

安定成層山越え気流による大気汚染物質の移流・拡散シミュレーション

海野俊太郎¹, 木村繁男²

¹〒920-1192 金沢市角間町 金沢大学大学院自然科学研究科;

²〒920-1192 金沢市角間町 金沢大学環日本海域環境研究センター

S. Unno and S. Kimura

Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in stratified flows over a two-dimensional mountain

1. 緒論

大気汚染物質の移流・拡散メカニズムの解明は、大気環境に注目が集まる現在、非常に重要なテーマである。このメカニズムの解明に、数値解析は極めて有効であるが、大気の振る舞いは地形形状およびその規模、大気の安定度などにより複雑に変化するため、比較的単純な気象現象に焦点を絞り解析されることが多い。例えば、山越え気流はその一つであり、2次元性のよい山脈の場合、風下山岳波、おろし風などの山岳風下側の現象が多数研究されている。一方、“風上ブロッキング”などの風上側の気象現象に注目した研究は少ないのが実情である。風上ブロッキングとは「山脈の風上で地表面付近の大気が山を越えることができず、流れが風上側でよどむ現象」であり⁽¹⁾、大気安定度によってブロッキング効果に変化し、汚染物質の拡散に大きな影響があると予想される。従って、本研究では、風上ブロッキングが大気汚染物質の移流・拡散過程に与える影響を明らかにするため、2次元数値解析を実施した。

2. 数値計算法

本研究では、2次元性の強い山越え気流を検討するため、2次元流れ場を解析する。本シミュレーションの支配方程式は、連続の式 (1), Navier-Stokes 方程式 (2), (3), (4), 温位の輸送方程式 (5), そして、スカラー濃度の輸送方程式 (6) である。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -c_p \theta_0 \frac{\partial \pi}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right\} + f_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right\} - f_u \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} &= -c_p \theta_0 \frac{\partial \pi}{\partial z} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\} + \frac{\theta'}{\theta_0} g \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial u\theta}{\partial x} + \frac{\partial w\theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right\} \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\} + C_{in} \quad (6)$$

ここで、 t は時間、 u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向の速度成分、 π はエクスター関数である。 θ は温位であ

り, 基準温位 $\bar{\theta}$, 変動温位 θ' として $\theta = \bar{\theta} + \theta'$ に分けられる. θ_0 は後述する参照温位, c_p は定圧比熱, g は重力加速度, f はコリオリパラメータ, ν_t は渦粘性係数, σ_T は乱流プラントル数, そして, c はスカラー濃度, C_m はスカラー濃度の生産項である. ただし, コリオリ力を考慮するため, 式(3)を付加している. また, 本研究で対象とする大気流れは概ね乱流状態にあるため, 乱流モデルの導入が不可欠である. 従って, 本研究では Rodi⁽²⁾により提案された成層効果を考慮した $k-\varepsilon$ モデルを採用した.

本計算では, 基準温位の鉛直分布は直線を仮定する. 従って, 温位は微小流体塊が成層流において断熱的に振動する場合の周波数である Brunt-Vaisala 周波数 N から与えた.

$$N^2 = \frac{g}{\theta_0} \frac{d\bar{\theta}}{dz} \quad (7)$$

ここで, θ_0 は参照温位で $z = 0.5h_0$ における $\bar{\theta}$ の値を用いる. また, h_0 は山の高さを表す.

大気安定度を評価するパラメータとして, 次式で定義される Froude 数 Fr を用いた.

$$Fr = \frac{U}{Nh_0} \quad (8)$$

上式から N が大きくなるほど, つまり, Fr 数が小さくなるほど大気は安定側になる. 一方, Fr 数が大きくなると流れは中立に近づき, $Fr = \infty$ では温位は全領域で一定となる.

