

# バルーン破裂実証実験について

日本大学理工学部物理学科

教授 高野良紀

(2021年2月18日)

# 背景



マイクロプラスチックによる  
環境破壊問題  
レジ袋の有料化



バルーンリリースは  
環境に悪影響を及ぼ  
すのか？



空中での破裂の仕方と  
細菌による生分解が重要なのでは！？

# 目的

風船の破裂実験を行い，実験結果から風船が破裂する高度などのシミュレーションを行う。

# 原理

## ゴム風船の物理学

図1について  
半径  $r$ , 厚さ  $h$ , 大気圧  $P$ ,  
内側と外側の圧力差  $\Delta P$

ゴム風船の半径が  $\lambda$  倍となった系の  
自由エネルギー  $\Delta F$  は, 以下のようになる.

$$\Delta F = \underbrace{\frac{1}{2} G 4\pi r^2 h \left( 2\lambda^2 + \frac{1}{\lambda^4} - 3 \right)}_{\frac{1}{2} kx^2} - \underbrace{\Delta P \frac{4\pi}{3} r^3 (\lambda^3 - 1)}_{P\Delta V}$$

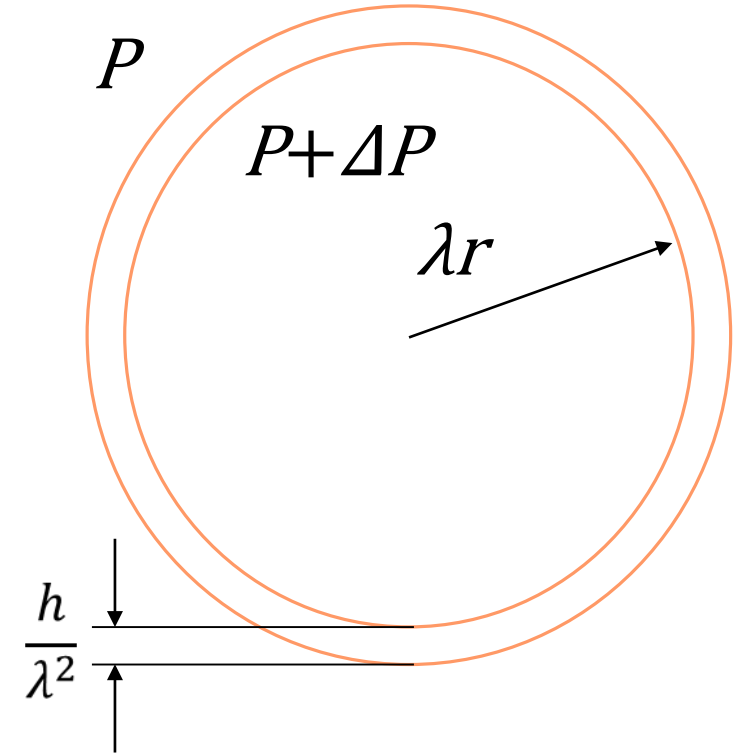


図1. 半径  $r$  のゴム風船

圧力差が $\Delta P$ の時の平衡状態は

$$\frac{\partial \Delta F}{\partial \lambda} = 0$$

より

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

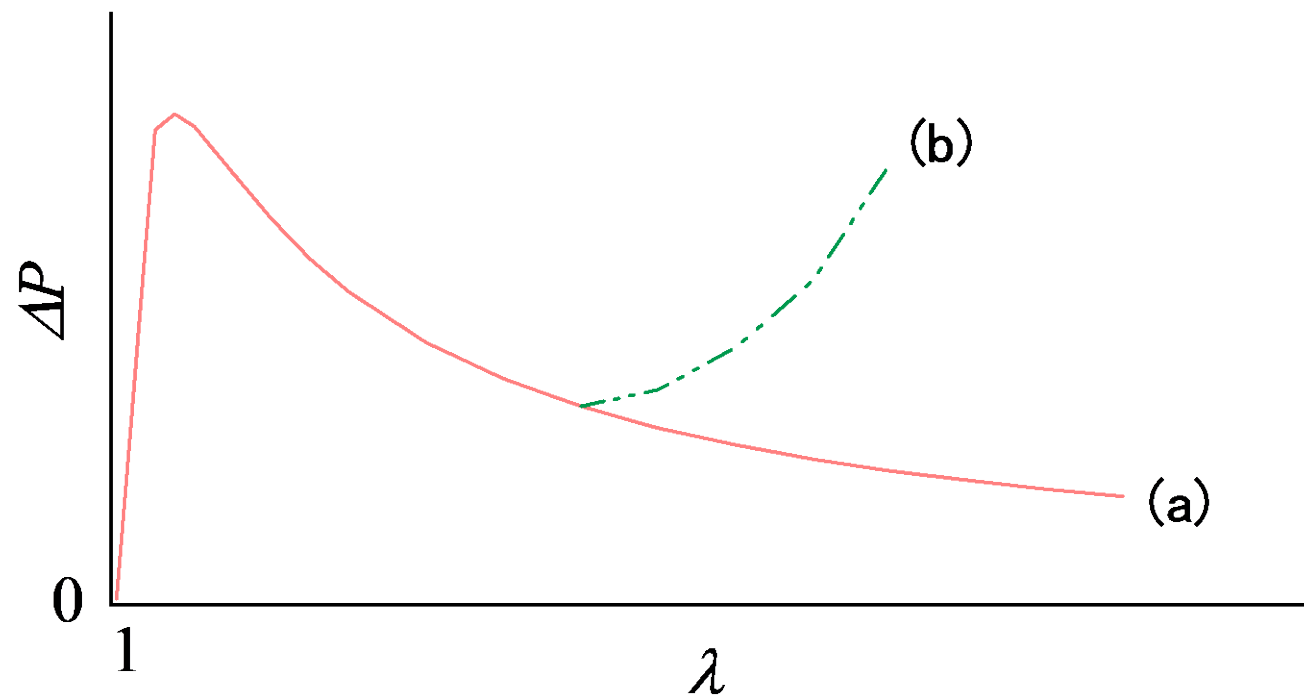


図2.  $\Delta P$ の $\lambda$ 依存性

$\lambda = 1.38$ で極大値をとり、その後、減少する(a).  
しかし実際は伸びきり効果を考慮するため、ある程度膨らむと再び $\Delta P$ は上昇する(b).

# 実験

## ライオンゴム風船(10 inches)の特性

表1. ライオンゴム風船(10 inches)の特性

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

ずれ弾性率の実験値  $G = 3548$  hPa

理科年表による値  $G_t = 5000 \sim 15000$  hPa

参考文献:国立天文台編「理科年表1992」,丸善出版(1991).

