

機関番号：17102

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2010

課題番号：20200050

研究課題名（和文）酸素活性化金属酵素反応解明と高効率分子触媒創製に向けての学際的研究

研究課題名（英文）Interdisciplinary study for the elucidation of metalloenzyme reaction mechanism in dioxygen activation and highly efficient molecular catalyst creation

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：

酸素の活性化および還元は生体反応および燃料電池のエネルギー変換において重要な化学反応である。本研究課題では金属酵素における酸素活性化機構の解明と高効率な酸素還元触媒の創製を目的とし、合理的に分子設計したヘムモデル錯体にて、酸素活性化の分子機構について分光学的に解析した。本研究により、ヘム酸素活性化酵素と生体模倣触媒による酸素活性化の分子機構の解明に大きく寄与したほか、卑金属錯体を用いた燃料電池酸素極触媒の開発に向けた応用の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：

The O₂ activation/reduction reaction is one of the most important reactions involved in both of life processes and in energy converting systems such as fuel cells. This project is intended to further elucidation of the O₂ activation mechanism of metalloenzymes and creation of highly efficient molecular catalyst for O₂-reduction. Using well designed heme enzyme chemical models, we have successfully captured and fully characterized key intermediates involved in the O₂-activation processes of heme-containing enzymes by various kinds of spectroscopies as well as quantum chemical calculations. These studies have contributed significantly to the understanding of the mechanism of dioxygen activation by heme enzymes and their models. The prepared non-precious-metal catalysts will have prosperous applications as the cathode oxygen reduction reaction (ORR) catalysts in fuel cells.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
総計	23,500,000	7,050,000	30,550,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：複合化学・生体関連化学

キーワード：酵素、モデル化、生体分子、生体機能化学、生物無機化学、分子触媒化学、酸化触媒

1. 研究開始当初の背景

酸素分子活性化を触媒する金属酵素は多数存在し、酸素の還元によるエネルギー獲得から、酸素分子を用いる酸化反応に到るまで多数の反応を触媒している。そのため、高いエネルギー効率や反応選択性は古くから注目を集めてきている。近年、酵素における反応機構の解明が進んだ。ヘム系においては Fe^{2+} 種への酸素付加により生成するスーパーオキシ種に一電子還元によりヒドロペルオキシ種が生成すると推定されている。この化学種は窒素凍結下、 γ 線照射により生じる電子による還元法（低温放射線分解法）により主として EPR により観測されているが、溶液中で選択的に発生させることは成功していない。一方、このヒドロペルオキシ種（いわゆる **Compound 0**; **Compd. 0** と略称）はそれ自身、酸化活性を有することが提案され、またその O-O 結合の不均等解裂を経て高原子価オキシ種（いわゆる **Compd. I**）が生成し、酸化反応や引き続き還元反応によるエネルギー変換など重要な反応の鍵となっている。このような反応の重要性にも係わらず、様々の反応へ適用可能となるよう、**Compd. 0** の溶液中での発生には成功していない。

2. 研究の目的

酸素活性化を経由する酸素還元（末端酸化酵素）や酸化（チトクローム P450、pMMO、sMMO）などの触媒機能を持つ金属酵素が多数存在し、その反応は地球上での物質変換の中核の一つとなっている。これらに共通した酸素活性化においては（ヒドロ）ペルオキシ種が鍵中間体であると信じられている。酵素において、この種は基質の直接酸化を触媒する他、酸素-酸素結合解裂を経て強酸化力がかつ多彩な反応性を有する金属高原子価（オキシ）種を生み出している。これらの反応を溶液中で人工的に再現できれば酵素反応解明につながり、かつ反応部位の微細な環境の最適化や詳細な電子状態の制御を通して、酸素還元（燃料電池酸素極反応）や有機基質の酸化反応に向けての多彩な分子触媒としての展開が期待される。したがって、酸素活性化機能を有する金属酵素の真の不安定中間体（ペルオキシ体、ヒドロペルオキシ体）を化学モデルにて溶液中、選択的な合成法を確立し、そのラマンや金属イオンに配位するあらゆる原子間の振動が検出可能な核共鳴非弾性散乱スペクトル等による構造解析と量子化学計算による電子状態、反応性予測を行う。さらに、ペルオキシド基の活性化に新方法を加え、これら酸素還元や基質酸化が可能な分子触媒としての利用展開を目的とする。

