

世界の環境・食料モニタリング

誌名	農林水産技術研究ジャーナル
ISSN	03879240
著者	岡本, 勝男
巻/号	20巻6号
掲載ページ	p. 22-28
発行年月	1997年6月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



世界の環境・食料モニタリング

岡本 勝男

現在、地球環境問題が注目されている。それは、将来にわたって世界の人口を十分満たすだけの食料が確保できるかが、不透明だからである。1960年4月1日に初めて気象観測衛星 NOAA/TIROS-1 が打ち上げられて以来、広域の環境を同時に同一条件で、繰り返し観測することが可能になった。環境モニタリングについては、土地被覆変動や炭素フラックスの評価だけでなく、作物生育環境の評価についての研究成果にも触れる。食料モニタリングについては、作付け分類や面積推定のほかに、生育診断や収穫量推定に関する研究成果についても触れる。最後に、主要作物の作付け面積や収穫量を地球規模で推定するために、なにが必要かについて述べる。

1. はじめに

1960年4月1日に初めて気象観測衛星 NOAA/TIROS-1 が打ち上げられて以来、広域の環境を同時に同一条件で繰り返し観測することが可能になった。NOAA/POES シリーズでは、TIROS-1 から37年間のデータが蓄積されている。LANDSAT シリーズでは25年間のデータが蓄積されている。また、これらの衛星データやモデルを使い、温度、降水量、植生指数など地球規模の観測データも毎日得られるようになった。さらに、標高や土壌区分などの地球規模の地理情報も作成されてきた。その結果、リモートセンシングデータや地理情報を使い、環境、作物生産地域や収穫量について地球規模で議論することが可能になっている。

本稿では、広域のモニタリングを扱うため、

Katsuo OKAMOTO: Global monitoring of environment and crop production

主に衛星リモートセンシングデータ解析技術とその成果について述べる。なお、右肩に*を付けた用語は、末尾に説明を記した。

2. 環境モニタリング

(1) 地球環境

炭素は、二酸化炭素やメタンなどの温室効果ガスの構成要素なので、その挙動を把握することは、地球温暖化を研究するうえで重要である。熱帯林は、伐採や焼畑のような土地利用変化によって、大気中の炭素の供給源となるが、一方で光合成によって大気中の炭素を固定する。そこで、Foody, G. M., *et al.* (1996) はブラジルで林地の再生過程の分光反射特性*の変化を調べ、炭素固定能力や広域での森林と大気との間のカーボンフラックスの推定も可能であると報告している。Veroustraete, F., *et al.* (1996) は、炭素フラックスを推定する手法を開発した。彼らは光合同化作用と純生態系交換を評価する

ために、NOAA-11/AVHRR データから計算した正規化植生指数* NDVI を使って、リージョナル・スケールで光合成有効放射吸収*割合 fPAR を求めている。

熱帯雨林は、地球上の炭素のシンクとして重要である。橋本泰明・土屋清 (1995) は、ブラジルで JERS-1/SAR LHH バンド・データ (L は波長帯を、HH は偏波*を表す。) を使って、森林伐採面積とその推移を推定し、1年間に303km²が伐採されたと報告している。Frohn, R. C., *et al.* (1996) は、ブラジルの Rondônia 州で、LANDSAT/MSS と TM データ、動的経済的土地保有解析 (DELTA) モデルを用いて、土地利用変化における植民と道路建設の空間的影響を推定した。一方、Rosenqvist, A., (1996) は、森林伐採後に植えられたエステート作物を区分するために、マレーシア西部でオイルヤシとゴムの木の後方散乱特性を調べ、LHH バンド・データはゴムの成長と、LHH と CVV バンド・データは葉面積指数 LAI と相関があったと報告している。

