地面附近に於ける気温の垂直分布について*

武 田 京 一

(林業試験場)

On the vertical air temperature distribution in the lowest layers of the atmosphere.

K. TAKEDA

(Government Forest Experiment Station)

1. 緒 言

同じ表題の下に数年前著者⁽¹⁾は風速垂直分布から気温垂直分布を論じそれが大體において對數法則によつて表わされること及び著者の實驗結果並に Best の實驗結果には細部に於いて對數法則からの同様な偏倚の見られることを述べた。然し當時に於いては風速並に温度の詳細な同時觀測が存在しなかつたから此の問題についてそれ以上立入ることの出来なかつたのも止むを得なかつた。最近發表された Pasquill⁽²⁾の結果は此の問題の解決を決定的なものとする様に見える。Pasquill の論文は本誌の讀者の多數の方々にとつて直接眼に觸れる機會の少ない様に思われるから、彼の結果の一部を簡単に紹介するのも無駄なことではないであらう。そしてその後それに對する著者の考察を少し述べて見たい。

2. Pasquill の 結果

Pasquill は各種條件下に於ける地上 2, 1.5, 1, 0.5, 0.375 m 及び 0.25 m の高度の風速, 湿度及び温度の多

數の同時觀測値⁽³⁾を與え更にその内より若干のものを取出して圖示している。第 1 圖に示すものは彼の與えた圖である。湿度, 風速, 温度共何れも左側が不安定, 中央が斷熱, 右側が安定大氣に對するものであるが, 温度の場合に斷熱條件のものが圖示されていないのはその場合に $(T_{25}-T_2)/(T_{25}-T_{50})$ が求まらないからである。圖より明かな如く湿度, 風速及び温度が何れも同様な變化(對數法則からの偏倚)を示すことは注目すべきことである。温度の對數法則からの偏倚の傾向は表わし方こそ違うが前述の吾人の結果及び Best の結果と同様である。斯くの如く各氣象要素が皆同様な變化を示すことはその分布を支配する要因が同一のものであることを意味するものと考えられる。そしてそれは多分地面附近の亂流であらう。吾人は次節にその要因を亂流と考えて各分布が如何に理論的に説明されるかを簡単に論じることにする。

湿度の問題については Pasquill はなお地面からの蒸發量を測定している。今蒸發量を ψ , 水蒸氣の地面附近に於ける傾度を $\partial W/\partial z$ (z は高さ), 水蒸氣に對する渦

第 1 圖 湿度, 風速, 気温の同時の分布

動擴散係数を K_v とすれば

$$K_v = - \frac{\psi}{\partial W / \partial z} \quad (1)$$

一方風速を u , 渦動粘性係数を K_m とすれば亂流の混合巨離の理論により

$$K_m / \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right) = k^2 \quad (2)$$

である(但し k は混合巨離の常數 $= 0.4$)。故にもし $K_v = K_m$ であるならば

* 昭和 26 年 5 月 6 日總會において發表

$$-\psi / \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial W}{\partial z} \right) = K_0 / \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right) = k^2 \quad (3)$$

でなければならぬ。Pasquill は断熱大気の場合に此の量を求めた所殆んど (0.4)² に近い値が得られた。之即ち断熱大気の場合に實驗的に $K_0 = K_m$ が證明されたことになる。然し断熱大気でない場合には問題は簡単でなかつた。Pasquill は Deacon⁽⁴⁾ によつて與えられた風速直分垂布 (後述の (7) 式) 及び渦動粘性係数の式 (5) を使用して

$$K_m / \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right) = k^2 \left(\frac{z}{z_0} \right)^{2\beta-2} \quad (4)$$

を得た。茲で z_0, β は風速垂直分布の式の中に生ずる常數であつて風速分布の實驗から求まるものである。故にもし $k=0.4$ とすれば (4) 式の値は風速分布から求めることが出来る。Pasquill は此の値と (3) の値とを比較することによつて断熱大気でない場合にも $K_m = K_0$ なることを實驗的に證明しようとした。然し (3) の値と (4) の値とは断熱大気及び不安定大気の場合にはよく一致したが安定大気の場合には一致しなかつた。従つてその場合に $K_m = K_0$ であるとは云うことが出来なかつた。之について Pasquill は Deacon の式並に $z_0 = \text{const}$ としたことが必ずしも妥當ではなかつたからかも知れぬと述べている。

