

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14029

研究課題名(和文)水素結合および金属配位結合により対合する人工塩基対を用いたDNA鎖交換反応の開発

研究課題名(英文)Development of DNA strand displacement reactions using bifacial nucleobases that form both hydrogen-bonded and metal-mediated base pairs

研究代表者

竹澤 悠典 (Takezawa, Yusuke)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・助教

研究者番号：70508598

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：天然核酸塩基と水素結合型塩基対を形成し、かつ金属イオン存在下では配位結合により対合して金属錯体型人工塩基対を形成する「ヤヌス型人工塩基」を合成し、水素結合型塩基対と金属錯体型塩基対の可逆な変換に基づくDNA鎖交換反応の開発を行った。5-ヒドロキシウラシル(UOH)を導入したDNA鎖を用い、水素結合型塩基対UOH-Aと金属錯体型塩基対UOH-Gd(III)-UOHの組み換えにより、Gd(III)イオン添加を外部刺激とした可逆なDNA鎖交換を実現した。さらに新規ヤヌス型人工塩基として5-カルボキシウラシルを設計し、DNA二重鎖中で水素結合型塩基対と金属錯体型塩基対の双方を形成することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

DNA鎖交換反応は生体内では相同組換えの過程でも見られるが、近年ではDNAナノ構造体の動的変換などDNAナノテクノロジーの分野でも活用されている。本研究で開発した金属錯体形成に基づくDNA鎖交換反応は、金属イオンを外部刺激として駆動するDNA分子マシンの開発や、機能性人工核酸の機能スイッチングなどへの応用が期待される。特に、水素結合型塩基対と金属錯体型塩基対の双方を形成する「ヤヌス型人工核酸塩基」の設計戦略は、外部刺激応答性のDNA材料や機能性核酸の新規なビルディングブロックとして有用であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We have developed metal-triggered DNA strand displacement reactions by utilizing bifacial unnatural nucleobases that form both hydrogen-bonded base pairs and metal-mediated base pairs. 5-hydroxyuracil (UOH) bases were incorporated into DNA strands and the Gd(III)-triggered strand displacement was demonstrated based on the reversible switching between hydrogen-bonded UOH-A base pairs and metal-mediated UOH-Gd(III)-UOH base pairs. In addition, a 5-carboxyuracil base was found to form both hydrogen-bonded and metal-mediated base pairs in DNA duplexes, and thus would be utilized for metal-triggered strand displacement reactions.

研究分野：生体関連化学

キーワード：DNA 人工塩基対 鎖交換反応 金属錯体 人工核酸

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

DNA は、相補的な水素結合に基づく核酸塩基対形成により、配列特異的に会合し二重らせん構造を形成する。DNA 二重鎖から一本鎖が解離し別の一本鎖が結合する DNA 鎖交換反応は、生体内では相同組換えの過程でも見られるが、近年では DNA ナノ構造体の構造変換や DNA 分子マシンの開発などにも活用されている。一般に鎖交換反応は、組み換わる DNA 鎖の添加により引き起こされるが、種々の化学種や光などの外部刺激に応答する鎖交換反応の開発が注目されていた。

我々は以前、チミンの 5 位メチル基を水酸基に置換した 5-ヒドロキシウラシル( $\text{U}^{\text{OH}}$ )が、DNA 二重鎖中で水素結合型塩基対  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$  に加え、金属錯体型塩基対  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-M-U}^{\text{OH}}$  ( $\text{M} = \text{Gd}^{\text{III}}, \text{Zn}^{\text{II}}$  etc.)を形成することを見出した(図 1, Y. Takezawa et al., Chem. Eur. J., 2015)。そこで、一つの分子で水素結合型天然塩基対と金属錯体型塩基対の両方を形成する非天然核酸塩基(「ヤヌス型核酸塩基」)を用いれば、二種類の塩基対形成モードの相互変換に基づく DNA の鎖交換反応が実現でき、金属配位を駆動力とした核酸構造・機能のスイッチングが可能になると考えた。

