

原著論文

MODIS-GRVI 時系列データを使用した常緑針葉樹林の 春季の植物季節の推定

Estimating Spring Phenology of Evergreen Coniferous Forest using MODIS GRVI Time-series Data

清水 庸*、大政謙次
Yo Shimizu* and Kenji Omasa

東京大学 大学院農学生命科学研究科 〒113-8657 文京区弥生 1-1-1
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo.
1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, Japan

(2015年3月2日受付、2015年5月8日受理)

ABSTRACT

A remotely sensed observation of an evergreen forest phenology is more difficult than that of a deciduous forest, as seasonal changes on leaves are relatively small. In this research, we estimated spring phenological transition dates of evergreen coniferous forest using GRVI (Green red ratio vegetation index), which can detect changes in leaf color. Using plantations of Japanese cedar, hinoki cypress and sawara cypress located in the Ashio mountainous region in Tochigi, Japan, as test sites, we derived GRVI time-series data from the MODIS 500 m reflectance data (MCD43A4) during a 12-year period between 2001–2012. By fitting a logistic function to the GRVI time-series data from winter to summer for each pixel, we estimated two phenological transition dates, the onset of greenup and the onset of maturity. The GRVI time-series data showed a bell-shaped seasonal pattern for each year. The averages of estimated dates of greenup and maturity onset were DOY (Day-of-year) 92 and DOY 142, respectively, and there was a 50-day difference between the two phenological dates. There were significantly negative relationships between the average of the two estimated phenological transition dates and the spring air temperature (the onset of greenup, $r=-0.73$; the onset of maturity, $r=-0.74$) for the 12 years. In comparison with results based on EVI (Enhanced vegetation index) from MODIS-MCD12Q2 data, our estimations showed a low degree of spatial phenological variability. Based on the statistical relationships with spring temperature, the satellite monitored GRVI could estimate the interannual variations in onset of greenup and maturity for evergreen coniferous forest.

Key words : Evergreen coniferous forest, GRVI, MODIS, Plant phenology, Time series analysis

1. はじめに

展葉や落葉、春季から秋季までの葉の成長期間などの植物葉のフェノロジーは、陸域生態系の変化を示す重要な指標のひとつであり、同時に光合成を通して、生態系の炭素、水などの物質循環に影響を与える (White et al., 1999; Rosenzweig et al., 2007)。地球温暖化や都市のヒートアイランド現象などの中・長期的な気候変化と植物季節の変化との関連性の解析において、よく利用さ

れるデータは気象台などの定められた観測点にて取得されたものである (例えば Matsumoto, 2010; Shimizu and Omasa, 2010; Shimizu et al., 2014)。これらのデータは観測のためのガイドライン (JMA, 1985) にもとづき、目視によって観測された信頼性の高いものであるが、観測地点は限定される。また 1990 年代後半からの測候所の廃止に伴い、気象庁による植物季節の観測地点数は減少している。

衛星のリモートセンシングデータを利用し、植物季

*Corresponding author : Phone: +81-3-5841-8101, Fax: +81-3-5841-8175, E-mail: ayosh@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

節の変化を捉えることができれば、観測点の位置に制約されず、広域・面的なデータを取得できる。これまで NOAA-AVHRR、Landsat-TM/ETM+ そして SPOT-VEGETATION センサなどのデータが使われ、植物季節の推定が行われてきた（例えば Delbart et al., 2006; Melaas et al., 2013）。また 2000 年以後、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) センサのデータが利用できるようになり、日単位から週単位データの多様なデータセットの整備が進み、植物季節の推定におけるリモートセンシングの利用可能性は広がった (Zhang et al., 2003)。これらの研究では NDVI (Normalized difference vegetation index) や EVI (Enhanced vegetation index) などの植生指標の時系列データを利用し、植物季節の時期を推定しており、特に季節的に見られる葉の変化が明瞭である落葉広葉樹を対象とした研究が多く、常緑針葉樹を主たる対象とした研究は Sweden の研究例 (Jönsson et al., 2010) などに限られる。また落葉性の樹種と比較して、常緑性の樹種では推定した値のばらつきが大きいことが知られており (Ganguly et al., 2010)、改善が必要されている。常緑針葉樹は北半球の寒冷な地域において優占しており、国内においても、その面積は日本の総面積の約 2 割を占めているため、その植物季節の変化を広域に把握する手法を見つけることは重要な課題である。

