

気球上昇計による気球高度オートコントロール

岡部 選司・西村 純・太田 茂雄
藤井 正美・狛 豊

(1981年9月4日受理)

はじめに

気球の上下運動を観測する上昇計はこの数年にわたって開発をつづけてきたが、最近市販で極めて高感度の微差圧計が得られるようになり高精度の上昇計を作ることができるようになった。昭和55年度はこの上昇計に飛行中に零点較正を入れる方式のものを開発し、上昇計の温度ドリフトの影響をとり除くことを試みた。結果は良好で気球の上下運動を1～2 cm/secの精度で検出できるようになった。

気球が上空浮遊中の日没補償や、観測のために一定速度で高度を下げる操作は、従来レーダートランスポンダで気球の高度変化を観測しながら、地上で判断してコマンドを送ることによって行なわれていた。しかしこのような高精度の上昇計が出来ると、上昇計からのデータを使って演算し、オートマティックに操作を行なうことが可能となる。昭和55年度は第一次実験でB₅-100にこの装置を搭載し、試験を行った所基礎データを得ると同時に一応の成果をあげることができた。今後改良を加え更に完全なものにしたいと考えている。

高精度の上昇計を気球に搭載したため、気球の水平浮遊時における微妙な運動も観測された。これは従来も上昇計を搭載した場合観測されていたが、今回は上昇計の感度が上ったためより明確に運動をとらえることができた。この運動は気球のハンティングと大気自身の周期的な運動にもとずいているが、若干の解析を試みたのでその内容もあわせて報告することとした。

1. 上昇計の原理

細管を通して外気とつながっている容積一定の容器を、大気中で垂直方向に移動させると、容器内外に圧力差が生ずる。この圧力差を測定することによって、気球の上昇及び下降速度が求められる。上昇計の原理についてはすでに文献〔1〕〔2〕で詳しく述べてあるので、ここではその概要を述べることにする。

文献〔1〕に述べてある様に、気球が一定速度で上昇及び下降しているとき、差圧 Δp_{eq}

と速度 v との間には次の関係が成り立っている。

$$\Delta P_{eq} = \frac{\beta}{\alpha} V v \dots\dots\dots (1)$$

ここで V は容器の容積、 α は細管の空気流入抵抗で空気の粘性係数に比例する量である。又 β は高度とともに大気圧が低下する割合を示す量である。式(1)から差圧 ΔP_{eq} は速度 v に比例しており、大気圧に無関係である。したがって差圧 ΔP_{eq} を観測することによって上昇速度を知ることができる。又等温大気の場合の感度は高度によらず一定である。

上昇計の応答時間 τ は

$$\tau = \frac{V}{\alpha P} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。応答時間 τ は大気圧 P に逆比例しているため、高々度になるにつれて長くなる。大気圧の高度変化による変動が、そこでの気圧に比例しているためである。式(1)式(2)より

$$\tau = \frac{\Delta P_{eq}}{\beta v P} \dots\dots\dots (3)$$

となる。大気圧 P が低下するにつれて一定の速度 v に対して ΔP_{eq} を得よえとする応答時間 τ が大きくなる。これは応答時間の間に上昇した高度 τv によって変化した気圧量が、差圧 ΔP_{eq} となるためである。したがって応答時間を短くすると、差圧が小さくなり感度が悪くなる。感度を高めると応答時間が長くなる。感度をよくし、かつ応答時間を短くするにはできるだけ小さな差圧迄測定できる差圧計が必要となる。最近では市販で精度の高い差圧計がでてきたので高性能の上昇計を作ることができるようになった。

2. 上昇計の構造と性能

2-1 リラクセーションタイムについて

上昇計の構造及び性能については図1、表1に示した。

上昇計は差圧計に容積 100 cm^3 の円筒形の容器を取りつけたもので、容器は細管を通して外気とつながっており、大気圧と容器の内圧との差圧を差圧計で測定する構造になっている。差圧計の零点は温度によってドリフトするので容器に電磁弁が取り付け、電磁弁をある時間間隔で開くことによって差圧計の較正を行なった。この結果従来の上昇計に比較して著しく高性能のものが作られ、精度の高い観測が行なえるようになった。

