

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(S)
研究期間：2005～2009
課題番号：17105003
研究課題名(和文) 水と酸素の相互変換分子触媒の創製
研究課題名(英文) Synthesis of Molecular Catalysts for Interconversion between Water and Oxygen
研究代表者 成田 吉徳 (NARUTA YOSHINORI) 九州大学・先導物質化学研究所・主幹教授 研究者番号：00108979

研究成果の概要(和文)：再成可能エネルギーによる水の分解による酸素/水素生産とその逆反応による電力等への変換は近未来に想定される水素エネルギー社会の基本となる化学反応である。その中において四電子変換を必要とする両反応を高いエネルギー効率で行える触媒が重要である。現行の触媒は不十分であることから、生体中で対応する光合成と呼吸に関与する金属酵素を規範とし研究を進めた結果、その合理的設計指針を解明し、分子触媒の創製に成功した。

研究成果の概要(英文)：The decomposition of water to oxygen/hydrogen by the renewable energy and its inverse reaction, oxygen reduction to water, are fundamental ones in hydrogen economy. Creation of catalysts to perform both four-electron reactions in high energy-efficiency is important for realizing it. However, since the existing catalysts are still immature and less efficient, we have studied to obtain deep understanding on these reactions modeling of metalloenzymes, which work in photosynthesis and respiration. According to this research, we succeeded to elucidate both reactions mechanism with elaborate (functional) models of the enzymes and to propose them as the excellent molecule catalysts.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	24,300,000	7,290,000	31,590,000
2006年度	16,300,000	4,890,000	21,190,000
2007年度	14,300,000	4,290,000	18,590,000
2008年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
2009年度	12,400,000	3,720,000	16,120,000
総計	79,700,000	23,910,000	103,610,000

研究分野：分子触媒化学、生物無機化学

科研費の分科・細目：分子触媒化学、生物無機化学

キーワード：環境調和型反応、分子触媒、生物無機化学、光合成、酸素発生中心、呼吸、末端酸化酵素、燃料電池

1. 研究開始当初の背景

地球上では35億年前から、光合成が始まり、太陽エネルギーにより水を酸化分解し、得られた電子を二酸化炭素還元に使っている。一方、好気性生物は呼吸により炭水化物より得た電子を使い酸素を還元し、生じるエネルギーを用いて生存している。

この様に生物が作り上げた循環型エネルギー利用システムは次世代の環境に負荷を与えないエネルギー利用=水素エネルギー社会の規範となる。しかし、水分解と酸素還元は、いずれも四電子酸化還元過程であることから、反応制御が困難なために、エネルギー効率の低下と活性酸素種の生成、な

らびに貴金属触媒を必要とするなど、その重要性に反して諸課題が学術的に未解決である。

2. 研究の目的

- (1) 高選択的・高エネルギー効率で進む光化学系 II の酸素発生中心における水の酸化・酸素発生反応をマンガン含有分子触媒により実現し、その機構と触媒に求められる要件を明らかにする。また、その効率向上により高い触媒回転数を目指す。
- (2) 末端酸化酵素活性中心と関連した多様な化学モデル分子を用いて反応中間体を解析し、酸素反応機構を明らかにする。
- (3) 合理的に設計した水の酸化・酸素還元分子触媒を創製する。
- (4) これらを通して水素エネルギー社会と生命科学への寄与を目指す。