衛星データではなく、Flux タワーなどの高い位置から取得した分光反射率やデジタルカメラの RGB (3 色の DN 値) 情報から算出した植生指標の時系列データを使って、植物季節の季節的变化そして光合成関連の指標との関連性を解析した研究も近年、盛んに行われている (例えば、Nakaji et al., 2008; Saitoh et al., 2012)。Nagai et al. (2012) は分光放射計のデータを使い、緑色光と赤色光の 2 つの反射率から算出される植生指標 GRVI (Green red ratio vegetation index) が常緑針葉樹 (スギ) の葉の色の季節的な変化を捉え、またキャノピーの最大光合成速度と高い相関関係を持つことを示している。衛星データを利用したりリモートセンシングにおいても常緑針葉樹林を対象とする場合、GRVI は有効な指標となりうる。本研究では、常緑針葉樹林が分布している地域を対象として、MODIS データから算出した GRVI の時系列データを用いて、春季における植物季節の時期の推定を試みた。

2. データおよび方法

2.1 使用したデータと対象地域

衛星データは、MODIS-MCD43 データ (Nadir BRDF-Adjusted Reflectance 16-Day L3 Global 500 m, MCD43A4)

を利用した。このデータはセンサ直下の地表面の反射率データであり、2 方向性反射分布関数を使用して作成されている (Schaaf et al., 2002)。青色光から近赤外域までの 7 バンドにより構成され、地上分解能は 463.31 m である。MODIS センサは NASA の地球環境観測衛星 Terra と Aqua に搭載されており、空間分解能は中程度であるが、全球を対象として日単位のデータ取得が可能である。しかし、可視・近赤外域における分光反射率データは雲や水蒸気などの大気の影響を受けやすい。MCD43 データの場合は 8 日毎にデータが作成されており、そのデータには前後 8 日間の計 16 日間のデータが使われ、コンポジット処理が行われている。解析には 2001 年から 2012 年の 12 年間分のデータを利用し、1 年間分のデータは 45 画像で構成される。使用した画像の MODIS-IS (Integerized Sinusoidal) 番号は H29V05 である。各画像は Sinusoidal 座標系から UTM 座標系へ投影変換後に、後述の対象地域を切り出して使用した。また反射率データ作成時の雲やエアロゾルの影響の程度が数値化された MCD43A2 データを使い、解析に適さないデータは除外した。

対象地域は栃木県の南西部および群馬県の東部に位置する足尾山地である (Fig. 1)。この地域は関東地域において主要な林業地域のひとつであり、常緑針葉樹のスギ (*Cryptomeria japonica* D. Don)、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Sieb. et Zucc.) そしてサワラ (*Chamaecyparis*

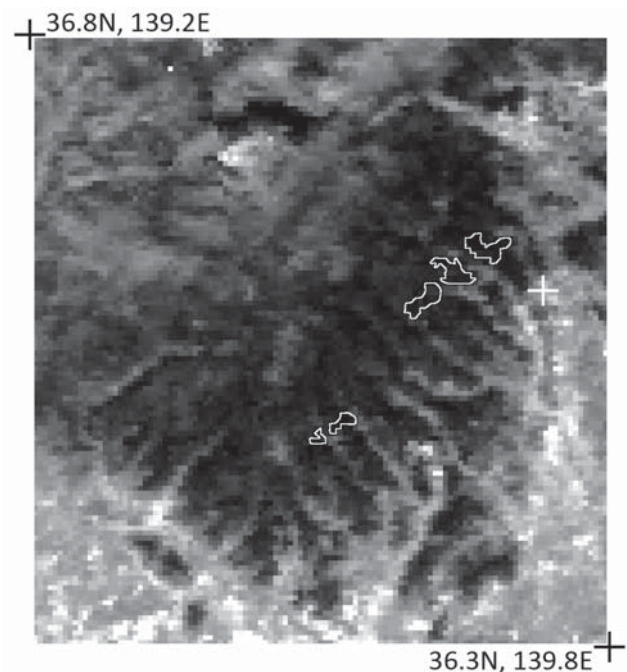


Fig. 1. Study area and regions of interest for the estimation of phenological transition dates.

