

# 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答

## 2. 赤松群落の乱流輸送に関する 空気力学的パラメータの特徴

Dynamic Response of a Red Pine Canopy to Changes  
of the Outside Environment

2. Features of Aerodynamic Parameters  
on Turbulent Transfer of a Red Pine Canopy

原菌 芳信\*・林 陽生\*\*・那須野正明\*\*\*・鳥谷 均\*\*\*\*

Yoshinobu HARAZONO, Yousay HAYASHI, Masaaki NASUNO, and Hitoshi TORITANI

### I まえがき

大気の安定度が中立の乱流状態の場合、境界層内の平均風速の鉛直分布は対数法則に従うことが知られており、乱流境界層内におけるエネルギーと物質輸送の評価は風速の対数分布を前提として構築されている(例えば、Monteith, 1963; Thom, 1975)。植物群落上方では群落自体の形状抵抗や粗度に伴う摩擦抵抗により対数法則からずれた風速分布となるため、対数分布として取り扱うには、地面修正量 $d$ と粗度長 $z_0$ の空気力学的パラメータを導入する必要がある。粗度長 $z_0$ は群落上における運動量や $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 等の輸送に直接関係し、地面修正量 $d$ は乱流の群落内部への侵入限界の指標となり、群落内外のフラックスに関係している。従来の研究により、空気力学的パラメータは群落構造に特徴的な値を持つことが明らかにされているが(谷, 1960, 1963; Lemon, 1965; Udagawa, 1966; 真木ほか, 1968)、植物群落は気流の変動に伴って揺らぎ、その揺らぎが群落内

外の気流に作用することも多く、空気力学的パラメータも変化することが考えられる。揺らぎによって模擬群落に作用する剪断応力が減少するという報告があるが(林, 1987)、実際の植物群落の空気力学的パラメータと風速、気流の乱れ、群落の揺らぎ等との関係については十分に明らかにされていない。

空気力学的パラメータを、A: 群落固有の特性値として扱うか、B: 風速や気流の乱れと群落構造の影響を受ける変数として扱うかは、植物の成育期間全体にわたるような長期間の群落内外の輸送量の見積りに差異を生じさせる。長期間にわたる植物群落のガスフラックス収支の正確な把握は、地球規模の大気ガス環境変化に対する植物生態系の寄与を評価するうえで重要であり、植物群落におけるフラックスを十分な精度で評価するには、植物群落の空気力学的パラメータと風速や群落の揺らぎ等との関係を明らかにする必要がある。

本研究では、群落の揺らぎに伴って空気力学的パラメータが変化すると仮説に基づいて赤松群落で

\*農業環境技術研究所気象管理科 \*\*農業環境技術研究所気象管理科(現・四国農業試験場生産環境部) \*\*\*筑波大学・院・地球科学研究科(現・(株)芙蓉情報センター) \*\*\*\*筑波大学・水理実験センター(現・防衛大学校地球科学科)

の観測を行い、上述のBの立場から空気力学的パラメータと風速との関係を検討した。

## II 測定対象地と測定方法

筑波大学水理実験センター敷地内の赤松群落を測定対象地とした。平均群落高さ12.5m、立木密度約27本/100m<sup>2</sup>の赤松が東西約200m、南北約100mに分布している(杉田ほか, 1986)。観測は1988年10月27日から11月11日まで、林地のほぼ中央に組み立てられた建設用足場鉄塔(地上高13.0m)に測定用ポールを接ぎ足し、測器を取り付けて実施した。以後これを観測塔と呼ぶ。測定対象地ならび観測期間は前報(林ほか, 1989)に示したものと同じであるので、詳細は前報を参照されたい。観測塔の地上12.4, 13.0, 14.0, 15.5mに光電式風速計(牧野応用測器製, AF-750S)を、15.5mに光電式風向計(牧野応用測器製, VF-016)を設置し、風向風速を測定した。高さ12.4mと14.0mには、銅-コンスタンタン熱電対を感部とする通風乾湿計を設置し気温と湿度を測定し、また、高さ13.0mには日射計(石川産業製, S140)を設置し日射強度を測定した。

データ収集は、パーソナルコンピュータ(富士通製, FM-7)と汎用データサンプリング装置(ESD製, Green Kit 88)を組み合わせを行い、6秒毎に読み取り、1分間の平均値をプロッピーディスクに記録した。

