



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	衛星レーダーを用いた尾瀬ヶ原湿原の観測と環境変化の推定
Author(s)	久田, 泰広; 小川, 佳子; 出村, 裕英
Citation	低温科学, 80, 123-134
Issue Date	2022-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/lowtemsci.80.123
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/85008
Type	departmental bulletin paper
File Information	07_p123-134_LT80.pdf



衛星レーダーを用いた尾瀬ヶ原湿原の観測と環境変化の推定

久田 泰広¹⁾, 小川 佳子¹⁾, 出村 裕英¹⁾

2022 年 1 月 25 日受付, 2022 年 3 月 3 日受理

尾瀬ヶ原は本州最大の湿原であり, 東西 6 キロ, 南北 2 キロにわたる広大な地域で, かつ環境保護のため木道以外の立ち入りが厳しく制限されている. そのため, 立ち入ることのできない領域の動植物相, 水文・水質などを把握することが困難である. 本稿では, 人工衛星に搭載された合成開口レーダー (SAR: Synthetic Aperture Radar) による観測に基づいて, 木道付近に制限されることがない湿原の環境について推定する. 尾瀬ヶ原全域に対する夏季, 冬季の SAR 画像から, 湿原域・非湿原域の推測が可能だった. また, 背中アブリ田代と泉水田代の SAR 画像とドローンによる空撮画像との詳細な比較から, 湿原域の識別を迫認し, ドローン画像では識別が困難な土砂堆積領域を識別できた. また, 植生に対応した調査地点の 3 衛星に亘る後方散乱係数の時系列変化から, 各衛星レーダーのセンサー感度が異なっている可能性が高く, 全期間にわたって比較することは困難であった. しかしながら, 後方散乱係数の取る値は植生によって異なり, ミズゴケクラス<ヌマガヤオーダー<拋水林という関係になっている. いくつかの調査地点において後方散乱係数の上昇傾向が認められたが, その要因の一つとして考えられる降水量との関係性は明らかにできなかった.

Observation of Ozegahara mire and estimation of environmental changes using satellite radar

Yasuhiro Hisada¹, Yoshiko Ogawa¹, Hirohide Demura¹

Ozegahara mire is the largest wetland in Honshu, Japan, covering a vast area of 6 km from east to west and 2 km from north to south, and access to this area is strictly restricted except by wooden roads for environmental protection. Therefore, it is difficult to grasp the flora, fauna, hydrology, and water quality in the inaccessible areas. In this paper, we estimate the environment of the wetland based on observations using Synthetic Aperture Radar (SAR) onboard the satellite.

From the SAR images of the entire Ozegahara area in summer and winter, it was possible to discriminate between mire and non-mire areas. By comparing the SAR images of Senaka-aburi tashiro and Sensui tashiro with the aerial images taken by a drone, we were able to reconfirm the identification of mire areas and to identify the area where sediment was deposited, which was difficult to identify in the drone images.

Based on the results of the time series of backscatter coefficients across the three satellites (JERS-1, ALOS-1, 2), it was difficult to direct compare the results over the entire period because the sensor sensitivity of each satellite radar was likely to be different.

責任著者

久田 泰広

連絡先

〒 965-8580 福島県会津若松市一箕町鶴賀字上居合 90

会津大学 コンピュータ理工学部

Tel / Fax : 0242-37-2570

e-mail : hisada@u-aizu.ac.jp

1) 会津大学コンピュータ理工学部兼宇宙情報科学研究センター

1 Dept. of Computer Science and Engineering/Aizu Research Center for Space Informatics, University of Aizu, Aizuwakamatsu, Japan

However, it was shown that the value range of the backscatter coefficient varied depending on the vegetation. Although there was an upward trend in the backscatter coefficient at some of the investigation sites, the relationship with precipitation, which could be one of the factors, could not be clarified.

キーワード：衛星観測, 合成開口レーダ (SAR), ドローン, 後方散乱係数, 尾瀬ヶ原湿原
satellite observation, synthetic aperture radar (SAR), drones, backscatter coefficient, Ozegahara mire

1. はじめに

尾瀬ヶ原は福島県, 群馬県, 新潟県にまたがる本州最大の湿原である。観光用に木道が整備されており, 春から秋に掛けての景観は季節ごとに人々の目を楽しませている。しかしながら東西6キロ, 南北2キロにわたる広大な地域で, かつ環境保護のため木道以外の立ち入りが厳しく制限されている。そのため, 立ち入ることのできない領域の動植物相, 水文・水質などの把握が難しい。衛星レーダーを利用した観測は湿原全体を含む広範囲で定期的に行われていることから, 都合がよい。また, 通常の光学的衛星観測とは異なり, 天候の影響を受けにくく, 昼夜問わず観測ができるため, 観測機会の喪失が少ないことも利点である。本稿では, 人工衛星に搭載された合成開口レーダーの観測により湿原を利用した観測を基軸とし, SAR画像による識別や状態の推測, 観測日と同時期のドローン画像との比較検証を行う。また, 後方散乱係数の時系列変化を通して, 湿原の環境について推定・考察を行う。

1.1 衛星レーダー

1.1.1 衛星レーダーについて

合成開口レーダー (SAR) は航空機や衛星に搭載された小さなアンテナを使って仮想の大きなアンテナを合成し, 高分解能のレーダー画像を生成する能動型のレーダーである (日本リモートセンシング学会編, 2011)。本稿で使用している衛星レーダーは, 日本の地球資源衛星 JERS-1 (ふよう1号, 1992 - 1998) に搭載のLバンド合成開口レーダー (JERS-1 SAR), 陸域観測技術衛星 ALOS-1 (だいち1号, 2006 - 2011), ALOS-2 (だいち2号, 2014 -) に搭載されているフェーズドアレイLバンド合成開口レーダー (PALSAR-1, 2) である。これらのレーダーは, 天候の影響を受けにくく, 昼夜を問わない観測が可能といった特徴を持ち, 合成開口技術を使用することで, 空間分解能の高い画像を得る事ができる

(JERS-1 SAR の最高分解能は18 m, PALSAR-1は3 m, PALSAR-2は1 m)。

1.1.2 観測時期

JERS-1 および ALOS-1, 2 は高度6 - 700 km を約100分かけて南北方向に地球を1周している。衛星が南から北に向かう軌道を上昇軌道 (Ascending), 北から南に向かう軌道を下降軌道 (Descending) と呼ぶ。JERS-1, ALOS-1 は衛星の移動方向に対して, 右側にだけ放射可能だが, ALOS-2 は左右にマイクロ波を放射することができる。JERS-1 は44日回帰, ALOS-1 は46日回帰, ALOS-2 は14日回帰で衛星自体は同じ場所に戻ってくるが, 複数の偏波やオフ・ナディア角, 観測モード (観測幅や解像度) を変えて観測されるため, 対象地域が観測されるのは, おおむね年に数回となる。