Polygons show the regions of interest for the estimation of phenological transition dates. The meteorological station (white cross shape) is also indicated.

pisifera Sieb. et Zucc.) の植林が行われている。Fig. 1 に示す範囲から常緑針葉樹林の解析に適した地域を選定するにあたり、現地調査、植生図および ALOS データ（地上分解能 10 m）の冬季の画像（2010 年 2 月 8 日）を元に、落葉広葉樹林の混雑の程度が最も低い地域を選び、図中において白線で囲む地域を解析地域とした。ピクセルの数は 145 である。当該地域の標高の平均値は 414 m であり、標高が低いことから、積雪の影響が少ない地域である。

2.2 植物季節の推定方法

可視域における植物葉の分光反射特性はクロロフィルによる吸収のため、赤色光と青色光の波長域にて反射率が低くなり、緑色光の波長域で相対的に高くなる。GRVI はその特性を利用しており、赤色光と緑色光の 2 つの反射率を使用した正規化差の式形（数式 1）の植生指標である（Tucker, 1979; Motohka et al., 2010）。

$$GRVI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{Red}}{\rho_{Green} + \rho_{Red}} \quad (\text{数式 1})$$

ρ_{Green} と ρ_{Red} は緑色光と赤色光の反射率をそれぞれ示す。MCD43 データでは Band 4（545 ~ 565 nm）と Band 1（620 ~ 670 nm）の反射率がそれぞれ該当する。

Fig. 2 に、冬季から夏季にかけての GRVI の時系列データをもとに、その期間中の植物季節の時期を推定する方法の概略図を示す。植物の成長期間では植生指標の時系列データは S 字形の成長曲線を示すことが多く、sigmoid 型の関数がよく利用される。本研究では植生指標 EVI の時系列データを使い、植物季節の時期を推定した研究（Zhang et al., 2003; Ganguly et al. 2010）と同様に、4 つのパラメータを持つロジスティック関数を利用した。

$$GRVI(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bx}} + d \quad (\text{数式 2})$$

ここで、 t は通日（Day of year, DOY）を示す。4 つのパラメータのうち、 a と b は S 字形に数値が上昇する際の時期と勾配にそれぞれ関わるパラメータである。また d は数値の下限値を示し、 c は下限値からの変化幅を示す。パラメータは GRVI の値とロジスティック関数式による推定値との間の誤差（Mean absolute error, MAE）が最小になるように決定した。Zhang et al. (2003) の手法を元に、パラメータのフィッティング後の関数式から、曲率とその変化率を算出した。曲率の変化率が極大値を示すときの t は、GRVI の数値が上昇しはじめる時期と飽和し始める時期をそれぞれ示し、繁茂期の開始時期と最盛期の開始時期をそれぞれ表す。これら 2 つの時期の推定は解析地域内のピクセルを単位として、2001 年 ~ 2012 年の

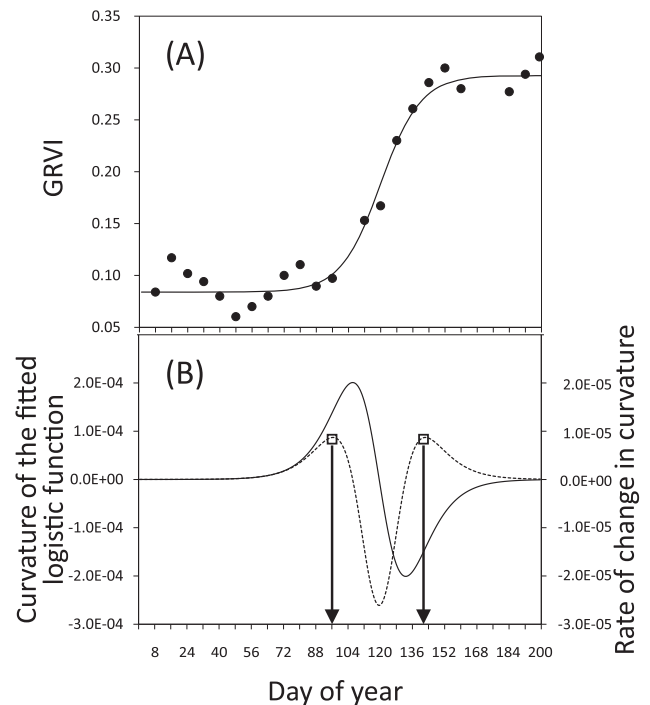


Fig. 2. Method for estimating phenological transition dates using the fitted logistic function for GRVI.

(A) The dots represent the GRVI data, and the solid line is the fitted logistic function. (B) The solid line is the curvature of the fitted logistic function. The dashed line is the rate of change in the curvature. The two rectangles indicate the local maximal values of the rate, and the arrows show the estimated phenological transition dates for evergreen coniferous forest pixel.

