

## J-1 人工衛星データ等を利用した陸域生態系の3次元構造の計測とその動態評価に関する研究

### (2) スケーリングによる広域生態系の構造評価手法に関する研究

#### ② 多スケール計測と植物生理モデルによる植物機能評価手法の開発

研究代表者 農林水産省農業環境技術研究所環境管理部隔測研究室 井上吉雄

研究担当者 同上 井上吉雄・小川茂男・美濃伸之・富田淳志

平成9年度～11年度合計予算額 17,961千円

(平成11年度予算額 5,618千円 )

〔要旨〕 可視～熱赤外域のリモートセンシングと環境物理モデルに基づいた植物生理機能評価手法の開発を目的として、空間的解像度の異なるリモートセンシングデータの利用および時間的変動の評価・予測手法に着目しつつ、観測と解析を行った。耕地生態系を対象として、①地上～低高度からの可視～熱赤外領域のリモートセンシング計測データと生理モデルに基づいた個葉ならびに群落レベルの植物の生理活力モニタ手法を考案し、また、②ハイパースペクトル計測に基づく植物生理特性の評価手法についての検討を行い、それぞれの手法の有効性を明らかにした。

〔キーワード〕 植物活性、光合成、葉水分、リモートセンシング、モデリング

#### 1. 序

陸域植生のもつ資源生産機能と環境形成機能を定量的に解明し、高精度の監視や予測を可能にするためには、分類や同定のみならず植物の生理生態的特性をリモートセンシングによって計測・評価することが不可欠である。しかし、精密な調査はポイントに限られ上位スケールの現象に結びつけることが容易でなく、一方、広域リモートセンシングはアバウトな評価にとどまり現象のメカニズムや因果関係の評価については今後の課題となっているのが現状である。

以上のことから、精細な実測研究と広域的なリモートセンシング手法を有機的に結びつけるための手法研究や、空間的・時間的に異なるスケールの観測データを相互に検証し結びつける手法研究が重要になっている。特に、植物の生理的活力の計測・評価は、観測時点の生産力評価や環境影響評価の基礎になるだけでなく、病気や環境ストレスなどによる局地的な生理活性の異常の兆候を検出し、植生変化が広域的に顕在化する前に将来の動向を予測する上でも有効である。しかしながら、このような目的に対しては、これまでのリモートセンシングデータのみでは限界がある。したがって、可視～熱赤外にわたるリモートセンシングと環境物理モデルの有機的結合あるいはハイパースペクトル計測などの新しいアプローチに基づいて、光合成活性、水分状態、色素成分などの生体情報を評価する手法の開発が強く求められている。

#### 2. 研究目的

ある時点で観測される植物の生理的活力はその時点の生産力評価や環境影響評価の基礎になるだけでなく、以後の生長やバイオマスの変化方向を見通す上でも有用である。また、大スケールにおいて植生変化が顕在化するはるか以前に局地的な機能変化が起こるため（たとえば、病気、水ストレス、障害）、局地スケールにおける生理的機能の変動を押さえることが特に有効

と考えられる。そこで本課題では、空間的解像度の異なるリモートセンシングデータの利用および時間的変動の評価・予測手法に着目しつつ、可視～熱赤外域のリモートセンシングに基づいた植物生理機能のモニタリング手法を開発する。具体的には、植物葉や植物群落の蒸散速度を定量することを目標に、個葉レベル、群落レベルなど異種スケールにおける可視～熱赤外域のリモートセンシングデータと植物生理活性との関係を解析し、リモートセンシングによるこれら植物パラメータ評価の可能性を明らかにする。さらにセンサの空間分解能に対して植物群落の分布が粗な場合における植物の活性評価法、および植被における水分利用可能性の評価法について検討を進める。また、植物の活性評価においては、クロロフィル色素等の濃度や水分含有率などの成分的変量を評価することが重要であるため、ハイパースペクトル計測データによるこれら特性の評価手法について検討し、新規手法を提示する。

### 3. 研究方法

#### (1) 基本的アプローチ

森林植生等自然植生は生理・形態的特性やライフサイクルの異なる多くの異種植物で構成されており、上記の手法的研究を行うには必ずしも適切といえないため、構造とライフサイクルが単純で制御しやすくかつ植物生長の幅と速度が大きい（たとえば葉面積指数は数ヶ月で0～7程度まで生長）耕地生態系を対象とする。そのため、地上～低層までの高度で可視～熱赤外領域におけるリモートセンシング計測を行い、同時に植物生理生態的変量（バイオマス、LAI、光合成蒸散、成分、etc.）や気象データ等を計測する。リモートセンシング計測と環境物理的モデルに基づいた植物の生理特性・活性モニタ手法を考案し、その妥当性を検証する。

#### (2) 具体的方法

##### ① 植物葉・群落のリモートセンシング計測

測定対象： 実験には、野外条件下で育成したイネ、ダイズ、トウモロコシ、ワタ等を用いた。野外条件のため日射強度、温湿度等は大きく変動した。また、人為処理として、水や窒素の投与量と時期、大気CO<sub>2</sub>濃度を变化させ、植物に対して種々の環境ストレスを与えた。

測定センサ等： 群落の反射スペクトルの測定には試作した7チャンネルの小型分光放射計を用いた。測定波長は560、660、830、1100、1200、1650、2200nmで視野角は15°で1回の測定・記録時間は1秒以下。測定は群落上方数mから直下方向に行った。データの基準化にはBaSO<sub>4</sub>の標準白板を用い、反射係数を求めた。個葉ならびに植物群落の表面温度の測定には、サーマルイメージャおよび赤外線放射温度計を用いた。それぞれ温度分解能は0.025℃および0.1℃、絶対精度はともに±0.5℃であった。群落の測定距離は3m～30mとした。

植物の生理的特性値の測定には、ポロメータ（光合成、蒸散、気孔コンダクタンス等）、個体当りの蒸散速度の測定には、茎熱収支法によるゲージ(SFG)およびデータロガシステムを用いた。測定は個葉、個体とも数点～数十点の反復計測を行った。また、個葉ならびに群落周囲の気象環境については、温湿度、日射エネルギー、風速、光合成有効放射を1～2分間隔で連続的に記録した。

##### ② 航空機等による可視・近赤外・熱赤外面像計測

異なる土壌水分条件における植物群落・植被を対象に、ヘリおよび航空機に可視、近赤外・熱赤外面像センサを搭載して、200m～1000mの各種地上高度で画像計測を行った。反射率への

