

# 機能リモートセンシングによる 穀類の品質管理

松田 真典 Masanori Matsuda

株式会社サタケ 技術本部穀物研究室 室長

坂坂 幸男 Yukio Hosaka

株式会社サタケ 専務執行役員

大政 謙次 Kenji Omasa

東京大学 大学院農学生命科学研究科  
生物環境情報工学研究室 教授

水稻の生育において最も重要な指針は窒素含有率であり、従来、葉色板や葉身窒素測定器、葉緑素計などが診断に用いられてきた。圃場脇の高度約12 mから斜方視撮影したデジタルカメラ画像を用いて、その場で簡便に水稻の生育診断を行う近接リモートセンシングシステムを開発した。出穂25～10日前に推定した葉身窒素量から適切な施肥量を算出する指針として用いる。また、収穫15～10日前には玄米のタンパク質を予測する。本システムは、衛星・航空機では撮影できない曇天時にも診断可能である。

## 1 はじめに

水稻の生育状態によって変化する葉色が、栽培時における施肥管理や収穫時期の決定、また収穫時における米の収量・品質に関係することから、JAや個人農家などでは、生育診断の目安として従来から葉色板が広く用いられてきた。最近では、葉色板に比べて定量性に優れた、特定波長の透過光量から葉身の窒素含有率を計測する葉身窒素測定器や、独自の指数を計測する葉緑素計などのハンディタイプの計測器が使われているが、これらの計測器は葉身1枚単位では手軽に測定できる反面、圃場全体の平均値あるいは分布を計測するには多大な労力を要するという欠点があった。このため、航空機や衛星からの広域リモートセンシングにより、水稻の収量や生育状況を推定す

ることが試みられてきた<sup>1)~4)</sup>。しかし、現状では、衛星画像は撮影間隔が長く、撮影からユーザーの手に届くまでの期間も最低数日必要であり、また航空機での観測も年度によっては天候不良のため撮影できない場合も生じるなど、現場での実用技術としての利用には限界がある。そして、日本では、一部の地域を除いて栽培時期の曇量が多いため、航空機や衛星データにより直ちに適切な施肥が必要な時期の水稻の生育診断や収穫前のタンパク質含有量予測を行うには問題があるとの指摘もなされている<sup>5)</sup>。

このため、確実に実施可能な日本型生育診断のためのリモートセンシング技術として、圃場脇から斜方視撮影したデジタルカメラ画像により水稻の窒素含有率を推定するシステムを開発した。このシステムは、快晴の日だけで

なく、曇天下でも撮影でき、またその場で圃場ごとの窒素含有率を計算し、水稻の生育診断を行うことができる。加えて、単独での使用だけでなく、航空機・衛星観測時のグランドトゥース (ground truth) データとして、また航空機・衛星観測ができない日のデータを補完するためにも使用可能である。

## 2 米の食味と成分の関係

米の食味(おいしさ)と成分の関係については、アミロース含有量とタンパク質含有量が食味官能値\* (大きい

### 【食味官能値】

「パネラー」と呼ばれる試験官が実際に炊飯した白飯を試食して総合的に評価した値。

ほどおいしい) に関係しているといういくつかの研究報告がある<sup>6)7)</sup>。

竹生らの報告<sup>6)</sup>から、説明変数をアミロース含有量(重量%)とタンパク質含有量(重量%)として回帰式を求めると、下記のようになる。

$$\begin{aligned} \text{食味官能値} = & \\ & -0.1498 \times \text{アミロース含有量} - 0.1724 \times \\ & \text{タンパク質含有量} + 4.417 \quad (\text{式1}) \end{aligned}$$

また、桜田ら<sup>7)</sup>は、下記の回帰式を示している。

$$\begin{aligned} \text{食味官能値} = & \\ & -0.1522 \times \text{アミロース含有量} - 0.6804 \times \\ & \text{タンパク質含有量} + 8.1948 \quad (\text{式2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{食味官能値} = & \\ & -0.1020 \times \text{アミロース含有量} - 0.6757 \times \\ & \text{タンパク質含有量} + 0.1537 \times \text{水分(重量\%)} \quad (\text{式3}) \end{aligned}$$

式1と式2ではタンパク質の寄与の程度が異なり、また式3では水分の寄与がある式になっているが、仮に栽培技術により、アミロース含有量を16~20%の範囲で、またタンパク質含有量を6~9%の範囲で変えることができる。たとえば、式1において

