



Title	相互作用の担い手 : 接地層乱流の空間構造を探索
Author(s)	渡辺, 力; 下山, 宏
Citation	低温科学, 77, 79-86
Issue Date	2019-03-20
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.77.79
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/73995
Type	departmental bulletin paper
File Information	11_p079-086.pdf



相互作用の担い手—接地層乱流の空間構造を探る

渡辺 力¹⁾, 下山 宏¹⁾

2018 年 11 月 30 日受付, 2018 年 12 月 27 日受理

著者らは, 地表面直上における乱流の空間構造やメカニズムを理解するために, 野外のフィールドにおける, 多数のセンサーを水平方向に配置した観測や PIV 法による流れの可視化計測とともに, 数値シミュレーションによる解析を並行して進めている. 接地層の乱流には, 流れ方向に長く伸びる大規模構造 (ストリーク構造) が存在し, 主流風速や温度の変動を特徴づけている. その一方で, 運動量や熱の輸送に参与する鉛直風速の変動は, それよりも空間スケールの小さな渦構造によってもたらされる. こうしたスケールの異なる 2 種類の構造が互いを強め合うことで接地層の乱流が維持され, 大気—陸面相互作用の根幹を担っている.

Exploring the spatial structure of near-surface atmospheric turbulence

Tsutomu Watanabe¹ and Kou Shimoyama¹

To elucidate the spatial structure and mechanism of turbulence in the atmospheric surface layer, we are conducting field measurements by a horizontal rake of thermocouples and sonic anemometers, a direct inspection of velocities' spatial distributions using a PIV technique and numerical simulations using the lattice Boltzmann method. Fluctuations in horizontal velocities and temperature are characterized by streamwise-elongated large-scale structures, i.e., the so-called streak structures, whereas vortical structures of much smaller scales are responsible for causing vertical velocities that contribute to the vertical transfer of momentum and heat. These two different-scale structures are mutually reinforcing each other to maintain the surface-layer turbulence.

キーワード: 乱流, 接地境界層, PIV, 野外観測, 格子ボルツマン法

Turbulence, Atmospheric surface layer, Particle image velocimetry, Field measurements, Lattice Boltzmann method

1. はじめに

地表面に接する厚さ数 10 m ほどの大気層を接地境界層 (または接地層) という. 接地層を吹く風は, 大きささまざまな渦を含み, 時々刻々と姿を変えながら流れるい

わゆる乱流の状態にある. 日々の生活の中で, 私たちは, 風に「息」(強さや向きの細かい変動)があることを体感し, 煙突から出た煙がたなびく様子や, 水面のさざ波や水田の穂波を見ることによって, その様子を断片的に知ることができる.

乱流は, さまざまな大きさをもつ不規則な 3 次元渦運動からなり, 大気中の熱や物質を拡散させる性質をもつ. それによる輸送・拡散の効率は, 層流状態のときの分子拡散に比べ, はるかに (数オーダーも) 大きい. そのため, 常に乱流状態にある接地層では, 大気の運動量や, 地表から放出された熱や物質が速やかに上下方向に輸送される.

接地層の大気は, 直下にある地表面の影響を強く受け, 風速, 温度, 湿度などが高さとともに急激に変化する特

連絡先

渡辺 力

北海道大学 低温科学研究所

〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

Tel. 011-706-5488

e-mail: t-wata@lowtem.hokudai.ac.jp

1) 北海道大学 低温科学研究所

Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Sapporo, Japan

有な微気象環境を形成する。こうした接地層の環境場は、植物の生理・生態プロセス、地表面起源の物質の拡散、地表面下の熱・水輸送過程、都市環境、寒冷地域での積雪や凍土の消長など、陸面過程に強い影響を及ぼしている。その一方で、微気象環境自体も、これらの個別過程との相互作用によって時空間的な変動を繰り返している。相互作用の過程において、地表を構成する個々の要素（すなわち土壌、植物、積雪、建築物等）の表面と接地層大気の間では、常に熱や物質の交換が行われている。そして、接地層大気の中を、乱流が熱や物質を上下方向に輸送することにより、上空の大気と陸面との間に熱や物質の流れが生じ、よりマクロなスケールの熱・物質循環へとつながっている。こうした背景から、接地層における乱流輸送のメカニズムを理解し、支配要因を特定して適切にモデル化することは、気象学、水文学、生態学、農学などの広範な分野に対する重要な貢献となる。

