

LESにおけるパラメタリゼーションスキームの相互比較

* 北村 祐二 (気象研究所)

1. 序

大気境界層は地表面との摩擦や熱・水蒸気の交換が直接的に行われている領域であり、大気境界層における乱流輸送を精度よく見積もることは、気象現象の正確な予測および評価を行う上で必要不可欠であるといえる。その一方で、大気境界層での乱流現象の特徴的な時空間スケールは、領域モデルなどで対象となっている現象と比べると遥かに小さいため、数値モデルで乱流輸送の効果を表現するためにはサブグリッドスケールの寄与を何らかのパラメタリゼーションを用いて取り扱う必要がある。サブグリッドスケールの現象を表現する手法として、Large-Eddy Simulation(LES)が近年盛んに用いられるようになっており、サブグリッドスケールの運動を表現するためのスキームについても Smagorinsky(1963) 以来様々な定式化が提案されている。しかしながら、特に安定成層した温度場の場合には乱流の鉛直輸送が抑えられるために、サブグリッドスケールの寄与を適切に表現することがより困難になることもあって、各種パラメタリゼーションスキームの妥当性や適用範囲などについてはまだ十分に検討されているとは言えない状況である。そのような問題意識から GEWEX Atmospheric Boundary Layer Study(GABLS)では、理想化した安定成層場中の大気境界層の状況を想定し、様々な LES のパラメタリゼーションスキームを用いた比較実験を実施した(Beare et al. 2006)。彼らは、各種パラメタリゼーションスキームによる結果を広範囲にわたって整理しているが、乱流輸送に関する統計解析が限られており、個々のパラメタリゼーションスキームの問題点を抽出するにはまだ至っていないように思われる。また、個々の数値実験が全く異なる数値モデルを用いて行われているので、結果の違いがパラメタリゼーションスキームの違いに因るものなのかは必ずしも明確とは言えない。本研究では、単一の数値モデルを用いて各種スキームを実装することで、より系統的なパラメタリゼーションスキームの相互比較を行った。

2. 数値実験の概要

本研究では Boussinesq 近似を施した f 面 3 次元モデルを用いて数値実験を実施した。水平方向には周期境界条件を課したうえでスペクトル法を用い、鉛直方向には 2 次精度の中心差分を用いて離散化した。実験設定については GABLS の標準実験として設定されているもの (<http://www.gabls.org/>) を採用している。基本場として 8[m/s] の地衡流流速を与え、地表面温度を 0.25[K/h] で冷却させ、9 時間の時間積分を行った。実験領域は 400×400×400[m³] で解像度は 6.25[m](64³ グリッド) と 3.125[m](128³ グリッド) の場合について数値実験を行った。また、本研究で用いたパラメタリゼーションスキームは、(1) Smagorinsky model, (2)

Deardorff model, (3) Two-part model (Sullivan et al. 1994), (4) Dynamic Smagorinsky model(Germano et al. 1991, Lilly, 1992) の 4 つである。Two-part model は水平平均場とその偏差とで異なるパラメタリゼーションスキームを適用するもので、偏差に関しては Deardorff model と同一のスキームが用いられる。得られた結果について、ほぼ定常となる最後の 1 時間を解析に用いた。

3. 結果

3.1 平均場の比較

ここでは、水平平均した温位の鉛直分布について比較した結果(図 1)を示す。全般的な傾向として、高解像度の場合の方がサブグリッドスケールの乱流輸送の寄与が少なくなることから、パラメタリゼーションスキームの依存性は小さくなり、個々のスキーム間の違いが小さくなっていることが分かる。Two-part model では他のモデル結果よりも混合層が高い高度まで及ぶ傾向があるが、これは Beare et al.(2006) で報告されている結果と整合的である。この傾向は Deardorff model には見られないことから、水平一様成分についてのパラメタリゼーションが主な原因であると推察される。また、混合層上端に見られる温度勾配は Smagorinsky model では解像度が高いほど強くなるのに対し、Deardorff model, Two-part model では逆の傾向となっている。一方、Dynamic Smagorinsky model はいずれの解像度においてもほぼ同様の鉛直分布が得られることが分かった。

