

圧力を視る：力学刺激に応答する化学センサーの開発

メカノバイオロジーの観点から、細胞や組織にかかる力学刺激（圧力）を定量的に視ることは重要な課題である。静水圧は、基底状態でのコンフォメーションや励起状態過程の変化を引き起こすことができる。筆者らはこのような特性に着目し、静水圧によって光学特性の変化する化学センサーを開発し、静水圧の可視化を試みた。本稿では、筆者らが開発した化学センサー類とその高圧分光分析の結果をあわせて紹介する。

若 子 綜 思, 福 原 学

1 はじめに

力学刺激に対する細胞の生物学的応答はメカノバイオロジーという分野として近年注目を集めている。その起源は古く、1917年にThompsonが「*On Growth and Form*」で生物学的な形態と機械的な力との間における関連性について提唱したことに始まる¹⁾。しかし、当時の計測技術や培養技術では詳細な研究を行うことが難しく、この分野が注目されることはなかった。それから時を経た1985年、Binningらによって原子間力顕微鏡 (atomic force microscope, AFM) が開発され、試料の表面構造が観察できるようになった²⁾。1986年にはAskinらによって光ピンセット技術が開発され、非接触な光によって生体細胞を補足/操作できるようになった³⁾。これらを皮切りに細胞の力学計測が盛んに行われ、1994年に生体細胞間の吸着力、1999年にがん細胞株のヤング率、2012年にはがん組織のヤング率が測定されている^{4)~6)}。これらの研究によって、正常細胞とがん細胞のヤング率は有意に異なることがわかり、組織のヤング率はがんの進行度によって変化することも報告された⁷⁾。さらに2006年には、間葉系幹細胞 (mesenchymal stem cell, MSC) を培養する足場の弾性率によって分化を制御できることが報告された⁸⁾。例えば、柔らかい足場では神経細胞に、硬い足場では骨芽細胞に、中間の硬さでは筋芽細胞に分化した。これは、細胞が足場との相互作用によりその弾性率を力学刺激として認識し、化学シグナルへと変換することで遺伝子発現を制御しているためである。このように、力学刺激に対する細胞の応答が組織の生理学や病理学に関係していることは明らかであり、細胞の生物学的応答およびそのシグナル変換プロセスであるメカノトランスダクションの機構について研究する分野としてメカノバイオロジーが台頭した。その一方で、細胞のどの

部分がどれほどの機械的な力を感知しどのように生物学的応答に変換しているのか、はいまだ不明である⁹⁾。この課題の解決に向けて、筆者らは細胞や組織にかかる圧力を可視化するための化学センサーの開発に取り組んでいる¹⁰⁾。メカノバイオロジーで用いられる力学的な力は超音波や衝撃波といった異方的な圧力である動圧が主に選択されている。しかし、動圧は局所的な圧力の違いによって生じる圧力勾配の影響のため、詳細な機構についての検討が困難である。そこで筆者らは、等方的な圧力である「静水圧」による光学特性の制御に着目した。

本稿ではまず静水圧下での分光分析を可能にする高圧装置の説明を行い、生体細胞への静水圧実験の適用例、そして静水圧の可視化を達成した化学センサー類を紹介する。

2 静水圧下での分光分析手法

静水圧下での分光分析を可能にする実験装置の詳細を説明する。図1aは内部セルであり、金属製の蓋、テフロンチューブ、石英製のセルから構成されている。石英セルのサイズは、3 mm (W) × 2 mm (D) × 7 mm (H) であり、このセルは~500 MPaの静水圧印加が可能である。図1bは高圧装置の全体図であり、圧力ゲージ、ポンピングユニット、外部セルからなっている。ステレンス製の外部セルには三つの窓があり、紫外可視吸収 (UV/vis)、蛍光スペクトルおよび時間相関単一光子計測では石英製窓、円二色性 (CD) スペクトルではダイヤモンド製窓を使用する。なぜなら、CD分光測定では、直線二色性 (LD) や複屈折などの分光干渉を避ける必要があるためである。図1c~fはそれぞれUV/vis, CD, 蛍光/励起、時間相関単一光子計測装置に外部セルを設置した図となっている。

