

上層における気温・風の観測

前田 憲一・竹屋 芳夫・松本 治弥・奥本 隆昭

1. 序

国際地球観測年 (IGY) に対して日本は 140° E の線で、世界の観測網の一環として上層大気諸現象を観測することになった。これは上層大気物理学 (Aeronomy) にとっては重要なことである。この学の対象とするところは主として電離層であり、またその付近に起こる地球物理学的現象 (極光、夜光、流星、宇宙線、太陽放射など) をも含んでいる。

地上 10~15 km を成層圏、その上 20~35 km をオゾン層と呼び、また通常 90 km 以上に E 層、F 層と呼ばれる電離層がある。電離層においては、地磁気変化の観測結果に対するダイナモ理論的解析によって、電離層内特に E 層において一定の系統的な風系の存在が仮定されている。また近年の地上からの電波観測によってもこの種風系が推論される。くわしい解析によれば、この風系は 24 時間周期および 12 時間周期をもっていることが認められている。

一方地上付近で認められる気圧変動 (これは風に直結している) において最も正規のものとしては 12 時間周期のものが実測上確立されており、他の周期のものはあまりはっきりしない。この理論で重要なのは大気温度の垂直分布であり、地上 20~30 km まではラジオ・ゾンデによる観測があるので、この範囲では信頼できる資料が得られている。

30 km 付近より約 90 km までは中間層と呼ばれ、現在までには確定した観測法はなかった。この層における風については、電離層およびラジオ・ゾンデの観測からの推定値のほかに大気の共鳴振動の理論があるに過ぎなかった。

われわれがロケット観測の一部として“音波伝播による上層の気温および風の測定”を行なう目的は、以上述べたように、この中間層の風を実際に観測して、従来の推定値が正しいかどうか、また、その季節的な変化はどうか、さらに進んでこの中間層の風系と電離層の風系との関連を究明することである。

ロケットによる上層の気温および風の測定法は種々ある。このうち、気温の測定は簡単な方法があるが、風の測定はかなり困難である。いま、風の測定法で知られているものを列挙すれば、

(a) ロケットに発音弾を搭載し、上層で発音し、その音波を地上で受音し、音波の伝播路を計算し、その結果

と伝播時間から風の垂直分布を導出する方法 (この方法は気温の垂直分布をも同時に導出できる)。

(b) 薄明にナトリウムを上層にて散布すれば、これが発光するから、これを地上より望遠鏡で観測し、この光の移動より風を算出する。

(c) 軽量の大きな風船を折り畳んで、ロケットで上層に打ち上げる。これに金属性の光沢を与えれば、薄明において光を反射するから (b) と同様の方法で風を算出できる。

(d) 多数の電波反射物を上層にて散布し、これをレーダにて追跡する。反射物は例えば、レーダ波長の 1/2 の長さの金属箔が用いられる。

われわれは気温も同時に導出され得る点と、その他種々の条件を考慮して (a) の方法を採用した。以下これについてくわしく述べる。

2. 測定原理

先に述べたように、(a) の方法では音の伝播路をくわしく計算する必要があるため、観測に当たっては、次の諸値をすることが必要である。すなわち

- 1) 発音弾の発音位置および発音時間
- 2) その音波が地上に達した時間
- 3) 音波の地上での入射角および方位角

このうち1)はロケットに対するレーダ追跡によって行なわれ、2)は地上に設けられた音源標定器によって行なわれる。3)を知るためには受音点は3個以上を必要とする。これは Gutenberg 氏が地上爆発を使用して風の分布を計算した方法の展開である。

(1) 地上におけるスネルの法則

(a) 受音点が水平面上にある場合 第1図に示すような座標 $O-x'y'z'$ を考える。O, A および B は三つの受音点である。ここで

$$\overline{OA} = S_x, \quad \overline{OB} = S_y,$$

とし、音波は平面波であると仮定すれば、 x' および y' 軸に沿った見かけの音速 $v_{x'}$ および $v_{y'}$ は

$$\left. \begin{aligned} v_{x'} &= W_{x'} + W_{y'} \tan \varphi + \frac{C}{\sin i \cdot \cos \varphi} \\ v_{y'} &= W_{y'} + W_{x'} \cot \varphi + \frac{C}{\sin i \cdot \sin \varphi} \end{aligned} \right\} (1)$$

となる。ここで $W_{x'}$ および $W_{y'}$ は地上における風の x' および y' 成分である。また、 i および φ はそれぞれ波面の入射角および方位角であり、 C は音速である。

音速は良く知られた式

$$C = \sqrt{\frac{r\dot{p}}{\rho}} = \sqrt{\frac{rR\theta}{m}} \quad (2)$$

で与えられる。ここで

p : 大気の圧力 ρ : 大気の密度 r : 比熱の比

R : ガス定数 m : 分子量

である。地上付近の空気組成に対しては (2) 式は

$$C^2 = (20.06)^2 \theta \quad (3)$$

となり θ は大気の温度を絶対温度で示したものである。

風の存在する場合の音波の通路を支配する法則は次式で表わされる。

$$\frac{C}{\sin i} + W_c = k_0 \quad (4)$$

この式は光学におけるスネルの法則と同様の意味をもっているのので、いまこれをスネルの法則と称することにする。ここで k_0 はスネルの定数であり、 W_c は波面法線方向の風の水平成分である。ここで座標を第 1 図に示すように、 x 軸が波面法線方向になるような $O-xyz$ に変換する。ただし xy 平面は水平とする。そうすれば、 W_c は

$$W_c = W_x = W_x' \cos \varphi + W_y' \sin \varphi \quad (5)$$

となる。しからば (1), (4) および (5) 式より

$$\left. \begin{aligned} k_0 &= v_x' \cos \varphi + v_y' \sin \varphi, \\ \tan \varphi &= \frac{v_x'}{v_y'}, \\ k_0 &= \frac{v_x' v_y'}{\sqrt{(v_x')^2 + (v_y')^2}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

