

高分解能衛星データを用いた水田のタンパク含有率の推定

——川口町と旧山古志村の事例——

阿部 信行¹・福山 利範²・上家 浩視³

Estimating Rice Grain Protein Contents using High Resolution Satellite Data in case of Kawaguchi Town and Yamakoshi Ward

by

Nobuyuki ABE, Toshinori FUKUYAMA, Hiromi KAMIIE

Abstract

We presumed the rice grain protein content rate using image of IKONOS and GeoEye-1, sensors in Budokubo and Yamakoshi ward which were the stricken area of a Cyuetsu great earthquake. In both regions, relations were admitted between the rice grain protein content rate and normalized difference vegetation index(NDVI) in 2009 data. In addition, we presumed the rice grain protein content rate and made it to the map using obtained regression. The protein content rate was able to be understood from the map in the sight and the large area. To obtain the regression of higher accuracy, it is necessary to examine the method of acquiring the taking an image satellite date and extraction method of digital number. And, it is necessary to use high resolution satellite data for the protein content rate can be presumed in the case of small rice field.

キーワード：米粒タンパク含有率, IKONOS衛星, GeoEye-1衛星, 水田, NDVI

Keywords: rice grain protein content rate, IKONOS, GeoEye-1, paddy field, NDVI

はじめに

本研究の目的は、平成16年10月23日に発生した中越大地震により深刻な農業被害を受けた中山間地の農家に対し、支援の一環として食味に優れた米生産のための情報提供にある。既に、Ⅰ、Ⅱ報（木村ら、2007：阿部ら、2008）を報告している。その後、2008年は川口町武道窪を対象に、高分解能衛星データを用いた米粒内のタンパク含有率の推定を解析済みであり、2009年度は、川口町武道窪地区および長岡市山古志地区で同様の解析を実行した。米の食味は、米粒のアミロース含有率とタンパク含有率の影響を受けるとされている（山下ら、1974）。アミロース含有率は主に品種と登熟期間の気温で決まるので、制御の余地は少ない。一方、タンパク含有率は生育後半の窒素栄養状態の影響を受けるため、施肥量や散布時期による制御が可能である。佐賀農協では、集荷時のタンパク含有率が6.3%以下と以上では、買い取り価格に差をつけている（朝日新聞、2007）。既に衛星データを用いて、水稻成熟期の米粒タンパク含有率の推定が行われている（安積ら、2003）。

2009年度、高分解能衛星GeoEye-1衛星、及び2008年度、IKONOS衛星を用いて、米粒内のタンパク含有率の推定を試みた。川口町武道窪地区における経年変化も含めて解析結果を報告する。

対象地域、使用データおよび解析手法

研究解析対象地

研究対象地は新潟県北魚沼郡川口町武道窪地区および新潟県長岡市山古志地区である。川口町内の水田は区画整理が行われており、比較的一枚当たりの面積は大きい。しかし、長岡市山古志地区は棚田になっており、一枚当たりの面積は非常に小さい。両地区とも、植え付けはコシヒカリBLが主であり、試験用の水田はすべてコシヒカリBLである。水田への移植は、武道窪地区が5月上旬、山古志地区が中旬、出穂期は8月上旬から中旬、収穫期は9月中旬から下旬である。両地区の収穫は約2週間の差があるが、同じ地区内での生育のバラツキは少ない。

¹新潟大学農学部、災害復興科学センター、²新潟大学農学部、³長岡振興局長岡農業普及指導センター

使用データ・使用ソフト

使用した衛星データはアメリカの商業衛星IKONOSの2008年8月18日の画像、および2009年8月25日および2009年9月24日撮影のGeoEye-1衛星である。分解能はIKONOS衛星は4m×4m、GeoEye-1衛星は2m×2mである。画像解析ソフトはERDASIMAGINE8.7、ArcGIS9.1である。

現 地 調 査

研究対象地の農家の圃場を対象に、川口町は収穫時に穂を採集、山古志地区は坪刈を実行した。川口町は、9月19日、山古志地区は、9月18日、9月22日、9月28日、10月7日にわけて坪刈を行った。稲を大学のフィールドセンターに運び、2週間の乾燥後、脱穀、粳すりを行い、食味分析計（PS-500 静岡製機株式会社）を用いて玄米タンパク含有率の計測を行った。3回の測定の実値を採用した。タンパク含有率は水分基準を0とし乾物換算で表示した。従って、水分換算を行わない場合に比較してタンパク含有率は約1%高くなる（静岡製機2006）。