3. 研究の方法

(1) ヘム-ペルオキシ体の合成の改良と分光学による構造解析：

ヘム-ペルオキシ体及び類縁体 [Fe(III)-ペルオキシ体、Fe(III)-ヒドロペルオキシ体、Fe(II)-スーパーオキシ体] についてヘム周辺の置換基の最適化により安定性の向上を図るとともに、メスバウバー、吸収分光法、電子スピン共鳴法、共鳴ラマン分光による分子構造解析を行う。量子化学計算を併用して電子状態、分子構造の解析を行う。

(2) 放射光源を用いた核共鳴非弾性散乱法 (NRIS) の酸素活性中間体への適用：共鳴ラマン分光で振動構造解析したヘム-（ヒドロ）ペルオキシ種の更なる詳細な分子構造を解析すべく、Spring8 のビームタイムを獲得して、酸素活性錯体の NRIS 解析と量子化学計算による基準振動モード解析を行い微細分子構造の解明をはかる。この解析により、共鳴ラマン分光では明らかにされなかった分子振動構造が明らかにされ、構造機能および電子状態の相関についてさらなる知見を得る。

(3) プロトンメディエーターを有するヘム錯体の合成および酸素との反応性の検討：

ヘム側鎖を修飾した配位子結合部にプロトン供給を可能にするヘム錯体を合成して、酸素との反応性について吸収分光法、電子スピン共鳴法、共鳴ラマン分光法により解析する。End-on 型ヘムペルオキシ錯体の構造解明に基づき、生成したヒドロペルオキシ錯体の酸素-酸素結合の不均等解裂反応のための化学モデル合成を行う。スーパーオキシ錯体の末端酸素原子に選択的に2つのH+付加を行うことが鍵となることから、そのようなプロトン化を可能にする分子設計および合成し、溶液中で生成するスーパーオキシ錯体の CoCp2 を一電子還元剤に用いて、ヒドロペルオキシ錯体の生成と観測を行う。更に、本錯体を触媒として使用することにより、電極上（回転ディスク電極使用）での触媒的酸素還元とその選択性（2電子還元 対 4電子還元）を評価する。これにより鉄を用いた燃料電池陰極触媒への利用の可能性を検証する。

(4) ヒドロペルオキシ錯体から基質への直接的酸化反応および酸素-酸素結合切断反応：酵素反応においてはFe(III)-ヒドロペルオキシ錯体 (Compd. 0) が脱ホルミル化反応などに関与するとされている。これらの例では、Cyt. P450 などの酵素において、Compd. 0 が基質酸化に関与しているとの状況証拠から反応が推定されているに留まり、実際にヒドロペルオキシ体を発生させて反応を検証されているわけではない。そこで、合成した

化学モデルを用いて、これらの反応を検証する。

(5) ペルオキシ架橋銅錯体結合ヘムにおける酸素活性化と基質酸化反応：
ヘム-銅錯体結合錯体について、 $\mu-\eta^2:\eta^2$ ペルオキシ錯体については、既に構造決定等が完了しているが、本ペルオキシ体に対して、フェノレートを反応させるとチロシナーゼ様反応を起こし、フェノレートを酸化されカテコールが生成する。この反応のスペクトル追跡により、本反応は2段階の中間体を経由して進行していると考えられる。これは不活性なペルオキシ体の活性化反応とも考えられ、中間に高原子価錯体の生成が予測される。この高原子価中間体を共鳴ラマン、メスバウバー、などにより同定する。さらに、2,6-ジフルオロフェノレート(ArFO-)など、耐酸化性を有するプロモーター分子を用いて、高原子価中間体への反応を阻害する事により、フェノール結合型中間体の構造、特に金属イオンの酸化数をより確実に確定する。また、安定に生成したフェノール結合型中間体と種々の外部基質酸化活性を検討する。

(6) 極低温下 77 K においてヘム鉄-酸素付加体を γ 線照射して得られる還元化学種について各種分光法（電子スピン共鳴および共鳴ラマン分光）により検討した。

4. 研究成果

(1) ヘム-ペルオキシ体の合成の改良と分光学による構造解析：
ヘム-ペルオキシ体及び類縁体について、ヘム周辺の置換基の最適化により安定性の向上を図りメスバウバー、吸収分光、電子スピン共鳴、共鳴ラマンによる分子構造解析を行った。これらの解析により各種ヘム-ペルオキシ体の微細分子構造を明らかにし、酸化触媒の分子設計において重要な知見を得た。本研究により、6 配位エンドオン型ヒドロペルオキシ錯体、7 配位サイドオン型ペルオキシ錯体の分子振動構造を明

