

群落外環境の変化に対する赤松群落の動的応答

3. 赤松群落内外の乱流輸送について

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

3. Turbulence Transport over and
within a Red Pine Canopy.

那須野正明*・林 陽生**・原 蘭 芳信***・西沢 利栄****

Masaaki NASUNO, Yousay HAYASHI, Yoshinobu HARAZONO and Toshie
NISHIZAWA

I. 序 論

植物群落上の風速分布は、大気が中立の場合には、対数則に従うことが知られている。しかし、植物群落内においては、一般に対数則が成り立たず、群落内の物質輸送量の評価についてさまざまな議論が行なわれてきた。

内嶋 (1962a) は植被層内部の熱収支特性の研究から群落内の拡散係数を推定し、さらに植被係数を導入して群落構造の定量化を試みた (内嶋, 1962b)。武田 (1964, 1965) は繁茂度を用い、その大小と群落内の風速分布について論じた。また群落内外の物理量の鉛直分布のシミュレーションとしては、内嶋・井上 (1970)、Kondo and Akashi (1976)、林 (1980) などがある。近年、Maitani (1978)、米谷・竹内 (1981)、Maitani and Ohtaki (1987)、Amiro and Davis (1988) らにより野外観測が、また、Raupach et al. (1986)、Coppin et al. (1986)、Shaw and Seginer (1987) らにより風洞実験が行なわれ、群落内の鉛直方向の風速成分の乱れが平地のそれよ

り大きく、歪み度が負の値をとること、間欠的な下降流による運動量とスカラー量の鉛直方向への輸送が卓越すること、乱流変動量は安定度の関数として表現できること、群落内および群落上では尖り度が大きく、突発的な上昇流や下降流が起きていることなどが報告されてきた。一方、森林群落については、その空間的構造が一樣でないこともあり、群落内の鉛直方向の乱流輸送に力点がおかれた研究が多い。McBean (1968)、Allen (1968) らにより、スペクトル解析の結果から、群落下層ほど乱流変動に対する高周波の渦の寄与は小さく、波長が100mほどの大きな渦が存在することが報告されている。また、高周波域において乱れのエネルギーが周波数の $-5/3$ 乗に比例して減衰するという慣性小領域の仮定が成り立たないこともRaupach and Shaw (1982) などにより説明されてきた。

しかしながら、高さ10mを越すような背の高い植物群落と大気間のエネルギーや物質交換過程は、まだ未解明の部分が多いと考える。そこで本研究は、赤松群落内外の乱流輸送について、群落上の乱れと

*筑波大学・院・地球科学研究科 **農業環境技術研究所 (現：四国農業試験場) ***農業環境技術研究所 ****筑波大学地球科学系

の関係からその鉛直輸送過程を検討することを目的とする。

II 観測および解析方法

1) 観測方法

観測は、筑波大学水理実験センター南側の松林で、1988年10月下旬から11月上旬にかけて行なった。本研究では、大気不安定度や日射条件を考慮して、11月8日の観測記録を解析の対象とした。

測定は、3次元超音波風速温度計（海上電機製DAT-300型）を高さ約13.5mに設置し、3方向の風速成分（ u , v , w ）と温度（ T ）の測定を行なった。ここで、 u , v はそれぞれ直交する2方向の水平風速成分、 w は鉛直方向の風速成分である。これらのデータはアナログ磁気記録計（TEAC製R-71型）に記録した。また、群落内の高さ約9mと約5mの2高度に超小型3次元超音波風速温度計（海上電機製WA(T)-395型）を設置し、赤松群落内の風速（ u , v , w ）と温度（ T ）を測定し、別のアナログ磁気記録計（SONY Magnescale Inc.製FE-39A型）に記録した。

2) 解析方法

(1) 安定度

本研究においては、大気不安定度が中立に近いものを解析の対象とした。大気不安定度の計算にはモーンオブコフの長さ（ L ）を用いた。 L は次式で定義した。

$$L = -\frac{u_*^3 \cdot T}{\kappa \cdot g \cdot (\overline{T'w'})}$$

ここで、 u_* は摩擦速度、 T は平均温度、 κ はカルマン定数、 g は重力加速度、 $(\overline{T'w'})$ は温度と鉛直風速の共分散で、バーは平均を表わす。

