

平成30年6月26日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05492

研究課題名(和文) DNAナノリアクターで構築する高効率な人工光合成システム

研究課題名(英文) Artificial photosynthesis system constructed on DNA nanoreactor

研究代表者

中田 栄司 (NAKATA, EIJI)

京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授

研究者番号：70467827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：細胞には膨大な種類の酵素が存在しており、それぞれが特定の化学反応を触媒する。個々の化学反応が相互に連結し共役することで、物質やエネルギーの代謝がおこなわれ、生命が維持されている。このような連携した化学反応を試験管で構築できれば、単純に数種類の酵素を混ぜ合わせただけでは達成できない高効率な物質変換システムになると期待される。その代表例の一つは、光を利用して物質を創る光合成システムである。本研究では、DNAナノ構造体を足場として、我々が開発したモジュール型アダプターを利用してDNAナノ構造体上に複数種類の酵素を配置し、高効率な多段階反応を実現するDNAナノリアクターの開発をおこなった。

研究成果の概要(英文)：Recent development in the field of structural DNA nanotechnology has enabled the controlled self-assembly of biomacromolecules and nanomaterials. The precise and programmable base-pairing of DNA is utilized to provide fully addressable nanoarchitectures of various shapes and geometries as ideal scaffolds to position the molecules of interest with nanometer-level precision.

DNA binding-based adaptors have the potential to be an ideal protein-DNA conjugation method to locate several kinds of proteins of interests at desired positions on the DNA scaffold with orthogonality and fast reaction kinetics to realize quantitative loading yields. By using a series of DNA binding adaptors, an enzyme cascade reaction system was constructed on the DNA scaffold.

研究分野：生体機能関連化学

キーワード：DNAナノ構造体 DNAナノリアクター 多段階物質変換反応 人工光合成システム モジュール型アダプター 共有結合型アダプター

1. 研究開始当初の背景

生体内では、酵素などの複数の反応点がネットワークを形成し、様々な物質を変換して生命活動を営んでいる。このような生体内のネットワークを手本とし、試験管内で再現することができれば、高機能な物質変換をおこなえる反応場(ナノリアクター)が構築できる。これまでもリボソーム内水相やナノ界面などを反応場として利用したナノリアクターに関する研究例は数多く報告されている(*Chem. Rev.*, **2005**, *105*, 1445)。しかしながら、それらはナノ空間を構築することで各要素が高密度化された状態を反映しているものの、生体内で見られるようなナノ空間で構成要素を1分子レベルで分子数や空間配置・配向を制御することまでは実現できておらず、ナノ構造情報と活性の相関関係の知見は得られていない。その原因は、これらを精密に制御する方法論がこれまでなかったことにある。

近年、DNA origami (*Nature* **2006**, *440*, 297)に代表されるDNAナノ構造体が、人工分子などの機能性分子を配置するための足場として注目されている。これは、DNAの塩基配列に従って二次元や三次元のナノ構造体を精密かつ自在に設計でき、分子レベルで制御して配置できるからである。これまでも生体内で高い機能を有するタンパク質・酵素を、DNAナノ構造体に配置した機能性複合体を構築する試みはなされてきたが、1分子レベルの精度でDNAナノ構造体上に配置する方法論には乏しかった。申請者らが最近開発した、DNA結合性タンパク質をアダプターとし、DNAナノ構造体上の狙った位置にDNA結合性アダプターを融合した目的タンパク質・酵素を選択的に配置する方法(*Angew Chem. Int. Ed.*, **2012**, *51*, 2421; *Methods*, **2014**, *4*, 348)で、この問題点は解決できる。これにより、DNAナノ構造体上に複数の酵素などの反応点を厳密に配置した反応場、『DNAナノリアクター』の構築が可能となる。実際にDNAナノ構造体上に2種類の酵素を配置すると、それらを単に溶液中に共存させた場合と比べて反応効率が上がることは、Willnerら(*Nature Nanotech.*, **2009**, *4*, 249)やYanら(*J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, 5516.)らが報告している。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの我々の知見を基盤として『人工光合成システム』を『DNAナノリアクター』で構築し、その空間配置を合理的に設計することで、高い反応効率を実現する。太陽光エネルギーを化学エネルギーに変換する『人工光合成システム』は、再生可能エネルギーの有効利用方法のひとつとして期待されている。これまでに人工光合成システムの構築を目指して、人工光アンテナ分子、触媒分子などの構成要素が個別に開発され、それらを溶液中で混合したシステムが構築されてきた(*Current. Opin. Biotech.* **2014**, *28*, 1)。しかしながら、『1分子レベルの精度で制御した反応場の構築による物質変換反応の高効率化』という視点での研究はなされていない。まさに、『DNAナノリアクター』による反応の高効率化のモデルシステムとして最適である。そこで本研究では、光合成