静水圧下での分光分析の手順を以下に示す：

- (1) 調製した試料溶液を内部セルに入れ、金属製の蓋で密閉する

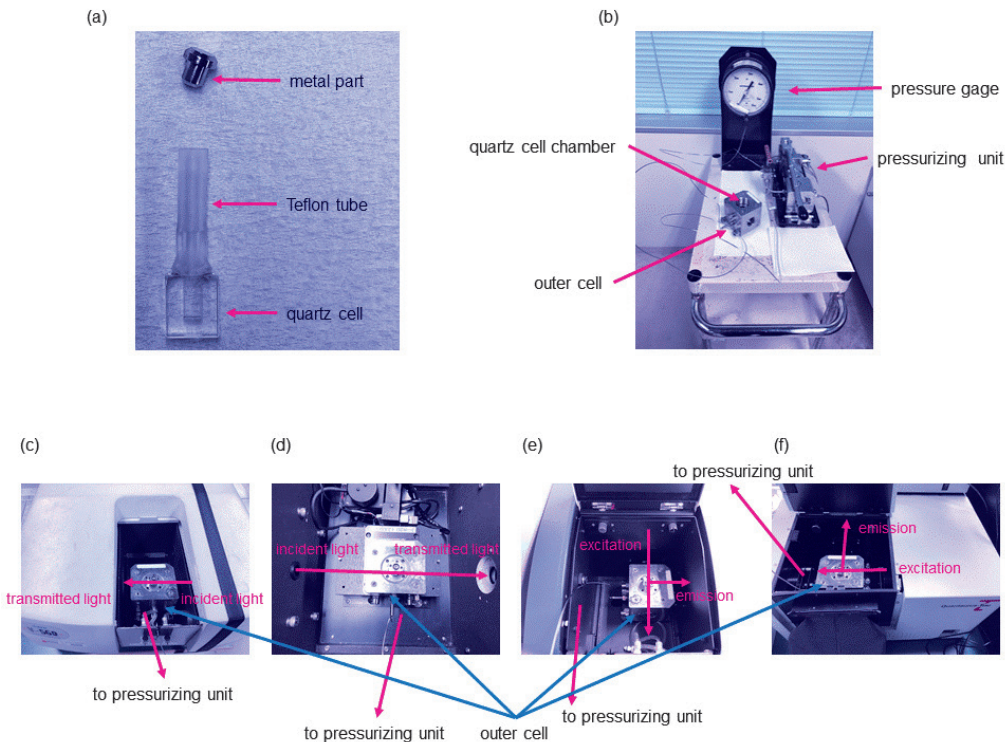


図 1 高圧装置 (a) 内部セル, (b) 高圧装置, 各種分光装置に外部セルをセットした図; (c) UV/vis, (d) CD, (e) 蛍光/励起, (f) 時間相関単一光子計測装置

Reproduced with permission from ref 12. Copyright 2020 John Wiley & Sons.

- (2) 内部セルを外部セル内のセルフホルダーにセットする
- (3) 外部セル内を水で満たし密閉する
- (4) 外部セルを各種分光装置に設置する
- (5) ポンプユニットから外部セル内に水を送り込む
- (6) 圧力の安定保持後に各種測定を行う

このように、外部セルに送り込まれた水によって内部セルのテフロンチューブへ水圧がかかり、試料溶液へ等方的な静水圧が印加される仕組みとなっている。

3 生体細胞への静水圧実験の適用例

静水圧下での分光分析を HeLa 細胞 (子宮頸がん細胞) に適用した例を紹介する¹¹⁾。細胞内のカルシウムイオン (Ca^{2+}) 応答は血圧などの力学刺激によって活性化されることが明らかにされているが、その機構については不明であり、イオンチャネルに対する圧力効果の解明は重要なテーマである。そこで、筆者らは HeLa 細胞内の Ca^{2+} 応答の静水圧効果に着目した。

Ca^{2+} 感受性蛍光リポーターとして Ca^{2+} の存在下で蛍光強度が増加する特性を持つ Fluo4-AM を用いた (図 2)。また、静水圧の印加によって細胞死が引き起こされないことを確認するために、死細胞の染色として Fluo4-AM と光学的に干渉を起こさない DAPI を用い

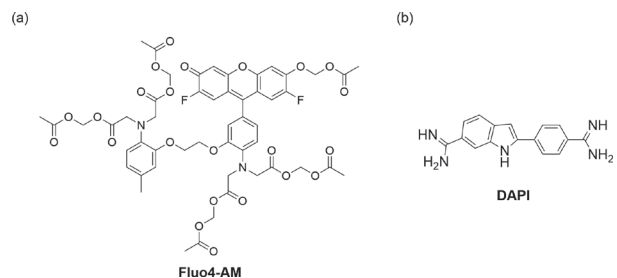


図 2 (a) Fluo4-AM と (b) DAPI の構造式

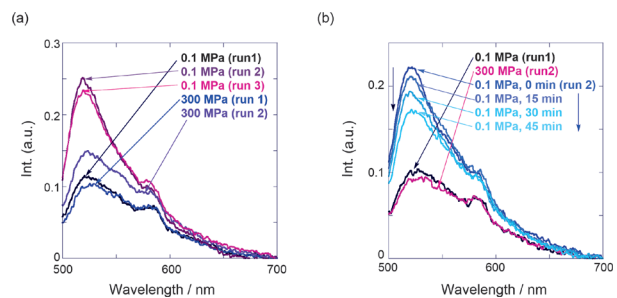


図 3 L-15 中における Fluo4-AM (1 μM) と DAPI (3 μM) を含む HeLa 細胞の蛍光スペクトル (λ_{ex} 490 nm) (a) 加圧/減圧サイクルと (b) 減圧後の経時変化。

た。細胞培養地 (Leibovitz's L-15) で Fluo4-AM と DAPI を HeLa 細胞に導入し、0.1 MPa から 300 MPa

の加圧/除圧サイクルにおける蛍光スペクトルを測定した。DAPIの蛍光強度モニターによってこのサイクルでは細胞死がほとんど起こらないことが確認された。図3aに示す通り0.1 MPa (run1) から300 MPa (run1)への加圧ではFluo4-AMの蛍光強度はほとんど変化せず、300 MPa (run1) から0.1 MPa (run2)への除圧によって約2倍の蛍光強度へと増強した。さらに、減圧後一定時間ごとに蛍光スペクトルを測定すると(図3b)、時間経過とともに徐々に蛍光強度は減少した。これらのことから静水圧の印加によってCa²⁺のHeLa細胞への流入が促進され、時間経過に伴って細胞特異的な恒常性のため元の状態へと戻っている(Ca²⁺が排出されている)ことが示唆された。

