

簡便な液体の粘度測定法 : 食品のとろみ評価を目的に

NISHIOKE, Masaki / 西桶, 雅輝

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

6

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026433>

簡便な液体の粘度測定法 —食品のとろみ評価を目的に—

A SIMPLE METHOD FOR MEASURING VISCOSITY OF LIQUIDS
-AIMING AT AN EVALUATION OF FOOD THICKNESS-

西桶雅輝

Masaki NISHIOKE

指導教員 鈴木 郁

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻創生系修士課程

Food thickening is important to prevent aspiration in elderly, and the appropriate thickness may be varied by individual swallowing function. The purpose of this study is to propose a simple and quantitative method for measuring food thickness in comparison with the conventional evaluation methods. The method proposed in this study detects food thickness based on viscosity of foods. Key parts of this method are vibrators driven by voice coils, and the evaluation in this study is based on the impedance when the vibrators are driven at mechanical resonant frequency. In this study, the author measured several kinds of Newtonian liquids, which were different in viscosity and/or density. Density of some liquid samples was the same as that of water, and viscosity of those samples was ranging from 60.5mPa·s to 387mPa·s. Those samples showed decreased impedance relative to that of water, and the relative impedance was ranging from 97.46% to 94.25%.

Key Words : food thickening, aspiration, thickness, Newtonian liquids

1. はじめに

高齢者や障がい者は、嚥下障害により誤嚥を引き起こしやすい。誤嚥により引き起こされる誤嚥性肺炎は介護、医療の現場では大きな問題となっている。誤嚥防止の取り組みの一つとして、とろみ調整食品（とろみ剤）による飲食物へのとろみ付け[1]が行われている。各人の嚥下機能障害の程度に応じて、適切なとろみ具合に調整する必要がある。水やお茶といった、とろみの程度に応じた用量が示されている食品を除き、飲食物にとろみ調整食品を添加した後にとろみ評価を別途行う必要がある。しかし既存の評価機器は大型かつ高価である点や操作が煩雑である点から、実際の現場では熟練者の目視や感覚、経験により評価が行われている。また日本摂食嚥下リハビリテーション学会嚥下調整食文分類 2021[1]では、一部の食品において粘度を物性測定値として定めたとろみの段階的 분류が行われている。そこで、本研究では液体を注ぐだけで定量的かつ簡便に粘度測定を行う評価方法についての検討を行った。先行研究では原理確認のために、圧電セラミックを用いた粘度評価が行われている[2]。圧電セラミックは耐水性が低く、防水加工も難しいので工業用潤滑油を液体試料として使用していた。

