

## 非破壊計測による水稻生育形質の推定精度の検討

荒井 (三王) 裕見子<sup>1)</sup>・岡村昌樹<sup>2)</sup>・建石邦夫<sup>2)</sup>・矢部志央理<sup>1)</sup>・  
荻原均<sup>1)</sup>・吉田ひろえ<sup>3)</sup>・吉永悟志<sup>2)</sup>・小林伸哉<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup> 農研機構次世代作物開発研究センター, <sup>2)</sup> 農研機構中央農業研究センター, <sup>3)</sup> 農研機構農業環境変動研究センター)

**要旨:** 主食用水稻品種「コシヒカリ」や業務・加工用多収品種「あきだわら」等の6品種を供試し, 4段階の窒素施肥条件下で栽培した. 画像情報や分光センサ情報等(植被率, NDVI, 受光率)から水稻の生育形質(葉面積指数(LAI), 茎数, 地上部乾物重, 葉身窒素含量, 植物体窒素含量)を説明できるか検討するために, 非破壊計測による生育形質の推定精度を評価した. 非破壊計測と生育形質の調査は, 移植後24, 38, 54, 66日に行った. その結果, 移植後24日~幼穂形成初期において, 植被率とLAI, 地上部乾物重, 植物体窒素含量, NDVIとLAI, 葉身窒素含量, 植物体窒素含量, 受光率と地上部乾物重との間では, 回帰式の決定係数( $R^2$ )が0.8以上と高く, 関係性があると示唆された. また, 移植後24日では手持カメラ画像の植被率と地上部乾物重, 植物体窒素含量, 移植後24と38日では全ての非破壊計測値と茎数を除いた生育形質, 幼穂形成初期では携帯型計測のNDVIと地上部乾物重を除いた生育形質, 受光率とLAIとの間では, 回帰式の $R^2$ が0.7以上と高く, 関係性があると示唆された. しかしこれらの二乗平均平方根(RMSE)で示される推定誤差は, 大きい傾向があった.

**キーワード:** NDVI, 受光率, 植被率, 水稻, 生育, センシング.

イネ収量や品質の向上を目的として, 気象や土壌肥沃度, 生育状態に応じた新たな栽培管理支援技術の確立が求められている. 近年, スマート農業における栽培管理支援技術の1つとして, 非破壊計測情報の利用による群落生育量の推定が有望視されている.

非破壊計測情報と生育や収量に関わる形質の関係については, イネ (Shibayama and Akiyama 1986a, b, 1991, Wiegand ら 1989, Yamamoto and Honjo 1993, Inoue ら 1998, Duan ら 2019, Stavrakoudis ら 2019), ダイズ (Nguy-Robertson ら 2012), トウモロコシ (Wiegand ら 1990, Li ら 2014), コムギ (Dusek ら 1985, Kanemasu ら 1985, Wiegand ら 1992, Lukina ら 1999, Li ら 2010), 牧草 (Everitt ら 1985, Itano ら 2000, 佐々木ら 2014) など様々な植物で検証されている. 我が国において, ドローンに代表される無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) や衛星によるリモートセンシングは, 局所から広域まで幅広い計測が可能のため, 水稻栽培においては地域の栽培体系や圃場毎の生育ステージや生育量の把握, 幼穂形成初期の可変施肥や窒素追肥量の決定, 出穂期の把握, 収穫適期判断などに用いるための技術開発が期待されている (秋山 1996, 井上 1997a, b, 鳥山 2009, 田中・近藤 2016, 井上・横山 2017, 齋藤ら 2017). また, これらの診断技術を活用した広域の圃場情報の可視化は, 農業機械と連携させることにより, 栽培の効率・高精度化を可能とする. 一方で, 地上における計測は局所的ではあるが, 手持カメラ, 携帯型分光センサ, トラクタ搭載センサ等によって取得された作物情報は, ドローンや衛星で取得した観測データとの比較や, 農業現場において簡易的に生育状況を把握する技術として期待

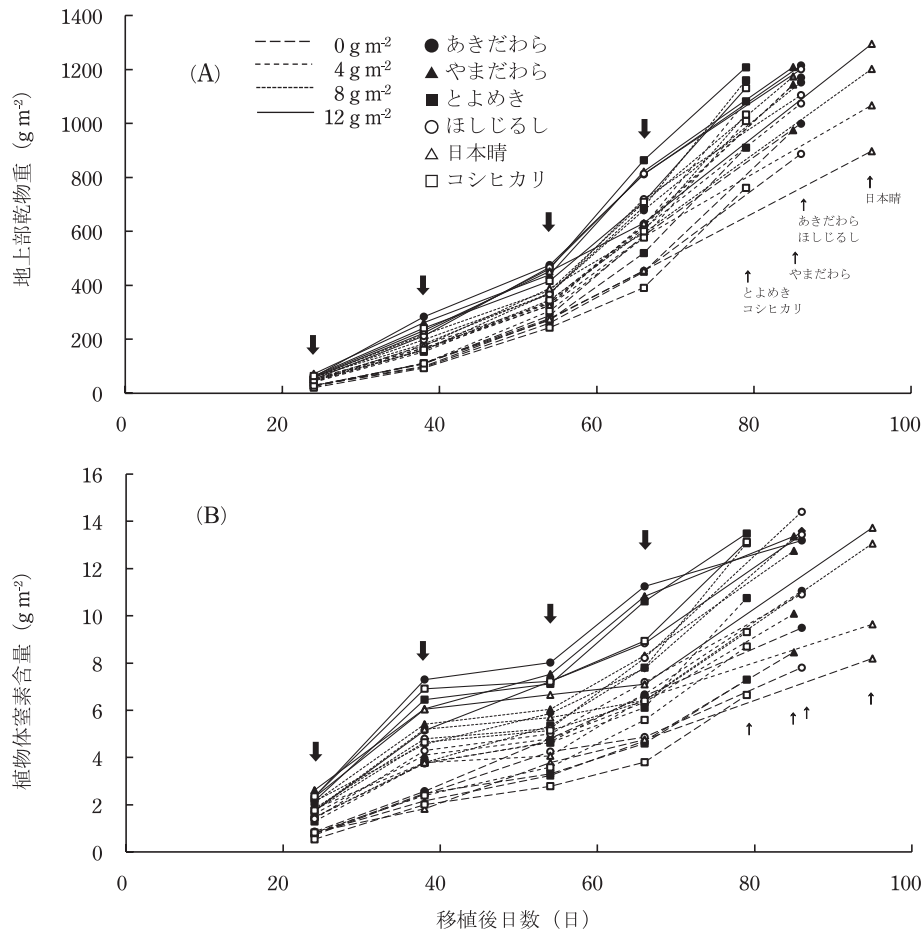
されている.