となる。

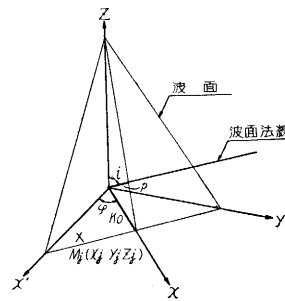
さらに受信点 O と A および O と B の間の音波到達時間差をそれぞれ Δt , Δt_B と書けば、(6) 式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{S_x' \cdot \Delta t_B}{S_y' \cdot \Delta t_A}, \\ k_0 &= \frac{S_x' \cdot S_y'}{\sqrt{(S_x' \cdot \Delta t_B)^2 + (S_y' \cdot \Delta t_A)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6) 式の右辺は地上において測定され得る値のみであるから、 k_0 および φ は求めることができる。

(b) 一般の場合 受信点の位置を $O-x'y'z'$ 座標において第 2 図に示すように $M_j(x_j, y_j, z_j)$ とし、 M_0 は原点 $O(0, 0, 0)$ であるとする。

いま、波面の方程式を



第 2 図

$$lx + my + nz = p \Delta \quad (8)$$

とおけば、各受信点においては次の関係が成立する。すなわち

$$\left. \begin{aligned} lx_j + my_j + nz_j &= p \Delta_j \\ [j &= 1, 2, 3] \\ l^2 + m^2 + n^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

である。ただし Δ_j は M_j と M_0 における音波の到達時間差、 (l, m, n) は波面法線方向の余弦である。また p は波面法線方向の音波の進行速度で、

$$p = C + lW_x' + mW_y' \quad (10)$$

で与えられる。

(9) 式より l を解けば

$$l = \frac{\begin{vmatrix} \Delta_1 & y_1 & z_1 \\ \Delta_2 & y_2 & z_2 \\ \Delta_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix}} p = \frac{|\Delta y z|}{|x y z|} p \quad (11)$$

同様に m と n は

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{|x \Delta z|}{|x y z|} p, \\ n &= \frac{|x y \Delta|}{|x y z|} p \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

となる。ここでわれわれに必要なのは k_0 と φ であるから、(11), (12) 式よりこれらを求めれば

$$\left. \begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{m}{l} = \frac{|x \Delta z|}{|\Delta y z|}, \\ k_0 &= \frac{C}{\sin i} + W_x = \frac{C + lW_x' + mW_y'}{\sqrt{1-n^2}} = \frac{p}{\sqrt{l^2 + m^2}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。 k_0 はさらに変形すれば

$$k_0^2 = \frac{|xyz|^2}{|\Delta yz|^2 + |x\Delta z|^2} \quad (14)$$

となる。

(c) 多くの受信点を持つ場合 (b) の場合には理論的には 4 個の受信点で良いが、これはあくまで波面が平面と仮定した場合であって、実際には空気移動の不規則性のため、上の仮定が成立しない。この場合には 4 個以上の受信点をおき、最小二乗法を用いて計算をすることができる。(11) 式に対応して、

$$l = \frac{\begin{vmatrix} \sum x_j \Delta_j & \sum x_j y_j & \sum x_j z_j \\ \sum y_j \Delta_j & \sum y_j^2 & \sum y_j z_j \\ \sum z_j \Delta_j & \sum y_j z_j & \sum z_j^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum x_j^2 & \sum x_j y_j & \sum x_j z_j \\ \sum x_j y_j & \sum y_j^2 & \sum x_j y_j \\ \sum x_j z_j & \sum y_j z_j & \sum z_j^2 \end{vmatrix}} p = \frac{|\sum \Delta x \sum xy \sum xz|}{|\sum x^2 \sum xy \sum xz|} p \quad (15)$$

同様に m と n は (15) 式の表現を用いて

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{|\Sigma x^2 \Sigma x\Delta \Sigma xz|}{|\Sigma x^2 \Sigma xy \Sigma xz|} p, \\ n &= \frac{|\Sigma x^2 \Sigma xy \Sigma x\Delta|}{|\Sigma x^2 \Sigma xy \Sigma xz|} p \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

となる。したがって φ と k_0 は

$$\left. \begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{|\Sigma x^2 \Sigma \Delta x \Sigma xz|}{|\Sigma \Delta x \Sigma xy \Sigma xz|}, \\ k_0^2 &= \frac{|\Sigma x^2 \Sigma xy \Sigma xz|^2}{|\Sigma \Delta x \Sigma xy \Sigma xz|^2 + |\Sigma x^2 \Sigma x\Delta \Sigma xz|^2}. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

