

# ゴンドラ降下地点の予測

藤井 正美・西村 純・丹生 潔\*

## 1. ま え が き

気球からゴンドラを切り離して落下傘で降下させるとき、切り離れた位置からゴンドラの降下地点を予測することは、ゴンドラを回収する必要がある場合など特に重要である。たとえば、宇宙塵の採集や原子核乾板を使用する観測の場合には、ゴンドラが回収できないときには実験の意味がないし、また、テレメータにより観測データが刻々地上で受信できる場合でも、観測器が高価な場合などゴンドラの回収が強く望まれている。観測器に不備があった場合なども回収することによって原因が解明されることも多い。普通ゴンドラは都市を避けて降下させているが、あまり人の行かない山奥に降下した場合には降下直後の回収はまず望めないのが現状である。

気球が浮遊中の状態では測距装置[1]により気球までの直距離を数百メートルの精度で知ることができる。また、別にゴンドラに搭載された気圧計により気球の高度がわかるから、受信アンテナの方位角および仰角を使って気球の位置を知ることができる。このとき位置の精度は気圧計の精度およびアンテナの追尾精度によって決まる。気圧の精度は気圧計の種類によって異なり沸点気圧計[2]の場合は10mb付近で1%の精度があるが、アネロイド気圧計の場合には10%の精度を出すのもむずかしい。アンテナの追尾精度[3]は0.05度であるから水平距離がたとえば200kmのところでも約200mの精度で位置がわかる。したがってゴンドラが降下して仰角が小さくなるまで受信できる場合は測距と方位角を用いてゴンドラの降下地点を約200mの精度で知ることができるはずである。しかし、実際にはゴンドラが山の陰に隠れて最後まで受信できないことが多いので予測は必要であり、また先に述べた理由からも切り離し前からゴンドラの降下地点を予測しておく必要があるわけである。

ゴンドラが落下傘で降下するとき上空の風によって流されるが、落下傘の降下速度はゴンドラの重量と落下傘の大きさから計算することができるので放球後の気球の航跡および高層気象のデータを使ってゴンドラが降下するときのドリフトを予測することが可能である。これまでゴンドラを切り離す場合にはかならず前もって降下地点の予測がなされていたが、ここでは降下速度および風向、風速の予測から最終的にどれくらいの精度で予測できるものであるか検討してみたい。

## 2. 落下傘の降下速度

落下傘の降下速度はゴンドラの重量および落下傘の大きさから計算することができるもの

---

\* 東京大学原子核研究所

である。しかしゴンドラの形状の違いによる空気抵抗の差，落下傘の大きさの精度などにより実際には降下速度にバラツキが生ずるのであろう。まずこれまでの降下データを整理して降下速度のバラツキがどの程度あるか調べることにする。

ゴンドラが降下するときの刻々の高度は気圧計あるいは直距離と仰角により求まるが，これを普通のグラフにプロットしたのでは直線にならない。したがって降下速度を簡単に求めるのは困難である。落下傘の抵抗  $F$  は，空気の密度  $\rho$ ，降下速度  $v$  の二乗，落下傘の面積  $S$  に比例するから，ゴンドラの重量を  $W$  とすると

$$W = F \quad (1)$$

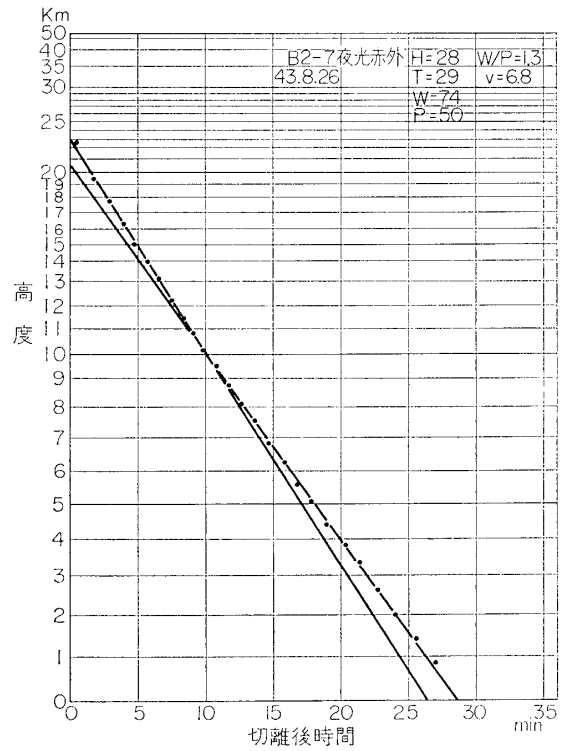
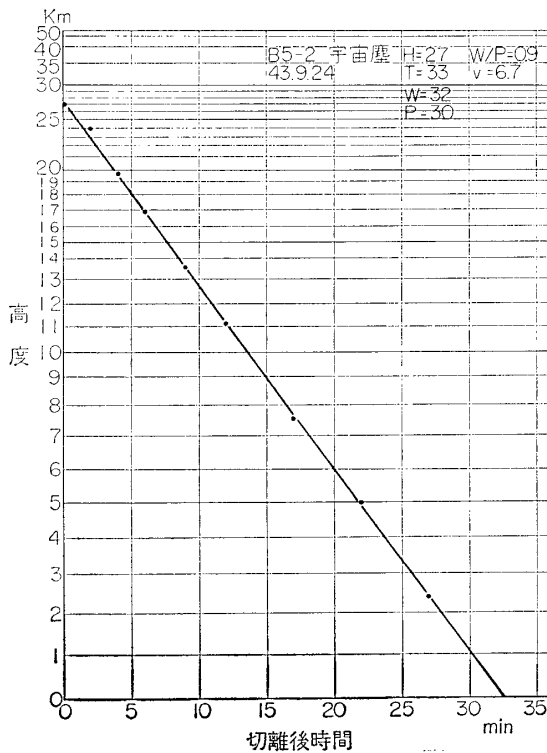
$$F \propto \rho v^2 S \quad (2)$$

