

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19580305

研究課題名（和文）夜間能動型多重分光画像観測による作物の形態および栄養状態の計測法に関する研究

研究課題名（英文）Nighttime field spectral imagery for detecting crop productive structure and nutritional status

研究代表者

芝山 道郎（SHIBAYAMA MICHIO）

独立行政法人農業環境技術研究所・生態系計測研究領域・上席研究員

研究者番号：10354060

研究成果の概要：収穫物の安定的な生産のみならず、周辺環境の保全管理に役立つ技術のひとつとして、作物の生育段階、葉面積、葉の傾斜などの特性を観測する省力的な手法が求められている。本研究では、野外に栽培された作物の形態・構造および各種成分含有率を分光光学的・画像工学的にモニタリングする新たな方法、特に夜間に人工光源下で撮影することで、より高精度な作物生育データを連続的・長期的に自動取得するための基盤技術を開発した。

交付額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2007年度 | 2,900,000 | 870,000 | 3,770,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業情報工学

キーワード：分光反射 偏光 葉群構造

1. 研究開始当初の背景

リモートセンシングにより非破壊・非接触で栽培作物の生理生態情報を観測することは、安定的な生産や、合理的肥培管理・作業管理による環境保全をより重視する農業にとり今後重要な基盤技術のひとつとなる。太陽光を光源とする野外作物や植生の分光反射特性の測定とその作物計測への応用に関する研究により、可視・近赤外反射率によるイネの葉緑素量、窒素量、葉面積およびバイオマスの推定法、高波長分解能反射スペクトルを活用した収量や水分ストレス検出法などが開発されている。携帯型の装置で測定した作物

反射率から栄養状態を推定し、適切な追肥量を算定する試みもある。しかし以上の研究ではいずれも光源を太陽に依存しており、太陽光を光源とすることの不安定性の克服はつねに大きな課題となっている。国内外においても、時刻、天候、季節、測定場所により変動する太陽光を補正する様々な試みが行われてきたが、その再現性と精度には限界があった。したがって従来、省力かつ非破壊で作物の生育状態を連続的・安定的にモニタリングすることは困難であり、気象観測システムのように作物生育を常時監視した基盤的観測データベースの構築は遅れている。

2. 研究の目的

本研究では、野外に栽培された作物の生育を分光光学的・画像工学的にモニタリングする新たな基盤技術として、夜間に人工光源下で撮影すること、ならびに太陽光を光源とする連続的・長期的な自動観測により高精度な作物生育データを取得することを目的とした。常時変動する太陽光の影響を克服するために、①夜間測定すなわち、光源を太陽光に依存せずに人工光で代替することにより、および②デジタルカメラを改造した長期連続分光画像モニタリングにより、それぞれ光学的測定の安定性と再現性を向上させることを目的とした。前者では、太陽光に依存しない能動的な観測により、天候等に左右されずノイズの少ない計測を可能にするための技術的課題の検討、作物生育情報把握のための新たなデータの指標化手法などを検討する。後者では刻々と変動する太陽光照明の欠点を補うため、日中天候にかかわらず常に観測を継続し、収集した多量のデータの処理方法と、観測値と対象作物の生育過程（フェノロジー）、現存量などの特性とを関連づける手法を開発する。データ処理として、分光反射率の日変化、季節変動および面的変異の把握、ならびに画像工学的特徴抽出手法の適用などを試みる。

3. 研究の方法

(1) 夜間分光画像観測

①野外用の分光画像撮影装置により、イネ個体群中の葉身および当熟中の穂の一部の分光反射スペクトルを同一日の昼間および夜間に測定し、スペクトルデータから葉身葉緑素濃度（SPAD 値）および籾千粒重の推定を試みた。宇宙航空研究開発機構で開発された波長 450nm~720nm を 10nm 間隔で走査する分光画像放射計により、施肥水準の異なるイネ個体群（品種コシヒカリおよび日本晴）を登熟期間中 3 回、いずれも晴天日の昼間および夜間にそれぞれ撮影した。夜間撮影時には 100W キセノンランプ 2 灯により照明した。分光画像中の直接に照明された葉身および穂上の微少部分の反射強度値について、平均値および標準偏差で処理した標準化反射率を算出した。