温度の問題については Pasquill は更に輻射を測定しそれより熱に対する渦動擴散係數 K_H を求めている。而して $K_H / \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right)$ を求め $K_0 / \left(z^2 \frac{\partial u}{\partial z} \right)$ と比較した所安定大気の場合は一致したが不安定大気になると前者が大となつた。彼は之に對して實驗上生じ得べき誤差を調べたが此の偏倚を説明するに足る程大きな値は起り得ないことを知つた。そして結局地面附近に於いて熱及び他の性質の渦動輸送の間に差異がある爲であらうと述べている。

3. 地面附近に於ける渦動輸送

著者⁽⁵⁾ は最近 Deacon の與えた渦動粘性係数の式

$$K = k v_* z_0 \left(\frac{z}{z_0} \right)^\beta \quad (5)$$

が誤りでありその代りに

$$K = \frac{v_*^2 (z_1^{1-\beta} - z_0^{1-\beta})}{U(1-\beta)} z^\beta \quad (6)$$

を使用すべきであること而して此の式を使用することにより Pasquill の證明出来なかつた安定大気の場合の $K_m = K_0$ が實驗的に證明出来ることを示した。但し茲に v_* は摩擦速度, U は $z=z_1$ に於ける風速を表わす。

Pasquill は $K_m = K_0$ が證明出来なかつたことの爲に湿度の垂直分布に於ける對數法則からの偏倚が亂流によるものであると斷定することが出来なかつたのであらう。然し $K_m = K_0$ が實驗的に證明された以上湿度の對數法則からの偏倚も當然渦動輸送によるものと考えられるので以下にそれを調べて見よう。

今水蒸氣の渦動輸送の式として (1) 式をとり, 水蒸氣に對する渦動擴散係數と渦動粘性係數とを同一と考えて K とする。偕て Deacon⁽⁴⁾ は最近風速垂直分布に關して一般化された幕法則とも云うべき次式を提出した。

$$u = \frac{a z_0^{1-\beta}}{1-\beta} \left\{ \left(\frac{z}{z_0} \right)^\beta - 1 \right\} \quad (7)$$

但し a は常數である。之に對して著者⁽⁶⁾ は

$$\frac{u}{U} = 1 + A \ln \frac{z}{z_1} \left(1 + \frac{E}{2} \ln z z_1 \right) \quad (8)$$

の如き一般化された對數法則とも云うべき式も同様に實驗結果をよく表わすことを示した。茲に A, E は z については常數である (不安定大気中では $E < 0$, 断熱大気中では $E = 0$, 安定大気中では $E > 0$)。而して渦動粘性係数の式は (7) 式を基にすれば (6) 式が導かれる譯であるが (8) 式を基にすると

$$K = \frac{v_*^2 z}{U A (1 + E \ln z)} \quad (9)$$

が導かれる。(8) に見られる如く E の存在が風速分布に於ける對數法則からの偏倚を規定する。而して對數法則からの偏倚を問題にする場合には (6) 式よりも (9) 式の方が分り易いので (9) 式を使用することとし, (9) 式中の z を含まない項を F とおいて $K = F z / (1 + E \ln z)$ を (1) に代入して積分すれば

$$W - W_1 = \frac{\psi}{F} \ln z \left(1 + \frac{E}{2} \ln z \right) \quad (10)$$

を得る。但し W_1 は $z=z_1=1$ に於ける W の値である。偕て風速の結果から求めた E 及び $z=1$ に於ける $\frac{\partial W}{\partial \ln z}$ から求めた ψ/F の値を示すと第 1 表に示す如き値を得る。第 2 圖に示すものは之等の値を使用して

第2圖 湿度の分布

(10)式より計算された曲線(實線)と第1圖中に示された實驗點との比較である。安定及び不安定の場合共に一致は良好である。斯くして湿度垂直

第 1 表

	不安定	安定
E	-0.306	0.223
$W_1, \text{g/m}^3$	5.100	4.210
$\psi/F, \text{g/m}^3$	-0.339	-0.1825
$T_1, ^\circ\text{F}$	52.90	47.08
$\phi/F, ^\circ\text{F}$	-0.500	1.260

