

GCOM-C1 を用いた新緑・紅葉判定のためのミクセル解析

Mixed pixel analysis to detect the tender green and autumn colour

using GCOM-C1

高知工科大学大学院
工学研究科基盤工学専攻
社会システム工学コース
国土情報処理工学研究室
1267002 藤原崇真

指導教員 高木方隆
副指導教員 赤塚慎
論文副審査 佐藤慎司

2025 年 3 月

論文要旨

近年、地球温暖化や森林破壊に起因する海面上昇や洪水豪雨、陸上生態系の損失などが大きく問題視されている。植物フェノロジーは気候や環境変化に左右されやすく、気温の推移と共に観測を行うことで、精度の高い温暖化の影響予測が可能になると考えられており、現状の気候変動の把握と将来に及ぶ影響の予測を行い、国際的な環境施策を議論していく上で重要視されている。一般に人工衛星を用いることが全球で植生フェノロジーを観測するためには最も有効な手法とされ、これまでも米国 NOAA /AVHRR に始まり、国を超えて観測が続けられてきた。

高知工科大学 国土情報処理工学研究室では、JAXA の打ち上げた地球観測衛星 GCOM-C1 の SGLI データを利用し、四国を対象エリアとして、植生解析のための新緑・紅葉経過マップを作成してきた。GCOM-C1 は同一軌道上から、広い観測幅で、高頻度で、グローバルな観測データを均質に取得することが可能である。GCOM-C1 よりも高分解能な観測データを提供する衛星は多々存在する。しかし、分解能と観測幅はトレードオフの関係がある。観測したデータを地上基地局に転送する際に、転送スピードがボトルネックとなり分解能の高いデータを取得すると観測幅が狭くなる。均質なデータを高解像度で高頻度で取得することは現在実現されていない。そのため、現状では植生フェノロジーの観測にとって広域、高頻度で均質性のある GCOM-C1 の観測データが優れている。しかしながら、GCOM-C1 の空間分解能が 250 m であるために、群落ごとの観測になってしまい、異なる群落の境界線や、山林と平地部の境界線において、1 ピクセルの中に複数の土地被覆を含むミクセル状態となっている。

土地被覆の反射係数と、その土地被覆の面積の線型結合で、そのピクセルの反射係数を表現できる。求まった、その土地被覆の反射係数はピュアピクセルの反射率に相当する。その反射係数を求めるには、 n 種類の土地被覆を分類するのであれば n バンド以上の反射係数がないと求まらない。しかしながら、新緑・紅葉マップは可視域の赤バンドと近赤外バンドの 2 バンドを用いた NDVI の値で作成しており、これまでの落葉樹の着葉状態を表す NDVI 閾値を求めた研究成果としても、新たな解析手法としても、簡便に行うために一貫して 2 バンドを使用する。そこで本研究では、その土地被覆の反射係数を求めるにあたって、1 ピクセルに対して n バンドを用いる代わりに $n/2$ ピクセル(多ピクセル)を用いたミクセル解析手法の構築を目的とした。

多ピクセルを用いたミクセル解析により、落葉樹のみのピュアピクセルの反射率から NDVI 値を求めた。GCOM-C1 の 8 日間統計量データより求めた、落葉樹率が 80%以上で落葉樹のピュアピクセルに最も近いピクセルの NDVI 値との比較によって、多ピクセルを用いたミクセル解析の手法が、GCOM-C1 のミクセル状態のピクセルから地物の純粋な反射率を取得することに有効であることを示した。しかしミクセル解析では、それぞれの教師エリア全体の 新緑・紅葉判定は可能であるが、1 ピクセルずつの判定が行えない問題がある。

そこで、1pixel ずつの新緑・紅葉時期を判定するために、多ピクセルを用いたミクセル解析を行う際に作成した GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率を元に NDVI を補正し、落葉樹ピュアピクセルの NDVI を推定する手法を試みた。これにより、最終週に落葉したと誤判定されるピクセルにおいて、常緑樹の影響により NDVI が落葉期も落ち切らなかった点が考慮され、新緑・紅葉マップの明確な誤判定が無くなった。GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率を用いて NDVI を補正した結果から得た判定結果の妥当性が高いことは、高分解能の土地被覆のデータを元に作成していくことで、新緑・紅葉マップの更なる精度向上が図れることを示せた。今回、落葉樹率と NDVI の関係を求め、1 つのピクセルに対して落葉樹のみの NDVI を推定した。このことは、NDVI から落葉樹率を推定することにも繋がる。しかし、落葉樹率と NDVI の関係は標高による影響を大きく受ける。標高が違えば落葉状況も異なり、今回使用した教師エリアでは狭く、解析範囲全体に対応できるとは言えない。落葉樹が、いつ落葉したかを知るためには新たに閾値設定が必要となるため、現状では落葉樹率を必要としない手法の構築は難しい。新緑紅葉マップの精度はいまだ十分でない。検証するためには分類精度の高い土地被覆のデータ作成が必要である。

Abstract

In recent years, issues such as sea level rise, heavy rainfall and flooding, and the loss of terrestrial ecosystems, caused by global warming and deforestation, have been of increasing concern. Plant phenology is highly sensitive to climate and environmental changes, and it is believed that by observing its progression along with temperature trends, it is possible to make highly accurate predictions of the impacts of global warming. Understanding the current state of climate change and predicting its future impacts are crucial for discussing international environmental policies. Satellite observation is generally considered the most effective method for globally monitoring vegetation phenology. Observations have been continuously conducted across national borders, beginning with the United States' NOAA/AVHRR satellite.

At the Laboratory of Geomatics Information Processing Engineering at Kochi University of Technology, we have utilized data from the SGLI sensor on the Earth observation satellite GCOM-C1, launched by JAXA, to create tender green and autumn colour progression maps for vegetation analysis in Shikoku. GCOM-C1 is capable of uniformly acquiring global observation data with wide observation swaths and high-frequency observations from the same orbital path.

Although many satellites provide higher-resolution observation data than GCOM-C1, there is a trade-off between resolution and observation width. The data transfer speed becomes a bottleneck when transferring observed data to ground stations, meaning that acquiring high-resolution data results in a narrower observation width. Currently, it is not feasible to acquire high-resolution, high-frequency, and uniform data simultaneously.

Therefore, at present, GCOM-C1's observation data, which is extensive, frequent, and uniform, is superior for vegetation phenology observation. However, since GCOM-C1 has a spatial resolution of 250 m, observations are conducted at the community level. As a result, at the boundaries between different plant communities or between forests and flatlands, multiple land cover types are included within a single pixel, leading to a mixed-pixel state.

The reflectance coefficient of a land cover can be expressed as a linear combination of the reflectance coefficients of its land cover components and their respective areas within the pixel. The calculated reflectance coefficient of a land cover corresponds to the reflectance of a pure pixel. To determine this reflectance coefficient, at least n bands of reflectance coefficients are required when classifying n types of land cover. However, tender green and autumn colour maps are created using NDVI values derived from only two bands: the red band in the visible spectrum and the near-infrared band. In both previous studies that established NDVI thresholds representing the leafing status of deciduous trees and new

analytical methods, two bands were consistently used for simplicity. Therefore, this study aims to develop a mixed pixel analysis method that uses multiple pixels instead of n bands per pixel to determine land cover reflectance coefficients.

Using multiple pixels in mixed pixel analysis, the NDVI value was derived from the reflectance of pure pixels containing only deciduous trees. By comparing these values with the NDVI values of pixels that were closest to pure deciduous pixels, having at least 80% deciduous tree coverage, derived from GCOM-C1's 8-day statistical data, it was demonstrated that the mixed pixel analysis method using multiple pixels is effective in extracting pure surface reflectance from GCOM-C1's mixed-pixel state pixels. However, mixed pixel analysis allows for tender green and autumn colour determination across entire training areas but does not enable determination at the single-pixel level.

To address this limitation and determine tender green and autumn colour timing for each pixel, we attempted a method that corrects NDVI based on the deciduous tree ratio per GCOM-C1 pixel, derived during mixed pixel analysis, to estimate the NDVI of pure deciduous pixels. This approach eliminated clear misclassifications in the tender green and autumn colour maps by accounting for pixels mistakenly classified as defoliated in the final week, where evergreen trees influenced NDVI, preventing it from fully declining during the defoliation period. The validity of the classification results obtained by correcting NDVI using the deciduous tree ratio per GCOM-C1 pixel indicates that further improvement in tender green and autumn colour map accuracy can be achieved by utilizing high-resolution land cover data.

In this study, we established the relationship between the deciduous tree ratio and NDVI, estimating the NDVI of purely deciduous pixels for individual pixels. This relationship also allows for the estimation of the deciduous tree ratio from NDVI. However, the relationship between the deciduous tree ratio and NDVI is significantly influenced by elevation. As leaf shedding patterns vary with elevation, the training areas used in this study were limited and cannot be assumed to represent the entire study area. Determining when deciduous trees shed their leaves requires new threshold settings, making it currently difficult to develop a method that does not require deciduous tree ratio information. The accuracy of the tender green and autumn colour maps is still insufficient, and to further validate them, high-accuracy land cover data creation is necessary.

目次

論文要旨	i
Abstract	ii
1	序論 1
1.1	気候変動と植生フェノロジー 1
1.2	地球観測衛星による植物観測の現状 2
1.2.1	GCOM-C1 の目的と概要 2
1.2.2	GCOM-C1 の観測プロダクトを用いた研究の現状 5
1.2.3	国土情報処理工学研究室による GCOM-C1 を用いた新緑・紅葉マップ 7
1.3	研究目的 10
2	新緑・紅葉プロダクト作成手法 11
2.1	GCOM-C1 使用データ 11
2.2	座標変換 11
2.3	反射率の正規化と年間での NDVI 変化量の把握 13
2.4	周波数成分のカットによるノイズの低減 15
2.5	落葉樹エリアの分類 16
2.6	新緑・紅葉マップの作成手法 18
3	ミクセル解析 21
3.1	対象エリアと教師データの作成 21
3.2	リニアミクスチャーモデル 25
3.3	リニアミクスチャーモデルの解析結果 28
3.3.1	リニアミクスチャーモデルの精度確認 28
3.3.2	ミクセル解析による紅葉判定結果 31
3.4	ミクセル解析結果の考察 34
4	落葉樹率を用いた補正 NDVI 35
4.1	NDVI の補正手法 35
4.2	落葉樹率を考慮した新緑・紅葉判定 38
4.3	考察 40
5	結論 41
6	引用文献と参考文献 42

目次

1.1	VNR 光学系分光特性(気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用 ハンドブック B 版より用)	4
1.2	JAXA 高解像度土地利用土地被覆図と航空写真との比較	6
1.3	ミクセル概念図	8
1.4	2018 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	8
1.5	赤色のピクセルが目立つ, 現状の新緑紅葉マップ	9
2.1	EQA 図法で示された VN10 の画像	12
2.2	座標変換後の VN10 の画像	12
2.3	代表的な常緑針葉樹と落葉樹の NDVI の年変化	14
2.4	NDVI の 3 年間の変化	15
2.5	2019 年 落葉樹エリアマップ	16
2.6	落葉樹ピクセル判定フロー	17
2.7	2018 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	19
2.8	2019 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	19
2.9	2020 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	19
2.10	2021 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	20
2.11	2022 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	20
2.12	2023 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)	20
3.1	2023 年 紅葉マップ拡大図	21
3.2	ミクセル解析の教師データ作成エリア	22
3.3	作成したポリゴン(三嶺エリア)	24
3.4	作成したポリゴン(鉢ヶ森エリア)	24
3.5	作成したポリゴン(梶ヶ森エリア)	24
3.6	作成したポリゴンの 36 ピクセルの区分(例は梶ヶ森)	26
3.7	落葉樹率マップ(三嶺エリア)	27
3.8	落葉樹率マップ(鉢ヶ森エリア)	27
3.9	落葉樹率マップ(梶ヶ森エリア)	27
3.10	教師エリア全てのピクセル 36 ピクセルでの確認(検証時期は WOY = 15)	29
3.11	教師エリアの中心地点で 1 年分 46 週での確認	30
3.12	三嶺エリアにおけるミクセル解析により推定された落葉樹ピュアピクセル(左)と 落葉樹率が 80%以上のピクセル(右)の 1 年間の NDVI の変化グラフとの比較	32
3.13	鉢ヶ森エリアにおけるミクセル解析により推定された落葉樹ピュアピクセル(左)と 落葉樹率が 80%以上のピクセル(右)の 1 年間の NDVI の変化グラフとの比較	32

3.14	梶ヶ森エリアにおけるミクセル解析により推定された落葉樹ピュアピクセル(左)と落葉樹率が80%以上のピクセル(右)の1年間のNDVIの変化グラフとの比較	33
3.15	梶ヶ森エリアの現地調査写真	34
4.1	落葉樹率とNDVIの散布図と回帰直線(2023年第12週目:三嶺)	36
4.2	落葉樹率とNDVIの散布図と回帰直線(2023年第12週目:鉢ヶ森)	36
4.3	落葉樹率とNDVIの散布図と回帰直線(2023年第12週目:梶ヶ森)	36
4.4	落葉樹率とNDVIの回帰直線式の傾きの年変化グラフ(2023年:三嶺)	37
4.5	落葉樹率とNDVIの回帰直線式の傾きの年変化グラフ(2023年:鉢ヶ森)	37
4.6	落葉樹率とNDVIの回帰直線式の傾きの年変化グラフ(2023年:梶ヶ森)	37
4.7	既存手法で作成した紅葉マップ(左)新たに作成した紅葉マップ(右) (三嶺エリア)	38
4.8	既存手法で作成した紅葉マップ(左)新たに作成した紅葉マップ(右) (鉢ヶ森エリア)	39
4.9	既存手法で作成した紅葉マップ(左)新たに作成した紅葉マップ(右) (梶ヶ森エリア)	39

表目次

1.1 SGLIの観測波長帯(気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用 ハンドブック B 版より引用)	3
1.2 SGLI プロダクトの定義(気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用 ハンドブック B 版より引用)	4
3.1 ポリゴン作成時の分類項目	23

1 序論

1.1 気候変動と植生フェノロジー

近年、地球温暖化や森林破壊に起因する海面上昇や洪水豪雨、陸上生態系の損失などが大きく問題視されている。IPCC 第 6 次評価報告書[1]では、世界平均気温の上昇は少なくとも今世紀半ばまで続くことが予想されており、温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り、2100 年までに産業革命以前の世界の平均気温から 1.5-2.0°C を超えるとされている。このことは穀物生産や、フェノロジーのタイミングに大きく影響を与える。フェノロジーとは、生物季節を意味し、着葉、開花、落葉などの時期を長期間にわたって記録することで評価が可能となる。

