

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20676001

研究課題名（和文） 確率共鳴で動作するナノ機械によるセンシング

研究課題名（英文） Sensing Based on Nanomechanical systems coupled with stochastic resonance

研究代表者

小野 崇人（ONO TAKAHITO）

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90282095

研究成果の概要（和文）：

マイクロ・ナノスケールの振動子の機械的非線形性を利用し、その振動振幅が2値化する振動状態を実現する。この振動子は、外部からのノイズの印加により確率共鳴状態となり、さらに外部刺激に応答するため、ロバストなセンサとして応用できることを示した。同様の目的で、自己検知型の振動子のアレイ、同期型の振動子などを開発した。また、振動子の結合により、演算素子として利用できる可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

Bistable states of the vibration amplitude of micro/nano-resonators are realized using its mechanical nonlinearity. Those resonators exhibit stochastic resonance state by applying external noise, in addition, respond to external stimulus. It is shown that the resonators can be applicable to robust sensors. For same purpose, an array of resonators with self-sensing function has been developed. In addition, possibility of mechanical logic devices has been shown using mechanically coupled resonators.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	16,800,000	5,040,000	21,840,000
2009年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2010年度	17,600,000	5,280,000	22,880,000
2011年度	17,600,000	5,280,000	22,880,000
2012年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
総計	77,600,000	23,280,000	100,880,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 ・ 応用物理学一般

キーワード：マイクロマシン

## 1. 研究開始当初の背景

本来、生物の感覚器官では、確率共鳴現象を利用して信号を増幅していることが知られており、本提案ではナノ・マイクロ機械による固体素子によりこのような生体の感覚器官に似た機能を実現するものである。

これまでの研究で、微細加工技術により作製した極薄のシリコン共振子が極めて特異

な、機械的非線形性を示すことを見出した。大きな駆動力を与えると非線形性により、“大きな振幅状態”と“小さな振幅状態”の二つの安定な状態（バイナリー状態）が出現する。そして、この非線形性をもつ共振子を振動させ、ノイズとなる外力を与えると確率的に2準位間をランダムに遷移する。この確率的な遷移は、確率共鳴とよばれ多くの生物

の感覚器が本来利用している現象であると考えられている。

## 2. 研究の目的

確率共鳴を利用したセンシングの一つの利点は、環境にあるノイズを利用してその感度を高めていることである。一般にセンサの分解能は、外部からのノイズによって制限されるが、逆にノイズを使って感度を高めることができれば、ノイズがある環境下でも動作するセンサとして使える。このことは、理論的にも確認されているが、この現象を利用したセンサはこれまでに報告されていない。

そこで、本研究では、この確率共鳴を利用したセンサ技術、およびその応用技術を開発する。具体的には、マイクロ・ナノ振動子の非線形について調べ、この非線形を利用した2値化状態を実現し、外部からノイズを加えて、確率共鳴状態を実現する。マイクロ・ナノ振動子の非線形については、未知な部分が多く、そのサイズや形状に対する依存性について詳しく調べる。確率共鳴型センサに振動子のアレイを用いて高度なセンシング機能を実現するため、振動子同士を機械的、あるいは電気機械的に結合させた結合振動子を開発する。特に機械的な結合による信号（振動情報）の伝達に観点を置き、結合振動子について調べる。結合振動子により、ノイズを制御し、信号を伝えることで高感度なセンシングを実現する。

## 3. 研究の方法

確率共鳴を実現するための、デバイスの作成技術を開発する。マイクロからナノスケールの振動子において、水晶やPZTなどの圧電振動子、 piezo抵抗型センサ、容量センサなどを集積化した自己検知機能をもつ振動子を開発する。

確率共鳴型の振動型センサを実現するため、振動子の非線形性を調べる。また、振動型センサを機械的に結合させて、その結合状態を調べる。

上記の要素技術を展開し、新しいセンシング技術やセンサを開発する。熱輻射などのように、本来、熱ノイズを伴う信号を高感度に検出する、輻射センサを開発する。また、結合型振動子でノイズを低減し、高感度にスピンを測定する磁気共鳴センサを開発する。室温における熱機械ノイズを利用し、確率共鳴により信号を増強する“ノイズ環境センサ”に取り組む。また、より高度に輻射や力などを検出するために大規模結合型センサの開発を行う。

## 4. 研究成果

### (1) マイクロ・ナノ振動子の非線形性評価

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。一般的に、両側を指示された振動梁は、振幅が大きくなると引っ張られて、正の非線形性（振幅の増大とともに共振周波数が増大）を示す。一方、このような非線形性は片持ち梁（カンチレバー）では見られないはずであるが、実験では、多くが負の非線

