

プログラムブーメラン気球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・松 坂 幸 彦
並木 道 義・高 成 定 好・丹 生 潔
石井 千 尋

1. はじめに

ブーメラン気球では、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て、気球を東方に流す。東方に流す距離が大きければ大きいほど、観測時間は増す。

しかし、東進距離をあまり大きくとると、気球は見通し範囲外に出てしまい、電波によるコントロールが効かなくなる。気球を東進させるときの高度は大体13kmから15kmの範囲であるが、この高度に対する見通し距離は540kmから570kmである。

東進終了後再び気球を上昇させるためにバラストを投下する。通常のブーメラン気球では、この指令をコマンド電波によって行なっている。そこで、バラストの投下にタイマーを利用して、気球を見通し範囲外まで流して再上昇させることを考え、技術的な検討および飛ばしよう実験を昭和49年度に行なった[1]。この方式を、ブーメラン気球の拡張として、プログラムブーメラン気球と名付けた。

昭和49年の飛ばしよう実験では、気球の再上昇過程の試験に重点を置き、全ての実験を見通し範囲内で行なった。この実験で各種装置の動作を確認し、また気球の上昇も予定通り行なわれることを確かめたので、次で、気球を見通し範囲外まで流して再上昇させる実験を計画した。

実験は、昭和50年6月に、気球B₁₅-29において行なった。気球を、高度13kmに止めて東方700kmまで流し、そこでバラストを投下させて再上昇させた。見通し範囲外で再上昇させるための装置は全て正常に働いた。

プログラムブーメラン気球は、著しく長い観測時間を期待できるものであるが、実用に供するにあたっての条件は、通常のブーメラン気球に比べてかなりきびしいものとなる。東西方向の飛行距離が格段に大きくなり、また、一時的に気球が追跡できない状態になるので、コントロールの正確さが一段と要求される。また、高層風の風向に対する制限も強くなる。

気球の上昇のコントロールに関しては、この2、3年のブーメラン実験を通じて、適正なコントロール量をかなり正確に定量化できるようになった。気象条件についても、高層気象データを用いて検討した結果、条件のよい時期には、プログラムブーメラン方式によって、

東方 1000 km位まで流しても回収の可能性があることがいえる。

ブーメラン気球は、現在すでにさまざまな科学観測に利用されて、大きな成果を上げている。毎年2ないし3機のブーメラン気球が放球され、10数時間から20時間に及ぶ観測を行なっている。ここに、更に、プログラムブーメラン気球を確立することは、きわめて大きな意義を持つものといえよう。

以下に、まずプログラムブーメラン気球の原理および気象条件から見たその可能性について述べ、次いで、B₁₅-29気球における実験結果および成果、ならびに気球の上昇のコントロールに関する検討結果を述べる。

2. プログラムブーメラン気球の原理と気象条件

ブーメラン気球の飛揚は高度10kmから15km付近に強い偏西風が吹き、高度25km以上では東風が吹いている時期に行なわれる。

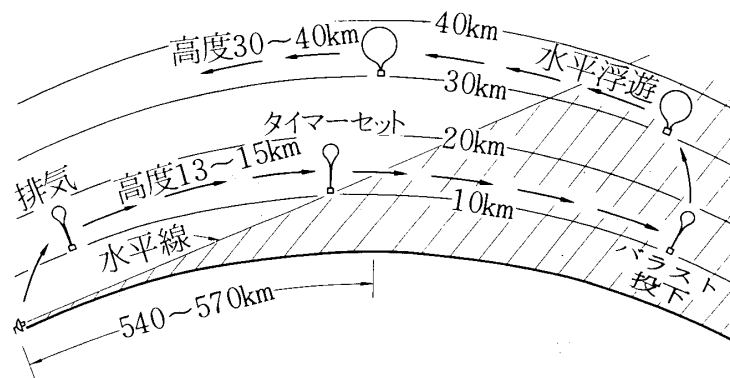
プログラムブーメラン気球におけるコントロールおよび気球の飛しよう経過は次の通りである。

(1) 放球後上昇中の気球を、いったん高度13kmから15kmのブーメラン高度[2]にとどめる。そのためには排気弁を用い、自由浮力分のガスを放出させる。排気量は、温度効果があるため、地上で与えた自由浮力とは異なり、また夜間と日中とでも異なる。

(2) ブーメラン高度で気球は東進する。見通し限界が近ずいたところで、東進速度および気球高度の変化の状況から計算して、再上昇開始時刻を指令電波によって指定する。つまり、指令の時刻を基準にして、ある特定の時間後にバラストの投下を開始するようにタイマーをセットする。偏西風の風速は高度によって異なりまた時間的にも変化するので、タイマーの動作時刻を放球前に決めておくことはできない。

(3) 気球は見通し範囲外に出て、更に東進を続けるが、(2)において設定された時刻に、タイマーが働き、バラストの投下が始まる。バラストの投下量および投下速度は、総重量に応じてあらかじめ決めておく。気球は上昇を開始する。

