上層雲と高層気象要素との関係

来 海 徹 一

Studies on the Meteorological Elements of High Cloud

T. Kimachi

(Yonago Weather Station)

Since the accurate height of high cloud is measured by balloon tracking, we can know the meteorological elements there from radiosonde data.

High cloud exists in the transitional layer between two air flows. This transitional layer has the temperature lapse rate of about $0.2 \sim 0.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

From the fact that the balloon disappears at the top, inside, and base of the layer, the thickness of the layer seems to denote the thickness of high cloud but it follows, the thickness of the layer is not in so good proportion to the thickness by sight, and we must consider not only the thickness but also the density of the cloud particles.

We have no reliable data of humidity at higher level. Hair hygrometer doesn't work enough there, and in this paper the value is decided from temperature and humidity.

Temperature range of high cloud extends $-10 \sim -50^{\circ}\text{C}$. This has a certain connection with the experiments on the growth of ice crystals.

By analysis of transitional layer on time-isopleth, we can analyse the states of high cloud, and make it use for weather forecast. Here we show two cases, that is, developing and dissipating of high cloud. Relation between temperature lapse rate and state of the sky (C_A) is given as one of the general results.

緒 言

上層雲は大気の状態、或いは天気の変化を目視することが出来るもののうちでは時間的に最も早いものである。この理由から天気分析、或いは天気予報のために、上層雲について多くのことが研究されている。然し雲の高さ及び動き以外の上層雲の持つ気象要素を知ることは困難であるために、雲の発生、発達等についての研究はあまりなされていないようである。

この論文ではラジオゾンデの気球が上層雲に入つたことが確認された場合をとりあげて、ラジオゾンデ及び測風の資料から上層雲の種々の性質を求め、又その結果から上層雲の発達及び消滅の手掛を得ようとした。

上層雲高の観測方法が限定されているために資料が少ないが一応の結果が出たので報告する。

§ 1. 観 測 方 法

上層雲高を求めるには二点観測による方法、及び測高機による方法等があるが我々には、これらの方法が用いられないので、測風気球が雲に入つたことが確認されたときの高度を雲高とした。この方法で高度を求める際には次のことを注意する必要がある。

- 1) 上層雲は高度が高いから気球が視力外になつたのか、雲に入つたのか明瞭に区別出来る場合がある。
- 2) 淡い上層雲では雲に気球が入つても引続いて見える場合がある。
- 3) 風速計算は分単位であるから、切捨てられた端数に相当するだけの高度は誤差として残る。

ラジオゾンデ及び測風の観測精度を考慮して 1949, 1950 年の米子における資料を用いて約 30 の例を得た。

§ 2. 上 層 雲 高

上層雲の高度については今までに多くの研究¹⁾があるが、ここでは観測回数が少ないので、一応それらと比較する意味で記しておく。(Table 1)

Table 1. Mean height of high cloud at Yonago (km).

	C_t	C_{ist}	C_{icu}		C_t	C_{ist}	C_{icu}
Mean.	8.2	8.3	9.9	Min.	6.5	5.2	8.7
Max.	10.7	12.2	11.1	Number	11	21	2

結果として平均雲高が低いのは観測方法に原因があり、高い雲は気球が到達するまでに視力外になつてしまうからである。従つてこの雲高は米子における上層雲の平均高度を示すものではない。

§ 3. 上 層 雲 速

雲高の場合と同じ意味で雲速(雲向を考慮しない)の値を記しておく。(Table 2)

Table 2.

Mean velocity of high cloud at
Yonago (m/s).

Mean velocity of high cloud at
Mera (m/s).

	C_t	C_{ist}	C_{icu}		C_t	C_{ist}	C_{icu}
Mean.	24	31	33	Mean.	30	27	23
Number	11	21	2	Number	66	26	33

C_t の速度が C_{ist} のそれよりも小さいのは、 C_t の平均高度が C_{ist} よりも低いためであり、米子における平均雲速とは云え難い。吾々は雲を観測する際に雲速を「緩」「中」「急」の 3 階級に分けて

いるがこの目視観測の階級の区分が実際の雲速と如何なる関係にあるかを知っておくことは無意味ではない、さて上層雲の存在する高度には、かなりの巾があるから、目視雲速は雲が単位時間に占める視角の大きさと解さなければならない。

即ち高度 H にある速さ $V_{(H)}$ の雲が単位時間に或る視角を占めたとすると、 H' にある雲が同一の視角を占めるためにはその雲速は

$$V_{(H')} = V_{(H)} \times \frac{H'}{H}$$

となる。この関係から雲の高度と雲の速度を両軸にとり、その雲の目視雲速を階級別に記入すると目視階級を区別する直線が引ける。Fig. 1 に示すように実際の点はバラツキ、「緩」と「中」とをはつきり区別することは難しいが、8 km で雲速 25 m/s とすると図のような直線が引け大体両者を区別することが出来る。すなわち目視による上層雲速の階級区分は明確とは云えないが「緩」「中」を区別する雲速は雲高 8 km でほぼ 25 m/s である。布良の報告⁽¹⁾によると 8 km の平均風速は 23 m/s であるから、平均よりやや強いあたりから「中」と観測されているようである。「急」と「中」との区分は資料がないので触れることは出来ない。図で点がバラツクのは観測した風速と実際の雲速とが一致しないことがあるためと目視観測の個人誤差が大きいためであろう。

Fig. 1. Cloud velocity and its classification by sight.

