論文・Paper

ガラスびんの耐衝撃強度

横倉修一

(麒麟麦酒(株) 富田製罐工場)

ガラス円管及びびん試験体について、スチールボールによる落球衝撃を与え、試験体の内、外表面に発生するひずみ(円周方向)分布をストレインゲージにより測定し、スチールボールの衝撃エネルギー、試験体の肉厚並びに発生したひずみ量の関係を定量的に検討し、それと並行して試験体と同じく点荷重(静荷重)を加えた場合に発生するひずみ分布との比較検討を行った。

また市場で7~10年間使用されたびんを試験体として、表面傷が集中的に発生している円筒部(外表面)に同様の落球衝撃を与えて破壊実験を行った。

これらの実験から以下のような知見が得られた。

1. 衝撃時に発生するひずみ分布

i) 試験体内表面の場合

発生した引っ張りひずみは衝撃点直下で最大を示し、それから離れるにつれて急激に減少した。またその最大値と衝撃エネルギーの間には両対数で直線関係が認められた。

ii) 試験体外表面の場合

発生した引っ張りひずみは試験体の肉厚に応じて、衝撃点から円周方向に 30° ~ 60° (ずれ角度)離れた位置に最大値が認められ、本試料びん(肉厚、約4 mm)の場合では衝撃点からのずれ角度 50° 近傍に引っ張りひずみのピークが認められ、外部衝撃による典型的なびんの破壊パターンである“ヒンジ割れ”(Hinge fracture)の場合の破壊起点とよく一致した。

2. 試験びんの耐衝撃強度

スチールボールの質量、衝撃速度並びに衝撃エネルギーとびんの耐衝撃強度の関係について検討を行った結果、①式のような関係式が得られた。

$$m \cdot V^{2.54} = C \quad \text{①}$$

(ここで、 m :スチールボールの質量、 V :衝撃速度、 C :定数である。)

また衝撃の負荷速度とびんの破壊強度の関係につき検討を行い、Charles, Evans らにより導かれた②式から、疲労定数、 $n \approx 18$ が得られた。

$$\sigma = \beta \cdot \dot{\sigma}^{\frac{1}{n+1}} \quad \text{②}$$

(ここで、 σ :破壊応力、 $\dot{\sigma}$:荷重の負荷速度、 β :定数、 n :疲労定数である。)

(1983年10月3日受付)

Impact Strength of Glass Containers

Shuichi YOKOKURA

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

Characteristics of impact strength of glass containers were investigated, by measuring the extent and distributions of flexure and hinge strains on the surface of glass cylinders and abused sample bottles at the moment of impact by ball-drop testing. The results obtained are summarized as follows:

1) Strain distributions which develop on impact: In the case of flexure strain, a linear relationship was found between impact energy and circumferential flexure strain on the internal surface just under the impact point in logarithmical unit. In the case of hinge strain, the position, where the circumferential hinge strain on the external surface was peaked, was dependent on

the thickness of the cylindrical sidewall. For instance, at the thickness of ca. 4 mm, the circumferential hinge strain was found to be peaked at ca. 50° round the bottle from the impact point.

2) Fracture strength of bottles : The relationship between mass and impact velocity of a steel ball at the moment of bottle breakage was investigated, and the following formula was obtained:

$$m \cdot V^{2.54} = C$$

where, m : mass of a steel ball, V : impact velocity, C : constant.

Further, the elasto-mechanical characteristics of this test were compared with that of a static load test.

[Received October 3, 1983]

Key-words : Glass, Bottle, Impact, Strength, Ball-drop test, Strain, Stress

1. 緒 言

リターナブルびん（回収、再使用可能）の強度特性については、従来から業界で内圧試験、熱衝撃試験等が中心に検討され実施されているが、実際に市場でびんが破損する主な原因は何らかの外部からの衝撃が加わった場合が圧倒的に多く、内圧あるいは熱衝撃が直接的な原因となることは必ずしも多くない。ところでこの衝撃に関する研究は、その大半が断片的な検討に終わっている観があり、びんの耐衝撃強度に関する総合的な研究は行われなかった^{1)~8)}。