(4) 気球は満膨張高度に達し、高度一定のまま東風に乗って西進する。



第1図 プログラムブーメラン気球の飛翔経過

以上の経過を第1図に示す。満膨張高度に達したときに見通し範囲内に戻っていなければならないとすると、東進の限度は大体750～800 kmである。テレメータによる観測データの取得は必要なく、長時間フライトと回収のみが必要な観測では、更に東方に流すことが可能である。

プログラムブーメラン気球では東西方向の飛しよう距離が大きくなるため、上層風の風向に対する制限は厳しくなる。気球が戻ってきたときの位置が、放球点から南または北に大きくずれてしまうと、回収は困難である。しかし、高層気象データ[3]を用いて検討すると、条件の良い日をとらえることは可能であり、東方に1000 km位流しても十分回収の可能性があることがわかる。次は高層気象データの検討結果の要点である。データの詳細は付録に示す。

(1) 1年のうちで最も条件の良い時期は5月下旬から6月上旬である。

(2) 5月の下旬から6月上旬にかけて、偏西風が丁度270°方向をとる日は、平均して、20日間に約6日の割合でおこり、このうち風向が安定していてプログラムブーメラン気球の放球に向いている日は平均2ないし3日ある。

(3) この時期の偏西風の風速の平均値は高度175 mb(13.3 km)で37 m/sである。ただし分散がかなり大きく、標準偏差は15 m/sである。37 m/sの風速のとき800 km進むのに約6時間かかる。

(4) 東風は5月10日頃に吹きはじめ、20日頃に安定する。6月に入るとしだいに風速が増す。5月下旬には、高度26～30 kmで平均6 m/s、31～35 kmで9 m/s、36～40 kmで11 m/sである。これを800 kmを戻る時間に対応させると、それぞれ、37時間、25時間、20時間となる。

(5) 東風の南北成分は大体±2 m/sの範囲の値をとり、数時間で向きや大きさがランダムに変わる。これから、例えば40時間後の南北方向への位置の分散は、±110 kmと求められる。この程度の範囲ならば回収は可能である。

以上のうちの(5)に関連して、気球を戻す過程では人為的にコントロールを加えて望ましい風向の高度を選ぶこともある程度は可能である。したがって、南北へのドリフトは更に減らせるものとおもわれる。

3. プログラムブーメラン気球飛しよう実験

プログラムブーメラン気球の実験を、昭和50年6月20日に放球したB₁₅-29気球において行なった。実験要目および経過を第1表および第2表に示す。

(1) コントロール機器

プログラムブーメラン気球に必要なコントロール機器は、排気弁、タイマーおよびバラスト(オートバラストと呼ぶ)である。

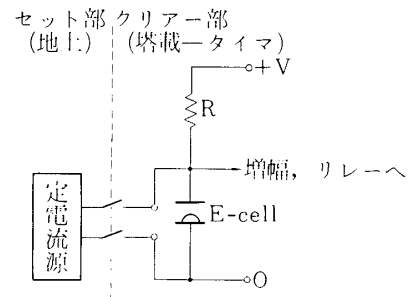
排気弁には、すでに性能の確立したモータ駆動式のもの[2]を使用した。

タイマーとしては、E-cellを利用したタイマーを搭載した。E-cellは電気メッキの原理を応用した素子である。一定量の電荷を与えることによってセットされた素子は、通過電流の積算がセット時に与えられた電荷量に等しくなった時にクリア状態となり、端子電圧の上昇を起す。タイマーとしては、素子に流す電流とクリアになるまでの時間は正確に逆比例

することを利用する。第2図にタイマーの構成を示す。時間精度は、地上テストで、2~3%である。プログラムブーメラン気球では、何段階かの時間の選択が必要であり、図に示したユニットを並列に組合せている。B15-29では、1時間および2時間の2段階とした。

再上昇用のオートバラストの投下速度は、この実験では、毎分1.2 kgとした。これは総重量の0.64%にあたる。全量18kgを15分で投下する。総重量に対する割合で考えると、昭和49年度のB30-17およびB30-18の場合の1.5倍の投下速度になっている。

他に、B15-29では上昇速度を直接測定することのできる気球上昇計[4]を搭載した。微差圧計を利用したもので、0.1 m/sの感度がある。排気弁によって上昇速度のコントロールを行なうさいにきわめて有効である。



第1表 B15-29気球要目

放球年月日	昭和50年6月20日
放球時刻	7時28分
総重量	187 kg
総浮力	206 kg
自由浮力	19 kg (総重量の10.2%)
オートバラスト	18 kg (" 9.6%)
オートバラスト投下速度	1.2 kg/分 (0.64%/分)
通常のバラスト	45 kg
タイマー	E-cell. 1時間又は2時間の選択

