

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26600058

研究課題名(和文) ナノ粒子プラズモンによる超回折限界精度での熱励起を用いた微細構造の選択的駆動

研究課題名(英文) Thermal Actuation of MEMS Structure by Plasmonic Local Heating

研究代表者

菅 哲朗 (Kan, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30504815

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光の回折限界を超える極微小領域(10nm～1μm)の選択的な機械駆動を実現する技術の構築を目標として、金属ナノ粒子をヒータとして用いた熱駆動型アクチュエータを提案した。楕円体など、等方的でない形状のナノ粒子は、照射光の偏光方向に対して光吸収が100倍以上異なる。これを生かし、複数のナノ粒子を異なる向きで配置し、特定の偏光を持つ光を照射することで、特定のナノ粒子だけを選択加熱することができ、局所加熱によるマイクロ構造の選択駆動が可能である。本提案では、ナノ粒子の構造と入射光の波長、偏光による発熱量の変化について理論解析し、局所加熱により3軸駆動を実現するMEMS構造の設計と試作に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：We proposed thermal actuation method of MEMS structures by local heating using a metal nano particle in order to develop a mechanical actuation well below the diffraction limit of light. Since an an-isotropic nano particle exhibits a polarization dependent light scattering characteristics, directional orientation nano particles can be arranged such that only one particular nano particle responds to one particular polarization state of the radiating light. Such arrangement can offer a polarization dependent local heating by a choice of a polarization state of the irradiation light, which can produce a selective micro structure actuation. In this study, we analyzed a scattering and heating characteristics of nano particle, and investigated a beam design of tri-axial actuation of MEMS structures.

研究分野：MEMS

キーワード：表面プラズモン MEMS 局所加熱 偏光

1. 研究開始当初の背景

小胞輸送 (vesicle traffic) が 2013 年のノーベル医学生理学賞を受賞したことに象徴されるように、ナノ領域 (10 nm~1 μm) の物質輸送は、細胞の恒常性維持・成長・情報伝達などにおいて重要な役割を担っている。一方、ナノ領域において人工的に物質輸送をする方法はまだない。細胞 (10~100 μm) サイズのマイクロ領域での物質輸送には光ピンセットが広く用いられているが、回折限界により光のスポットが約 1 μm 以上に制限されるため、利用可能なサイズに原理的な限界があり、ナノ領域での利用は不可能である。本提案は、金属ナノ粒子のプラズモン共鳴による発熱性の制御性の高さに着目したものである。提案構造は無機材料で構成され、制御性と安定性を兼ね備えている。また、その原理から光回折限界以下のサイズでの選択的機械駆動が可能であり、光のスポットより小さな輸送機構が実現可能である。

2. 研究の目的

光の回折限界を超える極微小領域 (10 nm ~ 1 μm) の選択的な機械駆動を実現する技術の構築を目標として、金属ナノ粒子をヒータとして用いた熱駆動型アクチュエータを提案する。楕円体など、等方的でない形状のナノ粒子は、照射光の偏光方向に対して光吸収が 100 倍以上異なる。これを生かし、複数のナノ粒子を異なる向きで配置し、特定の偏光を持つ光を照射することで、特定のナノ粒子だけを選択加熱することができる。この方法では、光吸収による加熱領域が光スポットには依存しないため、光回折限界以下の局所加熱が可能となる。この局所加熱方式を MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によるバイメタル型カンチレバーなどに適用することで、照射光の波長・偏光方向によるカンチレバーの選択アクチュエーションを実現する技術の基盤構築に取り組んだ。

