

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2005～2008

課題番号：17510106

研究課題名（和文） ナノ・フォノンクスの開拓と新たな音響量子素子設計への展開

研究課題名（英文） A basic study of nanophononics for the development
of new phononic devices

研究代表者

田村 信一郎（TAMURA SHINICHIRO）

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80109488

研究成果の概要：本研究課題の下、以下に挙げる研究の展開と成果を通じ、ナノ・フォノンクス分野の進展と、新たな音響量子素子の設計への道を拓くことが出来たと、結論される。

- (1) ナノ構造中の量子化熱伝導度の低温下における破綻と回復現象の発見
- (2) 1次元周期超格子構造中のフォノンの共振モード、並びにナノ・マイクロ・ディスク構造におけるフォノン・キャビティモードの発見とその特性解明
- (3) フォノン結晶中の表面導波路モードの確認とその安定性解析
- (4) ナノ人工オパールにおけるフォノンの完全ギャップの発見とバンド構造の解明
- (5) フォノン・ソリトンの伝播における多次元性効果の解明
- (6) 熱パルス実験で発見された CaWO_4 結晶中のフォノンの「特異モード」の解明

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,100,000	0	1,100,000
2006年度	700,000	0	700,000
2007年度	900,000	270,000	1,170,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 マイクロ・ナノデバイス

キーワード：フォノン、量子化熱伝導、フォノン結晶、ソリトン、キャビティモード

1. 研究開始当初の背景

近年のフォノン・スペクトロスコピー分野の進展は目覚ましいものがある。実験領域では、超短光パルスを用いて音響フォノンを励起・検出するコヒーレント・フォノン分光法（ピコ秒超音波法）が確立し、この手法は、ナノスケール極微細量子構造の物性解明と制御に関し、電子・光技術と相補的で、強力な武器となった。また、ナノ・リソグラフ技術の展開により、ナノ細線中の熱伝導量子の存在や細線振動の量子性の観測、微小 SASER (Laser の超音波版) 素子の開発など、微小ス

ケールにおけるフォノンクス研究と、その応用の飛躍的発展が期待されている。一方、本研究グループは国内におけるフォノンクス分野における殆ど、唯一の理論研究グループであり、その研究は多岐にわたり、これまでに国内外の実験研究グループとの共同研究も含めて、この研究分野の最先端を切り開いてきた。複合的な本テーマに関しても、現時点で国際的に唯一の研究グループである。

2. 研究の目的

上記の研究開始当初の背景を踏まえ、本研究

では以下に示す4つの主要な研究テーマを設定し、その解析と説明を通じ、ナノ・フォノン分野の新展開を計り、新たな音響量子素子への道を拓くことを目的とした。

- (1) ナノ構造における熱伝導量子の解析
- (2) ナノマイクロ・フォノンキャビティの設計
- (3) フォノン結晶のデバイス応用を目指した新たな研究展開
- (4) 非平衡フォノン・スペクトロスコーピー分野の新展開：バルクフォノンの集束効果とイメージング

3. 研究の方法

(1) 「ナノ構造における熱伝導量子の解析」系のサイズが減少するとフォノンの最大波長は短くなり、最小エネルギーは大きくなる。後者が熱エネルギー kT を超えるとフォノンによる熱伝導は生じない。例えば巾 100nm の量子細線では 1K 以下の温度で4つのギャップレス・フォノンのみが励起され、もし各フォノンの細線透過率が1なら、温度 T に比例し物質パラメーターに依らない量子化熱伝導度が実現する。しかし透過率が1と見なせるのは一般に高周波数領域のみであり、1K 以下の低温領域ではこの量子化の破綻と、新たな熱伝導度の量子化が示唆される。本テーマでは、細線構造での熱伝導度を低振動数領域で有効な Euler- Bernoulli 理論と、より厳密な Timoschenko 理論の併用により解析を展開した。