近年、計算機技術の著しい発展を背景に、乱流の大規模な数値シミュレーションが行われるようになった。それにより、境界層乱流の3次元的な構造やその形成メカニズムに関する解析が進められている。一方、普及が進んだとは言え、決して廉価とは言えない乱流計測器を野外フィールドにおいて3次元的に配置することは現実的ではないし、仮にできたとしても、無数の測器を設置すると流れ場自体に影響を及ぼしてしまう。そうした技術的な制約から、観測による実証的な研究はやや遅れ気味である。そこで本稿では、フィールド観測に重点を置きながら、数値モデルも併用しつつ、接地層における乱流

の空間構造を捉える試みを紹介する。

2. 細線熱電対による乱流水平構造の観測

従来、乱流の空間構造に関する観測的研究では、1地点の微気象観測タワーに複数の乱流測器を設置して行う、高さ方向の観測が主流であった。それにより、乱流構造の鉛直断面（高度-時間断面から推定する）に関する知見が蓄積されてきた（たとえば Bergström and Högström, 1989; Gao et al., 1989）。一方、先行する数値シミュレーション研究により、接地層の乱流は、水平面内にも特徴的な構造（後述）をもつことが示唆されてきた。しかし、上で述べた理由から、野外フィールドにおいて、乱流構造の水平分布を観測で示した例は多くない（希少な観測例として Marusic and Hutchins, 2008 による報告がある）。そこで、応答の速い細線熱電対を横一線に並べ、1高度における温度変動の水平-時間断面を計測することで、乱流の水平構造を推定する観測を行った。

2009年3~4月に北海道長沼町の畑地で実施した観測（大友, 2010）の様子を図1に示す。この観測では、長さ66 mの直線上に、44本の細線熱電対と5台の超音波風速計を設置し、温度や風速の変動を0.1秒間隔で連続記録した。直径0.05 mmの銅-コンスタンタン熱電対を自作し、園芸用の細いポールを用いて地面上に設置することにより、流れ場への影響を最小限に抑えつつ、乱流に伴う急速な気温変動の測定を可能にしている。測

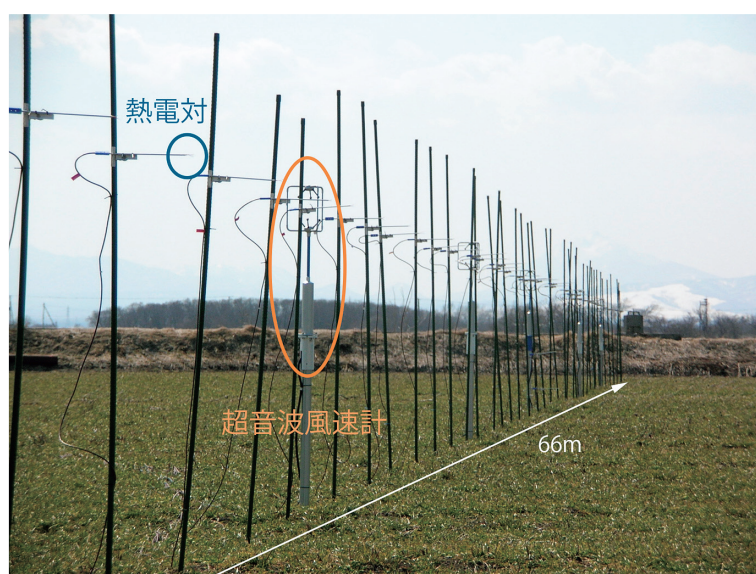


図1：乱流水平構造の観測。
平坦な畑地において44本の細線熱電対（直径0.05 mm）と5台の超音波風速計（Gill WindMaster）を全長66 mの直線上に配置している。

器の設置高度は地上 1.5 m である。10 分間の平均風向が、測器の列に対して垂直に近いときのデータを解析することにより、平均風と平行な水平面内における、乱流の空間構造を求めることができる。

図 2 に観測結果の一例を示す。この図は、大気安定度が中立に近い条件下における乱流の水平構造を、細線熱電対によって計測された温度の時間変動データから推定したものである。図の縦軸は、風向に直交する方向の水平距離を示し、図の縦幅が熱電対列の全長 (66 m) の範囲に相当する。横軸は、図の右端を基準とする風上方向への水平距離である。ここでは、乱流の特徴が時間的に変化せずに風に流されるとして (これを Taylor の凍結乱流仮説という; Taylor, 1938; Stull, 1988), 基準時刻からの経過時間に平均風速をかけた値を水平距離としている。図によれば、高さ 1.5 m という、地表のごく近くを吹く風の中に、流れ方向に伸びる筋状の高温域と低温域が交互に存在していることが分かる。特に、暖色で示された高温域は、凍結仮説に基づく推定ではあるが、風上方向に 100 m 以上にも渡って続いていることが確認できる。図には示さないが、超音波風速計によって同時に計測された水平風速変動との照合により、高温の領域は主流風速が周りより遅い低速な領域とほぼ一致し、低温領域は高速領域に対応していることが分かっている。これまで、乱流の数値シミュレーション研究により、境界層の乱流速度場には、「ストリーク構造」と呼ばれる流れ方向に長く伸びる大規模な構造が形成されることが指摘されてきた (たとえば Foster et al., 2006)。本観測の結果は、現実の接地境界層においても、それと同様な筋状の大規模構造が存在していることを示すものである。

