

気球の水モデル破壊テスト

西村 純・太田 茂雄

1. はじめに

プラスチック気球をデザインしかつ製作するに当って、ある浮力に対して気球の各部分にどのような張力がかかるかを知っておく必要がある。張力分布を知ることにより、気球に必要な最小限の膜厚が定まり、安定した軽量高性能の気球をデザインすることができる。

気球に水素が詰められた時とる形は、もともとの気球の形にもよるが、一般に局所的にひずみのかからない形は自然形[1]といわれ、その形は変分から導かれる微分方程式を解くことにより求めることができる。また、もともとの気球の形が自然形にそぐわないものであっても、自然形と気球の形を適当な境界条件でつなぎ合せて水素を注入した時の形を計算で求めることもできる[2]。形のみならず、張力分布も一般に計算で求めることはできるが、実際には張力の強くかかる部分の球皮が伸び、形が変わる影響などは計算の中にくみ入れることはむずかしい。また、製作に伴い生ずる球皮のわずかなひずみや、球皮の厚さむらなどによる影響なども気球の張力分布を議論する場合無視することはできない。

気球が上昇中に受ける動的な張力は、もし気球が正常な上昇を続ける時には*、一般に静的な張力に比べて小さく、また、静的な張力分布が一番大きいのは外圧の最も高い地上放球前であることを証明することができる**。したがって、地上係留時の気球強度を調べるため、モデルテストを行なうことが必要となってくる。モデルテストとしては実物大モデルを数多く行なうことが望ましいことは論をまたないが、これは言うべくして行なうことはむずかしい。そこで1966年の気球開発に当って、水モデルと言われるモデリングテストをかなり系統的に行ない、気球デザインの基礎データとすることにした。

2. 水モデル

水モデルの原理については文献[1]にくわしいが、ここではその原理について簡単な紹介をすることにする。

まず、第1図のように、水素注入後地上に係留されている気球を考えてみる。この気球の代表的な長さを L とし、体積を V とする。今代表的な長さ l の別の気球を考えた場合、もし球皮の重さと伸びを無視すれば、水素注入量 $v = V(l/L)^3$ の場合には、相似の膨張形を

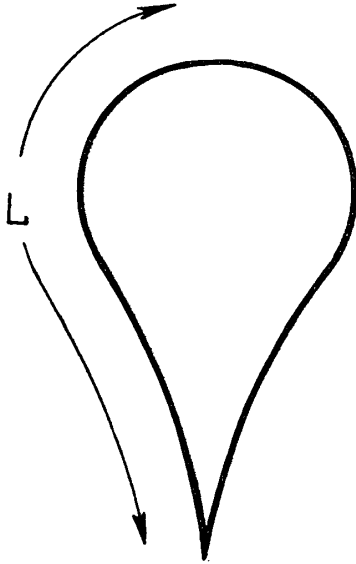
* ここで正常と言うのは、上昇速度が 200 m/min くらいで気球々皮がフラッターのような現象をおこさない場合を言う。

** それにもかかわらず、上空では気温が低下して (-50°C) 材料の劣化がおこり、気球の破壊をおこすことがある。これは低温性能のよい材料の必要性を示すものではあるが、低温時における動的な張力の影響は今後の問題として調べていく必要がある。

とることになる。この場合対応する場所の球皮にかかる張力はその場所での内外圧差と曲率半径に比例するので、前者の張力 T_1 と後者の張力 T_2 とは長さの自乗に比例し

$$T_1 \propto L^2 \quad (1)$$

$$T_2 \propto l^2 \quad (2)$$



第1図

となる。これまでは空気中で二つの気球に水素を注入した場合を考えたが、今、第2の気球を液体中で体積 v にふくらませた場合を考える。液体、空気、水素の比重をそれぞれ ρ , ρ_a , ρ_H とすれば、内外圧差はそれぞれ空気中の気球については、 $\rho_a - \rho_H$ に比例し、液体中の気球については ρ に比例することとなる。したがって、対応する場所の球皮にかかる張力は、

$$T_1 \propto (\rho_a - \rho_H) L^2 \quad (3)$$

$$T_2' \propto \rho l^2 \quad (4)$$

となり、

$$l = \left[\frac{\rho_a - \rho_H}{\rho} \right]^{1/2} L \quad (5)$$

とすれば、気球は相似形となり、かつ対応する場所での張力は等しくなる。もちろん張力による球皮の伸びも同じ割合でおきるので完全な相似則が成り立つことになる。

実際には液体中で気球をふくらませることは何かと不便であるので、気球に液体を入れ逆にする状態でもデルテストを行なう。また、液体も簡単なものとして水を用いることとなる。水を用いた場合、スケールファクター $\{(\rho_a - \rho_H) / \rho\}^{1/2}$ は 28.8 となり、実際の気球との対応については、表1に示すような値となる。

