

平成 22 年 5 月 27 日現在

研究種目： 若手研究(B)

研究期間： 2008~2009

課題番号： 20760049

研究課題名(和文) 電界ピンセットによる分子膜力学物性の直接測定

研究課題名(英文) Direct measurement of kinetic properties of molecular layer by electric field tweezers system

研究代表者 細田 真妃子 (HOSODA MAIKO)
 東京電機大学・理工学部・講師
 研究者番号： 40366406

研究成果の概要(和文)： 電場ピックアップ法により液膜の振動モードを制御することによって、液膜の DLVO 相互作用の測定を試みた。具体的には、DLVO 相互作用の情報を含む S モードの時定数と、B モードの分散関係から求める膜厚とから DLVO 相互作用を得ようというものである。液膜の振動は、膜の面に垂直な方向に対する対称性から、S モードと B モードの二つの振動モードに大別できる。S モードは両面が反対方向に変位するモードで、B モードは両面とも同じ方向に変位するモードである。

研究成果の概要(英文)： The electric field tweezers is the measurement system of the local surface properties of the soft materials. The system excites the surface mechanical vibration on the surface with non-contact manner with dielectric force. Electric field is applied by a needle electrode set just above the sample surface, which picks up the surface of the dielectric materials. The amplitude of the surface deformation gives the measure for the surface tension as restoring force, while the time constant of the deformation yields the viscosity. We can determine the shear viscosity and the surface tension uniquely by measuring the dynamic behavior of the liquid film with non-contact manner.

In this study, we applied the electric tweezers system to measure the local mechanical properties of liquid thin films. We can determine the DLVO interaction of the sample from the time constants of symmetric (spray) and asymmetric (bending) modes. The system was also employed for the rapid measurement of highly viscous liquids. The principle experimentally proved is now considered for the application of very slow and accurate mechanical actuator.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野： 工学

1. 研究開始当初の背景

界面活性剤や脂質など両親媒性を有する分子が配列して生成する膜構造は、細胞膜や神経軸索などの生態の基本要素を構成する重要な分子集合体である。これらはまた、ソフトマテリアルの界面改質や多成分系の相溶・分離といった工業プロセスにとっても重要な役割を果たしている。

これらの膜構造は、静電相互作用やロンドン分散力、あるいは排除堆積効果などが複雑に関与した分子間の異方的な相互作用によって形作られている。このため分子膜の構造や力学物性は温度や pH、電場や磁場といった外的要因に敏感に応答し、容易にその機能を変化させるという特色を持つ。これらの膜の力学的な物性や、膜を安定化させる分子間相互作用を調べることは、これらの膜構造が形成される機構とダイナミクスを分子レベルで理解し、さらに新たな特異機能を有する膜を設計する上で極めて重要である。しかし一方で、たとえば典型的な 2 分子膜であるシャボン玉を考えればわかるとおり、その構造はきわめて脆弱であるため、これを形成する分子レベルの力学物性を従来の方法で調べることは極めて困難であった。

2. 研究の目的

最近、申請者を含む研究グループは局所的な電界を物質表面に印加し、マックスウェル応力によって極めて微小な力を表面に非接触で及ぼして、これに対する応答から物質の表面張力や粘弾性を測定する「電界ピンセット」技術の開発に成功した。これは材料表面に触れることなくその力学物性を測定し得るという点で画期的な測定法であり、たとえば空中に保持したシャボン玉膜や脂質 2 分子膜を、触ることなくつまんで引っ張り、あるいは曲げる、という操作を可能にする。

本研究は、この電界ピンセットというまったく新しいプローブをさらに高性能化して、分子膜構造の力学物性をとらえる新しい計測手法として隔離することを目的とする。さらに研究後半では、これを用いて様々な分子膜構造を安定化させる分子間相互作用を直接測定し、膜構造が自己組織化的に形成されるメカニズムを分子のレベルから解明する。