また、同じ観測の結果から、大規模構造が大気安定度とともに姿を変える様子を確認することもできた (図は省略)。変化の傾向のみを簡単に示すと、不安定度が増すとともに筋状構造の蛇行が大きくなり、次第にセル状

の対流のような構造が現れるようになる。一方、成層が安定になると筋状の構造は姿を消し、空間スケールの小さな細粒状の乱流変動や、内部重力波とみられる波状の構造がしばしば見られるようになる。乱流に運動エネルギーを供給するソースには、平均風速の鉛直シアと浮力の 2 つがあるが、大気安定度の変化とともに、2 つのソースの相対的な寄与の大きさや、それぞれの空間スケールが変化するため、乱流構造にこのような違いが生じてくるのである。

このように、接地境界層における水平風速や温度の変動には、特に大気安定度が中立～不安定の条件において、空間スケールの大きな構造が関与している。こうした大規模な構造は、各物理量の輸送に対する直接的な寄与は大きくないものの、境界層における乱流運動を維持する上で重要な役割をもつと考えられており (Townsend, 1976; Hutchins and Marusic, 2007), その形成プロセスの解明に向けた研究が進められている。

一方、地表面と大気との交換 (運動量や熱などの鉛直フラックス) には、各瞬間における風速の上下方向の成分である鉛直風速が関与する。図 3 は、5 台の超音波風速計の記録をもとに、図 2 と同じ瞬間の鉛直風速の空間分布を推定した結果である。この図によれば、鉛直風速の空間分布には、水平風速や温度とは違う、細かな変動が卓越していることが分かる。つまり、運動量や熱などのフラックスは、水平風速や温度の変動に寄与する乱流構造よりもひとまわり空間スケールの小さな構造 (渦) によって輸送されている。しかし、この観測では超音波風速計の設置間隔が広いので、それを十分に解像することはできない。輸送に寄与するこうした小スケールの渦の構造をより詳しく調べるためには、風速の空間分布をさらに高い解像度で、しかも時間変動からの推定ではなく直接的に計測する必要がある。

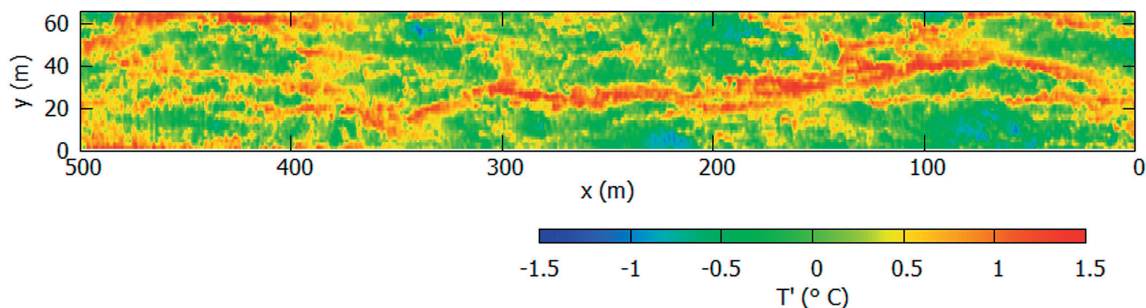


図 2: 図 1 の観測で得られた気温偏差の水平分布。

ここで、気温偏差とは 10 分間の平均気温からの差であり、横軸の風上距離 x は基準時刻からの経過時間と 10 分平均風速 (5.95 ms^{-1}) の積である。

