論文・Paper

ガラスびん円筒部の楕円度が耐内圧力強度に 及ぼす影響について

横 倉 修 一

(麒麟麦酒(株) 富田製壺工場)

我が国において、従来より広く使用されているガラスびんを試料として、びんの円筒部における楕円度が内圧負荷時に発生する応力に及ぼす影響について、弾性力学的な検討を行い、ストレインゲージによる実測値との比較検討を行った。また内圧負荷による耐内圧試験において楕円度が強度に及ぼす影響についても併せて検討を行った。その結果以下のような知見が得られた。

(1) 所定の楕円度及び肉厚を有する試料びんについて、内圧負荷時にびん円筒部の円周方向に発生するストレイン量を弾性力学的に算出し、ストレインゲージによる実測値との比較を行ったところ、かなりよい一致が認められた。

(2) びん円筒部の任意位置における肉厚及び曲率半径が分れば、内圧負荷時に発生するストレインを推定し得る計算方法を検討し、偏肉を伴ったかなり複雑な形状のびん円筒部についても、実測値と比較的よく一致することを確認した。

(3) 試料びんについて内圧負荷による破壊実験を行った結果、耐内圧強度は楕円度の増加とともに低下した。また楕円度が約1.5%以上に大きい場合では、破壊時のき裂の出発点は円筒部の外表面の短径部(曲率半径が最大の位置に対応)に集中することが分った。(1983年8月22日受付)

Stresses in Bottles with Oval Cross-Section When Subjected to Internal Pressure

Shuichi YOKOKURA

(Kirin Brewery Co., Ltd., Tonda Bottle Manufacturing Plant)
(4473-4, Ooaza-Tonda, Shin-Nanyou-shi, Yamaguchi 746)

In the glass industry it is recognized that bottles with oval cross-sections are not suitable if the bottles are to be subjected to internal pressure. We investigated theoretically and experimentally the effect of slight ovality on the stresses developed in nominally circular glass bottles under internal pressure. The results obtained are summarized as follows:

(1) When the stresses were measured with strain gauges on bottles of oval cross-section under internal pressure, they showed good agreement with elasto-mechanical calculations.

(2) The new method of stress calculation was investigated under the conditions of known wall thickness and internal radius of curvature of an oval cross-section, and this calculation agreed closely with that obtained by experimental measurements.

(3) The resistance to internal pressure of sample bottles decreased with increasing ellipticity, and it is interesting to note that a origin of the bottle fracture by a bursting test concentrated on the part of minor axis of oval cross-sections at the ellipticity of over ca. 1.5%.

[Received August 22, 1983]

Key-words : Glass bottle, Strength, Ovality, Stress, Strain, Internal Pressure

1. 緒 言

ガラスびんの円筒部が設計どおりに真円状であることは商品としての外観のみならず日常の取り扱いのうえからも好ましいことであるが、市販されているびんの円筒

部のほとんどが多少とも楕円状になっていることは、現在の吹製技術からみてある程度はやむを得ないであろう。

ところでこの楕円度〔本報文では $\frac{\text{長径} - \text{短径}}{\text{真円径}} \times 100$

(%)と定義した]は一般にびんの品質規格としてびん種に応じた許容基準が設定されているが、楕円度が許容基準を超えて大きくなれば液体充てん、包装工程等において各種の機器、装置通過時にびんの流れが阻害されとか、何らかの支障をきたすことは明らかである。

またこの楕円度についてはびん強度という見地からの検討がこれまでにわずかしかなされておらず、文献として楕円状円筒に関するわずかな知見があるにすぎず^{1), 2)}、偏肉を伴った楕円状の複雑なびん形状に至っては、応力解析の方法が見いだされていないのが現状である。そこで円筒部が楕円形状となっているガラスびんについて、内圧負荷時に発生するストレインにつき弾性力学的な検討を行い、理論式の作成を試みた。またこの楕円度がびんの耐内圧強度、耐熱圧力強度³⁾等に及ぼす影響についても検討を行ったので併せて報告する。

2. 実験方法

2.1 試料びんの調製

ガラスびんとしては現在我が国で広く使用されているびん類(内容積 658 cm³, 胴径 75 mm, 高さ 289 mm, 肉厚約 4 mm)を選んだ。試料びんの形状を図 1 に示す。

Fig. 1. Schematic illustration of a test bottle.

