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.

が湿潤断熱的に行われる時は、T.P.E は増大するため、運動エネルギーの増大は凝結のエネルギーによる。従つて次のように結論出来る。湿潤断熱運動が行われて凝結のエネルギーが放出されると必ずや T.P.E は増大し、この際運動エネルギーは凝結のエネルギーから補給される。

以上の結果をもう少し具体的に示して見る。0~ h の単位気柱の T.P.E は普通の記号で

$$(P+I) = \frac{C_p}{A} \frac{1}{g} \int_{p_h}^{p_0} T dp - p_h \cdot h$$

で表わされる。こゝに才 1, 才 2 項は普通同じ大きさであるが、閉じた系内では、その変化を考へる限り、

$$\left| \frac{C_p}{A} \frac{1}{g} \Delta \int_{p_h}^{p_0} T dp \right| \gg p_h \Delta h$$

であるから、今後の議論の性質上次のようにおくことにする。

$$(P+I) = \frac{C_p}{A} \frac{1}{g} \int_{p_h}^{p_0} T dp. \quad (3)$$

すなわち、T.P.E は絶対温度に比例する。 $p_0 \sim p_h$ 間の単位気柱を考え、 $p_0 \sim p_i$ を 2 気塊、 $p_i \sim p_h$ を 1 気塊と呼ぶ。転層によつて 1 気塊は乾燥断熱的に下降、2 気塊は乾燥又は湿潤断熱的に上昇したとせば、始め及び終りの状態の量に添字 i, e を附して区別すると

$$(P+I)_i = \frac{C_p}{A} \frac{1}{g} \int_{p_h}^{p_0} T dp, \quad (P+I)_e = \frac{C_p}{Ag} \int_{p_i}^{p_0} T' dp + \frac{C_p}{Ag} \int_{p_h}^{p_i} T_a' dp, \\ -\Delta(P+I) = (P+I)_i - (P+I)_e = \frac{C_p}{Ag} \int_{p_i}^{p_0} (T - T') dp + \frac{C_p}{Ag} \int_{p_h}^{p_i} (T - T_a') dp. \quad (4)$$

添字 d, w は乾燥及び湿潤断熱変化を表わす。 $T - T' > 0, T - T_a' < 0$ により、(4) の右側才 1 項は正、才 2 項は負である。さて 2 気塊が乾燥又は湿潤断熱的に上昇する時は、才 1 項は $\int_{p_i}^{p_0} (T - T') dp$ 又は $\int_{p_i}^{p_0} (T - T_w') dp$ となるが、 $T_w' > T_a'$ により、

$$\int_{p_i}^{p_0} (T - T_a') dp > \int_{p_i}^{p_0} (T - T_w') dp.$$

乾燥断熱減率以下の減率では (4) の右側才 2 項の絶対値は才 1 項より大きく、従つて $-\Delta(P+I) < 0$ であるが、この際気塊が湿潤断熱的に上昇した方が乾燥断熱上昇に比し T.P.E の増大が大きい。

1 (寒気塊)、2 (暖気塊) 気塊が水平に並んだ時も同様に

$$(P+I)_i = \frac{C_p}{Ag} \int T_1 dp_1 + \frac{C_p}{Ag} \int T_2 dp_2, \quad (P+I)_e = \frac{C_p}{Ag} \int T_1' dp + \frac{C_p}{Ag} \int T_2' dp \\ -\Delta(P+I) = \frac{C_p}{Ag} \int (T_1 - T_{1a}') dp + \frac{C_p}{Ag} \int (T_2 - T_{2a}') dp \quad (5)$$

となり、(5) 式右側才 1 項は負、才 2 項は正である。 $T_2 > T_1$ (同じ気圧面上で) の時は、 $T_2' = T_{2a}'$ (乾燥断熱上昇) では、才 2 項の絶対値が大きく、(5) は正で T.P.E の減少となる。所が $T_2' = T_{2w}'$ (湿潤断熱上昇) では、 $T_{2w}' > T_{2a}'$ により、

$$\int (T_2 - T_{2a}') dp > \int (T_2 - T_{2w}') dp$$

となり、才 2 項は才 1 項の絶対値より小さくなつて、(5) 式は負となる。つまり T.P.E は増大する。

以上を総括して、湿潤断熱運動は乾燥断熱運動に比しより多く T.P.E (従つて P.E 又は内部エネルギー) を増大させるように働くことが分る。T.P.E の減少は発達する乾燥低気圧内でしか観測出来ないだろう (この結論には若干例外が伴ふことを附記しておく)。

Spar, J., 1950: Synoptic Studies of the Potential Energy in Cyclones, *J. Met.*, 7, 48-53.