<C03-4>

振動する稲穂の波と植生層流れの乱流構造

Turbulence Structure of Canopy Flow Effected by Waving Plant

日野幹雄,中央大学総合政策学部,八王子市東中野742-1

Mikio HINO, Chuo Univ., Faculty of Policy Studies, 742-1 Higashi-Nakano, Hachioji-Shi, Tokyo, 192-0393

<Abstract> The canopy flow turbulence has been modeled extending the LES concept to a canopy flow through waving plant layer. Waving plant (rice or wheat) has been simulated by arrays of vertical elastic rods. Spectral and correlation (auto- and cross-) analysises show that the turbulence is strongly affected by the waving motion of plant. But, the shear-layer instability mechanism of 'honami' generation could contribute only at the initial stage of turbulence generation. Computer graphics representation elucidates a double-decked large-eddy-structure of the canopy flow, composed of a boundary layer type longitudinal slanted vortices and a lateral row of shear-flow-instability type vortices.

1.序

目的: 穂波現象は,陸面過程において大気層と植生層間 の運動量や物質の交換(すなわち,CO2の吸収または放出な ど)に関連する問題である.また,穂波の発生のメカニズム自体 についても,そして穂波と大気流との乱流構造についても, フィールドでの測定が困難なこともあり,解明さるべき点が多い. 本論文ではこれを数値シミュレーションにより明らかにしようとした. 穂波と風波:風による水の波-風波-の発生メカニズムにつ

いては, Miles(1957) による理論(流体力学的不安定説) の発表以来,様々な検証実験・実測,数値シミュレーションが行われ ており,風波に関するわれわれの理解は十分にすすんでいる

と考えられる(Belcher and Hunt, 1993)

 一方 ⁽¹⁸⁾ 現象は,井上(栄一)(1955)⁽¹⁸⁾により恐らく 最初に研究対象として取り上げられ,'honamiの名称と共に研 究者の注目を引くようになった.以来,米谷(1979)⁽²⁵⁾ や
Finnigan(1979)⁽⁴⁾,その他の多くの研究(日野⁽⁸⁾⁻⁽¹⁴⁾,神 田他 1993,4⁽²²⁾池田他 1992 1999⁽¹⁶¹¹⁷⁾,他に(6),(20),(27) - (32),(34) - (36))があるものの,著者には未だ全貌が見えな いような気がしてならない.

水の波の場合,水面の変形は水を媒質として四周に伝播す るのに対して,穂波の場合には稲の撓みはその稲の揺れに止 まり,伝播することはない.これが,同じ"波"ながら両者 のメカニズムが異なる理由である.

穂波の研究の難しさの理由の一つに,現場実測の難しさも ある.そこで,本論文では次のようないくつかの条件下に数 値シミュレーションを行い,穂波の発生メカニズムや乱流秩序構造の解明 を試みた.

2.数値シミュレーションの方法

2.1. 大気流: 大気流の数値シミュレーションには,単純な Smagorinsky - Schumann型のLES モデルを用いた.高次の LES モデルに依らなかったのは大気流のシミュレーションは, 次に述べる植生層流のシミュレーションと同程度の精度のモ デルで良いとの考えからである.

2.2. 植生層流の LES シミュレーション : 植生層内の大気流 は,流れの中に分布した多数の抵抗体による抵抗とエネルギー消 散を考慮した LES モデルによって記述した.植生の流れに対す る作用は,単位体積中の植生面積密度 LAD (leaf area density) によって表す.植生(稲や麦)のゆらぎと共に各計



(N=30400-220000, T=105.029-294.625)





算メッシュ内のLADおよび植生層の高さは刻々変化する.

