

## 確率共鳴で動作するナノ機械によるセンシング

### Nanomechanical sensing based on stochastic resonance

小野 崇人 (ONO TAKAHITO)

東北大学・大学院工学研究科・教授



#### 研究の概要

力学的な非線形性を利用し、マイクロ・ナノ機械がもつ振動状態を2値化でき、外部からノイズを印加することで、振動状態が変化する確率共鳴が引き起こされる。この状態は外部からのわずかな刺激で変化するため、ノイズ環境下でも高感度なセンサとして利用できると期待できる。さらに複数の振動子を機械的に結合させ、より高度なセンシングが可能になる。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：ナノメカニクス、MEMS、マイクロマシン、確率共鳴、高感度センサ

#### 1. 研究開始当初の背景

マイクロ・ナノマシニング技術の発達により、機械や電気要素を小型化、集積化し、さまざまなセンサが実現されてきた。小さな機械要素は共振型センサとして、高感度に力や質量、電荷、輻射などを測定するセンサとして利用される。一方、研究代表者は、機械要素をナノメートルにまで小型化していくと、機械的な非線形性が顕著になることを見出し、これを利用すると振動状態を2値化し、ノイズに強いロバストセンサとして使えるとの着想に至り、研究を開始した。もともと、このような原理は自然界の生物が持っているものであり、本研究ではこれを人工的に実現するものである。

#### 2. 研究の目的

ナノスケールまで小型化した機械要素の非線形性を評価し、その形状やサイズと非線形性パラメータの関係を調べる。自己検知型のセンサを開発するとともに、振動の2値化状態（バイナリー化）を実現し、外部からのノイズの印加による自発的な状態間の遷移を実現する。複数の振動子を機械的に結合させ、同期させる。同期を利用したセンシングを試みる。多数のセンサを結合した大規模なセンサによる高度なセンシングを実現する。複数の振動子を電気機械的に結合し、その振動子間で情報伝達を行うことで、高性能、あるいは高度な機能をもつ、センサを実現する。

#### 3. 研究の方法

マイクロ・ナノマシニング技術を利用し、シリコンからなる微小な振動子を作製し、その機械的な非線形性を評価する。微小な振動子の振動はレーザードップラー振動計で測定するとともに、将来、大規模なセンサアレイを利用することを想定し、自己検知型のセンサの開発を進める。自己検知型センサとして、ピエゾ抵抗型センサ、圧電センサの両方のタイプを開発する。振動子は、真空中と待機中の両方で評価する。振動子同士を細い梁で結合させた結合振動子を作製し、その同期現象について調べ、機械的な結合について評価する。センサを多数並べたセンサを作製し評価する。

#### 4. これまでの成果

マイクロ・ナノメカニクスの機械的な非線形性の評価により、振動子を小型化すると大きな非線形性を示すことを見出し、その詳細について調べた。その結果、シリコン振動子の厚さが200nm以下になると、非線形性が顕著になることがわかった。また、非線形性は形状にも依存することを見出した。

振動子を機械的、あるいは電氣的に結合させたインテリジェントなセンサシステムを開発するためには、個々の振動子に自己検知機能を持たせる必要がある。このため、自己検知型ナノセンサの開発を行った。ピエゾ抵抗型と圧電検出型の2種類の方式のセンサ

を開発した。ごく薄の不純物をシリコン表面に拡散する技術を開発し、ピエゾ抵抗型ナノセンサを試作した結果、良好な振動検出特性を得た。また、圧電薄膜をゾルゲル法により自動でコーティングする技術を開発し、圧電型振動子アレイを作製した。これ以外に、水晶を反応性イオンエッチングでエッチングする技術と水晶をシリコンに接合する技術を開発して、水晶の結合振動子を試作した。この結合振動子により、圧電効果を利用して高感度に微小な力が検出できることを示した。

