

## 群落-気流の相互作用(1):

誌名	農業気象
ISSN	00218588
著者	林, 陽生
巻/号	43巻2号
掲載ページ	p. 127-134
発行年月	1987年9月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター  
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council  
Secretariat



## 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

林 陽 生

(農業環境技術研究所)

Canopy-Airflow Interaction

(1) Organized Waving of Flexible Model Stand and Its Dependence on Wind Speed

Yousay HAYASHI

(National Institute of Agro-Environmental Sciences)  
3-1-1 Kannondai Yatabe Ibaraki 305, Japan

#### 1. 緒 言

風が強い日に、麦畑や水田の穂面が波打ったように見える現象、すなわち穂波が発生する。穂波を詳細に観察すると、ある広さをもった班状の領域内に一定の波長の波が発生し、この班状領域全体が群落上を吹走する様子が見られる。風の中に含まれるさまざまなスケールの乱れのうち、特定のものが群落の空気力学的特性によって選択的に穂面の揺れの中に取り込まれ、穂波が発生すると考えられている。

穂波を計測する試みとして、井上ほか(1955)、Finnigan and Mulhearn (1978 a)は穂波発生中の群落の景観を8mm映画等に記録した。その結果、前述した班状領域の発生は「風の息」のスケールの乱流と関係があることなどが指摘された。穂波発生中の群落の一部に注目すると、個々の植被が周期的に揺れている様子が見られる。局所的には、一本の茎の揺れと物理量等の鉛直輸送量は極めて関係が深い。そこで、揺れを定量的に評価しようとする観点から、Finnigan (1979 a, b)、佐藤ほか(1980)、米谷(1981)等は、歪みゲージを用いて一本の茎の揺れの変位やその周期を計測した。この他の方法を利用した研究として、Maitani (1979)やHayashi (1983)は、植被の一部にマークを付けて揺れを可視化し、これをビデオテープ等に記録して画像解析をおこなった。これ等の結果、植被の種類や成育段階により固有の振動数が存在すること、また振動数と風速微変動の間

に密接な関係があること等が示された。

穂波に関するこれまでの研究は、主に野外観測結果を基にして論じられたものが多い。しかしこの一方で、揺れ動く群落を考慮したFinnigan and Mulhearn (1978 b)の数学的モデルやPlate (1965)、Finnigan and Mulhearn (1978 a)の風洞実験による研究がおこなわれた。室内実験の場合には野外観測の場合と比較して、実験条件を制御したデータを基にして解析できる利点がある一方、複雑な現象を再現することが困難である点に欠点がある。換言すれば、複雑な自然現象の中から支配的な要素を抽出して本質的な関係を見出す役目が室内実験にはある。

風洞内に、自然に存在する風の乱れをまるごと再現することは困難である。そこでまず第一に適当な乱流を発生させ、組織的な揺れすなわち流れ方向に特定の位相をもって移動する波動が群落上面に発生する状況を風洞内に作り出すことを試みた。上述の点から、本論では以後解析対象とする現象を「組織的な揺れ」と呼び一応穂波とは区別することにする。

穂波の移動速度、波長、周波数などは、風の運動エネルギーと群落の物理的特性の両者によって特徴づけられるものと考えられる。この考えに基づき、風洞内に発生した群落の組織的揺れの流速依存性に着目した実験をおこなった。揺れの流速依存性に関する問題としては、群落面の空気力学的抵抗係数の減少、拡散係数の減少やこれ等に付随して起る蒸発散の抑制、群落光合成速度の抑制、作物や樹木の倒伏、種子や花粉の飛ばし、さらに魚の泳ぎ方、漕艇の底の形状、低速で飛ぶ飛行機の翼の

昭和61年5月31日 全国大会にて発表

昭和62年4月9日 受理

形状など興味ある問題が多いが、研究例は少ない。

## 2. 実験方法

### 2.1 風洞と模型群落

実験に使用した風洞は、農業環境技術研究所の縦型ゲッチンゲン風洞(測定部断面1×1m、長さ2m)である。この風洞の縮流比は4、流速制御範囲は0.3~15 m・s<sup>-1</sup>である。今回はほぼ0.4~4.6 m・s<sup>-1</sup>の範囲で実験をおこなった。一般に風洞内気流の乱流構造を野外の接地境界層のそれに近づけるため、風上床面上に乱流発生用の棒を並べたり格子を立てるなどの方法が用いられる。本実験では、測定部の上流端に高さ0.38m、密閉率(全投影面積に対するしゃへい面積の百分率)40%の格子を設置した。この結果、後述する模型群落を設置しない状態での格子の下流1.5m、高さ0.21mにおける流速2.5 m・s<sup>-1</sup>時の乱流強度は6%となった。この値は、格子を設置しない場合の約3.3倍である。ここで用いた乱流強度とは、熱線流速計による測定値を使い評価時間を1秒とした場合の値である。

