

## 新ブーメラン気球

西村 純・広沢 春任・太田 茂雄  
秋山 弘光・藤井 正美・山上 隆正  
粕 豊・岡部 選司・並木 道義  
松坂 幸彦・高成 定好

(1983年5月27日受理)

## The "New Boomerang" Balloons

By

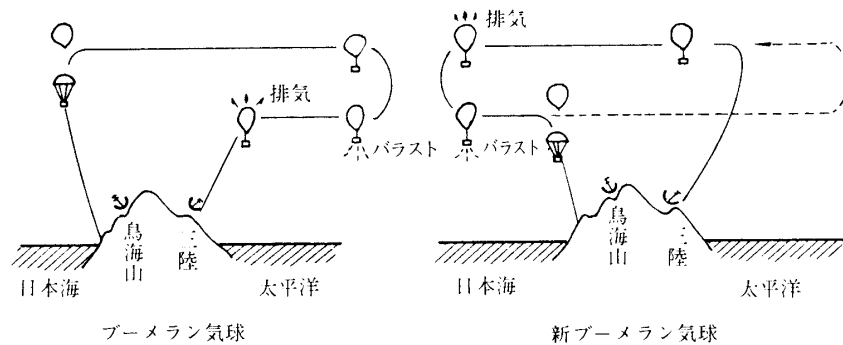
Jun NISHIMURA, Haruto HIROSAWA, Sigeo OHTA,  
Hiromitsu AKIYAMA, Masami FUJII, Takamasa YAMAGAMI,  
Yutaka KOMA, Yoriji OKABE, Michiyoshi NAMIKI,  
Yukihiko MATSUZAKA and Sadayoshi TAKANARI

**Abstract:** The "New Boomerang" balloon flights have been proposed for longduration scientific observations. The observation is carried out from the Pacific side through the Japan-Sea side by using the summer-stratospheric easterly, and then the balloon is placed at lower level altitudes, by exhausting gas, to draw back eastwards with the westerly jet stream. This flight method can be performed by completion of the mobile telecommand station placed at the Japan-Sea side to control the balloon altitude and also to get continuous observational data. The superiority of the "New Boomerangs" to the "Boomerangs", so far made, is that the ballast consumption is much reduced in the new methods. We report here two successful flights of the "New Boomerang" balloons. Related problems including the feasibility studies are also discussed.

## 1. はじめに

日本の気球観測では長時間フライトと観測器の回収のため、気球コントロール技術の開発が続けられてきた。サイクリング気球[1]はその最初のものである。ブーメラン気球[2]はサイクリング気球が発展したもので、上昇中の気球を排気弁によって止め強い偏西風にのせて基地から約500 kmの太平洋上に出す。そこでパラストを投下し再上昇した気球が弱い東風によってゆっくり基地の方向にもどって来る間に観測を行なうものである。プログラムブーメラン[3]はその拡張で、受信限界以上に東へ流した気球を前もってプログラミングしたパラスト投下装置によって再上昇させるものである。

これに対し新ブーメラン気球は第1図に示すように通常の方法で気球を上昇させる。東風により日本海上約300 kmに達した気球を排気弁によって降下させ、偏西風によって日本海沿岸に近づいた時観測器を切離し回収する。この方式が可能になったのは、移動受信車[4]が完備し鳥海山の中腹の第2受信点から日本海上空の受信が可能となったためである。