1.1.3 SAR画像の特徴

マイクロ波の反射信号は, 開水面, 土地形状, 表面粗さ, 土壌水分, 植生などによって影響を受ける。開水面は一般的に滑らかであるため, 斜めから入射するマイクロ波が水面上で鏡面反射を起こし, 衛星 (受信機) に信号が戻ってこない。一方, 山や建物のように斜面あるいは壁面がビーム方向に対して垂直に近いと反射強度は高くなり, 平行に近い場合は低く, ビーム方向の影になっている場合はその物体 (その面) からの反射は無いことになる。また, 地面・開水面と物体の間の2回反射によって反射強度が高くなる場合もある。マイクロ波の性質により土壌水分が多いと電波の吸収が起こり, 反射強度が低くなる。植生に関しては一般的にマイクロ波の周波数バンドにより異なり, Lバンドでは木の幹に対して直接あるいは地面との間で2回反射が起こるため反射強度は高くなり, 枝葉や草本では透過するという性質を持つ。

2. 方法

2.1 SAR データの前処理

本稿で使用している PALSAR-1, 2 データはレベル 1.1 (複素数) およびレベル 1.5 (振幅) 形式, JERS-1 SAR

はレベル 2.1 (振幅) 形式である。これらは, 照射面積等によって変化するため, 単位面積当たりの後方散乱係数として, 以下の式 (1) (2) より規格化レーダー断面積 (NRCS: Normalized Radar Cross Section) に変換し, 使用する。

$$\text{NRCS[dB]} = 10 * \log_{10}(DN^2) + CF \quad (1)$$

$$\text{NRCS[dB]} = 10 * \log_{10}(\langle I^2 + Q^2 \rangle) + CF - 32.0 \quad (2)$$

ここで, DN: レベル 1.5 (or 2.1) 形式のピクセル値である Digital Number

I, Q: レベル 1.1 形式のピクセル値である I 成分値, Q 成分値

CF: 校正係数

また, これらのデータには, レーダー画像特有の幾何的な歪が生じるため, オルソ補正を行う。表示用 SAR 画像については, SAR 画像特有のスペックルノイズを低減するために平滑化フィルタ処理も行う。これらのデータ処理にはソフトウェアとして, SNAP (ヨーロッパ宇宙機関: ESA) および ENVI (Harris Geospatial Solutions 社) を使用した。

2.2 SAR 画像の識別およびドローン画像との比較

先に述べたように SAR 画像は複数の要因によって影響を受けるため, 一般的な光学的画像とは見え方が異なる。したがって, 観測日に現地の状態を把握し, 比較検証することが必要である。ここでは, (A) 尾瀬ヶ原全域の夏季および冬季の SAR 画像より識別できる内容について調べ, (B) 背中アブリ田代, (C) 泉水田代の SAR 画像と同時期に撮影したドローン画像とを比較し, 対応関係や状態等を考える。

2.3 後方散乱係数の時系列変化および降水量との関係

2.2 では, SAR 画像およびドローン画像での定性的な識別や変化を捉えることになるが, ここでは, 湿原の変化を定量的に捉えるために, 後方散乱係数の時系列変化について調べる。また, 後方散乱係数は開水面の面積や土壌水分の影響も受けるため, 降水量の関係についても考える。

2.3.1 データと解析方法

具体的な解析として, 以下 3 点について行う。

- (A) 3 衛星に亘る 1992 年から 2020 年までの後方散乱係数の時系列変化
- (B) ALOS-2/PALSAR-2 の観測期間 2014 年から 2020 年までの後方散乱係数の時系列変化
- (C) 2014 年から 2020 年までの後方散乱係数と降水量

との関係

調査地点は環境省生物多様性センターの植生図 (1/2.5 万) (環境省, 2017) を基に, 図 1 のようにツルコケモモ・ミズゴケクラス (以下ミズゴケクラス) 3 地点 M1-M3, スマガヤオーダー 3 地点 N1-N3, 抛水林 (植生はハルニレ群集) 2 地点 G1-G2, 湿原外 (植生はチシマザサ・ブナ軍団) 1 地点 O1 とした。

SAR データは式 (1) または式 (2) によって規格化後方散乱係数に変換した後, ノイズ低減のために, 一番分解能の低いデータにおいて, 十分な点 (100 ピクセル以上) を確保するよう 125 m 四方の平均値を各調査地点の後方散乱係数の代表値とした。

調査期間は 1992 - 1998 (JERS-1), 2006 - 2010 (ALOS-1), 2014 - 2020 (ALOS-2) とし, 表 1 に示す観測日のデータを使用した。また, 冬期間 (積雪期) の湿原域の後方散乱係数は, それ以外の期間と比較して低い値を示すため (Ito, 2013; 豊崎ほか, 2015), 積雪のない 6 月下旬から 10 月下旬までの時期のデータを採用する。

降水量との比較において, 衛星での観測時刻と気象庁アメダスの日毎降水量データの間には最大 24 時間分のズレが生じる可能性があるため, 観測日の 2 日前から当日までの総降水量を観測日直近の降水量とする。尾瀬ヶ原の降水量として, 桧枝岐村と片品村の総降水量の平均を採用し, (B) での後方散乱係数との相関を取る。

3. 結果と考察

3.1 SAR 画像から見た尾瀬ヶ原とドローン画像の比較

(A) 尾瀬ヶ原の SAR 画像について

図 2 に (a) 夏季 2015 年 7 月 16 日, (b) 冬季 2017 年 2 月 14 日の尾瀬ヶ原の SAR 画像を示す。共に同じ観測

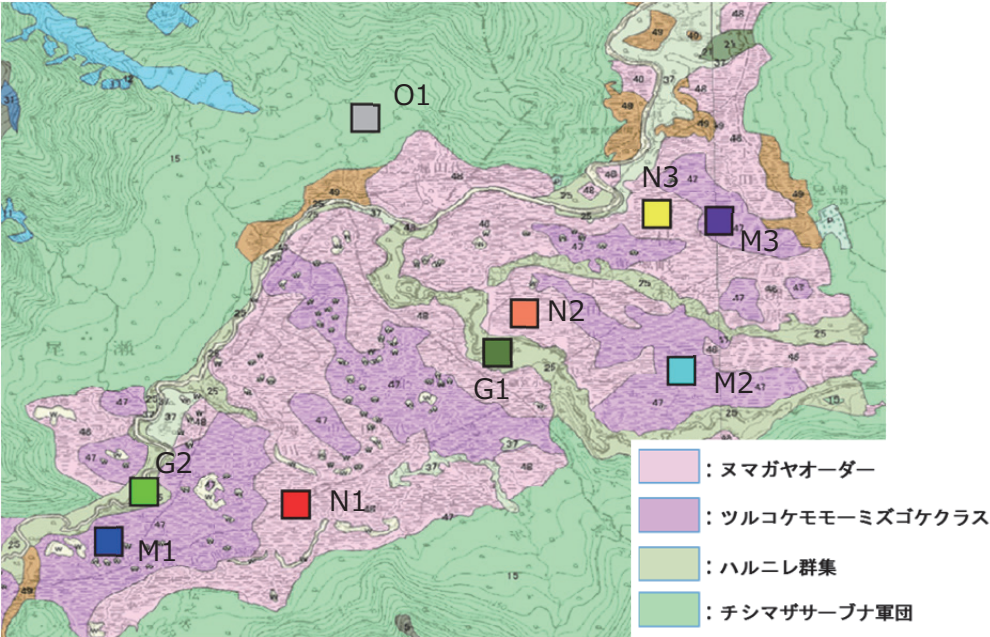


図 1： 時系列変化の解析用調査地点. 植生図は（環境省, 2017）を引用・加工し，調査地点・凡例を追記，植生調査は 2009 年.