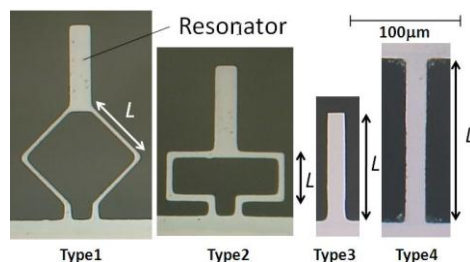


図1. 機械的非線形性を示すさまざまな振動子

形性を示すことを見出した。また、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、図4にその測定例を示すように、非線形性は形状にも依存することを見出した。

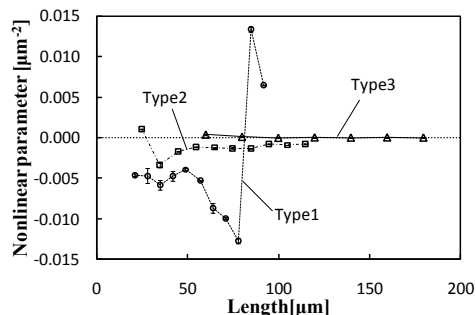


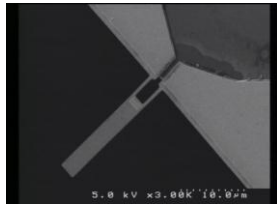
図2. 非線形性（非線形ばね定数）のサイズ依存性の例

### (2) 自己励起・自己検知型センサの開発

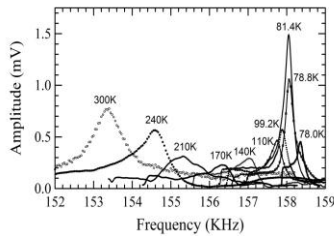
振動子を機械的、あるいは電氣的に結合させたインテリジェントなセンサシステムを開発するためには、個々の振動子に自己検知機能を持たせる必要がある。このため、自己検知型ナノセンサの開発を行った。piezo抵抗型と圧電検出型の2種類の方式のセンサを開発した。

#### (a) piezo抵抗ナノセンサの開発

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、piezo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（図5）。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。



(a)



(b)

図 3. (a) 100nm の厚さの piezo 抵抗型ナノセンサ。(b) 室温から 77K までの piezo 抵抗による振動検出

(3) 機械振動における確率共鳴現象

(a) 確率共鳴状態の実現 作製した非線形振動子と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して、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。

(b) 確率共鳴現象の計測 図4では、振動子にノイズを与えて確率共鳴状態に保った状態で、外部から印加するノイズを徐々に変えていった時の振動振幅を示している。適切なノイズで振動状態が、外部から加えた刺激信号（輻射）に反応して応答していることがわかる。

