

自然共生型の高効率光エネルギー変換システムの構築

研究代表者

中村龍平 理化学研究所環境資源科学研究センター

共同研究者

橋本和仁 東京大学大学院工学系研究科



1. 研究の背景と達成目標

地中や海底などの太陽光が全く届かない環境においては、地球内部に蓄えられた水素やメタン、硫化水素や2価鉄など（Geo-chemical）をエネルギー源とした生物学的CO₂固定が進行している。その中でも、化学独立栄養型の鉄酸化細菌は、熱力学的に低いエネルギー状態にある2価鉄を唯一の電子源としてCO₂を固定する。その結果得られる有機物は、海底バイオマス全体の50%をも占める。本研究では、このような非光合成環境で進行しているCO₂固定プロセスに着想を得て、光合成に依存しない新しいタイプのCO₂固定ならびにCO₂の再資源化技術を提案する。その特徴は、光合成プロセスを半導体の光吸収と鉄酸化菌によるCO₂固定の二つに分けて行う点にある。それにより、光合成研究において常に問題となる光損傷が解決される。したがって、高強度太陽光を用いて光化学的に2価鉄を作り出し、それを高濃度の細胞を充填したバイオリクターに供給することで、光合成を耐久性と速度の両面で上回るCO₂固定ならびにCO₂再資源化のための新技術の創成につながると期待される。

2. 主な研究成果と社会、学術へのインパクト

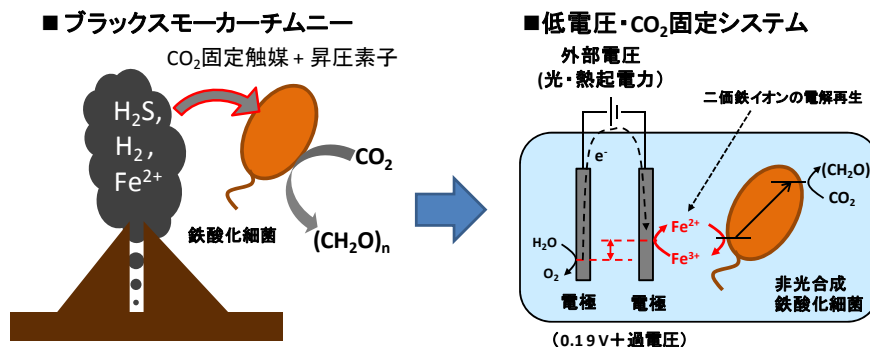
- ・深海底に生息する鉄酸化細菌 *Mariprofundus ferrooxydans* が、外界から獲得した電子のエネルギーを0.95 eVも高める「Voltage Multiplier（昇圧デバイス）」として働くことを見出した。
- ・植物などのPSII中心で進行する水の酸化反応に着目することで、エネルギー損失がほぼゼロで進行する新規なマンガン系酸素発生触媒の開発に成功した。

以上の成果は、鉄酸化細菌を「CO₂固定触媒」ならびに「昇圧デバイス」として組み込んだ低電圧・炭酸ガス固定システムの創生に向けて、鍵となる成果である。

3. 研究成果

第一課題として、本研究では非光合成型微生物の生体電子移動を理解することを目的とし、電気化学的手法を用いた *in vivo* 電子伝達反応の追跡に焦点を当て研究を進めた。その結果、鉄酸化細菌の一種 *Acidithiobacillus ferrooxidans* が、(1) 2価鉄から獲得した電子のエネルギーを1 eV程度も昇圧させる能力を持ち、最大70%のエネルギー変換効率で有機物を製造することを明らかにした。さらに(2) また、深海底におけるバイオマス生産の50%を担っていると予測されている鉄酸化菌の一種 *Mariprofundus ferrooxidans* の電気化学培養にも成功し、CO₂を炭素源としたバイオポリマー合成が可能であることを明らかにした。一方で、本提案技術の特徴は、鉄酸化細菌の電子昇圧能力を用いることで、現状では2V以上もの大きな外部電源を必要としていた電気化学的CO₂固定プロセスに対して、僅か400 mV程度の小さな電圧で反応を駆動させる点にある。その実

現に向けては、高効率な水の酸化触媒の開発が不可欠である。そこで本研究では、第二の課題として、植物が PSII 中心で行っている酸素発生反応に着目し、窒素を含有させた新規マンガン系触媒の開発を進めてきた。酸化マンガンの電子状態を制御することで、エネルギーロスがほぼゼロで進行する酸素発生触媒の開発にて成功した。



4. 今後の展開

深海底で進行するエネルギー変換過程に着想を得た本提案技術は、炭酸ガス固定研究において新しい発想を提供するものであり、半導体材料化学との融合により大きく発展する可能性を秘めている。ヒトゲノム解読が終わった現在、多くの分子生物学者達はその研究対象をライフサイエンスから新エネルギー獲得にシフトさせ、次々に新種微生物を海洋から採取している。その中には光合成細菌のみならず、当然、深海底に生息する非光合成・鉄酸化細菌も含まれている。したがって、本提案のコンセプトを世界に先駆けて実証できれば、太陽エネルギー変換研究における新しい流れを、日本が世界を先導する形で提供できると考えられる。さらに将来的には、低起電力で CO₂ の資源化が可能であるという本提案の特長を生かすことで、熱電変換素子をもちいた工場排熱や太陽熱の利用も十分に考えられるであろう。

5. 発表実績

- (1) T. Mogi, T. Ishii, K. Hashimoto, R. Nakamura, Low-Voltage Electrochemical CO₂ Reduction by Bacterial Voltage-Multiplier Circuits, **Chemical Communications**, 2013, 49, 3967-3969.
- (2) T. Takashima, K. Hashimoto, R. Nakamura, Inhibition of Charge Disproportionation of MnO₂ Electrocatalysts for Efficient Water Oxidation under Neutral Conditions, **Journal of American Chemical Society**, 2012, 134, 18153-18156.
- (3) T. Takashima, K. Hashimoto, R. Nakamura, Mechanisms of pH-Dependent Activity for Water oxidation to Molecular Oxygen by MnO₂ Electrocatalysts, **Journal of American Chemical Society**, 2012, 134, 1519-1527.
- (4) R. Nakamura, T. Takashima, S. Kato, K. Takai, M. Yamamoto, K. Hashimoto, Electrical Current Generation across a Black Smoker Chimney, **Angewandte Chemie**, 2010, 49, 7692-7694.
- (5) 「電気で生きる微生物存在か」読売新聞, 2012年2月12日
- (6) 「電気をつくる微生物を利用してエネルギー問題を解決したい」Dream Navi, 2011年12月号
- (7) 「常識を覆す海底の仕組みー深海底における微生物の省エネシステム！」東進タイムズ, 2011年11月号
- (8) 「Did life begin with a bolt from the deep blue?」 NewScientist, 29 October 2010