テオシントおよびソルゴー群落における 風の乱れの垂直分布

真 木 太 一

(農業技術研究所気象科)

Vertical Profiles of Wind Turbulence in Teosinte and Sorgo Canopies

Taichi MAKI

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences,)
Nishigahara, Kita-Ku, Tokyo, 114

1. は し が き

作物の生育および作物生産は作物とその周りを取りまく空気および土壌間の物質交換・エネルギー交換の結果であり、土-植物-大気系においてそれらの交換機構を解明し、効率良い交換を行わせることによって生育および生産を向上させることができる。

著者は物質・エネルギーの交換機構の基礎的研究として作物群落内外の風の乱れの特性について検討した。本論文では主として各乱流要素の垂直(鉛直)分布について、植物形態との関連からどのような変化を示すか調べるとともに、作物の種類によってどのように変わるかを明らかにさせる。

種々の作物群落内外における気流の乱れの研究として、中川(1956)は水稻、Uchijima & Wright(1964)はトウモロコシ、Allen(1968)はカラマツ林、齊藤ら(1970)はトウモロコシ、Baines(1972)は小麦、Cionco(1972)は種々の植物、Perrier *et al.* (1972)は大豆、Shaw *et al.* (1974)は出穂したトウモロコシ、Inoue *et al.* (1975)は水稻、Maitani(1977)は水稻と小麦、Desjardins *et al.* (1978)はトウモロコシ、およびInoue & Uchijima(1979)は、水稻とトウモロコシの各群落で、温度、湿度、炭酸ガス、風速、風速の標準偏差、乱流強度、摩擦速度、運動量フラックス、混合距離、拡散係数、シャー応力、エネルギー逸散率、最小・最大乱渦、構造関数、歪度、尖度、オイラー自己相関係数の

2/3乗則、特徴的時間スケール、スペクトル密度の $-5/3$ 乗則、相互相関、乱渦勾配などの垂直分布およびパワースペクトル、コスペクトル、コヒーレンス、位相差などを求めている。

Isobe(1972)はトウモロコシ群落内外の乱流観測で水平縦・垂直成分のスペクトル解析、および相互スペクトルより計算される2高度間の変動の位相差の解析から、群落内では或る周波数帯にエネルギーの極大値があり、この乱流成分が下部から上方に伝播し、高周波成分は主として茎により群落上部で作られ、下層に伝達されることを報告している。

風洞実験では、Meroney(1968)は模型森林を用いスペクトル密度が群落上ではかなり広い周波数範囲で $-5/3$ 乗則が成立するが、群落内では50~500 Hzでエネルギーの減少がある結果を得ている。Roth(1971)はパワースペクトルの極大値の低周波数側で $-5/3$ 乗より傾きが小さいことを見出し、Silversides(1974)は模型森林で風速と温度のスペクトルを得ている。Seginer *et al.* (1976, 1978)は円柱棒を用い、三成分の乱流強度、歪度、シャー応力、抵抗係数、混合距離、コヒーレンス、時間の遅れ、乱渦勾配の垂直分布やスペクトル分布を高度別に算出している。

Maki・Allen(1978)は松の防風林を用い吹上げ・吹下ろし風の特徴、三成分風速の標準偏差、乱流強度、特徴的時間スケール、最小・最大乱渦、オイラー自己相関係数の2/3乗則、スペクトル密度の $-5/3$ 乗則、最大スペクトルの周波数などの水平分布・垂直分布を求めた。

以上のように種々の作物・森林における観測や、模型

森林の風洞実験より群落上の乱流特性がかなり明らかにされて来たが、群落内における観測結果は少なく、体系化されていない。また、三成分とくに水平横成分風速の種々の乱流要素の特徴を求めたものは極めて少ない。従って著者は三成分風速の標準偏差、乱流強度、特徴的時間スケール、オイラー自己相関係数の2/3乗則、エネルギー逸散率、最小・最大乱渦、スペクトル密度の-5/3乗則、最大スペクトル密度の周波数などの垂直分布を求めると同時に三推定法による乱流拡散係数の比較を行った。群落はソルゴー、テオシントであり、作物の種類による乱流要素の差異についての考察も加えた。

2. 観 測 条 件

(1) テオシント群落における観測

テオシント群落での観測は1974年8月28日～10月17日に東京大学農学部附属農場(東京都田無市)で行われた(真木, 1975, Maki, 1976)。そのうち乱流研究には観測後期の10月16・17日のデータを用いた。

風速測定はスパン10cmの三成分超音波風速計(海上電機)一台で風向風速変化の少ない時間帯を選び、高度75, 120, 165, 175, 185, 195, 250cmと時間別に移動させて観測を実施した。解析数は250cm4点, 150cm3点, 75, 165, 175, 185cm各2点, 120, 195cm各1点の合計17点であった。

観測時間は10時半～18時半で、リチャードソン数(Ri)は2m高度で $-0.05 < Ri < 0.05$ の範囲にあり、中立に近い場合が多かった。風速・気温の垂直分布は光電式三杯風速計(牧野応用測器)、高感度電気抵抗温度計(飯尾電機)で測定した。圃場は南北方向に130m、東西方向には圃場の北端辺で約100m、南端辺で約140mであった。南側は低層建物の市街地で北側および東側には防風林があるが、北東側は開けていた。超音波風速計による風速測定は南東ないし南西風の場合に限って圃場の北端から約30m地点で行った。従ってフェッチは100～120mであった。

(2) ソルゴー群落における観測

ソルゴー群落での観測は1975年7月31日～8月15日に東京農工大学農学部附属農場(東京都府中市)で行われた。このうち乱流研究には観測後期の8月13・14日のデータを利用した。

風速測定はテオシント群落の場合と同様に高度100, 170, 200, 250, 300cmと測器を移動させて行った。解析数は高度300, 100cm各2点, 高度250cm3点, 高度200, 170cm各4点の合計15点である。ソルゴー群落の観測では平均植物高度付近または高い葉面積密度付近を中心に測定した。

