

3次元孤立峰上の大気中CO₂輸送のLES

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

筆者らは現在、地形や森林生態系が大きく影響する地表付近のCO₂輸送過程を詳細に解明するための数値モデルをLESをベースとして開発を進めている。既報^{1),2)}は本モデル開発の一環であり、2次元山岳地形上のCO₂輸送を対象として、大気が中立の場合と不安定の場合の解析を行い、大気安定度の違いが流れ場やCO₂濃度場に及ぼす影響について検討した。本研究では、地形形状を変化させて3次元孤立峰上のCO₂輸送を対象とし、既報^{1),2)}と同様、中立時と不安定時の2種類の解析を行い、大気安定度や地形形状の違いが及ぼす影響について検討する。

2. 計算概要

2.1 計算対象

余弦の2乗の断面形状を持つ3次元孤立峰上のCO₂輸送を対象。孤立峰の形状はIshiharaらの風洞実験（流れ場のみを測定）³⁾で用いられた地形モデルと同じ。孤立峰を含む地表面の鉛直座標 x_3 は次式で与えられる。

$$x_3 = \begin{cases} H \cos^2\left(\pi \cdot \sqrt{x_1^2 + x_2^2} / L\right) & \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \leq L/2 \\ 0 & \sqrt{x_1^2 + x_2^2} > L/2 \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x_1 、 x_2 はそれぞれ主流方向、主流横断方向の座標（孤立峰中心軸位置が $x_1=x_2=0$ ）、 H は孤立峰高さ、 L は孤立峰底面長さである。尚、 $L=5H$ とした。孤立峰を含む地表面全体は高さ5m程度の樹木に覆われている状況を想定し、これらの樹木はCO₂吸収源として機能するものとした。樹木によるCO₂吸収量は $0.174\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ の一定値を与えた^{1),2)}。大気の状態として中立時（case 1）と不安定時（case 2）の2ケースを検討。境界層外の一様流速 U_0 と H に基づくReynolds数は 1.57×10^4 。不安定時（case 2）のbulk Richardson数は地表面第1セルの平均温度と流入気流温度との代表温度差 $\Delta\theta_0$ 、 U_0 及び H に基づく値で -0.123 。

2.2 計算手法

Boussinesq近似を施した非圧縮性の運動方程式、連続式、温度輸送方程式、CO₂濃度輸送方程式を一般曲線座標系に座標変換し、連成した方程式系を使用。計算領域は $60H(x_1) \times 20H(x_2) \times 22.5H(x_3)$ 、計算格子数は $143(x_1) \times 64(x_2) \times 32(x_3) = 292,864$ 。既報^{1),2)}同様、SGS応力、SGS熱フラックス、SGS濃度フラックスのモデル化には渦粘性モデル（勾配拡散近似モデル）を使用。但し、SGS応力に対する渦粘性係数は稲垣らの静的モデル⁴⁾の修正型⁵⁾を用いて算出。離散スキーム等、その他の計算手法についても既報^{1),2)}と同じ。境界条件は側面境界条件を周期条件から対称条件に変更した以外は既報^{1),2)}と同じ。

