

## 耐圧ペットボトルの構造挙動と 耐圧強度に関する一検討

### A Study on Structural Behavior and Strength of Pressure PET Bottle under Internal Pressure

岡山県立大学情報工学部

福田 忠生 (Tadao FUKUTA)

尾崎 公一 (Koichi OZAKI)

NOK

山部 匡央 (Tadahisa YAMABE)

ムトーテクノ

飯坂 元哉 (Motoya Iisaka)

(元)岡山県立大学情報工学部

早川 悌二 (Teiji HAYAKAWA)

The structural behaviors and strength of actual pressure PET bottle have been investigated, mainly by experimental measurements under internal pressure. First, tensile tests of PET resin material for PET bottle were carried out in order to obtain the fundamental tensile properties and the stress-strain diagram. Then, the mechanical behaviors of PET bottle were found by strain measurements under internal pressures. Finally, burst tests were conducted for 21 PET bottles. In the present burst tests, resulted magnitudes of burst pressures were not so much scattered, within the range of 1.9~2.3 MPa. Fractured shapes of bottles by bursting would be categorized in three kinds of I, L, X types.

For trial, burst pressure evaluation for the bottle were made by applying the theoretical analysis of N. L. Svensson. The calculated bursting pressure and radial deflection were numerically near the experimental values. However, in further investigation for more rigorous solutions, the following items are to be studied: (1) The material properties including stress-strain diagram for the actual bi-axially oriented PET bottle itself formed by blow molding, not only PET resin material. (2) The development of analytical approach for large deformation to the range of bursting.

Key Words: PET Resin, Pressure PET Bottle, Burst Pressure, Experimental Measurements, Internal Pressure

## 1. まえがき

PET (Poly Ethylen Terephthalate) ボトルのうち、耐圧ボトルは耐圧性に優れ、加工しやすく、リサイクル性の高い容器として広く使用されている。しかしながら、PET ボトルの成分等に関する規格などは整備されているが、PET ボトルの耐圧強度に関する規格は明文化されておらず、PET 成形メーカーにより個別に設計し製造されているのが現状である。近年、PET ボトルの破裂事例が国民生活センターや消防庁などから報告されている<sup>1),2)</sup>。PET ボトルの劣化や遊び目的の用途外使用など状況は多様であるが、いずれも内圧の過圧が破裂の原因となっている。これらの問題に関連して、PET を含めたエンジニアリングプラスチック材料に関する研究やボトル製造法に関する報告は従来から発表<sup>3),4)</sup>などされているものの、ボトル現物に対する構造挙動や強度に関する報告は著者らの知る限りほとんど見当たらないようである。本検討では、500ml 実物ボトルを対象に、耐圧PET ボトルの耐圧強度について、主として実験により検討を行った。PET 樹脂の引張特性試験およびPET ボトルの内圧負荷実験を行って内圧負荷時の構造挙動を調べるとともに破裂圧力を測定した。併せて、N L Svenssonの破裂解析<sup>5)</sup>を適用して破裂強度の検討を試みた。

## 2. PET 樹脂の引張特性

### 2.1 引張試験

試験片は耐圧ボトルのブロー成形用樹脂を射出成形により作製した。試験片は Fig. 1 に示すように JIS K 7162<sup>6)</sup> のダンベル型試験片 1B (板厚 3.2mm) に準拠している。高分子材料用

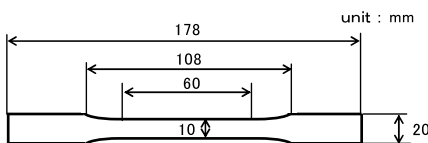
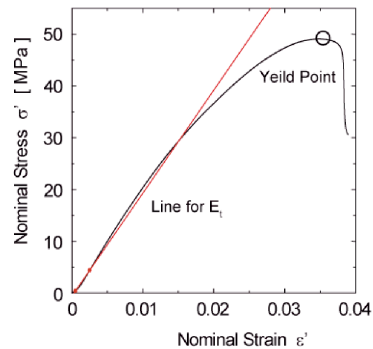


