

令和 4 年 6 月 17 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00542

研究課題名(和文) リモートセンシング観測による里山林の代表的な樹種の判別と分布域の地図化手法の開発

研究課題名(英文) Development of algorithm for discrimination and mapping of typical tree species in "Satoyama" ecosystem by remote-sensing observation

研究代表者

永井 信(Nagai, Shin)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(地球表層システム研究センター)・主任研究員

研究者番号：70452167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：地上(デジタルカメラ・ドローン・マニュアル)と衛星(高空間分解能を持つ)観測データの相互の解析による、里山林の代表的な樹種の判別と分布域の地図化を目的として、茨城・千葉・東京・横浜・京都・高知の里山林や植物園などにおける地上真値の取得及び、地上と衛星観測データの解析を行った。その結果、(1)衛星による樹種判別を可能とする植物季節の特徴と(2)スタジイ・コナラ・クヌギの開葉や開花の気象要因が解明され、(3)高空間分解能衛星(10m)によるスタジイとマテバシイの樹種判別と分布域の地図化が達成された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

落葉樹と比べて植物季節が不明瞭である常緑広葉樹であっても、高空間分解能を持つ衛星は、開葉や開花という特徴的な植物季節を広域的に観測可能であること、そして、その特徴に基づいた樹種判別と分布域の地図化が可能であることを明らかにした点は学術的な意義がある。人々による生態系利用の低下や気候変動が植生遷移に対して大きな影響を及ぼしている里山林を対象とした衛星観測の高精度化は、生物多様性や生態系サービスの低下などの時空間分布の変動を評価する上で社会的な意義がある。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is discrimination of typical trees in Satoyama forest and mapping of their distributions by integrative analyzing in situ (digital camera, drone, and manual observation) and satellite (with a high spatial resolution) observed data. Towards this, we conducted field studies at Satoyama forest, botanical gardens, and so on in Ibaraki, Chiba, Tokyo, Yokohama, Kyoto, and Kochi and analyzed in situ and satellite observed data. In consequence, we identified (1) the useful characteristics of tree phenology for tree discrimination by satellite observed data and (2) the meteorological factor for leaf flush and flowering of *Castanopsis sieboldii*, *Quercus serrata*, and *Quercus acutissima*, and then achieved (3) the tree discrimination of *C. sieboldii* and *Lithocarpus edulis*, and mapping of their distributions by analyzing satellite observed data with a high spatial resolution (10 m).

研究分野：季節学、生気象学、リモートセンシング、植生気候学、生態学

キーワード：植物季節(フェノロジー) リモートセンシング ドローン タイムラプスカメラ 里地里山 スタジイ 樹種分類 クヌギ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

森林が提供する様々な生態系サービスは、生物多様性により発揮される。しかしながら、近年の気候変動や人々による過度/過少な生態系利用は、生物多様性を低下させ、その結果、生態系サービスを低下させるという可能性が危惧されている。生物多様性や生態系サービスの変動を評価するためには、樹種の構成やその分布を広域的かつ経年的に地図化することが喫緊の課題の一つとなる。このとき、人々による生態系利用の低下が植生遷移に対して大きな影響を及ぼしている里山林を対象とした重点的な解析、そして、衛星観測により樹種判別を容易とする適切な時期や各樹種の特徴的な植物季節についての知見の収集は、現地踏破、空中写真、衛星観測データの解析に基づいた既往研究が持つ限度や精度の問題を解決するために重要な着眼点となる。

