

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26400394

研究課題名(和文)非線形連成振動系におけるエネルギー局在理論の実験的検証

研究課題名(英文) Experimental study on energy localizations in nonlinear coupled oscillator arrays

研究代表者

渡邊 陽介 (Watanabe, Yosuke)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：30304033

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：非線形局在モード(ILM)の励起は今日、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。本研究では最もよく知られた非線形格子の一つである Fermi-Pasta-Ulam-型 の特性を模した非線形バネを自作、量産し、これらのバネと振動子からなる連成振動子列を作製した。加振装置を自作し、この系における移動型 ILM の励起およびその伝播に関する実験をおこなった。また適切な初期形状を与えることにより定在型 ILM の実証にも成功した。実験結果は力学モデルに対する数値計算の結果と良い一致を示し、実験的研究が極めて少ない ILM 研究の分野においてインパクトのある成果を残すことができた。

研究成果の概要(英文)：Excitation and propagation of nonlinear localized oscillations are demonstrated experimentally by using a mass-spring chain to emulate those in the celebrated Fermi-Pasta-Ulam chain of beta type. Two types of experiments are performed, one corresponding to a boundary-value problem and the other to an initial-value one. In the former experiment, one end of the chain is driven sinusoidally in the direction of the chain above a cut-off frequency. In the latter experiment, only a number of weights centered around the weight in the middle of the chain are held displaced initially and released suddenly. The experimental results show quantitatively good agreements with the numerical ones.

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 実験

1. 研究開始当初の背景

非線形局在振動モード (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。

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。意外なことに、本研究でチャレンジしようとしているような、シンプルな「質点-バネ系」で ILM の実証実験を行った研究はこれまでに全く報告されていない。その最も大きな理由は恐らく非線形バネの入手・製作が困難なためであると思われる。本研究で作成する実験系は Fermi-Pasta-Ulam (FPU) - β 系に相当している。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。

本研究課題の前段階となる基礎実験に関して、申請者は H24 年度の科学研究費補助金 (挑戦的萌芽研究 (2 年間)) の交付を受けた。この研究の目的は、メカニカルに ILM を励起させ、実際に目で“ILM を見る”ことであった。試行錯誤の結果、研究期間内に、移動型 ILM の励起および観察に成功した。しかしながら、実験装置のサイズが小さいため、理論との比較に足る十分な精度の実験データが得られないこと、現在の実験装置では定在型 ILM の励起実験ができないこと等の大きな問題が残っていた。本研究ではこれらの問題をクリアし、研究成果を当該研究分野に還元することが狙いである。本研究の成果は、これまで数理モデルの解析およびシミュレーションに留まっていた ILM 研究とその知見が、例えば、マクロな周期構造物における特異振動や、材料内部のミクロなエネルギー局在構造の

解明等、実験的な研究や工学的な応用へ、現実味を帯びて広がっていくことが期待できる。

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 ILM の実験的検証および理論との比較に耐え得る ILM の精密な実験データの取得を目指す。

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。

「移動型 ILM の励起、励起条件と移動パターンとの関係」、「二つの ILM どうしの衝突 (相互作用) のメカニズム」、「ILM の安定性」、「定在型 ILM の励起、振動特性」について実験による観察をおこなう。それぞれの励起 ILM について、振幅、局在の幅、波形、固有振動数、伝播速度の精密な実験データの取得をおこない、実験による理論の検証を目指す。

3. 研究の方法

本研究では ILM の力学的実験装置を用いた検証および理論との比較に耐え得る精密な実験データの取得を目的としている。以下の手順で研究を進めた：(1) 強非線形特性を示す非線形バネの開発および製作 (2) 多数の振動子からなる非線形連成振動子列 (吊り下げ型) の作製および振動計測システムの構築 (3)(2)を用いた ILM (移動型、定在型) の励起実験、実験データの取得および解析モデルに対する数値計算結果との比較 (4) 新たな方式による非線形振動子列 (空気浮上型) の作製およびこれに伴う非線形バネの開発、加振装置の改良、ILM の励起実験 (5) モード励起方法の見直しおよびユニットの試作、ILM の伝播特性の詳しい観察。以下それぞれについての詳細を述べる。

