

PIV 法を用いた接地境界層における乱流構造の把握 —観測システム開発と予備実験結果—

森 文洋^{1,2}、下山 宏²、森 章一³、新堀 邦夫³、渡辺 力²

1. 北海道大学 環境科学院 地球圏科学専攻
2. 北海道大学 低温科学研究所 大気陸面相互作用グループ
3. 北海道大学 低温科学研究所 技術部

1. はじめに

地面から高さ数 10 メートルに存在する接地境界層では、地表面と大気間の熱・水蒸気・運動量などの輸送が活発に行われている。そしてこれらは乱流によって支配されていることから、接地境界層における乱流構造の把握は非常に重要である。近年、LES (Large Eddy Simulation)、ドップラーライダーなどの結果から、組織的 (3 次元) な乱流構造の存在が示唆されており、このような組織的な構造が、各輸送量に対して大きな影響を持つことが指摘されている (Drobinski et al., 2006; 藤吉ら, 2005)。接地境界層の乱流スケールは数メートル~数 10 メートル程であるため、従来行われてきた超音波風速計等を用いた点ベースの観測手法から、その組織的な乱流の空間構造を把握するには、点を線として表現するような大量の測器が必要であり、現実的には困難である。

そこで、本研究では野外での乱流観測の新たな手法として、従来風洞実験で主に使用されてきた PIV 法 (Particle Image Velocimetry: 粒子画像処理流速測定法) を野外観測に適用し、接地境界層における乱流の空間構造を把握することを目的とする。PIV 法とは、流れ場にトレーサーと呼ばれるマーカーを混入させ、シート状のレーザ光を照射し流れを可視化、その様子を CCD 素子などの映像記録媒体によって記録し、粒子の移動量を解析することで流れ場の瞬時・多点の速度情報を抽出する手法である。本研究を実施するためにまず、野外における PIV 法観測システムの開発を行った。

2. 観測システムの開発

PIV 法はこれまで風洞実験など小スケール・安定風向の条件で行われてきた。例えば、建物周辺に生成される流れの解析に対し、風洞内に実スケールの建物を小さな模型として再現し、人工的に生成された風を流すことによって生じる模型周辺の流れ場を相似則に基づいて解析する、などがある。このような実験室で行われてきた PIV 法を野外に適用する際に、問題点として、1) トレーサーを実スケールである数 10 メートル規模に均一に散布しなければならない、2) レーザ光を実スケール規模に照射し、且つ映像記録素子が探知できる光量でなければならない、3) 風向変動への対応や様々な地表面条件下での観測が実施できるよう、観測システムを固定式ではなく可動式にする、といったものが挙げられる。

そこで、本研究ではまず野外実験に適したシーディング装置を開発した。図1はシーディング装置の概観を示したものである。舞台演出などで用いられる Fog マシン (V1 fogger; ANTARI) で生成したシーディング粒子は塩ビパイプを通して、幅約 2.5 m の平板状の排出口から排出される。その際、塩ビパイプ途中に設置したファンで外気を取り込む仕組みになっている。

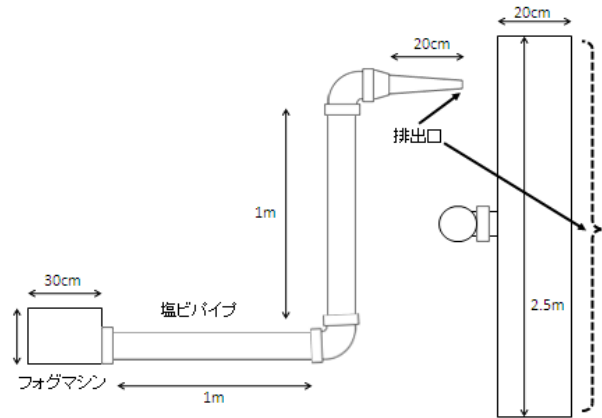


図1. シーディング装置概観図。左は側面、右は先端部分のみを上から描いたもの。

開発にあたっての焦点は、上述のように、シーディング装置が広範囲・連続的にトレーサー粒子を均等に散布出来ること、また、粒子の温度と外気温に差がある場合には、浮力などの影響が生じるため、これらの温度差を出来るだけ小さくすること、の2点である。このシーディング装置による排出の均一性、浮力の抑制に効果に関する実験結果を図2および図3に示す。図2は排出口からの掃き出しの風速を示したものであり、室内において熱線風速計を用いて排出口の風速を 0.3 m 間隔で計測した。排出口の中心付近である 1.2 m、1.5 m で風速が若干大きく、風速の変動が大きい傾向が見られたが、これらは標準偏差の範囲内であり、掃き出し風速は均一であると考えられる。図3はトレーサー粒子と外気との温度差を示したものである。温度計測には熱電対温度計を使用し、排出口に等間隔で5個、ファン2台に1つずつ取り付け、それぞれの平均値をトレーサー粒子と外気の温度とした。温度差は 0.7~1.6 °C の範囲で変動しているが、概ね全体の温度差の平均値 1.1 °C を中心としたランダムな変動であった。図3ではデータの開始から終わりにかけて徐々に上昇しているように見られるが、別なケースの実験から、この結果が徐々に温度差が上昇するものではなく、ランダムな変動の一環であることが確認されている。このことから、外気とトレーサー粒子の温度差は約 1 °C であり、浮力の発生を抑制出来ていると考えられる。

