

一般論文

非接触音響探査法を用いた食品飲料用軟性容器の 内容物粘性液体測定に関する研究

川井 重弥*、中川 裕**、杉本 恒美***

Study on Content Viscosity Measurement of the Soft Container for Drinks Using the Non-contact Acoustic Inspection Method

Shigeya KAWAI*, Yutaka NAKAGAWA** and Tsuneyoshi SUGIMOTO***

軟性容器内容物の粘度の検査方法としては、容器を破壊した上で、市販の粘度計を用いた測定方法で行うことが多い。しかしながら、音波照射振動を用いれば、非接触非破壊で軟性容器であっても容易に振動させることが可能である。その為、音波照射振動とレーザドップラ振動計を組み合わせた非接触音響探査法が有効である。軟性容器の振動エネルギー量を計測することによって、軟性容器内容物の粘度の検査が可能かどうかについて検討が行われた。供試体を用いた実験結果から、軟性容器内容物の粘度に応じた振動エネルギー量の差異が検出されたため、非接触音響探査法による飲料用軟性容器の内容物粘性が容器との複合体の合算挙動から測定可能であることが判った。

As a method of inspecting the viscosity of the soft container content, it is often carried out by a measurement method using a commercially available viscometer after breaking the container. However, by using acoustic irradiation induced vibration method, it is possible to easily vibrate non-contact non-destructively even a soft container. For that reason, a non-contact acoustic inspection method combining acoustic irradiation induced vibration and a laser Doppler vibrometer is effective. We investigated whether it is possible to inspect the viscosity of the soft container contents by measuring the vibration energy of the soft container. Experimental results using the specimen showed that it was possible to measure the viscosity of soft container contents by non-contact acoustic inspection method, because It turned out that the content viscosity of the soft container for drinks by the non-contact acoustic inspection method can measure from the total action of a complex with a container.

キーワード：非接触検査、非破壊検査、軟性容器、粘度測定、レーザドップラ振動計、音波照射加振、非接触音響探査法、振動エネルギー量

Keywords : non-contact inspection, non destructive inspection, soft container, viscosity measurement, laser Doppler vibrometer, acoustic irradiation induced vibration, non-contact acoustic inspection method, vibration energy

1. 緒言

1.1 飲料用軟性容器の粘度計測に関する

背景

一般的に飲料容器に使用する軟性容器

は、PP（ポリプロピレン）、PS（ポリスチレン）、PET（ポリエチレンテレフタレート）ボトル等の樹脂製容器、紙パック製品及び缶などの薄肉金属容器が有る。

* ** *** 桐蔭横浜大学 大学院 工学研究科 Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama
1614, Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama, 225-8503
TEL: 045-974-5059, E-mail: *td23b51g@ust.toin.ac.jp, **y-naka27@toin.ac.jp, ***tsugimot@toin.ac.jp

軟性容器の殺菌不足、内容物殺菌不足、漏洩による吸い込み等により、内容物が腐敗しガスが発生する場合や、容器内で内容物の粘性に変化が起こる場合がある。このような腐敗・変敗を中心とした破壊的な検査方法としては、内容物の粘度^[1]、濁度、臭気、pH、微生物検査などを行い管理が行われている^[2]。非破壊検査方法は、内容物に変化があった場合、容器の形状変化をカメラによる画像処理で寸法測定する方法や、変位計を用いて測定する方法、押圧を掛けての圧力測定^[3]により判定することが多かった。何れも内容物の変化が大きい場合（外形寸法に変化がある場合）には有効な手段であった。また内容物の粘度の変化による濁度を検査する方法がある。光学的に透過可能な容器であれば、入射光を用いて容器を透過し内容物濁度の状態による光学的分散を測定する方法^[4]がある。しかしながら遮光性のある容器では光学的分散の測定が出来なかった。また、非接触で電磁インパルスによる加振を利用して容器から発生する音波を測定する方法^{[5]-[6]}がある。飲料用薄肉の金属缶容器では従来この方法が採用されてきた。また、飲料用軟性容器でもアルミ箔を中間層に用いた紙製多層容器等は、アルミ箔が微量の常磁性不純物を含み、また自身が磁化されることから電磁インパルスによるアルミ箔の加振が行え、加振による振動音を解析する手法で測定が可能であった。この方法

