



Working Paper No. 2

# Aakash Working Paper

Sentinel-2/MSI データを用いたインド・  
パンジャール州における野焼き火元画素の抽出条件

于琨  
(奈良女子大学)

村松加奈子  
(奈良女子大学)

March 2023



This Aakash Working Paper No.2 is licensed under a Creative Commons Attribution - Credit must be given to the creator, Noncommercial-No Derivatives 4.0 International License.



Published by

Aakash Project of Research Institute for Humanity and Nature  
457-4 Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto, 603-8047 JAPAN

This publication is available in electronic format:

**Aakash Project Website** (<https://aakash-rihn.org>)

**RIHN Institutional Repository** (<https://chikyu.repo.nii.ac.jp/?lang=english>)

#### **About the Aakash Working Papers**

These working papers are based on the work of the Aakash Project at the Research Institute for Humanity and Nature (RIHN), Kyoto, Japan.

This study addresses air pollution caused by the large-scale post-harvest burning of rice straw in October and November in the Indian states of Punjab and Haryana. The burning results in severe air pollution in the areas around it, affecting public health and the well-being of hundreds of millions of people. Therefore, the Aakash project aims to encourage the social change needed to keep air clean, improve public health, and develop sustainable agriculture in northwestern India.

The aim of this series is to share the initial findings and lessons learned from the research studies conducted by the Aakash project. By sharing new knowledge in a prompt manner, we will be able to identify complexities and develop solutions faster than if this was not done. In addition, reporting detailed information and data that cannot be presented in a general paper will create new areas of knowledge. We hope that the publication of this series will stimulate discussion among project members and facilitate communication with academic and general stakeholders outside the project.

# Sentinel-2/MSI データを用いたインド・パンジャーブ州 における野焼き火元画素の抽出条件

## Selection criteria of agricultural burning pixels using Sentinel-2/MSI data in Punjab, India

于琨<sup>1,i</sup>・村松加奈子<sup>1\*</sup>

奈良女子大学

Kun YU<sup>1,i</sup>, and Kanako MURAMATSU<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Nara Women's University, Japan

\*Corresponding author (muramatu@es.nara-wu.ac.jp)

### Abstract

High concentrations of PM<sub>2.5</sub> in Delhi, India, are a health concern. Main emission sources of PM<sub>2.5</sub> are smoke from factories and exhaust gas from cars, but considerable amount of smoke from burning of agricultural residues is significant. Satellite observation is useful to monitor the fires from burning agricultural residues. We examined characteristics and seasonal changes in spectral reflectance and normalized vegetation index (NDVI) at the origin-of-fire by burning of agricultural residues. The reflectance in shortwave infrared (SWIR) of 2190 nm ( $R_{\text{SWIR}2190}$ ) was higher than 0.4, and the ratio between two SWIR ( $R_{\text{SWIR}2190}/R_{\text{SWIR}1610}$ ) was higher than 1.25. That was specific characteristic for the origin-of-fire. Most landcover such as water, vegetation and city area did not have that characteristic, but specific city area which had relatively high temperature such as brickyards had similar characteristics of  $R_{\text{SWIR}2190}$  was around 0.4. It was needed to remove hot pixels such as brickyards from candidate pixels of origin-of-fires. To confirm the pixel being farm by detecting vegetation signal, the condition was useful that the number of times with NDVI being higher than 0.85 was greater than 1 in a year. The pixels after agricultural burning showed gray in natural color composite image, and the spectral reflectance pattern was different from that in harvest and post-harvest time. From these results, it is suggested that after burning area could be extracted from satellite image, even if satellite could not observe on time of burning agricultural area. Further study with using ground survey data is needed to identify the agricultural burning pixels and estimate identify accuracy.

キーワード：短波長赤外の反射率、植生指標 NDVI、季節変化

*Keywords:* Reflectance of short wavelength infrared, vegetation index NDVI, seasonal changes

## 1. はじめに

インド・デリーにおける 2020 年の PM<sub>2.5</sub> の年間平均値は 84.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  で、世界最悪レベルである (IQAir, 2021)。PM<sub>2.5</sub> は人間の健康に様々な悪影響を与えることが知られている (Dey et al., 2012; Dandona et al., 2019)。デリーの北西にあるパンジャール州はインドの重要な農業生産地域であり、大量の農業残渣が焼却されていることが知られている。そのために発生する大気汚染物質の影響はデリーを含むヒンドゥスタン平野全域に影響を与えると考えられている (Kaskaoutis et al., 2014; Sarkar et al., 2018)。デリーでの大気汚染を考える上でも、排出源として近隣の工場の煙や自動車の排気ガスの他に、デリー首都地区近隣州のパンジャール州やハリヤーナー州における農業残渣焼却、すなわち「野焼き」からの煙が無視できない (Cusworth et al., 2018; Takigawa et al., 2020)。

野焼きからの大気汚染物質排出の影響評価のためには、野焼きが行われた場所のモニタリングが必要である。人工衛星に搭載されたセンサによる観測データを用いて、広域を周期的に観測することができる。NASA (アメリカ航空宇宙局) の Terra 衛星・Aqua 衛星に搭載された MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) センサや、S-NPP 衛星に搭載された VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) センサのデータから、それぞれ、1 km、375 m の空間分解能で “active fire” プロダクト (Justice et al., 2002; Schroeder et al., 2014) が作成され利用されている。これらの “active fire” の検出では、「火」の輝度温度が他の被覆より高いことを、アルゴリズムの基本としている。これらの衛星は数日毎に決まった時間に地球を観測する。森林火災のように鎮火までに数日かかる場合は、「火」からの高温がセンサでも観測される確率が高い。一方、野焼きのように燃焼時間が短い場合には、衛星観測時に行われていた野焼きのみが観測されるため、実際に行われた野焼きの一部しか観測できないと考えられる。また、MODIS センサの可視から近赤外波長帯での空間分解能は 250 m ~ 500 m であり、農地 1 枚あたりのサイズに比べて粗い。欧州宇宙機関 (European Space Agency (ESA)) が 2015 年と 2017 年にそれぞれ打ち上げた Sentinel-2A/2B 衛星 (ESAa) には MSI (Multispectral Instrument) センサが搭載されており、比較的高頻度 (5 日毎)・高空間分解能 (10 m または 20 m) で全球を観測している。10 m ~ 20 m の空間分解能では野焼きの煙や農地の形まで観測が可能である。

本論文では、インド・パンジャール州における野焼きの動態把握のため、MSI センサ観測のデータを用いて野焼き火元やその他の被覆の分光反射率の特徴解析を行い、野焼き火元画素の抽出条件を決めることを目的とした。また、野焼き後の分光反射率の変化から、野焼きの痕跡と考えられる画素ではどのような分光反射率のパターンを示し、そのパターンが何回観測されるかについて考察し、野焼き跡地検出の展望について述べる。