(2) 音波の伝播路の方程式

前節に述べたように、 x 軸は波面法線の方向であり、 z 軸は高さの方向である。もし発音点 $G(x, y, z)$ から出た音波が M_0 すなわち $O(0, 0, 0)$ に到達したとすれば、一般に次の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} X &= \int_0^z \tan \theta \, dz = \int_0^z \frac{C \sin i + W_x}{C \cos i} \cdot dz, \\ Y &= \int_0^z W_y \, dz = \int_0^z \frac{W_y}{C \cos i} \cdot dz, \\ z &= \int_0^z dz. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここで θ は第1図に示す角である。また W_x は風の y 分力であって z 方向の風の分力はないものと考えている。

また、 T を G から O までの音波の伝播時間とすれば、

$$T = \int_0^z dt = \int_0^z \frac{1}{C \cos i} \cdot dz \quad (19)$$

となる。

(a) 風速および温度が一定の場合 風速および温度が高さに対して一定であると仮定する。これは例えば (18), (19) 式の計算で粗い近似をする場合、すなわちその一定値が考えている範囲での平均値を用いるような場合である。

この時

$$\left. \begin{aligned} C^2 &= \xi, \\ W_x &= \eta, \\ W_y &= \zeta \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

と置けば、(18), (19) 式は

$$\left. \begin{aligned} X &= \frac{\xi + k_0 \eta - \eta^2}{\sqrt{\xi} \sqrt{(k_0 - \eta)^2 - \xi}} \cdot z, \\ Y &= \frac{(k_0 - \eta) \zeta}{\sqrt{\xi} \sqrt{(k_0 - \eta)^2 - \xi}} \cdot z, \\ T &= \frac{(k_0 - \eta)}{\sqrt{\xi} \sqrt{(k_0 - \eta)^2 - \xi}} \cdot z \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

となる。

もし ξ, η, ζ が未知であり、 X, Y, Z, T が既知である場合には次の式が便利である。

$$\left. \begin{aligned} X &= CT \sin i + W_x T = (\sqrt{\xi} \sin i + \eta) T, \\ Y &= W_y T = \zeta \cdot T, \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} Z &= CT \cos i = \sqrt{\xi} \cos i \cdot T. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

(b) 風速および温度が二次式の分布をする場合 音源が十分多く、かつ高さに対して等間隔に存在している場合には (a) の一定値である場合でも十分近い近似値が得られるが、そうでなくただか二、三個の場合には、さらに温度および風速の高さに対する式を高次にしなければならない。この場合分布の式を次のように仮定する。

$$\left. \begin{aligned} C^2 &= a_0 + a_1 z + \xi z^2, \\ W_x &= b_0 + b_1 z + \eta z^2, \\ W_y &= c_0 + c_1 z + \zeta z^2. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

ここで $a_0, a_1, b_0, b_1, c_0, c_1$ は次節で述べるように既知であるとする。(23) 式を用いると (18), (19) 式は

$$\left. \begin{aligned} X &= \int_0^z \frac{(a_0 + k_0 b_0 - b_0^2) + (a_1 + k_0 b_1 - 2b_0 b_1)z + (\xi + k_0 \eta - 2b_0 \eta - b_1^2)z^2 - b_1 \eta z^3 - \eta^2 z^4}{S} dz, \\ Y &= \int_0^z \frac{(k_0 - b_0)c_0 + [(k_0 - b_0)c_1 - b_1 c_0]z + [(k_0 - b_0)\xi - c_0 \eta - b_1 c_1]z^2 - (b_1 \xi + c_1 \eta)z^3 - \eta \xi z^4}{S} dz, \\ T &= \int_0^z \frac{(k_0 - b_0) - b_1 z - \eta z^2}{S} dz \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

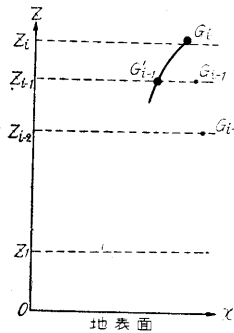
ここで

$$\begin{aligned} S &= (a_0 + a_1 z + \xi z^2)^{1/2} \left[(k_0 - b_0)^2 - a_0 \right. \\ &\quad \left. - \{2(k_0 - b_0)b_1 + a_1\}z + \{2(k_0 - b_0)\eta \right. \\ &\quad \left. + \xi - b_1^2\}z^2 - 2b_1 \eta z^3 + \eta^2 z^4 \right]^{1/2} \end{aligned}$$

である。

(24) 式は超楕円積分であるが、アナログ電子計算機の助けを借り、数値積分法を用いれば、積分の値を求めることができる。

(3) 風速および気温の計算



第3図

第3図に示すように音源を $G_i(X_i, Y_i, Z_i), [i=1, 2, \dots]$ と表わすことにする。また $z_{i-1} \leq z \leq z_i$ なる高さの範囲を S_i 層と定義する。

いま、 S_1, S_2, \dots, S_{i-1} 層の風速、温度の分布は分っているものとし、 S_i 層のそれは分っていないとしてこれを計算する。 S_i 層の

