

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2017～2019  
課題番号：17K05931  
研究課題名(和文) 光機能性膜タンパク質による新規光デバイス開発のための生体環境疑似固定法の創製

研究課題名(英文) Development of methods in protein immobilization with artificial life environments for application of photo-receptor membrane protein bacteriorhodopsin to a new optical functional device

研究代表者  
横山 泰範 (Yasunori, Yokoyama)  
名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：80402486  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光機能性膜タンパク質・バクテリオロドプシンを用いた新しい光デバイス開発のため、中核技術となる生体環境疑似固定法の開発に取り組んだ。固体中でも生体分子が溶液中と同等の機能を発揮可能な固定法を探索し、新規光デバイスの基礎となる固体試料を作製した。過渡吸収分光による評価の結果、水分を豊富に保つことができるハイドロゲルで固定することで固体中でも天然の機能性を維持できることを示した。先行研究で見出したゲル中での紫膜積層メカニズムについて検討した結果、静電斥力と枯渇引力のバランスの結果溶液中で形成する紫膜間周期構造と多孔質なゲルネットワーク構造による固定の両方が必要であることを明らかにした。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の研究成果により、固体中でも天然と同等の機能性を維持した固体試料を作製する上での大きな指針が得られ、生体分子の工業応用の可能性を増大することができた。また、溶液中では通常起こらない膜の整列状態がなぜ固体試料中で容易に実現され得るのかについて、単純な物理現象の組み合わせで説明することができ、その機構を解明した。これにより、外部刺激で膜の整列状態を制御することが原理的に可能となり、現代技術における新材料開発の面で生体材料・高分子コンポジット材料の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：To apply a photo-receptor membrane protein bacteriorhodopsin (bR) to a new optical functional device, we developed methods in protein immobilization with artificial life environments. The immobilization methods that bR can function as if in the solution environments was searched and the immobilized bR samples were made. The immobilization samples by hydrogels in which can retain huge water content showed that bR can keep its native functionality even in the solid samples, by an assessment by a time-resolved absorption spectroscopy. We studied about a mechanism for the purple membrane stacking in the hydrogel which was discovered in our previous research. We revealed that both the periodic structure of the purple membranes in solution emerged as a result of balance between electrostatic repulsive force and attractive depletion force and immobilization with a porous gel network structure.

研究分野：生物物理学、タンパク質科学

キーワード：生体材料 光受容タンパク質 工業応用 固定化 疑似生体環境

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

現代社会における技術の発展は半導体素子の小型化を可能とし、我々の生活の利便性向上に貢献してきた。集積回路の密度向上に関する経験則・ムーアの法則によると、2020年代にはプロセスサイズ 5 nm 程度まで微細化が達成されると予想されるが、ここまで微細化すると電子回路としては安定的に使用できなくなる。つまり、現代技術の枠組みはいずれ限界を迎えることになり、今後の継続した技術発展のために新しい技術によるブレークスルーが必要となる。その観点から見ると、生命の分子機械・タンパク質の応用はこの目的に合致する。nm オーダーサイズの構造からなるタンパク質は、外部刺激に対し高効率・選択特異的な応答を示すためである。しかしタンパク質のデバイス応用については芳しい成果が得られていない。その原因は、タンパク質の構造は水溶液環境下で非常に弱い相互作用のバランスの上で形成されるので、水中においても容易に変性し失活するためである。さらに水以外の環境下で天然状態を保つこと自体が困難で、工業応用の難しさの一因となっている。

この問題意識の中、研究代表者は光受容膜タンパク質バクテリオロドプシン(bR)の新しい光デバイス応用に取り組んでいる。細胞膜中でbRは3量体が6方格子を組んだ2次元結晶(格子定数: 6.27 nm)<sup>1</sup>を自発的に形成し、極めて高い熱安定性<sup>2</sup>を持つため、デバイス応用に大きな利点となる。結晶中のbR分子は光照射により本来の機能である光駆動プロトンポンプ機能を発現するのに対し、研究代表者は結晶が融解した条件下での光照射によりbRが変性し色素レチナルの退色が起きることを見出した。<sup>3,4</sup>その発見から、bRの2次元結晶からなる膜を記録層とし、結晶性の制御により光で色の変化を誘起して書込む光記録素子への応用を着想した。