## 2. 解析領域と使用データ

解析領域はインド・パンジャール州南部の、北緯 30°42'21" ~ 30°16'51"、東経 75°01'52" ~ 75°31'11" の約 2200 km<sup>2</sup> とした。パンジャール州では、1970 年代半ば以降、雨期 (カリフ期) に稲作、米収穫後の乾期 (ラビ期) に小麦の二毛作が行われている (藤田、2006)。

Sentinel-2/MSI で観測された 2019 年 1 月 13 日 ~ 12 月 4 日までの 32 シーンの大气補正済み表面反射率データ (S2MSI2A) (ESAa) を使用した。Sentinel-2/MSI データを以後 MSI データと記述する。使用した観測波長帯の中心波長は 490 nm (Band 2)・560 nm (Band 3)・665 nm (Band 4)・842 nm (Band 8)・1610 nm (Band 11)・2190 nm (Band 12) の 6 バンドで、それぞれ青 (Blue)・緑 (Green)・赤 (Red)・近赤外 (NIR)・短波長赤外 1 (SWIR1)・短波長赤外 2 (SWIR2)



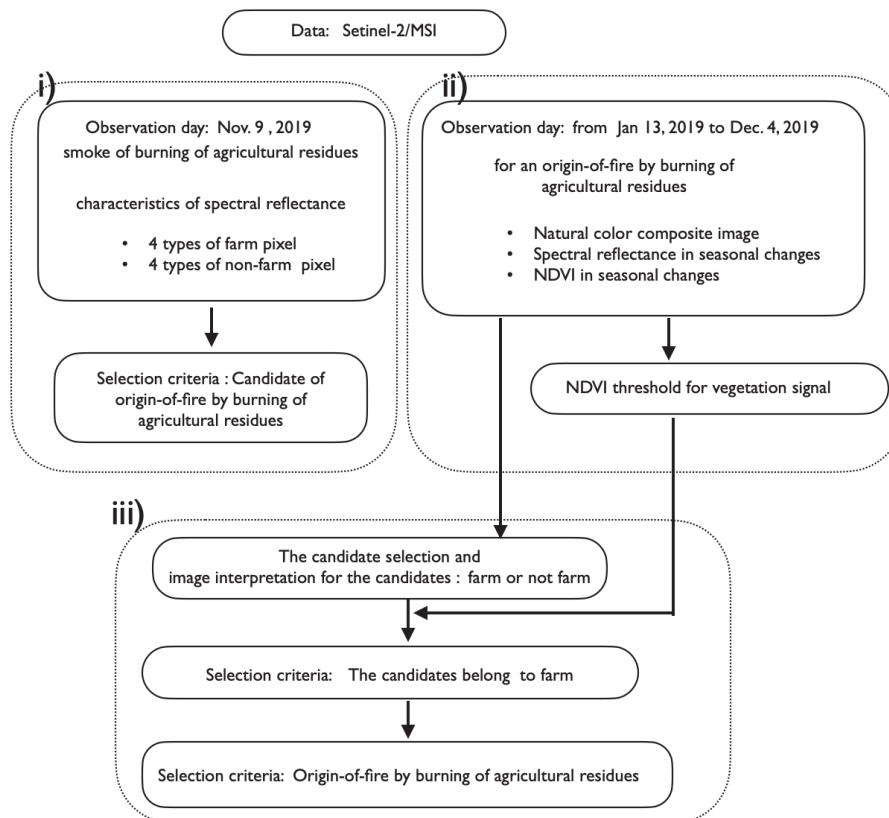


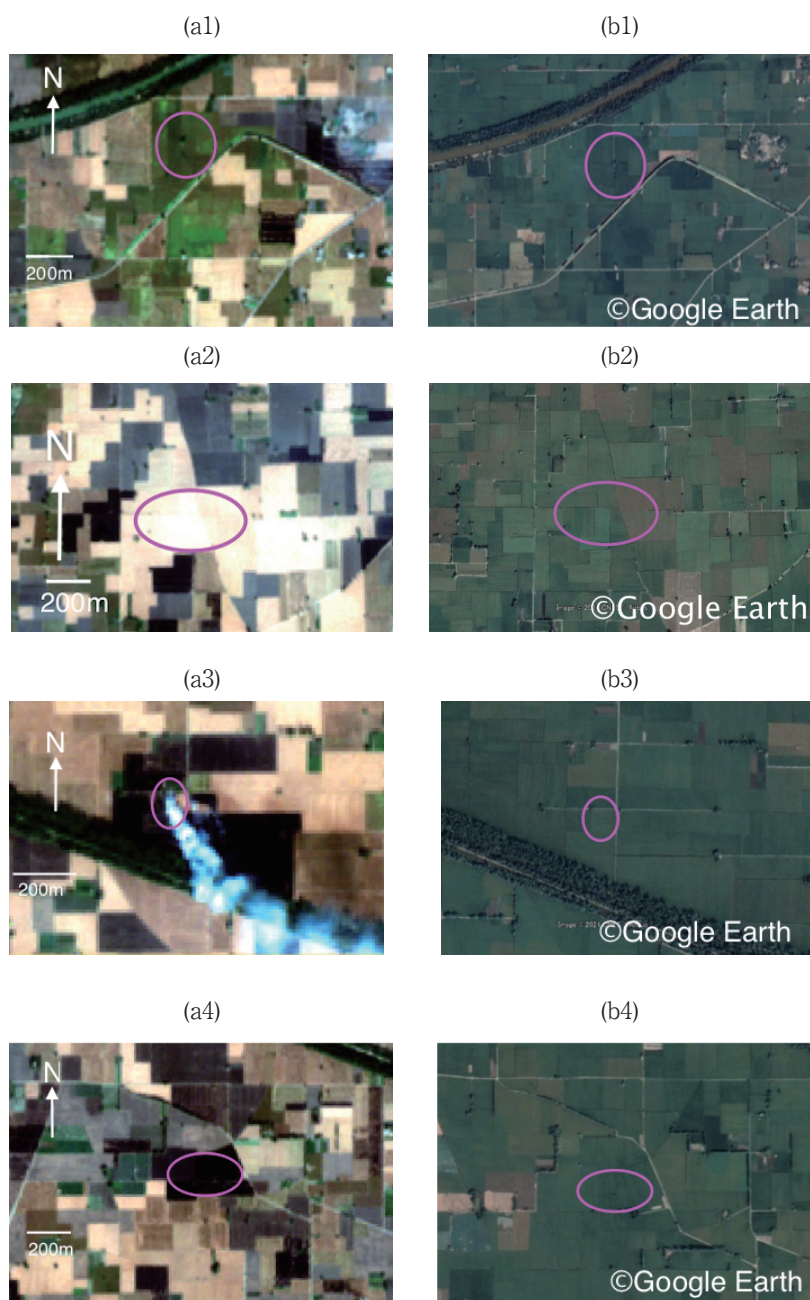
Figure 1. Flow of this analysis

と表す。空間分解能は Band2~4 と Band8 が 10 m、Band11~12 が 20 m である。なお、Band11 と Band12 はリサンプリングし、空間分解能を 10 m に補正した。MSI データの解析には、欧州宇宙機構が開発した衛星データ画像処理ソフト SNAP (Sentinels Application Toolbox) (ESAc) を用いた。また、土地被覆を画像判読するため、Google Earth の画像をソフトウェア Google Earth Pro で処理した。

