

スマート農業に向けたリモートセンシングシステムの開発

Remote Sensing System for Crop Growth Monitoring

片桐 哲也*
Tetsuya KATAGIRI

岡本 誌乃**
Fumino OKAMOTO

要旨

日本では、農業従事者の高齢化と新規就業者不足により、ノウハウの継承が難しくなっている。また農業法人の増加、耕地の集積化など経営の大規模化が進んでいる。このように農業現場が変わって行く中、ノウハウを持たない従事者が圃場の状態を科学的に把握し（見える化）、品質と収穫量を安定的に確保できる対応技術の提供が望まれている。

それに対して我々は、2014～16年に山形大学農学部、ヤンマーヘリ&アグリ(株)らとドローンを活用したリモートセンシングによる見える化と、無人ヘリによる可変施肥の実証実験を行った。その結果、これまで経験と勘が必要であった追肥作業を省力化しながら品質と収量の確保（ばらつき抑制）の効果を確認できた。さらに2017年は、全国1,000haでリモートセンシングを実施し、圃場生育の見える化によって、効率的な土壌改善、作業指示や工程改善への効果を確認した。

本稿では、リモートセンシングシステムの要素技術とアプリケーション例を紹介する。圃場全体の生育状況の評価を広範囲で高速に行うために、ドローンに搭載したマルチスペクトルカメラで圃場を撮影する。得られた画像からNDVI (Normalized Difference Vegetation Index) および植被率の生育指標が算出される。どちらの指標も、各地の農業試験場で測定された生育調査結果と高い相関が得られている。圃場の生育指標データは、撮影時に取得したGPS情報でタグ付けされ、圃場全体の生育マップとして「見える化」されることで、効率的な土壌改善、作業指示や教育、工程改善に利用できる。また生育マップは施肥量に変換され、無人ヘリコプター等の肥料散布機によって圃場の部分ごとに施肥量を変えることで（可変施肥）生育ばらつきの改善が可能となる。

今後は、センシングメニューや対象作物を広げるだけでなく、経年データの蓄積によって、分析や改善提案の自動化を目指す。近年失われつつある経験豊富な農家の目と頭脳を代替し、日本だけでなく世界の農業に貢献できると考えている。

Abstract

In Japan, the aging of agricultural workers and shortage of new workers has threatened the traditional and critical handing down of farming know-how. At the same time, agricultural corporations blossom, farmlands are integrated, and farming has become large scale. With these changes, technologies must accommodate a new breed of farm worker, one whom those technologies empower to manage crops scientifically by providing a visualized status of those crops, thus allowing measures to be taken to ensure a bountiful crop of high quality.

In 2017, we conducted remote sensing studies of rice fields throughout Japan totaling 1,000 hectares in area. We found that the ability to visualize crop growth was an effective aid to soil improvement, work instruction, worker education, and the improvement of the process of cultivation.

We evaluated vegetative growth quickly over a large area using a multispectral camera mounted on a drone, and, from the acquired images, we calculated both the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and the vegetation cover rate. Each of these indexes correlated highly with growth survey results at agricultural experiment stations throughout Japan.

With our system, the growth index data of a rice field is tagged with GPS information acquired at the time of imaging, and this data is visibly overlaid the photo of the field to provide a field-wide growth map. This growth map can then be used to aid in soil improvement, work instructions, worker education, and cultivation process improvement.

The growth map also aids in determining the proper amounts of fertilizer to be used within particular areas of the rice field. This helps the farmer reduce growth variation by varying the amount of fertilizer applied to those areas of the field, such as by precision-spreading fertilizer with an unmanned helicopter.

