

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 18 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310097

研究課題名(和文) DNAナノテクノロジーを基盤とした動的な1分子観察系の構築と応用

研究課題名(英文) Construction and application of single molecule observation system based on DNA nanotechnology

研究代表者

遠藤 政幸 (Endo, Masayuki)

京都大学・物質-細胞統合システム拠点・准教授

研究者番号：70335389

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高速原子間力顕微鏡(AFM)を用いてDNAナノ構造上で1生体分子の動きを可視化することで、詳細に動的な状態での生体分子反応を解明し、DNAナノ構造体を用いて、生体分子の相互作用の制御や1分子レベルでの化学反応の操作を検討した。分子が反応や運動するナノスケールの空間を自在に作り出し、その空間内でB-Z転移のようなDNAの構造変化や転写やDNA組換え反応中の酵素の挙動を直接観察する手法を開発した。また、光に応答する2次元及び3次元DNA構造体の作成し、高速AFMによってその挙動を観察できる系を構築した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we intend to elucidate dynamic biological reactions in detail using DNA nanostructures, and visualize the behavior of single biomolecule on a DNA nanostructure using high-speed atomic force microscopy (AFM). We also operate of the interaction of biomolecules and chemical reactions at the single-molecule level. We created the DNA naospace for reaction and movement of target molecules, and developed a method to directly observe the behavior of DNA structural change such as the B-Z transition and the enzyme reaction such as transcription and DNA recombination. Furthermore, we successfully created two-dimensional and three-dimensional DNA nanostructures that have photoresponsive functions, and created a system to visualize their behaviors using high-speed AFM.

研究分野：DNAナノテクノロジー

キーワード：DNAナノテクノロジー DNAオリガミ 1分子観察 高速原子間力顕微鏡 ナノ構造体 ナノ空間 DNA構造変化 酵素反応

1. 研究開始当初の背景

分子の反応や運動を直接観測する手法の開発は、ナノサイエンス、ナノテクノロジーの中心課題の一つであり、分子の持つ反応性や相互作用などの情報が不可欠な現代科学において、学術的に重要な研究課題である。申請者は、現在まで、DNA によって任意のナノスケールの構造や空間を設計することで、分子の配列や1分子レベルの観察を行う手法を世界に先駆けて開発してきた。DNA オリガミ法を基盤技術として 100 nm 程度のさまざまな構造の DNA ナノ構造体を設計し、新規な 2 次元及び 3 次元 DNA ナノ構造の構築、並びに DNA ナノ構造体を 1 次元及び 2 次元にプログラム通りに配列できる系の構築を行った。また、DNA ナノ空間内での酵素の反応制御と高速原子間力顕微鏡 (AFM) による分子運動の可視化、及び分子を輸送するシステムの開発も成功している。しかしながら、新規な構造体の設計とその利用、形成されるナノ空間での分子の挙動や反応の制御とその可視化など発展途上にある。

2. 研究の目的

本研究では、生体分子の相互作用の制御や 1 分子レベルでの化学反応の操作を行い、高速原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて DNA ナノ構造上で 1 生体分子の動きを可視化することで、生体反応を動的な状態で詳細に解明する。また、分子が反応や運動するナノスケールの空間を自在に作り出し、その空間内で 1 分子の挙動を操作し、直接観察する手法を開発する。また、高速 AFM による 1 分子観察についても、目的に合わせて対象物に最適な観察手法を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、DNA オリガミ法で目的とする DNA ナノ構造体やナノ空間を設計・構築し、その空間で生体分子の相互作用の制御や 1 分子レベルでの化学反応の操作を行う。高速 AFM を用いて DNA ナノ構造上で 1 生体分子の動きを可視化することで、生体反応を動的な状態で詳細に観察し解析する。

4. 研究成果

**RNAポリメラーゼによる転写反応の1分子観察**

RNA ポリメラーゼによる転写反応の全過程を高速 AFM による 1 分子観察で検討した。T7 RNA ポリメラーゼが転写する鋳型 DNA (約 1000 塩基対) をテープ状の 2 次元 DNA ナノ構造体 (400 nm) に固定し、RNA ポリメラーゼを加え、転写に関する一連の様子を実時間観測した。RNA ポリメラーゼをナノ構造体に加え、高速 AFM で観察すると、鋳型 DNA 上を RNA ポリメラーゼがスライディングする様子が観測された。また、DNA 構造上で RNA が合成されることが明らかとなり、ヌクレオシド 3 リン酸存在下で、RNA ポリメラーゼが転写を行う一連の様子を高速 AFM によって解析できた。以上のように、設計した DNA ナノ構造体を用いて、DNA 組み換え反応と転写を動的に 1 分子で観

