

## 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 4月20日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)一般

研究期間：2009～2011

課題番号：21510132

研究課題名（和文） 磁場配向を利用したハイブリッドナノ素子の開発

研究課題名（英文） Magnetic orientation for development of nano-devices

研究代表者

大庭 亨 (OBA TORU)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30291793

研究成果の概要（和文）：

本研究は、ナノサイズの高集積回路を実現するための基礎技術の開発を目指した。その結果、磁性ナノ粒子と蛋白質集合体「微小管」の複合体を作ることができ、比較的弱い磁場の中でも高い精度で自発的に整列させることができた（磁場配向）。磁場配向のメカニズムを検討し、配向精度に影響する因子を明らかにした。さらに、光照射によってリポソームが出芽・分離する現象や、クロロフィル類の生合成モデル反応も見出すことができた。

研究成果の概要（英文）：

We aimed at developing basics for fabrication of integrated nano-circuits. We conjugated magnetic nanoparticle and microtubule, a cytoskeletal protein assembly. The conjugates were magnetically oriented in a relatively weak magnetic field derived from a neodymium magnet. Factors that affected the magnetic orientation were examined. We also found that photo-irradiation induced budding and fission of dye-containing giant liposomes, possible platforms of nano-devices. Furthermore, in the course of synthesis of photo-functional molecular-devices, we developed novel organic reaction that modeled yet unidentified biosynthesis of a chlorophyll.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：自己組織化、ペプチドナノロッド、磁性ナノ粒子

## 1. 研究開始当初の背景

真核細胞の細胞骨格である「微小管」は、外径 25 nm、長さ数 $\mu\text{m}$ のナノチューブ状蛋白質集合体で、直径 4 nm の球状蛋白質「チューブリン」の自己組織化によって形成される。チューブリンと微小管は会合・脱会合によって可逆的に相互変換可能で、生理的条件下で

は動的平衡にある。そこで我々は、チューブリンに種々の機能分子を複合化して会合させれば、可換性をもつナノ集積回路が得られるのではないかと考えた。我々は微小管に色素などを修飾し、光エネルギー移動および光誘起電子移動を行う「微小管ナノ素子」を構築することができた。

研究開始当初、半導体ナノワイヤーや量子ドット、DNAや人工ペプチド集合体等の自己組織化を応用したナノ素子の研究例が報告されていたが、より簡便に、より精密に素子を配列・接続する方法が今後求められると考えられた。また、ナノレベルの構造欠陥を補うために、可換性や冗長性の導入も課題となると考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究では、①ペプチド・ナノロッド（蛋白質集合体「微小管」もしくはポリプロリン）とナノ粒子等を複合化したナノ素子を作製し、②これを任意の方向に配列させる技術と、③集積度を制御する技術を研究期間内に確立することを目的とした。本研究の最終目標は、ナノサイズの高集積回路を生体分子の特徴（動的平衡など）を応用して実現することである。

## 3. 研究の方法

本研究の主要な方法論は、申請者らが開発してきた「微小管ナノ素子」とその磁場配向である。微小管に磁性ナノ粒子を複合化し、磁場配向を利用することによって、まずマイクロメートル・オーダーの、次いでナノメートル・オーダーに素子を配列させることを目指した。Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>ナノ粒子は凝集しやすく、微小管は変性しやすい蛋白質集合体であることから、より安定で、より扱いやすいナノ構造体の構築のために、ペプチドやリポソームの応用を検討した。さらに、ナノ素子に利用する蛍光色素開発のために、クロロフィル類の誘導体化を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) 微小管の磁場配向

既報に従って作製した Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子に、グルタル酸を修飾した。グルタル酸のカルボキシ基に N-ヒドロキシスクシンイミドを反応させて活性エステルとし、次いで微小管を加えて、微小管表面に Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子を共有結合させた。また、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子に L-アスパラギン酸を修飾した。アスパラギン酸のアミノ基にビオチン誘導体を縮合し、アビジン、次いでビオチンおよび蛍光色素の修飾された微小管を結合させた。これらの方法によって、共有結合またはアビジン-ビオチン相互作用を介して Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子と微小管を複合化 (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT) させることができた。

