水稻植被状態の地上画像計測における観測角度の特性検討

A Study of the characteristic of the observation angle on the terrestrial image measurement of paddy vegetation cover

高橋 一義*・力丸 厚**・坂田 健太**・遠藤 重紀***

Kazuyoshi TAKAHASHI, Atsushi RIKIMARU

Kenta SAKATA and Shigenori ENDOU

Abstract : Vegetation coverage is one of the well-known parameters indicating the growth of rice plants. It is usually calculated as a ratio of the extracted visible green area of plants, the green visibility ratio, in a camera image using the vertical photography. However, early in the season, growth is mostly vertical and therefore a near-vertical observation angle doesn't observe vegetation coverage sensitively. But, a near-horizontal angle of observation can observe vertical and horizontal growth and allow early season monitoring of vegetation coverage. In this paper, the green visibility ratios were calculated by the visible green areas in different observation angles (the range of the observation angle 0.0 degrees to 22.0 degrees) using camera image data taken from vertical photography during the growing period. The relationship between the green visibility ratio and the observation angle was analyzed. As a result of this analysis, the green visibility ratio was increased with the increase in the observation angle and the according to the progress of growth. In addition, the range of the observation angle with the green visibility ratio almost equivalent as the vegetation coverage was decreased rapidly with the progress of growth in 40 to 50 days after transplanting.

Keywords : 植被率, 緑視率, 鉛直撮影画像, 生育情報

1. はじめに

従来からの水稻の生育調査方法は、慣行的に稲株の草丈、茎数、葉色の直接計測によりなされている。しかし、ひと株ずつ計測する手法のため稲株の個体差や生育条件に起因する生長のバラツキの評価が難しく、計測結果の空間代表性が低い。このため、計測の再現性や記録性を高めることを目的として稲株の生育を簡便に計測する手法が研究されている（堀尾ら，2002；林ら，1993；佐藤ら，1993）。その一つに植被状態に着目した水稻植被率計測がある。植被率は、作物茎葉の繁茂程度を表す指標で、作物茎葉を水平面へ正射投影した茎葉領域、すなわち植被領域の単位面積あたりの占有率として定義される。この手法では、複数の稲株

を同時計測し画像記録するため計測の再現性が高く、空間代表性の高い計測結果が取得可能である。水稻植被率と水稻の生理状態との関係に関しては、移植後から出穂期の期間において水稻植被率が葉面積指標や稲株の窒素含有量と相関が高いことが報告されている（佐藤ら，1993；竹峰ら，2007）。

一般に水稻植被率の地上画像計測では、稲株直上からカメラ撮影した画像を利用することが多い。画像上では、位置により観測角度が変化する。また、稲株は水平のみならず垂直方向に大きく生長する。このため、観測角度が変化すると撮影される稲株の部位やその割合が変化する。

鉛直軸を基準に観測角度を考えると、カメラ画像内においてカメラの投影中心から直下に近い計測領域では、稲株の鉛直方向に伸びる葉や茎にくらべ、水平方向に伸びる葉が卓越して観測される。このため、水平方向へ広がる葉面が稲株緑視領域として観測される。この時の稲株緑視領域は、植被領域とほぼ合致する。また、観測角度が大きい画像内周辺部の計測領域では、

* 福島工業高等専門学校

** 長岡技術科学大学

*** 茨木大学工学部

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 50, NO. 6, 2011

水平方向へ生長する葉面とともに垂直方向に生長する茎や葉面が稲株緑視領域として観測される。

このため、水平方向への生長が小さく、鉛直方向の生長が卓越する生育初期では、観測角度が大きい画像内周辺部の計測領域の方が、カメラの投影中心直下周辺領域にくらべ、高い観測感度で生育状態の計測が可能と考えられる。

しかし、隣接する稲株同士の茎葉が重なるにつれ、植被領域の変化にくらべ稲株緑視領域の変化は小さくなり、稲株緑視領域が飽和して植被率計測が不能な状態になると考えられる。

このことから、生育初期においては観測角度が大きい画像内周辺部の計測領域を利用し、生長にともない鉛直計測領域が多くなる画像中心部を利用するというように、水稻の生育に合わせて観測角度の異なる撮影画像領域を組み合わせて利用することが、効率的な水稻植被率を地上画像計測する上で必要である。

本論文では、水稻植被率を地上画像計測する際、観測角度により稲株緑視領域がどう変化するか、高さ2.6 mから鉛直撮影された水稻撮影画像を用いて調べた結果を報告する。そして、生育にともない稲株緑視領域が植被領域とみなせる観測角度が、どう変化するのか推定し効率的な水稻の生長情報収集のための基礎検討を行った。なお、観測角度により変化する稲株の緑視領域を稲株緑視領域と定義し、単位面積あたりの稲株緑視領域の比率を稲株緑視率とする。