3. 研究の方法

ナノ粒子の基本特性の検証を行い、局所加

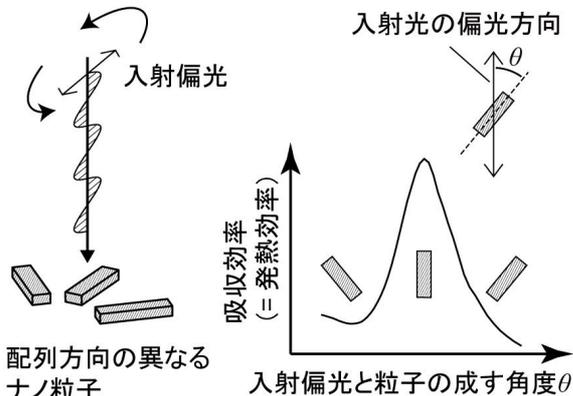


図1 ナノ粒子による吸収特性

熱による駆動に適した構造の検討を進める。最終的に、実際にプラズモン構造を有したカンチレバー構造を試作し、実験的に局所加熱駆動の可能性について検討を進める。

4. 研究成果

ナノ粒子の光学特性検証

形状に異方性を持つ金属ナノ粒子として、試作しやすい直方体の金粒子構造について検証を進めた。分極率を解析的に求められるナノ粒子の形状は、球を含む回転楕円体に限定されているので、離散双極子近似を用いたシミュレーションソフト DDSCAT によって、散乱吸収を数値計算した。ただし、計算を簡略にするため、形状モデルは直方体と寸法が近い楕円柱形状とした。厚さ 45 nm、短軸長さ 200 nm、長軸長さ 1300 nm の楕円柱形状に対して、図 2 に示す二つの直交する偏光方向の光を入射したときの計算吸収散乱断面積スペクトルを図 2 に示す。入射光波長 1165 nm 付近で偏光面角度が 0° (偏光方向と粒子の角度が平行) 方向での吸収断面積のピークを持つこ

