

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17998

研究課題名(和文)超音波の非線形変調を利用した液体の粘度測定

研究課題名(英文) Measurement of liquid viscosity focusing on non-linear modulation of 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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：超音波パルスを用いて容器の外から内部液体の粘度を推定する手法の研究、開発を行った。パルスはその透過経路と液体の物性に基づく減衰を受け、周波数成分が変化する。これを利用して、送受信パルスの違いから粘度を同定する。実験、波動伝播シミュレーション、波動方程式の解析的考察から、粘度300～1200 mPasの鉱油では誤差25%以内でこれを同定できた。提案手法では液体試料に直接触れないため、密封容器内や管内の液体も測定でき、潤滑油の評価や医薬品、食品の検査などに広く応用できると期待される。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop a new measurement method of liquid viscosity in sealed packages using ultrasonic pulse. The ultrasonic pulse is projected from the outside of the package. Frequency component of the pulse attenuates depending on its transmission path and physical properties of the liquid. We identify the viscosity using the observed attenuation and theoretical relationships between the attenuation and the viscosity that are obtained from numerical simulations of the pulse propagation or an analysis of the wave equation. In a basic study, viscosities of some kinds of mineral oil whose already-known viscosity ranges from 300 mPas to 1200 mPas were identified with an uncertainty of 25%. The proposed method does not need direct contact to the target liquid. Therefore, this method has the potential to be helpful for the testing and the evaluation of lubricants, medical drugs and foods.

研究分野：機械工学

キーワード：粘度 超音波 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

高齢化社会における誤嚥対策に有効なゾル状、ゲル状食品の粘性は物理的機能として重要性を増している。とろみやねばりの食感
は日本の食文化の重要な要素でもあり、安全かつおいしい高機能食品の開発には粘性の評価と制御が欠かせない。また、工業用の潤滑、作動、冷却油や医薬品においても粘性は重要な機能である。容器や配管の中にあるこれらの液体に触れずに粘性を評価する手法はほとんどなく、これを開発することは様々な産業と福祉の発展に寄与すると期待された。

2. 研究の目的

容器や配管の中にある液体の粘度を外部から測定する手法の開発を目的とする。提案手法では壁を介して液体に超音波パルスを投射し、液体透過前後のパルスの減衰に着目する。液体中で音波はその透過経路と液体の物性に基づき、周波数成分ごとに異なった減衰を受ける。そこで、これをシミュレーションや理論解であらかじめ求めておいた減衰と粘度との関係に当てはめることで粘度を同定する。液体の粘度には圧縮、膨張時の減衰に寄与する体積粘度と、せん断変形時の減衰に寄与するせん断粘度があるが、本研究では後者の同定を主体にしつつ体積粘度の同定も試みる。

3. 研究の方法

提案手法では液体中での超音波パルスの減衰を実験的に計測したうえで、数値シミュレーションまたは理論解に基づく減衰-粘度関係に実験結果を適用して粘度を同定する。そのため、研究では(1)液体透過時の減衰の計測、(2)超音波伝播の数値シミュレーション、(3)超音波伝播の解析的検討、の三つの小テーマに分けて研究を進める。いずれの小テーマにおいても、粘度の既知な鉱油(粘度計校正用標準液)をリファレンスとして用い、妥当性の検証を行う。

(1) 液体透過時の減衰の計測

液体試料に超音波パルスを投射し、透過波を計測する。図1に示す基礎実験用の容器に液体試料を入れ、温度管理された条件下で超音波を透過させる。超音波は一般的なパルサーレーサーと接触型探触子で発信できる5周期程度のパルス波である。探触子は送受信を兼ね、容器壁のみを透過した経路Aと液体も透過した経路Bの波を受ける。反射面での反射率が違うことを除けば、経路A、Bの波の差は液体中での減衰のみであるため、フーリエ変換で得られる周波数成分において両者の差をとることで周波数成分ごとの減衰を得ることが可能である。ただし、減衰には粘度以外の性質も影響するため、減衰のみでは粘度を同定できない。

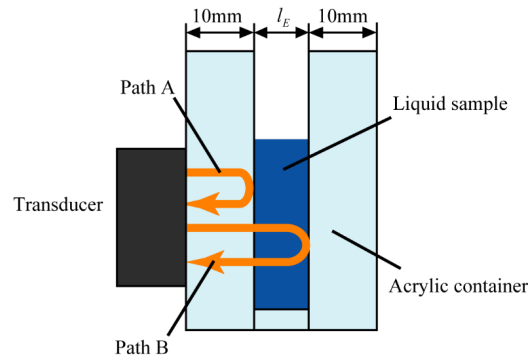


Fig. 1 An acrylic container and liquid sample for the fundamental experiment. l_E is the thickness of the liquid.