諸量には指数 i をつけることにする。そうすれば S_i 層における (23) 式は

$$\left. \begin{aligned} C^2 &= a_0 + a_1(z - z_{i-1}) + \xi(z - z_{i-1})^2, \\ W_x &= b_0 + b_1(z - z_{i-1}) + \eta(z - z_{i-1})^2, \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$W_y = c_{0i} + c_{1i}(z - z_{i-1}) + \zeta(z - z_{i-1})^2$$

となる。この場合 (25) 式の第 1 項は S_{i-1} 層の諸量によって与えられる。すなわち分布が連続であるという条件から

$$\left. \begin{aligned} a_{0i} &= C^2(z_{i-1}), \\ b_{0i} &= W_x(z_{i-1}), \\ c_{0i} &= W_y(z_{i-1}), \\ k_{0i} &= k_0. \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

さらに、 $G'_{i-1}(X'_{i-1}, Y'_{i-1}, Z'_{i-1})$ を G から O に至る音波の伝播路中 z_{i-1} における位置とし T'_{i-1} を G'_{i-1} から O に至る音波の伝播時間とする。

ここで 2-(2)-(b) の場合、 S_i 層と S_{i-1} 層の境界 (z_{i-1}) における気温と風速の微係数がそれぞれ連続であると仮定する。すなわち

$$\left[\frac{\partial i_{i-1}}{\partial z} \right]_{z=z_{i-1}} = \left[\frac{\partial i_i}{\partial z} \right]_{z=z_{i-1}} \quad (27)$$

しからはば

$$\left. \begin{aligned} a_{1i} &= a_{1(i-1)} + 2a_{2(i-1)} \cdot (z_{i-1} - z_{i-2}), \\ b_{1i} &= b_{1(i-1)} + 2b_{2(i-1)} \cdot (z_{i-1} - z_{i-2}), \\ c_{1i} &= c_{1(i-1)} + 2c_{2(i-1)} \cdot (z_{i-1} - z_{i-2}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

となる。(26), (28) 式を用いて, (18), (19) 式は次のように ξ, η, ζ の関数になる。

この場合積分の下限は z_{i-1} である。

$$\left. \begin{aligned} X_i - X'_{i-1} &= X(\xi, \eta), \\ Y_i - Y'_{i-1} &= Y(\xi, \eta, \zeta), \\ Z_i - Z'_{i-1} &= Z, \\ T_i - T'_{i-1} &= T(\xi, \eta). \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

2-(2)-(a) および (b) のおのおの場合, (29) 式によって ξ, η および ζ は連立的に解くことができ、一意的に定められる。

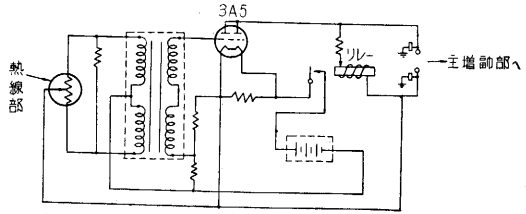
したがって S_i 層内の風速と音速の分布は (20) あるいは (25) 式によって決定されることになる。また温度は音速から (3) 式によって決定される。

実際に実験を行なう場合にはラジオ・ゾンデにより測定しうる範囲内はこれを用いて測定し、それを S_i 層内の値として順次上層の諸量を上式により計算することになる。この場合 S_i 層内の計算には (21) 式を用いて、数値積分を行なうことができる。

3. 測定装置

本実験においては、音源となるべき発音弾およびその付属装置と地上における受信装置が必要であるがロケットに搭載する発音弾およびその付属部分は他の稿にゆだねここでは地上の受信装置についてのみ述べる。

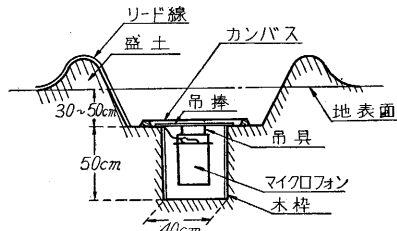
受信装置は音源標定器と呼ばれる低周波マイクロフォンを持った測音器の一種である。それはマイクロフォン、増幅器、記録器、電源およびその他より成っている。この受信装置は現在 2 台を併用しているが、細部では少々異なるので以下異なる部分だけは分けて 1 号器、2 号器として説明をする。



第 4 図

(1) マイクロフォン

マイクロフォンは 4~60 サイクルの通過域をもつ金属製の空洞と、この空洞の口に、60 および 25 サイクルの低域音響フィルタをそなえた熱線マイクロフォンであって、その回路を第 4 図に示す。図中 3A5 はプリアンプであって平衡出力を出すための負荷すなわちプレート抵抗およびカソードの抵抗は主増幅部につけられている。これは後に述べるように受信点と増幅部が離れているため、リード線の短絡による電源事故の防止の意味である。



第 5 図

このマイクロフォンは第 5 図に示すように地上に掘られた穴の中に吊られ、ビニロン厚手帆布の蓋を持っている。これは雑音を防ぐためであるが、Stroud 氏による広口の穴についても実験中であり、TW 6 号機、同 7 号機の実験において一部用いたがその効果については目下検討中である。

第 1 表 増幅部減衰器表

1 号器		2 号器	
減衰器番号	減衰度 (-db)	減衰器番号	減衰度 (-db)
1	48.4	1	60
2	42.0	2	49.6
3	38.2	3	40.2
4	36.0	4	31.7
5	31.4	5	24.3
6	28.1	6	17.8
7	24.8	7	12.4
8	23.2	8	7.9
9	22.0	9	4.5
10	18.4	10	2.0
11	15.8	11	0.7
12	12.2	12	0
13	5.2		
14	2.6		
15	1		
16	0		