風に対してフレキシブルな特性をもつ植物群落を想定して模型群落を製作した。材料には、長さ150mm、直径0.25mmのプラスチックファイバーを使用した。厚さ5mmの亚克力製の基板に穴をあけ、0.5本・cm<sup>-2</sup>の割合でプラスチックファイバーを埋め込んだ。Fig.1に模型群落の概観を示す。模型全体の大きさは、幅0.9m、長さ1.35mである。

プラスチックファイバーの一端を基板に鉛直に埋めて固定した場合に、先端が多少たわんだ。そこで、ファイバー一本一本が同方向になびいた状態になるような模型を作り、なびいた方向と気流の方向が一致するようにして風洞測定部床面上に模型群落を設置した。この結果、無風時の平均群落高は90mmとなった。ファイバーの固有振動数は3.6Hz、対数減衰率は0.54となった。

### 2.2 測定方法とデータの採取

プラスチックファイバーの揺れを歪み計で計測した。使用した歪みゲージはグリッド幅0.7mm、長さ4mm、無負荷時の抵抗値が120Ωのものである。また、流速微小変動を直径5μm タングステン線をX型に張った二次元熱線流速計で測定した。

歪み量および流速測定の概観をFig.2に示す。乱流発

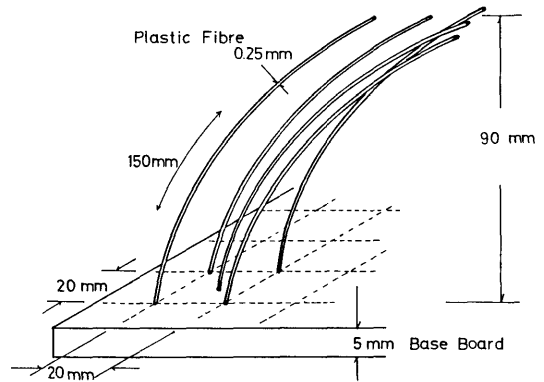


Fig. 1 View and size of a canopy model.

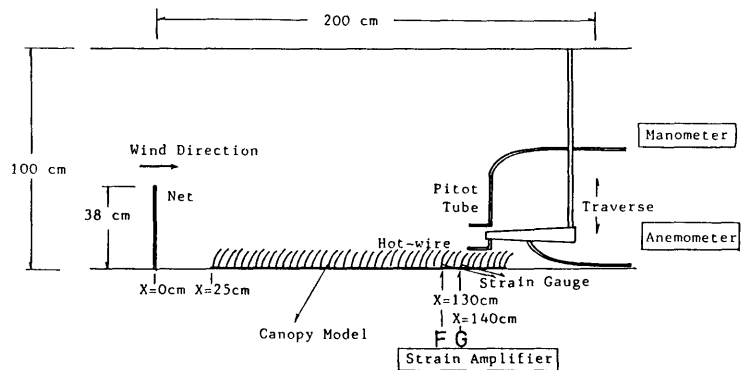


Fig. 2 Schematic view of working section of a model canopy within NIAES wind tunnel.

生格子の位置をX=0mとし、これより下流のX=1.3m(F点)とX=1.4m(G点)の位置にあるファイバーの下部(基板上1cm)に歪みゲージを張りつけた。流速鉛直分布の測定はG点上でおこなった。

予備の実験によると、模型群落上に形成された境界層の厚みは、G点上でz=0.21m以下であった。ここでzは基板上の高さである。一般に、平板境界層の厚みとレイノルズ数との間には、逆比例の関係があり、境界層厚みは流速増大にともない減少する。しかし、本研究では境界層外部の運動エネルギーに関する量を基準にして実験結果を整理するという立場から、G点上z=0.21mにピトー管を固定し、マンメーターで平均流速を測定した。この値を風洞内気流の基準流速U<sub>p</sub>とし、これを系統的に変化させ実験をおこなった。