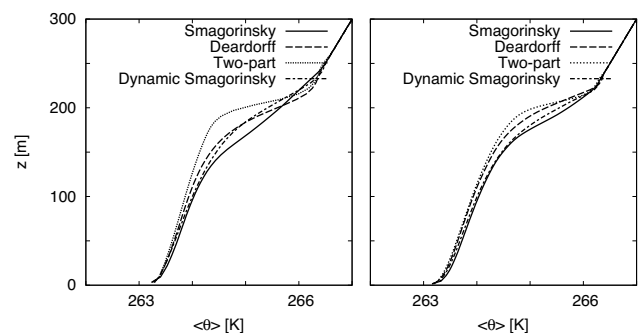


図 1: 水平平均した温位の鉛直分布。(a) グリッド間隔が 6.25m の場合、(b) グリッド間隔が 3.125m の場合をそれぞれ示している。

3.2 サブグリッドスケールのフラックス

上で見た結果の違いは、サブグリッドスケールの運動を診断した結果が各パラメタリゼーションスキームで異なっていることに起因する。そこで、サブグリッドスケールの運動量・熱の鉛直フラックスが各スキームでどのような特徴を持っているかを調べた。各モデルの結果からサブグリッドスケールの量を比較することも可能であるが、ここではより直接的な比較を行う

ために、同じスナップショットを用いて各スキームでサブグリッドスケールのフラックスを診断した結果の比較を行うことにした。さらに、単純な比較ではスキームの妥当性についての検討を行うことはできないため、以下の方法でモデル解像度を変えたときに診断されるフラックスの整合性を調べた。

ある解像度で得られた場 $\bar{u}_i, \bar{\theta}$ があつたときに、それよりもさらに格子スケールの大きな成分だけを取り出すテストフィルタを各変数に作用させることを考える。テストフィルタをチルダで表すことにすると、以下の関係式 (Germano の恒等式) が成り立つ:

$$\widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \widetilde{\bar{u}_i} \widetilde{\bar{u}_j} = T_{ij} - \tilde{\tau}_{ij}.$$

ここで τ_{ij}, T_{ij} はそれぞれ元の格子スケール、テストフィルタで特徴づけられる格子スケールにおけるサブグリッドストレスを表す。ここで、左辺はモデルから直接診断可能な量であるが、右辺は何らかの形でパラメライズする必要がある、そのスキームが適切でないと上の等式は成り立たないことに注意する。したがって、両辺の値の差

$$\epsilon_{ij} := (T_{ij} - \tilde{\tau}_{ij}) - (\widetilde{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \widetilde{\bar{u}_i} \widetilde{\bar{u}_j}),$$

はパラメタリゼーションスキームの整合性を見る指標となり得る。ただし、上の等式を満たすことは τ_{ij} の表現が適切であるための必要条件にしかなり得ないことには注意する必要がある。

図2に各スキームを用いて診断したサブグリッドスケールの運動量・熱フラックスと上で定義した ϵ_{ij} の水平平均の鉛直分布を示した。各スキームを用いて時間積分して得られた場について解析を行ったが、定性的な違いは現れなかったため、ここでは Dynamic Smagorinsky model を用いて時間積分した場を元データとした結果のみを示している。全般的な傾向として、サブグリッドスケールのフラックスは Two-part model で大きく Dynamic Smagorinsky model で小さいことが分かる。また、スキーム間の違いは熱フラックスでより顕著に現れており、乱流エネルギー (TKE) を予報するスキーム (Deardorff model, Two-part model) でフラックスが大きくなる傾向がある。これは主に乱流プラントル数の診断方法の違いに起因していると考えられる。

$\epsilon_{13}, \epsilon_{\theta 3}$ の鉛直分布に着目すると、どのモデルでも地表付近で誤差が大きくなることが分かる。熱フラックスについては、解像度を下げたときに TKE を予報するスキームでは過大評価、Smagorinsky 型のモデルでは過小評価する傾向にある。さらに Smagorinsky model では混合層の上部で大きなフラックスの誤差が見られる。これは解像度が低いほど、サブグリッドスケールのフラックスが混合層上端の温度勾配を解消するセンスに働いていることを意味する。このために、解像度が低いときに混合層上端の逆転層を適切に表現できないと解釈できる。また、Dynamic Smagorinsky model では時間積分して得られる平均場の解像度依存性が最も少なかったが、解像度を下げたときに地表付近でのフラックスを過小評価する傾向が最も顕著であった。Smagorinsky model と異なり、混合層上端で Smagorinsky 定数が