観測時間は10時半～16時、温度範囲は30～35℃で、中立～安定状態($0.02 < Ri < 0.23$)であった。夏期に十分繁茂した植被では3m高よりも植被層内2m高の気温が低い。なお、8月下旬にも観測予定であったが、台風6号の来襲でソルゴーが完全に倒伏したため、所期の目的が達成できなかった。

圃場は南北に約50m、東西に約100mであり、北(風下)側にはトウモロコシが約50mあった。南側は幅5mの農道を隔てて背の低いソルゴーが約150mあり、その前方は高い林であった。南西(風上)側約200mは障害物がなく開けているためこの風向のデータを収録した。ソルゴー群落のフェッチは、50～80mであり、観測地点は同圃場の北端より約15mであった。

(3) 作物形態要素の測定

テオシント、ソルゴー群落の作物形態要素として平均植物高度(h)、最高植物高度($h_{\max}$)、葉面積指数(LAI)、表面積指数(SAI)、平均葉面積密度(LAD)、茎数を求めた。葉面積は植被の代表的な1m²の値(1回)であり、その他は5回の値である。 h , LAI , SAI , LAD は平均値を示し、 $h_{\max}$ はその群落の最高値を示す。

作物体は出穂直前であって、十分草高のあるこの時期が乱流観測に選ばれた。出穂すると形態形成要素の評価が難しくなるためである。超音波風速計を植被層内に入れる場合、水稻などと異なり、これらの作物ではとくに風速計を入れる空間を作って、作物形態を不自然に乱すことは少ないので場所による差は小さいと考えられる。

3. 解 析 方 法

オイラー自己相関係数およびスペクトルエネルギー密度の解析方法はMaki (1974)と同様である。

各高度における5分間の平均風向を基準にして水平縦(u)・横(v)方向、垂直(w)方向成分の平均風速($\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{w}$)および標準偏差($\sigma_{u,v,w}$)を計算した。

乱流場の風速を時間および空間における偶然量と考えると、ある一点で観測される風速変動(u')の i および $i+p$ 時刻における風速変動量、 u'_i と u'_{i+p} 間の関係をオイラー自己相関係数、 $R(t)$ と呼び、 u 成分は次式で表わされる。

$$R_u(t) = N \sum_{i=1}^{N-p} u'_i \cdot u'_{i+p} / (N-p) \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2, \quad (1)$$

ここで、 N は全データ数(読み取り個数=1500)、 p は1, 2, 3, …… M (=250)、 $t=p\Delta t$ (遅延時間、40～60秒)、 Δt は読み取り間隔(0.2秒)である。

スペクトル密度はWiener-Khinchineの関係を使ってオイラー自己相関係数のフーリエ変換から計算される。 u 成分のスペクトル密度は次式で表わされる。

$$S_u(n) = \Delta t \{ R_u(0) + 2 \sum_{i=1}^{M-1} R_u(p \Delta t) \cos(\pi p i / M) + R_u(p \Delta t) \cos \pi i \}, \quad (2)$$

ここで、 n は周波数($=\pi i / M \Delta t$), $i=0, 1, 2 \cdots M-1$, M は最大遅延時間である。 M と N はそれぞれ、250と1500でその比は1/6となっている。Yokoyama (1971)によると経験的に1/3~1/10が適当とされている。式(1), (2)より三成分のオイラー自己相関係数, $R_{u,v,w}(t)$ およびスペクトル密度, $S_{u,v,w}(n)$ が計算される。また滑らかなスペクトル密度分布を求めるために、Blackman & Tukey (1958)のHamming Window, ローパスフィルターにける平均化の手法を適用した。

乱流の特徴的時間スケール($T_{u,v,w}$) (井上ら, 1955)は両対数グラフで縦軸にオイラー自己相関係数の1からの差, 横軸に遅延時間を取り, 0.2秒から2~5秒の直線関係部分の外挿から相関係数が0になる値を求めた。なお, この時の直線の傾度はオイラー自己相関の冪指数($m_{u,v,w}$)を表わす。

u 成分のエネルギー逸散率(ϵ_u), 最大乱渦(λ_u), 最大乱渦(A_u)は井上ら(1955)の方法による。

$$\epsilon_u = 1.40 \sigma_u^3 \{1 - R_u(t)\}^{3/2} / t \bar{u}, \quad (3)$$

$$\lambda_u = (\nu^3 / \epsilon_u)^{1/4}, \quad (4)$$

$$A_u = T_u \bar{u}, \quad (5)$$

ただし、 ϵ は乱流場の乱渦運動によって単位時間、単位質量当りの運動エネルギーが逸散して熱に変る量であり、 ν は空気粘性係数を表わす。なお、 v, w 成分も同様に式(3), (4), (5)より求められる。

拡散係数(K)は次の3方法によって求めた。

$$K_{M1} = c \sigma_w^4 / \epsilon, \quad (\text{Hanna, 1968}) \quad (6)$$

$$K_{M2} = \frac{1}{2} u_* \sigma_w / (du/dz), \quad (\text{Hanna, 1968}) \quad (7)$$

$$K_{M3} = \kappa u_* (z-d), \quad (8)$$

ただし、 c は経験定数、 u_* は摩擦速度、 du/dz は風速の鉛直傾度、 κ はカルマン定数($=0.4$)、 d は地面修正量である。 u_* は植被層内外では乱流変動法で同時に算定できないため、植被層上の風速分布より6mの値を基準にして求めた。

4. 結果および考察

(1) 作物群落の特徴

テオシント、ソルゴーの群落特性をFig.1に示す。

テオシント群落(測定日10月15日)では $h=145$ cm, $h_{\max}=175$ cmで30cmの差がある。 $LAI=13.5$, $LAD=0.0931$ cm²/cm³, 茎数=40本/m²である。ソルゴー群落(測定日8月14日)では $h=170$ cm, $h_{\max}=220$ cmで50cmの大きい差がある。 $LAI=9.73$, $LAD=0.0572$ cm²/cm³, 茎数=29本/m²である。なお、 LAI , SAI

Fig. 1. Leaf area index (LAI) and surface area index (SAI) as a function of height above the soil surface, and values of LAI , leaf area density (LAD), mean plant height (h) and maximum plant height ($h_{\max}$) in teosinte (upper) and sorgo (lower) canopies.

