温度成層を考慮に入れた自然風現象の 風洞模型実験について*

井 上 栄 一

(農業技術研究所 気象科)

On the Model Experiments in Wind Tunnel of Atmospheric Phenomena
Accompanied with Effects of the Thermal Stratification

E. INOUE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

防風林や防風垣などの風洞模型実験では一般に強い風の下に起る現象を対象とするから、気層の熱的な安定性を考慮する必要がないものと考えられている。しかし実物の防風林などについての観測は必ずしも強風のもとに行われるとは限らず、真夏の日中で弱い風の下に防風林前後の風速分布の測定を行つて、その防風林の防風効果を求めたりすることもある。このような場合には当然接地気層は不安定な状態にあるものと考えられ、そこで求められた風速の低下現象を、期待されるような強風下の防風率として解釈することは許されない。即ち防風林などの防風効果に対する気層安定度の影響が予めしられなければならないことになる。

一方同じ林帯や垣根であつてもそれを防霜林としてその効果を期待する場合には、一般に冷却のはげしい夜間であり、風速も弱くて気層が極めて安定した状態の下に起る現象が問題となる。このような現象は重要なものとはみなされながらも、観測が困難であつたり模型実験が困難であつたりするため詳細な研究対象とはなり得なかつたようであり、断片的な観測が行われたに過ぎなかつた。

著者(井上 1952)はこれまで自然風の中に起る各種の現象が乱流拡散の考え方によつて解釈されるものとして乱流拡散現象の相似法則をもつて風洞模型実験の相似法則に代用することを提案し、

(I) 乱れの強さの一致

(II) 乱流 Reynolds 数**の一致

を必要な条件として与えた。この思想は谷(1958)により模型防風垣の風洞実験によつて検討され、可成りの確からしさをもつて有効であることが示された。しかし著

者のこれまでの考え方の中には、気層の安定性の効果が全く無視されていたので、この思想を気層安定度の如何にかかわらず成立するような形態に拡張することが必要になつて来た。また一方において、谷(1958)がその必要性を述べていたような、「底板を加熱又は冷却して熱の境界層を作り」得るような風洞施設の完成も近づきつつある。そこで著者はまず理論的に乱流拡散現象に対する温度成層の効果を予測し、その現象の相似法則を提案することにする。この提案が再び近い将来において実験的に検証されることを著者は期待している。

2. 温度成層のない接地気層内の 乱流拡散現象と相似条件

接地気層の中における乱流拡散現象が気流の乱流構造によつて表わされることについてはすでに多くの研究が発表されている(例えば 井上 1956)。一例として高さ H の煙突から出る煙の垂直方向の拡散について考えよう。よく知られているようにこういう場合の拡散現象は Lagrange 相関係数 $R_w(\xi)$ と乱れの強さ(あるいは風の息) $\langle w^2 \rangle^{1/2}/U$ とによつて記述することが出来て、拡散する煙の垂直方向の幅 $\langle Z^2 \rangle^{1/2}$ と煙突の出口から風下に測られた距離 x との関係は

$$\left. \begin{aligned} \langle Z^2 \rangle &= 2 \langle w^2 \rangle \int_0^t \int_0^\eta R_w(\xi) d\xi d\eta, \\ t &= x/U \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

で表わされる(Taylor 1921)。著者(井上 1956)が先に与えたように $R_w(\xi)$ として

$$R_w(\xi) = \exp(-\xi/\tau_w) \quad (2.2)$$

を採用すれば、幅 $\langle Z^2 \rangle^{1/2}$ と操作時間 $t(=x/U)$ あるいは距離 x との関係は

$$\langle Z^2 \rangle^{1/2} = \sqrt{2} \langle w^2 \rangle^{1/2} \left\{ \frac{t}{\tau_w} - 1 + \exp(-t/\tau_w) \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

