

第 1 章 熱気球の飛行原理

1.1	浮力	.....	1-1
1.2	空気の密度	.....	1-4
1.3	地上における浮力計算	.....	1-5
1.4	上空における浮力計算	.....	1-7
1.5	ロードチャート	.....	1-10
1.6	ロードチャートの読み方	.....	1-12
1.7	ロードチャート使用上の注意点	.....	1-14

1.1 浮力

飛行機のように翼を持たない気球が空を飛ぶことができるのはなぜでしょうか？。この章では気球が空中に浮くことができる基本的な原理 - 浮力について簡単な計算を用いて説明します。

水中にある物体はその物体が押しのけた水の重さに等しい力を上向きに受けます。これは、アルキメデスの原理とも呼ばれていますが、この上向きに受ける力を浮力と呼びます。例えば、お風呂の中で身体が軽く感じるのはこのためです。すなわち、自分の身体で押しのけた水の重さの分だけ浮力を受けているからです。これは空気の場合も同様で、空気中にある物体はその物体が押しのけた空気の重さに等しい浮力を受けているのです。

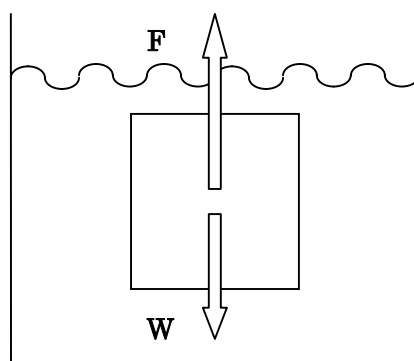


図1 水中の物体が受ける力（1辺が10cmの立方体の場合）

F：物体が水から受ける浮力 **W**：物体に働く重力

図1に示すように、水中の物体には浮力**F**と重力**W**の二つの力が働き、2つの力の大小で水中の物体が浮き上がったり沈んだりします。前述のように

$$(\text{物体が水から受ける浮力 } \mathbf{F}) = (\text{物体が押しのけた水の重さ})$$

であるため、図1の物体は体積が1リットルなので、押しのけた水の重さ、すなわち、浮力は1kg重となります。

図1の物体の重さを0.4kg重とすると、 $\mathbf{F}=1[\text{kg重}]$ 、 $\mathbf{W}=0.4[\text{kg重}]$ で、物体に働く重力より浮力の方が大きいので $\mathbf{F}-\mathbf{W}=1-0.4=0.6[\text{kg重}]$ の上向きの力を受けて物体は浮き上がろうとします。

ここで熱気球が浮かぶ条件を考えてみることにします。気球の体積を V [m^3]、気球の機体の重さ（人、燃料を含む）を W_E [kg 重]、球皮^(注1)内の空気の重さを W_B [kg 重]、球皮内の空気密度を ρ_B [kg/m^3]、気球によって押しのけられた空気の重さを W_0 [kg 重]、大気の密度を ρ_0 [kg/m^3]、とした場合、下記の式(1)を満たせば気球は浮くことができます。

