

---

 総 説
 

---

## 作物・農地の高精度管理のためのリモートセンシング

### [1] 情報知識集約型作物生産の基礎としてのリモートセンシング —応用可能性と到達点—

井上 吉雄

(農林水産省農業環境技術研究所)

#### Remote and Non-Destructive Sensing for Precision Crop and Field Managements

##### I. Remote sensing method as a basis for information-based crop management

##### —Potential and the state of the art—

Yoshio INOUE

(National Institute of Agro-Environmental Sciences, 3-1-1 Kannondai,  
Tsukuba, Ibaraki 305, Japan)

1996年11月11日受理

作物生産はたえず変動する環境のなかで行われるものであり、作物は低温、高温、養水分の欠乏・過多、病虫害といったストレス要因に常時さらされている。さらに、近年、人間活動に起因するCO<sub>2</sub>濃度の上昇や温暖化など地球規模の気象変動が顕在化しつつあり、人類生存の最重要基盤である植物生産、とりわけ作物生産に対して大きな影響を与えることが懸念されている<sup>92,67)</sup>。一方、環境保全の面からは、農薬や肥料の効率的利用など環境負荷の低減化への要請が強まっており、農業にとってかつてない困難な制約条件の下で、予測される急激な人口増加に見合った食糧を安定的に生産することが期待されている。

このような背景のもと、将来の農業には、資源エネルギーと化学資材を効率的に利用する高生産力・低環境負荷かつ収益性の高い生産システムを実現することが期待される。しかし、それを実現するためには、バイオテクノロジーによる作物特性そのものの改良と同時に、気象、土壌、作物などの計測情報に基づいた診断・管理手法の高度化、すなわち作物や土壌、気象等に関するこれまでの研究成果と情報を最大限に利用した知識情報集約型の精密農業の展開が不可欠である。特に、農業機械の進歩と相まって、従来の均一管理ではないきめ細かな「位置や状態に応じた可変管理」が可能になりつつあり<sup>164)</sup>、高精細度な面的情報への要請はますます高まると予想される。したがって、農業におけるリモートセンシングは、作付け面積、作物の分類、地域レベルの収量査察といった旧来の単なる農業台帳の情報だけでなく、生

産管理のためのリアルタイム情報を得る手段としても大いに期待される。

一方、作物生理生態学・土壌学等の多大な研究成果を実際の生産管理に結びつけるためには、農地や植生の空間的変異ならびに時間変化を把握することが根本的に重要であるが、適切な手段がこれまで実質的に存在しなかった。したがって、リモートセンシングによって基礎的な農地・作物情報を高精細度かつ定量的にとらえ得るならば、その有用性は計り知れず、農業のみならず自然植生のモニタリングや管理にもはば広く応用できるものと考えられる<sup>83)</sup>。

本論文では、作物と農地管理の情報化・高精度化のためのリモートセンシングという観点から、適用可能性のある具体的場面を抽出するとともに、それらの実現に必要なセンシングシステムの特性を提示し、さらには既存のリモートセンシングの到達点と問題点を明らかにし、将来方向を展望する。本論文が、当テーマに関する直接的な情報としてだけでなく、作物学の研究基盤を生かした新たな切り口の研究展開あるいは作物学の研究成果をどのように実農業に結びつけていくかの道筋についてもささやかなヒントになれば幸いである。

#### 1. 資材の可変散布技術の高度化と必要な計測情報

作物管理の高精度化あるいは自動化を実現するためには、肥料・農薬・水等を作物生育と環境条件に応じてきめ細かく調節する技術、すなわち可変散布技術の進歩が不可欠である<sup>174)</sup>。

たとえば、雑草防除ではすでに除草剤の間欠散布

装置が開発されており、雑草の検出技術と防除診断ソフトの判断を組み合わせたシステムが試みられている<sup>116)</sup>。このような可変散布装置を殺虫剤の散布に利用すれば、局所的な病虫害管理を行うことも可能である<sup>50)</sup>。また、肥料の散布についても、量だけでなく散布する資材や散布パターンを変えることも可能になりつつある<sup>46,172)</sup>。窒素肥料の散布では、応答時間 2 秒、精度 95 %の可変散布装置が報告されている<sup>24)</sup>。

米国における最新の灌漑システムでは、センターピポットがポンプの弁を自動的に開閉しながら、回転速度を調節したり、必要に応じて逆方向に回転することもできる<sup>95)</sup>。また、このような装置では灌漑水に各種の化学資材を溶かして散布することで養分や農薬の散布量を調節できるようになっている。

ところで、上記のような可変散布技術を圃場に適用するためには、位置情報が不可欠である。人工衛星による位置決め技術(GPS: Global positioning system)の農業への応用についても研究が進められている。可変散布の精細度からみた位置決めの精度は、① 散布速度を変化させるのに最低必要なレベル(2~5 m)、② 重複部分や欠落部分がないように散布できるレベル(15 cm)、③ 個体別散布が可能なレベル(1cm)の3種類に分けられるが、相対側位GPSやその他の位置情報モニタ技術を併用することで、②~③レベルの位置精度をリアルタイムに近い速さで求められるようになりつつある<sup>136)</sup>。

以上のように、精密農業管理のための基礎技術に関する研究は着実に進みつつある。しかし、実際の圃場における可変散布の精度は、まだ、運転速度、装置のキャリブレーション、圃場の地表面の状態、風向風速などの気象条件によって大きく影響され<sup>30)</sup>、実圃場での使用に耐える高精度な装置の開発およびその自動化、無人化等は今後の課題となっている。また、作業機を的確に走行させ、かつ可変作業を行うための情報計測技術の開発が極めて重要になっており、特に、作物、土壌、環境に関わる多種の情報を高精細度かつリアルタイムで計測することが不可欠となる。したがって、リモートセンシングは地域レベルだけでなく、個々の圃場レベルや圃場内の面的分布の各スケールにおいて、診断・予測・管理のための高精細度リアルタイム情報を得るための強力な情報収集手法になり得る。

