

衛星画像データを用いた水稻の品質監視*

青山 隆司^{*1}, 大橋 佳司^{*2}, 金子 巧光^{*2}

Quality Monitoring of Paddy Rice Using Satellite Image Data

Takashi AOYAMA^{*1}, Keiji OOHASHI^{*2} and Takumi KANEKO^{*2}

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering

We have been researching to support production of rice with good taste by using satellite image data. Specifically, we aim to extract protein content of rice using satellite image data before harvesting. When comparing measured values such as growth condition and protein content of rice with satellite image data, it is necessary to consider the difference of phenology by varieties of rice. So, as a first step towards monitoring rice quality, a method for determining varieties of rice using Landsat-8 OLI data was proposed. Next, in order to estimate the protein content of rice using a vegetation index (NDVI) obtained from the satellite image, it was analyzed which satellite image (observed at which season) should be used. Furthermore, as a result of investigating the new vegetation index instead of NDVI, the estimation accuracy of rice protein content using the new index was greatly improved.

Key Words : Paddy Rice, NDVI, Protein Content, New Vegetation Index, Varieties of Rice

1. はじめに

現在,日本の農業は後継者不足による農業従事者の高齢化という問題を抱えている.その問題の解決策として,ロボット技術や情報通信技術を農業分野で活用する「スマート農業」の研究が行われており,農業の省力化や精密化が進められつつある.しかし,さらに重要なのは,農業(特に稲作)で十分生活ができるだけの収入が得られるようにし,若い農業従事者を増やすことである.そのためには高く売れる良食味米を生産し,ブランド化を図ることが不可欠である.そこで我々は福井県の圃場を研究対象に,人工衛星の画像データを利用して良食味米の生産を支援する研究を行っている.本報告では,Landsat-8 衛星の画像データを用いて行った水稻の生育予測に関する研究の初期成果について述べる.

2. 衛星画像を利用したコメの品種の同定

水稻の成長具合や米の成分分析値などの実測値を衛星データと比較検討する場合,品種によるフェノロジー(Phenology)の違いを考慮する必要がある.そこで研究の第一段階として,衛星データから求められる正規化植生指標(NDVI)を用いて水稻の品種を同定することを試みた.具体的には福井県で多く栽培されているコシヒカリとハナエチゼンを対象に,各圃場ごとに品種を決定する.品種の特徴として,(i)ハナエチゼンの出穂日と収穫日がコシヒカリに比べて,20日程度早い事,(ii)水稻のNDVI値は出穂期頃にピークを示す事,が明らかになっている.具体的には,ハナエチゼンの出穂期は7月中旬頃で,収穫期が8月下旬頃.コシヒカリの出穂期は8月初旬頃で,収穫期が9月中旬頃である.

* 原稿受付 2018年2月28日

^{*1} 工学部 電気電子工学科

^{*2} 工学部 電気電子情報工学科(4年)

E-mail: aoyama@fukui-ut.ac.jp

ここでは Landsat-8 の OLI センサー（空間解像度 30m）のデータを用いて観測地点①（武生-三ツ屋）と⑪（福井-砂子田）の2地点の各7枚（地点①は2015年、地点⑪は2016年の衛星データ使用）の衛星画像から得られた NDVI 値の季節変化を Fig. 1 に示す。衛星画像の枚数は必ずしも十分ではないが、NDVI 値のピークが明らかにずれていることが解る。つまり観測地点①の圃場（Fig. 1 上のパネル；出穂日7月15日）はハナエチゼンが、観測地点⑪の圃場（Fig. 1 下のパネル；出穂日8月3日）はコシヒカリが栽培されていることを衛星データのみから知ることが出来る。この結果を受けて、以下の解析を実施した。