しかし, 作物栽培学的視点から, これら非破壊計測情報と群落生育量に関連する形質の関係性について検証を行った研究は少ない. 水稻の生育状態を把握するためには, 群落における茎数, 葉面積指数 (Leaf area index: LAI), 地上部乾物重, 葉身窒素含量や植物体窒素含量などの形質が重要な生育指標となる (浪川ら 2016, 西田ら 2018). そこで本報告は, 主食用品種「コシヒカリ」や業務・加工用水稻多収品種「あきだわら」等の6品種を4段階の窒素施肥条件下で栽培し, 画像情報や分光センサ情報等の非破壊計測値から水稻の生育形質を説明できるか検討した.

### 材料と方法

#### 1. 栽培方法

栽培試験は, 2018年に, 農研機構谷和原水田圃場 (茨城県つくばみらい市) (埴壤土) にて行った. 主食用水稻品種「コシヒカリ」と, 近年業務・加工用として育成された多収品種「あきだわら」, 「やまだわら」, 「とよめき」, 「ほしじるし」, および標準的な品種「日本晴」の6品種を供試した. 5月11日に移植し, 栽植様式は, 株間15 cm, 条間30 cmの1株3本植とした. 肥料は, 緩効性肥料リニア40日型 (溶出日数は, 地温25℃で成分の約80%が溶出する日数) と140日型, シグモイド100日型を1:1:1の割合で混合し, 基肥として窒素成分で0, 4, 8, 12 g m<sup>-2</sup> 施用した. また P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と K<sub>2</sub>O をそれぞれの成分で12 g m<sup>-2</sup>, 冬期に完熟牛糞堆肥を1 kg m<sup>-2</sup> 施用した. N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> と K<sub>2</sub>O の基肥は全て移植前全層施肥とした. 栽培面積は,



第1図 地上部乾物重 (A) と植物体窒素含量 (B) の推移。

下向きの矢印は、移植後24, 38, 54, 66日のサンプリング日を示す。

上向きの矢印は、各品種の出穂日を示す。

1区約20  $m^2$ とした。

6品種および窒素施肥量0, 4, 8, 12  $g\ m^{-2}$ の4処理の合計24区について、非破壊計測と抜き取り調査によるデータを各区で取得した。各区20  $m^2$ を2分割し、10  $m^2$ で各形質計測のための調査およびサンプリングを行い、残り10  $m^2$ で非破壊計測の調査を行った。非破壊計測は、移植後24日の6月4日、移植後38日の6月18日、移植後54日（「日本晴」以外の5品種では、幼穂形成初期にあたる出穂前32から25日）の7月4日、および移植後66日（「日本晴」では幼穂形成初期にあたる出穂前29日の7月16日）（日本晴区のみ）に行った。抜き取り調査は、全ての品種について非破壊計測日と出穂期に行った。

## 2. 非破壊計測法（正規化植生指標（Normalized Difference Vegetation Index: NDVI）、植被率、受光率、栄養指標値）

マルチスペクトルカメラ（Sequoia, MicaSense）を搭載したUAV（Phantom 4 PRO, DJI）を高度20 mで自動飛行し、オーバーラップ率が80%以上となるように圃場全域の画像を取得した。撮影した画像は、写真解析用ソフト

ウェア（Pix4Dmapper, Pix4D）を用いて、可視光および各反射率のオルソ画像に変換した。得られた反射率画像からNDVI（ $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$ ）（IRは近赤外光の波長帯（中心波長790 nm, バンド幅40 nm）の反射率, Rは可視光の波長帯（中心波長660 nm, バンド幅40 nm）の反射率）を算出した。携帯型分光センサ（GreenSeeker Handheld Crop Sensor, ニコン・トリニプル）で、地表面より約90 cmの高さで群落直上よりNDVIを計測した。また、地表面より約90 cmの高さから手持カメラ（GR2, リコー）、高度20 mよりPhantom 4搭載カメラを用いて可視光画像を撮影した。手持カメラの可視光画像とPhantom 4搭載カメラから得られたオルソ化画像から、Easypccプログラム（Guoら2017）を用いて群落の植被率を算出した。併せて、群落上と群落内田面直上に入射する光合成光子束密度（Photosynthetic Photon Flux Density 波長400 nm～700 nm）を光量子計（LightAnalyzer LA-105, 日本医化機器製作所）で計測し、受光率を算出した。栄養指標値（武田1986, 末信ら1994, 荒木ら2005, 堀尾・紺谷2007）は、草丈（cm）、 $m^2$ 当たり茎数、SPAD値の積を105で除して求めた。