そこで本研究においては試験体としてガラスびん及びガラス円管（形状を単純化する理由から）の2種類を用い、衝撃に関する基本的な検討をした。

まず衝撃体として、スチールボールを選び、その自然落下により試験体に衝撃を加え、試験体の内、外表面に発生するひずみをストレインゲージにより測定した。それと並行して試験体に点荷重（静荷重）を加えて同様の測定を行い、動的並びに静的荷重負荷に関する比較検討を行った。

ところでびんが衝撃により破壊する場合は落下、転倒等により硬い床面に衝突するなどのケースが多いと考えられるが、破壊の起点を調査してみると、びんの特定の位置（表面傷が集中的に発生している円筒部、外表面）に集中していることが分る。また破壊パターンをみると“ヒンジ割れ”（衝撃点からびんの円周方向に沿って40°~60°程度離れた外表面のヒンジ（Hinge）部で引っ張りひずみが最大を示す位置に破壊起点が発生することを特徴とする破壊パターン）^{2), 9), 10)~12)}がその大半を占めており、その破壊状態を観察すると、破壊起点からの割れ目が上下方向に進展しているケースが圧倒的に多い。また衝撃時に発生する引っ張りひずみ量をみると、円周方向の方が垂直方向よりも明らかに大きいため^{11), 12)}、本研究においては円周方向に発生するひずみに限定して検討することにした。

またガラス円管については市場に出回っているガラスびんの肉厚がワンウェイ（1回使用后、廃棄）、リターナブルを含めて2~5 mm程度が大半を占めているため、肉厚として1.6~6.8 mmの範囲に限定した。外径につ

いては70~80 mmのびんが圧倒的に多いため、今回は75 mmを中心に検討することにした。

2. 実験方法

2.1 ガラス試験体の概要

ガラス試験体としては円管及びびんを用いた。円管としては両端開きで、管長400 mm、外径33~75 mm、肉厚1.6~6.8 mmの範囲とし、落球時の衝撃点の位置は円管中央部とした。試料びんとしては我が国で、広く使用されているびん種を選んだ。びん形状を図1に示す。またびんの諸元は以下のとおりである。重量575 g、内容量658 cm³、高さ289 mm、胴径75 mm、肉厚、約4 mm。この試料びんは市場で7~10年間使用したものに限定した。その理由としては表面傷が一樣に発生しており、強度のばらつきが比較的小さく、安定しているためである¹³⁾。落球時の衝撃点は表面傷が集中的に発生している円筒部（びん底より140 mm高さの位置）とした。なおガラス円管並びに試料びんの化学組成を表1に示す。

2.2 試験方法

(i) 落球衝撃の場合

球径の異なるスチールボールを一律に高さ100 mmより鉄製台座上に水平に置かれたガラス試験体の所定位置へ自然落下させて点衝撃を与え、試験体の内、外表面に

Fig. 1. Schematic illustration of a test bottle.

- 1) Inner volume : 658 cm³, Weight : 575 g
- 2) The two oblique areas illustrated incur heavy abrasion (Wall thickness, ca. 4 mm).

Table 1. Chemical compositions (wt %) of a glass cylinder and a bottle.

Composition	Cylinder	Bottle
SiO ₂	71.2	70.6
B ₂ O ₃	9.4	
Al ₂ O ₃	1.4	2.0
K ₂ O		1.2
Na ₂ O	8.7	14.7
CaO	2.5	9.6
MgO	3.3	1.7
ZnO	3.1	
BaO		0.06
MnO		0.12
Fe ₂ O ₃		0.17
TiO ₂		0.07
SO ₃		0.09

Fig. 2. Schematic diagram of a ball-drop test.

