

気象教材の研究 (その1)

—ゴム風船による高層風観測の基礎的実験—

新 田 義 信

この研究は、高等学校の気象学習の教材化をねらって、高層風観測の基礎的な実験を行ったものである。ゴム風船は、市販のもので、ヘリウムガスを使用しており、規格35丸の風船の上昇速度は、 2.4m/s 、12丸で 1.2m/s の値を得ている。

35丸の風船を使用して高層風の予備観測を実施し、高層の風向・風速のデータが得られることを実証し、さらに、いくつかの航跡図パターンを見いだしている。

1 はじめに

高層風の観測は、気象庁の現業で高価なラジオ・ゾンデやパイボールなどを使用して行っている。筆者は、運動会などで使用されている市販のゴム風船を用いて、高層風観測の可能性を追求した。ゴム風船による高層風観測は、高層気象のデータを自らの観測で得られるという満足感の外に、手の届かない上空の風を、1個の風船の動きから求めていくという探究的な面白さを十分に味わうことができ、教材化に適した観測であると考えられる。

なお、この研究は、気象のしくみや法則を、できるだけ実験や観測を通して理解させるという観点から行っている研究の一部である。

2 ゴム風船の上昇速度の理論^{1), 2)}

風船の上昇速度の理論式を簡単に述べると次のようになる。まず初めに、風船にかかわる力を考えるならば、上方に向う力(P)と、これに反して、下方に向う力として風船内のヘリウムガスの重さ(Q)、風船の風袋(B)、上昇に対する抵抗(R)がある。この抵抗は、上昇速度 v の2乗に比例し、風船の切口(S)に比例するから、

$$R = \mu \rho v^2 S \quad (\text{ただし、}\rho\text{は}Z\text{の高さの空気の密度})$$

である。

雨滴は、落下後20メートル以内で空気の抵抗により等速になることから、逆に上昇する風船も放球後間もなく、等速になることが充分予想される。風船が等速で上昇するならば、 $P - Q - B - R = 0$ でなくてはならない。この式を書き換えると、 $(P - Q) - B = R$ となる。 $(P - Q)$ は風船中のガスの

浮力であり、これを全浮力(W)と呼ぶ。W-Bは風船の浮力であって、これを自由浮力(A)という。風船が空気の抵抗とつり合って等速で上昇するから、A=Rという関係がある。

さて、風船の上昇力はAであって、これは風船中のヘリウムガスの浮力(P-Q)から風袋Bを引いたものに等しい。すなわち、

$$A = (P - Q) - B$$

$$\therefore P - Q = A + B \quad \dots\dots\dots (1)$$

風船を正球とみなすと、

$$A + B = V(\rho - \sigma) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(ただし、 σ はZの高さのヘリウムガスの密度)

$$A + B = \frac{\pi}{6} D^3 (\rho - \sigma) \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、

$$R = \mu \frac{\pi}{4} D^2 \rho v^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

風船が等速で上昇するとすれば、

$$A = R = \mu \frac{\pi}{4} D^2 \rho v^2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

(3)式よりDを求めると、

$$D = \left\{ \frac{6}{\pi(\rho - \sigma)} \right\}^{\frac{1}{3}} \cdot (A + B)^{\frac{1}{3}}$$

これを(5)に代入してvを求めると、

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu}} \cdot \left(\frac{4}{3}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \pi^{-\frac{1}{6}} \cdot \frac{(\rho - \sigma)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\rho}} \cdot \frac{A^{\frac{1}{2}}}{(A + B)^{\frac{1}{3}}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

いま、

$$\left(\frac{4}{3}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \pi^{-\frac{1}{6}} \cdot \frac{(\rho - \sigma)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{\rho}} = v \quad \frac{v}{\sqrt{\mu}} = k$$

とおくと、(6)の式は、

$$v = k \cdot \frac{A^{\frac{1}{2}}}{(A + B)^{\frac{1}{3}}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。

しかし実際は、風船が膨らんだときの形が正球でなく、卵形～長卵形になるため理論通りにはならない。そのため、ゴム風船を放球し上昇速度を野外実験で測定し確かめた。

なお、kの値は、風船の容量、風船の形、ガスの種類などで異なってくる。気象庁の現業で使用しているパイボールでは、^{注1)}k = 46.02を用いている。

注1 気象庁現業用の測風気球観測常用表によれば、測風気球の上昇速度Vは、気温や気圧および高度によって異なるが、その誤差は小さいとし、気圧760 mm Hg、気温0°Cのときの公式 $V = 46.02 \left[\frac{L}{Q} \right]^{\frac{1}{21.62}}$ を用いて計算表を作っている。

