

気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用

1. 植物群落構造の差異がフラックスや群落抵抗係数に及ぼす影響

The Interaction of Turbulent Air Flow and Communities of Rice Plants and Red-pines 1. Effects on Fluxes and Drag Coefficients over Canopies due to Differences in Canopy Structure

原 菌 芳信*・村上 智美**・及川 武久***

Yoshinobu HARAZONO, Tomomi MURAKAMI, and Takehisa OIKAWA

1. まえがき

近年、大気中の二酸化炭素増加による地球の温暖化が大きな問題となっている。植物は光合成により大気中の二酸化炭素を固定し地上部バイオマスや地下埋蔵有機物として貯蔵しており(Bolin, 1983)、吸収源の一つである。しかし、陸上植物に限ってもこれが大気中の濃度変動や気候変動にどのような役割を果たしているか、定量的に不明の点が多い。特に、植物群落における乱流輸送特性、群落のガス flux 収支は気象条件や植物条件によって変化しているが、広域的にこれを把握することはまだ正確にはできていない。植物群落における flux の正確な把握は、大気汚染質の吸収などの機能を含めて、地球規模の大気ガス環境変化に対する植生の寄生を評価する上で重要な課題である。

群落境界層内における物質・エネルギー輸送に関しては、完全な乱流状態の場合に風速の対数分布が認められ、これを基礎にした flux 測定法が開発され測定に用いられてきた(例えば、井上, 1952: Inoue,

1963: Monteith, 1963: Thom, 1975)。

植物群落の粗度長 z_0 や地面修正量 d などの空気力学的パラメータは群落内外の風速分布や flux に影響することから、群落高さとの関係が調べられてきた(例えば、Tanner and Pelton, 1960: 古藤田・林, 1980など)。しかし、植物の生長に伴い群落構造は変化するし、気流の変動に伴って群落が揺らぐことから、植物群落における flux の評価にこれらの要素を含める必要がある。林(1987)は模擬群落に作用する剪断応力は揺らぎによって減少することを報告し、筆者らは植物の生長に伴う群落構造の変化のみならず、気流の乱れ、群落の揺らぎ等によって境界層の空気力学的パラメータの特性値が変化することを示した(原菌・林, 1989; 原菌ら, 1989)。本研究では異なる群落構造を持つ水稻とアカマツについて、群落上の微気象とガス濃度変動を測定し、植物群落における flux の動態を明らかにしようとした。一連の結果の中で、本報告では植物群落の構造的差異が flux に及ぼす影響について示す。これらの知見は種々の植物群落における熱・物質輸送過程を明らかにする

*農業環境技術研究所・気象管理科 **筑波大学自然科学類 (現:富士総合研究所・解析技術部) ***筑波大学生物科学系

上で重要であると考える。

2. 測定対象群落と測定方法

2.1 測定対象群落の位置と状況

水稻群落とアカマツ群落について観測した。両観測場所を図1, 2に示す。

水稻群落における観測は、農業環境技術研究所(NIAES)内にある東西約250m, 南北約300mの圃場で行なった。ほぼ中央に位置する水田(縦50m, 横20m)に高さ4mのポールを立て風速や気温の鉛直分布などを測定した。1989年5月10日にコシヒカリが栽植密度18.3株/m²で移植され、慣行の栽培方法で管理された。圃場全体で水稻が栽培されており、6月中旬以降は圃場全体の草丈がほぼ均一な状態であった。

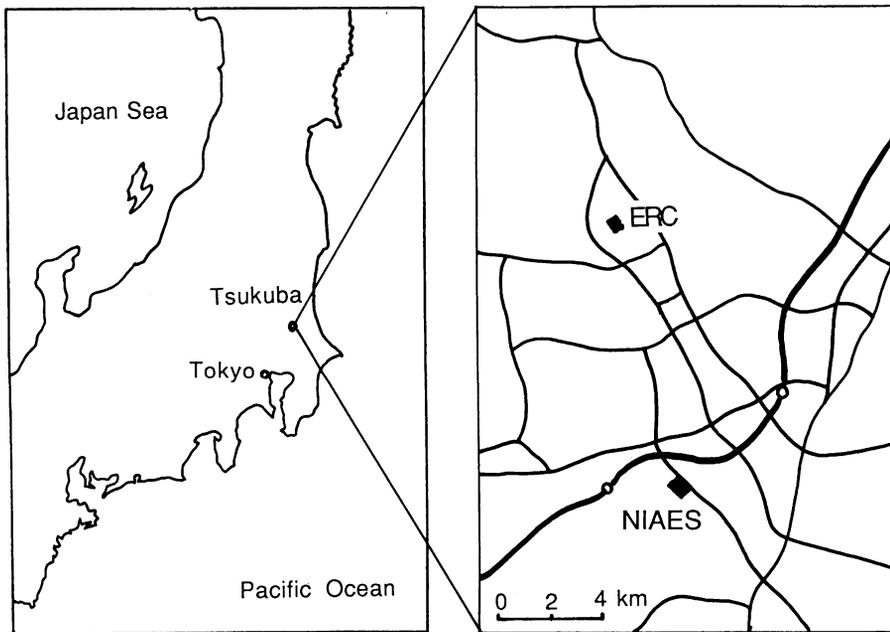
アカマツ群落における観測は、筑波大学水理実験センター(ERC)の南北約100m, 東西約200mのアカマツ林分で行なった。群落の平均高さは1988年10月で約12.5m, 1989年5月で約12.7m, 平均胸高直径は124mm, 立木密度は27本・100m⁻²である(杉田ら,

1986)。この林分は自然状態で放置しており、アカマツの葉層や幹からなる樹冠部が地上7mから群落頂部までを占め、地面から約2.5mの層はヤマウルシ、ヒサカキ等の低木がまばらに生えている。群落上層は葉密度が高く鉛直方向の通気は少ない(原菌ら, 1990)。