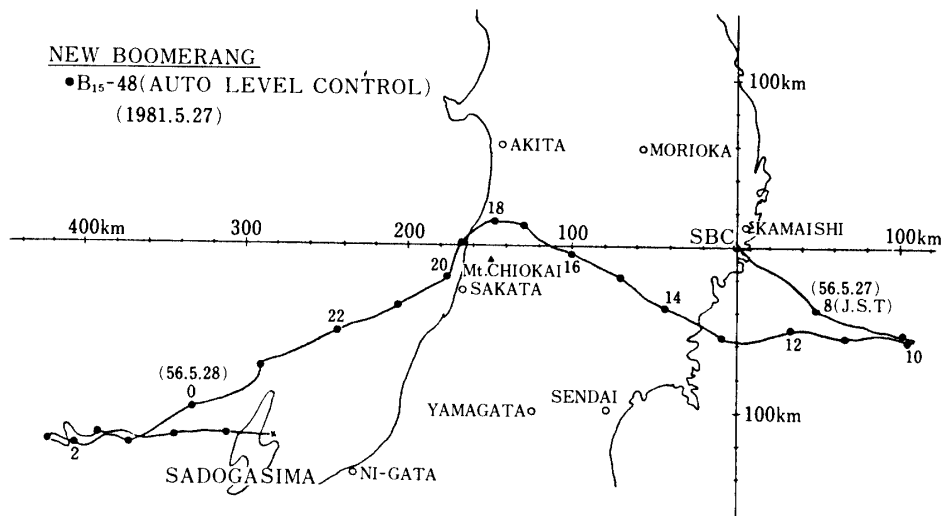
第1図 新ブーメラン気球の原理

新ブーメラン気球の特徴は、ブーメラン気球[2]が再上昇のために全重量の10~15%のパラストを必要とするのに対し、5%程度の比較的少ないパラスト量ですむこと、観測が終ってから回収のためのコントロールが行なえることである。また鳥海山の受信点が海拔1000 mの地点にあるため、北は界鹿半島から南は佐渡ヶ島まで見渡せ、切離し後三陸からは数分間しか受信できないのに対し、観測器が海上に着水するまで受信できるという利点がある。このため降下地点の決定精度が格段に向上し、ラジオバイの性能が安定化したことと相まって海上でのゴンドラ回収が確実に became.

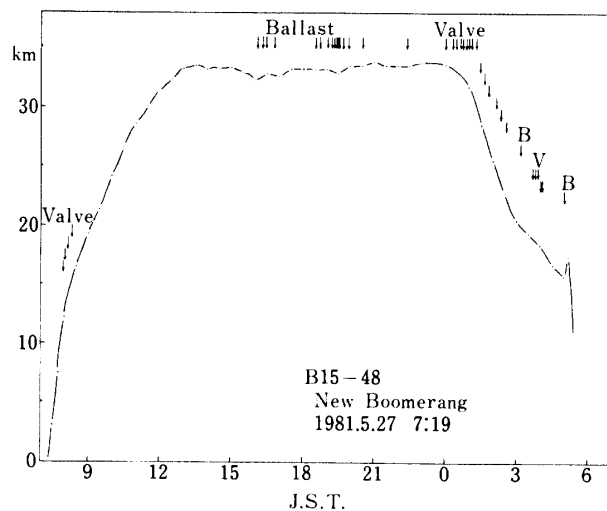
以下2機の新ブーメラン気球、B 15-48号機とB 30-44号機のフライト例、及びその解析結果、新ブーメラン気球に適した上層風の条件について述べる。

## 2. 飛しよう経過

昭和56年5月27日7時19分に放球したB 15-48号機によって新ブーメラン気球のテストを行なった。第2図にその航跡図を、第3図にその高度曲線を示した。この気球はオ