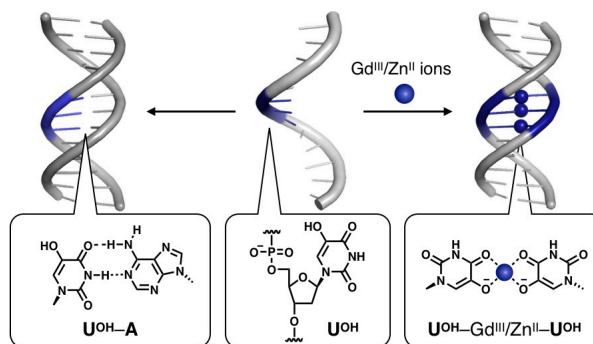


図 1 5-ヒドロキシウラシル( $\text{U}^{\text{OH}}$ )塩基が形成する水素結合型塩基対( $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$ )と金属錯体型塩基対( $\text{U}^{\text{OH}}\text{-Gd}^{\text{III}}/\text{Zn}^{\text{II}}\text{-U}^{\text{OH}}$ )。簡単のため、他の配位子は省略してある。

### 2. 研究の目的

本研究では、天然核酸塩基と水素結合を介したワトソン-クリック型塩基対を形成し、かつ、金属イオン存在下では配位結合により対合して金属錯体型非天然塩基対を形成する「ヤヌス型人工核酸塩基」を創製し、「水素結合型天然塩基対  $\rightleftharpoons$  金属錯体型人工塩基対」の可逆な変換に基づく DNA の鎖交換反応を開発することを目的とした。具体的には、天然ウラシル塩基の 5 位に配位性官能基を導入した 5-ヒドロキシウラシル( $\text{U}^{\text{OH}}$ )および 5-カルボキシウラシル( $\text{caU}$ )塩基を用い、金属イオンの添加・除去を外部刺激とした可逆な DNA 鎖交換の実現を目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 5-ヒドロキシウラシル塩基を用いた DNA 鎖交換反応の開発

5-ヒドロキシウラシル( $\text{U}^{\text{OH}}$ )塩基は、アデニン(A)塩基と水素結合型塩基対  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$  を形成する一方で、 $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオン存在下で金属錯体型塩基対  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-Gd}^{\text{III}}\text{-U}^{\text{OH}}$  を形成する。 $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオンの添加により  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$  塩基対から  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-Gd}^{\text{III}}\text{-U}^{\text{OH}}$  塩基対への組み換えを誘起することで、DNA の鎖交換を引き起こせると考えた。まず、末端に複数の  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-U}^{\text{OH}}$  対を有する DNA 二重鎖を合成し、 $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオンとの金属錯体形成を評価した。次に、 $\text{U}^{\text{OH}}\text{-U}^{\text{OH}}$  対もしくは  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$  対を導入した DNA 二重鎖の融解実験を行い、 $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオンが  $\text{U}^{\text{OH}}$  含有 DNA 二重鎖の熱的安定性に与える影響を評価した。さらに、 $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$  対を有する DNA 二重鎖と、その片方の相補鎖となる  $\text{U}^{\text{OH}}$  含有 DNA 鎖を用いて、 $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオン添加を外部刺激とした鎖交換反応を検討した。鎖交換の進行は、非変性ポリアクリルアミドゲル電気泳動により解析した。また、 $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオンとキレート配位子である EDTA とを交互に加えることで、可逆な鎖交換反応の繰り返し制御も試みた。

