産業用無人ヘリコプター搭載型ハイパースペクトル観測による 稲葉の SPAD 値推定技術に関する基礎的研究

SPAD value estimation of paddy leaves using a hyperspectral sensor mounted on a radio-controlled helicopter

向山 信治*・小杉 幸夫*・宇都 有昭*・斎藤 元也**・小田九二夫***

Shinji MUKOYAMA, Yukio KOSUGI, Kuniaki UTO

Genya SAITO and Kunio ODA

Abstract : Stable supply of high quality crop is an urgent requirement for rice cropping facilities in Japan. To cope with this demand, it is absolutely essential to evaluate rice leaf's chlorophyll content by measuring the SPAD values. But it requires lots of elaboration to measure the SPAD values for wide area in paddy. Therefore, the objective of this study is to resolve this problem by estimating the rice leaves SPAD values through remote sensing. Specifically, we made use of a trial observation equipment using hyperspectral sensor mounted on a radio-controlled helicopter, and calculated new indices LVI_{pure} and LVI_{mixture} using the obtained data to estimate SPAD values. As a result, the relations between the SPAD value and the estimation index exhibits high correlation: $R^2=0.885$ for LVI_{pure} and $R^2=0.927$ for LVI_{mixture} , which facilitated to obtain "the estimated SPAD value image" from the obtained data.

1. はじめに

近年、国内における稲の栽培管理は、日本人の主食としての高品質米の安定生産・供給という点から特に重要となっている。そのため、葉色による稲の生育状態の診断や収穫米の食味予測に関する研究は、盛んに行われてきている(石井ら, 2008等)。稲作における栄養診断では、稲葉内のクロロフィル量を調べるために葉緑素計(SPAD-502)が広く用いられている。そして、この出力値(SPAD 値)を用いて、農業試験場や普及指導機関, JA 等では、稲の栄養診断を行っている。具体的には、7 月上中旬頃の追肥のタイミングや施肥量

を判断するために SPAD 値が用いられている。この様に、SPAD 値は、稲の栄養状態を的確に診断可能な重要な値である。しかしながら、SPAD 値の測定は、人間が水田に入り、葉を装置に挟んで測定する必要があり、多くの場合、圃場端の測定となってしまう、圃場全体を代表していない。そのため、圃場中心部等の未測定地点での施肥量の過不足状態の発生による、後の収穫米品質の低下、更には窒素肥料の過剰使用による温室効果ガス N_2O の余剰排出という問題を生じてしまう可能性がある。このような背景の中、近年の農業分野では、農作物の生産管理作業において、広域の対象を反復して観測が可能なりモートセンシング技術が注目され、その研究が盛んに行われている。そこで、生育状況の広範囲・非破壊調査を行うことができるリモートセンシング技術を用いて SPAD 値の推定とその状態の可視化を行うことで、上述の問題を解決することができ、米品質の向上と均一化を図れると考えられる。しかしながら、広域のデータが取得可能である航空機や人工衛星搭載センサによる高高度リモートセンシングでは、追肥量決定に最も重要な時期の天候(梅雨時期における曇天・降雨等)に左右され、必要なタイミングでのデータ入手が困難であること、取得デー

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

** 東京工業大学イノベーション研究推進体
Innovative Research Initiatives, Tokyo Institute of Technology

*** 山形県庄内酒田農業技術普及課
Shonai Area General Branch Administration Office
Sakata Agricultural Popularization Division
「写真測量とリモートセンシング」VOL. 50, NO. 2, 2011

タの精度が低いこと等の問題があり、圃場単位における管理技術として考えた場合、現時点での実用的な利用は難しい。

そこで、本研究では、観測プラットフォームとして飛行高度が低く、観測を行う際に航空機と比較して、天候に左右されにくい産業用無人ヘリコプター（無人ヘリ）を用いた。そして、センサには高波長分解能を有するハイパースペクトル (HS) イメージセンサを用いて、観測対象である水稻圃場内における稲生育状態解析用の情報取得を行った。これにより取得した HS 画像データから、稲葉 SPAD 値のより詳細な評価に必要な光学情報を抽出し、筆者（2010a, 2010b）が提案して、SPAD 値推定への有用性を確認した SPAD 値推定指標 LVI を用いて推定解析を行った。