研究代表者及び分担者はこれまで、国内外に位置する様々な生態系観測サイトにおける長期連続的な植物季節観測 (Phenological Eyes Network: <http://pen.envr.tsukuba.ac.jp/>)・国内の様々な生態系サイトを対象としたドローンや無人小型ヘリコプターによる生態系観測・高空間分解能を持つ衛星データの解析による「高解像度土地利用土地被覆図」の作成を継続的に行い、本研究の立案に繋がる次の3点を明らかにした。すなわち、(1)樹種ごとの植物季節の特徴検出の可能性と重要性・(2)ドローンによる植物季節観測の重要性・(3)土地利用・土地被覆分類のための植物季節観測の重要性である。これらの結果は、ある時期に、ある樹種の、ある特徴的な植物季節を対象とした観測により、常緑・落葉を問わず、ドローンや衛星観測により樹種判別と分布域の地図化が可能となることを示唆した。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、地上 (デジタルカメラ・ドローン[無人航空機]・マニュアル) と衛星 (高空間分解能を持つ) 観測データの相互の解析による、我が国の里山林の植生遷移の各過程を代表する樹種であるスタジイ (*Castanopsis sieboldii*) / ツブラジイ (コジイ: *Castanopsis cuspidata*) ・コナラ (*Quercus serrata*) ・クヌギ (*Quercus acutissima*) ・モウソウチク (*Phyllostachys edulis*) の広域性と詳細性を兼ね備えた分布図を作成することある。このとき、樹種判別の高精度化にとって有用であると考えられる、[1]特徴的な植物季節が生じる時期の予測と、[2]特徴的な植物季節と色や分光反射率の対応関係に着目する。

## 3. 研究の方法

2017年度から2021年度までの5年間にわたり、茨城・千葉・東京・横浜・京都・高知の里山林・大学や研究所の構内・植物園における地上真値の取得とデータ解析を中心として、以下の4項目を行った。

- (1) デジタルカメラまたはマニュアルによるスタジイ/ツブラジイ・コナラ・クヌギ・モウソウチクの植物季節観測
- (2) ドローンによる里山林の植物季節観測
- (3) 上述(1)の樹種の開花日や開葉日の予測モデルの開発
- (4) 空中写真や高解像度な衛星観測データの解析による樹種判別と分布域の地図化  
各項目の具体的な内容に関して、以下に述べる。

- (1) デジタルカメラまたはマニュアルによるスタジイ/ツブラジイ・コナラ・クヌギ・モウソウチクの植物季節観測  
及び

- (2) ドローンによる里山林の植物季節観測:

各サイトにおいて行った地上観測は、表1にまとめられる。特記すべき事項として、小石川植物園では2021年の4~5月にかけて、スタジイの指標木を対象に、葉の形質(対象としたシュート内の葉の枚数・大きさ・SPAD[クロロフィルの指標となる値]・角度分布)と分光を約1週間ごとに測定した。また、各スタジイ個体の位置情報を調査した。みほの森サイト(東金市)では最大約1~2ヶ月ごとに(年毎に間隔は異なる)京都東山地区では、ツブラジイの開花時期を中心に毎年、ドローンにより空中写真を撮影した。横浜研究所では、コナラやクヌギを含む様々な樹種を対象に、毎年3~5月にかけて、開葉や開花季節の様子をほぼ毎日観察し、観察シートや写真に記録した。みほの森サイトと玉川大では、1時間ごとの気温を連続的に計測した。

表 1. 地上観測のまとめ。カッコ内は、対象樹種を示す。

場所	タイムラプスカメラによる植物季節観測	マニュアル観測		ドローンによる観測
		目視観察や写真撮影	シュートの観測(形質・分光)	
茨城	筑波大学植物見本園	(ブナ・スダジイ・シラカシ・コナラ)		
	県内の里山林			
千葉	みほの森サイト(里山林)	(スダジイ・コナラ・モウソウチク)		
	房総半島(里山林)			
東京	小石川植物園(栽植/二次林)		(スダジイ)	
	国立科学博物館附属自然教育園(自然林)	(コナラ/スダジイ/ツブラジイ)		
	玉川大学構内(二次林)	(コナラ)		
横浜	海洋研究開発機構横浜研究所構内	(クヌギ・ヤマザクラ・モウソウチク)		
京都	吉田山(里山林)	(ツブラジイ)		
	東山地区(二次林)			
高知	高知大学構内	(スダジイ)		

(3) 上述(1)の樹種の開花日や開葉日の予測モデルの開発

上述(1)により得た植物季節画像や、国立科学博物館附属自然教育園において長期的に観測・公開されているスダジイの満開日の記録と、気温データとの対応関係を調査した。また、有効積算温度によるコナラやくヌギの開葉日の推定について検討した。