と表わされる。  $W$  および  $S$  が一定であると

$$v \propto 1/\sqrt{\rho} \quad (3)$$

となるから，単位距離だけ降下するに要する時間は  $\sqrt{\rho}$  に比例する。したがって各高度での空気密度  $\rho$  の平方根に比例する目盛を刻んでおけば，時間に対して高度をプロットした場合には直線になるはずである。

第 1 図はこのような特別なグラフを用意して降下時の高度をプロットしたものである。よく直線に乗っていることがわかる。このようなグラフを利用すると原理的には最初の数点をプロットするだけで地上まで降下するのに何分かかるかすぐに求めることができる。第 2 図は降下の途中でパラストを落してゴンドラを軽くしたために降下速度が途中から遅くなっている例である。これらは気圧計により高度を求めた場合であるが，直距離と仰角とから高度

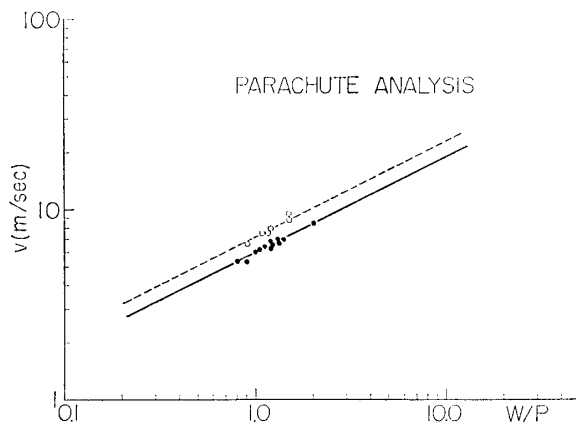


を求めた場合には仰角が小さくなったとき、高度の精度が悪くなり直線からずれてくる。しかしこのような場合でも初めの数点から速度を推定することが可能でこのグラフの有効性が認められる。また、逆に仰角の補正をすることもある程度可能になってくる。

(1) および (2) 式から

$$v \propto \sqrt{W/S} \quad (4)$$

となることがわかるから両対数グラフに降下速度をプロットすると傾き 1/2 の直線に乗るはずである。第3図は第1図および第2図



第3図 降下速度の解析

に例を示した特別なグラフを用いて決めた降下速度をプロットしたものである。

約5%の精度でよく直線に乗っていることがわかる。規格どおりの重量をつり下げた場合には地上付近での降下速度は6 m/sec となっている。別に点線に乗っているグループがあるが、これらは気球放球時に小雨にうたれたりして落下傘がぬれ上空で乾いたときに縮んだものと考えられる。あるいは一度回収した落下傘も雨にうたれて、実測してみると約10%縮んでいることがわかった。したがって

実際の落下傘の大きさ  $S$  が規格より小さくなってしまったためこのグラフの上で速度が約10%速く出ているものと考えられる。

### 3. 気球の飛揚とゴンドラのドリフト

日本における気球観測は現在7, 8, 9月に限られている。それは冬の間は地上風が強く、しかも上空のジェット気流は60 m/secを越えることもまれではなく、数時間で気球が東の海上500 km くらいに流され受信できなくなるからである。第1表には仙台の1967年の上層風東西成分の月平均[4]を示してある。風速が最大になるのは年間を通じて高度12 km (200 mb) 付近となっている。東の成分は太字で示しておいたが、これからわかるように夏の間は比較的上空の風速が小さく、高度20 km 付近から上では偏東風が吹いているため一たん東の海上に出た気球は東風に乗ると西進を始める。日本の気球観測はこの東風をうまく利用して長時間の観測を行ない、かつ陸地でのゴンドラの回収が可能になっているのである。

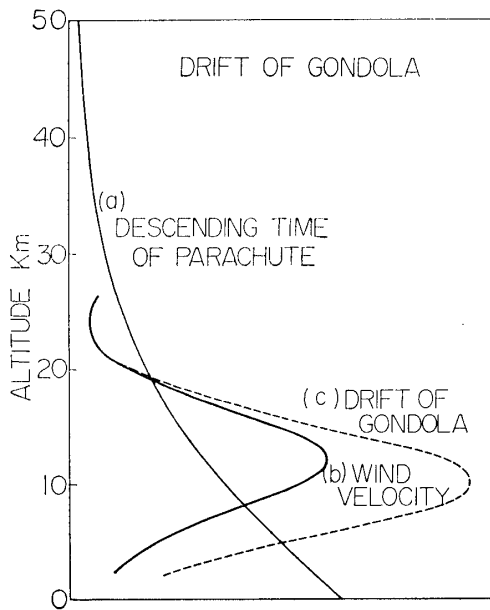
この表を見てもう一つ気がつくことは、12月、1月にも弱い東風があることである。これまで冬に気球を放球することがなかったため、この東風は注目されなかったが、水素排気弁を用いるサイクリング方式[5]によれば冬でも放球の可能性は皆無ではないだろう。

第1表はあくまで1967年の月の平均であり、年によってもある程度の変化があると思われる。実際1969年の実験では、9月25日から30日までは偏東風が消え高度12 km 付近で約60 m/secの風が吹いた。

第4図はゴンドラの風によるドリフトを模式的に示したものである。曲線(a)は落下傘

第 1 表 風 の 東 西 成 分 (1967年・仙台)