昭和55年度に試作した2種類の上昇計は構造及び性能において若干異なっている。A型上昇計及びB型上昇計の性能で異なる点は、使用した差圧計の圧力範囲が $\pm 2 \text{ gr/cm}^2$ 、 $\pm 0.78 \text{ gr/cm}^2$ であり、共に測定範囲を 600 m/min 迄としたため、この結果リラクセーションタイムが 1.5 sec、0.58 sec となっている。B型上昇計の方がリラクセーションタイムが短くなっているのは、圧力範囲がA型上昇計の約 $\frac{1}{3}$ になっているためである。両方の上昇計は、毎秒数 cm ま

表1 上昇計の機能

	A 型 上 昇 計	B 型 上 昇 計
速度範囲	± 600 m/min	± 600 m/min
リラクゼーションタイム	1.5 sec (760 mmHg)	0.58 sec (760 mmHg)
差圧計	MP 45 パリダイン社	モデル 239 セトラ社
圧力範囲	± 2 g/cm ²	± 0.7 g/cm ²
直線性	± 0.5 % FS	0.1 % FS
ヒステリシス	0.1 % FS	0.1 % FS
ゼロシフト	0.018 % FS/°C	0.036 % FS/°C
感度シフト	0.036 % FS/°C	0.036 % FS/°C
温度補償範囲	- 18 ~ 71 °C	- 54 ~ 121 °C
励起電圧	5 V 3 KHz ~ 5 KHz	24 VDC
出力	25 mV/V	± 2.5 V
重量	340 g	230 g

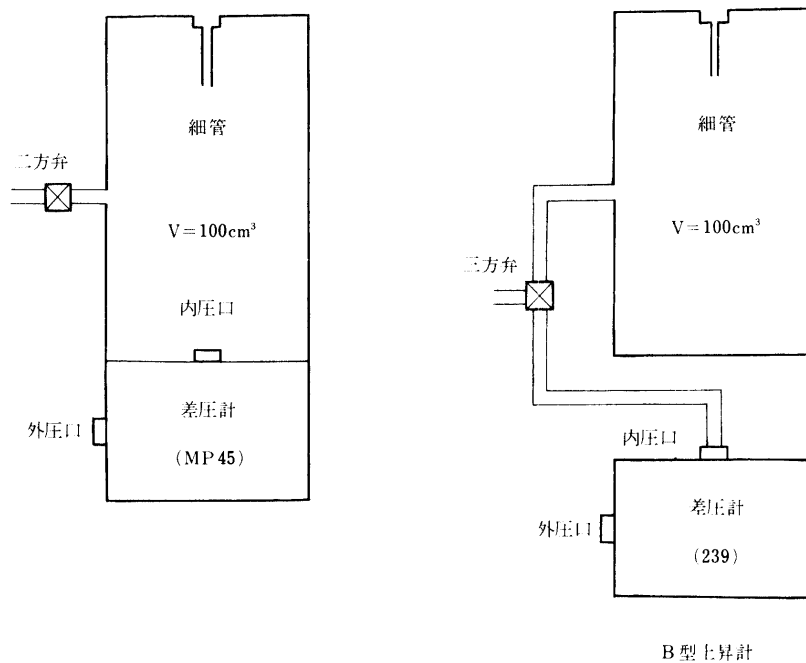


図1 上昇計の構造

での上昇速度を測定できる感度がある。勿論B型の方がA型に比較して高感度であり、実際に毎秒1cm程度の上昇速度を検出することができた。

図1に示すようにそれぞれの上昇計は零点校正の方法が異なっている。A型上昇計は差圧が零になるまで二方弁により容器に空気の流入あるいは流出を行なう方法をとっている。この場合零点校正を行った後観測が正常に行なわれる迄にはリラクゼーションタイムの何倍かの時間を必要とする。そこでB型上昇計では、三方弁により差圧計の圧力口にたまっているごくわずかの空気(1~2cm)のみを逃がす構造をとることにした。したがって二方弁方式に比べ三方弁方式は $1/50 \sim 1/100$ 程度の短時間で零点校正後の観測を行なうことができる利点をもっている。

この後者の特長は高々度になって上昇計のリラクゼーションタイムが長くなるにつれてさらに有利になってくる。たとえばA型上昇計の場合高度30km(13mb)においてのリラクゼーションタイムは117秒であり、零点校正後の応答時間に117秒の数倍もの時間を必要としているが、B型上昇計の場合は、どの高度においてもほとんど回復時間を必要としない。