目視観察によって、風洞内に発生した組織的揺れの周波数はほぼ3Hzであることが推定された。そこで歪み計および熱線流速計による測定値に対し25Hz以上の高周波成分の除去操作を施して以後の解析をおこなった。

相関確率計, フーリエ変換器を用いて自己相関関数, 相互相関関数, パワースペクトル密度分布を求めた。データ採取間隔は, 相互相関関数を求める場合には 2 ms, これ以外の場合には 10 ms とした。データ採取個数は 4096 個とした。

### 3. 群落高の変化と測定高度の決定

風に対してフレキシブルな特性をもつ植物群落では, 風圧によって吹き曲げられる効果のため, 群落の高さが変化する。拡散係数や乱れの代表的長さなどは基準面からの高さに比例して変化し, この基準面は群落の平均高度と関係している。特に背の高い群落上における拡散係数等を議論する場合には, 測定高度と群落の平均高度の差の変化が見掛け上の値となって現われる誤差は無視できない。そこで, 次のように群落直上の測定高度を決めた。

今回の風洞実験では, 流速が増大するにつれ個々のファイバーの揺れの振幅が増すとともに平均群落高が低下することが観察された。実際には個々のファイバーは三

次的に揺れ動くが, 第一近似的に見て流れ方向に沿った鉛直面内で変位すると考えてよい。すなわち, 歪み量はファイバーが下流側に吹き曲げられた場合の先端の鉛直変位に対応した値となる。これより, G点における瞬間的歪み量から群落高の微変動を求め, その時間平均値を平均群落高  $H$  として基準流速との関係を調べた。

基準流速  $U_p$  を  $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  から  $6.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  まで変化した場合の群落高の変動を Fig. 3 に示す。これによると,  $U_p = 1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  では, 変動幅は 5 mm 以内で小さい。流速増大とともに変動の振幅が大きくなり, 同時に周期性が明瞭になるように見える。振幅は,  $2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  から  $6.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  にかけて大きくなり, 10~15 mm となる。また,  $H$  について見ると, 基準流速が増大したためほぼ 10 mm 低下した。

以上より, 群落上の流速を測定する場合の下限高度を次のように決めた。すなわち,  $U_p < 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の範囲では  $z = 85 \text{ mm}$ ,  $2.5 < U_p < 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  では  $z = 80 \text{ mm}$ ,  $U_p > 4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  では  $z = 75 \text{ mm}$  とした。以後これ等の高度で測定した値を, 群落直上における値として用いる。

## 4. 結果と考察

### 4.1 組織的揺れの移動速度とその流速依存性

気流方向に並んだ二点 (F, G点) で変位量を測定し, 両者の変動の相関係数を調べるにより位相の有無を評価することができる。この方法は特定な一点の振動の周期性を解析する方法に比較し, 組織的揺れの移動速度と波長を独立に求めることができる点で有利である。

F, G点の間隔を  $L$ , 組織的揺れの波長を  $\lambda_0$  とする。F点ではG点に先行して揺れが発生し, 二点間の空間相関関数  $R_{FG}(t)$  の典型的な型が Fig. 4 の様な場合を考える。ここで  $\lambda_0 \gg L$  であり  $t_1, t_2, t_3$  は特徴的な時間である。図はG点の歪み量変動に対しF点のそれを  $t_1$  秒遅らせた場合に, 二点間で正の相関が最も大きくなることを示している。同様に,  $t_3$  秒遅らせた場合には負の相

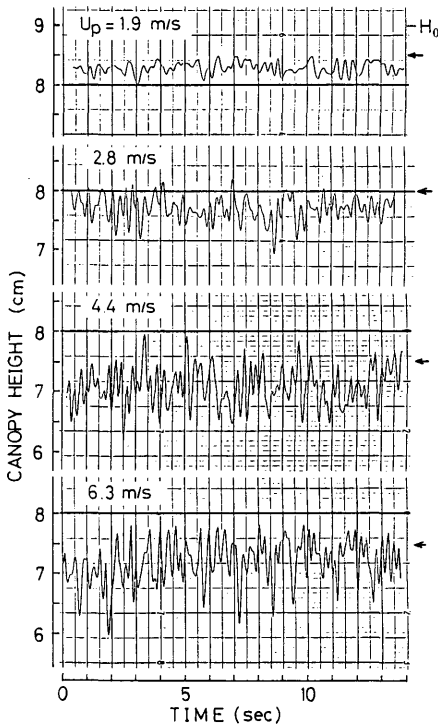


Fig. 3 Fluctuation of the instantaneous canopy height and its dependence on the mean wind speed.  $H_0$  means mean height of model stand under calm condition. Arrows represent measuring height just above the stand.

