

ブーメラン気球Ⅱ

西村	純・広	沢春	任・太	田茂	雄
秋山	弘光・藤	井正	美・山	上隆	正
大塚	豊・岡	部選	司・前	川	仁
関和	市・並	木道	義・高	成定	好
丹生	潔*	石井	千尋**		

1. はじめに

わが国の上空では、高度 10km から 15km 付近に常に偏西風が吹いており、その上層の高度 25km 付近以上では、5月中旬から9月中旬にかけて、逆向きに偏東風が吹いている。この時期に放球された気球は上昇中まず東の方向に流され、次いで上層の偏東風によって西に進行する。気球は通常毎分 250m 程度のほぼ一定の速度で水平浮遊高度まで上昇するので、例えば放球地点付近の上空にもどってくるまでの時間は、上層の偏西風と偏東風の風速とその高度分布で決ってしまう。

気球上昇中に、偏西風の強い高度で一時的に上昇を停止させると、気球はその高度で急速に東に流される。十分に東方に流したところで、再び気球を上昇させて水平浮遊状態に入れると、気球ははるか東方から西進してくることになり、通常の方法に比べて、観測時間を著しく長くとることができる。その上、放球地点付近あるいは東北地方の沿岸付近での回収が可能になるという利点が加わり、わが国のように東西方向に陸地の幅の狭い地理的条件のもとではきわめて好都合である。このように、気球の上昇をコントロールすることにより、特定の気象条件を利用して、気球を長時間にわたって浮遊させ、さらに放球地点近くに呼びもどして回収する方法を、特に、ブーメラン方式と名付けている。

気球によるさまざまな科学観測のなかには、長時間にわたる観測を必要とするもの、さらには長時間観測を行なった後にせび回収を必要とするものが数多くあり、このブーメラン方式を確立させることは宇宙科学観測上きわめて有意義である。

ブーメラン方式を確立していく上で、技術的に問題となるのは、気球の上昇を確実にコントロールすることである。すでに、昭和 47 年以来、まず、補助気球を用いて気球の上昇をコントロールする方式について検討を重ね、実験を行ってきた、補助気球方式に関して得られた成果については、ブーメラン方式に関する全般的考察と併せて、文献[1]に報告したところであるが、その後、さらに、より改良された方法と考えられる排気弁を用いたコントロール方式について開発を進めてきた。これは主気球に取り付けた排気弁の操作により気球の上昇をコントロールするもので、信頼性の高い排気弁が得られれば、気球の構成は非常に

* 名古屋大学理学部

** 青山学院大学理工学部

単純化されたものになる。

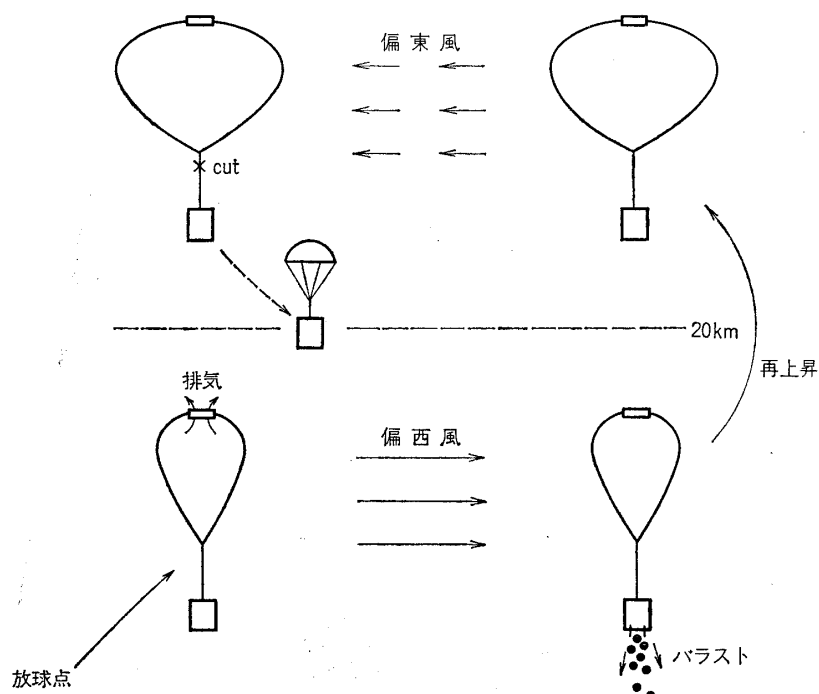
排気弁としては昭和47年以来開発を進めてきたものが適用可能となり、この排気弁を用いたブーメラン実験を昭和48年に4回にわたって行なった。これらの実験から、ブーメランのために必要な気球のコントロールに関する基礎的なデータが得られ、弁およびバラストによる操作についての一般的な指針を、定量的な考察から導き出すことができた。4回の実験の中には、気球コントロールの実験を目的とするもののほかに、回収まで含めたブーメラン方式全体の実験を目的としたもの2機が含まれており、内1機は宇宙線の観測に応用された。この2回の実験では、上昇のコントロール、長時間水平浮遊および回収が全て順調に行なわれ、大きな成果をおさめることができた。

以下に、排気弁を用いたブーメラン方式について、その原理的な事柄と実験の結果、および実験結果に基づいて行なった気球コントロールについての理論的な検討と結果などについて述べることにする。

2. 排気弁を用いたブーメラン方式

2.1 原 理

気球は、放球されると、地上で与えられた自由浮力によって上昇していく。気球の頭部に排気弁を取りつけておいて、気球が偏西風の強い高度に達したところでガスを排気し自由浮力をなくすと、気球はその高度にとどまることになる。その結果、気球は急速に東に流されていく。十分東に流したところでバラストを投下すると気球は上昇し満膨張高度に達する。



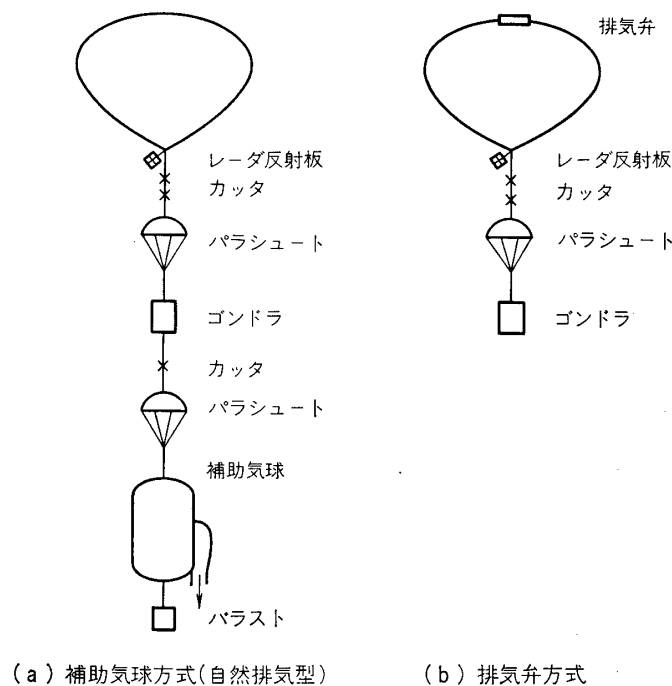
第1図 排気弁を用いたブーメランの原理

その高度に偏東風が吹いていれば、気球は放球点の方向にもどってくることになる。以上の経過を、第1図に示した。

上昇中の気球をいったんとどめる高度をブーメラン高度と呼ぶことにする。偏西風の強い高度範囲と航空機に対する安全性とを考慮すると、ブーメラン高度は12kmから15km付近にとるのが適当である。ブーメラン高度で東方に流す距離を長くするほど観測時間を増すことになるが、電波の受信限界が上限となる。実際には、偏西風および偏東風に含まれる南北成分のために、気球が日本の上空付近にもどってきた時にどの程度南北にドリフトするか、そのドリフトが回収あるいは追跡の上で、不都合にならないか、について検討した上で東進距離を決めることになる。