察する系の構築に成功した。

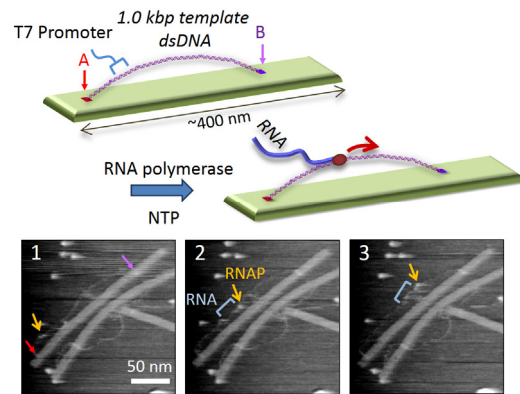


図1. 転写の1分子観察のためのDNAナノ構造体。テープ状の構造体上に転写の鋳型となる約 1000 塩基対の 2 本鎖 DNA を 2 か所で結合する。AFM イメージでは RNA ポリメラーゼが鋳型 DNA 上を RNA を合成しながら動く様子を捉えている。走査速度：0.2 フレーム/秒。

**DNAナノ空間でのDNA組換え反応の1分子観察**

DNA 組み換え酵素 Cre を用い、その組み換え反応を 1 分子観察で検討し、反応機構の解明と反応の制御を検討した。IoxP 配列の方向や距離、張力、角度を制御して DNA フレーム構造に導入し、高速 AFM によって組み換え反応を 1 分子レベルでの動的な観察を検討した。

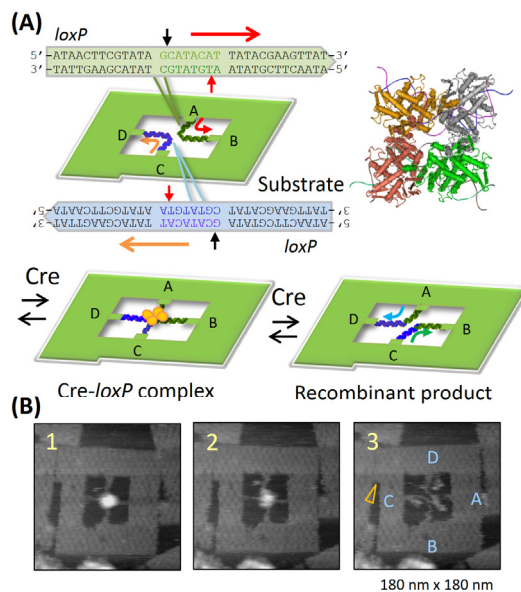


図2. DNA 組み換え反応の 1 分子観察のための DNA フレーム構造体。(A) 方向が逆平行である 2 本鎖 DNA をフレーム空間に導入し、組み換えの様子と複合体の形成を 1 分子で観察する。Cre は 4 量体を形成し DNA と複合体を形成する。(B) Cre 複合体が DNA 鎖から解離し、組み換え産物を生成する様子を捉えた高速 AFM による連続イメージ。走査速度：1 フレーム/秒。

1 対の IoxP 配列を DNA フレーム内に逆平行で固定して Cre との反応を検討すると、組み換え反応の進行が確認できた。次に、Cre4 量体と基質 DNA との複合体を高速 AFM によって観察すると、組み換え産物の生成とと 4 つの Cre モノマーに分解する場面を捉えることに成功した。さらに、組み換え反応の方向性について、Holiday Junction 中間体に構造的

なストレスをかけることで検討した。その結果、Holiday Junction が直交するものと  $60^\circ$  で交差するものが、その組み換えの方向性について逆の挙動を示した。このことから、DNA フレーム構造内に方向や角度を制御した 2 本鎖 DNA を導入することで、DNA の高次構造が組み換えの方向性を決定することが明らかになった。

### B-Z構造転移のナノ構造内での1分子観察

DNA構造のバリエーションに左巻きらせん構造であるZ型のDNA構造が存在する。CG繰り返し配列の2本鎖DNAは塩濃度によって右巻きらせんのB型DNAから左巻きのZ型のDNA構造をとる。このB-Z転移を可視化するため、(5-methyl-CG) 6回繰り返し配列を導入し、可視化のマーカとなる3本の2本鎖DNAが並んだ「旗」となる構造を結合し、DNA フレーム構造内に導入した。これらの旗状マーカーを持つ2本鎖は上側がB-Z転移を起こせるCG配列を含むもの、下側が転移しないランダムな配列を持つものである。それらの両側は回転を可能にするため、垂直方向に吊り上げた新たなDNA フレームを用いた。溶液中のMgイオンの濃度を上昇させていくと、それに伴ってB-Z転移できる配列では旗状マーカーが下向きから上向きになる割合が増加した。また、Mgイオンの濃度を調節することで、B-Z転移の平衡状態を作り、旗構造が回転する様子を高速AFMによって観察した。その結果、AFMで走査している間に旗状マーカーが上下に動く様子が観察され、旗構造のフレーム内での位置やその高さを測定することで、B-Z遷移によるらせんの回転に伴って旗構造が回転することが分かった。