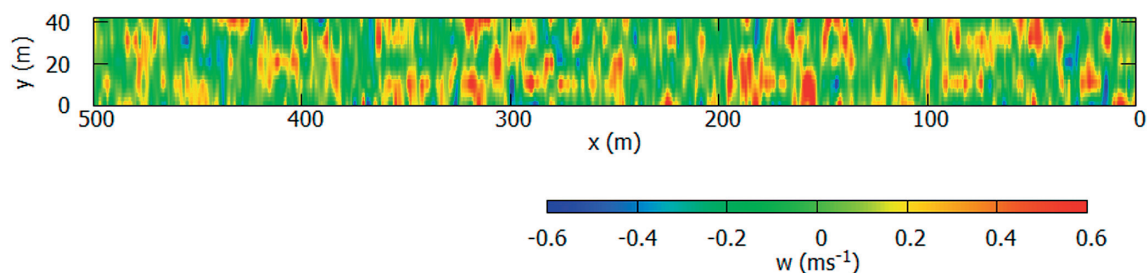


図3：図2と同時刻における鉛直風速の水平分布。

3. PIV による乱流空間構造の詳細な直接観測

PIV (Particle Image Velocimetry) 法と呼ばれる流速の計測手法（たとえば，可視化情報学会，2002）を，野外の流れに応用することができれば，速度の空間分布を直接測り，空間スケールの小さな乱流現象の実態を「その場」で明らかにすることができる。PIV とは，風の流れに混入させたトレーサーの動きをレーザー光で可視化し，その様子を撮影した映像から，画像解析によって各座標における瞬間風速を求める手法である。この手法は，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きた。それを，変動の大きな野外環境へ応用するため，広範囲にトレーサーを散布することのできるシーディング装置や，輝度の十分でない可視化流れを撮影するための最適な方法などについての開発・改良を進めてきた。図4に野外 PIV 法の概念図を示す。この図は，流れの鉛直断面を計測する際の装置やカメラ等の配置を示しているが，レーザー光を地表面と平行に照射し，上方（もしくは斜め上方）からトレーサーの動きを撮影することで，流れの水平断面を計測することができる。

図5に，2010年12月に北海道月形町の石狩川河川敷

（草地）で実施した観測において，実際に撮影された画像の例を示す（森，2011）。撮影範囲は地面直上の横幅 9 m × 高さ 4.5 m 程度の鉛直断面であり，図の右から左に向かって吹く風の風下側からレーザー光を照射することによって，トレーサーの濃淡分布の一断面を可視化したものである。風下方向に傾いた濃淡のパターンが流されていく瞬間が捉えられているのが分かる。地面直上の接地層では，水平風速が高度とともに急激に大きくなる（つまり大きなシアールをもつ）ため，この図のように，風下の斜め上方向に引き伸ばされたような構造が頻繁に形成される。元の動画では，これと同様な風下に傾くパターンが，渦巻くような動きを伴いながら，先行するパターンに次々とのかかるようにして流れていく様子を見ることができる。このような，地面直上に形成される，空間スケールの比較的小さな渦構造が，運動量や熱などの物理量を上下方向に輸送する働きを担っているのである。

PIV では，一定時間ごとに撮影された図5のようなトレーサーの濃淡画像をもとに，画像間のトレーサー位置の変位を求めることで，撮影面内の各座標における瞬間風速を算出する。観測時に取得する動画は，一般的なビデオカメラを用いる場合には1秒間に30～60枚の画像