- 1) Inner volume : 658 cm³, Weight : 605 g
- 2) The two oblique areas illustrated incur heavy abrasion

本実験においては試料びんの円筒部(びん底から 140 mm 高さの位置)の楕円度に限定して検討を行った。なおこの円筒部はびんが繰り返し市場で使用されることにより、表面傷が集中的に発生する位置に対応している。試料びんのサンプリングは製壺工場にて行った。なお楕円度が 2% 以上に大きい試料びんについては実験室的に調製した。まず真円状のびんを電気炉に入れて 650°C に加熱した後、電気炉内でびん円筒部の両端から荷重を加えて楕円形状として徐冷した。

2.2 びん円筒部に発生するストレインの測定方法

所定の楕円度を有する試料びんの円筒部(びん底より

140 mm 高さの位置)のうち、外表面にストレインゲージ(共和電業社製, KFC-03-CI-11, 抵抗 120 Ω , ゲージ・ファクター 2.2, ゲージ長さ 0.3 mm)を張り付け、びんに内圧 4 kg $\cdot$ cm⁻²を加えた場合のガラスの伸びを動ひずみ計(共和電業社製, DPM-3 E 6)を用いて測定した。なお内圧負荷時に発生するストレインは円周方向の方が垂直方向に比べて大きく^{4)~6)}、また内圧負荷による破裂実験を行い、びんの破裂パターンをみると、破裂の出発点からの割れ目の進展は一律に垂直方向であることから、本実験においては円筒部の円周方向のストレインに限定して検討することにした。また本実験による円筒部の位置は内圧負荷時にびんの底部並びに口部の端末条件の影響をほとんど受けず、無限円筒に準じて考えてよいことをあらかじめ実験により確認した³⁾。

2.3 試料びんの強度測定方法

(i) びんの加傷方法

新びん(未使用で、表面傷のほとんど発生していないびん)を実験的に加傷する場合はびん加傷機(アメリカン・グラスリサーチ社製, ライン・シミュレーター)を用いた。この加傷機は回転円板及び円板外周に沿って設けられた円形状送びんガイドから構成されており、水の充てんされたびん 22 本をガイドに沿って単列状に並べ、円板を回転させることにより、速度 50 m/min でびんを円板上に送行させて、びん同士に押し合い、衝撃等を与えてびん外表面を加傷させる装置である。

(ii) 耐内圧強度の測定方法

びんに内圧(水圧)を負荷して破裂させる装置(アメリカン・グラスリサーチ社製, インクレメント・プレッシャーテスター, 1200-Dual Head Type)を用い、びん破裂時の加圧値を 1 分間持続の耐内圧強度^{7), 8)}として表示した。

(iii) 耐熱圧力強度³⁾の測定方法

びんに水を満量充てんした後、びん口部にナイロン製耐圧導管を取り付け、それにプランジャー・ポンプを連結した状態でびんを温水槽に 1 h 浸漬した後、プランジャー・ポンプの稼働により耐圧導管から加圧水を送り込み、びんに所定の内圧を加えて 30 s 経過した後、冷水槽(10°C一定)へ移動させて、外表面に熱衝撃を与える方法を取り、温水槽を 3°C 間隔で段階的に昇温させるプログレッシブ・テスト法を採用し、びん破壊時の内圧及び温度差を測定した。なおびん内圧の調整は接点圧力計を用い、電磁弁による自動制御方式をとった。

3. 楕円円筒に関する弾性力学的な検討

3.1 内圧負荷時に発生する応力

図 2 に示すような楕円円筒(断面)について、内圧負荷時に発生する応力について Schmidt¹⁾の方法に従って

Fig. 3. Relationship between calculated strains and internal radii of slightly oval cylinders.

- 1) Internal pressure, 4 kg/cm²
- 2) Values in the graph show wall thicknesses

Fig. 4. Relationship between calculated total strains and internal radii of oval cylinders

- 1) Internal pressure, 4 kg/cm²
- 2) Values in the graph show wall thicknesses

力並びに法線力について、楕円度及び肉厚との関係について、図2のA点を対象として検討を行った。

まず P_A に関する計算を肉厚3~6 mmの範囲にわたって行い、その結果を図3に示す。同じく N_A に関する計算結果を図3に示す。したがってA点に生ずる全応力 S_A は図4のようになる。

3.2 楕円の長径及び短径と曲率半径の関係

いま図2においてA点(長径部)での曲率半径は $\frac{b^2}{a}$

Fig. 5. Relationship between an internal radius (a) and a radius of curvature at point A in Fig. 2. a and b in the graph mean internal radii shown in Fig. 2.