Fig. 1 Tensile test specimen

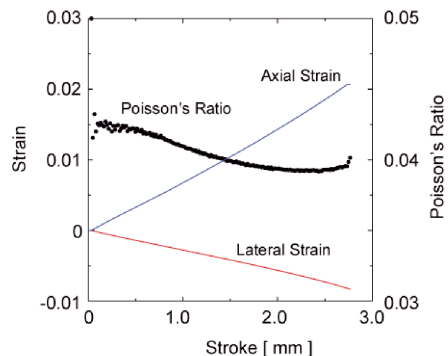
万能材料試験機を使用し JIS K 7161<sup>7)</sup> の試験方法にしたがって引張特性試験を行った。引張速度は基本的な引張特性の測定では 1mm/min とし、破断までの応力 - ひずみ特性の計測では 5mm/min とした。

### 2.2 引張試験結果

基本的特性値は、Fig. 2 に示す計測データを用いて文献<sup>7)</sup>の規定に従って決定し、引張弾性率  $E_t = 1990\text{MPa}$ 、ポアソン比  $\mu = 0.4$ 、引張降伏応力  $\sigma_y = 49.1\text{MPa}$ 、引張降伏ひずみ  $\epsilon_y = 0.036$  であった。破断までの公称応力 - 公称 (呼び) ひずみ線図を Fig. 3(a) に示す。また、この線図に対応した試験片の形状変化を模式的に Fig. 3(b)

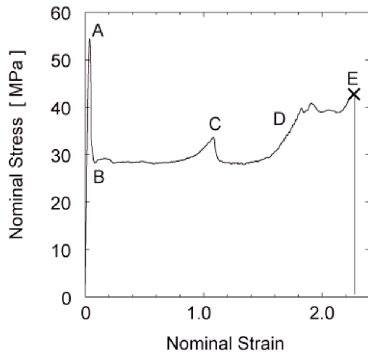


(a) for modulus of elasticity and yield stress



(b) for Poisson's ratio

Fig. 2 Determination of tensile properties



(a) Nominal stress - nominal strain curve

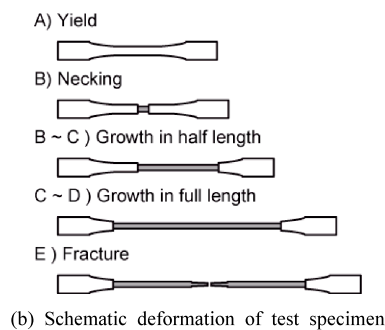


Fig. 3 Result of tensile test

に示した。破断時のひずみは  $\epsilon_B = 2.27$  であった。

### 3. 内圧負荷実験による変形挙動と破裂圧力

内圧負荷実験装置を Fig. 4 に示す。圧力センサーで内圧を計測しながら手動の水圧ポンプによりテストタンク内に取り付けた供試ボトルに内圧を负荷した。

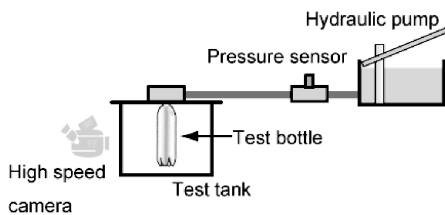
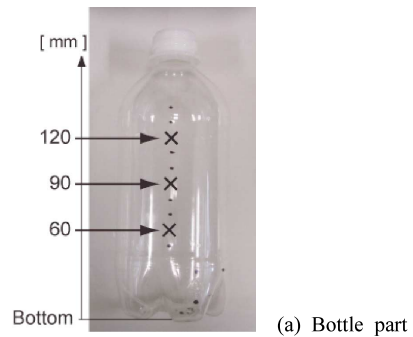


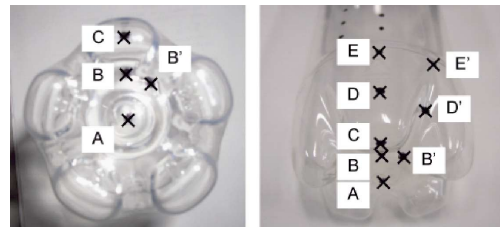
Fig. 4 Test equipment

### 3.1 供試ボトル

供試ボトルは市販の 500ml 炭酸飲料用耐圧 PET ボトルで、Fig. 5(a)に示すように円筒部とペタロイド（花びら）形状の底部から成り、二軸延伸ブロー成形によって作られたものである。Fig. 5(b)に耐圧ボトルに特有なペタロイド形状の底部詳細を示す。寸法計測の結果、円筒部はボトル底面から 50~140mm の範囲で、平均内径 64 mm、平均肉厚 0.35mm であった。ペタロイド部の肉厚は全体的に円筒部よりも厚く、平均肉厚は、A、B、B'部で 2.5mm、他の部分で 0.5mm であった。



