J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 158, p. 29～ 42 (2024)

非破壊・非侵襲計測特集
論　文
Original Paper

UAS リモートセンシングによる水田土壌化学性の推定精度にピクセル抽出範囲と撮影高度が与える影響

佐藤（金子）のぞみ [1,2]・飯島慈裕 [3]・岡島賢治 [1]・関谷信人 [1]・渡辺晋生 [1]

Influence of pixel extraction area and flight altitude on estimation of soil chemical properties in paddy field using UAS remote sensing

Nozomi KANEKO SATO[1,2], Yoshihiro IIJIMA[3], Kenji OKAJIMA[1], Nobuhito SEKIYA[1] and Kunio WATANABE[1]

Abstract: In unmanned aircraft systems (UAS) remote sensing, flight altitude and pixel extraction size are important factors that determine the accuracy of soil physical and chemical property estimation. In this study, UAS multispectral imagery of bare and submerged soils were acquired at flight altitudes of 60 m and 140 m, the former with a ground sampling distance (GSD) of 5 cm/pixel and the latter with a GSD of 10 cm/pixel. Pixels were extracted from 4 sizes of buffer circles (radius 0.3 m, 0.5 m, 1.0 m and 1.5 m) to calculate the spectral index and the correlations of these indices with soil chemical properties were evaluated. Imagery taken at the 140 m altitude had higher correlations, suggesting that the lower GSD imagery could reduce the effect of interfering pixels such as crop residues and shadows. Although larger pixel extraction areas had higher correlations, there were some cases where the correlations were lower at the 1.5 m radius buffer circle. The multispectral band reflectance statistics showed that the data range increased from the 1.0 m radius buffer, suggesting that the correlation would be higher if the extraction areas included a variety of pixels. On the other hand, areas that were too large also included interfering pixels, resulting in lower correlations. It was considered that the optimal pixel extraction size was 1.0 m radius buffer for high accuracy of soil chemical estimation in practical use.
Key Words : multispectral imagery, spectral index, correlation analysis, bare soil, submerged soil

1. はじめに

近年，スマート農業の導入が推進される中，UAS（unmanned aircraft systems）リモートセンシングの活用が盛んになっている．本技術は，複数の波長が撮影できるマルチスペクトルカメラを UAS に搭載して圃場を撮影し，特定波長帯（バンド）の反射率を利用して画像解析を行うものであり，作物の栄養状態の把握や収量の予測等に利用されている（石塚, 2019）．土壌に関しては，近赤外分光法等により土壌の分光データから土壌水分や全炭素，全窒素，土壌有機物等の土壌特性が計測されている（小川ら, 1989; 森次ら, 2015; Hong et al., 2020）．この技術を UAS リモートセンシングに活用し, 試験区や圃場単位，地域レベルなど様々なスケールで土壌特性の分布とムラを推定する手法が開発されている（森下・石塚, 2021; Diaz-Gonzalez et al., 2022）．特に土壌改良に有機資材を活用する場合，地力の把握とムラの改善が重要であり，本技術の汎用化が期待されている．

実際の撮影と解析方法は，まず一定の高度で UAS を飛行させ，対象圃場のマルチスペクトル画像を複数取得する．これらの画像を SfM（structure from motion）処理ソフトで結合して，オルソモザイク画像を作成する．植物体や土壌特性等の現地観測値と画像のデータセットを作成するため，地理情報システム（GIS: geographic information system）等を用いて観測地点における各バンドの反射率のピクセル値を取得する．近年は機械学習を用いて反射率から観測値を推定する手法の開発が進みつつある（Diaz-Gonzalez et al., 2022）．しかし，現時点では個別のバンド反射率や，それらの比および差分を演算して分光指数を作成し，観測値と関連が強い説明変数を用いて推定式を作成する手法の汎用性が高く，未だ一般的である（井上ら, 2008; Jones and Vaughan, 2010; 横山ら, 2016; Xu et al., 2018）．この場合，相関係数に基づき説明変数を選定することが多く，作成した推定式を用いて推定対象とする変量の圃場内分布を表現する．ここで推定精度を高めるうえで重要なのが，画像の解像度とピクセル値の抽出である．

画像の解像度はマルチスペクトルカメラの性能と UAS の飛行高度で決定される．UAS に搭載可能なマルチスペクトルカメラは日々開発が進んでおり，性能は個々のカメラによって異なるが，一般に 20 m 程度の低高度の

[1]Graduate School of Bioresources, Mie University, 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu, Mie, Japan. Corresponding author: 佐藤（金子）のぞみ，三重大学大学院生物資源学研究科.
[2]Office SoilCares, 99 nong, Dongxiulu, Pudongxinqu, Shanghai, China.
[3]Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo, Japan.
2024 年 4 月 17 日受稿　2024 年 10 月 1 日受理

Table 1 UAS リモートセンシングに関する撮影高度と解像度，ピクセル抽出に関する既往文献の整理結果.
Literatures on flight altitude, resolution and pixel extraction area in UAS remote sensing.

参考文献	推定対象	作物	土壌	センサー	撮影高度 [m]	解像度 [cm/pixel]	観測データ数	ピクセル抽出サイズ	解析手法
森下・石塚（2020）	土壌含水率	ダイズ	黒ボク土	5Bd MS: P4 Multispectral サーマル: Mavic 2 Enterprise dual	100	22（最低解像度のサーマルで統一）	64 地点	直径 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m バッファー	RF
Bai et al.（2021）	土壌含水率	不明	壌土	6Bd MS: Tetracam	120	6.5	180 地点（60 地点 ×3 圃場）	16 種類の window size: 1×1～31×31	BPNN
Bertalan et al.（2022）	土壌含水率	トウモロコシ-牧草	チェルノーゼム	5Bd MS: RedEdge-MX, サーマル: Zenmuse XT2	70	MS: 5.1, サーマル: 12.4	72 地点	シングルピクセル，半径 20 cm, 30 cm バッファー	RF, ENR, GLM, RLM
Aldana-Jague et al.（2016）	土壌有機炭素	春大麦	粘土質の褐色土	6Bd MS: Tetracam	120	12	109 地点	記載なし．おそらくシングルピクセル	SVM
丹羽ら.（2018）	熱水抽出性窒素	小麦	黒ボク土	可視領域（RGB）デジタルカメラ	不明	不明	A 圃場: 9 地点, B 圃場: 16 地点	1 m メッシュ	単回帰
森下・石塚（2021）	粒径組成, pH（H_2O）, EC, TN, TC	ダイズ	黒ボク土	4Bd MS: Sequoia, サーマル: Mavic 2 Enterprise dual	145	22	36 地点	直径 1.5 m バッファー	RF
田中・近藤（2016）	水稲の分げつ数, 草丈, 収量, 玄米タンパク質量	水稲	不明	GoPro 2 台を併用して可視領域（RGB）と近赤外を取得	50	5.9	6 – 8 地点	5 m メッシュ	単回帰
Zheng et al.（2018）	稲体窒素	水稲	壌土	6Bd MS: Tetracam	100	5.4	36 圃場 ×3 – 4 生育ステージ ×2ヶ年	window size 3×3	単回帰
Li et al.（2022）	小麦と大麦の草丈, LAI, 葉の窒素量, バイオマス	小麦, 大麦	壌土	5Bd MS: RedEdge-M	50	3	40 地点（20 地点× 2 圃場）×3 生育ステージ	半径 2 m バッファー	単回帰

Bd: バンド，MS: マルチスペクトル，RF: ランダムフォレスト，BPNN: BP ニューラルネットワーク，ENR: エラスティックネット，GLM: 一般線形モデル，RLM: ロバスト線形モデル，SVM: サポートベクターマシーン

撮影で数 cm の超高解像度が得られ，UAS の飛行規制にかかる 150 m に近い高度でも，10 数 cm の高解像度を得ることが可能である．撮影高度は画像解像度の決定とスペクトルの識別に重要な要因であり，観測対象や目的に合わせた最適なサイズのピクセルを用いて解析する必要性がある（Mesas-Carrascosa et al., 2015）．井上 · 横山（2017）は，植物を対象とした UAS リモートセンシングにおいて，バイオマス等の単位土地面積当たりで表される変量は，数 m 程度の低解像度の利便性が高く, 病徴等の微細な変化を発見する目的以外では，超高解像度を取得する必要性は低いとしている．土壌に関しては，解析に適切な解像度について言及した研究事例はなく，経験的な高度で撮影した画像の解像度で解析をしているのが実態であろう．