変換は、同時に取得したキャリブレーション済みのグレイスケールの値を用いて行った。また、同時に地上で光合成蒸散測定装置を用いて、個葉の光合成、蒸散、気孔コンダクタンスを反復計測し、群落の代表値を求めた。日射強度、純放射強度、温湿度、風速などの微気象データは近傍において連続計測した。

### ③野外でのハイパースペクトル画像計測のための AOTF システム試作およびモデル実験

ハイパースペクトルと画像計測という二つを同時に満たす測定を行うことを目的に、AOTF (Acousto-Optic Tunable Filter) を用いたハイパーイメージングスペクトロメータを試作した (図 1 3)。本システムでは  $\text{TeO}_2$  結晶に周波数の異なる振動を与えることにより、屈折率を変化させて分光フィルタの機能を持たせ、周波数に応じた波長別の画像を CCD カメラで記録する。試作した装置の波長範囲は 450~900nm、波長分解能(半値幅)は可視域 3 nm~近赤外域 5 nm であった。特徴としては、機械的可動部分がなく波長選択速度が速いためにミリ秒オーダーで特定波長の画像を選択できる。また、コンピュータ制御により何個の波長を測定するか、どの波長を選ぶか、何枚繰り返し記録するかなどが簡単にプログラムできる。比較的小型軽量で、DC 駆動であり野外計測にも利用できる。問題点としては、両端波長域近傍は感度がかなり落ちること、原理上視野角が狭いこと ( $10^\circ$  程度)、若干波長収差があることがあげられる。

本装置を用いて、生長量と窒素濃度、クロロフィル濃度の異なるイネの幼植物群落 30 群落を対象に分光画像計測を行った。波長間隔 10nm、測定バンド数は 50 として全波長域をスキャンした。今回用いた CCD カメラは廉価なもので通常感度のものであったため、同一波長の画像が複数枚撮れるように 1 回の測定には数秒程度かけた。画像は Hi-8 テープに録画し、A/D 変換して波長ごとのシェーディングやノイズ補正、積算処理による S/N 改善、および幾何補正等を半自動で行った。

### ④ハイパースペクトル分光放射計による個葉の測定

生育中期のコムギ、ダイズ、ラッカセイ、トウモロコシの個葉を採取し、積分球付きの分光放射計 (Beckman, UV5240) を用いて室内測定した。植物葉は採取後、光合成有効放射が約  $10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  程度の湿室におき最大膨圧状態になったのち、生きたまま自然乾燥させ、秤量と分光計測を順次繰り返した。最終計測後は乾燥機で完全乾燥させた後乾燥重を求めた。これにより水分含有量( $\text{mg m}^{-2}$ )と相対水分含有率(RWC, %)を求めた。

## 4. 結果・考察

### (1) 個葉におけるガス交換と光合成と蒸散速度の関係

図 1 に示したように、植物の単位葉面積あたりの生理的活力を示す光合成と蒸散は、葉内部の生理生化学的状态、気孔開閉とクチクラの伝導度および葉面境界層、さらには気孔内外の  $\text{CO}_2$  および  $\text{H}_2\text{O}$  濃度によって規定される。通常条件では、気孔の開閉 (気孔コンダクタンス) が最も重要な役割を果たしており、気孔を介してのガス交換を定量することが生理的活性の直接的な評価につながる。図 2 から明らかなように、光合成速度と蒸散速度は大気飽差を介して直線的な関係にある。このことは、気孔が  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  の交換に主要な役割を果たしており、蒸散速度と葉外水蒸気圧がわかれば、光合成速度を高い精度で推定できることがわかる。同様の関係は他の植物についても得られた。両者の直線的関係は大気  $\text{CO}_2$  濃度を倍加した場合にも成立しており、一般性が高いことが推察される。このことから、リモートセンシング計測に

