

# Terra Incognita における大気境界層モデルのアプリオリ・テスト

\*伊藤 純至<sup>1,2</sup>・新野 宏<sup>1</sup>・中西 幹郎<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 東京大学・大気海洋研究所、<sup>2</sup> 気象研究所・物理気象、<sup>3</sup> 防衛大学校

## 1. はじめに

大気と地表の間での、運動量、潜熱、顕熱などの交換は大気境界層の乱流中の渦によってなされている。メソ気象モデルでは、このような交換プロセスをアンサンブル平均した 1 次元大気境界層モデル(e.g. MYNN モデル、Nakanishi and Niino 2009, JMSJ)によって表現してきた。近年、積雲対流をある程度陽に表現できような、1km から 2km 程度の解像度でのメソ気象モデルによる数値予報が現実的となっており、集中豪雨など予測精度向上が期待されているが、このとき大気境界層の乱流の中のスケールの大きな渦は解像されるようになる。その場合、従来の 1 次元大気境界層モデルにおける水平一様の仮定がゆらいでしまう。また乱流中の渦をフィルター平均するラージ・エディ・シミュレーション(LES)は、大気境界層の比較的大きな渦を陽に解像することができるが、格子解像度以下の渦は等方的と見なせるまでに格子間隔を小さくする必要があるため、一般的にメソ気象モデルで扱いたいような領域での LES を行なうことは難しい。

Wyngarrd(2004, JAS)は「Terra Incognita (未開の大地)」と名付けた中間のスケールでは、従来の大気境界層モデルと LES の両者が適用できないという問題提起し、サブフィルターのフラックスの輸送方程式を考えたとき、1 次元境界層モデルや LES では無視できた項の寄与が大きくなることを、観測結果から示している。

Wyngarrd のアプローチによって Terra Incognita の大気境界層モデルの設計を行なうためには、アプリオリ・テストとして、サブフィルター成分がどのように振る舞うべきか知る必要がある。そこで本研究では LES によって、大気境界層乱流のデータベースを作成し、それに Terra Incognita スケールの水平フィルターを適用した場合における、サブフィルター成分の熱フラックスの輸送方程式の各項の収支を調べた。

## 2. LES による大気境界層乱流データベースの作成とサブフィルター成分のフラックスの評価

大気境界層で乱流が活発になっている状態の対流混合層を、LESによって再現した。格子間隔は 50m、計算領域は 36km × 36km × 4.5km である。一定のヒートフラックス 0.2K・m/s を与え続ける。初期は安定成層(4.0K/km)で、一般風のない静止した状態から 0.2 秒

刻みで計算を開始した。図1は計算開始5時間後の対流セルの様子を表す。このとき混合層高さは約 1.5km であった。この計算結果を、以降の解析で乱流データベースとして利用する。

メソ気象モデルでは一般的に、水平解像度が鉛直解像度よりはるかに粗い。そこでメソ気象モデルを想

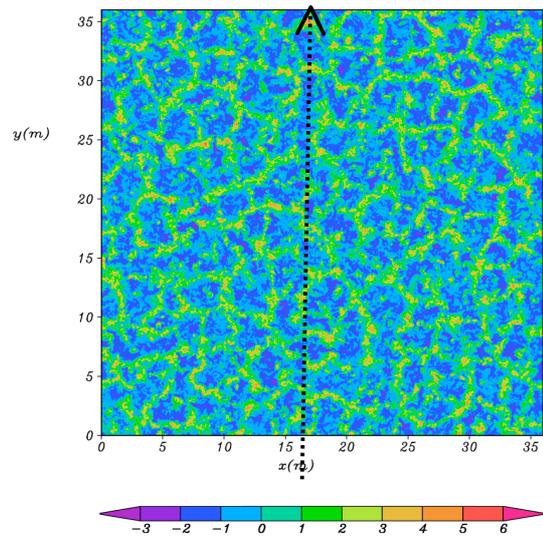


図1 計算開始5時間後、高さ750mの水平断面での鉛直速度。

定したアプリオリ・テストのため、乱流データベースの計算結果に、水平方向のみに、Terra Incognita スケールの Top-hat フィルターをかけ(上付のバーで表す)、サブフィルターの運動量フラックス  $R_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$  および熱フラックス  $f_i = \overline{\theta u_i} - \overline{\theta} \overline{u_i}$  を求める。

