ドローンリモートセンシングによる 農地の分光画像・3D 情報計測

—スマート農業に向けた G 空間情報計測—*

Spectral and 3D Measurement by Drone-Based Remote Sensing of Farmland—Geo-Information for Smart Farming—

井上吉雄** 横山正樹***

Yoshio INOUE and Masaki YOKOYAMA

Key words drone, UAV, remote sensing, spectral, 3D, crop, precision agriculture, smart farming

1. 緒 言

近年、ドローン（UAV, UAS）の性能の進歩と普及は著しく、広範な用途での活用が期待されている。一方、安全な利用のためには環境整備が不可欠であり、各国で法的制度や管制システムの整備が急速に進められつつある¹⁾。わが国でも 2015 年 12 月に改正航空法（国土交通省）によって「無人航空機」が初めて明確に定義され、その後も飛行に関わる法規制の改良が進んでいる。また、農薬散布などの各応用分野でも無人ヘリコプターを想定されてつくられていた規制の枠組みが、先進的な固定翼やマルチロータタイプのドローン技術をより高度に活用できるように緩和されつつある。このような環境整備の下、土木測量、物流、空撮、インフラ点検、農薬散布などさまざまな用途での産業利用が進みつつあり、リモートセンシングのプラットフォームの一つとしても本格活用への環境が整ってきた²⁾。

本稿では、特にスマート農業／精密農業への応用に向けたドローンリモートセンシングの可能性について、筆者らの研究を踏まえつつ解説する。

2. スマート農業とリモートセンシング

2.1 国内農業の現況とスマート農業へのニーズ

国内の農業生産現場では、農業従事者の持続的な減少（過去 20 年間にほぼ半減）と高齢化（2015 年に平均年齢 66.3 歳）が進みつつある。それにともなって、耕作放棄地の増加（2015 年に 40 万 ha 超）とともに、30 a 程度の小規模圃場を多数集積して経営規模を拡大する傾向が急激に進行している¹⁾。このような背景の下、省力的に省資材・高品質・多収を維持・増進するために、センサ技術や情報技術、ロボット技術等を高度に活用して、少人数で多数の

圃場を的確に管理する技術として「スマート農業」が期待されている（図 1）²⁾

スマート農業を促進する上で、圃場ごとあるいは圃場内の作物生育や土壌の実態に関する空間情報は特に重要である。具体的には、①営農上の計画や判断を支える基礎情報として、②農作業機械制御のためのデジタルマップとして、また、人工知能を駆動するビッグデータの一角を担う圃場 G 空間情報として、重要な情報源となる。そのため、衛星やドローンによるリモートセンシングは、作物生育や土壌の実態情報を空間的に計測する手法としてスマート農業／精密農業での役割は大きい^{3)~5)}。

2.2 ドローンリモートセンシングの機能と役割

高解像度衛星センサは、広域観測力を生かした産地スケールの高品質作物生産への活用が進みつつある²⁾。一方、ドローンリモートセンシングでは、比較的小面積を低空から機動的に観測できることから、国内では～100 ha 程度規模の営農における多数圃場のスマート管理への応用が有望である。衛星センサに比べて、搭載センサや解像度の選定が比較的柔軟に行えることも利点の一つである⁶⁾。なお、ドローンはエンジンヘリ型、固定翼型、マルチコプタ型に大別されるが、圃場サイズ、営農規模、有視界飛行の

技術イノベーション
へのニーズ

- ・急速な大規模化により管理が粗放化
- ・篤農の経験技術が継承されにくい
- ・気象条件の不安定化

【篤農技術】

経験に培われた高度な
ノウハウとスキル

- ①作物や土壌を診る技術(目)
- ②意思決定の技術(頭脳)
- ③作業の技術(手)

