

安定化有限要素法による植生を考慮した風況解析

中央大学大学院 学生員 ○板橋 翔
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

都市域においてヒートアイランド現象、及びそれと連動して起こる大気汚染や粉塵公害の現象や、これらの対策として進められている屋上緑化などの屋外温熱環境緩和手法の効果を定量的に評価することは極めて重要である。このヒートアイランド現象における既存の数値シミュレーションの研究では差分法が多く用いられている。しかし、構造物や地形などの任意複雑形状への適合性において、非構造格子に基づく有限要素法は優れた手法といえる。

本研究では、Launder-Kato 型の改良 $k-\varepsilon$ モデルを安定化有限要素法に適用し、さらに樹木の流体力学的影響を考慮するため、既往の植生キャノピーモデル¹⁾を組み込んだ。本解析手法の有効性について検討を行うため、出雲地方の築地松後方の風速分布を対象とする解析を行い、実測値²⁾、及び解析値¹⁾との比較を行った。

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

等温場における非圧縮性粘性流体を考え、乱流モデルには Launder-Kato 型の改良 $k-\varepsilon$ モデルを使用する。アンサンブル平均操作を施された運動方程式、連続式、乱れエネルギーの輸送方程式、エネルギー散逸率の輸送方程式はそれぞれ式 (1), (2), (3), (4) で表される。

運動方程式；

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + F_i = 0 \quad (1)$$

連続式；

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

乱れエネルギー k の輸送方程式；

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} - \left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial^2 k}{\partial x_j^2} - P_k + \varepsilon - F_k = 0 \quad (3)$$

エネルギー散逸率 ε の輸送方程式；

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x_j^2} - (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} - F_\varepsilon = 0 \quad (4)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$\bar{S}_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2}, \bar{\Omega}_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)^2}$$

$$\begin{cases} P_k = \nu_T \bar{S}_{ij} \bar{\Omega}_{ij} & (\bar{\Omega}_{ij} / \bar{S}_{ij} \leq 1) \\ P_k = \nu_T \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} & (\bar{\Omega}_{ij} / \bar{S}_{ij} > 1) \end{cases}$$

$\bar{u}_i$, $\bar{p}$ はそれぞれアンサンブル平均操作を施された流速、圧力であり、 k は乱れエネルギー、 ε エネルギー散逸率、 ν は動粘性係数、 ν_T は渦動粘性係数、 ρ_0 は基準密度。また、定数群は以下の通りである。

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

(2) 植生キャノピーモデル

樹木が温熱空気環境に及ぼす影響には様々なものがあるが、主なものとしては

1. 樹木の流体力学的影響。
2. 樹木による日射等の放射減衰の効果。
3. 樹木からの蒸発散による潜熱放射を含む熱収支への影響などがあげられる。

樹木の流れ場に対する力学的影響とは主に樹木の風速に対する流体力学的抵抗と乱れの増大効果であり、これらの効果をモデル化したものが植生キャノピーモデルである。流体力学的抵抗に関するモデルは $F_i = C_f a \bar{u}_i \sqrt{\bar{u}_i^2}$ として付加され、乱れの増大効果に関するモデルは、乱流エネルギー k の輸送方程式とエネルギー散逸率の輸送方程式の右辺にそれぞれ F_k , F_ε として付加される。乱れの増大効果の F_k , F_ε のモデルに関しては研究者によって異なる。本研究では以下に示す、持田らが改良した Green のモデル¹⁾を用いる。

$$F_k = \bar{u}_i F_i - 4 C_f a \sqrt{\bar{u}_i^2} k$$

$$F_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{k} (C_{p\varepsilon 1} \bar{u}_i F_i - C_{p\varepsilon 2} 4 C_f a \sqrt{\bar{u}_i^2} k)$$

