

論文

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
水稻生育マップの作成田中 圭^{*1}・近藤昭彦^{*2}

Mapping of Rice Growth Using Low Altitude Remote Sensing by Multicopter

Kei TANAKA^{*1} and Akihiko KONDOH^{*2}

Abstract

The purpose of this study was to monitor the growth of rice on a weekly basis by multicopter. The data collected were used to 1) determine whether topdressing was required, 2) assess the potential for lodging risk, 3) estimate yield, and 4) create maps of rice growth for estimated protein contents. The conventional NDVI and 2G_RBi were both suitable as monitoring indices, and their application revealed the following: 1) The standard deviation of 2G_RBi values was found to be useful for determining the timing of topdressing, which was estimated to be most effective 10–15 days after maximum standard deviations were recorded. Areas with poor growth could also be identified by using the NDVI values of the non-productive tillering stages and areas where topdressing was needed could be identified. 2) To diagnose lodging, plant length was estimated using the differences between the DSM before the field was prepared for planting and on the monitoring day, and the risk of lodging 14 days before heading was shown for the entire area. 3) Yield was found to be highly correlated with the NDVI values of the heading stage, and yield maps were created using a yield estimation equation. 4) With regard to eating quality, a strong correlation was observed between the protein content of brown rice and NDVI values from the heading stage to the first half of the maturing stage (15 days after the heading stage), and accurate maps of eating quality were created.

The monitoring of rice growth using a multicopter is both safe and cost effective for individual farmers. The findings presented here show that the use of this method to obtain objective data and maps to assess topdressing, lodging risk, yield, and protein content is useful for the detailed management of crop growth in fields.

Keywords : multicopter, NDVI, 2G_RBi, DSM, rice growth

1. はじめに

近年、安価で小型のマルチコプターの登場によって、容易に超高解像度の地理空間情報を取得することができるようになった。マルチコプターとは複数のローターを搭載した回転翼機であり、固定翼機と回転翼機の両方を含む UAV (Unmanned Aerial Vehicle) やドローン (drone) と呼ばれることもある。これらの機体には、GNSS (Global Navigation Satellite System)、ジャイロ・加速度センサなど軽量かつ小型化した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスを搭載することで安定した飛行が可能となり、利用用途が広がった。また、それまで高価であった機体が 2012 年に登場した安価な Phantom (DJI 社) によって、多くの利用者にも手が届くようになり、急速に広がった。MEMS デバ

イスは、一つの基板上に電気回路と機械構造を集積させたシステムであり、大きさは一般的に数 μm から数 mm である。従来のラジコンヘリコプター (シングルローター) による空撮やモニタリングなどの研究例^{1)~3)}はあるが、操縦に関しては高度な技術・知識が必要とされ、非熟練者が飛行させることは困難であった。そのため、ラジコンヘリコプターは専門的な利用に限られ、利用者の裾野拡大までには至らなかったといえる。しかし、近年では噴火活動が続く小笠原諸島西之島における地図作成⁴⁾⁵⁾、広島県における集中豪雨の土砂災害把握⁶⁾、御嶽山における降灰調査⁷⁾、福島県川俣町における空間線量率計測⁸⁾といった様々な分野で UAV やマルチコプターが運用されはじめている。また、2013 年に刊行された米国の AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) の報告書によると、今後 10 年間における UAV 市場 (民生利用) の約

(2015. 7. 25 受付, 2016. 6. 2 改訂受理)

^{*1} 一般財団法人 日本地図センター

〒153-8522 東京都目黒区青葉台 4-9-6

^{*2} 千葉大学 環境リモートセンシング研究センター

〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33

^{*1} Japan Map Center, 4-9-6 Aobadai, Meguro-ku, Tokyo 153-8522

^{*2} Center of Environmental Remote Sensing, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8522

80%は農業分野で占められると予測されている⁹⁾。

一方、わが国の農業は、生産者の高齢化および少子化による担い手不足が深刻化し、労働力の不足が懸念されている。そのような現状に伴い、今後は農業用ロボットやIT技術を駆使して生育管理を行う精密農業の導入が各地で検討されている¹⁰⁾。精密農業とは農作物の生育状態をきめ細かく管理し、収量及び品質の改善をもたらすことであり、その一例に、衛星・航空機を用いた水稻のモニタリング手法がある。この手法は地域的制約や技術的な課題はまだ残されているが、既に運用されており、生育管理された農産物は地域ブランド化され、一般価格より約20~30%ほど高く販売されている(たとえば、JA津軽みらい管内で栽培されているキャッチ米つがるロマンなど)。しかも、近年の消費者意識の多様化および安全な品質志向などによって、農作物の生育管理情報の重要度は増している¹¹⁾。しかし、衛星・航空機を頻繁に使用するには手間とコストがかかり、さらに天候にも左右されやすいことから、高頻度で観測するモニタリングには課題が残されていた¹²⁾。一方、マルチコプターはこれらに比べて、天候の影響を受けにくい低空を高頻度で観測できるため、新たなモニタリングツールとして注目されはじめています。

さらに、わが国のような小さい圃場面積であっても、収量の分布は均一とは限らず、ばらつきの存在が既往研究で報告されている¹³⁾。すなわち、小面積の圃場内を高分解能でモニタリングする技術が、わが国の精密農業には求められつつあるといえる。そこで本研究では、小面積の圃場内を高頻度・高分解能でモニタリングするためにマルチコプターを活用し、近接リモートセンシングの手法によって農作物の生育状況を週単位でモニタリングし、解析データを用いて1) 追肥判定、2) 倒伏リスク診断、3) 収量推定、4) タンパク質含有率推定に関するマップを作成し、圃場内のばらつきを明確に示すことを目的とする。

モニタリングの前提条件としては、わが国の農業が置かれている現状を考慮し、モニタリングに費やす作業人数とコストをそれぞれ最小限とすることとした。例えば、生産者不足といわれる現状において、農作物のモニタリングに多くの人手をかけるのは難しい。そのため、モニタリングは基本的に一人体制で行えるか検証する。また、モニタリングシステムに高額な投資をしなくて済むよう、機材やシステムの導入においてはコストを最小限に抑えつつ、十分な精度が得られるシステムを検証する。

一方、マルチコプターによるモニタリングは安全かつ効率的にできなければならない。マルチコプターは機体性能が高度化し、利用者の範囲が専門家だけでなく一般市民にまで広がり、国内における注目度も高まってきているが、その一方で、運用上のルールや知識が未成熟であることから、墜落・接触事故も発生している。このようなマルチコプターにおける墜落事故の原因は、バッテリー切れ、整備不良、誤操作などといった初歩的なヒューマンエラーがほとんどである。そこで本研究では、個人で安全にモニタリ

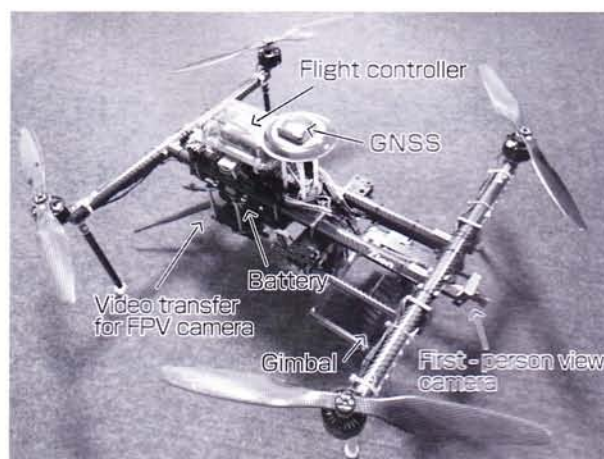


Fig. 1 Multicopter Zion EX 700.

グを実施できるよう、マルチコプターには自律飛行機能を有する機体を採用し、ヒューマンエラーによる墜落の危険要素を軽減することとする。

2. モニタリングの概要

2.1 モニタリングシステム

2.1.1 マルチコプターの機体諸元

モニタリングに使用したマルチコプターはZion EX 700(エンルート社)である(Fig. 1)。本機体は購入時、価格が数十万円と高価であったが、自律飛行が可能なフライトコントローラを搭載できるなど拡張性が高い点を評価し、本研究で採用した。なお、その後プラットフォームの低コスト化が進み、現在では数万円台でも自律飛行可能な機体が登場している。本研究で採用した機体は、全長約70cm、重量約3.2kg(バッテリー重量含む)、ペイロードは1.0kg程度まで積載できる。カメラなどの観測センサは機体前方のジンバルに搭載し、操縦者が飛行時に向きを調整することができる。ジンバルは機体の傾斜を感知すると、傾斜と反対方向にモータを作動させて、傾斜の影響を小さくすることができ、常に一定の方向を維持することができる。つまり、風が強くても直下視の画像を撮影できる。

機体の心臓部であるフライトコントローラには、Pixhawk(3DRobotics社)を搭載し、ジャイロやGNSSなどのセンサによって安定な飛行および自律飛行を可能とした。自律飛行の経路設定には、オープンソースソフトウェアの「Mission Planner」を用いた。Mission Plannerは、撮影に用いるカメラの仕様や飛行高度などを入力することで、最適な飛行経路を設定できる。これにより、撮影画像の品質保持および操縦者の負担軽減を図った。本研究では、機体が地面効果によって不安定になりやすい離着陸時のみマニュアル操縦とし、それ以外は自律飛行で空撮を行った。そのため、モニタリング期間中の空撮データは全て同じ経路上の画像であり、時系列的な変化を追うことができる。また、飛行中の安全確保のために、機体に映像および飛行情報の

Table 1 Specifications of the camera and conditions.