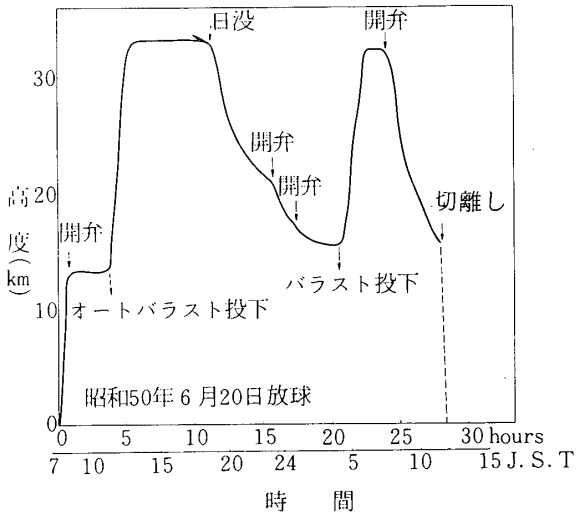
第2図 E-cellタイマーの構成

第2表 プログラムブーメラン実験経過

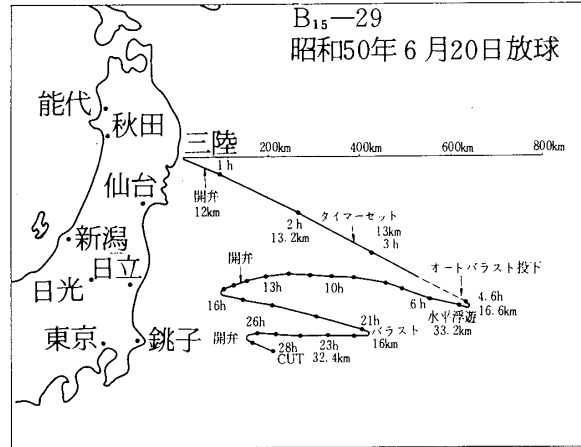
	J S T		+ X		高度	水平距離
	時	分	時間	分	km	km
放球	7	28	0	0	0	0
開弁開始	8	26	0	38	11.1	46
ブーメラン高度レベルフライトに入る	8	48	1	00	13.5	108
タイマーセット	10	12	2	44	13.0	440
補助バラスト投下, 4回, 11kg	10	28~52	3	0~24	13.0	—
受信限界外に出る	10	52	3	24	13.0	580
オートバラスト動作 (推定)	11	12	3	44	—	640
受信再開	11	31	4	03	16.7	700
満膨張高度に達する	13	08	5	40	32.7	645

(2) 気球の飛ばし経路

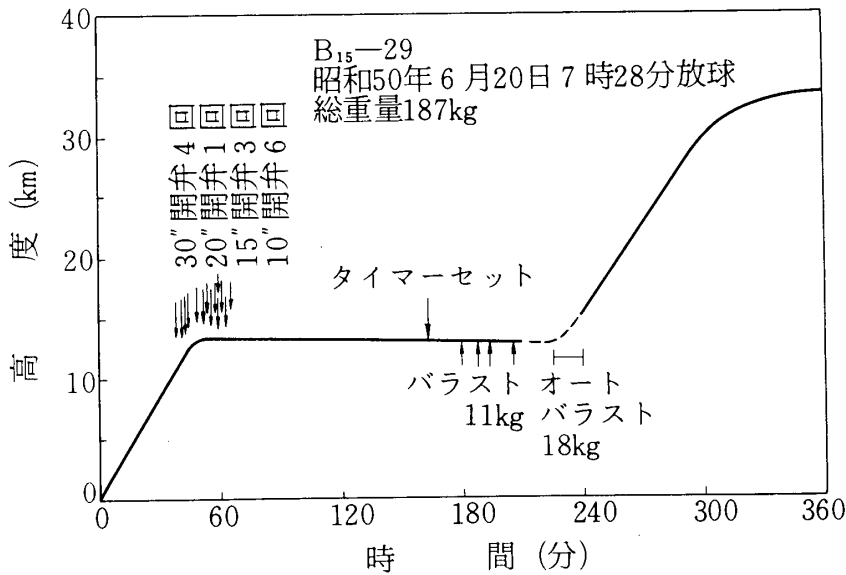
全飛ばし時間についての高度曲線と航跡図を第3図と第4図に、ブーメランコントロールの行なわれた部分を拡大した高度曲線を第5図に示す。



第3図 B15-29高度曲線



第4図 B15-29航跡



第5図 B15-29におけるブーメランコントロール

高度11kmに達したところで排気弁を働かせ、13.5 km の高度で完全に上昇を止めた。排気

過程の詳細は後出第7図に示してある。気球は一定高度を保ちながら、およそ 200 km/hr の速度で東南東に進行した。放球後2時間44分、水平距離 440 km の地点で、コマンドによりタイマーを1時間に設定、つまり、およそ 640 km の地点でオートバラストの投下を開始するように指令した。東方 580 km 、バラスト投下開始予定時刻の約20分前に受信不能となり、以後約40分間受信できなかった。なお、タイマー設定後、受信不能となるまでの間に、あらかじめ気球を徐昇させておくために、 11 kg のバラストをコマンドにより投下している。