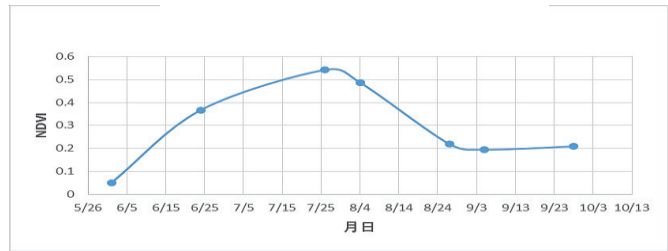
また、Fig. 2 に Landsat-8 の想像図⁽⁴⁾を示し、Table 1 に Landsat-8 の OLI センサーのバンド構成⁽⁴⁾を示す。正規化植生指標 NDVI は Band4 および Band5 を用いて、

$$NDVI = (Band5 - Band4) / (Band5 + Band4)$$

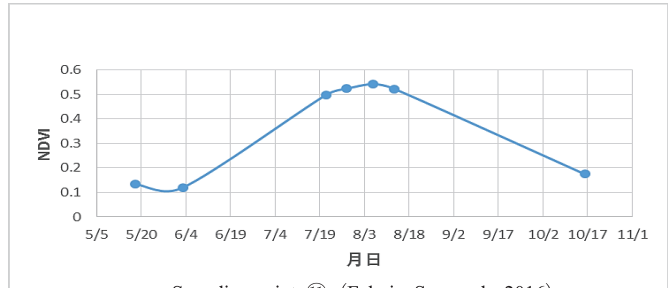
で表される。



Fig. 2 An image of Landsat-8⁽⁴⁾



Sampling point ① (Takefu - Mitsuya, 2015)



Sampling point ⑪ (Fukui - Sunagoda, 2016)

Fig.1 Seasonal variations of NDVI at sampling point ① (Upper panel) and ⑪ (Lower panel)

Table 1 Band specifications of Landsat-8, OLI

Band	Wave length	Spatial resolution
1(Blue)	0.43-0.45μm	30m
2(Blue)	0.45-0.51μm	30m
3(Green)	0.53-0.59μm	30m
4(Red)	0.64-0.67μm	30m
5(NIR)	0.85-0.88μm	30m
6(SWIR)	1.57-1.65μm	30m
7(SWIR)	2.11-2.29μm	30m
8(Panchro)	0.50-0.68μm	15m
9(NIR)	1.36-1.38μm	30m

3. NDVI と米のタンパク質含有率との相関

衛星画像から得られる出穂後の稲の植生指標（NDVI 等）と収穫後の玄米のタンパク質含有率との間の相関関係については多くの研究がある^{(1),(2),(3)}。これは米のタンパク質含有率が米の食味と強い負の相関関係があることを利用して、収穫前の圃場の衛星データから収穫後の米の食味を推定できる可能性があるからである。しかし、品種、気候、土壌状況等の地域性が大きく影響するため、地域ごとに、品種ごとに、使用する衛星データの時期や解析手法を検討する必要がある。

そこで福井県下の圃場から Table 2 に示すような 20 地点を選択し、品種（前章で示した手法により決定）ごとに使用する衛星データの最適な時期を決定するため、いろいろな時期の NDVI 値と玄米のタンパク質含有率との相関関係を調べた。なお、①から⑩がハナエチゼンの圃場、⑪から⑳がコシヒカリの圃場である。玄米のタンパク質含有率や出穂時期などについては、福井県が「ふくいアグリネット」⁽⁷⁾（Web 上の情

Table 2 Location of sampling point ①～⑳

地点	緯度	経度
①	35° 55'17.10"N	136° 12'7.84"E
②	35° 55'17.05"N	136° 12'12.69"E
③	36° 6'54.73"N	136° 11'24.31"E
④	36° 6'48.88"N	136° 11'32.57"E
⑤	36° 6'54.55"N	136° 11'37.69"E
⑥	36° 6'58.04"N	136° 11'38.04"E
⑦	35° 31'29.23"N	135° 54'21.78"E
⑧	35° 31'34.46"N	135° 54'0.66"E
⑨	35° 31'19.66"N	135° 54'15.94"E
⑩	35° 31'26.41"N	135° 54'29.15"E
⑪	36° 9'37.62"N	136° 8'59.24"E
⑫	36° 9'38.82"N	136° 8'57.17"E
⑬	36° 9'35.36"N	136° 8'56.86"E
⑭	36° 9'34.51"N	136° 9'5.22"E
⑮	36° 12'59.21"N	136° 12'38.46"E
⑯	36° 13'4.90"N	136° 12'36.16"E
⑰	36° 13'2.09"N	136° 12'37.26"E
⑱	36° 6'58.34"N	136° 18'4.11"E
⑲	36° 7'2.23"N	136° 17'52.19"E
⑳	36° 7'5.37"N	136° 17'42.67"E