解析方法

衛星データから米粒タンパク含有率の推定方法

高分解能衛星データのIKONOSおよびGeoEye-1であれば、水田位置図に対応した画像上の位置を容易に特定できる。川口町および山古志地区ともにデジタル化された水田情報がある。これらの座標は公共座標のため、衛星データの座標を公共座標に転換した。その結果、衛星データと水田位置との重なりは極めて良好であった。武道窪は8月25日、山古志は9月24日のシーンをを用いた。山古志の撮影日が遅かったので、稲刈りは撮影後に行われたことを確かめた。

武道窪、山古志地区共に、試験水田ごとに水田内の十数個の輝度値を抽出後、その平均値を算出して、水田ごとの平均

輝度値とした。各調査水田から得られた各バンドの平均値・NDVIの平均値と、現地調査で得た米粒タンパク含有率との相関を調べ、有意な相関関係があるものに対し、回帰式を適合させた。回帰式から、タンパク含有率を5区分して表示した。

タンパク含有率推定マップの作成

武道窪地区、山古志地区のタンパク含有率推定マップを作成した。武道窪地区はデジタル化されている水田位置図を衛星データと重ね合わせて、衛星データに対応する水田位置を抽出した（2008年度）。抽出された水田には休耕田も含まれるため、この抽出された図を対象に教師付分類を行って水田を抽出した。撮影時（8月18日）水田に水が入っているため、水田の分類精度は高かった。抽出された水田を対象に、ERDAS IMAGINEのモデラーから、抽出された水田のピクセルの輝度値をタンパク含有率の推定式に当てはめ、推定された各ピクセルのタンパク含有率を5段階に区分した。その結果を衛星データに重ね合わせて表示した。2009年度の武道窪地区の解析では、水田情報を用いないで、直接、衛星データから水田を抽出した。一方、山古志地区の水田情報は、養鯉池と水田が混在している情報のため、衛星データを対象に、教師付き分類を行って水田を抽出した。抽出された水田を基に、輝度値とタンパク含有率との関係を解析した。調査水田箇所は、2008年の川口町武道窪および相川地区で18箇所、2009年度31箇所、2009年度の山古志地区で17箇所である。2008年武道窪では31箇所の試験地を設定したが、2008年の画像内に雲の影響が見られた箇所を省いた。一方、2009年山古志地区の坪刈用の試験水田位置は、空中写真を基に確定したが、空中写真は今年度のものではなく、画像の水田位置と空中写真の位置が合わなかった1箇所を省いて解析を行った。なお、タンパク含有率と重なる衛星画像はフォールスカラー図を用いた。これは養鯉池が分かりやすいためである。

表－1 2008年武道窪の玄米タンパク含有率と各バンド輝度値およびNDVIとの相関表

| データ数 | Band1 | Band2 | Band3 | Band4 | NDVI |
|------|-------|-------|-------|--------|------|
| 18 | -0.07 | -0.13 | 0.17 | 0.77** | 0.44 |

（撮影日：2008年8月18日）

表－2 2009年武道窪のタンパク含有率と各バンド輝度値およびNDVIとの相関表

| データ数 | Band1 | Band2 | Band3 | Band4 | NDVI |
|------|-------|---------|--------|--------|--------|
| 30 | -0.11 | -0.50** | -0.38* | 0.57** | 0.61** |

（撮影日：2009年8月25日）

表－3 2009年山古志のタンパク含有率と各バンド輝度値およびNDVIとの相関表

| データ数 | Band1 | Band2 | Band3 | Band4 | NDVI |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 17 | -0.45 | -0.49※ | -0.50※ | 0.64** | 0.67** |