風速計の検定は農業環境技術研究所の大型風洞で、スパン長0.1mの超音波風速計(海上電機製, SAT-300)を基準として行い、また、通風乾湿計の検定は温湿度を制御可能な同小型風洞内で、アスマン通風乾湿計(吉野計器, SY-1A)を基準として行い、測器間の器差を補正した。

## III 解析方法

1分毎に記録されたデータから10分平均値を求め、10分間を1つの解析単位とした。空気力学的パラメータを算定する場合、4高度の10分間平均風速 $\bar{u}$ は対数分布式(1式)に合致するものと仮定し、各解析単位毎に4高度の $\bar{u}$ と $z-d$ を(2式)に代入し、最小二乗法で係数a(勾配)、b(縦軸切片)、相関係数

を計算した。この時、地面修正量 $d$ は7.5mから12.5mまで2cm毎に変化させ、相関係数が最大となった時の $d$ をその解析単位の気流条件における地面修正量とし、a, bを用いて、それぞれ(3)(4)式より摩擦速度 $u_*$ と粗度長 $z_0$ を求めた。ここで $\kappa$ はKarman定数であり、 $\kappa=0.4$ とした。

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left( \frac{z-d}{z_0} \right) \quad (1)$$

$$\ln(z-d) = a \times \bar{u} + b \quad (2)$$

$$u_* = \kappa/a \quad (3)$$

$$z_0 = \exp(b) \quad (4)$$

また、大気の安定度の指標として、高さ12.4mと14.0mで測定した気温を用いてRichardson数を(5)式から求めた。

$$Ri = \frac{g \times \Delta \bar{T} / \Delta z}{\bar{\theta} \times (\Delta \bar{u} / \Delta z)^2} \quad (5)$$

ここで $g$ は重力加速度、 $\Delta \bar{T}$ 、 $\Delta \bar{u}$ 、 $\Delta z$ はそれぞれ高さ14mと12.4mの平均気温差、平均風速差、高度差、 $\bar{\theta}$ は平均温位(14mと12.4mの平均気温、単位K)である。風速の対数分布式(1)は大気の安定度が中立の場合にのみ定義されているので、ここでは全ての解析単位について(5)式からRichardson数 $Ri$ を計算し、 $-0.05 < Ri < 0.2$ の大気条件の場合を近似的に中立状態と仮定し、その場合について得られた $d$ と $z_0$ のみを、測定時の気流条件に対応する粗度長と地面修正量として用いた。解析に用いた $Ri$ の範囲は低風速でのデータ数を確保するため、安定側が0.2とやや大きい値となったが、大部分(約95%)のデータは $-0.05 < Ri < 0.05$ の範囲にあった。

赤松群落上での運動量拡散速度 $Df$ (拡散抵抗の逆数)は(3)式から計算される $u_*$ 又は $d$ 、 $z_0$ を用いて(6)式のように表わせる。

また、摩擦速度 $u_*$ と剪断応力 $\tau$ との関係は(7)式のように表わせ、 $\tau$ と平均風速 $\bar{u}$ から群落の抵抗係数 $Cd$ が(8)式のように定義される。

$$Df = \frac{u_*^2}{\bar{u}} = \frac{\kappa^2 \bar{u}}{\ln(z-d) - \ln(z_0)} \quad (6)$$

$$u_*^2 = -\bar{u}'w' = \tau/\rho \quad (7)$$

$$Cd = \frac{\tau}{\rho \bar{u}^2} = \left( \frac{u_*}{\bar{u}} \right)^2 \quad (8)$$

ここで、 $u'w'$ はそれぞれ(9)式で示される乱流の主流方向と鉛直方向の変動成分であり、 $\rho$ は空気の密度である。

$$u = \bar{u} + u' \quad w = \bar{w} + w' \quad (9)$$

本観測地では各風向に対して十分なフェッチを確保できないため、群落上の高い高度のデータを用いて種々の空気力学的パラメータを算出すると移流の影響を含む恐れがある。したがって、風速の鉛直分布を調べ地面修正量 $d$ を決める場合には、高さ12.4mから15.5mまで4高度のデータを用いたが、拡散速度やRichardson数を算定する場合には、群落境界層底部の14mと12.4mの2高度間のデータを用いた。