## 2. 作物管理高精度化へのリモートセンシングの 応用可能性と到達点

地域内の圃場ごとの可変管理あるいは圃場内の局所管理のうちかなりのものは、年次や季節によってあまり変化しない基本的な管理区画にしたがって実行することができる。そして、その基本的な管理区画は土壌分布図や収量マップから推定することができる。しかし、比較的短期に変化するもの、たとえば雑草や害虫、土壌水分や栄養条件の違い、病害などによるストレスについては、リアルタイム情報が不可欠である。以上のことから本章では、精密農業管理への応用という観点で、地上における遠隔・非破壊計測手法、および衛星・航空機等による上空からのリモートセンシング画像計測に分けて、それぞれ作物とその生育環境の計測・評価法の具体的な応用場面を明らかにしつつ、研究の現状と今後の可能性を展望する。なお、ここで取り上げるリモートセンシング手法としては、農業への応用の観点から、可視近赤外と短波長赤外(0.4~2.6 $\mu$ m)の反射スペクトル計測、熱赤外放射計測(3~16 $\mu$ m)、および合成開口レーダ(SAR)の後方散乱計測(0.9~25cm)の波長領域で、かつ空間解像度が120m以下のリモートセンシング手法に限定した。

### (1) 地上におけるリモート・非破壊計測手法

#### 1) ハンドヘルドセンサ

作物や土壌を対象にした地上での各種分光器によるスペクトル計測研究は多数蓄積されている<sup>4)</sup>。これらの研究は、衛星など上空からの観測データの解析と解釈のための基礎としてだけでなく、地上で利用できるハンドヘルドセンサの開発にも展開されている。たとえば、作物診断用に少数バンドを瞬時に測定できるピストル型のセンサが試作されている。これらのハンドヘルドリモートセンサを使って、作物や土壌の変異とその原因をモニタリングするアプローチもきわめて有効である。特に、可視~近赤外のハイパースペクトルデータ(10 nm程度以下の高い波長分解能で、スペクトルパターンを連続的に測定する手法をハイパースペクトル計測と呼んでいる)は、窒素欠乏や病害、水分欠乏、白化などによる作物ストレスを識別できる可能性が示されている<sup>76,177)</sup>。たとえば、ハイパースペクトル測定によって、6種類の作物について各種のストレス要因(除草剤、病原、オゾン、菌根、老化枯死、乾燥、競争など)の影響を識別できる可能性が報告されている<sup>26)</sup>。また、可視域の低い反射率から近赤外域の高い反射レベルへと立ち上がる肩、すなわち「レッドエッジ」の位置は、作物のクロロシスやストレス反

応に特に敏感である<sup>39)</sup>。

現時点では、衛星搭載のハイパースペクトルセンサはまだないし、航空機用も限られたものしかない。さらに、ハイパースペクトル画像はデータ処理、解析、解釈ともコンピュータとそのユーザーにとって非常に時間がかかるのが現状である。したがって、航空機搭載の広波長帯センサによってストレスの変異をマップ化し、それをもとに、ハンドヘルドの反射スペクトルセンサを使うことによって、迅速かつ現場で、非破壊的に作物・土壌の変異の原因を診断するという方法が今のところ現実的であろう。

## 2) トラクタ搭載センサ

トラクタに各種センサを搭載して、圃場管理作業を自動的に最適化するアプローチは魅力的であるが、今のところ実用化されているものはほとんどない。試作例としては、除草剤や肥料を調節する目的で近赤外の反射特性から土壌有機物を測定するセンサ<sup>194)</sup>、土壌の養分レベルを推定するためのイオン選択性のあるセンサプローブ<sup>1)</sup>などがあるが、キャリブレーションが大きな問題になっている。また、プラウ耕の際、土壌貫入抵抗を測定して土壌水分、有機物レベル、土壌構造を間接的に推定する試み<sup>61)</sup>があるがこれは破壊法である。

大型トラクタによる土壌の圧密化は土壌管理上重要な問題である。圧密化を防ぐには、土壌硬度を測定するトラクタ搭載センサなどの開発<sup>165)</sup>により、1回の走行で最も効果の上がる耕起方法を実現する必要がある。土壌特性値を非接触で迅速に測定する電磁プローブが提案されており<sup>184)</sup>、粘土含有量や粘土層の厚さ<sup>206)</sup>、土壌水分<sup>90)</sup>、塩類濃度<sup>159)</sup>を推定できる可能性が示されている。

電磁波計をトラクタに搭載して、土壌水分起因の作物ストレスをマップ化する方法<sup>89)</sup>が提案されているが、電磁波特性と作物収量の関係の定量化に難点がある。また、作土層の厚さを推定するために使う試みもあるが<sup>184)</sup>、電磁波特性は粘土層の厚みだけでなく、作物の種類と密度、栽培法、測定時の土壌水分などの影響を強く受けることがわかっている。したがって、これらのセンサによる計測方法と測定値の解釈にはまだかなり注意を要する段階である。

雑草と作物をリアルタイムで分離する方法についても、すでにいくつかの研究がある<sup>89,189)</sup>。また、トラクタに搭載した CCD カメラのデータから作物

と土壌、残査を分離し最も効果的に農薬を散布できるようなアルゴリズムも提案されている<sup>25)</sup>。しかし、現存のセンサは赤と近赤外の2バンドの反射を利用するもので、緑の植生を検出するだけなので、今のところ作付け前の除草か、畦間の除草剤散布への応用に限られている<sup>45,176)</sup>。

収穫後圃場に残される作物体の一部や根系すなわち作物残査を定量評価することは、土壌肥沃土や土壌侵食を管理する上で重要である。たとえば、土壌と作物残査を分離する上で蛍光測定法が有効で、作業車に搭載できるプロトタイプが試作されている<sup>37)</sup>。

