

# 合成開口レーダーによる水稻の生育状況の分析\*

西川 隼人\*<sup>1</sup>

## Analysis of paddy rice growth by synthetic aperture radar

Hayato NISHIKAWA\*<sup>1</sup>

\*<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

In recent years, satellite images have been used in various fields such as disaster prevention, agriculture, and monitoring of infrastructure facilities. In this study, I investigated the correlation between the backscattering coefficient obtained from satellite image data and the growth situation of paddy rice by taking advantage of the characteristics of the synthetic aperture radar. Multiple varieties of rice such as Hanaechizen cultivated in Fukui Prefecture were targeted in the survey.

**Key Words** : Synthetic aperture radar, SENTINEL-1, Paddy rice, Backscattering coefficient

### 1. 緒 言

近年、人工衛星画像が防災、農業、インフラ施設のモニタリングなど、様々な分野で利用されている。人工衛星による画像データは大きく分けて、光学センサと合成開口レーダーによるものがあり、前者は解析が容易であるが、天候の影響を受けやすく、また、夜間は観測できない。一方、後者は光学センサに比べると画像処理が高度かつ煩雑であるが、天候の影響を受けにくく、夜間でも観測可能である。このような特性から、合成開口レーダーは光学センサに比べて、継続的に衛星画像を入手しやすく、ある期間での連続的な画像解析が必要な農業分野などの利用に適していると考えられる。

本研究では上記の合成開口レーダーの特性に基づいて、2019年5月～2019年9月に撮影された衛星画像のデータの分析結果から算出した後方散乱係数と水稻の生育状況の対応を調査し、両者の相関関係を検証した。検討では福井市と坂井市の水田で栽培されたハナエチゼン、コシヒカリ、あきさかりなど、複数の品種の水稻を対象とした。

### 2. 合成開口レーダー

合成開口レーダー (Synthetic aperture radar) は SAR とも呼ばれており、Fig. 1 のように SAR を搭載する人工衛星が移動しながら、電波を送受信することにより、解像度の高い衛星画像を取得することができる。SAR から照射されるマイクロ波は天候の影響を受けにくく、昼夜問わず観測できるという特徴がある。また、対象物によってレーダーから照射されたマイクロ波を反射する程度を表す後方散乱の強度 (Fig. 2) が異なるため、後方散乱強度を観測することで地表の被覆状況を調べることができる。例えば、構造物は人工衛星からのマイクロ波をよく反射するが、水域ではあまり反射しない。

衛星によって SAR から照射されるマイクロ波の波長が異なっており、主に X バンド、C バンド、L バンドが用いられている (Table 1)。波長によって対象物による散乱、反射の程度が異なることから、利用目的に応じて、適した SAR 衛星を選択する必要がある。

\* 原稿受付 2020年5月29日

\*<sup>1</sup> 工学部 建築土木工学科

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

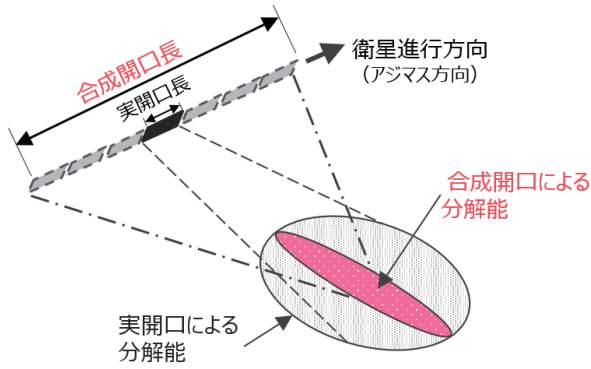


Fig. 1 Schematic of synthetic aperture radar<sup>(1)</sup>

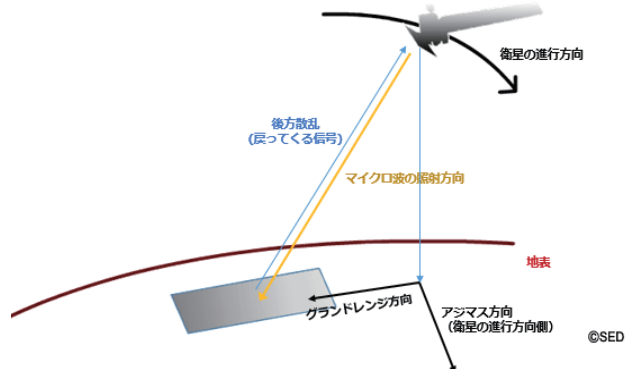


Fig. 2 Image of backscatter<sup>(2)</sup>

Table 1 Main microwave wavelengths used in SAR<sup>(3)</sup>

周波数	X帯:8.0-12GHz	C帯:4.0-8.0GHz	L帯:1.0-2.0GHz
対応波長	25-37.5mm	37.5-75mm	150-300mm
対応衛星/センサ	TerraSAR-X(独) Tandem-X(独) COSMO-SkyMed(伊)	ENVISAT/ATSR(欧) RADARSAT-1,2(加) KOMPSAT-5/COSI(韓) RAISAT-1(印) Sentinel 1A(欧)	ALOS/PALSAR(日) ALOS2/PALSAR2(日)

### 3. SENTINEL-1

SAR 衛星には、ドイツの TerraSAR-X<sup>(4)</sup>、欧州宇宙機関 (European Space Agency, ESA) の SENTINEL-1<sup>(5)</sup>、日本の ALOS-2<sup>(6)</sup>、ASNARO-2<sup>(7)</sup> などがある。本研究では SAR の衛星画像を無償で利用できる SENTINEL-1 の画像データを解析に用いた。

