

令和元年6月3日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14617

研究課題名（和文）透過超音波パルスを用いた粘稠性評価

研究課題名（英文）Viscosity evaluation using transmitted ultrasonic pulse

研究代表者

門脇 廉（Kadowaki, Ren）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：10735872

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、粘稠状物質がもつ流動性と付着性を広帯域超音波パルスによって測定することを目指した。流動性の基礎となる粘度の評価では、液体を集中系にモデル化したシミュレーションに実験を組み合わせてせん断粘度の評価指標を得た。特に、申請者らの過去の研究で扱っていなかったモデル中の結合減衰にもせん断粘度と体積粘度との関係が見られ、これらの評価に寄与しうることがわかった。また、実験系の改良によって、従来より低粘度の液体からも粘度の指標を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の粘度評価手法は液体が用いられているシステムから少量をサンプルとして取り出す必要があったため、当該システム内での液体の物性を測定できなかった。また、代表的なB型粘度計や振動式粘度計ではせん断粘度を測定できるのみで、体積粘度に関わる指標は得られなかった。本研究の成果は容器や管路の内部にある液体の粘度評価に有効で、体積粘度の評価にもつながる。特に、高温、高压の環境で用いられる液体の流動性を評価する上で重要な知見であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to measure flowability and adherability of viscus materials using a broadband ultrasonic pulse. Evaluation of the viscosity is the basic problem. We obtained an index for shear viscosity through a numerical simulation of a lumped model of the liquid and an experiment. And a damping coefficient of the connecting damper, which had not been considered meaningful for our previous viscosity identification, indicated a relationship with the shear viscosity and the bulk viscosity. Also this damping coefficient is effective to evaluate the viscosities. Experimental system was also improved so that the lower viscosity liquid than the previously used liquids was measured. This improvement broadened the range of application of our proposed evaluation method.

研究分野：機械力学

キーワード：粘度測定 せん断粘度 体積粘度 超音波パルス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

高齢化社会における誤嚥対策では、食品に「ねばり」と「まとまり」を与えつつ「べたつき」を抑えることが有効である。しかし、これらの性質の簡便かつ高精度な評価方法はない。従来あるテクスチャプロファイル試験では巨視的な流動性と付着性の特徴量が求められるのみであり、これらは機械的性質との対応が明確でない。また、動的粘弾性測定では弾性率や粘度などの解析に堪える機械的性質が得られるが、少量の試料を抜き取って検査するため容器や管路の中にある物体には適用できない。また、数 Hz の振動を一定時間加え続けるため時間も要する。そのため、これらの問題を有しない新たな粘稠性の評価方法が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ゾルに代表される粘稠状の粘弾性体をもつ流動性と付着性を同時、簡便、高速に評価する手法の開発である。提案手法では、粘稠状対象物に投射された超音波パルスが減衰によって非線形変調を受けることに着目し、対象物の減衰係数を同定する。この同定された減衰係数を通じて、従来は巨視的な動的応力-ひずみ関係から得ていた流動性と付着性を同時に評価する。本手法は超音波を用いて容器の外から粘弾性体を加振するため、従来の動的粘弾性測定や剥離試験のように少量の試料を抜き取る必要がなく、密閉された対象にも適用できる。そのため、管内流動中や製品容器密閉後の粘弾性製品のモニタリング、全数検査が実現できると期待される。

### 3. 研究の方法

粘稠性の基礎である粘度の評価を目指し、実験と数値シミュレーションを行って考察する。超音波パルスを用いた粘度の評価は著者らが提案したものである。この提案手法では液体中に超音波パルスを透過させ、その減衰を計測する。パルスは広帯域信号であるため、各振動数成分の減衰が得られる。その一方で、数値シミュレーションを用いて粘度と減衰の関係を考察し、実験結果にこれを当てはめることで実験的に得られた減衰から液体の粘度を評価する。そのため、(1) 液体中での超音波パルスの減衰の計測、(2) 液体中での超音波伝播の数値シミュレーションに分けてそれぞれについて研究を進める。

#### (1) 液体中での超音波パルスの減衰の計測

液体試料を入れた容器に外部から超音波パルスを投射し、液体中を伝播させる様子を図 1 に模式的に示す。この容器では超音波パルスは容器壁内部を往復する経路と液体中を往復する経路に分かれ、両者の比較から液体中での減衰が求められる。具体的にはパルス全体をフーリエ変換し、各周波数成分同士の比から周波数成分ごとの吸収係数という形で減衰を求める。また、著者らの従来の研究では動粘度が  $40 \text{ mm}^2/\text{s}$  を下回る液体では十分な精度で減衰が得られなかったことから、これより低い粘度の液体も計測できるよう工夫する。