2. 観測機器の試作

2.1 産業用無人ヘリコプターと使用センサ

本研究では、無人ヘリ“RMAX”（ヤマハ発動機社製：最大積載量：30kg，実用距離（目視範囲）：150m（水平距離），飛行時間：60min）を観測プラットフォームとして使用した。HS イメージセンサは、1 フレーム毎にライン空間軸と波長軸の 2 次元の光学情報を取得できるプッシュブルーム式ハイパースペクトルリニアアレイセンサを用いた。センサ系は、イメージセンサおよび分光器から構成され、バンド数121, 波長分解能 5 nm, 波長幅0.85nm, フレームレート30fps, センサ視野角約30°である。また、植物の葉内クロロフィル量の推定には、可視－近赤外域(400-800nm)における分光反射係数が有効である（Sims et al., 2002）ことから、分光器には、観測波長帯400-1000nm の ImSpector V10(Specim 社製)を、イメージセンサには、MC-781 PF（Texas Instruments 社製）を用いた。

2.2 観測機器

試作した観測機器は、無人ヘリに搭載される HS イメージセンサと情報取得用ラップトップ PC（Lenovo 社製）、情報取得補助用の高性能小型 CCD カメラ HG-88s（RF SYSTEM 社製）から構成され、これらは全て、飛行時の振動による破損・誤動作を防ぐための防振対策を施した状態で、防除作業時等には何も取り付けられないスペースである機体底部に取り付けた。また、センサや CCD カメラ等に供給される電源は、ヘリ本

図 1 観測系外観

体のバッテリー（DC12V，5 A）から供給されており、全機器重量は約11kg となった。観測機器外観を図 1 に示す。

3. 農作物状態の観測

3.1 SPAD 値

本研究における観測は、山形県酒田市広野地区の水田 1 圃場にて行った。栽培されている水稻の品種は、“はえぬき”である。まず、実地データとして、圃場内 16箇所の稲葉 SPAD 値（2010年 7 月14日に測定・曇天/微雨）を取得した。その際、各測定箇所につき 1 畝10株分の SPAD 値を取得（測定葉位は、最上位葉から 3 枚目の葉（ $n-2$ ）（最上位葉は0.8葉以上展開した葉とする）し、その平均値をその地点における代表 SPAD

表 1 各測定箇所における SPAD 値

	コース 1	コース 2	コース 3	コース 4
北	46.3	46.2	43.0	44.4
↑	45.7	45.7	43.5	44.3
↓	45.9	45.3	44.4	44.3
南	43.8	45.5	45.3	45.1
	西←		→東	

表 2 観測条件および推定条件

飛行速度 [km/h]	5	15		
飛行高度 [m]	10	5	10	20
1 pixel 幅 [mm]	11.1	5.5	11.1	22.1
1 pixel 長 [mm]	30-34	80-90		
測定点長 [pixel]	29-44	11-15

(a)

図2 (a) HSデータの取得風景

(b)

図2 (b) SPAD測定点と各コースの概要

値とした(表1)。更に、各測定地点北端にはHS画像データを取得する際のマーカーとして白色紙(242mm×272mm)を設置した(図2(a))。

3.2 HS画像データ

HS画像データの取得(2010年7月15日に観測・曇天/微雨)は、SPAD値の測定を行った圃場南北方向の各4つのコースにおいて飛行条件を変えて行った(表2, 図2(b))。(なお、飛行速度5km/hの条件はコース3, 高度10mのみ)その際、搭載CCDカメラにより撮影される画像の確認を行いながら、データ取得を行うことで、正確なコース上における飛行操作の補助を図った。また、SPAD値推定を行う対象範囲として、SPAD値測定を行った10株分の長さを取得画像データのpixel数に換算して、その各pixel範囲内から偏りが起きない様、無作為に10点(10pixel)分の反射スペクトルデータの抽出を行った。その後、この10点の抽出データの平均値を、その測定点における代表反射スペクトルデータとした。

