

# 気球についての空気力学的考察

河村 龍馬

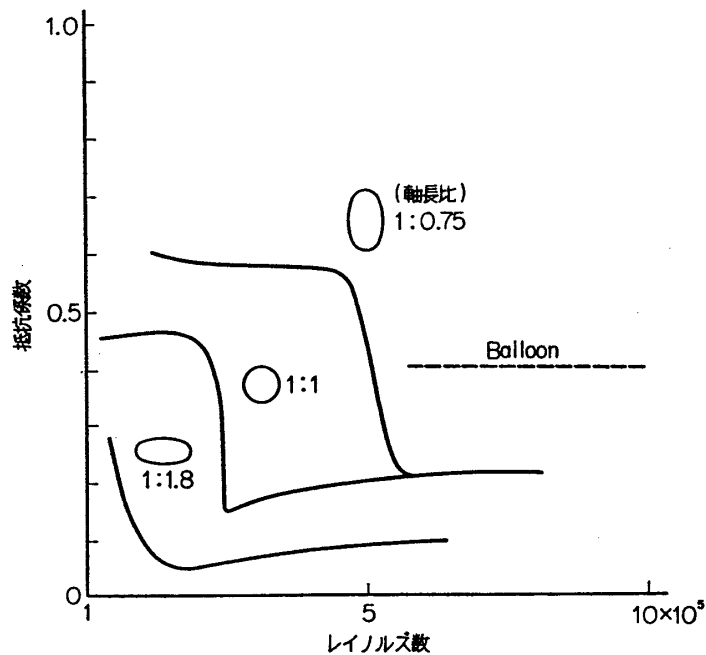
## まえがき

気球による観測実験の失敗の多くは気球の破壊によるものである。そして、気球の破壊は、放球時、上昇時およびジェット・ストリーム通過時におこることが多い点から考えて、気球に作用する空気力とこれに伴う空気力学的な諸現象がその原因の相当部分をなしているものと推察できる。今後大型気球を開発して行く上の目標の一つとして、成功率の高上という課題があるが、これを達成するためには、気球の空気力学的問題点をあらためて考えて見る必要がある。

気球空気力学の概要は、たとえば文献 [1] に記述されているから、ここでその詳細に触れることはやめて、主として問題点を提起することにする。

## 1. 気球の抵抗係数について

球を含む回転楕円体の抵抗係数  $C_D$  とレイノルズ数  $Re$  との関係我代表例について示すと第1図のようになる。直径数メートル程度の気球の地上附近での  $Re$  数は、大体  $10^6 \sim 10^7$  程度になり、放球後の上昇速度から換算された  $C_D$  値は、平均して 0.4 程度になる (第1



第1図 回転楕円体の抵抗係数

図の破線). この値は球の抵抗係数の約2倍で, 非常に大きい. この原因として考えられる要素をあげれば,

- (1) 形状効果 (形が球形でないことの影響)
- (2) 膜面の変形による表面の不整の影響
- (3) 大気中の乱流による見掛けの  $C_D$  の増加
- (4) 加速運動による VIRTUAL MASS 効果

などがあるが, その影響度合の大小についてはほとんど研究が行なわれていないし, 実験の資料もない. この点を調べるためには, まず乱れのない人工気流の中で, 気球の抵抗実験を行なって見る必要がある.

## 2. 気球の模型実験と相似則について

模型実験によって実機の場合に役立つ資料を得るためには, まず相似則が確立されていなければならない. 気球の空気力学について考えると, A, B二つの場合について相似則が成立つための条件は次の二つである.

- (1) 両方の場合に気球の形状が幾何学的に相似であること.
- (2) 両方の場合に流線が相似であること.

まず, 条件(1)について考えよう. 二つの気球を作る場合, 膜を全く相似形にとってこれをはり合せるものとする. このような気球にガスを充てんして浮揚させた場合, 膜面のどこでも内圧  $P$  が外圧  $p$  よりも大きければ, 二つの気球は相似形になることは明らかである. もちろん内外圧の差が大きければ, 膜面の張力が大となり, 膜の伸びによる変形のために幾何学的相似が狂ってくる場合がおこるが, プラスチックを材料とする通常の気球では, その誤差はわずかである. 外圧は, 静的圧力のほかに, 気球の上昇速度によって生ずる動圧分だけ場所的に変動があるが, 普通の場合動圧は内圧にくらべて小さく, (1)の条件は容易に満すことができる.