また解析に用いるピクセル値は，地上に設定した観測地点が含まれるピクセルの分光データを抽出する必要が

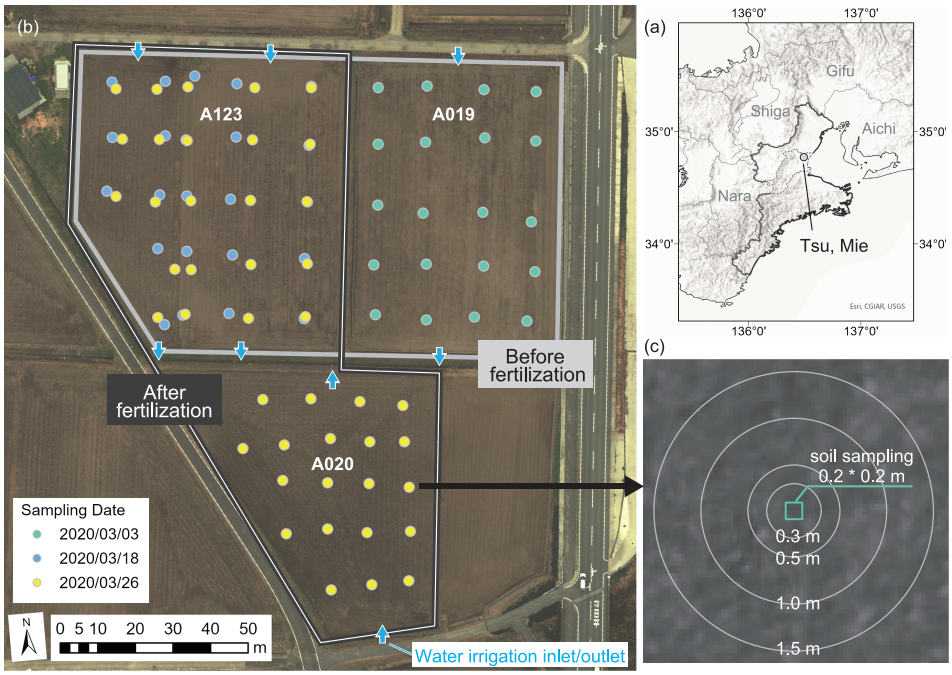


Fig. 1　(a) 調査対象地，(b) 調査圃場と土壌採取地点，(c) 土壌採取とピクセル抽出範囲のバッファー円．
(a) Location of the study fields, (b) Soil sampling points in the study fields, (c) Soil sampling area and buffer circles for pixel extraction.

ある．緯度経度で観測地点を指定し，該当するピクセルを抽出する方法（シングルピクセル）は，高解像度の場合，観測地点と完全に一致させることが困難である．そのため，観測地点を中心に一定の範囲（ピクセル抽出範囲）を設定し，包含されるピクセルから分光データの平均値を取得する手法が採用されている．土壌表面は不均一であり，観測地点に対応した代表性のあるピクセルを取得する範囲は，経験的に設定されることが多い（Bai et al., 2021）．

UAS リモートセンシングに関する近年の文献について，「ピクセル抽出」，「バッファー」等のキーワードで検索したが，これらの記載がない文献が多く，解像度や撮影高度，ピクセル抽出範囲が整理できた文献は 9 件，そのうち土壌を推定対象としたものは 6 件であった（Table 1）．その中で森下 · 石塚（2020），Bai et al.（2021），Bertalan et al.（2022）は，複数のピクセルの抽出範囲を設定して精度を検証しているが，他の事例はシングルピクセルやメッシュサイズの決め打ちで抽出されていた．また，解像度や撮影高度は研究手法の緒言として記載されており，推定精度に与える影響は考慮されていない．このように，撮影高度とピクセル抽出は，対象とする変量の推定精度を左右する重要な要因であるにもかかわらず，明確な根拠がないままに研究が進められているのが現状である．

そこで本研究では，UAS リモートセンシングで得られる分光指数を用いて水田の土壌化学性を推定する際に，撮影高度やピクセル抽出範囲の大きさが推定精度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

2.　研究方法

2.1 調査対象地

三重県津市大里睦合町のつじ農園にある水田圃場 A019，A020，A123 において，2020 年 2 – 5 月に UAS の撮影と土壌の採取を行った．これらは有機栽培または特別栽培（農薬および化学肥料の使用量を慣行より 50 % 以上削減する栽培方法）の圃場で，有機資材が活用されている．調査対象地と土壌採取地点を Fig. 1 に示す．当年のイネの栽培品種はいずれも三重 23 号であった．A019（面積 0.42 ha，55 × 80 m）は特別栽培で，1 月 6 日に有機資材として米ぬか 300 kg/10 a を施用した後，5 月の田植え時に基肥一発肥料（有機セラコート 355EF，全窒素 13 %，リン酸 5 %，カリウム 5 %）40 kg/10 a を同時に施用した．3 月 3 日に施肥前の土壌を 20 点（Fig. 1）で採取した．A020（面積 0.53 ha，72 × 80 m）は有機栽培で，3 月 24 日に有機肥料の匠のぼかし（全窒素 3.9 %，リン酸 2.9 %，カリウム 1.8 %，マグネシウム 3.0 %）と有機ハイミネコン（カルシウム 5 %）を各 80 kg/10 a 施用した．3 月 26 日に施肥後の土壌を 21 点で採取した．A123（面積 0.5 ha，74 × 80 m）も有機栽培で，前年の 10 – 11 月に米ぬか 300 kg/10 a を施用した後，3 月 24 日に自作のぼかし肥（成分不明）150 kg/10 a を施用した．3 月 18 日に施肥前，3 月 26 日に施肥後の土壌をそれぞれ 23 点で採取した．土壌採取地点は，3 圃場すべてで概ね 10 – 15 m 間隔で設定し，20 cm 四方の範囲から表

Table 2　UAS 撮影日と土壌分析結果の組み合わせ.
Combinations of UAS shooting dates and soil chemical analysis.

土壌表面	撮影日時	撮影高度 [m]	圃場別土壌データ数			
			A019	A020	A123	計
裸地	2020/02/25 10:55	60	施肥前 3/3 採取 JA：20 点 協会：0 点 自主：20 点	データなし	施肥前 3/18 採取 JA：23 点 協会：23 点 自主：23 点	施肥前 JA：43 点 協会：23 点 自主：43 点
	2020/03/04 09:20	60				
	2020/03/18 09:54	60				
	2020/03/18 10:17	140				
	2020/03/26 14:45	60				施肥前後 JA：41 点 協会：42 点 自主：64 点
	2020/03/26 15:04	140		施肥後 3/26 採取 JA：21 点 協会：21 点 自主：21 点	施肥後 3/26 採取 JA：0 点 協会：21 点 自主：23 地点	
湛水	2020/04/17 09:26	60				
	2020/04/17 09:50	140				
	2020/04/25 18:00	60	田植え同時 施肥のため, データなし			施肥後 JA：21 点 協会：42 点 自主：44 点
	2020/04/25 18:20	140				
	2020/05/03 11:26	60				
	2020/05/08 04:55	60				

JA: JA 全農土壌分析センター，協会: 土壌協会，自主：自主分析

層 0 – 約 10 cm の作土を採取，混合した．また採取時に RTK-GNSS（Real Time Kinematic — Global Navigation Satellite System）受信機（Emlid, REACH RS）を用いて，採取地点の緯度経度を取得した後，RTKLIB ver. 2.4.2（Takasu, 2013）で後処理補正を行い，数 cm 精度の位置データを取得した．

2.2 土壌化学性の分析

採取した土壌は風乾後 2 mm 篩通過分を用いて，以下の 13 項目を分析した．pH（H_2O）, 電気伝導度（EC）, 有効態リン酸（Av-P_2O_3），交換性カルシウム（Exc-CaO），交換性マグネシウム（Exc-MgO），交換性カリウム（Exc-K_2O），イオン交換容量（CEC），有効態ケイ素（Av-Si）は，JA 全農土壌分析センターに分析を委託した．保温静置法（土壌環境分析法編集委員会, 2000）による可給態窒素（AvN）は，日本土壌協会に分析を委託した．また，抽出性有機炭素（Ext-TOC）と抽出性窒素（Ext-TN）は，中央農業総合研究センター（2016）に基づいて土壌溶液を抽出し，TOC 計（島津製作所, TOC-V CPH）で測定した．全炭素（TC）と全窒素（TN）は 1 mm 篩を通過した風乾土を用いて，元素分析装置（Elementar, Vario El cube）で測定した．

矢内ら（2000）は，これらの土壌化学性の空間依存性について，セミバリオグラムを解析している．空間依存性が低い有効態リン酸と交換性カリウムは，サンプリング距離間隔を 40 – 50 m，空間依存性が高い EC やその他の交換性陽イオン，全炭素，全窒素などは 20 m 程度としている．本研究の土壌採取間隔は 15 m 程度であり，圃場内の土壌化学性の空間分布を表現可能とみなした．

2.3 UAS 撮影

UAS の撮影は，AgEagle 社のマルチスペクトルカメラ RedEdge Mx（以下, RedEdge とする）を DJI 社の Inspire 2 に搭載して行った．RedEdge は，青（B1: 475 nm，帯域幅 20 nm），緑（B2: 560 nm，帯域幅 20 nm），赤（B3: 668 nm，帯域幅 10 nm），レッドエッジ（B4: 717 nm，帯域幅 10 nm），近赤外（B5: 840 nm，帯域幅 40 nm）の 5 バンドの光強度を示すデジタルデータ（DN）が取得可能である．撮影の前後で反射率が既知の標準拡散板を撮影し，DN から反射率に変換して各バンドの反射率を取得した．

撮影は，2020 年 2 月 25 日 – 5 月 8 日に計 12 回行った．志賀ら（1989）はリモートセンシングで土壌腐植量を推定する際は，耕起および砕土の状態や地表の湿り具合が均質な裸地が望ましいとしている．その理由として，作物の被覆や土壌表面の凹凸，水分状態も土壌の反射率に影響を及ぼすことを挙げている．水田は稲わら等の被覆により裸地画像が得られにくいことから，土壌表面が比較的均一になる湛水状態の衛星画像を用いて解析を行っている．そこで本研究では，UAS リモートセンシングで基肥および追肥の調節を行う際に実用的な画像を検証するため，入念に耕起を行って均一化を図った裸地と，湛水の画像を対象とした．UAS 撮影日と土壌分析の組み合わせを Table 2 に示す．3 月 18 日までは施肥前の裸地，3 月 26 日と 4 月 17 日は施肥前後が混在した裸地と湛水，4 月 25 日以降は施肥後の湛水画像となった．UAS の飛行高度は 60 m と 140 m とし，画像のオーバーラップ率をフロント 80 %，サイド 75 % で設定した．SfM 合成時にオルソモザイク画像の位置精度を向上させるため，対象圃場の周囲 8 カ所に GCP（ground control point）を設置し，RTK-GNSS を用いて各地点の緯度経度の取得と後処理補正を行った．

Table 3 土壌化学性分析結果の平均値と標準偏差.
Means and standard deviations of soil chemical properties in each study fields before and after fertilization.