3. 研究の方法

- (1) 末端酸化酵素（チトクロム *c* 酸化酵素; CcO）の活性中心モデルとして、多様な銅錯体結合・鉄ポルフィリン、及び全ての残基を一分子内に含む「完全モデル分子」を合成し、共鳴ラマン分光法（色素レーザー、CCD 検出器）や ESR を縦横に活用して酸素活性化中間体の追跡し、中間体の構造を決定。併せて、各残基の役割と反応機構を決定した。
- (2) 酸素活性化を行うヘム含有酵素（CytP450, ヘムオキシダーゼ、NO 還元酵素、CcO やペルオキシダーゼ類）に共通するヘム活性中心構造モデルとして軸配位子を共有結合で固定したモデル錯体を用い酸素活性化過程において生成するとされる低スピン鉄(III)(ヒドロ)ペルオキシ錯体の選択的な生成とその同定、並びに関連したペルオキシ錯体との構造・反応の関連性を明らかにする。
- (3) 光合成酸素発生中心の機能モデルとして耐久性の高いマンガンポルフィリン二量体を合成し、化学酸化剤を用いた量論反応による反応中間体の構造決定と水中での陽極酸化による水の触媒的酸化能の評価を行った。

4. 研究成果

- (1) チトクロム *c* 酸化酵素活性点「完全モデル」における酸素活性化反応追跡による反応機構と各残基の役割の解明

チトクロム *c* 酸化酵素活性点には 4 種の残基 [Tyr-His, His₃Cu_B, heme a₃, His_{ax}] が存在している。酸素還元（活性化）に対するそれぞれの寄与、および銅部位を含めて生成する中間体を解明するために、全ての残基を 1 分子内に持つ完全モデルを合成した（図 1）。これを用いた酸素活性化反応

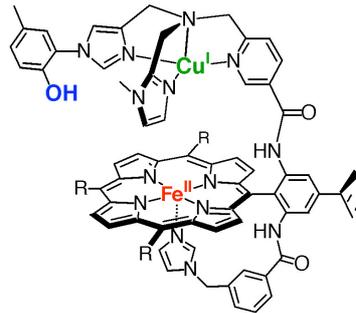
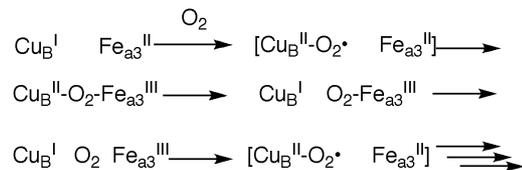


図 1. 酵素活性中心に存在する全ての残基を有する「完全モデル」

を低温で行った結果、次の結論が得られた。
(i) モデル還元体と酸素との反応により最初に生成する中間体は銅・ヘム間にペルオキシ架橋 (Cu^{II}-O-O-Fe^{III}) を持つ酸素付加体である。

微量の水の共存下では、このペルオキシ架橋体は容易に鉄スーパーオキシ錯体 (Fe^{III}-O-O·) へと変換され、同時に銅サイトは還元体(Cu^I)に戻った。このようなペルオキシ体からスーパーオキシ体への変換は大変希少な例である。この反応の駆動力は分子内にある Tyr 等価体とペルオキシ酸素原子間に水が水素結合し水素結合ネットワークを介して安定化するためであると考えられた。また、触媒反応中の CcO 酵素の時間分解分光法により酸素との反応により最初に生成する種として観測された酸素付加体がヘム-スーパーオキシ錯体である事とも良く一致している。

- (ii) このスーパーオキシ錯体は Cu^I, Tyr-His 共存下で見かけ上、安定であり、低温条件下では、不活性気体置換や真空条件下においても酸素を可逆的に脱着せず安定であることが明らかになった。一方、Tyr 等価体の水酸基を保護したモデルにおいては一般の鉄ポルフィリン類と同様に酸素の可逆的な吸脱着を行うことから、完全モデル錯体におけるスーパーオキシ錯体の安定性増大には Tyr 等価体の水酸基との水素結合が大きく寄与していると結論づけられた。また、還元型 CcO と酸素の反応において最初に銅(Cu_B)-スーパーオキシ錯体が生成するとの事実と本モデルでの架橋ペルオキシ体→鉄スーパーオキシ錯体への変換反応と考え併せると、酵素内では次のような反応サイク