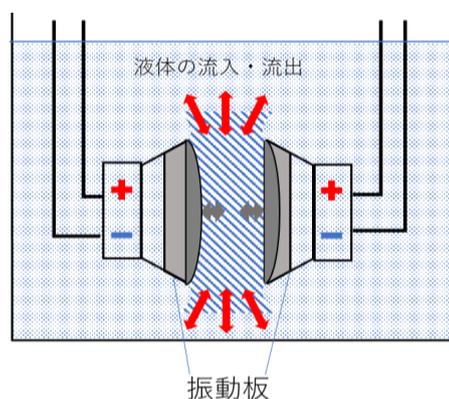


図1 振動板浸漬式評価法

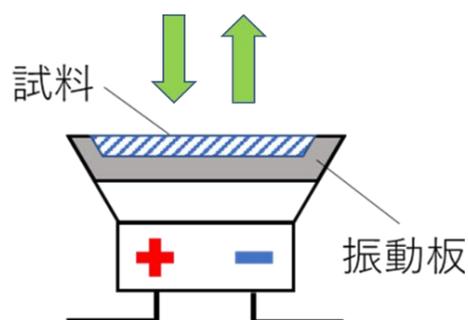


図2 振動板に注いだ際の液体の挙動

しかし実際には水を主成分とする食品の評価が必要であるため、本稿では耐水性のある素子や耐水性の確保できる構造を用いた評価方法の提案を行うこととした。

2. 測定原理と測定装置

関連研究として、音叉型振動式粘度計を用いた粘度測定[3]が行われている。振動による粘度測定法においては、静粘度（粘度と密度の積）が得られるが、とろみを評価する上では密度による影響を除いた粘度測定が求められる。予備実験において、図1のように向かい合わせた2枚のスピーカーユニットを液体に浸漬し、振動板間の距離を振動周期によらず一定に保ちながら駆動させて測定を行った[3]。その結果、密度が大きい液体ほど共振周波数が小さくなり、また、粘度と密度が大きい液体ほど共振周波数におけるインピーダンスの実部が低減する結果が得られた。しかし、この測定方法では駆動部を液体に浸漬するため、大量の液体が必要である。また防水加工の都合上、浸漬後の食品を口に含むことができないため、廃棄前提で試料を用意しなければならない。そこで、新たな試みとして本稿では振板のくぼみや容器に注いだ液体を振動させて測定を行った。これにより食品に浸漬する必要がなくなるため、LST(Line Spread Test)などの従来の評価方法と比べても試料が少量で済み、試料は測定後に廃棄前提ではあるが、測定機器が食品衛生法に制約されない等の利点が挙げられる。振動板のくぼみや容器に注いだ液体を振動させることで、振動板および容器に触れている液体が引きずられ、粘度と密度に応じた摩擦が発生するはずである。この摩擦は運動エネルギーを熱に変換することから、振動素子の消費電力を増大させると考えられる。機械共振点においては、図3に示す振動素子の内部等価回路におけるC1とL2の合成インピーダンスが理想的には無限大となるため、

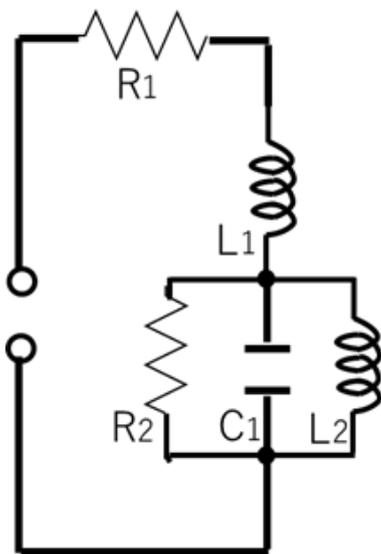


図3 振動素子の内部等価回路

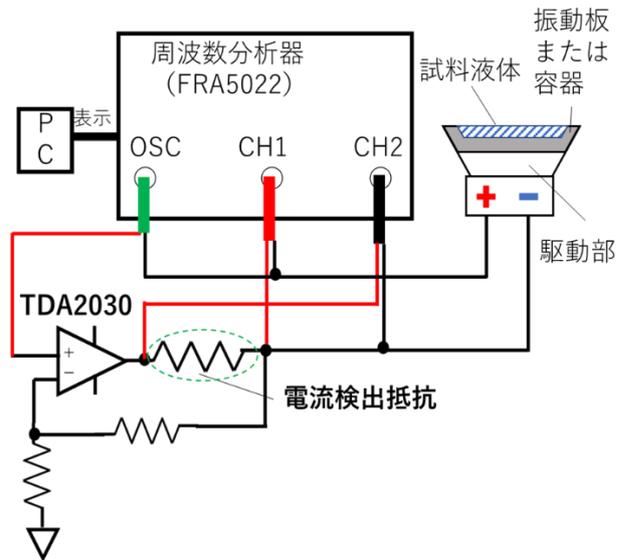


図4 振動素子を用いた測定系

表1 本研究で用いる試料の濃度、粘度、密度

	質量 パーセント 濃度(%)	粘度 (mPa・s)	密度 (g/cm ³)
水		1	1.00
食塩水	7.24	1	1.05
	14.5	1	1.10
	21.1	1	1.15
飽和食塩水	23.4	1	1.18
薄い砂糖溶液	41.5	9.7	1.18
濃い砂糖溶液	57.1	48	1.25
飽和砂糖溶液	67.1	261	1.29
タマリンド	1.0	60.5	1.00
シードガム	1.4	185	1.00
水溶液	1.8	387	1.00