界面活性剤水溶液の液面は、界面活性剤の分子膜で覆われている。このとき界面活性剤の効果で水溶液の表面張力は溶媒である水に比べて低下する。このことから、界面活性剤水溶液は、水の場合には安定に存在させる

ことが難しい液膜のような大表面積の形状をとることができる。ただし、液膜の場合、単に表面張力が低下しただけではその膜構造を維持することはできない。液膜がその構造を安定に存在させ得るのは、DLVO 相互作用が働いているためである。DLVO 相互作用は、液膜の異なる表面にある界面活性剤分子同士に働く van der Waals 引力と、液膜内部の水溶液中に形成される電気二重層反発力をあわせた相互作用のことである。この DLVO 相互作用と静水圧がつりあうことで、液膜は安定に存在することができる。

DLVO 相互作用は液膜の安定性や、振動などのダイナミクスなど、その物性に大きな影響を与える。そのため液膜の物性を支配するには、DLVO 相互作用の情報を知ることが必要になる。DLVO 相互作用を定量的に評価する試みとしては、液膜表面の熱揺らぎのパワースペクトルを光散乱法により測定し、それをもとに DLVO 相互作用を求める方法などが行われてきた。

本研究では、液膜の物性測定のための新しい手法を開発すべく、電場ピックアップ法による液膜の DLVO 相互作用測定を試みた。

3. 研究の方法

電界ピンセット装置による液体表面の物性測定法を開発した。通常の表面観察装置ではプローブで構造を破壊するおそれがあるため、表面直上に高圧電場を印加し表面を變形させる。これにより非接触での表面張力測定が可能になったが、低粘性物質に対しては表面波が生成され、粘性の測定が困難であった。そこで今回、毛細管端面の表面共鳴現象を利用することにより、表面張力ならびに粘性の測定精度を大幅に向上させることに成功した。直径 1 mm 程度の毛細管内で電界ピックアップにより表面に周期的応力を与えると、ある周波数において共鳴現象を示す。その周波数より液体試料の表面張力が、またピーク幅から粘性が求められる。さらに電場ピックアップ法により液膜の振動モードを制御することによって、液膜の DLVO 相互作用の測定を試みた。具体的には、DLVO 相互作用の情報を含む S モードの時定数と、B モードの分散関係から求める膜厚とから DLVO 相互作用を得ようというものである。液膜の振動は、膜の面に垂直な方向に対する対称性から、S モードと B モードの二つの振動モードに大別できる。S モードは両面が反対方向に変位するモードで、B モードは両面とも同じ方向

に変位するモードである。電場ピックアップ法を用いれば、電極針の配置を変えることによって液膜の面に対する印加電場の対称性をコントロールすることができる。すると、針を非対称に配置してBモードを、また針を一直線上に配置してSモードを選択的に励起することができると考えられる。そうすれば、Bモードの分散関係から膜厚を求め、膜厚の測定値とSモードの変形の時定数からDLVO相互作用を求めることが可能である。

液膜は、直径1.3cmの円形の穴が開いた銅製のホルダーを鉛直に立て、試料水溶液に浸して形成した。電極として、先端の太さが約 $10\mu\text{m}$ の真鍮製の針を用いた。この電極針は、液膜の両面に一本ずつ配置し、液膜に対して相互の位置関係を調整して電場を印加することにより、液膜表面の変形をコントロールすることができる。入力電場はファンクションジェネレーターを用いて生成し、高压電源を用いたアンプにより100倍に増幅した。

電場によって変形した表面の挙動を検出するプローブ光として、He-Neレーザーを用いた。このプローブ光を球面平凸レンズで膜表面に集光し、液面からの反射光をレンズを通して平行光に戻した。電場を印加していない状態の液面からの反射光を、強度が半分になる位置に設置したナイフエッジを通して、フォトダイオードで検出した。ナイフエッジを用いることで、液面の傾きに比例した信号強度の変化を検出できる。また、プローブ光はハーフビームスプリッターにより分割され、液膜の両側から液膜内の同一点をめがけて面対象に入射する。これは、反射光の強度変化の対称性を検出することで、電場により励起された変形がBモードかSモードかを区別するためである。