各観測年において、冬季から夏季の画像データ（DOY 8 ~ 200、25 画像）を利用して行った。

推定した結果の妥当性を検討することも併せ、解析地域近傍の気温条件との相関関係および気温変化に対する感度（1℃あたりの変化日数）を線形回帰分析によって調べた。気温データは AMeDAS の鹿沼観測点（36.59N、139.74E、Fig.1 に図示）の月別平均気温データを使用した。

3. 結果

Fig. 3 に、解析地域における赤色光および緑色光の反射率の平均値、および GRVI の平均値について 12 年間の時系列変化を示す。雲などの影響により、画像においてピクセルの欠損が多い場合、平均値は大きくばらつく。そのため、図ではピクセルの総数（145）のうち、9 割以上のピクセル数が確保されている画像を対象にして、平均値を示している。赤色光および緑色光の反射率はほとんどの場合、0.06 以下の値であり、ともに季節的变化が見られる。これらの変化を受けて、GRVI にも季節的变化が見られ、春から夏にかけて上昇し、秋から冬において下降するベル型の変化傾向を示す。12 年間分のデータを元に、DOY ごとに平均値を算出した場合、3

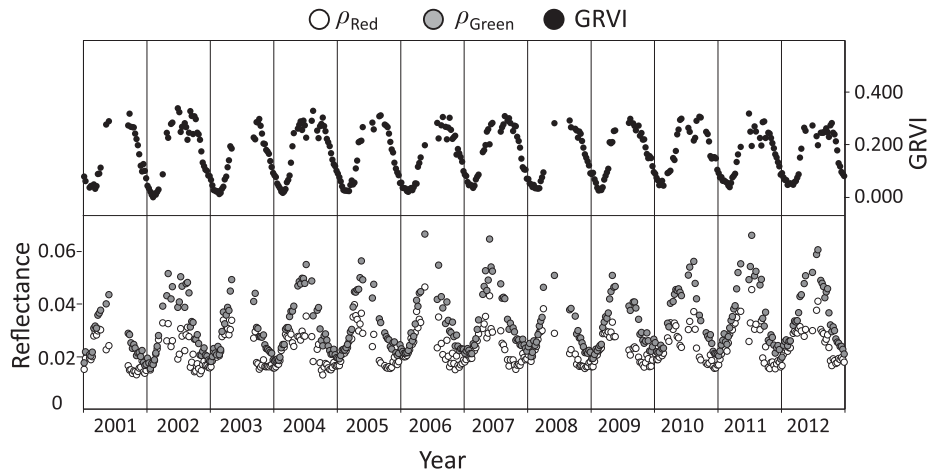


Fig. 3. Time series of average reflectance (Red / Green) and average GRVI for evergreen coniferous forest pixels.

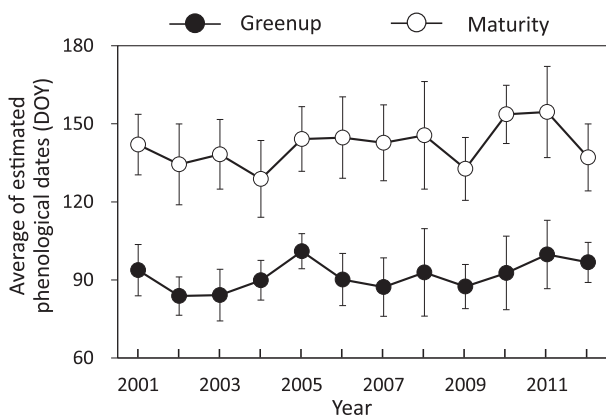


Fig. 4. Temporal changes in average of estimated phenological transition dates in spring.

Bar shows standard deviation ($n=145$).

月初旬 (DOY64) において最小値 0.036 を示し、7 月初旬 (DOY184) において最大値 0.305 を示す。緑色光の反射率は赤色光の反射率よりも大きく、GRVI は正の値を示している。赤色光の反射率では前年の 10 月下旬から 12 月下旬 (DOY304 ~ 360) において、最小値 0.017 を示し、その後、1 月上旬から上昇しはじめ、4 月上旬 (DOY104) において、0.032 まで上昇した後、値にばらつきは見られるが下降する。緑色光の反射率の場合、12 月下旬 ~ 1 月初旬 (DOY360 ~ DOY8) において最小値 0.020 を示し、その後、6 月下旬 (DOY176) まで値は上昇しており、赤色光と緑色光の反射率の変化は異なる。

GRVI の時系列データへロジスティック関数を当てはめた結果、算出された GRVI の誤差の平均値と標準偏差は 0.026 ± 0.008 であった。Fig. 4 に、推定した繁茂期および最盛期の開始時期の平均値の変化を示す。繁茂期の開始時期の場合、最小値は DOY 84 (2002/3/25)、最大値は DOY 101 (2005/4/11) であり、12 年間における平均値は DOY 92 (4/2) であった。最盛期の開始時期

