

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2006～2010

課題番号：18GS0207

研究課題名（和文）

還元系金属酵素の有機金属・クラスター化学

研究課題名（英文）

Organometallic and Cluster Chemistry in Metalloenzymes with Reducing Activities

研究代表者

巽 和行 (Tatsumi Kazuyuki)

名古屋大学・物質科学国際研究センター・教授

研究者番号：10155096

研究成果の概要（和文）：錯体・有機金属化学、構造生物学、理論化学の研究者を結集し、エネルギー問題等への対応に関連して最近注目を浴びている「還元系金属酵素」の化学研究に挑戦し、標的となるクラスター活性中心の化学合成や酵素モデル反応の達成に加え、新型活性中心構造を発見するなど、当初の目標を超える多くの成果を得た。例えば、ニトロゲナーゼやヒドロゲナーゼの良好な活性中心モデルとなる金属硫黄クラスター化合物の構築に成功し、酵素反応機構の化学研究の端緒を拓いた。また、新たに見いだした窒素分子を活性化する複核金属錯体の理論解析から、窒素分子活性化機構を明らかにし、ニトロゲナーゼなどの酵素反応機構に示唆を与えた。さらに、酸素耐性型新規[NiFe]ヒドロゲナーゼの研究から、先例のない[4Fe-3S]クラスターを発見した。

研究成果の概要（英文）：Through the integration of coordination/organometallic chemistry, structural biology, and theoretical chemistry, we have undertaken the chemical study of reductases, the importance of which has been noticed recently in connection with social needs for energy and food. Our accomplishments in this program have exceeded our expectations, and we have achieved significant results that provide clues in understanding the enzymatic function of reductases at the cluster active sites. We have succeeded in synthesizing favourable models of the active-sites of nitrogenase and hydrogenase, and their physicochemical properties have been clarified, enabling us to study the chemistry of these enzymes. From the theoretical analysis of the newly synthesized dinuclear complex that activates dinitrogen, we revealed its reaction mechanism, which also provides us with important information concerning the reaction mechanisms of nitrogenase and hydrogenases. We have also discovered the novel [4Fe-3S] cluster in the structure of an oxygen-tolerant [NiFe] hydrogenase.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	102,300,000	30,690,000	132,990,000
2007年度	88,000,000	26,400,000	114,400,000
2008年度	88,000,000	26,400,000	114,400,000
2009年度	88,000,000	26,400,000	114,400,000
2010年度	79,200,000	23,760,000	102,960,000
総計	445,500,000	133,650,000	579,150,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：基礎化学・無機化学

キーワード：金属-硫黄クラスター、ニトロゲナーゼ、ヒドロゲナーゼ、還元系金属酵素

1. 研究開始当初の背景

遷移金属元素を含む金属酵素はあらゆる生命活動に必須で、元素の特性を利用することによって温和な条件下で高効率・高選択反応を巧みに制御している。金属酵素の活性中心を人工的に合成して酵素機構を解明し、究極的には自然を凌駕する機能を新たに開発することが、化学者に課せられた重要かつ緊急の研究課題となっている。金属酵素の化学研究はこれまで、ヘム蛋白やオキシゲナーゼなどの酸化系金属酵素に偏重していたが、生命体の還元反応を触媒する「還元系金属酵素」の生化学研究が最近急速に発展し、ニトロゲナーゼやヒドロゲナーゼなど、活性中心のクラスター構造と機能に関して従来の化学常識を覆す知見が次々と明らかにされた。興味深いことに、還元系酵素の多くはクラスター活性中心に「有機金属部位」を持ち、生体内で有機金属反応の触媒として働く。活性中心のクラスター骨格は従来の合成概念では達成できない特異な構造を持ち、海外の化学者の新たな重要標的分子として特に注目を浴びており、我が国において、有機金属化学・遷移金属クラスター化学と生化学分野とが連携して、還元系金属酵素の機能に挑戦する新たな学術分野を世界に先駆けて確立することが緊急の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究課題では、未開拓であった還元系金属酵素の化学を解明することを目的とし、生化学分野と連携した新たな有機金属化学および遷移金属クラスター化学を展開させる。空気中の窒素を還元するニトロゲナーゼ、一酸化炭素代謝やアセチル化反応を行う CO-デヒドロゲナーゼ/アセチル-CoA シンターゼ、水素分子を可逆的にプロトンと電子に変換するヒドロゲナーゼなどの還元系金属酵素を対象とし、これらに存在する前例のない複雑で特異な構造をもつ金属硫黄クラスター活性中心を人工合成して、基質活性化反応や電子移動機能の機構解明をめざす。