第2図 B<sub>15</sub>-48号機の航跡図



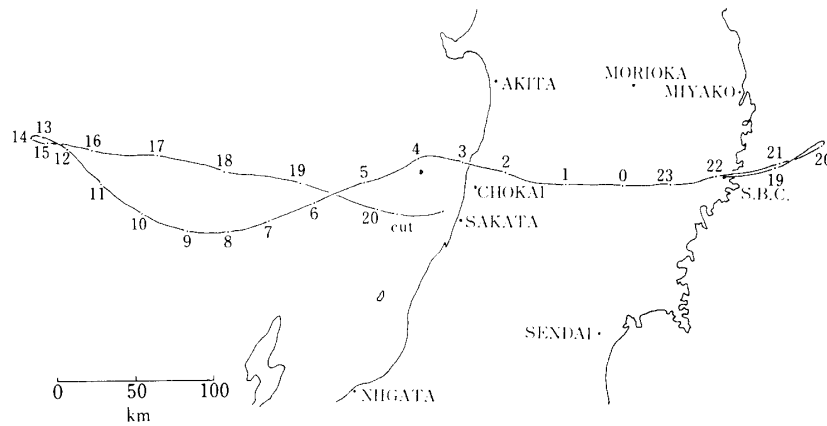
第3図 B<sub>15</sub>-48号機の高度曲線

オートレベルコントロール[5]のテストも合わせて行なった。上昇中に排気弁を作動させているのは、上昇速度を遅くして気球をなるべく太平洋側に出し、オートレベルコントロールによる日没補償の時期に気球を三陸からの受信範囲内に滞空させるためであった。18時頃からは鳥海山の移動観測車でも受信を開始し、オートレベルコントロールのテストが終了した21時頃からは移動観測車が受信を引継いだ。

航路図からわかるようにはじめ西北西に進行していた気球は、日没の頃にちょうど鳥海山を取巻くように南下しその後西南西へ進行した。このままでは観測車の回収が困難となるので、気球の高度をコントロールして佐渡ヶ島附近に降下させることにした。翌28日の

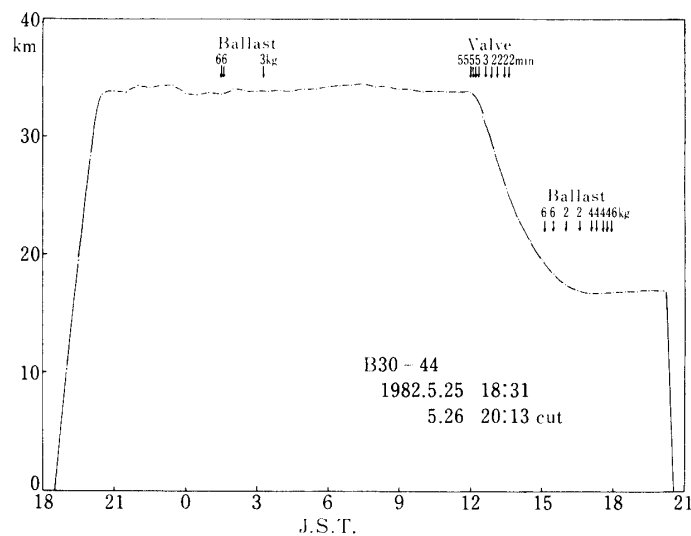
0時頃から排気弁を作動させて気球の高度を下げた。この気球には上昇計[6]が搭載されていたので、上昇計の出力を見ながら気球の降下速度が2 m/secとなるように排気弁のコントロールを行なった。高度が20 kmに下った3時頃から気球は東へ流れ始め、5時8分佐渡ヶ島の西方約10 kmの海上に達した時コマンドによりゴンドラを切離し両津湾に降下させた。両津湾は鳥海山の第2受信点からは見通し範囲外であるが、電波の回折のためラジオブイの信号を受信することができた。幸いゴンドラは附近の漁船によってすぐに発見され回収された。

昭和57年5月25日18時31分に放球したB30-44号機は、エマルジョンチェンバーによる宇宙線重粒子の観測を目的としたものである。出来る限り長時間のフライトとゴンドラの回収を必要としたので新ブーメランコントロールを行なうことにした。第4図にその航路図を、第5図にその高度曲線を示した。航路図からわかるように気球はほぼ真西に進



NEW BOOMERANG B30-44  
1982.5.25 18:31 launch  
5.26 20:13 cut

第4図 B<sub>30</sub>-44号機の航跡図



第5図 B<sub>30</sub>-44号機の高度曲線

行し新ブーメラン気球としては理想的なコースであった。ただし風速は時速 30 km と比較的速く、翌午前 3 時に気球は日本海に達した。通常の気球ではここで観測を終了することになるが、新ブーメラン気球ではさらに日本海上 300 km 程度まで観測を続けることができる。受信限界に近づく 12 時頃から排気弁により気球の高度を下げ偏西風にのせ気球を日本海沿岸に引もどすことにした。

