

作物生理生態・圃場情報のリモートセンシング手法

－ 1 枚の葉から生態系まで－

(独) 農業環境技術研究所 生態系計測研究領域

井上 吉雄

1. はじめに

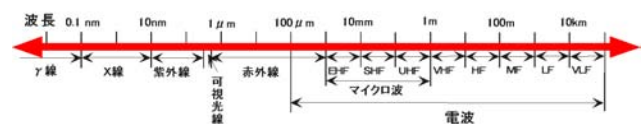
リモートセンシングは、広域的性、非破壊・省力性、および肉眼ではとらえ得ぬ情報を感知できる、など多くの有用な特性があり、作物生産および環境問題に関わる多方面への応用が可能である(図1)。

近年、環境保全や安全志向などの面から、農薬や肥料をはじめとする化学資材や資源の適正利用・最少利用への要請が世界的に強まっており、「精密農業」や「局所的作物管理」などの圃場・作物管理の精密化はそれに応える手段の一つである。そこでは、作物生育に応じた過不足のない管理を行うことが最重要課題であり、光・電磁波を用いたリモート・非破壊計測法は、必要な作物生体情報や土壌情報を圃場条件で迅速あるいは面的にとらえる方法としてきわめて有用である。作物生産に直接関わる応用としては以下のようなものがあげられる。

- (1) 生育診断・生産管理のための情報計測：水ストレス・栄養ストレス・病気の検出、雑草の検出、施肥・灌漑・薬剤散布のスケジューリング、土壌管理など
- (2) 作物生産量の予測や評価：作物栽培面積の評価、単位収量の評価など
- (3) 災害の影響評価：病虫害、低・高温障害、洪水、干ばつの面積や被害程度など
- (4) 農地利用状況：耕地改廃、作目分布など

一方、大気CO₂濃度の上昇や温暖化、水資源の不安定化などの環境変動が農耕地・林地など陸域生態系に与える影響の定量評価や、逆に農業の水質や大気環境に対する影響評価には、空間的情報が不可欠となるため、リモートセンシングの役割は大きい。環境に関わる応用として、以下のようなものがあげられる。

- (1) 温暖化等環境変動の影響評価：森林減少・砂漠化など土地利用・土地被覆・土壌分布の定量化など
- (2) 生態系の環境機能の評価：生態系CO₂フラックスの広域評価、農業的土地利用、作物分布、水質など



分光反射輝度・輝度温度・後方散乱等の計測

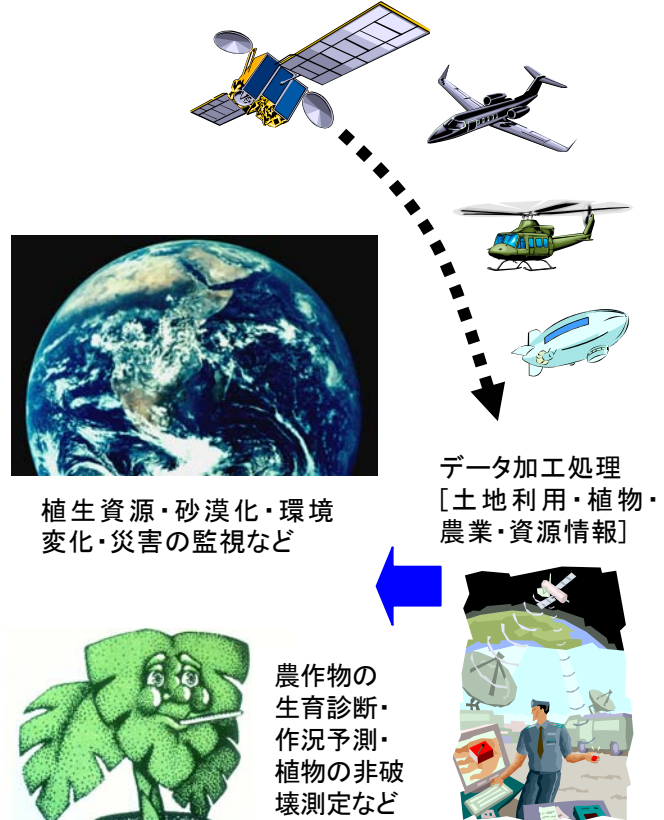


図1 植物・環境・生態系情報のリモートセンシングと利用 (井上 2006)

(3) 環境資源の維持管理・計画：水・日射・植生資源、生物生息環境の分布など

すでにリモートセンシングによって、土地利用や植生の分布のみならず、植物の生理生態的な機能や成分に関わる情報を広域的・定量的にとらえることが可能になりつつある。それらは利用方法とアイデアによっては、種々の実用場面で活用できると考えられる。ここでは、農業生産管理や農業生態系・地域の実態把握などへの応用のヒントになることを念頭に、おもに筆者らが進めている作物・農業生態系の広域・遠隔・非破壊・リアルタイム計測手法に関する研究事例を通して、農業生態系のリモートセンシングの基礎と実際を紹介する。