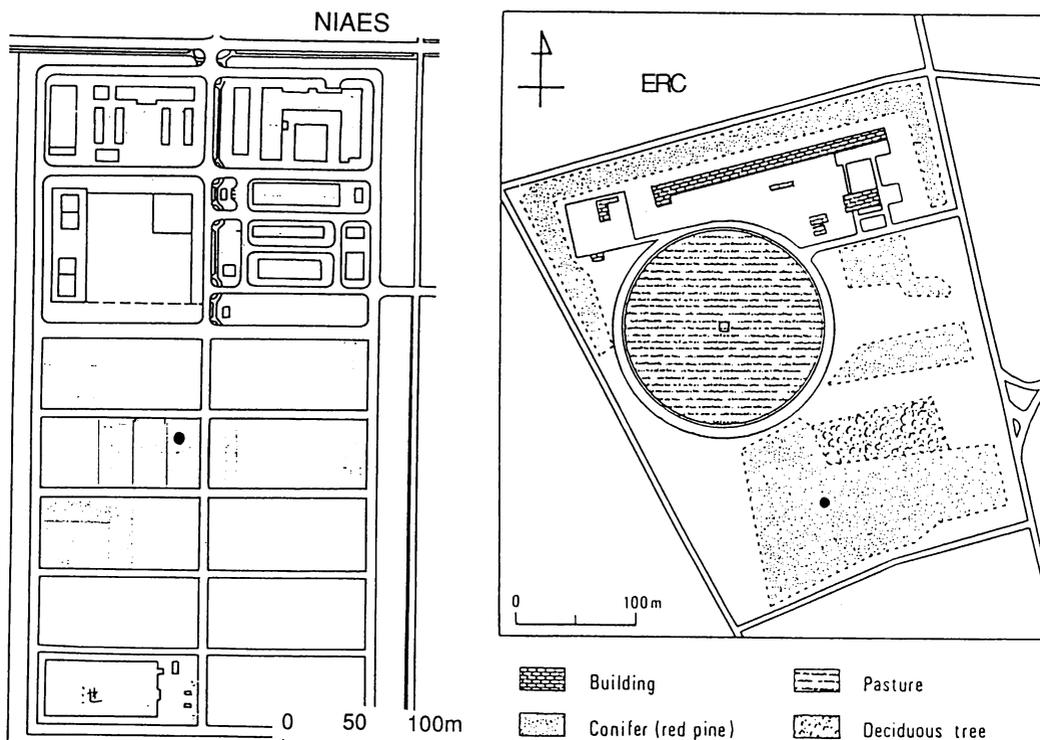
2.2 測定項目と方法

2.2.1 水稻群落における測定

水稻の移植約1ヶ月後から収穫期までの間に7回観測を行なった。図2に示した水田の中央よりやや風下に測定用ポールを設置し、種々のセンサーを取りつけた。群落上5高度の風速と風向は光電式風向風速計(牧野応用測器 VF016, AF750S)を用いて測定し、群落内の風速は無指向性プローブの熱線風速計(KANOMAX model 1000)を用いて測定した。湿度測定には湿球部にセラミックカップを使用した通風乾湿計を用いて、群落上3高度で測定した。日射強度は日射計(中浅測器 H205)を用いて測定した。観測期間、測定項目、使用測器、測定高さ等を表1に示す。水稻の生育に伴って群落高さや群落密度が



第1図 測定地の地理的位置



第2図 水稻群落 (NIAES) とアカマツ群落 (ERC) における測定地点 (●) とその周辺の状況

変化するので、群落境界層の厚さや摩擦速度など特性も異なると予測されたので、風杯や通風乾湿計等の設定高さは、群落境界層内の特性の変化を把握できるように、水稻の生育ステージに応じて測定毎に変えた。

各測定要素は、汎用データログ (ESD GreenKit 88) を用いて10秒毎に読み取り、その1分間平均値をフロッピーディスクに記録した。このほか超音波風速温度計、赤外線吸収式 $\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ガス変動計、動ひずみ測定器を用いて応答の速い環境要素の測定も行ったが、これらは磁気テープにアナログ記録した。

2.2.2 アカマツ群落における測定

アカマツ群落における観測は、アカマツの生理的機能の季節的变化を考慮して1988年10月下旬から11月上旬の秋期、1989年4月下旬から5月上旬の初夏と、7月下旬の夏期の3回行った。測定は群落内に立てられた高さ13mの観測用鉄塔を使用した。鉄塔

への測器の取り付け状況は林ら (1989) とほぼ同様である。観測期間毎の測定項目、使用測器、設置位置を表2に示す。

アカマツ群落内外の観測に用いた風速計、通風乾湿計、日射計などは水稻群落の観測に用いたものと同じであり、記録方法も水稻群落の場合に準じた。

2.2.3 層別刈り取り調査

水稻群落については生育ステージを異にする各測定時期毎に層別刈り取りを行い、群落構造を調べた。調査日は、6月2日、6月30日、7月17日、7月31日、8月11日、8月25日、9月8日の7回である。層区分は高さ10cm毎とし、各層ごとに稈と葉に分け、自動葉面積計 (林電工 AAM 8) で葉面積を測定した後、電子式上皿台秤 (Mettler PJ300) で生重量を測定した。その後、資料を約90°Cで3-4日間乾燥させ乾物重量を測定した。

第1表 水稻群落における測定項目と測器の設置高さ

	h	δ	$T_{D,W}$	u_{OUT}	u_N	u, w	WD	R_s	R_n	c, q
測定日	草丈	歪計	通風乾湿計	3杯型光電式	熱線型	超音波風速温度計	光電式風向計	日射計	純放射	赤外線呼吸式
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
6/3 }	0.2		2.5	2.8		0.3	2.8	2.0	2.2	0.3
6/5	-0.25		0.6	1.8						
			0.2	1.1						
				0.6						
				0.3						
6/26 }	0.45		2.5	3.0		0.4	2.8	2.0	2.2	0.4
6/29	-0.5		0.7	2.0						
			0.4	1.3						
				0.8						
				0.5						
7/11 }	0.6		2.5	3.25		0.6	2.8	2.0	2.2	0.7
7/18	-0.7		0.7	2.35						
			0.4	1.55						
				1.0						
				0.7						
8/2 }	0.7		2.3	3.1			3.0	2.0	2.5	
8/8	-0.8		1.1	2.2						
			0.8	1.5						
				1.1						
				0.85						
8/8 }	0.75	0.64	2.3	3.1	0.8	1.1	3.0	2.0	2.5	1.1
8/11	-0.85	0.6	1.2	2.2	0.6					
			0.9	1.6	0.4					
				1.2	0.2					
				0.95						
8/23 }	0.9	0.8	2.3	3.1	0.9	1.2	3.0	2.0	2.5	1.2
8/25	-1.05	0.8	1.3	2.3	0.7					
			1.0	1.7	0.5					
				1.3	0.3					
				1.1						
9/6 }	0.9	0.75	2.3	3.1	0.9	1.2	3.0	2.0	2.5	1.2
9/11	-0.0	0.75	1.3	2.3	0.7					
			1.0	1.7	0.5					
				1.3	0.3					
				1.0						