アミロース含有量を4%変化させたとすると、食味官能値は $-0.1498 \times 4 = -0.599$ 変化する。また、タンパク質含有量を3%変化させたとすると、食味官能値は $-0.1724 \times 3 = -0.517$ 変化する。すなわち、食味官能値に対するアミロースの分担幅は0.599、タンパク質の分担幅は0.517である。同様に式2、式3についても食味改良に寄与するアミロース、タンパク質それぞれの分担幅を計算すると、下記のとおりになる。

【式1について】  
アミロース分担幅：0.599、  
タンパク質分担幅：0.517

【式2について】  
アミロース分担幅：0.609、  
タンパク質分担幅：2.041

【式3について】  
アミロース分担幅：0.408、  
タンパク質分担幅：2.027

式1においては、アミロースの分担幅とタンパク質の分担幅が比較的近い値であるのに対し、式2および式3では、アミロースの分担幅に対してタン

パク質の分担幅が約3~5倍大きくなっている。これは、式1においてはサンプルの品種数が多いのに対して、式2と式3では品種数を少なくしてタンパク質の変動幅を大きくしたためと考えられる。

このように、米の食味は、主としてアミロース含有量とタンパク質含有量によって決まる。しかし、アミロース含有量は品種と天候でほぼ決まり、それぞれの地域において適地適作の観点から品種が選定されて稲作が行われているので、栽培により値を管理するのは事実上不可能である。

一方、タンパク質含有量は施肥設計により管理できる。しかも、タンパク質含有量による食味の改良の余地は、式1、式2、式3によれば、アミロース含有量も含めた全改良余地の50~80%に及ぶ。したがって、低タンパク米の生産による食味の向上は、現実的な食味向上策として大いに意義のあることと言える。もちろん、収量、玄米の外観品質、高温障害等との関係でどこまで低タンパク化できるかはケースバイケースで検討する必要がある。

### 3 葉身窒素量と米の品質あるいは収量との関係

稲作技術の開発、改良の中で、品質等の良い米を得るために生育の進行に伴うイネの葉の窒素カーブを管理するという概念があり(図1)、これが米粒のタンパク質含有量に影響を及ぼす。

どのような品質の米の収穫をターゲットにするかによって、窒素カーブは異なってくる。食味の良い米にすることがターゲットである場合、窒素カーブは低めがよい。その方が米粒の

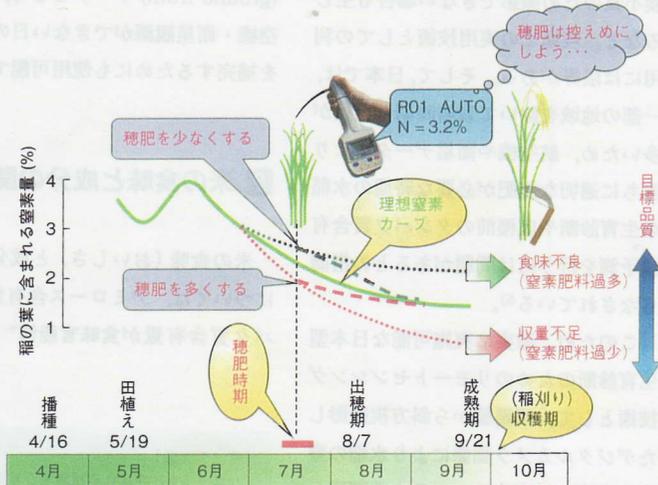


図1 水稲の生育管理

タンパク質含有量が少なくなるからである。ただし、収量は減る傾向にある。収量を多くしたい場合には、窒素カーブは高めがよい。ただし、米粒のタンパク質含有量が増加し、食味は悪くなる。すなわち、良食味米を得たいか、収量を多くしたいかの目的に応じて窒素カーブを管理すればよい。管理の手段は施肥である。出穂25～10日前の穂肥時期、すなわち「幼穂形成期」や「減数分裂期」と呼ばれる時期に葉の窒素含有量を測定し、あるべき窒素カーブに対して、窒素含有量が少なければ窒素肥料の量を増やし、窒素含有量が多ければ窒素肥料の量を減らすのである。このようにして、目標とする窒素カーブとなるように施肥の設計をすることにより軌道を修正し、目的に合わせて生育を管理することができる。

