

# フェロセン骨格を用いたミセル型超音波機能性分子の研究

宗宮 創

生命科学講座 (化学)

## New Development of A Micelle-type Sono-functional Molecule with Ferrocene Framework

Hajime SOHMIYA

Department of Fundamental Bioscience (Chemistry)

**Abstract** A "sono-functional molecule" offers new functions through the structural changes caused by ultrasonic cavitation. As a new type of "sono-functional molecule", micelle-type one with a ferrocenyl framework was developed. Ferrocenyl framework is known to be sensitive to the ultrasonic irradiation at relatively low pH and finally oxidized or degraded. The new sono-functional molecule can be expected to be used for new drug delivery system switched by ultrasound irradiation. In this study, (Ferrocenylmethyl)trimethylammonium Bromide (FcMTAB) was employed for ultrasonic degradation experiments of micelles as a model compound. Micelle of FcMTAB was degraded at relatively faster rate by ultrasonic irradiation comparing with the typical surface active agent, Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) and Sodium Dodecyl Sulfate (SDS), though the reproducibility of micelle formation was not satisfactory. It was also shown that sonochemical degradation process of FcMTAB micelle depended on pH of the solution. UV-Vis spectra suggested that FcMTAB was oxidized to ferrocenium ion and the micelle was degraded at pH 2.1. On the other hand, at pH 4.8, ferrocene moiety of FcMTAB was cleaved to cyclo-pentadienes. The investigation on dependency of ultrasound frequency showed that the irradiation at 200 kHz was more effective for the degradation of micelles than the irradiation at 19.5 kHz.

**Keyword** Ultrasound, Ferrocene, Sono-functional Molecule, Micelle, Drug Delivery

### 1. はじめに

水及び有機溶媒中での比較的強い超音波の照射は、キャビテーション現象による各種活性種の発生や局所極限環境によ

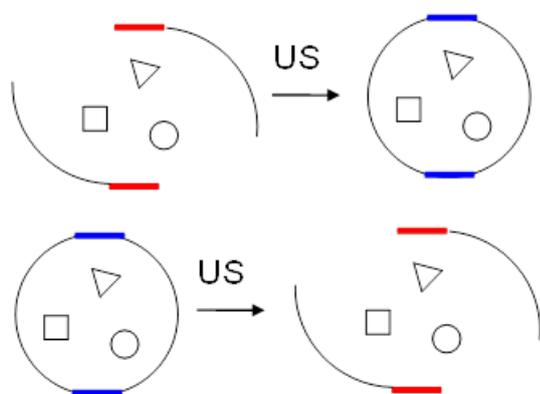


図1. 超音波照射により閉じる (上)・開く (下) 機能性分子

り、様々な化学反応や物理的作用を引き起こす。特に興味をひかれるのが、有機化学反応への応用である。たとえば酸化反応やハロゲン-炭素間の結合開裂、ベンゼン環の分解などへの促進効果が報告されている[1-7]。しかも、これらの反応は、特定の化学構造や官能基を持つ有機化合物に特に選択的に働く。このような超音波化学反応の特性を生かした分子設計を行うことにより、超音波照射を引き金として、分子構造の変化を制御できるように設計された機能性分子のコンセプトを発想し、これを「超音波機能性分子」(Sono-functional Molecule)と名づけた[8]。超音波照射による化学反応促進は、主に物理的な攪拌作用や不均一系における表面活性化の効果、局所高温の効果などによるものであるが、本研究の重要なコンセプトは、より精密に超音波の効果を応用するために、超音波照射により水中で発生する化学活性種、主に酸化種を活用することにある。その際、化学反応を分子構造の変化に応用した機能性コンセプトとして、図1のように、超音波照射により反応する化学構造を組み込まれた(図中の赤青の着色部分)閉じる・開く分子構造変化を起こす分子設計を行った。その例として、著者は既に、「閉じる」超音波機能性分子であ