ルにより一旦反応サイトへ取り込まれた酸素を逃がさないようにする機構の存在が本モデル研究より提唱できた。CcOは細胞内部ミトコンドリア中の酸素分圧の低い部分に存在し、高速度での酸素還元を触媒していることを考え併せると本機構の存在は合理的である。このモデル錯体には他に電子供与サイトを持たないことから、酵素「混合原子価体」(Cu_Bおよびheme a₃部分のみが還元型)と同等である。スーパーオキシ錯体への電子供与は行わない、ことが明らかになった。これよりTyrは電子供与体としてよりプロトン供与体として機能していると結論づけた。また、「混合原子化体」においてheme a₃スーパーオキシ体が更に一電子還元を行う供与体は同じ反応サイトにあるCu_BやTyrではなく別の種であると考えられる。

(iii) 本モデルにおいて安定に生成したスーパーオキシ錯体を外部からの一電子還元剤添加により還元後、酸の添加によりヘム側はFe(III)=O (Compound II)、銅側はCu(II)へと変換されることよりこの過程において酸素活性化が起こり、酸素-酸素結合の均等解裂が起こったと結論づけられた。

(iv) その他、銅錯体結合鉄ポルフィリンにおいて、銅側の配位子を各種のN3とN4とすることにより銅-鉄間に形成されるペルオキシ構造は $\mu-\eta^2:\eta^2$, $\mu-\eta^2:\eta^1$ など多様なモードでの酸素付加体の生成が明らかになり、錯体の反応性の面からの興味を持たれた。

(2) ヘム含有酵素における酸素活性化反応のシミュレーションと共通中間体である(ヒドロ)ペルオキシ錯体の選択的生成

ヘムFe(III)(ヒドロ)ペルオキシ錯体(end-on型、略称: compound 0)は酸素活性化における主要な中間体であるが、過酸化水素の付加体であり、熱的に極めて不安定であることから、これまで溶液中で選択的合成は困難とされていた。また、関連したside-on型構造を取るペルオキシ錯体との関連や相互変換も不明であり、上記、CcOの反応機構解明においても主要な中間体となると考えられることから、イミダゾール軸配位子を共有結合で固定したヘム酵素活性中心モデル(FeTMPIm、図2)を合成し、その反応と生成物の分光学的解析を進め、以下の成果を得た。

(i) 酸素付加体のプロトン共役電子移動(PCET)によるヒドロペルオキシ錯体の選択的合成 酸素活性化を行うヘム酵素においては、PCET機構により活性化エネルギーを下げてヒドロペルオキシ体生成を行っ



図2. 酸素活性化ヘム酵素活性中心モデル

ている。その溶液内での再現はこれまで困難とされていたが、本モデル錯体を用いることにより純度良く溶液中で合成することに成功した。

(ii) 低温溶液中での超산화物イオン(O₂^{•-})とFe(II)錯体間での反応によるend-on型ペルオキシドの合成 低温(-75°C)でFe^{II}TMPImとO₂^{•-}との反応では従来のイミダゾール配位を持たない鉄錯体と異なり低スピンend-on型ペルオキシドの生成に成功した。この生成物にプロトン性溶媒を加えるとヒドロペルオキシドへと変換した。(iii) 中間温度での超산화物イオン(O₂^{•-})とFe(II)錯体間での反応によるside-on型ペルオキシドの生成とend-on型ペルオキシドへの変換 1978年にJ. S. Valentineらにより報告されたように、O₂^{•-}と鉄(II)錯体との反応と同様、Fe^{II}TMPImは高スピンside-on型ペルオキシFe(III)体を与えた。従来の知見では、この高スピンside-on型ペルオキシドは弱い嗅覚性を示す以外には反応性に乏しいことが知られている。本研究の場合、この反応生成物にプロトン性溶媒を加えると選択的にend-on型ヒドロペルオキシドへと変換することが発見された。これは、当初のO₂^{•-}と鉄(II)錯体との反応前にイミダゾールが配位し、O₂^{•-}との反応後には7配位錯体となっていることと考え



図3. モデル錯体と各種の反応による(ヒドロ)ペルオキシ種の生成.