日本においては温暖化によって、フェノロジー反応が地理的に容易に変化することが知られており、2024 年には全国的に酷暑に見舞われ、紅葉時期が例年よりも後ろにずれ込んだことは大きなニュースとなった。気温上昇とフェノロジー反応性の両者の地域差を考慮することで精度の高い温暖化の影響予測が可能になると考えられており[土居ら, 2010]、植物フェノロジーの観測は現状の気候変動の把握と将来に及ぶ影響の予測を行い、国際的な環境施作を議論していく上で重要視されている。一般に人工衛星を用いることが広域に植生フェノロジーを観測するために最も有効な観測手法とされ、これまで米国 NOAA/AVHRR に始まり、同じく米国の MODIS、欧州の Sentinel などにより観測が続けられてきた。日本では 2017 年に GCOM-C1(しきさい)が打ち上げられ、現在も観測が続けている。

1.2 地球観測衛星による植物観測の現状

1.2.1 GCOM-C1 の目的と概要

地球環境変動観測ミッション(Global Change Observation Mission)は、宇宙から地球の気候変動・水循環メカニズムを解明する上で有効な物理量を、全球規模の電波と光学の 2 種類の観測手段により長期間に渡って、グローバルに観測することを目的とした宇宙航空研究開発機構(JAXA)の人工衛星プロジェクトである。このプロジェクトの中で、光学センサにより、植生、雲・エアロゾル、海面水温、等の物理量を、全球規模で観測し、科学的理解を深めることで、将来の気候変動予測の精度を高めることを担っているのが気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C1)である。GCOM-C1 は 2017 年 12 月に種子島宇宙センターから H-IIA ロケットにより打ち上げられた。高度は 798km(赤道上)で、太陽同期準回帰軌道に投入された。2022 年 12 月 23 日に 5 年間の定常運用を達成したものの、2024 年 12 月現在も健全な状態で観測を続けている。

GCOM-C1 に搭載されている観測装置の「多波長光学放射系(SGLI)」は、環境観測技術衛星「みどり II」に搭載された観測装置のグローバルイメジャー(GLI)に続く多波長光学センサであり、地上からの光を、近赤外から可視光線、赤外線(380nm~12 μ m)まで 19 の領域に分けて広範囲かつ高精度で観測することができる。地表面分解能は 250m であり、同種の欧米の衛星よりも高い分解能である。19 の領域の中から目的に応じてバンドを選択することで、陸域から、大気、海洋、雪氷まで様々な対象を観測することができる。SGLI は「可視・近赤外放射計部(VNR: Visible and Near Infrared Radiometer)」と「赤外走査放射計部(IRS: InfraRed Scanning radiometer)」の 2 つの放射計から構成される。SGLI-VNR は可視から、近赤外域までのチャンネルを持ち、SGLI-IRS は、短波長赤外から熱赤外のチャンネルを持ち、赤外線で観測するために、昼夜を問わず観測が可能で、24 時間休まず観測を続けることができる[3]。SGLI の観測波長帯を表 1.1 に、各バンドの分光特性を図 1.1 に示す。また、SGLI プロダクトの処理レベルの定義を表 1.2 に示す。

表 1.1 SGLI の観測波長帯
 (気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用ハンドブック B 版
 より引用)

SGLI channels						
CH	λ	$\lambda\Delta$	L_{std}	L_{max}	SNRatLstd	IFOV
	VN, P, SW: nm T: μ m		VN, P, SW: W/m ² /sr/ μ m T: Kelvin		VN, P, SW: SNR T: NE Δ T	m
VN1	380	10	60	210	250	250/1000
VN2	412	10	75	250	400	250/1000
VN3	443	10	64	400	300	250/1000
VN4	490	10	53	120	400	250/1000
VN5	530	20	41	350	250	250/1000
VN6	565	20	33	90	400	250/1000
VN7	673.5	20	23	62	400	250/1000
VN8	673.5	20	25	210	250	250/1000
VN9	763	12	40	350	1200	250/1000
VN10	868.5	20	8	30	400	250/1000
VN11	868.5	20	30	300	200	250/1000
P1	673.5	20	25	250	250	1000
P2	868.5	20	30	300	250	1000
SW1	1050	20	57	248	500	1000
SW2	1380	20	8	103	150	1000
SW3	1630	200	3	50	57	250/1000
SW4	2210	50	1.9	20	211	1000
T1	10.8	0.7	300	340	0.2	250/500/1000
T2	12.0	0.7	300	340	0.2	250/500/1000

λ : Wavelength L_{std} : Standard radiance SNR: Signal to Noise ratio
 $\lambda\Delta$: Wavelength width L_{max} : max radiance IFOV: Instantaneous Field Of View
 NE Δ T: Noise Equivalent Temperature Difference

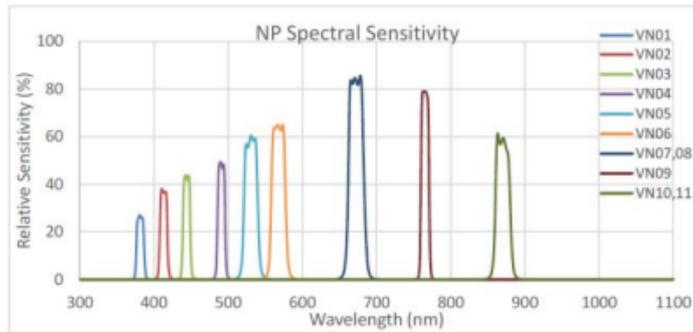


図 1.1 VNR 光学系分光特性

(気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用ハンドブック B 版より引用)

表 1.2 SGLI プロダクトの定義

(気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用ハンドブック B 版より引用)

処理レベル	概要
レベル 0	ASD を入力とし、時刻、バケットシーケンスカウンタ等に基づくデータソートと欠損処理を施したデータ。各地上局からインタフェースされる ASD 単位で処理される。
レベル 1A	レベル 0 データを入力として以下の処理を施したプロダクト。 <ul style="list-style-type: none"> 重複バケットの削除・欠損バケットのダミーデータによる補間 シーンの編集・切り出し(前後オーバーラップを考慮) ラジオメトリック補正情報の算出・付加 幾何学情報の算出・付加 バケット欠損情報、品質情報の付加
レベル 1B (マスターデータ)	レベル 1A プロダクトを入力とし、以下の処理を施したプロダクト。 <ul style="list-style-type: none"> ラジオメトリック補正 幾何補正及びレベル 1B 基準座標系ヘリサンプリング 波長バンド毎の幾何情報と使用した校正情報等の付加 または高解像度のレベル 1B プロダクトを入力とし低解像度リサンプリング処理を施したプロダクト。
レベル 2	レベル 1B プロダクトやレベル 2 プロダクトを入力とし、各種物理量を算出したプロダクト。出力領域はレベル 1B と同じシーン、全球(等面積格子)、タイル(全球を格子状に緯度 10 度毎 18 分割、赤道上で経度 10 度毎 36 分割したもので、空間分解能はシーン・タイルが 250m/1km、全球は 4km(1/24 度)のものが存在する。また全球及びタイル形式は、等面積格子上でモザイク処理したプロダクト(モザイクプロダクト)を含む。
レベル 2 統計	レベル 2 プロダクトのタイルプロダクトを入力とし、領域定義は変更せずに、8 日分/1カ月の時間統計処理あるいは雲域除去処理を施したプロダクト。
レベル 3	レベル 2 プロダクト(全球・タイル)を入力とし、全球を出力領域として空間(1/12 度、1/24 度)および時間(1 日、8 日、1 月)統計処理を施したプロダクト。

1.2.2 GCOM-C1 の観測プロダクトを用いた研究の現状

GCOM-C1 に搭載された SGLI センサは、陸域エアロゾル観測に適した近紫外観測機能や、1km 分解能での偏光観測、植生観測に有効な多方向可変観測、陸域観測に必要な 250m 分解能観測機能を備えており、これは他国の観測プログラムである米国の Terra/MODIS、欧州の Sentinel3 と比べても空間分解能・スペクトル分解能のデータの品質面で先をゆく、優れた観測技術である。GCOM-C1 の観測プロダクトを用いた先行研究には、地表面温度観測結果を利用した、農業用水管理を可能とする蒸発散量の推定[多炭ら, 2019]や、斜視チャンネルと直下視チャンネルを組み合わせて多角度観測を行うことで、水と炭素の動態を含む生態系の状態と機能のモデル化と監視において重要な役割を果たす、葉面積指数 (LAI) と吸収された光合成有効放射の割合 (FAPAR) のデータを作成した[本多ら, 2023]研究、SGLI センサから得られる PRI と CCI の森林における観測精度評価[秋津ら, 2022]などがあり、フェノロジー分野に大きく貢献している。しかし、これらの研究の精度は土地被覆に依存する。正確な土地被覆分類の作成・公開が期待されているが、GCOM-C1 の観測データを用いた土地被覆分類の例は少ない。

GCOM-C1 以外の地球観測衛星の観測データを使用した土地被覆分類を挙げると Sentinel2 衛星の Multispectral Instrument と ALOS-2(だいち 2 号)の合成開口レーダ PALSAR-2 の観測データを用いた JAXA 高解像度土地利用土地被覆図[奈佐原ら, 2022]があるが、航空写真と見比べると(図 1.2)、存在しない水田や竹林が判定されていることがわかり、分類精度に問題があることが見てとれる。また、対象を四国地域に限定した植生分類図を Sentinel-2 MSI データから作成した例[原ら, 2023]を見ても精度の高い分類は行えていないのが現状である。

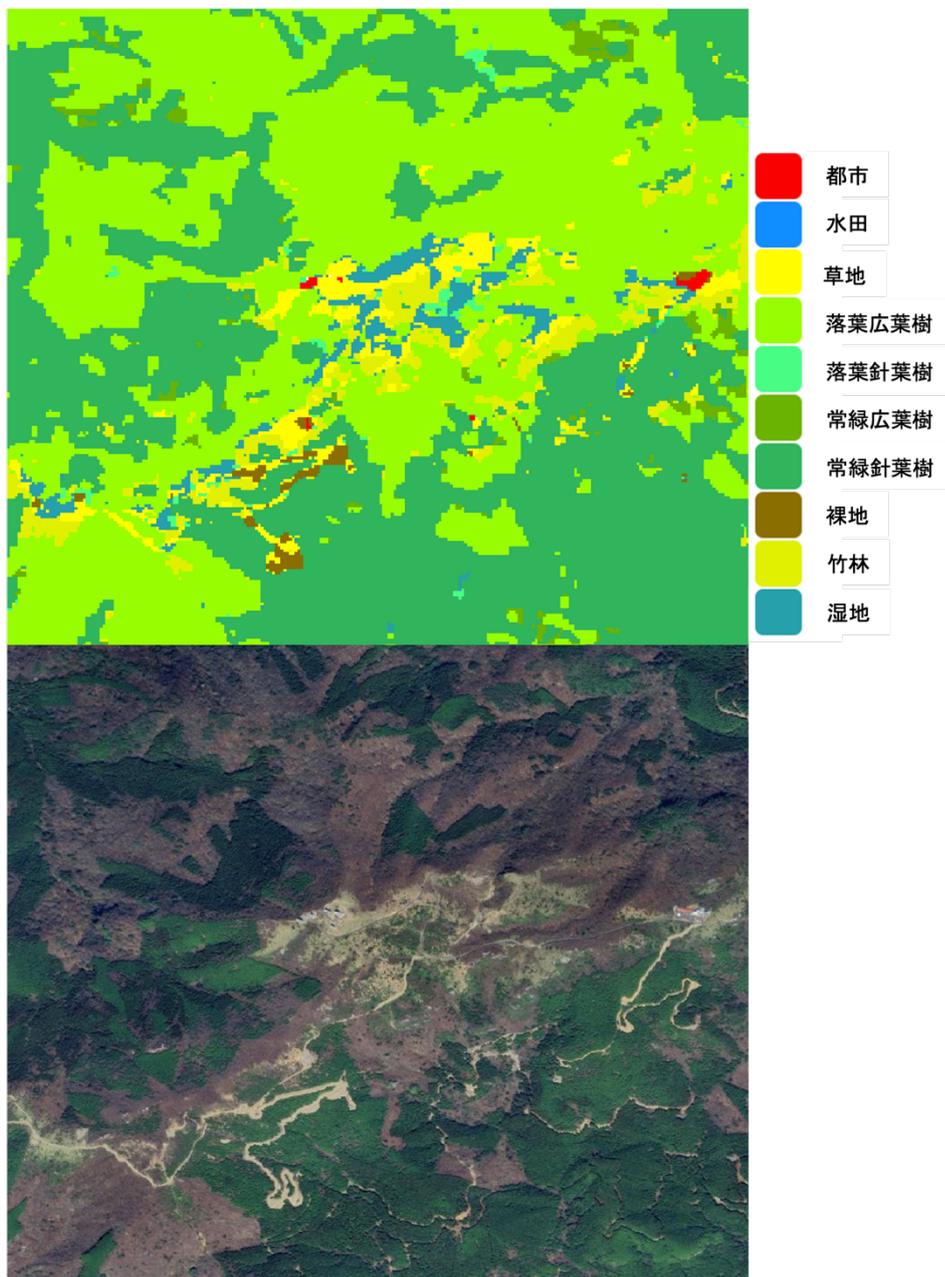


図 1.2 JAXA 高解像度土地利用土地被覆図と
航空写真(Google Earth より転載)との比較

1.2.3 国土情報処理工学研究室による GCOM-C1 を用いた新緑・紅葉マップ

GCOM-C1 のような高品質なデータを全球で取得している衛星は未だ少ない。また、このデータを用いた植生フェノロジーの解析が期待されているものの、全球観測が可能な衛星であるが故にローカルな話題が少ない。GCOM-C1 の空間分解能は 250 m であるため、樹木ごとのフェノロジー観測はできないが、8 日間の統計量データを公開しているため、群落ごとの新緑や紅葉時期の観測では変化がわかりやすいという利点がある。そこで高知工科大学 国土情報処理工学研究室では、2018 年から GCOM-C1 の SGLI データを利用し、四国を対象エリアとして、植生解析のための新緑・紅葉経過マップを作成してきた。

常緑樹と落葉樹の着葉期落葉期の画像から落葉樹の着葉状態の閾値を決定し、四国の落葉樹エリアを抽出。1 年間の NDVI の変化を追い、着葉期落葉期のカウント手法を開発したことで週単位での新緑紅葉のタイミングを判定を可能にした[高見, 2021]。しかし、悪天候により NDVI にノイズが発生すると精度が低下するなど課題が残った。

そこで、精度向上を目的として、雲によるノイズを高速フーリエ変換を用いて対処した。これにより、日ごとの新緑紅葉のタイミングを算出できるようになり、日ごとの変化の大きい樹木の新緑紅葉のタイミングを把握しやすく、精度向上につながった[藤原, 2022]。

