

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 17 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26550002

研究課題名(和文) 安定接地境界層における乱流水平構造の可視化計測

研究課題名(英文) Visualization measurements of turbulence spatial structures in the stable surface boundary layers

研究代表者

渡辺 力 (WATANABE, Tsutomu)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：60353918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、PIV法を屋外観測に応用し、これまで観測できなかった、安定接地境界層における小スケールの乱流現象を面的に捉える手法を開発して検証することを主目的として実施した。得られた主な成果は以下の通りである。(1) 屋外の風を可視化するため、広範囲にトレーサ粒子を散布することのできるシーディング装置が開発された。(2) レーザシート面に対して斜め方向から撮影される動画から、透視変換や画像相関によって、微小時間間隔におけるトレーサの移動速度を算出するコードが開発された。(3) 屋外での実証実験により、本研究のPIV観測システムによって、超音波風速計とほぼ同等な乱流計測が行えることが確認された。

研究成果の概要(英文)：This study aimed at developing a new technique for in-situ measurements of turbulence spatial structures in the stable boundary layers. A PIV method was introduced to measure turbulence velocities in outdoor conditions. Main achievements include the following. (1) A specially designed seeding device was developed to supply tracer particles into a large area of measurements in the field. (2) A parallelized computer software was compiled to efficiently calculate velocities through perspective transformation and cross-correlations of images taken at an oblique angle. (3) Field tests confirmed that the developed PIV system was able to measure turbulence velocities as accurate as sonic anemometers.

研究分野：境界層気象学

キーワード：PIV 乱流 接地境界層 空間構造 その場観測 流れの可視化

## 1. 研究開始当初の背景

現在、世界中で陸上生態系 - 大気間の CO<sub>2</sub> フラックスのモニタリングを目的としたタワー観測が行なわれている。しかし、これらの観測現場では、大気が安定成層となる夜間に、渦相関法による CO<sub>2</sub> フラックスが過小評価になるという共通の問題が生じている。安定成層下で生じる乱流現象が時空間的に間欠的・突発的であるため、渦相関法的前提であるエルゴード性が満たされないことがその理由の一つである。

従来、接地境界層における熱や物質の輸送現象は、水平一様性と時間的定常性を前提とした理論 (Monin-Obukhov 相似則) によって説明されてきた。しかし、近年の乱流計測の広まりとともに、特に安定成層時において、その理論に限界があることが認識されるようになった。応用上も、たとえば気候・気象モデルの地表面過程において、静的安定度が強い場合であっても一定以上の熱輸送が生じるような人工的な調節を施さなければ、地表面温度が非現実的な値にまで低下してしまうという問題が生じている。

このように、問題の存在は広く認識されながらも、安定成層時の乱流現象やその効果についての本質的な理解が進展しない背景には、従来の観測スタイル (タワーによる点計測) の限界がある。これまで、安定成層下の乱流現象に関する観測的研究は数多くなされてきた (例えば、Kondo et al., 1978; Mahrt, 1999 他)。しかし、観測対象が時空間スケールの小さな現象であるため、1本~数本程度の気象観測タワーを用いて風速や気温等の時間変動を測定するという従来の観測手法では、その空間構造をとらえることが難しく、屋外のフィールドにおいては、未だその全容が明らかにされていない。一方、風洞実験や数値シミュレーションによって、安定成層下の乱流現象を再現する研究も行われている (例えば、Ohya et al., 2008; Flores and Riley, 2011 他)。こうした研究は、理想条件における生粋な乱流現象のダイナミクスを解明する点において重要な役割を果たす。しかし、時空間スケールの異なる複数の要因が乱流形成に関与する現実的な安定接地層を再現するのは困難である。

## 2. 研究の目的

上で述べた現状にブレークスルーをもたらすには、現実の安定接地層における乱流の空間的な構造を、「その場で」観測する技術の開発が何より必要であり、本研究はその要請に答えることを目的とするものである。具体的には、地表面付近の流れの水平断面を可視化し、画像解析によって流速の水平分布 (と時間変化) を計測する新たな観測手法を提案する。

研究の主眼は、風向・風速が定まらない現

実の環境において、解析に堪える良質な画像を継続的に取得できるようにするためにはどのようにすればよいかという点にある。本研究では、広範なシーディングと、レーザシート面に対してあえて浅い角度から撮影する方法、および全装置の可搬性を確保するなどのアイデアを実現することにより、目標の達成を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 野外 PIV 観測システム