Fig.3 は宇宙空間での SENTINEL-1 のイメージ図、Fig.4 は SENTINEL-1 の観測のイメージ図である。Table 2 に SENTINEL-1 の概要を示す。SENTINEL-1A は 2014 年、SENTINEL-1B は 2016 年に打ち上げられ、現在、運用中である。回帰日数は 12 日である。搭載機器は C バンドの SAR であり、観測モードは Table 3 の 4 つである。IWS (Interferometric Wide Swath) と EWS (Extra Wide Swath) のモードでは観測幅が数 100km であり、一度に広範囲の画像を取得できることから、大規模災害時の広域的な被害状況の把握などへの利用が期待される。空間分解能が最も高いのは Stripmap モードであり、解像度 5m×5m である。



Fig. 3 Image of SENTINEL-1 in outer space<sup>(8)</sup>

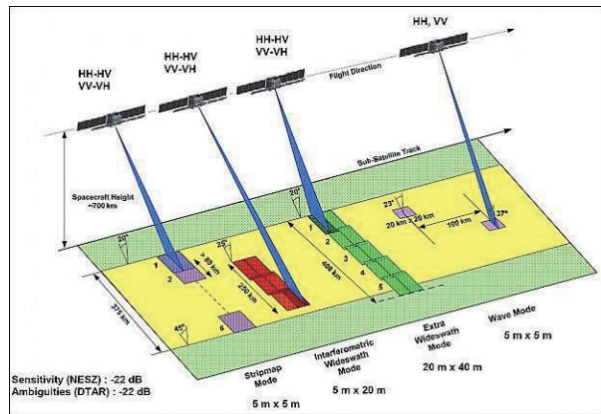


Fig. 4 Observation image of SENTINEL-1<sup>(8)</sup>

Table 2 Onboard equipment<sup>(9)</sup>

別名1	Copernicus: Sentinel-1 — The SAR Imaging Constellation for Land and Ocean Services
打ち上げ (状態)	2014-04-03 (1A) 、 2016-04-25 (1B)
運用状態	運用中
運用機関	ESA/EC
観測項目・目的	地表形状、陸域画像取得、海面画像取得、海上風 (水平方向の風向と風速)、海面の流速、波高、海水の分布・タイプ
軌道	太陽同期準回帰ドーナツ軌道
高度	693 km
周期	98.74分
軌道傾斜角	98.19度
赤道通過地方太陽時	18:00 (赤道を南から北へ通過)
回帰	12日

Table 3 Observation mode<sup>(9)</sup>

モード	観測幅	解像度	偏波
Stripmap	80 km	5 m × 5 m	HH-HV, VV-VH
IWS (Interferometric Wide Swath)	250 km	5 m × 20 m	
EWS (Extra Wide Swath)	400 km	25 m × 100 m	HH or VV
Wave	20 km × 20 km	5 m × 20 m	

