

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06149

研究課題名（和文）衛星搭載合成開口レーダを用いた、森林伐採監視

研究課題名（英文）Deforestation monitoring by using satellite-borne SAR

研究代表者

渡邊 学（Watanabe, Manabu）

東京電機大学・理工学部・研究員

研究者番号：10371147

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：全世界で高頻度観測を行い、無償でデータ入手が可能な光学衛星データ（Sentinel-2）に、深層学習と時系列解析を適用して、森林伐採検出を行うために、日本域で0.25ha以上の伐採域を、4回/年の頻度で行うアルゴリズムを開発した。47都道府県の県毎に、4回/年の頻度で伐採検出を行った結果、2022年の1年間で43,000か所、39,000haの伐採を検出し、日本全国の検出精度の平均値88.6%、未検出割合～50%の精度を達成する事ができた。また、研究成果の公開の一環として、得られた伐採情報を県毎、季節毎に2分程度にまとめた森林伐採ニュースを、YouTubeやツイッターで配信した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで季節変化があまりない熱帯林で、衛星データを用いて広域森林伐採検出を行うアルゴリズムは提案されている。本研究では季節変化や積雪の影響がある日本全域で、深層学習技術を取り入れる事で、そこそこの精度（検出精度：88.6%、未検出割合～50%）の伐採検出アルゴリズムを開発する事に成功した。近年、合法に伐採された木材の利用を促進するクリーンウッド法の義務化や森林クレジット、森林認証制度の普及により、森林伐採情報が求められる機会が多くなっている。本研究の社会的意義は、このような社会システムに正確かつ低コストで情報提供を行う手段を確立した事にある。

研究成果の概要（英文）：Deforestation detection in Japan was done by applying deep learning and time-series analysis to optical satellite data (Sentinel-2), which is frequently observed worldwide and available free of charge. We have developed an algorithm to detect the area larger than 0.25ha, and at a frequency of four times a year. As a result of conducting deforestation detection in each of the 47 prefectures, deforestation was detected in 43,000 locations and 39,000 ha in 2022, with an average detection accuracy of 88.6% across Japan. We were able to achieve an accuracy of 50% to the non-detection rate. In addition, as part of the publication of the research results, deforestation news, which summarizes the obtained deforestation information for each prefecture and season in about two minutes, was distributed on YouTube and Twitter.

研究分野：環境リモートセンシング

キーワード：森林監視 AI Sentinel-2

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年日本で、多くの無許可・違法伐採が報告されている。

- 宮崎県でスギ「盗伐団」暗躍 (日経新聞 2018年9月17日版)。
- 北海道のニセコ積丹小樽海岸国定公園や周辺では地熱発電の調査名目で、6～8月にハイマツなど約3千本が伐採(産経新聞電子版、2017年12月12日)

林野庁が調べたところ、2017年4月から翌一月にかけて、無断伐採相談状況は62件あり、そのうち九州・沖縄が33件と多数を占め、全国に拡大する恐れもあると心配されている。合法的な伐採であった場合でも、森林伐採が計画通り行われているかを監視する必要があるが、限られた予算内で広域森林監視を行うことは難しい。リモートセンシング、特に合成開口レーダ (SAR) は、昼夜天候に関係なく観測する事ができるため、高頻度での広域観測が可能となる。現在この特性を生かし、日本の衛星を使って世界の熱帯雨林を対象にした森林伐採監視が行われている。2016年11月に運用が始まった早期森林伐採監視システム“JJ-FAST”は、日本が打ち上げた“だいち2号”衛星に搭載された PALSAR-2 の広域観測モードで得られたデータを使い、約1.5カ月の頻度で熱帯林を持つ77カ国の森林を監視している。得られた伐採情報は、Webから無料で公開されている。申請者らは2016年から JJ-FAST で使われている伐採検出アルゴリズムの開発を行っており、2018年にはその有効性を示すためにブラジルで現地調査を行った。その結果、検出アルゴリズムで得られた12のサイトで2600haが違法伐採と認定され、約4億円の罰金が違法伐採をしていた農家に課せられた。同様のシステムの日本域での適用可能性を検討した際、“衛星観測モード”、“分解能”、“森林の季節変化”の3つの大きな問題点がある事が明らかになった。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、熱帯林で使用されている JJ-FAST の伐採検出アルゴリズムを、異なる観測モード、分解能で観測している日本域にも適用する事で、日本で年5～6回の観測頻度で、0.8ha以上の森林伐採検出を実用的に行うためのアルゴリズムの作成を目指す。