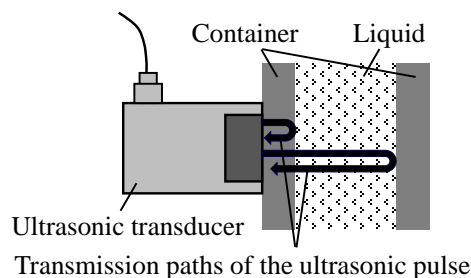


Fig. 1 Experimental setup and transmission paths of the ultrasonic pulse.

#### (2) 液体中での超音波伝播の数値シミュレーション

吸収係数と粘度の関係を実験のみで明らかにすることはできない。そのため、図 2 に示すように液体を集中系にモデル化し、数値シミュレーションを行う。このシミュレーションでは、粘度と関係のあるパラメータとして要素間の結合減衰  $c_v$  と要素-基礎間の基礎支持減衰  $c_s$  が現れる。適当な入力パルスに対して減衰した出力パルスが得られるので、吸収係数を求め、実験で得られた吸収係数と比較する。このとき、両者の差が最小となる減衰を同定する。これらの減衰と液体の粘度との関係は液体の微小要素にはたらく応力から求めておく。これにより、同定した減衰の値を基に粘度を評価することができる。

### 4. 研究成果

#### (1) 液体中での超音波パルスの減衰の計測

本研究では液体試料にせん断粘度の既知な鉱油（粘度計校正用標準液）とグリセリン、シロ糖水溶液を用いた。図 1 の実験で、液体の厚さを  $4 \text{ mm}$  として得られた鉱油の吸収係数を図 3 に示す。吸収係数が大きいことは減衰が大きいことを意味する。また、横軸は周波数であるので、#1~#7 までの 7 種類の鉱油では減衰の周波数分布が異なることがわかる。また、図 3(b)には試料ごとに 5 回行った実験のコヒーレンスを示してある。これによれば減衰の大きな #6 および #7 は高周波数領域でのコヒーレンスの低下が著しい。これは減衰が大きすぎて受信時の SN 比が低下していたためである。一方で、減衰の小さな #1 では低周波数成分がほとんど減衰しないため、後述のシミュレーション結果との整合が崩れる様子が見られた。これが低粘度の液体における本手法の問題であったが、液体の厚さを  $10 \text{ mm}$  に変えて同様の実験を行い、十分に減衰した受信波も得ることができた。

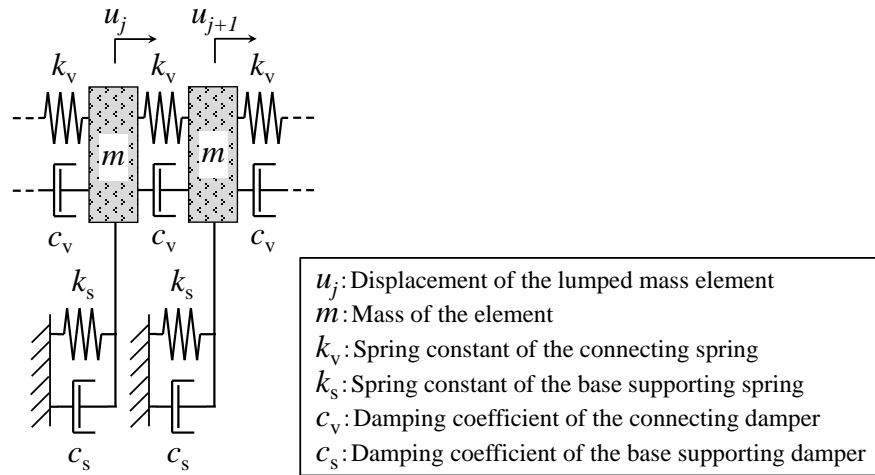


Fig. 2 One dimensional lumped mass model.