* 産業光学システム事業本部 状態監視ソリューション事業部 第1事業推進部
** 産業光学システム事業本部 状態監視ソリューション事業部 第1事業推進部（ファームアイ(株)出向）

1 はじめに

日本では、農業従事者の高齢化と新規就業者不足により、ノウハウの継承が難しくなっている。また農業法人の増加、耕地の集積化など経営の大規模化が進んでいる。このように農業現場が変わって行く中、ノウハウを持たない従事者が圃場の状態を科学的に把握し（見える化）、品質と収穫量を安定的に確保できる対応技術の提供が望まれている。

それに対して我々は、2014～16年に山形大学農学部、ヤンマーヘリ&アグリ(株)らとドローンを活用したリモートセンシングによる見える化と、無人ヘリによる可変施肥の実証実験を行った。その結果、これまで経験と勘が必要であった追肥作業を省力化しながら品質と収量の確保（ばらつき抑制）の効果を確認できた¹⁾。さらに2017年は、全国1,000haでリモートセンシングを実施し、圃場生育の見える化によって、効率的な土壌改善、作業指示や工程改善への効果を確認した。

本稿では、リモートセンシングシステムの要素技術とアプリケーション例を紹介する。

2 リモートセンシング/データ処理システム

2.1 全体システム

Fig. 1 に全体システム図を示す。撮影対象圃場の圃場名や品種・GPS位置等の圃場情報にもとづいて、マルチスペクトルカメラを搭載したドローンで空撮を行う。

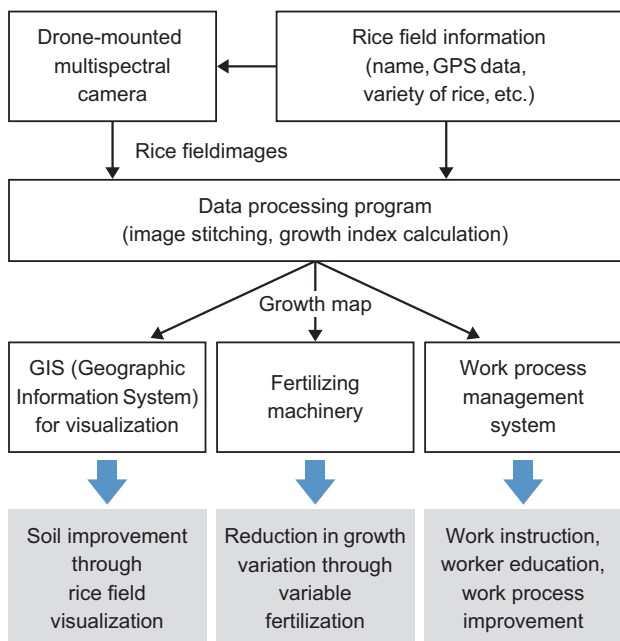


Fig. 1 Remote sensing and data processing system for the high-quality, stable harvest of wet-field rice.

得られた画像データは、PCベースのデータ処理プログラムにて圃場単位で合成され、後述するNDVIおよび植被率の生育指標が求められる。農業試験場や研究所で

は、水稻の生育は葉色・茎数・草丈3つの指標で評価されており、NDVIは葉色、植被率は茎数に強い相関が確認されている。草丈は倒伏が問題とならない品種では一定とみなせるため、NDVIおよび植被率で圃場の生育を評価することができる。

圃場の生育指標データは、撮影時に取得したGPS情報でタグ付けされ、生育マップとしてGIS (Geographic Information System) 等の地図ソフトで可視化できる。Fig. 2 左は可視画像マップ、Fig. 2 右はNDVIマップの例である。圃場Bは圃場Aに比べNDVIが高く生育が良いことを示している。

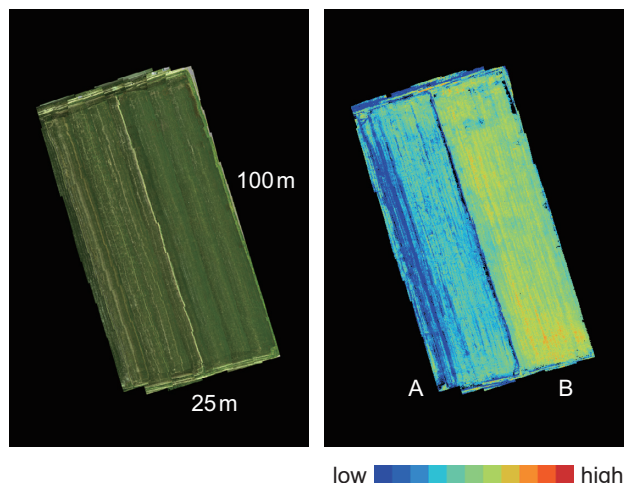


Fig. 2 Stitched visible rice field image (left) and NDVI image (right).

