

論文

非接触音響探査法を用いた 円形軟性容器の粘度測定方法の研究

Research on viscosity measurement method for
circular soft containers using noncontact acoustic inspection method

川井 重弥*・中川 裕¹・杉本 恒美²

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2022年3月10日 受理)

I. はじめに

飲料業界での軟性容器の包材容器中に充填された内容物の粘度を非接触非破壊で測定する方法として、音響探査法を用いた内容物の凝集状態の可視化を可能な方法を検討する。主な容器は樹脂を用いたPET（ポリエチレンテレフタレート）、PP（ポリプロピレン）、PE（ポリエチレン）製容器、紙製容器などがあげられる。今回は円形の軟性容器内に充填された内容物の粘度を測定する。円形容器は射出成形やブロー成形で製作される。面が存在する四角容器と比較した場合たわみが少ない容器であるため、円形の軟性容器の場合検査ができるかを調査する。

内容物が腐敗した際に、ガスが発生し容器が膨張すること、または内容物が腐敗するがガスが発生しないフラットサワーと呼ばれる内容物粘度が変化する場合、また内容物に離水が発生する場合や凝集する場合などがある。特に内容物がフラットサワーと呼ばれる状態にあっては容器形状が変化しない状態であり、

検査が困難である。そこで、今回我々の研究室に於いては、非常に小さな内容物の粘度変化を音波照射加振とレーザドップラ振動計を用いた非接触音響探査法²⁻¹⁷⁾により、非接触非破壊で測定する方法の研究を行った。

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法の概念図を図1に示す。非破壊非接触で検査を行う方法として、スピーカーで対象の軟性容器の側面部に音波照射加振を行い励振させる。軟性容器の側面の表面をレーザドップラ振動計（LDV）で振動

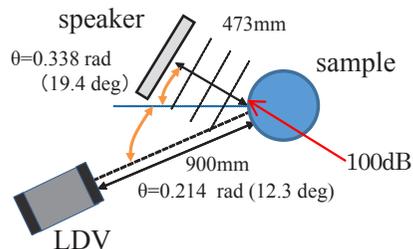


図1 非接触浅層地中探査の概念図
セットアップ図（上面図）

* KAWAI Shigeya: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama. 1614 Kuroganecho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ NAKAGAWA Yutaka: Researcher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

速度を計測し近接することなく検査を行う。内容物の粘度を測定するに当たり、軟性容器の円形側面を測定する。容器表面の音圧は 100 dB になるようにスピーカーからの音圧を調整した。

軟性容器側面に対して加振が行われた際に、その計測対象面内部で内容物に振動が伝搬され反射波が容器側面に発生する。その軟性容器の側面は、内容物に密着しているため、軟性容器側面はたわみ振動が励起される。これにより内容物の粘度による軟性容器側面に振動速度に差異が生じるため、粘度状態を振動速度分布として特定することが可能になる。音波加振では接触型の直接加振に比べて、非常に小さなエネルギーしか対象に与えることが出来ない、対象の共振現象を利用するという方法である。単純支持された円盤の場合のたわみ振動の定義式を式(1)に示す。

$$fr = \frac{4.98h}{2\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}} \quad (1)$$

式(1)において、 fr は共振周波数、 h は軟性容器側面の壁厚み、 a は測定点の半径、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比を表している。

音響加振時にはこれらの共振周波数範囲の音波を放射することで、計測対象面でたわみ共振を励起させ内容物凝集部を検出することが可能になるのである。音圧は軟性容器側面で 100 dB 程度の音圧を設定することで振動速度分布を得ることが出来る。

III. 実験方法

図2に測定容器の概要を示す。実験に使用した円形の軟性容器は透明な為に充填上面から 10 mm の箇所反射シールを貼り、レーザーの反射光を検出しやすくしている。

測定用軟性容器は市販の PS (ポリスチレン) 容器を使用した (壁面の厚みは平均 70 μm)。

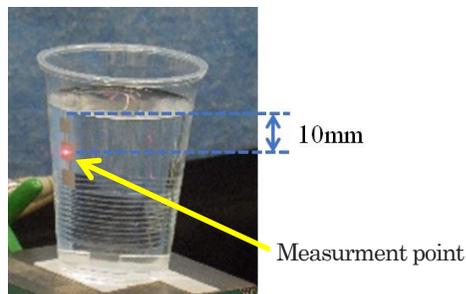


図2 測定容器と反射シール

図3に粘度測定に使用する水溶液の製作方法を示す。蒸留水及び CMC (カルボキシメチルセルロース) を 22.3~22.9°C に保ち、粘度は蒸留水と CMC を混合して適宜粘度を製作する。始めにビーカーに蒸留水と CMC の混合水を 400 g 用意し、500 rpm の回転数でプルペラ攪拌を 3min 行う。安定したところで、測定容器に 179.94 g~180.00 g を充填し測定に用いた。

