

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：34428

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05577

研究課題名(和文)非線形格子の高次元化がエネルギー局在化に及ぼす影響についての実験的研究

研究課題名(英文)Experimental study on the effect of higher dimensionality to energy localization

研究代表者

渡邊 陽介 (Watanabe, Yosuke)

摂南大学・理工学部・准教授

研究者番号：30304033

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)：非線形離散周期構造における、普遍的なエネルギー局在現象として認知されている非線形局在モード(ILM)の励起、伝播に関する実験研究をおこなった。研究代表者らは先行研究で、最もよく知られた非線形格子の一つであるFPU- β 型の特性を模した連成振動子列(1次元系)および加振装置を自作し、この系におけるILMの励起およびその伝播の実証に成功している。本研究課題ではこの実験装置の2次元化のための検討と、系の高次元化が系を移動するILMに及ぼす影響についての考察をおこなった。研究では系の高次元化が(1次元系に)新たにオンサイト効果を付加することに相当すると考え、ILMの移動速度への影響を実験的に調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周期系の高次元化がILMの存在やILMの伝播特性に対してどのような影響を与えるのかについては、ILM研究者らの中でも明確な答えが出されていない。FPU- β 系はシンプルかつ非線形力学研究の世界では最もよく知られた数理モデルの一つであり、コンピュータの発展とともに世界中のたくさんの研究者達が方程式およびその解の挙動を調べ、これまでに膨大な量の研究結果が蓄積されている。系のシンプルさ故、実験データが得られれば、解析・数値計算結果との比較は極めて容易である。本実験で得られるILMの精密な振動・伝播特性データは理論的研究と実験的研究の“橋渡し”として当研究分野に大きく貢献をすることができる。

研究成果の概要(英文)：Nonlinear localized oscillations excited and propagated in a mass-spring chain are experimentally studied. In our previous studies, mobile type of nonlinear localized oscillations have been excited by making mechanical experiments using a mass-spring chain which emulates the Fermi-Pasta-Ulam (FPU) one of beta type. In this study, to consider the on-site effects on the propagation, we have attached linear springs to the weights in the chain. One end of the linear spring is attached at the bottom of the weight and the other is fixed vertically downward. It is found that the speed of propagation of localized oscillations is changed depend on the strength of the effects.

研究分野：非線形力学

キーワード：)非線形局在振動 エネルギー局在 周期構造 離散系 非線形格子

1. 研究開始当初の背景

Intrinsic Localized Mode (: ILM) とは「非線形的な相互作用を有する、“不純物”や欠陥のない“パーフェクト”な離散周期系において励起される、空間的に局在した周期振動モード」であり、非線形力学の分野において「エネルギー局在現象」として注目されている。1980年代の ILM の発見以来、多数の研究がおこなわれており、ILM の特徴として、固有振動数が線形波の伝播禁止帯にあること、系内の任意の位置に、複数個の励起が可能、条件によっては移動することが可能、系の次元によらないこと、系が可積分であることや保存系であることを問わないこと等が明らかにされ、今日、ILM は極めて普遍的な非線形現象・概念として認識されている。本研究代表者の渡邊と研究分担者の土井も、それぞれ異なった数理モデルに対して、ILM の解析的、数値的研究を進め、その研究成果を学術論文誌、国内外の学会において報告してきた。

これまでの世界的な ILM 研究の特徴は、理論（解析、数値計算、シミュレーション）が大きく先行していることである。概念の普遍性の故、幅広い応用が期待されながらも、実験的研究が極めて少なく、観測結果の報告も特定の分野、物理系に限定されているのが現状である。特に高次元の周期系に対しての実験研究はほぼ皆無である。

研究代表者らは先行研究で、最もよく知られた非線形格子の一つである FPU- 型の特性を模した連成振動子列（1次元系）および加振装置を自作し、この系における ILM の励起およびその伝播の実証に成功している（図1）。FPU- 系はシンプルかつ、非線形力学研究の世界では最もよく知られた数理モデルの一つであり、コンピュータの発展とともに世界中のたくさんの研究者達が方程式およびその解の挙動を調べ、これまでに膨大な量の研究結果が蓄積されている。系のシンプルさ故、実験データが得られれば、解析・数値計算結果との比較は極めて容易である。本実験で得られる ILM の精密な振動・伝播特性データは理論的研究と実験的研究の“橋渡し”として当研究分野に大きく貢献をすることができる。