PIV (Particle Image Velocimetry: 粒子画像流速計測法) とは、流れに混入させたトレーサ粒子にシート状の光を照射し、散乱される光をカメラで撮影することにより画像として捉え、画像解析によってトレーサの移動速度を求める方法である。微小時間を隔てた 2 時刻の画像からトレーサ粒子の変位を算出することで、撮影面内の 2 次元的な流速の空間分布を求めることができる。

PIV は、従来、室内の風洞や水路など、流れや撮影の条件が安定した環境で用いられて来た手法である。それを、本研究では、変動の大きな屋外環境へ適用するため、以下のような技術の開発と検証を行う。

### シーディング装置

風向変動の大きな屋外環境で、撮影範囲内に常にトレーサ粒子を供給するために、広範囲にトレーサ粒子を散布することのできるシーディング装置を開発する。トレーサ発生装置によって生成される湯気状のトレーサに、空気を十分に混合することで浮力をなくし、大型の排出口から大気中へ放出する仕様とすることで、風への追従性のよい大量のトレーサを広範囲に散布することを実現する。また、屋外観測にはつきものの、予期せぬ観測条件の変化に臨機的に対応できるようにするため、装置の展開・移動・撤収が速やかにできるような工夫を施す。開発された装置は、屋内・屋外で試運転を行いながら、動作確認や改良を進める。

### 撮影方法

地表面付近の乱流空間構造を適切に観測するためには、10 数 m 四方程度の範囲にわたる流れ場を計測する必要がある。そのため、光源には高出力のレーザシート光を用いる。また、PIV の画像は、シート面に垂直な方向から撮影することが多いが、そうすると撮影範囲が大きくなるにつれて輝度が低下し、解析に耐えうる画像の取得が困難になる。本研究では、シート面に対して斜めの方向 (垂直よりも浅い角度) から撮影することで、トレーサ粒子からの前方散乱光または後方散乱光 (側方散乱光よりも散乱強度が強い) をとらえ、安定して良質な画像を取得する方法を確立する。

## (2) 画像解析の手法とソフトウェア開発

斜め方向から撮影された個々の画像は、透視変換によって、真上の視点から撮影されたときに得られるであろう画像に変換した後に、PIV の解析に用いることにする。そのため、各観測に先立ち、撮影範囲内の5 m四方の4 点にマーカを設置した画像を撮影し、透視変換の変換行列を求める。PIV の解析は相互相関法に基づいて行うが、屋外での大きな風速変動にも対応できる適切なアルゴリズムを用いる。これらの処理を高速に行えるプログラムを開発することにより、大量に取得される画像の迅速な解析を可能にする。

## (3) 超音波風速計との比較による検証

札幌市羊ヶ丘にある北海道農業研究センター内の牧草地において、開発されたシステムの実証実験を実施する。現地では、PIV 画像の撮影範囲内に、複数台の超音波風速計をあらかじめ設置しておき、PIV との同時計測を行う。PIV によって算出された風速値を超音波風速計による実測値と比較することで、算出結果の検証を行う。

## 4. 研究成果

### (1) 開発されたシステムの概要

#### シーディング装置

長さ2 m、幅40 cm程度のプラスチック製ダンボール板の断面をトレーサの排出口として用いることで、流れを過度に乱さずに、トレーサを広範囲に散布することを可能にした。また、粒子の生成装置と排出口の間を長さ20 m程度の蛇腹ホースで連結することにより、観測現場での速やかな移動・展開を可能にした。さらに、複数のシーディング装置を、撮影エリアを中心とする風上の円弧上に配置するとともに、測量用三脚を用いた可搬性の高い設置方式を採ることにより、観測実施中の大きな風向変動にも対応できるようにした。これらの技術開発の結果、地表面直上の水平面における乱流構造を、20分以上にわたり連続して可視化・撮影することが可能となった。

#### 解析手法及びソフトウェア開発

PIV の演算処理においては、画像内に写り込んだ測器等の領域(背景)を演算の対象から除外するためのマスキング処理を施すアルゴリズムを開発した。マスキングを施す領域は、撮影された複数枚の画像を重ねあわせて平均を取ることで、動きのない背景部分を浮き上がらせることによって取得することができる。その上で、時間的に前後して撮影された2枚の画像間の相互相関に基づき、トレーサの移動ベクトルを算出する。

PIV の解析アルゴリズムには、大域的な移動方向を最初に求め、次第に精密な移動ベクトルを算出する再帰的な手法を取り入れた。それによって、誤ベクトルの発生を低減することができた。また、次のような高速化を施