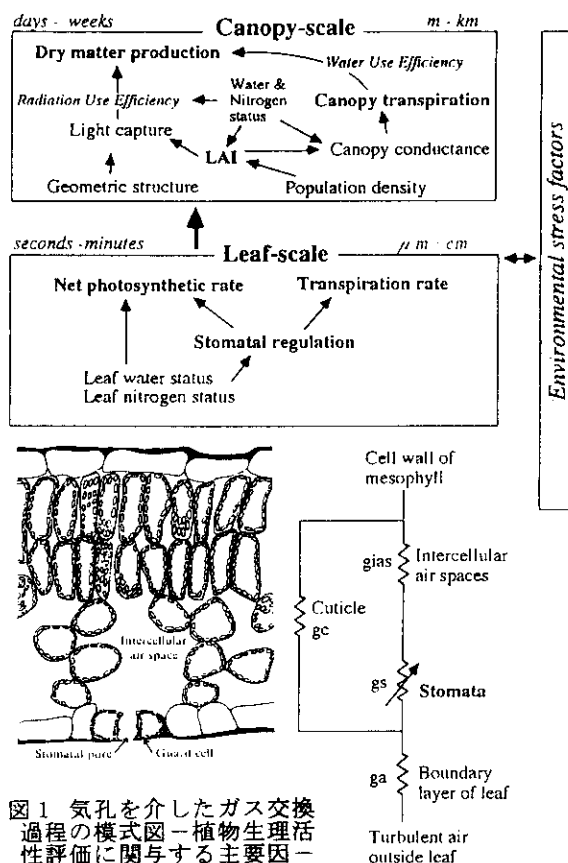


図1 気孔を介したガス交換過程の模式図—植物生理活性評価に関する主要因—

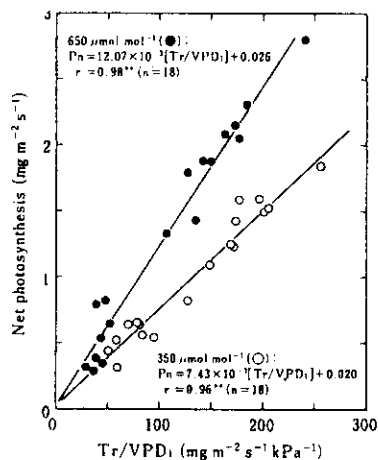


図2 個葉レベルの光合成と蒸散の関係—大気CO<sub>2</sub>濃度の異なるワタの例—

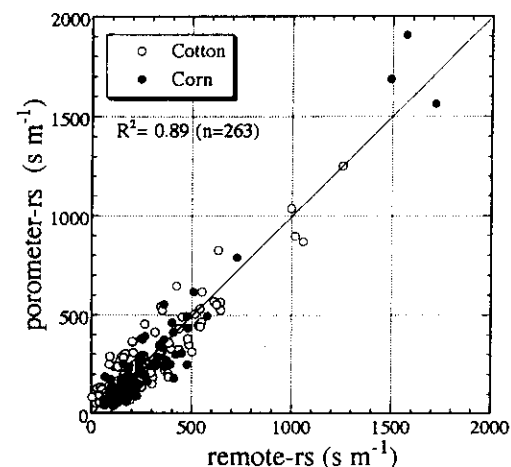


図3 個葉レベルにおける気孔抵抗の直接計測値とリモートセンシングによる推定値の比較—ワタとトウモロコシの例—

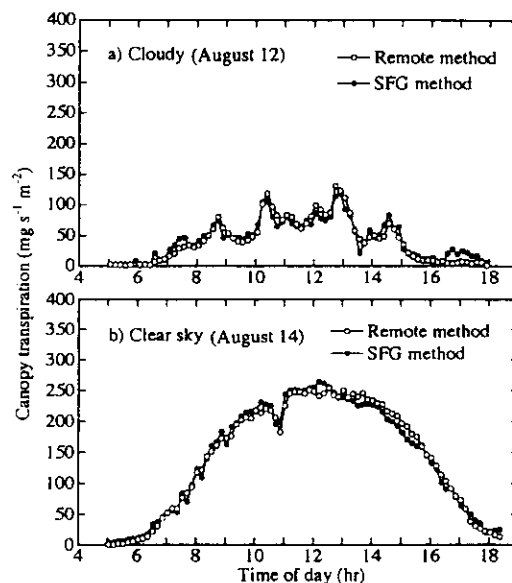


図4 植物個体群の蒸散速度の日変化の直接計測値とリモートセンシングによる推定値の比較—ダイズ群落の例—

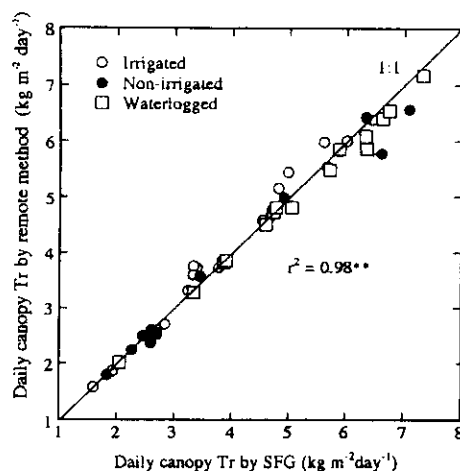


図5 植物個体群蒸散速度の日量の直接計測値とリモートセンシングによる推定値の比較—土壌水分条件の異なるダイズ群落の例—

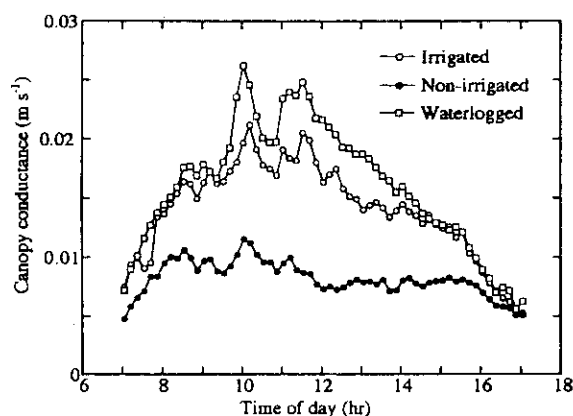


図6 リモートセンシングに基づいた植物個体群の植被コンダクタンスの日変化—ダイズ群落—

関係づけやすい蒸散速度あるいは気孔コンダクタンスを生理活力の直接指標とするのが妥当と判断された。

## (2) 個葉の生理学的活性と赤外線放射測温による葉温の関係

水ストレス条件にある植物と健全な植物について、生理活力とサーマルイメージャによる葉温値（植被温度）との関係を比較した結果、光合成速度、蒸散速度ならびに気孔コンダクタンスの低下と葉温上昇が密接にリンクしていることが確認された。この関係は、植物による水ストレスの感受→気孔コンダクタンスの低下→蒸散速度の低下→葉温の上昇というプロセスで起こるもので、気孔と葉面境界層を介しての熱と水蒸気の交換過程に従うため、周囲大気の基本データ（温湿度、日射等）が得られれば、蒸散速度、気孔コンダクタンスを推定することが可能である。本方法では、赤外線放射測温によって直接測定される葉温が、個々の葉の活力差を表す上で重要な役割を果たしている。図3は、トウモロコシおよびワタの個葉について、放射測温と微気象計測によって遠隔推定した気孔抵抗値をポロメータによる実測値と比較したもので、気孔の開閉動態を非接触で評価することができることが明らかになった。

## (3) 植物群落の生理的活力の遠隔評価手法

植物機能を物質生産や環境形成の観点からみると、生長やガス交換機能を植物群落（あるいは植被）のレベルで評価することが重要かつ適切である場合が多く、本研究で群落をキーレベルとしている。そこでつぎに、群落スケールにおける蒸散速度およびコンダクタンスの推定手法について検討した。ここで開発した遠隔手法は、基本的には個葉の場合と同様、群落についての熱収支過程に基づいており、遠隔計測される植被温度および群落に吸収される純放射エネルギーを主要な入力とするものである。群落の光合成有効放射吸収率(APAR)とLAIは分光反射率と密接な関係にあり、本方法においても群落が吸収するエネルギーの算出に分光計測に基づいて評価したLAIを用いている。すなわち、植被の機能に関する情報を熱赤外波長により、量的な情報を可視-近赤外波長域により評価し、両者をモデルを介して結合することより、植被全体としての生理的活力を評価するものである。

干ばつ、湛水および適時灌水と土壤水分条件の大きく異なるダイズ群落を対象として、同手法による推定値と茎熱収支法(SFG)による測定値とを比較した。茎熱収支法は個体の茎にゲージを取り付けて個々の茎中を流れる蒸散流の速度を評価する方法で、現時点ではほぼ唯一の信頼性の高い直接計測法である。同一群落について群落全体の蒸散速度の日変化をみた結果(図4)、遠隔手法による群落蒸散速度推定値と直接法による実測値は、天候条件によらずよく一致した。したがって、群落の蒸散速度をほぼリアルタイムで遠隔的に追跡することが可能と考えられた。