第1表 水モデルのスケールファクター

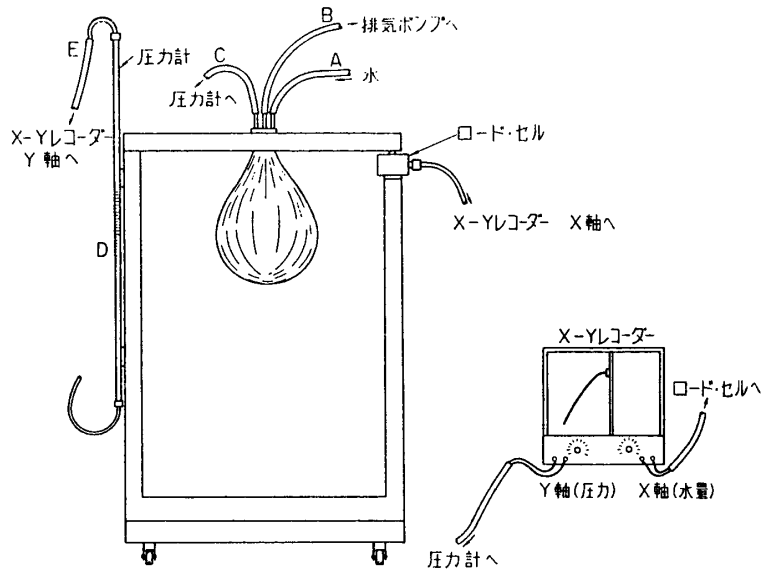
実際の気球の長さ	5 m	10 m	20 m
モデルの長さ	17.4 cm	34.7 cm	69.4 cm
実際の気球の浮力	10 kg	100 kg	1,000 kg
モデルに注入する水量	0.417 l	4.17 l	41.7 l

表からわかるように、水モデルは実験室で行なうテストとしては適当な大きさとなる。

3. 水モデルテスト装置

水モデルテストを行なうため、水量約 40 kg (実物大気球の浮力にして約 1,000 kg) のモデルテストが行なえるよう第2図に示す様な装置を製作した。

中央部の気球押え金には、図に示すように3本のパイプがついており、Aは水注入用、Bは水注入に伴って混入した空気除去パイプ、Cは気球の内圧測定用である。図に示すように気球押え金はバーの中央部に取り付けられ、一端にロードセルを取り付けて、注入された水量を電氣的に測定する。実際に取り付けたロードセルは2種類で東洋測器製 CLB-10 L-C 型



第2図

と CLB-50 L-C 型とであり、それぞれ 10 kg, 50 kg 用のものである。内圧はCのパイプからサイフォンで図のDおよびEにつながっている。Dでは水面の高さから読みとりを行ない、Eでは電氣的に検知することにし、XYレコーダーのおのおの軸に水量と内圧を入れ、この関係が曲線として記録できるようにした。

4. 気球のモデルについて

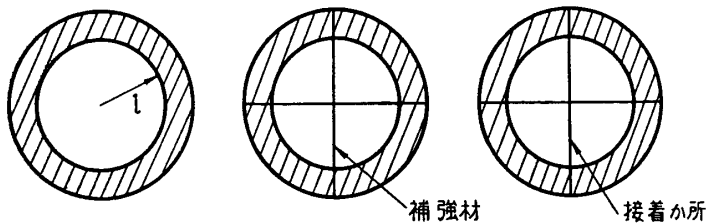
ポリエチレン気球は、上空で満膨張に達したのちガスを排気して一定の高度を滞空する。たとえば 10 mb で満膨張に達する気球について考えると、地上における水素の注入量は気球本来の体積の 100 分の 1 に過ぎない。つまり地上では気球の頭部にごくわずかの水素を注入することになる。