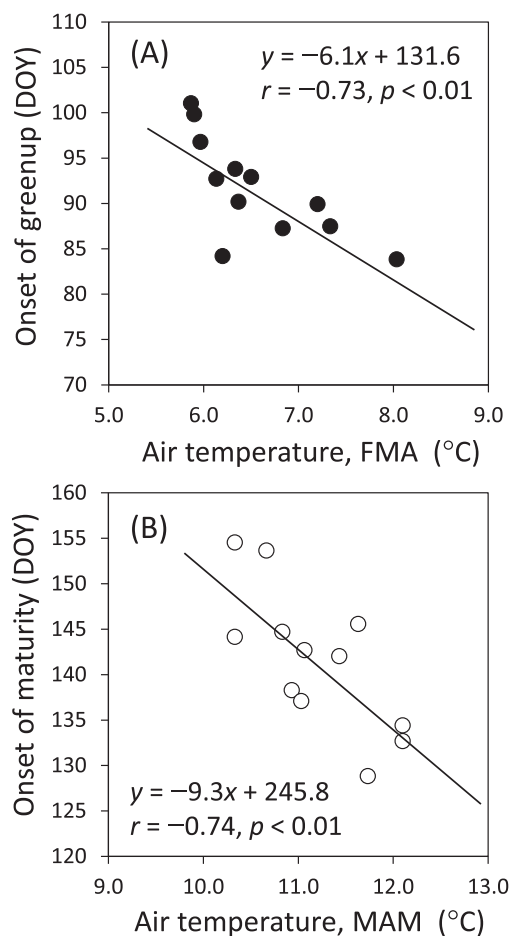


Fig. 5. Relationships between average of monthly air temperature in spring and phenological transition dates with the onset of greenup (A), and with the onset of maturity (B).

Solid line indicates the linear regression line between spring air temperature and the estimated phenological transition dates during 2001-2012.

の場合には、最小値は DOY 129 (2004/5/9)、最大値は DOY 155 (2011/6/4) であり、平均値は DOY 142 (5/22) であった。2 つの平均値には 50 日間の差があり、この期間において GRVI は急な上昇傾向を示すことがわか

る。これら2種類の植物季節の対応関係を相関係数で表すと $r = 0.53$ ($p = 0.08$) であり、強い対応関係ではなかった。推定値のピクセル間のばらつきを標準偏差にて示した場合、繁茂期の開始時期は12年間で7日～17日の範囲であり、それらの平均値は10日であった。一方、最盛期の開始時期の場合、標準偏差の数値は11日～21日であり、平均値で14日となり、繁茂期の場合と比較して、標準偏差は大きかった。また繁茂期および最盛期の双方で2008年の推定値のばらつきが最も大きかった。これは、いくつかのピクセルにおいて夏季のGRVIの数値が低く、ロジスティック関数の当てはめの結果、推定値が大きくなることに起因していた。

Fig. 5に植物季節の推定結果の平均値と気温条件との対応関係を示す。繁茂期の開始時期に対応させて2月～4月の3ヶ月間の平均気温を利用し (Fig. 5A)、最盛期の開始時期については3月～5月の平均気温を利用した (Fig. 5B)。双方において、12年間における春の気温変化と有意な負の相関関係が見られ (それぞれ、 $r = -0.73$ と $r = -0.74$)、気温の変化傾向によく対応しており、気温の上昇に対応して、それぞれの時期が早まることを示していた。なお相関係数は同程度であるが、回帰係数によって示される、気温変化に対する感度 ($d/^\circ\text{C}$) には差が見られ、最盛期の開始時期は気温変化に対応して、より大きな変化を示していた。

4. 考 察

2001年から2012年のGRVIの数値には、ベル型の季節的変化の傾向が見られた。この傾向は、Fluxタワー上部から計測されたスギ林の場合 (Nagai et al., 2012) と同様である。Nagai et al. (2012) は、GRVIがスギの葉の色の季節的変化とよく対応しており、反射率の変化によって検知される、葉の色の変化が葉の色素の変化傾向と相互に関連するためと考察している。本研究ではMODISデータを利用しているが、大気の影響や空間解像度が粗く、他の土地被覆の影響を受けやすい衛星データを利用した場合においても、GRVIは常緑針葉樹の葉の季節的変化を示すことがわかった。

