

植生—大気境界面での運動量輸送に関するLESモデルによる検討

Numerical Experiment on the Momentum Transfer at the Air-Plant Interface

日野 幹雄*・神田 学**・稲垣 聡***

By Mikio Hino, Manabu Kanda and Satoshi Inagaki

Numerical experiment with LES model which includes the effect of plants has been performed to investigate the mechanism of momentum transfer between plants and surrounding air.

Following results are obtained.

- 1) Vortex structures are generated a little above the inflection point of the profile of mean velocity.
- 2) Vortex lines at the air-plant interface activate the vertical momentum transfer.

Keywords : LES, plant, momentum transfer, vortices, NEO SPAM

1. はじめに

植生とそれをとりまく大気との間には顕熱、潜熱等の熱輸送や水蒸気・CO₂等様々な物質のやりとりがなされている。この物質交換の機構は、界面近傍の乱流構造（池田ら¹⁾の指摘する大規模渦構造）と密接な関係を持つと思われるが、その詳細は明らかにされていない。本研究では乱流モデルを用いて植被面上に起こる流れの構造とそれに伴う大気との運動量交換について解析を行った。現在一般に使用される乱流モデルにはk-εモデル、LES等があるが、我々はその汎用性と計算時間の効率性から一貫してLESモデルを活用してきた。今回、このLESを用いた物理方程式系を植生層に適用出来るよう拡張し、大気—植生間の相互作用について現象の説明を試みた。

「穂波」に関する研究は農業気象学者井上栄一²⁾によって着手され、その後原園ら³⁾によっておもに観測・実態把握を中心に研究が行われてきた。池田ら¹⁾は主流（大気や水）—植生境界において平均風速プロファイルが変曲点を持つことに着目し、安定解析的手法により外部パラメーター（植生密度・外部流速など）からそこで発生する渦の周期を理論的に求めている。

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科
*** 学生会員 東京工業大学大学院修士課程 理工学研究科土木工学専攻

本研究では我々のモデルを使用して風速場を求めるとともに、植被面上での乱れの発達を追跡し、植生境界面上の乱れの大規模構造が植生と大気との運動量交換に果たす役割についてシミュレーションを行った。

2. 計算の概要

2-1 モデルの説明

スキームは神田・日野⁴⁾と基本的に同じLESを用いる。但し、今回は奥行き方向の現象を均一として2次元計算を行った。

モデルの詳細は文献を参照されたいが、前述のように今回は物理方程式中に植物の効果を取り入れる。サブグリッド内の質量の保存を考える時、葉が占める実質的な体積は無視し得るものとして抵抗の影響だけを考えたと運動方程式は次のようになる⁵⁾。

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} - \underbrace{c_m \cdot s \cdot U^2 \frac{u}{|U|}}_{\text{抵抗項}} \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} - \underbrace{c_m \cdot s \cdot U^2 \frac{v}{|U|}}_{\text{抵抗項}} \quad (2)$$

波線部が植生による抵抗の項を表す。 c_m : 葉の抵抗係数、 s : 葉面積密度、 U : 風速
この式及び連続の方程式から得られる圧力の Poisson 型方程式は、

$$\nabla^2 p = \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \left[-u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \rho \left[\underbrace{c_m \cdot s \cdot U^2 \frac{u_i}{|U|}}_{\text{抵抗項}} \right] \quad (3)$$

また、(1)、(2)式からレイノルズ応力項について展開して行くと、次の乱流エネルギーの予報式を得る。

$$\frac{DE}{Dt} = -R_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_m \frac{\partial E}{\partial x_j} \right] - \frac{C_e}{L} E^{3/2} - \underbrace{c_m \cdot s \cdot (2E) \cdot |U|}_{\text{抵抗項}} \quad (4)$$

$$\text{但し、} \quad R_{ij} = K_m \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} E$$

$$K_m = C_m L E^{1/2} \quad L = (dx dy dz)^{1/3}$$

R_{ij} : SGSレイノルズ応力、 K_m : 渦粘性係数、 E : SGS乱流エネルギー、
 dx , dy , dz : 格子間隔、 C_m , C_e : LES定数