### 3. 解析方法

解析の流れを Figure 1 に示す。まず、i) 野焼きによる煙が観測された 2019 年 11 月 4 日の MSI データから、次の 8 種類の土地被覆の分光反射率をサンプリングし、その特徴を調べた。農地からはナチュラルカラー合成画像で緑色に見える農地と黄色に見える農地（それぞれ、以後「緑の農地」と「黄色の農地」と記述する）、野焼きによる煙が観測され煙の発生場所と考えられる場所（以後「野焼き火元」と記述する）、ナチュラルカラー合成画像で黒く見え「野焼き跡地」と考えられる 4 種類である。「緑色の農地」は農作物の成長期と考えられ、「黄色の農地」は、収穫期あるいは収穫後と推測される。農地以外では水域、森林域、市街域と、「野焼き火元」同様に表面温度が比較的高い被覆物として煉瓦焼き工場をサンプリングした。これらのサンプリング場所は、2019 年 11 月 4 日に観測された MSI データのナチュラルカラー合成画像・その前後に観測された画像・Google Earth の画像でその色・形状・テクスチャ・シーンによる色の変化から画像判読し決めた。サンプリングした各被覆の分光反射率の特徴解析から、「野焼き火元」の候補地を抽出する条件を決めた。

次に、ii) 野焼き前後で分光反射率がどのように変化するかを詳細に調べるため、i) で野焼き火元画素と判読した画素周辺のナチュラルカラー合成画像と「野焼き火元」画素の分光反射率の季節変化を調べた。また、農作物の成長時の分光反射率は植生の分光反射率の特徴を示すため、「野焼き火元」画素の植生指標 NDVI ( $= (\text{NIR の反射率} - \text{Red の反射率}) / (\text{NIR の反射率} + \text{Red の反射率})$ ) の季節変化を調べた。「野焼き火元」画素では、農作物の成長期に NDVI は植生のシグナルとしてどのくらいの値以上を示すのかを調べ、植生のシグナルとしての NDVI の閾値を決めた。



**Figure 2.** Examples of MSI natural color composite image interpretation for (a1) green farm, (a2) yellow farm, (a3) origin-of-fire for agricultural burning, (a4) burned area. (b1–b4) Google Earth images for the same area of MSI image for (a1–a4), respectively.

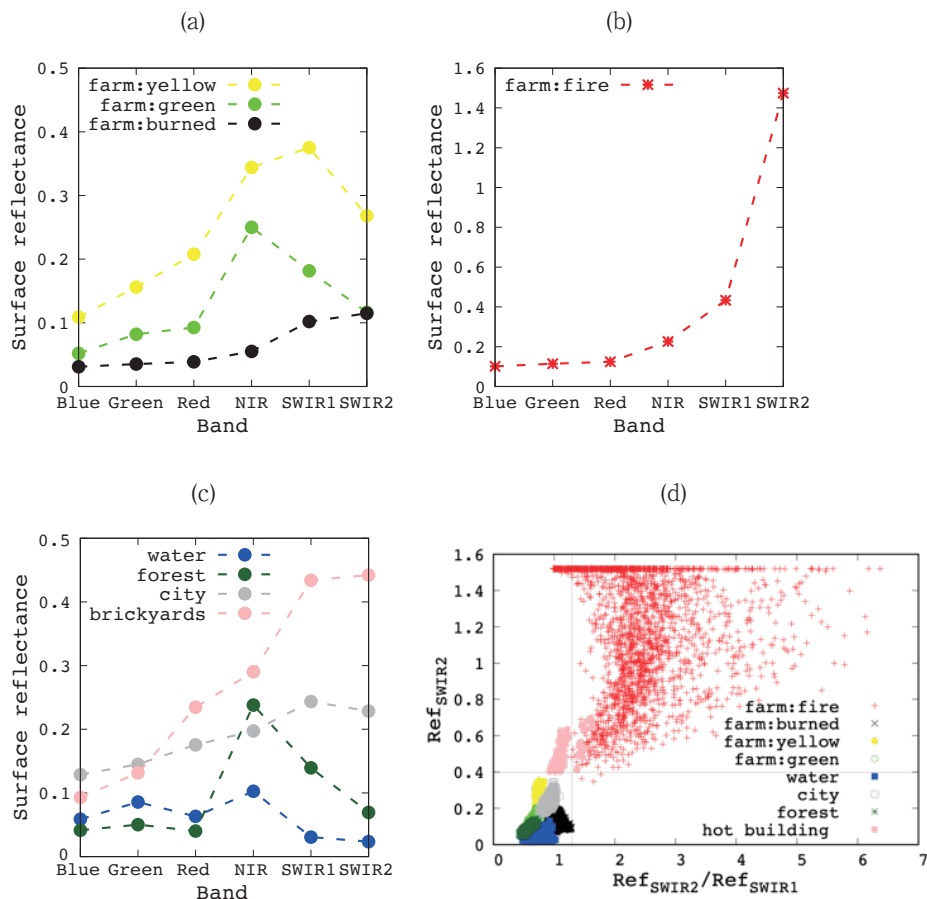
次に、iii) i) の条件を1年間のデータに適用し「野焼き火元」候補地と抽出された画素すべてを画像判読により、農地であるかを確認した。ただし、「野焼き火元」候補地が周辺とは独立して1画素のみ抽出された場合、画像判読がむずかしいため、「野焼き火元」候補地として抽出された画素が3画素以上隣接していた場合のみ、以後の解析に用いた。また、画像判読には、MSIのナチュラルカラー合成画像とGoogle Earthの画像を用いた。「野焼き火元」候補地が農地である場合は、その画素のNDVIの季節変化で植生の強いシグナルが観測され、農地でない場合は、植生の強いシグナルは観測されない、と考えた。そこで、「野焼き火元」候補地の画素が農地であった場合と、農地ではなかった場合それぞれに対して、年間のNDVIがii) で決めた閾値以上の回数を調べた。その結果から、「野焼き火元」候補地で植生のシグナルが観測される条件を決めた。

