

## カンチレバーアレイ中の走行モード

金沢大学 自然科学研究科 (理学部物理) 佐藤政行 (Masayuki Sato)  
Graduate School of Natural Science and Technology  
Kanazawa University

### 1. イントロダクション

非線形局在励起 (Intrinsic localized mode, ILM) は、不純物を含まない非線形格子で実現される、ノーマルモードとしての局在モードという興味深い現象である。[1, 2] これは、非線形で格子、さらに非可積分性が重要で、理論にとっては困難な問題である。計算機実験や、試料を用いた実験が果たす役割は大きいと信じる。

非可積分の非線形格子は局在励起を格子にピン止めする効果を持つ。格子ピンング効果、すなわち静止安定性が非線形局在励起の大きな特徴である。我々は、マイクロカンチレバーアレイを試料として非線形局在励起に関する実験を行ってきた。[3, 4] 今まで、非線形局在励起の生成や移動に成功している。この課程で、格子ピン止め効果の重要性については十分認識してきた。次の興味は、連続移動、すなわち走行モードである。ここでは、走行モードを生成するためにバンド構造の中ほどの周波数を励起周波数に用いた。

### 2. 試料と実験装置、シミュレーションモデル

試料は、以前の実験と同じ、マイクロカンチレバーアレイである。真空中で試料全体を PZT を用いて上下に振動させる。カンチレバー先端に線状にフォーカスしたレーザービームを照射し、反射光を一次元の CCD カメラで観測する。振動の振幅が大きいカンチレバーは、CCD カメラでは暗く記録される。これにより、局在励起の時間的位置が記録される。(図 1)

カンチレバーは窒化シリコンの薄膜から出来ている。個々のカンチレバーを一個の振動子と捉え、振動子間の結合はオーバーハングというカンチレバー間の薄膜が伝える振動が担う。オーバーハングの長さが大きいほど、結合が密になることは実験で確かめられている。真空中では空気との摩擦によるダンピングが抑えられ、 $Q$  値で 1 万に近い値が得られる。振動の励起方法は、全体を一様に振動させるというシンプルな方法である。これは、固体の結晶格子中に光やマイクロ波でもって振動を励起するという状況に近い。

シミュレーションモデルでは、非線形性は、カンチレバー自身の持つ正の 3 次の非線形性と、オーバーハングの持つ正の 3 次の非線形性が考慮されている。構造解析により、オーバーハングによる、サイト間の非線形性の方が大きいという結論が得られている。[4]