分布に於ける對數法則からの偏倚は風速垂直分布に於ける對數法則からの偏倚と同じ原因(即ち亂流)によるものと考えられる。

次に気温の垂直分布の方を調べて見よう。今熱輸送が全く渦動擴散のみによるものとすれば水蒸氣の場合と同様

$$T - T_1 = \frac{\phi}{F} \ln z \left(1 + \frac{E}{2} \ln z \right) \quad (11)$$

が成立つと考えられる。但し T は温度、 T_1 は $z=1$ に於ける値又 ϕ は熱流を空氣の密度及び比熱でわつたものである。實驗から求めた ϕ/F の値は第 1 表に示された通りである。

第 3 圖は第 2 圖と同様(11)式より計算された曲線と第 1

第 3 圖 気温の分布

圖中に示された實驗點との比較である。之によれば安定の場合はよく一致しているが、不安定場合は實驗點の對數法則からの偏倚は(11)式から豫想されるものよりも甚しい。此の差異は E , ϕ/F 等を求める計算中に這入つて来る誤差として説明するには餘りに大き過ぎる様に見える。故に多分気温の垂直分布を支配するものが渦動擴散のみであると假定した點が間違つてゐるのである。地面附近に於ける気温の垂直分布を支配するものとしては此の他に輻射(例えば Brunt⁽⁷⁾の輻射輸送)及

び最近 Priestley 及び Swinbank⁽⁸⁾によつて提唱された浮力項等が考えられるが之等の原因による Pasquill の資料の検討は別の機會に譲りたい。

嘗つて著者は気温の垂直分布に於ける對數法則からの偏倚が大氣亂流の特性の更に深い洞察を可能ならしめる鍵であるかも知れぬと述べた。確かに上に見た如く吾人は風速、濕度及び温度の垂直分布に於ける對數法則からの偏倚を調べることにより大氣亂流の特性の洞察を一步深めることが出來た。然し同時に気温の分布に於ける對數法則からの偏倚には渦動擴散のみからでは説明し得ない部分の存在することが明かにされた。之は多分輻射又は熱に關聯せる大氣亂流の更に深い洞察を可能ならしめる鍵となるであらう。

引用文献

- (1) 武田京一：地面附近の気温垂直分布に就て，農業氣象，**1** (1944) 87—89.
- (2) Pasquill, F.: Eddy diffusion of water vapour and heat near the ground, Proc. Roy. Soc., **198** (1949) 116—140.
- (3) 氣象觀測方法の詳細は Pasquill, F.: A portable indicating apparatus for the study of temperature for the study of temperature and humidity profiles near the ground, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., **75** (1949) 239—248 參照.
- (4) Deacon, E. L.: Vertical diffusion in the lowest layers of the atmosphere, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., **75** (1949) 89—103.
- (5) 武田京一：大氣亂流の研究第2報，一般化された對數法則について，氣象集誌に發表の豫定.
- (6) 武田京一：大氣亂流の研究第3報，一般化された對數法則について，氣象集誌に發表の豫定.
- (7) Brunt, D.: Physical and Dynamical Meteorology, 2nd ed., 1939.
- (8) Priestley, C. H. B. and Swinbank, W. C.: Vertical transport of heat by turbulence in the atmosphere, Proc. Roy. Soc., **189** (1947) 543—561.

Résumé

A few years ago the author remarked in this Journal that in his and in Best's temperature profile measurement in the lowest layers of the atmosphere a systematic deviation from logarithmic law was observed. But as a precise wind velocity measurement was not simultaneously made then, the deviation could not be attributed to any reasonable source. Recently Pasquill has published many simultaneous measurements of wind velocity, absolute humidity and air temperature in which the same systematic deviation from logarithmic law as described above is shown not only in temperature profile but also in wind and humidity profiles. This makes us expect that the deviations are due to a single source—probably, turbulence. Thus the author tries to explain the deviation in humidity profile by turbulence and shows a close agreement between the theory and the Pasquill's experiment both in stable and unstable atmospheres. But as regards temperature profile a systematic discrepancy between the theory and the Pasquill's experiment is found out in unstable condition though a close agreement is obtained in stable case. The disagreement may be due to radiation (e. g. the radiative transfer by Brunt) or a buoyancy term recently introduced by Priestley and Swinbank, but a closer computation is transferred till a next article.