の分布図を示した。

両群落を比較すると、テオシントは背が低く、 LAI , LAD は大きい十分繁茂した群落である。 LAI の高い領域は植被のかなり上層部にあり、葉は80~140cm間に多く分布している。空気力学的にソルゴーより密度が高く、植物高度差が小さいため、地面修正量(d)は相対的に大きく、空気力学的粗度長(z_0)は小さい。一方、ソルゴーでは背が高く、密度はほぼ半分の低い値で、比較的滑らかな葉面積分布を示しており、 h は LAI の値がかなり大きい高度にある。なお、出穂率は両群落共1%未満で、一部で出穂し始めた穂孕後期に相当していた。

(2) 風速の標準偏差および乱流強度

風速の標準偏差($\sigma_{u,v,w}$), 乱流強度($\sigma_{u,v,w} / \bar{u}$, $\sigma_{u,v,w} / u_*$)をFig.2に示す。なお、図を比較する場合に絶対値と無次元値の両方で比較する必要があるために二種の分布図を示した。また、群落間で h と $h_{\max}$ の中央値が同じ高さになるように図示した。

$\sigma_{u,v,w}$ (Fig. 2-上)は両群落共 u, v, w の順に小さくなり、植被層内外で高度の増加につれて増大している。植被層上では増加割合は小さい。観測高度以上は植被の境界層を越えてしまう恐れがあるためフェッチの問題とも関連してこれ以上論議できない。

σ を $\bar{u}$ で無次元化した乱流強度 ($\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$, Fig. 2-中)を見ると、テオシント群落の変化傾向は植被層内から植被の上層部、 $h \sim h_{\max}$ 付近で大きい値を取り、植被層上では小さい。ソルゴー群落の u, v 成分の変化はよく類似しており、植被層内で大きく、植被層上で急激に小さく、 w 成分では全体に小さい。ソルゴー群落内の乱流強度が大きい理由として、植被の上層部が空気力学的に凸凹で粗度が大きいためと考えられる。テオシント群落の

u 成分とソルゴー群落の u, v 成分の変化はお互いに類似している。

u_* で無次元化した乱流強度 ($\sigma_{u,v,w}/u_*$, Fig. 2-下)も $\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$ と類似した変化を示しているが、両群落共に植被層上での値が相対的に増加している。

風速による植被の変化を考慮しない場合に、 d はテオシント (Maki, 1976)、ソルゴー群落でそれぞれ、平均 126 cm, 125 cm とほとんど同じであるのに対して、 z_0 は平均 9 cm, 20 cm と 2 倍以上の差がある。それを h で無次元化した値、 d/h は 0.869, 0.735, z_0/h は 0.062, 0.118 となっている。ソルゴー群落の d/h は小さいが、 z_0/h はやはり 2 倍弱の値で凹凸が大きい。

他の研究者の結果と比較すると、中川 (1956) は水稻群落内で $\sigma_u/\bar{u}$ は高度によってあまり変化しなく、 σ_u/u_* では高さにつれて増加する結果を得ている。これは著者の結果と類似している。Uchijima & Wright (1964) はトウモロコシ群落 ($h=140$ cm) で u 成分の乱流強度は植被層内では高度と共に増加し、 h よりやや下方の 120 cm 高にピークがあり、その上層では急激に減少する結果を得ている。

Meroney (1968) は模型森林による風洞実験で、風下側 1~4 m では $h (=18$ cm) よりやや上層部に $\sigma_u/\bar{u}$ のピークがあり、風下 4~8 m 地点ではほぼ h の高度に、風下 8~11 m ではやや下層域にある結果を報告している。テオシント群落のプロファイルは見掛上風洞実験の風下 1~4 m の境界層の未発達の場合に相当し、ソルゴー群落のそれはもっと風下側の場合に相当する。模型森林の h は均一であるのに対して自然植被では高度差があるために境界層が未発達な風洞実験の垂直分布に類似してしまった。野外観測のフェッチから考えると風洞実験の 4~8 m (20~45 倍) 区間に相当しており、 $h \sim h_{\max}$ 間にピークがある場合に当てはまる。模型森林では下層部は枝がなく風通しがよいために乱流強度が下層部で急減する。従ってピークがやや下方にあると考えられる。

著者と斉藤ら (1970) の結果と比較するとトウモロコシ植被層内の u 成分の絶対値は近似しているが、全体の変化傾向は異なっている。 w 成分ではかなり類似している。Cionco (1972) は $\sigma_u/\bar{u}$ がトウモロコシ群落の層内上層部で大きく、層上で急激に小さく、その上下領域で小さい結果を得ている。この形は著者のソルゴー群落の場合と類似している。また、小麦群落内の変化に近い。

Perrier *et al.* (1972) によると $1/5 \sim 4 h$ の高度範囲にある大豆群落で、 $\sigma_u/\bar{u}$ は h で最大になり、上下で減少するが、層上の方が層内の減少傾向より緩やかである。彼等は植被の上下で不連続な二曲線を考えているが、その変曲点は h ではなくて、それよりやや上部にあるよう

Fig. 2. Top: Vertical profiles of standard deviations ($\sigma_{u,v,w}$, root-mean-square) within and above teosinte (left) and sorgho (right) canopies. Middle: Vertical profiles of turbulent intensities ($\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$) normalized by mean wind velocity ($\bar{u}$). Bottom: Vertical profiles of turbulent intensities ($\sigma_{u,v,w}/u_*$) normalized by friction velocity (u_*). Notations of u, v and w in the figure denote longitudinal (u), lateral (v) and vertical (w) components of wind velocity. Lines of h and $h_{\max}$ indicate mean plant height and maximum plant height, respectively.