冬季から夏季にかけてのGRVIの変化に関わる、赤色光と緑色光の反射率の変化傾向は3つの時期に分けられた。最初は前年末から2月下旬の時期であり、赤色光と緑色光の反射率はともに低い状態から緩やかに上昇し、加えて2つの反射率の差は小さいままであるため、GRVIは下降した。もしくは双方の反射率が低いままで、ほとんど変化しないため、GRVIの変化が少ない時期である。

2つ目の時期では、4月上旬まで反射率はともに上昇するなかで、赤色光の反射率の上昇が相対的に小さく、2つの反射率に差が生じるため、GRVIは上昇しはじめる。それ以後の時期は赤色光の反射率が下降し、緑色光の反射率は上昇するため、GRVIは急な上昇を示した。冬季から4月上旬における赤色光の反射率の上昇は、常緑針葉樹の葉が冬季に赤くなる現象に関わると考えられる。スギやヒノキなど針葉樹は秋から冬にかけて陽光が当たる部分の葉が黄褐色から赤褐色に変色する (Sakaguchi, 1983; Mukai, 2004)。これはクロロフィルやキサントフィルの分解消失と赤色のカロチノイドであるロドキサントンの合成と関連づけられ (Hida and Ida, 1964; Mukai, 2004)、冬季の寒冷・乾燥の条件下での光防御 (強光緩和機能) のためと考えられている (Han et al. 2003; Hughes, 2011)。また対象地域内での現地調査によって、冬季から春先にかけて、淡黄色から黄褐色の雄花がスギの枝先には多く付き、雌花が発育した後、褐色の球果が枝に付いている多くの個体を確認しており、葉が赤くなると共に、赤色光の反射率の上昇に影響を与えている可能性がある。4月中旬以後の赤色光の反射率下降について、葉緑体と黄褐色～橙褐色の有色体間の変化は可逆であり、温暖な気温条件下にて葉緑体が再合成され (Hughes, 2011)、赤色光の吸収が増えるためと考えられる。

本研究では、赤色光の反射率の季節的变化に加えて、緑色光の反射率においても変化傾向が見られた。Nagai et al. (2012) のスギを対象とした場合、緑色光に季節的な変化の傾向は見られない。本解析地域はスギ、ヒノキそしてサワラが混在しており、樹種による違いの影響も考えられるが、冬季から夏季にかけての反射率の上昇について、今後の現地調査の結果を踏まえ、その理由を説明する必要がある。

推定対象とした春季における2種類の植物季節の時期は、落葉性の樹木を対象とした場合には開葉の時期そして葉が展開を終えた時期にそれぞれ対応する。しかし、常緑針葉樹の場合は目視によって明瞭に観察できる植物季節の現象と関連づけることは難しい。植物季節の変化には、気温、降水量、土壌水分など、さまざまな要因が影響を与えるが、特に気温の影響が大きく (Badeck et al., 2004; Estrella and Menzel, 2006)、気象台にて観測されている植物季節のデータと気温条件との関連性にも強い相関関係が見られる (例えば Nasu et al., 2005; Matsumoto, 2010)。そこで本研究でも推定した結果の妥当性を検討することも含め、気温との相関解析を採用した。気象台のデータを利用した既往研究のうち、落葉性

樹木の発芽（開葉）について、イチヨウの発芽は全国60地点における春の気温条件との相関係数の平均値が -0.67 (Matsumoto, 2010) であり、クワの発芽については全国25地点での相関係数の平均値と標準偏差が -0.58 ± 0.15 (Doi, 2012) である。これらの結果は使用したデータの観測年数が短くても30年以上であり、本研究の解析とは条件に違いがあるが、相関係数の比較から、推定した常緑針葉樹の繁茂期と最盛期の開始時期は気温の変化によく対応しており、衛星データから算出したGRVIの時系列変化データから、これらの2つの時期を推定可能と考えられる。但し、ピクセル間での推定値のばらつきが大きい観測年もあるため、ノイズ除去の改良そして欠損データの補間が今後、必要とされる。

気温変化に対する植物季節の変化日数について、イチヨウの発芽は、全国の観測点において $-6.1 \sim -1.2$ d/°Cの範囲を示し、平均値で -3.1 d/°C (Matsumoto, 2010) であり、落葉性樹木の発芽以外にも、サクラやノダフジの開花など春季に見られる植物季節の場合は、概ね $-3.0 \sim -2.0$ d/°Cの間の数値 (Nishioka et al., 2003) である。本解析の結果は繁茂期の開始時期については -6.1 d/°C、最盛期については -9.3 d/°Cである。GRVIの時系列変化によって表される葉の色の変化は、葉内の色素の変化と関連づけられるが、発芽や開花の現象と比較して、気温の変化に対する感度が高い可能性がある。

