

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (A)

研究期間：2006-2009

課題番号：18206008

研究課題名 (和文) 放射圧を利用した非破壊光子検出法の開発

研究課題名 (英文) Development of non-destructive photon detection method using radiation pressure

研究代表者

笹木 敬司 (SASAKI KEIJI)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：00183822

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、放射圧を利用して光子の状態を保ったまま光子を検出するという全く新しいアイデアに基づく光物理計測手法を開発することを目的として、a) 光子 1 個レベルを検出するために光子場を増強する手法の考案、b) 極めて高感度な力測定技術の開発および熱雑音の抑制技術の確立を行った。開発したシステムを用いれば、光子を消滅させず何度でも検出することができるので、光子の時間・空間などマルチパラメータの計測が可能となる。具体的には、微小共振器の Q 値に対応して得られる光増強度の見積りを行った。その結果得られる変位量や実験装置の位置検出感度等の試作に必要な実験条件の見積りを行った。これらの結果をもとにファイブリー・ペロー共振器を元にしたシステムの設計を行った。また、金コートした AFM プロブに周波数変調したレーザー光を入射しながら、AFM プロブの変位を測定した。その結果、熱による形状変化とは別に放射圧による変調成分を高感度に観測することに成功した。これらの知見をもとに金コート AFM プロブを片側ミラーとしたファブリ・ペロー共振器を含むシステムの試作を行った。さらに、テーパファイバを作製するための装置の設計、構築を行い、最適なテーパ形状を得る為の作製パラメータの探索を行った。その結果、安定して  $1\mu\text{m}$  程度のテーパ径をもつテーパファイバの作製が可能となった。また、このテーパファイバと微小球共振器を結合する為の測定系の作製を行い、テーパから微小球やトロイド共振器へ 100%に近い高効率なカップリングを観測した。

研究成果の概要 (英文)：

In this research project, we were aiming to develop a new optical measurement method based on an original idea that photons can be nondestructively detected by use of radiation pressure. For this purpose, we studied a) a technique for enhancing the photon field towards the single photon detection, b) a force measurement method with ultra high sensitivity and with low thermal noise. By using the developed method, a single photon can be observed repeatedly, so that this method will make it possible to measure multiple parameters of temporal and spatial properties of photon. For example, we experimentally determined the enhancement factor corresponding to Q-value of an optical microcavity. We also estimated the experimental conditions such as the expected displacement and sensitivity necessary for position sensing. From these estimations, we designed the system

using Fabry-Perot interferometer. In addition, we measured the displacement of a metal-coated tip of an atomic force microscope that was irradiated with frequency-modulated laser beam. We have successfully detected the vibration component of radiation pressure separately from the thermal deformation. From these results, we designed and developed the Fabry-Perot interferometer with a mirror of the metal-coated tip. Furthermore, we developed an apparatus for preparing a tapered optical fiber, and determined the optimal conditions for obtaining the taper shape suitable for optical coupling. We made it possible to reliably prepare fine (<1 um) taper. Then, we developed a coupling system between the tapered fiber and microcavities such as microspheres and toroids, which provided highly efficient optical coupling nearly reaching to perfect condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年	15,300,000	4,590,000	19,890,000
2007年	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2008年	8,000,000	2,400,000	10,400,000
2009年	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年			
総計	37,000,000	11,100,000	48,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学、量子光工学

キーワード：超精密計測、光ピンセット、微小共振器、マイクロ・ナノデバイス、量子エレクトロニクス

### 1. 研究開始当初の背景

光の放射圧を利用したレーザートラッピング・レーザーマニピュレーション技術は、1970年にベル研究所のアシュキン博士によって提案されて以来、数多くの研究がなされており、最近では、マイクロ化学チップの流体制御、DNA・タンパク分子・細胞などのバイオ光操作への応用等、様々な分野に展開している。しかしながら、放射圧現象から光（光子）そのものの物理性質・物理量を検知し解析するという光物理計測的観点からの応用研究は数少ない。一方、光子の検出器としては、光電子増倍管、CCD、フォトダイオードなど数多くあるが、それらは、光子のエネルギーを使って電子等を発生し感知する原理に基づいており、検出と同時に光子は

