

# マシンビジョンによる精密ほ場管理のための作物窒素 ストレスセンシングシステム (第1報)

—システムの基本構想と基礎実験—

飯田 岳\*<sup>1</sup>・野口 伸\*<sup>1</sup>・石井一暢\*<sup>1</sup>・寺尾日出男\*<sup>1</sup>

## 要 旨

精密ほ場管理技術による適切な窒素施肥管理が、収量増加、環境保全や生産コスト削減の面から期待されている。本研究はマシンビジョンを用いた作物窒素ストレスのリモートセンシングシステムの開発を最終目標とし、本報ではシステムの構想を概略した。既往のデジタル葉緑素計や葉色カラースケールに対し、葉面反射率を測定するマシンビジョンによる窒素ストレス診断法を提案した。トウモロコシ葉面の分光反射特性を調べた結果、反射測定においては550nm、650nm分光が窒素ストレス推定に適していると判断し、今後屋外実験においてマシンビジョンに装備する光学バンドパスフィルタの波長帯を550nm、650nmに決定した。

[キーワード] 精密ほ場管理, デジタル葉緑素計, 窒素ストレス, 分光反射特性

## Nitrogen Stress Sensing System using Machine Vision for Precision Farming (Part 1)

—Measurement System Overview and Fundamental Experiments—

Takashi IIDA\*<sup>1</sup>, Noboru NOGUCHI\*<sup>1</sup>, Kazunobu ISHII\*<sup>1</sup>, Hideo TERAO\*<sup>1</sup>

## Abstract

Precision farming technology with controlling nitrogen treatment is available for management and environmental considerations. The objective of this study is to develop a method for obtaining nitrogen stress using machine vision. Digital green meter and leaf color scale have been already commercialized as measurement devices for nitrogen stress of crops. In this paper, measurement principle of nitrogen stress is proposed based on leaf reflectance. It was concluded that the wavelength of 550, 650nm is proper for detecting nitrogen stress.

[Keywords] precision farming, digital green meter, nitrogen stress, reflectance spectrum

## I 緒 言

\*1 会員, 北海道大学大学院農学研究科 (〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目 TEL 011-706-3847) School of Agriculture, Graduate School of Hokkaido University, Sapporo, 060-8589 Japan

### 1) 精密ほ場管理の現状

今世紀の農業技術は、機械の大型化と肥料や農薬の大量消費といった投入エネルギーの増大が基盤

である。しかし1980年代後半よりエネルギー浪費と環境問題が深刻化したことから、持続的農業(Sustainable Agriculture)の実現に向けて技術改革が進められてきた。現在、投入資材をできる限り節減して最大の収益を上げるための精密ほ場管理(Precision Farming, PF)が新技術として脚光を浴びている<sup>1)</sup>。既にこの技術の一部は米国の中西部の穀倉地帯において新しい農法として定着しつつある<sup>2)</sup>。ほ場マップをベースにしたPFは長期的な農作業計画の立案に対して有効であるため、現在PF技術の主流となっている。一方、センシングと投入管理をリアルタイムで行うセンサベースのPFが将来の技術として注目を集めている<sup>3,4)</sup>。しかしセンサベースPFはマシンビジョンによるセンシング技術と高度な画像処理技術が必要となるために、国際的にいまだ開発途上にある<sup>5)6)</sup>。

## 2) 窒素肥料とPF

投入量管理を行なう対象となる資源には、窒素・リン・カリウムなどの肥料、水、農薬などがある。稲・小麦・トウモロコシなどの生産における窒素施肥は収量、品質の両者に深く関わっている<sup>7)8)</sup>。しかし過度な窒素肥料の投入はかえって生産の低下を招くだけでなく<sup>9)10)</sup>、硝酸塩の形態で土壤中に蓄積し地下水への流出・汚染を引き起こすことが問題となっている<sup>11)</sup>。このような背景から従来のは場単位での大量均一窒素肥料投入をやめて、よりきめ細かい空間ユニットごとにセンシングを行い、窒素ストレスを起こしている空間ユニットのみに窒素施肥を行なう必要がある。さらに、現在米国の典型的なトウモロコシ生産者は生産コストのうち、およそ4分の1を窒素肥料に充てていると言われていることから、窒素肥料の精密散布は生産コスト削減の点からも大いに期待されている<sup>12)</sup>。以上の背景から本研究はマシンビジョンを用いてトウモロコシの窒素ストレスをリモートセンシングできる方法を開発し、マップベース、センサベース両方のPFに適用することを最終目的とした。

