植物群落上の風速分布と その空気力学的特徴量について

古藤田一雄・林 陽 生
(筑波大学水理実験センター)

On the Wind Profile above Plant Canopies
and its Aerodynamic Properties

Kazuo KOTODA and Yousay HAYASHI

(Environmental Research Center, The University)
of Tsukuba, Ibaraki, 305, Japan

1. 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 および地面修正量 d と、植物高度 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、様々な報告がなされてきた。Tanner and Pelton (1960) は、 z_0 と H の関係を $\log z_0 = a \log H + b$ で整理し、この常数として $a = 0.997$, $b = -0.883$ の値を求めた。この関係は、近似的には $z_0 = 0.13H$ で表わされ、 z_0 を簡単に推定する方法として、しばしば用いられている (Monteith, 1973)。常数 a , b の値は、その後 Kung (1961) [$a = 1.19$, $b = -1.24$], Sellers (1965) [$a = 1.417$, $b = -1.385$], Stanhill and Fuchs (1968) [$a = 1.476$, $b = -2.022$] などにより、新しい値が次々と発表された。

Lettau (1969) は、 z_0 が H のみならず粗度要素の形態的特性によっても影響を受けるとして、比面積 $S = A/n$ (n は粗度要素の数, A は地表面積) に対する風上側よりみた粗度要素の断面積 s の比 s/S で示されるパラメーターを導入して $z_0 = 0.5H(s/S)$ を提案した。しかし、この式により求めた予測値 z_0 は、植物群落に対しては実測値との一致があまり良好でないことが指摘されている (Kondo, 1971)。

Stanhill (1969) は、 d と H の関係式として $\log d = 0.9793 \log H - 0.1536$ を得た。この関係式は、実測値のバラツキの大きさを考慮すると、実用的には $d = 0.63H$ で十分近似できる (Monteith, 1973)。また、Uchijima (1976) は、水稻およびトウモロコシ群落に対する平均的な関係として、Stanhill らと若干異なる経験式 $z_0 =$

$0.062H^{1.08}$, $d = 1.04H$ を得た。

樹林に対する z_0 , d の観測値は、Jarvis et al (1976) が、多くの研究者の成果をまとめて一覧表にしている。その表によると、 z_0/H の値は、0.002 から 0.26 までの2桁のオーダーの範囲にわたる様々な値が得られている。また、 d/H の値も、その多くは 0.6–0.9 の範囲内にあるが、樹種や、同一の樹種でも観測時を異にしたような場合には、かなり異なった値が得られている。このことは、 z_0 や d が H によって一義的に決定し得ないことを示しているとみなせる。

z_0 や d が、植物群落の高さのみならず、風速 u や摩擦速度 u_* にも依存することは、たとえば、谷 (1960), Udagawa (1966), 真木 (1969, 1975 a, 1975 b), Denmead (1971) などの報告で指摘されている。また、Kondo and Akashi (1976) は、 z_0 , d が H のほかに $C_D' = C_d a_l H/2$ (C_d は個々の植物要素の抵抗係数, a_l は葉面積密度) で定義される群落抵抗因子 (canopy drag factor) と関係づけられることを示した。

以上のように、 z_0 や d は H のほかに u , u_* あるいは C_D' などに依存して変化することが明らかになったが、これらの相互関係については、必ずしも十分に明らかにされているとは言えないように思える。

筆者らは、これらの点を考慮して、本報告では主として次のような点について研究を行った。

① 植物群落上の風速分布の観測と解析によって、② u_* , z_0 , d などの風速分布パラメーターと、これらの振舞いに関係する植物高度 H や、群落の総抵抗係数 C_D などの関係を理論的に検討し、③ これらの結果と実測値の比較・考察を行う。

昭和 54 年 4 月 3 日 全国大会にて発表

昭和 54 年 9 月 26 日 受理

2. 風速分布の基本式およびそのパラメーター

いま、問題としている植物群落内外の空間を、数学的取扱いの便宜を考えて、植物群落高度 H を基準として上下に二分することにする。ここで H は研究者により若干定義のしかたが異なるが、ここでは、Inoue (1963) と同じように、無風時における植物群落の頂部の平均高度をとることとする(実際の求め方は後述する)。また、 H は風が吹くことによって植物要素が振動したり、傾いたりするため、実際には風速に対して独立ではないが、本報告では H は風速とは関係なく一定値をとり得るものと仮定する。

