

# 研究報告書

## 「スライド型ナノアクチュエータの開発に向けた基盤技術の確立」

研究タイプ： 通常型

研究期間： 平成25年10月～平成29年3月

研究者： 武仲 能子

### 1. 研究のねらい

本研究が目指す最終ゴールは人工筋肉(スライド型ナノアクチュエータ)の作製である。昨今、ロボット技術がますます発達し、工場での生産現場はもちろんのこと、医療・福祉分野におけるパワースーツや癒しロボット、手術支援ロボット、またエンターテインメント分野では2足歩行ロボットなど、日常生活でもロボットが身近に活躍し始めている。これらのロボット技術を担う重要なシステムの一つがアクチュエータである。アクチュエータとは、「動作させるもの」であり、電気的なモーターの他、生物の筋肉もアクチュエータの一つである。今後、ますますロボットは身近な存在になると予想され、それに伴って小型化も重要になると考えられるが、実は従来の電気モーターは小型化に際して大きな問題を抱えている。

1 cm 以下程度の小さなロボットを作製するにあたって、これまでの電気モーターを小型化していくと、発生した熱をうまく拡散できない、複雑な電気回路の微細加工が必要になる、などの問題があった。また、アクチュエータは、動くためのエネルギーを外部から取り込む必要があるが、従来のアクチュエータのように外部エネルギーとして電気的なエネルギーを用いると、そのための配線が必要になる(孤立駆動できない)、あるいは電池を積む必要がある(重量が増える)、などの問題もある。さらにモーター音なく静かに動かすことも困難であった。

そのような中で注目されているのが、刺激応答性材料を用いたソフトアクチュエータである。これは、光、熱、電場、磁場、化学物質などの外的刺激に応答する、高分子、ゲル、液晶などのソフトマテリアルを用いて作製したアクチュエータである。ソフトアクチュエータは、複雑な配線設計が必要でないため小型化が比較的容易であり、また非接触に外部エネルギーを供給できる、無音で駆動する、などの利点もある。さらに柔らかい素材を用いることから、生体内での使用にも適し、日常生活での使用においても馴染みやすいという期待がある。そこで本研究では、分子物性に着目し、刺激応答性材料を適切に用いることで、従来のアクチュエータでは困難であった、nm～ $\mu$ mスケールのミクロな動きを実現する筋肉様のアクチュエータを開発すべく、その基盤技術の開発を行う。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本研究では、最終ゴールであるスライド型ナノアクチュエータの形態として生物の筋肉をモデルとした。我々の筋肉は、サルコメアと呼ばれる微小な筋肉素子が多量に集まって形成され、それらが協同して動くことで、力や変位を取り出している。そこで、スライド型ナノアクチュエータを作るにあたっては筋肉の構造を模し、まず微小な素子を開発し、その後その素子を結合させていくことを考えた。

モデルとなるサルコメアのサイズは数マイクロメートル、特徴としては、①一次元運動をする、②アクチンとミオシンという 2 つのタンパク質間のスライド運動によって動きを取り出す、③化学エネルギーから運動エネルギーへの直接変換を行う、等が挙げられる。サルコメアのサイズであるマイクロメートル程度の空間は、極微小領域で決定的となる熱運動の影響が決定的ではなく、また一方、ミリメートル領域で決定的となる重力の影響も決定的ではない、中間的な空間サイズである。この中間領域では、分子特性をうまく利用することで、ナノメートルスケールの分子の動きを協調させ、ミリメートル以上のマクロな運動を取り出すことが可能であり、多くの研究がなされている。そこで、スライド型ナノアクチュエータの素子もマイクロメートルサイズで作製することとした。

実際に研究を行うにあたっては、研究内容を以下のように、スライド型ナノアクチュエータ開発のために必要な数々の基盤技術に細分化した。

- A. アクチュエータ素子を形作る部品の開発
- B. アクチュエータ素子の作製
  - 1. 一次元で動く機構の開発
  - 2. スライドして動く機構の開発
  - 3. アクチュエータ素子へのくみ上げ
  - 4. ケミカルエネルギーから運動エネルギーへの直接変換を可能にする機構の開発
- C. アクチュエータ素子からスライド型ナノアクチュエータへの組み上げ
  - 1. アクチュエータ素子の複合化
  - 2. 多くの素子が協同して動く機構の開発