受信が再開された時の高度は 17 km 、水平距離は 700 km であった。以後気球は 3.8 m/s の速度で正常に上昇した。水平距離と高度との時間的な経過を見通し線図に画いたのが第6図である。受信不能時間における軌跡は、同日の高層気象データから、図中の点線のように推定される。注¹ これから、タイマーおよびバラストの動作は完全に予定通りであったと考えられる。

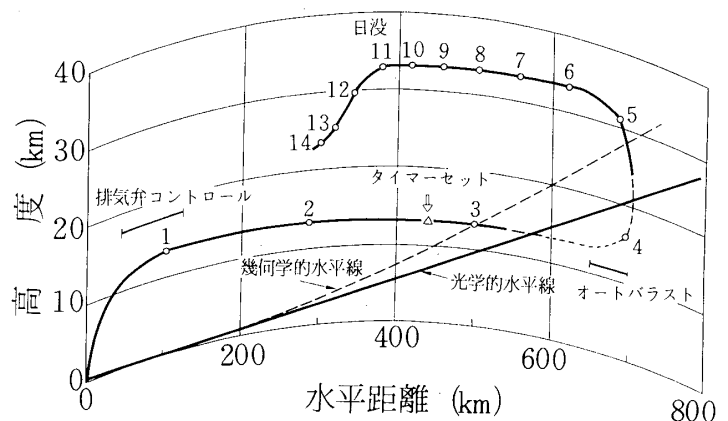
放球後5時間40分、高度 32.7 km 、水平距離 645 km の地点で気球はレベルフライトに入り、以後時速約 50 km の速度で西に進行した。

以上のように、見通し限界外まで東進させた上で、プログラムタイマーによりバラストを投下して再上昇させるというブーメラン方式の試験を計画通りに行なうことができた。ブーメランの効果は、満膨張高度に達したときの東方距離が、ブーメラン方式はとらずに普通に上昇させたときに比べてどの位大きいかが、示されるが、この気球では約 600 km に達している。

なお、この実験は気球コントロールに主眼をおいて行なったので、偏西風の風向や東風の風速については、特に最適な時期を選んでいない。第4図に見るような東進方向がかなり南寄りであるのはそのためであり、また戻り風の速度が時速 50 km と速いのは時期が6月下旬近かったためである。

B15-29では、ブーメランコントロール終了後、気球を高度 $32\sim 33\text{ km}$ から $14\sim 15\text{ km}$ まで下降させる実験を2度にわたって行なった。その様子は第3図に示されている。1回目は日没

注¹ 第6図で、精密気圧計のモルス信号が受信できなくなった位置と、再び受信できるようになった位置が対応していないが、これは受信不能となってから、受信機にプリアンプを増結して、受信系に僅かではあるが改善(約 2 dB)を加えたためである。



第6図 見通し線図上のプログラムブーメラン気球B15-29の航路

(数字—放球後時間, 点線—受信不能区間, 鎖線—S/Nは極めて悪かったが, 気圧計のモルス信号は聴きとれた区間)

降下と排気弁の併用，2回目は排気弁による下降である．満膨張高度から気球を下降させることも気球コントロールの重要な一面であるが，その実験の結果については，ここではこれ以上触れず，別の機会に譲ることとする．

(3) コントロール過程

従来ブーメラン実験は大部分夜間に行なってきたが，この実験は日中であり，日射による温度効果が効く場合の実例になるので，ここに，コントロールデータを示しておく．

第7図は上昇を止めるコントロールにおける排気の経過である．図中の排気量は累積量で表わしてある．約5 m/sで上昇していた気球は，18%の排気によって速度はほぼ零となっている．そのあと3%更に排気した結果，気球は約0.1 m/sの速度で下降することとなった．放球時の自由浮力は10%であったので，8%の浮力に相当する温度上昇があったことになる．これは温度に直すと17度である．

再上昇にあたっては，オートバラスト18 kg，通常のバラスト11kg，合計29 kgを投下した．総重量の15.6%にあたる．

これらのコントロール量の日中と夜間との相違については，4.において詳しく述べる．

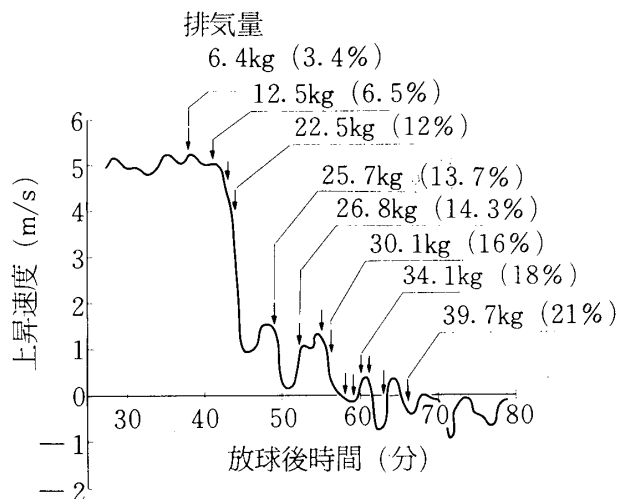
4. 気球の上昇のコントロール

ブーメラン気球における上昇を止めるコントロールおよびバラスト投下による再上昇については，文献[2]において，主に昭和48年度の実験データに基づいて詳しく述べられている．しかし，その後のブーメラン実験により，データ量も増えてきたため，当時は不明確であった点も，かなり明瞭になってきた．そこで，ここにコントロールデータのまとめを行ない，改めてコントロール則について検討を加えることとする．