タンパク質のデバイス応用のための第1歩として、タンパク質の存在環境を水溶液系から固体系へ転換する必要があるが、その際タンパク質の天然の機能性は維持されなければならない。bRの光機能が存在環境の水分量に敏感であること<sup>5</sup>を考慮して、研究代表者は固定化媒体に親水性高分子が形成するハイドロゲルに着目した。様々な高分子の中で、タンパク質へのダメージの恐れがある化学架橋剤を使用せず、高温での処理が必要ない方法として、紫膜(bRの2次元結晶からなる平面膜)をポリビニルアルコール(PVA)の凍結融解(FT)法<sup>6</sup>により固定した。結果として、bRの天然の機能性を維持した固体試料作製に成功したが、固定化の過程で紫膜が水溶液中では見られない非常に特異な構造を取ることを<sup>7</sup>を見出した。つまり、PVAと紫膜を混合したゾルの状態で紫膜間に約20 nmの等方的な周期構造が形成され、凍結融解過程を繰り返してできたゲルの状態では紫膜は一方向に積層した。<sup>7</sup>

この紫膜の特異な構造形成機構は全く不明であるが、記録層の高密度化や光励起の高効率化など応用上有益であるので、積層制御のためにメカニズムを理解する必要がある。また、PVA-FTゲルは高分子鎖間が水素結合で架橋された所謂物理架橋ゲルで、比較的低い温度(60°C)で融解するなど、応用面で問題も残っている。より強固なで、タンパク質の機能性を維持し得る疑似生体環境とも言える固定化媒体・方法を探索する必要がある。

### 2. 研究の目的

本研究課題における目的は、光機能性膜タンパク質・bRの光デバイス応用を実現する上で必須となるbRの機能性を維持しつつ強固な構造による固定法(生体環境疑似固定法)を開発することにある。また、PVAゾルおよびFTゲル中で見られた特異な膜構造の形成機構を解明し、固体試料中での紫膜の積層制御に取り組む。

### 3. 研究の方法

#### (1) 生体環境疑似固定法の探索

研究代表者の先行研究では、紫膜の固定方法としてPVAのFT法が試みられその対照実験としてアガロースによる固定が行われたただであった<sup>7</sup>。これはbRに対する侵襲性のリスクを避けるため、化学架橋剤による化学ゲルによる固定については取り組んでこなかった。本研究課題においては、物理架橋ゲル・化学架橋ゲルの枠を取り払い幅広く固定化媒体を選択し、紫膜を固定した固体試料を作製した。具体的には、まずPVAにジメチルスルホキシド(DMSO)を混合して得られる物理架橋ゲル、同じくPVAにグルタルアルデヒド(GA)を混合して得られる化学架橋ゲルであり、これらは同一の固定化媒体中でbR機能性にどのような影響があるかを検討する。他には化学架橋ゲルであるポリアクリルアミド(PAAm)ゲルとN-イソプロピルアクリルアミド(NIPAm)ゲルと、通常のゾルーゲル転移とは逆の高温でゲル化するメチルセルロース(MC)ゲルについて作製した。これらの固体試料中のbR機能性の評価を、bRが機能する際に経る光中間体への構造変化パルスウェイ(光サイクル)を過渡吸収測定により直接評価した。

#### (2) 紫膜積層メカニズムの解明

研究代表者の先行研究において、PVAゾル中で見られた紫膜間の約20 nmの周期構造は紫膜濃度が増加すると減少したことから、この周期構造は紫膜とPVA分子の間の何らかの相互作用の結果であることが示唆されていた<sup>7</sup>。一方ゲル化後の紫膜積層については、多孔質なゲルネットワーク構造を形成するPVA-FTゲル中の10 μm程度の大きさの穴の中で、紫膜表面に多く存在する負電荷アミノ酸間の静電斥力を避けるように試料全体に一方向に整列すると考えていた<sup>7</sup>。そこで、問題を①ゾル中での紫膜間の周期構造と、②ゲル化後の紫膜積層の2つに分け、それぞれどのような相互作用が関与するのか、詳細に検討した。具体的には、上述の課題(1)に