SEM および DLS 測定から、本研究で用いた磁性粒子は粒径 10~20 nm ナノ粒子が凝集して約 2.3 μm になったものであることがわかった。磁性ナノ粒子とチューブリンとのモル比 (tubulin subunit / Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle) が 10 の場合、磁気ナノ粒子凝集体 (直径 2.3 μm) 1 つに対し、微小管 (長さ 10 μm) は約 3.8×10<sup>4</sup>

本存在することになる。このことから、磁気ナノ粒子の表面に多数の微小管が結合していると考えられた。

次に、簡便な磁場を用いて、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT を任意の方向に配列させることを目指した。ネオジム磁石 (0.45 T) 上に置いたカバーガラスに Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT 溶液を滴下し、30 分間静置した。光学顕微鏡像または蛍光顕微鏡像を画像解析ソフト Image J に取り込み、対象物を楕円に近似した。近似した楕円の主軸が外部磁場方向となす角度などを算出した。

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT は長さ 10~30 μm、太さ 2~7 μm ほどの棒状構造体を形成した。チューブリンに対する Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子の量を一連に変化させて実験を行ったところ、チューブリン量が増加するとともに配向精度が高くなり、一定の精度 (角度の標準偏差 21.0°、滴下量 3 μL) に収束した。Tublin subunit/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle = 0 では角度標準偏差 43.0°であったが、tublin subunit/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle = 10.0 では角度標準偏差 21.0°であった。

粒径約 2.3 μm の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子を超音波処理で約 300nm とし、同様にして磁場を印加したところ、角度標準偏差 42.8°で配向した。一方、界面活性剤 TritonX-100 によって約 130 nm に分散性を向上させた Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子は、角度標準偏差 11.6°で磁場配向した。このことから、チューブリン量の増加とともに配向精度が高くなったのは、磁性粒子表面に微小管が結合または吸着し、分散性が向上したからであると推測した。

次に、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT の量と磁場配向精度の関係調べた。Tublin subunit/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticle = 10.0 の Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT を用いた。一度に滴下する試料量が多いほど、棒状構造体は高精度で磁場配向した (5 μL 滴下だと、角度標準偏差 13.2°)。また、1 μL ずつ滴下していくと、4~5 回目から配向精度が向上し、滴下量の増加に従って棒状構造体が長くなる傾向が見られた (5 回滴下で、角度標準偏差 10.4°)。これは、複合体が少量では塊状の凝集体がまばらにできるが、複合体の量が増えると、塊と塊がつながり、棒状になっていくからであると考えられる。

以上のように、チューブリン量を多く、滴下量を多く、滴下回数を多くすれば、ネオジム磁石程度の磁場によっても、精度よく (角度標準偏差 10.4°) マイクロメートルオーダーの配列を作ることができると分かった。さらに、直交するように二度に分けて Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-MT を磁場配向させ、棒状構造体のクロス構造を簡便に作ることもできた。アビジン-ビオチン相互作用を介して Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ナノ粒子と微小管を複合化させた試料を用いても、上と同様に磁場配向させることができ、クロス構造も作ることができた。後者のクロス構造では、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Flu-MT の 83 %が、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Rho-MT の

66 %が、 $\pm 12.5^\circ$ 以内の精度で整列していた(標準偏差  $18.8^\circ$ および  $19.6^\circ$ )。

また、磁石とスライドガラスの距離を変えたり、形状の異なるネオジム磁石を用いたところ、磁場強度や磁力線の形に応じて棒状構造体の形状や密度が変化することもわかった。

#### (2) ペプチドナノロッドの利用

ポリプロリンペプチド  $WP_4EP_4G$  などを合成できた。 $WP_4EP_4G$  はエタノール中でポリプロリンIIヘリックスを形成した。これらのペプチドは、エタノール中で  $Cu^{2+}$ イオンを作用させることによって会合した。また、会合したペプチドに EDTA を加えたところ、脱会合が起こった。His や Glu と  $Cu^{2+}$ との錯形成によって会合したものと考えられた。このように容易に会合・脱会合を制御可能なポリプロリンペプチドは、オンデマンド型の分子素子の材料として有望である。