満膨張時に自然形になるようにデザインされた気球については、地上で水素注入の行なわれる頭部の部分はほとんど平面であり、したがって、モデルとしては平面の布地を採用することができる。テストを行なった布地は 1966 年の気球布地として採用した DFD 5505, 大日本樹脂で折径 2 m にインフレーションを行なったものである。膜厚は公称 20 μ , 40 μ の 2 種類で接着の影響, 補強材への影響, 気球の頂点から根元までの周長 (l) への影響を調べるために第 2 表に示すようなサンプルについて実験を行なった。

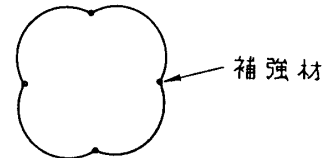
第 2 表 気球モデル

公称膜厚	l	補強および接着の有無	テスト数
20 μ	30 cm		5
	40 cm		8
	40 cm	接着 2 か所 補 強	4
			4
40 μ	50 cm		2

補強材としては気球の頂点から根元に、つまり気球の縦の稜線に沿って、幅5mmのガラステープ (scoth #890) を布地に粘着したもので、第3図に示すように平面になった時十文字に入れる。自然形の理論から補強材の効果として考えられることとしては、縦方向の張力はおもに補強材が受け持ち、また、気球の横断面は第4図のように曲率半径が小さくなり、したがって、膜面上にはたらく横方向の張力は小さくなることである。



第3図



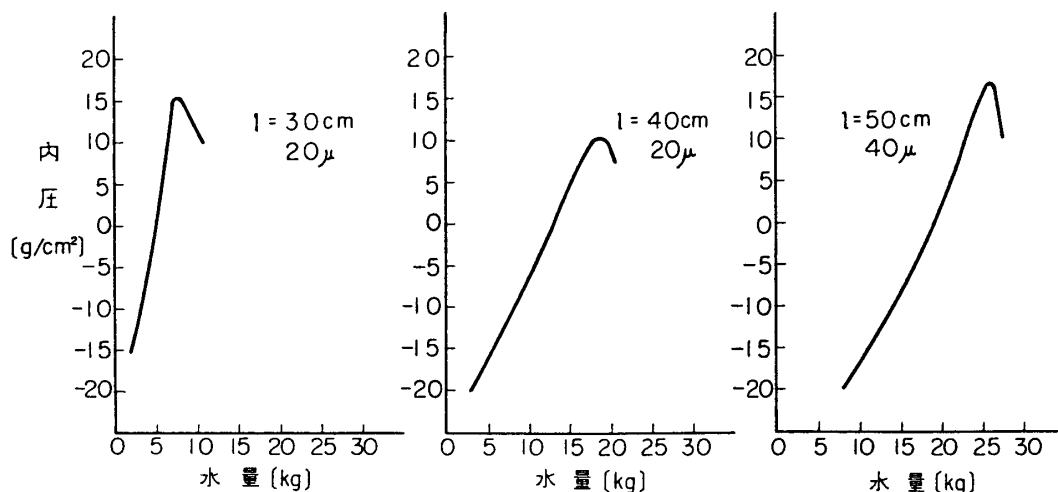
第4図 補強材の効果

5. 実験結果

実験結果を解析するに当たって、同じ条件のフィルムで周長 l の異なる場合の結果について考察を行なう必要がある。モデルに水を注入すると、水量の増加とともに気球内の圧力は負（マイナス）側から正（プラス）側に転化し、やがて気球は破壊する [1][2]。

同じフィルムについて l の異なる場合の水量内圧カーブは第5図に示した。周長 l が短い時には、気球容積が小さいため、内圧がかかり気球は破壊しない。

内圧 ΔD 、水量 V の気球についてハート型自然形の理論から各部分にはたらく張力を計算できる。ただし、このモデル実験のように破壊に至るまで水量または内圧を増した時には張力が強くかかる部分のフィルムは延伸を起し、気球はハート型から水滴型の自然形 [1] に近似的に移行するものと考えられる。内圧のかかった水滴型自然形は球型で近似できるので球型近似 [3] を使って解析を行なってみることにする。

