

令和 5 年 5 月 18 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04057

研究課題名（和文）PIV観測と格子ボルツマン解析による安定成層時の植生キャノピー内乱流輸送の解明

研究課題名（英文）PIV observations and the lattice Boltzmann simulations of turbulent transport in a plant canopy under stably-stratified atmospheric conditions

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：森林キャノピー内におけるPIV観測を実現するためのシステムを構築し、複数夜間の異なる安定成層条件下において観測を行い、大気安定度によって変化するキャノピー内乱流の空間構造に関する基礎データを取得した。また、格子ボルツマン法に基づく植物群落内の乱流場を再現する数値シミュレーションモデルを構築した。それにより、群落内におけるスカラー量（熱・水蒸気・CO₂等）の輸送を支配する、空間スケールの大きな乱流の時空間構造を明らかにするとともに、それに伴って群落下部に生じる圧力変動の形成要因を解析し、森林内で実際に観測された圧力と乱流構造の間の相互関係のメカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

森林群落内での流れの可視化観測を実現することで、従来の乱流観測手法では得ることができなかった、夜間（安定成層条件）の森林群落内の乱流の空間構造を直接観測した。また、これまで計測の困難さから観測例が非常に限られていた、森林内で生じる気圧の微小変動を観測し、森林群落内の乱流が時空間的に変動する過程における気圧変動の役割を明らかにした。さらに、従来とは異なる新たな計算手法により、森林群落内の乱流を忠実に再現するシミュレーションモデルを開発し、群落内での熱や物質の輸送を支配する乱流の時空間構造を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We constructed a PIV observation system to realize direct observations of the spatial structure of coherent turbulence within plant canopies. Using the developed system, we obtained basic data for elucidating the dependency of turbulence structure on the atmospheric stability. A numerical simulation model was constructed to reproduce the turbulent flow field in plant canopies based on the lattice Boltzmann method. Through numerical analysis, we elucidated the spatio-temporal structure of large-scale turbulence that governs the transport of scalar quantities (heat, water vapor, and CO₂, etc.) within plant canopies, and the involvement of pressure fluctuations in the mechanism of spatio-temporal variation of turbulence structure in plant canopies.

研究分野：境界層気象学

キーワード：乱流輸送 植物群落 PIV観測 格子ボルツマン法 大気安定度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球上の全陸地面積の約 75% を覆う植生面が、全球規模・地域規模の熱・水収支や炭素循環に重要な寄与をもつことは明らかである。また、植生は、群落を構成し、その内部に植生キャノピー層と呼ばれる空間を作る。その内部には、特有な微気象環境が形成され、植物の生理・生態プロセスや土壌の熱・水輸送過程、あるいは寒冷地域での積雪や凍土の消長過程に強い影響を及ぼす。一方、微気象環境は、これらの個別過程との相互作用によって時空間的に変動する。こうした相互作用の過程において、植物や土壌・積雪の表面とキャノピー内の大気との間には、常に熱や物質の交換が行われている。そして、植生キャノピー内の大気中を、乱流によって熱や物質が輸送されることにより、大気と植生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。

植生キャノピーにおける乱流の最も支配的な形成要因は、キャノピー上端付近の風速シアをエネルギー源とする力学的な生成過程である。これまでの研究により、中立成層時における力学的な乱流形成の過程については多くの知見が蓄積されてきた。一方、中立成層時以外には、こうした機械的な乱流生成に加え、キャノピー内大気の成層状態に依存した浮力が作用することによる、速度変動の増幅または減衰効果が加わる。その結果、中立時とは異なる空間構造をもつ乱流が形成され、植生キャノピー内の輸送効率の増減が生じる。安定成層時には、風速シアによる乱流の生成と負の浮力による乱流の減衰という相反する 2 つの要因が、植生キャノピー内の乱流形成過程に関与する。そのため、2 つの要因のうち、どちらの効果が優勢かによってキャノピー内の熱輸送や物質拡散の効率に大きな違いが生じることになる。これまで、中立時以外の植生キャノピーにおける乱流形成過程に対しては、不安定成層の場合についての解析が数例報告されているのみで、安定成層時に着目した研究はほとんど行われていない。そのため、大気安定度の強さが植生キャノピー内の輸送に寄与する乱流の空間構造やそれによる輸送の効率をどのように変化させるのか、という基本的な問題についての系統的な理解は未だ得られていない。

