

令和2年4月3日

報道機関 各位

東北大学学際科学フロンティア研究所
東北大学大学院工学研究科

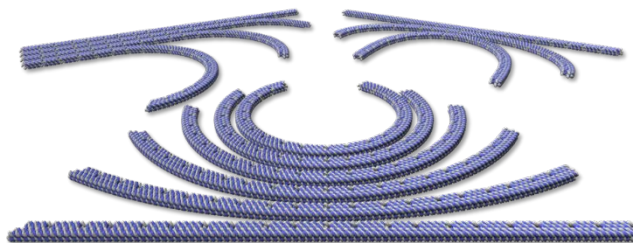
DNA オリガミで「しなやかに」曲がるナノアームを実現
～化学環境に応じて変形する分子スケールのアクチュエータ～

【発表のポイント】

- DNA分子を材料としたナノアームを開発
- 多数のモジュールの変形を累積することで、ナノアームをしなやかに曲げることに成功
- イオンに応答した可逆的な変形を実現
- 細胞表面などやわらかで不定形な場において機能するロボットの開発に貢献

【概要】

東北大学学際科学フロンティア研究所の鈴木勇輝助教は、本学工学研究科川又生吹助教、大学院生の水野康平氏、村田智教授らとともに、DNAオリガミ法と呼ばれるナノ構造体作製技術を駆使して、イオンに



「しなやかに」変形するナノアームを開発しました。今回開発したナノアームは、多数の極微の変形モジュールから構成されており、それらの変形が累積されることでしなやかな動きを実現しています。本研究成果は、開閉運動、スライド運動、回転運動といった単純な動きが主だったDNAナノマシンの世界に、新たな設計アプローチを提案するものであり、細胞表面などやわらかで不定形な場で機能するナノ～マイクロスケールのロボット開発に資するものと期待されます。

研究成果は4月1日にドイツ化学会誌「*Angewandte Chemie International Edition*」にオンライン掲載されました。

本研究は、日本学術振興会、文部科学省学術研究助成基金助成金／科学研究費補助金の支援を受けて行われました。

【詳細な説明】

【研究の背景】

ロボットの微小化は今やナノメートルスケール（1 ナノメートルは10億分の1メートル）まで進んでいます。特に、生体高分子で作られたナノロボットは生命・医療分野からの需要が高く、分子・細胞レベルでの新たな診断法・治療法や送薬技術を提供するものとして期待が高まっています。

このような期待のなかで、ロボットの構成要素となるナノマシンをDNAで作製する技術が注目を集めています。DNAと言えば遺伝情報を担う物質というイメージが強いかもしれませんが、しかし、化学合成の発展によって任意の配列のDNA分子を迅速かつ安価に得られるようになった現在では、ナノ材料としても盛んに利用されています。DNAオリガミ^{*1}と呼ばれるナノテクノロジーでは、長鎖一本鎖DNAを人工的に配列設計した多数のDNA鎖で折りたたむことで、望みの形状のナノ構造体を創り出します。この手法を応用することで、これまでに、開閉運動、回転運動、スライド運動などの動きを示すさまざまなDNAナノマシンが作られてきました。しかし、細胞のようなやわらかで不定形な対象に働きかけるためには、このような機械的な動きだけでなく、しなやかな動きを示すナノマシンの実現が望まれます。

【成果】

今回、鈴木助教らは、一つのDNAオリガミ構造のなかに極微の変形モジュールを連続的に配置することで、しなやかに変形するナノアームを実現しました。各変形モジュールは、弓に弦を張るように、適切な長さの一本鎖DNAを張ることで変形します。各モジュールの変化は極めて微小ですが、その効果が累積されることで、線状のナノアームが円弧状へと大きく変形します。

研究グループは、まず、各モジュールに張るDNA鎖（ブリッジ鎖）の長さに応じてナノアームの曲がり具合が変化することを示しました。加えて、ナノアームの特定の部位を望みの曲率で曲げることに成功しました。さらに、グアニン四重鎖^{*2}と呼ばれる特殊な構造を形成する塩基配列をブリッジ鎖に採用することで、カリウムイオン濃度に応じて屈曲・伸展するナノアームを実現しました。

【今後の展開】

DNAの塩基配列のなかには、pH変化や他の小分子との結合によって、構造変化を示すものも知られています。それらをブリッジ鎖として利用すれば、カリウムイオン以外にもさまざまな刺激に応答した変形が実現できると考えられます。変形モジュールに、分岐や捩じれを設計していくことで、より三次元的で複雑な動作を生み出すことも可能です。今回の研究は、生体高分子を素材としたナノマシン構築における新たな設計アプローチを拓いたものであり、ナノス

ケールでのロボット開発の発展を加速するものとして期待されます。

本研究は、日本学術振興会、文部科学省学術研究助成基金助成金／科学研究費補助金の支援を受けて行われました。

【用語説明】

*1 DNA オリガミ：長い一本鎖 DNA（一般的に 7,000～8,000 塩基程度の環状一本鎖 DNA）と望みの構造にあわせて配列設計された多数の短い一本鎖 DNA（各数 10 塩基程度）から構築される DNA ナノ構造体（または、その作製手法）。2006 年にカリフォルニア工科大学の Paul Rothemund 博士によって報告された。