さらに、土壤水分の違いによって蒸散速度・光合成速度が大きく異なる群落について、1日当たり蒸散量積算値を比較した結果(図5)、多様な土壤水分・微気象条件下において、遠隔法による推定値と実測値の間にはきわめて密接な1:1の関係が得られることがわかった。さらに、遠隔法によって、植物群落のガス交換能を規定する重要な特性値である植被コンダクタンスの日変化を推定した結果(図6)、各土壤水分条件に応じた妥当な推移が得られた。

## (4) VITT(Vegetation Index-Temperature Trapezoid)手法に基づいた可視～近赤外域および熱赤外域のリモートセンシングデータの同時利用による植生活性評価手法の検討

航空機等による地上観測データのうち、可視～近赤外波長域の反射率と、熱赤外域の放射データに基づいて、植生を含む複合的な地表面を対象に、植物活性および地表面の水分状態の評

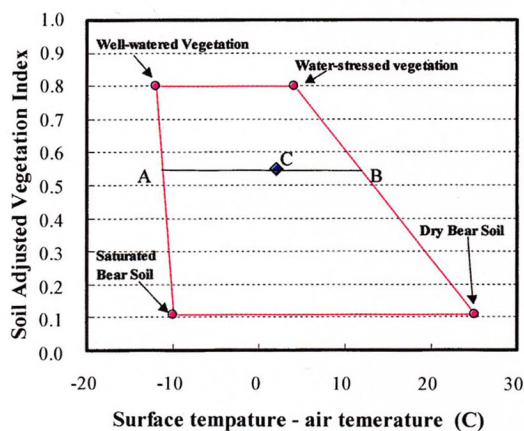


図7 遠隔計測によるコンポジットデータによる植生活性の評価法の概念図。植生指数－地表面温度の2次元平面上では4つの極点は台形(VITT)を形成する。

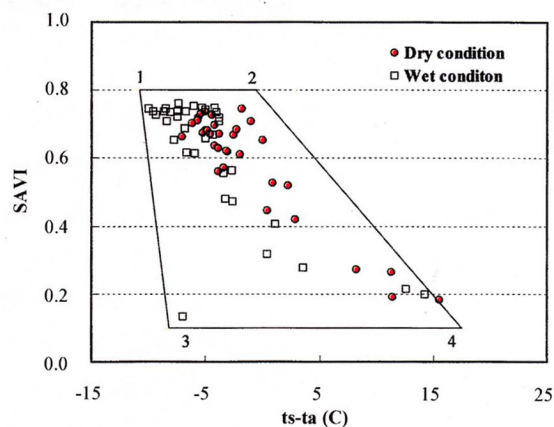


図8 灌漑条件の異なるアルファルファ圃場における測定値の VITT 内のプロット

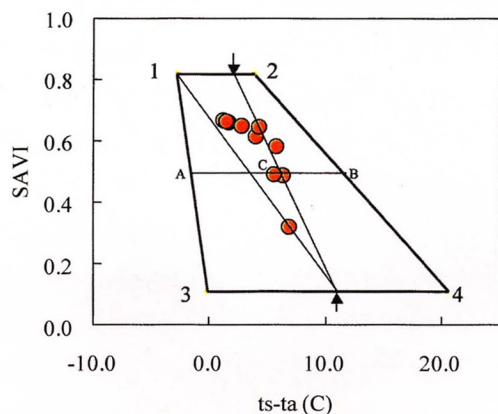


図9 灌漑条件の異なるダイズ圃場におけるヘリによる観測値の VITT 内のプロット

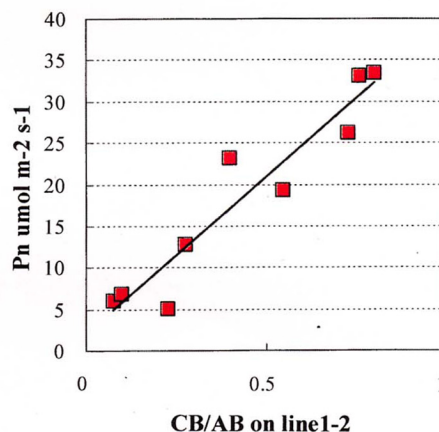


図10 ダイズ圃場(図9)における WAVI と光合成速度の関係

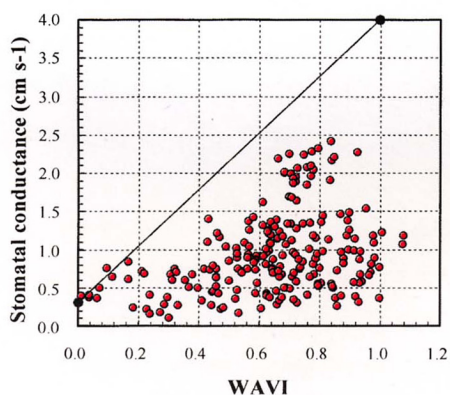


図11 灌漑条件の異なるコムギの気孔コンダクタンスと WAVI の関係

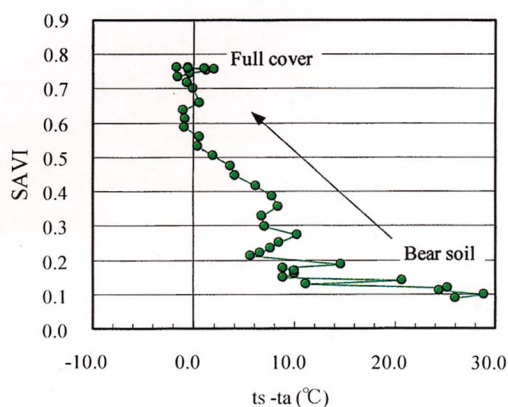


図12 ダイズ圃場における観測値の生長に伴う VITT 内での位置の移動

価手法を考案した（VITT；Vegetation Index - Temperature Trapezoid 法）。すなわち、図 7 に示したように、全ての地表面は、湿潤裸地、乾燥裸地、湿潤植生、乾燥植生の 4 つの頂点の中に位置すると仮定される。植被率は裸地で 0、全面植生の場合 1 とし、[表面温度-気温]は微気象計測データ等に基づいてエネルギーと水蒸気交換過程のモデルにより推定する（下記にポイント 1 の例）。気孔コンダクタンスの最大・最小値などの植物パラメータを実測値等から与える。

$$(ts-ta)_i = [r_a(Rn-G)/C_v][\gamma(1+r_{cm}/r_a)/\{\Delta + \gamma(1+r_{cm}/r_a)\}] - [VPD/\{\Delta + \gamma(1+r_{cm}/r_a)\}]$$

ts,ta:地表面温度および植物温度、 $r_a$ :境界層抵抗、Rn:純放射、G:土壌熱流、

$C_v, \gamma, \Delta$ :常数、 $r_{cm}$ :気孔抵抗、VPD:飽差

そして、VITT 領域内の位置 CB/AB は任意のピクセルの内の植被の水分供給状態、植物活性の指標になると考えられる。ETa:実蒸発散、ETp:潜在蒸発散、 $x, r, m$ :それぞれ最大値、最小値、評価値を示す。