は密閉された容器の内圧変化による容器の共振周波数及び振動音エネルギー量の変化を捕らえることが出来る。しかし密閉された容器で内圧変化の相違が得られない場合は測定が困難であった。また、飲料用軟性容器でプラスチック製容器や紙製容器では電磁インパルスによる加振が行えなかった。容器に接触振動を与えて液面の波動の影響を静電容量で測定する方法^[7]があるが、振動を発生させるため容器に接触しなければならない。そして容器との距離を正確に一定に保つ必要性があった。果物の硬度を非接触で測定する方法^[8]がある。これは果物に接触加振を行い、レーザドップラ速度計で果物表面の振動速度を計測し粘弾性を測定している。しかし、加振は接触することで行っている。

1.2 従来の非接触粘性計測手法の問題点

非接触で超音波振動による物体表面の法線方向の変化を利用した粘弾性の推定^[9]及び音波を用いた非接触粘度計測に関する基礎研究^[10]の粘度検査方法は、どちらの手法も液面の振動状態を計測する手法であり、容器の上面を開口させ液面の測定を行う必要がある。そのため、実際の容器に内容物液体が充填され封入された状態では計測が出来ないという問題点があった。本研究は液体の振動面の測定ではなく、容器外側から非接触非破壊で加振及び計測することで、容器と内容物

の複合振動挙動から内容物の粘性を測定することを目標とした。

1.3 非接触音響探査法を用いた計測方法

一方、本研究室で検討を行っている非接触音響探査方法^{[11]-[17]}は、主としてコンクリート構造物の欠陥探査のための非破壊検査法として発展してきたものであり、将来的には叩き点検の代替検査方法として期待されている。本手法は音波照射加振を用いて対象物に振動エネルギーを与え、その振動速度をレーザドップラ振動速度計 (LDV: laser Doppler vibrometer)により計測を行うものである。コンクリートに限らず、様々な対象物に対して適用可能である。たとえば、紙製容器や樹脂製容器に対しても完全非接触で加振及び計測を行うことが可能である。本手法の利点は、加振距離や振動速度を計測するための LDV による計測距離を比較的自由に設定できることである。この手法を用いて、液体が充填された軟性容器内の微量内部ガス検出方法^{[18]-[19]}は既に確認されている。

さらに、軟性容器に充填された内容物の腐敗原因の一つである粘性が変化した場合、音波加振により与えられた一定の振動エネルギーによる振動減衰も変化することが予測できる。そのため、本手法を用いることにより、その振動速度減衰の違いから容器自体を破壊することなく軟性容器の容器振動と内容物液体の振動

挙動より粘性変化を推定できる可能性がある。そこで、本研究室では、粘性の異なる液体の入った容器自体に本手法を適用することにより、実際に容器振動と内容物粘性の振動挙動から粘性が測定できるかどうかについての検討を行った。そのため、一定条件の下、測定に要する測定パラメータを少なくし容易に測定する方法を検討した。

2. 非接触音響探査法の基本構成と粘度測定原理

2.1 非接触音響探査法の基本構成

軟性容器を対象とした場合の非接触音響探査法の基本構成上面図を Fig.1 に示す。

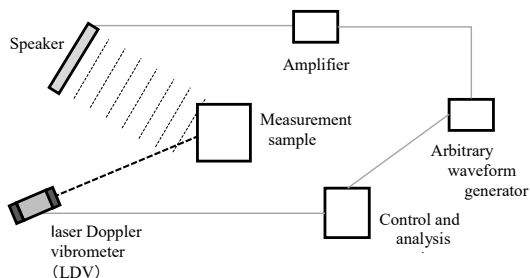


Fig.1 Basic configuration top view diagram of noncontact acoustic inspection method.

スピーカーより発生させた平面音波を軟性容器に照射することにより振動させ、LDV により容器表面の振動速度を計測するというものである。なお、スピーカーと軟性容器間の定在波による影響を避けるためにスピーカーは軟性容器に対して入射角を付けている。LDV とスピーカ

一の軟性容器に対する角度は、同角度ではない角度を設定して設置する。これはスピーカーより照射される音波が、入射角と反射角が同じである場合、軟性容器からの反射波が影響する為である。また、任意波形発生装置により加振用音波の信号と同期用のトリガ信号を発生させて、音波照射および LDV による測定タイミングを制御する。