分析項目		A019 施肥前	A020 施肥後	A123 施肥前	A123 施肥後
pH（H_2O）	平均値	5.85	6.34	6.16	NA
	標準偏差	0.11	0.09	0.24	
電気伝導度 [dS m^{-1}]	平均値	0.06	0.07	0.05	NA
	標準偏差	0.01	0.01	0.02	
有効態リン酸 [mg kg^{-1}]	平均値	139.60	189.71	209.13	NA
	標準偏差	27.54	36.00	80.24	
交換性カルシウム [mg kg^{-1}]	平均値	2135.00	2522.38	2407.83	NA
	標準偏差	278.03	219.22	490.70	
交換性マグネシウム [mg kg^{-1}]	平均値	336.00	284.29	337.39	NA
	標準偏差	47.17	36.27	60.09	
交換性カリウム [mg kg^{-1}]	平均値	281.50	205.71	252.61	NA
	標準偏差	64.01	51.05	77.82	
CEC [$cmol_c$ kg^{-1}]	平均値	14.50	12.70	14.16	NA
	標準偏差	1.23	0.72	1.20	
有効態ケイ酸 [mg kg^{-1}]	平均値	106.15	115.95	98.52	NA
	標準偏差	15.11	9.50	22.48	
全炭素 [%]	平均値	1.81	1.53	1.85	1.83
	標準偏差	0.15	0.11	0.25	0.32
全窒素 [%]	平均値	0.17	0.14	0.18	0.17
	標準偏差	0.01	0.01	0.02	0.03
可給態窒素 [mg kg^{-1}]	平均値	NA	103.14	143.09	146.86
	標準偏差		12.29	47.53	36.38
抽出性有機炭素 [mg kg^{-1}]	平均値	836.65	779.43	1234.61	1182.04
	標準偏差	78.52	172.77	171.02	239.85
抽出性窒素 [mg kg^{-1}]	平均値	60.15	68.52	127.04	107.61
	標準偏差	8.29	21.61	14.43	15.52

NA: not analyzed

2.4 データ処理

取得した画像は, Metashape Professional ver.1.8.0（Agisoft 社）により反射率補正と SfM 処理を行った．UAS の位置情報に加えて, 撮影画像に含まれた GCP の位置情報を基に縮尺および方位の位置補正を行い，5 バンド × 撮影 12 回分のオルソモザイク画像を生成した．各画像の解像度は，撮影高度 60 m で 4.2 – 5.1 cm/pixel，140 m で 9.9 – 11.4 cm/pixel であった．これらの画像を GIS ソフトウェア（ESRI 社，ArcGIS Pro ver. 3.2.1）で解析した.

ArcGIS Pro では，ピクセル値の抽出範囲として土壌採取地点の緯度経度を中心に半径 0.3，0.5，1.0，1.5 m のバッファー円を生成し（Fig. 1c），取り込んだオルソモザイク画像について，円内に含まれる各バンドのピクセル平均値をゾーン統計で取得した．本研究では，各バンドのピクセル平均値 5 個と，これらを代入して得られる（1）（2）式のバンド演算値各 10 個，（3）式の正規化指数（NDI：normalized difference index）10 個，計 35 個の説明変数を作成し，土壌化学性の分析結果とあわせて相関分析用のデータセットを作成した.

$$B_i - B_j \tag{1}$$

$$B_i / B_j \tag{2}$$

$$NDI(B_i, B_j) = (B_i - B_j)/(B_i + B_j) \tag{3}$$

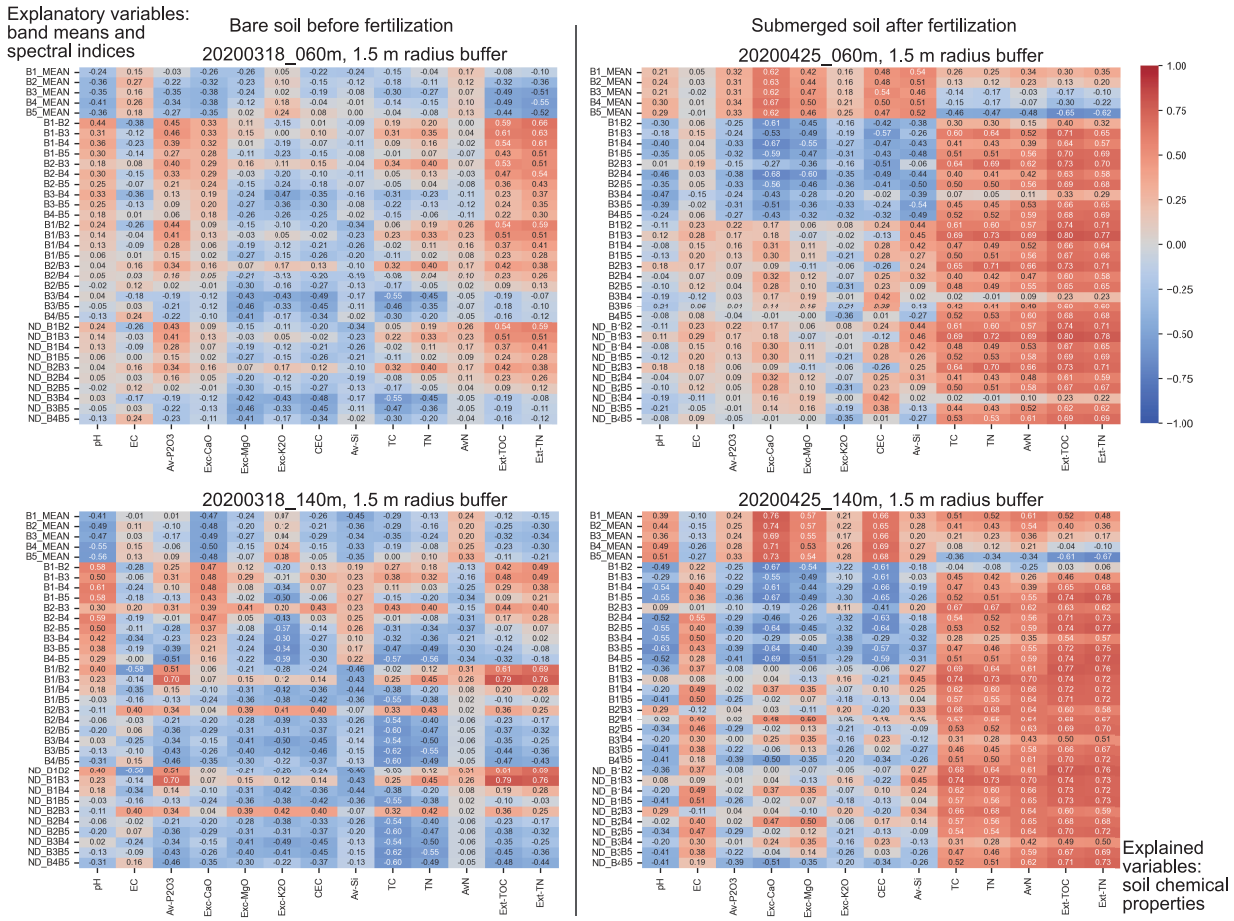


Fig. 2 土壌化学性と分光指数の相関係数ヒートマップの例（施肥前 · 裸地: 2020 年 3 月 18 日，施肥後 · 湛水: 2020 年 4 月 25 日，いずれもバッファー半径 1.5 m）．各図中の文字列（例えば 20200318_060 m，1.5 m radius buffer）は左から撮影日（YYYYMMDD），撮影高度 [m]，バッファー半径 [m] を示す．
Heatmaps of correlation coefficients between soil chemical properties and multispectral band means and spectral indices in the case of 1.5 m radius buffers. (Bare soil before fertilization: 2020/03/18. Submerged soil after fertilization: 2020/04/25). The titles in each figure (e.g., 20200318_060 m, 1.5 m radius buffer) indicate the UAS shooting date (YYYYMMDD), flight altitude [m] and buffer radius [m].