金ナノ粒子の表面にポリプロリンペプチドを修飾することができた。さらに、ペプチド内の一級アミン部位に蛍光分子を導入することができた。金ナノ粒子の凝集を抑えつつ、物質の授受や変換などの機能をナノ粒子上のペプチドに発現させられれば、人工ナノ情報伝達系の構築に発展させることができるだろう。

#### (3) リポソームの利用

上記のように、磁性ナノ粒子と微小管の複合体を磁場配向させることにより、分子素子をマイクロスケールのオーダーで配列させる技術を確認できた。しかし、磁性ナノ粒子は原理的に磁気力によって凝集しやすいこともあり、ナノスケールオーダーの配列制御は容易でなかった。

そこで、リポソームを利用して、マイクロメートルオーダーの配向技術と、ナノメートルオーダーの分子素子の配列の両立を目指した。すなわち、リポソームの膜内に分子素子を導入し、超分子化や、膜の相分離を利用して機能分子を集積させる。そのようなリポソームに磁性ナノ粒子を封入したり、表面修飾させることによって、リポソームを磁場配向させることを目指した。

このような系はまだ完成できていないが、検討途中で興味深い現象を見出した。新規なカチオン性ペプチド脂質を合成し、アニオン性色素(クロロフィルド、ピラニン)とともにジャイアントリポソームを作成した。蛍光励起エネルギー移動から、この脂質と色素はリポソーム膜内で会合していることがわかった。興味深いことに、このジャイアントリポソームに光照射すると、リポソームが出芽や分離を起こすことを見出した(「光誘起リポソーム膜分離」)。一般に、リポソームの出

芽や分離は容易ではなく、本研究の見出した現象はリポソームのエンジニアリングに新しいツールを提供することになると考えられる。

ミセル等を利用すると、このジャイアントリポソームに色素やペプチドを供給することができた。この方法を上記の光誘起リポソーム膜分離と組み合わせれば、膜内に分子素子を供給し、一定の機能を果たさせた後、光誘起リポソーム膜分離によって古い素子を回収して、フレッシュな分子素子を供給するというサイクルを構築できる可能性がある。すなわち、本研究の見出した技術は、オンデマンドで素子を交換することができるナノシステムや、動的平衡条件下で素子の交換が行われるナノシステムの基礎となると期待される。

#### (4) 新規な蛍光色素合成法の発見

本研究では、微小管やポリプロリンペプチド、磁性ナノ粒子、リポソームなどに複合化する蛍光色素の合成も行ってきた。我々が最近見出した新規な酸化反応を天然の光合成色素(クロロフィル-*a*)に適用したところ、温和な条件下で一段階でクロロフィル-*d*を合成することができ、不安定な天然色素にも応用可能なことを立証した。クロロフィル-*a*からクロロフィル-*d*への変換を、実質的な収率で実現できたのは本研究が初めてである。

クロロフィル-*d*は特殊なシアノバクテリア(*A. marina*)の光合成色素である。クロロフィル-*d*はクロロフィル-*a*よりも長波長の光を吸収することから、*A. marina*は通常のシアノバクテリアよりも低いエネルギーの光で光合成を行っていることになり、そのメカニズムが注目されている。クロロフィル-*d*の生合成経路も、クロロフィル-*a*から合成されること以外はまだまだよくわかっていない。我々の反応は、温和な条件下で初めてクロロフィル-*a*をクロロフィル-*d*に変換することができた。したがって、この反応は *A. marina* のクロロフィル-*d* 生合成反応の有望なモデル反応であるとわかった。