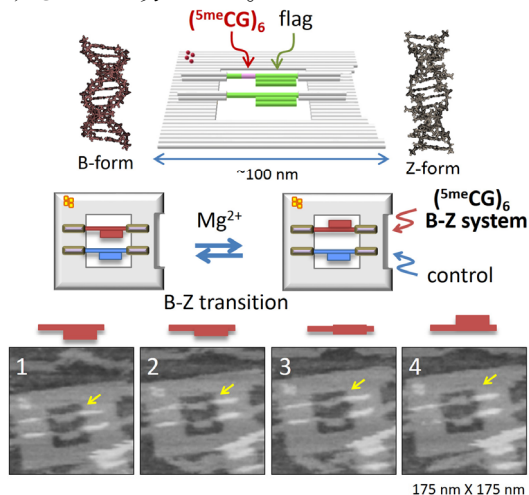


図3. B-Z転移のDNAフレーム内での1分子観察。(A) B-Z転移する配列  $(5^{me}CG)_6$  と旗状構造 (マーカー) を導入したDNA鎖をDNAフレームに導入する。下のDNA鎖は特異的な配列のないコントロール。(B) MgイオンによるB-Z転移状態の平衡状態での観察。B-Z遷移配列を導入した旗構造(矢印)が回転したAFMイメージ。

### 光応答性DNA鎖の形成と解離の1分子観察

2本鎖DNAの形成と解離をDNAフレーム内に固定し、それらの直接観察する系の構築を行った。これらを直接観察するため、アゾベン

ゼン誘導体を導入した光応答性DNA鎖を使用し、これらの光応答性DNAを側鎖として2本鎖DNAに導入し、それらをDNAフレーム構造内に結合した(図4A)。トランス体のアゾベンゼンは2本鎖形成を行うので、DNAフレームに導入した際、形成された光応答性2本鎖DNAが、2本の2本鎖DNAの中央に観察された(図4B)。この状態ではDNAフレーム構造内に導入した2本鎖DNAが中央でコンタクトしているためX字構造として観察される。UV光の照射を行うと、アゾベンゼンはシス体に変換され、光応答性DNAの2本鎖は解離し、DNAフレーム内に2本の離れた2本鎖DNAが観察できた。続けて可視光照射を行うとトランス体に変換され、解離した光応答性DNA鎖は2本鎖形成をして、X字構造として観察された。次に、この1分子観察システムで光応答性2本鎖DNAの形成と解離の動的な挙動を観察した。高速AFMを走査しながら光照射を行い、その動きを観察するとUV光と可視光に応じて2本鎖DNAの解離と形成が直接観察できることが示された。また、UV光-可視光-UV光と連続的に照射しても2本鎖の解離と形成の可逆的な動作が見られた(図4C)。このことから、DNAフレーム内の2本の2本鎖の全体的な構造の変化を観察することで、光応答部位の解離と結合を可逆的な機械的スイッチングとして可視化することが可能となった。

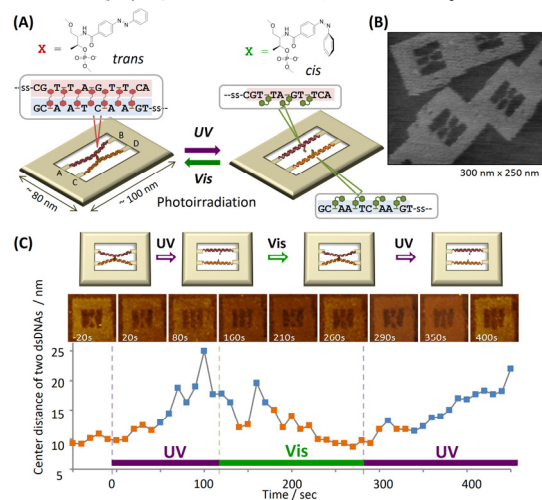


図4. 光応答性DNAによる2本鎖形成と解離の1分子観察。(A) 光応答性DNAを2本鎖DNAにそれぞれ組み込みDNAフレーム構造内に導入する。アゾベンゼンの光異性化に対応し、UV光照射で2本鎖は解離し、可視光照射で2本鎖形成する。(B) 光応答性DNA導入後のAFMイメージ(X字構造)。(C) UV光と可視光による2本鎖形成と解離の連続的な1分子観察。