§ 4. 上層雲層の気温遞減率

上層雲の発生機構を大別すると次の3つになる⁽²⁾。

- a) frontal surface によるもの、
- b) 部分的な渦動によるもの、
- c) 貫通気流其他によるもの。

吾々の観測方法では b) 及び c) を把えることは少く、資料として得たものは frontal surface に発生する雲の性質を持つものが多いと考えられる。調査の結果では上層雲は上下に温度差或いは風の shear を有する異つた気流間の転移層に存在していることが判つた。転移層は普通小さい気温遞減率を有する。この転移層を上層雲層とすると観測された上層雲は転移層の上面或いは下面にあるのがほとんどである。Table 3 に示すように雲の存在位置が、上層雲層から上面、下面とも約 200 米の偏差があるが気球の上昇速度が約 400 m/minute であるからこの偏差は分の端数で切捨てられる誤差高度内に含まれると考えて差支えない。上層雲層の下面で気球が見えなくなるのは濃い雲の場合であり、又上面で見えなくなるのは淡い雲の場合に相当する。以上のことから小さい気温遞

Table 3. Height of high cloud and its deviation from the transitional layer.

	C_i	C_{ist}	C_{icu}	Mean of the deviation from the layer (m)
Top of the layer	3	9	1	+240
Inside of the layer	1	5	0	—
Base of the layer	2	1	0	-200

Table 4. Temperature lapse rate of the high cloud layer.

Lapse rate ($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$)	<0.02	$0.02\sim0.1$	$0.1\sim0.2$	$0.2\sim0.3$	$0.3\sim0.4$
Number	0	2	1	11	14

減率を有する転移層に上層雲が存在すると考えられよう。この上層雲層の気温遞減率は Table 4 に示す如く $0.2\sim0.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ であるのがほとんどである。

§ 5. 上層雲層の厚さ

上層雲層の厚さと考えることには異論があるであろうが § 4 で述べたようにこの層の上下で気球が見えなくなることから一応雲の厚さとする平均の厚さは Table 5 のようになり C_i , C_{ist} , C_{icu} の間には特に明瞭な差異は認められない。これはここで取扱う C_i は空の状態 $C_H=5, 6$ 等の場合で C_{ist} に関連しており厚い場合が多いためと考えられる。

Table 5.

Mean thickness of the high cloud layer.			Relation between thickness classification by sight and thickness of C_s -layer.				
	C_i	C_{ist}	C_{icu}		C_{ist}^1	C_{ist}^2	C_{ist}^4
Thickness (m)	510	520	400	Thickness (m)	660	420	630
Number	5	16	1	Number	3	10	2

一方 C_{ist} のみの場合についての目視観測による雲の厚さは雲層の厚さと関係していると考えられるが、実際には厚いと目視した雲の雲層が厚いという結果になつていない。吾々の観測方法では細いことを論ずることは出来ないが、雲の濃淡を決定するものは、雲の厚さのみでなく雲の構成粒子（氷晶）の密度も考える必要があるといえよう。下、中層雲の場合には雲の厚さを判断する要素として湿度分布を用いるが上層雲の場合には、毛髪湿度計が鋭く働かないので用いることが出来ない。

§ 6. 上層雲の湿度

上層雲の高度になると毛髪湿度計は鋭く働かないのが普通であつて、実際上層雲に入つても湿度が増加する場合と増加しない場合とがほぼ同じ割合で起る。この変化の状態を Table 6 で示す。この場合の増加量としては雲層の下方 (2 km 以内) の湿度が一定のところから雲層の上端までの差を

Table 6. Variation of hair-hygrometer in high cloud.