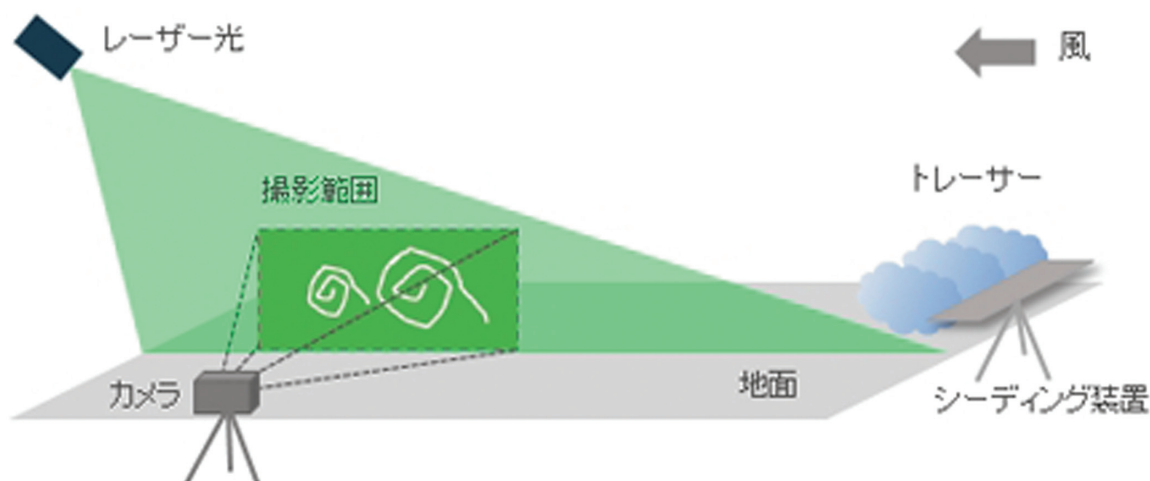


図4：野外 PIV 観測の模式図。

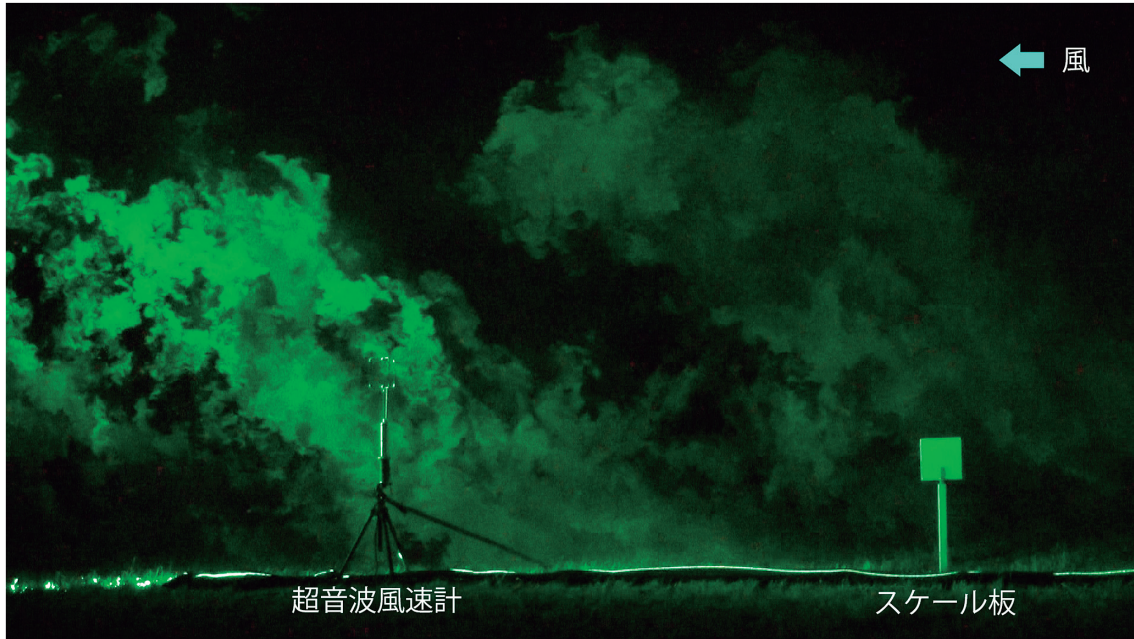


図5：PIV 観測で撮影された画像の例。
撮影範囲はおよそ横幅 9 m×高さ 4.5 m. スケール板の大きさは 30 cm×30 cm.

で構成されるので、各コマの画像について同じ処理を繰り返すことで、風速ベクトルの詳細な時空間変動を求めることができる。そのようにして、図5における超音波風速計のセンサー部のやや風上側の座標点で算出された風速の水平成分を、超音波風速計による実測値と比較した結果が図6である。PIVによって、超音波風速計で実測された0.1秒毎の風速とほぼ同等の算定結果が得られていて、乱流の解析に耐えうるデータを取得できることが分かる。

また、PIVによって算出された、図5と同じ瞬間における風速ベクトルの空間分布を図7に示す。ベクトルが算出できるのはトレーサーが明瞭に写っている領域に限られるものの、この図の例では、およそ 25 cm の空間解

像度で風速の瞬時値を求めることができていて、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を、「その場」で求められることが、野外 PIV 観測の最大の利点である。PIV は、夜間における乱流の時空間構造を計測する手法として有望であり、今後も観測事例を積み重ねることで、中立～安定成層下における乱流の空間構造の実態を解明していくことができる。

