総 説

分光計測による作物生育診断技術

秋 山 侃*

(農業環境技術研究所)

Spectroradiometric Crop Growth Diagnosis

Tsuyoshi AKIYAMA

(National Institute of Agro-Environmental Sciences)

医者が患者の顔色や皮膚の艶をみて症状を診断するように、篤農家は作物の色艶や株の勢いを観察することによって、その生育状態を瞬時に読みとってきた。このような農民の豊かな経験にもとづく知恵と優れた勘による栽培管理技術を、機械の眼（センサ）に置き換えて、誰でもが使えて、普遍的かつ即時的な技術にすることができないだろうか。そうすれば、農業の機械化・軽労化に役立つばかりでなく、時代的ニーズである良食味・高品質農産物の生産や、環境保全的な栽培管理のための有力な情報を提供することが可能となる。

分光計測法あるいはリモートセンシング法は、それぞれの物体が持つ分光反射特性から、物体の種類や量、その状態などを検出する手法であり、近年のメカトロニクスやエレクトロニクス技術の革新に伴い、農業分野でも広く適用されるようになった。分光計測法を作物評価に導入することのメリットとして次のような点が期待できる。1) センサによって、人間の目よりも広い電磁波域からの作物情報を検出できる、2) 非破壊計測技術であることから、同一個体を継続して追跡調査できる、3) 生育の違いを数値データとして計測できる、4) 短時間に、あるいはリアルタイムで生育過程を計測できる、5) 航空機などに搭載して広域の面的情報を得ることができる、6) 人工衛星によって取得されたデータと比較しながら解析ができる。

そこで進歩の著しい最近の分光計測による作物生育診断技術について、研究の動向を紹介したい。しかし、この分野の文献は極めて多数あることから、本報では、バイオマスと収量の推定、体内成分量の推定、およびストレス反応の検出の3点に焦点を絞って紹介する。

1. 分光放射計と植生指数

(1) 野外用作物分光放射計の試作と改良

* 現在：岐阜大学流域環境研究センター、岐阜市。

従来から室内で物体の分光反射率や透過率を精密に測定する機器はいくつか開発されている（例えば Beckman UV5240 など）が、野外で農作物の生育状態を計測するのに適したシステム（センサと、これを搭載するためのプラットフォームおよび生体情報解析ソフトウェアを含む）はほとんど作られていなかった。しかし野外で作物の分光計測を安定的かつ効率的に実施するためには、小型軽量で操作性に優れた分光放射計が必要であり、1970 年代前半から 1980 年代にかけて、多くの試作機が開発された。そこでまず、作物計測にしばしば使われる代表的な機種について最初に概説する。

Canada Centre for Remote Sensing⁸⁾ が開発した Spectrascan は 380 nm から 1000 nm を 10 nm 刻み、1000 nm から 2400 nm を 20 nm 刻みで、合計 117 の波長帯によって、可視～中赤外までの広い範囲をほぼ連続的に計測できる。Spectron 社の可視・近赤外狭波長分光放射計 SE-590 (390～1100 nm の範囲を 2.8 nm 刻み、合計 252 波長) もこれに類似した連続波長取得用の分光放射計である³²⁾。また農業環境技術研究所で試作した可視・中赤外分光放射計⁵²⁾ も、400 nm から 900 nm を 5 nm 刻み、900 nm から 1900 nm を 10 nm 刻みで測定する連続波長型のセンサであり、可視・近赤外域 (400～900 nm) と近赤外・中赤外域 (900～1900 nm) を同時に測定できるよう、回折格子モノクロメータと光検知器を 2 組ずつ備えている。このように連続波長を計測できる分光放射計は、red edge の移動のような植物体内成分の変化に伴う微妙なスペクトルパターンの変化を把握したり、スペクトル曲線の微分値から変曲点を求めたりする場合には有効である。その反面、計測システムが大型化し重量がかさみ、電源を必要とする。また計測に時間を要す、などの点で野外での簡易計測には必ずしも適していない。このため、植物生体計測に有効と思われる数波長のみを計測する簡易型分光放射計も開発されている。

Exotech 100A はフィルタ方式の分光器²⁹⁾で、ランドサット MSS に対応する 4 波長、すなわち 500~600 nm, 600~700 nm, 700~800 nm, 800~1100 nm の反射係数を計測することができる。瞬時視野 (FOV) はふつう 15° にセットされていて、3~4 m のブームの先端にとりつけて作物個体群を真上から観測する。観測波長が可視域 2, 近赤外域 2 と限られるうえ、波長幅が広いので、シャープな変化パターンは追従できないが、ランドサット MSS データと直接比較できる利点がある。

Barnes MMR 12-1000 は、基本的にはランドサット TM の波長帯に合わせて開発された分光器で、7 波長用と 8 波長用のものがある⁴¹⁾。観測波長帯は TM1: 450~520 nm, TM2: 520~600 nm, TM3: 630~690 nm, TM4: 760~900 nm, TM5: 1550~1750 nm, TM7: 2080~2350 nm と、TM6: 10.4~12.5 μ がランドサット TM に対応する 7 波長で、このほかに MMR5 と呼ばれる 1150~1300 nm 帯が付加されている場合もある。波長数が多く、従来の可視域・近赤外域に加え、中赤外域の波長帯が含まれている点と、各波長帯の幅が狭い点に特徴がある。またランドサット TM データと直接比較できる点も有利である。

Model MarkII⁵⁹⁾ と呼ばれる分光器も、630~690, 760~900, 1550~1750 nm の 3 波長だけを計測する軽量小型の簡易型分光放射計で、観測用のポールに設置して一人で計測することも可能である。この放射計には可視・近赤外各 1 波長の 2 波長用や、可視から中赤外域までを測れる 9 波長用も作られている。Exotech 100A, Barnes MMR 12-1000 および Model MarkII の 3 機種分光計測特性については、Robinson⁴⁰⁾ が比較し、各々の特徴を報告している。農業環境技術研究所で試作した携帯型分光放射計は Barnes MMR 12-1000 に類似していて、中心波長が 491, 560, 662, 833, 1101, 1201, 1649, 2201 nm の 8 波長の分光反射が瞬時に観測できる⁴⁷⁾。

野外用分光放射計測システムのこれまでの開発の方向として、センサに関しては、計測時間の短縮、広い波長域を狭い刻みでカバーすること、振動・熱・湿度・ほこり等に対する頑強性が求められてきた。またプラットフォームに対しては、機動性の向上や軽量化が期待され、このような改善により、現場での操作性の向上が図られている¹⁾。今後は多波長分光画像放射計などの開発が期待される。

(2) 植生指数 (Vegetation Index, VI)

野外で分光放射計を用いて分光計測を行う場合、太陽光を光源とし、対象となる植生や葉身の反射を計測する。しかしこの値は太陽光の強さや観測方向によって容易に変化する。そこで同じ光条件下で標準白色板とよばれる BaSO₄ を塗布した板の反射値を測り、白色板に対する対象物の反射割合で相対的な反射率を求めている。この値は積分球などを用いて計測する全方向の反射率とは異なり、2 方向性の反射率 (Bidirectional Reflectance Factor) であるため、区別して反射係数と呼ばれている。