で与えられる。ここに τ_w は垂直連結乱子の寿命時間であり、気層安定度が中立状態にある場合には

* 1958 年 11 月 12 日, 第 5 回「風に関するシンポジウム」において発表

**これは最近「有効 Reynolds 数」とよばれ、各種の空気力学的現象に採用されるようになった(今井 1958)。

$$\tau_w = \frac{kH}{V_*} \quad (2.4)$$

で表わされるものと考えられている。但し V_* , k はそれぞれ摩擦速度, Kármán 常数を意味する。

(2.3) で与えられる煙の幅のひろがり, 出口の極く近傍 ($t \rightarrow 0$ 又は $x/U \rightarrow 0$) と出口から十分に離れた場所 ($t \rightarrow \infty$ 又は $x/U \rightarrow \infty$) とで夫々次のようになることが導かれる:

(I) $t \rightarrow 0$,

$$\langle Z^2 \rangle^{1/2} = \langle w^2 \rangle^{1/2} t = \langle w^2 \rangle^{1/2} \frac{x}{U}; \quad (2.5)$$

(II) $t \rightarrow \infty$,

$$\begin{aligned} \langle Z^2 \rangle^{1/2} &= \sqrt{2} \langle w^2 \rangle^{1/2} \tau_w \left(\frac{t}{\tau_w} - 1 \right)^{1/2} \\ &= \sqrt{2} \langle w^2 \rangle^{1/2} \tau_w \left(\frac{x}{U \tau_w} - 1 \right)^{1/2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

便宜上著者は前者を第 I 種拡散領域と名づけ, 後者を第 II 種領域と名づけているが, 上の二式より明らかなように第 I 種領域では幅が直線的にひろがり, 第 II 種領域では放物線的にひろがる点に明らかなそれぞれの特徴が見られる。第 I 種領域のひろがりの角度を θ_Z で特徴づければ, (2.5) 式より

$$\tan \theta_Z = \frac{\langle Z^2 \rangle^{1/2}}{x} = \frac{\langle w^2 \rangle}{U} \quad (2.7)$$

となり, θ_Z の大小がそのまま風の息 $\langle w^2 \rangle^{1/2}/U$ の大小を表わすこととなる。また第 I 種と第 II 種の両領域の移り変りの位置を特徴づける長さとしては第 II 種領域の放物線の頂点の位置を与える長さ

$$L_Z = \tau_w U \quad (2.8)$$

をとることは合理的であろう。このようにして拡散現象の幾何学的形状を特徴づける量としては角度 θ_Z と長さ L_Z とをとることが合理的となる。

さて中立的な気層安定度の状態にある接地気層では風速の高度分布が対数法則

$$U = \frac{V_*}{k} \ln \frac{Z}{Z_0} = 5.75 V_* \log \frac{Z}{Z_0} \quad (2.9)$$

で表わされることはよく知られている。ここに Z_0 は地表面の粗さを特徴づける長さであり, 便宜上地表面修正量 d の存在は無視出来るものと考えられている。また風速の垂直変動量 $\langle w^2 \rangle^{1/2}$ は摩擦速度 V_* に比例し,

$$\langle w^2 \rangle^{1/2} \approx V_* \quad (2.10)$$

で与えられることが知られている (例えば井上・谷・今井 1955)。従つて高さ H の煙突より出る煙の拡散角度 θ_Z は (2.7) の関係より

$$\begin{aligned} \theta_Z &= \tan^{-1} \frac{\langle w^2 \rangle^{1/2}}{U} \approx \tan^{-1} \frac{V_*}{U} \\ &= \tan^{-1} \frac{k}{\ln \frac{H}{Z_0}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

で与えられることとなり, 角度 θ_Z は煙突の高さ H と地表面の粗さを特徴づける長さ Z_0 との比 (H/Z_0) によつて決定されることがわかる。従つて一定の H に対しては Z_0 が大きくなればなるほど, つまり粗さが著しいほど θ_Z は大きくなる。また同じような対数法則の適用される二つの乱流場があるとして, それぞれの中にある H_1 および H_2 という高さの煙突から出る煙の拡散を考えるときには, 両者の地表面の粗さを特徴づける長さ Z_{01} および Z_{02} が

$$\frac{H_1}{Z_{01}} = \frac{H_2}{Z_{02}} \quad (2.12)$$

で示される関係を満足させる時に両者の拡散角度が一致することになる。一方両者の拡散領域が幾何学的に相似であるためには (2.8) で与えられる長さ L_Z と煙突の高さ H との比も一致していなければならないが, (2.8) および (2.4) 式を考慮に入ればこの比 (L_Z/H) も

$$\frac{L_Z}{H} = \frac{kH}{V_*} \cdot \frac{1}{H} = \frac{kU}{V_*} = \ln \frac{H}{Z_0} \quad (2.13)$$