【スマート農業】

データに基づいた客観的で
伝えやすく誰にでも使いやすい技術

- ①センシング(圃場 G 空間情報)
- ②情報通信
- ③人工知能
- ④ロボット

先進技術と専門知識を高度に
活用して生産管理を最適化

収量・品質の向上、省力化、省資材を目指す

図 1 スマート農業の要素技術と役割

*原稿受付 平成 31 年 1 月 3 日

**東京大学先端科学技術研究センター（東京都目黒区駒場 4-6-1）

***国立研究開発法人農研機構 農業環境変動研究センター（茨城県つくば市観音台 3-1-3）

図2 先進的なドローンセンシングシステムの実用モデル

制約、飛行時間やペイロードを総合的に勘案すると、日本国内（あるいは同様な条件のアジア等）でのスマート農業への応用には、マルチコプタ型ドローンが最も有望で、逆に欧米での同型ドローンの普及は限定的になるものと推察される⁷⁾。

3. ドローンリモートセンシングシステムとその応用

現在、通常のビデオカメラやデジタルカメラを装備したドローンも多く市販されるようになっており、一般的な空撮は簡易に行うことが可能になっている。すなわち、篤農家の目視観察（例：雑草や病徴の発見）を代替する高解像度写真を低層から連続的に取得するなどの監視カメラ的用途には、すでに市販品が活用できる。このような用途では、圃場に入らず全面を低空から観察できるメリットはあるものの、画像計測自体には研究要素は乏しく、むしろ取得された大量の写真から着目エリアや異物を自動的に選定・抽出するための画像処理・機械学習・AIを活用した判定技術等に技術的課題が多いと考えられる。

一方、可視～近赤外～熱赤外～マイクロ波の波長領域にわたってドローンに搭載可能な小型軽量のセンサが開発されつつあり、さまざまな診断情報の計量が可能と考えられる。しかし、そのためには計測データから求められる診断情報を生成するアルゴリズムが鍵となる。また、求められる情報の種類や対象範囲の規模、データ品質等を勘案して、適切な飛行機体やセンサ仕様、観測諸元（画角、波長帯、調査範囲、地上解像度、飛行高度、積載重量、飛行時間等）を最適化することが重要である。そこでは、リモートセンシング研究分野において多大な研究蓄積がある計測信号の物理精度確保のための輝度補正手法や、分光反射率

図3 ドローンの自動航行による圃場観測の事例
上) フライトログデータにより再現した飛行軌跡
下) 直下視画像から生成した3Dモデルと画像位置

による植物生理生態特性の評価アルゴリズム、熱赤外計測による水ストレス評価アルゴリズム等が活用できる。

これらの状況を踏まえ筆者らは、マルチスペクトル、ハイパースペクトル、熱赤外、微気象等の各種センサを純国産の産業用ドローンに搭載した計測システムを構築した（図2）³⁾⁴⁾。

機体本体は純国産ドローン（自律制御システム研究所、ACSL-PF1、ペイロード：電池含め約6 kg）である。カスタマイズや保守点検の容易さだけでなく、近年強まっている情報セキュリティやデータセキュリティの観点からも国産機体の開発は重要と考えられる。本システムは任意の飛行経路をタブレット上でデザインし、GPS制御により高い位置精度を確保しつつ、自動航行・離着陸を行うことが可能である（図3）。

搭載センサは分光画像モジュール熱画像モジュール、および可視動画モジュールの三つのモジュールから成る。主な構成センサとそれにより取得される地上解像度は以下のとおりである：可視・近赤外域のマルチスペクトルセンサ（NIAES-MM3：約8 cm）、ハイパースペクトル画像センサ（Headwall photonics-NanoHyperspec3：約5 cm）、熱赤画像センサ（Optris-PI-LW：約20 cm）、4K可視動画カメラ（SONY:FDR-X3000：約3 cm）。また、センサ類の制御・データ記録用小型制御システムに加えて、環境計測用に標準温湿度プローブ（rotronic, HC2-S3H）等を目的に応じて搭載する。なお、同システムの運用にあたっては、飛行高度100 m、水平移動速度4 m s⁻¹で自動航行