## 4. 解析結果と考察

### 4.1 「野焼き火元」候補地の抽出条件

分光反射率のサンプリング場所を決めるため、MSIのナチュラルカラー合成画像での農地の画像判読を行った。Figure 2 (a1) のピンクの線で囲った部分は、「緑の農地」の判読例で、農地の形状と緑色が観測され、Google Earthの画像 (Figure 2 (b1)) からその色・形状・テクスチャから農地であることを確認した。Figure 2 (a2) のピンクの線で囲った部分は、「黄色の農地」の判読例で、Figure 2 (b2) のGoogle Earthの画像から農地であることを確認した。Figure 2 (a3) で「野焼き火元」と判読したピンクで囲んだ部分では、黒い画素から濃い白い色が観測され、その場所から南東へ徐々に白い色が薄くなった。これは「野焼き火元」から煙が立ち上り拡散している状態であると判断した。この場所もGoogle Earthの画像から農地であることを確認した。また、Figure 2 (a3) の「野焼き火元」周辺に黒い画素が観測され、燃焼後であると判断した。Figure 2 (a3) の「野焼き火元」周辺の黒い画素とFigure 2 (a4) のピンクで囲んだ部分は似ており、この黒い画素は「野焼き跡地」と考えられると判読した。

以上と同様の判読にて、「緑の農地」、「黄色の農地」、「野焼き火元」、「野焼き跡地」を画像中からそれぞれ70、39、92、66カ所サンプリングし、その画素の分光反射率の特徴を調べた。農地の分光反射率をFigure 3 (a-b) に、比較のための農地以外の分光反射率をFigure 3 (c) に示す。「緑の農地」 (Figure 3 (a) farm:green) では森林 (Figure 3 (c) forest) に比べて赤波長での反射が若干高く、赤色系の土壌の反射が含まれていると考えられた。「黄色の農地」 (Figure 3 (a) farm:yellow) では、可視域で波長が長くなるにつれて反射率が高くなり、近赤外、中間赤外の波長帯では反射率が0.35付近と高くなっていた。このスペクトルの特徴は裸地や枯れた植生が示す反射率のパターンである。「野焼き跡地」のスペクトルをFigure 3 (a) farm:burnedに示す。可視域の反射率が0.05程度と低いが、NIR、SWIR1、SWIR2と波長が長くなるにつれて若干高くなり0.1程度であった。一方、水域 (Figure 3 (c) water) では、可視からNIRでの反射率が0.05~0.1程度と低く、SWIR1とSWIR2ではほぼ反射率が0であり、SWIR1、SWIR2で黒い農地と異なった。一方市街域 (Figure 3 (c) city) では、可視域の反射率が0.1以上と水域や森林域より高く、可視からSWIR1にかけて反射率の値が高くなった。Figure 3 (b) の「野焼き火元」 (farm:fire) では、分光反射率が可視光Blueから近赤外NIRにかけて0.2より低く、他の土地被覆より短波長赤外SWIR2の値が高くなる傾向が見られ、このサンプルではSWIR2が1.0より高くなった。「野焼き火元」は通常の土地被覆に比べ高温と考えられる。絶対温度Tの物体は、Tの4乗に比例したエネルギーを放射しており、物体の温度が高いほど、放射エネルギーのピーク

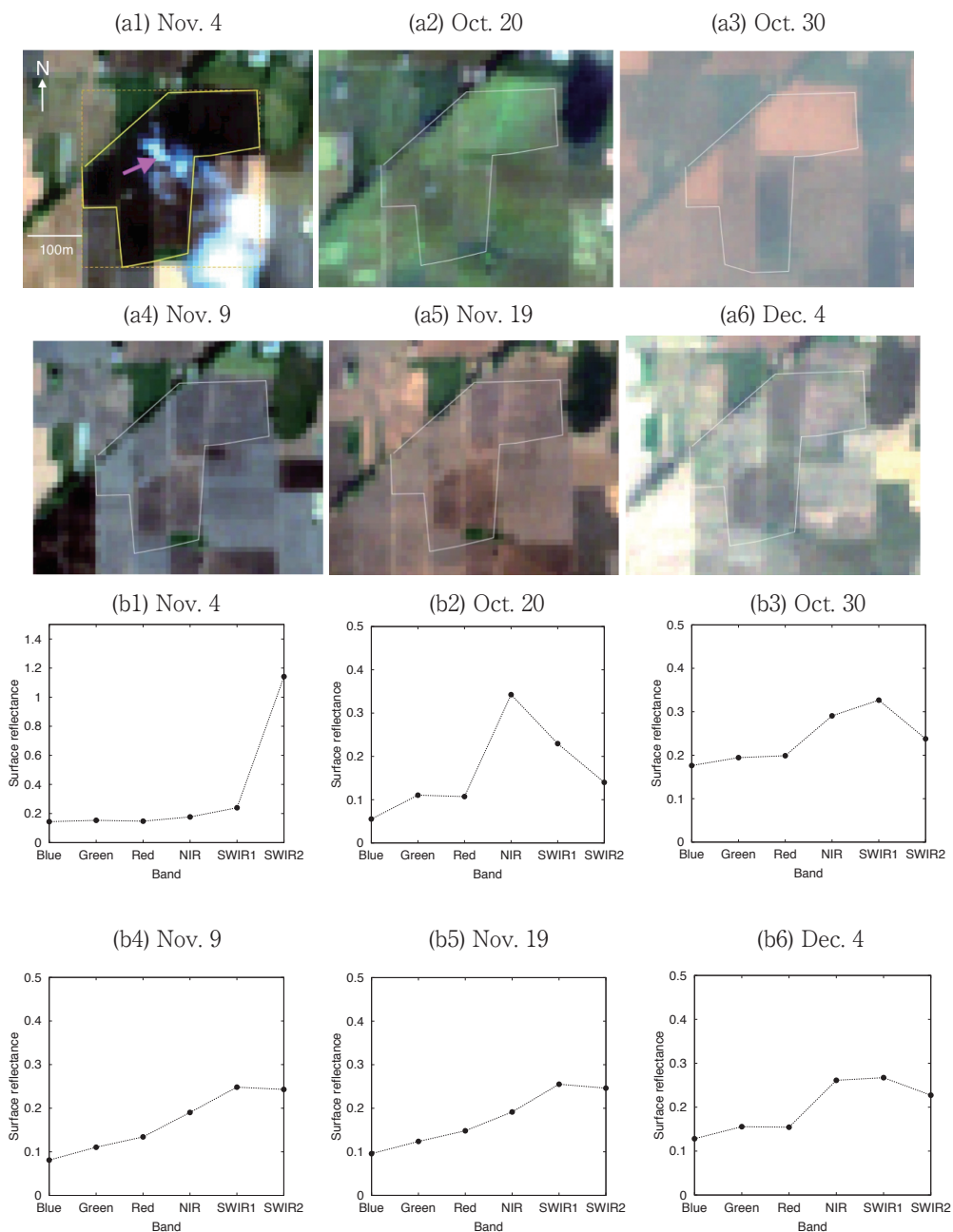


**Figure 3.** Spectral reflectance and scatter plots for various types of land covers observed by Sentinel-2/MSI sensor on November 14, 2019. (a) Spectral reflectance of yellow and green farm in natural color composite image, and post-agriculture-burning area. (b) Spectral reflectance of water, city and forest area. (c) Spectral reflectance of the origin-of-fire of agricultural burning and brickyards. (d) Scatter plots between reflectance of SWIR2 and the ratio of reflectance of SWIR2 and SWIR1.