報提供サイト) に公表している情報を利用した。

まず、ハナエチゼンについては、2013 年の出穂期 (7 月 14 日) から約 1 週間経過した 2013 年 7 月 20 日, 2015 年の出穂期 (7 月 15 日) から約 2 週間経過した 2015 年 7 月 26 日, 2016 年の出穂期 (7 月 14 日) から約 3 週間経過した 2016 年 8 月 6 日のデータを用いた。それぞれの衛星画像 (true color 画像) を Fig. 3^{(5),(6)}に示す。図中の赤丸は武生—三ツ屋(地点①, ②), 黄丸が福井—高屋(地点③~⑥), 白丸が若狭—相田(地点⑦~⑩)となっている。この中で, 2013 年 7 月 20 日の若狭—相田地区, 2013 年 7 月 20 日の武生—三ツ屋地区の地点②, 2016 年 8 月 6 日の地点②, ③は雲の影響のため除外した。また一例として, Fig. 3(b)の福井—高屋(黄色の丸内: 地点③~⑥)の拡大図を Fig. 4 に示す。図中赤丸が衛星データを取得した 4 地点の圃場を表している。

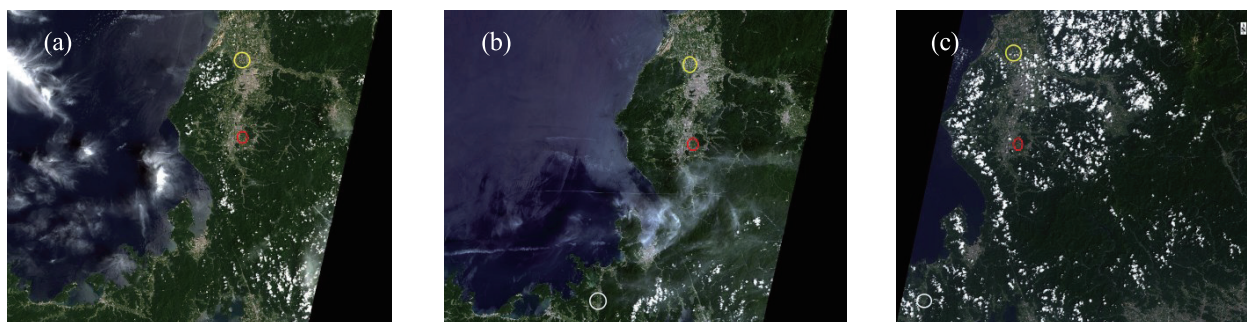
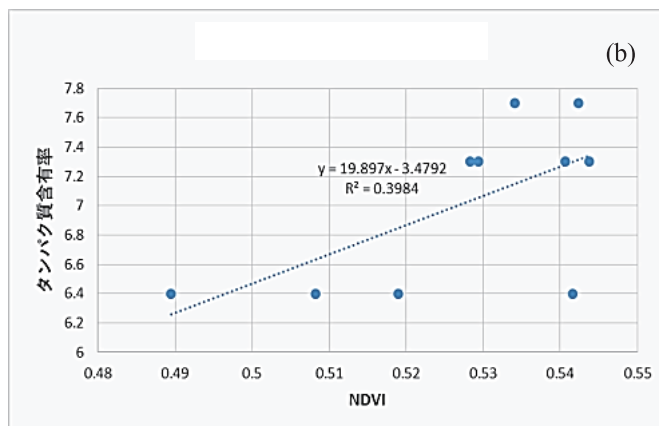
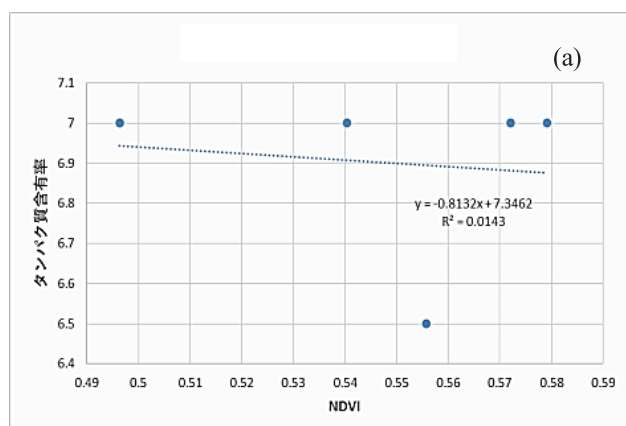


Fig. 3 True color images of Landsat-8, OLI: (a) 2013/7/20, 01:36UT, (b) 2015/7/26, 01:33UT, (c) 2016/8/6, 01:27UT, and study sites indicated by colored circles.