消滅してしまう。非破壊光子測定手法として、非線形光学効果を利用した方法が提案されているが、現実的な非線形光学定数をもつ材料系では高強度の光が必要となり、単一光子レベルの検出は極めて困難である。重力波の分野で放射圧を利用した高感度力測定法を考案した研究はあるが、マクロなシステムと本研究で開発するミクロなシステムでは要求されるテクノロジーも原理的に異なるものである。

### 2. 研究の目的

本研究では、放射圧を利用して光子の状態を保ったまま光子を検出するという全く新しいアイデアに基づく光物理計測手法を開発した。放射圧は光子の運動量に基づく現象

であり、反射・屈折により運動量ベクトルが変化して力が発生するが、そのプロセスにおいて光子エネルギーの損失は無い。本研究で開発した手法は、放射圧を高感度に測定することにより、運動方向以外は元の光子の状態に変化を与えずに光子を計測することを可能にする。すなわち、本手法を利用すれば1個の光子を何度でも検出することができ、光子の空間分布・時間特性などマルチパラメータの同時計測が実現可能となる。物質系を介さず放射圧を利用して光子の非破壊検出を実現するというアイデアは我々独自のものであり、類似の研究例は世界的にも無い。また、本開発手法は、エネルギー損失の無いシステムを実現できるので、エコロジーの観点からも光計測・光情報処理の研究分野にブレイクスルーをもたらすことが期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、我々が培ってきた放射圧研究に関する知識と経験に基づいて超高感度フォトンフォース計測技術を開発し、非破壊光子測定の実現を目指した。可視領域の光子1個が1回反射したとき発生する力は、 $10^{-19}$ ニュートンオーダーであり、感度の高い原子間力顕微鏡の力検出限界 ( $\sim 10^{-12}$ ニュートン) を大幅に下回る。そこで、実現に向けて、a) 光子1個レベルを検出するために光子場を増強する手法の考案、b) 極めて高感度な力測定技術の開発および熱雑音の抑制技術の確立を行った。電子の増倍と同様に光子をアンプする技術は存在するが、非破壊量子測定(量子情報技術への展開)を目指すためには光子の量子状態を保つ必要があり、量子力学の基本原則から光子を複製し増幅することは

できない。そこで、Q値の高い光共振器を使って光子場を増強するというアイデア、すなわち、検出デバイス内に光子が滞在する時間を長くし、運動量変化を大幅に増大させて発生する力を増強するデバイスを考案した。共振器としては微小球を用い、シングルモードファイバの一部を数マイクロメートルまで延伸したテーパファイバを作製し、エバネッセント場を介して微小球に光子がカップリングする系を構築した。100%に近いカップリング効率を得られることを実験的に示すことに成功した。

### 4. 研究成果

#### 【金属コート AFM プローブによる放射圧検出技術の開発】

金コートした AFM プローブ (SiN) に周波数変調したレーザー光 (780 nm) を入射しながら、AFM プローブの変位を光学顕微

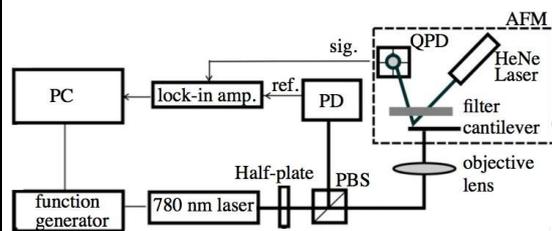


図1 変調レーザー光を照射したAFMプローブの振動測定システム

鏡下で測定した(図1)。図2(a), (b)は、レーザー変調周波数に対するプローブ変位の振幅と位相のグラフ、および、図2(c)は、振幅と位相を複素平面上にプロットした図である。この特性を理論的に解析した結果、熱により誘起される共鳴振動成分以外に、放射圧による変調成分が観測されていることが示された。また、共鳴成分とともに、Fano