Camera model	Nikon 1 AW1 1 NIKKOR AW 10mm f/2.8	GoPro HERO3 (Black Edition)
Effective pixels	14.2 million	12.0 million
Image sensor	13.2 mm × 8.8 mm	5.9 mm × 4.4 mm
Dimensions (W × H × D)	113.3 mm × 71.5 mm × 37.5 mm	59.0 mm × 40.5 mm × 30.0 mm
Weight (with lens)	479 g	73 g
Focal length	10 mm (angle of view equivalent to that of 27 mm lens in 35mm format)	2.77 mm (angle of view equivalent to that of 16 mm lens in 35mm format)
Shutter speed	1 / 1000 sec.	Auto (1 / 10 - 1 / 1400 sec.)
Aperture range	Auto (f / 3.2 - f / 6.3)	f / 2.8
ISO sensitivity	Auto (160 - 200)	Auto (100 - 400)
White Balance	Auto	Auto
Exposure value	0.0 EV	0.0 EV
Interval timer shooting	4 sec. (separately, build shutter mechanism)	1 sec.
Remarks	feature : waterproof and shock- proof location : GPS and GLONASS	Simplified near-infrared camera : Total weight approx. 300g (GoPro × 2, case × 2),

転送システムを搭載し、上空からの映像や機体の位置や姿勢などを操縦者がリアルタイムに確認できるような運用システムを構築し、緊急時でも対応できるよう安全面に配慮した。なお、本研究では練習飛行も含めて 100 回以上の自律飛行を実施したが、墜落事故は一度も発生しなかった。

2.1.2 撮影カメラと撮影条件

本研究に用いた撮影カメラおよび撮影条件の仕様を Table 1 に示す。撮影は、圃場状況を詳細に記録することと同時にプロペラから発生するダウンウォッシュが稲穂に影響を与えない対地高度 50 m から撮影を行った。モニタリングには 2 種類の撮影カメラを用意し、飛行ごとにカメラを取り換えて、垂直写真の撮影を実施した。

まず、ミラーレス一眼カメラの Nikon 1 AW1 (ニコン社) を用いて可視光域の撮影を行った。13.2 mm × 8.8 mm サイズの CMOS イメージセンサを持ち、4608 × 3072 ピクセルで撮影できるカメラ本体に単焦点レンズ (1 NIKKOR AW 10 mm : f/2.8) を取り付け、理論上で地上解像度 1.4 cm の画像を取得した。なお、この機種はインターバル撮影機能がないため、遠隔操作ができるシャッター機構を取り付ける必要がある。本研究で利用したシャッター機構はカメラ上部に小型サーボを設置し、操縦者の送信機で小型サーボを等速度かつ一定方向に回転するように自作し、インター

バル撮影を可能とした (Fig. 2a)。記録媒体への転送速度も考慮した結果、4 秒間隔で撮影を行った。

次に、水稻の生育状況を把握するために、GoPro3 (GoPro 社) 2 台を用いて、近赤外域と可視光域を同時に撮影する簡易型近赤外カメラを作製した (Fig. 2 b)。GoPro3 に使用されているイメージセンサは、近赤外域にも感度を持っている。そこで、GoPro3 の 1 台に 780 nm 以下の可視光の波長域を遮断できる光吸収・赤外線透過フィルタ IR-78 (富士フイルム社) をレンズの前に設置することで、近赤外域画像を記録できる。この 2 台を同時撮影することで、ほぼ同じ範囲の近赤外域と可視光域を取得でき、ここから植物の活性を示す指標として用いられている NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) を求めることができる。GoPro3 はシャッタースピードなどの撮影条件の設定ができないため、機体の揺れによって画像のブレが生じやすい。そこで、インターバル撮影機能を用いて 1 秒間隔で撮影し、ブレの少ない画像を選択した。以上のカメラシステムで対地高度 50 m から撮影したところ、地上解像度 5.9 cm の画像を取得することができた。

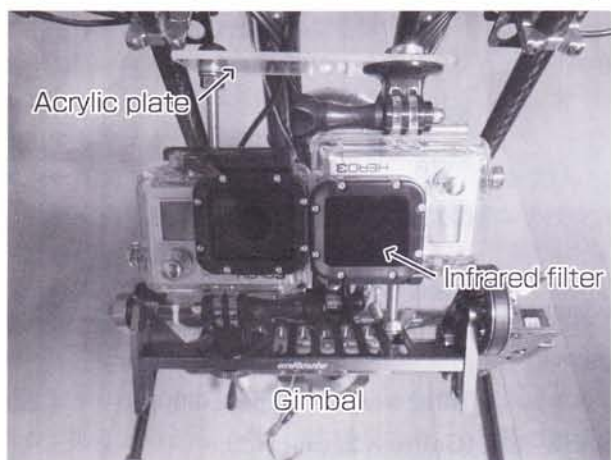
2.2 観測の概要

2.2.1 試験サイト

本研究では、埼玉県坂戸市北部の水田を試験サイトとし、



a) Visible light camera (shutter mechanism)



b) Simplified near-infrared camera

Fig. 2 Observation camera.

水稲の生育モニタリングを実施した。Fig. 3 に対象地域および試験サイトの概要を示す。対象地域は1991年に圃場整備事業が行われ農道や用排水路などが整備されたが、耕作地が所有者ごとに集約されることはなく、1耕作者の小規模耕作地が数カ所に分散している。生育状況把握のためには圃場ごとの管理が必要であり、小規模で高頻度に行えるモニタリングシステムが効率的である。試験サイトは短辺37m、長辺88mの長方形で、圃場面積は地区周辺の圃場1枚当たりの平均面積16.4aより大きい32.5aである。水稲栽培品種は、対象地域で主に栽培される「コシヒカリ」である。稲作栽培層は、5月下旬に水田への移植、8月上旬が出穂期（Heading stage：全体4～5割の穂が出穂した時期）、9月中旬頃の収穫となる。

2.2.2 モニタリング期間

水稲移植日から概ね週1回の頻度でモニタリングを行い、期間全体（移植日：2014年5月24日～収穫日：9月15日）で18回の情報を得た。また、ベースマップを作成するために、代掻き実施前と収穫後に各1回、それぞれ上空からの撮影を実施した（Fig. 4）。使用したマルチコプターは1回の充電で最長約20分、距離3.0km程度の飛行が可能



Fig. 3 Location map and test site
(Background : shaded-relief map created from DSM (ground resolution 5 cm) before soil puddling).

である。ただし、飛行時間は風と気温によって大きく変化するため、おおよそ風速5m/s以下および気温20℃～35℃の条件で飛行距離約0.8kmの試験サイトを速度3m/s（10.8km/h）で設定したところ、1回の飛行に要する時間は約6分程度であった。

撮影時間は影の影響が最小となる10時～11時、13時～14時の間で実施した。太陽が真上に位置する正午前後の1時間は、水面によるハレーションが生じやすく、解析に不適な画像が撮影されることが多いため、避けて撮影した。なお、作製した簡易型近赤外カメラの精度を検証するために、Landsat 8が飛来する日時（対象地域は10時16分頃通過）については、ほぼ同時刻に撮影を実施した。対象地域は関東シーン（PATH：107-ROW：35）と長野シーン（PATH：108-ROW：35）が重複する範囲に位置し、期間中にLandsat8が観測できた7回のうちマルチコプターとの同時観測を3回行った。

3. 解析手法

3.1 撮影画像の解析手法

撮影画像の解析フローをFig. 5に示す。本研究では、撮影時の分光反射の差異を取り除き、モニタリング指標の標準化を行うために白色板を用いた。本来、標準白色板を用いることが望ましいが、数万円程度と高価であるため、安価な簡易白色板¹⁴⁾を複数枚作成し、撮影時に用いた。まず、簡易白色板を地面に置き、影などが映り込まないようにNikon 1 AW1およびGoPro3の計3台を順番に撮影する。次に、あらかじめ晴天時（2014年5月11日11時）に撮影した簡易白色板のRGBおよびIR値を基準値として、観測日ごとにR、G、B、IRチャンネルの比を求め、補正係数を算出した。マルチコプターで撮影した画像データに補正係数を乗算することで、標準化した撮影画像に変換した。ほぼ同じ撮影範囲の近赤外域と可視光域を撮影できる簡易

2014		MAY Transplanting	JUN	JUL	AUG	SEP Harvesting	Total
Observational date	Multicopter Landsat 8	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	• • • • •	
Number of observations	Multicopter	1 (1)	5	5	5	1 (1)	18 (2)
	Landsat 8	1 (1)	2	2	2	0 (1)	7 (2)

() : Outside of observation

Fig. 4 Number of monitoring times.