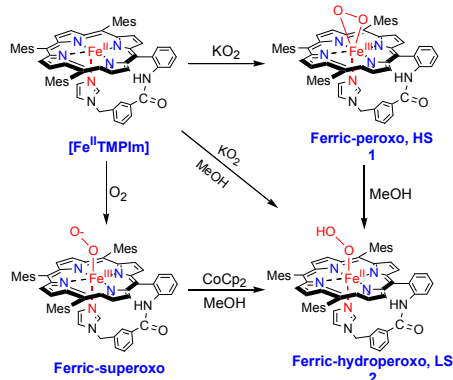


Fig. 1 Schematic preparation of the low-spin hydroperoxy intermediate (2).

らかにし、各種ペルオキシ種の構造と反応性の相関の理解に寄与した(Fig. 1)。

(2) 放射光源を用いた核共鳴非弾性散乱法(NRVS)を用いて、ヘム鉄錯体のヘム鉄フォノンの解析を行った。共鳴ラマン分光ではその選択則から解明されなかったヘム鉄低振動モードについて理解が深められ、酸素活性化機構において本質的な軸配位子が与えるヘム鉄の分子振動ダイナミクスへの効果について知見を得た。

(3) 低スピン型エンドオン鉄三価-ペルオキシ中間体は、一酸化窒素合成酵素、シトクロム P450 において重要な反応中間体として考えられているが、モデル錯体を用いた研究においても、捕捉され研究された例はなかった。そこで、酸素反応部位上方に MeO_2C -基を有するモデルを合成することにより、 -70°C において、スーパーオキシド錯体から還元によりエンドオン型ペルオキシド生成/プロトン化が実現できた(Fig. 2)。これらのエンドオン型ペルオキシド化学種は、酸素活性化分子機構の解明において鍵とされながらその不安定性により諸性質が知られていなかった。本研究により安定に化学種を研究する方法が開かれ、関連分野に大きく寄与することとなった。これらの研究成果は、燃料電池酸素還元触媒の合理的な設計に必要な知見を与える。

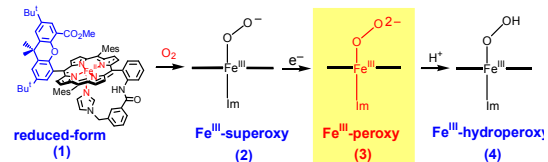


Fig. 2 Schematic preparation of the low-spin end-on peroxy intermediate (3) from a synthetic model in solution.

(4) プロトンメディエーターを有するヘム錯体の合成および酸素との反応性の検討：
配位子結合部にプロトン供給を可能にするヘム側鎖（キサンテン骨格をカルボン酸で修飾）をもつ新規ヘム錯体を合成し、酸素との反応性について検討した。吸収分光法、共鳴ラマン分光法による解析により、ヘム鉄に結合した酸素分子とカルボン酸が水素結合を生成することを明らかにし、高効率な分子触媒設計に重要な指針を得た。

(5) ペルオキシ架橋ヘム-銅錯体における酸素活性化と基質酸化反応：
ヘム-銅錯体において生成するペルオキシ錯体のチロシナ

一様反応の分子機構について検討するために、低温にてペルオキシ錯体とフェノラートとの反応を行い吸収分光法および共鳴ラマン分光法により解析した。反応初期においてフェノールがペルオキシ錯体と相互作用することが示唆されたが、結論するにはさらなる解析を要する。

(6) 極低温下 77 K においてヘム鉄-酸素付加体をγ線照射して得られる還元化学種について各種分光法（電子スピン共鳴および共鳴ラマン分光）により検討した。その結果、低極性溶媒中では、鉄二価スーパーオキシ体が生成するのに対し、高い極性溶媒中においては、鉄三価ペルオキシ体が生成することを明らかにした。スーパーオキシ種およびペルオキシ種は原子価互変異性体であり、ヘム周辺環境により電子状態に違いが生じることは理論化学的な解析と一致している。また、硬い対カチオン（カリウムイオン）存在下では、エンドオン型およびサイドオン型鉄三価ペルオキシ錯体が生成することを見出した。反応溶液の温度を下げるとエンドオン型ペルオキシ錯体が生成するが、温度を上げるとサイドオン型ペルオキシ錯体が主に生成することを見出した。このことは、ヘム酸素付加体の一電子還元においてサイドオン型およびエンドオン型両方が存在しうることを意味する。ヘムペルオキシ錯体は酸素活性化において鍵となる反応中間体であり、本基礎研究により、酸素活性化酵素反応機構の理解の深化ならびに、燃料電池酸素極触媒の分子設計に重要な知見を与えた。

