

パイロットバルーン的位置計算誤差について

白木 恭一・矢部 武男

原田 浩平・佐藤 祐二

はじめに

上空風の調査にはパイロットバルーンによる方法が簡単で手軽なので一般に用いられているが、器材や人員の点からセオドライト1台で観測を行う場合も多い。この方法ではバルーンの上昇速度を一定と想定し

て高度を求めるが、気象状態によっては実際の高度との間に差異が生じている場合も考えられる。

今回セオドライト2台で観測を行ったので、上昇速度30m/分、50m/分、100m/分の低速度上昇バルーンについて、1台の観測データによる計算と2台の観測データによる計算との差異を比較した。

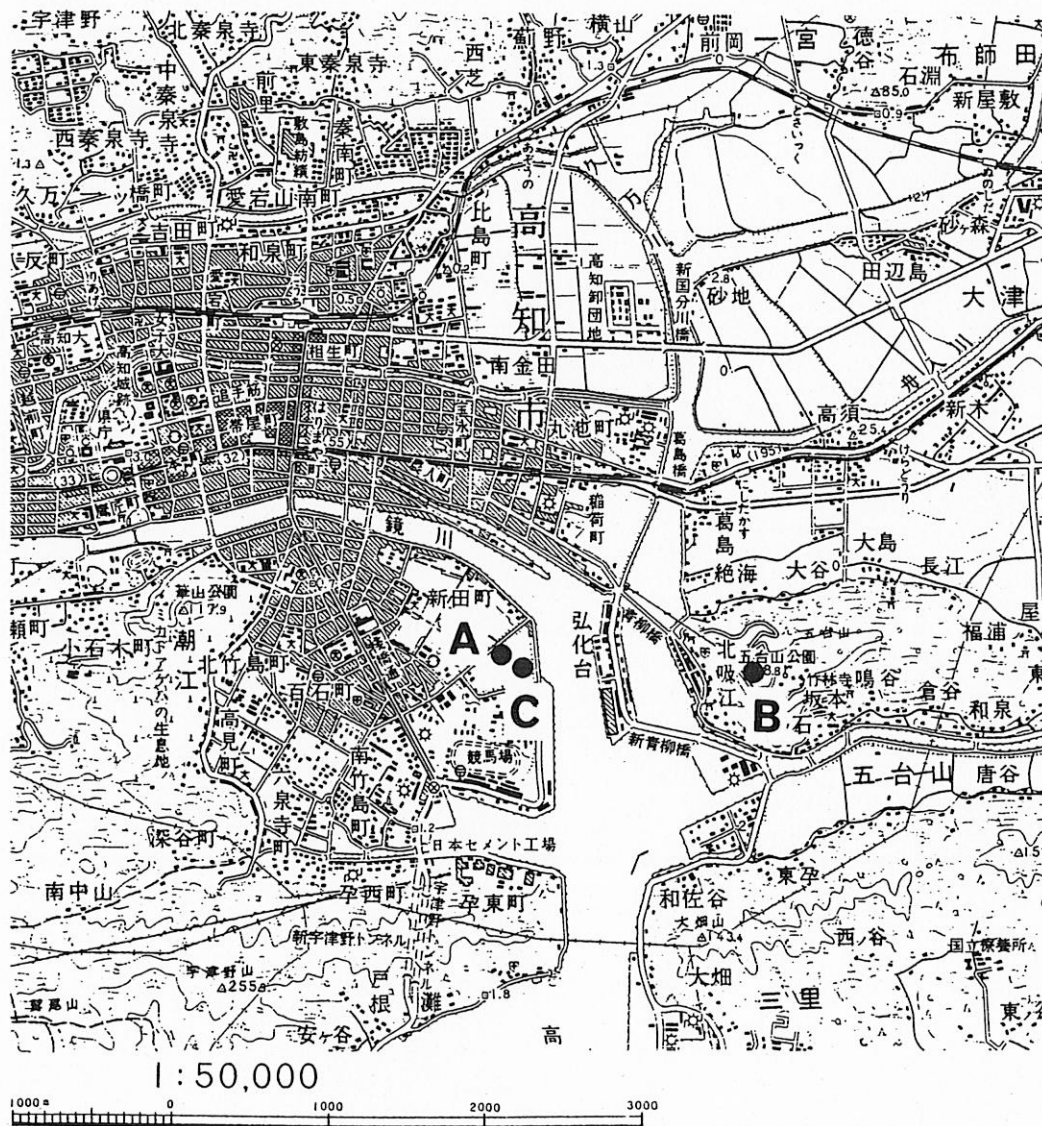
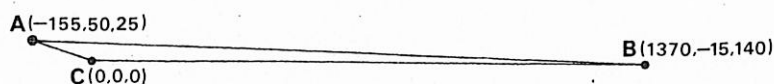


図1 観測地点ならびに放球地点



$$\angle A = 15.5^\circ$$

$$\angle B = 1.5^\circ$$

$$\angle C = 163.0^\circ$$

座標は東西, 南北, 上下方向を表わし単位はmである。

C点は毎回少しずつ異なったが平均的な位置を基準にした。

図2 位置関係

1. 観測方法

観測地点と位置関係を図1, 図2に示した。

観測は高知市棧橋において1984年11月19日と11月30日に行ったが, 19日は曇, 30日は晴れであった。

観測に使用した気球は気球製作所が測風用に製作した質量20gの赤色ゴム気球で, これにヘリウムガスを充てんし直径約50cmに膨張させた後, 砂袋(封筒等を使用)に砂を入れ浮力の調整を上皿天秤を用いて行った。ノンリフトバルーンについては上皿天秤は使用せずバルーンを空中に浮遊させて静止する状態になるように浮力の調整を行った。

