

植被面における風速分布のパラメーターについて

On Wind Profile Parameters in and above a Vegetative Canopy

古藤田 一 雄*

Kazuo KOTODA

I まえがき

植物群落内外の風速分布を規定する粗度長(z_0)と地面修正量(d)および植被高(H)の相互関係については、従来から多くの研究者の関心を惹き、Tanner and Pelton (1960), Kung (1961), Sellers (1965), Stanhill (1969), Lettau (1969) などにより、種々の経験式が求められてきた。しかしながら、これらの報告にみられる、 d , z_0 と H の経験的な関係は、Lettau (1969) や Kondo and Akashi (1976) が指摘するように、風速分布に関与する一部の空気力学的特徴量を考慮したもので、すべての物理因子を考慮したものではない。したがって、その適用範囲を誤まると、実際とは全くかけ離れた d や z_0 を予測してしまうことも起り得る。

d や z_0 に関連する植被層内外の風速分布に関する理論的な研究は、拡散係数と混合距離を関係づけた、いわゆる混合距離モデルによる解が、Inoue (1963), Cionco (1965), Kondo (1971), Kondo and Akashi (1976) らによって示されている。一方、拡散係数の形を直接仮定することにより解を求めたものとして、武田(1964, 1965), Takeda (1966), Cowan (1968) らの研究がある。Inoue (1963) は、植被層が密で、粗度要素が垂直的に均一で、かつ混合距離(l)が高度に対して一定と仮定した場合の植被層内の風速分布が指数関数で表わされることを示し、Cionco (1965) も同様

の解を得ている。武田(1964)は、 $K=\alpha u(1-F)$ の拡散係数を仮定して、風速の指数則を得、これに対して、Cowan (1968) は $K/u=(K/u)_H$ を仮定して、双曲線正弦関数で示される風速分布を得ている。

真木 (1975b) は、竹田が導いた理論式中の経験定数(α)が、 z_0 と比例関係にあることを多くの観測結果(真木ら, 1968; 真木, 1969; 真木, 1975 a) から明かにし、 α 代る新しい経験定数(c)を導入した。また、Kondo and Akashi¹ (1976) は、コリオリの力を考慮した2次元流の風速分布を数値計算により求め、 z_0/H , d/H と植被面における総抵抗係数(C_D)との関係を明らかにした。しかしながら粗度要素の表面積密度が疎の場合には真木の提案した経験定数(c)の数値にはなお検討の余地があるように思われ、また、Kondo and Akashi の数値解析においては、比較的疎な植被層に対する条件として $d/H=0$ を仮定して、 z_0/H , d/H と C_D の関係を与えている。

この報告は、以上に述べた諸点を、野外の観測データによって検討し、その結果に基づいて、 z_0 , d および H の相互関係を理論的に説明することを試みている。

II 基礎方程式

地面修正量、粗度長、植被高の関係を理論的に取扱うため、まず、問題としている空間領域の範

*筑波大学水理実験センター

囲および、基礎となる方程式、すなわち運動量輸送、剪断応力、拡散係数に関する方程式について説明する。

1) 植被層内外の空間領域の区分

植被層内外の空間は、Inoue(1963)や竹田(1964)が区分したのと同じ様に、3つの領域に分け、上からⅠ(植被面上)、Ⅱ(植被層上部)、Ⅲ(植被層下部)とする。

領域Ⅰ($H \geq Z$)は一般に風速の対数則が成立つと考えられる空間で、ここでもそのように取扱う。領域Ⅱは粗度要素としての植物の葉や枝が空気の流れに大きく影響を及ぼす空間、領域Ⅲは流れが植物要素によるよりは、地表面の存在による影響をより強く受ける空間で、その境界面の高度をここでは z_0 とする。ⅠとⅡの境界面の高さは、植被面の高度 H に一致するものとする。ここで取扱う空間は特別のことわりがない限り、Ⅰ、Ⅱとする。また、コリオリの力は無視し得るような植被層とする。