#### (2) 5-カルボキシウラシル塩基を用いた金属錯体型塩基対の形成

金属配位をトリガーとした DNA 鎖交換反応を開発するにあたり、新たな「ヤヌス型核酸塩基」として、5-カルボキシウラシル( $\text{caU}$ )塩基に着目した。 $\text{caU}$  塩基は  $\text{U}^{\text{OH}}$  塩基と同様に天然チミン塩基と同様の水素結合部位を有しており、アデニン(A)塩基と水素結合型ワトソン-クリック塩基対  $\text{caU}\text{-A}$  を形成する。一方、4 位のカルボニル基と 5 位に導入したカルボキシ基が二座配位子として機能し、金属錯体型塩基対( $\text{caU}\text{-M-caU}$ )を形成することが期待された。そこで、 $\text{caU}$  塩基を導入した DNA 二重鎖を合成し、各種金属イオン存在下での金属錯体形成挙動を DNA 二重鎖融解実験、円二色性(CD)スペクトルを用いた滴定実験、および質量分析により評価した。さらに、 $\text{caU}\text{-caU}$  対もしくは  $\text{caU}\text{-A}$  対を含む二重鎖の熱的安定性を、金属イオンの存在下・非存在下で比較し、鎖交換反応への応用可能性を評価した。

### 4. 研究成果

#### (1) 5-ヒドロキシウラシル塩基を用いた DNA 鎖交換反応の開発 (図 2)

5-ヒドロキシウラシル( $\text{U}^{\text{OH}}$ )は、DNA 二重鎖中で水素結合型塩基対( $\text{U}^{\text{OH}}\text{-A}$ )および金属錯体型塩基対( $\text{U}^{\text{OH}}\text{-Gd}^{\text{III}}\text{-U}^{\text{OH}}$  等)を形成する「ヤヌス型核酸塩基」である。そこで、末端に 3 個の  $\text{U}^{\text{OH}}$  塩基を含む互いに相補的な 15 塩基長の DNA 鎖(1 および 2)、および  $\text{U}^{\text{OH}}$  の代わりに A を含む 1 の相補鎖(3)を合成し、金属錯体型塩基対形成を駆動力とする DNA 鎖交換反応の検討を行った。まず、末端に 3 個の  $\text{U}^{\text{OH}}\text{-U}^{\text{OH}}$  塩基対を有する DNA 二重鎖 1-2 に対し  $\text{Gd}^{\text{III}}$  イオンを添加し、

金属錯体型塩基対の形成を評価した。紫外可視吸収スペクトルに基づく滴定実験、およびESI-TOF質量分析により、3個のGd<sup>III</sup>イオンが結合した1・2・Gd<sup>III</sup><sub>3</sub>が形成したことがわかった。対照実験と合わせ、DNA二重鎖中で3対のU<sup>OH</sup>-Gd<sup>III</sup>-U<sup>OH</sup>塩基対が形成しことが示唆された。

次に、Gd<sup>III</sup>イオンの非存在下・存在下で二重鎖融解実験を行い、熱的安定性を評価した。3対のU<sup>OH</sup>-U<sup>OH</sup>対を有する二重鎖1・2では、3当量のGd<sup>III</sup>イオンの添加により+25℃の非常に大きな熱的安定化を示した。これは金属錯体型塩基対U<sup>OH</sup>-Gd<sup>III</sup>-U<sup>OH</sup>の形成により、二重鎖間が配位結合により架橋されたためと考えられる。一方、3対のU<sup>OH</sup>-A塩基対を含む二重鎖1・3では、-4℃の不安定化が見られた。Gd<sup>III</sup>イオンがU<sup>OH</sup>塩基に結合することで、U<sup>OH</sup>-A間の水素結合が弱まったためと考えられる。両者の二重鎖融解温度(T<sub>m</sub>)を比較により、Gd<sup>III</sup>イオン非存在下ではU<sup>OH</sup>-Aを含む二重鎖1・3(T<sub>m</sub> = 43℃)の方が、U<sup>OH</sup>-U<sup>OH</sup>を含む二重鎖1・2(39℃)よりも熱的に安定であった。一方、3当量のGd<sup>III</sup>を加えると、二重鎖1・2(64℃)の方が二重鎖1・3(38℃)よりも安定になった。以上より、Gd<sup>III</sup>イオンの添加により、二重鎖1・2および1・3の熱的安定性を逆転できることが示された。このことは、U<sup>OH</sup>塩基を含むDNA鎖1の二重鎖形成の相手鎖を、Gd<sup>III</sup>イオンを外部刺激として交換できること、すなわち金属錯体形成を駆動力としたDNA鎖交換が可能であることを強く支持する結果である。