これらのバルーンは放球直前に作製し, 観測は20秒間隔で放球後20分間行った。

2. 計算方法

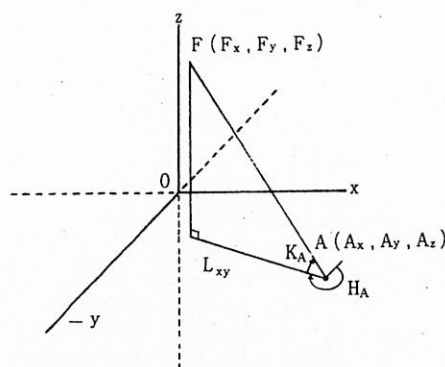
計算にあたっては, 東西方向東を+x, 南北方向北を+y, 上下方向上方を+zとする3次元座標を考え, バルーン的位置を $F(F_x, F_y, F_z)$, 観測地点Aを $A(A_x, A_y, A_z)$, 観測地点Bを $B(B_x, B_y, B_z)$, 観測地点A, Bでのバルーンの方角を H_A, H_B , 高度角を K_A, K_B とした。

2.1. 上昇速度を一定とし, 1台の観測データを使用してパイロットバルーン座標を求める方法(以後第1法とする。)

概略を式とともに図3に示した。この方法の欠点は高度が推定高度である点と高度と高度角より水平距離を求めるため高度角が 0° 付近ではx, y座標についての誤差が大きくなる点であるが, 一般には観測地点と放球地点を同一地点にとるので後者の欠点は無くなっている。

2.2. 2台の観測データを使用し, 2つの直線の最短距離の中点をバルーン座標とする方法(以後第2法とする。)

一般にはA, Bでの方位角よりx, y座標を求め,



$$L_{xy} \tan K_A = F_z - A_z = Vt$$

$$L_{xy} \sin H_A = F_x - A_x$$

$$L_{xy} \cos H_A = F_y - A_y$$

(ここで Vは上昇速度(m/分)
tは経過時間(分)
 L_{xy} は直線AFのxy平面への写影)

図3 第1法による計算

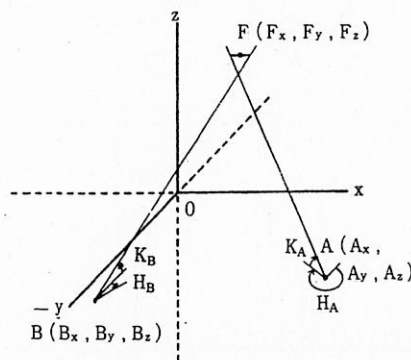


図4 第2法による計算

AまたはBでの高度角よりz座標を求める方法がとられる¹⁾が, 下記の2点により第2法を採用した。

- A, Bの方角, 高度角それぞれのデータの重みは同等である。
- 一般の方法はA, Bを含みXY平面に垂直な平面付近にバルーンがある場合は誤差が大きくなるの

に対し、第2法は誤差が大きくなる範囲がA、Bを通る直線付近にバルーンがある場合のみである。

図4に概略図を示し、式は図4中の記号を用い次のように導いた。

A点を通る直線(直線Aとする.)

$$\begin{cases} x = \alpha_x t + A_x \\ y = \alpha_y t + A_y \\ z = \alpha_z t + A_z \end{cases} \quad \left(\begin{array}{l} \text{ここで } \alpha_x = \cos K_A \cdot \sin H_A \\ \alpha_y = \cos K_A \cdot \cos H_A \\ \alpha_z = \sin K_A \\ t \text{ はパラメーター} \end{array} \right)$$

B点を通る直線(直線Bとする.)

$$\begin{cases} x = \beta_x q + B_x \\ y = \beta_y q + B_y \\ z = \beta_z q + B_z \end{cases} \quad \left(\begin{array}{l} \text{ここで } \beta_x = \cos K_B \cdot \sin H_B \\ \beta_y = \cos K_B \cdot \cos H_B \\ \beta_z = \sin K_B \\ q \text{ はパラメーター} \end{array} \right)$$

直線A上の任意の1点と直線B上の任意の1点との距離 L_{xyz} は

$$L_{xyz}^2 = \{(\alpha_x t + A_x) - (\beta_x q + B_x)\}^2 + \{(\alpha_y t + A_y) - (\beta_y q + B_y)\}^2 + \{(\alpha_z t + A_z) - (\beta_z q + B_z)\}^2$$

L_{xyz}^2 を最小にする t, q は

$$\frac{\partial L_{xyz}^2}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial L_{xyz}^2}{\partial q} = 0 \text{ において}$$

$$t = \frac{P_A - P_B \cdot P}{P^2 - 1}, \quad q = \frac{P_A \cdot P - P_B}{P^2 - 1}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{ここで } P = \alpha_x \beta_x + \alpha_y \beta_y + \alpha_z \beta_z \\ P_A = \alpha_x (A_x - B_x) + \alpha_y (A_y - B_y) + \alpha_z (A_z - B_z) \\ P_B = \beta_x (A_x - B_x) + \beta_y (A_y - B_y) + \beta_z (A_z - B_z) \end{array} \right)$$

中心座標 $F (F_x, F_y, F_z)$ は

$$F_x = \frac{(\alpha_x t + A_x) + (\beta_x q + B_x)}{2}$$

$$F_y = \frac{(\alpha_y t + A_y) + (\beta_y q + B_y)}{2}$$

$$F_z = \frac{(\alpha_z t + A_z) + (\beta_z q + B_z)}{2}$$

3. 観測結果と考察

放球の状況を表1に示した。ノンリフトバルーンについては11月19日はすべて下降落下, 11月30日はNo10, No21は下降落下, No12, No15は20分間にそれぞれ400m, 800m上昇, No18は水平に移動した。11月19日は全日

