

牧草群落上の気流の風向変動

Fluctuation in Wind Direction of Airflow Blowing over Pasture Stand

林 陽 生*

Yousay HAYASHI

I 緒 言

我々は、小川の中の水草が、流れの中で揺れ動くのをしばしば見ることがある。揺れ動く水草を注意深く観察していると、規則的にかつ組織的に動く様子がわかる。これを水の側から考えると、水流の中のある決まったスケールの渦が水草の上を、流れに乗って移動していると考えられる。陸上においても、田圃や麦畑・とうもろこし畑などの上に穂波が起る。水中でも陸上でも、両者の揺れ現象の間には、物理的アナロジーが成立すると考えることができる。

本研究は、このような観点のごく初歩的な立場から、牧草群落上の気流の特徴について論じようとする。実際に圃場を観察していると、穂波が発生するわけであるが、その揺れ方は鉛直面内よりも水平面内で波打つ現象が顕著であり、同時に風速が変わると穂波の移動速度も変るよう見える。このことから、植物体の水平面内の変位が、群落直上の気流場へ影響を及ぼすという点に注目して、風向の微変動とその風速依存性を解析するところに、本研究の特色がある。

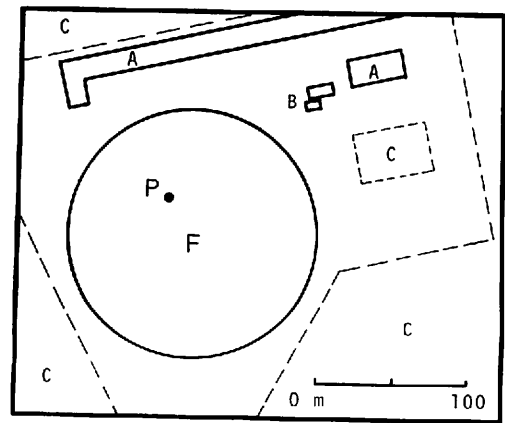
農業気象あるいは環境物理学の分野において、井上 (1955 a, 1955 b, 1955 c, 1958, 1961), 井上ほか (1955), 谷 (1963), Finnigan and Mulhearn (1978 a, 1978 b), Finnigan (1979 a, 1979 b), Maitani (1979), 佐藤ほか (1980), 米谷 (1981) などが、群落揺れ現象下のさまざまな乱流特性を論じている。しかしながら、どの研究においても鉛直方向の物理量の分布に関する

議論が多く、風速が変化した場合の揺れの応等性といった点に注目した議論は非常に少ない。

II 観測および解析方法

観測は、筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場にておこなった。この圃場は、直径160mの円形をしており、地表面にはライグラスを主とする牧草が播種されている(古藤田ほか, 1978)。当圃場では、1977年以来夏季に総合的な観測を実施しているが、今回の解析に用いたのは、1980年8月5日に実施した観測結果である。

圃場内の測定点の位置および周辺の概要を第1図に示す。圃場周辺は、高さ約10mの建物が散在するが、観測日の風向は東であり、この場合の圃場上吹走距離は約100mであった。観測時における



A: Building (about 10m) F: Grass field
B: Observation house P: Pole
C: Green belt (about 10m)

第1図 観測点(P)と圃場周辺の概要

* 筑波大学地球科学系

(1984年6月4日受理)

牧草の高さ(群落高, h)は約50cmであった。測定要素は、(i) $z=50\text{cm}$ における風速の3成分(X, Y, Z成分)の微変動、(ii)気温の微変動、(iii)群落構成要素である牧草の葉の変動である。(i), (ii)については超音波風速温度計で、(iii)についてはビデオカメラを用いて測定した。又、(i), (ii)はデータを磁気テープに集録した後A-D変換し、その後の処理を大型計算機で、(iii)は2次元画像解析装置を用いて解析した。いずれもサンプリング間隔、 $\Delta t=0.05$ 秒でデータを採取した。

このような方法で収録したデータのうち、鉛直方向の風速微変動と牧草の葉の変位については、すでに解析をおこなった(Hayashi, 1983)。そこで、今回はX, Y成分の水平風速をベクトル合成して得た、風向の微変動につき解析をおこなう。また、スペクトル解析にはブラックマン・タッキー法を用いた。観測時間についてはIV節に記す。