L1 が十分に小さいものと仮定すると、インピーダンスはR1+R2の抵抗としてふるまう。また、機械共振点では小さなパワーで大きな振幅が得られ、その一方で消費電力は顕著に低減される。ただし、摩擦による粘性抵抗が大きければその分、損失により共振周波数における消費電力の低減が顕著ではなくなると考えられる。振動素子の抵抗が小さくなることで定電圧駆動であれば消費電力が増大することが期待される。エフェヌ回路設計ブロック社の Frequency Response Analyzer 5022 型を用いた図4の測定系において、振動素子の共振周波数近辺の電圧をスイープし、振動素子の両端間と検出抵抗の両端間の電圧比および位相（電流に対する電圧の位相の遅れ）を測定し、それらを基に複素インピーダンスの大きさ|z|および複素インピーダンスの実部の算出を行う。本来であれば機械共振周波数 f_s における複素インピーダンスの実部を評価に用いるところだが、機械共振周波数近

辺であり、かつ検出が容易である点からインピーダンス実部が最大となる時の値 Z_r とその時の周波数 f_m を評価に用いる。液体を注いだ容器が振動する際に、純粋な上下振動が起こると仮定すると、質量が負荷されたバネの単振動として考えられ、次式のように表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

式 (1) より、液体の質量が大きくなるにつれて周波数が小さくなると期待される。この時、注いだ液体の体積が一定であるならば質量の違いは液体の密度に依存する。すなわち周波数 f_m の違いを用いて密度評価が可能と期待できる。

本研究では、水と食塩水、砂糖溶液、タマリンドシードガム水溶液を試料として使用する。これらの試料は全て、せん断応力がずり速度に比例し、ずり速度によらず一定の粘度を示すニュートン性の液体である。液温 25°Cにおける各試料の濃度、粘度、密度を表 1 に示す、各試料の密度は 200ml のメスシリンダーに 100ml の液体を注いだ際の質量から算出した実測値である。また各試料の粘度は東機産業社の回転式粘度計 TVC-10 型で、回転速度を 20 rpm で測定した時の実測値である。

3. 実験方法および結果

(1) 防水スピーカーユニットを用いた測定とその結果

本実験では、東京コーン紙製作所社の防水スピーカー S36G27-1 型を使用した。これは直径 36mm、厚さ 5.2 mm、コーン紙、エッジが PET 素材でできた防水等級 IPX7 相当のスピーカーユニットで、予備実験の振動板浸漬式評価法で使用したものと同じである。スピーカーを支持するハウジングは光造形 3D プリンターにて作成し、ハウ