曇天で上昇気流は発生せず, 11月30日は晴天で日中には上昇気流が発生したものと推測された。

各放球ごとの第2法による2直線の最短距離を表2に示した。拡散計算において風速の階級分けを行う場合, 一般に0.5m/s未満をcalmとするが, 風速の許容誤差を同様に0.5m/sとすると, 測定間隔は20秒だ

表1 放球状況

放球No	放球時刻	上昇速度
1	84年 11月 19日 10時 34分	50m/分
2	84年 11月 19日 11時 11分	ノンリフト
3	84年 11月 19日 11時 39分	100m/分
4	84年 11月 19日 14時 2分	100m/分
5	84年 11月 19日 14時 29分	ノンリフト
6	84年 11月 19日 14時 58分	100m/分
7	84年 11月 19日 15時 33分	ノンリフト
8	84年 11月 19日 16時 10分	50m/分
9	84年 11月 30日 7時 8分	50m/分
10	84年 11月 30日 7時 35分	ノンリフト
11	84年 11月 30日 9時 14分	50m/分
12	84年 11月 30日 9時 40分	ノンリフト
13	84年 11月 30日 10時 4分	100m/分
14	84年 11月 30日 11時 45分	100m/分
15	84年 11月 30日 12時 8分	ノンリフト
16	84年 11月 30日 13時 54分	100m/分
17	84年 11月 30日 14時 13分	30m/分
18	84年 11月 30日 15時 42分	ノンリフト
19	84年 11月 30日 16時 6分	100m/分
20	84年 11月 30日 16時 30分	30m/分
21	84年 11月 30日 16時 58分	ノンリフト

表3 第1法と第2法による距離の差

放球No	上昇速度 (m/分)	観測回数	単位: m			
			X方向	Y方向	XY方向	Z方向
1	50	18	150	18	152	59
3	100	59	20	18	27	21
4	100	30	12	12	19	34
6	100	38	26	33	43	39
8	50	61	75	97	123	68
9	50	44	33	19	39	13
11	50	60	61	27	67	36
13	100	46	19	10	22	15
14	100	61	65	44	80	60
16	100	47	108	168	202	88
17	30	61	215	438	502	149
19	100	61	25	25	39	39
20	30	57	518	1,232	1,342	124
上昇	30		367	835	922	137
速度別	50		80	40	95	44
	100		39	44	62	42

(注) 計算にあたっては差の絶対値を合計し, 測定回数で割って平均としたが, 上昇速度別の平均については上でもとめた平均を合計し各放球回数で割って平均とした。

表2 第2法による2直線の最短距離

単位: m

放球 No	1	3	4	6	8	9	11	13	14	16	17	19	20
放球時刻	11月19日						11月30日						
	10:34	11:39	14:02	14:58	16:10	7:08	9:14	10:04	11:45	13:54	14:13	16:06	16:30
上昇速度(m/分)	50	100	100	100	50	50	50	100	100	100	30	100	30
分 秒													
0:00	4	—	4	3	4	3	3	3	3	4	3	0	3
:20	7	4	—	6	1	3	0	0	4	4	3	4	5
:40	—	5	3	2	3	3	2	3	1	1	5	0	6
1:00	4	3	1	4	7	5	—	1	1	3	1	0	4
:20	3	4	3	3	2	3	5	3	2	1	3	3	2
:40	—	1	2	4	3	5	4	2	2	7	3	5	2
2:00	3	5	7	8	1	7	3	2	0	4	3	3	3
:20	3	13	3	6	6	7	4	1	0	7	3	3	2
:40	3	16	7	3	6	4	1	1	2	3	4	3	3
3:00	1	20	5	5	1	3	2	2	5	3	4	2	4
:20	2	22	—	8	1	5	6	0	1	5	3	2	5
:40	3	34	7	13	10	4	4	1	3	2	7	1	2
4:00	4	50	2	3	0	6	4	1	4	2	11	2	10
:20	7	14	8	3	1	5	2	0	5	3	8	1	8
:40	1	8	11	5	8	7	2	0	3	5	12	2	9
5:00	2	7	5	5	6	7	0	0	1	5	2	0	8
:20	1	3	10	5	8	4	3	2	4	3	2	0	3
:40	2	5	5	8	3	7	3	3	3	5	2	1	8
6:00	3	0	6	10	1	7	3	3	4	5	4	0	4
:20	1	4	2	6	1	5	3	4	7	4	3	1	3
:40		4	1	3	3	5	6	0	4	5	2	1	5
7:00		1	7	2	6	4	5	2	6	3	2	4	6
:20		9	5	3	9	6	3	0	9	7	4	3	4
:40		6	6	4	5	6	2	0	4	8	3	3	8
8:00		5	4	6	3	5	5	1	11	8	5	1	5
:20		2	5	9	5	5	1	7	5	6	3	2	7
:40		4	4	11	1	4	4	4	8	4	3	4	7
9:00		7	1	9	3	7	4	4	11	10	0	2	9
:20		4	4	8	2	5	4	4	7	1	4	0	5
:40		10	2	8	8	5	7	5	7	9	6	1	6
10:00		5	1	7	8	6	2	6	11	11	4	0	4
:20		12	15	10	6	4	4	0	12	7	1	2	8
:40		9		7	6	5	3	4	9	6	0	0	15
11:00		6		8	1	6	5	6	11	10	2	2	11
:20		7		6	4	5	3	5	4	14	4	0	11
:40		6		11	7	3	4	5	14	15	5	0	14
12:00		0		7	8	1	2	4	13	18	6	0	11
:20		2		7	5	2	2	7	13	9	4	0	15
:40		1			8	4	2	5	19	14	6	1	12
13:00		3			10	2	1	2	10	12	2	3	14
:20		3			6	2	0	4	6	18	5	4	15
:40		2			5	0	0	5	8	12	6	2	14
14:00		8			2	5	8	7	12	15	4	3	8
:20		7			0	6	0	5	9	18	9	1	12
:40		3			8		1	5	12	23	1	5	12
15:00		7			2		3	10	9	25	10	8	16
:20		0			3		2		10	21	11	6	12
:40		7			6		2		9		9	6	13
16:00		—			9		6		14		7	6	15
:20		18			7		6		8		12	7	15
:40		22			1		3		11		13	11	16
17:00		15			8		7		17		9	15	18
:20		30			6		9		18		11	16	12
:40		34			10		11		15		14	17	18
18:00		24			7		10		14		14	21	14
:20		35			9		9		15		11	20	21
:40		41			0		14		21		14	14	17
19:00		35			10		7		17		12	16	
:20		34			1		11		11		12	18	
:40		51			9		9		28		11	15	
20:00		57			1		14		13		15	17	