波長は短くなる。そのため、地表面温度が 30℃ 程度の場合は、放射エネルギーが最大となる波長は 9 μm あたりで、SWIR2 の波長帯での放射エネルギーは無視できるほど小さいが、地表面温度が 50℃、100℃、200℃ の場合 SWIR2 の波長帯での放射エネルギーは、30℃ の場合のそれぞれ約 4、60、2400 倍となるため、SWIR2 の波長帯にも物体からの放射エネルギーの裾野が太陽光の反射に含まれ、反射率が 1.0 より高くなると考えられる。Figure 3 (c) に示した煉瓦焼き工場 (brickyards) では、SWIR2 の反射率が「黄色の農地」(Figure 3 (a) farm:yellow) や市街域 (Figure 3 (c) city) よりも高かった。

「野焼き火元」画素では SWIR2 の反射率が高い特徴があったため、それぞれの土地被覆のサンプリング数を増やし、SWIR2 の反射率 ( $R_{SWIR2}$ ) を SWIR1 の反射率 ( $R_{SWIR1}$ ) で除した比 ( $R_{SWIR2}/R_{SWIR1}$ ) と、 $R_{SWIR2}$  の散布図を作成した (Figure 3 (d))。  $R_{SWIR2}/R_{SWIR1}$  が 1.0 より高くかつ  $R_{SWIR2}$  が 0.4 以上に「野焼き火元」画素が多く分布していた。しかしながら「野焼き火元」以外にも  $R_{SWIR2}$  が 0.4 以上となる被覆が農地ではなく市街域にあり、Figure 3 (d) 中にピンク色 (hot building) で示した。Figure 3 (c) の煉瓦焼き工場も hot building に含まれる。以上より、「野焼き火元」候補地の抽出条件を  $R_{SWIR2}/R_{SWIR1}$  が 1.0 より高くかつ  $R_{SWIR2}$  が 0.4 より高いとした。

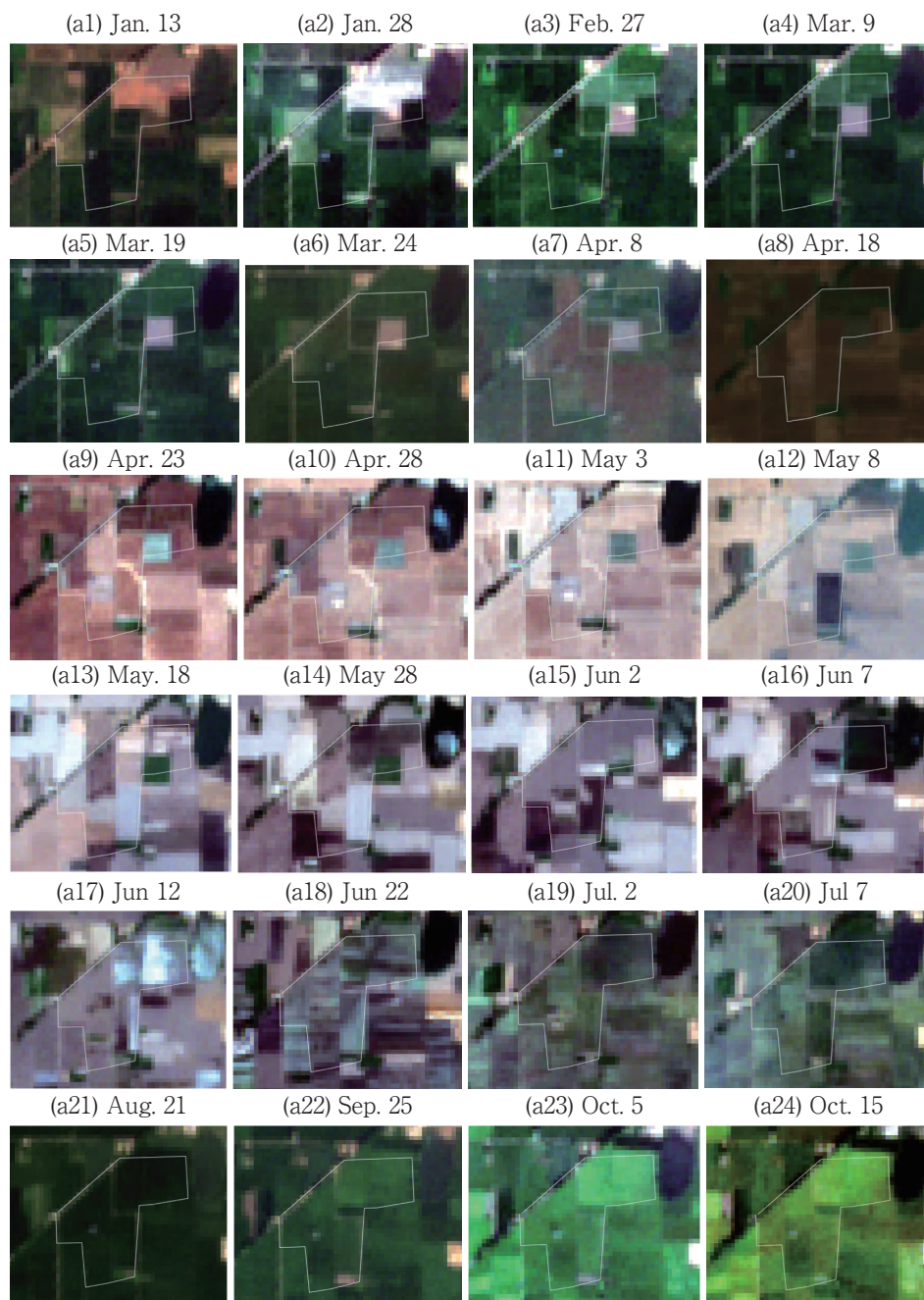




**Figure 4.** (a) Natural color composite image around the origin-of-fire for agricultural burning, and (b) Spectral reflectance of the pixel position of the origin-of-fire on Nov.4 (a1, b1), Oct. 20 (a2, b2), Oct. 30 (a3, b3), Nov. 9 (a4, b4), Nov. 19 (a5, b5), and Dec. 4 (a6, b6). The position of the origin-of-fire pixel is shown with a pink arrow in (a1).