図2に上昇中における上昇計のデーターを示した。図2で上部がB型上昇計、下部がA型上昇計であり、零点校正時の様子を示している。

図3はそれぞれの上昇計の気圧によるリラクゼーションタイムを表わしており、気圧が低くなるにしたがってリラクゼーションタイムが長くなるようすがわかる。図中の・印はA型上昇計の実測のリラクゼーションタイムの値であり、理論値とほぼ一致している。

気球高度に対するオートコントロール用の飛翔試験(B5-100 55年5月12日放球)には、B型上昇計を搭載し、零点校正は10分間に約10秒の一定間隔で行なった。

2-2. 上昇計の感度変化

上昇計の内圧変動は(3)式からわかる様に出力はリラクゼーションタイムの間におきる圧力の変化

$$\Delta P_{eq} = \beta P v \tau = \rho v \tau \dots\dots\dots (4)$$

が出力となっている。空気密度(ρ)は気圧に比例し、 τ は気圧に逆比例するので結果として ΔP_{eq} は速度に比例する。一方空気の密度は大気温度に逆比例するので、地上と上空では同じ速度でも出力は違ってくる。 τ は空気の粘性係数に比例し、粘性係数は温度の平方根に

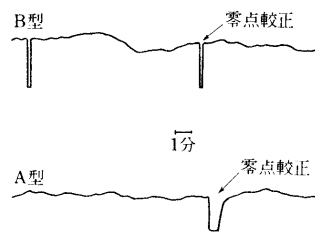


図2 A, B型上昇計の零点校正と、リラクゼーションタイム

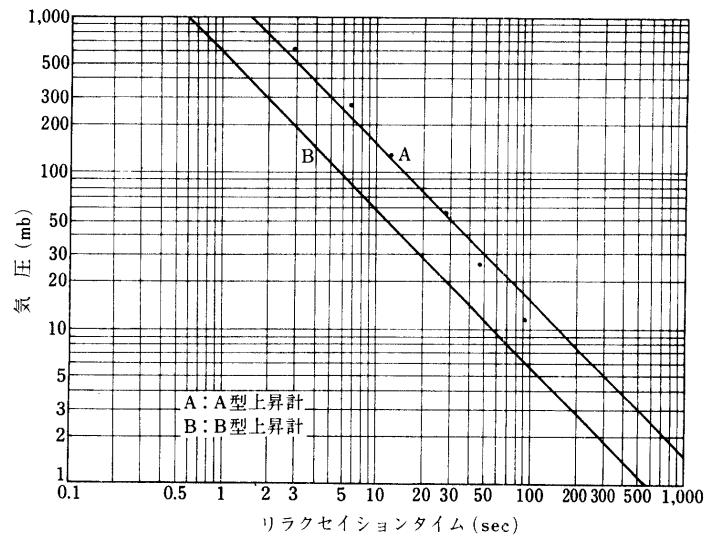


図3 リラクゼーションタイム

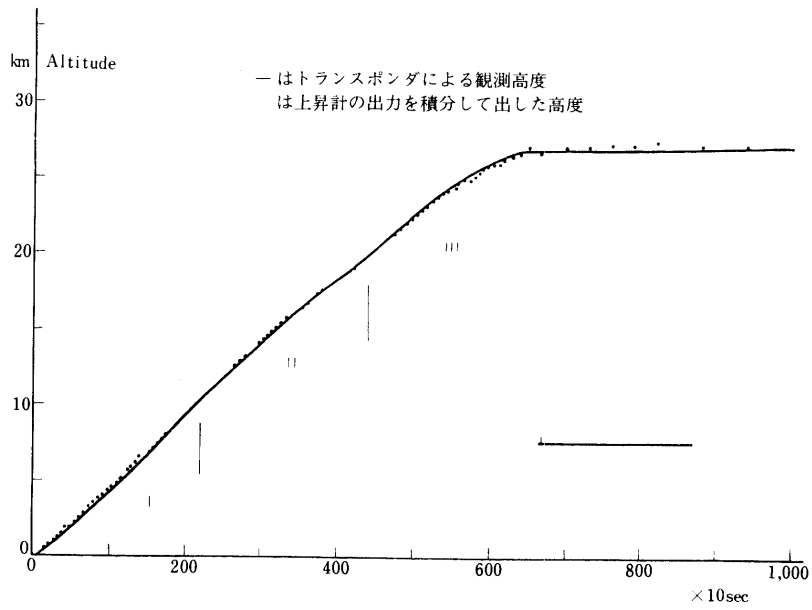


図4 気球高度と上昇計

略比例しているのです、この点も考慮する必要がある。併し上昇計はゴンドラ内におかれているので大気温度程変化が激しくない。

こゝではまず、 τ の温度変化を無視して考察をすゝめ、ついでこの補正を行なうこととする。

気球上昇中の高度を0~10km, 10km~20km, 20km~27kmの領域にわけ、各々の領域について上昇計で測定された速度を時間について積分する。この結果を測距で観測した高度と比較してよい一致が得られるための上昇計の感度を算出する。結果は図4に示した。