Table 2 Orthophoto and DSM accuracy validation.

	X error (cm)		Y error (cm)		Z error (cm)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Visible Orthophoto・DSM	2.0	7.9	0.9	6.0	0.1	8.5
Near-Infrared Color Orthophoto	0.9	10.6	0.8	9.2	0.7	14.6

The image by Multicopter

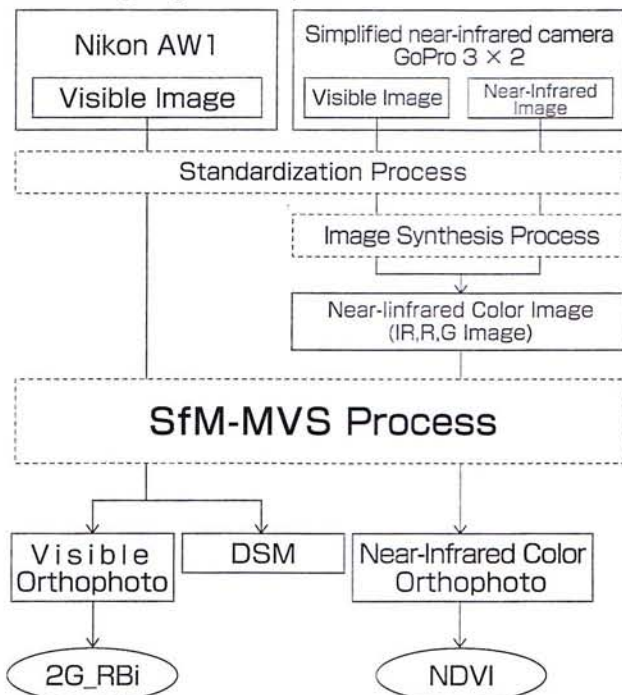


Fig. 5 Flowchart.

型近赤外カメラの画像データは、画像処理ソフトウェア「Photoshop」(Adobe 社)を用いて両者の画像を合成し、IR、R、Gチャンネルの画像を作成した。これらの画像合成の工程は、目視による判断が必要となり、作業時間が増加してしまう。市販されている数十万円の近赤外カメラシステムを利用すれば、手作業による作業を簡便化することができるが、本研究ではモニタリングシステムのコスト削減を図るため、簡易型近赤外カメラを自作した。

標準化した可視画像および近赤外画像を SfM-MVS (Structure from Motion - Multi-View Stereo) ソフトウェア「PhotoScan

Professional」(Agisoft 社)で取り込み、平面直角座標系第Ⅸ系のオルソ画像および DSM (Digital Surface Model) を作成した。SfM 技術は、対象物をカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像からカメラの撮影位置を推定する手法で、それらの位置から三次元形状を復元するのが MVS 技術であり、既にコンピュータビジョン分野で確立された技術といえる¹⁵⁾。近年、この技術を用いてオルソ画像や DSM の作成といった報告例がある^{16)~18)}。本研究では、水平方向を国土地理院刊行の正射空中写真、鉛直方向を数値地図 5m メッシュ (標高) の値を用いて GCP (Ground Control Point) を 4 地点設置し、SfM-MVS 処理を行った。1 回の飛行で得られた可視画像約 60 枚、近赤外画像約 40 枚は数時間程度の処理時間でオルソ画像や DSM を作成することができ、観測した当日にモニタリング結果を手にすることができるなど、迅速な対応が可能といえる。オルソ画像の地上解像度は可視画像で約 2cm、近赤外画像で約 6cm、DSM は 5cm の高解像度で作成することができた。Table 2 にモニタリング期間中に得られたオルソ画像 (可視画像・近赤外画像) と DSM の X、Y、Z 方向の最小および最大誤差を示す。可視画像から作成したオルソ画像・DSM は最大で水平方向 8cm、鉛直方向 9cm 程度の誤差を含んでいる。一方、近赤外画像のオルソ画像は最大で水平方向 11cm、鉛直方向 15cm 程度の誤差を含んでいる。これら的高解像度データを実際にモニタリング結果を活用する生産者に提示したところ、情報が詳細過ぎるため、反対に読み取りにくいとの意見が得られた。そこで、本研究では 5m×5m のメッシュを設定し、メッシュ内に含まれるピクセルの平均値をメッシュの代表値とした。試験サイトは南北方向 7、東西方向 17 の全体で 119 メッシュとなった。

次に、得られたオルソ画像からモニタリング指標を作成するため、近赤外画像から NDVI (式 1) を、可視画像から 2G_RBi (Green excess index; 式 2)¹⁹⁾²⁰⁾ をそれぞれ上記のメッシュごとに算出した。

$$NDVI = (DN_{nir} - DN_{red}) / (DN_{nir} + DN_{red}) \quad (1)$$

ここで、 DN_{nir} は近赤外撮影の DN (Digital Number)、 DN_{red} は可視光撮影の赤チャンネルの DN である。本来ならば、DN から放射輝度を計算し、さらに反射率を求める必要があるが、本研究では解析処理を簡便化するために DN から近似的に NDVI を求めた。

$$2G_RBI = (2DN_{green} - DN_{red} - DN_{blue}) / (DN_{red} + DN_{green} + DN_{blue}) \quad (2)$$

ここで、 DN_{red} 、 DN_{green} 、 DN_{blue} は、それぞれの可視光撮影の赤チャンネル、緑チャンネル、青チャンネルの DN である。 $2G_RBI$ はデジタルカメラなどから計算できる簡便な分光モニタリング手法として注目されており、画像データの RGB 値を用いて、植物のフェノロジーをモニタリングする上で有効な指標である²¹⁾。そこで、本研究では NDVI と $2G_RBI$ をモニタリング指標として採用し、解析を行った。

3.2 解析データを用いた水稻生育マップの作成手法

3.2.1 追肥判定マップの作成手法

生育不良な場所に対して、追肥は有効な手段である。適切な施肥の時期や箇所、量の判断は収量の増加につながるが、どれか一つでも誤ると、圃場内の品質のばらつきを増大させてしまう。しかし、対象地域におけるコシヒカリの追肥時期は出穂 20～15 日前頃が目安とされており、追肥時期の判断は地域ごとに得られる営農情報や出穂期を予測して逆算する生産者の長年の勘や経験に委ねられている。追肥箇所も同様に生産者の目視による判断に委ねられている。そのため、追肥の時期と箇所に関する客観的な情報は圃場内の品質のばらつきを最小にするために重要であるといえる。そこで本研究ではモニタリングの解析データを用いて、追肥時期と追肥箇所を推定する追肥判定マップを作成した。

まず、解析データの NDVI と $2G_RBI$ から生育状況の空間的不均一性の程度を示す標準偏差をメッシュ毎に算出し、圃場内の全メッシュの平均を圃場全体の代表値とした。これらの値を観測日ごとに算出することで、追肥時期を推定した。次に、先に求めた $2G_RBI$ の値が最大となる観測日の NDVI から圃場全体の平均値より相対的に低いメッシュを生育不良箇所として追肥判定マップを作成した。

3.2.2 倒伏リスク診断マップの作成手法

倒伏は稲穂が地表面に着くほど倒れる状態を指し、穂が垂れやすいコシヒカリでよく生じる現象である。倒伏状態になり稲穂が地表面の水に着いてしまうと、収量低下や乾燥の割増し、機械による収穫困難、穂発芽などの問題が生じ、食味も落ちてしまう。そのため倒伏のリスクがある箇所については、倒伏軽減剤の散布や倒伏前に刈取りを行うなどの対応が必要といえる。日本海側に位置する石川県では、コシヒカリの草丈が幼穂形成期で 70 cm を越える場合、または出穂 13～14 日前で 84 cm 以上であると、倒伏の

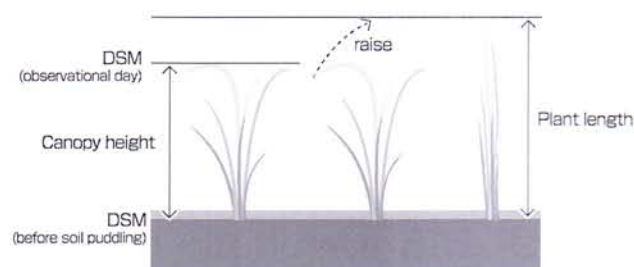


Fig. 6 Schematic of DSM acquisition.