に見受けられるため曲線を引き直すと、層内の小さい値から h 付近で急増し、 $1.3h$ の高度で極大値を取り、その上層ではほぼ一定となり、著者の結果とよく一致する。Shaw *et al.* (1974) によると LAD の最高が $0.5h$ にあるトウモロコシ群落 ($h=280$ cm) の $100\sim350$ cm 高では高度の増加につれてほぼ $\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$ は直線的に減少している。三成分共上層部で小さい点では著者の結果と一致するが、直線的減少の点では一致していない。

水田 (Inoue *et al.*, 1975) での $\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$ は層内から層上へと増加し、 h で急激に減少傾向に転じて層上で一定値に漸近する。これはソルゴー群落の場合とかなり類似しているが、 h の高度で尖った形態は異なっている。その後 Inoue & Uchijima (1979) は比較的滑らかな変化曲線を得ている。水稻は風に対してなびき易く、 $\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$ は h よりやや下方に緩やかなピークを持つことが想像できる。

Seginer *et al.* (1976) のモデル植被の風洞実験では乱流強度は三成分共にソルゴー群落の結果と合致し、 v 、 w 成分ではテオシント群落の w 成分とよく類似している。また、Seginer & Mulhearn (1978) の u 成分の乱流強度はテオシント群落のそれとよく一致している。Desjardins *et al.* (1978) によるとトウモロコシ群落 ($h=260$ cm) の σ_u は下層部の小さい値から 300 cm で極大値を取り、一度少し減少してその上層で増大しており、ソルゴー群落の σ_u とよく近似している。また、乱流強度も h よりやや高い 300 cm で極大となり、その上層で急減し、下層では比較的緩やかな変化を示す点よく一致している。

h を求める際に面積当りの全個体の草丈を測定したため他の研究者の結果と比較すると h の値は小さいかも知れないが、いずれにしても乱流強度のピークが多くの群落において $h\sim h_{\max}$ 付近にあると考えられる。

(3) 特徴的時間スケール

オイラー自己相関係数、 $R_{u,v,w}(t)$ より求められる特徴的時間スケール ($T_{u,v,w}$) の垂直分布を Fig. 3-上 に示す。テオシント群落では $h_{\max}$ またはそのやや上方で極大値を取り、その高度より上層域で緩やかに減少している。植被層内で急激に減少するが、 T_u 、 T_v では植被下層部で少し増大している。また、ソルゴー群落においても $h_{\max}$ よりやや上方で最大となり、それより 1 m 上層まで減少している。植被下層部での値は上層部のそれより小さい、この点ではテオシント群落と異なっている。

テオシント群落では植被上層域で相当密度が高いため、この領域で乱れの性質が急激に変ると予想される。ソルゴー群落では上層部の密度はテオシント群落の場合の半分以下であるために、比較的緩やかに乱れの性質が変ると考えられる。

Fig. 3. [Top] Characteristic time scales of the Eulerian autocorrelation coefficient ($T_{u,v,w}$); [Middle] ratios of $T_{u,v,w}/T_w$ and T_u/T_v ; and [Bottom] slopes of the log of the Eulerian autocorrelation coefficient vs. log of the lag time ($m_{u,v,w}$) in teosinte (left) and sorgho (right) crops as functions of height above the ground surface.

中川 (1956) による水稻群落内では、層内の T_u は層上の値より大きく、著者の結果と逆になっている。斉藤ら (1970) のトウモロコシ群落では $h=300$ cm のやや上部 (320 cm) から 200 、 100 cm と下層になるにつれて T_u は減少しており、著者の場合とよく一致している。また、 320 cm の T_w が少し小さくなっているが、変化傾向は類似している。Perrier *et al.* (1972) は大豆群落の T_u は植被外の上層程大きく、植被層内上層部では小さい結果を得ている。群落構造が大きく異なることもあって高さと共に増加する傾向は著者の結果には認められなかったが、植被層内の分布は一致している。

特徴的時間スケールの比 ($T_{u,v,w}/T_w$, T_u/T_v) のプロフィール (Fig. 3-中) について、テオシント群落では $h\sim h_{\max}$ 間で極小となり、上下方向に増加している。この比は直接には渦の空間形態を表わしている訳ではないが、著者は渦のスケールの一つの指標として相対的な比較を行った。植物密度の大きい領域では渦の形態は相対的に

丸く縦横方向共に楕円型を示している。 u 成分は v 成分に対して1.2~1.3倍であり、 u 成分は w 成分の約2倍と小さな比で特徴的な渦を形成している。植被層上250 cm高の値は群落の境界層内にはあるが、一般気流の特性(Maki, 1974)に近く、比較的細長い渦となっている。

ソルゴー群落上では乱渦はテオシント群落のそれよりも細長く、上層程大きくなっている。この場合も乱渦は植被上層部で急激に減少し、植被下層部で最小となり、植被下層部程相対的に丸い形態をしている。植被下層部ではかなり形が異なって見えるが、植被最下層の値自体は両群落共にほとんど同じである。またテオシント群落の $h \sim h_{\max}$ 間で急激に値が減少するのは密度が高いためと考えられる。すなわち、ソルゴー群落では上層部で粗度が大きい、密度はテオシント群落よりはるかに小さい植被である。ソルゴー群落の $h_{\max}$ 上約80 cmの高度では T_u/T_w は8.4であるが、テオシント群落の同じ高度では5.0とかなり小さい。この傾向は v 成分についても同様であるが、 u, v 成分の比では両群落共ほぼ同じ値になっている。

齊藤ら(1970)によると T_u/T_w は320 cmで11.9, 200 cmで4.9, 100 cmで4.2を得ており、植被層内の値はソルゴー群落の場合と比較的よく合っているが、層上の値は著者の結果よりかなり大きい値である。しかし、同様な草型であるために全般的な変化傾向は概して類似している。

以上の結果より渦のスケール比は、上層部における葉面積密度の大小によって変ると考えられる。ただし、関係式はデータが少ないために求めている。

(4) オイラー自己相関係数の2/3乗則

Fig. 3- 下にオイラー自己相関係数の冪指数($m_{u, v, w}$)を示す。両群落共植被上では u, v, w の順に小さくなっており、 u, v 成分では2/3乗則が成立するが、 w 成分ではやや小さくテオシント群落では0.6以下、ソルゴー群落では0.5程度となっている。また、植被層内下層部では層上の場合とは逆に u, v, w の順に大きく、その中間領域、 $h \sim h_{\max}$ または最高密度領域(それぞれ115 cm, 140 cm)で値の大小が交代している。

