

作物の形態研究法：マクロからミクロまで 光・電磁波・超音波による作物形態情報の非破壊計測手法

井上吉雄
(農業環境技術研究所)

作物個体や群落の形態・生理・生態的諸特性を、対象に触れることなく追跡的に調査できれば、作物研究上きわめて魅力的である。さらに、それを広域的に取得できれば、圃場や生態系のスケールで種々の問題を追究する際に、優れたツールとなる。その意味で、光・電磁波・超音波などの測定媒体を用いる非破壊計測やリモートセンシングは、作物の葉～個体～群落～生態系の量・形態・機能についての多様な特性を定量化する上できわめて有用である (Inoue 2003)。本稿では、そのうち特に形態的な情報に着目して上記媒体を用いた非破壊的計測手法について概観する。

1. 反射・透過光の分光計測による群落構造評価

作物や群落・圃場などを測定する主な分光計測装置として、①金属干渉フィルタと回折格子、音響光学素子などとシリコンフォトダイオードなどの検出素子を用いた広波長帯の分光器 (例：PREDE, PSR-02)、②回折格子等を用いた高波長解像度のいわゆるハイパースペクトルを測定する装置 (例：ASD, FR1000)、③干渉フィルタと CCD 等画像素子を組み合わせた離散的分光画像装置 (例：井上ら 2000)、および④音響光学素子や液晶フィルタと CCD 画像素子を組み合わせたハイパースペクトル画像装置 (例：Inoue ら 2001) 等がある。

分光反射率を利用する光学域のリモートセンシングは、葉面積指数や窒素含有量あるいは光利用効率など、作物の量・成分・機能など多くの作物形質を評価できるが (Inoue 2003)、形態情報の評価は比較的苦手である。しかし、偏光反射光には葉の表面の微細な構造や葉の傾きなどの違いが反映されることが知られている (Herman ら 1997)。偏光は自然光のように光の振動方向が一樣でなくある方向 (偏向角) に偏りをもつ光で、自然光が葉や土壌などに入射し透過・散乱され反射される際にその対象の特性に応じた偏りが起こる。そのため、偏光度を測定することにより葉の表面形状や葉の傾斜角度を評価できる可能性がある (Rondeaux ら 1991)。これまでに、マメ科イネ科牧草の混在比率、出穂開花などの生育段階の検出、ストレス検出などへの応用が試みられている (Fitch ら 1984, Rondeaux ら 1991, 芝山ら 1995, Shibayama 2004)。近年、Shibayama et al. (2002) は可搬型の分光反射偏光計測装置を試作した。装置は①のタイプの分光計測装置 (可視～短波長赤外に 8 バンド) に、偏光フィルタを組合せて偏光度を測定するとともに、入射角・方位を制御できるシステムとなっている。自然光の入射角観測角などの影響などを考慮する必要があるが、葉の平均傾斜角などの形状特性を遠隔評価できる可能性がある。

一方、特定波長の透過光を測定する装置に LAI2000 (Li-Cor) がある。天頂角 148° の魚眼レンズを通して入射する光が、5つの同心円状のシリコン素子により検出され、離散的な 5つの天頂角における遮蔽率が定量される。葉などの遮蔽物と天空を 2 値化するため、フィルタにより 490 nm 以下の波長のみを検出するように設計されている (Wells and Norman 1990)。この装置では、上記のデータを群落上と群落下で取得し、放射伝達モデルを用いて、葉面積指数と葉の平均傾斜角を推定する。短時間に多くの作物・品種を調査したい場合や、破壊計測が困難な状況では特に有用である。植物体による太陽光の遮蔽を用いているため、葉群構造の違いや緑葉以外の部位の影響、さらには入射光強度の不均一性などが原理的な誤差要因となる。イネでは 5 程度、ダイズでは 4 程度までの LAI 推定に適用できる (山本 1995) とされているが、高い精度を求める場合には対象作物について検量線を求めておいたほうがよい。また、曇天あるいは太陽高度の低い条件で、より安定したデータが得られるが、直達光のある条件では、キャップにより視野を調節する方法もある。

2. スキャニングレーザの応用

群落の幾何学的構造を測定するために考案されたポイント・コドラート法では、位置決めされた金属針を群落に一定の角度で挿入し針の先端が葉群に接した点数を記録したが (Warren Wilson ら 1963)、後に金属針はレーザビームに置きかえられ自動化された (Vanderbilt ら 1979)。商品化されたが現在は市販されていない。その後さらに、レーザ誘導によるクロロフィル蛍光に着目し、緑葉のみの幾何学的構造を同様の原理で測定する方法が提案されている (Denison and Russotti 1997)。レーザダイオードによる 680 nm のビームを照射することで、励起されるクロロフィル蛍光の有無と距離を同時に測定するもので、広範な光条件で安定した測定が可能であり、また、群落上方だけでなく群落下からの測定もできる。一方、同じくレーザ光を用い