(1)の幾何学的相似が満された場合, さらに(2)の流線相似を実現するためには, すでに知られているように, 二つの場合についての  $Re$  数が一致しなければならない.  $Re$  数は, 流体部分に働く慣性力と粘性力との比を表す数で, 速度を  $V$ , 物体の基準長を  $L$ , 流体の動粘性係数を  $\nu$  とすると,  $Re = VL/\nu$  で表わされる. 一般に模型は実物より寸法が小さく, 同じ流体を使う場合は  $Re$  数を合わせるためにはその分だけ  $V$  を大きくしてやらなければならないが, 速度を大きくしすぎるとマッハ数効果などが入ってくるなどして, 実際には模型の  $Re$  数を実物と合致させることは困難である.

第1図に見られるように, 回転楕円体の  $C_D$  は, ある  $Re$  値を境にして階段状の変化をする. その原因はすでによく知られていて,  $Re$  数の小さい場合は表面境界層が層流状態のまま早期はくりをおこし, 広い後流を発生するため圧力抵抗が大きくなって  $C_D$  が大となり  $Re$  数が大きい場合は境界層が乱流状態になってからはくりするためはくり点が後方に移動し, 後流の拡がり小さくなって  $C_D$  も減小する. いずれか一方の状態では  $Re$  数が変化しても  $C_D$  はそれほど大きくは変らない. 流線についても同様のことが言える. したがって, 境界層が層流はくりから乱流はくりに移る境目の  $Re$  数を臨界レイノルズ数  $Re_{CRIT}$  とすれば,

対比すべき二つの流れの  $Re$  数の一方が  $Re_{CRIT}$  以下で他が以上という場合には、両者間の流線相似が成立しないことは明らかであるが、二つとも  $Re_{CRIT}$  の上か下の領域にある場合には、たとえ二つの流れの  $Re$  数が厳密には一致しなくても、大体の流線相似は成立つものと考えられよう。さきに記したように、実際の大型気球の  $Re$  数は  $10^6 \sim 10^7$  位で、第1図からわかるように、明らかに  $Re_{CRIT}$  より大きい。したがって、模型実験を行なう場合、 $Re$  数を実物と完全に等しくすることが最も望ましいが、それが不可能のときには、少くも  $10^6$  以上の  $Re$  数になるようにしなければならない。

前記(1)、(2)の条件が満されれば空気力学的相似が成立つわけであるが、このようにして行なう気球の模型実験の主要目的の一つは、どのような状態で気球の破壊がおこるかを調べることにある。したがって、気球膜の張力を考える必要を生じてくる。模型気球と実物とが、対応する状態で同一の張力分布を持っていれば、模型の破壊を実物のそれと正しく関係づけることができる。

第2図は膜面の一部に作用する力のつりあいを示すもので、 $P$  は内圧、 $p$  は外圧、 $T$  は膜の張力、 $R$  は曲率半径である。力のつりあいの関係式は次のように書ける。

$$(P-p)R=T \quad (1)$$

ここで、内圧  $P$  は内部および外部の気体の密度差によって生ずる静的圧力で、外圧  $p$  は外部気体の運動によって生ずる動的圧力である。

気球の基準長を  $L$ 、気球の速度を  $V$ 、内部気体と外部気体との密度をそれぞれ  $\rho_G$ 、 $\rho_A$ 、重力加速度を  $g$  とすれば、

$$P=(\rho_A-\rho_G)gL\bar{P}, \quad p=\rho_A V^2 \bar{p}, \quad R=L\bar{R}$$

と書ける。ここで、 $\bar{P}$ 、 $\bar{p}$ 、 $\bar{R}$  は無次元内外圧および無次元曲率半径で、相似状態にある実物と模型の対応点で同一の値をもつと考えられる。したがって(1)から、

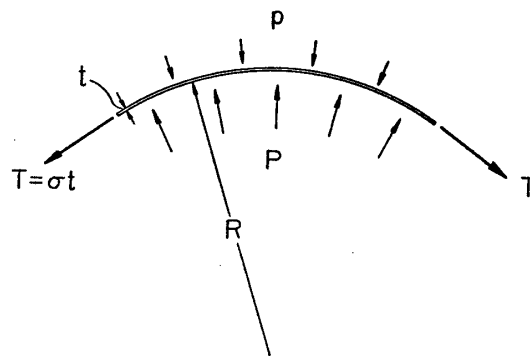
$$(\rho_A-\rho_G)gL^2\bar{P}\bar{R}-\rho_A V^2 L\bar{p}\bar{R}=T$$

となる。一般に  $\rho_A \gg \rho_G$  だから、 $\rho_G$  は無視することができる。また膜の張力  $T$  は膜厚  $t$  と引張応力  $\sigma$  との積になるから、上の式を書き換えて次のようになる。

$$\rho_A g L^2 \bar{P} \bar{R} - \rho_A V^2 L \bar{p} \bar{R} = \sigma t$$

あるいは

$$\frac{\sigma}{\sigma_M} = \frac{\rho_A L^2 g}{\sigma_M t} \left[ \bar{P} \bar{R} - \frac{V^2}{gL} \bar{p} \bar{R} \right] \quad (2)$$