なお、出穂後の「登熟期」と呼ばれる時期の葉身窒素含有量と玄米タンパク質含有量との間には高い正の相関があることが知られている。

#### 4 従来の生育診断

栽培管理の際にどのようにして葉の窒素量の情報を取得してきたかという点、古くは直接目視で葉色の濃淡を確認する方法であった。1980年代から葉色板が導入され、また1990年頃から葉を挟んで複数波長の吸光度から葉の窒素量を測定する葉身窒素測定器(図2)や葉緑素計などが使われ始めた。これらの方法は、人が田んぼへ入り一枚一枚の葉身を挟んで測定していくために、作業の能率は低かった。



図2 葉身窒素測定器

#### 5 航空機や人工衛星からの広域リモートセンシング<sup>1)~4)</sup>

測定作業の能率を飛躍的に向上させるために、航空機や人工衛星からの広域リモートセンシングの利用が期待されている。人工衛星や航空機に搭載されるセンサの技術的トレンドは、高空間解像度化、多チャンネル(ハイパースペクトル)化、3次元化、レーザーやマイクロ波などの能動的センサ利用、高頻度観測などである。

たとえば、2001年に打ち上げられた米国の商用衛星であるQuickBirdは、パンクロ画像(0.45~0.90 μm)で0.61 m、マルチスペクトル画像〔青(B): 0.45~0.52 μm、緑(G): 0.52~0.60 μm、赤(R): 0.63~0.69 μm、近赤外(NIR): 0.76~0.90 μm〕でも2.44 mと、従来の航空機からのリモートセンシングに匹敵する空間解像度を有している。また、2000年に打ち上げら

れたEO-1 (Earth Orbiter-1) に搭載のHyperionはLandsatに搭載のものと 同じ30 mの空間解像度で、可視~近赤外(0.4~2.5 μm)の220バンドのハイパースペクトル画像を提供する。わが国でも現在、NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のプロジェクトにより、衛星搭載のハイパースペクトルセンサ(2014年にALOS-3として打ち上げ予定)が開発されており、カナダ(HERO)やドイツ(EnMAP)の計画と合わせて、ハイパースペクトルでの地球観測ネットワークが構築される予定である。

一方、航空機に搭載されているリモートセンサには、20 cm程度の空間解像度を有するマルチバンドセンサや、2 mの空間解像度で可視~近赤外(0.43~1.0 μm)を512バンドで計測できるハイパースペクトルセンサなどがあり、人工衛星搭載センサよりも高解像度で、より利便性がある。しかしながら、

前述したように、航空機や衛星からのデータによる、適切な施肥が必要な時期の水稲の生育診断への実用利用には問題がある。

今後、水稲の生育診断への実用利用のためには、複数の人工衛星による高頻度観測、航空機や下記に述べる圃場生育診断システムなどの階層的なりモートセンシング、また生育モデルとの併用による診断手法の開発が望まれる。

## 6 圃場生育診断システム

天気の影響を受けない圃場でのリモートセンシングのために開発した水稲の圃場生育診断システムの外観を、図3Aに示す。このシステムは、積載量1tクラスのトラックに積載し、使用する。装置重量は680kg、長さ1,580

mm、幅1,480mm、高さ2,670mmである。油圧ボールの上に電動旋回台を介してデジタルカメラ4台が搭載されている。これらのデジタルカメラ(図3B)は、可視カラー画像を撮影するカメラ2台と近赤外画像を撮影するカメラ2台であり、それぞれ水平画角69度の広角レンズ、12.8度の望遠レンズを装着している。画素数は約1,000万画素である。トラックに搭載している撮影装置本体内に設置してある操作ボックス(図3C)により油圧ボールを地上12mまで伸長し、操作ボックスディスプレイ上で撮影範囲を確認しながら電動旋回台を上下左右に操作して撮影方向を定めシャッターを切ることができる。カメラは360度回転可能で、半径約710mまでの範囲を測定できる。

