

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04020

研究課題名（和文）ナノ領域における熱制御を目指した移動型局在振動の基礎研究

研究課題名（英文）A fundamental study on moving intrinsic localized modes for thermal control in nano-scale

研究代表者

木村 真之（Kimura, Masayuki）

京都大学・国際高等教育院・特定講師

研究者番号：00551376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鎖のように変形可能な1次元結合振動子を考え、そこに存在するエネルギー局在振動の基礎的性質、とくに安定性や移動性を明らかにした。また、現実存在する白雲母結晶の原子振動モデルを用いて静止型・移動型のエネルギー局在振動の性質を検討した。その結果、移動型は崩壊せずに長距離移動可能な場合があることを明らかになり、エネルギー局在振動を用いたナノ領域における熱制御の可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギー局在振動の研究は、変形しない1次元結合振動子におけるものがほとんどであるが、現実の系は変形するのが普通である。本研究では、従来研究に基づいた解析を変形する系に対して適用し、エネルギー局在振動の安定性や移動性について新たな知見を得た。また、ナノ系において長距離移動可能な局在振動解を発見し、エネルギー局在振動の移動メカニズムについて新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In this study, we consider a one-dimensional coupled oscillator that can be deformed like a chain and clarify the fundamental properties of the energy localized vibrations, especially stability and mobility. In addition, the properties of stationary and mobile energy localized vibrations were investigated using an atomic vibration model of a realistic model of the crystal of Muscovite. As a result, it is shown that the mobile type can travel long distances without collapsing. It implies the possibility of thermal control using the energy localized vibrations in the nanotechnologies.

研究分野：非線形動力学

キーワード：局在振動 移動型局在振動 非線形結合振動子

1. 研究開始当初の背景

本研究は、非線形現象であるエネルギー局在振動の基礎的性質を解明し、工学的な応用を目指すものである。エネルギー局在振動とは、右図のような結合振動子において、数個の振動子のみが強く振動する状態、すなわちエネルギーが空間的に局在した状態のことである。1988年の発見[1]以来、多くの研究者の注目を集め、理論的・数理的な研究が主に行われてきた。近年では、ナノ領域の結合振動子、すなわち結晶格子における原子振動も非線形性によって局在しうることが示唆されており[2]、ナノ領域における熱制御(フォノンエンジニアリング)への応用可能性が指摘されている。しかしながら、理論的・数理的な研究は、結合振動子が1次元の場合、質点の変位方向も1次元に拘束されている場合が多い。現実の原子は2次元、3次元に変位可能であり、エネルギー局在振動の安定性などが従来とは異なる可能性が指摘されている[3]。したがって、移動型の局在振動についても、基礎的な性質を詳細に調べる必要がある。

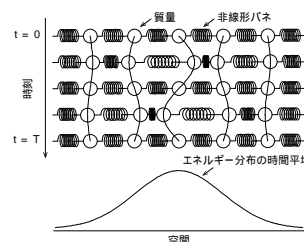


図1 エネルギー局在振動

2. 研究の目的

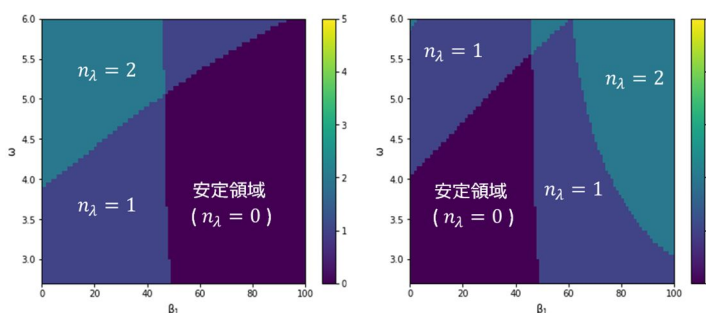
本研究では、1次元非線形結合振動子の各振動子が2以上の自由度を持つ場合を検討対象とする。つまり、結合振動子は柔軟に変形できることになる。この柔軟性がエネルギー局在振動、特に移動型のものへ及ぼす影響を明らかにすることが本研究の主目的である。また、ナノ領域において移動型局在振動がどのように振る舞うかを明らかにすることも研究の目的である。