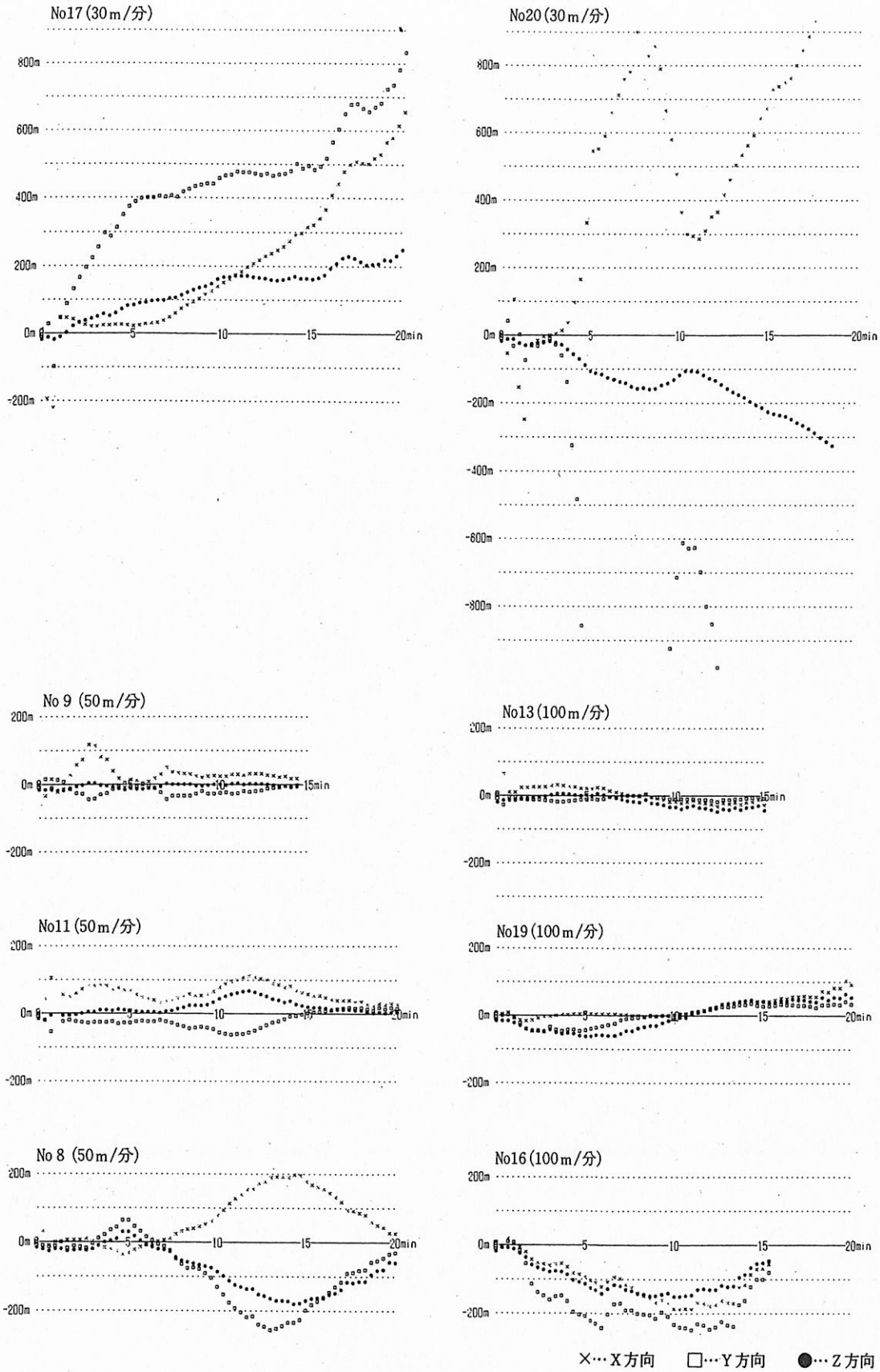


図5 距離の差の経時変化

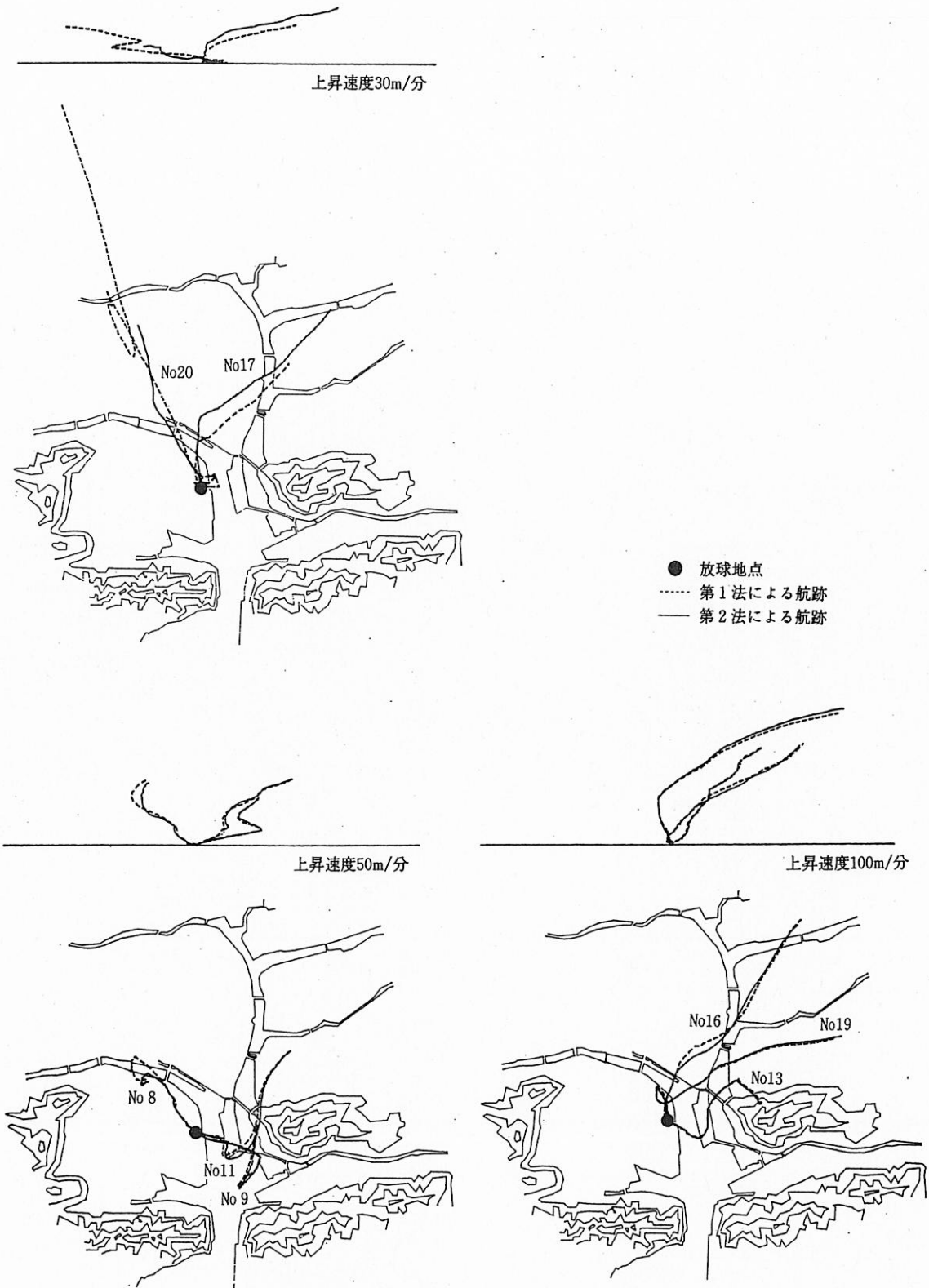


図6 航 跡

から、XY平面方向の許容誤差は10mであり、Z方向の許容誤差も同様に10mとすると、3次元空間での許容誤差は14mとなる。表2で最短距離が14m以上の回数は72回、全体の11%であり、観測は精度良く行われたと考えられた。

表3に示した第1法と第2法による距離の差をみると、上昇速度50m/分と100m/分のZ方向の差はほぼ同じだが、XY平面方向の差は50m/分の方