発生するひずみ(円周方向)を衝撃点から円周方向に沿って測定した(図2参照)。なおひずみの測定はストレインゲージ(共和電業社製, KFC-03-C1-11, ゲージ抵抗 120 Ω, ゲージ・ファクター 2.0, ゲージ長さ 0.3 mm)を用い, 動ひずみ計(共和電業社製, CDV-110 A)から, トランジェント・メモリ(岩崎通信機社製, SS-5025 型)を通し, オシロスコープに振動波形を出した。衝撃直後に試験体に発生する振動波の最大振幅を求めた。

(ii) 点荷重の場合

材料試験機(島津製作所製, IS-5000)を用いて, 鉄製台座上に水平に置かれたガラス試験体の所定位置にスチールボールを介して点荷重を加え, 発生する円周方向のひずみを同様にストレインゲージを用いて, 荷重点から円周方向に沿って測定した¹⁴⁾。

3. 結果並びに考察

3.1 衝撃時及び静的点荷重時に発生するひずみ分布

(i) 円管の内表面の場合

ガラス円管として肉厚の異なる3種類(肉厚 2.2 mm, 4.3 mm 及び 6.8 mm, 外径を一律に 75 mm)につき, 球径の異なるスチールボールを一律に高さ 100 mm より

Fig. 3. Strain distributions developed on the internal surfaces of test cylinders at impact tests.

	Wall thickness	Weight of steel ball	Fall height
○—○	2.2 mm	2.07 g	100 mm
△—△	4.5 mm	4.10 g	100 mm
□—□	6.5 mm	13.70 g	100 mm

Fig. 4. Strain distributions developed on the internal surfaces of test cylinders at static load tests.

- 1) Wall thickness : ○—○ 2.3 mm, △—△ 4.1 mm, □—□ 4.8 mm
- 2) The value of a load, 10 kg

自然落下させ, 発生したひずみを衝撃点直下より円周方向に沿って, ずれ角度(衝撃点からずれた角度) 90°の範囲にわたり測定した。測定例を図3に示す。図3から明らかなように円管内表面に発生したひずみは衝撃点直下が最大であり, それからずれるに従って急激に低下し, ずれ角度 10°~15° 近傍でひずみは引っ張りから圧縮へと変わった。ずれ角度 15° 以降の圧縮ひずみ領域ではずれ角度 20°~40° の近傍にひずみのピークが認められた。

一方点荷重の場合では図4から明らかなように, 圧縮ひずみ領域では明確なピークは認められず, 点衝撃の場合とはかなり異なったひずみ分布を呈した。

次に衝撃点直下に発生した引っ張りひずみ量(最大値)と落球による衝撃エネルギーの関係を検討してみると, 図5から明らかなように両対数で直線関係が認められた。

一方静的点荷重の場合では図6から明らかなように,

Fig. 5. Relationship between impact energy and maximum tensile strain developed on the internal surface of test cylinders.

*The values in the graph show wall thickness.

Fig. 6. Relationship between a load and the maximum tensile hinge strain developed at the external surface of a test cylinder.

* Angle from a loading point

Wall thickness : 4.5 mm

荷重量と荷重点直下に発生した引っ張りひずみ量（最大値）の間には直線関係が認められた。

(ii) 円管の外表面の場合

ガラス円管として肉厚の異なる4種類（肉厚1.6 mm, 1.9 mm, 4.3 mm 及び 6.7 mm, 外径は一律に75 mm）につき、球径の異なるスチールボールを一律に高さ100 mmより自然落下させて、発生するひずみ量を衝撃点より円周方向に沿って、ずれ角度90°の範囲にわたって測定し、引っ張りひずみがピークを示すヒンジ部^{10)~12)}の位置について検討を行った。その結果を図7に示す。図7から明らかなようにひずみ量が最大を示す位置（ずれ角度）は円管の肉厚に依存しており、肉厚の増加とともにずれ角度が30°近傍から60°近傍へと移行する傾向が認められた。したがってびんに“ヒンジ割れ”が発生し

Fig. 7. Distribution of tensile strain developed on the external surface of test cylinders at ball-drop tests.

Wall thickness : ◇—◇ 1.6 mm, ○—○ 1.9 mm, □—□ 4.3 mm, △—△ 6.7 mm

Fig. 8. Strain distributions developed on the external surface of test cylinders at the static load test.