3. 計算結果

以下に示す計算結果は無次元時間180（ U_0 で主流（ x_1 ）方向の計算領域3周）分で時間平均したものである。尚、

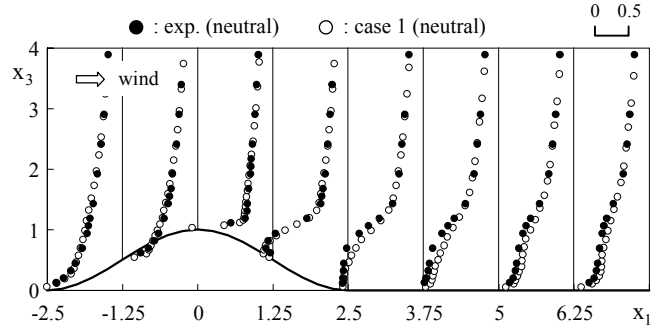


図1 主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ の鉛直分布（中心断面）

以下に示す諸量は U_0 、 H 及び C_0 で無次元化して表記する。

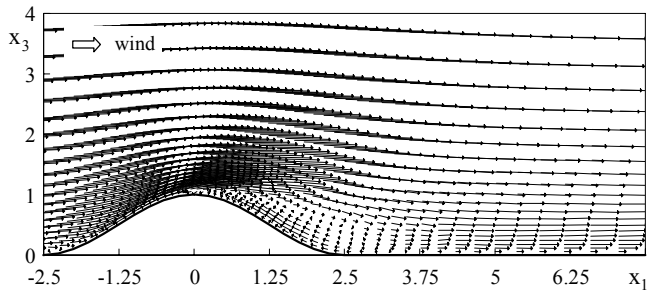
3.1 予測精度の検証

本計算のcase 1（中立）の流れ場に関する条件はIshiharaらの3次元孤立峰上流れの風洞実験³⁾と同じものを用いている。そこでまず、流れ場のみとなるがIshiharaらの実験とcase 1の結果を比較することにより、本計算の予測精度の検証を行う。図1は孤立峰中心断面（ $x_2=0$ ）における主流方向平均風速 $\langle \bar{u}_1 \rangle$ （ $\bar{\cdot}$ 、 $\langle \cdot \rangle$ はそれぞれグリッドフィルタ値（GS成分）、時間平均値を示す）の鉛直分布を示したものである。case 1の結果は実験に比べて孤立峰背後流の速度回復が僅かに早い（ $x_1 \geq 2.5$ のライン参照）、全体的には両者は良く一致した結果となっている。

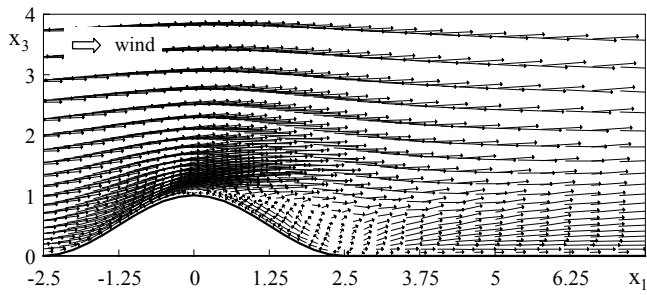
3.2 中立時と不安定時の比較

(1) 平均流れ場 図2に孤立峰中心断面（ $x_2=0$ ）における平均風速ベクトルを示す。case 1（中立）の場合、山頂部（ $x_1=0$ 、 $x_3=1$ ）付近で流れの剥離が生じ、山後方に循環流域が形成されている。この流れ場の様相は2次元山のケース²⁾と同様であるが（図省略。既報²⁾参照）、3次元孤立峰の場合（case 1）、山を回り込む流れの影響を受けるため、2次元山の場合に比べて循環流域の大きさはやや小さくなっている。一方、case 2（不安定）では流れの剥離はcase 1と同様に山頂部付近で生じているが、山後方において明確な循環流域は形成されていない。

(2) 平均CO₂濃度場 図3に孤立峰中心断面（ $x_2=0$ ）における平均CO₂濃度 $\langle \bar{C} \rangle$ の鉛直分布を示す。山前方、山後方ともに $x_3 < 1.5$ の領域においてcase 2（不安定）はcase 1（中立）に比べて $\langle \bar{C} \rangle$ を高く評価している。図4は同じく中心断面（ $x_2=0$ ）におけるCO₂濃度フラックスの鉛直成分 $-\langle \bar{u}_3 \bar{C}' \rangle$ （GS成分のみ。符号に注意）の鉛直分布を示したものである。山前方、山後方ともにcase 2はcase 1に比べて、より上方まで $-\langle \bar{u}_3 \bar{C}' \rangle$ の絶対値が大きくなっている。そのため、case 2では上方から下方への下向き大きな濃度輸送が生じることになり、 $x_3 < 1.5$ の領域においてcase 1よりも $\langle \bar{C} \rangle$ が高くなる（図3）。この濃度場の構造は、2次



(1) case 1 (中立)



(2) case 2 (不安定)

図2 平均風速ベクトル (中心断面)

元山のケースの中立時と不安定時の比較²⁾で見られた様相と同様である。図5(1)はcase 2 (不安定) の山前方及び山後方の濃度分布 ($x_1 = -3.75, -2.5, 2.5, 3.75, 5, 6.25, 7.5$ のライン (中心断面位置) の結果を表示) を1つの図にまとめたものである。参考のために、2次元山の不安定時の結果²⁾も合わせて示す(図5(2))。2次元山の結果と同様、case 2 の山前方、山後方の濃度分布に大きな差は見られず、また全体として2次元山の結果とほぼ同様の値となっている。case 2 の場合、2次元山の不安定時²⁾よりも遙かに複雑な流れ場が形成されているが(図省略。発表時に報告)、濃度場においては2次元山の不安定時と同様、山前方、山後方ともに前述した $-\langle \bar{u}_3 \bar{C}' \rangle$ による下向きの大きな濃度輸送が支配的になっており、流れ場の影響、さらに言えば流れ場を形成する地形の影響を殆ど受けていない(図は省略するが、case 1 (中立) の濃度場は当然流れ場に大きく影響される)。図6は高さ $x_3 = 0.5$ の位置における $\langle \bar{C} \rangle$ の水平分布について、case 1 と case 2 を比較したものである。case 2 の結果は山風下斜面を除いてほぼ一般的な分布となっている。この図からも、case 2 の濃度場においては前述した $-\langle \bar{u}_3 \bar{C}' \rangle$ による下向きの大きな濃度輸送が支配的になっていることが分かる。但し、以上は今回用いた熱の条件での話であり、今後さらに細かく熱の条件を変化させてCO₂濃度場に及ぼす影響を調べて行く予定である。