2) 領域Ⅰの基礎方程式

領域Ⅰにおいては、よく知られた次の基礎方程式が成立つものとする。

$$\tau = K\rho \frac{du}{dz} \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dz} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$K = ku_*(z-d) \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 τ (dyne/cm²=gr/cm sec²)は、地表面からの高さ z (cm)における剪断応力(摩擦応力)で、(1)式は、 τ が高さ z における下向き運動量フラックスに等しいとみなしていることを示している。 K (cm²/sec²)は運動量の拡散係数、 ρ (gr/cm³)は空気の密度、 u (cm/sec)は高さ z における風速、 u_* (cm/sec)は摩擦速度、 k (=0.4)はカルマン定数、 d (cm)は地面修正量である。

(1)式から導かれる次の関係

$$\frac{\tau}{\rho} = \text{const.} = u_*^2 \dots\dots\dots(4)$$

及び、(1)、(3)式から、気層の安定度が中立の場合

の風速分布式

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \dots\dots\dots(5)$$

が得られる。ここで z_0 は粗度長である。

3) 領域Ⅱの基礎方程式

領域Ⅱ ($H \geq Z \geq Z_0$)においては、次に示すような関係が成立つものと仮定する。

$$\tau = K\rho \frac{du}{dz} \dots\dots\dots(6)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dz} = C_d a(z) u^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$K = \lambda (1-f) uH \dots\dots\dots(8)$$

ここで、 λ および f は、次のように定義される新しいパラメーターである。

$$\lambda = \beta (z_0/H)^m \dots\dots\dots(9)$$

$$f = \frac{a(Z/H)H}{a_m S_d} \dots\dots\dots(10)$$

λ 、 f はいずれも無次元の物理量で、 β 、 m 、 a_m は定数とする。 λ は相対粗度 (z_0/H)、 f は形状因子に関する空気力学的特徴量と考えることができる。 C_d は粗度要素の抵抗係数、 $a(z)$ は、高度における単位水平面積当り、単位高さ当り(したがって単位容積当り)の粗度要素(葉・径枝・葉柄・実・きやなど)の表面積 (cm²/cm³)で、 S_d と $a(z)$ の関係は次式で定義される。

$$S_d = \int_0^H a(z) dz \dots\dots\dots(11)$$

上式の S_d は、Thom (1971)が植物要素面積指数 (foliage-clement area index)と名付けたもので、葉面積指数 (leaf-area index)は、このうち葉の部分だけを考慮したものである。

III パラメーターの相互関係

前章で述べた基礎方程式を基にして、風速分布式中のパラメーターの相互関係を検討する。

ⅠとⅡの領域を分ける境界面高度を $z=H$ とし、 H における u 、 z および K の連続条件と、 $f=f_0$ の境界条件を考慮すると、(3)、(5)、(8)、(9)および(10)式から、次のような無次元表示の関係式が導

かれる。

$$\frac{u_H}{u_{*H}} = \frac{1}{k} \ln \frac{1-\delta}{\zeta_0} \dots\dots\dots(12)$$

$$\frac{u_H}{u_{*H}} = \frac{k}{\beta_0} \frac{1-\delta}{\zeta_0^m} \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 u_H および u_{*H} は $z=H$ における風速および摩擦速度で、領域 I においては定義により摩擦速度は一定であるが、他の領域における摩擦速度と区別するために H の添字をつけた（明らかに他と区別がつく場合には、この添字を省略する場合もある）。 ζ_0 および δ は、それぞれ、 $\zeta_0 = z_0/H$ および $\delta = d/H$ の関係で表わされる無次元化した粗度表および地面修正量である。また $\beta_0 = \beta(1-f_0)$ で置き換えてある。

(12), (13) 式をそれぞれ ζ_0 および δ について解くと、

$$\zeta_0 = \left(\frac{\beta_0}{k} \frac{u_H}{u_{*H}} \right)^{1/(1-m)} \exp \left(- \frac{k}{1-m} \frac{u_H}{u_{*H}} \right) \dots\dots\dots(14)$$

$$\delta = 1 - \left(\frac{\beta_0}{k} \frac{u_H}{u_{*H}} \right)^{1/(1-m)} \exp \left(- \frac{km}{1-m} \frac{u_H}{u_{*H}} \right) \dots\dots\dots(15)$$