(a) Bottle part



(b) Petaloid part

Fig. 5 Tested PET Bottle

### 3.2 ひずみ計測実験

円筒部の下面から 60, 90, 120mm の 3ヶ所とペタロイド部 8ヶ所に弾性 2軸ひずみゲージを貼付して内圧 0.4MPa までのひずみを計測した。ゲージの貼付位置を Fig. 5(a), (b)に併記して示す。測定結果を円筒部について Fig. 6 に、ペタロイド部について Fig. 7(a), (b)に示す。この圧

力範囲では、各ひずみとも圧力にほぼ比例して増加している。Fig .6 から、円筒部では軸方向ひ

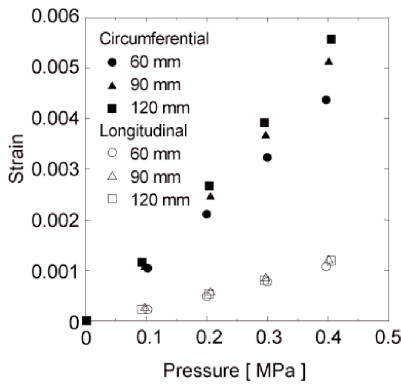
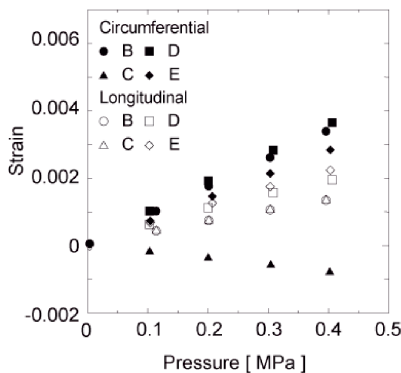
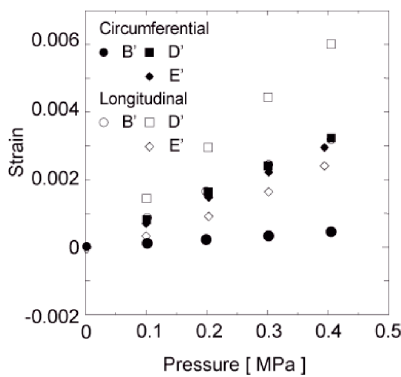


Fig .6 Measured strains in cylinder



(a) Mountain line



(b) Valley line

Fig .7 Measured strains in petaloid part

ずみは軸方向位置によらずほぼ一定値を示し、周方向ひずみは中間に近い90mmでの値が最大となっており半径方向の膨らみが太鼓状に分布することがうかがわれる。Fig .7の(a)はペタロイド部の山部分を、(b)は谷部分のひずみを示している。図から、周方向ひずみはB、B'点を除いて山と谷部分でほぼ同様の傾向にある。最下底のC点では圧力とともに減少傾向にある。なお、軸方向ひずみは谷部のD'点最大であるほかは同様の傾向にある。

### 3.3 破裂実験

破裂に至るまで加圧し、計21個の供試ボトルについて破裂実験を行った。実験時の水温は6~14であった。破裂時の圧力を読み取った結果を破裂形状ごとにまとめてTable 1に示す。本実験では破裂圧力 $P_B$ にばらつきは比較的少なく $P_B = 1.9 \sim 2.3$ MPaであった。破裂はすべて円筒部に生じ、破裂形状は、Fig .8(a), (b), (c)に示すようなI型、L型、X型に大別されるようである。I型は円筒の軸方向に直線に近い裂け目状を呈し、L型は軸方向の裂け目に加えて上部または下部に周方向の裂け目を呈するものであり、X型は爆裂に近い状況であった。これらの破裂形状を特定する因子は不確定であったが、I型が一番少なく、L型とX型はほぼ同数であり、いずれも破裂圧力は前述の1.9~2.3MPaであった。