水平浮遊からの降下では降下速度を  $v$  m/sec として  $2v\%$  の初期排気が必要である [7]。2 m/sec で降下させることとし、4% の排気を行なった。夜間に合計 15 kg のバラストを投下しているの、この時点での気球の総重量は 471 kg であった。気球の高度 33 km での排気能力は 1 分間に 0.9 kg であるので約 21 分間の排気が必要である。実際には 5 分間ずつ 4 回に分けて排気し、降下速度を監視したところ予定通り気球は 2 m/sec で降下を始めた。その後はこの降下速度を維持するため、高度が 1~2 km 下る毎に 0.7% の継続排気を行なった。高度 20 km に降下した時からバラストを投下し高度 17 km で水平浮遊させることにした。17 km 以下に降下させると偏西風がより強くなり 20 時以前に日本海沿岸にもどってくるため切離しが出来なくなるからである。なぜなら日本海沿岸上空を航空路が通っており、最終便が通過するのを待つ必要があったからである。気球は約 50 km/h の速度で進み、20 時 13 分酒田西方 40 km の地点に達した時にカッターを作動させた。観測器は酒田西方 10 km の海上に降下し、鳥海山の受信点からラジオブイが発信していることを確認した。翌 27 日、酒田海上保安部の巡視艇「べにばな」の協力を得てゴンドラの回収を行なうことができた。

なお以上 2 機の他に B 30-35 号機、B 50-23 号機についても新ブーメランコントロールを行なう予定であったが、風向が悪いことやテレメータの不調などのため気球が日本海に達したところで観測を打切った。

### 3. 気球の下降のコントロール

ブーメラン気球では上昇中の気球を止めるための排気弁コントロールと、再上昇のためのバラスト投下が必要である。プログラムブーメラン気球 II の文献 [3] にまとめられているように、速度  $v$  m/sec で上昇する気球を停止させるために必要な排気量は、

夜間には 総重量の  $(2\sim 2.5)v\%$

日中には 総重量の  $(2\sim 2.5)v+5\%$

である。4 m/sec 程度の速度で再上昇するためには

夜間には 総重量の 12~13%

日中には 総重量の 14~15%

のバラスト投下が必要である。

これに対し新ブーメラン気球では、水平浮遊から降下させるための排気弁操作と、高度 15 km 付近で停止させるためのバラスト投下が必要である。

高度 10 mb 付近から 100 mb 付近まで一定速度で降下させるためには、 $2v\%$  の初期排気に加えて高度が 1 km 下る毎に 0.8% 程度の継続排気が必要である。それはこの高度では 1 km 下る毎に気温が約  $1.5^{\circ}\text{C}$  の割合で低下し、ガス温度をほぼ一定に保ちながら下降する

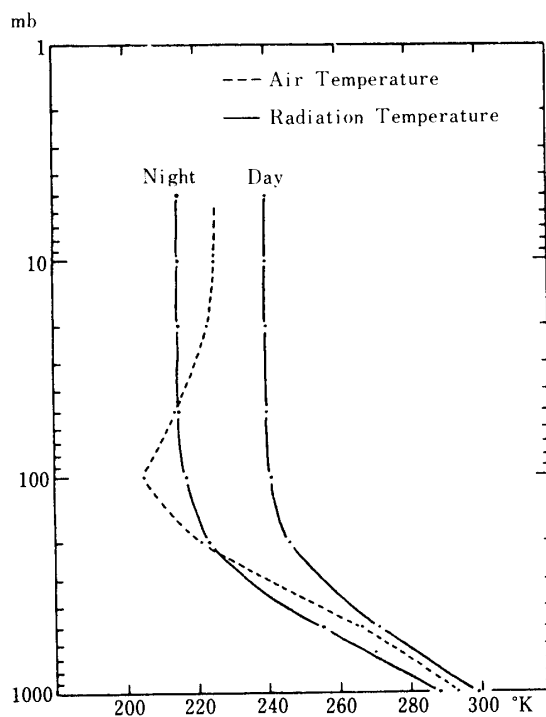
気球は相対的に浮力が増加することになるためである。このことは初期排気のみで継続排気を行なわない場合には、気球の降下を止めるためのバラストが不用になることを示している。

