

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820164

研究課題名(和文) エネルギー局在現象の制御とナノテクノロジーへの応用

研究課題名(英文) Control of Energy Localizations and Its Applications to Nanotechnology

研究代表者

木村 真之 (Kimura, Masayuki)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

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)：本研究課題では、エネルギーが空間的に局在する現象について、ナノテクノロジーでの応用を視野に入れた基礎的研究を行った。解析対象は、マイクロカンチレバーアレイ、電磁機械系、および炭素単原子鎖である。マイクロカンチレバーアレイと電磁機械系に対しては、エネルギー局在状態の位置に対するフィードバック制御、パラメトリック励振による不安定化を達成した。また、炭素単原子鎖については、同等の特徴を持つ古典的非線形格子を用いて検討し、これまでに知られていない新たな局在状態を発見した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we studied on spatially energy localization phenomena, focusing on applications in nanotechnologies. Micro-cantilever arrays, magneto-mechanical systems, and carbon monoatomic chains are focused on in this research. For the cantilever arrays and the magneto-mechanical systems, it has been confirmed that the position of the energy localized state can be controlled by a feedback control and can be destabilized by a parametric excitation. In addition, for the carbon monoatomic chains, we studies localization phenomena by using a classical nonlinear lattice which has the same characteristics as the carbon monoatomic chains. As a result, novel energy localized states have been discovered.

研究分野：非線形動力学 局在現象 電気工学

キーワード：空間局在モード 非線形結合振動子

1. 研究開始当初の背景

エネルギーが空間的に局在し、時間経過に対して安定に存在する現象は、エネルギー局在現象として知られている。とくに、結晶格子を模した非線形結合振動子におけるエネルギー局在現象は空間局在モード(ILM: Intrinsic Localized Mode / DB: Discrete Breather)と呼ばれる。非線形結合振動子は自然界にしばしば現れる物理モデルであり、数 km オーダーのものから数 nm 以下のスケールまで様々な現象を記述するために用いられる。したがって、エネルギー局在現象である ILM は自然界に普遍的に存在すると考えられ、実際、電子回路や DNA 鎖、カーボンナノチューブなど種々の系において観測例が報告されている。特に、マイクロカンチレバアレイやジョセフソン接合ラダーにおける観測例は、ILM がナノテクノロジーにおいて応用可能であることを示唆している。すなわち、ILM の生成法や制御法など、工学的な観点による研究が必要であると考えられる。

Intrinsic Localized Mode の特性については、存在条件や安定性、移動性などが検討されてきたが、制御に関する検討はほとんど為されていない。ILM の性質について、未だに不明な点が多いことが理由の 1 つである。こうした状況下で、局所的な格子不純物による ILM の操作が実現されている。ILM の近傍に、例えばバネ係数が増えるような不純物を加えると、ILM が不純物に向かって引き寄せられたり、逆に反発したりすることが報告されている。こうした格子不純物との相互作用は、移動型 ILM についても研究されており、不純物の位置で ILM が反射、または加速されるなどの現象が観察されている。したがって、ILM は系のバネ係数などのパラメータに敏感に依存すると考えられる。

一方、ILM の安定性については、ILM の空間的対称性と強く結びついていることが知られている。例えば、偶対象な ILM が安定であれば奇対象なものは不安定である。このような関係が、非線形性の比、すなわち振動子自身の非線形性と結合部の非線形性との比に強く依存することが知られている。このような現象を安定性交替といい、安定性の切り替えによる ILM の操作についても提案されている。しかしながら、状態フィードバックによる ILM の位置制御については未だ報告がない。

2. 研究の目的

Intrinsic Localized Mode の制御は、その応用において必要不可欠である。本研究では、ナノテクノロジーにおいて ILM を制御することを念頭に、ILM の制御則の検討を行う。

前述の通り、ILM の位置や安定性は系のパラメータに強く依存する。この点に着目し、系パラメータを空間的に徐々に変化させるこ

とで ILM の位置を変化させることを着想した。すなわち、ILM に対して仮想的な力を加えることができるはずである。この点が明らかになれば、比較的単純な制御則によって ILM の位置を制御できるはずである。

また、ILM の安定性について、系パラメータを時間的に変化させる、すなわちパラメトリック励振による不安定化を試みる。パラメトリック励振はナノテクノロジー関連分野においてもよく使われる手法であり、実現可能性が高いと手法といえる。