月 高度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
mb												
15	-6.4	6.5	10.3	3.0	0.5	-10.5	/	-14.0	-1.3	9.4	4.9	1.3
20	-2.3	4.2	10.1	4.4	-1.0	-7.3	-13.6	-10.7	-2.3	5.2	3.7	-12.5
30	5.1	4.8	9.2	7.1	-1.8	-7.4	-12.6	-8.3	-3.2	5.2	6.2	-7.3
40	11.4	9.8	10.7	8.7	-0.0	-4.1	-11.3	-6.7	-2.6	7.3	12.0	-0.9
50	15.8	17.7	13.9	10.8	2.3	-0.7	-8.3	-5.2	0.5	9.0	14.8	6.0
70	28.2	22.5	21.6	19.3	8.6	7.1	-2.9	-0.1	5.8	16.6	24.3	17.1
150	36.5	31.5	31.0	26.5	14.6	18.4	5.9	7.1	14.4	27.3	39.7	30.0
125	44.6	39.6	37.5	33.6	19.7	23.3	11.3	10.7	20.3	34.9	50.3	41.0
150	47.0	46.0	41.9	38.3	22.6	28.8	15.9	12.8	23.6	40.1	58.6	48.5
175	50.0	48.4	44.2	42.5	25.5	32.1	18.6	14.3	24.1	43.3	62.4	51.3
200	50.8	48.7	46.3	45.4	25.4	32.3	19.5	15.2	23.5	43.5	61.3	52.8
250	47.9	44.4	42.8	41.2	23.2	30.1	19.5	14.2	21.9	39.9	58.7	52.4
300	41.8	39.4	38.8	36.2	19.7	25.1	17.4	13.5	19.8	35.2	51.4	48.1
350	35.0	34.5	35.8	31.0	17.1	21.0	15.2	12.4	17.2	30.6	44.7	44.9
400	31.0	30.4	32.2	26.2	15.7	17.3	13.1	11.5	14.5	27.5	39.7	41.4
500	25.5	23.0	23.1	18.7	11.9	12.3	9.1	9.7	10.0	20.1	29.1	32.8
600	22.2	17.7	19.1	14.3	9.4	8.8	7.4	7.9	7.4	14.4	22.4	23.2
700	18.5	15.0	15.0	11.0	6.0	5.9	5.6	6.3	4.8	11.1	17.4	16.1
800	14.9	12.6	11.3	7.2	4.0	4.8	4.9	5.3	1.9	6.4	13.5	11.5
850	11.0	9.9	8.6	5.2	2.9	4.0	4.0	4.2	0.1	5.1	9.8	8.1
900	7.8	6.8	5.8	3.8	2.3	3.0	2.5	2.6	-1.7	3.6	6.9	5.3
1000	2.3	1.1	2.0	0.6	-0.2	-0.1	-0.8	-0.3	0.0	1.5	2.2	1.5

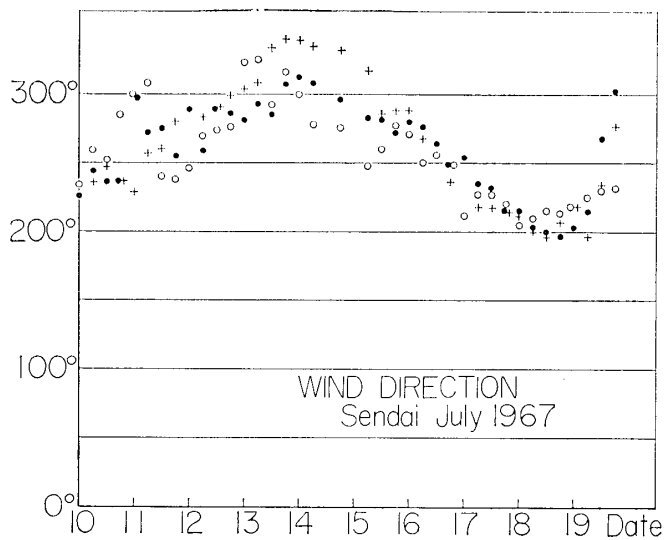


第 4 図 ゴンドラのドリフト

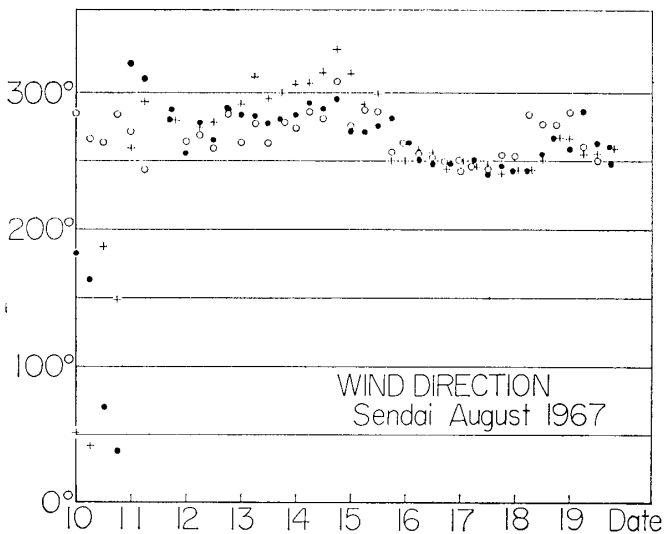
が各高度で単位距離だけ降下するのに要する時間、曲線 (b) は風速の高度による変化を示したもので、高度 12km に最大がある。したがってこれらを掛け合わせるとゴンドラのドリフト (c) が求まるわけで、図から高度 10km 付近におけるドリフトが最も大きいことがわかる。高度 20km 以上では落下傘の降下速度が速いためほとんどドリフトは問題にならず、また高度 5km 以下になると風速が小さくなるためやはりドリフトは小さい。したがってゴンドラの降下地点を予測するためには、高度 10km 付近の風向、風速をどの程度精度よく予測できるかということが一番問題になる。

4. 風向, 風速の変化と降下地点予測の精度

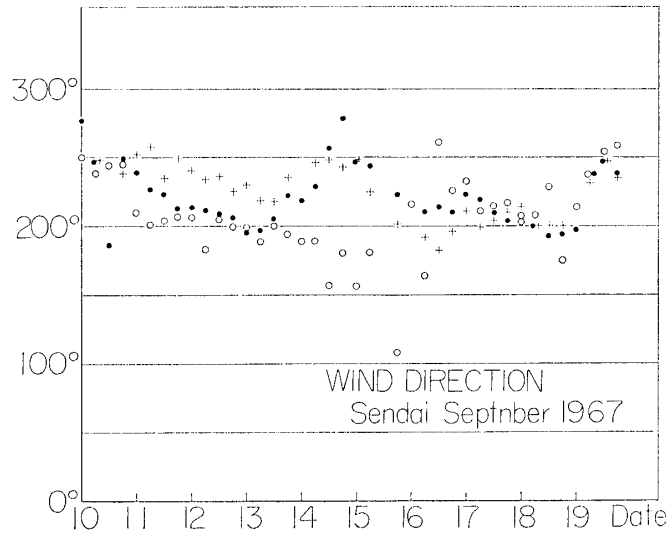
第5-a, b, c 図は実験期間である7, 8, 9月の高度5, 10, 15kmにおける仙台の風向の変化, 第6-a, b, c 図は同じく風速の変化を示している. 現在気球実験は福島県の前町で行なわれているので, 上層風のデータは仙台(38°16' N, 140°54' E)の気象台からもらっているわけであるが, ここではデータのそろっている1967年の風の変化[4]を示した. 気球は東西にドリフトするだけでなく風の南北成分により南北にも100km近くドリフトすることがあるので, 第5-d 図および第6-d 図には場所による風の差を調べるために館野(36°03' N, 140°08' E)のデータを使ってプロットした.