以上は、走行作業中に可変散布のための情報をセンシングする手法として比較的有望な手法の例であるが、実用化レベルに達しているものはほとんどない。さらなる開発とテストを重ね、下記のような応用場面に利用できる精度と耐久性をもったトラクタ搭載リモートセンサシステムの開発研究を進める必要がある。① 土壌有機物含有量の測定、② 土壌硝酸塩レベルの測定、③ 土壌圧密程度の測定、④ 土壌の粘土含有量、⑤ 水分含有量、⑥ 塩類濃度の測定、⑦ 雑草の検出、⑧ 作物残査の検出、⑨ 作物の窒素含有量の測定。

## (2) 作物生育と収量のリモートセンシング画像計測

### 1) 発育・生長

作物に対する管理の多くは、発育段階に対応して適時に行われることが多い。たとえば、コムギの登熟期やトウモロコシの粒の生長期、水稻の幼穂形成期、カンタループの糖分の増加期など決定的な発育段階で肥料を与えたり、水ストレスを制御したり、あるいは、成熟の進行状況に基づいて収穫のスケジューリングを行うなど、作物の発育段階を知ることが、管理を的確に行う上できわめて有用である。栄養生長期、生殖生長期そして老化期の発育相の変化は、レッドエッジの季節的な位置変化<sup>156)</sup>や、方向性反射の違い<sup>209)</sup>、反射光の偏光程度<sup>56)</sup>、あるいは、NDVI (正規化植生指数: 赤と近赤外波長の反射率の差と和の比) の経時変化<sup>16)</sup>に現れることが報告されている。

作物の生長量をリモートセンシングによって評価する試みはこれまで多くなされており<sup>4,88)</sup>、そのほとんどは、植生指数 VI と葉面積指数 LAI、植被率、バイオマス あるいは光合成有効放射 PAR 吸収率との関係を実験的に求める方法である (たとえ

ば, Pinter ら<sup>147)</sup>). そして, さまざまな種類の作物, 地域, 気象条件における生長との相関関係を求める試みは枚挙にいとまがない. 最近では, 土壌背景や大気やセンサ特性に感度の低いすなわちそれらの影響をあまり受けない VI が工夫されており<sup>69,108)</sup>, 種々の作物, 地域, 測定条件に対して安定的に適用できる関係式も提案されている<sup>161,162,204)</sup>. マイクロ波を使った合成開口レーダ (SAR) は雲を透過し夜間も観測できるという特有の利点があるため, 短波長の SAR 散乱係数を植被状態や作物相対生長のモニタに使える可能性が示唆されている<sup>19,125)</sup>.

一方, 別のアプローチとして, 作物情報を高精度で評価するにはリモートセンシングだけでは不十分であるとの前提に立ち, 作物生長モデルあるいは植被の放射伝達モデル (RTM) を組み合わせて用いる試みがなされている. たとえば, Clevers ら<sup>33)</sup> は, 作物生長モデル SUCROS のキャリブレーションや作物収量の推定精度向上のために反射スペクトルデータを用いており, Kimes ら<sup>93)</sup> は植被の反射率の推定, あるいは逆に多バンドないしは多方向の反射スペクトル計測から植被の特性値を推定する知識ベースシステム (VEG) を開発している. 植被を多方向から測定できれば, そこには空間構造についての情報が含まれているので, 植被の放射伝達モデルを用いることによって植被パラメタを精度よく推定することが可能である<sup>153)</sup>.

植生指数 VI を用いる方法はいくつかの限界があるが, 広域的なデータセットの解析には当面有効な方法であると考えられる. 今後は, 光収支に関する物理的構造をふまえたモデルとコンピュータシミュレーションを最大限に利用する手法を開発していくことが重要である<sup>129)</sup>.

## 2) 水ストレス・活性度

病害, 水分欠乏, 虫害などの環境ストレスに起因する作物の生理的活性の低下は, 多くの場合, 作物の蒸散速度の減少として現れる. そのため, 群落からの蒸発散・蒸散速度をリモートセンシングでモニタする多くの試みがなされてきた.

たとえば, 比較的簡単な方法としては, リモートセンシングによる植生指数から蒸発散についての植被係数(ある標準状態の作物群落の蒸発散に対する実際の蒸発散の比)を推定し, 業務的に定時観測されている気象データから実際の蒸発散の面的な分布を評価する方法が提案されている<sup>49)</sup>. もう一つの実

用的な方法として上げられるのが Jackson ら<sup>87)</sup> によって考案された作物ストレス指数 CWSI (Crop Water Stress Index) である. CWSI はリモートセンシングによる植被表面温度-気温差と大気飽差, および作物に固有のベースラインと呼ばれるストレス無しの場合のデータに基づいて, 作物の活性を 0 (ストレスなし) から 1 (ストレス最大) の範囲の指数として相対的に表わすものである<sup>87)</sup>. すでに, CWSI を算出するハンドヘルドセンサが開発されており, いくつかの空撮会社が圃場の CWSI 図を農場に販売している. また, この考え方を発展させて航空機センサや衛星センサによる熱画像と地上での気象観測データを結びつけて蒸発散や蒸散を推定する試みが多く報告されている<sup>85,119,133)</sup>. 一方, 赤外線放射测温と作物の光合成や気孔コンダクタンスと結びつけて生理的な活性を遠隔的に推定する試みも進められている<sup>77,78,79,81,82)</sup>. その他のアプローチとしては, 作物群落の光合成有効放射吸収能 (APAR) を介した植生指数と気孔コンダクタンスあるいは光合成速度の間の相関関係を利用したものがある<sup>175,199)</sup>. ハイパースペクトル計測によって求められるレッドエッジの位置移動も水ストレスの早期検出に有効かも知れない<sup>112,178)</sup>.