生体細胞へのCa²⁺流入は細胞内プロセスと細胞外プロセスの二つが知られており、前述の静水圧によって促進されたCa²⁺流入がいずれのプロセスに起因するか評価を行った。阻害剤であるthapsigargin処理することで細胞内の小胞体からのCa²⁺供給を阻害し(図4a)、キレート剤であるEGTAを用いることで細胞外からのCa²⁺供給を阻害する(図4b)といった2条件で同様の加圧/除圧サイクルでの実験を行った。この結果、thapsigarginで処理した場合の蛍光強度は抑制された(図4c)。このことから静水圧によって促進されたCa²⁺流入経路は、主に細胞内に起因することが分かった。以上のように、HeLa細胞内のイオンチャネルを介したCa²⁺供給を静水圧によって制御可能であることを明らかにした。

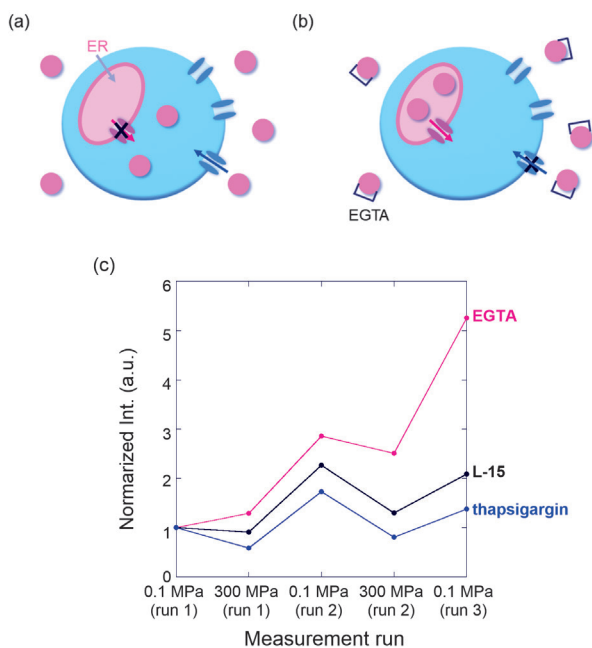


図4 Ca²⁺の生体細胞への流入を阻害するメカニズム ((a) 細胞内プロセス (b) 細胞外プロセス) と (c) 518 nmの蛍光強度推移

4 静水圧を可視化する感圧化学センサー

本節では力学刺激(圧力)によって光学特性が変化することで、静水圧を可視化できる感圧センサー類を紹介する。

4.1 ピレン連結ペプチド

まずは、発色団同士の相互作用によって異なる波長で蛍光を示すピレンを用いた感圧センサーを紹介する¹²⁾。ピレンは高濃度溶液(~mM)で励起状態モノマーと基底状態モノマーが会合したエキシマーからの発光を示すことが知られている。本系では、2分子のピレンを一連のペプチドリンカーでつなぐことで(図5a)、低濃度でも3種類の発光励起種を観測できた。一つ目は単量体(モノマー)からの発光、二つ目は基底状態で2分子が会合した二量体からの発光、三つ目がエキシマーからの発光である(図5d)。静水圧印加でピレン間の相互作用を制御し、これらの発光種による静水圧の可視化を目的とした。

ピレン間のメチレン数のnが1のL2C1の静水圧下での蛍光スペクトルを測定した(図5b)。加圧に伴い380 nm付近のモノマー発光強度は減少し、460 nm付近の基底状態二量体および550 nm付近のエキシマー発光は増加した。L2C1はメチレン鎖が短くピレンが近い距離に存在しているため、加圧によって基底状態での二量化およびエキシマー形成が促進されたと考えられる。

一方で、nが4のL2C4の静水圧下での蛍光スペクトル

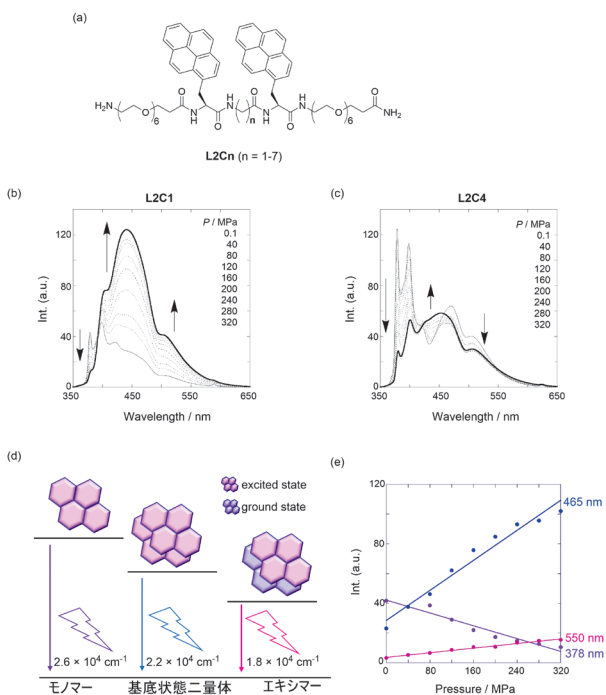


図5 (a) L2Cnの構造と (b) L2C1 (57 μM, λ_{ex} 295 nm) と (c) L2C4 (38 μM, λ_{ex} 313 nm)の蛍光スペクトル, (d) エネルギー準位図, (e) L2C1における蛍光強度の圧力依存性

ルを測定すると (図 5c), 加圧に伴いモノマーおよびエキシマー蛍光強度は減少し, 基底状態二量体からの蛍光強度が僅かに増加した。これはピレン間の距離が長くなることで, 拡散で支配されている励起状態での相互作用が抑制され, エキシマー形成が起こりにくくなったためである。また, L2C1 の圧力に対する蛍光強度をプロットすることで (図 5e), 各発光の強度から圧力の定量化が可能であることがわかる。このようにピレン間の距離を変化させることで, 静水圧に対する蛍光特性を制御できることが明らかになり, 3 波長での静水圧の可視化が達成された。