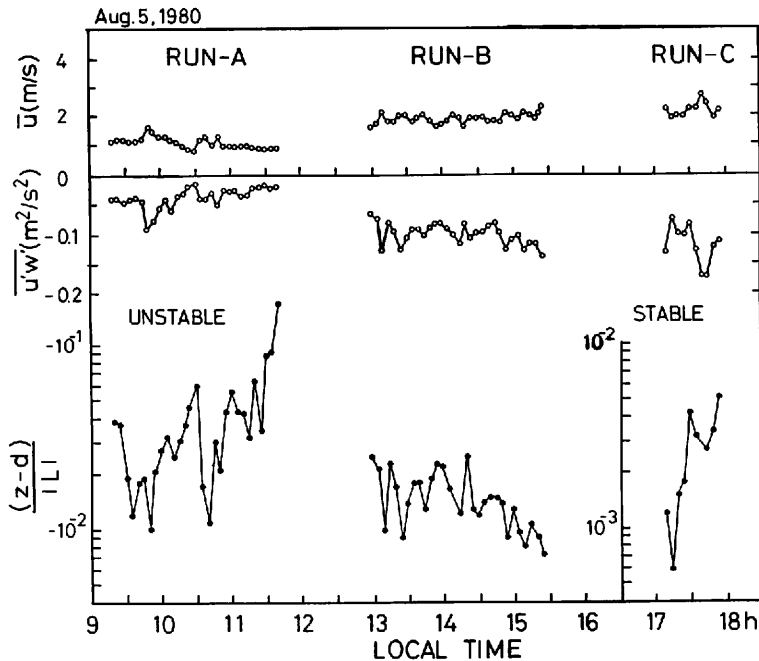
III 観測期間中の気象要素の概要

第1表に示すような3つのRunに分けた時間帯

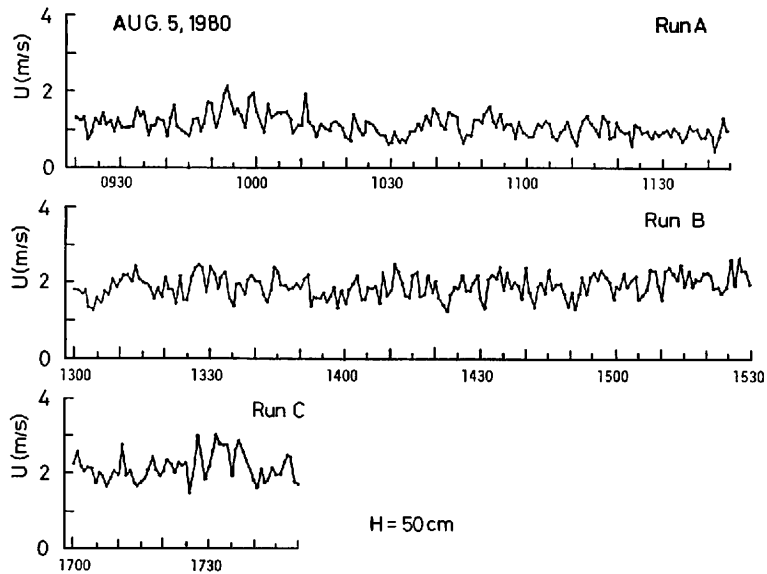
第1表 Run名と時刻・平均風速

Run名	時刻(時, 分, 秒)	50秒平均風速範囲(m/s)
Run A	9h20m00s—11h45m50s	$0.5 < \bar{u} < 2.1$
Run B	12h00m00s—15h30m50s	$1.2 < \bar{u} < 2.6$
Run C	17h10m00s—18h00m50s	$1.5 < \bar{u} < 3.0$

