

## LES

LES (Large Eddy Simulation) は、3次元の空間を格子状に分割し、それぞれの格子の目を通して流体の運動をコンピュータで計算する数値シミュレーション手法の1つです。格子サイズよりも小さく普遍的な性質を持つ渦はパラメタライズし、すなわちその渦の効果は渦粘性として考慮し、それよりも大きな渦を計算するので、この名が付いています。厳密で詳しい解説は飯塚・近藤 (2008) を参照していただくとして、ここでは概念的な説明をしたいと思います。

流体の運動はNS (Navier-Stokes) 方程式で記述できます。この式は、シアや浮力によってエネルギーを得るスケール  $L$  の渦から、粘性で散逸するスケール  $l$  の渦まで、広範なスケールの渦の運動を包含しています。このため、NS 方程式を支配方程式として流体の運動を解くDNS (Direct Numerical Simulation) という方法では、 $L$  のスケールの渦を超えるサイズの計算領域を確保し、 $l$  のスケールの渦をも解像できる小さなサイズの格子を取ります。しかし、空気のように粘性の小さな流体の場合、 $l$  は  $L$  に比べて桁違いに小さくなるので、DNS は非現実的なコンピュータの記憶容量と計算処理能力を必要とします。ところが幸い、 $L$  よりもある程度小さなスケールの渦の普遍的な性質 (いわゆる慣性小領域の  $-5/3$  乗則) は分かっているので、 $L$  よりも小さく  $l$  よりも大きなサイズ  $\Delta$  の格子を取り、 $\Delta$  よりも小さな渦は平均して見かけ上消去しつつ、その渦の効果は渦粘性項で表す Filtered NS 方程式を構築できます。これが LES の支配方程式となりますが、 $\Delta$  の大きさは大雑把には大気境界層の厚さに依存します。

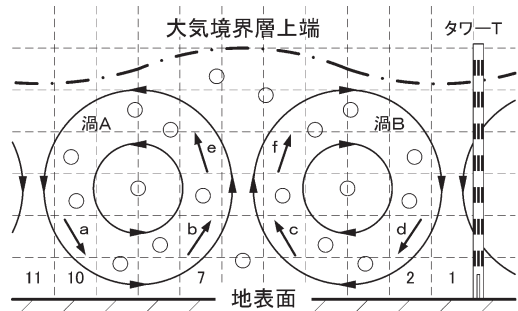
大気境界層内の渦を模式的に示すと第1図のようになります。 $L$  のスケールの渦を大きな渦AとBの円、 $l$  のスケールの渦を最も小さな円で示しています。縦横の破線は空間を分割する格子を表します。LES は、サイズ  $\Delta$  の格子よりも小さな渦 (実際には大きな渦も一部含む) を平均した流れ (例えば矢印 a

~f) を扱います。渦AやBの運動を計算するためには、格子ごとの矢印で渦の形状が表現できるように  $\Delta$  は渦の半径、すなわち大気境界層の厚さの半分よりも小さくしなければならないことが分かります。

数値シミュレーション手法は、日々の天気予報でも利用されています。しかし、その方法はLESではなく、RANS (Reynolds-Averaged NS; アンサンブル平均NS) 方程式に基づく方法です。RANSも簡単に説明しておきましょう。第1図と同様の渦が水平方向に延々と続くとするとき、地表面から同じ高さ (例えば1~11の番号を振った高さ) のすべての格子で観測される流れのデータは、1つの系の母集団と考えることができます。この平均がアンサンブル平均であり、高さごとの系の平均値は鉛直1次元の分布となるので、この平均ではすべての渦は見かけ上消えてしまいます。つまりRANSは、運動量や熱量の鉛直輸送に寄与するスケール  $L$  の渦をもパラメタライズし、 $L$  よりも小さな渦は解像しない方程式です。

余談ですが、アンサンブル平均は現象が定常ならば時間平均に置き換えることができます。第1図の渦が形状を保ちながら水平風により左から右に流れているとすると、タワーTでは、時間の経過とともに1, 2, ..., 11, ...番の流れを観測するので、両者の平均が一致することが分かります。

LESは、性質がよく分かっている小さな渦しかパ



第1図 大気境界層内の渦の模式図。

ラメタライズしません。したがって、RANSと比較すると計算結果の信頼性は高いと言えます。しかしLESは、渦AやBを解像できるサイズの格子を取らなければならないので、格子サイズに特に制約のないRANSよりも多くの計算を必要とします。したがってLESは、時間との勝負となる日々の天気予報には不向きで、もっぱら研究に利用されています。ただし、最近の計算機の進歩はめざましく、パーソナルコ

ンピュータでも、ある程度のLESの計算は可能になっています。

#### 参 考 文 献

飯塚 悟, 近藤裕昭, 2008: LESの基礎. 気象研究ノート, (219), 1-20.

(防衛大学校応用科学群地球海洋学科 中西幹郎)