(1) 風速分布の基本式と拡散係数の仮定

植物群落上 ($z \geq H$) における風速鉛直分布は、中立成層状態の場合には、一般に次のような対数法則式によく適合することが多くの研究者により確かめられている。

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (1)$$

ここに u は地表面からの高さ z における風速、 u_* は摩擦速度、 d は地面修正量、 z_0 は粗度長、 k はカルマン常数である。

また、植物群落上における運動量の鉛直方向の拡散係数 K_1 は、中立成層状態の場合には、

$$K_1 = k u_* (z-d) \quad (2)$$

で与えられるものとする。ここで K_1 の添字 1 は、群落上 ($z \geq H$) における拡散係数を意味する。これに対して、群落内 ($z \leq H$) においては、群落を構成する植物要素に起因して、空気の流れが乱されるため、風速分布が変形され、一般には対数分布と異なった形になる。このため、群落上では適用可能な風速分布の対数則も、群落内の気層に対しては、そのまま適用できなくなる (Inoue, 1963; Cowan, 1968)。

Takeda (1966) は、 d および z_0 と、植物高度 H との関係の説明するために、群落内の拡散係数を

$$K_{2T} = \alpha H u (1-F) \quad (3)$$

と仮定した。ここに K_{2T} は Takeda の拡散係数で、 α はその経験常数、 F は植物の繁茂度 ($1 \geq F \geq 0$) である。

その後、真木 (1969, 1975 a), Maki (1976) は、テオシント、トウモロコシ、ソルゴー、ガラス棒モデル群落等での観測や実験結果をもとにして、Takeda の式を検討し、次のような改良式を提案した。

$$K_{2M} = c z_0 u (1-F) \quad (4)$$

ここに、 K_{2M} は真木の拡散係数で、 c はその経験常数である。

真木の提案した K_{2M} に基づいて導かれた d や z_0 と H との関係式は、Takeda の提案した式に比べてかなり改良

され、実測値とも一致するようであるが、なお観測誤差に起因するとは思われない若干のパラツキがみられる。このため、著者らの一人、古藤田 (1979) は真木の提案した式をさらに改良するために、次の形の拡散係数を提案した。

$$K_2 = \lambda H u (1-F) \quad (5)$$

$$\lambda = \beta (z_0/H)^m \quad (6)$$

ここに、パラメーター λ は、相対粗度長 (z_0/H) の関数として与えられ、 β 、 m はそれぞれ無次元の経験常数である。

(2) 相対粗度長 (z_0/H)、相対地面修正量 (d/H) と u_H/u_* の関係

植物群落の上部境界面の高度 $z=H$ においては、連続の条件によって、群落上の拡散係数 K_1 と、群落内の拡散係数 K_2 は一致しなければならないので、 $K_H = K_1 = K_2$ となる。ここで K_H は $z=H$ における拡散係数である。同様に、 $z=H$ における風速を u_H で表わすと、この高さでは、風速の連続の条件によって、(5) 式の u は、(1) 式の u_H と等しくなければならない。また、繁茂度 F は $z=H$ において $F=f_0$ の値をとるものとする (ただし、 $1 \geq f_0 \geq 0$) と、これらの条件と (1) 式から

$$\frac{u_H}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{1-\delta}{\zeta_0} \quad (7)$$

さらに、(2)、(5) および (6) 式から

$$\frac{u_H}{u_*} = \frac{k}{\beta_0} \frac{1-\delta}{\zeta_0^m} \quad (8)$$

が得られる。ここに $\delta = d/H$ 、 $\zeta_0 = z_0/H$ 、 $\beta_0 = \beta(1-f_0)$ である。

(7)、(8) 式から、相対粗度長 ζ_0 および相対地面修正量 δ が、それぞれ次式のように導かれる。

$$\zeta_0 = \left(\frac{\beta_0}{k} \frac{u_H}{u_*} \right)^{1/(1-m)} \exp \left[- \frac{k}{(1-m)} \frac{u_H}{u_*} \right] \quad (9)$$

$$\delta = 1 - \left(\frac{\beta_0}{k} \frac{u_H}{u_*} \right)^{1/(1-m)} \exp \left[- \frac{k m}{(1-m)} \frac{u_H}{u_*} \right] \quad (10)$$