第2図 気球膜面の力のつり合い

ここで  $\sigma_M$  は破壊応力を表す。

(2) 式から、実物と模型とが相似状態にあるとき、気球膜の応力分布が等しくなるためには両者の間に次の二つの関係が成立しなければならない。

$$\left[ \frac{\rho_A L^2 g}{\sigma_M t} \right]_{\text{実物}} = \left[ \frac{\rho_A L^2 g}{\sigma_M t} \right]_{\text{模型}} \equiv K \quad (3)$$

$$\left[ \frac{V^2}{gL} \right]_{\text{実物}} = \left[ \frac{V^2}{gL} \right]_{\text{模型}} \equiv F \quad (4)$$

結局、実物と同じ形状の模型で、 $R_e$ 、 $K$  および  $F$  が実物と同じ値をとるようにして実験すれば、模型と実物との間には完全な相似関係が成立し、たとえば気球が破壊する限界状態を模型実験から決定することができる。

$R_e$ 、 $K$ 、 $F$  の中に含まれる物理量のうち、 $g$  は一定であり、また同一の膜材料を使うものとするれば  $\sigma_M$  も不変である。したがって、模型実験で変え得る量は、 $V$ 、 $L$ 、 $\lambda = \rho_A t$ 、 $\nu$  の四つで、このうち、 $\nu$  は使用する外部流体の物理特性としてきまってくるから、ここでは相似パラメータ  $R_e$ 、 $K$ 、 $F$  の三つを一定にするための条件を  $\nu$  を使って表わして見る。模型と実物との比をプライムをつけて表わせば、上記の条件から次のような関係が求められる。

$$L' = \nu'^{2/3}, \quad V' = \nu'^{1/3}, \quad \lambda' = \nu'^{-4/3} \quad (5)$$

模型実験では寸法比  $L'$  が小さい方が便利だから、(5) 式から当然  $\nu'$  の小さいものを選びなければならない。一番ありふれたものとしては水 ( $\nu' \doteq 0.076$ ) が考えられる。メチルアルコール ( $\nu' \doteq 0.053$ ) なども有望かも知れない。水を外部流体として、水槽の中で模型実験を行なうことを想定すると、(5) 式から得られる数値は第 1 表に示すようになり、約

第 1 表 水を使用する模型実験の寸法比、速度比および膜厚比

	(1) $R_e' = K' = F' = 1$	(2) $R_e' = 0.1, K' = F' = 1$
寸法比 ( $L'$ )	0.18	0.039
速度比 ( $V'$ )	0.42	0.20
$\lambda'$	31	67
膜厚比 ( $t'$ )	27	12

18% の寸法比が必要になる。直径 10 m の気球を考えると、模型寸法は 1.8 m となり、これを入れる水槽としては少なくとも直径 5 m 位にはなるから、現状ではやや過大である。

この点を救済するために考えられることは、まず  $R_e$  数の完全一致をあきらめて、模型の  $R_e$  数を  $R_{eCRIT}$  以上であればいいとすることである。すでに述べたように、 $R_e > R_{eCRIT}$  の状態での模型実験ならば、大体の流線近似が得られよう。大型気球の  $R_e$  数は  $10^8$  位に達し、 $R_{eCRIT}$  は  $10^6$  程度であるから、模型と実物との  $R_e$  数の比  $R_e'$  を 1 の代りに  $10^{-1}$  とおき、その条件で  $L'$ 、 $V'$ 、 $\lambda'$  (使用流体は水) を求めると、その数値は表 1 のようになる。この場合は寸法比が 4% 位になって誠に具合がいい。膜厚比  $t'$  も 12.5 でこれも実現可能であろう。

以上の考察から、水を使う模型実験は今後の気球開発上かなり有力な手段を提供するものと考えられる。

### 3. その他考えられる問題点

空気力学的観点から考えられるその他の問題点を列举すると次のようになる。

(1) 上層大気の乱れについての微細構造を明らかにすること。特にジェット・ストリームのようなところではかなり強い乱流を生じていることが推定され、当然気球破壊の原因となるから、その微細構造についての資料を集める必要がある。このためには、やはり気球を用いた観測を数多く行なう必要がある。

(2) 空気力による気球の変形および膜面フラッタの研究。空気力と膜の弾性とが組合わされて生ずる空力弾性学の応用問題であるが、気球の破壊には大いに関係ある問題で、今後研究を進めて行く必要がある。

### 参 考 文 献

- [1] 東大原子核研究所気球グループ：“プラスチック気球について1 (サイクリングプロジェクト)” 1962年10月。