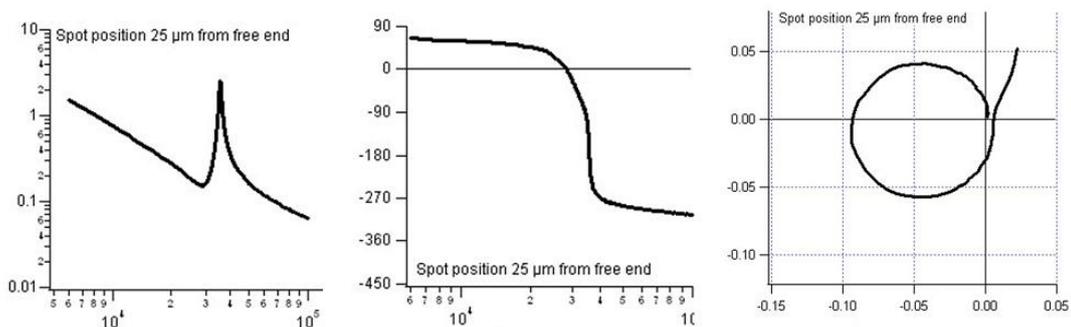


図2 AFMプローブの光誘起振動の(a)振幅、(b)位相の周波数特性、(c)複素平面プロット

効果を観測することに成功しており、この結果は、光誘起共鳴振動によるタッピングモード AFM 顕微鏡が高い感度を有することを明らかにした。

【微小光共振器と局在プラズモンを利用した増強電場形成技術の開発】

金コートした AFM プローブの局在プラズモンによる空間的光捕集（光アンテナ効果）と、テーパファイバ結合微小球共振器による時間的光捕捉（群速度抑制効果）を組み合わせることにより、光を 100% 結合（全入射光エネルギーのナノ領域への集光）する超高効率集光系の実現を目指した研究について説明する。図 3 の写真に示すような、テーパフ

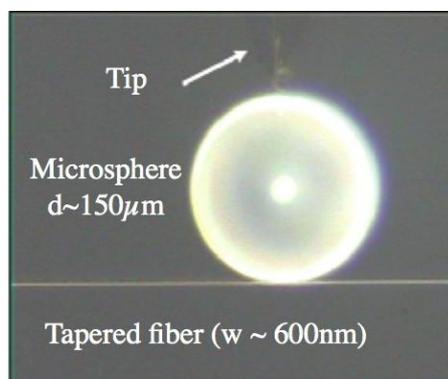


図 3 テーパファイバ・微小球共振器・金属コートチップ結合システムによる超高効率光カップリング

ィバ結合微小球共振器と金コート AFM チップ間の距離を制御しながら透過スペクトルを測定するシステムを構築した。図 4 は、

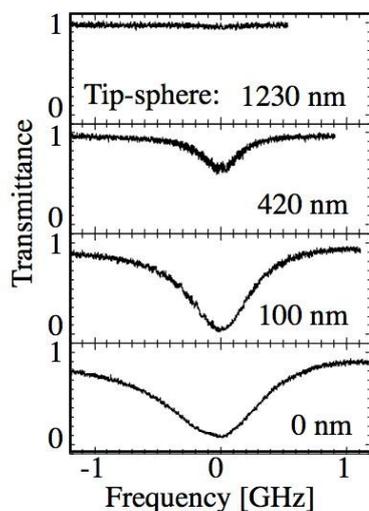


図 4 金属コートチップと微小球共振器の距離に依存した共鳴スペクトル

AFM チップと微小球表面間の距離を変化させたときの共鳴スペクトルである。距離に応じて、透過スペクトル中の共鳴ディップの深さや共鳴幅が変化する様子を観測されており、光のナノ局在特性を解析したところ、最適な距離（最適結合条件）においてディップ深さの変化から約 90% の入射光が金コートチップに集光されていることが示された。結合効率を 100% まで向上させるため、テーパファイバと微小球、金コートチップ間距離の最適化を行っている。また、金コートチップへの集光による局在プラズモン場の検証のため、金コートチップに吸着させた分子のラマン散乱測定による電場増強効果について評価を行い、微小共振器を介した金属ナノ構造への高効率光集光系の実証を目指す。