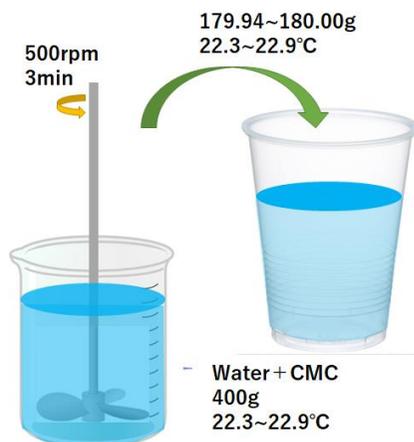
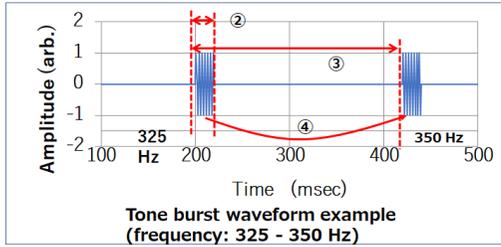


図3 粘度測定内容物の製作

測定に使用した音波はトーンバースト波を使用した。図4に送信波形例を示す。音波照射による加振力を得るためにパルス継続時間を 20 msec とした。加振周波数範囲内で見落としのしない測定を行うために、バースト波の周波数は離散的に 25 Hz 毎 (帯域幅は 50 Hz) に変化させている。今回の加振周波数範囲は、軟性容器側面部の共振周波数は 175 Hz があるので、周波数範囲は 100 Hz ~



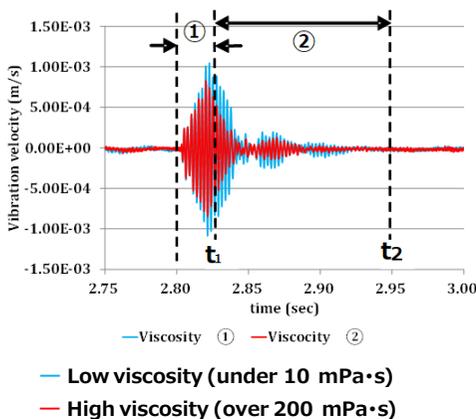
- ① Transmission frequency range 100 Hz ~ 1200 Hz
- ② Pulse duration time 20 msec
- ③ Interval time 200 msec
- ④ Step frequency 25 Hz (Bandwidth 50 Hz)

図4 送信波形例 (トーンバースト波)

1200 Hz で設定した。また、減衰特性を明確にするために、バースト波のインターバル時間は 200 msec、パルス幅 20 msec としている。測定時の加算平均回数は 5 回とし、周波数フィルターとしては遮断周波数 50 Hz のハイパスフィルターを使用した。

図5に解析方法を示す。①の領域は加振状態 (20 msec) であり、②の領域の自由振動領域 (130 msec) の振動速度を計測することで粘度さを測定する。

式(2)に自由振動領域の振動エネルギー



- ① Sound wave irradiation vibration time 20 msec (forced vibration)
- ② For t1 to t2, measurement time of 20 to 150 msec = 130 msec (free vibration)