地上で校正した上昇計の感度を各高度別に求め、気温変動にともなう空気密度の変化による感度変化を計算し比較する。ついで上昇計の温度変化にともなう粘性係数の変化を考慮に入れた結果を表2に示した。

表2 高度別による感度変動

高 度	観測値	平均気温 *(T)	T_0 **/T	上昇計温度	粘性係数による補正
0~10km	1.08	265° K	1.11	2.2°C	1.11
10~20km	1.39	217.4° K	1.35	2.0°C	1.35
20~27km	1.18	221.6° K	1.32	1.8°C	1.31

* 三陸上空5月の平均気温

** T_0 として地上校正時の気温20°Cをとった。

表2からわかる様に高度20km迄はほぼ感度変化は気温の変化だけで説明できる。これは上昇計の温度が未だ大きく変化していないためである。高度20km以上になると上昇計の温度変化による粘性係数の変化を考察しても感度の変化は説明できない。原因は今の所よくわからない。しかし日中から夜間にかけて浮遊する長時間観測においては上昇計の温度変化がかな

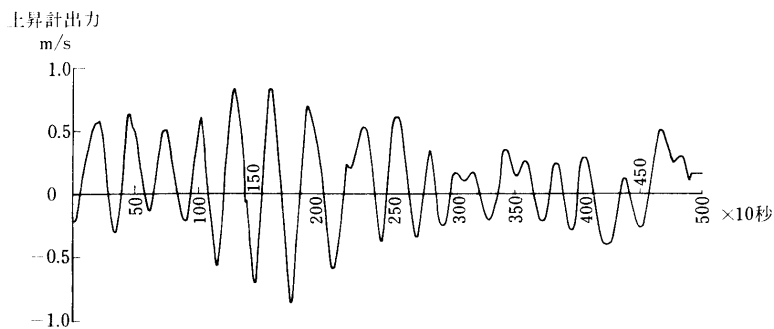


図5 水平浮遊中の上昇計出力

りあり、この例では -10°C ~ 20°C の範囲にわたっているので、上昇計を一定温度に保つことが重要であることを示している。一方差圧計の感度の温度変動は表1に示した通り 0.006% / $^{\circ}\text{C}$ であり、数十度の温度変動に対しては問題とならない。

3. 水平浮遊中の気球の運動

上昇計によって観測した気球の運動については、文献[1]に詳しい、今回の観測で得られた一部を図5に示したが、数分間周期の運動が明瞭に見られる。気球のハンティング周期は文献[1]に示した通り、5~6分のものでありこの運動は気球のハンティングが主な部分を示していると思われる。周波数解析を行った結果は図6に示したが、5分程度の所にすどいピークが見られ、6分附近にも小さなピークと40分附近にも盛り上がりが見られる。

アメリカ及びフランスではスーパーブレッシャー気球を使って大気の動きを観測している[2]が、その結果によれば大気の振動として数分間のLee波、40分程度の重力波があるとされている。図6に参考のために彼等の結果を示しておいた。

気球のハンティングは気球の上下動にともなう断熱圧縮と膨脹によりガス温度が変化することに起因している。このガス温度の大気中への熱伝達によりハンティングは減衰することになる。又気球の空気抵抗によっても運動は減衰する。計算の結果文献[1]によれば2~3周期でハンティングはおさまる筈である。実際に何周期にもわたってきれいに振動運動がつづくのは大気運動にこの周期に近いものが存在し、ハンティングを励起しているためと考えられる。