(2) 「ナノマイクロ・フォノンキャビティの設計」

弾性体周期構造(超格子)に構成層と異質な層(キャビティ層)を導入すると、その層に局在したフォノンのモード(キャビティモード)が出現する。このモードは層内に閉じ込められ、バルクフォノンよりも大きな振幅を持って伝播するため、相互作用効果も増強されると期待されている。本テーマでは半導体、金属超格子中のキャビティ層内に閉じ込められて伝播するフォノンの存在とその特性を、格子グリーン関数法を用いて解析し、相互作用の増強効果(フォノン・ソリトンの生成等)の解明、並びにピコ秒超音波実験による検証の可能性を検討した。解析手法として、有限時間領域差分法(FDTD法)に基づいたフォノン波束の伝播イメージング・シミュレーションを併用した。更に超音波レーザ(SASER)のための共振器の設計を目指し、円柱状の弾性体ディスクの振動モードの解析を行い、キャビティモードの存在を探った。

(3) 「フォノン結晶のデバイス応用を目指した新たな研究展開」

- 3-1 表面導波路モードの探索
- 3-2 人工オパールにおけるフォノンのバンド構造の解明

弾性体の多次元複合周期構造であるフォノン結晶は、完全ギャップの存在と、それを利用したナノマイクロ音響デバイスへの応用上重要である。本テーマではフォノン結晶の表面に種々の線状欠陥(導波路)を導入することにより、表面に束縛されて伝播するフォノンのモードを探索した。特に表面導波路バンドの存在条件とその構造、また伝播安定性を、分散関係と群速度の解析、および実時間パルス伝播シミュレーションにより明らかにした。解析には有限時間領域差分法(FDTD法)を用いた。さらに、最近3次元フォトニック・フォノン結晶として注目され、実験研究が盛んになりつつある人工オパールの振動特性や、フォノンのバンド構造、フォノン透過率などの音響基礎物性に関する解析をやはりFDTD法に基づいて遂行した。

(4) 「非平衡フォノン・スペクトロスコーピー分野の新展開：バルクフォノンの集束効果とイメージング」

バルク結晶はその弾性的性質が異方的であり、その内部を伝わるフォノンのエネルギーには特異な集束現象が生じる。最近、正方晶 CaWO_4 における熱パルス実験で、音速測定結果からは説明のできないフォノンの「特異モード」が存在しているとの報告がなされた。この結晶は宇宙のダークマター探査のための標的物質として重要であるこの「特異モード」の正体を突き止めるために、弾性定数に基づく連続弾性論($< 1 \text{ THz}$ の低周波数領域で有効)を用いた解析に加え、さらに格子力学モデル($\sim 1 \text{ THz}$ 高周波数分散領域で有効)を援用し、群速度ベクトルの解析を展開した。同時にフォノン・スペクトロスコーピー分野の新展開を目論むと共に、ダークマター検出の分野への貢献も目指した。

4. 研究成果

(平成17年度)

(1) 「ナノ構造における量子化熱伝導度の破綻と回復」

量子化熱伝導度は、断面積が断熱的に変化するナノ細線中でのみ観測される。このような細線構造の音響振動解析を低振動数領域で有効な Euler- Bernoulli 理論と、より厳密な Timoschenko 理論の併用により展開した。特に4つの音響フォノン・モード(縦モード、振れモード、撓みモード、ずれモード)と低

次のギャップ・モードである曲げ振動モードに関し、運動方程式に基づく解析をカテナイダル細線形状に対して遂行した。その結果、フォノン透過率は細線の形状、モードと周波数に依存して複雑に振る舞うことを明確にし、量子化熱伝導度が実現されるのは、一般に高周波数領域のみであり、従来量子化が保たれると考えられていた1 K以下の低温領域において、熱伝導度の量子化が一旦破れることを示した。さらに1 mK領域の極低温において、量子化が回復される。これらナノ細線ことを初めて明らかにした。ナノ細線構造における熱伝導の量子化に関する実験報告は、これまでに1グループによるもののみであり、さらなる実験的検証が望まれる。