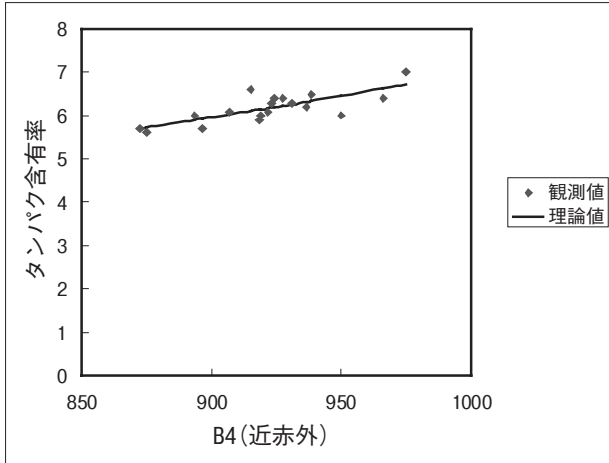
（撮影日：2009年9月24日）

※1%水準有意 ※5%水準有意

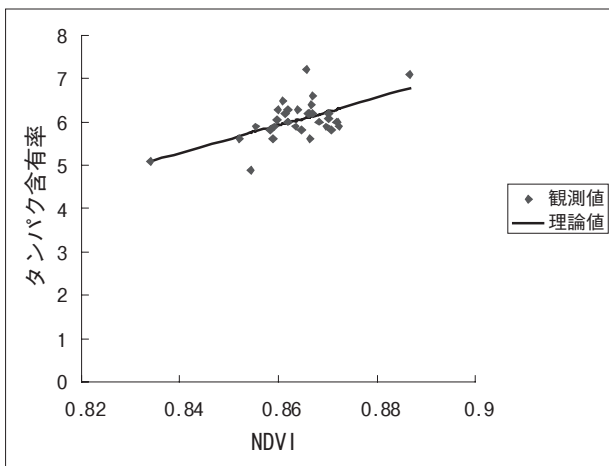
結 果

米粒タンパク含有率の推定

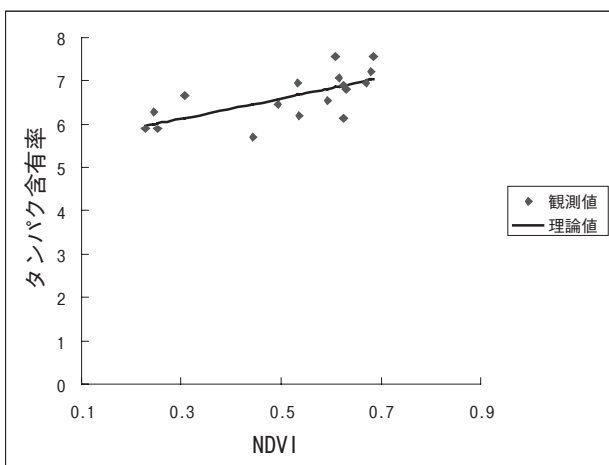
各バンド輝度値、NDVI（植生指数）と米粒タンパク含有率との相関係数を、武道窪地区2008年を表－1に、2009年を



図－1 2008年度タンパク含有率とバンド4（近赤外）との関係（武道窪）



図－2 2009年度タンパク含有率とNDVIとの関係（武道窪）



図－3 2009年度タンパク含有率とNDVIとの関係（山古志）

表－2に、山古志地区を表－3に示した。

バンド4はいずれも有意水準1%の正の相関が認められた。一方、バンド4、3を組み合わせたNDVIは2008年の武道窪以外は有意水準1%の正の相関が認められた。

タンパク推定式に使用した回帰式は以下である。

説明変数は、最も高い相関係数を示した変数とした。

2008年武道窪（図－1）

$$Y = 0.00997x - 3.0095$$

Yは玄米タンパク含有率、xはBand4の平均輝度値、 $r=0.767$

2009年武道窪（図－2）

$$Y = 33.6725x - 23.0352$$

Yは玄米タンパク含有率、xはNDVI、 $r=0.615$

この回帰式には牛ケ島の2箇所、山古志地区の2箇所が含まれている。これは、これらの回帰式を用いて、武道窪地区、牛ケ島、隣接する山古志地区のタンパク区分を推定するためである。追加のデータは、武道窪地区と比較して有意な差は認められない。