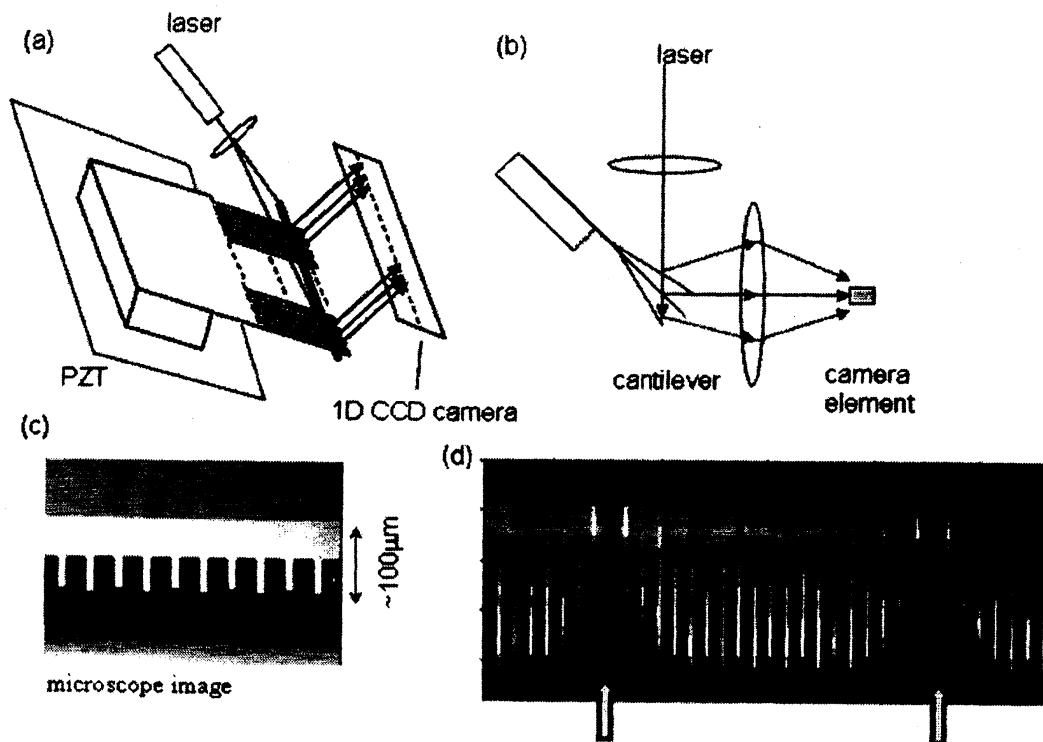


図1. (a) 実験装置の全体。カンチレバーアレイの先端にレーザー光を線状にフォーカスして反射光を CCD で測定。(b) カンチレバーの振動振幅が大きくなると、ビームが逸れるので暗く記録される。(c) 試料の顕微鏡写真。(d) 励起状態のアレイの2次元イメージ。矢印の、先端が暗い部分に非線形局在励起（静止モード）が記録されている。

### 3. 静止モード

初めに、今まで観測されている静止モードについて述べる。非線形局在励起も、不純物モードのようにバンドの外側に局在励起を生成する。(図2参照) 試料は正の非線形性を持つので、振幅増大とともに共鳴周波数が増加する。この性質を利用して、線形バンドの外側に状態を作る。線形バンドの端に一番近い、高い方の周波数のモードは、最高周波数のモードである。このモードを大振幅に励起することで非線形局在励起が生成すると期待される。実空間での最高周波数のモードの形状は、隣同士が互い違いに上下している。ユニットセルが1個の格子では、格子全体で質量中心の振動が互いに打ち消しあってしまい、一様励起では励起することが出来ない。そこで、ユニットセルに長さの違うカンチレバー2つからなる試料を用意した。(図1c) このため、分散関係は2つのバンドからなる。(図2a)

最高周波数のモードの振幅を増大させるため、励起周波数をその位置から、時間とともに増大させる。ある点で、変調不安定性により多くの非線形局在励起が発生する。そのうち、いくつかは励起源と同調してエネルギーをもらい続け、さらに振幅を増大させる。大振幅の非線形局在励起は強い格子ピンング効果を受け、静止する。このとき、波数空間では非線形局在励起は線形バンドの外側に位置することがシミュレーションで示されている。(図2参照)