[4. 研究成果 (続き)]

られ、これまで、不活性とされていた side-on 型ペルオキシドの反応性を根本から覆す結果となった(図 3)。この結果より、ヘム酵素においてはヒスチジン等の軸配位子が存在することにより、酸素活性化の重要な中間体である end-on 型ペルオキシドを選択的に与えるようになっていくと結論づけられた。

(v) 液体窒素凍結試料の背面散乱型共鳴ラマンスペクトル測定系の製作 共鳴ラマンスペクトルは本研究で用いた試料のように強い吸収帯を持つ場合、その主要吸収帯のレーザー光励起により周辺の配位子類の振動スペクトルを直接観測ですることにより、配位子や配位構造等を明らかにすることができる有力な分光法である。熱的に極めて不安定な溶液試料について、レーザー光による励起下では低温に保持しても分解は免れない。そこで本研究においては液体窒素凍結下での散乱スペクトル測定系を製作し、反応において生成する各種中間体の同定に活用した。この方法の利点として、

① 凍結試料を液体窒素中で回転させることにより局部的加熱や光分解を大きく抑制できる。②液体窒素凍結により分解を最小限に抑えられる結果、散乱光の長時間の積算が可能となり S/N の良好な質の高いスペクトルが得られる。③ 例え、光分解等が起こっても、サンプル上のレーザー照射位置を変えることにより新たな試料として積算が可能である。

(3) 光合成酸素発生中心の機能モデルとしてのマンガンポルフィリン二量体の水分子酸化分子触媒としての展開

本研究グループにおいて、植物光合成系 II に存在し、水の酸化触媒として作用している酸素発生中心(OEC)の反応にヒントを得て、独自にマンガンポルフィリン二量体創案した。これは均一溶液中で低い触媒回転数ながら (TN \approx 9) 触媒的に水を酸化し酸素発生を行う。また、酸化剤を用いた酸化反応により、中心のマンガニオンが (HO)Mn^V(=O) の高原子価構造をもつ反応中間体の生成を立証し、酸添加によるプロトン化により瞬時に水の酸化と定量的な酸素発生を実証した。本研究においてはこのモデル錯体を分子触媒としての展開の可能性を検討し、従来の不均一、均一系水の分解触媒の中で最も低過電圧で水分解を高い触媒活性で行うことを実証した。これまでのマンガンポルフィリン二量体の酸化において、迅速な四電子酸化によりマンガ(V)種を生成することが、マンガ錯体の分解を抑制する上で鍵となる事が判明している。そこで、迅速な四電子酸化を可能とする

ようこの錯体を電極上に化学結合により固定することで酸化反応の向上を行った。その結果、水の標準酸化還元電位と比較して約 100 mV 以上の過電圧をかけることにより高い回転数 (>10⁶ 回、TOF \approx 100/sec) を達成した。この方法は、将来、水の分解だけでなく人工光合成系の創製にも有用な方法となる。

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 30 件)