第1表 非破壊計測値と水稻生育量に関わる形質の決定係数 ( $R^2$ ) と推定誤差 (RMSE)。

計測時期	生育形質	平均値	植被率				NDVI				受光率		栄養指標値	
			手持カメラ画像		UAV 画像		携帯型計測		UAV 計測		光量子計		草丈×茎数×SPAD 値÷10 <sup>5</sup>	
			$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE	$R^2$	RMSE
移植後 24 日～ 54 または 66 日 <sup>1)</sup> (出穂前 32 から 25 日 : 幼穂形成初期) (n=76)	LAI	2.08	0.93	0.35	0.90	0.46	0.89	0.45	0.88	0.48	0.43	0.42	—	—
	茎数 (本 m <sup>-2</sup> )	481	0.53	86.88	0.52	86.99	0.53	86.14	0.59	80.90	0.44	94.23	—	—
	地上部乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	210	0.91	47.03	0.86	60.61	0.79	71.65	0.77	75.77	0.93	42.07	—	—
	葉身窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	2.66	0.78	0.72	0.79	0.71	0.83	0.64	0.85	0.59	0.70	0.83	—	—
	植物体窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	3.82	0.82	0.86	0.84	0.82	0.85	0.79	0.88	0.71	0.75	1.00	—	—
生育初期  移植後 24 日 (n=24)	LAI	0.56	0.54	0.12	0.45	0.14	0.24	0.16	0.46	0.13	0.32	0.15	—	—
	茎数 (本 m <sup>-2</sup> )	385	0.68	61.29	0.59	69.72	0.40	83.83	0.54	69.76	0.45	80.83	—	—
	地上部乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	45.7	0.70	7.48	0.65	8.11	0.47	10.00	0.66	8.03	0.43	10.30	—	—
	葉身窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	1.02	0.68	0.22	0.65	0.23	0.49	0.28	0.67	0.22	0.43	0.29	—	—
	植物体窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	1.57	0.70	0.32	0.65	0.34	0.47	0.45	0.65	0.34	0.43	0.44	—	—
中干開始時期  移植後 24 と 38 日 (n=24)	LAI	1.23	0.89	0.28	0.86	0.32	0.84	0.34	0.88	0.30	0.84	0.34	—	—
	茎数 (本 m <sup>-2</sup> )	443	0.62	75.80	0.51	85.55	0.43	92.41	0.53	84.20	0.59	78.42	—	—
	地上部乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	108	0.91	22.24	0.90	23.12	0.88	24.93	0.93	19.78	0.89	23.70	—	—
	葉身窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	2.02	0.88	0.47	0.82	0.58	0.80	0.60	0.84	0.55	0.86	0.50	—	—
	植物体窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	2.91	0.89	0.59	0.84	0.70	0.80	0.78	0.86	0.66	0.86	0.66	—	—
幼穂形成初期  移植後 54 または 66 日 <sup>1)</sup> (出穂前 32 から 25 日 : 幼穂形成初期) (n=24)	LAI	3.51	0.66	0.46	0.54	0.54	0.73	0.41	0.69	0.41	0.91	0.44	0.70	0.40
	茎数 (本 m <sup>-2</sup> )	540	0.45	74.50	0.49	71.79	0.79	49.89	0.49	46.64	0.46	73.59	0.70	55.86
	地上部乾物重 (g m <sup>-2</sup> )	388	0.53	68.50	0.38	78.44	0.31	82.34	0.30	83.26	0.61	62.53	0.35	74.67
	葉身窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	3.80	0.60	0.69	0.51	0.76	0.82	0.58	0.66	0.64	0.68	0.62	0.67	0.57
	植物体窒素含量 (g m <sup>-2</sup> )	5.44	0.62	0.85	0.61	0.86	0.74	0.71	0.69	0.77	0.65	0.81	0.81	0.62

推定誤差の値は、二乗平均平方根 (RMSE) を示す。<sup>1)</sup> 日本晴は移植後 66 日、その他の品種は移植後 54 日に計測した。

### 3. 生育形質の測定

植物体の抜き取りによる調査は、各区 8 株を採取して茎数を測定し、8 株のうち茎数の中庸な 2 株について、草丈と主茎の展開上位第 2 葉身の SPAD 値 (SPAD502, コニカミノルタ) を測定し、葉身と茎部に分解した。サンプルは 80℃ で 5 日間通風乾燥し、6 株の全重と 2 株の葉重と茎重を測定し、m<sup>2</sup> あたりの乾物重に換算した。葉身および茎部窒素濃度は、燃焼法元素分析装置 (SUMIGRAPH NCH-22, 住化分析センター) を用いて測定した。葉身および植物体窒素含量は、各乾物重と窒素濃度から算出した。葉面積は、葉面積計 (LI-3100C, LI-COR) を用いて測定した。