3. 研究の方法

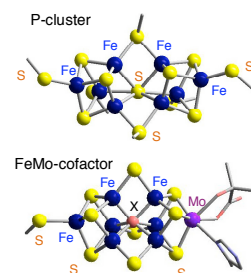
研究代表者らの名古屋大学グループ（巽和行、松本剛、大木靖弘）が本研究の中核を担い、有機金属錯体化学と金属クラスター化学を基盤として、還元系金属酵素活性中心の人工合成と機構解明を行う。対象研究は黎明期にあり、その推進には、有機金属反応化学・構造生物化学・理論化学の関連研究領域で卓越した業績をあげている研究者の協力が欠かせない。検討の結果、各分野を代表する研究者として吉澤一成（九大・理論化学）、樋口芳樹（兵庫県立大・構造生物化学）、川口博之（東工大・有機金属化学）が分担・連携

研究者として加わり、新たな学術を創成するための最強の研究組織を構築して本課題に取り組む。

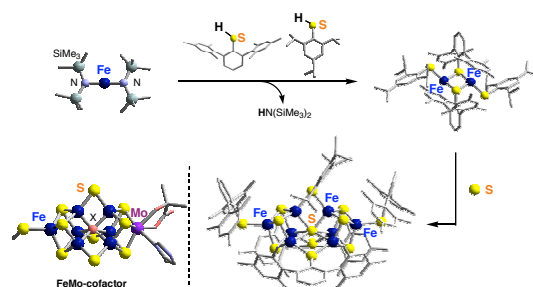
4. 研究成果

(1) ニトロゲナーゼ活性中心を模倣する鉄-硫黄クラスターの合成

ニトロゲナーゼには、ともに8金属原子を含む硫黄クラスターからなる、P-cluster と FeMo-cofactor（右下図）が存在する。これまでに我々は、非極性溶媒中でクラスターを構築する独自の自己集合反応を開発し、P-cluster の複雑な金属クラスター骨格を完璧に再現することに成功している。本研究では、非極性溶媒中で行う自己集合型反応の概念を発展させ、P-cluster の化学研究をさらに推進するとともに、FeMo-cofactor の構造に関連する新しい $[\text{Fe}_8\text{S}_7]$ 型クラスター等の合成に成功した。



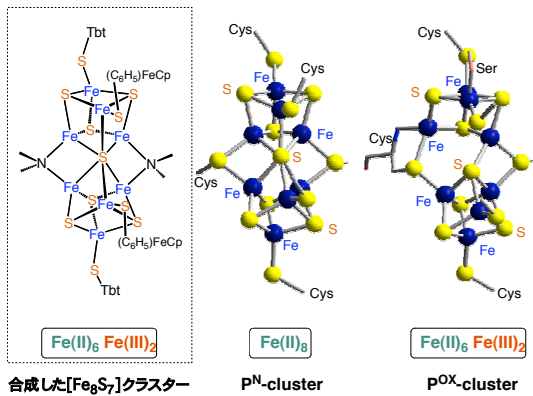
ニトロゲナーゼ活性部位の構造



非極性溶媒中で行う上記反応は、クラスター化反応を制御する指針として従来用いられてきた量論比の制御に加え、クラスターの酸化状態や、用いるチオラート配位子の立体効果による速度論的制御を複合的に利用できる革新的な手法であり、より精密な反応制御を可能とし、従来合成不可能であった新規鉄硫黄クラスターの合成が達成された。

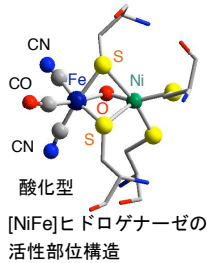
P-cluster モデル合成では、アミド置換 $[\text{Fe}_8\text{S}_7]$ クラスターに鉄錯体 $(\eta^5\text{-C}_5\text{H}_5)\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5\text{S})$ を導入し、続いてアミド配位子を高いチオラート類に置換して、計4つのチオラート配位子をもつ $[\text{Fe}_8\text{S}_7]$ クラスターの合成に成功した（次図）。合成したクラスターの酸化状態は全て $6\text{Fe(II)}\cdot 2\text{Fe(III)}_2$ であり、これは酸化型P-cluster (P^{OX})に対応する。また電気化学測定の結果、一連のクラスターは準可逆な2段階の1電子還元を経て還元型(P^{N})に対応する 8Fe(II) 状態を取りうることを示され、合成し