1. Formation of an End-On Ferric-Peroxo Intermediate upon One-Electron Reduction of a Ferric-Superoxo Heme. J.-G. Liu, Y. Shimizu, T. Ohta, and Y. Naruta, *J. Am. Chem. Soc.* (査読有り) **2010**, *132*, 3672-3673.
2. Copper(II) and Nickel(II) hexafluorophosphate complexes Derived from a Monoanionic Porphyrin Analogue: solvato- and Thermochromism of the Ni complexes by Spin-Interconversion, M. Ishida, Y. Naruta, and F. Tani, *Dalton Trans.* (査読有り, Issue cover & hot paper) **2010**, *39*, 2651-2659.
3. A Novel Porphyrin-related Macrocyclic moiety as a fluorescent Mg(II) Ion Sensor, M. Ishida, Y. Naruta, and F. Tani, *Angew. Chem. Int. Ed.* (査読有り) **2010**, *49*, 91-94.
4. Using Synthetic Models to Probe the O₂ Metabolic Mechanism in Heme-Containing Enzymes, J.-G. Liu, T. Ohta, F. Tani, Y. Naruta, *Science of Future Molecular Systems* (査読無し) **2009**, *3*, 30-36.
5. Characterization of a Hydroperoxy-Heme Intermediate of a Synthetic Model: Conversion of a Side-on Peroxy to an End-on Hydroperoxy Complex, J.-G. Liu, T. Ohta, S. Yamaguchi, T. Ogura, Y. Sakamoto, Y. Maeda, and Y. Naruta, *Angew. Chem. Int. Ed.* (査読有り, VIP) **2009**, *48*, 9262-9267.
6. Synthesis and Characterization of a New Prostaglandin H Synthase Model, J. J. Reddy, T. Ohta, Y. Naruta, *Tetrahedron Lett.* (査読有り, 50th Anniversary Issue, Invited paper) **2009**, *50*, 3418-3421
7. Kinetic Investigation of the Process of Encapsulation of Small Hydrocarbon into a Cavitand Porphyrin. J. Nakazawa, Y. Sakae, M. Aida, and Y. Naruta, *J. Org.*

- Chem.* (査読有り) **2007**, 72, 9448-9455.
8. Synthetic Models of the Active Site of Cytochrome *c* Oxidase: Influence of a Tridentate vs Tetradentate Copper Chelate Bearing a His-Tyr linkage Mimic on the Dioxygen Adduct Formation by Heme/Cu Complexes, J.-G. Liu, Y. Naruta, and F. Tani, *Chem. Eur. J.* (査読有り) **2007**, 13, 6365-6378.
 9. Characterization of Phenoxy Radical in Model Complexes for the Cu_B site of Cytochrome *c* Oxidase: Steady-State and Transient Absorption, UV resonance Raman, EPR, and DFT Studies for [M^{II}BIAIPBr]Br, Y. Nagano, J.-G. Liu, Y. Naruta, T. Ikoma, S. Tero-Kubota and T. Kitagawa, *J. Am. Chem. Soc.* (査読有り) **2006**, 128(45), 14560-14570.
 10. 水素エネルギー社会の鍵: グリーン水素生産, 成田吉徳, 化学工業 (査読無し) **2007**, 58, 39-45.
 11. 光合成モデル系-水の酸化による酸素発生, 成田吉徳, 現代科学 (査読無し) **2006**, No. 424, pp. 24-30.
 12. Syntheses, Crystal Structures, and Single Small Molecule Encapsulation Properties of Cavitand-Porphyrins, J. Nakazawa, M. Mizuki, J. Hagiwara, Y. Shimazaki, F. Tani, Y. Naruta, *Bull. Chem. Soc. Jpn.* (査読有り) **2006**, 79, 1431-1443.
 13. Size-selective and Reversible Encapsulation of Single Small Hydrocarbon Molecules by a Cavitand-Porphyrin Species, J. Nakazawa, J. Hagiwara, M. Mizuki, Y. Shimazaki, F. Tani, and Y. Naruta, *Angew. Chem. Int. Ed.* (査読有り) **2005**, 44, 3744-3746.
 14. An Elaborate Functional Model of Cytochrome *c* Oxidase Active Site Displaying a Unique Conversion of a Heme- μ -peroxo-Cu^{II} Species to a Heme-superoxo/Cu^I, J.-G. Liu, Y. Naruta, and F. Tani, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2005** 44, 1836-1840 (2005).
 15. UV Resonance Raman Study of Model Complexes of the Cu_B Site of Cytochrome *c* Oxidase, Y. Nagano, J.-G. Liu, Y. Naruta, T. Kitagawa, *J. Mol. Struct.* **2005**, 735-736, 279-291.
 16. Selective Formation of a Stable μ -Peroxo Ferric Heme-Cu^{II} Complex from the Corresponding μ -Oxo Fe^{III}-Cu^{II} Species and Hydrogen Peroxide, T. Chishiro, Y. Shimazaki, F. Tani, and Y. Naruta, *Chem Commun.* **2005** (8), 1079-1081.