Table.1 Cases of numerical experiments

		(x,y, <i>ː</i> 方向) 計算領域 (メッシュ)	乱れの seeding	計算領域	穂波 / 撓み	上面境界 その他の条
Case		24m × 6m × 4m (241 × 7 × 42) 12m × 12m × 4m (141 × 25 ×	N = 70,000	幅狭く長い領域	撓み	free slip
Case	a b	42)	N = 10,000	幅広く短い領域	揺れなし 撓み	free slip free slip
Case		Case に同じ	N = 70,000	Case に同じ	撓み	加速
Case		Case に同じ	N = 70,000	Case に同じ	撓み	減速加速
Case		Case に同じ	N = 70,000	Case に同じ	撓み	上粗面

2.3. 植生(稲や麦)の撓み: 植生層は稲や麦より成るもの とし,それらはx-,y-方向にそれぞれDhX=0.1m DhY=0.2m の間隔で並んだ高さh=1mの弾性棒120×25本で模擬し, それぞれの弾性棒の流体力による撓みの形を各時間ステップご とに一本ずつ計算し,最後に刻み時間ごとの各計算メッシュ内の LADの値を求めた.植生の撓みは弾性棒ごとに求めたが,棒 ごとのwakeは計算格子内の現象であり,LESの考え方から してその計算は無意味でありのみならず, メモリーや計算時間の 上からも行っていない.

2.4. 基本方程式の式形については,これまで幾度も掲げたの

で,例えば文献 (日野 1998^{、®)}, Hino 2000⁽¹⁴⁾など) を参 考にされたい.

3. シミュレーションの条件

シミュレーションの条件の一覧を表-1に示す.

4.結果

層流状態の計算は、時間刻み $t = 0.01 \sec 0$ 差分計算で時 間 π_{yJ} [°] N = 10,000 まで行い、N = 10,000 において、一度だ け「乱れの種」を播いて、以後時間間隔を $t = 0.001 \sec c$ 細 かくした計算を N = 220,000(撓みあり N=320,000 撓み拘束) まで続けた.この時まず初めに shear 不安定メカul Aによる渦 列が発生・発達し、やがて流れは乱流化する.

以下の 4.1 ~ 4.4 に示す図はケース IIa,b に関するものである. 4.1. 平均風速・乱れ・レイノルズ応力の鉛直プロファイル

乱流化後の計算時間刻み幅 t=0.001sec,計算ステッフ[°]N = 10,000 ~ 220,000(320,000)の区間について流速の乱れの変 化が定常化した区間(N=30,400 ~ 220,000(320,000);T=105.0 - 294.6sec)についての平均風速・乱れ・レイノルス[°]応力の鉛直分 布フ[°] ロファイルを Figs. 1, 2, 3 に示す.

模擬稲に揺れを許さない場合と揺れを許す場合では,後者の平均風速がかなり大きくなっている.

これに対し、レイルは、応力の分布はキャル。一層上縁までは両者 の分布は一致している.稲の揺れを許さない場合ではレイルは、 応力はそれ以下の高さで減少する.これはこれまでに他の研 究者によるキャル。一層流れの場合と同じである.

しかしこれに反し,稲が揺れる場合では,レイノルスⁱ応力は揺 れのない場合のキャノヒ[°]-層の上縁以下更に 20cm の深さにまで 増加し,それ以後減少している.これは,揺れにより稲の平 均的な高さが低くなり,また稲の揺れのために乱流混合が促 進されて平均高さの位置までレイノルスⁱ応力が増加するためと考 えられる.

計算領域の上下流端間の平均圧力差一定の条件のもとであ るにもかかわらず,大気層下面の剪断応力 (= - +) が増 加し,風速(そして風量)は増加している.この点は,粗い礫 河床(つまり,本研究のキャノピー層に対応する厚いporous media 層が存在する流れ)において流量が増え,河床抵抗が減少する 現象(Kennedy, 1986⁽²⁴⁾,山田 1987⁽³⁶⁾)との類似が見ら れる.

4.2. 流速変動と稲の撓みの時系列



Fig.3 Vertical distribution of Reynolds stress (N=30400-220000, T=105.029-294.625)



流速の x-方向成分の変動 U(t)と稲穂の先端の撓み Xh(t)の 時系列を Figs. 4.5(穂波の初期)および 6(全体), 7(拡大)に示す.