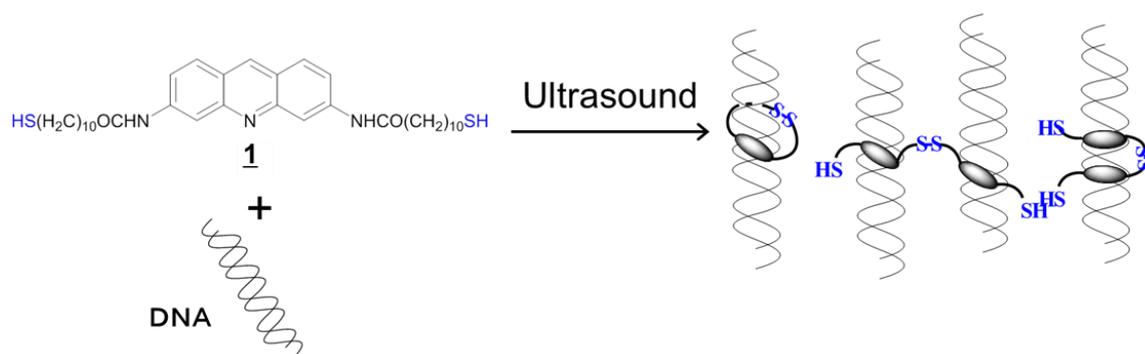


図2. アクリジンとチオールによる閉じる超音波機能性分子

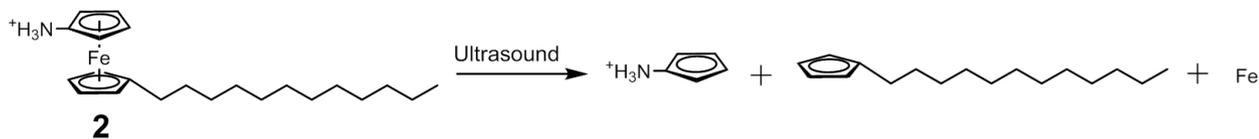


図3. フェロセン骨格を利用した「開く」超音波機能性分子の構造

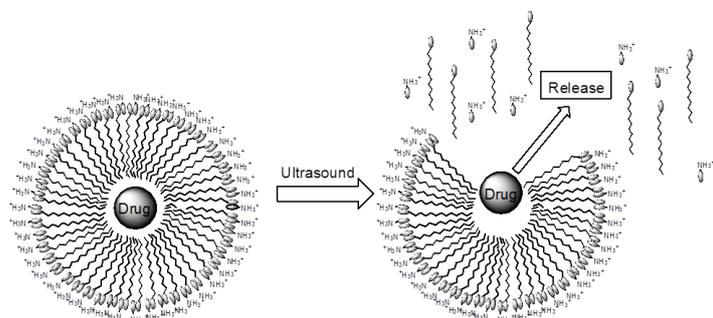


図4. 超音波照射による「開く」超音波機能性分子ミセルのドラッグリリースのコンセプト

図2の1で示した新規分子を合成した。これはアクリジン骨格とし、その両端に末端にチオール基をもつアルキル長鎖を導入したもので、アクリジンのインターカレターとしての性質と、末端チオール基の超音波照射によるジスルフィド結合への酸化を利用した。実際、DNA共存下で超音波照射によりDNAとの不可逆な結合が観測された[9]。これは、1がDNAにインターカレートした後、超音波照射により発生した過酸化水素他の酸化活性種により、チオール基の酸化が起きたためであり、超音波機能性分子のコンセプトに基づく分子設計の有効性を示した。

本研究では、新たに図1(下)の「開く」超音波機能性分子として、フェロセン骨格を用いた分子デザインを行った。その機能コンセプトは、超音波照射によるフェロセン骨格の超音波化学反応を利用し、ミセル型分子集合体の超分子構造制御を行うことにある。フェロセン骨格は著者らの研究で、超音波照射により分解して二つのペンタジエン環を放出したり、酸化されてフェロセニウムイオンになることがわかっている[10]。そこで、フェロセン環のひとつに親水性基、もうひとつに疎水性基をもつ分子デザインを考え、図3の新規化合物2のような超音波機能性分子を着想した。この新規分子は親水性基と疎水性基を同一分子内に持つため、界面活性剤として機能しミセル形成能を持つと考えられる。超音波照射によりフェロセン骨格が分解あるいは酸化されると、そのミセルが分解するようデザインされている。用途としては、図4のように、超音波照射をスイッチとしてミセルを形成する界面活性剤分子が分解してミセル形成能を失い、ミセルの崩壊とともに薬剤を放出する、というドラッグデリバリーへの応用が期待できる。このような新しい着想のもと、本研究を行った。

## 2. 方法・結果及び考察

### 2-1. ミセル型超音波機能性分子の合成の試み

まず、ミセル型超音波機能性分子として機能する新規化合物の分子構造とその合成経路について検討した。脂溶性と水溶

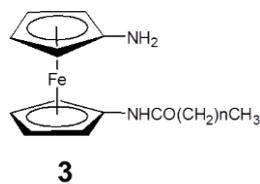
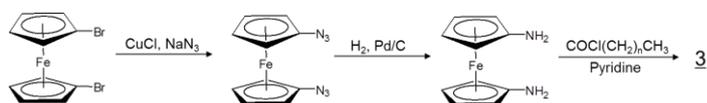


図5. ミセル型超音波機能性分子の合成目標化合物性のバランスを系統的に調整できる分子設計及び有機化学合

成の容易さを考慮した結果、実際の合成目標とするには図5の化合物3が適当であると考え、その合成経路を検討した。その結果、市販品である1,1'-dibromoferroceneから出発するスキーム1の合成経路が適当であると考え、合成を実施した。1,1'-dibromoferroceneから1,1'-diaminoferroceneまでの段階は既知であり[11]、文献通り進めたが、最後のアシル化の段階で多数の副生成物とともにフェロセン骨格の分解が認められ、反応条件の各種調整を行ったが、目標化合物は合成できなかった。代わりにmonoaminoferroceneを用いると、最後のアシル化が収率良く進行することは確認できたため、この反応条件下での1,1'-diaminoferrocene特有の不安定性の問題だと思われる。他の合成経路は格段に複雑さが増すことから、代替案として、ミセル形成能をもつ市販のフェロセン誘導体を探し、当面のモデル化合物として研究を進めることとし、合成経路の改良は随時検討することとした。



スキーム1. ミセル型超音波機能性分子の合成経路

### 2-2. ミセル型超音波機能性分子のモデル化合物による実証実験

2-1.の結果を踏まえ、代替モデル化合物として市販の(Ferrocenylmethyl)trimethylammonium Bromide (以下FcMTABと略す)を選択した(図6)。FcMTABは疎水性であるferrocenylmethyl部分と親水性であるtrimethylammonium部分が分子内に共存しているため、両親媒性であり、水にも塩化メチレンにも良く溶解する。このため、界面活性として機能することが期待できる。対照化合物としては、代表的な界面活性剤であるCetyltrimethylammonium Bromide (CTAB)やSodium Dodecyl Sulfate (SDS)(図7)などを用いた。以下、FcMTABを用い、ミセル型超音波機能性分子の機能コンセプトを実証するためのミセル崩壊実験を行った。

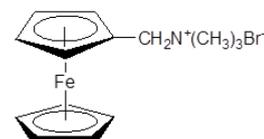


図6. (Ferrocenylmethyl)trimethylammonium Bromide (FcMTAB)

