

環境シミュレーター構築に向けたスカラー濃度拡散の高精度数値計算

名古屋工業大学技術グループ研究基盤チーム

服部博文

hattori@nitech.ac.jp

1. 緒言

都市空間や大気中で拡散輸送される汚染物質等の濃度分布を予測することは、環境改善対策に対して必須である。本研究では汚染物質等の濃度分布予測をする環境シミュレーター構築に向け、大気流れ中の熱や物質の輸送現象に関する基礎物理量データを取得し、基礎現象の解明を目的としている。予測精度が高い環境シミュレーターを構築するためには、地表面近く、温度（密度）成層、地形といった影響因子が基礎熱物質移動現象に与える効果についてのデータを蓄積すること重要となる。

地表面近くでは流体は減速させられ、温度成層は流体を加減速させ、地形は流体剥離や再付着現象を引き起こすことが分かっているが、これらが複合かつ乱流現象が加わりさらに複雑な熱流動現象が引き起こされる。そのため、その中で汚染物質がどう輸送されるかは全く予測がつかない。しかしながら、個々の基礎現象を把握し、複合的に知見を組み上げれば予測は可能となると考えられる。

本研究では、環境シミュレーター構築の一環として、高精度数値計算法を用いた大気成層境界層内のスカラー物質濃度拡散現象を模擬し、基礎データの取得と現象解明を行った。

2. 基礎方程式

大気中で拡散輸送される汚染物質等の濃度分布を予測するためには、流体の運動方程式、質量保存式（連続の式）、エネルギー式、スカラー濃度輸送方程式を連立させて解く必要がある。

$$\text{運動方程式：} \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}_{\delta_2}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \delta_{i2} \text{Ri}_{\delta_2} \theta \quad (1)$$

$$\text{連続の式：} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\text{運動方程式：} \quad \frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re}_{\delta_2} \text{Pr}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

$$\text{運動方程式：} \quad \frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = \frac{1}{\text{Re}_{\delta_2} \text{Sc}} \frac{\partial^2 c}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4)$$

ここで u_i は i 方向速度、 t は時間、 x_i は i 方向座標、 p は圧力、 θ は温度、 c は濃度、 Re_{δ_2} は慣性力と粘性力の比を表すレイノルズ数、 Ri_{δ_2} は浮力の影響度を表すリチャードソン数、 Pr は温度伝導度を表すプラントル数、 Sc は濃度拡散率を表すシュミット数である。

計算手法は、上記微分方程式を高精度差分式に置き換え、圧力と速度をカップリングさせて連立方程式を解く方法で行った。例えば、式 (2) を直線上に Δx の幅で等間隔に配置された計算格子点 A、B、C を使い、格子点 B における微分を差分にすると以下ようになる。

$$\left. \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right|_B \approx \frac{\delta u_i}{\delta x_i} \Big|_B = \frac{u_C - u_A}{2\Delta x} = 0$$

よって、格子点 B における式 (2) の値は、格子点 A と C における速度で与えられることとなる。次に格子点 C における値を格子点 B と格子点 C から Δx 離れた次の格子点の値、と格子点上を順次計算を進めることによって値を求める。格子点の端は境界条件として予め与えられるために計算は閉じられることとなる。

次に本計算で問題となる点は、乱流現象と境界層を模擬することにある。乱流は、時々刻々と風速が変化し（非定常現象）、かつランダム、3次元現象であるために境界条件が設定しづらい。また、境界層は地表面近くの影響

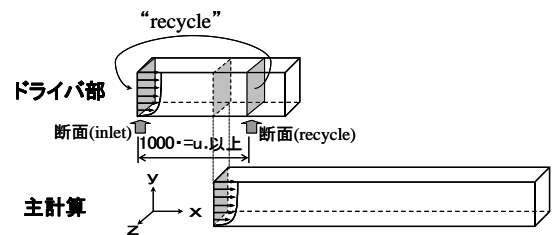


図1：乱流境界層の計算

で速度が減速するために発生する流体形態であるが、境界層は下流方向に向かって減速する範囲が変化するために最下流における境界条件が設定しづらい。これらの問題を解決するために、時々刻々と変化する乱流については図1に示すようなドライバ部で乱流を生成するスキームを用いたり、これは下流へ向かって発達する乱流境界層をドライバ部のある断面から最上流部へリサイクルすることによって乱流現象を再現している。そのドライバ部で生成された乱流のある断面データを時々刻々と主計算部へデータを渡すことによって、主計算部での計算を進めた。また、最下流部での境界条件は質量保存を満たすような境界条件（対流境界条件）を設定し、境界層の発達を妨げないようにした。

計算に用いたパラメータは、レイノルズ数を

1000 とし、プラントル数は空気を想定して 0.71, シュミット数は空気と同程度の拡散係数を持つ物質を想定して 1 とした。主計算領域に成層条件を課すために、リチャードソン数を 0（中立成層）、-0.06（不安定成層）、0.06（安定成層）と設定した。また、計算格子点数は、現象を捉える十分な格子解像度を確保するために主計算部では約 2500 万点用いている。計算時間は、有意な統計量を算出するために Opteron プロセッサ搭載のワークステーションで約 3 ヶ月を要する。

3. スカラー濃度輸送の計算

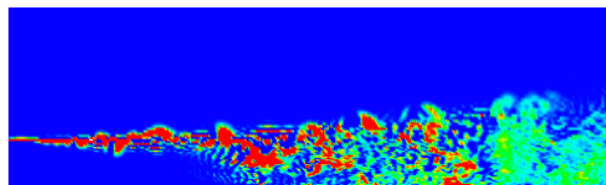
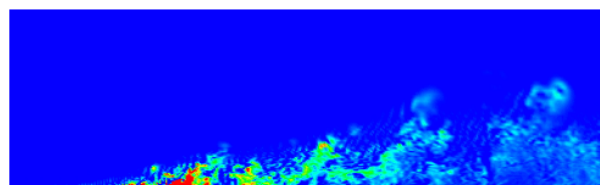
図2に示すように、スカラー物質を地表面からとある空間から放出させ、下流における濃度分布を算出した²⁾。図3に計算された瞬時濃度分布を示す。放出場所、乱流境界層における成層度の違いにより、スカラー物質濃度の下流における分布の差異がよく分かる。

4. 結言

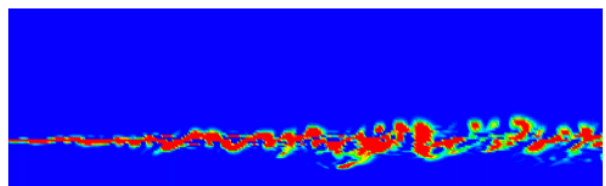
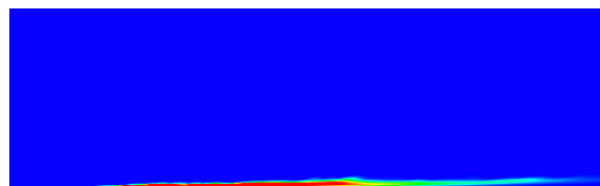
環境シミュレーターを構築するための熱物質移動基礎データ取得を目的として、温度成層乱流境界層内で輸送されるスカラー物質濃度分布の計算スキームを完成させ、空間内に分布するスカラー物質濃度の詳細を得ることができた。

参考文献

- 1) H. Hattori, T. Houra and Y. Nagano, 2007, "Direct Numerical Simulation of Stable and Unstable Turbulent Thermal Boundary Layers," *J. Heat and Fluid Flow*, Volume 28, Issue 6, 2007, Pages 1262-1271
- 2) H. Hattori, S. Yamazaki and Y. Nagano, 2009, "DNS of turbulent transport of scalar concentration in various thermally stratified boundary layers," *Proc. the 12th ETC*, pp. 593-596.

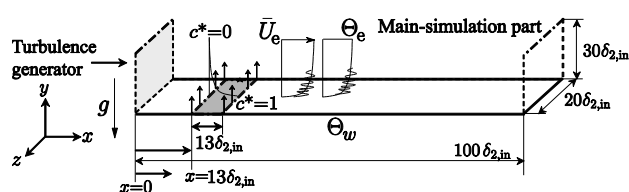


(a) 不安定成層（左：地表面放出，右：空間放出）

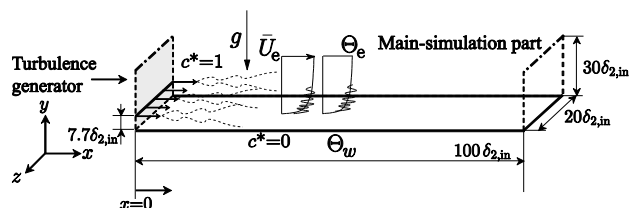


(b) 安定成層（左：地表面放出，右：空間放出）

図3：計算された瞬時濃度分布



(a) 地表面からの放出



(b) 空間からの放出

図2：スカラー濃度の放出条件