## II 既往の研究・センシングデバイス

### 1) 既往の研究成果

人工衛星、航空機によるリモートセンシングは

農業分野でも利用されてきた。Buschmannら<sup>13)</sup>、Fernandezら<sup>14)</sup>、Hinzmanら<sup>15)</sup>は緑(550nm)、赤(650nm)、近赤外(800nm)の反射スペクトルを測定することで作物のクロロフィルあるいは窒素の濃度をリモートセンシングできる可能性を示した。しかし農業分野では従来高い上空からのリモートセンシングは、窒素ストレス測定以外の目的、主に植生調査などに利用されてきた<sup>16)</sup>。したがってスペクトルセンサの波長分解能が低く、さらに400~2,200nmと測定波長領域が広いことから、可視~近赤外の範囲内で高い波長分解能が求められる窒素ストレス測定には適さない<sup>17)18)</sup>。また装置の規模からくるコストの問題、気象条件の制約、土壌による影響を考慮していないなどの欠点もある<sup>19)</sup>。

そこでトラクタに搭載できる程度に小型で、地上で容易に利用できるスペクトルセンサの研究・開発が盛んになってきた。Takebeら<sup>20)</sup>は水稲の作物群から7、8mの高さにセンサを設置して可視~近赤外のスペクトルを測定することによって、作物の栄養状態を推定する手法を考案した。しかしこれは光源である太陽の傾きや天候に左右され、特定の時間帯・日射量の範囲でしか測定できない。大角ら<sup>21-23)</sup>は太陽光による取得画像の明るさの違いを白色板リファレンスを用いて補正して葉色測定を試みた結果、葉緑素計に及ばないものの葉色カラースケールによる目視以上の精度で測定することができた。Thaiら<sup>24)</sup>、Suiら<sup>25)</sup>は緑、近赤外領域のスペクトル測定の結果からニューラルネットワークを用いて窒素量の推定を行なった。いずれも可能性は示唆されているものの実用レベルに達していないのが現状である。

### 2) 既往の葉色センシングデバイスの原理、問題点

現在作物の窒素栄養状態をセンシングするために以下の2法が一般に知られ、広く用いられている。

#### (1) 葉色カラースケール

一般に作物体の窒素量が多くなると葉緑素含量も増加し、葉の緑色濃度を増すという性質を利用して<sup>26)</sup>、渡辺ら<sup>27)</sup>は1980年に葉色の濃淡から簡易に窒素濃度を推定できる葉色カラースケールを開発した。葉色カラースケールは7段階の明度を

持つ緑色の板で緑色が薄い板から順に1, 2...と番号が付いている。葉色板を肉眼で作物と照らし合わせることで、その葉色を7段階に識別し栄養状態を判定する。カラースケールの明度は一般に出現すると思われる範囲の明度より広範囲で、明度指数  $L^*$  を63から36まで  $\Delta L^* = 4.5$  の等間隔に設定されている。カラースケールは全国の農業試験場などで窒素ストレスを評価する標準的方法として用いられていた。しかしこの方法は測定が目視によるため個人差の影響によるばらつきが生じる。また測定時刻や天候、太陽の位置なども判定に影響する。

### (2) デジタル式葉緑素計

葉色カラースケールの有する利用者による個人差や外部光源によって生じる問題を解決するセンサとして、デジタル式葉緑素計（ミノルタ(株)、SPADメータ）がある。SPADメータは測定器内部に発光部と受光部があり、発光部にはピーク波長650nm付近の赤色領域の発光ダイオード(LED)とピーク波長940nm付近の赤外領域LEDの2つの光源が内蔵されている。測定する試料を発光部と受光部で挟むと、2つのLEDが交互に点灯し、その光が試料を透過して受光素子に導かれて光電変換される<sup>28)</sup>。葉緑素クロロフィルは一般に400~500nmの青色域と600~700nmの赤色域に吸光帯を有しているが、青色域ではカロチノイド類など他の色素の吸収波長と重複するため、クロロフィルのみを吸収する赤色域と、どの色素にもほとんど吸収されない赤外領域の光学濃度差をもとにSPAD値を求める<sup>29-31)</sup>。SPADメータ以外のデジタル葉緑素計も波長領域に若干の違いはあるが赤色と近赤外の2波長吸光度差測定法(dual wavelength difference photometry)を用いている。SPAD値の算出方法は(1)式の通りである。