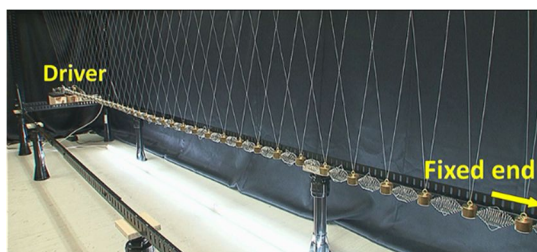


図1. 連成振動子列実験装置

2. 研究の目的

理論解析や数値シミュレーションによりその存在が予言されている高次元格子における ILM の実験的検証をおこなう。系の高次元化が ILM の特性に及ぼす影響とそのメカニズムの解明および ILM の制御方法の確立を目指す。この目的の達成のために、力と伸びが強い非線形性を示すメカニカルなバネ（非線形バネ）の作成、この非線形バネと多数の質点からなるシンプルな高次元連成振動子列（非線形格子）の自作、この格子に励起される ILM の精密な測定がおこなえる計測システムの構築をおこなう。本研究により高次元系の ILM の振動・伝播特性、相互作用について、これまで研究者達が取り組まなかった、理論的知見の、実験による検証が初めて可能となる。

3. 研究の方法

本研究の目的は ILM の実験的検証であるが、2次元系での ILM 解の存在および性質を調べるため、数値計算も併用して研究を進めた：

- (1) まずオンサイトポテンシャルが作用する“1次元”連成振動子列の構築をおこなう。高次元格子では隣接する振動子から受ける作用がオンサイトの的になると考えられるためである。現有の連成振動子列を利用し、先行研究の結果を睨みながら必要な改良を施す。
- (2) 改良ができ次第、ILM の伝播実験をおこなう。オンサイト効果の大きさを調整しながら予備実験をおこない、オンサイト効果が有意であることを確認する。
- (3) ILM 伝播の長時間の実験データを得るために振動子列の端の改良をおこなう。新しいパーツの作製（加振端側）および振動減衰機構の検討と設置（固定端側）をおこなう。
- (4) 並行してこの高次元格子における ILM の数値解析を進める。
- (5) オンサイト効果下における移動型 ILM の伝播特性の変化の解明に重点をおき、パラメータ値を変化させて実験を繰り返し、詳細な振動データを取得する。
- (6) ILM 間での衝突も含め、実験をおこない、ILM の安定性について実験による結果と数値解との比較をおこなう。

4. 研究成果

(1) 主な成果

オンサイト効果の実証 振動子列の中ほど（15番目）の1振動子だけにオンサイト効果を課した場合の数値計算結果を図2に示す。図2左がオンサイト効果が小さい場合、図2右がオンサイト効果がやや大きい場合の結果である。15番目の振動子の前後で局在振動の伝播速度が変化していることがわかる。