これらの研究項目のうち、A(アクチュエータ素子を形作る部品の開発)とB-1(一次元で動く機構の開発)、B-2(スライドして動く機構の開発)について集中的に研究を行い、C-1(アクチュエータ素子の複合化)についても有益な示唆を与えた。研究成果の詳細を以下に示す。

## (2) 詳細

### 研究テーマA「アクチュエータ素子を形作る部品の開発」

#### (主な研究成果リスト 1-(2)、3-(3)、3-(5))

スライド型ナノアクチュエータでは、筋肉素子サルコメアのように一次元状に素子が運動することを目指すため、動きの一助になると考えらえる棒状の構造を持った運動物体の作製を目指した。そこで、多くの先行研究がなされている金ナノロッドに着目した。一次元状物質では、金ナノロッドの他にもカーボンナノチューブや各種金属ナノワイヤー等が報告されているが、金ナノロッドは表面修飾が容易であることから様々な条件での実験が可能であり、化学的にも安定であることから、アクチュエータ素子の候補とした。さらに、一次元状に金ナノロッドを運動させるためには、金ナノロッド自体にも図 1(a)で示すような異方性があると良いと考えた。図 1(a)は双晶構造をもつ金ナノロッドで、端面と側面とが異なる結晶面を持っている。このような金ナノロッドの場合、周囲環境や基板と端面とをより相互作用しやすくすること

で、異方的な運動が取り出しやすいと期待された。

我々はこれまでに、高アスペクト比金ナノロッドの高収率合成を可能にするゲル中成長法を開発してきたが、作製された金ナノロッドの構造は、双晶構造に規定されているわけではなかった。そこで、本研究では双晶構造をもつ高アスペクト比金ナノロッドを高収率で合成できる方法の開発を目指した。双晶金ナノ

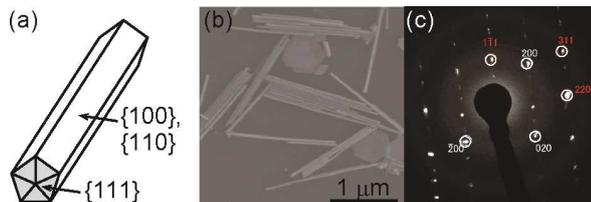


図 1 高アスペクト比双晶金ナノロッド。(a)双晶構造を持つ金ナノロッドの概略図。(b)電子顕微鏡像。(c)回折像。

ロッドは、クエン酸で被覆された金の結晶核を段階的に成長させると得られると報告されている。しかし、この方法で高収率に作製される金ナノロッドは、最長でも平均長 500 nm に満たない。1 μm 以下の物体は観察も操作も困難であり、またモデルとしているサルコメアの特徴的なサイズ(数μm)よりも小さいことから、ゲル中成長法を用いて双晶金ナノロッドを 1 μm 以上に伸ばすことを試みた。その結果、図 1(b)のように 1 μm を大きく超える金ナノロッドを得ることができた。このナノロッドの回折像から、得られた金ナノロッドが双晶構造であることも確認できた(図 1(c))。添加剤として用いる硝酸銀濃度や結晶核数密度を最適化し、最終的に平均長約 1.7 μm の高アスペクト比双晶金ナノロッドを 60%程度の比較的高い収率で合成する方法を開発した。

#### 研究テーマ B-1「一次元で動く機構の開発」

#### 研究テーマ B-2「スライドして動く機構の開発」

#### (主な研究成果リスト 1-(3)、2-(1)、3-(1))

スライドして動く仕組み、一次元運動する仕組みを開発するに当たっては、液晶に着目した。小型アクチュエータの候補としてソフトアクチュエータが注目されていることは上述したが、ソフトマテリアルの中でも特に液晶を用いた研究では、微粒子を駆動させる結果が多く報告されているからである。