このような標準化作業を行っても、植被表面は本来的に不均一で、影や鏡面反射が不規則に生じるため、安定した反射係数はなかなか得がたい。また植被が粗な場合は、背景となる土壌や水面が混入してしまう。そこで、このようなノイズや背景の影響を軽減し、目的とする植物情報を抽出するために、2 波長以上の分光反射係数を組み合わせた演算値である分光植生指数 (VI) が提案されている。その中でしばしば使われる基本的な VI を最初に紹介しておく。

① RVI: Ratio Vegetation Index, 比植生指数, 2 波長の反射係数間の比⁵⁷⁾で、下式で表わされる。

$$RVI = Ra/Rb \dots\dots\dots (1)$$

以後、 Ra , Rb はそれぞれ a nm, b nm における反射係数を表すこととする。植物葉が近赤外光 (NIR) を強く反射し、青や赤の可視光を吸収することから、 Ra には NIR の反射係数、 Rb には赤 (Red) の反射係数をあてはめる場合が多い。

② DVI: Difference Vegetation Index, 差植生指数, 2 波長の反射係数の差 (例えば Shibayama and Munakata⁴⁹⁾) で、(2) 式で表わすことができる。

$$DVI = Ra - Rb \dots\dots\dots (2)$$

③ NDVI: Normalized Difference Vegetation Index, 正規化 (演算) 植生指数⁴²⁾ と呼ばれる。

$$NDVI = (Ra - Rb) / (Ra + Rb) \dots\dots\dots (3)$$

ここでも (1) 式と同様、 Ra には NIR, Rb には Red の波長帯が適用されることが多い。

④ GVI: Greenness Vegetation Index, 緑度指数²⁶⁾ は (4) 式で表わされる。

$$GVI = A Ra + B Rb + C Rc + D Rd \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $Ra \sim Rd$ はランドサットに搭載されている MSS の 4 波長帯における反射値、 $A \sim D$ は定数、MSS の代わりに TM の 7 波長を用いて 7 次元重回帰式とする場合もある。また、任意の波長帯による重回帰式を採用することもある。

第1表 ムギ類のバイオマス推定.

処理・計測対象	センサ・プラットフォーム	植生指数等	主な内容と著者、掲載年
春小麦2品種、 水分、播種期、N 各2段階、 LAI, DW, 植 被 率等推定.	Exotech 100A (ランドサット MSS 対応4波長) FOV=15°, 3.5 m 上空から太陽高 度 45° 以上時に観測.	GVI RVI: NIR/Red	GVIが LAI($r=0.88$), 水分量(0.81)と 高い相関. 500-600 nm 帯が 植 被 率, LAI, FW, 水分量と 0.7 以上の相関. LAI, DW, 植 被 率も RVI で推定可. Daughtry ら 1980 ¹²⁾
冬小麦 全 DW の推定, 乾 燥ストレス検出.	携帯型デジタル分光放射計 Red(650-700 nm) NIR(775-825 nm)	Red, NIR RVI: NIR/Red NDVI	DW= $a+bX$ (X : 植生指数) RVI は $r^2=$ 0.65~0.86, NDVI では $r^2=0.66\sim0.82$ で 推 定 可. 蓄 積 DW を 積 分 RVI で 76%, 積分 NDVI で 79%説明可. Tucker ら 1981 ⁵⁸⁾
大麦, 小麦 播種期: 8 回 密度: 3 LAI, 植 被 率推定.	試作器, 648, 676, 740, 790 nm FOV=8° 上空 3.6 m から 直径 0.5 m~0.25 m の範囲 SZA(天頂角)53-70°	RVI	LAI は RVI から推定できるが, 太陽高 度や作物密度の影響が大. Brach 1981 ⁷⁾
エン麦2品種 緑 LAI 推定.	Barnes MMR 12-1000 TM 対応 8 波長, Exotech M-100 MSS 対 応 4 波長 ブームトラック 6 m 上 空 から FOV=15° SZA(天頂角)>40°	GVI RVI NDVI 重回帰式 logRVI	緑色 LAI の推定を行った結果, GVI で $r^2=0.588$, RVI(NIR/Red)で 0.659, NDVI(NIR, Red)で 0.584. 重回帰式で は MMR(1, 2, 3, 4, 6)を使い $R^2=$ 0.730, Exotech 4 波長を用いて $R^2=$ 0.654. 対数式に GVI をあてはめ $r^2=$ 0.896 で推定可. Best ら 1985 ⁶⁾
冬小麦6品種 給水処理: 4 LAI, DW, FW, LDW, 植 被 率 (GC)の推定.	Barnes MMR 12-1000 TM 7 波 長, MMR1: 450-520 nm, MMR2: 520-600, MMR3: 630- 690, MMR4: 760-900, MMR5: 1150-1300, MMR6: 1550-1750, MMR7: 2080-2350 nm. 5 m 上 空から.	1240 種 類 の 植 生 指 数 を 相 互 比 較	LAI 推定: RVI では 46/3, 46/1(数字は MMR 波長帯を示す)どちらも $r^2=0.85$. GC 推定: 235/146, 23/47, 23/16 でい ずれも $R^2=0.86$. FW 推定: 2/67, 34/16 で $R^2=0.83$. DW 推定: 25/467 で 0.83. LDW 推定: 156/23 で 0.79. Dusek ら 1985 ¹⁴⁾
小麦 草型の異な る 4 品種, 播種期: 4 緑葉面積推定.	中 赤 外 3 波 長 分 光 計(1300-2500 nm), TM 5, TM 7, 1660-1700 nm SPOT シミュレーション 3 波 長分光計(500-590, 620-680, 790- 890 nm).	主成分 分析	1560-1685 nm(TM 5 バンドに対応)が生 体・環境情報量が豊富. TM 5 は直立型品 種では土壌の影響を受けやすい. TM 5 は SPOT データと組み合わせると効果 大. Baret ら 1988 ⁵⁾
大麦(ミノリムギ) 播種期, 密度, N 水準: 各 3 LAI, DW の推定.	携帯型分光反射計(8波長)491, 560, 662, 833, 1101, 1201, 1649, 2201 nm, FOV=2°, 太 陽 に直角, 2 m 高から斜め 45°観測.	単波長 RVI NDVI 重回帰式	LAI < 3, DW < 300 g の 条 件 で, R1101(単回帰)と LAI は $r=0.95$, DW は $r=0.92$. R833 も各々 $r=0.92, 0.93$. 他の VI でも, これ以上の相関係数なし. 井上ら 1991 ²²⁾
小麦 全米5箇所 共通実験. LAI 推定.	Barnes MMR 12-1000, 7 波 長 Exotech 100, 4 波 長 Mark II, 2 波 長	GVI NDVI PVI SAVI 2 TSAVI	小麦の LAI を推定するうえで, 全米共通 の VI として何が最も良いかを検討した. その結果, PVI と GVI が適応性が広い ことが判った. $R^2=0.75\sim0.86$. Wiegand ら 1993 ⁶²⁾

⑤ KVI: K 植生指数または K 値⁴⁴⁾と呼ばれる.

$$KVI = R_{NIR} - aR_{Red} - b \dots\dots\dots (5)$$

ここで, R_{NIR} , R_{Red} はそれぞれ近赤外域, 赤色域における反射係数で, この演算により背景土壌の影響を排除することができる.