3 ゴム風船の上昇速度の測定

ゴム風船は、直角方向へ上昇しようとする風船のベクトルと、水平方向に吹いている風のベクトルの合成されたものとして流されていく。従って高層風の測定は、流されている風船の位置を一定時間毎に観測し、この位置を水平面上に投影すれば風向と風速として求められる。ただしこの場合、ゴム風船の上昇速度がわかっていると、水平面上に投影する距離を計算することができない。

(1) 測定方法

(a) 準備

入手しやすい市販のゴム風船は3種類ある。各規格のゴム風船の大きさと重量は表1に示した通りである。風船に充てんするガスは、安全を考えヘリウムガス(純度99.9995%密度は $0^{\circ}\text{C}\cdot 1\text{気圧で}0.17847\text{g/l}$)を用いた。

表1 ゴム風船の大きさ

大きさ 規格	重 量		短 径	
	平均値(g)	標準偏差値	平均値(cm)	標準偏差値
35丸	4.39	0.17	7.2	1.66
12丸	2.87	0.22	5.2	2.01
7丸	1.78	0.10	4.1	1.01

実験においては、まず、ゴム風船の重量を精密秤(秤量300g,感量0.001g)で測定し、ヘリウムガスを充てんする。この時、同一規格の風船ではほぼ同じくらいのガス容量になるようにするため、膨らんだ風船の最大周囲を測りながら徐々にガスを充てんした。ガスの充てんがすんだら、再び風船の最大周囲を測定し、浮上しようとする風船とつり合うまでゼムクリップを懸垂させ、その重量(自由浮力)を精密秤で測定しておく。なお、風船の正確なガス容量を求めるため、膨らんだ風船をあらかじめ写真撮影をしておき、その輪郭の曲線の式を求めて積分することにより容量を算出するようにした。

(b) 方法

実験は、できるだけ無風の日を選んで屋外で行った。ゴム風船の上昇速度の測定は、浮上していく風船をモータードライブ装置を用いて1こま $\frac{1}{2}$ 秒で写真撮影し、この写真を解析して求める方法をとった。写真撮影は、写真のバックに建物が写るように、カメラの40メートル前方に風船を放球させる位置をとり、さらにその前方4メートル位置に建物がくるようにカメラをセットして行った(図1,図2参照)。その理由は、浮上した風船の位置を、建物の目印から逆に測定するためである。この場合、図1から考えるように、写真に写っている風船の高さは、風船の上昇に従い、実際

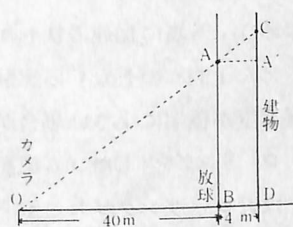


図1 風せんの高さの補正



図2 ゴム風船の上昇の様子(モータードライブ装置で撮影)

より高く写るため、補正する必要がある。

高さ補正の仕方は、次のようにして行った。図1より、 $\triangle OAB \sim \triangle OCD$ であるので、比例式から、実際の風船の高さABは、

$$AB = \frac{OB \cdot CD}{OD}$$

で求まる。高さの補正がすんだら、経過時間と風船の高さの関係を表わすグラフを作成し、最小二乗法により風船の上昇速度を求めた。

(2) 結果とその検討

規格35丸の風船は、12丸の風船に比べ浮力が約4倍、上昇速度で約2倍あり、重量・短径ともに偏差値が小さく高層風観測に適している。7丸の風船は、浮力がわずかで微風でもかなり流されるため充分実験することができなかった。

ゴム風船の上昇速度は図3、図4から、35丸で2.4m/s、12丸で1.2 m/s程度であることがわかった。

図3のグラフでは、放球後5.5秒を過ぎると、いかにも加速がついたように上昇速度の割合が増加している。この原因は、屋上を越える風でおきる吸い込みにより、風船が吸い上げられるためと考える。また、グラフでは、最初から等速度で上昇しているかのようで、加速された状態は認められない。しかし、これはおそらく放球直後に加速があったものの、わずかの時間で終速度に達するためグラフに表われないのか、或いは撮影のシャッターと放球のタイミングが同調しにくく(シャッターの方に遅れがあるため)、写真に加速の状態が写らないためと考えられる。