2009年山古志（図－3）

$$Y = 2.1415x + 5.4125$$

Yは玄米タンパク含有率、xはNDVI、 $r=0.67$

米粒タンパク含有率推定マップの作成

水田として抽出された箇所を対象に、上述の回帰式からピクセルごとのタンパク含有率を推定し、設定したタンパク区分階に入らなかった階級を除き、4段階で表示した。武道窪地区を中心としたタンパク含有率分布図を図－4（生産組合所有の水田は白い枠で囲む）に、山古志地区のタンパク分布図を図－5～図－7に示した。山古志地区のタンパク分布図は、試験用水田が多く分布している種学原地区を中心に示した。

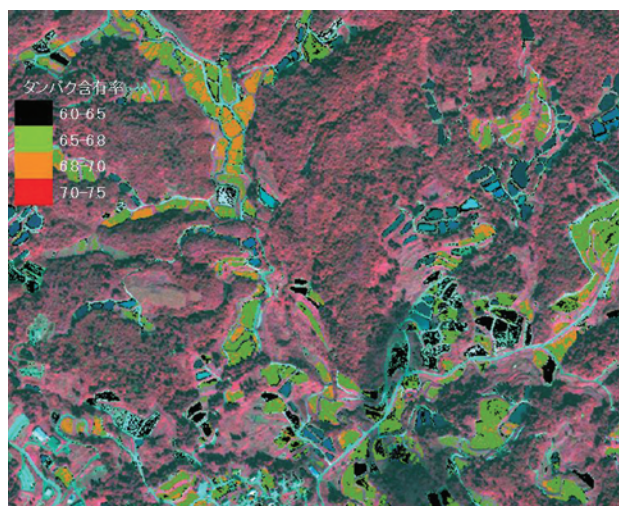
考 察

タンパク含有率とバンドとの関係

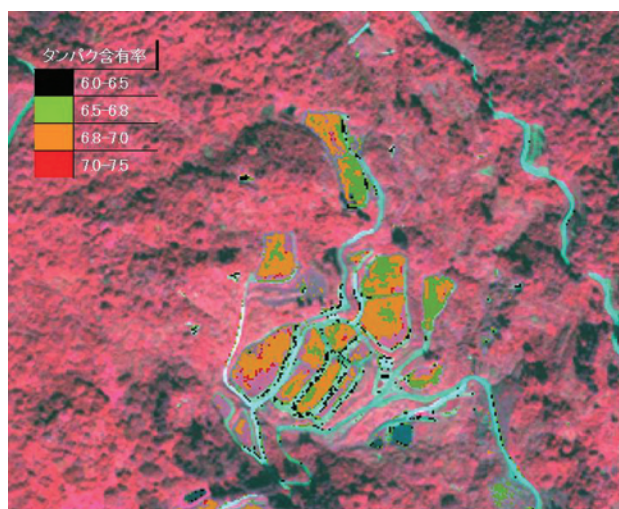
安積ら（2003）はSPOT/HRV、HRVIRデータを使って、タンパク含有率との相関を調べ、バンド3（赤）、NDVIとの間に有意な相関が得られたことを報告している。2008年度はバンド4（近赤外）、2009年度はNDVIとの相関が最も高い値を示し、安積らと同様の結果を示した。一方、2007年度はバンド2（グリーン）との負の相関が最も高かった（阿部ら2008）。安積ら（2003）の報告もバンド1のグリーン領域とは負の相関関係を示している。バンド2との相関は2008年度を除き、2009年度は武道窪（8月25日撮影）、山古志（9月24日撮影）の両地区とも表－1に示したように、 $-0.49 \sim -0.50$ と有意な相関を示している。一方、2008年度の撮影日は8月18日であり、撮影日により、米粒タンパク含有率と相関を示すバンドは変動する。試験用品種はすべてコシヒカリであることを考えると、成熟度により葉色が変わるためと考えられる。2009年度におけるグリーン域とタンパク含有率に負の相関が生じるのは、以下のように考えられる。窒素肥