2-2 計算内容

計算の諸元は表-1に示す通りである。側面境界には、平行平板間の乱流（例えば Deardorff⁶⁾）や自由せん断流（例えば Lasherasら⁷⁾）できわめて一般的に用いられる周期境界条件を用いる。この条件は擾乱が水平方向に発達できる最大波数を与えることに相当している。池田らの理論によると、今回の諸元の時稔波の周期 T は約2.8秒であり、植被面付近での風速を考慮すると波長は約5(m)になる。これを参考に計算の制約から1周期分だけととして、計算領域を $5m \times 2m$ (50×40 メッシュ) に設定した。また、メッシュ間隔は横方向に10(cm)、鉛直方向に約5(cm) (不等間隔) であり、時間刻みは1ステップ0.02秒とした。

表-1 計算諸元

植生高さ	1.0(m)
基準風速	5.0(m/s)
抵抗係数	0.5
葉面積密度	1.0(m ² /m ³)

上下の境界条件は、上端 u : 2回微分ゼロ、 v : mass保存、下端 u : 対数則（壁法則）に接続 v

: mass 保存とする。今回大気の安定度は中立とし、成層の影響は考慮していない。境界層が十分に発達した段階で、植被面上流速の1%の大きさの白色ノイズを領域全体に与え、乱れの発達を追った。

3. 計算結果

3-1 風速及び乱れの平均分布

図-1に風速、 u の乱れの流下方向平均、レイノルズ応力の鉛直分布をまとめて示す。

植生と大気境界(植被面)の周辺で乱れは発達していき、乱れのプロファイル植被面の近傍で極大値を持つ三角形分布になる。植生の存在する流れ場では植生内部と外部の流速に大きな差ができ、風速プロファイルは植被面近傍で変曲点を持つ。流速が変曲点を持つことによる不安定性によってこの乱れが発達していったものと考えられる(池田¹⁾)。乱れの極大値をとる高さはこの変曲点をとる高さよりやや高い場所に生じている事が注目される。

3-2 乱れの発達と運動量交換

図-2(a)(b)に異なる時刻での渦度の分布を挙げる。乱れの初期段階では渦度は流下方向一様であり、シアの分布に対応して変曲点付近で強い渦層を形成している。時間の経過に伴い渦層は拡散すると同時に自己の不安定性によって全体が波打ち出してくる。図-3の乱流エネルギーの分布とあわせてこれが総波の様な乱れの構造に対応したものであると考えられる。図-4に流れのベクトル図を示すが、実験のときにカメラを移動させて撮る可視化写真のように、 u は植被面での平均値を差し引いた流速を示してみた。これを見ると、植被面上で一つの大きな渦を形造りながら波形を成している

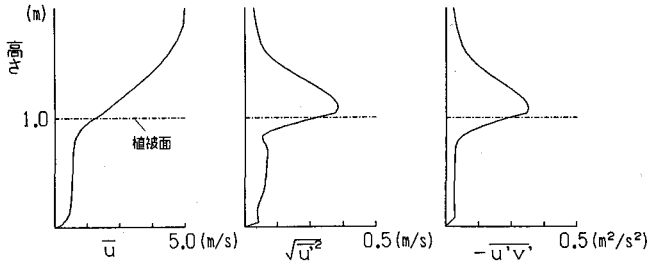


図-1 流速及び乱れの空間平均

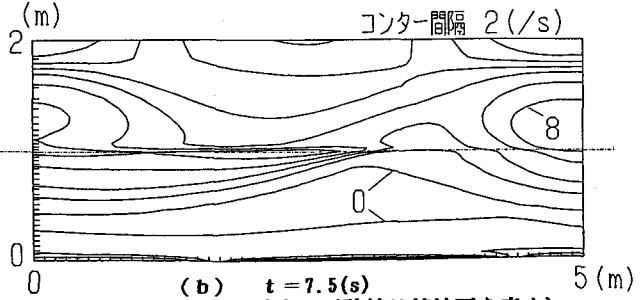
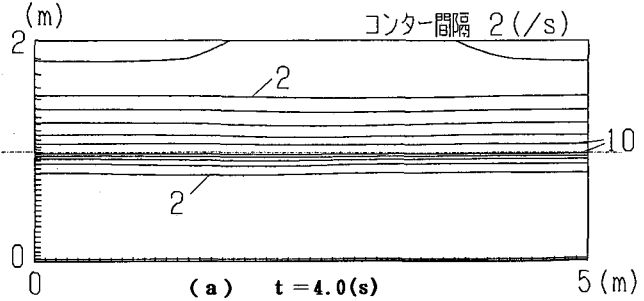


図-2 渦度の分布 (破線は植被面を表す)