The images from a drone-mounted, GPS-equipped multispectral camera are converted into visible and NDVI images which are then stitched together into a single image. In the NDVI image, the right side of the rice field (B) shows higher NDVI, and thus better growth, than the left side of the field (A).

生育マップは施肥量に変換され、無人ヘリコプター等の肥料散布機によって圃場の部分ごとに施肥量を変えることで（可変施肥）生育ばらつきの改善が可能となる。また、生育マップは作業工程管理システム等で作業指示や教育、工程改善に利用できる。

2.2 マルチスペクトルカメラ搭載ドローンによる空撮システム

圃場全体の生育状況の評価を広範囲で高速に行うために、ドローンにマルチスペクトルカメラを搭載した空撮システムを用いる。Fig. 3 に外観を示す。ドローン、マルチスペクトルカメラ、GPSおよび方位計で構成される。Fig. 4 に構成を示す。マルチスペクトルカメラは、モノクロカメラに可視光/近赤外光のみ選択するバンドパスフィルタを装着している。カメラとGPSの制御はタブレットPCで行い、蓄積された画像はフラッシュメモリによって外部に出力される。

ドローンの飛行時間は1回最大8分でおよそ2haの撮影が可能である。飛行高度30m条件で地上分解能は3cmである。30aの圃場で40～50枚の画像が撮影される。

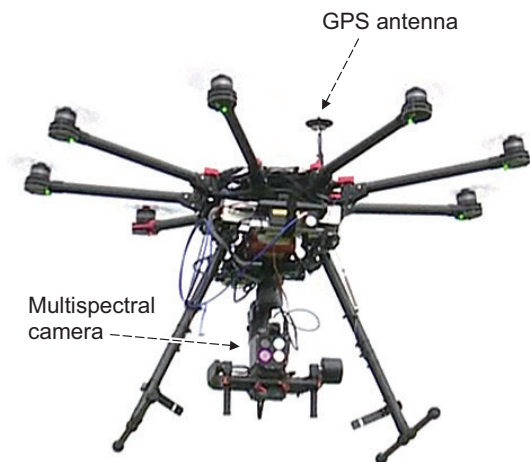


Fig. 3 Multispectral camera drone.
This drone can acquire multispectral images of 2 hectares of rice field in 8 minutes.

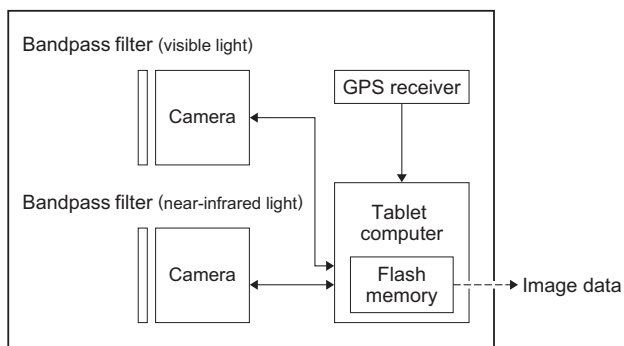


Fig. 4 Imaging system.
For a growth map of a rice field, multispectral images are taken using a visible light filter and a near-infrared light filter.