$$SPAD = K \log_{10} \left[ \frac{IR_t / IR_o}{R_t / R_o} \right] \quad (1)$$

SPAD : SPAD 値

K : 定数

$IR_t$  : 赤外領域(940nm)の透過エネルギー

$IR_o$  : 赤外領域(940nm)の照射エネルギー

$R_t$  : 赤領域(650nm)の透過エネルギー

$R_o$  : 赤領域(650nm)の照射エネルギー

以上がSPADメータの測定原理であり、測定者の上観に頼る葉色カラースケールに比べ精密で客観性の高い測定方法とされている。しかしSPADメータは葉を一枚ずつ測定するために、長い測定時間を要する。したがって現在はほ場全体の作物を測定できず、ほ場の一部のデータを代表値として利用することで肥培管理を行なっているのが現状である<sup>32)</sup>。以上のことからSPADメータは、ほ場空間を細かなメッシュ単位に分割して観測するPF用センシングデバイスとしては不向きであることがわかる。

## III センシングシステムの基本構成

### 1) マシンビジョン

本研究で開発しているシステムの概略を図1に示す。本システムはマシンビジョンをトラクタに搭載し、太陽を光源として作物の画像を取得し、輝度値より反射率を推定する方式である。その際可視~赤外のうちどの波長の反射率が窒素ストレスと密接に関係するのかを検討し、適切な波長帯の光学バンドパスフィルタを装備する必要がある。取得画像はソフトウェア処理を行い、作物と土壌の識別を行なう。

### 2) 光量センサ

Takebeら<sup>33)</sup>、大角ら<sup>34)</sup>の方法は光源である太陽の高度条件に制約されることから使用時間が限定される。本システムは光量センサを用いて太陽

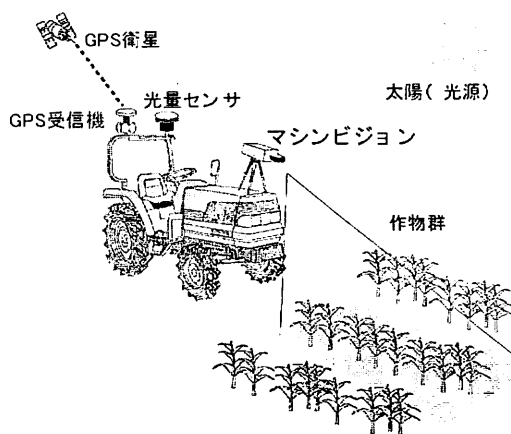


図1 センシングシステムの概要

Fig. 1 The overview of the sensing system

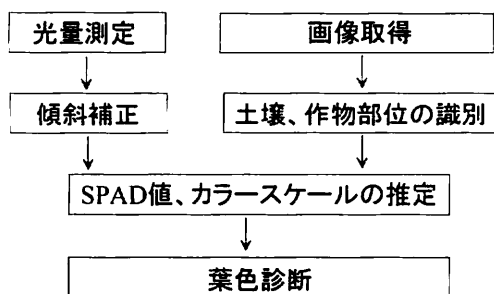


図2 葉色診断法の手順

Fig. 2 Method of detecting greenness index

の日射量を測定し、マシンビジョンで得られた作物反射光エネルギーに正規化を行なうことが狙いである。したがって時刻や車両の位置によって太陽から光量センサへの入射角が異なってくるため、光量センサへの入射角の値の影響を補正する方法を考案する必要がある。この問題については第2報で取り扱う。