## 3) 養分欠乏

作物の窒素含有率やクロロフィル濃度は, 緑 (0.545  $\mu\text{m}$ ), 赤 (0.66  $\mu\text{m}$ ) および近赤外 (0.80  $\mu\text{m}$ ) の反射スペクトルに関係づけられる可能性がある<sup>23,47)</sup>. 同様な試みがコムギ<sup>65,182)</sup> や水稻<sup>186)</sup> についてもなされ, その可能性が示されている. しかし, 植被からの反射率やスペクトル指数は土壌背景の違いに敏感で, 最適の波長帯は非常に狭い領域であるため, 衛星に搭載されているような半値幅の広い波長帯を持ち空間分解能の低いセンサによる検出は困難である.

したがって, 現時点で面的な評価に利用されているのはほとんどが空中写真に基づくものである. たとえば, Balckmer ら<sup>12)</sup> は作物の窒素濃度に感度の高い波長帯 (0.55  $\mu\text{m}$ ) の空中写真を使って, トウモロコシ圃場内の窒素欠乏状況の分布図を作成し, 窒素欠乏の起こっている領域を検出できる可能性を示している. また, 実際の作物の反射スペクトルを窒素欠乏のない正常な作物の参照スペクトルと比較することによって, 窒素含有率に密接に関係する吸収の最大および最小値を決定し, 生育の早い時期から窒素欠乏に関する情報を得る試みがなされてい

る<sup>31)</sup>。また、筆者らも地上でのハイパーイメージングスペクトル計測による高精度推定を試みている。しかし、空中計測あるいは地上での精密計測によっても、窒素欠乏をはじめとする栄養状態ないしは成分を実用的な精度で推定する段階には至っていないのが現状である。

#### 4) 病気

病源の感染は生理機能の低下やバイオマスの減少につながるが、同時に作物葉の反射スペクトルにも種々の変化をもたらすので、リモートセンシングによって作物の病害の検出と種類の判別をできる可能性がある。たとえば、うどん粉病に感染した葉の変化は、兆候が肉眼で感知できるようになる前に反射スペクトルに変化が現れることが報告されている<sup>104,107)</sup>。また、ワタの根こぶ病とコムギの茎腐れ病を検出するのに赤外カラー写真を使った例がある<sup>191)</sup>。広波長帯の可視、近赤外の反射は病気によるバイオマス、葉面積、葉の傾斜角度などの変化を間接的にとらえるのには有効であり、葉面積指数推定手法をそのまま適用可能である。ただし、これらの変化は、気象環境、虫害、病気等々いろいろなストレスによって引き起こされる共通的な結果であり、それが病原によるものかどうかを判別するのは困難である。

しかし、病気の種類や症状によって変化の現れる波長が微妙に異なるため、病原の種類と葉の反射スペクトルや群落構造の変化との間の生理学的な対応が暗色化し可視スペクトルに変化が現れ、また、細胞の萎縮を引き起こし、その結果、近赤外域の反射率を減少させる。病気（うどん粉病やあるウイルス）によるクロロシス（白化）の場合には、窒素欠乏と同様、可視の反射スペクトルに明瞭な変化を引き起こすし、また、他の病気は萎凋やLAIの減少などによる群落の幾何構造の変化を伴うので、それによって検出できる可能性がある。以上のことから、これらの原因の識別のためのハイパースペクトル計測および判別アルゴリズムの開発が今後の重要な課題である。

#### 5) 気象災害など障害

作物障害は、低温、害虫、病気、養分や水分の過不足、機械的（風水害など）あるいは化学的（塩害、農薬害など）要因など多くの原因によって起こる。これらの障害は、多くの場合作物体の地上部の変化、すなわち、葉色や葉の形状（萎凋やねじれ、腐敗）、葉面積（落葉を含む）、あるいは葉や茎の角

度（折根、倒伏など）の変化として現れる。したがって、リモートセンシングによってこれらの変化をとらえ障害の程度を評価することができる。特に、航空機等による低層からの画像計測は、これらの変化を適時にかつ高精細度で記録し、被害の範囲と程度を評価する方法として有効である。それによって、行うべき管理を迅速に決定することができる。

航空機による空中写真を使ったこのようなアプローチはすでに広く行われており、病害や虫害の及んでいる範囲の推定や、散布した除草剤や落葉剤、水の効果を評価するのに利用した例が報告されている<sup>13,191)</sup>。たとえば、ピーナッツ群落の近赤外の反射を測定することによって、落葉の程度を定量化し、病害の面的変化を捉え得る<sup>134)</sup>。現在利用できる航空機搭載用のセンサのうちもっとも簡易なものは、数時間以内にデジタル画像を提供することができ、即時あるいは適時の管理作業への利用が可能になりつつある。

以上のことから、各種障害による作物障害の範囲や対応管理作業を迅速に決定するための情報計測の手段として、航空機等による低層からの高精細度マルチスペクトル画像観測手法の確立が期待される<sup>84)</sup>。

#### 6) 収量

収量は種々の要因の影響が集積された総合的な生産性の指標であり、その面的な分布の相対変異は年次変化が比較的小さく、土壌生産力の相対的な差を反映していると考えられる。したがって、収量マップは施肥<sup>96,171)</sup>、灌漑<sup>42)</sup>、栽植密度や土壌などの管理<sup>95)</sup>に直接利用できるほか、雑草、害虫、病気の管理にも間接的な情報として役立つ。また、収量水準の面的な変異についての情報は、土壌改良その他の長期的な圃場管理を的確に行う上で特に有用なものである。

精細な収量マップを作成するためには、一般に、直接サンプリングによって得られる点データと、距離の重み付けを用いた統計的な方法<sup>128)</sup>が用いられるが、このような空間統計学的方法は、細かい区画で多くのデータを必要とするだけでなく、扱っている要因以外には系統的な誤差がなく統計的にはランダムな変異のみであるという前提が必要である<sup>192)</sup>。しかし、実際には、土壌や作物の分布について、そのような前提をおけることはほとんどない。