2.2 気球の構成

補助気球を用いた方式と排気弁を用いた方式それぞれについて、気球の構成を第2図に示



第2図 ブーメラン気球の構成

した。補助気球方式ではブーメラン高度に達したところで補助気球が浮力を失なうようにコントロールする[1]。再上昇用のバラストは補助気球の下につり下げられている。これに対して、排気弁方式では、気球の頭部に弁がとりつけられており、再上昇用のバラストは主ゴンドラの中に組み込まれる。第2図からも明らかなように、排気弁方式では気球の構成が著しく単純化される。開弁およびバラストの投下は、必要な時点に地上からのリモートコントロールによって行なわれる。

2.3 排気弁

気球用のガスがヘリウムに切替えられると同時に開発を進めてきたモータ駆動式の排気弁

に性能のよいものが得られたので、この排気弁をブーメラン実験に使用することとした。地上では、150 kg の総重量に対して、およ 40 kg/min の排気能力がある。排気弁についての詳細は附録 1 に述べてある。

気球上昇中に弁を開いた場合に空気が気球中に流入する可能性があるが、実験的には、後に述べるように、ほとんど問題とならないことが示された。

2.5 ブーメラン実験

昭和 48 年に気球の上昇のコントロールとブーメランの実験を 4 回にわたって行なった。その概要を第 1 表に示す。

第 1 表 実験の概要

気 球 名	B ₅ -48	B ₁₅ -22	B ₅₀ -10	B ₅₀ -11
放 球 年 月 日	48年 2 月 4 日	48年 5 月 27 日	48年 6 月 2 日	48年 6 月 5 日
放 球 時 刻	8 時 37 分	17 時 37 分	19 時 25 分	19 時 05 分
実 験 目 的	気球コントロール	ブーメラン実験	超重核の観測	一次電子の観測
気 球 総 重 量	146.9 kg	233.4 kg	501.6 kg	465.1 kg
自 由 浮 力	17 kg	23 kg	45 kg	42 kg
ブーメラン高度	16~17 km	13~17 km	10 km	12~20 km
水平浮遊高度	26 km	30 km	33 km	33 km
水平浮遊時間	1 時間 03 分	14 時間 07 分	17 時間 54 分	19 時間 47 分
回 収	戻り風なく未回収	はやちね丸回収	日本海にて回収	日本海にて回収

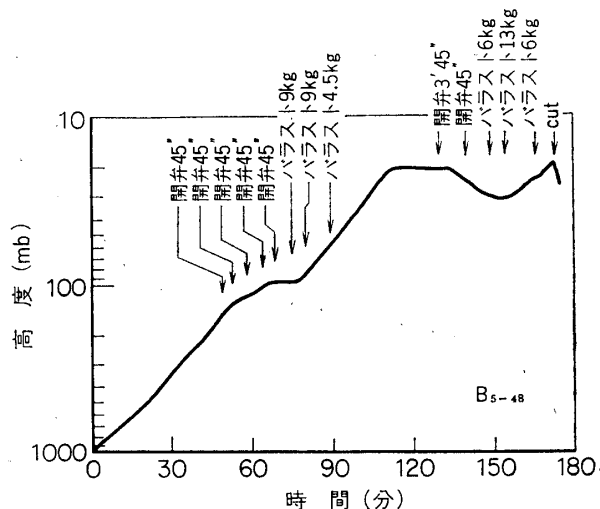
2 月に飛揚した B₅-48 気球では、気球上昇のコントロールの実験を行ない、排気弁が予定した通りに動作することを確認した。5 月に飛揚した B₁₅-22 気球では完全なブーメラン実験に成功し、海上に待機した回収船が着水後直ちにゴンドラを回収した。6 月に放球した B₅₀-10 と B₅₀-11 はいずれも観測を目的とする気球であった。B₅₀-10 では重重量気球に対する上昇のコントロールの実験を行なった。B₅₀-11 ではブーメランが順調に行なわれ、観測に対して十分な役目を果たした。

これらの 4 回の実験について、以下に順次述べることにする。

a. B₅-48 における上昇、コントロール実験

B₅-48 は、排気弁による気球の上昇コントロール実験、気球引裂き装置試験、落下傘リーフリングによるゴンドラの急速降下実験などを目的として、昭和 48 年 2 月 4 日に放球された。

総重量は 146.9 kg、地上で与えた自由浮力は 17 kg であった。排気弁とバラストによってコントロールされた気球上昇の経過を第 3 図に示した。放球後毎分約 270 m の速度で上昇する気球が高度 14.7 km (140 mb) に達したところで排気弁を働かせ、減速をはかった。小刻みに 5 回にわたって開弁した結果、気球は高度 100 mb 付近でほぼ水平浮遊するにいた



第3図 B5-48 高度曲線

った。この間に排気されたガス量は、地上での排気能力から換算すると、22.1kg と推定された。

この実験ではブーメラン高度で東方に流すことは予定しなかったもので、引続いて再上昇に移った。再上昇では9kg, 9kg, 4.5kgと3回にわたってバラストを投下した。合計22.5kgで、総重量の15%にあたる。バラストを22.5kg落したあとの上昇の状態は上昇中の弁をあける前の状態にほぼもどっていたので、22.5kgのバラストにより開弁の効果が補償されたことになる。したがって、弁の排気量を22.1kgと推定したことは正しく、これから、使用した排気弁が気球上昇中においても地上の静止状態の排気能力から計算される通りの性能を示すことが確かめられた。

また、再上昇後気球は満膨張高度26kmに達したが、これは気球の容積と総重量から決まる理論高度に一致している。したがって、気球の上昇中に開弁したことによる空気の流入は、たとえあったとしても無視できるほどの量であることも明らかとなった。

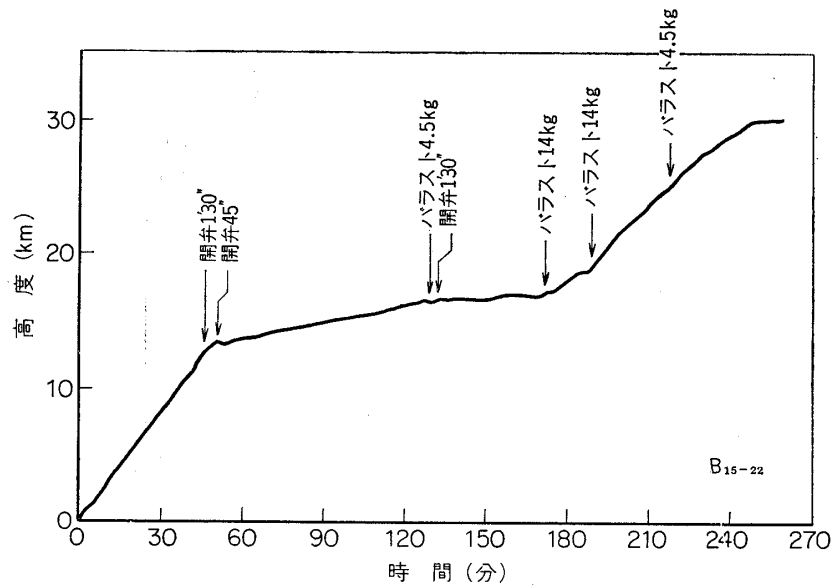
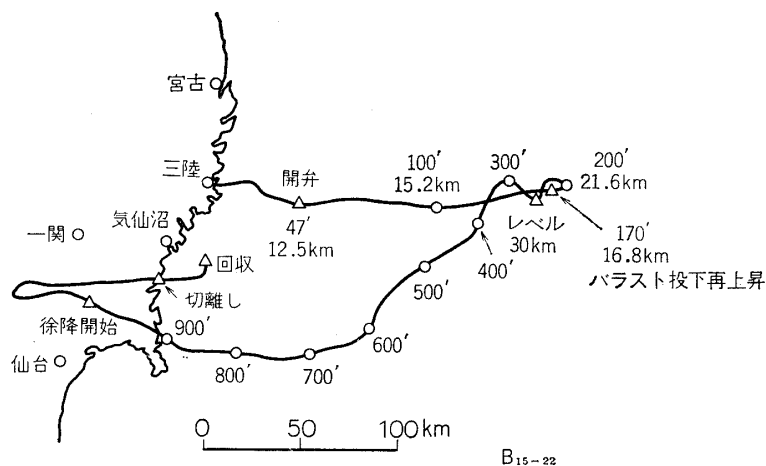
放球時の自由浮力と、上昇を止めるための排気量に差があるのは温度効果によるものであるが、この点については3-1で詳しく論じることとする。

b. B15-22 におけるブーメラン実験

B15-22は、ブーメランと回収の実験を目的として、昭和48年5月27日に放球された。この時期は上層風の点ではブーメランを行なうのに最も効率のいい時期にあたっている。