しかしながら、現状、新緑・紅葉経過マップの決定的な精度検証が行えていない。精度検証が容易に進まない原因としては GCOM-C1 と同じ分光特性を持つセンサを搭載し、観測波長幅が同じで、定期的に日本上空を通過し、空間分解能が GCOM-C1 よりも高い衛星が存在しないことがあげられる。

また、GCOM-C1 の空間分解能は 250 m なので、群落ごとの観測になってしまい、異なる群落の境界線や、山林と平地部の境界線においてミクセル状態となってしまう(図 1.3)、ピュアピクセルでの反射率を求めることが困難であることが挙げられる。この問題により、現状の新緑・紅葉マップには、落葉樹であると判定されたにも関わらず 12 月の最終週まで紅葉/落葉しないと判定されたピクセル(赤色で塗られたピクセル)が点在して見受けられる。現状の四国全域での新緑・紅葉マップ(2018 年)の例を図 1.4 に、現状の新緑・紅葉マップにて赤いピクセルが多く確認される、高知県大豊町付近を拡大した図を図 1.5 に示す。これは特に標高の低い場所に生育する落葉樹とその他の土地被覆との境界に多い。これはマップの精度上問題があり、改善が必要である。

一般的に、これらのミクセルによる問題は、ハイパースペクトルセンサ等による、多バンドを使用したミクセル解析[篠原ら, 2016][Kosaka, 2005][Alberto ら, 2010][Chein ら, 2011] が主流である。しかしながら、観測バンドが少ない衛星画像でのミクセル解析を行うためには、新たに手法の構築が求められる。

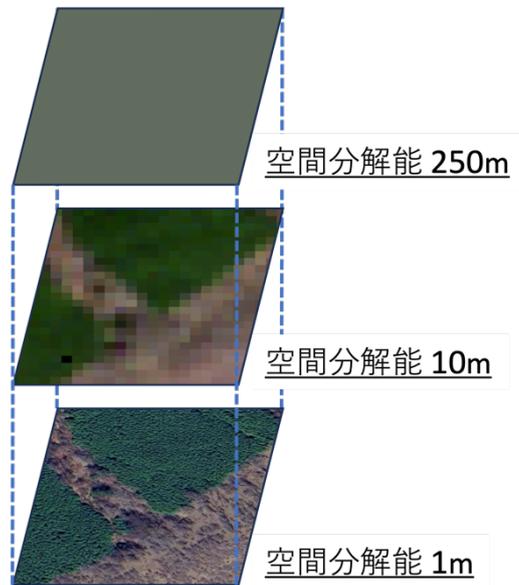


図 1.3 ミクセル概念図

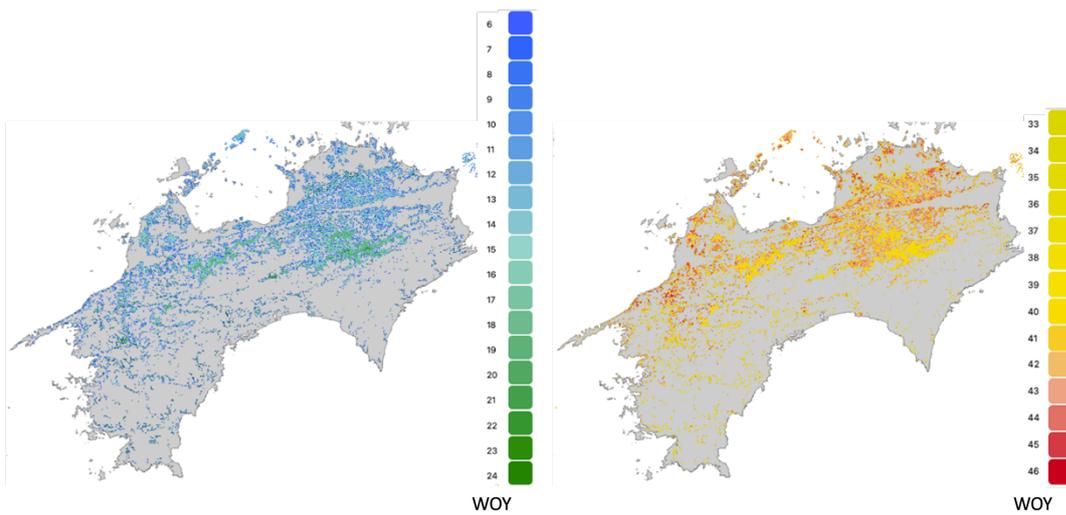


図 1.4 2018 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

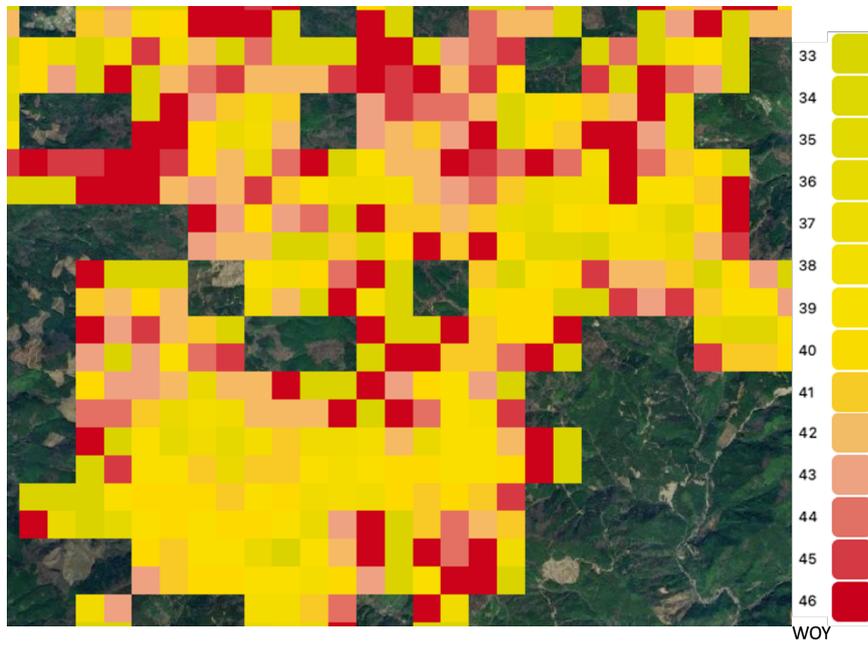


図 1.5 赤色のピクセルが目立つ,現状の新緑紅葉マップ
(背景は Google Earth より転載)

1.3 研究目的

本研究は、新緑・紅葉マップのミクセル問題に対して、問題を改善した新たなマップ作成手法の構築を目的とした。改善手法にはミクセル解析を使用する。現状の新緑・紅葉マップにおける、土地被覆判定に対して、ミクセル解析を行い落葉樹のピュアピクセルでの反射率を推定し、新たに新緑・紅葉時期の判定を行うことで対処することを目標とする。しかし、一般的なミクセル解析に必要な観測バンド数を確保できない。本研究では簡便な手法開発を目標とし、これまでの研究成果として挙げられる着葉状態の NDVI 閾値を活用するという点でも、一貫して NDVI の値を用いた。したがって、本研究の特徴は可視域の赤バンドと近赤外バンドの2バンドのみで、多ピクセルに対してミクセル解析手法を取り入れたことである。本研究で使用した GCOM-C1 のデータを用いた先行研究を見ても、多ピクセルでのミクセル解析の研究事例は確認できなかった。

2 新緑・紅葉判定プロダクト作成手法

2.1 GCOM-C1 使用データ

新緑・紅葉マップには JAXA が提供している GCOM-C1 の 8 日統計処理画像レベル 2 統計プロダクトの地表面反射率を使用した。衛星による観測には雲の影響が常に存在し、観測対象の陸域全てを常時観測できているわけではない。8 日間統計量データは、8 日間の観測シーンをを用いて、雲の影響をなるべく少なくした画像を生成したものである。本研究では 8 日を 1 週間とし、1 年の第何週目であるかを WOY(Week of Year)で表す。その際、1 年間の〇〇週で表せられる。また、レベル 2 プロダクトは既にラジオメトリック補正が行われたデータである。幾何精度は 1/5pixel 程度で、メートル換算すると 50m 未満であることが 2020 年高知工科大学・山田らの研究で確認されている[12]。

物理量プロダクトのうち観測波長帯の可視域バンドである VN2, VN3, VN6, VN7, VN8 と近赤外バンドである VN10, VN11 の計 7 バンドを新緑・紅葉判定プロダクトで使用した。使用するデータは JAXA の衛星観測データ提供システム G-Portal より FTP を利用してダウンロードを行った。データは HDF 形式でアーカイブされており、バンドごとに閲覧することができる。(2024 年 12 月現在, G-Portal がサービスを停止しており、「しきさい臨時 FTP サイト」で公開を行なっている.)

2.2 座標変換

G-Portal からダウンロードして作成した画像は投影法が EQA 図法に従ってタイルごとに区画分けされている。本研究の対象エリアである四国地域のタイル番号は 0529 となっている。このとき、座標変換を行うことにより、公共測量で使われる座標系と重ね合わせて利用ができるようにした。座標変換式は GCOM-C データ利用ハンドブック[1]に記載されている変換式を利用して座標変換を行い geotiff 形式で保存した。座標変換前の EQA 図法で表された VN10 の画像を図 2.1 に、座標変換後の平面直角座標系 4 系で表された VN10 の画像を図 2.2 に示す。

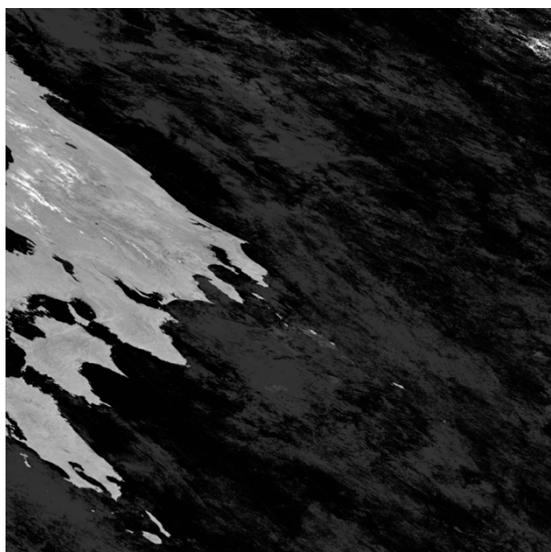


図 2.1 EQA 図法で示された VN10 の画像



図 2.2 座標変換後の VN10 の画像

2.3 反射率の正規化と年間での NDVI 変化量の把握

人工衛星のセンサが受光している放射量は光源や地形、大気等の影響を受けている。本研究ではそれらの影響を小さくするために式(a)を用いて正規化反射率に変換する処理を行った。反射率の正規化には VN2, VN3, VN6, VN7, VN8, VN10, VN11 の計7バンドを使用し、赤バンド(VN7)と近赤外バンド(VN10)の正規化を行った。

$$R_e(VNi) = \frac{N \times r_e(VNi)}{\sum_{i=1}^N r_e(VNi)} \quad (a)$$

R_e : 正規化反射率 r_e : 反射率
N: 使用バンド数 i : バンド番号

正規化を行った反射率のデータを用いて NDVI(正規化植生指標)を算出し、本研究の新緑・紅葉マップに使用した。一般に衛星画像を用いた植生解析には、NDVI、EVI(拡張植生指標)、緑被率などが用いられるが、NDVIが最も値域が広く、落葉樹の着葉状態を判定するのに適していると判断した。NDVIの演算式を式(b)に示す。また、落葉樹の着葉・落葉判定の際の閾値は $NDVI = 0.75$ と設定しており、これは2021年高知工科大学高見らの研究で、GCOM-C1よりも分解能の高いSentinel2の画像を教示データにを用いて検討された[9]。図2.3に代表的な常緑樹と落葉樹のNDVIの年変化のグラフを示す。

$$NDVI = \frac{Re(VN10) - Re(VN7)}{Re(VN10) + Re(VN7)} \quad (b)$$

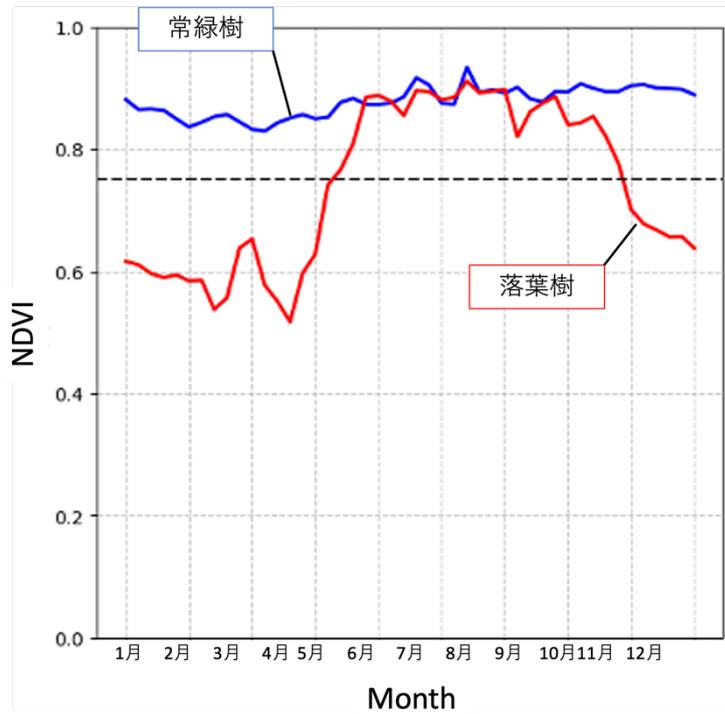


図 2.3 代表的な常緑針葉樹と落葉樹の NDVI の年変化

2.4 周波数成分のカットによるノイズの低減

本研究で使用している 8 日間統計量データは雲域のない画像を提供するために生成されたデータであるものの、8 日間のうち極端に雲の多い時期が重なってしまうと除去しきれずに NDVI の値が極端に下がる、もしくは $NDVI = 0$ となる期間がある。日本は 9 月から 10 月にかけて台風と、台風の暖かく湿った風の影響を受けた活発な秋雨前線により、特に快晴の日数が減り NDVI の値にノイズを及ぼす。

そこで、精度向上を目的としてノイズ除去を行なった[藤原, 2022]。ノイズ除去には、Python の NumPy ライブラリを使用して高速フーリエ変換 (FFT) を実行し、特定の周波数成分をカットした。この際、精度を向上させるために、3 年間の NDVI データにおいて、周期の短い成分をノイズとして除去した。具体的には、実時間にして約 1 か月以下の周期を持つ成分をノイズとみなし、それを除去することで、周期の長いデータの特徴のみを残した。ここで、周期は時間的なデータの変動を示し、NDVI の変化に含まれるどの周期成分が重要であるかを考慮した。そして、周波数成分カット後に逆フーリエ変換 (IFFT) をかけた。加えて、1 年間の周期と振幅が合うように、第 1 週目に周波数成分をカットする前の振幅の値を切片として与えてオフセットを調整した (図 2.4)。

