分光反射特性に基づくクズ優占群落の葉面積指数の推定と その空間分布の経時的評価への応用*

岩本啓己^{★1,2}・渡邊 修³

要 約：無人航空機 UAV (unmanned aerial vehicle) によるリモートセンシングでは植物群落の高解像度の面的データを経時的に取得でき、雑草群落モニタリングへの応用が期待される。本研究では UAV で取得した群落表層の分光反射特性から算出した植生指数によってクズ (*Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi) 優占群落の LAI を推定し、その推移と空間分布特性を評価した。2018 年 6 ~ 10 月に河川敷 (40 m × 30 m) のクズ優占群落を対象にマルチスペクトル画像を計 5 回取得し、オルソモザイク画像を 50 cm × 50 cm のグリッドに分割した。3 種類の植生指数から各調査日におけるクズ群落の LAI を推定する重回帰式を得た。その結果、10 月の推定精度は低かったが (調整済み $R^2 < 0.2$)、6 ~ 8 月では調整済み R^2 が 0.42 ~ 0.57 の範囲で LAI を植生指数から推定することができた。また、得られた重回帰式から群落の LAI の経時変化を評価したところ、LAI は 7 ~ 8 月に群落中央部で低下し、高い値が集積する箇所は群落中央部から周縁部へと移動していた。この変化は夏季に葉を更新する際、より高次の分枝に新たに葉を展開する過程で生じたものと考えられた。以上のように UAV で取得した群落表層の分光反射率から、クズ群落の空間分布特性が明らかになった。

キーワード：無人航空機 (UAV)、群落動態、クズ、LAI 推定、空間分布

緒 言

雑草の侵入への対応としてはまず早期発見および根絶、ついで拡大の抑制が重要とされる (Auld and Johnson 2014)。マメ科多年生蔓性植物であるクズ (*Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi) は原産地の日本において広く分布しているほか、近年はアメリカ南東部をはじめとした海外にも分布を拡大し、草地・林地・道路・河川などの環境に蔓延して管理上の問題となっている (伊藤 2018)。クズは越年茎や着根節から発

生した当年茎が夏季に急速に伸長することで (津川・佳山 1981a)、占有範囲を拡大する。そのためクズの拡大抑制において費用対効果を高めるには、その生育と空間分布に基づいてリソースを配分し、当年茎の生長を抑えることが重要である。シミュレーションによってクズの空間分布を評価した例としては Hughes *et al.* (2014) や Aurambout and Endress (2018) があるが、実際の野外の群落を対象に面的データに基づいて群落動態を評価した例は無いため、植生モニタリングに基づく評価を行うことが求められる。

リモートセンシングは地表面の分光反射特性を測定することで非破壊的・経時的に植生の面的情報を得ることができ、植生モニタリングの手段としての利用が進められている。農学分野で利用されているリモートセンシング技術のうち、分光反射特性から植生の葉面積指数 (LAI: Leaf Area Index) やバイオマス量を推定する技術は、主に作物 (井上ら 2008) や牧草 (川村・秋山 2012) の生育状態の評価に利用されている。雑草群落を対象にした例としては、渡辺ら (2005) が航空機で観測した分光反射率から水田畦畔や道路法面の植生バイオマス量を推定し、高橋・安岡 (2006) が地上で観測した分光反射率から河道内植生の LAI を推定しているが、作物や牧草ほど導入が進んでいるとは言い難い。その背景としては、雑草は作物や牧草に比べ分布が局所的かつ生長や分布拡大が早いために人工衛星や航空機では雑草群落の判別に堪える時間的・空間的分解能を得られないことや、種類が多くターゲットを絞りにくいことが挙げられる。このため、雑草の生育状況をリモートセンシングによって評価するには、時間的・空間的に高い分解能を持つ画像データが求められる。