### 3. 研究の方法

日本が打ち上げた L-band SAR 衛星 ALOS-2 による日本域での高頻度観測は、森林伐採検出に適している HV 観測ではなく、HH 偏波モードのみで行っている。当初予定していた、日本域で0.8ha以上の伐採域を年5-6回の頻度で検出するために、テクスチャを用いた解析を行ったが、あまり良い精度を得る事ができなかった。そこで、もう一步進んだ深層学習を利用し、以下に示す手法1に従って伐採検出を試みた。しかし、4. 研究成果で示すように、こちらでもよい検出精度を得る事ができなかった。

そこで近年、全世界の陸域の高頻度観測を行い、無償でデータ入手が可能な光学衛星データ (Sentinel-2) に、深層学習と時系列解析を適用する事にした。そして、日本域で0.25ha以上の伐採域を、4回/年の頻度で行うアルゴリズムを開発した。その手法について、手法2に示す。

#### 【手法1】

手順1、2の流れで伐採検出を行った。

#### 手順1： $\sigma^0$ 差分法による伐採検出

JAXA が提供する高解像度土地利用土地被覆図を使って、森林部のみを抜き出す。最新の画像 (期末画像) と、その1つ前に観測された画像 (期首画像) から、平均サイズ0.25haのポリゴンを作成するセグメンテーションを行い、期首と期末で平均 $\sigma^0$ 値が2dB以上か-3dB以下の変化があったポリゴンを抜き出した。この時点で500個以上の多数のポリゴンが検出された。森林変化が見られた場所以外に、季節変化や山岳地域の地形に起因した誤検出が多く含まれていた。

#### 手順2：深層学習による誤検出の除去

手順1で検出されたポリゴンから誤検出を除くために、CNN を適用した。手順1で検出されたポリゴンに対し、正しく検出されたかどうかを、Sentinel-2 画像を使って調べ、CNN を適用して正解、誤検出の2分類を行う際の検証データとした。

一部の場所については、現地調査で森林伐採の有無を確認した。これらを訓練データとし、誤検出されたポリゴンを取り除くのに適したネットワークの開発を行った。ネットワークは、2次元CNNをベースとして時系列データをチャンネルとして入力した。畳み込み層数を2～6層、全結合層数を1～4層、フィルタサイズを(4, 8, 16, 32) の4種類で試し、高い判定精度を示す層数とフィルタ数を持つモデルを特定した結果、今回のケースでは畳み込み層数6層、全結合層1層、フィルタサイズ16のネットワークが最もよい精度を示した。このネットワークに訓練データを使

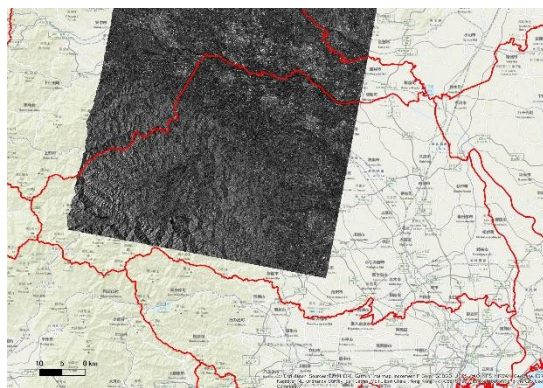


図 1. 2020年9月17日に埼玉県で撮影された PALSAR-2 画像

うことで、モデルの作成を行った。2017年～2020年の期間に埼玉県と宮城県で観測された PALSAR-2 データを訓練データとして用い、2020年4月2日と2020年9月17日(図1)、2020年9月17日と2021年4月1日に観測されたデータを用いて、精度検証を行った。評価用データは、PALSAR-2 で森林変化検出を行った対象期間とほぼ同じ期間に、Sentinel-2 でよく晴れた観測が得られたデータを中心に用いた(2020年5月2日、8月20日、11月13日、2021年4月22日)。正規化植生指数(NDVI)が0.2以上差があった場所をベースに評価データを作成したが、一部の雲がかかった場所等での誤検出・未検出に対応するために、上記以外のデータも用いて目視判読を行った。