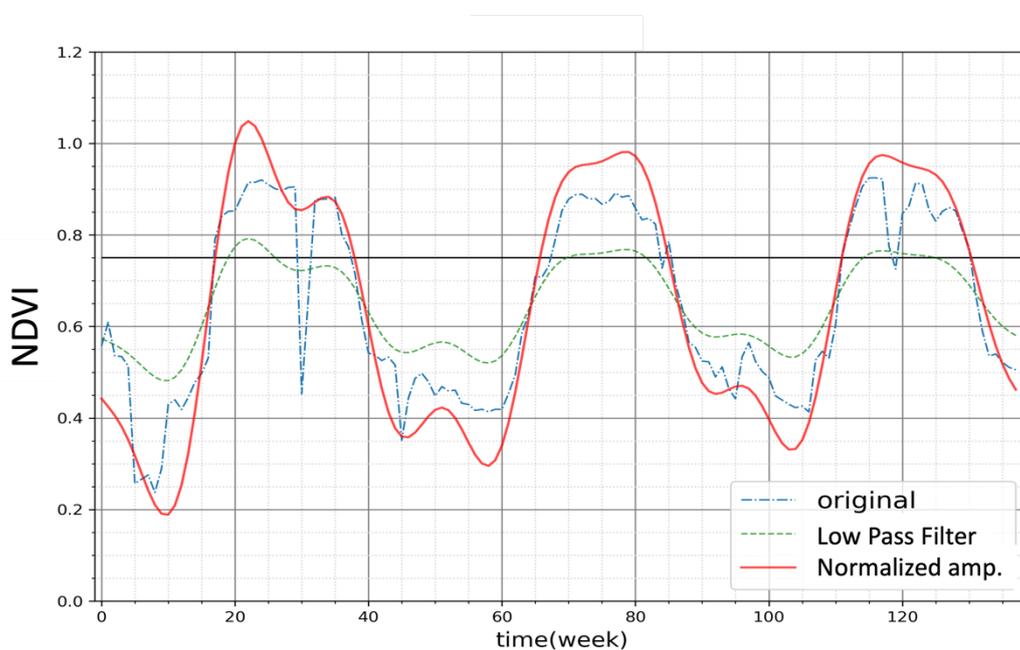


図 2.4 NDVI の 3 年間の変化

2.5 落葉樹エリアの分類

本研究の対象は四国地方の落葉樹である。そこで、落葉樹エリアのマスク画像を作成した [図 2.5]。落葉樹ピクセル判定のフローを図 2.6 に示す。落葉樹の判定には、落葉樹が葉を落としていると考えられる、2 週目から 8 週目までの各週の NDVI のうち $NDVI = 0.75$ を下回った週数と、落葉樹が葉をつけていると考えられる、25 週目から 31 週目までの各週の NDVI のうち $NDVI = 0.75$ を上回った週数をピクセルごとにカウントし、足し合わせた和が 12 以上ならば落葉樹が含まれるピクセル、11 以下なら常緑樹が含まれるピクセルと判定し、これを 3 年間のデータに対して行った時の論理積をとった。また、選択した 3 年間のデータは、作成したい新緑・紅葉マップの年が間に来るように選択した。2020 年のマップを作成したい時は 2019, 2020, 2021 年のデータを使用した。(GCOM-C1 の観測初年度にあたる 2018 年と最新の 2023 年のエリアマスクに関しては、それぞれ、 $2018 = 2018 \cap 2019 \cap 2020$, $2023 = 2021 \cap 2022 \cap 2023$ 年のデータを使用した。)但し、落葉樹エリアの検証は行えないため注意が必要であり、また、本アルゴリズムは改良の余地があると考えられる。しかしながら、本研究では以上の手法により落葉樹と判定されたピクセルに対して新緑・紅葉の時期を判定し、新緑・紅葉マップを作成していく。

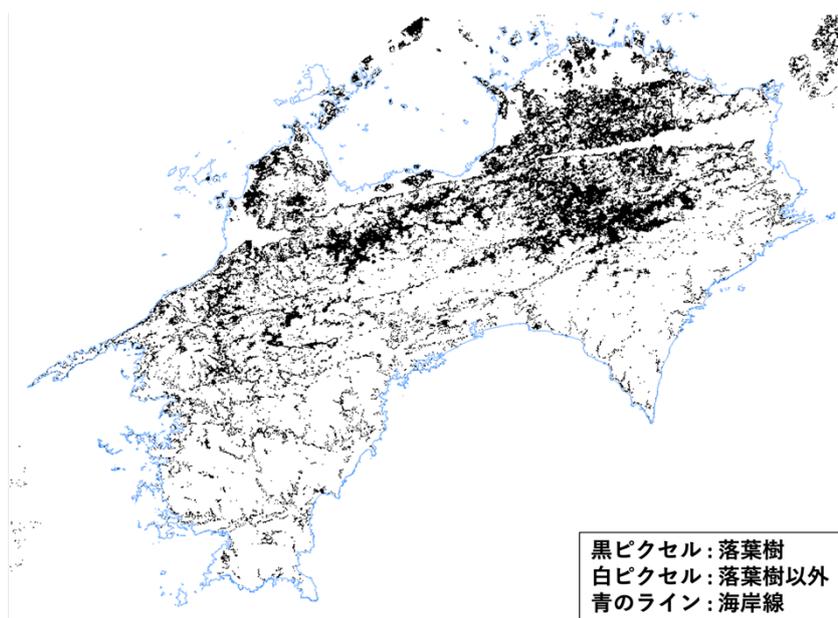


図 2.5 2019 年 落葉樹エリアマップ

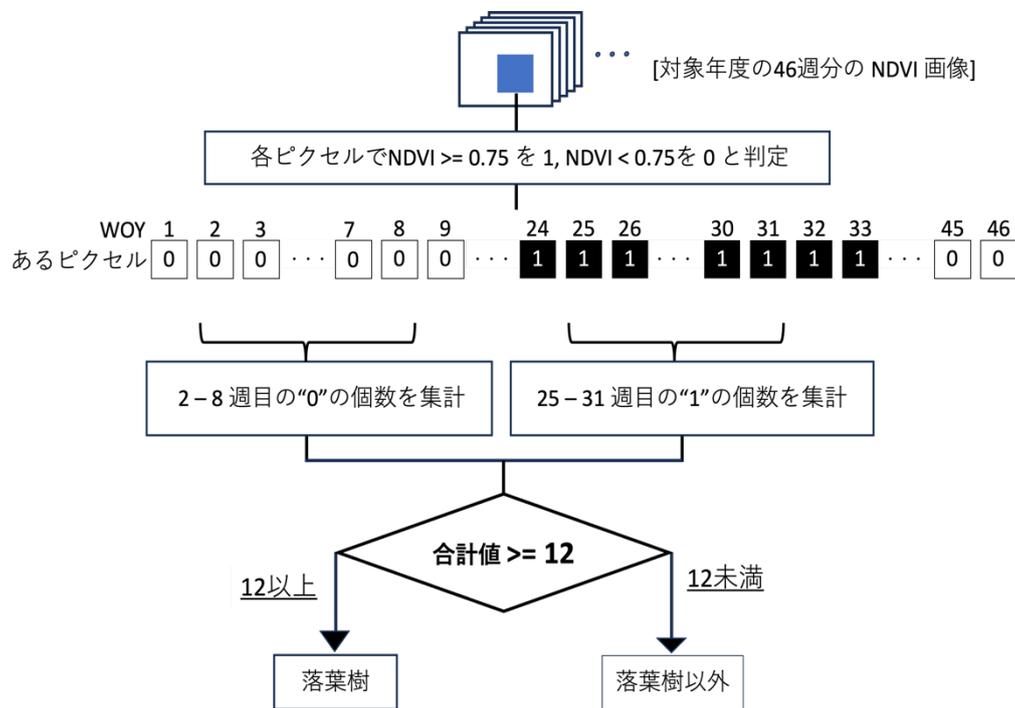


図 2.6 落葉樹ピクセル判定フロー

2.6 新緑・紅葉マップの作成手法

新緑・紅葉時期の決定は以下の手順で行う。まず、使用するデータは2.4節で述べた IFFT 結果にオフセットをかけた NDVI の結果を使用する。NDVI = 0.75 を上回った日を着葉日、NDVI = 0.75 を下回った日を紅葉日として決定した。これにより、日ごとの新緑紅葉のタイミングを得ることができた。

最終的な新緑・紅葉経過マップには、ピクセルごとに新緑・紅葉時期の WOY を入力する。桜前線や紅葉前線など、等高線でその時期を示す方法が一般的だが、全てのピクセルにその時期が入力されている方が、前年度との比較や他の画像との重ね合わせも容易であることから、この形式を採用した。