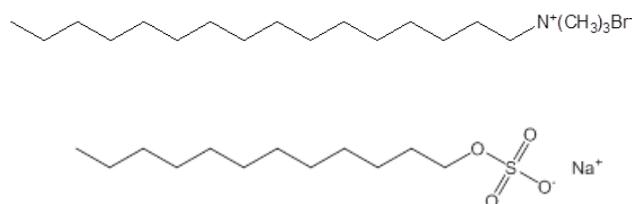


図7. Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB)(上)及びSodium Dodecyl Sulfate (SDS)(下)

### 2-2-1. 実験系とその手順

FcMTAB は界面活性剤としての分子構造の要件は一応満たしているが、疎水性部分については空間的な広がりはあるものの、一般的な界面活性剤の分子設計から考えると、いわゆる長さが相対的に短いため、ミセルを形成する能力を持つのかを実験的に確認する必要がある。実験系としては、最も一般的なもののひとつである、excimer complex の形成により特徴的な蛍光発光を示す pyrene をミセル形成の指標とする系を用いた[12-13]。

実験手順は、まず pyrene の固体 3.1 mg を入れた 30 ml 容量のバイアルに pH7.1 の緩衝溶液を 10 ml 加え、超音波洗浄器 (40 kHz、35 W) で 10 min. 照射した。その後、速やかに 335 nm の励起波長で蛍光発光スペクトルを測定 (日立 F-4500 掃引速度 1200 nm/min スリット幅 2.5 nm /2.5 nm 励起 335 nm ホトマル電圧 950 V レスポンス 0.1 sec) した。pyrene は大半が溶けずに残った。その後 49.9 mg の FcMTAB (東京化成) (CTAB の場合は 53.5 mg、SDS の場合は 37.5 mg) を加え、プローブ型超音波照射装置 (Astrason XL2020 20 kHz 550W) で超音波を 30 sec. 照射し、同様に蛍光発光スペクトルを測定した。この超音波照射では、FcMTAB、SDS、CTAB 及び pyrene はほとんど分解しなかった。SDS の CMC は 8.2 mM、CTAB は 0.92-1.0 mM。FcMTAB については不明である。実験は室温で行った。試薬類はいずれも市販品をそのまま用いた。また用いた緩衝溶液は、既知の方法に従い、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ - $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ - $\text{H}_3\text{PO}_4$ 系を用いて調製した。

