

穂波の研究*

2. 穂波スペクトルと穂ゆれスペクトル

井 上 栄 一

(農業技術研究所気象科)

Studies of the Phenomena of Waving Plants ("HONAMI") Caused by Wind

Part 2. Spectra of Waving Plants and Plants Vibration

E. INOUE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

前報(井上 1955)では卓越穂波と卓越穂ゆれとの統計的性質が穂面すれすれに吹く穂風に含まれる摩擦連結乱子のあらわれとして論じられた。摩擦連結乱子の中には更にそれよりも小さな幾つかの階級の中間乱子が含まれていて、その各々が穂波と穂ゆれとを起しているものと考えられる。臨界風速以下では、そのために穂波も穂ゆれもある幅を持つた帯状スペクトルと考えられることがすでに述べられた。本報ではこの種のスペクトルについてくわしく論じようとする。スペクトルの考察は穂波の微細構造に関する我々の知識を深めるばかりでなくひろく耕地風の微細構造とその耕地風の中に起こる各種の乱流拡散現象に関する知識を深める上にも重要な価値をもつものと思われる。そして穂波あるいは穂ゆれのスペクトルの研究はそのまま作物の穂を一種の微細気象計器としての耕地風の構造の研究と全く同一であるとも云えよう。

穂風の乱子には直接穂面の存在によつて生じている摩擦連結乱子の他に周囲の地形や地物等に原因するもつと大規模の乱子も含まれる。長い時間や非常に広い範囲にわたる穂波現象にはこのような大規模乱子の寄与も考えなければならないので、本報では摩擦連結乱子と大規模乱子との関係についても述べることにする。

2. 摩擦連結乱子の微細構造

長さ A_x , 幅 A_y 及び厚さ A_z をもつ連結乱子は平均流の歪に連結されて平均流から運動エネルギーを供給される。そして夫々の方向に V_x , V_y 及び V_z という乱子速度で運動し, V_x と V_z との連結によつて運動量を上下方向に輸送してそれが摩擦応力としてあらわれ, また自身の乱子運動によつて起こるエネルギー逸散は其中に含まれるもつと小さな乱子に伝えられる。このようにして供給されるエネルギーと逸散されるエネルギーとが平衡した状態にあり, また逸散されるエネルギーは順次により小さな乱子に淀みなく伝えられて, 遂に分子の運

動エネルギーになるという仮定から, 平均風速分布の対数法則と乱子の大きさとそのエネルギーとの関係が求められる(井上 1955)。

上記のような機構を考へてある特殊な階級の乱子に摩擦連結乱子という名前がつけられているが, それが局部的等方性の状態にある中間乱子の最大限の地位をしめるという意味でしばしば最大乱子と呼ばれ, またその行動や作用が最も著しいという意味でしばしば卓越乱子ともよばれる。

中間乱子領域にある一つの階級の乱子の大きさと乱子速度とを方向に無関係に A_n 及び V_n で夫々表わすことにすれば, 単位時間, 単位質量当りのエネルギー逸散量 ε は

$$\varepsilon = \text{const. } V_n^3 / A_n \quad (1)$$

で与えられ, この量が乱子階級に無関係な量であるという相似性の仮定から, (1) の関係が中間乱子領域における乱子の大きさと乱子速度とを結びつける普遍的な関係とみなされる(例えば井上 1952)。

穂風の連結乱子はこの中間乱子領域の最大端に位置するものとみなしてよいであろう。そしてその大きさ A_0 は前報で示されたように, その存在する高度 $(h-d)$ に比例するものとみなされる。ここに h 及び d は夫々穂の高さ及び地表面修正量である。穂風の連結乱子の乱子速度 V_0 は平均流より供給されるエネルギー量 ε_* によつて決定されるが, 穂風の ε_* は

$$\varepsilon_*(h) = \frac{0.0165 U^3(h)}{(h-d) \left(\log \frac{h-d}{z_0} \right)^3} \quad (2)$$

で与えられる。供給される量 ε_* と逸散される量 ε とは等しいものと仮定されている。

一方穂風の最小乱子の大きさ A_∞ , 乱子速度 V_∞ は中間乱子領域の最小端として与えられ, 空気の分子動粘性係数を ν とすれば,

$$A_\infty = \text{const. } \nu^{3/4} \varepsilon^{-1/4}, \quad V_\infty = \text{const. } \nu^{1/4} \varepsilon^{1/4} \quad (3)$$

で与えられる。そして穂風には最小乱子よりも大きな色々な大きさをもつた乱子が同時に含まれていて, それら

* 昭和 30 年 4 月 3 日, 総会にて発表

がその各々の階級に応じた穂波や穂ゆれを起こさせているものと考えられる。

3. 摩擦連結乱子と大規模乱子との関係

風速の変動には 1 秒あるいはそれ以下の小さな週期をもつたものから、それ以上に極めて大きいたとえば数十秒とか数分、あるいは更に数時間というような週期をもつたものまで色々と含まれている。このように色々な週期をもつた変動はしばしばその週期の大小によつて三種類に分類されることが多い。あるいは又その週期に風速を乗じた長さを目安にして大きさで矢張り三種類に分類されたりする。このような分類は多分に任意性を含んでいて、たとえば 10 秒の週期をもつ変動を小規模変動とよぶか中規模変動と呼ぶかは、全く測定者の立場の相違によつて生ずることに過ぎない。著者はここでは摩擦連結乱子の運動によつて生ずる変動とそれ以外のそれよりも大きな乱子によると思われる変動との二つに区分してみる。

後者の変動がどの程度の週期を持つかということは全くその周囲の地形とか風がどの方向から吹いているかとかによつて支配されるように思われる。これに反して前者の摩擦連結乱子による変動は測定点の近傍（測定点の高さのせいぜい 100 倍程度の長さをもつ範囲であろう。）の地表面の形状に主として支配されるものとみなされ、これが穂波に関係していると考えられる。実際に数米程度のひろがりを持つに過ぎない穂波は、数百米以上にもわたる穂面全体のひろがりに関係するよりもむしろ穂の高さに直接関係するのである。そして非常に大きな乱子の存在はただ穂波を起こさせている穂風の平均の強さと方向とが穂波の週期とはくらべものにならない位にゆつくりと変化しているその変化の振幅と週期として現われるに過ぎないものと考えてよいであろう。しかし非常に広い一様な圃場を高々度より見下すような場合、あるいは草高が非常に低い作物の圃場の場合などには、摩擦連結乱子による穂波よりも、むしろ大規模乱子による穂波が卓越して観測される可能性がある。そこで簡単に摩擦連結乱子と大規模乱子との関係を述べておくことにする。

大規模乱子の行動は連結乱子の通過に全く感じないような感度の鈍い計器を使うか、感度のよい計器で得られた風速の変動の記録に適当な移動平均的操作をほどこして求められる。実際に著者等（井上・谷・今井 1955 a）は D:Chigasaki の観測（前報参照）について移動平均操作を施して大規模乱子の特性を次のように求めた。

(a) 大規模乱子による風の息 $\langle u_l'^2 \rangle^{1/2}/U$ は高さに

は無関係である。このことは乱子速度 $\langle u_l'^2 \rangle^{1/2}$ が U に比例することを意味し、 U が高さと共に増すと全く同様に乱子速度も高さと共に増すことを意味している。これは摩擦連結乱子の乱子速度 $\langle u_s'^2 \rangle^{1/2}$ が高さに無関係であることは全く異つた性質である。

(b) 大規模乱子の通過時間は高さに殆んど無関係である。従つて通過時間に各高度の平均風速を乗じた長さを大規模乱子の大きさとみなせば、その大きさは平均風速と同じように矢張り高さと共に増すことを意味する。

上の二つの性質からもし平均風速の高度分布が対数法則で表わされるとするならば、大規模乱子のエネルギー逸散率、即ち（乱子速度）³/（乱子の大きさ）は高さと共に増加することとなる。この傾向は摩擦連結乱子のエネルギー逸散率が高さと共に減少するという傾向と全く逆であることに注意を要する。即ち地表面近くでは摩擦連結乱子が卓越するけれども、高度が大きくなると急激に大規模乱子が卓越することになる。両者の卓越性の釣合う高度は当然両者のエネルギー逸散量が同じ程度に落着く高度と見なされるであろう。そしてこの高度がまた風速高度分布に関する適用限界の上限を与えるものと想像されるが、詳細は今後の研究にまつ所が多い。いづれにしろ両者の釣合は地表面の粗さだけではなく、周囲の大規模な地形等に支配されるものであり、現在の所簡単には解決されない問題であろう。

4. 穂波のスペクトル

穂波が穂風乱子の運動の Lagrange 的記述によつて表現されることが前報で示された。ここでは摩擦連結乱子の微細構造に関する知識から穂波のスペクトルを乱子の Lagrange 的スペクトルと全く同一に取扱う。この取扱いは次報に述べられる穂波上の乱流拡散現象にそのまま応用される。

穂波の運動は三つの方向（平均風向に対して平行、直角、垂直）に分解して考えられるが、ここでは簡単のため風向に平行な一方向の運動だけを取扱うことにする。他の二方向については全く同様な取扱いが可能であろう。

穂波は穂面の上を移動して行く。これは穂面の上をこるがる無揚力気球の運動と全く同様に考えられる。ただ気球のジグザグの運動の代りに、絶えず消えたり出来たりする穂波の時間的特性、即ち寿命時間を考えればよい。

乱子の寿命時間は乱子の持つエネルギーと単位時間当りのその逸散量とを考えるとにより、

$$\tau = \frac{V^2}{\epsilon} = \text{const.} \cdot \epsilon^{-1/3} A^2/3 \quad (4)$$

で与えられ、中間乱子領域では乱子が大きいくほどその寿

命時間も大きいことがわかる(井上 1952)。そして連結乱子は単に大きさ、速度に卓越するばかりでなく、寿命時間においても卓越することがわかる。そこで連結乱子の行動と結びつく大きさ、寿命等をもつ穂波を特に卓越穂波と呼ぶことにする。臨界風速以下の状態ではこの卓越穂波の上に更に多くの階級の中間乱子による穂波が重なる。これを中間穂波とよぶ。最小穂波は作物の個有振動週期と一致する通過時間をもつ乱子によつて決定され、必ずしも最小乱子とは関係しない。即ち作物の物理的性質によつて相対的に決定されるある通過時間をもつた階級の乱子が穂波にとつての有効最小乱子として作用するのであり、それ以下の小さな乱子はたとえ穂風の中に存在していたとしても穂波を起こす作用はないものとみなされる。穂を一種の計器とみなすならば、この現象も計器の感度によつて相対的に測定可能な有効最小乱子が決定される一つの例と云える。しかし存在する小さい乱子は穂波としては現われなくとも、脱粒等のこまかい現象には関係するかもしれない。

臨界風速以下では卓越、中間及び最小穂波のすべてが重なつて起こっている。その穂波のスペクトルは乱子運動の Lagrange 的表現として

$$F(n/n_0) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 + (n/n_0)^2} \quad (5)$$

がそのまま適用されるものと思われる(井上 1952)。ここに n は乱子の寿命振動数(あるいは寿命時間の逆数)を意味する。 n_0 はほぼ卓越穂波の寿命振動数に相当し、

$$n_0 = \text{const. } V_*/(h-d) \quad (5)$$

という関係が与えられる。そして卓越穂波の寿命時間は風速の増すにつれて次第に減少し、前報に述べられた水田臨界風速を越すとほぼ 1.5 秒位の値に落着くことが計算される。この状態では卓越穂波と最小穂波とが一致してしまい、上記の様の幅をもつたスペクトルの代わりに、線スペクトルが適用されるであろう。そして上記の寿命時間が穂波の出来たり消えたりする時間を与えることになる。

5. 穂ゆれのスペクトル

穂波は進行して行くが、個々の穂は前後左右にゆれているだけである。これは穂を通過する乱子の動きの現われに他ならない。通過振動数によつて乱子スペクトルを表現すれば、

$$F(N/N_0) = \frac{2}{3} \frac{(N/N_0)}{\{1 + (N/N_0)^2\}^{4/3}} \quad (7)$$

となる(井上・谷・今井 1955a)° N_0 は連結乱子の通過振動数にほぼ相当し、

$$N_0 = \text{const. } U(h)/(h-d) \quad (8)$$

与えられる。穂ゆれについても卓越、中間及び最小穂ゆれが考えられ、卓越穂ゆれの週期は風速と共に減少して行き、臨界風速では卓越穂ゆれと最小穂ゆれとは一致してしまつて穂ゆれスペクトルは線状となる。

穂ゆれの変位量は穂に働く風力に比例するから、これは圧力変動のスペクトルと全く同様に取扱われ、

$$F(N/N_0) = \frac{20}{9} \frac{(N/N_0)^3}{\{1 + (N/N_0)^2\}^{8/3}} \quad (9)$$

という変動スペクトルが与えられる(井上・今井 1955)。このスペクトルは通過振動数 N の大きい範囲で $-7/3$ 乗則を与えるものである。

穂ゆれ速度の変動は変位量の時間微分として与えられ、その変動スペクトルは圧力勾配変動スペクトルと一致することがわかるから、振動数 N の大きい領域では

$$F(N) \sim N^{-1/3} \quad (10)$$

という形が与えられる。

6. 結 び

この論文で述べられた色々な理論的結果と比較されるような測定はまだ一度も行われたことがない。しかし穂波現象の測定によつて耕地風の構造に関する知識が一段と深められるであろうことは確かである。またこのようなスペクトルの研究は作物にかかる繰返し応力の振幅や週期の模様を明らかにすることとなり、倒伏現象の機構を明らかにするためにも必要なものと思われる。

このようなスペクトルの測定に当つては当然その測定の操作が問題になるのであるが、必要な観測の平均化時間あるいはその読み取りの時間々隔等の選び方については他の機会(井上・谷・今井 1955 b) に述べたからここでは省略しておく。

参 考 文 献

- 井上(1952)：地表風の構造，農研報告，A 2 号，p. 93
- 井上(1955)：穂波の研究 (1)，農業気象，11，18-22.
- 井上・今井(1955)：Eulerian Correlation of the Atmospheric Pressure Fluctuations of Medium Scales，気集，33，169-173.
- 井上・谷・今井(1955 a)：耕地風の測定 (4)，農業気象 11，44-48.
- 井上・谷・今井(1955 b)：耕地風の乱れの測定，農研報告，A 4 号

Résumé

Phenomena of waving plants and vibration of individual plant are regarded to be both caused by behaviors of turbulons contained in the surface wind just at the plants height. Turbulons are divided into two classes of the coupling frictional ones and the larger ones. The former is further subdivided into the predominant corresponding to the earlier mixing length concept, the intermediate to which the well known second similarity hypothesis of turbulence is applicable and the smallest to which the first similarity hypothesis is applicable.

The predominant turbulon is fed energy from the shearing mean wind field and simultaneously provides the same amount of energy to the intermediate, and the energy distribution among the intermediate turbulons is represented by the so-called $-5/3$ power law of the turbulon energy spectra.

The Lagrangian description of turbulon spectrum is applied to the waving plants phenomena, in which the progressing plants waving is compared to the non-lift balloons floating over the plants, and the Lagrangian spectrum of turbulence is presented as

$$F(n/n_0) = \frac{2}{\pi} \frac{1}{1 + (n/n_0)^2},$$

where n denotes the life-frequency of turbulon and n_0 does approximately that of the predominant turbulon and/or waving plants. The life-time of the predominant waving plants over rice fields is estimated to decrease with increasing wind velocity and to attain a constant value of about 1.5 sec at and beyond the critical wind velocity (over ca. 5.5 m/sec at 2 m height).

The vibration of individual plants is regarded to be due to the successive passage of turbulons in the surface wind. Since under a condition of wind velocity below the critical the fluctuations in displacement (or the amplitude of plant vibration) is represented in terms of the wind force or wind pressure fluctuations, the spectral function of wind pressure fluctuations is suggested to be applicable to the plants vibration as follows :

$$F(N/N_0) = \frac{20}{9} \frac{(N/N_0)^3}{\{1 + (N/N_0)^2\}^{3/2}},$$

where N_0 corresponds approximately to the passage-frequency of the predominant turbulon.

The plants vibration is divided also into the predominant, the intermediate and the smallest vibration. The smallest vibration is considered to be caused by turbulons of the passage-time just same as the period of natural vibration of plants. At and beyond the critical wind velocity, periods of the predominant and of the smallest vibration coincide with each other and the above spectral function cannot be applied, but the line spectrum of vibration is expected to predominate at the period of natural vibration of plants.

No practical observations have yet been available to be compared to the theoretical results.