日中 30 km 附近の高度に浮遊していた気球は、日没後 1.3~2 m/sec [ 8 ] の速度で降下をはじめ 18 km 附近で停止する。従って、新ブーメラン気球の降下操作を日没時刻に合わせて行うことが出来れば、排気弁操作をあまり行なうことなく高度を下げる事が出来るので大変都合がよい。

B 15-48 号機では夜間 0 時に、B 30-44 号機では日中 12 時に降下を開始した。これはいずれも気球が鳥海山からの受信限界に近づいたためである。

実際に行なった気球のコントロールの様子は第 1 表にまとめた。B 15-48 号機では初期排気 2.7 v%, 継続排気 0.6 %/km, B 30-44 号機では初期排気 2v%, 継続排気 0.4 %/km が必要であった。B 15-48 では降下をとめるのに使用したバラストは 1% であった。これはちょうど日出を迎えたためである。B 30-44 では降下をとめるに要したバラストは 4% であった。ただし日没時刻が近づいていたため、その後切離しまでに 4.1% のバラストを必要とした。

上空における気球の熱的効果については詳しく調べられている [ 9 ]。第 6 図は輻射平衡を仮定した場合に気球のガスが到達する温度すなわち輻射温度と気温を示したものである。水平浮遊している場合、気球と周囲の大気との熱交換は輻射と自然対流のみである。10 mb 附近では自然対流の効果は輻射の約 1/10 であり、気球ガス温度は輻射温度に近い。



第 6 図 気球の輻射温度と気温

日中と夜間では輻射温度に約 25°C の差があり、日没補償に約 8 % のパラストを必要とすることに対応している。

降下中の気球では強制対流による熱交換と、ガスの断熱圧縮による効果加わる。10 mb から 50 mb まで 2 m/sec の速度で降下した場合について附録に示すようにガス温度の計算を行なった。B 15-48 では浮力が約 250 kg で夜間の降下、B 30-44 では浮力が約 500 kg で日中の降下である。これらの気球について浮力の差も考慮に入れて計算すると、10 mb から 50 mb まで降下する間にガス温度の上昇は、夜間で 26.2°C、日中で 19.1°C となった。これは夜間の輻射温度より気温の方が高いため、降下する気球は断熱圧縮に加えて対流によって暖められるのに対し、日中は対流によって冷されるためである。このガス温度の上昇は浮力に換算すると、それぞれ 11.6 % と 8.5 % となり、その差は 3.1 % である。B 15-48 と B 30-44 では 50 mb まで降下させるのに、初期排気と継続排気を合わせて、それぞれ 11.9 % と 8.4 % の排気を必要とした。その差は 3.4 % であり、夜間降下の方が排気量が多い。ガス温度の計算から予測した必要排気量と、実際に必要とした排気量はこのようによく一致しており、気球に対する熱の出入りの取扱いが正しいことを示している。この様な考察からもわかるように、気球は日中に降下させた方が排気量が少なくなり、停止のためのパラストも少なくなるから効率がよい。

#### 4. 新ブーメラン気球に適した上層風の条件

気球をちょうど日没に合わせて自然に降下させればほとんどパラストを必要としない。したがってどのような条件の時に放球すればよいか問題となる。上昇中に東へ 50 km 程度流された気球を考えると、三陸から日本海までは 150 km、鳥海山から西方 300 km まで受信範囲があるので、合計 500 km の有効距離がある。夕方放球した気球が翌日の夕方 500 km 以内に留まっているためには、上層風が約 20 km/h (6 m/sec) 以下でなければならない。春と秋の三陸上空の風速を予測するため、綾里の気象ロケットのデータ [10] を整理し

第 1 表 気球のコントロール

気 球	B 15-48	B 30-44
コントロール時の総重量	254 kg	471 kg
高 度	33 km	33 km
2m/sec の降下速度を得るための初期排気量	5.3% (2.7v%)	4 % (2v%)
2m/sec の速度を継続した期間の継続排気量	6 % (0.6%/km)	3.6% (0.4%/km)
停止させるのに要したパラスト量	1 % (但し日出時)	4 %
昼 夜 の 区 別	夜 間	日 中