たクラスターは、P-cluster の主要な機能と考えられている $P^N \leftrightarrow P^{OX}$ の可逆な 2 電子酸化還元を再現する。

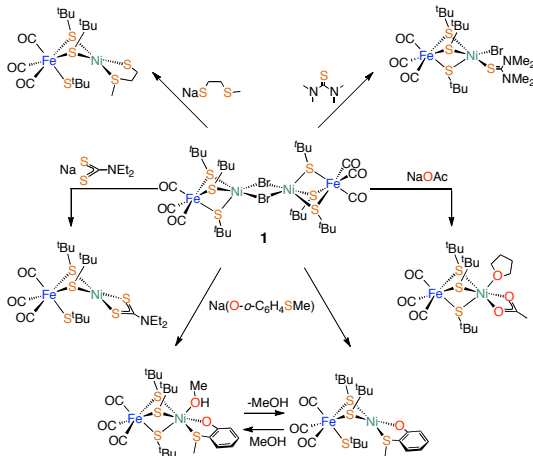


(2) [NiFe]ヒドロゲナーゼ活性中心の構造モデル合成および反応モデルの構築

自然界に広く存在する [NiFe]型ヒドロゲナーゼの活性部位 (右図) は、CO/CN を持つ鉄とニッケルがチオラートで連結された二核構造からなる比較的単純な骨格を持つ。しかし硫黄配位子および CN は鉄

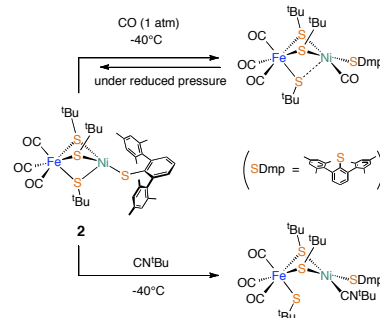


とニッケル両方に親和性が高く、また Fe(II)-CO 結合は熱的に不安定であるため、そのモデル合成は困難を極めていた。本研究では、合成前駆体として有用な鉄カルボニル/チオラート錯体を合成し、ニッケル錯体との反応から [NiFe]ヒドロゲナーゼの活性部位を高い精度で再現する鉄-ニッケル錯体の合成に成功した (下図)。



また生化学研究によって、[NiFe]ヒドロゲナーゼの機能が CO によって阻害されることが知られている。我々は CO 阻害型ヒドロゲナーゼの蛋白結晶構造を初めて明らかにするとともに、そのモデル錯体を合成した

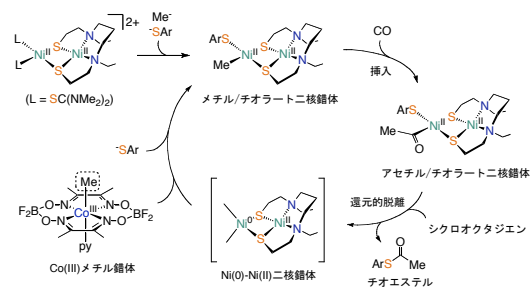
(次図)。すなわち、錯体 **1** から合成される錯体 **2** のニッケル上に CO が可逆的に配位することを見だし、ヒドロゲナーゼの CO 阻害過程モデルを構築した。



(3) アセチル CoA 合成酵素モデル構築に基づく反応機構解明

アセチル CoA 合成酵素(ACS)は炭素固定サイクルの一端を担い、CO デヒドロゲナーゼで生成した CO とコバラミン由来のメチル基を基質として、チオールである CoA のアセチル化を触媒する。ACS の活性中心は $[Fe_4S_4]$ クラスターとニッケル二核錯体からなり、CoA からアセチル CoA への変換反応はニッケル二核錯体によって触媒されると考えられている。本研究では ACS のニッケル二核部位に着目し、その構造を再現する錯体の反応を詳細に検討し、ACS の酵素機構に示唆を与える重要な成果を得た。