4.2 テトラフェニルエチレン修飾ポリエチレン

次に, 凝集することで蛍光を発する凝集誘起発光 (aggregation-induced emission, AIE) を示すテトラフェニルエチレン (TPE) を用いた感圧センサーを紹介する¹³⁾。TPE はモノマー状態からの発光は観測されないが, 凝集することでベンゼン環の回転 (無輻射失活過程) が抑制され, 400~600 nm に蛍光を示すようになる。また TPE は, AIE とは別に光によって環化反応を起こすという特徴的な性質を持つ。図 6a に示したように, 光照射によって分子内光環化, 続く溶存酸素との反応で蛍光性 1,9-ジフェニルフェナントレン (DPP) を生成する。この DPP は 340~450 nm に蛍光を示し, TPE の AIE とは異なるため 2 波長での蛍光観測が可能となる。

化学センサーの構造を図 6b に示す。主鎖には柔軟なポリエチレン骨格を選択することで, 側鎖に修飾した TPE の AIE 性と光環化に対する圧力効果を制御し, 2 波長での静水圧の可視化を試みた。

まずは大気圧下 (0.1 MPa) で, 6 回連続で蛍光スペクトルを測定した (図 7a)。光照射に伴って, TPE-PE の 450~600 nm における TPE 凝集体からの蛍光強度が減少し, 380 nm 付近の DPP から蛍光強度は増加した。このことから, 光照射によって溶液中で TPE-PE の TPE 凝集体が減少し, DPP が生成したことが示唆さ

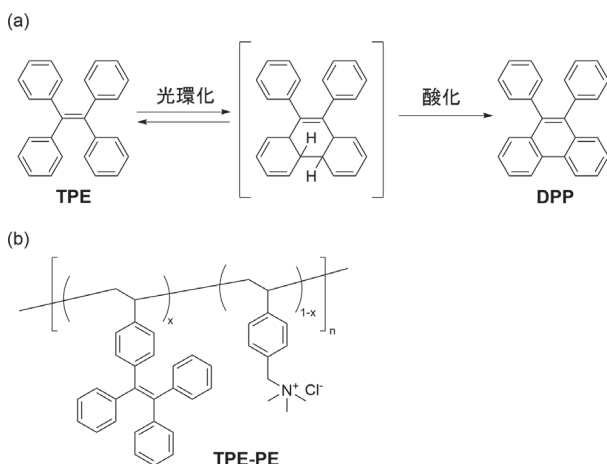


図 6 (a) TPE の光反応と (b) TPE-PE の構造

れた。また, 483 nm に等発光点を持つことから TPE から DPP が生じる過程は単一過程であり, 光照射によってレシオ型の発光特性を示すことが明らかになった。

続いて, TPE-PE の圧力応答性について調べた。280 MPa の静水圧を印加して, 同様に 6 回連続で蛍光スペクトルを測定した (図 7b)。加圧条件下の場合でも大気圧と同様に凝集体由来の蛍光強度が減少し, DPP 由来の蛍光強度が増加し, 440 nm 付近に等発光点が観測された。光照射後の 380 nm における蛍光強度の増加度合いを比較すると, 圧力をかけるほどその傾きが大きくなることが明らかになった (図 7c)。つまり, 圧力を印加することで TPE から DPP への光反応が促進され, その度合いを静水圧によって制御できることを意味している。

ここからは, 静水圧印加によって TPE の光環化反応が促進された理由について述べたい。TPE-PE のポリエチレン主鎖は大気圧下で伸長した構造であると考えられる (図 8)。ここに光を照射すると (320 nm, 58 $\mu\text{W cm}^{-2}$),

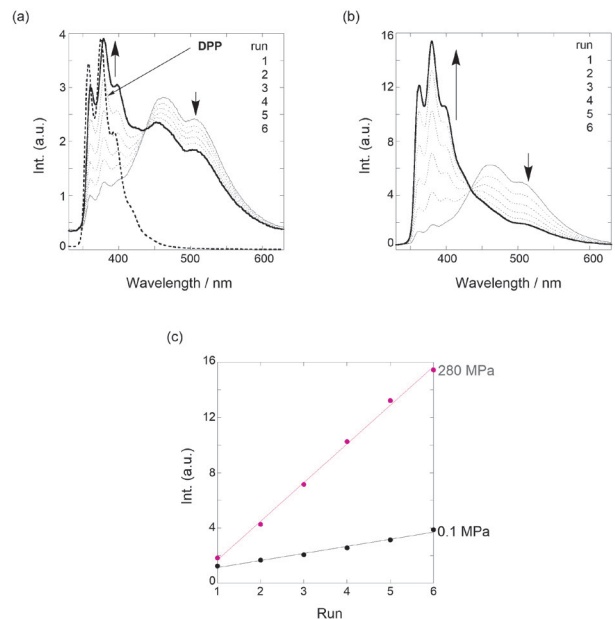


図 7 10 % DMSO 水溶液中での TPE-PE の蛍光スペクトル ((9.8 μM , λ_{ex} 320 nm) (a) 0.1 MPa (大気圧) と (b) 280 MPa), (c) 各光照射回数に対する 380 nm での蛍光強度変化