第2表 アカマツ群落における測定項目と測器の設定高さ

	δ	T_d, T_s	$T_{d,w}$	u_{OUT}	u_{IN}	u, w	WD	R_s	R_n	c, q
測定日	歪計	気温 地温	通風 乾湿計	3杯型 光電式	熱線型	超音波 風速温度計	光電式 風向計	日射計	純放射	赤外線 呼吸式
	(m)	(cm)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
1988年 10/27) 11/11	なし	12.5	14.0	15.5	5.1	14.0	15.5	13.0	13.0	13.5
		10.5	12.4	14.0	3.5	8.7				
		7.0		13.0	2.0	5.0				
		5.0		12.4	1.0	3.4				
		3.0								
		1.5								
		1.0								
	0.5									
	0.1									
1989年 4/29) 5/6	9.6		14.5	16.0	9.0	13.5	16.0	13.0	13.0	13.5
			12.8	14.5	6.0					
			9.0	13.5	3.0					
			3.0	12.9	1.0					
		1.5								
1989年 7/20) 7/31	12.0	0.0	14.8	16.3	9.0	13.8	16.5	13.0	13.0	13.8
	11.45	5.0	13.0	14.8	6.0					
	11.3	15.0	9.0	13.8	3.0					
		30.0	5.0	13.0	1.5					
		1.5								

3. 解析方法

大気安定度が中立に近い状態では、境界層における風速分布は次式のような対数分布になることが知られている。

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

ここで、 $\bar{u}(z)$ は高さ z における水平方向の平均風速、 u_* は摩擦速度、 d は地面修正量、 z_0 は粗度長、 κ はカルマン定数である。大気が中立状態の場合、群落境界層の輸送は乱流輸送に支配されるため、運動量輸送と水蒸気や CO_2 、熱などのスカラ輸送とが等しくなる。運動量輸送については群落上の風速勾配から空気力学的方法（傾度法）により測定できる。

本研究においては、大気安定度が中立に近い場合

の測定結果を対象として解析を行なうこととし、その指標としてリチャードソン数 (Ri) を用いた。 Ri は群落上 2 高度 $z(1)$ 、 $z(2)$ の風速と気温の10分間平均値 $\bar{u}(1)$ 、 $\bar{u}(2)$ と $\bar{T}(1)$ 、 $\bar{T}(2)$ とを用いて以下の式(2)から求めた。

$$Ri = \frac{g \times (\bar{T}(1) - \bar{T}(2)) / \Delta z}{\bar{\theta} \times ((\bar{u}(1) - \bar{u}(2)) / \Delta z)^2} \quad (2)$$

$$\Delta z = z(1) - z(2) \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度、 $\bar{\theta}$ は 2 高度間の平均温位 (単位 K) である。(2)式で求めた Ri の絶対値が 0.05 以下の大気状態の場合を近似的に中立とみなして解析に用いた。

空気力学的方法で運動量 flux を求める場合、地面修正量 d 、粗度長 z_0 などの空気力学的パラメータを算出する必要がある。 d を決定する場合、各測定高さ

z と平均風速 \bar{u} を(4)式に代入し、仮の地面修正量 di の値を変化させながら繰返し計算を行い、直線回帰の相関係数が最も高くなった時の di を地面修正量 d とした。 di の変化幅はアカマツ林の場合20mm、水稻群落の場合2mmとした。

$$l_n(z-d) = a \times \bar{u} + b \quad (4)$$

地面修正量 d が決まった後、粗度長 z_0 と摩擦速度 u_* を(4)式の回帰係数 a , b を用いて(5), (6)式から求めた。ここで κ はカルマン定数であり、 $\kappa=0.4$ とした。

$$z_0 = \exp(b) \quad (5)$$

$$u_* = \kappa/a \quad (6)$$

摩擦速度 u_* と群落上に作用する剪断応力 τ とは、(7)式のように定義されており、摩擦速度は群落上の運動量 flux と等価である。また、群落拡散速度 Df や群落抵抗係数 Cd も u_* と τ との関数として定義されており、(8), (9)式からそれぞれの値を求めた。

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

$$Df = \frac{u_*^2}{u} \quad (8)$$

$$Cd = \frac{\tau}{\rho \bar{u}^2} = \left(\frac{u_*}{\bar{u}} \right)^2 \quad (9)$$

ここで u' , w' はそれぞれ水平方向、鉛直方向の風速変動量、 ρ は空気の密度である。実際の計算手順は原菌ら (1989) と同様である。

4. 水稻の群落構造の変化と運動量フラックスの変化

4.1 生育に伴う群落構造の変化

水稻の生育ステージ毎の群落構造図と層別の葉面積指数 (LAI) 分布を図3と図4に示す。本研究では、水稻の形状や高さなど物理的な群落構造と flux との関係に着目するので、穂は稈に含めて表示した。図中の記号で L は葉を、 S は稈を、 T は全体を示す。また、 FW は生重量を、 DW は乾物重量を示す。

本観測で使用した水稻圃場における出穂日は8月8日から11日であり、8月11日以後群落上層部の構造が変化した。層別の葉面積指数分布図から明らかのように、8月下旬になると下層葉の枯れ上がりのため LAI は減少した。植被面の状態は、出穂期には葉や穂が立っていたが、登熟が進むにつれて穂が垂

