

ドローンLiDAR計測した水稻群落点群の鉛直分布推定モデルの高度化

防災・復興システム工学研究室 島田 康司

1. はじめに

近年、農業分野では少子高齢化や担い手不足を背景として、作業の省力化・効率化を目的としたスマート農業の推進に伴い、ドローンLiDARを用いた水稻群落の三次元計測が注目されている。ドローンLiDARは、天候や光条件の影響を受けにくく、圃場全体の構造を面的に把握できる点で有効な計測手法である。一方で、ドローンLiDAR計測によって取得される水稻群落の点群鉛直分布は、主に飛行高度に応じて変化するレーザースポットサイズなどの観測条件に依存して変化することが報告されており、これらの影響を適切に考慮することが求められている。

既往研究では、レーザースポットサイズに着目し、その効果を考慮した水稻群落点群の鉛直分布を推定するシミュレーションモデルが提案されている。磯野らの研究¹⁾では、特定の観測条件（飛行高度10mのZenmuse L1を搭載したドローンLiDAR計測）において実測点群の鉛直分布を再現可能であることが示され、モデルの有用性が確認された。しかしながら、以下の点が課題として残されている。

- ・生育初期において推定点群鉛直分布の再現性が低下すること
- ・異なる飛行高度や異なるLiDARシステムに対する適用性が検討されていないこと

そこで本研究では、生育初期におけるモデル内の反射高さ付与方法の影響および飛行高度やLiDARシステムの違いにより生じるレーザースポットサイズの変化に焦点を当て、水稻群落点群の鉛直分布を推定するシミュレーションモデルの高度化を図り、モデルの再現性および有用性を検討することを目的とする。具体的には、以下の2点について検討を行う。

- 1) 2024年度の生育初期における計測データを用いて、磯野¹⁾が報告した既往モデルと本研究で提案する高度化モデルの再現性を比較することで、モデルの高度化が点群鉛直分布の再現性に及ぼす影響を検討する。
- 2) 2024年度および2025年度に取得した、異なるLiDARシステムおよび飛行高度条件下のドローンLiDAR計測データを用いて、観測条件の違いがモデルの再現性に及ぼす影響を検討する。