風速の変化が細かい(周期の短い)変動を伴うのに反し,稲 の撓みにはそれがない.また,稲の撓みの位相が風速の変化 に遅れていることも示される.

稲の撓み変動の時系列を Fig. 8(全体), その一部の区間を拡 大したものを Fig. 9 に示す.

これらの特徴は,以下のデータ解析においてより明確に示される.

4.3. スペクトル

穂波の解析は,本論文ではスペクトルおよび相関解析によ

り行った.wavelet による穂波の解析は論文(日野 1999) (12) で行ったのでここでは省略する.

流速変動のエネルギースペクトル: 地面より様々な高さの 予め指定した 23 箇所の地点の風速変動を T=0.02(=20* t)(sec)ごとにサンプルした長時間ステップの計算結果が file に記録

されている.これらから一部の区間(データ数 Nfft=1024)を 抜き出して FFT によるスペクトル解析を行った.乱れのエネ ルギーの分布は, Fig. 10(稲の撓みのなし)および Fig. 11(稲の 揺れあり)に示す. 稲の撓みのなし, ありの場合を比較すると, 高い位置(z=3.0m)での風速変動のエネルギー・スペクトルの逓減の様 子は両者は同じであるが,低い位置(z=1.0m,z=0.1m)では 高周波数域のエネルギー・レベルの逓減は稲が揺れる場合に少なく なっている.

稲の撓みのエネルギースペクトル: 稲の揺れのスペクトルは, Fig. 11 の実線で示すように高い周波数域で変動のレベルは風 速スペクトルと同形で逓減している.また,低い周波数域で揺れ の卓越周期を示す明確なピークをもつわけではない.

クロス・スペクトル : z = 1.0(m)の風速 Uと z = 3.0(m), z=0.1(m)の風速および同じ鉛直線上の稲の撓み(Xh)とのク ロス・スペクトルを Fig. 12 に示す.

4.4. 大気流・植生層流内の乱れの時空相関・相互相関 風速変動の時空相互相関: キャル[®]-層直上点(Z=1.0m)とそ の鉛直線上の各点における x 方向速度成分の時空間相互相関 を, Fig. 13a, Fig. 14a(揺れなし), Fig. 13b, Fig. 14b(穂波あ りの場合) について示す. 穂波に揺れる場合 Fig.13b, 14b に 相関の高い範囲が広がっている.これは同時に Fig.3 に示し た運動量の交換(- ++++・)が増加していることに対応している.

穂の撓みの時空相互相関(穂波の伝播): 計算領域中央風下 方向の 12 点においてキャノピー上縁の穂の先端部の撓みを長時 間(N=10,000~220,000(穂波あり))にわたって記録した.その 時空相関を計算した結果が Fig. 15 である.

また,風下方向に並ぶ12点の撓みの時系列を,縦軸の原点 を上下方向にずらして作図したのが Fig. 16 である.

風と稲の揺れとの相互相関: 稲の揺れを許す場合について, 揺れの変位 Xh(zh=1.0m)と各高さ(z)における x-方向の風速 との相互相関を Fig.17 に示す. キャパ - 層直上の z = 1.0m の 風速変動と稲先端部の撓み Xh には強い相関があり,しかも Lag>0となっている.これは,稲の揺れが風速変動に起因 することを示している.

逆に,風速の乱れはもちろんキャノピー層との相互作用を受け るはずである.境界層乱流の秩序構造に伴うインラッシュ型の変動 あるいは剪断乱流の longitudinal vortices 型の変動との関連 を想定して,稲の撓み Xhと風速変動 U,wおよび(-Uw)の 時系列とを比較した.しかし, Fig.18(Xh~(-Uw))にみら れるようにこの関係は明確ではない.

4.5. 植生層乱流の秩序構造

穂波乱流の二重構造性:穂波層流の乱流の構造((ケース Iの 場合の)乱れの速度変化,圧力変動の等値図)を Fig.19a(N=220,000), b(N=546,000)に示す.平板上の境界層 流場と類似の流下方向にやや傾いて並ぶ大規模構造と、流れ の横断方向に軸をもつ渦列の(残存的であろうか)構造の共存 場となっている.