### 4. 回帰分析

非破壊計測で得られた値と生育形質のそれぞれの関係を、以下の曲線にあてはめ、回帰式を得た。

$$y = ae^{bx} + c \quad (\text{式 1})$$

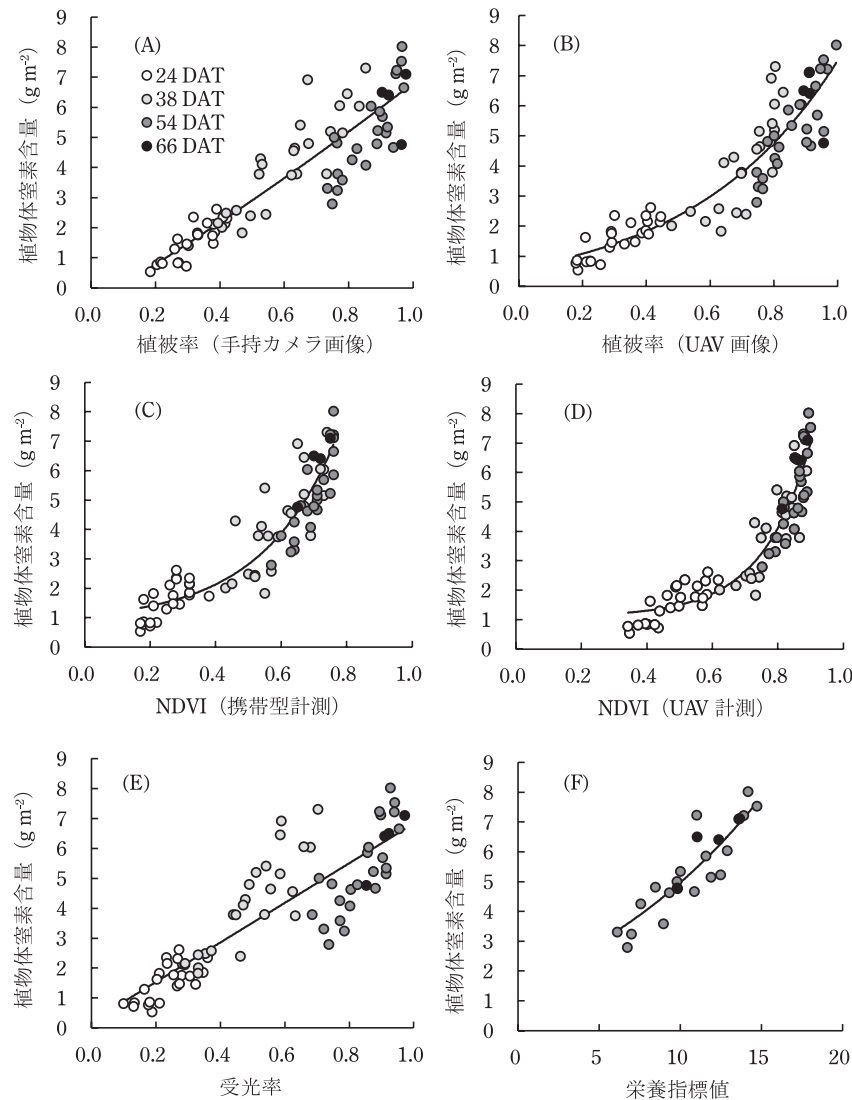
なお、説明変数 (x) を非破壊計測によって得られた値 (手持カメラ画像と UAV 画像の植被率、携帯型計測と UAV 計測の NDVI、受光率) と栄養指標値、目的変数 (y) を生育形質の値 (LAI, 茎数, 地上部乾物重, 葉身窒素含量, 植物体窒素含量) とした。非破壊計測値と生育形質の各

組合せに対し、解析対象とした 4 時期それぞれについて回帰式の係数 a, b および c を推定した。各計測について、移植後 24 日～移植後 54 日または 66 日 (以下、出穂前 32 から 25 日 : 幼穂形成初期) までは 76 データ、移植後 24 と 38 日では 48 データ、移植後 24 日および出穂前 32 から 25 日の各時期では 24 データを用いて解析を行った。解析は、SigmaPlot 13.0 (SYSTAT) を用いて、二乗平均平方根 (RMSE) で示される推定誤差と、回帰式の決定係数 ( $R^2$ ) を求めた。

## 結 果

6 品種および 4 段階の窒素施肥条件での地上部乾物重および植物体窒素含量の推移を第 1 図に示した。出穂日は、「コシヒカリ」、「あきだわら」、「やまだわら」、「とよめき」、「ほしじるし」、「日本晴」でそれぞれ 7 月 29 日、8 月 5 日、8 月 4 日、7 月 29 日、8 月 5 日、8 月 14 日だった。出穂までの生育量や出穂日には、施肥または品種間差があった。

生育形質を非破壊計測値で説明したモデルにおける決定係数 ( $R^2$ ) と RMSE で示される推定誤差を第 1 表に示した。例として、植物体窒素含量と非破壊計測値の関係を第 2 図に示した。非破壊計測値と生育形質の関係性と推定精度を検討するために、生育初期 (移植後 24 日) か



第2図 植被率(手持カメラ画像)(A), 植被率(UAV 画像)(B), NDVI(携帯型計測)(C), NDVI(UAV 計測)(D), 受光率(E), 栄養指標値(F)と植物体窒素含量の関係。回帰曲線は、移植後24日から移植後54または66日(出穂前32から25日: 幼穂形成初期)のデータで求めた( $n=76$ )。栄養指標値=草丈 $\times$ m<sup>2</sup>あたり茎数 $\times$ SPAD値 $\div 10^5$ 。凡例のDATは移植後日数を示す。

ら幼穂形成初期(移植後54または66日: 出穂前32日から25日)までの長期間, 生育初期(移植後24日), 中干開始時期(移植後24日と38日), 幼穂形成初期(移植後54または66日: 出穂前32から25日)の3つの生育時期に分けて解析した。移植24日後～出穂前32から25日において, 手持カメラ画像およびUAV画像の植被率とLAI, 地上部乾物重, 植物体窒素含量の関係では, 回帰式の $R^2$ が0.8以上でよくあてはまっていた(第1表)。また, 携帯型計測およびUAV計測のNDVIとLAI, 葉身窒素含量, 植物体窒素含量の関係では, 回帰式の $R^2$ が0.8以上でよくあてはまっていた。受光率と地上部乾物重の関係では, 回帰式の $R^2$ が0.8以上でよくあてはまっていた。一方, 移植後24日では, 回帰式の $R^2$ が0.7以上となったのは, 手持カメラ画像の植被率と地上部乾物重, 植物体窒素

含量の関係のみであった。また移植後24日と38日において, 手持カメラ画像およびUAV画像の植被率, 携帯型計測およびUAV計測のNDVI, 受光率と茎数を除いた各生育形質の関係では, 回帰式の $R^2$ が0.8以上でよくあてはまっていた。出穂前32から25日では, 携帯型計測のNDVIと地上部乾物重を除いた各生育形質の関係, 受光率とLAIの関係では, 回帰式の $R^2$ が0.7以上でよくあてはまっていた。また栄養指標値は, LAI, 茎数, 植物体窒素含量では, 回帰式の $R^2$ が0.7以上でよくあてはまっていた。