### 3) SPAD 値, カラスケール値の推定

開発システムでは作物体の栄養状態を表現する指標に SPAD メータの指示値である SPAD 値と葉色カラスケール番号を採用している。マシンビジョンを用いて作物葉面からの太陽光反射率を測定し、上記2葉色値の推定を行なうことを目指している。これは葉色カラスケールや SPAD メータが作物学分野において既に広く用いられており、葉色から窒素含量を推定する方法として様々な作物への有効性が確認されていることによる<sup>35)36)</sup>。特に稲の肥培管理では個々の生育ステージの適正 SPAD 値が明らかになっており、追肥の時期を見極める手段として用いられている<sup>37)</sup>。すなわち、既に窒素ストレスのスケールリングとして認知されている値を正確に推定できることも開発するシステムの具備すべき条件となる。開発システムの2葉色値の推定方法の処理手順を図2に示した。

## IV センシングデバイス基礎実験

### 1) 目的

SPAD メータが作物体による吸光率を測定するのに対し、マシンビジョンを用いた本システムのセンシングは輝度情報より反射率を測定する。

したがってまず SPAD メータとは異なる光学的原理で測定可能かどうか調べる必要がある。またどの波長光の反射率測定が葉色インデックスを測定するのに適切であるかについても考察する。

### 2) 方法

窒素の施肥量を 0, 28, 56, 111kg/ha の4段階に調整したトウモロコシほ場において、異なる個体から葉の中央部を 50 点、SPAD メータと分光測色計の2種類のセンサによって測定した。供試したトウモロコシは Pioneer 3394 Hybrid である。この実験から反射率の測定による窒素ストレス推定が可能であるか検討する。また 50 点のトウモロコシ葉色を葉色カラスケールと SPAD 値の2つの葉色インデックスで表現した。

### 3) 測定装置

本実験で用いた分光測色計(ミノルタ(株), CM-2002)は、測定器内部にキセノンランプ光源を持つために常に一定の条件下での測定が可能である。分光測色計は可視領域 400nm から 700nm の範囲を 10nm の分解能で分光反射率を得ることができる。また受光は正反射光込み方式(Specular Component Include, SCI)により測定試料の表面状態に影響されない計測器である。

### 4) 結果及び考察

供試トウモロコシ葉の栄養状態は SPAD 値の範囲で 22.6~61.2 であった。図3に 50 点のうち、施肥量を4段階に分けたそれぞれの区域を代表するトウモロコシ葉の分光反射特性を示す。各プロットの SPAD 値は 22.6, 30.8, 45.9, 61.2 であった。葉色の薄い葉ほど高い反射率が得られている。全ての葉において緑領域 550nm 付近で反射のピークが見られ、650~700nm の間で反射率が一度小さく収束し、700nm 付近ではレッドエッ