図 8-10 は上記手順に従って測定した pyrene 単独および各

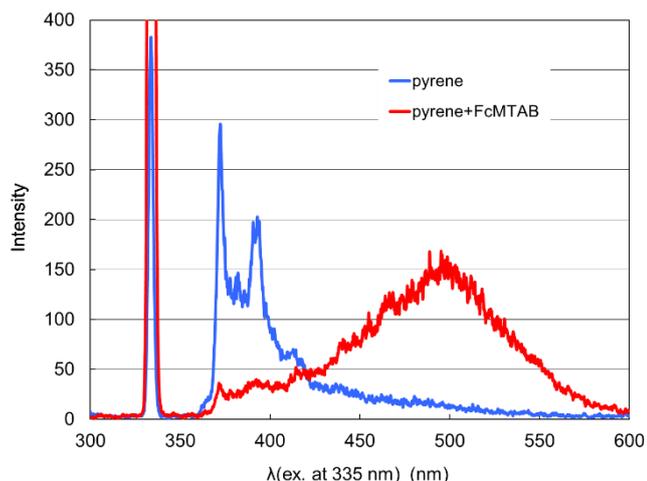


図 8. FcMTAB 共存及び非共存下での pyrene の蛍光スペクトル

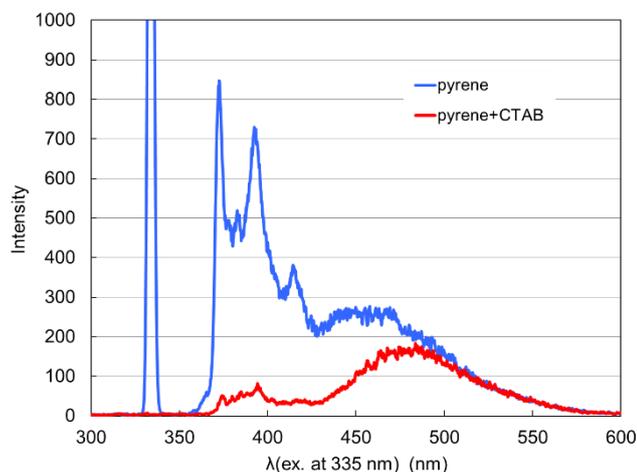


図 9. CTAB 共存及び非共存下での pyrene の蛍光スペクトル

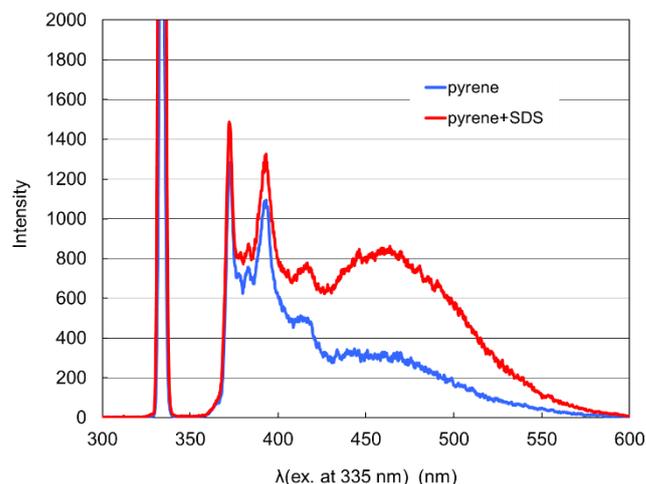


図 10. SDS 共存及び非共存下での pyrene の蛍光スペクトル

界面活性剤添加時の pyrene の蛍光スペクトルである。pyrene は超音波照射によりごく微量、緩衝溶液に溶解、単独では 335 nm 励起で 375、395 nm 付近に monomer 由来の蛍光発光帯を示し、500 nm 付近には発光帯はない。図 8 を見ると確かに単独では 500 nm 付近に発光はない。しかし FcMTAB を加えると、375、395 nm 付近の monomer の発光はほぼ消え、500 nm 付近をピークとする幅の広い特徴的な excimer 発光が観測された。これは pyrene が分子集合したことによる excimer complex の生成を示しており、通常は pyrene がミセルの中に取り込まれた状態であると解釈される現象である。したがって、FcMTAB は界面活性剤分子として機能してミセルを形成し、pyrene 分子をミセル内に取り込んだといえる。

一方、界面活性剤としてよく知られた CTAB でも、強度などが異なるものの、図 9 のように、基本的にほぼ FcMTAB と同様なスペクトルが得られた。図 8 と図 9 で界面活性剤なしでの pyrene のスペクトルに 450-500 nm 帯で大きな違いがあるが、これは pyrene の溶解性が低いため、固液の不均一系での超音波照射による溶解が均質ではなく、再現性にやや難があったためと考えられる。また、FcMTAB と CTAB を加えた時では約 20 nm ほど excimer 発光の  $\lambda_{\text{max}}$  が異なった。これはミセル内での pyrene どうしの分子間距離が異なったためと考えられる。また目視による観測であるが、CTAB 添加—超音波照射後の溶液は無色透明であるが、FcMTAB 添加—超音波照射後の溶液はややにごっていた。その様子は蛍光スペクトルの励起光の散乱光からもわかる。CTAB 添加時は散乱光がほぼ 0 であることは注意すべきである。陰イオン界面活性剤である SDS を用いた場合、図 10 のように、FcMTAB や CTAB と異なり、界面活性剤添加後も monomer 由来の発光が消えず、かつ excimer complex の蛍光発光は見えるものの、CTAB に比べさらにピーク波長は短く、460 nm 付近にあった。また励起光の散乱も強かった。改めて図 8-10 を見比べると、pyrene 単独での蛍光スペクトル強度やスペクトル自体に大きなばらつきがあることがわかる。難溶解性の有機化合物を扱う上での避けられない問題であると考えられる。

このように注意すべき実験上の問題があるものの、FcMTAB は、CTAB、SDS と同様に界面活性剤としての機能を持っていることが分かり、ミセル型超音波機能性分子の機能コンセプトの有効性を確認するための実験に用いることは適当であることが分かった。

### 2-2-2. 超音波照射によるミセル分解実験

2-2-1.の結果を踏まえ、超音波照射によるミセルの分解実験を行った。手順、試薬類、装置等は、3-2-1 と同様で、超音波照射装置には Kaijo TA-4021 を使い、 $25.0 \pm 1.0^\circ\text{C}$  に保たれた水槽で行った。緩衝溶液は pH4.8 または 2.1 のものを用いた。すでに著者らの研究で、pH4.8 ではフェロセン環は超音波照

射でフェロセニウムに酸化されず、一方 pH2.1 では酸化されることがわかっている[10]。

図 11-13 は 2-2-1 と同様の手順で形成した FcMTAB、CTAB 及び SDS と Pyrene のミセルに pH4.8 で 200 kHz の超音波を照射した場合の蛍光発光スペクトルの時間変化である。比べてみると 0 hr の時点から時間経過とともに 3 者ともに excimer complex の 450-500 nm 付近の蛍光発光強度は減少した。しかし、定量的な比較をするには、基準とすべき 0 hr の強度の再

この実験の対照として超音波照射なしでの蛍光スペクトルの時間変化を測定したのが図 14-16 である。SDS でやや異なる挙動がみられたものの、放置しておいても時間経過とともに蛍光発光は減少することがわかった。しかし、その減少量は超音波照射時より相対的に見て、明らかに少なく、超音波照射によりミセルが早く壊れていることは明らかであろう。ま

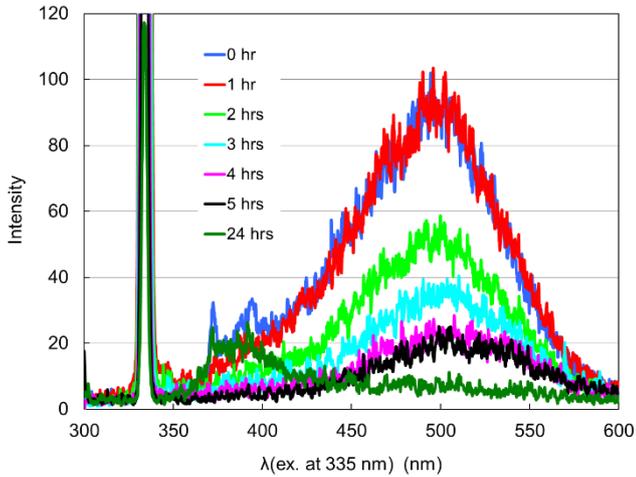


図 11. 超音波照射時の FcMTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH4.8)