総重量233.4kg、地上での自由浮力23kgであった。気球上昇の経過を第4図に示す。放球されてのち270m/minの速度で上昇した気球は、高度13~14km付近で行なわれた弁コントロールにより、およそ40m/minの速度に減速された。以後この速度で徐昇させたが、ブーメラン高度は、その目的からいって厳密に一定である必要はなく、偏西風の強い高度範囲内にとどまればよいわけであるから、安全性の点などからみると徐昇させたほうがむしろ实际的といえる。

放球後130分付近で補正的なバラストの投下と開弁を行なって高度90mb付近にとどめ

第 4 図 B₁₅₋₂₂ 上昇経過第 5 図 B₁₅₋₂₂ 航 跡

たのち、放球後 173 分に再上昇のためのバラストを投下した。気球は高度 17km から 30 km まで順調に上昇した。再上昇に必要としたバラストは 32.5kg である。

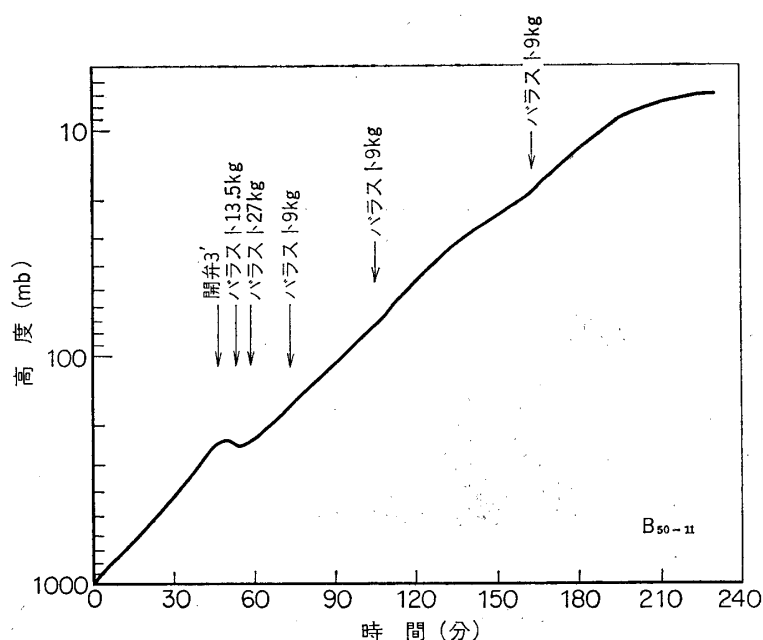
気球上昇中、および水平浮遊を経て回収にいたるまでの航跡を第 5 図に示した。三陸東方 50 km に達したところで減速を開始し、それから減速されていた時間内に気球は 120 km 東進した。減速しなかった場合に比べると 100 km よけいに東に流されたことになる。水平浮遊に入って気球は南廻りの円弧状の軌跡を描きながら西進した。三陸南西 75 km の地点に達したところで水平浮遊を打ち切り、徐々に降下させはじめたが、それまでの全水平浮遊時間 14 時間内における気球の平均の西方進行速度は 16 km/hr であったので、ブーメランさせたことによって得られた 100 km という東進距離の増加は観測時間を約 6 時間増加させた

ことになった。

また、この気球では岩手県沿岸での海上回収の実験を行なった。実験に協力を依頼した船舶が待機しているところにゴンドラを降下させ回収することを計画したが、実験は成功し、パラシュートを回収船の目視距離内に降下させ、着水後数分以内にゴンドラを船上に引上げることができた。この実験では3.3に述べるような気球の下降のコントロールを行なって回収に都合のいい位置に気球を誘導するとともに、気球切離し高度を15 kmまで下げて着水点予測の精度を高めた。

c. B₅₀-10 気球

B₅₀-10 は宇宙線超重核の観測を目的とした気球で、総重量 501.6 kg、総浮力 546.6 kg と



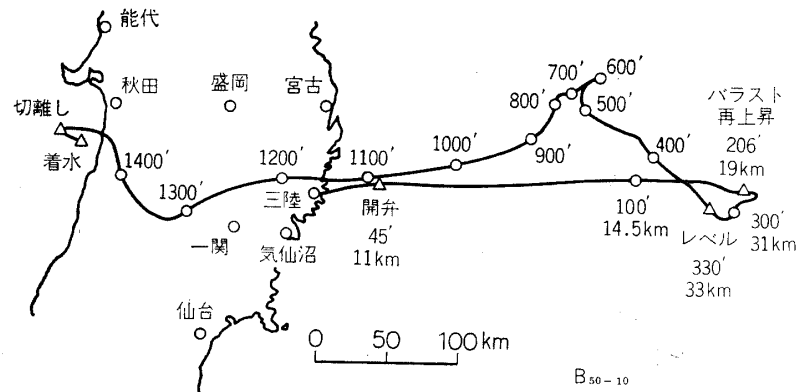
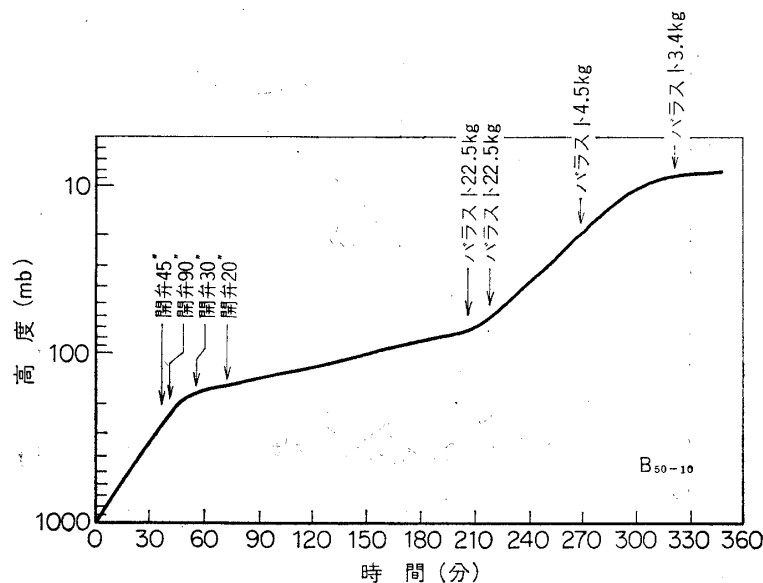
第6図 B₅₀-10 上昇経過

いう大重量の気球であった。排気弁とバラストにより上昇のコントロールを行なった結果を第6図に示す、地上で与えた自由浮力は45 kgであったが、高度10.5 kmで3分間弁を開いた結果、自由浮力は完全に失われ気球はやや下降した。この下降は13.5 kgのバラストで補償され、引続いて行なった再上昇には54 kgのバラストを必要とした。この実験でも、後に述べるようにガス排気量は計算から推定される値によく一致している。

B₅₀-10では、上層風の南北成分によるドリフトを避けるために、ブーメラン高度には短時間しか滞空させなかった。

d. B₅₀-11 におけるブーメラン実験

B₅₀-11 は一次電子の観測を目的として昭和48年6月5日に放球した気球であり、著しく大きなブーメラン効果が得られた。気球の航跡と上昇曲線は第7図と第8図に示した通りである。

第7図 B₅₀-11 航 跡第8図 B₅₀-11 上昇曲線

ブーメラン高度では気球を徐昇させ、高度 11km から 19km の間を毎分 50m のほぼ一定の速度で上昇させた。この間に気球は東に 270km 進行したが、これは減速を行なわなかった場合に比べておよそ 220km 多く東に流したことになる。再上昇には 50kg、総重量のおよそ 11%、のバラストを使い、高度 33km、東方 285km の地点で水平浮遊に入れた。水平浮遊中、一時的な航跡の南北方向へのずれはあったが、気球は偏東風に乗って西進し、約 20 時間にわたって水平浮遊したのち、秋田沖の海上に達した。そこでゴンドラの切離しが行われたが、上述の 20 時間のうちブーメランによる寄与はおよそ 10 時間に及んでおり、観測時間は 2 倍になったことになる。