に代表されるような生体内で起こる高効率な物質変換を可能とする多段階代謝反応をDNAナノリアクター上で実現し、その効率を左右するためのパラメータの算出をおこなった。

3. 研究の方法

DNAナノ構造体は、前述の論文(*Nature* **2006**, *440*, 297)および我々がこれまでに培った知見(*Angew Chem. Int. Ed.*, **2012**, *51*, 2421; *Methods*, **2014**, *4*, 348)に基づき、調製した。調製に際して、原子間力顕微鏡(AFM)においてその構造を評価しやすい形状をデザインし、AFMにて設計通り作成できていることを確認した。また、DNAナノ構造体上の任意の場所にDNA結合性タンパク質が認識するアドレス配列を導入した。DNA結合性アダプターは、これまでに開発していた非共有結合型のDNA結合性アダプターでは、その後の反応効率等の算出の際に困難を生じることが予測されたため、安定に配置することができ、未結合の成分を洗浄操作で簡単に除去することができる共有結合型のDNA結合性アダプター(モジュール型アダプター)の開発をおこない、その反応性の高さや実際のDNAナノ構造体への配置効率をAFMやゲル電気泳動によって評価した(*Chem. Commun.*, **2015**, *51*, 1016.)。さらには、複数種類の酵素を配置できるよう直交性を有するモジュール型アダプターの開発もおこない、それぞれの異なるアドレスに対して、迅速かつ定量的に最大3種類の酵素を配置できるようになったことを確認した(*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 8487.)。また、DNAナノ構造体上に配置した酵素による多段階反応に関しては、2種類の酵素による2段階反応システム(*J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, *138*, 3012.)および3種類の酵素による3段階反応システム(*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 8487.)を設計・評価した。評価に当たっては、配置されたそれぞれの酵素をAFMおよび吸収スペクトルによって定量し、同濃度の非配置の酵素との反応効率を酵素間距離をパラメータとして比較した。反応効率の評価は、反応中間体および最終生成物を吸収スペクトルおよびHPLCによって定量しておこなった。

4. 研究成果

DNAナノ構造体は、様々な機能性分子を1分子レベルでナノメートルの精度で配置するための足場として優れている。具体的には、DNAナノ構造体上に、機能性分子を配置可能なアドレスを導入し、そのアドレスに対して機能性分子を配置することで達成される。その特長を生かして、様々な機能性分子をDNAナノ構造体上に配置して、連続した化学反応を高効率に実現可能なDNAナノリアクターを構築する。有機小分子などの人工分子を導入する際には、一本鎖DNAをアドレスとし、その配列に相補的なDNAを有機小分子を導入することで達成される。一方で、酵素やタンパク質を配置する際に同様の方法を用いた場合、煩雑な調製操作やその過程での酵素の喪失、十分な配置効率が得られないなどの問題があった。これらの問題の一部を解決する手法として、我々は、これまでにDNA結合性タンパク質をアダプターとして利用する方法論を確立してきた(*Angew Chem.*