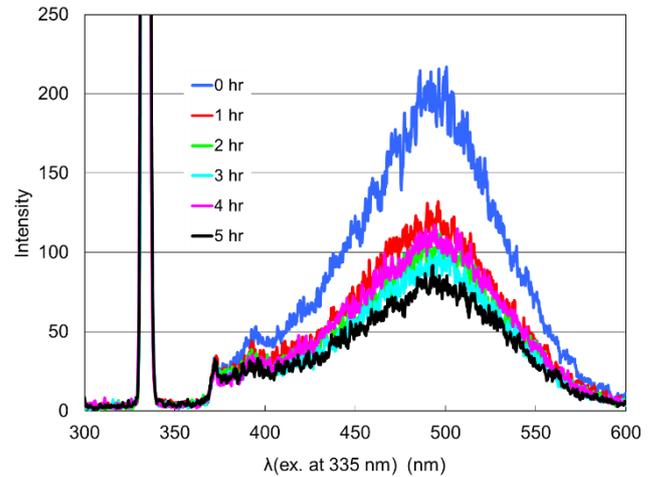


図 14. 超音波無しでの FcMTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (US なし pH4.8)

現性が得られなかったため、減少割合を 0 hr の強度を基準に

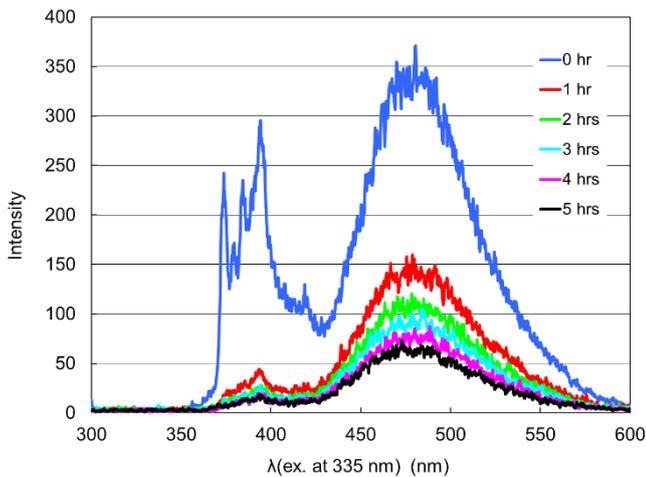


図 12. 超音波照射時の CTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH4.8)

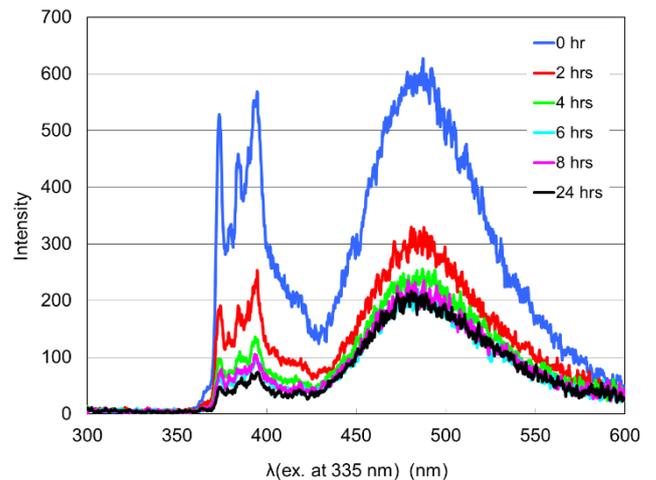


図 15. 超音波無しでの CTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (US なし pH4.8)

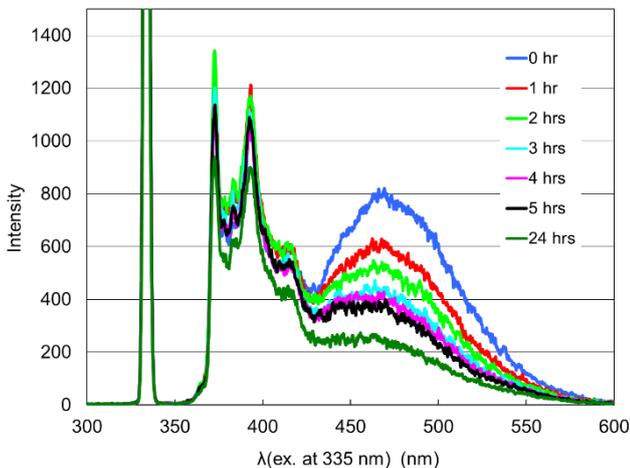


図 13. 超音波照射時の SDS-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH4.8)

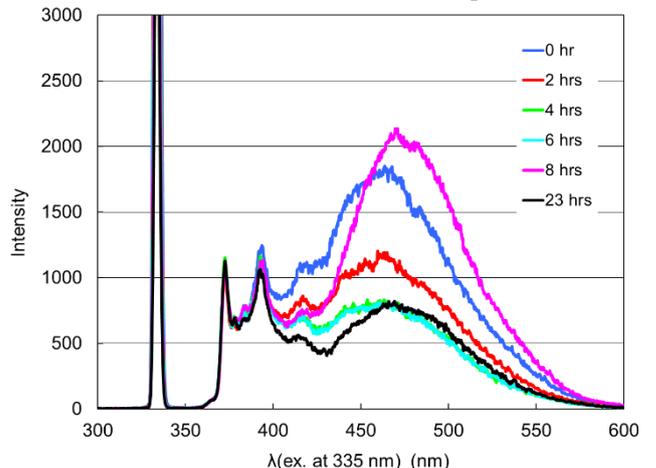


図 16. 超音波無しでの SDS-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (US なし pH4.8)

して算出することは適当ではないと考えられた。

た特徴的なのは、超音波ありなしにかかわらず 0 hr から 1-2 hrs にかけて急激に発光強度が減少する様子がみられることである。これは、溶液調製から 1-2 hrs ぐらいまでは、ミセルの生成と崩壊が繰り返され、平衡状態に達するまで時間が必要であることを示唆している。そこで、超音波照射前に一定時間静置し、その後超音波照射を開始した方が、より正確に超音波照射の効果を見積もれると考えられた。図 17、18 は、FcMTAB と CTAB について、ミセル溶液調製後 24 hrs 放置した時点から超音波照射を始めた結果である。明らかに FcMTAB の方が蛍光発光強度の減少が大きく早い。また、0 hr 時のスペクトルの再現性も改善される傾向にあった。したがって、この実験手順は有効な方法である。