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 5 件)

- (1) J.-G. Liu; Y. Naruta, Probing dioxygen activation mechanisms in heme-containing enzymes by heme models, *Indian J. Chem.* (査読あり), 50A, (2011), 363-373.
- (2) J.-G. Liu; Y. Shimizu; T. Ohta; Y. Naruta Formation of an End-On Ferric Peroxo Intermediate upon One-Electron Reduction of a Ferric Superoxo Heme, *J. Am. Chem. Soc.* (査読あり), 132, (2010), 3672-3673.
- (3) J.-G. Liu; T. Ohta; Y. Yamaguchi; T. Ogura; S. Sakamoto; Y. Maeda; Y. Naruta *Angew. Chem. Int. Ed.* (査読あり), 48, (2009), 9262-9267.
- (4) J.-G. Liu; T. Ohta; F. Tani; Y. Naruta Using Synthetic Models to Probe the O₂

Metabolic Mechanism in Heme-Containing Enzymes, *G-COE Journal*, (査読無), 3 (2009), 30-36.

- (5) J. J. Reddy, T. Ohta, Y. Naruta, Synthesis and Characterization of a New Prostaglandin H Synthase Model, *Tetrahedron Letters*, (査読あり), 50 (2009), 3418-3421.

[学会発表] (計 42 件)

- (1) 太田雄大・劉 勁剛・成田吉徳・依田芳卓・斎藤真器名・小林康浩・瀬戸 誠 酸素活性化ヘム酵素モデル錯体の振動分光学的研究、日本化学会第 91 春季年会、2011 年 3 月 29 日、横浜。
- (2) 安部慶郎・太田雄大・成田吉徳、新規三核化配位子を用いた多核銅酸化酵素モデル錯体の合成と性質、日本化学会第 91 春季年会、2011 年 3 月 29 日、横浜。
- (3) J.-G. Liu, T. Ohta, Y. Naruta, Preparation and spectroscopic characterization of the elusive heme-nitroxyl complexes, *The 91th Annual Meeting of Chemical Society of Japan*, 2011/03/26, Yokohama.
- (4) P. Nagaraju, J.-G. Liu, T. Ohta, Y. Naruta, Preparation of Bio-inspired Catalyst for O₂ Reduction, *The 91th Annual Meeting of Chemical Society of Japan*, 2011/03/26, Yokohama.
- (5) J.-G. Liu, T. Ohta, Y. Naruta, Bio-inspired Model Compounds for Oxygen Activation and Reduction, *I2CNER Workshop, Kyushu University*, 2011/02/04, Fukuoka.
- (6) J.-G. Liu, T. Ohta; Y. Shimizu & Y. Naruta, Solution Capturing End-On Peroxo and Hydroperoxo Intermediates of Heme Enzymes, *2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2010)*, 2010/12/19, Honolulu/USA.
- (7) Y. Naruta, J.-G. Liu, T. Ohta, A. C. Maity, Y. Shimizu, F. Tani, Activation and catalytic reduction of dioxygen: Lessons from heme enzyme chemical models, *2010 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (PACIFICHEM 2010)*, 2010/12/17, Honolulu/USA.
- (8) 太田雄大, 酸素活性化ヘム酵素のモデル化学と分光学, 第一回統合物質シンポジウム「統合創製物質化学の現状と展望」, 2010 年 12 月 3 日, 京都。
- (9) J.-G. Liu, T. Ohta; Y. Naruta, Capturing Ferrous-Superoxo, Ferric-