#### 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 18 件）

- ① Y. Tanaka and K. Sasaki : “Selection and transfer of individual plasmon-resonant metal nanoparticles”, *Appl. Phys. Lett.*, 107(5) : 054310/1-054310/6 (2010) 査読有
- ② H. Fujiwara, Y. Tanaka, H. Ishiguro, A. Saito, and K. Sasaki : “Direct observation of localized fields in nanogaps between metal particles using a scattering-type near-field microscope”, *Appl. Phys. Exp.*, 2 (10) : 102002/1-102002/3, (2009) 査読有
- ③ H. Fujiwara, Y. Hamabata and K. Sasaki : “Numerical analysis of resonant properties of a waveguide structure within a random medium”, *Opt. Exp.*, 17(13) : 10522-10528 (2009) 査読有
- ④ T. Chiba, H. Fujiwara, J. Hotta, S. Takeuchi and K. Sasaki : “Dynamical analysis of triplet lifetime of single molecules by a photon interdetction time analysis method”, *J. Phys. Chem. C*, 113(27) : 11652-11656 (2009) 査読有
- ⑤ D. Kawase, Y. Miyamoto, M. Takeda, K. Sasaki and S. Takeuchi : “Effect of high-dimensional entanglement of Laguerre-Gaussian modes in parametric down conversion”, *J. Opt. Soc. Am. B* 26(4) : 797-804 (2009) 査読有

- ⑥ H. Fujiwara, Y. Hamabata and K. Sasaki : “Numerical analysis of resonant and lasing properties at a defect region within a random structure”, *Opt. Exp.* 17(5) : 3970-3977 (2009) 査読有
- ⑦ R. Okamoto, J. L. O'Brien, H. F. Hofmann, T. Nagata, K. Sasaki and S. Takeuchi : “An entanglement filter”, *Science* 323 : 483-485 (2009) 査読有
- ⑧ D. Kawase, Y. Miyamoto, M. Takeda, K. Sasaki and S. Takeuchi : “Observing quantum correlation of photons in Laguerre-Gauss modes using the Gouy phase”, *Phys. Rev. Lett.* 101 : 050501/1-050501/4 (2008) 査読有
- ⑨ R. Okamoto, H. F. Hofmann, T. Nagata, J. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi : “Beating the standard quantum limit: phase super-sensitivity of N-photon interferometers”, *New. J. Phys.* 10: 073033-1-073033-9 (2008) 査読有
- ⑩ H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi : “Control of spontaneous emission coupling factor  $\beta$  in fiber-coupled microsphere resonators”, *Appl. Phys. Lett.* 92 (7) : 07115/1-07115/3 (2008) 査読有
- ⑪ Y. Kawabe, H. Fujiwara, R. Okamoto, K. Sasaki and S. Takeuchi : “Quantum interference fringes beating the diffraction limit”, *Opt. Exp.* 15(21) : 14244-14250 (2007) 査読有
- ⑫ Y. Kawabe, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki : “ Investigation of the spatial propagation properties of type-I parametric fluorescence by use of tuning curve filtering method”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 46(9A) : 5802-5808 (2007) 査読有
- ⑬ T. Nagata, R. Okamoto, J. O'Brien, K. Sasaki and S. Takeuchi : “Beating the standard quantum limit with four entangled photons”, *Science* 316 : 726-729 (2007) 査読有
- ⑭ H. Takashima, H. Fujiwara, S. Takeuchi, K. Sasaki and M. Takahashi : “Fiber-microsphere laser with a submicrometer sol-gel silica glass layer codoped with erbium, aluminum, and phosphorus”, *Appl. Phys. Lett.* 90(1) : 053709/1-053709/3 (2007) 査読有
- ⑮ H. Fujiwara, Y. Kawabe, S. Takeuchi and K. Sasaki : “Numerical analysis of spatial propagation of parametric fluorescence photon-pairs using the tuning curve filtering method”, *Phys. Rev.A* 75 : 023802/1-023802/8 (2007) 査読有
- ⑯ H. Konishi, H. Fujiwara, S. Takeuchi and K. Sasaki : “Polarization-discriminated spectra of a fiber-microsphere system”, *Appl. Phys. Lett.* 89(12) : 121107/1-121107/3 (2006) 査読有
- ⑰ H. Takashima, H. Fujiwara, J. Hotta, S. Takeuchi, K. Sasaki, S. Murakami, T. Torimoto and B. Ohtani : “Analysis of quantum dot fluorescence coupled with a microsphere resonator”, *Jpn. J. Appl. Phys.* 45(9A) : 6917-6921 (2006) 査読有
- ⑱ H. Fujiwara and K. Sasaki : “Observation of optical bistability in a ZnO powder random medium”, *Appl. Phys. Lett.* 89 : 071115/1 - 071115/3 (2006) 査読有
- [学会発表] (計 22 件)
- ① H. Fujiwara, Y. Tanaka, H. Takashima and K. Sasaki : “Analysis of photon-localization within integrated functional structures using narrow-band laser microimaging spectroscopy”, The 3rd Taiwan-Japan Symposium on Organized Nanomaterials and Nanostructures Related to Photoscience, Silks Place Taroko Hotel, Hualien, Taiwan (2010-03-23)
- ② K. Sasaki : “Quantum photonic technology beating the classical limit”, Visiting Professor Seminar, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia (2010-01-21)
- ③ K. Sasaki : “Photon technology beating the classical limit”, RIES-CIS Mini-workshop on Nano/Bio/Quantum Science, National Chiao Tung University or Hsinchu Jiao Tong University, Taiwan, Taiwan (2009-12-10)
- ④ K. Sasaki : “Observation of entangled photon interference beating the diffraction limit”, 2009 International Conference on Optical Instrument Technology (OIT 2009), Shanghai Everbright Convention & Exhibition Center, China (2009-10-19)
- ⑤ K. Sasaki : “Temporal and Spatial Interference of Entangled Photon Process”, Japan-Taiwan Joint Symposium on Organized Nanomaterials and Nanostructures Related to Photoscience , Kyoto, Japan (2008-11-05)
- ⑥ K. Sasaki : “Novel properties of a microspherical cavity coupled with a tapered fiber”, CREO