(1) 非線形バネの開発 本実験では FPU- β 型の非線形格子の作成を目指している。この系では、振動子間の相互作用を与えるバネの特性が、相対変位の 1 次と 3 次に比例する強いハードスプリングで、変位の向きについて対称的な復元力を与えるものであることが要求される。もちろんこのような特性をもつバネは市販されておらず自作する必要がある。要求される特性を示す非線形バネを得るために、バネ製造専門業者に特殊な形状のバネの製作を依頼し、更に研究室内で手作業の加工をおこなうことにより、期待する特性をもつ非線形バネの量産 (約 100 個) に成功した。

(2) 非線形連成振動子列 (吊り下げ型) の作成および振動計測システムの構築 形状と

質量が等しい 39 個のおもり (振動子) と, (1) で作成した 100 個のバネの内, バネ特性のばらつきが最も小さくなる 40 個のバネからなる, 吊り下げ型の非線形連成振動子列を組み上げた (図 1)。また系を加振するための装置について, 機構自体を見直し, 正確な加振ができるように作り直した (ステップング・モーターおよびスコッチヨークの採用)。振動の計測には光学式のモーションキャプチャを用いるが, カメラの台数を増やし広角の計測が可能になるようにした。



図 1. 連成振動子列 (吊り下げ型)

(3) ILM の励起実験と理論との比較 適切な加振条件 (振幅, 振動数) に対して局在振動の励起および伝播を確認することができた。加振端で間欠的に励起された局在振動が次々と系を伝播していく様子を観察することができた (図 2)。加振条件を変えて実験と計測を繰り返し, 励起局在振動 (移動型 ILM) の詳細なデータ (局在振動の振動数, 局在部の形状, 伝播速度) を得ることができた。実験と並行して, 対応する力学モデルの数値解析をおこなったが, 実験結果と数値計算結果は良い一致を示した。これらの研究結果は 2014 年度に開催された 2 つの国際会議および国内学会で発表, 報告した。

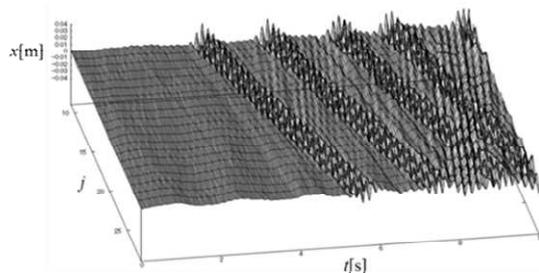


図 2. 移動型 ILM

また理論解析から存在が示されている定在型の ILM の実証実験をおこなった。本実験で新たに自作した「初期変位装置」により, 特定の少数振動子だけに初期変位を与えることができる。数値解を基に, 系中央付近の隣接する少数の振動子に初期変位を与えて拘束し, 同時にこれらの拘束を解く。この方法により, 位置を変えずに, 比較的長時間, 局在する高い振動数をもつ非線形モード, すなわち定在型 ILM の存在が確認できた (図 3)。