# 実験結果

- 伸びきり効果が表れている。
- $d = 30$  cm付近で破裂。
- 破裂するときは、伸びきり効果の延長線上。

- ヘリウム風船が浮き始める直径は  $d_0 = 17.0$  cm。
- 安定的に浮くのは、伸びきり効果の領域。

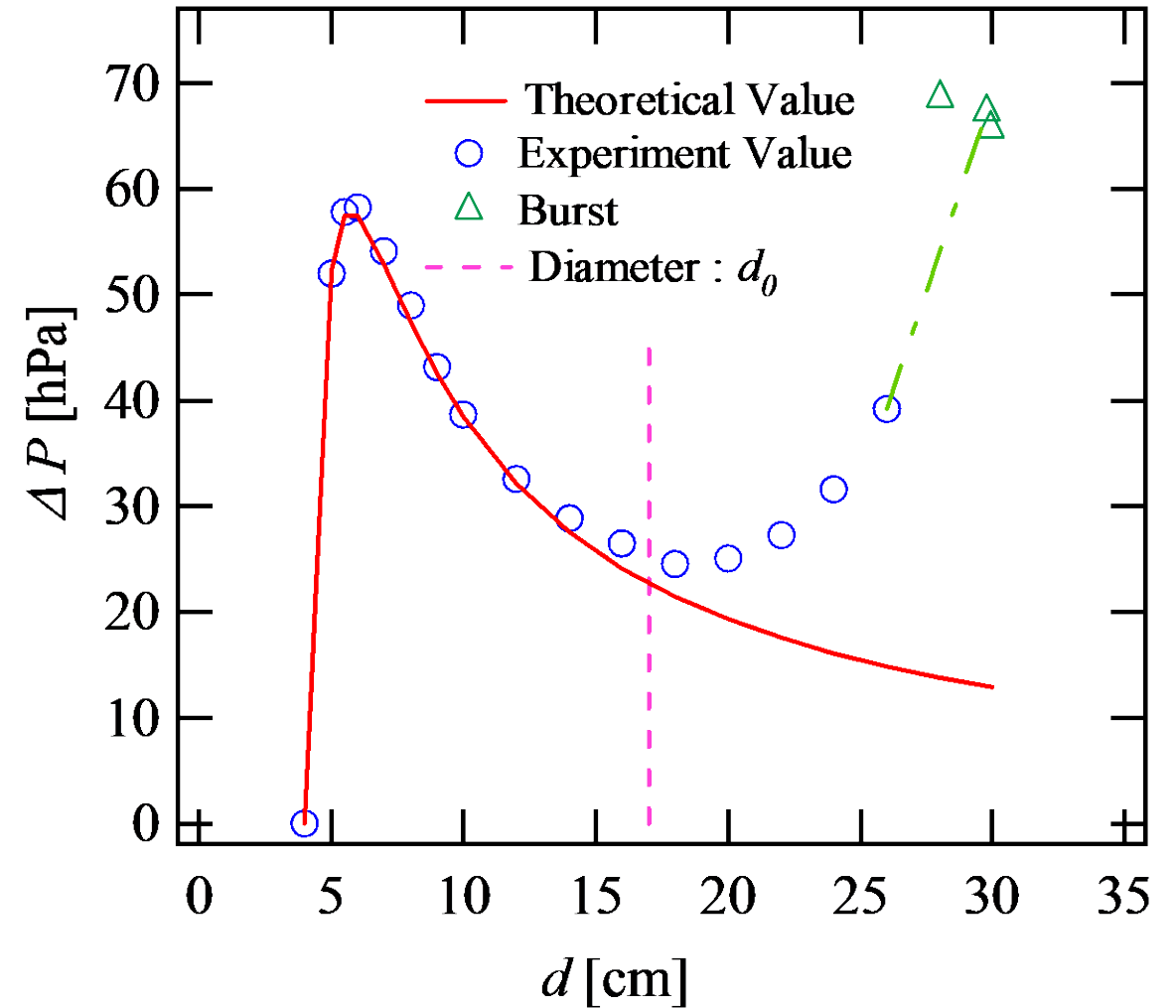