- 1) Wall thickness : ○—○ 1.5 mm, □—□ 2.3 mm, △—△ 4.1 mm, ◇—◇ 6.8 mm.
- 2) The value of a static load : 10 kg

Fig. 9. Relationship between impact energy and maximum tensile strain developed on the outer surface of test cylinders at the impact test.

1) * The values show wall thickness

2) Fall height of steel balls : 100 mm

た場合の破壊起点の位置は一定でなく、びん円筒部の肉厚に依存すると考えてよい。

また発生した引っ張りひずみの最大値と衝撃エネルギーの関係を見ると、図9から明らかなように両対数で直線関係が認められた。

Fig. 10. Relationship between impact energy and tensile strain developed on the surface of a test bottle at the impact test.

- 1) Wall thickness, 4.3 mm
- 2) Impact point : Cylindrical part, 140 mm high from the bottom
- 3) Fall height of steel balls : 100 mm

一方静的点荷重の場合では図8に示すように、引っ張りひずみが最大を示すヒンジ部の位置は明確には認められず、また肉厚にほとんど関係なく、ずれ角度 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 近傍になだらかなピークが認められ、点衝撃の場合とはかなり異なった傾向が認められた。

(Ⅲ) 試料びんの場合

試料びんを鉄製台座上に水平に置き、びん底より140 mm高さの円筒部に落球衝撃を与え、衝撃点直下の内表面及び衝撃点より円周方向にずれ角度 50° の外表面(引っ張りひずみが最大を示す位置)に発生したひずみ量を測定した。

測定結果を図10に示す。図10から明らかなように内表面(衝撃点直下)に発生した引っ張りひずみ量はガラス円管の場合とほとんど同じ値を示したが、一方外表面に発生した引っ張りひずみ量はガラス円管に比べて若干低い傾向が認められた。この原因はびん首部及び底部の端末条件の影響と考えられる。

3.2 試料びんの破壊実験

(Ⅰ) 衝撃エネルギーとびん強度の関係

市場で7~10年間使用され、表面傷が多数発生している試料びんについて、落球衝撃による破壊実験を行った。試料びんを鉄製の台座上に水平に置き、びん底から140 mmの高さにある円筒部で表面傷が集中的に発生しており、破壊起点となりやすい位置(図1参照)を対象として、所定重量のスチールボールを自然落下させて衝撃を与え、落下高さを段階的に上昇させていくプログレッシブ法による破壊実験を行った。実験結果を図11に示す。またびん破壊時のスチールボールの質量と衝撃速度の関係を図12に示す。図12から明らかなように本実験におけるスチールボールの質量及び衝撃速度の範囲においては両対数で直線関係が認められ、以下のような実験式成立した。

Fig. 11. Relationship between impact energy and the weight of steel balls at the bottle breakage.

Fig. 12. Relationship between the speed of dropping and the weight of steel balls at the bottle breakage.

Fig. 13. Schematic illustration of a hinge breakage of test bottles.

$$m \cdot V^{2.54} = C \quad (1)$$

ここで、 m :スチールボールの質量、 V :衝撃時の落球速度(m/s)。

したがって落球衝撃によるびんの破壊は単に衝撃エネルギー量だけでは一律に把握し得ないことが分った。

(Ⅱ) 衝撃速度とびん強度の関係

落球衝撃による試料びんの破壊状態を観察すると、図13に示すような特徴的な破壊パターンが一様に認められ、破壊起点はヒンジ・ストレインが最大となる外表面(衝撃点より円周方向に沿って $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ずれた位置)にほぼ一致した⁹⁾。そこで試料びん破壊時のヒンジ・ストレイン量について検討を行った。まず本実験における

スチールボールの落下高さは一律に 100 mm に設定しており、それに対応する落球速度、 $V=1.4$ m/s におけるスチールボール質量、 m は図 12 から 500 g が読み取れる。したがって衝撃エネルギーは約 0.49 Joule ($=\frac{1}{2}m \cdot V^2$) である。したがってびん外表面のヒンジ部に発生する最大引っ張りひずみ量は図 10 から約 550×10^{-6} が読み取れる。