リスクが高まるとされている²²⁾。日平均気温が異なる埼玉県で、これらの数値をそのまま用いることができるかどうかは検討する必要があるが、まずは倒伏リスクの診断を行うことが重要と考え、採用した。地上から草丈を実測する場合は、計測地点でしか把握することができず、圃場全体を面的に把握するには時間的制約から困難である。近年では、マルチコプターを用いて幼穂形成期および出穂 13～14 日前の NDVI から草丈を推定し、予測モデルから倒伏リスク箇所を抽出している研究例がある²³⁾。そこで本研究でも、モニタリング解析データから草丈を推定し、圃場内全体の倒伏リスクを面的に把握する倒伏リスク診断マップを作成した。

草丈に相当するデータには、モニタリング解析で得られた DSM を用いた。しかし、2 時期の DSM の差分から求めた値は草高であり、地上で実測した草丈より低くなる。Fig. 6 は草丈の計測の違いを示した。地上で実測する草丈は垂れ下がっている水稻を手で伸ばしてから、地表面から最も高い葉先までを計測する。一方、DSM から求める草高は稲穂が垂れ下がっている状態を取得するため、実測の草丈との差が生じてしまう。そのため、モニタリングと同時に地上から草丈を実測し、DSM の差分から求めた草高を補正した。倒伏リスク診断の判定時期は、前述の手法で用いられている幼穂形成期と出穂 13～14 日前とし、「各期の DSM と代掻き前の DSM との差分」に補正して求めた草丈から、それぞれ 70 cm を越える、または 84 cm 以上をリスクが高いと診断した。倒伏リスク診断マップは、メッシュ内の DSM 平均値を代表値として用いることで、圃場内の倒伏リスク箇所を面的に判断しやすくした。

3.2.3 収量推定マップの作成手法

米の収量は生産者にとって関心の高い項目といえるが、現在はコンバインによる収穫が主流であるため、圃場内全体の収量はわかるが、圃場内のばらつきを定量的に把握するには手間やコストがかかる。圃場全体の収量およびばらつきを推定することは長期的な栽培管理を行う上で有用な資料であることから、本研究では米の収量を面的に推定する収量推定マップを作成した。

まず、収穫直前の圃場内の 6 メッシュを対象にメッシュ内の全株数、10 株あたりの穂数かつ玄米重量を実測した。これらの値よりメッシュ内の玄米重量を算出し、単位面積当たりの収量とした。既往研究から水稻の収量ポテンシャル

ルを決定する重要な要素である籾数と出穂直前の NDVI には高い相関があることが示されている²⁴⁾。そこで本研究では、これらメッシュ毎の値とモニタリング指標である NDVI と 2G_RBi との関係を示すため、出穂期前後の NDVI および 2G_RBi と単位面積あたりの収量の相関を求めた。ここから得られた推定式に基づき、圃場内の収量を面的に表す収量推定マップを作成した。

3.2.4 タンパク質含有率推定マップの作成手法

市場に流通する米は等級別品位基準の審査を受けている。しかし、等級別品位基準は粒の大きさや色、水分量などから品質を判断し、等級を区分しているが、食味に関する項目は審査に含まれていない。米のおいしさは、主にタンパク質、アミロースなどの含有量によって決定する²⁵⁾。特に、タンパク質は栽培管理次第で大きく変動する²⁶⁾。ことから、本研究ではおいしさの指標としてタンパク質に着目した。

日本食品標準成分表 2010²⁷⁾によると、一般的な玄米のタンパク質含有率は 6.8% とされており、タンパク質含有率が低いほどやわらかいご飯となり、高いほどしっかりとしたご飯の硬さとなる²⁸⁾。しかし、タンパク質含有率を測定するには専門的分析機材や知識が必要であり、一般の生産者が計測することは稀である。しかも、圃場内のばらつきを把握するために、全エリアの米をサンプリングして調査することは難しい。そこで本研究では、米のタンパク質含有率とモニタリング指標との関係性から圃場内の食味を面的に推定するタンパク質含有率推定マップを作成した。

まず、収穫直前の圃場内 8 メッシュのほぼ中心から 10 株ずつをサンプリングし、天日乾燥、脱穀、籾摺りを行ったうえで、玄米のタンパク質含有率（水分 15% 換算）を調べた。タンパク質分析は女子栄養大学栄養科学研究所に依頼し、得られたデータとモニタリング指標の NDVI および 2G_RBi との関係を解析した。なお、玄米タンパク質含有率は登熟期の NDVI と高い相関があることが既往研究で示されている²⁹⁾。そこで本研究では、出穂期から登熟期内の観測日を対象に玄米タンパク質含有率と NDVI および 2G_RBi との相関を求めた。ここから得られた推定式に基づき、圃場内の玄米タンパク質含有率を面的に表すマップを作成した。

4. 結果と考察

4.1 モニタリング指標 (NDVI と 2G_RBi) の変化

水稻移植から収穫までの 114 日間におけるモニタリング指標の変化を Fig. 7 に示した。マルチコプターを用いたモニタリングで取得した NDVI と 2G_RBi の値は、両者とも水稻移植直後から分けつ期 (Tillering stage: 根付近から新芽が伸びて株分かれする時期) にかけて増加し、幼穂形成期 (Panicle formation stage: 茎の中にある稲穂の元が形成される時期) から出穂期の間は、ほぼ一定な値を維持し、登熟期 (Maturing stage: 籾殻の中で米粒が成長する時期) に

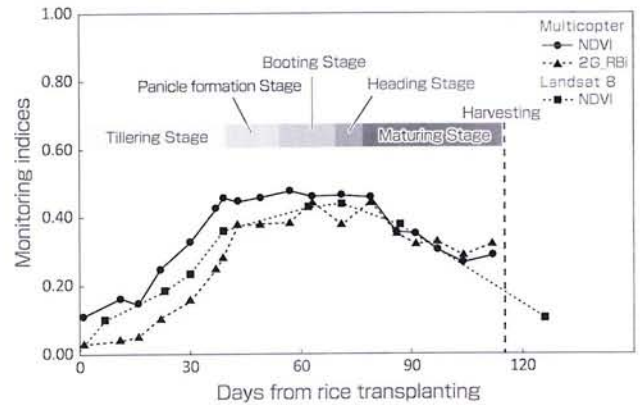


Fig. 7 Changes in monitoring indices.

入ってから徐々に減少した。本研究で作製した簡易型近赤外カメラの精度を検証するために、マルチコプターで取得した NDVI と Landsat 8 から求めた NDVI (大気補正済) を 7 回の観測データから比較した。このうち、3 回は Landsat 8 通過時刻にマルチコプターによるモニタリングを実施した。Landsat 8 の NDVI は試験サイトを含む 4 ピクセルの平均値、マルチコプターは 119 メッシュの平均値をそれぞれ採用した。Fig. 8 にマルチコプターの NDVI と Landsat 8 の NDVI との関係を示した。その結果、いずれの生育ステージにおいても同様な分布を示し、両者の相関は高かった ($r=0.944$, $p<0.01$)。このことから、本研究で作製した簡易型近赤外カメラに十分な精度があることがいえる。

次に NDVI と 2G_RBi との関係 Fig. 9 に示した。全体的に水稻移植から生育ステージが進むにつれ、NDVI と 2G_RBi の値がともに大きくなる分布傾向が読み取れる。特に、分けつ期から出穂期までの期間をみると、両者の関係は対数関数的で高い相関が得られた ($r=0.988$, $p<0.001$)。一方、分けつ期から登熟期までの全生育ステージの相関をみると若干低くなった ($r=0.857$, $p<0.001$)。籾が成熟しはじめる登熟期では、分けつ期から出穂期の対数関数の近似曲線から離れた分布傾向がみられた。この結果から、分けつ期から出穂期では 2G_RBi を計測することで NDVI を間接的に推定することが可能と考えられる。

