

機関番号：32657

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740315

研究課題名(和文) 表面粒子の回転モード解析によるゲル表面波の研究

研究課題名(英文) Rotation Phase of gel surface waves

研究代表者

吉武 裕美子 (YOSHITAKE YUMIKO)

東京電機大学・理工学部・助教

研究者番号：80453794

研究成果の概要(和文)：

ゲル表面には波長によって二種類の波が伝搬すると考えられている。波長の長い波は表面張力波に一致し、波長の短い波はレイリー波(表面弾性波)に一致する。しかし、二つの波は伝搬状態が根本的に異なり、表面張力波は波の進行方向に対し前方円運動をし、レイリー波は後方楕円運動をする。このため、両者の波が競合する波長領域では特殊な波が伝搬することが予想される。これまで中間領域の表面波については実験的にも理論的にも様々な報告があるが、未だ整理されていない。本研究では、表面粒子の挙動を直接観察する装置を開発し、二つの表面波モードによる表面近傍粒子の回転運動を観察した。

研究成果の概要(英文)：

The surface wave propagations are generally subject to elasticity and surface tension: The former governs the behavior in the long-wavelength range where the gel surface waves behave as Rayleigh waves, while the latter plays a major role in the region of short wavelength and Capillary waves run. In the intermediate region, gel is involved in a complex phenomenon that is troublesome from a viewpoint of measurement. We developed the high-speed observation system which enabled us to observe surface waves propagating on gel. In practice, we observed the movement of surface particles on capillary wave and Rayleigh wave.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：ソフトマテリアル

科研費の分科・細目：物理学・生物物理・化学物理

キーワード：ゲル、表面張力、表面波

## 1. 研究開始当初の背景

ハイドロゲルは、架橋された高分子による3次元網目構造の中に溶媒である液体を閉じ込めた、固体と液体の中間に属する状態をとる物質である。マクロにはそれは固体的な性

質を示し、ミクロに見ると液体的な性質を示す。その表面はネットワークの弾性、溶液の粘性、および水に因果する大きな表面エネルギーが競合して特異な物性が出現する。現在、ゲルを新たな有機デバイス材料として応用

する試みや、人口筋肉やドラッグデリバリーなどゾルゲル転移を利用した種々の医用技術への応用が注目を集めているが、これらの基盤となる現象の素過程は、バルクではなくほとんど表面に依存する。したがってゲルの応用技術開発においては、表面の基礎的物性を解明し、その特性を熟知することがまず必要である。

物質の表面を伝搬する波は物質表面近傍の性質を反映するため、ゲル表面波には液体的な性質を受けた表面張力波と固体的な性質を示すレイリー波(表面弾性波)の2種類が存在すると考えられる。

ゲル表面波の分散関係については HPP 理論や Jäckle and Kawasaki の理論がよく知られている。HPP 理論ではゲルをニュートン流体として扱い、粘性の虚部に弾性率を入れている。一方、Jäckle and Kawasaki の理論ではゲルを弾性体として考え、その表面の境界条件として表面張力を考慮している。どちらの式も、弾性率・粘性率が実部に入るか虚部に入るかの違いはあるものの、粘性を 0 とした極限では完全に一致する。また、これらの理論より、ゲルの表面波は、その波長、周波数によって、表面張力波に一致するモードとレイリー波に一致するモードとに分離可能だと分かっている。波長がある特徴的長さ  $\lambda^* = \gamma/G$  ( $\gamma$ : 表面張力,  $G$ : 弾性率) よりも十分に短い場合には表面張力波が支配的となり、波長が  $\lambda^*$  よりも長い場合にはレイリー波が伝搬する。多くの実験結果はこれをフォローしているが、しかし、波長が  $\lambda^*$  と同程度の中間領域では、どのような波が伝搬するのかは未だ分かっていない。

