

植生キャノピー乱流の RANS/LES ハイブリッドシミュレーション

飯塚 悟・近藤裕昭（産業技術総合研究所・環境管理技術研究部門）

1. 序

植生キャノピー乱流への LES (large-eddy simulation) の適用に関しては、これまでに多くの研究が行われている例 (例えば 1)~4)。植生キャノピー乱流解析の場合、LES においても RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) モデルにおいても、植生による遮風効果 (力学的影響) は運動方程式に抗力項を組み込むことで表現される。いわゆるキャノピーモデルである。しかし LES のキャノピーモデルの場合、一つ問題となるのは抗力係数の与え方である。RANS モデルのキャノピーモデルとは異なり、実験や実測で求められる平均値としての抗力係数をそのまま用いるのは問題があると考えられる一方で、与え方の明確な指針もない。

本研究ではこの問題を回避する一方策として、RANS/LES ハイブリッドモデルの導入を試みる。これはキャノピー層に RANS モデルを適用し、それよりも上層部に LES を適用するものである。また同時に、LES のキャノピーモデルの抗力係数の感度解析も行う。

2. 計算概要

2.1 計算対象

平板上に水平及び鉛直方向に一樣に植生が分布する場合の植生内外の流れ。計算領域は植生の高さを L として、 $10L(x_1) \times 6L(x_2) \times 4L(x_3)$ (x_1 : 主流方向、 x_2 : 主流横断方向、 x_3 : 鉛直方向)。

2.2 キャノピーモデル

運動方程式に抗力 $-C_d a u_i \sqrt{u_j^2}$ (C_d : 抗力係数、 a : 葉面積密度) を組み込むタイプ。本研究では植生の体積は考慮していない。

2.3 乱流モデル

(1) LES

LES の SGS (subgrid-scale) モデルは標準 Smagorinsky モデル (Smagorinsky 定数 C_S は 0.1)。

(2) RANS/LES ハイブリッドモデル

渦粘性モデルを用い、渦粘性係数

$$\nu_{SGS} = (C_S \ell)^2 \cdot (2S_{ij} S_{ij})^{1/2} \quad (S_{ij} \text{ は変形速度テンソル}) \quad (1)$$

中の長さスケール ℓ を以下のように変化させて使用。

$$\ell = \begin{cases} \kappa x_3 / C_S & (0 \leq x_3 \leq 0.9L) : \text{RANS} \\ \bar{\Delta} & (x_3 > 0.9L) : \text{LES} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 κ はカルマン定数 (= 0.4)、 $\bar{\Delta}$ はグリッドスケール。(2)式に示すように、RANS モデルとしては混合距離モデル、LES としては標準 Smagorinsky モデル ($C_S = 0.1$) を用いている。

2.4 計算ケース

表 1 に示す 4 ケース。LES の 3 ケースはキャノピーモデルの抗力係数の値のみを変化。葉面積密度 $a = 2/L$ は LAI

表 1 計算ケース

ケース名	C_d	a	乱流モデル
LES01	0.1	2/L	LES のみ
LES015	0.15	2/L	LES のみ
LES02	0.2	2/L	LES のみ
HYB02	0.2	2/L	ハイブリッド

(Leaf Area Index) = 2 に相当。

2.5 計算条件

計算格子は全てのケースで同じ。主流 (x_1) 及び主流横断 (x_2) 方向の計算格子は等間隔。鉛直 (x_3) 方向は $0 \leq x_3 \leq 1.5L$ の範囲は幅 0.05L の等間隔、それより上層は不等間隔の計算格子とした。格子分割数は $50(x_1) \times 30(x_2) \times 44(x_3)$ 。 x_1 、 x_2 方向は周期境界条件。上空境界は slip 壁条件、地表面境界は粗度長 (z_0) 型対数則 ($z_0 = 0.001L$)。流れは一定の圧力勾配を与えることにより駆動。空間スキームは 2 次精度中心差分、時間スキームは低容量型の 3 次精度 Runge-Kutta 法。アルゴリズムは SMAC 法、圧力解法は前処理付きの Bi-CGSTAB 法。

3. 計算結果

以下に示す計算結果は、時間平均及び水平方向 (x_1 及び x_2 方向) 平均した結果である ($\langle \cdot \rangle$ で表記)。また、図 1 ~ 図 6 において、横の実線はキャノピー上端 ($x_3/L = 1$)、横の点線は RANS/LES ハイブリッドモデルの切替位置 ($x_3/L = 0.9$) を示す。

