

光受容膜タンパク質バクテリオロドプシンによる バイオミメティックセンシング

笠井克幸 春山喜洋 山田俊樹 秋葉 誠 富成征弘 梶 貴博
照井通文 フェルディナンド・ペパー 片桐祥雅 田中秀吉
菊池 宏 岡田佳子 大友 明

バクテリオロドプシン (bR) は光駆動プロトンポンプ機能をもつ光受容性膜タンパク質であり、塩湖に生息している高度好塩菌から抽出して得られる。電極と電界液界面の bR に光を照射すると時間微分応答性の光電流が得られ、動物の視物質に類似した機能を有する。ここでは、バイオ分子に適したディップコーティング法による bR の薄膜作製と評価、光応答特性、及び視覚機能構築へ向けたバイオミメティックセンシング応用について紹介する。

1 まえがき

近年、生物の優れた機能に学ぶという研究が多方面で進められているが、自然が数十億年をかけて創りだした生物は現在の技術でも作りだすことが困難なナノスケールの高機能バイオ分子をすでに有している。このバイオ分子そのものを利用して現在の技術と融合することにより、生体システムの高度な機能を活かした新たなバイオミメティック人工システムなどが実現できると考えられる。NICT では、これらの実現へ向けた研究開発により、低環境負荷・低コストの新奇 ICT デバイス産業の創出およびコミュニケーションパラダイムの創成を目指している。そこで我々は、塩湖に生息する高度好塩菌の細胞膜から抽出して得られる光受容膜タンパク質バクテリオロドプシンを用いたバイオミメティック光センシングの研究開発を進めている。

高度好塩菌は塩湖や塩田などの高塩環境を好んで生育する古細菌であり、アフリカ、セネガルにあるレトバ湖という塩湖などで繁殖してその水面が紫色になっていることが知られている。1971 年にマックス・プランク生化学研究所の D. Oesterhelt とカリフォルニア大学の W. Stoeckenius は、この紫色が高塩濃度のところで生育する高度好塩菌と呼ばれるバクテリアであることを明らかにした^[1]。このバクテリアは学名を *Halobacterium salinarum* (慣用名 *Halobacterium halobium*) といい、その細胞膜に紫色の膜タンパク質をもっている。このタンパク質には動物の視物質であるロドプシンと同様に発色団であるレチナール (ビタミン A アルデヒド) が結合しており、バクテリアが有するロドプシンであることからバクテリオロドプシン (bR) と呼ばれている。

その機能も動物の視物質ロドプシンに類似しており、光駆動のプロトンポンプ機能を有している^[2]。bR の光反応はロドプシンと同様にレチナールの光異性化によって始まるが、光分解代謝型のロドプシンと違って元の状態に戻ることから、図 1 に示す光化学反応サイクルを有している。図中のアルファベットは各中間体を、また添字は吸収極大波長を示している。基底状態にある bR は黄色の光を吸収すると各種中間体を経て準安定状態である M 中間体に至り (bR → J → K → L → M)、レチナールに存在したプロトン (H⁺) が細胞外へ放出される。M 中間体は熱的緩和により初期の基底状態へと戻り (M → N → O → bR)、その過程でプロトンの取り込みがおこる。この一連の光化学反応サイクルは、室温で約 10 ミリ秒である^{[3][4]}。高度好塩菌は、このプロトンポンプ機能を用いて細胞の内外に

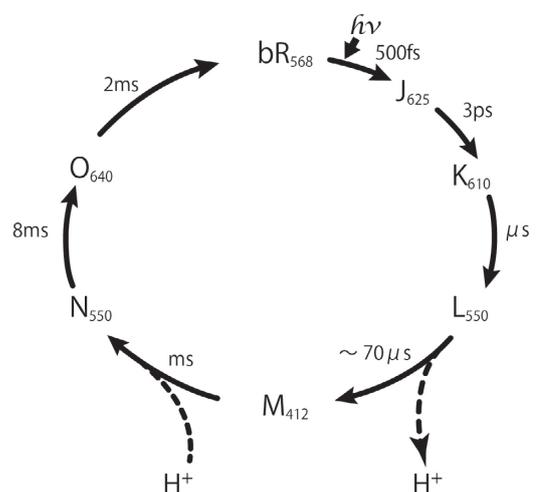


図 1 バクテリオロドプシン (bR) の光化学反応サイクル

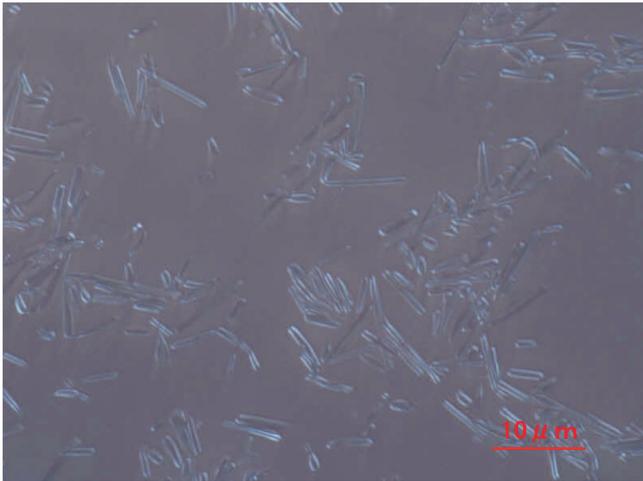


図2 高度好塩菌 (*Halobacterium salinarum*)

