

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03935

研究課題名（和文）2次元非線形格子における移動型局在振動の研究

研究課題名（英文）A Study on Moving Localized Vibrations in Two-dimensional Nonlinear Lattices

研究代表者

木村 真之（Kimura, Masayuki）

摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号：00551376

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では2次元非線形格子における移動型局在振動の性質を理解することを目指し、柔軟な1次元非線形格子や2次元スカラー格子での移動型局在振動について検討を行った。その結果、静止型局在振動解から移動型局在振動解を推定する手法が確立され、2次元FPUTスカラー格子での移動型局在振動の生成に成功した。また、柔軟な1次元非線形格子を実験的に構成し、端点加振による移動型局在振動の生成、および観察に成功した。また、同格子を力学モデルとして定式化し、数値解析を行った。その結果、1次元非線形格子の周囲に配置された振動子が静止型、および移動型局在振動を安定化させることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、これまで1次元格子において進められてきた非線形な移動型局在振動の解析を2次元以上の系に拡張し、より現実的な系における移動型局在振動の性質の一端を明らかにしたものである。特に移動型局在振動解の高精度な推定方法は、これまでほとんど明らかにされてこなかった移動型局在振動の詳しい性質の探究を可能にするもので、学術意義が高いと考えられる。また、現実的な系での解析は、移動型局在振動と余剰電子との相互作用について示唆を与えるものであり、将来的に絶縁物質中の電荷輸送の研究につながるものが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to understand the nature of moving localized vibration on a two-dimensional nonlinear lattice. For this purpose, we investigate moving localized vibration on a flexible chain and a two-dimensional scalar lattice. As a result, a method for estimating initial values of the moving localized vibration from the corresponding standing localized vibration was established. The estimating method was extended to the two-dimensional FPUT scalar lattice, and moving localized vibrations were successfully generated. In addition, a flexible chain was experimentally fabricated, and moving localized vibrations were successfully generated and observed by exciting the edge of the chain. By numerically analyzing the mechanical model of the chain, it was suggested that resonators surrounding the chain stabilize standing and moving localized vibrations.

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

結晶格子において、不純物を中心としてエネルギーが局在した振動モードが存在することは古くから知られていた。一方、不純物が無い場合でも、系の非線形性と離散性によってエネルギーが局在した振動解が存在する。この振動解を内因的局在モード(ILM: Intrinsic Localized Mode) または、離散ブリーザー(DB: Discrete Breather)という。1988年にその存在が初めて指摘[1]されて以降、多くの理論的・数理的な研究が行われ[2]、最近では、金属結晶におけるエネルギー局在振動[3]や、MEMS カンチレバーアレイなどの人工的なナノ構造[4]、グラフェンやカーボンナノチューブなどの低次元炭素材料[5]、白雲母のカリウムイオン層[6, 7]などにおいても、その存在が示唆されている。

エネルギー局在振動の特筆すべき特徴の一つに、局在を保ったまま移動可能である点が挙げられる[2]。これを移動型エネルギー局在振動、または移動型局在振動と言う。力学的エネルギーが局在を保ったまま系を移動できるため、熱輸送を担うキャリアとして考えることができる。したがって、移動型局在振動の制御が実現できれば、ナノ領域での熱制御、すなわちフォノンエンジニアリング[8]への応用が可能ではないかと考えられる。

移動型局在振動の研究は、その多くが、質点が格子軸上に拘束された1次元格子モデルにおいてなされてきた。一方、現実系の多くは2次元状または3次元状に分布しており、質点は格子軸以外にも運動する上に、注目した格子列以外の質点も自由に運動できる。そこで申請者は、従来の1次元格子の質点に格子軸以外の自由度を与え、全体として変形可能な柔軟な1次元格子を考えた。この柔軟性は、特に安定性に大きく影響を与え、多くの局在振動が不安定化する結果となった。しかしながら、2次元格子では静止型局在振動は安定に存在することができることが知られている。また、移動型局在振動が柔軟性から受ける影響については未解明であった。そこで本研究では、1次元格子の周囲に配置されている質点が静止型・移動型局在振動に与える影響を検討することとした。