(2) 増幅器

増幅部は上述の 3A5 プリアンプの次に続いて 3A4 プッシュ・プル 2 段 (1, 2 号器) および 6A Q5 プッシュ・プル 1 段 (2 号器) による平衡出力を記録器に直結している。

プリアンプとアンプとの間に減衰器があり、その減

衰度は第 1 表の通りである。これは雑音の多い時に減衰を効かせれば記録が読み易くなるからである。

第2表 記録器の諸元

	1号器	2号器
素子数	6チャンネル	6チャンネル
(時間目盛用素子)	2チャンネル	2チャンネル
内部抵抗	7KΩ	3KΩ
最大入力電流	4mA	30mA以上
最大振レ	±14mm(クリップ)	±30mm以上
紙送り速度	15~6cm/sec (連続可変)	12.5.5.1cm
最大記録紙長サ	45m/巻	40m/巻

1号器, 2号器とも6チャンネルである。

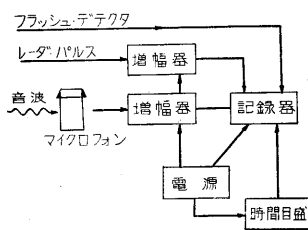
(3) 記録器

記録器はともにペンオシログラフであるが1号器は放電記録であり, 2号器は三栄測器製インク書きであって, その定格は第2表の通りである。ただし発音時間によって受音の所用時間がだいたい計算できるので2号器の方は一卷約65mのものを使用したことがある。

(4) 電源

電源は携帯用に設計したため, 電池12ボルトを用いている。増幅器の+B電源は115サイクルのバイブレータによる同期整流を用いて300ボルトにしている。

(5) その他



第6図

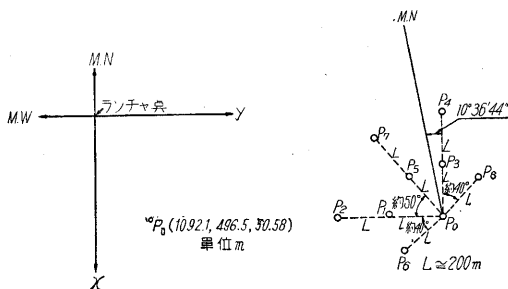
1号器に0.01sec, 0.1secの音叉時間目盛を持ち, このうち0.1secは増幅して2号器にも用いている。なお受音時間の精度を増すため, TW5号機よりロケット発射時より送信される0.1secのレーダ・パルスを有線で伝送し増幅して2号器に用いている。

以上のまとめとして, 全体のブロック・ダイアグラムを第6図に示す。

4. 受音点

受音点とはマイクロフォンを設置する場所であって, 2-(2)-(b)において述べたように一般には多くの点のある方が精度が上がることは容易に知られることである。

したがって可能な限り受音点を多く設置することにしTW1~4号機においては7点, TW5号機以後は9点の受音点を設置した。その位置は第7図 $P_0 \sim P_8$ に示す



第7図

通りロケット・ランチャー東南の通称春の丘付近の海岸に向かってゆるやかな傾斜をもつ斜面に約200mの間隔を置いてとった。初め第7図で $\angle P_1 P_0 P_3$ を 90° にとり, これを基本として 40° 回転した別の座標系を得るようにとったところ, 丸安教授による再測定の結果, 間隔, 角度とも若干の相違のあることがわかり, 現在はその結果を用いている。

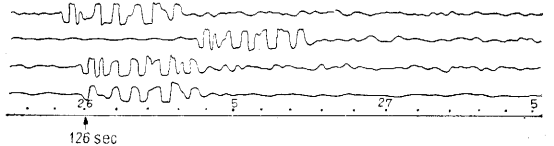
5. 予備実験

(1) 音源標定器受音実験

1957年4月28日にだいたい P_0 の位置付近で受音し約42km離れた男鹿半島潮瀬岬北方63.4m高さの丘で発音弾を爆発させた。これは発音弾の薬量を定めることと, 音源標定器の性能を調べるために行なわれた。

第3表 32, 4, 28 実験記録

番号	時刻	薬量	フィルタ	減衰器番号 (1号器)	結果	受音時間	備考
1	13時2分	1kg	60~	16	良	125.8秒	
2	14時10分	1kg	60~	16	良	125.9秒	
3	14時33分	1kg	60~	16 チャンネル4のみ	良	126.1秒	
4	14時50分	1kg	25~ 60~	16 12 10	良 かなり小 不感	126.0秒	波形なまる



第8図

その結果は第3表の通りであり, また一部記録を第8図に示す。第3表によって平均音速を計算すれば約333m/secとなる。この結果1kg以下の薬量で十分であることが分った。

(2) 150G 実験

150Gロケットは1958年5月27日12時45分発射された。実験においては高さによる減衰および音波の到達状況を実測する基礎実験を目的とし, $P_0 P_1 P_3 P_5$ の4