撮影した画像は真上から見た画像に逆透視変換して、圃場ごとの窒素含有

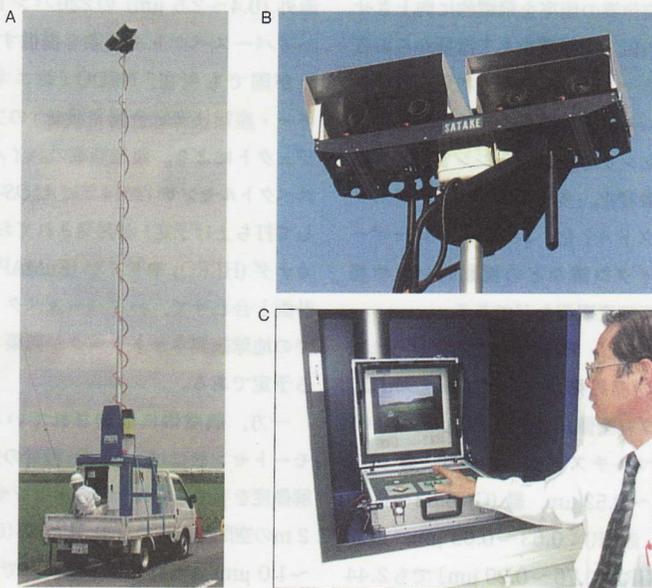
率を算出する。GIS(地理情報システム)と結合させて、圃場内の区画ごとまたは圃場ごとの窒素含有率を表示できる。地上付近から近接撮影することで、曇天でも診断可能である。この時期の水稲は比較的垂直に近い角度で葉が伸びているため、斜方視撮影により、直下視撮影と比較して葉を効率的に撮影できる。しかしながら、斜方視撮影では、撮影画像上で遠くと近くの1画素の占める実面積が異なるという問題が生じる。このため、撮影した画像と地図(GIS)との位置合わせを行い、各画素に重みづけすることにより、正確に圃場全体の平均値を算出するようにした。また、広角レンズの水平画角は69度であり、広範囲を撮影する場合は、画角を10~50%程度重ねてパンしながら複数コマ撮影している。さらに、広角レンズだけでは遠方の解像度が不足するため、望遠レンズも併用して遠方の解像度を確保している。なお、別途、対象圃場内に1カ所、約10m四方の基準領域をあらかじめ設定し、四隅に目印となるマーカーを立て、領域内からまんべんなく25枚の葉身窒素を葉身窒素測定器で測定し、基準値とする。

画像処理手順は、

- (1) 撮影画像をパソコンに転送
- (2) 画像フォーマットの変換
- (3) 専用画像処理ソフトウェアで診断
  - 地図と画像の位置対応づけ
  - 画像間の位置対応づけ
  - 基準領域指定と基準値入力
  - 圃場領域指定
  - RGBとNIRの輝度値から圃場ごとの葉身窒素含有率を計算

である。

本システムは出穂25~10日前に推定した葉身窒素量から適切な施肥量を



A: 撮影装置, B: カメラ, C: 操作ボックス

図3 圃場生育診断システム撮影装置



図4 可視カラー画像(左)と近赤外画像(右)

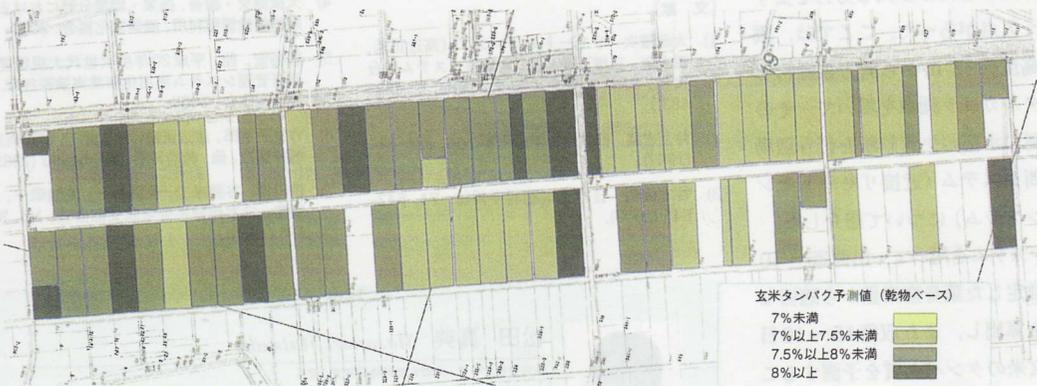


図5 玄米タンパク質予測マップ

算出するとともに、収穫15～10日前に推定した葉身窒素量から玄米タンパク質含有量を予測することができる。

図4に、本システムで撮影した可視カラー画像および近赤外画像例を示す。また、図5に玄米タンパク質予測値マップの例を示す。可視カラー画像を見ると、圃場により葉色が異なる様子がわかる。近赤外画像では、植物の反射が大きいので圃場や樹木が白く見えている。また、近赤外画像の周辺部が暗い

が、これはレンズの周辺減光のためであり、可視画像においても存在する。そのため、診断の前処理において補正を行っている。

各時期の画像から得られた、幼穂形成期・登熟期の診断結果および玄米タンパク質の予測結果を図6に示す(平成20年度、広島県ヒノヒカリ)。

葉身窒素含有率を幼穂形成期には標準誤差0.06%、登熟期には標準誤差0.07%の精度で診断できている。また

玄米タンパク質含有量を標準誤差0.18%の精度で予測できている。

## 7 おわりに

水稻の生育において最も重要な指標は窒素含有率であり、従来、葉色板や葉身窒素測定器、葉緑素計などが診断に用いられてきた。しかし、これらの方法では、圃場全体の平均値あるいは