表 1：時系列変化に使用した SAR データー一覧. (1 行目：衛星レーダー名, 2 行目以降観測日).

JERS-1 SAR	PALSAR-1	PALSAR-2
1992/7/20	2006/7/10	2014/10/9
1992/9/2	2006/8/25	2015/7/16
1992/10/16	2006/10/10	2015/9/1
1993/7/7	2007/7/13	2015/9/11
1993/8/20	2007/8/17	2015/10/22
1993/10/3	2007/8/28	2016/7/14
1994/6/24	2007/10/13	2016/10/25
1994/8/7	2008/7/15	2017/7/13
1994/9/20	2008/8/19	2017/9/21
1995/7/25	2008/10/15	2017/9/24
1995/9/7	2009/7/18	2017/10/24
1995/10/21	2009/8/22	2018/7/12
1996/7/11	2009/9/2	2018/9/20
1996/8/24	2009/10/7	2018/9/23
1996/10/7	2010/7/21	2018/10/23
1997/6/28	2010/8/25	2019/6/2
1997/8/11	2010/9/5	2019/9/19
1997/9/24	2010/10/21	2019/10/22
1998/7/16		2020/9/17
1998/7/29		2020/10/20
1998/8/29		
1998/9/11		

モードで下降軌道、衛星進行方向に対して右側方向にマイクロ波を照射して観測されたものである。SAR 画像は、図 2 (a) のように、反射強度が高い箇所は白く、低い箇所は黒く表示される。開水面および土壌水分が多く、樹木がない湿原域は、反射強度が低くなるため、黒い領域として表わされる。尾瀬ヶ原周囲の山谷では、電波照射方向に正対しているところはより白く、そうでないところは暗くなる。挾水林や比較的平坦な森林域では中程度の灰色になっている。適度に幅のある河川は兩岸の木々に覆われることなく開水面と捉えられるため、ヨッピー橋下流側の只見川は河川として明瞭に識別できる。(b)の観測日は、桧枝岐村での積雪量が273 cmとなっており、尾瀬ヶ原でも相当の積雪があると推測される。冬季画像(b)の湿原域は夏季に比較し、全体に輝度変化がやや乏しく霧が掛かるように見えている。これは積雪表面での反射あるいは内部での体積散乱による反射が増えることにより生じている可能性が考えられる。しかし、挾水林やその他森林域に対して、湿原域境界は十分に識別できる。源五郎堀から下ノ大堀川および池塘 NN4-32 付近は反射強度が周辺と比較して非常に低くなっており、開水面になっている可能性が高いと思われる。

(B) 背中アブリ田代の SAR 画像とドローン画像の比較

先に述べたように SAR 画像は複数の要因によって影響を受けるため、観測日に現地の状態を把握し、比較検証することが必要である。

2017 年 6 月 4 日、2017 年 9 月 21 日の観測日程に合わせて、現地観測として 2017 年 6 月 5 - 6 日、2017 年 9 月 24 - 25 日に尾瀬ヶ原にてドローン (DJI 社 Mavic Pro) により撮影した画像とを比較する。図 3 (a), (b) は背中アブリ田代の SAR 画像で、(a) が 2017 年 6 月 4 日、(b) が 2017 年 9 月 21 日に観測されたものである。(a) の緑枠内がおおむね (c), (d) のドローン画像撮影範囲になっている。SAR 画像において背中アブリ田代の湿原域は周辺の森林域、挾水林に囲まれた暗い領域として識別できる。(a), (b) の赤丸部分は湿原域中の後方散乱係数の高い部分であるが、(c), (d) の赤丸部分のように小規模の林になっている事が確認できる。(c) の猫又川支流 (猫又川の北側) に沿って樹木が比較的まばらに点在しており、川の兩岸にあるオレンジ枠内の木々が、(a) の SAR 画像では、対応する地点 (オレンジ枠内) で反射の強い点となって現れている。(c) のドローン画像では支流周辺で木々がまばらにあるようにしか見えていないが、(a) の SAR 画像では挾水林と同程度の後方散乱

係数になっている。これは、川によって運ばれ堆積した土砂による反射が増していると考えられる。実際、(d) 秋季 (2017 年 9 月 24 日) のドローン画像では、その部分が草地になっている事が分かる。ドローン画像上の黄色いラインは草地の南側の縁をトレースしたものであるが、(a), (b) の SAR 画像でのラインと一致していることから、SAR 画像を利用し、湿原域とそれ以外の境界を識別する事が可能であることが分かる。

(a), (b) の SAR 画像同士での比較では、(a) 9 月の湿原域は (b) 6 月よりもやや後方散乱係数が増している。6 月は、雪解け期のため開水面や地表付近に水が染み出ているものと考えられ、湿原域での後方散乱係数は低い。一方、9 月には開水面の減少や草花の成長により、6 月に比較すると後方散乱係数は高くなると考えられる。

(C) 泉水田代とドローン画像

図 4 には、泉水田代の 2015 年春秋 ((a) 2015 年 6 月 21 日、(b) 2015 年 9 月 11 日)、2017 年春秋 ((c) 2017 年 6 月 4 日、(d) 2017 年 9 月 11 日) の SAR 画像と 2017 年の同時期のドローンでの空撮画像 (e), (f) を示す。(c), (d) の緑枠は空撮で撮影された (e), (f) のおおよその範囲を表している。

(a) の泉水田代湿原域は周囲の森林域から比較してかなり低い反射強度になっており、開水面およびそれに準じた水が多い環境であったと考えられる。特に泉水田代北部は泉水池よりも広範囲に水があふれていたように見える。

一方、(b) 9 月には、泉水田代の北東部の一画を除くと北部側は反射強度が高くなっているが、南部に関しては若干増加した程度でそれほど大きな変化は見せていない。

(c) は (a) のおよそ 2 年後の春の SAR 画像であるが、泉水池周辺はやや広く開水面になっていたと推察され、その東部の川周辺は反射が強いことがわかる。泉水田代中央付近の小規模な挾水林 (オレンジ丸枠内) は 5, 6 月の SAR 画像では明瞭になっているが、9 月の SAR 画像では周辺と見分けがつかない。なお、(c) は上昇軌道の右側観測のため、泉水田代の西側斜面からの反射が弱く、湿原との境界部分が識別しにくくなっている。(b), (d) は 9 月の SAR 画像であるが、北側の反射が比較的強く、泉水池もはっきりと写っていない。南側は反射強度が春より僅かに強い程度である。