第4表 150G 実験における記録

発音時刻	30.4秒
P_0 の受音時刻	59.12秒
設置マイクロフォン数	4
受音マイクロフォン数	4
感度	良

個の受音点で測定を行なった。以下記録を第4表に示す。

この記録から, 秋田測候所のラジオ・ゾンデによる記録を基にして発音点の位置を求めたところ, レーダ追跡による爆発の位置と完全な一致には至らなかったので本番実験ではマイクロフォンの個数を増加することにした。

なお減衰は, 理論的には

$$I_n(E_2/E_1) = -0.0013 e^{-\frac{x}{L^2}}$$

第5表

高さ(km)	0	60	70	80	85
音圧振幅比 (減衰度)	15~	1.52	2.05	2.81	7.51
	20~	1.59	2.60	6.66	20.8

第 6 表 本番観測実験記録

ロケット番号	ロケット発射時刻	レーダによる発音時刻	P ₀ の受音時間	設置マイクロフォン数	受音マイクロフォン数	フラッシュ・デテクタ	備 考
TW-1	1958年6月24日10時50分			7 (P ₀ 2個 P ₁ ~P ₆)	0		約20秒にて爆発
TW-2	1958年6月30日16時52分	約 85 秒	229.71秒	7 (同 上)	6		約29秒にてレーダ消失
TW-3	1958年9月25日11時55分	約 100 秒	279.94 "	7 (同 上)	7		約29.5秒にてレーダ消失
TW-4	1958年9月26日12時50分	99.8秒	298.91 "	7 (同 上)	7		
TW-5	1958年12月23日12時3分	G ₁ 58 秒	200.10 "	10 (P ₀ 2個, P ₁ ~P ₈)	8		
G ₂ 123 秒		341.77 "					
TW-6	1959年3月18日11時45分	G ₁ 41.7秒	169.72 "	10 (同 上)	0	50.84 秒	} 2号機記録器故障 1部記録欠損
		G ₂ 50.6秒			5		
		G ₃ 61.4秒			0		
		G ₄ 75.2秒			5		
G ₅ 103.6秒	10	103.80 "					
TW-7	1959年3月20日11時52分	G ₁ 42.2秒	139.37 "	10 (同 上)	10	曇天のため雑音多くデータとして読み得ない。	} 2号機記録器故障 1部記録欠損
		G ₂ 51.0秒	168.82 "		10		
		G ₃ 62.0秒	200.90 "		5		
		G ₄ 75.65秒	235.20 "		5		
		G ₅ 104.0秒	290.28 "		10		

表中の G とは発音弾 (grenade) の略である。

TW-6, 7 においてはレーダによる発音時刻は発音弾の放出時刻である。

ただし, L: 音波の波長

E_1, E_2 : 高さ z km 離れた点の音波のエネルギーで与えられるから実際二, 三の例を示して見れば第 5 表のようになり現在の受音機器では 1 kg で 80 km 程度までは測定可能であることが計算された。

6. 本番観測の測定記録とその処理方法

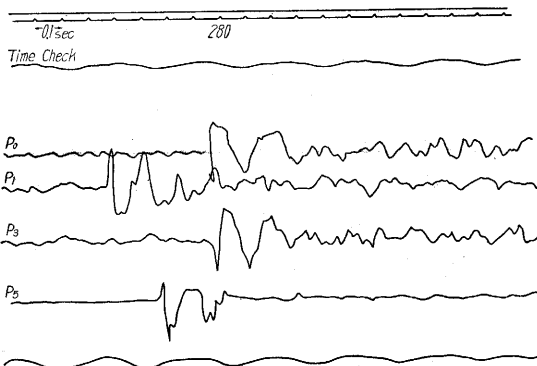
(1) 受音記録

現在までに実験された気温, 風の観測 (略して TW) ロケットは全部で 7 機であるが, その受音結果は第 6 表に示す通りである。なお先にも述べたように発音点の位置および時刻はレーダによって知られるので, その成否も合わせて記しておいた。さらに, TW 6 号機より発音弾 5 発のため, 赤外線フラッシュ・デテクタを用いて発音時間を知るようにし, その出力は 2 号器の記録器に直接入るよう設計された。これは晴天に行なわれた TW 6 号機実験では, きわめてすぐれた性能を発揮した。TW 7 号機では曇天のため地上よりの反射, その他によるため

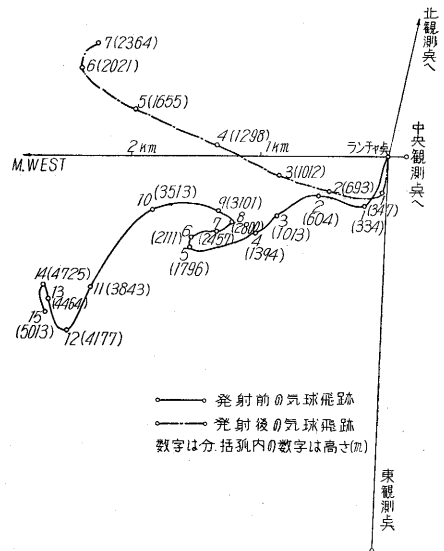
か雑音が多く, 測光は失敗した。なお記録の 1 例として, TW 3 号機実験の記録の 1 部を第 9 図に示す。