⑥ PVI: Perpendicular Vegetation Index, 鉛直植生指数³⁸⁾は (6) 式で表わされる.

$$PVI = (R_{NIR} - aR_{Red} - b) / (1 + a^2)^{1/2} \dots\dots (6)$$

前項 (5) 式の KVI が含まれ, やはり土壌の影響軽減をねらっている.

このような各種分光植生指数の詳しい特性については, Jackson ら²⁵⁾や Wiegand⁶²⁾によって総括的に比較, 検討されている.

2. バイオマスと収量の推定

(1) 葉面積指数や乾物重の推定

葉面積指数(LAI)や乾物重(DW),新鮮重(FW),植被率(C)等,植物のバイオマスに関わる諸生体量は,作物生育の良否を判断するうえで不可欠の要因であるが,従来から時間と労力を伴う刈取り調査によって計測されている。

第1表には,麦類のバイオマス推定を分光計測で推定した実験結果を例示した。まず LAI 推定に対し,どの波長帯が有効かを比較してみよう。井上ら²²⁾は,越冬前の大麦の LAI は近赤外域 (1101 nm) における反射係数 (以後 *R1101* と略す) と $r=0.95$ の相関があったと報告している。ただしこれは $LAI>3$, $DW>300\text{ g/m}^2$ の条件ゆえに成立した特殊ケースと思われ,バイオマスが高い状態では,単独波長の分光データから高い相関は得にくいと考えられる。これに対して,近赤外と赤の比植生指数 RVI (R_{NIR}/R_{Red}) は, LAI が 3 以上でも直線性が維持されている^{6,7,12,62)}。

Dusek ら¹⁴⁾ はランドサット TM の 7 波長帯に対応する波長を備えた Barnes MMR 12-1000 放射計で,4 段階の給水处理を与えて栽培した冬小麦 6 品種を,生育時期を追って 24 回にわたり分光計測した。この間,植物生体量として, LAI のほかに, DW, FW, LDW (葉乾重), GC (緑色植被率) を実測し,分光データとの関係を総括的に解析した。すなわち, RVI としては Ra/Rb だけでなく, $Ra \cdot Rb/Rc \cdot Rd \cdot Re$ といったあらゆる組み合わせ (1092 通り) を用意し, NDVI については $(Ra-Rb)/(Ra+Rb)$ を基本形とする 21 組, GVI は 2 次元から 7 次元までで考えられうる 120 組,これに単波長による単相関 7 組を加え,合計 1240 通りの VI を対象とした。これら VI と前述の 5 種類の生体量との間のすべての相関係数を計算した。その結果, LAI については, NIR と MIR (中赤外域) の積を赤または青の反射係数で除した場合,すなわち式で表すと $(R_{NIR} \times R_{MIR})/R_{Red}$ または R_{Blue} で, $r^2=0.85$ という高い相関を得た。一方, NDVI や GVI はいかなる組み合わせでも,これに勝る相関は得られなかった。DW や FW 等の生体量についても,可視, NIR, MIR を取り入れた RVI で $R^2=0.86$ の相関が得られた。

家畜の餌となる牧草は,見えている地上部分すべてがそのまま収穫対象であり,分光計測によって直接的に収量を推定できるため,早い時期から多くの試みがなされている。特に 1970 年代初頭に IBP (International Biological Program) のもとに,コロラド州の草原で行われたものが多い^{36,54,55,56)}。こ

の時代には 1000 nm 以上の波長域を簡易に計測するセンサが無かったため,得られる情報にも限界があった。その中で Tucker⁵⁵⁾ は, FW や DW の推定に R385 (385 nm の反射係数) が有効なことを報告している (それぞれの r^2 は 0.78 および 0.80) 点は興味深い。

野口・近津³⁵⁾ は,法面保護などに使われるウィーピングラブリグラスの模擬群落を用いて,植被率 (VCR) と活力度 (VVR) を求めた。この方法は,いろいろな時期 (すなわち様々な現存量が存在する) にラブリグラスの Red と NIR の分光反射係数を計測し, NIR と Red を X, Y 軸とする植生量の散布図を描く。この植生点に対する裸地土壌が示す soil line からの X 軸, Y 軸への投影距離により VCR と VVR を求めた。

Weiser ら⁶¹⁾ は,草原野草の緑色 DW と LAI を, Barnes MMR 12-1000 と Exotech M-100A から求めた植生指数で推定したところ, LAI 推定には NIR と Red の波長帯を用いた NDVI, 緑色 DW の推定には MSS の 4 波長による GVI で,それぞれ $r=0.9$ 以上の相関が得られたと述べている。また Ripple³⁹⁾ は,施肥や給水条件を変えた牧草のトルフェスク 107 区の LAI や DW に対して,指数式 $Y=aX^b$ がよく適合したとしている。ここで X は生体量, Y は NIR の反射係数である。ただし, Weiser の場合も Ripple の場合も, LAI が 2~3, DW が 300~400 g/m² の範囲での実験であることは考慮すべきであろう。さらに Everitt ら¹⁵⁾ は,中赤外域まで計測可能な分光放射計を用いて,窒素施用量に差を設けた草地を計測し, NIR (1100 nm) や MIR (1650 nm) の波長帯の有効性を報告している。

以上の結果から, LAI や DW のような生体量の推定に,単波長では NIR, 2 波長では分母に Red, 分子に NIR を配した RVI, さらに 3 波長が使える場合には,前記の 2 波長に MIR を加えた植生指数でかなり精度よく推定できる,との報告が大勢を占めているといえる。

(2) 収量の推定

第2表に分光計測によって作物収量を推定あるいは予測した例をまとめた。福原ら²⁰⁾ は,3 種類の土壌の下で秋小麦を使った 3 要素肥料試験を行った。そして 5 月から 7 月にかけて小麦の分光反射を計測し, R850 と R650 を用いた logRVI が穀実収量と相関が高いことを見いだした。特に 6 月の logRVI は $r=0.96$ と高い。5 月は 0.82~0.83 に留まり,土

第2表 作物の収量予測と推定.