以下、図 2.7 から図 2.12 に 2018 年から 2023 年までの新緑・紅葉マップを示す。

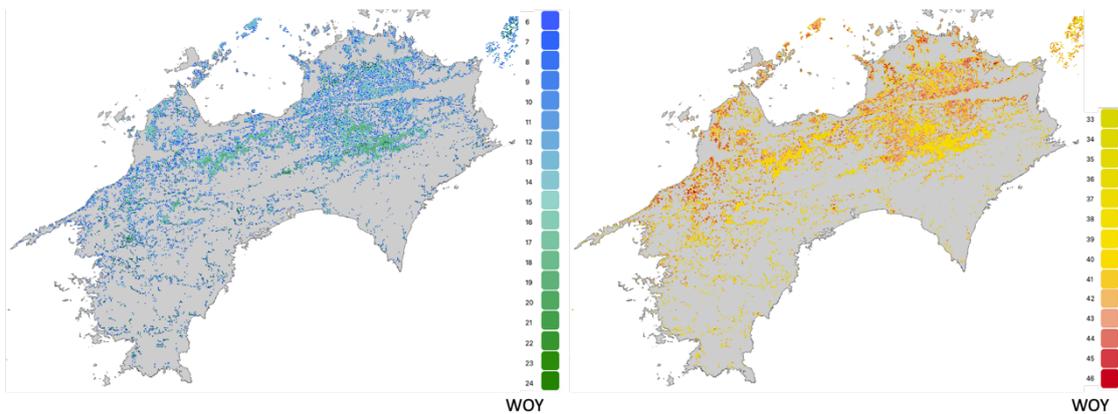


図 2.7 2018 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

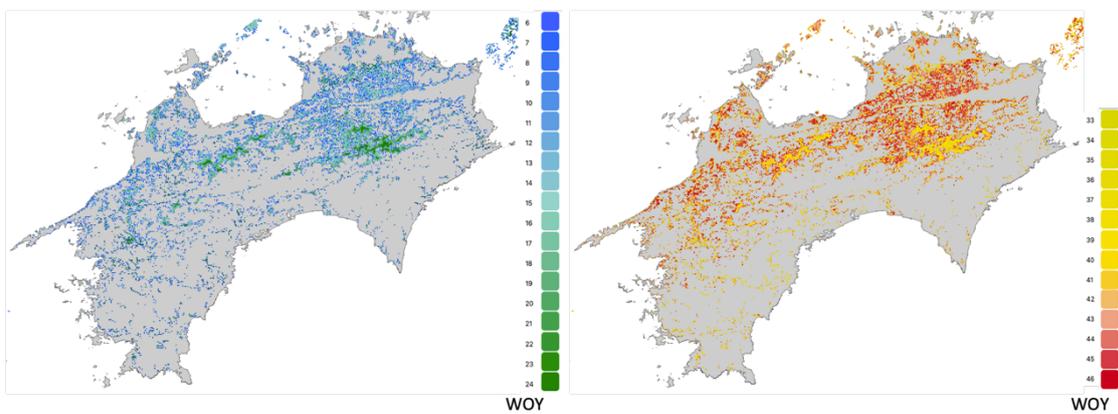


図 2.8 2019 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

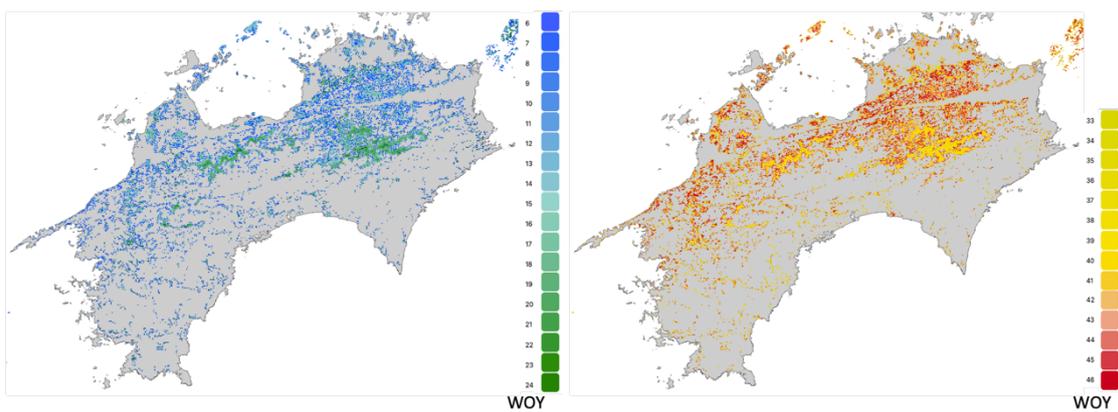


図 2.9 2020 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

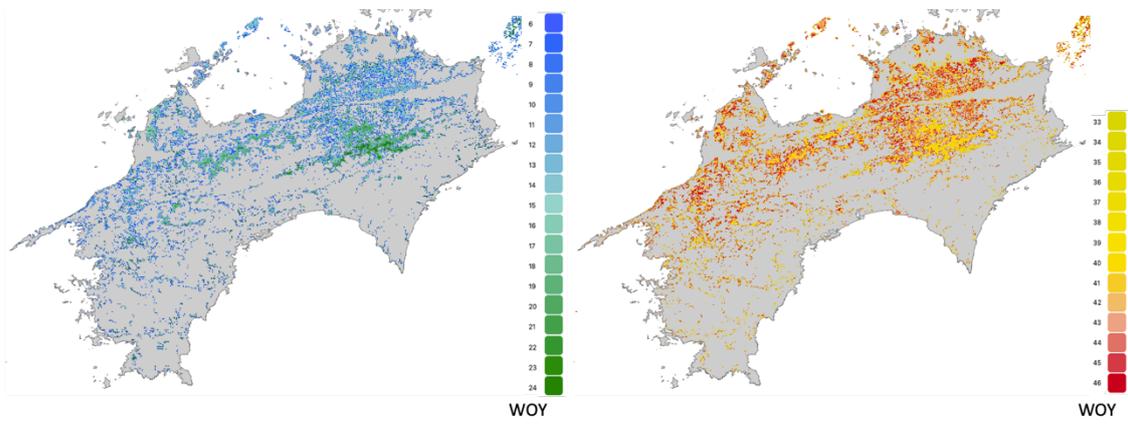


図 2.10 2021 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

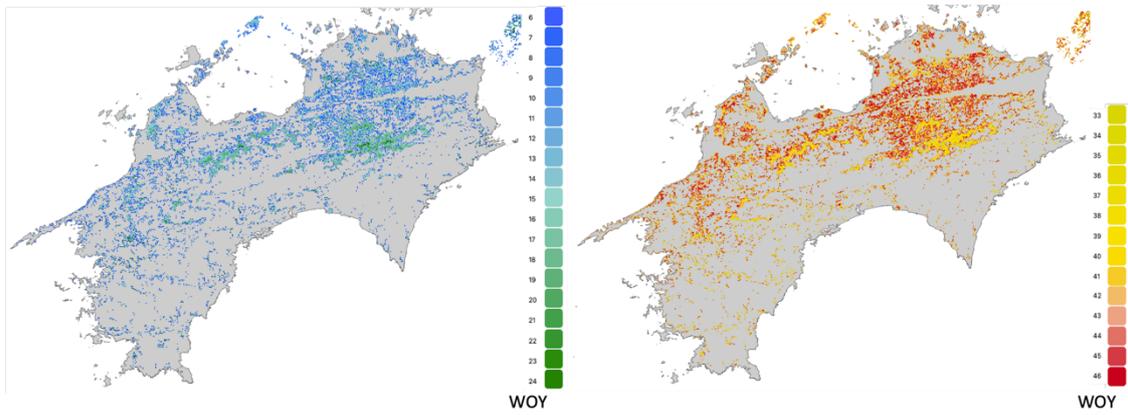


図 2.11 2022 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

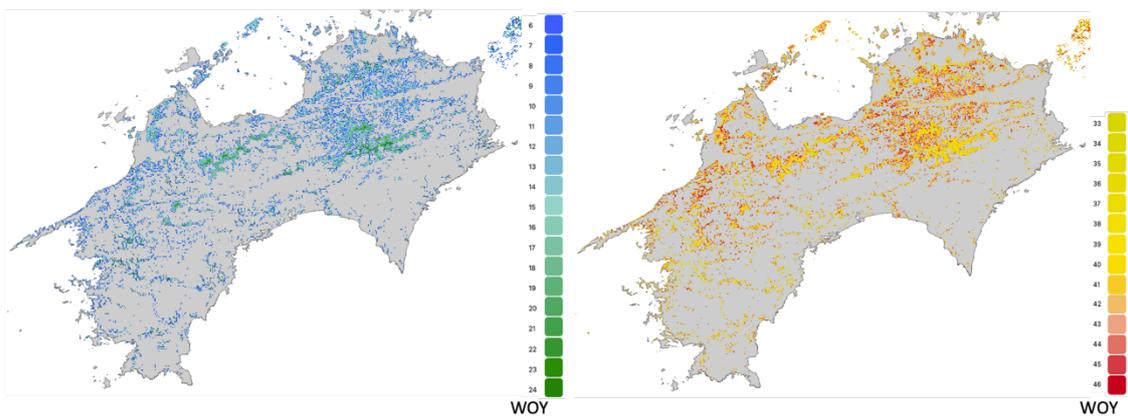


図 2.12 2023 年新緑マップ(左),紅葉マップ(右)

3 ミクセル解析

3.1 対象エリアと教師データの作成

ミクセル解析は一般に、様々な土地被覆で構成されている画素(ミクセルと呼ばれる)の輝度値から、各地目の面積を逆算できるというものである。土地被覆の反射係数と、その土地被覆の面積の線型結合で、そのピクセルの反射係数を表現できる。

2章で作成した紅葉マップを拡大し確認してみると次の図 3.1 のようになっている。標高の低いエリアでは、1年の最終週の46週目に落葉したと判定されている赤ピクセルが多く、判定の精度に問題があることがわかった。そこで、ミクセル解析を行い、新緑・紅葉マップの精度向上を試みた。

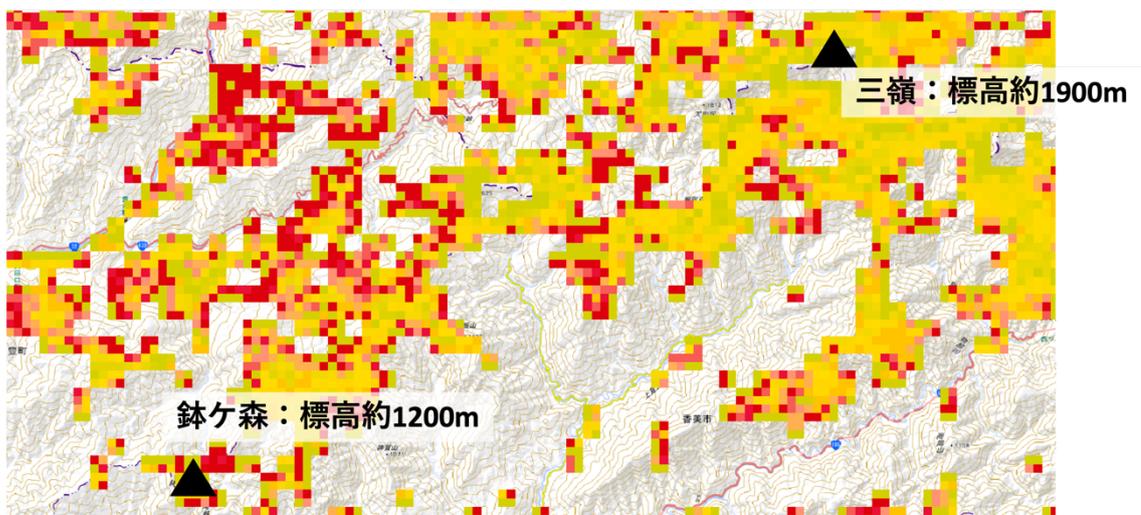


図 3.1 2023 年 紅葉マップ拡大図
(背景は国土地理院地図より転載)

目視による分類項目別ポリゴンデータ

今回ミクセル解析の対象エリアには高知県の鉢ヶ森、梶ヶ森、また、高知県と徳島県の県境に位置する三嶺、それぞれの山頂周辺を対象とした(図 3.2)。山頂の標高はそれぞれ、三嶺が約 1900m、梶ヶ森が約 1500m、鉢ヶ森が約 1200m となっている。対象エリアの選定理由は、これらの山頂周辺に本研究の対象である落葉樹林が多く確認できたこと。また、実際に現地に足を運び、分布している樹種や土地被覆を感覚的に把握することができるためである。

教師データは QGIS 上で、Google Earth の画像を背景に目視でポリゴンを作成した。ポリゴンを作成するにあたって、現地に行った経験は非常に役に立った。ポリゴンを作成した範囲は、エリアごとに、GCOM-C1 の pixel(250m 分解能)を 6×6 の 36pixel 分であり、その際の分類項目は、落葉樹・常緑樹・岩盤・ササ・水・アスファルト道路・裸地・コンクリート人工物の計 8 種とした(表 3.1)。図 3.3,3.4,3.5 に実際に作成したポリゴンによる教師データを示す。

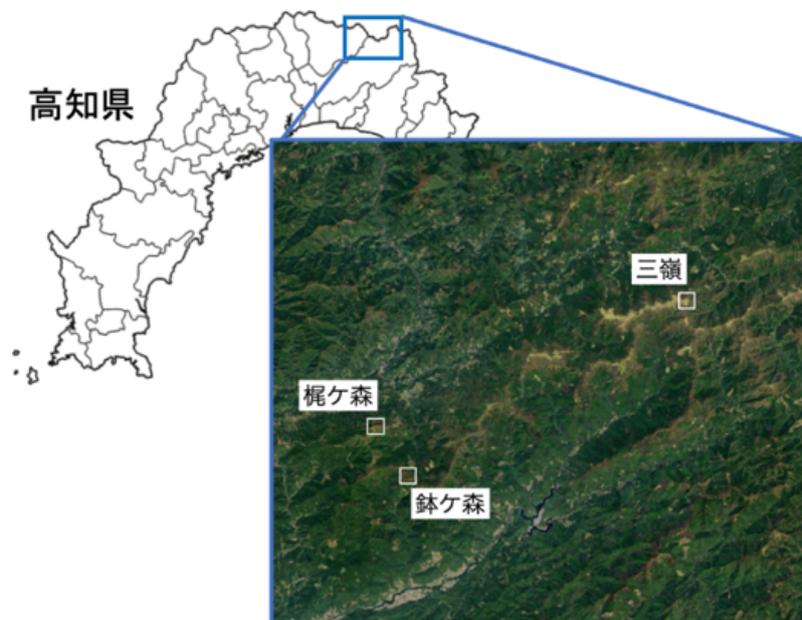


図 3.2 ミクセル解析の教師データ作成エリア
(背景は Google Earth より転載)

表 3.1 ポリゴン作成時の分類項目(反射係数は 3.2 節で解説)

分類項目	反射係数
落葉樹	a_1
常緑樹	a_2
岩盤	a_3
ササ(クサ)	a_4
水	a_5
アスファルト道路	a_6
裸地	a_7
コンクリート人工物	a_8

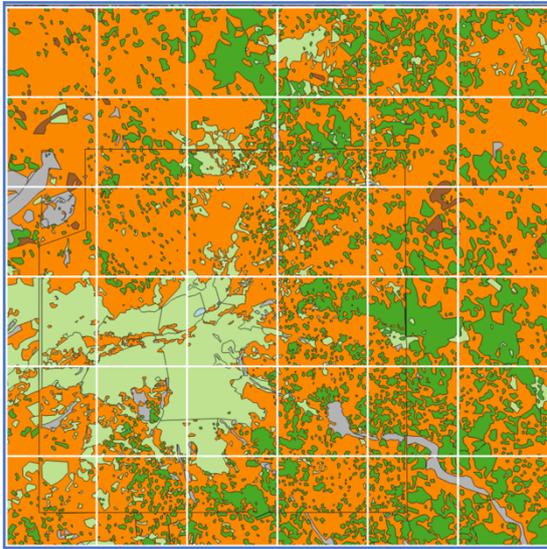


図 3.3 作成したポリゴン(三嶺エリア)



図 3.4 作成したポリゴン(鉢ヶ森エリア)

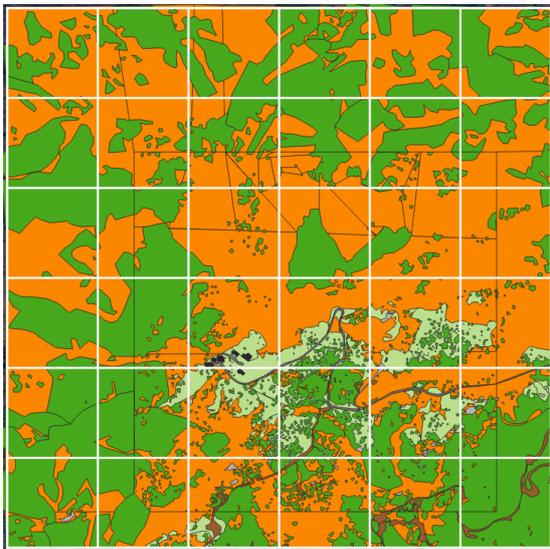
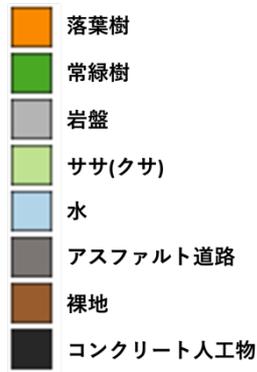


図 3.5 作成したポリゴン(梶ヶ森エリア)



3.2 リニアミクスチャーモデル

本研究では、ミクセル解析にリニアミクスチャーモデルを使用した。GCOM-C1それぞれの輝度値は、ポリゴンの面積を用いた構成要素の面積割合をもとにバンド毎に線形変換式(式(c))で表すことができる。反射係数は表 3.2 で構成要素との対応を示している。一つのバンドで構成要素に対して、たくさんのピクセルを利用したことで(今回は36ピクセル(図 3.6)), 式(c)を用いて分類項目毎の反射係数を推定することができる。一般に、ミクセル解析において反射係数を求める際には、バンド間の相関が高い場合は解が不安定となり連立方程式で求めることに問題が生じる。その場合、各地目の面積割合を少しずつ変化させながら、最も反射率の値に近づくものを探す、総当たりの方法が用いられることが多い。しかしながら本研究の主な対象である植物は、可視域の赤バンドの反射と近赤外バンドの反射に相関がほとんど見られない。そのため、本研究においては反射係数の推定の際に連立方程式を用いることで解を求めることができる。

また、今回は1ピクセルごとの各分類項目の面積割合の推定に、QGIS上で作成したポリゴンを1m²のラスタに変換し、QGIS上のゾーン統計量ツールを用いて落葉樹率を計算させた。計算された落葉樹の面積割合より作成した、教師エリアにおける落葉樹率マップを 図 3.7,3.8,3.9 に示す。以上の手順により、ミクセル解析にて観測バンド NIR, VR に対応する VN10, VN7 の反射係数を推定した。

$$\begin{aligned} Re(VN10) &= a_1 x_1 + a_2 x_2 + \cdots + a_8 x_8 \\ Re(VN7) &= b_1 x_1 + b_2 x_2 + \cdots + b_8 x_8 \end{aligned} \quad (c)$$

R_e : 正規化反射率 a, b : 反射係数 x : 構成要素の面積

1pixel (250m)

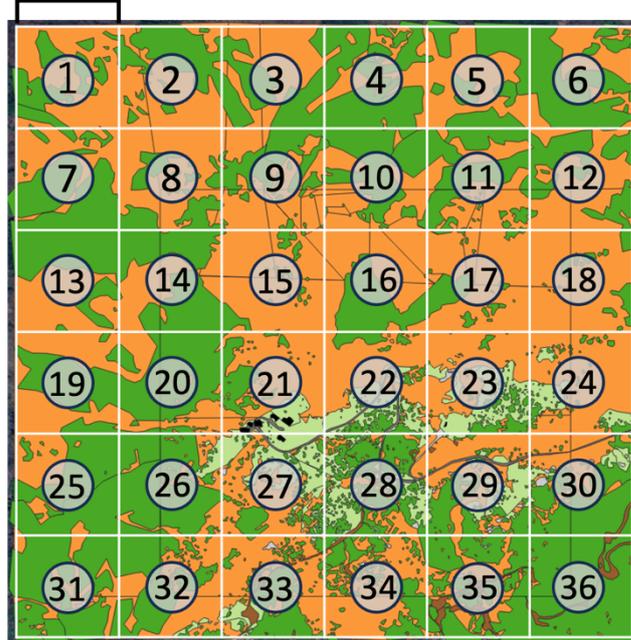


図 3.6 作成したポリゴンの 36 ピクセルの区分(例は梶ヶ森)