2. 研究の目的

本研究は、実際の森林群落における (1) 乱流の大規模な空間構造の影響を受けて生じる微小な大気圧変動の観測と (2) 乱流の「空間構造」を直接かつ詳細に測定することのできる PIV (Particle Image Velocimetry) 法による野外観測を実施するとともに、(3) 格子ボルツマン法を用いた LES (Large-Eddy Simulation) による乱流の数値解析を併用することにより、安定成層条件における、植生キャノピー内の乱流輸送現象の時空間構造と大気安定度との関係を明らかにすることを目的とする。なお、(1) は当初の計画には含まれていなかったが、目的達成に有効な手段であるため新たに追加した。

3. 研究の方法

(1) 乱流に伴う圧力変動の観測

群落内 (特に安定成層時) においては、群落の上端付近で生成される乱流渦の影響が群落内部にまで直接的には及びにくい状態になる。このとき、群落下層における輸送は、圧力の変動を介して生じる流れの変動によって行われる。そのため、群落下層における圧力変動のメカニズムを明らかにする必要があるが、実際の森林での実測例は非常に限られている。一般に、乱流にともなう圧力変動のオーダーは微小 (~ 10 Pa 程度) である。そのため、通常の気圧計を用いることはできず、変動の大きな実際の気圧と、なんらかの基準圧力との差を差圧計で精密に測定するシステムを構築する必要がある。ここでは、大気圧の長周期変動を伴う野外での観測を可能にするため、長い時定数をもたせた圧力バッファを基準圧力の測定に用い、また風の流れとの干渉によって生じる動圧の影響を極力低減する空気取入口を使用することで、接地境界層内の静圧変動を精密に測定するシステムを構築する。このシステムを、森林総合研究所北海道支所構内 (札幌市) の樹高約 20m の試験林内にある高さ 40m の観測タワーに超音波風速温度計とともに複数高度に設置し、乱流とそれに伴う圧力変動の観測を実施した。これらのデータの解析と後に述べる数値シミュレーションの結果から、森林群落内の圧力変動をもたらず要因を明らかにする。

(2) PIV を用いた乱流の空間構造の観測

従来的一点計測に基づく乱流観測では、空間的に不均一で間欠的な流れが卓越する条件下における乱流の空間構造を正確に把握することは難しい。一方、PIV は、流れの中に混入させたトレーサー粒子の動きを、シート状のレーザー光を照射することで可視化し、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。この手法によれば、レーザー光で照射された 2 次元面内における風速ベクトルの空間分布を、高い空間分解能で計測することができる。しかし、この手法を野外観測に適用した研究事例は少なく、また、森林内に適用した事例は存在しない。そこで、本研究においては、これまで開発を進めてきた屋外 PIV システムを改良・拡張することで、安定成層時 (夜間) の森林群落内における乱流空間構造の直接計測を可能にする。

観測は(1)と同じ森林で実施し、林床から樹冠までの約20mの高さの範囲を観測対象とする。PIV観測のシステム構成は、トレーサー粒子を散布するためのシーディングシステムと、粒子の流れ場のレーザー光を照射して映像を取得する撮影システムからなる。しかし、高さ20mにも及ぶ広範な領域にシーディングする方法と、同範囲を撮影する適切な方法を確立することが大きな課題であり、本研究ではまず、そのためのシステム構築を行った。室内での予備実験を経て試作した撮影システムと、複数のシーディングシステムを観測タワー上に配置することで、広範囲を同時に可視化するPIV観測システムを構築し、令和5年3月に観測を実施した。