2. 材料と方法

2.1 水稻の植被画像取得と生育データ

水稻の画像は、新潟県農業総合研究所の試験圃場内の一角に水稻の生育観測を目的として設置された観測やぐら（高橋ら、2010）のデジタルカメラにより撮影されたものを用いた。このデジタルカメラは、木村応用工芸社製の植被率カメラで近赤外光を撮影するよう市販カメラを改造したものである。画像は観測やぐらの計測レール下をカメラが移動する際、5秒間隔で鉛直撮影されたものである。ここで、撮影時の計測レールの水平位置は、稲株と稲株の中央に位置している。また、画像撮影時のカメラの高さは2.6mである。

本論文では、2009年6～8月に取得された水稻画像の中から画像内が同一栽植密度、60株/坪(18.2株/m²)である画像を各観測日につき1枚、選択し解析に用い

表1 画像撮影条件

カメラ	木村応用工芸社製 (Canon PowerShot A620ベース)
画素数	3072×2304
撮影時の焦点距離	7.3(mm)/35(35mm 換算値)
画像記録形式	JPEG

表2 水稻生育調査結果

観測日	6/19	6/23	6/26	6/30	7/3	7/7	8/4
草丈[cm]	33	38	44	51	55	63	106
茎数[本/株]	17	22	24	29	30	30	23

た。なお、画像撮影範囲の株間は18cm、条間隔は30cmである。撮影対象の水稻は、2009年5月14日に移植されたコシヒカリである。画像の撮影条件を表1、画像撮影同日に稲株の草丈と茎数を調査（6月22日については、翌日に実施）した結果を表2に示す。表2より撮影範囲内の水稻の最高分げつ期（農山漁村文化協会、2000）が7月3日～7日付近であることがわかる。

2.2 観測角度の算出と稲株緑視率算出領域の設定

まず、画像内において観測角度を算出するにあたり計算を単純にするため、(1)撮影画像はレンズ歪の無い理想的な中心投影画像、(2)カメラの光軸は鉛直、(3)カメラレンズは、水田面から高さ2.6mの位置にあり、(4)水田面は水平であると仮定した。つぎに、稲株一つ一つが確認できる水稻画像（6月19日）を用いて撮影スケールを算出した。撮影スケールは、鉛直撮影条件に近い画像中央に写っている稲株間の画素数と条間隔から算出した。そして、図1に示すように稲株の栽植間隔を考慮し稲株1つ分の占有面積（550cm²）に相当する長方形領域を基準に、画像中央から稲株緑視率算出領域を7通り設定した。各領域の面積は、稲株1、4、9、16、25、36、49株分に相当する。また、株間方向の領域の大きさから各領域の観測角度の範囲を算出し、その最大値をその領域の観測角度の代表値とした。各領域の観測角度の範囲は、領域①0～3.3度、領域②3.3～6.6度、領域③6.6～9.8度、領域④9.8～13.0度、領域⑤13.0～16.1度、領域⑥16.1～19.1度、領域⑦19.1～22.0度となった。

2.3 稲株緑視率の算出方法

水稻画像において、稲株緑視領域と土壌や水面など

図1 稲株緑視率算出領域（7領域）の配置

の背景領域を判別した。まず、固定しきい値法と動的しきい値法（楦リンクス，2004）を併用して大まかに画像を二値化処理した。つぎに、目視判読により誤判別領域を修正することで、稲株緑視領域判別結果を得た。その後、解析領域の稲株の生育は均一であると仮定し、前述した稲株緑視率算出領域ごとに稲株緑視領域の画素数と領域内の全画素数の比から稲株緑視率を算出した。この際、稲株緑視率算出値が領域の位置設定により変動することを低減するため、図1に示した設定位置を基準に各稲株緑視率算出領域を条間および株間方向に局所移動させ、稲株緑視率の平均値と標準偏差を算出した。各稲株緑視率算出領域における稲株緑視率は、平均値を採択した。算出時に稲株緑視領域を局所移動させた範囲は、条間および株間方向それぞれ条間、株間間隔の半分とした。なお、本論文では、観測角度が0～3.3度と最も小さい領域①を鉛直計測領域とみなし、その稲株緑視領域を植被領域とした。そして、植被領域とした領域①の稲株緑視率を植被率とした。

3. 結果および考察

3.1 稲株緑視領域の判別と稲株緑視率の算出結果

前述した手順により観測日ごとに水稻画像から稲株緑視領域を判別した。その結果を図2に示す。図中の黒色部分が稲株緑視領域を表す。図2より生育の進行にともない、水稻の茎葉が繁茂してゆく様子が見てとれる。とくに、7月7日と8月4日の画像では、画像中央から周縁部に向かい稲株緑視領域が増加する様子が確認できる。観測日ごとの稲株緑視領域判別結果を