②デジタルカメラを近赤外域に感度を有するように改造し、夜間、野外で生育するイネおよびオオムギ個体群を直上より自動間歇的にフラッシュ撮影した。撮影画像および保存されたカメラの各撮影パラメータを用いて、植物個体群から反射される近赤外域の相対的輝度変化を算出する方法を開発し、その季節変動を追跡した。一方で作物の三次元的な形態特長量（受光態勢と関連のある構造；

草高・草丈・乾物重等）を調査し、撮影・算出された相対輝度変化量の指標から、これらを連続的に非破壊測定する方法を検討した。

(2) 昼間長期連続分光画像観測

①可視赤色域（RED, 波長 630-670 nm）と近赤外域（NIR, 波長 820-900 nm）で同時に画像を撮影する装置を富山県農林水産総合技術センター内の水田上空高さ 12m に設置し、栽培期間中の日中（0800-1600）, 10 分間隔でイネ個体群の鳥瞰画像を取得した。システムを予め野外条件で較正しておき、撮影時の天空光強度から、画像中の任意の点の分光反射率を推定した。栽植密度 3 水準、基肥量 3 水準の試験栽培 9 区それぞれの中心部の波長別反射率および植生指数（NDVI, 両波長反射光強度の差と和の比）を算出し、さらにそれらの日平均値を求めた。

②上記と同様のシステムを、同時に 6m 高にも設置し、分光反射率に変換した画像から NDVI の季節変化を計算し、併行して実施した人手による草丈・茎数調査データと比較した。撮影高度が低いために、イネ個体の細部、茎葉の形態がより明瞭に撮影された。そこで分光反射率に変換した定点カメラ画像を時期別に二次元高速フーリエ変換（FFT）処理した結果と調査データとを比較した。

4. 研究成果

(1) 夜間分光画像観測

① 登熟期イネ個体群における昼間および夜間分光画像による葉身緑度ならびに籾千粒重の推定

太陽光を光源とする昼間の分光画像取得では、雲による光量変動など、天候条件による制約が大きい。一方、夜間撮影では、人工的な照明により、雲の有無は問題とならず、さらに地域によって日没後に風速が弱まる場合には、測定対象植物体の動きが抑制され、結果的に測定機会が増す。測定機会の増大は、生体情報推定モデルの精緻化ならびにその適用場面の拡大につながる。本研究で試用した標準化反射率は、同一日の昼間と夜間とでは各波長において同一対象器官間でよく合致していた。葉身 SPAD 値ならびに籾千粒重に対する波長別標準化反射率の相関分析および回帰分析によれば、夜間撮影は昼間撮影をよく代替し得ることがわかった。夜間の分光画像撮影技術の確立により、たとえば当熟中の籾の色や水分含量などこれまで目視やサンプリング調査に依存してきた各種生体情報収集の省力化が期待できる。

② 夜間人工光撮影近赤外画像による個体群

作物の草高・現存量等の非破壊推定

改造デジタルカメラによる自動間歇夜間フラッシュ撮影により、イネおよびオオムギにおける形態的特長量を連続計測した結果、出穂期までの草丈と本計測手法によって得られる指数との間に決定係数 0.95 以上の精度で相関関係のあることがわかった。さらに、比較実験において、可視域の輝度情報では植物群落の形態的特長量を安定的に抽出できないことを明らかにした。これは、近赤外域の輝度情報およびカメラのセンサ感度を考慮した本提案手法の有効性を示している。従来、同様の測定を行う場合には、昼間の時間帯に太陽光のもとで測定することが行われてきた。このような方法は、照明を設置する必要がないという長所がある反面、太陽光による照度の変化を常に較正する必要がある。今回の研究は、従来測定対象とされなかった夜間に着目し、人工的な照明によって測定を行う点および人工的な照明を用いることで、それに適したオリジナルな植生指数を考案した点にある。なおこの新規手法に関しては特許権を出願中である。