Table 1 Burst pressures of tested bottles

| Fracture Types | Burst Pressures [MPa] |      |
|----------------|-----------------------|------|
| I-Type         | 1.89                  | 1.90 |
|                | 2.11                  |      |
|                |                       |      |
| L-Type         | 1.98                  | 1.98 |
|                | 2.07                  | 2.04 |
|                | 1.99                  | 2.08 |
|                | 1.99                  | 2.19 |
|                | 2.06                  | 2.11 |
|                |                       |      |
| X-Type         | 2.29                  | 2.00 |
|                | 2.29                  | 2.12 |
|                | 2.14                  | 1.94 |
|                | 2.00                  | 2.15 |
|                |                       |      |

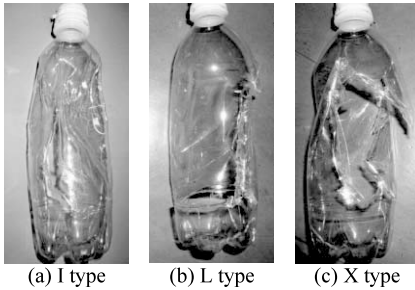


Fig. 8 Fractured types of bottles

### 3.4 高速ビデオカメラによる観察

加圧による変形状態と破裂時の様子を調べるために高速ビデオカメラを設置して観察を行った。加圧とともに円筒部が太鼓状に膨れてゆき、破裂直前に近い 2.0MPa 近傍で最大 10 数 mm 前後の半径方向変位が観察された。一例を Fig. 9 に示す。Fig. 10 に高速ビデオカメラの変形映像から求めた半径方向変位の概略観測値を示す。破裂形

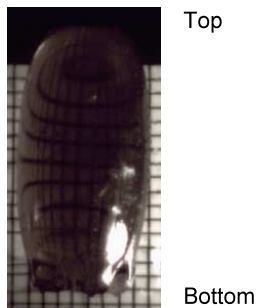
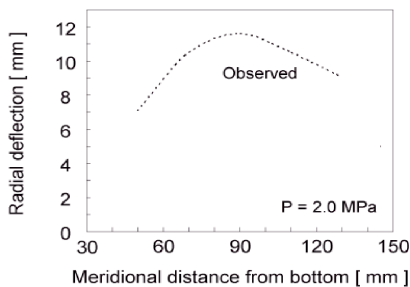
Fig. 9 Deformed cylinder ( $P \cong 2.0 \text{ MPa}$ )

Fig. 10 Radial deflection of cylinder

状によらず、加圧とともに細かいき裂がボトル表面に発生し、そのき裂が増大してついには破裂に至るといふメカニズムが観察された。I 型の場合は円筒に発生したき裂が軸方向に進展し、L 型では 2 箇所発生したき裂が 2 方向に進展して合体し、X 型では発生したき裂中心に拡散的に拡大して全体破裂に至るようである。

## 4. 破裂解析

金属製圧力容器の破裂解析のなかで、各種規格資料等で参照されている N. L. Svensson の解析<sup>5)</sup>を本 PET ボトルの破裂に適用してみた。

### 4.1 N. L. Svensson の解析

均質等方性かつ非圧縮性を仮定し、真応力 - 真ひずみ関係は  $n$  乗硬化特性で表示できるものとの前提の下に有限変形理論を適用して圧力と変形の関係式(1)を導出している。

$$P = \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{n+1} \frac{\sigma_0 t_i (\ln x)^n}{R_i x^2} \quad (1)$$

$$\text{ここに, } x = \frac{R}{R_i}$$

また、 $\sigma_0$  および  $n$  は  $n$  乗硬化式  $\sigma = \sigma_0 \epsilon^n$  における係数と指数、 $t_i$  および  $R_i$  はそれぞれ初期の肉厚、内半径、 $R$  は変形後の半径

破裂限界の条件は、圧力～変形曲線における最大圧力点とし、局部的な bulging を生じてき裂が発生するまで膨れが成長しついに破裂に至るものとしている。薄肉円筒の破裂圧力  $P^*$  として次式を与えている。

$$P^* = \sigma_0 \frac{t_i}{R_i} \left( \frac{n}{e} \right)^n \frac{2}{(\sqrt{3})^{n+1}} \quad (2)$$