我々は、一般によく用いられる液晶 5CB(4-Cyano-4'-pentylbiphenyl)を液晶セルに挿入し、365 nm の LED 光(150 mW/cm<sup>2</sup>)を照射したところ、液晶内に分散させたシリカ微粒子が動くことを見つけた。シリカ微粒子は光照射とともに、光源から遠ざかる方向に運動し、光照射をやめると元の位置に戻った(図2)。従来研究における微粒子駆動のメカニズムとしては、電気浸透流、電気対流、光圧、液晶欠陥相互作用、熱が報告されているため、これらそれぞれの可能性を検討した結果、熱の効果であることが示唆された。そこで、光照射中の液晶セルの表面温度を赤外温度計で測定したところ、5 秒間の光照射によって約 1 度温度が上昇していることが分かった。次に、この温度上昇の原因となっている物質を特定するため、系に存在する材料の分光特性を調べたところ、液晶配向材としてセル表面に塗布されているポリイミドに、365 nm の吸収があることが分かった。これらの結果から、ポリイミドの光熱変換能によって LED 光が熱に変換され、局所的に液晶の熱膨張が誘発され、それに伴って微粒子が押し出されるように動いたと考えられた。同様の運動は、ポリイミドではなく ITO が塗布さ

れたセルを用いて、ITO が吸収する 830 nm のレーザーを用いたときにも観察されたことから、この運動が液晶の熱膨張によるものであることを強く示唆する結果となった。

液晶の熱膨張を用いて微粒子を動かす研究は既になされているが、従来研究ではサーモプレートを用いた大域的な温度勾配を利用していた。そのため、微粒子の運動を局所的に制御することは困難であった。

一方で我々の系では光を用いるため、光照射の向きや強度によって微粒子の動く向きや距離を局所的に制御できる利点がある。さらに、液晶の熱膨張率は水などに比べて 10 倍程度大きく、ネマチック-アイソトロピック転移点直下で発散的に増加することが報告されている。液晶は、混合などによってネマチック-アイソトロピック転移点を制御することが比較的容易にできることから、任意の温度で大きく熱膨張させることが可能である。この点が、アルコールのような他の熱膨張率の高い材料には無い有利な点だと考えられた。以上より、液晶の熱膨張を利用して、微粒子を一次元的にスライドして動かす方法の基礎ができた。

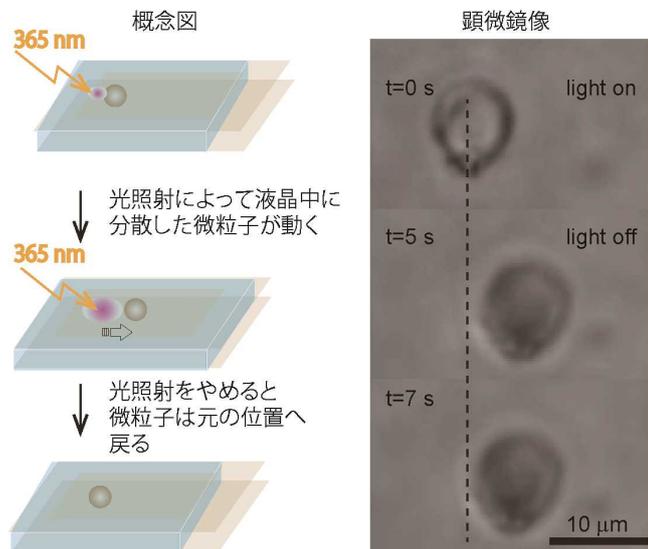


図 2 液晶中での微粒子運動。(左)概略図。(右)顕微鏡像。

## 研究テーマ C「アクチュエータ素子の複合化」

### (主な研究成果リスト 1-(1)、3-(2)、3-(4))

まだアクチュエータ素子はできていないが、将来的にマイクロメートルサイズのアクチュエータ素子ができたときには、多くの素子を配列化し、協調して力と変位を取り出す仕組みを作らなければならない。そのような観点から、微小物体を基板上に自己組織的に配列化させる方法を検討していた。その中で、一般的な微粒子分散液を基板に滴下した時に観察されると考えられる特徴的な脱濡れ現象を見つけたため、これを解析した。

純水を基板上に滴下すると、平衡接触角になるように純水滴は基板を濡らす。しかし微粒子分散液には、微粒子分散のための界面活性剤などが含まれていることが多い。そのため、滴下された分散液滴中の界面活性剤などが基板と相互作用し、接触角の平衡値が時間とともに変化する。その結果、液滴の動的な脱濡れ現象が観察される。この現象は reactive dewetting として知られているが、これまで分散液中に含まれる界面活性剤濃度を陽に式に含んだ形で、定量的に現象を解析した報告はなかった。そこで、本研究では界面活性剤濃度を陽に含んだ理論式を作り、実験も行う事で、半定量的に現象を解析することに成功した。