図 5 (b) は 2017 年 6 月について図 4 (c) を拡大し、緑枠内に対応するドローン画像を (a)、オレンジ枠内に対応する画像を (c) としたものである。(a) の泉水池 ①に対して SAR 画像 (b) の泉水池付近の低輝度領域

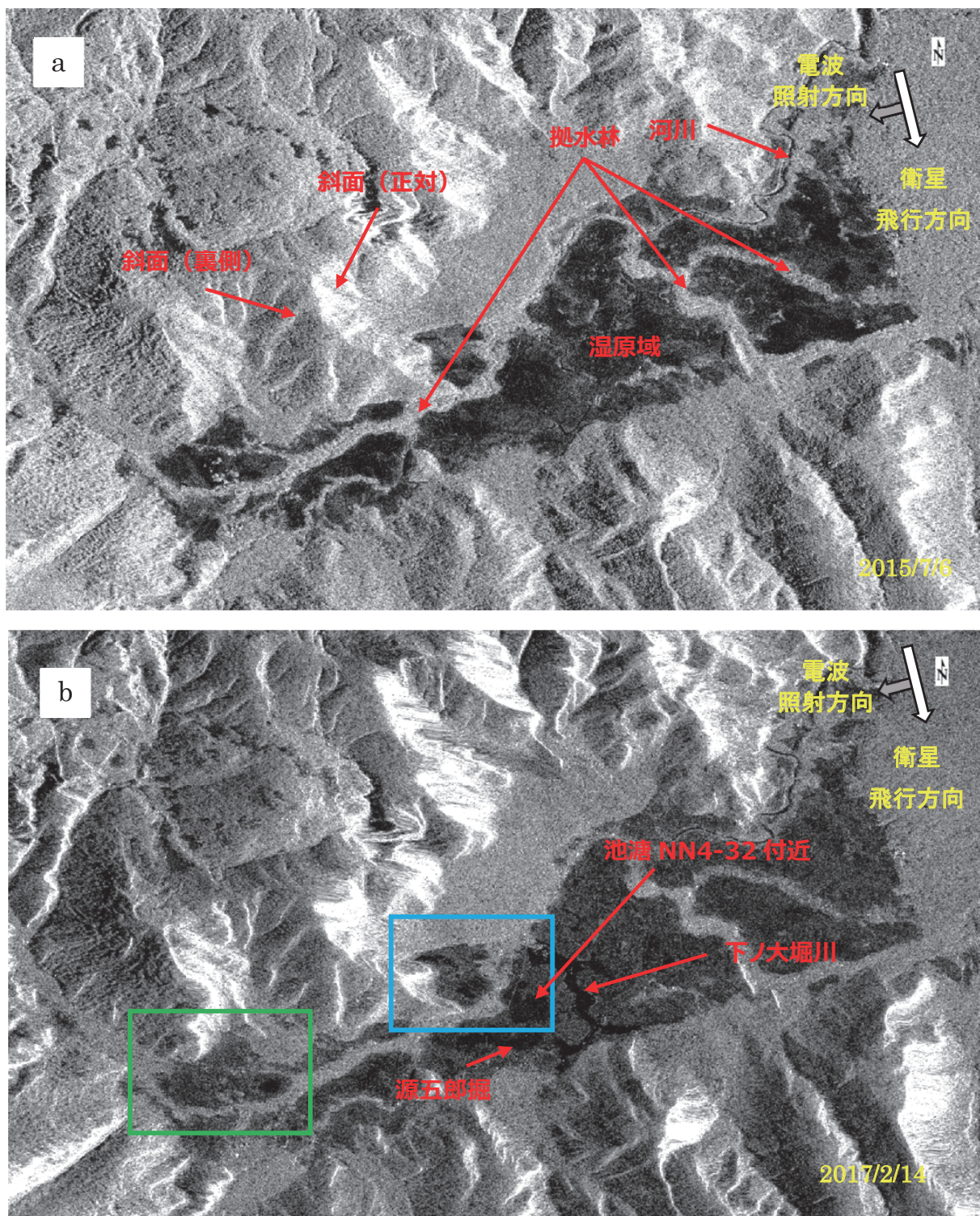


図2:尾瀬ヶ原全体SAR画像。(a)夏季SAR画像(2015年7月16日,下降軌道,右側観測), (b)冬季SAR画像(2017年2月14日,下降軌道,右側観測), 緑枠:背中アプリ田代(図3 (a) - (b) 対象領域), 水色枠:泉水田代(図4 (a) - (d) 対象領域)。SAR画像は明度 +20% とした。