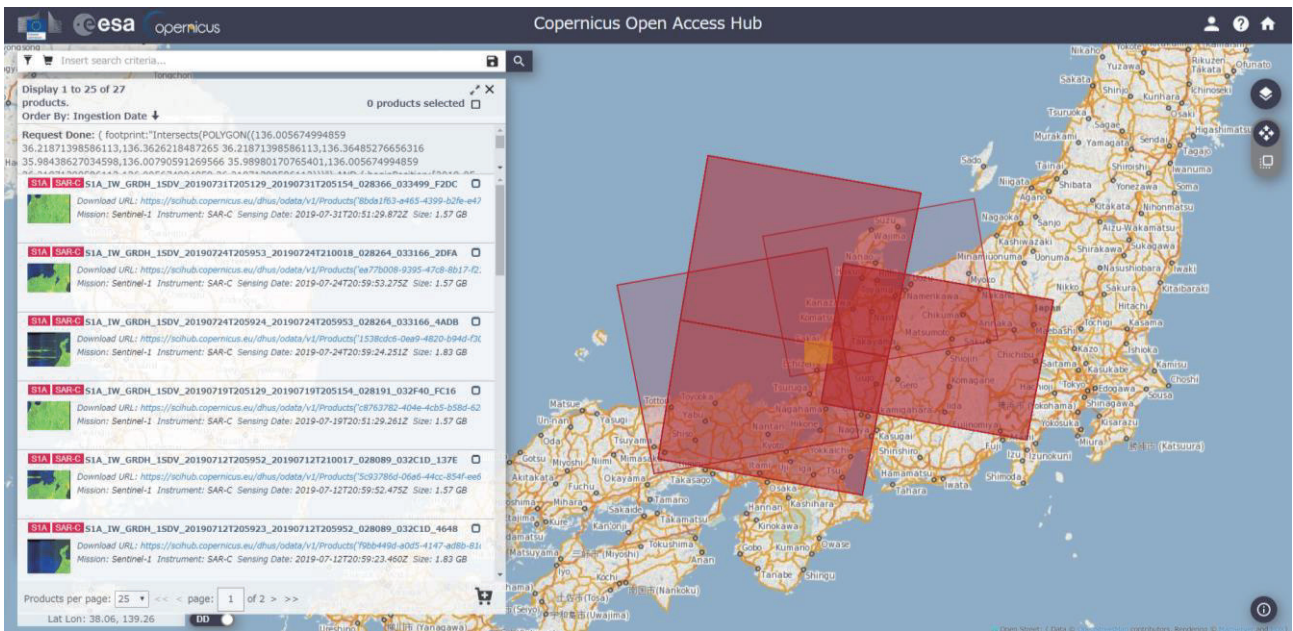


Fig.5 European Space Agency satellite image public site<sup>(13)</sup>

## 4. SAR 画像の解析

### 4.1 画像のダウンロード

Fig.5 に示す欧州宇宙機関の衛星画像の検索ページで SENTINEL-1 による画像を検索、ダウンロードした。地図上で対象地域、Fig.5 の場合は福井市とその周辺を検索対象とし、検索する期間や衛星の種類、観測モード、画像のタイプをプルダウンから選択し、対象となる画像を検索した。検索期間は 2019 年 5 月～2019 年 9 月とし、衛星の種類は SENTINEL-1A, B である。観測幅と解像度のバランスを考慮して、観測モードを IWS (Interferometric Wide Swath) とした。観測幅が 250km、解像度が 5m×20m である。画像のタイプは GRD (Ground Range Detected) であり、SAR による取得データを、地球を表すモデル表面に投影したデータである。偏波画像は公開されている VV 偏波 (送信, 受信ともに垂直) と VH 偏波 (送信は垂直, 受信は水平) である。

### 4.2 画像の解析

ダウンロードした SAR 画像を用い、ESA が公開している解析ソフト SNAP を用いて解析を行った。Fig.6 が SNAP の画面である。図から明らかなように、画像が反転した状態で映っている。これは解析ソフトの特性によるものであり、衛星の軌道とマイクロ波の照射方向によっては、画像が反転した状態で表示される。衛星画像を用い、以下の手順で後方散乱係数の情報を含む画像を求めた。解析では文献 (10)、(11) を参考にした。

- 1) 衛星画像から解析対象とする領域を切り取る.
- 2) 衛星で観測された画像データを地上における後方散乱係数へ変換するキャリブレーションを行う.
- 3) キャリブレーションした画像に対して、スペックル（画像中の高周波ノイズ）の除去、軽減のために LEE フィルター（フィルターサイズ 7×7）<sup>(14)</sup>による処理を行った.
- 4) 地形補正を行う.
- 5) 単位をデシベル（dB）に変換する.
- 6) 画像を geotiff 形式で出力.

### 4.3 GIS ソフトによる対象地点の後方散乱係数の出力

前節の解析で得られた geotiff 形式の画像には 10m メッシュで緯度、経度、後方散乱係数の値が含まれている。フリーの GIS ソフトである QGIS<sup>(12)</sup>を用いることにより、選択した画像の任意地点の後方散乱係数などのデータを出力した。Fig.7 は QGIS で SNAP を用いて解析した結果を geotiff 形式のファイルで表示した図である。画像の中央よりも左側にある緑色の円が今回、対象とした水田の位置に対応しており、後方散乱係数などのデータの出力対象地点である。

## 5. 後方散乱係数と水稻の発育状況の対応

### 5.1 稲の生育状況と後方散乱の対応について

4 章で求めた対象地点の後方散乱係数と水稻の生育状況の対応を見るにあたり、まず、両者に相関が見られる原理を説明する。Fig.8 の稲の生育状況の図に示すように、田植えの初期の状態では稲が小さく、茎が広がっていないため、SAR からのマイクロ波の多くは水田で大部分を占める水面に照射され、後方散乱が小さくなる。しかし、稲が育つに従い、広がりをもつため、マイクロ波が稲にも照射されるようになり、後方散乱が強くなる。従って、稲の成長に従い後方散乱が強くなると考えられる。