(4) 空中写真や高解像度な衛星観測データの解析による樹種判別と分布域の地図化

上述(1)及び(2)により得たスダジイ・ツブラジイなどの特徴的な植物季節の地上真値に基づいて、各観測地点周辺において、国土地理院より公開されている空中写真や高空間分解能を持つ Sentinel-2A/2B 衛星 (10m・5日ごとの観測) や GEOEye-1 衛星 (1.64m) により観測された分光反射率や植生指数を解析し、樹種判別と分布域の地図化の可能性を検討した。樹種判別の手法として、教師付きの機械学習のアルゴリズムである SVM (Support Vector Machine)・ランダムフォレスト・KNN (k-Nearest Neighborhood) を用いて、Sentinel-2A/2B 衛星で得られた赤・緑・青・近赤外の計 8 バンドの反射率データを解析した。

4. 研究成果

前節で述べた研究手法により、主に次の 3 項を明らかにした。2020 年度及び 2021 年度は、新型コロナウイルス感染症拡大の影響により、とりわけ観測実施に関して大きな制限が生じた。このため、当初の研究計画を見直し、必要最低限度の観測研究を継続できるように善処した。

(1) 衛星による樹種判別を可能とする植物季節の特徴の解明：

スダジイ・ツブラジイは、4~5 月にかけて新葉の開葉と開花が生じる際に、樹冠全体の色が明瞭に変化した (スダジイ：緑色からクリーム色へ、ツブラジイ：緑色から淡黄色へ)。この変化に応じて、Sentinel-2A/2B 衛星で得られた RGB 合成画像は、スダジイでは緑色から明るい緑色へ、ツブラジイでは緑から淡黄色へと変化する様子を示した (図 1, 2)。また、マテバシイ (*Lithocarpus edulis*) も同様に、5~6 月にかけて新葉の開葉と開花が生じる際に、樹冠全体の色が明瞭に変化した (緑色からクリーム色へ)。この変化に応じて、Sentinel-2A/2B 衛星で得られた RGB 合成画像は、緑色から明るい緑色へ変化する様子を示した。Sentinel-2A/2B 衛星と比べて空間分解能が高い、ドローンにより撮影した空中写真や GEOEye-1 衛星で得られた RGB 合成画像は、個体レベルでのスダジイ/ツブラジイの開葉・開花季節の観測と樹種判別を可能とすることを示唆した。

京都東山地区において撮影された長期連続的な植物季節画像は、ツブラジイの開花には豊凶が見られることを示した。開花の豊凶に応じて、Sentinel-2A/2B 衛星で得られた RGB 合成画像は、年ごとに異なる樹冠の色や分布域を示した。ただし、スダジイやツブラジイの開花季節には個体差が見られた (花の量や、開花の有無など)。このため、開花季節により樹種判別を行う場合、1 年分のデータでは、スダジイやツブラジイの分布域を過小評価する可能性が示唆された。くわえて、植物季節の特徴ではないが、自然教育園において発生したカシノナガキクイムシを原因とするナラ枯れの状況 (コナラ) を Sentinel-2A/2B 衛星で得られた RGB 合成画像や正規化植生指数 (NDVI) の変化により検出できることが地上真値に基づいて検証された。