近年利用が広がっている無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) は撮影範囲が限定されるが、高頻度の観測と高解像度のデータの取得が可能になるため、実際の雑草管理に近い時間的・空間的スケールでのモニタリングが可能となる。UAV の普及により時間的・空間的分解能の高いデータを得られるようになったことでリモートセンシング技術の雑草モニタリングへの活用の道が開かれ (渡邊 2016)、実際に画像から雑草を検出する試みがなされている (Lopez-Granadoz *et al.* 2016; Alexandridis *et al.* 2017; Louargant *et al.* 2017)。観測対象としたクズは他植物によじ登ってその上に大きな葉を展開するため、空撮画像からの検出が可能である (岩本・渡邊 2020)。クズ群落は急速に生長するため、観測頻度を高めることで群落の動態評価が可能となる。ゆえに UAV で測定し

* 本論文の内容の一部は日本リモートセンシング学会第 65 回 (平成 30 年度秋季) 学術講演会 (2018 年 11 月) および日本雑草学会第 58 回大会 (2019 年 4 月) で発表した。

1 信州大学大学院総合工学系研究科

2 現：福井県食品加工研究所

〒910-0343 福井県坂井市丸岡町坪ノ内 1-1-1

★ h-iwamoto@fklab.fukui.fukui.jp

3 信州大学農学部

(2019 年 11 月 30 日受付, 2021 年 5 月 20 日受理)

た群落表層の分光反射率の取得は、クズの生育と空間分布の評価に有用と考えられる。

本研究では、UAVを用いて経時的に観測したクズ群落の分光反射特性からLAIを推定し、その空間分布を評価する手法が、クズの生育特性や管理方法を検討する上で有用であること示す。まず、UAVに搭載したマルチスペクトルカメラで観測した分光反射率から、クズ群落のLAIを推定するモデル式を構築した。次いで、開発したモデルを用いて群落の経時的なLAIの推移を推定し、その空間分布特性を考察することでクズ群落の空間動態と管理方法について検討した。

材料および方法

1. 現地調査

2018年6月4日、7月2日、7月20日、8月18日、10月2日の計5回、調査は長野県伊那市美篋の三峰川河川敷のクズ優占群落（北緯35.823°、東経137.992°、東西約60m、南北約40m）（第1図）を対象に行った。調査時期はそれぞれ、当年茎が発生する時期、当年茎が伸長して広範囲を占有する時期、当年茎の葉が最も盛んに展開する時期、当年茎の生長が鈍化する時期、根に炭水化物が転流する時期にあたる（大林1979; 津川・佳山1981a; Rashid *et al.* 2017）。調査地ではクズに加えススキ（*Miscanthus sinensis* Anderss.）やヨモギ（*Artemisia princeps* Pampan.）が生育していた。なお調査範囲の北東部から南西部にかけて作業用通路が設けられており、7月下旬（7月20日の調査後）に拡幅のため、バックホーでの踏圧・引きむしりによる除草が1回行われた。

RGBカメラZenmuse X4S（DJI）および4波長域（緑（G）：550 ± 40 nm、赤（R）：660 ± 40 nm、レッドエッジ（RE）：735 ± 10 nm、近赤外線（NIR）：790 ± 40 nm）の非圧縮画像を取得可能なマルチスペクトルカメラParrot Sequoia（Parrot）をUAV Inspire 2（DJI）に搭載し、晴天時の午前10時ごろに地上50mから群落を撮影した。画像の空間解像度はRGBカメラで約1.65 cm/pixel、マルチスペクトルカメラで約4.68 cm/pixelであった。飛行管理アプリGS Pro（DJI）を用いてRGB画像のオーバーラップ率が80%となるようルートを設定して自動で飛行させ、同時にマルチスペクトルカメラを用いて3秒間隔で撮影した。また、撮影範囲内に50 cm × 50 cm 枠を10ヶ所設置し、坪刈りによってクズの葉面積を測定し葉面積指数（LAI）を算出した。なお、7月20日分のみ1ヶ所のサンプリングに不備があり、正確な葉面積を測定することができなかったため、9ヶ所のクズのLAIを算出した。