た距離計の原理でレーザパルスを検出する走査型 LIDAR (Light Detection and Ranging: レーザスキャナ) が開発されている (Nilsson 1996, Parker ら 2004). たとえば, 可搬型システム (RIEGL, LPM-i800HA) では近赤外レーザを用い, 測定範囲が 10~250 m, 距離精度 ± 1 mm, 角度分解能 $\pm 0.009^\circ$, また航空機搭載システム (Enerquest, RAMS) ではレーザパルスを毎秒 15000 回発射し, 高さ方向の精度は ± 15 cm とされている. 近年は商業ベースの運用も進んでおり, いまのところ森林構造や地表面形状の測定に多用されている (例: Flood ら 1997, 武田ら 2005).

3. マイクロ波後方散乱計と合成開口レーダの利用

マイクロ波は周波数が 0.3~300 GHz (波長で 1 mm~1 m) の電波の総称である. 周波数バンドごとに Ka (35 GHz), ku (15 GHz), X (9 GHz), C (6 GHz), L (1 GHz), P (0.3 GHz) などと呼ばれる. 測定装置は一般にマイクロ波を射出するための送信アンテナ・受信アンテナおよび信号分析装置からなる. 受信アンテナでは対象で散乱され戻ってきた信号を受信し, その強度と偏波を解析し, 各周波数・偏波 (垂直・水平) における対象の散乱係数を求める. センサには特定領域の平均値を求める散乱計と, 画像計測が可能な航空機・衛星搭載の合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) があり, X, C, L バンドなどが搭載されている.

マイクロ波後方散乱係数は, 対象の誘電率 (水分含有率がよく規定), 幾何学構造, および周波数, 入射角などの観測条件によって影響されるが, 幾何学特性としては, 散乱要素体のサイズと縦・横成分比が特に強く関係している. たとえば, 水稻群落では, L バンドでバイオマス, C バンドで葉面積指数, X バンドで茎密度を推定できるだけでなく, Ka, Ku などの高周波数バンドは穂の重量と特異的に関係している (Inoue ら 2002). これは, Ka, Ku などの 1 cm 前後波長が群落に透過することなく群落最上部の微細な構造 (穂) に特異的に反応するためであると考えられる. このように種々の幾何学的特長を群落スケールで抽出するうえで周波数の異なるマイクロ波を活用できる可能性がある.

4. 超音波レーダを用いた群落構造情報の抽出

超音波レーダでは超音波パルスを照射し, 対象物に当たって戻ってくる反射波を検出して, その時間差から対象物までの距離を求める. 群落上方でセンサを走査しながら, 短時間に多数の超音波パルスを発射し, 反射波の距離別頻度やエコー強度を積算して, 葉などの反射エレメントの空間分布を求める. 作物群落用に開発された装置の基本構成は, アームに取り付けられた超音波発信器, 受信器, 信号処理装置および制御・演算を行う計算機からなる (Shibayama ら 1985). その後の改良型では約 3 m のアームに 5 セットの送受信器ヘッドを取り付け, 120 度の回転幅で自動的に

アーム走査とセンサヘッドの切替えを行い, 短時間でデータを取得することができる. 超音波周波数は 10~60 Hz, 発信時間 0.1~10 ms, 発信周期は 1~100 ms で, 距離分解能は数 cm 程度である. この方法により, 群落内の葉面積の垂直分布をかなりよく推定できる (Shibayama ら 1985). この測定法は光条件に影響されない利点があるが, 超音波の浸透自体が葉の角度分布によって影響されるため, 葉面積垂直分布の正確な計測には向かない. むしろ, 水平葉か垂直葉かといった品種特性や受光態勢, ダイズ葉の調位運動などに関わる形態指標を群落スケールで簡易に捉える方法として有用である (森永ら 1993).

5. 磁力線式 3 次元デジタイザとレーザによる立体計測

磁場を発生させる発信器 (ソースコイル) とその磁力線を検出するセンサコイル, その信号を位置情報に変換する回路からなり, 磁場内の任意の位置を針状の受信センサでポイントすることにより, 瞬時にその点の空間座標と角度情報を取得できる (例: Polhemus, FASTRACK). 最新のモデルでは位置精度約 0.8 mm で, 測定範囲は発信器から 1.5 m 程度とされている. この方法を作物形状測定に適用した例は多く, これまでに葉形やその空間的分布, 葉の傾斜角分布, 調位運動, 受光態勢の評価などに用いられている (森永ら 1993, Shibayama 2004, 岡ら 2005). 3 次元デジタイザは正確であるが微細な構造を精密に再現するためには時間と労力がかかり, また, 野外条件では風の影響も受けやすい. 最近, この装置を手持ち型のレーザラインスキャナと組み合わせて, リアルタイムで任意の立体曲面を 3 次元データとしてコンピュータに取り込むシステムが開発されている (Polhemus, FASTSCAN). これが作物計測に応用された例は見られないが解像度 0.5 mm 程度で約 20 cm の走査幅内であれば, 立体形状をそのまま数値的に記録できるので, 葉や穂などの詳細な立体的形状計測が容易になるものと考えられる.