5. その他の二, 三の検討

以下にケース I~V すべてのケースから得られた計算結果につい て検討する(ケース Ⅲ~V 関連の図は省略).

穂波と剪断流不安定メカニズム(Shear flow instability mechanism)についての検討: 穂波の発生メカニズムに関する魅力的な ⁽¹⁶⁾による shear instability theory 説の一つに 池田他(1992)

(15) がある.すなわち, キャノピー流の流 (Ho & Huerre 1984) 速分布はキャノピーより上層では対数分布則に従い, キャノピー層内 では exponential 型で変化し,その流速分布は変曲点をもつ ため, "Rayleigh の変曲点不安定理論(機構)"により, 微小攪 乱が増幅し渦列が発生し、それに伴う風速の周期変動により 穂波が発生するというものである.

数値実験においては,層流状態にあるキャパ゚-層流れに一度



Fig.5 Time series of U & Xh at the initial stage (h21KKK, NS=1-2000, N=10020-50000)



Fig.6 U (velocity)&Xh(grass bending oscillation) (h21KKK) N=10020-220000 (NS=1-10500)



Fig.7 Time series of Xh (x=1m) and U (x=6m), z=1m) (h21KKK)

極く小さな「乱れの種」を与えると、これが"変曲点不安定"

により,徐々に規則的な渦列が形成されるが,やがて渦列の 規則性が崩れ,乱流化することが示されている(神田・稲垣・ 日野 1993⁽²²⁾,Kanda and Hino 1994⁽²³⁾,日野 2000⁽¹³⁾).

本計算の場合の初段階における高さ z = 1.0(m)での流速の 鉛直成分 w と圧力変動 p の時系列を示す(Fig.20).(稲の揺れ のあるなしに関わらず同一の挙動を示すので,揺れなしの場 合のみを示す)

乱流剪断流における変曲点不安定はあるか?: 問題は,流 れが完全に乱流化した場合にも,この'変曲点不安定のメカェス ム'が働くか否かである.凹曲面上の流れに発達するゲルトラ ー渦については,凹曲面上の流れが乱流であっても不安定幼

ニズムが働き, ゲルラー渦が形成されることが谷(1962)⁽³³⁾によ リ示されており; 加マン渦についても大洋中の孤島の孤立峯の 背後に加マン渦列が生じていることがリモセン写真により知られて いる.

しかし,穂波については一度キャノピー層内外の流れが乱流化 すると,再び規則的で明確な渦列の発生は本シミュレーションでは認 められなかった.4.5.で触れたように,渦列の存在を示唆す る水平横断方向軸をもつ低圧部が乱流状態でも形成されては いるが.渦列が形成されるか,否かに関するゲルトラー渦と変曲 点不安定(穂波)との差違は,不安定の要因の強さ(ゲルトラー渦の 場合には,遠心力)の違いによるものであろう.

加速場のケース: 流れの加速時には乱れは層流化することは良く知られている(例えば,振動流乱流(Hino 1983)⁽⁷⁾). そこで,乱流状態のキャノピー流れに急に加圧(- p/ xを大きく)して,剪断流不安定による規則的な配列の渦列が再び形成されるのではないかと期待して数値実験を行ったが予想通りにはならなかった(ケース III, IV).

穂波発生のガスト・アタック説について: 豊かに実った秋の田圃の稲穂が,風に揺れて穂波が田面を渡っていく映像を稀に TV で見ることがある.(残念ながら録画の準備をしていなくて,いつもシマッタと思う.)このような映像から見られる穂波はいかにも一陣の風(カ゚スト・アタック)によるようにみえる.

こうした映像からは強い撓みの穂波は,本数値実験で行ったようなキャパ゚ー層の流れに内在的なものではなく,外部からの強制によるようにみえる.

そこで,ガストをシミュレートするために,計算領域の上の境界 を固定粗面とする計算を行った.この粗面からは境界層型の パースティングがキャノピー層に対するガストとなり,予想通り稲穂は 大きく振動することが認められた(ケース V).