れ下がり、刈り取り直前には穂が層をなし、その上に黄化して堅くなった止め葉が立った状態となった。

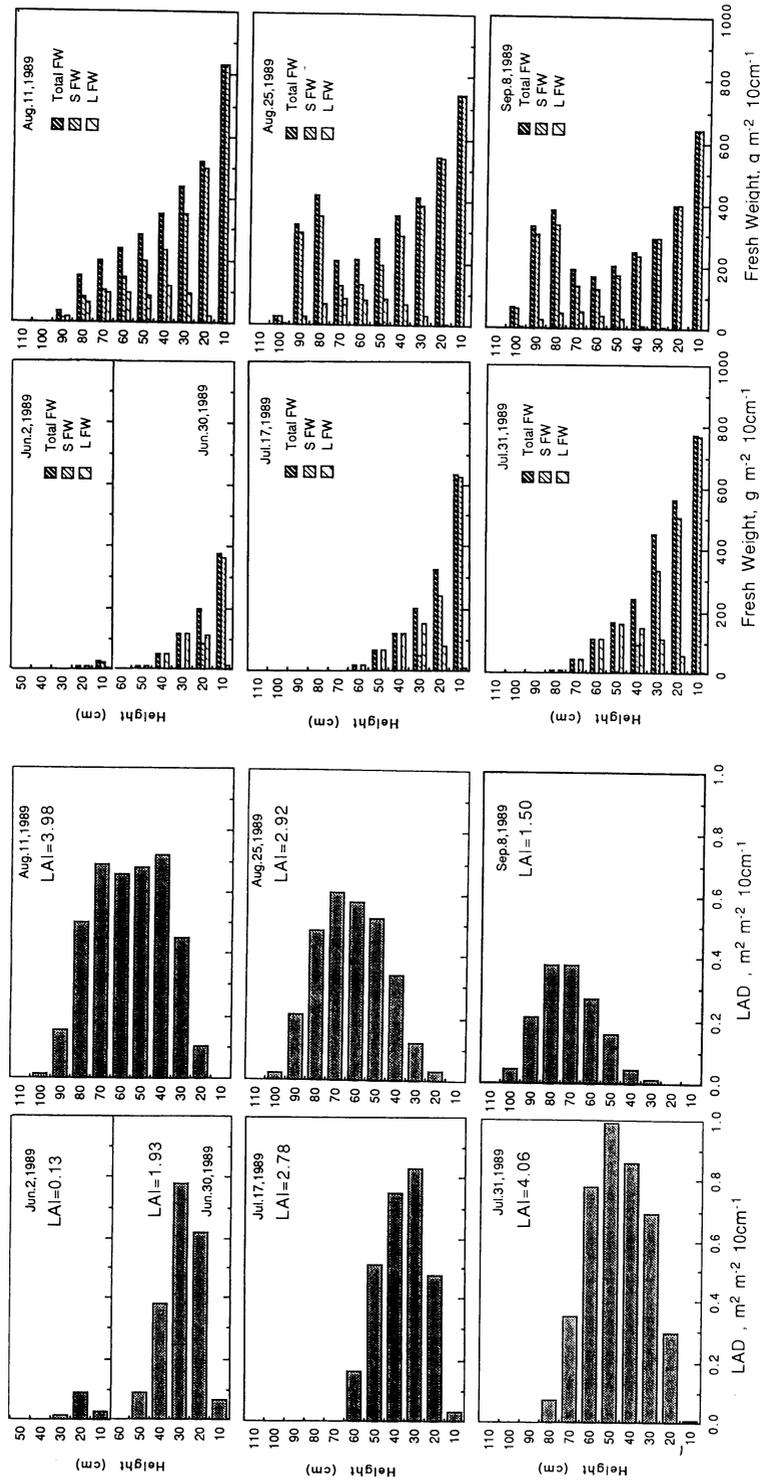
4.2 水稻群落の生育ステージ毎の摩擦速度の変化

水稻の生育ステージ毎に空気力学的パラメータを求め摩擦速度を算出した。田植から穂ばらみ期までの摩擦速度 u_* と平均風速 \bar{u} との関係を図5に、出穂直前以後の関係を図6に示す。図中の点は風速や気温などの10分平均測定データから各時刻毎に時系列値を求め、風速順配列に直した後20データ毎に平均化した値である。したがって、点の分布は観測期間において大気がほぼ中立状態とみなせる場合の風速の出現頻度を示している。摩擦速度は運動量 flux と等価であるので、以後摩擦速度を指標として気流条件や群落構造と flux との関係を検討する。

4.2.1 移植直後から穂ばらみ期

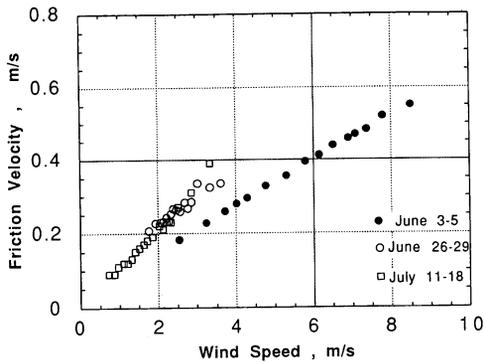
6月上旬には地面修正量、粗度長、抵抗係数ともに小さかった。摩擦速度は風速の増加に伴って直線的に増加し、平均風速の約6%の大きさである。この時期の水稻は、平均高さ22.5cm、 $LAI=0.13$ と群落密度が小さく水面がよく見える状態であったことから、空気力学的には群落としての機能が小さいといえる。

6月下旬には、草丈約48cm、 $LAI=1.93$ となった。風速2-3m/sの範囲で地面修正量は増大し、粗度長は減少した。摩擦速度 u_* は風速約3m/sまでは風速 \bar{u} に比例して増加し、平均風速の約8%の大きさである。風速3m/s以上では、観測結果が3点と少ないが、風速が増大しても u_* はほとんど増加していない。同様の生育ステージの水稻 (品種シナノモチ) の観測結果では約2m/s以上で u_* の \bar{u} に対する勾配が著しく低下した (原菌・林, 1989)。両年度の結果から、出穂前の生育ステージでは高風速域で u_*/\bar{u} が低下することがわかる。この時風速3m/s以上で粗度長が減少したことから、3m/s以上の風速になると柔らかい葉が風になびき、植被面上を気流が滑る状態となり、粗度としての機能が小さくなったと考えられる。この場合、葉が風と平行になびくことにより、群落内部への乱流輸送が制限されることも摩擦速度の風速に対する勾配が小さくなることの一因と考えられる。

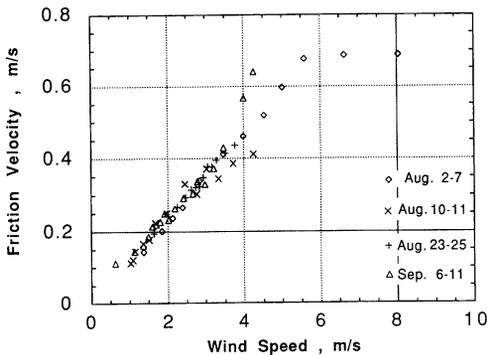


第3図 水稻(コシヒカリ)の生育に伴う群落構造の変化、
1989年5月10日移植

第4図 水稻(コシヒカリ)の生育に伴う葉面積指数の変化、
1989年5月10日移植



第5図 移植後から穂ばらみ期の水稻群落上の摩擦速度と平均風速との関係



第6図 出穂直前から刈取りまでの水稻群落上の摩擦速度と平均風速との関係

7月中旬には、草丈約60cm, $LAI=2.78$ となった。平均風速 \bar{u} に対する摩擦速度 u_* の勾配はさらに増大し、測定された約3.4m/s以下の風速範囲で u_*/\bar{u} は直線関係にあり頭打ち傾向はみられない。6月下旬に比べて、比較的高風速域まで u_*/\bar{u} が直線関係となるのは、稈が植被面付近にまで分布するようになることと、個々の葉自体も大きく堅くなり、葉の曲がりやなびきが生じる下限風速が増大したことによると考えられる。

出穂直前(8月上旬)には、草丈約80cm, $LAI=4.06$ となった。摩擦速度 u_* は、風速約6m/sまで風速に比例して増加したが、それ以上の風速では、 u_* はほとんど変化しなかった。これは、水稻の稈の高

さが高くなり、葉も堅くなり群落全体の粗度が増大したことから、6月中旬、7月中旬と徐々に葉の曲がりやなびきが生じる下限風速が増加し、約6m/sまで u_*/\bar{u} が直線関係となったと考えられる。それ以上の高風速域では、葉がなびくことにより、粗度が低下すると同時に群落上層に水平な面を構成し、上下方向の乱流輸送を抑制したことが考えられる。これらのことから、7月中旬の水稻群落では u_*/\bar{u} が直線関係となる上限風速は、3.5m/s以上6m/s未満の風速範囲にあるものと推測される。