が得られる。(14), (15) は、 ζ_0 および δ が、それぞれ、 k , β_0 , m の定数の係数をもつ u_H/u_{*H} の関数で表わされることを示している。 β , m の定数は、植被面上の風速プロファイルの観測値から決めることができる。 m の値は、理論的には $m < 1$ および $m < 0$ の場合も考えられるが、十分なるデータを得ていないので、ここでは $1 > m > 0$ 範囲内の場合について考えることにする。

(14) および (15) 式は、 $m = 0$ とすると武田 (1965) が与えた式と一致する。すなわち武田が与えた式は、(14), (15) 式の特別な場合の式と見ることができる。

ここで植被面高度 $z=H$ における総抵抗係数 (total drag coefficient) を次式

$$C_D = \frac{\tau_H}{\rho u_H^2} = \left(\frac{u_{*H}}{u_H} \right)^2 \dots\dots\dots(16)$$

のように定義すると、 ζ_0 および δ は、それぞれ次式に示されるように、 C_D の関数として表わすことができる。

$$\zeta_0 = \left(\frac{\beta_0}{k \sqrt{C_D}} \right)^{1/(1-m)} \exp \left[- \frac{k}{(1-m)} \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right] \dots\dots\dots(17)$$

$$\delta = 1 - \left(\frac{\beta_0}{k \sqrt{C_D}} \right)^{1/(1-m)} \exp \left[- \frac{km}{(1-m)} \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right] \dots\dots\dots(18)$$

Kondo (1971), Kondo and Akashi (1976) は、 $\zeta_0 (=z_0/H)$ および $\delta (=d/H)$ と C_D の関係を求めるのに際して、植被層が高く密な場合と、疎な場合に分けて、密な場合 (C_D の値が大きい領域) には、

$$\zeta_0 = 2 k^2 A^3 / (C_D \exp A) \dots\dots\dots(19)$$

$$\delta = 1 - \frac{2 k^2 A^3}{C_D} \dots\dots\dots(20)$$

ここに $A = \gamma(H-d) = \text{const.}$

で表わし、疎な場合 (C_D の値が小さい領域) には、

$$\zeta_0 = \exp \left(- \frac{2 \tan B}{B} \right) \dots\dots\dots(21)$$

$$\delta = \frac{d}{H} = 0 \dots\dots\dots(22)$$

$$B = \frac{2 C_D}{k} \left(\frac{u}{u_*} \right)_H \dots\dots\dots(23)$$

を与えた。後述する様に Kondo らが与えた式と (17), (18) 式は良く似た関係を示しているが、Kondo らの式は、 C_D のとる領域に応じて、 ζ_0 および δ の関係式をそれぞれ別々に求めなければならない。一方 (17), (18) 式では、 β_0 および m の値を考慮することにより、それぞれ 1 つの式により ζ_0 および δ と C_D の関係を表わすことができる。

次に、(12), (13) 式から、 u_H/u_{*H} を消去すると、次式を得ることができる。

$$\lambda_0 = \beta_0 \zeta_0^m = \frac{k^2 (1-\delta)}{\ln \left(\frac{1-\delta}{\zeta_0} \right)} \dots\dots\dots(24)$$

ここで $\lambda_0 = \lambda(1-f_0) = \beta(1-f_0)\zeta_0^m = \beta_0\zeta_0^m$

β_0 および m の値は、上式の関係を利用して求めることができる。

(24)式を書き直すと、

$$\frac{(z_0/H)^m}{H-d} \ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{k^2}{\beta_0 H} \quad (25)$$

の関係が得られる。上式は、種々の空気力学的特徴量を有する植被面に対応する β_0 、 m の値を考慮することにより、その植被層に対する z_0 と d および H との関係を規定することができると思われる。たとえば、(25)式は、 $m=0$ の場合を考えると、

$$\frac{1}{H-d} \ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{k^2}{\beta_0 H} \quad (26)$$