で示されるように (H/Z_0) によつて決定されることがわかり, 角度を一致させるための条件 (2.12) と全く同一の条件によつて一致させられることになる。

結局中立状態の安定度条件のもとでは,

(a) 二つの乱流場の速度分布が同様な対数法則で表わされるような状態にあり,

(b) 特徴的な高さ H と地表面の粗さを特徴づける高さ Z_0 との比 (H/Z_0) が一致しているならば,

それら二つの乱流場における乱流拡散現象が幾何学的に相似となることになる。これら二つの条件はまた見方を変えれば,

(a') 乱れの強さ (V_*/U) の一致

(b') 乱流 Reynolds 数 ($R_K = UH/K_Z = (U/V_*)(H/kH)$) の一致

を求めた著者らの以前の結果 (井上 1952, 谷 1958, 根本 1958) と全く一致するものであることが容易に判る。

速度についての条件と長さあるいは寸法についての条件の二つから, 自然に時間についての条件が生じて来る。この場合には特徴的な時間として (2.4) で与えられた寿命時間 τ_w をとることは極めて自然なことであろう。そこで二つの現象の間の特徴的時間量の比として

$$\frac{\tau_{w1}}{\tau_{w2}} = \frac{H_1/V_{*1}}{H_2/V_{*2}} = \frac{H_1}{H_2} \cdot \frac{U_2}{U_1} \quad (2.14)$$

が求められる。より複雑な同種の条件は同じ著者によつてすでに与えられているが (Inoue 1951), 条件 (2.14) はその中の特別な場合に相当している。時間縮率 (τ_{w1}/τ_{w2}) は寸法縮率 (H_1/H_2) と速度縮率の逆数 (U_2/U_1) との積として与えられているが, 一般に速度縮率は 1 から

甚しく離れることのないのが普通であるため、従来は経験的に時間縮率と寸法縮率とが一致するという見方もなされて来たようである。例えば工場の煙突より出る煙による大気汚染を風洞実験的にしらべるために Sherlock 及び Leshner (1954) は工場の (1/300) 模型を作り、風洞に於て 1 sec の間に起る現象が実物についての 300 sec (5 min) 間に起る現象に対応すると述べているのもその一例とみなされるが、正確には実際の風速と風洞風速とを一致させなければ彼等の記述は誤りを犯すことになる。しかし幸なことに自然風速と風洞実験風速とはほぼ同じ程度に選ばれることが多いため、経験的には Sherlock-Leshner の記述でも不都合は生じないことになるものとみなされる。

3. 相似条件に対する気層安定度の効果

接地気層における温度成層の状態が中立あるいは断熱状態として知られているものから離れるにつれて、前節の考察の基礎となつている風速高度分布の対数法則が次第に適用されなくなるため、そのような状態の下に起る拡散現象についての相似条件としては前節に得られたものより若干複雑なものが要求されるということは容易に予想される。

まず風速高度分布について言えば、安定度の効果が著しくなるにつれて対数法則からはずれが著しくなつて来ることが知られるようになり、その分布法則が

$$\frac{U}{V_*} = 5.75 \log \frac{Z}{Z_0} + \alpha \frac{(Z - Z_0)}{L}, \quad (3.1)$$

