

風洞実験による中立大気接地層内サブグリッドスケール乱流の空間構造に対するフィルターサイズ影響への洞察 Insight into filter-size effect on SGS turbulence structure in the neutral-surface layer with wind-tunnel experiment

服部 康男^{1*}, チンホー モーエン², 須藤 仁¹, 平口 博丸¹
Yasuo Hattori^{1*}, Chin-Hoh Moeng², Hitoshi Suto¹, Hiromaru Hirakuchi¹

¹ (財) 電力中央研究所, ² 米国大気研究センター
¹ CRIEPI, ² NCAR

接地境界層内のサブグリッドスケール (SGS) 乱流構造の同定は、数値気象予報モデルによるラージエディシミュレーション (LES) に関連した重要な課題である。そのような LES は、計算機能力の向上とともに、大気乱流研究の有力なツールとなりつつある (e.g. Takemi and Rotunno 2003, Michioka and Chow 2008, Catalano and Moeng 2010, Hattori et al. 2011)。しかし、必ずしも乱流のエネルギー保有渦を捉えるために十分な格子解像度を与えておらず (特に、接地層近傍において)、その精度向上には、SGS フラックスへのモデル化に更なる改良が必要と考えられている (Wyngaard 2004, Chow et al. 2005, Moeng et al. 2007)。この課題の解決を図るべく、観測を通じた SGS 乱流の特性把握も進んでいるが (e.g. Sullivan et al. 2003)、高解像度を確保した多次元風速計測が困難なこともあり、空間構造の詳細については不明な点が残されている。

このような状況を勘案して、著者ら (Hattori et al. 2010, 服部ら 2009) は、中立大気接地層の構造解明に、多次元計測の実施が容易な風洞実験の活用を検討している。ここでは、大気境界層に内在する大規模 (接地層の風速勾配が作り出す乱流渦より大きな) な変動をアクティブ格子により付加することで、風洞測定部の乱流境界層下層の対数領域と大気境界層下層の中立大気接地層との間で乱流構造の相似性を得ている。

本研究では、この対数領域を対象とした粒子画像流速測定法 (PIV) による 2 次元 2 成分風速測定を行った。得られた速度ベクトルにフィルタ処理を施し、SGS 乱流成分を抽出した後、その空間構造をフィルターサイズの影響に留意しつつ調べた。

風洞実験における大気接地層の模擬方法は、既報 (Hattori et al. 2010, 服部ら 2009) と同じであるため、ここでは概略のみを示す。(財) 電中研の堅型風洞を使用した。風洞の主流速度を 5ms^{-1} に設定した。測定部 (面積 $1000\times 1000\text{mm}^2$, 長さ 6200mm) の上流に設置したアクティブグリッドの動作条件を調整し、測定位置 (アクティブ格子から 4180mm 下流位置) での対数領域内の乱流統計量を大気接地層の値と一致させた。対数領域厚さ h_s は 70mm であった。

本研究では、PIV による鉛直 2 次元断面内の 2 成分風速測定を行った。測定部にオイルミストを混入し、シート状のダブルパルスレーザ光を照射することで流れ場を可視化した。対数領域厚さ h_s をカバーする可視化画像 (観察領域サイズ $88.4\times 88.4\text{mm}^2$) を CCD カメラ ($2048\times 2048\text{pixel}^2$) により撮影した。風速ベクトルの算出には相互相関法を用いた。検査領域を $1.4\times 1.4\text{mm}^2$ とし、50% のオーバーラップを付加することで、各画面組につき、4096 個の風速ベクトルを得た。動的平均操作に基づき、過誤ベクトルを除去した後、3000 時刻 (サンプリング周波数は 7Hz 程度) のベクトルデータから乱流統計量を算出した。これにより得られる対数領域内の平均風速、変動風速の乱れ強さは、熱線計測の値 (Hattori et al. 2010) と定量的に一致した。風速ベクトルに対して、主流方向に対してトップハット型フィルタ処理を施すことで、SGS 変動風速を求めた (Sullivan et al. 2003, Natrajan and Christensen 2006, Inagaki and Kanda 2010)。

はじめに、対数領域高さでのフィルタ幅 D_f に対する SGS 変動風速の乱れ強さの変化を調べた。フィルタ幅 D_f の増加とともに SGS 成分の寄与が顕著となった。 $D_f/h_s \ll 1$ では、グリッドスケール (GS) 成分が大半を占めるが、 $D_f/h_s = 0.5$ では、SGS 成分が支配的となった。この挙動は、実大気接地層の観測結果 (Sullivan et al. 2003) と定量的に一致した。同時に SGS 変動風速の確率密度関数 (PDF) 分布も変化した。 $D_f/h_s \ll 1$ の結果と比べて $D_f/h_s = 0.5$ では、大規模低風速塊の出現頻度が低くなった。これは、 $D_f/h_s = 0.5$ の SGS 成分でのバーストライクイベントの減衰を意味するものであり、大気境界層内の大規模擾乱の直接的な影響を示唆する (Hattori et al. 2010)。

次に、固有直交関数展開 (Meyer et al. 2007) を用いて、SGS 変動風速の空間構造を調べた。 $D_f/h_s \ll 1$ では渦構造が存在し、 $D_f/h_s = 0.5$ では組織構造 (Adrian 2000) に類似した流体運動が存在することを突き止めた。

最後に、数値気象モデル LES の格子解像度が $D_f/h_s = 1$ 程度であること (Sullivan et al. 2003) を勘案して、 $D_f/h_s = 0.5$ での SGS 変動風速によるフラックスと GS 成分の勾配テンソルとの相関を調べた。両者の相関は極めて弱く、通常の勾配拡散型のモデルによる LES は、この SGS フラックスの表現に不適であることを明らかにした。

キーワード: 組織構造, ラージエディシミュレーション, 接地層, 乱流, 風洞実験
Keywords: coherence structure, LES, surface layer, turbulence, wind-tunnel experiment