(3) 格子ボルツマン法を用いた乱流の数値解析

数値シミュレーションを野外観測と並行して用いることにより、群落内部における輸送メカニズムの解析を行う。計算手法には、比較的新しい手法である格子ボルツマン法(以下LBM: Lattice Boltzmann Method)を採用する。LBMは、従来のナビエ・ストークス方程式に基づく数値計算法に比べ、移流の再現性に優れている他、メモリアクセスの並列性が高いことから、高精度な大規模計算を容易に行える利点がある。そのため、安定成層条件において、空間スケールの小さな乱流運動を解像する数値計算を実行することができ、従来よりも詳細に、大気安定度が乱流構造と輸送効率に影響を及ぼすメカニズムを解析することができる。

中立条件下での群落乱流を再現する格子ボルツマンLESモデルは既に開発済みであるので(Watanabe et al. 2020)、温度などのスカラー量の場合を再現するコードを新たに開発して追加する。これを用いて、まず中立条件において、植物群落内におけるスカラー輸送に寄与する乱流の時空間構造を明らかにする。次に、温度場と連動する浮力の効果を流れのLESに取り入れることにより、非中立時の群落乱流の再現を可能にし、輸送に寄与する乱流の時空間構造と大気安定度の関係を明らかにする。また、PIV観測との直接的な比較を可能にするため、トレーサー粒子の移流拡散モデルを追加構築する。PIV観測で見られる特徴的なトレーサーの動きとシミュレーション結果を比較検討することで、群落内部での輸送に寄与する乱流の時空間構造の特徴を抽出する。

4. 研究成果

(1) 乱流に伴う圧力変動の観測と解析

圧力変動測定システムの開発

乱流に伴う圧力変動の観測システムの概要を図1に示す。大気中の圧力変動を測定する高度に空気取り入れ口を設置し、そこでの圧力をポリエチレンチューブによって差圧センサーに伝達する。差圧センサーの基準圧ポートは、大気圧の変動に緩やかに追従するバッファータンク内に接続されており、装置の全体は断熱処理を施した容器内に組み込まれている。バッファータンクの内外をつなぐ細管の太さや長さを変えた予備実験を重ねることで、外部の大気圧に対しておよそ90分の時定数をもって追従するシステムを構築し、乱流にともなう変動圧力を計測するための基準圧の測定手段を得た。また、圧力変動を測定するための空気取り入れ口には、市販の静圧プローブを用いることで、風との干渉による動圧変動の影響を低減する仕様とした。

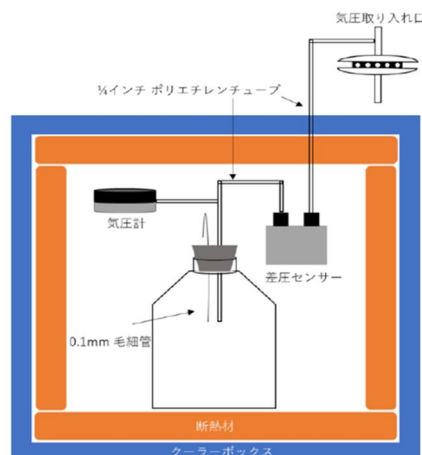


図1. 圧力変動測定部の概念図

乱流に起因する圧力変動

図2に風速と圧力変動の観測結果の一例を示す。スペクトル解析の結果、高周波成分は空気取り入れ口付近の動圧変動の影響が残存したものであり、低周波成分は森林外の気圧変動に対応することが判明した。そこで、中間周波数域のバンドパス操作を施した成分を乱流にともなう圧力変動として分離した。分離された圧力変動は、群落上端付近での風速変動と高い相関関係をもち、群落内の全高度で同位相の変動を示すことが明らかとなった。さらに、群落上で測定された風速変動の空間構造から理論的に復元された圧力変動と、実測された圧力変動のパターンが整合したことから、群落内の圧力変動が群落上の乱流変動によってもたらされることが観測的に