さらに、近年重要性を増している低次元炭素材料に着目し、ILM の応用可能性を模索する。本研究では、その第一歩として、炭素単原子鎖に着目する。炭素単原子鎖は、炭素原子が 1 次元状に配列したものであり、各原子は 3 次元に運動可能である。一方、従来の ILM 研究では、振動子の配列の次元と各振動子の自由度は一致していた。この違いによる影響を考察するために、本研究では古典的な 1 次元 Fermi-Pasta-Ulam(FPU)格子を 2 次元または 3 次元空間に配置したときの ILM の存在・安定性を検討する。

3. 研究の方法

(1) フィードバック制御

Intrinsic Localized Mode の位置についてフィードバック制御を考える場合、ILM 位置の検出と ILM 位置に対する作用を考える必要がある。位置の検出は容易で、本研究ではエネルギー分布の重心を用いることとする。一方、ILM 位置への作用であるが、本研究においては、オンサイトポテンシャルの線形項の係数 α_1 を、振動子番号 n に対して線形に変化させることで発生させることを試みる。具体的には、 $\alpha_{1,n} = \alpha_{1,c} + m_{\alpha_1}(n - c)$ とする。ここで、 c は ILM の初期位置、 m_{α_1} はパラメータ変化の傾きである。このパラメータ変化の傾きにより、実際に ILM 位置に対して作用が生じるかどうかを数値的に確かめた後、図 1 の様なフィードバック制御系を構築し、制御実験を数値的に行う。

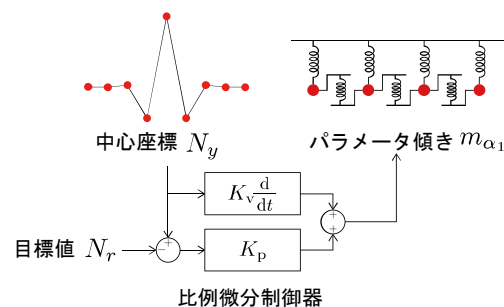


図 1 ILM 制御のブロック図

(2) パラメトリック励振

パラメトリック励振による ILM の不安定化については、ILM の特性乗数と対応する固有ベクトルに基づいて検討する。ILM が安定の場合、ある固有ベクトルに沿って摂動しても、ILM は移動したり崩壊したりせずに、元の位置を中心に正弦的に振動する。その振動周波数はその特性乗数の複素角によって決まる。したがって、特性乗数からパラメトリック励振による ILM の不安定化領域が推測できると予想される。このことを確かめるため、パラメトリック励振の振幅と周波数に対する ILM の不安定化領域を網羅的に調べ、従来の単一振動子における結果との比較を行う。これにより、ILM 不安定化のメカニズムがパラメトリック共鳴であるかどうかを確かめる。

(3) 3次元空間内の1次元FPU格子

Fermi-Pasta-Ulam 格子において、質点は3次元的に運動可能であるとし、それら質点間を繋ぐバネは質点間の距離に対して非線形な復元力を有するとする。この条件下、各質点の従う運動方程式を導出し、数値計算によって ILM の存在や安定性を検討する。質点の自由度を3としたことで、図2のような ILM が存在すると考えられる。このうち、(a)の縦振動型 ILM は古典的な FPU 格子においても存在するものである。

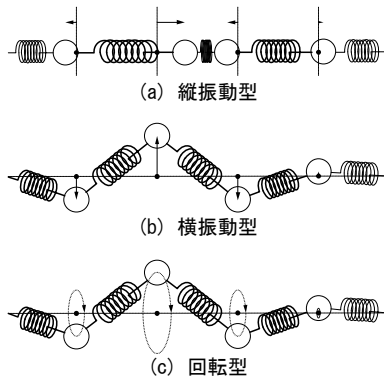


図2 3種類の ILM

(M. Kimura *et al.*, *Letters on Materials* 6, pp.22-26, 2016. Fig.2 より改変して転載)

4. 研究成果

(1) フィードバック制御

数値計算により、パラメータの傾きに対して ILM 位置が作用を受けることが明らかとなった。この事実を用いて、図1のフィードバック制御系を数値的に作成し、数値実験を行った。結果の一例を図3に示す。図では、 $t=100$ から $t=1000$ の間で制御が行われている。この区間における黒太線は目標値である。何れの場合も、目標値へ収束していることが分かる。また、制御を切った後は目標値の位置により挙動が異なることが観測された。