さらに、光応答性DNAとグアニン4重鎖(GQ)の間の1分子スイッチングの可視化をDNAフレーム内で行った。2本鎖DNAの形成と解離を異なる波長の光照射によって操作し、GQの形成をカリウムイオン(K+)の添加で操作した。DNAフレームには3本の2本鎖DNAを導入し、それぞれに、光応答性DNA、対となる光応答性DNAとGQ鎖、対となるGQ鎖を導入した。UV光の照射を行うと、形成されていた光応答性DNAの2本鎖は解離し、3

本の2本鎖がDNAフレーム内に観察できた。次に高速AFMでそのスイッチングを観察した。K<sup>+</sup>存在下でUV照射すると光応答性2本鎖の解離とGQの形成を観察でき、逆反応もK<sup>+</sup>非存在下で可視光照射するとGQの解離と光応答性2本鎖の形成を観察できた。この結果、2つの異なる反応を可逆的な機械的スイッチングとして可視化することに成功した。

### DNA ナノ構造体のプログラム集合体の構築と光照射による集合と解離の操作

光応答性DNAを六角形のDNAナノ構造体に導入し、これらの構造体を2次元の様々な方向にプログラム通りに配列できる手法を検討した。異なる六角形の構造体の辺に光応答性DNAを配置して混合すると2量体に集合し、UV光照射を行うと解離し、可視光を照射すると再び効率よく2量化した。UV光と可視光を交互に照射することで可逆的に集合体の集合と解離を制御できた。六角形の構造体を直線的またはカーブして3量化でき、さらに多量体に集合させることもできた。より精密に集合体の構造を制御するため、導入する光応答性DNAの数と位置をコントロールすることで、隣り合う構造体の裏表を制御でき、直線状の安定な集合体構造や6個のユニットが集合した環状の集合体構造の構築に成功した。

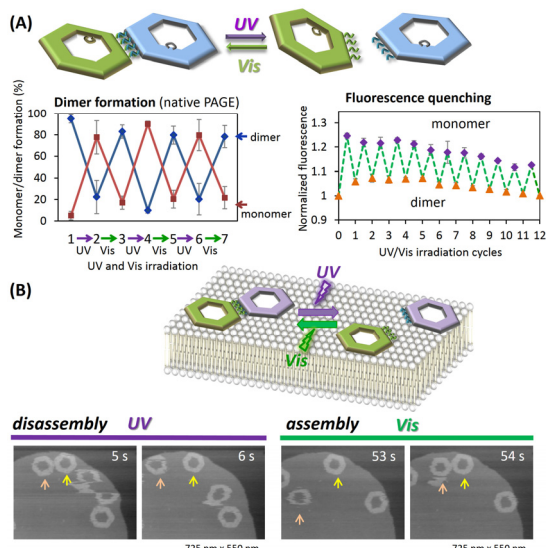


図5. DNAナノ構造体の形成と解離の光操作。(A) 六角形構造体の1辺に光応答性DNAを配置し、光照射により集合体形成を制御する。光照射による単量体・2量体形成の繰り返し動作。電気泳動と蛍光消光。(B) 脂質2重膜上での光応答性DNA構造体の解離と集合の高速AFMによる動的な観察。

次に、光応答性六角形構造体を使用して、UV光・可視光照射による2量体形成と解離の1分子観察を行った。DNAナノ構造体の集合と解離を直接観察するため、六角形構造体にコレステロールを導入し、脂質2重膜上でその動的な挙動を観察した。構造体は作成した脂質膜上に結合し、高速AFMによって観察が可能であった。脂質2重膜上でUV光照射を行うと、形成した2量体が解離し、可視光照射によって単量体が結合する様子を高速AFMによって直接観察することに成功した。

### DNAチューブ構造体の構築とその性質

新規な3次元DNAナノ構造体の構築を行った。2本鎖DNAをテープ状に巻きつけることで、チューブ構造体を作成する新たな方法を開発した。1周当たりの塩基対数(192, 256, 320塩基対)からチューブの直径と長さを自由に設定でき、形成された構造体をAFMで詳細にその構造と形成過程を検討した。構造体は設計どおりのチューブ構造体と少数の長く伸びたチューブ構造体が観察された。詳細な解析から、長いチューブ構造体は隣接する2本鎖DNAを繋ぎ止めるHoliday junction構造の異性化による2本鎖DNAの方向が組み変わった異性体であることが分かった。特に1周192塩基対のチューブでは長いチューブの形成が多く形成され、2本鎖DNAの曲がるストレスによって、異性化が起こり、長いチューブ構造体が形成されることが分かった。