計算領域と境界条件を図 1 に示す. 計算領域は主流方向に 100 [km], 鉛直方向に 18 [km] と設定し, 地表面上の中央 ($b = 50$ km) に次式で与えられるベル形状の山を配置した.

$$h(x) = \frac{h_0}{1 + \left(\frac{x-b}{a}\right)^2} \quad (9)$$

ここで, $h_0 = 500$ [m] は山の高さであり, a は山の半値幅である. 計算格子点数は主流方向, 鉛直方向に 250×150 点である. 境界条件は, 流入境界は, 一様流速 $U = 5$ [m/s] を与え, 流出境界は諸量に関して放射条件, 天井面を対称境界, 地表面は対数則を用いた.

流れ場の計算は有限差分法を使用し, 圧力と速度のカップリングは SMAC 法, 支配方程式の離散化は時間項がオイラー陽解法, 対流項は QUICK 法, 拡散項は 2 次精度中心差分を用いた.

また, 大気汚染物質の輸送はスカラー濃度の移流・拡散により模擬した.

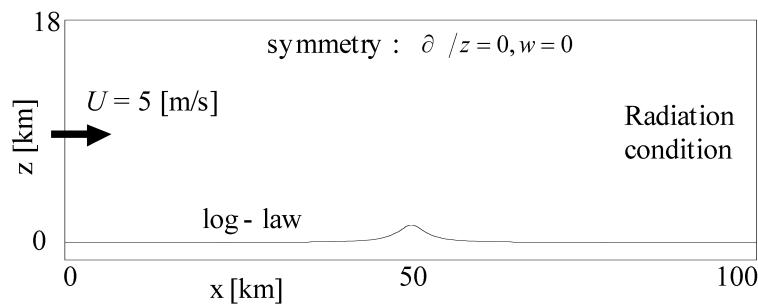


Fig.1 Computational domain and boundary conditions

3. 計算結果及び考察

本計算では, 大気安定度と地形形状が流れ場に与える影響を検討するため, Fr 数と半値幅 a をパラメータに解析を行った. また, 大気汚染物質の排出源高度が汚染物質の移流・拡散過程に与える影響も検討した. 以下に計算結果をまとめる. 尚, 以下の結果は全て時刻 $t = 10000$ [s] の計算結果である.

3.1 安定度が流れ場に与える影響 大気安定度が流れ場に与える影響を検討するため, $Fr = \infty, 1.0, 0.5$ の 3 ケースの解析を行った. 図 2 に $Fr = \infty, 0.5$ の水平方向速度の鉛直分布を示す. $Fr = \infty$

では成層効果の影響を受けないため、流れはよどみなく山を越えることができる。一方、安定度が非常に高い $Fr = 0.5$ では山の風上側で気流が大きく減速し、山の風上側領域で流れがよどんでいる。従って、大気安定度の増加に伴い、風上ブロッキングの影響が強くなることが分かる。また、山より上空の領域では安定度の増加に伴い、風速が増加している。これは、風上ブロッキングの影響により、風上側の上空で流量が増加したことによると考えられる。

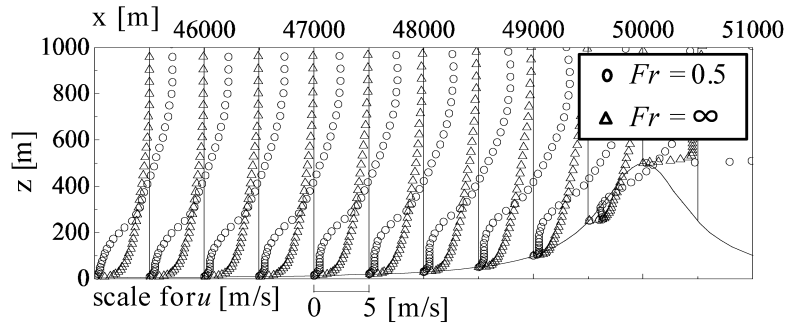


Fig.2 Vertical profiles of horizontal velocity for $Fr = 0.5, \infty$

3. 2 半値幅が流れ場に与える影響 半値幅が流れ場に与える影響を検討するため $Fr = 0.5$ において、 $a = 250, 500$ [m]の解析を行った。図3に水平方向速度の鉛直分布を示す。図3より、各半値幅において風速分布はほぼ一致し、半値幅の変化が流れ場に与える影響は見られないことが分かる。