続いて、3本のDNA鎖(1, 2および3)を混合・アニーリングし、非変性ポリアクリルアミドゲル電気泳動により二重鎖形成の選択性を評価した。その結果、Gd<sup>III</sup>イオン非存在下では約70%の収率でU<sup>OH</sup>-A塩基対を有する二重鎖1・3が形成した。一方、3当量のGd<sup>III</sup>存在下では、Aを含む一本鎖3が放出され、約80%の収率でU<sup>OH</sup>-Gd<sup>III</sup>-U<sup>OH</sup>を含む二重鎖1・2が形成したことが示唆された。U<sup>OH</sup>塩基をT塩基に置き換えたDNA鎖を用いた場合は、Gd<sup>III</sup>イオンを加えても二重鎖形成挙動に変化が生じなかったことから、U<sup>OH</sup>の金属錯体形成によりDNA鎖1の会合挙動を変換できたことが示された。

さらに、25℃の等温条件下でDNA鎖交換を試みた。二重鎖1・3とDNA鎖2の当量混合物に3当量のGd<sup>III</sup>イオンを加えると、二重鎖1・2への鎖交換が4時間で約70%進行した。この速度は天然DNA鎖の鎖交換反応と同程度であった。紫外可視吸収スペクトルの時間変化はGd<sup>III</sup>錯体の形成が速やかに進行したことを示しており、U<sup>OH</sup>-Gd<sup>III</sup>-U<sup>OH</sup>錯体形成をトリガーとして鎖交換が誘起されたと考えられる。さらに、EDTAを加えてGd<sup>III</sup>イオンを除去したところ、二重鎖1・2から二重鎖1・3への逆向きの鎖交換が進行した。また、Gd<sup>III</sup>イオンとEDTAを交互に繰り返し加えることで、可逆な鎖交換を連続して誘起することにも成功した(図3)。

以上により、5-ヒドロキシウラシル(U<sup>OH</sup>)塩基を末端に導入したDNA鎖を用いることで、Gd<sup>III</sup>イオンの添加を外部刺激としたDNA鎖交換反応の誘起に成功した。この鎖交換反応は可逆であることから、DNA分子マシンや機能性核酸の活性スイッチングへの応用が期待される。

## (2) 5-カルボキシウラシル塩基を用いた金属錯体型塩基対の形成(図4)

金属配位駆動のDNA鎖交換反応に用いる「ヤヌス型核酸塩基」として、5-カルボキシウラシル塩基(caU)に着目し、その金属錯体形成挙動を評価した。中央に3対のcaU-caU塩基対を導入した15塩基対長のDNA二重鎖4・5を合成し、種々の金属イオン存在下、二重鎖融解実験を行った。その結果、Cu<sup>II</sup>イオンやGd<sup>III</sup>イオンの添加により、二重鎖の安定性が顕著に上昇することを見出した。例えば、二重鎖4・5の融解温度(T<sub>m</sub>)は17.7℃であったが、3当量のCu<sup>II</sup>イオンを添加すると48.4℃となり、ΔT<sub>m</sub> = +31℃の大きな熱的安定化を示した。一方、caU塩基