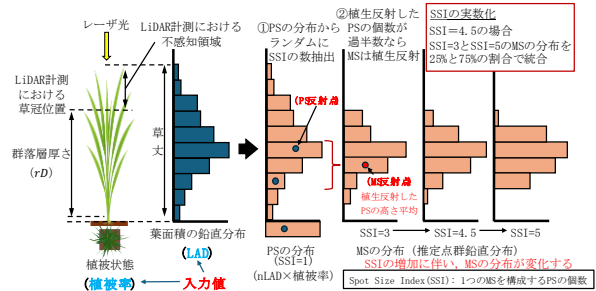


図1 シミュレーションモデルのイメージ図

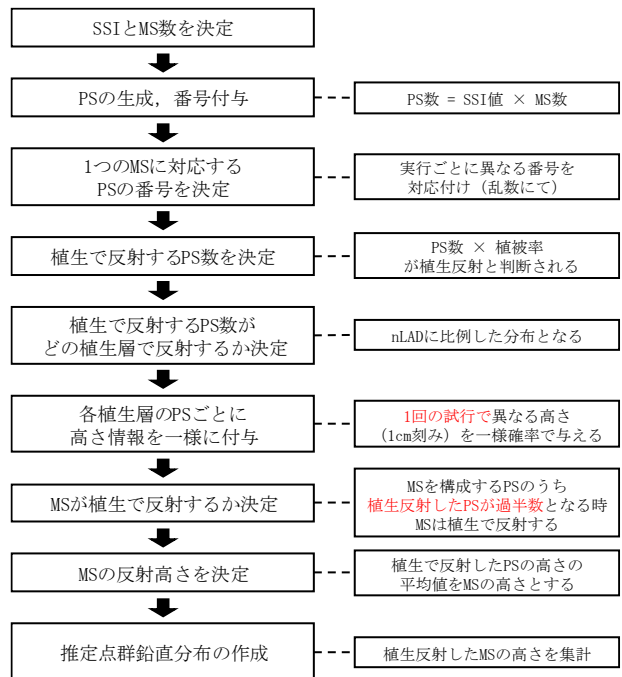


図2 シミュレーションのワークフロー

2. 方法

2.1 点群鉛直分布推定モデルの概要と高度化

本研究で用いた点群鉛直分布推定モデルは、ドローンLiDAR計測によって取得される水稻群落点群の鉛直分布を再現することを目的としたシミュレーションモデルである(図1)。本モデルでは水平方向の不均一性は考慮せず、水稻群落を鉛直方向のみに変化する一次元多層構造として表現する。

モデル内ではレーザースポットをPure Spot (PS) およびMixture Spot (MS)の2種類に定義する。PSはレーザー発散角が極めて小さい仮想的な反射

要素であり、MS は複数の PS から構成される実際のドローン LiDAR 計測に対応したレーザスポットである。1 つの MS は 1 つの計測点に対応し、構成する PS の反射状態に基づいて計測点高さが決定される。

レーザスポットサイズの効果を表現するため、Spot Size Index (SSI) を定義する。SSI は 1 つの MS を構成する PS の個数を表し、SSI が大きいほどレーザスポットサイズが大きい条件に対応する指標である。

モデルへの入力パラメータは、層別刈取法により得られた葉面積密度 (LAD) および圃場の植被率である。LAD は正規化葉面積密度 (nLAD) に変換して用い、PS が各植生層で反射する確率を「nLAD×植被率」とする。植生で反射した PS には、層内で 1 cm 刻みで一様に反射高さを付与する。

MS の反射は、構成する PS の過半数が植生反射した場合に MS を植生反射と判定し、MS の計測点高さは植生反射した PS の反射高さの平均値として与える。

以上より、SSI を変化させて異なるスポットサイズ条件に対応した推定点群鉛直分布を出力する (図 2)。

なお、本研究では、既往モデルに対して以下の 3 点の高度化を行った。

- (1) PS の反射高さ付与方法を改良し、同一試行内で層内を 1 cm 刻みの一様分布として反射高さを与えることで、推定点群鉛直分布の連続性を向上させた。
- (2) MS の反射判定条件を、構成する PS の過半数が植生反射した場合に MS を植生反射と判定する条件に変更し、反射判定の一貫性と直感的な解釈性を高めた。
- (3) レーザスポットサイズを表現する指標である Spot Size Index (SSI) を実数値として扱うことで、飛行高度や LiDAR システムの違いによるレーザスポットサイズの変化を詳細に表現可能とした。

2.2 ドローン LiDAR 計測と計測点群鉛直分布

2024, 2025 年度に新潟県長岡市越路中沢地区の圃場を対象にドローン LiDAR 計測を実施した。ドローンに異なるレーザスポットサイズを持つ LiDAR システム (図 3), DJI 社製の Zenmuse L1 と Zenmuse L2 (以下, L1, L2) を搭載し、複数の飛行高度条件で水稻の三次元点群を取得した。なお、使用したドローン LiDAR システムの諸元を表 1 に示す。

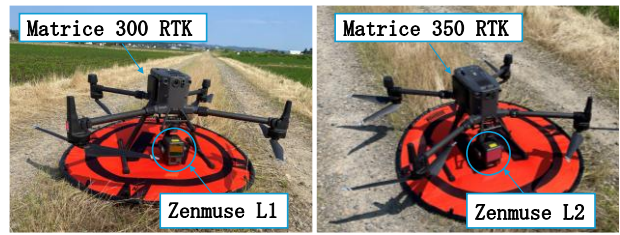


図 3 ドローン LiDAR システム (左図: L1 計測, 右図: L2 計測)

