

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24654124

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の基礎実験

研究課題名(英文)fundamental experiment on energy localizations in nonlinear chains

研究代表者

渡邊 陽介 (Yosuke, Watanabe)

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) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：離散周期構造において励起される安定な局在振動は非線形局在モード(ILM)とよばれ、今日、系自身の離散性と系に内在する非線形性により励起される普遍的な非線形振動として認知されている。ILMに関する研究はこれまでに様々な離散周期系を対象として広く行われているが、その多くは解析や数値計算を中心とした理論研究であり、実験研究は極めて少ないのが現状である。本研究では、力と伸びの関係が強い非線形性を示すメカニカルなバネ(非線形バネ)および、この非線形バネと多数のおもり、加振装置からなるシンプルな連成振動子列(非線形格子)を作成してモード励起実験をおこない、移動型ILMの励起に成功した。

研究成果の概要(英文)：It is now known that the intrinsic localized modes (ILMs) are generic in spatially periodic, discrete and nonlinear systems. Excitations of the nonlinear localized oscillations have been demonstrated in a forced chain of masses. The masses are suspended, arranged along a horizontal line and connected with neighboring ones through a spring, which are designed so as to give the nonlinear restoring force to deflections. One end of the chain is fixed on the frame and the other is driven sinusoidally in the direction of array with an adjusted amplitude and tunable frequencies. It is revealed that the high-frequency driving excites the localized oscillations with a higher frequency than that of linear waves permitted to propagate in the system. Under the driving force with a constant frequency, the excitations occur intermittently near the forced end of the chain and the excited localized oscillations propagate the chain at a constant speed. They are regarded as the mobile type of ILMs.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・数理物理・物性基礎

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

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、空間的に局在した安定な周期振動モード」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、多数の研究が国内外でおこなわれている。ILM 研究者人口が多いのは欧米であるが、先駆的研究には故 武野教授ら日本人研究者も大きな貢献をしている。

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ており、今日、ILM は極めて普遍的な存在・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近年、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分野、物理系に限定されているのが現状である。

2. 研究の目的

理論やシミュレーションにより ILM の存在が予言されている系の一つが Fermi-Pasta-Ulam (FPU) 格子である。シンプルで性質の良い力学系であるため、これまでに多数の研究者により膨大な研究がなされてきた。しかし我々が知る限りこの系に対する ILM の実験的研究はない。本研究の目的は FPU- 型格子を模した実験装置を作成し、ILM の存在を実験的に検証することである。

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を実際に製作し、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) を作成する。これを用いて定在型 ILM の振動特性や移動型 ILM の存在、二つの ILM 間の相互作用等、理論による知見の検証および理論結果との比較をおこなう。また ILM 研究の工学的な応用への可能性を探る。

3. 研究の方法

本研究の目的は ILM の実験的検証である。

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・製作をおこなう。

(2) バネの開発に目処がついたら、バネの量産と並行して、連成振動子列の作成、ステップング・モーターの入手、動作特性のチェックおよび計測システムの構築に取り掛かる。装置完成後、直ちに ILM 励起のための加振条件の検討に入る。

(3) 移動型 ILM の励起実験をおこなう。実験と計測を繰り返しおこない、励起条件と振動特性の関係について理論による知見との比較をおこなう。

本研究では、最もシンプルでなじみのある離散周期系である、1次元連成振動子列 (いわゆる「質点-バネ」系。質点数は数十個程度) を作成する。本実験での最大のポイントの一つは非線形バネの作成である。理論やシミュレーション結果との比較を行うためには期待する力学的特性を有する非線形バネが必須であるがこのようなバネの市販による入手は全く期待できない。本研究ではまず「非線形バネの開発製作とその力学特性の測定」に集中する。また実験開始当時は、理論との比較が容易であろうとの理由から、まず「定在型 ILM」の励起を目指していたが、本実験の装置で励起し易い「移動型 ILM」の励起を先に目指すことにした。

(1) 非線形バネの開発

本実験では FPU- 型の非線形格子の作成を目指している。この系では質点間の相互作用を与えるバネの特性は、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。一般の量販店で市販されているバネはそのほとんどが線形特性をもつ非対称な「引張バネ」あるいは「圧縮バネ」であるため、要求される性質を示す非線形バネを得るためには、バネの特注および更なる加工が必要である。FPU- 系がシンプルな質点-バネ系でありながら ILM の実証実験がこれまでになされてこなかった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。特殊形状バネ入手の際には、製造専門業者に単にバネを注文するだけでなく、工場を訪ね、現場で打ち合わせやアドバイスを受けて、バネの試作、加工、測定を繰り返した。入手後は実験室でさらにバネに加工を施した。この作業にはかなりの時間と労力を投入することになったが、最終的に、希望する特性を示す、ほぼ同じ非線形バネを20個以上作成することに成功した。図1にその一例を示す。

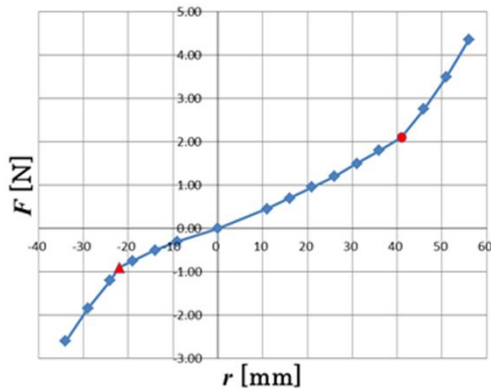


図1 作成した非線形バネのバネ特性

(2) 連成振動子列の作成

20個の同形状・同質量をもつ錘をバネで一直線上に連結した連成振動子列を組み立てた(図2)。振動子列の一端は外枠に固定し、他端はモーターとクランク機構からなる加振装置に取り付けた。