4. 取得データの解析

4.1 SPAD値推定指標LVI

本項では、取得データからのSPAD値推定に用いる提案指標LVIについて述べる。LVIは、植生反射スペクトル波形において、緑色域波長 λ_G (540-560nm付近)と近赤外域波長 λ_{NIR} (740-770nm付近)のピーク反射

係数(R_G , R_{NIR})を結んだ直線である包絡線を利用した指標である(式(1))。この包絡線上に設定した反射係数(仮想反射係数 iR_x)とそれに対応する実反射係数 R_x を400-800nm間の波長で走査し、仮想反射係数 iR_x と実反射係数 R_x の乖離度合を正規化した $LVI = \{(iR_x - R_x)\} / \{(iR_x + R_x)\}$ を評価する。この解析からSPAD値との相関値が最大となる波長 λ_x を選定することで、LVIを決定した。包絡線を表す式を上記LVI表現に代入することで、式(1)に示すように、指標LVIの具体的表現を得ることが出来る。

$$LVI = \frac{(\lambda_x - \lambda_G)R_{NIR} + (\lambda_{NIR} - \lambda_x)R_G - (\lambda_{NIR} - \lambda_G)R_x}{(\lambda_x - \lambda_G)R_{NIR} + (\lambda_{NIR} - \lambda_x)R_G + (\lambda_{NIR} - \lambda_G)R_x} \quad (1)$$

ここに、 λ_G と λ_{NIR} は、それぞれ包絡線に用いる緑色域波長及び近赤外域波長を表し、それぞれの波長での反射係数を R_G , R_{NIR} とする。LVIに含まれる波長 λ_x の決定手法として、携行型スペクトロメータと地上HS画像観測系により取得したHSデータを用いて、それぞれ、 $LVI_{mixture}$ と LVI_{pure} を作成した。 $LVI_{mixture}$ ($\lambda_G=551nm$, $\lambda_x=697nm$, $\lambda_{NIR}=763nm$)は、SPAD値を1箇所(測定葉位は、最上位葉から3枚目の葉($n-2$))(最上位葉は0.8葉以上展開した葉とする))測定した稲株に対して、携行型スペクトロメータ(波長分解能: 1nm)を用いて取得した株全体(測定した測定葉以外の葉やバックグラウンドの土壌等も含む)の反射スペクトルから、算出した指標である(向山ら, 2010a)。更に、 LVI_{pure} ($\lambda_G=560nm$, $\lambda_x=695nm$, $\lambda_{NIR}=740nm$)は、本観測系にも用いたHSイメージセンサ(波

長分解能：5 nm)にて取得した画像データ中から抽出した、作物個葉毎のSPAD 値測定点における反射スペクトルから算出した指標である（向山ら，2010b）。 LVI_{pure} に関しては、式(3)の表現に見るように、従来から用いられている赤色域波長と近赤外域波長を用いた正規化植生指標 NDVI（Becker et al., 1988）に、緑色域波長と赤色域波長を用いた正規化植生指標 NDGI（嶺川ら，2007）の効果を加味した新しい指標という意味を持つと解釈出来る。この2種類のSPAD 値推定指標 $LVI_{mixture}$ と LVI_{pure} を用いて、本観測系から得られたデータによるSPAD 値の推定解析を行う。以下に、各指標を示す。式(2)、式(3)における R_i は波長 i nm における実反射係数である。

$$LVI_{mixture} = \frac{73R_{763} + 33R_{551} - 106R_{697}}{73R_{763} + 33R_{551} + 106R_{697}} \quad (2)$$

$$LVI_{pure} = \frac{3R_{740} + R_{560} - 4R_{695}}{3R_{740} + R_{560} + 4R_{695}} \quad (3)$$

4.2 解析方法

各測定点において抽出した10点の反射スペクトルデータの平均値を、測定点の代表反射スペクトルとして用いて、式(2)および式(3)の LVI_{pure} と $LVI_{mixture}$ の2種類の推定指標を算出し、SPAD 値推定に関する回帰分析を行った。飛行速度を変化させた場合、取得される情報の進行方向への伸縮が考えられるが、飛行速度に応じた pixel 数内から情報を抽出することで、データ取得範囲の均一化を図った。解析の際に $LVI_{mixture}$ は、使用波長が551nm, 697nm および763nm であり、携行型スペクトロメータの波長分解能1 nm に対して、本センサは波長分解能5 nm であることから、使用波長を取得することが出来ない。そのため、各波長域