また、図3のNo.4の実験例からわかるように、同一規格の風船でも上昇速度が極端に小さい場合がある。この原因は、風船がローリングをおこすためである。

ローリングを生じたゴム風船の形は、長い卵形をしている。つまり、風船の短径：長径の比の値が小さいほどローリングがおこるらしい。従って、ヘリウムガスを充てんするときは、できるだけ正球になるように手で押しながら整形をした方がよい。

表2 実験から求めたk値

風船 No.	規格	V (cm ³)	B (g)	A (g)	v (m/s)	k	備考	
1	35丸	14779	421	9.70	2.4	111.2	平均 107.0	正常に上昇
2	35丸	15545	459	11.32	2.4	107.0		正常に上昇
3	35丸	22466	446	12.62	2.4	103.0		正常に上昇
4	35丸	14895	426	10.22	1.5	67.3		ローリングした
5	12丸	5308	2.85	2.42	1.2	79.7		正常に上昇
6	12丸	5235	2.66	2.42	0.6	44.0		ローリングした

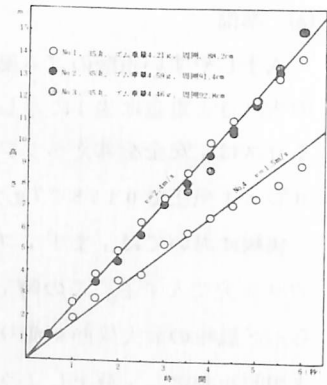


図3 風船の上昇速度 (35丸)

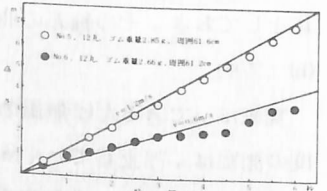


図4 風船の上昇速度 (12丸)

なお、正常に上昇した風船の上昇速度実験公式は、表2のk値から35丸風船で、

$$v = 107 \cdot \frac{A^{\frac{1}{2}}}{(A+B)^{\frac{1}{3}}} \text{ (m/min)}$$

12丸風船で、

$$v = 80 \cdot \frac{A^{\frac{1}{2}}}{(A+B)^{\frac{1}{3}}} \text{ (m/min)}$$

となった。

4 ゴム風船による高層風の観測

今回の観測は、ゴム風船で実際どのくらい高層風を観測できるか見きわめるための、予備観測として行った。

高層風観測に使用した風船は、規格35丸の風船である。風船の上昇速度は、実用的なことを考え、個々の風船について計算せず、先の実験より求めた毎秒2.4メートルの値を用いた。

(1) 観測方法

風船の観測は、経緯儀を使用し1点観測で行い、1分毎、方位角と高度で流されている風船の位置を読んだ。なお、観測は風船を見失うまで続した。

(2) 風速・風向の測定方法³⁾

ゴム風船の上昇速度は、2.4m/sであるから、毎分に換算すると144メートルである。いま、図5のO点から風船を放球したとすると、風船はOから流されながら上昇する。仮に無風であれば、1分間にOの頭上144メートルの高さA'に達する。風船が図のAにあるということは、水平方向に吹いている風の作用のためである。つまり、風船がOからAへ動いたのは、風船の垂直方向へ上昇する力と水平方向に吹いている風の力の合成によってなされたものである。従って、A'からAへの距離(=OB)がわかれば、この距離が144メートル層間あたりの平均的な風速になる。さらに60秒で割ると1秒間あたりの平均風速になる。距離OBは、すでに風船Aの高度 ΔAOB (= ϕ_1)を観測してあるので、次式で求めることができる。

$$OB = 144\text{m} \times \cot \phi_1$$

次の1分後(A)から2分後(C)にかけての平均風速の求め方は、次のように行う。図6からわかるように、高さ144メートル(A)から288メートル(C)間の平均風速は、距離BDである。BDを作図から求めるには、まず、風船Cの高度 ϕ_2 から距離ODを求めておかなければならない。ODは次式から求められる。