上昇計で観測される上下運動の速度は、上昇計にリラクゼーションタイムがあるので実際より小さい値を示している。気球の実際の運動を

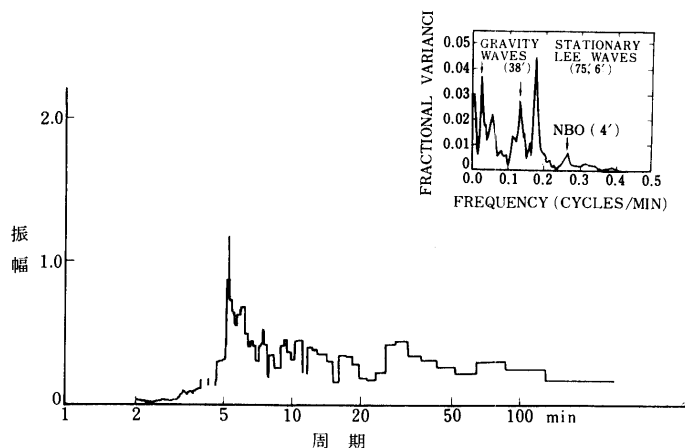


図6 気球上下速度のパワースペクトル
右上の図はフランスにおける測定例

$$v_0 e^{i\omega_0 t}$$

とすれば、観測される速度 v は

$$v = \frac{v_0 e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau} \int_0^t e^{+\frac{t}{\tau}} e^{i\omega_0 t} dt \approx \frac{v_0 e^{i\omega_0 t}}{1 + i\omega_0 \tau} = \frac{v_0 e^{i(\omega_0 t + \delta)}}{\sqrt{1 + \omega_0^2 \tau^2}}$$

$$\text{但し } \delta = \tan^{-1} \omega_0 \tau$$

となる。従って速度のピーク値は $\frac{1}{\sqrt{1 + \omega_0^2 \tau^2}}$ となって観測される。水平浮遊高度での上昇計のリラクセーションタイムは $\tau = 25$ 秒

$$\text{程度であるので、5分周期の運動に対して } \omega_0 \tau = \frac{2T \times 25 \text{ sec}}{5 \text{ min}} = 0.52$$

となり、気球運動の速度のピーク値 v_0 は $v_0 / \sqrt{1 + \omega_0^2 \tau^2} = 0.89 v_0$ として観測される。又位相は $\delta = \tan^{-1} \omega_0 \tau = 27^\circ$ で時間に直すと約23秒のおくれとなっている。

4. オートコントロール

気球の上下運動がわかれば、日没補償や一定速度での降下のためのコントロールを行なうことができる。厳密には気球の運動は文献 [3] に示す様にガス温度の変化が加わり大変複雑である。しかしこれまでの経験から気球の速度を v_m / sec 変化させるには全重量の 2% だけ浮力を変化させればほぼよいことがわかっている。又高度により大気温度が変化するのでその補償を行なう必要がある。通常観測が行なわれる高度 30km 附近以上では 1 km あたり 0.7 °C 程度変化するのでその補償分は 0.3 ΔH % 程度となる。但し ΔH は希望高度からのズレで km で測ってある。

ΔH の測定には精密な高度計を用いればよい、しかし 30km 附近では現在最も精度よい気圧計を用いても高度差の精度は高々 ± 100 m である。この上昇計で観測された速度を積分すると、データに 1 cm/sec の系統的なズレがあっても 1 時間の積分の結果 36 m 程度の誤差を生ずるに過ぎない。

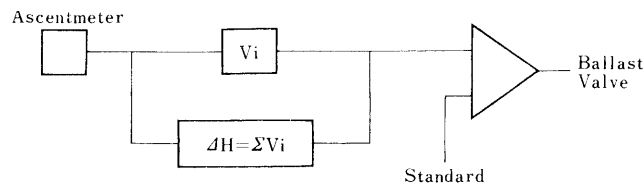


図7 オートコントロールの構成

前節で述べた様に気球は5～6分の周期を持つ運動をしているので、この影響を消すため速度と高度の平均値を導くには最低10～15分間の積分時間が必要であり、以下に述べる実験においてもこの程度の積分を行ったコントロールを行った。

上昇計のデータ処理は将来は機上で行なうことを考えているが、今回は最初のことであるので一旦地上にデータを送り、地上でデータ処理を行った後計算された量のパラスト投下、及び弁の開閉を行った。