### 八面体DNAナノカプセルの光照射による開閉と金粒子の着脱の操作

2つの四角錐構造からなる1辺50nmの八面体のDNA構造体(ナノカプセル)を構築し、光応答性DNA鎖を導入し、構造体の開閉を光照射により制御した。ナノカプセルはAFMによって構造を確認し、開閉は電気泳動による移動度の違いとAFMによる構造変化によって確認した。UV光または可視光の照射によって開閉が繰り返し制御できることも確認した。次に、ナノカプセル内への10nmの金ナノ粒子の導入と放出の制御を行った。導入には金粒子のDNAによる修飾とカプセル内部への相補鎖を導入することで、開いた状態のカプセル内に金粒子を固定した。光照射によってナノカプセルを閉じ、電子顕微鏡によって金粒子を内包した構造を解析した。閉じたカプセル内には金粒子が約50%包摂されることが確かめられた。次に、UV光照射によってカプセルを開き、金粒子を放出するためのDNA鎖を添加した。この結果、ほぼすべての金粒子が放出された。また、カプセルを閉じた状態では金粒子の放出が抑制された。これらの結果から、DNA構造体に比較的大きなナノ材料を導入でき、開閉によってその包摂や放出を制御できる分子システムの開発に成功した。

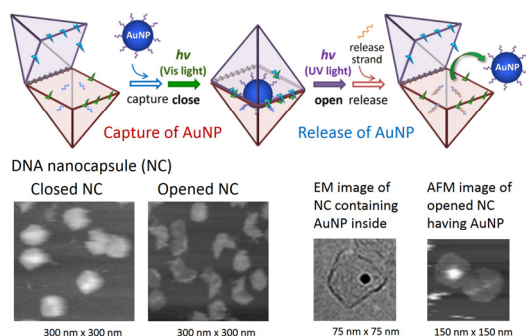


図6. 八面体DNAナノカプセルの開閉の操作と金粒子の包摂と放出の操作。光応答性DNA鎖を導入したDNAナノカプセルの開閉のAFMイメージ。ナノカプセルの開閉による金粒子の包摂と放出。金粒子を包摂したDNAナノ構造体(EM)と金粒子の内包したナノカプセルの開放(AFM)。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 35 件)