地球環境変動や、農地を把握する際に、土地被覆分類は前処理として重要である。ところが、気象条件は毎年変動するため、衛星データを土地被覆分類するとき、毎年の気象変動の影響が入ってくるのは避けられない。そこで、Ehrlich, D., and Lambin, E. F., (1996) は、地表面温度と NOAA/AVHRR GAC データから計算した NDVI の時系列を用いて、アフリカ大陸の土地被覆分類を行った。その結果、8年の土地被覆分類を行い、気象変動の影響が除去できたと報告している。Carleton A. M., and O'Neal, M., (1995) は、リージョナルな地表面水分の短期的変動やフェノロジーの推移が、NOAA/AVHRR LAC データから計算した NDVI の変動に「シグナル」として現われると報告している。

川島博之・戸田任重 (1995) によれば、国レベルの窒素収支はその国の食料生産力を表す指標となる。生態系レベルの窒素収支は、地下

水の NO₃-N 汚染の指標ともなる。Johnson, L. F., and Billow, C. R., (1996) は、ダグラス・モミの葉に含まれる全窒素濃度を分光反射率から推定している。

陸域の環境だけでなく、海域の環境についても研究が行われている。Forster, B., *et al.* (1994) は、LANDSAT/TM データと実測データから陸上から流れ出した水面浮遊物質粒子サイズと数を推定している。主に、農業に起因する環境汚染も、社会問題化している。岡本ら (1992) は、LANDSAT/TM データを用いて、沖縄島のサンゴ礁が流出して堆積した赤土の分布を把握する手法を開発し、Okamoto *et al.* (1993) は、この手法を用いて、沖縄島カタバ地区沖の1984~1989年のサンゴ礁内の赤土堆積分布の変動を明らかにした。また、灘岡和夫・田村英寿 (1992) は、理論的堆積指標を導入して、植生による土地被覆率が赤土流出・堆積に対して最も大きな寄与率を持つことを示した。

(2) 農業環境

作物の生育にとって土壌水分は、気温と共に重要な要素である。O'Neill, P. E., *et al.* (1996) は、Lバンド PBMR データと ESTAR データを用いて、トウモロコシ畑の土壌水分率を推定した。Taconet, O., *et al.* (1994) は、航空機搭載散乱計 ERASME を用いて、コムギ畑のレーダ後方散乱特性*を調べ、XHH バンド・データから作物体の水分含量を推定している。Wigneron, J. P., *et al.* (1995) も、CバンドとLバンドの受動型マイクロ波センサ・データを用い、フランスのダイズとコムギ圃場で、15%の誤差で土壌水分含量と植物体水分含量が推定できたと報告している。

Bhatti, A. U., *et al.* (1991) は、土壌の肥沃度 (腐植含量とリン含量) とコムギ収穫量を推定し、少ない地上調査で広い範囲を推定するのに有効であると報告している。

IRRI (1984) の作物の生育環境把握についての興味深い研究もある。イネ生育環境は、灌漑、

天水利用低地, 高台, 深水および潮間帯湿地の5つのイネ生態系に分けられる。さらに, これらの生態系は, 6つのサブ生態系に分けられる。Singh, V. P., and Singh, A. N., (1996) は, 天水利用型イネが生育する生態系/サブ生態系の抽出と特徴付けの基準を示した。インドのウタール・プラデッシュ州で検証した結果, 一部を修正することで, ほかの穀物の生態系にも適用可能であると報告している。

3. 食料モニタリング

(1) 耕地の検出と作付面積の推定

リモート・センシング画像の概略を目視判読で把握しておく, その後のデジタル解析を容易, かつ, 正確に行うことができる。そこで, Haack, B., and Jampoler, S., (1995) は, 農作物の目視判読のための画像合成方法について検討し, 作物の違いを正確に表すことができることを示した。

イネは主要穀物であり, アジアを始めとする多くの国で広く栽培されている。精度の良い作付面積の推定は, 作付, マーケティング, 流通において重要な情報となる。それに資するため, McCloy, K.R., (1987) は, オーストラリアのニュー・サウス・ウェールズ州でイネの分光反射特性を調べた。そして, McCloy, K. R., et al. (1987) は, 水稲作付け地域の抽出を行い, 最高95%の精度を得たと報告している。Nageswara Rao, P. P., and Rao, V. R., (1987) は, インドの稲作地帯で行政区ごとの水田の抽出を行った。統計資料と比較した結果, 水田面積割合が50%以上の行政区では, 面積にして90~94%の精度を得たと報告している。Tennakoon, S. B., et al. (1992) はタイでイネの作付け地を, Pestemalci, V., et al. (1995) はトルコでコムギとオオムギの作付け地を, Dawbin, K.W., and Evans, J. C., (1988) はオーストラリアでコムギ, オオムギ, オーツムギの作付け地を, それぞれ90%以上の精度で抽出している。しかし, こ