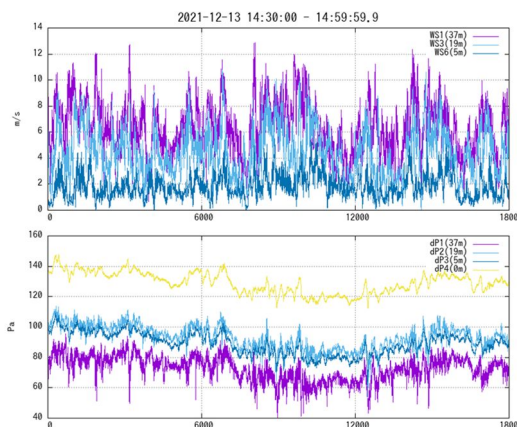


図2. 風速(上図)と圧力変動(下図)の観測結果の例。横軸は10Hzで観測されたデータ数で経過時間を示す

示された。また、数値解析の結果からは、群落内の圧力変動が群落下層の乱流変動の生成に寄与していることが示され、群落上の乱流が圧力を介して遠隔的に群落下層の乱流変動をもたらすという、植物群落内の乱流輸送現象に特有な力学構造が明らかとなった。

(2) PIV 観測

トレーサー粒子の生成には舞台演出等で用いられるスモークマシンを利用し、生成されたスモークを十分な量の外気と混合しながら排出するシーディングシステムを構成した。また、限られた電力供給量の下で複数のシステムを同時運転するための制御装置を開発した。これらのシステムを観測タワーの複数高度に設置することにより、森林群落内の広範囲を可視化するためのシーディングを可能にした。一方、高さ 20m までの鉛直面の映像を歪みなく撮影するために、軽量で強靱なカーボン製の伸縮性ポールの先端部に強度加工したカメラ雲台とカメラジンバルを取り付けた、遠隔操作が可能な可搬型撮影プラットフォームを開発した。これらのシステムを用いて撮影された画像の例が図 3 である。

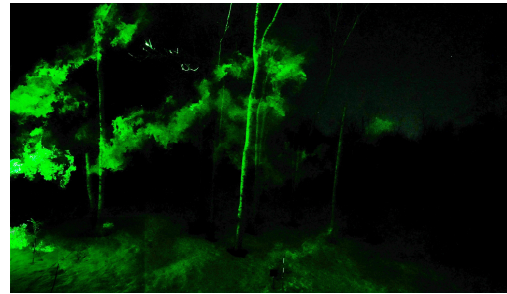


図 3. 森林群落内における PIV 観測の撮影映像のスナップショット

高さ 20m、幅 40m のゆがみの無い正確な鉛直断面を真横からの撮影によって取得したものである。同様な映像を、複数夜間における異なる安定成層条件の下で取得することができたため、今後の画像解析等により乱流構造と大気安定度との関係を明らかにすることができる。

(3) 格子ボルツマン法を用いた乱流の数値解析

中立条件でのスカラー輸送に寄与する乱流構造

植物群落における乱流とそれによって受動的に輸送されるスカラー量の移流拡散を、格子ボルツマン法によって再現する数値モデルを開発し、シミュレーションを実行した。乱流速度場やスカラー量の変動に関する各種統計量の解析結果が、ナビエ・ストークス方程式と移流拡散方程式に基づく従来のモデルと同等であり、観測事実とも整合的であったことから、開発したモデルの妥当性が検証された。また、このモデルを用いて、群落下の地表面（林床）付近におけるスカラー量輸送に寄与する乱流の時空間構造を解析した。その結果、群落高の数倍に及ぶ背の高い構造をもつ乱流渦が、群落下の地表面付近と群落上の大気の間でダイレクトな輸送を引き起こしていることを明らかにすることができ（図 4）、その成果を国際誌上で発表した（Watanabe et al. 2021）。