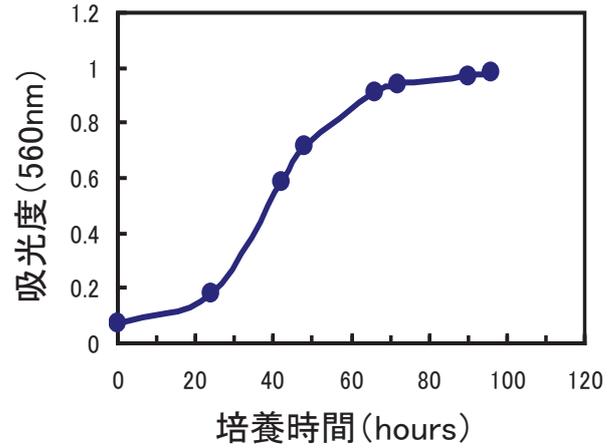


図3 高度好塩菌の増殖曲線

プロトンの濃度勾配を作り出し、その電気化学ポテンシャル差から ATP 合成酵素系を駆動してエネルギーを作り出している^[5]。このように、bR は動物の視物質と違い照射による代謝がなく光化学反応を繰り返す安定な光受容性タンパク質である。他のタンパク質に比べて光化学反応や熱に対して高安定でもあることから工学的応用研究の題材として好適であり、光応答デバイス、非線形光学応答デバイス、実時間ホログラム記録、空間変調素子などへの応用の試みが報告されている^{[6]-[11]}。電極と電解液界面のバクテリオロドプシンに光を照射すると時間微分応答性の光電流が得られ、光強度の変化のみに応答する信号が外部から電源供給を受けることなく得られる。この時間微分応答型の光応答特性はヒトあるいは動物の網膜における光情報圧縮特性に類似しており、視覚機能のようなバイオミメティック光情報処理に有用なバイオ材料と言える。本稿では、バイオ分子に適したディップコーティング法による bR 薄膜作製と評価、bR 薄膜を用いた光応答セルの時間応答特性、及び視覚機能における受容野をシミュレートするバイポーラ型 bR 光センサーの構築について報告する。

2 バクテリオロドプシン (bR) の培養と精製

バイオ材料である bR は、実験室において高度好塩菌を培養・精製することにより得ることができ、環境負荷の少ない資源である。高度好塩菌は塩湖や塩田のような塩濃度の非常に高い環境に適応しており、4 M 以上のほぼ飽和食塩水中で最もよく生息している。このような過酷な生育条件では他の雑菌などが生息できないため、実験室で容易に培養ができる。この好塩菌は図2に示すように長さ数~10 μm 程度の細長い桿体であり、菌体の前後に数本のべん毛をもつ。タンパク質

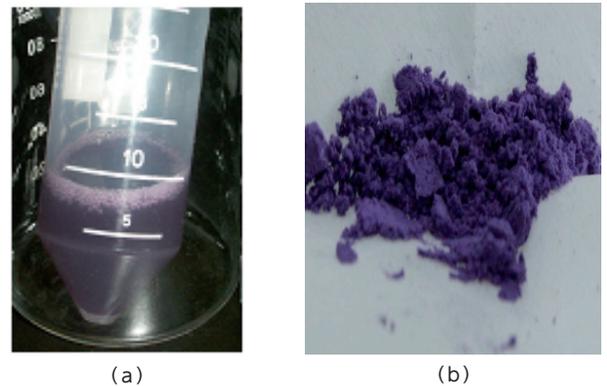


図4 培養した高度好塩菌から精製して得られた bR 紫膜の (a) 懸濁液と (b) フリーズドライパウダー

と糖よりなる細胞壁をもち、その内側に細胞膜がある。細胞膜は紫膜と赤膜からできていて、紫膜は直径約 0.5 μm、厚さ約 4 nm の円盤型の形状をしている。紫膜は bR タンパク質であり、赤膜はバクテリオルベリンという赤色の色素で菌体内に近紫外線が入らないための役割をしている。bR 紫膜の生成量が多い高度好塩菌の野生菌株を入手し（提供元：理研バイオリソースセンター、創価大学久保研究室）、菌の培養と bR の精製を行った。図3は、培養時に得られた増殖曲線を示している。培養液の吸光度（波長 560 nm）の時間変化を分光光度計で測定した結果、約4日で高度好塩菌の増殖が飽和していることが分かる。増殖した菌を破碎し、透析・遠心・ショ糖密度勾配遠心分離法によって分離分画して紫膜を得ることができた^{[12][13]}。図4 (a) は実験室で得られた bR 懸濁液であり、(b) はフリーズドライ製法によりパウダー化したものである。紫膜の回収量は1リットル培養時に 13 mg、10リットル培養時に 240 mg であった。図5は、精製した bR 紫膜と赤膜の分光吸収特性である。bR 紫膜は、前述のように光化学反応サイクルにおいて基底状態からプロトンを放出して準安定状態へ変化する際に、波長 570 nm 付近におい