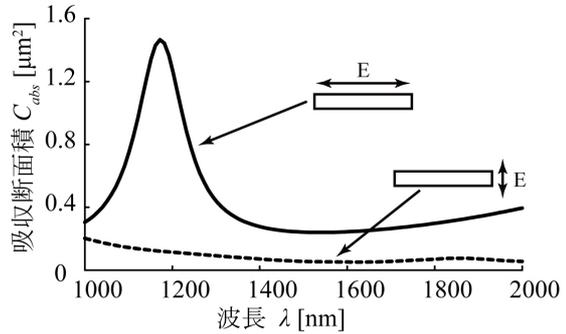


図2 計算吸収散乱断面積スペクトル

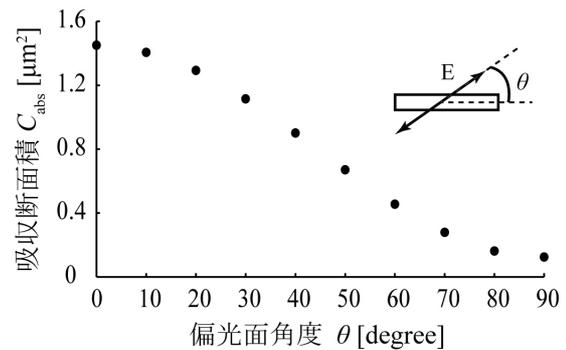


図3 偏光面角度と吸収断面積

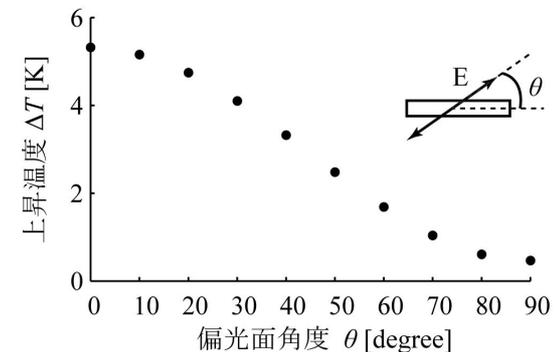


図4 偏光面角度と温度上昇の関係

とが分かった。また、偏光面角度が 90° (偏光方向と粒子の角度が直交) 方向の場合、 0° 方向の 12 分の 1 程度の低い吸収断面積を示すことが分かった。次に、次に DDSCAT を用いて図 3 に示すように、短軸長さ 200 nm、長軸長さ 1300 nm、厚さ 45 nm の直方体形状において、偏光面角度 θ に対する吸収断面積 C_{abs} の変化を計算した。入射光波長は 1165 nm としている。 θ が 0 度から増加するに従い、 C_{abs} がなだらかに減少することが分かった。さらに、この吸収断面積 C_{abs} の値を用いて、有限要素法解析によるシリコン基板上的の粒子の温度上昇 ΔT K を計算し、温度上昇 ΔT の偏光面角度 θ に対する変化を検証した (図 4)。有限要素法解析のシミュレーションソフトウェアとして COMSOL を用いた。入射パワー密度は $6.37 \times 10^3 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ とした。これは、出力 400 mW のパルスレーザが、スポット直径 5 mm に集光されてナノ粒子を照射することを想定して算出した値である。また、粒子は光を吸収し熱に変換するため、粒子を熱源とした。ここで、光熱変換効率に関しては 40% と仮定した。この条件で、定常状態での粒子の温度を算出した。ナノ粒子の下には、短軸長さ方向 $1.5 \mu\text{m} \times$ 長軸長さ方向 $5 \mu\text{m} \times$ 厚さ $500 \mu\text{m}$ のシリコン基板が存在している。周囲の温度及び基板、粒子の初期温度は 293.15 K とした。Fig. 4 の温度上昇 ΔT の θ 特性は図 3 の吸収断面積 C_{abs} の θ 特性と似た特性となった。なお、光熱変換効率は理論的算出が困難であるため、仮定として 40% とおいたが、上記の条件において、光熱変換効率が変わっても ΔT の値は変わるものの θ 特性

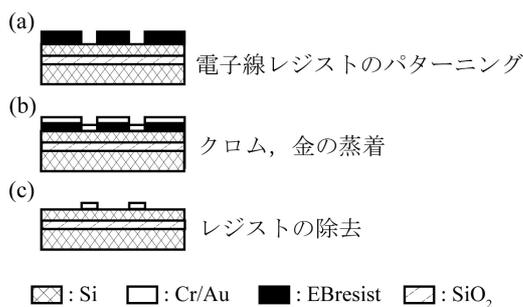


図 5 試作プロセス

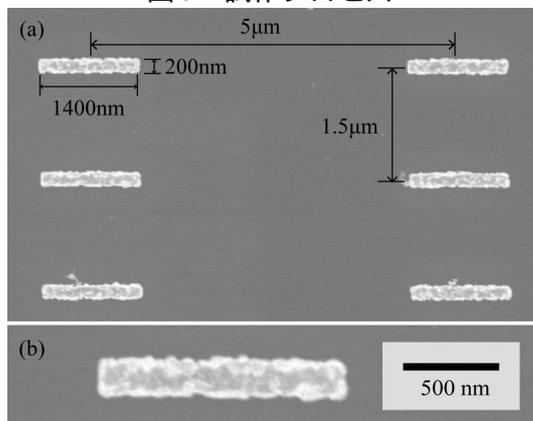


図 6 Si 上に試作したナノロッド

としての形状はほとんど変わらなかった。この結果から、例えば、2 つの金ナノロッドの長軸方向を 90 度異なるように配置すると、温度上昇 ΔT が 11 倍異なった選択的加熱を行うことができる。ただし実際には、利用する場面において、基板の熱容量が異なるので、ケースごとに計算を行う必要がある。

また、理論解析の結果に基づいて、金属ナノ粒子の製作にも取り組んだ。トップシリコン層とガラス層の厚みがそれぞれ $1 \mu\text{m}$ 、基板全体の厚みが $550 \mu\text{m}$ の 1 インチ角 SOI 基板上に粒子間ピッチを長軸方向を $5 \mu\text{m}$ 、短軸方向を $1.5 \mu\text{m}$ とし、直方体の粒子を同一方向に一定間隔で並べた構造を製作した。図 5 に金粒子の製作プロセスを示す。製作には微細加工に優位なリフトオフと呼ばれる手法を用いた。まず、1 インチ角の SOI 基板上に電子線レジストをスピンコートし電子線描画装置を用いて金粒子の形状をパターニングし現像する。次に、残ったレジストを O_2 プラズマエッチングで 1 秒間アッシングした後、上から電子ビーム蒸着装置によって密着層としてクロム(Cr)を約 3.5 nm 成膜し、その上に金(Au)を約 45 nm 成膜した。最後に、剥離剤でレジストを常温 18 時間浸潤、IPA で洗浄後、流水にてレジストを除去することで金粒子を製作した。図 6 は長軸の寸法が 1400 nm の製作粒子を Scanning Electron Microscope