(2) 昼間長期連続分光画像観測

① デジタルカメラを用いたイネ個体群の可視および近赤外反射率の定点連続観測による窒素吸収量の推定

各波長反射率日平均値は、それぞれの波長域に特徴的かつ作物の生育量、生育段階に応じた季節変化特性を示した。最高分けつ期および幼穂形成期において RED と NIR の日平均反射率と土地面積あたり地上部窒素吸収量との間にそれぞれ 0.79 と 0.81 の単相間係数が得られた。一方、NDVI と同量との間の単相間係数はこれらよりも劣る -0.13 であったため、天空光で補正された波長ごとの反射率推定値が、単純な波長間光強度の比演算よりも有利な場合のあることが示唆された。上記の生育段階における RED・NIR の日平均反射率推定値を用いた土地面積あたり地上部窒素吸収量の重回帰分析で、測定値と推定値間の相関係数 0.96、RMSE 0.5 g m⁻² (平均窒素吸収量の約 10%) が得られた。複数年次でさらなる検証が必要ではあるが、二波長域での連続定点撮影画像から算出した日平均反射率によるイネの生育関連情報の簡易で省力的な非破壊的推定の可能性が示された。

② 定点カメラ画像の高速フーリエ変換 (FFT) によるイネの生育状況の推定

カメラ設置方法として太陽を背にし、斜め下方を撮影するかたちとしたため、定点カメラから測定された NDVI は、実測の草丈×SPAD 値よりも生育の初期段階においては、より速く増加する傾向が見られた。今後、カメラの観測方向および照明条件についてさらに検

討する必要がある。一方、FFT 処理後の画像中の特定の周波数領域における平均画素値の推移が、最高分けつ期前までの草丈の推移と極めてよく一致していた。定点カメラ測定は、NDVI のような分光学的指標の推定に加えて、画像パターンの特徴変化から草丈に代表される生育の形態学的変移を推定する手段として有効であると推察された。さらに追試実験が必要ではあるが、これまで見極めが難しかった生育段階 (フェノロジー) のリモートセンシングへの展望が開かれた。

(3) まとめ

夜間に人工光源下で撮影観測することにより、天候の変動の影響を受けにくい作物計測が技術的に可能なことが示された。しかし夜間計測では、光の到達範囲など対象作物圃場の面積には現状では制約がある。一方、太陽光を光源とする画像観測では、長期・連続的に同一対象を計測することおよび較正法を工夫することにより、比較的広い圃場の作物生育情報を一定の精度で推定可能なことがわかった。また複雑な作物形態の微妙な変化を検出する手法としてデジタル画像の特徴を活かした画像工学的手法の有効性が示唆された。推定すべき作物情報の種類と要求精度に応じてこれらの技術を使い分けるとともに、それぞれ装置と手法の精緻化が必要である。今後はさらに観測データを特定の作物情報に結びつける新たな指標の開発が必要と考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Michio Shibayama, Toshihiro Sakamoto, Eiji Takada, Akihiro Inoue, Kazuhiro Morita, Wataru Takahashi and Akihiko Kimura, Continuous Monitoring of Visible and Near-Infrared Band Reflectance from a Rice Paddy for Determining Nitrogen Uptake Using Digital Cameras. *Plant Production Science*, 12(3):293-306, 2009 査読有
- ② Michio Shibayama, Toshihiro Sakamoto, Kohzo Homma, Shuhei Okada and Hiromichi Yamamoto, Daytime and Nighttime Field Spectral Imagery of Ripening Paddy Rice for Determining Leaf Greenness and 1000-Grain Weight. *Plant Production Science*, 12(3):307-318, 2009 査読有
- ③ 高田英治・井上晃宏・芝山道郎・坂本利弘・守田和弘・木村昭彦・高橋渉, 定点カメラ画像による水稻の生育状況の推定. シス