(2) 「超格子構造におけるフォノン・キャビティ効果」

フォノン・キャビティモードは母体である超格子に周期性を破る異質な層が埋め込まれた構造に生じる。このような1次元周期系の音響振動の解析には、格子グリーン関数法が有用である。すでに我々が単一フォノン（スカラー場）・モードの場合に開発し、成功を収めたこの手法を、新たに3つのフォノン（ベクトル場）・モードが結合している本問題へ拡張し、キャビティ層内に局在し、しかもこの層に沿って伝播して行くキャビティモードの固有解を求めた。その結果、このモードは種々の群速度を持つブランチから形成されていることが判明した。興味深い結果として、群速度が0で全く伝播できないモードも見つかった。以上の結果を検証するため、FDTD法に基づく実時間フォノン波束伝播シミュレーションを展開し、励起波束が複数のキャビティモードへ分裂し、それらがキャビティ層に沿って安定に伝播する様子を明らかにした。更に、円柱状ディスク構造における音響キャビティモードの解析を平成20年度に行っている。

(平成18年度)

(1) 「フォノンニック結晶における表面導波路モードの探索」

異なる弾性体の複合周期構造であるフォノンニック結晶は、完全ギャップを利用したナノマイクロ音響デバイスへの応用に繋がる。本テーマではフォノンニック結晶の表面に線状欠陥（導波路）を導入することにより、表面導波路内に束縛されて伝播するフォノンの探索を行った。フォノンニック結晶は、弾性的にソフトな母体（高分子固体）にハードな円柱（金属）が周期的に配列した構造であり、この系のフォノンには円柱充填率の広い範囲にわたり、完全ギャップが存在している。しかし、欠陥のない完全表面では、この

ギャップ内に固有なモードとして表面フォノンは存在しない。一列の円柱列を母体物質で置き換えることにより、線形導波路を導入すると、表面と導波路に同時に束縛されて伝播する表面導波路モードが出現する。実際、これらのモードのブランチが、周波数について下から2つの完全ギャップ内に見いだされた。しかし、それらのブランチの下には伝導に寄与するバルクフォノンのブランチがあるため、これら表面導波路モードの安定性の確認が重要である。本研究では実際に寿命の評価を行い、ブランチ内に減衰率が千分の1程度にまで落ち込む振動数の存在を確認した。同時に表面導波路モードの伝播シミュレーションも行い、この安定性を確認した。

(平成19年度)

(1) 「フォノン・ソリトンの伝播における多次元性効果」

結晶固体は本質的に非線形分散媒質である。もし、周波数成分がTHz領域に及び、また、励起振幅が大きければ、波動伝播においてフォノン・ソリトンが出現する。実際、複数の実験グループはフォノン・ソリトンの生成と伝播を観測している。しかし、その解析は1次元KdVモデルに基づいている。ソリトンの励起のためのレーザのスポット・サイズは通常10 μm 程であり、縦伝播距離に比べて小さいが、横方向の広がり効果は興味深い。そこで、（実験状況を考慮に入れ）横方向での非線形性と分散性を無視した近似での格子歪みの従う運動方程式を導出した。これは2次元ではK-P方程式、また3次元では軸対称な3次元K-P方程式となる。横方向の初期歪みの分布を、ポンプ・レーザの強度分布に合わせてガウス関数（縦方向では矩形関数）でモデル化し、伝播数値シミュレーションを行った。その結果、1次元モデルの場合と同様、縦方向に複数のソリトンが形成されてゆくこと、またそれらの横方向のプロファイルが放物線状であることを見いだした。この結果はプローブ光を横方向に走査することにより、1次元の実験と同様に、観測可能である。ここで見いだした歪みソリトン伝播における次元性効果の観測は、その後第12回凝縮体におけるフォノン散乱国際会議（2007年）において、パリ大学の実験グループ（B. Perrin教授）によって公表された。