このように出穂期までは、水稻の生育に伴って低風速域での運動量 flux は増大し、その風速範囲は生育とともに高風速域まで拡大することが分かる。

4.2.2 出穂期から収穫期

8月8~11日に収穫し草丈は約85cmとなり、群落上層は柔らかい穂で覆われた。 u_*/\bar{u} に直線関係が認められるのは風速約2.5m/s以下と、出穂直前より低下した。そして、風速2.5~3m/sでは u_* と \bar{u} の間にかかなりの変動が認められ、2.5~4.5m/s風速範囲における u_*/\bar{u} の勾配は、それ以下の風速の場合に比べてかなり小さい。この時には、風速1~2.5m/sで粗度長 z_0 の値が大きく約2.5m/s以上で減少した。このような出穂直前との差異は、出穂直後の穂は柔らかく軽量なため、低風速域でよく揺らぎ、気流に対して6月下旬から7月下旬の柔らかい葉と同様の機能を持ったことによると考えられる。ただし、同一風速では6月下旬や7月中旬より摩擦速度が大きく、葉のみの場合に比べて稈の存在が粗度を大きくし、運動量 flux を増大させている。

8月下旬になると登熟が進み一部穂は垂れ下がり、下葉の刈れ上がりのため LAI は2.92に低下した。この時の観測では測定された約4m/s以下の風速範囲全域で u_*/\bar{u} に直線関係が認められ、登熟が進むにつれて穂や葉が堅くなったことにより、葉や稈がなびく下限風速が高くなっている。しかし、同一風速における摩擦速度の値は出穂期より少し低下している。

9月中旬の刈取り直前には、穂は完全に垂れ下がりその上に黄化した止め葉が層を成すようになった。この時期は稈も葉も堅く、群落上層部のみの曲がりやなびきは生じ難い状態である。このため、風速が

高くなると水稻の根元から植物全体が揺らぎ、群落全体に大きなうねり「穂波現象」がみられるようになった。

摩擦速度は風速約3.5m/s以下の範囲で風速に対する勾配が小さく、風速約3.5m/s以上では急に大きい値となった。低風速域では穂の上に出ている止め葉が風に揺らぎ、出穂前と同様に u_*/\bar{u} に直線関係が認められるが、勾配が小さいのは出穂前より葉量が少なく粗度としての機能が小さいためと考えられる。高風速域では穂波が生じ、水稻全体の揺らぎに伴って上下方向の乱流輸送が増大し、摩擦速度を非線形的に増大させたと考えられる。風速約3.5m/s以上ではこれまでの時期と異なり、地面修正量は風速の増加にともなって減少し粗度長は増大した。このことは、穂波の発生時には群落の揺らぎに伴って気流が群落下層にまで侵入し、水稻群落全体の抵抗を増大させることを示している。このことが気流の運動エネルギーを吸収して、摩擦速度の増大や運動量 flux を増大させると理解される。

4. 3 生育に伴う抵抗係数の推移

どの生育ステージにおいても風速が低い範囲では、風速と摩擦速度との間に直線関係が認められた。そこで、生育ステージ毎に以下の式で両者の関係を整理し、その勾配と群落の抵抗係数を比較する。

$$u_* = \alpha \bar{u} + \beta \quad (10)$$

ここで α, β は各ステージ毎の係数である。また、 (β/\bar{u}) は小さいので抵抗係数 Cd は(9)式から近似的に次式のように α^2 と置くことができる。

$$Cd = \left(\frac{\bar{u}_*}{\bar{u}} \right)^2 = \left(\alpha + \frac{\beta}{\bar{u}} \right)^2 \approx \alpha^2 \quad (11)$$

表3に各生育ステージ毎に求めた u_* と \bar{u} との関係式と α^2 を示す。それぞれを比較すると、6月上旬以後出穂直前まで α の値は増大し、その後減少している。前述のように、この時期までは u_* と \bar{u} とが比例関係となる上限風速が、水稻の生育に伴って高風速域まで増加したが、これは図3、4に示された葉面積の増大と葉身の硬化に対応している。8月上中旬の勾配 ($\alpha = u_*/\bar{u}$) は6月上旬の約2倍、抵抗係数は約4倍であり、水稻の生育が群落上の flux を増加

第3表 水稻群落上の摩擦速度、群落抵抗係数と平均風速との関係

date	$u_* = \alpha \bar{u} + \beta$	相関係数 r	抵抗係数 Cd
6/3-6	$u_* = 0.063\bar{u} + 0.026$	0.999	0.0040
6/26-29	$u_* = 0.082\bar{u} + 0.058$	0.868	0.00672
7/11-18	$u_* = 0.111\bar{u} + 0.008$	0.979	0.00123
8/2-8	$u_* = 0.124\bar{u} + 0.027$	0.997	0.0154
8/10-11	$u_* = 0.123\bar{u} + 0.002$	0.961	0.0151
8/23-25	$u_* = 0.114\bar{u} + 0.013$	0.987	0.0130
9/6-11	$u_* = 0.1085\bar{u} + 0.031$	0.918	0.0118

させることが分かる。このことは、水稻群落が生長することにより、大気中から群落内への輸送量が移植直後に比べて約2倍増加することを意味する。葉面積指数は7月下旬が最大であったことから、植物による運動量の吸収が葉面積指数だけに比例するのではなく、群落の構造や植被面の状態によっても異なることが明らかである。

出穂後、 α の値が低風速域でも低下したのは、稔実が進むにつれて穂が重くなり、群落内部への乱流の侵入を制限するようになったためと理解される。

このように、平均風速 \bar{u} に対する摩擦速度 u_* の勾配 α の変化は水稻の葉や茎の密度と植被面の柔軟性に依存していることが明らかである。また、前節で示したように、 u_* と \bar{u} との比例関係が認められる風速範囲の変化も群落構造や植被面の状態に依存した。水稻の揺らぎとその時の瞬間的な flux との関係は別報(村上ら, 1990)で検討するが、不規則な揺らぎが最も卓越する出穂期に flux が大きくなったことは興味深い。群落全体が穂波として揺らぐ場合も摩擦速度 u_* は増大したが、この場合は u_* と \bar{u} とが比例する領域での輸送とは別のメカニズムが作用していると考えられ、別途検討したい。

4. 4 水稻の揺らぎと重心位置の変化

水稻の生長に伴って、稈の揺らぎ方に大きな相違があることが分かった。そこで、水稻の群落構造に関連したパラメータとして群落の重心を求め、それと揺らぎの違いについて検討した。