て吸収極大をもっている。

3 ディップコーティング法による bR 薄膜作製と評価

bR の電極への固定化法として、従来はキャスト法、電着法、ラングミュア・プロジェクト法 (Langmuir-Blodgett: LB) 法、交互積層法などが用いられてきた^{[6][14]-[17]}。我々は、bR 薄膜を作製するために新たにディップコーティング法を導入した^[18]。この方法では、高度好塩菌から精製抽出した bR を効率良く薄膜化できることに加え、均一な薄膜の作製及びマスキングを用いた薄膜のパターニングが容易である。図 6 にディップコーティング装置の外観を示す。安定で均一な薄膜を作製するために、ディップコーティング装置は防音除振ボックスの中に設置されている。bR 固定化の基板には、透明導電性の ITO (Indium Tin Oxide) 膜付ガラス基板(ジオマテック社 FLAT ITO)を UV オゾンクリーナーで洗浄して用いた。bR 懸濁液には、Tris-HCl 緩衝液 (10 mM) を添加してタンパク質の凝

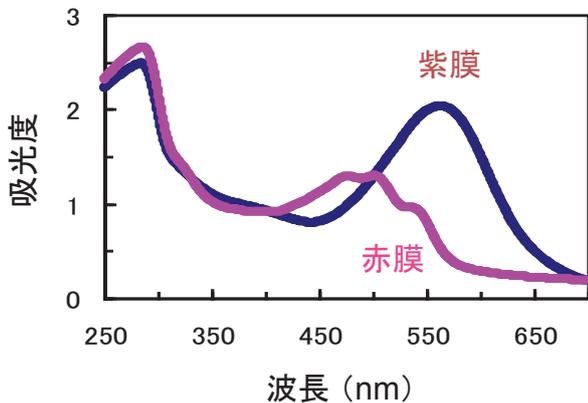


図 5 bR 紫膜の分光吸収特性



図 6 防音防振ボックス内に設置されたディップコーティング装置

集を抑制している。図 7 は、ITO 基板を bR 懸濁液から引上げながらディップコーティング法により bR 薄膜を作製しているところである。ディップコーティング法では基板の引上げ速度により膜厚制御が可能であり、引上げ速度に応じた膜厚の評価を行った。bR 懸濁液の濃度を 5 mg/ml とし、ITO 基板の引き上げ速度を 0.01 ~ 10 mm/sec と変化させて複数の bR 薄膜を作製して干渉顕微鏡 (Zygo 社 NewView 6200) で膜厚を測定した。図 8 に基板引き上げ速度に対する膜厚の変化を両対数スケールで示す。ディップコーティング法においては、溶液の密度・粘度と引き上げ速度が成膜パラメータとなる^{[18][19]}。bR 懸濁液の濃度・温度が一定の場合、膜厚は引き上げ速度の平方根に比例し、引き上げ速度の増加と共に膜厚が増大する。これらの実験結果によれば、引き上げ速度の制御により bR 薄膜の膜厚を 4 ~ 50 nm の範囲で制御することが可能である。bR 紫膜の膜厚は約 4 nm であるため、単層から 12 層程度までの膜厚制御が可能になることとなる。また、bR 懸濁液の濃度の違いによっても膜厚は変化するが、5 mg/ml の濃度の時に最も均一な薄膜を作製することができた。次に、AFM (Atomic Force Microscope) を用いて、作製した bR 薄膜 (引き上げ速度: 0.1 mm/sec)

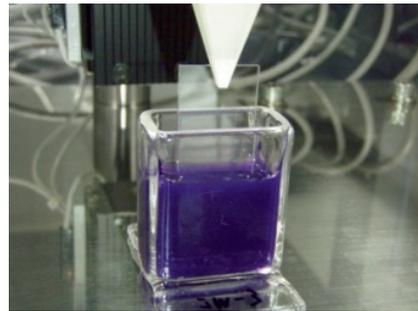


図 7 ディップコーティング法による bR 薄膜の作製 (ITO 基板を bR 懸濁液 (紫色) から引き上げている)

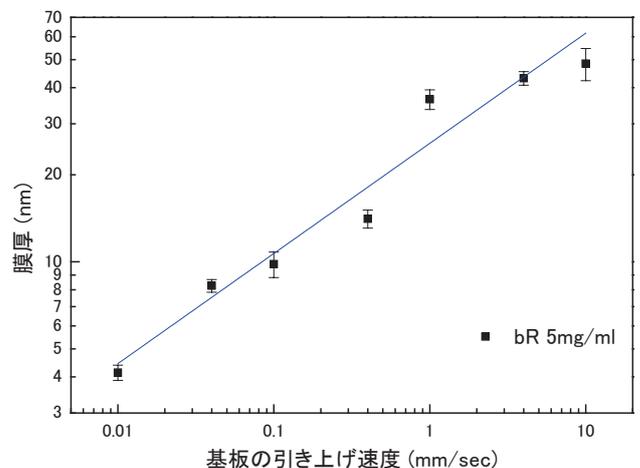


図 8 基板引き上げ速度と膜厚の関係 (bR 濃度: 5mg/ml)