し、約 10 分程度のフライト 1 回で 2~3 ha をカバーする観測諸元を基本としている。

4. 診断情報作成のための画像計測・処理・アルゴリズム

4.1 動画処理による 3D 情報作成法

リモートセンシングによる測量や 3D 計測にはレーザープロファイラー（レーザー距離計：Lidar）が用いられることが多いが、まだ高価かつ軽量のセンサがなく小型ドローンでの利用は限定的である。一方、特別な計測装置なしにビデオカメラ等によって連続的に撮影された多数の静止画像から簡易に 3D モデルを作成することが可能である。すなわち、重複する静止画像群から SfM（Structure from Motion）法⁵⁾によって広範囲の正射影合成画像（オルソモザイク画像）や数値標高モデル DEM を作成することが容易に実現できる。この方法では、個々の静止画像から特徴点を抽出し、重複する画像間の特徴点のマッチングによって 3 次元の点群を生成し、それに基づいて 3 次元モデルや DEM、オルソモザイク画像を生成する。このデータ処理には、Pix4Dmapper（Pix4D S.A.）や PhotoScan（Agisoft）などの画像処理ソフトあるいは同様な処理モジュールがすでに市販されており、自動/半自動的に行うことが可能である。筆者らの研究例では、PhotoScan をベースにした処理システムを用いた。

筆者らのドローンセンシングシステムでは、高精細の可視画像から 3D モデルとオルソモザイク画像を作成するため、4K 動画から一定のインターバル（上述の自動航行条件で 5 秒程度）で自動的に静止画像を抽出して用いた。この条件下では前後方向および左右方向の画像重複率はおおむね 70~90% である。オルソモザイク処理は各画像データが位置情報をもたない場合でも重複画像の間に十分多数の特徴点（マッチングポイント）が取れば画像のみから仮想カメラの諸パラメータ算出が可能で、それを用いて 3D モデルを作成することができる。

また、各静止画像が GPS 等による位置データを保有する場合には、より精度良く、かつそのまま GIS で地図情報と共に扱えるオルソモザイク画像を作成することが可能である。本研究では、ドローン本体のログに記録される GPS 位置データを各静止画像に与えることにより、幾何学的な補正を同時に行うこととした。図 4 は、可視動画モジュールにより連続的に撮影された 200 枚の位置データ付き静止画を処理した例で、a) は粗なマッチング点群（約 87 万点）である。これからさらに密な点群の作成（約 370 万点）を経て、b) の 3D 面を構成するポリゴン群（約 74 万個）を生成し、c) のオルソモザイク画像が作成される。

このように、通常の空撮画像や分光画像から簡易に 3D モデルを作成できるため、地形の起伏、圃場表面の凹凸、作物の草高などの情報を十分実用に耐える数 cm 程度の精度でマッピングできる。農地の表面状態、作物の生育や倒

図 4 ドローンセンシングシステムによる連続直下視画像の SfM 処理により生成した 3D 画像の事例

注) 上から順に元画像の粗マッチング点群、ポリゴン群で表示した 3D モデル、オルソモザイク画像（3D 表示）、上部位置の直下視画像 200 枚を使用

伏状況の情報は、農地整備や収穫管理等さまざまな意思決定や管理に活用される。

4.2 分光画像計測および診断情報の作成法

一般に、リモートセンシング技術を科学、実業および社会的な問題の解決に活用するためには、計測される信号データから、それぞれの分野において意味のある有用情報を生成することが求められる。すなわち、スマート農業での利用では、分光反射率や表面温度、植生指数のデータを、生産管理上の診断に有用な農学的情報に変換することが必要である⁷⁾。そのため、筆者らは、ハイパースペクトルリモートセンシングや熱赤リモートセンシングに関わるアルゴリズム研究の成果に基づく一般化分光指数法^{8)~12)}やストレス指数法¹³⁾¹⁴⁾を基本アルゴリズムとして組み込んでいる。ハイパースペクトルデータとは高い波長解像度の連続スペクトルデータの総称であり、図 5a) にその一例を示した。リモートセンシングでは物性や構造によって決まる分光反射率が計量モデルの主要な入力変数であるため、センサによらず正確な分光反射率を取得することが基本である（図 5b)）。