ここで，i, j はマルチスペクトル画像のバンド番号を示し，B_i と B_j は各バンド反射率のピクセル平均値である．

汎用プログラミング言語 Python の解析ツール Numpy ver. 1.25.2 を用いて，13 項目の土壌化学性の被説明変数と 35 個の説明変数で，455 の組み合わせについて相関分析を行った．これを撮影画像 12 枚とバッファー円 4 サイズの 48 ケースを繰り返して，計 21,840 個の相関係数を算出し，UAS 撮影高度およびバッファー円サイズとの相関を検証した．

3. 結果および考察

3.1 土壌化学性分析値

調査を行った 3 圃場の土質は，いずれもシルト質埴土の灰色低地土であった．各圃場における土壌化学性の平均値と標準偏差を Table 3 に示す．pH の平均は A019 で 5.85，A020 は 6.34，A123 は 6.16 であり，A019 でやや酸性であった．EC は 0.05 – 0.07 dS m^{-1} で A020 の施肥後でも低い値であった．有効態リン酸，交換性塩基類，CEC は，3 圃場とも地力増進基本方針（農林水産省, 2008）の適正値内であったが，有効態ケイ酸は 98.5 – 116 mg kg^{-1} で適正値以下であった．全炭素は 1.53 – 1.85 %，全窒素は 0.14 – 0.18 % であり，可給態窒素は 103.14 – 146.86 mg kg^{-1} で適正値であった．抽出性有機炭素は 779.43 – 1,234.61 mg kg^{-1}，抽出性窒素は 60.15 – 127.04 mg kg^{-1} であり，施肥前の A123 で高い値であった．A123 は調査年次に合筆しており，有機物の関連項目が高い点が特徴的であった．一方で，A020 は施肥後でも全体の土壌肥料成分が少なかった．

3.2 相関分析

3.2.1 相関係数の検証

SfM 処理により作成したマルチスペクトル画像に対し，4 サイズのバッファー円を設定し，Table 3 の土壌化学性と相関分析を行った．解析は撮影全 12 回分，計 48 ケースについて行ったが，本論文では撮影高度による比較を行うため, 同日に 60 m と 140 m で撮影を行った 2020 年 3 月 18 日（施肥前の裸地）と 4 月 25 日（施肥後の湛水）の画像の結果（相関係数計 7,280 個）につ

Table 4 相関係数 0.7 以上として抽出された被説明変数と説明変数の組み合わせ.
Combinations of explained variables and explanatory variables selected as significant (≧ 0.7) correlation coefficients.

被説明変数 土壌化学性	説明変数 バンド平均値，分光指数	抽出数
pH	該当なし	0
EC	該当なし	0
Av-P_2O_3	B1/B3，ND_B1B3	2
Exc-CaO	B1_MEAN，B2_MEAN，B4_MEAN，B5_MEAN，B1 − B4，B4 − B5	6
Exc-MgO	該当なし	0
Exc-K_2O	該当なし	0
CEC	該当なし	0
Av-Si	該当なし	0
TC	B1/B3， ND_B1B3	2
TN	B1/B3，B2/B3，ND_B1B3，ND_B2B3	4
AvN	B1/B3，ND_B1B3	2
Ext-TOC	B1 − B3，B1 − B5，B2 − B3，B2 − B4，B2 − B5，B1/B2，B3 − B5，B4 − B5，B1/B3，B1/B4，B1/B5，B2/B3，B2/B4，ND_B1B2，ND_B1B3，ND_B1B4，ND_B1B5，ND_B2B3，ND_B2B4，ND_B2B5，ND_B4B5	21
Ext-TN	B1 − B5, B2 − B4, B2 − B5, B3 − B5, B4 − B5, B1/B2, B1/B3, B1/B4, B1/B5，B2/B3，B2/B4，B2/B5，B4/B5，ND_B1B2，ND_B1B3，ND_B1B4，ND_B1B5，ND_B2B3，ND_B2B4，ND_B2B5，ND_B4B5	21
合計		58

B1 – B5: マルチスペクトル画像のバンド 1 – バンド 5，B1: 青，B2: 緑，B3: 赤，B4: レッドエッジ，B5: 近赤外，ND: 正規化指数，末尾の_BiBj は指数の算定に適用したバンドの組み合わせを示す.

いて詳細を述べる．その他の日付の解析結果は電子付録（Fig. S1）に示す．例として, バッファー半径 1.5 m の相関係数ヒートマップを Fig. 2 に示す．施肥前の裸地画像では，撮影高度 140 m で有効態リン酸，抽出性有機炭素，抽出性窒素が B1/B3 および B1 と B3 の正規化指数でそれぞれ 0.70，0.79，0.76 であった．施肥後の湛水画像では，撮影高度 140 m で交換性カルシウムが B1 平均値で 0.76，全炭素，全窒素，可給態窒素が B1/B3 でそれぞれ 0.74，0.73，0.70 であった．撮影高度 60 m で抽出性有機炭素と抽出性窒素が B1/B3 および B1 と B3 の正規化指数でそれぞれ 0.80，0.78 と高相関であった．湛水画像で高相関となる被説明変数が多く，湛水により表面が均質な状態の画像が，水田土壌の解析に適していると考えられた．一方で抽出性有機炭素と抽出性窒素は，裸地 · 湛水のどちらの条件でも高い相関係数が得られた．pH，EC，交換性マグネシウム，交換性カリウム，CEC，有効態ケイ素は，相関係数が 0.7 未満であった．森次ら（2015）は，スペクトルを利用した近赤外分光法による土壌診断では，全炭素，全窒素，可給態窒素，CEC などは高い精度で推定可能としている．その要因として，炭素や窒素を含む官能基および有機物，粘土鉱物に由来するバンドの影響を挙げている．一方で，pH, EC，交換性塩基は，推定精度が低いことを報告しており，本研究でも概ね同様の結果が得られた．

3.2.2 ピクセル抽出範囲による比較

算出された 7,280 個の相関係数のうち，相関が強いとされる 0.7 以上（川瀬, 2009）の相関係数は 210 個であった．これらを撮影日，撮影高度，バッファーで集約し，Table 4 に示す 58 ケースの被説明変数と説明変数の組み合わせを整理した．組み合わせの中には，あるバッファーでは相関係数が 0.7 以上だが，その他のバッファーで 0.7 未満のものも含まれる．これらの組み合わせについて，ピクセル抽出範囲のバッファー半径 0.3，0.5，1.0，1.5 m で相関係数を比較した．Fig. 3 に一部を抜粋して示す．全体として，バッファー半径が大きいほど相関係数が高くなるケースが多かった．

ピクセル抽出範囲は，様々な土壌化学性の平均的な値をよく示すバッファー半径ほど，相関係数の高い組み合わせが増加すると考えられた．また相関係数の高い組み合わせが多いほど，汎用性の高いバッファー半径といえる．そこで，Table 5 に撮影日と撮影高度，バッファー半径別に相関係数 0.7 以上の組み合わせ数を整理し，相関が高くなる条件を検証した．バッファー半径については，半径 1.5 m が最も多く，4 月 25 日の画像では撮影高度 60 m で 19 個，140 m で 40 個であった．撮影日と高度別に見ると，相関係数 0.7 以上の組み合わせは計 73 ケースあり，そのうち 50 ケースが半径 1.5 m で最も高い相関係数を示した．一方で，1.5 m で若干低下