図2 観測日ごとの稲株緑視領域判別結果

表3 観測角度ごとの稲株緑視率算出結果

単位は%，上段は平均値，下段は標準偏差を表す

観測日	観測角度 θ (度)						
	3.3	6.6	9.8	13.0	16.1	19.1	22.0
6/19	12.3 (2.0)	12.2 (1.4)	12.1 (1.8)	12.1 (2.3)	11.9 (2.9)	13.5 (2.8)	15.7 (2.2)
6/22	22.6 (2.1)	22.3 (2.1)	22.7 (3.3)	24.0 (4.4)	23.4 (5.2)	24.4 (4.7)	27.1 (3.8)
6/26	23.4 (2.2)	23.7 (2.6)	24.3 (3.5)	25.8 (4.7)	25.7 (5.0)	27.6 (4.8)	30.4 (4.2)
6/30	38.1 (2.2)	39.2 (2.9)	38.6 (3.5)	39.7 (5.5)	38.8 (5.1)	41.3 (4.7)	45.2 (3.0)
7/3	38.6 (2.1)	39.3 (2.5)	39.8 (3.9)	41.5 (6.7)	40.7 (5.9)	43.4 (5.3)	47.4 (3.4)
7/7	39.7 (3.2)	45.5 (3.0)	45.9 (4.1)	49.7 (6.2)	53.6 (3.6)	54.9 (5.2)	54.7 (4.4)
8/4	65.4 (3.6)	67.4 (6.2)	69.6 (6.4)	75.8 (3.6)	79.1 (1.5)	81.9 (1.1)	86.1 (0.8)

用いて前述の方法により、領域ごとに稲株緑視率を算出した。各観測日の観測角度ごとの稲株緑視率の一覧を表3に示す。表3中の（ ）内の数値は、各領域における稲株緑視率の標準偏差を示す。植被率とみなす領域①（観測角度3.3度）の場合、6月19日から8月4日の期間内で、稲株緑視率算出領域の位置設定によって、約2～4%の範囲で値が変動することがわかる。なお、期間内の植被率の標準偏差の平均値は2.5%であった。

3.2 観測角度と稲株緑視率の関係

観測日ごとの観測角度と稲株緑視率の関係を図3に

図3 観測角度と稲株緑視率の関係

示す。これより、6月19日を除き、観測角度の増加にともない稲株緑視率が増加する傾向が確認できる。また、生育の進行にともない、その傾向が強くなることも確認できる。6月19日については、観測角度16.1度までは稲株緑視率がほぼ一定値となるものの、観測角度19.1度以降、稲株緑視率が増加している。鉛直計測領域とした観測角度3.3度と観測角度22.0度の稲株緑視率の期間増加量（6月19日から8月4日）を算出すると、それぞれ53.1%と70.4%となった。このことから、鉛直計測領域よりも観測角度の大きい領域の方が生育にともなう稲株緑視率の期間増加量が大きいことがわかる。

ここで、観測角度に対して明確に稲株緑視率の増加傾向が確認できる6月22日以降のデータを用いて、観測日ごとに観測角度の増加量と稲株緑視率の変化量の関係を式(1)に示す線形回帰モデルで表すことを考える。

$$D_{\theta} = k_i \cdot A_{\theta} \quad (1)$$

D_{θ} は、植被率（領域①の稲株緑視率）からの稲株緑視率の変化量（%）、 A_{θ} は鉛直撮影とみなした領域①の観測角度（3.3度）を基準にした観測角度の増加量（度）である。また、 k_i は観測日*i*の線形回帰係数で単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量（%/度）を表す。なお、観測角度を θ （度）、観測角度 θ の時の稲株緑視率 V_{θ} （%）とすると、 A_{θ} と D_{θ} は、つぎのようになる。

表4 観測日ごとの線形回帰係数（ k_i ）と相関係数

観測日	移植後 日数 t （日）	単位観測角度あたりの 稲株緑視率の変化量 k_i （%/度）	相関係数
6/19	37	—	—
6/22	40	0.15	0.859
6/26	44	0.29	0.933
6/30	48	0.24	0.802
7/3	51	0.34	0.896
7/7	55	0.94	0.966
8/4	83	1.05	0.991

$$\left. \begin{aligned} A_{\theta} &= \theta - 3.3 \\ D_{\theta} &= V_{\theta} - V_{3.3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

観測日ごとの線形回帰係数（ k_i ）と観測角度の増加量と稲株緑視率の変化量の相関係数の一覧を表4に示す。表4より、本論文の解析範囲である観測角度22.0度までは、観測角度の増加と稲株緑視率の変化量の相関は高く（正の相関）、両者の関係を線形式で表すことが可能であることがわかる。また、移植後日数の経過にともない、単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量が大きくなることがわかる。このことから、生育にともない鉛直計測とみなせる観測角度の範囲が減少することがわかる。