れらの精度はあくまでも分類精度であって, 水田面積の推定精度ではない。

作物の作付け面積や収穫量を推定する上で, 作付け図の作成は欠くことができない。岡野千春ら (1993) は, 北海道帯広市周辺で, 作物の生育ステージの違いを利用して, 95%以上の精度で作付け図を作成した。圃場レベルで精密に作物分類するためには, 高空間解像度衛星データは有効である。Jewell, N., (1989) は, イギリスで, SPOT データを用いて, 最高88%の精度で作物を分類できたと報告している。

広域の面積推定精度を高めるため, 統計的手法も取り入れられている。Moreira, M. A., et al. (1986) は, ブラジルで, 航空写真の目視判読結果に基づいて, LANDSAT/MSS データの分類結果を補正して, コムギの作付け面積を推定した。Sridhar, V.N., et al. (1994) は, インドで, IRS-1B/LISS-I データをコムギの占有率別に3層に分け, 階層別にコムギ畑面積を推定した。Buckland, S. T., and Elston, D. A., (1994) によれば, このような比推計手法では地上データを用いて推定結果を補正する場合, 標本の取り方によって補正值が大きく変わる危険がある。

土地被覆分類を施しただけでは, 複数の土地被覆クラスを含む混合画素があるため, 作付面積の推定精度に限界がある。そこで, Okamoto, K., and Fukuhara, M., (1996) は, 温帯地域の水稲作付け面積を正確に推定する手法を提案した。LANDSAT/TM データを用いて北海道と宮城県で検証した結果, 統計値との平均の差は3%以下であったと報告している。Quarmby, N. A., et al. (1992) は, NOAA/AVHRR データをカテゴリ分解するための線形混合モデルを提案した。ギリシャ北部で検証し, イネ, 棉花, トウモロコシ, コムギの作付け面積を平均89%の精度で推定できたと報告している。

作付分類を, 作物生育期間中の植生量の変動パターンを利用して行う試みも多い。作物生育期間中の NOAA/AVHRR データから計算した

NDVIの時系列データを用いて、Kerdiles, H., and Grondona, M. O., (1995) はアルゼンチンで冬作物（主にコムギ）と夏作物（主にヒマワリ）、牧草面積を、Rasmussen, M. S., (1992) は北部ブルキナ・ファソの半乾燥地でキビの栽培面積を推定した。Brisco, B., and Brown, R. J., (1995) は、カナダ西部で、作物生育期間中の複数の LANDSAT/TM データと CCRS/SAR データを用いて、作付分類をした。そして、TM データでは雲で観測できないときでも、SAR データは確実に取得できるため、利用効果は大きいと報告している。

土地被覆データは、作付けの把握、収穫量推定、これらの農業統計への応用のために重要である。Schotten, C. G. J., *et al.* (1995) は、ERS-1/SAR データの作物の生育初期での識別の可能性を評価している。

食料政策上、国レベルや地球レベルの作物生産量を推定することは、重要な課題である。Quarmby, N. A., (1992) は、北ギリシャを対象に、NOAA/AVHRR データを用いて、作付け面積を推定した。統計資料と比較し、平均90%の精度で推定できたと報告している。

作物の作付パターンや農地面積とその変動を把握することは、次の作期の作付を予測したり、作付面積を統計的に推定する際に、重要である。Manavalan, P., *et al.* (1995) は、インドのカラナタカ州で冬作と夏作の作付パターンを評価している。Lenney, M. P., *et al.* (1996) は、エジプトのナイル・デルタおよび西隣地域で農地の改廃を評価し、1986年から1993年までに農地が43%増加したと報告している。Salem, B. B., *et al.* (1995) も、同地域で都市化による農地面積の変動を解析し、15年間で同地域の80%以上を占めていた農地が46%にまで減少したと報告している。