4.2 水稻生育マップの考察

4.2.1 追肥判定マップ

全メッシュから計算した NDVI と 2G_RBi の標準偏差 (生育状況の空間的不均一性) の変化と地上で実測した 1 株当たりの茎数の変化を Fig. 10 に示した。2G_RBi の標準偏差は水稻移植約 16 日後から増加し、移植日から約 40 日後に最大を示し、その後減少した。一方、NDVI の標準偏差では顕著なピークは現れず、ほぼ一定な値を維持した。2G_RBi の標準偏差が最大を示した日 (2014 年 7 月 2 日) は、試験サイトで出穂日 (2014 年 8 月 3 日) と判断した日から約 1 ヶ月前にあたり、またこの時期の 1 株当たりの茎数が最大値を示していることから、無効分けつ期 (Non-productive tillering stage: 分けつした茎のうち穂をつけずに

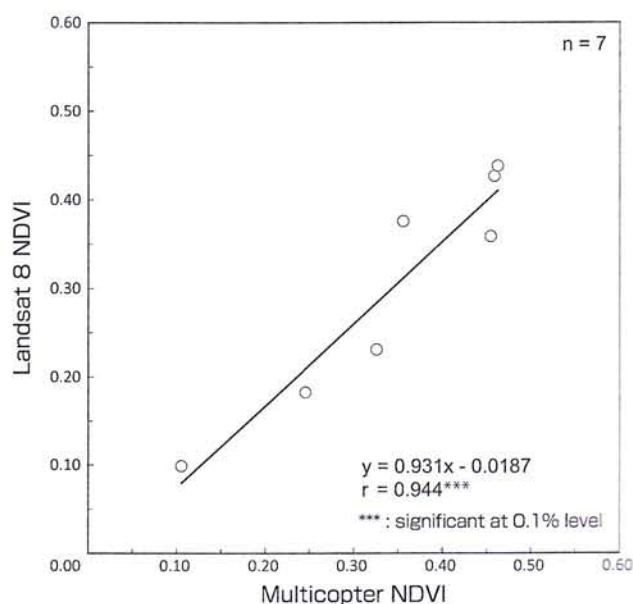


Fig. 8 Accuracy verification of simplified near-infrared camera.

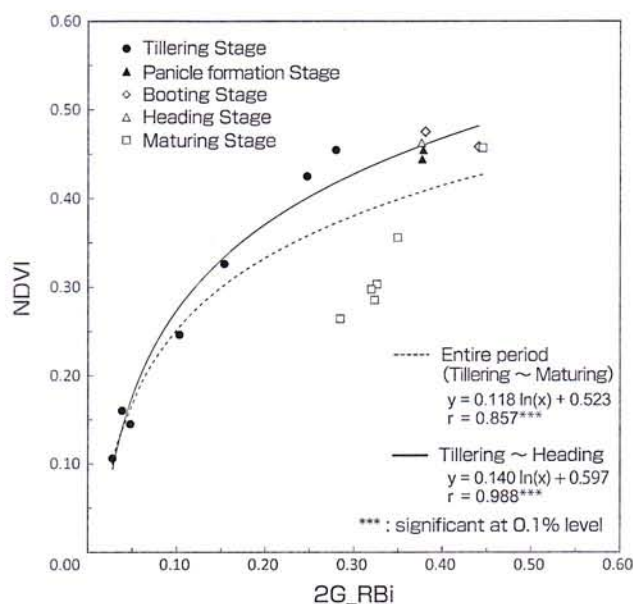


Fig. 9 Relationship between NDVI and 2G_RBi.

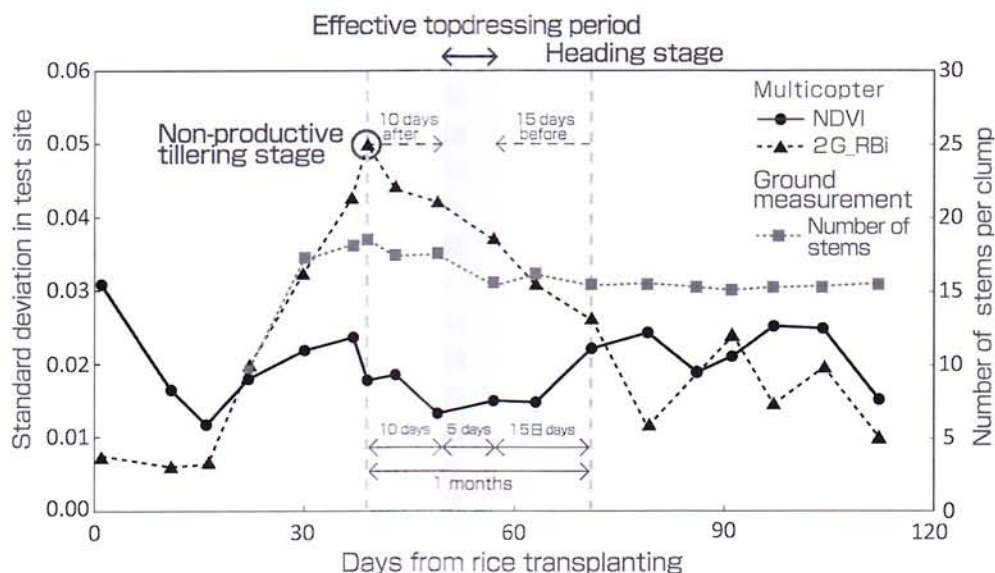


Fig. 10 Changes in standard deviation of NDVI and 2G_RBi.

枯死する時期)の生育ステージであると判断した。本研究のモニタリング結果より 2G_RBi の標準偏差の最大日は無効分けつ期の指標として利用できる可能性があると考えられる。無効分けつ期から出穂期の 1 ヶ月に有効な追肥時期が含まれている。一般に同じ品種を例年通りに栽培する地域では、出穂期はほぼ予測ができるため、それから逆算することで把握できる³⁰⁾。対象地域における追肥時期は営農情報などでは出穂期から逆算した 20～15 日前頃が目安とされている。しかし、猛暑や冷夏といった天候不順が続くと出穂期の予測は難しくなり、出穂期から逆算して求める追肥時期はより不定となりやすい。本研究で示した無効分けつ期に着目すると、出穂 20～15 日前頃は無効分けつ期

から 10～15 日後頃でもあると言い換えることもできる。このことから、モニタリングデータを基に無効分けつ期を判定し、その測定結果から有効な追肥時期の判断が可能にできたと考えられる。ただし、2G_RBi は圃場内の可視画像から計算しているため、対象地域の土壌や品種、基肥の量などによって、解析データに差が生じる可能性がある。そのため、当面の間は茎数の変化と併せてモニタリングを実施するとともに、天候などの条件による変化を把握するために、複数年に渡るモニタリングデータの蓄積が必要といえよう。

追肥が必要と考えられる箇所は無効分けつ期の NDVI から圃場全体の平均値より低い値を抽出することで選定し

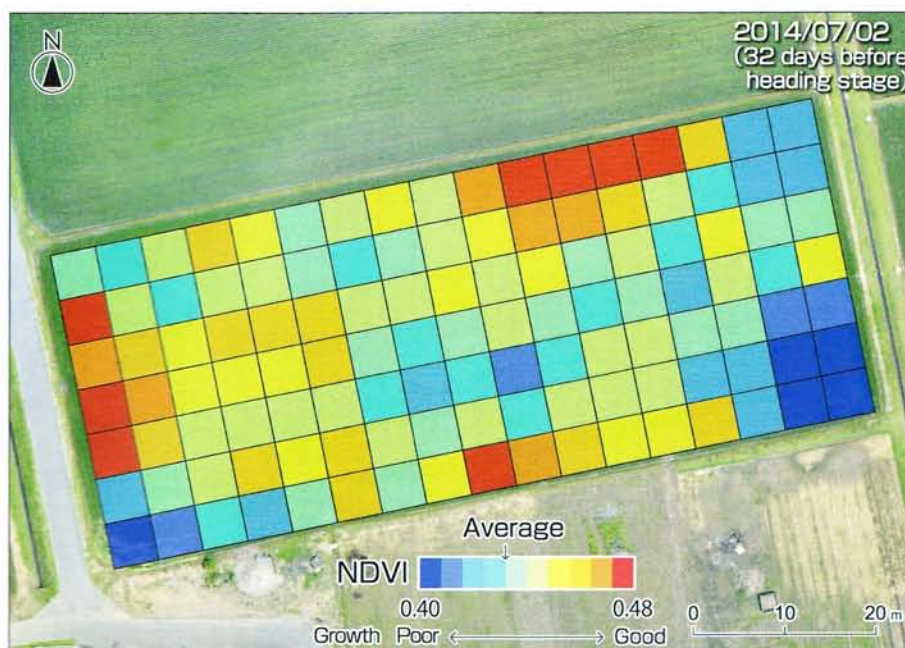


Fig. 11 Topdressing decision map.