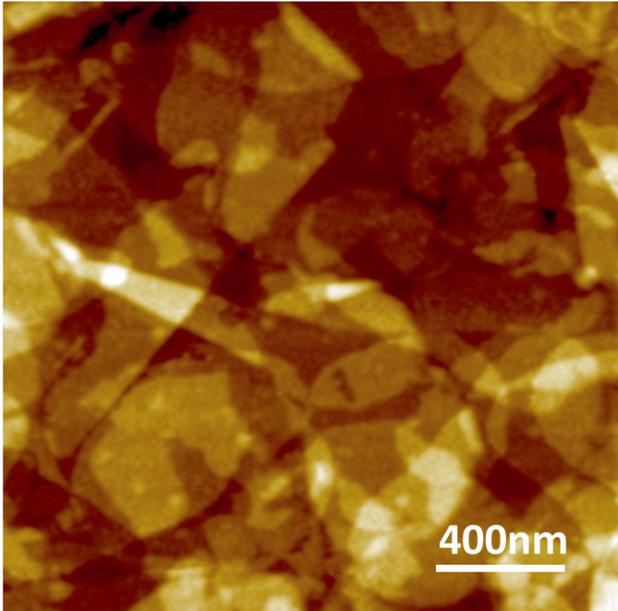


図9 bR紫膜のAFMイメージ

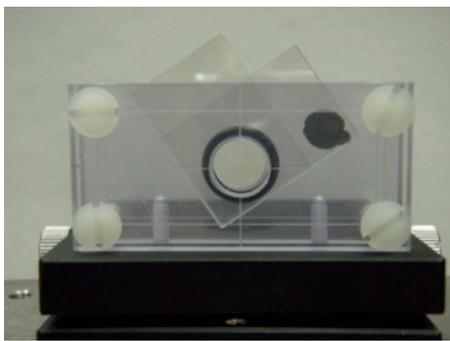
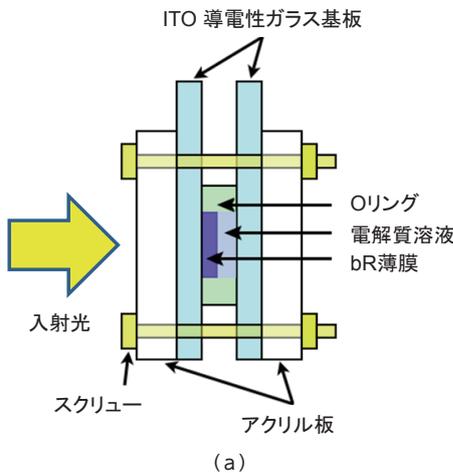


図10 bR薄膜を用いた光応答セルの (a) 構造と (b) 外観

の観察を行った。図9はbR紫膜のAFMイメージであり、0.5～1 μm程度の円状あるいは楕円状の紫膜が確認された。ディップコーティング法で作製されたbR薄膜では、この紫膜が積み重なるように積層されて膜を形成していると考えられる。

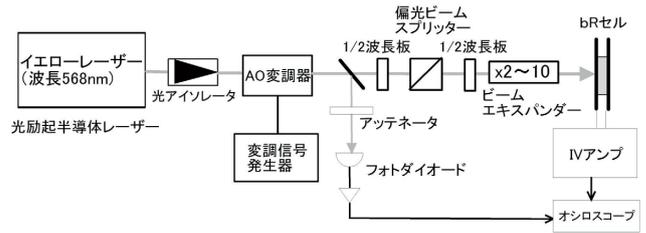


図11 bRセル光応答特性評価のための実験構成

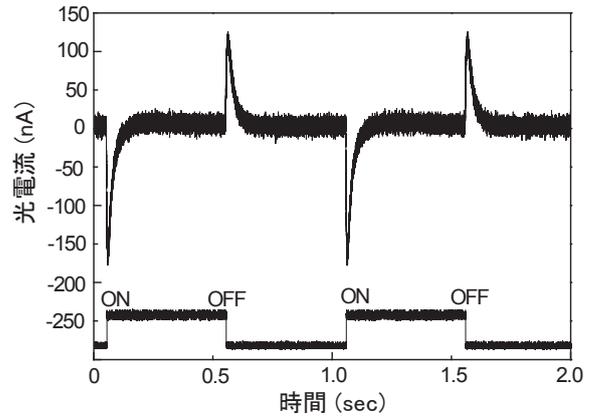


図12 bRセルの時間微分型光電流応答特性 (下側の信号はフォトダイオードからのON/OFF参照出力)