- Peroxo and Ferric-Hydroperoxo Intermediates in Heme Models, *60th Anniversary Conference on Coordination Chemistry Chem. Commun. Symposium*, 2010/09/28, Osaka.
- (10) Z. N. Zaharan, 太田雄大・成田吉徳, Efficient Electrocatalytic Water Oxidation with Manganese and Cobalt Porphyrin Dimers-ITO Assembly, 第60回錯体化学討議会, 2010年9月28日, 大阪。
- (11) J.-G. Liu, T. Ohta; Y. Naruta, Synthetic Heme Models Mimic the Formation of Peroxo- and Hydroperoxo-heme Intermediates Relevant to Dioxygen Activation in Heme-containing Enzymes, *Asian International Symposium on Inorganic Chemistry and Coordination Chemistry, Organo-metallic Chemistry*, 2010/03/28, Osaka
- (12) J.-G. Liu; T. Ohta; Y. Shimizu; Y. Naruta, Spectroscopic characterization of side-on and end-on (hydro)peroxo-heme intermediates, *The 90th Annual Meeting of Chemical Society of Japan*, 2010/03/28, Osaka.
- (13) 太田雄大・千代健文・谷文都・成田吉徳、三座窒素配位子配位銅錯体を有するヘム-銅二核錯体の酸素活性化反応、日本化学会第90春季年会、2010年3月28日、大阪。
- (14) 安部慶郎・太田雄大・成田吉徳、新規銅三核化配位子誘導体を用いた多核銅酸化酵素モデル錯体の合成と性質、日本化学会第90春季年会、2010年3月28日、大阪。
- (15) 王昂・太田雄大・成田吉徳、鉄ポルフィリンニトリド架橋錯体の合成と酸化反応、日本化学会第90春季年会、2010年3月28日、大阪。
- (16) Z. N. Zahran, 太田雄大・王昂・成田吉徳、マンガンポルフィリンダイマー修飾ITO電極を用いる低過電圧での水の酸化反応、日本化学会第90春季年会、2010年3月28日、大阪。
- (17) J. J. Reddy, 太田雄大・成田吉徳、新規マンガンコロネットポルフィリン錯体によるプロスタグランジン-H合成酵素のモデル反応、日本化学会第90春季年会、2010年3月26日、大阪。
- (18) J.-G. Liu, T. Ohta; Y. Naruta, Spectroscopic Characterization of Peroxo/Hydroperoxo Heme Intermediates: Opening a Closed Side-on Peroxy to an End-on Hydroperoxy, *The 10th International Workshop on Future Molecular Systems-Recent Development in Phorphyrin-related Chemistry*, 2010/02/19, Fukuoka.
- (19) J. J. Reddy, T. Ohta, Y. Naruta, Mn-Porphyrin as a New Prostaglandin H Synthase Model: Its Catalytic Oxygenation of All-cis-Polyenes, 大学間連携第3回物質合成国際シンポジウム、2010年1月7日、名古屋。
- (20) 太田雄大・劉 勁剛・千代健文・谷文都・成田吉徳、ヘム-ペルオキシ種の合成と分光学による同定、大学間連携第5回物質合成シンポジウム、2009年11月19日、京都府。
- (21) Z. N. Zahran, T. Ohta, A. Wang, and Y. Naruta, Efficient Electrolytic Water Oxidation with Manganese Porphyrin Dimer Catalysts Assembled on ITO Electrodes, 第42回酸化反応討論会、2009年11月15日、仙台。
- (22) 王昂・太田雄大・成田吉徳、鉄ポルフィリンニトリド架橋錯体の合成と酸化反応、第42回酸化反応討論会、2009年11月15日、仙台。
- (23) 田尾和也・太田雄大・成田吉徳、位フッ素置換されたマンガンポルフィリン二量体の合成と高原子価種の同定、第59回錯体化学討論会、2009年9月26日、長崎。
- (24) J.-G. Liu, T. Ohta, Y. Shimizu, Y. Naruta, Synthetic heme models to mimic the formation of ferric peroxo and hydroperoxo intermediates involved in heme-containing enzymes, *The 59th Symposium of Coordination Chemical Society of Japan*, 2009/09/26, Nagasaki.
- (25) 王昂・太田雄大・成田吉徳、鉄ポルフィリンニトリド架橋錯体の合成と酸化反応、第59回錯体化学討論会、2009年9月25日、長崎。
- (26) J. J. Reddy, T. Ohta, Y. Naruta, Mn-Porphyrin models of prostaglandin H synthases and their catalytic oxygenation of all-cis-polyenes, 第24回生体機能関連化学シンポジウム、2009年9月15日、福岡。
- (27) J.-G. Liu, T. Ohta, S. Yamaguchi, T. Ogura, Y. Naruta, Preparation of Low-spin End-on Ferric-Peroxo and Ferric-Hydroperoxo Species by a Heme Model Complex Bearing an Imidazole Tail, *The 14th International Conference on Biological Inorganic Chemistry (ICBIC-14)*, 2009/7/27, Nagoya.