ここで、 C_f は樹冠の抵抗係数、 a は樹冠の葉面積密度 [m^2/m^3]、 $C_{p\varepsilon}$ はモデル係数である。

(3) 安定化有限要素法

基礎方程式 (1), (2), (3), (4) に対して安定化有限要素法を (SUPG/PSPG 法³⁾) を適用し、P1/P1(流速・圧力1次)要素を用いて補間を行うと、次のような有限要素方程式を得る。時間方向の離散化には、2次精度を有する Crank-Nicolson 法を用いた。移流項における移流速度 $\bar{u}_i$ は、2次精度 Adams-Bashforth 法により近似した。なお、連続式、圧力は陰的に取り扱っている。連立1次方程式の解法には、Element-by-Element Bi-CGSTAB2 法を用いた。

3. 数値解析例

(1) 解析条件

解析領域を図-1に、境界条件を表-1に示す。解析に用いたメッシュは 110×33 の最小メッシュ幅 6.72×10^{-2} の不等分割メッシュを用いた。微少時間増分量は $\Delta t = 1.0 \times$

KeyWords： 安定化有限要素法、 $k-\varepsilon$ 型2方程式モデル、植生キャノピー

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 E-mail: show@civil.chuo-u.ac.jp

10^{-3} とし $t = 100\text{sec}$ まで解析を行い、LineA～LineF において実測値との比較を行った。なお、使用した植生キャノピーモデルの葉面積密度 $a = 1.17$ 、抗力係数 $C_f = 0.8$ とし、モデル内のパラメータ値を Case1 として $C_{pe1} = 1.8, C_{pe2} = 1.4$, Case2 として $C_{pe1} = 1.8, C_{pe2} = 1.6$ 、それぞれ 2 ケースについて解析を行った。

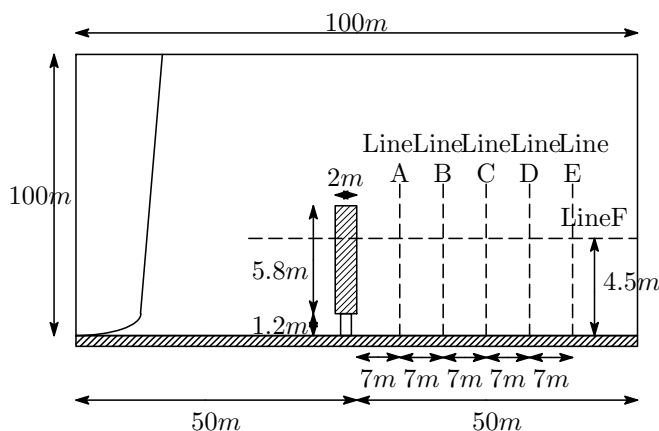


図-1 解析領域

表-1 境界条件

流入境界	$\bar{u} = U_b \left(\frac{y}{H_b} \right)^{0.22} [m/s], \bar{v} = 0.0 [m/s]$ $U_b = 5.6 [m/s], H_b = 9.0 [m]$ $k = 3.02 [m^2/s^2], \varepsilon = 0.3k \frac{\partial u}{\partial y}$
流出境界	自由流出境界 ($\bar{u}, \bar{v}, k, \varepsilon = \partial/\partial x = 0$)
上端面	slip 条件
底面	一般化対数測

(2) 解析結果

図-2,3 に Case1,2 における LineA～E の時間平均風速と時間平均乱流エネルギーを、LineF に時間平均乱流エネルギーを示す。また、図中の U_H は流入側の樹木高さ (7m) の平均風速である。

Case1 の平均風速を見ると、LineA, B に関しては、LineC, D, E よりも実測値に比較的一致している。また、底面近傍の平均風速の実測値は無いが、持田らの解析値と比べると底面付近で過小評価されている。乱流エネルギーの値は実測値に近い値を示しているが、持田らの解析値よりは全体的に若干大きい値を示している。Case2 は持田らの解析で最もよい結果とされており、本解析結果は定量的には風速、乱流エネルギー共に若干の過大評価が見られるが、定性的に非常によく一致している。