参考文献

- 1) 飯塚ら, 第5回非静力学モデルに関するWS (2003) pp.34-35
- 2) 飯塚ら, 第17回数値流体シンポジウム (2003) E5-2
- 3) Ishihara et al., J. Wind Engineering, 89 (2001) pp.573-576
- 4) 稲垣ら, 日本機械学会論文集 (B編) 68-673 (2002) pp.2572-2579
- 5) 飯塚ら, 日本建築学会環境系論文集, 576 (2004) pp.23-28

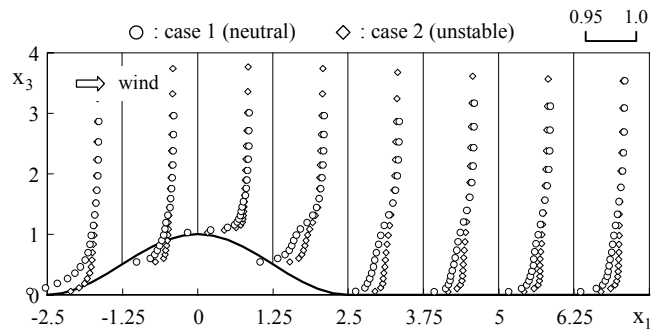


図3 平均濃度 $\langle \bar{C} \rangle$ の鉛直分布 (中心断面)

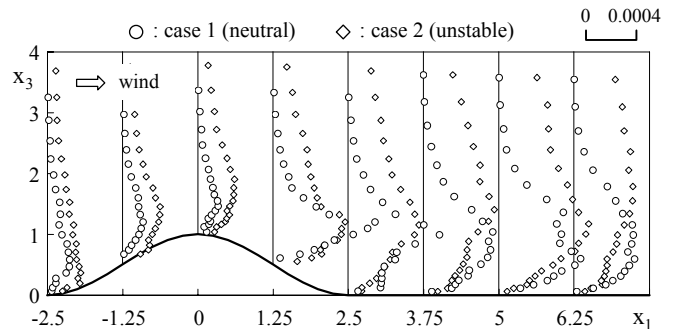
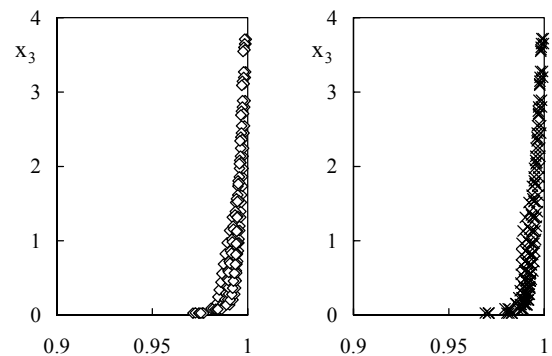


図4 濃度フラックス $-\langle \bar{u}_3 \bar{C}' \rangle$ の鉛直分布 (中心断面)



(1) case 2 (不安定) (2) 2次元山 (不安定)

図5 平均濃度 $\langle \bar{C} \rangle$ の鉛直分布 (中心断面)

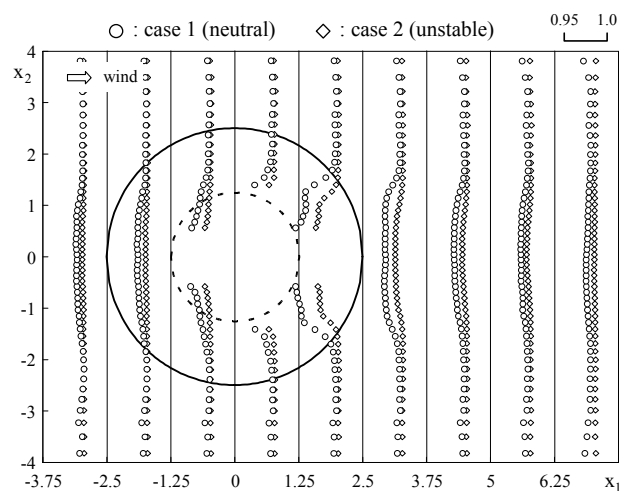


図6 平均濃度 $\langle \bar{C} \rangle$ の水平分布 ($x_3 = 0.5$)