3. 研究の方法

- (1) 従来の研究は、非線形性が結合ポテンシャルに含まれている Fermi-Pasta-Ulam(FPU) 格子、オンサイトポテンシャルに含まれている Nonlinear-Klein-Gordon(NKG) 格子に生じるエネルギー局在振動を対象としており、これらの系については多くの性質が明らかになっている。本研究では、従来研究との比較のため、FPU 格子と NKG 格子を合成した混合格子に柔軟性を付加したものを対象とする。この柔軟な格子において、エネルギー局在振動の存在性や安定性、移動性を解析的・数値的に検討する。
- (2) 柔軟な結合振動子におけるエネルギー局在振動については、2自由度振動子列を製作して実験的にも性質を検討する。前後左右に変形可能な棒バネを2自由度振動子とし、磁気力によって互いに非線形結合するように設計する。
- (3) ナノ領域におけるエネルギー局在振動については、白雲母結晶のモデルを用いて数値的に検討する。また、ナノ領域においてよく見られる格子不純物による局在モードについては電気回路を用いた系を使って解析的に検討する。

4. 研究成果

(1) 一般に、静止型局在振動にはエネルギー分布の中心が格子点上のサイトセンターモードと、格子点間のボンドセンターモードがある。また、本研究で対象とする柔軟性を付加した1次元格子の場合、振動方向が軸方向の縦振動型、軸に垂直な横振動型、軸周りを回転する回転型が存在する。縦振動型のエネルギー局在振動について、安定性の指標となる1より大きい特性乗数の個数 n_λ をプロットしたものを図2に示す。図の横軸はオンサイトポテンシャルの非線形性の強さであり、左端ではFPU的、右端ではNKG的な格子となる。縦軸は角周波数であり、エネルギーに対応する。図2aはサイトセンターモードの場合であり、格子がNKG的な場合に安定であることがわかる。一方、図2bはボンドセンターモードの場合であるが、格子がFPU的な場合に安定である。両者の安定性は、図の中央で入れ替わっている。これを安定性交替という。従来の混合格子でも報告されているものである[4]。一方で、両者とも周波数が高くなると不安定化することがわかる。これは柔軟性によって生じる座屈が影響しており、従来の系には存在しない不安定化メカニズムである。その他、横振動型や回転型についても安定性交替が生じることを確認した。



(a) サイトセンター

(b) ボンドセンター

図2 縦振動型局在振動の1より大きな特性乗数の数 n_λ

(2) 一般に、静止型局在振動の安定性交替点近傍のパラメータを選べば、移動型局在振動が生成しやすいことが知られている [5] .そこで、本研究では移動型局在振動の探索を成果 (1) で明らかにした特性乗数分布に基づいて行った .その結果、縦振動型と回転型については、局在を保ったまま比較的長距離移動する移動型局在振動の存在が確認された .しかしながら、横振動型については、自由度が 6 以下の極めて短い系についてのみ存在が確認できた .なぜ横振動型が移動しづらいかという点は今後の課題である .

(3) 柔軟な 1 次元格子における移動型局在振動の存在を確認するため、図 3 のような 2 自由度振動子列の設計を行った .各振動子は、前後左右に変形可能な棒パネであり、先端には永久磁石が取り付けられている .隣り合う振動子とは磁気力で相互作用するため、変位に対して強い非線形性を有する .加振機は移動型局在振動を生成するための装置である .本研究では、棒パネを実際に製作し、共振周波数や磁気相互作用の大きさを見積もった .実験的に得られたパラメータを用い、移動型局在振動の生成実験を数値的に行った .その結果の一例を図 4 に示す .図中青線が加振端の変位、赤線が振動子、灰色線が反射を防ぐための吸収境界を表している .時刻が 0.2 秒付近で、局在した振動が移動し始めている様子が見られる .こうした移動型局在振動は一定の間隔で次々に生成されるが、格子軸に垂直な y 方向成分はほぼ零のままであり、静止型のように座屈による不安定化は生じていないことがわかる .移動型局在振動の安定性に関する詳しい検討は今後の課題である .