2. 分光反射特性に基づくクズ優占群落のLAIの推定

撮影した画像は画像処理ソフトウェアPix4Dmapper（Pix4D）によって貼り合わせと幾何補正、輝度補正を行った。幾何補正は撮影範囲内にある特徴的な構造物（柵、ブロックなど）を基準点とし、その座標（平面直角座標系第8

第1図 調査を実施した長野県伊那市美篋の三峰川河川敷のクズ群落（撮影日：8月18日）

（注記）広域地図は地理院タイルの電子国土基本図に依った。図中のグリッドのサイズは50 cm × 50 cmである。

系）を国土地理院のウェブサイト（国土地理院2019）から取得して行った。輝度補正は撮影範囲内に置いた白色反射板を基準に行った。

LAIを推定するにあたり、各波長域の分光反射率から正規化植生指数（NDVI: Normalized Difference Vegetation Index）、正規化差レッドエッジ指数（NDRE: Normalized Difference Red Edge）、土壌補正植生指数（SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index）の3種類の植生指数を算出し、それぞれのオルソモザイク画像を得た。植生指数は複数の波長域の反射率から算出される指数で、日照条件の変動や対象の構造的特徴による干渉の影響を軽減でき（Jones and Vaughan 2010）、LAIやバイオマス量

などの植生の 3 次元的情報を推定するのに適している。

NDVI はクロロフィルに吸収されやすい赤色光と吸収されにくい近赤外線の反射率から算出され、LAI やバイオマス量の推定に早くから用いられてきた指数であり、式 (1) のように表される (Rouse *et al.* 1974)。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

ここで NIR は近赤外線の、R は赤色光の反射率である。

NDRE はクロロフィルに対して鋭敏に反応する指数であり、式 (2) のように表される (Gitelson and Merzlyak 1997)。

$$NDRE = \frac{NIR - RE}{NIR + RE} \quad (2)$$

ここで RE はレッドエッジの反射率である。

SAVI は土壌の反射率による影響を低減するために考案された指数であり、式 (3) のように表される (Huete 1988)。

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - R)}{NIR + R + L} \quad (3)$$

ここで L は定数であり LAI によって調整されるが、今回は幅広い値の LAI に適する $L=0.5$ を採用した (Huete 1988)。これら 3 種類の植生指数のオルソモザイク画像を地理情報システム QGIS 3.10 に取込み、坪刈りを行った範囲の各植生指数の平均値を算出した。

統計ソフトウェア R ver. 3.4.4 (R Core Team 2018) を用い、目的変数を LAI、説明変数を NDVI、NDRE、SAVI の 3 種類とし、LAI を推定する重回帰式を構築した。モデル選択は AIC によるステップワイズ法によって行った。得られたモデルのあてはまりの良否は自由度調整済み決定係数によって評価した。なお、各グリッドの分光反射率には、クズ以外の植物による反射も含まれることに留意しなくてはならない。複数の植物種が混在する群落から厳密にクズのみの分光反射特性を得ることは技術的に困難である。そのため、植生指数からの推定結果はクズ優占群落の LAI として評価した。

前報 (岩本・渡邊 2020) にて QGIS 上で対象群落を 50 cm グリッド (3221 個) に分割し、RGB 画像の輝度値に基づき教師あり学習でクズの在・不在を判別した。そのうちクズが存在すると判別されたグリッドについて、植生指数から LAI を推定した。ただし 6 月 4 日は教師あり学習による判別の精度が低かったため、目視でクズが存在すると判別されたグリッドについて推定を行った。また、10 月 2 日のデータに関しては、十分な推定精度のモデルが構築できなかったため、LAI の推定を行わなかった。その上で 2018 年 6 月 4 日～7 月 2 日、7 月 2 日～7 月 20 日、7 月 20 日～8 月 18 日の 3 期間について、グリッドごとの葉群の生長速度 (= LAI の差