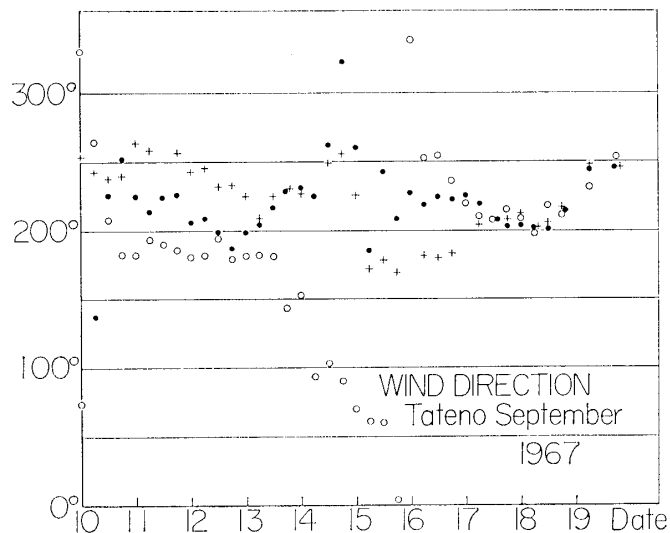
第5-a 図 風向の変化(7月)  
(○ 5 km, ● 10 km, + 15 km)



第5-b 図 風向の変化(8月)



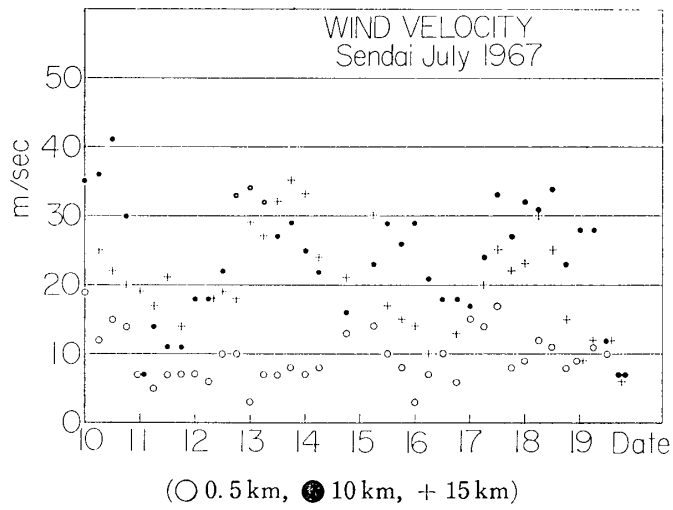
第 5-c 図 風向の変化 (9月)



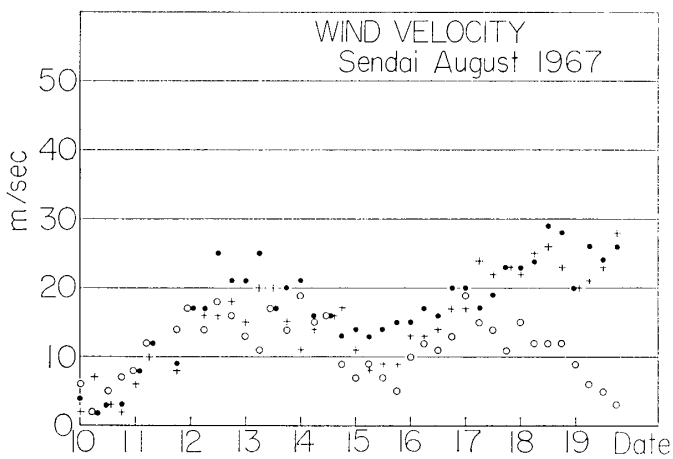
第 5-d 図 風向の変化 (9月, 館野)

気象台の定時観測は1日4回、6時間ごとに行なわれているので、ゴンドラを切り離す時刻によっては6時間以上前の風のデータから風向・風速を予測する必要にせまられることもあるわけである。気象台で受信データを整理するのにある程度時間がかかるから、われわれの手にデータが入るのは、最新の場合でも1~2時間以前のものになってしまう。

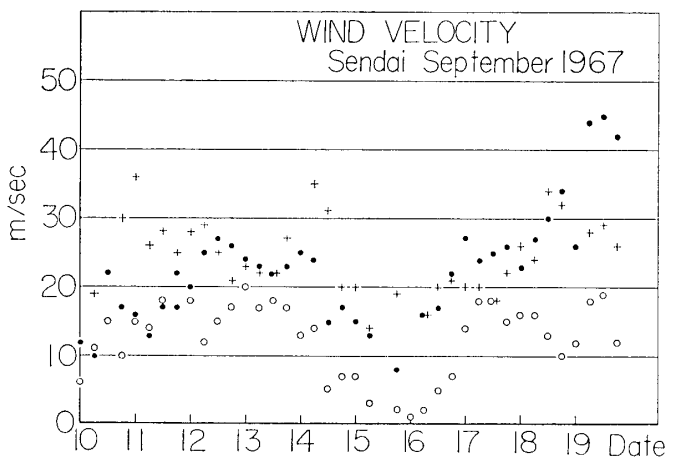
第7-a, b, c 図では高度10kmにおける続く2点の風向の差の分布をとったものである。第8-a, b, c 図は同じく高度10kmにおける続く2点の風速の差すなわち6時間ごとの風速の変化の分布をとったもので、第7-d 図および第8-d 図は、同時刻における仙台と館野の風向、風速の差の分布をとったものである。さきに述べたように、平均すればわれわれは3~4時間前のデータを用いて風向、風速の予測をすることになるから、これらの分布の