MODIS-MCD12Q2 データは、NASA が全球を対象として、植生指標の EVI (Huete et al., 2002) を使い、同様の方法によって植物季節の時期を推定したデータセットである (Zhang et al., 2003; NASA LP DAAC, 2012)。このデータから本研究の解析地域の範囲を切り出し、繁茂期と最盛期の開始時期に関する12年間の平均値を求めると、それぞれ DOY 101 と DOY 163 であり、本結果とはそれぞれ9日間と21日間の差が見られた。EVIの場合、繁茂期と最盛期の開始時期の推定において、ピクセル間のばらつきが明らかに大きく、観測年ごとに算出した標準偏差について、12年間の平均値はそれぞれ44日と39日であった。また推定した2時期と春季の気温との相関関係について、それぞれ $r = -0.67$ と $r = -0.66$ (ともに $p < 0.05$) であり、気温変化との対応関係は見られたが、本結果の方が相関係数はともに高かった。EVIはNDVIのように近赤外域と赤色光の反射率の差を用い、青色光の反射率の情報を加えることで大気の影響の補正を試みた植生指標であり、葉の量の季節的変化を捉えることに適している。常緑性の樹木は、落葉性の樹木と比較した場合、単位面積あたりの葉量の季節的変化が小さいため、植物季

節の情報を推定するためには葉の色の季節的変化を捉える必要があり、GRVIの利用が適していると考えられた。

5. おわりに

MODIS-MCD43 データから算出した2001年から2012年の植生指標GRVIの時系列データを使用して、常緑針葉樹林の春の植物季節を推定した。GRVIの時系列変化は春から夏にかけて上昇し、秋から冬において下降するベル型の季節的変化を示した。冬季から夏季の時系列データから推定した、繁茂期および最盛期の開始時期について、12年間の平均値はDOY 92とDOY 142となり、50日間の差があった。植生指標EVIによる推定結果(MCD12Q2)と比較すると、解析地域内のピクセル間での推定値のばらつきを抑え、繁茂期と最盛期の開始時期が推定可能であった。2つの時期それぞれの解析地域内の平均値は、春の気温との間に有意な負の相関関係を示しており、衛星データから算出したGRVIの時系列データから、常緑針葉樹林の繁茂期と最盛期の開始時期が推定可能と考えられる。

謝 辞

本研究の一部は科研費(23580344)の助成を受け、実施された。解析において、U.S. NASAのEarth Observing System Data and Information System (EOSDIS)、Reverbから入手したMODISデータ、および気象庁AMeDASデータを利用した。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Badeck, F. W., Bondeau, A., Bottcher, K., Doktor, D., Lucht, W., Schaber, J. and Sitch, S., 2004: Responses of spring phenology to climate change. *New Phytol.*, **162**, 295-309.
- Delbart, N., Le Toan, T., Kergoat, L. and Fedotova, V., 2006: Remote sensing of spring phenology in boreal regions: A free of snow-effect method using NOAA-AVHRR and SPOT-VGT data (1982-2004). *Remote Sens. Environ.*, **101**, 52-62.
- Doi, H., 2012: Response of the *Morus bombycis* growing season to temperature and its latitudinal pattern in Japan. *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 895-902.
- Estrella, N., and Menzel, A., 2006: Responses of leaf colouring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany. *Clim. Res.*, **32**, 253-267.
- Ganguly, S., Friedl, M. A., Tan, B., Zhang, X. and Verma, M., 2010: Land surface phenology from MODIS: Characterization of the Collection 5 global land cover dynamics product. *Remote Sens.*