注 1) 球皮：気球の袋の部分、2章参照

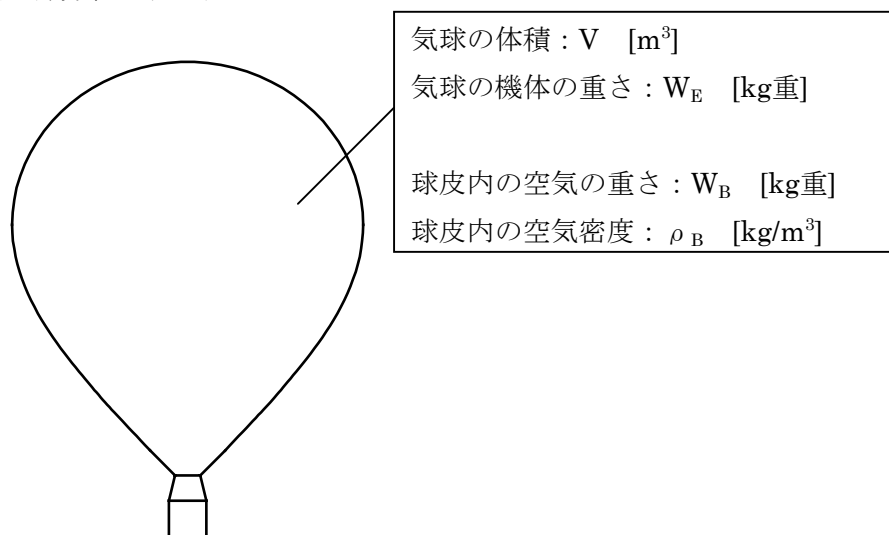


図2 気球にかかる浮力と重力を作り出す要素

(気球が空気から受ける浮力) $>$ (球皮内の空気の重さ) + (気球の機体の重さ) \dots (1)
すなわち

(気球が押しのけた空気の重さ) $>$ (球皮内の空気の重さ) + (気球の機体の重さ) \dots (2)

$$W_0 > W_B + W_E \dots (3)$$

(質量[kg]) = (密度 ρ [kg/m^3]) \times (体積 V [m^3]) = $\rho \times V$ [kg] より
空気の重さ[kg 重]は $\rho \times V$ [kg 重] と表せるので、式(3)に代入すると

$$\rho_0 \times V > \rho_B \times V + W_E \dots (4)$$

なお、ここでは簡単のために気球内部の温度、空気密度は一樣なものとし、気球内の空気と外気の圧力差はないものとして考えています。

式 (4) を変形すると

$$(\rho_0 - \rho_B) \times V - W_E > 0 \dots (5)$$

したがって、式 (5) より、気球が浮くかどうかは、気球内外の空気の密度 ρ_0 、 ρ_B 、気球の体積 V 、気球の機体の重さ W_E により決まることとなります。

コラム① <質量と重さの単位>

「質量」とは物体の動きにくさの度合いを表すもので、地球上でも月面上でも変わることはなく、その単位は **kg (キログラム)** です。

「重さ」は物体に働く重力の大きさを表すもので、その単位として **kg 重 (キログラム重)** と **N (ニュートン)** があります。「重量」という言葉も「重さ」と同じ意味で用いられます。

「浮力」は力であり、浮力に釣り合うのは「質量」ではなく「重さ」ということとなります

1 [kg 重]とは、地球上で質量 1 [kg]の物体にかかる重力の大きさを示します。一方、1 [N]は質量 1 [kg]の物体に $1 [m/s^2]$ の加速度を生じさせる力の大きさです。

$$1 [N] = 1 [Kg \cdot m/s^2] \quad \dots (a)$$

体感的には、**kg 重**の方が分かりやすいため、本書ではこちらを用いていますが、国際単位としては **N** が用いられるので両方覚えておく方が便利でしょう。ちなみに、

$$1 [kg \text{ 重}] \doteq 9.8 [N] \quad \dots (b)$$

という関係になります。

1.2 空気の密度

前述のように、気球が浮くかどうかには、空気の密度が関係していることがわかりました。そこで、次は、空気の密度について考えてみます。

乾燥空気の密度 ρ [kg/m^3] は下記の式(6)で表されます。(理科年表より)

$$\rho = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15 + t} \times \frac{P}{1013.25} \quad \dots (6)$$

ここで、

1.293 : 0°C、1013.25hPa での空気密度 [kg/m^3]、 t : 空気温度 [°C]、 P : 大気圧 [hPa] となっています。

表 1 乾燥空気における空気密度
(標準大気圧 1013.25hPa)

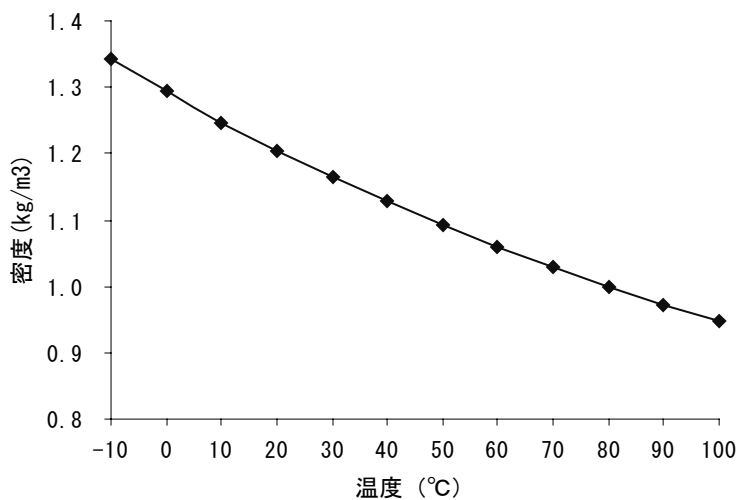


図3 乾燥空気密度の温度特性
(標準大気圧 1013.25hPa)