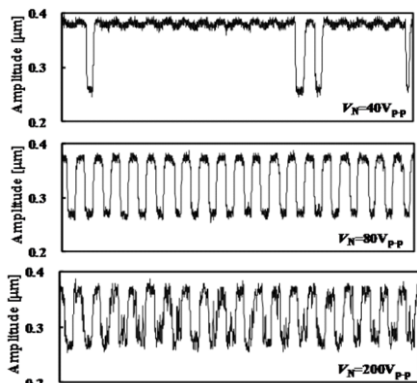


図 4. 確率共鳴状態に外部ノイズを加えていくと、適切なノイズでは、振動振幅の変化が外部信号と同期する。

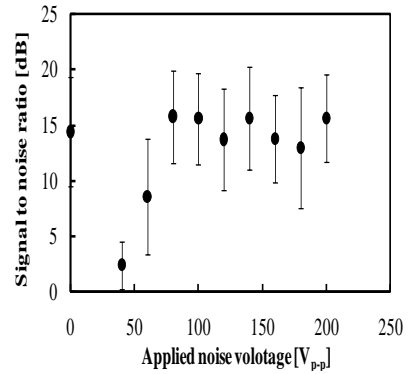


図 5. 加えたノイズに対する SN 比の変化。ノイズによって感度が増加していることがわかる。

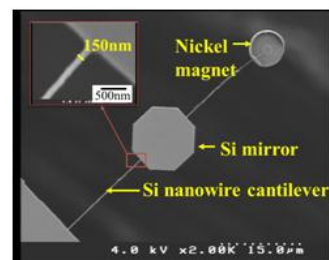


図 6. 磁気共鳴を検出するための、先端に磁性体をもつ確率共鳴型センサ。非常に小さな磁気信号を、センサそれ自身のノイズにより増幅することができる。

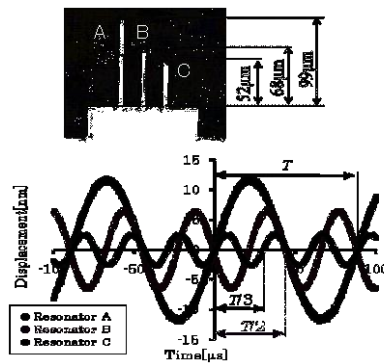


図 7. 結合振動子と振動周波数比が 1 : 2 : 3 に同期した振動波形

(c) 確率共鳴を利用したセンシング

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。また、図 10 に示すように、

磁気共鳴を力変化から高感度に検出し、マイクロ・ナノスケールで3次元イメージングするためのセンサを試作して評価し、確率共鳴で高感度なセンシングができることを実証した。

(4) 機械的結合したマイクロ・ナノメカニクス

(a) 機械結合による同期現象

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、図7に示すように、振動子の共振周波数が整数倍に近い時、振動子の共振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。さらに3つ以上の振動子の同期にも成功している(図7)。

(b) 結合振動子モデル

非線形ばねで結合された振動子のモデルを提唱し、結合振動子の非線形性を導出する方法を開発した。具体的には、振動子が同期振動する条件から逆にばねの非線形パラメータを算出する。

(c) 結合した非線形振動子の論理回路のアナロジー

結合した振動子において、その駆動電圧を入力とし、確率共鳴時の振幅を出力として論理回路が形成できることを実験的に示した。

図8にその例を示したように、駆動入力電圧と振動振幅の大きさを0,1の2値で表現した時の論理回路モデルを示した。この論理回路は動作条件によって変化することも見出した。この様に論理回路を構成できるのは、非線形性を駆動条件によってスイッチングできるためである。

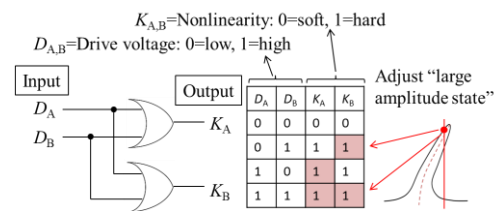
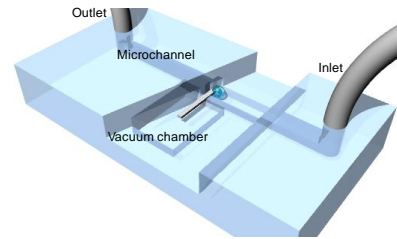


図8. 結合した確率共鳴振動子による論理回路構成

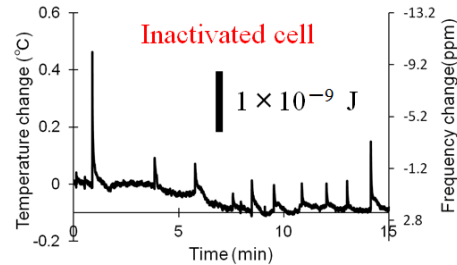
(5) 高感度センサへの応用

(a) 高感度センサ

振動子を高感度の熱量センサや力センサに応用し、高感度な検出が可能であることを示した。具体的には、ピコジュールの熱量を検出できる高感度なセンサを開発し、単一の細胞が発する熱量測定に成功した。また、高感度な力センサを開発し、磁気共鳴に伴うスピンの動きを検出することに成功した。



(a)



(b)

図9. (a)高感度振動型センサによる単一細胞から熱計測システム。(b)実際に観測された単一細胞が発する熱パルス。

(6) 多数のセンサによる確率共鳴を利用した高度センシング

多数の確率共鳴型センサをアレイ状に並べ、それぞれのセンサの出力を平均化することで、アナログ出力が得られると期待できる。本来、確率共鳴型センサは2値のデジタル的な信号に変換し、ノイズに対するロバスト性をもつが、これをアレイに並べることで、ロバスト性を持ち、かつ高感度なセンサが実現できる。また、前述したように、確率共鳴信号による論理演算も可能である。

図10に示したような、PZTの駆動、検出機能を内蔵したセンサを試作し、確率共鳴状態が得られることを確認した。情報のストレージ機能、機械結合による情報の伝達機能も用いることが可能であると期待でき、センシングと論理演算の両方の機能が実現できる。