Fig. 3 に示した 3 時期, 3 地域の衛星データと, ふくいアグリネットから得られる各地域のタンパク質含有率との相関を求めた結果を Fig. 5 に示す。ハナエチゼンの観測地点 (圃場) は①から⑩まで 10 地点あるが, 雲の影響で 2013 年は 5 点, 2015 年は 10 点, 2016 年は 8 点のデータを用いて相関関係を調べた。その結果, 出穂期から約 1 週間経過した 2013 年 7 月 20 日の相関係数 R は $R=-0.1196$, 出穂期から約 2 週間経過した 2015 年 7 月 26 日の相関係数 R は $R=0.6312$, 出穂期から約 3 週間経過した 2016 年 8 月 6 日の相関係数 R は $R=0.5381$ であった。つまり, 出穂期から約 1 週間後は相関がみられないが, 出穂期から 2 週間程度経過したときの NDVI とタンパク質含有率との間に比較的高い相関があることが分かる。



Fig. 4 An enlarged image of Fukui-Takaya area (2015/7/26) and sampling points (③~⑥) of satellite data indicated by red circles



次にコシヒカリの栽培されている圃場に対しても同様な解析を行った。コシヒカリに対しては出穂後 2 週間程度の衛星画像が得られなかったため、出穂後 1 週間と 3 週間の 2 時期での解析結果を示す。Fig. 6(a)は 2016 年 8 月 13 日, Fig. 6(b)は 2015 年 8 月 27 日の衛星画像 (true color 画像) であり, 図中の赤丸は福井—砂子田(地点⑪~⑭), 黄丸が福井—高屋(地点⑮~⑰), 白丸が丸岡—下久米田(地点⑱~⑳)地域を示している。ここで, 2016 年 8 月 13 日の丸岡—下久米田地域及び 2015 年 8 月 27 日の地点⑪, 地点⑫は雲の影響で今回の解析対象から除外した。コシヒカリの観測地点 (圃場) は⑪から⑳までの 10 地点あるが, 2016 年は 7 点, 2015 年は 8 点のデータを用いて相関関係を調べた。

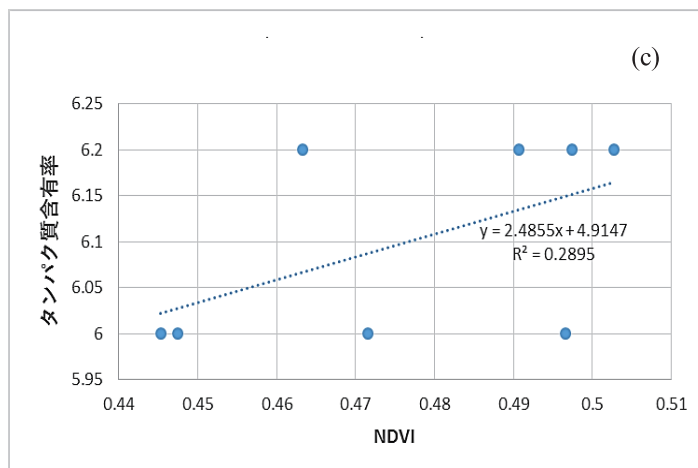


Fig. 5 Correlations between the protein content of rice after harvest, and NDVI values at about one week (a: 2013), two weeks (b: 2015) and three weeks (c: 2016) after the heading date of rice (Hanaechizen).