となり、上式において $\beta_0 = \alpha$ ($=0.087$) とすると、前述したように、Takeda (1966) が与えた式と全く同等となる。また、 $m=1$ の特別な場合については、次式、

$$\ln \frac{H-d}{z_0} = \left(\frac{k^2}{\beta_0} \right) \frac{H-d}{z_0} \quad (27)$$

が得られ、上式の定数を $\beta_0 = c$ ($=0.47$) で置き換えると、真木(1975)が与えた式になる。真木は、種々の植物群落における観測結果から、粗度要素の表面積密度 $a(z)$ が、 $0.05\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 以上の高密度条件下では、(27)式から求められる d 、 z_0 と H (平均植物高度) の関係は実測結果と良く合致すると報告している。そして粗度要素の分布密度が疎の場合には、 H の代わりに有効粗度高度 H_e ($z_0=0$ のときの d の値) を使用することを提案している。しかし、(25)式は、そのような手続きをしなくても、定数 β_0 および m で考慮されると考えられるので、 H の値をそのまま使って、 z_0 、 d との関係を求めることができると考えられる。

IV 観測および計算方法

1) 観 測

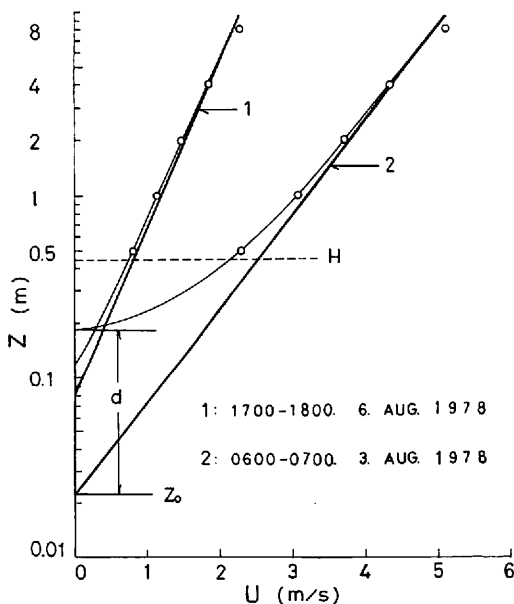
観測は、筑波大学水理実験センター内の熱収支・水収支実験圃場(古藤田ほか, 1978)で行なわれた。圃場は、直径180mの円形をしており、観測当時(1978年8月2日~9日)の平均植物高度は45cmで、ウィーピング、ケンタッキーブルーグ

ラスを主とする5種混播の牧草および一部の雑草に被われていた。

観測方法および測器(林ほか, 1979)は、高さ8mの観測用ポールを利用し、風速は、三杯の光電式微風速計AF750S(牧野応用測器製)を使用し、測定高度は地表面から、0.5、1.0、2.0、4.0、8.0mの5点で、同時にこの高度においてサーミスター温度計により乾球・湿球(通風式)温度も測定した。観測値はマイクロモデム(DC-230 S T)方式によって伝送され、記録計に内蔵されたマイクロコンピュータによって10分間平均値に処理された後、プリントアウトされた値を基礎データとした。

本報告で、解析に利用した観測値は、上記の基礎データを、さらに1時間平均値に処理したものをを用いた。

第1図は、風速が弱い時と強い時の代表的プロファイルを図示したもので、太い直線は地面修正量 d を考慮した時の風速分布プロファイルである。



第1図 風速プロファイルの観測例

2) 計算方法

d , z_0 , u_* , β_0 および m の計算は次のような方法で行なった。

① 浮力などの熱的な原因による風速分布への影響を除くために、取扱う風速分布は中立状態に近い時のデータを選んだ。選別の基準としては、高度 2 m におけるリチャードソン数 (R_i) を計算し、 $|R_i| < 0.03$ の条件を満足するものだけを選んだ。 R_i は次式に従って計算した。

$$R_{i2} = \frac{(T_{z2} - T_{z1})}{(u_{z2} - u_{z1})^2} \left(\frac{g}{T} \right) \sqrt{z_1 \cdot z_2} \ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \dots \dots \dots (28)$$