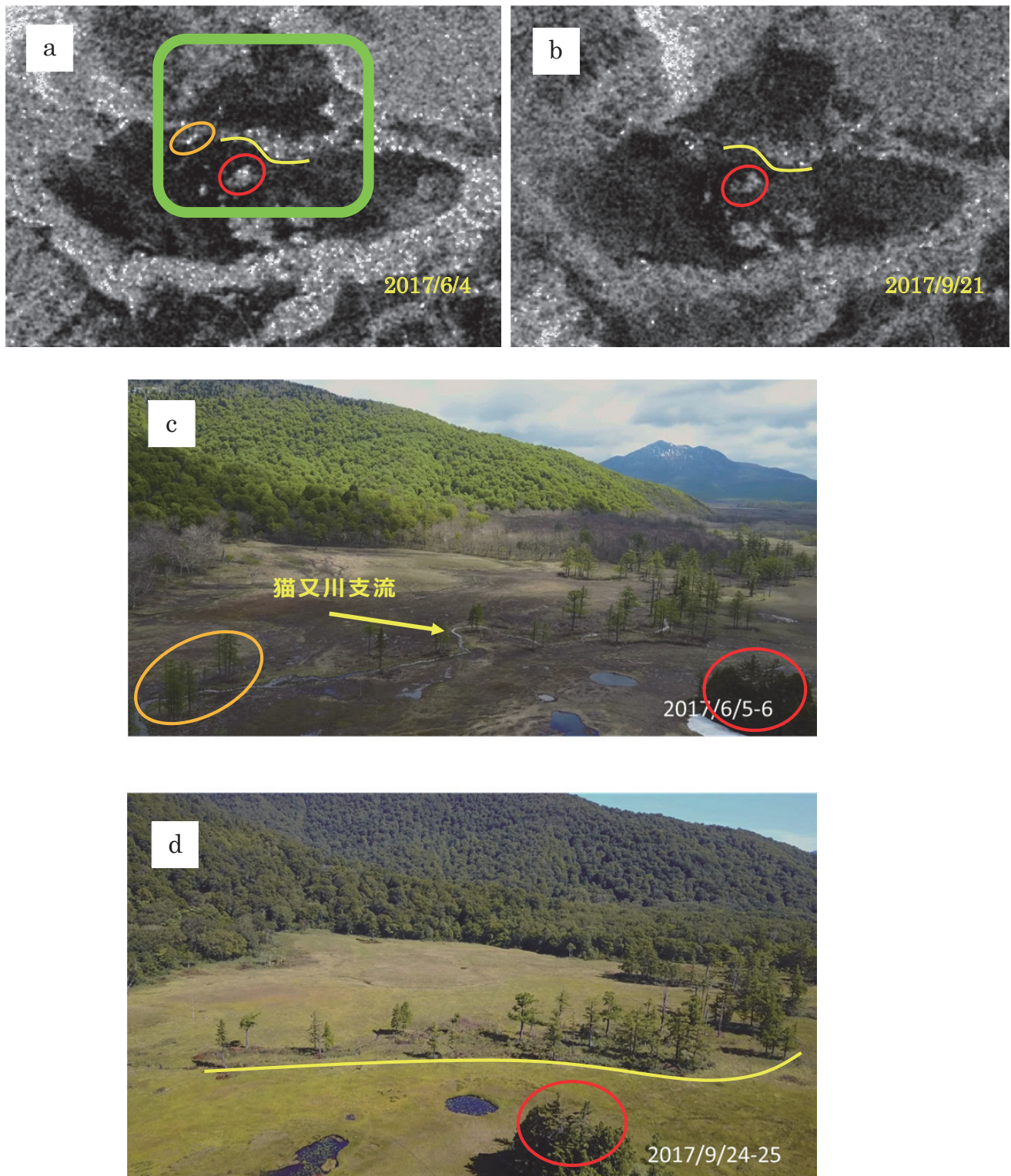


図3：背中アブリ田代SAR画像，ドローン画像．(a) SAR画像（2017年6月4日，上昇軌道，右側観測），(b) SAR画像（2017年9月21日，下降軌道，右側観測），(c) ドローン画像（2017年6月5日，高度67 m），(d) ドローン画像（2017年9月24日，高度59 m），緑枠はドローン画像対象領域，オレンジ円，赤円，黄曲線はSAR画像とドローン画像上の同一箇所を示す．

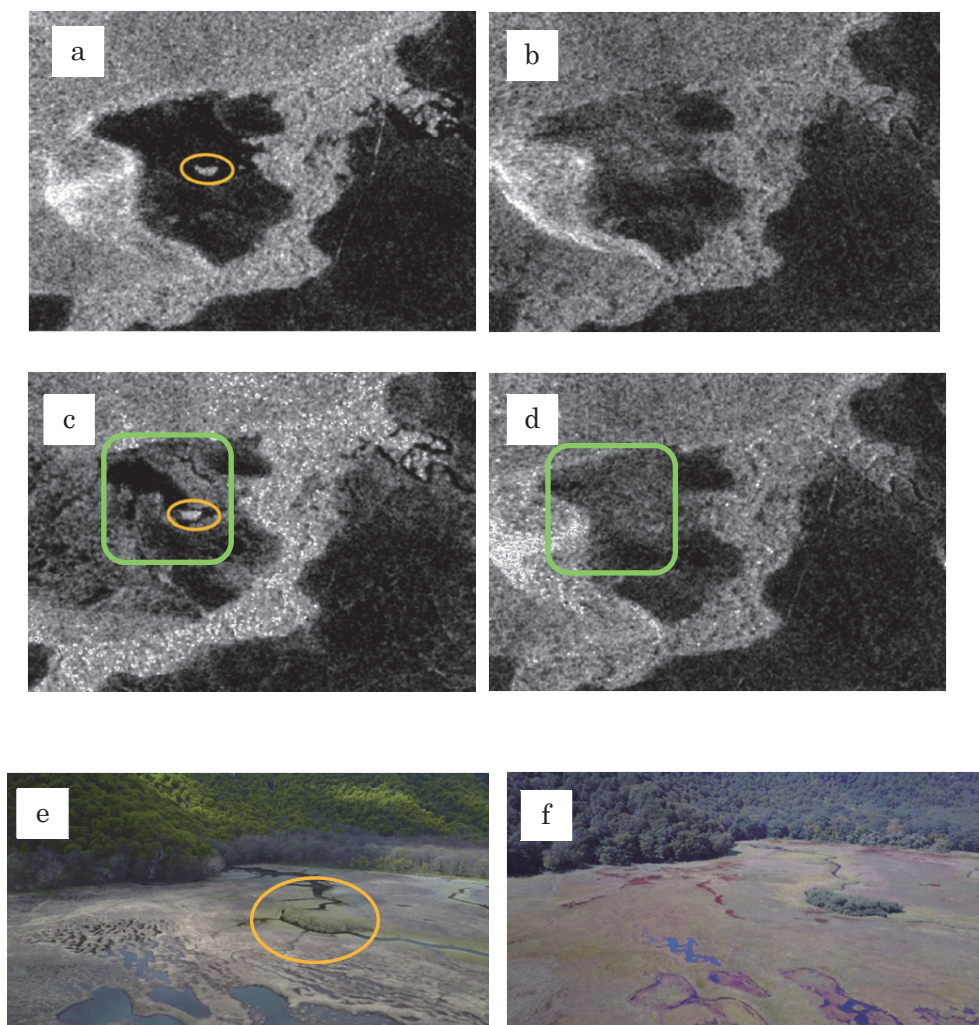


図4：泉水田代のSAR画像(a-d)とドローン画像(e-f)。(a) SAR画像(2015年5月21日, 下降軌道, 右側観測), (b) SAR画像(2015年9月11日, 上昇軌道, 左側観測), (c) SAR画像(2017年6月4日, 上昇軌道, 右側観測), (d) SAR画像(2017年9月21日, 下降軌道, 右側観測), (e) ドローン画像(2017年6月5日, 高度50 m), (f) ドローン画像(2017年9月24日, 高度56 m), 緑枠はドローン画像対象領域, オレンジ円はSAR画像とドローン画像上の同一箇所を示す。

は範囲が広がっているように見受けられるが, 泉水田代北東部のやや低輝度領域②は, (a) を見るとケルミ・シュレンケを形成しており, シュレンケ部分の開水面による反射強度の低下と考えられる。(c) の右側(東側)には比較的大きな池塘群③があり, SAR画像上でも視認する事ができる。また, (c) の下部(南側)U字領域④は, 池塘といった開水面は存在しておらず, ドローン画像での色彩からは乾燥しているように見えているが, (b) では低輝度になっている。このような現象が起こる可能性としては, 雪解け間もないころということを考慮すると, 表面直下の水分が非常に多いか, あるいは植生が積雪で圧迫されたゆえに表面粗度が低下したと考えられる。

3.2 後方散乱係数の時系列変化

(A) 3衛星に亘る後方散乱係数の時系列変化(1992 -

2020)

図6に衛星ごとの時系列変化を折れ線グラフとして示す(期間1992/7/20 - 2018/10/23の後方散乱係数データは(Hirayama, 2018; Ishizawa, 2020)より引用)。縦軸は規格化された後方散乱係数(NRCS: 単位dB)であり, 横軸は観測日となっている。また, 各衛星についてそれぞれ稼動期間があり, それらがオーバーラップしていないため, 観測されていない期間が生じている。挾水林G1-2・湿原外O1は後方散乱係数が比較的高く-10 dB以上-5.5 dB以下, 湿原域N1-N3およびM1-M3は-12 dB以下と低くなっている。また, 中層湿原の代表的植生であるヌマガヤオーダーN1-N3は, 低層湿原の代表的植生のミズゴケクラスM1-M3より高い後方散乱係数を持っている。