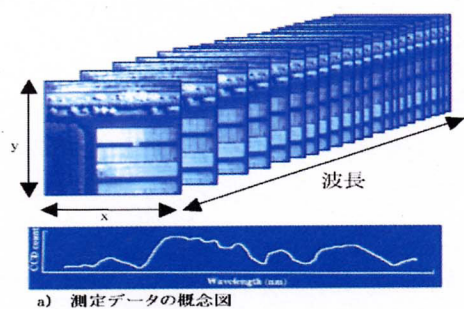
$$\begin{aligned} CB/AB &= WAVI \text{ (Water Availability Index)} \\ &= [(ts - ta)_x - (ts - ta)_r] / [(ts - ta)_x - (ts - ta)_m] \\ &\approx ETa/ETp \end{aligned}$$

この方法では反射率に基づいた植生指数と放射測温に基づいた表面温度－気温差を二つの軸として、任意の地表面を表示する。すなわち、上記 2 軸によって表される平面上の位置によって、地表面の水分状態、そしてそこに含まれる植生の活性を推定、評価しようとするものである。このアプローチは地上および上空からの膨大な観測データのプロットから着想したものである。完全乾燥の裸地、湿潤状態の裸地、ストレスの内健全な植生、ガス交換を全く行っていない植生、という 4 つの極点についてモデル計算を行うと、これら 4 点は台形状の 4 角形をなし、実際の観測データの点はすべてこの台形の中にプロットされる。台形領域のなかの位置を相対化することにより、個々の実際の地点の水分状態が評価され、その中の植生の生理状態も間接的に推定することができる。植物体の光合成蒸散速度、気孔コンダクタンスなどの生理的変量と、VITT 法によりリモートセンシングデータから求めた相対的な活性評価指数との間には密接な相関関係が得られることがわかった。

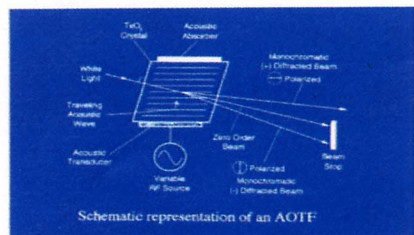
同様の手法を、地上での精密計測データ、ヘリによる実測データ等多くのデータセットに基づいてその可能性と限界を検討した。その結果、WAVI（Water Availability Index）は直接計測した光合成速度との間に密接な関係があり、また、微気象的にポテンシャルな範囲に対して、実際の地表面－気温差を相対評価する上で有効であり、植生活性に関する情報を推定できる可能性が明らかになった。また、これにより実蒸散／可能蒸散の値の推定範囲についても情報を与え得ることがわかった（図 8～12）。

#### （5）AOTF 反射率画像による植物体窒素濃度の推定

40 バンドの反射率画像に対して教師無し自動分類を行い、植物体領域を抽出した。これらの領域の反射スペクトルパターンはバイオマスと窒素濃度によって非常に大きく変化した（図 14）。多波長の反射係数と各種の植物体パラメータとの相関関係を調べた結果、反射係数の単相関や比もあまり明確な関係が得られず、多波長を要約した主成分回帰もあまり高い説明力は得られなかった。これらの試みのうち最も説明力が高かったのは多波長の反射係数をそのまま用いた重回帰モデルで、決定係数（自由度補正済）は、窒素濃度、クロロフィル指数、窒素量についてそれぞれ 0.72, 0.86, 0.85 であった。いずれも 520-570nm, 610-680nm, 720-800nm の波長帯に高い寄与率を持つ波長が選択された（図 15）。なお、さらに細かい波長幅での測定も