*2 グアニン四重鎖（G-quadruplex）：グアニンに富んだ一本鎖 DNA が形成する高次構造。グアニン四重鎖は K^+ など一価の陽イオンにより安定化する。グアニン四重鎖を形成する代表的な塩基配列として、ヒト染色体末端のヒトテロメア配列 $(TTAGGG)_n$ がある。

【図】

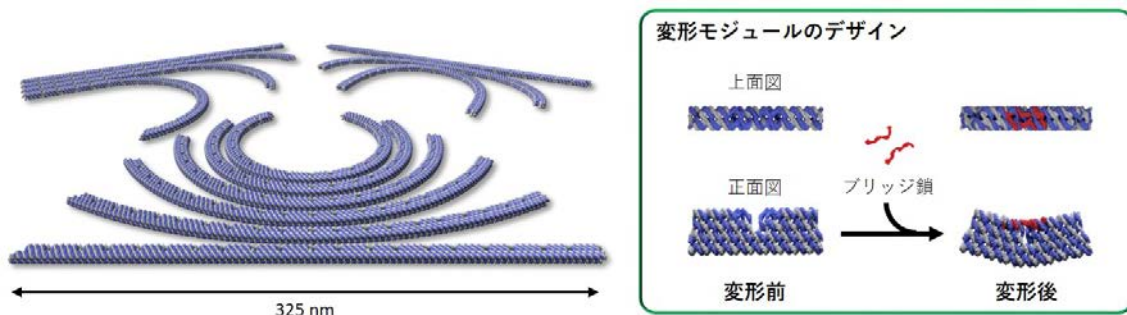


図1 DNA ナノアームのモデル図。作製した DNA ナノアームは変形モジュール（点線）の繰り返しから成っている。各モジュールの変形が累積されることで、ナノアームの形状が大きく変化する。各モジュールの変形の度合いはブリッジ鎖の長さで調節できる。変形させるモジュールの位置や数を選択することで、ナノアームの曲がり方を調節することができる。

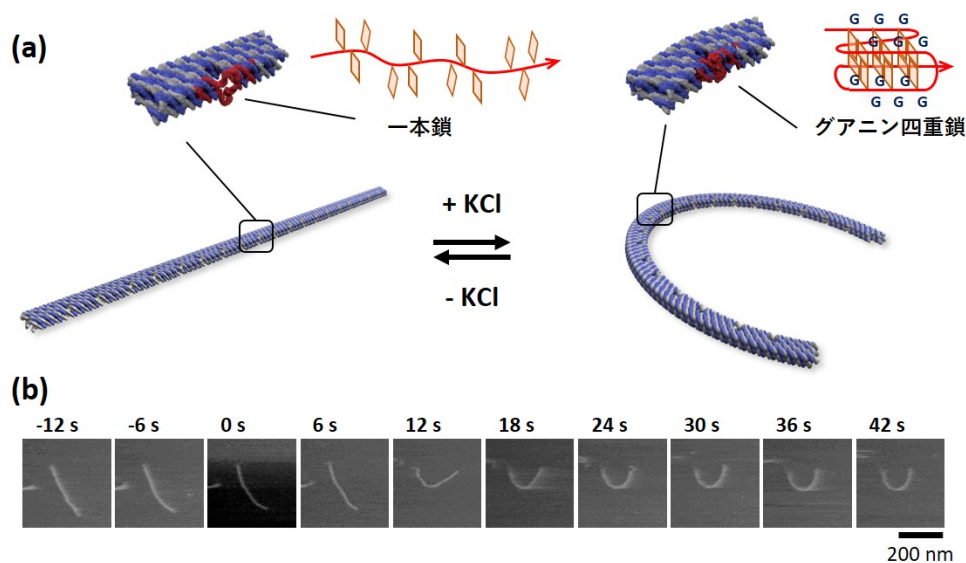


図 2 (a) イオンに応答したナノアームの変形。(b) カリウムイオン存在下でグアニン四重鎖構造を形成する塩基配列を各変形モジュールのブリッジ鎖として採用している。(c) カリウムイオンによるナノアームの変形の様子を捉えたタイムラプス原子間力顕微鏡像 (OLYMPUS 株式会社と共同開発した顕微鏡 (BIXAM) で撮像)。時刻 0 s に塩化カリウム溶液が注入されている。

【論文情報】

題目 : Large deformation of a DNA-origami nanoarm induced by the cumulative actuation of tension-adjustable modules

著者 : Yuki Suzuki^{1,2}, Ibuki Kawamata², Kohei Mizuno², Satoshi Murata²

所属 : ¹ 東北大学学際科学フロンティア研究所, ² 東北大学大学院工学研究科

掲載誌 : Angewandte Chemie International Edition

DOI 番号 : 10.1002/anie.201916233

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学学際科学フロンティア研究所

助教 鈴木 勇輝

電話番号: 022-795-6966

E-mail: ysuzuki79r@molbot.mech.tohoku.ac.jp

(報道に関すること)

東北大学学際科学フロンティア研究所

特任准教授 (URA) 鈴木 一行

電話番号: 022-795-4353

E-mail: suzukik@fris.tohoku.ac.jp