1. M. Endo, H. Sugiyama, Single-Molecule Imaging of Dynamic Motions of Biomolecules in DNA Origami Nanostructures Using High-Speed Atomic Force Microscopy. *Acc. Chem. Res.* **2014**, *47*, 1645-1653.
2. A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, State-of-the Art High Speed Atomic Force Microscopy for the Investigation of Single-Molecular Dynamics of Proteins. *Chemical Reviews*, **2014**, *114*, 1493-1520.
3. Y. Suzuki, M. Endo, Y. Katsuda, K. Ou, K. Hidaka, H. Sugiyama, DNA Origami Based Visualization System for Studying Site-Specific Recombination Events. *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 211-218.
4. Y. Suzuki, M. Endo, Y. Yang, H. Sugiyama, Dynamic Assembly/Disassembly Processes of Photoresponsive DNA Origami Nanostructures Directly Visualized on a Lipid Membrane Surface. *J. Am. Chem. Soc.* **2014**, *136*, 1714-1717.
5. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Direct and Single-Molecule Visualization of the Solution-State Structures of G-Hairpin and G-Triplex Intermediates. *Angew. Chem Int. Ed.* **2014**, *53*, 4107-4012.
6. M. Endo, S. Yamamoto, T. Emura, K. Hidaka, N. Morone, J. E. Heuser, H. Sugiyama, Helical DNA origami tubular structures with various sizes and arrangements. *Angew. Chem Int. Ed.* **2014**, *53*, 7484-7490.
7. D. Koirala, P. Shrestha, T. Emura, K. Hidaka, S. Mandal, M. Endo, H. Sugiyama, H. Mao, Single-molecule mechanochemical sensing using DNA origami nanostructures. *Angew. Chem Int. Ed.* **2014**, *53*, 7484-7490.
8. S. Yamamoto, D. De, K. Hidaka, K. Kim, M. Endo, H. Sugiyama, Single molecule visualization and characterization of Sox2-Pax6 complex formation on a regulatory DNA element using a DNA origami frame. *Nano Lett.* **2014**, *14*, 2286-2292.
9. E. Osada, Y. Suzuki, K. Hidaka, H. Ohno, H. Sugiyama, M. Endo, H. Saito, Engineering RNA-protein complexes with different shapes for imaging and therapeutic applications. *ACS Nano*, **2014**, *8*, 8130-8140.
10. T. Takenaka, M. Endo, Y. Suzuki, Y. Yang, T. Emura, K. Hidaka, T. Kato, T. Miyata, K. Namba, H. Sugiyama, Photoresponsive DNA nanocapsule having an open/close system for capture and release of nanomaterials. *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 14951-14954.
11. M. Endo, Y. Takeuchi, T. Emura, K. Hidaka, H. Sugiyama, Preparation of chemically modified RNA origami nanostructures. *Chem. Eur. J.* **2014**, *20*, 15330-15333.
12. Y. Yang, M. Endo, Y. Suzuki, K. Hidaka, H. Sugiyama, Direct Observation of the Dual-Switching Behaviours Corresponding to the State Transition in a DNA Origami. *Chem. Commun.*, **2014**, *50*, 4211-4213.
13. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, N. Shimada, A. Maruyama, H. Sugiyama, A lock-and-key mechanism for the controllable fabrication of DNA origami structures. *Chem. Commun.* **2014**, *50*, 8743-8746.
14. Y. Suzuki, M. Endo, C. Cañas, S. Ayora, J. C. Alonso, H. Sugiyama, K. Takeyasu, Direct analysis of Holliday junction resolving enzyme in a DNA origami nanostructure. *Nucleic Acids Res.* **2014**, *42*, 7421-7428.
15. S. Kizaki, Y. Suzuki, T. Takenaka, M. Endo, H. Sugiyama, AFM analysis of changes in nucleosome wrapping induced by DNA epigenetic modification. *Biomaterials Science*, **2014**, *2*, 1399-1403.
16. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, P. L. T. Tran, M-P. Teulade-Fichou, J-L. Mergny, H. Sugiyama, G-quadruplex-binding ligand-induced DNA synopsis Inside a DNA Origami Frame. *RSC Advances*, **2014**, *4*, 6346-6355.
17. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Direct and real-time observation of rotary movement of a DNA nanomechanical device, *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 1117-1123.
18. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, P. L. T. Tran, J-L. Mergny, R. J. Gorelick, H. Sugiyama, HIV-1 Nucleocapsid Proteins as Molecular Chaperones for Tetramolecular Antiparallel G-Quadruplex Formation. *J. Am. Chem. Soc.* **2013**, *135*, 18575-18585.
19. M. Endo, M. Inoue, Y. Suzuki, C. Masui, H. Morinaga, K. Hidaka, H. Sugiyama, Regulation of B-Z Conformational Transition and Complex Formation with a Z-form-binding Protein by Introduction of Constraint to Double-stranded DNA using DNA Nanoscaffold. *Chem. Eur. J.* **2013**, *19*, 16887-16890.
20. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Control of the two-dimensional crystallization of DNA origami with various loop arrangements. *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 686-688.
21. M. Endo, S. Yamamoto, K. Tatsumi, T. Emura, K. Hidaka, H. Sugiyama, RNA-templated DNA origami structures. *Chem. Commun.* **2013**, *49*, 2879-2881.
22. A. Rajendran, M. Endo, K. Hidaka, P. L. T. Tran, J-L. Mergny, H. Sugiyama, Controlling the Stoichiometry and Strand Polarity of a Tetramolecular G-quadruplex Structure by Using a DNA Origami Frame. *Nucleic Acids Res.* **2013**, *41*, 8738-8747.
23. M. Endo, Y. Yang, H. Sugiyama, DNA origami technology for biomaterials applications. *Biomaterials Science*, **2013**, *1*, 347-360.
24. S. Dhakal, H. Mao, A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, G-quadruplex nanostructures probed at the single molecular level by force-based methods. *Guanine quartets: Structure and application*, Royal Society of Chemistry, 73-85 (2013).
25. S. Wickham, J. Bath, Y. Katsuda, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, A. J. Turberfield, A DNA-based molecular motor that can navigate a network of tracks. *Nature Nanotechnology*, **2012**, *7*, 169-173.
26. M. Endo, R. Miyazaki, T. Emura, K. Hidaka, H. Sugiyama, Transcription Regulation System Mediated by Mechanical Operation of DNA Nanostructure. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 2852-2855.
27. T. Yoshidome, M. Endo, G. Kashiwazaki, K. Hidaka, T. Bando, H. Sugiyama, Sequence-Selective Single-Molecule Alkylation with a Pyrrole-Imidazole Polyamide Visualized in a DNA Nanoscaffold. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 4654-4660.
28. Y. Yang, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Photo-controllable DNA Origami Nanostructures Assembling into Predesigned Multiorientational Patterns. Photo-controllable DNA Origami Nanostructures Assembling into Predesigned Multiorientational Patterns. *J. Am. Chem. Soc.* **2012**, *134*, 20645-20653.
29. A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, Single-Molecule Analysis Using DNA Origami. *Angew. Chem Int. Ed.* **2012**, *51*, 874-890.
30. E. Nakata, L. -F. Fong, C. Uwatoko, S. Kiyonaka, Y. Mori, Y. Katsuda, M. Endo, H. Sugiyama, T. Morii, Zinc finger proteins as the adaptor for locating proteins at specific addresses of DNA origami. *Angew. Chem Int. Ed.* **2012**, *51*, 2421-2424.
31. M. Endo, K. Tatsumi, K. Terushima, Y. Katsuda, K. Hidaka, Y. Harada, H. Sugiyama, Direct Visualization of the Movement of a Single T7 RNA Polymerase and Transcription on a DNA Nanostructure. *Angew. Chem Int. Ed.* **2012**, *51*, 8778-8782.
32. M. Endo, Y. Yang, Y. Suzuki, K. Hidaka, H. Sugiyama, Single-Molecule Visualization of the Hybridization and Dissociation of Photoresponsive Oligonucleotides and Their Reversible Switching Behavior in a DNA Nanostructure. *Angew. Chem Int. Ed.* **2012**, *51*, 10518-10522.