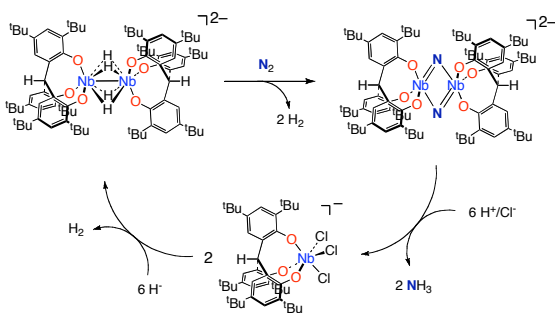
ニッケル二核部位にある Cys-Gly-Cys 配列を模倣する $[Ni_2S_2]$ 配位子をもつニッケル二核錯体 (右図の左上) にメチル基およびチオラートを導入して CO を作用させたところ、Ni-Me 結合に CO が挿入してアセチル/チオラート二核錯体が生成し、さらにアセチル基とチオラート配位子が還元的に脱離してチオエステルと Ni(II)-Ni(0)二核錯体が生成した。この Ni(II)-Ni(0)二核錯体は、メチルコバラミンに類似した Co(III)メチル錯体およびチオラートと順次反応してメチル/チオラート二核錯体を再生した。



この反応系は、アセチル CoA 合成酵素の機能モデルであり、ACS の酵素反応が Ni(II) ↔ Ni(0) のサイクルを利用した有機金属反応として理解できることを、実験化学的に初めて証明するものである。これは、還元系金属酵素の機能と有機金属化学の接点を明らかにした重要な成果である。

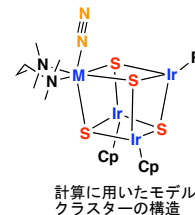
(4) 遷移金属錯体による窒素分子の活性化とその理論的研究

ニトロゲナーゼによって窒素分子が還元される反応機構は未解明であるが、金属ヒドリド種の生成は重要な反応過程の一つだと考えられている。この点に着目して金属-ヒドリド錯体と窒素分子の反応を検討し、 $N\equiv N$ 三重結合の切断に成功した。剛直な三脚型アリールオキシド配位子を持つニオブ-ヒドリド錯体は、アルゴン雰囲気下で単離できるが、これを1気圧の窒素分子にさらすと室温で速やかに反応し、 $N\equiv N$ 三重結合を切断してニトリド錯体を与えた。この反応ではヒドリド配位子が水素分子として脱離してニオブを還元し、 $N\equiv N$ 結合の切断に必要な電子を供給している。また得られたニトリド錯体は、プロトンと反応してアンモニアを生成した。つまり、一連の反応では、窒素分子、金属ヒドリド、プロトンから段階的にアンモニアを生成し、ニトロゲナーゼの機能を模倣する反応サイクルが構築されている。さらに、ニオブ-ヒドリド錯体を出発とした密度汎関数計算から、ヒドリド配位子に由来する水素原子と金属間結合が電子溜めとして働き、効率的に窒素分子を還元することも明らかにした。



一方、最近 FeMo-cofactor の構造的なモデルとして、ルテニウムおよびイリジウムが硫黄で架橋された $RuIr_3S_4$ クラスタ $[(Cp^*Ir)_3\{Ru(N_2)(tmeda)\}(\mu_3-S)_4]$ が窒素分子を配位子としてもつ初めてのキュバン型金属-硫黄錯体として報告された。このクラスタ上で窒素分子は活性化されるものの、プロトン付加を経る $N\equiv N$ 結合活性化は進行しないことが報告されている。しかし我々は1個の遷移金属原子と3個のイリジウム原子および4個の硫黄原子からなる骨格は窒素変換を行うための反応サイトとして良い選択肢であると考えている。なぜなら現在のところ $RuIr_3S_4$ クラスタが窒素分子を捕捉できる唯一のキュバン型錯体であり、これまでに知られている Ru 錯体よりも強く配位窒素を活性化できるためである。そこで本研究では、より高い窒素分子活性化能を有する新規キュバン型錯体の提案を目的とし、当該キュバン型クラスタの Ru を様々な遷移金属元素

に置き換えた右図の MIr_3S_4 クラスタ ($M = V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, W$) による窒素分子活性化について理論計算によって検討した。