#### 4.2 「野焼き火元」候補地のスペクトルの1年間の季節変化と植生からのシグナルの閾値

解析領域内の Jodhpur 周辺で 11 月 4 日に「野焼き火元」と画像判読された画素周辺の MSI のナチュラルカラー合成画像と分光反射率の 1 年間の変化を調べた。Figure 4 (a1) に「野焼き火元」と判読された周辺の 550 m × 430 m の領域の画像を示す。画像中央から南東に白い野焼きの煙が判読された。同じ場所の 10 月 20 日では画像は緑色、10 月 30 日では黄色、11 月 9 日では灰色、その後、11 月 19 日、12 月 4 日と色が変わっていた。Figure 4 (a1) のピンク色の矢印で示した画素の分光反射率は、11 月 4 日 (Figure 4 (b1)) では、可視から SWIR1 の反射率の値が 0.2



**Figure 5.** Natural color composite image around the origin-of-fire from Jan. 13 to Oct. 15. The area is same as Figure 5 (a1). The observation day of the image is written next to right of the figure number.

程度で、SWIR2の反射率の値が1より高い、典型的な「野焼き火元」のスペクトルを示していた。10月20日（Figure 4 (b2)）では「緑の農地」のパターンを、10月30日（Figure 4 (b3)）では「黄色の農地」のパターンを示していた。また、11月9日（Figure 4 (b4)）では、反射率も「黄色の農地」のパターンとは異なりSWIR1とSWIR2の値が0.25付近ではほぼ同じであった。その後、11月19日（Figure 4 (b5)）は、11月9日と似たパターンを示し、12月4日（Figure 4 (b6)）では、「黄色の農地」のパターンに似た形となった。以上より、10月20日の時点では緑色の植生（作物）があり、10月30日では、収穫期あるいは収穫後で11月4日に野焼きを行い、11月9日、

19 日では野焼きを行った痕跡が観測されたと考えられる。

以上の結果を元に、Figure 4 と同じ領域のナチュラルカラー合成画像をみていく。Figure 5 (a1-a6) の 1 月から 3 月の画像では、全体的に緑色で、4 月に入ると (Figure 5 (a7)) 若干緑色に茶色が混ざったような色となっていた。4 月から 5 月の初旬 (Figure 5 (a9-a11)) では、全体的に画像は薄茶色となり、5 月中旬から 6 月中旬 (Figure 5 (a13-a18)) では、灰色みを帯びており、7 月初旬 (Figure 5 (a19-20)) では、緑色が少し加わっていた。その後、8 月 (Figure 5 (a21-a22)) から 10 月 (Figure 5 (a23-a24)) にかけて明るい緑色となった。

Figure 4 (a) の「野焼き火元」画素と同じ場所の 1 月から 10 月の分光反射率を Figure 6 に示す。1 月から 3 月初旬 (Figure 6 (a)) では、クロロフィルの吸収が強い青と赤波長の反射率

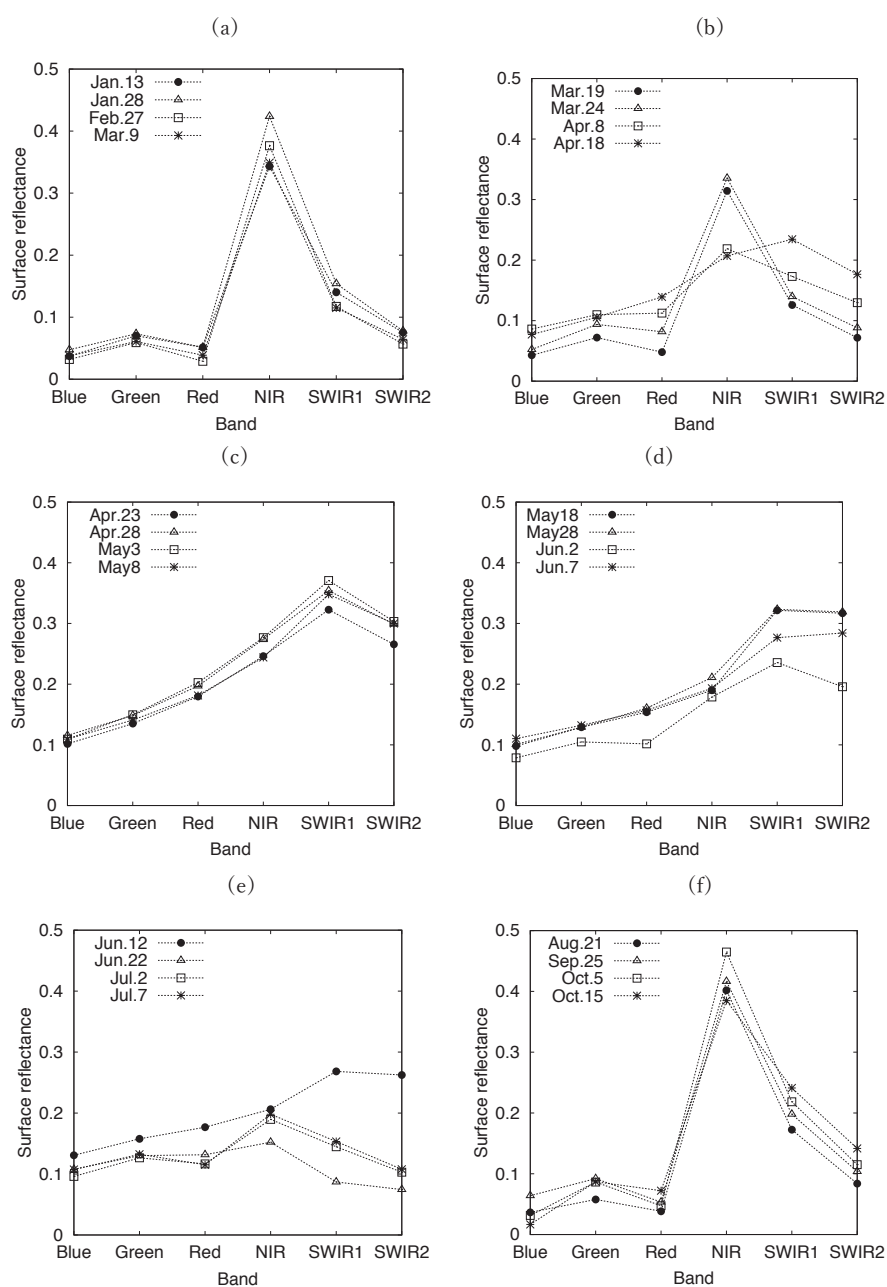


Figure 6. Spectral reflectance of the pixel position of the origin-of-fire (Figure 5 (a)) from Jan. 13 to Oct. 15.