図3. ライオンゴム風船(10 inches)の直径  $d$  と圧力差  $\Delta P$  との関係



図4. 破裂後のゴム風船

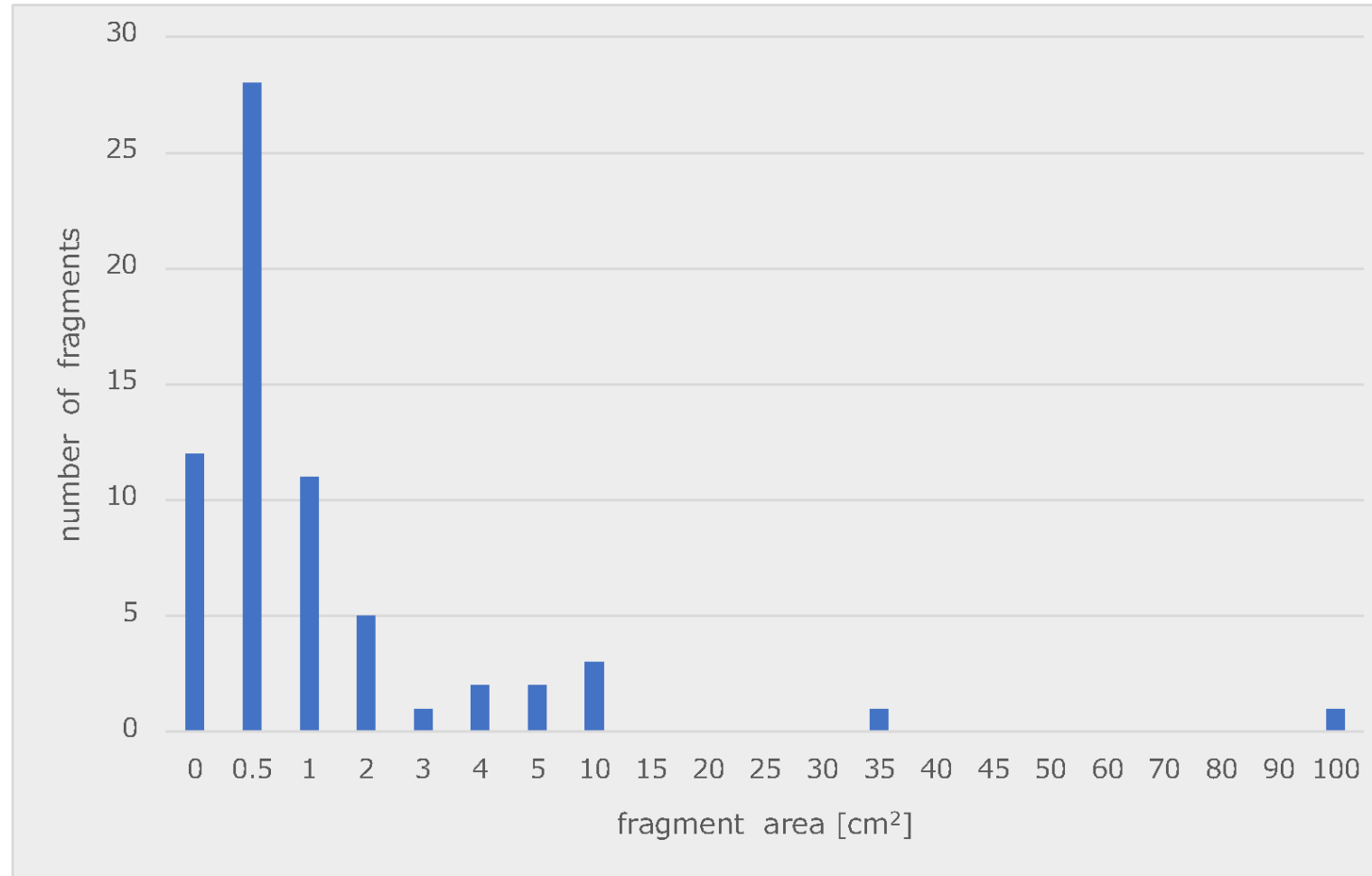
参考文献: S. Moulinet and M. Adda-Bedia, Phys. Rev. Lett. 115, 184301 (2015)