(9)、(10) 式から明らかなように、 ζ_0 および δ は、それぞれ摩擦速度に対する $z=H$ における風速の比 u_H/u_* に依存して変化することがわかる。

(3) 経験常数 β_0 、 m について

(7)、(8) 式から u_H/u_* を消去すると、

$$\lambda_0 = \beta_0 \zeta_0^m = \frac{k^2 (1-\delta)}{\ln \left(\frac{1-\delta}{\zeta_0} \right)} \quad (11)$$

が得られる。ここで、 $\lambda_0 = \lambda(1-f_0) = \beta(1-f_0) \cdot \zeta_0^m = \beta_0 \zeta_0^m$ である。

いま、植物群落上の風速分布の観測値を利用して、 δ

および ζ_0 の値を求めることができれば、 β_0 および m の値は、(11)式を利用して推定することができる。

(4) ζ_0 , δ と C_D の関係

植物群落上の接地境界層の風速分布が対数法則で示されると仮定して、植物群落の総抵抗係数 C_D を次式の形で定義する。

$$C_D = \frac{\tau_H}{\rho u_H^2} \quad (12)$$

ここで、 C_D は、 $z=H$ における総抵抗係数、 τ_H 、 u_H はそれぞれ $z=H$ における摩擦応力および風速である。

(12)式は、接地境界層における $\tau_H = \rho u_*^2$ の関係と、(1)式の関係を考慮すると、

$$C_D = \left(\frac{u_*}{u_H}\right)^2 = k^2 / \left[\ln\left(\frac{H-d}{z_0}\right) \right]^2 \quad (13)$$

の関係で示すことができる。

(13)式の第1式を、それぞれ(9)、(10)式に代入して、 u_H/u_* を消去すると、 ζ_0 および δ はそれぞれ次式のように、 C_D の関数として表わすことができる。

$$\zeta_0 = \left(\frac{\beta_0}{k\sqrt{C_D}}\right)^{1/(1-m)} \exp\left[-\frac{k}{(1-m)\sqrt{C_D}}\right] \quad (14)$$

$$\delta = 1 - \left(\frac{\beta_0}{k\sqrt{C_D}}\right)^{1/(1-m)} \exp\left[-\frac{km}{(1-m)\sqrt{C_D}}\right] \quad (15)$$

(14)、(15)式は、 $m=0$ の特別な場合を考えると、それぞれ

$$z_0 = \frac{\beta_0 H}{k\sqrt{C_D}} \exp\left(-\frac{k}{\sqrt{C_D}}\right) \quad (16)$$

$$d = H\left(1 - \frac{\beta_0}{k\sqrt{C_D}}\right) \quad (17)$$

となる。(16)、(17)式は、係数 β_0 の値が、Takeda (1966)の求めた係数 α の値と等しい場合には、Takeda の得た式と同一のものとなる。

(5) z_0 , d および H の相互関係

(11)式を書き直すと

$$\ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{k^2}{\beta_0 H} \left(\frac{H-d}{z_0/H}\right)^m \quad (18)$$

が得られる。上式は $m=0$ の特別の場合には、

$$\ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{k^2}{\beta_0} \frac{(H-d)}{H} \quad (19)$$

となる。(16)、(17)式の場合と同様に、上式は $\beta_0 = \alpha$ を仮定すると、Takeda (1966) が得た式と同一になる。Takeda は、谷 (1960) の水稻群落における観測データから、 $\alpha = 0.087$ を得ている。

また、(18)式は、 $m=1$ の場合を考えると、

$$\ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{k^2}{\beta_0} \frac{(H-d)}{z_0} \quad (20)$$