3.1 RANS/LES ハイブリッドモデルの性状

(1) 渦粘性係数分布

図 1 に各ケースの渦粘性係数 $\langle \nu_{SGS} \rangle$ の鉛直 (x_3) 分布を示す。LES のみのケースは全てキャノピー内外で $\langle \nu_{SGS} \rangle$ が小さな値となっているのに対し、ハイブリッドモデルではキャノピー内部、即ち、RANS 領域において大きな渦粘性の値を示している。一方、ハイブリッドモデルの LES 領域 (キャノピー上層部) では LES のみのケースと同様の小さな $\langle \nu_{SGS} \rangle$ の値を示す。このような渦粘性の挙動は、チャンネル乱流 (平行平板間流) 解析における RANS/LES ハイブリッドモデルの結果 (例えば 5) と整合したものであり、ハイブリッドモデルとして自然な結果と考えられる。尚、ハイブリッドモデルの RANS 領域における渦粘性の最大値は LES 領域の 100 倍近くになっている。

(2) シアストレス分布

図 2、図 3 はそれぞれ、シアストレスの RS (resolved scale) 成分 $\langle \bar{u}_1 \bar{u}_3 \rangle$ 、SGS 成分 $\langle \tau_{13} \rangle$ ($= -\langle 2\nu_{SGS} S_{13} \rangle$) の鉛直 (x_3) 分布を示したものである。ハイブリッドモデルの結果は LES のみのケースに比べて RANS 領域 (キャノピー内部) で $\langle \bar{u}_1 \bar{u}_3 \rangle$ の絶対値が速やかに減少し (図 2)、逆に SGS

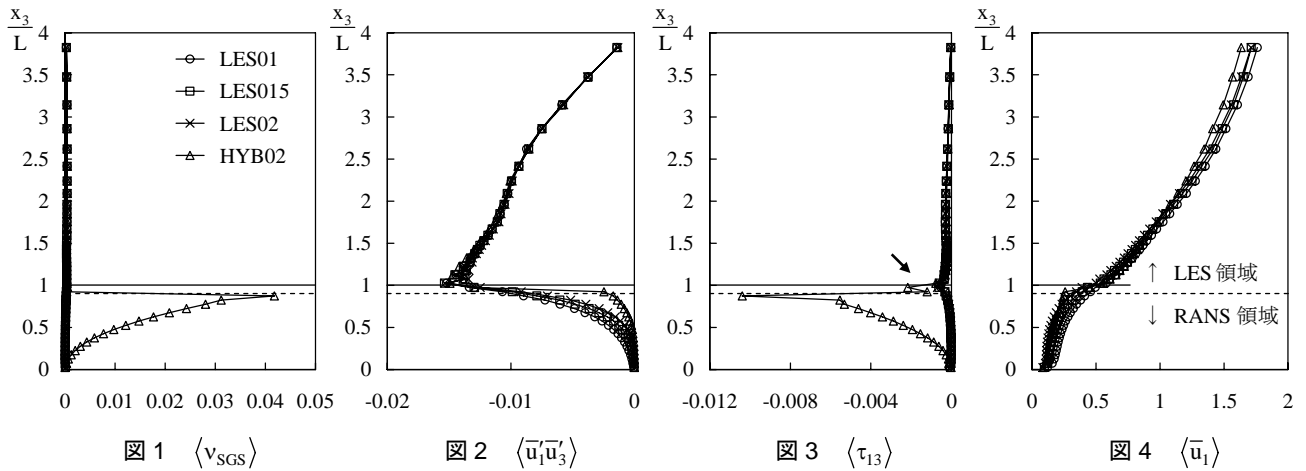


図1 $\langle v_{SGS} \rangle$

図2 $\langle \bar{u}_1 \bar{u}_3' \rangle$

図3 $\langle \tau_{13} \rangle$

図4 $\langle \bar{u}_1 \rangle$

成分 (モデル成分) $\langle \tau_{13} \rangle$ の絶対値は増大する (図3)。このようなシアストレス成分の挙動もハイブリッドモデルとしてごく自然な結果と考えられる。但しハイブリッドモデルの場合、切替位置直上の LES 領域において、LES のみの各ケースに比べて SGS 成分 $\langle \tau_{13} \rangle$ の絶対値を大きく評価している点に注意が必要である (図3中の \rightarrow 参照)。次に述べるように、これはハイブリッドモデルの速度場の予測精度の問題点に対応している。