で示されるが⁵⁾¹⁰⁾、ここで a と b の関係についてみると、まず楕円方程式は以下のとおり

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

ところで、楕円弧の全周(U)を求めてみると、まず弧の単位長さを d_s とすれば

$$d_s = \sqrt{1 + (y')^2} = \sqrt{1 + \frac{b^2 x^2}{a^2(a^2 - x^2)}} \cdot dx \quad (13)$$

いま $x = a \sin \varphi$, $k^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ とすると

$$U = 4a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{k^2 \sin^2 \varphi + 1} \cdot d\varphi \quad (14)$$

なお(14)式は第2種楕円積分である。ところで U は円筒の楕円度とは無関係に一定であるから、いま外径が試料びんと同じ75 mm(真円の場合)とし、肉厚4 mmの場合の円筒内面の曲率半径(図2のA点における) b^2/a を(14)式の a, b の関係から求めてみると図5に示すとおりである。

4. 結果並びに考察

4.1 楕円度に関する計算値と実測値の比較

所定の楕円度を有する試料びんに内圧4 kg/cm²を負荷した場合に円筒部(びん底より140 mm高さの位置)の円周方向に発生するストレインにつき、前記の(12)式を用いて計算を行い、一方それと並行してストレインゲージによる実測値との比較検討を行った。以下にその比較例を示す。

(i) 楕円度8%の試料びんの場合

円筒部(図6参照)の長径及び短径部につき合計4点(P, Q, R及びS点)について、計算値と実測値を表1及び図6に表す。図6から明らかなように、計算値は実測値とかなりよい一致が認められた。以上の検討例か

Table 1. Strain calculation at an oval cross-section of a sample bottle.

Measured point	Wall thickness (mm)	Internal radius (mm)	Calculated strain ($\times 10^{-6}$)		
			Normal strain	Bending strain	Total strain
P	3.7	31.50	34	68	102
Q	4.5	31.50	28	30	58
R	4.5	33.85	35	-30	5
S	4.8	33.85	32	-22	10

Note: 1) Measured points, A, B, C, and D are shown in Fig. 6.
 2) Internal pressure, 4 kg/cm².

Fig. 6. Strain distribution at an slightly oval cross-section of a sample bottle at the internal pressure of 4 kg/cm²

White point : Measured value
 Black point : Calculated value

ら明らかなように、楕円度が10%程度までは本報告による計算式を適用し得ると考えられる。なおこの場合びんの底部及び首部の端末条件の影響をあらかじめ検討しておく必要があり、端末の影響がある円筒部の装置については、あらかじめ補正を行う必要がある。

4.2 円筒部の曲率半径とストレインの関係

楕円度が小から大にわたって試料びんを10本選び、それらについて円筒部（びん底より140 mm高さの位置であり、平均肉厚4.3 mm）の任意位置の内表面にストレインゲージを円周方向に張りつけて、内圧4 kg/cm²を負荷した場合に発生するストレイン量を測定し、測定位置（ストレインゲージの接着位置）における曲率半径との関係について検討を行った。なお曲率半径はコンパスを用いて測定位置（円筒内表面）を中心に周囲10 mm程度にわたる接円を描くことにより求めた。

次に同様の検討を前記(12)式及び(14)式を用いて、理論計算を行った。まず内圧4 kg/cm²負荷時に、A点

Fig. 7. Relationship between calculated total strains and internal radii of oval cross-sections.

- 1) Internal pressure, 4 kg/cm²
- 2) Values in the graph show wall thicknesses

Fig. 8. Comparison between measured strains and calculated ones.

Line in the graph shows calculated strain at 4.3 mm wall thickness.

Fig. 9. Strain distribution at an oval cross-section of a sample bottle at the internal pressure of 4 kg/cm².

Solid line : Measured value
Broken line : Calculated value

(図2参照)に発生するストレイン量と曲率半径の関係を肉厚 3.0~5.5 mm の範囲にわたって求めてみると、図7に示すような曲線群が得られた。一方ストレインゲージによる実測値を図8に示す。図8から明かなように試料びん 10 本の平均肉厚 4.3 mm に対応する曲線(計算値)と実測値の間にはかなりよい一致が得られた。なお実測値のばらつきの原因はそれぞれの測定位置における肉厚の違いによるものと考えられる。

次に極端に偏肉状でありかつ楕円度を有する複雑な内径からなる試料びんの円筒部(図9参照)について、曲率半径に基づく計算値とストレインゲージによる実測値について比較検討を行った。その結果を図9に示す。図9から明かなように計算値は実測値とかなり合っていると考えられるが、実測値とのずれの原因としては、肉厚、偏肉程度、曲率半径等が円筒部の全域にわたって同一でない点(特に偏肉びんにおいて)が考えられる。ところでこの計算値はA点(図2における長径部)を対象とし、曲率半径を b^2/a で表示したが、図8から明かなようにA点以外の楕円弧上の任意の点においても成立すると考えてよい。