次にスチールボールが試料びんに衝突し、衝撃エネルギーを伝達する時間（本報告では仮に衝撃持続時間と呼ぶことにする）については柴田ら⁸⁾の研究報告があり、それによれば、まず衝撃点直下の内表面の場合に衝撃持続時間とスチールボール質量の関係は図 14 から明らかなように両対数で直線関係が認められており、また外表面（引っ張りひずみが最大となるヒンジ位置）の場合では、衝撃持続時間は内表面直下の場合に比べて若干短い、同じくスチールボール質量との間に両対数で直線関係が認められており²¹⁾、この関係を用いてスチールボール 500 g に対応する衝撃持続時間を求めると約 310 μ s、が得られた。この値から衝撃時のヒンジ・ストレインの上昇速度を計算すると、 $550 \times 10^{-6} / \frac{310 \times 10^{-6}}{2} \div 3.5$ (s^{-1}) が得られる。この結果を前報¹⁴⁾で報告した（荷重速度-びん強度）関係図にプロットしてみると、図 15 か

Fig. 14. Relationship between duration of strain developed on the internal surface of a test bottle and the weight of steel balls at an impact test.

- 1) These data were cited from Shibata's report⁸⁾
- 2) Duration of strain is illustrated in the following figure

ら明らかなようにほぼ直線上に乗ることが分り、Charles¹⁵⁾、Evans¹⁶⁾らによって導かれた(2)式から $n \div 18$ なる値が得られ、Ritter ら¹⁷⁾、Chandan ら¹⁸⁾のソーダ・石灰ガラスにおける実験結果とほぼ一致した。

$$\sigma = \beta \cdot \dot{\sigma}^{\frac{1}{n+1}} \quad (2)$$

ここで、 σ :破壊応力、 $\dot{\sigma}$:応力の負荷速度、 β :定数、 n :疲労定数。

(ii) びんの内、外表面傷の深さと破壊起点の関係

落球衝撃により破壊起点となったびん円筒部（びん底から 140 mm 高さの位置）の外表面に発生している表面傷の最大深さを横倉ら¹⁹⁾の方法により測定してみると、約 0.6~0.7 mm に分布していることが分った。

そこでいま表面傷の深さと、それを破壊起点とする破壊応力の関係につき破壊力学的に検討してみる。まず限界応力拡大係数、 K_{Ic} は以下のように表される。

$$\text{外表面の場合, } K_{Ic} = \sigma_0 \sqrt{\pi \cdot C_0} \cdot Y_0 \quad (3)$$

$$\text{内表面の場合, } K_{Ic} = \sigma_1 \sqrt{\pi \cdot C_i} \cdot Y_i \quad (4)$$

ここで σ :破壊応力、 C :表面傷の深さ、 Y :クラックに関する形状係数。

ところで Y は点荷重、点衝撃ともに曲げ応力に関する形状係数と考えてよいから、以下の式で示される²⁰⁾。

$$Y = 1.122 - 140\xi + 7.33\xi^2 - 13.08\xi^3 + 14.0\xi^4 \quad (5)$$

ここで $\xi = C/W$ (W :びんの肉厚)

いま $C_0 = 0.7$ mm とすると、 $W = 4$ mm であるから、外表面の場合は $\xi = 0.7/4$ 、したがって $Y_0 \div 1.04$ となる。

一方内表面の場合は $C_i \ll C_0$ と考えられるから、したがって $Y_i \div 1.12$ と考えてよい。

そこでびん破壊時の衝撃エネルギー 0.49 Joule におけるびんの内、外表面に発生する引っ張りひずみ量は図 10 から 6600×10^{-6} 及び 550×10^{-6} と推定されるから、発生する引っ張り応力は以下のように示される。

$$\sigma_0 = 550 \times 10^{-6} \cdot E \quad (E: \text{ヤング率})$$

$$\sigma_1 = 6600 \times 10^{-6} \cdot E$$

ところで衝撃時にもし内、外表面が同時に破壊起点になるとすれば、内表面傷の深さ C_i は(3)式、及び(4)

Fig. 15. Relationship between a strain rate and a strain value at the bottle breakage.