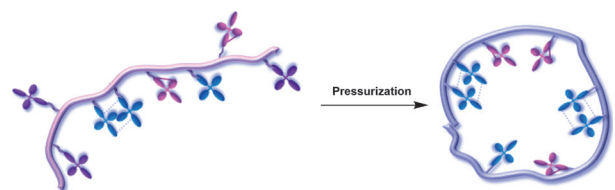


図 8 大気圧・高圧下における TPE-PE の模式図
紫: 基底状態の TPE, 青: 励起状態の TPE, 赤: 環化後の励起状態 DPP

TPE 凝集体が解離し、分子内光環化を経て DPP が生じる。TPE 凝集体が解離したのちに光環化を起こさなかった TPE モノマーは発光を示さないまま失活する。一方、静水圧を印加するとポリエチレン主鎖は収縮し、その結果 TPE 凝集体を形成しやすくなる。しかしながら、光照射による凝集体の分解が容易に起こるため、素早く酸素と反応して DPP を生じやすくなる。結果としてどちらもレシオ型の蛍光特性を示すが、静水圧印加でより光環化が促進されたと考えられる。以上により、TPE-PE によって 2 波長で静水圧の可視化を達成した。

4.3 蛍光性ヘリセン

続いて、ヘリカルアントラセンの一種である [4]HA (図 9) を用いて達成した静水圧の可視化の例を紹介する¹⁴⁾。[4]HA は、光照射によってアントラセン末端での [4+4] 光環化二量化を経て [4]HA-C を生成する。[4]HA と [4]HA-C は異なる発光波長をもつため、光反応に対する圧力効果を制御することで、2 波長での静水圧の可視化を試みた。

まずは大気圧 (0.1 MPa) で、6 回連続で蛍光スペクトルを測定したところ、ほとんどスペクトルに変化は見られなかった (図 10a)。次に、320 MPa の静水圧を印

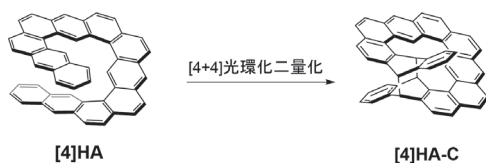


図 9 [4]HA の [4+4] 光環化二量化反応

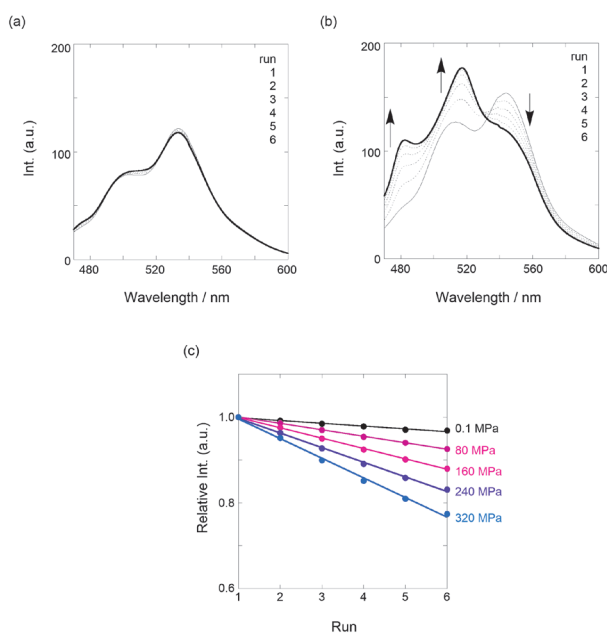


図 10 トルエン中での蛍光スペクトル (95 μM , λ_{ex} 456 nm) (a) 0.1 MPa (大気圧) と (b) 320 MPa. (c) 蛍光強度比 ($I_{\text{run}X}/I_{\text{run}1}$) 変化

加して同様の測定を行った (図 10b)。興味深いことに、545 nm 付近における [4]HA からの蛍光強度が減少し、480 nm と 515 nm 付近の [4]HA-C からの蛍光強度が増加するといったレシオメトリックな蛍光変化が観測された。545 nm 付近の蛍光強度比 ($I_{\text{run}X}/I_{\text{run}1}$) を測定回数に対してプロットしたところ、各圧力において、強度比の減少と励起回数は非常に良い相関を示した (図 10c)。その減少度合を比較すると、圧力をかければかけるほど、その傾きが大きくなることが明らかになった。これは、静水圧印加によって分子内 π スタックが促進され、スタック種への光照射によってアントラセン末端の [4+4] 光環化二量化が促進されたことに起因する。以上のように、圧力によって [4]HA の光反応性を制御することで静水圧の可視化を達成した。

4.4 キラルピラーアレーン

ここでは、シクロファン型ピラーアレーン (MUJ) を用いた感圧センサーを紹介する¹⁵⁾。MUJ は二つの状態 {サブリングが空孔内に包接された *in*-(R_p) と排出された *out*-(S_p)} の平衡混合物である (図 11a)。これらのコンフォーマーは面不斉によるキラリティーを有しており、圧力によってこれらを制御することで静水圧の可視