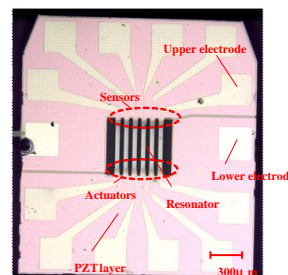


図10. PZTセンサを集積化した結合振動子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 35 件)

1. Naoki Inomata, Masaya Toda, Masaaki Sato, Akihiko Ishijima, and Takahito Ono, Pico calorimeter for detection of heat produced in an individual brown fat cell, *Applied Physics Letters* 100, (2012) 154104-1~154104-4. (DOI: 10.1063/1.3701720) 【査読有】
  2. Zhonglie An, Masayoshi Esashi, and Takahito Ono, Piezoresistive Silicon Microresonator for Measurements of Hydrogen Adsorption in Carbon Nanotubes, *Japanese Journal of Applied Physics*, 51 (2012) 116601-4. (DOI: 10.1143/JJAP.51.116601) 【査読有】
  3. Nguyen Van TOAN, Hidetoshi MIYASHITA, Masaya TODA, Yusuke KAWAI, and Takahito ONO, Fabrication of Hermetically Packaged Silicon Resonator on LTCC Substrate, *Microsystem technologies*, 23, (2012). (DOI: 10.1007/s00542-012-1716-5) 【査読有】
  4. Masaya Toda, Tomoyuki Otake, Hidetoshi Miyashita, Yusuke Kawai, Takahito Ono, Suspended bimaterial microchannel resonators for thermal sensing of local heat generation in liquid, *Microsystem technologies* (2012). (DOI: 10.1007/s00542-012-1698-3) 【査読有】
  5. Yonggang Jiang, Masayoshi Esashi, Takahito Ono, Modeling and Experimental Analysis on the Nonlinearity of Single Crystal Silicon Cantilevered Microstructures, *電気学会論文誌 E*, 131, (2011) 195-196. (DOI: 10.1541/ieejms.131.195) 【査読有】
  6. 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. (DOI: 10.1088/0957-4484/21/40/405502) 【査読有】
  7. 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. 【査読有】
  8. 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. (DOI: 10.1088/0960-1317/20/11/115001) 【査読有】
  9. 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. (DOI: 10.1063/1.3095680) 【査読有】
  10. 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. (DOI: 1088/0957-0233/19/8/084011) 【査読有】
  11. 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. (DOI: 10.1143/APEX.1.123001) 【査読有】
- 〔学会発表〕 (計 76 件)
1. N. Inomata, M. Toda, M. Sato, A. Ishijima, and T. Ono, Resonant Thermal Sensor for a living cell in liquid, The 25th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2010), Paris, France. 1 February (2012).
  2. Keitaro Tanno, Yusuke Kawai, and Takahito Ono, Experimental and modeling analysis on entrainment condition of submicrometer thick Si micro mechanical resonators with nonlinear coupling element, The 25th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2010), Paris, France, 1, February (2012).
  3. Keitaro Tanno and Takahito Ono, Coupled mechanical Si resonators and its entrainment condition, *Microprocess and Nanotechnology Conference*, 25 October, Kyoto (2011).
  4. Masaya Toda, Tomoyuki Otake, Naoki Inomata, Takahito Ono, Microchanneled resonant heat sensor for a living cell, *Microprocess and Nanotechnology Conference*, 26 October, Kyoto (2011).
  5. Yusuke Yoshida and Takahito Ono, Nonlinear Micromechanical Bistable Resonator Capable of Vibration Switching by Thermomechanical Noise at Room Temperature, The 5th Asia-Pacific Conference on Transducers and Micro-Nano Technology, Perth, Western Australia, 7 July (2010).
  6. Yusuke Yoshida and Takahito Ono, Noise-enhanced sensing using micromechanical nonlinear resonator, The 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials, 7 Oct. Sendai, (2009).
  7. Yonggang Jiang, Takahito Ono, and Masayoshi Esashi, Development of 100-nm-thick self-sensing nanocantilever and characterization of the temperature

dependence of the piezoresistivity and conductivity, Proceeding of International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Denver, USA, 24 June, (2009).

〔図書〕 (計 6 件)

1. Takahito Ono, Masayoshi Esashi, Microfabricated Probe Technology, Encyclopedia of Nanotechnology, Springer Science+Business Media B.V. (2012),1-13.
2. 小野崇人, ナノ計測を可能にするツール, 応用物理 81, 1 (2012) 45-50. (日本応用物理学会)

〔その他〕

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小野 崇人 (ONO TAKAHITO)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：90282095

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：