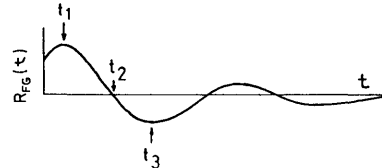


Fig. 4 Typical shape of a correlation function of waving motion between two fibres. The function represents that an inherent displacement is carried with  $t_1$  from F to G and the passing time is equal to  $4(t_2 - t_1)$  or  $2(t_3 - t_1)$ .

関が最大になることを示している。このことから、時間差  $(t_3 - t_1)$  は組織的な波動の半波長、また  $(t_2 - t_1)$  は  $1/4$  波長の通過に対応する時間と考えることができる。実際に二点間の相関係数を求めると、ずらし時間が大きくなるに従って零に収束した。なお、本実験では  $L = 0.1$  m とした。

顕著な揺れが発生した、 $2.06 < U_p < 4.57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の範囲で相関関数  $R_{FG}(t)$  を求めた。主に  $L$  による制限のため、ほぼ  $U_p = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下の流速では明瞭な位相が認められず解析不可能であった。基準流速を一定とし、2 ms 間隔で約 33 秒間のデータを連続して 5 回 ( $U_p = 2.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の場合のみ欠測のため 2 回) 採取した。同一流速条件のものを重ねて図示した結果を Fig. 5 に示す。流速条件が同じ場合には  $R_{FG}(t)$  の型はほぼ一致した。また  $U_p$  増大にともない  $t_1$ ,  $(t_2 - t_1)$ ,  $(t_3 - t_1)$  の値が系統的に小さくなる傾向が現われた。これより、群落の揺れに明瞭な位相が存在し、その移動速度は基準流速とともに速まることが明らかである。

F, G 間の間隔  $L$  と特徴的な時間  $t_1, t_2$  の関係から次式を使って組織的な揺れの移動速度  $\theta_0$ , 波長  $\lambda_0$ , 周波数  $n_0$  を求めることができる。

$$\theta_0 = L/t_1 \quad (1)$$

$$\lambda_0 = 4 \cdot (t_1 - t_2) \cdot \theta_0 \quad (2)$$

$$n_0 = \theta_0 / \lambda_0 \quad (3)$$

式(1), (2), (3)から  $\theta_0, \lambda_0, n_0$  の値を求め、これ等と流速との関係を Fig. 6 に示す (図中の  $\Delta$  について

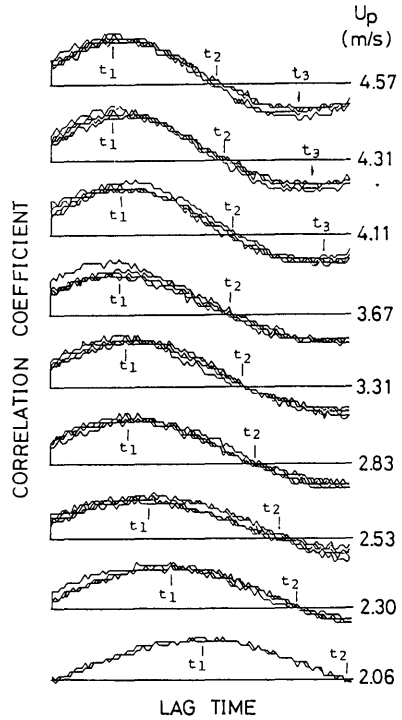


Fig. 5 Dependence of the correlation function on the mean wind speed. Correlation coefficient is in an arbitrary scale.

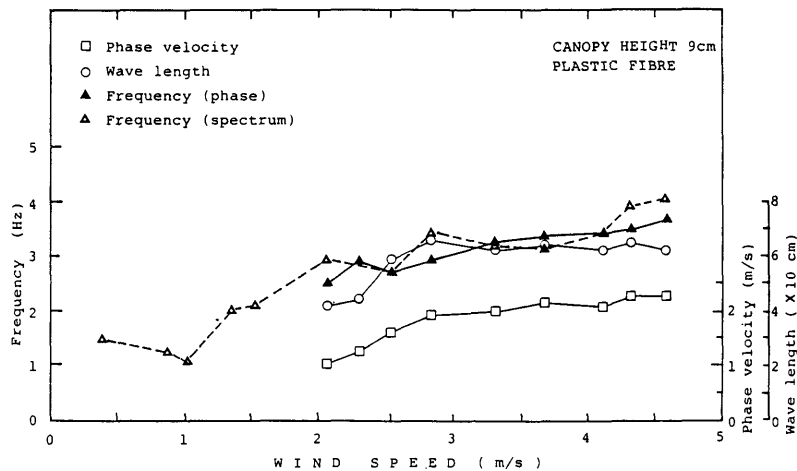


Fig. 6 Variations of the parameters for organized waving structure with the mean wind speed.