Int. Ed., **2012**, *51*, 2421; *Methods*, **2014**, *4*, 348)。DNA 結合性アダプターを配置したい酵素と融合したキメラタンパク質を調製し、DNA 結合性アダプターの結合配列を配置した DNA ナノ構造体に配置することで達成される。特筆すべき点として、本手法は遺伝子組み換え技術によって調製できることから、細胞内で直接調製することができるため、細胞内においても DNA ナノ構造体の有無でのタンパク質活性の制御が可能である点が上げられる (*Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *130*, 2616)。しかしながら、これら DNA 結合性アダプターと DNA 間の相互作用は可逆的であるため、融合タンパク質を DNA ナノ構造体上に定量的に配置するためには過剰量のタンパク質が必要であった。また、過剰なタンパク質を洗浄により除去した場合、DNA ナノ構造体上に配置されたタンパク質も一部解離してしまう問題点もあり、DNA ナノリアクターの機能評価をおこなう上で問題になることが懸念された。そこで、DNA 結合性タンパク質が DNA ナノ構造体上のアドレスを認識した後に DNA と融合タンパク質の間に共有結合を形成させる技術モジュール型アダプターを開発した (*Chem. Commun.*, **2015**, *51*, 1016)。複数種類の酵素を配置した DNA ナノリアクターを調製するためには、複数種類のモジュール型アダプターが必要となり、かつそれぞれのモジュール型アダプターには直交性が求められる。そこで、モジュール型アダプターの構成要素である DNA 結合性タンパク質とタグタンパク質(特定の基質と安定な共有結合を形成することができるタンパク質)を複数種類用意し、最終的に直交性を有するモジュール型アダプターを 3 種類見出した。さらには、反応速度論に基づいた直交性を有するモジュール型アダプターの合理的設計戦略を見出すことも成功し、今後さらに複数のモジュール型アダプターの開発が可能となった (*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 8487)。

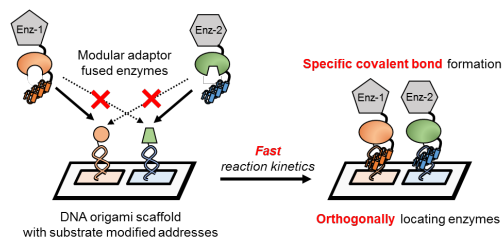


図 1. 直交性を有するモジュール型アダプターの開発

開発したモジュール型アダプターを用いて DNA ナノリアクターの開発をおこなった。評価する反応としては、酵母におけるキシロースからのエタノール生産経路の初発の重要な 2 段階の酵素反応であるキシロースリダクターゼ(XR)とキシリトールデヒドロゲナーゼ(XDH)を、DNA ナノ構造体上に配置し、その空間配置を変化させることで、その効率がどのように変化するかを詳細に評価した。また、2 種類の分子(基質と補酵素)が酵素間を移動する場合と、1 種類の分子(補酵素のみ)が移動する場合における、酵素間距離の影響についても詳細に検討し、報告した (*J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, *138*, 3012)。本反応システムは、各酵素の持つ酵素学的パラメータをもとに、さらに効率の良い反応

システムとなるよう酵素比を変化させての評価についてもおこなっており、良好な結果を得ている (日本化学会第 98 春季年会 2018 等で発表済, *to be submitted*)。さらには、本研究の当初の提案のように、光照射による補酵素の再生システムと連携した人工光合成システムについても評価している (*to be submitted*)。

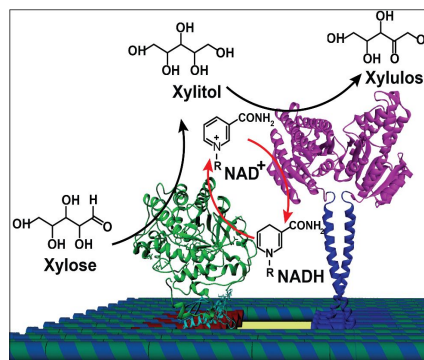


図 2. DNA ナノ構造体に配置したキシロース代謝関連酵素(XR-XDH)による高効率な二段階物質変換反応を実現する DNA ナノリアクター

また、直交性を有するモジュール型アダプターの開発により、上述の二段階反応システムを三種類の酵素を配置した三段階反応システムへと拡張することにも成功した。この三段階反応システムにおいても、酵素間距離に対応して反応の効率が変化することを確認した (*J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 8487)。

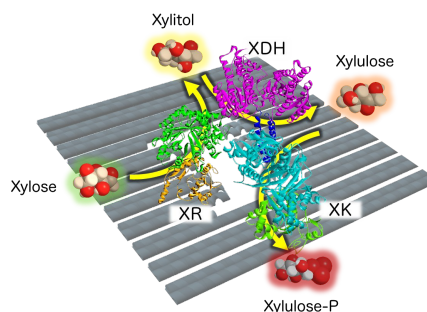


図 3 段階酵素反応(糖代謝反応 XR-XDH-XK)を実現する DNA ナノリアクター

上記のように、DNA ナノ構造体上に酵素を一分子レベルで制御して配置することで現在のところ最大 3 段階の酵素反応を高効率に進行させることに成功した。これは、酵素を定量的かつ安定に配置することのできるモジュール型アダプターの開発によるところが大きく、直交性を有するモジュール型アダプターの合理的設計戦略を獲得したことは、今後の研究展開に大きく貢献できると期待される。また、より複雑な酵素反応システムを構築するために、それぞれの酵素を 1 分子ずつ配置することのできる DNA ナノ構造体の設計もおこなっており(日本化学会第 98 春季年会 2018 等で発表済, *to be submitted*)、当初の申請提案どおり、人工光合成を実現する DNA ナノリアクターとして示す予定である (*to be submitted*)。