図 6 に、農家法人の稲圃場を対象として観測した分光画像から群落クロロフィル指数（クロロフィル総量 g m^{-2} ）を算出した分布図の一部（約 8 ha 分）を例示し

図5 ドローン搭載分光画像センサにより取得した分光反射率データの例 a) キャリブレーション後のハイパースペクトルデータ b) キャリブレーション後のハイパースペクトルセンサおよびマルチスペクトルセンサの反射率

図6 分光画像から作成した稲群落のクロロフィル含有量マップ
注) 図4と同一エリアの圃場。数値は農機による実測収量

た。表示解像度は1m×1mである。クロロフィル指数の算出には、ハイパースペクトル基礎データの解析に基づいた汎用性の高いアルゴリズムと計量モデルを適用している¹¹⁾。同アルゴリズムは多様な植物のデータセットにより高い予測力 ($r^2=0.88$) を有することが検証されている¹¹⁾。観測を実施した幼穂形成期(7月中旬)は、重要な追肥診断時期であり、この時期の施肥判断はそれぞれ収量・品質に大きく影響することが分かっている。

図7は水稻試験圃場を対象として観測した分光画像から群落素素含有量 (g m^{-2}) を算出した分布図の一部 (約1 ha, 表示解像度1 m) を例示したものである. この地域

図7 マルチスペクトル画像による稲群落窒素量マップ

ではブランド米の良食味を確保するために厳密な施肥管理が義務付けられており、幼穂形成期に圃場の一部で葉色を測定し、それに基づいて追肥の要否や量が決定されている。しかし、地上調査での対応には限界があり、リモートセンシングによる省力的な調査法が強く求められている。分光画像から群落窒素を正確に評価するアルゴリズムが利用できることから¹⁰⁾、地上試験による幼穂形成期の群落窒素量と玄米蛋白質含有率の基礎的な関係に基づいて、省力的な施肥診断法が開発されつつある¹⁵⁾。予測結果は実測データと密接な関係 ($r^2=0.80$) にあることが検証されている。

そのほか、分光画像の複数バンドを使う計量アルゴリズムを適用し、小麦の登熟期の穂の水分含有率など図2に示した九つの重要な生育診断指標の評価法が提案されている。

一方、熱赤外画像データは水分欠乏や罹病など植物のストレス程度の評価に特に有用である。熱赤外リモートセンシングによる植物の水ストレスや蒸散速度、気孔コンダクタンスの評価法については多くの研究が行われてきた^{13) 14) 16) -19)}。リモートセンシングによる葉群温度のみを用いる方法や、気温と大気飽差と共に用いる方法、さらには熱収支モデルを用いる方法などが提案されており、手法の妥当性は多くの実験によって検証されている。ここでは、筆者らが考案した群落温度と飽差、気温を用いるアルゴリズムで、熱赤外センサと共に搭載した温・湿度センサデータから大気飽差を求め、飛行中に熱画像の任意のエリアを対象に水ストレス指標をリアルタイム演算することも可能となっている¹⁶⁾。このようなアプローチで、低層を飛行しつつ水ストレス状態を把握し、地上の自動灌水装置を遠隔的に制御したり、水ストレスを早期検出し灌漑スケジュールを最適化する、あるいは、罹病の早期検出や罹病範囲を同定するなどの目的に応用できる。

4.3 ドローンリモートセンシングにおける留意点とグッドプラクティスの推奨

ドローンの主要なメリットは機動性や高解像度観測である。しかし、安定的に良質な画像データを取得するという観点からは、観測環境（日射や風）の影響、輝度補正や幾何補正、モザイク処理などのように、ドローンの場合に特に留意すべき点がある。また、より実際的な問題として、データ収集を安全・円滑に実施するための離着陸地点や移動ルートなど現場環境についての地上条件にも留意する必要がある。