温度[°C]	密度 [kg/m³]
-10	1.342
0	1.293
10	1.247
20	1.205
30	1.165
40	1.128
50	1.093
60	1.060
70	1.029
80	1.000
90	0.972
100	0.946

図 3 は式 (6) をグラフ化したもので、表 1 は各温度における空気密度の値を示しています。ただし、これらは乾燥空気 (湿度 0%) の密度であることを注意してください。

図 3 からわかるように温度が高いほど空気の密度は小さくなります。つまり、温度が高い空気の方が軽いということです。

そのため、熱気球の内部の空気を加熱すれば空気の密度が小さくなって気球は上昇し、内部の空気が冷えて空気の密度が大きくなれば気球は降下することになります。

1.3 地上における浮力計算

次は、いよいよ、気球が離陸するための条件を考えてみます。体積 2000m^3 、機体重量（人、燃料を含む） 450kg 重の熱気球が離陸するには気球内の空気を何度まで加熱すればいいでしょうか？。

外気温 15°C 、気圧 1013.25hPa 、という条件で A) 気球内温度 50°C の気球と B) 気球内温度 90°C の気球について浮力を計算してみると
外気温 15°C での空気密度 ρ_0 は式 (6) から

$$\rho_0 = 1.226 \quad [\text{kg/m}^3]$$

A) 気球内温度 50°C の気球

式 (6) から 気球内の空気密度

$$\rho_1 = 1.093 \quad [\text{kg/m}^3]$$

式 (5) より

$$(\rho_0 - \rho_1) \times V - M = (1.226 - 1.093) \times 2000 - 450 = -184 < 0$$

この気球は浮力が気球の総重量よりも小さいので、離陸できません。

B) 気球内温度 90°C の気球

式 (6) から 気球内の空気密度

$$\rho_2 = 0.972 \quad [\text{kg/m}^3]$$

式 (5) より

$$(\rho_0 - \rho_2) \times V - M = (1.226 - 0.972) \times 2000 - 450 = 58 > 0$$

この気球は浮力が気球の総重量よりも大きいので、離陸可能となります。

A)、B) では気球内の温度から浮力を計算しましたが、今度は浮力と気球の総重量が釣り合う気球内温度を求めてみます。

この場合の空気密度を ρ_3 とすると、式 (5) より

$$(\rho_0 - \rho_3) \times V - M = 0$$

となる場合に力が釣り合う。この式を変形すると、

$$\rho_3 \times V = \rho_0 \times V - M$$

$$\rho_3 = \rho_0 - \frac{M}{V} = 1.226 - \frac{450}{2000} = 1.001 \quad [\text{kg/m}^3]$$

このときの気球内の温度は、式 (6) に $\rho_3 = 1.001 \text{ [kg/m}^3]$ 、 $P = 1013.25 \text{ [hPa]}$ を代入することで求められます。したがって、

$$1.001 = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15 + t} \times \frac{1013.25}{1013.25}$$

$$t = 79.7 \quad [^\circ\text{C}]$$

以上から、この気球は気球内の温度を 79.7°C まで加熱すれば離陸可能となります。

1.4 上空における浮力計算

一般的に、高度が上がるにつれて気圧と気温が下がっていきます。では高度によって浮力がどのように変化するのか考えてみましょう。

高度と気温・気圧の関係は気象条件によって変化するので、ここでは国際標準大気というモデル大気における気温・気圧の関係を使用して計算してみます。国際標準大気 (ISA:International Standard Atmosphere) は以下のように定義されています。

- ・海面上 (高度 0m) における気圧 : 1013.25hPa
- ・海面上 (高度 0m) における気温 : 15°C
- ・高度 0~11km の気温変化率 (遞減率とも言う) : -6.5°C/km
- ・高度 11~20km の気温変化率 : 0°C/km
- ・高度 20~32km の気温変化率 : +1.0°C/km