処理・計測対象	センサ・プラットフォーム	植生指数等	主な内容と著者, 掲載年
秋小麦ホロシリ 土壌型: 3 種類 3 要素肥料試験 収量と穂含水率推定	簡易分光放射計 (阿部設計) 400-1050 nm (50 nm) 45°斜め下観測.	単波長 (450, 550, 650, 750, 850 nm) RVI: (R850/R650)	5 月の logRVI と収量とは $r=0.81, 0.82$, 6 月の logRVI と $r=0.96$ の相関, ただし 5 月は土壌別の回帰直線が必要. 穂含水率 $y=15.78-0.14(\log R450)+29.29(-\log R650)$ ($r=0.78$) 福原ら 1978 ²⁰⁾
テンサイ Solorave 3 要素肥料試験 収量, 地上部 DW, 茎葉 N, P の含有 率推定.	簡易分光放射計 400- 1050 nm を 20-100 nm 刻み. ここでは 450, 550, 650, 750, 850 nm を使用.	KVI (Red: 650 nm, NIR: 850 nm) KVI=NIR-1.636× Red-9.20	Red (650 nm) と NIR (850 nm) の分光反射 値を使用. KVI で地上部 DW, 収量, 生長 曲線を推定可. 推定収量と実収量との相関 係数 r は, 7 月は 0.92, 8 月が 0.91, 9 月が 0.88. 斎藤・福原 1982 ⁴⁴⁾
水稻 5 品種: 日本 晴 Milyang 23, LT 18, 峰光, 須賀 1 本, 粗粒収量の予測.	可視・中赤外分光放射 計 460-1600 nm (20 nm 刻み) 上空 2 m か ら.	重回帰式: R 1: 580, R 2: 620, R 3: 840, R 4: 1260 nm	5 品種, N レベル処理等を与えた水稻を完 熟期に分光計測. 4 波長の重回帰式で粗粒 収量を予測. $Y(\text{収量})=600.6-264.0\times$ $R1+274.0\times R2+30.4\times R3-31.1\times$ $R4$ ($R^2=0.79$) Shibayama ら 1986 ⁵⁰⁾
小麦 3 品種 Anahuac, IAC-24 BH-1146 穀実収量の予測.	Spectron SE-590 390-1100 nm 252 波長 上空 3 m から FOV=15° 直径 0.5 m の範囲.	単波長 R 1: 547-562 nm, R 2: 661-673 nm, R 3: 756-780 nm, R 4: 786-823 nm, RVI: (R1+R4)/R2, ND: (R4-R2)/(R4+R2) IND: ND の積分値.	出穂期から開花期にかけての RVI 値は穀 実収量と $r=0.82\sim0.93$ の相関. 6 月 30 日の RVI, IND と収量 Y では, $Y=251+115\times RVI$ ($r^2=0.86$) $Y=275+624\times IND$ ($r^2=0.92$) Rudorff ら 1990 ⁴³⁾
水稻 5 品種 施肥 4 段階 密度 3 段階 穀実収量推定.	可視・中赤外分光放射 計 400-1900 nm (5, 10 nm 刻み) 3 年間実施.	60 波長間の NDVI, 1 年のデータで他の 2 年を推定. 重回帰分析.	1985 年と 1987 年の分光データから, 他の 2 年の穀実収量を $r=0.77$ の精度で推定で きたが, 1986 年は $r=0.48$ と低かった. 2 次 微分値による平滑化有効. Shibayama・Akiyama 1991 ⁴⁸⁾
水稻 3 品種 施肥 6 水準 収量, DW, PAR 吸収量推定.	可視・中赤外分光放射 計 400-1900 nm (5, 10 nm) 10~2 週間隔で計測.	PVI= .778(R840) - .628(R660) - 1.35 DVI=R1100 - R1650	移植期から登熟期において, 収量並びに積 算 PAR 日吸収量は積算 PVI の一次式で 精度高く推定できた. また出穂期の DW は 収量と相関が高く, DVI で DW を推定で きた. Wiegand ら 1989 ⁶³⁾

壤の種類毎の回帰直線が必要であった. 斎藤・福原⁴⁴⁾はテンサイについても 3 要素肥料試験を行い, R850 と R650 を用いた KVI が地上部の DW の推定や収量予測に有効であると報告している. この場合, $KVI=R850-1.636\times R650-9.20$ で表され, 収量との相関は 7 月に $r=0.92$, 8 月に 0.91 であった. Rudorff and Batista⁴³⁾ は, 390 nm から 1100 nm の範囲を 252 波長に分光して計測する Spectron SE-590 分光放射計を用いて, 小麦の出穂から開花期にかけて計測し, 穀実収量との関係を明らかにした. その結果, 6 月 30 日には, 収量 $Y=251+115\times RVI$ ($r^2=0.86$), また, $Y=275+624\times IND$ ($r^2=0.92$) が得られた. ここで, $RVI=(R1+R4)/R2$, $ND=(R4-R2)/(R4+R2)$, IND は一定期間の積分 ND

値である. また R1 は緑, R2 は Red, R4 は NIR の反射係数である.

水稻の分光計測による収量推定の例もいくつかある^{48,50,63)}. このうち Shibayama and Akiyama⁴⁸⁾ は, 可視・中赤外分光放射計で取得したデータから計算した NDVI を用いて収量を推定した. 5 品種, 施肥 4 段階, 栽植密度 3 段階からなる処理区 3 年分の分光反射をプールし, 1 年のデータから他の 2 年の収量を推定したところ, 1985 年と 1987 年のデータはそれぞれ他の 2 年の収量を推定できたが, 1986 年だけは困難であった. Wiegand ら⁶³⁾ の報告では, 移植期から登熟期において, 収量ならびに積算 PAR 日吸収量 (PAR: 光合成有効反射) は, 積算 PVI の一次式で精度高く推定できると述べている.

第3表 植物体内成分(葉緑素, 窒素) 含量・含有率の推定.