2. センサとプラットフォームおよびデータ利用手法

リモートセンシングでは、可視～不可視(波長では数百 nm～数十 cm)の広範な波長領域の光・電磁波を計測する。太陽を光源とする可視～短波長赤外の波長別反射輝度・反射率の計測には、各種の分光フィルタやスキャナ装置等と受光素子を組み合わせた分光放射計・分光画像計測装置等の計測システムを用いる。植物や土壌の可視～短波長赤外までの反射スペクトル(特に数 nm 程度の高い波長解像度の反射・透過スペクトル:ハイパースペクトルデータ)には、多くの生理生態情報・成分情報が反映されているため、バイオマス、水分、色素、窒素、光合成速度などいわゆる「植物生体情報」の把握に有用である。また、偏光特性など強度以外の物理特性も利用できる。波長 2.5～15 μ m の熱赤外域の計測には、焦電素子、サーモパイル、InSb、HgCdTe 素子等が用いられる。最近のサーモグラフィ装置は、解像度やフレーム速度、冷却方式、データの記録容量などが改良され、野外計測にも利用しやすくなっている。マイクロ波は天候や光条件の影響を受けにくいいためデータ取得頻度が高いという大きなメリットがある。信号の計測にはマイクロ波散乱計・放射計および合成開口レーダ(SAR)が用いられる。センサを搭載するシステム(プラットフォーム)には人工衛星、航空機、飛行船、ヘリコプタ、クレーン、トラクタなど種々のものが利用される。また、ハンドヘルドセンサも地上での測定に有用である。Landsat、SPOT、QuickBird、ASTER、Radarsat、ALOS をはじめ多数の人工衛星が宇宙空間から地上を観測し、航空機や地上での各種センサも利用可能となっている。ハイパースペクトルセンサも試験的にはすでに人工衛星に搭載されている。データの空間的解像度や品質はセンサの分解能とプラットフォームの高度(数 m～数万 km)および大気状態によって決まる。広域性に優れる衛星データの場合、空間分解能は数m～数十 km、回帰周期は毎日～数十日程度であり、「精密農業」に直接利用できるものはまだ限定されているが、生態系スケールの問題には活用できるものは少なくない。実用場面への利用からみたリモートセンシングデータの好適性は以下の基準から行う必要がある(表1)。

- ① 実際的な空間解像度(≠センサ分解能)： 検出器感度、大気影響、レジストレーション
- ② 実際的な観測周期(≠回帰周期)： 天候、競合
- ③ 目的変量に好適な波長特性： 波長域(可視～マイクロ波)、波長分解能
- ④ 観測範囲： モザイクの必要性、方向性反射
- ⑤ 適時性： 情報伝達時間＝データ処理時間＋配送時間
- ⑥ 単位面積当りのコスト： 利用主体、目的の公共性、多面的利用性

リモートセンシングデータを植生・生態系情報の評価に結びつける方法としては、画像の判別・分類等から波長別物理信号の定量的利用、さらにはプロセスモデルとの協働まで、多様な手法が研究されてきている(図2)。評価の一般化や高精度化にはリモートセンシング信号に関する物理モデルが、生長に関わる生理生態的な特性値や水・CO₂ のフラックス等の評価には生態プロセスモデルとの協働が、それぞれ特に有用である。

表 1. 精密農業管理におけるリモートセンシングのおもな応用場面と必要とされる条件の概要

応用場面	精細度	モニタ周期	モニタ範囲	伝達時間	波長帯
植物の発育段階モニタリング	1m-10m	1週	圃場～集落	2日	広帯可視近赤外, 熱赤外, SAR, ハイパースpectral
生長のモニタリング	1m-10m	1週	圃場～集落	2日	広帯可視近赤 熱赤外, SAR, ハイパースpectral
植物の水分欠乏・活性のモニタリング	1m-1km	1日	圃場～集落	0.5-1日	熱赤外, 広帯可視近赤 狭帯可視近赤 ハイパースpectral
植物の養分欠乏モニタリング	1m-10m	1週	圃場～集落	2日	狭帯可視近赤, ハイパースpectral
植物の病気モニタリング	1m-10m	1週	圃場～集落	2日	ハイパースpectral
植物災害のマッピング	10m-1km	3日[特期]	圃場～地域	1-8時間	パンク, 広帯可視近赤, 熱赤外
収量マッピング	1m-10m	3月[特期]	圃場～地域	1日-1週	広帯可視近赤, 熱赤外, 狭帯可視近赤
生長と収量の予測	100m-1km	1月[特期]	集落～地域	1日-1週	広帯可視近赤, 熱赤外, 狭帯可視近赤
土壌特性のマッピング	1m-10m	6月[特期]	圃場～集落	1日-1週	広帯可視近赤, 熱赤外, 狭帯可視近赤
管理区画マップの更新	1m-10m	1月[特期]	圃場～集落	1日-1週	パンク, 広帯可視近赤, 熱赤外, SAR
土壌水分モニタリング	10m-100m	3日	圃場～集落	0.5-1日	広帯可視近赤, 熱赤外, SAR
雑草発生モニタリング	1m-10m	1週	圃場	2日	広帯可視近赤, 狭帯可視近赤, ハイパースpectral
昆虫発生モニタリング	1m-100m	1週	圃場～集落	0.5-1日	広帯可視近赤, 熱赤外
モデル-AIと結合した面変異の原因同定	1m-30m	3日[特期]	圃場～集落	1日-3日	広帯可視近赤, 熱赤外, 狭帯可視近赤 ハイパースpectral
ハンドヘルドセンサによる面変異の原因同定	1m-10m	3日[特期]	圃場	即時-1日	広帯可視近赤, 熱赤外, 狭帯可視近赤, ハイパースpectral etc.
地域気象データのマッピング	>1km	1日	地域	即時-0.5日	広帯可視近赤, 熱赤外, etc.
数値標高データ生成	10m-30m	5-10年	集落～地域	1週-1月	広帯可視近赤, パンク
植物・土壌特性の点サンプリングを面データへ展開	1m-30m	3月[特期]	圃場～集落	1日-1週	パンク, 広帯可視近赤, 熱赤外, SAR