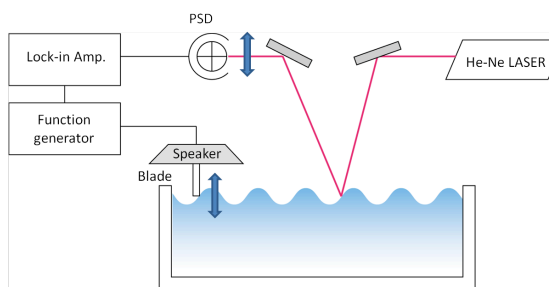


図 1. EESWS 法の測定装置図。ゲル表面にスピーカーに接続したブレードを接触させ、これを励振させることにより波を励起する。励起された表面波は、He-Ne レーザーにより観測され、オプティカルレバーにより振動させられたレーザー信号は PSD(Position Sensitive Detector)により検出される。この信号よりロックインアンプを通して、ブレードと同周期のもののみを検出する。ゲル表面波の振幅は非常に小さいが、本測定により精度良く測定することが可能である。

## 2. 研究の目的

表面張力波とレイリー波の 2 種類の波は、伝搬状態に根本的な違いをもっている。液体表面を伝搬する表面張力波では、その表面近傍の粒子は波の伝搬方向に対して前方円運動をしている。これに対し、固体表面を伝搬するレイリー波では、表面近傍の粒子は後方楕円運動をする。それぞれの寄与が同程度となる  $\lambda^*$  の領域では、特殊な波が伝搬すると容易に想像できる。表面張力波とレイリー波の競合する中間領域の表面波については、実験的にも理論的にも様々な結果が報告されており、現在決着がついていない。

本研究は、表面波の回転方向より、ゲル表面波の中間領域における挙動を解明することを目的としている。

## 3. 研究の方法

ゲルの表面波挙動を明らかにするには、周波数、波数、回転方向を測定することが必要である。本研究では EESWS (Electrically Excited Surface Wave Spectroscopy)法による周波数、波数の測定と、パルスライトを用いた高速な表面波回転測定法の二つを用いて実験を行った。始めに EESWS 法による実験装置を図 1 に示す。EESWS 法ではサンプルの表面に薄い板を接触させ、これを振動させることにより波を励起し、その伝搬状態をレーザー光によって観察する。サンプルには濃度 0.2~0.3wt% のアガロースゲルを用いた。アガロースはその弾性率が濃度の 2 乗に比例すること、また、その表面張力の値も濃度に依存せず一定であることが分かっている。この測定による実験結果を図 2 に示す。本測定より、弾性率の低い領域( $k \ll k^*$ )では、ゲル表面には表面張力波モードの波が伝搬し、弾性率の高い領域( $k \gg k^*$ )では、レイリー波

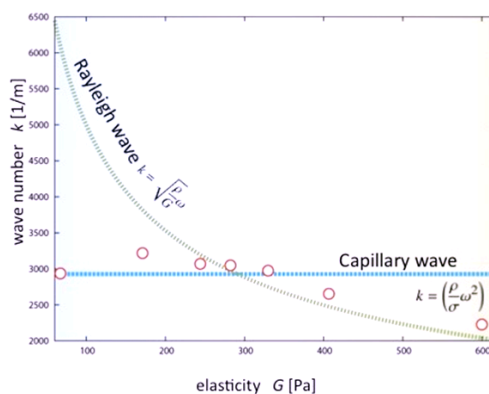


図 2. EESWS 法による、ゲル表面波の分散関係の測定結果。弾性率の小さいゲル表面では表面張力波と一致する表面波が、高いゲル表面ではレイリー波と一致する表面波が伝搬している様子が分かる。

モードが伝搬するという、HPP理論やJäckle and Kawasaki の理論の指し示す分散関係と合致することが確認できた。しかしながら、中間領域における挙動は、やや複雑である。HPP理論やJäckle and Kawasaki の理論では、中間領域におけるゲルの挙動は十分には解析されていない。Onodera らによる解析結果では、中間領域ではレイリー波の2倍の速度をもつ波が伝搬可能であるが、それは振幅を大きく減衰させながら伝搬する（漏洩波）とされている。本測定結果では、レイリー波の2倍の分散関係を示すものは観測されなかった。しかしながら、中間領域の表面波は減衰が大きく、測定が困難であった。本測定では、表面波の振幅が小さいため、減衰の大きさを定量的に評価することはできないが、漏洩波のような挙動が確認された。この表面波についてはさらなる検証が必要である。