取得された画像より NDVI および 植被率の生育指標が求められる。NDVI はリモートセンシングで一般的に用いられており、 $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ で表される²⁾。ここで IR は近赤外光の反射率、R は可視光の反射率である。NDVI が高いほど稲体の窒素含有率が高く栄養状態が良いことを示している³⁾。植被率は稲体の茎数に相当する指標であり、画像における土と葉の割合を算出する。Fig. 5 (A) は低い植被率、Fig. 5 (B) は高い植被率を示している。

どちらの指標も、各地の農業試験場で測定された葉色・茎数の生育調査結果と高い相関が得られている (Fig. 6, Fig. 7)。

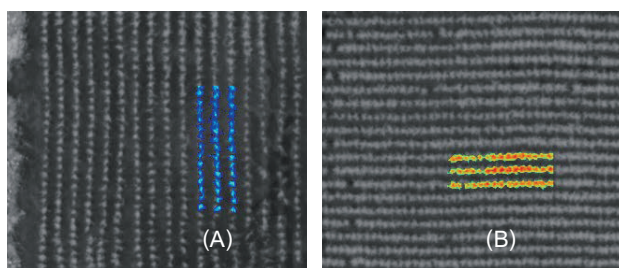


Fig. 5 Vegetation cover rate images obtained from a multi spectral image.
A: Low vegetation cover rate. B: High vegetation cover rate.

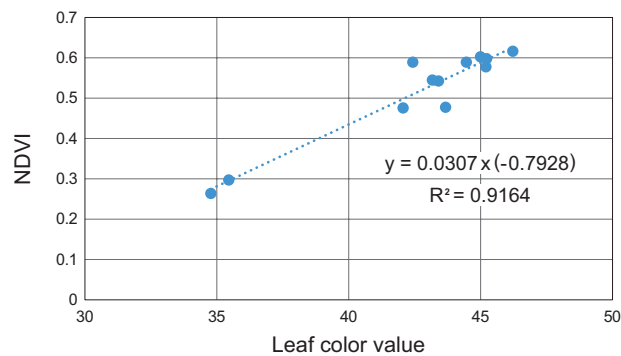


Fig. 6 NDVI and leaf color value.
A strong correlation appears between the NDVI value and the leaf color value measured with a chlorophyll meter.

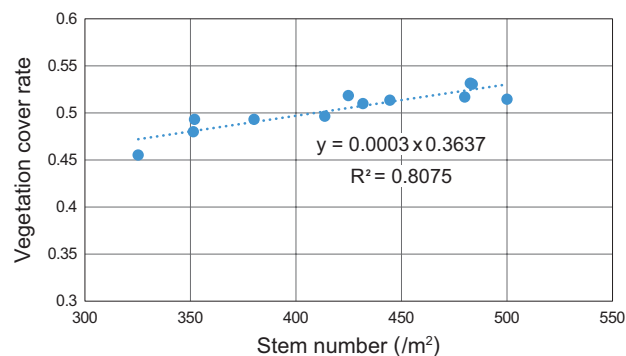


Fig. 7 Vegetation cover rate and stem number.
A strong correlation appears between the vegetation cover rate calculated from the multispectral image and the stem number counted in the rice fields.

2.3 データ処理システム

データ処理システムでは生育指標の算出後、画像合成が行われる。圃場で撮影された画像は、枚数が膨大である。また撮影効率を上げるため、画像間の重複 (ラップ率) が少ない。既存の画像合成ソフトを利用した場合、2017年目標の1,000haに対し、処理時間や合成精度で課題が残った。そこで我々はGPSの緯度・経度および回転補正のみに計算量を抑えて高速に画像合成を行うプログラムを構築した。Fig. 8 に画面の例を示す。画像合成品質を確保するために、GPSのずれや、加速度や飛行高度などドローン操作者のばらつきを補正するパラメーターを入力できる。1時間あたり15haの圃場画像を処理できる。

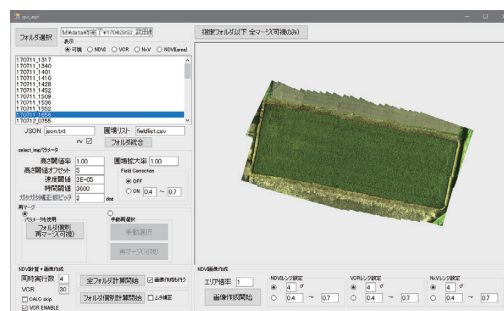


Fig. 8 Screen shot of an image stitching program. Images acquired with the drone are stitched into a larger image using GPS data and the rotational position of the drone.

