

# ヘリウムガスの浮力係数

西村 純・山上 隆正・藤井 正美

(1981年9月4日受理)

## 1. はじめに

宇宙科学観測用の気球は約10%の自由浮力をつけ毎分約270 mで上昇させている。より正確には自由浮力の量，気球の総重量によって，また放球時の日射量によって自由浮力を1%程度の精度で決定する必量がある。

浮力の測定に関して日本ではランチャーで直接測定し，使用したガス量から浮力を再確認するという方式をとっている。一方外国ではダイナミックランチングが一般的であり浮力の直接測定ができないので，浮力は使用ガス量のみから求めている。直接測定は正確であり，地上で気球にリークがあった時にも発見できるという利点があるが，風のあるときに測定がむずかしいことおよびランチャーの構造がある程度複雑になるという欠点がある。

又将来より大重量の機器を放球する場合を想定すると，浮力の直接測定のために気球をランチャーに強く固定することにより気球の本体を損傷することが考えられる。将来の大重量機器の放球方式についてはガス量による浮力測定が必要になるものと考え，この方式の検討を行なった。

## 2. ガス量からの浮力推定

ガス量からの浮力推定はガスコンテナの容積がわかっているので，ガス圧測定から使用したガス量すなわち浮力を求めることができる。現在使用しているコンテナの容積は4.92 m<sup>3</sup>，空気およびヘリウムの密度はそれぞれ1.29，0.179 kg / m<sup>3</sup>であるので，20°Cでの浮力係数は

$$(1.29 - 0.179) \times 273 / 293 \times 4.92 = 5.09 \text{ kg}$$

となる。すなわち1気圧分のガスをつめると1 m<sup>3</sup>あたり5.09 kgの浮力がつくはずである。しかし実際には断熱膨張でガス温が下がることを考慮に入れなくてはならない。ガス温を測定するか，ガス温度を推定できればよい。ここでは断熱膨張とポンベの熱伝達を考慮してガス温度変化を推定し，ヘリウムガスの浮力係数を求めることにする。

2-1. ガス温度の計算

ヘリウムガス温度  $T_{He}$  とコンテナの温度  $T_{Fe}$  の変化は

$$\frac{AP}{T_{He}} \frac{dT_{He}}{dt} = \alpha P^{\frac{1}{2}} (T_{Fe} - T_{He})^{\frac{5}{4}} + B \frac{dP}{dt} \dots\dots\dots ①$$

$$C_{Fe} \frac{dT_{Fe}}{dt} = -\alpha P^{\frac{1}{2}} (T_{Fe} - T_{He})^{\frac{5}{4}} + \beta (T_{Air} - T_{Fe})^{\frac{5}{4}} \dots\dots\dots ②$$

と書ける。ここで  $\alpha$ ,  $\beta$  はそれぞれヘリウムおよび空気の自然対流による熱伝達係数,  $C_{Fe}$  は単位長さあたりのコンテナの比熱,  $dP/dt$  はガス注入のスピードである。係数  $A$ ,  $B$  についてはそれぞれヘリウムの比熱と断熱膨張の効果を示す係数で詳しくは附録に示した。

ガスとコンテナとの間の熱交換の時定数  $\tau_{He}$  は①式より

$$\tau_{He} = \frac{AP^{\frac{1}{2}}}{T_{He} \alpha} = 15.3 P^{\frac{1}{2}} \text{ sec} \dots\dots\dots ③$$

と計算される。ガス圧 100 気圧程度のとき約 2 分となる。ガスの圧力を測定する時は、ガス注入をやめて数分後の値を読む必要がある。

一方コンテナと周囲の空気の熱交換による温度変化の時定数  $\tau_{Fe}$  は②式より

$$\tau_{Fe} = C_{Fe} / \beta \dots\dots\dots ④$$

である。附録に示した様に  $C_{Fe}$  は 87,  $\beta$  は  $5.5 \times 10^{-3}$  程度であるので  $\tau_{Fe}$  は 4.4 時間程度となる。コンテナの熱容量が大きくこのように温度変化の時定数が大きいので、②式の空気の自然対流による熱伝達の項は無視することができる。

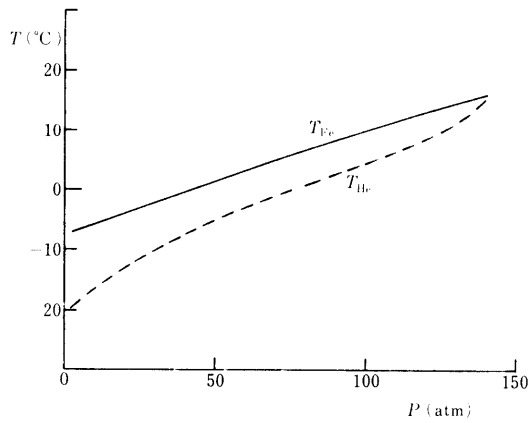


図1 コンテナとヘリウムガスの温度変化  
 $dP/dt = 0.1$  気圧/sec,  $C_{Fe} = 87$  とおいて計算した.