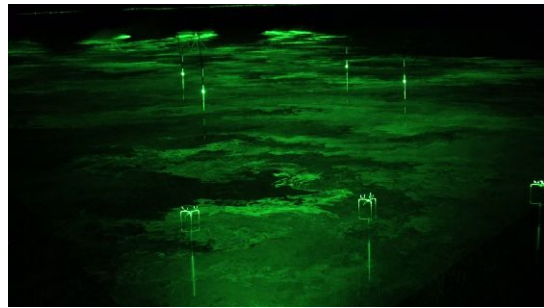


図1. 撮影された画像の例

高さ2.5m程度の脚立の上からレーザシート面を見下ろすように撮影されたもの。画面上部に配置されたシーディング装置からトレーサが散布され、風によって画面下部に向かって流されている。中央上部の4つの明点は5m四方に設置されたマーカであり、下部には検証用の超音波風速計が3台写っている。

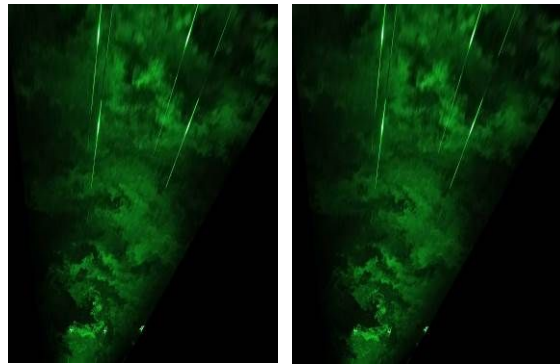


図2. 透視変換された画像の例

図1の画像と、その0.1秒後に撮影された画像をそれぞれ真上からの視点に透視変換したものの。

すことで計算速度を著しく向上させることができた。すなわち、複数コアのCPUを使う場合には、相関係数の計算をFFTを用いて高速化した上でOpenMPによる並列化を行い、GPUが使える環境向けには、直接法による相関係数の計算をGPU上で並列実行するプログラムをC++AMP言語を用いて開発した。

なお、動画や静止画の各画素における輝度値へのアクセスや、演算処理および解析結果の表示など、画像処理の基本部分については、フリーの画像処理ライブラリOpenCV (<http://opencv.org/>)を用いた。

### (2) 撮影画像及び解析結果の例

図1に、斜め方向から撮影された画像の一例を示す。風は画面の奥から手前に向かって吹いており、地表面に平行なレーザシートが手前から奥に向かって照射されている。また、画面中央の上より、透視変換のためのマーカが4点の明点として写っているのが分かる。4点のマーカは1辺5mの正方形の頂点に設置されているため、この画像には幅10



図3 . PIV による風速ベクトルの例  
0.1 秒間隔で撮影された 2 枚の画像 ( 図 2 ) から算出された結果。

数m、奥行 20 m 程の範囲がとらえられていることになる。斜め方向からの撮影によって、こうした広範囲の流れ場の映像が明晰に得られることが確認された。

図 1 に示された画像と、その 0.1 秒後に撮影された画像を、それぞれ真上の視点から見た画像に透視変換したものが、図 2 に示した 2 枚の画像である。それぞれの画像において、4 点のマーカが正方形に配置されるように変換されたことが分かる。変換にともない、画像下部の両端には、輝度の情報を持たないマージンが形成されるが、PIV の解析においては、これらのマージン部にはマスキング処理が施され、風速分布の算出時には参照されない。

図 2 の 2 枚の画像から、PIV によって水平面内の風速ベクトル分布を算出し、図示したものが図 3 である。解析結果に対する後処理を一切行っていないため、一部に誤ベクトルと思われるものが含まれてはいるが、多くの地点で周囲と整合的なベクトルが算出されていることが分かる。また、この例では、およそ 50cm 間隔で風速ベクトルが求められている。このように、各瞬間における風速ベクトルの詳細な空間分布が、野外観測で求められる点が、本研究で開発した PIV システムの大きな利点である。