ここに、 R_{i2} は幾何学的平均高度 $z = \sqrt{z_1 \cdot z_2} = 2$ m における R_i 数、 T_{z1} , T_{z2} , u_{z1} , u_{z2} はそれぞれ高度 $z_1 = 1$ m および $z_2 = 4$ m における気温 (絶対温度) および風速である。 g は重力の加速度、 T は平均温位であるが、ここでは、 $z = 1, 2, 4$ m の高度の平均温度 (絶対温度) を使用した。

② d は次式で示される Rider (1954) の方法によって計算した。

$$\frac{u_3 - u_2}{u_2 - u_1} = \frac{\ln(z_3 - d) - \ln(z_2 - d)}{\ln(z_2 - d) - \ln(z_1 - d)} \dots \dots \dots (29)$$

ここに、 u_1 , u_2 , u_3 は、それぞれ高度 z_1 , z_2 , z_3 における風速で、 d は地面修正量である。

風速は測器の測定精度を考慮して、高度 0.5 m における風速が 0.5 m/sec 以下の場合には計算から除外した。計算の具体的手順は、風速および高度が既知なので、 d の値を 0 から始めて 1 mm 刻みで、45 cm になるまで増やして行きながら右辺を計算し、左辺の値と比較し、右辺と左辺の値が、所定の許容誤差 ($\epsilon = 0.03$) におさまれば、その時の d の値を採用して計算を打ち切り、所定の許容誤差におさまらない場合は、 $d = 45$ cm になるまで計算をくり返し、その間の最も誤差が小さい時の d の値を採用するようにプログラムを組んで、コンピュータで計算した。 d の算出は、種々の高度の組合わせについて計算したが、高度 8 m の値を利用すると、バラツキが大きく出てきたので、0.5, 1, 2, 4 m までの風速データを用い、そ

の平均値をもって、1つのプロファイルについての d の値とした。

③ z_0 および u_* の値は、次式、

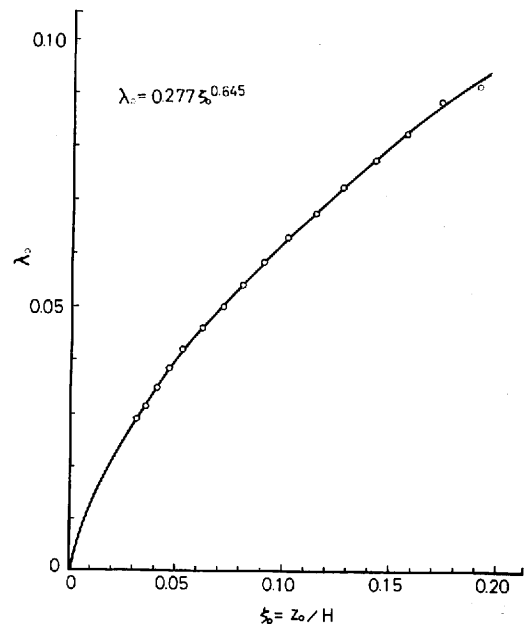
$$u = \frac{u_*}{k} \ln(z - d) - \frac{u_*}{k} \ln z_0$$

を利用して求めた。すなわち、安定度が中立状態のデータを選んだので、 $u(z)$ と $\ln(z - d)$ は、片対数グラフ上では直線になり、 u_*/k はその勾配となる。そこで、 d の値と、 $z = 0.5, 1, 2, 4$ m に対応する u の値を代入し、 u と $\ln(z - d)$ が直線関係になるような u_*/k を最少自乗法で求め、 $k = 0.4$ として u_* を求めた。 z_0 の値はその時の切片の値から、 u_* が決まれば同時に計算によって求めることができる。

V 結果および考察

1) 経験定数 β_0 および m について

β_0 および m の値は、 δ および ζ_0 の個々の値を (24) 式に代入して求めることができるが、 δ の値にバラツキが大きいため、計算処理に手間がかかることから、 ζ_0 と u_n/u_{*n} の関係を示す実験式を