4-1. 日没補償

上昇計を搭載したB₅-100は5月12日17時41分に放球し、翌13日に日没をむかえたので日没補償を試みていた。

当時B₅-100は139°55'E, 39°16'Nで鳥海山の上空附近を浮遊していたが、同附近での日没時刻は

地上日没	18時45分
上空日没 (高度27km)	19時06分

であった。

当初上昇計のデータ積算は、15分間に一回行っていたが、日没の影響を補償するのに遅れ気味であるので10分間の積算方式にきりかえた。

コントロールとしては前に述べた様に $(2v + 0.3 \Delta H) \%$ をとり、パラスト投下の最少単位としては投下時間1秒に相当する。全重量の0.2% (0.2 kg)を採用した。これは降下速度10cm/sec (6 m/min)、高度差500 mにあたる。

日没補償の実際は図8に示したが、パラスト投下が幾分遅れぎみで、結果として水平浮遊

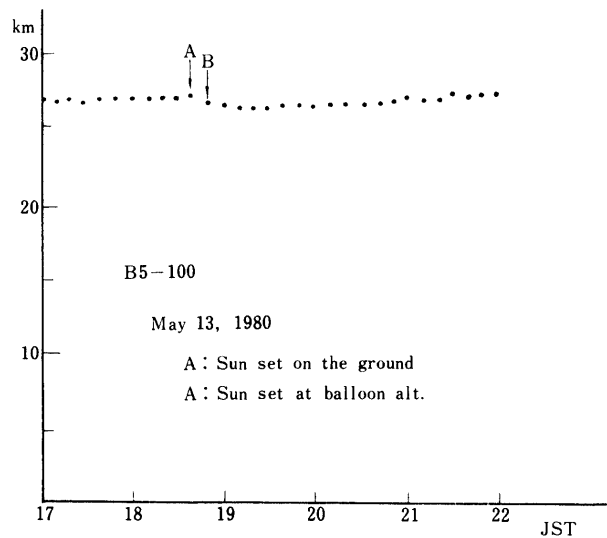


図8 日没補償のオートコントロール

状態から500 m下った附近で平衡に達している。

今後改善すべきこととして次の2点が考えられる。1つは日没効果の場合にはガス温度の低下の影響が非常に早いので、10分間隔の積算を行ってもバラスト投下が遅れ、高度を失う結果となっている。5分間隔程度の積算を行なう必要があり、このためハンティングの影響を避けるようなプログラムが必要となる。

第2の点は、今回使用したコントロール方式 ($2v + 0.3 \Delta H$) % のバラスト投下は高度の低下を回復する要素をあまり含んでいない。バラストの最小投下量が $\Delta H = 600 \text{ m}$ に対応するので、予定高度から500 m下を水平浮遊する気球に対してはバラスト補償は行なわれないことになる。

むしろ予定高度へ一定時間後に復帰できる様に改良すべきで、この考察については後に述べることにしたい。

4-2. 降下速度コントロール

気球観測では高度を変えて観測を行なう必要がある場合が屢々おきる。この場合にも一般には高度気圧計の変化を観測しつつ弁の開閉を行って降下速度のコントロールを行っている。

上昇計によるデータがある場合、予定高度の変化を $H = H_0 - v_0 t$ とおくと、弁を操作して、全重量の $[2(v - v_0) + 0.3(\Delta H - v_0 t)]$ % の浮力を減少させればよいことになる。

B₅-100 について一定速度降下のコントロールを行った例では図8に示す様にほぼ満足すべき結果が得られた。

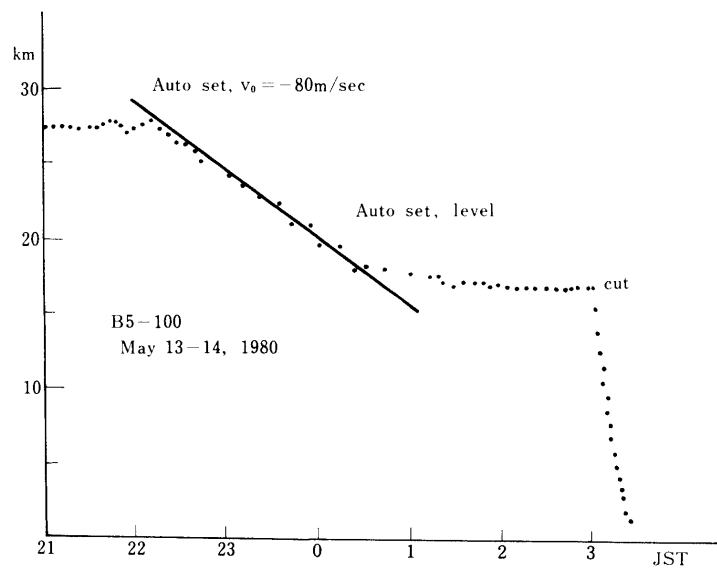


図9 一定降下速度コントロール

5. むすびと考察

B₅-100 で試験を行った。上昇計については従来のもものと比較して高性能の差圧計を採用したこと、零点較正を入れたことにより極めて高精度の性能をもつことが明らかになった。気球の上下動に対する最小検出感度は1~2 cm/sec 程度であった。