一方、最近実用化されたコンバイン搭載型の穀実

量モニタ装置は、収穫走行しながら収量の面的な分布をマップ化できるという点で、圃場の局所管理上きわめて重要な進歩のひとつである。これらの収量モニタ装置の原理は、体積センサ<sup>72,173)</sup>、衝撃力センサ<sup>38)</sup>、光学センサ<sup>140)</sup>、電磁波センサ<sup>5)</sup>などによる流量測定に基づいている。これらの方法は、コムギ、トウモロコシ、ソルガム、ダイズ、ヒマワリなどの種子作物の収量モニタリングに利用されている<sup>170)</sup>。たとえば、Schrockら<sup>170)</sup>は容器内へ流入する穀実の量を5%以下の誤差で推定できたと報告している。しかし、この流量を収量の面的な分布に結びつけるためには、コンバイン内の穀実流の時間変動の正確なモデリングが必要で、解像度の粗さ、刈り取り地点と流量計測点との時間差、コンバインの速度変動、振動や起伏に起因するノイズなどかなりの誤差が入ってくる<sup>11,99)</sup>。また、相対側位GPSによって特定の場所で瞬時的な位置データが得られても、まだ解像度が粗く誤差も大きいので、コンバイン搭載型の収量モニタ装置による収量マップの作成には今のところ空間分解能、精度とも限界がある。

そのため、点測定された収量推定値から収量マップを作成するために、赤外空中写真をサンプリングによる点推定値と組み合わせ、対応する点の相関関係からマップを作成する試み<sup>192)</sup>が行われている。Longら<sup>103)</sup>によると、コンバインによる点推定値から収量マップを作成する4種類の手法、すなわち、土壌調査図を使う方法、空中写真を使う方法、および2種類の空間統計学的内挿法を比較した結果、空中写真を使う方法が他の3つの方法に比べて有意に高精度であった。収穫時点の反射スペクトルと収量の相関関係についても、種々の方法が検討されており<sup>135,177)</sup>、点側定値を面データに展開する過程なしに、空中ビデオ写真あるいは衛星写真から直接収量マップを求める方法も示唆されている<sup>207)</sup>。いずれにしても、高精度農業の基礎としての圃場間および圃場内の収量分布図の作成方法は、改良の必要性が高くかつ改善の余地も大きく、リモートセンシング画像計測の応用が特に期待される場面である。

### 7) 生長と収量の予測

収穫時点における収量の評価だけでなく、できるだけ早期に収量を予測することも重要な課題である。簡単なアプローチとしては、生育の途中段階で推定した1回のNDVI測定値あるいはその一定期間中の積算値を最終収量と関係づける試みが行われている<sup>48,158,193)</sup>。その他、生長に伴うNDVIの変化

曲線の積算値によって収量を推定したり(たとえば、トウモロコシ、ダイズ、ムギ類)<sup>15)</sup>、出穂後の枯死速度をモニタしたり<sup>74,148,149)</sup>、登熟期間の長さを測定することによって<sup>154)</sup>、収量を評価している。これらの研究から、NDVIは発芽や栄養生長についての情報を得るために有効であることがわかっている。しかし、高い精度で収量を予測するためには、生育経過を正確にモニタすることが必要で、多波長データを用いた多変量回帰モデル<sup>75)</sup>や、農業気象的なシミュレーションモデルと結びつけることが必要である<sup>138,166)</sup>。

具体的には、リモートセンシングデータをモデルに対するリアルタイムの入力として使うとか、モデルのキャリブレーションや検証に用いるなどの方法によって、シミュレーションモデルの能力や精度を向上させることができる。特に、リモートセンシングデータは作物の光吸収に関連したモデル入力(LAIや植被率など)を推定するために利用できることがわかっている。たとえば、作物の乾物生長速度は吸収された光量から一定の変換効率を介して算出される<sup>68,203)</sup>。生長経過についてのこのような情報は、乾物生産速度と最終収量との関係に基づいた収量予測に用いることができる。また、別のアプローチとして、リモートセンシングによって推定されるLAIや蒸発散の値を、モデルのキャリブレーション、すなわち初期条件やモデルパラメタの修正に使うことによって、収量予測の精度を上げようとするアプローチがある<sup>18,105,106,121)</sup>。後者は、モデルが基本的な生長パターンを内蔵しているので、少数回のリモートセンシングデータでもかなり効果的に予測精度を上げられるという利点がある<sup>86)</sup>。

なお、リモートセンシングと生育モデルの結合に関しては、モデルに必要な入力そのものをリモートセンシングによって推定しようとする方向と、モデルに必要な入力のうち当面手に入らないデータをリモートセンシング情報で置き換えられるように、モデルを改変する方向がある。たとえば、作物群落の光吸収能は光合成量を決定する重要なパラメタであるが、従来のモデリングのアプローチはこれを葉面積指数の関数として表現してきた。しかし、光吸収能は葉や茎など群落構成要素の幾何学的配置や個々の葉の吸収スペクトル特性、太陽高度などに影響されるため、むしろ葉面積指数の推定をスキップしてリモートセンシングによる反射スペクトルを用いた方がより直接的かつ正確に光吸収能を求められる可

性能がある<sup>3,80,147</sup>。このように、リモートセンシングデータを利用することによって、より生物学的に意味のあるかつ正確なモデル化を図り得ることもあり、リモートセンシングデータを利用できる方向でモデリングを図るアプローチが効果的と考える。

以上のことから、今後特に有望な方向として、① 生育シーズンの途中にマルチスペクトル画像を測定し、回帰モデルあるいは農業気象的なモデルと結びつけることによって収量の面的分布図を作成する、② リモートセンシングによるリアルタイムデータをシミュレーションモデルと結合することにより生育・収量を高精度で予測する、などが考えられる。