## 考 察

イネ群落の生育量を把握することは, 収量や品質の向上のための栽培管理において重要である。そこで本報告



では、様々な品種および窒素施肥条件で、非破壊計測で得られた値から生育形質を説明できるか検討するために、非破壊計測による生育形質の推定精度を評価した。

幅広い施肥条件で様々な品種を栽培し、解析には生育期間を通じて生育量に幅のあるデータを用いた(第1図)。移植後24日～出穂前32から25日において、各非破壊計測値とLAI、地上部乾物重、植物体窒素含量の関係では、回帰式の $R^2$ が高い傾向があった(第1表)。 $R^2$ が0.8以上で関係性があると示唆された非破壊計測値と生育に関わる形質のRMSEは、LAIでは0.35~0.48 (RMSEを計測値の全体平均値で除したRMSEr: 0.17~0.23)、地上部乾物重では42.07~60.61 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.20~0.29)、葉身窒素含量では0.59~0.64 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.22~0.24)、植物体窒素含量では0.71~0.86 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.19~0.23)となった。これまでの報告では、水稻において、幅広い生育時期における非破壊計測値とLAI (Kanemasuら1985, Yamamoto and Honjo 1993, 柴田ら2002, Xiaoら2002, Evriら2008, Shibayamaら2011, Wangら2013, Maki and Homma 2014, Koら2015, 濱ら2016)、地上部乾物重 (Yamamoto and Honjo 1993, Wangら2013, Koら2015)、葉身および植物体窒素含量 (Inoueら1998, 2012, Takahashiら2000, 柴田ら2002, 佐々木2007, Shibayamaら2009, Wangら2013)との間に関係性が認められており、本報告と同様だった。

水稻栽培における生育診断は、診断目的に応じ、適切な時期に生育形質を評価することが重要である。また異なる生育ステージでは、非破壊計測値と生育形質の関係性や、非破壊計測値による生育形質の推定精度が異なる可能性が考えられる。そこで本報告では、第1表に示したデータセットを用いて、生育時期毎に非破壊計測値と生育形質の関係性と推定精度を検討した。

水稻栽培においては、初期の生育状況に応じて、水田の水管理や追肥などを行う必要性が生じることがある(松島1973)。これまでは農家の経験則による目視で独自の診断を行っていたが、非破壊計測によって生育量を定量的に推定することが出来れば、より精度の高い栽培管理が可能となる。移植後24日では、手持カメラ画像の植被率と、地上部乾物重と植物体窒素含量との間でのみで関係があると示唆された(第1表)。このときの推定誤差は、地上部乾物重では7.48 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.16)、植物体窒素含量では0.32 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.20)だった。手持カメラ画像の植被率が0.3の群落では、回帰式に当てはめると地上部乾物重の推定値42.62 g m<sup>-2</sup>に対して、誤差を含めた推定範囲が、約35.14~50.10 g m<sup>-2</sup>となる。これまでの報告で、水田の水位調整や追肥の必要性などを初期生育量の定量データから判断した例は見当たらないため、この推定誤差が十分かどうかの検証は今後の課題となるであろう。

水田の中干作業は、過剰な分げつを抑制し、適切な穂数および籾数を確保する等の水管理技術である。中干は、

最高分げつ期や目標穂数と同程度の時期(作物学用語辞典2010)、また千葉県半湿田～湿田では、目標とする穂数の8割程度確保した時期(千葉県山武農業事務所改良普及課2017)に開始すること推奨されている。しかしこれまでの中干開始時期調査では、圃場において茎数等の生育形質を計測する必要があり、多大な労力が必要なため簡易計測法の開発が求められている。そこで、移植後24日と38日のデータで検証したところ、全ての非破壊計測値とLAI、地上部乾物重、葉身窒素含量、植物体窒素含量の間に関係性があると示唆された(第1表)。 $R^2$ が0.8以上で関係があった非破壊計測値と、それぞれの生育に関わる形質のRMSEは、LAIでは0.28~0.34 (RMSEr: 0.23~0.28)、地上部乾物重では19.78~24.93 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.18~0.23)、葉身窒素含量では0.47~0.60 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.23~0.30)、植物体窒素含量では0.59~0.78 g m<sup>-2</sup> (RMSEr: 0.20~0.27)だった。これまでの中干開始時期診断は、茎数を指標としており、LAI等の指標は無いため、推定誤差の大きさに関する考察は難しいが、茎数以外を指標として検討する余地はあると考える。一方で、各非破壊計測値と茎数の間には、関係性が認められなかった。非破壊計測値と茎数の関係性に関するこれまでの研究では、移植時期と施肥量を変えた「コシヒカリ」等3品種を用いた移植後17から71日におけるNDVIと茎数では、回帰式の $R^2$ が0.87~0.90でよくあてはまっており、RMSEは約58~71本 m<sup>-2</sup>だった(濱ら2016)。また移植時期と施肥量を変えた「コシヒカリ」等のカメラ画像での植被率と茎数の関係では、回帰式の $R^2$ が0.90だった(望月ら2018)。また0本 m<sup>-2</sup>から中干開始適期の茎数より50本 m<sup>-2</sup>多い茎数の範囲において、RMSEは約29~38本 m<sup>-2</sup>だった。さらに独立したデータセットで推定した茎数のRMSEも約28本 m<sup>-2</sup>となり、植被率を用いた茎数推定モデルの中干適期診断への適応可能性を示唆した。本報告の結果が濱ら(2016)や望月ら(2018)の報告の結果と異なったのは、本報告が同日に移植した、生育ステージが同じ水稻の移植後24と38日のみのデータセットで検討したことが要因の1つとして考えられる。また群落内の茎数が多く、葉面積が拡大するこの時期において、特に生育が旺盛な条件では、非破壊計測による精度の高い茎数推定は難しい可能性があると考えられる。