処理・計測対象	センサ・プラットフォーム	植生指数等	主な内容と著者, 掲載年
9 種植物(個葉) 草本: サツマイモ 常緑樹: 5 種, 落葉樹: 3 種, 葉身 Chl 推定.	Cary 17 DX 分光反射計 (Varian 社) 450, 550, 600, 630, 680, 800 nm	RVI	RVI と葉内 Chl 含量との間に, 季節と種を超え高い相関, $R800/R500$ ($r=0.95$), $R800/R600$ (0.89), あるいは $R800/R630$ で ($r=0.83$). $R500$ の単波長でも $r=0.81$. Aoki ら 1984 ⁴⁾
9 種植物の模擬群落 ネズミモチ, クスノキ, ドベラ, ウバメガシ, ケヤキなど. Chl 濃度, LAI 推定.	7 波長簡易分光反射計 417, 461, 550, 583, 624, 660, 800 nm. FOV=10° 斜め 30°から観測.	RVI 対数	Chl 濃度と反射係数の関係: 種共通で $r=0.855$. $\ln(\text{Chl}+50)=0.159(R800/R660)+3.657$ LAI と反射係数 $r=0.853$. $\ln(10 \times (\text{LAI}+1))=0.157(R800/R660)+2.345$ 青木・戸塚 1985 ⁵⁾
イネ(日本晴) 大麦(愛媛裸 1 号) 小麦(農林 61 号) Chl 含量/LA 推定.	日立 320 型分光光度計 (半球反射スペクトル計測) 室内計測.	DVI RVI	単位 LA 当たり Chl 含量(Chlmg/LAcm^2) と反射係数の関係, $R800-R550$ ($r=0.920$), $R800/R550$ ($r=0.970$). 530~630 nm と 750 nm 以上の NIR との RVI でイネ科の Chl 量推定可. Inada 1985 ²¹⁾
牧草ブッフエルグラス N: 5 段階(0~224 kg), Chl 量/葉重, 葉身 N%の推定.	ベックマン Model DK-2 A 6 波長分光計(500, 550, 600, 650, 700, 750 nm) 室内計測.	単相関	葉身 N%, 葉重当たり葉身 Chl 含量と分光反射率の関係: $1/\text{Chl}=2.27-18.5/R500$ ($r^2=0.939$). $1/N=1.83-15.4/R550$ ($r^2=0.805$). N%は 550 nm, Chl 含量は 500 nm が有効. Everitt ら 1985 ¹⁷⁾
インゲンマメ 光照射により緑化の程度を変えた着生葉. Chl 含量/LA の推定.	VIRAF(可視・近赤外反射吸収蛍光)分光計 セラミック白色標準板使用 葉身レベル実験.	logRVI DVI	Chl 含量推定には 550 nm(緑)と 800 nm(NIR)を用いた植生指数が有効. DVI: $R800-R550$ ($r^2=0.906$). $\log R800/R550$ ($r^2=0.942$). Buschmann・Nagel 1993 ⁹⁾
冬小麦 Astral 給水有無 LA, N%推定.	Barringer, Model Mark II フィルタによる 9 波長分光器 485, 545, 560, 635, 660, 842, 910, 1662, 2210 nm 三脚上.	単波長 RVI NDVI 重回帰式	株当たり LA: $\text{NDVI}(R842, R660)$ と $r^2=0.900$. 植物体 N 推定には $R545$ と $R660$ の重回帰が有効. $N\%=6.73-0.29 \times R545 -0.02 \times R660$ ($R=0.86$) Fernandez ら 1994 ¹⁸⁾
コショウ: N・水条件, インゲンマメ: N・水条件, <i>Gerbera jamesoni</i> : Chl 濃度, 水条件変化 LAI, 水分の推定.	狭波長可視・近赤外分光放射計 Model-SE 590, Spectron 社. 390-1100 nm, 258 波長 680-780 nm のみを使用 FOV=15°, SZA=45° 0.75 m 高から 0.18 m ² 直下観測.	一次微分	水ストレスを受けた植物の 680-780 nm 域の一次微分ピーク位置が短波長側にずれる. コショウ: 730 → 715 nm, インゲンマメ: 735 → 705 nm へ. Chl 濃度および LAI は, レッドエッジの高さや面積に関係. Filella・Penuelas 1994 ¹⁹⁾
冬小麦 Apollo N 施用 8 水準 0~248 kg Chl 濃度 mg/葉重 g 推定.	Specton SE 590 分光計 連続波長, FOV=15°	一次微分	レッドエッジの位置, 無肥区 706.7 nm, 多肥区 756.1 nm. Chl 0.7 mg 以上では飽和. 収量と Chl 濃度は直線関係. Muden ら 1994 ³³⁾
水稻 14 品種 葉身葉緑素含量 Chl, 土地当たり Chl 量 (CI), 葉身 N 含量等推定.	野外用移動分光計測システム 400~1200 nm(連続波長) 小型クレーン車.	RVI 重回帰式	最高分けつ期~登熟期を対象. CI 推定には $RNIR/RGreen$ ($r=0.816$) か, $RNIR/RRed$ ($r=0.791$). 土地当たり N 量は 620, 760 nm を用いた重回帰で 0.874 の相関. Shibayama・Akiyama 1986 ^{45,46)}

3. 葉緑素の体内成分含有量の推定

作物体に含まれる養分や物質の含有量は, 作物の生育を診断する上で重要な要因である. 特に作物体に吸収された窒素や, 葉身に含まれる葉緑素の量や含有率は光合成能力に反映されるため, 物質生産に直接的に影響を与えている. このため, 近年では水

稲作を中心に, 色票³¹⁾や葉緑素計⁶⁰⁾を用いて葉身葉緑素を推定し, 肥培管理の指針とするケースが増えている⁵³⁾. 第3表には葉緑素や窒素などの体内成分含有量に関する分光計測例を示す.

Aoki ら⁴⁾は草本, 木本を含む 9 種植物の葉身を分光計測した結果, 葉身葉緑素 (Chl) の含量は, 種あるいは季節を越えて, $R800/R500$ で示される RVI

と極めて高い相関 ($r=0.95$) があると報告した。一方、模擬群落実験では、Chl 濃度は $R800/R600$ を用いた対数関数で表わされる³⁾としている。これに対し Inada²¹⁾ は、水稻、大麦、小麦の葉面積当たりの葉緑素含量を、 $R800$ と $R550$ を用いる差植生指数 ($DVI: R800-R550$) で精度高く ($r=0.920$) 推定した。同じ波長帯による DVI を、Buschmann and Nagel⁹⁾ は暗黒中での白色光照射で人為的に Chl 量を変えたインゲンマメにも適用できること ($r^2=0.906$) を実証している。また Everitt ら¹⁷⁾ は、牧草ブッフエルグラスの葉を分光計測し、葉身窒素の推定には $R550$ 、Chl 含量には $R500$ または $R550$ を用いた関数が適していることを示した。

ここまでの実験は、室内で植物の葉身を対象とした実験が主であった。これに対して Shibayama and Akiyama^{45,46)} は、圃場で水稻個体群がもつ Chl や窒素の量を可視・中赤外分光放射計で計測して、生育診断に適用することを試みた。したがって、ここでは単位土地面積当たり (m^2) の Chl 量 (g) や窒素量が計測の対象となる。これによると Chl 量の推定には NIR ($R800 \sim R900$) と ($R560$) の反射係数を組み合わせた RVI との相関が高く ($r=0.816$)、窒素量は 400 nm, 620 nm, 800 nm の 3 波長の重回帰式で高い重相関係数 ($R=0.865$) を得たことが報告されている。一方、Fernandez ら¹⁸⁾ は冬小麦植物体に含まれる窒素濃度の推定には、545 nm と 660 nm の反射係数を用いた重回帰式が有効 ($R=0.86$) と述べている。

最近になって、波長分解能の高い野外用分光センサが開発されてきた。例えば Spectron 社の Model SE-590 は 390~1100 nm の波長範囲を 2.8 nm ずつ 252 の狭い波長帯でカバーしている。この結果、ほぼ連続した分光反射曲線が得られることになったため、red edge のような微細な変化を比較したり、分光反射曲線の微分処理が可能となった。その結果、水分ストレスを受けた植物の近赤外域での分光曲線の一次微分値が短波長側にずれること¹⁹⁾ や、0~248 kg/ha の範囲で 8 段階の窒素施用レベルを変えて育てた冬小麦で、red edge 位置が 0 kg 区の 706.7 nm から 248 kg 区の 756.1 nm まで連続的に移動し、さらにこれが Chl 濃度、あるいは収量と直接関係があること³³⁾ などが報告された。

以上のように、植物体の窒素や Chl の量を推定するうえで、可視域では 500 nm から 600 nm の範囲、近赤外では 800 nm 付近の反射係数を組み合わせた

VI が有効と考えられる。また高分解能分光放射計が使える場合には、680 nm から 780 nm にかけての red edge の移動によって、Chl 量や葉身窒素量を推定できることも判明した。