### (3) 作物生育環境のリモートセンシング画像計測

#### 1) 土壌特性の評価

**土壌肥沃度**：土壌の肥沃度は収量生産性に影響する環境要因のうちでも特に重要なものである。Nielsen ら<sup>131</sup>は収量性に影響する重要な肥沃度特性として、土壌窒素など多量要素および微量元素、圃場の起伏と傾斜、土壌有機物量を上げている。また、土壌有機物の含有量は、施肥効果の大小とも密接に関係している。肥沃度は多数の要因によって規定されるため評価が難しく、不耕起土壌の場合には深さ方向の変化も加わるため、土壌の面的変異を定量化するのはさらに複雑になる。

圃場の局所管理のために土壌特性の面的変異をマッピングする方法として、① 土壌調査図を使う方法、② 各圃場についてメッシュ状にサンプリングした点データから空間統計学的方法で内挿する、③ リモートセンシングデータを使う方法、④ 数値標高データと土壌・地形モデルを使う方法、の4つのアプローチがある<sup>9</sup>。しかし、現存する縮尺（我国では5万分の1）の土壌図では圃場ごとあるいは圃場内の面的な変異を表わすことはできない。米国の圃場規模でも、圃場内の土壌の面的な分布を管理に使うには6千分の1～8千分の1の縮尺の調査図が必要とされている<sup>180</sup>。また、調査データそのものの精度が圃場内の土壌特性の詳細な変異を表すには不十分である<sup>120</sup>。したがって、土壌調査図を局所管理に応用することは難しく、詳細な土壌データを得るためには、数十m程度のメッシュ毎に土壌サンプリングを行い、その分析データに依存しているのが現状である<sup>52</sup>。このような直接サンプリングによる点データに基づいて面的な情報を得るために、従来のクライジング法（空間統計学的な予測法の一つ）に代わるものとして、スペクトルおよび

コスベクトル分析、空間共分散法、ファジー推論法などいくつかのデータ処理法が提示されている<sup>14,131</sup>。

リモートセンシング画像が得られれば、点データとリモートセンシング画像を併用する方法によって、マッピングの精度を上げたり、調査頻度や1回のサンプリング数を減らすなどの大きな効果を上げ得る<sup>46</sup>。特にGISと空中写真を併用したファジー分析は、少ない点データから連続的な面情報をもとめるのに効果的とされている<sup>112</sup>。さらに、航空機やヘリコプタに搭載した高精細度のデジタル画像は、局所管理のための土壌マップの作成に特に有効である。土壌表面の反射特性を、レス土層の厚さ<sup>114</sup>、土壌有機物<sup>163,208</sup>、土壌養分<sup>190</sup>、土壌粒度分布<sup>95</sup>などの変異と直接関係づけようとする試みも行われている。土壌の熱特性は土壌水分<sup>73</sup>や土壌の圧密度<sup>22</sup>の面的変異と関係付けられている。そして、実際に土壌表面の反射スペクトル特性と土壌物理特性や肥沃度との相関関係に基づいて、空中写真から圃場を直接いくつかの小管理区画に分類する試みもある。

土壌と植生の関係が密接な自然植生域では、リモートセンシングによって植生を観測して間接的に土壌タイプを推定していることが多いが<sup>97</sup>、農作物の場合にはこのような関係が希薄なので、裸地の反射スペクトルから土壌特性を直接抽出する必要がある。一般に、可視～近赤外波長帯の反射スペクトル特性にもっとも強く影響する土壌要因は土壌有機物と炭酸カルシウムの含有率である<sup>101</sup>。土壌中に2%以上の有機物が存在する場合には、土壌のスペクトル特性は主に有機物含有率によって支配されることが報告されている<sup>7</sup>。また、赤のスペクトル(0.6～0.7 μm)は特に酸化鉄の含有率に感度が高い<sup>34</sup>。Leone ら<sup>101</sup>によると、Landsat-TMの波長帯を使った単純な教師なし分類の結果は土壌の種類とよく対応した。ただ、土壌特性と反射スペクトルの間に上記のような関係が明らかにされているにもかかわらず、いまのところ、リモートセンシング画像は土壌特性図の作成に系統だって利用されているとはいえない。その理由は、土壌水分や、表面粗度、気象要因、太陽高度、観測角などの変化によって、評価したい土壌特性（たとえば、有機物、粒度分布、化学成分）に対応する反射スペクトルが影響を受けるからである。このことは、たとえばいろいろ違った方法で耕起された農地の土壌特性をマップ

化するような場合に特にはっきり現れる。Leekら<sup>100)</sup>は逆にこれを利用して、プラウ耕が行われる時期にとった反射スペクトル画像から耕起された領域を抽出し、土壤侵食防止のための基礎情報として使えることを示している。上記のような種々の攪乱要因の影響を減少させる方法として、Kimesら<sup>94)</sup>は土壤のハイパースペクトル画像データにエキスパートシステムを利用する方法を提案している。このアプローチは土壤粒度の大まかな分類や、有機物の多少を識別するといった場合には比較的うまくいっている。また、土壤粒子のサイズの分布図を作成する場合の、土壤表面の粗度や水分、植被などの違いによる誤差は、多時期の画像を分類に使うことによってかなり解消できることが指摘されている<sup>127)</sup>。Salisburyら<sup>168)</sup>はまもなく打ち上げられるEOS-ASTERのセンサ(8~14  $\mu\text{m}$ , 解像度 90 m)によって得られる熱赤外バンドの比をつかって、粒子サイズ、水分率、有機物含有量、多量要素含有量などの土壤特性を面的に区分可能なことを示している。