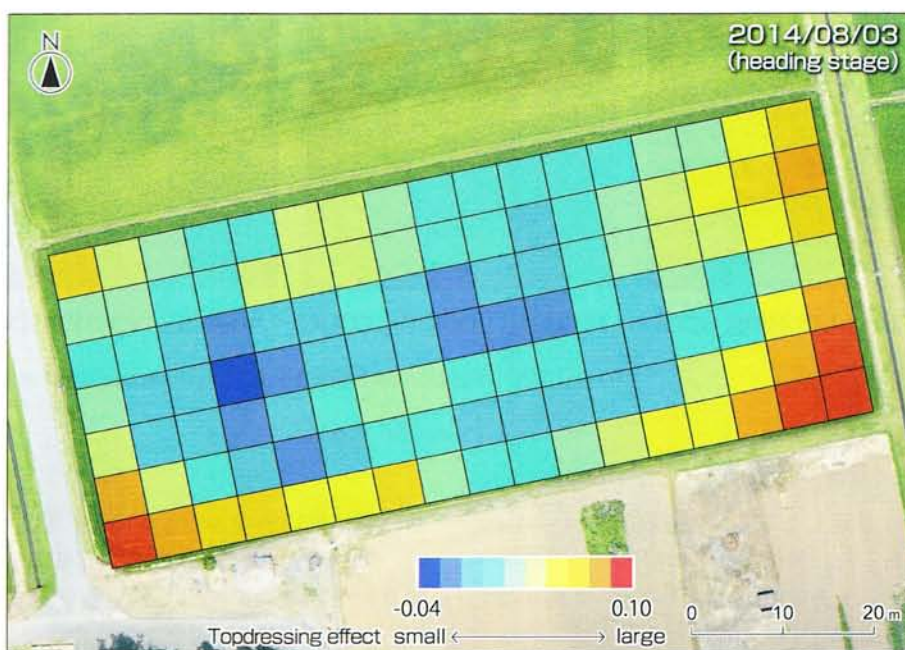


Fig. 12 Topdressing effect map.

た。Fig. 11 は、上記により作成した追肥判定マップである。東側の縁辺部と南西端の一部が NDVI の低い生育不良箇所であると判定した。Fig. 12 は、追肥後（出穂期）の NDVI から追肥前（無効分げつ期）の NDVI を差分し、作成した追肥影響確認マップである。試験サイトでは無効分げつ期の 15 日後に、圃場内には立ち入らず畦畔から追肥を行った。その結果、追肥を行った畦畔周辺のメッシュにおいて生育の促進が確認できた。このように、モニタリングデータを解析し、図化することにより、追肥時期の判定、

生育不良箇所の抽出、追肥の影響を確認できる可能性を示した。

4.2.2 倒伏リスク診断マップ

Fig. 13 は、収穫直前（2014 年 9 月 13 日）のオルソ画像を背景に出穂 14 日前の草丈から求めた倒伏リスク診断結果を重ねた倒伏リスク診断マップである。圃場 1 メッシュ内の 10 株の草丈を実測し、それらを平均した値と同メッシュの DSM から求めた草高の差分から補正係数 20 cm を算出し、全メッシュに補正係数を一律に加算し、出穂 14 日



* 2014/07/20 : Diagnosis from 14 days before heading stage

Fig. 13 Lodging risk map.

前の草丈を推定した。推定した草丈は分布範囲 63.4~91.4 cm, 平均 78.2 cm であった。倒伏リスクは前述の判断基準に則り、草丈が 84 cm 以上ある箇所を倒伏のリスクありと診断した。その結果、試験サイトでは概ね倒伏のリスクは低いことが求められた。しかし、一部で倒伏リスクが高いとされる 84 cm 以上の結果となった箇所もある。倒伏リスクが高いと診断した箇所は、北側の畦畔周辺である。実際に収穫直前のオルソ画像を確認すると、倒伏のリスクが高いと診断した箇所 (Area1, 2) で倒伏がみられ、リスクが無いと診断した箇所 (Area3) では倒伏がみられなかった。このように、モニタリングデータから倒伏リスク診断マップを作成することにより、出穂 14 日前に収穫直前の倒伏リスクを予測し、面的に示すことが可能となった。

4.2.3 収量推定マップ

実測値に基づき算出した単位面積当たりの収量とモニタリング指標との相関を求めた結果、出穂期における NDVI

の相関係数は $r=0.840$, $p<0.05$ と高い相関となった (Table 3)。Fig. 14 に出穂期の NDVI と単位面積当たりの収量の散布図を示した。突出しているサンプルが一つ含まれるが、このサンプルは追肥を行った箇所に該当するため、推定式に組み込んで解析した。その結果、単位面積当たりの収量の推定式が得られた (式 3)。

$$Y = 968.42 \times \text{NDVI} - 33.50 \quad (3)$$

ここで、Y は単位面積当たりの収量 (g/m^2) である。式 (3) をもとに、出穂期の NDVI から収量推定マップを作成した (Fig. 15)。試験サイトでは、南東端や西側縁辺部などの畦畔周辺のメッシュで収量が多く、圃場内側の収量が少なく推定されていることがわかる。収量が多く推定された箇所は、追肥を行った箇所および縁辺部で収量が多くなる周辺効果の影響を受けたと考えられる。すなわち、追肥した畦畔周辺および周辺効果の影響を受けたメッシュで収量

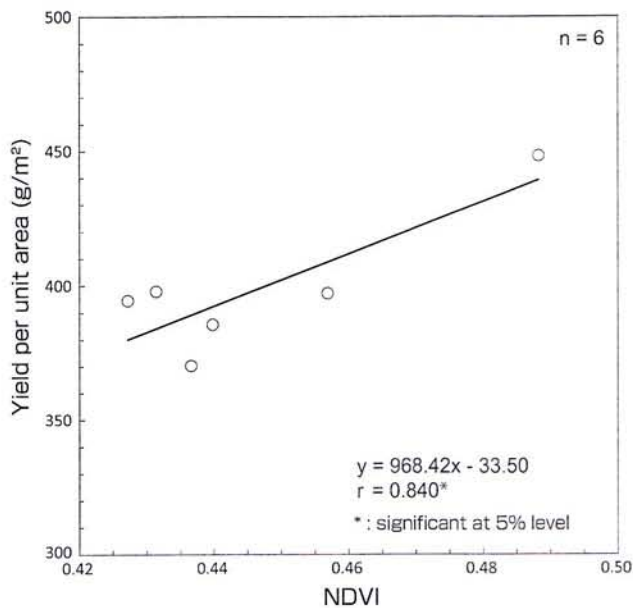


Fig. 14 Relationship between NDVI at heading stage and yield per unit area.

が多く、追肥の影響が小さい圃場内側のメッシュで収量が少なく推定されているといえる。なお、圃場全体の推定玄米収量 (1,327 kg) は、実際の玄米収量 (1,260 kg) より 5.3 % ほど多い結果となった。実測時には小粒の玄米も計測値に入れ、その値を用いて推定式を作成したため、実際の玄米収量より若干多めに推定されたと考えられる。

4.2.4 タンパク質含有率推定マップ

サンプリングした 8 メッシュの玄米からタンパク質含有率 (水分 15 % 換算) を求め、出穂期から登熟期の NDVI、2G_RBi との相関を求めた (Table 4)。Fig. 16 に最も相関が高い登熟期前半 (出穂 15 日後) の NDVI と玄米タンパク質含有率の散布図を示した。その結果、玄米タンパク質含有率の推定式が得られた (式 4)。

$$Y = 37.99 \times \text{NDVI} - 6.44 \quad (4)$$

ここで、Y は玄米タンパク質含有率 (%) である。特に出穂 15 日後までの NDVI は玄米タンパク質含有率との相関が高いことから、出穂から 15 日までにモニタリングすることで精度の高い推定ができると考えられる。Fig. 17 は出穂 15 日後の推定式から求めた玄米タンパク含有率に基づく食味推定マップである。試験サイトにおける玄米タ



Fig. 15 Estimated yield map.

Table 3 Correlation of monitoring indices and yield per unit area.