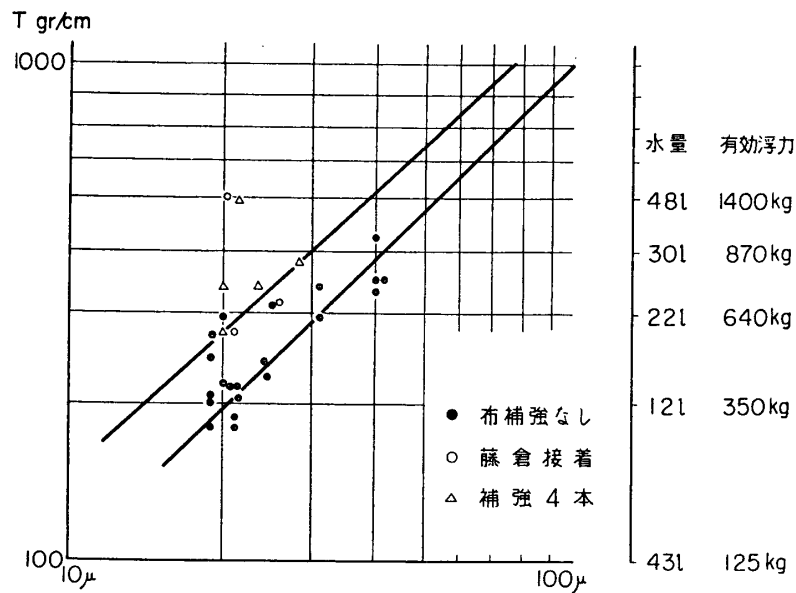
第5図 膜厚 20μ 補強材のない場合の例

水量がある限度を越えると、フィルムが延伸を起し、一たん内圧が降下して破壊する様子を見ることが出来る。

球型の半径を a とすると気球の頂点付近の張力は

$$T = (a/2)(2a + \Delta D)g \quad (6)$$

で与えられ、この近似式を使って破壊張力を求めた結果を第6図に示した。図から推測されることは球型近似での解析結果は l に無関係な破壊張力を与えこの近似が比較的よい近似であることが推定される。つまり一つの l の値から他の l の場合の結果を推定することができる。この様な解析ののちに内圧 D の状態で負荷し得る最大浮力、その際の破壊張力と膜厚との関係を示したのが第6図である。



第6図

実験結果をまとめた図から次のようなことが結論される。使用した DFD 5505 大日本樹脂製フィルムについて、

1. 補強なし、 20μ 厚のフィルムを使用した気球の最大負荷浮力は 350 kg であり、1966年に使用する浮力 100 kg 程度の浮力の気球に対して、十分な強度を持っている。
2. 破壊強度は膜厚に比例しているので、浮力 100 kg 程度の気球は膜厚 10μ 程度のもので使用に耐え気球の自重を 20μ に比較して半分とすることができる。
3. 補強材の効果は十分認められ、補強材4本を付加した時、実質的に膜厚を $1.5\sim 2$ 倍にしたことに対応する。
4. 接着を行なったサンプルについては、接着か所に 30μ 厚、幅 2 cm のポリエチレンフィルムを付加してあるため、上記3の補強材の付加と同じような効果が認められる。

以上総括すると、補強材の適当な配置などのデザイン効果を生かすことにより、1966年に製作した $15,000$ 立方メートル程度までの気球については膜厚を更に下げ、超軽量の気球をデザインすることは強度的には可能なことである。

実際には 20μ 以下のフィルムの製作がむずかしい点、また、接着の際のハンドリングの難点を考慮して1966年度は膜厚 20μ に統一した気球の製作飛揚を行なった。

ここでは上空におけるフィルム性能の劣化を無視して地上のモデルテストにのみ話を限っ

たが、低温性能のすぐれた 10μ 厚程度のフィルムの製作に尽力中であり、これらの生産に伴い気球の性能を一段と向上せしめることが期待できる。

1967年5月9日 宇宙工学

参 考 文 献

- [1] 東大原子核研究所気球グループ：プラスチック気球 I, INSTCB-2 (1962)
- [2] 荻田直史：気球の自然形. 宇宙研報告, 2, 1 (C) (1966) 402
- [3] 河田幸三：気球の材料と強度について. 宇宙研報告, 2, 1 (C) (1966) 409