で観測をおこなった。各Runにおける、300秒平均した風速 \bar{u} 、運動量の鉛直輸送量に比例する量 $\overline{u'w'}$ 、安定度のパラメーター $(z-d)/L$ の時間変化を第2図に示す。ここで、 z は高度、 d は地面修正量、 L はモニン・オブホフ長である。また、瞬間値は平均値と変動量の和で表わす。すなわち $u = \bar{u} + u'$, $w = \bar{w} + w'$ とする。 \bar{u} は午前中比較的弱く、午後から夕刻にかけて強くなった。これと逆比例して、 $\overline{u'w'}$ が変化している。これは平均的にみて、 u が大きい程、群落高に相当する水平面を通して上から下に輸送される運動エネルギーが増すことに対応している。これは、同時に摩擦速度が増大することを意味する。安定度は、Run A, Bで



第2図 観測日の風速、運動量輸送に比例する量、安定度パラメーターの変化



第3図 50秒平均風速の時間変化

負, Run Cでは正となり, それぞれ不安定, 安定の気層となっていることを示している。特に, 風速の弱い日中に不安定の割合が大きくなっていることがわかる。

次に50秒平均風速の時間変化を第3図に示す。Run A ではほぼ $0.5 < \bar{u} < 2.1$ m/s, Run Bでは $1.2 < \bar{u} < 2.6$ m/s, Run Cでは $1.5 < \bar{u} < 0.3$ m/sの範囲で変動している。風速変化は激しいが, 概して午前中に弱く, 午後から夕刻にかけ強くなる傾向は前図と同様の傾向である。

本研究では, 静穏で葉の揺れが少ない状態から風速が増大するとともに風向変動の特性がどのように変化するかという点に注目するため, はじめに Run A (9時20分~11時45分)の時間のデータを用いることにする。VI節に言及する鉛直風速変動の風速依存の解析には, Run A・B・Cのデータを用いている。

IV 観測時間と現象の持続性

すでに述べたように, 本研究では群落直上の風向変動の風速依存性につき論じる。観測期間中, 圃場の群落上面には間欠的に穂波が出現し, 固有

な速度で移動することが観察された。

ところで, スペクトル解析などの統計処理をおこなう場合には, 現象の定常性が問題となる。この点, 今回の観測(特に弱風の領域)では, 観測時間をあまり長くすることは不合理である。なぜなら, 風が弱い場合には個々の葉は揺れていても, 組織的な揺れすなわち穂波は, 長時間持続して出現しないからである。このような制限のもとでしかも現象を充分説明する観測時間を設定する必要がある。

同じデータを用いた鉛直風速の微変動の統計処理の場合(Hayashi, 1983)は, 経験的に観測時間を50秒として解析をおこなった。この場合, 観測時間を50秒とした時の標準偏差の平均値は, 300秒とした場合の標準偏差の約98%を説明することが示されている。そこで風向変動の解析に関しても観測時間を50秒に設定した。

加えて, 解析する50秒間のデータの質を均一にする目的で, (i) 近中立 ($|\xi| \leq 0.03$)の条件にあてはまるデータを選び, かつ (ii) 規格化した風向変動スペクトル, $nS_D(n)/\sigma_D^2$, の高周波域 ($n \geq 5\text{Hz}$)にて, $nS_D(n)/\sigma_D^2 > 0.1$ となるデー

タを解析から除外した。特に (ii) の制限は、あらかじめ観察から周期約 1 秒の揺れが卓越していたために設定した。ここで、安定度のパラメータは次式で求めた。

$$\xi = \frac{z-d}{L} = \frac{-kg(z-d)(\overline{\theta'w'})}{\overline{\theta}(-\overline{u'w'})^{3/2}} \quad (1)$$

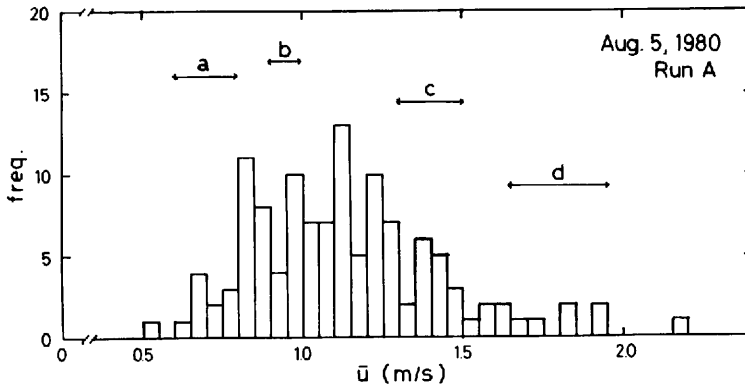
上式にて、 k はカルマン定数、 g は重力加速度である。地面修正量 d については同じ圃場における観測結果(林, 1980)による平均的な値、 $d=0.18\text{m}$ を用いた。この結果、風向変動の解析に用いたデータ数は、Run A の全 50 秒平均値数 174 個中 53 個となった。

V 風向変動の周期性と平均風速の関係

前節に述べた方法で選択したデータの風速別出現頻度を第 4 図に示す。解析に用いたデータ全体の平均風速は、約 1.3 m/s となった。代表的な風速の平均的な風向変動スペクトルを求めるため、

第 2 表に示す 4 つの風速域を設定した。この a ~ d グループの領域は第 4 図中にも示してある。同時に表には、各グループの $n=1\text{ Hz}$ における、 $nS_D(n)/\sigma_D^2$ の平均値とその標準偏差を示した。全データにつき周波数 $0.1\sim 10\text{ Hz}$ のスペクトルを求め、第 2 表のグループ別に平均的スペクトルを計算した。

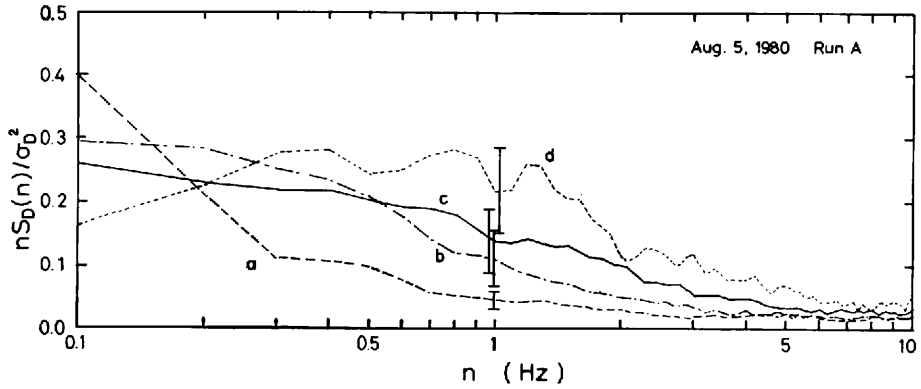
結果を第 5 図に示す。図の縦軸は規格化したスペクトル、 $nS_D(n)/\sigma_D^2$ を示す。図中破線は a グループを、1 点鎖線は b を、実線は c を、点線は d をそれぞれ表わす。同時に、 $n=1\text{ Hz}$ における各グループの規格化したスペクトルの標準偏差を縦実線で示した。a ~ d の順に平均風速が増大するに従い、 $0.5\sim 2.0\text{ Hz}$ の周波数帯に対応するスペクトルが少しづつ大きくなる様子がわかる。d グループの母数は 6 で、他のグループより少ない。従って、平均化したスペクトルは相対的に凹凸が目立つが、概して、 $n=2\text{ Hz}$ より低周波側に変動エネルギーが集中している。以上の結果は、



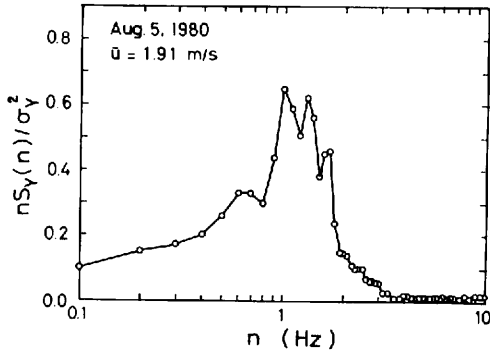
第 4 図 50 秒平均風速別出現頻度 (a ~ d は第 2 表参照)

第 2 表 風向変動解析に用いたグループ

グループ	風速範囲 (m/s)	平均風速 (m/s)	データ数	$n=1$ における $nS_D(n)/\sigma_D^2$	$n=1$ におけるスペクトルの標準偏差
a	$0.61 \leq \bar{u} \leq 0.77$	0.71	9	0.046	0.015
b	$0.91 \leq \bar{u} \leq 0.99$	0.96	14	0.110	0.046
c	$1.31 \leq \bar{u} \leq 1.46$	1.39	15	0.139	0.051
d	$1.68 \leq \bar{u} \leq 1.94$	1.81	6	0.215	0.068



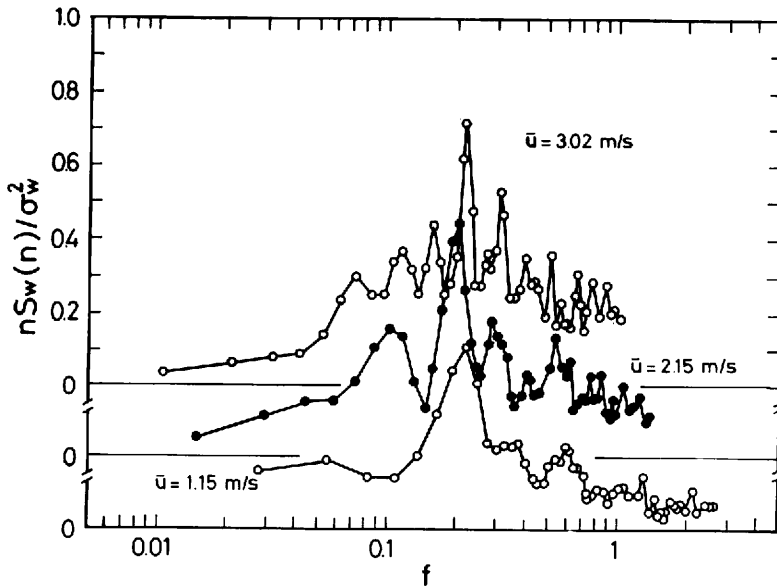
第5図 風向変動のスペクトル (a~dは第2表参照)



第6図 群落を構成する葉の揺れのスペクトル

静穏な状態から風速が増大し、平均風速が 1.8m/s 近くに達すると、風向変動に周期性が現われ始め、この場合の周波数はほぼ 1 Hz 前後であることを示すものである。

風向変動は、その下層群落の揺れの影響を強く受けると考えられる。そこで、牧草群落を構成する1枚の葉の鉛直面内の変位をスペクトル解析した結果を第6図に示す。周波数1.0~1.4Hzの領域にスペクトルのピークが現われている。この時の平均風速は約 1.9 m/s であり、第5図 d グループ



第7図 風速鉛直成分の変動スペクトル

の平均風速とほぼ等しい。第6図は1ケースのスペクトルのため、平均したスペクトルと直接比較することはできないが、風向変動の周波数帯に卓越した葉揺れ変動の存在することが示される。

VI 風速鉛直成分の解析結果との比較

風向変動について解析したと同様、風速の鉛直成分についても風速増大とともにスペクトルの型がどう変るかといった点に注目して解析をおこなった。第7図に平均風速が、 $\bar{u}=1.15 \text{ m/s}$, $\bar{u}=2.15 \text{ m/s}$, $\bar{u}=3.02 \text{ m/s}$ の観測時間50秒のデータから得た鉛直風速のスペクトルを示す。縦軸は規格化した鉛直風速のスペクトル、 $nS_w(n)/\sigma_w^2$ を、横軸は無次元周波数 f を示す。無次元周波数と周波数との関係は次式で示される。

$$f = \frac{nz'}{u} \quad (2)$$

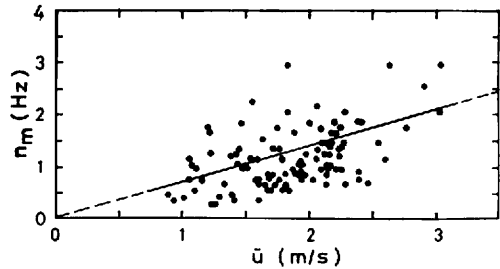
ここで、 z' は代表的な長さである。本研究では、 $z'=(h-d)$ とした。

図の縦軸は、見易いように目盛をずらしてある。風速が増大すると、スペクトルのピークに対応する周波数 n_m は高周波側に移動するが、無次元周波数から見ると、 $f \approx 0.2$ に固定したピークの存在することが示されている。(2)式は同時に、ストローハル(Strouhal)数の定義である。このことは、(2)式の関係が広い風速域で普遍的に成立する場合に、風速変動のスケールが空間スケール z' によってのみ決まることを示唆するもので興味深い。

そこで、8月5日の全データ($0.9 \text{ m/s} < \bar{u} < 3.0 \text{ m/s}$)について解析した結果を第8図に示す。ばらつきは多いが、第1近似として直線をあてはめた結果、次の経験式を得た。

$$u_m = 0.71 \bar{u} \quad (3)$$

ここで、 u_m はスペクトルのピークに対応する周波数、係数0.71は m^{-1} の単位を有する。はたして(3)式は群落上で普遍的といえるかどうか。これについてはさらに考察を加える必要があり、今後の問題である。



第8図 鉛直成分スペクトルの風速依存性

(3)式に、前節のグループの平均風速を代入すると、 $u_m \approx 1.3 \text{ Hz}$ となる。このことは、風向変動に寄与する現象と風速鉛直成分の変動に寄与する現象が、ほぼ同じ周波数を有する現象によるものであることを示すものといえる。

VII 結 語

以上の議論は、いわば非常に柔軟な群落上に発生する穂波に関する定性的な特徴を示したにとどまる。すなわち、静穏な状態から風速が増大するとともに、葉の変位に対応した固有の鉛直スケールを持った渦が発生する。また、植物体の組織的な水平面内の揺れの効果が、その上を吹く気流に顕著な影響を及ぼすのは、さらに風速が増大し、本研究の場合 $\bar{u} \approx 1.8 \text{ m/s}$ になってからと考えられる。まさにこの時に、穂波が発生することになる。

今後は、穂波により励起された乱れがどのように上層に伝播するかなど、より詳細な構造について解析をおこなう必要がある。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、筑波大学地球科学系吉野正敏教授・古藤田一雄助教授ならびに、泉耕二氏には数多くの貴重な助言を賜りました。記して感謝の意を表します。また、観測には水理実験センター熱・水収支観測圃場を利用させていただきました。本研究の骨子は、昭和58年度水理実験センター年次研究報告会にて発表したものである。

文 献

- 井上栄一 (1955 a) : 穂波の研究, (1)穂波の機構と特性. 農業気象, 11, 8-22.
- 井上栄一 (1955 b) : 穂波の研究, (2)穂波スペクトルと穂ゆれスペクトル. 農業気象, 11, 87-90.
- 井上栄一 (1955 c) : 穂波の研究, (3)穂波上の乱流拡散現象. 農業気象, 11, 147-151.
- 井上栄一・谷 信輝・今井和彦 (1955) : 耕地風の乱れの測定. 農業技術研究所報告, A-4, 1-36.
- 古藤田一雄・佐倉保夫・林 陽生・甲斐憲次 (1978) : 水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システムとデータ集録・処理について. 筑波大学水理実験センター報告, 2号, 65-89.
- 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.
- 谷 信輝 (1963) : 耕地風に関する研究. 農業技術研究所報告, A-10, 1-99.
- 林 陽生 (1980) : 物群落によって特徴づけられた気層の風. 地理学評論, 55, 51-64.
- 米谷俊彦 (1981) : 小型の台風7912号通過時の倉敷における水稲の揺れの観測. 農業気象, 36, 251-255.
- Finnigan, J. J. (1979 a) : Turbulence in waving wheat. I. Mean statistics and Honami. *Bound. Layer Met.*, 16, 181-211.
- Finnigan, J. J. (1979 b) : Turbulence in waving wheat II. Structure of momentum transfer. *Bound. Layer Met.*, 16, 213-236.
- Finnigan, J. J. and Mulhearn, P. J. (1978 a) : Modelling waving crops in a wind tunnel. *Bound. Layer Met.*, 14, 253-277.
- Finnigan, J. J. and Mulhearn, P. J. (1978 b) : A simple mathematica 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. *Env. Res. Cen. Pap., Univ. of Tsukuba*, No. 3, 54 p.
- Maitani, T. (1979) : An observational study on wind-induced waving of plants. *Bound. Layer Met.*, 16, 49-65.