Observational date	Days from rice transplanting	Days from heading stage	NDVI	2G_RBi
2014 / 7 / 26	63	-8	0.784	0.309
2014 / 8 / 3	71	0	0.840 *	0.634
2014 / 8 / 11	79	8	0.815 *	0.706

* : significant at 5% level

ンパク質含有率は分布範囲 5.8~11.4%, 平均 6.82% であり, 一般的においしいとされる玄米タンパク質含有率 6.8% 以下の値を示すメッシュが全体の約 70% を占めた。しかし, 残りの 30% は玄米タンパク質含有率が高く, おいしさを損なっていると推定される。また, 玄米タンパク質含有率が高いと推定された箇所は, 西側, 南側, 東側の縁辺部であり, 追肥影響確認マップ (Fig. 12) で追肥の影響が高いと推定された箇所および収量推定マップ (Fig. 15) で収量が多いと推定された箇所とほぼ一致する。現状の結果から, 試験サイトで追肥を行った箇所では収量が上がった

ものの, 食味を損なってしまった可能性があると考えられる。

5. 生育のばらつきの要因

試験サイトでモニタリングを実施したところ, 同一圃場内の生育にばらつきが生じていることが明らかとなった。生育にばらつきが生じた要因の一つとして, 圃場内の地表面の高さが均平でなかった点が考えられる。代掻き実施前の DSM を解析すると, 生育不良箇所は地表面が周囲より最大 10 cm 程度, 平均 6 cm 程度高くなっていることが判明した。つまり, 圃場の均平化を目的とする代掻きが不十分だったため, 圃場内の凹凸を取り除けず, その結果, 均一な水管理が行えなかったことが要因の一つと推定される。本研究では代掻き実施前の詳細な DSM をその後の生産管理に有効に活用することができなかったが, モニタリングデータが圃場を均平に整備するための基礎的な資料となり得ると考えられる。

DSM の有用性は収量でも関係していると考えられる。試験サイトの 10a 当たり収量は 388 kg であり, 埼玉県坂戸市の 10a 当たり平均収量 493 kg³¹⁾ を大幅に下回った。さらに, 試験サイトからサンプリングした稲穂と埼玉県の作柄概況³²⁾ を比較すると, 試験サイトの有効穂数は県平均より少ないことが明らかとなった (Table 5)。この要因としては, 圃場内の地表面の高さが均平でなかったことが, 間断灌水といった細かい水管理や中干しを圃場全体において均一な水管理が行えず, 穂数にばらつきが生じ, 収量にも影響を与えてしまった可能性があると考えられる。

次に生育不良箇所への対応に着目すると, 追肥が生育のばらつきを助長させた要因の一つとして考えられる。本研

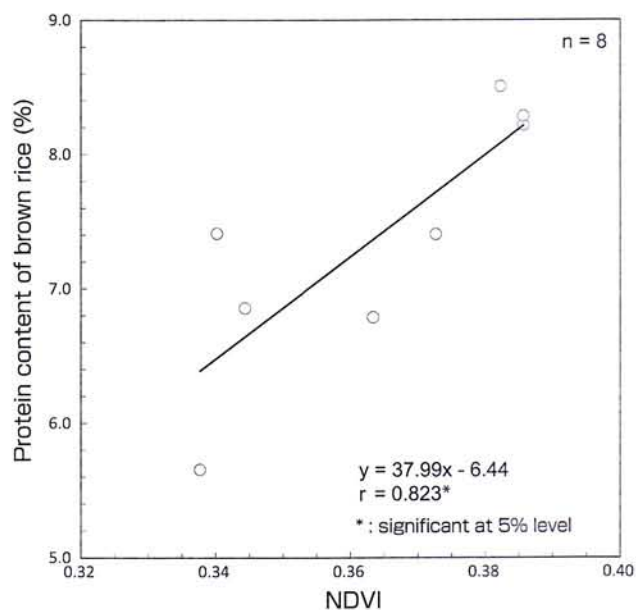


Fig. 16 Relationship between NDVI at maturing stage and protein content of brown rice.

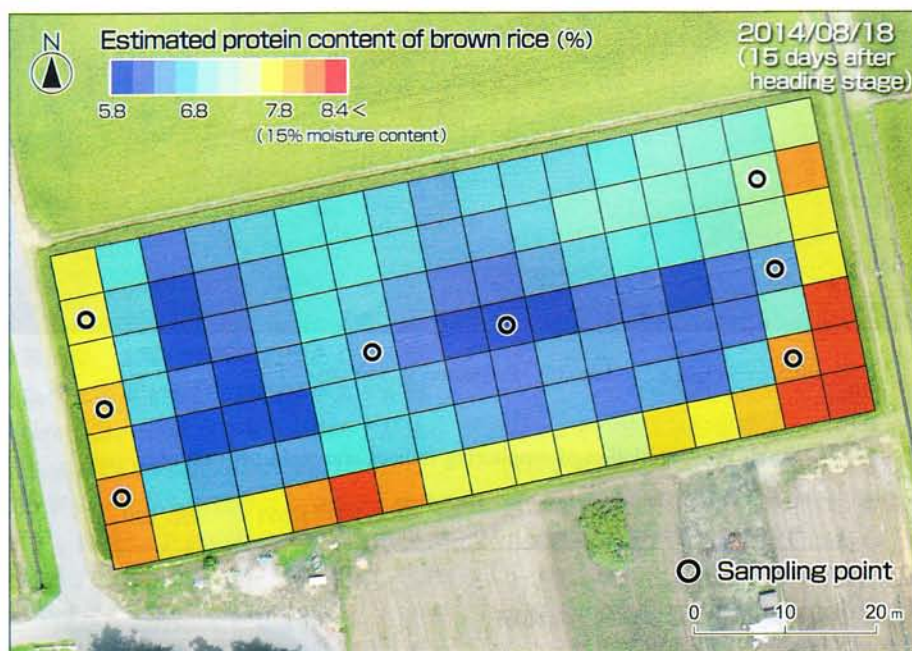


Fig. 17 Estimated protein content of brown rice map.

Table 4 Correlation of monitoring indices and protein content of brown rice.

Observational date	Days from rice transplanting	Days from heading stage	NDVI	2G_RBi
2014/8/3	71	0	0.804 *	0.527
2014/8/11	79	8	0.759 *	0.399
2014/8/18	86	15	0.823 *	0.700
2014/8/23	91	20	0.511	0.739 *
2014/8/29	97	26	0.630	0.603
2014/9/5	104	33	0.671	0.579
2014/9/13	112	41	0.799 *	0.590

*: significant at 5% level

Table 5 Rice crop summary of 2014.

	Test site	Saitama Pref.
Number of clump per unit area (clump / m ²)	18.5 · 20.3	16.9
Number of effective panicles per clump (ear / clump)	15.5 · 19.4	22.1
Number of effective panicles per unit area (ear / m ²)	289 · 360	374

究では、モニタリングデータを活用した追肥時期および追肥箇所の判定を行い、ほぼ適正な時期に必要な箇所へ追肥できたと考えられる。しかし、追肥の影響が認められた箇所はいずれも収量の増加が推定されたが、食味の視点から見ると品質の低い米であるとも推定された。また、本来周辺効果で収量が多くなる箇所に追肥を行ったため、品質の低下を招いてしまった可能性も考えられる。

5. 結 論

本研究では、小面積の圃場内を高頻度でモニタリングするためにマルチコプターを活用し、近接リモートセンシングの手法によって農作物の生育状況を週単位でモニタリングし、解析データを用いて 1) 追肥判定、2) 倒伏リスク診断、3) 収量推定、4) タンパク質含有率推定に関するマップを作成し、圃場内のばらつきを明確に示すことができた。

まず、水稻生育モニタリングにおいて、マルチコプターを用いて低空からの高頻度空撮を実施したところ、圃場内の詳細な生育状況の分布を把握することができた。モニタリング指標としては、従来から使われている NDVI に加え、近年注目されている 2G_RBi が有効である。また、マルチコプターを用いたシステムは大がかりな機材を使用しないため、一人で運用することが可能であった。特に、マルチコプターの自律飛行機能の活用は同一箇所のデータを確実に得ることができ、操縦者のヒューマンエラーによる事故などの不安要素を取り除くことができるなど、安全かつ効率的な運用に役立つことが実証できた。水稻の生育モニタリングに分光放射計やハイパースペクトルカメラといった

高価な観測機器を用いれば、正確な情報を取得できるが、本研究で用いた簡易型近赤外カメラでも十分な精度を得られることを示すことができた。

次に、解析データから作成した追肥、倒伏、収量、タンパク質含有率のマップは、圃場内における生育のばらつきを視覚的に示すことができた。また、各マップとモニタリング指標との関係は次のとおりである。

- ・追肥時期の判定には 2G_RBi の標準偏差が有効である指標と考えられる。対象地域において最大値を示した観測日は無効分けつ期と考えられ、その日から 10～15 日後が有効な追肥時期と推定できる可能性が示された。また、追肥が必要な生育不良箇所は無効分けつ期の NDVI から抽出することが可能であると考えられる。
- ・倒伏リスク診断は代掻き実施前と観測日の DSM の差分から草丈を推定し、出穂 14 日前に倒伏のリスクを面的に示すことが可能であることが確認できた。
- ・収量は出穂期の NDVI と相関が高く、推定式から収量推定マップを作成することが可能となった。
- ・玄米タンパク質含有率は出穂期から登熟期前半（出穂 15 日後）までの期間の NDVI との相関が高いことを示し、タンパク質含有率推定マップを精度良く作成することが可能となった。