／日数) を算出した。なおクズが存在しないと判別されたグリッドについては、LAI の値を 0 として計算した。また、後述のように 10 月 2 日の LAI を良好な精度で推定するモデルが得られなかったため、8 月 18 日～10 月 2 日のグリッドごとの葉群の生長速度の算出は行わなかった。

3. LAI の推定値に基づくクズ優占群落の空間分布特性の評価

Getis-Ord の G_i^* 統計量に基づいて LAI の高い値および低い値が集積している箇所を特定した。この統計量は、観測点の位置を考慮した局所的な空間的自己相関の指標として用いられる (瀬谷・堤 2014)。グリッド i における G_i^* 統計量は、式 (4) で定義される。この値が大きいほどグリッド i の周辺に LAI の値が大きいグリッドが集中していることになり、そのような箇所をホットスポットと呼ぶ。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^n y_j} \quad (4)$$

n は全てのグリッドの数、 y_j はグリッド j の LAI の推定値である。 w_{ij} はグリッド j のグリッド i に対する空間的な依存度を表すパラメータであり、今回は 3 m 以内のグリッドのみを考慮するため、グリッド間の距離が 3 m 以内の場合を 1、それ以外を 0 とした。計算は R の `spdep` パッケージ (Bivand and Wong 2018) の `localG` 関数を用いて行った。

結 果

植生指数を用いたクズ優占群落の LAI の推定

クズ生育期間中の 5 時期 (6 月 4 日、7 月 2 日、7 月 20 日、8 月 18 日、10 月 2 日) の植生指数から LAI を推定する重回帰式と自由度調整済み決定係数を第 1 表に示す。自由度調整済み決定係数は 7 月 20 日と 8 月 18 日では 0.55～0.57 の値をとったが、6 月 4 日と 7 月 2 日では 0.42～0.44 という低い値となった。10 月 2 日は決定係数の値が 0.14 と低く、植生指数による LAI の推定は困難と判断された。また、SAVI は 6～8 月の 4 時期を通じてモデルに組み込まれたのに対し、NDVI は 6 月 4 日のみ、NDRE は 6 月 4 日と 7 月 2 日のみに限られた。

クズ優占群落の LAI の推移

6 月 4 日、7 月 2 日、7 月 20 日、8 月 18 日の 4 時期について、50 cm グリッドごとにモデル式を用いて LAI を推定した結果を第 2 図に示す。6 月から 7 月にかけて LAI は増加したが、8 月にかけては群落中央部で減少する一方、周縁部では増加する傾向が見られた。

グリッドごとの葉群の生長速度の分布を第 3 図に示す。6 月 4 日～7 月 2 日では、生長速度は広い範囲で一様に正の値を示した。7 月 2 日～7 月 20 日では群落の中央部で 0.30 d^{-1} 以上の大きな正の値を示したが、群落周縁部に負の値を示す箇所が見られた。7 月 20 日～8 月 18 日の生長速度は群落中

第1表 LAI 推定モデルの回帰係数, p 値および自由度調整済み決定係数

日付	説明変数	回帰係数	p 値	自由度調整済み決定係数
6月4日	(切片)	2.31	0.437	0.44
	NDVI	-9.76	0.132	
	NDRE	17.11	0.181	
	SAVI	10.62	0.088	
7月2日	(切片)	-8.60	0.090	0.42
	NDVI	—	—	
	NDRE	12.43	0.166	
	SAVI	11.28	0.066	
7月20日	(切片)	-42.54	0.017	0.57
	NDVI	—	—	
	NDRE	—	—	
	SAVI	76.34	0.011	
8月18日	(切片)	-7.11	0.045	0.55
	NDVI	—	—	
	NDRE	—	—	
	SAVI	21.00	0.008	
10月2日	(切片)	-0.08	0.986	0.14
	NDVI	0.00	0.257	
	NDRE	-0.47	0.082	
	SAVI	0.00	0.257	