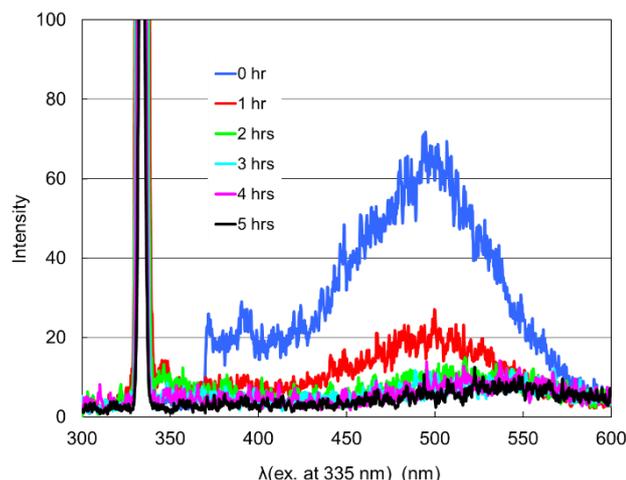


図 17. 24 hrs 放置処理後超音波照射時の FcMTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH4.8)

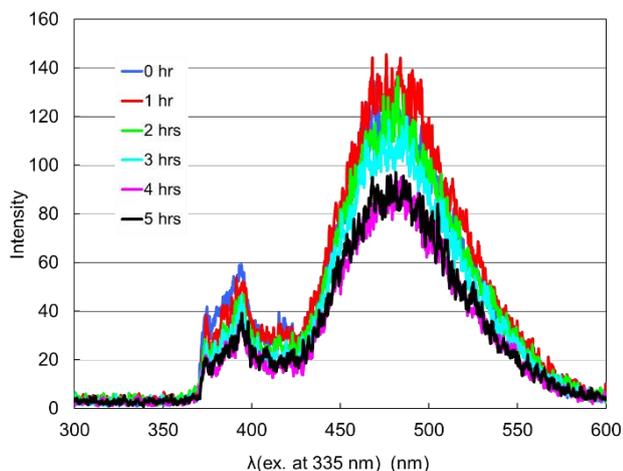


図 18. 24 hrs 放置処理後超音波照射時の CTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH4.8)

次に pH 依存性について検討を行った。緩衝溶液の pH を 2.1 に変えて測定した結果が図 19、20 である。これらの実験については、先の図 17、18 の測定のような調製後 24 hrs の放置や対照実験としての放置測定は、フェロセニウムへの酸化が起きてしまうため行わなかった。図 19、20 の結果を見ると、やはり 0 hr の値が大きく異なるが、傾向として FcMTAB の方が蛍光発光強度の減少が早く、大きいといえる。しかし、pH2.1 では、フェロセン環の超音波照射による酸化が加わり、pH4.8 時より大きな崩壊現象を期待したが、図 11、12、17、18 と比べてみる限り、大きな傾向の差はみられなかった。一方、UV-Vis スペクトルを測定すると大きな違いがみられた。図 21 は、FcMTAB 添加時、それぞれ pH4.8、pH2.1 での超音波照射後の溶液の UV-Vis スペクトルである。図 21 をみると、5 hrs 照射後に 625 nm 付近に、フェロセニウム環に由来する吸収がみら

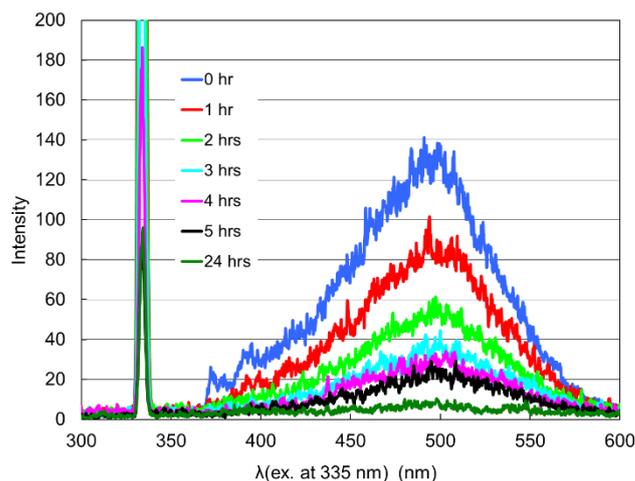


図 19. 超音波照射時の FcMTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH2.1)

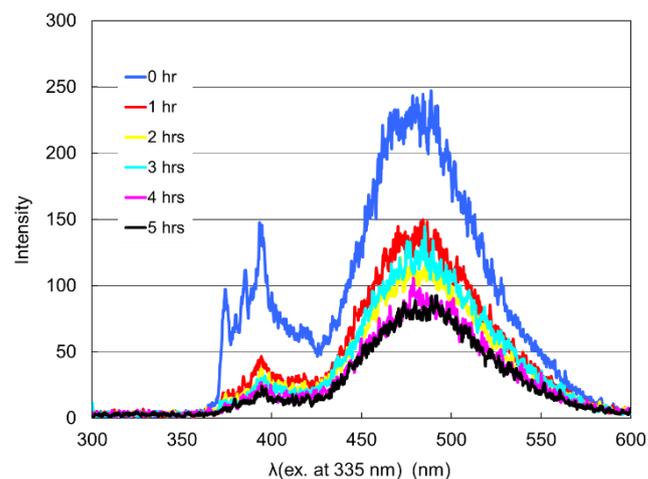


図 20. 超音波照射時の CTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (200 kHz pH2.1)