このシーディング装置は、塩ビパイプの長さで設定高度が自由に設定可能であり、さらに縦・横自在に台数を増やして設置できるため、様々な観測条件に対応することが可能である。

3. 観測結果・展望

開発したシーディング装置を用いて、平坦で一様な雪面上・牧草地において PIV 観測を実施した。トレーサー粒子には滞留時間が長い Fog 専用液 ノーマル (Dantec Dynamics) を使用した。野外では広範囲・高出力の照射が必要と考えられるため、出力 5 W の連続波レーザーシート (G5000 カトウ光研; Nd:Yag レーザ) を使用した。画像の記

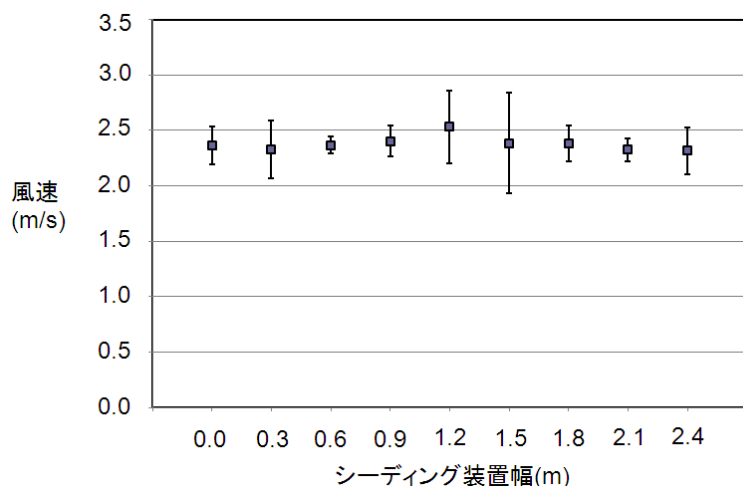


図 2. シーディング装置掃き出し口における風速分布。プロットはサンプリング周波数 1 Hz で 60 秒間計測の平均値、縦棒は標準偏差を示す。

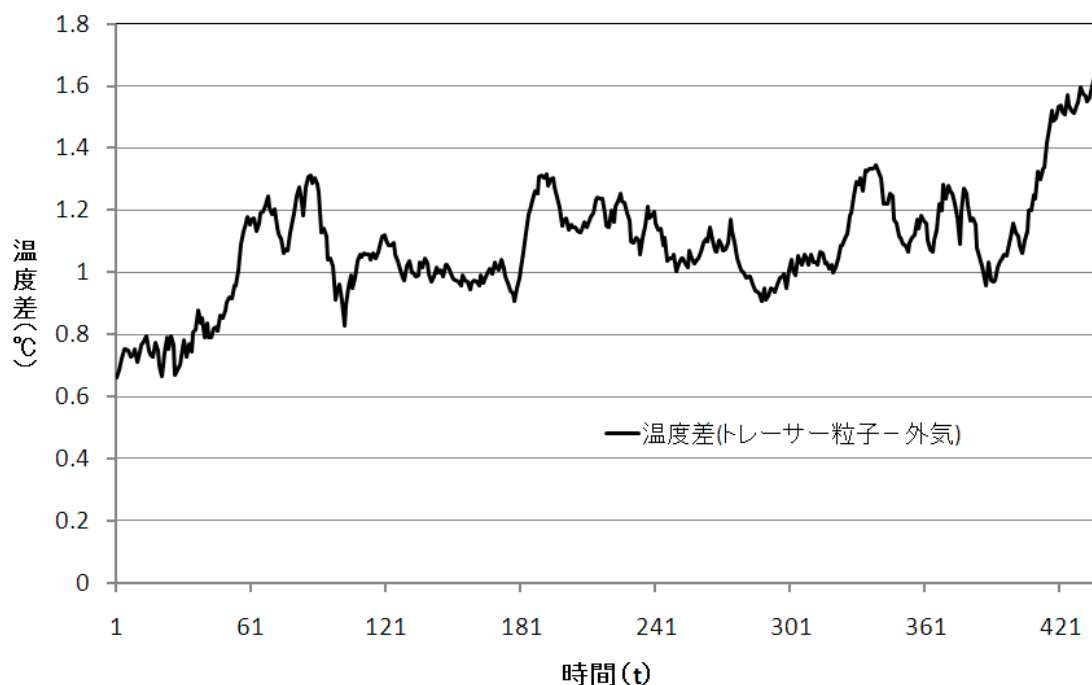


図 3. トレーサー粒子と外気の温度差。トレーサー粒子の温度から外気の温度を引いた値。

録媒体には画像の記録には高解像度であり、可搬性がある民生用フルハイビジョンカメラ (HDR-CV520V; Sony) を使用した。画像解析には直接相互相関法を用いる 2 次元流体解析ソフト (Dipp-Flow; ディテクト) を使用した。