中央部の広い範囲で負の値を示した一方、群落周縁部に正の値をとる箇所が見られた。

クズ優占群落の LAI の空間分布特性

各時期の LAI 推定値の Getis-Ord の G_i^* 統計量の分布を第4図に示す。LAI のホットスポットは、6月4日から7月2日にかけて中央部にみられ、分布に大きな変化は見られなかった。ホットスポットはその後、7月20日に群落中央部で拡大したが、8月18日にかけて群落の周縁部に移動し中央部の LAI は低下した。クズ群落の LAI の空間分布は7月下旬から8月中旬にかけて急激に変化することが示された。

考 察

本研究ではまず重回帰式とステップワイズ法によって、3種類の植生指数からクズ優占群落の LAI を推定するモデルを構築した(第1表)。作物(ワタ、トウモロコシ、コムギ、ダイズ)では NDVI は土壌の反射の影響で LAI が高いときに値が飽和し推定が困難になる一方、SAVI は LAI の増加に伴って直線的に増加するためより幅広い値の LAI の推定に適することが確認されている(Huete 1988; Haboudane *et al.* 2004)。そのため、NDVI が6月においてのみモデルに組み込まれた一方、SAVI はその後の LAI の高い時期においてもモデルに組み込まれたと考えられる。NDRE が7月下旬以降モデルに組み込まれなくなったのは、葉群内の葉のクロロフィル量の幅が大きくなり、NDRE が葉量を反映しなくなっ

第2図 50cm グリッドごとの LAI 推定値の推移

たためと考えられる。また、10月2日で植生指数と LAI に有意な相関が見られなかったのは、褪色した葉や葉面積に算入されない枯葉が群落内に多く含まれていたためと考えられる。なお、高橋・安岡(2006)がクズ、ツルヨシ(*Phragmites japonica* Steud.), オオブタクサ(*Ambrosia trifida* L.), ヨモギ, ツルマンネングサ(*Sedum sarmentosum* Bunge.), イタドリ(*Reynoutria japonica* Houtt.)等を優占種とする河道内植生の LAI を推定した際は決定係数が0.70となったが、今回のモデルの決定係数は低い水準にとどまった。その要因としては、クズの群落構造に対してグリッドサイズが小さいために、グ

第3図 50 cm グリッドごとの LAI 推定値の生長速度 (d^{-1}) の推移

リッド周辺の葉群構造やグリッド内の他の植物の存在が分光反射特性に影響した可能性が挙げられる。推定精度の改善には、植物群落の構造や種組成に合わせて適切なグリッドサイズを検討することや、他の植物や周辺グリッドの葉群構造などの誤差要因を推定モデルに組み込むことなどが有効と考えられる。また、分光反射率から LAI を推定し、その空間分布評価に供する場合には、一般化線形モデルや機械学習など、より柔軟なモデル構築を検討すべきと考えられる。

次に、LAI の推定値からクズ優占群落の葉面積の分布の推移を評価したところ（第2, 3, 4図）、6月4日～7月20日には LAI は全体的に増加したが、その後8月18日にかけては群落中央部で減少し、周縁部で増加する傾向が見られた。このことから、クズが7月以降に主に中央部の葉を落として周縁部に新たに葉を展開したことで、クズの葉面積の分布が中央部から周縁部に移行したと考えられる。7月のクズの当年茎1本当たりの葉面積の増加速度は6月より小さくなることが知られているが（津川・佳山 1981a）、この時期に葉の更新が行われていると推察される。また、クズの当年茎の着

第4図 50 cm グリッドごとに推定した LAI 値における Getis-Ord の G_i^* 統計量の推移

葉率（＝着葉節数／全節数）は主茎で6月、1次分枝で9月、2次および3次分枝で10月にそれぞれ最高となり、葉面積／茎長比は当年茎の主茎で7月、1次分枝で9月、2次および3次分枝で10月にそれぞれ最高となる（津川・佳山 1981b）。