て示したのが第2表、第3表である。10年間以上にわたって気象ロケットのデータが蓄積されているので、放球時期の設定のために役立つと思われる。この表では東風で平均の風速が標準偏差 ( $\sigma$ ) より大きいところを斜線で、 $2\sigma$  より大きいところをクロス斜線で示してある。上の風速条件を満すのは、5月の第3週と9月の第3週である。ただし年毎の変動が大きく、この時期にすでに西風に変っている可能性が30%程度ある。9月10日頃から偏西風と上層の東風の風向がなるべく東西に近く、気球浮遊高度の風速が5 m/sec程度になる時まで待機するのがよいであろう。

第2表 上層風東西成分(春)

E-W COMPONENT ( m/s ) 1970-1982 Ryori

H km	April		May			
	17-23	24-30	1-7	8-14	15-21	22-28
40	12	3	-4	-4	-9	-12
39	13	5	-1	-3	-7	-10
38	13	5	-1	-2	-5	-9
37	12	5	-4	0	-4	7
36	11	5	-3	2	-4	-6
35	9	6	0	1	-4	-6
34	8	5	0	2	-3	-6
33	6	4	-1	2	-2	-7
32	5	4	1	2	-2	-7
31	5	5	1	0	0	-7
30	4	4	2	0	1	-7

第3表 上層風東西成分(秋)

E-W COMPONENT ( m/s ) 1970-1982 Ryori

H km	September				October	
	1-7	8-14	15-21	22-28	29-5	6-12
40	-16	-10	-4	-1	3	1
39	-15	-10	-4	-1	2	2
38	-14	-8	-5	-1	3	3
37	-12	-5	-3	-1	3	3
36	-11	-4	-2	0	1	3
35	-10	-5	-3	1	3	2
34	-9	-7	-4	2	4	1
33	-8	-9	-4	3	5	1
32	-8	-8	-4	3	5	1
31	-9	-7	-4	3	4	0
30	-10	-7	-5	2	3	4

東風の確率  50~68%  
 68~95%  
 >95%

なお9月の上層風速がゼロになるターンアラウンドは第3表から21日頃であり、パトロール気球[10]に適した時期である。また絶対に回収を必要とする観測の場合は、東風の平均値が $1\sigma$ 以上ある9月15日以前に放球するよう計画するのがよいことを示している。

### 5. まとめ

新ブーメラン気球について飛しょう経過と、必要な排気量、バラスト量について述べた。従来のブーメラン気球が10~15%のバラストを必要とするのに対し、新ブーメランでは5%程度のバラストですむという利点がある。また観測を始めた後に気球のコントロールを行なうので、上層風の変化に合わせて浮遊時間、回収場所などを設定することができる。

新ブーメラン気球は、鳥海山の第2受信点を有効に利用する飛しょう方式である。この受信点の高度は海拔1000mと高く、西側の視界が開けているため観測器が着水するまで



受信でき、降下地点を精度よく決定できるという利点があり回収のために大変都合がよい。

移動観測車の受信アンテナは1.5 m $\phi$ のパラボラであるが、現在これを2.0 m $\phi$ に改造中である。この改造によって受信範囲を300 kmから500 kmに拡大できる。これによって新ブーメラン気球の東西の浮遊距離は約700 kmとなり、長時間観測に威力を発揮するものと考えられる。

新ブーメラン気球では、高度を下げて気球を受信点近くに引もどした時、上層風の条件もよくバラストにも余裕があれば再上昇させて観測を続けることも可能である。いわば大型のサイクリング気球であるブーメラン気球は、長時間フライトと観測器の回収に都合のよい方式であり、将来の気球観測に積極的に応用してゆきたいと考えている。