注1) 特期: 特定時期のタイムリーなモニタが必要。広帯: 広波長帯, 狭帯: 狭波長帯。AI: 人工知能による意思決定支援システムなど。
 注2) 精細度とモニタ範囲は情報の利用の仕方と現象の発生状況によって異なる。モニタ範囲は下限を示す。
 注3) これらに対応するリモートセンサ特性の仕様は本文で述べた要因を考慮する必要がある。

(Moran & Inoue 1997; 井上 1998; Inoue 2003)

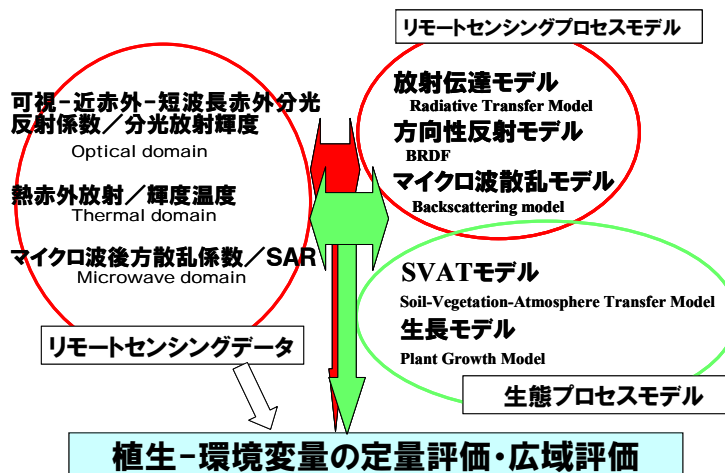


図2 植物・生態系情報評価のためのリモートセンシングデータの利用方法 (Inoue 2003; 2006)

3. 作物・生態系変量の評価に有用なリモートセンシング信号

3.1 可視～短波長赤外域

3.1.1 植生指数

図3に例示したように、赤と近赤外の反射率は植物量にきわめて特徴的な反応を示す。特に人工衛星データでは、取得できるデータが少数の離散バンドに限られていたことから、これらの2波長を用いた反射指標が種々考案された。植生の背景(土壌の種類など)の違いの影響と、大気の影響とを最小限におさえること、さらには着目する形質との線形性を主眼に、多数の植生指数が考案されてきている(NDVI, SAVI, MSAVI, TSAVI, EVI, WdVI, RVI等)。これらのうち、もっともよく利用されてきたものが正規化植生指数 $NDVI = (R_{NIR} - R_{Red}) / (R_{NIR} + R_{Red})$ である(R_{NIR} , R_{Red} はそれぞれ近赤外と赤のバンドの反射率; 代わりに分光反射輝度、デジタル指数が用いられる場合もある)。条件によって若干の差異はあるものの、いずれの植生指数も、バイオマス、葉面積指数、光吸収率、窒素濃度(例:図)などの評価に有効であることが多くの実験データによって検証されている。

植生指数 VI からバイオマスや葉面積指数を推定する方法には実験的回帰モデルと、植被の放射伝達モデルを介した半経験的モデルがある。

例 1: $LAI = aVI^3 + bVI^2 + cVI + d$

例 2: $LAI = a + bVI^c$

例 3: $LAI = -1/2a \ln(1-VI)$

衛星データを用いた収量の予測には、いまのところ植生指数を直接用いる場合がほとんどで、生育途上のある時点で得られた NDVI 測定値や一定期間中の NDVI 積算値を入力として収量を予測する試みが多い。

例 1: $Y = f(NDVI_{Heading})$

例 2: $Y = f(\sum_{D1-D2} NDVI)$

関数fの形は、線形・非線形種々のものがあるが、いずれの場合も多年次の実測データから回帰モデル(関数形やパラメータ)を求め検証する必要がある。植生指数は簡易なため種々の利用がなされているが、反射スペクトルには、多くの要因(幾何学的構造、ストレス、観測方向、太陽高度等)によって影響されるため、適用範囲(作物の種類、作付時期、地域など)には注意を要する。一般化のためには、植被における光の反射・吸収・透過のプロセスをモデル化した放射伝達モデルや方向性反射モデルを介してリモートセンシング計測データを