参考文献

(1)Belcher, S. E. and Hunt, J. C. R., Turbulent flow over hills and waves, Ann. Rev. Fluid Mech., 30, pp.507-537.

(2)Collineau, S. and Brunet, V., Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy Part I: Wavelet analysis, Boundary-Layer Meteorl., 65,(1993),pp.357-379. (3)Collineau, S. and Brunet, V., Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy Part II: Time-scales and conditional averages, Boundary-Layer Meteorl., 66, (1993),pp.49-77.

(4)Finnigan J. J., Turbulence in waving wheat, I. Mean statistics and Honami, Boundary-Layer Meteorl., 16, (1979), 181-211.

(5)Finnigan, J. J. and Shaw, R. H., A wind-tunnel study of airflow in waving wheat : An EOF analysis of the structure of the large-eddy motion, Boundary-Layer Meteorl. 96,(2000), pp.211-255.

(6)Gao, W., Shaw, R. H. and Paw U. K. T., Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy, Boundary-Layer Meteorology,



Fig.8 Grass bending oscillation (h21KKK) NS=1-10500, N=10020-22000



Fig.9 Grass bending (h21KKK) N=138100-220000



Fig.10 Spectrum of u-component grass : no-waving (h21KKK2, Nfft=1024, N=320,000)

47,(1989),pp.349-377.

(7) Hino, M., Kashiwayanagi, M., Nakayama, A. and Hara, T., Experiments on the turbulence statistics and the structure of a reciprocating oscillatory flow, J. Fluid Mech., 131,(1983), pp.363-400.

(8)日野幹雄、大変形を考慮した植生群と大気流との相関場,

第 12 回数値流体力学シンポジウム講演論文集,(1998), pp.403-404.

(9)日野幹雄, 葛生和人, 風に戦ぐ稲穂(穂波)の数値シミュレーション とアニメ表現, 第 14 回生研 NST シンポジウム講演論文集,東京大 学生産技術研究所, (1999a), pp.103-107.

(10)日野幹雄,大変形を考慮した植生境界層流の不安定化と 穂波発生機構に関する数値シミュレーション,水工学論文集,43, (1999b), pp.803-808.

(11)日野幹雄,大変形を考慮した穂波の数値シミュレーション(4),日 本流体力学会年会論文集,(1999c),pp.515-516.

(12)日野幹雄, 穂波とキャノピー・フローの数値シミュレーションとウェーブレット 解析, 第 13 回数値流体力学シンポジウム論文要旨集,(1999d), p.177.

(13)日野幹雄,植生の大変形弾性振動を考慮した穂波発生の メカニズムと物質・エネルギー交換過程の研究,平成10年度-11年 度科学研究費補助金(基礎研究(c)(2))研究成果報告書(課題番 号 10650513),(2000a).

(14) Hino,M.: Numerical simulation of waving plant -Honam - ,NAL International Workshop on Prediction of Laminar - Turbulent Transition in Boundary Layers, (2000b), p30.

(15) Ho, C. M. and Huerre, P., Perturbed free shear layers, Ann. Rev. Fluid Mech. 16,(1984), pp.365-424.

(16)池田駿介,太田賢一,長谷川洋,側岸部植生境界の周期 渦の発生機構,土木学会論文集,no.433/II-18,(1992), pp.47-54.

(17)池田駿介,山田知裕,戸田祐嗣,2次元LESを用いた可 撓性を有する植生層内外の乱流構造と穂波現象に関する研究, 土木学会論文集,No.621/II-47,(1999),pp.53-63.

(18)井上栄一,穂波の研究,1 穂波の機構と特性,農業気象, 111 号,(1955),pp.18-22.

(19)Inoue, E., On the turbulent structure of air flow within crop canopies., J. Met. Soc. Jpn., vol.41,(1963), pp.371-326.

(20)Inoue, K., Numerical experiments of carbon dioxide environment and plant photosynthesis in a greenhouse with forced ventilation, J. Agr. Met.(農業気象),37,(1981), pp.91-101.