解析対象にしたデータの大気不安定度は $|(z-d)/L| \leq 0.5$ の範囲のものとした。ここで、 d は $d = 0.8H$ （農業気象用語編集委員会、1986）で近似した地面修正量であり、 H は平均群落高である。なお、解析対象とした測定記録は日中のデータであり、当日は西よりの風が吹いており、フェッチは少なくとも約100mはあった。

(2) 運動量フラックスと摩擦速度

フラックスの計算に際し、アナログ演算器（海上電機製UDF-03型）を用い、 $u'w'$ をサンプリング間隔は0.05秒で、50秒間の平均値として求めた。この値から運動量フラックス（ $\overline{\rho u'w'}$ 、ここで、 ρ は空気密度を表わす）と、摩擦速度（ u_* ）を、

$$u_* = \sqrt{\overline{u'w'}}$$

として求めた。同じ時間の平均風速の値は、フラックスと同様に50秒平均の値で、アナログ演算器（海上電機製UDF-01型）を用いて求めた。なお、以下では運動量フラックスを $u'w'$ というように、空気密度 ρ を省略した形で表わすことにする。

(3) 混合距離

鉛直方向の混合距離（ l ）は、次式で定義した。

$$l = \gamma \cdot \sigma_w$$

ここで、 γ はオイラーの時間スケールで、

$$\gamma = \int_0^\infty R(\xi) d\xi$$

で定義する。 $R(\xi)$ は時間遅れ ξ についてのオイラー自己相関関数で、

$$R(\xi) = \frac{\overline{w'(t) \cdot w'(t+\xi)}}{\sigma_w^2}$$

である。実際の積分の上限時間は $R(\xi)$ が最初に0になる時間である。また、 σ_w は w の標準偏差であり、バーは平均を表わす。 σ_w と γ は10Hzでサンプリングした5分間の記録を一つの解析単位とした。この解析単位を、高さ14mの5分間の平均風速の強弱に基づき、10例選び出して解析した。なお、高さ9mと5mの解析単位は、高さ14mの解析単位と同時間であり、それぞれ10例である。