以上のことから、今後は、① 一時期あるいは多時期に裸地状態でマルチスペクトル画像を測定し、その画像解析やモデルとの結合によって、局所管理に必要な高精細度の土壤分類を行う、② 裸地条件あるいは完全植被の状態での反射スペクトルの画像を測定し、土壤特性図およびそれに基づいた管理マップの作成、ならびにそれらの定期的更新に利用する、などが有望と考えられる。

**土壤水分:** 土壤水分の圃場内の面的変異が時期的にどう変化するかは、耕起や窒素施肥などの管理に特に有用である。Lindstromら<sup>102)</sup>が指摘しているように、トラクタの車輪が繰り返し通過することによる土壤の緊密化とそれに伴う収量低下は、耕起時に土壤表面の水分状態についての情報があれば軽減化できる。また、土壤水分は窒素の利用効率が最大になるように窒素施肥のタイミングを調節するための判断材料にもなる<sup>70)</sup>。トウモロコシの土壤残留窒素に対する感受性は、水ストレスを受けた部分や、干ばつの厳しい年には高まることがわかっている<sup>167)</sup>。

裸地の土壤水分は比較的長い波長(たとえば、5.7 cmのCバンドや21 cmのLバンド)のマイクロ波後方散乱係数と密接に関係しており、合成開口レーダ(SAR)の後方散乱係数を利用して農地の土壤水分をマッピングする試みがなされてきている。この相関関係は裸地についてははっきりしている

が、生育量が異なる圃場のデータを込みにすると、ばらつきがかなり大きくなる<sup>10)</sup>。それ以外にも、SAR画像によって圃場の局所管理のために土壤水分のマッピングをするにはいくつかの問題点がある。これまでの研究で、SARの測定深度は波長の0.1~0.2倍にしかすぎず、かつその深さは土壤水分が高くなるほど浅くなることがわかっている。たとえば、Lバンドでは土壤水分が中程度のときの測定深度は約10 cmである<sup>44)</sup>。また、SARの散乱係数は土壤水分だけでなく土壤表面の粗度にも感度があり、したがって、耕起による作土表面のこぼこ状態の違いや地面の起伏の影響を受ける。そのため、現時点での単バンドSAR画像データのもっとも有効な利用場面は、表面粗度や植被や地面起伏の影響が小さいという前提条件をおける場合に、土壤水分の経時変化を捉えることであると考えられる<sup>44)</sup>。

一方、以上のような問題点を解消するため、土壤水分の分布の推定に関する最近の研究では、複数の波長のSARデータ、すなわち上記のような長波長バンドとKuバンド(2 cm)、Xバンド(3 cm)といった短い波長を同時に使う試みがなされている<sup>125,137,150,185)</sup>。これは複数波長を使うことによって、植生による長波長バンドの減衰を補正して土壤水分の推定精度を高めることをねらったものである。また、マイクロ波データとともに他の波長域のリモートセンシングあるいは補助データをマイクロ波伝達モデルに対する入力として使うことによって、土壤水分以外の表面特性の違いによるノイズを低減化し、土壤水分推定精度を改善しようとする試みもなされている<sup>124,205)</sup>。

**塩類集積:** 塩類集積の起こっている土壤は、そうでない土壤に比べて一般に可視および近赤外領域の反射スペクトルが相対的に高いことが確かめられている<sup>157)</sup>。Vermaら<sup>200)</sup>は反射スペクトルと表面温度を同時に使うことによって、塩類集積の進んだ土壤と正常な砂土の反射スペクトルが同程度の場合でも、より容易に識別ができると報告している。さらに、Sreenivas<sup>181)</sup>は分光計測とSARの散乱係数データを結びつけて使うことによって、土壤水分が高い条件においても塩類集積土壤とそうでない土壤を分類できる可能性のあることを示した。このように、塩類集積のような短期的な変化をマッピングする上でもリモートセンシング画像を利用できる。

## 2) 生物的生育環境の評価

**雑草害:** 雑草の発生状況を正確にとらえることは、その時点での雑草防除だけでなく、次年度以降の圃場管理を考える上でも重要である。雑草の侵入を地図化したり薬剤散布の要不要をリアルタイムで決定する際に、センシング技術の重要性が指摘されている<sup>3)</sup>。

一般に、除草剤の散布は播種前（主として多年生雑草の防除）、播種直後と生育初期（一年生雑草および播種前の防除で残ったもの）の3つの時期に行われる。播種前の局所管理については必要な情報は単に作物があるかないかを判別するだけでよく、したがって、リモートセンサも比較的簡単なものでよい。すなわち、既述したトラクタ搭載型のセンサあるいはVIや教師付き分類に基づいたデジタル画像の利用で十分である（たとえば、Richardsonら<sup>160)</sup>）。普通、多年生雑草は毎年同じ付近に発生する傾向があるので、多年生の雑草の制御には前年度の発生マップでも使える可能性がある<sup>21)</sup>。一方、出芽後の除草剤による局所的防除は、作物と雑草の識別が必要なのでやや難しくなる。位置情報の利用（たとえば、畦間植物はすべて雑草とみなす）を別とすれば、両者の識別は、一般に作物と雑草の間の可視・近赤外の反射スペクトルの違いを利用するか<sup>20)</sup>、雑草の色が明確に異なる特定の時期（たとえば開花時期）の画像を計測する方法による。Hansonら<sup>62)</sup>はコムギ圃場での野生エンバクの侵入分布のマッピングを試み、雑草の侵入を図化する場合の空中写真の有効性（タイミング、精度、コスト等）を検討している。

Brownら<sup>21)</sup>は、リモートセンシングを使った雑草防除システムの試みを報告している。彼らのシステムは、不耕起栽培のトウモロコシを対象に、画像計測による雑草マップとGISに基づいた判断モデルを使って、除草剤の最適の組み合わせと散布量を決定するものである。このシステムによって、除草剤の使用を40%以上も減らすことができたとしている。