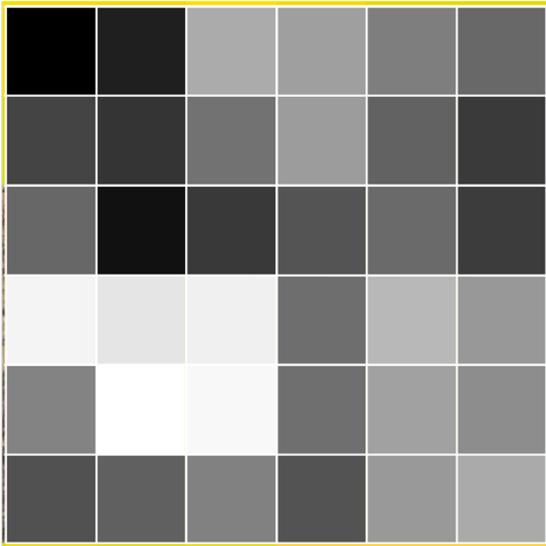


図 3.7 落葉樹率マップ(三嶺エリア)

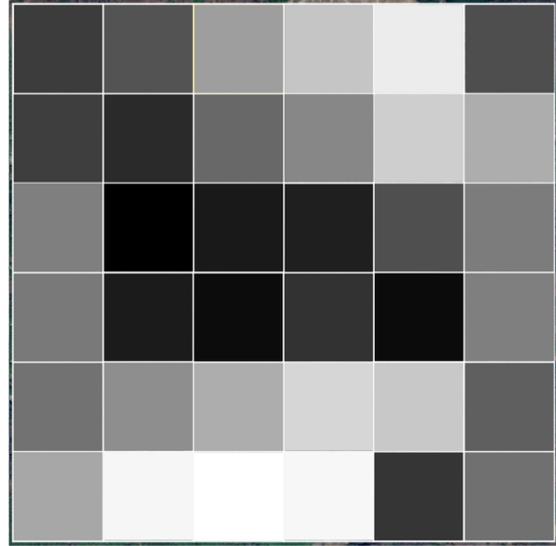


図 3.8 落葉樹率マップ(鉢ヶ森エリア)

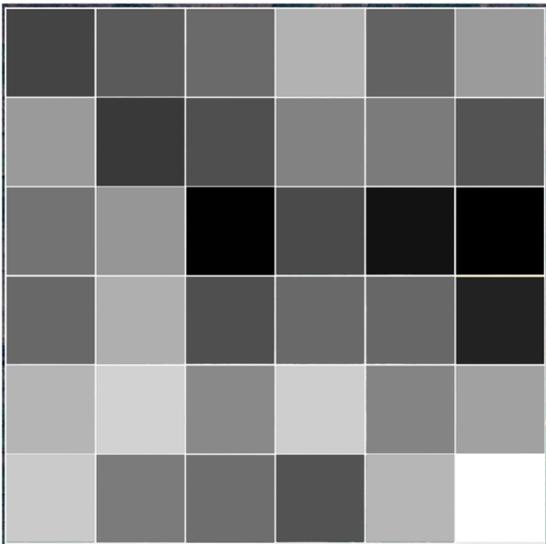
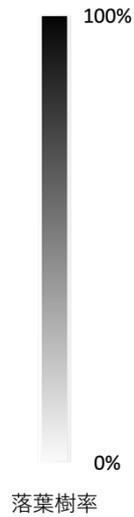


図 3.9 落葉樹率マップ(梶ヶ森エリア)



3.3 リニアミクスチャーモデルの解析結果

3.3.1 リニアミクスチャーモデルの精度確認

ミクセル解析によって推定された値の精度が有効であるかを確認するために、リニアミクスチャーモデルの精度確認を行なった。確認には、ある週の教師エリア全てのピクセル 36 ピクセルでの確認と、教師エリアの中心地点で 1 年分 46 週での確認、2 通りの方法で行った。

まず初めに、ある週の教師エリア全てのピクセル 36 ピクセルでの確認であるが、確認時期は 2023 年 4 月 15 日から 22 日、WOY で 15 に当たる週とした。図 3.10 に NIR バンドに対して行った確認結果と R バンドに対して行った確認結果を示す。グラフは教師ポリゴンを作成したエリア毎に左から三嶺、鉢が森、梶が森で、グラフの横軸は GCOMC-1 の実測値(反射率)、縦軸はミクセル解析結果を用いた NIR バンドと R バンドの推定値(反射率)となっている。反射率の正規化に平均を用いているため、NIR バンドの値は 0.0 から 4.0 となっている。

グラフの飛び値について説明すると、NIR バンドでの、鉢が森、梶が森のグラフについては伐採地・人工物の含まれるピクセルであった。これは草などの影響によって土地被覆に変化があったと考えられる。R バンドでは、鉢が森のエリアに伐採地と川辺のピクセル、梶が森のエリアに人工物のピクセルで影響があった。これに対しても土地被覆の変化による影響であると考えられる。

次に、教師エリアの中心地点で 1 年分 46 週での確認である。図 3.11 に NIR バンドに対して行った確認結果と R バンドに対して行った確認結果を示す。

こちらも同様に、グラフの飛び値について説明する。NIR バンド、R バンド双方での、山嶺の青色のポイントは冬季の積雪によるものであることが確認された。また、R バンドでは、鉢が森に、雲とまでは言えない水蒸気の影響が見られた。

以上の散布図のプロット図 3.10,3.11 が $x=y$ の直線に大方載っているため、今回使用したリニアミクスチャーモデルは本研究に使用できる精度であると判断した。よって、ミクセル解析結果より推定された落葉樹の反射率から紅葉マップを作成する。

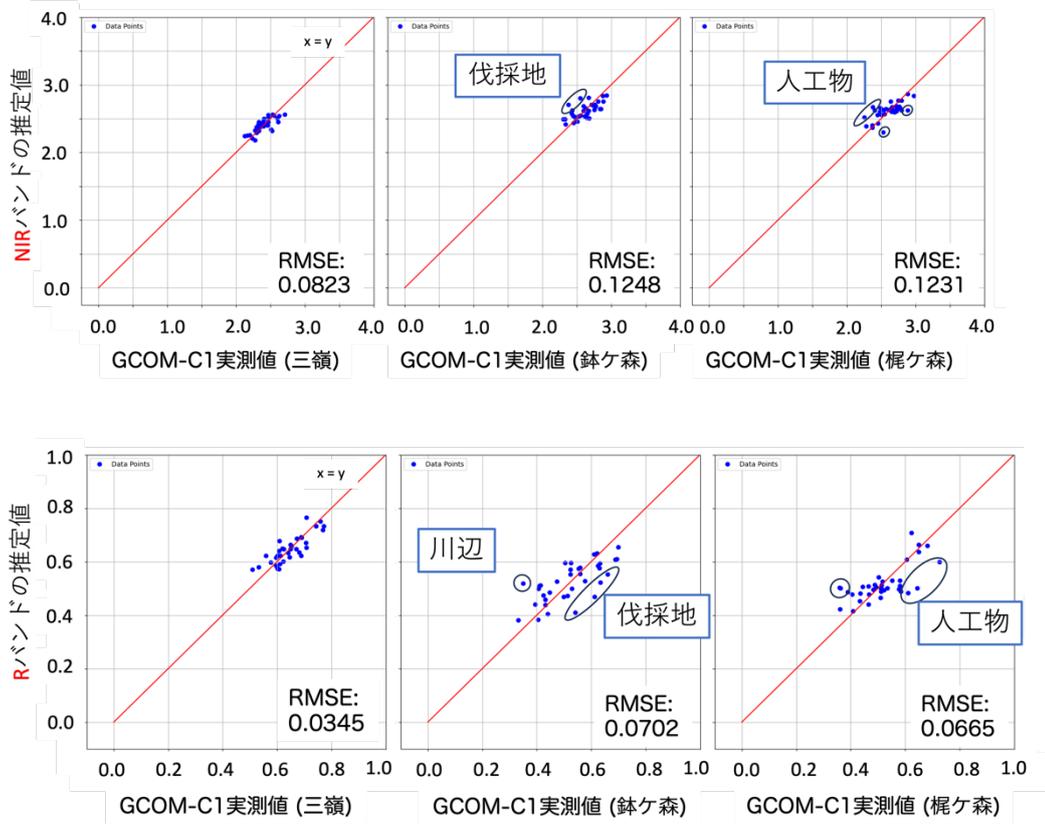


図 3.10 教師エリア全てのピクセル 36 ピクセルでの確認
(検証時期は WOY = 15)

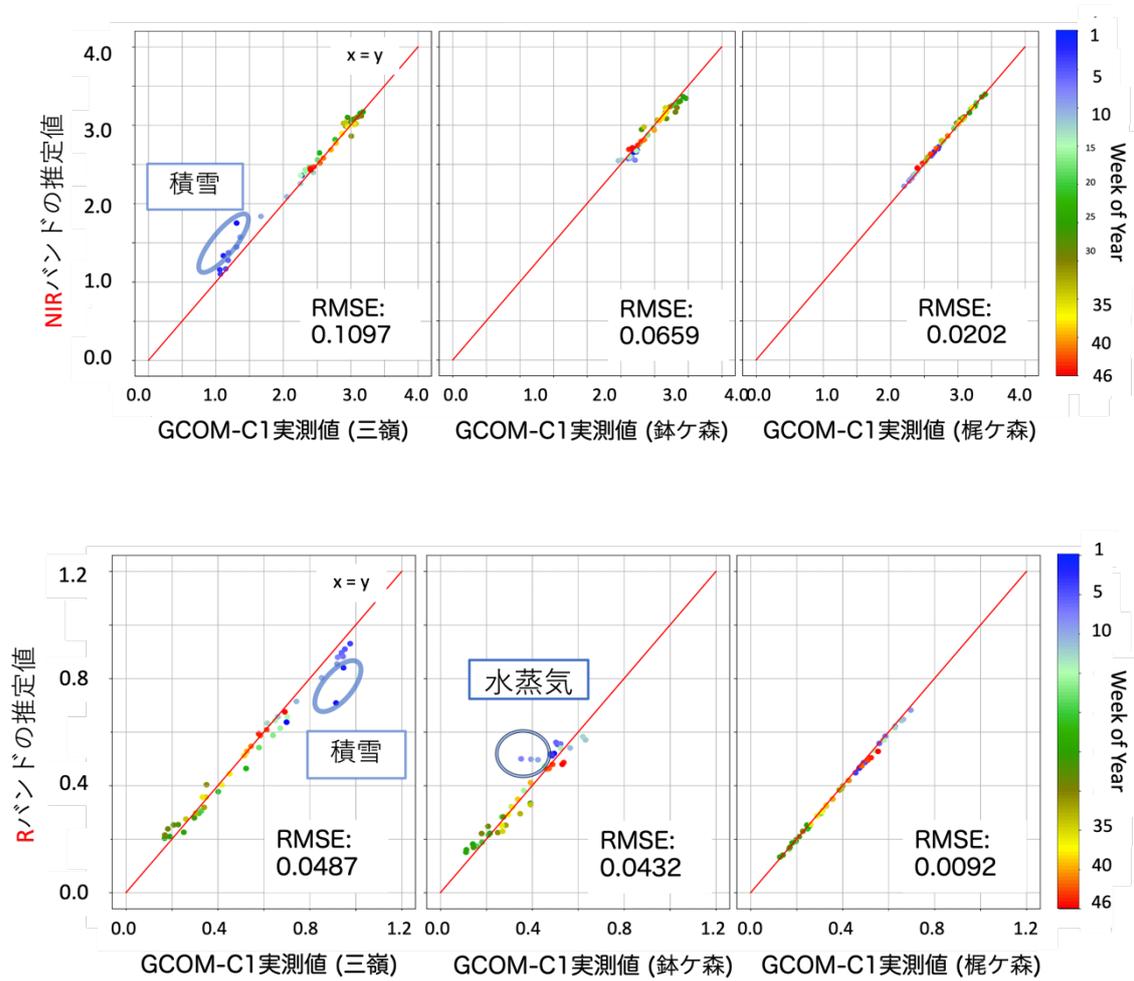
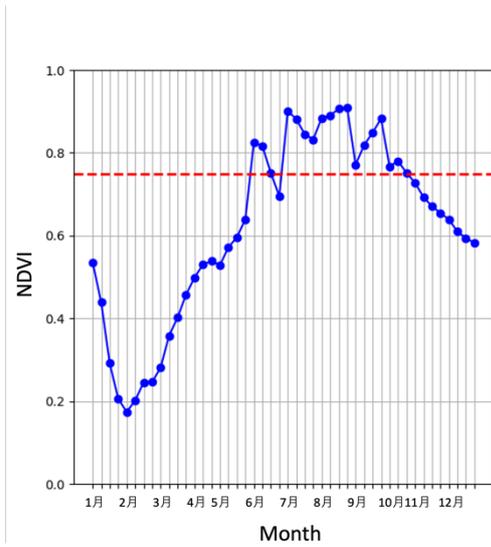


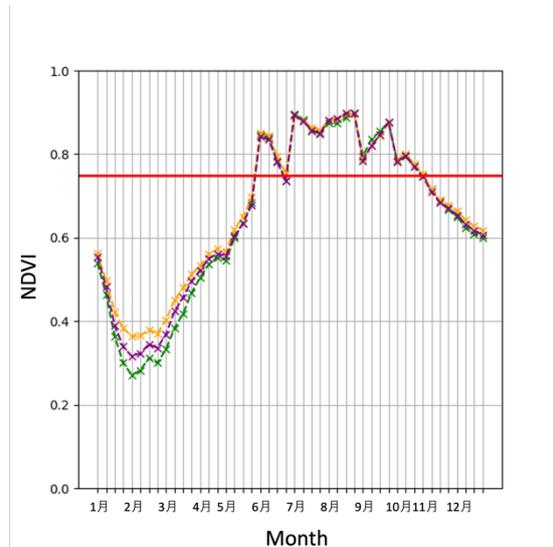
図 3.11 教師エリアの中心地点で1年分46週での確認

3.3.2 ミクセル解析による紅葉判定結果

ミクセル解析により推定された反射係数を用いて、落葉樹がピクセル全てを占める時(ピュアピクセル)の反射率のデータを作成し、教師エリアごとに1年間のNDVIの変化グラフを作成した。グラフに示されたNDVI = 0.75のラインより、教師エリアそれぞれのエリア内全体で求めたミクセル解析結果を用いた新緑・紅葉時期が推定できる。この結果を、落葉樹率が80%以上のピクセルのNDVIの変化グラフと並べて比較したものを図3.12, 3.13, 3.14に示す。落葉時期において、推定された落葉樹ピュアピクセルの値が、落葉樹80%以上のピクセルの値と比較して低く出ている。これは、ミクセル解析によって、常緑樹の影響を排除しミクセル状態を解消できたことを意味する。三嶺の23週目においてはNDVIが0.75を下回っているものの、GCOM-C1の画像から雲による影響であることを確認した。また、GCOM-C1よりも地上分解能の高いSentinel-2において着葉状態を確認した。