が大きく、また30m/分はZ方向の差は大きくなり、XY平面方向の差はさらに大きくなっている。図5、図6に両法の差の経時変化と航跡を、上昇速度別の代表例（両法の差が最も小さい、中間、最も大きい）で示した。図5では上昇速度が遅いほどZ方向の差が大きく、Z方向の差が大きいほどX、Y方向の差が大きい傾向がみられ、図6では、100m/分の航跡はほとんど同じだが、50m/分はいくぶん違いがみられ、30m/分は大きな違いがみられた。

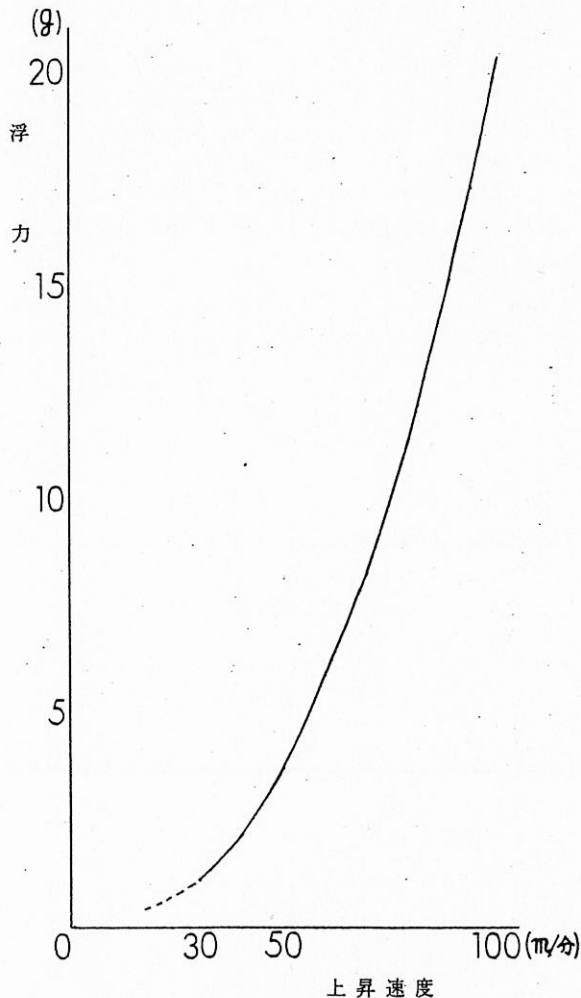


図7 バルーンの上昇速度と浮力の関係
(バルーン自重28gの場合)