(2) 「非平衡フォノン・スペクトロスコピー分野の新展開：バルクフォノンの集束効果とイメージング」

弾性的異方性により、バルク結晶中の非平衡フォノン（熱パルス）のエネルギー伝播には集束現象が生じる。最近、英国ランカス

ター大学のグループにより、正方晶 CaWO_4 における熱パルス実験で、音速測定結果からは説明のできないフォノンの「特異モード」の存在が報告された。(CaWO_4 結晶は宇宙のダークマター探査のための標的物質として使用される。) われわれはこの「特異モード」の正体を突き止めるために、(1) 弾性定数に基づく非分散領域 (100 GHz 以下の周波数域) のフォノンの群速度と、フォノン・イメージの計算、(2) 格子力学モデルを用いた分散領域 (100 GHz - 1 THz 周波数域) のフォノンの群速度と、フォノン・イメージの計算、の両方を行った。その結果、「特異モード」は波数ベクトルの方向とずれた方向にエネルギーを伝える横波モードであることがほぼ確定した。同時に、2組のグループにより公表されている CaWO_4 の弾性定数が、この結晶中の横波フォノンの群速度 (従ってフォノン・イメージ) に対し、大きく異なる値を与えることを明らかにした。この矛盾を解決するために、 CaWO_4 結晶を用いたフォノン・イメージング実験の遂行を提案した。

(3) 「3次元フォトニック・フォノンニック結晶 (オパール) のバンド構造」

最近3次元フォトニック・フォノンニック結晶として注目され、実験研究が盛んになりつつある人工オパールの振動特性や、フォノンのバンド構造、フォノン透過率などの音響基礎物性に関する理論解析を、主としてFDTD法に基づいて進めた。特に、FCC構造をとる3次元シリカガラス球からなる人工オパールにおいて、球間の焼結度を増すにつれ、孤立球のスペクトルから、次第にフォノンのバンドが形成されてゆく様子を初めて明らかにした。また、分散関係に現れる完全ギャップと、ガラス球間の焼結度との関係を解明した。以上の成果をPHONONS 07 (第12回凝縮体におけるフォノン散乱国際会議)において口頭で発表した。また引き続きフォトニック-フォノンニック・ギャップの相互作用に着目し、これらの2つの“結晶”は実は同一の人工物質であることから、両結晶の概念を更に拡張することにより、新たに「フォノトニック結晶 (Phonotonic crystals)」の概念を提案し、それらに関する研究成果を米国物理学会のレター誌 (PRL) に公表した。

(平成20年度)

(1) 「ナノ-マイクロ構造におけるフォノンのキャビティモード」

Sound-Laser (SASER) 実現のための音響共振器として、ディスク状の多層マイクロ・ナノ周期構造を初めとする種々の3次元微小構造を対象に、可能な限り小さなモード体積を有する音響キャビティモード探索と、1 GHz -

1 THz 領域の高性能マイクロ・ナノ音響キャビティの設計を目指した。これらの構造ではその周縁に局在して循環伝播する音波のモード [Whispering Gallery (WG) モード] が存在している。我々はこの事実に着目し、先ず円柱状の弾性体単一ディスク構造における音響キャビティモードを解析的に求めることを試み、成功を修めた。具体的には、有限な厚さの円柱ディスクにおいて、WGモードよりも更に低い固有振動数と、小さなモード体積を持つ音響キャビティモード (ディスク端に局在して伝播するエッジモード) の存在を解析計算で見いだした。(より高い振動数のモードは共振器内部へ広がっており、音波のパワーが蓄積しない。) このモードはディスク側面での閉じ込めに加え、更に上面、底面における閉じ込め効果と、構造に付随する幾何学的対称性が相乗的に作用した結果、生じたものである。本成果は、微小音響共振器の設計に留まらず、光、電子との結合により、量子情報技術への応用まで視野に入れた新たなナノ量子デバイスへの展開にも繋がると期待出来、ナノ・フォノンクス分野の本格的展開を促す契機になるものと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

1) S. Tamura,

Vibrational cavity modes in a free cylindrical disk.

Physical Review B 79, 054302-1~054302-18 (2009).

査読有

2) A. V. Akimov, Y. Tanaka, A. B. Pevtsov, S.

F. Kaplan, V. G. Golubev, S. Tamura, D. R. Yakovlev, and

M. Bayer,

Hypersonic modulation of light in

three-dimensional photonic and phononic band-gap materials.

Physical Review Letters 101, 033902-1~033902-4 (2008).