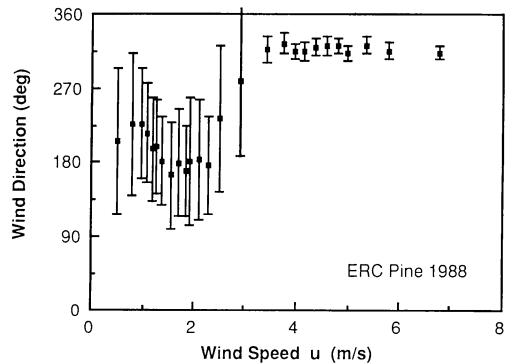
#### IV 結果ならびに考察

##### 1) 観測期間の気象条件と解析に用いた気流条件

観測期間における気象状況を第1表に示す。10月28日午後と11月5日に降雨があったが、その他は概ね晴天であった。観測期間中の最高気温は10月27日に20.3°C、最低気温は11月8日に-0.4°Cを記録し、日平均気温は6.8°Cから12.9°Cまで変化した。日中の風速は10月28、29両日が大きく、10分間平均風速値

が8 m/s以上となる時もあったが、その他の日中は2-3 m/sであった。解析に用いた $-0.05 < Ri < 0.2$ の場合の風速、風向の10分平均値の出現分布を第1図に示す。図中の点とその上下に引かれた線は、10分間平均風速値の時系列データを風速順配列データに並べかえた後、低風速から順に20データ(200分間)ずつ区切った時の平均値と標準偏差である。

平均風速約3 m/s以下では南東から南西の風が多



第1図 解析に用いた赤松群落上(高さ15.5m)の風速と風向の出現分布。各点は10分間平均風速20データの平均値

第1表 観測期間の気象状況(つくば市観音台, 農業環境技術研究所露場での観測結果)

Day	Wind Speed (m/s)	Temperature			Humidity			Solar Radiation (cal)	Rain Fall (mm)
		Max	Min	Mean	Max %	Min %	Mean %		
27-Oct	1.4	20.3	5.3	12.6	96.0	39.0	72.0	268.0	.0
28-Oct	1.6	19.8	7.9	12.9	93.0	35.0	72.0	252.0	2.5
29-Oct	3.7	16.8	6.0	9.5	91.0	21.0	62.0	288.0	.0
30-Oct	4.4	14.9	2.6	9.0	88.0	28.0	52.0	354.0	.0
31-Oct	1.0	15.3	.0	7.8	95.0	28.0	64.0	329.0	.0
1-Nov	1.0	16.6	.9	8.9	95.0	27.0	69.0	310.0	.0
2-Nov	1.5	19.3	4.5	11.0	90.0	32.0	66.0	185.0	.0
3-Nov	1.7	17.6	4.1	10.0	94.0	23.0	58.0	308.0	.0
4-Nov	1.5	14.9	2.6	9.5	90.0	39.0	65.0	228.0	.0
5-Nov	2.6	17.5	3.8	10.6	96.0	30.0	67.0	212.0	3.0
6-Nov	1.4	16.2	.8	8.7	93.0	28.0	64.0	311.0	.0
7-Nov	2.9	18.2	2.8	9.7	95.0	22.0	54.0	299.0	.0
8-Nov	1.1	14.2	-.4	6.8	94.0	25.0	57.0	298.0	.0
9-Nov	1.3	17.2	1.5	9.1	95.0	40.0	74.0	263.0	.0
10-Nov	1.8	20.3	2.9	11.3	94.0	18.0	51.0	267.0	.0
11-Nov	2.7	14.8	1.3	8.2	80.0	23.0	42.0	290.0	.0

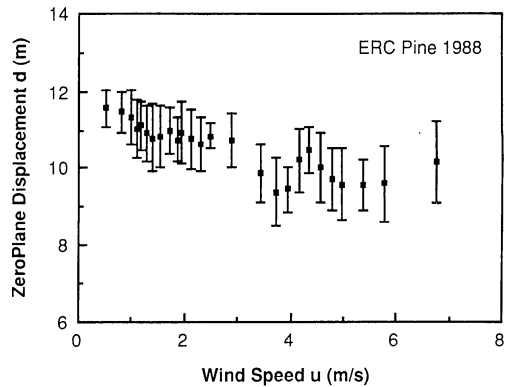
く、風向の変動が大きい、約 3 m/s以上の強風の場合の風向はほぼ北西で一定している。以下に示す空気力学的パラメータや摩擦速度、抵抗係数等の平均値は、第 1 図と同じ区分の風速順配列データから計算した。したがって、低風速の場合の結果は風向の異なるデータについての平均的な値を表わすことになるが、風速約 3 m/s以上の場合は北西の風についての結果であり、赤松群落と風速の相互作用を特徴的に表わすと考えられる。