(4) 乱れ強度

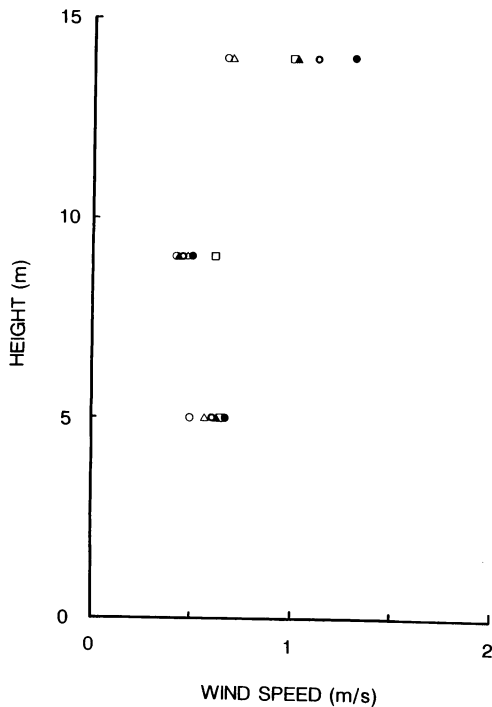
乱れ強度 i は、

$$i = \frac{\sigma}{U}$$

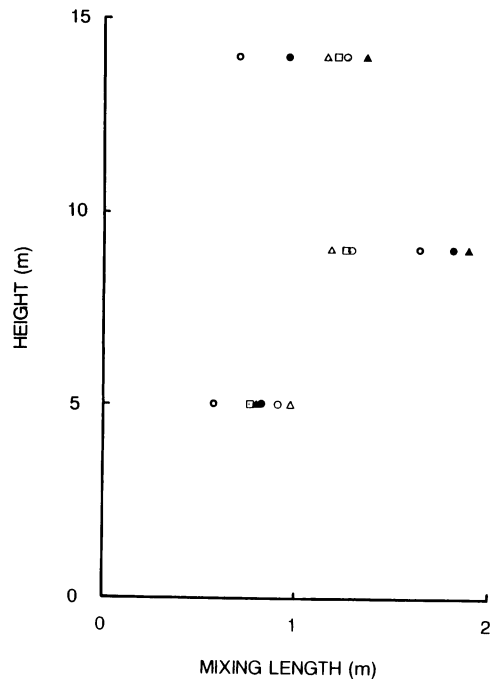
で定義する。ここで、 σ は標準偏差、 U は局所的な平均風速である。乱れ強度は10Hzでサンプリングした5分間の値に対し、各高度10例ずつ求めた。また、 U の値は5分間の平均値である。

(5) 歪み度と尖り度

鉛直風速の歪み度と尖り度は、5Hzでサンプリングした30分間の記録を1単位とする解析単位について求めた。これは、高次のモーメントの計算の際に



第1図 赤松群落内外の主流風速の鉛直分布.



第2図 赤松群落内外の混合距離.

は安定した解を得るためにそれだけ多くのデータ数が必要とされるからである。この解析単位は、1例しか設けなかった。

歪み度 (S) は、

$$S = \frac{1/N \cdot \sum(w - Mw)^3}{\sigma^3}$$

で求めた。ここで、 N はデータ数、 w は瞬間値、 Mw はその平均値、 σ は標準偏差を表わす。

尖り度 (K) は、

$$K = \frac{1/N \cdot \sum(w - Mw)^4}{\sigma^4}$$

で求めた。

(6) パワースペクトル

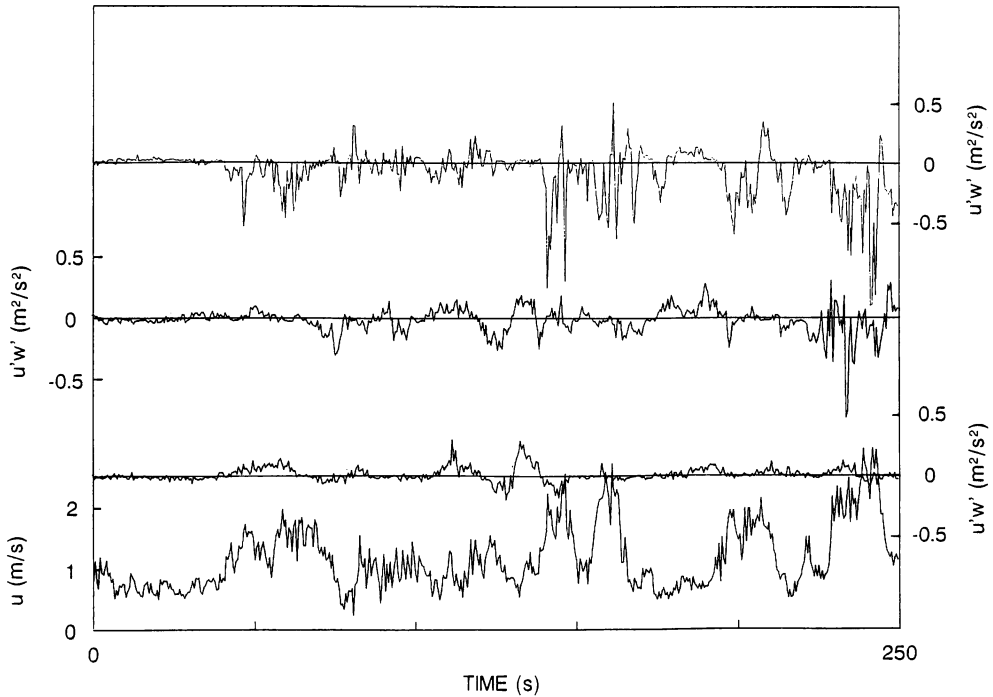
解析にはFFT (Fast Fourier Transfer methods) を使い、鉛直風速のパワースペクトルを求めた。この時、サンプリング間隔は0.1秒で、5分間を一つの解析単位とし、各高度10例の解析単位を設け、計算した。なお、FFTの計算にはTEAC製のPC-9300型を使用した。