G1-G2, O1については衛星間で大きな違いはないが, N, M群では衛星毎に取る値の範囲が異なっており, これ

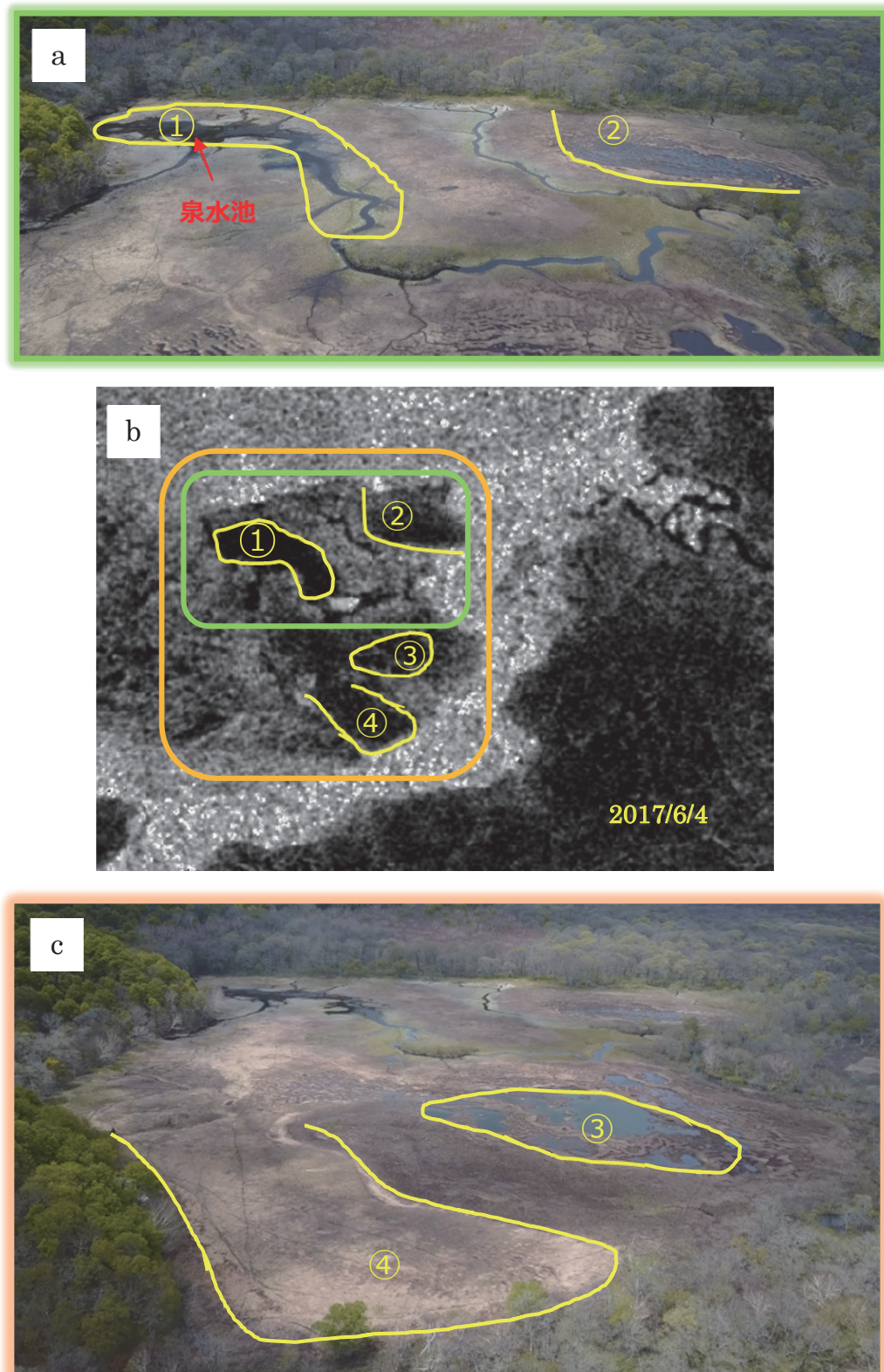


図5: 泉水田代 SAR 画像 (b), ドローン画像 (a,c). (a) 泉水田代北側ドローン画像 (2017 年 6 月 5 日, 高度 148 m), (b) SAR 画像 (2017 年 6 月 4 日, 上昇軌道, 右側観測), (c) 泉水田代ドローン画像 (2017 年 6 月 5 日, 高度 148 m), (b) の緑枠は (a) のおよその撮影範囲, オレンジ枠は (c) の撮影範囲を示す. また, ①-④はそれぞれの対応関係を示している.