**昆虫害:** 昆虫の害は多くの場合、葉面積指数や生長の低下<sup>201)</sup>に現れるため、これらの変化をモニターすることで間接的に虫害を評価することは可能である。また、バッタやダニなど昆虫の生息地や伝播パターンの特徴をリモートセンシングによってとらえることにより間接的に昆虫の動態を評価することもできる<sup>71)</sup>。また、リンゴにダニがとりつくると葉のクロロフィル濃度が低下し、カロチノイドとクロロフィ

ルの含有量の比率が増大するという作物体内の化学的变化を利用して、可視、近赤外のハイパースペクトル測定によって、ダニの付着樹を遠隔的に検出できる可能性が報告されている<sup>139)</sup>。しかし、昆虫の存在をリモートセンシングによって直接評価する試みは少ない。被害を作物体の変化として定量化することは、特に低層リモートセンシングの重要な役割である。今後さらに原因の同定手法や詳細な発生状況の把握手法の開発も期待される。

#### (4) 面的変異の原因の診断と管理対策

精密管理を実現するためには、リモートセンシングによって得られた面的変異情報に基づいて診断を行い、最適化のための処方決定が必要がある。それには、統計的解析によって変異の原因をはっきりさせ<sup>2)</sup>、作物や土壌の変異と管理手段との関係の解析に基づいて可変散布の基準を定量化し<sup>96)</sup>、意思決定支援システム<sup>35)</sup>を確立することが必要である。診断の方法としては、ひとつの特性値分布に閾値を設けるだけの簡易な方法<sup>188)</sup>から、農業的に重要な複数の特性値の分布とエキスパートシステムを使った複雑な方法<sup>64)</sup>までいくつかの選択肢がある。面的にも時間的にも変化する作物と土壌の状態を制御するには、因果関係の解析ならびに総合的な管理方策決定のためのエキスパートシステムを高度化することが必要となる<sup>49)</sup>。McGrathら<sup>113)</sup>の土壌沃度管理パッケージでは、データの解析と他の要因を参照したデータ評価、および管理方策のメニューを提示するエキスパートシステムが一体化されている。このパッケージはリン酸、カリ、有機物、土壌水分を扱ういくつかのサブモデルを組み合わせたもので、入力としては各地点に固有で比較的变化の少ないデータとともにリアルタイムの変動データが必要である。このようなモジュール合体型モデルとGIS情報を結合するアプローチは、局所管理のためのエキスパートシステムや意思決定支援システムを開発する非常に有効な方法の一つである<sup>21)</sup>。個別作物の管理のための意思決定支援モデルは、ソルガム<sup>196)</sup>やその他の穀類<sup>17,66)</sup>について開発されているが、今後は生産プロセス全体を面的に捉えるために、リモートセンシング情報やメッシュ気象データなどを組み込んだ総合的な診断・意思決定システムを構築することが重要である。

#### (5) 局地気象情報のリモートセンシング画像計測

作物生長モデルの多くは、各地点の正確な気象データを必要とする。特に局所管理のように精密な面

的分布を追究する場合には、微気象条件が面的にどのように分布しているかの情報は不可欠である。しかし現実には、何 km も離れた地点の、しかも圃場条件とはかなり異なる測候所でとられたデータを使う場合が多い。我国でも 1 km メッシュの気象データを算出するのに 20 km~50 km 程度離れた観測地点のデータから内挿したデータを利用している。

しかし、日射<sup>146)</sup>、PAR<sup>54)</sup>、長波純放射<sup>43)</sup>、降雨量<sup>143)</sup>などの気象要因を、衛星からのスペクトル画像データを使って推定できる可能性を示した例は多い。このような気象要因の推定は、静止衛星からの 1 日 2 回という高頻度の観測データによってほぼリアルタイムで行うことができる。したがって、比較的解像度でも高頻度の観測が可能であれば、マルチスペクトル画像を使って、日射、PAR などの気象情報の詳細なマッピングができる可能性があり、農地・作物の局所管理や予測のための基礎情報として利用することができる。

#### (6) 地形特性のリモートセンシング画像計測

標高や傾斜についての情報は、特に大規模な畑地や草地の管理上重要である。圃場の水利特性は地形要因によって大きく影響される。実際、収量変異には化学的特性よりも、土壌の物理特性あるいは水分収支に関わる地形要因の方が強く影響する場合がある<sup>145)</sup>。Vetsch ら<sup>198)</sup>も単純な地形起伏の情報が窒素施肥の局所管理に有効であったと報告している。た

とえば、Verhagen ら<sup>197)</sup>は土壌の物理特性の測定値と標高データを水収支および作物生長に結びつけた機構モデルを作成し、同じ水利特性を持った区画を切り分け、その経時的な変化をマップ化する試みをしている。また、有機態炭素、pH、水分、作土層の厚さなどの土壌特性の面的変異のマップは、施肥の効率化すなわち生産コストと環境負荷の低減化に役立つが<sup>132)</sup>、それらのパラメタの推定にはこれまでは主に粗い起伏と地形のみに基づいたモデルが使われている<sup>9,202)</sup>。

以上のように、土壌特性や水利特性の面的変異の評価にはデジタル標高図 (DEM) 情報が不可欠である。しかし、現存する標高数値データは圃場レベルの局所管理には粗すぎるため、これらのアプローチをただちに局所管理に応用するには無理がある。したがって、航空機あるいは衛星からの高解像度ステレオ画像を利用した局所管理に必要な精度の DEM 生成への期待は大きい。Spangrud ら<sup>180)</sup>は最近、GPS データを使って高精度の圃場起伏マップを作成できる可能性について検討し、局所管理のために必要な測定点数と測定点の分布を提示している。また、ステレオ画像から数値標高マップを生成することは、すでにパソコン上で実行でき<sup>55)</sup>、ステレオ画像から DEM 情報を自動的に求める自動化ステレオ補正法が利用可能になりつつある<sup>28)</sup>。  
(つづく：引用文献は次回に一括して掲載)