

浸透圧を利用したW/O/Wエマルジョンの滴径制御と安定性*

清水 正高*1・中島 忠夫*2

Droplet size control and stability of W/O/W emulsion by utilizing osmotic pressure

Masataka SHIMIZU and Tadao NAKASHIMA

膜乳化法によって調製した単分散W/O/Wエマルジョンを用い、均一な液滴のわずかな滴径変化を追跡して、W/O滴の膨張収縮および破壊に及ぼす浸透圧の影響を調べた。その結果、内水相滴径とW/O滴径の変化は、浸透圧差に基づく物質収支計算によって正確に予測することができ、実験値と良く一致した。すなわち、浸透圧の利用によって新たなW/O/Wエマルジョンの滴径制御技術を構築できる可能性が示唆された。一方、内水相滴の膨張によりW/O滴が破壊される理由の一つは、油性界面活性剤の不足であることも明らかになった。油水界面積の増大に対応する過剰量の油性界面活性剤を添加することが、W/O/Wエマルジョンの安定性維持に必要であった。

キーワード：膜乳化， W/O/Wエマルジョン， 滴径コントロール， 多孔質ガラス， 界面活性剤

1 はじめに

内水相滴を包含した油滴、すなわち、W/O滴が外水相に分散したW/O/Wエマルジョンの安定性は、内水相と外水相の浸透圧差に基づく水分子の油相透過と関連づけて議論されることが多い。W/O/Wエマルジョンを液体カプセル^{1,2)}あるいは乳化液膜^{3,4)}に利用する場合、現実的には内水相に多量の物質を封入するケースが多く、通常、内水相の浸透圧は著しく高くなる。この浸透圧差を駆動力に外水相から水分子が移動して内水相滴の膨張を招き、結果的にW/O滴の破壊が発生する。こうした水分子の油相透過については油溶性界面活性剤分子⁵⁾がキャリアとなって水を輸送するメカニズムなどが提示されている。しかし、水の透過量と水滴の膨張を定量的に解析した報告は少なく、W/O/Wエマルジョンの安定性にまで言及した例に至ってはほとんどない。

これは、上記の研究において滴径のわずかな変動を正確に検出できる単分散エマルジョンを使用していないことに理由がある。一方、筆者らは、膜乳化

法により調製した単分散W/Oエマルジョンを利用して浸透圧差を駆動力にした水分子の油相透過を解析⁶⁾し、水滴径変化を正確に予測できることを明らかにした。

本研究では、膜乳化により生成した単分散W/O/Wエマルジョン⁷⁾を用い、W/O滴の膨張収縮および破壊に及ぼす浸透圧差の影響について調べた。水分子の油相透過によって内水相滴が膨張収縮し、結果的にW/O滴も膨張収縮する。この現象を利用して、浸透圧差に基づき変化するW/O滴径を計算し、実測値と比較した。また、W/O/Wエマルジョンの安定性低下を導く原因の一つが油溶性界面活性剤の吸着不足であることを突きとめ、これを改善した安定なW/O/Wエマルジョンの生成方法、さらにはW/O滴径のコントロール方法を明らかにした。

2 方法

2-1 W/O滴径変化の計算

浸透圧 π は、

$$\pi = -RT \ln X / v_w \\ = v RT M_w \phi C_m / (1000 v_w) \quad (1)$$

である。ここで、浸透圧をもたらず各水相中の溶質イオン数は一定に保たれ、液滴の合一はなく、かつ

* 本報は、膜(MEMBRANE)31巻2号p.101~106 (2006)に掲載済み。

*1 材料開発部

*2 宮崎県機械技術センター

W/O滴の破壊による内水相滴の放出がないと仮定した場合、初期の内水相滴径 iD_w と体積 ${}^iV_{wi}$ ならびに平衡状態の内水相滴径 eD_w と体積 ${}^eV_{wi}$ の間には、Eq.(1)と水の物質移動収支に基づき次式が成立する。

$$\begin{aligned} {}^eV_{wi}/{}^iV_{wi} &= ({}^eD_w/{}^iD_w)^3 \\ &= [1+A^e\phi^i\rho/({}^e\pi_i M_s)]/[1+A^i\phi^e\rho/({}^i\pi_i M_s)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{ただし, } A = RT\nu M_w/\nu_w \quad (3)$$