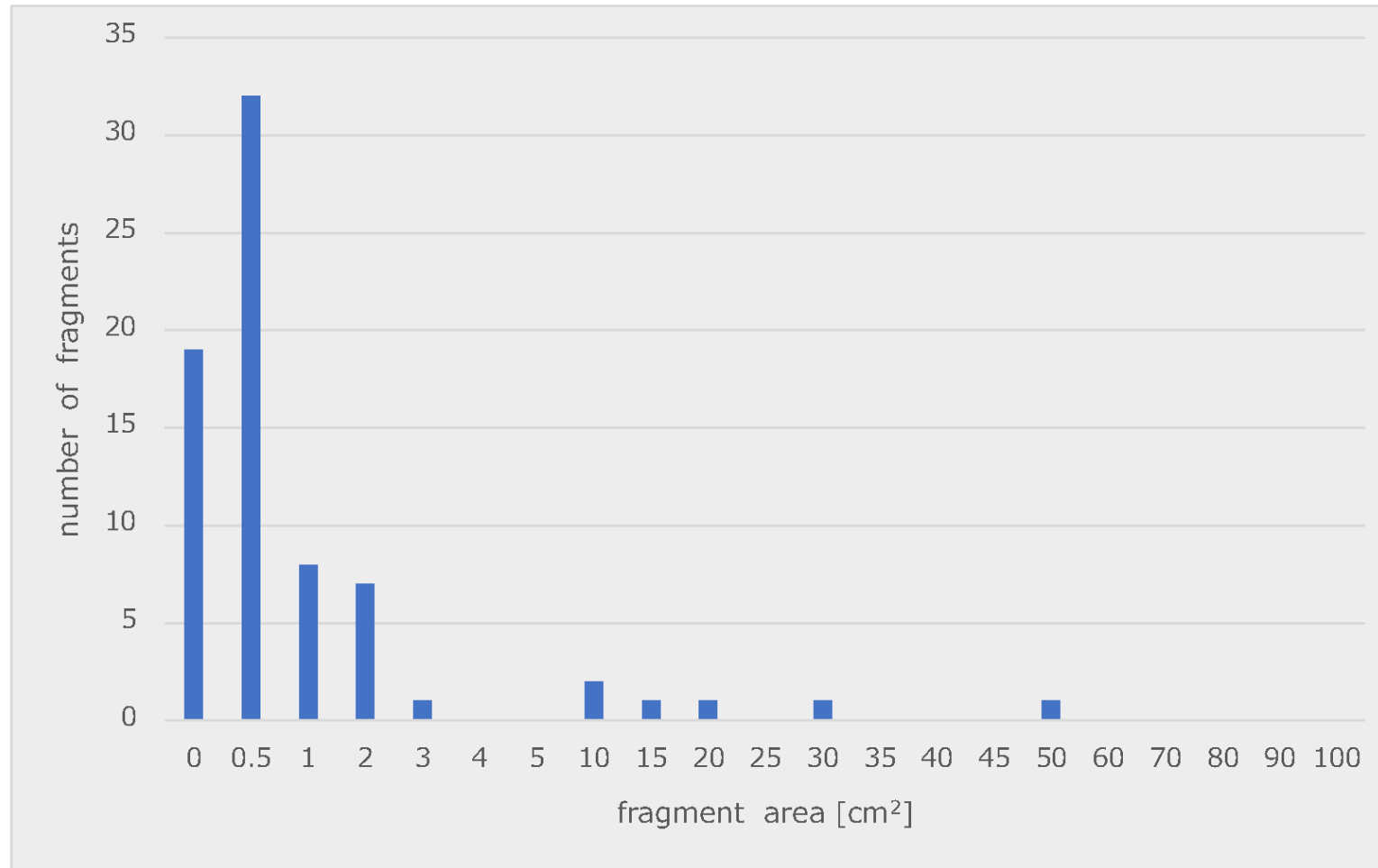
- 断片の重さを面積に変換（ Balloonの1cm角当たりの重さは0.015[g]）
- Rangeは任意の大きさでとっている.