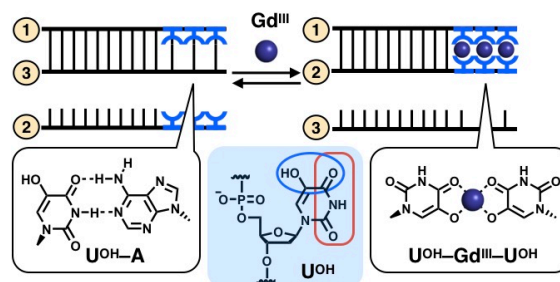


図2 5-ヒドロキシウラシル(U<sup>OH</sup>)塩基を導入したDNA鎖を用いた金属配位駆動型DNA鎖交換反応

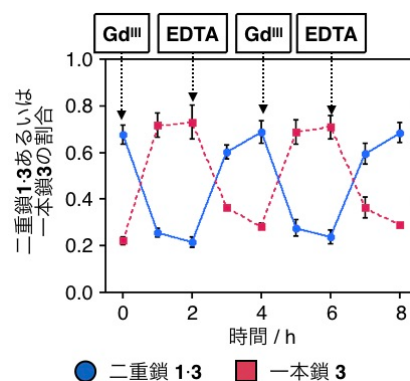


図3 Gd<sup>III</sup>イオンの添加・除去を外部刺激とした金属配位駆動型DNA鎖交換反応。[DNA] = 2 μM, [Gd<sup>III</sup>]/[DNA] = 3 eq. in 10 mM HEPES buffer (pH 8.0), 100 mM NaCl, 25℃.

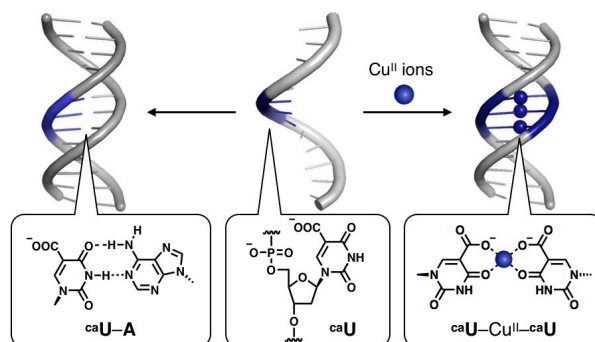


図4 5-カルボキシウラシル(caU)塩基が形成する水素結合型塩基対(caU-A)と金属錯体型塩基対(caU-Cu<sup>II</sup>-caU)。

を天然のチミン(T)塩基に置き換えた DNA 二重鎖では金属イオン添加による融解挙動の変化は見られなかった。このことから、Cu<sup>II</sup>イオンが<sup>ca</sup>U塩基に選択的に結合し、金属配位結合により二重鎖が架橋されたことが示された。さらに、融解実験や円二色性(CD)スペクトル測定に基づくCu<sup>II</sup>イオンの滴定実験、およびESI-TOF質量分析測定により、DNA二重鎖に3個のCu<sup>II</sup>イオンが結合した三核錯体4・5・Cu<sup>II</sup><sub>3</sub>の形成が示された。DNA二重鎖4・5は3対の<sup>ca</sup>U-<sup>ca</sup>U塩基対を有するため、二重鎖中で3対の金属錯体型塩基対<sup>ca</sup>U-Cu<sup>II</sup>-<sup>ca</sup>U塩基対を形成したと考えられる。

次に、<sup>ca</sup>U塩基のDNA鎖交換反応への応用を目指し、Cu<sup>II</sup>イオン添加によるDNA二重鎖の安定性の制御を試みた。中央に3対の<sup>ca</sup>U-A塩基対を導入した15塩基対の二重鎖4・6(T<sub>m</sub>=41.2°C)に対してCu<sup>II</sup>イオンを加えると、二重鎖融解温度が下がり、6当量のCu<sup>II</sup>存在下では34.0°C(ΔT<sub>m</sub>=-7.2°C)にまで低下した。対照実験から、<sup>ca</sup>U塩基にCu<sup>II</sup>イオンが結合し<sup>ca</sup>U-A塩基対が選択的に不安定化されたためと考えられる。融解温度(T<sub>m</sub>)を比較すると、Cu<sup>II</sup>イオン非存在下では<sup>ca</sup>U-A塩基対を含むDNA二重鎖4・6がもっとも安定であり、6当量のCu<sup>II</sup>イオン存在下では、<sup>ca</sup>U-Cu<sup>II</sup>-<sup>ca</sup>U塩基対を形成したDNA二重鎖4・5がより安定となった。このことは、<sup>ca</sup>U塩基を導入したDNA鎖の会合挙動をCu<sup>II</sup>イオンによって制御できることを示している。