III 結果と考察

1) 赤松群落内外の風速分布と混合距離

第1図に赤松群落内外の主流風速の鉛直分布の様子を示す(全部で10例の鉛直分布について解析したが、ここでは代表的な6例を示す)。群落内の高さ9mと高さ5mの風速のばらつきは、群落上の高さ14mに比べて小さい。また、高さ9mでは、風速が最も小さくなっている。一般には、下層ほど風速の値は小さくなるといわれているが、ここで高さ5mの風速が高さ9mに比べ相対的に大きいのは、高さ5m付近には松の葉や枝がないために、比較的幹部を吹き抜ける風の効果を受けやすいためであろう。

第2図に鉛直方向の混合距離の変化を示した。記号は第1図の高さ14mの風速の値に対応させて示している。鉛直方向の混合距離は、群落内9mの高さで最も大きく、その変動幅も大きい。これは、群落上の高さ14mでは、群落上の主流風速が0.69m/sから1.31m/sまで変化したのに対し、鉛直方向の混合距離



第3図 赤松群落内外の運動量フラックスの時系列変動。
 (上段から順に高さ14m, 9m, 5mの摩擦速度。下段は高さ14mの風速の時系列変動)。

がそれほど大きく変化していないことと対称的である。鉛直方向の混合距離の変化については、多くの研究がある。斎藤ほか(1970)は、トウモロコシ群落において混合距離を2通りの方法で求め、群落内では指数関数的に減少することを示した。Inoue *et al.* (1975)は異なる3種類の方法から水稲群落の混合距離を求めて比較し、方法により混合距離の値は異なるが、最大葉面積密度を示す層付近において極大を示す結果を得ている。Willson *et al.* (1982)とAmiro and Davis (1988)では、トウモロコシ群落と黒トウヒ群落において鉛直方向の混合距離を求め、樹冠部付近で大きな値をとっている。本研究において高度9mの混合距離の値が大きくなったのは、この層付近の葉面積指数(密度)が大きいことから(杉田ほか1986)、密に茂った松の葉や枝の効果により2次的な渦が発生したためと考える。原菌ほか(1989)に示されたように、赤松群落の地面修正量の値は約10.7mとなった。そして、この高さは葉面積

指数や葉面積密度が最大になる層とほぼ一致した。したがって、群落上層からこの層より下層に渦が輸送されるときには、葉や枝のため複雑な2次渦が発生し、群落内の樹間サイズに対応した渦に成長していると考えられる。しかし、下層の高さ5mでは横方向の移流の効果が認められたように、ある程度混合され、渦のサイズも減衰し多少小さくなったと考える。

高さ9mでは、群落上の主流風速が1.02m/s, 1.12m/s, 1.31m/sの3ケースでは、それ以下の風速に比べ混合距離は明らかに大きくなった。したがって、群落上の高さ14mの主流風速の値が約1m/sを境にして、群落内の輸送構造が変化することが考えられる。この点について、運動量フラックスの面から考察する。