これらの知見と本研究の結果とを総合すると、クズは7月以降に主に群落中央部の主茎や低次の分枝の葉を落とし、その後10月にかけて周縁部のより高次の分枝に新たに葉を展開すると考えられる。ただし、Frye and Hough-Goldstein (2013)が夏季にクズの摘葉処理を行った後の生育を調査したところ、茎長に占める3次以上の分枝の割合が摘葉しない場合に比べ高くなった。このことから、周縁部の葉面積が増大した一因として、通路拡幅時の葉の除去や茎の切断で高次の分枝が促進されたとも考えられる。一般に、茎の分枝や伸長のような移動を伴わない増殖の過程では集中的な空間分布が生じる(巖佐・寺本 1977)。クズの場合、蔓が伸長する過程で新たな葉が近接した場所に順次展開されるため、葉面積は群落中央部に集中的な分布を示すと考えられる。また、7月20日から8月18日にかけて、主茎や低次の分枝の葉が落とされる過程で主として群落の中心部の葉が落ち、周縁部に新しく葉が展開することで、葉面積の分布が周縁部に移動すると考えられる。

夏季に葉の分布を周縁部に移動する生態的利点としては、群落としての光合成効率が高まることが挙げられる。葉は展開当初は明るい条件にあるが、次第に新たな葉や他の草本に庇陰されることになる。8月に古い葉を落として群落内の葉の分布をより均一にすることで、残る葉の光環境を改善し、光合成効率が高められると考えられる。この過程で葉面積のホットスポットが群落の周縁部に向かって移動しているが、茎や葉の密度の低い周縁部に向けて葉群を展開することで、光合成効率を高めていると考えられる。樹木は他個体に面した方向より他個体の存在しない方向により多くの枝葉をつけるため、樹冠の形状は高い可塑性を有している(Jones and Harper 1987a; Jones and Harper 1987b)。蔓性であり空間構造の可塑性の高いクズもまた、茎や葉の密度の低い周縁部に向けて葉群を展開することで、光合成効率を向上させていると考えられる。

また、周縁部への成長は、群落を拡大する上でも有利であると考えられる。クズは茎が伸張した先で着根することで、仮に地上部を除去されたとしても翌春以降その地点からシュートを発生させることができる。クズの茎の節発根は6~7月、ついで9月に盛んになる(大林 1979)。7~8月はクズの根や茎の炭水化物貯蔵量が年間で最低となり、それ以降地上部の炭水化物が根に盛んに転流する(Rashid *et al.* 2017)。また、クズは栽植密度が高くなると成長速度および根や茎の乾物重が減少することが観察されている(Tsugawa *et al.* 1989)。このため、クズは群落周縁部に9月以降に光合成産物を転流させることで、翌年にシュートが発生する範囲を分散・拡大していると考えられる。ゆえにクズ優占群落の拡大を抑制するには、8月に特に群落周縁部の高次の分枝とその葉を除去することで、周縁部での新たな着根を防ぐと

もに貯蔵器官に転流する光合成産物を減ずるのが有効と考えられる。

一般に草本植物の空間分布特性は主として繁殖型に依存することが示唆されており、繁殖を種子に依存する植物は比較的均一な空間分布を示すのに対して、地上系や地下茎によるクローナルな成長をする植物はより集中的な空間分布を示すとされている(Tsutsumi *et al.* 2001; Yasuda *et al.* 2003)。クズの葉面積も、当初は茎の伸長や葉の展開によって集中的な分布を示すが、その後は葉の更新に伴って周縁部への移動し、中央部への集中は緩和される。この現象は、葉や着根節の空間分布が過度に集中的になることを防いでいると考えられる。加えて、クズの発根節は根群の発達に伴って減少し、その空間分布はより均一になることが知られている(津川・佳山 1978)。これらの過程を通して、クズ群落内部の空間分布の集中度が調節されているものと考えられる。

本研究ではUAVで測定した分光反射特性からクズ優占群落のLAIを推定し、その経時的な空間分布の推移からクズ優占群落の空間動態を考察した。より長期的な評価を行うには、特に生育の初期と後期の推定精度の改善が求められる。UAVを用いて実際の植生管理に近い時間的・空間的分解能で群落の空間分布を評価することで、群落の管理を効果的に行うための基礎となる知見が充実するであろう。