	Range	Balloon 1	Balloon 2	Balloon 3	Balloon 4	Balloon 5	Balloon 6	Balloon 7	Balloon 8	Balloon 9	Balloon 10
	0	12	19	9	5	10	19	11	14	0	3
	0.5	28	18	26	24	32	32	12	30	10	7
	1	11	8	3	6	7	8	5	8	7	1
	2	5	5	4	10	8	7	7	4	6	1
	3	1	3	0	3	3	1	1	1	4	1
	4	2	1	0	1	2	0	0	2	4	0
	5	2	2	0	0	0	0	2	0	1	1
	10	3	5	0	5	7	2	2	1	4	2
	15	0	2	0	3	3	1	1	0	0	2
	20	0	1	0	0	1	1	0	0	4	1
Fragment area [cm <sup>2</sup> ]	25	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1
	30	0	1	0	0	0	1	1	0	0	2
	35	1	1	1	2	1	0	0	1	0	0
	40	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	45	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	50	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	60	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	70	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	etc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Number of fragment	SUM	66	66	46	59	76	73	44	63	40	22

➤ データ(2) Balloon 1 より典型的なヒストグラムを作成.



- データ(2)Balloon 6 より典型的なヒストグラムを作成.



## ➤ 破断理論と平均断片の長さ

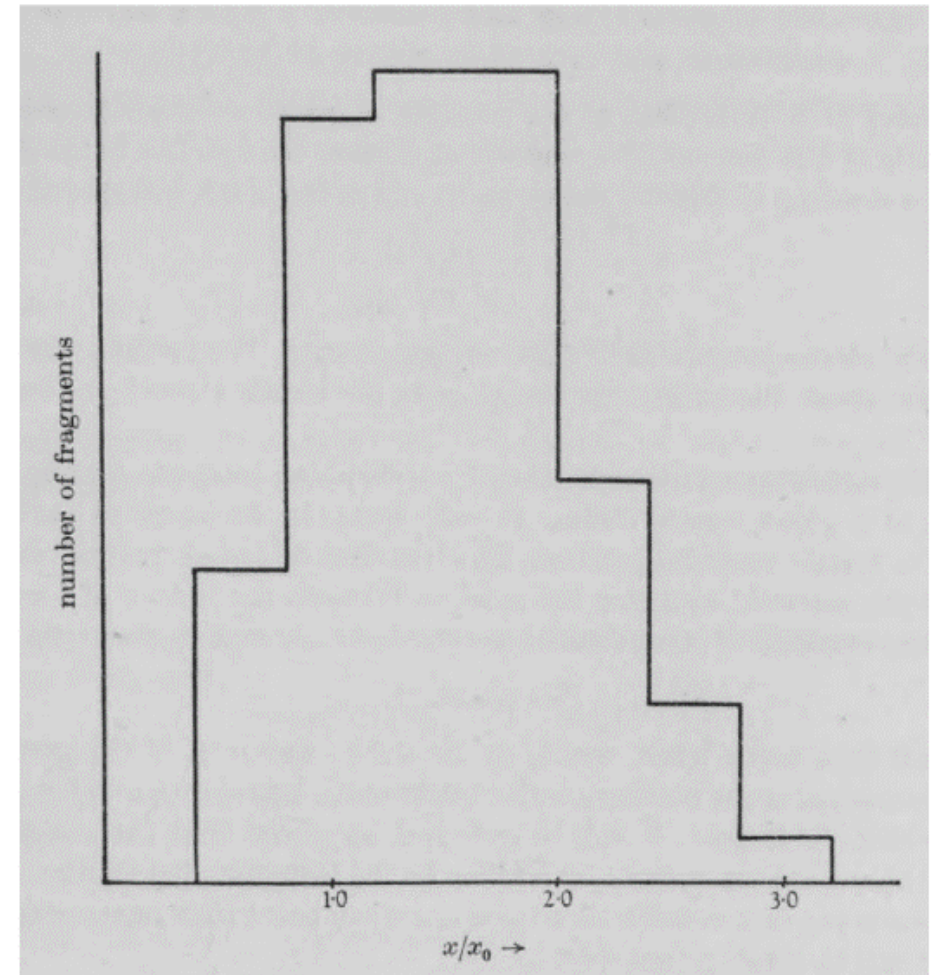
The calculations were made with  $l/x_0 = 20$ ; the distribution would not be sensibly different for larger values.