$$OD = 288\text{m} \times \cot \phi_2$$

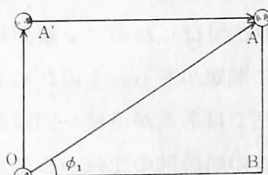


図5 平均風速の求め方

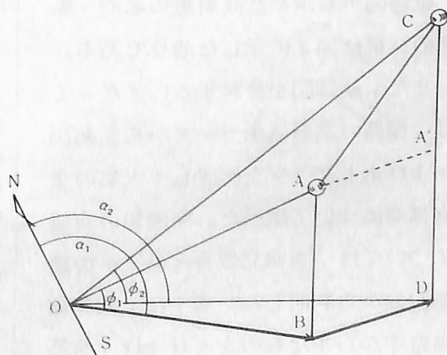


図6 航跡の作図法

これで風船AとCの水平距離がそれぞれ求められたから、風船AからCへ流された気層間の平均風速(=BD)は次のようにして求まる。まず図上に観測地点Oを適当に決め、Oを通る基準になる北の方位ONを任意にとる。風船Aの方位角が α_1 とすると、ONから $\angle\alpha_1$ を決め、その線上に距離OBをとる。次に風船Cの方位角 $\angle\alpha_2$ をONから決め、その線上に距離ODをとる。あとは、BとDを結べば、距離BDが1分後から2分後間の気層間の平均的な風速になる。以下、次々に同様のことを行って求め、縮尺を考えて作図する。このようにして作った図を航跡図という。

風速を求める式は、航跡図の2点間の距離がメートル単位、時間が分単位で表わされているので、次のようになる。

$$\text{風速} = \frac{\text{航跡図の2点間の距離}}{\text{縮尺} \times \text{時間間隔} \times 60} \quad (\text{m/s})$$

なお風向は、航跡と逆の方向であるから、それぞれの位置を方位の基点として読みとればよい。航跡図を作成する方法は、方位角と距離がわかって作図を行うから、極座標による作図法である。

(4) 観測結果とその検討

観測は6月から12月にかけて計16回行った。表3はその中ででの主な観測例である。前述したように、観測は1点観測法で行ったので、観測結果の信頼性に問題がある。そのため、間接的な方法ではあるが連続2回観測を実施し、二つの航跡図の比較から結果の信頼性をチェックした。例えば図7の6月19日の航跡図を見ると、ほぼ同一の航跡図パターンとなっている。このようなことから、1点観測でも特別な状態がおこらない限り、充分観測できるものと判断した。

航跡図から求めた高層風の風向・風速の結果は図8に示した通りである。

また、航跡図を検討するにあたっては、輪島の高層気象データから断熱図およびホドグラフを作成し、大気の垂直構造について調べた。海陸風の有無については、当県立教育センターの観測記録から判断した。表4は、観測結果の中から主なものをとり上げ、断熱図やホドグラフなどの資料を総合的に

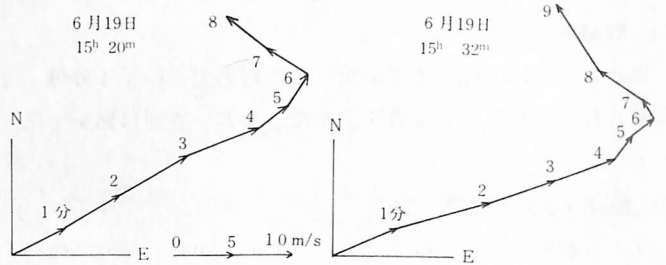


図7

表3 ゴム風船による高層風の観測例

	6月19日 15時20分		7月3日 15時46分		11月21日 9時46分		12月3日 15時15分		
時間	高さ	高度	方位	高度	方位	高度	方位	高度	方位
1(分)	144(m)	22°	156°	28°40'	210°20'	23°	344°	14°10'	48°50'
2	288	19°	160°	25°10'	206°00'	20°	334°	14°30'	49°30'
3	432	20°	160°	22°55'	202°20'	14°	329°	14°50'	51°10'
4	576	21°	160°	23°30'	205°00'	12°	329°	15°00'	53°20'
5	720	21°	158°	24°50'	207°20'	11°	329°	14°50'	56°20'
6	864	24°	156°	25°45'	210°50'	11°	332°	14°40'	61°20'
7	1008	30°	152°	26°45'	215°40'	12°	335°	14°20'	65°30'
8	1152	35°	144°	28°30'	222°20'	12°	338°	14°00'	68°50'
9	1296	37°	130°	30°10'	229°20'	12°	341°	13°40'	71°30'
10	1440			31°40'	237°30'	13°	344°		
11	1584			32°00'	243°00'	13°	347°		
12	1728			33°00'	248°20'	13°	350°		
13	1872			34°20'	252°30'	13°	355°		
14	2016			35°50'	257°40'				
15	2160			37°50'	261°50'				
16	2304			40°20'	261°10'				
17	2448			43°50'	269°10'				
18	2592			49°10'	274°15'				