## 2) 地面修正量ならびに粗度長と風速との関係

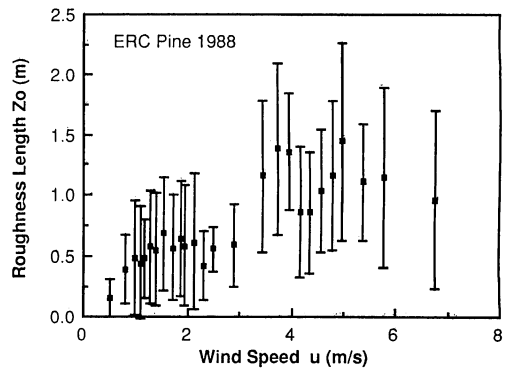
赤松群落の空気力学的パラメータとして、地面修正量と粗度長を求めた。前述のように大気不安定度がほぼ中立状態にある場合の結果のみを第 2 図、3 図に示す。横軸は高さ 15.5m の平均風速である。以後高さ 15.5m の平均風速を単に風速と呼ぶ。赤松群落の地面修正量  $d$  は低風速で大きく高風速で小さい傾向であるが、風速約 3 m/s を境に風速依存性に差異がみられる。すなわち、風速約 1.5 m/s まで風速の増加に伴って  $d$  が減少し、1.5–3 m/s ではほぼ一定の値 10.7 m となった。風速約 3 m/s 以上では  $d$  は変動し、風速 3–4 m/s の範囲で約 9.4 m まで急激に低下し、風速約 4.5 m/s で不連続的に 10.5 m まで増大した後、風速約 5 m/s の 9.6 m まで再び減少し、後は増加傾向にある。

粗度長  $z_0$  と高さ 15.5m の風速との関係 (第 3 図) では、全風速範囲で地面修正量  $d$  が増大すると  $z_0$  は減少するという、逆位相の傾向が認められ、井上ほか (1954) の水稻の場合と合致する。 $z_0$  は風速約 1.5 m/s までは風速と共に増加するが、1.5–3 m/s の風速範囲では  $d$  と同様  $z_0$  もほぼ一定値の約 0.6 m となった。風速 3–4 m/s の間で  $z_0$  は約 1.4 m/s まで急に増大し、一旦低下した後 5 m/s まで再び増加し、その後減少している。3–5 m/s の風速範囲における  $z_0$  の変動は  $d$  の変動とよく対応しており、この風速域で  $d$  と  $z_0$  に同時に影響するような現象、すなわち、赤松群落の樹冠部が揺らいだことが考えられる。

Prandtl の混合距離  $L$  を定義に従い (10) 式のように記述し、本観測結果では、赤松群落境界層内で風速の対数分布が成り立つことを考慮して、(1) 式中の  $z-d$  を  $L/\alpha$  で置き換え (11) 式のように表わすと、



第 2 図 高さ 15.5m の風速変化に伴う赤松群落の地面修正量の変化



第 3 図 高さ 15.5m の風速変化に伴う赤松群落の粗度長の変化

$$L = \alpha(z-d) \quad (10)$$

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{\alpha} \ln \left( \frac{L}{\alpha z_0} \right) \quad (11)$$

ある高さの風速と混合距離、すなわち、乱れの規模とは比例関係にある。そして、境界層内での等方性から、乱流輸送における  $L$  と渦拡散係数 (渦動粘性係数)  $K$  との関係は (14) 式のように表わせ、 $L^2$  に比例する (例えば、Rotta, 1972)。

$$u' = w' = L \frac{du}{dz} \quad (12)$$

$$-\overline{\rho u' w'} = \rho L^2 \left( \frac{du}{dz} \right) \left| \frac{du}{dz} \right| = \rho K \frac{du}{dz} \quad (13)$$