以上の結果の一部は、永井ほか (2020a, b) 及び永井ほか (2021) として論文出版、Shin et al. として論文投稿された。

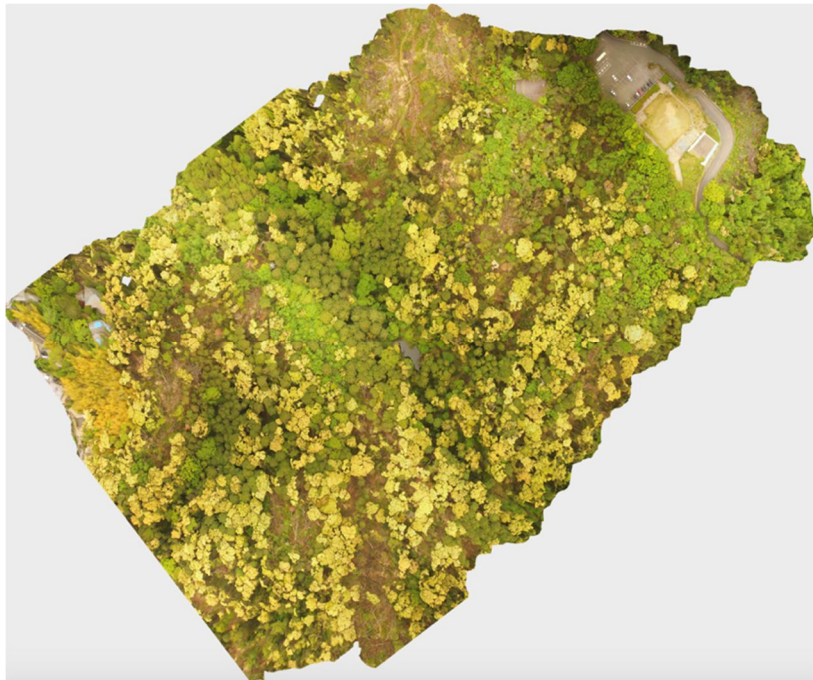


図1. 京都東山地区において、2019年5月9日（ツブラジイの開花期）にドローンにより撮影した空中写真から作成したオルソ画像。

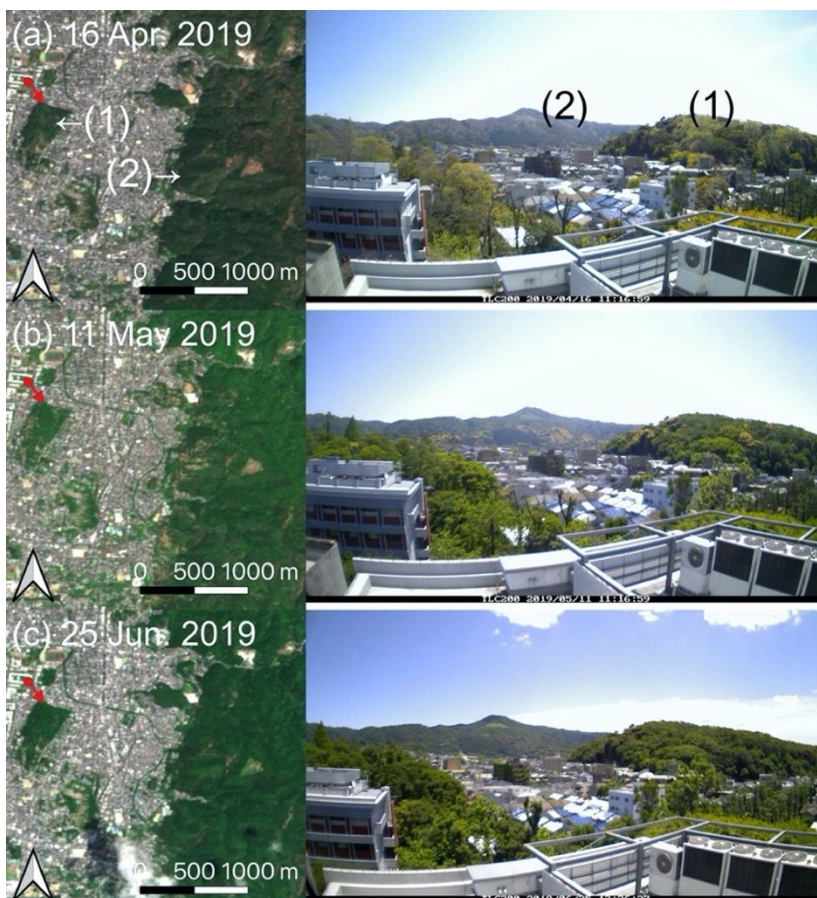


図2. 京都東山地区における、Sentinel-2A/2B衛星で得られたRGB合成画像（左：10m空間分解能）とタイムラプスカメラにより撮影した植物季節画像（右）の対応関係（a: 2019年4月16日：ツブラジイの開葉と開花前・b: 2019年5月11日：ツブラジイの開花期・c: 2019年6月25日：ツブラジイの開葉と開花後）。赤い丸はタイムラプスカメラの設置地点、赤い矢印は画角を示す。カッコ内の数字は、Sentinel-2A/2B衛星で得られたRGB合成画像とタイムラプスカメラにより撮影した植物季節画像の位置の対応を示す。図は、Shin et al. (submitted)を加工して掲載。

(2) スダジイ・コナラ・クヌギの開葉や開花の気象要因の解明：

2018年のスダジイの開花は、例年と比べて約2週間早かったが、その原因は開花直前(春先)

の高温状態であることが分かった。また、コナラとクヌギの開葉日や開花日は、3月の各旬の平均気温と負の相関を示す傾向が見られた。これらの結果は、タイムラプスカメラによる植物季節画像の撮影などにより、各樹種を対象とした開葉日や開花日の長期データが今後蓄積されることにより、毎日の気温データから各樹種の開葉日や開花日を統計的に推定するモデルの構築が可能になることを示唆した。

以上の結果の一部は、永井ほか（2020b）として論文出版された。