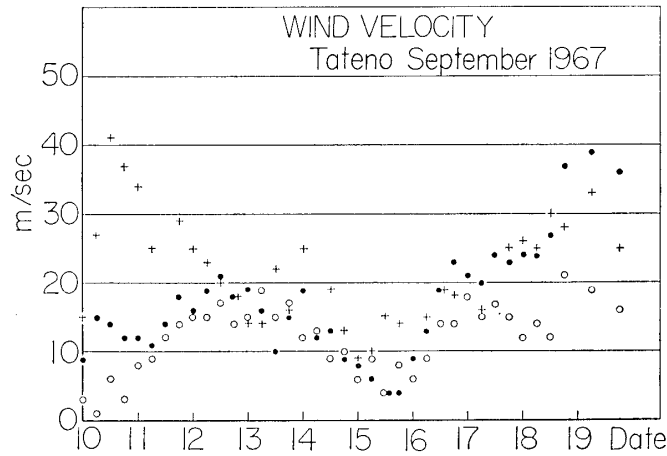
第 6-a 図 風速の変化 (7月)



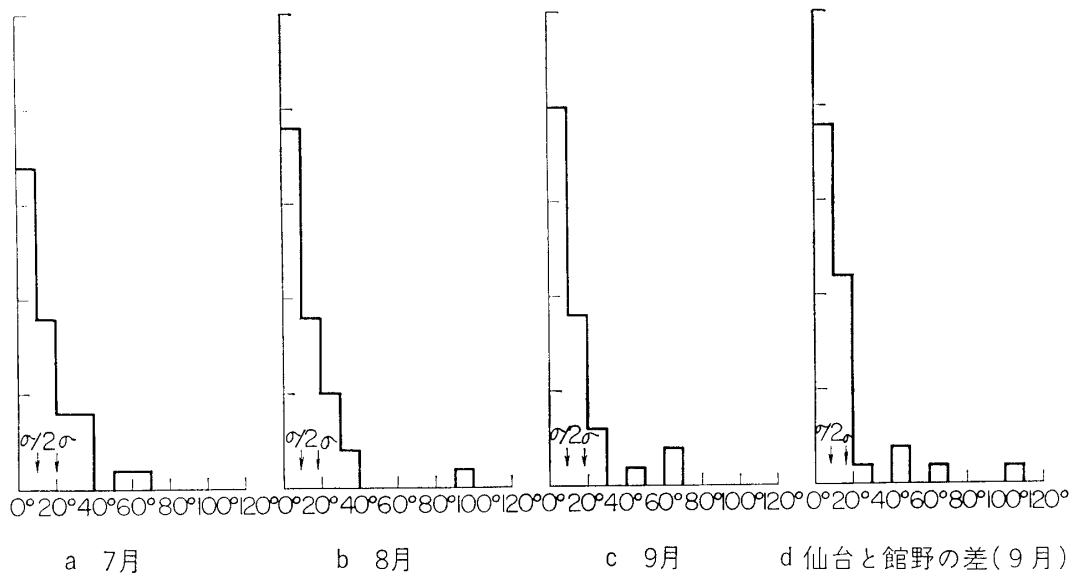
第 6-b 図 風速の変化 (8月)



第 6-c 図 風速の変化 (9月)



第 6-d 図 風速の変化 (9月, 館野)



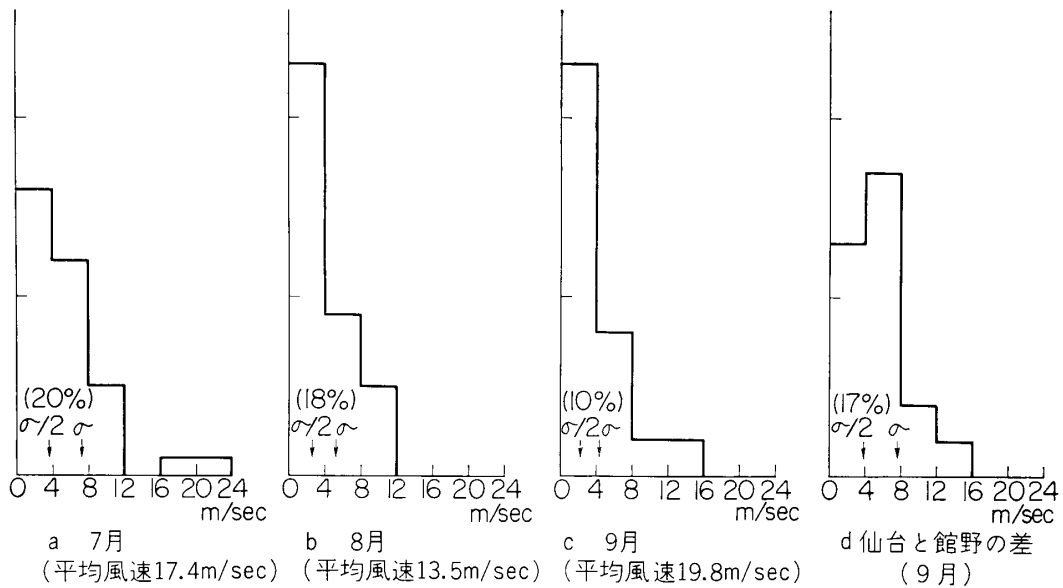
第 7 図 風向の変化分布 (高度 10 km)

分散の半分が風向, 風速を予測した場合の精度の目安を与えているものと考えられる。

第 5 図から 7 月の風向は約 10 日の周期でゆっくり 150 度ばかり変化しており, 8 月は比較的安定, 9 月は 15, 16 日に特異な風が吹いており, 館野の方にはそれがよりはっきり見られる。第 6 図から風速は 8 月が一番弱く 5 日くらいの周期で変化しているのがわかる。

第 7 図から風向予測の精度は 7 月が 10 度, 8, 9 月は 9 度くらいと考えられる。仙台と館野との差の分散は 7, 8, 9 月の仙台の分散と同程度であるから, 仙台のデータのみを使用してもさしつかえないことになる。第 8 図から風速予測の精度は分散の半分を高度 10 km の平均風速で割ると 7 月は 20%, 8 月は 18%, 9 月は 10% と考えられる。しかし 9 月の