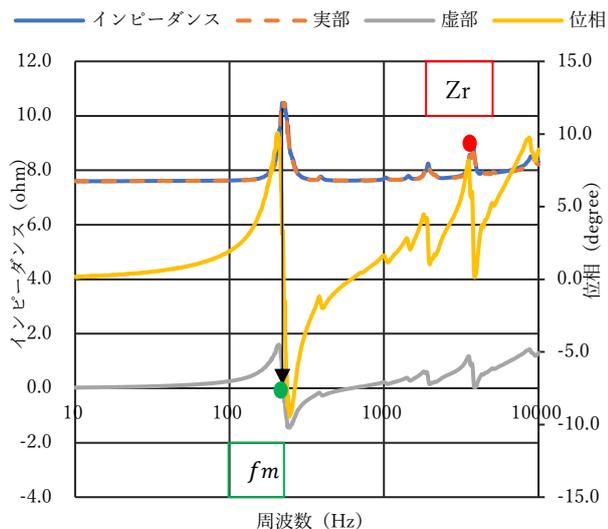


図 5 水 2.5ml を注入して駆動させたときのスピーカーのインピーダンス特性

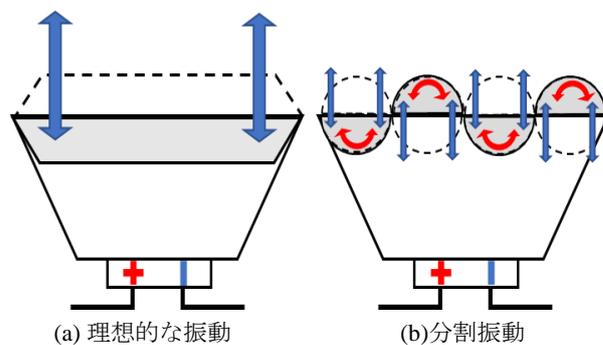


図 6 振動板の 2 種類の挙動

表 2 水と濃度の異なる 3 種類の砂糖溶液における粘度とインピーダンス Z_r

	粘度 [mPa·s]	インピーダンス Z_r [Ω]
水	1	9.02
食塩水	1	8.84
薄い砂糖溶液	9.7	8.69
濃い砂糖溶液	48	8.54
飽和砂糖溶液	261	8.39

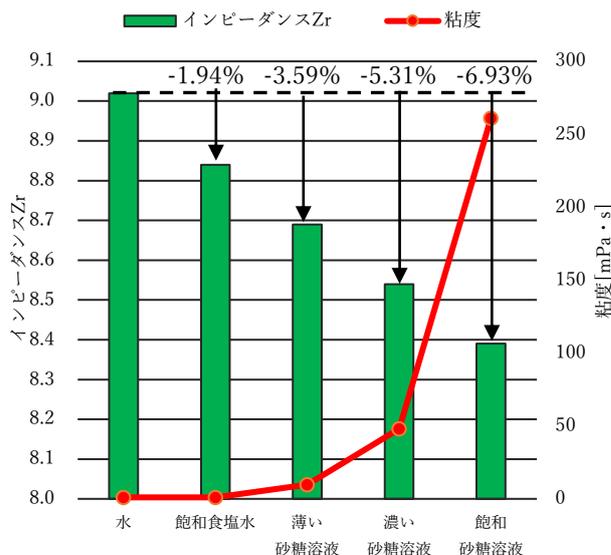


図 7 水と飽和食塩水、濃度の異なる 3 種類の砂糖溶液におけるインピーダンス Z_r と粘度

ジングとスピーカーの接合部分は光硬化樹脂で接着を施すことで水密性を高めた。また、試料液体として水、濃度の異なる砂糖溶液、濃度の異なる食塩水を使用した。砂糖溶液は濃度の上昇に伴い粘度と密度の両方が増加し、食塩水は濃度上昇により密度が増加する一方、粘度の増加はごくわずかである。したがって、濃度の違いにより砂糖溶液では粘度と密度の組み合わせを、食塩水では密度を段階的に変えている。実験用 5ml シリンジにて採取した試料液体 2.5ml を振動板 (コーン紙部分) に注いだ後、設定周波数 10~10kHz、スピーカーの入力電圧両振

幅 1.41Vpp で交流信号を印加し、振動素子の両端間と検出抵抗の両端間の電圧比および位相差からインピーダンスの大きさ $|z|$ 及びインピーダンス実数部を算出した。水を注いだ時のインピーダンス特性を図5に示す。液体が負荷された際に、スピーカー本来の共振に加えて複数の共振点が確認された。これは振動板の分割振動により高い周波数においても共振が発生したと考えられる。スピーカーユニットが本来持つ共振周波数（最低共振周波数 f_0 ）における振動に比べて分割振動時の方が振動板と液体との摩擦がより顕著に生じると考え、本実験では共振点のうち、低い周波数から数えて3つ目の共振点におけるインピーダンスの実数部を z_r とし、比較を行った。