4. 数値流体シミュレーションの新たな手法

乱流の空間構造について、その形成メカニズムまで含めて解明していくためには、数値シミュレーションによる解析を並行して進めるのが有効である。従来、境界層

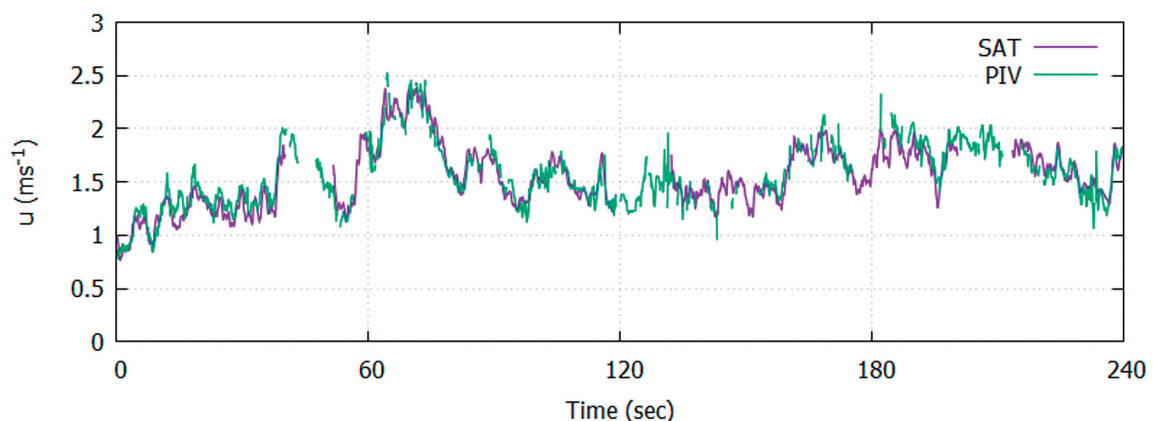


図6：PIVによって算出された水平風速と超音波風速計（SAT）による実測値の比較。
ただし、PIV 風速は、時間平均値が実測と一致するようにスケーリングしてある。個々のデータの間隔は 0.1 秒。

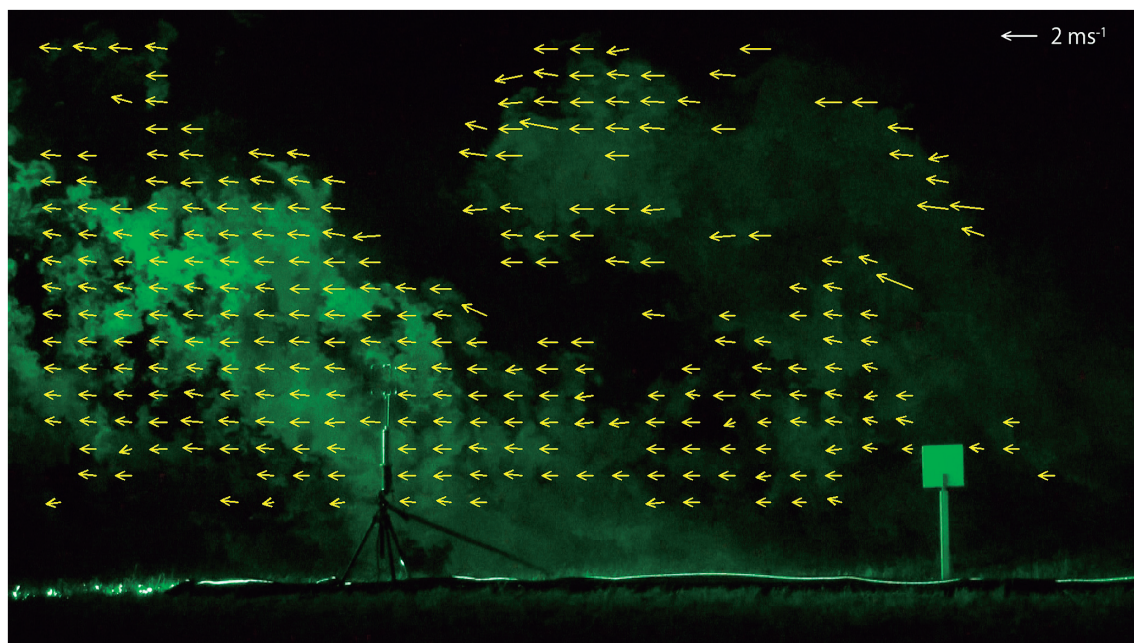


図7：PIVによって算出された風速ベクトルの空間分布。

乱流の数値シミュレーション研究には、流体の運動方程式であるナビエ・ストークス式に基づくLES (Large-Eddy Simulation) が広く用いられてきた (Deardorff, 1970; Moeng, 1984; Kanda and Hino, 1994; Watanabe, 2004, 2009; Inagaki et al., 2012; Ito et al., 2017)。それらの研究では、計算機性能の著しい向上とともに大規模な数値計算が実行されるようになり、高レイノルズ数の流れの構造が次第に明らかにされつつある。一方、中規模程度の計算を手軽に実施することができれば、前節で例示したような観測結果を解釈するなどの目的で、条件を変えた複数回のシミュレーションを行うには効率的である。