第8図 風速の変化分布 (高度10km)

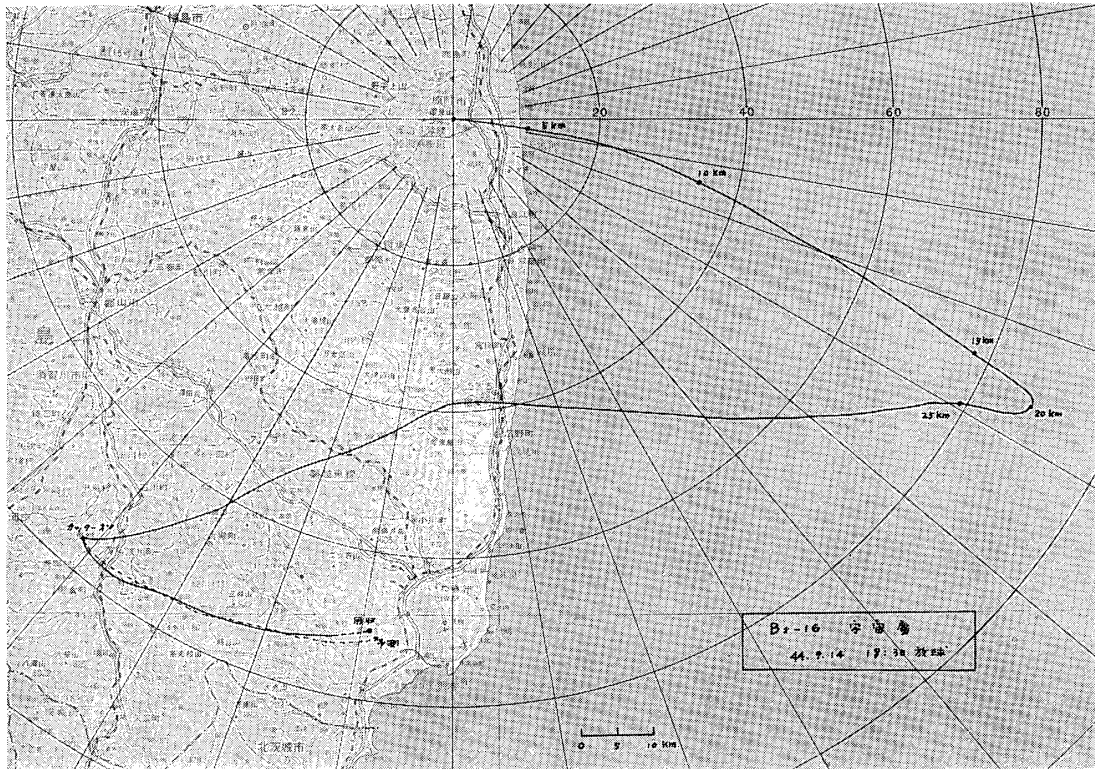
仙台と館野の差は20%近くあるので、ゴンドラ切り離しの位置での風速を精度よく予測するには、仙台のデータを使うだけでは不十分で気球がかなり遠くへ流された場合には、精度はかなり落ちることになる。ただし数多くの気象台のデータを加重平均して希望する場所での風速を予測するには、かなりの手数を要するであろう。

降下地点予測の精度には、降下速度予測の精度および風向、風速予測の精度によって決まる。実際の降下地点のずれはドリフト距離に比例するわけでそれらをまとめたのが第2表である。

以上に述べた方法でドリフトを予測したものと、実際の切り離し後の航跡を比較したものの一例を第9図に示した。これはB<sub>2</sub>-16気球によって1969年9月14日、18時30分に放球された宇宙塵の採集を目的とするもので、普通は発見者の通報により回収に向うので

第2表 降下地点予測の精度  
(高度10kmの風向、風速の変化から予想されるもの)

降下地点予測の精度				
	7月	8月	9月	
降下速度誤差	5%	5%	5%	
風速誤差	20%	18%	10%	
風向誤差	10°	9°	9°	
ドリフト距離	30km	25km	30km	
降下地点誤差	降下速度及び風速によるもの	6 km	5 km	3 km
	風向によるもの	5 km	4 km	5 km

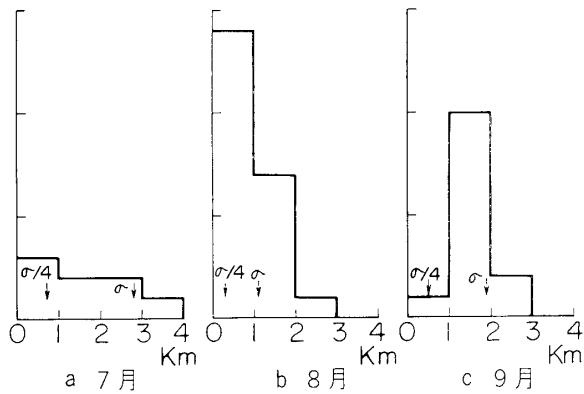


第 9 図 降下地点予測の例

あるが、あらかじめ降下予測点に小型の受信機を持って駆けつけ、まもなく田んぼの中で回収したものである。

### 5. 降下のシュミレーション

前節では落下傘の降下速度の予測およびドリフトの一番大きい高度 10 km における風向、風速の予測から降下地点予測の精度を検討したが、実際には高度 10 km の風だけがきくのではないから、計算機によって降下のシュミレーションを多数回行なった。降下速度は一定



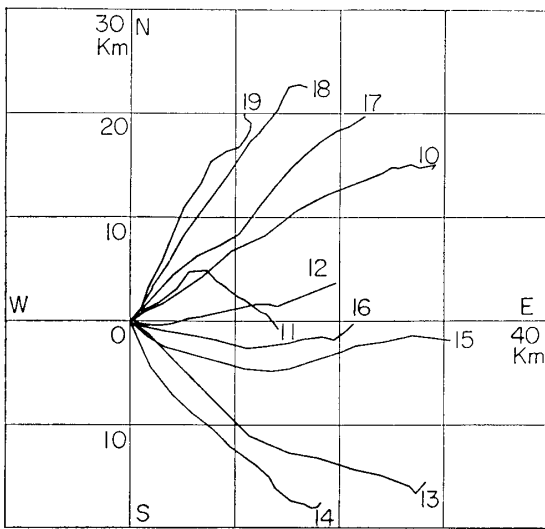
第 10 図 ドリフトの変化分布 (25 km→15 km)