また、対流圏(高度 0~11km)における高度 h [m]と気圧 P [hPa]の関係は以下の式で求められます。(『気象学』 関岡 満 著 東京教学社 より)

$$P = P_0 \times \left[\frac{t_0 + 273.15 - \gamma \times h}{t_0 + 273.15} \right]^{\frac{g}{R\gamma}} \quad \dots (7)$$

ここで、 P : 高度 h [m]での気圧[hPa]、 P_0 : 高度 0m での気圧 1013.25[hPa]、 t_0 : 高度 0m での気温 15[°C]、 γ : 気温変化率 0.0065[°C/m]、 R : 乾燥空気の気体定数 287.04[J / kg K]、 g : 重力加速度 9.80665[m/s²]とすると、

$$P = P_0 \times \left[1 - \frac{0.0065 \times h}{288.15} \right]^{5.2561} \quad \dots (8)$$

また、式 (8) を変形して気圧 P [hPa]から高度 h [m]を求める式にすると次のようになります。

$$h = 153.8 \times (t_0 + 273.2) \times \left\{ 1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.1902} \right\} \quad \dots (9)$$

電子式の気圧高度計などはこの計算式を使って気圧から高度を算出しています。

ここで、例として高度 2000m (6600ft) の気温と気圧を求めてみると、

- ・ 気温： 国際標準大気 の定義より

$$15 [^{\circ}\text{C} \cdot \text{地上気温}] - 6.5 [^{\circ}\text{C}/\text{km}] \times 2 [\text{km}] = 2 [^{\circ}\text{C}]$$

- ・ 気圧： 式 (8) を使って

$$P = 1013.25 \times \left[1 - \frac{0.0065 \times 2000}{288.15} \right]^{5.2561} = 794.9 \quad [\text{hPa}]$$

したがって、空気密度は、式 (3) より、

$$\rho = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15 + 2} \times \frac{794.9}{1013.25} = 1.007 \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

となります。

地上における空気密度は 1.3 節で求めたように 15°C、1013.25hPa で $\rho_0 = 1.226 [\text{kg}/\text{m}^3]$ なので、高度が高いほうが空気の密度が小さい。すなわち、高度が上がると、気温の低下による空気密度の増加よりも、気圧の低下による空気密度の低下の方が大きい。したがって、気球が外気から受ける浮力は小さくなります。

そこで、1.3 節と同様に体積 2000m^3 、機体重量 (人、燃料を含む) 450kg の熱気球が、高度 2000m において、浮力と気球の総重量が釣り合う気球内温度を求めてみると ρ_h : 高度 2000m での空気密度、 ρ_{B2} : 高度 2000m での気球内部の空気密度 として

$$(\rho_h - \rho_{B2}) \times V - M = 0$$

となる場合に力が釣り合うので、この式を変形して

$$\rho_{B2} \times V = \rho_h \times V - M$$

$$\rho_{B2} = \rho_h - \frac{M}{V} = 1.007 - \frac{450}{2000} = 0.782 \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

このときの気球内の温度は、式 (6) に $\rho_{B2}=0.782[\text{kg/m}^3]$ 、 $P=794.9[\text{hPa}]$ を代入することで求められます。したがって、

$$0.782 = 1.293 \times \frac{273.15}{273.15+t} \times \frac{794.9}{1013.25}$$

$$t = 81.2 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

地上でこの気球が離陸するのに必要な気球内温度は 79.7°C であったのに対して、高度 2000m では浮力が減少した分、浮力と気球の総重量が釣り合う気球内温度は高くなっています。このように、気球の体積・重量が同じでも高度が異なれば気球の総重量が浮力と釣り合う気球内温度は異なり、高度が高くなるほど、より多くの熱が必要となります。

ただし、実際の大気の状態は上記の計算に使用した国際標準大気とは異なります。特に高度と気温の関係は気象条件、地形によって変化するので、常に気温の遞減率 $-6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ が適用できるとは限りません。高度が高くなるとともに気温も上昇するような場合（逆転層という）もありますので注意が必要です。

1.5 ロードチャート

気球が上昇するためには球皮内部の空気を加熱して温度を上げればいいのですが、球皮の素材である化学繊維（ナイロンなど）には耐熱限度があります。そのため、球皮内部の空気を加熱しすぎると球皮が高温に耐え切れず軟化、さらには溶融してしまうことになります。