a) 測定データの概念図



b) AOTFフィルタの原理

図 1 3 試作したハイパースペクトル画像計測装置の原理と概念図

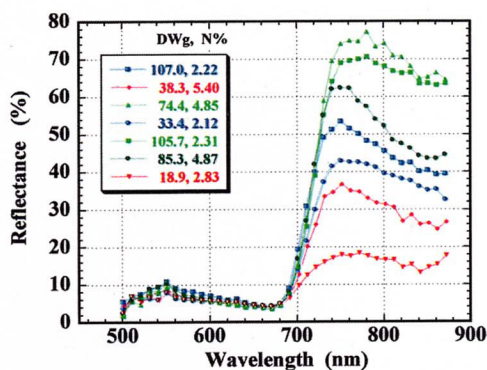


図 1 4 ハイパースペクトル画像計測システムによって測定したバイオマスと窒素濃度の異なるイネ苗群落の反射スペクトル

注) 一度の測定で多数群落の反射スペクトルを同時に取得。図には一部群落のデータのみ表示。DWg, N%はそれぞれ  $m^2$  当たり乾物重と乾物窒素含有率。

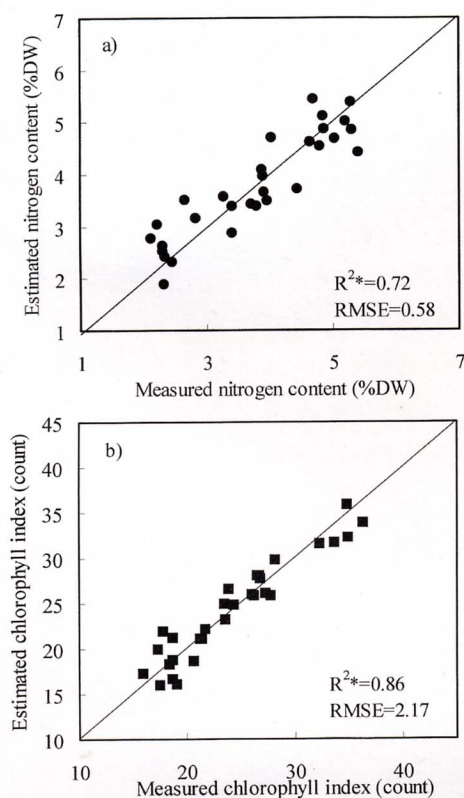


図 1 5 ハイパースペクトルデータによる窒素濃度およびクロロフィル指数の重回帰推定—イネ苗群落の例

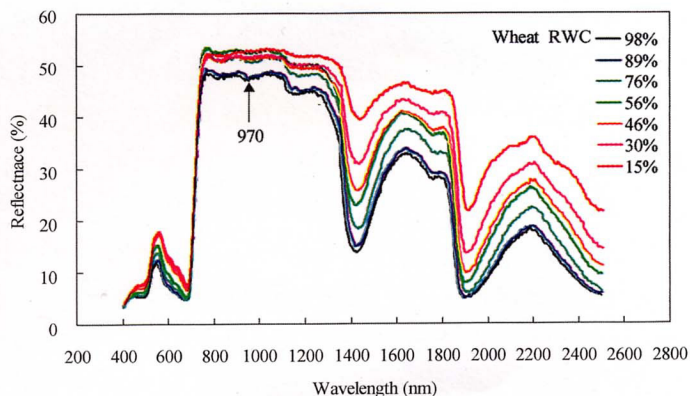


図 1 6 水分状態の異なる葉のハイパースペクトル反射特性

行ったが、微分値やそれによって得られるレッドエッジのシフトについては明瞭な関係はなかった。

#### (6) ハイパースペクトル計測による葉の水分状態の推定

水分状態の異なる個葉の反射スペクトルを解析した結果、いずれの波長においても反射率は乾燥とともに増加し、特に 1430nm や 1950nm 付近の水分吸収スペクトルの谷が乾燥とともに消失した。1430nm や 1950nm 付近の水分の吸収帯を含む短波長赤外域のいくつかの指数が特に有効である(図 1 6)。しかし、野外では、特に短波長赤外域の水分吸収帯は吸収が強すぎて測定困難なこともあり、ここでは近赤外域(950-970nm)の弱い水分吸収帯の反射率を中心に有効性を検討した。970nm 付近の谷も短波長赤外域の吸収帯と同様の傾向を示し、この弱い吸収を相対化した反射指数  $R900/R970$  は、葉の水分含有量とかなり高い相関関係をもつことがわかった(図 1 7)。ただし、同一の反射指数に対してラッカセイはコムギの 2 倍近い水分を保有しており、葉の組織構造の違いにより関係が変化する。上記指数をさらに  $NDVI [(NIR-RED)/(NIR+RED)]$  で除した指数ではより直線的な関係が得られた(図 1 8)。これは乾燥に伴う色素分解と組織構造の変化を補正する効果によると考えられた。一方、色素変動を表す指数  $[R800 \cdot R445]/[R800 \cdot R680]$  も相対水分含有率と高い相関関係があることがわかった。これらの関係は、水ストレスや環境汚染に伴う植物の水分含有率や色素濃度の変化など生理変化の検出に利用できる可能性が高い(図 1 9)。

ハイパースペクトルデータを用い、放射伝達モデルの数値的インバージョンによって葉内水分を求める試みを行った。モデルは単位面積あたりの水分、クロロフィル濃度、組織構造指数を内部パラメータとしている。ハイパースペクトルデータのみからモデルインバージョンにより独立に求めた水分含有量と実測した水分含有率および相対水分含有率とを比較した結果、両者は各植物葉についてはきわめて良好な直線的関係にあることがわかった(図 2 0)。とくにコムギ、トウモロコシ、ダイズについてはほとんど共通的な関係があり 1 : 1 にも比較的近かった。また、求められたパラメータを用いたシミュレーションの結果は各植物とも一部を除いてよく測定値と一致した(図 2 1)。しかし、ラッカセイについては他の 3 種とは異なる直線関係にあることがわかった。これは前項の結果と同様、葉の組織構造の違いをこのモデルでは十分考慮していないことによると考えられた。モデルにおける葉内部組織構造パラメータの与え方等改良の必要性があると考えられた。

### 5. 本研究により得られた成果

(1) 光合成と蒸散は飽差を介して密接な直線関係にあることを、実験に基づいて検証し、リモートセンシングによる植物生理活力の評価には蒸散速度あるいはより直接的には気孔開閉を直接指標とするのが妥当であることがわかった。

(2) 地上での遠隔計測データと個葉生理状態の計測実験データの解析から、熱赤外リモートセンシングにより個葉レベルの解像度で葉温が得られれば個葉蒸散速度と気孔の開閉状態をかなり高い精度で推定できることが明らかになった。

(3) 植物個体群を対象に地上での熱赤外計測ならびに可視～近赤外の計測実験の解析から、熱赤外では植物群落(植物葉群の平均温度)のみの、また、可視近赤外では植被面の平均反射率が評価できる解像度でリモートセンシングデータが得られれば、それらと熱収支をふまえた