[1] A.J.Sievers, S.Takeno, Phys. Rev. Lett. 61, 970(1988). [2] S.Flach, A. V. Gorbach, Phys. Rep. 467, 1(2008). [3] S. V. Dmitriev, et al., Physics - Uspekhi 59(5), 446(2016). [4] Y. Doi, A. Nakatani, J. of Solid Mechanics and Materials Engineering 6, 71(2012). [5] F.M.Russell, "Tracks in Mica, 50 years later," In Quodons in Mica, Springer (2015). [6] F.M. Russell, J.C. Eilbeck, Europhysics Letters 78, 10004 (2007). [7] J.F.R. Archilla, F.M. Russell, Letters on Materials 6, 3-8 (2016). [8] A. Balandin, et al., Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics 2, 140(2007).

2. 研究の目的

本研究の目的は、移動型局在振動の存在性・安定性が、媒質が1次元から2次元になったことでどのような影響を受けるかを明らかにすることである。相互作用に単純な多項式ポテンシャルを有するモデルを用いて一般的な結論を導き、実験や現実系のモデルを用いて検証する。この成果は、現実系での安定した移動型エネルギー局在振動の生成法や制御法の研究の端緒になると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、2次元非線形格子における移動型局在振動の性質を調べるため、まずはその生成法を検討する。多項式ポテンシャルを有する単純な1次元格子では、移動型局在振動の数値的な厳密解が知られている。これを手がかりに、静止型局在振動から移動型局在振動の解を構成する手法を開発する。1次元格子における手法の検証の後、2次元格子へと拡張する。

次に、柔軟な1次元非線形格子を製作し、移動型局在振動の生成を試みる。各振動子は先端に磁石が取り付けられた棒バネで構成されており、それらが配列された方向以外にも振動できる特長を有する。この非線形格子において、移動型局在振動の生成を実験的に試みる。また、数値シミュレーションなどにより、格子列の増加に伴う静止型・移動型局在振動の安定性の変化を検討する。

現実的な系として、白雲母のK⁺層における移動型局在振動について数値的に検討する。本研究では、2次元状に広がる格子から、ある特定の軸に沿った1次元格子だけを取り出して検討する。主に、余分な電荷(電子)と局在振動との相互作用について数値シミュレーションを用いて検討する。

4. 研究成果

本研究で検討した移動型局在振動の解の推定法は、同じ基本周波数を持つ静止型局在振動と移動型局在振動とを周波数・波数空間で比較することで構成した。静止型局在振動の時空間波形をフーリエ変換すると、周波数・波数空間では直線状のスペクトルとなる。一方、移動型局在振動も同様に直線状のスペクトルとなるが、速度に応じた傾きを持った直線となる。つまり、静止型のフーリエスペクトルを所望の速度に応じて傾け、それを逆フーリエ変換することで移動型の解を得ることができる。この着想に基づき、多項式ポテンシャルを持つ Fermi-Pasta-Ulam-Tsingou 格子 (FPUT 格子) において

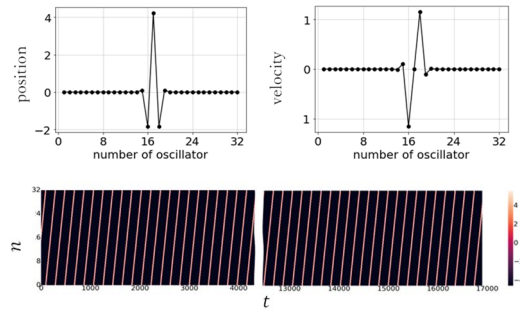


図1 推定された初期値とシミュレーション結果

移動型局在振動の解を静止型局在振動から生成した。その一例を図1に示す。変位(position)は17番目の質点を中心とした分布になっている。速度成分も同様であるが、対称性は異なっている。図下部のエネルギー分布図は、周期境界を持つ32質点のFPUT格子において、推定した初期値を用いたシミュレーションを実行した結果である。周期境界であることを考慮すると、移動型局在振動が一定速度で移動し続けていることが分かる。このように、本手法を用いることで十分な精度で移動型局在振動の初期値を推定できることを確認した。