ガスの注入スピードは  $dP/dt \sim 0.1$  気圧/sec 程度でおおむね一定である。ガス温度は①式および②式の連立微分方程式を、ルンゲ・クッタ法で積分して求めることができる。初期のガス圧 140 気圧の場合について、コンテナとガスの温度変化について計算結果の1例を図1に示した。

## 2-2. 浮力係数

ヘリウムガスの浮力係数  $K$  はガス温度の変化を考慮すると、ヘリウムの初期圧  $P_0$ 、終圧  $P$ 、初期温度  $T_0$ 、温度  $T_{He}$  とすれば

$$K = \frac{5.09 (P_0 - P T_0 / T_{He})}{\left[ 1 + \frac{0.05}{100} \frac{(P_0 + P T_0 / T_{He})}{2} \right] (P_0 - P T_{eq} / T_{He})} \quad (5)$$

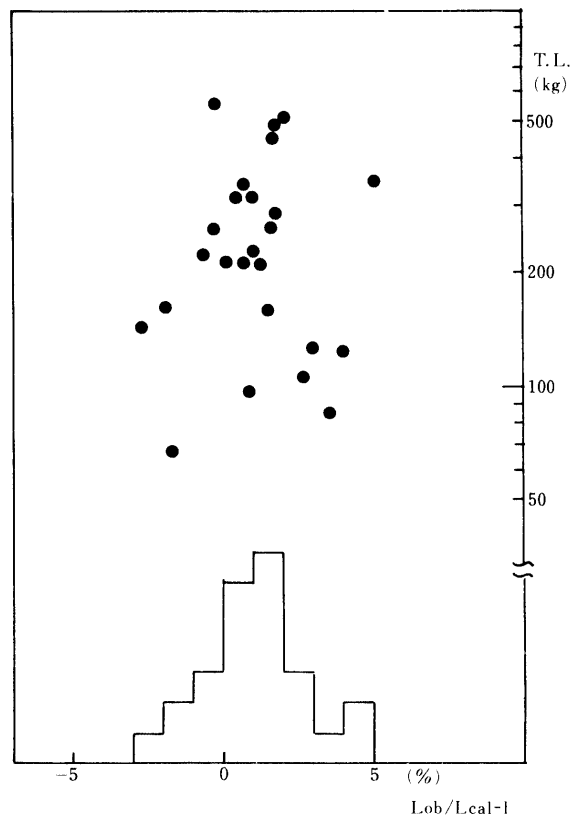


図2 浮力の実測値と計算値の比較  
 $L_{ob}$  は浮力の実測値  $L_{cal}$  は①, ②式を  
 解き⑤式を用いて計算した。

と求まる。ここで  $T_{eq}$  はヘリウムガスとコンテナが熱伝達の結果到達する温度で

$$T_{eq} = T_{He} + \frac{(T_{Fe} - T_{He}) C_{Fe}}{C_{Fe} + AP/T_{He}} \dots\dots\dots ⑥$$

である。⑤式の分子の係数 5.09 はガス温度の変化がないときの浮力係数で、ガスを1気圧ぶんつめると 5.09 kg の浮力がつくことを示している。分母の第1項は、ガス圧が高いときガス分子がつまってくる影響すなわち圧縮係数を考慮したものである。  $PT_0/T_{He}$  は温度変化を補正した真のガス圧、  $PT_{eq}/T_{He}$  は温度変化のあるときの実測値で  $PT_0/T_{He}$  より小さい。すなわちガス温度が低下した時にはみかけ上ガスを多く使ったことになり浮力係数が小さくなることを示している。

計算で求めた浮力係数と使用したガス量から決まる浮力と実際にランチャで測定した浮力を比較したものが図2である。総浮力の異なる種々の気球について比較した。点のばらつきは浮力測定およびガス圧測定の誤差と考えられるが、計算値と実測は±1%の精度で一致している。ただしここでは実測値との一致をよくするため  $C_{Fe} = 60$  とした結果を示した。コンテナの肉厚から計算した熱容量  $C_{Fe} = 87$  を使うと浮力の計算値が実測より2.5%小さくなってしまう。この原因については不明である。

ガス温は初期のガス圧  $P_0$  と使用後の圧力  $P$  の関数になっている。 $P_0$  が140気圧のとき  $P/P_0$  の関数として浮力係数を計算したのが図3の実線である。各点は実際の浮力係数で、各気球の浮力と使用したガス量から逆算したものである。ガス注入の初期の段階はガス温度低下は小さいが、ガス圧変化に対する温度低下の影響が大で浮力係数は小さい。コンテナ中のガスをほとんど使い切るとガス温度低下は大きい、結局はじめのガスを全部使うことになり浮力係数は  $5.09/1.035 = 4.9$  に近づくことになる。ただしここで平均のガス圧を70気圧とし、圧縮係数3.5%をとった。