(3) 速度分布

図4に各ケースの主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直 (x_3) 分布、図5にキャノピー内部 ($x_3/L \leq 1$) におけるハイブリッドモデルの $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布を示す。キャノピー上層部 (全てのケースで LES が適用) では、上層にいくにつれて各ケースでやや異なった値を示している (図4)。今回用いた計算条件ではハイブリッドモデルがキャノピー層から離れた上層部の速度を一番小さく評価している。

図5に示すキャノピー内部では、ハイブリッドモデルの結果は切替位置直上の LES 領域において急激に速度が増加している (図5中の点線で囲った部分を参照)。これは、前述した切替位置直上の LES 領域におけるシアストレスの SGS 成分 $\langle \tau_{13} \rangle$ の絶対値の過大評価と対応する。本研究で導入したハイブリッドモデルの LES の SGS モデルとしては渦粘性モデル (Smagorinsky モデル) を用いているため、シアストレスの SGS 成分の絶対値が過大評価されているということは速度勾配も過大評価されていることになると考えられる。このような切替位置付近での速度分布の不自然な段差は、チャンネル乱流解析を通じてこれまで多く指摘されている^{5),6)}点であり、ハイブリッドモデルの適用においてはこのような速度分布の不整合の解消が大きな課題となる。この点に関しては、今後、切替位置でのフィルタリングの導入⁵⁾など、さらなる検討を重ねていく予定である。

3.2 LES のキャノピーモデルにおける抗力係数の影響

図6は図5と同じキャノピー内部 ($x_3/L \leq 1$) における各ケースの主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直 (x_3) 分布を比較したものである。LES のみの各ケースを比較すると、キャノピーモデルの抗力係数 C_d の値が大きくなるほど抵抗が大きくなり、速度が減速している。ハイブリッドモデル (図

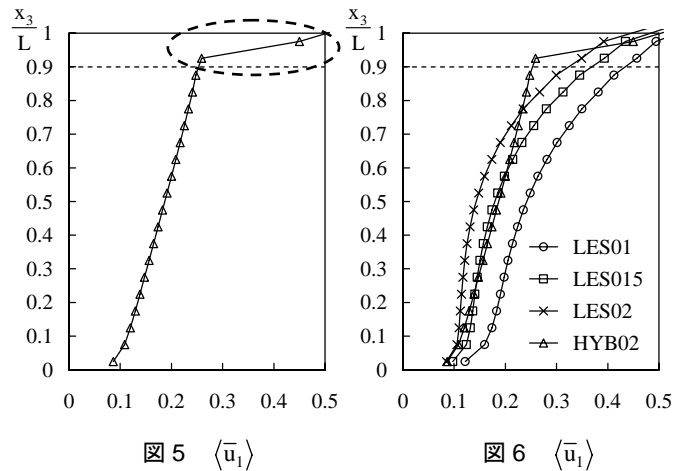


図5 $\langle \bar{u}_1 \rangle$

図6 $\langle \bar{u}_1 \rangle$

示している範囲では最上部2点を除き、RANS モデルが適用)の結果には $C_d = 0.15$ の LES の結果に近い。前述したように、本研究で用いた RANS/LES ハイブリッドモデルは速度分布の不整合の解消に大きな課題を残すものの、この結果を基に定性的に判断すると、LES のキャノピーモデルの抗力係数は、RANS モデルのキャノピーモデルで用いる平均値としての抗力係数の値よりも小さめに与える必要があると考えられる。

参考文献

- 1) Shaw, R. H. and Schumann, U., "Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest", *Boundary-Layer Meteorol.*, 61 (1992) pp.47-64.
- 2) Kanda, M. and Hino, M., "Organized structures in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation", *Boundary-Layer Meteorol.*, 68 (1994) pp.237-257.
- 3) Watanabe, T., "Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies", *Boundary-Layer Meteorol.*, 112 (2002) pp.307-341.
- 4) 平岡, "植生を有する流れ場の LES モデルの作成", 第21回生研 TSFD シンポジウム講演論文集 (2006) pp.7-14.
- 5) 半場, "RANS/LES ハイブリッドフィルターとチャンネル乱流への適用", 第22回生研 TSFD シンポジウム講演論文集 (2007) pp.47-52.
- 6) Nikitin, N. V., Nicoud, F., Wasistho, B., Squires, K. D. and Spalart, P. R., "An approach to wall modeling in large-eddy simulations", *Phys. Fluids*, 12 (2000) pp.1629-1632.