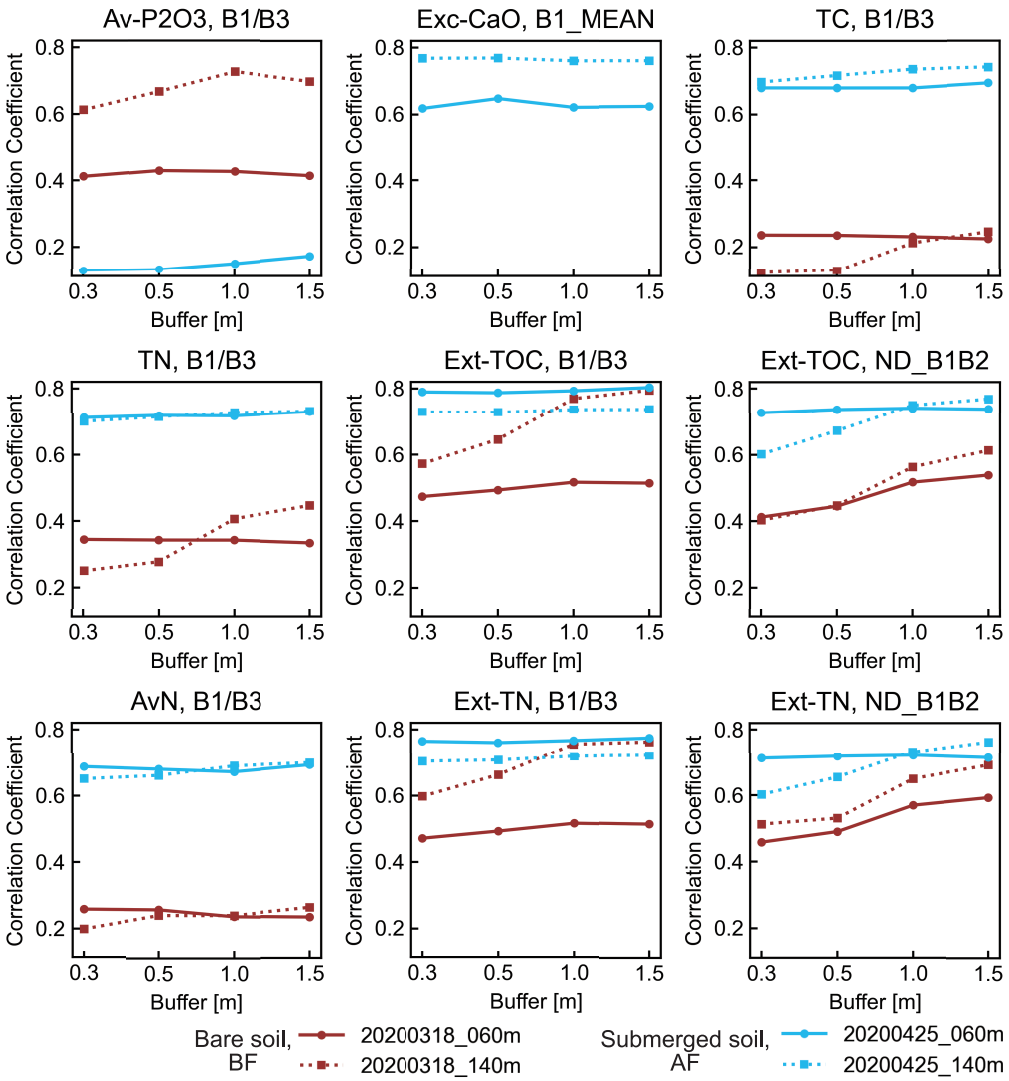


Fig. 3　バッファー半径 0.3 m, 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m における相関係数の比較．凡例は（例えば 20200318_060 m）は撮影日（YYYYMMDD）と撮影高度 [m] を，BF と AF は施肥の前と後をそれぞれ示す．
Comparison of correlation coefficients between 0.3 m, 0.5 m, 1.0 m and 1.5 m radius buffers. The legends (e.g., 20200318_060 m) indicate the UAS shooting date (YYYYMMDD) and flight altitude [m] and BF and AF are before and after fertilization, respectively.

Table 5　バッファー半径および撮影高度別の相関係数 0.7 以上を示した被説明変数と説明変数の組み合わせと相関係数最高値の数．
Number of combinations of explained variables and explanatory variables with significant (≧ 0.7) correlation coefficients.

撮影日	撮影高度 [m]	バッファー半径 [m]				計
		0.3	0.5	1.0	1.5	
2020/03/18 施肥前 · 裸地	60	0	0	0	0	0
	140	0	0	6	4	10
2020/04/25 施肥後 · 湛水	60	11	13	15	19	58
	140	31	34	37	40	142
計		42	47	58	63	210
最高値の組み合わせ数		14	2	7	50	73
バッファー半径 1.5 m との	相関係数	0.982	0.989	0.999	–	–
	p 値	1.3×10^{-32}	4.0×10^{-13}	1.0×10^{-35}	–	–

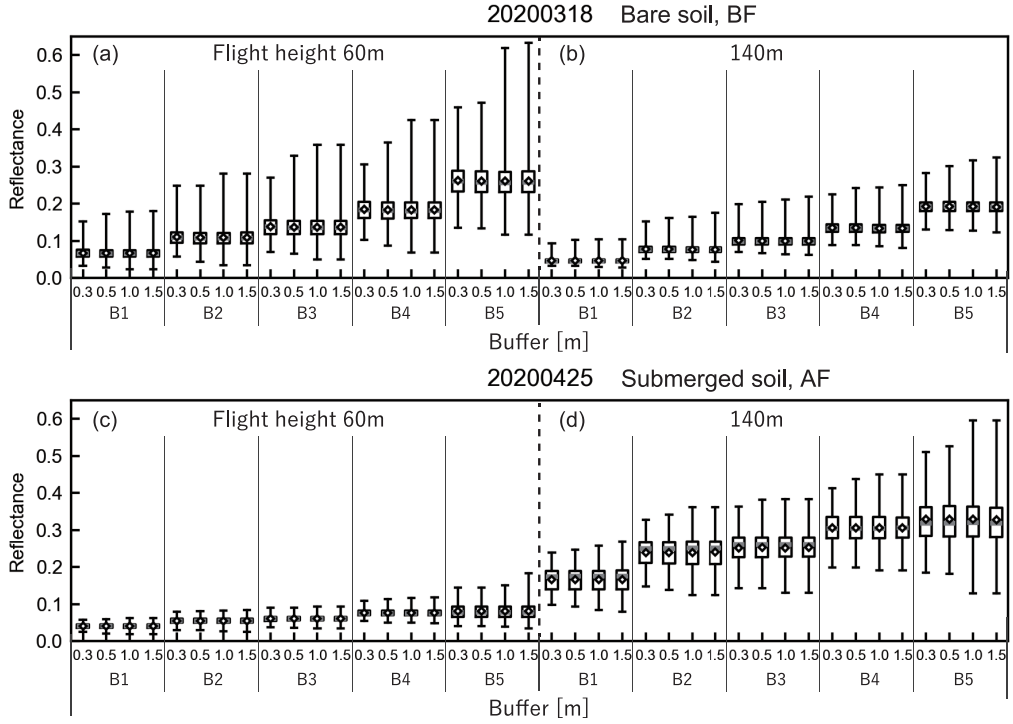


Fig. 4 撮影高度およびバッファー半径別のバンド反射率統計値（施肥前 · 裸地: 2020 年 3 月 18 日，施肥後 · 湛水: 2020 年 4 月 25 日）．箱ひげ図内の灰色の線は中央値，白ダイヤは平均値を示す．
Five-bands reflectance statistics by flight altitude and buffer radius. (Bare soil before fertilization (BF): 2020/03/18. Submerged soil after fertilization (AF): 2020/04/25). The gray line and diamond in the boxplot indicate the median and the average values, respectively.

する組み合わせが 23 ケースあった．1.5 m とその他のバッファーの相関係数の類似度を検証するため，すべての相関係数を（4）式でフィッシャーの z 変換を行い（R Documentation, 2024），得られた z 値を用いて 1.5 mとの相関係数を算出した（Table 5）．

$$z = \frac{1}{2}\log\left(\frac{1+r}{1-r}\right) \tag{4}$$

ここで，r は元の相関係数（7,280 個）である．1.5 mとの相関係数はすべてのバッファーで 0.98 以上，p 値 < 0.01 であり有意差はないと判断された．特に 1.5 m と 1.0m の相関係数は 0.999 であり，両者の値が類似しており，土壌化学性の被説明変数に対する各変数の相関の強さはほぼ同じであると考えられた．

森下 · 石塚（2020）および Bai et al.（2021）はピクセル抽出範囲の拡大に伴って土壌含水率推定式の決定係数が増加した後，下降することを報告している．その要因として，範囲が小さいと学習データが少なく，大きいと範囲内の土壌条件が均一という仮定が成立しないことを挙げている．Fig. 4 に各バンド反射率の統計値を撮影高度およびバッファー半径別に示した．平均値に大きな差はないが，バッファー半径が大きくなるにつれ，データ範囲が広がっていることが分かる．特に 0.5 m から 1.0 m で四分位範囲と最大 · 最小値の幅が広がる傾向があり，ピクセル抽出範囲を大きくすることで，多様なピクセルが変数に組み込まれて相関係数が向上することが分かった．一方で，半径 1.5 m で相関係数が低下するケースについては，抽出範囲が大きすぎると作物残渣などの夾雑物を多く含むことが懸念された．そのため，一括の処理で複数の土壌化学性を推定するには，バッファー半径 1.0 m で設定することが妥当と考えらえた．また可変施肥における実用性を考慮すると，トラクターの耕耘幅 1.5 m 前後，ドローン散布幅 3 m 程度のため，バッファー半径 1.0 m の設定は多方面への応用が可能と言える．

3.2.3 撮影高度による比較

Fig. 3 で撮影高度 60 m（実線）と 140 m（点線）の相関係数を比較すると，高度 140 m の方が 60 m より相関係数が高いケースが多く確認された．Table 5 のバッファー半径 1.5 m の場合，算出された 455 個の相関係数のうち 0.7 以上であった組み合わせは，3 月 18 日の高度 60 m で 0 個，140 m で 4 個のみであった．4 月 25 日は高度 60 m で 19 個，140 m で 40 個あり，撮影高度が高い方が高相関の組み合わせが多く，特に施肥後の湛水画像で顕著であった．Fig. 4 でバンド反射率の統計値を撮影高度別に見ると，湛水画像（4 月 25 日）は高度 140 m の方がデータ分布範囲が広く，反射率平均値が高いのに対し，裸地画像（3 月 18 日）は逆の傾向となった．撮影