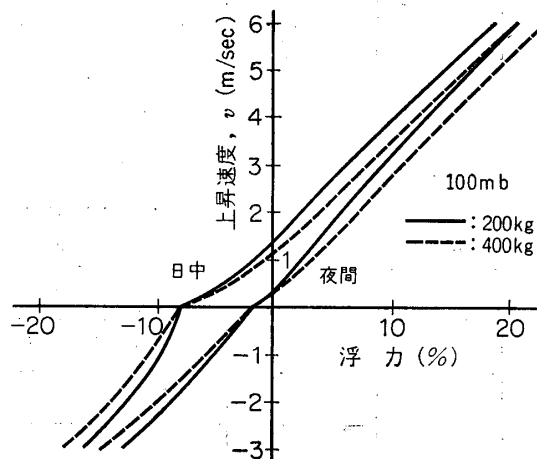
なお、海上に降下させたゴンドラは、海上保安庁秋田海上保安部の協力により回収することができた。また、回収にあたっての着水点の決定には、能代実験場に設けた仮受信点からの追跡が有効に働いた。

以上のように、排気弁を用いたブーメラン方式は実験的にきわめてよい結果が得られ、総重量 500 kg 前後の気球にも応用された。なお、ここで気象条件について付言すると、上層風に関しては5月中旬から6月上旬までが最適で、もどり風が安定しており、かつ風速も弱く、ブーメラン効果を十分に高めることができる。ただし、この時期でも、ブーメラン高度付近の偏西風に南北成分がみられ、それが数日程度の周期で変北するので、南北への大きなドリフトが好ましくない場合には、上層風の変化の状況を十分にみきわめて実験する必要がある。

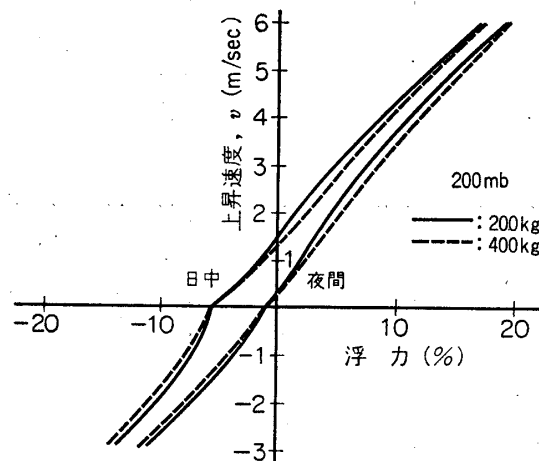
3. 気球のコントロールについて

ブーメラン気球を遂行するにあたって、上昇中の気球をいったんブーメラン高度で停止させる必要がある。上昇中の気球を停止させるには、一見地上で附加した自由浮力分を排気弁から抜きとってしまえばよさそうに思えるが、実際の気球上昇の物理的な状態はもっと複雑である。

上昇のための断熱膨張によるガス温低下、各高度での気球への輻射、気球皮膜と大気との間の対流などにより、気球のガス温度は上昇速度や高度によってさまざまな値をとっている。この結果気球の各高度での有効浮力は地上でつけた自由浮力とは大分異なった値をもっている。このような熱の出入りの気球上昇速度に及ぼす影響については文献[2]に詳しくとりあつたが、ここではブーメラン高度である 10 km (100 mb~200 mb) 附近での様相について、気球総重量 200 kg と 400 kg の場合の計算結果を第 9 図に示した。日中と夜間では、日射の影響により、比較的大きな差があることがこの図からよみとることができる。



第 9 a 図 100 mb における浮力と上昇速度



第 9 b 図 200 mb における浮力と上昇速度

幸いなことにこの高度では浮力と上昇速度の関係は高度にあまり関係なく、また 200 kg と 400 kg の気球ではその差はあまり顕著ではない。したがってこの程度の気球重量の場合いろいろな気球についてのコントロールのデータの解析は一括してとりあつかってよさそうである。

第 2 表

1. 気球 B₅-48 (総重量 146.9 kg)

放球年月日 昭和 48 年 2 月 4 日

JST	コントロール	高 度 mb	浮 kg	力 %	上昇速度 m/sec	備 考
9 h 27m	開弁 45"×1	140	17	11.6	4.9	ブーメラン開始
9 30	開弁 45"×1	130	11.8	8.0	2.9	
9 35	開弁 45"×1	115	6.9	4.7	2.0	
9 42	開弁 45"×1	100	2.6	1.7	1.7	
9 46	開弁 45"×1	95	— 1.4	— 0.9	0.5	
9 52	バラスト 9kg	100	— 5.1	— 3.5	— 0.5	再上昇
9 57	バラスト 9kg	88	3.9	2.8	2.7	
10 07	バラスト 4.5kg	58	12.9	10.0	4.2	

2. 気球 B₁₅-22 (総重量 233.4 kg)

放球年月日 昭和 48 年 5 月 27 日

JST	コントロール	高 度 mb	浮 kg	力 %	上昇速度 m/sec	備 考
18 h 24m	開弁 45"×3	178	23	9.9	4.4	ブーメラン開始
19 47	開弁 45"×2 バラスト 4.5kg	98	0.7	0.3	0.7	
20 30	バラスト 14kg	90	— 3.6	— 1.5	0	再上昇
20 47	バラスト 14kg	62	10.4	4.8	2.1	

3. 気球 B₅₀-10 (総重量 501.6 kg)

放球年月日 昭和 48 年 6 月 2 日

JST	コントロール	高 度 mb	浮 kg	力 %	上昇速度 m/se	備 考
20 h 05m		280	50	10.0	3.8	ゴム気球破壊 —5kg
20 12	開弁 45"×4	235	45	9.0	2.5	ブーメラン開始
20 19	バラスト 9kg	250	— 7.9	— 1.6	— 2.0	再上昇
20 21	バラスト 31.5kg	250	1.1	0.2	0.0	
20 39	バラスト 9kg	165	32.6	7.1	2.7	
21 10	バラスト 9kg	73	41.6	9.2	2.4	
21 15		62	50.6	11.4	3.6	

4. 気球 B₅₀-11 (総重量 465.1 kg)

放球年月日 昭和 48 年 6 月 5 日

JST	コントロール	高度 mb	浮力 kg	力 %	上昇速度 m/sec	備考
19 h 48m	開弁 45"×3	215	47	10.1	4.7	ブーメラン開始
20 01	開弁 30"×1	185	9.7	2.1	1.5	
20 19	開弁 20"×1	155	3.7	0.8	1.0	
22 31	バラスト 22.5 kg	70	0.2	0.0	0.7	再上昇開始
22 45	バラスト 22.5 kg	59	22.9	5.2	1.2	

これらの計算値はいろいろの仮定のもとで導き出されたものであるから、その絶対値までそのまま信用することはできないが大よその傾向は正しいものと考えてよいであろう。

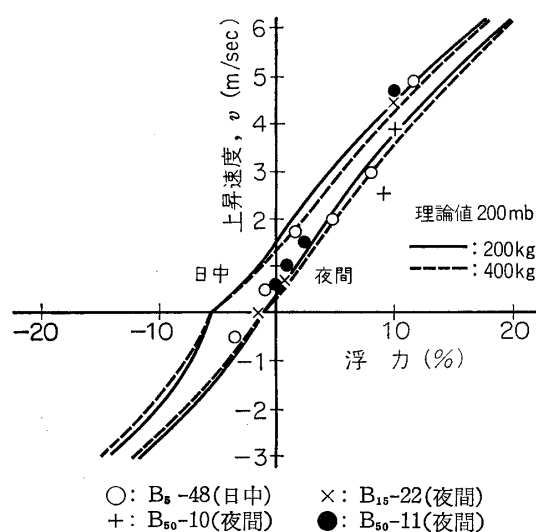
3.1 上昇をとめるコントロール

昭和 48 年の実験で新しく開発した排気弁を使用してブーメラン高度での上昇コントロールを行ったものはすでに述べたようにテスト機も含めて B₅-48, B₁₅-22, B₅₀-10, B₅₀-11 の 4 機であった。そのコントロールの細目について第 2 表にまとめておいた。ここで各高度での排気能力は附録に述べたように、地上での排気の実験データをもとに、毎分失なう浮力を