It will be seen that:

(1) The fragments have lengths most of which lie between  $x_0$  and  $2x_0$ , and that the average length is about  $1.5x_0$ .

(2)  $x_0$  is proportional to  $r$ , so that if the linear proportions of the bomb are scaled up by a given factor, the average fragment length is changed by the same factor.

(3)  $x_0$  is inversely proportional to  $v$ , the velocity of the case at the moment of break-up.



# 高度と温度、気圧の関係 ( $z < \sim 10$ km)

高度0 mでの気温：15 °C

(湿潤断熱減率0.5~0.6, 乾燥断熱減率1.0)

高度 $z$  kmにおける気温 $T$  Kは

$$T = 288 - 6.0z$$

高度0 mでの大気圧：1013 hPa

高度 $z$  kmにおける圧力 $P$  hPaは

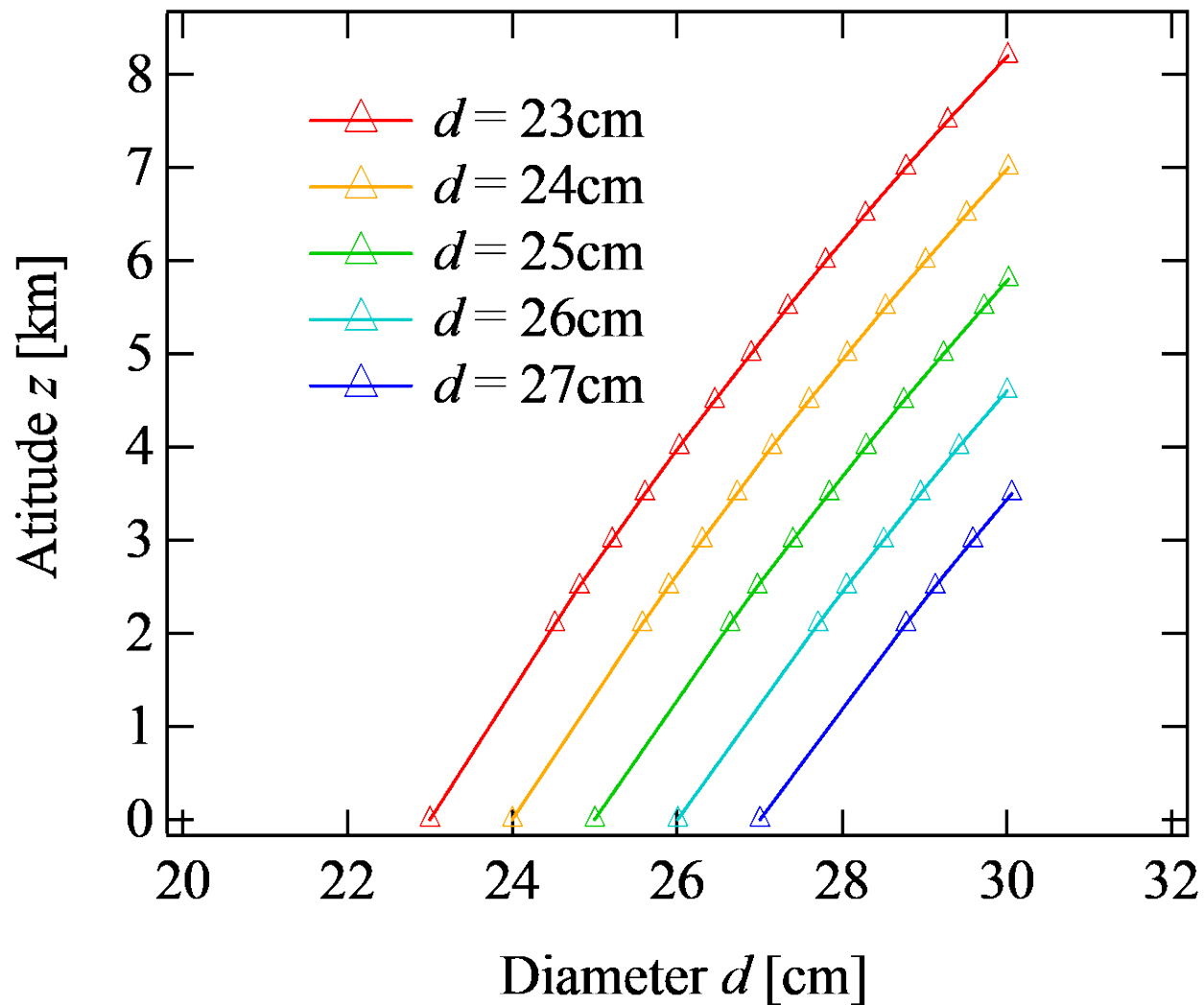
$$P = 1013 \left( \frac{288 - 6.0z}{288} \right)^{5.260}$$

