

大きな揺れ変形をする植生層流れの 遷移と乱流秩序構造

日野幹雄

Transition process and coherent turbulence structure above and within a waving plant of large bending oscillation

Mikio Hino, Katasseyama 4-20-6, Fujisawa-shi, Japan

ABSTRACT

Two methods of numerical solution of an elastic beam performing large bending oscillation together with LES simulation of both air and canopy flows have been proposed. Transition processes to turbulence through the K-H type shear flow instability mechanism are analyzed using 3D bird's eye view of the flow field. Turbulent canopy flows are shown to have a multiple structure consisted of the longitudinal vortices common to wall turbulence and lateral vortices accompanied by low pressure zones, which supply energy to the former by elongation of vortices. Prevalence of sweeping motion in canopy flow is shown. 3D structure of the so-called micro-front characterizing canopy flow is composed of vertical curtains extending downstream.

Key Words: Transition to turbulence, coherent structure, waving plant, honami

1. はじめに

(a) 穂波の研究：

穂波の科学的な研究は、井上栄一(1955,1964)に始まる。ついで、Finnigan, 米谷俊彦, 池田駿介らの研究が続く。穂波の発生に伴って、大気と植生層の間には、運動量,熱,CO₂,O₂,水蒸気などの交換が生ずる。したがって、植生層は地球環境の問題には大きな役割を果たす。大気層との熱の交換現象に注目したサーモグラフィを利用した穂波の観測が米谷, 池田により行われている。

(b) 穂波の発生理論：

穂波の発生理論には次の3つがある。Gust attack (Finnigan), Resonance with atmospheric turbulence (Inoue, Maitani), Shear flow instability (Ikeda). 井上は「穂波は大気乱流のセンサーである」と述べている。

ついでながら、風波の発生については、18世紀のフランクリン, 第2次世界大戦中のSMB法, Phillips(共鳴説 1957 JFM), Miles (流力不安定説 1957 JFM), Hasselmannほかの研究があり、既に完成域にある。

(c) 剪断流の遷移過程と乱流：

剪断流は穂波流れと共通する現象である。剪断流の遷移過程については、多数の研究が行われている。

2. 基礎方程式および計算法

(a) 乱流のLESモデル

[大気乱れと植生層内流れのLES]

$$\frac{Dx_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} - \frac{c_m \cdot s \cdot U^2}{|U|} \frac{z_i}{|U|} \quad (1)$$

[サブグリッド・スケール乱流エネルギー式]

$$\frac{DE}{Dt} = -R_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \partial [K_m \frac{\partial E}{\partial x_i}] / \partial x_i - (ce/L)E^{3/2}cm.s.(2E)U + acm.s.|U|^3 \quad (2)$$

ここに,

$$R_{ij} = Km [\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}] - (2/3) \delta_{ij} E \quad (3)$$

$$K_m = c_m LE^{1/2} \quad (4)$$

$$L = (dx dy dz)^{1/3} \quad (5)$$

また、s : 葉面積密度, α : 葉による抵抗損失のうち乱れ成分への寄与率。

(b) 弾性柱の大変形の基礎式と解法

弾性柱の軸方向をs,これと直角方向への変位をx_sとすれば、弾性柱の撓み変形は次式(局所座標)で表される。

$$EI \frac{\partial^4 x_s}{\partial s^4} + m \frac{\partial^2 x_s}{\partial t^2} + C_{sr} \frac{\partial (\frac{\partial x_s}{\partial s})}{\partial t} - f_s(x_s, z_s, t) = 0 \quad (6)$$

上式を次の何れかの方法で解いた。

(1) 吉田(裕)法 : (吉田, 魚地, 日野を参照)

(2) 曲線座標系による表示

植生素素である弾性柱の各瞬間の軸方向座標sを変数とし、global座標系での弾性柱の変位(X, Z)をsに閉して表す。まず、釣り合い静止状態についてs軸に垂直な方向の変位Xは次のようになる。

$$\frac{(d^2 X / ds^2)}{\{(+) (1 - (dX/ds)^2)^{1/2}\}} = M / EI \quad (7)$$

ここに、M:曲げモーメント, EI:剛性。振動方程式は、慣性力項を考慮し上式から導くことができる。一方、sに沿うz軸方向の弾性棒の変位は、次のように表される。

$$dZ/ds = (\pm)(1 - (dX/ds)^2)^{1/2} \quad (8)$$

(c) 差分法による数値解 : 振動偏微分方程式は時間に関し2階偏微分, 場所に関し4階偏微分で記述され, そのまま差分化しては収束性に問題がある。そこで, 次のように中間変数(∂X/∂t = V_x,)を導入し, 時間について1回偏微分, 空間については2回偏微分に偏分