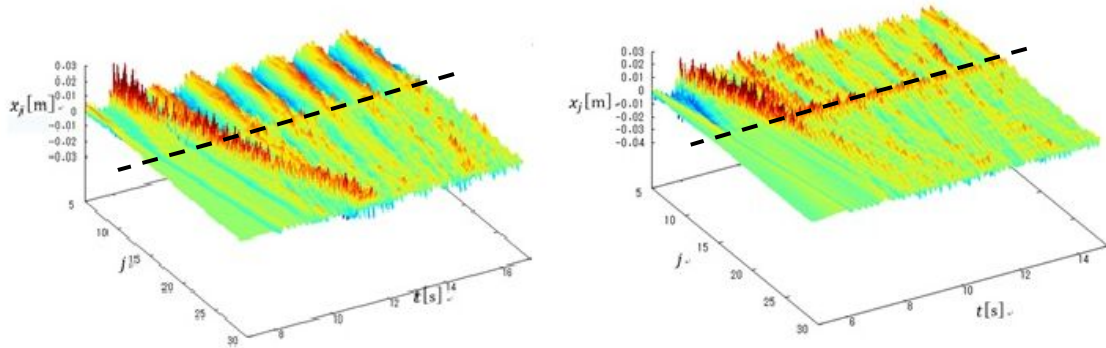


図2. 数値解析によるオンサイト効果の検証：(左)効果が小さい場合、(右)効果が大きい場合

加振機構の改良 局在振動を間欠的に励起させ伝播させるために、supratransmission（非線形超伝播）の現象を用いる。の数値計算結果を実証する、あるいは局在振動の伝播の精密な実験データを得るためには、加振端において励起する局在振動の伝播のタイミングを制御する必要がある。この制御を可能にする電磁石を用いた装置を作製した（図3）。

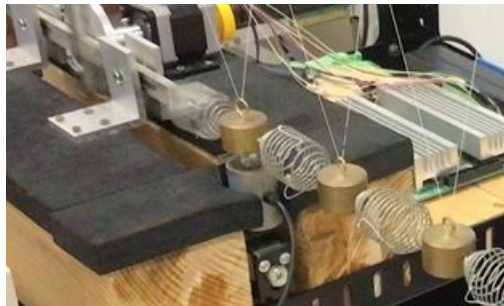


図3. 電磁石を用いた加振端制御装置

振動減衰機構の開発と設置 振動子列の端を正弦的に加振し続けると間欠的に局在振動が励起し、次々に一定の速度で系を伝播する（入射波）。その結果系内は、入射波と、終端（固定端）で反射した局在振動（反射波）の混在、相互作用により複雑な振動モードを形成する。長時間、入射波のみを観察するためには、反射波を終端で急速に減衰させる必要がある。試行錯誤の結果、摩擦を用いた振動減衰機構を作製した。この機構により反射波の励起伝播を抑え、長時間にわたる入射波の明確な区別が可能になった（図4）。

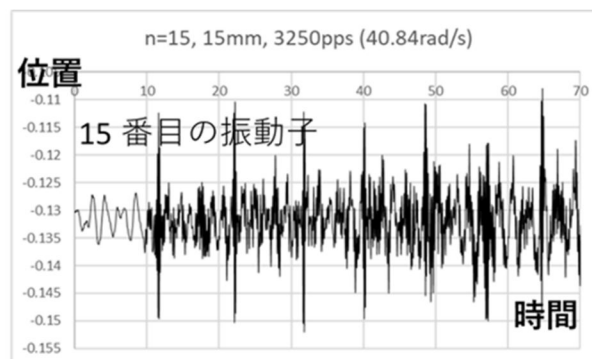


図4. 次々と伝播する局在振動（実験結果）

移動型 ILM の励起 加振の振幅 A と振動数 ω を変化させ、 A - ω のパラメータ平面において局在振動の励起可能領域を特定した (図 5)。特定の加振振幅に対して振動数の、局在振動励起の下限と上限を明示することができた。上限の存在は、実験で用いている非線形ばねの特性が区分別線的であるためだと考えられる。

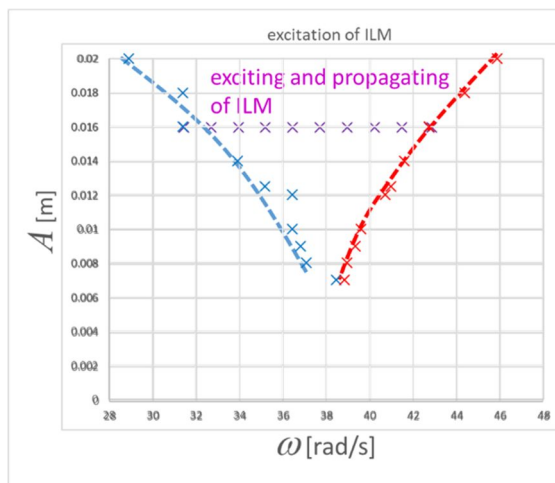


図 5. 移動型非線形局在振動の励起可能領域 (実験結果)