次に、ゲル表面波の回転運動について観察を行った。ここでは、十分な時間分解能を得るために、H. Kutsuna and K. Sakai によって確立された  $\mu\text{m}$  サイズの液滴の運動を観察する手法を応用する。この手法により観測できる現象は安定した繰り返し現象の観察のみに限られる。本研究でも安定した表面波の伝搬を観測するので、H. Kutsuna and K. Sakai の採用した原理を応用すれば広範囲な周波数の表面波の観察が可能となる。本測定ではナノパルスライトと CCD カメラを組み合わせ、本研究で必要とされる時間分解能を有する観察装置を開発した。

観察装置のブロック図を図3に示す。ゲル表面に薄いブレードを接触させ、表面波励振用の piezo アクチュエーターを用いて周波数  $10^2 \sim 10^5$  Hz の表面波を励起する。このとき波の波長は  $100 \mu\text{m} \sim$  数 mm 程度となる。ゲル表面粒子の挙動を可視化するため、ゲル表面に直径  $16 \mu\text{m}$  のガラスビーズを薄く散布する。ガラスビーズは表面に付着しており、表面波の伝搬による粒子変位と全く同じ軌跡を描く。ガラスビーズの挙動、即ち表面粒子

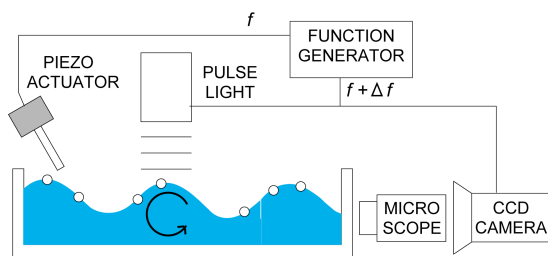


図3. ゲル表面波挙動を観測するの高速観察装置。図はレイリー波の伝搬領域におけるゲル表面粒子の運動を表しており、紙面右方向に伝搬する波に対して反時計回りに回転している。表面張力波の伝搬領域では、媒質表面粒子は時計回りに回転する。

の挙動は顕微鏡を通して拡大され CCD カメラに記録される。ガラスビーズの散布量は非常に少量であり、表面波の運動に影響を与えることはない。

十分な時間分解能を得るため、マイクロパルスライト、CCD カメラ、表面波励振用の piezo アクチュエーターをファンクションジェネレーターで制御する。CCD カメラから出力される一定周期の信号をトリガとし、表面波励振用の piezo アクチュエーターとパルスライトに同期させた信号を送る。piezo アクチュエーターには励振、観察したい表面波の周波数  $f$  の正弦波信号を観察に必要な周期分送る。パルスライトにはトリガ信号を受けてから一定時間後に一つのパルス発光をするように信号を送る。パルスライトの発光タイミングは、着目している波を十分ゆっくりと観測するためにディレーをかけ、発光タイミングを少しずつずらす。CCD カメラにはパルスライトが点灯した瞬間のみ、ガラスビーズが次々と撮影される。ガラスビーズの周期運動は非常に安定しているため、1、2、3、…発光後のガラスビーズを CCD カメラで撮影したものは高速度カメラで連続的に撮影した動画のようになる。本装置での時間分解能の限度はパルスライトの点灯時間によ