一方、油相の体積 V_{oil} は、

$$V_{oil} = (100 - {}^iC_w)/{}^iC_w \cdot {}^iV_w \quad (4)$$

従って、W/O滴径の変化は、Eq.(2)とEq.(4)を利用して次式のように表される。

$$\begin{aligned} {}^eV_{w/o}/{}^iV_{wi} &= ({}^eV_{wi} + V_{oil})/({}^iV_{wi} + V_{oil}) \\ &= ({}^eD_{w/o}/{}^iD_{w/o})^3 \\ &= 100/{}^iC_w \{ [1+A^e\phi^i\rho/({}^e\pi_i M_s)] / [1+A^i\phi^e\rho/({}^i\pi_i M_s)] + (100 - {}^iC_w)/{}^iC_w \} \end{aligned} \quad (5)$$

一般に、内水相や外水相の体積は ${}^eV_{wo} \sim {}^eV_{wo} \gg {}^eV_{wi} > {}^iV_{wi}$ である。そこで本報では、外水相の体積変化がなく $V_{wo} = {}^eV_{wo} = {}^iV_{wo}$ 、外水相の浸透圧変化もない $\pi_o = {}^e\pi_o = {}^e\pi_i$ と考えた。その結果、内水相浸透圧 ${}^i\pi_i$ 、W/O滴内の内水相体積割合 iC_w 、W/O滴径 ${}^iD_{w/o}$ および外水相浸透圧 π_o の初期条件が決まれば、膨張収縮後の平衡に達したW/O滴径 ${}^eD_{w/o}$ をEq.(5)によって予測できる。なお、油相から見て、内水相滴は半径が小さな凸の曲率を有し、外水相は半径が大きな凹の曲面を持っている。しかし、この曲率に基づく溶解度差が水の油相内移動に及ぼす影響は、浸透圧差に比べて非常に小さい⁶⁾と予想された。また、水の油相内飽和溶解度自体が浸透圧に依存する効果も小さい⁸⁾と推測されたため、本報では浸透圧以外のファクターを無視した。

2-2 単分散W/O/Wエマルションの調製と評価

W/O/Wエマルションの調製は既報⁷⁾に従った。すなわち、高速かくはん式ホモミキサー (Hansen社製, TP18/10S2) を用い、所定量の油相に対して内水相を滴下しながら24,000rpm, 3minの条件でW/Oエマルションを調製し、膜乳化法により所定の浸透圧、内水相滴径、水相体積割合およびW/O滴径を有する単分散W/Oエマルションを調製した。本実験におけるW/O/Wエマルションの組成をTable 1

Table 1 Main initial composition of W/O/W emulsion and diluting solution

inner aqueous phase	solute	EDTA·Ca·Na ₂ ·2H ₂ O	0.037×10 ³ mol·m ⁻³
		EDTA·Na ₄ ·4H ₂ O	0.075×10 ³ mol·m ⁻³
		KCl	0.10×10 ³ mol·m ⁻³
	initial osmotic pressure : ${}^i\pi_i$		1.3 MPa
initial mean aqueous droplet size : iD_w		0.65 μm	
initial volume ratio to oil phase : iC_w		25~30 vol%	
oil phase	purified soybean oil		
	TGCR concentration		5~10 wt%
outer aqueous phase	solute	NaCl	0.27×10 ³ mol·m ⁻³
	initial osmotic pressure : ${}^i\pi_o$		1.3 MPa
	Poloxamer 188 concentration		1 wt%
diluting solution	solute	NaCl	0.01×10 ³ ~2.1×10 ³ mol·m ⁻³
	osmotic pressure		0.05~10 MPa
	Poloxamer 188 concentration		0.5 wt%

に示す。内水相にはEthylenediamin-N, N, N', N'-tetraacetic acid calcium disodium salt dihydrate ; Na₂[Ca-EDTA](株同仁化学研究所), Ethylenediamin-N, N, N', N'-tetraacetic acid tetra-sodium salt tetrahydrate ; Na₄-EDTA (株同仁化学研究所) および KCl (和光純薬工業株, 特級) を溶解して浸透圧を調整した。外水相には水溶性界面活性剤の Poloxamer 188 (BASF Aktiengesellschaft社製, Lutrol F68) を添加し、浸透圧はNaClにより調節した。なお、界面活性剤は単一成分ではないため、濃度をwt%で表記し、それぞれの成分濃度は、溶解している相に対する含有割合として表示した。

油相には、油溶性界面活性剤としてテトラグリセリン縮合リシノレートTGCR (阪本薬品工業株, CR-310) と精製大豆油 (和光純薬工業株) を用いた。なお、TGCR濃度 $C_{TGCR} = 5\text{wt}\%$ の条件で高速攪拌式ホモミキサーにより調製したW/Oエマルションに対して、TGCRを再度添加した $C_{TGCR} = 6.9\text{wt}\%$ と $10\text{wt}\%$ 、また、添加していない $5\text{wt}\%$ のW/Oエマルションを準備し、それぞれを分散相に膜乳化により単分散W/O/Wエマルションを生成した。いずれの場合も水相体積割合 iC_w が同じ値になるように組成を調節した。

2-3 浸透圧差を設けたW/O滴の膨張・収縮実験

内外水相の浸透圧が等しい単分散W/O/Wエマルションを2.2の方法で先に調製した。別に異なる浸透圧のNaClとPoloxamer188の水溶液を用意し、これに上記エマルションの一定量を投入す

ることにより浸透圧差を設け、膨張収縮実験を実施した。W/O滴が膨張した場合にはせん断力によって破壊しやすくなるため、60~120rpmの低速でかくはん翼が回転する上水凝集反応試験機(宮本理研工業(株)製, JT-40)を使用してW/O滴の均一分散を図った。

W/O滴から外水相に放出された $[\text{Ca-EDTA}]^{2-}$ は原子吸光光度計(株島津製作所製, AA-660)を使用して測定した。すなわち、W/O滴に封入されるべき $[\text{Ca-EDTA}]^{2-}$ の量が W_t 、外水相へ放出された量が W_o であるなら、破壊率は $\alpha_{[\text{Ca-EDTA}]^{2-}} = W_o/W_t \times 100$ として算出される。浸透圧には文献値⁹⁾あるいは浸透圧計(Hermann Roebling Messtechnik社製, 13DR)により測定した実測値を用いた。

2-4 滴径分布の測定と単分散性評価

滴径分布はレーザー回折/散乱式粒度分布計(株島津製作所製, SALD-2000)のフローセルを用いて測定した。W/Oエマルションの水滴径分布を測定する場合には灯油を、また、W/O/WエマルションのW/O滴径を測定する場合には、実験条件と同じ浸透圧のNaCl水溶液を分散媒に用いた。平均水滴径 mD_w と平均W/O滴径 $mD_{w/o}$ メディアン径で表した。液滴の形態観察と写真撮影には光学顕微鏡(オリンパス光学工業(株)製, BHS-323)を使用した。

2-5 界面張力の測定方法

界面張力は滴容法¹⁰⁾により303Kで測定した。具体的には、外径6mmのJ型ガラス管を水相に沈め、そのガラス先端から垂直上に向かって形成した油相球あるいはW/Oエマルション球の大きさから界面張力を算出した。ガラス先端は鏡面研磨し、その表面を疎水化処理剤(信越化学工業(株)製, KP-18C)により親油性にした。球の形成速度は測定値の変動がなくなる $1.7 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ に設定し、この一定速度を確保するためシリンジポンプ(株トップ製, TOP-5200)を使用した。

3 結果

3-1 W/O滴の膨張と安定性

膜孔径 $D_m=8.82 \mu\text{m}$ の多孔質ガラス膜を用いて、平均W/O滴径 $m^i D_{w/o}=25.5 \mu\text{m}$ の単分散W/O/Wエマルションを調製した。内水相と外水相の浸透圧

は等しく ${}^i \pi_i = {}^i \pi_o = 1.3 \text{ MPa}$ 、内水相体積割合は ${}^i C_w = 25 \text{ vol}\%$ であった。次に、このエマルションをNaClとPoloxamer188の水溶液によって希釈し、外水相の浸透圧を $\pi_o = 0.13 \text{ MPa}$ に設定した。その結果、浸透圧が1/10になり、外水相から内水相へ向かう水分子移動によってW/O滴の膨張が始まった。初期滴径に対する膨張比 $(m D_{w/o}) / (m^i D_{w/o})$ および破壊率 $\alpha_{[\text{Ca-EDTA}]^{2-}}$ の経時変化をFig.1に示す。 $\alpha_{[\text{Ca-EDTA}]^{2-}}$ がほとんど0%である $C_{\text{TGCR}} = 10 \text{ wt}\%$ のW/O滴(□印)に注目すると、2.5~3時間で膨張は終了し、見かけの水分子移動が停止した。これ以降、平衡到達に必要な時間は3時間以上とした。

一方、 $C_{\text{TGCR}} = 6.9 \text{ wt}\%$ のW/O滴(●印)は2.5時間を境に膨張から縮小へ転じ、 $\alpha_{[\text{Ca-EDTA}]^{2-}}$ は徐々に上昇し破壊を続けた。浸透圧差による内水相滴の膨張と不安定化による内水相滴の放出、すなわち、W/O滴の破壊が同時に進行し、放出が過剰な場合にW/O滴が縮小したように見えたと考えられる。 $C_{\text{TGCR}} = 5 \text{ wt}\%$ のW/O滴(△印)では急激な破壊によって $\alpha_{[\text{Ca-EDTA}]^{2-}}$ が著しく上昇し、膨張比 $(m D_{w/o}) / (m^i D_{w/o})$ は初期値よりむしろ低下した。

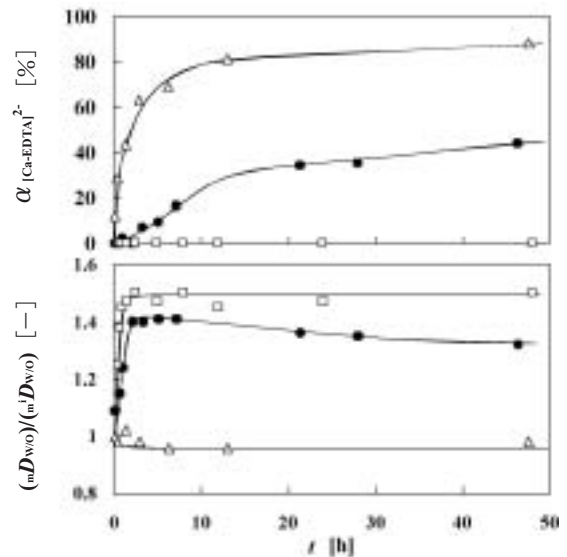


Fig.1 Variation of ratio of mean size of W/O droplets, $m D_{w/o}$ to the initial size, $m^i D_{w/o}$ and destruction ratio of W/O droplet after diluting the initial W/O/W emulsion by a different solution
 △; addition of TGCR=0 wt%(total $C_{\text{TGCR}}=5 \text{ wt}\%$), ●;1.9wt% (6.9wt%), □;5 wt%(10wt%). Initial conditions were following ; $D_m=8.82 \mu\text{m}$, $m^i D_{w/o}=25.5 \mu\text{m}$, ${}^i \pi_i = 1.3 \text{ MPa}$, ${}^i \pi_o = 1.3 \text{ MPa}$, ${}^i C_w = 25 \text{ vol}\%$. Diluting solution ; $\pi_o = 0.13 \text{ MPa}$.