表わし、航跡図の検討をやすくしたものである。

(a) 6月19日の高層風(図7参照)

この日は、一時的に前線が南下し、日本列島は高気圧になった。そのため、よく晴れ著しく暑くなった。ホドグラフでは、1,000mb面は無風、850mb面でNW風、700mb面でNW風となっている。断熱図を見ると、942mbから910mbの高さに逆転層があり、きわめて大気が安定した状態であることがわかる。

航跡図が示す型は、V字型に折れ曲った型で、非常に特徴がある。V字型のパターンは、おそらく逆転層と関係があるものと思われる。航跡は4分の位置(高さ576m)から方向を変えはじめ、6分の位置(高さ864m)で急転換している。そして、再び8分の位置(高さ1,152m)から方向を変えはじめているところで観測が終っている。一方、断熱図から逆転層のおよその高さをメートル単位に換算すると、500m~1,000mの高さに相当する。これは航跡図がV字型に折れ曲った高さとも一致する。なお、観測がもう少し続いたならば、航跡は上層のNW風の影響で徐々に南東に折れ曲がっていくことが予想される。

(b) 7月3日の高層風(図9参照)

この日は、日本海に高気圧があり、典型的な海陸風が発生した。ホドグラでは、1,000mb面でNE風、850mb面でSW風、700mbでSW風となっていて、地表と上層は、風向が逆になっている。断熱図は、状態曲線と湿潤断熱線の勾配がほぼ同じであり、飽差からも大気が垂直方向に不安定な要素の少ないことを示している。

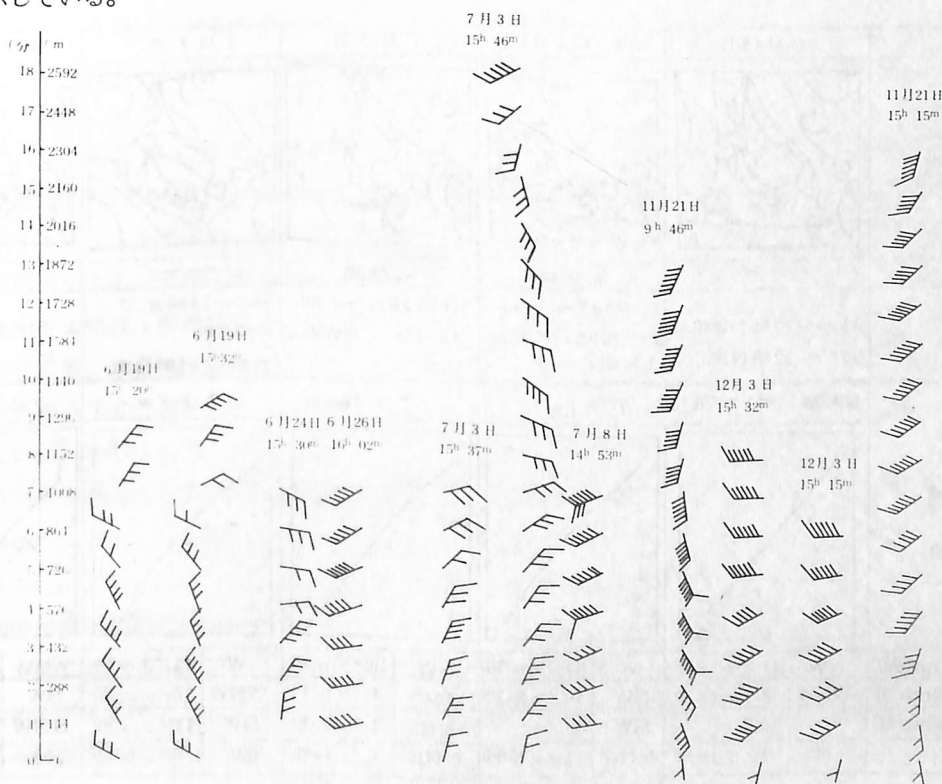


図8 航跡図より求めた高層風

航跡図の型は、ブーメランのように再びもどってくるような、これまた非常に特徴のある型となっている。航跡図に表われているはじめのNNE風は、海風による。5分の位置(高さ720m)から徐々に風向が変わり、7分の位置(高さ1008m)で大きく転換している。15分の位置(高さ2160m)で再び大きく転換している。この原因を考察すると、5分から7分の位置では補償流のS風の影響を受けはじめ、徐々に風向がE~SE方向に変わっていったのであろう。