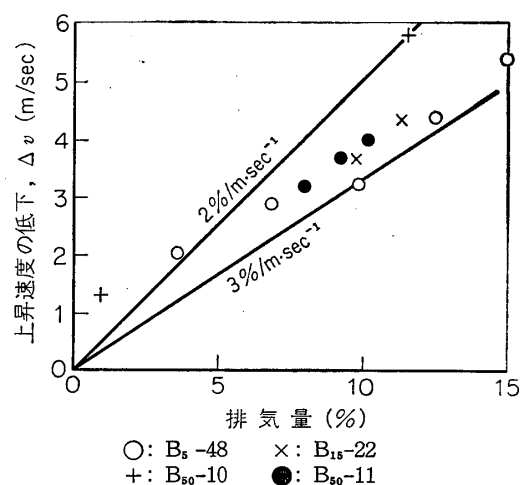
$$F = 40 \left(\frac{W}{150} \right)^{1/6} (P/P_0)^{5/6} \text{ kg/min} \quad (1)$$

とした。ただしここで W は気球の総重量を kg ではかり、 P/P_0 はその高度での気圧と地上気圧との比をあらわしたものである。

この表にかかげたデータを、上昇速度と浮力のグラフにプロットすると第 10 図に示したように、比較的そろった傾向を示していることがわかる。計算値との比較にあたって次のことを注意しておきたい。ここに示した計算値は気球が熱平衡にある場合の結果であって、この種の実験データと完全に対応する値とはなっていないことである。気球が熱平衡に達する



第 10 図 排気による減速



第 11 図 上昇速度の低下と排気量 (100 mb~200 mb)

までに要する時間は約十数分と推定されるので短い時間の間に引きつづいて排気弁の操作を行った場合には速度低下にともなう気球内ガス温度の上昇が追いつかず、この結果計算値と比較して、遅い上昇速度を与えることになる。

さて実際のコントロールにあたっては、ある上昇速度の気球を停止させるのに何%の浮力分を排気すればよいかがということが問題となる。第10図からの推定も可能であるが、上昇速度と浮力の関係が略直線的であることから、排気にともなう上昇速度変化の実験的な関係を求めておくことが实际的である。第11図に示したのがその関係である。気球は熱平衡に入っていないので、排気の上昇速度に与える影響は理論から期待されるよりもやや大きくなる。実験データの中ではB₅-48は日中の飛揚であったため、日射の影響をうけて、上昇速度の低下率が低いことが期待され、実際のデータもその傾向を示しているようにも見える。しかし日中及び夜間の差を明らかにするためにはさらに気球の観測データをふやす必要があるものと思われる。

さて上昇速度を 1 m/sec 低下させるには、これらのデータから 2～3 %の排気が必要であることがわかる。

強いて夜間のデータと日中のデータにわけると

夜間は $2.3 \pm 0.3\%/\text{m/sec}$

日中は $3.0 \pm 0.3\%/\text{m/sec}$

程度の値が導かれる。これに対応する理論値は、それぞれ 2.8%, 3.6% とやや高い値を示している。

安全をみてこの係数として 2 %/m/sec をとれば、速度 v m/sec で上昇する気球を停止させる場合

$$2v\%$$

の浮力分を排気すればよく(1)式とくみあわせて必要な開弁時間は

$$T = \frac{vW \times 10^{-2}}{20 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{5/6} \left(\frac{W}{150} \right)^{1/6}} \text{ min} \quad (2)$$

となる。

この開弁時間は排気能力と上昇速度の係数として 2 % という低い値をとったので本当に必要な値よりやや短い。したがってこの開弁時間で気球が下降にうつることはまずないと考

第 3 表

実 験 デ ー タ							式より
気 球	総 重 量	P/P_0^*	v コントロール前	v コントロール後	T	備 考	T
B ₅ -48	146.9	0.120	4.9 m/sec	0.5	3 min	日 中	2.1 min
B ₁₅ -22	233.4	0.17	4.4	0.5	2.25	夜 間	2.1
B ₅₀ -10	501.6	0.235	2.5	— 2	3	夜 間	1.7
B ₅₀ -11	465.1	0.230	4.7	1.5	2.27	夜 間	3.1

* 弁は数回にわたって開いているのでその平均高度をとった。

第4表 上昇速度を 1 m/sec 低下させるのに必要な排気時間 (min)

(100 mb~250 mb)

P: 高度 W: 総重量

P \ W	100 kg	200 kg	300 kg	400 kg	500 kg
100 mb	0.364	0.65	0.91	1.16	1.39
150	0.260	0.46	0.65	0.83	0.99
200	0.205	0.364	0.51	0.65	0.78
250	0.170	0.303	0.42	0.54	0.65

えられる。

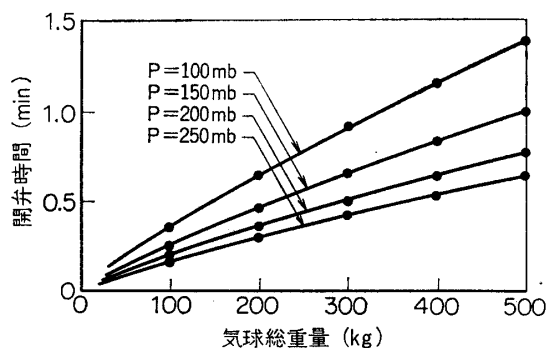
実際今までのデータとの比較は第3表に示したが、この式から出した結果は十分の余裕をもっており、一回目にまずこの程度の排気を行った後微細なコントロールを行なうのが実際のであると考えてよい。

(2)式から期待される開弁時間はいろいろな高度と気球重量について第12図に示した。数値は第4表にまとめておいた。

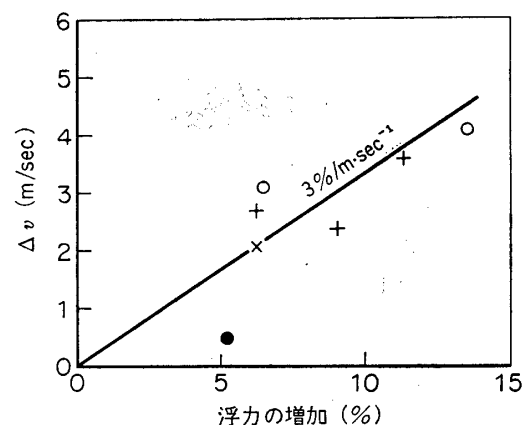
3.2 再上昇について

弁を操作して気球を水平浮遊させたあと、気球を再上昇させるにあたってどの程度のバラストを投下すべきかが問題となる。原則的には排気した量だけバラストを補償すれば、元にもどるはずである。しかしブーメラン高度での水平浮遊中実際には安全をみてややプラスの上昇速度をつけているので、再上昇のためバラストを投下する高度は 100 mb から 50 mb 高度になっている。したがって排気弁を操作した高度より数 km 高い高度から再上昇させるので、たとえ排気で失った浮力を完全に補償しても同じ上昇速度になるとは限らない。

文献[2]の計算結果によると 100 mb より高い高度では同じ浮力に対する上昇速度は 100 mb 附近の上昇速度より遅くなっている。これは 100 mb 附近を境とし上空では大気温度の高度分布がかわり、それまで高度とともに低下した大気温度の変化がゆるくなり、むしろ逆



第12図 色々な高度で上昇速度 1 m/sec へらすのに要する排気時間



第13図 バラスト投下による上昇速度の増加 (100 mb~50 mb)

○B_s-48(日中) ×B_s-22(夜間)
+B_{so}-10(夜間) ●B_{so}-11(夜間)