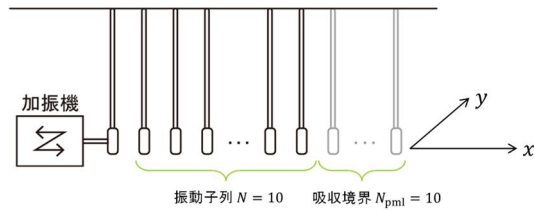


図 3 2 自由度振動子列の概観

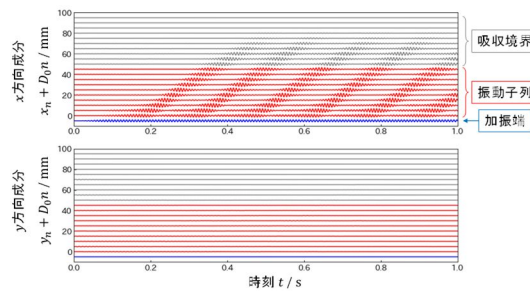


図 4 移動型局在振動の例

(4) ナノ領域におけるエネルギー局在振動については、静止型の安定性とエネルギーの関係を示し、高エネルギーで不安定な局在振動からキックが生じることを確認した [6] .また、移動型局在振動の詳しい解析を行い、格子フォノンと全く共鳴しない通常とは異なる移動型局在振動の存在を世界に先駆けて発見した [6] .しかし、そのメカニズムは未だ不明であり、今後さらに検討する必要がある .また、不純物による局在モードの解析では、平面コイルを有する共振回路のアレイを対象として解析的な検討を行った .外部から近づけられたコイルが不純物となり、共振回路アレイに電流分布が局在した解が生じる .適切な近似の下に解析解を導出することに成

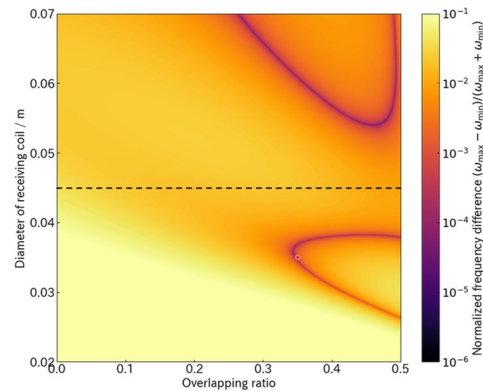


図 5 局在モードの周波数変動

功し、空間対称性の異なるモードの周波数差を極小にする条件を可視化した .図 5 は隣接する平面コイル間の重なりを横軸、受電コイルの大きさとした場合の周波数差である .破線より下側で数値的な検討結果と良く会うことが確認された .このような周波数差が小さい条件は、非線形の場合は移動性に大きく影響を与える .今後は、周波数差が小さくなる条件を検討し、非線形局在振動の移動メカニズム解明に取り組む予定である .