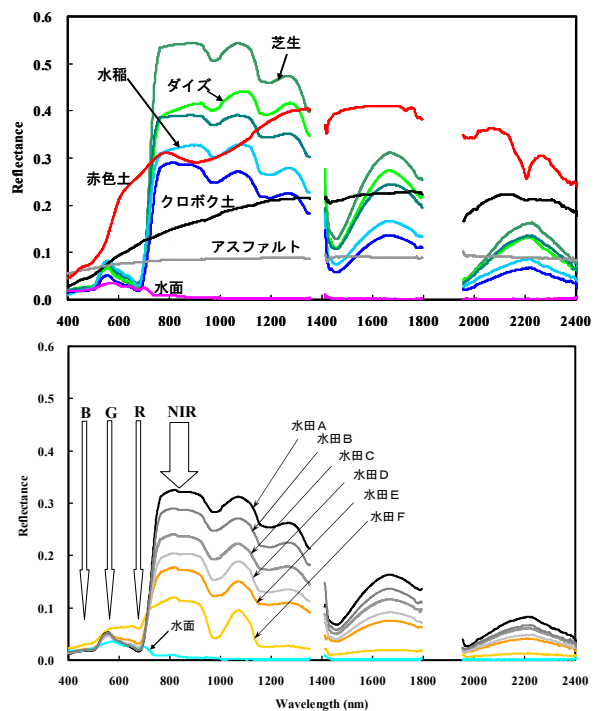


図3 地表面の典型的な反射スペクトルおよび生育の異なる水田の反射スペクトル例 (Inoue et al., 2001)

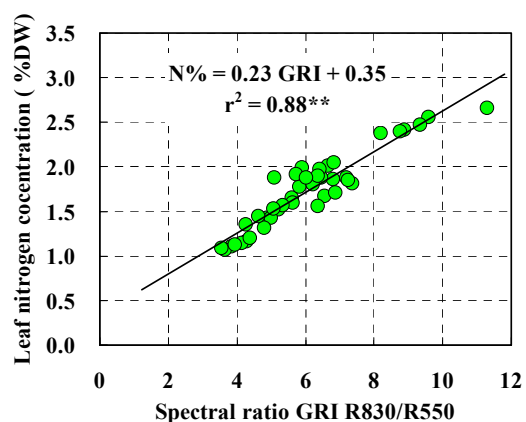


図4 稲の登熟期における反射スペクトル指数 R830/R550 と葉身窒素含有率の関係 (Inoue 1998)

利用することが必要である。

3.1.2 ハイパースペクトル計測

筆者らが開発したハイパースペクトルイメージャなどの計測システムを用いた解析によると、葉のクロロフィル濃度や窒素濃度の推定には、520-570nm、610-680nm、720-800nm が有用であった。また、葉の水分率の推定には、1430nm や 1950nm 付近の水分の吸収帯を含む短波長赤外域と近赤外域の波長を用いたいくつかの指数が有効であることがわかっている。一方、光合成に対する光利用効率の評価には、531nm と 550nm の反射率を用いた指数が有望である(図5)。このように、ハイパースペクトルデータでは高い波長分解能を活かした特徴量抽出が可能であるため、植物の成分や生理機能に関わる形質を評価するうえで特に有効である。

ハイパースペクトルデータから有用情報を抽出評価する方法は大別して、①特徴量に相関の高い狭帯波長の探索と指数化、②主成分回帰、PLS などを含む多変量解析手法、および③放射伝達モデルによるシミュレーションモデルの数値的逆解法があり、①は簡易性、②は安定性、③は一般性に、それぞれ主なメリットがある。

3.1.3 土地利用・土地被覆の空間的把握

Landsat や SPOT、QuickBird などの衛星に搭載されている可視・近赤外バンドの情報は、土地利用や植生の変化を広域評価するうえで大きな威力を発揮する。前述したように可視・近赤外の少数バンドでも、植生の繁茂程度は比較的明確に評価できるため、Landsat のように長年のデータ蓄積があると、長期的な土地利用・土地被覆を評価することが可能である。図6は Landsat と QuickBird を併用して東南アジアにおける焼畑耕地面積の長期変化を定量化したものであり、このような分析は恒常的な衛星観測によってはじめて可能となるもので、生態系スケールでの資源劣化や炭素収支の評価など、種々の生態系研究や政策提言に対する重要な基礎データを提供する。

3.2 熱赤外波長域

3.2.1 熱赤外面像計測によるストレスの検出

植物の葉温が植物体の生理状態に関連していることは古くから知られていたが、それを作物群落の生理状態やストレス反応の評価に用いようとする試みは赤外線放射测温技術の進歩とともに近年に大きく進展した。植物の気孔開度や蒸散速度は、水ストレス・病気等によって大きく影響されるため、熱赤外面像計測装置によって葉温変化を測定することによって、検出することができる。このような変化は、