小さく診断されることは利点であるが、地表付近でも Smagorinsky 定数が小さく見積られる傾向にあり、これがフラックスの過小評価につながっていると考えられる。

参考文献

- 1) Beare, R. J., et al., 2006 : *Boundary-Layer Meteor.*, **118**, 247–272.
- 2) Germano, M., et al. 1991: *Phys. Fluids*, **A3**, 1760–1765.
- 3) Lilly, D. K., 1992: *Phys. Fluids*, **A4**, 633–635.
- 4) Smagorinsky, J., 1963: *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 99–164.
- 5) Sullivan, P. P., et al., 1994: *Boundary-Layer Meteor.*, **71**, 247–276.

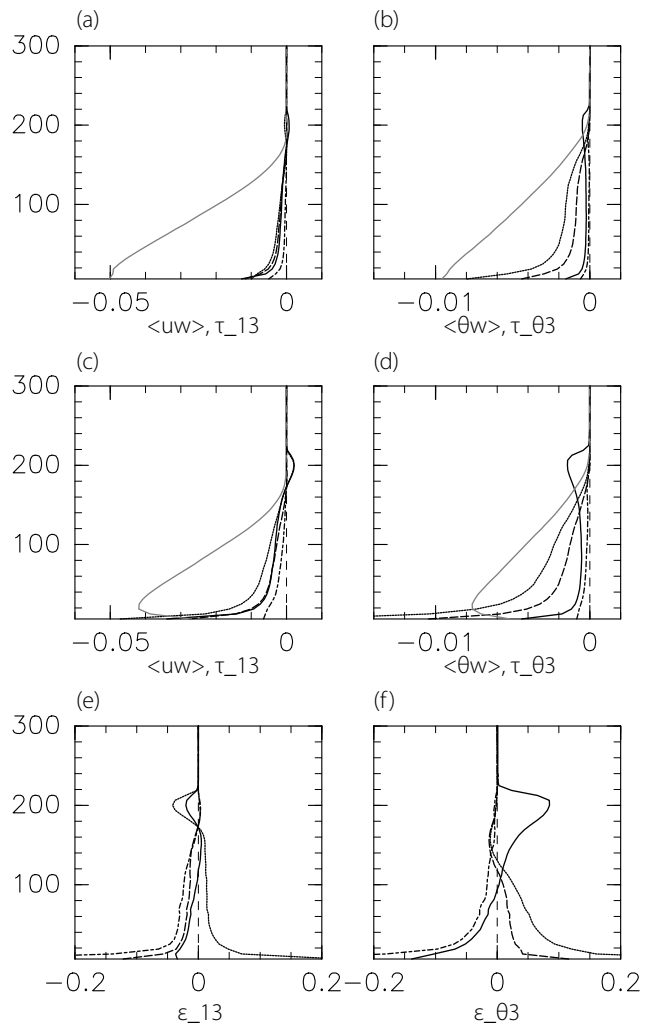


図2: Dynamic Smagorinsky model を用いて得られたスナップショットについて、各スキームでサブグリッドスケールのフラックスの水平平均を見積もった結果。(a) τ_{13} , (b) $\tau_{\theta 3}$, (c) T_{13} , (d) $T_{\theta 3}$, (e) ϵ_{13} , (f) $\epsilon_{\theta 3}$ をそれぞれ示しており、実線、破線、点線、一点鎖線はそれぞれ、Smagorinsky model, Deardorff model, Two-part model, Dynamic Smagorinsky model を用いてサブグリッドストレスを求めた結果に対応している。また、グレーの実線はグリッドスケールのフラックスを表している。また (e)(f) において、 $\epsilon_{13}, \epsilon_{\theta 3}$ は最下層のフラックスで規格化した値をプロットしている。