引用文献

- Alexandridis, T.K., A.A. Tamouridou, X.E. Pantazi, A.L. Lagopodi, J. Kashefi, G. Ovakoglou, V. Polychronos and D. Moshou 2017. Novelty detection classifiers in weed mapping: *Silybum marianum* detection on UAV multispectral images. *Sensors* 17, 2007.
- Auld, B.A. and S.B. Johnson 2014. *Invasive alien plant management*. CAB Review 9, 1–12.
- Aurambout, J.P. and A.G. Endress 2018. A model to simulate the spread and management cost of kudzu (*Pueraria montana* var. *lobata*) at landscape scale. *Ecological Informatics* 43, 146–156.
- Bivand, R.S. and D.W.S. Wong 2018. Comparing implementations of global and local indicators of spatial association. *TEST* 27, 716–748.
- Frye, M.J. and J. Hough-Goldstein 2013. Plant architecture and growth response of kudzu (Fabales: Fabaceae) to simulated insect herbivory. *Environmental Entomology* 42, 936–941.
- Gitelson, A.A. and M.N. Merzlyak 1997. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing* 18, 2691–2697.
- Haboudane, D., J.R. Miller, E. Pattey, P.J. Zarco-Tejada, I.B. Strachan 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90, 337–352.
- Huete, A.R. 1988. A soil vegetation adjusted index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295–309.
- Hughes, M.J., E.G. Johnson and P.R. Armsworth 2014. Optimal spatial management of an invasive plant using a model with above- and below-ground components. *Biological Invasions* 16, 1009–1020.