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9件)

Eiji Nakata, Huyen Dinh, Tien Anh Ngo, Masayuki Saimura, Takashi Morii, "A modular zinc finger adaptor accelerates the covalent linkage of proteins at specific locations on DNA nanoscaffolds" *Chem. Commun.* **2015**, *51*, 1016-1019.

Tien Anh Ngo, Eiji Nakata, Masayuki Saimura, Takashi Morii, "Spatially Organized Enzymes Drive Cofactor-Coupled Cascade Reactions" *J. Am. Chem. Soc.*, **2016**, *138*, 3012-3021.

Thang Minh Nguyen, Eiji Nakata, Masayuki Saimura, Huyen Dinh, Takashi Morii, "Design of Modular Protein-Tags for the Orthogonal Covalent Bond Formation at Specific DNA Sequences", *J. Am. Chem. Soc.*, **2017**, *139*, 8487-8496.

Arivazhagan Rajendran, Eiji Nakata, Shun Nakano, Takashi Morii, "Nucleic-Acid-Templated Enzyme Cascades" *ChemBioChem* **2017**, *18*, 696-716.

Tatsuki Kurokawa, Shigeki Kiyonaka, Eiji Nakata, Masayuki Endo, Shohei Koyama, Emiko Mori, Nam Ha Tran Huyen Dinh, Yuki Suzuki, Kumi Hidaka, Masaaki, Kawata, Chikara Sato, Hiroshi Sugiyama, Takashi Morii, Yasuo Mori, "DNA Origami Scaffolds as Templates for Functional Tetrameric Kir3 K⁺ Channels" *Angew. Chem. Int. Ed.* **2018**, *130*, 2616-2621.

中田 栄司「DNA ナノ構造体に酵素を配置した分子スイッチボード」生体機能関連化学部会 News Letter **2016**, *3*, 3.

中田 栄司「若手研究者からのメッセージ」バイオテクノロジー部会 News Letter **2017**, *20*, 7.

中田 栄司, 森井 孝「ナノレベル間隔で異なる酵素を並べる! - 複雑な多段階反応を可能にする分子コンピナートへの挑戦 - 」化学, **2017**, *72*, 23-28.

中田 栄司, 森井 孝「効率的な多段階酵素反応を実現する分子コンピナート」バイオサイエンスとインダストリー, **2018**, *76*, 46-48.

〔学会発表〕(計56件)
(招待講演)

中田 栄司・森井 孝「DNA ナノ構造体に機能

性タンパク質を配置した分子スイッチボードの開発」Workshop in 富山大学, 富山, 2015.11.18

中田 栄司「高効率な多段階酵素反応を実現する DNA ナノリアクターの創製」新化学技術研究奨励賞受賞講演会, 東京, 2016.5.27

中田 栄司「DNA ナノ構造体上で実現した高効率な多段階物質変換システム」2016年度化学・生物素材研究開発奨励賞受賞講演, 横浜, 2016.10.12

E. Nakata, T. Morii, "DNA Binding Adaptors to Locate Multiple Enzymes on DNA scaffold", ISPAC_2017, ベトナム, 2017.06.10.

中田 栄司, 森井 孝, "高効率な多段階酵素反応を実現する DNA ナノリアクターの創製酵素を「1分子ずつ」狙った場所に配置する", 生体機能関連化学部会若手の会 第29回サマースクール, 島根, 2017.07.10

中田 栄司, 森井 孝「分子コンピナートによる非天然化合物合成システムの創製」, 新学術領域「生合成リデザイン」第2回公開シンポジウム, 北海道, 2017.08.05.