本観測ではシーディング装置下流約 30 m において鉛直断面主流方向約 4.5 m × 鉛直方向 3.0 m の撮影範囲を設けた。得られた動画から速度ベクトルを算出したものを図 4 に示す。画像中央部 (青丸) とその風上側 (画像右手; 赤丸) に、水平風速の速い下降流と水平風速の遅い上昇流のまとまった構造が見られた。これらは運動量輸送に寄与する sweep (水平風速の速い下降流) と ejection (水平風速の遅い上昇流) であると思われる。

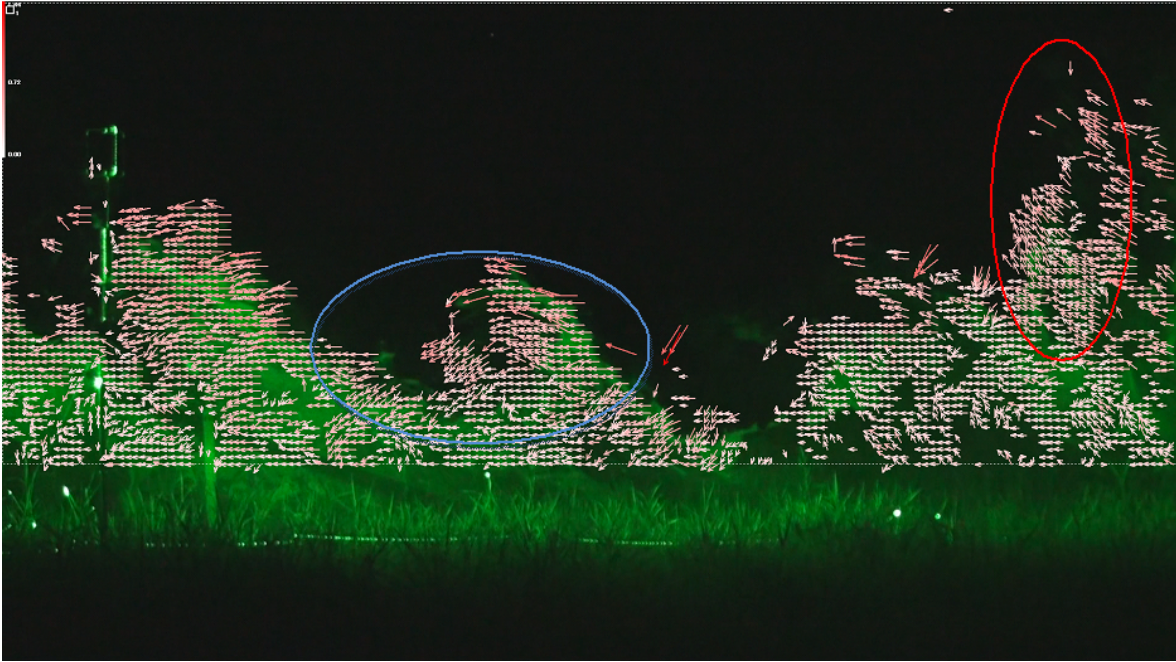


図 4. 撮影された画像と PIV 解析によるベクトル算出図。主風向は右から左、画像範囲は $4.5 \text{ m} \times 3.1 \text{ m}$ 。青丸は水平風速の速い下降流、赤丸は水平風速の遅い上昇流を示している。

動画では約 10 秒の短い間にこれらが繰り返し発生しているような現象が確認できた。また、地表面付近を流れてきたトレーサー粒子が、先端部を渦巻かせ、風下側に進みながら上昇していく（画面左斜め上方向に進んでいく）構造も見られた。これは Adrian らが示唆したヘアピン渦構造だと思われる。

本研究で開発した PIV システムを用いて野外観測を行うことによって、実際の地表面上で、上述のような構造の面的・多点での速度情報を得ることが可能となった。しかしながら、鉛直方向へのトレーサー散布不足、地表面上でのレーザ光の乱反射などにより解析画面全体での乱流統計量算出には至らなかった。今後はこれらの問題点を解決し、連続したデータ取得を目指していく。

参考文献

- Drobinski P, Carlotti P, Newsom RK, Banta RM, Foster RC, Redelsperger J-L.: The structure of the near-neutral atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **61**, 699–714, 2004.
- 藤吉 康志, 山下 和也, 藤原 忠誠: 3 次元走査型コヒーレントドップラーライダーによる大気境界層の流れの可視化, *天気*, **52**, 665–666, 2005.
- Adrian, R.J., Meinhart, C.D., Tomkins, C.D.: Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.*, **422**, 1–54, 2000.