

接地境界層における乱流の構造に関する研究

○毛利英明、萩野谷成徳、北村祐二、三上正男(物理気象研究部)

1. はじめに

地球温暖化等の環境問題を背景として、物質循環・水循環過程の把握、さらに数値予報の高度化という観点から、運動量・熱・水蒸気等の輸送を担う接地境界層の乱流運動を解明することが要請されている。本研究では、境界層乱流の数値計算・風洞実験そして野外観測を行った。

(1) 乱流を明示的に計算するLarge Eddy Simulation (LES)を自主開発し、境界層乱流の数値計算を行った。

(2) 接地境界層乱流におけるようにレイノルズ数が非常に高い場合の乱流の振舞を解明するため、風洞実験を行った。

(3) とくに水蒸気の乱流輸送に注目し、様々な陸面状態において、接地境界層の野外観測を行った。

2. 接地境界層乱流のLarge Eddy Simulation

接地境界層乱流のための数値モデルは、数mスケールの運動を解像する必要がある。その有望な計算手法がLESである。格子スケール以上の運動が直接計算されるのに対し(文献1と2)、格子スケール以下の運動は平滑化され、格子スケール以上への寄与だけがパラメタライズされる。格子間隔が十分に小さければ、パラメタライズの対象が接地境界層の構造に依存しない小スケールの普遍的乱流運動となる。こうした小スケール乱流運動は特性が比較的明らかであり、LESには高精度の数値計算が期待される。

我々はLESに基づく数値モデルを自主開発し、接地境界層乱流の計算を行った。例を第1図に示す。安定成層中の境界層乱流における或る時刻での温位分布である。左右が平均風方向(右側が風下)、上下が鉛直方向で、暖色系ほど高温になる。

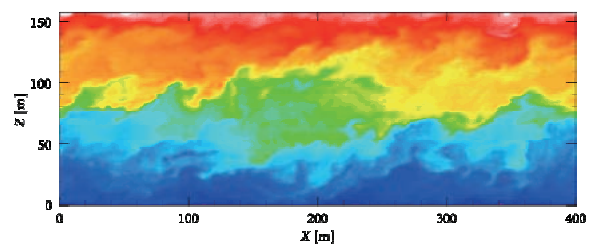
これまで格子スケール以下のLESパラメタライゼーションは数多く提案されている。我々は異なるパラメタライゼーションを用いた場合の計算結果を比較した。例を第2図に示す。安定成層中の境界層乱流における平均風速と平均温位の鉛直分布で、異なる曲線が異なるパラメタライゼーションに対応する(実線が第1図の結果に相当)。パラメタライゼーションが異なると計算結果は顕著に異なる。従って、計算結果を風洞実験・野外観測における実測値とも比較しつつ、十分な精度が保証されるパラメタライゼーションを見出すための研究を推進していくことが重要である。

3. 高レイノルズ数乱流の風洞実験

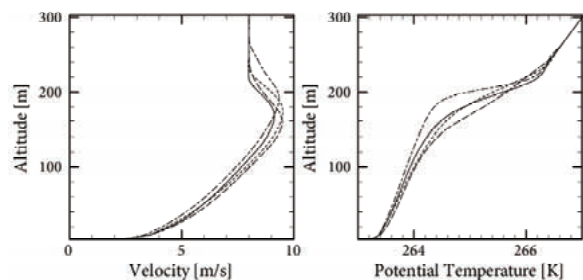
LESパラメタライゼーションが対象とする小スケール乱流運動を調べる手段は、現在のところ室内実験しか無い。しかし室内実験において生成される乱流のレイノルズ数は、接地境界層乱流のレイノルズ数に比べ一般的に低い。乱流の特性の多くはレイノルズ数に依存するから、接地境界層乱流の理解を視野にいれた実験では、レイノルズ数を出来るだけ高くして、接地境界層での値に近づける必要がある。

国内有数の大型風洞である気象研風洞では、他の小型風洞で達成困難な高いレイノルズ数が得られる。小スケール乱流運動を特徴づける微細長レイノルズ数 Re_λ の値が、接地境界層において通常1,000-10,000なのに対し、本研究課題では気象研究所大型風洞を用い2,000までの値を達成し、速度変動の時系列データを得た(文献3と4)。

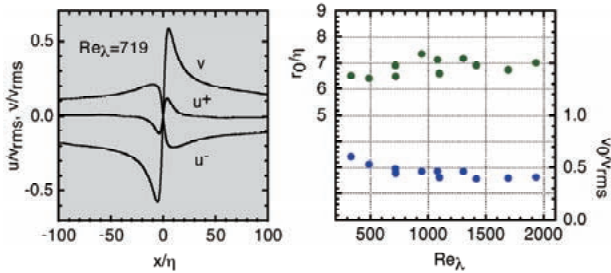
乱流の小スケールにおける普遍的な空間構造として渦管がある。渦度が顕著な管状の領域で、その半径 r_0 は小スケールを特徴づけるコルモゴロフ長 η 程度である。我々は上の時系列データから渦管構造を抽出し、半径 r_0 と旋回速度 v_0 を微細長レイノルズ数 Re_λ の関数として調べた(文献3)。結果を第3図に示す。微細長レイノルズ数 Re_λ が充分に高いと、渦管半径 r_0 はコルモゴロフ長 η の数倍程度、旋回速度 v_0 は速度揺らぎの標準偏差 v_{rms} 程度の一定値をとることが解る。つまり渦管は高レイノルズ数において普遍的パラメータを持つ。