### 参 考 文 献

- [1] プラスチック気球 I (サイクリングプロジェクト) INS-TCB-2 (1962)
- [2] 西村 純他, 「ブーメラン気球 II」, 宇宙研報告 10, No. 1 (B), 125 (1974)
- [3] 西村 純他, 「プログラムブーメラン気球 II」, 宇宙研報告 12, No. 2 (B), 563 (1976)
- [4] 西村 純他, 「大気球移動観測車」, 宇宙研報告 15, No. 2 (B), 207 (1979)
- [5] 岡部選司他, 「気球上昇計による気球高度オートコントロール」, 宇宙研報告 1, 15 (1981)
- [6] 西村 純, 広沢春任, 岡部選司, 「気球上昇計」, 宇宙研報告 13, No. 3 (B), 749 (1977)
- [7] 松坂幸彦, 狛 豊, 「排気弁」, 大気球シンポジウム報告, 93 (1977)
- [8] 秋山弘光他, 「日没効果について」, 大気球シンポジウム報告, 181 (1970)
- [9] 西村 純, 藤井正美, 山上隆正, 「上層における気球動作の温度効果について」, 宇宙研報告 9, No. 1 (B), 167 (1973)
- [10] 「Aerological Data of Japan」, Japan Meteorological Agency (1970~1982)

### 附 録 気球ガス温度の変化について

気球のガス温度は、輻射、対流および断熱効果によって変化する。ここでは水平浮遊している気球を 2 m/sec で降下させた場合の気球ガス温度の変化を計算し、降下のために必要となるガス排気量を求める。

気球に対する熱の出入りは文献[9]で詳しく調べられており、浮力 100 kg の場合について各高度での、輻射、対流および断熱効果の寄与が計算されている。ここでは B 15-48 および B 30-44 に対応する浮力 250 kg および 500 kg の場合を 100 kg の値をもとに計算する。

各過程の気圧  $P$ 、気球の直径  $D$ 、速度  $v$  に対する依存性は、

$$\text{自然対流} : P^{1/2} D^{-1/4} \Delta T^{1/4}$$

$$\text{乱 流} : P^{0.8} D^{-0.2} v^{0.8}$$

$$\text{断熱効果} : P \quad D \quad v$$

である。これらの依存性を考慮して 2 m/sec の場合を計算した結果は表 A-1、表 A-2 に示した。

表 A-1 各過程の寄与 (浮力250kg)

気 圧	100	50	20	10	mb
輻 射	16	18	20	21	$\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}$
自然対流(空 気)	7.4	4.7	2.8	1.9	"
" (ヘリウム)	15.8	10.2	5.6	3.7	"
乱 流	25.6	19.2	6.4	3.2	$\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}(\text{m/s})^{0.8}$
断 熱 効 果	201.3	136.0	73.4	43.5	$\text{c}\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}(\text{m/s})$

表 A-2 各過程の寄与 (浮力500kg)

気 圧	100	50	20	10	mb
輻 射	16	18	20	21	$\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}$
自然対流(空 気)	7.0	4.4	2.6	1.8	"
" (ヘリウム)	15.0	9.7	5.3	3.5	"
乱 流	24.5	18.4	6.1	3.1	$\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}(\text{m/s})^{0.8}$
断 熱 効 果	248.6	168.0	90.7	53.8	$\text{c}\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{K}(\text{m/s})$

表 A-3 輻射温度

気 圧	100	50	20	40	mb
気 温	205	214	223	225	$^\circ\text{K}$
$\Delta T_R(\text{日中})$	36	26	17	15	"
$\Delta T_R(\text{夜間})$	12	1	-8	-10	"

表A-4 ガス温度 (浮力250kg, 2m/sec, 夜間)

気圧	100	50	20	10	10*	mb
$\Delta T_{G-B}$	12.7	13.3	13.1	11.8	0	°K
$\Delta T_B$	8.0	3.7	-3.0	-6.4	-9.2	"
$\Delta T_G$	20.7	17.0	10.1	5.4	-9.2	"

\*水平浮遊中

表A-5 ガス温度 (浮力500kg, 2m/sec, 日中)