(2) その他の必要な記録について

(a) ロケット飛しょうにともなって, 実験場付近の風向を知る必要から, 発射時刻 20 分前と 20 分後に水素気球が上げられ, 光学観測班によってその飛跡が測定される。大体晴天の日で 15 分程度 (約 5 km) 追跡できる。その 1 例を示せば第 10 図のごとくである。



第 9 図



第 10 図

(b) 受音点付近に温度計および風向風速計を設け, 発射時刻の前後に 5 分おきに測定している。

(c) ラジオ・ゾンデによる観測は, 気温・風の実験の日には, 3時, 9時, 15時, 21時の4回秋田気象台によって行なわれる。

(3) 記録処理

(a) k_0 および φ の計算 第2章で述べたように、温度および風の計算式に必要な量は k_0 と φ である。われわれの実験では第2図 x' 軸に対応するものを第7図に示した $\overrightarrow{P_0P_0}$ にとり原点 O を P_0 とした。そして $P_1 \sim P_6$ の位置をこの座標系の座標で示し、これを (x_j, y_j, z_j) としている。

また受音記録から Δ_j は読むことができるが、これは非常に正確になされねばならない。われわれは2台の記録器を使用している関係上原点 O (P_0) の受音点にはおのおのの記録器が独立に測定できるよう2個のマイクロフォンを入れており、時間目盛と比較して測定の精度を上げるようにしている。 Δ_j は現在 0.001 秒まで正確に読取ができる。

以上の数値を用いて(17)式より k_0 , φ を計算する。また ρ の値も計算しているが、これは上記の計算結果のチェックのためである。

(b) S_1 層における記録に対する諸計算 第2章で述べたように、6-(2)-(c) のラジオ・ゾンデの観測記録のある高さまでを S_1 層とする。この記録は風については 0.5~1 km ごとであるが、気温については気圧を基準にしてなされているので高さに対しては等間隔ではない。われわれは後に述べるように数値積分を行なうので、計算の便宜上風の記録のある高さの気温を得るため、気温の分布が直線であると仮定して内挿法によってこれを求めた。

さて、地上数 km 以上の所用数値は、道川実験場上空における値も秋田における値も変化はないものとして、秋田气象台により得られた上記のゾンデ記録を用いるが地上より数 km 高さまでは風向、風速が第10図にも示すように、時間によって相当変化するののでできる限り現地における観測に主体をおき 6-(2)-(a) の放球の追跡記録を用いることにした。なおこれも高さに対して等間隔の記録を要するため面積平均の方法でこれを求めるようにした。

6-(3)-(a) にて φ が求まっているからわれわれの計算に対する座標 $O-xyz$ によって以上の結果から風の成分 W_x , W_y を計算する。これは例えば x 成分については、 x 軸の正の方向から負方向に向かって吹く風を正とする。

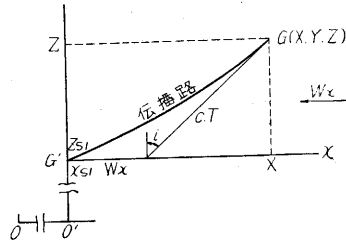
以上の計算は先に述べたゾンデの定時観測、あるいは気球の追跡の記録のおのおのに対してであってこれはロケット発射の時刻とは一致していないので、ロケット発射の前後の記録より、ゾンデまたは気球の上昇速度をも考慮して内挿法により発射時の所要量を推定する。

以上で S_1 層の (20) 式に対する ξ , η , ζ の値が求められる。

(c) S_1 層における伝播路の計算 以上の値を用いて (21) 式により伝播路を計算するが、それは Simpson 氏

の公式を用いて、数値積分を行なう。その結果を $(X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1}, T_{s1})$ とする。

(d) S_2 層における計算 S_1 層の上、一番低い発音弾 G_1 の発音高さまでを S_2 層とする。そうすれば G_1 の位置はレーダ観測によって分っているので、この位置を (X_{s1}, Y_{s1}, Z_{s1}) を原点とした $O-xyz$ に平行な座標系の座標で示しこれを (X, Y, Z, T) とする。