階数を縮退する。

[s 方向に Runge-Kutta 法で解く]

$$\partial^2 X / \partial s^2 = (M/EI) (1 - (\partial X / \partial s)^2)^{1/2} \quad (9a)$$

$$\partial Z / \partial s = (1 - (\partial X / \partial s)^2)^{1/2} \quad (9b)$$

[t 方向に 1-time step だけ Runge-Kutta 法で解く]

$$\partial X / \partial t = V_x \quad (9c)$$

$$\partial V_x / \partial t = (1/mass) * ((-1) \partial^2 M / \partial s^2 \cdot \cos(\theta) + (force)_x) \quad (9d)$$

$$\partial M / \partial t = (EI) \cdot V_x \cdot s^2 / \sin(\theta) \quad (9e)$$

ここに、 $\sin(\theta) = \partial X / \partial s$ 。

計算法の Check は、大変形の計算精度については beam に一定モーメントを付加するとき beam が円環に変形することで確かめた。また、非定常変形については片持梁の振動の mode 法による厳密解と比較して計算精度を確認した。

(d) 計算領域：数値シミュレーションは、計算領域の幅が狭いが長さは長い場合 ($x_{max}=24.0m, y_{max}=2.4m, z_{max}=4.0m; I_{max}=121, J_{max}=13, K_{max}=42$) と幅を倍に長さを半分 ($x_{max}=12.0m, y_{max}=4.8m, z_{max}=4.0m; I_{max}=61, J_{max}=25, K_{max}=42$) にした場合について行った。流れが 2 次元的な乱流への遷移過程の初期(穂波の発生)は主に細長領域で、流れの 3 次元性が無視できない場合(本計算の大部分)は後者でおこなった。時間刻みは層流計算では $\Delta t=0.01sec$, 乱流計算では $\Delta t=0.001sec$ とした。

3. 穂波の発生, 乱流遷移過程

[K-H 波の発生]

あるステップ数(10,000 あるいは 70,000)まで層流計算を続けた後、唯一度だけ流れ場の各格子点に数パーセント、オーダーの乱数を与え、乱流の種播をした。最初の内は流れ場は微かに不規則に乱れているだけであるが、やがて植生面上に y 軸方向に中心を持つ渦(列) ω_y , およびそれに伴う低圧部が発生する(Fig.1(a))。同時に横断方向に並ぶ高圧部も見られるが、これは当然ながら渦ではない。渦の場合は Fig.1(b)に見られるように 2 次元的に周期的に整然と並んでおり、K-H 型の不安定波が発生していると見做させる。

[3 次元化]

やがて流れに垂直に植生面上に並んだ渦の一部が引き延ばされて細く変形し始める。このとき切れた渦の相対する端に回転方向が逆の流下方向に軸をもつ一対の渦($+\omega_x$)が形成される。この渦の変形過程は Fig.2 のように展開し、遂に壁面乱流の場合と同様な多数のラフな渦対から形成される乱流場となる。

しかし、5.に見るように横断方向の低圧部が消滅するわけではない。

4. 穂波流れ乱流場の統計特性(略, 日野 2000 参照)

5. 穂波乱流の大規模乱流構造(3 次元 CG 可視化)

(a) 二重構造: 穂波流れの大規模乱流構造の 3 次元 CG の一例を Fig.3(a)に示す。穂波面上の乱流はラフな対を

形成する多数の x 軸方向の+または-符号の渦度成分の渦で占められている。また、植生層上面上辺りに中心を持つ横断方向に延びる低圧部が存在し、これとほぼ重なって y 軸方向の渦度成分をもつ渦(ω_y)が存在する(Fig.3(b))。この ω_y は低圧部ほど連続的ではなく断片的である。植生層界面付近の強い剪断により ω_y が発生し、これがバースティングにより引き伸され x 軸方向の渦度 ω_x を供給していると解釈される。

このように二重構造ないしは二階建て構造を持つことが穂波乱流の特徴で、これは植生層が常に主流速の剪断流形を維持している為である。

(b) マイクロフロント: Gao らの先駆的な研究以来、植生層流れの大規模構造の特徴の一つに流下方向鉛直断面で見ると流速や温度分布のマイクロフロントの存在が指摘されている。確かに、本シミュレーションでも等値線が密な流下方向斜めに傾斜した領域が認められる。しかし、これは高速域を包み込んだ横断方向に延びる幕状のものではなく、Fig.3(やその他の鳥瞰図)および Fig.4(横断面)の示す所によればむしろ流下鉛直(x-z)面方向に並んだ狭いカーテン状領域になっている。