**【手法2】**

手法2で行ったデータ解析の流れを図2に示す。衛星データクラウドサービス(Google Earth Engine)を利用して、Sentinel-2 データの季節毎の雲なし時系列モザイク画像を5季節分作成する。最新の2季節が森林変化検出の対象期間となる。このデータから画素毎に、時系列データとバンド情報、緯度経度情報、標高情報などからチップ画像を作成する。深層学習を適用して森林変化箇所を検出し、傾斜補正していない地表面投影面積で0.25ha以上となる場所を抜き出した。この手法を用いて、2021年以降、6季節で森林変化検出を行った。2021年夏は、過去(2020年夏)の埼玉、神奈川、宮城データを訓練データとして作成したAIモデルを用いて、2021年夏の全国の森林変化検出を行った。2022年冬以降は、過去データだけでなく、森林変化検出の対象となる期間のデータの一部も利用して、全国をいくつかの地域に分けてAIモデルを訓練した。

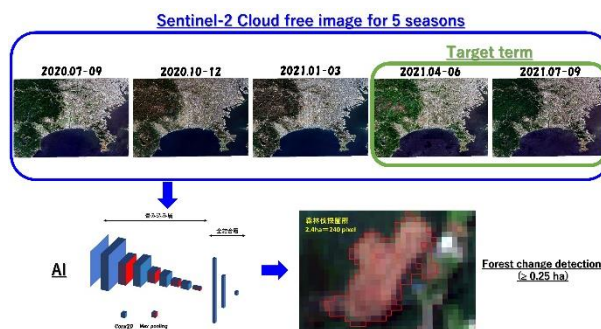


図2. データ処理の流れ

4. 研究成果

**【手法1】**

$\sigma^0$  差分法による伐採検出の精度と、深層学習を適用して誤検出を除いた後に評価された精度をまとめた結果を表1に示す。HH 偏波を用いた $\sigma^0$  差分による検出では、森林部での $\sigma^0$  の季節変化や山岳地域の地形に起因した変化などの要因で、対象地域で500ポリゴン以上の誤検出が見られた。このため、200402\_200917、200917\_210401の期間の User's accuracies はそれぞれ3.4%、6.0%(平均:4.7%)と、大変低い値を示した。次に、 $\sigma^0$  差分法で得られたポリゴンに対して、深層学習を用いて誤検出を取り除いた結果、User's accuracies は95%、83.3%(平均:89.2%)と劇的に改善する事が確認された。一方で、Producer's accuracies は $\sigma^0$  差分法で検出できていない事が原因となり、45.2%、42.2%(43.7%)となった。このアルゴリズムを埼玉県以外の宮城県や宮崎県でも試したが、埼玉県で得られた結果より悪い結果しか得られなかった。原因としては、伐採が起こった場所でも、HH 偏波で得られたテクスチャ情報は大きな変化を示さないケースが多く見られた事があげられ、手法1では劇的に検出精度を改善できる可能性は低いと判断した。

表1 検出精度

Target term (YYMMDD)	Method	Number of polygons				UA* (%)	PA** (%)	F-value
		Detection	Correct	False	Miss			
200402_200917	$\Delta\sigma^0$	587	20	567	22	3.4	47.6	6.4
	$\Delta\sigma^0+AI$	20	19	1	23	95.0	45.2	61.3
200917_210401	$\Delta\sigma^0$	715	43	672	40	6.0	51.8	10.8
	$\Delta\sigma^0+AI$	42	35	7	48	83.3	42.2	56.0

\* User's accuracies \*\* Producer's accuracies

## 【手法 2】

2021年～2023年(継続中)にかけて、47都道府県の森林で検出された0.25ha以上の結果を表2に示す。対象期間中に得られた森林変化箇所は58,911か所、面積は61,202haとなった。県毎に得られたUser's精度(UA)の全国平均値は、手法の改良やトレーニングデータを増やす事により、48.0%から90%近くまで改善された。Producer's精度(PA)は、広域での検証データを得る事が難しかったため、いくつかの県で見積もりを行った。見積もり手法は、User's精度は低いが生産者精度が高いAIモデルを2～3個作成した結果から、目視で正解と確認できた場所を、検証データとした。2021年夏に山形で見積もられたPAは82.1%であったが、岡山では、61.5%とやや低い値を示した。2022年春のPAは、中部や四国では81.1%、92.1%と良い値を示したが、東北地方の3県(宮城、岩手、山形)から見積もられたPAは、40.5%と低い値を示した。これらの県の春季データは、雪の影響が残っていた場所、落葉等の影響があった場所が多く見られ、このような場所で起こった森林変化箇所を見落としが原因であった。2022年中に検出された全国の森林伐採面積は38,901.2haとなった。1年間の日本の森林伐採面積は約8万haと言われており、この値に比べると、今回用いた手法では半分程度、PAとしては50%程度と見積もられた。