$$K = L^2 \left| \frac{du}{dz} \right| \quad (13)$$

したがって、乱流渦が赤松群落上層の凹部分のどの深さまで侵入できるかは乱れの規模に依存し、風速

に影響されることになる。

風速約1.5m/s以下では、風速の増加に伴って群落の平均高さ12.5mより下まで乱流渦が侵入するため $d$ は減少し $z_0$ は増加する。しかし、風速1.5—3 m/sでは、風向は南東から南西の広い範囲であるにもかかわらず、 $d$ 、 $z_0$ がほぼ一定値となっている。前述の考察から、気流の乱れの規模は風速に伴って大きくなるが、この風速範囲では乱流渦のエネルギーは群落上部に密集した葉や茎を貫入するほど小さくなく、鉛直方向の渦輸送が群落樹冠表面で制限された結果、風向によらず、 $d$ と $z_0$ が一定値を保ったと考えられる。水稻群落のように植被面が比較的均一で柔かい場合には $d$ 、 $z_0$ が一定となる風速範囲は存在していない(谷, 1963)ことから、このような領域が存在するのは樹木群落のように植被面の凹凸が大きく、ある風速以上で植被面が不連続的に変形する(揺らぎや曲がりが生じる)場合の特徴と考えられる。したがって、 $d=10.7\text{m}$ 、 $z_0=0.6\text{m}$ はこの赤松群落が風によって変形しない場合の固有値といえる。

このように群落が変形しない場合には、群落上方の気流は群落内部には貫入できず、群落境界層と群落内部の気流との相関は無いと予測される。超音波風速計による測定結果から、高さ9 m、5 m(群落内部)と高さ13.5 m(群落上方)の気流との乱れや混合距離 $L$ を比較すると、13.5 mの風速が約1 m/s以上では、高さ9 mの鉛直方向の $L$ が13.5 mの値より大きく、風速が低い場合には群落内部の $L$ のほうが小さくなる(那須野ほか, 1989, 本論文第3報)。これらのことは、ある風速以上になり葉が揺らいだり群落表面が変形した場合に、群落上方から群落内部へ乱流が貫入できることを示しており、赤松群落のような群落上層の樹冠部密度が高い群落では、低風速時の群落内部への乱流輸送は小さいと考えられる。

### 3) 赤松群落の揺らぎと空気力学的パラメータとの関係

風速3 m/s以上では $d$ は急激に減少し、 $z_0$ も大きく変動したが、これは風速の増加に伴って乱れの規模(エネルギー)が増大し、赤松樹木を揺らせると同時に、乱流渦が赤松群落の葉や茎の層を貫入したことによると考えられる。今回の観測では赤松自体の揺

れの定量的測定は行わなかったが、風速計のモニタリングと目測による赤松の幹の揺れとの比較観測では、幹の揺れは群落上の風速に比例して増大せず、約4—5 m/sの風速で幹は大きく揺れそれ以上風速が増大しても揺れは小さくなるが多かった。幹の揺れは個々の樹木毎に異なり、個々の樹木の固有振動数とある風速に対応する乱れの振動数とが共振した時に、最も大きく揺れると見られる状態が観察された。したがって、第2図に示された平均風速約3—5 m/sにおける $d$ の変動は赤松の幹や枝の揺れの結果と判断するのが妥当であろう。この場合に群落上に発達する境界層では、群落上層の揺らぎに伴う凹凸の増大が粗度として作用して $z_0$ を増大させ、揺らぎに伴って乱流渦が下層にまで侵入し $d$ を低下させたと考えられる。

3—5 m/sの風速範囲における $d$ 、 $z_0$ の変動を赤松群落の樹冠の揺らぎと対比させると、 $d$ が急増し $z_0$ が急減した風速約3 m/sで赤松の幹が揺らぎはじめ、3.5—4.0 m/sと5 m/s付近で幹の固有振動数と共振した最大の揺らぎとなり、それ以上の風速では共振状態を超えて揺れは減衰したと見られる。 $d$ と $z_0$ のピークが2箇所見られるのは、この場合の風向が一定であることから、観測塔の風上にある赤松の固有振動数と平均風速約3.5—4.0 m/sと約5 m/sの乱流渦の振動数とが共振したためと考えられる。赤松群落の幹直径や樹高、立木密度にはばらつきがあることから、群落の平均的な揺らぎの固有振動数はある幅を持つことになり、風向が異なる場合には群落の揺らぎに伴う $d$ の減少と $z_0$ の増大が、より広い風速範囲にわたって生じると考えられる。