(4) 非線形連成振動子列 (空気浮上型) の作成およびモード励起実験 吊り下げ型の連成振動子列では, 局所的に強い圧縮が掛かる

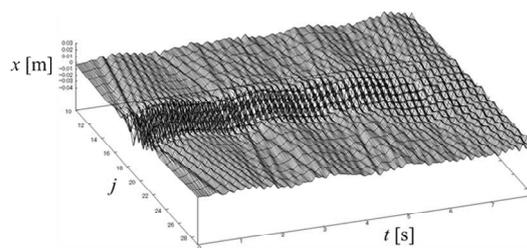


図 3. 定在型 ILM

と系が座屈する懸念がある。この弱点の克服を目指して新たに, 空気浮上を利用した連成振動子列の開発を試みた。振動子を乗せる中空の角柱レールの側面には多数の小孔が一定間隔で開けられており, レールの一端に接続されたブロアにより角柱内部の空気圧が高められている。小孔から噴き出す空気によって各振動子は浮上し, レール上を摩擦なく滑らかに動くことができる (図 4)。またこの連成振動子列では平衡状態においても系全体に張力がかけられており, 極力, 座屈が発生しないよう設計されている。このため新たな方式の非線形バネを開発する必要があった。バネの専門業者を訪問し, 打合せとバネの試作, 加工, 測定を繰り返して, 所望する「変位一力」応答をするバネの作製に成功した。この実験装置においても, 系端を加振することにより, 移動型 ILM を励起, 観察することに成功した。得られた結果は 2016 年度に開催された 2 つの国際会議および国内学会で発表, 報告した。

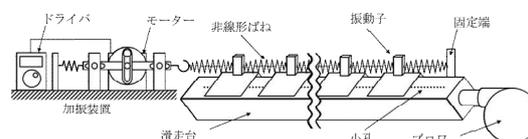


図 4. 連成振動子列 (空気浮上型)

(5) モード励起方法の見直しおよびユニットの試作 局在振動励起のための加振機構を見直し, “単発”の移動型 ILM の励起および伝播の実現を試みた。(3)や(4)では移動型 ILM の励起のために振動子列の一端を連続加振していた。これにより加振端で ILM が間欠的に励起し, 次々と系を伝播, 他端 (固定端) で反射する様子が観察できた。しかし個々の進行する局在振動の挙動を, 反射して戻ってきた別の先行局在振動と区別してクリアに観察することは困難であった。このため加振機構の見直しと試作を進め, 新たに作成した「振動子保持装置」により単発の局在振動の励起, 伝播の実現を目指した。試作機による結果は 2016 年秋の国内学会 (日本物理学会) で報告した。振動子保持装置を用いた結果については, 同年度末に英国の ILM のパイオニア的研究者である C. Eilbeck 教授と M. Russell 教授を訪問して議論をおこない様々なアドバイスをすることができた。

4. 研究成果

(1) 非線形バネの開発について

手作業のため 100 個の非線形バネを作るためにかなりの時間と労力を必要としたが、先行研究での経験が生かされ、ばらつきの少ないバネを作ることができた。本実験での手法により、押し引きに対して対称な振る舞いをする非線形バネの作製が可能になったので、今後様々な非線形力学の実験への応用の可能性が広がったと言える。

(2) 長連成振動子列の作製について

先行研究で 20 個の振動子からなる装置の作製に成功しており、これを基に本実験用のほぼ倍の長さの振動子列を作製した。これにより ILM の長時間の伝播を調べることが可能になった。また加振機構の見直しにより、正確に正弦的な加振が可能になった。

(3) ILM (移動型/定在型) の励起について

①移動型 当初の目標であった詳細な実験データの取得が可能となり、数値解との一致および相違点が明らかになった。連続的な加振により、間欠的に局在振動が励起される仕組みが明らかになった。加振条件と伝播速度の関係について、実験結果と数値解の間でやや異なる傾向が見られることがわかった。

②定在型 個別のバネの振動特性の観察から見積もられる、バネのもつ減衰効果を考慮したとき、実験結果と数値解は良い一致を示した。理論解析により、モードの形、すなわち初期変位の与え方の違いで ILM の安定性に違いがあることが知られているが、本実験ではその差異を見出すことができなかった。これは実験装置ではバネ特性のばらつきの効果が大きく、モード形状の違いの効果が現れなくなってしまったからだと考えられる。

(4) 空気浮上型連成振動子列の作製およびモード励起実験について

実際の装置の作製ではいくつかの想定外の困難の解決が必要であったが、最終的に要求される水準の実験装置を完成させることができた。加振装置により移動型 ILM の励起、観察、データの取得に成功した。空気浮上型の実験装置は系の局所的な圧縮に対して座屈が発生しないというメリットをもつが、装置の拡張性と振動子を浮上させるための空気圧の制御に関して大きなデメリットをもつことがわかった。今後の ILM の実験研究では吊り下げ型の装置を改良しながら進めていくことにした。