ドローンリモートセンシングによって、スマート農業での活用に耐える信頼性の高い空間情報（作物生育や土壌に関する有用データ・情報）を生成するためには、以下のようなワークフローを踏まえることが望ましい。各要件は以下のように要約される。

1) 目的に応じた適切な観測計画と運用

ドローンを用いた観測に当たっては、対象とする範囲の面積や圃場配置、取得すべき情報などを考慮して、安全かつ効率的にデータを取得するための観測諸元（飛行高度、速度、センサの選定、フライトルート等）の設計が必要になる⁷⁾。例えば、追肥診断等生育診断の目的では、対象となる多数の圃場を数日程度の間に診断することが求められるため、広域（例：30 ha、圃場数：50～100 枚程度）を数日で観測する必要がある。この場合、高い空間解像度は不要であるため、主に観測すべき面積と配置および日射条件が好適な時間帯における観測効率を考慮して、飛行の高度や速度、ルートなどを決定する。

2) 良質な分光画像の取得

ドローンリモートセンシングによる画像データの品質に関与する因子としては、①機体因子、②センサ因子および③環境因子を考慮する必要がある^{20)~22)}。

機体因子としては、振動や移動、姿勢変動、場合によっては電磁波がセンサや記録系・制御系の機器の動作に悪影響を及ぼすことも考えられる。シャッター方式（特にグローバルシャッター）のセンサの場合、防振材やジンバル等を使用する通常の搭載システムにより、画質の劣化は抑え得ると考えられる。また、移動によるブレや姿勢変化による光軸の直下視からのずれ（方向性反射）についても、一般的に強風（ 5 m s^{-1} ）の場合を除いて影響は小さいと考えられる。ドローン自体は、風速が $8 \sim 12 \text{ m s}^{-1}$ の環境でも計画経路の再現性は高く、計画エリアの観測にも支障はないが、姿勢の変動にともなう画質への影響については注意する必要がある。

画像センサに関わる因子としては、露光時間やダイナミックレンジ、感度特性、周辺減光などの問題を考慮する必要がある。また、環境因子としては、天候や太陽高度の変化にともなう地表面への日射強度の変動が最も重要である。ドローンの場合、随時の機動的観測がメリットの一つとされているが、これは曇天を含め多様な日射条件下での観測を意味し、日射の変動は重要な誤差因子の一つとな

る。基本的に補正は不可欠であるが、この誤差因子を低減するためには、できるだけ日射条件の安定した条件で運用することが望ましい。

3) 輝度精度を確保する画像データ処理

ドローンリモートセンシングでは、各種の撮像センサを用いて、対象物から反射される光強度をバンドごとのデジタルデータ（DN）として記録し、DN 値を分光反射率あるいはそれに準じた一貫性のある画素データに変換する。基本的にバンドごとの検出器の感度特性に応じて、主要な対象物の輝度がダイナミックレンジに収まるように、露光時間やゲインを調節する。日射条件が変動する場合には、バンド別の水平面入射強度を同時に記録し、それに対する比率として、対象物からの反射率を導く必要がある。参照光計測センサを、地表面計測センサとともにドローンに搭載する方式と、前者を地上に設置する方法があるが、いずれの場合にも上向き・下向きのデータの同期性と、参照光データの精度を確保することが要件となる。

センサによる DN 画像を分光反射率に変換する際に、センサ自体の特性に起因する誤差因子として、画素ごとの感度のバラつきや周辺減光などの光学系に起因する画像内の空間変動がある²⁰⁾²¹⁾。一般に、撮像素子や光学系に関するデータは開示されていないことが多く、また、実際の撮像データにはそれらの因子の影響が複合的に反映されているため、反射率既知の標準拡散板の撮影データを用いるなどの方法で、DN-反射率の応答関数を画素ごとに明らかにしておくことが望ましい。