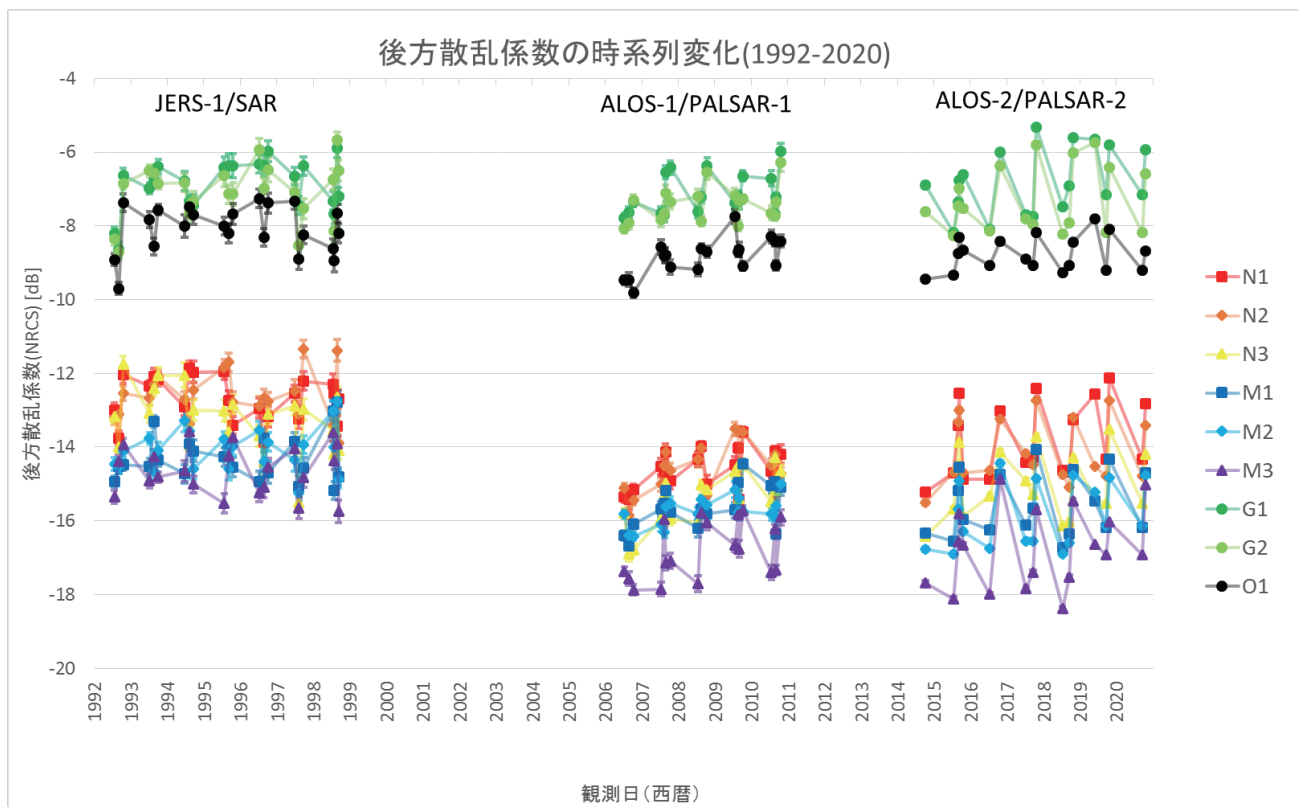


図6：後方散乱係数の時系列変化（1992 - 2020）。N1-N3, M1-M3, G1, G2, O1 は時系列変化の調査地点。

は受信信号の感度が衛星によって差があるためと考えられる。

(B) PALSAR-2 での後方散乱係数の時系列変化（2014 - 2020）

(A) で述べたように、湿原域の後方散乱係数の数値範囲には衛星間で差異があるため、それらを単純に比較するのは困難である。したがって、ここでは ALOS-2/PALSAR-2 による 2014 年以降の時系列変化について分析した。

図7は ALOS-2/PALSAR-2 の観測による 2014 年から 2020 年の 6 年間の後方散乱係数の時系列変化である（期間 2014/10/9 から 2018/10/23 のデータは (Ishizawa, 2020) より引用）。直線は各調査地点の後方散乱係数の最小二乗法による回帰直線であり、直線の傾きと平均値を表2に示す。

ミズゴケクラス M1-M3 の平均値は -15.5 dB 以下、ヌマガヤオーダー N1-N3 は -14 dB 前後、森林 G1-G2, O1 は -9 dB 以上となっている。一方、傾きについてみると、O1, N2 はあまり変動がないが、N1, M2, M3 は年当たり 0.1 dB 以上上昇している。N1 は西中田代東南部のヌマガヤオーダー、M2 は南下田代南部のミズゴケクラス、M3 は北下田代東部のミズゴケクラスになっている。これらの結果は、土地形状、植生は数年程度の期間では大きく変わらないと仮定すると、開水面の減少や土壌水分

の減少により後方散乱係数が増大している可能性が考えられる。しかし、土壌水分条件については、降雨等により変動が大きいと予想されるため、降水量との関係について示す。

(C) 後方散乱係数と降水量

図8に調査地点 N2, M3 について、(B) で使用した後方散乱係数と観測日を含む直近 3 日間の総降水量との相関図を示す。回帰直線からは降水量の増加に伴い、後方散乱係数の増大を示している。表3に全調査地点の相関係数 r と「2 変数間は無相関である」とした帰無仮説に対する有意確率 p を示す。調査地点 N2 において r が 0.5 以上、 p 値が 0.02 で有意確率 5% としたとき相関ありと解釈できるが、M3 は r が 0.17, p 値は 0.48 で相関があるとは解釈できない。結果的に相関ありと十分に見なせるのは N2, N3 だけで、時系列変化が上昇傾向にあった N1, M2, M3 に関して降水量に対する相関は認められなかった。

4. まとめ

SAR 画像とドローン画像を比較する事で、湿原域とそれ以外を識別可能である事がわかった。しかしながら、衛星観測において融雪期やそれ以外といった観測時期や軌道、観測方向、観測モードといった観測条件により、

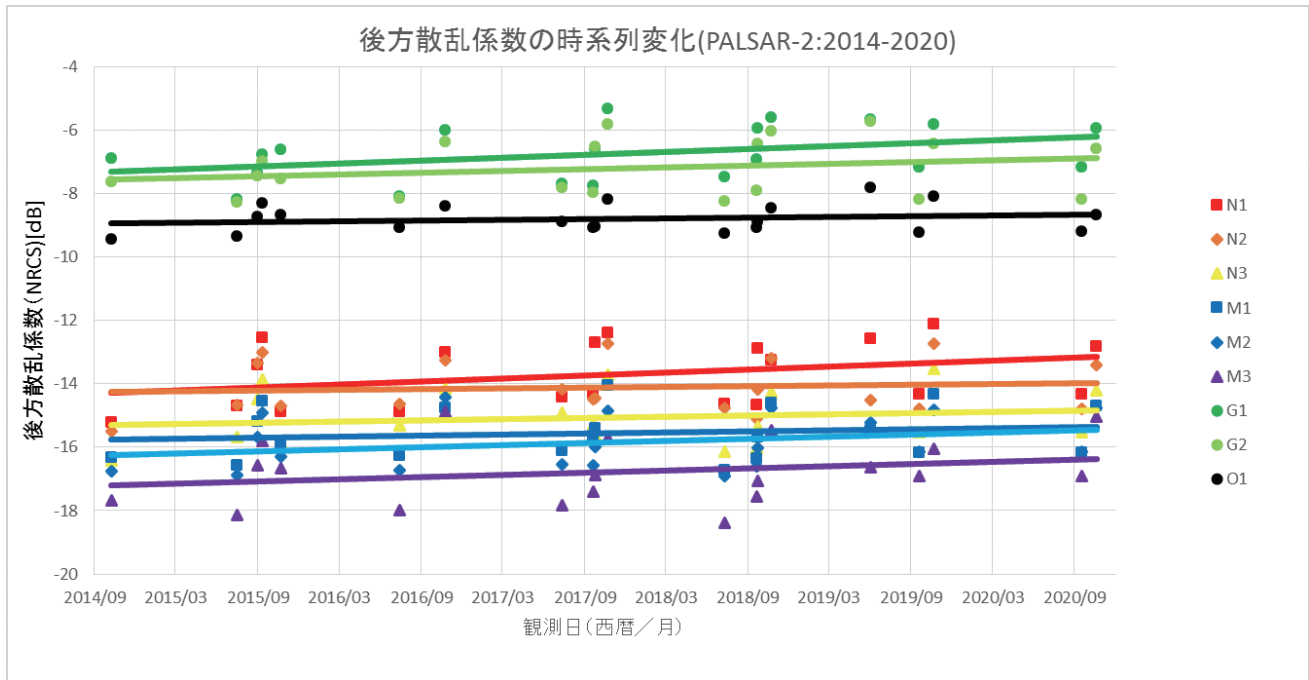


図7：後方散乱係数の時系列変化（PALSAR-2：2014 - 2020）. N1-N3, M1-M3, G1, G2, O1 は時系列変化の調査地点.

表2：後方散乱係数に対する回帰直線の傾きと平均値（PALSAR-2：2014 - 2020）.