33. K. Mohri, M. Nishikawa, N. Takahashi, N. Matsuoka, M. Endo, K. Hidaka, H. Sugiyama, Y. Takahashi, Y. Takakura, Design and development of nano-sized DNA assemblies in polypod-like structures as efficient vehicle for immunostimulatory CpG motifs to immune cells. *ACS Nano*, **2012**, *6*, 5931–5940.

34. A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, Structure and Functional Analysis of Proteins by High-Speed Atomic Force Microscopy. *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*, **2012**, *87*, 5–55.

35. A. Rajendran, M. Endo, H. Sugiyama, DNA Origami: Synthesis and Self-Assembly. *Current Protocols in Nucleic Acid Chemistry*, **2012**, *48*, 2.9.1–12.9.18.

[学会発表] (計 27 件)

1. 遠藤政幸, D. Koirala, P. Shrestha, S. Mandal, 江村智子, 日高久美, H. Mao, 杉山弘, 光ピンセットによる力測定を使ったDNAナノ構造上での1分子検出, 日本化学会第95春季年会, 2015年3月27日, 日本大学(船橋).

2. 遠藤政幸, DNAナノ構造体を使った1分子イメージング法の開発, 第8回分子ナノテクノロジーセンター講演会(招待講演), 2015年3月6日, 兵庫県立大学(姫路).

3. M. Endo, Y. Suzuki, Y. Yang, H. Sugiyama, Controlled self-assembly of DNA origami nanostructures on the lipid bilayer and their AFM imaging, 細胞を作る研究会 7.0, 2014年11月13日, 東京大学(東京).

4. M. Endo, S. Yamamoto, T. Emura, K. Hidaka, N. Morone, J. E. Heuser, H. Sugiyama, Novel helical DNA tubular structures with defined size and arrangement, The 41st International Symposium on Nucleic Acid Chemistry, 2014年11月6日, 北九州国際会議場(小倉).

5. Masayuki Endo, Creation of mechanical nanodevices using DNA origami, The 8th International Symposium on Nano-Biotechnology (招待講演), 2014年10月20日, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing, China.

6. M. Endo, S. Yamamoto, T. Emura, K. Hidaka, N. Morone, J. E. Heuser, H. Sugiyama, Construction of helical DNA origami tubes with various sizes and arrangements, DNA20: The Twentieth International Meeting on DNA Computing and Molecular Programming, 2014年9月22日, 京都大学(京都).

7. 遠藤政幸, 山本清義, 江村智子, 日高久美, 杉山弘, 新規DNAチューブ構造体の構築とその性質, 第8回バイオ関連化学シンポジウム, 2014年9月11日, 岡山大学(岡山).

8. 遠藤政幸, DNAナノテクノロジーの1分子観察への応用, 東京大学大学院化学生命工学専攻 2014年度第1回談話会(招待講演), 2014年7月5日, 東京大学(東京).

9. Masayuki Endo, Photoresponsive DNA nanostructures; single-molecule imaging and controlled assembly, 11th Conference on the Foundations of Nanoscience 2014 (招待講演), 2014年4月18日, Snowbird, UT, USA.

10. 遠藤政幸, 山本清義, 江村智子, 日高久美, 杉山弘, らせん状のDNAチューブ構造体の設計と構築, 日本化学会第94春季年会, 2014年3月27日, 名古屋大学(名古屋).

11. Masayuki Endo, Single-molecule manipulation of artificial DNA nanostructures, The 2nd Kyoto-Bristol Symposium (招待講演), 2014年1月9日, 京都大学(京都).

12. M. Endo, Y. Suzuki, Y. Katsuda, K. Ou, K. Hidaka, H. Sugiyama, Single-molecule observation and control of DNA recombination in the DNA frames, The 40th International Symposium on Nucleic Acid Chemistry, 2013年11月15日, 神奈川大学(横浜).

13. 遠藤政幸, DNAオリガミを利用した生体分子の動きの1分子観察, 日本農芸化学会中部支部 第169回例会若手シンポジウム『核酸科学の新潮流』(招待講演), 2013年11月9日, 岐阜大学(岐阜).

14. Masayuki Endo, Single-molecule observation and control of DNA recombination in the DNA frames, 7th Annual Symposium on Nanobiotechnology (招待講演), 2013年11月6日, Bristol University, Bristol, UK.