第 2 図 λ_0 と ζ_0 の関係

次に示すような級数近似で求め、

$$\zeta_0 = \frac{z_0}{H} = 0.9681 - 0.3551\gamma + 0.0574\gamma^2 - 0.00515\gamma^3 + 0.00021\gamma^4 \dots (30)$$

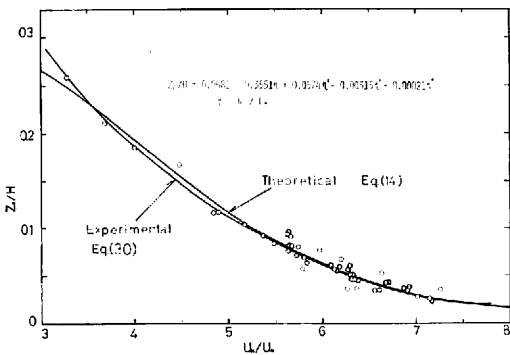
$$\gamma = u_H / u_{*H}$$

これと、風速分布式から、 ζ_0 に対応する $\delta = d/H$ の値を求め、この値を利用して(24)式から β_0 および m を決定した。第2図は、筑波大の実験圃場で得られた $\lambda_0 = k^2(1-\delta)/\ln[(1-\delta)/\zeta_0]$ と ζ_0 の関係を図示したもので、 β_0 および m の値はそれぞれ次のようになった。

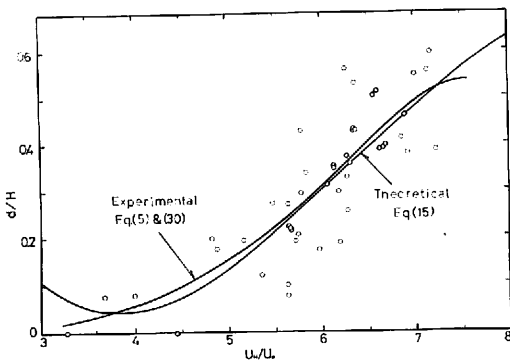
$$\beta_0 = 0.277, m = 0.645 \dots (31)$$

2) パラメーターの相互関係

第3図は、 $\zeta_0 = z_0/H$ と u_H / u_{*H} の関係を図示したもので、比較のため、級数近似により求めた実験式〔(30)式〕と、 $\beta_0 = 0.277, m = 0.645$ とした