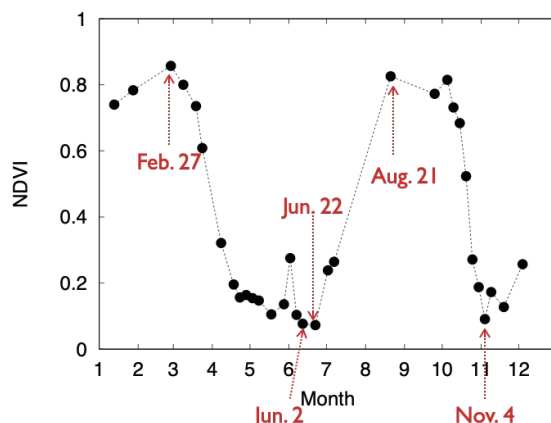


Figure 7. Seasonal changes in NDVI of the origin-of-fire pixel in 2019.

が緑波長より低く、NIRの反射率が高くなる活性な植生のスペクトルが観測された。3月19日から24日、4月8日 (Figure 6 (b)) へと徐々に赤の反射率が高く、NIRの反射率が低くなり、4月18日には「黄色の農地」と同様のスペクトルの形となった。Figure 6 (d) の5月18日、28日と6月12日 (Figure 6 (e)) スペクトルは、Figure 4 (b4-b5) の野焼きの痕跡が残るスペクトルと形は近かった。この期間より前の4月と5月の初旬 (Figure 6 (c)) では、野焼きの痕跡が残るスペクトルと似通ってはいるが、SWIR2がSWIR1より低くなっており、どの程度の野焼きの痕跡なのかはこれらのデータからのみでは判断がむずかしかった。6月22日 (Figure 6 (e)) では、Figure 3 (c) の水のスペクトルと似ており、田に水がはられたと判断した。その後、7月2日、7日に植生のシグナルが若干観測され、田植えが行われたと判断した。その後、Figure 6 (f) では、緑の植生のスペクトルが観測され、農作物が成長したと判断した。

Figure 4 (a1) の「野焼き火元」画素の場所の2019年1月13日から12月4日までの分光反射率 (Figure 4 (b1-b6), Figure 6) から、植生指標 NDVI を計算した結果を Figure 7 に示す。NDVI は2月27日と8月21日に2つのピークが観測され、NDVI の値はそれぞれ、0.857、0.826であった。この2つのピークは、乾期作の小麦収穫の直前と、雨期作の米収穫の直前に対応すると考えられる。NDVI の値が低かったのは、水をはったと考えられる6月22日、「野焼き火元」と判別した11月4日であった。以上より、農作物の活性な植生のシグナルとしての NDVI の閾値を 0.85 とした。

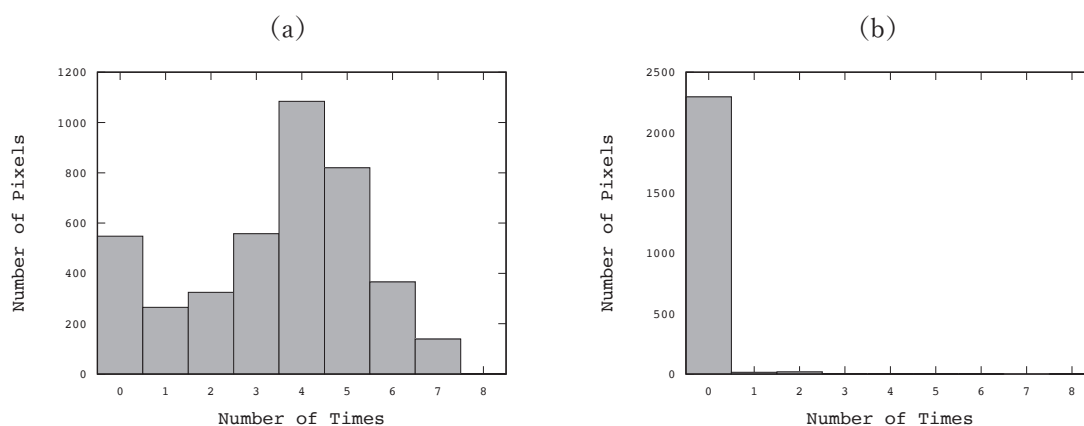


Figure 8. The number of times that NDVI>0.85 in a year. (a)Farm area, (b)non-farm area.

#### 4.3 「野焼き火元」候補地から非農地画素を排除する条件

1年間の MSI データで、「野焼き火元」候補地の抽出条件を通過した解析領域内のすべての画素に対して、農地と非農地を画像判読した。農地と判読した画素数は 4106、非農地と判読した画素数は、2334 であった。画像判読した農地と非農地それぞれに対し、1年間で NDVI が 0.85 以上となる回数を調べた。その結果を Figure 8 に示す。非農地箇所では NDVI が 0.85 以上の回数が 0 回で農地箇所では 1 回以上が多かった。そこで、植生のシグナルを検出する厳しい条件設定として、NDVI の値が 0.85 より高い回数が年間において 1 回以上と決めた。この条件を加えることにより、「野焼き火元」候補地に含まれる煉瓦工場などの誤分類を排除することとした。

以上より、「野焼き火元」の抽出条件は、

$$R_{\text{SWIR2}} > 0.4 \text{ かつ } R_{\text{SWIR2}} / R_{\text{SWIR1}} > 1.0 \quad (1)$$

この (1) の条件を通過した画素に対して、NDVI > 0.85 が年間で 1 回以上と決めた。

#### 4.4 「野焼き跡地」抽出に関する展望

4.2 の「野焼き火元」画素の年間の分光反射率の変化と画像から、「野焼き跡地」の検出の可能性について考察する。Figure 4 (a1) で 11 月 4 日に野焼きの煙が判読されたことから、野焼きの最中であることがわかる。11 月 9 日 (Figure 4 (a4)) の画像では、野焼きが行われた周辺は灰色で、11 月 19 日の画像 (Figure 4 (a5)) では、灰色に黄色が加わった色となつてはいるものの、11 月 9 日と 11 月 19 日のスペクトル (Figure 4 (b4-b5)) では、10 月 30 日 (Figure 4 (b3)) 「黄色の農地」のスペクトルとは異なり、全波長において反射率は低く、特に可視から NIR の反射率では、波長が長くなるにつれて値が高くなっていた。12 月 4 日 (Figure 4 (b6)) では、10 月 30 日 (Figure 4 (b3)) のスペクトルの形にもどっていた。以上から、野焼きの痕跡は、11 月 9 日と 11 月 19 日に見られると判断した。この例では野焼き後 2 週間は野焼きの痕跡が観測されており、5 日に一度観測する Sentinel-2 衛星では、「野焼き跡地」として検出できる可能性があると考えた。ただし、Figure 3 (c) に示す市街域 (city) のスペクトルの形と Figure 4 (b4-b5) は似通っていた。Figure 3 (c) の方が Figure 4 (b4-b5) より可視域において反射率は高めではあったが、建物の影などが画素に含まれると可視域の反射率は低くなり、Figure 4 (b4-b5) のスペクトルとほぼ同じ形になる可能性がある。しかし、市街域では 1 年間の反射率はほとんど変化せず、農地のように植生からの強いシグナルは観測されないと考えられる。1 年間の植生からのシグナルの変化も条件に加えることで、市街域からの誤分類は除去できると考えた。また、Figure 4 (a1) の黄色い点線は、「野焼き火元」周辺の黒い「野焼き跡地」を正方形で囲ったもので、340 m × 340 m のサイズである。この黄色い点線の領域の北東には緑の画素が観測されていた。空間分解能が 340 m 程度のセンサにおいては、観測の軌道によっては、この黄色の枠内を 1 画素とは観測されず、画素位置がずれば、緑のスペクトルや画像中の西にある「黄色の農地」とミックスした画素として観測される可能性があり、スペクトルの形状から「野焼き跡地」の判別は困難になる。以上より、MSI の空間分解能では、50 m × 50 m や 50 m × 100 m のサイズの農地も数十画素として観測でき、「野焼き跡地」の抽出に有用であると考えられる。「野焼き火元」や、“active fire” プロダクトには衛星観測時に野焼きが行われた場合だけが含まれ、野焼き面積の推定は過小評価となる。MSI による「野焼き跡地」の抽出では、野焼き面積において“active fire” プロダクトより優位性があると考えられる。しかしながら「野焼き跡地」では、野焼きの「火」を観測するわけではないため、野焼きの強度は推定できない。