#### (5) まとめ

本研究では、微小管やポリプロリンとナノ粒子を複合化したナノ素子を作製することができた。この微小管と磁性ナノ粒子の複合体を、磁場を利用して任意の方向に配列させることができた。また、その配向精度や集積度を制御する技術を確認することができた。

微小管と磁性ナノ粒子の複合体をマイクロスケールのオーダーで配列させることはできたが、ナノスケールオーダーの配列制御は容易でなかった。そこで、ナノ素子を配列・集積・機能する場としてリポソーム膜の検討を行ったところ、その過程で「光誘起リ

ポソーム膜分離」を見出した。本研究の最終目標は、ナノサイズの高集積回路の実現に、動的平衡などの生体分子の特徴を応用することである。リポソームを利用して非平衡定常系を構築するには、リポソームの分離と融合が定常的に行われる必要があり、「光誘起リポソーム膜分離」は特に有用な技術と考えられる。

本研究はいくつかの副次的な研究成果も与えた。第一に我々は、温和な条件下で初めてクロロフィル-*a*からクロロフィル-*d*への変換を実現することができた。この反応は *A. marina* のクロロフィル-*d* 生合成反応の有望なモデル反応であるとわかった。

第二に「光誘起リポソーム膜分離」から、色素を直接生体膜に溶かしこむことは生物にとって危険であることが示唆される。光機能をもつ膜蛋白質は数多く知られているが、このような観点から検討されたことはない。光機能をもつ膜蛋白質の成熟・分解過程や進化過程について、「光誘起リポソーム膜分離」を起点に考察を重ねたい。

第三に「光誘起リポソーム膜分離」を「人工細胞分裂」ととらえるならば、人工細胞研究にも寄与できるだろう。構成的理解の立場から、天然の光合成超分子システムのシステム設計原理の理解にも貢献していきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

- ① Takanori Fukusumi, Kohei Matsuda, Tadashi Mizoguchi, Tomohiro Miyatake, Satoshi Ito, Tsukasa Ikeda, Hitoshi Tamiaki, and Toru Oba, “Non-enzymatic conversion of chlorophyll-*a* into chlorophyll-*d* in vitro: a possible model reaction of the chlorophyll-*d* biosynthesis”, *FEBS Lett.*, in press (2012).
- ② Toru Oba, Hitoshi Tamiaki, “Aggregation of chlorophylls in Chlorophyll-proteins ~ An analysis of packing motifs ~”, In *Peptide Science 2011* (Sakaguchi, K. ed.), p. 359, The Japanese Peptide Society, Minoh, Japan (2012).
- ③ Toru Oba, Yuki Uda, Kohei Matsuda, Takanori Fukusumi, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, Hitoshi Tamiaki “A mild conversion from 3-vinyl- to 3-formyl-chlorophyll derivatives”, *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, 21, 2489-2491 (2011).
- ④ Takanori Fukusumi, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, Tsukasa Ikeda, and Toru Oba, “A novel oxidation reaction and its application to Fmoc solid phase synthesis of therapeutic photosensitizers”, In *Peptide Science 2010* (Fujii, N. and Kiso, Y. eds.), p. 293, The Japanese Peptide Society, Minoh, Japan (2011).
- ⑤ Toru Oba, Tetsuya Sato, Kanae Togo, Yoshimi Yoshioka, Shinya Natrio, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, “Pigment-helix interactions suggests a maturation process of a photosynthetic protein”, In *Peptide Science 2010* (Fujii, N. and Kiso, Y. eds.), p. 173, The Japanese Peptide Society, Minoh, Japan (2011).
- ⑥ Toru Oba, Kanae Togo, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, “Kinetics of Chlorophyll Demetallation and Possible Design of the Active site for the Reaction”, In *Peptide Science 2009* (Okamoto, K. ed.), p. 437-440, The Japanese Peptide Society, Minoh, Japan (2010).
- ⑦ Toru Oba, Yoshimi Yoshioka, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, “Intermolecular Interactions between Chlorophyll and Peptides that mimic the in vivo binding moieties”, In *Peptide Science 2009* (Okamoto, K. ed.), p. 131-132, The Japanese Peptide Society, Minoh, Japan (2010).