において作製した様々なゲルについて、ゾル状態の試料について小角 X 線散乱(SAXS)測定を行い、紫膜間の周期構造の有無ならびに周期間隔を求めるとともに、ゲル化した固体試料についても可視の円二色性(CD)測定から紫膜積層を評価した<sup>8</sup>。同じ PVA による固体試料でも作製方法によって形成されるゲルネットワーク構造が大きく異なるため、今回紫膜積層とゲルネットワーク構造の関係性についても検討を行った。上記 2つの問題設定に共通し、紫膜表面の負電荷アミノ酸の影響を塩添加による静電遮蔽の効果を評価した他、プロテアーゼ処理により負電荷リッチな C 末端ペプチドのみを切除した酵素処理紫膜を固定化し、上記の実験を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 生体環境疑似固定法の探索

まずはじめに、様々な固定化媒体・固定方法により紫膜試料を固定した試料を作製し、bR の機能評価を行った。Fig. 1 に PVA-DMSO ゲル、PVA-GA ゲル、アガロースゲルにより固定した紫膜 bR の過渡吸収測定結果を、参照実験である紫膜懸濁液の結果と共に示す。横軸にレーザー励起からの遅延時間、縦軸に吸光度の変化を取り、bR 光サイクル中における 2つの光中間体(M, O)と基底状態(BR)の最大吸収波長の時間発展を示している。Fig. 1(a)を見ると、BR の励起後 M 中間体への遷移が 0.3  $\mu$ s にかけて見られ、その後 M 中間体の減衰とともに O 中間体への遷移が 3  $\mu$ s 付近の時間領域で観測された。さらに O 中間体の減衰と相まって BR の復元が生じ、20 ms 付近で完全に BR に戻った。この結果は過去に報告された紫膜 bR の過渡吸収の結果と良い一致を示しており、以降固体試料のデータと比較するのに用いる。PVA-DMSO ゲル(Fig. 1(b))およびアガロースゲル(Fig. 1(d))により固定した試料については、光中間体の遷移に若干の差異はあるものの(PVA-DMSO ゲルでは懸濁液に比べて 3 倍程度遅く、アガロースゲルでは同程度)、光サイクルの経路の観点からは紫膜懸濁液とほぼ同様のレチナル光反応性を示した。一方、PVA-GA ゲル(Fig. 1(c))で固定した試料については、他の 3つと比較して明らかに異なる光反応性を示した。M 中間体の生成は起こるが、O 中間体を経ずに直接 BR へ復元していることと、中間体の遷移の時定数が懸濁液と比較して 100 倍程度遅くなる結果であった。この光サイクルにおける異常は、GA により bR の 3 量体間で架橋<sup>9</sup>されてしまったためと考えられる。懸濁液系では GA の添加によりプロトンポンプ活性の約 8 割が失われたという報告<sup>10</sup>もある。これらの結果は、基本的に水ゲルを選択し含水量を担保することは必須であるが、GA など bR の機能性に影響するものは使用できないことを示した。

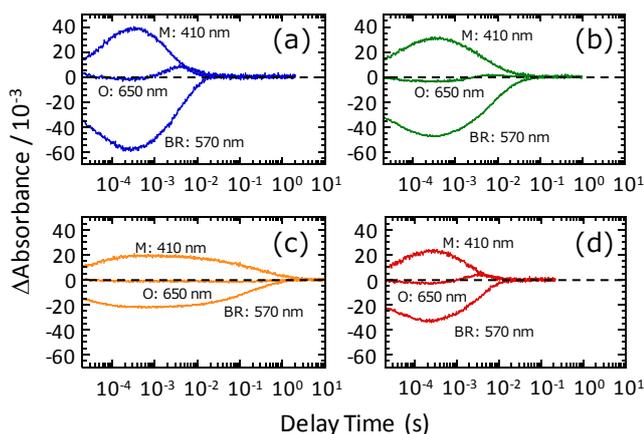


Fig.1. 紫膜固体試料中のbRの過渡吸収測定結果: (a) 紫膜懸濁液(参照実験として), (b) 紫膜/PVA-DMSOゲル, (c) 紫膜/PVA-GAゲル, (d) 紫膜/アガロースゲル。