風船の初期直径 $d$ と $d=30\text{ cm}$ になったときの高度 $z$ ，気温 $T$ の関係について

表2. 風船を膨らませたときの直径 $d$ と $d=30\text{ cm}$ での高度 $z$ と気温 $T$ の関係

$d$	$\Delta P$	$z$	$T$
[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

絶対温度 238 K      267 K  
↑                      ↑  
摂氏      -35 °C      -6 °C



破裂するときは，どの場合でも 3.5 km 以上は上昇する。

初期直径  $d$  が 3, 4 cm 異なるだけで，高度差は約 5 km となる。

図5. 初期直径  $d$  と  $d = 30$  cm となる高度  $z$  との関係

# 生分解度試験について

## LATEX風船とHifloat PVA Based Liquid Plasticの生分解度について

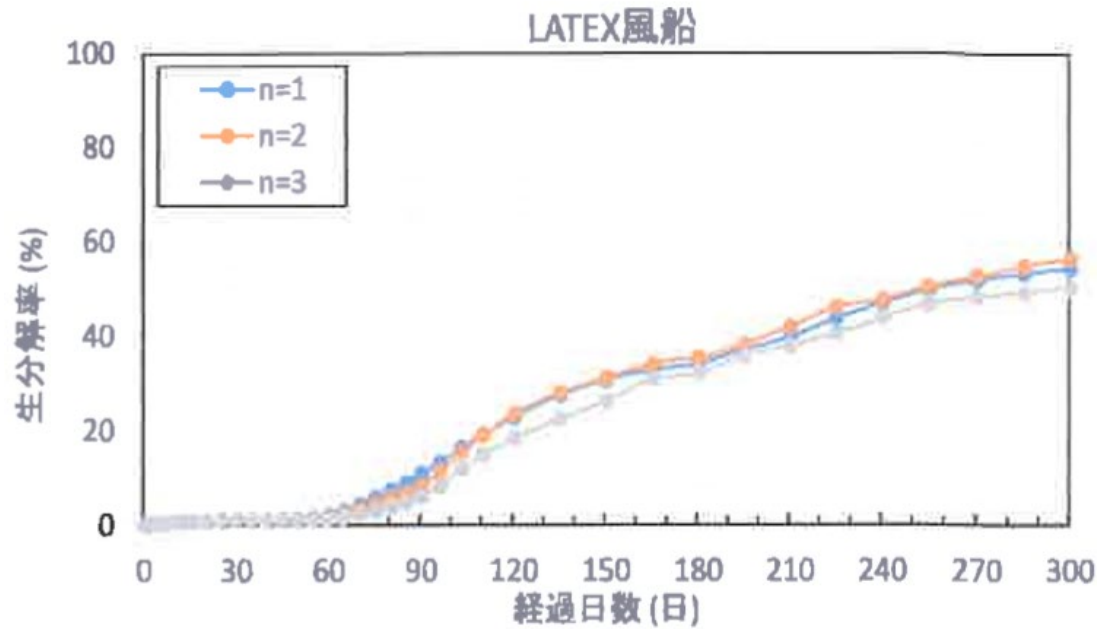


図6. LATEX風船の生分解度

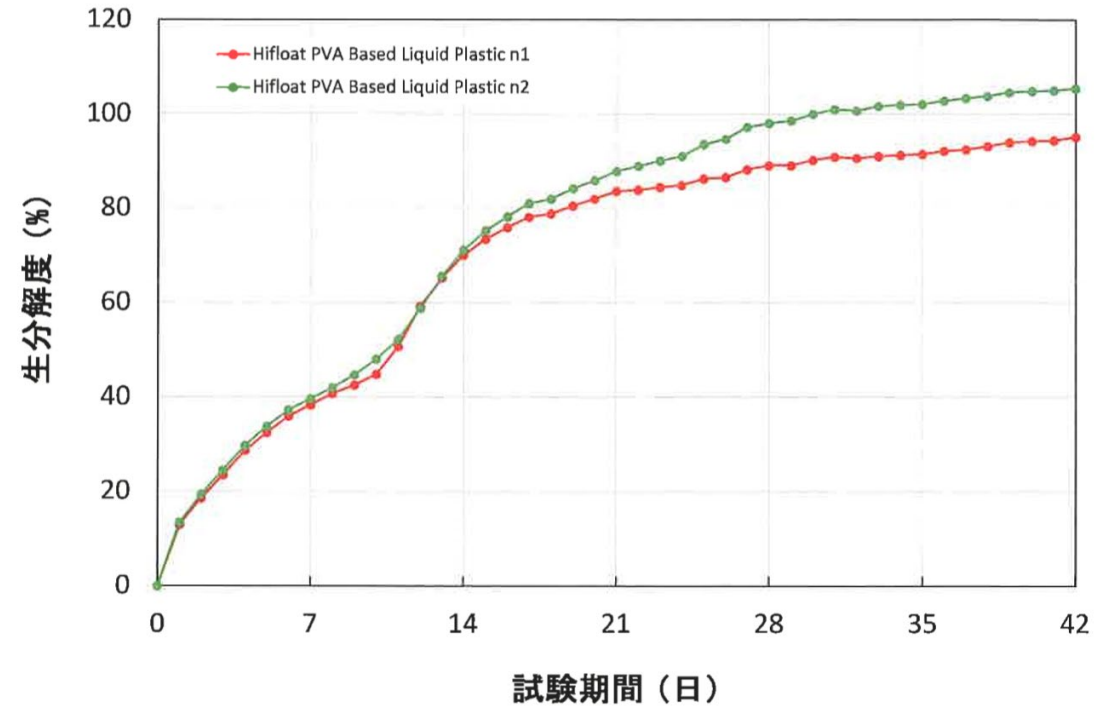


図7. Hifloat PVA Based Liquid Plastic の生分解度

参考文献: 「活性汚泥による水系培養液中の好氣的究極生分解度試験」(化学物質評価研究機構,2019-12-23)  
「JIS K 5953-1:2011 生分解度試験(コンポスト中)」(化学物質評価研究機構,2020-6-8)



# まとめと展望

1. 風船を膨らませた時，伸びきり効果を考慮する必要がある。
2. ライオンゴム風船(10 inches)が割れるのは， $d = 30$  cm付近である。
3. 風船が破裂したときには，連続的に分布する小破片は約30%だが，口の部分を除く約80%が破裂する。
4. ヘリウム風船が浮き始めるのは， $d = 17.0$  cm以上である。
5. 上昇して気圧が低くなり， $d = 30$  cmで破裂するとした場合，初期直径が3, 4 cm異なるだけで， $d = 30$  cmになる高度は大きく変わる。過去の報告で破裂する高さが3 km ~ 8 kmと幅があるのはそのためである。

6. ヘリウム風船は， $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ の液体窒素につけても割れないため，割れるのは温度のみの効果ではないと考えられる．
7.  $-5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で $d = 30\text{ cm}$ 程度で破裂するかどうかを確認する．
8. 太陽光による風船の劣化への影響について確認する．
9. 風船の膨張速度と小破片の大きさの関係を確認する．