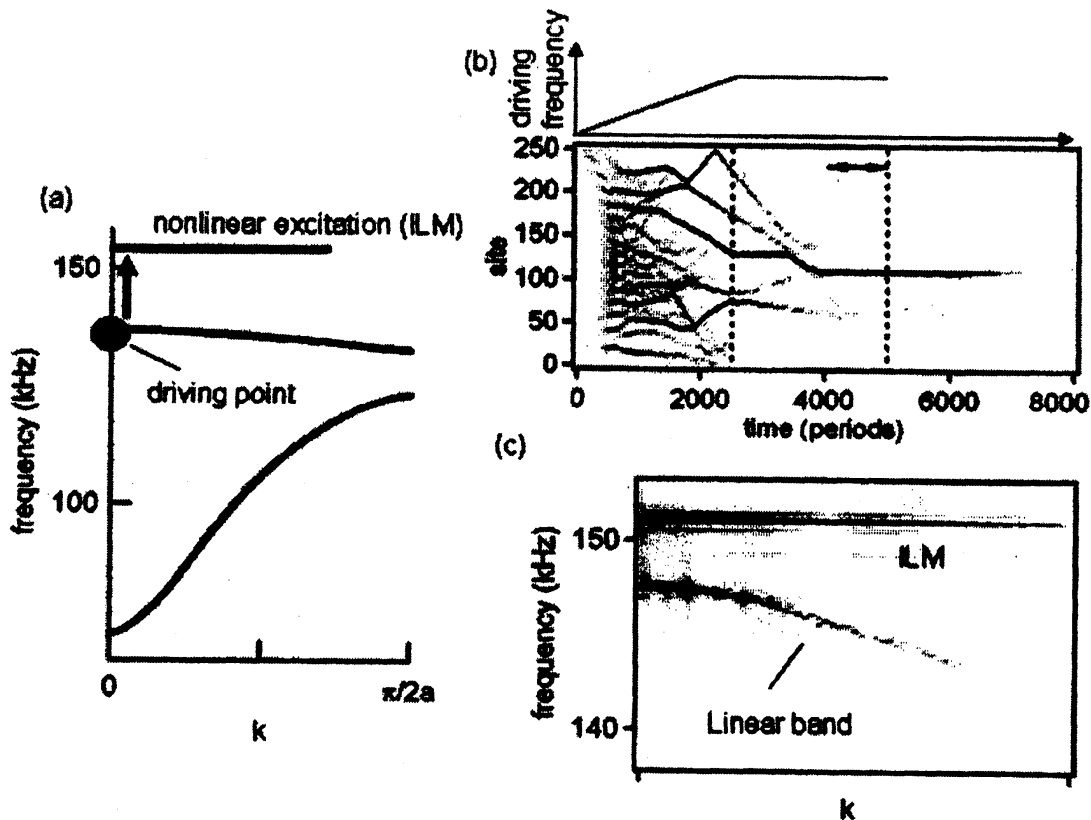


図2. 静止非線形局在励起。(a)2種類のカンチレバーからなるアレイは、2つのバンドを持つ。上のバンドの最高周波数のモードを、周波数をスイープすることで大振幅励起する。(b)シミュレーション結果。上は、励起周波数の時間変化、下はエネルギーを濃淡で示してある。黒い、線状の部分が非線形局在励起。周波数の高い、大振幅の非線形局在励起は格子に強くピンされるので、静止する。(c) (b)の、矢印で示された時間内の2次元フーリエ変換の結果。波数空間では、非線形局在励起は上の線形バンドの上に、直線状に表示される。

#### 4. 走行モード

走行モードを生成するには、下のバンドの中側、それも上半分が良いことを見つけた。静止モードがバンドの上側にあることと、対照的である。静止モードが外側になければいけない理由は、静止モードは分散図(図2(a))では水平な横線で表現されること、安定な状態は線形状態と重ならないことによる。非線形状態が線形状態と重なると、重なった状態を通じて緩和が起こり、寿命が短くなるために、重なってはならない。

バンドの中の状態を励起した場合で、線形状態と重ならない、新たな非線形状態の一種は、図3に示すような傾いた直線が一つの解として考えられる。また、時間とともに形状を変えず、一定の速度で進む局在励起は、分散図では傾いた直線で示されることも容易に示せる。実験では、励起周波数をわずかに上昇させると走行モードの速度が減少することも確認できた。