- (28) T. Ohta, T. Chishiro, F. Tani and Y. Naruta, A novel dioxygen activation by a heme-copper binuclear complex, 14th International Conference on Biological Inorganic Chemistry (ICBIC-14), 2009/07/27, Nagoya.
- (29) Y. Naruta, J.-G. Liu, T. Ohta, T. Ogura, Simulation of O₂ activation/reduction with enzyme active site models of terminal oxidases, *The 14th International Conference on Biological Inorganic Chemistry (ICBIC-14)*, 2009/7/26, Nagoya.
- (30) J.-G. Liu, T. Ohta; Y. Naruta, Spectroscopic Characterization of End-on Heme Peroxide and Hydroperoxide Intermediates Relevant to Dioxygen Activation Mechanism of Heme-containing Enzymes, *PreICBIC-Frontiers in Bioinorganic Chemistry*, 2009/07/24, Fukuoka.
- (31) 劉歆・劉勁剛・成田吉徳、ヘム含有酸化酵素活性部位モデルとしてのフッ素化ポルフィリン鉄錯体の合成、日本化学会第89春季年会、2009年3月29日、石川県。
- (32) 清水雄太・太田雄大・劉勁剛・谷文都・成田吉徳、カルボキシル基を導入した鉄ポルフィリンの合成および酸素との反応、日本化学会第89春季年会、2009年3月28日、石川県。
- (33) 劉勁剛・太田雄大・山口悟・小倉尚志・成田吉徳、side-onおよびend-on型ペルオキシ-およびヒドロペルオキシヘムの合成と分光法による同定、日本化学会第89春季年会、2009年3月27日、千葉県。
- (34) 太田雄大・千代建文・谷文都・成田吉徳、ヘム鉄・銅二核錯体における新規酸素活性化反応、日本化学会第89春季年会、2009年3月27日、千葉県。
- (35) 太田雄大、酸素活性化金属酵素の反応機構解明に向けてのモデル化学と分光学、第3回核共鳴散乱研究会、2009年3月11日、兵庫県。
- (36) 太田雄大、生体金属のダイナミックな配位・電子構造の制御-ヘム、非ヘム鉄蛋白質を例に、第46回日本生物物理学会(シンポジウム:遷移金属の生物物理-若手研究者の挑戦)、2008年12月3日、福岡県。
- (37) 太田雄大、ヘム、非ヘム鉄酵素の分光学とモデル錯体化学、物質合成研究拠点機関関連事業 第3回大学間連携若手フォーラム、2008年11月21日、福岡県。
- (38) 劉勁剛、Using Synthetic Models to Probe the Dioxygen Metabolic Mechanism in the Terminal Enzyme of Respiratory、G-COE「物質・エネルギー変換ユニット」ワークショップ、2008年11月12日、福岡県。
- (39) T. Ohta・S. Chakrabarty, J. D. Lipscomb, and E. I. Solomon, Near-IR MCD of the Non-Heme Ferrous Active Site in Naphthalene 1,2-Dioxygenase: Correlation to Crystallography and Structural Insight into the Mechanism of Rieske Dioxygenases, *The 4th Asian Biological Inorganic Chemistry Conference*, 2008/11/11, Jeju/Korea
- (40) 太田雄大、生体金属酵素活性中心の分光学とモデル錯体化学、バイオミメティクス-東北大多元研、九大先導研、北大電子研合同研究会、2008年10月30日、東京都。
- (41) 劉勁剛・太田雄大・小倉尚志・成田吉徳、Selective Preparation of Superoxo, Peroxo, and Hydroperoxo Species Relating to Heme-Containing Oxygenase and Peroxidase、第58回錯体化学討論会、2008年9月21日、石川県。
- (42) 清水雄太・太田雄大・劉勁剛・谷文都・成田吉徳、カルボキシル基を導入した鉄ポルフィリンの合成および酸素との反応、第58回錯体化学討論会、2008年9月20日、石川県。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

太田雄大 (OHTA TAKEHIRO)
九州大学・先導物質化学研究所・助教
研究者番号：70509950

(3) 連携研究者

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

依田 芳卓 (YODA YOSHITAKA)
(財) 高輝度光科学研究センター・主幹研究員
研究者番号：90240366