(2) パラメトリック励振

従来から研究を行ってきたマイクロカンチレバーアレイのモデルに対して、不安定化領

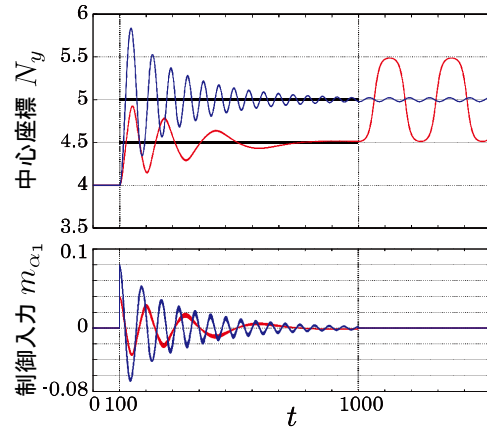


図3 フィードバック制御の例

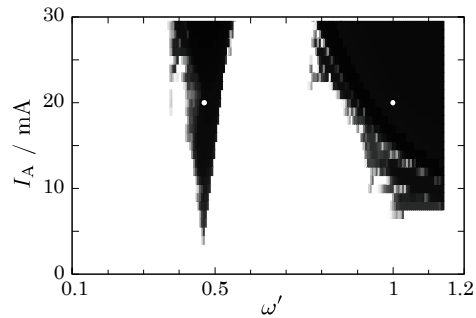


図4 ILM の不安定化領域

(M. Kimura *et al.*, *Proceedings of NOLTA2015*, pp.801-804, 2015. Fig.6 より改変して転載)

域と特性乗数、固有ベクトルの関係を検討した。結果として、固有ベクトルの空間的対称性が ILM と異なる場合、対応する特性乗数から予想されるような不安定化領域が得られた。すなわち、ILM はパラメトリック共鳴により不安定化しうることが確かめられた。続いて、電磁機械系における実験的検証を目標として、電磁機械系の運動方程式で同様の検討を行った。結果は図4に示すとおりであるが、マイクロカンチレバーアレイのものとはやや異なる形状の不安定化領域となった。これは、パラメータ変動に対する特性乗数の感受性の違いが要因ではないかと考えられる。

(3) 3次元空間内の1次元FPU格子

導出した運動方程式を用いて、3種の異なる ILM を発見的に探索した。その結果、図5に示すような3種の ILM の存在を確認することができた。図5(a)は従来から知られた ILM であるが、従来とは安定性が異なっていることが明らかになった。これは、格子の軸方向以外の方向へ不安定化するのが原因である。また、他の ILM についても安定性解析を行ったが、ほとんどの解は不安定であった。しかしながら、特性乗数の絶対値が小さい ILM も存在するため、比較的長時間局在を保つことは可能と考えられる。

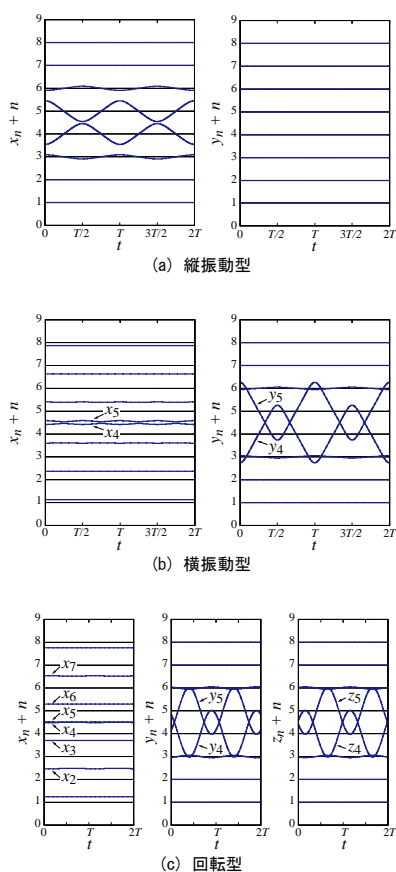


図 5 3 種の ILM の例

(M. Kimura *et al.*, *Letters on Materials* **6**, pp.22-26, 2016. Fig. 3, 4, 5 より改変して転載)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

① E. Perkins, M. Kimura, T. Hikiyara, B. Balachandran, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 85, pp. 333-341, 2016, 査読有.
DOI: 10.1007/s11071-016-2688-2