2.2 Voigt 静的モデルを用いた粘度測定原理

測定原理は、今回の実験では音源からの照射を一定にして行うため、粘弾性体の基本モデルである Voigt の静的モデル^[10]を用いている。基本的な Voigt 静的モデルを Fig.2 に示す。応力 S はバネ及びダッシュポットに均等に掛かる為 $S=S_1+S_2$ となる。また、歪み $\gamma=\gamma_1=\gamma_2$ で同一である。

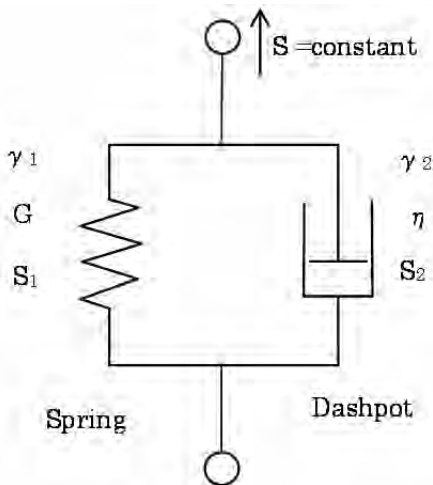


Fig.2 Basic configuration diagram of Voigt model.

バネはフックの法則に従うものとし、バネ弾性率 G とし応力 S_1 は式(1)の関係、ダッシュポットはニュートン液で満たされた円筒容器とした場合、粘度 η とし応力 S_2 は式(2)の関係がある。

$$S_1 = G\gamma_1 \quad (1)$$

$$S_2 = \eta \frac{d\gamma_2}{dt} \quad (2)$$

Voigt モデルは並列に配置されるため、合成の応力 S は式(3)の関係になる。

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 \\ &= G\gamma_1 + \eta \frac{d\gamma_2}{dt} = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad (3) \end{aligned}$$

クリープ現象として捕らえ、応力が一定 $S=S_0$ 、式(3)の微分方程式を積分定数 C として式(4)が得られる。

$$\gamma(t) = e^{-\frac{Gt}{\eta}} \left(\left(\frac{S_0}{\eta} \right) \int e^{\frac{Gt}{\eta}} t dt + C \right) \quad (4)$$

$t=0$ では初期歪み $\gamma_0=0$ であるので式(5)の関係を得られる。 $\gamma(t)$ は応力状態において時間 t が経過した時の歪みである。

$$0 = \frac{S_0}{G} + C \quad (5)$$

よって、歪み $\gamma(t)$ は式(6)になる。

$$\gamma(t) = \frac{S_0}{G} \left(1 - e^{-\frac{Gt}{\eta}} \right) \quad (6)$$

式(6)より、静的自由振動領域での歪 γ は粘度 η の大きさに反比例した指数関数的減衰特性を示すことがわかる。すな

わち粘度 η が大きいと与えた一定の歪 γ は急速に減衰し、逆に粘度 η が小さいときは、与えた一定の歪 γ はゆっくりと減衰する特性を示す。

3. 粘度測定実験セットアップ

3.1 PS 製容器を使用した実験測定のセットアップ

Fig.3 に市販の PS (ポリスチレン) 製容器を使用した実験セットアップ図を示す。

市販されている飲料容器の壁厚は 1 mm 以下が殆どであるので、市販の PS 製容器を使用して容器と内容物の合算振動エネルギー量から内容物粘度の関係を調査した。PS 製容器 (上底 W100-下底 W90 mm×上底 D100-下底 D90 mm×H60 mm、壁面厚み 平均 $t=250 \mu\text{m}$ (220~280 μm)、満充填で 500 g の上面解放テーパ角形) を使用した。容器には反射シールを貼りレーザー光の反射を得られるようにしている。LDV はシングルポイントタイプとスキャニングタイプがあるが、今回の実験ではスキャニングタイプの SLDV (scanning laser Doppler vibrometer: PSV-400, Polytec Corp.) を使用した。音源としてはラウドスピーカー (ATW-SP88, audio-technica Corp.) を用いた。PS 製容器と音源との距離は 473 mm、SLDV との距離は 900 mm である。