査読有

- 3) Y. Tanaka, T. Yano, and S. Tamura,
Surface guided waves in two- dimensional phononic crystals.
 Wave Motion 44, 501-512 (2007).
 査読有
- 4) K. Hayasaka, R. Higashi, J. Suda,
Y. Tanaka, S. Tamura, M. Giltrow and
 J. K. Wigmore,
Phonon images, anomalous mode and elastic constants in CaWO_4 .
 Solid State Communications 143,
 386-389 (2007).
 査読有
- 5) Y. Tanaka, S. Tamura, A. V. Akimov,
 A. B. Pevtsov, S. F. Kaplan,
 A. A. Dukin, V. G. Golubev,
 D. R. Yakovlev and M. Bayer,
Phononic properties of opals.
 Journal of Physics: Conference
 Series 92, 012107-1~ 012107-4 (2007).
 査読有
- 6) K. Hayasaka, R. Higashi, J. Suda,
Y. Tanaka, S. Tamura, M. Giltrow and J. K.
 Wigmore,
Phonon images in CaWO_4 .
 Journal of Physics: Conference Series 92,
 012099-1~012099-4 (2007).
 査読有
- 7) T. Kawasaki, S. Tamura and H. J. Maris,
Multi-dimensional effects on the propagation of strain solitons in solids.
 Journal of Physics: Conference Series 92,
 012091-1~12091-4 (2007).
 査読有
- 8) D. H. Hurley, O. B. Wright, O. Matsuda, T. Suzuki, S. Tamura and Y. Sugawara,
Time-resolved surface acoustic wave propagation across a single grain boundary.
 Physical Review B 73, 125403-1~125403-6
 (2006). 査読有
- 9) S. Tamura, H. Watanabe and
 T. Kawasaki,
Acoustic-phonon cavity modes in one-dimensional multilayered elastic structures.
 Physical Review B 72, 165306-1 ~
 165306 -11 (2005). 査読有
- 10) Y. Tanaka, F. Yoshida, and S. Tamura,
Lattice thermal conductance in nanowires at low temperatures: Breakdown and recovery of Quantization.
 Physical Review B 71, 205308-1 ~
 205308-12 (2005). 査読有
- [学会発表] (計 6 件)
- 1) K. Hayasaka, R. Higashi, J. Suda,
Y. Tanaka, S. Tamura, M. Giltrow and
 J. K. Wigmore,
Phonon images in CaWO_4 .
PHONONS 2007,
 Conservatoire national des arts et
 metiers, Paris, France, 15-20 July 2007.
- 2) Y. Tanaka, S. Tamura, A. V. Akimov,
 A. B. Pevtsov, S. F. Kaplan,
 A. A. Dukin, V. G. Golubev,
 D. R. Yakovlev and M. Bayer,
Phononic properties of opals.

PHONONS 2007,

Conservatoire national des arts et metiers, Paris, France, 15-20 July 2007.

- 3) T. Kawasaki, S. Tamura and H. J. Maris
Multi-dimensional effects on the propagation of strain solitons in solids,
PHONONS 2007,
Conservatoire national des arts et metiers, Paris, France, 15-20 July 2007.

- 4) S. Tamura,
Theory of localized phonons in multilayered structures.
Son et Lumiere: from microphotonics to nanophononics,
Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Cargese, France, October 16- 28h, 2006.

- 5) Y. Tanaka and S. Tamura,
Surface waveguide modes in 2D phononic crystals.
Son et Lumiere: from microphotonics to nanophononics,
Institut d'Etudes Scientifiques de Cargèse, Cargese, France, October 16- 28h, 2006.

- 6) Y. Tanaka, T. Yano, and S. Tamura,
Surface guided waves in two-dimensional phononic crystals.
International Symposium on Mechanical Waves in Solids (ISOMWS 06)
Zhejiang University, 杭州, China,
May 15-18, 2006

田村 信一郎 (TAMURA SHINICHIRO)
北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80109488

- (2) 研究分担者
田中 之博 (TANAKA YUKIHIRO)
北海道大学・大学院工学研究科・助教授
研究者番号：00281791

- (3) 連携研究者
なし

6. 研究組織
(1) 研究代表者