が得られる。上式は $\beta_0 = c$ とおくと、真木 (1975 a) が提案した式と同じになる。ただし、真木は H の値として平均植物高度を与えている。経験常数 c の値は、Maki (1976) が、植物群落の平均値として $c = 0.48$ を得ている。

同様の式が、Kondo (1971) によっても求められている。Kondo は、草丈が高く、植物要素が均質で密に分布する植物群落の場合と、草丈が短かくて疎な場合とに分け、それぞれについて別個に z_0 、 d および H を規定する関係式を導き、前者の場合には、次式を与えている。

$$\ln \frac{H-d}{z_0} = \frac{1}{r(H-d)} \quad (21)$$

ここに、 r は植物要素の運動量吸収係数に相当する係数である。後者の場合には、 $d \ll H$ を仮定して、次式

$$x = \frac{2 \tanh[a_l C_d H x / k^2]^{1/2}}{(a_l C_d H x / k^2)^{1/2}} \quad (22)$$

$$x = \ln \frac{H}{z_0} \quad (23)$$

を導いている。そして、 $a_l C_d H / k^2 \ll 1$ のとき、すなわち粗度要素が小さくて、その密度が疎な場合には、(22)式から次式が導かれることを示した。

$$\frac{H}{z_0} \div e^2 = 7.39 \quad (24)$$

しかしながら、筆者により導かれた(18)式は、Kondo のように、植物群落の高低や、植物要素密度の疎密によって、それぞれ別の式を使い分ける必要はなく、一つの式でより統一的に d 、 z_0 と H の関係を説明できると考えられる。

3. 観測場所および観測方法

前章において導かれた風速分布パラメーターと u_H/u_* 、 C_D および H との関係の妥当性について検討するために、筑波大学水理実験センターの熱収支・水収支圃場における牧草上での観測結果 (古藤田, 1979; 林, 1979)、トウモロコシ圃場 (真木, 1969, 1975 a; Maki, 1976) およびカラマツ林 (Allen, 1968) の観測結果を利用した。以下これらの観測地点の概要と観測方法を略記する。

(1) 筑波大学熱収支・水収支圃場 (古藤田ほか, 1978)

直径 180 m の円形の圃場で、観測当時 (1978 年 8 月 2 ~ 9 日) の植物群落の高い個体の頂部 (穂の高さ) の平均高度は 45 cm であった。牧草は同年 5 月にケンタッキーブルーグラス、レッドトップ、ウィーピング、クリーピング、ホワイトクローバの 5 種類を混播し、7 月下旬に約 30 ~ 40 cm の高さに刈込んで頂部をそろえ、8 月に観測を開始した。この観測時には葉面積指数 (LAI) は測定し

なかったが、1979年度の測定結果から推定すると、LAIは約 3 ± 0.5 程度と考えられる。

風速の測定は、8mの観測用マストに三杯型光電式微風速計(牧野応用測器研究所製、AF750S型)5台を測定高度0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0mにセットし連続観測を行った。観測された信号は、マイクロモデム方式による送受信装置(デュアル電子株式会社製)により伝送され、マイクロコンピュータによって、約1.5秒間隔にサンプリングされた各測定値を、10分間平均値に演算して、デジタルプリンターにプリントアウトされたデータを原データとして使用した(林・古藤田, 1979)。原データは、筑波大学学術情報処理センター大型計算機(TOSBAC-5600)によって、演算・処理を行った。データの平均化時間の長短については、種々の考え方があろうかと思われるが、本報告では、気候学的な便を考慮して、1時間平均値をもって解析に利用した。