風速5 m/s以上では赤松の幹が乱流渦と共振して揺れることなく、枝や葉が風圧でなびいた状態となり、乱流渦はその上部を滑るように流れるため粗度が減少し、その結果 $d$ がやや増大し $z_0$ が低下したと考えられる。模型群落では高風速時における風下方向への曲がりが大気から群落への運動量フラックスを低下させることが明らかにされており(林, 1987)、これは $d$ の増大と $z_0$ の低下に等価である。このような $d$ と $z_0$ の風速依存性は、群落の揺らぎや風下方向への曲がり等に影響されている。赤松群落で

は、風圧による群落の曲がりが生じる限界風速が約 5 m/s以上であったとみられ、 $d$ や $z_0$ が一定値となる風速範囲や極大値となる風速等は群落の構造や性質によって異なると推測される。

#### 4) 地面修正量と粗度長との関係

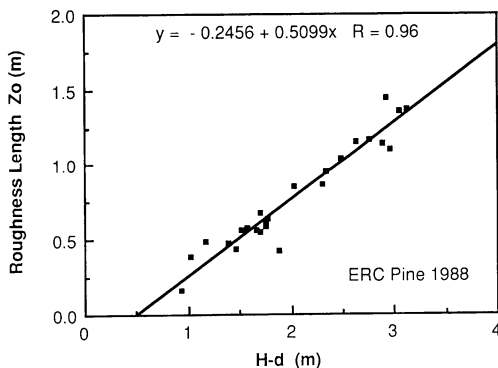
第2図、3図に示した赤松群落における $d$ と $z_0$ は、風速の対数分布を仮定して各々独立に求めたものである。赤松群落の樹冠が静止状態の場合から大きく揺らぐ場合までを含んでいるにもかかわらず、両図は $d$ と $z_0$ との間に強い相関の在ることを示唆している。実際に両者の相関をとると、

$$z_0 = -0.517d + 6.19 \quad (\text{単位m}) \quad (15)$$

相関係数0.97 (標本数26)

となる。このことは、乱流渦が群落内部のどの深さまで貫入したかが $d$ に反映され、貫入深さの増大( $d$ の減少)に伴って $z_0$ が増加したと理解できる。群落の平均高さ $H$  (12.5m) と $d$ との差を乱流渦の貫入深さと定義すると、風速に伴う $d$ 、 $z_0$ の変化を乱流渦の貫入深さという現象との関係で見ることができる。

$H-d$ と $z_0$ との関係をプロットしたのが第4図である。 $H-d$ が2.8m以上の赤松が乱流渦と共振して大きく揺れた場合にはばらつきが見られるが、 $z_0$ と $H-d$ の間には $H-d > 0.5$ の範囲で次式(第4図の直線)に示すように極めて高い相関が認められ(今回観測した赤松群落では $3.2 > H-d > 0.9$ )、粗度長 $z_0$ は乱流渦の貫入深さの約50%となることがわかる。



第4図 赤松群落の粗度長と乱流貫入深さ( $H-d$ )との関係。Hは群落の平均高さで12.5mであった。回帰式でのXは $H-d$ 、Yは $z_0$ を表わす。

$$z_0 = 0.509(H-d) - 0.246 \quad (16)$$

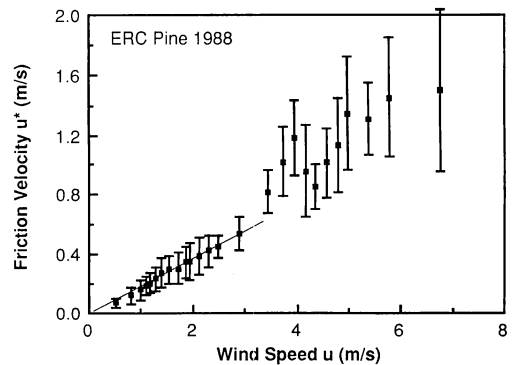
#### 5) 赤松群落上の摩擦速度と運動量拡散速度

(3)式から求めた摩擦速度 $u_*$ を第5図に示す。風速約3 m/s以下では平均風速 $\bar{u}$ と $u_*$ との間に直線関係が認められ、

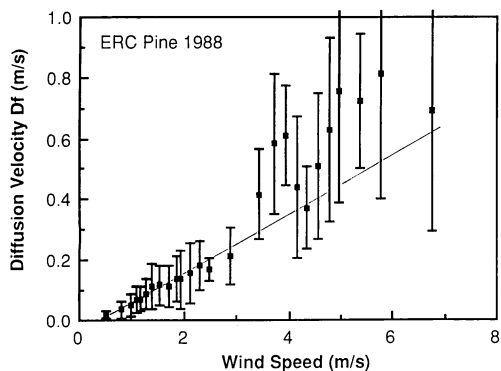
$$u_* = 0.19\bar{u} \quad (\bar{u} < 3) \quad (17)$$