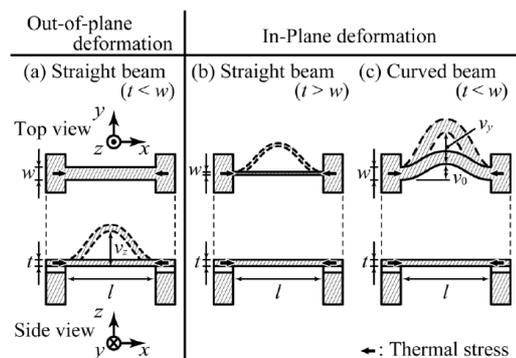


図 7 加熱による座屈を利用した駆動

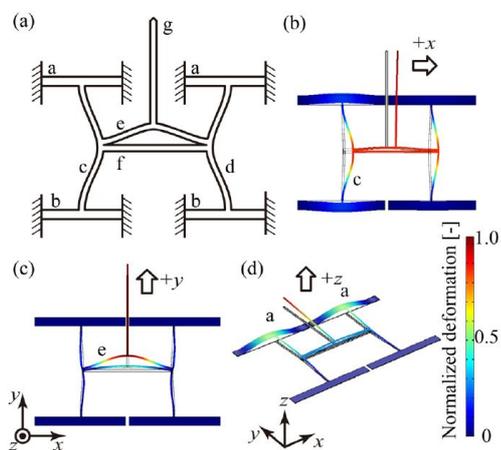


図 8 有限要素計算による駆動状況

(SEM)で撮影した写真である。このように、理論解析を行ったパラメータと同等の構造を試作可能な技術を確立できた。

局所加熱による駆動に適した機械構造

次に、局所加熱を用いた駆動に適した機械構造の解析について取り組んだ。目標としては、シリコン単一層で構成される薄膜構造の変形が、MEMS基板の面内もしくは面外方向に選択的に駆動可能とする設計論の構築である。そこで、本課題では研究分担者の岩瀬が専門的知見を有する、座屈を利用したマイクロ構造駆動方法について研究した。

図7に示すように、単一層、同一基板内で基板の面外方向、面内方向に変形させるために、熱応力による梁の座屈や変形を用いるのが本方法のポイントである。長さ l と幅 w が一定の真直梁において、座屈変形は、幅と厚さの小さい方に生じる。そのため、 l と w の大小関係が逆となる2つの梁を製作すれば、 $l < w$ の真直梁は長さ方向すなわち基板の面外方向に座屈変形し(図7(a))、 $l > w$ の真直梁は幅方向すなわち基板の面内方向に座屈変形する(図7(b))。

具体的な梁の形状として、図7に示すように、梁の長さ方向を x 軸、幅方向を y 軸、基板に垂直方向の厚さ方向を z 軸とする。また、熱膨張による伸びが拘束されたと仮定した場合に内部に生じる熱応力を σ 、熱膨張係数を α 、ヤング率を E 、温度変化を ΔT としたとき、 $\sigma = \alpha E \Delta T$ となる。最初に、長さ l 、幅 w 、厚さ t の真直梁が熱応力 σ により z 軸方向に v_z だけ変位する場合を考える。長さ l に対して、変位 v_z と厚さ t が微小であることと仮定すると、変位 v_z は

$$v_z \sim 2 \sqrt{\frac{\alpha \Delta T l^2}{\pi^2} - \frac{t^2}{3}}$$

と表せる。熱膨張係数はシリコンの $\alpha = 2.6 \mu\text{m}/\text{K}$ を用い、梁の長さ $l = 1000 \mu\text{m}$ 、 $\Delta T = 100 \text{ K}$ とする。上の関係式より、梁の厚さ t は $8.9 \mu\text{m}$ 以下とする必要があるため、 $t = 5 \mu\text{m}$ と置いて計算すると、温度変化 ΔT が 30 K 付近から熱応力が座屈応力を超えることにより変位が得られ、温度変化 ΔT が 100 K のとき $8.5 \mu\text{m}$ の変位が得られることが分かり、マイクロ構造を駆動する上で十分な変形を得ることが可能と分かった。