以上より、<sup>ca</sup>U塩基もU<sup>OH</sup>塩基と同様に、金属配位をトリガーとしたDNA鎖交換反応に適した「ヤヌス型人工核酸塩基」として機能することが示された。<sup>ca</sup>U塩基を含むDNA鎖を用いることで、Cu<sup>II</sup>イオンの添加に応答するDNA鎖交換反応の実現できると考えている。さらに、Cu<sup>II</sup>イオンの酸化還元を利用した酸化還元応答性のDNA鎖交換反応の開発や、複数のヤヌス型人工塩基を用いた論理演算回路への応用が期待される。

以上のように本研究では、天然核酸塩基と水素結合型塩基対を形成し、かつ金属イオン存在下では配位結合により対合して金属錯体型人工塩基対を形成する「ヤヌス型核酸塩基」を合成し、「水素結合型塩基対⇌金属錯体型塩基対」の可逆変換に基づくDNA鎖交換反応の開発を行った。5-ヒドロキシウラシル(U<sup>OH</sup>)を導入したDNA鎖を用い、水素結合型塩基対U<sup>OH</sup>-Aと金属錯体型塩基対U<sup>OH</sup>-Gd<sup>III</sup>-U<sup>OH</sup>の組み換えにより、Gd<sup>III</sup>イオン添加を外部刺激とした可逆なDNA鎖交換を実現した。さらに新規ヤヌス型人工塩基として5-カルボキシウラシル(<sup>ca</sup>U)を設計し、DNA二重鎖中で水素結合型塩基対<sup>ca</sup>U-Aと金属錯体型塩基対<sup>ca</sup>U-Cu<sup>II</sup>-<sup>ca</sup>Uの双方を形成することを見出し、DNA鎖交換反応に適した「ヤヌス型核酸塩基」として機能することが示された。水素結合型・金属錯体型の二種類の塩基対モードの相互変換に基づくDNA鎖交換反応は、スイッチング能を有する機能性核酸やDNA分子マシンへの応用が可能であり、本研究で開発した「ヤヌス型塩基対」はその新規ビルディングブロックとして有用であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① [Yusuke Takezawa](#), Jens Müller, Mitsuhiro Shionoya, “Artificial DNA Base Pairing Mediated by Diverse Metal Ions”, *Chem. Lett.*, **2017**, 46, 622–633. DOI: 10.1246/cl.160985 (査読あり)
- ② Kotaro Nishiyama, [Yusuke Takezawa](#), Mitsuhiro Shionoya, “pH-Dependence of the Thermal Stability of Metallo-DNA Duplexes Containing Ligand-Type 5-Hydroxyuracil Nucleobases”, *Inorg. Chim. Acta*, **2016**, 452, 176–180. DOI: 10.1016/j.ica.2016.04.040 (査読あり)
- ③ [Yusuke Takezawa](#), Teruki Kobayashi, Mitsuhiro Shionoya, “Effects of Magnesium Ions on the Enzymatic Synthesis of Ligand-bearing Artificial DNA by Template-independent Polymerase”, *Int. J. Mol. Sci.*, **2016**, 17, 906. DOI:10.3390/ijms17060906 (査読あり)
- ④ [Yusuke Takezawa](#), Shuhei Yoneda, Jean-Louis H. A. Duprey, Takahiro Nakama, Mitsuhiro Shionoya, “Metal-responsive Structural Transformation between Artificial DNA Duplexes and Three-Way Junctions”, *Chem. Sci.*, **2016**, 7, 3006–3010. DOI: 10.1039/C6SC00383D. (査読あり)
- ⑤ Teruki Kobayashi, [Yusuke Takezawa](#), Akira Sakamoto, Mitsuhiro Shionoya, “Enzymatic Synthesis of Ligand-bearing DNAs for Metal-mediated Base Pairing Utilising a Template-independent DNA Polymerase”, *Chem. Commun.*, **2016**, 52, 3762–3765. DOI: 10.1039/C5CC10039A (査読あり)