で 6 m/sec とし、第 5 図、第 6 図に示した 6 時間ごとの風のデータを使って高度 15 km から次々と 6 時間ごとに降下させたと仮定してドリフトを求めてみたのである。したがってこの場合には降下速度の誤差が入っていないので、風向、風速の変化のみによるドリフトの変化を表わしていることになる。実際の気球の場合には高度 25~30 km で切り離すことが多いのであるが、気象台の定時観測はゴ

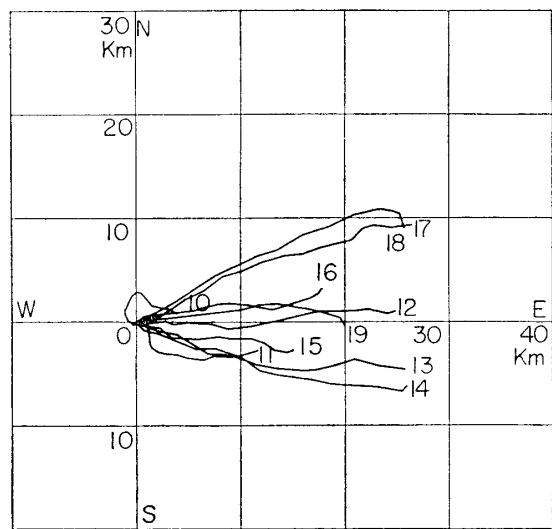
ム気球の大きさによって高度 30km 近く上るものと 15km 前後しか上らないものがあるので、高度をそろえるために 15km からの降下を計算したのである。

高度 25km から 15km まで降下するときのドリフトの変化は 12 時間ごとの変化で、データの数も半分になるが結果を第 10-a, b, c 図に示した。これから第 4 図のドリフトの模式図から予測されたようにドリフトは小さくあまり問題とならないことがわかる。

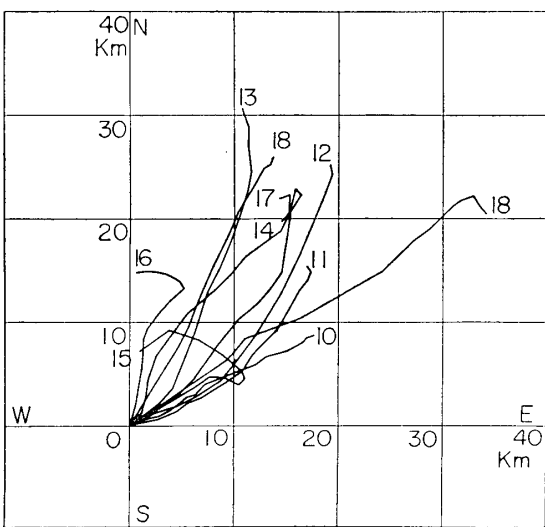
第 11-a, b, c 図は高度 15km から地上までのドリフトの変化の様子を示したもので、6 時間ごとに書くと図が見にくくなるので 1 日ごとに書いてある。各線のさきに付けた数字は日付である。これを見ると 7 月は 10 日の間に大きく南北に振っていることがわかる。 8 月



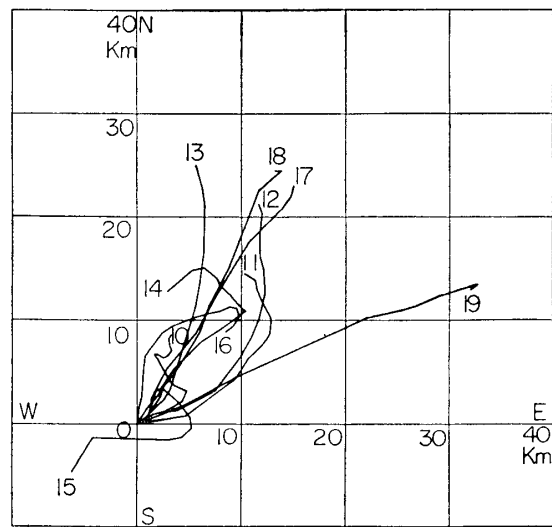
第 11-a 図 ゴンドラのドリフト (7月)



第 11-b 図 ゴンドラのドリフト (8月)



第 11-c 図 ゴンドラのドリフト (9月)



第 11-d 図 ゴンドラのドリフト (9月, 館野)

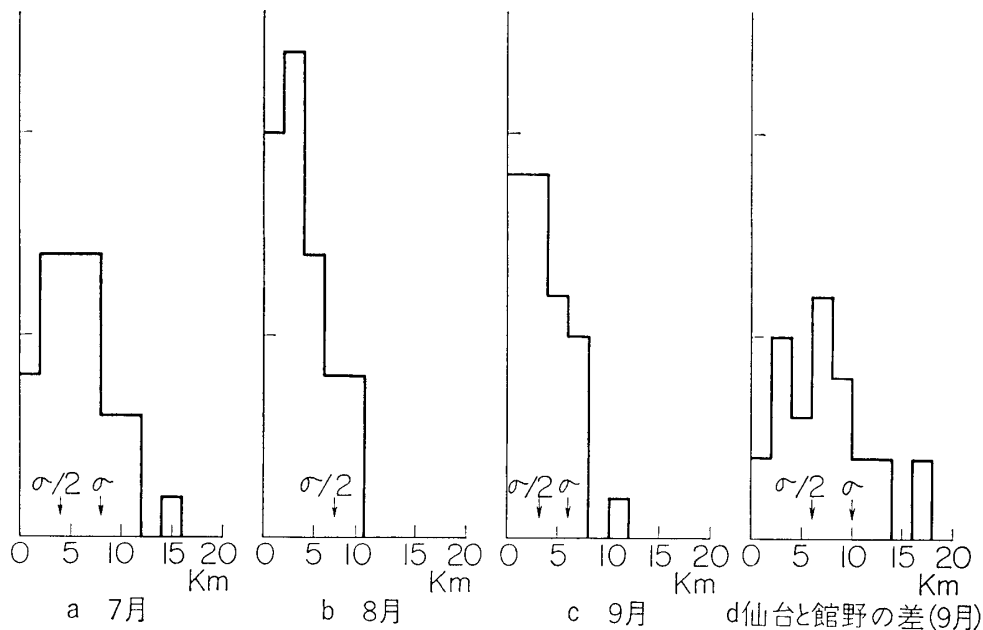
は比較的パターンが似ており、9月15日、16日が特異なドリフトを示しているが、このときは地上風が約15m/secあり台風の影響と考えられる。地上風が強いときには気球の放球は行なわないから今までこのようなドリフトは実際には観測されていない。9月14日には地上近くでドリフトが逆転しているのがわかる。地上付近の風は地形に影響されやすいから、ゴンドラが山岳部に降下した場合などは地上付近のゴンドラのドリフトは地上風が強い場合予測が困難であろうと思われる。第11-d図は仙台と比較するために同じく9月のドリフトを館野のデータを用いて計算したものである。