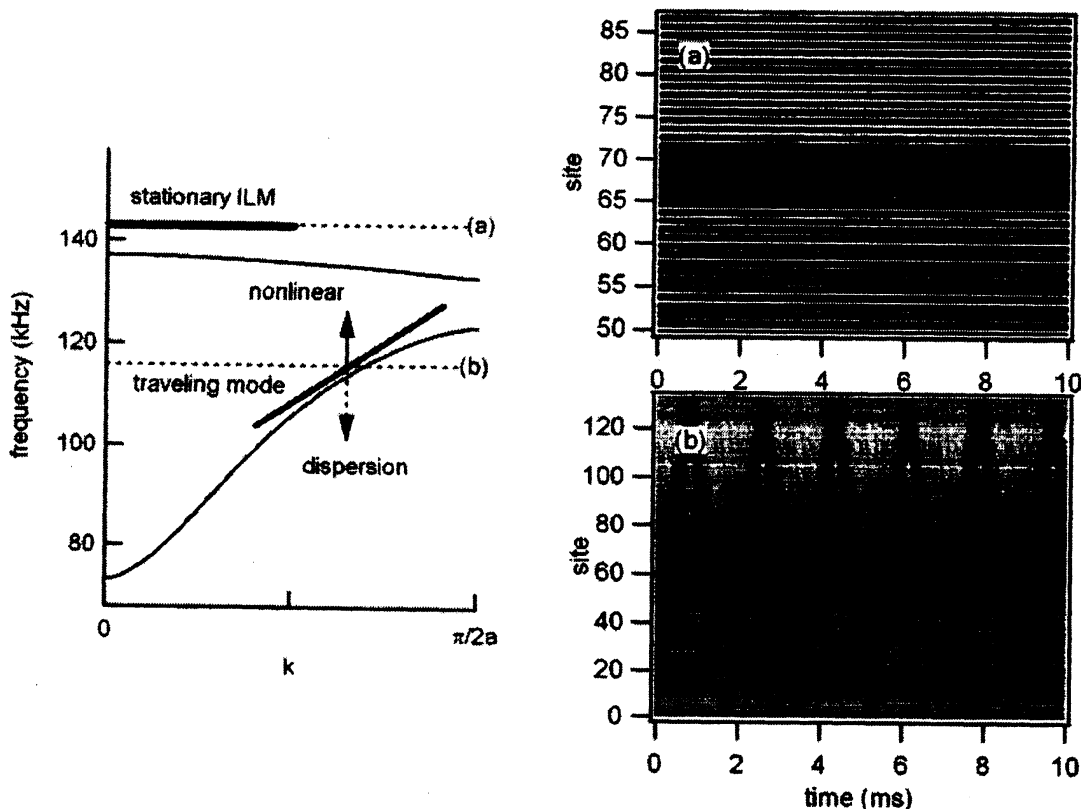


図3. 静止モード、走行モードと分散関係。(左) 分散関係と2種類の非線形局在励起を生成するための励起周波数。(右) (a)静止モード。励起周波数はバンドの外側。(b)走行モード。励起周波数はバンドの中。

## 5. まとめ

同一の試料にて、励起周波数を変えるだけで非線形局在励起の静止モードと走行モードが観測できた。また、非線形局在励起がその元となる線形モードから作られる様子が、波数空間で考えることでイメージされた。なお、この研究は、コーネル大学の A.J.Sievers との共同研究です。

## 参考文献

- [1] A. J. Sievers and S. Takeno, "Intrinsic localized modes in anharmonic crystals", *Phys. Rev. Lett.* **61**, 970 (1988).
- [2] D. K. Campbell, S. Flach, and Y. S. Kivshar, "Localizing energy through nonlinearity and discreteness", *Physics Today*. **57**, 43 (2004)
- [3] M. Sato, B. E. Hubbard, A. J. Sievers, B. Ilic, D. A. Czaplewski, and H. G. Craighead, " Observation of Locked Intrinsic Localized Vibrational Modes in a Micromechanical Oscillator Array", *Phys. Rev. Lett.* **90**, 044102(pp.1-4) (2003).
- [4] M. Sato, B. E. Hubbard, and A. J. Sievers, " *Colloquium*: Nonlinear energy localization and its manipulation in micromechanical oscillator arrays", *Reviews of Modern Physics* **78**, pp.137-157 (2006).