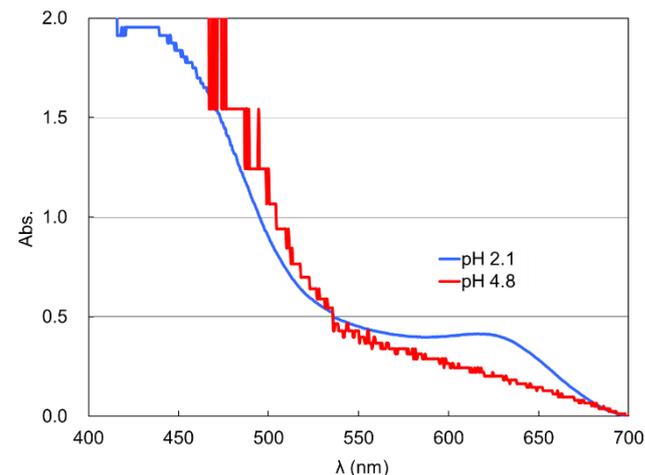


図 21. 超音波照射後の FcMTAB-Pyrene の UV-Vis スペクトルの pH による違い (200 kHz 5 hrs)

れており [14]、フェロセン骨格の酸化が起きている。一方で、pH4.8 のときはこの 625 nm 付近にはっきりした吸収ピークは見られず、溶液からはシクロペンタジエン臭がしていた。これはフェロセン骨格の分解を示唆している。これらの測定結果は pH の値により、ミセルの分解機構が異なっていることを示唆している。すなわち、pH4.8 のときはフェロセン骨格の分解、pH2.1 のときはフェロセニウムイオンへの酸化による脂溶性喪失という違いである。もちろん、両過程が同時に起

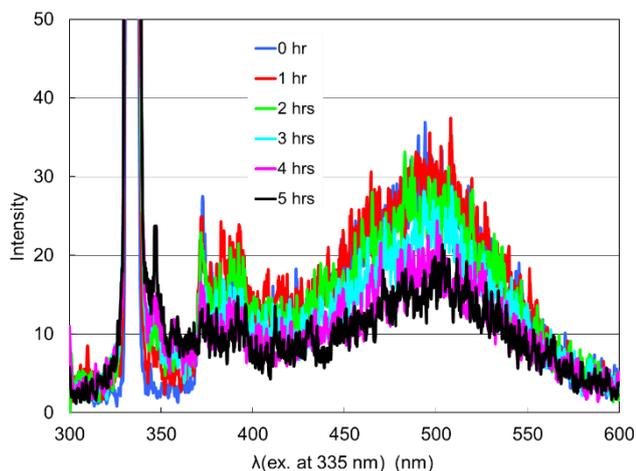


図 22. 超音波照射時の FcMTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (19.5 kHz pH4.8)

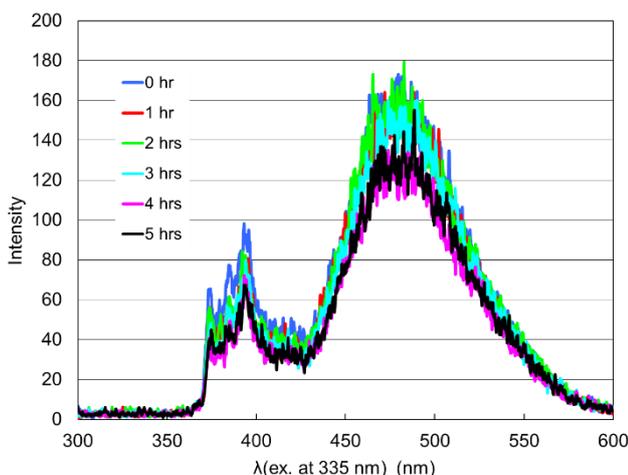


図 23. 超音波照射時の CTAB-Pyrene の蛍光スペクトルの時間変化 (19.5 kHz pH4.8)

きる、或いは酸化後分解するという過程が混在している可能性も十分考えられる

次に超音波の周波数の効果について検討した。図 22、23 は 19.5 kHz の超音波照射の結果である。両方ともに調製後 24 hrs 放置した後、超音波照射した。19.5 kHz の超音波は 200 kHz 時に比べて物理的作用は大きい、化学活性種の産生量は少ないのが一般的である。図 22、23 を見ると 200 kHz の時に比べて、明らかにミセルの崩壊量が遅いことが示唆された。少なくとも 19.5 kHz 時が 200 kHz よりも大きなミセル破壊作用はみられなかった。従って、本実験系では、超音波照射により発生した化学種による FcMTAB への化学的作用がミセル崩壊の主な原因過程であると考えられる。

以上の一連の FcMTAB を用いたミセル型超音波機能性分子の超音波によるミセル崩壊実験の結果、超音波照射によって化学構造が変化しにくいと考えられる CTAB や SDS に比べて、FcMTAB は分解されやすいことが示唆された。これは当初目的としたミセル型超音波機能性分子の機能設計が適当であることを示している。

ただ、実験上の問題点、すなわち、pyrene の蛍光スペクトルの再現性、及び界面活性剤の種類による蛍光スペクトルの違いという、二つのばらつきについての解釈あるいは実験上の解決策を与える必要も明らかとなった。