4 光応答セルの作製と時間応答特性

ディップコーティング法で作製したbR薄膜を用いて光応答セルを作製し、照射光に対する時間応答特性の評価を行った。図10に、ディップコーティング法で作製したbR薄膜を用いた光応答セルの構造(a)と外観(b)を示す。対向する2枚のITO基板の一方にbR薄膜が成膜されており、Oリング(厚さ1.9 mm、内径9.8 mm)を用いて電解質溶液(KCl, 0.2 M, pH7.2)が封入されている。両側のアクリル板は、対向するITO基板を固定化するためのものである。作製したbRセルの光応答特性を評価するための実験構成を図11に示す。bRの基底状態における吸収極大波長は570 nm付近にあるため、光源として同波長のイエロー光出力が可能な光励起半導体レーザー(COHERENT社 Sapphire 568)を用いた。レーザー光出力はAO変調器を用いてON/OFF変調され、ビームエキスパンダーを用いてbRセルの受光部全体を照射している。bRセルから出力される光電流は、電流電圧変換増幅器(IVアンプ)を用いてオシロスコープで観測されている。照射光強度はフォトダイオードを用いてモニターされている。図12はディップコーティングの引き上げ速度1 mm/secで作製した膜厚36 nmのbR薄膜を用いたセルに、1 HzでON/OFF(70 mW)する光を照射した時に得られた光電流である。光照射のON/OFF時

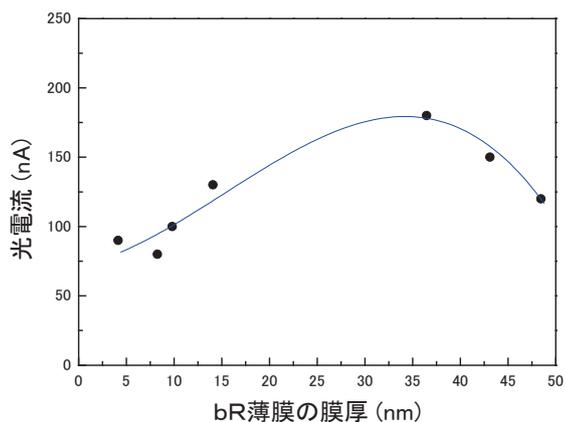


図 13 光電流 (光照射 ON 時) の膜厚依存性

の変化に対応する時間微分応答の特性を示しており、光照射 ON 時に -180 nA、OFF 時に $+130$ nA の一過性光電流が得られている。この微分応答型の光電流は bR のプロトン (H^+) ポンプ機能のメカニズムに大きく起因しており、他の方法で作製した bR 薄膜を用いた例と同様に、プロトン放出・取り込みに依存した電極表面の pH 変化に由来すると考えられる^{[20] - [22]}。光電流の応答方向については、光照射 ON 時に薄膜が固定化されている電極から電流が流れ出すカソード方向であり、光照射 OFF 時にアノード方向であった。次に、ディップコーティングの際の引き上げ速度を変化させて各種の膜厚の bR 薄膜を作製し、その光電流 (ON 時) の膜厚依存性を測定評価した。図 13 は bR セルから発生する光電流の膜厚依存性を示している。膜厚の増加と共に光電流は増大して膜厚 36 nm において電流値最大となり、さらに膜厚を増加させると電流値は減少し始めた。bR 紫膜の厚さが 4 nm 程度であることから、その積層が 9 層になるまで電流値が増大していることになる。この光電流の起源は方向性のある bR のプロトンポンプ機能に基づくものであり、bR の極性配向と大きく関連している。膜厚にほぼ比例して光電流が増大していることから、ディップコーティング法で作製した bR 薄膜はその極性配向がある程度揃うように引き上げ速度に応じて積層されていると考えられる^{[23][24]}。また、膜厚 36 nm 以上での電流値の減少は、積層時の極性配向の乱れと薄膜の厚さによる等価抵抗の増大などに起因している可能性がある^[25]。

5 バイポーラ型セルによる視覚機能構築

ヒトあるいは動物の視覚機能においては、網膜に入った光信号は視細胞で電気信号に変換され水平細胞、双極細胞などを経て神経節細胞に達する。この際に光信号のすべての情報が脳に伝えられて処理されるのではなく、前処理としての視覚情報処理が行われている。