##### (2) 紫膜積層メカニズムの解明

固体試料中で紫膜が積層しているか否かの判定は、可視 CD スペクトル測定により行った。Fig.2(a)に NaCl 濃度が異なる PVA-FT ゲル固定紫膜(PM)の可視 CD スペクトルを示す。低塩濃度(50 mM)の場合、先行研究<sup>7</sup>と同様に単一の正の CD バンドが観測されたのに対し、高塩濃度(500 mM)では正と負の CD バンドに分裂した。懸濁液中でランダムに配向した紫膜の可視 CD スペクトルは後者の形で観測されるのに対し、単一方向に積層した試料では 2次元格子中に配列した隣接する bR 間におけるレチナルの励起子相互作用が 3 回対称性のため完全にキャンセルされるため、単一の正の CD バンドとして観測される<sup>8</sup>。つまり、固体試料の可視 CD スペクトルの形状から紫膜積層を判定することが可能である。他の固体試料のスペクトルを観測した結果、PVA-FT ゲルの低塩濃度以外の試料は全て紫膜積層が起こらなかった。これらのゲルネットワーク構造は、PVA-FT ゲルは~10

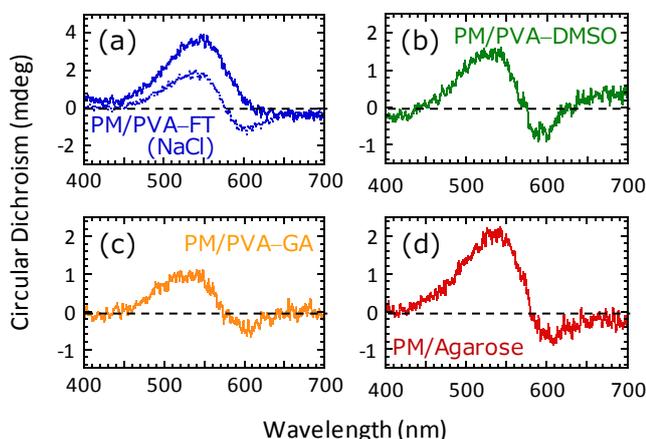


Fig.2. 紫膜固体試料の可視CDスペクトル測定結果: (a) 紫膜/PVA-FTゲル(実線: [NaCl] = 50 mM, 点線: [NaCl] = 500 mM), (b) 紫膜/PVA-DMSOゲル, (c) 紫膜/PVA-GAゲル, (d) 紫膜/アガロースゲル。

μm 程度の孔からなる多孔質であるのに対して、その他のゲルはそれよりも細かい 100~200 nm 程度の網目状のゲルネットワークである。その点を考慮すると、今回得られた可視 CD の結果は興味深い。なぜなら PVA-FT ゲルのゲルネットワーク構造は塩添加に影響しないこと<sup>11</sup>が報告されているので、今回の結果は単純に多孔質なゲルネットワーク構造の場合積層が起こると言うことではないからである。添加する塩濃度の多寡により紫膜積層に影響が生じることを示しており、ゲルネットワーク構造とは別の要因も積層に関係していることを示唆している。

次に、PVA 溶液中で観測された紫膜間の約 20 nm 周期の構造について検討した。Fig.3 に PVA-NaCl 溶液(a)、PVA-DMSO 溶液(b)、PVA-GA 溶液(c)、ならびにアガロースゲル(d)の SAXS データを示す。NaCl を含んだ PVA 溶液では、低塩濃度の場合には  $q = 0.4$  付近(対応する周期  $d = 16$  nm)であり、塩を含まない場合よりも周期が減少した。一方、高塩濃度条件ではピークが完全に消失した。可視 CD のデータと並べて考えると、ゲル中での積層の有無と溶液中の 20 nm 周期構造の有無は対応しているように見える。しかしながら、紫膜積層が起こらなかった PVA-DMSO や PVA-GA では、溶液中で周期構造が観測された。これらの実験結果を整理するため、ゲル中での紫膜積層・溶液中での周期構造・ゲルネットワーク構造で分類し、関連性を検討した。Fig.4 にその結果の模式図を示す。この分類により、紫膜積層には(1) 溶液中での周期構造と(2) 多孔質なゲルネットワーク構造の2つとも必要であることがわかる。多孔質なゲルネットワーク構造の孔サイズは紫膜の長軸方向の長さ(1~2 μm)と同程度かそれより大きなサイズであり、凍結融解過程の繰り返しの伴い数日かけてゆっくりとネットワーク構造が形成される。ゲルネットワーク構造ができる過程で紫膜は構造の再配置をする時間的余裕があるものと考えられる。一方で、他のゲルは 100~200 nm の網目状構造で、ゾルゲル転移により速やかに形成される。そのため、溶液中での周期構造の有無にかかわらず、ゲル化後紫膜は積層しない。ここで、多孔質なゲルネットワーク構造の PVA-FT ゲルで高塩濃度下では紫膜が積層しない結果について考える。SAXS の実験結果では、高塩濃度添加により溶液中の周期構造は消失していた。塩添加でも多孔質な形状に影響はない<sup>11</sup>ことを考えると、塩の影響は主に紫膜間の周期性の身に影響するものと考えられる。塩添加により静電相互作用の及ぶ距離が短くなる静電遮蔽の効果を考えると、負に帯電した紫膜表面間の静電斥力が周期構造形成や積層に深く関連していることが考えられる。