オイラー自己相関係数の2/3乗則の成立する範囲は植被層上および植被層内上層域であるが、下層域では全く成立しなく、乱流としての特性が大きく変質している。

齊藤ら(1970)はトウモロコシ群落で m_u が植被層上(320 cm)の値から200 cm高で少し減少し、下層部(100 cm)で増加する結果を得ている。これは著者の結果とよく一致している。320 cm高の m_w の値は小さく、200, 100 cm高で約2/3に増加する傾向はソルゴー群落の場合とよく一致している。

(5) エネルギー逸散率

Fig. 4- 上にエネルギー逸散率($\epsilon_{u, v, w}$)の垂直分布を示す。テオシント群落の ϵ_u, ϵ_w は植被層上より層内へと次第に減少しているが、 ϵ_u では $h \sim h_{\max}$ 間で最大値を持っている。植被層内下層部では三成分共に非常に小さく、運動エネルギーの逸散が小さくなっている。一方、ソルゴー群落では植被層上の小さい値から植被の $h \sim h_{\max}$ 間で急増し、下層部で減少している。 ϵ_u のピークは4000 cm^2/sec^3 にもなっているが、テオシント群落ではこのような極端なピークは認められなかった。 ϵ の値は全般的にソルゴー群落の場合が大きい。これは風速がソルゴー群落での観測時に強かったことと z_0 が約2倍大きいためである。従って運動エネルギーの熱への変換量がテオシント群落の場合よりも大きいことになる。

中川(1956)は水稻群落内で高度と共に ϵ_u が急激に増加する結果を得ており、絶対値は小さいが傾向は著者の結果とよく一致している。Uchijima & Wright (1964)はトウモロコシ群落で、Inoue *et al.* (1975)は水稻群落で ϵ_u は植被層内下層部から h にかけて急激に増加し

Fig. 4. [Top] Energy dissipation rate ($\epsilon_{u, v, w}$) profiles; [Middle] the smallest eddy (turbulon) ($\lambda_{u, v, w}$) profiles; and [Bottom] the largest eddy (turbulon) ($\Lambda_{u, v, w}$) profiles within and above teosinte (left) and sorgo (right) crop canopies.

て h の高度で最大となり、植被層上では層内の变化よりもやや緩やかに減少する結果を報告している。これらの形態はソルゴー群落の場合の u, v 成分の変化に類似している。著者の場合のピークは $h \sim h_{\max}$ 間にあり、傾向はよく一致している。ただし、彼等は h で不連続な変化形態を提示しているが、 LAD の変化は連続的であるため、ソルゴー群落程度の比較的滑らかな変化が妥当と考えられる。Baines (1972) は小麦群落で ε_u の垂直分布を詳しく測定 (8 点) している。 ε のピークが h の高度にあり、上下方向に値が減少する結果はトウモロコシ、水稻、ソルゴー群落の結果とよく一致している。

(6) 最小乱渦

最小乱渦 ($\lambda_{u,v,w}$) の垂直分布 (Fig. 4-中) には $\varepsilon_{u,v,w}$ の値が大きく関与するが、その大小関係は逆になっている。テオシント群落では植被層上での小さい値から植被上層部を経て下層部で急増している。 u, w 成分ではほぼ同じ値であるが、 v 成分でやや大きい値となっている。ソルゴー群落の w 成分では、テオシント群落の場合と類似した変化を示し、下層部で大きい、 u, v 成分ではかなり異なった変化で、プロフィール全体が小さいのが特徴的である。

Uchijima & Wright (1964) はトウモロコシ群落で、Inoue *et al.* (1975) は水稻群落で λ と ε とに逆関係のあることを報告し、 λ の最小値は h の高度にあるとして急激な変化を考えているが、ソルゴー群落の u, v 成分でもその変化は比較的滑らかである。Baines (1972) は小麦群落で λ は層内より植被直上にかけては直線的に減少する結果を得ている。上層までのデータはないが観測範囲内ではテオシント群落の三成分およびソルゴー群落の w 成分がこれに類似している。

(7) 最大乱渦

Fig. 4-下 に最大乱渦 ($A_{u,v,w}$) の垂直分布を示した。テオシント群落では植被層トップよりやや上層でピークを取り、それより上層では少し減少している。植被層内に入るとすぐ急減し、170 cm 以下では高さと共に直線的に減少している。ソルゴー群落では植被層上の大きい値から植被層内に入ると急減し、さらに植被下層部においても減少している。

両群落の $A_{u,v,w}$ の変化は $T_{u,v,w}$ と植被層上で少し異なっている他はよく一致している。これは A が T と $\bar{u}$ の関数だからである。

(8) スペクトル密度の $-5/3$ 乗則

スペクトル密度、 $S_{u,v,w}(n)$ の $0.5 \sim 5$ Hz の傾度 ($S_{u,v,w}$) を Fig. 5-上 に示す。テオシント植被上および層内上層・中層部では u, v, w の順に小さくなり、 u, v 成分ではほぼ $-5/3$ 乗則が成立しているが、 w 成分では小さい。下層部では反対に w 成分の絶対値は大きくなっている。

Fig. 5. Vertical profiles of; [Top], slopes of the log of the power spectral density vs. log of the frequency ($S_{u,v,w}$); [Middle], peak frequencies of the power spectral density ($u, v, w n_p$); and [Bottom], normalized peak frequencies (nondimensional) of the power spectral density ($u, v, w n_p z / \bar{u}$) in teosinte (left) and sorgho (right) canopies.