に高度とともに温度が上昇する傾向を示すためである。このため上昇中の気球内のガス温度と大気温度の差がはげしくなり有効浮力が減ってくるためである。

気球内ガス温度はバラストをおとして上昇速度がふえていく傾向にあるときには断熱膨張の影響で平衡温度に達しやすい。このため計算値と実験値の一致は上昇速度をおとす前節の場合に比較してよいことが期待される。

バラスト投下と上昇速度の関係の実験データは第 13 図に示したが、計算値との一致も比較的よいといえそうである。実験データのバラツキのため、日中と夜間のフライトデータの差はみとめられないが 1 m/sec の上昇速度の増加に対して投下すべきバラスト量は

$$3 \pm 0.5\%$$

であることがわかる。

これに対する理論値は日中、夜間ともに

200 kg の気球重量に対して 3%

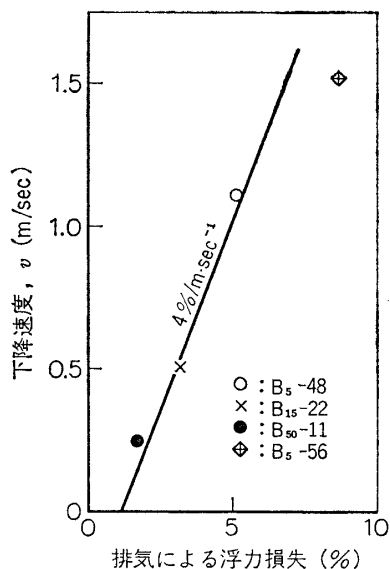
400 kg の気球重量に対して 3.8%

程度となっている。

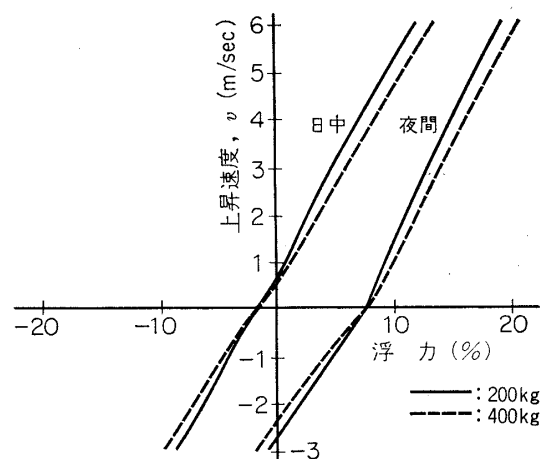
このようなバラスト投下による再上昇のデータが比較的計算値とよい一致を示すことは (1) 式で与えた排気能力が実際に近い値を示しているものと解釈される。4.5 m/sec 程度の上昇速度を得ようとする 13% 程度相当のバラストを投下する必要があることがわかる。

3.2 水平浮遊後の降下について

気球が予定高度まで上昇し観測を行った後、異なる高度での観測を行なうため気球を下降させたり、また高度を 20 km 程度まで下げて西風に乗せ、観測所の方角に誘導させる必要にせまられることがある。



第 14 図 水平浮遊高度から 1km 下での下降速度と排気量の関係 (10 mb 付近)



第 15 図 10 mb における浮力と上昇速度

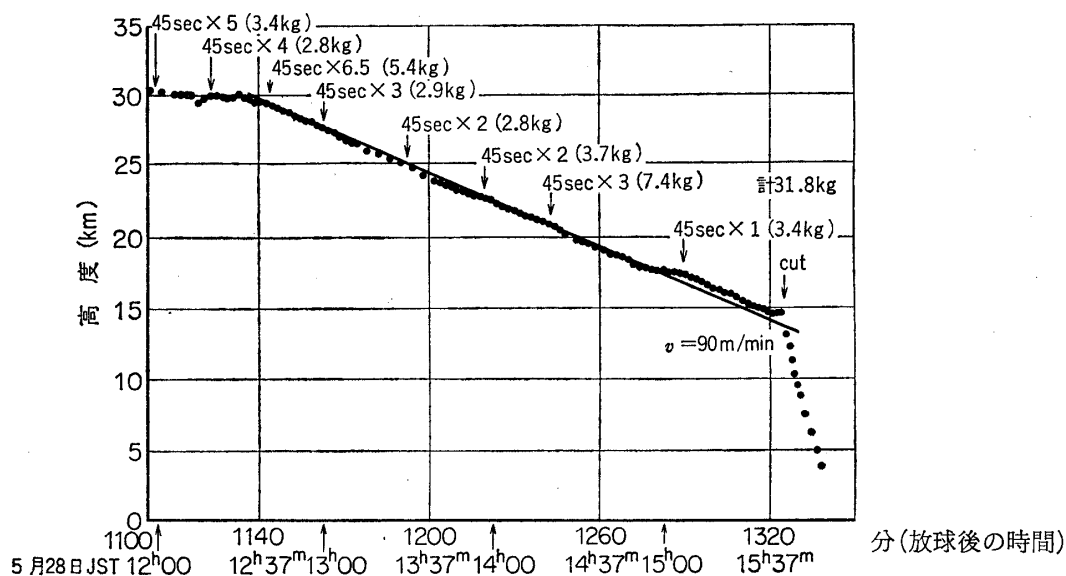
気球の水平浮遊高度は一般に 10 mb またはそれ以上の高度であるが、この付近では高度が下がるにつれて大気温度も低下する。一方 20 km 以上の高度では気球に入射する輻射はほぼ一定であるので気球内のガス温度は高度が低下するにつれて大気温度に対して上昇する。したがって下降する気球の有効浮力は増加するのでやがてある高度で停滞するに至る。

20 km 以上の高度で高度 1 km 上昇ごとに 1.5°C 位の大気温度の上昇があれば、下降する気球の速度を一定に保つためには 1 km あたり約 0.7 % の浮力を減らしてやる必要がある。したがって気球を下降させるには下降速度を決める初期排気とこの速度を維持するための継続排気が必要となる。

上空で弁をひらいて下降させた例は B₅-48, B₁₅-22, B₅₀-11, B₅-56 でこれらのデータをもとに排気量と下降速度の関係を検討することにした。

気球が水平浮遊高度から排気の結果下降をはじめ、元の高度から 1 km 下がった所での下降速度とそれまでに排気した量の関係を示したのが第 14 図である。実験点は比較的一直線に並ぶが、横軸の排気量約 1 % 程度の所で下降速度が 0 としてある。この約 1 % の排気量は高度 1 km 下降にともなう大気温度の下降分を補償するもので、これを考慮すると、下降速度 1 m/sec に相当する排気量は約 4 % という値が得られる。

先に述べた文献 2 で気球総重量 200 kg, 400 kg, 高度 10 mb の場合について計算した結果を第 15 図に示した。この図からわかるように下降速度はこの程度の気球重量の場合には、気球重量及び日中夜間による差はあまりなく 1 m/sec あたりの必要排気量は約 3 % で実験結果とよく一致している。なおこの場合も気球内ガスの断熱圧縮の効果のため比較的気球内ガスは熱平衡状態に入りやすいことを注意しておきたい。



第 16 図 B₁₅-22 の下降状況 (数字は排気時間)

B₁₅-22 では高度 30 km から 15 km 迄第 16 図に示すようにかなりの高度範囲にわたって 1.5 m/sec というほぼ一定の速度で降下しているので、下降に必要な継続排気量をこのデー

タから推定できる。各高度での排気量と下降速度のデータから 1 km 下降に必要な継続排気量を計算すると、その数値は 0.6% から 1.3% の範囲に分布している。全高度について平均をとれば 0.78%/km となり、この値ははじめに述べた期待値にほぼ等しい。

以上の議論から、高度差 h km の範囲を速度 v m/sec で下降させるとは

$$(4v + 0.8h)\%$$

に相当する排気を行なえばよいという結論が得られる。

この排気を行なうために必要な開弁時間は(1)式から、まず

$$\frac{Wv \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{P}{P_0}\right)^{5/6} \left(\frac{W}{150}\right)^{1/6}} \text{min} \quad (3)$$

で、ついで高度 1 km 下降あたり

$$\frac{2Wv \cdot 10^{-4}}{\left(\frac{P}{P_0}\right)^{5/6} \left(\frac{W}{150}\right)^{1/6}} \text{min} \quad (4)$$