(2) 超音波伝播の数値シミュレーション

実測した減衰から粘度を求めるために、減衰と粘度の関係を求める必要がある。本研究では、まず超音波の伝播経路を1次元に単純化した集中系モデルを用いて液体中の超音波伝播をシミュレートする。モデルは図2に示すように要素間の弾性、粘性と基礎から要素を支持する弾性、粘性をもつ。これら2種類の粘性が波動伝播に与える影響を定量的に考察する。

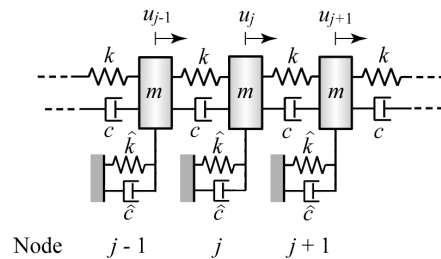


Fig. 2 One dimensional lumped mass model of the liquid.

(3) 超音波伝播の解析的検討

数値シミュレーションと並行して、波動方程式からの解析解の導出も試みる。妥当な解析解が導出できれば、シミュレーションよりも直接的に減衰から粘度を同定できる可能性がある。その一方で、液体が非ニュートン流体の場合はニュートン流体に対して導出した解析解が使えない。個々の液体に対応するフレキシビリティは数値シミュレーションが勝ると思われる。

4. 研究成果

(1) 液体透過時の減衰の計測

図1の容器を用いた実験で、液体を透過した超音波パルスの周波数成分は高周波数帯ほど大きく減衰し、かつ粘度が高いほどその減衰が大きくなることを確認した。図3に粘度の違う鉱油を透過したパルスを示す。#1が本実験中での最低粘度、#6が最高粘度の鉱油を表す。図3(a)で受信時刻が異なるのは密度

などの粘度以外の物性も異なっており、音速に差があったためである。図 3(b)のスペクトルを見ると粘度が大きいほど減衰し、かつ高周波数帯の減衰が大きくなっていることがわかる。この減衰を吸収量として図 4 に示す。一部の鉱油の吸収量が高周波数帯で不安定になっていることを除けば、吸収量は周波数に対して単調増加を示している。吸収量は液体の体積粘度とせん断粘度の両方に依存するため、(2)、(3)ではこれらと吸収量との関係の解明を目指した。

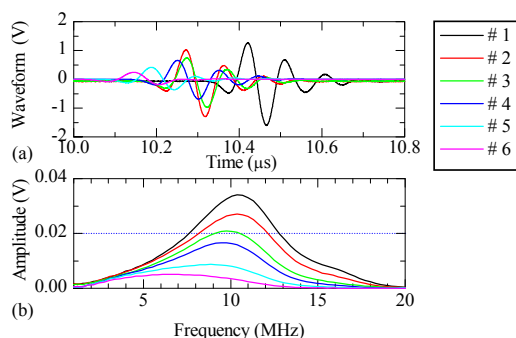


Fig. 3 Received ultrasonic pulse through the path B: (a) waveforms, (b) frequency spectra.

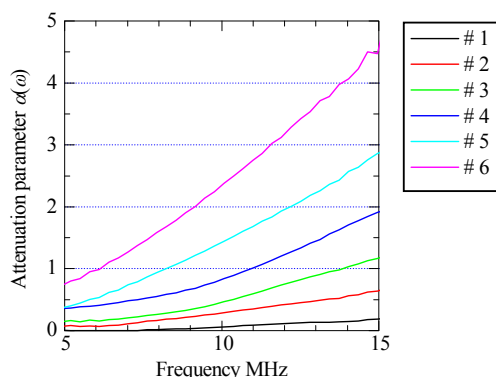


Fig. 4 Relationships between attenuation parameter and frequency of the transmitted pulse.

(2) 超音波伝播の数値シミュレーション

図 2 に示した集中系力学モデルで液中の波動伝播を模擬し、弾性、減衰を表す各変数と伝播により生じる減衰の関係を求める。質量をもつ要素間の減衰は c 、基礎と要素との間の減衰は \hat{c} である。本研究では、各減衰係数を要素質量 m で正規化した $c/m, \hat{c}/m$ を導入し、これらを実験結果から同定した。せん断粘度は集中系モデル上でせん断による減衰を担う \hat{c}/m と関係が深いので、両者の関係を観察し、図 5 を得た。この図は粘度の既知な鉱油（粘度計校正用標準液）とグリセリン、シヨ糖水溶液の結果の比較である。各液体が 2 種類のマーカーで表されているのは、実験において液体厚さを 2 種類与えたためである。グラフから、せん断粘度が 30 mPas を超える鉱油ではせん断粘度と \hat{c}/m との関係