*Fall height of a steel ball: 100 mm

式から以下のように示される.

$$C_i = C_0 \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_i} \right)^2 \cdot \left(\frac{Y_0}{Y_i} \right)^2 \quad (6)$$

これまでに得られた数値を(6)式に代入し, C_i を求めれば, $C_i = 6 \times 10^{-3}$ mm なる値が得られた. したがって内表面傷の深さが 6μ 以上であれば, びんの破壊は“ヒンジ割れ”ではなく, 内表面が破壊起点となる“たわみ割れ”(Flexure breakage)になると考えられる.

4. 総 括

ガラス円管及びびん(市場で7~10年間使用された)を試験体としてスチールボールによる落球衝撃試験を行い, 試験体に発生するひずみ分布をストレインゲージを用いて測定し, それと並行して試験体に点荷重を加えた場合のひずみ分布との比較検討を行った.

その結果, 試験体内表面に発生した引っ張りひずみの最大値と衝撃エネルギーの間にはそれぞれ両対数で直線関係が認められた. また衝撃時に外表面に発生する引っ張りひずみが最大を示す位置(ヒンジ部)はずれ角度は一定ではなく, 肉厚に依存することが分った.

次に落球によるびんの破壊実験を行い, スチールボールの質量, 落球速度, 衝撃エネルギー, 衝撃持続時間等とびんの耐衝撃強度の関係につき検討を行った.

その結果, びんの破壊は単に衝撃エネルギー量だけでは一律に把握し得ず, 本実験条件の範囲においては, $m \cdot V^{2.54} = C$ (m : スチールボールの質量, V : 落球速度,

C : 定数) なる関係が得られた. また衝撃の負荷速度と耐衝撃強度の関係について Charles や Evans らにより導かれた式を採用した. 疲労定数, n を計算して, $n \approx 18$ が得られた.

文 献

- 1) R. N. Haward, *J. Soc. Glass Technol.*, **28**, 5-31 (1944).
- 2) 中山 淳, 旭硝子研究報告, **8**, 65-81 (1958).
- 3) Y. M. Tsai and H. Kolsky, *J. Mech. Solids*, **15**, 263-78 (1967).
- 4) E. B. Shand, *Ceramic Bulletin*, **47**, 1157-65 (1968).
- 5) G. Schönbrunn, *Glastechn. Ber.*, **46**, 49-58 (1973).
- 6) R. E. Berger, *Am. J. Optom and Physiol Optics*, **53**, 279-86 (1976).
- 7) W. H. Duckworth and A. R. Rosenfield, *Am. J. Optom and Physiol Optics*, **55**, 801-06 (1978).
- 8) M. Shibata and H. Itami, *Rept. Res. Lab. Kirin Brewery Co. Ltd.*, **21**, 1-9 (1978).
- 9) 横倉修一, 白倉 昌, 材料科学, **19**, 323-29 (1983).
- 10) R. E. Mould, *J. Am. Ceram. Soc.*, **35**, 230-35 (1952).
- 11) S. M. Budd and W. P. Cornelius, *Glass Technol.*, **17**, 54-59 (1976).
- 12) S. M. Budd and W. P. Cornelius, *Glass Technol.*, **20**, 170-73 (1979).
- 13) 横倉修一, 窯業, **91**, 429-36 (1983).
- 14) 横倉修一, 岡田 稔, 窯協, **92**, 360-65 (1984).
- 15) R. J. Charles, *J. Appl. Phys.*, **29**, 1657-62 (1958).
- 16) A. G. Evans, *Int. J. Fracture*, **10**, 251-59 (1974).
- 17) J. E. Ritter and C. L. Sherburne, *J. Am. Ceram. Soc.*, **54**, 601-05 (1971).
- 18) H. C. Chandan, R. C. Bradt and G. E. Rindone, *J. Am. Ceram. Soc.*, **61**, 207-13 (1978).
- 19) 横倉修一, 吉田明輝, 窯協, **91**, 196-97 (1983).
- 20) 岡村弘之, “線形破壊力学入門”, 培風館 (1980) p. 217-18.
- 21) 柴田正敏, 土田富士夫, 麒麟紀要 (未公開).