## 5. まとめ

「野焼き火元」の分光反射率の特徴と、「野焼き跡地」の分光反射率の特徴について調べた。その結果、「野焼き火元」候補地の抽出条件を  $R_{\text{SWIR2}}/R_{\text{SWIR1}}$  が 1.0 より高くかつ  $R_{\text{SWIR2}}$  が 0.4 以上とした。11 月 4 日の MSI の解析領域に上記条件を適用し、「野焼き火元」候補地を抽出した。「野焼き火元」候補地には、煉瓦焼き工場のように「野焼き火元」候補地の条件を通過するものもあった。そのため、11 月 4 日に「野焼き火元」と画像判読した画素の 1 年間の NDVI を調べたところ、作物の成長期には NDVI が 0.85 以上の値となった。そこで、11 月 4 日の MSI データで野焼き候補地の条件を通過した画素に対して、農地と非農地を 11 月 4 日前後の MSI 画像や Google Earth 画像を用いて画像判読した。農地と非農地に判読された画素に対して、1 年間で NDVI の値が 0.85 より大きい回数を調べた結果、1 年間で NDVI の値が 0.85 以上を 1 回以上観測される条件を加えることにより、煉瓦焼き工場のような植生のない非農地を除去することとした。

また、「野焼き跡地」のナチュラルカラー合成画像は黒色または灰色を示し、分光反射率のパターンは、収穫期あるいは収穫後の「黄色い農地」と異なった。また、「野焼き火元」が観測された 11 月 4 日以降、11 月 9 日と 11 月 19 日のスペクトルには「野焼き跡地」と考えられるスペクトルが観測されおり、今回の例では野焼き後、約 2 週間は「野焼き跡地」を検出するチャンスがあると考えられる。また、MSI の空間分解能は、50 m × 50 m 程度の「野焼き跡地」も数十画素で観測されるため、フェノロジーの異なった隣あう農地のスペクトルが混ざりあう率が低く、「野焼き跡地」の抽出に有効であると判断した。

本研究では「野焼き火元」や「野焼き跡地」は、MSI のナチュラルカラー画像で観測された煙や農地の形状からスペクトルのサンプリング場所を決めた。「野焼き火元」や「野焼き跡地」のスペクトルの特徴をより正確に解析するためには、地上での野焼き箇所や野焼き跡地の調査データを用いて行う必要がある。「野焼き跡地」の抽出条件の決定と「野焼き跡地」面積の推定は次の課題として取り組む予定である。

## 謝辞

本研究は、人間文化研究機構総合地球環境学研究所の Aakash プロジェクト (14200133) の一環として行われました。

## 参考文献

- Cusworth, D. H., Mickley, L. J., Sulprizio, M. P., Liu, T., Marlier, M. E., DeFries, R. S., Guttikunda, S. K. & Gupta, P. (2018). Quantifying the influence of agricultural fires in northwest India on urban air pollution in Delhi, India. *Environ. Res. Lett.*, *13*, 044018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab303>
- Dandona, L. & India State-Level Disease Burden Initiative Air Pollution Collaborators (2019). The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: the Global Burden of Disease Study 2017, *Lancet Planet Health*, *3*, e26–39. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30261-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30261-4)
- Dey, S., Girolamo, L. Di, Donkelaar, A. van, Tripathi, S., Gupta, T. & Mohan, M. (2012). Variability of outdoor fine particulate (PM<sub>2.5</sub>) concentration in the Indian subcontinent: a remote sensing

- approach, *Remote Sensing of Environment*, 127, 153–61. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.08.021>
- ESAA, Sentinel online, Sentinel-2, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2> (Accessed 2023-02-21)
- ESAb, Sentinel online, Level-2A Algorithm Overview, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-2a/algorithm> (Accessed 2023-02-21)
- ESAc, Toolbox, SNAP, <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (Accessed 2023-02-21)
- 藤田幸一 (2006). インドの農業・貿易政策の概要, 平成 17 年度アジア大洋州地域食料農業情報調査分析検討事業報告書.
- IQAir (2021), 2020 WORLD AIR QUALITY REPORT -Region & City PM2.5 Ranking.
- Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin F. & Kaufman, Y. (2002). The MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, 83, 244–262. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00076-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00076-7)
- Kaskaoutis, D. G., Kumar, S., Sharma, D., Singh, R. P., Kharol, S. K., Sharma, M., Singh, A. K., Singh, S., Singh, A., & Singh, D. (2014). Effects of crop residue burning on aerosol properties, plume characteristics, and long-range transport over northern India, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9), 5424–5444. <https://doi.org/10.1002/2013jd021357>
- Sarkar, S., Singh, R. P. & Chauhan, A. (2018). Crop Residue Burning in Northern India: Increasing Threat to Greater India, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(13), 6920–6934. <https://doi.org/10.1029/2018jd028428>
- Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L. & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment, *Remote Sensing of Environment*, 143, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>
- Takigawa, M., Patra, P. K., Matsumi, Y., Dhaka, S. K., Nakayama, T., Yamaji, K., Kajino, M. & Hayashida, S. (2020). Can Delhi's Pollution be Affected by Crop Fires in the Punjab Region?, *SOLA*, 16, 86-91. <https://doi.org/10.2151/sola.2020-015>







Research Institute for  
**Humanity and Nature**  
大学共同利用機関法人 総合地球環境学研究所  
人間文化研究機構