Variation	increase	no change	decrease
Number	16	10	7
Mean: (%)	7.2		

示す。上層雲の場合毛髪湿度計が鋭く働かないのは

$$F-f=\alpha \cdot \frac{df}{dt}$$

F : 実際の湿度, f : 毛髪湿度計の示度, α : 遅差係数

において温度が低く湿度が小さいために α が大きくなるからである。湿度が増加しない場合が起るのは、遅差係数がある臨界点から無限大になるためだと考えられる。この係数は個々の湿度計によつて異なるが、個々の差はないとすると Fig. 2 に示すような臨界線が求まる。即ちこの線の下方では湿度計は働かない。又上方でも真の湿度を示しているかどうかは疑わしい。何故ならば上層雲が存在する以上少くとも氷に対しては飽和していると考えられるが実際には遙かに小さい湿度しか示さない。以上のことから上層雲の高度においては現在の毛髪湿度計の信頼度は低く、観測された湿度を種々の論議のために使用することは出来ない。

§ 7. 上層雲の温度

上層雲の温度としては純粹の氷晶の雲が発生する温度と氷晶の雲が存在する温度とは別に考えなければならぬ。即ち純粹の氷晶が発生するのは実験室内では $-41^{\circ}\text{C}^{(3)}$ から生ずるといわれているが、一方氷晶の

存在する温度としては「雪の結晶の研究」によれば発生した氷晶は温度及び過飽和度の変化によつてその形を変えて行くから、高度が変化する場合又 $C_t \rightarrow C_{ist}$ の変化をする場合等には水蒸気の供給如何によつて種々の温度で氷晶の雲が存在して良いと考えられる。我々の観測では上層雲の氷晶が如何なる過程にあるかを知ることが出来ないが把握できたものは種々の変化過程にあるとすればその温度は広い範囲にわたることが予想される。即ち Table 7 で示す如く -10°C から -50°C までの広い範囲に存在しており従つて上層雲としての特定の温度を決めることは出来ない。今上層雲の位置をその温度及び湿度を座標として表わすと、Fig. 3 のように存在範囲が規定され、その限界線では各々の温度に対して湿度が異つており、低温になるほど湿度が小さくても上層雲が存在して

Fig. 2. Relation between variation of hair-hygrometer in high cloud and its humidity and temperature.

Table 7. Temperature of high cloud.

Temperature range (°C)	-10~-20	-20~-30	-30~-40	-40~-50
Number	5	8	6	3

いる。これは「雪の結晶の研究」の結晶の分布図と同じ傾向を持つており温度、湿度についての上層雲の存在条件を表わすものであるが § 6 で述べた如く湿度の観測精度が低いからこれを量的な値とすることは出来ない。

§ 8. 上層雲層の解析

今まで述べて来たのは上層雲が存在するときの高層気象要素との関聯についてであつた。その結果上層雲

は異つた気流間の転移層（上層雲層）に存在することが判つた。従つて上層雲層を解析することにより上層雲の状態を解析することが出来る。又上層雲の発達、消滅は上層雲層の消長と関係がある。低気圧モデルでは良く知られているように暖気の移行上昇によつて転移層が生じ、これが上層から次第に下方に及んで来るために上層雲から中層雲への変化をする。この他上層雲の変化には種々の場合があるがここでは上層雲が発達して行く場合と消滅する場合との例を示す。

1) 上層雲発達の場合

上層雲から中層雲、下層雲へと発達する場合の典型的なものは低気圧モデルに示されるような明瞭な温暖前線による暖気の移行上昇によつて起るが、この他に地上では明瞭な温暖前線が現れないものにも起つており、この場合はむしろ低気圧による暖気の侵入と解釈すべきである。この場合の1例を Fig. 4 に示す。

以上のように雲が発達して、上層雲から中層雲へと変化するときの解析の結果を総合すると

- a) 上層雲から中層雲への変化は早い。
- b) 上層雲層の気温遞減率は小さく $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ の場合が多く、上層雲層は地上に明瞭な温暖前線を伴なわないときにも現れる。

Fig. 3. Existing limit of high cloud by its humidity and temperature.

— lapse rate $0.2 \sim 0.3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$
 ... lapse rate $0.3 \sim 0.4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$

21h(I) 11. Oct. 1949
Fig. 4 (2)

- c) C_{tot} は濃くて気球は上層雲層の下面で消失する。
 d) 上層雲層は図の如く直線的に外挿出来て、季節によつて異なるが雲層の低下高度から降雨開始の予測が出来る。

2) 上層雲消滅の場合

上層雲が発生して層状にまで発達してから消滅する現象がある。これは上層の谷によるものであるが、この時も上層雲層が現われる消滅の仕方に二通りあつて、上層雲層が次第に低下して行き消滅するものと、上層雲層が発生させた気流が上空に閉塞されるものがある。これらの場合の例を Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。これらの場合の解析の結果を総合すると

- a) 上層雲層の気温遞減率は $0.3 \sim 0.4^\circ\text{C}/100\text{ m}$ のことが多く雲層高度の時間的変化は小さい。
 b) 高圧帯中の気圧の谷に発生するときには空の状態 $C_H=8$ を示すことが多い。
 c) 移行する暖気が強く、気温遞減率が $0.2 \sim 0.3^\circ\text{C}$ になり $C_H=5, 6$ 或いは 7 等が発生するが、上空に閉塞してしまうことがある。この場合 1) の発達する場合との区別は難かしい。