〔学会発表〕(計 44 件)

- ① 巻幡大志・大庭 亨・伊藤 智志、「テトラベンゾポルフィリンチタニル錯体の合成と物性」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年 3 月 27 日
- ② 手谷祥彦・大庭 亨・伊藤 智志、「Suzuki カップリング反応を用いた meso 置換テトラベンゾポルフィリンの合成とその物性」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年 3 月 26 日
- ③ 大庭 亨・安田 哲・伊藤智志・石橋直也・大月 穰・永瀬浩喜・藤原恭子・渡部隆義、「ヨウ素を導入した新規なクロロフィル誘導体の合成」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年 3 月 25 日
- ④ 福住高則・伊藤智志・溝口 正・民秋 均・宮武智弘・池田 幸・大庭 亨、「Chlorophyll-*a* から chlorophyll-*d* への生体外での新規変換反応」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年 3 月 25 日
- ⑤ 大庭 亨・森岡みさき・伊藤智志・吉里麻理・佐々木真一・民秋 均、「3<sup>1</sup> 位にアールスルファニル基をもつクロロフィル誘導体の合成」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年 3 月 25 日
- ⑥ 岩部 勇希・大庭 亨・佐藤 剛史・伊藤直次・伊藤 智志、「超臨界二酸化炭素を用いたイソインドール誘導体合成における反応条件の最適化」、日本化学会第 92 春季年会、横浜、2012 年 3 月 25 日
- ⑦ 斉藤悠生・諸星知広・加藤紀弘・池田 幸・大庭 亨・伊藤智志、「Quorum Sensing 阻害効果の向上を目指したシクロデキストリン誘導体の合成」、日本化学会第 92 春季