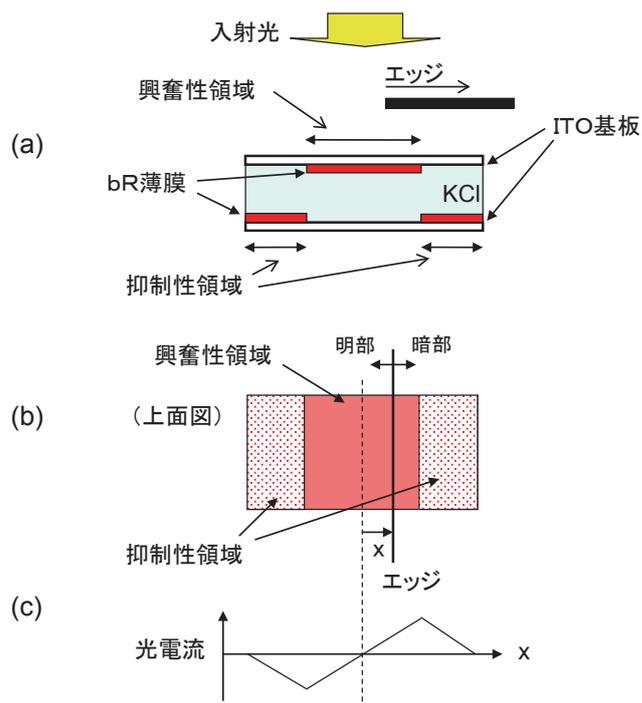


図 14 バイポーラ型 bR セルを用いた受容野の構築：(a) セルの構造 (断面図) (b) セルの構造 (上面図) (c) エッジ検出の概念図

その前処理のひとつとして輪郭抽出 (エッジ検出) 機能がある。輪郭抽出機能は、視覚機能における画像認識において重要な情報処理のひとつである。神経節細胞は網膜上の受容野と呼ばれる領域に光刺激が与えられると、興奮性または抑制性の応答を示す。これによって、画像の輪郭が強調され脳に伝達されている。bR セルからの光応答信号はヒトや動物の視覚と同様の時間微分応答波形を示すため、興奮性と抑制性の特徴をうまく組み合わせることにより視覚機能の疑似的な受容野を作り出すことができる^{[26][27]}。

ディップコーティング法を用いた薄膜作製では、マスキング処理をした ITO 基板を引き上げることで bR 薄膜のパターニングを容易に行うことができる。また、bR セルからの光応答電流の方向が光照射時にカソード応答であることに着目すると、対向する ITO 基板の両方に bR 薄膜を作製することよりバイポーラ型の光応答セルを構築することが可能である。さらに、両方の基板の bR 薄膜に選択的なパターニングを行うことにより、等価的な興奮性領域と抑制性領域を極めて簡単な構造で作り出すことができる。したがって、このようなバイポーラ型 bR セルは、視覚機能における基本単位となる受容野の働きをシミュレートするバイオミメティックセンサーとして機能する。図 14 に bR 薄膜を用いて作製したバイポーラ型光応答セルの構成の概要を示す。図 14 (a) に示すように、セルの上側の基板では中央部分 (興奮性領域: Excitatory region) に、下側の基板では両サイド部分 (抑制性領域:

Inhibitory region) に bR 薄膜が作製されている。本実験では作製したセンサーの基本的特性の評価を目的とし、レーザー光(波長 568 nm)をビームエキスパンダーで拡げて照射した状態で遮光板を水平方向(図中の左から右方向)に動かした時のエッジ検出特性を測定した。図 14 (b) はセルの上面図であり、中央部分が興奮性領域(15 × 6 mm²)、両サイド部分が抑制性領域(2 × 15 × 3 mm²)となっている。光照射時に各々の領域から発生する光電流はカソード方向であることから、セルの電極間には興奮性領域(正)の電流と抑制性領域(負)の電流が演算されたものが出力される。その結果、遮光板を動かした時のエッジ検出特性として、図 14 (c) に示すようにエッジの位置に比例した光電流(中央部分)が得られることになる。エッジ移動速度が 120 mm/sec の時に、作製したバイポーラ型 bR 光センサーで得られたエッジ検出特性を図 15 に示す。移動するエッジを検出して変位に応じた光電流が得られており、受容野の機能が一次的にシミュレートされた結果として解釈される。

6 むすび

本稿では、光受容膜タンパク質であるバクテリオロドプシンのディップコーティング法による薄膜作製とバイオミメティックセンシングへの応用について述べた。ディップコーティング法は装置がシンプルであり、室温下で膜厚制御可能なバイオ材料に優しい薄膜作製技術である。今回の薄膜作製条件で得られた光電流は最大で 180 nA であったが、bR 懸濁液の濃度条件によっては 800 nA 程度まで光電流が増大することを確認している。これには作製した薄膜内における紫膜の被覆率なども関係していると考えられ、さらに成膜条件を最適化する必要がある。また、bR セルの積層化によっても電流増大が可能であり、システム始動のトリ

ガーなどに利用できる無電源光応答センサーの構築が可能である。bR の光応答出力は従来のセンサーと異なり、ヒトや動物の視覚と同様の時間微分型の応答である。一定の光量に対しては反応せずに変化があった時のみに反応することから、物体の動きの検出などに適している。シンプルなバイポーラ型構造とパターンニングした bR 薄膜を組み合わせることにより、人工受容野の機能構築が可能であることを示した。この構造ではパターンニングの形状や成膜配置に異方性をもたせることにより物体の移動方向を検出することが可能であり、ロボットビジョンへの適用の可能性について目下検討している^[28]。また、遺伝子組換え技術により光応答特性の異なる bR 変異体を作り出すことが可能であり^[29]、それらを組み合わせてオプティカルフロー(相対運動する物体の速度場)を検出する光センサーの開発も進めている^{[30][31]}。昆虫に内在する視覚情報システムは対象や自身の動きなどの情報を瞬時に知覚するために進化の過程で最適化されており、オプティカルフローを視覚情報として用いている。一方、実環境下で動作する自律移動型ロボットにおいては危険回避などの運動制御に特化したシステムを構築することが重要であり、消費電力、占有面積、コストなどの制約を克服するビジョンシステムを考える必要がある。今後、ネットワークを介したりリモート制御による自律移動型ロボットの普及が想定され、昆虫の視覚系にあるオプティカルフロー検出を模倣するインセクトミメティックセンシング技術の開発が上記の制約を克服するブレークスルーにつながると考えている。