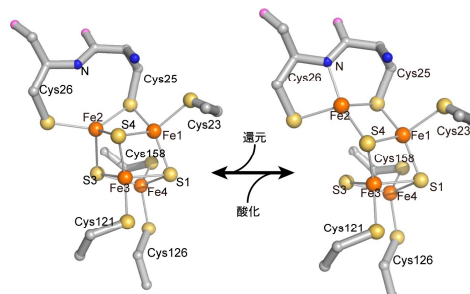
計算に用いたモデルクラスタの構造

その結果、 $M = Mo, W$

の場合に効率よく窒素分子が活性化され、末端 N 上をプロトン化が進行することが示唆された。この結果は、ニトロゲナーゼの窒素活性化部位である FeMo-co が Mo を含むことと関連して興味深い。

(5) 酸素耐性 [NiFe]ヒドロゲナーゼの構造解析

[NiFe]ヒドロゲナーゼのうち酸素耐性能をもつことが知られている膜結合型ヒドロゲナーゼの結晶化に世界に先駆けて成功し、X線結晶構造解析によってその構造の詳細を明らかにすることができた。電子伝達を担う鉄-硫黄クラスタは3つ存在し、そのうち触媒反応中心である Ni-Fe 活性部位のもっとも近くに位置する鉄-硫黄クラスタは、従来まで知られていた[4Fe-4S]-4Cys型ではなく、新規の構造である[4Fe-3S]-6Cys型であることがわかった。これまでに研究されていた標準型ヒドロゲナーゼは好気条件下では O_2 が活性部位に結合し、その活性が失われることが知られていた。構造解析の結果、酸素耐性能をもつ膜結合型ヒドロゲナーゼは、 O_2 雰囲気下で[4Fe-3S]-6Cys型の鉄-硫黄クラスタに次図に示したような特徴的な構造変化が起こることを見出した。さらに、この構造変化により鉄-硫黄クラスタは Ni-Fe 活性部位に1電子余分にあたえ、酸素による不活性化を防いでいることを明らかにした。今回の研究成果は、酸素によるヒドロゲナーゼの機能の損傷を克服するのに重要な知見であり、水素をエネルギーとして利用するための、酸素に安定な水素合成化学触媒や新規の燃料電池の開発研究への応用も期待される。



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216件：全て査読有)
うち16件を抜粋して以下に記載する。