4. おわりに

本研究では、Launder-Kato 型の改良 $k-\varepsilon$ モデルを安定化有限要素法に適用し、さらに既往の植生キャノピーモデルを組み込んだ。本解析手法の有効性について検討を行うため、出雲地方の築地松後方の風況解析を行い、実測値及び解析値との比較を行い以下の結論を得た。

- 植生キャノピーモデルによる風況の変化、パラメータによる違いが確認できた。
- 持田らが改良した Green のモデルを用いた場合、 $C_{pe2} = 1.6$ が最も実測値に近い解析結果となった。

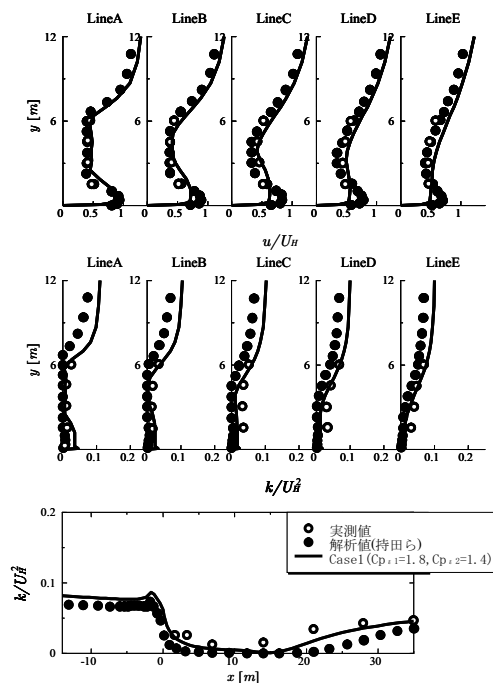


図-2 平均風速 u/U_H の鉛直分布:上段,
乱流エネルギー k/U_H^2 の鉛直分布:中段,
乱流エネルギー k/U_H^2 の水平分布 (高さ 4.5m):下段

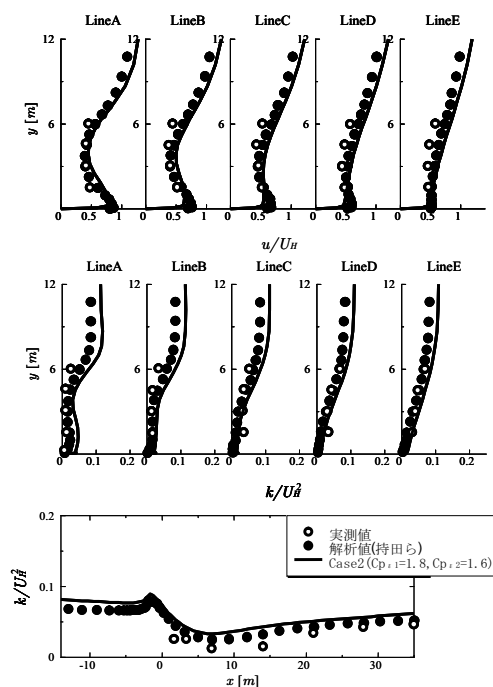


図-3 平均風速 u/U_H の鉛直分布:上段,
乱流エネルギー k/U_H^2 の鉛直分布:中段,
乱流エネルギー k/U_H^2 の水平分布 (高さ 4.5m):下段

今後の課題としては他の植生キャノピーモデルの検討、3次元化などが挙げられる。

参考文献

- 1) 木村敦子, 岩田達明, 持田灯, 吉野博, 大岡龍三, 吉田伸治: 樹木の流体力学的効果の再現のための植生 Canopy モデルの最適化 (その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.721-724, 2003, 9.
- 2) 黒谷靖雄, 清田誠良, 小林定教: 出雲地方の築地松が有する防風効果 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.745-746, 2001.
- 3) T.E.Tezduyar: Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, Advance in Applied Mechanics, 28, pp.1-44, 1991.