## 3. 熱フラックスサブフィルター成分の輸送方程式の各項の評価

ここでは運動量フラックスの場合より項数が少ない、熱フラックスのサブフィルター成分の輸送方程式について考察を行う。サブフィルター成分の輸送方程式は式(1)のように表される(Wyngarrd 2004, JAS)。ここで  $\theta$  は温位、 $\theta_0$  は基準温位、 $p$  は圧力である。左辺第 1 項は時間変化項、左辺第2項は移流項、第3項は乱流輸送項、右辺第1・2項は生成項、右辺第3項は圧力輸送項、右辺第4項は圧力拡散項、右辺5項

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial f_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\theta u_i u_j} - \overline{\theta u_i} \overline{u_j} - \overline{\theta u_j} \overline{u_i} - \overline{\theta u_i} \overline{u_j} + 2\overline{\theta u_i} \overline{u_j}) \\ = -f_j \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - R_{ij} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{p\theta} - \overline{p} \overline{\theta}) + \left( \overline{p} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_i} - \overline{p} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{\theta_0} (\overline{\theta^2} - \overline{\theta}^2) \delta_{i3} \end{aligned} \quad (1)$$

は浮力項である。乱流データベースより、すべての項を陽に求めることができる。水平フィルターのスケールは750mとしている。

はじめに左辺第1項の時間変化を計算開始5時間後のあるステップの、直前と直後のステップの差分としてもとめた場合と、左辺第1項以外の項の残差として求めた場合を比較した。図2によれば、両者はよく一致しており、乱流データベースを用いた評価が、ある程度信頼できることを示している。

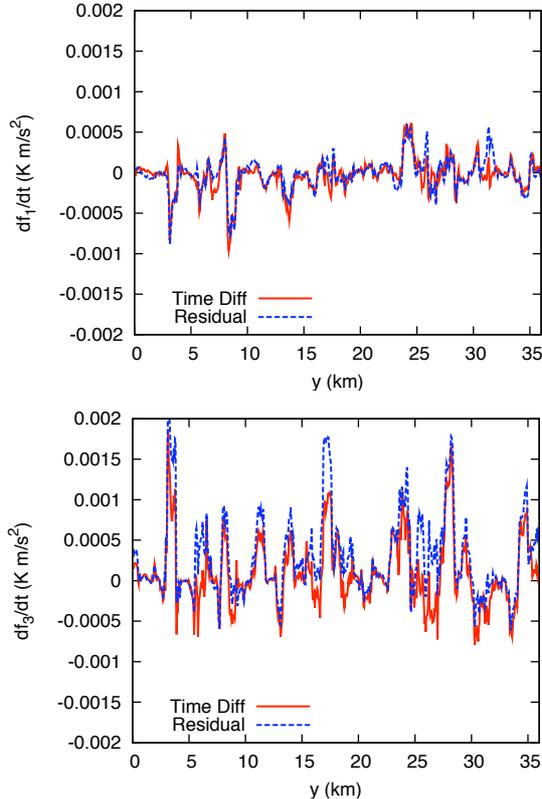


図2 熱フラックスのサブフィルターx方向成分(上図)とz方向成分(下図)の差分で求めた時間変化項(赤)とそれ以外の項の残差から求めた時間変化項(青)。高さ750mで、 $x=16\text{km}$ (図1の矢印が横軸に相当)。