調査地点	N1	N2	N3	M1	M2	M3	G1	G2	O1
傾き	0.19	0.05	0.08	0.07	0.13	0.14	0.19	0.11	0.05
平均	-13.70	-14.12	-15.06	-15.55	-15.85	-16.78	-6.75	-7.21	-8.79

単位：傾き [dB 年⁻¹], 平均 [dB]

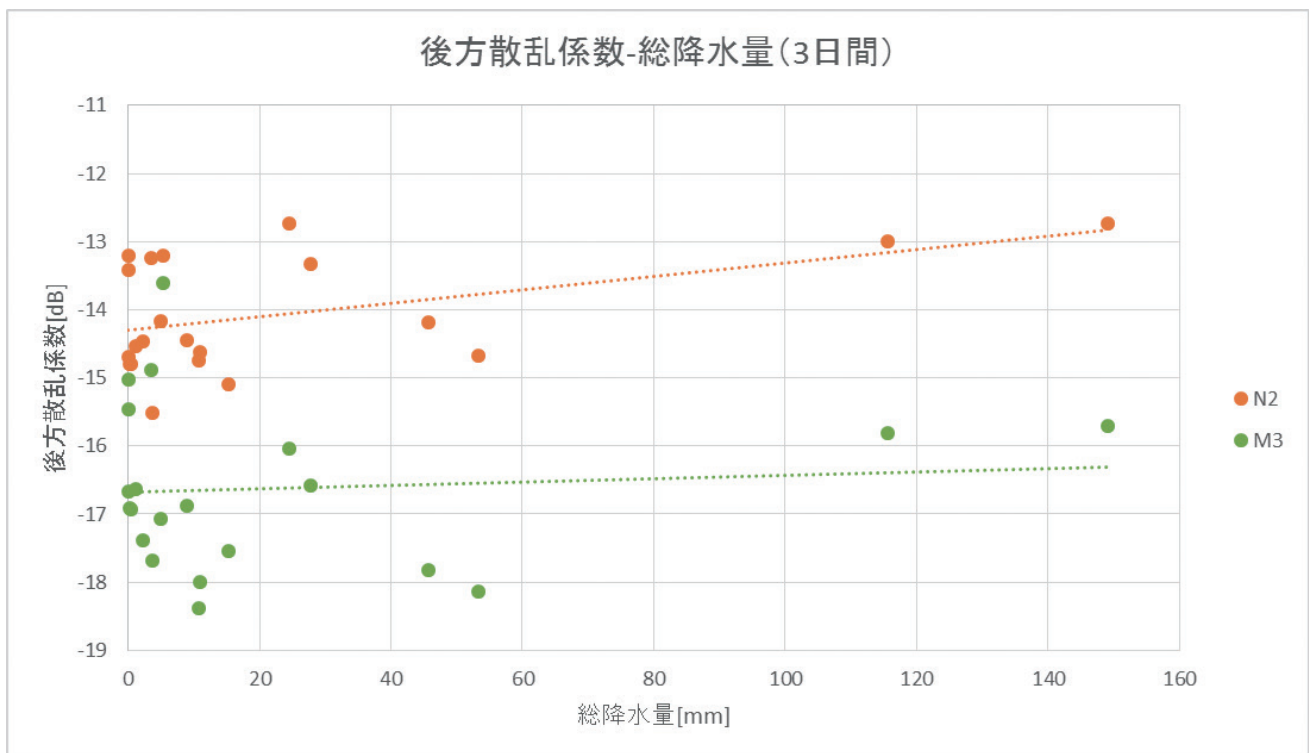


図8：後方散乱係数と3日間総降水量との相関. 調査地点 N2, M3 のみについて表示した.

表 3：後方散乱係数と降水量の相関と有意確率.

調査地点	N1	N2	N3	M1	M2	M3	G1	G2	O1
相関係数 r	0.34	0.51	0.50	0.43	0.25	0.17	0.11	0.21	0.34
有意確率 p	0.15	0.02	0.03	0.06	0.28	0.48	0.63	0.38	0.15

境界の明瞭度は変化する事から、湿原域の面積変化を捉えるような場合には適切な SAR データを選択する必要がある。逆に適切な SAR データを選ぶことで、ドローン画像では識別できない、河川付近の土砂が堆積したと思われる領域を抽出することが可能であることも分かった。

一方、後方散乱係数については、植生毎に反射強度が異なり、ミズゴケクラス<ヌマガヤオーダー<湿原外・拋水林となった。時系列変化で見ると、下田代のミズゴケクラス、中田代南側のヌマガヤオーダーにおいて、上昇傾向にあることが分かったが、その要因について明らかにする事はできなかった。

今後は、尾瀬ヶ原全域での後方散乱係数の分布や時系列変化から、植生、池塘、微地形、土壤水分等の影響や変化について詳細な調査が必要である。また、今までの衛星では、年に数回の観測しか行われてこなかったが、2022 年打ち上げ予定の ALOS-4/PALSAR-3 は回帰周期が ALOS-2 と同じ 14 日であるものの、観測幅が PALSAR-2 (50 km) の 4 倍 (200 km) になるため、より頻繁な観測が期待される。そのため、季節ごとの変動をより詳しく調査する事が可能となる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、各種許認可等の手続きを行っていただいた宇野翔太郎氏はじめ事務局スタッフの方に感謝する。データの解析に尽力をいただいた卒業生平山竜也氏、石澤満氏にも感謝する。本論文で使用した SAR データ (JERS-1 SAR, PALSAR-1, PALSAR-2) は、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) より提供を受けた。PALSAR-2 データの一部は PIXEL (PALSAR

Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface) において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) と PIXEL との共同研究契約に基づき提供された。また、本研究は第 4 次尾瀬総合学術調査の一環として行われ、福島県学術教育振興財団および東京大学地震研究所共同利用 (2021-B-03) の援助も受けた。

引用文献

- Hirayama, T. (2018) Long-term observation using backscattering coefficient of multiple satellites in Oze marsh., Graduation thesis, University of Aizu, Aizuwakamatsu.
- Ishizawa, M. (2020) Long-term monitoring of environmental changes in Oze marsh using backscattering coefficient of satellite radar., Graduation thesis, University of Aizu, Aizuwakamatsu.
- Ito, N. (2013) A pilot study based on PALSAR/ALOS for Hydrological monitoring of snowy highland marsh, Oze., Graduation thesis, University of Aizu, Aizuwakamatsu.
- 環境省(2017) 自然環境調査 WEB - GIS, 植生調査(1/2.5 万) 第 6 - 7 回植生調査 (1999-2012/2013-). 環境省生物多様性センター (<http://gis.biodic.go.jp/webgis/index.html>, 2017 年 10 月 18 日時点).
- 日本リモートセンシング学会編 (2011) 基礎からわかるリモートセンシング. 理工図書.
- 豊崎徳久, 小川佳子, 久田泰広, 出村裕英, 祖父江真一 (2015) ALOS/PALSAR データ解析に基づく厳冬期の多雪高層湿原における水の浸潤条件. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会予稿集.