塩の影響を考えるために、塩濃度や添加する塩の価数を変化させて溶液中の周期構造やゲル化後の積層の有無を検討した。静電相互作用の及ぶ距離(Debye 長;  $1/\kappa$ )は、次の式で表わされる。

$$1/\kappa = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0k_B T}{\sum_i \rho_i e^2 Z_i^2}} \quad (1)$$

ここで、 $\varepsilon$ : 比誘電率、 $\varepsilon_0$ : 真空の誘電率、 $k_B$ : ボルツマン定数、 $T$ : 温度、 $\rho_i$ : イオン  $i$  の濃度、 $e$ : 電子素量、 $Z_i$ : イオン  $i$  の価数である。様々な価数のイオンを持つ3種類の塩を紫膜/PVA 溶液に添加した際の紫膜間の構造周期を測定し、(1)式で示した Debye 長との関係を Fig.5 に示した。天然紫膜(a)とプロテアーゼ処理し4つの負電荷アミノ酸を持つC末端ペプチドを切除した酵素処理紫膜(b)の結果を合わせて示す。いずれの試料についても、塩濃度が十分薄い( $1/\kappa$ が大きい)場合は、塩の種類に依らず一定の膜間周期に収束し、塩濃度が高くなり静電相互作用の及ぶ距離

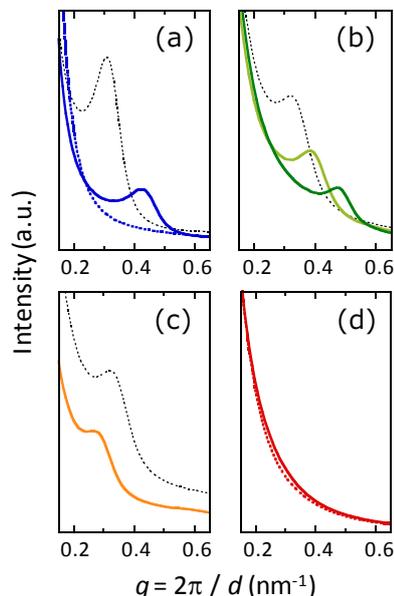


Fig.3. 様々な溶液中における紫膜の小角X線散乱測定結果: (a) 紫膜/PVA溶液(青実線: [NaCl]=50 mM、青点線: [NaCl]=500 mM), (b) 紫膜/PVA-DMSO溶液(黄緑: [DMSO]=0.1 wt%、深緑: [DMSO]=0.5 wt%), (c) 紫膜/PVA-GA溶液, (d) 紫膜/アガロースゲル(赤実線)とアガロースのみのゲル(赤点線)。黒点線は紫膜/PVA溶液のみのデータ。