4. ストレス反応の検出

病虫害や大気汚染による植物のストレスを早期に検出し、必要な対策を講ずることができれば、作物の被害を軽減し、収量や品質の低下を最小限にとどめることができる。また、水分や養分に対するストレスの検出についても同じことが当てはまる。さらに、病虫害の発生回避のための多量の農薬施用や増収を期待した過剰な肥料投下によって生じる地下水汚染など、環境負荷の増大も防止することが可能となるので、この分野での分光計測技術の向上は強く望まれている。

病虫害や大気汚染による被害を受けた植物の分光計測例を第 4 表、および第 5 表に示した。

(1) 病虫害・大気汚染に対するストレス反応

Cure ら¹¹⁾ はオーブントップチャンバ内でオゾンに被曝させた大豆の分光反射を計測し、720 nm 帯が大豆葉の被曝による脱色反応と関係が深いことを見出した。

バルサムモミ³⁰⁾ やブナ、マツ²⁸⁾ に対する虫害についての報告がある。どちらも成木の樹冠上 10 ないし 20 m の上空から樹木の一部分を計測し、正常木のスペクトルとの比較を試みている。バルサムモミについては中赤外域や近赤外域の有効性が指摘されたが、ブナ、マツなどでは虫害の影響より背景や天候の影響を強く受けることが懸念され、有効な波長帯を特定するに至らなかった。

Nilsson³⁴⁾ が行った二条大麦、冬小麦に立枯れ病などの病原菌を接種した実験では、スペクトル変化と病気の進展には密接な相互関係があることが指摘された。なかでも NIR/Red による RVI は麦立枯れ病の発病率、発病指数と $R^2=0.7 \sim 0.8$ の相関があった。

(2) 水分等に関するストレス反応

畑作物や牧草にとって、土壌水分の欠乏は生育障害を起こしたり、早魃による収量の低下をもたらす。しかし水条件の悪い地方では灌漑などの給水は最小限に抑える必要があることから、多くの畑作物に対して分光計測による水分ストレスの検出が試みられてきた。

Kleman and Fagerlund²⁷⁾ は、大麦の水分欠乏は

第4表 ストレス(病虫害, 大気汚染)反応の検出.

処理・計測対象	センサ・プラットフォーム	植生指数等	主な内容と著者, 掲載年
バルサムモミ Spruce budworm による虫害検出.	Spectrascan 117 波長 380-1000 nm (10 nm 刻み) 1000-2400 nm (20 nm) FOV=11° Bucket boom track で観測.	針葉の減少, 残骸・ 裸枝増加, 影等から の総合判断との比 較.	重要波長帯は 2030-2210 nm, 660-670 nm, 1560-1620 nm および 770-790 nm. Leckie ら 1988 ²⁹⁾
大豆 オゾン被曝 直径 3 m, 2.4 m 高の open top chamber, 被曝 5 段階判読.	SPEX Model-1670 400-1100 nm (20 nm 刻み) FOV=14° 1.2 m 上空から 直径 30 cm 範囲を計測.	目視判読との比較. 脱色部分面積との比 較.	700-800 nm, 特に 720 nm がオゾン 被曝脱色部分面積に対応. Cure 1988 ¹¹⁾
モミ, ブナ, マツ 虫害, 除葉, クロロ シス, 生育サイクル, 葉齢, 水分欠乏等の 推定.	56 波長分光計 可視域: 30 波長, NIR: 22 波長 MRI: 1300, 1650, 1800, 2000, 2200 nm, FOV=5, 10, 15, 20°	スペクトルパターン による正常葉との比 較.	害虫の食害による影響より, 背景や 天候の影響が大きくて有効な波長帯 の選択は不可. Koch ら 1990 ²⁸⁾
二条大麦, 冬小麦 立枯れ病等の病原菌 を麦に接種し検出.	8 波長 Cropscan (500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 nm) FOV=28° 携帯望遠型 ブーム上, Exotech 100 AX (MSS 対応)	単波長 650-850 nm 各種 RVI	スペクトル変化と病気の進展の間に 高い相関あり. 冬小麦収量は R_{NIR}/R_{Red} の RVI で $r=0.90$ 以上. 麦 立枯れ病に対しても R_{NIR}/R_{Red} で発病率, 発病指数を推定可能 ($R^2=0.7-0.8$). Nilsson 1991 ³⁴⁾

第5表 ストレス(水分, 養分)反応の検出.

処理・計測対象	センサ・プラットフォーム	植生指数等	主な内容と著者, 掲載年
大麦 給水有無 N 施肥: 4, 反復: 2 水分・N ストレスの 検出.	Gamma Scientific 社 分光放 射計 400-800 nm 計測可, 480, 560, 680, 790 nm のみ解 析. 移動計測車, 15 m, FOV = 3° 直下直径 80 cm 観測.	NDVI, RVI R, G, B/R+G+B R, G, B は各々赤, 緑, 青	R/R+G+B が水分ストレス検出に有 効. R_{790}/R_{660} も水分ストレス判読 に有効. R_{790}/R_{660} は N レベル判読 にも有効. Kleman・Fagerlund 1981 ²⁷⁾
小麦 Produra 水ストレス: 4 緑 LAI 推定 水ストレス検出.	Exotech Model 100 A (MSS 対応) 熱赤外放射計 で作物水分ストレス指標 (CWSI) 計算.	NIR/Red= ($R_{800} \sim 1100$)/ ($R_{600} \sim 700$)	NIR/Red は緑色バイオスを感じ. CWSI=0.28 で NIR/Red は水分スト レスを感じ. CWSI=0.52 で NIR/ Red は最大. Jackson・Pinter 1981 ²⁴⁾
野草 2 種 野生動物の餌 水ストレス検出.	Exotech Model-20 5 波長 550, 650, 850, 1650, 2200 nm FOV=15° 植被上 2.5-3.0 m.	5 波長の反射係数 を比較.	ストレス植物は 550, 650, 1650, 2200 nm の反射が高く, 850 nm で低い. Everitt・Nixon 1986 ¹⁶⁾
牧草 Buffelgrass 水ストレス: 3 段階 水ストレス経日計 測.	MARK II 2 波長分光放射 計, Red: 630-690, NIR: 760-900 nm 三脚上 1.5 m から直下観測.	Red, NIR, PVI, NDVI.	NIR と PVI は 24 日早く水分ストレ スを検出できた. Richardson・Everitt 1987 ³⁷⁾
大豆 ストレス付与 ストレス区 -0.5 MPa 正常区 -0.03 MPa トウモロコシ, 小麦, ラッカセイ, 大豆 葉身相対含水率, 水 分ストレスの検出.	560, 620, 760, 860, 850 nm 植被上 1.2 m から FOV=14° 直径約 30 cm の範囲を観測. 積分球付分光放射計: 切断葉 野外用積分球放射計: 着生葉 可視・近赤外・中赤外域.	Red (620 nm) NIR (850 nm) RVI=NIR/Red 単波長, 対数 RVI, DVI, 一次微分.	反射率と葉温, 気温の関係を調査. Red, NIR (単波長) 及び NIR/Red は 葉温と相関大. Cure ら 1989 ¹⁰⁾ 相対含水率は $\ln R_{1910}$, R_{1430} と高 い相関 ($r < -0.95$). 単位葉面積当たり 含水量は R_{1200}/R_{1430} , $R_{1100}/$ R_{1430} 等が相関大. Inoue ら 1993 ²³⁾