図 5b) にドローンに各種分光センサを搭載して取得した DN データから生成した反射率データを、グレイスケールの反射率と比較した結果を例示した。バンド別の入射光データを参照光として用いる方法や、標準反射板を参照する方法により、ハイパースペクトルセンサならびにマルチスペクトルセンサのいずれも妥当な反射率画像が得られている²³⁾。

4) 幾何精度を確保するためのデータ処理

異なる年次や生育時期に取得された画像データを、地上調査データ、気象データ等異種空間データと共に比較したり、一貫性のある形で集積したりする上で、計測画像からひずみが少なくグローバルな位置データをもつ画像を生成する必要がある（オルソ補正）。特に、広い面積を対象とする用途の場合、多数の画像を処理するため、このデータ処理は自動化する必要性が高い。連続的に撮影された多数の部分重複画像から、広範囲の合成画像（オルソモザイク画像）や数値標高モデル DEM を作成する画像データ処理法（SfM）については 4.1 で触れた。

特にスマート農業における応用では、診断情報を各種判断や農作業機械に活用するため、数 ha 以上の面積を 1 フライトで取得した連続画像を広い面積で合成する必要がある場合が多いため、正確な位置データの賦与は不可欠である。

また、時系列データを一貫性のある圃場 G 空間データ

図8 スマート農業におけるリモートセンシング情報の利用スキーム

としてアーカイブし、機械学習等のための基盤データとして活用するためには、膨大な空間データを体系的に蓄積する必要がある。そのため、大容量の画像データの迅速な処理技術の開発が期待される。

5) 適切な解像度・形式の診断情報マップの作成と提供
ドローンリモートセンシングにより作成した診断情報を、作業計画や機械作業に結びつけるためには、マップデータを迅速に利用者の手元に届けることが不可欠である。近年、WebGISの活用が容易になり、簡易なアプリケーションでマップデータを利用者のタブレット端末やスマートフォンでじかに閲覧することが可能となっている。Webサーバでのデータ集積方法やシステム間のデータ授受、端末での表示方法、さらには農業機械での利用データ形式の標準化とともに、生産現場でのデータ利用環境はすでに整ってきた。

したがって今後は、むしろ、オリジナルなデータソースとして、良質のリモートセンシングデータを機動的かつ効率的に取得し、有用情報を生成する技術、すなわち、本節で触れたいいわゆるグッドプラクティス（好適ワークフロー）の実施が重要である⁷⁾。

6. 結 言

近年、ドローンは低層における新たな無人飛行体として、物資配送や災害調査、測量などへの応用が有望視されている。スマート農業／精密農業での本格的な活用も期待される（図8）²⁾⁷⁾。しかし、その実用化と普及のためには、技術開発や法整備などの面で取り組むべき課題も多く残っている。

農地での利用は、関係する事業者や住民、規制、リスクは他の諸応用よりも比較的少ないと見られるが、安全性と安定性の確保は必須であり、費用対効果の向上は技術水準の向上に強く依存している。今後、各技術要素（飛行機体、センシングシステム、観測／運用方法、データ処理方法、アルゴリズム、情報提供技術）の高度化と体系化なら

びにグッドプラクティスの実践を進める必要がある。それらの成果はスマート農業だけでなく、植生調査や生態学的調査、フェノタイピング（育種応用等）などの分野への広範な応用も期待される。

謝 辞

本研究の一部は内閣府総合科学技術・イノベーション会議「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」（農研機構生研支援センター）の支援を受けた。