ばらつきの問題については、先の図 17、18 の実験のように 24 hrs 放置後に測定することである程度の解決策が得られた。

一方の界面活性剤の種類による pyrene の蛍光スペクトルの違いとは、図 8-10 の結果を見てわかるとおり、スペクトルの形状・強度、excimer complex の蛍光発光波長のピーク、などが界面活性剤の種類ごとに異なる問題である。excimer

complex の蛍光スペクトルはミセルに取り込まれた pyrene の分子集合状態を反映するはずであり、これは界面活性剤分子の疎水性による分子集合の強さやミセルの大きさの違いを反映している。これまでの実験でわかるとおり、同じ条件ならば FcMTAB が CTAB、SDS に比べて蛍光強度が低い傾向にある。もし、FcMTAB の方が疎水性部分の長さにより「ゆるい」ミセルを形成し、pyrene がゆるやかに包まれているなら、超音波によるミセル崩壊への化学的・物理的効果も FcMTAB の方が大きくて当然である可能性がある。しかし、一方で、FcMTAB、CTAB、SDS でそれぞれ excimer complex の蛍光発光波長のピークは明らかに異なっており、FcMTAB で約 500 nm、CTAB で約 480 nm、SDS で約 460 nm であった。一般的に、excimer complex 発光の長波長側へのシフトは、pyrene どうしのパッキングによるバンドギャップの低下によるものと考えられるので、この場合、蛍光発光波長のピーク値を考慮すると、FcMTAB > CTAB > SDS の順により強く密集したミセルを形成しているのではないかと推測できる。しかし、また一方で、蛍光強度から考えると、一個のミセルに取り込まれた pyrene の数または溶液中のミセルの数は FcMTAB < CTAB < SDS であるとも考えられる。さらに FcMTAB については、他の CTAB、SDS がない芳香環構造を持つことから、ミセル経由でなくフェロセン環とピレンの間の芳香族環どうしの相互作用による可溶性、錯体形成の可能性も考慮しておく必要がある。この場合も可溶性、excimer complex 形成の挙動が観測されると推定されるが、現在、根拠となる報告はない。以上のように複雑な過程のため、理論的解釈は現時点では困難であり、ミセル型超音波機能性分子の機能発現のメカニズムについては更なる検討を要する。

### 3. 結論

ミセル型超音波機能性分子の実証実験を行ったが、フェロセン環をもつモデル化合物での超音波分解実験の結果、総合的に見て、超音波照射によるミセル分解への有効性を示唆する結果が得られた。開くミセル型超音波機能性分子という新しいコンセプトの研究展開に期待できる結果であると考えられる。

### 4. 文献

- [1] a) T. J. Mason (Ed.) Sonochemistry: The Use of Ultrasound in Chemistry, RSC, UK, 1990. b) T. Ando, T. Kimura, Adv. in Sonochemistry, T. J. Mason (Ed), vol.2, JAI Press, (1991) 211.
- [2] K. S. Suslick (Ed.) Ultrasound, Its Chemical, Physical, and Biological Effects. VCH, Weinheim, 1989.
- [3] G. Siegel, G. Pfennigsdorf, H. Monig, Naturwissenschaften 45 (1958) 415.
- [4] D. Kessel, R. Jeffers, J. B. Fowlkes, C. Cain, J. Photochem. Photobiol., B, 32(1-2) (1996) 103.
- [5] V. Misik, N. Miyoshi, P. Riesz, Free Radical Biol. Med., 26(7/8) (1999) 961.
- [6] W. G. Dauben, D. P. Briton, B. A. Kowalczyk, J. Org. Chem. 55 (1990) 376.
- [7] K. S. Suslick, M. W. Grinstaff, J. Am. Chem. Soc. 112 (1990) 7807.
- [8] 宗宮創, 化学工業, 2005 年 2 月号 89-93.
- [9] H. Sohmiya, M. Fujita, T. Kimura, Ultras. Sonochem, 17, 633-636, 2010
- [10] 岡部育夫, 龍谷大学理工学部卒業論文, 2006 年
- [11] A. Shafir, M. P. Power, G. D. Whitener, and J. Arnold, Organometallics, 19, 3978-3982, 2000.
- [12] K. P. Ananthapadmanabham, E. D. Goddard, N. J. Turro, and P. L. Kuo, Langmuir, 1, 352-355, 1985.
- [13] 吉田秀幸, 薬学雑誌, 123(3), 691-696, 2003.
- [14] a) W. H. Huang and J. J. Jwo, J. Chin. Chem. Soc., 38, 343-350, 1991. b) C. Swearingen, J. Wu, J. Stucki, and A. Fitch, Environ. Sci. Technol. 38, 5598-5603, 2004.

## 和文抄録

新しい超音波機能性分子として、ドラッグ・デリバリーの機能を目指すミセル型超音波機能性分子を研究した。これは、界面活性剤としての機能を持ちながら、超音波照射をスイッチとしてその分子構造が変化し、その結果、形成したミセルを崩壊させ、内包した脂溶性有機分子を放出する機能性分子である。その実証実験として、モデル化合物に(Ferrocenylmethyl)trimethyl ammonium Bromide (FcMTAB) を用い、pyrene の excimer 発光を指標として、FcMTAB のミセルの 200 kHz 超音波照射による崩壊実験を試みた。その結果を代表的な界面活性剤である Cetyltrimethylammonium Bromide (CTAB) や Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) と比較した。諸条件から、定量的な評価は困難であったが、定性的には FcMTAB のミセルのほうが CTAB、SDS などよりも速やかに大きく崩壊する傾向が認められた。また、FcMTAB では、その超音波分解過程において pH 2.1 ではフェロセニウムへの酸化が認められ、pH4.8 ではそれ以外の崩壊過程を経ることが認められた。また、超音波の周波数は 19.5 kHz よりも 200 kHz の方がミセル崩壊への有効性が認められた。

キーワード：超音波、フェロセン、超音波機能性分子、ミセル、ドラッグ・デリバリー