収量向上や高品質米生産のためには、m<sup>2</sup>あたり籾数を適正な数に制御し、登熟を向上させることが重要である。そのため一般的には、幼穂形成初期には、生育診断による適正な追肥で籾数制御が試みられている。生育診断には、草丈、m<sup>2</sup>あたり茎数、SPAD値の積で求められる指標値が用いられており、この指標値によって植物体窒素含量を推定し、窒素の適正施肥量を決定する(武田1986, 末信ら1994, 荒木ら2005, 堀尾・紺屋2007)。しかし、生育診断には、圃場において多大な労力が必要であり、新たな生育指標と簡易的な計測法が求められている。そこ

で、幼穂形成初期にあたる出穂前 32 から 25 日のデータを用いて、非破壊計測値と生育形質の関係を検討したところ、携帯型計測の NDVI と地上部乾物重を除いた各形質、受光率と LAI との間では、回帰式の  $R^2$  が 0.7 以上で関係性があると示唆された。また栄養指標値と LAI、植物体窒素含量との間では、回帰式の  $R^2$  が 0.7 以上で関係性があると示唆され、植物体窒素含量との関係性が最も高かった（第 1 表）。植物体窒素含量との関係性に着目すると、RMSE で示す推定誤差は、携帯型計測の NDVI では  $0.71 \text{ g m}^{-2}$  (RMSEr: 0.13)、従来から幼穂形成初期の診断で用いられてきた栄養指標値では  $0.62 \text{ g m}^{-2}$  (RMSEr: 0.11) だった。栄養指標値は各非破壊計測値よりも回帰式によくあてはまっており、推定誤差が小さい傾向があった。

携帯型計測の NDVI が 0.75 だった場合、NDVI と植物体窒素含量の回帰式に当てはめると、植物体窒素含量の推定値  $6.73 \text{ g m}^{-2}$  に対して、誤差を含めた推定範囲が  $6.02 \sim 7.44 \text{ g m}^{-2}$  となった。基肥と穂肥量が異なる「あきだわら」のデータセットを用い、籾数を目的変数 (y)、幼穂形成初期の植物体窒素含量、穂肥量を説明変数 (x1 と x2) とした場合の重回帰分析を行った。得られた回帰式より、目標とする籾数が 3.8 万粒のときの植物体窒素含量 ( $6.02 \sim 7.44 \text{ g m}^{-2}$ ) に対する穂肥量を求めると、 $3.70 \sim 5.75 \text{ g m}^{-2}$  となった。本報告で供試している業務・加工用多収品種では、収量  $700 \text{ g m}^{-2}$  以上を達成する総穂肥量は、 $3.0 \sim 4.5 \text{ g m}^{-2}$  (小林・長田 2018, 小林・長田 2020, Yoshinaga ら 2018) とされているため、穂肥量約  $2.0 \text{ g m}^{-2}$  の誤差は、やや大きいと考えられる。本報告の幼穂形成初期では、群落内の茎葉が繁茂しており、植被率、NDVI、受光率の値が各計測値の最大値に近い値となる傾向があった。そのため植物体の生育が旺盛な品種や肥沃な土壤環境、気象条件下においては、より推定誤差が大きくなる可能性が考えられた。よって、非破壊計測において、幼穂形成初期の生育に関わる形質を推定するためには、測定精度の向上だけでなく、品種や地域等の生育特性を把握した上で非破壊計測の利用可能性を検討する必要がある。

以上の結果より、いくつかの非破壊計測で得られた値と生育に関わる形質において、回帰式の  $R^2$  が高く関係性があると示唆されたが、これらの RMSE で示す推定誤差はやや大きいと考えられ、窒素追肥量の決定などの栽培管理に応用するには不十分と推察された。

これまで、水稻の生育や生産性を、気象要素により評価・予測する研究が行われている (村田 1964, Hanyu ら 1966, 杉原・羽生 1980, 堀江・桜谷 1985)。将来的な多収・高品質水稻生産のためには、生育のリアルタイムなセンシング情報だけでなく、気象情報や作物生育モデルを組み合わせた高精度の栽培管理技術の開発が重要である。また、非破壊計測システムは、植物の生育など、人の目で観察可能な形質を、群落レベルで迅速・省力的に検出可能な技術であり、栽培管理だけでなく作物育種など幅広い分