[学会発表] (計 292 件)

代表的基調講演、招待講演(部分)

1. Synthetic Heme Models Mimic the Formation of Peroxo- and Hydroperoxo-heme Intermediates Relevant to Dioxygen Activation in Heme-containing Enzymes, J.-G. Liu, Asian International Conference in Coordination, Organometallic, and Inorganic Chemistry in 90th Annual Spring Meeting of CSJ, Funabashi, 28/3/2010.
2. Peroxy to tan end-on Hydroperoxy, J.-G. Liu, T. Ohta, Y. Naruta, "Recent progress in Porphyrin-related Chemistry (40th international Workshop on Future Molecular Systems 2010), Fukuoka, Japan, 1/2/2010.
3. Dioxygen Activation on Chemical Models of Heme Enzymes, Y. Naruta, 12th international Symposium on Physical Organic Chemistry (KISPOC-12), Kyushu University, Fukuoka, Japan, 16/12/2009.
4. Dioxygen Activation on Chemical Models of Heme Enzymes, Symposium of Advancement on Biological Inorganic Chemistry (SaBIC), Y. Naruta, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, 4/11/2009.
5. Preparation of End-on Peroxy and Hydroperoxy Intermediates Relevant to Dioxygen Activation in Heme Enzymes and Cytochrome *c* Oxidase, Y. Naruta, International Workshop on Metalloprotein Functions, University of Hyogo, Harima, Japan, 31/7/2009.
6. Simulation of O₂ Activation/Reduction with Enzyme Active Site Models of Terminal Oxidases, Y. Naruta, J.-G. Liu, T. Ohta, H. Ogura, 14th International Conference on Biological Inorganic Chemistry (ICBIC-14), Nagoya, Japan, 26/7/2009.
7. 化学モデルを用いたヘムにおける酸素活性化とチトクロム *c* 酸化酵素酸素代謝機構, 成田吉徳, 平成 20 年度分子研研究会「配位子場制御に基づく機能性錯体の創成と応用～生体から触媒およびデバイスまで」, 岡崎, 18-19/7/2008.
8. Selective Preparation of End-on Ferric-Peroxo, Ferrous-Superoxo, and Ferric-Hydroperoxy Species in Solution, Y. Naruta, International Union of Material Research Society-International Conference in Asia, Nagoya, 12/12/2008.
9. Selective Preparation of End-on Metal Peroxy Complexes in a Solution and Their Relevance to Dioxygen Activation, Y. Naruta, J.-G. Liu, T. Ota, S. Yamaguchi, T. Ogura, *4th Asian Bioinorganic Chemistry*