気圧	100	50	20	10	10*	mb
$\Delta T_{G-B}$	16.6	17.3	17.1	15.4	0	°K
$\Delta T_B$	17.4	15.6	15.0	14.2	13.8	"
$\Delta T_G$	34.0	32.9	32.1	29.6	13.8	"

\*水平浮遊中

表A-6 実験との比較

	B 15-48(夜間)	B 30-44(日中)	夜間と日中の差
初期排気	5.3%	4.0%	
継続排気 (10~50mbの間)	6.6%	4.4%	
合計	11.9%	8.4%	3.4%
ガス温度の計算	11.6%	8.5%	3.1%

平衡状態では、輻射、対流および断熱効果による熱の出入りがバランスして気球のガス温度が決まる。次に気球皮膜の温度、ガス温度、大気温度の間に成立つ関係式をまとめて示す。

i) 気球皮膜とガス温度の差  $\Delta T_{G-B}$

$$\Delta q(\text{自然対流}) = \Delta q(\text{断熱効果})$$

$$\therefore \Delta T_{G-B} = \frac{(\text{断熱効果})}{(\text{ヘリウムの自然対流})} \quad (\text{A-1})$$

ii) 気球皮膜と大気温度の差  $\Delta T_B$

$$\Delta q(\text{輻射}) + \Delta q(\text{断熱効果}) = \Delta q(\text{自然対流}) + \Delta q(\text{乱流})$$

$$(\text{輻射})(\Delta T_R - \Delta T_B) + (\text{断熱効果}) = (\text{自然対流})\Delta T_B + (\text{乱流})\Delta T_B$$

$$\therefore \Delta T = \frac{(\text{輻射})\Delta T_R + (\text{断熱効果})}{(\text{輻射}) + (\text{空気})\text{の自然対流} + (\text{乱流})} \quad (\text{A-2})$$

iii) ガス温度と大気温度の差  $\Delta T_G$

$$\Delta T_G = \Delta T_B + \Delta T_{G-B} \quad (A-3)$$

ここで(A-2)式に現われる輻射温度  $\Delta T_R$  については、表 A-3 に示した。

気球のガス温度は(A-1), (A-2), (A-3)式, 表A-1, 表A-2 に示した輻射, 対流, 断熱効果の寄与の大きさ, 表A-3 の輻射温度を使って求めることができる。計算の結果は表 A-4, 表A-5 に示した。

ガス温度が求まると, 大気温度 225°K を考慮して, 気球の浮力に換算することができる。浮力の増加分が必要排気量となる。計算の結果と実際に必要とした排気量を比較したのが表A-6 である。

B 15-48 と B 30-44 の実験で 2 m/sec で降下させるのに必要とした全排気量は, ガス温度の上昇から予測される浮力の増加とよく一致している。また実際の場合も計算の場合も, 夜間の排気量が約 3 % 多くなっている。これは, 日中の輻射温度が大気温度より高いため, 輻射温度に近い気球は降下中に対流によって冷されるのに対し, 夜間はこれと逆で, 気球は対流によって温められるからである。

ここではガス温度の変化による気球の浮力のみを考え, 空気中を動く気球に対する空気の抵抗は無視した。空気の抵抗  $F$  は地上附近で

$$F = \frac{\rho C_D S v^2}{2g} \sim \frac{1 \times 0.2 S v^2}{2 \times 10} \sim 10^{-2} S v^2 \quad \text{kg}$$

である。浮力 500 kg の気球では,  $S \sim 76 \text{ m}^2$  であり, 抵抗は 1 m/sec で 0.76 kg, 2 m/sec の場合でも 3 kg (0.6 %) である。また抵抗は気圧の 1/3 乗に比例して変化するので, 上空ではさらに小さくなり無視できる。

ここに示した計算では, 初期排気を分けなかったが, 水平浮遊中のガス温度と, 10 mb で 2 m/sec に達した時の温度の差に相当する浮力を, 必要初期排気量と考えることができる。その値は, 夜間と日中でそれぞれ 6.5 % および 7.0 % である。実際の気球コントロールでは, まず 2 v% の初期排気を行ない, その後は上昇計または気圧計のデータを見ながら継続排気を行なうがよいと考えられる。