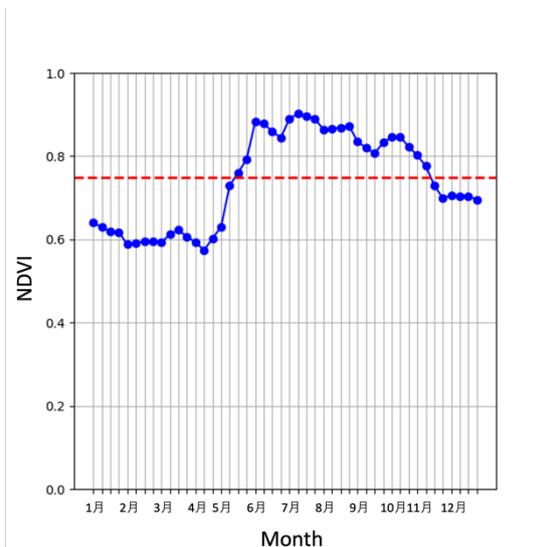


推定された落葉樹ピュアピクセル

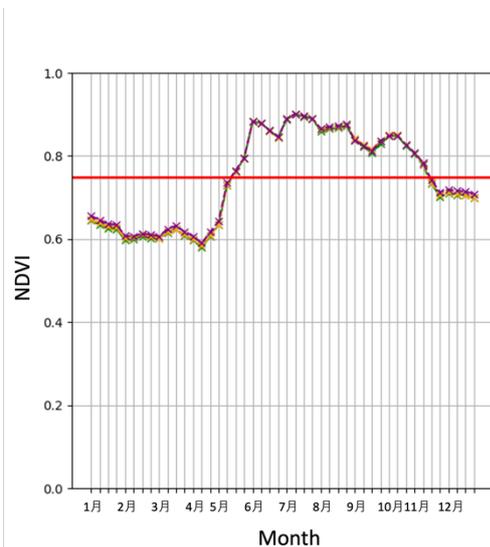


落葉樹率が80%以上のピクセル

図 3.12 三嶺エリアにおける
ミクセル解析により推定された落葉樹ピュアピクセル(左)と
落葉樹率が80%以上のピクセル(右)の1年間のNDVIの変化グラフとの比較

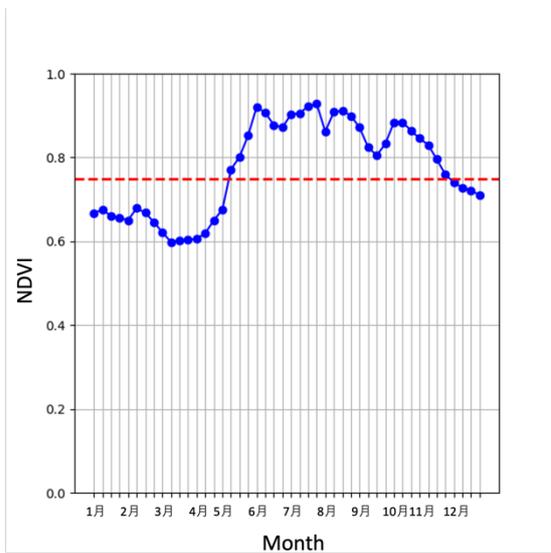


推定された落葉樹ピュアピクセル

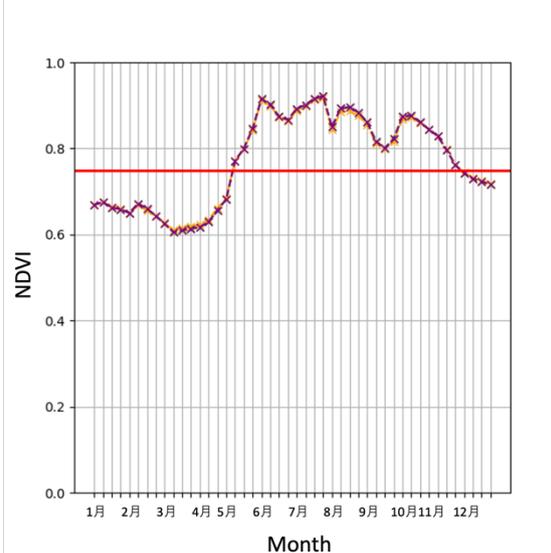


落葉樹率が80%以上のピクセル

図 3.13 鉢ヶ森エリアにおける
ミクセル解析により推定された落葉樹ピュアピクセル(左)と
落葉樹率が80%以上のピクセル(右)の1年間のNDVIの変化グラフとの比較



推定された落葉樹ピュアピクセル



落葉樹率が80%以上のピクセル

図 3.14 梶ヶ森エリアにおける
ミクセル解析により推定された落葉樹ピュアピクセル(左)と
落葉樹率が80%以上のピクセル(右)の1年間のNDVIの変化グラフとの比較

3.4 ミクセル解析結果の考察

今回のミクセル解析で、教師エリアそれぞれのエリア内全体で求めたミクセル解析結果を用いた新緑・紅葉時期を求めることができた。落葉樹ピュアピクセルの NDVI 値と、落葉樹 80%以上のピクセルの NDVI 値の比較によって、ミクセル解析が GCOM-C1 のミクセル状態の解消に有効であり、多ピクセルを用いたミクセル解析の手法が、GCOM-C1 のミクセル状態のピクセルから地物の純粋な反射率を取得することに有効であることを示した。

また、今回のミクセル解析のために作成した落葉樹率マップにて、落葉樹率が高いにも関わらず落葉樹エリアとして判定されていない箇所を発見した。梶が森においてこのエリアを現地で確認すると、落葉樹の林床部分にシキミ/シロダモやクマササ(図 3.15)が多く分布していたことがわかった。このことから下層植生による誤判定であると考えられる。

図 3.12,3.13,3.14 で求めた新緑紅葉結果は教師エリアそれぞれに対して一つの判定結果になっている。そこで次章では、1pixel ずつ新緑・紅葉時期を判定するために、NDVI を落葉樹率に合わせて補正する。



シキミ



クマササ

図 3.15 梶ヶ森エリアの現地調査写真

4 落葉樹率を用いた補正 NDVI

4.1 NDVI の補正手法

1pixel ずつ新緑・紅葉時期を判定するために GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率から、NDVI の補正を行った。それぞれのピクセルの落葉樹率と NDVI の散布図 46 週分を 3 つの教師エリアごとに作成し、最小二乗法により回帰直線式を求めた。この時、GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率と NDVI の散布図から求めた回帰直線は 2023 年 12 週目において図 4.1, 4.2, 4.3 のように、落葉期において負の傾きが確認できる。

3 つの教師エリア、46 週分の回帰直線式の傾きをグラフ化したものを図 4.4, 4.5, 4.6 に示す。落葉期には回帰直線の傾きが負になっていることが望まれる。しかし、三嶺エリアの 12 月において傾きが正になっている。理由としては三嶺エリアにて、冬季に枯死するササが多く分布しているエリアが落葉樹率の低い 0.2~0.4 の落葉樹率に集まっているためである。その他の落葉期には傾きが負の傾向が見られ、NDVI の補正手法の妥当性を確認した。

回帰直線式を求める際には、GCOM-C1 の画像を教師エリア別に 1 枚ずつ確認し、雲の影響が大きく明らかに正常な NDVI の値でないと判断したものについては除外した。また、三嶺においては積雪のあるピクセルにおいても同様に除外した。その回帰式を用いて GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率が 1.0 であるとした時の NDVI の値を求めた。式(d)、式(e)に NDVI の補正に用いた式を示す。式(e)によって、もとの NDVI から最小二乗法によって求められた NDVI を引くことで、そのピクセルごとの樹種や樹冠上の葉面積によって幅を持った NDVI の値の差異に対応した。

$$NDVI_{cal} = mD_r + n_0 \quad (d)$$

$NDVI_{cal}$: 最小二乗法によって求められた NDVI

m : 回帰直線の傾き

D_r : 落葉樹率

n_0 : 落葉樹率が 0% のときの NDVI

$$NDVI_{new} = NDVI_{ori} - (NDVI_{cal} + n_{100}) \quad (e)$$

$NDVI_{new}$: 補正 NDVI

$NDVI_{ori}$: もとの NDVI

n_{100} : 落葉樹率が 100% のときの NDVI

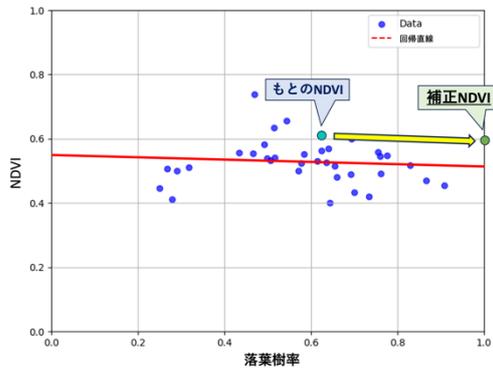


図 4.1 落葉樹率と
NDVI の散布図と回帰直線
(2023 年第 12 週目：三嶺)

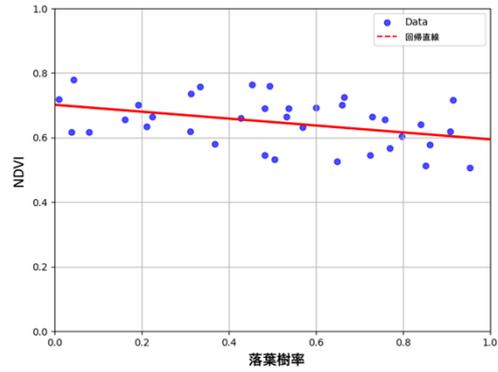


図 4.2 落葉樹率と
NDVI の散布図と回帰直線
(2023 年第 12 週目：鉢が森)

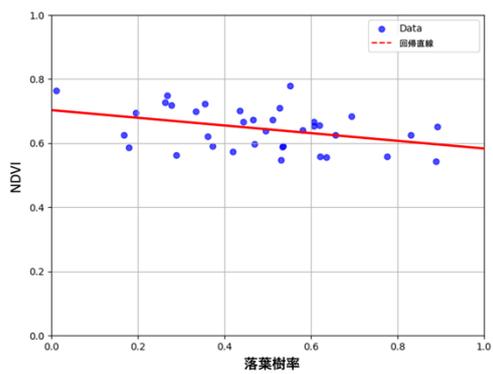


図 4.3 落葉樹率と
NDVI の散布図と回帰直線
(2023 年第 12 週目：梶が森)

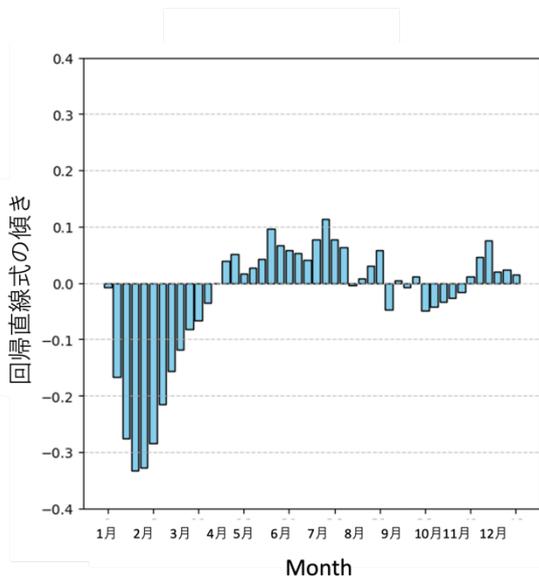


図 4.4 落葉樹率と NDVI の
回帰直線式の傾きの年変化グラフ
(2023 年：三嶺)

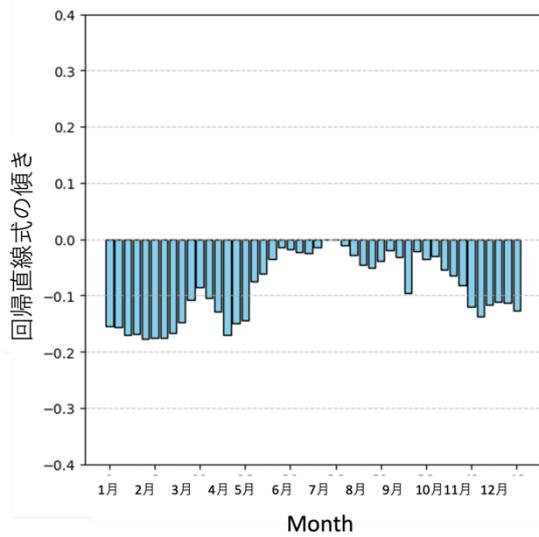


図 4.5 落葉樹率と NDVI の
回帰直線式の傾きの年変化グラフ
(2023 年：鉢ヶ森)

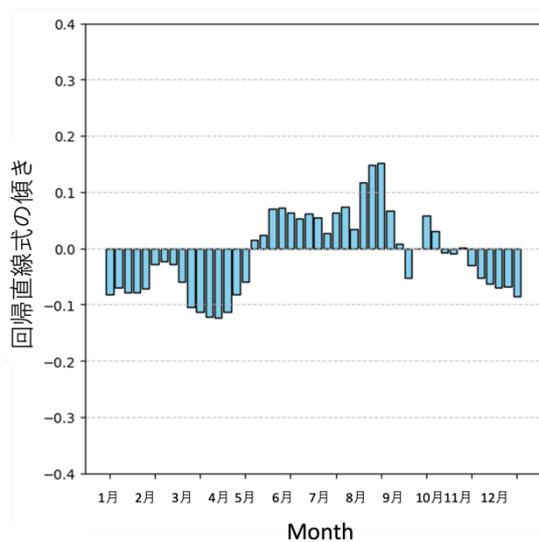


図 4.6 落葉樹率と NDVI の
回帰直線式の傾きの年変化グラフ
(2023 年：梶ヶ森)

4.2 落葉樹率を考慮した新緑・紅葉判定

式 d, 式 e によって補正した NDVI を用いて, 紅葉マップを新たに作成したものを図 4.7, 4.8, 4.9 で既存の手法で作成したマップと並べ比較している. 今回, 紅葉のタイミングは地球温暖化の影響を受け変化しやすく, 重要な季節変化のバロメータとなっていることがよく知られている[松本, 2013]ことから, 紅葉マップに着目した.