- 年会、横浜、2012年3月25日
- ⑧ Toru Oba, Sakae Oinuma, Satoshi Ito, “Phase behavior of liposomes containing chlorophyll-peptide complexes”, P-24, 21th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 20-21, 2011.
- ⑨ Toru Oba, Hitoshi Tamiaki, “Conformation of the long alkyl chain of chlorophylls in the crystal structures of chlorophyll-proteins”, P-25, 21th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 20-21, 2011.
- ⑩ Toru Oba, Yuki Uda, Kohei Matsuda, Takanori Fukusumi, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, and Hitoshi Tamiaki, “A model study on the biosynthesis of chlorophyll-*d*” (oral), The International Congress on Tetrapyrrole Photoreceptors in Photosynthetic Organisms 2011, Berlin (Germany), Jul. 24-28, 2011. (Abstract, L50).
- ⑪ Toru Oba, Kanae Togo, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, “The fifth ligand influences demetallation of chlorophylls” (poster), The International Congress on Tetrapyrrole Photoreceptors in Photosynthetic Organisms 2011, Berlin (Germany), Jul. 24-28, 2011. (Abstract, P-B1).
- ⑫ Toru Oba Yuki Uda, Kohei Matsuda, Takanori Fukusumi, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, and Hitoshi Tamiaki, “Facile Conversion from Chlorophyll-*a* to Chlorophyll-*d* *in vitro*”, 7th International Workshop on Supramolecular Nanoscience of Chemically Programmed Pigments (SNCPP11), Kusatsu (Shiga), Jun. 10-11, 2011.
- ⑬ Toru Oba, Misaki Morioka, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, Mari Yoshizato, Shin-ichi Sasaki, and Hitoshi Tamiaki, “Synthesis and Properties of Sulfur-Containing Chlorophyll Derivatives”, 7th International Workshop on Supramolecular Nanoscience of Chemically Programmed Pigments (SNCPP11), Kusatsu (Shiga), Jun. 10-11, 2011.
- ⑭ Toru Oba, Kohei Matsuda, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, and Hitoshi Tamiaki, “Conversion of the Peripheral Substituent of Tetrapyrroles with Thiol”, 7th International Workshop on Supramolecular Nanoscience of Chemically Programmed Pigments (SNCPP11), Kusatsu (Shiga), Jun. 10-11, 2011.
- ⑮ 岩部 勇希・伊藤 智志・大庭 亨・平谷和久・佐藤 剛史・伊藤 直次(宇都宮大院工)、「超臨界二酸化炭素を用いた新規イソインドール誘導体の合成」、日本化学会第91春季年会、大阪、2011年3月29日
- ⑯ 五味 潤 雄太・伊藤 智志・大庭 亨・平谷和久(宇都宮大院工)、「エステル基を複数持つテトラベンゾポルフィリンの合成と物性」、日本化学会第91春季年会、大阪、2011年3月29日
- ⑰ 伊藤 智志・伊藤 貴洋・大庭 亨・平谷和久(宇都宮大院工)、「テトラベンゾポルフィリンバナジル錯体の合成と物性」、日本化学会第91春季年会、大阪、2011年3月29日
- ⑱ 手谷 祥彦・伊藤 智志・大庭 亨・平谷和久(宇都宮大院工)、「*meso* 位臭素化ベンゾポルフィリンの合成」、日本化学会第91春季年会、大阪、2011年3月29日
- ⑲ 永山 勇樹・伊藤 智志・諸星 知広・加藤 紀弘・池田 幸・大庭 亨・平谷和久(宇都宮大院工)、「Quorum Sensing 阻害効果を有するシクロデキストリン誘導体の合成」、日本化学会第91春季年会、大阪、2011年3月29日
- ⑳ 和知 由里子・倉山 文男・大庭 亨・加藤 紀弘・飯村 兼一(宇都宮大院工)、「クロロフィル誘導体単分子膜における分子配列と光電流発生特性」、日本化学会第91春季年会、大阪、2011年3月29日
- 21 大庭 亨・柳田史乃・伊藤智志・平谷和久、「ヘムシャペロンのモデル反応系(2)アミン付加クロロフィル類の性質」、日本化学会第90春季年会、横浜、2011年3月26日
- 22 大庭 亨、松田康平、伊藤智志、平谷和久、民秋 均、「チオール類を用いたクロロフィル誘導体の変換反応」、日本化学会第90春季年会、横浜、2011年3月26日
- 23 大庭 亨、森岡みさき、伊藤智志、平谷和久、吉里真理、佐々木真一、民秋 均、「含硫黄置換基を有するクロロフィル誘導体の合成と性質」、日本化学会第90春季年会、横浜、2011年3月26日
- 24 福住高則、伊藤智志、平谷和久、民秋 均、池田 幸、大庭 亨、「新規な酸化反応を応用したクロロフィルペプチド複合体の合成」、日本化学会第90春季年会、横浜、2011年3月26日
- 25 Takanori Fukusumi, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, Tsukasa Ikeda, and Toru Oba, “A novel oxidation reaction and its application to Fmoc solid phase synthesis of therapeutic photosensitizers”, P2-375, The 5th International Peptide Symposium, Kyoto, Dec. 4-9, 2010.
- 26 Toru Oba, Tetsuya Sato, Kanae Togo, Yoshimi Yosioka, Shinya Natroi, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, “Pigment-helix interactions suggests a maturation process of a photosynthetic protein”, P1-175, The 5th International Peptide Symposium,