あるいは右辺第 2 項の Z_0 を Z に比べて無視出来るものとして

$$\frac{U}{V_*} = 5.75 \log \frac{Z}{Z_0} + \alpha \frac{Z}{L} \quad (3.2)$$

という形のいわゆる (対数+直線) 法則で与えられることが最近多くの人々によつて求められるようになった (例えば Sheppard 1958)。ただし L は安定度の程度を表わす量で次のように定義され、長さの次元を持つている：

$$L = - \frac{V_*^3}{k \frac{g}{\Theta_0} \frac{q}{C_p \rho}}, \quad (3.3)$$

g = 重力加速度

Θ_0 = 平均温度 (°K)

q = 輸送熱量, 上向きを正にとる。つまり不安定状態では正, 安定状態では負。

C_p = 空気sの定圧比熱

ρ = 空気密度

この長さはまだはつきりした名前をつけられていないが

著者は仮りに「安定度の長さ (stability length)」と呼ぶことにする。また α は経験的の常数であつてまだその確定的な数値は得られていないけれどもこれまでの乏しい資料からは 0.6~2 の間にあるものとみなされるようである (井上 1957)。

(3.2) 式を書き直せば

$$\frac{V_*}{U} = \frac{1}{5.75 \log \frac{Z}{Z_0} + \alpha \frac{Z}{L}} \quad (3.4)$$

となり、断熱状態の場合と同様に (V_*/U) が乱れの強さを表わすものとするならば、乱れの強さは地表面の粗さの影響を表わす (Z/Z_0) と安定度の影響を表わす (Z/L) との二つの項の各々に関係することとなる。従つてこの場合には高さ H の煙突から出る煙の拡散角度 θ_Z は

$$\begin{aligned} \theta_Z &= \tan^{-1} \frac{\langle w \rangle^{1/2}}{U} \approx \tan^{-1} \frac{V_*}{U} \\ &= \tan^{-1} \frac{1}{5.75 \log \frac{H}{Z_0} + \alpha \frac{H}{L}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

によつて表わされることが出来、角度 θ_Z は (H/Z_0) のみならず (H/L) によつても左右されることになる。後者の (H/L) は不安定状態では負、安定状態では正の値を持つから、 θ_Z は不安定になるほど大きく、安定になるほど小さくなることが容易に判る。先に前節では Z_0 の大きいほど、つまり地表面が粗いほど煙の拡がる角度が大きくなることを述べたが、気層が不安定になるにつれても θ_Z は大きくなるから、一見した所角度を増大させるという効果だけから言えば地表面が粗くなるということと気層が不安定になるということは同様な効果を持つものと言える。

さて二つの乱流場を考へて、(2.12) で与えられた地表面の粗さについての条件の他に

$$\frac{H_1}{L_1} = \frac{H_2}{L_2} \quad (3.6)$$

という条件が満足されるならば、(3.5) から明らかなように両者における拡散角度は一致することになる。つまり安定度の効果によつて拡散角度の相似条件が二つ必要となつたわけである。

一方拡散領域の幾何学的相似のもう一つの条件は

$$\frac{U \tau_w}{H} = \frac{U}{V_*} = 5.75 \log \frac{H}{Z_0} + \alpha \frac{H}{L} \quad (3.7)$$

で与えられ、ここでも (H/Z_0) と (H/L) が同時に等しくなければならないことになる。

粗さの効果を表わす項 (H/Z_0) を相似にすることは、断熱状態の場合と同様に模型の地表面の粗さを適当に作ることによつて達成されるが、問題は安定度の効果を表

わす項 (H/L) を相似にさせることにある。(3.3) で定義された L の量を使つて (3.6) を書き直せば

$$\frac{k \frac{g}{\Theta_0} \cdot \frac{q_1}{C_p \rho} \cdot H_1}{V_{*1}^3} = \frac{k \frac{g}{\Theta_0} \cdot \frac{q_2}{C_p \rho} \cdot H_2}{V_{*2}^3} \quad (3.8)$$

となり、両辺の g , Θ_0 , C_p , ρ はほぼ共通であるとみなせるから

$$\frac{q_1 H_1}{V_{*1}^3} = \frac{q_2 H_2}{V_{*2}^3} \quad (3.9)$$

が得られる。この関係が (H/L) を相似にさせるための条件である。

U_1 と U_2 とを一致させない場合、 q_1 と q_2 とを一致させれば

$$\frac{V_{*1}^3}{H_1} = \frac{V_{*2}^3}{H_2}$$

特に実際の現象における H_1 の高さの風速と模型実験における H_2 の高さの風速とを等しくすれば $V_{*1} = V_{*2}$ とみなせるから、上式は

$$q_1 H_1 = q_2 H_2 \quad (3.10)$$

となる。この結果は

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{q_2}{q_1} = \sigma \quad (3.11)$$