において使用波長と隣り合う2つの取得波長における反射係数から線形補間することで、使用波長の反射係数を算出し、 $LVI_{mixture}$ に用いることとした。また、解析には、圃場中心部で観測条件・取得状態が最も良かったコース2・コース3におけるデータを用いることとした（コース1・コース4では、ヘリ飛行時の横揺れにより、取得データ中の圃場外情報が多く混在してしまい、SPAD 値の測定位置の判別が困難であったため、本解析では、その取得データを用いないこととした）。

4.3 解析結果

コース2・コース3での各観測条件におけるSPAD 値の推定結果を表3に示す。コース3のみの結果では、観測条件として飛行高度20m, 飛行速度15km/hにおいて、非常に高い相関 ($LVI_{mixture}$: $R^2=0.941$, LVI_{pure} : $R^2=0.945$)を得ることが出来た。そのため、上記の推定の有用性を検証するため、同条件でコース2において取得したデータを用いて同様の解析を行ったところ、高い相関 ($LVI_{mixture}$: $R^2=0.657$, LVI_{pure} : $R^2=0.753$)を得ることが出来た。このことから、更に、両解析結果を同グラフ上に表すことで傾向の検証を行った。その結果においても、高い相関 ($LVI_{mixture}$: $R^2=0.927$ $p<0.001$, LVI_{pure} : $R^2=0.885$ $p<0.001$)を得ることが出来た（表3、図3）ことから、本研究における観測方式およびSPAD 値推定への有用性を示すことが出来たと考えられる。更に、この結果から取得したHS 画像データを用いて、非常に良好な推定結果が得られた $LVI_{mixture}$ によるSPAD 値の推定強度画像の生成を行った（図4：（注）飛行状況が一定ではなかったため、図中の縮尺は、画像幅方向の理論値

表3 各条件における推定結果（コース2，3における解析，速度5 km/hはコース3のみ）

	高度 5 m・速度15km/h				高度10m・速度15km/h			
指標	R ² 値	相関傾向	p 値	測定点数	R ² 値	相関傾向	p 値	測定点数
LVI _{mixture}	0.475	負	<0.001	8	0.373	負	<0.001	8
LVI _{pure}	0.134		0.228		0.268	正	0.373	
	高度20m・速度15km/h				高度10m・速度 5 km/h			
指標	R ² 値	相関傾向	p 値	測定点数	R ² 値	相関傾向	p 値	測定点数
LVI _{mixture}	0.927	正	<0.001	8	0.640	負	—*1	4
LVI _{pure}	0.885				0.499			

*1：検証点数が少なく、p 値の信頼性は薄いため算出を行わなかった

図3 高度20m, 速度15km/hにおける推定結果

図4 高度20m, 速度15km/h (コース2)におけるHS画像データ

- (a) $LVI_{mixture}$ によるSPAD値推定画像
(b) 疑似カラー画像 (R : G : B = 650nm : 550nm : 450nm)

から求めたもののみに止める)。

4.4 考 察

取得データへの観測条件の影響として、飛行高度が低い場合、観測範囲は狭まるものの、1畝分の詳細な情報を取得することが可能であった。しかし、この条件では、ヘリ飛行時特有のダウンウォッシュの影響により稲葉が攪拌されてしまい、葉の裏面や水田土壌等