3 提供価値（アプリケーション）について

3.1 圃場生育の「見える化」

データ処理システムから得られた生育マップは、一般のGISソフトで閲覧可能である。Fig. 9, 10に約100圃場のNDVI/植被率マップ例を示す。Fig. 9内の圃場Xは、圃場内で青から黄へカラスケールが大きく変化している。複数の圃場を合併させたため、圃場間の地力（土壌が保持する窒素量）の差が生育差として現れたものと考えられる。またD行の圃場はまとまってNDVIが低く植被率が高い。すなわち、茎数は多いが葉色は薄い状態であり、田植え直後の生育は良かったが途中で肥料切れを起こしていると考えられる。対策としては、堆肥の導入など土壌窒素の保持力強化が望ましい。

これらのまとまった生育差は土壌のばらつきによって発生する。圃場生育の「見える化」によって効率的な土壌改善が可能となる。

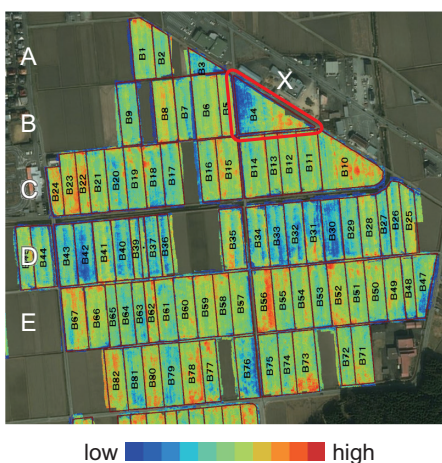


Fig. 9 NDVI map.

In field X, there is a large variation in color from blue to red, indicating a large variation of nitrogen in the soil. The fields in row D are generally blue, indicating a lack of fertilizer.

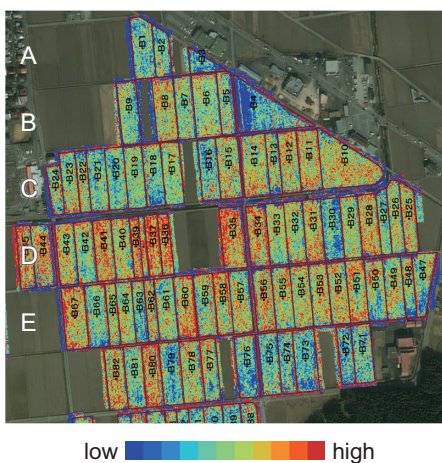


Fig. 10 Vegetation cover rate map.

The fields in row D show a high vegetation cover rate, which indicates good growth immediately after planting. However, by additionally taking Fig. 9 and Fig. 10 into account, it is seen that fertilizer has been depleted.

3.2 可変追肥による収量・品質の安定化

生育マップは施肥量に変換され、無人ヘリコプター等の肥料散布機によって圃場の部分ごとに施肥量を変えることで（可変施肥）生育ばらつきの改善、ひいては収穫物の質と量の安定化が可能となる。前述の実証実験では、可変施肥によって圃場の収穫量およびタンパク質含有率の安定化を確認した⁴⁾。

NDVIや植被率が低く生育の悪い圃場には、追加の肥料を与えて収穫量を増やすことができる。一方、NDVIが高い領域は葉色が濃く生育が良いので、追肥量を減らすことで食味（タンパク質含有率）を改善できる。Fig. 11 (A)は圃場のNDVIマップ、Fig. 11 (B)は対応する追肥量マップの例である。NDVIマップ左側の生育が低い圃場は追肥量が多くなっている。Fig. 11 (C)は追肥後に測定したNDVIマップである。可変追肥によって生育ばらつきが改善されていることが分かる。

肥料散布はFig. 12に示す無人ヘリコプターで行われる。GPSを備えており、追肥量マップに基づいて場所ごとに散布する肥料量を変えられる。

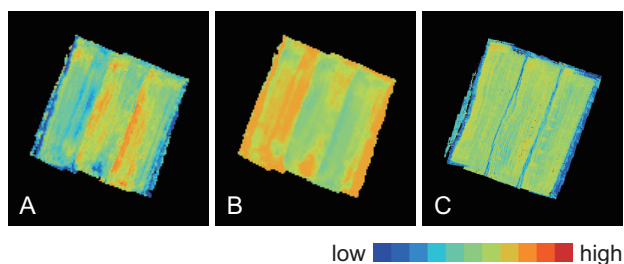


Fig. 11 Visualized effects.