### (3) 高空間分解能衛星によるスタジイとマテバシイの樹種判別と分布域の地図化：

房総半島を対象に、スタジイとマテバシイの開花期に Sentinel-2A/2B 衛星によりそれぞれ観測された反射率データを用いて教師付きの機械学習アルゴリズムにより、スタジイ・マテバシイ・その他の常緑樹（JAXA により公開されている高解像度土地利用土地被覆図：<https://earth.jaxa.jp/ja/data/2562/index.html> において常緑樹と分類されるピクセルを対象に）を判別したところ、SVM では約 93%、ランダムフォレストでは約 91%、KNN では約 92%の精度を得た（図3）。また、スタジイとマテバシイの開花前・開花期・開花後における、反射率データの特徴を明らかにした。くわえて、Sentinel-2A/2B 衛星で得られた RGB 合成画像により、岐阜金華山・滋賀県・奈良県・千葉県・茨城県の里山林などにおける、ツブラジイ/スタジイの開花の広域的な分布を確認した。これらの結果は、スタジイ・ツブラジイ・マテバシイの開花期に Sentinel-2A/2B 衛星や、より高い空間分解能を持ち高頻度な観測を行う商用衛星（PlanetScope [毎日・3m]など）により複数年観測された反射率データを解析することにより、全国を対象としたスタジイ・ツブラジイ・マテバシイの判別と分布域の地図化が可能となることを示唆した。

以上の結果の一部は、篠原碧による筑波大学修士論文（2022）として発表され、篠原と奈佐原（2022）として論文出版された。

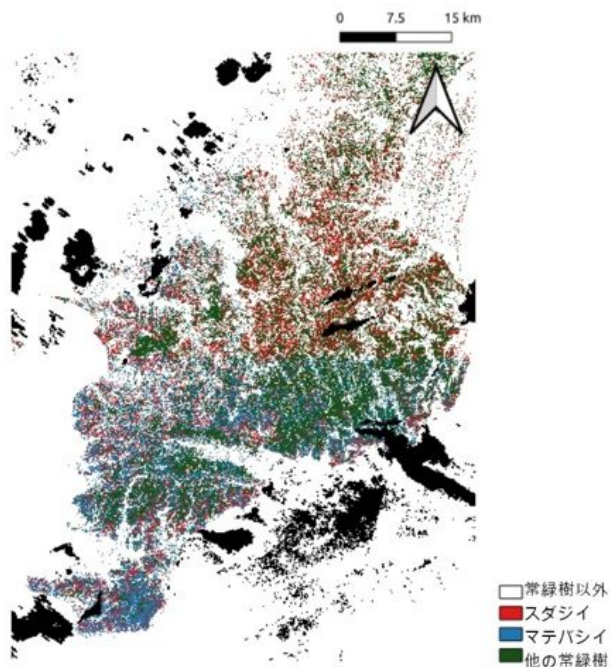


図3. Sentinel-2A/2B 衛星データの解析により判別された（教師付きの機械学習アルゴリズム：SVM による）房総半島におけるスタジイ・マテバシイ・その他の常緑樹の分布図。図は、篠原碧による筑波大学修士論文（2022）を加工して掲載。