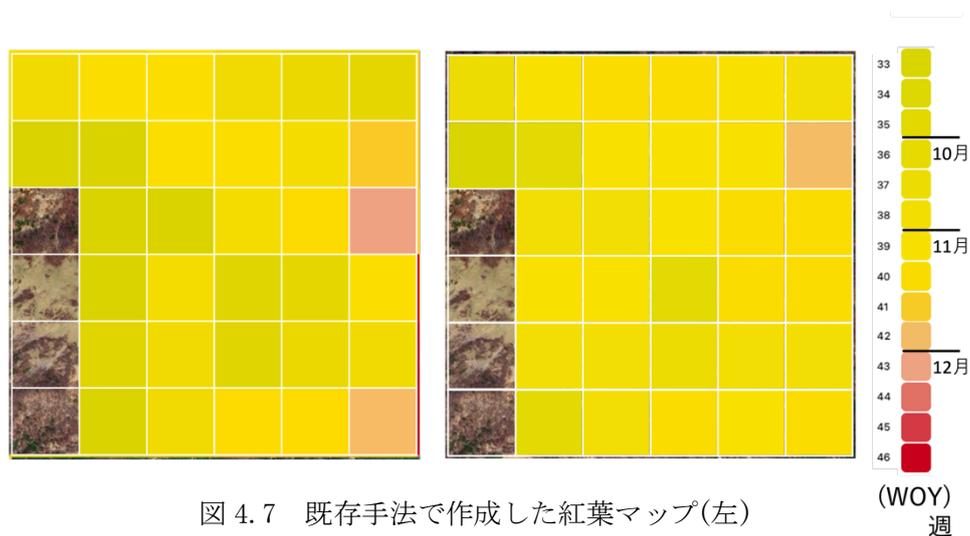


図 4.7 既存手法で作成した紅葉マップ(左)
新たに作成した紅葉マップ(右)
(三嶺エリア)
(背景は Google Earth より転載)

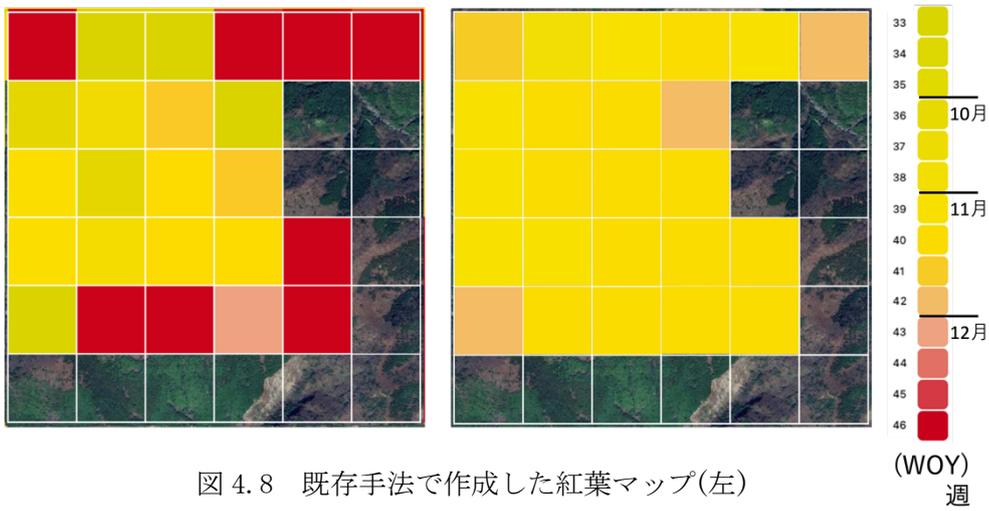


図 4.8 既存手法で作成した紅葉マップ(左)
 新たに作成した紅葉マップ(右)
 (鉢ヶ森エリア)
 (背景は Google Earth より転載)

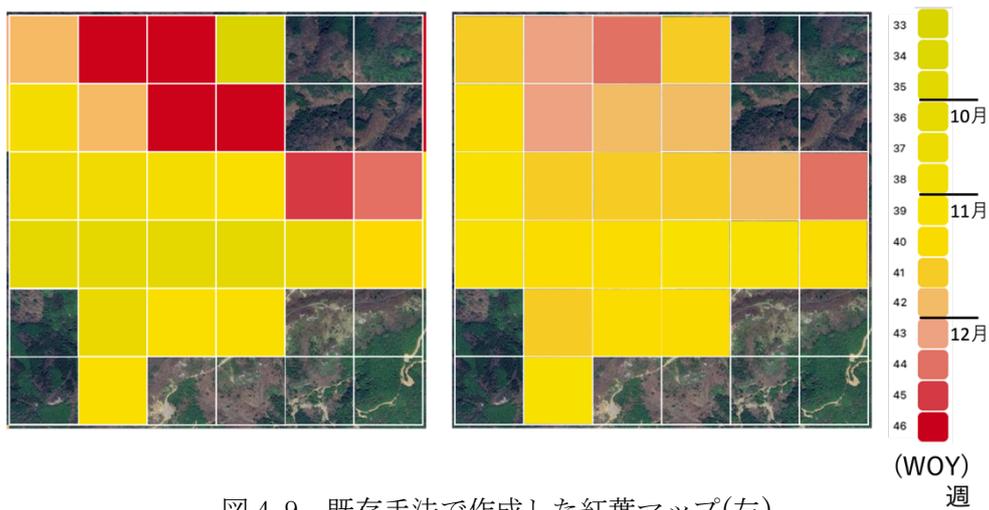


図 4.9 既存手法で作成した紅葉マップ(左)
 新たに作成した紅葉マップ(右)
 (梶ヶ森エリア)
 (背景は Google Earth より転載)

4.3 考察

GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率を元に NDVI の補正を行い、補正した NDVI を使用して新緑紅葉マップを作成した。これにより、当初問題であった最終週に落葉したと判定される図 4.8(右),4.9(右)に見られる赤いピクセルにおいて、常緑樹の影響により NDVI が落葉期も落ち切らなかった点が考慮され、新緑・紅葉マップの妥当性が向上した。梶が森のエリアにおいては、赤いピクセルがなくなり、落葉判定時期が早まった。加えて、画像中心部分の標高が高いエリアから、その周りのエリアに向かって判定結果はなだらかに遅くなっており、標高差による落葉時期の特徴を捉えた納得のいく判定となった。このことから、3章で図 3.12,3.13,3.14 より求めた、教師エリアそれぞれのエリア内全体で求めたピクセル解析結果を用いた新緑・紅葉時期は教師エリアの作成の際に標高のばらつきを考慮すべきであったと考えられる。

三嶺においては画像中心部の落葉判定が遅くなる結果となったが、これはクマササの分布エリアであり、冬季に枯死した草地においても精度が高くなったと考えられ、今後もデータを継続的に取得することで明らかになると考える。

また、GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率による補正については、対象範囲を解析範囲全域で作成して行う場合、今回目視で行った積雪と過度な雲のノイズに対してどのような対処を行うか検討が必要である。

5 結論

本研究では GCOM-C1 の 8 日間統計量データを用いた新緑・紅葉マップのミクセル問題に対して、問題を改善した新たなマップ作成手法の構築を試みた。

多ピクセルを用いたミクセル解析では、教師エリアそれぞれのエリア内全体で求めたミクセル解析結果を用いた新緑・紅葉時期を算出した。一般的にミクセル解析と呼ばれる多バンドを使用したミクセル解析の代わりに、多バンドを用意できない衛星画像での解析に対して多ピクセルでのミクセル解析が有効であることを示した。

GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率を用いて NDVI を補正した結果からは 1pixel ごとの紅葉結果を得た。その結果、従来の新緑・紅葉マップにおいて目立った誤判定である、最終週に落葉したとされる判定ピクセルがなくなり、判定結果の妥当性が向上した。また、冬季に枯死した草地に対しての判定精度の向上等も期待される結果となった。

しかしながら、GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率が高いにもかかわらず、落葉樹エリアと判定されなかったピクセルが見つかるなど、今後の課題も残った。これは、本研究で使用した落葉樹エリアマップの高精度化も必要であることを示す。落葉樹エリアの判定については、現状 3 年間のデータストックを用いて、それぞれの対象年ごとに作成しているが、落葉樹に分類されたエリアは本来、1 年ごとの変化はあまり見られないはずであるから作成フローに改善の余地があると考えられる。

GCOM-C1 の 1 ピクセルあたりの落葉樹率を用いて NDVI を補正した結果から得た判定結果の妥当性が高いことは、高分解能の土地被覆のデータを揃えることが、この新緑・紅葉マップの更なる精度向上に有効であることを示している。今回、落葉樹率と NDVI の関係を求め、1 つのピクセルに対して落葉樹のみの NDVI を推定した。これが分かれば、NDVI から落葉樹率を推定することにも繋がる。ただ、落葉樹率と NDVI の関係は標高による影響を大きく受ける。標高が違えば落葉状況も異なり、今回使用した教師エリアでは狭く、解析範囲全体に対応できるとは言えない。落葉樹が、いつ落葉したかを知るためには新たに閾値設定が必要となるため、現状では落葉樹率を必要としない手法の構築は難しい。よ緑紅葉マップの精度はいまだ十分でない。検証するためには分類精度の高い土地被覆のデータ作成が必要である。

6 引用文献と参考文献

引用文献

- [1] 環境省, 2023, IPCC 第 6 次評価報告書
- [2] 土居秀幸, 高橋まゆみ, 2010. マクロスケールからみる温暖化の植物フェノロジーへの影響: 気象庁・生物季節データセットによる解析. 日本生態学会誌, 60(2), 241-247
- [3] 気候変動観測衛星「しきさい」(GCOM-C) データ利用ハンドブック B 版
- [4] Tasumi, M, Moriyama, M, Shinohara, Y, 2019. Application of GCOM-C SGLI for agricultural water management via field evapotranspiration. Proceedings of PAWEES & INWEPF International Conference 2018 in Nara
- [5] Toshiyuki Kobayashi, Hideki Kobayashi, Wei Yang, Hiroshi Murakami, Yoshiaki Honda, Kenlo Nishida Nasahara, 2023. The development of a global LAI and FAPAR product using GCOM-C/SGLI data
- [6] Taiga Sasagawa, Tomoko Kawaguchi Akitsu, Reiko Ide, Kentaro Takagi, Satoru Takanashi, Tatsuro Nakaji, Kenlo Nishida Nasahara, 2022. Accuracy Assessment of Photochemical Reflectance Index (PRI) and Chlorophyll Carotenoid Index (CCI) Derived from GCOM-C/SGLI with In Situ Data
- [7] 平山颯太, 田殿武雄, 大木真人, 水上陽誠, 奈佐原(西田)顕郎, 今村功一, 平出尚義, 大串文美, 道津正徳, 山之口勤, 2022. JAXA 高解像度土地利用土地被覆図 日本域 21.11 版(HRLULC-Japan v21.11)の作成. 日本リモートセンシング学会誌 42 巻 3 号 p199-216
- [8] 原慶太郎, 平山英毅, 2023. 全国規模の衛星植生図化の現況と課題. 日本写真測量学会 秋季学術講演会学会誌, 45-48
- [9] 高木方隆・高見海都・村井亮介, 2021. 地球観測衛星 GCOM-C1 を用いた新緑・紅葉経過マップ作成, 紀要論文 18(1), pp. 57-63.
- [10] 藤原崇真・高木方隆・村井亮介, 2022. 地球観測衛星 GCOM-C1 を用いた新緑・紅葉判定アルゴリズム開発, 日本写真測量学会学術講演会発表論文集
- [11] 篠原崇之, 松岡昌志, リュウ・ウェン, 山崎文雄, 2016. 光学衛星画像を用いた混合スペクトル解析に基づく浸水度の定量推定と SAR 画像を組み合わせた東北地方太平洋沖地震津波への適用 日本地震工学会論文集 2016 年 16 巻 3 号 p. 3_157-3_168
- [12] 山田史博, 2020. 地球観測衛星 GCOM-C1 を用いたミクセル解析 高知工科大学学位論文
- [13] 松本太, 2013. 紅葉の季節学 日本生気象学会雑誌 2013 年 49 巻 4 号 p. 141-148

- [14] Alberto Villa, Jocelyn Chanussot, Jón Atli Benediktsson, Christian Jutten, 2010. Spectral Unmixing for the Classification of Hyperspectral Images at a Finer Spatial Resolution
- [15] N. Kosaka; K. Uto; Y. Kosugi, 2005. ICA-aided mixed-pixel analysis of hyperspectral data in agricultural land IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 2005 年 2 卷 2 号
- [16] Chein-I Chang; Xiaoli Jiao; Chao-Cheng Wu; Eliza Yingzi Du; Hsian-Min Chen, 2011. Component Analysis-Based Unsupervised Linear Spectral Mixture Analysis for Hyperspectral Imagery
- [17] JAXA G-Portal

参考文献

- [1] L.M. Vermeulen , Z. Munch , A. Palmer , 2021. Fractional vegetation cover estimation in southern African rangelands using spectral mixture analysis and Google Earth Engine
- [2] Singh Sartajvir, Sood Vishakha, Kaur Ravneet, Prashar Shivend, 2019. An efficient algorithm for detection of seasonal snow cover variations over undulating North Indian Himalayas, India
- [3] 長谷川大輔, 浅沼市男, 原慶太郎, 朴鍾, 富田瑞樹, 2017. Terra/MODIS を用いた北海道東地方における落葉期の カラマツ人工林と落葉広葉樹林の植生フェノロジーの差異の検出
- [4] 大吉慶, 竹内渉, 安岡善文, 2008. NOAA AVHRR を用いた北東アジア落葉樹林における フェノロジー観測手法の提案
- [5] Lukas Blickensdörfer, Katja Oehmichen , Dirk Pflugmacher , Birgit Kleinschmit , Patrick Hostert, 2024. National tree species mapping using Sentinel-1/2 time series and German National Forest Inventory data
- [6] 高橋勇太, 高木方隆, 2016. ミクセル解析を目的とした Landsat/OLI データと MODIS データの重ね合わせにおける要求精度
- [7] 高木方隆 国土を測る技術の基礎-地理空間情報技術者を目指す人のために- 改訂 第2版 東京 公益社団法人 日本測量協会 2012
- [8] 柴田昌三, 2015. 緑化植物としてのササ類 草と緑 7巻 p20-29
- [9] 林勇真, 2023. 落葉樹率を考慮した GCOM-C1 による着葉・落葉マップの高精度化 高知工科大学学位論文