# 第6章 日射ゾンデ\*

気象研究所における「中層大気の研究」の一環として、中層大気の放射収支を把握する目的で、 次章に述べる放射ゾンテによる赤外放射フラックスの高度分布の測定とともに、日射フラックスの 高度分布の測定を昭和57年度から昭和59年度にかけての3ヶ年間おこなった。以下でその結果をの べる。最初に日射ゾンデの構造および、その器械常数の決定について述べる。

### 6.1 日射ゾンデの構造および器械定数の決定

日射ゾンデの外観図を図6.1に示す。日射ゾンデは上向きおよび下向き水平面日射フラックスを



図 6.1 日射ゾンデの構造

測定するセンサー部,送信部および気温センサー等付属センサーより成る。センサーは、英弘精機 製のネオ日射計を軽量化したものを用いた。各センサーの受感面は黒および白の面から成り、その

\* 嘉納宗靖、柴田裕司、鈴木正:元高層物理研究部、宮内正厚:気象庁海洋気象部、八尾孝、青木忠生、 水野芳成、青木輝夫:高層物理研究部 大きさは直径約5 cmである(図 6.1 参照)。 入射した日射によって、黒白の面の間に熱起電力が発生し、これによる電圧が周波数に変換されて地上へ送信される。このようにして送信された周波数は、地上でF-V変換器によって電圧に変換される。更に、この電圧に器械定数を乗ずることによって、各高度の上向きおよび下向き日射フラックスが得られる。

上述の日射ゾンデ受感面に発生した電圧を日射量に変換する変換係数すなわち器械定数は、水平 面日射計の検定と同様にして次のようにおこなう。雲のない快晴の日を選び、直達日射計による直 達日射の測定と、日射ゾンデによる水平面日射の測定を同時におこなう。直達日射の測定値を *I*<sub>0</sub>、 そのときの太陽高度を*h*、日射ゾンデに生じた電圧を*V*、さらに日射ゾンデに直達日射が当たらな いようにしたときの電圧を*V*′とすると、器械定数kは次式で与えられる。

 $I_0 \sin(h) = k (V - V')$ 

(6.1)

このようにして各日射ゾンデの器械定数を決定した。

### 6.2 日射ゾンデの揺れの補正

日射ゾンデの測定で最も厄介な問題は、日射ゾンデの揺れに基づく誤差である(嘉納他1973、 1978)。下向き日射フラックスはその大部分が直達日射に基づくものである。このため、太陽光の方 向と日射ゾンデ受感面の法線とのなす角がゾンデの揺れによって変化すると、それに伴って、下向 き日射フラックスの測定値がかなり変動する。そこで、この揺れによる変動を補正することが測定 上非常に重要となる。一方、上向き日射フラックスは、次章で述べる放射ゾンデの場合と同様に、 快晴の場合にはあらゆる方向からほぼ同程度で入射するので、ゾンデの揺れの影響は殆どない。そ れ故、ゾンデの揺れの影響は下向き日射フラックスの測定の場合に限られる。次にこの揺れによる 下向き日射フラックス測定値の変動を補正する方法を述べる。

バルーンから吊り下げられたセンサーは緩かに円を描きながら上昇する。バルーンからセンサー までの吊り糸の長さは約50mで、円運動の周期は平均して12~16秒くらいである。実験は冬期に行 われたのでバルーンが日射をさえぎり、センサーがバルーンの陰に入ることはまず起こらない。

(1) バルーンが水平面内を等速円運動をしていると仮定したとき

バルーンと太陽の位置関係等を図 6.2 のように定める。1回転したときの日射の計測値の最大を  $I_{max}$ 、最小を  $I_{min}$  とし、これからセンサーの傾きを求める。太陽、およびセンサーの法線の方 位角を $\phi$ 、 $\phi$ ・両者のなす角度を $\theta$ ・とすれば、センサー面での日射量 I は

 $I = I_0 \cos \theta$ '

 $= I_0 \left( \sin \theta \sin \phi \sin \zeta \sin \phi' + \sin \theta \cos \phi \sin \zeta \cos \phi' + \cos \theta \cos \zeta \right)$ 

 $= I_{\theta} (\sin \theta \sin \zeta \cos (\phi - \phi') + \cos \theta \cos \zeta)$ 

(6.1)



## 図 6.2 センサー面と太陽の位置関係 (b)

で与えられる。ここで $\theta$ は太陽の天頂距離 (= $\frac{1}{2}\pi - h$ ),  $\zeta$ はセンサー面の水平面から傾きである。 *I* が最大になるのは  $\phi = \phi'$  のときだから

$$I_{max} = I_0 \cos\theta \cos\zeta + \sin\theta \sin\zeta$$
  
=  $I_0 \cos(\theta - \zeta)$  (6.2)

$$I_{min} = I_0 \cos\left(\theta + \zeta\right) \tag{6.3}$$

(6.1)、(6.2)から

$$\tan \zeta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \frac{1}{\tan \theta}$$
(6.4)