空気力学的パラメーターの一つである地面修正量 d は高度2mにおけるリチャードソン数 Ri が $|Ri| < 0.03$ の条件を満足するほぼ中立成層に近いデータのみを選んで算出した。計算は次式で示されるRider(1954)の方法により、電算機を利用して数値的に求めた。

$$\frac{u_3 - u_2}{u_2 - u_1} = \frac{\ln(z_3 - d) - \ln(z_2 - d)}{\ln(z_2 - d) - \ln(z_1 - d)} \quad (25)$$

z_0 および u_* の値は、気層が中立成層を仮定できる場合には、次式

$$u = \frac{u_*}{k} \ln(z - d) - \frac{u_*}{k} \ln z_0 \quad (26)$$

を利用して求めることができる。すなわち、(26)式は、 $A = u_*/k$ 、 $B = A \ln z_0$ とおくと、 $u = A \ln(z - d) - B$ で示されるので、 n 組($i = 1, 2, \dots, n$)の $\ln(z_i - d)$ に対する u_i のデータを用いて、最少自乗法により係数 A 、 B を求め、 $u_* = A/k = A/0.4$ 、 $z_0 = \exp(B/A)$ によって u_* 、 z_0 を推定することができる。

(2) カラマツ林(合衆国, N.Y.州 Ithaca)

林の平均樹高は1040 cmで、吹送距離は西方向に150 m、南南西方向に600 m、北西方向に300 mである。観測時のカラマツ群落は、1964年10月30, 31日の場合には、最繁茂時の葉の約2/3が落葉した状態であった。これに対して、11月10, 12日の場合は、完全に落葉した状態であった。

風速は樹冠上ではBeckman & Whitleyの風杯型風速計(4高度)およびThorntwaiteの風杯型風速計(6高度)で測定され、樹林内ではHasting-Raydistの熱電対風速計(6高度)によって測定された(Allen, 1968)。

(3) トウモロコシ圃場(東大付属農場, 田無市)

観測当時のトウモロコシ畑は100 m×200 mの広さで、

風速は理工研式小型ロビンソン風速計(佐野屋鉄工所製)を用いて、2.1, 2.5, 3.2, 4.2, 5.2 mの5高度で測定された。1968年7月24・25日の観測当時のトウモロコシの平均高は245 cmで、LAIは5.2であった(真木, 1969, 1975a)。

4. 観 測 結 果

(1) 摩擦速度と風速の関係

牧草上での風速分布から求めた摩擦速度 u_* と、植物高度 $H = 45$ cmにおける風速 u_H の関係は、Fig. 1に見られるように、風速0.5 m/s付近から3 m/s付近までの範囲内では、 $u_* = 0.133 u_H + 6.48$ (cm/s)の直線で近似できる。

Fig. 1. Relation between friction velocity (u_*) and wind velocity (u_H) at the height of plant canopy ($H = 45$ cm).

これに対して、トウモロコシ群落では、 u_* と u_z の関係は指数関数で近似した方が良く適合することが真木(1975)によって報告されている。真木は、7月24・25日のトウモロコシ群落における風速の観測結果をまとめて、 $u_* = 0.017 u_{5.6}^{1.351}$ (ここに $u_{5.6}$ の下付きの添字は、風速測定高度5.6 mを意味する)を得た。

(2) 経験常数 β_0 、 m と λ_0 の関係

筑波大の牧草上での風速分布観測結果から、(11)式で示される ζ_0 と λ_0 の関係をプロットして、係数 β_0 および m を決めた結果、 $\lambda_0 = 0.277 \zeta_0^{0.645}$ を得た。Ithacaのカラマツ林における λ_0 と ζ_0 の関係は、後述の理由で10月と11月の観測結果は各々別個に分離できるようである。ただし、10月のデータは、対数グラフ上で一本の直線関係に表わせないで、 $\zeta_0 = 0.06$ 付近を境にして、 $\zeta_0 > 0.06$ の領域における直線($\beta_0 = 0.400$, $m = 0.950$)と $\zeta_0 < 0.06$ の領域における直線($\beta_0 = 0.113$, $m = 0.513$)に分離した。11月のデータは、1本の直線($\beta_0 = 0.347$, $m = 0.851$)に近似できる。トウモロコシ群落に対する係数値

Table 1. Values of β_0 , m and $C_D(H)$ for some canopies.

canopy	$H(\text{cm})$	β_0	m	$C_D(H)$	Date	Reference
Japanese larch	1040	0.400	0.950	0.08-0.20	31-31, Oct., 1964	Allen (1968)
"	1040	0.113	0.513	0.04-0.08	"	"
"	1040	0.347	0.851	0.01-0.20	10-12, Nov., 1964	"
maize crop	245	0.370	0.870	0.30-1.5	24-25, July, 1968	Maki (1969, 1976)
rye grass	45	0.277	0.645	0.01-0.12	2-8, Aug., 1978	Kotoda (1979)