謝辞

高度好塩菌の株菌を提供して頂いた創価大学久保研究室及び理研バイオリソースセンターに感謝の意を表します。また、本研究を開始するにあたり御助言頂いた桐蔭横浜大学小山行一教授に深く感謝致します。

【参考文献】

- 1 D. Oesterhelt and W. Stoeckenius, "Rhodopsin-like Protein from the Purple Membrane of Halobacterium Halobium," *Nature* 233, 149-152, 1971.
- 2 D. Oesterhelt and W. Stoeckenius, "Functions of a new photoreceptor membrane," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 70, 2853-2857, 1973.
- 3 神取秀樹, "ロドプシンの分子科学," *Mol. Sci. (分子科学会)* 5, A0043_1-16, 2011.
- 4 T. Miyasaka, "Design of Intelligent Optical Sensors with Organized Bacteriorhodopsin Films," *Jpn. J. Appl. Phys.* 34, 3920-3924, 1995.
- 5 E. Racker and W. Stoeckenius, "Reconstitution of Purple Membrane Vesicles Catalyzing Light-driven Proton Uptake and Adenosine Triphosphate Formation," *J. Biol. Chem.* 249, 662-663, 1974.
- 6 佐賀佳央, 渡辺正, "バクテリオロドプシンの機能解析と工学応用," *生産研究* 49, 154-161, 1997.
- 7 Y. Okada, I. Yamaguchi, J. Otomo, and H. Sasabe, "Polarization

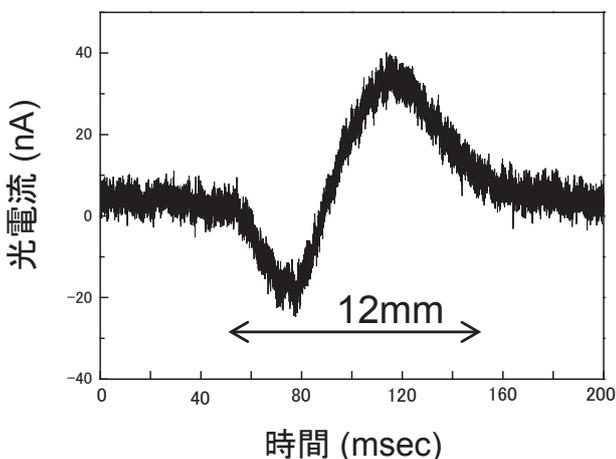


図 15 バイポーラ型 bR 光センサーから得られたエッジ検出特性(エッジ移動スピード: 120mm/sec)