(注) 測風気球観測常用表²⁾よりプロット

計算方法の違いによりこのような差異を生じた理由は第1法において上昇速度を一定と想定して高度を求めたためであるが、上昇速度を変化させる要因としては上昇気流、下降気流や浮力の増加、減少が考えられる。上昇気流、下降気流は一般に地表付近に発生しやすいので、地表付近に長時間滞留する低速度バルーンほど影響を受けやすいと考えられる。また浮力の変化による速度変化は低速度バルーンほど大きい特性をパイロットバルーンはもっている(図7参照)ことが知られており²⁾、浮力の増加、減少の原因としては、パイロットバルーン作製時の浮力の違い、日射によるバルーンの膨張、ガス漏れによるバルーンの収縮³⁾などが考えられる。

表4に実際の上昇速度から想定した上昇速度を差し引いた値を上下方向の風速として示したが、上昇速度の違いによる標準偏差の差はあまりなく、平均風速は上昇速度が遅いほど0 m/sからのずれが大きくなり、30m/分では+0.22m/s、-0.28m/sと両方向に大きなずれを示した。表4における平均風速は時間経過に関係なくばらついており、図8に示した11月30日の日射量との間に関係を認めることは難しかった。これは、パイロットバルーンの作製は日の当たる車の中で行ったので、日射条件がバルーン上昇時とほぼ等しかったためではないかと考えられた。

これらのことより上昇速度の変化は、上昇気流、下降気流の影響よりも浮力の増加、減少、特にパイロットバルーン作製時の浮力の違いによるところが大きいのではないかと考えられた。参考までに例を示すと、図7では、浮力が±0.5g変化すると30m/分では上昇速度は-10m/分、+5m/分変化するのに対し、100m/分では±1m/分しか変化しない。

Z方向の差のXY平面への影響は高度角が小さいほど大きく顕われるので、このことは結果的に、上昇距離の少ない低速度バルーンほどXY平面方向の差を生じやすいことになっている。表3で示した放球速度別のZ方向、XY方向の差がこの例である。

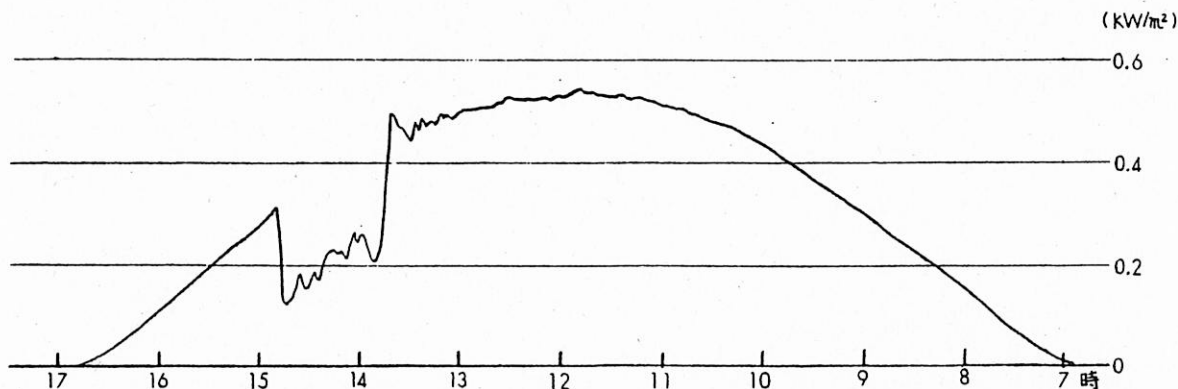
放球したパイロットバルーンすべての高度別風向・風速を図9に示した。図で破線は第1法、実線は第2法を表し、矢印は風向、折れ線は風速を、それぞれ高度について表している。地上より高度100m前後までの風向、風速の差異が大きいのは、観測地点を放球地点より高い位置に設けたため、バルーンの上昇により高度角が0°前後になった時の計算誤差と考えられた。

100m/分では上昇気流が発生したと推測された11月30日の日中に放球したNo14、No16を除いて、第1法、第2法ともほぼ同じ風向、風速を示した。No14では実際の高度と想定した高度との差の分だけ全体的に風

表4 垂直方向の風速

放球 No	放球時刻	上昇速度 (m/分)	観測回数	平均風速 (m/s)	標準偏差 (m/s)
1	10:34	50	15	0.19	0.30
2	11:11	ノンリフト	17	-0.17	0.18
3	11:39	100	57	-0.05	0.35
4	14:02	100	27	0.14	0.32
5	14:29	ノンリフト	20	-0.23	0.33
6	14:58	100	37	-0.04	0.29
7	15:33	ノンリフト	12	-0.15	0.26
8	16:10	50	60	-0.04	0.44
9	7:08	50	43	0.01	0.16
10	7:35	ノンリフト	17	-0.11	0.40
11	9:14	50	58	0.02	0.22
12	9:40	ノンリフト	60	0.31	0.15
13	10:04	100	45	-0.03	0.25
14	11:45	100	60	0.06	0.31
15	12:08	ノンリフト	60	0.68	0.47
16	13:54	100	46	-0.03	0.47
17	14:13	30	60	0.22	0.33
18	15:42	ノンリフト	21	-0.02	0.32
19	16:06	100	60	0.06	0.26
20	16:30	30	56	-0.28	0.37
21	16:58	ノンリフト	15	-0.33	0.09
上昇速度別		ノンリフト		0.25	0.28
		30		0.25	0.35
		50		0.065	0.28
		100		0.059	0.32