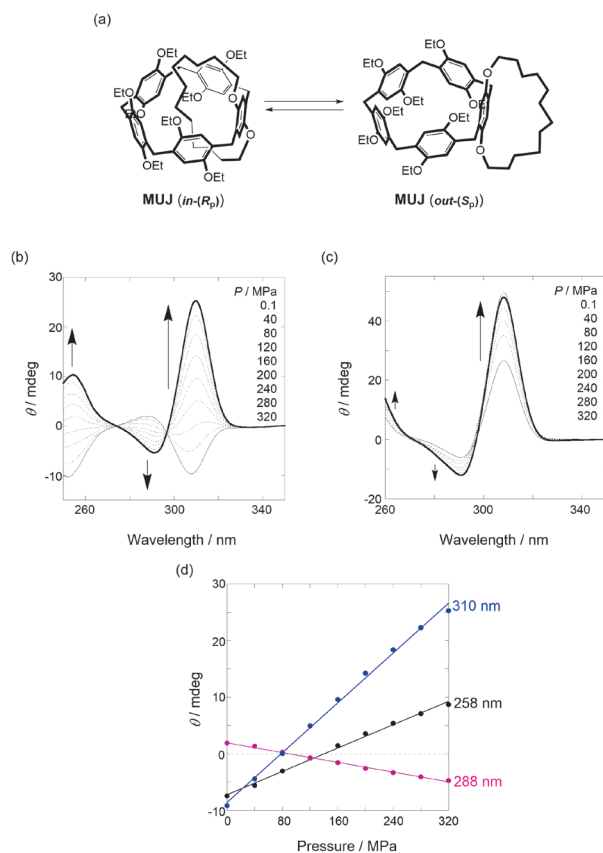


図 11 (a) MUJ の平衡. CD スペクトル (b) アセトニトリル中 (92 μM) と (c) 酢酸エチル中 (136 μM) (0.1 ~ 320 MPa), (d) アセトニトリル中での CD 強度の圧力依存性

化を試みた。

アセトニトリル中とジクロロメタン中における高圧 CD スペクトルを測定したところ、静水圧印加に伴って *out*-(S_p) から *in*-(R_p) へのコンフォメーション変化に起因する CD スペクトルの反転が見られた (図 11b)。一方で、6 種類の溶媒 (ヘキサン, メチルシクロヘキサン, 四塩化炭素, テトラヒドロフラン, 酢酸エチル, クロロホルム) ではキラリティー反転は観測されず、わずかなシグナル強度の増減にとどまった (図 11c)。NMR 滴定および等温滴定カロリーメトリー測定によって、比較的極性の高いアセトニトリルとジクロロメタンの溶媒分子がピラーアレーンの空孔内に包接された *out*-(S_p) コンフォマーが安定化されていることが明らかとなった。静水圧を印加することで脱溶媒和とサブリングの空孔内への挿入が促進され、*in*-(R_p) が安定化された結果キラリティー (CD) 反転が観測された。さらにアセトニトリル中において、各波長での CD 強度を圧力に対してプロットした図 11d より、静水圧の定量化も可能であることがわかった。以上のように、圧力によるピラーアレーンのキラルコンフォメーション制御によって静水圧の可視化を達成した。

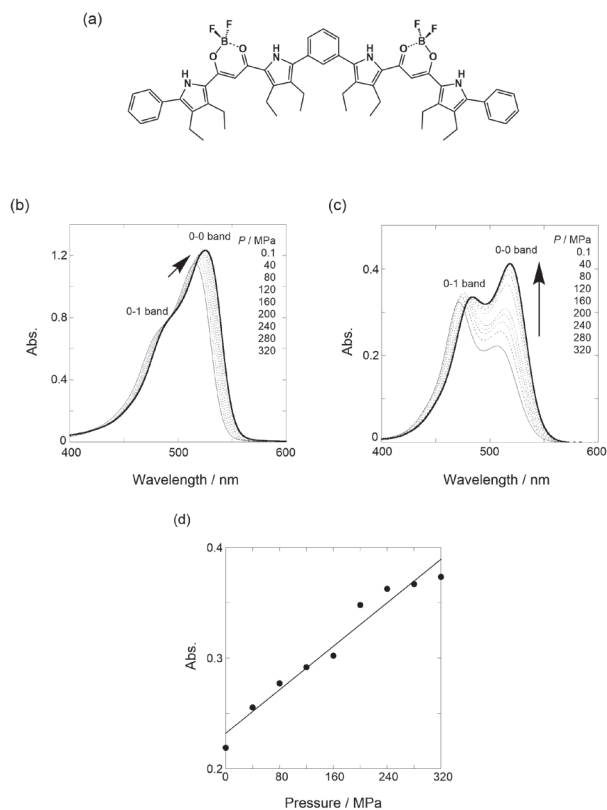


図 12 (a) フォルダマーの構造。吸収スペクトル (b) トルエン中 (44 μ M) と (c) アセトニトリル中 (15 μ M) (0.1~320 MPa), (d) アセトニトリル中での 510 nm における吸光度の圧力依存性

4・5 伸縮性フォルダマー

本節では、フォルダマーを用いた化学センサーを紹介する (図 12a)¹⁶⁾。本フォルダマーは、溶液中で蛍光特性の異なる折りたたまれた状態 (F) と伸長した状態 (E) を動的にとっている。静水圧によってこのコンフォマーを制御することで静水圧の可視化を試みた。

大気圧下 (0.1 MPa) における UV/vis スペクトルを測定したところ、アセトニトリル中では 0-1 バンドに対する 0-0 バンドの吸収がトルエン中と比較して抑制された (図 12b, c)。これは、極性の高いアセトニトリル中における疎溶媒効果によって安定化される F コンフォマーが優先したためである。静水圧印加によって 0-0 バンドの増強が見られたのは (図 12c), E コンフォマーの存在比が上昇したためである。さらに、この 0-0 バンドの濃色効果は圧力との相関が見られ (図 12d), 圧力の定量化が可能であることが分かった。

また、アセトニトリル中における蛍光寿命を測定したところ、E コンフォマーに帰属される短寿命種 (0.6~0.7 ns) および F コンフォマーに帰属される長寿命種 (6.5~8.1 ns) の 2 種類の励起種が観測された。この 2 種類の励起種の存在比は圧力の増加とともに変化することが明らかとなった。したがって、蛍光フォルダマーのコンフォマーおよび光学特性は静水圧によって制御可能であり、静水圧を可視化することが可能であった。