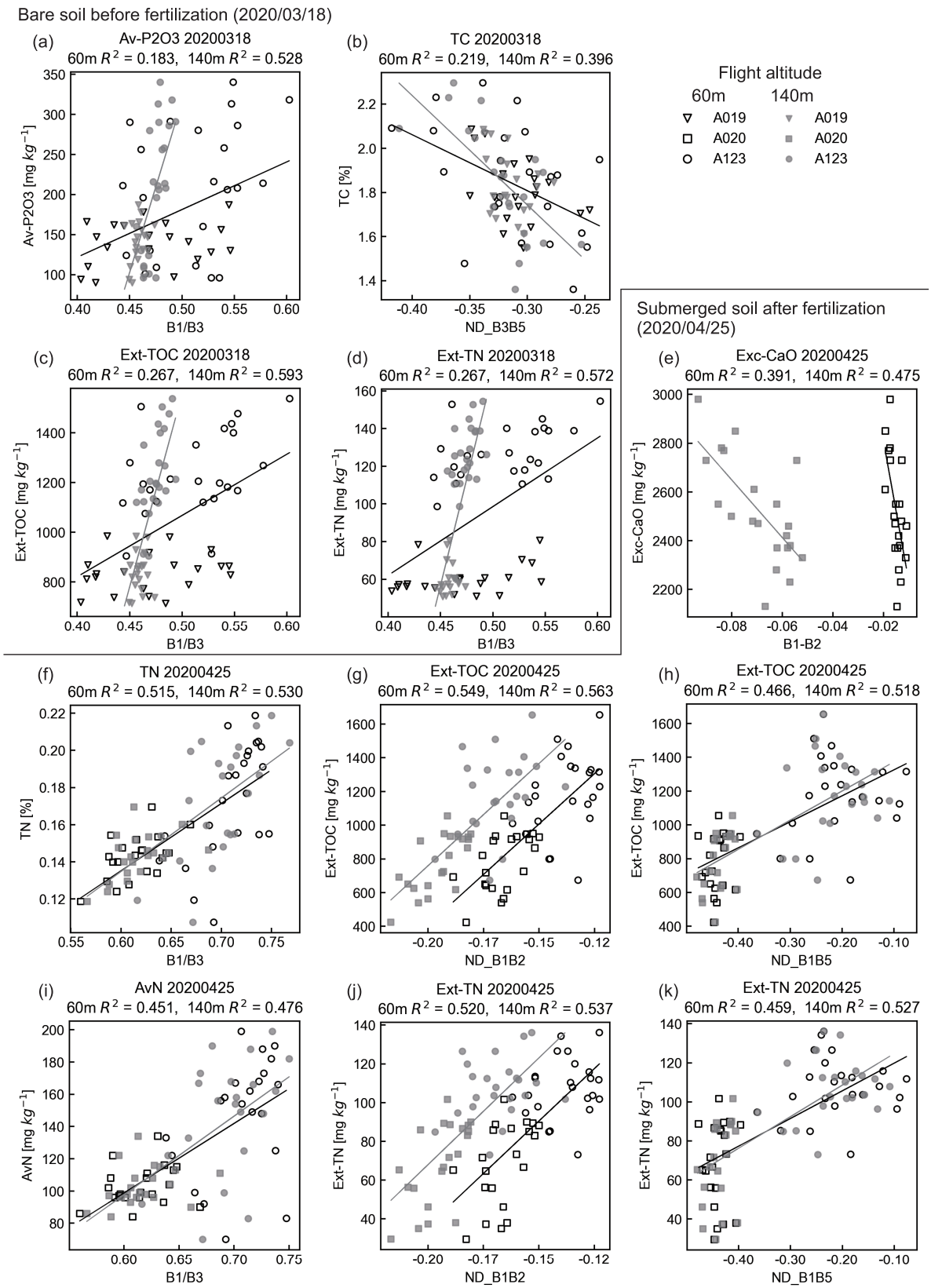


Fig. 5 撮影高度 60 m と 140 m の線形回帰結果の比較（施肥前 · 裸地: 2020 年 3 月 18 日，施肥後 · 湛水: 2020 年 4 月 25 日，いずれもバッファー半径 1.0 m）．白抜きシンボルと黒の回帰線は高度 60 m の結果，灰色の塗りつぶしシンボルと回帰線は高度 140 m の結果を示す．

Comparison of the linear regressions between flight altitude at 60 m and 140 m in the case of the 1.0 m radius buffer. (Bare soil before fertilization: 2020/03/18. Submerged soil after fertilization: 2020/04/25). Open symbols and black regression lines indicate results at 60 m altitude. Gray symbols and regression lines indicate results at 140 m altitude.

高度を上げることにより一つのピクセルに多様な情報が含まれ，データの分布範囲が広がり相関が上がると考えられた．しかしながら，裸地土壌では逆に高高度の画像のデータ分布範囲が狭く（Fig. 4b），相関が高い結果となった．UAS の撮影条件と土壌の状態によってピクセル値の分布傾向が異なる場合があり，今後他の撮影日も含めて裸地画像と湛水画像のピクセル値を検証する必要がある．

本研究で取得したマルチスペクトル画像の解像度は，高度 140 m で約 10 cm/pixel，60 m で約 5 cm/pixel であり，低解像度で相関が高い傾向を示した．大政（2014）は，植物のリモートセンシングにおいて，高解像度の画像では，方向性反射や影の影響で正確な反射率を得ることが難しいとしている．Sato et al.（2023）は，UAS リモートセンシングによる土壌可給態窒素の推定式について，作物残渣と土壌がピクセル内で混在するミクセルにより，推定精度が下がることを挙げている．土壌の場合，表層の作物残渣や影が夾雑ピクセルとなるが，高解像度ではその影響が大きいことが予想される．UAS の飛行高度を上げて解像度を下げることにより，夾雑ピクセルの影響が緩和されると考えられる．

3.3 土壌化学性の推定

3.3.1 撮影高度の影響

相関分析では，高高度で撮影し画像の解像度を下げることで，相関係数が高くなる傾向が示された．撮影高度が各土壌化学性の推定精度に与える影響を具体的に検証するため，高度 60 m と 140 m の画像を用いて，土壌化学性とバッファー半径 1.0 m の説明変数で線形回帰を行った．Fig. 5 に結果を抜粋して示す．各図の上端に高度 60 m と 140 m の回帰式の決定係数を記載した．施肥前の裸地画像では，有効態リン酸，抽出性有機炭素，抽出性窒素が高度 140 m（灰色）で決定係数 0.528 – 0.593 であったのに対し，高度 60 m（黒色）は 0.183 – 0.267 と低かった．全炭素は高度 140 m でも決定係数が 0.4 以下で精度は低いが，高度 60 m より高かった．施肥後の湛水画像では，交換性カルシウムと可給態窒素が高度 140 m で 0.475 程度，高度 60 m で 0.391 – 0.451 であった．全窒素，抽出性有機炭素，抽出性窒素は高度 140 m で 0.530 – 0.563，高度 60 m で 0.515 – 0.549 であり，ほとんどのケースで高度 140 m の精度が高く，施肥前の裸地画像で顕著であった．施肥前の裸地は，有機栽培（A123）と基肥一発肥料を用いた特別栽培（A019）で調査しており，有機物を多く含む A123 で B1/B3 の分光指数が高く，圃場間の施肥管理の違いが表れていた．

また Fig. 5h, k は B1 と B5 の正規化指数であるが，圃場によって分布が二分されていることが分かる．施肥後の湛水は，有機栽培の A020 と A123 で調査を行ったが，目視確認では A020 の一部で地表面が露出していることがあった．B5 は近赤外で，水面に吸収され反射率が低下する．圃場によって湛水状態に差異があるため，湛水画像では近赤外領域のバンドの選択には留意が必要といえる．

3.3.2 ダウンサンプリング画像の検証

高高度で撮影することにより，土壌化学性の推定精度が向上することが示された．そこで，低高度で撮影した超高解像度画像についても，解像度を高高度撮影と同程度に低下させる（ダウンサンプリング）ことで精度が向上するか検討した．高度 140 m の画像の解像度は約 10 cm/pixel である．高度 60 m のみで撮影した 3 月 4 日（解像度 4.2 cm/pixel）と 5 月 3 日（4.3 cm/pixel）の画像を 10 cm/pixel にダウンサンプリングした画像を新たに作成し，本来の画像と比較した．相関係数が 0.7 以上であった 29 ケースを選出して回帰分析を行い，決定係数を比較した．一部の結果を Fig. 6 に示す．ダウンサンプリング画像で決定係数が上がったケースは 13 ケースで，全体の 45 % であった．しかし，決定係数の差は平均 0.002 であり，ほとんど変化がなかった．また施肥後 · 湛水の抽出性窒素の推定（Fig. 6e, f）では，決定係数は高いものの被説明変数に B5 が含まれると分布が二分されており，前節と同様の結果となった．

高度 60 m とダウンサンプリング画像について，バッファー半径 1 m に含まれる各バンド反射率の統計値を整理した（Fig. 7）．ダウンサンプリング画像の反射率の検出レンジと中央値（灰色実線），平均値（白ダイヤ）は，いずれも 60 m 画像とほぼ同じであった．ダウンサンプリング画像の決定係数が変わらない要因として，バッファー円に含まれるピクセルの平均値で説明変数を作成しているため，解像度を下げてもバッファー円内のピクセル平均値は大きく変わらないことが挙げられる．すなわち，高高度で撮影を行い，個々のピクセルに多様な土壌情報を取得することが重要といえる．画像の解像度はマルチスペクトルカメラの性能により異なるため，最適な撮影高度については，個々のカメラによって検証が必要であろう．高高度での撮影は撮影時間も短縮でき，天候変化（日射の変化）の影響が抑制される．撮影枚数も少なくなるため，データ容量や SfM 処理等の負荷が軽減され，実用面でも利便性が高い．