リモートセンシング技術利用の利点の1つに、コストの軽減がある。Nageswara Rao, P. P., and Mohankumar, A., (1994) は、インドのカラナタカ州で作付分類とその解析費用計算をし、

分類精度は95%以上で、解析費用は同州農業統計作成の1/2、同州経済統計作成の1/5であったと報告している。

(2) 作物の生育状態の把握と収穫量の推定

McCloy, K. R., (1987) は、オーストラリアでイネの分光反射特性を調べ、赤波長と近赤外波長からイネの生育状態を把握できると報告している。しかし、空間解像度の高い衛星データは、時間解像度が低かったり、時間解像度の高いデータでも雲の影響で毎日観測できない。そこで、Moulin, S., *et al.* (1995) は、作物の衛星観測分光反射率データをシミュレートするモデルを提案した。

作物の栄養状態やストレスを把握することは、重要な課題である。Pearson, R., *et al.* (1994) は、アメリカのテキサス州で、航空機搭載デジタル・ビデオ・カメラ画像を用いて、作物ストレスの検出を行った。その結果、凍結や早魃、虫害のストレスの検出が可能となり、リアルタイム農業モニタリング衛星の技術の確立とマーケティングに役立ったと報告している。Ferna'ndez, S., *et al.* (1994) は、植物体内窒素含量や水分のストレスと冬コムギの分光反射特性との関係を解析している。

作物水分ストレス指標は、植物のストレスの検出に使われている。しかし、葉温測定値が必要なため、広域の適用には困難であった。そこで、Moran, M. S., *et al.* (1994) は、水不足指数という新しい概念を導入し、アメリカのアリゾナ州のアルファルファ畑の水不足を正確に推定できたと報告している。

作物の成長をモニタリングしたり、収穫量を予測する際に、生育ステージを把握することは、重要である。Gallo, K. P., and Flesh, T. K., (1989) は、NOAA/AVHRR データから計算した植生指数 NDVI の播種からの時系列データを用いて、トウモロコシの絹糸抽出期を予測した。Badhwar and Henderson (1981) は、時系列のスペクトル・データから計算したグリー

ンネス値を使い、トウモロコシの生育ステージを推定した。

作物の生育や自然植生をモニタリングするうえで、バイオマスの年内変動を把握することも重要な課題である。Fischer, A., (1994) は、温帯農業地帯の NDVI の季節変化を表す半経験的モデルを開発し、生育ステージの日にちがいが良い精度で求められたと報告している。Cloutis, E. A., *et al.* (1996) は、カナダで航空機 SARC バンド・データの農作物の後方散乱特性を調べ、LAI や草丈を推定した。Xu, H., *et al.* (1996) は、イギリスで ERS-1/SAR CVV バンド・データのテンサイに対する後方散乱特性を調べ、LAI が推定できるので、ERS-1/SAR データを作物モニタリングに利用できると報告している。

アジアでは、コメは主食として重要な作物である。例えば、川島博之・久保田宏 (1996) では、今後もアジアでは人口が増加し、食料需要が増大することが予想されている。したがって、これらの国々では、イネの収穫量を正確に推定することは、食料供給政策上、重要な課題である。志賀弘行・安積大治 (1995) は、北海道石狩平野で水稻収量地図を作成した。Tennakoon, S. B., *et al.* (1992) は、タイでイネの収穫量を、Pestemalci, V., *et al.* (1995) は、トルコでコムギとオオムギの単収を、Singh, R., *et al.* (1992) と Sridhar, V. N., *et al.* (1994) は、インドでコムギの収穫量を推定している。

