

## バルーン破裂実証実験について

## Burst experiments of rubber balloons

○古川主能<sup>1</sup>, 宮尾佳延<sup>3</sup>, 加藤政昭<sup>3</sup>, 高野良紀<sup>2</sup>\*Sunou Furukawa<sup>1</sup>, Yoshinobu Miyao<sup>3</sup>, Masaaki Kato<sup>3</sup>, Yoshiki Takano<sup>2</sup>

Abstract: The safety of balloon release is discussed with the problem of the environmental destruction by micro plastics. We have carried out burst experiments of rubber balloons and simulated the altitude occurring the burst. The balloon burst is occurred around a diameter of  $d = 30$  cm. Altitude simulation shows that it rises more than 3.5 km.

## 1. はじめに

近年、マイクロプラスチックによる環境破壊問題は深刻であり、我が国においても本年7月からはスーパーなどのレジ袋が有料化となっている。また、バルーンリリースによる環境破壊も問われ始めている。天然ゴムから成るゴム風船は、地上に落ちるとバクテリアなどにより生分解されるが、分解速度はゴムの大きさに依存すると考えられる。そこで、空中における破裂の仕方が重要であると考え、ゴム風船の破裂実験を行い、破裂する高度などのシミュレーションを行った。

## 2. 理論

半径  $r$ , 厚さ  $h$  のゴム風船をその半径を  $\lambda$  倍した時の風船内外の圧力差  $\Delta P$  は、ゴムのずれ弾性率を  $G$  とすると

$$\Delta P = \frac{2Gh}{r} \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda^7} \right) \quad (1)$$

で表すことができる[1]。(1)式によると  $\Delta P$  は、 $\lambda \asymp 1.38$  で極大値をとり、その後、減少する。しかし実際には伸び切り効果を考慮する為、ある程度膨らむと再び  $\Delta P$  は上昇する。

## 3. 実験と結果

実験に用いたライオンゴム風船(10 inches)の特性を Table 1 に示す。

Table 1. Characteristics of rubber balloon.

自然の直径 $d$	厚さ $h$	質量 $M$
[mm]	[mm]	[g]
41.3	0.259	3.09

ライオンゴム風船の直径と圧力差との関係を示す (Fig. 1)。実験値より求めたずれ弾性率は  $G = 3548$  hPa であり、理科年表による値は  $G = 5000 \sim 15000$  hPa である [2]。

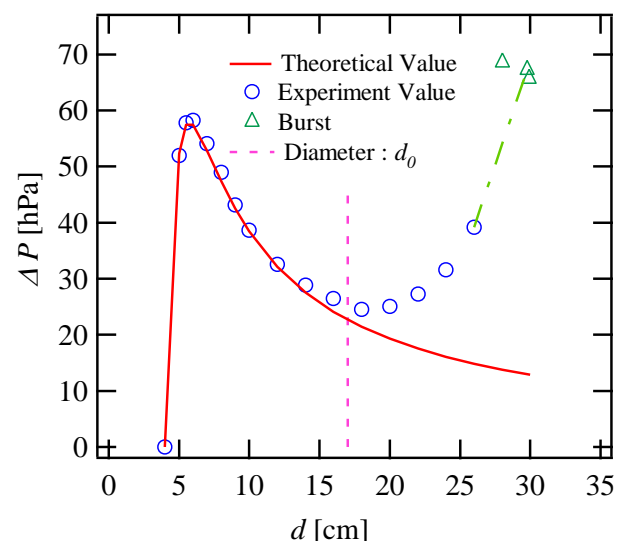


Figure 1. Relation between a diameter  $d$  and a pressure difference  $\Delta P$  in rubber balloons.