- (1) Y. Ohki, Y. Igarawa, K. Tatsumi, "Synthesis of New [8Fe-7S] Clusters: A Topological Link Between the Core Structures of P-cluster, FeMo-co, and FeFe-co of Nitrogenases", *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 10457-10465 (2007). DOI:10.1021/ja072256b
- (2) Y. Ohki, K. Yasumura, K. Kuge, S. Tanino, M. Ando, Z. Li, K. Tatsumi, "Thiolate-bridged dinuclear iron (tris-carbonyl)-nickel complexes relevant to the active site of [NiFe] hydrogenase", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105**, 7652-7657 (2008). DOI:10.1073/pnas.0800538105
- (3) M. Ito, M. Kotera, T. Matsumoto, K. Tatsumi, "Dinuclear Nickel Complexes Modeling the Structure and Function of the Acetyl CoA Synthase Active-Site", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **106**, 11862-11866 (2009). DOI:10.1073/pnas.0900433106
- (4) Y. Ohki, M. Imada, A. Murata, Y. Sunada, S. Ohta, M. Honda, T. Sasamori, N. Tokitoh, M. Katada, K. Tatsumi, "Synthesis, Structures, and Electronic Properties of [8Fe-7S] Cluster Complexes Modeling the Nitrogenase P-Cluster", *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 13168-13178 (2009). DOI:10.1021/ja9055036
- (5) T. Hakoyama, K. Niimi, H. Watanabe, R. Tabata, J. Matsubara, S. Sato, Y. Nakamura, S. Tabata, J. Li, T. Matsumoto, K. Tatsumi, M. Nomura, S. Tajima, M. Ishizuka, K. Yano, H. Imaizumi-Anraku, M. Kawaguchi, H. Kouchi, N. Sugauma, "Host Plant Genome Overcomes the Lack of a Bacterial Gene for Symbiotic Nitrogen Fixation", *Nature*, **462**, 514-518 (2009). DOI:10.1038/nature08594
- (6) Y. Ohki, K. Yasumura, M. Ando, S. Shimokata, K. Tatsumi, "A Model for the CO-Inhibited Form of [NiFe] Hydrogenase: Synthesis of $(\text{CO})_3\text{Fe}(\mu\text{-S}^t\text{Bu})_3\text{Ni}\{\text{SC}_6\text{H}_3\text{-2,6-(mesityl)}_2\}$ and Reversible CO Addition at the Ni Site", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **107**, 3994-3997 (2010). DOI:10.1073/pnas.0913399107
- (7) F. Akagil, T. Matsuo, H. Kawaguchi, "Dinitrogen Cleavage by a Diniobium Tetrahydride Complex: Formation of a Nitride and Its Conversion to Imide Species", *Angew. Chem., Int. Ed.*, **46**, 8778-8781 (2007). DOI:10.1002/anie.200703336
- (8) T. Watanabe, Y. Ishida, T. Matsuo, H. Kawaguchi, "Reductive Coupling of Six Carbon Monoxides by a Ditantalum Hydride Complex", *J. Am. Chem. Soc.*, **131**, 3474-3475 (2009). DOI:10.1021/ja9007276
- (9) F. Akagi, Y. Ishida, T. Matsuo, and H. Kawaguchi, "Synthesis and Reactivity of Niobium Complexes Having a Tripodal Triaryloxy Ligand in Bidentate, Tridentate, and Tetridentate Coordination Modes", *Dalton Trans.*, **40**, 2375-2382 (2011) (*invited paper*, "New Talent Asia"). DOI:10.1039/b911082h
- (10) T. Schwarz-romond, M. Fiedler, N. Shibata, P. J. G. Butler, A. Kikuchi, Y. Higuchi, M. Beinze, "The DIX domain of Dishevelled confers Wnt signaling by dynamic polymerization", *Nat. Struct. Mol. Biol.* **14**, 484-492 (2007). DOI:10.1038/nsmb1247
- (11) H. Ogata, W. Lubitz, Y. Higuchi, "[NiFe] hydrogenases: structural and spectroscopic studies of the reaction mechanism", *Dalton Trans.*, **37**, 7577-7587 (2009) (Cover Image). DOI:10.1039/b903840j
- (12) Y. Shomura, K. Yoon, H. Nishihara, Y. Higuchi, "Structural Basis for a [4Fe-3S] Cluster in the Oxygen-tolerant Membrane-bound [Ni-Fe]-hydrogenase", *Nature*, **479**, 253-257 (2011). DOI:10.1038/nature10504
- (13) H. Tanaka, H. Mori, H. Seino, M. Hidai, Y. Mizobe, K. Yoshizawa, "DFT Study on Chemical N_2 Fixation by Using a Cubane-Type RuIr_3S_4 Cluster: Energy Profile for Binding and Reduction of N_2 to Ammonia via Ru-N-NH_x (x = 1-3) Intermediates with Unique Structures", *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 9037-9047 (2008). DOI:10.1021/ja8009567
- (14) T. Inoue, Y. Shiota, K. Yoshizawa, "Quantum Chemical Approach to the Mechanism for the Biological Conversion of Tyrosine to Dopakinone", *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 16890-16897 (2008). DOI:10.1021/ja802618s
- (15) H. Tanaka, A. Sasada, T. Kouno, M. Yuki, Y. Miyake, H. Nakanishi, Y. Nishibayashi, K. Yoshizawa, "Molybdenum-Catalyzed Transformation of Molecular Dinitrogen into Silylamine: Experimental and DFT Study on Remarkable Role of Ferrocenyldiphosphine Ligands", *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 3498-3506 (2011). DOI:10.1021/ja109181n
- (16) J. Li, K. Yoshizawa, "Computational Evidence for Hydrogen Generation via Reductive Cleavage of Water and α -H Abstraction on a Molybdenum Complex", *Angew. Chem., Int. Ed.*, **50**, 11972-11975 (2011). DOI:10.1002/anie.201102917
- [学会発表] (依頼・招待講演 計 152 件)
- (1) 国際会議
研究代表者、分担研究者、連携研究者が発表した依頼・招待講演：88 件
うち 6 件の講演を抜粋して以下に記載する。
- (a) K. Tatsumi, "Metal-Sulfide-Cluster Synthesis—Challenge to Model the Active Sites of Reductases—", *The 5th National Symposium on Structural Chemistry (5th NSSC)*, October 25-31, 2007, Fuzhou, China (*Plenary Lecture*).
- (b) K. Tatsumi, T. Matsumoto, Y. Ohki,

“Activation of H₂ by S-donor/O-donor-bridged Heterodunuclear Complexes relevant to the Function of [NiFe] Hydrogenase”, International Conference on Hydrogen and Hydrogen Storage: Methods and Materials, January 3-6, 2009, Bangalore, India (*Plenary Lecture*).