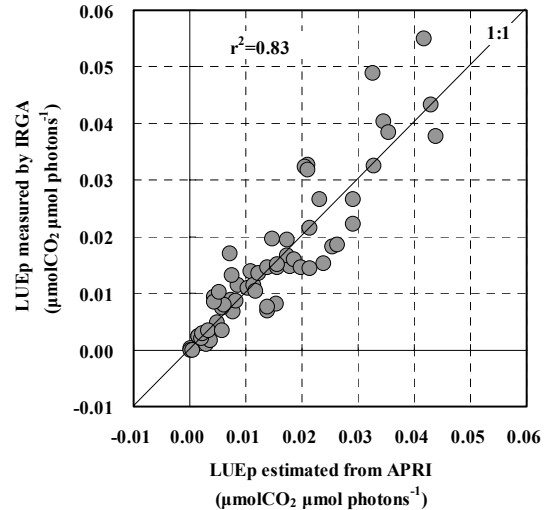


図5 反射スペクトルによる光利用効率の推定 (Inoue et al., 2006)

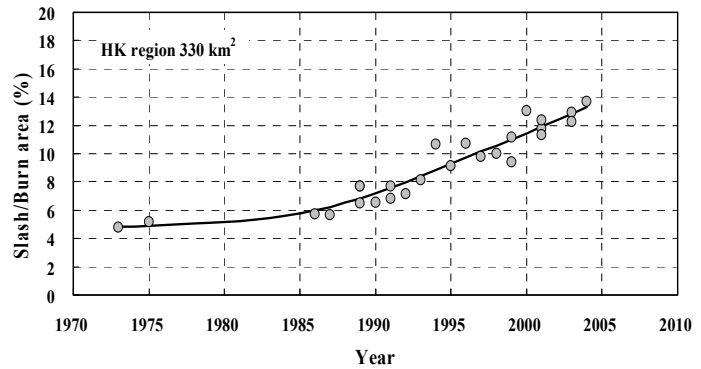


図6 多時期衛星画像による求めた焼畑地面積の長期変化 - Laos山岳域における例- (Inoue et al., 2005)

予兆程度の微弱な反応の段階においても遠隔的に検出できることがわかっている。

3.2.2 熱赤外計測によるストレス指数

熱赤外放射測温によって検出されるストレス程度を、簡易指標として一般化するため、気温を用いて相対化した SDD や、さらに大気湿度の影響を考慮した CWSI などの水ストレス指数や、それに加えて植被の発達程度を考慮した WDI などの指数が考案されている(図7)。これらは、主として水ストレスの検出と灌漑のスケジューリングを目的としたもので、簡易さに優れている。なお、後述するように熱赤外リモートセンシングの計測値(輝度温度)は、気温、日射、風速など関与する要因が多いため、要因間の相互影響のメカニズムの理解と一般化・適用範囲の拡大のためには、土壌-作物-大気系の輸送過程モデルとリモートセンシング計測値を利用する方法がより有望である。

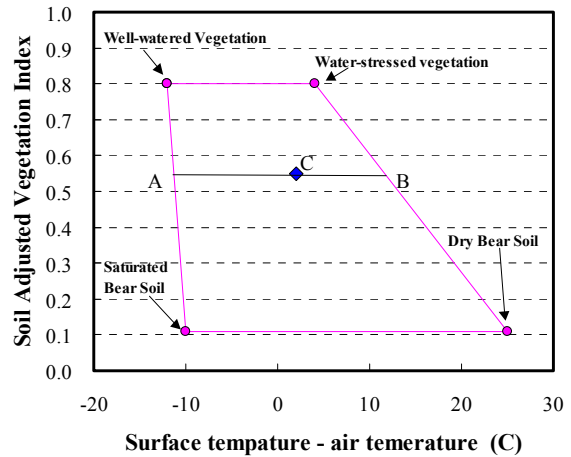


図7 熱赤外リモートセンシングによるストレス評価指数の模式図; 任意の植被Cの水ストレス程度を可視・近赤外指数および熱赤外指数で評価する。(Moran & Inoue, 1994)

3.3 マイクロ波領域

世界の多くの地域・用途で光学衛星センサのみではデータ取得頻度が不足するため、雲を透過して観測できるマイクロ波センサのメリットは大きい。また、水面からのマイクロ波後方散乱は特異的に低いため、広域的な湛水域面積の推定などに有用であることはよく知られている。マイクロ波散乱計を用いて Ka(35.25GHz)、Ku(15.95GHz)、X(9.6GHz)、C(5.75GHz)、L(1.26GHz)の5周波数・水平垂直偏波・多入射角の全組合せの測定を行った結果では、水稻の葉面積指数、バイオマス、穂重、茎数が、