3-2 安定性に及ぼす油性界面活性剤添加の効果

内水相滴が水透過によって膨張する場合、その安定性は油性界面活性剤TGCRの存在状態と大きな関わりがあると予想される。そこで既報⁶⁾と同様にW/Oエマルションに純水を添加し、高浸透圧の内水相滴に水分子を均等に分配させる水滴膨張実験を行った。その水滴径積算分布の変化をFig.2に示す。高速かくはん式ホモミキサーを用いて生成した平均水滴径 $m^1D_w=0.62\mu\text{m}$ の初期W/Oエマルション (○印) に対して、そのまま内水相量が3倍 (▲印) および8倍 (■印) になるように純水を添加した結果をFig.2 (A)、また、TGCRを再添加して $C_{\text{TGCR}}=10\text{wt}\%$ にした初期W/Oエマルションに3倍、8倍および30倍 (●印) になるように純水を添加した結果をFig.2 (B) に示す。Fig.2 (B) では滴径分布の形が保たれたまま増大側へシフトし、内水相滴は安定な状態で膨張したと推測される。一方、Fig.2 (A) では滴径分布の形が著しく崩れ、内水相滴の合一が進んでいた。

次に、TGCRの再添加が安定性に及ぼす効果を明らかにするため、 C_{TGCR} が異なる油相の界面張力 γ を測定し、Fig.3に示す γ と C_{TGCR} の関係図を作成した。同図を利用し、測定した初期W/Oエマルションの $\gamma=13\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$ から平衡濃度 $\cdot C_{\text{TGCR}}=0.23\text{wt}\%$ を求めた。界面張力は油相界面におけるTGCRの吸着量によって変化する。実際には、TGCRが界面で吸脱着しており、本報では、その吸着量と油相内のTGCR濃度、すなわち、平衡濃度 $\cdot C_{\text{TGCR}}$ の間に吸脱着の平衡関係が成立していると考えて議論を進めた。従って、上記初期W/Oエマルションの $\cdot C_{\text{TGCR}}=0.23\text{wt}\%$ から、強力なせん断力を発生する高速かくはん式ホモミキサーによって造られたW/Oエマルションは、 $\cdot C_{\text{TGCR}}$ がほぼ臨界ミセル濃度に近い値⁸⁾ にまで低下し、初期添加量5wt%の大部分が内水相滴形成に消費されたことが明らかである。このためFig.1 (△) およびFig.2 (A) では、内水相滴の膨張に伴って界面積が増加しても、それに吸着して安定化に寄与するTGCRが不足し、内水相滴の合一が急激に起こったと考えられる。一方、Fig.1 (□) およびFig.2 (B) では過剰のTGCRが再添加されるため、増加した界

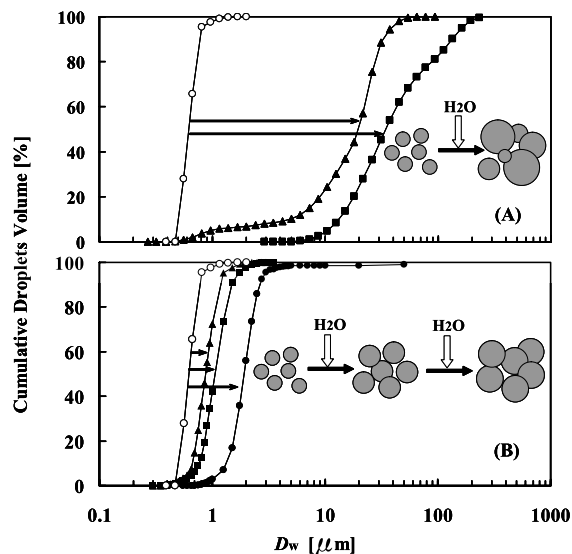


Fig.2 Effect of TGCR addition on swelling of inner aqueous droplets by permeation of water molecules (A) TGCR concentration is 5 wt% without addition and (B) 10 wt% with addition of TGCR 5 wt%. Key ○ ; an original W/O emulsion. ▲ ; inner aqueous volume is 3 times of origin. ■ ; 8 times. ● ; 30 times.