A: NDVI map. B: fertilizer map indicating the amount of fertilizer required. C: NDVI map after the application of fertilizer. After fertilization, the NDVI variation seen in map A has now been reduced in map C.



Fig. 12 A GPS-equipped, unmanned helicopter applies fertilizer selectively as guided by a fertilizer map.

3.3 工程改善および作業指示や教育への利用

生育マップのばらつきは、土壌起因だけではなく、作業のムラによっても発生する。Fig. 13右側の青い部分は、画像の周波数を分析した結果、トラクター作業が原因と推測した。農家へのヒアリングを行ったところ、作業を一

部省略した部分に肥料不足が発生していたことが分かった。このムラを作業員へフィードバックすることで工程の改善が可能となる。作業工程管理システムでムラを経年で評価することで工程の改善度合いが定量化できる。

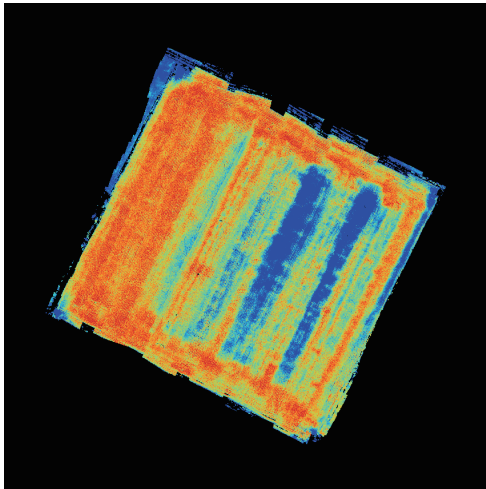


Fig. 13 NDVI map displaying a large variation caused by the uneven application of fertilizer.

日本の農業現場は圃場の集約化が進んでおり、経営者＝作業員から、経営者と作業員が分業化された経営形態に変化しつつある。圃場の観察力のある経営者が現場スタッフに指示・教育する場合、これまで生育状態を主観的に表現していたが、マップによって生育が定量化されることで、迅速かつ正確な情報共有が可能となる。

4 今後の展開について

今後は、NDVI・植被率以外に、病気診断や雑草検知などセンシングの幅を広げることで生育マップの価値を高められると考えている。また他作物への展開として、水稲の技術を応用しやすいイネ科の小麦、大規模な作付けが行われており、見える化の効果を得られやすいダイズ等の土地利用型作物、将来的には野菜や果樹の付加価値の高い作物にも広げていきたい。

現状、農家や専門家が生育マップの分析を行い、土壌改良等の施策を決定している。今後は全国の経年データを蓄積し、ビッグデータ・機械学習の技術を活用して改善提案の自動化まで発展させたい。近年失われつつある篤農家の目と頭脳を代替することで、日本だけでなく世界の農業に貢献できると考えている。

5 謝辞

2014年からリモートセンシングの実証実験にご協力いただいた山形大学農学部藤井教授、ヤンマーヘリ&アグリ(株)長田様、安藤様をはじめとする「ISSA山形」コンソーシアム関係各位にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

●参考文献

- 1) 星野康「ISSA山形プロジェクトの概要と今年度の成果報告」庄内水田農業推進機構ワークショップ「大区画圃場におけるおいしい米の安定確収技術」
- 2) Rouse, J. W., R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering, (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317.
- 3) 今野周・長谷川正俊・武田正宏：水稲「はえぬぎ」の施肥量と収量・品質・食味，東北農業研究，50，57-58 (1997)．
- 4) 片桐，安藤，松本，森，藤井：ドローンによる圃場生育評価と無人ヘリによる可変追肥システムを利用した水稲の収量・品質改善について，計測と制御 Vol. 55, No.9 (2016)