(c) Sweep 運動の卓越性: 穂波乱流が壁面乱流と異なる著しい特徴の一つに、壁面乱流では 4 象限分類による sweeping(II 象限)と bursting(IV 象限)運動が同程度に Reynolds 応力に寄与しているのに対して、穂波乱流では sweeping(II 象限)が卓越している点がある。このことは、Gao らを初め他の研究者により指摘されてきたが、Fig.5 により一層明らかに示される。この理由は次のように説明される。x 軸方向の渦度成分の渦(ないしは渦対)による sweeping は稲穂面で遮られ方向を転じる。しかし、稲穂面は平板とは異なり透過性であり、かつ凹凸がある。また、平板の場合のようにこの位置に強い streak 構造も作らない。従って、強い bursting は発生しない。

6. その他の検討

(a) Shear Flow とはどう違うのか: 剪断流の乱流へ遷移過程は、Brown & Roshko 以来多くの研究がなされている。例えば、Ducros, et al.(木田, 柳瀬(朝倉))の数値シミュレーションによる 3D Graphics にみられる構造は穂波流れの本シミュレーションの場合と比較しうる。しかし、遷移過程の後半を示す Figs.3-5 のようなものは見いだせなかった。これは普通の shear flow では流速分布の剪断形が維持できないためであろう。

(b) 実測。観測との比較: 本シミュレーションによる穂波(canopy surface, 植生面)の波のコンター図を Fig.6(a),(b)に示す。「穂波」と言うと、海の波のように進行方向に直角に延びる峰を持つ波を考えてしまう。しかし、ある程度風の強い日に高所から辛抱強く稲田を見ていると、確かに一陣の風によって起こされる穂波ははじめは風に直角方向の峰をもっているが、その穂波をずっと目で追って行くとやがて本シミュレーションで見たようにストリーク状やランダムパッチ状に崩れてしまう。この二つの型の穂波は米谷(1995)による口絵写真でも示されている。

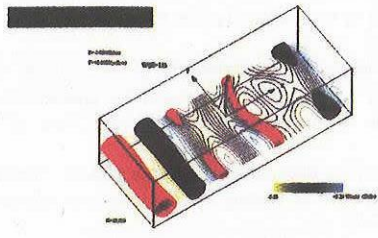


Fig.1(a): Equi-pressure surface.
N=20,000.

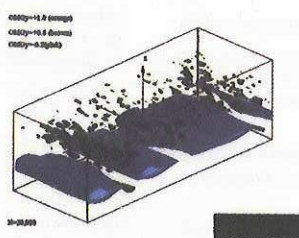


Fig.1(b): Equi-vorticity (ω_y).
N=20,000.

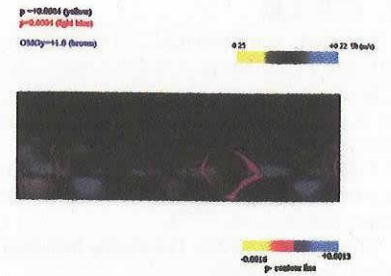


Fig.1(c): Distribution of P, ω_y and U, N=20,000.



Fig.2(a): Deformation of equi-pressure and equi-vorticity zone. Birth of (+&-) ω_x . N=20,000

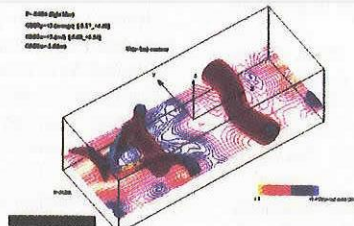


Fig.2(b): N=24,000.

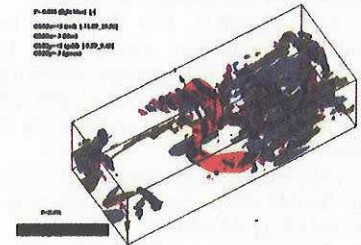


Fig.2(c): N=30,000

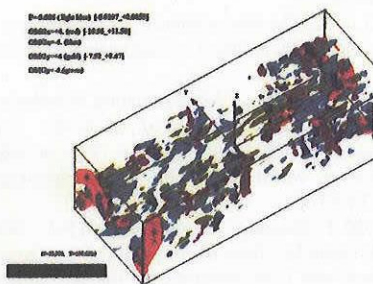


Fig.3(a): Distribution of ω_x and pressure. N=220,000.