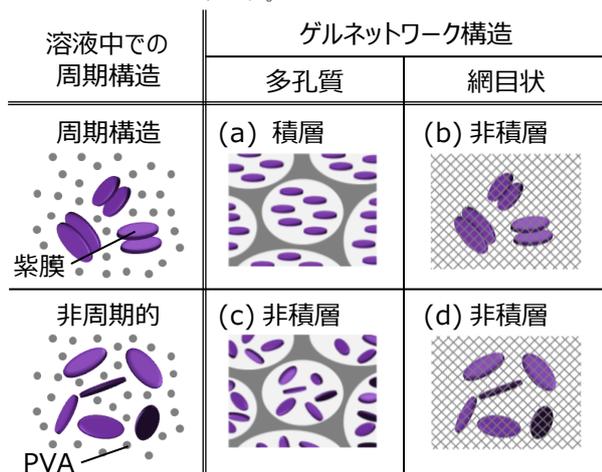


Fig.4. 紫膜積層に対する溶液中の紫膜周期構造とゲルネットワーク構造の相関図: (a) PVA-FTゲル(NaCl低濃度), (b) PVA-DMSOゲルおよびPVA-GAゲル, (c) PVA-FTゲル(NaCl高濃度), (d) アガロースゲル。

が短くなるにつれて膜間距離は減少する結果が得られた。この結果は、静電相互作用が弱まると膜間距離が減少することを明確に示しており、紫膜表面間の静電斥力が溶液中での周期構造形成に本質的な関与をしていることを明らかにした。酵素処理により紫膜表面の負電荷を減じた試料では、 $1/\kappa$ が十分大きい領域で収束する膜間距離が約 3 nm 短くなっており、静電斥力の寄与の重要性を指示するものである。

しかし、ここで1つの疑問が生じてくる。つまり、斥力のみ働く状況で、溶液中でなぜ紫膜は一定の周期を取り得るのか、ということである。これには同時に紫膜間に引力相互作用が働く必要がある。PVA 濃度一定で紫膜濃度を減少により  $d$ が増加することを先行研究<sup>7</sup>で見出しており、PVA と紫膜間に何らかの相互作用が働いていることが想像できる。また、PVA との特異的な相互作用ではなく、より一般的な紫膜-高分子間の相互作用の可能性もある。そこで、今度は紫膜濃度を一定のもと PVA 濃度、

PVA 重合度の  $d$ に及ぼす影響を検討した。同時に、PVA 以外の高分子についても同様の検討を行った。Fig.6 に典型的な SAXS 測定例としてメチルセルロース(MC)添加時の散乱プロファイル(a)と様々な高分子・重合度において得られた  $d$  の高分子濃度依存性(b)を示す。Fig. 6(a)を見ると、紫膜間周期構造は MC 溶液中でも形成されており、その他ポリエチレングリコール(PEG)添加でも同様の周期構造が見られたことから、紫膜間周期構造には高分子による紫膜間の引力相互作用が原因であることが示された。Fig.6(b)に示す通り、高分子濃度や重合度に応じて  $d$ が変化しており、この引力相互作用は高分子溶液中でコロイド粒子間に働く枯渇引力(朝倉・大沢の力)<sup>12</sup>であると考えられる。この結果を受け、コロイド粒子の安定性を記述する DLVO 理論を拡張し、紫膜間に働く van der Waals 力、静電斥力、枯渇引力を考慮したポテンシャル計算を行ったところ、膜間距離 17 nm 付近に極小を持つポテンシャルカーブが再現された。このことから、高分子溶液中での紫膜の周期構造形成機構について明らかにしたと言える。

### (3) ゲルネットワーク構造からの影響と将来展望

ハイドロゲル中での紫膜積層に対するゲルネットワーク構造の影響について、さらに踏み込んで検討した。ポリアクリルアミド(PAAm)ゲルを一般的な方法で作製すると大きさ数 nm 程度の網目構造が形成され、タンパク質の電気泳動に利用される。それに対し、基剤と架橋剤の割合を変化させてゲルを作製すると、数 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの孔を持つ不均一な多孔質ゲルになる。この実験条件で紫膜を固定しても積層は確認できなかったが、興味深いことに凍結融解処理を経ることにより紫膜は積層した。通常の均一な網目ゲルの条件で作製すると、凍結融解を経ても紫膜は積層しなかった。この固体試料のゲルネットワーク構造を顕微鏡観察により評価したところ、ゲル作製直後はいずれの試料も紫膜と同じ程度の 2  $\mu\text{m}$  程度の多孔質構造であったのに対し、凍結融解後は不均一ゲルのみ孔サイズが 4  $\mu\text{m}$  程度まで増加した。このことは、紫膜積層に対する多孔質ゲルネットワーク構造の必要性を強く支持するだけでなく、紫膜積層を多孔質ゲルのポアサイズを変化させることで制御可能であることを強く示唆する。実際、感温性ゲルとして知られる *N*-イソプロピルアクリルアミド(NIPAAm)ゲルで紫膜を固定した試料を作製し、温度上昇によるゲル体積減少の影響を検討したところ、紫膜の積層化が見られた。本研究課題で得られた成果から、将来的に温度などの外部刺激でゲル構造を変化させ紫膜積層を制御する新しいバイオマテリアルとポリマーのコンポジット材料が創製できる可能性を見出すことができた。