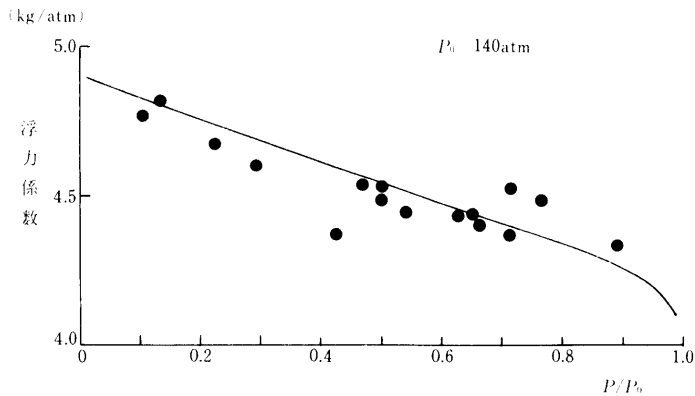


図3 浮力係数とガス圧関係

## 3. ま と め

ヘリウムの断熱膨張とコンテナの熱伝達の効果を考慮して浮力を計算すると実測値とほぼ一致する結果が得られることを示した。従来ガス圧は浮力の再確認のためにのみ使用しており、浮力係数は平均として4.5程度と考えていた。ここに示したようにガス温度の変化を考慮すると浮力係数の精度が向上し、ガス圧のみから気球の浮力を決めることが可能となる。これによって浮力の測定がより正確になると同時に、新しい放球方式を導入する上でも有効であると考えている。ガス温度はこのような計算で推定することができるが、さらに確実に期するためにコンテナのヘリウムガス温度を実測することも検討している。

## 参 考 文 献

- [1] 西村 純, 藤井正美, 山上隆正: 宇宙研報告 9巻1号(B) 167 (1973)

## 附 録

理想気体の断熱膨張の式は

$$P - \frac{r-1}{r} T = \text{const} \quad (\text{A-1})$$

であたえられる。この式を時間微分して

$$\frac{r-1}{r} \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} \quad (\text{A-2})$$

が得られる。ヘリウムガス温度  $T_{\text{He}}$  の変化は、断熱膨張およびコンテナとガスの熱伝達を考慮し

$$\begin{aligned} \rho_0 C_p \left( \frac{P}{P_0} \right) \frac{T_0 V}{T_{\text{He}}} \frac{dT_{\text{He}}}{dt} \\ = \alpha (T_{\text{Fe}} - T_{\text{He}}) + (C_p - C_v) \rho_0 \frac{T_0 V}{P_0} \frac{dP}{dt} \quad (\text{A-3}) \end{aligned}$$

と書ける。コンテナの温度  $T_{\text{Fe}}$  は空気とヘリウムとの間の熱伝達で変化し

$$C_{\text{Fe}} \frac{dT_{\text{Fe}}}{dt} = -\alpha (T_{\text{Fe}} - T_{\text{He}}) + \beta (T_{\text{Air}} - T_{\text{Fe}}) \quad (\text{A-4})$$

となる。ここで  $\alpha$ ,  $\beta$  はそれぞれヘリウムと空気との自然対流による熱伝達係数、 $\rho_0$  はガス密度、 $V$  は単位長さあたりのコンテナ容積、 $C_{\text{Fe}}$  はコンテナの熱容量である。ヘリウムコンテナは266.7 l ボンベ18本組で、全容積は4.926 m<sup>3</sup> である。ボンベは外径  $D = 318$  mm, 肉厚 10.5 mm であるので、 $V = 693$ ,  $C_{\text{Fe}} = 87$  となる。

ヘリウムの自然対流による熱伝達係数  $\alpha$  は

$$\alpha = 0.65 (K/D) (P_r \cdot G_r)^{\frac{1}{4}} \quad (\text{A--5})$$

$$G_r = \frac{\rho^2 g_e D^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (\text{A--6})$$

から計算できる。Kはヘリウムの熱伝導率，Dはポンベの直径，P<sub>r</sub>はプラントル数，G<sub>r</sub>はグルシヨフ数と呼ばれるもので詳しくは(文献1)を参照されたい。

空気とコンテナ間の熱伝達係数βについても同様に計算できる。実際にはポンベの全円周の熱伝達を考えるのでπDを掛けて，α = 1.1 × 10<sup>-2</sup>，β = 5.5 × 10<sup>-3</sup>となる。

(A--3)，(A--4)式を見やすくするために

$$A = \rho_0 C_p T_0 V / P_0 = 42.3$$

$$B = (C_p - C_v) P_0 T_0 V / P_0 = 16.8$$

とおく。ここでP<sub>0</sub>は単位圧力，T<sub>0</sub>は初期温度である。(A--5)，(A--6)式から，熱伝達係数は気圧および温度差の関数となっているので，P<sup>1/2</sup>・ΔT<sup>1/4</sup>を外に出し，(A--3)，(A--4)式を書換えると，本文の①，②式が得られる。