### (3) 算出結果の検証

実際の観測時には、同様な画像が 1 秒間に 60 枚の割合で連続的に取得される (60p のプログレッシブカメラを用いた場合)。それ

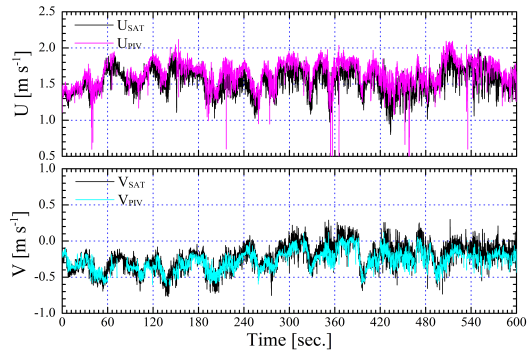


図 4 . PIV による風速の時系列と超音波風速計による実測値 ( SAT ) との比較

U : 図 3 の下向き成分、V : 同図の右向き成分

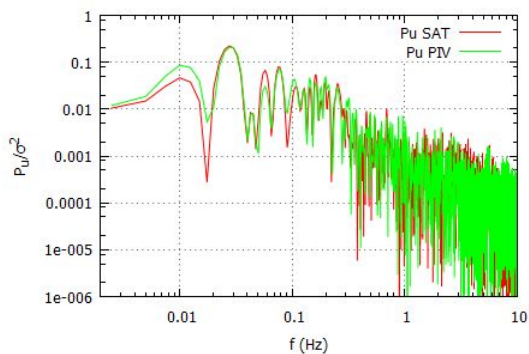


図 5 . 風速変動の周波数スペクトルの比較  
PIV と超音波風速計 ( SAT ) によって計測された U 成分の時系列 ( 図 4 ) について、それぞれ最小 2 乗スペクトルを求め、分散で規格化した上で、周波数に対してプロットしたものを。

それぞれの画像に対して、これまでに述べた処理が施され、PIV 解析によって風速ベクトルの時空間変動が求められる。このうち、図 1 ~ 3 の画像に写っている 3 台の超音波風速計の中央のものに最も近い位置で算出された風速の時系列を、同風速計による実測値と比較した結果が図 4 である。U と V は、それぞれ図 3 の画面下向き及び画面右向きの風速成分を表す。両成分とも、PIV による算出結果は超音波風速計による実測値をよく再現している。また、いずれの成分も、周期が数 10 秒程度の大きなゆらぎの上に細かい変動が重なるような変化を示している。いわゆるサブメソスケールの風速変動の上に乱流が重なる、安定接地境界層における典型的な風速変動のパターンであるが ( Mahrt, 1999 )、PIV はこうした変動をよく捉えている。

最後に、風速変動の再現性を周波数空間で確認するため、風速変動の周波数スペクトルを比較した結果が図 5 である ( 図には U 成分のみを示しているが、V 成分についても同様な結果が得られている )。スペクトルもよく一致することから、PIV によって、超音波風速計を用いたのと同様な乱流計測が可能

ことが分かる。

以上より、本研究で開発した PIV システムは、夜間の安定接地境界層における乱流の時空間構造を計測するツールとして非常に有望であることが確認された。今後は、観測事例を積み重ね、安定成層下における乱流現象について、生成プロセスや空間構造の実態解明を進めていくことが可能である。

#### 引用文献

- Kondo, J., O. Kanechika and N. Yasuda, 1978: Heat and momentum transfer under strong stability in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1012–1021.
- Mahrt, L., 1999: Stratified atmospheric boundary layers. *Boundary-Layer Meteor.*, **90**, 375–396.
- Ohya, Y., R. Nakamura and T. Uchida, 2008: Intermittent bursting of turbulence in a stable boundary layer with low-level jet. *Boundary-Layer Meteor.*, **126**, 349–363.
- Flores, O. and J. J. Riley, 2011: Analysis of turbulence collapse in the stably stratified surface layer using direct numerical simulation. *Boundary-Layer Meteor.*, **139**, 241–259.

#### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

Mori, F., Shimoyama K. and Watanabe T.: Turbulence structure measurement in atmospheric surface layers by a PIV technique. ILTS International Symposium on Low Temperature Science, 2015年11月30日～12月2日, 北海道大学低温科学研究所(札幌)

森 文洋・下山 宏・渡辺 力, PIV 観測による地表面近傍における乱流構造の検討, 日本農業気象学会, 2015年3月19日, 文部科学省研究交流センター(茨城県つくば市)

Watanabe T.: Coherent eddies developing in the roughness sublayer. International Symposium on Agricultural Meteorology, 17 March 2015, Tsukuba, Japan, 文部科学省研究交流センター(茨城県つくば市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

#### 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 力 (WATANABE, Tsutomu)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号: 60353918

(2) 研究分担者

下山 宏 (SHIMOYAMA, Kou)

北海道大学・低温科学研究所・助教

研究者番号: 50391115