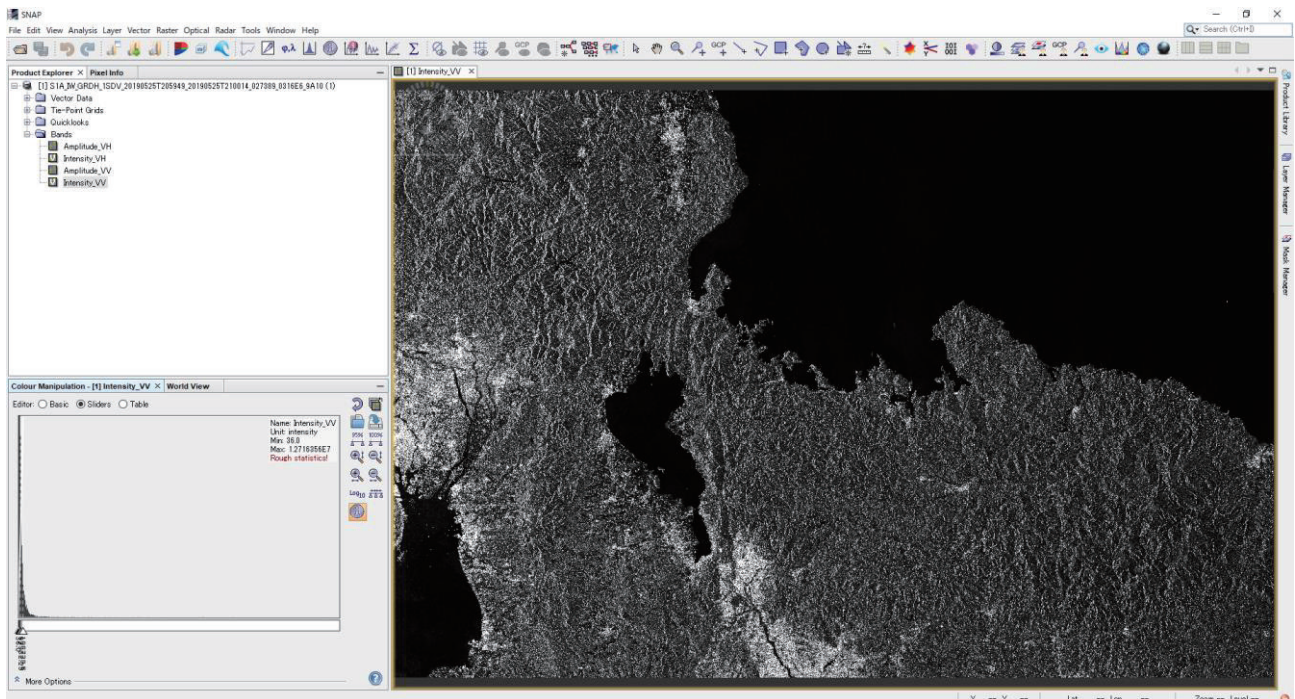


Fig.6 SNAP operation screen

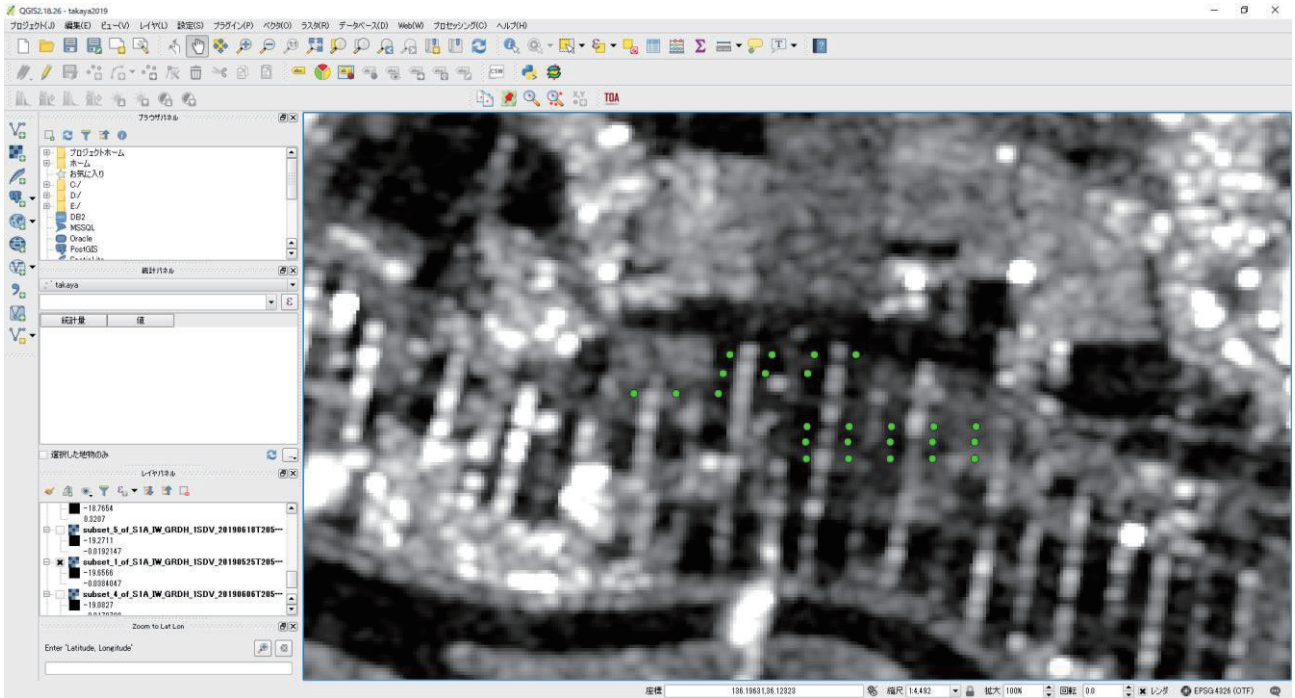


Fig.7 QGIS operation screen (Satellite image of May 25, 2019)

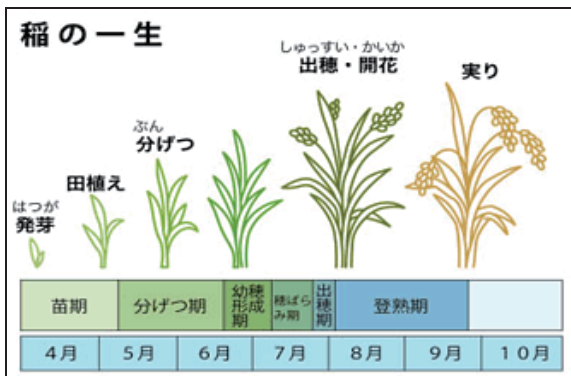


Fig.8 Image of rice growth <sup>(15)</sup>

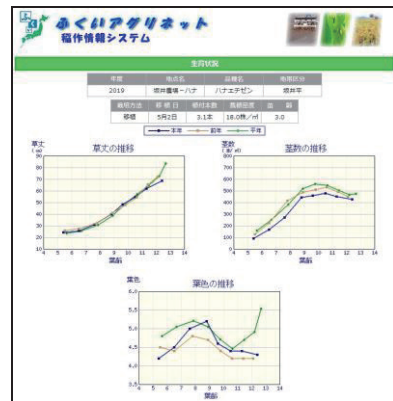


Fig.9 Fukui Agrinet's rice crop information system <sup>(16)</sup>

## 5.2 稲の草丈、茎数と後方散乱係数の対応

本研究ではふくいアグリネット (Fig.9) <sup>(16)</sup>で公開されている 2019 年 5 月～7 月の稲の生育状況と後方散乱係数の対応を調べた。ふくいアグリネットでは福井県内の複数の地点の稲の生育状況が公開されているが、今回は坂井農場のハナエチゼン、コシヒカリ、あきさかり、および、福井市高屋地区のハナエチゼンを対象に検討を行った。QGIS を用いて、坂井農場と福井市高屋地区の水田 25 地点の後方散乱係数を出力し、稲の草丈 (cm)、単位面積あたりの茎数 (本/m<sup>2</sup>) との対応を調べた。