- 井上吉雄・ギアシュディン ミア・境谷栄治・中野憲司・川村健介 2008. ハイパースペクトル計測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, 317–330.
- 伊藤操子 2018. 雑草科学に基づいたこれからのクズ対策. 草と緑 10, 59–73.
- 岩本啓己・渡邊修 2020. 空撮画像の教師あり判別に基づくクズ個体群拡大の評価手法の検討. 雑草研究 65, 95–102.
- 巖佐備・寺本英 1977. 分布様式形成のモデルと集合度指数. 日本生態学会誌 27, 117–124.
- Jones, M. and J.L. Harper 1987a. The influence of neighbours on the growth of trees I. The demography of buds in *Betula pendula*. Proceedings of the Royal Society London 232, 1–18.
- Jones, M. and J.L. Harper 1987b. The influence of neighbours on the growth of trees II. The fate of buds on long and short shoots in *Betula pendula*. Proceedings of the Royal Society London 232, 19–33.
- Jones, H.G. and R.A. Vaughan 2010. 植生のリモートセンシング. 森北出版, 東京. pp. 210–250.
- 川村健介・秋山侃 2012. 精密な草地管理のためのリモートセンシング. 日本リモートセンシング学会誌 32, 232–244.
- 国土地理院 2019. 平面直角座標への換算. <https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2xyf.html> (2021 年 6 月 25 日アクセス確認)
- Lopez-Granadoz, F., J. Torres-Sanchez, A.-I. De Castro, A. Serrano-Perrez, F.-J. Mesas-Carrascosa and J.-M. Pena 2016. Object-based early monitoring of a grass weed in a grass crop using high resolution UAV imagery. Agronomy for Sustainable Development 36, 67.
- Louargant, M., S. Villette, G. Jones, N. Vigneau, J.N. Paoli and C. Gee 2017. Weed detection by UAV: simulation of the impact of spectral mixing in multispectral images. Precision Agriculture 18, 932–951.
- 大林弘之介 1979. 森林保育上よりみたクズの個生態. 林業技術 444, 231–235.
- Rashid, Md. H., Md. N. Uddin, T. Asaeda and R.W. Robinson 2017. Seasonal variations of carbohydrates in *Pueraria lobata* related to growth and phenology. Weed Biology and Management 17, 103–111.
- R Core Team 2018. R: A language and environment for statistical computing. <https://www.R-project.org/> (2021 年 6 月 25 日アクセス確認)
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering 1974. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium; NASA SP-351. pp. 309–317.
- 瀬谷創・堤盛人 2014. 空間統計学—自然科学から人文・社会科学まで—. 朝倉書店, 東京. pp. 35–39.
- 高橋俊守・安岡善文 2006. 分光反射率の計測と植生指数による河道内植生の葉面積指数推定. 水工学論文集 50, 1213–1218.
- 津川兵衛・佳山良正 1978. クズの群落構造に関する研究 第 4 報 根群の発達程度の異なる発根節や株の分布様式. 日本草地学会誌 23, 307–311.
- 津川兵衛・佳山良正 1981a. クズの乾物生産ならびに葉面積の拡大に関する研究 I. 越年茎の節から発生した当年茎の乾物重ならびに葉面積. 日本草地学会誌 27, 267–271.
- 津川兵衛・佳山良正 1981b. クズの乾物生産ならびに葉面積の拡大に関する研究 II. 当年茎の乾物ならびに葉面積生産性における主茎と分枝の差異. 日本草地学会誌 27, 272–276.
- Tsugawa, H., T.W. Sasek, N. Komatsu, M. Tange and K. Nishikawa 1989. Seasonal changes in dry matter production and leaf area expansion of first year stands of kudzu-vine (*Pueraria lobata* OHWI) differing in spacing. Journal of Japanese Grassland Science 35, 193–205.
- Tsutsumi, M., M. Shiyomi, S. Takahashi and K. Sugawara 2001. Use of beta-binomial series in occurrence counts of plant populations in sown grasslands. Grassland Science 47, 121–127.
- 渡辺修・大谷一郎・大原源二 2005. 高空間分解能画像データによる畦畔等の植生バイオマス量の推定. システム農学 21, 47–57.
- 渡辺修 2016. ドローンによる雑草・病害虫発生の早期発見～防除への利活用に向けて～. 植物防疫 70, 826–830.
- Yasuda, T., M. Shiyomi and S. Takahashi 2003. Differences in spatial heterogeneity at the species and community levels in semi-natural grasslands under different grazing intensities. Grassland Science 49, 101–108.

Estimation of leaf area index based on spectral reflectance and its application to the evaluation of the spatial distribution of a kudzu-dominated community

Hiroki Iwamoto^{★1,2} and Osamu Watanabe³

Summary

Remote sensing using unmanned aerial vehicles (UAVs) can obtain high-resolution surface data of weed communities over time and is expected to be useful for monitoring their dynamics. In this study, we estimated the leaf area index (LAI) of a community dominated by kudzu (*Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi) and evaluated its

growth and spatial distribution based on the spectral reflectance measured by the UAV. The multispectral images of the riverbank (40 m × 30 m) were obtained from a 50 m altitude five times from June to October 2018. The orthomosaic images were then generated and divided into 3221 grids (50 cm × 50 cm). The multiple regression models, used to estimate LAI from three vegetation indices, were acquired on each observation date (adjusted $R^2 = 0.42-0.57$) except for October 2 (adjusted $R^2 < 0.2$). The LAI estimated from the regression models were found to decline in the center of the kudzu community from July to August 2018, as the clusters of high LAIs moved from the center to the outer margins of the community. This change is seemingly due to the spread of leaves on higher-order branches, which occurs in the renewal process of leaves during the summer. Time-series spectral reflectance measured by UAVs is considered to be useful in evaluating the spatial growth and distribution of weed communities.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), community dynamics, kudzu, LAI estimation, spatial distribution

1 Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

2 Present address: Fukui Food Processing Research Institute, 1-1-1 Tsubonouchi, Maruoka-cho, Sakai, Fukui 910-0343, Japan

★ h-iwamoto@fklab.fukui.fukui.jp

3 Faculty of Agriculture, Shinshu University