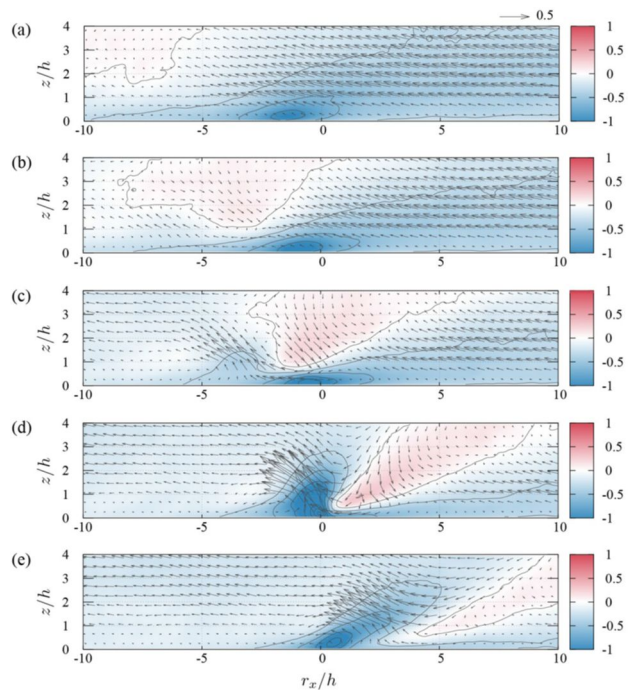


図 4. 群落下部に上昇流を伴うスカラー輸送をもたらす乱流の時空間構造（上から下に時間が推移する）。縦軸・横軸はそれぞれ群落高で規格化した高さや水平距離、カラーはスカラー量濃度の偏差、ベクトルは風速の偏差をそれぞれ表す（Watanabe et al. 2021 より引用）

非中立条件での乱流シミュレーションモデルの構築

上で開発したスカラー量の移流拡散を含む数値シミュレーションモデルに、さらに浮力の効果を取り入れ、安定または不安定成層時における群落乱流を再現するモデルを開発した。具体的には、スカラー量に対する格子ボルツマン法で温度の空間分布を求め、それに基づく浮力を風速場に対する格子ボルツマン法の外力として与えることで、流れと温度場の相互作用を再現する手法をとった。数例のテスト計算の結果、群

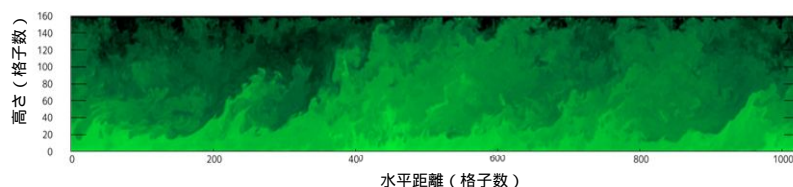


図 5. 群落乱流シミュレーションにおけるスカラー濃度の瞬間分布の例。PIV 画像に近い着色を施してある

落下の各種乱流統計量の安定度に対する依存性が、従来の観測で示される傾向と同等であることが確認された。図5にモデルで再現されたスカラー量の空間濃度分布の例を示す。群落乱流に特徴的な、大きな空間スケールをもつ濃度パターンが再現されていることが分かる。また、群落内部の乱流構造に関しては、特に圧力変動のパワースペクトルにおいて、安定度による差異が顕著に現れることが明らかとなり、上に述べた圧力変動観測の結果と合わせ、さらに詳細な解析を今後継続して進める。

トレーサー粒子の移流拡散シミュレーションモデルの構築と応用

上で開発された格子ボルツマン法による乱流シミュレーションモデルに、流れの中に浮遊するトレーサー粒子の運動を個別に追跡する Lagrange 型の粒子追跡モデルを組み合わせることで、浮遊粒子の移流拡散現象を詳細に再現する数値モデルを開発した。これによって、PIV 観測をより直接的に再現することが可能となった。ただし、後述のように PIV 観測の実施計画が大幅に遅延したため、再現シミュレーションの実行と解析は今後に持ち越された。