を乗で近似できることがわかる。したがって、(1)の実験と 1 次元波動伝播シミュレーションとを組み合わせれば、減衰 \hat{c}/m を通じて液体のせん断粘度を評価できることが示された。このことは油の粘度変化を提案手法で検出できることを意味し、潤滑油の劣化診断などへの応用が期待される。

ただし、液体の種類が異なる場合における \hat{c}/m とせん断粘度の関係はなお検討の余地があるほか、せん断粘度を直接求められないことも課題である。そこで、特に後者の課題に対応するため、波動方程式の解析解を利用してせん断粘度の同定を試みた。

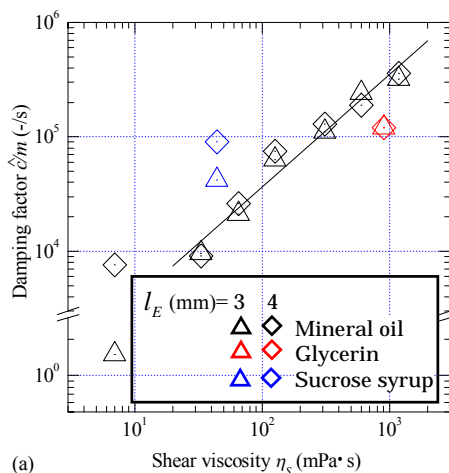


Fig. 5 Comparison between the identified viscous damping factors \hat{c}/m and the known shear viscosities of the liquids.

(3) 超音波伝播の解析的検討

液体の特性をフォークトモデルで近似し、三次元の波動方程式を導出した。これに容器の形状や送受信探触子の形状に基づく境界条件を適用することで解析的に解き、減衰と体積粘度、せん断粘度の関係を求めた。この関係に実験結果を当てはめることで、液体の体積粘度とせん断粘度を同定できる。

得られた解析解と実験結果とを組み合わせるとせん断粘度を同定し、既知のせん断粘度と比較した結果を図 6 に示す。対象の液体は図 5 と共通である。300 mPas から 1200 mPas の範囲では誤差 25 % 以内で同定できていることがわかる。ただし、近似曲線の傾きが 1 でないことや、シヨ糖水溶液における誤差が鉱油より大きいことは今後さらに考究すべき点である。また、同定された体積粘度はせん断粘度よりも 3 桁程度小さな値となった。今回の対象液体では体積粘度が未知であったものの、一般的に言ってこの結果は過小である。せん断粘度と体積粘度を同時に求められることは提案手法の長所であるため、体積粘度の同定精度向上にも努めたい。

この他の具体的な課題には境界条件の改良が挙げられる。提案手法中では、圧力分布の形状を円形探触子の最外周で圧力が 0 かつ半径方向の圧力勾配も 0 と仮定している。こ

の境界条件は本研究における解析解の求解に不可欠であるものの、現実には探触子の最外周でも圧力変動があると思われる。より妥当な境界条件を与えることが図6における問題点の改善に寄与する可能性がある。

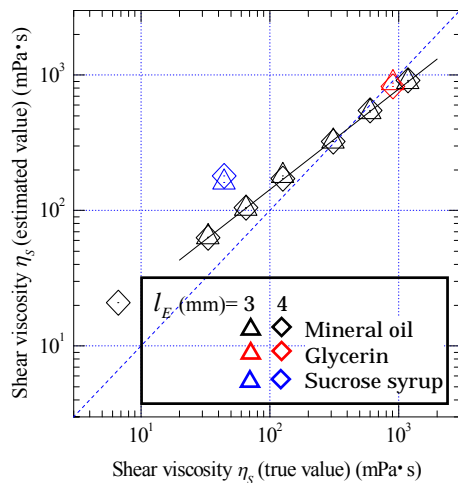


Fig. 6 Comparison between the identified shear viscosities and the known shear viscosity of the liquids.

(4) 結言

以上のように、体積粘度の同定には大きな誤差が伴う可能性があるものの、実用上重要なせん断粘度を容器の外から測定する基礎的な方法論が得られたと考えられる。

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0件)

〔学会発表〕(計1件)

大坪直樹, 門脇廉, 井上卓見, 超音波パルスを用いた液体の粘度推定, 日本機械学会 2016年度年次大会, 2016, 9/11 ~ 9/14, 九州大学 (福岡県福岡市西区)

〔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：
 出願年月日：
 国内外の別：

取得状況 (計0件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 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

6. 研究組織

(1) 研究代表者
門脇 廉 (KADOWAKI, Ren)
 九州大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号：10735872

(2) 研究分担者
 ()

研究者番号：

(3) 連携研究者
 ()

研究者番号：

(4) 研究協力者
 ()