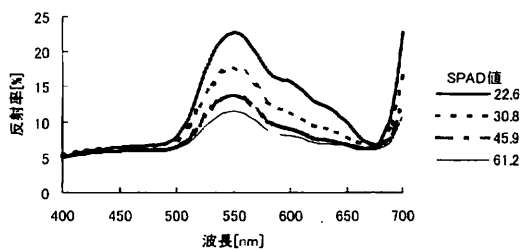


図3 トウモロコシ葉の分光反射特性

Fig. 3 Spectral reflectance of corn leaves

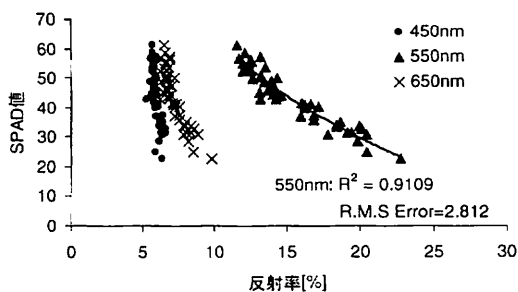


図4 分光反射率とSPAD値の関係

Fig. 4 Relationship between spectral reflectance and SPAD value

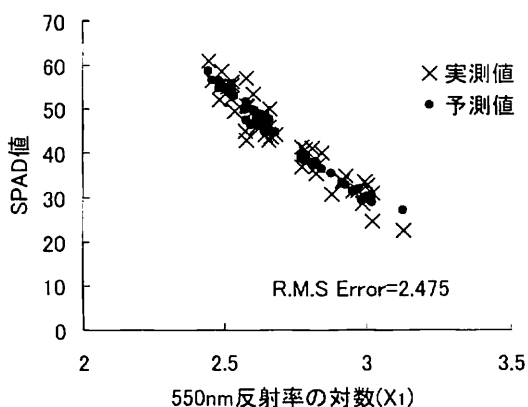


図5 550nm反射率対数（説明変量  $x_1$ ）における実測SPAD値と予測値

Fig. 5 Multiple regression on explanatory variable  $x_1$

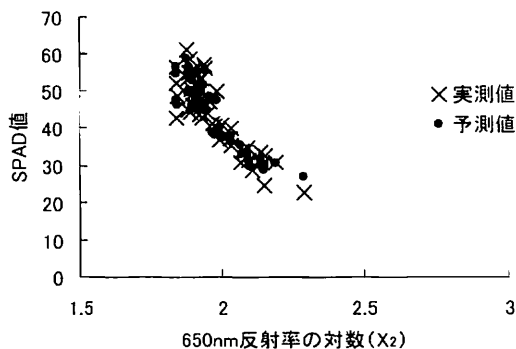


図6 650nm反射率対数（説明変量  $x_2$ ）における実測SPAD値と予測値

Fig. 6 Multiple regression on explanatory variable  $x_2$

ジ<sup>38)</sup>と呼ばれる急激な反射率の変動が見られる。図4に450nmから100nmごとの各波長分光の反射率と、SPAD値の関係を表した。SPAD値の変化に関らず一定の反射率を示す波長と、負の相関を示す波長があることがわかる。400~500nmではほぼ一定の反射率を示し、さらに波長が大きくなると徐々にグラフが横ばいになり550nmで最も反射率の変動が大きくなる。550nm以上の波長では反射率変化の幅が小さくなっていき、650nmでは非常に幅の狭いレンジ内でSPAD値との相関を示している。図4中に葉面での550nm分光の反射率とSPAD値の回帰曲線を表した。これによりSPADメータが葉身の透過率を測定しているのに対し、反射率を測定しても窒素ストレスを診断できる可能性が示唆されている。550nm分光が可視領域の中でもっともSPADとの相関関係が良く、またダイナミックレンジも広いことから、窒素ストレスの測定に適していると言える。実測SPAD値と回帰式による予測値の誤差のR.M.S.は2.812であった。

ダイナミックレンジは狭いものの、650nm分光の反射率もSPADと同様な相関関係が見られたため、550nm、650nm分光についてそれぞれ対数をとって説明変量  $x_1$ 、 $x_2$ として重回帰分析を行なったところ(2)式の重回帰式を得た。

$$y = -73.75x_1 + 42.71x_2 + 159.54 \quad (2)$$

予測値と実測値の誤差のR.M.S.は2.475であった。したがって550nm分光の反射率だけでSPAD値を推定するよりも650nm分光の反射率を加味して推定を行なったほうが、SPADの推定精度が高くなると判定された。また説明変量に対する実測値と予測値の関係をそれぞれ図5、6に示した。

さらに550nmと650nm分光反射をニューラルネットワーク(NN)に入力して非線形画像を用いることによる推定精度向上の可能性を調べた。図7のように550nm分光の反射率と650nm分光の反射率の2入力を入力層として、3ユニットの中間層、出力ユニットをSPAD値とした。実験データとNN出力データの間関係を図8に示す。教師データ50セットで2,000回学習を行なった結果、SPADの実測値と予測値の誤差のR.M.S.は2.232となり、重回帰分析よりもさらに予測精

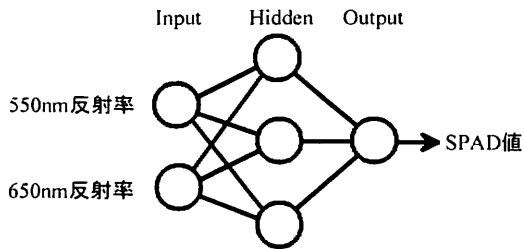


図 7 SPAD ネットワークの構造  
Fig. 7 Overview of Neural Network for estimating SPAD

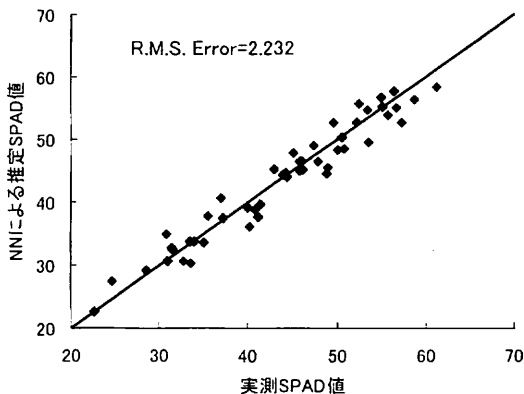


図 8 ニューラルネットワークによる SPAD 推定の結果  
Fig. 8 Results of estimating SPAD value by Neural Network