(21)神田学,大気 - 植生 - 土壌および水面の相互作用を考慮した水文気象に関する研究,東工大・博士論文,(1992).

(22)神田学,稲垣聡,日野幹雄,植生-大気境界面における 大規模渦構造と運動量交換に関する LES モデルによる検討,土 木学会論文集, no.461, II-22, (1993), pp.39-48.

(23)Kanda, M. and Hino, M., Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using Large Eddy simulation, Boundary-layer Meteorl, 68, (1994), pp. 237-257.

(24)Kennedy, J. F., Hsu, S. T., et al, Proc. ASCE, 99, no.HY4, (1973).

(25)Maitani, T., An observational study of wind-induced waving of plants, Boundary-Layer Meteorl., 16,(1979), pp.49-65.

(26)Miles, J. W., On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., 3,(1957), pp.185-204.

(27)Raupach, M. R., Finnigan, J. J. and Brunet, Y., Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: The mixing-layer analogy, Boundary-Layer Meteorology, 78,(1996),351-382.

(28)Raupach, S. and Thom, A. S., Turbulence in and above plant canopies, Ann. Rev. Fluid Mech., 13, (1981), pp.97-129.

(29)Shaw, R. H. and Schumann, U., Large-Eddy Simulation of turbulent flow above and within a forest, Bound.-Layer Meteoyl, 61,(1992), pp.47-64.





NI_1901AA 99AAAA

(30)Shaw, R. H., Tavangar, J. and Ward, D. P., Structure of the Reynolds stress in a canopy layer, J. Clim. Appl. Meteorol., 22,(1983), pp.1922-1931.



Fig.13a Cross-correlation diagram (h21KKK2, Nfft=1024)



Fig.13b Cross-correlation diagram (h21KKK, Nfft=1024)



Fig.14a Cross-correlation diagram (h21KKK2, Nfft=1024, Nmax=320,000)



Fig.15 Space-time correlation of Xh(x=6, t=0) and Xh(x, t+Lag)



Fig.17 Cross-correlation of U(1.0) and Xh (h21KKK, Nsample=1024, Time=220,000(sec))



Fig.14b Cross-correlation diagram (h21KKK, Nfft=1024, Nmax=220,000)



Fig.16 Time series of bend Xh at x (Ordinates are shifted upward by 0.05 for every 2m)



Fig.18 Xh(grass bend) and (-UW)



Fig.19a Double-decked turblence structure of canopy flow (N=220,000)

(31)Su, H.-B., Shaw, R. H. and Paw U, K. T., Two-point corre-lation analysis of neutrally stratified flow within and above a forest from Large-Eddy simulation, Bound.-Later Meteorol., 94, (2000), pp.423-460.

(32)Su, H.-B., Shaw, R. H., Paw U, K. T., Moeng, C.-H. and Sullivan, P. P., Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from Large-Eddy simulation and field observations, Bound-Layer Meteorol, 88, (1998), pp.363-397.

(33)Tani, I., Production of longitudinal vortices in the boundary layer along a concave wall, J. Geoph. Res., 67,(1962), pp.3075-3080.

(34) 辻本哲郎,北村志紀,中川博次,植生層構造の不安定現 象としての穂波の形成機構,水工学論文集,39,(1995), pp.519-524.

(35)Wilson, N. R. and Shaw, R. H., A higher order closure model for canopy flow, J. Appl. Meteorol., 16, (1977), pp.1197 -1205.

(36)Wilson, J. D., A second-order closure model for flow through vegetation, Boundary-Layer Meteorol, 42,(1988), pp.371-392.

(37)山田正,吉川秀夫,中沢均,川端規之,浸透性の壁面を 有する流れの基礎的研究,第 23 回水理講演会論文集,(1979), pp.9-14.



Fig.19b Double-decked turblence structure of canopy flow (N=546,000)



Fig.20 Temporal variation of P & W at the initial stage (h21KKK, NS=1-500)