図2 作成した連成振動子列(錘20個)

また振動の測定装置として、3台の光学カメラからなるモーションキャプチャシステムを用いた(図3)。

まず予備実験として、線形バネと小さな振幅での加振による、線形固有振動のモード励起実験をおこなった。駆動振動数を少しずつ上げていくと、振動数が小さなものから次々に固有振動モードの定在波が現れる様子が観察できた。理論上、本系には20個の固有振動数およびそれぞれに対応する固有振動モードが存在するが、最小値の固有振動と、最大値(π モード)に近い数個の固有振動を除く全ての固有振動モードの励起を確認することができた。(固有振動数

が最小値のモードおよび最大値付近の数モードの特定ができなかった理由としてそれぞれ、実験に使用したステッピングモーターの特性が低振動数の回転に不向きであったことと、 π モード付近では各振動数の間隔が極めて小さくこれらを区別することが難しいことが挙げられる。)

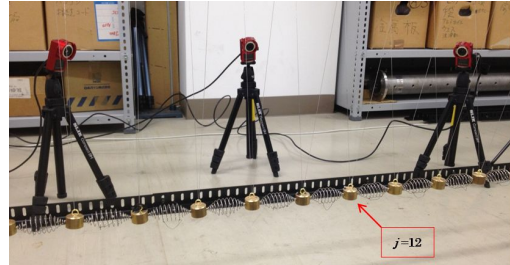


図3 3台のカメラによる振動モード測定

(3) 移動型 ILM の励起実験

(2)における線形バネを、(1)で作成した非線形バネに取り換えて、(2)と同様の方法により励起振動モードの観察をおこなう。 π モードの定在波の励起後、さらに駆動周波数を上げ、非線形振動領域において現れる振動モードの観察、測定を繰り返した。

4. 研究成果

非線形バネを用いた励起実験で、線形固有振動数の上限を超えた高い振動数で駆動すると、駆動側の系端で、突然、局在した強い振動が発生し、系を伝播する様子が観察された。この局在振動は間欠的に発生し、次々と系を一定の速さで他端に向かって伝播した。図4に駆動端から12番目の錘の変位を測定した結果を示す。系端に達した局在振動は反射し、逆向きに伝播するが、後続の局在振動と衝突を繰り返し、混在し、最終的には加振部と共振し振動子列の座屈を引き起こした。

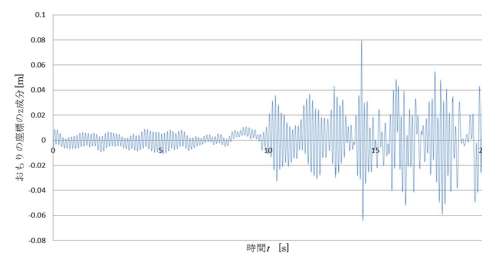


図4 振動子(12番目)の変位の時間発展

モーションキャプチャシステムを用いて局在振動を解析した結果を図5に示す。局在振動のスペクトルが線形波伝播帯の外側の振動数をもつモードから構成されていることがわかる。このことから局在振動が非線形振動であることが明らかになった。またこの局在振動が励起される駆動振動数には上限があり、この上限を超える高振動数

で駆動した場合、系には振動が励起されないことも明らかになった。局在振動の伝播特性は、減衰効果と加振端をもつ FPU 格子に対する数値計算で得られた系の挙動と定性的に一致しており、移動型の ILM の励起実験に成功したといえる。

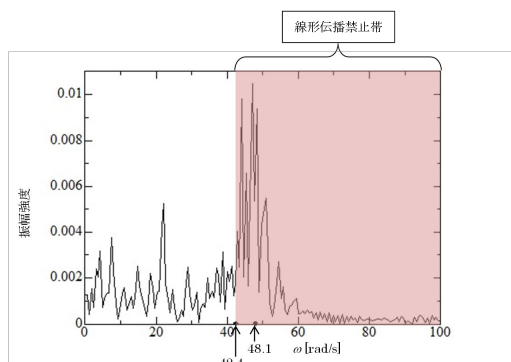


図 5 局在振動のスペクトル

本研究の成果は物理系学術雑誌および次年度に開催される二つの国際会議で、動画とともに発表、報告する予定であるが、喫緊の課題は、現実装置の拡張および非線形バネと加振機構の改良による、より精度の高い実験データの取得である。

また今後は本実験を更に発展させ、移動型 ILM どうしの相互作用や定在型 ILM 等の実験的検証をおこなうことを目指している。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計2件)

熊谷 顕、西田 拓展、渡邊 陽介、土井 祐介、質点-バネ系における非線形局在振動の励起実験、日本機械学会関西支部第 89 期定時総会講演会、2104 年 3 月 18 日、大阪府立大学

Yosuke Watanabe, Intrinsic localized mode in an articulated structure, Workshop on nonlinear excitations in discrete lattices, 2014 年 4 月 2 日, 金沢大学

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：3 0 3 0 4 0 3 3

(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：1 0 4 0 3 1 7 2