($\beta_0=0.370$, $m=0.870$)は、真木(1969, 1975 a)の論文のグラフから読取った値を使用している。得られた β_0 および m の値は、まとめてTable 1に掲げてある。

(3) z_0/H , d/H と u_H/u_* の関係

a) z_0/H と u_H/u_* の関係 Fig. 2 は、牧草群落における z_0/H と u_H/u_* の関係をプロットしたもので、図中の曲線は、 $\beta_0=0.277$, $m=0.645$ として(9)式で計算した z_0/H と u_H/u_* の関係を描いたものである。

Fig. 3 は、カラマツ群落における z_0/H と u_H/u_* の関係を図示したものである。図に示されているように、10

Fig. 2. Dependence of relative roughness length (z_0/H) on u_H/u_* for pasture grass canopy.

Fig. 3. Dependence of relative roughness length (z_0/H) on u_H/u_* for Japanese larch and rice crop canopies.

月の観測結果は、A線およびB線で近似できるが、大部分はA線に沿って値が分布している。これに対して、11月の観測結果は、C線で近似できる。このように、カラマツ群落における u_H/u_* の変化に対する z_0/H の変化は、10月と11月の場合では明らかに相違することが指摘できる。両者の z_0/H の変化の相違は、一部は計測誤差にも起因していると思われるが、その主因は、10月と11月におけるカラマツ林の葉の有無が風に対する空気力学的応答特性を大きく変えたものと考えられる。Fig. 3には、また、谷ら(1954)が水稻群落で得たデータをもとにして計算した z_0/H と u_H/u_* の関係もプロット(Δ 印)してある。このデータによれば、水稻群落の z_0/H の値は、低風速領域($u_{200}=4\text{ m/s}$ 以下)においては、図のA線で近似される線にのり、高風速領域($u_{200}=6\text{ m/s}$ 以上)ではC線で近似される線の上に値がのり、低風速から高風速への遷移領域($u_{200}=4\sim 6\text{ m/s}$)はB線上にのっている。ここで、曲線A, B, Cは、カラマツ林のデータをもとにして定められた値であるが、水稻群落で得たデータもよくのということとは、両者に空気力学的な相似関係を有することを暗示する。

b) d/H と u_H/u_* の関係 Fig. 4は、牧草群落における u_H/u_* に対する d/H の変化を図示したものである。同様に、Fig. 5にはカラマツ群落および水稻群落における d/H の変化をプロットしてある。 u_H/u_* に対する d/H

Fig. 4. Dependence of relative zero-plane displacement (d/H) on u_H/u_* for pasture grass canopy.

Fig. 5. Dependence of relative zero-plane displacement (d/H) on u_H/u_* for Japanese larch and rice crop canopies.

の値は、 z_0/H の値に比べてややバラツキが大きい、測定された範囲内では、 u_H/u_* の増大にともなう d/H もまた増大しており、その傾向線は(10)式で近似できる。

(4) z_0/H , d/H と C_D の関係

Fig. 6 および Fig. 7 はそれぞれ $\zeta_0 (=z_0/H)$ と C_D およ

A	$m = 0.950$	$\beta_0 = 0.400$	MAIZE CROP (MAKI, 1969, 1976)
B	$m = 0.513$	$\beta_0 = 0.113$	□ 24-25, JULY, 1968, $H = 245$ CM
C	$m = 0.851$	$\beta_0 = 0.347$	⊠ 1-3, AUG., 1968, $H = 265$ CM
D	$m = 0.870$	$\beta_0 = 0.370$	■ 5-9, AUG., 1968, $H = 275$ CM
E	$m = 0.645$	$\beta_0 = 0.277$	BEAN CROP (THOM, 1971)
			■ 7, JULY, 1966, $H = 118$ CM
			PINE FOREST (OLIVER, 1971)
			△ 14, SEPT., 1954, $H = 110$ CM
			○ 30-31, OCT., 1964, $H = 1040$ CM
			● 10-12, NOV., 1964, $H = 1040$ CM
			○ 2-8, AUG., 1978, $H = 45$ CM

Fig. 6. Dependence of relative roughness length (z_0/H) on total drag coefficient (C_D) for six different types of canopies.