このように、マルチコプターを用いた水稻生育モニタリング手法は、安価で安全に個人が導入でき、圃場内の詳細な生育管理に有効であることを示した。しかも追肥、倒伏、収量、タンパク質含有率といった栽培計画や将来予測としての客観的なデータおよびマップを圃場内で詳細に示すことができた。本研究結果は単年のデータに基づく解析であ

るが、複数年間モニタリングすることによって推定精度の向上を図ることができれば、圃場ごとの詳細な生育状況をリアルタイムに提供するシステムとして、精密農業に貢献できる可能性があると考えられる。なお、今回は水稲を対象としたモニタリングを実証したが、本研究で示した手法を用いれば、他の農作物、森林や湿地といった様々な植生分布域でのモニタリングに応用することが可能であるなど、マルチコプターは新たなモニタリングツールとして有効であることが明らかとなった。

謝 辞：玄米の成分分析に協力していただいた根岸由紀子氏（女子栄養大学栄養科学研究所）に感謝いたします。また、原稿を注意深くお読み頂き、適切な助言を頂いたことに対して、匿名査読者には深く感謝いたします。本研究は、千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究により実施した（平成 26 年度、平成 27 年度）。

引用文献

- 1) M. Ujiie, S. Sasaki, K. Kawase, T. Itagaki : A Practical Application of Photographs Taken from a Radio-Controlled Model Helicopter to the Survey of Forests, *Journal of the Japanese Forest Society*, 68 (3), pp. 105-110, 1986.
- 2) 嶋田 浩, 嶋 栄吉, 田中勝千, 永吉武志, 吉野邦彦, 服部俊宏, 加藤 亘, 渡辺一哉: 簡易マルチバンドデジタルカメラによる圃場地理情報のモニタリング, *農業土木学会誌*, 74 (11), pp. 969-972, 2006.
- 3) 長井正彦, 柴崎亮介, アーメッド アフザル: 無人ヘリコプターによる河川環境モニタリング手法の開発, *水文・水資源学会誌*, 22 (5), pp. 401-408, 2009.
- 4) 飛田幹男, 神谷 泉, 岩橋純子, 中埜貴元, 高桑紀之: 無人航空機による西之島空中写真の撮影とその分析, *国土地理院時報*, 125, pp. 115-124, 2014.
- 5) 飛田幹男, 神谷 泉, 中埜貴元, 岩橋純子, 大角光司, 高桑紀之: 無人機による西之島地形計測の高精度化, *国土地理院時報*, 125, pp. 145-154, 2014.
- 6) 国土交通省: 九州地方整備局 TEC-FORCE の活動状況「マルチコプターによる空撮調査を実施」, <http://www.qsr.mlit.go.jp/n-topics/h26/140824/bousai1.pdf> (2015.6.30)
- 7) 国土交通省: 長野県王滝村・木曾町へ TEC-FORCE 派遣～御嶽山噴火～, http://www.cbr.mlit.go.jp/saigai/tec-force/pdf/h26_onntake_pamphlet.pdf (2015.6.30)
- 8) 千葉大学: 無人ヘリによる超低高度計測による空間線量率マップの作成とハイパースペクトル技術による植生・土地被覆現況図の作成, 千葉大学, 千葉, 2013.
- 9) AUVSI : 『The Economic Impact of Unmanned Aircraft Systems Integration in the United States』, <http://www.auvsi.org/econreport/> (2015. 6. 30)
- 10) 澁澤 栄: 精密農業の研究構造と展望, *農業情報研究*, 12 (4), pp. 259-274, 2003.
- 11) 磯島昭代: テキストマイニングを用いた米に関する消費者アンケートの解析, *農業情報研究*, 15 (1), pp. 49-60, 2006.
- 12) 秋山 侃, 川村健介: Landsat 5 号の快晴データ取得率に関する農林業分野からの一考察, *写真測量とリモートセンシング*, 42 (3), pp. 29-34, 2003.
- 13) 庄司浩一, 川村恒夫: 水稲の収量マップの作成, *農業機械学会誌*, 60 (4), pp. 73-74, 1998.
- 14) 山下 恵, 吉村充則, 土田 聡, 本多嘉明, 梶原康司: 簡易白色板作成法の検討およびその性能評価・校正, *写真測量とリモートセンシング*, 40 (2), pp. 26-32, 2001.
- 15) 満上育久: Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections, *映像情報メディア学会誌*, 65 (4), pp. 479-482, 2011.
- 16) 内山庄一郎, 井上 公, 鈴木比奈子: SfM を用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, *防災科学技術研究所研究報告*, 81, pp. 37-60, 2014
- 17) 内山庄一郎, 中田 高, 井上 公, 熊原康博, 杉田 暁, 井筒 潤, 後藤秀昭, 福井弘道, 鈴木比奈子, 谷口 薫: 小型 UAV と SfM ソフトウェアを用いた断層変位地形把握の試み—根尾谷断層水鳥断層崖を例に一, *活断層研究*, 40, pp. 35-42, 2014.
- 18) 小花和宏之, 早川裕弐, 加藤 顕, ゴメス クリストファー: 小型無人航空機および単独測位 GNSS 搭載カメラを用いた簡易的な地形測量手法, *地形*, 36 (2), pp. 87-106, 2015.
- 19) Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Vonbargen, K. and Mortensen, D. A. : Color indexes for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions, *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 38, pp. 259-269, 1995.
- 20) Richardson, A. D., Jenkins, J. P., Braswell, B. H., Hollinger, D. Y., Ollinger, S. V. and Smith, M. L. : Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest, *Oecologia*, 152, pp. 323-334, 2007.
- 21) R. Ide and H. Oguma : Use of digital cameras for phenological observations, *Ecological Informatics*, 5 (5), pp. 339-347, 2010.
- 22) 水稲栽培管理情報 (JA 金沢市版): <http://www.is-ja.jp/kanazawa/702.pdf> (2016.5.7)
- 23) 濱 侃, 早崎有香, 望月 篤, 鶴岡康夫, 田中 圭, 近藤昭彦: 小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稲生育モニタリング, *水文・水資源学会誌*, 29 (1), pp. 44-54, 2016.
- 24) 脇山恭行: 植生指数と水稲の籾数の関係, *農業気象*, 61(1), pp. 61-67, 2005.
- 25) 竹生新治郎, 渡辺正造, 杉本貞三, 真部尚武, 酒井藤敏, 谷口嘉廣: 多重回帰分析による米の食味の判定式の設定, *澱粉科学*, 32 (1), pp. 51-60, 1985.
- 26) 本庄一雄: 米のタンパク含量に関する研究: 第 2 報 施肥条件のちがいが玄米のタンパク質含有率およびタンパク質総量に及ぼす影響, *日本作物学会紀事*, 40 (2), pp. 190-196, 1971.
- 27) 文部科学省 科学技術・学術審議会資源調査分科会編: 日本食品標準成分表 2010, 全国官報販売協同組合, 東京, 2010.
- 28) 稲津 脩, 佐々木忠雄, 新井利直: お米の味: その科学と技術, 北農会, 北海道, 1982.
- 29) 安積大治, 志賀弘行: 水稲成熟期の SPOT/HRV データによる米粒蛋白含有率の推定, *日本リモートセンシング学*

- 会誌, 23 (5), pp. 451-457, 2003.
- 30) 星川清親: 解剖図説 イネの生長, 農山漁村文化協会, 東京, 1975.
- 31) 農林水産省農林水産関係市町村別統計 (平成 26 年度水稻埼玉県): <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000028657290> (2015. 6. 30)
- 32) 農林水産省水稻の収量構成要素 (水稻作況標本筆調査成績) (全国農業地域別・都道府県別): <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Xlsdl.do?sinfid=000028477366> (2015. 6. 30)

〔著者紹介〕

●田中 圭 (タナカ ケイ)



所属: 一般財団法人日本地図センター。
1980 年生まれ。2002 年日本大学文理学部
地理学科卒業。2007 年同大学大学院理工
学研究科地理学専攻修了。博士 (理学)。
専門は自然地理学。原子力規制庁 (技術
参与)。日本地理学会, 地理情報システム
学会, 日本地図学会等会員。
E-mail: tanaka@jmc.or.jp

●近藤 昭彦 (コンドウ アキヒコ)



所属: 千葉大学環境リモートセンシング
研究センター。1958 年生まれ。1985 年筑
波大学大学院博士課程地球科学研究科地
理学・水文学専攻修了 (理学博士)。専門
は地理学・水文学。水文・水資源学会, 日
本文科学会, 日本地理学会等会員。
E-mail: kondoh@faculty.chiba-u.jp