5. 参考文献

- [1] A.J. Sievers, S. Takeno, Phys. Rev. Lett. 61, 970 (1988).
- [2] S. V. Dmitriev, et al., Physics - Uspekhi 59(5), 446 (2016).
- [3] M. Kimura, A. Mitani, and S. Doi, Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE 8(2), pp.153-161 (2017).
- [4] M. Kimura and T. Hikihara, Physics Letters A 372, pp.4592-4595 (2009).
- [5] S. Aubry, Physica D 216, 1 (2006).
- [6] J.F.R. Archilla, Y. Doi, M. Kimura, Phys. Rev. E 100, 022206 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Archilla Juan F. R., Doi Yusuke, Kimura Masayuki	4. 巻 100
2. 論文標題 Pterobreathers in a model for a layered crystal with realistic potentials: Exact moving breathers in a moving frame	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 22206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.100.022206	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 古田 耀、木村 真之、土居 伸二	4. 巻 119(381)
2. 論文標題 非線形結合振動子におけるエネルギー分布を用いた局在振動検出手法の一検討（非線形問題）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 117-120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Togueu Motcheyo Alain Bertrand, Kimura Masayuki, Doi Yusuke, Tchawoua Clément	4. 巻 95
2. 論文標題 Supratransmission in discrete one-dimensional lattices with the cubic-quintic nonlinearity	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nonlinear Dynamics	6. 最初と最後の頁 2461 ~ 2468
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11071-018-4707-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 田中 宗一郎、木村 真之、土居 伸二	4. 巻 118(15)
2. 論文標題 FPU鎖の端点加振により生成される移動型ILMと波束に関する数値的検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 9-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 茂木 大和、木村 真之、土居 伸二	4. 巻 118(413)
2. 論文標題 共振回路アレイにおける局在モードの周波数変動抑制のためのコイル配置の検討 (非線形問題)	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 85-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Kimura Masayuki, F.R. Archilla Juan, Doi, Yusuke
2. 発表標題 Moving Intrinsic Localized Modes in a Mixed Model of Fermi-Pasta-Ulam and Nonlinear Klein-Gordon Lattice
3. 学会等名 JSLoc 2019: Japanese-Spanish Symposium on Energy Localization in Nonlinear Lattices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F.R. Archilla Juan, Doi, Yusuke, Kimura Masayuki
2. 発表標題 Pterobreatheers: wing and breather frequencies in their moving frame
3. 学会等名 JSLoc 2019: Japanese-Spanish Symposium on Energy Localization in Nonlinear Lattices (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mogi Yamato, Kimura Masayuki, Doi Shinji
2. 発表標題 Analytical solutions of localized modes induced by a receiving coil on resonant circuit array with nearest neighbor coupling
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F.R. Archilla Juan, Doi, Yusuke, Kimura Masayuki
2. 発表標題 Energy and charge transport in a silicate layer
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 茂木 大和、木村 真之、土居 伸二
2. 発表標題 共振回路アレイにおける局在モードの解析的導出
3. 学会等名 2019年 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古田 耀、木村 真之、土居 伸二
2. 発表標題 非線形結合振動子におけるエネルギー分布を用いた局在振動検出手法の一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口 郁馬、木村 真之、土居 伸二
2. 発表標題 2次元平面におかれたFPU-KG混合モデルにおける空間局在モードの分岐と安定性に関する一検討
3. 学会等名 2020年 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimura Masayuki、Doi Yusuke、Yoshimura Kazuyuki
2. 発表標題 Bifurcation of Intrinsic Localized Modes in Perturbed Pairwise Interaction Symmetric Lattice
3. 学会等名 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F.R. Archilla Juan、Doi Yusuke、Kimura Masayuki
2. 発表標題 Breathers and tail-breathers in a realistic model of a silicate
3. 学会等名 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tanaka Soichiro、Kimura Masayuki、Doi Shinji
2. 発表標題 A Numerical Study on Generating Condition of a train of Moving ILMs by Exciting an Edge of Stretched FPU Chain with an Impurity
3. 学会等名 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kimura Masayuki
2. 発表標題 Moving Intrinsic Localized Modes in Perturbed Pairwise Interaction Symmetric Lattice
3. 学会等名 International Conference on Nonlinear Localization in Lattices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 宗一郎、木村 真之、土居 伸二
2. 発表標題 不純物を導入したFPU鎖の端点加振による移動型ILMの周期的生成に関する数値的検討
3. 学会等名 2018年 電子情報通信学会 NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村 真之、吉見 悠河、土井 祐介、土居 伸二
2. 発表標題 空間的に不規則な摂動による非線形局在振動の崩壊に関する一検討
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田中 宗一郎、木村 真之、土居 伸二
2. 発表標題 FPU鎖の端点加振により生成される移動型ILMと波束に関する数値的検討
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会(2018-04-NLP)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茂木 大和、木村 真之、土居 伸二
2. 発表標題 共振回路アレイにおける局在モードの周波数変動抑制のためのコイル配置の検討 (非線形問題)
3. 学会等名 電子情報通信学会非線形問題研究会(2019-01-NLP-NC)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学 教育研究活動データベース
<https://kyouindb.iimc.kyoto-u.ac.jp/j/sJ4yL>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	佐藤 政行 (Sato Masayuki) (00266925)	金沢大学・数物科学系・教授 (13301)	実験系設計・構築の補助
連携研究者	吉村 和之 (Yoshimura Kazuyuki) (40396156)	鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (15101)	理論解析の補助
連携研究者	土井 裕介 (Doi Yusuke) (10403172)	大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (14401)	数値解析の補助
連携研究者	渡邊 陽介 (Watanabe Yosuke) (30304033)	大阪大学・基礎工学研究科・助教 (14401)	実験解析の補助

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------