Fig. 7. Dependence of relative zero-plane displacement (d/H) on total drag coefficient (C_D) for six different types of canopies.

び $\delta (=d/H)$ と C_D の関係を図示したものである。両図中の曲線 A, B, C は、カラマツ群落に対して、曲線 D はトウモロコシ群落、曲線 E は牧草群落に対してそれぞれ (14), (15) 式より計算された ζ_0-C_D 曲線および $\delta-C_D$ 曲線を示している。図には、このほかに、データ数が少なくて、 β_0 , m の係数値を決定するまでには至らなかった水稲、ソラマメ、マツなどの群落のデータ (谷ら, 1954, Thom, 1971; Oliver, 1971) から計算した ζ_0 および δ の値も図示している。

Fig. 6 で示されているように、 z_0/H の値は、 C_D の値にともなう増加するものと、減少するものがある。前者は、牧草、水稲、カラマツなどの群落で、後者はトウモロコシ群落である。これに対して Fig. 7 に見られるように d/H と C_D の関係は、 z_0/H の C_D に対する関係と丁度逆の関係をもって変化している。すなわち、 C_D の増大にともなう z_0/H が増大する領域では、 C_D の増大にともなう d/H は減少し、 C_D の増大にともなう z_0/H が減少する領域では、 C_D の増大にともなう d/H は増大していることが、Fig. 6 と Fig. 7 の比較からわかる。

4. あとがき

植物群落上を吹く風の風速分布式の外部パラメーターとして導入された d , z_0 と他の空気力学的特徴量の相互関係を明らかにするため、武田や真木が提案した拡散係数を検討した。その結果、(5) 式で示される拡散係数を仮定すると、 d , z_0 , および H の間の関係を説明するの

に、より都合が良いことを見出した。以下、得られた結果を要約する。

(1) 新しい形の拡散係数(5)式を仮定すると、相対粗度 $\zeta_0(=z_0/H)$ および相対地面修正量 $\delta(=d/H)$ は、それぞれ u_H/u_* の関数として与えることができる[(9), (10)式]。

(2) ζ_0 および δ は、また、群落の総抵抗係数 C_D の関数として与えることができる[(14), (15)式]。

(3) 上述の関係式中の経験定数 β_0 、 m の値は、(11)式を利用して決定することができる。

(4) z_0 、 d および H の相互関係を規定する(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徴量をもつ植物群落にも適用できる。

謝 辞

観測の実施にあたっては、筑波大学大学院生中川慎二氏の助力を得た。ここに感謝の意を表します。また、データの整理にあたっては、筑波大学学生出口賢二、佐藤朗の両君の助力を得、水理実験センター内においては、佐倉保夫氏をはじめ、同センターの教職員の方々の御便宜を得た、ここに厚く御礼申しあげます。