3.3 鉛直計測領域とみなせる観測角度の検討

ある移植後日数*t*における単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量 k_t を推定できれば、式(1)により移植後日数*t*における観測角度の増加に対応する稲株緑視率の変化量が算出できる。そこで、6月22日から8月4日までの移植後日数と単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量の関係を式(3)の線形回帰モデルで表し、鉛直計測領域とみなせる観測角度の範囲を推定した。図4に6月22日から8月4日までの移植後日数と単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量の関係を示す。単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量が移植後日数55日を境に変化しているものの、6月22日から8月4日のデータを用いて線形回帰計算した。その結果、線形回帰係数は、 $\beta_1 = 0.022$ （%/度・day）定数項は、 $\beta_2 = -0.65$ （%/度）となった。

$$k_t = \beta_1 \cdot t + \beta_2 \quad (3)$$

鉛直計測領域とみなせる観測角度の範囲を判定する

図4 移植後日数と単位観測角度あたりの稲株緑視率の変化量の関係

には、植被率が算出領域の位置設定により変動する範囲を考慮する必要がある。本論文では、前述したとおり領域①の稲株緑視率を植被率としている。そこで、領域①における稲株緑視率算出時の標準偏差 T に着目し、式(1)、(3)から算出した観測角度の増加に対する稲株緑視率の変化量が T 以下になる観測角度の範囲を鉛直計測領域と判定した。前述したように、本論文における植被率は、算出領域の位置設定により約2～4%の範囲で変動している。ここで、計算を単純にするため観測期間内の平均値2.5%を T とした。

移植後40～80日まで5日間隔で鉛直計測領域とみなせる観測角度の範囲を推定した結果、鉛直計測領域とみなせる観測角度の範囲は、移植後40日で13.0度（領域④）まで、45日で9.8度（領域③）まで、50～60日では、6.6度（領域②）まで、65日以降は、3.3度（領域①）となった。この結果は、現地において植被率を鉛直撮影画像から画像計測する際のひとつの目安になると考える。

4. まとめ

本論文では、高さ2.6mから鉛直撮影した水稻植被画像を用いて、観測角度により稲株緑視率がどう変化するか調べた。その結果、移植後40～83日の期間、観測角度22.0度までは、観測角度の増加にともない、稲株緑視領域あるいは稲株緑視率が増加する傾向があり、両者の関係を線形モデルで表すことが可能である

ことがわかった。また、観測角度の増加に対する稲株緑視率の増加量は、生育にともない大きくなることがわかった。しかし、稲株が小さい移植後40日程度では、観測角度の増加に対する稲株緑視領域の変化が小さく、観測角度の増加にともなう稲株緑視率の増加が明確には確認できなかった。そのため、生育初期においては、より大きな観測角度をもつ観測データを用いて、観測角度と稲株緑視率の関係を調べる必要がある。また、鉛直計測領域とみなされる観測角度の範囲は、移植後40日から50日の間に、画像中央の4条分（16株）の面積を計測する13.0度から、2条分（4株）の面積を計測する6.6度へ急速に減少することがわかった。

（受付日2011.10.7，受理日2011.11.11）

参考文献

- ㈱リンクス画像システム事業部，2004. HALCO 活用
法，㈱リンクス出版事業部，pp.61-64.
- 佐藤 勉，林 恒夫，岩田忠寿，1993. 画像解析を利用
した水稻の生育診断技術 第2報 葉面積指数及び
植被率を指標とした生育診断と制御技術. 福井県農
業試験場研究報告，pp.19-26.
- 高橋一義，和泉勇希，樋口泰浩，2010. 水稻群落上か
らのレーザスキャナ計測による生育推定に関する検
討. 第48回日本リモートセンシング学会学術講演会
論文集，pp.185-186.
- 竹峰秀祐，力丸 厚，高橋一義，樋口泰浩，2007. 簡
易画像計測法を用いた水稻植被率による稲体窒素量
の推定に関する基礎研究. 写真測量とリモートセン
シング，Vol. 46，No. 4，pp.61-65.
- 農山漁村文化協会，2000. 稲作大百科Ⅲ基本技術/生育
診断，p.369.
- 林 恒夫，佐藤 勉，酒井 究，岩田忠寿，笈田豊彦，
間脇正博，斎尾乾二郎，二宮正士，吉田隆亮，1993.
画像解析を利用した水稻の生育診断技術. 福井県農
業試験場研究報告，pp. 9-18.
- 堀尾光広，西村 洋，市川友彦，林 和信，後藤隆志，
飯塚勝弘，田中秀樹，奥西陽平，2002. 携帯型作物
生育情報測定装置の開発. 日本作物学会紀事，71(2)，
pp.126-127.
- 謝辞 本研究の一部は、科研費（21780237）の助成を
受けたものである。