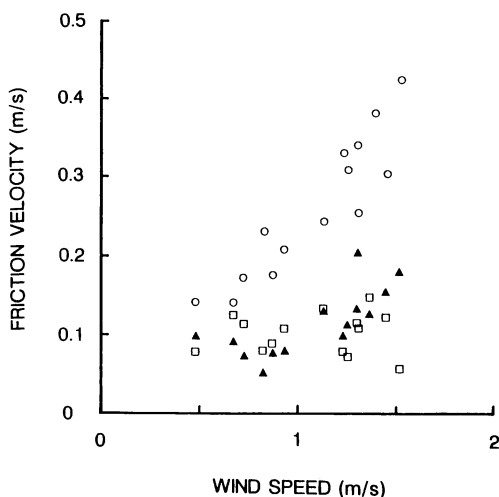
2) 赤松群落内の乱流輸送

第3図は群落上高さ14mの主流風速とその時の運動量フラックス、および高さ9mと5mの運動量フ

ラックスの250秒間の時系列変動である。高さ14mの風速が大きくなると、同高度の下向きの運動量フラックスが大きくなっている。その変動幅も大きく、間欠的に下向きに強く輸送されている。高さ9mの運動量フラックスの変動は、群落上の風速が1 m/s以上の場合、下向きの運動量輸送があり、高さ14mの運動量フラックスとの対応が読み取れるが、振幅は小さい。高さ14mの風速が弱くなる場合には、時折上向きの運動量輸送も認められる。一方、高さ5mでは振幅は小さく、鉛直方向の運動量輸送はほとんどない。また、高さ9mの運動量フラックスの変動とは多少対応関係があるものの、群落上のそれとはほとんど対応が認められず、群落上と群落内部では運動量フラックスの機構に差異のあることが推測される。

第4図は、群落上高さ14mの主流風速に対する各高度の摩擦速度の変化である。高さ14mでは、風速の増大にともない摩擦速度は一次的に増大しているが、高さ5mではほぼ一定の値を示し、群落上の風速に対する依存性は認められない。高さ9mの摩擦速度は、両高度の中間的な変化を示し、群落上の風速が1 m/s以上になると摩擦速度が風速に依存するが、それ以下ではほぼ一定の値を示した。

第1表に、赤松群落内鉛直方向の乱れ強度を示した。乱れ強度は、群落内の高さ9mの値がその上下の高さに比べ非常に大きく、高さ14mの風速が1 m/s以上になると、乱れ強度はさらに増大している。Maitani (1978)、米谷・竹内 (1981) は、水稻群落上の観測から乱れ強度は樹冠部付近で最大を示し、(測定高度) / (群落高度) の値の増加にともない減



第4図 高さ14mの風速に対する高さ14m、9m、5mにおける摩擦速度。
(○は高さ14m、▲は高さ9m、□は高さ5mにそれぞれ対応する)。

少するとしている。しかし、水稻のように群落上層が均一でない赤松群落の構造を考えると、本研究で得られた結果はほぼ妥当であると考えられる。また、群落上の風速が1.0m/s以上の場合に群落内の乱れ強度が増大したことから、群落上の風速が1 m/s以上になると、群落上で発達している乱流がこの赤松群落内の高さ9mの鉛直混合に影響すると考えられる。そして、それまでは群落の立木密度といった空間スケールに支配された乱れ場に、風速の増大にともない上層から侵入してきた渦が加わり、見かけ上乱れが大きくなるものと考えられる。このような鉛直方向の渦の侵入が混合距離を大きくした(第2図)と考え

第1表 赤松群落内外の乱れ強度

高 度	風速1.0m/sまで	風速1.0m/s以上	平 均 値
14m	0.358	0.341	0.35
9m	0.744	1.083	0.89
5m	0.278	0.293	0.28

(注) 単位はすべてm/s. 風速の値は高さ14mの値である。

第2表 赤松群落内外の平均風速, オイラー時間スケール, 混合距離, 鉛直風速の乱れ強度, 歪み度, および尖り度

H	U	τ	l	i	S	K
14m	0.92	3.46	1.07	0.35	-0.36	4.14
9m	0.51	3.70	1.61	0.90	-1.22	5.99
5m	0.59	4.55	0.75	0.28	-0.40	5.50

(注) H : 測定高度 (m), U : 平均風速 (m/s), τ : オイラー時間スケール (s),
 l : 混合距離 (m), i : 鉛直風速の乱れ強度, S : 鉛直風速の歪み度, K : 鉛直風速の尖り度.

られる.

3) 群落内外の高次モーメントの変化

第2表に, 赤松群落内外における平均風速, オイラー時間スケール, 混合距離, 鉛直風速の乱れ強度, 歪み度, 尖り度の平均値をまとめて示す.