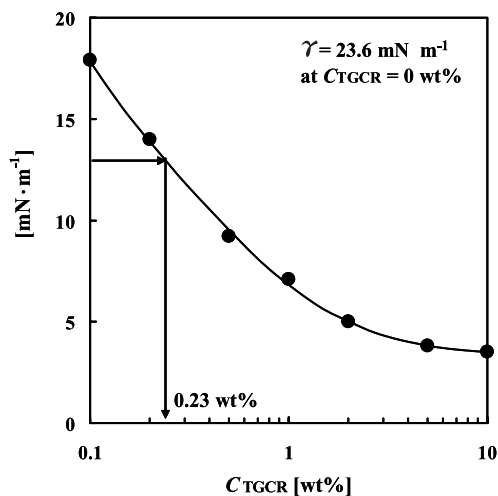


Fig.3 Relationship between interfacial tension and TGCR concentration measured for searching the equilibrium concentration of TGCR in W/O emulsion

面に吸着できる十分なTGCRが油相中に存在し、このことが安定化に寄与する要因だったと推測される。

以上のメカニズムをモデル的にFig.4に示す。Fig.4 (A) は膨張しても安定なW/O滴であり、Fig.4 (B) は合一や破壊が起こった不安定なW/O滴を表している。また、内水相滴の安定性はFig.2

の結果を反映している。

3-3 W/O滴の膨張収縮を利用した滴径制御

油溶性界面活性剤を再添加したW/O滴は、外水相の浸透圧変化に追従して膨張収縮し、さらにその平衡W/O滴径 $m^e D_{w/o}$ はEq.(5)から容易に予想できると考えられる。そのことを確かめるため、Table 1の条件で調製した単分散W/O/Wエマルションを所定の希釈液に分散し、外水相浸透圧を $\pi_o = 0.05 \sim 8.4 \text{MPa}$ に設定した。W/O滴径比 $(m^e D_{w/o}) / (m^i D_{w/o})$ の実測値とEq.(5)の計算値をFig.5に示す。両者は実験誤差の範囲でほぼ一致しており、浸透圧を利用した液滴設計技術の可能性が示唆された。

Fig.5において π_o を8.4MPaに設定し、 $(m^e D_{w/o}) / (m^i D_{w/o})$ が0.91に収縮したW/O/Wエマルションの光学顕微鏡写真をFig.6 (A)に示す。内水相滴が小さくなってW/O滴に透光性があられ、O/Wエマルションに似ている。一方、Fig.6 (C)は、 $\pi_o = 0.05 \text{MPa}$ に設定したため $(m^e D_{w/o}) / (m^i D_{w/o}) = 1.92$ にまで膨張し、内水相滴の体積割合が初期 ${}^i C_w = 25 \text{vol}\%$ から平衡状態の ${}^e C_w = 89 \text{vol}\%$ まで増加した。Fig.6 (B)には $\pi_o = 1.3 \text{MPa}$ 、 $(m^e D_{w/o}) / (m^i D_{w/o}) = 1$ の初期エマルションを示した。(A)と(C)のいずれも(B)の単分散性を保持したまま膨張収縮していることが明らかである。

4 まとめ

膜乳化法により生成した単分散W/O/Wエマルションを用い、浸透圧差を駆動力とする水分子の油相透過によって内水相滴およびW/O滴が膨張収縮し、破壊に至るメカニズムを調査した。また、浸透圧を利用した液滴設計技術の可能性を検討した。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 浸透圧の高い水相へ向かって水分子の油相透過が起こった。W/O/Wエマルションでは、特に内水相の浸透圧が高く、内水相滴およびW/O滴が膨張する場合に不安定となり、液滴の合一や破壊が発生した。
- 2) 不安定要因の一つは油溶性界面活性剤TGCRの平衡濃度が低いことにあった。強力なせん断力を利用してW/Oエマルションを生成した場合、平衡濃度は臨界ミセル濃度まで低下する。このため、