[学会発表] (計49件)

- ① 森 圭太・西山 康太郎・[竹澤 悠典](#)・塩谷 光彦, “5-ヒドロキシウラシル塩基の金属錯体形成を駆動力とした可逆なDNA鎖交換反応”, 日本化学会第99春季年会, 2019年
- ② [Yusuke Takezawa](#), Akira Suzuki, Manabu Nakaya, Mitsuhiro Shionoya, “Metal-dependent regulation of DNA duplex stability based on the metal complexation of 5-carboxyuracil nucleobases”, 日本化学会第99春季年会, 2019年
- ③ 仲谷 学・鈴木 暁・[竹澤 悠典](#)・塩谷 光彦, “5-カルボキシウラシル塩基のCu(II)錯体形成によるDNA二重鎖安定化: 修飾塩基の導入数の効果”, 第12回バイオ関連化学シンポジウム, 2018年
- ④ 森 圭太・西山 康太郎・[竹澤 悠典](#)・塩谷 光彦, “5-ヒドロキシウラシル塩基を末端に有するDNA鎖を用いた金属配位駆動型DNA鎖交換反応の開発”, 第12回バイオ関連化学シンポジウム, 2018年
- ⑤ [Yusuke Takezawa](#), Kotaro Nishiyama, Akira Suzuki, Mitsuhiro Shionoya, “Construction of Metallo-



DNA Duplexes by Using 5-Substituted Uracil Nucleobases as Metal Ligands”, The 43<sup>rd</sup> International Conference on Coordination Chemistry (ICCC2018), 2018 年

- ⑥ Yusuke Takezawa, Akira Suzuki, Kotaro Nishiyama, Mitsuhiko Shionoya, “Metal-dependent Thermal Stabilization of DNA Duplexes containing 5-Carboxyuracil Nucleobases”, 錯体化学会第 68 回討論会、2018 年
- ⑦ 森 圭太・西山 康太郎・竹澤 悠典・塩谷 光彦、”5-ヒドロキシウラシル塩基の金属錯体形成に基づく DNA 二重鎖の熱的安定化：修飾塩基の導入位置の検討”、錯体化学会第 68 回討論会、2018 年
- ⑧ 鈴木 暁・竹澤 悠典・塩谷 光彦、”5-カルボキシウラシル塩基を導入した DNA 二重鎖の金属錯体形成に基づく熱的安定化”、第 11 回バイオ関連化学シンポジウム、2017 年
- ⑨ Yusuke Takezawa, Kotaro Nishiyama, Mitsuhiko Shionoya, “Metal-dependent Thermal Stability of DNA Duplexes containing 5-Hydroxyuracil Nucleobases”, The 6th Asian Conference on Coordination Chemistry (ACCC6), 2017 年
- ⑩ Kotaro Nishiyama, Yusuke Takezawa, Mitsuhiko Shionoya, “Metal-responsive Bifacial Nucleobase Pairing of 5-Hydroxyuracils inside DNA Duplexes”, The 43rd International Symposium on Nucleic Acids Chemistry, 2016 年
- ⑪ 西山 康太郎・竹澤 悠典・塩谷 光彦、”5-ヒドロキシウラシル塩基の pH 依存的金属錯体形成を利用した DNA 二重鎖の安定性制御”、第 10 回バイオ関連化学シンポジウム、2016 年

[図書] (計 1 件)

- ① Yusuke Takezawa, Jens Müller, Mitsuhiko Shionoya, “Self-Assemblies Based on Metal-Mediated Artificial Nucleobase Pairing” in *Comprehensive Supramolecular Chemistry II*, Elsevier Ltd., 2017, 259–293.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/~bioinorg/>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。