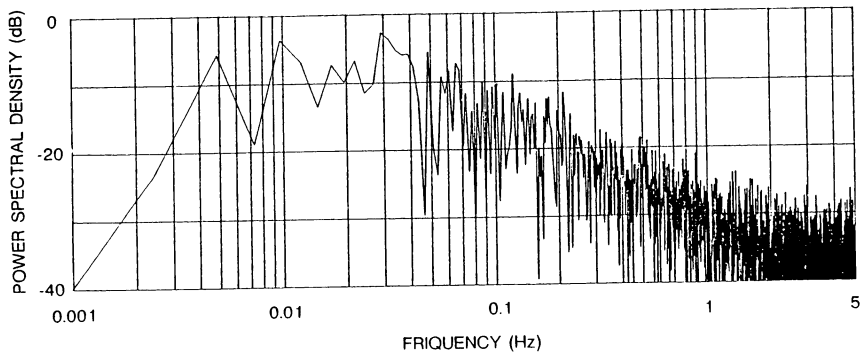
歪み度は, 瞬間ごとの乱れの大きさについて頻度分布をつくったとき, それが正規分布からどれほどずれているかを表わす. 正規分布の時は歪み度は0になる. 歪み度が大きな負の値をとることは, 下向きの変動が間欠的に発生していることを意味する. また, 測定レベルより低い位置に測定対象とする物理量のsinkがあると, 歪み度は負になることが知られている. 一方, 平均値の周りの変動成分の頻度分布が正規分布になるとき, 尖り度は3になることが知られている. 尖り度が3より小さいときは, 平均値付近に集中した微変動となり, 逆に3より大きいときは, 大きな波動的な変動が考えられる.

第2表から群落上より群落内において, 負の歪み度と尖り度が大きくなっていることがわかる. 群落内で負の歪み度と尖り度が大きくなることは, Amiro and Davis(1988), Baldocchi and Hutchison (1988), Baldocchi and Meyers (1988) などでも報告されている. 今回, 特に群落内9mの負の歪み度と尖り度が, ほかの高度に比べ大きくなった. その値から, 高さ9mにおける輸送は非常に間欠的で, 変動周期の長いことが考えられ, 群落上層から間欠的に侵入した乱流が, この層の枝や葉により2次的な渦を引き起こしたことが想像される. 高さ5mの尖り度も大きい値を示すことから, このような変動はその下層の5mまで十分伝わっていたと考える.