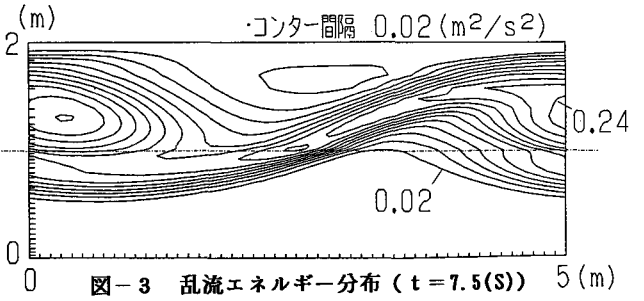


図-3 乱流エネルギー分布 (t = 7.5(s))

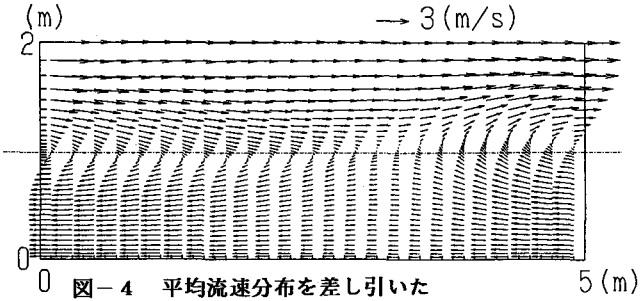


図-4 平均流速分布を差し引いた
流れのパターン (t = 7.5(s))

様子が分かる。穂波が発生する前と後で植生の作り出す摩擦速度 U_* と粗度長 z_0 を、平均風速プロファイルからMarquardt法により同定してみた⁸⁾。結果を表-2に示す。境界層の発達に加えて穂波の生成が風速プロファイルに変化を与え、運動量交換の促進に寄与していることが分かる。今回の計算においては、K-H不安定のように乱れの渦層がオーバーハングを起こしているわけではない。しかしながら渦層が波打つ事自体が運動量交換に貢献しているものと考えられる。

表-2 U_* 、 z_0 の同定結果

	U_* (m/s)	z_0 (m)
$t = 4.0$ (s)	0.88638	0.06970
$t = 7.5$ (s)	1.25748	0.2451

4. まとめ

- 1) LESモデルによる物理方程式中に植生の効果を導入し、現象のシュミレーションを行った。植被面上の乱れは風速プロファイルの変曲点よりやや高い位置において極大値をとるように発達する。
- 2) 各格子点での乱れの大きさを直接求めていることから渦度の分布、流れ場の可視化表示が可能になり、植生内と外部領域との運動量交換について穂波の影響を調べることが出来た。

謝辞 本研究は文部省科学研究費一般研究(B)課題番号03452207「植生の気候緩和効果に関する土・植・気圏を一体とした水文学的研究、研究代表者、日野幹雄」の補助を受けて行われたものである。ここに謝意を表する。また、本計算は池田駿介(東工大教授)の理論・実験的研究に強く感化されて始めたものであり、同教授の助言に厚く感謝する。

参考文献

- 1) 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，土木学会論文集に投稿中。
- 2) 井上栄一：穂波の研究 1. 穂波の機構と特性，農業気象 第11巻第1号，pp.18-22, 1966.
- 3) 原園芳信・村上智美・及川武久：気流変化と水稻およびアカマツ群落との相互作用 1. 植物群落構造の差異がフラックスや群落抵抗係数に及ぼす影響，筑波大学水理実験センター報告 No.14, pp.1-14, 1990.
- 4) 神田学・日野幹雄：大気-土壌系の相互作用に着目した対流性雲の発生・発達に関する3次元LESモデルによる検討，水工学論文集第35巻，pp.27-32, 1991.
- 5) 神田学・日野幹雄：大気-植生-土壌系モデル(NEO SPAM)による数値シミュレーション (2) 植生の気候緩和効果の数値実験，水文・水資源学会誌，vol.3, pp.37-46, 1990.
- 6) Deardorff: A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, J.Fluid.Mechanics, vol.41, pp.453-480, 1970.
- 7) Lasheras J.C. and Meiburg E.: On the Three-Dimensional Dynamics of Coherent Vortical Structures Forming in Free, Shear Flows, Turbulence and Coherent Structures, Kluwer Academic Publishers, pp.91-111, 1991.
- 8) 日野幹雄・神田学・土岐道夫：環境変化が植物蒸散および流出に及ぼす影響について，水工学論文集第36巻に投稿中。