まず、対象とした福井市高屋地区の 25 地点とその周辺の後方散乱係数 (VV 偏波) の画像の変化を見る (Fig.10)。対象地点は画像中央の緑色の円で示している。画像の黒い部分の多くは水田、白い部分は建物や道路などであり、白いほど後方散乱係数が大きい。図の時間変化を見ると対象地点付近の水田に対応する黒い部分 (Fig.10 の赤い枠線) が日数の経過に伴い、白くなっており、稲の発育に伴い、後方散乱係数が大きくなっていることがうかがえる。

Fig.11 は衛星画像の撮影日ごとの後方散乱係数である。同図を見ると、坂井農場、福井市高屋地区ともに日数が経過するほど、後方散乱係数も大きくなる傾向が見られる。また、両地点とも VV の係数が VH よりも大きいことが分かる。これは VV の後方散乱に作物の構造の影響が反映されること<sup>(17)</sup>に起因すると考えられる。

続いて、後方散乱係数と水稻の生育状況の対応を調べた。ふくいアグリネットのホームページでは5月23日から7月11日まで1週間ごとの稲の生育状況の値が掲載されているが、掲載されている水稻の調査日と衛星画像の撮影日が一致しないことが多いため、5月23日を起点とした日数（起点日数）から後方散乱係数を予測する式を求めた。予測式を求めるにあたり、起点日数と後方散乱係数の関係をまとめた（Fig.12）。まとめたデータを用い、隣接する撮影日には起点日数と後方散乱係数が直線的に変化すると仮定して、隣接する撮影日ごとに起点日数を独立変数とする後方散乱係数の予測式を求めた。以下に予測式を示す。

$$y = ax + b \tag{1}$$

$y$  は後方散乱係数、 $x$  は起点日数、 $a$ 、 $b$  は回帰係数である。Fig.13 に起点日数2日（5月25日）、14日（6月6日）とそれぞれに対応する後方散乱係数、および、予測式による直線と起点日数7日（5月30日）に対する予測値を示す。後方散乱係数の予測値はVVでは-13.71dB、VHでは-20.78dBとなった。

次に式（1）の予測式に水稻調査日に該当する起点日数を代入することにより、水稻調査日に対する後方散乱係数の予測値を求め、水稻の生育状況との関係を調べた。Fig.14、Fig.15 に後方散乱係数の予測値と稲の草丈、茎数の対応を示す。ハナエチゼン、コシヒカリ、あきさかり、それぞれの水田内の栽培箇所が分からなかったため、水田内25地点の後方散乱係数の算術平均値を求めて、各品種の生育状況との対応を調べた。同図を見ると、後方散乱係数が大きくなるほど、稲の草丈、茎数が大きくなっている。ただし、坂井農場と福井市高屋地区のハナエチゼンの茎数は、ある値の後方散乱係数から頭打ちする傾向が見られた。後方散乱係数と水稻の生育状況の相関関係を定量的に評価するために、後方散乱係数を式（1）の $x$ 、稲の草丈または茎数を $y$ とする予測式を求め、その際に得られる相関係数から相関関係を考察した。Table 4 に予測式を求めた際に得られた相関係数を示す。Table 4を見ると、相関係数が0.7を下回ったケースもあるが、8割以上で相関係数が0.86~0.98という高い値となり、後方散乱係数と水稻の生育状況に相関が見られることが明らかになった。