4. おわりに

本研究では，UAS リモートセンシングでマルチスペクトル画像から土壌化学性を推定する手法において，UAS の撮影高度とピクセル抽出範囲について検討し，影響を精査した．2 つの撮影高度と 4 つのサイズのバッファー円でピクセル抽出範囲を設定して分光指数を作成し，これらの要因が土壌化学性との相関関係に与える影響を検証した．ピクセル抽出範囲は，バッファー円が拡大すると相関が高い分光指数が増加するが，最大バッファーで相関係数が低下するケースもあった．バッファーに含まれるバンド反射率は，半径 0.5 m から 1.0 m でデータ範囲が広がる傾向があり，バッファーを大きくして多様なピクセルを分光指数に組み込むことで，相関係数が向上

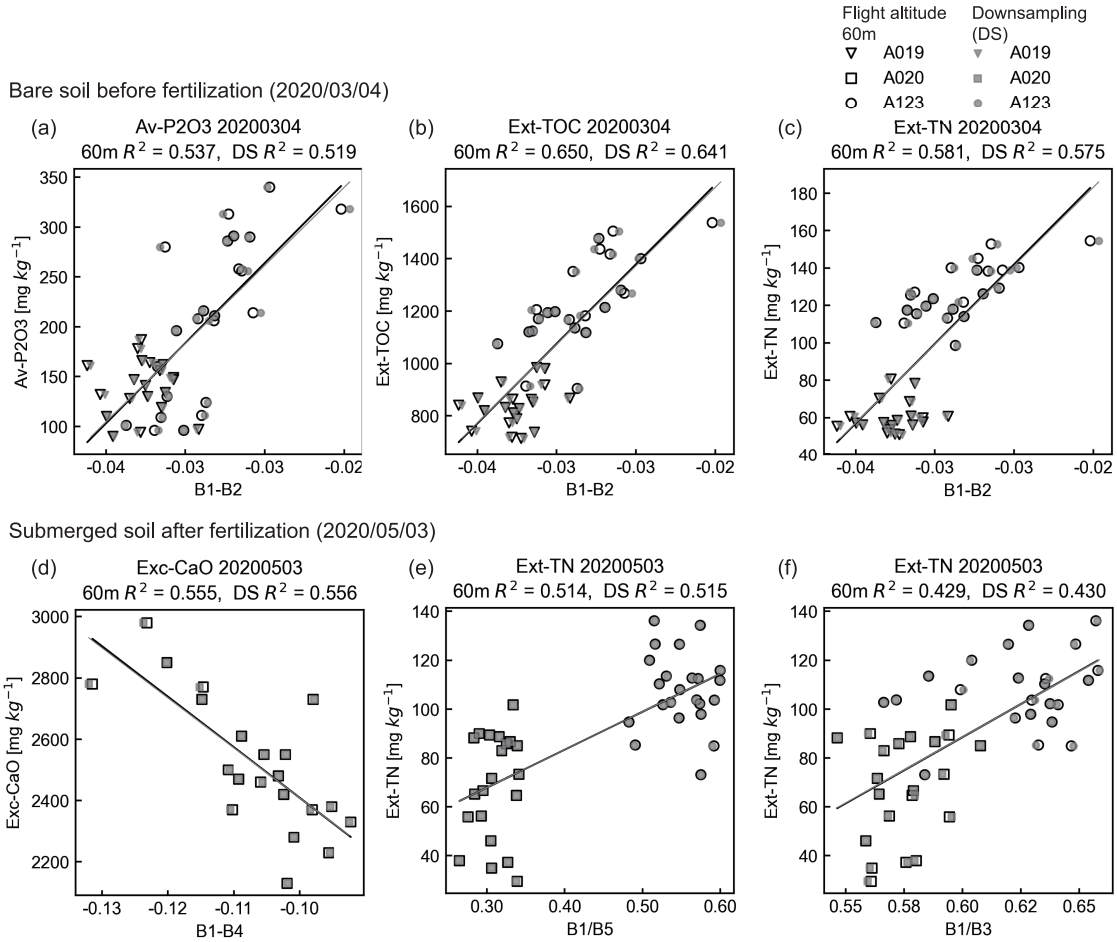


Fig. 6 撮影高度 60 m とダウンサンプリングした画像の線形回帰の比較（施肥前 · 裸地: 2020 年 3 月 4 日，施肥後 · 湛水: 2020 年 5 月 3 日，いずれもバッファー半径 1.0 m）．白抜きシンボルと黒の回帰線は高度 60 m の結果，灰色の塗りつぶしシンボルと回帰線はダウンサンプリング画像の結果を示す．
Comparison of the linear regressions between the flight altitude of 60 m imagery and the downsampled imagery in the case of the 1.0 m radius buffer. (Bare soil before fertilization: 2020/03/04. Submerged soil after fertilization: 2020/05/03）. Open symbols and black regression lines indicate results at 60 m altitude. Gray symbols and regression lines indicate results of downsampled imagery.

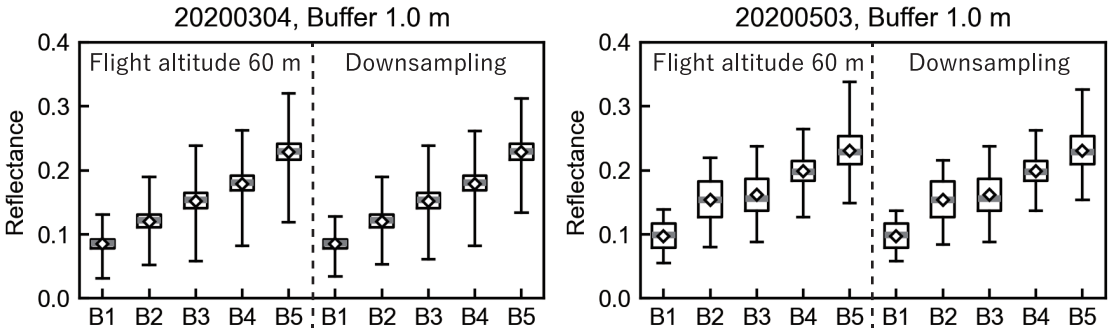


Fig. 7 撮影高度 60 m とダウンサンプリング画像のバンド反射率統計値の比較（施肥前 · 裸地: 2020 年 3 月 4 日，施肥後 · 湛水: 2020 年 5 月 3 日，バッファー半径 1.0 m）．箱ひげ図内の灰色の線は中央値，白ダイヤは平均値を示す．
Comparison of the band reflectance statistics between the flight altitude of 60 m imagery and the downsampled imagery in the case of the 1.0 m radius buffer. (Bare soil before fertilization: 2020/03/04. Submerged soil after fertilization: 2020/05/03). The gray line and diamond in the boxplot indicate the median and the average values, respectively.

することが示唆された．一方で範囲が大きすぎると作物残渣などの夾雑物も多く含むこととなり，それらの夾雑ピクセルが精度を下げる要因となるため，バッファー半径を 1.0 m とすることが実用面でも望ましいと考えられた．本研究では，4 つのサイズのバッファー円でピクセル抽出範囲を設定したが，既往の研究では経験的に実施されている事例がほとんどである．Bai et al.（2021）は，サンプリングポイントの距離から局所バリオグラムを計算し，その閾値で設定する方法を提案しているが，精度の向上には至っていない．今後はより明確な設定手法の確立が必要といえる．撮影高度については，60 m（解像度約 5 cm/pixel）より 140 m（解像度約 10 cm/pixel）の相関が高かった．解像度が高すぎると，作物残渣や影などが夾雑ピクセルとなり精度が低下すると考えられた．撮影高度を上げて解像度を下げることで，夾雑ピクセルの影響を抑えつつ，一つのピクセル内に多様な土壌情報を取得でき，土壌化学性の推定精度が向上すると考えられた．最適な撮影高度は個々のカメラによって検証が必要であるが，高高度での撮影は天候変化の影響を抑えるとともに，データ処理の負荷軽減にもつながるため，実用面でも利便性が高い．また，高解像度の画像をダウンサンプリングした画像では，反射率の平均値が変わらないため，推定精度の向上は見られなかった．

今後は，今回詳述しなかった撮影画像についてもピクセル値を精査し，土壌化学性の推定に適した土壌の状態と UAS 撮影条件を検証するとともに，重回帰分析や現在開発が進みつつある機械学習等を適用して，更なる精度向上を図ることが課題である．また，これらの結果と調査圃場におけるイネの生育状況の比較検証を行い，水田の施肥管理において UAS リモートセンシングの活用を図る．

謝辞

株式会社つじ農園の辻武史氏には，現地調査に多大なご協力をいただいた．ここに謝意を示す．

電子付録

Fig. S1　各 UAS 撮影日とバッファー半径における土壌化学性と分光指数の相関係数ヒートマップ．各図中の文字列（例えば 20200225_1055_060_04.2_0.3）は左から撮影日（YYYYMMDD），撮影時刻（hhmm），撮影高度 [m]，解像度 [cm/pixel]，バッファー半径 [m] を示す．
Heatmaps of correlation coefficients between chemical properties and multispectral means and spectral indices for each shooting dates and buffers. The titles in each figure (e.g., 20200225_1055_060_04.2_0.3) indicate the UAS shooting date (YYYYMMDD), shooting time (hhmm), flight altitude [m], ground sampling distance [cm/pixel] and buffer radius [m].