ソルゴー群落でも植被層内中層部以上の u, v 成分ではおおむね $-5/3$ 乗則が成立しているが、 w 成分はやや小さく、下層部では三成分共に絶対値が大きい。

両群落の植被層下層部では三成分共に傾度が大きくなり、乱流特性はそれ以上の層とは大きく異なっている。同様の結果は $m_{u,v,w}$ の場合にも認められ興味深い。

(9) パワースペクトルと周波数の積の最大エネルギー密度の周波数

$n S_{u,v,w}(n) / \sigma_{u,v,w}^2$ のピーク周波数 ($u, v, w n_p$) については Fig. 5-中 に示されている。両群落共に値は u, v, w の順に高周波数側に移動する。 u, v 成分では植被の $h_{\max}$ 付近に極大値があり、上下方向に減少している。 w 成分もその変化傾向と類似している。ソルゴー群落の上層部の粗度はテオシント群落のそれより大きいために全般的にピーク周波数は高周波数側にある。

$z / \bar{u}$ で無次元化した最大エネルギー密度の周波数 ($u, v, w n_p z / \bar{u}$) は Fig. 5-下 に示すようにテオシント群落

の u , v 成分では $h_{\max}$ あたりに極大値があるが、 w 成分ではかなり上層に極大値が予想される。ソルゴー群落では三成分共に $h \sim h_{\max}$ 間にピークがあって u, v, w, n_p の場合と類似している。両群落の u , v 成分ではよく類似した変化を示しているが、テオシント群落の w 成分では少し異なった変化を示している。

齊藤ら(1970)はトウモロコシ群落でスペクトル密度のピーク周波数(u, n_p)は 200 cm 高度で高周波数側に、320, 100 cm で低周波数側にピークがあることを報告している。この傾向はソルゴー、テオシント群落の u , v 成分のものに近い。また w, n_p ではテオシント群落の w 成分の変化に類似している。齊藤ら(1970), Panofsky & McCormick (1960)は $n_p z / \bar{u} \approx 0.2$ という定数を求めている。なお、著者は $n_p z / \bar{u}$ を用いたが、群落上では $n_p(z-d) / \bar{u}$ を用いた方が裸地上のデータとも比較することが可能となり便利である。

Inoue *et al.* (1975)は植被層上から層内下層部まで高度が減少すると無次元周波数は高周波側に移動する結果を求めており、著者の結果とは層上で一致するが層内

下層部では合致していない。Desjardins *et al.* (1978)はトウモロコシ群落で植被の下層部程ピークは高周波数側に移動する逆の結果を報告している。

(10) 運動量の拡散係数

3 方法で求めた拡散係数($K_{M1, 2, 3}$)の比較を Fig.6 に示す。 K_{M1} , K_{M3} は両群落共よく一致している。ただし、 K_{M1} の c の値はテオシント群落では 0.20 が、ソルゴー群落では 0.25 が妥当と考えられる。Hanna (1968)は 0.30 を使用しており、Inoue *et al.* (1975)は高度によって値を大きく変化させ、比較的よい結果を得ている。この値は植物の種類、生育段階その他の条件で異なることが考えられる。

一方、 K_{M2} , K_{M3} については、ソルゴー群落では設定高度(z)として $h=170$ cm を用い、テオシント群落では d の値が大きいために h と $h_{\max}$ の中間の 160 cm を用いた。その結果、テオシント群落ではよく一致しているが、ソルゴー群落では約 1.8 倍と K_{M3} が K_{M2} より大きくなっている。 z は植物群落密度、植物高度、空気力学的パラメーターなどが関連するためテオシント群落では適当であるが、ソルゴー群落では d の値が小さいので $h=170$ cm よりも低い値が妥当と考えられる。計算式は簡単であるが、このように設定高度にかなり問題があるためかならずしも機械的には求められないと考えられる。

5. ま と め

テオシント群落(1974 年 10 月)とソルゴー群落(1975 年 8 月)で植被層内外における風の乱れの観測を行った。植物群落の特徴および乱流要素の垂直分布の特性を要約すると次のようになる。

(1) テオシント、ソルゴー群落の植被特性について、平均植物高度(h)はそれぞれ、145, 170 cm, 最高植物高度($h_{\max}$)は 175, 220 cm, 葉面積指数(LAI)は 13.5, 9.7, 平均葉面積密度(LAD)は 0.093, 0.057 cm^2/cm^3 , 茎数は 40, 29 本/ m^2 であった。

(2) 風速の標準偏差($\sigma_{u, v, w}$)は両群落共に植被層内の下層部より上層部にかけて急増し、植被層上において増加率は緩やかになるが、概して増加している。乱流強度($\sigma_{u, v, w} / \bar{u}$, $\bar{u}$ は平均風速)のテオシント群落の u 成分、ソルゴー群落の u , v 成分は植被層下層より上層にかけて増加し、 $h_{\max}$ 付近でピークを取り、それ以上では急激に減少して一定値に近づく。テオシント群落の v , w 成分、ソルゴー群落の w 成分の変化は緩やかである。摩擦速度(u_*)で無次元化した乱流強度($\sigma_{u, v, w} / u_*$)は植被層上では相対的に $\sigma_{u, v, w} / \bar{u}$ より増加している。これらの値は植被密度と空気力学的粗度に密接な関係があるが、データ数が多くないため定量的な関係は求められなかつ

Fig. 6. Comparisons of turbulent transfer coefficients (K_{M1} , K_{M2} and K_{M3}) calculated from Eqs. (6), (7) and (8) in teosinte (upper) and sorgo (lower) canopies. The solid line shows 1 to 1 relation.