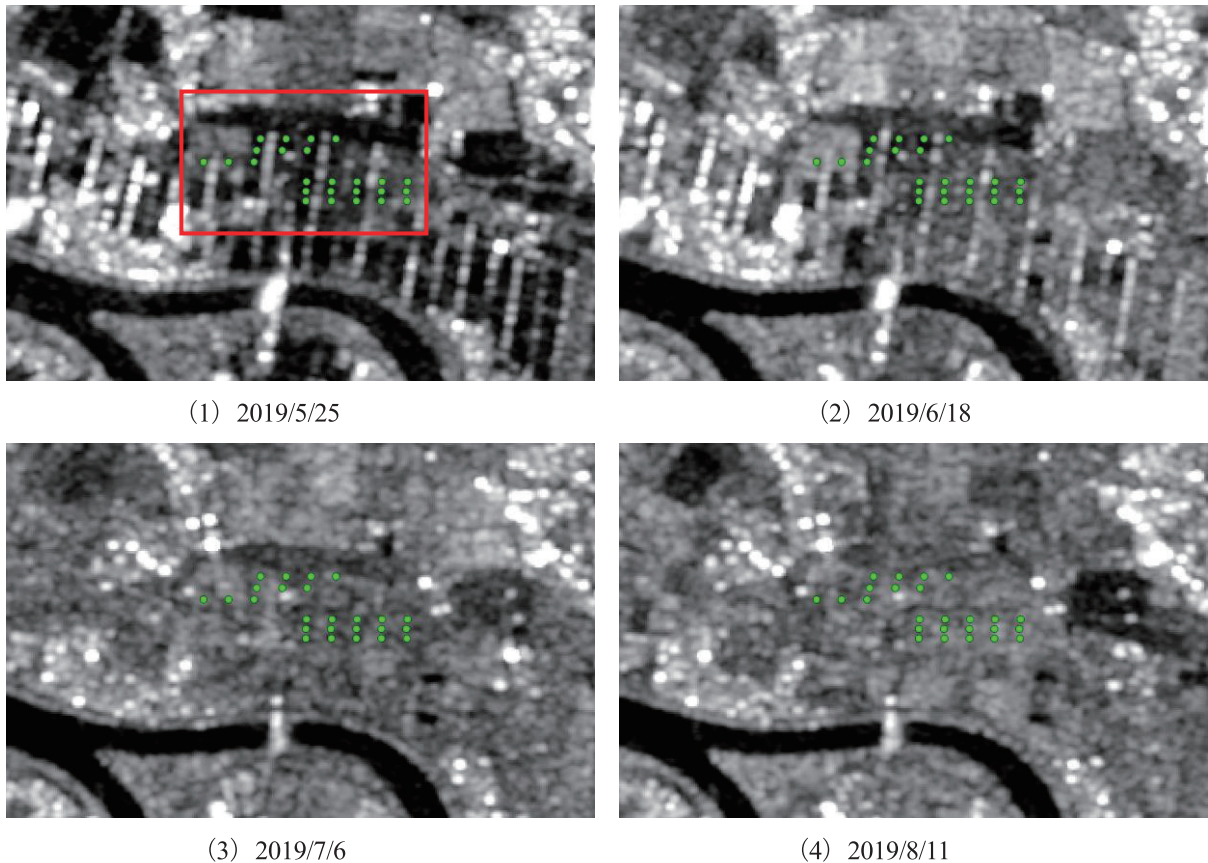
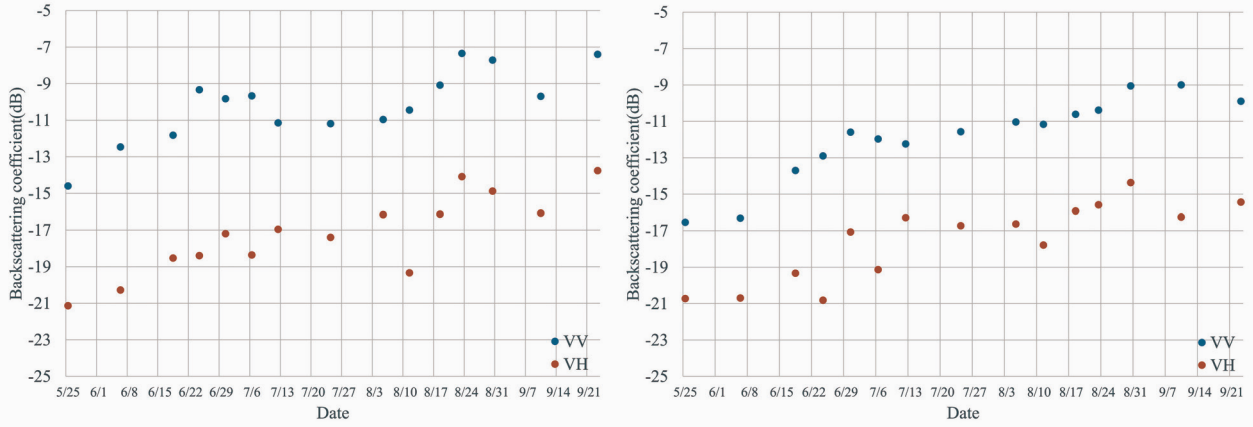


Fig.10 Change in backscattering coefficient image (VV polarization)