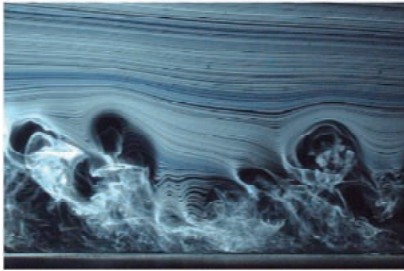
第1図 LESから得られた接地境界層の瞬間温位分布。



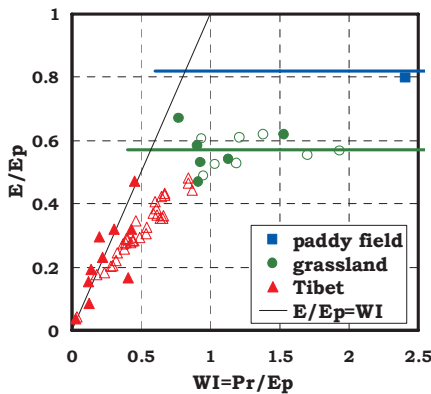
第2図 LESから得られた接地境界層の平均風速(左)と平均温位(右)の鉛直分布。



第3図 風洞実験から得られた渦管の速度プロファイル(左)と渦管半径 r_0 ・回転速度 v_0 のレイノルズ数依存性(右)。



第4図 風洞実験で可視化された境界層乱流の空間構造。



第5図 野外観測から得られた気候湿度 WI と蒸発量 E/Ep 。

このように乱流の高レイノルズ数における空間構造は普遍的性質を持つと期待される。乱流運動の理解ひいてはLESパラメタリゼーション開発のため、渦管以外の空間構造(第4図)についても研究を推進していくことが重要である。

4. 接地境界層乱流による水蒸気輸送の野外観測

接地境界層における水蒸気輸送は、大気の状態に加え、陸面状態にも依存する。そこで気温・湿度・風速等の大気状態を代表するポテンシャル蒸発量 Ep と陸面の乾燥状態を代表する降水量 Pr の比である気候湿度 $WI=Pr/Ep$ を、様々な陸面状態における数ヶ月間の野外観測から得られたデータを用い調べた。

第5図に、気候湿度 WI を、実蒸発量 E をポテンシャル蒸発量 Ep で規格化した無次元蒸発量 E/Ep と比較する。塗り潰し印は実測値、白抜き印は気象官署の現業データから経験式を

用い評価した値である。水田(青印)と草地(緑印)に関し、我々の結果が従来より提案されている関係式(横線)と矛盾しないことを見出した。さらに、これまで空白だった乾燥域について、我々のチベットにおける野外観測データ(文献5と6)から値を得た(赤印)。これら乾燥域で降水量 Pr が蒸発量 E と等しいことが解る(黒線)。

このように大気状態を代表するポテンシャル蒸発量 Ep で規格化すれば、様々な大気状態における乱流の水蒸気輸送を単一の関係で表現できる。この関係は観測の空白域における水収支の評価に有用である。陸面の乾燥状態を代表する降水量 Pr に加え、地中温度分布や大気の状態等に関しても、代表的な指標を見出し、それらを用いた水蒸気・熱の乱流輸送の研究を推進していくことが重要である。

5. まとめ

境界層乱流の野外観測と風洞実験から、大気状態やレイノルズ数に依存しない普遍則を得た。普遍則の探究は、観測・実験技術を開発しつつ、今後も推進することが重要である。また我々はLESの自主開発も行い、境界層乱流の数値計算を行った。開発したLESは、そのパラメタリゼーションを改良しつつ、境界層乱流における普遍則の探究に活用することが重要である。こうした普遍則は接地境界層乱流の理解ひいては数値予報の高度化に大きく寄与すると期待される。

参考文献

- (1) Y. Kitamura, and Y. Matsuda 2006: The k_H^{-3} and $k_H^{-5/3}$ spectra in stratified turbulence, Geophys. Res. Lett., 33, L05809.
- (2) Y. Kitamura, and K. Ishioka 2007: Equatorial jets in decaying shallow-water turbulence on a rotating sphere, J. Atmos. Sci., 64, 3340-3353.
- (3) H. Mouri, A. Hori, and Y. Kawashima 2007: Laboratory experiments for intense vortical structures in turbulence velocity fields, Phys. Fluids, 19, 055101
- (4) H. Mouri, A. Hori, and M. Takaoka 2008: Fluctuations of statistics among subregions of a turbulence velocity fields, Phys. Fluids, 20, 035108.
- (5) Y. Oku, H. Ishikawa, S. Haginoya, and Y. Ma 2006: Recent trends in land surface temperature on the Tibetan Plateau, J. Climate, 19, 2995-3003.
- (6) K. Wang, Z. Wan, P. Wang, M. Sparrow, J. Liu, and S. Haginoya 2007: Evaluation and improvement of the MODIS land surface temperature/emissivity products using ground-based measurements at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau, Int. J. Remote Sensing, 2007, 28, 2549-2565.