(1) 気球の上昇をとめるコントロール

上昇中の気球のガス温度は，断熱膨張，熱放射，外気との対流による熱交換などのために，外気温度とは異なっている．したがって，上昇中の有効浮力は地上で与えた自由浮力とは等しくない[5]．上昇を止めるには，この有効浮力分を排気する必要がある．

第3表に昭和48年から50年までの間に放球した8機のブーメラン気球のコントロールデータを示す．8機のうち3機が日中，5機が夜間である．排気を行なった高度に幅があるのは，全量を数回に分けて排気しているためである．ブーメラン高度で気球を徐昇させた場合には排気後の速度は零ではなく，僅かに正の値をとっている．



第7図 気球の上昇を止めるコントロールにおける排気過程と上昇速度の変化 (排気量は累積量で示す)

第3表 気球の上昇をとめるコントロール

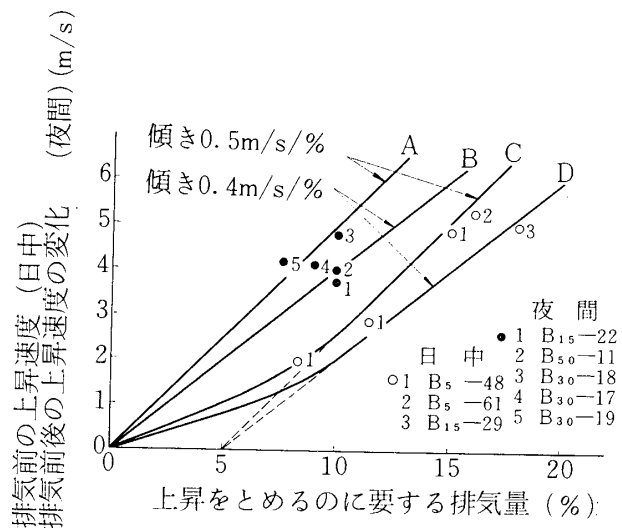
気球	放球年月日	総重量	昼夜	排気前速度	排気高度	排気量	排気後速度
	年月日	kg		m/s	km	%	m/s
B5-48	48 2 4	147	日中	4.9	14~17	15.1	0.5
				2.9	15~17	11.4	0.5
				2.0	16~17	8.3	0.5
B15-22	48 5 27	233	夜間	4.4	13~14	9.9	0.7
B50-11	48 6 5	465	"	4.7	12~13	10.1	0.7
B30-18	49 6 7	455	"	5.3	12~13	10.0	0.5
B30-17	49 6 13	489	"	4.1	11~12	9.0	0.0
B5-61	50 5 29	116	日中	5.3	13~15	16.0	0.2
B30-19	50 5 30	500	夜間	4.8	11~13	7.7	0.5
B15-29	50 6 20	186	日中	5.0	11~13	18.0	0.0

排気を行なっている高度は大部分が11kmから13kmの間で、気圧では200 mb付近である。上昇中の気球の有効浮力は一般に高度によって変化する[5]が、ブーメランコントロールを行なう高度範囲はこのように狭いので、高度一定として考えてよい。

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%の浮力を排気すればよいかということが問題となる。熱平衡を仮定した気球の上昇運動の理論[5]によると、夜間については、排気によって速度を低下させた場合に、速度の減少量は排気量にはほぼ比例することがいえる。日中にも速度が大きい場合には同様のことがいえるが、速度が2, 3 m/s以下のところでは、日射の影響が他の熱交換の過程に比べて強く働いてきて、比例関係が成り立たない。

そこで上のような考え方を基礎において実験データを検討する。第8

図は、排気前の上昇速度と上昇をとめるのに要した排気量との関係をプロットしたものである。ただし、夜間については排気前と排気後の速度の差をとっている。日中と夜間との相違を明瞭にするために、記号を夜と昼にわけ、添字で個々の気球を区別している。



第8図 気球の上昇をとめるコントロール

図から、まず、日中と夜間で明らかに差のあることがわかる。夜間の実験値は、傾きが 0.4 m/s/\% および 0.5 m/s/\% の2本の直線 A, B で囲まれる部分に大体集まっている。実験値のばらつきと総重量との間に特に相関は見られない。夜間には排気量と速度の変化量とは比例すると考えてよいので、排気前の上昇速度を与えて上昇をとめるための排気量を求めるのに、この2本の直線を目安とすることができる。