野の発展に大きく貢献すると期待される。

## 引用文献

- 荒木雅登・山本富三・満田幸恵 2005. 有効積算温度と生育診断による暖地水稻の窒素吸収量推定法. 土肥誌 76: 427-433.
- 秋山侃 1996. 分光計測による作物生育診断技術. 日作紀 65: 379-389.
- 千葉県 山武農業事務所改良普及課 2017. フィールドノート平成 29 年 水稻 水管理 (中干し) について. <https://www.pref.chiba.lg.jp/ninaite/network/field-h29/sui-2017-05.html> (2020 年 5 月 5 日閲覧).
- Duan, B., Fang, S., Zhu, R., Wu, X., Wang, S., Gong, Y. and Peng, Y. 2019. Remote estimation of rice yield with unmanned aerial vehicle (UAV) data and spectral mixture analysis. Front. Plant Sci. 10: 204.
- Dusek, D. A., Jackson, R. D. and Musick, J. T. 1985. Winter wheat vegetation indices calculated from combinations of seven spectral bands. Remote Sens. Environ. 18: 255-267.
- Everitt, J.H., Richardson, A.J. and Gausman, H.W. 1985. Leaf reflectance-nitrogen-chlorophyll relations in buffelgrass. Photogramm. Eng. Remote Sensing 51: 463-466.
- Evri, M., Akiyama, T. and Kawamura, K. 2008. Optimal visible and near-infrared waveband used in hyperspectral indices to predict crop variable of rice. J. JASS. 24: 19-29.
- Guo, W., Zheng, B., Duan, T., Fukatsu, T., Chapman, S. and Ninomiya, S. 2017. EasyPCC: Benchmark datasets and tools for high-throughput measurement of the plant canopy coverage ratio under field conditions. Sensors 17: 798.
- 濱侃・早崎有香・望月篤・鶴岡康夫・田中圭・近藤昭彦 2016. 小型 UAV と SfM-MVS を使用した近接画像からの水稻生育モニタリング. 水文・水資源学会誌. 29: 44-54.
- Hanyu, J., Uchijima, T. and Sugawara, S. 1966. Studies on the agro-climatological method for expressing the paddy rice production. Part I. An agro-climatic index for expressing the quantity of ripening of the paddy rice. Bull. Tohoku Nat. Agric. Exp. Stat. 34: 27-36.
- 堀江武・桜谷哲夫 1985. イネの生産の気象的評価・予測法に関する研究. 農業気象 40: 331-342.
- 堀尾光広・紺屋秀之 2007. 水稻の生育・栄養診断への携帯式生育情報測定装置の利用. 農業機械学会誌 69: 8-11.
- 井上吉雄 1997a. 作物・農地の高精度管理のためのリモートセンシング [1] 情報知識集約型作物生産の基礎としてのリモートセンシング - 応用可能性と到達点 -. 日作紀 66: 335-344.
- 井上吉雄 1997b. 作物・農地の高精度管理のためのリモートセンシング [2] 高精度農業管理におけるリモートセンシング手法の将来的展望. 日作紀 66: 511-523.
- Inoue, Y., Sakaiya, E., Zhu, Y. and Takahashi, W. 2012. Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements. Remote Sens. Environ. 126: 210-221.
- Inoue, Y., Moran, M.S. and Horie, T. 1998. Analysis of spectral measurements in paddy field for predicting rice growth and yield based on a simple crop simulation model. Plant Prod. Sci. 1: 269-279.
- 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: 224-235.
- Itano, S., Akiyama, T., Ishida, H., Okubo, T. and Watanabe, N. 2000. Spectral characteristics of aboveground biomass, plant coverage, and plant height in Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) meadows,



- Grassl. Sci. 46: 1-9.
- Kanemasu, E.T., Ransom, J., Saunders, D., Killeen, J. and Yoshida, M. 1985. Use of spectral data to assess wheat response to soil water. *Field Crops Res.* 12: 105-113.
- Ko, J., Jeong, S., Yeom, J., Kim, H., Ban, J. and Kim, H. 2015. Simulation and mapping of rice growth and yield based on remote sensing. *J. Appl. Remote Sens.* 19: 1-17.
- 小林英和・長田健二 2018. 業務・加工用水稲品種「やまだわら」の多収条件. *日作紀* 87: 67-75.
- 小林英和・長田健二 2020. 業務用水稲品種「恋初めし」における最適窒素施肥体系. *日作紀* 89: 16-23.
- Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X., Liu, Y., Liu, B., Ustin, S.L. and Chen, X. 2014. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Res.* 157: 111-123.
- Li, Y., Chen, D., Walker, C.N. and Angus, J.F. 2010. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. *Field Crops Res.* 118: 221-227.
- Lukina, E.V., Stone, M.L. and Raun, W.R. 1999. Estimating vegetation coverage in wheat using digital image. *J. Plant Nut.* 22: 341-350.
- 松島省三 1973. 稲作の改善と技術. 養賢堂, 東京.
- Maki, M. and Homma, K., 2014. Empirical regression models for estimating multiyear leaf area index of rice from several vegetation indices at the field scale. *Remote Sens.* 6: 4764-4779.
- 望月篤・濱侃・鶴岡康夫 2018. スマートフォンカメラを用いた中干開始適期の推定. *日作関東支報* 33, 20-21.
- 村田吉男 1964. 我が国の水稻収量の地域性に及ぼす日射と温度の影響について. *日作紀* 33: 59-63.
- 浪川茉莉・西田瑞彦・高橋智紀・金田吉弘 2016. 携帯型 NDVI 測定機による NDVI 値と水稻窒素吸収量の関係. *土肥誌* 87: 450-454.
- Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, Y., Viña, A., Arkebauer, T. and Rundquist, D. 2012. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agron. J.* 104: 1336-1347.
- 西田瑞彦・浪川茉莉・工藤洋晃・大平陽一・高橋智紀 2018. 生育時期別に異なる高さで測定した携帯型 NDVI 測定機による NDVI 値と極穂重型水稻「いわいだわら」の窒素栄養指標値との関係. *土肥誌* 89: 146-151.
- 齋藤元也・石塚直樹・坂本利弘 2017. 日本における農業リモートセンシング研究の軌跡. *日本リモートセンシング学会誌* 37: 193-203.
- 作物学用語辞典 2010. 日本作物学会編 農山漁村文化協会 東京. 22.
- 佐々木次郎 2007. 高品質・良食味米の生産に向けた生育情報の予測・診断技術への応用. *農業機械学会誌* 69: 12-16.
- 佐々木大・村上則幸・林怜史 2014. 携帯型 NDVI センサの特性と利用の検討. *農作業研究* 49: 155-161.
- 柴田洋一・佐々木良治・鳥山和伸・荒木 幹・浅野修・広川誠 2002. 水稻の局所栽培管理のための画像マッピングシステム. *農業機械学会誌* 64: 127-135.
- Shibayama, M. and Akiyama, T. 1991. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurement. *Remote Sens. Environ.* 36: 45-53.
- Shibayama, M. and Akiyama, T., 1986a. A spectroradiometer for field use. VI. Radiometric estimation of for chlorophyll index of rice canopy. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 433-438.
- Shibayama, M. and Akiyama, T. 1986b. A spectroradiometer for field use. VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 439-445.
- Shibayama, M., Sakamoto, T., Takada, E., Inoue, A., Morita, K., Takahashi W. and Kimura, A. 2009. Continuous monitoring of visible and near-infrared band reflectance from a rice paddy for determining nitrogen uptake using digital cameras. *Plant Prod. Sci.* 12: 293-306.
- Shibayama, M., Sakamoto, T., Takada, E., Inoue, A., Morita, K., Yamaguchi, T., Takahashi, W. and Kimura, A. 2011. Regression-based models to predict rice leaf area index using biennial fixed point continuous observations of near infrared digital images. *Plant Prod. Sci.* 14: 365-376.
- Stavrakoudis, D., Katsantonis, D., Kadoglidou, K., Kalaitzidis, A. and Gitis, I.Z. 2019. Estimating rice agronomic traits using drone-collected multispectral imagery. *Remote Sens.* 11: 545.
- 末信真二・角重和治・山本富三・井上恵子 1994. ヒノヒカリの窒素栄養診断 第2報 草丈・茎数・葉色からの水稻窒素吸収量の推定. *福岡農試研報 A-13*: 5-8.
- 杉原保幸・羽生寿郎 1980. 水稻の気候生産力の評価に関する研究 I. 水稻の気候生産力評価の試み. *農業気象* 36: 71-79.
- Takahashi, W., Nguyen-Cong, V., Kawaguchi, S., Minamiyama, M. and Ninomiya, S. 2000. Statistical models for prediction of dry weight and nitrogen accumulation based on visible and near-infrared hyper-spectral reflectance of rice canopies. *Plant Prod. Sci.* 3: 377-386.
- 武田敏昭 1986. 福島県における水稻の生育診断および生育予測技術開発に関する土壌肥料の研究. *福島農試特研報* 3: 1-118.
- 田中圭・近藤明彦 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稻生育マップの作成. *日本リモートセンシング学会誌* 36: 373-387.
- 鳥山和伸 2009. 非破壊的手法による作物栄養診断の最前線 1. 水稻: リモートセンシングによる窒素栄養診断. *土肥誌* 80: 66-74.
- Wang, Y., Wang, D., Zhang, G. and Wang, J. 2013. Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method. *Field Crops Res.* 149: 33-39.
- Wiegand, C.L., Gerbermann, A.H., Gallo, K.P., Blad, B.L. and Dusek, D. 1990. Multisite analyses of spectral-biophysical data for corn. *Remote Sens. Environ.* 33: 1-16.
- Wiegand, C.L., Maas, S.J., Aase, J.K., Hatfield, J.L., Pinter, Jr. P.J., Jackson, R.D., Kanemasu, E.T. and Lapitan, R.L. 1992. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sens. Environ.* 42: 1-21.
- Wiegand, C.L., Shibayama, M., Yamagata, Y. and Akiyama, T. 1989. Spectral observations for estimating the growth and yield of rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 58: 673-683.
- Xiao, X., He, L., Salas, W., Li, C., Moore III, B., Zhao, R., Froelking, S. and Boles, S. 2002. Quantitative relationships between field-measured leaf area index and vegetation index derived from VEGETATION images for paddy rice field. *Int. J. Remote Sens.* 23: 3595-3604.
- Yamamoto, H. and Honjo, H. 1993. Evaluation of the leaf area index and the biomass of crop canopies by spectral reflectivity. *J. Agr. Met.* 48: 871-874.
- Yoshinaga, S., Heinai, H., Ohsumi, A., Furuhashi, M. and Ishimaru, T. 2018. Characteristics of growth and quality, and factors contributing to high yield in newly developed rice variety 'Akidawara'. *Plant Prod. Sci.* 21: 186-192.