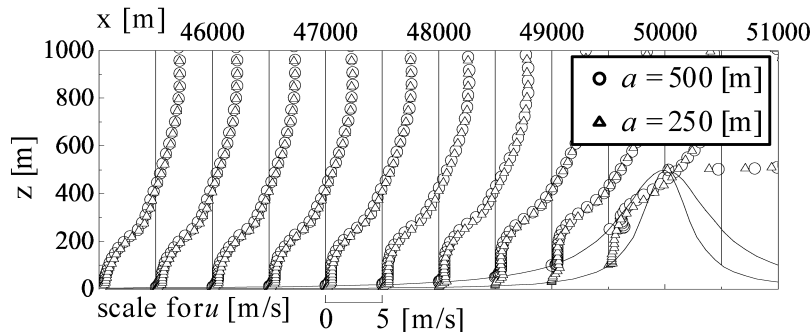


Fig.3 Vertical profiles of horizontal velocity for $a = 250, 500$ [m]

3. 3 排出源高度がスカラー濃度の拡散に与える影響

一般に、工場煙突の高さなど、排出源の高度によって大気汚染物質の拡散は大きく変化すると考えられる。従って、本節では、大気安定度だけでなく排出源高度が大気汚染物質に与える影響を併せて検討する。従って、排出源位置は山の風上側の $x = 45$ [km]、高度 $z = 50, 150, 250$ [m] の3点に設定した。図4に排出源高度 $z = 50$ [m] における計算結果を示す。 $Fr = \infty$ では、成層効果の影響を受けないため、スカラー濃度はよどみなく山を越えることができる。一方、成層効果の影響を受ける $Fr = 0.5$ では、風上ブロッキングの影響により、スカラー濃度はほとんど山を越えることができずに山の風上側に滞留していることが分かる。