日中については、夜間の2本の直線 A, B を、横軸に沿って日中の実験値を囲む位置まで平行移動する。その上で速度の小さい部分を図のように、それぞれ適当な曲線で原点と結ぶ。この曲線部分の具体的な形はここでは重要ではない。でき上がった2本の線 C, D で囲まれる部分が日中のコントロールにおける適正範囲を与えるものと考えられる。

夜間から日中へと平行移動させた距離は日射の効果を与える。図から日射の効果はおおよそ5%であることがわかる。

以上のように、実験値が広がりを持っているので、コントロール則も幅を持たせて考えておいたほうがよい。上の結果をまとめると次のようになる。

a. 速度 $V \text{ (m/s)}$ で上昇する気球を停止させるための排気量は、

$$\begin{array}{ll} \text{夜間には} & \text{総重量の } (2 \sim 2.5) V \quad \% \\ \text{日中には} & \text{総重量の } (2 \sim 2.5) V + 5 \quad \% \end{array}$$

である。

b. 実際のコントロールにあたっては、夜間は $2V\%$ 、日中は $(2V + 5)\%$ をまず排気（これも2ないし3回に分けたほうがよい）し、その上で、上昇の様子を見ながら残りの必要量を排気する。

c. 総重量の効き方について現在のところ規則性は見られないので、特に考慮しない。

(2) バラストの投下による再上昇

ブーメラン高度で水平浮遊している気球を再び上昇させるためにバラストを投下する。原則的には、上昇をとめる際に排気した量だけバラストを投下すれば、元の上昇速度に戻るはずである。しかし、個々の気球について見ると必ずしもそうになっていない。その原因は、再上昇を始める高度が、丁度大気温度の高度分布が大きく変るところに当るためである。

さきの第3表に示した8機の気球について、再上昇のデータをまとめて第4表に示す。排気とバラストの投下が裏返しの関係にあれば、実験値は、夜間と日中とに応じて、第9図の2つの斜線部分 N および D に含まれるはずである。図の N および D は、それぞれ、第8図の直線 A, B の囲む部分および C, D の囲む部分に対応している。実際の実験値は、同図に併せて示してあるように、夜間はバラスト投下量が増す方向にずれており、日中は平均的なずれは無いがばらつきが大きい。

夜間のずれは温度効果によるものである。大気温度は 100 mb 付近でもっとも低く、 100 mb 以上ではほぼ一定かあるいは高度とともに上昇する。したがって、上昇する気球のガス温度と大気温度の差は 100 mb を越すと急に大きくなって、有効浮力が減る。この現象は日中でも夜間でも起るが、日中は日射の効果があるために軽減され、夜間で著しい[3]。ブーメラン高度から再上昇させるにあたっては、この夜間の減速効果を補償する必要がある。第9図の実験データからみると、補償量は平均して3%位である。 100 mb における有効浮力

第4表 バラスト投下による再上昇

気 球	総重量	昼 夜	投下前速度	投下高度	投下量	投下後速度
	kg		m/s	km	%	m/s
B ₅ -48	147	日 中	-0.5	17~18	12.6	4.2
B ₁₅ -22	233	夜 間	0.0	17~19	12.0	3.9
B ₅₀ -11	465	"	0.6	19~20	9.7	3.2
B ₃₀ -18	455	"	0.0	18~22	13.2	4.3
B ₃₀ -17	489	"	0.1	14~17	12.3	3.0
B ₅ -61	116	日 中	0.2	19~20	10.0	3.7
B ₃₀ -19	500	夜 間	0.9	17~19	7.2	4.3
B ₁₅ -29	186	日 中	0.0	13~15	15.6	3.8
		"	0.0	16~18	21.0	6.5

と上昇速度の関係は、理論的には、第9図の鎖線のようになっており[5]、実験値はそれに比べてやや速度の小さいほうにずれている。

再上昇の実験値は、上昇をとめるコントロールに比べて、ばらつきが大きい。日中、夜間それぞれについて、再上昇開始高度の違いとの関連を調べても特に規則性はない。総重量との関連性も見られない。このことは、再上昇開始高度付近での気球の運動が熱的な状態の僅かの違いによって大きな影響を受けるものであることを示している。

再上昇のためのバラスト投下量としては、ここでは次のように考えておくのが妥当であろう。

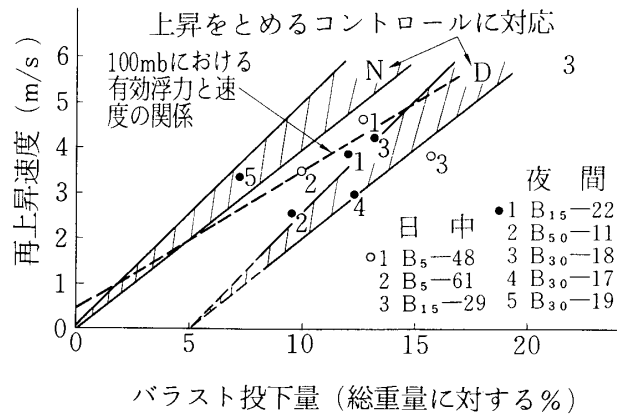
ブーメラン高度に滞空する気球を再上昇させ、4 m/s程度 of 速度を与えるには、