### 3. 今後の展開

液晶の熱膨張によって微粒子を運動させる程度の仕事ができる系は見つけたが、今後はこの系をうまく用いることで、より大きな力や変位を取り出せるようにする必要がある。どの程度の変位と力を取り出すかは、目指す応用分野によって異なるものの、例えばマイクロ流路中でのポンプとして用いるとしても、変位として数十マイクロメートル以上は必要になると予想され、現在の変位より1ケタ大きい変位が必要である。これを可能にする方法として、

#### 1. 力を取り出すシステムの構築

#### 2. 液晶材料の検討

の2つが考えられる。

1. は一次元運動をうまく取り出せるようにチューブ状のセルに液晶を閉じ込める、などといったシステムの工夫であり、2. はより熱膨張率の大きな液晶を用いる、といった材料の工夫である。また本研究では微粒子として高アスペクト比金ナノロッドの開発も行ったが、この微粒子を液晶中で運動させることで、将来的にはマイクロメートルスケールでの物質運搬が可能になると期待できる。

### 4. 評価

#### (1) 自己評価

(研究者)

スライド型ナノアクチュエータを作製するにあたっては、いくつかの基盤技術の開発が必要であるが、そのうち本研究では最も重要な基盤技術の一つである、一次元状にスライドして動く機構を液晶を用いて開発した。さらに、運動する物体候補として将来的に必要なと考えられる、高アスペクト比双晶金ナノロッドの高収率合成法の開発にも成功した。スライド型ナノアクチュエータの実現には、まだ多くの技術開発が残っているものの、本研究成果がその実現に向けて果たした役割は大きいと考えられる。研究実施体制、研究費執行状況はいずれも適切であり、さきがけ予算が有効に使われたと考えられる。本研究成果は、すでに論文発表や特許出願によって一部社会還元されているものもあり、今後得られる結果も、スライド型ナノアクチュエータの開発や液晶を使った材料開発に関して、産業界にとっても基礎科学にとっても有益なものになると期待できる。以上より、本さきがけ研究により、スライド型ナノアクチュエータ開発に関する研究が加速しただけでなく、液晶関連分野の研究も加速したと考えられる。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

武仲研究者は、スライド型ナノアクチュエータを作るという難しい課題に挑戦し、微粒子を液晶中でスライドさせて動かす、という仕組みの開発に成功した。当該研究は、従来ないものを新しく作るというチャレンジングな課題であったが、その状況の中でスライド型ナノアクチュエータ

実現のための重要な2つの基盤技術、つまり①アクチュエータ素子を形作る部品、および②1次元でスライドして動く機構を開発したことは評価に値する。領域会議でのディスカッションを通し、原理的な内容から実装の可能性も考慮した内容へと研究方針が広がっていったことがうかがえ、将来的にさきがけ事業の目的である革新的技術シーズとなり、長期的な視野で産業界にも有益な成果になったと考えられる。また、本さきがけ研究の成果が認められ、2つの学会賞を受賞するなど、関連分野のトップランナーの一人として注目されるようになり、研究者としての飛躍にもつながった。研究費は適切に執行されており、研究実施体制も適切であった。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 論文(原著論文)発表

- |   |
|---|
| 1. Y. Takenaka, Y. Sumino, T. Ohzono, Dewetting of a droplet induced by the adsorption of surfactants on a glass substrate, <i>Soft Matter</i> , 2014, 10, 5597–5602. |
| 2. Y. Takenaka, One-pot synthesis of long twin gold nanorods in a gelled surfactant solution, <i>RSC Advances</i> , 2015, 5, 34690–34695.                             |
| 3. Y. Takenaka, T. Yamamoto, Light-induced displacement of a microbead through the thermal expansion of liquid crystals, <i>Soft Matter</i> , in press.               |
|   |
|   |

### (2) 特許出願

研究期間累積件数:1件

### (3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

1. 武仲能子, スライド型ナノアクチュエータ開発への取り組み, *PEN*, 2014, 5, 103–105.
2. 武仲能子, 日本油化学会 オレオマテリアル賞(2016).
3. 武仲能子, コロイドおよび界面化学討論会 科学奨励賞(2016).
4. 武仲能子, 物体表面における脱濡れ現象のダイナミクス, *Oleosience* 2017, 17, 15–20.
5. 武仲能子, 高アスペクト比金ナノロッドの高収率合成法の開発と応用可能性の拡大, *C&I Commun*, 2016, 41, 41–42.