4.3 楕円度とびん強度の関係

(i) 楕円度と耐内圧強度及び耐熱圧強度の関係

楕円度がそれぞれ異なる試料びん 80 本について、AGR ラインシミュレーターにより 30 min 外表面を加傷処理して表面傷を一樣に生成させた状態で耐内圧強度及び耐熱強度(びん内圧は一律に 8 kg/cm²)を測定した。その結果を図10及び図11に示す。びん強度はいずれも楕円度の増加とともに低下する傾向が認められた。この傾向は Lehnert⁽¹¹⁾の実験結果とよく一致した。なお図

Fig. 10. Relationship between ellipticity and the internal pressure and thermal shock strength of sample bottles.

Internal pressure, 8 kg/cm²

Fig. 11. Relationship between ellipticity and the bursting strength of sample bottles.

Bursting strength shows the internal pressure of 1 min duration^{(7),(8)}.

10及び図11のデータ(実測値)のばらつきが大きい原因としては、主として破壊起点における肉厚の違いによるものと考えられる。

(ii) 楕円度と破壊オリジンの関係

前記(i)の耐内圧強度試験において、試料びんの破壊時におけるオリジン(破壊の出発点)と楕円度との関係を調べた。その結果を表2に示す。破壊オリジンは表面傷が生成している円筒部外表面(びん底より 140 mm 高さの位置)に集中した。表2から明かなように楕円度が約 1.5% 以上の場合では、破壊オリジンはほとんど短径部(円筒部内表面の曲率半径が最大である位置に対応)に集中していた。したがって肉厚が 3.0~4.5 mm 程度に分布しているガラスびんにおいては、破壊オリジンは

Table 2. Relationship between ellipticity and the location of fracture origin of sample bottles.

Ellipticity (%)	Sample number	Probability of the location of fracture origin*
0 - 1.3	10	70 (%)
1.3 - 2.7	10	90
2.7 - 4.0	10	100
4.0 - 5.3	10	100
5.3 - 6.7	10	100
6.7 - 8.0	10	100

(Note) *The location means external surface of the minor axial part.

楕円度に大きく依存していることは明らかであり、びんの楕円形状が分っていれば破壊オリジンをあらかじめ推定することが可能といえる。

5. 総 括

我が国において、広く使用されているガラスびん（胴径 75 mm, 肉厚約 4 mm, 内容積 658 cm³）を試料として、びん円筒部における楕円度が内圧負荷時に円周方向に発生する応力に及ぼす影響について検討を行い、以下のような知見を得た。

（1）楕円円筒において内圧負荷時に発生する応力を Schmidt の方法に従って、弾性力学的な計算を行い、この計算式を試料びん円筒部に適用したところ、ストレインゲージによる実測値とかなりよい一致が認められた。

（2）びん円筒部の任意位置における肉厚及び曲率半径が分れば、内圧負荷時に発生するストレインを推定し得る計算方法を検討し、偏肉を伴ったかなり複雑な形状のびん円筒部についても、実測値と比較的よく一致することを確認した。

（3）試料びんの耐内圧強度は円筒部の楕円度の増加とともに低下した。また楕円度が約 1.5% 以上では破壊時の割れの出発点は円筒部外表面の短径部（曲率半径の最も大きい位置に対応）に集中することが分った。

文 献

- 1) K. Schmidt, *VDI-Zeitschrift*, 98, 121-24 (1956).
- 2) A. O. Houghan, *Glass Technol.*, 1, 85-93 (1960).
- 3) 横倉修一, 窯協, 91, 429-36 (1983).
- 4) J. M. Teague and H. H. Blau, *J. Am. Ceram. Soc.*, 39, 229-38 (1956).
- 5) S. M. Budd and W. P. Cornelius, *Glass Technol.*, 17, 54-59 (1976).
- 6) S. M. Budd and W. P. Cornelius, *Glass Technol.*, 20, 170-73 (1979).
- 7) K. H. Borchard, *VDI-Zeitschrift*, 82, 1461-63 (1938).
- 8) J. J. S. Lomax, *Glass Technol.*, 24, 27-33 (1983).
- 9) シモチェンコ・ギアー著, “弾性安定の理論”, プレイン図書出版 (1980) p. 263-67.
- 10) 機械設計便覧編集委員会編, “機械設計便覧” (1981) p. 58-59.
- 11) L. H. Lehnert, *Glastechn. Ber.*, 28, 380-83 (1955).