図5 振動速度測定例

変位の求め方を示す。

$$FE_{\text{res}} (\text{m}^2/\text{s}) = \int_{t_1}^{t_2} V(t)^2 dt \quad (2)$$

IV. 測定結果

図6は175 Hzの音波で測定容器が振動した時のそれぞれの粘度測定に於ける振動速度波形である。フーリエ変換後の振動速度スペ

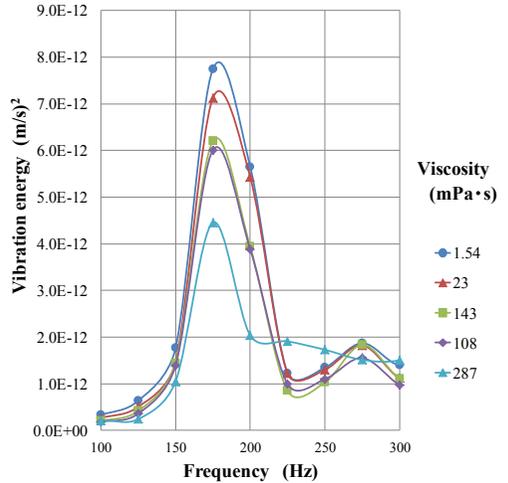


図6 175 Hz に於ける粘度と振動速度エネルギーの関係

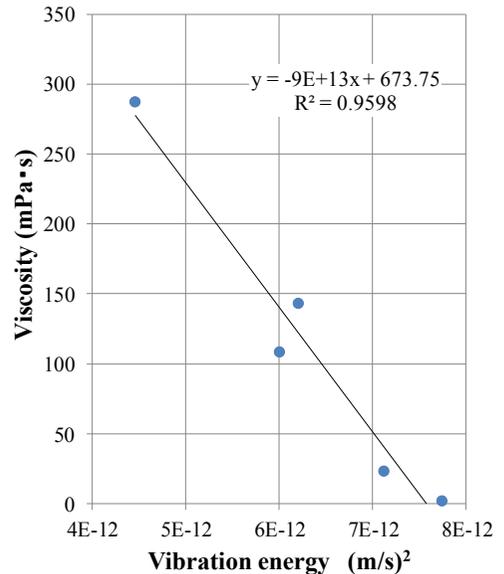


図7 粘度と振動速度エネルギーの検量線

クトル例および積分区間の例を示す。振動エネルギーは任意の周波数範囲の振幅の2乗を積分することにより得ることができる。粘度が低いと振動量が多くなる。

図7に粘度と振動エネルギーの関係を示す。粘度によって振動エネルギーが比例的関係であることがわかる。

V. まとめ

今回は円形の軟性容器での粘度測定を行った結果、内容物は総じて振動速度の差が得られており、軟性容器の外側から、非接触非破壊で内容物の凝集状態を可視化することが可能であった。このことは、工程検査において本手法による非破壊検査が実施可能であることを意味しているおり、将来的に品質管理手法の一つとして、本手法が用いられる可能性があると思われる。

円形の軟性容器での円周上の差異はあるものの、同一点での測定では粘度の差異を得ることがわかった。

【参考文献】

- 1) JIS Z803:2011 液体の粘度測定方法
- 2) R. Akamatsu and T. Sugimoto: Acoust. Soc. Jpn. Spring. Meet. 3-8-7 (2011) p. 1569 [in Japanese].
- 3) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Jpn. Soc. Civil. Eng. 66 (2011) p.1569 [in Japanese].
- 4) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Proc. of the 10th Int. Symp. on New Tech. for USMCA (2011) p.104.
- 5) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2011), p.744.
- 6) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp. (2011) p.84.
- 7) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 07HC12, (2013).
- 8) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2012), p.94.
- 9) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2013), p.1303.
- 10) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto, and N. Utagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 53, 07KC15 (2014).
- 11) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura, JJAP, 54, 07HC15, (2015).
- 12) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N.Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura, JJAP, 56, 07JC10, (2017).
- 13) K. Sugimoto, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 58, SGGB15, (2019).
- 14) 川井重弥, 中川裕, 杉本恒美: “非接触音響探査方法を用いた軟性容器の内部腐敗ガス検出に関する研究” 日本包装学会誌 Vol.27, No.6, pp.409-423, (2018).
- 15) 川井重弥, 中川裕, 杉本恒美: “非接触音響探査法を用いた飲料用軟性容器の内容物粘性液体測定に関する研究” 日本包装学会誌 Vol.28, No.3, pp.187-198, (2019).
- 16) 杉本恒美, 中川裕, 川井重弥: 特願 2017-126317 “非接触検査システム”.
- 17) 杉本恒美, 中川裕, 川井重弥, 嶋隆志: 特願 2020-021473 “非接触検査システム, 非接触検査装置及び非接触検査方法”.