と書きかえられ、実物の大きさが模型の σ 倍ならば、模型実験で必要とされる輸送熱量の大きさは実際の現象で起つている輸送熱量の σ 倍でなければならないことを意味しており、一般に小さな模型を使う風洞実験では大きな熱量が輸送されるように模型の地表面を強く加熱あるいは冷却してやることを必要とすることが判る。一例として $1/100$ 模型を考えるならば、輸送熱量は 100 倍でなければならない、普通に起る $\pm 0.1 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ 程度の輸送熱量を伴う自然風現象を風洞で再現するためには $\pm 10 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ 程度の熱輸送が起るように模型の地表面を人工的に加熱したり冷却したりしなければならないことになる。

またもし q_1 と q_2 を著しく相違させることが困難であるような場合には、 V_* を調節することによつて (3.9) の関係を満足させる方法を考えなければならない。これは

$$\frac{V_{*1}^3}{V_{*2}^3} = \frac{q_1 H_1}{q_2 H_2} \quad (3.12)$$

という関係で表わせるように、 $q_1 \approx q_2$ ならば

$$\frac{V_{*1}}{V_{*2}} \approx \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{1/3} = \sigma^{1/3} \quad (3.13)$$

となることが要求される。従つて σ がせいぜい 10 程度の値ならば、 σ 分の 1 の模型で実物と同様な輸送熱量

$q_1 \approx q_2$ が存在する場合には実際の現象の高さ H_1 における風速の約 2 分の 1 の風速を模型における高さ H_2 に生ぜさせればよいことになる。この結果は小さな現象では安定度の効果が小さな風速で現われ易いことを意味するものと解釈される。

安定度による影響が最も顕著にあらわれる日常現象の一つは煙突の煙の拡散である。そして煙突からの煙の拡散現象をしらべるためにしばしば風洞模型実験が行なわれているが、この模型実験に安定度の効果を入れるためにはぜひとも上記の相似法則の採用が必要である。またこうした安定度効果による拡散領域の増減は必然的に防風垣の防風効果範囲にも変化を生じさせることが予想される。例えば不安定な気層の中では防風垣の吸収する負の運動量の拡散領域が広い角度をもつこととなり、それに応じて垣の後方における風速低下領域が短くなることになる。また安定状態ではその逆の現象の起ることが容易に想像される。特に後者の現象は夜間冷却の強い気層の中での防霜林の模型実験などには特に考慮されねばならない。

4. 結 び

中立状態について求められている自然風現象の風洞模型実験の相似法則が拡散現象の相似条件に他ならないことから、非中立状態における拡散現象の特徴をつかつて相似法則の拡張をはかつてみた。得られた結果は従来の相似法則に更に安定度の効果を表わす項を追加する必要性を明らかにしており、模型実験を行う際に必要となる地表面の人工的な加熱や冷却の程度を与える関係が求められた。簡単に言えば小さな模型を使う場合には実際よりも多くの熱量が表面から、あるいは表面に向つて輸送されるようにしなければならないということである。

しかしこの結論は全く思考実験によつて導かれたものであり、実験によつて検証されることを著者は期待している。

引用文献

- 今井 功 (1958) : 科学, 28, 110.
 Inoue, E. (1951) : Geophys. Mag., 23, 1.
 井上栄一 (1952) : 農技研報告 A 2 号, 1.
 ——— (1956) : 農業気象, 11, 147.
 井上・谷・今井 (1955) : 農業気象, 11, 44.
 根本 茂 (1958) : 気象学会乱流分科会にて講演.
 Sheppard, P. A. (1958) : QJRMS, 84, 205.
 Sherlock, R. H. and Leshner, E. J. (1954) : Air Repair, 4, no. 2, 1.
 谷 信輝 (1958) : 農技研報告 A 6 号, 1.
 Taylor, G. I. (1921) : Proc. London Math. Soc., 20, 196.