である。式(3)の結果は第17図に示したが、その具体的数値については第5表に示した。

第5表 1 m/sec の下降速度を得るため必要な排気時間 (min)
(2 mb~20 mb)

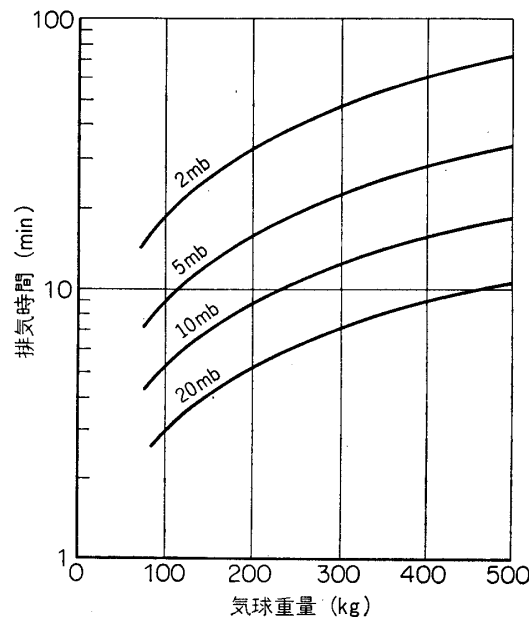
$P \backslash W$	100 kg	200 kg	300 kg	400 kg	500 kg
2 mb	19.0	33.8	47.4	60.2	72.6
5	8.8	15.8	22.0	28.1	33.8
10	4.966	8.8	12.3	15.7	19.0
20	2.8	5.0	6.9	8.8	10.7

1 km 下降に必要な排気時間 (min)

$P \backslash W$	100 kg	200 kg	300 kg	400 kg	500 kg
2 mb	3.8	6.8	9.5	12.0	14.5
5	1.8	3.2	4.4	5.6	6.8
10	1.0	1.8	2.5	3.1	3.8
20	0.6	1.0	1.4	1.8	2.1

4. お わ り に

気球の飛しょうをコントロールして、長時間の水平浮遊と放球点の近くでの回収をめざすブーメラン方式について述べた。排気弁を用いて気球をコントロールする方式は昭和48年の実験において、以上に述べてきたように、十分な成果をあげることができ、実際の観測にも応用された。排気弁を用いたブーメラン方式は、気球の構成の単純さとコントロールの方



第17図 1 m/sec の下降速度となるために必要な排気時間

式がほぼ確立したとことと相まって、今後広く応用され、これからの気球観測に大きな寄与をなすものと考えられる。

おわりにあたって、ブーメラン実験を進めるにあたりご協力をいただいた岩手県釜石水産事務所ならびにはやちね丸の方々、釜石漁業無線局の方々、ならびに日本海での回収にご協力いただいた秋田海上保安部、酒田海上保安部の方々に厚く感謝の意を表します。

1974年1月30日 新設部(工学)

参 考 文 献

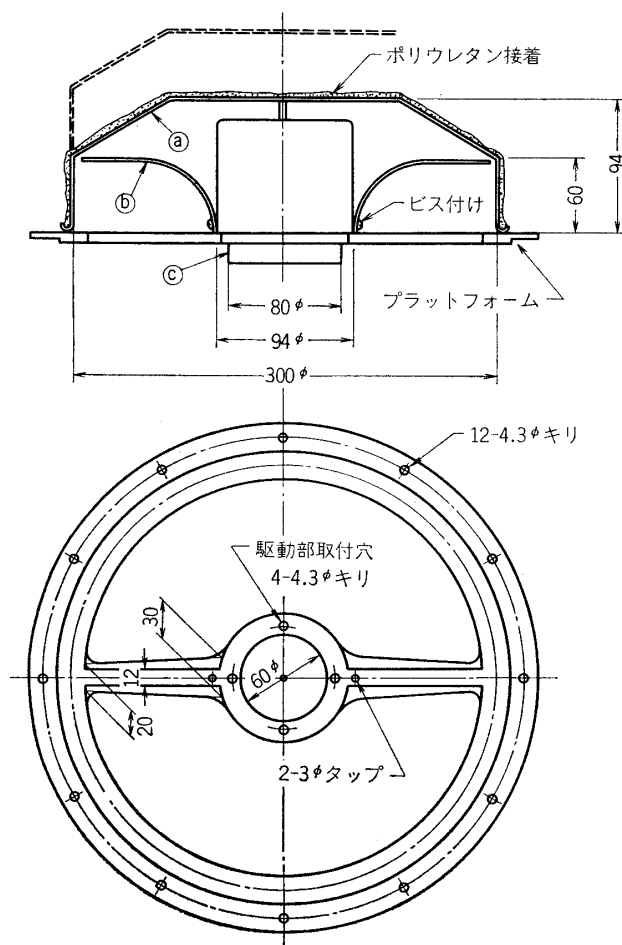
- [1] 西村 純ほか：東京大学宇宙航空研究所報告，9，1(B) (1973) 186.
- [2] 西村 純，藤井正美，山上隆正：東京大学宇宙航空研究所報告，9，(B)，(1973) 167.
- [3] 西村 純ほか：東京大学宇宙航空研究所報告，4，1(B)，(1968) 111.

付録 1 排気弁について

サイクリングやブーメラン気球で、気球をコントロールする際に気球内ガスを排気するための排気弁が必要となる。従来気球内ガスとして水素を使用してきたため、安全性の観点からソレノイド又はガス圧により駆動する方式を採用してきた[3]。しかし前者は大きなストロークのとれないこと、また後者は機構上複雑であることなどの欠点をもっていた。昭和47年度から気球用ガスとしてヘリウムを使用することになったので排気弁の駆動にモーターを用いることができるようになりこの結果性能のよい排気弁を作ることができるようになった。

A1.1 排気弁の構造

排気弁の一般的構造は第 A-1 図に示したが、これを気球頭部にとりつけ図の a の部分を



第A-1図 排気弁の構造

上にもちあげるにより排気を行なうことができる。

中心の駆動部としては2種類のものを試作した。一つはラックピニオンとマイクロクラッチを併用しモーターで駆動する型で、通電がとまればマイクロクラッチが切れ弁はスプリングの力で自動的に閉じる。フルプールの型であるが機構がやや複雑である。

もう一つの型はモータでスクリーを回転させ弁を上下させるもので弁が所定の位置に達した時はマイクロスイッチでモータは停止する。コマンド信号で弁を開いた後、コマンドがきければモータに逆電流が流れて弁は閉じる。この方式は機構的に簡単であるが弁が開いた後モータに故障をおこすと閉じることはできない。しかし弁を開いている時間は一般に数分(比較的長時間弁を開く時も数分間に一度はコマンドで測距信号をおくるためその間弁を閉じる)であるので、この間に故障をおこす確率は低いと考えられる。

ストロークとして5cmのものを両者について試作し検討を行った。

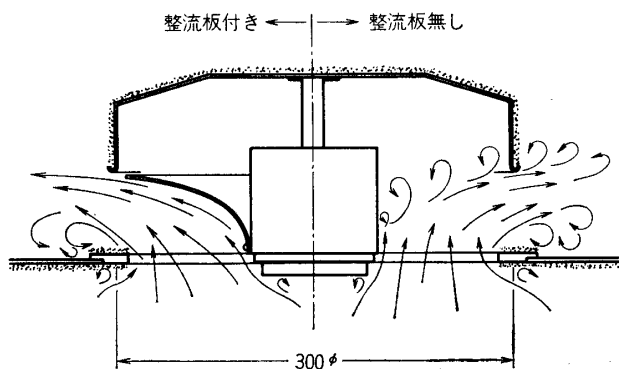
低温試験では -70°C で3時間冷却したが、共に満足すべき結果であった。

以上の点を総合し実際に使用する排気弁としては機構上簡単なスクリー方式を採用することとした。

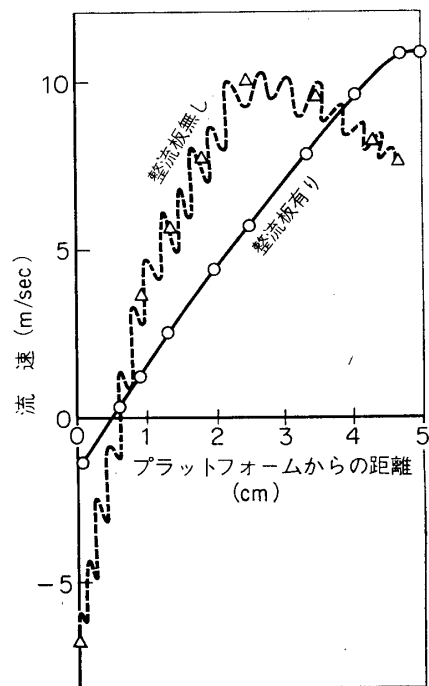
A1.2 地上での排気能力

排気弁からガスが噴出する際、ガス流は弁の内部形状がやや複雑であるので大きく乱れる。この乱れのため排気能力が低下することが考えられるので第 A-1 b 図に示すように弁内部に整流板を取りつけた。整流板の形としては、平板にけられた円孔の前面に平板がある場合にこの穴から噴出する流体の流線にそうよう計算して決定した。