以上の諸手法は, 量・成分・機能等の計測に加えて形態情報を非破壊で評価する方法として, 作物遺伝形質のマクロレベルでの評価や環境因子との関係解明・モデル化などへの応用が期待される.

引用文献

- Denison, R. F. and R. Russotti 1997. Field estimates of green leaf area index using laser-induced chlorophyll fluorescence. *Field Crops Research* 52: 143-149.
- Fitch, B. W., R.L., Walraven and D.E., Bradley 1984. Polarization of light reflected from grain crops during heading growth stage. *Remote Sens. Environ.* 15: 263-268.
- Flood, M. and B. Gutelius 1997. Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar. *Photogram. Eng. Remote Sens.* 63: 327-366.
- Herman, M. and V. Vanderbilt 1997. Polarimetric observations in the solar spectrum for remote sensing purposes. *Remote Sens. Reviews.*

- 15 : 35–57.
- 井上吉雄・美濃伸之・富田淳志・小川茂男・崔毅年 2000. スペクトル画像の空中計測による作物・圃場状態の診断と予測 [5]. 日作紀 69 (別 1) : 170–171.
- Inoue, Y. and J. Penueus 2001. An AOTF-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications. *Intl. J. Remote Sens.* 22 : 3883–3888.
- Inoue, Y., K. Kurosu, H. Maeno, S. Uratsuka, T. Kozu, K. Dabrowska-Zielinska and J. Qi 2002. Season-long daily measurements of multi-frequency and full-polarization backscatter signatures over paddy-rice field and their relationship with biological variables. *Remote Sens. Environ.* 81 : 194–204.
- Inoue, Y. 2003. Synergy of remote sensing and modeling for estimating ecophysiological processes in plant production. *Plant Prod. Sci.* 6 : 3–16.
- 森永慎介・井上吉雄・芝山道郎・秋山侃 1993. 植物立体構造計測センサによるダイズ調位運動の計測. 日作紀 62 (別 1) : 266–267.
- Nilsson, M. 1996. Estimation of tree stand volume using an airborne LIDAR system. *Remote Sens. Environ.* 56 : 1–7.
- 岡正明・八木庸介 2005. 受光効率評価のためのトマト個体 3 次元構造と複葉形の計測. 日作紀 74 別 2 : 56–57.
- Parker, G.G., D.J. Harding and M.L. Berger 2004. A portable LIDAR system for rapid determination of forest canopy structure. *J. of Applied Ecology* 41 : 755–767.
- Rondeaux, G. and M. Herman 1991. Polarization of light reflected by crop canopies. *Remote Sens. Environ.* 38 : 63–75.
- Shibayama, M., T. Akiyama and K. Munakata 1985. A portable field ultrasonic sensor for crop canopy characterization. *Remote Sens. Environ.* 18 : 269–279.
- Shibayama, M. and S. Akita 2002. A portable spectropolarimeter for field crop canopies. *Plant Prod. Sci.* 5 : 311–319.
- 芝山道郎・高橋繁男・奥俊樹 1995. 採草地におけるクローバ混生率と反射係数, 植生指数および偏光度観測. 日本リモートセンシング学会誌 15 (4) : 22–37.
- Shibayama, M. 2004. Seasonal profiles of polarized reflectance and leaf inclination distribution of wheat canopies. *Plant Prod. Sci.* 7 : 397–405.
- 武田知己・小熊宏之・米康充・藤沼康美 2005. レーザスキャナを用いたカラマツ群落の三次元構造の測定. 農業気象 61 : 39–47.
- Vanderbilt, V.C., M.E. Bauer and L.F. Silva 1979. Prediction of solar irradiance distribution in a wheat canopy using a laser technique. *Agric. Meteorology* 20 : 147–160.
- Warren Wilson J. and J.E. Reeve 1963. Estimation of foliage denseness and foliage angle by inclined point quadrats. *Aust. J. Bot.* 11 : 95–105.
- Wells, J. M. and J.M. Norman 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy J.* 81 : 818–825.
- 山本晴彦・鈴木義則・早川誠而 1995. プラントキャノピーアナライザを用いた作物個体群の葉面積指数の推定. 日作紀 64 : 333–335.