(1)式による理論値は  $d = 5.5$  cm を境に  $d$  が大きくなるにつれ  $\Delta P$  は減少していくが、実際は伸び切り効果により  $d = 20$  cm あたりから再び  $\Delta P$  が上昇していく。風船が破裂したのは  $d = 30$  cm 付近であり、個体差はあるがどれも伸び切り効果を考慮した実験値の延長線上にある。また、ゴムに大きな張力がかかった状態で破裂する場合には多くの小破片に分裂する[3]。実験においても風船が膨らんで割れたとき、約 80 % が小破片に分裂した (Fig. 2)。分裂していない残りの部分のほとんどは開口部にあたる。

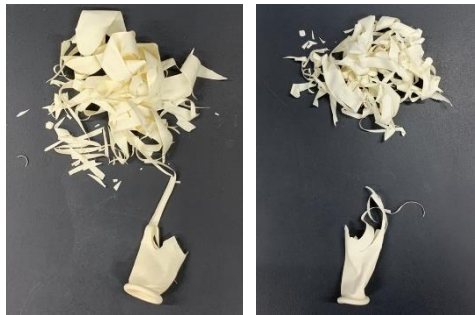


Figure 2. Rubber balloons after burst.

#### 4. 風船が浮く条件と破裂する条件

ヘリウム風船が浮く条件のシミュレーションを行った。ゴム風船内部の圧力と大気圧との圧力差  $\Delta P$ 、ヘリウムの分子量  $\rho_H$ 、空気平均分子量  $\rho_A$ 、絶対温度  $T$ 、気体定数  $R$ 、ゴム風船の体積  $V$ 、ライオンゴム風船の質量  $M$  とすると、ゴム風船の浮く条件は

$$\frac{P\rho_A}{RT}V > \frac{(P + \Delta P)\rho_H}{RT}V + M \quad (2)$$

で表すことができる。浮き始める時、ゴム風船の直径は  $d_0 = 17.0 \text{ cm}$  である。風船が安定的に浮くのは伸び切り効果の領域である(Fig. 1)。

次に、風船が破裂する条件のシミュレーションを行った。高度  $0 \text{ m}$  での気温を  $15^\circ\text{C}$ 、大気圧を  $1013 \text{ hPa}$  とする。高さ  $z \text{ km}$  における圧力を  $P \text{ hPa}$  とすると

$$P = 1013 \left( \frac{288 - 6.0z}{288} \right)^{5.260} \quad (3)$$

で表すことができる。風船の初期直径  $d$  と  $d = 30 \text{ cm}$  になった時の高度と温度の関係を Table 2 に示す。破裂するときは、どの場合でも  $3.5 \text{ km}$  以上は上昇する。

Table 2. Relationship between the initial diameter  $d$  and the altitude  $z$ , the pressure difference  $\Delta P$  and the absolute temperature  $T$ , where  $d$  becomes  $30 \text{ cm}$ .

$d$	$\Delta P$	$z$	$T$
[cm]	[hPa]	[km]	[K]
23	30	8.2	238
24	32	7	246
25	35	5.8	253
26	40	4.6	260
27	50	3.5	267

#### 5. バクテリアによる生分解度

LATEX 風船とバリア剤である Hifloat PVA Based Liquid Plastic の生分解度の実験によると、前者は  $300$  日で  $50\%$  程度となり、後者は個体差はあるが  $42$  日で  $95\%$  以上となった[4, 5]。

#### 6. 今後の課題

風船が破裂した際の破片の大きさの分布を調べ、その破片の生分解度を調べる。

#### 7. 参考文献

- [1] 土井正男：「ソフトマター物理学入門」，岩波書店，pp.77-78，2010.
- [2] 国立天文台編，「理科年表 1992」，丸善出版，pp.444，1991.
- [3] S. Moulinet and M. Adda-Bedia：「Popping Balloons: A Case Study of Dynamical Fragmentation」，Phys. Rev. Lett. 115, 184301, 2015.
- [4] 化学物質評価研究機構：「活性汚泥による水系培養液中の好気的究極生分解度試験」，2019.
- [5] 化学物質評価研究機構：「JIS K 6953-1:2011，生分解度試験(コンポスト中)」，2020.