- : phase velocity of organized waving
- : wave length of waving structure
- ▲ : frequency of waving defined by its phase
- △ : frequency of single stalk vibration

は後述)。いずれの値も  $U_p$  増大に従い大きな値になることがわかる。しかし、この傾向は  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下で明瞭であるが、それ以上の流速範囲では  $U_p$  に対する依存度は小さい。揺れの周波数は、比較的流速が大きい範囲で  $n_0 = 3.4 \sim 3.7 \text{ Hz}$  に漸近する。また波長に関しては、ほぼ一定の値  $\lambda_0 = 0.65 \text{ m}$  に近づく特徴が見られる。組織的な揺れの移動速度は  $\theta_0 = 2.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  に漸近する。

井上 (1955) は、同時に存在する種々の大きさの乱れの中でその時間スケールが作物の固有振動数より長いものが作物を振動させ穂波を起させると述べている。今回の模型は、プラスチックファイバーの固有振動数が  $3.6 \text{ Hz}$  である。これより組織的揺れの振動数の上限は植被の固有振動数によって決まると考えられる。実験結果は先に示した井上の指摘を裏付けるものと考えられる。

#### 4.2 一本のファイバーの揺れの周波数

Fig. 3 に示した一本のファイバーが振動する様子と組織的揺れの周波数が一致するかどうかを検討する目的で以下の考察をおこなった。すなわち、G点における歪み量微小変動のパワースペクトル密度分布を求め、スペクトルのピークに対応する周波数  $n_m$  を読み取り  $n_0$  と比較した。

基準流速を 14 段階に設定し実験をおこなった結果のうち、代表的な例を Fig. 7 に示す。いずれの場合にも明瞭なピークが現われ、 $n_m$  の値は  $U_p$  とともに大きくなる。基準流速が  $1.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  からほぼ 2 倍の  $2.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

に変わると、 $n_m$  は  $1.10 \text{ Hz}$  から  $2.95 \text{ Hz}$  へ 2.7 倍に変化する。この過程でも、目視にて組織的揺れが観察された。ここで  $U_p = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  付近まで組織的揺れの発生を定量的に評価するためには、 $L$  をさらに短く設定して  $n_0$  を求める必要がある。

一方これより流速が大きい範囲では、 $n_m$  は  $2.95 \text{ Hz}$  から  $3.90 \text{ Hz}$  へ移動する。この特徴は前節にて言及した  $n_0$  の特徴、すなわち流速が増大すると一定の値へ漸近する傾向と類似である。

$n_m$  と  $n_0$  の流速依存性を Fig. 6 中の  $\Delta$  で示した。 $n_m$  は  $U_p = 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下でも求まるが、特に弱流速の場合には組織的な揺れの発生が不明確であるため、 $n_0$  と比較することは合理的でない。ここでは、 $n_0$  の解析範囲 ( $U_p > 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) にて両周波数は良い対応関係で変化することが認められる。

概して  $n_m$  と  $n_0$  が一致したことから、一般に風向変化が大きく、空間相関によって周波数を評価することが困難な野外観測の場合には、一本の茎の揺れから平均風向に沿った成分の組織的揺れの周波数を求めることが可能であると考えられる。

#### 4.3 乱れの代表的長さの鉛直分布

流速を  $u$ 、その変動の標準偏差を  $\sigma_u$  とすると、流れ方向の乱れの代表的長さ  $l_u$  は一般に次式で表わすことができる。

$$l_u = \sigma_u \int_0^{t_0} R_u(t) dt \quad (4)$$

ここで、 $R_u(t)$  は流速の変動の自己相関関数、 $t_0$  はこの自己相関関数が零になる時間である。式 (4) 右辺の積分項は、乱れの卓越周期に対応する時間である。これはまた、次元解析的に考えると、流速変動のスペクトル解析から求まるピーク周波数の逆数と考えることもできる。すなわち、ピーク周波数を  $n_u$  とすると次のように書き換えられる。

$$l_u = \sigma_u / n_u \quad (5)$$

組織的に揺れている群落における、揺れと直上気層の乱流構造の間には密接な関係があることが予想される。そこで、 $U_p = 2.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  の条件を与えた場合に流速微小変動の鉛直分布を測定し、式 (5) を使って乱れの代表的長さを求めた。平均流速の鉛直分布は群落の直上でわずかに極大が現われる分布型となった。