このように求めたくを使って、水平面日射量は

$$I_h = I_0 \cos\theta = \frac{I_{max} + I_{min}}{2\cos\zeta} \tag{6.5}$$

として計算できる。

実は、その値は Imax 、 Imin でなくても(6.1)を使って任意の観測値から計算できる。等速 円運動を仮定し、半周するのに要する時間、すなわち Imax から Imin を観測するのに要する時

-117 -

間を T。秒とする。1秒間に10回の観測を行うので

$$\delta = \frac{\pi}{10 T_0} \tag{6.6}$$

なる角度毎に観測を行っていることになる。  $T_0$  は 8 秒くらいのオーダーなので、  $I_{max}$  と  $I_{min}$ は図 6.-2 (b)のようにほぼ直線上の方向にあると近似できる。すると  $I_{max}$  からn 番目の観測、  $I_{max+n}$  と  $I_{min}$ よりn 番前の観測、  $I_{min-n}$  を使うと

$$I_{max+n} + I_{min-n} = 2 I_0 \cos \theta \cos \zeta \equiv P_n$$

$$I_{max+n} + I_{min-n} = 2 I_0 \cos \theta \cos \zeta \cos \delta \equiv Q_n$$
(6.7)

より

$$\tan \zeta_n = \frac{Q_n}{P_n} \frac{1}{\tan \theta \cos n\delta}$$
(6.8)

として別なζの値が得られる。

実際にはこのようにして計570個のnに対して求めた水平面日射量の平均値を採用した。なおこのときくの平均や分散も計算した。

これらの高度別水平面日射量を図 6.3 に示す。なおこのときのバルーンの高度は、半回転すると



きの中央の時刻の気圧を採用した。個々の観測値のばらつきは非常に大きい。しかし地上から700 mb くらいまでは、日射量は急速に増加し、以後500 mbまで、次第に増加はゆるやかとなり、更 に100 mb まで増加傾向は続いている。しかしそれ以後は反対に減少の傾向さえ見える。

(ii) 以上はセンサーが水平に回転していることを前提として計算を行った。実際はバルーンは風 に流され、センサーはバルーンに引張られながら回転している。バルーンが水平に回転しているか どうか判定し、回転が水平に近いものを選択した。その方法を以下に述べる。

① 水平面日射量の標準偏差(*σ*)による方法

1回の観測は 5 $T_0$  組の観測値からなる。これらの標準偏差をとり、 $\sigma$ が0.005 ly 以下のものをとる。

② センサー面の水平からの傾きぐのばらつきの程度による方法

①と同様 5T。組のぐの最大と最小の差 A くをとり、 A くが 0.5°以下のものをとる。

③ 受信周波数の波形による方法

バルーンが水平に回転しているとき、 $I_{max}$ のときの周波数を $F_1$ とすると、これから $\delta$ だけ回転したときの周波数  $F_2$ は次の式により求められる。

$$F_2 = \frac{I_0 \sin \theta \cdot \sin \zeta \left(\cos \pi - \cos \left(\pi + \delta\right)\right)}{F_k \cdot v s / (\mathrm{HR} - \mathrm{LR})} + F_1$$

HR = High Reference

LR = Low Reference

vs = 発信器の標準電圧

 $F_{k} = 日射計の定数$ 

 $\theta$  = 天頂角

こうして求めた  $F_2$  と実際の周波数を較べたものを図 6 – 4 に示す。判定に当って、実際の計算 は  $I_{max}$  から、 $I_{min}$  までの半回転について計算値 ( $F_{cal}$ ) と観測値 ( $F_{obs}$ )の差の平均が2.0 Hz 以下、差の最大が4 Hz以下のものをとった。①~③の方法により観測値を選びプロットしたものを図 6.5 と図 6.6 に示す。最初の図 6.3 のばらつきより小さいが、まだ大きい。

(iii) 以上の選択方法で、更に条件を厳しくすると、残った観測値は極端に少なくなる。バルーン が上昇するにつれ、日射量は減少することはまずないという仮定を入れて、プロットしたものが図 6.7 から図6.12である。



図 6.4 受信周波数の時間変化の観測値と計算値



 図 6.5 |F<sub>cal</sub>-F<sub>cbs</sub> | < 2.0 Hz、 | ΔF | max < 4.0 Hz、 左 は σ < 0.01、 | Δζ | < 1.0°右は σ < 0.005、 | Δζ | < 0.5°の条件を満たすデータだけのプロット(ただしσは 下向き日射量の標準偏差)1984年1月13日10時37分。