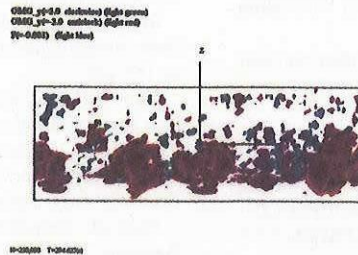


Fig.3(b): Distribution of ω_y and Pressure. N=220,000.

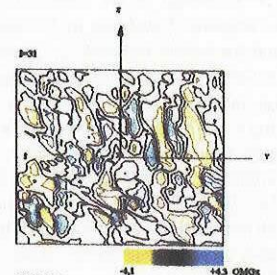


Fig.4: Contour of ω_x in (y-z) plane. N=220,000.

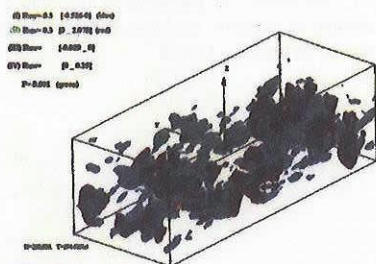


Fig.5: Four quadrant classification of Reynolds stress R_{uw} . Sweeping motion (quadrant II) is prevailing. N=220,000.



Fig.6(a): Contour of equi-deflection of deformable plant field at the initial stage, N= 20,000.

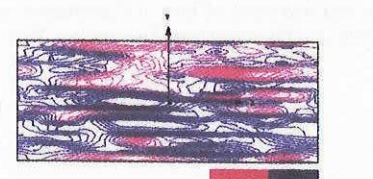


Fig.6(b): Contour of canopy surface depression. N=220,000.