したがって、フライトを行う前には、その日の条件に合わせた適切な搭載重量を計算し、その範囲内で搭乗人数・搭載燃料を決定する必要があります。なぜならば、得られる浮力に対して、搭載重量が大きすぎると、過度の温度上昇を招くことになるからです。

しかし、前述のように、高度によって、同じ気球内温度でも得られる浮力が異なるため、離陸前に、その都度計算するのは容易ではありません。そこで、この計算式をグラフ化し、浮力計算を容易にしたものが、ロードチャートです。これを利用すれば外気温、予定最高高度から気球内温度を 100℃にした場合に得られる浮力を簡単に求めることができます。

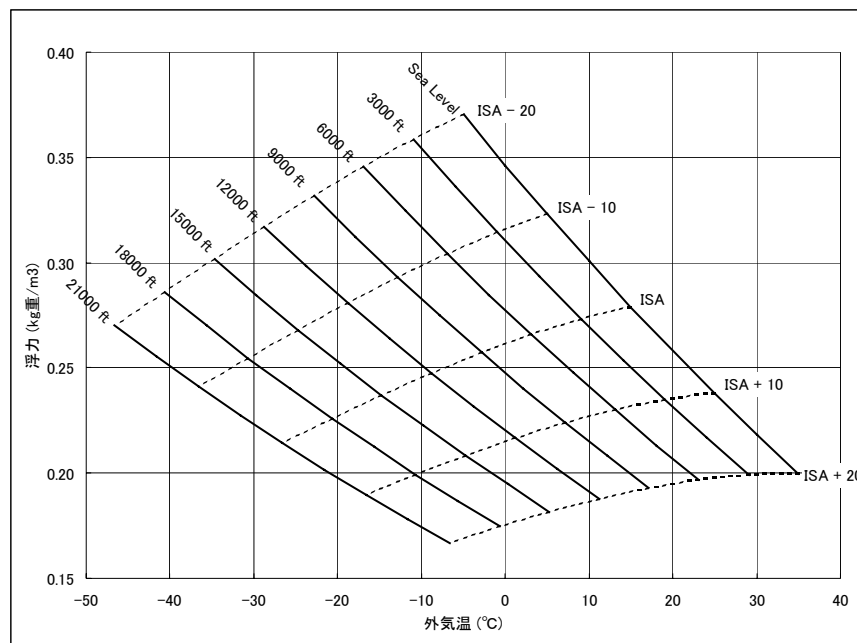


図4 ロードチャート

ロードチャート中の ISA という曲線は国際標準大気での各高度における、気球内温度が 100℃、体積 1m³の気球が受ける浮力を示します。したがって、例えば 2000m³の気球であれば、この値の 2000 倍の浮力を得られることになります。また、ISA+○は国際標準大気からそれぞれ温度を変化させた場合の浮力を示しています。ただし、ここでは、外気温が標準大気と異なる場合でも、外気圧は標準大気と同じとしています。

コラム② <ロードチャートにおける浮力の定義について>

ロードチャートから求められる浮力は、前述の力学的に定義された浮力から空気自身の重さを引いたものであることに注意が必要です。

これは、力学における浮力(buoyancy)が式(4)における $\rho_0 \times V$ なのに対して、ロードチャートで求められる浮力(lift：持ち上げ力とでも訳すのが適当かもしれない)は式(5)における $(\rho_0 - \rho_B) \times V$ を意味しています。

このように、本来違う意味の言葉であるのに、日本語では、どちらも「浮力」とされているため、混乱を生じやすいですが、ここでは、1.4 節までは前者の意味で、1.5 節以後は後者の意味で使用しています。これは、ロードチャートの計算においては、力学的な厳密性よりも、気球界で一般的に利用されている定義に従い、利用しやすさを優先したためです。