AIモデルはトレーニングデータを増やしながら精度の向上を行っている。2023年冬に得られた結果は、1年前の2022年冬に得られた結果に比べUAが51.3%から88.1%と30%以上改善し、検出面積も6,190.7haから14,532.7haと2倍以上に増えている。今後、継続してモデル改善を行うことで、2023年はより良い結果が得られると考えている。

2022年春に得られた県毎の森林変化率(森林変化面積/森林面積)を図3に示す。2022年春に限らず、今回の解析対象になった期間内では、九州南部と茨城県が高い森林変化率を示していた。またいずれの季節も、森林変化サイズの頻度は0.25-0.5haが50%弱と、多くの割合を占めていた。

現在、得られた森林変化場所情報は対象期間終了から1-3か月後に、Google mapのマイマップ機能を使って無料で一般公開している。単にネットで公開しただけでは、誰にも見てもらえない事から、YouTube(チャンネル名: AIを使って宇宙から森林変化みつけちゃいました)やTwitter(ハンドル名: ningencer)を使って各県毎森林伐採の状況報告を行っている(図4)。Google Mapは、現在地表示や道案内機能があり、公開されている森林変化情報をスマホで見ながら、身近で検出された森林変化箇所へのアクセスが簡単にできる。今回、協力者の方にGoogleの編集権限を付与した上で、現地に行って森林変化箇所の写真のアップする作業ができる事も確認できた。このような既存の機能を用いる事で、森林管理、監視への関心と積極的な参加を促す事ができる事が確認された。

当初の計画では、衛星搭載SARデータを利用し、日本で年5～6回の観測頻度で、0.8ha

表2 手法2で得られた森林変化検出結果

対象期間			検出 ポリゴン数	検出面積 <sup>1</sup> (ha)	面積合計 (ha)	森林変化割合 (%)	User's精度 (%)	Producer's精度 (%)
2021年	夏	4～6月	6,582	77,67.5		0.026	48	82.1(山形) 61.5(岡山)
		7～9月						
		10～12月						
2022年	冬	10～12月	6,046	6,190.7	38,901.3	0.02	51.3	
		1～3月						
		1～3月						
	春	1～3月	9,819	10,708.1		0.041	88.6	81.1(中部 <sup>2</sup> ) 92.1(四国) 40.5(東北 <sup>3</sup> )
		4～6月						
		4～6月						
	夏	4～6月	12,287	13,810.8		0.055	85.4	
		7～9月						
		7～9月						
秋	7～9月	8,707	8,191.7	0.033	77.1			
	10～12月							
	10～12月							
2023年	冬 (43都府県)	10～12月	15,470	14,532.7		0.058	88.1	
		1～3月						

<sup>1</sup> 2021夏～2022春の処理では、DSMを用いた傾斜補正を行っていなかった。ここでは、傾斜補正の平均的な係数である1.2を用いて、簡易的に傾斜補正をした後の面積を示す。

<sup>2</sup> 山梨、静岡、愛知で見積もられた値の平均値

<sup>3</sup> 宮城、岩手、福島で見積もられた値の平均値

以上の森林伐採検出を実用的に行うというものであった。しかし結果としては、衛星搭載光学データを利用する事で、日本で年4回の観測頻度で、0.25ha以上の森林伐採検出を実用的に行うアルゴリズムの開発を達成した。学会参加中に日本の森林管理を行っている方からの話として、伐採情報は年数回程度で十分であるとの声も聴かれ、観測頻度4回/年でも十分に今回の“日本全国の森林監視を行うためのアルゴリズム開発“は達成できたものと考えている。