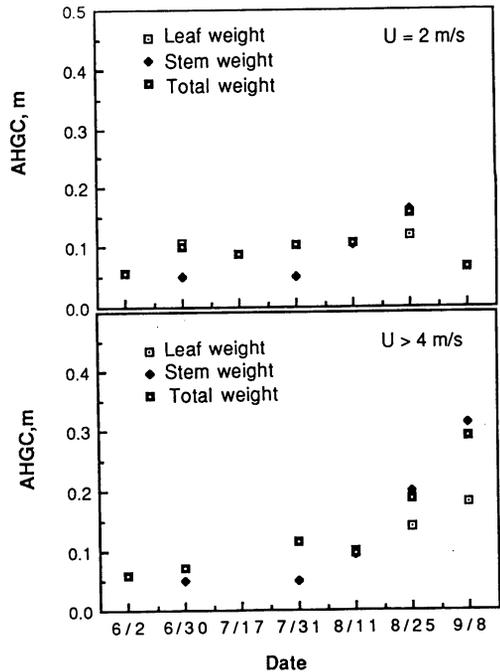
群落上の風速分布の定義から、平均風速が0とな

るのは地面修正量 d に粗度長 z_0 を加えた高さであるが、乱流は平均的に地面修正量高さ d まで侵入すると見なせる。そして境界層内の気流は d 以上の高さの植物に作用して植物の揺らぎや摩擦速度に変化をもたらす。そこで、 d 以上の葉、稈、全重量それぞれについて重力中心 (GC) を求めた。これは地面修正量以上の高さ存在する植物についての重心高さであるので、これを空気力学的重心高さ (空力重心高さ: Aerodynamic Height of Gravity Center, *AHGC* と略称) と呼ぶことにする。ただし、筆者らが既に示しているように (原菌ら, 1989; 原菌・林, 1989), *AHGC* の算定に必要な地面修正量 d は風速によって変化するので、風速が約 1, 2, 3, 4 m の場合について、それぞれに対応する地面修正量を用いて *AHGC* を求めた。風速 2 m/s と 4 m/s の結果を図 7 に示す。

各生育ステージ毎に空力重心高さ (*AHGC*) が変化している様子が認められる。田植期から出穂期までは、どの風速の場合にも葉の重心と全体の重心はほぼ同じ高さであったが、稈の *AHGC* は低かった。出穂期には稈は急激に伸び、葉、茎、全重量各々の *AHGC* はどの風速でも接近し、登熟期には風速によって変化した。風速 2 m/s と 3 m/s とは非常によく似た空力重心高さの経時変化を示したが、風速 1 m/s の場合には 7 月下旬に最も *AHGC* が高くなり、風速 4 m/s の場合には登熟が進むにつれて *AHGC* が増大した。

群落のゆらぎや群落抵抗係数 C_d と *AHGC* との関係について検討すると、風速 2 m/s の *AHGC* は群落上層の葉や稈が揺らぐ状態に対応し、風速 4 m/s の *AHGC* は群落が大きく揺れたり、なびく状態に対応する。

風速 2 m/s の場合には、6 月下旬から 8 月下旬まで葉と全重量の *AHGC* は約 0.1 m 前後で大きい変化はない。これに対して、風速 4 m/s の場合には出穂期を除いて水稻の生育に伴って *AHGC* が増加する傾向がみられる。そして、6 月下旬は風速 1 m/s の場合より 4 m/s のほうが重心が低く、風速の増大にもなつて水稻がなびいたり、曲がるため *AHGC* が低下したことを示している。7 月下旬は高風速時にも



第 7 図 水稻の生育に伴う空気力学的重心高さ *AHGC* の変化

AHGC の低下が見られず、高風速域まで u_w と \bar{u} が比例関係にあったこととよく対応している。出穂後は、稈実に伴って稈の *AHGC* が高くなるが、収穫直前には風速 3 m/s 以下とそれ以上とで大きく異なった。すなわち、低風速では稈や群落の揺らぎが生じないが、稈実に伴って穂が垂れ下がるため *AHGC* はそれ以前より低下している。高風速で穂波が生じる場合には、気流が群落下層にまで侵入し地面修正量が低くなるため、*AHGC* は増大し最大値となっており、*AHGC* から穂波の発生を推定できる。

全体的にみると、水稻に揺らぎがみられないときの *AHGC* は高いが、風速が増加し群落頂部がそよぎはじめると *AHGC* は低下し、気流に対する抵抗を減少させる方向に働いていることが分かる。したがって、*AHGC* が低下している場合は群落上を気流が滑る状態にあると判断される。

このように、群落内部への気流の貫入を考慮して空力重心高さ (*AHGC*) を定義し、生育ステージ、

風速に伴う $AHGC$ の変化を調べることにより、水稻の揺らぎと群落構造の変化との関係、さらには群落上における乱流輸送の状態を明らかにできた。

5. アカマツ群落のフラックスの季節的变化

5.1 アカマツ群落の季節的な変化と特徴

水稻の場合と同様に、アカマツ群落における運動量 flux の季節的变化を群落構造や植表面の状態との関係で検討する。観測は1988年秋期と、1989年春期、夏期に実施したので、アカマツの平均樹高は夏期が高く秋期が低かった。ここでは春期の新葉の展開から秋期に至る過程において、群落上の気流と運動量 flux との関係がどのように異なるかに着目して測定結果を検討する。

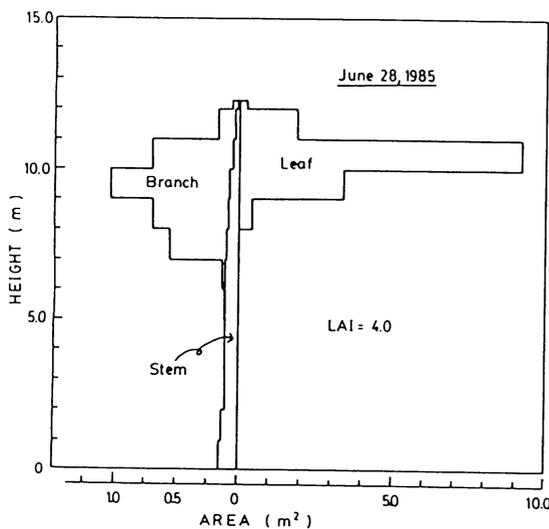
アカマツ群落の場合、水稻のように群落構造を詳細に調べることは容易でない。しかし、この林分については杉田ら (1986)、杉田・古藤田 (1987) により詳細に調べられ、群落構造図や葉面積指数が明らかにされている。それによると、葉面積指数 (LAI) は季節的变化をし、新葉が展開する直前の4月に最