図－４ タンパク含有率マップ（2009年度武道窪）



図－５ タンパク含有率マップ（2009年度山古志、種芋原地区）

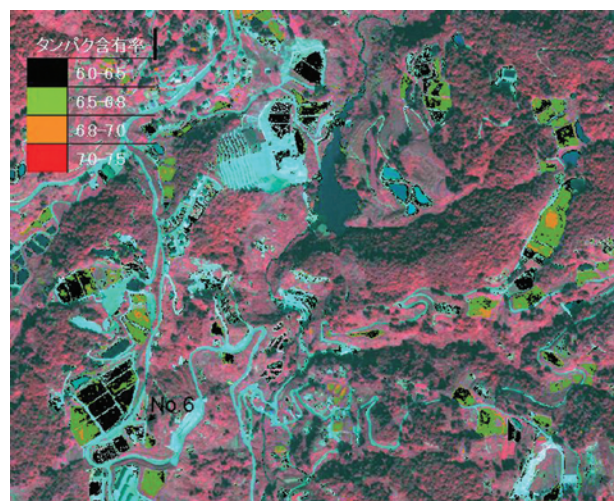


図－６ タンパク含有率マップ（2009年度山古志、種芋原地区）

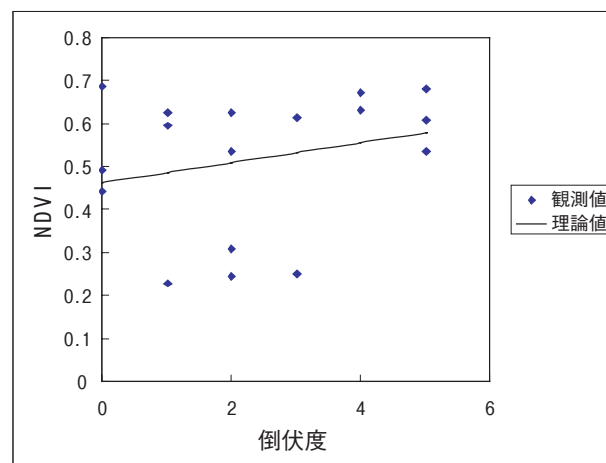
料が多いと、稲の色は、緑色が濃くなる。一方、窒素肥料が少なければ、緑色が薄くなり、黄色が増す。黄色になれば、輝度値が大きくなるので、タンパク含有率とは負の相関関係を示すことになる。表－３に示したように、９月２４日撮影でもバンド２（グリーン領域）は負の相関関係を示す。収穫直前であっても、葉色が薄い方がタンパク含有率も高い傾向を示している。NDVIとの間にはバンド２よりも強い相関関係が認められる。撮影日の影響を受けない要因として先ず、NDVIの動向を調べるのが効率的と考えられる。

撮影時期

安積ら（2003）は、米粒タンパク含有率の高い相関を得るためには、観察日から成熟日までの日数を20日以内にすべきことを提唱している。一方で2009年山古志地区の場合、稲刈り寸前の9月24日の衛星データであり、コシヒカリの課題として指摘されている倒伏が見られた。倒伏とNDVIとの関係を図－８に示した。両者の間には関連性は見られなかった。一方、9月24日撮影のNDVIとタンパク含有率との相関係数は表－２に示したように8月25日とあまり変わらない。



図－７ タンパク含有率マップ（2009年度山古志、大久保地区）



図－８ NDVIと倒伏度との関係（2009年度山古志地区）

8月18日の川口町武道窪の例では、NDVIとタンパク含有率の間には有意な相関係数が得られなかった（表－1）。これからコシヒカリの場合、タンパク含有率の推定には8月24日以降の撮影が望ましいと考えられる。

一方、SPAD計を用いて試験水田内に設置した10株の葉色を8月12日、8月31日、9月11日に測定し、10株の平均値SPAD値とタンパク含有率との相関関係を調べた結果、8月31日測定以降、タンパク含有率とSPAD値との間には1%水準で有意な関係が得られた。収穫時に近づいた9月11日の測定ではさらに相関係数が上昇した。SPAD計を用いて、収穫時におけるタンパク含有率推定の可能性が得られた。

輝度値の取得方法

GeoEye-1衛星の分解能は2m×2mである。いずれも画像で圃場ごとの水田を識別し、数十ピクセルを抽出し、そのピクセルごとに、各バンド値、バンド3,4を用いてNDVIを計算し、その平均値を用いて試験水田の輝度値とした。一方、水田のタンパク含有率測定用の稲は、武道窪地区は、4ないし5程度の株をランダムに採取、山古志地区は坪刈した稲からのタンパク含有率を用いた。坪刈した場所に対応した輝度値を抽出するのが理想だが、現実的には難しい。従って、一枚の水田から広く穂を取り、その平均値と水田一枚の平均輝度値とを対比させた方がより適切だと考えられる。