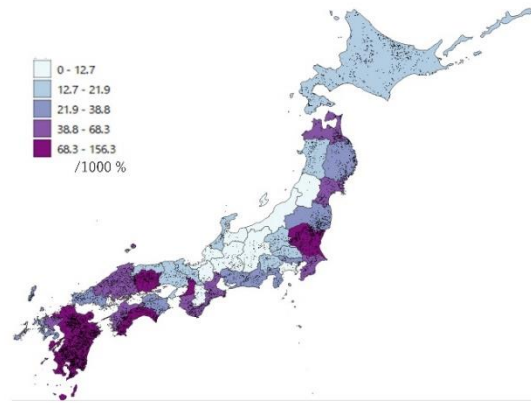


図3 2022年春に得られた県毎の森林変化率(森林変化面積/森林面積)



図4 各県毎森林伐採の状況報告を行っているYouTubeチャンネル(チャンネル名: AIを使って宇宙から森林変化みつけちゃいました)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 渡邊 学, クリティアン コヤマ, 島田 政信
2. 発表標題 深層学習とPALSAR-2時系列データを用いた埼玉県での森林変化検出
3. 学会等名 第 71回 (令和3年度秋季) リモートセンシング学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 学, 島田 政信
2. 発表標題 衛星データと深層学習を用いた、全県森林変化域検出の試み
3. 学会等名 第 133回 日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Manabu Watanabe, Christian Koyama, Masato Hayashi, Izumi Nagatani, Takeo Tadono, Masanobu Shimada
2. 発表標題 Trial of deforestation detection accuracies improvement for JJ-FAST algorithm by using deep learning.
3. 学会等名 JpGU2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Manabu Watanabe, Christian Koyama, Masato Hayashi, Izumi Nagatani, Takeo Tadono, Masanobu Shimada
2. 発表標題 Trial of Deforestation detection by using 25m resolution PALSAR-2/ScanSAR data
3. 学会等名 2020 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Izumi Nagatani, Masato Hayashi, Manabu Watanabe, Takeo Tadano, Tomohiro Watanabe, Christian Koyama, Masanobu Shimada
2. 発表標題 SEASONAL CHANGE ANALYSIS FOR ALOS-2 PALSAR-2 DEFORESTATION DETECTION
3. 学会等名 2020 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Christian Koyama, Manabu Watanabe, Masato Hayashi, Izumi Nagatani, Takeo Tadono and Masanobu Shimada
2. 発表標題 RAINFALL-INDUCED CHANGES IN L-BAND BACKSCATTER OVER TROPICAL FORESTS AND THEIR IMPACT ON DEFORESTATION MONITORING
3. 学会等名 2020 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊 学, クリスティアン コヤマ, 林 真智 永谷 泉, 田殿 武雄, 島田 政信
2. 発表標題 深層学習を用いたJJ-FAST伐採検出アルゴリズム検出精度向上の試み
3. 学会等名 第 69回 (令和2年度秋季) リモートセンシング学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Manabu Watanabe, Masanobu Shimada
2. 発表標題 Trial of deforestation detection using deep learning technique in Saitama prefecture
3. 学会等名 JAXA E0-RA PI Workshop (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊 学, 島田 政信
2. 発表標題 深層学習を利用した、日本国内の森林伐採 “見える化” の試み
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 学, 島田 政信
2. 発表標題 深層学習を利用した、日本国内の森林変化 “見える化” の試み2
3. 学会等名 第 73回 (令和4年度秋季) リモートセンシング学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 学, 島田 政信
2. 発表標題 衛星データと深層学習を用いた、全県森林変化域検出の試み 2
3. 学会等名 第 134回 日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2021年～2023年に、今回開発した森林変化検出アルゴリズムを用いて全国で検出された伐採箇所の検証データ(58,911か所)を、以下にて公開(継続中)  
 YouTube チャンネル名: AIを使って宇宙から森林変化みつけちゃいました  
<https://youtu.be/ckkZz6d2iL4>  
 説明欄にGoogle Mapへのリンクが示してあり、58,911か所の伐採場所を無償で見える事、ダウンロードしてGoogle Earthで利用する事が可能になっている。  
 Twitter ハンドル名: ningencr



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	KOYAMA CHRISTIAN  (Koyama Christian)  (40704961)	東京電機大学・理工学部・研究員   (32657)	削除：2022年3月7日
研究 分 担 者	島田 政信  (Shimada Masanobu)  (90358721)	東京電機大学・理工学部・教授   (32657)	

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