流れの状況をしらべるためには風洞実験を行った。宇宙研の 2m 風洞で風速 10 m/sec の流れを排気弁にあて流れの状態を調べ開口部附近の流れの様子を測定した。



第 A-2 図 整流板効果



第 A-3 図 排気弁からのガス流出速度
風洞実験 (10 m/sec)

第 A-2 図は整流板のある場合とない場合の流れの様子を示したもので整流板のない場合には各所に渦を生じていることが観測された。整流板のある場合は渦の発生はきわめてすくない。ただし受け板の角付近では渦を生じておりこの付近の形状についてはさらに検討を要することがわかった。

一方噴出部の流速を弁の受け板部から上部にわたって測定すると第 A-3 図に示した結果が得られた。この図からわかるように整流板を取りつけることは排気能力にはあまり関係なく、この流速を積分してわかる様に端の効果がない場合と比較すると効率は約 1/2 となっている。開口部の形状および整流板については排気能力を高めるようさらに検討する予定である。

なお整流板がある場合には外部ガスの吸込みがすくなくなっている。排気中気球内への空気の侵入がすくなくなることであり好ましい結果が得られたと考えられる。

風洞実験の結果、この排気弁は端効果のない場合の約 1/2 の効率をもっていることがわか

ったので、気球頭部にこの弁をとりつけたときには毎秒あたり

$$\Delta F = 0.5 \times 1.2 C_0 \left(\frac{\Delta P}{P} \right)^{1/2} (\rho_{\text{air}} - \rho_{\text{He}}) S \quad (\text{A1})$$

の排気が期待される。

ここで C_0 はヘリウムの音速、 ΔP は気球頭部の内外圧差、 P は大気の圧力、 ρ はガス密度、 S は排気弁の排気口面積である。

浮力約 100 kg の気球が地上にある場合には、

$$\Delta P \cong 0.6 \text{ gr/cm}^2$$

$$C_0 \cong 900 \text{ m/sec}$$

$$S \cong 470 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{\text{air}} \cong \rho_{\text{He}} = 1.1 \text{ kg/m}^3$$

であるので

$$\Delta F \cong 0.68 \text{ kg/sec}$$

$$\cong 40 \text{ kg/min}$$

の浮力損失が期待される。

実際に気球にとりつけて地上試験を行った結果の一例は第 A-4 図に示したが、B₅-48 で浮力 137 kg に対してコマンドで 12 秒間弁を開き、その間の 1 秒ごとの浮力変化から排気量を求めたものである。弁の開閉に約 8 秒要しているが、この結果から 150 kg の気球浮力に対し地上で毎分約 40 kg の排気が行なわれていることを示しており、期待値とほぼ等しい結果を与えている。この値を採用すると地上で W kg の浮力をもつ気球に対して毎分の排気量は (A1) 式から

$$\Delta F = 40 \left(\frac{W}{150} \right)^{1/6} \text{ kg} \quad (\text{A2})$$

となる。

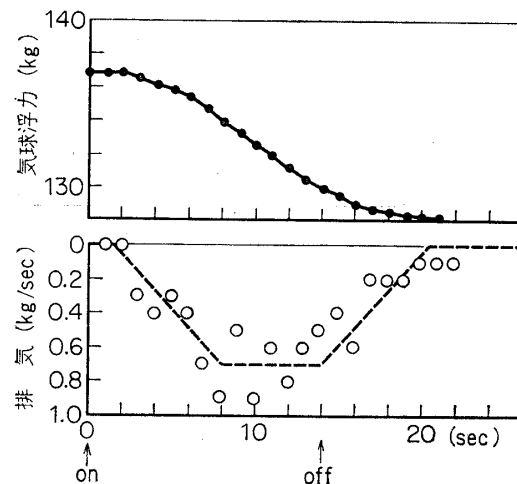
第 A-1 表に従来試作使用した排気弁と今回の方式のものとを比較して掲げておいた。

A1.3 上空での排力能力

気球が上空に昇ると気圧の低下にともない体積は膨張する。気球の頭部における内外圧差はこの結果

$$P \times \left(\frac{1}{P} \right)^{1/3} = P^{2/3}$$

に比例することとなる。したがって上空でのガス流出速度は $P^{-1/6}$ に比例するため浮力損失は $P^{5/6}$ に比例することとなる。



第 A-4 図 地上排気試験

第 A-1 表

	1960	1967	1978~9	1972	1972
方 式	ソレノイド	ガス圧	ソレノイド	モーター (スクリュー) 方式	モーター (ラックピニ オン方式)
電 力	100 V 0.5 A	16 V 0.2 A	100 V 0.7 A	12 V 0.1 A	12 V 0.2 A
ボンベ容量及びガス 圧		90 cc 70 atm, N ₂			
ストローク	1 cm	5 cm	2 cm	5 cm	5 cm
開弁力	2 kg	7 kg	2 kg	5 kg	5 kg
排気口プラットフォーム	230 cm ²	550 cm ²	518 cm ²	492 cm ²	481 cm ²
排気口外縁部	86 cm ²	525 cm ²	180 cm ²	471 cm ²	471 cm ²
地上排気能力	7 kg/min	60 kg/min	18 kg/min	40 kg/min	40 kg/min
低温性能	-70°Cで動作	左に同じ	左に同じ	左に同じ	左に同じ
重 量	2.5 kg	3.5 kg	3.0 kg	1.9 kg	2.5 kg
開閉時間	瞬 間 瞬 間	瞬 間 "	瞬 間 "	10 sec 10 sec	10 sec 瞬 間

第 A-1 表 上空における排気量期待値
Efficiency of the Exhaust Valve (150 kg total lift)

Height	ressure	Loss of Lift	Height	ressure	Loss of Lift
0 km	1,010 mb	40 kg/min	21 km	50.8 mb	3.33 kg/min
1	900	37	22	43.4	2.92
2	804	33	23	37.1	2.57
3	714	30	24	31.8	2.26
4	632	27	25	27.2	1.99
5	556	24.5	26	23.4	1.75
6	488	22.0	27	20.3	1.55
7	429	20.0	28	17.5	1.37
8	377	17.7	29	15.1	1.21
9	330	15.9	30	13.0	1.07
10	287	14.1	31	11.2	0.94
11	248	12.5	32	9.6	0.83
12	213	11.0	33	8.2	0.74
13	184	9.7	34	7.2	0.66
14	158	8.6	35	6.2	0.58
15	134	7.5	36	5.4	0.52
16	114	6.5	37	4.5	0.44
17	97	5.7	38	3.9	0.39
18	82.2	5.0	39	3.4	0.35
19	70.0	4.4	40	2.9	0.30
20	59.6	3.81			

これらの結果を総合すると総浮力 W kg の気球が気圧 P の所で排気弁を作動させた場合、期待される毎分あたりの排気量は

$$\Delta F = 40 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{5/6} \left(\frac{W}{150} \right)^{1/6} \text{ kg/min}$$

となる。

実際上空で行った排気量は本文の解析で示されたようにこの期待値から算出した値に矛盾していないように思われる。

総浮力 150 kg の気球に対する上空での排気の期待値は第 A-2 表にまとめておいた。