第12-a, b, c図にはシュミレーションによる6時間ごとのドリフトの変化の分布をとったもので、第12-d図は仙台と館野の差をとったものである。これからわかるように、7月は4km、8月、9月は3kmの精度で降下地点を予測できそうである。降下速度は実際にも精度よく決められるので問題とはならない。

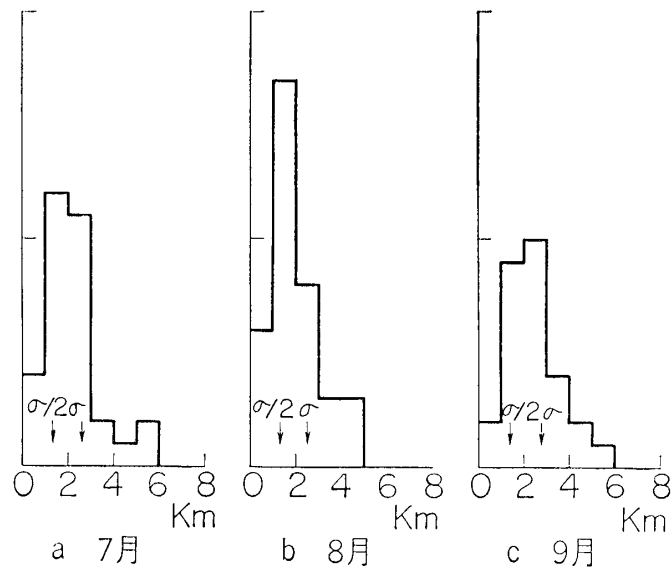
前節では、高度10kmの風のデータから予測の精度を調べたが、これは条件の一番悪い場合で、降下のシュミレーションによる予測の精度の検討では、第2表に示した結果よりかなりよい。平均3時間後の予測の必要があるとして分散の半分をとれば、実際に3~4kmの精度の予測が可能であることがわかる。ただし、第12-d図に示した仙台と館野の差は、予測の精度が気球が遠くへ行った場合には6kmくらいに落ちることを示しているので、精度のよい予測をしたい場合には、少なくとも数個所の気象台のデータを使って予測することがぜひ必要になる。

## 6. 検 討

以上述べたように降下地点の予測には、風向、風速の予測の精度が一番きいているわけで、現在のところこれ以上の精度を望むことはむずかしい。しかし切り離し前にこの程度の



第 12 図 ドリフトの変化分布 (15 km→地上)



第13図 ドリフトの変化分布 (5 km→地上)

予測ができておれば、おおむね希望どおりの場所に降下させることが可能であり、実際 B<sub>2</sub>-16 気球の場合に非常にうまく回収されている。

また、実際の降下地点は直距離および方位角の測定がかなり低い高度までできた場合には、最終的に 1 km 以内の精度で推定が可能である。しかしこれまでの経験では、一たんゴンドラが地上に降りてしまうと、林の中に降下した場合などそばまで行っても発見できないことがあり、ゴンドラの発信が止まらないうちに移動用の受信機を持って行って捜すことが一番有効と考えられる。B<sub>2</sub>-16 の場合は試作の小型受信機を用いたが、回収用受信機の整備が必要と思われる。

予測の精度を今以上に上げるためには、ドリフトを小さくする必要があるが、たとえば、高度 5 km までは小さな落下傘で降下させ、高度 5 km 以下において気圧スイッチあるいは指令電波によりメインの落下傘を開かせ、ドリフトの一番大きい高度 10 km 付近を速く通り抜ける方法が考えられるであろう。たとえば、高度 5 km で落下傘を開いた場合のドリフトが、どの程度のものか検討するために前節で述べた方法でやはりシュミレーションを行なってみた。第 13-a, b, c 図には 6 時間ごとのドリフトの変化の分布を示したが、7, 8, 9 月とも降下地点を 1~2 km の精度で予測できそうである。これからわかるように、この 2 段落下傘方式は有効と考えられる。

最後に実験場でゴンドラ降下地点予測を能率よく行なうために、各高度での風向、風速などをダイヤルでセットすればドリフトの求まるような専用のアナログ計算機あるいは小型計算機が必要であろうと思われる。

1970年2月5日 宇宙工学

## 参 考 文 献

- [1] 野村民也, 広沢春任, 太田茂雄: 東大宇宙航空研究所報告, **5**, 1 (B) (1969) 92.
- [2] 広沢春任: 東大宇宙航空研究所報告, **5**, 1 (B) (1969) 117.
- [3] 広沢春任, 太田茂雄, 高木 昇, 渡辺 茂, 高橋 宏: 大気球シンポジウム講演集 (1970)
- [4] AEROLOGICAL DATA OF JAPAN: Japan Meteorological Agency Tokyo 1968.
- [5] 丹生 潔: 東大宇宙航空研究所報告, **2**, 1 (C) (1966) 390.