- Properties in Phase Conjugation with Bacteriorhodopsin," Jpn. J. Appl. Phys. 32, 3828-3832, 1993.
- 8 R. Thoma, N. Hampf, C. Bräuchle, and D. Oesterhelt, "Bacteriorhodopsin films as spatial light modulators for nonlinear-optical filtering," Opt. Lett. 16, 651-653, 1991.
 - 9 M. Sanio, U. Settele, K. Anderle, and N. Hampf, "Optically addressed direct-view display based on bacteriorhodopsin," Opt. Lett. 24, 379-381, 1999.
 - 10 T. Miyasaka, K. Koyama, and I. Itoh, "Quantum Conversion and Image Detection by a Bacteriorhodopsin-Based Artificial Photoreceptor," Science 255, 342-344, 1992.
 - 11 T. Miyasaka and K. Koyama, "Image sensing and processing by a bacteriorhodopsin-based artificial photoreceptor," Appl. Opt. 32, 6371-6379, 1993.
 - 12 D. Oesterhelt and W. Stoekenius, "Isolation of the cell membrane of Halobacterium halobium and its fractionation into red and purple membrane," Methods Enzymol. 31, 667-668, 1974.
 - 13 B.M. Becher and J.Y. Cassim, "Improved isolation procedures for the purple membrane of Halobacterium halobium," Prep. Biochim. 5, 161-178, 1975.
 - 14 Y. Jin, T. Hong, I. Ron, N. Friedman, M. Sheves, and D. Cahen, "Bacteriorhodopsin as an electronic conduction medium for biomolecular electronics," Chem. Soc. Rev. 37, 2422-2432, 2008.
 - 15 T. Miyasaka and K. Koyama, "Photoelectrochemical behavior of purple membrane Langmuir-Blodgett films at the electrode-electrolyte interface," Chem. Lett. 20, 1645-1648, 1991.
 - 16 G. Váró and L. Keszthelyi, "Photoelectric signals from dried oriented purple membranes of *Halobacterium halobium*," Biophys. J. 43, 47-51, 1983.
 - 17 J.-A. He, L. Samuelson, L. Li, J. Kumar, and S. K. Tripathy, "Bacteriorhodopsin Thin Film Assemblies - Immobilization, Properties, and Applications," Adv. Mater. 11, 435-446, 1999.
 - 18 L. E. Scriven, "Physics and applications of dip coating and spin coating," Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 121, 717-729, 1988.
 - 19 A. F. Michels, T. Menegotto, and F. Horowitz, "Interferometric monitoring of dip coating," Appl. Opt. 43, 820-823, 2004.
 - 20 Y. Saga, T. Watanabe, K. Koyama, and T. Miyasaka, "Mechanism of Photocurrent Generation from Bacteriorhodopsin on Gold Electrodes," J. Phys. Chem. B 103, 234-238, 1999.
 - 21 Y. Saga, T. Watanabe, K. Koyama, and T. Miyasaka, "Buffer Effect on the Photoelectrochemical Response of Bacteriorhodopsin," Anal. Sci. 15, 365-369, 1999.
 - 22 J.-P. Wang, S.-K. Yoo, L. Song, and M. A. El-Sayed, "Molecular Mechanism of the Differential Photoelectric Response of Bacteriorhodopsin," J. Phys. Chem. B 101, 3420-3423, 1997.
 - 23 T. Yamada, Y. Haruyama, K. Kasai, T. Terui, S. Tanaka, T. Kaji, H. Kikuchi, and A. Otomo, "Orientation of a bacteriorhodopsin thin film deposited by dip coating technique and its chiral SHG as studied by SHG interference technique," Chem. Phys. Lett. 530, 113-119, 2012.
 - 24 T. Yamada, Y. Haruyama, K. Kasai, T. Terui, S. Tanaka, T. Kaji, H. Kikuchi, and A. Otomo, "Orientation of a dip-coated bacteriorhodopsin thin film studied by SHG interferometry," accepted to Jpn. J. Appl. Phys.
 - 25 J.-A. He, L. Samuelson, L. Li, J. Kumar, and S. K. Tripathy, "Photoelectric properties of oriented bacteriorhodopsin/polycation multilayers by electrostatic layer-by-layer assembly," J. Phys. Chem. B 102, 7067-7072, 1998.
 - 26 H. Takei, A. Lewis, Z. Chen, and I. Nebenzahl, "Implementing receptive fields with excitatory and inhibitory optoelectrical response of bacteriorhodopsin films," Appl. Opt. 30, 500-509, 1991.
 - 27 J. Yang and G. Wang, "Image edge detecting by using the bacteriorhodopsin-based artificial ganglion cell receptive field," Thin Solid Films 324, 281-284, 1998.
 - 28 Y. Okada-Shudo, D. Kawamoto, K. Kasai, Y. Zhang, M. Watanabe, and K. Tanaka, SPIE Newsroom, "Robot vision using biological pigments," Published Online, 2012. doi:10.1117/2.1201212.004599. Available at http://spie.org/x91408.xml
 - 29 K. Koyama, T. Miyasaka, R. Needleman, and J. K. Lanyi, "Photoelectrochemical Verification of Proton-Releasing Groups in Bacteriorhodopsin," Photochemistry and Photobiology, 68, 400-406, 1998.
 - 30 Y. Katagiri and K. Aida, "Simulated nonlinear dynamics of laterally interactive arrayed neurons," Proc. of SPIE, 7266, 726610_1-9, 2008.
 - 31 笠井克幸, 片桐祥雅, "オプティカルフローセンサ、光センサ及び光電変換素子," 特願2012-270679.



笠井克幸 (かさい かつゆき)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員
博士 (工学)
量子光学、非線形光学、レーザー制御



春山喜洋 (はるやま よしひろ)

未来 ICT 研究所ナノ ICT
研究室バイオ材料



山田俊樹 (やまだ としき)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員
博士 (工学)
有機材料物性・光計測、ナノ材料

秋葉 誠 (あきば まこと)

未来 ICT 研究所企画室専門推進員
理学博士
光検出技術、半導体デバイス、低雑音技術



富成征弘 (とみなり ゆきひろ)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室有期技術員
超伝導、有機エレクトロニクス、テラヘルツ

4 ナノ・バイオ融合研究



梶 貴博 (かじ たかひろ)
未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究員
博士 (工学)
レーザー光化学、単一分子分光、ナノフォ
トニクス



大友 明 (おおとも あきら)
未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室室長
Ph.D.
ナノフォトニクス、非線形光学



照井通文 (てるい としふみ)
経営企画部企画戦略室プランニングマネージャー
博士 (理学)
物性物理、薄膜、走査型探針顕微鏡、ナノ電
子物性



フェルディナンド・ペパー
脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合
研究室研究マネージャー
工学博士
ナノコンピュータアーキテクチャ、セルオー
トマトン、ニューラルネットワーク、ナ
チュラルコンピューティング



片桐祥雅 (かたぎり よしただ)
脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合
研究室主任研究員
博士 (工学)
健康情報科学、人間情報学



田中秀吉 (たなか しゅうきち)
未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室研究マネー
ジャー/テラヘルツ研究センターテラヘルツ
連携研究室主任研究員兼務
博士 (理学)
ナノ固体物性、走査プローブ顕微鏡および分
光測定、物性物理学、ナノスケール構造科学

菊池 宏 (きくち ひろし)
NHK 放送技術研究所表示・機能素子研究部主
任研究員
博士 (工学)
光エレクトロニクス



岡田佳子 (おかだ よしこ)
電気通信大学情報理工学研究科先進理工学専
攻准教授
工学博士
ナノフォトニクス、バイオフィトニクス