上昇計の感度は大気温度の他に上昇計の自身の温度により空気の粘性係数が変化し変ることになる。このため将来上昇計の温度を一定に保つことを検討する必要があるものと思われる。

上昇計を使つての気球のオートコントロールは特に日没補償の際に有効な様に思われる。今回行った実験では気球のハンティング運動の影響を避けるため、最低10分間の積算を行った。しかし日没の際に気球の運動の変化が短時間でおきるため、将来は数分間程度での積算が必要であり、このためハンティング運動の影響を除くための特別なプログラムが必要であると思われる。又将来の問題として予定高度より下った気球は一定時間の間に元の高度に戻る様プログラムを改良することを考えている。

例えば30分後に元の高度に復するためには $v = \Delta H \times 1000 \text{ m} / 30 \text{ min} \approx 0.5 \Delta H \text{ m} / \text{sec}$ の上昇速度を付ける必要があり、従来のパラストコントロールの式 $(2v + 0.3 \Delta H) \%$ に対して $(2v + 1.3 \Delta H) \%$ を使用すればよいことになる。

B₅-100 の日没時のデータを使つて、以上の改良を加えてシュミレートした結果では、日没時の降下高度は100 m程度におさめることが出来ることがわかった。

気球運動のフーリエ解析の結果から大気の波動運動について若干の結論を導くことができる。その詳細については附録で述べることにした。

附 録 大気運動に対する気球のレスポンス

気球のハンティング運動の解析については文献 [1] に詳しい、気球の浮力と重量がバランスする高度で気球の上下運動がおきると、気球内のガスが断熱膨脹又は圧縮をうけて温度が変化し、従つて浮力の変化をおこして気球を元の高度へ戻す力がはたらく、これがハンティングをおこす主な原因である。一方気球の運動は空気抵抗や大気との間の熱伝達でダンピングをうけることになる。

熱伝達の時定数を τ_1

空気抵抗によるダンピングタイムを近似的に τ_2

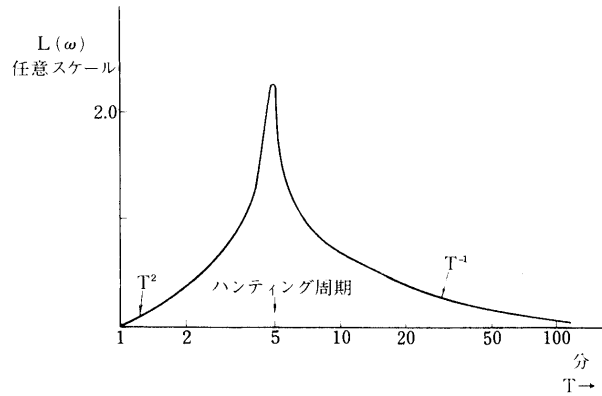
ハンティング運動の周波数を ω_0

とすると、気球のハンティング運動の方程式は、近似的に

$$\ddot{x} + \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right) \dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad \dots\dots\dots (A \cdot 1)$$

となる。 $\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \approx 2R$

とおき、大気変動を $g(t)$ とすれば上の式は $\ddot{x} + 2R \dot{x} + \omega_0 x = g(t)$ となる。



図A.1. $L(\omega)$ の大よその形

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

x のフーリエ成分 $F(\omega)$ は

$$(\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega R) F(\omega) = G(\omega) \tag{A \cdot 2}$$

で与えられる。但しここで $G(\omega)$ は大気変動による外力のスペクトル成分である。

(A・2) 式から

$$|F(\omega)| = \left| \frac{G(\omega)}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2i\omega R} \right| = \left| \frac{G(\omega)}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 R^2]^{1/2}} \right| \tag{A \cdot 3}$$