圃場の大きさ

武道窪、山古志、いずれもIKONOS衛星の4m×4m、GeoEye-1衛星の2m×2mで十分に水田を抽出できた。川口町武道窪地区の水田は、例えばALOS等の10m×10mの分解能でも識別可能である。しかし、山古志地区の棚田では、IKONOS衛星の4m×4m以上の解像度が必要である。棚田が多い中山間地域のタンパク含有率推定には、高分解能衛星が不可欠と言える。

タンパク含有率マップ

川口町武道窪地区におけるタンパク含有率分布図の図－4を見ると、タンパク分布の凡例に示したように、タンパク含有率は大部分が6.2～6.6（赤）、5.8～6.2（肌色）の範囲を示している。一方、ごく一部に5.4～5.8の緑色や5.0～5.4の黒色が見られる。タンパク含有率の低い水田が多く、また変動幅の小さいことが分かる。一枚の水田内もタンパク分布率が異なることが分かる。これは用いた衛星画像の解像度が高いためである。タンパク含有率を測定する際、衛星のピクセルに対応したタンパク含有率が測定できれば、より実用的な分布図が作成できると考えられる。一方、山古志地区のタンパク分布図を試験水田が多い種芋原地区を中心に図－5～7に示した。山古志地区と川口地区では、凡例に示したように、タンパク含有率の範囲が異なる。これは、各輝度値とタンパク含有率の関係を示す回帰式の違い、川口と山古志の撮影時期

の違い等により推定されるタンパク含有率が異なるためである。平均値的には緑色の6.5～6.8%が最も多い。一方、黒で示した6.0～6.5のタンパク含有率も広く見られる。種芋原地区の水田を拡大したケースを図－5に示した。タンパク含有率は比較的まとまっており、6.8～7.0を示している。一方、図－7に示したように、大久保地区では、黒色のタンパク含有率6.0～6.5が多く見られる地区も存在する。

タンパク含有率には窒素肥料量、肥料散布時期、土壌条件等、様々な要因が考えられる。武道窪地区の生産組合が所有する圃場は、肥料の量、時期、種類等も同じ条件である。しかし、タンパクマップからは、タンパク含有率に差が認められる。土壌条件の影響か、あるいは中越大震災で、2005年に稲の栽培ができなかった圃場による差なのか、検証する必要がある。そのためには、複数年の解析が不可欠である。

ま と め

武道窪地区30箇所・山古志地区17箇所を坪刈して得られた玄米の米粒タンパク含有率とGeoEye-1衛星の輝度値との関係を調査した。

武道窪地域2008年度は、タンパク含有率とバンド4、2009年度尾はNDVIとの回帰式を用いて水田のタンパク含有率を4段階表示できた。生産組合所有の水田のタンパク含有率もばらついていて、一方、山古志地区はNDVIとタンパク含有率の間に関係性が認められた。山古志地区は棚田の面積も小さいが、GeoEye-1衛星での判読は十分な効果を示した。

謝辞

本研究にご配慮頂き、調査の便宜をはかって頂いた川口町役場農林振興課阿部恒夫氏、山古志地区の調査にご協力を頂いた長岡地域振興局長岡農業普及指導センターの皆さん、稲の測定を行った匠陽子氏の協力を得た。お礼を言います。

引用文献

- 阿部信行・福山利範2008：高分解能衛星データを用いた水田のタンパク含有率の推定、新潟大学災害復興科学センター年報、No.2、115-118
- 朝日新聞2007：うまいコメ宇宙の目で、地域総合、大阪、6月17日
- 安積大治・志賀弘行2003：水稲成熟期のSPOT/HRVデータによる蛋白含有率の推定、日本リモートセンシング学会誌、23：451-457.
- 木村洋美・阿部信行・福山利範2007：衛星画像を用いた被災地水田のタンパク含有率の推定、新潟大学災害復興科学センター年報、No.1、143-147
- 静岡製機株式会社2006：食味分析計PS-500取扱説明書、66PP、
- 山下鏡一・藤本堯夫1974：肥料と米の品質に関する研究 4 窒素肥料による精米のタンパク質の変化と食味との関係、東北農業試験場研究報告、48、91-96.