流速微小変動の標準偏差、卓越周波数の逆数および乱れのスケールの鉛直分布を Fig. 8 に示す。縦軸は平均群落高で規格化した無次元高  $z$  である。この時の平均群落高は、 $H = 75 \text{ mm}$  であった。評価時間を 10 秒とした場合の標準偏差 (図中  $\bullet$ ) は下層ほど大きい。群落直上では  $\sigma_u = 0.27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  となり、 $z = 2$  の高度では  $z = 1$  の 54%

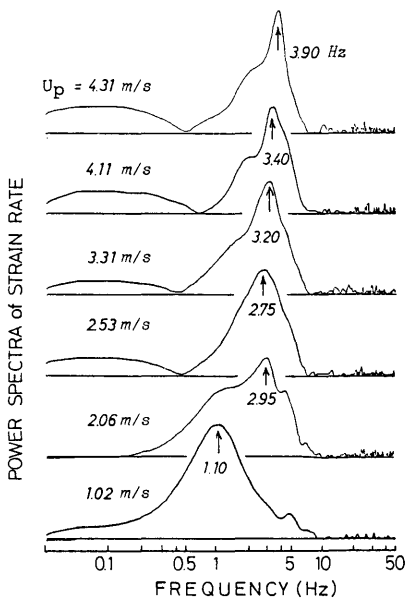


Fig. 7 Dominant frequency of the vibration of a fibre and its dependence on the mean wind speed.

Vertical axes are in arbitrary scales.

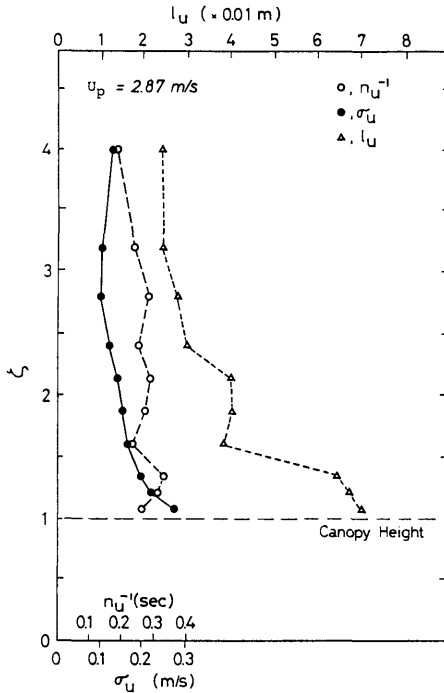


Fig. 8 Profiles of the parameters above a canopy.  
 $n_u$ : dominant frequency of streamwise velocity fluctuation  
 $\sigma_u$ : standard deviation of streamwise velocity fluctuation  
 $l_u$ : dominant length of eddy passing above a canopy  
 $\zeta$ : height normalized by canopy height

に減少する。この値は、Finnigan and Mulhearn (1978 a)が直径0.25mm、高さ5cmのナイロン糸製の模型を使用した場合の値、50%とほぼ等しい。

卓越周波数の逆数(図中○)は多少凸凹があるが、概して下層ほど大きな値となる。この結果、両者の積で表わされる乱れの代表的長さ(図中△)は下層ほど大きく、特に群落直上の $\zeta=1.4$ 以下の層では $l_u=0.07\sim 0.06\text{m}$ となった。模型群落上での $l_u$ の鉛直分布についてはこれまでにあまり研究例はないが、Seginerほか(1976)が直径2.38mm、高さ19cmのアルミ製棒の模型を使った実験結果を吟味すると、 $\zeta=2$ の高度の $l_u$ の値は $\zeta=1$ のその約70%となっている。今回の実験結果ではこの値は約50%である。また、群落直上と $\zeta=1.6\sim 2.1$ の層の中間で乱れのスケールがSeginerほかの結果よりも急激に変化するように見えるが、これ等が組織的な揺れの影響によるものか否かについてはさらに詳細な解析をおこなう必要がある。

### 5. まとめ

フレキシブルな特性をもつ模型群落を使用し、風洞実験をおこなった。この結果、模型群落の上面に組織的な揺れが発生した。同一群落でも、風速に対する空気力学的な応答特性が異なると予想されることから、主として揺れの流速依存性に注目して実験結果を整理した。

模型群落の素材にプラスチックファイバーを用い、揺れを歪みゲージで測定した。二点間の歪み量微小変動の位相に対応する時間から、組織的揺れの移動速度、波長、周波数を求めた。いずれも流速増大とともに大きな値となったが、ある程度以上の流速範囲では固有の値に近づく傾向が現われた。特に波長についてはこの傾向が明瞭で、ほぼ0.65mに漸近した。この時の揺れの周波数は3.4~3.7Hzとなった。この値は、ファイバーの固有振動数にはほぼ一致した。

平均群落高の変化を考慮して流速変動の鉛直分布を測定し、気流方向の乱れの代表的長さを求めた。上層と比較して、その値が約2倍となる層が群落面にごく近い層、平均群落高の1.4倍以下の気層、に現われた。この気層は直下に発生した組織的揺れの影響を強く受けて発現したものと考えられる。

ところで、接地境界層においてこれまで数多くおこなわれた観測結果を整理すると、風速鉛直微小変動の卓越周波数 $n_w$ と測定高度 $z$ の積を風速 $u$ で除した無次元周波数、 $f=n_w \cdot z/u$ 、がほぼ一定値、0.2~0.5、になることがわかっている(Pasquill, 1974)。また、Hayashi (1986)は牧草群落上での観測結果から、地面修正量を考慮した長さのスケール( $z-d$ )を $z$ の代わりに用いて、 $f=0.21$ となることを示した。このような接地境界層の特性は測定高度0.2~600mの範囲の観測値から示された結果である。さらに、斎藤ほか(1970)はトウモロコシ群落内およびその直上での観測結果から、 $z$ の代わりに式(4)と同じ定義にもとづく鉛直方向の乱れの代表的長さ $l_w$ を用い、無次元周波数が0.08となることを示した。この結果は、群落内でも $f$ がほぼ0.2となることを示している。

これ等より、同一測定高度で安定度の変化を無視できる場合に、乱れの周波数と風速が正比例の関係となることが導かれる。しかしフレキシブルな植物群落の直上で、かつ比較的広い風速範囲の現象を取り扱う場合には、流速に対する群落の応答特性が支配的なパラメーターの一つとなる。その結果、Fig.6の結果の通り、群落の物理性により特徴付けられた固有な周期の乱れを含む気流が境界層の下部に発生することが推測される。よって、上述の正比例の関係は成立しなくなる。ちなみに、組織的揺れ

の周波数, 群落の平均高, 基準流速を用いて無次元周波数を求めると,  $0.06 < f < 0.13$  の範囲で変化することが今回の実験結果からえられた。

組織的揺れと群落直上の流速のパワースペクトルや運動量輸送量コスペクトルの関係については, 引き続き考察する予定である。

すでに述べたように, 風洞内の気流は乱流の3次元的構造からみて, 自然風に比べて極端に抑制されている。ここで言及した組織的な揺れと穂波を直接比較するためには, 今後この点につき検討されなければならない。

## 謝 辞

本研究を進める過程で, 貴重な助言を頂いた野菜・茶業試験場磯部誠之室長に感謝の意を表します。なお, 本研究は昭和61年度重点基礎研究経費(土壌-植物-大気系におけるガス流束の測定法確立に関する基礎的研究)の一部を使用しておこなった。

## 引用文献

- Finnigan, J. J., 1979a: Turbulence in waving wheat. I. Mean statistics and Honami. *Bound. Layer Met.*, **16**, 181-211.  
 Finnigan, J. J., 1979b: Turbulence in waving wheat. II. Structure of momentum transfer. *Bound. Layer Met.*, **16**, 213-236.  
 Finnigan, J. J. and Mulhearn, P. J., 1978a: Modeling waving crops in a wind tunnel. *Bound. Layer Met.*, **14**, 253-277.  
 Finnigan, J. J. and Mulhearn, P. J., 1978b: A

simple mathematical model of airflow in waving plant canopies. *Bound. Layer Met.*, **14**, 415-431.

- Hayashi, Y., 1983: Aerodynamical properties of an air layer affected by vegetation. *Environ. Res. Center Pap.*, Univ. of Tsukuba, **3**, pp. 54.  
 Hayashi, Y., 1986: Observational aspects on a dominant spectral frequency in an airflow over a weepint-lovegrass stand. *Bound. Layer Met.*, **36**, 239-243.  
 井上栄一, 1955: 穂波の研究 1. 穂波の機構と特性. *農業気象*, **11**, 18-22.  
 井上栄一・谷 信輝・今井和彦, 1955: 耕地風の乱れの測定. *農技研報告A*, 4号, 1-36.  
 Maitani, T., 1979: An observational study of wind-induced waving of plants. *Bound. Layer Met.*, **16**, 49-65.  
 米谷俊彦, 1981: 小型の台風7912号通過時の倉敷における水稻の揺れの観測. *農業気象*, **36**, 251-255.  
 Pasquill, F., 1974: *Atmospheric diffusion*. John Wiley & Sons, New York, pp. 429.  
 Plate, E. J., 1965: Modeling of velocity distributions inside and above tall crops. *J. Appl. Met.*, **4**, 400-408.  
 斎藤孝幸・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**, 205-214.  
 佐藤 勉・米谷俊彦・大滝英治, 1980: 歪計による植物体の揺れの測定. *農業気象*, **36**, 103-107.  
 Seginer, I., Mulhearn, P. J., Bradley, E. F., and Finnigan, J. J., 1976: Turbulent flow in a model plant canopy. *Bound. Layer Met.*, **10**, 423-453.

## Summary

Phenomena of Honami show the regular, organized waves which appear on the surfaces of cereal crops on windy days. Honami has been recognized as a visualized indicator for canopy-airflow interaction. In the present study, the organized waving motion was defined as having a phase velocity along the airstream. To investigate the dependences of the organized waving over flexible stand on the mean wind speed, wind tunnel experiments were carried out using model stand. Fluctuating displacements generated by organized waving were measured by strain gauges. The velocity fields were also measured by hot-wire anemometers and Pitot static tube with manometer.

Material of the model stalks was plastic fibre. Each stalk was 15 cm long and 0.25 mm in diameter, and had a natural frequency of about 3.6 Hz. Mean height of the model stand reduced to 9 cm with gravitational bending. A section of model stand 1.35 m long by 0.9 m wide was constructed to model the prototype characterized by a flexible vegetation. The model was placed in the working section of the NIAES wind tunnel of 2 m long, 1 m high and 1 m wide. To make a turbulent flow in the working section, a vertical grid was attached upstream of the model.

Among the parameters derived from the organized waving motions, some non-linear relations were clearly shown by the experimental results as follows. Coherently waving phenomenon appeared over the model surface. The phase velocity,  $\theta_0$ , was evaluated from spatial correlation between



two fibres arranging in the wind direction. The value of  $\theta_0$  was increased with the increment of the mean wind speed,  $U_p$ , in general and approached  $\theta_0 = 2.2$  m/s. In precise the ratio,  $\theta_0/U_p$ , was clearly small in the range of high wind comparing with that of low wind. Then the length of organized waving,  $\lambda_0$ , was reached gradually to the value of  $\lambda_0 = 0.65$  m. Additionally under the high wind condition, the frequency of passing wave,  $n_0$ , approached an inherent value of  $n_0 = 3.4 - 3.7$  Hz. This value was very close to a natural frequency of a fibre of 3.6 Hz.

Vertical profile of the standard deviation,  $\sigma_u$ , and dominant cycle,  $n_u^{-1}$ , in the streamwise velocity fluctuations were obtained above the model stand. Here  $n_u$  means spectral peak of the streamwise velocity fluctuation. The profile of  $\sigma_u$  represented a characteristic tendency that the value decreases almost exponentially with the height above the canopy surface. The value of  $n_u^{-1}$  became larger near the canopy surface. Then the product  $\sigma_u/n_u$  which means a representative length of eddy passed above the canopy appeared to be particularly enhanced below the height of  $\zeta = 1.4$ . Here  $\zeta$  is a nondimensional height normalized by mean height of the model stand.

It was surmised that an inherent waving motion derived from a natural frequency of the stand appeared over the canopy surface in the high wind conditions. Then an air layer remarkably influenced by the organized waving was generated just over the waving canopy surface. Above mentioned condition is a significant phenomenon for studying the aerodynamical features of surface boundary layers affected by flexible vegetations.