小値となり、その直後に最大値になる。

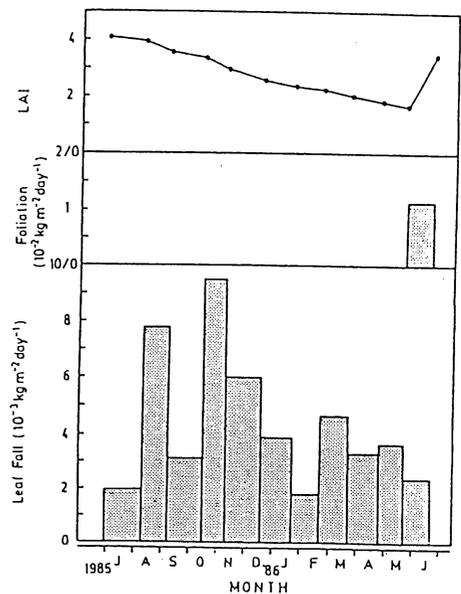
1989年は暖冬のため例年よりアカマツの新梢の展開が早く、5月の測定時にはアカマツの新梢が0.3—0.6mに伸びていた。このことと杉田・古藤田(1987)による結果とから1989年5月の LAI は約2.0、7月下旬の LAI は約4.0、1988年10月の LAI は約3.5と推定した。群落構造は杉田らによる測定時と相似であると仮定し、植表面の形態的变化を写真撮影により把握した。杉田らにより求められた群落構造図と葉面積指数の経時変化を図8に示す。

4月下旬から5月上旬には、柔らかい棒状の新梢が0.3—0.6mの長さに伸び、植表面は約0.3m四方に1本の割合でこれに覆われていた。新梢は風速約1.5 m/s上で揺らぎ、さらに風速が高くなるとなびいた。風速約3 m/s以上ではアカマツの幹自体が揺らいた。群落上層に柔らかく曲がり易い棒状の新梢が分布するのは、この時期のみの特徴である。この時のアカマツ群落の植表面の様子を図9に示す。

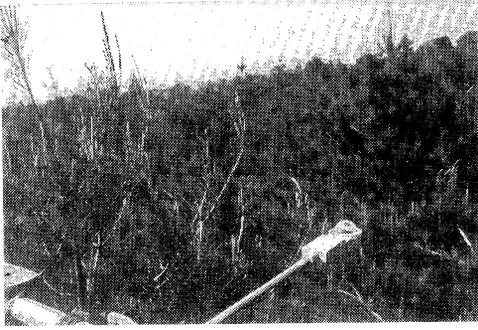
7月下旬には新梢に若葉が展開し、新梢部分も堅くなった。外見上は新梢と古い枝との区分が明瞭で



投影断面積の鉛直分布



第8図 アカマツの群落構造と葉面積指数、落葉量、展開葉量の季節的变化 (杉田ら, 1986; 杉田・古藤田, 1987)



第9図 初夏のアカマツ群落植被面の状態。棒状の新梢が伸びている

なくなったが、低風速時に新梢が揺らぐことは少なく、展開した新葉が風になびく様子が観察された。強風時には新梢を含めた枝全体あるいは樹木全体が揺らいだ。

1988年10月の観測時の群落の状況は1989年7月の状況と同様であったが、全体的に葉が硬く、葉のみがなびく様子は観察されなかった。強風時には樹木全体が揺らいだ。

5.2 アカマツ群落における摩擦速度の季節変化

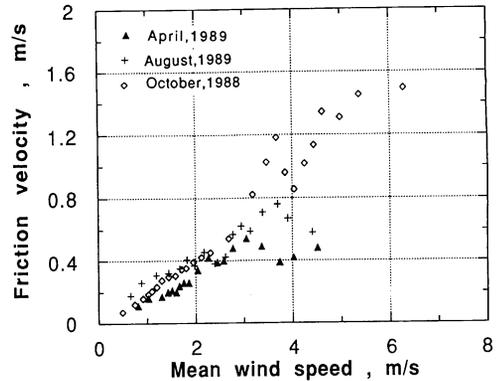
5.2.1 代表風速の補正

測定時期毎に群落高さが変化し、風速の鉛直分布測定時の測定高さも若干異なったため、代表風速を補正した。各測定時の最上測定高さとその時の代表的な地面修正量、粗度長を(1)式に代入し、地面修正量を基準面として群落境界層の同じ高さでの風速を求めた。補正した風速を用いることにより、風速と摩擦速度との関係を同じ境界層厚さで比較でき、水稲の場合と同様に平均群落抵抗係数を検討できる。

5.2.2 春期のアカマツ群落

季節毎に求めた摩擦速度 u_* と平均風速 \bar{u} との関係を運動量 flux の指標として図10に示す。春期のアカマツ群落上の摩擦速度 u_* は、風速約 3 m/s までは風速の増加に対してほぼ一定の割合で増加している。風速約 3—4 m/s の間で減少し、風速約 4 m/s 以上では再び風速と共に u_* が増加しているが、その増加率 (u_*/\bar{u}) は低風速域より小さい。

アカマツの場合も水稲と同様に粗度長と地面修正



第10図 アカマツ群落における摩擦速度と平均風速との関係の季節的变化

量を求めたが、棒状の新梢のみが揺らいだとみられる風速約 2—3 m/s の場合には、粗度長の増大と地面修正量の低下が生じ、それ以上の風速で幹が揺らぎはじめると逆の傾向となった。そして、風速約 4 m/s 以上ではアカマツの新梢がなびいた状態となり、地面修正量、粗度長共に変化しなかった。

アカマツ群落面が揺らいだり、なびいた状態に対応して、粗度長や地面修正量が変化したことから、アカマツ群落における摩擦速度 (運動量 flux) も水稲の場合と同様に植被面の変化に対応することが分かった。したがって、風速 3—4 m/s で u_* が減少したのは新梢がなびく過渡の状態を、また、風速 4 m/s 以上でそれほど変化しなかったのは、なびいた新梢の上を気流が滑る状態を、反映した結果と推測される。

5.2.3 夏期のアカマツ群落

7月になると、摩擦速度 u_* と \bar{u} とに比例関係が認められる上限風速が約 4 m/s まで増加し、新梢が固くなり葉が展開したことが境界層内の気流に影響していると考えられる。しかし、それ以上の高風速域では、風速の増加に伴って u_* の低下が認められたことから、この時期でも、群落頂部の葉は柔らかく、高風速では粗度としての機能より気流を滑らせる作用として機能したものと推測される。

0.6~1.3 m/s の低風速域で夏期の u_* が他の時期よりやや大きい値となり、 \bar{u} との直線関係も顕著ではな

い。この理由としては展開したばかりの新葉が低風速時に揺らいだことの影響が考えられるが、測定時の風向が春期や秋期と異なったことも差異の一因と考えられる。

5.2.4 秋期のアカマツ群落

秋期のアカマツ群落上の摩擦速度については、原菌ら (1989) が詳述しているが、本解析では基準風速の補正を行なっているので、春期や夏期と比較して風速との関係を示す。平均風速約 3 m/s 以下では u_* と \bar{u} とに比例関係が認められるが、それ以上の風速では春期や夏期と異なり u_* が増大した。これはアカマツが風速 3.5—5 m/s で大きく揺らいだことによる。群落上層の葉や枝が硬くなると、高風速域で植被面がなびくことがなく、幹全体が揺らぐことが多かった。幹全体が揺らぐ場合は、水稻の穂波の発生と同様の機能で、粗度の増大とそれに伴う運動量 flux の増加をもたらしたと理解される。