た。著者の結果はUchijima & Wright (1964), Meroney (1968), Perrier *et al.* (1972), Inoue *et al.* (1975, 1979), Seginer *et al.* (1976)などの結果と植被構造が異なるために細かい点では異なるが、類似している。

(3) 特徴的時間スケール($T_{u,v,w}$)は両群落共に $h \sim h_{\max}$ 間で急増し、植被層上で減少する。斉藤ら(1970)の結果($T_{u,w}$)に類似しているが、高度と共に増加するPerrier *et al.* (1972)の結果(T_u)とは異なっている。特徴的時間スケール比($T_{u,v}/T_w$, T_u/T_v)は層上の大きい値から $h \sim h_{\max}$ 間で急激に減少する。とくにテオシント群落では $h \sim h_{\max}$ 間で植被密度が高いために小さい値になっている。斉藤ら(1970)の u , w 成分の変化傾向は著者のソルゴー群落の結果と一致した。

(4) オイラー自己相関係数の冪指数($m_{u,v,w}$)は植被層上では u , v , w の順に小さいが、下層部ではその逆になり、 $h \sim h_{\max}$ 付近で交代する。 h 以上では $2/3$ 乗則がおおむね成立するが、植被層内下層部では急激に増加して乱流特性が大きく変化する。

(5) エネルギー逸散率($\epsilon_{u,v,w}$)はソルゴー群落の ϵ_u , ϵ_v とテオシント群落の ϵ_u では $h_{\max}$ 付近で急増し、上下方向に減少する。テオシント群落の ϵ_v , ϵ_w は高度を増すにつれて増加する。これらは中川(1956), Uchijima & Wright (1964), Baines (1972), Inoue *et al.* (1975)の結果とかなりよく一致した。

(6) 最小乱渦($\lambda_{u,v,w}$)はテオシント群落の三成分とソルゴー群落の w 成分では植被層上より層内下層部へと増加しつつ、ソルゴー群落の u , v 成分では激しい変化は示さず、 h 付近で最低値を取る。Uchijima & Wright (1964), Inoue *et al.* (1975)は後者, Baines (1972)は前者の変化に類似している。

(7) テオシント群落で最大乱渦($A_{u,v,w}$)の変化傾向は乱流強度の変化に近く、植被層直上にピークがある。ソルゴー群落では特徴的時間スケール比の変化に類似している。

(8) スペクトル密度の傾度($S_{u,v,w}$)は植被層上では u , v , w の順に小さく、 u , v 成分では $-5/3$ 乗則がほぼ成立するが、 w 成分では少し小さい。傾度は植被層下層部において急増し、植被層上および植被層上層部の乱流特性とは大きく異なる。

(9) パワースペクトル×周波数のピーク周波数(u, v, w, n_p)とその無次元周波数($u, v, w, n_p z/\bar{u}$)は両群落共に類似した変化を示し、テオシント群落の w 成分以外では $h \sim h_{\max}$ 付近にピークがある。 u , v , w の順に高周波側にピークが移動する。

(10) 運動量の拡散係数($K_{M, z, z}$)の式(6), (7)は両群落共よく一致した。式(7), (8)はテオシント群落では

よく一致したが、ソルゴー群落では式(8)が式(7)の約1.8倍となった。設定高度とか定数を適当に決定する必要がある。

おわりに著者は、テオシント圃場およびソルゴー圃場での観測にあたって便宜をはかっていただいた東京大学農学部農場の角田公正教授、東京農工大学農学部農場の渡部直吉助教授および両農場の方々に深謝いたします。

また、農技研の磯部誠之主任研究官に原稿の校閲を受けた。ここに感謝の意を表わします。なお、計算には農林水産省のHITAC-8000シリーズ電算機を使用した。

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.
- Baines, G. B. K., 1972: Turbulence in a wheat crop, *Agric. Met.*, **10**, 93-105.
- Blackman, R. B. and J. W. Tukey, 1958: *The measurement of power spectra, from the point of view of communications engineering*, Dover Publi. Inc., New York, 1-190.
- Cionco, R. M., 1972: Intensity of turbulence within canopies with simple and complex roughness elements, *Boundary-Layer Met.*, **2**, 453-465.
- Desjardins, R. L., L. H. Allen, Jr. and E. R. Lemon, 1978: Variations of carbon dioxide, air temperature, and horizontal wind within and above a maize crop, *Boundary-Layer Met.*, **14**, 369-380.
- Hanna, S. R., 1968: A method of estimating vertical eddy transport in the planetary boundary layer using characteristics of the vertical velocity spectrum, *J. Atmos. Sci.*, **25**, 1026-1033.
- 井上栄一, 谷 信輝, 今井和彦, 1955: 耕地風の乱れの測定, 農技研報, **A-4**, 1-36.
- Inoue, K., Z. Uchijima, T. Horie and S. Iwakiri, 1975: Studies of energy and gas exchange within crop canopies (10) Structure of turbulence in rice crop, *J. Agr. Met. Japan*, **31** (2), 71-82.
- Inoue, K. and Z. Uchijima, 1979: Experimental study of microstructure of wind turbulence in rice and maize canopies, *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.*, **A-26**, 1-88.
- Isobe, S., 1972: A spectral analysis of turbulence in a corn canopy, *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.*, **A-19**, 101-113.
- Maitani, T., 1977: Some turbulence characteristics in the surface layer over a wheat field, *Ber. Ohara Inst. landw. Biol. Okayama Univ.*, **17** (1), 29-46.
- Maki, T., 1974: Characteristics of atmospheric turbulence in stable stratification at Syowa Station in Antarctica, *J. Met. Soc. Japan*, **52**

- (1), 32-41.
- 真木太一, 1975: 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**(1), 7-15.
- Maki, T., 1976: Aerodynamic characteristics of wind within and above a plant canopy — Inter-relationship between aerodynamic parameters and plant canopy height, *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.*, **A-23**, 1-67.
- Maki, T. and L. H. Allen, Jr., Turbulence characteristics of a single line pine tree windbreak, *Proc. Soil & Crop Sci. Soc. Florida, U.S.A.*, **37**, 81-92.
- Meroney, R. N., 1968: Characteristics of wind and turbulence in and above model forests, *J. Appl. Met.*, **7**, 780-788.
- 中川行夫, 1956: 水田の畦間気流に関する研究(予報), 農業気象, **12**(2), 61-63.
- Panofsky, H. A. and R. A. McCormick, 1960: The spectrum of vertical velocity near the surface, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **86**, 495-503.
- Perrier, E. R., J. M. Robertson, R. J. Millington and D. B. Peters, 1972: Spatial and temporal variation of wind above and within a soybean canopy, *Agric. Met.*, **10**, 421-442.
- Roth, R., 1971: Turbulence spectra with two separated regions of production, *J. Appl. Met.*, **10**, 430-432.
- 斉藤隆幸, 永井良典, 磯部誠之, 堀部淑子, 1970: 植物群落内部の気流の乱れについて, 農業気象, **25**(4), 205-214.
- Seginer, I., P. J. Mulhearn, E. F. Bradley and J. J. Finnigan, 1976: Turbulent flow in a model plant canopy, *Boundary-Layer Met.*, **10**, 423-453.
- Seginer, I. and P. J. Mulhearn, 1978: A note on vertical coherence of streamwise turbulence inside and above a model plant canopy, *Boundary-Layer Met.*, **14**, 515-523.
- Shaw, R. H., G. Den Hartog, K. M. King and G. W. Thurtell, 1974: Measurements of mean wind flow and three-dimensional turbulence intensity within a mature corn canopy, *Agric. Met.*, **13**, 419-425.
- Silversides, R. H., 1974: On scaling parameters for turbulence spectra within plant canopies, *Agric. Met.*, **13**, 203-211.
- Uchijima, Z. and J. L. Wright, 1964: An experimental study of air flow in a corn plant-air layer, *Bull. Natl. Inst. Agric. Sci.*, **A-11**, 19-66.
- Yokoyama, O., 1971: An experimental study on the structure of turbulence in the lowest 500 meters of the atmosphere and diffusion in it, *Natl. Inst. Pollution & Resources*, **2**, 1-118.