- Conference (AsBIC IV), Jeju, Korea, 10-13/11/2008,
10. エネルギー変換酵素と触媒—理想と現実をつなぐ課題と展望, 成田吉徳、日本化学会第 89 春季年会 (アドバンステクノロジープログラム: 材料科学-未来材料), 船橋, 27-30/3/2008.
 11. Mutual Conversion Reactions between Water and Oxygen with Metal Complexes, Y. Naruta, 57th Coordination Chemistry Symposium, Nagoya, 25/9/2007.
 12. Oxygen Activation and Oxygen Reduction with Bio-inspired Chemical Models, Y. Naruta, 3rd Joint Symposium of Core Research Institutes, 'Multi-disciplinary Approach for Materials Synthesis', Fukuoka, 15/3/2008.
 13. Manganese porphyrin Dimers: functional Relevance to Oxygen Evolving Complex in Photosystem II, Y. Naruta, Y. Shimazaki, E. Tani, E. I. Solomon, S. DeBeer Geroge, 4th International Conference on Porphyrins and Phthalocyanines (ICPP-4), 2-7/7/2006, Rome, Italy.
 14. Modeling Study of Dioxygen Activation in Cytochrome *c* Oxidase Active Site, Y. Naruta, Taiwan Bioinorganic Symposium 2006 (TBICS-2006), Taipei, ROC, 6-7/10/2006,
 15. Oxygen Activation with Bio-inspired Model Complexes Relating to cytochrome *c* Oxidase, Y. Naruta, Asian Bioinorganic Chemistry Symposium (AsBIC-3), 31/10-3/11/2006, Nanjin, China.
 16. Hydrogen Production with Renewable Energy, Y. Naruta, Green Sustainable Chemistry Lectures, JCII, 7/12/2006, Tokyo, Japan.
 17. Modeling Study of Oxygen Activation in Cytochrome *c* Oxidase: Roles of Residues at the Active Site, Y. Naruta, J.-G. Liu, X.-M. Ouyang, T. Chishiro, T. Higa, and E. Tani, 12th International conference in Bioinorganic Chemistry (ICBIC-12), Ann Arbor, USA, 31/7-5/8/2005.
 18. Dioxygen Activation Chemistry of Metalloenzymes and Models, Y. Naruta, PACIFICHEM-2005 (Symposium: Dioxygen Activation Chemistry of Metalloenzymes and Models), Honolulu, Hawaii, USA, 15-20/12/2005.

[図書] (計 1 件)

1. Y. Naruta, Decomposition of Water: A Key for Hydrogen Economy in *Collection of Lectures in 'Chemistry: Life and Living enriched by Elements'*, Kubapro, Tokyo (2006)

pp. 130-145.

[その他]

ホームページ: <http://www.narutalab.ifoc.kyushu-u.ac.jp>

報道関係: 報文 No. 5 は次の新聞において報道された: 平成 21 年 10 月 31 日付け読売新聞、西日本新聞; 同 11 月 13 日付け科学新聞 次の論文誌にハイライトとして紹介された: *Nature*, 2010 年 464 巻、pp. 168-169 (1 月 14 日); *Angew. Chem. Int. Ed.* 2010 年 49 巻 pp. 2099-2101 (3 月 15 日).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

成田 吉徳 (NARUTA YOHSINORI)
九州大学・先導物質化学研究所・主幹教授
研究者番号: 00108979

(2) 研究分担者

谷 文都 (TANI FUMITO)
九州大学・先導物質化学研究所・准教授
研究者番号: 80281195

太田 雄大 (OHOTA TAKEHIRO)
九州大学・先導物質化学研究所・助教
研究者番号: 80281195
参画期間: H20. 7. 2~H22. 3. 31

島崎 優一 (SHIMAZAKI YUICHI)
九州大学・先導物質化学研究所・助教
研究者番号: 80335992
参画期間: H17~19 年度

千代 健文 (CHISHIRO TAKEFUMI)
九州大学・先導物質化学研究所・特任助教
研究者番号: 90398107
参画期間: H17~19 年度

劉 勁剛 (LIU JIN-GANG)
九州大学・先導物質化学研究所・学術研究員
研究者番号: 70380540
参画期間: H17. 4. 1~H19. 9. 30

欧陽 興梅 (OUYANG JING-MEI)
九州大学・先導物質化学研究所・学術研究員
研究者番号: 10423500
参画期間: H18. 4. 1~H18. 12. 31

(3) 連携研究者

劉 勁剛 (LIU JIN-GANG)
九州大学・先導物質化学研究所・特任准教授
研究者番号: 70380540
参画期間: H19. 10. 1~H22. 3. 31

小倉 尚志 (OGURA TAKASHI)
兵庫県立大学大学院・理学研究科・教授
研究者番号: 70183770