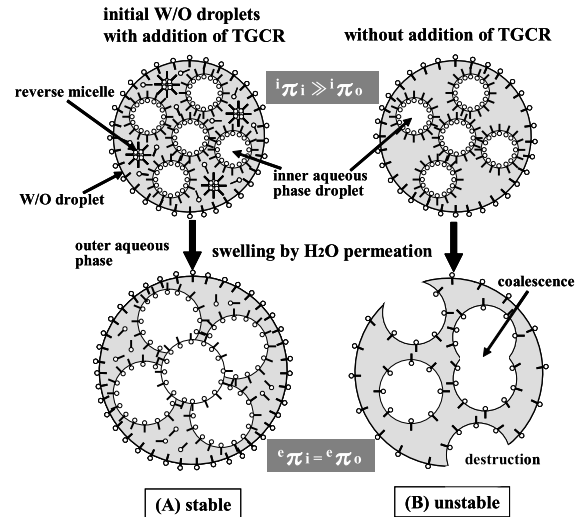


Fig.4 Swelling models of stable W/O droplets with and unstable W/O droplets without addition of TGCR

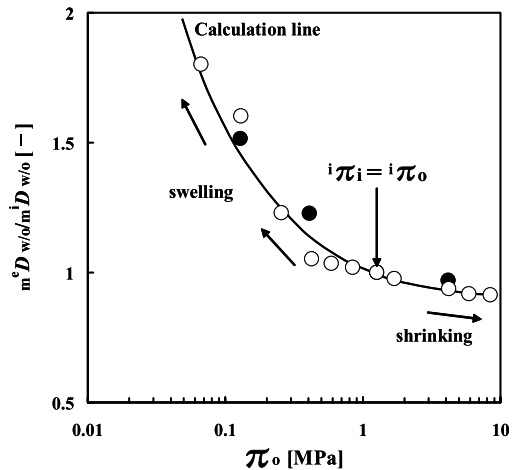


Fig.5 Effect of osmotic pressure of the outer aqueous phase on mean size of W/O droplets at equilibrium

White keys are mean size of actually swelled or shrunk W/O droplets, $m^e D_{w/o}$ started from initial mean size, $m^i D_{w/o} = 33.0 \mu\text{m}$. Black keys are $m^e D_{w/o}$ started from $m^i D_{w/o} = 8.71 \mu\text{m}$.

内水相滴が膨張して界面積が増加した結果、界面にTGCRが十分吸着できなくなり、不安定化を引き起こした。TGCRを再度添加して平衡濃度を上昇させた場合には安定性を維持できた。

- 3) 単分散W/O/Wエマルションの外水相浸透圧を変化させ、W/O滴を膨張収縮させた時の滴径実測値と浸透圧差や水の物質移動収支に基づくEq.(5)の計算値はよく一致した。この結果は、浸透圧を利用したW/O/Wエマルションの液滴径コントロール技術につながると考えられる。