§ 9. 上層雲層の気温遞減率と空の状態 (C_H) との関係

上層雲層から中層雲層の変化の早い場合には気温遞減率は $0.2 \sim 0.3^\circ\text{C}/100\text{ m}$ のことが多く、上層雲が消滅する場合には $0.3 \sim 0.4^\circ\text{C}/100\text{ m}$ のことが多いことを述べたが、これは空の状態との関係にも現われており、 $C_H=6, 2$ の存在する雲層は遞減率が小さく、 $C_H=8$ の存在する層雲では遞減率が大きい傾向がある。(Table 8)

Table 8. Relation between temperature lapse rate of high cloud layer and state of the sky (C_H).

Lapse rate ($^\circ\text{C}/100\text{ m}$)	C_H					
	1	2	5	6	7	8
0.02~0.1	1	—	—	—	—	1
0.1~0.2	1	—	—	—	—	—
0.2~0.3	—	2	—	5	3	1
0.3~0.4	3	1	1	2	3	4

結　　び

上層雲が上層雲層に存在することを知り、気温遞減率、温度及び湿度等との関係を求めた。上層雲の解析はこの層を解析すれば良いことを述べ、2, 3の例を示した。湿度及び測風の観測精度が充分でないために物足なさを感ずることは否めない。風の shear に全然ふれていないのもこのためである。

終りに臨み御激励を賜わつた大谷東平博士並びに御指導を頂いた三沢甚一前所長、真島善雄所長に厚く感謝致します。

文　　献

- (1) 岡田武松 (1939): 気象学 (上) p. 303. 中央気象台 (1930): 測雲報告.
- (2) 藤原咲平 (1939): 雲 p. 12.
- (3) C. M. B. Dobson (1949): Quart. Jour. Roy. Met. Soc., 75, 324, p. 126.
- (4) 中谷宇吉郎 (1949): 雪の研究 p. 138. 又は花島政人 1942: 気象集誌 Vol. XX, p. 238.

要　　報　　Notes

低気圧内のポテンシャル・エネルギーの変化について*

櫻　庭　信　一

最近 J. Spar (1950) は合衆国を通過した低気圧内のポテンシャル・エネルギー (以下 P.E と書く) を計算して、発達する低気圧内では P.E は増大することを見出し、従つて Margules の暴風勢力論は実際の低気圧勢力論に使えないと結論した。Margules の低気圧勢力論は閉じた系の勢力論で、その基礎式は

$$\Delta K = -\Delta(P+I) \quad (1)$$

で与えられる。ΔK, ΔP, ΔI はそれぞれ運動エネルギー、P.E, 内部エネルギーの変化である。(P+I) は全ポテンシャル・エネルギー (以下 T.P.E と書く) と呼ばれる。T.P.E は P.E に比例するから、P.E の変化を見れば、T.P.E の変化が分る。従つて Spar の結果は、発達する低気圧内では T.P.E が増大することを示すと解される。これは (1) 式から予想されることとは逆である。(1) 式によれば ΔK > 0 となるためには -Δ(P+I) > 0, つまり T.P.E は減少しなければならない。Spar が、Margules の暴風論を否定した理由はこゝにある。所がこの結論は少し間違つている。もち論一般論としては、低気圧のエネルギー論に閉じた系のエネルギー理論をあてはめるのは正しくないだろうが、発達する低気圧内で P.E が増大するからという一つの理由だけからして、Margules の理論が適用出来ないというのは間違いである (詳細は Geophys. Mag. に発表の予定)。以下定性的にその誤りを指摘してみる。

乾燥空気については Spar のいうとおりで、T.P.E の減少なくば運動エネルギーの増大はあり得ない。所が、水蒸気の凝結が起ると事情は一変する。この時は勢力式は

$$\Delta K = -\Delta(P+I) + \Delta Q \quad (2)$$

となり、ΔQ は凝結エネルギーの供給を示す。閉じた系では、-Δ(P+I) は ΔQ の函数で、一般に

$$-\Delta(P+I) < 0, \quad |\Delta(P+I)| < \Delta Q, \quad \Delta K > 0$$

となり、T.P.E は転層によつて増大するが、その際放出される凝結エネルギーによつて相殺され、結局運動エネルギーは増大する結果になる。これは低気圧内に水平温度傾度が存在するかどうかには無関係に成り立つ。Margules の低気圧論の骨子になつた、寒暖両気塊が水平に並ぶ時転層によつて放出されるエネルギーは、転層が乾燥断熱的に起る時は、成程 T.P.E の減少に基づくが、転層

* S. Sakuraba: On the Change of Potential Energy in Cyclone.