次に、2次元スカラー格子へ本手法を拡張した。スカラー格子とは、質点の配置される平面の座標と変位の座標が独立した格子のことである。2次元FPUTスカラー格子は通常の2次元FPUT格子よりもバンド構造が単純なため、本手法の拡張が容易である。結果として、改善の余地は残るものの、移動型局在振動を生成することに成功した。今後はこの手法をより洗練させ、2次元FPUT格子における移動型局在振動の性質を詳しく検討する予定である。

実験的に移動型局在振動の性質を調べるため、図2のような磁気結合2自由度振動子列を製作した。棒バネからなる各振動子には永久磁石が取り付けられており、磁氣的に相互

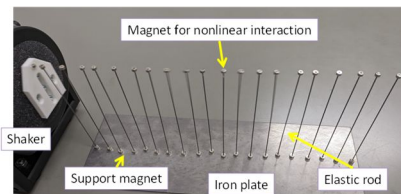
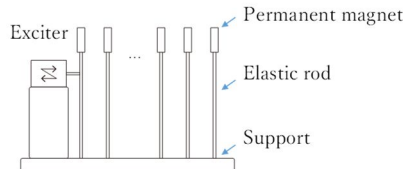


図2 磁気結合2自由度振動子列

作用する。このため、各振動子間の結合は非線形となる。振動子列の端には加振機が取り付けられており、適切な周波数・振幅を選択することにより、移動型局在振動を生成することができる。図3はモデルによる移動型局在振動の生成シミュレーションである。加振端はグラフの下部に相当する。明るい部分はエネルギーが高いことを表しており、局在したエネルギーが一定の時間間隔で生成され系を伝搬していることが分かる。この現象は実験でも確かめられ、2自由度振動子列においても移動型局在振動が存在することが確かめられた。数値モデルではこの振動子列を3列に増やし、周囲の振動子が局在振動子の安定性に与える影響を検討した。その結果、周囲に配置された振動子が折れ曲りによる不安定化を抑制することで、単一の振動子列の場合よりも、局在振動が安定に存在することが明らかになった。

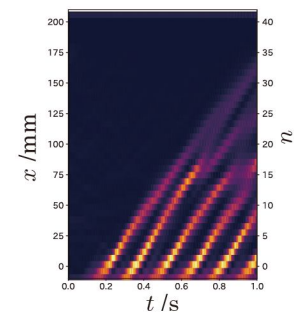


図3 モデルによる移動型局在振動生成シミュレーション

現実的な系における局在振動の研究については、セビリア大学(スペイン)の J.F.R.Archilla 教授の協力の下で遂行した。解析対象は、白雲母の K^+ 層におけるカリウム原子核の古典的な振動モデルに自由電荷(電子)との相互作用を強結合近似によって取り入れたモデルとした。このモデルにおいて、様々な初期値から数値シミュレーションを繰り返し、ほとんど周期的な静止型局在振動解を見いだした。このとき、電荷の存在確率が局在振動の中心に局在することを確認した。また、その解を摂動して移動型局在振動を生成した場合、電荷の確率密度分布も追従することを確かめた。このことは移動型局在振動が絶縁体でも電荷を運ぶキャリアになることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Togueu Motcheyo Alain B., Kimura Masayuki, Doi Yusuke, Archilla Juan F.R.	4. 巻 497
2. 論文標題 Nonlinear bandgap transmission by discrete rogue waves induced in a pendulum chain	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 129334 ~ 129334
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physleta.2024.129334	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