この設計論を踏まえて、梁を入れ子構造状に配置することにより、多軸マイクロ熱アクチュエータ実現できる。図8はその一例として設計した、入れ子構造型の3軸マイクロ熱アクチュエータである。梁の形状は前述の理論解析で用いた長さ $l = 1000 \mu\text{m}$ 、幅 $w = 20 \mu\text{m}$ 、厚さ $t = 5 \mu\text{m}$ をベースとしている。また、座屈には変形方向に左右の自由度があるの

で、あらかじめ初期変位として $v_0 = 20 \mu\text{m}$ を与え、変形方向を一方向のみとした。アクチュエータは固定端となっており、 z 軸方向に熱変形する。梁 c、d、e はそれぞれ x 軸方向正、 x 軸方向負、 y 軸方向正の向きに $v_0 = 20 \mu\text{m}$ だけ膨らんだ曲がり梁であり、初期変位が付いている向きに熱変形する。梁 f は梁 c、d 間の距離が変わるのを防ぐための梁である。このアクチュエータが実際に3軸に駆動する有限要素法を用いて解析した。図8(b)、(c)、(d) はそれぞれ梁 c のみ、梁 e のみ、梁 a のみを加熱した場合であり、それぞれ x 軸方向正、 y 軸方向正、 z 軸方向正向きに、それぞれ $0.38 \mu\text{m}$ 、 $1.04 \mu\text{m}$ 、 $8.3 \mu\text{m}$ 変位した。入れ子構造にしたために両端固定端条件での変位より小さくなっているが、シリコン単一層で3軸駆動が可能であることを確認できたといえる。

最終的にカンチレバー上へのプラズモン構造の付与による、熱アクチュエータの試作に取り組んだ。プラズモン構造としては、光の結合効率が高い回折格子タイプのものを採用し、カンチレバーの根元構造上に構成した。カンチレバー上に構成された回折格子のレーザ段差計画像を図9に示す。MEMS構造上にプラズモン構造を構成することが可能と分かった。今後は、レーザ光照射による熱駆動の実現に取り組むことを計画している。このためには、Si基板による熱の拡散による逃げを防いだ断熱構造の実現や、照射レーザ光強度の増大、および、プラズモン構造による吸収効率の最大化をはかることが必要であると考えられる。

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0件)

[学会発表](計2件)

- [1] 永澤稔也, 磯崎瑛宏, 岩瀬英治, “シリコン単一層による多軸マイクロ熱アクチュエータ,” 機械学会関東学生会卒業

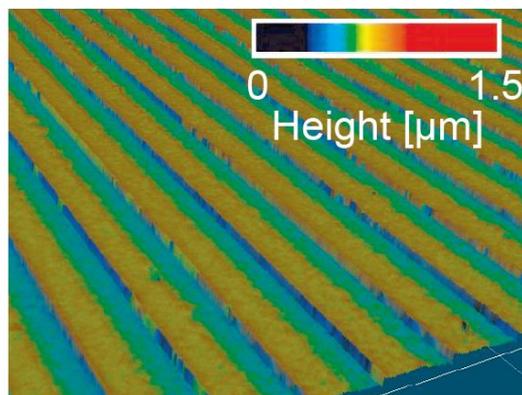


図9 カンチレバー上の回折格子構造

研究発表講演会，411，横浜国立大学 理工学部講義棟 A（神奈川県・横浜市），
20th March 2015.

- [2] 大西航，菅哲朗，岩瀬英治，“局在表面プラズモン共鳴を用いた金属ナノ粒子の選択的加熱，”機械学会関東学生会卒業研究発表講演会，401，横浜国立大学理工学部講義棟 A（神奈川県・横浜市），
20th March 2015.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ms.mi.uec.ac.jp>

6．研究組織

(1)研究代表者

菅 哲朗（KAN, Tetsuo）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30504815

(2)研究分担者

岩瀬 英治（IWASE, Eiji）

早稲田大学・理工学術院・准教授

研究者番号：70436559

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

磯崎瑛宏（ISOZAKI, Akihiro）