7. 参考文献

- . Brown, G.L. and Roshko, A.: 1974, On density effects and large structure in turbulent mixing layers, *J. of Fluid Mech.*, vol. 64, 775
- . Brunet, Y., Finnigan, J.J. and Raupach, M.R.: 1994, A wind tunnel study of air flow in waving wheat: Single-point velocity statistics, *Boundary-Layer Meteorol.*, 70, 95-132.
- . Collineau, S. and Brunet, V.: 1993, Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy Part II: Time-scales and conditional averages, *Boundary-Layer Meteorol.*, 66, 49-77.
- . Dimotakis, P.E.: 2000, The mixing transition in turbulent flows, *J. of Fluid Mech.*, vol. 409, 69-98
- . Finnigan, J. J.: 1979a, Turbulence in waving wheat, I Mean statistics and Honami, *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 16, 181-211.
- . Finnigan, J.J. and Shaw, R.H.: 2000, A wind-tunnel study of airflow in waving wheat: An EOF analysis of the structure of the large-eddy motion, *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 96, 211.
- . Fitzmaurice, L., Shaw, R.H., Paw U, K.T. and Patton, E.D.: 2004, Three-dimensional scalar microfront systems in a large-eddy simulation of vegetation canopy flow, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 12, 107-127
- . Gao, W., Shaw, R.H. and Paw U, K.T.: 1989, Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, *Boundary-Layer Meteorol.*, 47, 347-377
- . Hino, M.: 1998, Interaction between canopy layer flow and large amplitude bending of flexible plant, *Proc. 12th Symposium on CFD, JSCFD*, E4-1, 403-404, (and CD-ROM edition)
- . Hino, M.: 2000a, Numerical simulation of waving plant -Honami-, Abstract of NAL (National Aero-Space Science Laboratory) International Workshop on Prediction of Laminar-Turbulent Transition in Boundary Layers, p30.
- . Hino, M.: 2000 b, Numerical simulation of waving plant-Honami-, *Proceedings of the International Workshop on "Prediction of Laminar-Turbulent Transition in Boundary Layers"*, (Special Publication of National Aerospace Laboratory, SP-48T, 81-82)
- . Hino, M.: 2000 c, Studies on the mechanism of 'honami' (plant waving) generation and the exchange processes of matter and energy caused by it, considering a large deflection of plant stalk, Final Report on Research Project, Grant-in Aid for Scientific Research (C), Project Number 10650513, Ministry of Education, Science and Culture
- . Hino, M.: 2001, Turbulence structure of canopy flow effected by waving plant, 15th Symposium on Numerical Fluid Dynamics, Jpn. Soc. CFD, C03-4, [Abstract of 15th CFD Symp., p.68, and Proc. of 15th CFD Symp., CD-ROM edition]
- . Ho, C.M. and Huerre, P.: 1984, Perturbed free shear layers, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, vol. 16, 365-424.
- . Hussain, A.K.M.F. and Zaman, K.B.M.Q.: 1985, An experimental study of organized motions in the turbulent plane shear layer, *J. of Fluid Mech.*, vol. 159, pp. 85-104.
- . Ikeda, S. and Ohta, K.: 1992, Generation of honami over flexible vegetation, Proc of the 24th Symposium on Turbulence, Jpn Soc Fluid Mech., 245-252.
- . Ikeda, S., Yamada, T. and Sugimoto, T.: 1998, An observation on turbulent flow and transports of heat and substances at reed field, *J. of Hydraulic, Coastal and Environmental Engineering*, Proc. JSCE, no. 593, II-43, 79-91.
- . Ikeda, S., Yamada, T. and Toda, Y.: 1999, 2-D Large-Eddy Simulation on turbulent flow and honami in and above flexible plant canopy, *Proc. Jpn. Soc. Civil Eng.*, no. 621/II-47, 55-63.
- . Inoue, E.: 1955, Studies on the phenomena of waving plants ("HONAMI") caused by wind, Part I. Mechanism and characteristics of waving plants phenomena, *J. Agricultural Meteorol., Jpn Soc. of Agric. Meteorol.*, vol. 11, 18-22.
- . Inoue, E.: 1955, Studies of the phenomena of waving plants ("honami") caused by wind, Part 2 Spectra of waving plants and plants vibration, *J. Agric. Meteorol. Jpn.*, 11, 87-89
- . Inoue, E.: 1963, On the turbulent structure of air flow within crop canopies, *J. Met. Soc. Jpn.*, vol. 41, 371-326
- . Jeong, J., Grinstein, F.F., Hussain, F. & Albanis 1993, Eduction of coherent structures in a numerically simulated plane wake, *Eddy Structure Identification in Free Turbulent Shear Flows*, Bonnet, J.P. and Glauser, M.N. (editors), Kluwer Academic Publishers, 65-75.
- . Kanda, M. and Hino, M.: 1994, Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using large eddy simulation, *Boundary-layer Meteorol.*, vol. 68, 237-257.
- . Lasheras, J.C. and Choi, H.: 1988, Three-dimensional instability of a plane free shear layer: an experimental study of the formation and evolution of streamwise vortices, *J. Fluid Mech.*, 189, 53-86.
- . Maitani, T.: 1979, An observational study of wind-induced waving of plants, *Boundary-Layer Meteorol.*, vol. 16, 49-65.
- . Maitani, T.: 1995, Study on honami (waving plant) and turbulent transport above and within plant canopy, Report on Scientific Aids, (C), Ministry of Education, no. 05640477.
- . Maitani, T.: 1997, Measurements of fluctuations of turbulent fluxes, surface temperature and variation of a rice plant in a paddy, *J. Agric. Meteorol.*, 52(5), 437-440.
- . Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y.: 1996, Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies. The mixing-layer analogy, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 78, 351-382
- . Rogers, M.M. and Moser, R.D.: 1992, The three-dimensional evolution of a plane mixing layers: the Kelvin-Helmholtz rollup, *J. of Fluid Mech.*, vol. 243, pp. 183-226.
- . Shaw, R.H. and Schumann, U.: 1992, Large-Eddy Simulation of turbulent flow above and within a forest, *Boundary-Layer Meteorol.*, 61, 47-64
- . Shaw, R.H., Brunet, Y., Finnigan, J.J. and Raupach, M.R.: 1995, A wind tunnel study of air flow in waving wheat: Two-point velocity statistics, *Boundary-Layer Meteorol.*, 76, 349-376.
- . Su, H.-B., Shaw, R.H., Paw U, K.T., Moeng, C.-H. and Sullivan, P.P.: 1998, Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from large-eddy simulation and field observations, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 88, 363-397
- . Su, H.-B., Shaw, R.H. and Paw U, K.T.: 2000, Two-point correlation analysis of neutrally stratified flow within and above a forest from large-eddy simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 94, 423-460
- . Watanabe, I.: 2004, Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies, *Boundary-layer Meteorol.*, vol. 112, 307-341.
- . Yoshida, Y. and Uochi, S.: 1993, Discussion on the stability increase of direct numerical integration in nonlinear dynamic analysis, Proc of 17-th Symposium on Numerical Analysis of Structures, 525-53.