1.6 ロードチャートの読み方

次に、実際にロードチャートを利用して、地上外気温 8℃、予定最高高度 6000ft、体積 2000m³ の気球でフライトする場合の浮力を計算してみます。

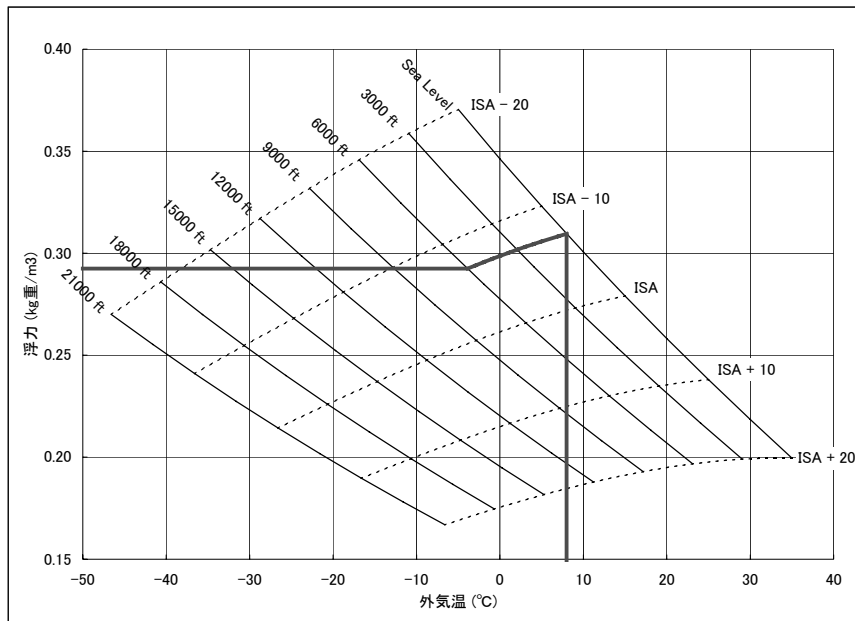


図5 ロードチャートの計算例

(地上外気温 8℃、予定最高高度 6000ft の場合の計算例)

- ①フライト中に予想される地上外気温（この例では 8℃）から縦軸に平行な線を引き、sea level の曲線との交点を求めます。
- ②求めた交点から ISA と書かれている曲線に平行に曲線を引き、その日の予定最高高度との交点を求めます。
- ③②で求めた交点から横軸に平行な線を引き縦軸との交点を求めます。
この値が、この日の予定最高高度における浮力となります。

この例では、約 0.28kg 重/m³ が、気球内温度 100℃、体積 1m³ の気球が得られる浮力となります。このように、ロードチャートから求められるのは 1m³ あたりの浮力なので、使用する気球の体積をかけたものが、総浮力となります。体積が 2000m³ の気球の場合は

$$0.28 \text{ [kg 重/m}^3\text{]} \times 2000 \text{ [m}^3\text{]} = 560 \text{ [kg 重]}$$

となり、これがこの気球の総浮力となります。

気球の機材重量（球皮＋バーナー＋バスケット＋その他装備品）を 200kg 重とした場合

$$\begin{aligned} \text{総浮力} & - \text{機材重量} = \text{搭載可能重量} \quad \text{となるので} \\ 560 \text{ [kg 重]} & - 200 \text{ [kg 重]} = 360 \text{ [kg 重]} \end{aligned}$$

よって、この気球の搭載可能重量は 360 [kg 重] となり、この範囲内に搭乗人員と搭載燃料の重さの合計が納まるようにすれば良いことになります。

ロードチャート使用上の注意点

- 1) 地上外気温はフライト中に予想される最高気温で計算すること。
- 2) ロードチャートから求められる総浮力は標準気圧下における総浮力である。しかし、実際には地上気圧は日々異なり、気温についても逆転層がある場合は高度とともに気温が上昇するため、ロードチャートで求めた総浮力以下であればよいというものではない。したがって、余裕を持った搭載重量にしなければならない。
- 3) 気球メーカーの発行するフライトマニュアルにロードチャートが記載されている場合はそれを使用すること。ロードチャートによっては、 1000ft^3 あたりの浮力をポンド(lbs)で表しているものもある。この場合は、ポンド(lbs)をキログラム(kg)に換算する必要がある。

ロードチャートで求めた離陸総重量を超える重量での離陸は、球皮内の温度がメーカーの定めている運用限界を超え、球皮に致命的なダメージを与えることが考えられるため、絶対に行ってはならない。特に夏場や体積の小さい気球でフライトを行う場合は注意が必要である。また、急上昇や、急降下時の制動も、過度の温度上昇を招くことを認識しておかなければならない。