オンサイト効果下における移動型 ILM の伝播特性の変化 20 番目から 30 番目の、連続する 11 個の振動子に一定の大きさのオンサイト効果を課し、この区間の局在振動の伝播速度を実験的に調べた。3 種類の大きさのオンサイト効果 (オンサイト効果なし、オンサイト効果 1 倍、1.5 倍) に対し、伝播速度に有意な差が見られた。実験で調べた範囲では、オンサイト効果が大きいほど局在振動の伝播速度が大きくなることがわかった。

2 次元正六角格子における ILM の数値解 実験と並行して 2 次元格子、特に正六角格子における、励起局在モードの数値解析をおこない、結果を国際学術雑誌で発表した。この格子形の FPU-型格子系には局在振動モードが励起することが数値的に既に知られていたが、攪乱を含まない十分に収束した ILM 解の素性は明確にされていなかった。本論文ではこの ILM 解の特性を明らかにしている (図 6)。実験装置の完全な 2 次元化に成功したときに、初期条件の与え方および励起モードの性質を調べる際、本論文で得られた知見は有用である。

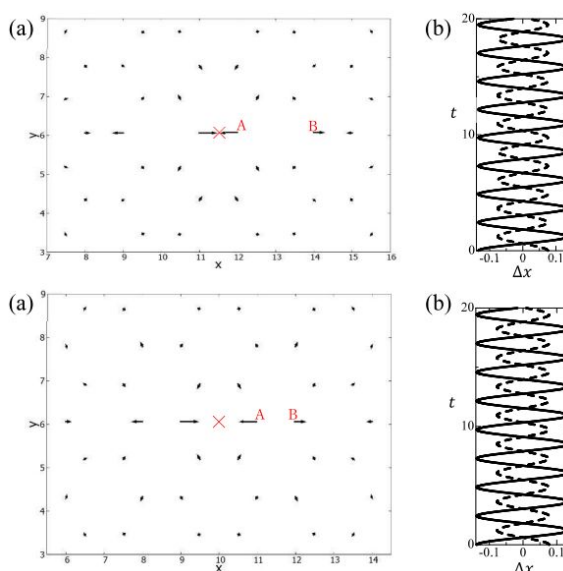


図 6. 明らかになった正方六角格子における 2 つの局在振動モード (数値計算結果)

(2) 成果の位置づけ

本課題の研究で得られた成果は随時、国内の研究会や学会 (物理系、機械系)、非線形力学に関する国際会議で発表してきた。非線形振動の研究を精力的におこなっている研究者と常に最新の成果について議論や情報交換をおこない、研究方法の見直しや再検討等を進めてきた。これら一連の活動をとおして、非線形力学のコミュニティーと分野の進展に寄与することができた。

(3) 今後の展望

ILM どうしの衝突実験 当課題最終年度からは局在振動どうしの相互作用について、実験と数値計算の両面から研究を進めている。これまでの改良で可能となった局在振動の伝播のタイミングの制御を利用して、実験による考察を進めている。また数値計算では通常の線形波の相互作用では見られない非線形相互作用の存在が示唆されている。本研究課題でメインでおこなってきたオンサイトの効果と共に、「局在振動の制御」の観点から新たな知見が得られると考えている。

2次元格子の作製および実験 当初は多数の振動子と非線形バネからなる2次元格子実験装置の作製を目指していた。複数の想定外の制約から達成できなかったが、本研究で得られたオンサイト効果に関する知見を利用して、小スケールの格子の実験に繋げていくことを考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yosuke Watanabe and Shun Izumi	4. 巻 90
2. 論文標題 Two-dimensional Intrinsic Localized Mode Solutions in Hexagonal Fermi-Pasta-Ulam Lattice	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 14003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.90.014003	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 -

1. 著者名 Yosuke Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 On-site effect on propagation of nonlinear localized oscillations in a mass-spring chain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Abstract booklet LCM 2021	6. 最初と最後の頁 9-9
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 Yosuke Watanabe and Masayuki Kimura	4. 巻 1
2. 論文標題 Experimental Observation of Supratransmission in a Mass-spring Chain with Suppression Effect of Reflection	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of NOLTA 2020	6. 最初と最後の頁 186-187
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 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 -