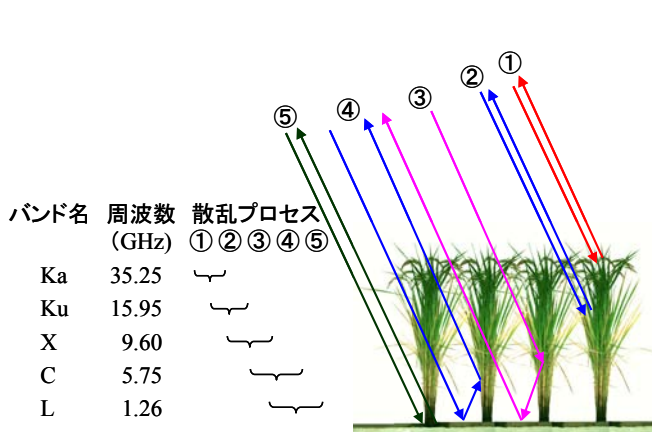
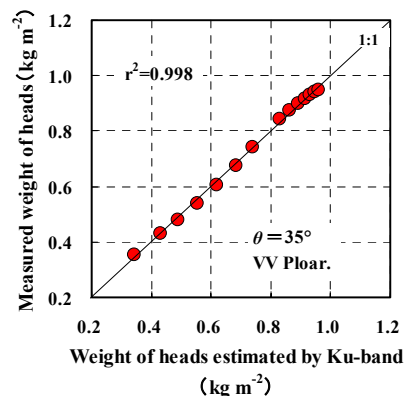
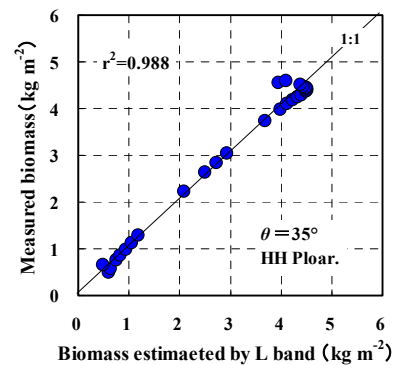


図8 周波数の異なるマイクロ波の散乱プロセス模式図(左)とLバンド後方散乱係数と群落地上部バイオマスの関係(右上)、およびKuバンド後方散乱係数と群落穂重の関係(右)(Inoue et al. 2002)



それぞれC、L、Ku、および X バンドの後方散乱係数と密接な関係にあることがわかっている(図8)。なお、マイクロ波の後方散乱は対象の誘電率や幾何学的構造のほか、周波数、偏波、入射角などのセンサ要因にも強く影響されるため、これらをパラメータとした物理モデルを介して適用範囲を拡張することが望ましい。

4. リモートセンシングとプロセスモデルを結合した生態系変量の動的評価法

リモートセンシングには非破壊・広域計測など多くのメリットがあるが、観測データは一般に瞬時的でかつその頻度も低いことが多いため、ターゲットが植物生長やフラックスなどのように動的な場合、環境要因との相互作用で決まるダイナミクスの一断面しか捉え得ない。一方、プロセスモデルは要因間の関係に関する知見を総合的に構造化できること、あるいは動的シミュレーションが可能など多くのメリットをもつが、複雑モデルおよび簡易モデルのいずれも、リアルな生長や収量を正確に推定できるまでに至っていない。これはモデルに組み込まれている要因が限定されていることや、また、多数のモデルパラメータをあらかじめ実験データ・調査データ等から正確に求めておく必要があるため、初期値や入力データを面的に求めることが困難な場合も多い。したがって、両者を相補的に協働させることが、動的な変量を精度よくかつ面的に捉えるうえで特に有効である。

具体的には、リモートセンシング信号の物理プロセス(植物・生態系における電磁波の反射・吸収・透過や放射、散乱などの過程)に関する放射伝達モデルと、植物生長モデルや土壌-作物-大気伝達に関わる生態的プロセスモデルを、計測されるリモートセンシング情報と協働させる手法である。その協働の仕方には、①リモートセンシングデータをモデルへの直接入力として使う(図11)、②モデルによる推測値をリモートセンシングによる推定値で更新する、および、③モデルのパラメータや初期値をリモートセンシングデータにより再校正する(モデルのチューニング; 図9)、などの方法が挙げられる。①では高頻度のリモートセンシング入力が必要であり、②では一時的に出力変量を修正するだけでモデル内部の修正がされないためモデル出力を改訂し続ける必要がある。これに対して③では比較的少数回のデータでも内部パラメータの校正を行えるためより適切かつ動的な評価が可能である。以下にいくつかの事例を示す。

4.1 マイクロ波後方散乱係数と群落後方散乱モデルによる葉面積指数・バイオマスの推定

植物群落のマイクロ波後方散乱係数には、バイオマス・水分含有率・葉の角度など群落の量的・電磁的・幾何学的特性が関与するだけでなく、土壌水分や地表面粗度等も影響し、さらに、センサの観測条件(周波数・偏波・入射角など)も重要な要因である。したがって、群落の後方散乱プロセスモデル