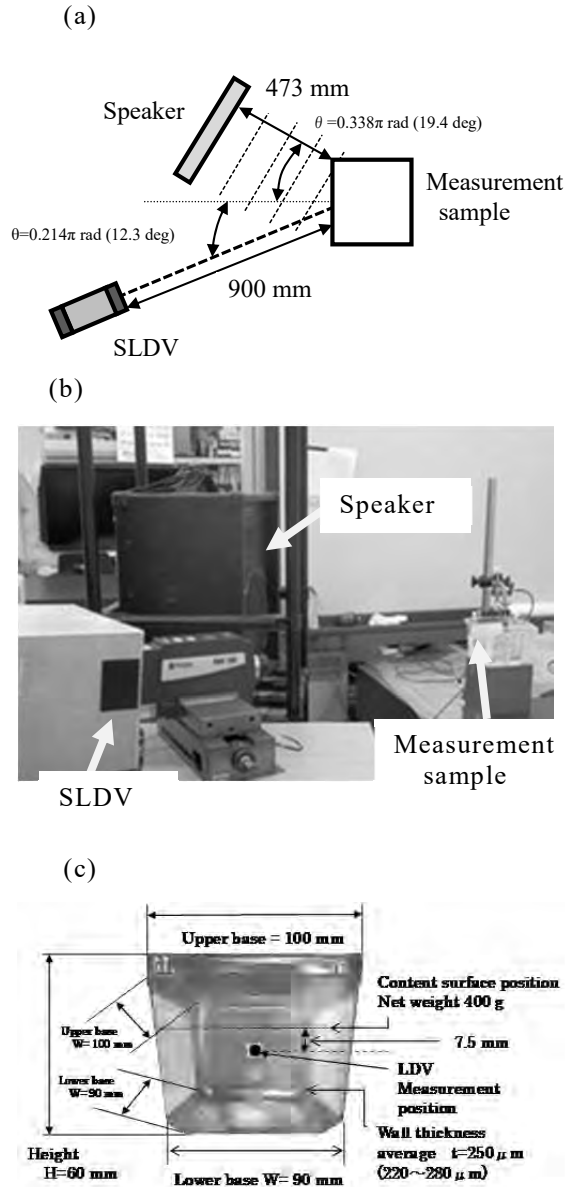


Fig.3 Experimental setup.
 (a) Setup diagram (top view).
 (b) Setup photograph (side view).
 (c) Polystyrene container.

ここでは PS 製容器に対して音源は $0.338\pi \text{ rad}$ (19.4 deg)、SLDV は $0.214\pi \text{ rad}$ (12.3 deg) の入射角で設置した。PS 製

容器の測定位置は、液面振動による影響の受け易さを考慮して、液面から 7.5 mm(壁厚みは 221 μ m)とした。測定時には天面にラップフィルムを張り、内容物の蒸発防止とし、容器ヘッドスペース部の内圧が大気圧状態(ヘッドスペースに内圧がある場合は振動速度が容器の壁に伝達し振動速度が変化する為である)とした。初期段階で天面ラップの有無での振動速度の相違がなかった為、上部は開放して測定を行うことにした。

3.2 粘度の異なる内容物のセットアップ

実験の 1~2 時間前に、蒸留水(蒸留水: 比重 0.99707、25 $^{\circ}$ C)は電気伝導率 0.66×10^{-4} S/m を使用し、別の容器に 10 リットル程度先に取り置きし安定させ、液温を 24.5 ± 0.1 $^{\circ}$ C、室温は 25 ± 0.3 $^{\circ}$ C、湿度は 50 ± 0.2 %にして使用するようにした。その際、蒸留水製造装置から測定器に移す作業において、蒸留水に泡を巻き込まないように入れ替えた。内容物は蒸留水を回転速度 500 rpm でプロペラを使用し回転攪拌時間 3 min の脱気蒸留水をベース水とした。その蒸留水に糊(成分カルボキシメチルセルロースナトリウム(CMC: ホーライ糊工業(株)), pH: 6~8 (1.0 %水溶液)、融点: 分解温度(290 $^{\circ}$ C以上)、比重(蒸留水と同等)、溶解度: 水に溶けて増粘する)を混ぜて攪拌し、粘度の異なる内容物とした。糊の比重が蒸留水とほぼ

同等なので重さ管理で実験を行った。内容物の容量は 400 ± 0.02 g、内容物温度 24.5 ± 0.1 $^{\circ}$ Cとして測定条件をほぼ一定に保った。粘度測定は粘度測定装置(Model: DV-I Prime, Brookfield Viscometer)を使用し、振動速度測定直後に行った。粘度測定の装置のスピンドル回転数は 60~100 rpm、トルクは約 10~90 %以上で 3 min 後のスピンドル回転安定状態で粘度測定を行った。