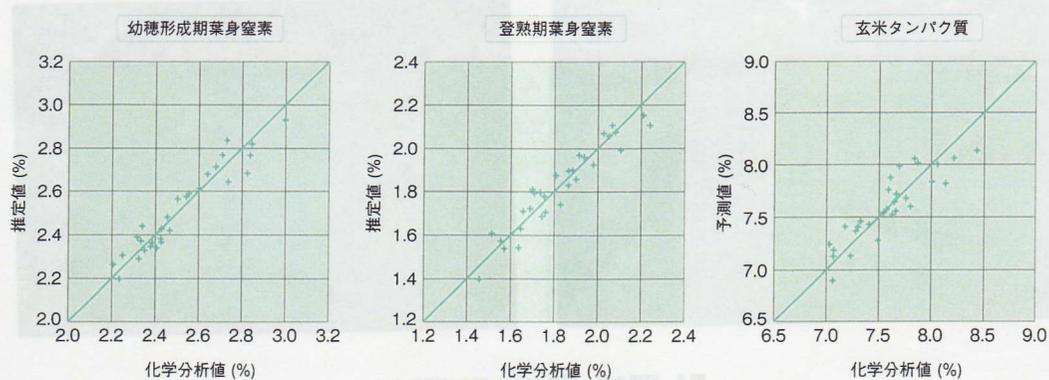


図6 葉身窒素診断結果(幼穂形成期, 登熟期)と玄米タンパク質予測結果

分布を計測するには多大な労力を要するという欠点があった。ここでは、圃場脇の高度約12 mから斜方視撮影したデジタルカメラ画像を用いて、その場で簡便に水稻の生育診断を行う圃場生育診断システム(近接リモートセンシングシステム)について紹介した。

このシステムを用いて、出穂25～30日前に推定した葉身窒素量から適切な施肥量を算出し、また収穫15～10日前には玄米のタンパク質を予測することが可能である。このシステムは、衛星や航空機では撮影できない曇天時にも使用可能であり、人工衛星や航空機のリモートセンシングとの併用利用も可能である。しかしながら、撮影や画像処理にエンドユーザの手間が必要であり、今後、各作業の自動化により、より簡便かつ短時間の作業で診断できるシステムにしていくことが望まれる。また、複数品種や栽培ステージの異なる圃場が混在する圃場群に対しても利用可能にする必要があろう。

[文献]

- 1) 大政謙次. リモートセンシング.(高辻正基, 橋本康, 三澤正愛・編. 新農業システム総合技術, R&Dプランニング, 1984, p. 459-483.)
- 2) 井上吉雄. 日本作物学会紀事, **66**, 335-344 (1997).
- 3) 谷本俊明. 日本土壤肥科学雑誌, **71**, 542-545 (2000).
- 4) 大政謙次・編著. 農業・環境分野における先端的画像情報利用, 農業電化協会, 2007.
- 5) 藤巻宏, 他. 平成20年度次世代大規模経営品質管理システム実用化事業実績報告書, 農業技術協会, 2009.
- 6) 竹生新治郎, 渡辺正造, 杉本貞三, 眞部尚武, 酒井藤敏, 他. 澱粉科学, **32**, 51-60 (1985).
- 7) 桜田博, 谷藤雄二, 佐藤農一, 菊池栄一, 中場勝. 日本作物学会東北支部会報, No. 31, 1-6 (1988).



松田 真典 Masanori Matsuda

株式会社サタケ 技術本部穀物研究室 室長

略 歴：1986年、広島大学工学部第二類(電気系)卒業。1987年、株式会社佐竹製作所入社。2001年、広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。

専 門：穀物の分光計測機器等の開発



保坂 幸男 Yukio Hosaka

株式会社サタケ 専務執行役員

略 歴：1968年、東京大学農学部卒業。同年、株式会社佐竹製作所入社。農学博士。

専 門：ポストハーベストテクノロジー

著 書：『新製粉技術の開発に関する研究』(東京大学出版会) など

大政 謙次 Kenji Omasa

東京大学 大学院農学生命科学研究科 生物環境情報工学研究室 教授

[著者紹介はp. 95をご覧ください(編集部)]