(注) 上昇速度別の風速, 標準偏差は絶対値の合計を各放球回数で割って求めた。



(注) 測定地点は放球地点の北東約4kmの大津測定局

図8 11月30日の日射量

向, 風速がずれている。No16は風向はほぼ同じであるが, 風速は複雑に違っており最高で3.2m, 平均で約1mの差が認められた。これは図5でZ方向の変化が他のバルーンと異なり乱れが大きいことや表4の標準偏差が0.47と最も大きいことから判断すると, バルーンは速度を激しく変化させながら上昇したものと考えられる。この原因としては, 1つは表4において標準偏差が大きいバルーンは上昇気流の発生したと推測さ

れる時間帯に限られていることから, 上昇気流による風の乱れが考えられ, 1つはNo16の放球前後に日射量が大きく変化していることから日射量による影響が考えられる。後者の考え方が正しいならば, No16は日射量の変化による影響は上昇速度100m/分のバルーンにも顕れることを示した例といえよう。

50m/分はNo11を除いて風向, 風速ともに差異が大きく, No8においては高度500m前後で風速で2m/s

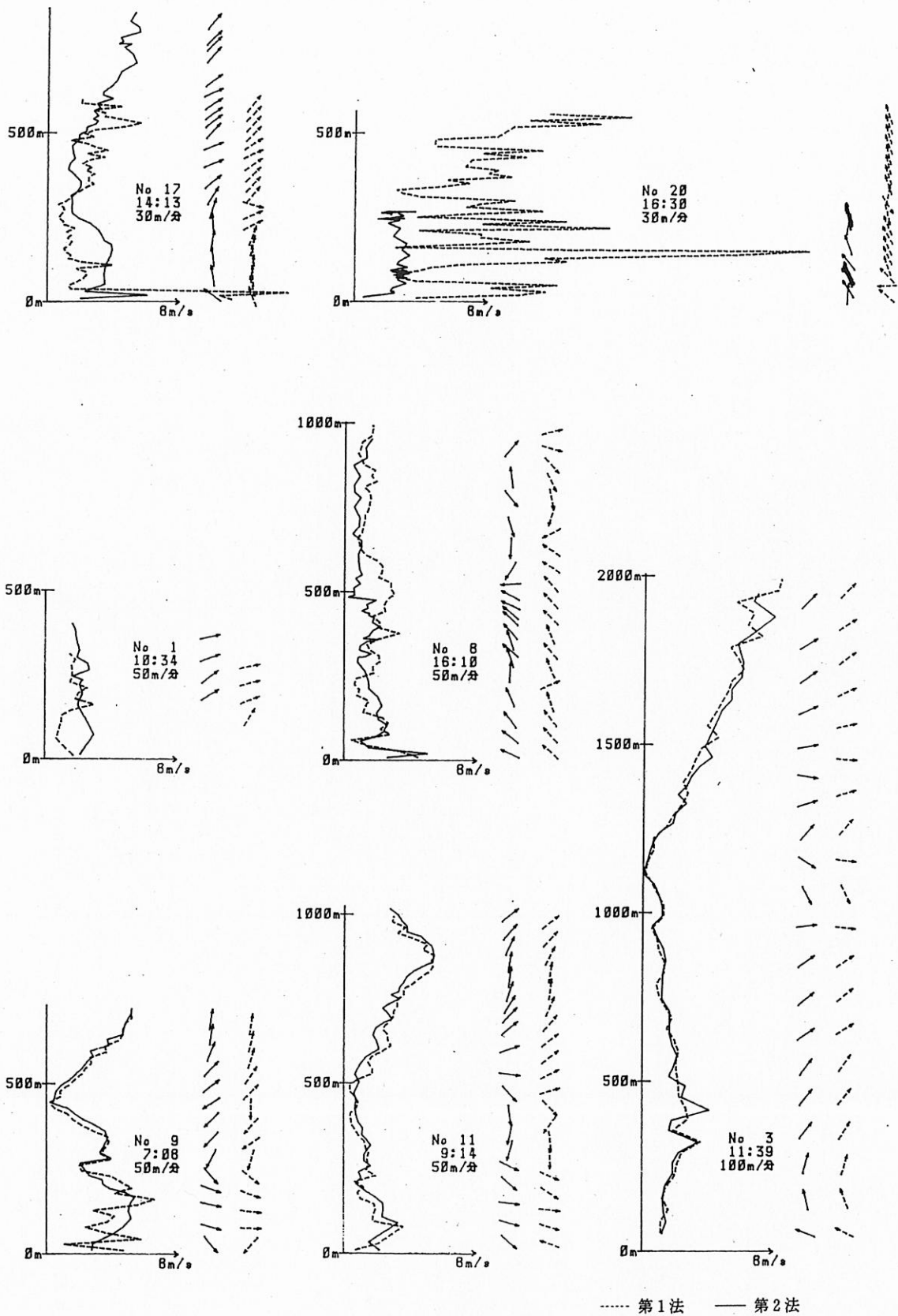


图9-1 高度別風向・風速

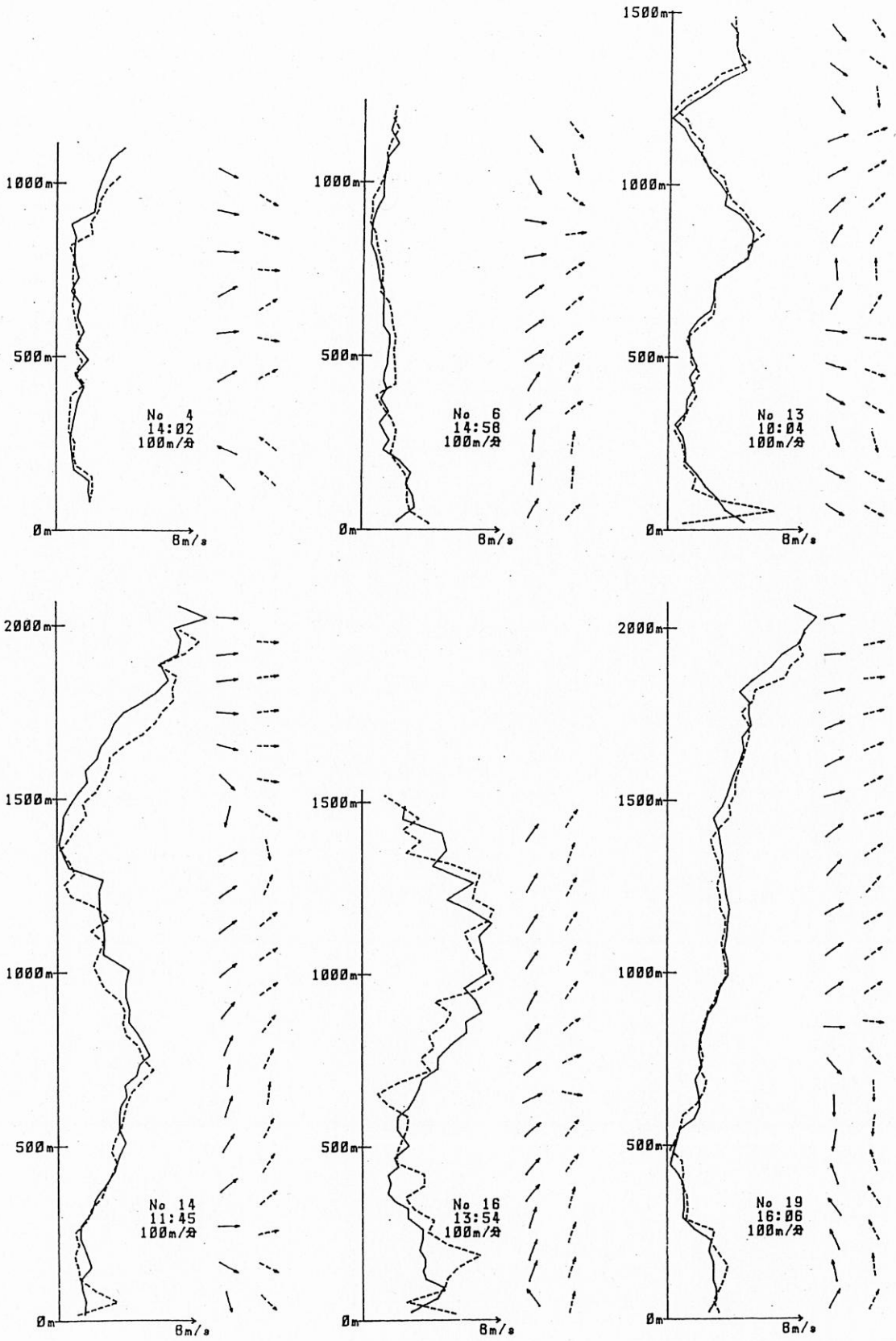


図9-2 高度別風向・風速

以上、風向で90°以上の差異が認められた。

30m/分については同一バルーンの観測結果とは思えないほど異なっており、No20について見ると、第1法と第2法による最終高度は565mと257m (比2.2:1)、観測地点Aからの最終水平距離は6,172mと2,599m (比2.4:1)、平均風速は8.7m/sと2.6m/s (比3.3:1)であり、図6で第1法による航跡がループを描いている点を考慮すれば、高度の違いがそのまま風速の違いとなって顕われたと考えられる。