表 1 LiDAR システムの諸元

LiDARシステム	L1	L2
レーザー波長	905 nm	905 nm
ビーム発散角	水平: 0.03 deg (0.52 mrad) 垂直: 0.28 deg (4.89 mrad)	0.023 deg (0.4 mrad) 0.069 deg (1.2 mrad)
測距精度 (RMS 1σ)	3 cm @100 m	2 cm @150 m
FOV (反復スキャン)	水平: 70.4 deg 垂直: 4.5 deg	70 deg 3 deg
最大ポイントレート (Single Return)	240,000 点/秒	240,000 点/秒

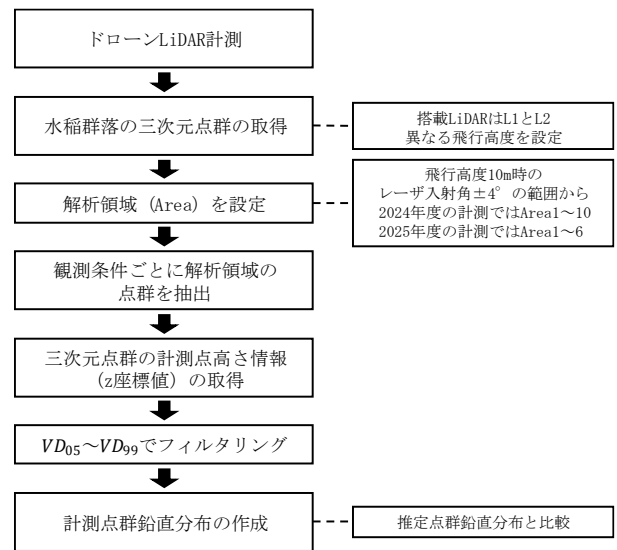


図 4 計測点群鉛直分布の作成フロー

ドローン LiDAR 計測と同期して、抜き株を行い層別刈取法により層別の葉面積を計測し、正規化した nLAD に変換しモデルに入力した。また、植被率をドローン LiDAR 計測時に取得した圃場の空撮画像に二値化処理を行い、算出した。計測点群鉛直分布は、条件圃場内に鉛直条件 (飛行高度 10m, レーザ入射角±4°) の範囲から解析領域 (2024 年度は Area1~10, 2025 年度は Area1~6) を設定し、各領域において作成した (図 4)。なお、階級幅 5cm の相対頻度分布となる。

3. 結果と考察

2024 年度および 2025 年度のドローン LiDAR 計測により取得した計測点群鉛直分布と、シミュレーションモデルにより出力される推定点群鉛直分布との類似度を RMSE により評価した。全解析対象日における RMSE の最小値と、そのときの SSI を表 2 に示す。なお、表中の数値は解析領域の平均 RMSE を示し、括弧内の数値は当該 RMSE を与えた平均 SSI である。

まず、生育初期に相当する 2024 年 6 月 4 日および 6 月 13 日の結果に着目する。6 月 4 日 (DAT32) では、RMSE の平均値は 0.057 (範囲: 0.045~0.064) であった。6 月 13 日 (DAT41) では、RMSE の平均値は 0.048 (0.033~0.055) であった。既往研究では、同時期、同解析領域における RMSE の平均値はそれぞれ 0.161 (6 月 4 日)、0.120 (6 月 13 日) であったことから、本研究で提案した高度化モデルにより、平均 RMSE は 6 月 4 日で 0.104、6 月 13 日で 0.072 低減しており、いずれも約 60% の改善が確認された。この結果から、既往モデルで課題とされていた生育初期における再現性低下が、本モデルにより大きく改善されたことが示された。