テム農学 25(1):27-34, 2009. 査読有

- ④ Michio Shibayama and Yoshiaki Watanabe, Testing Polarization Measurements with Adjusted View Zenith Angles in Varying Illumination Conditions for Detecting Leaf Orientation of Wheat Canopy. *Plant Production Science*, 11(4): 498-506, 2008. 査読有

[学会発表] (計 7件)

- ① 芝山道郎・坂本利弘・高田英治・守田和弘・高橋渉・木村昭彦, 作物個体群分光画像の長期連続俯瞰観測と生育診断への応用 第2報 可視・近赤外バンド反射率画像による水稲 LAI の推定. 日本作物学会紀事 78(別 1):194-195. 2009. 3. 28. 日本作物学会第 227 回講演会, つくばエポカル.
- ② 坂本利弘・芝山道郎・高田英治・守田和弘・高橋渉・木村昭彦, デジタルカメラ昼夜連続撮影による作物フェノロジー把握. システム農学 24(別 1):45-46. 2008. 5. 24. システム農学会 2008 年度春季一般研究発表会, 愛媛県西条市.
- ③ 高田英治・井上晃宏・芝山道郎・坂本利弘・守田和弘・木村昭彦・高橋渉, 定点カメラ画像と衛星画像によるイネの生育状況の推定. システム農学 24(別 1):49-50. 2008. 5. 24. システム農学会 2008 年度春季一般研究発表会, 愛媛県西条市.
- ④ 芝山道郎・坂本利弘・高田英治・守田和弘・高橋渉・木村昭彦, 作物個体群分光画像の長期連続俯瞰観測と生育診断への応用 第1報 市販デジタルカメラによる水田の可視・近赤外バンド反射率計測. 日本作物学会紀事 77(別 1): 328-329. 2008. 3. 28. 日本作物学会第 225 回講演会, 農林水産技術会議事務局筑波事務所.
- ⑤ Eiji Takada, Keita Kamato, Michio Shibayama, Toshihiro Sakamoto, Wataru Takahashi, Kazuhiro Morita and Akihiko Kimura, Processing of Seasonally Observed Visible and Near Infrared Images in Rice Fields Using Inexpensive Digital Cameras. *Journal of Ecotechnology Research* 13 (3):202. 2007. 10. 6. 14th Asian Symposium on Ecotechnology, Kyung-Hee University, Suwon, Korea.
- ⑥ 芝山道郎・渡邊好昭 偏光反射特性の測定による作物個体群の葉群構造推定 第7報 コムギの偏光特性に及ぼす太陽

天頂角と天候の影響」 日本作物学会紀事 76(別 2):286-287. 2007. 9. 27. 日本作物学会第 224 回講演会, 金沢大学.

- ⑦ 高田英治・釜戸敬太・芝山道郎・坂本利弘・高橋渉・守田和弘・木村昭彦 「定点カメラ画像の処理による稲の生育状況の追跡」 システム農学 第 23 巻 (別 1):94-95. 2007. 5. 25. システム農学会 2007 年度春季一般研究発表会, 京都大学.

[図書] (計 1件)

- ① 芝山道郎 日本作物学会 「作物の形態研究法—ミクロからマクロまで—」 前田英三・三宅博・井上吉雄 編. 作物個体群反射光の偏光特性の測定法と葉群構造の推定(分担執筆):117-120, 2008.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

- ① 名称:植物体の生育変化の連続測定方法
発明者:坂本利弘, 芝山道郎, 高田英治
権利者:同上
種類:特許
出願番号:特願 2009-073116
出願日:2009. 3. 25
国内外の別:国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芝山 道郎 (SHIBAYAMA MICHIO)
独立行政法人農業環境技術研究所・
生態系計測研究領域・上席研究員
研究者番号:10354060

(2) 研究分担者

坂本 利弘 (SAKAMOTO TOSHIHIRO)
独立行政法人農業環境技術研究所・
生態系計測研究領域・研究員
研究者番号:20354053

高田 英治 (TAKADA EIJI)

富山工業高等専門学校・電気工学科・准教授
研究者番号:00270885

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

守田 和弘 (MORITA KAZUHIRO)
富山県農林水産総合技術センター・研究員