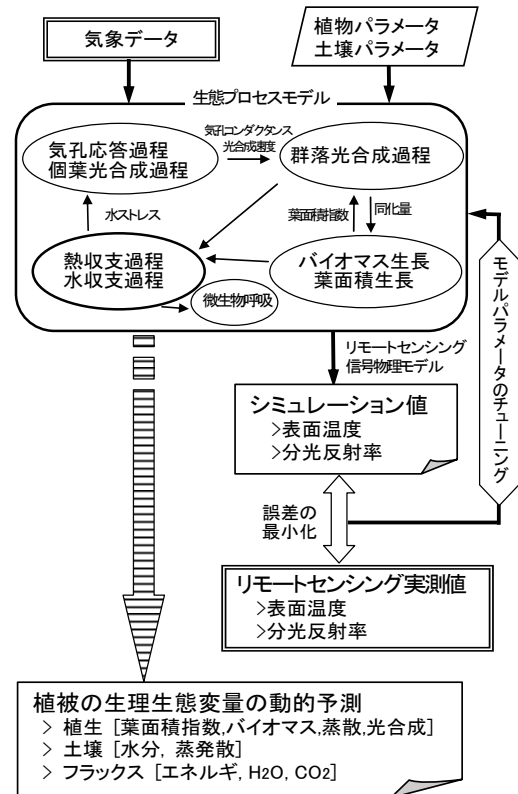


図9 リモートセンシングデータによる生態プロセスモデルの即時チューニングアプローチ (Inoue et al., 2005)

を用いることにより測定信号と群落変量の関係をより一般化できる。群落背景(田面水)からの散乱が一定と仮定し、群落変量に葉面積指数を用いた場合と地上部全生体重を用いた場合についてモデルの適合度を検討した結果、CバンドとLバンドによる葉面積指数とバイオマスのより広い条件で逆推定できることがわかった。

4.2 熱赤外計測データとエネルギー収支モデルの結合による群落蒸散速度の推定

熱赤外リモートセンシングによる植被温度に影響する要因は多数あるため、異常の検出には有効であるが、適用範囲や定量化に限界があった。そこで、その計測値と微気象要因(温湿度、日射等)の多元的計測データを、植物-大気間のエネルギー伝達モデルへの入力として用いることによって、個葉や群落の蒸散速度・コンダクタンスを精度よく評価できることを検証した(図 11)。群落蒸散速度は、水ストレスの検出や水利用効率の推定、灌漑管理などの重要な基礎量であるが、野外自然条件における実測は大変難しい変量であった。しかし、熱赤外リモートセンシングとモデルの結合によって、遠隔評価できる見通しが得られている。

4.3 リモートセンシングと生態プロセスモデルの協働による生態系多変量の動的予測

土壌-植物-大気系の熱収支、水収支等の物理的プロセスと光合成・生長過程などの生物プロセスを統合した生態プロセスモデルをリモートセンシングデータによってチューニングするアプローチを提示した。プロセスモデルによって推定されるリモートセンシング値を、観測値と比較し、その差が最小になるようにモデル内パラメータを動的に決定し、それを用いて新たに全期間のシミュレーションを行うアプローチである。この方法によって、モデルに対するデータ要求を補完するとともに、モデルの不確定性を大幅に減らし、かつバイオマス・蒸発散・CO₂ フラックス等の土壌-作物-大気系における多変量を動的に評価できることを検証した(図 12)。このアプローチでは、取得頻度が低いリモートセンシングデータや異種波長域のリモートセンシング信号を効率的に利用できるという利点もある。今後、種々の生態系における広範な応用が期待される。

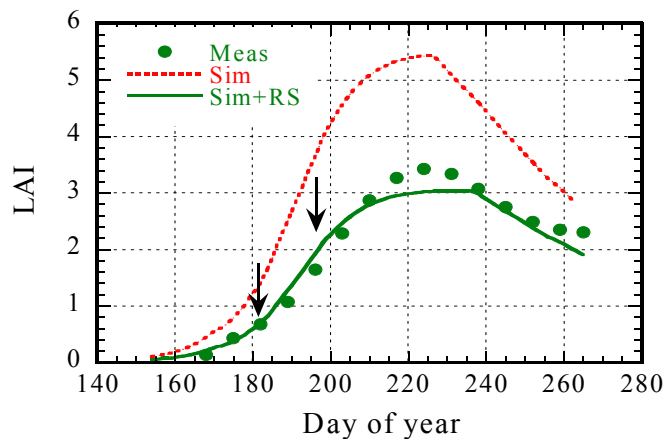


図 10 リモートセンシングデータによる作物生長モデルのチューニングによる葉面積指数の推定。

Meas:実測値; Sim:生長モデルのみによる推定結果, Sim+RS:リモートセンシングデータによるモデルパラメータの改変による推定結果. 矢印はRS データ測定時期. (Inoue et al., 1998)