次に水平方向フラックス、鉛直方向フラックスそれぞれについて、(1)式の各項の評価を行った(図3および図4)。

水平方向では生成項と圧力拡散項の逆相関と、移流項と乱流輸送項の相関がみられる。圧力輸送項や浮力項は大きくない。

鉛直方向では、同様に生成項と圧力分配項の逆相関がみられるがその他の項の寄与もあり、特に浮力項の寄与が大きくなる。非線形項は浮力項と逆相関しているように見える。

#### 4. まとめと今後の課題

Terra Incognita スケールを想定した大気境界層モデルのアプリオリ・テストとして、サブフィルタースケールの熱フラックスの輸送方程式の各項の収支を調べた。生成項や浮力項はメソ気象モデルでは既知の量であるが、その他の項は本研究を反映させた何らかのパラメタリゼーションが必要である。またフィルタースケールに対する依存性なども調べる予定である。

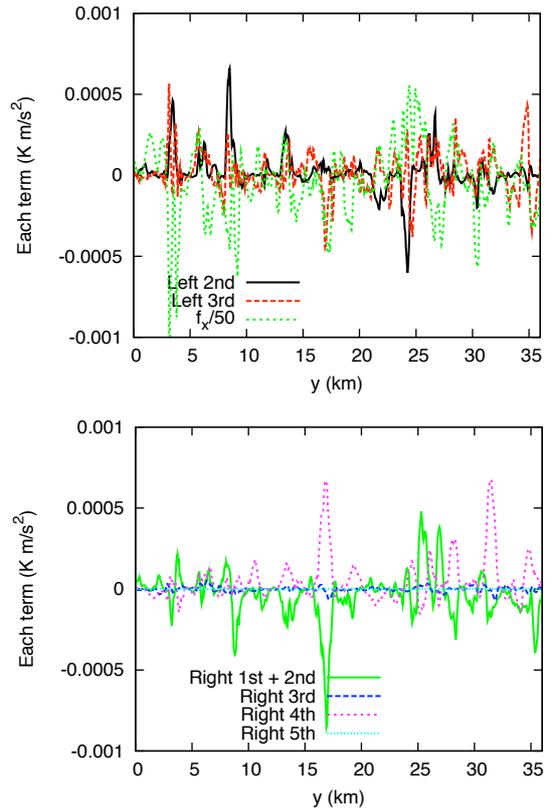


図3 熱フラックスのサブフィルターx方向成分の左辺各項(上図)と右辺各項(下図)。上図には参考のため $f_x/50$ をプロットしている(黄色、単位は $\text{K}\cdot\text{m/s}$ )。横軸は図2と同様。

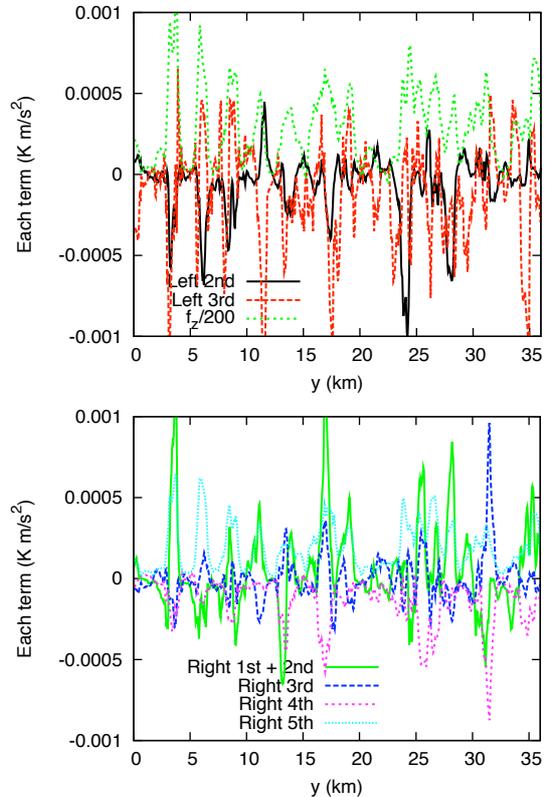


図4 図3と同様に、熱フラックスのサブフィルターz方向成分の左辺各項(上図)と右辺各項(下図)。上図には参考ため $f_z/200$ をプロットしている。