中田 栄司, 森井 孝「酵素を「1分子ずつ」狙った場所に配置するー試験管内での高効率な多段階反応システムへの挑戦ー」2nd NNBS, 福岡, 2017.10.23-24

E. Nakata, T. Morii, "DNA Binding Adaptors to Locate Multiple Enzymes on DNA scaffold", Nano-S&T-2017, 福岡, 2017.10.24-26

中田 栄司「生物から学んだ分子コンピナートへの挑戦」, 特別講演会, 京都, 2017.10.28.

中田 栄司, 森井 孝, "DNA ナノ構造体上に酵素を配置した分子コンピナート", 「統合物質創製化学研究推進機構」国内シンポジウム, 京都, 2017.10.30-31

中田 栄司, 森井 孝, "DNA ナノ構造体上に複数種類の酵素を配置した分子コンピナート", 第6回植物二次代謝フロンティア研究会, 兵庫, 2017.12.11-12

E. Nakata, T. Morii, "DNA Binding Adaptors to Locate Multiple Enzymes on DNA Scaffold", ISBC2017 The Second International Symposium on Biofunctional Chemistry, 京都, 2017.12.14-16

中田 栄司, 森井 孝, "酵素を「1分子ずつ」狙った場所に配置するー生物から学んだ分子コンピナートへの挑戦ー", 講演会, 福岡, 2018.1.17

中田 栄司, 森井 孝「酵素を「1分子ずつ」狙った場所に配置するー生物から学んだ分子コンピナートへの挑戦ー」, 第11回バイオ&マテリアル講演会, 福岡, 2018.1.18

中田 栄司, 森井 孝「酵素を「1分子ずつ」狙った場所に配置した DNA ナノリアクターの創製」, 日本物理学会第73回年次大会(2018年), 東京, 2018.3.24

中田 栄司, 森井 孝「非天然化合物合成を目指した分子コンピナートの創製」, 生体機能化学シンポジウム, 京都, 2018.3.26

(一般講演)

Dinh Huyen · Nakata Eiji · Ngo Anh Tien · Ashida Hiroki · Morii Takashi, “Orthogonal assembly of RuBisCO and Carbonic Anhydrase on a DNA nanoscaffold”, 第9回バイオ関連化学シンポジウム, 熊本, 2015.9.10-11

中田 栄司 · Huyen Dinh · Nguyen Minh Thang · Ngo Tien Anh · 才村 正幸 · 森井 孝, “DNA ナノ構造体への共有結合型 DNA 結合アダプターを介した酵素の配置”, 第9回バイオ関連化学シンポジウム, 熊本, 2015.9.10-11

西田 圭佑 · Dinh Huyen · 中田 栄司 · 森井 孝, “三次元的な酵素配置を目指した DNA ナノチューブの構築”, 第9回バイオ関連化学シンポジウム, 熊本, 2015.9.10-11

Huyen Dinh, Eiji Nakata, Tien Anh Ngo, Hiroki Ashida, Takashi Morii, “Orthogonal assembly of RuBisCO and carbonic anhydrase on a DNA nanoscaffold” ISNAC2015 第42回国際核酸化学シンポジウム, 兵庫, 2015.9.23-25

Keisuke Nishida, Huyen Dinh, Eiji Nakata, Takashi Morii” Construction of DNA nanotubes toward the three-dimensionally constrained assembly of enzymes” ISNAC2015 第42回国際核酸化学シンポジウム, 兵庫, 2015.9.23-25

Thang Minh Nguyen, Eiji Nakata, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Expansion of modular adaptors for covalently locating multiple enzymes on DNA nanoscaffold” ISNAC2015 第42回国際核酸化学シンポジウム, 兵庫, 2015.9.23-25

Eiji Nakata, Huyen Dinh, Nguyen Minh Thang, Ngo Tien Anh, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Site-specific covalent modification of individual protein molecule on DNA nanoscaffold” ISNAC2015 第42回国際核酸化学シンポジウム, 兵庫, 2015.9.23-25

Tien Anh Ngo, Eiji Nakata, Huyen Dinh, Thang Minh Nguyen, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Development of various types of protein adaptors to locate a single molecule of functional protein on molecular switchboard” 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem2015), USA, 2015.12.15-20

Huyen Dinh, Eiji Nakata, Tien Anh Ngo, Takashi Morii, “Orthogonal assembly of RuBisCO and carbonic anhydrase on a DNA nanoscaffold”, 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem2015), USA, 2015.12.15-20

Thang Minh Nguyen, Eiji Nakata, Huyen Dinh, Tien Anh Ngo, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Development of modular adaptors to covalently locate multiple enzymes on DNA nanoscaffold”, 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem2015), USA, 2015.12.15-20

Eiji Nakata, Thang Minh Nguyen, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Expansion of modular adaptors for covalently locating a number of

proteins on DNA nanostructure” ICIRS16, 京都, 2016.3.7

Tien Anh Ngo, Eiji Nakata, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Factor governing the efficiency of cascade reactions by spacially organized enzymes” 日本化学会第96春季年会, 京都, 2016.3.24-27.