4・6 メカノクロミック分子

最後に熱活性化遅延蛍光を示すメカノクロミック分子を用いて達成した静水圧の可視化の例を紹介する¹⁷⁾。熱活性化遅延蛍光 (thermally activated delayed fluores-

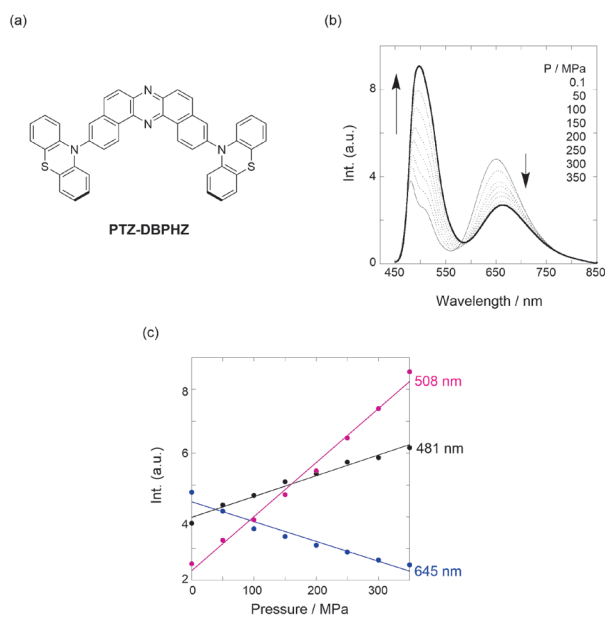


図 13 (a) PTZ-DBPHZ の構造と (b) トルエン中での蛍光スペクトル (222 μ M, λ_{ex} 400 nm) (0.1~350 MPa) と (c) 各波長における蛍光強度の圧力依存性

cence, TADF) とは、励起一重項状態 (S_1) と励起三重項状態 (T_1) のエネルギー準位が近いとき、項間交差によって T_1 となった励起子が逆項間交差により再び S_1 となり、ここから発せられる発光のことである。メカノクロミック分子である PTZ-DBPHZ (図 13a) は中央のジベンゾ [a, j] フェナジン (DBPHZ) アクセプターとその両端に結合しているフェノチアジン (PTZ) ドナーからなり、TADF を示す。また、それぞれ二つの PTZ のうち両方が DBPHZ 平面に対して水平方向のコンフォマー (*eq-eg*)、一方が垂直方向のコンフォマー (*eq-ax*)、そして両方が垂直方向のコンフォマー (*ax-ax*) の計 4 種類のコンフォメーションが存在し、圧力によってこれらを制御することで静水圧の可視化を試みた。

PTZ-DBPHZ のトルエン中における静水圧下での蛍光スペクトルを測定した (図 13b)。481 nm に局在励起発光 (LE), 508 nm と 650 nm に分子内電荷移動発光 (ICT1, ICT2) を示し、加圧に伴い LE, ICT1 の発光強度が増加する一方で ICT2 は減少するといったレシオ型の変化が観測された。さらに、圧力に対して各波長での蛍光強度をプロットすると (図 13c)、相関関係が見られ、蛍光強度によって圧力の定量化が可能であることが分かった。時間相関単一光子計測によって蛍光寿命を観測したところ、ICT2 帯に TADF 過程 (79~108 ns) が含まれており、この存在比は加圧によって抑制されることが明らかになった。この蛍光特性の変化は加圧によって溶媒であるトルエンの粘度が上昇し、PTZ と DBPHZ 間の C-N 結合の回転が抑制され、 T_1 から S_1 への逆項間交差が抑制されたためである。以上のように、静水圧によって PTZ-DBPHZ の TADF を制御することによって、静水圧の定量的な可視化が達成された。

4.7 各系のまとめ

本節では、ここまで紹介してきた化学センサーの原理および検出方法についてまとめる (表 1)。

表 1 各系の原理および検出方法

化学センサー	原理	検出方法
L2Cn	ペプチド足場上でのピレン間の相互作用	蛍光
TPE-PE	ポリエチレン足場上における TPE→DPP の光反応性	蛍光
[4]HA	ヘリセン骨格内での [4+4] 光環化二量体の反応性	蛍光
MUJ	ピラーアレーンのキラルコンフォメーション変化	CD
フォルダマー	フォルダマーの折り畳み構造と伸縮構造の変化	吸収
PTZ-DBPHZ	メカノクロミック分子における C-N 結合の抑制による TADF 過程の変化	蛍光

5 おわりに

本稿では、筆者らが開発した感圧化学センサーについて紹介した。静水圧によって分子内および分子間の相互作用の制御、基底状態のコンフォマーや励起状態の光物理化学過程の制御が可能であり、光学特性の変化として圧力を定量的に視ることができたといえる。

今後、動圧の可視化に展開していき、これが達成できれば、化学分野のみならず、メカノバイオロジー分野や医療・診断分野など幅広い領域における重要な知見をもたらすであろう。