一時期の衛星データだけでは、作期の異なる作物が混在する地域では、生育ステージの違いを収量の違いとしてとらえているという問題がある；志賀弘行・安積大治 (1995) ;ので、収穫量推定に、作物生育期間中の分光測定値のプロファイルを使った研究も多い。Patel, N. K., *et al.* (1985) は、生育期間中のイネの分光反射特性を測定し、移植後 50~90 日の比植生指数* RVI の積分値から収穫量を推定している。Shibayama, M., and Akiyama, T., (1989) も、同様にイネの各品種の分光反射特性と LAI や地上部光合成乾物重、地上部乾物重との関係を

解析している。Benedetti, R., and Rossini, P., (1993) は、イタリアで、10 日ごとの合成 NOAA/AVHRR データから計算した NDVI の登熟期の積分値を用いて、コムギの収穫量推定を行った。Idso, S. B., *et al.* (1977) は、ストレス積算温度を導入してコムギの収穫量を推定している。作物生育期間中の NOAA/AVHRR データから計算した NDVI のプロファイルを用いて、Quarmby, N. A., *et al.* (1993) は北部ギリシャでコムギ、綿花、コメ、トウモロコシの収穫量を、Rasmussen, M. S., (1992) は北部ブルキナ・ファソの半乾燥地でキビの収穫量を推定した。Henderson, K. E., and Badhwar, G. D., (1984) は、時系列のスペクトル・データから計算したグリーンネス値を使い、ダイズの生育ステージを推定した。作物生育期間中の分光測定値のプロファイルから、収穫量を予測する研究も行われている。Potdar, M. B., (1993) は、インドで複数日の NOAA/AVHRR LAC データから計算した NDVI を積分し、遅くとも収穫45日前にソルガムの収穫量予測ができた」と報告している。

収穫量推定のために、リモートセンシングデータに加えて、気象プロファイルデータも用いた試みもある。Rundorff, B. F. T., and Batista, G. T., (1991) は、ブラジルのサンパウロ州南部の約 250 圃場を対象に、コムギの収穫量を圃場レベルで推定している。

さらに、リモートセンシングデータと作物生長モデルを組合せた研究も行われている。Sharma, T., *et al.* (1993) は、インドで、LANDSAT/MSS データと IRS-1A/LISS-I データから計算した RVI を、コムギの生長モデルを使って規準化し、コムギの収穫量を行政区ごとに推定している。Clevers, J. G. P. W., and van Leeuwen H. J. C., (1996) は、光学センサーデータとマイクロ波センサーデータから推定した LAI を使ってキャリブレーション (補正) する作物生育モデルを開発した。検証の結果、キャリブレーションしなかった場合と比べて、収穫量推定

精度が向上したと報告している。

4. 今後の展開

Idso, S. B., *et al.* (1977) は、「食料政策は、すべての政府の重要課題になるであろう。農業研究には、二つの側面がある。一つは収穫量を上げるためのもので、もう一つは食料需給を最もバランス良く決定するために、地球規模で作物生産量を迅速かつ正確に評価することである。」と述べている。

今後、食料、特に主要作物の作付面積や収穫量を地球規模で推定・予測するためには、次のようなことを明らかにする必要がある。

(1) どこに農地があって、どこに草地があるか (土地被覆分類)

衛星データを用いて作成したものでは、空間解像度 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ のものは既にあるが、より高解像度のものが必要である。ローカルレベルでは、生態学的気候分類を用いて、潜在農地を抽出しようとする試み (Maselli, F., *et al.*, 1996) が行われている。

(2) どこでどんな作物が栽培できるか (栽培地域推定)

地球規模での作物栽培地域や栽培可能地域を把握することは、地球環境変化による栽培地域や栽培可能地域の変動を予測し、世界の作物生産量を推定する上で非常に重要な課題である。作物の地球規模での分布は気候によって決まることに注目し、現在と地球温暖化時の作物生産可能地域の分布と生産量の変動を推定した研究 (Leemans, R., and Solomon, A. M., 1993) 及び (Darwin, R., *et al.* 1996) や、作物の生育上重要な土壌の条件を加味して実際に農業が行なわれている場所の中で「栽培適地・可能地域」を示した研究 (岡本勝男他 (1997)) はあるが、境界領域における栽培可能性の議論はまだなされていない。

(3) 今年はどこで何を栽培しているか (リアルタイムの作付分類)