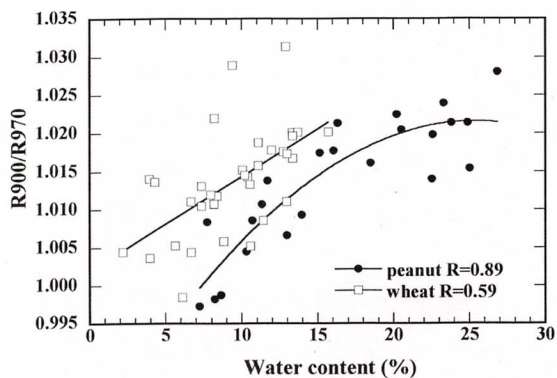


図 17 ハイパースペクトル計測による水分指数と葉の実測水分との関係

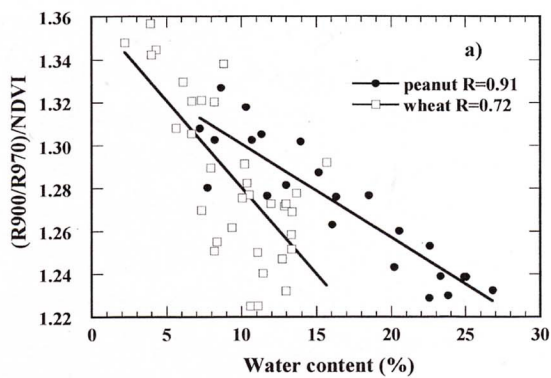


図 18 葉の水分状態とハイパースペクトル計測による水分指数／植生指数との関係

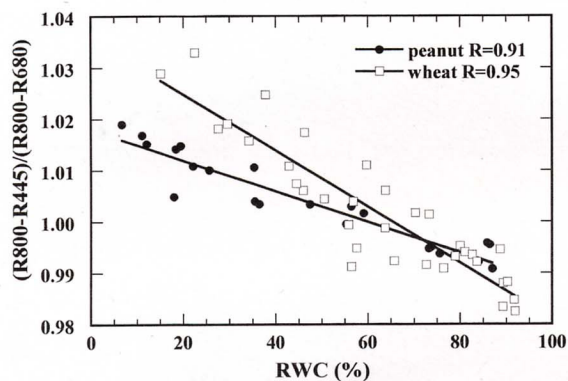


図 19 ハイパースペクトル計測による植物色素指数と相対水分含有率の関係

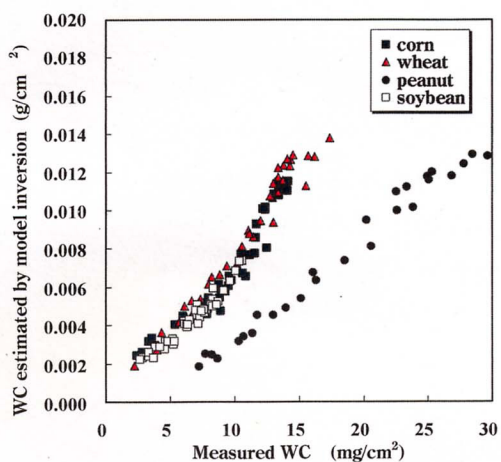


図 20 ハイパースペクトル計測データと反射シミュレーションモデルから求めた水分値と実測値との比較

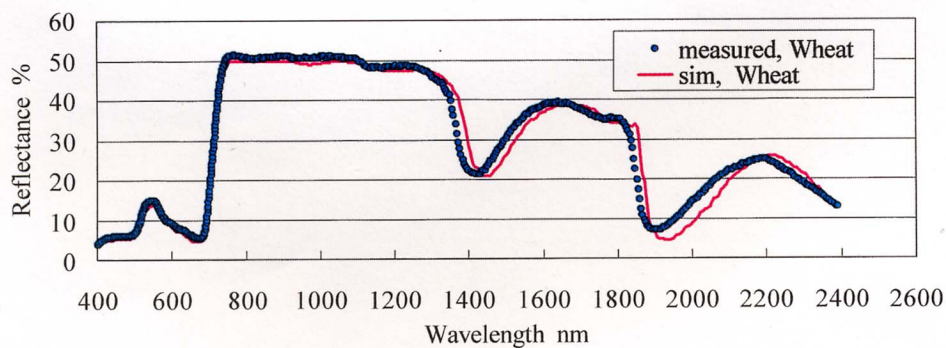


図 21 ハイパースペクトル計測データ実測値と反射モデルによるシミュレーションデータとの比較

生理モデルによって個体群蒸散速度と植被コンダクタンスを遠隔的に評価できることを明らかにした。同様の手法を、さらに大きなスケールの植被レベルでの評価に展開するため、熱赤外計測データと可視-近赤外データに基づいた VITT (Vegetation Index - Temperature Trapezoid) コンセプトを考案した。これにより、WAVI (Water Availability Index) は直接計測した光合成蒸散速度、気孔コンダクタンスなどの生理的変量と密接な相関関係があることを確認した。

(5) 試作した AOTF 画像計測装置は野外でのハイパースペクトル画像計測に有効であった。反射係数を用いた重回帰モデルにより、窒素濃度、クロロフィル指数、窒素量を比較的精度良く推定できる可能性が示された。

(6) ハイパースペクトル計測により、950-970nm の弱い水分吸収帯の反射率を相対化した指数  $R900/R970$  は、葉の水分含有率と高い相関関係があることがわかった。また、この指数を  $NDVI=[(NIR-RED)/(NIR+RED)]$  で補正した指数ではより直線的な関係が得られた。一方、色素変動を表す指数  $([R800-R445]/[R800-R680])$  も相対含有率と高い相関関係があることがわかった。

(7) ハイパースペクトルデータを用いた放射伝達モデルの数値的インバージョンによる植物の生理生化学的特性の遠隔的評価手法の有効性を提示した。

## 6. 参考文献

- 1) Asrar, G. et al.: Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron. J.* 76: 300-306, 1984.
- 2) Jackson, R.D. et al. : Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17: 1133-1138, 1981.
- 3) Jacquemoud, S. et al. : PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.* 34: 75-91, 1990.
- 4) Monteith, J.L. et al. : Principles of environmental physics. Edward Arnold, London. 1-291, 1990.
- 5) Inoue, Y., S. Morinaga, and M. Shibayama: Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Jpn. J. Crop Sci.* 62: 462-469, 1993.
- 6) Penuelas et al. : Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance, *Photosynthetica* 31: 221-230, 1995.

### [国際共同研究の状況]

- ① U. S. Water Conservation Laboratory, Dr. M.S. Moran
- ② Autonomà University of Barcelona, Dr. J. Penuelas
- ③ University of Arizona, Dr. P. Nagler
- ④ Michigan State University, Dr. J. Qi
- ⑤ INRA-Agroclimatologie, Dr. A. Olioso

### [研究成果の発表状況]

#### (1) 口頭発表

- ① Y. Inoue: The 1st European Conference on Precision Agriculture, Coventry, UK, (1997) "Remote imaging spectrometry for quantifying spatial variability"