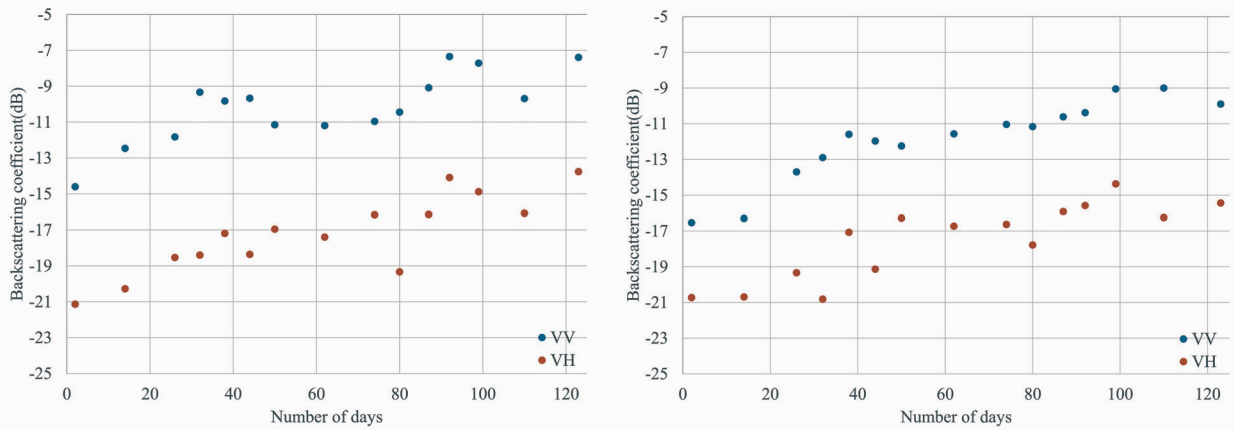
合成開口レーダーによる水稲の生育状況の分析



(1) Sakai farm

(2) Takaya area, Fukui city

Fig.11 Backscattering coefficient for each day



(1) Sakai farm

(2) Takaya area, Fukui city

Fig.12 Backscattering coefficient for each number of days

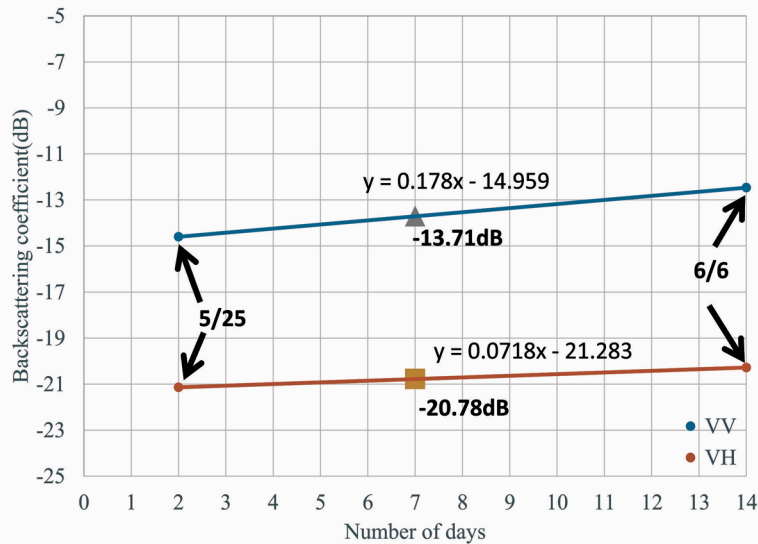
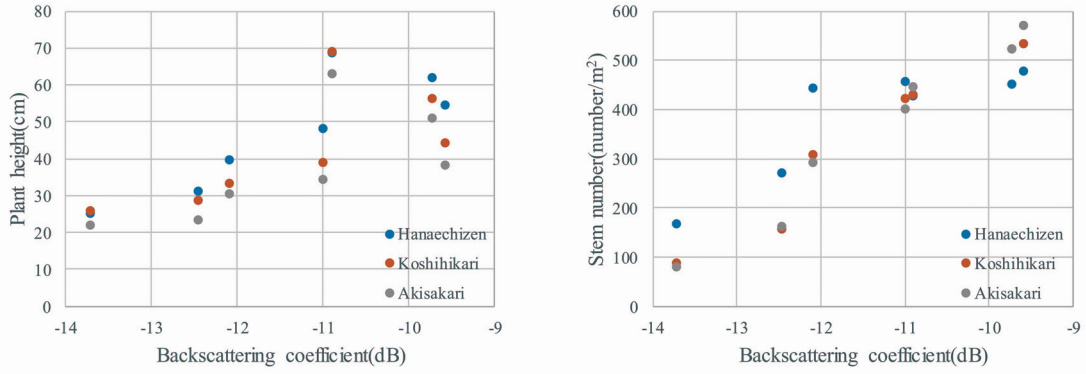
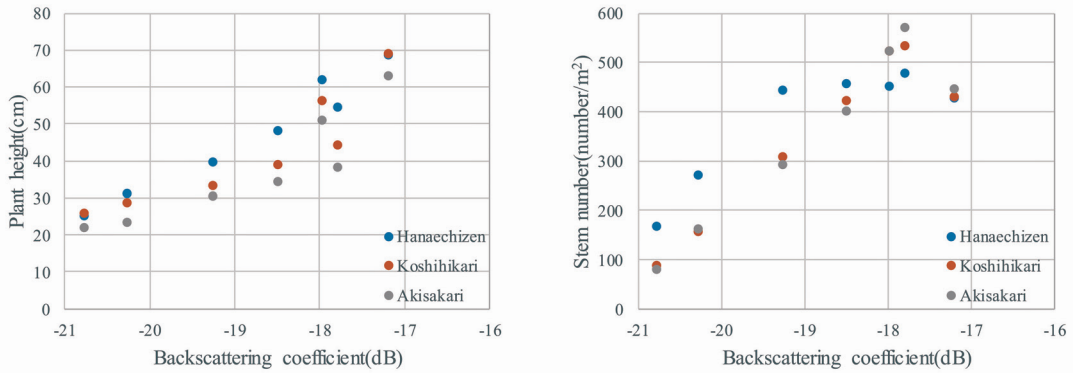


Fig.13 Backscattering coefficients corresponding to 2 days and 14 days, and predicted values of straight line and backscattering coefficient by the prediction formula