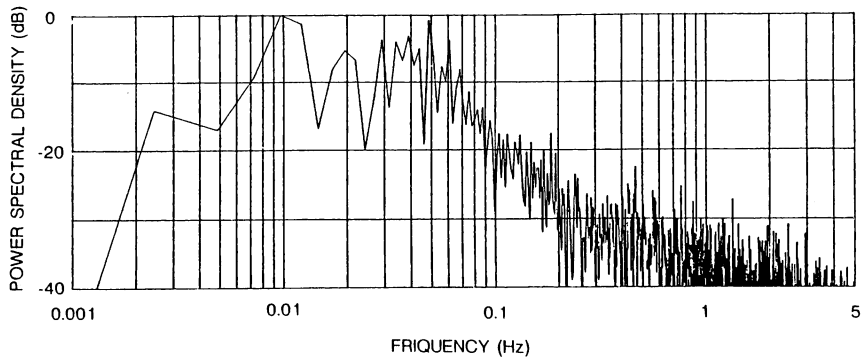
4) スペクトルと渦の時間スケール

第5図に, 群落上14mと群落内9m, および5mにおける鉛直風速のパワースペクトルを示す. この時, 群落上14mの平均風速は1.00m/sであり, 9mでは0.49m/s, 5mでは0.67m/sであった. 高周波側において下層ほどそのパワーの減衰が大きい. 特に高さ5mでは, 全周波数帯において群落上のそれよりパワーが小さい. パワースペクトルのピークの位置についての議論はあるが (Kaimal et al., 1972), 明瞭なピークが認められるのは, 群落上の高さ14mでは0.01Hz, 0.03Hz, 0.1Hzであり, 高さ9mでは, 0.01Hz, 0.05Hz, 0.45Hz, 5mでは0.01Hzであった. また, 9mと5mでは, 高周波側にAmiro and Davis (1988) の指摘した“shoulder”の存在が認められる. 各層共通に現われたピーク周波数としては, 0.01Hzのみであった. “shoulder”の存在は, 前述のAmiro and Davis(1988)の黒トウヒ群落, Baldocchi and Hutchison (1988) のアーモンド果樹園の観測でも確認されている. これについてRaupach and Shaw (1982) は, 群落構成要素による形状抵抗によって引き起こされた渦の発生によって説明できるとしている. また, パワーが減少し始める周波数は群落上から順に0.12Hz, 0.06Hz, 0.03Hz付近と, 下層に向かうにしたがって低周波側にずれている. 横軸が無次元化されていないため, 風速の強弱による効果も考えられる. しかし, その傾きは群落内の9mでは0.4Hzより高周波側においては-5/3乗に近いが, 高さ5mでは-5/3乗よりも大きく, 粘性消散以外のエネルギー損失が認められる. 慣性小領域においては, 乱流の運動エネルギーの生成も消散もないと仮定されているので, 群落内5mでは慣性小領域の仮定が保たれていないことになる. このようなエ

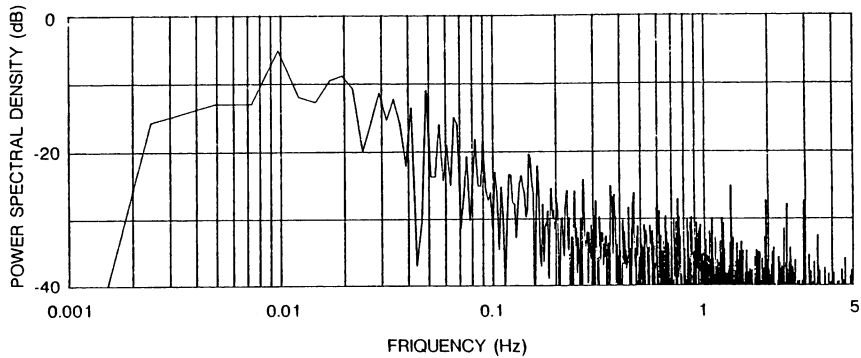
(a)



(b)



(c)



第5図 高さ14m, 9m, 5mにおける鉛直風速のパワースペクトル。
(a)は高さ14m, (b)は高さ9m, (c)は高さ5mにそれぞれ対応する。

エネルギー損失は、群落内では渦の乱流エネルギーがその輸送過程において松の葉や枝に吸収されてしまうためと考えられる。

IV 結論

赤松群落内外において、渦相関法による乱流変動量の直接測定を行ない、以下のことが明らかになった。

(1) 赤松群落内外の鉛直方向の混合距離を比較した。その結果、群落内の高さ9m付近において混合距離が大きくなることが認められた。この高さは、赤松群落の葉面積指数や葉面積密度が最大になる層とほぼ一致した。

(2) 赤松群落内の鉛直混合は、群落上高さ14mの風速が1m/s以上では群落上の風速の影響を受け、それ以下では影響されなかった。

(3) 赤松群落内では、群落上に比べ、相対的に大きな負の歪み度と大きな尖り度で特徴付けられた。また、葉や枝の影響によると思われるエネルギーの吸収がみられ、スペクトルの慣性小領域からはずれた。

なお、残された問題としては本研究は限られた期間のものであり、一年を通じた植物群落における乱流変動量の動向を知る必要がある。今後、日変化・季節変化を含め、群落構造の発達遷移過程と関連づけながら群落内外の乱流変動量の動向を調べる必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、筑波大学水理実験センターの鳥谷均技官と川村隆一技官には赤松群落の観測や測器の利用に当たり、ご指導とご協力を賜りました。これらの方々には、感謝の意を表します。

文献

内嶋善兵衛 (1962a) : 植物群落内の微気象に関する研究。

(1). 植被層内の乱流拡散係数について。農業気象, 18, 1-9.