このように、群落構造が見かけ上大きく変化していないアカマツ群落においても、新葉の展開や葉群の充実に伴う植被面の季節変化により群落境界層内の気流状態が変化し、空気力学的パラメータも異なってくるのが分かった。これらは、年間を通じた群落内外の物質輸送に影響すると考えられる。群落高さに対してわずか数%の植被面の変化が気流に大きく影響をしていることは興味深いことである。

5.3 アカマツ群落の抵抗係数の経時変化

水稻の場合と同様に u_* と \bar{u} とに比例関係が認められる風速範囲で、(10)式から u_*/\bar{u} の平均勾配 α を求め、(11)式から群落抵抗係数 Cd を求めた。これを表 4 に示す。

抵抗係数 Cd が最も大きいのは秋期であり、春期の Cd に比べて約 25% 大きい。表 4 に示した夏期の Cd は、低風速域の高い摩擦速度を含めた場合である。この場合、 α は春期より小さい値であるが風速 1.5—3 m/s の範囲のみで比較するとほぼ同じ値となる。春期の Cd が小さい値であることは、植被面上に分布する柔らかい新梢が田植直後の水稻と同様な機能を果たしていると理解される。一方、夏期には葉面積指数が増加したことにより、気流が群落下層にまで侵入できなくなり、植被面に分布する比較的柔らかい

第 4 表 アカマツ群落上の摩擦速度、群落抵抗係数と平均風速との関係

観測時期	$u_* = \alpha \bar{u} + \beta$	相関係数 r	抵抗係数 Cd
1989			
4/29— 5/6	$u_* = 0.1941\bar{u} + 0.0724$	0.988	0.0377
1989			
7/20— 7/31	$u_* = 0.1811\bar{u} + 0.0668$	0.991	0.0328
1988			
10/27— 11/11	$u_* = 0.2163\bar{u} + 0.0315$	0.999	0.0468

新葉が低風速時にも粗度として寄与したと理解される。秋期は個々の葉も硬度を増し、葉面積指数も夏期より低下したことから (図 8 参照)、植被面の粗度が最大となったと推測される。このように、春期から秋期までの Cd の変化は水稻の場合ほど顕著でないが、群落頂部の状態の変化に伴って群落抵抗係数も変化することが明らかとなった。

水稻群落とアカマツの空気力学的パラメータの風速に対する変化の様子を比較すると、変化がみられる風速範囲こそ異なるが、それぞれのパラメータの変化の仕方は似ていた。これは古藤田・林 (1980) が z_0/H について指摘しているのと同様に、群落境界層内の乱流が植物に作用する仕方が類似性を持つと考えることができよう。すなわち高風速時には、柔らかい植被面上では気流が滑る状態となり、硬く凹凸が著しい植被面では気流が植物に直接当たり、植物を揺らせると同時に群落下層にまで気流が侵入するといえる。

6. まとめ

水稻群落とアカマツ群落において、風速の鉛直分布や植物の揺らぎ、群落構造の変化などの測定を行ない、群落上の運動量 flux について解析した。

水稻の生育に伴う群落構造の変化と運動量 flux との比較から、群落頂部の柔らかさや葉面積指数の差異によって群落拡散係数が変化することが明らかと

なった。そして、柔らかい葉や稈が植被面に分布する時には、高風速の気流は植被面上を滑る状態となり、運動量 flux や群落抵抗係数が低下した。

アカマツ群落の場合にも、アカマツの新梢の伸びや新葉の展開とその後の硬化に伴って、群落抵抗係数は増加傾向を示し、群落上の運動量 flux も変化した。

水稻、アカマツ共に、植物の揺らぎが群落上の乱流に影響を与えることが空気力学的パラメータの変化から確かめられた。

これらの結果から、柔らかい植被面では気流が群落上を滑る状態となる一方、凹凸が著しく硬い植被面では気流が植物に直接当り、植物を揺らせると同時に群落下層にまで気流が侵入すると判断された。

植物群落の地面修正量を基準面とする空気力学的重心高さ (AHGC) の概念を導入することにより、気流と群落との相互作用の変化を定量的に判定できることがわかった。

アカマツ群落での観測を実施するに当たり、便宜を図って頂いた筑波大学水理実験センターの川村隆一博士他、関係者に感謝する。また、観測に協力を頂いた筑波大学大学院生那須野正明、廣田雅之、同学群生斎藤嘉一、松瀬雪恵、沖縄県農試の伊志嶺正人氏の各氏に感謝する。水稻群落での観測ならびに生育調査には農業環境技術研究所業務科の方々の協力を得た。これらの方々に厚くお礼申し上げる。

引用文献

- 井上栄一 (1960) : 地表風の構造, 農技研報, **A2**, 1—93.
- 古藤田一雄・林 陽生 (1980) : 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, 農業気象, **35**, 221—228.
- 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.
- 杉田倫明・古藤田一雄 (1987) : アカマツの林の葉面積指数の季節変化, 筑波大学水理実験センター報告, **11**, 111—112.
- 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. 赤松群落内外の乱流輸送について; 水理実験センター報告, **13**, 113—122.
- 林 陽生 (1987) : 群落—気流の相互作用, 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.
- 原菌芳信・林 陽生 (1989) : 植物群落の空気力学的パラメータの特徴, 農業気象学会1989年度大会講演会要旨, 96—97.
- 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, 水理実験センター報告, **13**, 105—112.
- 原菌芳信・村上智美・林 陽生 (1990) : 密度の異なるアカマツ林の緑陰の熱環境特性, 造園雑誌, **53**, 222—238.
- 村上智美・原菌芳信・川村隆一・西沢利栄 (1990) : 気流変化と植物群落の相互作用, 2 植物の揺らぎと群落上の乱流輸送特性, 水理実験センター報告, **14**, 15—29.
- Bolin, B. (1983) : The effects of man on the biogeochemical cycle of carbon in terrestrial ecosystems, The Global Carbon Cycle, *SCOPE Report NO21*, Wiley, 41—45.
- Inoue, E. (1963) : On the turbulent structure of airflow within crop canopies. *J. Met. Soc. Jpn.*, **41**, 317—346.
- Monteith J. L. (1963) : Gas exchange in plant communities, in *Environmental Control of plant growth*, ed by Evance 'Academic Press' New York, 95—112.
- 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, mass and heat exchange of plant communities, in *Vegetation and the atmosphere*, ed by J. L. Monteith, London, 57—109.