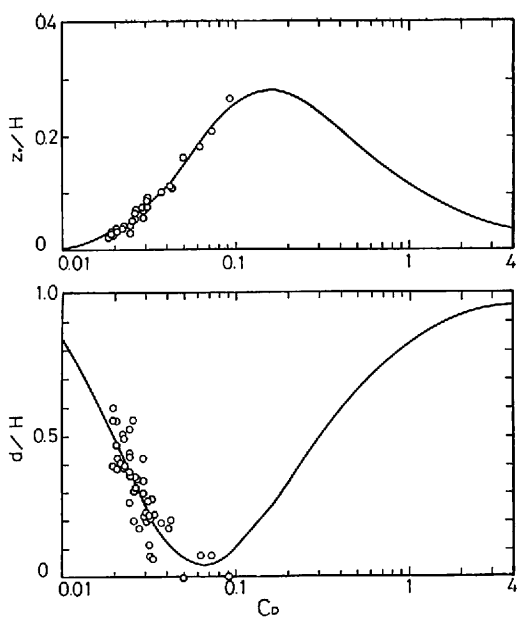
第3図 z_0/H と u_H / u_{*H} の関係



第4図 d/H と u_H / u_{*H} の関係

ときの理論式〔(14)式〕で計算した曲線を描いてある。同様に第4図は $\delta = d/H$ と u_H / u_{*H} の関係を図示したもので、両図を対比させて見ると、 z_0 の減少にともなって d が増大していることがわかる。谷(1960)は、水稻群落において、 z_0, d と高度1.5mの風速の推移の関係において、初期の風速の弱い時の z_0 の増大領域A(d は逆に減少する)、風速2~5mにおける z_0 の減少領域B(d は増大する)、および風速5m/sec以上になった時の z_0 の増大領域C(d は減少)があることを指適したが、実験圃場における観測値は、谷の区分したB領域に属する変化をしていると思われる。一般に水稻や小麦などの植物群落は、トウモロコシや樹木などの硬い(stiff)粗度要素からなる植物群落と比較して、より柔軟性(flexible)に富み、穂波現象(waving phenomena)や、自己遮へい(self sealing)などの現象が起ることが指適されている。圃場の植被層は、水稻や小麦などの植被層に比べて、更に柔軟性に富んでいると考えられ、このため、B領域に属する z_0, d の変化が良く観測されたものとする。従来、野外観測や風洞実験は、比較的剛直な粗度要素を対象とした研究が多く、柔軟な粗度要素を対象とする研究は殆んど見られなかった。しかしながら、本圃場の観測値にみられるように、waving phenomenaやself sealingが発達し易い柔軟性に富んだ植物群落では、B領域に属するような z_0, d の変化は容易に生ずるものと見られる。換言すれば、このような特性をもつ植物群落においては、 C_D が小さい領域においても、 $d/H \rightarrow 0$ とはならず z_0 の変化に対応した d の振舞いが見られると考えられる。

第5図は、 ζ_0 および δ と C_D の関係をプロットしたものである。図の $\zeta_0 = z_0/H$ と C_D 、および $\delta = d/H$ と C_D の関係を示す曲線は、それぞれ(17)式および(18)式の解析解を図示したものである。データは、谷の区分したB領域に属する値しか得られなかったが、解析解の曲線が示すところによれば、 z_0 は、 C_D の値が0.16のところで極大値($\zeta_0 = 0.28$)をもち、この値より C_D 値が大きい領



第5図 z_0/H , d/H との C_D 関係

域では、 z_0 は C_D 値の増大とともに減少するような傾向を示している。同様に d については、 C_D 値が0.07付近で極小値 ($\bar{\theta}=0.04$) をもち、これより C_D 値が大きい領域では C_D とともに d も増大する傾向をみせている。

Kondo and Akashi (1976) は、粗度要素密度の垂直分布の形を種々想定し、数値解析によって z_0/H および d/H と C_D との関係を探り、従来の研究者 (Saito, 1963; Denmead, 1964; Uchijima and Wright, 1964; Allen, 1968; Perrier et al., 1970; Saito et al., 1970; Druihet et al., 1971; Kondo, 1971; Oliver, 1971; Thom, 1971; Shinn, 1971; Baines, 1972; Tan and Ling, 1961) のデータと比較している。自然の植生面においては、風に対する植物群落構造の空気力学的反応は、植物群落構造の違いや、同一の植物群落でも、春先きの葉や枝が柔軟な時期と、完全に生長して葉枝がかなり剛直になった時期の群落では、かなり異った様相を見せる (Udagawa, 1966; 真木ほか, 1968)。したがって、第5図に示した曲線が、群落構造やその空気力学的反応を異にす

る他の植被層に直ちに適用できるとは思わないが、上述した Kondo and Akashi の得た結果と比べると、 C_D が大きい方の領域においても、他の研究者が得た値が、かなりのバラツキはあるものの、ほぼこの曲線上に乗ることが認められる。

VI 要 約

筑波大学水理実験センター内の熱収支・水収支実験圃場 (植被はウィーピング、ケンタッキーブルーグラスを主とする5種混播の牧草) において、運動量輸送量や熱収支を空気力学的に推定するための一連の観測を行なった。そのうち、風速プロファイルデータの解析結果から、

① 植被層内の拡散係数として、(8), (9), (10)式で示されるような形の拡散係数が提案された。この拡散係数を利用して理論的に導かれた、風速分布のパラメーターを関係づける諸式は、圃場で観測した z_0 , d および H の振舞いをよく説明できるようである。

② u_n/u_{*n} および C_D の関数として提示された ξ_0 および $\bar{\theta}$ の式 [(14), (15), (17), (18)式] は、経験定数 β_0 および m の値を考慮することにより、種々の空気力学的特性をもつ植被層に対しても適用され得ると考える。