- ②井上吉雄・富田淳志：日本作物学会誌 66 別号1, 230-231 (1997)「スペクトル画像の空中計測による作物・圃場情報の評価 第2報 低層巡航型スペクトル画像計測システムの試作」
- ③井上吉雄・M. S. Moran・森永慎介：日本リモートセンシング学会 1997 年秋季学術講演会論文集, 173-176(1997)「分光反射・熱赤外計測に基づく植物の生理的活力の推定手法」
- ④井上吉雄・J. Penuelas, Y. Nouvellon, M. S. Moran：日本リモートセンシング学会 1999 年春季学術講演会論文集, 595-598 (1999)「ハイパースペクトル計測による植物生理特性の評価 1. AOTF 分光画像装置の試作および植物水分、窒素の推定」
- ⑤井上吉雄・M. S. Moran 富田淳志：日本作物学会誌, 67 別号 2, 334-335 (1998)「生育・収量のモデル予測のための群落変量のリモートセンシング. 1. 水稻個体群の fAPAR、窒素濃度と反射スペクトルの関係」
- ⑥井上吉雄・M. S. Moran・堀江武：日本リモートセンシング学会 1998 年秋季学術講演会論文集, 255-258 (1998)「反射スペクトル計測による水稻群落の fAPAR の推定および生長モデルとの結合による生育・収量の予測」
- ⑦井上吉雄・P. L. Nagler, C. S. T. Daughtry：日本作物学会誌, 67 別号 1, 236-237 (1998)「スペクトル画像の空中計測による作物・圃場情報の評価 第4報 短波長赤外反射計測に基づく作物残査の定量化」
- ⑧井上吉雄・富田淳志：日本作物学会誌, 66 別号 2, 101-102(1997)「スペクトル画像の空中計測による作物・圃場情報の評価 第3報 ハイパースペクトル画像計測システムの試作」
- ⑨Y. Inoue, M.S. Moran, A. Tomita: Proc. International Symposium - World Food Security and Crop Production Technologies for Tomorrow -, 292-293 (1999) "Remote sensing of canopy variables for model prediction of growth and yield - fAPAR, nitrogen status and spectral reflectance in rice canopies"
- ⑩井上吉雄・J. Penuelas・Y. Nouvellon・M.S. Moran: 日本リモートセンシング学会 1999 年春季学術講演会論文集, 595-598 (1999)「ハイパースペクトル計測による植物生理特性の評価 1. AOTF 分光画像装置の試作および植物水分、窒素の推定」
- ⑪井上吉雄・J. Penuelas・Y. Nouvellon・M.S. Moran: 日本作物学会誌, 68 別 2, 254-255(1999)「ハイパースペクトル計測に基づいた分光指数およびモデル逆推定による作物葉特性の評価－葉水分－」
- ⑫井上吉雄・美濃伸之・富田淳志・小川茂男：日本作物学会誌, 68 別 2, 166-167(1999)「作物群落の  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  フラックスおよび放射環境の動態解析 1. 渦相関法と茎熱収支法によるダイズ群落の蒸散・蒸発散の分離評価」
- ⑬井上吉雄・富田淳志・森永慎介・小川茂男・美濃伸之：日本リモートセンシング学会 1999 年秋季学術講演会論文集, 265-268 (1999)「飛行船型低層巡航リモートセンシングシステム－植生生態・精密農業情報計測のための初期実験－」
- ⑭井上吉雄・美濃伸之・富田淳志・小川茂男・崔毅年：日本作物学会誌, 70 別号 1 170-171 (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. 第5報 航空機等による作物特性の面的変異の評価」
- ⑮井上吉雄・P.L. Nagler, C.S.T. Daughtry：日本リモートセンシング学会 2000 年春季学術講演会論文集, 267-268 (2000)「ハイパースペクトル計測による植物生理特性の評価 2. 短波

長赤外反射計測に基づく植物残査の定量化」

(2) 論文発表

- ①Y. Inoue and M. S. Moran: International J. Remote Sensing, 18, 139-152 (1997) "A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration- a case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopies-".
- ②Y. Inoue and M.S. Moran: Physical measurements and Signatures in Remote Sensing, 7, 743-750 (1997) "Predicting potential and actual crop growth and yield on a simulation model with remotely sensed spectral measurements".
- ③M.S. Moran, A. Vidal, D. Troufleau, J. Qi, T.R. Clarke, P.J. Pinter Jr., T.A. Mitchell, Y. Inoue, and C.M. Neale: Remote Sensing of Environment, 61, 96-109(1997) "Combining multi-frequency microwave and optical data for crop management".
- ④M.S. Moran, Y. Inoue, E. Barnes: Remote Sensing of Environment, 63, 310-309(1997) "Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management".
- ⑤中原正一・井上吉雄：農業気象, 53, 191-199 (1997)「赤外線放射測温によるトマトの水ストレスの検出-高糖度トマト栽培における低土壌水分管理への応用」
- ⑥Y. Inoue, M.S. Moran, T. Horie: Plant Production Science, 1, 269-279 (1998) "Analysis of spectral measurements in Rice paddies for predicting rice growth and yield based on a simple crop simulation model"
- ⑦Y. Inoue, M.S. Moran, A. Tomita : Proc. International Symposium - World Food Security and Crop Production Technologies for Tomorrow -, 292-293 (1999) "Remote sensing of canopy variables for model prediction of growth and yield - fAPAR, nitrogen status and spectral spectral reflectance in rice canopies"
- ⑧J. Penuelas, Y. Inoue: Photosynthetica, 36, 355-360 (1999) "Reflectance indices indicative of changes in water and pigment content of peanut and wheat leaves"
- ⑨M.S. Moran, A. Vidal, D. Troufleau, Y. Inoue and T.A. Mitchell : IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 36, 265-272 (1998) "Ku- and C-band SAR for discriminating agricultural crop and soil conditions"
- ⑩M. Shibayama, A. Salli, T. Hame, L. Iso-Iivari, S. Heino, M. Alanen, S. Morinaga, Y. Inoue and T. Akiyama: Remote Sensing of Environment, 67, 160-180 (1999) "Detecting phenophases of subarctic shrub canopies by using automated reflectance measurements"
- ⑪Y. Inoue, J. Penuelas, Y. Nouvellon and M.S. Moran: Spectral Sensing Research, 6, 251-257 (1999) "Estimating water and nitrogen conditions of crop plants based on hyper-spectral measurements"
- ⑫Y. Inoue, S. Morinaga and A. Tomita: International Journal of Remote Sensing, 21, 379-385 (2000) "A blimp-based remote sensing system for low-altitude monitoring of plant variables: a preliminary experiment for agricultural and ecological applications"
- ⑬Y. Inoue, J. Qi, Y. Nouvellon and M.S. Moran: IGARSS2000, (in press, 2000) "Hyperspectral and directional remote sensing measurements on rice canopies for estimation of plant growth variables"

- ⑭ Y. Nouvellon, A. Begue, M. S. Moran, D. Lo Seen, S. Rambal, D. Luquet, G. Chehbouni and Y. Inoue: Agricultural and Forest Meteorology (in press, 2000) "PAR extinction in shortgrass-ecosystems: Effects of clumping, sky conditions and soil albedo"
- ⑮ J. Penuelus and Y. Inoue: International Journal of Remote Sensing, 22(in press, 2000). "Reflectance assessment of canopy CO<sub>2</sub> uptake"
- ⑯ P.L. Nagler, Y. Inoue, C.S.T. Daughtry: Soil and Water conservation, submitted, (1999), "Shortwave infrared spectral reflectance of mixed plant litter and soils as a basis for quantitative estimation of plant residue"

(3) 出願特許、受賞等

- ① 井上吉雄・Josep Penuelas, Yann Nouvellon, M. Susan Moran :「ハイパースペクトル計測による植物生理特性の評価」 1999年度日本リモートセンシング学会優秀論文発表賞