Pacific Rim 2007(The 7th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics), COEX Convention Center, Seoul, Korea (2007-08-28)

- ⑦ H. Fujiwara, T. Chiba, S. Tamura, S. Takeuchi and K. Sasaki : “Analysis of single-molecule emission dynamics using photon interarrival time recording”, SPIE Optics & Photonics 2007, SanDiego convention center, USA (2007-08-27)
- ⑧ K. Sasaki : “Photon force analysis and spectroscopy”, 3rd Asian and Pacific Rim Symposium on Biophotonics (APBP 2007), Shangri-la Hotel, Australia (2007-07-10)
- ⑨ K. Sasaki : “Photon manipulation with microspherical cavity”, International Symposium on Organized Nanomaterials and Nanostructures Related to Photoscience, Center of Nanoscience and nanotechnology, National Chung Hsing University, Taiwan, Taiwan (2007-03-14)
- ⑩ K. Sasaki : “Nanophotonics and Nanobiology”, Nano Systems Seminar Series: 2006 Fall Quarter, La Kretz Hall 110, UCLA, USA (2006-11-21)

[図書] (計 2 件)

- ① H. Fujiwara and K. Sasaki : “Chap. 7 :Dynamic analysis using photon force measurement” in Molecular Nano Dynamics Vol.1, (Wiley, New York) 117-131 (2009) 査読有
- ② 笹木敬司 : “I-1-5 もつれ光子計測加工” 光科学研究の最前線 2、(2009)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://optsys2.es.hokudai.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

笹木 敬司 (SASAKI KEIJI)  
北海道大学・電子科学研究所・教授  
研究者番号 : 00183822

### (2) 研究分担者

藤原 英樹 (FUJIWARA HIDEKI)  
北海道大学・電子科学研究所・准教授  
研究者番号 : 10374670

松尾 保孝 (MATSUO YASUTAKA)  
北海道大学・電子科学研究所・准教授  
研究者番号 : 90374652  
(H20: 連携研究者)