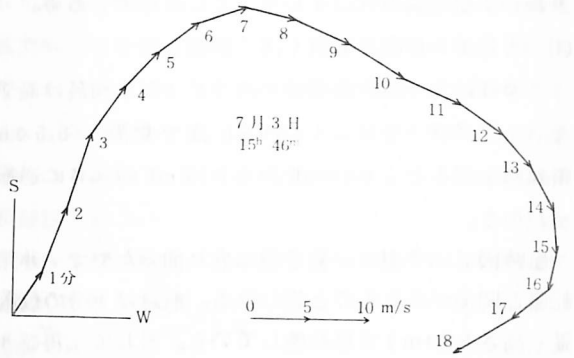


図9 7月3日の航跡図

7分から15分の位置では、今後はさらに上層のSE風の影響を次第に受け、18分の位置では上層の一般流のみであると推察される。なお、6月24日の場合も、ほぼ似たようなパターンを示している。

(C) 7月8日の高層風(図10参照)

この日は、梅雨前線が日本列島の南岸沖まで南下しているが、日本海に低気圧が残っているので、西寄りの風が吹き悪い天気である。ホドグラフでは、強い西風が250mb~200mb付近にあり、しかも、下

表4 主な観測日の天気図・断熱図・高層風(ホドグラフ)

		6月19日	6月24日	7月3日	7月8日	11月21日
地上天気図 (午後九時)						
海陸風の有無		—	海陸風	海陸風	—	—
地上風		15時~17時NW風 17時~23時N風	11時30分~23時 までNNW風または N風	10時30分~21時 40分までNW風, N風	9時~14時まで SSW風 14時~15時S風	1日中S風であ った
断熱図 (輪島)		逆転層, きわめて安定 	$\gamma \div \gamma_w$ 	$\gamma \div \gamma_w$ 	$\gamma \div \gamma_w$ 	$\gamma \div \gamma_w$
高層風	700mb面	NW 14ノット/秒	W 14ノット/秒	SW 10ノット/秒	W 43ノット/秒	WSW 25ノット/秒
	850mb面	WNW 2ノット/秒	SW 10ノット/秒	SW 4ノット/秒	WSW 37ノット/秒	SW 19ノット/秒
	1000mb面	— 0	SW —	NE 2ノット/秒	SW 12ノット/秒	SSW 10ノット/秒
	地上	N 4ノット/秒	NNW 1ノット/秒	NNE 4ノット/秒	SW 5ノット/秒	SE 6ノット/秒

層は毎秒30ノット以下の弱い風となっている。断熱図では、状態曲線と湿潤断熱線の勾配がほぼ同じであり、垂直方向の気は比較的に安定な状態である。

航跡図は、直線に近い型を示している。このような型となっているのは、下層から上層の気圧が、一様に低気圧に向かって流れているためと考えられる。

6月26日の場合は、地上の気圧配置ホドグラフ、断熱図とも7月8日の場合と似たような気象であった。

航跡図も、似たようなパターンである(図11参照)。

(d) 11月21日, 12月3日の高層風

11月21日は、いぜんとして移動性高気圧の圏内にあり、晴れ間の多い天気であった。12月3日は、移動性高気圧にすっぽりおゝわれ、好天に恵まれた日であった。

ホドグラフを見ると、11月21日の場合は500mb面で毎秒76ノット、400mb面で毎秒101ノットもあり、冬の特徴ある高層風である。また、11月21日の垂直方向の気は、断熱図から安定であると言える。12月3日の高層気象は、データが入手できなかったので明らかでない。しかし、12月3日の場合も、11月21日の場合と同様に、上空に強い偏西風が吹いていることは、充分予想される。

航跡図の型は、両日ともよく似ており、二次曲線の型である。これは、下層の風が、かなり低い高度まで下がってきた強い偏西風の影響を受けるためと考えられる。いわゆる、地表の風が弱くても、少し上空では天上大風となっている、冬期の特徴ある航跡図のパターンであろう。