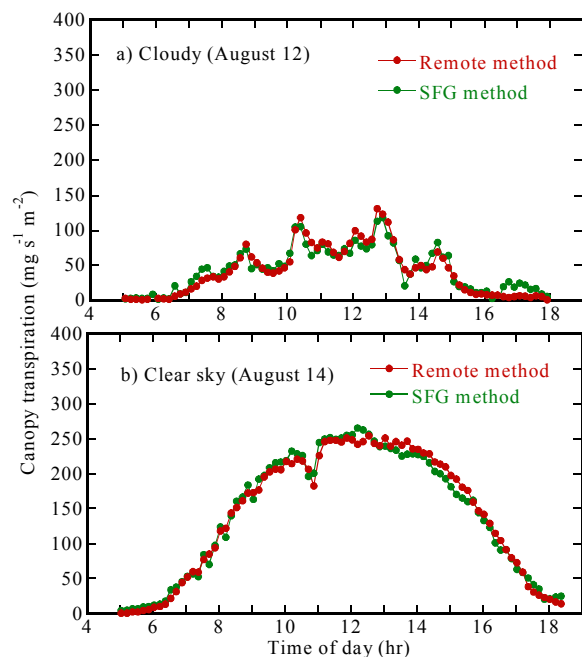


図 11 熱赤外放射測温とプロセスモデルによる群落蒸散速度のリアルタイム推定 (Inoue et al. 1994)

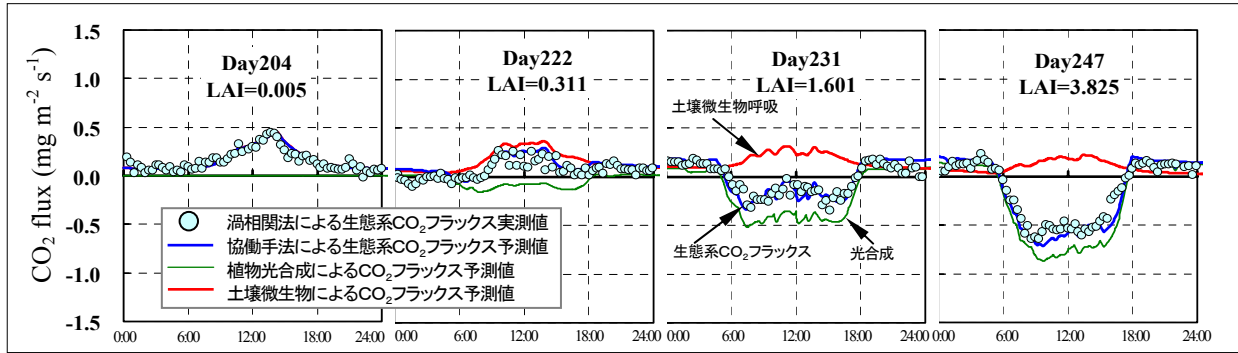


図 12 反射率計測データを用いた生態プロセスモデルのパラメタリゼーションによる生態系 CO₂ フラックスの動的推定—実測値と推定値の比較— (Inoue et al. 2006)

5. おわりに - 当面の活用方向について

リモートセンシングは陸域生態系の変動監視や、環境資源の計量、環境形成機能などの評価を行う上で不可欠な方法である。生育診断などの生産管理面では情報に対する要求水準が高いため、空間解像度、低頻度、方向性、大気影響、品質の一貫性などの面での技術的課題が多かったが、近年の工学的・生物環境物理的研究や、衛星センサの空間解像度や観測頻度の向上とともに、生産管理や農業環境評価への活用にも多くの場面で現実性が高まっている。これらの応用場面へのリモートセンシングデータの当面の活用方向としては、以下のような方法が考えられる。

- ① 指数情報の利用や簡易モデルの活用
- ② 現地調査とリモートセンシングを相補的に利用： 地上での定点調査データによるリモートセンシングデータの逐次校正
- ③ GIS を活用した空間データの総合利用： 過去の収量データ、立地・気象データ、画像データ等を空間情報ベースとして整備し、リモートセンシングによる現況データを併用
- ④ 異種センサ・複数センサのデータの複合的利用

参考文献 (総説的文献のみ)

- 1) 井上吉雄, 日本作物学会紀事 66: 511-523, 1997.
- 2) 井上吉雄, 日本リモートセンシング学会誌 17(3): 59-74, 1997.
- 3) Moran, M. S. & Inoue, Y., Remote Sensing of Environment 61: 319-346, 1997
- 4) 井上吉雄, 農業機械学会誌 60(3): 141-150, 1998.
- 5) 井上吉雄, オプトロニクス 204: 146-151, 1998.
- 6) 井上吉雄, 研究ジャーナル 7: 48-55, 2000.
- 7) Inoue, Y., Plant Production Science 6: 3-16, 2003.
- 8) Inoue, Y. & Oliso, A., 日本リモートセンシング学会誌 24: 1-17, 2004.
- 9) Inoue, Y., Environment-friendly Agricultural Technology and Crop Production: 22-46, 2005.
- 10) 井上吉雄, 光アライアンス 17(9): 4-9, 2006.
- 11) 井上吉雄, 日本作物学会紀事 75: 220-222, 2006.