- Environ.*, **114** 1805-1816.
- Han, Q., Shinohara, K., Kakubari, Y. and Mukai, Y., 2003: Photoprotective role of rhodoxanthin during cold acclimation in *Cryptomeria japonica*. *Plant Cell Environ.*, **26**, 715-723.
- Hida, M. and Ida, K., 1964: Studies on a pink carotenoid in red, autumnal leaves of Taxodiaceae. *Bot. Mag. Tokyo*, **77**, 458-461.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G., 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.*, **83**, 195-213.
- Hughes, N. M., 2011: Winter leaf reddening in 'evergreen' species. *New Phytol.*, **190**, 573-581.
- JMA, 1985: *Guidelines for the observation of phenology, 3rd edn.*, Japan Meteorological Agency, Tokyo, 110 pp. (気象庁, 1985: 生物季節観測指針第3版. 気象庁, 東京, 110 pp.)
- Jönsson, A. M., Eklundh, L., Hellstrom, M., Barring, L. and Jönsson, P., 2010: Annual changes in MODIS vegetation indices of Swedish coniferous forests in relation to snow dynamics and tree phenology. *Remote Sens. Environ.*, **114**, 2719-2730.
- Matsumoto, K., 2010: Causal factors for spatial variation in long-term phenological trends in *Ginkgo biloba* L. in Japan. *Int. J. Climatol.*, **30**, 1280-1288.
- Melaas, E. K., Friedl, M. A. and Zhu, Z., 2013: Detecting interannual variation in deciduous broadleaf forest phenology using Landsat TM/ETM plus data. *Remote Sens. Environ.*, **132**, 176-185.
- Motohka, T., Nasahara, K. N., Oguma, H. and Tsuchida, S., 2010: Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology. *Remote Sens.*, **2**, 2369-2387.
- Mukai, Y., 2004: Low-temperature induced photoinhibition and photoprotective functions in woody plants. *J. Jpn. For. Soc.*, **86**, 48-53.
- Nagai, S., Saitoh, T. M., Kobayashi, H., Ishihara, M., Suzuki, R., Motohka, T., Nasahara, K. N. and Muraoka, H., 2012: *In situ* examination of the relationship between various vegetation indices and canopy phenology in an evergreen coniferous forest, Japan. *Int. J. Remote Sens.*, **33**, 6202-6214.
- Nakaji, T., Ide, R., Takagi, K., Kosugi, Y., Ohkubo, S., Nasahara, K. N., Saigusa, N. and Oguma, H., 2008: Utility of spectral vegetation indices for estimation of light conversion efficiency in coniferous forests in Japan. *Agric. For. Meteorol.*, **148**, 776-787.
- NASA LP DAAC, 2012: Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500 m SIN Grid (MCD12Q2). USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota.
- Nasu, A., Shimizu Y. and Omasa K., 2005: Statistical analysis of the relationship between changes in plant phenology and daily mean air temperature in Japan under climate change. *J. Agric. Meteorol.*, **60**, 1227-1229.
- Nishioka, S., Masuda, K., Yamamoto, K. and Watanabe, K., 2003: Detection and monitoring of global warming impacts. In *Global warming and Japan, the third assessment report, impacts assessment on nature and human being* (ed. by Harasawa, H. and Nishioka, S). Kokon-shoin, Tokyo, pp. 357-384. (西岡秀三・増田啓子・山本桂香・渡辺耕一, 2003: 温暖化影響の検出と監視. 原沢英夫・西岡秀三編, 地球温暖化と日本 第3次報告 - 自然・人への影響予測 -. 古今書院, 東京, pp. 357-384.)
- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D. J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T. L., Seguin, B., and Tryjanowski, P., 2007: Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Linden P. J., and Hanson, C. E.). Cambridge University Press, Cambridge, pp.79-131.
- Saitoh, T. M., Nagai, S., Saigusa, N., Kobayashi, H., Suzuki, R., Nasahara, K. N. and Muraoka, H., 2012: Assessing the use of camera-based indices for characterizing canopy phenology in relation to gross primary production in a deciduous broad-leaved and an evergreen coniferous forest in Japan. *Ecol. Inform.*, **11**, 45-54.
- Sakaguchi, K., 1983: *All about Japanese cedar*. Zenrinkyou, Tokyo, 629 pp. (坂口勝美, 1983: スギのすべて. 全国林業改良普及協会, 東京, 629 pp.)
- Schaaf, C. B., Gao, F., Strahler, A. H., Lucht, W., Li, X. W., Tsang, T., et al., 2002: First operational BRDF, albedo nadir reflectance products from MODIS. *Remote Sens. Environ.*, **83**, 135-148.
- Shimizu, Y. and Omasa, K., 2010: Trends in flowering date of Japanese apricot (*Prunus mume* Sieb. et Zucc.) between 1961 and 2007. *J. Agric. Meteorol.*, **66**, 279-288.
- Shimizu, Y., Umemura, S. and Omasa, K., 2014: Temporal and spatial variations in budding and leaf coloring dates of *Ginkgo biloba* in Japan. *Clim. Biosph.*, **14**, 57-70.
- Tucker, C. J., 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, **8**, 127-150.
- White, M. A., Running, S. W., and Thornton, P. E., 1999: The impact of growing-season length variability on carbon assimilation and evapotranspiration over 88 years in the eastern US deciduous forest. *Int. J. Biometeorol.*, **42**, 139-145.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Hodges, J. C. F., Gao, F., Reed, B. C. and Huete, A., 2003: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sens. Environ.*, **84**, 471-475.