次に、2024 年 7 月 5 日の結果に着目する。ここでは、複数の飛行高度および LiDAR システム条件での再現性の検討を行う。L1 および L2 計測のいずれにおいても、飛行高度の上昇に伴い、下層および上層の相対度数が減少し、分布が平滑化する傾向が確認された。また、L1 計測では、飛行高度 7.5m において RMSE が最小となり、それ以上の高度では SSI および RMSE が増加した。一方、L2 計測では、飛行高度の上昇に伴い SSI が増加し、RMSE は低下する傾向を示した。L1 と L2 の異なる LiDAR システムにおけるレーザースポット効果を同一基準で評価するため、レーザースポットの長さで整理した (図 5)。その結果、長さの増加に伴い SSI は増加し、RMSE はレーザースポットの長さが約 0.037m で最小となった。なお、LiDAR と水稻群落との距離が最も近い飛行高度 5m の条件については、2025 年度の計測結果において検討している。2025 年度の結果では、飛行高度 5m において必ずしも RMSE が最小とはならず、低高度であっても再現性が必ずしも向上しない場合があることが示された。

4. まとめ

本研究では、水稻群落の点群鉛直分布推定モデルを高度化し、生育初期を含む複数年・複数観測条件下で再現性を検証した。第一に、生育初期

表 2 各観測条件での RMSE (SSI)

年度	日付	機器	ドローンLiDAR計測の飛行高度[m]						
			5	7.5	10	15	20	25	30
2024	6/4	L1	-	-	0.057 (3.2)	-	-	-	-
		L1	-	-	0.048 (4.3)	-	-	-	-
	7/5	L1	-	0.015 (3.0)	0.019 (3.5)	0.029 (5.6)	0.033 (6.1)	-	0.043 (8.3)
		L2	-	0.041 (1.2)	0.039 (1.3)	0.038 (2.3)	0.037 (2.7)	-	0.025 (3.4)
	2025	6/19	L1	0.034 (3.1)	0.032 (3.7)	-	-	-	-
L2			0.054 (1.3)	-	0.054 (1.3)	0.055 (1.4)	0.049 (2.2)	0.041 (3.0)	0.031 (4.7)
7/17		L1	0.016 (3.0)	0.012 (4.5)	-	-	-	-	-
		L2	0.027 (1.7)	-	0.026 (2.0)	0.023 (3.1)	0.021 (3.9)	0.019 (4.5)	0.015 (5.4)

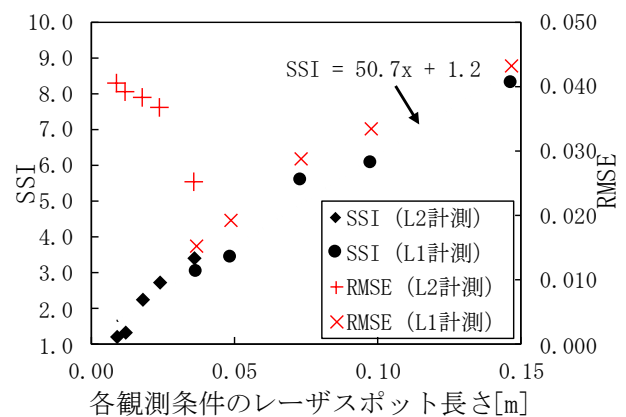


図 5 レーザスポットサイズと SSI, RMSE の関係

において既往モデルと比較して RMSE を約 60% 低減し、再現性が大きく向上することを示した。第二に、飛行高度および LiDAR システムの違いに応じて SSI が変化し、最適な計測条件が存在することを明らかにした。特に、レーザースポットの長さが約 0.0037m となる条件で高い再現性が得られ、他機器においても同程度のスポットサイズとなる飛行高度で計測することで、本モデルを効果的に適用できる可能性が示唆された。今後は、LAD の逆推定や入射角を考慮したモデル拡張により、実用的な群落計測手法への展開が期待される。

【参考文献】

- 磯野 柊二：UAV-LiDAR 計測におけるレーザースポットサイズの影響を考慮した水稻生育モニタリング手法の検討，長岡技術科学大学大学院環境社会基盤工学分野修士論文，2025