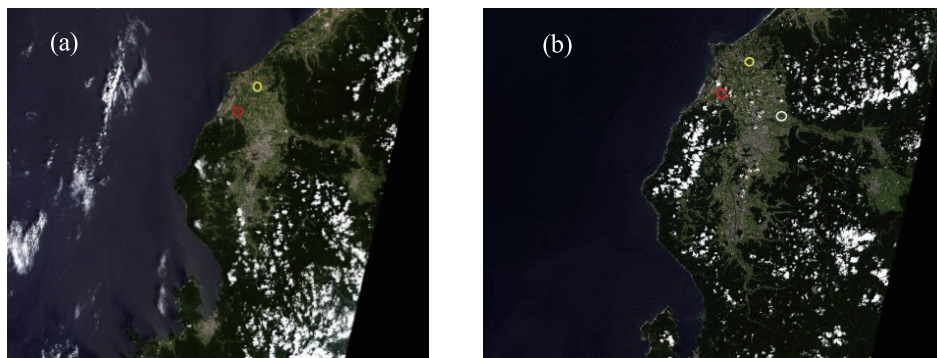


Fig. 6 True color images of Landsat-8, OLI: (a) 2016/8/13, 01:34UT, (b) 2015/8/27, 01:34UT, and study sites indicated by colored circles

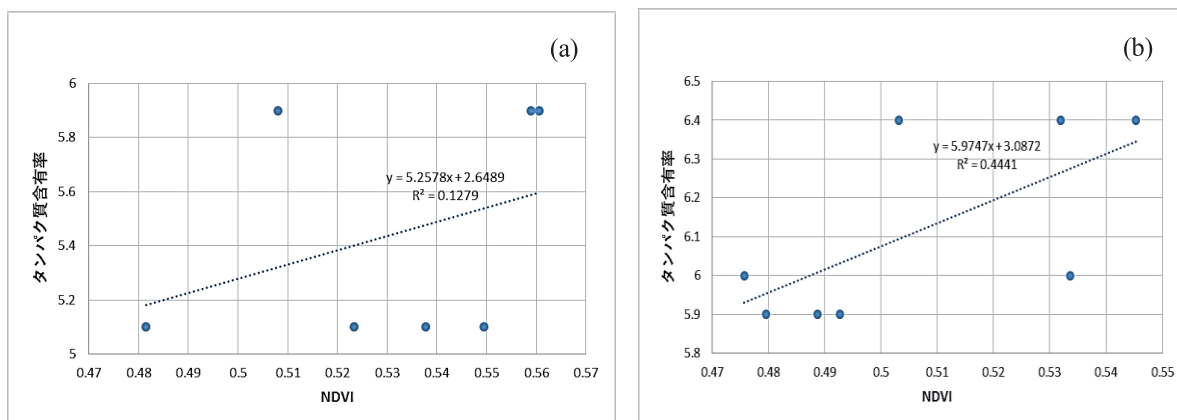


Fig. 7 Correlations between the protein content of rice after harvest, and NDVI values at about one week (a) and three weeks (b) after the heading date of rice (Koshihikari).

Fig. 7 に解析結果を示すが, 出穂期から約 1 週間経過した 2016 年 8 月 13 日の相関係数 R は $R=0.3576$, 出穂期から約 3 週間経過した 2015 年 8 月 27 日の相関係数 R は $R=0.6664$ であった。つまり, 出穂期から約 1 週間後は

相関がほとんど見られないが、出穂期から3週間程度経過したときのNDVIとタンパク質含有率との間にかなり高い相関があることが分かる。

研究結果としては、ハナエチゼン、コシヒカリともに出穂後2～3週間後のNDVI値と収穫後の玄米タンパク質含有率が高い相関を示すことが明らかになり、その時期の衛星画像が入手できれば、収穫後の食味が推定でき、刈り取り前の肥料や水の管理に役立つ情報を農作業者に提供できることが明らかになった。

4. NDVIに替わる新たな植生指標の検討

衛星データから植生の活性度や密集度を推定する指標としてNDVIが多く使われてきた。しかし、対象植物の種類や生育環境（地域性）、人工衛星の観測バンド（波長帯）によってはNDVI以外の指標を用いた方が、玄米のタンパク質含有率の推定確度が高くなる可能性も考えられる。そこで、考えられる全てのアルゴリズム（指標の計算式）に対してLandsat-8のOLIの観測バンドを当てはめ、最も相関が高いアルゴリズムを探した。

ここでは3章でNDVIとの相関が高かった、2015年7月26日（ハナエチゼン）と2015年8月27日（コシヒカリ）の衛星データを用いて、NDVIに代わる指標について検討した。使用したバンド間演算式は以下のA～Fまでの6種類である。