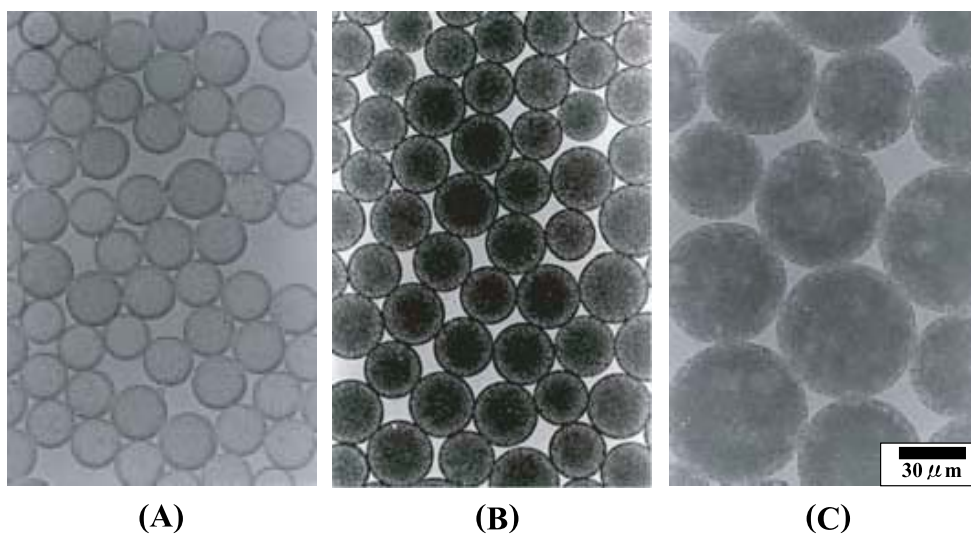


Fig.6 Photomicrographs of swelled or shrunk W/O droplets in W/O/W emulsion by osmotic pressure difference between inner and outer aqueous phase (A) ; shrunk W/O droplets because π_o was 8.4 MPa larger than initial osmotic pressure, ${}^i\pi_o$ of outer aqueous phase. (B) ; initial W/O droplets with ${}^i\pi_o = 1.3$ MPa.(C) ; swelled W/O droplets because π_o was 0.05 MPa smaller than initial osmotic pressure.

5 参考文献

- 1) Florence, A.T. and D. Whitehill : *J. Colloid and Interface Science*, 79, 243-256(1981)
- 2) 坪井勝巳, 秋田重人, 高橋勝六, 竹内寛 : 化学工学論文集, 13, 110-113(1987)
- 3) Matsumoto, S.T. Inoue, M. Kohda and K. Ikura : *J. Colloid and Interface Science*, 77, 555-563(1980)
- 4) 藤縄勝彦, 小松珠美, 宝沢光紀, 今石宜之, 井野一 : 化学工学論文集, 10, 226-232(1984)
- 5) Colinart,P.,S.Delepine,G.Trouve and H.Renon : *J. Membrane Science*, 20, 167-187(1984)
- 6) 清水正高, 中島忠夫, 久木崎雅人 : 化学工学論文集, 28, 304-309 (2002)
- 7) 清水正高, 中島忠夫 : 膜, 31, 51-56 (2006)
- 8) 清水正高, 中島忠夫, 久木崎雅人 : 化学工学論文集, 28, 310-316 (2002)
- 9) 「化学便覧 基礎Ⅱ」, 日本化学会編, p.1202, 丸善 (1980)
- 10) 「化学便覧 基礎Ⅱ」, 日本化学会編, p.609, 丸善 (1980)

記号

C_m : molarity [mol \cdot kg $^{-1}$]
 C_w : volume rate of aqueous phase in W/O emulsion [vol%]

C_{TGCR} : TGCR concentration in oil phase [wt%]
 D_m : pore size of porous glass membrane [μ m]
 D_w : droplet size of inner aqueous phase in W/O emulsion [μ m]
 $D_{w/o}$: size of W/O droplet in W/O/W emulsion [μ m]
 M_s : molecular weight of solute [kg \cdot mol $^{-1}$]
 M_w : molecular weight of water [kg \cdot mol $^{-1}$]
 R : gas constant [J \cdot mol $^{-1}\cdot$ K $^{-1}$]
 T : absolute temperature [K]
 t : time [h]
 V_{oil} : volume of oil phase in W/O emulsion [m 3]
 V_w : volume of aqueous phase in W/O emulsion[m 3]
 $V_{w/o}$: volume of W/O droplets in W/O/W emulsion[m 3]
 W_o : amount of [Ca-EDTA] $^{2-}$ in outer aqueous phase[mol]
 W_i : total amount of [Ca-EDTA] $^{2-}$ in W/O/W emulsion [mol]
 X : mole fraction [-]
 $\alpha_{[Ca-EDTA]^{2-}}$: leakage rate of [Ca-EDTA] $^{2-}$, that is, destruction rate of W/O droplet= $W_o/W_i \times 100$ [%]
 γ : interfacial tension [mN \cdot m $^{-1}$]
 ν : dissociation number [-]
 π : osmotic pressure [MPa]
 ρ : density of aqueous phase [kg \cdot m $^{-3}$]

v_w : molar volume of water $[\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}]$

ϕ : osmotic coefficient $[-]$

<subscript>

i : inner aqueous phase

o : outer aqueous phase

m : mean size

<superscript>

i : initial state

e : equilibrium state

* : adsorption/desorption equilibrium state
of surfactant to interface