15. Masayuki Endo, Visualizing molecular motions on the DNA origami, 第10回日独先端科学(JGFoS)シンポジウム(招待講演) 2013年11月1日 京都ブライイトンホテル(京都).

16. Masayuki Endo, Direct observation of molecular motions on the DNA nanostructure, 日本生物物理学会 第51回年会(招待講演), 2013年10月29日, 京都国際会議場(京都).

17. 遠藤政幸, 鈴木勇輝, 勝田陽介, 王惠瑜, 日高久美, 杉山弘, DNAナノ構造体上でのDNA組み換え反応の1分子観察と制御, 第7回バイオ関連化学シンポジウム, 2013年9月27日, 名古屋大学(名古屋).

18. 遠藤政幸, Arivazhagan Rajendran, 日高久美, 杉山弘, DNAナノ構造内でのB-Z構造転移の制御と可視化, 日本ケミカルバイオロジー学会 第8回年会, 2013年6月21日, 東京医科歯科大学(東京).

19. Masayuki Endo, Direct observation of DNA structural changes in the designed DNA nanostructures, 10th Conference on the Foundations of Nanoscience 2013 (招待講演), 2013年4月18日, Snowbird, UT, USA.

20. M. Endo, K. Tatsumi, K. Terushima, Y. Katsuda, K. Hidaka, Y. Harada, H. Sugiyama, Direct observation of RNA polymerase and transcription in the designed DNA nanostructure. The 39th International Symposium on Nucleic Acid Chemistry, 2012年11月17日, 名古屋大学(名古屋).

21. Masayuki Endo, DNA Molecular Technology for Imaging and Biological Applications. 6th Annual Symposium on Nanobiotechnology, Kyoto Cell-Material Integration 2012(招待講演), 2012年11月9日, 京都大学(京都).

22. 遠藤政幸, DNA分子テクノロジーの材料化への応用, バイオテンプレート研究会(招待講演), 2012年10月12日, 東京工業大学(東京).

23. 遠藤政幸, 辰巳純一, 照島功祐, 勝田陽介, 日高久美, 原田慶恵, 杉山弘, DNAナノ構造体上でのRNAポリメラーゼの挙動と転写の1分子観察, 第6回バイオ関連化学シンポジウム, 2012年9月7日, 北海道大学(札幌).

24. Masayuki Endo, Direct observation of single enzymatic and chemical reaction in the designed DNA nanostructures. dnatec 2012(招待講演), 2012年8月13日, Aarhus, Denmark

25. 遠藤政幸, DNAナノマシンの操作と運動の可視化, 分子ロボティクス研究会(招待講演), 2012年6月29日, 京都大学(京都).

26. 遠藤政幸, 勝田陽介, 鈴木勇輝, 王惠瑜, 日高久美, 杉山弘, DNAナノ構造上でのDNA組み換え反応の直接観察, 日本ケミカルバイオロジー学会 第7回年会, 2012年6月9日, 京都大学(京都)

27. Masayuki Endo, Direct visualization of single transcription on the designed DNA nanoscaffold, 9th Conference on the Foundations of Nanoscience 2012(招待講演), 2012年4月18日, Snowbird, UT, USA.

[図書] (計 9 件)

1. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAナノ構造体を利用したDNA構造変化の1分子イメージング, DOJIN BIOSCIENCE SERIES『1分子生物学』化学同人 pp274-276 (2014).

2. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAオリガミ構造体を利用した1分子イメージングシステムの開発, 新材料・新素材シリーズ『超分子材料の設計と応用展開』, シーエムシー出版, pp101-113 (2014).

3. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAオリガミ法を用いた次世代ナノシステム, 化学工業, Vol. 65, No. 1, 42-48 (2014).

4. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAオリガミによる生体分子の動的な観察システム, 現代化学, No. 508, 26-31 (2013).

5. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAナノ構造上を動くDNA分子マシン, 高分子, Vol. 62, No.3, 129-131 (2013).

6. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAオリガミを使った1分子解析, 生物物理, Vol. 53, No. 3, 153-157 (2013).

7. 遠藤政幸, 杉山弘, ナノ空間でDNA1分子の動作を捉える—極小の分子システムで操るナノマシン, 化学, Vol. 37, No. 5, 32-37 (2012).

8. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAオリガミによる1分子観察系の構築, 『疾患克服を目指したケミカルバイオロジー』実験医学 2012年増刊号, Vol. 30, No. 7, 180-186 (2012).

9. 遠藤政幸, 杉山弘, DNAオリガミ構造体と1分子観察への応用, 化学工業, Vol. 63, No. 2, 36-41 (2012).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 政幸 (ENDO, Masayuki)

京都大学物質-細胞統合システム拠点・准教授  
研究者番号: 2430097