表2、図7より粘度と密度の増加によりインピーダンス z_r は減少する傾向にあった。理想的な振動であれば、液体と振動板が一体となって上下に運動するため摩擦は発生しないと考えられるが、本実験においては図6に示すような振動板の分割振動により振動板と液体の間で粘度と密度に応じた摩擦が発生したと考えられる。一般に、定電圧駆動回路においてはインピーダンスの実数部が小さいほど消費電力が増大する。したがって粘度や密度が高くなるにつれてインピーダンスの実数部 Z_r が小さくなるのは、およそ定電圧駆動である本実験では順当であるといえる。

表3 水と濃度の異なる4種類の食塩水の密度と周波数 f_m

	密度[g/cm ³]	周波数 f_m [Hz]
水	1.00	219.5
食塩水	1.05	210.3
	1.10	203.2
	1.15	196.3
飽和食塩水	1.18	169.2

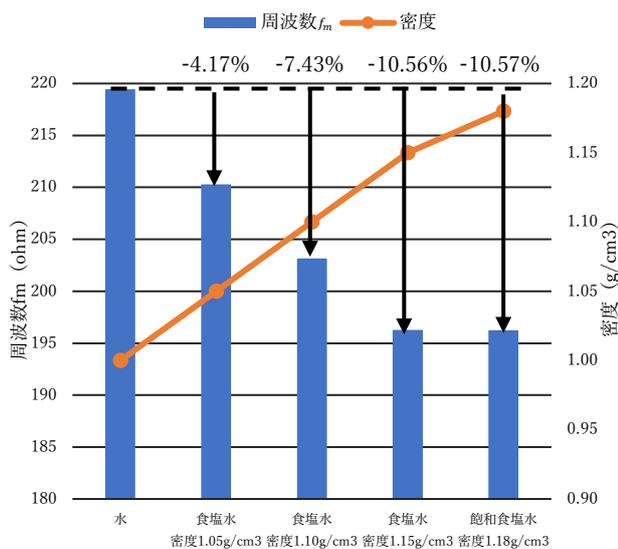


図8 水と密度の異なる4種類の食塩水の周波数 f_m と密度

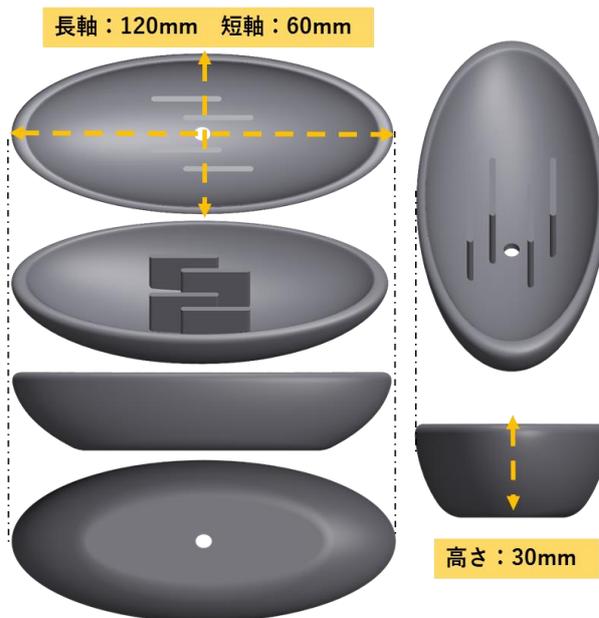


図9 バスタブ型容器のモデル

また表3、図8より、水と密度の異なる4種類の食塩水において、インピーダンスの実数部が最大となる時の周波数 f_m は密度が大きくなるにつれて小さくなった。したがって粘度がおよそ等しく、体積が一定の液体において、周波数 f_m の違いから、液体の密度評価の可能性が示された。