第11図

ようにする。第11図を参照すれば、(14), (22)式を用いることにより、

$$\sin 2i = \frac{2z}{T(k_0 - W_x)}$$

および

$$W_x = (X - Z \tan i) / T$$

が得られるから、これから W_x および i を求めることができる。また C および W_y は

$$C = Z / T \cdot \cos i, \quad W_y = Y / T$$

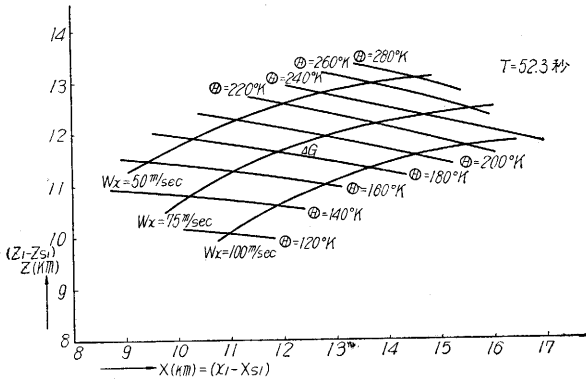
によって与えられる。

S_2 層の上、次の発音弾の位置までを S_3 層とすれば、 $S_1 + S_2$ 層を S_1 層と考えることにより同様の計算によって求められる。

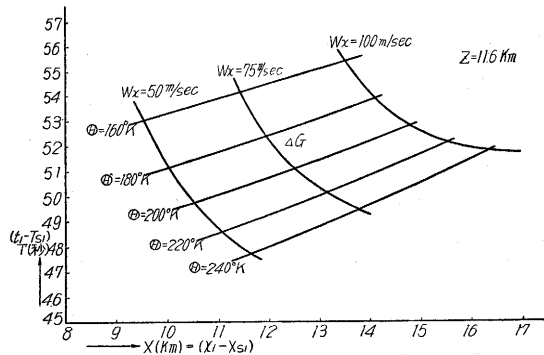
以上で平均値による計算法を述べたが、この結果からさらに、風および気温の垂直分布が一次式で示された場合について、その分布を示す式に対する推定を面積平均が先の結果と等しくなるように行なうことができる。またその結果を利用してさらに二次式の近似を同様に行なうことができる。実際に、この二次式による分布を行なうときには S_1 層における記録からは最小二乗法により、 S_1 層における分布の式を求めるが、この場合、大体地上より 15~20 km を一つの式で、それ以上 S_1 層の上限までを他の一つの式で求めた方がより正確な分布を得るように思われる。

伝播路を求めるには (24) 式を用いるが、この計算は、数値積分による。数値積分の分割の数による誤差は 100 分割と 50 分割では 1% 以内の差、50 分割と 25 分割では 1~2% の差である。

(e) TW 3号機実験の計算結果 以上の計算操作によって、TW 3号機実験の計算を行なったが、この結果は意外に低い平均温度および大きな風速を得た。そこでわれわれはこれについて検討を行なうため、平均温度をいろいろ変化させ、また風向、風速をいろいろ仮定した場合爆発点がどのような位置にならねばならないかを計算し



第 12 図 (a)



第 12 図 (b)

た。その結果を第 12 (a), (b) 図に示す。第 12 図 (a) は音波の伝播時間を実験における同一にとって高さ z と x 方向の距離との関係を示し、同 (b) は爆発の高さが実験と一致するとして音波の伝播時間と x 方向の距離との関係を示したものである。両図とも ΔG の点が爆発のレーダによる測定位置である。この範囲内の平均温度は現在標準として認められている温度と高度との曲線から求めると、 245°K 程度であるので、われわれの結果はなほだしく低いことがわかる。これについてはわれわれは丸安教授の受音点の再測定の結果を用い、さらに他の点をも検討しながら再計算を行ないつつあるので、この結果をまっけて詳細に再検討してみたいと考えている。

7. 結 言

以上でロケットによる風・気温の測定法に関して、その意義、理論、測定装置等を述べ、かつ昨年度行なわれた観測についての簡単な報告をし、あわせて具体的にその記録から風および気温の分布を求める方法および経過ならびに一部の計算結果を示した。

以上の実験中においてわれわれは不備な点を発見し、その改良に全力をあげて来たが、特に受音点の穴の構造に関しては研究の余地がある。これは最近アメリカで高

さ 90 km を越えた位置からの音を受音するに至っているが、その主な点は穴の構造の改良による S/N 比の増大によるものと見られる点からも明らかなようである。

また、発音弾の爆発位置およびその時間の測定については、その精度を上げることが必要である。時間については赤外線フラッシュ・デテクタの使用により精度をあげることができたが、位置の測定についてはまだ不十分な点が多いように思われる。米国等における実験においては数 m の精度で測定を行なっているので、われわれの場合もこの程度に精度を上げることが急務であると考えられる。また測定点については、この間隔を離せば大気の不規則性による誤差が増加し、間隔を狭めれば時間測定の誤差が増加する。このいずれの方法を採用した方がより有効であろうか。また第 7 図に示すような受音点群を数ヶ所設置して、そのおのおのによって独立に所要量を求めることができるようにしたいとも考えている。

このようにすれば、それぞれによる計算結果を互いに比較検討することができることになり、観測の信頼度を上昇させることができると思う。

さらにまた、序で述べたように、発音弾を用いる方法のほか種々の風の測定法が考えられているが、これらの方法についても検討し、あわせて実験できるよう努力をして行きたいと思う。

風の測定は、現在のところロケットで直接測定することができないので、その測定は安易ではないが、これについての新しい観測技術を開拓して行く方針である。

終りに当り本実験に対していろいろご協力いただいた秋田気象台、海上保安庁秋田海上保安部、本庄警察署および地元道川の方々、また実験装置を貸与していただいた防衛庁陸上幕僚本部第 4 部土屋正夫氏、およびカンパスを提供していただいた倉敷レイヨン株式会社のご厚意に対し感謝の微意をささげたいと思う。(1959. 5. 11)

文 献

- 1) 前田：科学 (岩波)、1月号、第 27 卷、昭和 32 年。
- 2) 竹屋、奥本：電気四学会連合大会講演論文集、p. 793、昭和 33 年 5 月。
- 3) 同 上：電気関係学会関西支部連合大会講演論文集、p. 38~39、昭和 33 年 10 月。
- 4) Takeya, Y. & Okumoto, T.: J.G.G. vol. 10, No. 3 1959.
- 5) Stroud, W.G., Bandeen, W.R. Nordberg, W.: IGY World Data Center A (Rocket and Satellites), p. 58, 1958.