この理由は第1法では測定された高度角と想定した高度より水平距離を求めるため、実際の高度が想定した高度より低い場合は風速が大きく計算されるからである。逆に実際の高度が想定した高度より高い場合は、No17のように、風速が小さく計算されよう。

4. 結 語

セオドライト1台を使用しパイロットバルーンの上昇速度を一定と想定してバルーンの位置を決定する方法と、セオドライト2台で観測を行い2直線の最短距離をバルーンの位置とする方法との計算誤差を比較検討したが、低速度バルーンほど水平誤差、高度誤差を生じやすいことがわかった。

観測結果を上昇速度別にみると、30m/分では上昇距離で倍以上、平均風速で3倍以上、風向では正反対の場合もみられた。

50m/分では風向、風速ともに差異が認められ、風速で2m/s以上、風向は90°以上の違いがある場合もみられた。

100m/分では両法による違いはほとんど見られなかったが、上昇気流が発生したと推測された時間帯に放球したNo14とNo16は風速で最高3.2m/s、平均約1m/sの違いがあった。

今回の観測結果により、セオドライト1台での観測は、地形や気象状態または観測結果の使用目的にもよるが、少なくとも上昇速度50m/分以下のパイロットバルーンには適さないと考えられた。

本調査は昭和59年度通産省委託事業「石炭導入地域環境影響調査(高知地域)」の一環として行われたものである。

最後に、今回の観測にあたりご指導頂いた高知医科大学上田寿名誉教授と観測に協力していただいた県職員の方々に深く謝意を表します。

文 献

- 1) 本田久雄, 長尾隆: 公害と気象. 地人書館・146 ~151・1984
- 2) 中央气象台: 測風気球観測常用表・1936
- 3) 上田寿: 高知市上空における大気拡散状況調査. 公害調査報告書. 高知県・1961