となった。係数0.19の値は水稲群落での平均的な値0.1-0.12(原菌ほか, 1985)より大きく、植表面の凹凸が大きいことがその原因と考えられる。赤松が揺らいだ風速3.5-4.0m/sと約5 m/sの場合の $u_*$ は揺らぎが顕著でない場合の約1.5倍に増大し、風速5 m/s以上ではほぼ一定の値となっている。風速約5 m/s以上で $u_*$ が $\bar{u}$ の増大に比例しなくなったのは、高風速時に赤松樹木の葉や小枝が風下になびき、乱流渦が群落樹冠上を滑ることによると考えられ、このことは $d$ が高風速域で再び増大し $z_0$ が減少する傾向にあることとも合致する。

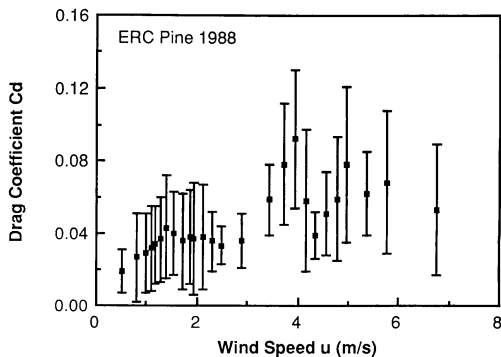
運動量拡散速度 $Df$ と風速との関係を第6図に示す。風速の増大に伴う $Df$ の変化は $u_*$ と同様の傾向であるが、風速約1.5-3 m/sでの増加がやや低下しており、風速との直線性が $u_*$ の場合より悪い。また、風速5 m/s以上では逆に減少している。これに対して赤松樹木が大きく揺らいだ風速3.5-4 m/sと約5 m/sでは、 $Df$ は $u_*$ の場合より著しく増大している。第6図中には、樹木が揺れない時の $Df$ は $\bar{u}$ に比例すると仮定した場合を直線で示したが、赤松が揺れた場合の運動量拡散速度は揺れない場合の約2倍



第5図 高さ15.5mの風速変化に伴う赤松群落上の摩擦速度の変化



第6図 高さ15.5mの風速変化に伴う赤松群落上の運動量拡散速度の変化



第7図 高さ15.5mの風速変化に伴う赤松群落の抵抗係数の変化

となり、樹木の揺らぎが乱流輸送を促進させていることがわかる。

#### 6) 抵抗係数の変化

群落の運動量拡散速度が樹木の揺らぎによって大きく増大することがわかったが、このことは群落の抵抗係数 $Cd$ にも反映されると考えられる。そこで、高さ15.5mの風速を用いて(8)式から求めた抵抗係数 $Cd$ と風速との関係を第7図に示す。ある粗度を持った平面上の境界層内の風速分布が対数分布の場合、その面に作用する抵抗係数は風速によらず一定となる。第7図に用いたデータは大気がほぼ中立状態の値のみをプロットしているの、赤松群落境界層の風速分布は対数分布とみなせ、 $Cd$ は風速によらず一定値となることが期待される。

図中の $Cd$ は風速約3 m/sまではほぼ一定の値と見なせるが、それ以上の風速では大きく変化している。このような $Cd$ の変化が生じたのは、風速の増大に伴って群落の表面状態が変化したためであり、これは樹木の揺らぎに伴う群落表面の変化によるのみ説明できる。群落が揺らいだ場合に $z_0$ 、 $u_*$ 、 $Df$ の増大が見られたが、群落の揺らぎは表面の粗度を増大させることから、群落の形状抵抗が大きくなり、これが群落全体の抵抗係数 $Cd$ の増大をもたらしている。特に、赤松が揺らいだ風速3.5–4.0m/sと約5 m/sでの抵抗係数は低風速の約2.5倍となっている。