1. 著者名 Yosuke Watanabe	4. 巻 1
2. 論文標題 Observation of propagation of nonlinear localized oscillations in a mass-spring chain with excitation and attenuation ends	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 CHAOS 2020 Book of Abstracts	6. 最初と最後の頁 149
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 Yosuke Watanabe, Shun Izumi, Susumu Goto	4. 巻 -
2. 論文標題 Intrinsic Localized Modes in Two-Dimensional Hexagonal Fermi-Pasta-Ulam Lattice	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of NOLTA 2019	6. 最初と最後の頁 452-452
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 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 -

1. 著者名 Yosuke Watanabe, Takunobu Nishida, Yusuke Doi, Nobumasa Sugimoto	4. 巻 382
2. 論文標題 Experimental demonstration of excitation and propagation of intrinsic localized modes in a mass-spring chain	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics Letters A	6. 最初と最後の頁 1957-1961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physleta.2018.04.055	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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Yosuke Watanabe
2. 発表標題 On-site effect on propagation of nonlinear localized oscillations in a mass-spring chain
3. 学会等名 LCM 2021 (Localisation in Condensed Matter) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊陽介
2. 発表標題 オンサイト効果が質点バネ系を伝播する局在振動に及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Watanabe
2. 発表標題 Observation of propagation of nonlinear localized oscillations in a mass-spring chain with excitation and attenuation ends
3. 学会等名 The 13th CHAOS 2020 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊陽介
2. 発表標題 質点バネ系を移動する非線形局在振動の励起と速度に関する実験的考察
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosuke Watanabe and Masayuki Kimura
2. 発表標題 Experimental Observation of Supratransmission in a Mass-spring Chain with Suppression Effect of Reflection
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊陽介
2. 発表標題 連成振動子列における非線形局在振動の伝播特性
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yosuke Watanabe, Shun Izumi, Susumu Goto
2. 発表標題 Intrinsic Localized Modes in Two-Dimensional Hexagonal Fermi-Pasta-Ulam Lattice
3. 学会等名 2019 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Watanabe, Yusuke Doi
2. 発表標題 Observation of excited modes in a mechanical coupled oscillator array
3. 学会等名 JSLoc 2019: Japanese-Spanish Symposium on Energy Localization in Nonlinear Lattices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊陽介, 泉竣, 後藤晋
2. 発表標題 Fermi-Pasta-Ulamポテンシャルをもつ2次元六方格子における局在振動モードの数値解析
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Watanabe
2. 発表標題 Observation of excited modes in mechanical coupled oscillator array
3. 学会等名 Workshop on Localized Nonlinear Waves
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Watanabe, Shun Izumi
2. 発表標題 Experimental study on interaction of mobile localized oscillation with onsite potentials in a mass-spring chain
3. 学会等名 The International Conference on Nonlinear Localization in Lattices (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shun Izumi, Yosuke Watanabe
2. 発表標題 Investigation of Spatially Localized Oscillations in the Two-dimensional Hexagonal Lattice of Fermi-Pasta-Ulam beta Type
3. 学会等名 International Symposium on Intrinsic Localized Modes 30th Anniversary of Discovery (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉竣、渡邊陽介
2. 発表標題 オンサイトポテンシャルのILM伝播に及ぼす影響
3. 学会等名 豊田理化学研究所特定課題研究「非線形エネルギー輸送による新しい物性理論の探求」第6回研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉竣、渡邊陽介
2. 発表標題 高次元格子ILMの研究に向けて
3. 学会等名 豊田理化学研究所特定課題研究「非線形エネルギー輸送による新しい物性理論の探求」第5回研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	土井 祐介 (Doi Yusuke) (10403172)	大阪大学・工学研究科・准教授 (14401)	

	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	木村 真之 (Kimura Masayuki) (00551376)	摂南大学・理工学部・准教授 (34428)	
連携 研究者	吉村 和之 (Yoshimura Kazuyuki) (40396156)	鳥取大学・工学研究科・教授 (15101)	
連携 研究者	佐藤 政行 (Sato Masayuki) (00266925)	金沢大学・理工研究域・教授 (13301)	

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
---------	---------