③ 経験定数 β_0 , m は (24)式を利用して決定することができる。

④ 新しい拡散係数の形を仮定して理論的に導かれた d , z_0 および H の関係を規定する(26)式は、柔軟な粗度要素をもつ植被層に対し適用されるが、 β_0 , m の値を考慮することにより、Takeda (1966), 真木 (1975) が提案したいずれの式をも満足する形となっている。

本研究を行うにあたり、観測の実施に際しては、筑波大学水理実験センターの林陽生氏、同地球科学系研究科大学院生中川慎二氏の協力を得た、また、同大学学生出口賢二、佐藤朗の両君にはデータの整理等を手伝っていただいた。ここに謝意を表する次第であります。なお、本研究は、筑波大学一般研究(甲) [地表面付近の熱収支・水収支変動の野外実験的研究] の研究

費の一部を使用し、また、データの計算にあたっては筑波大学学術情報処理センターの大型計算機 (TOSB AC-5600) を利用した。記して謝意を表します。

文 献

- 古藤田一雄・佐倉保夫・林 陽生・甲斐憲次(1978) : 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムデータ集録・処理について、筑波大学水理実験センター報告, 2, 65-89.
- 武田京一 (1964) : 植物群落内部の風について, 農業気象, 20, 1-5.
- 武田京一 (1965) : 植物群落内部の風について(II), 農業気象, 21, 11-14.
- 谷 信輝 (1960) : 耕地上の風の測定結果について, 農業気象, 16, 89-93.
- 林 陽生・古藤田一雄 (1979) : 接地層プロファイル測定装置について, 筑波大学水理実験センター報告, 3, 81-88.
- 真木 太一・高見 晋一・新庄 彬 (1968) : ソルゴー植被上に於ける風速分布式中の地面修正量と粗度長について, 農業気象, 24, 127-132.
- 真木太一 (1969) : トウモロコシ植被上における風速分布式中の地面修正量と粗度長について, 農業気象, 25, 13-18.
- 真木太一 (1975 a) : 植物群落高度と地面修正量および粗度長との相互関係, 農業気象, 31, 7-15.
- 真木太一 (1975 b) : 種々の植被面における風速分布式中の変数と安定度, 農業気象, 31, 61-70.
- Cionco, R. M. (1965) : A mathematical model for air flow in a vegetative canopy. *Journ. Appl. Meteor.*, 4, 517-522.
- Cowan, I. R. (1968) : Mass, heat and momentum exchange between stands of plants and their atmospheric environment. *Quart J. Roy. Meteor. Soc.*, 94, 523-544.
- Inoue, E. (1963) : On the turbulent structure of airflow within crop canopies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 41, 317-326.
- Kondo, J. (1971) : Relationship between the roughness coefficient and other aerodynamic parameters. *J. Meteor. Soc. Japan*, 49, 121-124.
- Kondo, J. (1972) : On a product of mixing length and coefficient of momentum absorption within plant canopies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 50, 487-488.
- Kondo, J. and Akashi, S. (1976) : Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layers. *Boundary-Layer Meteor.*, 60, 255-272.
- Kung, F. C. (1961) : Derivation of roughness parameters from wind profiles data above tall vegetation. pp. 151. In *Physical climatology*, Sellers, W. D. The Univ. of Chicago Press, Chicago & London.
- Lettau, H. (1969) : Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *J. Appl. Meteor.*, 8, 828-832.
- Rider, N. E. (1954) : Evaporation from an oat. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 80, 198-211.
- Sellers, W. (1965) : *Physical climatology*. University of Chicago Press, 272pp. Chicago & London.
- Stanhill, G. (1969) : A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. *J. Appl. Meteor.*, 8, 509-513.
- Takeda, K. (1966) : On roughness length and zero-plane displacement in the wind profile of the lowest air layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, 44, 101-108.
- Tanner, C. B. and Pelton, W. L. (1960) : Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, 65, 3391-3413.
- Thom, A. S. (1971) : Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 97, 414-428.