480 nm の反射係数,あるいは 790 nm と 660 nm の比反射係数(RVI)で検出できるとしている。小麦についても Jackson ら²⁴⁾が熱赤外放射計による観測値から得られる作物水分ストレス指数(CWSI)が 0.52 に達するまでは, NIR/Red がこれとパラレルに反応することを報告している。イネ科牧草であるブッフエルグラスでは,赤と近赤外波長から求めた植生指数 PVI で,肉眼で感知できるより 24 日も早く水分ストレスを検出できた³⁷⁾。また Inoue ら²³⁾はトウモロコシなど 4 種類の畑作物を用いた水分ストレス実験を行い,それぞれの作物の相対含水率(RWC)は 1430, 1650, 1910 nm など中赤外域を用いた VI (例えば $R1650/R1430$) と 0.95 以上の相関があることを示した。しかし 4 種共通の回帰直線は得られなかった。

世界の天水田では水稻といえども水分欠乏を引きおこす。旱魃との遭遇が幼苗期であれば,枯死にいたらしめる。またたとえ灌漑地であっても,日本海に面した地域ではしばしば発生するフェーン現象のため,葉身の先端が枯死して多くの被害が生じている。Shibayama ら⁵¹⁾は幌付きのライシメータで栽培中の水稻に落水処理を行い,水分欠乏による経日変化を分光計測法で追跡した。水田から水が無くなったことに最も敏感に反応したのは NIR と MIR の波長帯(その時の水稻の LAI=5)であり,個体群としての水分ストレスは落水 10 日後に 960 nm 付近の一次微分で検出された。

本報告ではバイオマスの推定,植物体内成分量の推定およびストレス反応の検出,という 3 つの項目について,研究報告例を掲げ,その手法を比較するなかで有効な波長帯を検討した。しかし,近年発展を遂げた分光計測技術の中には,ほかにもいくつかの潮流が生じている。そのひとつが,分光計測情報をモデルに組み込んで,生育や収量を予測する研究であり,現在世界中でおびただしい数の論文が発表されている(例えばその初期のものとして Daughtry ら¹³⁾など)。また地上での分光計測情報を人工衛星情報や地理情報と組み合わせ,総合的な農地・作物生育診断システムを構築しようとする試み(例えば Akiyama and Shibayama²⁾もある。これらについては別の機会に報告することとしたい。

引用文献

1. 秋山 侃 1990. 作物生体情報と栽培管理. システム

- 農学 6:9—19.
2. Akiyama, T. and M. Shibayama 1993. Multistage sensing system for crop monitoring. Proc. 1st Asian Crop Sci. Conf., Seoul, Korea. 251—265.
3. 青木正敏・戸塚 績 1985. 分光反射特性に基づく植物群落のクロロフィル量及び葉面積指数の遠隔計測に関する基礎研究. 国公研報. 82 (別冊):137—147.
4. Aoki, M., K. Yabuki and T. Totsuka 1984. An evaluation of chlorophyll content of leaves based on the spectral reflectivity in several plants. Res. Rep. Natl. Inst. Environ. Studies 66:125—131.
5. Baret, F., G. Guyot, A. Begue, P. Maurel and A. Podaire 1988. Complementarity of middle infrared with visible and near-infrared reflectance for monitoring wheat canopies. Remote Sens. Environ. 26:213—225.
6. Best, R.G. and J.C. Harlan 1985. Spectral estimation of green leaf area index of oats. Remote Sens. Environ. 17:27—36.
7. Brach, E.J. and R.L. Desjardins 1981. Field spectrometer to measure percent ground coverage and leaf area index of agriculture crops. Proc. Signatures spectrales d'objets en télédétection, Avignon, France. 323—330.
8. Brown, R.J. and F.J. Ahern 1980. The field spectral measurements program of the Canada Centre for Remote Sensing. Can. J. Remote Sens. 6:26—37.
9. Buschmann, C. and E. Nagel 1993. *In vivo* spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. Int. J. Remote Sensing 14:711—722.
10. Cure, W.W., R.B. Flagler and A.S. Heagle 1989. Correlations between canopy reflectance and leaf temperature in irrigated and droughted soybeans. Remote Sens. Environ. 29:273—280.
11. Cure, W.W., S.M. Nusser and A.S. Heagle 1988. Canopy reflectance of soybean as affected by chronic doses of ozone in open-top field chambers. Photogramm. Engin. Remote Sensing 54:499—504.
12. Daughtry, C.S.T., M.E. Bauer, D.W. Crecelius and M.M. Hixson 1980. Effects of management practices on reflectance of spring wheat canopies. Agron. J. 72:1055—1060.
13. Daughtry, C.S.T., K.P. Gallo and M.E. Bauer 1983. Spectral estimates of solar radiation by corn canopies. Agron. J. 75:527—531.
14. Dusek, D.A., R.D. Jackson and J.T. Musick 1985. Winter wheat vegetation indices calculated from combinations of seven spectral bands. Remote Sens. Environ. 18:255—267.
15. Everitt, J.H., D.E. Escobar and A.J. Richardson 1989. Estimating grassland phytomass production with near-infrared and mid-infrared spectral variables. Remote Sens. Environ. 30:257—261.