Summary

The observations of wind turbulence were carried out within and above a teosinte canopy (Oct. 16—17, 1974) and a sorgo canopy (Aug. 13—14, 1975) in Tokyo. The results on plant structures of the canopies and vertical profiles of turbulent elements were as follows:

(1) On the characteristic of plant structure, the mean plant height (h) for teosinte and sorgo canopies was 145 and 170 cm, the maximum plant height ($h_{\max}$) 175 and 220 cm, leaf area index (LAI) 13.5 and 9.7, leaf area density (LAD) 0.093 and 0.057 cm²/cm³, and stem number per m² 40 and 29, respectively.

(2) The standard deviations (root-mean-square) of wind fluctuation ($\sigma_{u,v,w}$) increased rapidly from a lower part to an upper part within both canopies, and increased gradually above the canopies. The turbulent intensity ($\sigma_u/\bar{u}$) in both canopies and $\sigma_v/\bar{u}$ in the sorgo increased from the lower region to the upper one within the canopies, had peaks around $h_{\max}$, and after then became approximately constant. $\sigma_v/\bar{u}$ in the teosinte and $\sigma_w/\bar{u}$ in both canopies indicated gentle variations. The turbulent intensities ($\sigma_{u,v,w}/u_*$) normalized by friction velocity were relatively larger than those of $\sigma_{u,v,w}/\bar{u}$ above both canopies. These values were closely related to a plant density and an aerodynamic roughness of canopies, however, the quantitative relation was not obtained because of small data. The changing tendencies of turbulent intensities were generally similar except a partial difference because of various plant structures, e.g., Uchijima & Wright (1964), Meroney (1968), Perrier *et al.* (1972), Inoue *et al.* (1975, 79), Seginer *et al.* (1976) and Desjardins *et al.* (1978).

(3) The characteristic time scales ($T_{u,v,w}$) in both canopies increased greatly between h and $h_{\max}$, and decreased over the canopy top. The results were similar to T_u and T_w of Saito *et al.* (1970), but different with the point that T_u (Perrier *et al.*, 1972) increased continuously with the increment of height. The ratios of T_u/T_w , T_v/T_w and T_u/T_v showed large figures above both canopies and diminished violently during h and $h_{\max}$, particularly in the case of teosinte. The reason would be that the plant density of teosinte was higher than that of sorgo between h and $h_{\max}$. T_u and T_w of

Saito *et al.* (1970) agreed generally with the variations in the sorgo canopy.

(4) The powers of the Eulerian autocorrelation coefficient ($m_{u,v,w}$) became to be small in the order of u , v and w above the canopies, however, at the lower areas of canopies the reverse. Hence the profiles were crossed around h and $h_{\max}$ regions. The 2/3 power law was applicable to the region above the height of h , on the other hand, at the lower canopy the values multiplied significantly and varied a turbulent characteristic.

(5) Energy dissipation rate (ε_u) in both canopies and ε_v in the sorgo had a large value around $h_{\max}$ and diminished at both upper and lower fields. ε_v and ε_w in the teosinte increased with the increment of the height. The trends agreed pretty well with those of Nakagawa (1956), Uchijima & Wright (1964), Baines (1972) and Inoue *et al.* (1975).

(6) The smallest eddies (turbulon) ($\lambda_{u,v,w}$) in the teosinte canopy and λ_w in the sorgo went on increasing from upper part of this figure to lower one. λ_u and λ_v in the sorgo would not change violently and had minima around h . The profiles of Uchijima & Wright (1964) and Inoue *et al.* (1975) were similar to the latter and that of Baines (1972) was the former.

(7) The changing patterns of the largest eddies (turbulon) ($A_{u,v,w}$) in the teosinte canopy were similar to those of turbulent intensities and the maxima came up at just above the canopy. $A_{u,v,w}$ in the sorgo corresponded to those of T_u/T_w , T_v/T_w and T_u/T_v .

(8) The slope of spectral density (S) was small in the order of u , v and w over h . The $-5/3$ power law was applicable for S_u and S_v but a little small for S_w . The profiles were multiplied severely at the lower areas in the canopies. The turbulent characteristic over h indicated a significant difference from the one at the lower canopy area.

(9) The peak frequencies of spectral density (n_p and $n_p z/\bar{u}$) indicated a similar pattern for both canopies. The peaks except w -component of teosinte canopy were recognized around h and $h_{\max}$. The peaks (n_p) were moved to the high-frequency region in alphabetic order of wind component.

(10) The turbulent transfer coefficient (K_{M2}) calculated from Eq. (7) was a good agreement with K_{M1} from Eq. (6) for both canopies. The value from Eq. (7) coincided well with that from Eq. (8) for the teosinte canopy, however, did not for the sorgo, *i.e.*, the scale of K_{M3} was 1.8 times as large as that of K_{M2} . The good agreement would be found in case of appropriate decisions of a calculation height and an empirical constant.