作製した非線形振動子をその共振周波数近傍のバイナリー状態をもつ周波数領域が生じているのを確認した。この周波数帯で振動させ、さらに振動ノイズを重畳すると、振動振幅が2つの状態をランダムに遷移する確率共鳴状態を作り出すことに成功した。用いた振動子は片持ち梁上の振動子と両持ち梁上の振動子の2種類である。両持ち梁型の振動子は遷移の活性化エネルギーが小さく、室温近傍の熱ノイズでも確率共鳴状態になることを確認した。これは、室温の熱ノイズを利用して、感度を増幅できることを示している。作製した振動子を用いて確率共鳴により輻射や外力が測れることを示し、ノイズの印加により、SN比が増加することを示した。これは、ノイズ環境下でも高感度なセンサとして働くことを示した重要な成果である。

これら振動子を複数並べて高度なセンシングを実現するため、振動子を機械的な非線形梁で結合させ、振動子の振動状態に同期が見られるかどうかを調べた。その結果、振動子の共振周波数が整数倍に近い時、振動子の振動周波数が整数比になるように引き込み現象が起きることを示した。これは振動子の厚さが厚い時には見られないが、200nm以下の厚さになると非線形性が現れこの現象がみられる。2つの周波数が異なる結合振動子において、信号を伝達し、かつノイズを抑制して高感度な測定が可能であることを示した。これは、結合振動子によりノイズを抑制し高感度化が得られることを示した重要な成果である。さらに3つ以上の振動子の同期にも成功している。

さらに、センサの大規模化をはかり高度なセンシングを行うための圧電センサアレイの作製を行い、確率共鳴状態を実現した。

#### 5. 今後の計画

振動子を電気機械的に結合する方法について調べ、複数個配列したセンサにて確率共鳴型のセンサを作製し、ノイズに対するロバスト性があることを実証する。また、結合振動子を磁気共鳴力センサなどに利用し、3次元のイメージングなどにも応用する。センサ間の機械的な結合を利用し、同期や周波数変換、情報伝達機能などの高度な機能を実現す

る。これらの組み合わせで、高度なセンシング機能をもつセンサシステムを開発する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Y. G. Jiang, T. Ono, and M. Esashi, Fabrication of piezoresistive nanocantilevers for ultra-sensitive force detection, *Measurement Science and Technology*, 19, (2008), 084011-1~084011-5.
2. Takahito Ono, Yusuke Yoshida, Yong-Gang Jiang, and Masayoshi Esashi, Noise-enhanced Sensing of Light and Magnetic Force Based on a Nonlinear Silicon Microresonator, *Applied Physics Express*, 1, (2008), 123001-1-123001-3.
3. Yonggang Jiang, Takahito Ono, and Masayoshi Esashi, Temperature-dependent mechanical and electrical properties of boron-doped, piezoresistive nanocantilevers, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19, (2009) 065030.
4. Sang-Jin Kim, Takahito Ono, and Masayoshi Esashi, Thermal imaging with tapping mode using a bimetal oscillator formed at the end of a cantilever, *Review of Scientific Instruments*, 80, (2009), 033703-1-033703-6.
5. Akihiro Takahashi, Masayoshi Esashi and Takahito Ono, Quartz-crystal scanning probe microcantilevers with a silicon tip based on direct bonding of silicon and quartz, *Nanotechnology*, 21, (2010), 405502-1-405502-5.
6. Jinyang Feng, Xiongying Ye, Masayoshi Esashi, and Takahito Ono, Mechanically coupled synchronized resonators for resonant sensing applications, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20, (2010) 115001-1~115001-5.
7. Yusuke Yoshida, Susuke Kawai, and Takahito Ono, Parallel array of noise-activated nonlinear micro-resonators with integrated actuators, *MEMS 2011, Cancun, MEXICO*, January 23-27, (2011) pp. 613-616.

ホームページ等

<http://www.nme.mech.tohoku.ac.jp/>