16. Everitt, J.H. and P.R. Nixon 1986. Canopy reflectance of two drought-stressed shrubs. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 52: 1189—1192.
17. Everitt, J.H., A.J. Richardson and H.W. Gausman 1985. Leaf reflectance-nitrogen-chlorophyll relations in buffelgrass. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 51: 463—466.
18. Fernandez, S., D. Vidal and E. Simon 1994. Radiometric characteristics of *Triticum aestivum* cv. Astral under water and nitrogen stress. *Int. J. Remote Sensing* 15: 1867—1884.
19. Filella, I. and J. Penuelas 1994. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status. *Int. J. Remote Sensing* 15: 1459—1470.
20. 福原道一・斎藤元也・安田嘉純 1978. 小麦の分光反射特性の測定. *写真測量とリモセン*, 17(3): 15—22.
21. Inada, K. 1985. Spectral ratio of reflectance for estimating chlorophyll content of leaf. *Jpn. J. Crop Sci.* 54: 261—265.
22. 井上健一・芝山道郎・岩田忠寿 1991. 積雪地帯におけるオオムギの生育の診断と制御に関する研究. 1. 分光反射スペクトルを利用した越冬前生育量の推定. *北陸作物学会報* 26: 121—124.
23. Inoue, Y., S. Morinaga and M. Shibayama 1993. Non-destructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Jpn. J. Crop Sci.* 62: 462—469.
24. Jackson, R.D. and P.J. Pinter, Jr. 1981. Detection of water stress in wheat by measurement of reflected solar and emitted thermal IR radiation. *Proc. Signatures spectrales d'objets en télédétection*, Avignon, France. 399—406.
25. Jackson, R.D., P.J. Pinter Jr., R.J. Reginato and S. B. Idso 1980. Hand-held radiometry. *USDA-ARM-W-19*, 1—66.
26. Kauth, R.J. and G.S. Thomas 1976. The tasseled cap - a graphic description of spectral temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proc. Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue Univ., West Lafayette IN, 4B. 41—51.
27. Kleman, J. and E. Fagerlund 1981. Spectral signature measurements of barley crops. The influence of irrigation and fertilization. *Proc. Signatures spectrales d'objets en télédétection*, Avignon, France. 417—424.
28. Koch, B., U. Ammer, T. Schneider and H. Wittmeier 1990. Spectroradiometer measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. *Int. J. Remote Sensing* 11: 1145—1163.
29. Leamer, R.W., V.I. Myers and L.F. Silva 1973. A spectroradiometer for field use. *Rev. Sci. Instrum.* 44: 611—614.
30. Leckie, D.G., P.M. Teillet, D.P. Ostaff and G. Fedosejevs 1988. Sensor band selection for detecting current defoliation caused by the spruce budworm. *Remote Sens. Environ.* 26: 31—50.
31. 松崎昭夫・刈屋国男・町田寛康・角田公正 1980. 水稻の生育調節と栄養診断に関する研究. 第1報 色票による葉色診断と単位面積当たり穎花数の推定. *日作紀* 49: 439—444.
32. Milton, E.J. 1987. Principles of field spectroscopy. *Int. J. Remote Sensing* 8: 1807—1827.
33. Munden, R., P.J. Curran and J.A. Catt 1994. The relationship between red edge and chlorophyll concentration in the broad balk winter wheat experiment at Rothamsted. *Int. J. Remote Sensing* 15: 705—709.
34. Nilsson, H.E. 1991. Hand held radiometry and IR-thermography of plant disease in field plot experiments. *Int. J. Remote Sensing* 12: 545—557.
35. 野口俊郎・近津博文 1985. リモートセンシングによる植物の活力度および植被率の測定に関する研究. *リモセン学会誌* 5: 113—121.
36. Pearson, R.L., L.D. Miller and C.J. Tucker 1976. Hand-held spectral radiometer to estimate gramineous biomass. *Applied Optics* 15: 416—418.
37. Richardson, A.J. and J.H. Everitt 1987. Monitoring water stress in buffelgrass using hand-held radiometers. *Int. J. Remote Sensing* 8: 1797—1806.
38. Richardson, A.J. and C.L. Wiegand 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 43: 1541—1552.
39. Ripple, W.J. 1985. Asymptotic reflectance characteristics of grass vegetation. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 51: 1915—1921.
40. Robinson, B.F. 1981. Performance comparison for Barnes Model 12-1000, Exotech Model 100, and Ideas Inc. Biometer Mark II. Technical Report SR-P2-04318, Purdue Univ. West Lafayette, IN 1—18.
41. Robinson, B.F., M.E. Bauer, D.P. DeWitt, L.F. Silva and V.C. Vanderbilt 1981. A multiband radiometer and data acquisition system for remote sensing field research. Purdue Univ. Technical Report SR-P1-04201. 1—11.
42. Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third NASA ERTS Symposium, NASA SP-351 1: 309—317.
43. Rudorff, B.F.T. and G.T. Batista 1990. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in the tropical region. *Remote Sens. Environ.* 31: 53—63.
44. 斎藤元也・福原道一 1982. テンサイ群落の分光反射特性と収量推定. *北農試研報* 134 (別冊): 39—54.
45. Shibayama, M. and T. Akiyama 1986a. A

- spectroradiometer for field use. VI. Radiometric estimation for chlorophyll index of rice canopy. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 433–438.
46. Shibayama, M. and T. Akiyama 1986b. A spectroradiometer for field use. VII. Radiometric estimation of nitrogen levels in field rice canopies. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 439–445.
47. Shibayama, M. and T. Akiyama 1989. Seasonal visible, near-infrared and mid-infrared spectra of rice canopies in relation to LAI and above-ground dry phytomass. *Remote Sens. Environ.* 27: 119–127.
48. Shibayama, M. and T. Akiyama 1991. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurement. *Remote Sens. Environ.* 36: 45–53.
49. Shibayama, M. and K. Munakata 1986a. A spectroradiometer for field use. II. Biomass estimates for paddy rice using 1100 and 1200 nm reflectance. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 28–34.
50. Shibayama, M. and K. Munakata 1986b. A Spectroradiometer for field use. IV. Radiometric prediction of grain yields for ripening rice plants. *Jpn. J. Crop Sci.* 55: 53–59.
51. Shibayama, M., W. Takahashi, S. Morinaga and T. Akiyama 1993. Canopy water deficit detection in paddy rice using a high resolution field spectroradiometer. *Remote Sens. Environ.* 45: 117–126.
52. Shibayama, M., C.L. Wiegand, T. Akiyama and Y. Yamagata 1988. Radiometric predictions for agronomic variables of rice canopies using visible to mid-infrared spectroradiometer. *Proc. 1988 Int. Geosci. Remote Sens. Symp. Kyoto.* 508–517.
53. 武田敏昭 1985. 土壌肥料分野からみた水稻の生育診断・予測技術の開発(3) —その現状とこれからの課題— *農及園* 61: 291–298.
54. Tucker, C.J. 1977a. Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance. *Applied Optics* 16: 1151–1156.
55. Tucker, C.J. 1977b. Spectral estimation of grass canopy variables. *Remote Sens. Environ.* 6: 11–26.
56. Tucker, C.J. 1977c. Resolution of grass canopy biomass classes. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 43: 1059–1067.
57. Tucker, C.J. 1978. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8: 127–150.
58. Tucker, C.J., B.N. Holben, J.H. Elgin, Jr. and J.E. McMurtrey III 1981. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sens. Environ.* 11: 171–189.
59. Tucker, C.J., W.H. Jones, W.A. Kley and G.T. Sundstrom 1981. A three-band hand-held radiometer for field use. *Science* 211: 281–283.
60. 渡辺 苞・畑中 勇・稲田勝美 1980. デジタル式葉緑素計の開発. 第1報 構造と性能. *日作紀* 49(別1): 89–90.
61. Weiser, R.L., G. Asrar, G.P. Miller and E. T. Kanemasu 1986. Assessing grassland biophysical characteristics from spectral measurements. *Remote Sens. Environ.* 20: 141–152.
62. Wiegand, C.L., S.J. Maas, J.K. Aase, J.L. Hatfield, P.J. Pinter, Jr., R.D. Jackson, E.T. Kanemasu and R.L. Lapitan 1992. Multiple analyses of spectral-biophysical data for wheat. *Remote Sens. Environ.* 42: 1–21.
63. Wiegand, C., M. Shibayama, Y. Yamagata and T. Akiyama 1989. Spectral observations for estimating the growth and yield of rice. *Jpn. J. Crop Sci.* 58: 673–683.