図 6.6 F曲線がスムーズで σ < 0.01、 ζ<sub>max</sub> - ζ<sub>min</sub> < 1°(σは下向き 日射量に対するもの)。 1984年 2月16日



図 6.7 図 6.5 - 6.6より厳しい条件でデータを選択したもの。1984年1月9日10時55分から79分間







図 6.9 図 6.7 に同じ。ただし1984年11月30日10時35分

-122 -

気象研究所技術報告 第18号 1986



図 6.10 図 6.7 に同じ。ただし1984年12月19日11時15分から 106分間。



図 6.11 図 6.7 に同じ。ただし1985年 2 月13日11時30分。



図 6.12 図 6.7 に同じ。ただし1985年3月23日

### 6.3 観測結果

この章の始めに述べた期間中に飛揚した日射ゾンデ10台のうち、第1年度のものは、ゾンデの揺 れ測定センサーの精度が悪く、揺れを補正することが困難となり、日射フラックスの高度分布を知 るには不適当なものとなった。そこで第2年度からは揺れ測定センサーをゾンデに設置することを 止めて、前節に述べた方法でゾンデの揺れを補正する方法に改め、このため下向き日射フラックス を測定する時間を延ばすように、ゾンデの信号切換の改良をおこなった。これによって、第2年度 以降の観測値に前記のような補正をほどこすことができた。その結果が前記の図6.7から図6.12に 示される。

図 6.10を除くこれらの図から分るように、下向き日射フラックスは、高度が増すとともに増加し、 この増加率は当然のことながら下層大気程大きく、高度とともに小さくなっている。すなわち、下 層大気程空気や水蒸気およびエーロゾルのような日射を減衰(散乱および吸収)させる要因物質が 多いことを示す。

次に、上向き日射フラックスを見ると、下向き日射フラックスに比較して高度による変化が小さいことがわかる。さらに詳細にみると、上向き日射フラックスはある高度(200~300mb)で不 連続的に小さくなっている。これはゾンデがこの高度付近で海洋上に出たためと思われる。すなわち、陸地表面の日射に対する反射率はおよそ10~30%程度で、一方海面のそれは数%程度で、かなり 小さい。そのため、同一条件下では海洋上の上向き日射フラックスは陸地上のそれに比較して小さ くなることによる。上向きフラックスのこの他の細い変動は、ゾンデ飛揚時で快晴とは言え、海洋 上その他で幾らかの雲(日射反射率40~70%)の存在および複雑な地形の霞ヶ浦(日射反射率~5 %)の存在等に主としてよると思われる。

下向き日射フラックスから上向き日射フラックスを差引いた日射のネットフラックスは下向き日 射フラックスとほぼ同様な高度変化をしていることがわかる。すなわち、日射のネット・フラック スは高度の増加とともに増加している。これは日射が大気中で吸収されていることを示す。そこで、 上記の日射ネット・フラックスの観測値から20~100 mb および 20~1,000 mbの大気層で吸収され た日射量およびこの吸収による大気の加熱率を表 6.1 に示す。この表の日射の吸収量およびそれに よる大気の加熱率がやや大きく、特に1985年3月23日の場合は大きすぎると思われる。今後は、地 表面アルベドの変化の影響等を考慮することが必要であろう。

Time	20~ 100 mb		20~ 1,000 mb	
	$\frac{\Delta F_N}{(ly / min)}$	<i>dT/dt</i> (°C/day )	$\frac{\Delta F_N}{(\text{ly /min})}$	<i>dT   dt</i> (°C/day )
Jan. 9, '84	0.035	2.6	0.295	1.8
Jan. 11, '84	0.025	1.8	0.250	1.5
Nov. 30, '84	0.020	1.5	0.275	1.7
Feb. 13, '85	0.015	1.1	0.295	1.8
Mar. 23, '85	0.045	3. 3	0.400	2.4

表 6.1 吸収日射量 ( $\Delta F_N$ )とそれによる大気の加熱率

図 6.10をみると、上向き日射フラックスが 200mb の高度を超えると、急激に増加していること がわかる。この原因はよく分らないが、多分海洋上でゾンデがこの高度に達した頃、その下の高度 に発生した多量の雲かあるいは既に発生している雲の影響によると思われる。

一方、下向き日射フラックスは 40mb 以上の高度で減少しているが、この原因についてはよく分らない。

#### 参考文献

嘉納宗靖・広田道夫(1978):輻射ゾンデ・日射ゾンデの問題点、気象庁技術報告第93号、361~ 363。

嘉納宗靖・鈴木正(1973):日射ゾンデ、天気 20,609~612。

-125 -