近年、計算効率の高い格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method, LBM; たとえば Chen and Doolen, 1998) が、数値流体力学の手法として用いられるようになってきた。LBMは、流体の巨視的な密度や流速に対する予測式を用いるのではなく、ボルツマン方程式に基づき、微視的な流体粒子の運動速度を統計的に取り扱うことによって、密度や流速の変化を予測する方法である。手法の詳細については、例えば葛原ら (1999) や稲室 (2001) らによる解説を参照して頂くことにするが、重要な点は、流速が音速より十分遅い通常の条件下では、LBMの基礎方程式は (単純であるが) 巨視的にはナビエ・ストークス方程式と等価になるという点である (Krüger et al., 2017)。LBMは、アルゴリズムが単純なためプログラミングが平易であることや、移流の計算にほとんど誤差を含まないことに加え、各計算格子におけ

る演算の並列性が高いという優れた特徴をもつ。そのため、並列演算性能に優れるGPU (Graphics Processing Unit) を用いることによって大幅な高速化が見込まれ、規模の比較的大きな計算を、ワークステーションやパソコン単体で実行することもできる。また、本稿では取り扱わないが、複雑な形状をもつ物体周りの流れの計算を、比較的容易に行えることもLBMの特色の一つである (本巻の稲垣厚至氏の解説を参照)。現在のところ、気象の分野ではまだあまり用いられてはいないが、これらの優れた特徴をもつLBMは、今後、特に大気境界層における気象の研究において広く応用されるようになるものと思われる。

実際に、LBMによって乱流の数値シミュレーションを行った結果の一例を図8に示す (中島, 2018)。これは、乱流シミュレーションのベンチマークの一つである平行平板間流 (互いに面した2つの平板にはさまれた領域内を一定の外力によって駆動される流れ) を再現し、壁面付近の乱流構造を解析した例である。計算コストの削減のため、粗い格子を用いながらもレイノルズ数の高い流れの再現を可能にするために、LESの考え方をLBMに導入して計算を実行している。図から、空間スケールの大きな低速ストリーク構造と、その周りに巻き付くようにして比較的小さな渦構造が形成されている様子が確認できる。壁面の近傍で生じる乱流は、これらの構造が互いを強め合いながら、平均流のシアから運動エネルギーを得ることによって維持される (Robinson, 1991; Adrian et al., 2000; Schoppa and Hussain, 2002)。この計

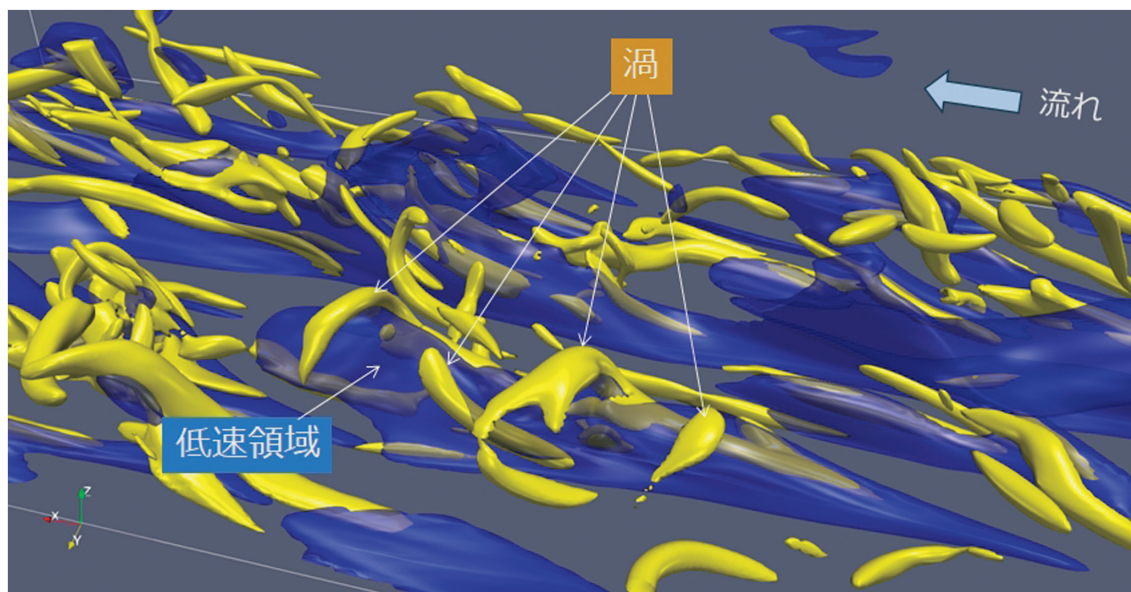


図8：LBMによるチャンネル流の数値シミュレーション結果から抽出された壁面付近の乱流構造。青色と黄色の部分はそれぞれ低速ストリークと渦を示す。レイノルズ数 $Re_\tau = 180$ 。