(2) エキサイターを用いた測定とその結果

本実験では Tectonic 社のエキサイター TEAX19C01-8 型を用いた。エキサイターとは、接触面を振動させて音を発生させる駆動ユニットである。スピーカーとは異なり、エキサイターには既存の振動板が接合されておらず、振動板に相当する部分を自分で作成することができる。そのため、スピーカーと比べてサイズや形状の制約なしに耐水性を確保できる。これにより防水加工が不要で、なおかつ形状次第で液体と振動板の摩擦をより顕著に生じさせることも可能となる。エキサイターにバスタブ型の容器を取り付けた本実験における測定系を図10に示す。また、このバスタブ型の容器は光造形型3Dプリンターにて作成したものであり、長軸120mm、短軸60mmの楕円体の半分をくり抜いた形状となっている。さらに振動により生じる摩擦を大きくする役割を期待して、内部に仕切りを取り付けて液体に触れる表面積を増やしている。底面部の穴は作成後に光硬化樹脂でふさぎ、底面はエキサイターが2つ取り付けられる構造となっている。これにより2つのエキサイターによる同相駆動と逆相駆動の2種類の駆動方法が可能である。同相駆動の場合、図10(a)に示すようにエキサイターを接続することで2つの振動が同位相になる。バスタブ型の容器および注がれた液体は一体となって上下に振動するため、理想的には質量が負荷されたばねの単振動のよう

にふるまう。したがって液体の質量が振動特性に影響を及ぼす。また逆相駆動の場合、図10(b)に示すように接続することで2つのエキサイターの振動が逆位相になる。上下の振動に加えて駆動部が左右に揺れ動くことで液体が容器の表面を滑るような挙動を示す。すると液体と容器の表面とで粘度と密度に応じた摩擦が生じる。したがって同相駆動では密度、逆相駆動では粘度と密度の組み合わせについて、個々の試料についての評価が可能と期待できる。本実験では試料液体として水、濃度の異なる食塩水、タマリンドシードガム水溶液を使用した。タマリンドシードガムは少量の添加で粘度を大幅に増加させることができるため、濃度の違いにより密度がおおよそ等しい条件での粘度を段階的に変えることができる。

実験用5mlシリンジにて採取した試料液体10mlをバスタブ型の容器に注入し、設定周波数10~10kHz、エキサイターの入力電圧両振幅0.71Vppで、同相駆動と逆相駆動のそれぞれにおける、接続した2つのエキサイターの両端間と電流検出抵抗の両端間の電圧比および位相差からインピーダンスの大きさ $|z|$ 及びインピーダンス実部を算出した。水を注いだ時のインピーダンス特性を図11に示す。また同相駆動時の水と、濃度の異なる食塩水、タマリンドシードガムについての密度と周波数 f_m を表4、図12に示す。表4、図12より、エキサイターを同相で駆動した際には、周波数 f_m は粘度によらず、密度が大きい液体ほど小さい値を示した。したがって同相駆動における周波数 f_m を用いた密度評価の可能性が示唆された。表5、図13より、逆相駆動時の水と、濃度の異なる食塩水において、密度の増加により、インピーダンスの実数部 Z_r が減少する傾向がみられた。また、水と濃度の異なるタマリンドシードガム水溶液において、粘度の増加によりインピーダンスの実数部 Z_r が減少する傾向がみられた。これらの結果から、粘度と密度に応じてインピーダンスの実数部 Z_r が小さくなることが確認された。粘度が高くなるにつれてインピーダンスの実数部 Z_r が小さくなるのは、およそ定電圧駆動である本実験では順当であるといえる。したがって、インピーダンスの変化により粘度評価の可能性が示唆された。