- A. $(R_{bandi})/(R_{bandj})$
- B. $(R_{bandi}-R_{bandj})/(R_{bandi}+R_{bandj})$
- C. $(R_{bandi})/(R_{bandj}+R_{bandk})$
- D. $(R_{bandi}+R_{bandj})/(R_{bandk})$
- E. $(R_{bandi})/(R_{bandj}-R_{bandk})$
- F. $(R_{bandi}-R_{bandj})/(R_{bandk})$

ここで、 R_{bandi} は $bandi$ の反射率を表している。使用したバンドは $band2$ から $band5$ の4バンド（Table 1 参照）で、それぞれ青、緑、赤、近赤外帯の画像データである。この4バンドの反射率をAからFまでの式中の R_{bandi} 、 R_{bandj} 、 R_{bandk} にそれぞれ対応させる。これらの計算式をハナエチゼン、コシヒカリの品種別に、実測値との相関係数を求める。ただし、ハナエチゼンに対しては地点①から⑩までの10地点のデータを、コシヒカリに対しては地点⑬から⑳までの8地点のデータを使用した。解析結果のうち刈り取り後のタンパク質含有率と相関が高い上位3つの計算式とその相関係数及びNDVIとの相関係数をTable 3に示す。さらに、最も相関が高かった計算式を用いた場合の相関関係をFig. 8に示す。

Table 3. Three formulas showing high correlation coefficient for Hanaechizen and Koshihikari

Hanaechizen		Koshihikari	
Formula	Correlation coefficient	Formula	Correlation coefficient
D: $(R_{bandi}+R_{bandj})/(R_{bandk})$ i=blue, j=nir, k=green	0.6634	D: $(R_{bandi}+R_{bandj})/(R_{bandk})$ i=green, j=nir, k=blue	0.8094
D: $(R_{bandi}+R_{bandj})/(R_{bandk})$ i=blue, j=nir, k=red	0.6573	D: $(R_{bandi}+R_{bandj})/(R_{bandk})$ i=red, j=nir, k=blue	0.8029
F: $(R_{bandi}-R_{bandj})/(R_{bandk})$ i=nir, j=red, k=green	0.6378	A: $(R_{bandi})/(R_{bandj})$ i=nir, j=blue	0.7717
NDVI	0.6312	NDVI	0.6664

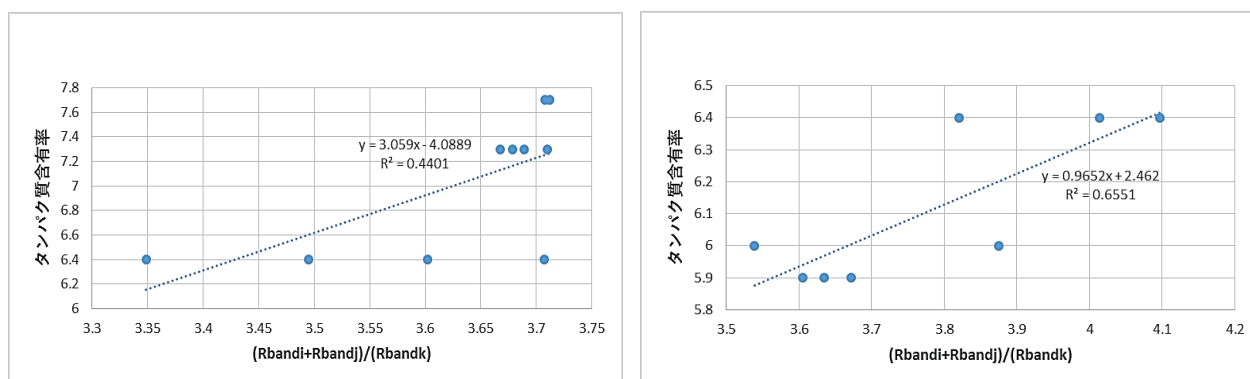


Fig. 8 Correlation between the value of the formula showing the maximum correlation coefficient and the protein content of rice, for Hanaechizen shown in the left hand side panel (i=blue, j=nir, k=green) and for Koshihikari shown in the right hand side panel (i=green, j=nir, k=blue).