#### V まとめ

筑波大学水理実験センターの赤松群落での観測結果から、群落内外の乱流輸送に関するパラメータを求め、風速や群落の揺らぎとの関係を調べた。風速約1.5m/s以下では、風速の増加に伴って粗度長 $z_0$ は増加し地面修正量 $d$ は低下したが、1.5–3 m/sではほぼ一定の値となった。この時には樹木の揺れは観測されず、赤松群落が風で変形しない場合の地面修正量と粗度長はそれぞれ、 $d=10.7m$ 、 $z_0=0.6m$ となった。風速3–5 m/sの範囲で赤松樹木は揺れ、 $z_0$ は急増し $d$ は低下した。同時に、摩擦速度 $u_*$ や運動量拡散速度 $Df$ も増大したが、これは群落の揺らぎが群落の形状抵抗を増大させ、それが境界層内の気流に影響し、群落内外の乱流輸送を促進したためといえる。このような群落の揺らぎの影響は、群落の抵抗係数の変化に顕著に現れた。この風速範囲を超えると、群落は風下になびく状態となり、 $d$ や $z_0$ は再び群落が揺らぐ以前の値に近づいた。

従来、群落における乱流輸送量を傾度法で求める場合、群落毎の空気力学的パラメータはほぼ一定の値として用いられてきたが、赤松の自然群落の揺らぎに着目した本研究では、乱流輸送に関するパラメータの値は群落が揺らぐ場合に大きく変化することがわかった。樹木が大きく揺れる場合には摩擦速度は約1.5倍に、運動量拡散速度は約2倍に、抵抗係数は約2.5倍に増大した。このようなことから、群落における拡散輸送量を評価する場合には、風速・乱れ強度のほか、群落の構造とその揺らぎの特徴毎に、

空気力学的パラメータの値を求めることが、評価精度を高めるうえで重要である。

本論文では、群落構造、その揺らぎと風速の相互関係にまで論議できなかったが、これについては今後観測と解析を進め、空気力学的パラメータの決定因子として抽出したいと考えている。赤松林地で観測を実施するにあたり、筑波大学水理実験センターの教職員の方々に便宜を図っていただいた。記して御礼申し上げる。

### 文 献

- 井上栄一・谷 信輝・今井和彦 (1954) : 耕地風の測定, 農業気象, **10**, 105-108.
- 杉田倫明・山下孔二・古藤田一雄 (1986) : アカマツの形態構造, 筑波大学水理実験センター報告, **10**, 47-60.
- 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.
- 谷 信輝 (1963) : 耕地風に関する研究, 農技研報, **A10**, 1-99.
- 那須野正明・林 陽生・原菌芳信・西沢利栄 (1989) : 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答, (3)赤松群落内の乱流輸送について, 筑波大学水理実験センター報告, **13**, 投稿中
- 林 陽生 (1987) : 群落—気流の相互作用, (1)フレキシブルな模型群落の組織的揺れとその風速依存性, 農業気象, **43**, 127-134.
- 林 陽生・原菌芳信・那須野正明・鳥谷 均 (1989) : 群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答, (1)赤松群落内外の温度場の特徴, 筑波大学水理実験センター報告, **13**, 97-103.
- 原菌芳信・矢吹万寿・坂井田幸一 (1985) : 耕地の物質輸送と気流環境の調節に関する研究, (2)水稲の成育に伴う気流特性の変化, 農業気象学会講演要旨, 56-57.
- 真木太一・高見晋一・新庄 彬 (1968) : ソルゴー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, **24**, 127-132.
- Lemon, E.R., (1965): Micrometeorology and the physiology of plant in their natural environment, in *Plant Physiology*, ed by F.C. Steward, Academic Press, New York, 203-227.
- Monteith, J.L., (1963): Gas Exchange in plant communities, in *Environmental Control of plant growth*, ed by Evance, Academic Press, New York, 95-112.
- Rotta, J.C., (1972): Turbulente Stromungen, B.G. Teubner, Stuttgart,大路通雄訳, 乱流, 岩波書店, 東京, PP 277.
- Thom, A.S., (1975): Momentum, mass and heat exchange of plant communities, in *Vegetation and the atmosphere*, ed by J.L. Monteith, Academic Press, London, 57-109.
- Udagawa, T., (1966): Variation of aerodynamical characteristics of a barley field with growth, *J. Agric. Meteorol. Japan*, **22**, 7-14.