- Kyoto, Dec. 4-9, 2010.
- 27 Toru Oba, Makoto Oda, Yurie Yamanaka, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, "Hydrogel nanoparticles for photosensitizing drugs", J-7, 20th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 21, 2010.
- 28 Toru Oba, Takuya Nagata, Takero Nagai, Yoshiyuki Suwa, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, "Assembly and magnetic orientation of conjugates of bio-supramolecules and nanoparticles", P-14, 20th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 21, 2010.
- 29 Toru Oba, Tetsuya Sato, Kanae Togo, Yoshimi Yoshioka, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, "Affinity between chlorophylls and a pigment binding motif in a photosynthetic reaction center", P-33, 20th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 22, 2010.
- 30 Toru Oba, Manami Hiraide, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, "Nano-formulation of chlorophyll aggregates for photodynamic therapy", P-34, 20th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 22, 2010.
- 31 Takanori Fukusumi, Satoshi Ito, Kazuhisa Hiratani, Tsukasa Ikeda, and Toru Oba, "Synthesis of peptidyl photosensitizers by a novel oxidation reaction", J-19, 20th MRS-Japan Academic Symposium, Yokohama, Dec. 22, 2010.
- 32 大庭 亨・宇田裕貴・松田康平・福住高則・伊藤智志・平谷和久・民秋 均、「クロロフィル a 誘導体からクロロフィル d 誘導体への新規変換反応」、生体関連シンポジウム、大阪、2010年9月25日
- 33 大庭 亨・宇田裕貴・藤郷佳苗・松田康平・福住高則・伊藤智志・平谷和久・民秋 均、「クロロフィル d の合成経路に関するモデル研究」、光合成の色素系と反応中心に関するセミナーXVIII、京都、2010年7月10~11日
- 34 T. Oba, K. Togo, S. Ito, and K. Hiratani, "An artificial enzymes for chlorophyll demetallation", 6th International Workshop on Supramolecular Nanoscience of Chemically Programmed Pigments (SNCPPI10), Kusatsu (Shiga), Jun. 11-12, 2010.
- 35 永山 勇樹・伊藤 智志・諸星 知広・加藤 紀弘・池田 宰・大庭 亨・平谷和久 (宇都宮大院工)、「クオラムセンシング阻害効果を有するシクロデキストリン誘導体の合成」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月29日
- 36 伊藤 貴洋・伊藤 智志・大庭 亨・平谷和久 (宇都宮大院工)、「5,15位二置換ベンゾポルフィリンの合成と物性」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月29日
- 37 小松 卓矢・清野 孔明・伊藤 智志・大庭 亨・平谷 和久 (宇都宮大院工)、「2メソフッ素化、及び塩素化ベンゾポルフィリンの合成と物性」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月29日
- 38 和知 由里子・倉山 文男・大庭 亨・加藤 紀弘・飯村 兼一 (宇都宮大院工)、「クロロフィル誘導体単分子膜の構造と光電流特性」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月29日
- 39 大庭 亨・永田拓也・伊藤智志・平谷和久、「蛋白質およびペプチドを用いた超分子形成とナノ素子化」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月28日
- 40 大庭 亨・老沼 栄・伊藤智志・平谷和久、「ペプチドを利用したクロロフィル輸送システムの構築」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月27日
- 41 大庭 亨・柳田史乃・伊藤智志・平谷和久、「ヘムシャペロンのモデル反応系に関する研究」、日本化学会第90春季年会、大阪、2010年3月27日
- 42 Toru Oba, Kanae Togo, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, "Kinetics of Chlorophyll Demetallation and Possible Design of the Active site for the Reaction", P-128, The 46th Japanese Peptide Symposium, Kokura, Nov. 4-6, 2009.
- 43 Toru Oba, Yoshimi Yoshioka, Satoshi Ito, and Kazuhisa Hiratani, "Intermolecular Interactions between Chlorophyll and Peptides that mimic the in vivo binding moieties", P-005, The 46th Japanese Peptide Symposium, Nov. 4-6, 2009.
- 44 大庭 亨・宇田裕貴・伊藤 智志・平谷和久・民秋 均、「チオール類を用いたテトラピロール類の官能基変換反応性」、日本化学会第3回関東支部大会、東京、2009年9月5日

[その他] ホームページ <http://www.chem.utsunomiya-u.ac.jp/lab/youuki2/oba/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大庭 亨 (OBA TORU)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：30291793