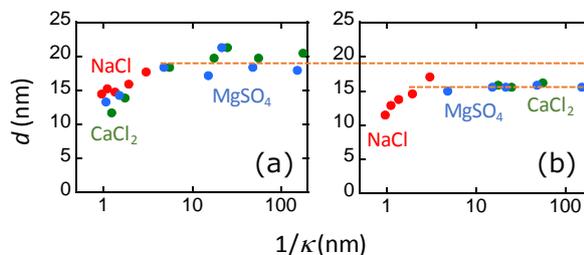


Fig.5. 紫膜/PVA溶液に様々な価数の塩を添加した際の紫膜間周期  $d$  と Debye 長  $1/\kappa$  との関係: (a) 天然紫膜, (b) 酵素処理紫膜。

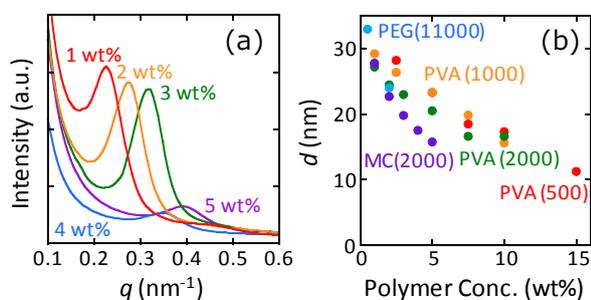


Fig.6. (a) 紫膜MC溶液におけるX線小角散乱プロファイル, (b) 様々な高分子添加による紫膜間距離  $d$  の高分子濃度依存性. 括弧の中の数字は高分子の平均重合度を示す。