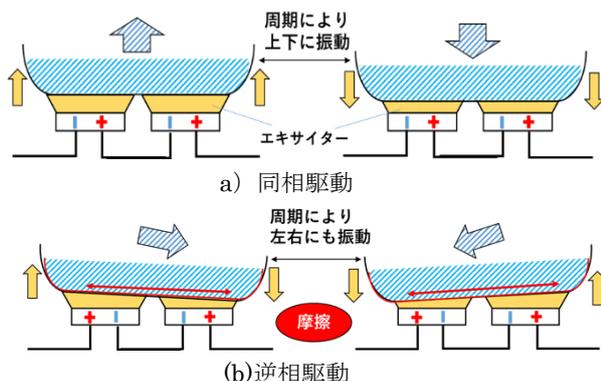
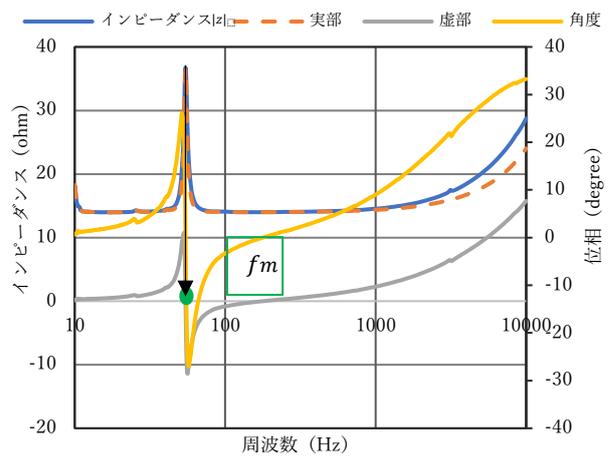
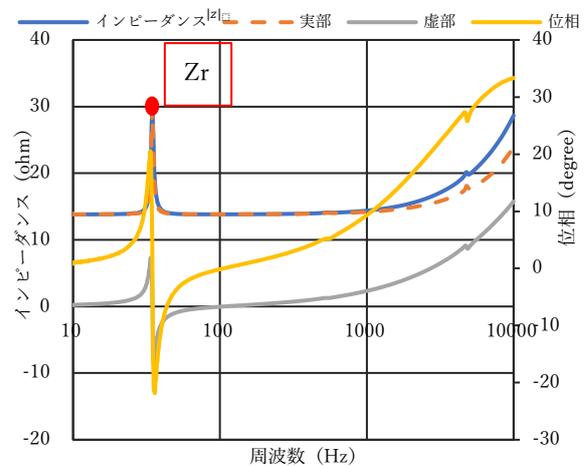


図10 本実験で使用する測定系と駆動時の挙動



(a) 同相駆動時



(b) 逆相駆動時

図11 バスタブ型カップに水10mlを注入し、エキサイターを駆動した際のインピーダンス特性

表4 2つのエキサイターの同相駆動時における各試料の密度と周波数 f_m

	密度[g/cm ³]	周波数 f_m [Hz]
水	1.00	54.98
タマリンドシード ガム水溶液 1.0%	1.00	54.98
タマリンドシード ガム水溶液 1.4%	1.00	54.98
タマリンドシード ガム水溶液 1.8%	1.00	54.98
食塩水	1.10	54.37
飽和食塩水	1.18	53.97

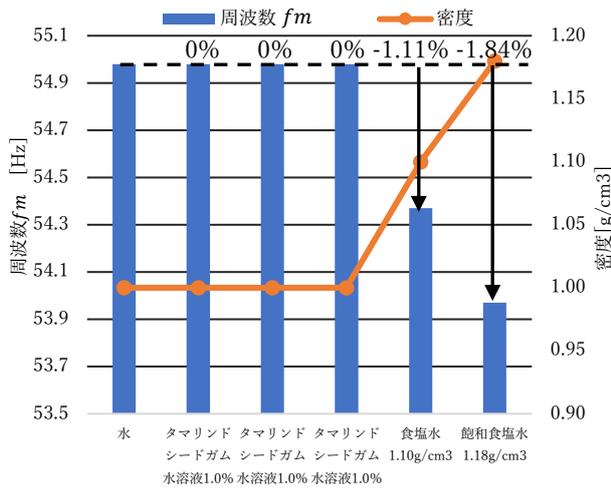


図 12 2つのエキサイターの同相駆動時における各試料を 10ml 注入した際の周波数 f_m と密度

表 5 2つのエキサイターの逆相駆動時における各試料粘度とインピーダンス Z_r

	粘度 [mPa·s]	インピーダンス Z_r [Ω]
水	1	29.03
食塩水 (1.10g/cm ³)	1	28.96
飽和食塩水 (1.18g/cm ³)	1	28.88
タマリンドシードガム水溶液 1.0%	60.5	28.62
タマリンドシードガム水溶液 1.4%	185	28.25
タマリンドシードガム水溶液 1.8%	387	27.61