合成開口レーダーによる水稲の生育状況の分析

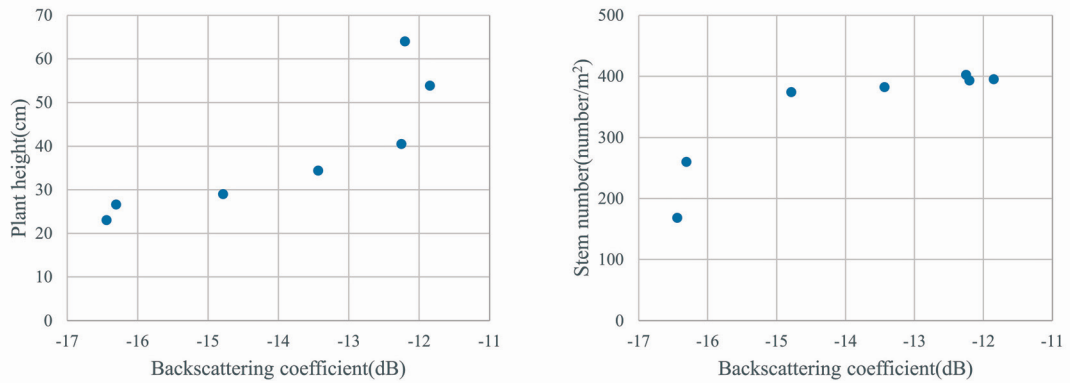


(1) VV polarization

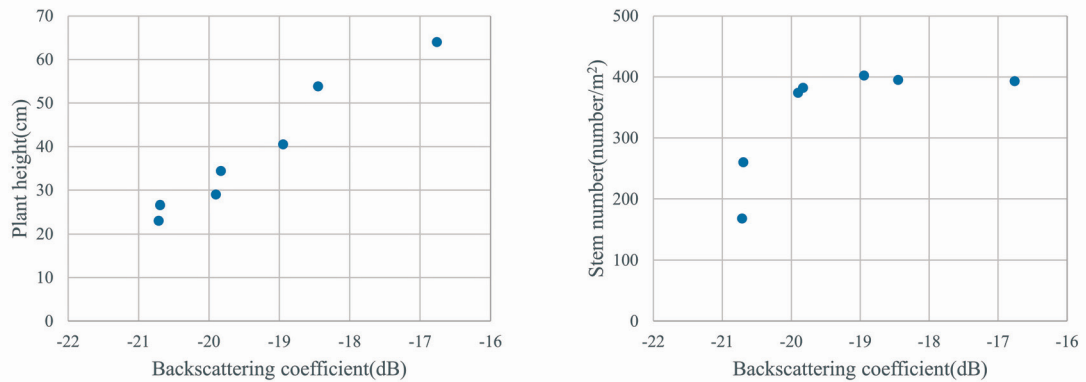


(2) VH polarization

Fig.14 Relation between backscattering coefficient and rice plant height, stem number in Sakai farm



(1) VV polarization



(2) VH polarization

Fig.15 Relation between backscattering coefficient and rice plant height, stem number in Takaya area, Fukui city



Table 4 Correlation coefficient between backscattering coefficient and plant height, stem number

(1) Sakai farm							(2) Takaya area, Fukui city		
	Hanaechizen		Koshihikari		Akisakari		Hanaechizen		
	Plant height	Stem number	Plant height	Stem number	Plant height	Stem number	Plant height	Stem number	
VV	0.85	0.86	0.69	0.98	0.68	0.98	VV	0.86	0.87
VH	0.98	0.86	0.90	0.93	0.90	0.94	VH	0.98	0.68

## 6. 結 言

本研究では SAR 衛星 SENTINEL-1 の画像データから後方散乱係数を求め、水稻の生育状況との対応を調べた。解析の結果、後方散乱係数が大きくなるほど、稲の草丈と単位面積あたりの茎数が大きくなり、両者に相関が見られたことから、後方散乱係数が稲の生育状況を把握する上で有用な指標であると考えられる。今回、用いた SAR 衛星の画像は観測幅が 250km であることから、広範囲の水稻の生育状況の把握に後方散乱係数を利用できる可能性がある。ただし、今回対象とした地点は 2 か所だけであったことから、他の地点に対しても後方散乱係数と稲の生育状況の関係を調べる予定である。

## 謝 辞

本研究は 2016 年度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」の助成を受けて、実施しました。また、欧州宇宙機関の衛星画像データ、および、解析ソフトを使用させて頂きました。GIS ソフトの QGIS を利用させて頂きました。記して御礼申し上げます。

## 文 献

- (1) 国土交通省 国土地理院, “干渉 SAR の原理”, [https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar\\_mechanism.html](https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html), (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (2) 宇宙技術開発株式会社ホームページ, “干渉 SAR の原理”, [https://www.sed.co.jp/sug/contents/edu/edu90\\_sarimaging.html](https://www.sed.co.jp/sug/contents/edu/edu90_sarimaging.html), (参照日 2019 年 10 月 17 日).
- (3) 宇宙技術開発株式会社ホームページ, “SAR データの波長の違い”, [https://www.sed.co.jp/sug/contents/edu/edu9b\\_sardatalevel.html](https://www.sed.co.jp/sug/contents/edu/edu9b_sardatalevel.html), (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (4) TerraSAR-X Archive, <https://terrasar-x-archive.terrasar.com/>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (5) European Space Agency, <http://www.esa.int/>, (参照日 2019 年 11 月 29 日).
- (6) JAXA (宇宙航空研究開発機構), “人工衛星による宇宙利用 陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2)”, <http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos2/>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (7) Earth observation portal, “ASNARO”, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/asnaro>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (8) Earth observation portal, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-1>, (参照日 2019 年 10 月 16 日).
- (9) 一般財団法人リモート・センシング技術センター, “Sentinel-1A / 1B / 1C / 1D”, <https://www.restec.or.jp/satellite/sentinel-1-a-1-b>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (10) Open.gis.lab, “Flood Mapping With Sentinel-1 Data Using SNAP And QGIS”, <https://opengislab.com/blog/2018/5/14/flood-mapping-with-sentinel-1-data-using-snap-and-qgis>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (11) 筑波大学流域管理研究室, “ESA SNAP を使った SAR 画像解析 2 (SAR 画像の準備)”, <http://pen.envr.tsukuba.ac.jp/~torarimon/?ESA+SNAP%A4%F2%BB%C8%A4%C3%A4%BFSAR%B2%E8%C1%FC%B2%F2%C0%CF2>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (12) QGIS ホームページ, <https://www.qgis.org/ja/site/forusers/download.html>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).

- (13) European Space Agency, “Copernicus Open Access Hub”, <https://scihub.copernicus.eu/>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (14) 若林裕之, 新井康平, “SAR スペックルノイズ低減化に関する一手法”, 写真測量とリモートセンシング, 第 34 巻, 第 2 号(1995), pp.15-24.
- (15) 全国農業協同組合連合会宮城県本部, “お米のカレンダー”, <http://www.mg.zennoh.or.jp/learn/rice/process/calendar.html>, (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (16) ふくいアグリネット, “稲作情報システム”, [http://www.agri-net.pref.fukui.jp/gizyutsu/ine\\_sys/](http://www.agri-net.pref.fukui.jp/gizyutsu/ine_sys/), (参照日 2020 年 3 月 6 日).
- (17) 石塚直樹, 大内和夫, “合成開口レーダの農業への応用”, 日本リモートセンシング学会誌, 第 37 巻, 第 3 号(2017), pp.182-192.

(2020 年 9 月 10 日受理)