4. 研究成果

共鳴測定の結果として微小な領域の表面張力と粘性の精密測定が可能になった。自由表面近傍において円筒形の領域流体の運動を計算する。境界条件として固体壁において流体速度が0、また平衡状態における表面の接触角度は $\pi/2$ とおく。まず流体の粘性を無視して、表面の振動の固有モードを計算する。さらに固有モードの1周期あたりのエネルギー散逸を計算して振動の減衰係数を求める。この装置は表面の振動の周波数スペクトルを測定することにより流体運動を観測するものであり、それは共鳴振動の固有振動数と、その減衰によって得ることができる。

実験は粘性 $1[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ 、直径 $1[\text{mm}]$ のシリコンオイルと純水で行った。シリコンオイルは比較的理論値と一致した値が測定されたが、純水表面においては誤差が大きく出た。これは試料セルとの接触角の決定によるものと見られ、液体表面形状のより正確な微細な観

察が必要であることが分かった。

液膜測定の結果は、まず電場を印加しない場合の液膜の振動は、Bモードが支配的であることが分かった。次に、電極針を液膜表面に対して非対称に配置することでBモードを、垂直な一直線上に配置することでSモードも励振することができた。その結果、Sモードの時定数を測定することができた。しかしBモードの分散関係測定は成功しなかった。これは、不安定な厚い膜を測定しようとして渦が生じたことが原因である。その結果、DLVO相互作用の測定には至らなかった。

一方、Sモードの時定数からは、干渉縞が見える比較的厚い液膜の厚さを大まかに見積もることができた。ただし、正確な膜厚の測定には、やはりBモードの分散関係測定が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計3件)

- ① Maiko Hosoda, Rheology Measurement of protein by EMS system, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, 130巻, in press, 査読有
- ② 細田真妃子・酒井啓司、複雑流体のレオロジー計測—新しい測定法あれこれ—, Netsu Sokutei, Vol. 37, No. 2, pp81-88, 2010, 査読有
- ③ Keiji Sakai, Taichi Hirano, and Maiko Hosoda, Appl. Phys. Exp., 3, 016601 (2010), 査読有

[学会発表] (計7件)

- ① 細田真妃子, 金 希洙, 酒井 啓司
EMS システムによる超高粘性測定と極遅アクチュエータへの応用、超音波研究会、2010年1月25日、関西大学
- ② 細田真妃子、Rheology Measurement of protein by EMS system、The 30th Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS、2009年11月20日、同志社大学
- ③ 細田真妃子、電磁スピニングシステムを用いたタンパク質水溶液の粘性特性評価、第54回音波と物性討論会、2009年10月22日、東京大学生産技術研究所
- ④ 細田真妃子、EMS システムによるタンパク質水溶液の粘性評価、第57回レオロジー討論会、2009年10月5日、宇部全日空ホテル
- ⑤ 細田真妃子、Rheology Measurement of Surfactant Solutions by Electro-Magnetically Spinning Viscometer、The 29th Symposium on ULTRASONIC ELECTRONICS、2008年11月

- 11日、仙台市シルバーセンター
- ⑥ 細田真妃子、球回転式粘度計によるミセル水溶液のレオロジー測定、第53回音波と物性討論会、2008年10月30日、同志社大学東京オフィス
 - ⑦ 細田真妃子、新型粘度計による界面活性剤のレオロジー計測、第56回レオロジー討論会、2008年10月6日、朱鷺メッセ(新潟コンベンションセンター)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

細田 真妃子 (HOSODA MAIKO)
東京電機大学・理工学部・講師
研究者番号：40366406

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし