穂波の研究

1. 穂波の機構と特性*

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 1. Mechanism and characteristics of Waving plants phenomena

E. INOUE

(Division of Meteorology, National Institute of Agricultural Sciences)

1. ま え が き

稲田, 麦畑, 或は長い草の生えている所でかなり風の強い時に見られる穂波は, 誰にも知られており, 又多くの文学的表現もなされている。しかしながらその科学的な記述は鈴木清太郎博士 (1948, 1951) の著書にある以外, 著者はまだ見付けていない。

気象学者は穂波を耕地風の性質即ち平均風速と風の息に関係するものと考えているが一方耕地風は穂波により別の性質が与えられるから, 穂波の研究には作物と耕地風とを別々に考えられずそれらの間の相互関係を考えながら進めて行かねばならない。

吾々は 1951 年より種々の耕地上の平均風速高度分布や乱れを測定し, その結果については既に発表 (井上・谷 1952; 井上・谷・今井 1953; 谷・井上・今井 1955; 井上・谷・今井 1955) した。その中で風速分布と風による作物の変形との関係を指摘し, 一部穂波現象について述べたがこの研究ではそれらより詳細に作物と耕地風の特異即ち風速分布, 乱れの大きさ強さ等との相互関係を論じ, 穂波は耕地風の連結乱子の働きの表われに他ならないことを明らかにしようと思う。

2. 水田上の風速分布

断熱或は断熱に近い状態の水田上の多くの風速観測値はその高度分布がいわゆる対数法則によつてよく表わされることを示した。即ち

$$U(z) = \frac{2.303}{\kappa} V_* \log \frac{z-d}{z_0}, \quad z > d+z_0: \quad (2.1)$$

ここで z は地面よりの高さ, κ はカルマン常数 (断熱状態では 0.45 とされている), V_* は摩擦速度, d は地表面修正量, z_0 は粗度径数とする。

対数法則は耕地上少くとも 6 m までは適用され, 連結乱子模型 (井上 1952) を用いて理論的に求められている。断熱状態下では, 連結乱子の長さは流体力学的な地表面からの高さに比例すると考えられ

$$\Lambda_z = \gamma_z (z-d) \quad (2.2)$$

で表わされる。比例常数 γ_z は風速変動の時間相関係数より求められ, 約 10 と推定される (井上・谷・今井 1955)。従つて断熱状態下の連結乱子の大きさは

$$\Lambda_z = 10(z-d) \quad (2.3)$$

として与えられる。

塩谷 (1953), MacCready (1953) 等の測定より, 気層の安定度の γ_z に及ぼす影響を考えると, γ_z は安定になると小さくなり不安定になると大きくなる様である。

連結乱子の巾 A_y , 厚さ A_z は夫々

$$A_y = \gamma_y (z-d) \quad (2.4)$$

$$A_z = \gamma_z (z-d) \quad (2.5)$$

で表わせると考えられる。比例常数 γ_y, γ_z はまだ正確には判らないが, カルマン常数の値と比較して γ_z は γ_y のある分数と考えられ, 実測 (例えば Gerhardt et al. 1952) によれば γ_y も又 γ_z の分数である様である。これらのことから連結乱子の形は細長い楕円か円筒 (Townsend 1951) の様に想像されるがここではこの問題にこれ以上深入ししないでおく。

連結乱子の垂直速度を V_z とし, 平均流の歪と乱子との間の連結機構の仮定より

$$\varepsilon(z) = K_M(z) \left(\frac{\partial U(z)}{\partial z} \right)^2 = \frac{V_z^3}{A_z} = \frac{V_*^3}{\kappa(z-d)}, \quad (2.6)$$

の関係が得られる (井上 1952)。ここで $K_M(z)$ は乱子拡散係数で $V_z A_z$ として与えられ, $\varepsilon(z)$ は平均流から乱れに与えられるエネルギーである。(2.5) の γ_z をカルマン常数に等しいとし, 乱子エネルギーの逸散率が方向に拘らず一定であると仮定すれば, 即ち

$$\frac{V_z^3}{A_z} = \frac{V_y^3}{A_y} = \frac{V_*^3}{A_z} \quad (2.7)$$

という関係を仮定すれば次の式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} V_z &= \left(\frac{10}{0.45} \right)^{1/3} V_* = 2.81 V_*, \\ V_z &= V_*, \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

* 昭和 30 年 2 月 25 日 関東支部例会にて発表

Fig. 1. Dependence of Surface Drag Coefficient on Wind Velocity

$$A_x = 10(z-d),$$

$$A_z = 0.45(z-d)$$

風向に直角な方向については

$$A_x > A_y \gtrsim A_z$$

$$V_x > V_y \gtrsim V_z$$

(2.9)

と想像される。

耕地面に働く摩擦応力は (2.1) より

$$S = 0.195 \rho U^2(z) / [\log\{(z-d)/z_0\}]^2 \quad (2.10)$$

抵抗係数は

$$C_s(z) = 2 S / \rho U^2(z) = 2 V_*^2 / U^2(z) \quad (2.11)$$

と定義される。一方風力による穂の平均変位を L とすると

$$L = \alpha S \quad (2.12)$$

となる。Richardson (1922) によると “Corn” はで α は $0.44 \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ はであるという。水稻についての α はまだ求められていないが、風速分布を (2.1) に似せた風洞実験の結果から推定出来る。穂の所の風速を $U(h)$ とすると

$$L = \eta(h) U^2(h) \quad (2.13)$$

で大体表わすことが出来、 L を cm , $U(h)$ を m/sec で表わすと $\eta(h)$ は 0.5 となった。 $U(h)$ と S とは (2.11) により求められるから大体ではあるが水稻の α も求め得られる。

この様にして水田上の風速分布の観測より d , z_0 を求めれば、更に風と穂との相互関係即ち摩擦応力、平均変位、エネルギー逸散率のみならず、連結乱子の長さ速度の様な特性までも推定することが出来る。

1954年の夏には4回の観測が行われた。

A: 茨城県潮来 August 5.

B: 埼玉県岡部 " 14.

C: 埼玉県妻沼 September 8.

D: 神奈川県茅崎 " 14.

前三者は航空機による農薬散布の実験の際の観測で気温分布の測定を同時に行い安定度の影響の少い時の測定値を選び最後のものは台風12号が接近して風速の非常に強い場合で安定度の影響は小さいと見て測定値を整理した。これらの観測器材、観測法については前に述べた通りであるから省略する。結果を整理し上記の方法で各種の値を計算し第1表に掲げる。但し風速の非常に弱い場合は d が殆ど求められないので他の量も計算していない。計算された諸量のうち最も著しい変化を示すものは $C_s(200)$ で第1図に示される様にある限界風速で最小値を示している。この限界風速の増加に従い d は増し、 z_0 と C_s は減ずる。限界風速以上ではこれと全く反対になる。以下前者の状態を“B”，後者を“A”と名付ける。Deacon(1949), Rider(1954) は“B”については注意しているが“A”については報告されていない。

又ここで計算された S を用い (2.12) の α を推算してみると約 $0.5 \text{ cm}^3 \text{ sec}^{-1}$ となる。

Table 1. Dependence of Profile Characteristics on Wind Velocity

Classification of Observation	$U(h)$ (m/sec)	$U(200)$ (m/sec)	d (cm)	z_0 (cm)	$(h-d)/z_0$	S (dyne/cm ²)	$C_s(200)$	$\varepsilon(h) \times 10^{-4}$ (cm ² /sec ³)
A: Itako	0.8	2.0	30	15	3.0	1.30	0.0542	0.173
Aug. 5, 1954	—	1.7	0	25	3.0	—	—	—
$h=75 \text{ cm}$	0.6	1.6	30	14	3.2	0.65	0.0420	0.175
	—	1.0	0	29	2.6	—	—	—
B: Okabe		0.9	0	29	2.6			
Aug. 14, 1954		0.75	0	33	2.3			

$h=75$ cm		0.5	0	42	1.8			
		0.4	0	41	1.8			
		0.3	0	70	1.1			
C : Menuma	2.5	5.0	70	4.5	5.6	5.12	0.0342	2.49
Sept. 8, 1954	2.4	4.6	70	4	6.3	4.13	0.0325	1.80
$h=95$ cm	1.7	3.3	60	8	4.4	3.20	0.0489	0.869
	1.5	3.05	70	5.2	4.8	2.11	0.0380	0.708
	1.4	2.85	60	11	3.2	3.50	0.0360	1.004
D : Chigasaki	4.95	7.7	40	16	4.4	27.2	0.0766	11.1
Sept. 14, 1954	4.7	7.5	60	9	5.6	18.8	0.0558	8.02
$h=110$ cm	4.1	6.6	55	11	5.0	15.7	0.0602	6.06
	3.8	6.1	60	8.9	5.6	11.8	0.0529	4.34
	3.7	5.9	70	5.6	7.2	8.54	0.0409	3.37
	3.3	5.5	80	3.7	8.1	6.05	0.0334	2.67

3. 連結乱子の働きと穂波

風速の増加と共に z_0 と C_s とが減ずることについて、Deacon (1949) は“草の葉が風により曲り滑らかな表面となる”又“微風中では風の流れに直角な葉も強い風では殆ど流れに平行となるまで曲り結果として抵抗の減少となる”といっている。吾々の観測(井上・谷・今井1953)でも作物の屈曲による他、振動によつても C_s が減ずることが認められた。

Fig.2 Dependence of Passage Time of Coupling Turbulon in Surface Wind on Wind Velocity

上記の4つの観測の時の記録映画を見ると、風の弱いA, Bでは殆ど穂波が見えず、風速が中位のCでは穂波が少しあり、風の強いDでは非常に発達した穂波が見られる。この様に風速により穂波の程度が異なり、 d , z_0 , C_s が変るのは、それらの間に何らかの関係があると考えられ更に z_0 , C_s がある限界風速で極大或は極小値となることは穂波の強さに関係するに違いないと考え次の作業仮説をおく、

「穂波は耕地風中の連結乱子の働きの表われである」

鈴木 (1948) は穂波は風向の方向に細長い楕円で波動としての性質は明らかでないといつたがこのことは連結乱子の想像的性質と一致する。高さ h に於ける連結乱子の長さ、通過時間、寿命時間を第2表に示す。“B”では風速と共に通過時間は急激に減少し極小値約 1 sec となり、“A”では風速に関係なく略一定値となつている(第2図)。この特徴的な通過時間 1 sec は作物の固有振動週期に略一致していると考え、次の第2の作業仮説をおく。

「限界風速では耕地風中の連結乱子の通過時間が作物の固有振動週期に一致し、“A”域でもこの関係は保たれる」

連結乱子の中には種々の大きさの多くの中間乱子が含まれその中でもその通過時間が作物の固有振動週期よりも長いものすべてが作物を振動させ、穂波を起させる。“B”では連結或は卓越乱子から有効最小乱子までの間の範囲の乱子による種々の週期の穂波があるのに対し“A”では作物の固有週期に一致した卓越穂波だけが存在する。換言すれば“B”での穂波は帯状スペクトルで“A”では線スペクトルを示すということである。“B”では連結乱子、従つて卓越穂波の寿命時間は風速と共に急に減少するが“A”では風速に拘らず約 1.5 sec に保たれ

る。

Table 2. Dependence of Coupling Turbulon Characteristics on Wind Velocity

Classification of Observation	$U(h)$ (m/sec)	Length (m)	Passage Time (sec)	Life Time (sec)
A : Itako	0.8	4.5	5.63	1.37
	0.6	4.5	7.50	1.94
C : Menuuma	2.5	2.5	1.00	1.36
	2.4	2.5	1.04	1.51
	1.7	3.5	2.06	2.41
	1.5	2.5	1.67	2.07
	1.4	3.5	2.50	2.30
D : Chigasaki	4.95	7.0	1.41	1.51
	4.7	5.0	1.06	1.44
	4.1	5.5	1.34	1.46
	3.8	5.0	1.32	1.80
	3.7	4.0	1.08	1.60
	3.3	3.0	0.91	1.50

穂波の巾は現在連結乱子の巾がよく判っていないから殆ど計算することが出来ないが卓越穂波は(2.9)と同じ関係により楕円形をなしていると極く大雑把に考えられる。

鈴木(1948)によれば、水田の風速 3 m/sec の状態で穂波の週期は 0.8 sec, その長さは 2.4 m というからこれらは前に計算された結果とよく一致しており、上記穂波現象に関する作業仮説は十分合理的であると思う。又“A”では連結乱子の通過時間 $10(h-d)/U(h)$ は一定に保たれるわけであるから $U(h)$ が増加すれば d は小さくならねばならず、流体力学的の有効粗度が増して α_0 と C_s とが増加することが同様な理由により説明される。

4. 1本の作物の振動(穂ゆれ)

鈴木(1948)が注意した様に穂波は平均風速と共に進行するが、1本の作物は(2.12)或は(2.13)で与えられる平均変位を中心にして前後左右に振動するだけである。即ち穂波の動く状態はラグランジュの方法で1つの乱子の動きを表わしているものであり、作物の振動はオイラーの方法で多くの乱子の動きを表わしていると考えられる。風洞気流内で1本の作物が振動している様子は平均風速と作物の変位の関係が同じであつても広い圃場に於いて耕地風にふかれて振動している様子とは全く異つたものである。即ち風洞内の作物は穂波現象とは全く関係なく動いているということである。

乱子の通過によつて広い圃場にある作物は振動させられるがここではその平均振巾だけを考えよう。連結或は

卓越乱子の速度および作物の変位と風速との関係は既に得られているから1本の作物の振巾は

$$\left. \begin{aligned} l_x/L &= \{V_x(h)/U(h)\}^2 \\ l_y/L &= \{V_y(h)/U(h)\}^2 \\ l_z/L &= \{V^2(h)/U(h)\}^2 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

と表わせる。ここで l_x, l_y, l_z は夫々風向に平行, 直角, 垂直方向の振巾, L は(2.13)の平均変位を表わすから作物は風向風速計の1種と考えられる。

鈴木(1948)は穂の動きがある種の楕円を画くことを指摘しているがこの楕円の長, 短軸の比は理論的に

$$l_x/l_y = \{V_x(h)/V_y(h)\}^2 \text{etc} \quad (4.2)$$

で与えられ、一方(2.7)の関係より穂波の楕円の2軸の比は

$$A_x/A_y = \{V_x(h)/V_y(h)\}^2 \text{etc} \quad (4.3)$$

となる。それから

$$\frac{(A_x/A_y)}{(l_x/l_y)} = \frac{V_x(h)}{V_y(h)}$$

となり $(V_x/V_y) > 1$ であるから穂波の楕円は作物振動のそれより細長いことを示し大変興味のある結果を得た。この結果は連結乱子の特性としてエネルギー逸散率を方向に拘らず一定と仮定(2.7)した場合であるが、連結乱子の寿命時間が方向に拘らず一定と仮定(井上 1952)すると

$$\frac{(A_x/A_y)}{(l_x/l_y)} = \left\{ \frac{V_x(h)}{V_y(h)} \right\}^{-1} \quad (4.5)$$

となり(4.4)と全く反対の結果を得る。今後穂波の詳細な観測によりこの2つの仮定のうち何れが良いか確かめたいと思う。

5. むすび

得られた結果からみて次の作業仮説は合理的だと考えられる。

1. 穂波は作物面上の耕地風中にある連結乱子の働きの表われに他ならない。
2. 連結乱子の通過時間が作物の固有振動週期に一致する様な限界風速で穂波は卓越する。

実際水田上では草高の風速が 3 m/sec のとき限界風速となること、穂波が楕円をなすこと、およびその週期と長さは鈴木博士の著書にあることとよく一致している。

著者は今後この現象の研究だけでなく、この問題に関係の深い農業, 熱, 水蒸気等の乱流拡散について理論的実験的研究を進めて行きたいと思う。又森林とか果樹園といった様なものの振動現象についても研究を始めており近く発表するつもりにしている。

終りに多くの現地観測をやつて呉れた谷・今井両君、並に坪井研究室の方々、又鈴木博士より与えられた御好

意に対し、深く感謝の意を表し、本研究の一部は文部省科学試験研究費によつたことを附記する。

参考文献

- Deacon, E. L. 1949: Q. J. Roy. Met. Soc., 75, 89.
 Gerhardt, J. R., Crain, C. M. and Smith, H. W.
 1952: J. Met., 9, 299.
 井上栄一 1952: 農研報告 A, 2, 93 p.
 井上・谷 1952: 農業気象, 7, 48.
 —・今井 1953: " , 8, 45.
 ————— 1955: 農研報告に発表予定

- MacCready, P. B. Jr. 1953: J. Met., 10, 434.
 Richardson, L. F. 1922: Weather Prediction by Numerical Process,
 Rider, N. E. 1954: Q. J. Roy. Met. Soc., 80, 198.
 Shiotani, M. 1953: 気象集誌, 31, 327.
 鈴木清太郎 1948: 農業物理学, 286 p. p.
 ————— 1951: 農業気象学, 267 p. p.
 谷・井上・今井 1955: 農業気象, 10, 105.
 Townsend, A. A. 1951: Proc. Camb. Phil. Soc., 47, 385.

Résumé

A number of wind velocity profiles over a rice field obtained during the summer season under a nearly adiabatic condition are represented by the logarithmic law, i. e.,

$$U(z) = \frac{2.303}{\kappa} V_* \log \frac{z-d}{z_0}, \quad z > d + z_0;$$

where κ , V_* , d and z_0 have their usual meanings respectively. The zero-plane displacement d is shown to have a maximum value at a certain critical wind velocity; and z_0 and, consequently, the surface drag coefficient C_s are shown to attain minimum simultaneously at the same critical.

These behaviors are related to predominance of the waving rice phenomena, whose period and amplitude being explained respectively by length and energy of the coupling turbulon in surface wind. The period of waving plants is computed as a passage time of coupling turbulon depending upon d and wind velocity, and is found at the critical velocity (ca. 5.5 m/sec at 2 m height) to coincide with the natural period of vibrating rice (ca. 1 sec). This coincidence is maintained even in the range of wind velocity over the critical value and to which the predominance of waving plants phenomena is attributed. Preliminary observations made by Suzuki (1948) are shown in accord well with the present considerations.

雑 報

新入会者

(昭 29, 11, 30~昭 30, 4, 30)

琉球大学事務局, 島村 匡俊, 内田 孝,
 加藤 義親, 佐藤 孝夫, 松山 幸栄,
 田村 勝義, 品川 浩清, 橋場 孝男,
 北海道大学低温科学研究所, 石黒 庄太郎,
 岩田 悦行, 阿部 繁, 東北統計指導官室,
 森 俊彦, 愛知農試挙母分場, Transportation
 Officer Dugway Proving Ground Dugway, U. S. A,
 大井 一郎, 北海道大学農学部農業気象学教室,
 金野 邦二, 小平 吉男, 大阪統計調査事務所,
 愛知県立農事試験場, 若林 金雄, 新庄 正敏,
 鴻海 実, 福岡蚕業試験場, 大根田 襄,
 相馬 恒一, 妹尾 正一, 川 俣 稔,
 東野 伸一, 小原 忠雄, 杉山 弘,
 太田 芳治, 熊谷 才藏, 鈴木 多賀,

訂 正

本誌 10 巻 3・4 号表紙 2 頁の伊勢屋機械製作所の
 広告文中電話番号・振替番号に誤りがありましたので次
 の如く訂正致します。

個 所	誤	正
営業部電話番号	本局 28 番	本局 2823 番
本社工場電話番号	伏見 233 番	伏見 671 番
振 替 口 座	大阪 602716	大阪 6023