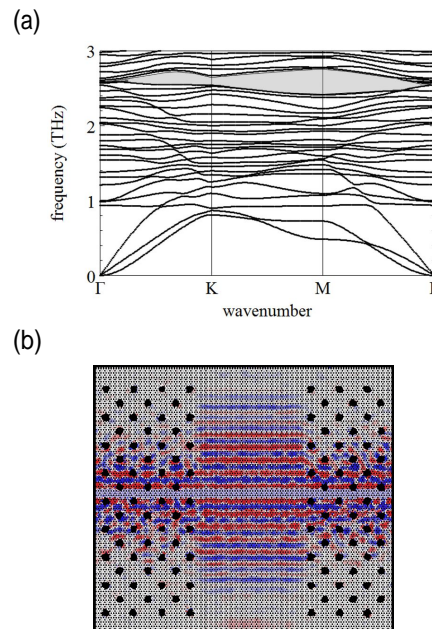


図3 (a)AlN 薄膜中に周期孔を持つ構造のフォノンバンド図;(b)設計した導波路上の THz 弾性波伝搬の MD シミュレーション。

膜厚 3.8nm の AlN 薄膜において厚み縦振動共振モードが励起され、かつ薄膜上を安定に伝搬できること、さらにその薄膜にナノスケールの周期孔構造を導入した薄膜構造にフォノンバンドギャップが形成されることを示し(図3(a))、その解析を基に、テラヘルツ導波路を設計、その中で弾性波が閉じ込められて伝搬特性が向上することを確かめた(図3(b))。この導波路構造と圧電効果を組み合わせることによって新しいテラヘルツ波発振源を実現できる可能性が示された。

### (3) 音響ダイオードの数値設計

高効率音響エネルギー回収デバイスの基本原理として、圧電体と誘電体の周期構造からなり、可聴域で動作する音響ダイオードの数値設計を行った。具体的には、PZT とアクリルプラスチックの数cmオーダーの周期構造を2種類配列することによって、界面での伝搬モード(振動方向が厚み方向に対称な S モードと非対称な A モード)の変換によって、弾性波の整流性を可聴域で実現する可能性を見出した。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Ryo Hikata, Kenji Tsuruta, Atsushi Ishikawa, and Kazuhiro Fujimori, Terahertz Acoustic Wave on Piezoelectric Semiconductor Film via Large-Scale Molecular Dynamics Simulation, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 54, 2015, (掲載決定)

Ryo Hikata, Kenji Tsuruta, Atsushi Ishikawa, and Kazuhiro Fujimori, Terahertz Acoustic Wave on Piezoelectric Semiconductor Film via Large-Scale Molecular Dynamics Simulation, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2014), 査読有, Vol. 35, 2014, 401-402

Kazuya Tsubouchi, Atsushi Ishikawa,

Kazuhiro Fujimori, and Kenji Tsuruta, Design and Visualization of Ultrasonic Wave in Phononic Structure for Efficient Energy Transmission, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics (USE2014), 査読有, Vol. 35, 2014, 225-226

Yusuke Kanno, Kenji Tsuruta , Kazuhiro Fujimori, Hideki Fukano, and Shigeji Nogi, Phononic-Crystal Acoustic Lens by Design for Energy-Transmission Devices, Electronics and Communications in Japan, 査読有, Vol. 97, 2014, 22-27, 10.1002/ecj.11491

Yuki Hori, Kazuhiro Fujimori, Kenji Tsuruta, Shigeji Nogi, Design and Development of Highly Efficient Transducer for Ultrasonic Wireless Power Transmission System, Electrical Engineering in Japan, 査読有, Vol. 184, 2013, 27-35, 10.1002/ej.22406

〔学会発表〕(計 12 件)

岩崎裕平, 石川篤, 鶴田健二, 圧電-誘電体周期構造を用いた音響ダイオードの設計, 応用物理学会 2015 春季学術講演会, 2015.3.11, 東海大学

Ryo Hikata, Kenji Tsuruta, Atsushi Ishikawa, and Kazuhiro Fujimori, Terahertz Acoustic Wave on Piezoelectric Semiconductor Film via Large-Scale Molecular Dynamics Simulation, The 35th Symposium on Ultrasonics Electronics (USE 2014), 2014.12.3-5, 明治大学

Kazuya Tsubouchi, Atsushi Ishikawa, Kazuhiro Fujimori, and Kenji Tsuruta, Design and Visualization of Ultrasonic Wave in Phononic Structure for Efficient Energy Transmission, The 35th Symposium on Ultrasonics Electronics (USE 2014), 2014.12.3-5, 明治大学

樋片亮, 石川篤, 鶴田健二, 圧電性半導体薄膜における弾性波伝搬・制御の大規模分子動力学シミュレーション, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 2014.11.22-24, 岩手大学

岩崎裕平, 石川篤, 鶴田健二, 圧電周期構造を用いた音響ダイオードの設計, 日本機械学会第 27 回計算力学講演会, 2014.11.22-24, 岩手大学

岩崎裕平, 石川篤, 鶴田健二, 圧電-誘電体周期構造を用いた音響伝播制御, 第 16 回 IEEE 広島支部学生シンポジウム, 2014.11.15-16, 広島市立大学

岩崎裕平, 石川篤, 鶴田健二, 圧電-誘電体周期構造を用いた音響ダイオードの設計, 平成 26 年度(第 65 回)電気・情報関連学会中国支部連合大会, 2014.10.25, 福山大学

Ryo Hikata, Kenji Tsuruta, Atsushi Ishikawa and Kazuhiro Fujimori, Acoustic Wave on Piezoelectric Semiconductor Film via Molecular Dynamics Simulation, The 15th IUMRS-International Conference in Asia (IUMRS-ICA 2014), 2014.8.24-30, 福岡大学

樋片亮, 鶴田健二, 薬師川裕貴, 圧電性半導体における弾性波伝搬・制御の分子動力学シミュレーション, 応用物理学会 2014 春季大会, 2014.3.18, 青山学院大学

田所正昭, 高海裕文, 羽井佐浩気, 鶴田健二, 藤森和博, 深野秀樹, 樹脂製フォノンニック結晶による超音波エネルギー輸送・収穫: 負の屈折と音響レンズ効果, 応用物理学会 2014 春季大会, 2014.3.18, 青山学院大学

田所正昭, 羽井佐浩気, 菅野祐輔, 藤森和博, 鶴田健二, 深野秀樹, フォノンニック結晶レンズの FDTD 解析と超音波実験, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 2013.11.3,

佐賀大学

樋片亮, 鶴田健二, 藤森和博, 薬師川裕貴, GaAs 結晶表面における弾性波伝搬・制御の大規模分子動力学シミュレーション, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 2013.11.3, 佐賀大学

樋片亮, 鶴田健二, 藤森和博, GaAs 結晶表面における弾性波伝搬・制御の分子動力学シミュレーション, 応用物理学会 2013 秋季大会, 2013.9.17, 同志社大学

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mdd.ec.okayama-u.ac.jp/pubs.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鶴田 健二 (TSURUTA, Kenji)

岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

研究者番号: 00304329

### (2) 研究分担者

藤森 和博 (FUJIMORI, Kazuhiro)

岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授

研究者番号: 70314705

### (3) 研究分担者

石川 篤 (ISHIKAWA, Atsushi)

岡山大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 90585994