のバックグラウンドの露出が大きくなってしまったと考えられる。そのため、適切なスペクトル情報の取得が困難となり、推定精度の低下に繋がったと推測できる。逆に、飛行高度を高くした場合、1畝分の空間解像度は低くなってしまふものの、上記のダウンウォッシュの影響が無くなったことで、適切なスペクトル情報の取得ができ、良好な推定結果に繋がったと考えられる。また、速度変化に関しては、取得画像1 pixelのセンサ走査方向のサイズは速度に比例することから、高速度になる程、対象物の画像情報は進行方向に圧縮されてしまう。しかし、飛行速度に合わせたSPAD値の測定点長さのpixel範囲内から情報を抽出することで、十分な推定精度を確保出来たと考えられる。なお、飛行速度5 km/hの条件での解析結果に関しては、コース3、高度10mのみの観測であったため、検証不足である。しかしながら、本観測機器のデータ取得方法では、ヘリの飛行速度が下がると、その分、観測位置に対するヘリ滞空時間が長くなることから、取得データへのダウンウォッシュの影響が大きくなると考えられる。その結果、解析の際の推定精度の低下が起こると推測できる。また、使用した指標間での推定結果の比較に関しては、稲葉や土壌等の圃場内構成物の情報が、1 pixel内にミクセル化された状態を想定して、より細かいスペクトル設定を行った評価式を用いて推定を行った。そのため、モデルの実質的な自由度が増加し、 $LVI_{mixture}$ による推定において高い相関を得られたものと考えられる。更に、 LVI_{pure} による推定結果に関しては、反射スペクトルの抽出範囲を、出来るだけ植生(稲株)のみの範囲に設定したため、良好な結果を得ることが出来たと考えられるが、検証データが少ないため要因は明確ではなく、今後の追加検証が必要である。

4.5 今後の課題

本研究では、高高度の飛行条件において良好な推定結果を得ることが出来た。しかしながら、農林水産航空協会が発行する民有の技能認定証では、水稻圃場における防除作業時の飛行条件として高度約5 m以下と定められているため、本条件での観測は困難である。そのため、規定条件で発生するダウンウォッシュによる推定精度低下問題を解決するために、観測用センサ設置法の改善を図る必要がある。具体的には、センサの取り付け方向をダウンウォッシュの影響が無いヘリ

進行方向に傾けることによる前方視観測を行う等、データ取得位置を航路上から外すことが挙げられる。また、本解析では、推定対象である SPAD 値の測定点数が少ないと考えられるため、より正確な推定を行うには、SPAD 値の測定点数を増やし、上述の改善を図った観測機器および観測計画の下で、より詳細な追加調査を行う必要があると考えられる。

5. おわりに

農業分野において本研究で用いた RMAX 等の無人ヘリは、防除や施肥を行う際のプラットフォームとして既に利用されており、飛行高度も地上数メートルと航空機等に比べて圧倒的に低い。このことから、観測を行う際に低空の雲や霧の影響を受けにくく、梅雨時期においても十分に活躍が期待出来る。更に、国内における無人ヘリの数は、数千機と観測用航空機と比較して圧倒的に多い。このような背景からも無人ヘリを用いた農作物の生産管理法は、実用化の有意性が非常に高いと言える。そして、将来的には、本当に有用な数波長のみの取得に限定したマルチスペクトルセンサへの切り替え等による観測機器のコストダウンと小型化を図り、更には、取得データのオンライン GIS 管理を推進することで、本技術の実用化への道筋が立つと考えられる。

謝 辞

本研究の実施に際して、ご協力頂いた広野カント

リーエレベータの佐藤広一様および、データ取得にご協力を頂いた圃場所有者の方々に感謝致します。

(受付日2011.1.21, 受理日2011.3.11)

参考文献

- 石井健太郎, 片野 學, 2008. 葉身 SPAD 値による水稻酒米品種山田錦の収量および玄米タンパク質含有率の生育診断, 日作九支報 74 pp.27-30
- 嶺川陽平, 小田九二夫, 森 静香, 小杉幸夫, 2007. 再現実験による水稻の潮風害被害解析, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 27, No. 3, pp.205-215
- 向山信治, 宇都宮昭, 小杉幸夫, 2010a. 包絡線上の仮想反射率を用いた稲葉 SPAD 値の推定, 日本写真測量学会平成22年度年次学術講演会発表論文集 pp. 5-8
- 向山信治, 小杉幸夫, 2010b. 植生状態推定のための地上ハイパースペクトル観測系の試作及び取得データの解析, 日本写真測量学会平成22年度秋季学術講演会発表論文集 pp.155-158
- Becker, F, Choudhury. BJ, 1988. Relative sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) and desertification monitoring, Remote Sensing of Environment 24 pp.297-311
- Daniel A. Sims, John A. Gamon, 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages, Remote Sensing of Environment 81 pp.337-354