**Estimation Accuracy of Growth Traits in Rice using Nondestructive Sensing** : Yumiko ARAI-SANO<sup>1)</sup>, Masaki OKAMURA<sup>2)</sup>, Kunio TATEISHI<sup>2)</sup>, Shiori YABE<sup>1)</sup>, Hitoshi OGIWARA<sup>1)</sup>, Hiroe YOSHIDA<sup>3)</sup>, Satoshi YOSHINAGA<sup>2)</sup> and Nobuya KOBAYASHI<sup>1)</sup> (<sup>1)</sup>*Institute of Crop Science, NARO*; <sup>2)</sup>*Central Region Agricultural Research Center, NARO*; <sup>3)</sup>*Institute for Agro-Environmental Sciences, NARO*)

**Abstract** : Twenty-four treatments consisting of combinations of four nitrogen application levels and six rice (*Oryza sativa* L.) cultivars with high yield and / or high eating quality were examined. The accuracy was evaluated for the estimation of growth traits (leaf area index (LAI), number of tillers, dry weight, nitrogen content of leaf and nitrogen content of plant) by nondestructive sensing data (vegetation cover rate, normalized difference vegetation index (NDVI) and light interception rate). The relationships and estimation accuracy based on data set obtained at 24, 38, 54, 66 days after transplanting (DAT) were evaluated. The coefficient of determination ( $R^2$ ) of regression equation between vegetation cover rate and LAI, dry weight and nitrogen content of plant, NDVI and LAI, nitrogen content of leaf and nitrogen content of plant, light interception rate and dry weight were more than 0.8 from 24 DAT to 54 and / or 66 DAT (panicle initiation stage (PI)). In addition, the  $R^2$  of regression equation between vegetation cover rate of handheld camera and dry weight and nitrogen content of plant at 24 DAT, and all nondestructive sensing data and growth traits except number of tillers at 24 and 38 DAT were more than 0.7. At PI, the  $R^2$  of regression equation between NDVI of handheld sensor and growth traits except dry weight, and light interception rate and LAI were also more than 0.7. It was suggested that root mean square error (RMSE) tended to be large, while there were relationships between these nondestructive sensing data and growth traits.

**Key words** : Growth, Light interception rate, NDVI, Rice, Sensing, Vegetation cover rate.

---