ローカルレベルでは、比推計によりコムギの作付け面積を収穫前に予測した例がある (Mahey, R. K., *et al.*)。しかし、リモートセンシング技術を用いた国以上の規模での作付分類や面積推定は、まだ行なわれていない。

(4) どんな作物がどのくらいできるか (生産力推定)

Tucker, C. J., *et al.*, (1985) が、NDVI から光合成有効放射吸収率を計算して以来、広域の純1次生産力の推定にリモートセンシングが使われるようになった。地球環境変化に伴って気候変動のふれ幅が大きくなることが予想されており、作物の収穫量がどのように変化するのかが研究されている (Mearns, L. O., *et al.* 1996 及び Fischer, G., *et al.* 1995)。しかし、これらの研究では、実際の栽培地域が示されていないため、作物ごとの潜在生産力はまだ明かではない。

(5) 今年はどれくらいとれるか、とれたか (リアルタイムの生産量推定)

収穫量を推定するために、生育モデルからアプローチするのは、たいへん有効である。しかし、入力すべきパラメータが多い (IBSNAT; The International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer; 1995) または地球規模のデータセットがないため、パラメータが既知の限られた狭い地域または地点での利用に限られる。

リモートセンシングからのアプローチでは、生育期間の植生指数の積分値 (光合成固定量) から収穫量を推定・予測する方法 (Hayes M. J., and Decker, W. L., 1996) が合理的である。そのため、時間解像度の高い衛星データを使って、生育状態をモニタリングすることは重要である。

地球温暖化に伴って、異常気象の多発が報告

されている(例えば、気象庁編(1994)異常気象レポート'94;近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—(V))。そこで、短期的食料確保政策上、気象災害発生地域の特定と災害(生産量減少)規模を迅速に把握することは、重要な課題である(Yamagata, Y., *et al.* 1988及び志賀弘行・安積大治1994)。また、気候変動に伴う異常気象は、地球規模で考えるべきでもある(Rosenzweig, C., (1994))。その予測にもリモートセンシングは、威力を発揮する(Lozano-Garcia, D.F., *et al.* 1995)。

以上の気象災害把握は、いずれも光学センサを用いている。高空間分解能・低時間解像度データは、広域を対象に、災害発生時点で確実に収穫量を推定することは不可能である。また、低空間分解能・高時間解像度データは、広域を対象として毎年収穫量を推定することは可能であるが、大規模単作地帯以外では使いにくい。今後は、高空間分解能・高時間解像度データの登場が予定されているため、この分野での実用化が期待されている。

(農業環境技術研究所 地球環境研究チーム)

用語解説

光合成有効放射吸収(量)

太陽からの放射のうちで光合成に利用されるのは、0.4~0.7 μm の波長帯であるが、そのエネルギー量を光合成有効放射という。そのうち、植物に吸収された量を光合成有効放射吸収量という。

後方散乱特性または後方散乱係数

広がりのある面がレーダの電波を電波の入射方向(レーダの方向)に散乱する程度を表わす量。定量的には「単位面積当りの後方散乱断面積」として定義される。次元は、 m^2/m^2 、つまり見かけ上、無次元である。

正規化植生指数 NDVI

$\text{NDVI} = (\text{TM} 4 - \text{TM} 3) / (\text{TM} 4 + \text{TM} 3)$ で表される。ただし、TM 4, TM 3はLANDSAT/TMバンド4(近赤外波長域)および3(赤波長域)の輝度値である。

比植生指数 RVI

$\text{RVI} = \text{TM} 4 / \text{TM} 3$ で表される。ただし、TM 4, TM 3はLAN-DSAT/TMバンド4(近赤外波長域)および3(赤波長域)の輝度値である。

分光反射特性またはスペクトル特性

光に関する量を波長または周波数の関数として表したもの。例えば、分光反射率、分光透過率など。

偏波

電界の振動方向が、地表面に対して垂直であるものを垂直偏波(V)といい、水平であるものを水平偏波(H)という。

引用文献

なお、引用文献リストは誌面の都合により割愛させて頂きました。(編集部)