3.3 加振用音波について

加振用音波としてはトーンバースト波^[16]を用いた。Fig.4 にトーンバースト波の例(バースト波形部分の拡大図)を示す。

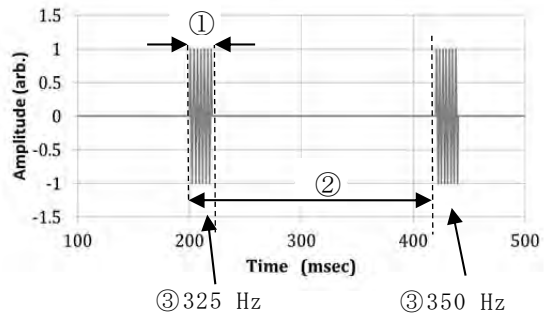


Fig.4 Enlarged view of emission wave form.
(Frequency range: 325-350 Hz)

- ① Pulse duration 20 msec.
- ② Interval time 200 msec.
- ③ Interval frequency 25 Hz.

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が比較的低周波に共振を持つことから 100~1200 Hz の範囲とした。また、粘度変化による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 としている。計測対象物近傍付近の音波の最大音圧は 92 dB とした。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。

3.4 振動エネルギー量を用いた粘度評価

Fig.5 に容器の共振周波数における振動速度波形の変化を示す。図中の①区間がトーンバースト波による加振領域 (強制加振領域)、その後の②区間が減衰領域 (自由振動領域) である。ここで Fig.5(a) は低粘度 (10 mPa・s)、(b) は高粘度 (200 mPa・s) の場合の振動速度波形の 325 Hz の切り取り例である。図中より、粘度が低い場合、②区間における振幅が大きくかつ振動時間が長く続いていることが分かる。一方、①区間においては振幅の差はあるものの大きな差は無い。そこで、この②区間における容器表面の振動速度の減衰状態の違いから、PS 製容器と内容物粘度の合算振動速度差を得ることが可能であると考える。

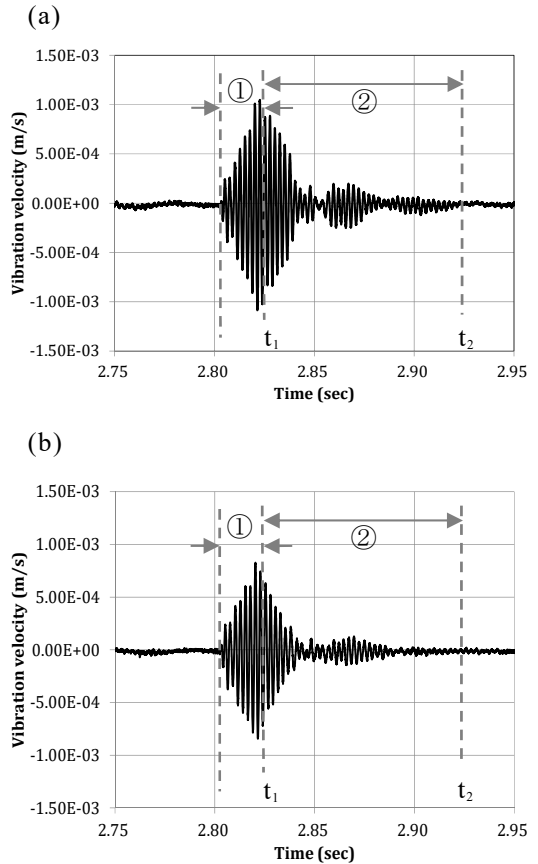


Fig.5 Measurement range definition.
 (a)Low viscosity. (10 mPa・s)
 (b)High viscosity. (200 mPa・s)
 ①Excitation time.
 ②Gate processing time.
 (measuring time $t_1 \sim t_2$)

②区間のみを時間ゲート処理により切り出して式(7)で定義する。共振周波数における自由振動エネルギー総和量 (FE_res (m²/s) : Total amount of free vibration energy at resonant frequency)は、振動速度波形の振幅値 V(t)、 t_1 および t_2 は減衰領域の計測積分区間の開始と終了

時間である。今回は送信波形に合わせて t_1 は 25 msec、 t_2 は 150 msec としている。

$$FE_{\text{res}} (\text{m}^2/\text{s}) = \int_{t_1}^{t_2} V(t)^2 dt \quad (7)$$

ここで比較として、共振周波数における自由振動時の変位全変化量 (DC_res (m) : Total amount of change in displacement at resonant frequency) として式(8)に定義する。積分範囲 t_1 、 t_2 は式(7)の範囲と同様にして求める。

$$DC_{\text{res}} (\text{m}) = \int_{t_1}^{t_2} |V(t)| dt \quad (8)$$

4. 粘度測定実験結果

4.1 音波照射加振による共振周波数と

粘度の関係

Fig.6 に共振周波数における自由振動エネルギー総和量 FE_{res} (m^2/s)の周波数特性を示す。(a)は周波数 100-1200 Hz 全体範囲、(b)は最大の振動エネルギー総和量を示す共振周波数 325 Hz を含んだ 100~450 Hz の範囲における内容物粘度毎の容器と内容物合算振動エネルギー総和量を示す。

Fig.6(b)で、2番目に大きい振動エネルギー総和量を示す 175 Hz よりも共振周波数である第一ピーク周波数 325 Hz において、内容物粘度毎に於ける容器と内容物合算振動エネルギー総和量の違いが明確に表れていることがわかる。

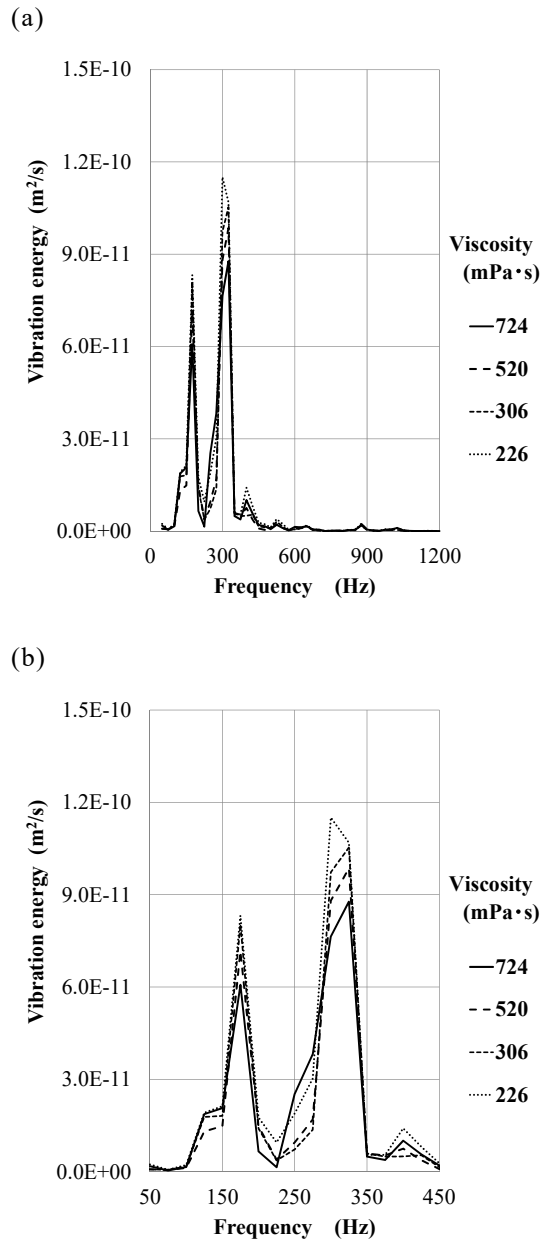


Fig.6 Vibration by the characteristic frequency measuring position.
 (a) Overall frequency.
 (b) Near the resonance frequency.

4.2 粘度と振動エネルギー量および振動速度の関係

Fig.7 に内容物粘度の容器と内容物粘性の合算振動挙動特性を示す。

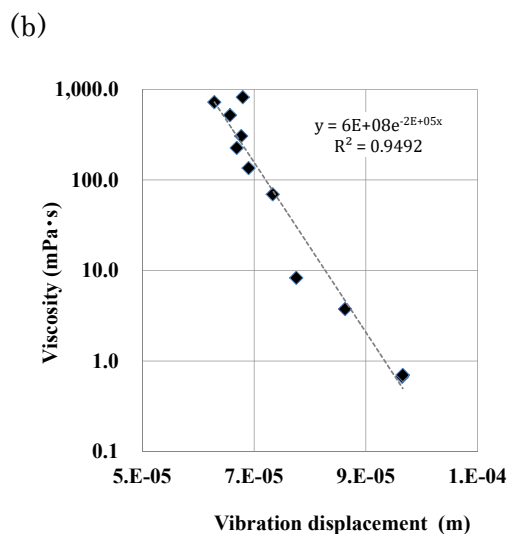
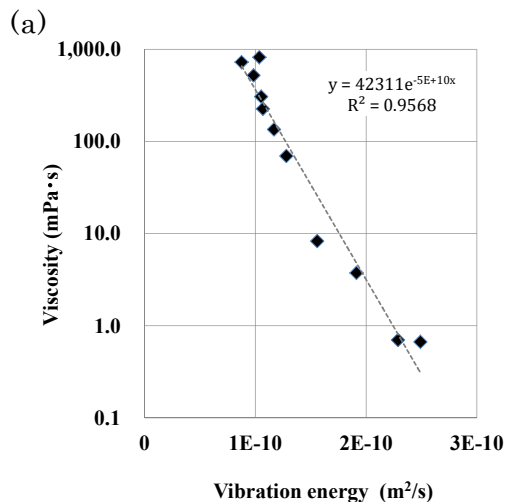


Fig.7 Relationship between viscosity and vibration energy and vibration displacement at resonant frequency.

- (a) Total amount of free vibration energy.
- (b) Total amount of change in displacement.

(a)は共振周波数 325 Hz における式(7)の計算結果としての自由振動エネルギー総和量、(b)は共振周波数 325 Hz における式(8)の計算結果としての自由振動時の変位の全変化量の関係を示す。

Fig.7(a)より、内容物粘度と共振周波数における自由振動エネルギー総和量の間には指数関数的な反比例関係が見て取れる。本来は歪量としては(b)の自由振動時の変位の全変化量の関係が静的粘弾性の式(6)との関係を示すことになるが、(a)の共振周波数における自由振動エネルギー総和量の関係でも指数関数的な反比例関係が得られている。内容物粘度が低下すると共振周波数における振動エネルギー総和量が増加し(減衰振動が長く続くことを意味する)、逆に増加すると振動エネルギー総和量が低下する(減衰振動が短い時間しか続かない)。Voigt 静止モデルにおける加圧振動とトーンバースト波の短時間加振後の自由振動エネルギー総和量という違いは有るものの、この関係は粘弾性 Voigt 静止モデルから得られた理論式(6)と同様な傾向を示しているのがわかる。

5. まとめと今後の課題

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により、軟性容器内で腐敗が発生した場合の内容物の

粘度差を容器と内容物粘性の合算振動挙動から検出が可能かどうかについて基礎的な検討を行った。容器条件、内容物液温度や液重量、加振条件、音圧等の測定条件を一定とした場合の軟性容器の共振周波数における自由振動エネルギー総和量の測定実験結果から、内容物粘度に応じた振動エネルギー総和量の変化が測定可能であることが明らかになった。この結果は、容器内容物の粘度変化を、容器の外側から非接触非破壊で検出できる可能性があることを示している。

また、高剛性容器であると容器の共振周波数における自由振動エネルギー総和量が小さくなり、内容物の振動エネルギー総和量の伝達で容器表面の振動に有意差がつけにくくなる。本実験の初段階で、アクリル製の厚みが 4 mm ある容器で行ったところ、今回使用した PS 製容器(厚み平均 $t=250 \mu m$)と比較し、自由振動エネルギー総和量が非常に小さいことを確認していた。内容物の粘度測定を行う場合は、壁厚が薄い容器である場合内容物粘度の有意差を得ることが比較的容易であった。したがって、飲料用軟性容器は一般的に 1 mm 以下の容器が多いことから、飲料容器の場合は内容物の粘度測定を容易にするものと思われる。さらに内容物温度が変化した場合は、温度による内容物粘度が変化することも掌握しており、温度補正を行うことで粘度換算が可能であった。

測定条件を一定とした状態で非接触音響探査法を適用することにより、短時間で低粘度から高粘度での広い粘度範囲測定が容器外部から容器と内容物粘性の合算振動挙動の測定ができる手法は従来無かった。このような手法が実用化されれば、倉庫保管後の軟性容で内容物腐敗による粘度変化が発生する際の再検査の時間短縮が期待されるために、倉庫滞留時間、生産コスト及び物流コストの削減が将来的には期待される。そのため、今後は非接触音響探査法を用いた軟性容器内のガス検出法^{[18]-[19]}と、今回の非接触音響探査法による粘度測定方法を組み合わせることで、軟性容器内容物の腐敗や漏洩による不良検査を現行の測定精度以上のものとしてできるかどうかについて検討する予定である。

<参考文献>

- 1) JIS Z 8803:2011 液体の粘度測定方法
- 2) 吉田信一郎“腐敗・変敗を中心とした検査方法”日本食品微生物学会誌 *Jpn.J.Food Microbiol.*,28(2),75-78,2011
- 3) 伊集院 太一、深澤 宏、浅野 稔浩 大和製罐株式会社 特許 6169341 “密封容器の内圧検査装置および方法”
- 4) 平野順子“濁度系の測定方法と濁度標準液”環境技術紹介広報誌「かんぎきょう」2013.7, pp18-19
- 5) 川井重弥“飲料缶検査装置(ケース打検機)の特徴と使用事例について”食

- 品機械装置 2008 年 11 月号 pp100-108
- 6) 網谷岳夫、池田学、歌川紀之、北川真也、磯光夫、水野浩、黒川浩、川井重弥 “コンクリート充填鋼管柱の損傷推定方法およびコンクリート充填鋼管柱の損傷推定装置” 公開番号 2018-016983
- 7) 阿部健、新妻定雄 東京ガスエンジニアリングソリューションズ(株)“非接触液体粘性計測技術の開発について”2017年10月4日 press 発表 液体物測定装置 特許公開 2016-142581
- 8) 桜井直樹 “レーザドップラ装置による果実の非破壊的粘弾性測定”日本バイオレオロジー学会誌、第17巻、第3号、2003
- 9) 青砥隆仁、向川康博“超音波振動による物体表面の法線方向の変化を利用した粘弾性の推定”情報処理学会研究報告 Vol.2017-CVIM-206, No.12 2017/3/10
- 10) 伊藤正幸、田井秀一、上羽貞行、小林力“音波を用いた非接触粘度計測に関する基礎研究” 日本音響学会誌 65 巻 2 号(2009),pp.63-68
- 11) Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi Sugimoto, Noriyuki Utagawa, and Kageyoshi Katakura : “Proposal of Non-Contact Inspection Method for Concrete Structures, Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.52, 07HC12, 2013.
- 12) 杉本恒美、赤松亮、歌川紀之、片倉景義 : “コンクリート非破壊検査のための遠距離非接触音響探査法”, *ンクリート工学年次論文集*、Vol.36, No.1, pp.2062-2067,2014.
- 13) Kazuko Sugimoto, Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi Sugimoto, Noriyuki Utagawa, Chitose Kuroda, Kageyoshi Katakura : “Defect-detection algorithm for noncontact acoustic inspection using spectrum entropy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.54, 07HC15, 2015.
- 14) 杉本恒美、杉本和子、川上明彦、歌川紀之 : “遠距離音波照射加振を用いた非接触探査法の欠陥検出アルゴリズム”, *コンクリート工学年次論文集*、Vol.39, pp.1849-1854, 2017.
- 15) 杉本恒美、杉本和子、歌川紀之、川上明彦 : “インフラ点検のための音波照射加振による高速非接触音響探査法,-マルチトーンバースト波を用いた橋梁における検証”, *建設施工と建設機械シンポジウム論文集*, pp.149-154, 2017.
- 16) Tsuneyoshi Sugimoto, Kazuko Sugimoto, Nobuaki Kosuge, Noriyuki Utagawa, and Kageyoshi Katakura : “High-speed noncontact acoustic inspection method for civil engineering structure using multitone burst wave”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.56, 07JC10, 2017.
- 17) Kageyoshi Katakura, Ryo Akamatsu, Tsuneyoshi Sugimoto, and Noriyuki Utagawa : “Study on detectable size and

depth of defects in noncontact acoustic inspection method”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.53, 07KC15, 2014.

- 18) 川井重弥, 中川裕、杉本恒美:”非接触音響探査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 pp409-423, 2018
- 19) 杉本恒美、中川裕、川井重弥 特願 2017-126317 “非接触検査システム”
- 20) 熊谷 仁、熊谷日登美“レオロジーと食品工学－嚥下障害者用介護食の物性を中心として ”日本食品工学会誌, Vol. 10, No. 3, pp. 137 - 148, Sep. 2009

(原稿受付 2018年12月26日)

(審査受理 2019年4月5日)