そのため、当初計画では予定していなかったことであるが、開発した粒子追跡モデルの検証を目的として、乱流中における粒子の移流拡散現象の一種である地吹雪のシミュレーションを実施した。風による積雪粒子の取り込み、飛雪粒子の雪面におけるリバウンド、粒子の衝突時に周囲の積雪粒子が飛散するスプラッシュの過程を確率過程としてモデルに取り入れることにより、飛雪粒子と乱流場とが相互作用しながら自律的に変動する地吹雪現象の再現を可能にした。シミュレーションの結果、吹雪輸送量の風速依存性や質量フラックスの高度分布の特徴などが過去の観測結果と整合的であることが示され、モデルの妥当性が確認できた。また、地吹雪現象に特徴的にみられる粒子濃度の間欠的な時空間構造と、地表にごく近い領域における乱流の時空間構造との関係を明らかにすることができ、これらを取りまとめた成果を国際誌に投稿した (Watanabe et al. 2023)。

5. おわりに (今後の研究計画)

本研究期間の3年間(特に最初の2年間)はコロナウイルス感染症拡大の影響により、システム構築のための予備実験等を含む現地観測に関わる活動が制限されたため、PIV 観測の計画に大幅な遅延が生じ、実際に観測を行えたのは最終年度の年度末であった。そのため、当初予定していた観測データの解析や数値モデルによる再現シミュレーション等による詳細な解析は課題終了後に引き続いて進めることとする。一方、当初は計画していなかった乱流圧力場の観測を新たに行うことで、これまで実測されることの少なかった、群落下層における輸送現象と圧力変動との関係を明らかにすることができた。今後、これらの観測データの解析と数値解析を総合することにより、2章で述べた研究目的の速やかな達成を目指す。

<引用文献>

Watanabe T, Shimoyama K, Kawashima M, Mizoguchi Y, Inagaki A (2020) Large-eddy simulation of neutrally-stratified turbulent flow within and above plant canopy using the central-moments-based Lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorology*, 176, 35–60.

Watanabe T, Takagi M, Shimoyama K, Kawashima M, Onodera N, Inagaki A (2021) Coherent eddies transporting passive scalars through the plant canopy revealed by large-eddy simulations using the lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorology*, 181, 39–71.

Watanabe T, Ishikawa S, Kawashima M, Shimoyama K, Onodera N, Hasegawa Y, Inagaki I (2023) Structure of drifting snow simulated by Lagrangian particle model coupled with large-eddy simulation using the lattice Boltzmann method. *Boundary-Layer Meteorology* (submitted).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Watanabe Tsutomu, Takagi Marie, Shimoyama Kou, Kawashima Masayuki, Onodera Naoyuki, Inagaki Atsushi	4. 巻 181
2. 論文標題 Coherent Eddies Transporting Passive Scalars Through the Plant Canopy Revealed by Large-Eddy Simulations Using the Lattice Boltzmann Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Boundary-Layer Meteorology	6. 最初と最後の頁 39 ~ 71
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10546-021-00633-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 下山宏, 加藤陸, 山野井克己, 溝口康子, 渡辺力
2. 発表標題 森林キャノピーにおける圧力変動観測.
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川修平, 渡辺力
2. 発表標題 格子ボルツマン法をベースとするLagrange型地吹雪モデルの開発.
3. 学会等名 日本農業気象学会2022年全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺力, 下山宏, 川島正行, 稲垣厚至
2. 発表標題 植物群落内におけるスカラー量の遠隔的輸送に寄与する乱流の時空間構造
3. 学会等名 日本農業気象学会2021年全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	下山 宏 (Shimoyama Kou) (50391115)	北海道大学・低温科学研究所・助教 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------