(5) モード励起方法の見直しとユニットの試作について

系端で適切な初期変位を与えることにより、単発の局在振動を励起、伝播させることを目指している。試作したユニットにより一定の成果が得られているが、現段階では十分と

は言えない。他のアイデアを含め、改良を進める予定である。

以上、本研究により、比較的大きなスケールである力学実験装置で ILM の存在およびロバスト性を実証できたことは ILM 研究分野において大変意義があり、実験動画を用いた研究報告では大きなインパクトを与えることができた。本研究で培った装置作製技術を生かして、今後は特に、オンサイト効果をもつ系での ILM や高次元格子の ILM の実験に取り組みたいと考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

① Yosuke Watanabe, Takunobu Nishida, Yusuke Doi, Nobumasa Sugimoto, Experimental demonstration of excitation and propagation of intrinsic localized modes in a mass-spring chain, *Physics Letters A*, 査読有, vol.382, Issue 30, pp. 1957-1961 (2018).

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.04.055>

② Yosuke Watanabe, Mai Nishimoto, Chika Shiogama, Experimental excitation and propagation of nonlinear localized oscillations in an air-levitation-type coupled oscillator array, *Nonlinear Theory and Its Applications*, 査読有, vol. 8, no. 2, pp. 146-152 (2017).

DOI: 10.1587/nolta.8.146

③ Yosuke Watanabe, Mai Nishimoto, Experimental Excitations of Intrinsic Localized Modes in an Air-Levitation-Type Coupled Oscillator Array, *Proceedings of NOLTA 2016*, 査読有, p.686 (2016).

④ Yosuke Watanabe, Takunobu Nishida, Nobumasa Sugimoto, Excitation of intrinsic localized modes in finite mass-spring chains driven sinusoidally at end, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 査読有, Vol. 64, Issue 3S, pp. 417-421 (2015).

DOI: 10.3176/proc.2015.3S.12

⑤ Yosuke Watanabe, Takunobu Nishida, Nobumasa Sugimoto, Nonlinear Localized Oscillations Excited in Forced Mass-Spring Chains, *Proceedings of NOLTA 2014*, 査読有, pp. 416-418 (2014).

[学会発表] (計 10 件)

① Yosuke Watanabe, Mai Nishimoto, Chika Shiogama, Making of air-levitation-type coupled oscillator array and experiments on excitation of intrinsic localized modes,

International Workshop on Nonlinear Energy Localization in Crystals and Related Media (NELC2016), 査読有, Kyoto International Exhibition Hall "Miyako Messe," Kyoto (2016).

② Yosuke Watanabe, Mai Nishimoto, Experimental Excitations of Intrinsic Localized Modes in an Air-Levitation-Type Coupled Oscillator Array, 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2016), 査読有・招待講演, New Welcity Yagawara, Shizuoka (2016).

③ Yosuke Watanabe, Takunobu Nishida, Nobumasa Sugimoto, Excitation of intrinsic localized modes in finite Fermi-Pasta-Ulam chains driven sinusoidally at end, IUTAM Symposium on Complexity of Nonlinear Waves (IUTAM 2014), 査読有, Institute of Cybernetics at Tallinn University of Technology, Estonia (2014).

④ Yosuke Watanabe, Takunobu Nishida, Nobumasa Sugimoto, Nonlinear Localized Oscillations Excited in Forced Mass-Spring Chains, 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2014), 査読有・招待講演, Luzern, Switzerland (2014).

[その他]

ホームページ等

<http://fm.me.es.osaka-u.ac.jp/watanabe/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡邊 陽介 (WATANABE, Yosuke)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：30304033

(2) 研究分担者

土井 祐介 (DOI, Yusuke)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10403172