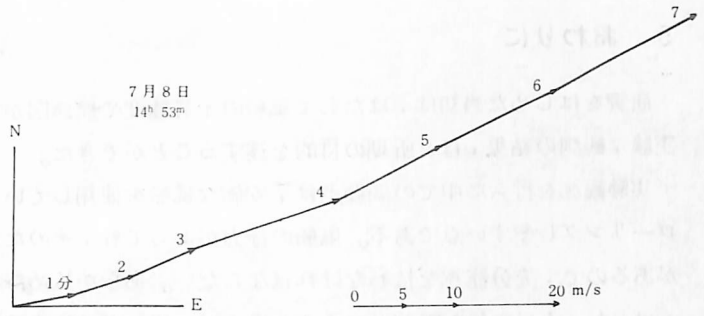


図10 7月8日の航跡図

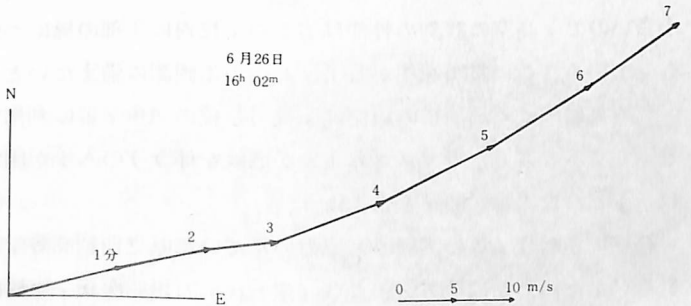


図11 6月26日の航跡図

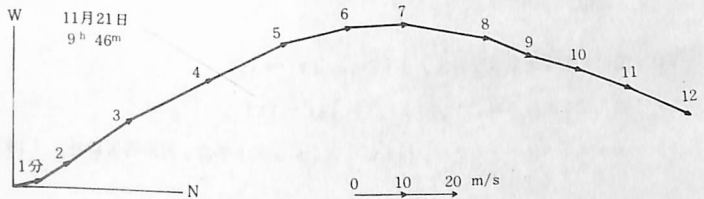


図12 11月21日の航跡図

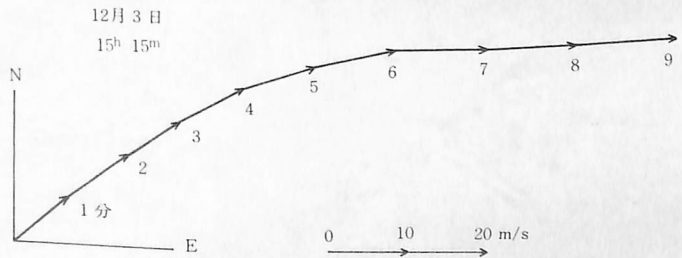


図13 12月3日の航跡図

5 おわりに

研究をはじめた当初は、はたして風船の上昇速度や航跡図が求まるかどうか、全く自信がなかったが、実験、観測の結果、ほぼ所期の目的を達することができた。

実験観測を行った中で問題点は、安価な風船を使用しているため、膨らませたとき正球にならず、ローリングしやすい点である。風船の浮力があっても、そのため計画通りの上昇速度が得られないことがあるので、充分注意を払わなければならない。あらかじめ浮力を計算し、それに見合った風船が作れれば、もっと計画的な観測ができると思うが、風船が破れやすいこと、正球になりにくいために、かなりの困難さがある。この研究で使用したゴム風船の上昇速度は、気象庁のパイボールよりもはるかに小さいので、高空の観測の性能は劣るが、反対に下部の風については、より細かな観測ができる特徴をもっている。この長所を生かして、今後の本観測に備えたいと考えている。

ゴム風船による高層風の観測は、高等学校の気象学習に利用できるものと考えられる。問題は、むしろヘリウムガス(水素ガスでもよいが危険を伴う)の入手が困難なことである。この点さえ解決されれば、手ごろな実験・観測と言えよう。

終りにあたり、この実験にご協力いただいた県立西越高等学校伊佐早晋先生、また、研究の資料と指針をいただいた新潟地方気象台草間宗三氏、石黒昭次氏、原稿について懇切にご指導くださった新潟地方気象台長理学博士根木 茂氏の諸氏には衷心より感謝申しあげる。

文 献

- 1) 岡田武松：気象学，岩波，(1941) 191～192
- 2) 平凡社：理科事典，4，(1953) 186～187
- 3) エルマー・R・ライター，松本誠一訳：ジェット気流，河出書房新社，(1970) 41～42