夜間は 総重量の12~13%

日中は 総重量の14~15%

に相当するバラストを投下する。

上昇をとめるコントロールにおける排気量の日中と夜間の差は5%であったが、ここでは、



第9図 バラスト投下量と再上昇速度

(再上昇速度については、夜間で、投下前に徐昇していた場合には、速度の差をとった。)

減速の効果3%が差引かれて、差は2%になっている。

以上のように日中と夜間とでバラスト投下量にあまり違いのないことから、ブーメラン気球は朝放球しても、夕方放球しても、再上昇のためのバラスト量に関しては特に有利不利はないことがわかる。むしろ、朝が不利な点は、一回目の日没を迎えるまでの時間が短いことにある。朝か夕方かの選択は、観測上の必要および回収のタイミングを考えて行なうべきであろう。

5. むすび

ブーメラン気球の拡張であるプログラムブーメラン気球について述べた。プログラムブーメラン気球の開発は昭和49年から行なってきたが、昭和50年6月に飛揚したB15-29気球において、気球を見通し範囲外の東方700 kmまで進行させて、再上昇させ東風に乗せる実験に成功した。見通し外における再上昇のためのコントロール機構は全て予定通り作動した。

これにより気球コントロールの技術的な面は、基本的にはでき上がったと考えられるので、今後は回収まで含めた実際の科学観測実験を計画していきたいと考えている。

1975年5月31日 新設部（工学）

参 考 文 献

- [1] 西村 純, 他: 「プログラムブーメラン気球」
東京大学宇宙航空研究所報告, 11, 2(B) (1975) 417.
- [2] 西村 純, 他: 「ブーメラン気球II」同上, 10, 1(B), (1974) 125.
- [3] AEROLOGICAL DATA OF JAPAN, Japan
Meteorological Agency, Tokyo (1968) ~ (1975)
- [4] 岡部選司, 西村 純: 「気球上昇計」, 昭和50年度大気球シンポジウム講演集, p. 53
- [5] 西村 純, 藤井正美, 山上隆正: 「上層における気球の温度効果について」,
東京大学宇宙航空研究所報告, 9, 1(B), (1973) 167.

付録 ブーメラン気球のための気象条件

ブーメランの条件を充す時期は5月中旬から6月中旬までと9月上旬であるが、9月は東風がしだいに無くなる季節で、また好条件の期間も短かいため利用しにくい[1]。現在ブーメラン実験を行なっているのは5、6月だけである。

ブーメラン気球のための気象条件については以前に検討を行なったものがある[1]が、その後高層ロケットデータなどの量も増えてきたので、ここで、改めて検討を加えておくことにする。

(1) 偏西風の風向

ブーメラン気球は偏西風の風向ができるだけ 270° に近いときに放球することが望ましい。例えば最遠東方位位置、つまり折返し点での南北方向へのずれを $\pm 50\text{km}$ に制限すると、角度の許容幅は、東進距離 800 km のときに $\pm 3.6^\circ$ である。

付表1 偏西風の風向について

年	5月16日～6月15日の 1月間に、風向が 270° 方向を横切った回数	左のうち、24時間 内の風向の変化幅 が 20° 以内のもの	同じ1カ月間に、風向が 24時間以上にわたって $270^\circ \pm 10^\circ$ にあった回数
1968	8回	3回	4回
1969	7	1	3
1970	11	2	0
1971	8	5	4
1972	10	3	3
1973	9	3	3
1974	8	4	3

高度 175 mb ，仙台午前9時のデータによる。

ジェット気流の帯は東西方向にのびているが、南北に波打っているので、偏西風の風向は 270° を中心に周期的に南北に振れる。1968年から1974年までの7年間の高層気象データ[2]から、 270° 方向をとる頻度を調べたのが付表1である。高度 175 mb ，仙台，9時のデータを用いている。5月16日から6月15日の1月間をとると、その間に風向が 270° 方向を横切る回数は約9回、つまり7日に2回の割合で風向が 270° を向くことがわかる。しかし、このうち風向の変化が余り速いものは特にプログラムブーメラン方式の場合には利用しにくいので、方向が安定している場合として、24時間の変化の幅が 20° 以内または24時間以上にわたって $270^\circ \pm 10^\circ$ にあった回数を調べると、表の第2列および第3列のようになっている。この2つの条件は大体一致している。表から、条件の良い日は1月に 3 ± 1 回あることがわかる。後に述べる東風の条件から、ブーメラン実験に最適の期間は5月20日から6月10日までの約20日間であるので、この間にプログラムブーメラン気球を放球できる機会は 2 ± 1 回あることがわかる。

