

a priori 解析に基づいて推定した渦粘性係数の空間解像度依存性

* 北村 祐二 (気象研究所)

1. 序

Large-Eddy Simulation (LES) は格子スケール以下の乱流のみをパラメタライズする手法であり、近年の計算機性能の向上を背景に、気象の数値シミュレーションにおいても広く活用されるようになってきている。しかしながら、LES は乱流の大部分を陽に解像できることを前提としていること、また多くの場合、パラメタリゼーションの際にサブグリッド成分の乱流が等方的であることが仮定されるために、水平・鉛直格子間隔のアスペクト比が1に近いことが要請されることによって、その適用範囲が限定される。さらに、グリッド成分とサブグリッド成分の寄与が同程度になる空間解像度 (terra incognita と呼ばれている) では、乱流パラメタリゼーションを構成する指導原理が確立していないことが近年指摘されている (Wyngaard 2004)。これらの理由から、格子間隔のアスペクト比が大きい場合や、サブグリッド成分の乱流の寄与が大きくなる場合の LES の適用可能性を明らかにする必要がある。本研究では、渦粘性係数や渦熱拡散係数が空間解像度どのような形で依存して、既存の LES で用いられているパラメタリゼーションがどの程度適用可能なかを調べる目的で、不安定混合層を対象に a priori 解析を実施したので、その結果を報告する。

2. 解析方法の概略

a priori 解析とは、何らかのリファレンスとなる解析データを用意し、解析データに対して空間フィルタを作用させることで意図的に高波数成分を取り除き、その結果として生じる影響に着目した解析手法である。本研究では、一定の温度フラックス (0.2 Km/s) を与え続ける設定で、空間解像度 $\Delta = 10, 20, 40$ m のそれぞれの場合について LES を実施し、その結果をリファレンスデータとして用いた。グリッド数は $512 \times 512 \times 64$ ($\Delta = 40$ m), $512 \times 512 \times 128$ ($\Delta = 20$ m), $512 \times 512 \times 256$ ($\Delta = 10$ m) とし、5 時間積分させた。解析対象は混合層下部から中部にあたる 200 m から 800 m までの領域で、最後の 1 時間について平均をとった。

今回の解析では、アスペクト比の影響を調べる目的で水平方向のみにテストフィルタを作用させた。このとき、水平スケール Δ_h に対応する渦熱拡散係数 $\kappa(\Delta_h)$ は Germano identity を用いることにより、以下のように求められる:

$$\kappa_i(\Delta_h) = \frac{F(\bar{u}_i, \Delta_h)F(\bar{\theta}, \Delta_h) - F(\bar{u}_i\bar{\theta}, \Delta_h) - F(\tau_{\theta i}, \Delta_h)}{\partial F(\bar{\theta}, \Delta_h) / \partial x_i}$$

ここで、 $\bar{u}_i, \bar{\theta}$ はリファレンスデータのグリッドスケールの速度および温度であり、 $F(\cdot, \Delta_h)$ は水平スケール Δ_h のフィルタ操作を表す。上式から得られる渦熱拡散

係数 $\kappa_i(\Delta_h)$ は 3 成分存在するが、 $i = 1, 2$ を水平成分、 $i = 3$ を鉛直成分とみなして解析を行った。

3. 結果

図に、a priori 解析に基づいて推定した渦熱拡散係数の水平成分 (左図) と鉛直成分 (右図) の水平フィルタ間隔 Δ_h に対する依存性を示した。本実験において、運動エネルギーのグリッド成分とサブグリッド成分が同程度になる水平スケール (terra incognita に対応するスケール) は 600 m 程度である。まず鉛直成分に着目すると、全ての場合で Δ_h について単調増大となっており、鉛直格子間隔が大きいほど渦熱拡散係数が大きくなっている。このことは、どの水平スケールでも渦熱拡散係数が鉛直格子間隔に依存することを意味している。また、アスペクト比の小さい場合 ($\Delta_h/\Delta_v < 6$ 程度) よりも大きい場合の方が、曲線の傾きが大きくなっていることも見て取れる。一方、水平成分については 3 つの領域に分けることができる。まず、 $\Delta_h/\Delta_v < 6$ の領域では渦熱拡散係数の鉛直成分と水平成分の違いはほとんど見られない。次に、 $\Delta_h/\Delta_v > 6$ から terra incognita に対応する領域では渦熱拡散係数は水平格子間隔のみに依存する形となっている。さらに terra incognita より大きな水平スケールでピークをもつ分布となっているが、この領域では結果のばらつきが非常に大きく、実質的に渦熱拡散係数が格子間隔の関数として推定できない (つまり、LES の前提が破綻する)。今回の結果は、terra incognita スケール程度までは適切なスケールングに基づいて渦熱拡散係数が推定できることを示唆している。

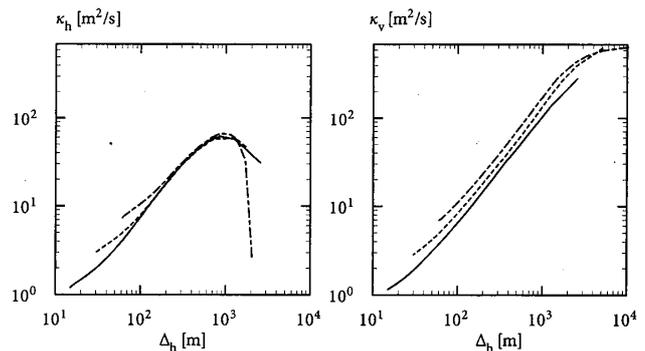


図 1: a priori 解析に基づいて推定した渦熱拡散係数の水平成分 (左図) と鉛直成分 (右図) の水平フィルタ間隔に対する依存性。実線、破線、一点鎖線はそれぞれ、鉛直格子間隔が 10 m, 20 m, 40 m の場合の結果を示している。