ここに、 $e$  は自然対数の底

### 4.2 破裂圧力の試算

ボトル現物では二軸延伸ブロー成形による延伸効果によって、基本的物性値および応力 - ひずみ関係は PET 樹脂の引張試験データとはかなり異

なっていることが予想される。

ここで、 $n$ 乗硬化特性として、Fig. 2(a)における引張降伏応力  $\sigma_y$  近傍までの真応力  $\sigma$  と真ひずみ  $\varepsilon$  の関係を  $n$ 乗硬化式で表示した式(3)を用いて式(2)により破裂圧力を試算してみた。

$$\sigma = 667.9 \varepsilon^{0.7455} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

結果として、 $P = 2.14 \text{ MPa}$  となり、実験で得られた破裂圧力  $P_B = 1.9 \sim 2.3 \text{ MPa}$  に近い値が得られた。また、式(1)を用いて、半径変化比  $x$  に対する圧力  $P$  と半径方向変位  $\delta = R - R_i = (x - 1) R_i$  を計算することにより、圧力 - 半径方向変位を試算した結果を Fig. 11 に示した。最大圧力に対応する変位は十数 mm の範囲にあり、3.4 で述べた高速ビデオカメラによる観察変位の最大値に近いものであった。これらの実験結果にかなり近い値が得られたのは、成形後の PET ボトル現物の応力 - ひずみ特性では PET 樹脂試験片による引張試験結果とは異なって、本計算に試用した  $n$ 乗硬化特性をもつものに近い傾向を現出するためによるのではないかと推測される。

以上の試算は、金属材料を前提としている解析解に PET 樹脂の材料特性を試用してみた一つの計算結果であるが、結果から、PET ボトル現物の材料特性を得て適用することにより破裂圧力推定の可能性がうかがわれる。

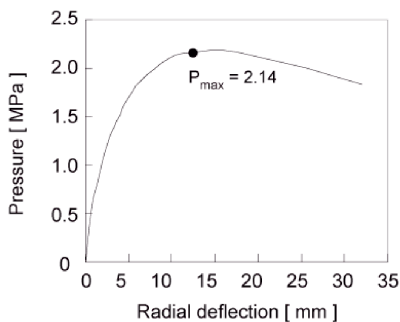


Fig. 11 Pressure vs radial deflection of cylinder (by Burst analysis)

## 5. まとめ

実用されている耐圧 PET ボトルについて内圧負荷実験を行い、円筒部およびペタロイド部を含む構造全体の力学的挙動を調べた。21 個の供試ボトルについて破裂圧力を測定した結果、 $P_B = 1.9 \sim 2.3 \text{ MPa}$  の破裂強度を有することがわかった。併せて、N. L. Svensson の理論的破裂解析の適用を試みた。今後の課題として、PET 樹脂を素材とする二軸延伸ブロー成形体に関する材料特性に基づく厳密な破裂現象の解析・検討と、ボトル成形体の過圧による破裂メカニズムおよび破裂原因の解明が重要と考えられる。

本検討が、耐圧 PET ボトルの強度および破裂事故防止に関する今後の研究の一助になれば幸いである。

## 謝辞

本実験研究を実施するに際して、設備の使用と技術的指導を賜った岡山県工業技術試験センターの方々に謝意を申し上げる。

## 参考文献

- 1) 独 国民生活センター報告書 2007 - 8 - 15 ([www.kokusen.go.jp/news/data/n-20070815.html](http://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20070815.html)).
- 2) 東京消防庁報道発表資料, 2010 - 7 - 14 ([www.tdf.metro.tokyo.jp/hp-kouhouka/pdf/220714.pdf](http://www.tdf.metro.tokyo.jp/hp-kouhouka/pdf/220714.pdf)).
- 3) プラスチック成形加工学会; “図解プラスチック成形材料” 工業調査会, 2006.
- 4) 高分子学会; “プラスチック加工技術ハンドブック” 日刊工業, 1995.
- 5) Svensson N. L.; “The Bursting Pressure of Cylindrical and Spherical Vessels”, J. Applied Mechanics, vol. 25, Trans. ASME, vol. 80, pp. 89 - 96, 1958.
- 6) 日本規格協会, “JIS K 7162 プラスチック - 引張特性の試験方法, 第 2 部: 型成形, 押出成形 及び注型プラスチックの試験条件”, 1994.
- 7) 日本規格協会, “JIS K 7161 プラスチック - 引張特性の試験方法, 第 1 部: 通則”, 1994.