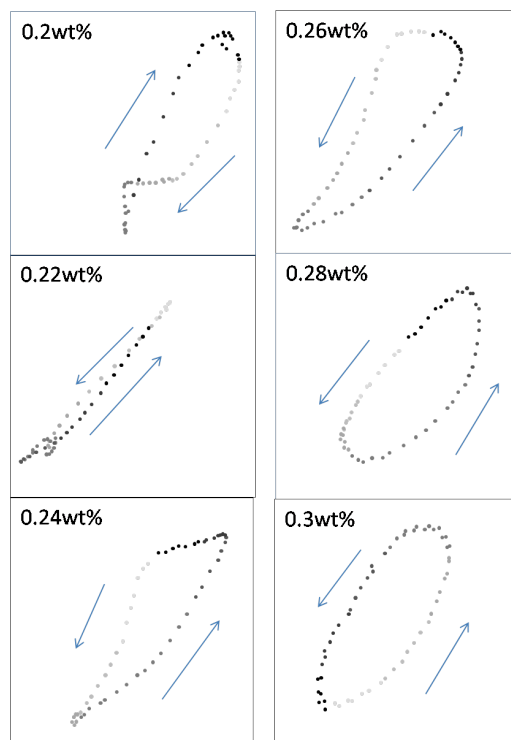


図4. アガロースゲルの表面に付着したガラスビーズの軌道を観察した結果。いずれも  $100\text{Hz}$  の波を、左方向から駆動している。ゲルの濃度が増加するのに伴い、表面張力波モードからレイリー波モードへと回転方向が変化している。

り制限されるが、原理的には 10<sup>6</sup>Hz の速さの粒子運動を測定することが可能である。撮影した映像を PC に取り込み、画像解析することで粒子の軌跡、変位、回転速度を定量的に評価する。

#### 4. 研究成果

アガロース濃度を 0.2wt% から 0.3wt% の範囲で測定した結果を図 4 に示す。図はゲル表面に付着させたガラスビーズの軌跡を描いたものである。色の薄い点から濃い点へと時間を追って表示している。また、表面波は図の左側より駆動している。最も濃度の薄い 0.2wt% のアガロースは表面張力波領域にあり、ガラスビーズは前方円運動している様子が伺える。他方、最も濃度の濃いレイリー波領域にある 0.3wt% のアガロース表面では、後方円運動している様子がよくわかる。表面張力波領域からレイリー波領域へかけての波の運動は、ちょうど両者を足し合わせたような形となっていることがわかる。特に二つの領域の中間域に相当する 0.22wt% では、粒子の変移はつぶれてしまい、縦の振動モードのみが観測されている。

本研究では、ゲルの表面を伝搬する波の、表面張力波領域、レイリー波領域における表面粒子の運動を観察することに成功した。表面張力波領域では、ゲル表面波の挙動は一般的な液体表面における表面張力波と同様に、前方回転運動をする様子が観察できた。またレイリー波領域では、固体表面の表面波と同様の回転が観察できた。また、中間領域では両者を足し合わせたような表面波の挙動が見られることが観察できた。しかし、中間領域における分散関係をみると、レイリー波と表面張力波を足し合わせたものが分散関係であると断定できる測定結果を得るには至らなかった。これは漏洩波により、ゲル表面波が強く減衰するため、この領域での測定が非常に困難であることに起因する。しかしながら、回転方向まで考慮すると、ゲルの表面波の伝搬状態は、ゲルの表面波分散関係として良く用いられている HPP 理論、Jäckle and Kawasaki の理論のどちらにも一致しない。また測定精度に問題が残るものの、中間領域における分散関係の測定も、これらをサポートするものではなかった。表面波分散関係を明らかにするためにはさらに研究を推し進める必要がある。

#### 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 1 件)

① 吉武裕美子、酒井啓司、ゲル表面波の回転位相、信学技報 IEICE technical Report、査読無、2009-54 巻、1-4

[学会発表] (計 11 件)

① 吉武裕美子、酒井啓司、ゲル表面波の回転位相、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 26 日、大阪府立大学

② 吉武裕美子、酒井啓司、回転位相からみたゲル表面分散関係、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 26 日、甲南大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

吉武 裕美子 (YOSHITAKE YUMIKO)  
東京電機大学・理工学部・助教  
研究者番号：80453794

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし