

論文

非接触音波照射加振を用いた樹脂製キャップと
ボトル口嵌合特性に関する研究Study on bottle mouth fitting characteristics of resinous cap using
non-contact acoustic irradiation induced vibration method川井 重弥¹・中川 裕²・杉本 恒美*

桐蔭横浜大学 大学院工学研究科

(2019年3月16日 受理)

I. はじめに

飲料業界での容器は多種存在している。金属製の缶容器、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。特に樹脂を用いたPET容器に関しての樹脂製キャップの嵌合性を調査する方法を検討する。

飲料容器において、ボトルの口部とキャップの嵌合状態は完全密封でなくてはならない。もしボトル、キャップ樹脂の成型不良や嵌合が悪い場合、漏洩や吸い込みで内容物が腐敗することがある。スクリューキャップに於いてボトル口部とキャップインナー部の嵌合は、トルク値監視され巻締られている。現状での検査方法は、キャップを回し実際のトルク値を測定¹⁻²⁾しキャッピング特性を評価している。この方法は破壊検査である故、全数検査には至らない。製品を製作する為にキャッピングはキャッピング装置³⁻⁴⁾が必要であり、

生産ラインでキャッピングする際は、キャッピング装置（複数ヘッド）の巻き締め機のトルク値を調整し装置に組み込み、実際に巻き締めた後のキャッピング特性はボトルとキャップの破壊試験で評価している。一部に巻締め機はトルク値管理型巻締め機も存在する。トルク値管理はあくまでもキャップの巻締め管理であり、実際のボトル口とキャップの嵌合状態を間接的に管理している。

一方、実際の実験で行う場合の検査方法として、X線の透過映像⁵⁾によりキャップ嵌合の断面を観察して嵌合状態を検査している。X線は現在では高価な機種としてはX線CT装置があげられる。ただし、実用域の測定としてはサブミリ程度の状態を非破壊で測定できる状態である。そこで、今回我々の研究室に於いては、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⁶⁻¹⁹⁾により、嵌合状態を非接触非破壊でPETボトル口部とのPP製樹脂キャップインナー部の嵌合状態、リーク状態およびトルク値を推定する研究を行った。

* SUGIMOTO Tsuneyoshi: Professor, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama. 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama 225-8503, Japan

¹ KAWAI Shigeya: Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² NAKAGAWA Yutaka: Reseacher, Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

II. 非接触音響探査法

非接触音響探査法概念図を図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PETボトル容器のPP製キャップ部に音波照射加振を行い励振させる。キャップ上面をレーザドップラ振動計(LDV)で振動速度を計測し近接することなく検査を行う。キャップ上面からキャップの状態を測定するキャップ中央部の測定、及びキャップ上面から詳細にボトル口部の嵌合状況を観察するために、ボトル口部とキャップインナー部が接する箇所であるキャップ表面の円周上の2種類の計測を行った。

キャップに対して加振が行われた際に、その計測対象面内部でボトルの口部損傷やキャップインナー部の損傷が発生し、空隙および変形欠陥が存在していた場合、そのキャップ表面部分ではたわみ振動が励起される。これにより空隙が有る場所では振動速度が上昇し、健全な場所と振動速度に差異が生じるため、空隙部の位置を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。そのため、ただ音波を当てるだけではキャップ部を励振させることは難しい。そこで重要になるのは、対象の共振現象を利用するという方法である。

キャップたわみ振動の定義式を(1)に示す。たわみ振動の共振周波数 f は単純支持された円盤のたわみ振動で近似することが可

能である。式(1)において、 h はキャップ上面からキャップ内側の厚み、 a はキャップ半径、 E はヤング率、 ρ は密度、 ν はポアソン比を表している。

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

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欠陥部を検出することが可能になるのである。また、音響加振を行う際に重要なことがもう一つ存在している。それはスピーカーから放射されている音圧である。前述した様に非接触音響探査法で使用している音波のエネルギーは微弱であるため、ある程度音圧を与える必要がある。これは、今までの研究結果から検査対象面で90~95 dB程度の音圧が必要であることが確認されている。非接触音響探査法は、この様に音波を用いて計測対象でたわみ共振を励起させ、それにより発生した振動分布の差異をレーザドップラ振動計により計測し、欠陥部を検出する手法である。本手法の利点としては、音響加振とレーザドップラ振動計を用いて計測を行うため、容器加振と測定を非接触非破壊で長距離から計測を行うことができ、定量的な検査も可能である点などが挙げられる。

III. 実験方法

3-1. キャップ中心部の測定

図2に実験セットアップを示す。実験に使用した飲料はPETボトルの生茶 525ml (キ

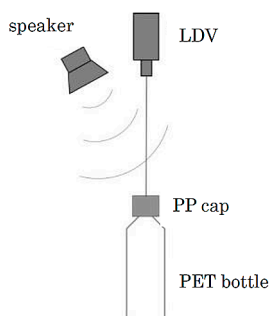


図1 非接触音響探査法概念図

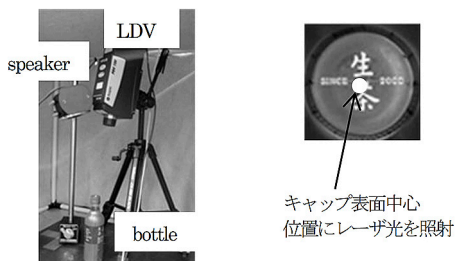


図2 キャップ中心測定実験セットアップ

リン(株))である。PET ボトルの上方にレーザドップラ振動計と音源となるスピーカーを配置し測定を行う。この実験で使用したシングルポイントタイプレーザドップラ振動計(LDV)はPolytec社のPDV-100(固定ポイント計測)であり、スピーカーはBOSS Audio SystemsのTW35を使用した。PETボトルのPP製キャップからスピーカーの距離は225mmとレーザドップラ振動計とキャップの距離は245mmである。測定方法はスピーカーから音波を照射し、その時に生じるキャップ表面の振動をLDVで振動速度を測定する。この時測定された振動波形から振動の周波数成分および振幅の積分値(振動エネルギー値)からキャップの漏洩状態およびトルク値について評価を行う。測定はキャップを30°回転させる毎に行う事で、開栓角度における振動計測結果と開栓トルク値及びキャップ側面のキャップ上昇状態、ブリッジ切れ状態について比較した。キャップ中心部を測定することで、キャップのたわみ共振を利用した振動速度の特性評価を行った。

3-2. キャップインナー部とボトル口部の嵌合位置のキャップ表面円周位置からの測定

図3に実験セットアップとレーザ光とキャップの関係を示す。

実験に使用したPETボトルは525mlである。PETボトルがキャッピングされた状態のPP製キャップ上方にレーザドップラ振動計と音源となるスピーカーを配置し測定を行う。この実験で使用したスキャニングレーザドップラ振動計(SLDV)はPolytec社のPSV-400であり、スピーカーはBOSS Audio SystemsのTW35を使用した。キャップからスピーカーまでの距離は225mmとキャップからSLDVまでの距離は475mmである。測定方法は前項と同様にスピーカーから音波を照射し、SLDVでその時生じるキャップ表面の振動速度を測定する。キャップインナー部とボトル口部の嵌合状態を把握するため、内部嵌合位置とキャップ高さ方向で同位置の

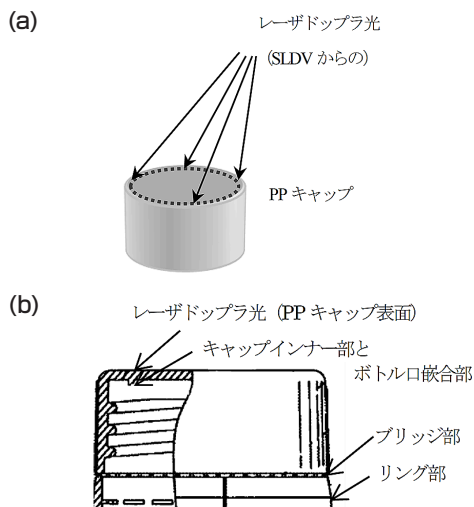


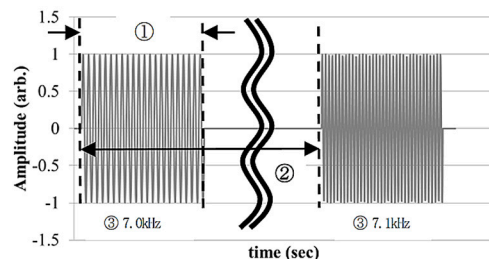
図3 キャップ表面円周上測定実験セットアップ
(a) キャップインナー部とボトル口部の嵌合位置のキャップ表面測定位置図
(b) キャップとボトル嵌合断面

キャップ天面表面円周上に沿ってSLDVキャップ開栓角度30°毎に緩めていき、キャップ表面円周上の角度を10°毎の振動速度を測定した。

3-3. 測定に使用する音波加振

加振用音波としては、図4にシングルトーンバースト波の例(周波数範囲:7.0~7.1kHzの音波波形拡大図)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5msec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



- ① パルス継続時間 5 msec.
- ② 間隔時間 100 msec.
- ③ 周波数間隔 100 Hz.

図4 トーンバースト波の拡大図の例(周波数範囲:7.0k~7.1k Hz)

スト波の周波数は離散的に 100 Hz 毎（帯域幅は 200 Hz）に変化させている。今回の加振周波数範囲は、樹脂キャップの共振周波数は 4k~10k Hz にあるので、周波数範囲は 1k~20k 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 100 msec としている。計測対象物近傍付近の音波の最大音圧は 93 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。

IV. 測定結果

4-1. キャップ中心部の測定

図5に樹脂キャップ中心付近の未開封、30°、60°、90°の開栓角度に於ける振動速度スペクトルを示す。

その際の未開封時と開栓角度 90° のキャップ中心部のたわみ共振の振動速度分布例を図6に示す。

図5、図6よりたわみ共振周波数に於ける振動速度がキャップ開栓の有無により変化し

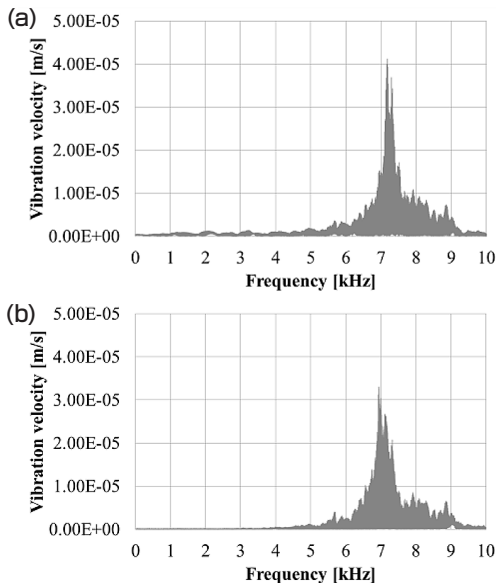


図5 キャップ中心付近の開栓角度に於ける振動速度スペクトル
(a) 未開栓、(b) 開栓角度 30°、(c) 60°、(d) 90°

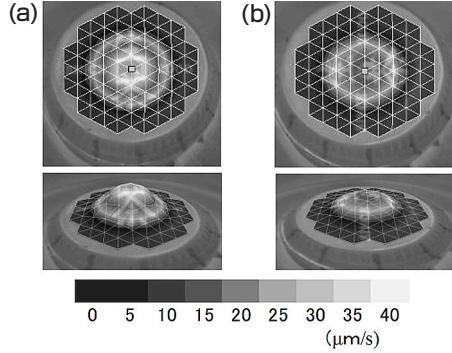


図6 キャップ天面の振動速度分布 (7.18kHz)
(a) 未開栓 上面図、斜面図
(b) 90°開栓 上面図、斜面図

ている事が確認できる。未開栓時は 7.18k Hz、30°~90°では 6.94k Hz に共振周波数が 240 Hz シフトしている。今回目的となる 1st 最大トルク値後のトルク緩みの範囲 (0°~90°) で、キャップインナー部とボトル口部の嵌合状態がキャップのたわみ共振振動エネルギー値から把握することができ、キャップ開栓角度に応じて、振動速度が変化していくことがわかる。次にキャップを 30°回転させる毎に測定し、得られたデータから図6のような振動速度スペクトルの振幅を 2 乗した値を 1k Hz~20k Hz の範囲で積分した値（振動エネ

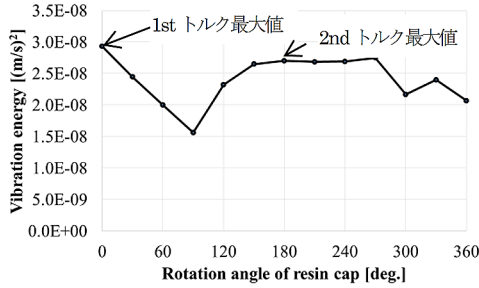


図7 キャップの開栓角度とキャップ天面の振動エネルギー

ルギー値)を図7に示す。

その定義式を式(2)に示す。VEは振動エネルギー(m/s)²、 f_1 は1k Hz、 f_2 は20k Hzとする。

$$VE(m/s)^2 = \int_{f_1}^{f_2} f(t) dt \dots\dots (2)$$

また、キャップの開栓角度と開栓トルク値(同サンプルで同時に測定できないため振動速度計測サンプルとは別サンプル)の特性を図8に示す。開栓トルク値の測定は、京都技研工業社MTP-6NT自動開栓トルク測定装置を使用した。

また、振動測定時のサンプルのキャップの開栓角度毎のキャップ側面写真を図9に示す。

図7 図8より未開封の状態から開栓角度30°から90°迄まで振動エネルギー及び開栓トルク値は低下する。一方、90°以降で開栓トルク値が再び上昇する(ブリッジが切れ始める)範囲では振動エネルギー値は上昇傾向を示した。この事からキャップの開栓トルク値と振動エネルギー値とが関係していることがわかる。さらに、図9よりキャップのブリッジが切れ始めを確認出来るのは回転角度90°~120°付近である。図7 図8の振動エネルギー値でもブリッジが切れ始める直前から振動エネルギー及び開栓トルク値が上昇する傾向がある事がわかる。ブリッジが切れ始める直前から2nd開栓トルク最大値に向かって振動エネルギー値が上昇する傾向がある事がわかる。この結果から、図10にキャップの振動エネルギー値と開栓トルク値の相関関係

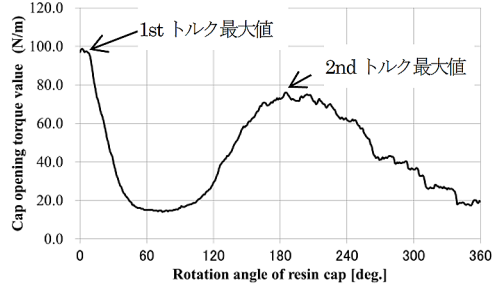


図8 キャップの開栓角度と開栓トルク

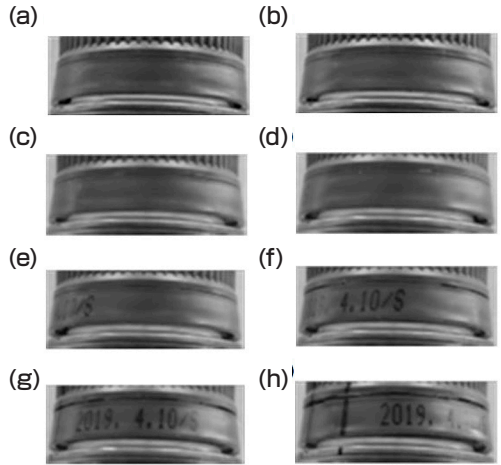


図9 キャップの開栓角度と側面写真
(a)未開栓、(b)30°、(c)60°、(d)90°、(e)120°、(f)150°、(g)180°、(h)210°

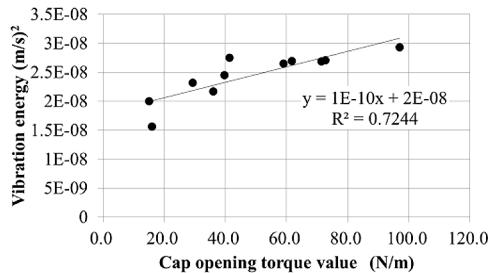
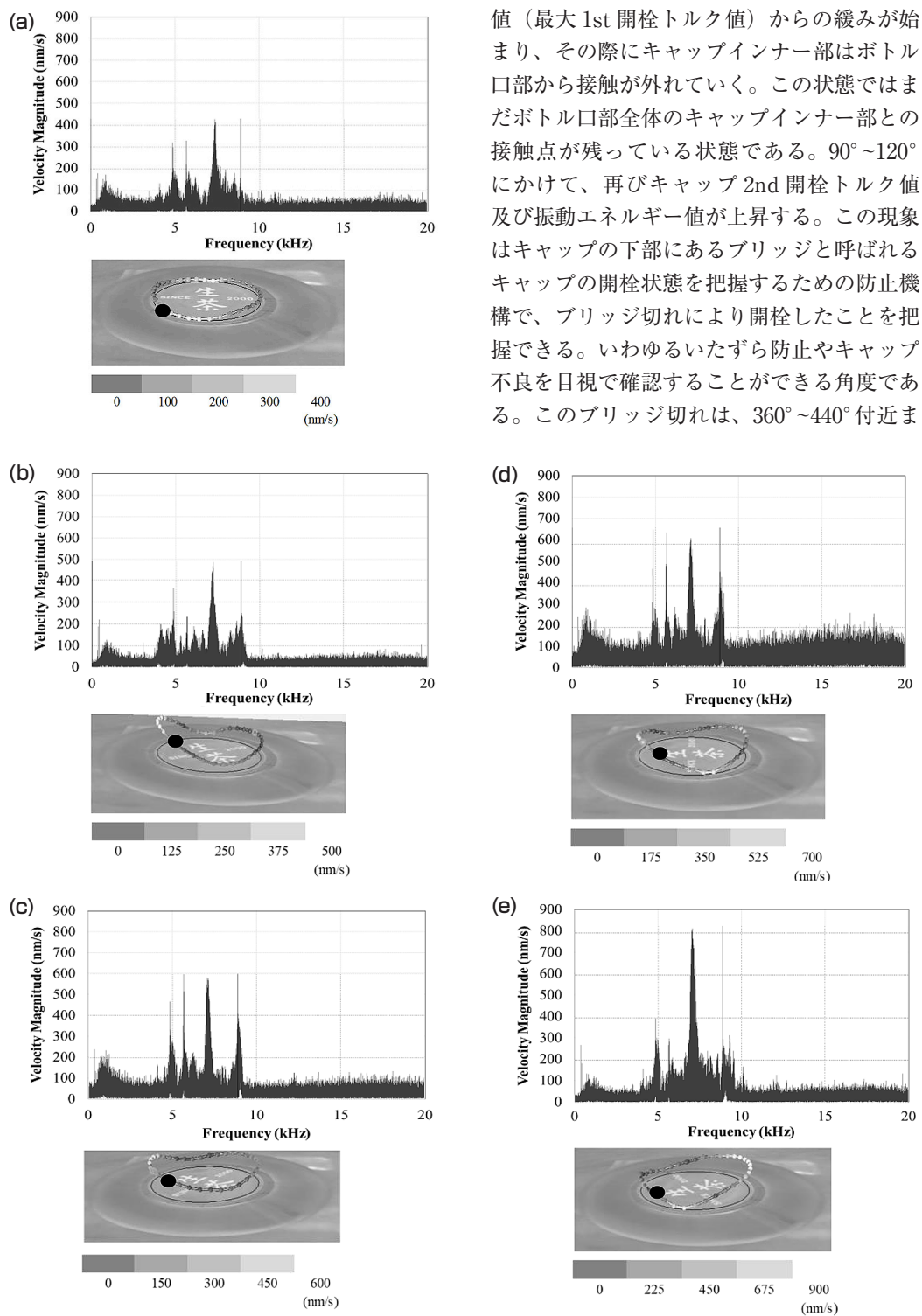


図10 キャップ開栓トルク値とキャップ天面振動エネルギー値の関係

係を示す。但し、同一サンプルの比較で無いことと、キャップによってキャップのブリッジ切れの誤差があるため、開栓トルク値と振動エネルギー値の関係の相関が低くなるが相関が得られている。開栓角度は300°までの指標を示す。

キャップ開栓角度が0°~90°にかけてトルク値が落ち込む。0°~90°は最大締めトルク



値（最大1st開栓トルク値）からの緩みが始まり、その際にキャップインナー部はボトル口部から接触が外れていく。この状態ではまだボトル口部全体のキャップインナー部との接触点が残っている状態である。90°~120°にかけて、再びキャップ2nd開栓トルク値及び振動エネルギー値が上昇する。この現象はキャップの下部にあるブリッジと呼ばれるキャップの開栓状態を把握するための防止機構で、ブリッジ切れにより開栓したことを把握できる。いわゆるいたずら防止やキャップ不良を目視で確認することができる角度である。このブリッジ切れは、360°~440°付近ま

図11 キャップの回転角度と円周上の振動速度スペクトル
(a) 未開栓、(b) 回転角度 30°、(c) 60°、(d) 90°、(e) 120°

で持続しブリッジが完全に切れてキャップ下部のリングがボトル口部に残る状態になる。ブリッジ切れが始まる90°~120°あたりから図9の画像でもわかるようにブリッジ切れが確認できる。また、キャップの高さも顕著に上方向に移動している。

4-2. キャップとボトル位置の勘合付近の円周状の測定

ここでは、キャップインナー部とボトル口部の嵌合状態を把握するため、内部嵌合位置とキャップ高さ方向で同位置のキャップ天表面円周上に沿ってSLDVでキャップ開栓角度30°おきに、キャップ表面円周上を10°毎の間隔で振動速度を測定した。図11にキャップ表面円周上の測定開始位置から270°(●)の振動速度スペクトルと全体の振動速度の画像を示す。

未開栓時には約7.3k Hzに共振周波数が確認出来る。キャップ開栓角度が30°、60°、90°、120°のキャップ円周上の振動速度スペクトルでは、円周上の特徴的な起点で振動速度が上昇していることがわかる。開栓角度が増加すると6k Hz~7k Hzと8.5k Hz~9k Hzにおいて振動速度が大きく変化している事が確認できる。この変化の要因はキャップ開栓に伴い、キャップインナー部とボトルの口部の隙間が大きくなることで発生する共振周波数と思われる。

キャップインナー部がボトル口部に接する部分の円周上の特性は、開栓角度が増加するに従って、部分的に振動エネルギー値が大きくなっている。キャップ中心部とは異なり、中心部のたわみ共振振動エネルギー値とは異なる挙動を示している。キャップ表面円周上の特定箇所によって振動エネルギー値が大きくなる傾向がある。特定箇所は、キャップインナー部とボトル口部が離れていき、空間距離が大きくなっているからと思われる。またキャップインナー部とボトル口部とは完全に平行で嵌合されていないと伺われる。

V. まとめ

ボトルはPET樹脂の射出成型金型でプリフォーム成型される。さらにブロー成形を行いPETボトルの成型を行う。キャップの成型はPP樹脂の射出成型金型で成型される。また、ボトル及びキャップの成型金型が複数取りの金型の場合、ボトルとキャップの組み合わせは多数存在し、嵌合組み合わせの特性が多数存在する場合がある。ボトル及びキャップ成型での金型は、部分的に樹脂押し出し圧力及び流速、冷却温度の違いにより樹脂の冷却が若干異なることも影響があり、キャップとボトルの嵌合組み合わせで巻縮状態はばらつきが生じることもある。そのため正確なボトルネジとキャップネジによる嵌合部は円周状に平行度がない状態であることがある。ただし漏洩になるような嵌合歪みは発生しない状態であり、通常は品質の安全性は保たれている。

今回のサンプルのキャップ中心部の共振測定結果では、キャップインナー部とボトル口部の嵌合状態が、振動エネルギー値と開栓トルク値に相関関係があることが確認された。さらにキャップ円周上の振動エネルギー値結果からは、キャップインナー部とボトル口部のキャップ表面円周上の角度に於いて、振動エネルギー値の強弱が観察された。これは、キャップインナー部とボトル口部との接触が平行でないことが伺える。キャップインナー部とボトル口部との接触点は、X-rayの透過画像で分解能的に観察できないほどの微小な間隙でも、キャップの振動エネルギー値で間接的に測定可能であることがわかる。今回の結果より、非破壊非接触での振動エネルギー値のデータの検証から、キャップ開栓トルク値の開栓時に於ける非接触でのトルク値測定の代用や、ボトル口部の金型設計、キャップインナー部の金型設計、ボトル及びキャップ嵌合の要となるネジ設計にフィードバックすることにより、ボトルとキャップ嵌合の精

度向上に寄与できるものであると思われる。そして現状までの全数検査は X 線の透過画像の検査や、キャップ外部からの画像処理での画像検査が主体であった。今回の非接触音波照射加振を用いた樹脂製キャップのボトル口嵌合特性に関する研究に於いて、キャップ中心部の振動速度エネルギー値での評価が可能になり、キャップの共振周波数を利用して短時間測定が可能になり、全数検査が可能になるとと思われる。ボトルとキャップの嵌合状態を非接触非破壊で全数検査が可能になり、一層の安全対策が構築できるとと思われる。

【参考文献】

- 1) きた産業株式会社 キャップの実務知識『PP キャップ編』Sake Utsuwa Research /10 XI pp.14-16
- 2) 伊藤隆一, 山崎光悦, 西山貞雄, 韓晶, 花房泰浩 ユニバーサル製缶(株)技術・開発部, 金沢大学大学院自然科学研究科 “アルミボトルの開栓特性とボトル寸法効果の検討” 日本機械学会論文集 (C 編)
- 3) 関義一, 遠藤栄三 京都技研工業株式会社, 有限会社エクサシステムズ “トルク測定装置” 特開平 07-134076
- 4) 松井一 澁谷工業株式会社 “キャッピング装置” 特開 2004-131132, 73 卷 729 号 (2007-5) 論文 No.06-0887
- 5) 高嶋善彦 高島技研株式会社 “X 線利用によるペットボトルキャップの巻縮検査装置” 実願平 10-9606
- 6) R. Akamatsu and T. Sugimoto: Acoust. Soc. Jpn. Spring. Meet. 3-8-7 (2011) p. 1569 [in Japanese].
- 7) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Jpn. Soc. Civil. Eng. 66 (2011) p.1569 [in Japanese].
- 8) N. Utagawa, R. Akamatsu and T. Sugimoto: Proc. of the 10th Int. Symp. on New Tech. for USMCA (2011) p.104
- 9) T. Sugimoto, R. Akamatsu, N. Utagawa and S. Tsujino: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2011), p.744
- 10) R. Akamatsu, T. Sugimoto, H. Kawasaki, N. Utagawa and S. Tsujino: Proc. of the 10th SEGJ Int. Symp. (2011) p.84
- 11) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: Jpn. J. Appl. Phys., Vol.52, (2013) 07HC12
- 12) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2012), p.94
- 13) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: IEEE Int. Ultrasonics Symp., (2013), p.1303.
- 14) R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa and K. Katakura: Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 07HC12
- 15) K. Katakura, R. Akamatsu, T. Sugimoto and N. Utagawa: Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 07KC15
- 16) K. Sugimoto, R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, C. Kuroda and K. Katakura: JJAP, Vol.54, 07HC15, (2015)
- 17) T. Sugimoto, K. Sugimoto, N. Kosuge, N. Utagawa and K. Katakura: JJAP, Vol.56, 07JC10, (2017)
- 18) 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
- 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”