内嶋善兵衛 (1962b) : 植物群落内の微気象に関する研究。

(2). 植被層内の乱れのスケールと運動量輸送につい

て。農業気象, 18, 58-65.

内嶋善兵衛・井上君夫 (1970) : 作物群落内におけるエネルギーと炭酸ガスの交換に関する研究。(9). 群落内の炭酸ガス環境のシミュレーション。農業気象, 26, 5-18.

斎藤隆幸・長井良典・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, 205-214.

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, 47-52.

武田京一 (1964) : 植物群落内部の風について。農業気象, 21, 1-5.

武田京一 (1965) : 植物群落内部の風について。(2)。農業気象, 20, 11-14.

日本農業気象学会農業気象用語編集委員会 (1986) : 農業気象用語解説集, p. 83.

林 陽生 (1980) : 植物群落内風速プロファイルの数値解。地理評, 53, 389-395.

原菌芳信・林 陽生・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。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。筑波大学水理実験センター報告, 13, 105-112.

水谷俊彦・竹内敬二 (1981) : 水田上の接地気層における運動量とスカラー量の輸送特性について。農業気象, 37, 1-7.

Allen, L.H., Jr. (1968) : Turbulence and wind speed spectra within a Japanese larch plantation. *J. Appl. Met.*, 7, 73-78.

Amiro, B.D. and Davis, P.A. (1988) : Statistics of atmospheric turbulence within a natural black spruce forest canopy. *Boundary-Layer Met.*, 44, 267-283.

Baldocchi, D.D. and Hutchison, B.A. (1988) : Turbulence in an almond orchard: Spatial variations in spectra and coherence. *Boundary-Layer Met.*, 42, 293-311.

Baldocchi, D.D. and Meyers, T.P. (1988) : Turbulence structure in a deciduous forest. *Boundary-Layer Met.*, 43, 345-364.

Coppin, P.A., Raupach, M.R. and Legg, B.J. (1988) : Experiments on scalar dispersion within a model canopy. Part II. An elevated plane source.

- Boundary-Layer Met.*, **35**, 167—191.
- Inoue, E., Uchijima, Z., Horie, T. and Iwakiri, S. (1975): Studies of energy and gas exchange within crop canopies (10). Structure of turbulence in rice crop. *J. Agric. Met. Japan* **31**, 71—82.
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. and Cote, O.R. (1972): Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quart. J.R. Met. Soc.*, **98**, 563—589.
- Kondo, J. and Akashi, S. (1976): Numerical studies on the two-dimensional flow in horizontally homogeneous canopy layer. *Boundary-Layer Met.*, **10**, 255—272.
- Maitani, T. (1978): On the downward transport of turbulent kinetic energy in the surface layer over plant canopies. *Boundary-Layer Met.*, **14**, 571—584.
- Maitani, T. and Ohtaki, E. (1987): Turbulent transport processes of momentum and sensible heat in the surface layer over a paddy field. *Boundary-Layer Met.*, **40**, 283—293.
- McBean, G.A. (1968): An investigation of turbulence within the forest. *J. Appl. Met.*, **7**, 410—416.
- Raupach, M.R., Coppin, P.A. and Legg, B.J. (1983): Experiments on scalar dispersion within a plant canopy, Part I, The turbulence structure. *Boundary-Layer Met.*, **35**, 21—37.
- Raupach, M.R., and Shaw, R.H. (1982): Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Boundary-Layer Met.*, **22**, 79—90.
- Shaw, R.H. and Seginer, I. (1987): Calculation of velocity skewness in real and artificial plant canopies. *Boundary-Layer Met.*, **39**, 315—332.
- Willson, J.D., Ward, D.P., Thurtell, G.W. and Kidd, G. E. (1982): Statistics of atmospheric turbulence within and above a corn canopy. *Boundary-Layer Met.*, **24**, 495—519.