参 考 文 献

- 1) 野波健蔵（編著）：ドローン産業応用のすべて，オーム社，(2018) 271.
- 2) 井上吉雄：高解像度光学衛星センサによる植物・土壌情報計測と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** (2017) 213.
- 3) 井上吉雄，横山正樹，大下泰生，深山大介，後藤元，小手和徳：ドローンリモートセンシングによる作物・農地の空間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 第61回学術講演会論文集，(2016) 219.
- 4) 井上吉雄，横山正樹，奥村英樹，宮本潤：ドローンによる低層自律飛行センシングシステム—分光画像・熱画像・可視動画計測モジュールと診断情報作成アルゴリズム—，日本リモートセンシング学会 第64回学術講演会論文集，(2018) 33.
- 5) G. Verhoeven: Taking computer vision aloft—Archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan, *Archaeological Prospection*, **18** (2011) 67.
- 6) C. Zhang and J.M. Kovacs: The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review, *Precision Agriculture*, **13** (2012) 693.
- 7) 井上吉雄，横山正樹：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** (2017) 224.
- 8) 井上吉雄，G. Miah，境谷栄二，中野憲司，川村健介：ハイパースペクトルデータ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** (2008) 317.
- 9) Y. Inoue, J. Peñuelas, A. Miyata and M. Mano: Normalized difference spectral indices for estimating photosynthetic efficiency and capacity at a canopy scale derived from hyperspectral and CO₂ flux measurements in rice, *Remote Sensing of Environment*, **112** (2008) 156.
- 10) Y. Inoue, E. Sakaiya, Y. Zhu and W. Takahashi: Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements, *Remote Sensing of Environment*, **126** (2012) 210.
- 11) Y. Inoue, M. Guérif, F. Baret, A. Skidmore, A. Gitelson, M. Schlerf, R. Darvishzadeh and A. Olivos: Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content: a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation, *Plant, Cell & Environment*, **39** (2016) 2609.
- 12) P.S. Thenkabail, J.G. Lyon and A. Huete (Eds.): *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, 2nd ed. CRC Press, New York, (2018) 781.
- 13) R.D. Jackson, S.B. Idso, R.J. Reginato and P.J. Pinter: Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water Resources Research*, **17** (1981) 1133.
- 14) Y. Inoue: Remote detection of physiological depression in crop plants with infrared thermal imagery, *Japanese Journal of Crop Science*, **59** (1990) 762.
- 15) 後藤元，石塚直樹，井上吉雄：水稻品種「つや姫」における衛星画像を利用した生育診断の可能性，日本作物学会第242回講

演会要旨集, (2016) 85.

- 16) Y. Inoue, B.A. Kimball, R.D. Jackson, P.J. Pinter and R.J. Reginato : Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry, *Agricultural and Forest Meteorology*, **51** (1990) 21.
- 17) M.S. Moran, T.R. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal : Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index, *Remote Sensing of Environment*, **49** (1994) 246.
- 18) Y. Inoue and M.S. Moran : A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration—a case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopies—, *International Journal of Remote Sensing*, **18** (1997) 139.
- 19) M. Gerhards, M. Schlerf, U. Rascher, T. Udelhoven, R. Juszczak, G. Alberti, F. Miglietta and Y. Inoue : Analysis of airborne optical and thermal imagery for detection of water stress symptoms, *Remote Sensing*, **10** (2018) 1139.
- 20) C.C.D. Lelong, P. Burger, G. Jubelin, B. Roux, S. Labbé and F. Baret : Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots, *Sensors*, **8** (2008) 3557.
- 21) J. Kelcey and A. Lucieer : Sensor correction of a 6-band multispectral imaging sensor for UAV remote sensing, *Remote Sensing*, **4** (2012) 1462.
- 22) J. Martinez, G. Egea, J. Agüera and M. Pérez-Ruiz : A cost-

effective canopy temperature measurement system for precision agriculture : a case study on sugar beet, *Precision Agriculture*, **18** (2017) 95.

- 23) 横山正樹, 井上吉雄, 後藤元, 小手和徳 : 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, **59** (2016) 810.

井上吉雄

京都大学大学院工学研究科および農学研究科を経て1981年農林水産省入省。農学博士。農林水産省農業研究センター、農業環境技術研究所、農研機構、筑波大学大学院（兼）等を経て現職。文部科学大臣賞等受賞。主な専門は植物と生態系のリモートセンシング。

横山正樹

名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了。博士（理学）。和歌山大学、（独）農業環境技術研究所等を経て、現職。ドローンを使った圃場リモートセンシングシステムの研究開発に従事。日本天文学会、日本リモートセンシング学会等に所属。