Table 3 に示した結果から分かるように、ハナエチゼンに対してはそれほど大きな変化 ($R=0.6312$ (NDVI) から $R=0.6634$ (NDVI 以外の最大値) へ) は見られなかったが、コシヒカリに対しては、 $(R_{green} + R_{nir}) / (R_{blue})$ の計算式を用いる事によって相関係数が大幅に ($R=0.6664$ (NDVI) から $R=0.8094$ へ) 増加することが明らかになった。ここで、 R_{green} 、 R_{nir} および R_{blue} はそれぞれ緑、近赤外、青バンドの反射率を示している。この結果は、コシヒカリの食味(タンパク質含有率)を衛星データから得られる植生指標を用いて推定する場合は、NDVI ではなく新しい指標である $(R_{green} + R_{nir}) / (R_{blue})$ を使用すべきであることを示唆している。

5. おわりに

我々は福井県の圃場を研究対象に、人工衛星の画像データを利用して良食味米の生産を支援する研究を行っている。その研究の一環として、ここでは無料で入手できる Landsat-8 の OLI センサーのデータを使用し、出穂後の圃場の植生指標と収穫後の米のタンパク質含有率の関係を調べることで、食味を左右するタンパク質含有率を収穫前に予測する手法の開発を目指した。

現時点では、圃場ごとの米の品種は公開されていない。そこで衛星データから各圃場の米の品種(福井県ではハナエチゼンとコシヒカリが主流)を決定する方法を提案した。それぞれの品種のフェノロジーの違いを、衛星データから計算できる植生指標を用いて抽出することで品種の同定が可能であることを示した。

次に衛星画像から得られる植生指標(NDVI)から米のタンパク質含有率(食味)を推定する際に、どの時期の衛星画像を使うべきかを解析した。その結果、ハナエチゼン、コシヒカリともに出穂後2~3週間後のNDVI値と収穫後の米のタンパク質含有率が高い相関を示すことが明らかになり、その時期の衛星画像が入手できれば、収穫後の食味が推定できるため、刈り取り前の肥料や水管理に役立つ情報が得られることを明らかにした。しかし、さらに高い相関係数を与えるNDVI以外の植生指標が見いだせれば、より確度の高いタンパク質含有率(食味)の推定が可能となる。そこで、新たな植生指標(計算式)を検討した結果、コシヒカリに対して相関係数を大きく改善する植生指標を見出した。

Landsat-8 の画像データを用いた今回の解析では解像度の問題と雲によるデータの不足という点を考慮する必要がある。Landsat-8 の OLI センサーは解像度 30m であり、小規模な福井県の圃場を観測するためには必ずしも十分な解像度ではない。可能ならば 10m 程度以下の解像度を持つ衛星データを使用することが望ましい。今後は欧州宇宙機関(ESA)の運用する Sentinel-2 (解像度 10m) や、数m程度の解像度を持つ他の衛星データの利用を考えていく。また、今後次々と打ち上げられる予定の福井県民衛星、福井工大衛星(FUTSAT)の衛星データにも期待している。雲によるデータの不足に対しては使用する衛星数を増やすしかないが、衛星毎に異なる解像度や観測波長域の違いによる解析結果への影響について考慮する必要がある。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 (JP25560176), 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (プロジェクト番号 : S1101025) および平成 28 年度文部科学省採択 私立大学研究ブランディング事業 (ふくい PHOENIX プロジェクト) の援助を受けて実施された. ここにそれらの援助に対し感謝する.

文 献

- (1) 境谷栄治, 井上吉雄, “リモートセンシングによる玄米タンパク含有率の推定制度に影響する誤差要因”, 日本作物学会記事, 81 (3) , (2012), pp.317-331.
- (2) 井上吉雄, ”高解像度光学センサによる植物・土壌情報計測とスマート農業への応用”, 日本リモートセンシング学会誌, 37(3) , (2017), pp.213-223.
- (3) 境谷栄治, ”青森県内における高品質米生産へのリモートセンシング技術の利用”, 計測と制御, 55(9), (2016), pp.801-805.
- (4) 一般財団法人リモート・センシング技術センター, <https://www.restec.or.jp/>, (参照日 2018 年 2 月 28 日).
- (5) LandsatLook, <https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>, (参照日 2018 年 2 月 28 日).
- (6) LandBrowser, <https://landbrowser.airc.aist.go.jp/landbrowser/index.html>, (参照日 2018 年 2 月 28 日).
- (7) ふくいアグリネット, <http://www.agri-net.pref.fukui.jp/>, (参照日 2018 年 2 月 28 日).

(平成 30 年 3 月 31 日受理)