を得る。この解からわかる様に気球の運動は $\omega_0 = \omega$ でピークを持ち、ピークの1/2にあたる周波数 $\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega$ は

$$\frac{4\omega_0^2 R^2}{[\omega_0^2 - (\omega_0 \pm \Delta\omega)^2]^2 + 4\omega_0^2 R^2} = \frac{1}{4} \tag{A \cdot 4}$$

で与えられる。従って

$$[\omega_0^2 - (\omega_0 \pm \Delta\omega)^2]^2 = 12\omega_0^2 R^2$$

$$4\omega_0^2 \Delta\omega^2 = 12\omega_0^2 R^2, \quad \therefore \Delta\omega = \sqrt{3} R \tag{A \cdot 5}$$

となる。

実際上昇計で観測されるのは気球の位置ではなく、上下動の速度であり、又本文中に述べた様に上昇計のリラクゼーションタイム(τ)があるので、観測されたデータのフーリエ成分は

$$\left| \frac{\omega \dot{F}(\omega)}{i\omega - \frac{1}{\tau}} \right| = \frac{\omega G(\omega)}{[(\omega^2 + \frac{1}{\tau^2})\{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 R^2\}]^{1/2}}$$

$$= L(\omega) G(\omega) \quad (\text{A} \cdot 6)$$

となる。L(ω)の値はτ，とRがわかれば求まるので，原理的には大気振動のフーリエ成分G(ω)を求めることができる。

気球のハンティング運動のダンピングについては，図6から半値幅は5分と5.6分位の間にさままわっていることがわかる。(A・5)式から

$$R = \frac{2\Delta\omega}{2\sqrt{3}} = \frac{2\pi}{2\sqrt{3}} \left[\frac{1}{5} - \frac{1}{5.6} \right] / \text{min} = 0.039 / \text{min}$$

従ってダンピングタイムとしては

$$\frac{1}{R} \approx 25 \text{ min}$$

で文献[1]の理論的な推定とほぼ一致している。

一方上昇計のリラクセーションタイムは高度27kmでは約30秒である。

(A6)に示したレスポンス関数 L(ω)

$$L(\omega) = \frac{\omega}{[(\omega^2 + \frac{1}{\tau^2})\{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4R^2\omega^2\}]^{1/2}}$$

について，主要な時間係数とそれに対応する周波数成分は表3に示す値をもっている。

表 3

主要なパラメータ	対応する時間	対応する周波数
$\frac{1}{\tau}$ (上昇計のリラクセーション)	～330秒	0.21 (Hz)
ω_0 (ハンティング周期)	～5分	2×10^{-2}
2R (運動のダンピング)	～12.5分	8×10^{-3}

以上のパラメーターに対応する周波数領域でレスポンス関数は図A・1に示す様な形を示しているが，全体の傾向は(A・6)式から表4の様な周波数依存性をもっている。

表 4

ω	T	L (ω)	L (T)
$> \omega_1$	$< 30 \text{ sec}$	ω^{-2}	T^2
$\sim \omega_0$	$\sim 5 \text{ min}$	const	const
$< \omega_3$	$> 12.5 \text{ min}$	ω	$\frac{1}{T}$

つまり、気球は等価的に30sec のおくれをもつ共振回路で、そこへ大気の振動という入力があった場合の出力を我々は観測していることにあたる。

上昇計のリラクセーションタイムは、信号のおくれに対応するので速い周波数に対しては対応できない。

図6でTの小さい所で出力が少ないのはこのためである。遅い周波数に対応してのL(ω)が ω となるのは、我々が気球の運動の速度成分を見ており、気圧変動の振副に換算するために、速い周波数成分が大きく見えるためである。

今回の実験では大気運動の観測よりも、気球のコントロール自体に主眼があったため、連続しての大気運動は観測が行なわれなかった。このため以上の解析法を使って大気運動を導くにはデータが不十分であるが、将来この方式を使って大気運動の解析を行なうことは可能であると考えられる。

参 考 文 献

- [1] 西村, 広沢, 岡部: 「気球上昇計」東京大学宇宙航空研究所報告第13巻第3号(B)1977年9月
- [2] P・Julian et al, The Twerl Experiment, Bulletin American Meteorological Soc. 58, No. 9, 936 (1977)
- [3] 西村, 藤井, 山上: 「上層における気球動作の温度効果について」東京大学宇宙航空研究所報告第9巻第1号(B), 1973年3月