(c) K. Tatsumi, “Recent Progress in the Synthesis of Fe/S and Fe/Mo/S Clusters”, 24th Latin American Chemistry Congress, September 27-Oct 1, Cartagena, Colombia (*Plenary Lecture*).

(d) H. Kawaguchi, “Small Molecule Activation by Group 5 Metal Hydrides Having Aryloxide Ligands,” 3rd Erlangen Symposium on Redox-Active Metal Complexes: Control of Reactivity via Molecular Architecture, October 5–8, 2011, Erlangen, Germany.

(e) Y. Higuchi, “Active site of [NiFe] hydrogenase-inhibited, unready, ready and active states”, 8th European Biological Inorganic Chemistry Conference (EUROBIC8), July 2-6, 2006, Portugal.

(f) K. Yoshizawa, “Computational Mutation of Enzymatic Reactions”

International Symposium of Homogeneous and Heterogeneous Catalysis XV, September 11-16, 2011, Berlin Free University, Berlin, Germany (*Plenary Lecture*).

(2) 国内会議

研究代表者、分担研究者、連携研究者が発表した依頼・招待講演：64件

うち5件を抜粋して以下に記載する。

(a) 巽 和行, “古くて新しい還元系金属酵素 – 生物無機化学の新展開”、錯体化学討論会、シンポジウム「金属イオンを含む新しい生体分子の創製と実践的活用」、9月25日、名古屋、(2007).

(b) 巽 和行, “還元系金属酵素の有機金属化学”、有機合成化学協会講習会、東京、6月23日 (2010).

(c) 巽 和行, “還元系金属酵素の化学 - 自然に学ぶ”、The 5th Waseda GCOE International Symposium on “Practical Chemical Wisdom” 「化学知をめぐる」、早稲田大学理工、1月13日 (2011).

(d) 川口博之, “フェノキシド多座配位子を用いた多核錯体反応場の構築と反応”、第58回錯体化学討論会 (シンポジウム：ヘテロ元素架橋多核サイトでの特異な反応性)、金沢大学、9月20-22日 (2008).

(e) 樋口芳樹, “酸素耐性膜結合型[NiFe]ヒドロゲナーゼのX線結晶構造解析 – 水素エネルギー利用に向けた基礎科学的研究 –”、関西サイエンスフォーラム、大阪、11月29日 (2011).

[その他]

受賞等

巽和行、平成23年 サイボルト賞 (ドイツ)
巽和行、平成23年 ミュンスター大学名誉博士号 (ドイツ)

大木靖弘、第58回 日本化学会進歩賞

大木靖弘、平成21年度文部科学大臣表彰 若手科学者賞

吉澤一成、第28回 日本化学会学術賞

吉澤一成、BCSJ賞、平成20年10月

ホームページ等

<http://inorg.chem.nagoya-u.ac.jp/frame.html>

報道等

(a) 雑誌論文(12)の内容が下記に報道される。

NHK ニュース, 毎日新聞, 産経新聞, 日本経済新聞, 神戸新聞, 化学工業日報, 朝日コム (平成23年10月17日), Chemical & Engineering News (October 24, 2011 Vol.89, No.43, P37), Angewandte Highlights (DOI: 10.1002/anie.201108761).

(b) 雑誌論文(1)の内容が Science 誌の Editor's Choice に紹介される (Science 2007, **317**, 1297).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

巽 和行 (Kazuyuki Tatsumi)

名古屋大学・物質科学国際研究センター・教授

研究者番号：10155096

(2) 研究分担者

吉澤一成 (Kazunari Yoshizawa)

九州大学・先導物質化学研究所・教授

研究者番号：30273486

樋口芳樹 (Yoshiki Higuchi)

兵庫県立大・大学院生命理学研究科・教授

研究者番号：90183574

平成18-19年度 研究分担者

平成20年度より連携研究者

川口博之 (Hiroyuki Kawaguchi)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20262850

平成18-21年度 研究分担者

平成22年度連携研究者

松本 剛 (Tsuyoshi Matsumoto)

名古屋大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50311717

平成18-19年度 研究分担者

平成20年度より連携研究者

大木靖弘 (Yasuhiro Ohki)

名古屋大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：10324394

平成18-19年度 研究分担者

平成20年度より連携研究者