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 6件/うち国際学会 16件）

1. 発表者名 Masayuki Kimura
2. 発表標題 Experiments on Spatially Localized Vibrations in Magneto-mechanical Resonator Array
3. 学会等名 JSLoc2024: 2nd Japanese-Spanish Symposium on Localization and Nonlinear Phenomena in Lattices and Waves（招待講演）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Juan Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Nonlinear excitations in a silicate chain. Experiments and theory
3. 学会等名 JSLoc2024: 2nd Japanese-Spanish Symposium on Localization and Nonlinear Phenomena in Lattices and Waves（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Juan Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Spectrum of Polarobreathers in a Model for Layered Silicates
3. 学会等名 2023 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications(NOLTA2023)（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayuki Kimura
2. 発表標題 Traveling Localized Vibrations Generated by an External Exciter Attached to an Edge of a Mass-spring ladder with Piecewise Linear Coupling
3. 学会等名 CMD30 FisMat2023 Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Juan Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Spectral properties of exact stationary and moving polarobreathers
3. 学会等名 CMD30 FisMat2023 Joint Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayuki Kimura, Kosuke Kawasaki, Shinji Doi
2. 発表標題 Moving Intrinsic Localized Modes Created by Transforming Wavenumber-frequency Spectrum of a Static Intrinsic Localized Mode in FPUT-NKG Mixed Lattices
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics(ICIAM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Juan Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Spectral properties of nonlinear excitations in semiclassical systems with charge transport
3. 学会等名 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics(ICIAM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Juan Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Spectrum of exact polarobreathers in tight-binding semiclassical systems
3. 学会等名 JT2023: 25th International Conference on the Jahn Teller Effect: Vibronic coupling and Jahn Teller Effects in Polyatomic Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayuki Kimura, Jung-Jin Lee, Alain Bertrand Togueu Motcheyo, Shinji Doi
2. 発表標題 Nonlinear supratransmission in a magnetically coupled elastic rods arranged in three lines
3. 学会等名 LONE2022 (Localized nonlinear excitations in condensed matter. Theory and experiments.), CMD 29 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Juan F.R. Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Polarokinks and polarobreathers in a model for silicate layers
3. 学会等名 LONE2022 (Localized nonlinear excitations in condensed matter. Theory and experiments.), CMD 29 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayuki Kimura
2. 発表標題 Intrinsic Localized Modes in a Magnetically Coupled Two-degree-of-freedom Resonator Array
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kosuke Kawasaki, Masayuki Kimura, Shinji Doi
2. 発表標題 Estimation of initial conditions for generating moving ILMs from wavenumber-frequency spectrum of static ILMs in FPU-NKG mixed lattice
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Juan F.R. Archilla, Janis Bajars, Yusuke Doi, Masayuki Kimura
2. 発表標題 Ballistic Charge Transport by Polarokinks and Polarobreathers
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Alain Bertrand Togueu Motcheyo, Masayuki Kimura, Yusuke Doi, Juan F.R. Archilla
2. 発表標題 Supratransmission-induced discrete rogue wave in nonlinear chain
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Miyazaki, Masayuki Kimura, Shinji Doi
2. 発表標題 A numerical study on maximum speed of localized vibrations following a moving external coil on resonant circuit array
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村 真之, イ ジョンジン, 土居 伸二
2. 発表標題 磁気結合を有する2自由度振動子列における移動型局在振動の生成
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 2021年

1. 発表者名 川崎 皓介, 木村 真之, 土居 伸二
2. 発表標題 移動型非線形局在振動の周波数-波数空間における初期値推定
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮崎 健太, 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振動の不純物移動に対する追従性の数値的検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会NOLTAソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shotaro Sugita, Masayuki Kimura, Shinji Doi
2. 発表標題 Approximate solutions of localized mode in a two-dimensional resonant circuit array with an impurity
3. 学会等名 LCM 2021 (Localisation in Condensed Matter), CMD 29 online series (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masayuki Kimura, Ikuma Yamaguchi, Jung-Jin Lee, Alain Bertrand Togueu Motcheyo, Shinji Doi
2. 発表標題 Moving intrinsic localized modes in a flexible nonlinear chain with on-site potential
3. 学会等名 LCM 2021 (Localisation in Condensed Matter), CMD 29 online series (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>木村真之の教育・研究活動 https://www.setsunan.ac.jp/~kimura/indexJ.html</p>
--

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

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		
スペイン	セビリア大学	バレンシア工科大学	カタルーニャ工科大学