引用文献

- Allen, L. H., Jr., 1968: Turbulence and wind speed spectra within a Japanese larch plantation. *J. Appl. Met.*, **7**, 73-78.
- Cowan, I.R., 1968: Mass, heat and momentum exchange between stands of plant and their atmospheric environment. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **94**, 523-544.
- 林 陽生, 1979: 牧草上における地面修正量と粗度長について, 筑大水理実験報, **3**, 25-31.
- 林 陽生・古藤田一雄, 1979: 接地気層における気象要素垂直分布測定装置について, 筑大水理実験報, **3**, 81-88.
- Inoue, E., 1963: On the turbulent structure of airflow within crop canopies. *J. Met. Soc. Japan*, **41**, 317-326.
- Jarvis, P. G., G. B. James and J. J. Landsberg, 1976: Coniferous Forest. In *Vegetation and the Atmosphere* (ed. by J. L. Monteith), Academic Press **2**, 171-240.
- Kondo, J., 1971: Relationship between the roughness coefficient and other aerodynamic parameters. *J. Met. Soc. Japan*, **49**, 121-124.
- Kondo, J. and S. Akashi, 1976: Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **10**, 255-272.
- 古藤田一雄, 1979: 植被面における風速分布パラメーターについて, 筑大水理実験報, **3**, 17-24.
- Lettau, H., 1969: Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *J. Appl. Met.*, **8**, 828-832.
- 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, 1975a: 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, 1975b: 種々の植被面における風速分布式中的変数と安定度, 農業気象, **31**, 61-70.
- Maki, T., 1976: Aerodynamic characteristics of wind within and above a plant canopy. *Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., Ser. A*, **23**, 1-67.
- Monteith, J. L., 1973: *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold Press Ltd. (佐伯敏郎・及川武久訳, 生物環境物理学, 共立出版, pp.222)
- Oikawa, T., 1978: Wind characteristics of the model canopy demonstrated with wind-blow computer experiments. *JIBP SYNTHESIS 19, Ecophysiology of photosynthetic productivity*, 159-167.
- Oliver, H. R., 1971: Wind profiles in and above a forest canopy. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **97**, 548-553.
- Rider, N. E., 1954: Evaporation from an oat field. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **80**, 198-211.
- Sellers, W. D., 1965: *Physical Climatology*. Univ. of Chicago Press, 1-272.
- Stanhill, G. and M. Fuchs, 1968: The climate of the cotton crop; physical characteristics and microclimate relationships. *Agric. Met.*, **5**, 183-202.
- Stanhill, G., 1969: A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. *J. Appl. Met.*, **8**, 509-513.
- 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.
- Takeda, K., 1966: On roughness length and zero-plane displacement in the wind profile of the lowest air layer. *J. Met. Soc. Japan*, **44**, 101-108.
- 谷 信輝, 井上栄一, 今井和彦, 1954: 耕地風の測定(3), 農業気象, **10**, 105-108.
- 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.
- Tanner, C.B. and W.L. Pelton, 1960: Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, **65**, 3391-3413.
- Uchijima, Z., 1976: Maize and Rice. In *Vegetation and the Atmosphere* (ed. by J. L. Monteith) Academic Press, **2**, 33-64.
- Udagawa, T., 1966: Variation of aerodynamic characteristics of a barley field with growth. *J. Agric. Met.*, **22**, 7-14.

Summary

To make clear the relationships between wind profile parameters and aerodynamic properties of the plant canopy, an analysis of wind profiles above canopy was carried out.

The results are summarized as follows:

(1) The equations of wind profile parameters $\zeta_0 (= z_0/H)$ and $\delta (= d/H)$ were obtained in terms of u_H/u_* and C_D as follows:

$$\zeta_0 = \left(\frac{\beta_0}{k} \frac{u_H}{u_*} \right)^{1/(1-m)} \exp \left[- \frac{k}{(1-m)} \frac{u_H}{u_*} \right] = \left(\frac{\beta_0}{k\sqrt{C_D}} \right)^{1/(1-m)} \exp \left[- \frac{k}{(1-m)\sqrt{C_D}} \right],$$

and

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

where z_0 is roughness length, d zero-plane displacement, H height of canopy top, u_H wind velocity at the height of H , u_* friction velocity, C_D total drag coefficient of the canopy, ζ_0 the relative roughness length, and δ the relative zero-plane displacement. β_0 and m are empirical constants.

(2) The empirical constants (β_0 and m) may be determined by the equation,

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

The values of β_0 and m estimated for several canopies are shown in Table 1. The main cause of differences in β_0 and m may be ascribed to the changing of aerodynamic structure of canopies.

(3) The relation among z_0 , d and H was derived as:

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

The above relation seems to be applied for various types of plant canopies.

(4) The dependences of $\zeta_0 (= z_0/H)$ and $\delta (= d/H)$ for Japanese larch canopies (Allen, 1968), maize crop (Maki, 1975a, 1976), and pasture grass (Kotoda, 1979) upon the total drag coefficient C_D were fairly well approximated by Eq. (14) and Eq. (15), respectively.