度の向上が確認できた。今後、テストデータを使用して画像精度の汎化性を調べる必要があるが、有望な SPAD 推定器として期待できる。

葉色カラスケールの分光反射スペクトルを図 9 に示す。図 3 に示したトウモロコシ葉の分光反射特性と比較すると 550nm に反射ピークが存在している点で類似している。それぞれの波長において反射率と緑色濃度が負の相関を表すが、特に 550nm において 50 点のトウモロコシ葉の葉色カラスケール番号を推定してその結果を図 10 に示した。SPAD 値 22.6~61.2 の範囲である供試トウモロコシは、葉色カラスケールによると葉色は 3.72~6.74 となり、550nm 分光の反射率を正確に測ることで、SPAD 値と葉色カラスケール番号の両方を精度良く推定できることが明らかになった。

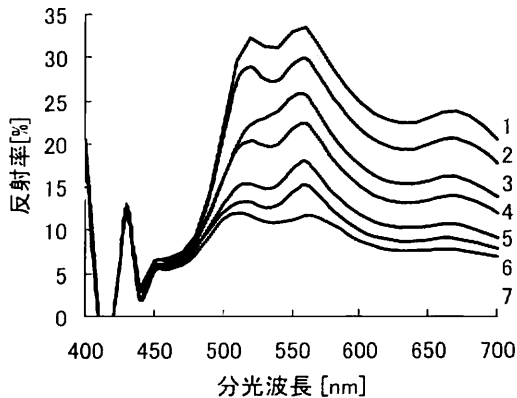


図 9 葉色カラスケールの分光反射特性  
Fig. 9 Spectral reflectance of a leaf color scale

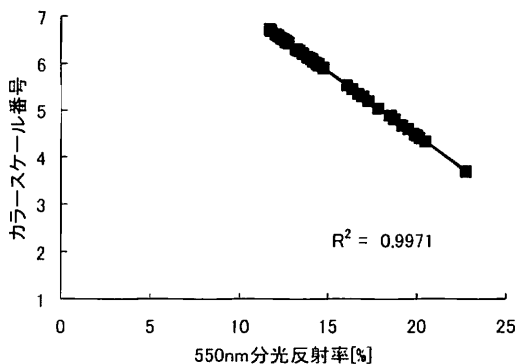


図 10 葉面反射率から葉色カラスケールの推定  
Fig. 10 Relationship between reflectance of leaves and color scale number

### V 摘 要

マシンビジョンを用いて SPAD 値と葉色カラスケールを推定するセンシングシステムの構想を示した。また基礎実験として、4段階に異なる窒素施肥を行なったトウモロコシほ場において、トウモロコシ葉面を SPAD メータと分光測色計の二つの測定器で測定した。SPAD メータを信頼できる窒素ストレス診断法としてみなし、分光測色計の値と比較することによって、光の反射率による窒素ストレス診断が可能であるか検討した。その結果、葉の透過率の代わりに反射率を用いて窒素ストレスを診断する可能性が示唆された。また 550nm 付近の分光がもっとも窒素ストレスを推定する際に適した測定領域であり、650