Thang Minh Nguyen, Eiji Nakata, Masayuki Saimura, Takashi Morii, “Development of orthogonal modular adaptors for assembling multiple proteins on DNA nanostructure” 日本化学会第96春季年会, 京都, 2016.3.24-27.

Huyen Dinh, Eiji Nakata, Tien Anh Ngo, Masayuki Saimura, Takashi Morii “Construction of an enzyme assembly on DNA scaffold via a modular adaptor” 日本化学会第96春季年会, 京都, 2016.3.24-27.

中田 栄司, 森井 孝 “DNA ナノ構造体に酵素を配置した分子スイッチボードの開発”, 第14回ホスト・ゲスト化学シンポジウム, 高知, 2016.6.4-5.

中田 栄司, Ngo Anh Tien, Dinh Huyen, Nguyen Minh Thang, 才村正幸, 森井孝” DNA ナノ構造体に酵素を配置した分子スイッチボード” 第10回バイオ関連化学シンポジウム, 石川, 2016.9.7-9

E. Nakata, T. Morii, “Assembling enzymes on a DNA scaffold”, Asian 3 Roundtable on Nucleic Acids and Chemical Probe Research Hub, Fukuoka 2016, 福岡, 2016.9.22-24

T. M. Nguyen, E. Nakata, M. Saimura, T. Morii, “Evaluation of orthogonal modular adaptors for assembling proteins on DNA scaffold” The 43rd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry, 熊本, 2016.9.27-29

H.T.T. Dinh, E. Nakata, T.A. Ngo, T. Morii, “Activity of the assembled enzyme on DNA scaffold” The 43rd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry, 熊本, 2016.9.27-29

E. Nakata, T.A. Ngo, M. Saimura, T. Morii, “The efficiency of cascade reactions by spatially organized enzymes on DNA scaffold” The 43rd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry, 熊本, 2016.9.27-29

21 A. Rajendran, S. Park, E. Nakata, Y. Kwon, T. Morii, “Topologically interlocked DNA nanostructures inside a DNA origami”, 日本化学会第97春季年会, 東京, 2017.3.16-20

22 H. Dinh, E. Nakata, T. Morii, “Activity of spatially organized enzyme on DNA scaffold” 日本化学会第97春季年会, 東京, 2017.3.16-20

23 T. Nguyen E. Nakata, M. Saimura, T. Morii, “Orthogonal modular adaptors for assembling multiple enzymes on DNA scaffold” 日本化学会第97春季年会, 東京, 2017.3.16-20

24 E. Nakata, H. Dinh, T. Nguyen, M. Saimura, T. Morii, “Enzymatic cascade reactions on the DNA scaffold” 日本化学会第97春季年会, 東京, 2017.3.16-20