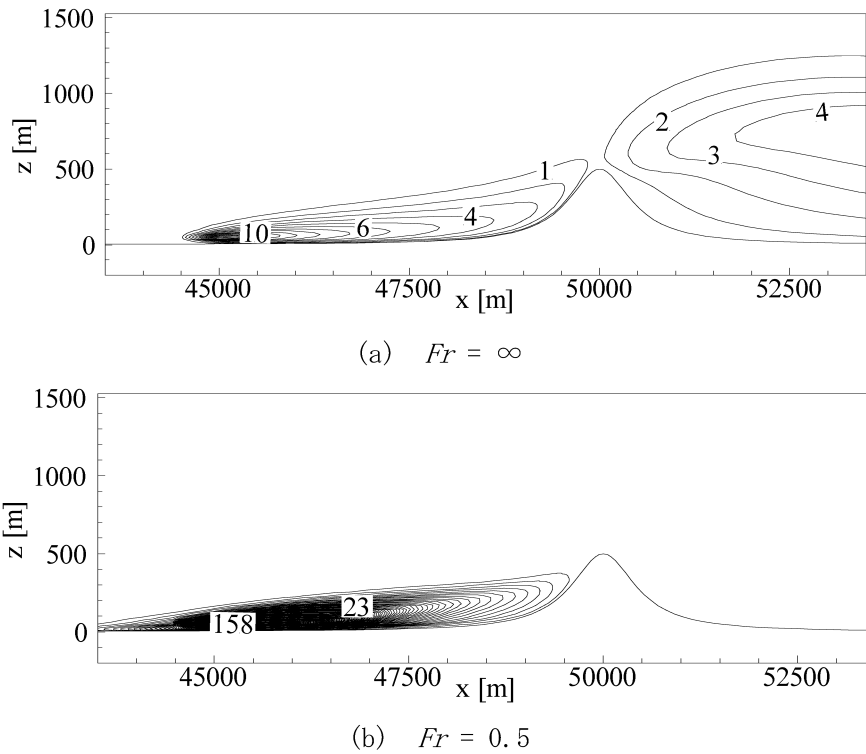


Fig.4 Scalar concentration profiles for 50 m high source point

次に、排出高度と風上側に滞留するスカラー濃度の相関を検討する。このため、図5に、各排出源高度における風上側全領域のスカラー濃度の積分値 C_{up} を Fr 数毎にプロットした。ただし、図中の値は全排出量 C_{ait} で規格化してある。図5から、排出高度が高くなると風上側でのスカラー濃度は低くなる傾向を示し、 $z = 250$ [m]では、安定度に関わらずほぼ一定値となっていることが分かる。これは、排出源の高度が、風上ブロッキングの領域よりも高い位置にあるからである。

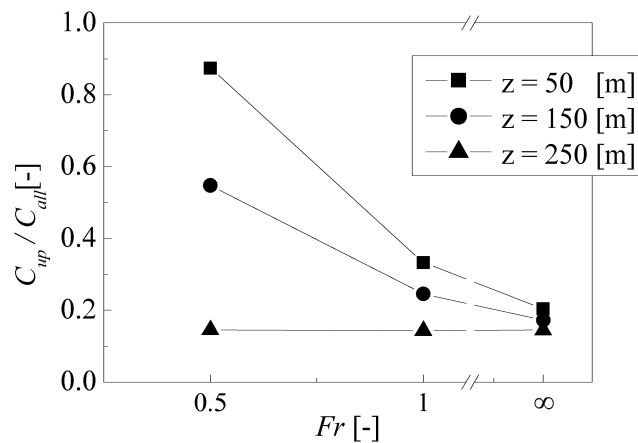


Fig.5 Normalized integrated scalar concentration in the windward side of the mountain

3. 4 地表面における濃度 大気安定度と地表面付近の汚染物質の相関を詳しく検討するため、図6に地表面でのスカラー濃度分布を示す。排出源高度 $z = 50$ [m] の場合、安定度の高い $Fr = 0.5$ では風上ブロッキングの影響によりスカラー濃度が風上側で上昇している。

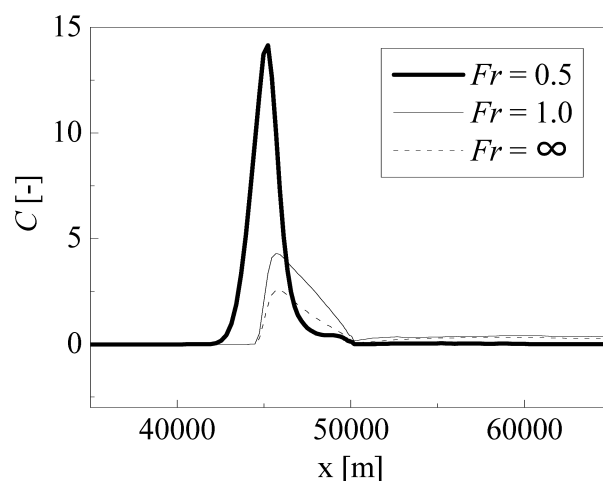


Fig.6 Scalar concentration on the ground for $z = 50$ [m]

4. 結論

山越え気流を対象に，風上ブロッキングが大気汚染物質の移流・拡散過程に与える影響を2次元数値解析により解析し，以下の結論を得た．

- (1) 大気の安定度が高くなるほど，風上ブロッキングが強く発達することを明らかにした．
- (2) 安定成層山越え気流において，山の幅が流れ場に与える影響は非常に小さいことを明らかにした．
- (3) 排出源高度が低く，風上ブロッキングが強く発達するほど，風上側に高濃度のスカラー濃度が滞留することを明らかにした．

参考文献

- (1) Peter G. Baines, Upstream blocking and airflow over mountains, *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, 19 (1987), pp.75-97.
- (2) Rodi, W., Calculation of stably stratified shear-layer flows with a buoyancy-extended $k-\varepsilon$ turbulence model, *Turbulence and Diffusion in Stable Environments*, Oxford Univ, (1985), pp. 111-140.