② M. Kimura, A. Mitani, S. Doi, *Letters on Materials*, Vol.6, pp.22-26, 2016, 査読有.
<http://lettersonmaterials.com/en/Reader/s/Article.aspx?aid=974>

③ A. Yamamoto, M. Kimura, T. Hikiyara, *Nonlinear Theory and Its Applications*, IEICE, Vol.4, pp.284-298, 2013, 査読有.
DOI: 10.1587/nolta.4.284
他, 査読有国際会議論文 3 件

[学会発表] (計 11 件)

① M. Kimura, T. Hikiyara, “Destabilization of Intrinsic Localized Modes in Magnetically Coupled Cantilever Array by Parametric Excitation,” 2015 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2015), 2015 年 12 月 1 日-4 日, Hong Kong (China), 査読有.

② 三谷 敦己, 木村 真之, 土居伸二, “圧縮または伸張された FPU- β 鎖における空間局在モードの存在と分岐に関する一検討,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, 大濱信泉記念館(石垣市), 2015 年 10 月 31 日-11 月 1 日, 査読無.

③ 木村真之, 松岩貴祐, 谷口義治, 松下泰雄, “相互誘導により結合された共振回路アレイにおける局在モードに関する一検討,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, アステールプラザ(広島市), 2015 年 10 月 5 日-10 月 6 日, 査読無.

④ M. Kimura, A. Mitani, S. Doi, “Existence and stability of intrinsic localized modes in FPU- β chain with fixed boundary condition embedded in two dimensional plane,” International Workshop on Discrete Breathers in Crystals, Ufa (Russia), 2015 年 9 月 21 日-24 日, 査読無.

⑤ 三谷 敦己, 木村 真之, 土居伸二, “準 1 次元 FPU- β 格子における ILM の存在と安定性に関する検討,” 電子情報通信学会 2015 年総合大会, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス(滋賀県), 2015 年 3 月 10 日-13 日, 査読無.

⑥ M. Kimura, R. Tsujisaka, T. Hikiyara, Y. Taniguchi, and Y. Matsushita, “A Study on Reflection of Moving Intrinsic Localized Modes at a Junction of Two Different Nonlinear Lattices,” 2014 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA2014), Luzern (Switzerland), 2014 年 9 月 14-18, 査読有.

⑦ 松岩 貴祐, 木村 真之, 谷口義治, 松下泰雄, “相互インダクタンスにより結合された共振回路における定在波と局在モードに関する一考察,” 電子情報通信学会 2014 年総合大会, 新潟大学(新潟市), 2014 年 3 月 18 日-21 日, 査読無.

⑧ R. Tsujisaka, M. Kimura, T. Hikiyara, Y. Taniguchi, and Y. Matsushita, “A study on energy barriers for moving intrinsic localized modes over junction of two regions,” 電子情報通信学会 非線形問題研究会, Hong Kong (China), 2013 年 12 月 6 日-7 日, 査読無.

⑨ M. Kimura, Y. Matsushita, T. Hikiyara, “A study on feedback control of intrinsic localized modes in a micro-mechanical cantilever array,” 2013 International

symposium on nonlinear theory and its applications (NOLTA2013), Santa Fe (USA), 2013年09月08日-11日, 査読有.

⑩ M. Kimura, Y. Matsushita, and T. Hikihara, “ Stability of intrinsic localized modes in parametrically driven coupled cantilever arrays, ” SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (DS13), Snowbird (USA), 2013年5月19日-23日, 査読無.

⑪ 辻阪 龍, 木村 真之, 引原 隆士, 谷口 義治, 松下 泰雄, “2つの異なる領域を有する非線形格子における移動型 ILM の速度変化に関する一検討,” 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 13), 兵庫県民会館(兵庫県), 2013年5月15-17日, 査読無.

[図書] (計1件)

① K. Yoshimura, Y. Doi, M. Kimura; M. Ohtsu and T. Yatsui (Eds.), Springer, Progress in Nanophotonics 3, 2015, pp. 119-166. (分担執筆)

[その他]

ホームページ等

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/~kimura/indexJ.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木村 真之 (KIMURA, Masayuki)

京都大学電気電子工学系 助教

研究者番号 : 00551376

(4) 研究協力者

引原 隆士 (HIKIHARA, Takashi)