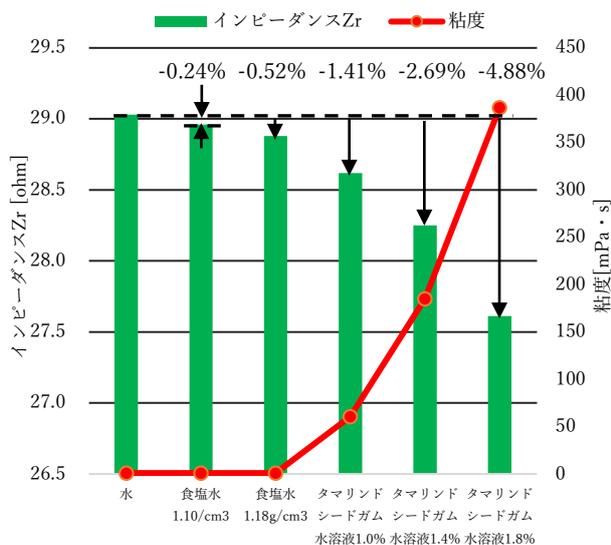


図 13 2つのエキサイターの逆相駆動時における各試料を 10ml 注入した際のインピーダンス Z_r と粘度

4. 結び

本研究では原理検証として、耐水性のある素子や耐水性の確保できる構造により、液体を振動させる測定方法の提案を行った。この測定方法であれば、浸漬した時に比べて液体の動きをより単純なモデルとして考えられるだけでなく、必要な試料が少量で済むといった点で実用的である。またエキサイターを用いた測定では、同相駆動と逆相駆動の2つ駆動方法により、同相駆動から密度の違いを、逆相駆動から粘度と密度の組み合わせの違いを求めることを目的としていた。その結果、共振周波数近辺でインピーダンスの実部が最大となる時の周波数 f_m の変化は密度の違いを反映し、またインピーダンス Z_r の変化は、粘度と密度の組み合わせの違いを反映する結果となった。この粘度と密度の組み合わせから密度の影響を切り分けることはまだできていないが、今後周波数 f_m の結果から密度の補正ができれば、密度を考慮した粘度評価が行えると推測される。

謝辞：本研究におきましては、指導教官の鈴木郁教授に熱心な指導をしていただきました。電気回路に留まらず、人間工学に基づいたモノづくりに対する創意工夫や研究・実験への向き合い方等、多くのことを学ばせていただき、大変感謝しています。研究室で学んだことを社会に出てからも活かしていきます。

参考文献

- 1) 栢下淳, 藤島一郎, 藤谷順子, 弘中祥司, 小城明子, 水上美樹, 仙田直之, 森脇元希: 日本摂食嚥下リハビリテーション学会嚥下調整食分類 2021, 日摂食嚥下リハ会誌, Vol.1, pp.135-149, 2021
- 2) 秋田麻友, 鈴木郁: 圧電セラミックを用いたとろみ評価機器の開発, 一般社団法人日本人間工学会講演集, Vol.49, pp38-39, 2019
- 3) 森茂雄: 音叉型振動式粘度計を用いた粘度指標作成の試み, 日農医誌, Vol.67, pp.9-19, 2018
- 4) 西桶雅輝, 鈴木郁: 簡便な振動板浸漬式とろみ評価法, 日本人間工学会, ol.58, pp.2G1-01, 2022