算例は、レイノルズ数の比較的低いケースのシミュレーション結果であるが、上で観測された接地層の乱流（レイノルズ数が高い）においても、異なる空間スケールを持つ構造同士の相互作用が、乱流の形成・維持やそれに伴う輸送効率を決定する重要なメカニズムになっていることは間違いない。先に述べた観測手法やこのシミュレーション法を併用した研究を進めることで、それを明らかにしていくことが可能である。

謝辞

本稿で紹介した解析結果の図は、大友康平氏、森文洋氏、中島正寛氏らの修論研究において得られた観測データや計算結果に基づくものである。また、東工大の稲垣厚至博士には、格子ボルツマン法の導入にあたり的確なアドバイスを頂いた。本稿で解説した研究の一部は、JSPS 科研費（26550002）と北海道大学低温科学研究所による助成及び北海道大学低温科学研究所技術部の支援を受けて実施した。

参考文献

- Adrian, R. J., C. D. Meinhart and C. D. Tomkins (2007) Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *J. Fluid Mech.*, **422**, 1–54.
- Bergström, H. and U. Högström (1989) Turbulent exchange above a pine forest. II. Organized structures. *Boundary-Layer Meteorol.*, **49**, 231–263.
- Chen, S. and G. D. Doolen (1998) Lattice Boltzmann method for fluid flows. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **30**, 329–364.
- Deardorff, J. W. (1970) A three-dimensional numerical investigation of the idealized planetary boundary layer. *Geophys. Fluid Dynam.*, **1**, 377–410.
- Foster, R. C., F. Vianey, P. Drobinski and P. Carloti (2006) Near-surface coherent structures and the vertical momentum flux in a large-eddy simulation of the neutrally-stratified boundary layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, **120**, 229–255.
- Gao, W., R. H. Shaw and K. T. Paw U (1989) Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, **47**, 349–377.
- Hutchins, N. and I. Marusic (2007) Large-scale influences in near-wall turbulence. *Phil. Trans. R. Soc. A*, **365**, 647–664.
- 稲室隆二 (2001) 格子ボルツマン法：新しい流体シミュレーション法。物性研究, **77** (2), 197–232.
- Inagaki, A., M. C. L. Castillo, Y. Yamashita, M. Kanda and H. Takimoto (2012) Large-eddy simulation of coherent flow structures within a cubical canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, **142**, 207–222.
- Ito, J. T., Oizumi and H. Niino (2017) Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Sci. Rep.*, **854**, 88–120.
- Kanda, M. and M. Hino (1994) Organized structure in developing turbulent flow within and above a plant canopy, using a large eddy simulation. *Boundary-Layer Meteorol.*, **68**, 237–257.
- 可視化情報学会 編 (2002) PIV ハンドブック。森北出版、東京。
- Krüger, T., H. Kusumaatmaja, A. Kuzmin, O. Shardt, G. Silva and E. M. Viggen (2017) *The Lattice Boltzmann Method*. Springer, Switzerland.

- Marusic, I. and N. Hutchins (2008) Study of the log-layer structure in wall turbulence over a very large range of Reynolds number. *Flow Trubulence Comust.*, **81**, 115-130.
- Moeng, C.-H. (1984) A Large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence. *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2052-2062.
- 森 文洋 (2011) PIV 法を用いた接地境界層における乱流構造の把握. 北海道大学大学院環境科学院修士論文.
- 中島正寛 (2018) 格子ボルツマン法を用いた接地境界層乱流の解析. 北海道大学大学院環境科学院修士論文.
- 大友康平 (2010) 接地境界層における乱流の水平構造に関する観測的研究. 北海道大学大学院環境科学院修士論文.
- Robinson, S. K. (1991) Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **23**, 601-639.
- Schoppa, W. and F. Hussain (2002) Coherent structure generation in near-wall turbulence. *J. Fluid Mech.*, **453**, 57-108.
- Stull, R. B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer, Dordrecht.
- Taylor, G. I. (1938) The spectrum of turbulence. *Proc. Roy. Soc. A*, **164**, 476-490.
- Townsend, A. A. (1976) *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- 薦原道久・高田尚樹・片岡武 (1999) 格子気体法・格子ボルツマン法. コロナ社, 東京.
- Watanabe, T. (2004) Large-eddy simulation of coherent turbulence structures associated with scalar ramps over plant canopies. *Boundary-Layer Meteor.*, **112**, 307-341.
- Watanabe, T. (2009) LES study on the structures of coherent eddies inducing predominant perturbations in velocities in the roughness sublayer over plant canopies. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 39-56.