本研究の成果は、2022 年度新規採択課題：基盤研究（C）「高頻度・高空間分解能衛星による日本とボルネオの常緑広葉樹の種判別と広域マッピング」（研究代表者：永井信、2022 年～2024 年度）の立案に繋がった。今後の継続的な発展が期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 永井 信、遠藤拓洋、奈佐原顕郎	4. 巻 52
2. 論文標題 高頻度・高空間分解能:SENTINEL-2A/B衛星による自然教育園の植物季節観測	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 自然教育園報告	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 永井 信、遠藤拓洋、下田彰子	4. 巻 53
2. 論文標題 SENTINEL-2A/B衛星による自然教育園のナラ枯れ観測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自然教育園報告	6. 最初と最後の頁 35-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 永井 信、関川清広、小林秀樹、友常満利	4. 巻 5
2. 論文標題 神奈川県におけるクヌギ・コナラのフェノロジー 海洋研究開発機構横浜研究所と玉川大学キャンパスの比較	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 玉川大学農学部研究教育紀要	6. 最初と最後の頁 15-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 篠原 碧、奈佐原顕郎	4. 巻 42
2. 論文標題 中分解能光学衛星センサーを使った常緑樹の樹種判別における開花シグナルの利用	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本リモートセンシング学会誌	6. 最初と最後の頁 129-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11440/rssj.2022.001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shin Nagai
2. 発表標題 Accurate phenology monitoring by time-lapse digital camera, satellite, and big data
3. 学会等名 Interdisciplinary Symposium: Weaving Climate Change and Ecosystem Services with Big Data (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shin Nagai
2. 発表標題 Remote sensing of vegetation in Borneo
3. 学会等名 Seminar at Forest Department Sarawak (RDID)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶原康司・本多嘉明・村木広和 (MORALS) ・その他11名
2. 発表標題 UAV搭載カメラ複数同時撮影による精度比較の考察
3. 学会等名 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋良太・山崎智之・梶原康司・本多嘉明
2. 発表標題 UAV飛行経路設計の為に加速度変動を考慮した軌道最適化法
3. 学会等名 日本写真測量学会令和元年度秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 永井 信・ 奈佐原顕郎・ 小野田雄介・ 梶原康司・ 本多嘉明・ 宇田弥生
2. 発表標題 開花季節に着目したスダジイ・コジイの判別手法の提案
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第65回（平成30年度秋季）学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片木仁・ 奈佐原顕郎・ 道津正徳・ 今村功一・ 山之口勤・ 田殿武雄
2. 発表標題 多時期土地被覆情報データセット"SACLAJ"のための再撮影アプリ開発
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第63回（平成29年度秋季）学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 篠原碧・ 奈佐原顕郎・ 永井信
2. 発表標題 開花季節を利用したスダジイ・マテバシイの分布図作成
3. 学会等名 日本リモートセンシング学会第71回（令和3年度秋季）学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

植物季節画像の一部は、Phenological Eyes Networkのウェブサイトにおいて公開(<http://pen.envr.tsukuba.ac.jp/>)。



6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	奈佐原 顕郎 (西田顕郎)  (Nasahara Kenlo)  (40312813)	筑波大学・生命環境系・准教授    (12102)	
研究分担者	本多 嘉明  (Honda Yoshiaki)  (60251774)	千葉大学・環境リモートセンシング研究センター・准教授    (12501)	
研究分担者	小野田 雄介  (Onoda Yusuke)  (70578864)	京都大学・農学研究科・准教授    (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関