【参考文献】<sup>1</sup>R. Henderson, *J. Mol. Biol.* **93**, 123 (1975). <sup>2</sup>M. B. Jackson & J. M. Sturtevant, *Biochemistry* **17**, 911 (1978). <sup>3</sup>Y. Yokoyama et al., *Proteins* **54**, 442 (2004). <sup>4</sup>Y. Yokoyama et al., *J. Phys. Chem. B* **114**, 15706 (2010). <sup>5</sup>G. Váró & J. K. Lanyi, *Biophys. J.* **59**, 313 (1991). <sup>6</sup>N. A. Peppas & S. R. Stauffer, *J. Control. Release* **16**, 305 (1991). <sup>7</sup>Y. Yokoyama et al., *J. Appl. Phys.* **121**, 204701 (2017). <sup>8</sup>D. D. Muccio & J. Y. Cassim, *Biophys. J.* **26**, 427 (1979). <sup>9</sup>P. L. Ahl & R. A. Cone, *Biophys. J.* **45**, 1039 (1984). <sup>10</sup>T. Uruga et al., *J. Biochem.* **108**, 938 (1990). <sup>11</sup>S. Patachia et al., *Express Polym. Lett.* **3**, 320 (2009). <sup>12</sup>S. Asakura & F. Oosawa, *J. Chem. Phys.* **22**, 1255 (1954).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yokoyama Yasunori, Tanaka Hikaru, Yano Shunsuke, Takahashi Hiroshi, Kikukawa Takashi, Sonoyama Masashi, Takenaka Koshi	4. 巻 121
2. 論文標題 Spontaneous stacking of purple membranes during immobilization with physical cross-linked poly(vinyl alcohol) hydrogel with retaining native-like functionality of bacteriorhodopsin	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 204701-01 ~ 09
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4984070	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Hiroshi, Yoshino Masaru, Morita Kohei, Takagi Toshiyuki, Yokoyama Yasunori, Kikukawa Takashi, Amii Hideki, Kanamori Toshiyuki, Sonoyama Masashi	4. 巻 1861
2. 論文標題 Stability of the two-dimensional lattice of bacteriorhodopsin reconstituted in partially fluorinated phosphatidylcholine bilayers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Biomembranes	6. 最初と最後の頁 631 ~ 642
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.bbamem.2018.12.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 柄澤森瀬、横山泰範、竹中康司、瀧口金吾、高橋浩、園山正史
2. 発表標題 ハイドロゲル固体試料中における紫膜積層と多孔質なゲルネットワーク構造
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 柄澤森瀬、横山泰範、竹中康司、瀧口金吾、高橋浩、園山正史
2. 発表標題 固体試料中の紫膜積層とアクリルアミドハイドロゲル多孔質化
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗田陸、横山泰範、竹中康司、高橋浩、園山正史
2. 発表標題 高分子溶液中における紫膜の周期構造形成メカニズム
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaru Yoshino, Hiroshi Takahashi, Yasunori Yokoyama, Toshiyuki Takagi, Hideki Amii, Toshiyuki Kanamori, Takashi Kikukawa, Masashi Sonoyama
2. 発表標題 Thermal Stability of the Hexagonal Lattice Packing Structure of Bacteriorhodopsin in Partially Fluorinated Phospholipid Bilayers
3. 学会等名 59th International Conference on the Bioscience of Lipids (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横山泰範、矢野俊介、栗田陸、田中輝、竹中康司、高橋浩、菊川峰志、園山正史
2. 発表標題 ハイドロゲル固体試料中の紫膜積層機構とゲルネットワーク構造
3. 学会等名 第45回生体分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗田陸、矢野俊介、横山泰範、竹中康司、高橋浩、園山正史
2. 発表標題 ハイドロゲル固体試料中の紫膜積層に対する静電遮蔽の効果
3. 学会等名 第45回生体分子科学討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗田陸、矢野俊介、田中輝、横山泰範、竹中康司、高橋浩、菊川峰志、園山正史
2. 発表標題 ハイドロゲル固体試料中のバクテリオロドプシンの機能・構造特性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢野俊介、田中輝、横山泰範、高橋浩、園山正史、菊川峰志、竹中康司
2. 発表標題 紫膜積層に対するアガロースゲル固定化の影響と高温での固体試料の色素退色
3. 学会等名 第44回生体分子科学討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shunsuke Yano, Hikaru Tanaka, Yasunori Yokoyama, Hiroshi Takahashi, Masashi Sonoyama, Takashi Kikukawa, and Koshi Takenaka
2. 発表標題 Comparative Study on Purple Membrane Stacking and Bacteriorhodopsin Functionality in Immobilized Samples with Various Hydrogels
3. 学会等名 55th Annual Meeting of the Biophysical Society of Japan
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yasunori Yokoyama, Hikaru Tanaka, Shunsuke Yano, Riku Kurita, Koshi Takenaka, Hiroshi Takahashi, Takashi Kikukawa, and Masashi Sonoyama
2. 発表標題 Spontaneous stacking of purple membranes during immobilization with physical cross-linked poly(vinyl alcohol) hydrogel with retaining native-like functionality of bacteriorhodopsin
3. 学会等名 The 14th International Conference on Flow Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高橋 浩  (Takahashi Hiroshi)	群馬大学・大学院理工学府・教授	
研究協力者	竹中 康司  (Takenaka Koshi)	名古屋大学・大学院工学研究科・教授	
研究協力者	瀧口 金吾  (Takiguchi Kingo)	名古屋大学・大学院理学研究科・講師	
研究協力者	菊川 峰志  (Kikukawa Takashi)	北海道大学・大学院先端生命科学研究院・講師	
研究協力者	矢野 俊介  (Yano Shunsuke)	名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	栗田 陸  (Kurita Riku)	名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生	
研究協力者	柄澤 森瀬  (Karasawa Morise)	名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携 研究者	園山 正史  (Sonoyama Masashi)  (40242242)	群馬大学・大学院理工学府・教授    (12301)	