25 小西 宏明 · 中田 栄司 · 仲野 瞬 · 森井 孝,

- “DNA オリガミを利用したナノリボソーム”
日本化学会第 97 春季年会, 東京,
2017.3.16-20
- 26 中田 栄司, Nguyen Minh Thang, 才村正幸,
Dinh Huyen, 森井孝, “直交性を有するモジュ
ール型アダプターによる複数の酵素を配置し
た分子スイッチボード”, 第 11 回バイオ関連
化学シンポジウム, 東京, 2017.9.6-8
- 27 H. Dinh, E. Nakata, T. Morii, “Activity of the
assembled enzyme on DNA scaffold” 第 11 回バ
イオ関連化学シンポジウム, 東京, 2017.9.6-8
- 28 A. Rajendran, S.-J. Park, E. Nakata, Y. Kwon, T.
Morii, “Assembly of DNA Rotaxane and
Catenane Inside a DNA Origami Frame”, 第 11
回バイオ関連化学シンポジウム, 東京,
2017.9.6-8
- 29 A. Rajendran, S.-J. Park, E. Nakata, Y. Kwon, T.
Morii, “Construction of Topologically Interlocked
DNAs Inside a DNA Scaffold”, The 44th
International Symposium on Nucleic Acids
Chemistry /The 1st Annual Meeting of Japan
Society of Nucleic Acids Chemistry, 東京,
2017.11.14-15.
- 30 T. M. Nguyen, E. Nakata, M. Saimura, H. Dinh, T.
Morii, “Orthogonal Modular Adaptors to Locate
Three Enzymes for Cascade Reaction on DNA
Scaffold” The 44th International Symposium on
Nucleic Acids Chemistry /The 1st Annual
Meeting of Japan Society of Nucleic Acids
Chemistry, 東京, 2017.11.14-15.
- 31 H. Dinh, E. Nakata, T. Morii, “Reaction of
enzymes in the ordered assembly states on DNA
nanostructures”, The 44th International
Symposium on Nucleic Acids Chemistry /The 1st
Annual Meeting of Japan Society of Nucleic
Acids Chemistry, 東京, 2017.11.14-15.
- 32 中田 栄司, 森井 孝, “「酵素を“1 分子ずつ”
狙った場所に配置する」”, 第 1 回 生命現象
の可視化に向けた研究会, 大阪, 2017.11.22
- 33 T. M. Nguyen, E. Nakata, M. Saimura, H. Dinh, T.
Morii, “Assembly of multiple enzymes on a DNA
scaffold”, ISBC2017 The Second International
Symposium on Biofunctional Chemistry, 京都,
2017.12.14-15
- 34 A. Rajendran, S.-J. Park, E. Nakata, Y. Kwon, T.
Morii, “DNA rotaxane and catenane inside a DNA
nanostructure” ISBC2017 The Second
International Symposium on Biofunctional
Chemistry, 京都, 2017.12.14-15
- 35 P. LIN, T. M. Nguyen, H. Dinh, E. Nakata, T.
Morii, “Efficiency of The Enzyme Cascade
Reaction on a DNA Scaffold”, 日本化学会第 98
春季年会 2018, 千葉, 2018.03.20-23
- 36 H. Dinh, E. Nakata, M. Kinoshita, T. Morii,
“Reaction of Carbonic Anhydrase assembled on
DNA scaffold”, 日本化学会第 98 春季年会 2018,
千葉, 2018.03.20-23
- 37 A. Rajendran, S.-J. Park, E. Nakata, Y. Kwon, T.
Morii, “Supramolecular Assemblies of
Mechanically Interlocked Components Inside a

DNA Origami Frame”, 日本化学会第 98 春季年
会 2018, 千葉, 2018.03.20-23

- 38 T. M. Nguyen, E. Nakata, M. Saimura, T. Morii,
“Sequence Specific Modular Adaptors for
Orthogonal Location of Multiple Enzymes on a
DNA scaffold” 日本化学会第 98 春季年会 2018,
千葉, 2018.03.20-23
- 39 小西 宏明・DINH Huyen・中田 栄司・仲野
瞬・森井 孝, “DNA ナノ構造体を鋳型にした
ナノリボソーム”, 日本化学会第 98 春季年会
2018, 千葉, 2018.03.20-23
- 40 中田 栄司・DINH Huyen・才村 正幸・森井 孝,
“多数のタンパク質を配置した DNA ナノ構造
体の構築” 日本化学会第 98 春季年会 2018, 千
葉, 2018.03.20-23

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
なし

〔その他〕

中田 栄司, 森井 孝 「酵素を“1 分子ずつ”狙
った場所に配置する-多段階反応を効率的に
進行させる分子コンビナートをつくる」
Academist Journal
(<https://academist-cf.com/journal/?p=5281>)

Our published paper (*J. Am. Chem. Soc.*, **2016**,
138, 3012-3021) was selected as “virtual issue on
engineered Biomolecular Catalysts-20 selected
articles and communications”
(https://pubs.acs.org/page/jacsat/vi/engineered-bio-catalysts?utm_source=JACS&utm_medium=IMG&utm_campaign=PUBS1017EJK)

ホームページ等

京都大学・エネルギー理工学研究所・生物機
能科学研究分野・森井研究室
http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/material/a-12_j.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

中田 栄司 (NAKATA, Eiji)
京都大学エネルギー理工学研究所 准教授
研究者番号: 70467827

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

なし