引用文献

Aldana-Jague, E., Heckrath, G., Macdonald, A., van Wesemael, B. and van Oost, K. (2016): UAS-based soil carbon mapping using VIS-NIR (480 – 1000 nm) multi-spectral imaging: Potential and limitations. Geoderma, 275: 55–66, doi:10.1016/j.geoderma.2016.04.012.

Bai, X., Chen, Y., Chen, J., Cui, W., Tai, X., Zhang, Z., Cui, J. and Ning, J. (2021): Optimal window size selection for spectral information extraction of sampling points from UAV multispectral images for soil moisture content inversion. Computers and Electronics in Agriculture, 190: 106456, doi:10.1016/j.compag.2021.106456.

Bertalan, L., Holb, I., Pataki, A., Négyesi, G., Szabó, G., Kupásné S.A. and Szabó, S. (2022): UAV-based multispectral and thermal cameras to predict soil water content — A machine learning approach. Computers and Electronics in Agriculture, 200: 107262, doi:10.1016/j.compag.2022.107262.

中央農業総合研究センター (2016): 水田土壌可給態窒素の簡易・迅速評価マニュアル. http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/pamphlet/tech-pamph/062019.html. (2024/02/01)

Diaz-Gonzalez, F.A., Vuelvas, J., Correa, C.A., Vallejo, V.E. and Patino, D. (2022): Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators — Review. Ecological Indicators, 135: 108517, doi:10.1016/J.ECOLIND.2021.108517.

土壌環境分析法編集委員会 (2000): 土壌環境分析法, pp. 255–257. 博友社, 東京.

Hong, Y., Chen, S., Chen, Y., Linderman, M., Mouazen, A.M., Liu, Y., Guo, L., Yu, L., Liu, Y., Cheng, H. and Liu, Y. (2020): Comparing laboratory and airborne hyperspectral data for the estimation and mapping of topsoil organic carbon: Feature selection coupled with random forest. Soil and Tillage Research, 199: 104589, doi:10.1016/j.still.2020.104589.

井上吉雄, ミアギァシュディン, 境谷栄二, 中野憲司, 川村健介 (2008): ハイパースペクトル計測に基づく正規化分光反射指数 ndsi マップおよび波長選択型 pls による植物・生態系変量の評価 —米粒タンパク含有率・クロロフィル濃度・バイオマス評価を事例として—. 日本リモートセンシング学会誌, 28(4): 317–330. doi:10.11440/rssj.28.317.

井上吉雄, 横山正樹 (2017): ドローンリモートセンシングによる作物・農地診断情報計測とそのスマート農業への応用. 日本リモートセンシング学会誌, 37(3): 224–235.

石塚直樹 (2019): スマート農業の目としてのリモートセンシング技術. 農研機構研究報告 1(5): 61–66, doi:10.34503/naroj.2019.1_61.

Jones, H.G. and Vaughan, R.A. (2010): Remote sensing of vegetation, pp.163–194. Oxford University Press, New York.

川瀬雅也 (2009): 生物学のための統計学入門, pp. 88–100. 化学同人, 京都.

Li, M., Shamshiri, R.R., Weltzien, C. and Schirrmann, M. (2022): Crop monitoring using Sentinel-2 and UAV multispectral imagery: A comparison case study in northeastern germany. Remote Sensing, 14(17), doi:10.3390/rs14174426.

Mesas-Carrascosa, F.J., Torres-Sánchez, J., Clavero-Rumbao, I., García-Ferrer, A., Peña, J.M., Borra-Serrano, I. and López-Granados, F. (2015): Assessing optimal flight parameters for generating accurate multispectral orthomosaicks by uav to support site-specific crop management. Remote Sensing, 7(10):12793–12814, doi:10.3390/rs71012793.

森下瑞貴, 石塚直樹 (2020): UAV 観測によるダイズ圃場の土壌含水率分布推定. システム農学, 36(4): 55–61, doi:10.14962/jass.36.4_55.

森下瑞貴, 石塚直樹 (2021): UAV 観測と機械学習による土壌特性の空間分布推定：データ拡張手法の土壌理化学性指標への適用. システム農学, 37(2): 21–28, doi:10.14962/jass.37.2_21.

森次真一, 鷲尾建紀, 高原知佳子, 大家理哉, 高野和夫 (2015): 近赤外分光法による土壌化学性診断の可能性. 岡山県農林水産総合センター農業研究所研究報告, 6: 41–48.

丹羽勝久, 横堀 潤, 原 圭祐, 笛木伸彦, 若林勝史 (2018): リモートセンシングにより推定した土壌窒素可給度と小麦生育の圃場内分布図に基づく小麦生育規定要因の解析. 日本土壌肥料学雑誌, 89(6): 544–551, doi:10.20710/dojo.89.6_544.

農林水産省 (2008): 地力増進基本指針. https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/. (2024/02/01)

小川茂男, 安養寺久男, 福本昌人 (1989): 分光反射率による土壌の腐植量および土壌水分の推定. 農業土木学会誌, 57(6): 465–469. doi:10.11408/jjsidre1965.57.6_465.

大政謙次 (2014): 植物機能リモートセンシング：植物診断，フェノミクス研究への応用. Eco-Engineering, 26(2): 51–61, doi:10.5363/tits.21.2_72.

R Documentation (2024): Fisher-transformation for correlation to z-score. https://search.r-project.org/CRAN/refmans/DescTools/html/FisherZ.htm. (2024/09/01)

Sato, N.K., Tsuji, T., Iijima, Y., Sekiya, N. and Watanabe, K. (2023): Predicting rice lodging risk from the distribution of available nitrogen in soil using UAS images in a paddy field. Sensors, 23(14), doi:10.3390/s23146466.

志賀弘行, 福原道一, 小川茂男 (1989): ランドサット TM データによる湛水下水田の腐植含量推定. 日本土壌肥料学雑誌, 60(5): 432–436. doi:10.20710/dojo.60.5_432.

Takasu, T. (2013): RTKLIB ver. 2.4.2 Manual. RTKLIB: An open source program package for GNSS positioning. Avairable at http://www.rtklib.com/rtklib.htm. (2024/02/01)

田中 圭, 近藤昭彦 (2016): 小型マルチコプターを用いた近接リモートセンシングによる水稲生育マップの作成. 日本リモートセンシング学会誌, 36(4): 373–387, doi:10.11440/rssj.36.373.

矢内純太, 李 忠根, 梅田幹雄, 小崎 隆 (2000): ジオスタティスティクスを用いた水田における土壌化学特性値の空間変動解析. 日本土壌肥料学雑誌, 71(4): 520–529. doi:10.20710/dojo.71.4_520.

横山正樹, 井上吉雄, 後藤 元, 小手和徳 (2016): ドローン搭載マルチバンド・ハイパースペクトルカメラの反射率特性の解析と圃場観測. 計測と制御, 55(9): 810–813, doi:10.11499/sicejl.55.810.

Xu, Y., Smith, S.E., Grunwald, S., Abd-Elrahman, A., Wani, S.P. and Nair, V.D. (2018): Estimating soil total nitrogen in smallholder farm settings using remote sensing spectral indices and regression kriging. CATENA, 163: 111–122. doi:10.1016/j.catena.2017.12.011.

Zheng, H., Cheng, T., Li, D., Yao, X., Tian, Y., Cao, W. and Zhu, Y. (2018): Combining unmanned aerial vehicle (UAV)-based multispectral imagery and ground-based hyperspectral data for plant nitrogen concentration estimation in rice. Frontiers in Plant Science, 9, doi:10.3389/fpls.2018.00936.

This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

要　　旨

UAS リモートセンシングで土壌の物理化学性を推定する際，撮影高度とピクセル抽出範囲は精度を左右する要因となる．本研究は，高度 60 m（解像度 5 cm/pixel）と 140 m（10 cm/pixel）で撮影した水田の裸地と湛水の画像について，4 サイズのバッファー円（半径 0.3，0.5，1.0，1.5 m）でピクセル抽出範囲を設定して分光指数を作成し，これらの要因が土壌化学性との相関に与える影響を検証した．高高度の画像は相関が高く，撮影高度を上げて解像度を下げることにより，作物残渣や影などの夾雑ピクセルの影響が低減された．ピクセル抽出範囲が拡大すると高相関となるが，半径 1.5 m で相関が下がるケースもあった．バンド反射率の統計値は半径 1.0 m からデータ範囲が広がり，多様なピクセルが含まれることで相関が上がるが，大きすぎると夾雑ピクセルを含むため，バッファー半径を 1.0 m とすることが適切と考えられた．

キーワード：マルチスペクトル画像，相関分析，分光指数，裸地土壌，湛水土壌