(2) 液体中での超音波伝播の数値シミュレーション

従来、液体中の微小要素にはたらく応力を考察して、図2の集中系モデルにおける要素-基礎間の基礎支持減衰 $c_s$ がせん断粘度に対応することがわかってきた。加えて、要素間の結合減衰 $c_v$ はせん断粘度と体積粘度の双方に関わっているため、仮に一方が何らかの形で求められていれば、提案手法で同定される結合減衰を通じてもう一方も求められることが明らかになった。本研究ではこれらの減衰を要素の質量 $m$ で割り、粘度指標 $c_s/m$ 、 $c_v/m$ を提案した。

図4に、せん断粘度を密度で割った動粘度と粘度指標 $c_s/m$ との関係を示す。動粘度と粘度指標との間にはほぼ比例の関係があり、提案した粘度指標が動粘度の指標となることが示された。また、鉱油#1の粘度指標が液体の厚さによってばらついているが、前述のように液体を厚くした実験結果の方が十分な減衰を計測できていると言える。その結果、粘度指標と動粘度との比例関係に沿う値になったものと思われる。

同様に粘度指標 $c_v/m$ と動粘度との関係を調べたところ、粘度指標 $c_v/m$ が動粘度の0.7乗に比例するという結果が得られた。これが単純な比例関係とならないのは粘度指標 $c_v/m$ がせん断粘度だけでなく体積粘度にも依存しており、かつ各液体試料の体積粘度が未知なためであると考えられる。

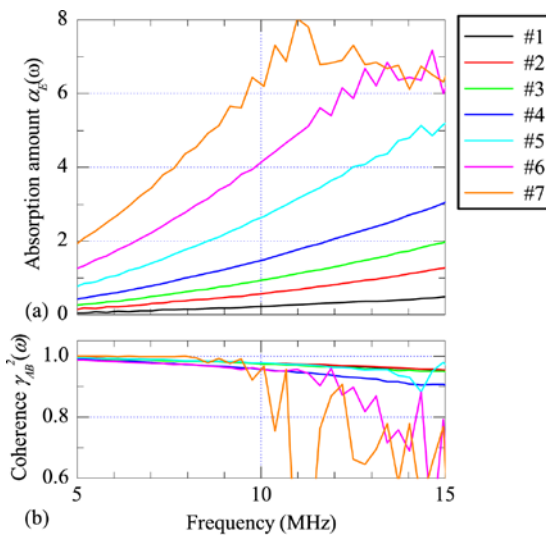


Fig. 3 Absorption coefficient of the mineral oils: (a) Frequency spectrum, (b) Coherence of five experiments.

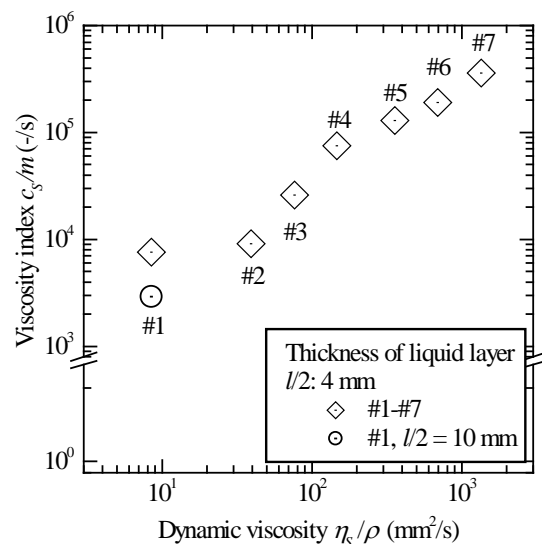


Fig. 4 Relationships between the viscosity index  $c_s/m$  and dynamic viscosity of the mineral oils.

以上のように、液体試料のせん断粘度と関連のある指標が得られ、せん断粘度については一定の評価ができることが示された。一方で、当初の目的であった流動性や付着性についての粘度以外の考究は十分ではない。現状では、粘度のほか体積弾性率を音速から算出できているものの、これら以外の物性を含めたパラメータ群による流動性や付着性の考察が今後の課題である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 2 件）

門脇廉, 大坪直樹, 井上卓見, 大村和久, 超音波パルスを用いた容器内液体の粘度検査, Dynamics and Design Conference 2017, 2017, 8/29～9/1, 愛知大学 (愛知県豊橋市)

Ren Kadowaki, Naoki Otsubo, Takumi Inoue, Kazuhisa Omura, Liquid Viscosity Evaluation using Ultrasonic Pulse, The 17th Asian Pacific Vibration Conference, 2017, 11/13～11/15, 南京航空航天大学 (中華人民共和国南京市)

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http://dynamic.mech.kyushu-u.ac.jp/Re\\_Viscosity\\_evaluation.html](http://dynamic.mech.kyushu-u.ac.jp/Re_Viscosity_evaluation.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。