(2) 偏西風の風速

ブーメラン気球を効率良く飛ばすためには、偏西風の風速は大きいほど良い。風向が270°を横切るときの風速について、各年の平均と標準偏差を付表2に示す。データは同じく仙台、

付表2 偏西風の風速

年		1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	全体
175 mb	平均	36.0	36.0	39.3	39.9	37.2	34.6	38.5	37.4 m/s
	標準偏差	14.7	14.6	16.3	12.2	18.5	12.9	15.9	14.7
150 mb	平均	28.9	28.4	34.2	34.3	33.7	33.9	30.7	32.0 m/s
	標準偏差	6.4	10.1	10.5	10.3	14.5	11.0	11.0	10.4

風向が270°方向を横切る時(付表1参照)の風速の平均値と標準偏差を計算。
期間5月16日～6月15日。仙台、午前9時のデータを使用。

9時であり、期間は5月16日から6月15日までである。

175 mb (13.3 km)での風速の期待値は37 m/s前後で、年によってあまり変わらない。ただし分散がかなり大きく、標準偏差は15 m/s位である。表には示していないが、200 mb (12.5 km)と175 mbでは風速にほとんど差がなく、この付近が風速最大の高度にあっている。150 mb (14.3 km)では、175 mbに比べて15%位風速はおちる。

なお、5月16日から6月15日の間では、風速がしだいに弱まるという傾向は見られない。

(3) 東風(戻り風)の風速

上空の東風は5月10日頃に出はじめ、20日頃に安定する。それ以後風速はしだいに増す。また高々度ほど速い。1971年から1975年までの気象ロケットのデータ[2]から、付表3が得られる。

付表3 東風の風速

高 度	5月下旬 (5/20～5/31)	6月上旬 (6/1～6/10)	6月中旬 (6/11～6/20)
km	m/s	m/s	m/s
36～40	11±3	17±6	19±3
31～35	9±3	10±4	13±3
26～30	6±3	8±3	10±3

気象ロケット(三陸)データによる。±に続く数値は標準偏差

ブーメラン気球のためには東風は安定でしかも風速が小さいことが望ましいので、5月下旬から6月上旬が最適な時期となる。35km以上の高々度の観測は5月中に限られる。

(4) 東風の南北成分と気球の南北方向へのドリフト

これまでの気球が東風に乗って西に進行する際の航跡を見ると、一般に進路は不規則に南北に振れている。一定の向きをとっている時間は3時間から5時間位である。高度が変化したことによる場合もあるが、一般に東風の南北成分は時間的变化が速く、また僅かの高度差で向きも変わっていると考えてよいようである。

気象ロケットのデータ[2]を用いて東風の南北成分の平均値と標準偏差を求めたのが付表4である。1971年から1975年の間に、表の3つの期間について各々4回のロケットデータがある。

付表4 東風の南北成分の平均値と標準偏差

時 期	5 / 20 ~ 5 / 31	6 / 1 ~ 6 / 10	6 / 11 ~ 6 / 20
平 均 値	0.6 m/s	1.0 m/s	0.7 m/s
標 準 偏 差	2.2 m/s	2.4 m/s	2.2 m/s

南北成分の南風を正としている。高度26~35km。

高度範囲は26~35kmとし、そこから2kmおきにデータをとり、それらを独立量と見なした。したがって各期間とも標本数は20である。

平均値が正に出ているのは有意かどうか不明であるが、ここでは標準偏差のほうに着目する。この標準偏差の値を用いて、気球が東風に乗って戻ってきた時の南北方向への拡がりを推定することができる。気球が時間 T_0 の間は一定速度 V_i （南北方向成分）をとるとすると、 T 時間後の南北方向の位置 D は、

$$D = \sum_{i=1}^N V_i T_0 \quad \text{但し、} T = NT_0$$

となる。ここで、 T_0 おきにとる速度 V_i と V_{i+1} とは独立とし、 V_i は平均値0、分散 σ^2 の正規分布に従うとすると、

$$D \text{ の標準偏差} = \sqrt{N} \sigma T_0$$

が成り立つ。そこで、 σ を2.2 m/sとし、時間間隔を5時間とにおいて、東風に乗って戻る全時間 T と D の標準偏差、つまり戻ってきたときの南北方向への分散の目安を与える距離、との関係を求めた。その結果が付表5である。30時間で南北への拡がりは約±100 km、50時間では±130 kmとなる。

V_i の平均値（南風）が有意ならば、それによるドリフトを補償するために、偏西風に乗せて東に流す際にやや南寄りに進行する時を選ぶべきであろう。

付表5 戻ってきた気球の南北方向への分散

気球が東風に乗って 戻る時間	時間	戻ってきた時の南北 方向の位置の標準偏差	km
	20	80	
	30	97	
	40	112	
	50	125	

- [1] 西村 純, 他: 「ブーメラン気球」, 東京大学宇宙航空研究所報告, 9, 1 (B) (1973) 186.
- [2] AEROLOGICAL DATA OF JAPAN, Japan Meteorological Agency, Tokyo, (1968)~(1975).