Summary

Taking the effect on the turbulent structure in atmospheric surface layer of the stability length L defined by Monin and Obukhov (1954) as

$$L = - \frac{V_*^3}{k \frac{g}{\Theta_0} \frac{q}{C_p \rho}}$$

into account, the vertically two-dimensional phenomena in the surface layer are characterized by the roughness parameter (H/Z_0) and the stability parameter (H/L) , where H and Z_0 denote the characteristic vertical scale of phenomena and the roughness length. The similarity of phenomena is shown to be given by the equality of both parameters of (H/Z_0) and (H/L) . The former condition is satisfied by the geometrical similarity of model and the latter requires the condition of

$$\frac{V_{*1}^3}{q_1 H_1} = \frac{V_{*2}^3}{q_2 H_2},$$

where suffices 1 and 2 denote respectively the quantities in the actual phenomena and in the model experiment. For example, when the condition of $V_{*1} = V_{*2}$ is satisfied by choosing the same wind velocity $U_1 = U_2$ at the heights of H_1 and H_2 , the heat flux q_2 must be increased to σ times q_1 , where σ is the reduction rate of model scale, i. e. $\sigma = H_1/H_2$. Several methods are proposed of applying these theoretical considerations to the model experiments of the stack meteorology and of the wind break problems in a strongly stabilized surface layer during winter cold nights when the frost damage to vegetations is apt to break out.

書 評

齋藤鍊一 荒井隆夫 編 全国農作物栽培分布図説

農業気候の研究には勿論、農学地理、農業生態の研究を行うには、先ず農作物の正確な地理的分布を知ることが必要である。ところが我国の各種農作物について国内の詳しい栽培分布を知るには、自から統計書をひもとくほかはなかつた。しかし手軽に入手できる統計書にはごく主要な作物について、しかも多くの場合県単位に記載されているにすぎないので、少し立入った調査には余り役立たない。

この度気象庁の齋藤・荒井両氏編による全国農作物栽培分布図説は、この点のある程度満たしてくれるものとしてありがたい。本書は 1950 年の世界農業センサスの資料に基づいて、我国の重要と思われる 75 種類の農作物の栽培分布図を市郡別に描いたものである。単に分布図だけでなく 75 種類の農作物について、それぞれ名称、性状、由来、分布、用途、栽培を記述し、写真と共にうまく一頁にまとめている。これだけの農作物についての上記の記載は農作物についての事典的役割も果たしてくれて便利である。また最後に農業気候図および表をかかげてある。これまで多数の気候図表があるが、直接農業に利用しにくい欠点があつたが、ここには農業に必要なものにしばつてまとめているのが特徴である。

本書には以上の如くこれまでにない新しい意図がもら

れ、農業気候や農業地理の研究を行うのに便利なのみならず、日本の農業、農作物についての一般的知識をうるのに好都合な本といえよう。従つて農業技術者や農政担当者が常時座右に置いて事典的役目に使用して便であり、農業高校の先生方の教授資料として活用できるものとして推せんできよう。

ただ本分布図が 1950 年（昭和 25 年）の資料に基づいているため、やや古い感がなくもない。作物によってはかなりこの数年間で変化したものがあるからである。その欠を補う意味で昭和 31 年度の県別の作付面積表をかかげているが、1960 年には再び世界センサスが行われるので、その機会に是非改訂されることを希望したい。またこの分布図がどの作物についても一律に市郡別収獲面積 100 町歩以上、99~10 町歩、10 町歩未満の 3 段階に区分されている点が気になる。このため図がやや平面的な印象を与え、作物によつてはどどこが適地であるのか知りにくいこともある。この欠も県別の作付面積表で補う考えのようであるが、今少し工夫が欲しかつたと思う。なお市別の境界を印刷した透明セルロイド板を付けておいてもらふと、利用上便利に思う。（坪井八十二）

——東京堂，34 年 5 月 11 日初版 188 頁，550 円——