文 献

- 1) D. W. Thompson : "On Growth and Form", p. 958 (1917), (Cambridge University Press).
- 2) G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber : *Phys. Rev. Lett.*, **56**, 930 (1986).
- 3) A. Askin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, S. Chu : *Opt. Lett.*, **11**, 288 (1986).
- 4) G. U. Lee, D. A. Kidwell, R. J. Colton : *Langmuir*, **10**, 354 (1994).
- 5) M. Lekka, P. Laidler, D. Gil, J. Lekki, Z. Stachura, A. Z. Hryniewicz : *Eur. Biophys. J.*, **28**, 312 (1999).
- 6) M. Plodinec, M. Loparic, C. A. Monnier, E. C. Obermann, R. Zanetti-Dallenbach, P. Oertle, J. T. Hyotyla, U. Aebi, M. Bentires-Alj, R. Y. H. Lim, C.-A. Schoenenberger : *Nat. Nanotech.*, **7**, 757 (2012).
- 7) S. E. Cross, Y.-S. Jin, J. Rao, J. K. Gimzewski : *Nat. Nanotech.*, **2**, 780 (2007).
- 8) A. J. Engler, S. Sen, H. L. Sweeney, D. E. Discher : *Cell*, **126**, 677 (2006).
- 9) J. H.-C. Wang, B. P. Thampatty : *Biomechan. Model. Mechanobiol.*, **5**, 1 (2006).
- 10) H. Mizuno, G. Fukuhara : *Acc. Chem. Res.*, **55**, 1748 (2022).
- 11) M. Fukuchi, K. Oyama, H. Mizuno, A. Miyagawa, K. Koumoto, G. Fukuhara : *Langmuir*, **37**, 820 (2021).
- 12) H. Mizuno, M. Kitamatsu, Y. Imai, G. Fukuhara : *ChemPhotoChem*, **4**, 502 (2020).
- 13) K. Nakasha, G. Fukuhara : *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2**, 2303 (2020).
- 14) T. Kinoshita, K. Fujise, E. Tsurumaki, S. Toyota, G. Fukuhara : *Chem. Commun.*, **58**, 3290 (2022).
- 15) J. Yao, H. Mizuno, C. Xiao, W. Wu, Y. Inoue, C. Yang, G. Fukuhara : *Chem. Sci.*, **12**, 4361 (2021).
- 16) T. Kinoshita, Y. Haketa, H. Maeda, G. Fukuhara : *Chem. Sci.*, **12**, 6691 (2021).
- 17) Y. Takeda, H. Mizuno, Y. Okada, M. Okazaki, S. Minakata, T. Penfold, G. Fukuhara : *ChemPhotoChem*, **3**, 1203 (2019).



若子 綜思 (Soshi WAKAKO)

東京工業大学理学院化学系 (〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。東京工業大学理学院化学系博士前期課程在学中。《現在のテーマ》音響波を定量的にイメージングするための感圧化学センサーの開発。《趣味》野球、読書。

E-mail : wakako.s.aa@m.titech.ac.jp



福原 学 (Gaku FUKUHARA)
東京工業大学理学院化学系 (〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1). 大阪大学大学院工学研究科博士課程修了. 博士 (工学). 《現在のテーマ》超分子センシング, 音響波イメージング, 光化学.
E-mail: gaku@chem.titech.ac.jp

日本分析化学会の機関月刊誌『ぶんせき』の再録集 vol. 2 が出版されました！ 初学者必見！ 正しく分析するための 241 ページです。

本書は書籍化の第二弾として、「入門講座」から分析試料の取り扱いや前処理に関する記事、合計 36 本を再録しました。『ぶんせき』では、分析化学の初学者から専門家まで幅広い会員に向けて、多くの有用な情報を提供し続けています。これまで掲載された記事には、分析化学諸分野の入門的な概説や分析操作の基礎といった、いつの時代でも必要となる手ほどきや現役の研究者・技術者の実体験など、分析のノウハウが詰まっています。

本書は下記の二章だてとなっています。

〈1 章 分析における試料前処理の基礎知識〉

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1. 土壌中重金属分析のための前処理法 | 11. 大気中揮発性有機化合物分析のための前処理 |
| 2. 岩石試料の分析のための前処理法 | 12. 放射性核種分析のための前処理法 |
| 3. プラスチック試料の分析のための前処理法 | 13. 脂質分析のための前処理法 |
| 4. 金属試料分析のための前処理 | 14. 糖鎖分析のための試料前処理 |
| 5. 分析試料としての水産生物の特徴と取り扱い | 15. イムノアッセイのための前処理法 |
| 6. 食品分析のための前処理法 | 16. 加速器質量分析における超高感度核種分析のための試料前処理法 |
| 7. Dried blood spot 法による血液試料の前処理 | 17. 生元素安定同位体比分析のための試料前処理法 |
| 8. 生体試料のための前処理法 (液-液抽出) | 18. セラミックス試料分析のための前処理法 |
| 9. 生体試料のための前処理法 (固相抽出) | |
| 10. 環境水試料の分析のための前処理法 | |

〈2 章 分析試料の正しい取り扱いかた〉

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1. 生体 (血液) | 10. 岩石 |
| 2. 生体 (毛髪) | 11. 食品 (農産物の残留農薬) |
| 3. 金属 (非鉄金属) | 12. ガラス |
| 4. 金属 (鉄鋼) | 13. 環境 (陸水) |
| 5. 食品 (酒類) | 14. 温泉付随ガス |
| 6. 医薬品 (原薬・中間体・原料) | 15. 透過電子顕微鏡観察の試料調整 |
| 7. 海水 (微量金属) | 16. 環境 (ダイオキシン類) |
| 8. 考古資料 | 17. 高分子材料 |
| 9. 海底下の試料 (地球深部の堆積物および岩石) | 18. 沈降粒子 |

なお、『ぶんせき』掲載時から数年が経過しているため、記事の中には執筆者の所属も含め、部分的に現在の状況とは異なる内容を含むものがあるかもしれません。本書では、各記事の『ぶんせき』掲載年を明記することで、再録にともなう本文改稿を割愛しました。これらの点については、執筆者および読者の方々にご了承いただきたく、お願い申し上げます。

本シリーズが化学分析の虎の巻として多くの方に活用されることを願ってやみません。