nm 分光と合わせることによってより精度良く推定できることが示された。

### 参 考 文 献

- 1) 齊藤 巨：プレシジョンファーミング，農機学会北海道支部会報，55-57，1997
- 2) 野口 伸：米国穀倉地帯におけるプレシジョンアグリカルチャ，農機誌，61(1)，12-16，1999
- 3) Morgan, M., et al.: The Precision Farming Guide for Agriculturists, John Deere Publishing, 94-98, 1997
- 4) Tian, L.: New Precision Farming Equipment Research in University of Illinois, セミナー「大規模農業に必要なメカトロニクスとその周辺」資料，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門，1-8，1998
- 5) 野口 伸：マシンビジョンをベースにした精密圃場管理，シンポジウム「日本型プレシジョンファーミングを考える」資料，農業機械学会，1-8，1998
- 6) 2) と同じ
- 7) Squire, G.R.: The Physiology of Tropical Crop Production, CAB international, 187-197, 1989
- 8) Delorit, R.J. and Ahlgren, H.L.: Crop Production-third edition, Prentice Hall Inc, 53, 1967
- 9) Marschner, H.: Mineral Nutrition of Higher Plants-second edition, Academic Press, 184-186, 1995
- 10) 田中明編：作物比較栄養生理，学会出版センター，25，1982
- 11) 矢口芳生：新農業基本法と「環境問題」，日本農業年報，44，61-66，1997
- 12) Morgan, M., et al.: The Precision Farming Guide for Agriculturists, John Deere Publishing, 2-7, 1997
- 13) Buschmann, C., et al.: In vivo Spectroscopy and Internal Optic of Leaves as Basis for Remote Sensing of Vegetation, Intl. J. Remote Sens, 14, 3181-3190, 1993
- 14) Fernandez, S., et al.: Radiometric Characteristics of Triticum aestivum cv. Astral under Water and Nitrogen Stress, Intl. J. Remote Sens, 15, 1867-1884, 1994
- 15) Hinzman, L.D., et al.: Effects of Nitrogen Fertilization on Growth and Reflectance Characteristics of Winter Wheat, Remote Sens. Environ, 19, 47-61, 1986
- 16) 日本写真測量学会編：空中写真の判読と利用，鹿島出版会，186-188，1980
- 17) 井上吉雄：情報化精密農業生産管理へのリモートセンシングの応用(1)，農機誌，60(1)，127-134，1998
- 18) 井上吉雄：情報化精密農業生産管理へのリモートセンシングの応用(2)，農機誌，60(2)，139-146，1998
- 19) 長谷川均：リモートセンシングデータ解析の基礎，古今書院，110-111，1998
- 20) Takebe, M., et al.: Spectral Reflectance Ratio of Rice Canopy for Estimating Crop Nitrogen Status, Plant and Soil, 122, 295-297, 1990
- 21) 大角雅晴，中村喜彰：画像処理による水稲の葉色測定に関する研究（第1報），農機誌，55(5)，75-81，1993
- 22) 大角雅晴，中村喜彰：画像処理による水稲の葉色測定に関する研究（第2報），農機誌，57(4)，45-52，1995
- 23) 大角雅晴，中村喜彰：画像処理による水稲の葉色測定に関する研究（第3報），農機誌，58(5)，65-70，1996
- 24) Thai, C.N., et al.: Visible & NIR imaging of Bush Beans Grown under Different Nitrogen Treatments, ASAE Paper983074, 1998
- 25) Sui, R., et al.: Integration of Neural Networks with a Spectral Reflectance Sensor to Detect Nitrogen Deficiency in Cotton, ASAE Paper983104, 1998
- 26) ファイトテクノロジー研究会：ファイトテクノロジー，朝倉書店，41，1994
- 27) 渡辺 苞，ほか：葉色の解析（第3報），日本作物学会紀事第49巻別1，93-94，1980
- 28) ミノルタ(株)：葉緑素計 SPAD502 取り扱い説明書
- 29) 渡辺 苞，ほか：デジタル式葉緑素計の開発—構造と性能—（第1報），日本作物学会紀事第49巻別1，89-90，1980
- 30) 西岡宗則：色彩センサとその応用，農機誌，59(6)，132-134，1997
- 31) 柴田和雄：スペクトル測定と分光光度計，講談社，148-149，1974
- 32) 21) と同じ
- 33) 20) と同じ
- 34) 21-23) と同じ
- 35) 渡辺 苞，ほか：デジタル式葉緑素計の開発（第2報），日本作物学会紀事第49巻別1，91-92，1980
- 36) 中鉢富夫ら，葉緑素計による水稲（ササニシキ）の窒素栄養診断，日本土壌肥料科学雑誌第57巻第2号，304-306，1986
- 37) 30) と同じ
- 38) 18) と同じ

（原稿受理：1999年6月10日・質問期限：2000年5月31日）