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

A new NOAA AVHRR-based phenology detection method over deciduous forests in northeastern Asia

大吉 慶*・竹内 渉**・安岡 善文*** Kei OYOSHI, Wataru TAKEUCHI and Yoshifumi YASUOKA

Abstract : Phenology is closely related to carbon, water and other material cyclings on the earth's surface, and one of the most important indicators to understand vegetation responses to climate change. Satellite data provides us with a tool to monitor and assesses spatio-temporal variations in phenology. However, phenology based on satellite observation does not validated extensively with green-up or leaves-dropping date acquired by ground based observation because of the lack in ground truth data for validation. By the way, Japanese Meteorological Agency (JMA) have observed the timing of flowering, budding, leaves coloring and dropping at more than 100 meteorological stations in Japan since 1953. In this study, green-up date detected from NOAA AVHRR observation was validated with JMA's phenological data, and four algorithms to detect green-up date were evaluated. As a result, spatio-temporal variation in green-up dates detected by newly developed algorithm was highly consistent with the ground data compared to another algorithms, and RMSE between the retrieved green-up dates and in situ data was 6.6 days. And, it was found that the algorithm was able to detect responses of green-up date to changes in annual temperature.

1. はじめに

1.1 本研究の背景

衛星リモートセンシングは,植物の展葉や葉の色の 変化,落葉といった植物季節(フェノロジー)を広域 的かつ継続的に観測できる手段として期待されている (Reed *et al.*, 1994)。フェノロジーは,地表近くでの 炭素や水などの物質循環を理解する上での重要なバラ メータであり (Running *et al.*, 1991),また北半球の 中高緯度帯における森林活動の長期化 (Myneni *et al.*, 1997, Stockli *et al.*, 2004) に代表される気候変 動に対する生態系の応答を理解する上でも必要不可欠 な要素である。

これまでに衛星リモートセンシングから植物の展葉 時期や落葉時期などのフェノロジーが推定されている

*京都市西京区京都大学桂

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 47, NO. 5, 2008

が、地上で実際に観測された植物状態との検証が不十 分であり信頼性に乏しい(土田ら, 2007)。北半球全体 の森林フェノロジー変動を観測した Myneni et al. (1997) や Zhou et al. (2001) らの研究においては, 植生指標の経年変動のみを議論しており地上観測値と の比較・検証は一切行われていない。Yu et al. (2003) は中国とモンゴルの国境付近の展葉日観測を行った が、気温や気象データとの関係を解析しているのみで 地上観測値による検証は行っていない。Stöckli et al. (2004)らのヨーロッパの森林を対象とした展葉日観測 においては、フェノロジーの地上観測網である International Phenological Garden (IPG)の観測データ を検証に用いたが,定性的な比較のみに留まっている。 耕作地に関しては、Sakamoto et al. (2005)が MODIS データから推定した稲の植付け時期と実際の植付け時 期の統計データとを比較し、15日程度の精度で植付け 時期が検出できることを示した事例がある。森林を対 象として定量的な検証をした数少ない事例としては、 Delbart et al. (2005) によるシベリアにおける北方林 の展葉時期観測がある。しかしながら、検証地点が10

^{*}京都大学大学院工学研究科/**東京大学生産技術研究所

^{***}国立環境研究所

点と少なく,年ごとの安定性も検証されていない。広 域にわたる定量的な検証が欠如している要因として は,陸域生態系は空間・時間的に非均質性が高いため に,検証データの観測が困難であることが挙げられる。 客観性の高い地上でのフェノロジー観測値を検証デー タとして利用し,衛星データによるフェノロジー観測 を空間的に広範囲かつ高密度で年々変動を検証するこ とは信頼性の向上に大きく寄与する。

1.2 本研究の目的

本研究では、春の展葉時期を対象として地上観測に よる植物季節データを用いることにより、衛星データ を用いた既存の展葉時期検出アルゴリズム、および本 研究で新たに提案する検出アルゴリズムを比較・評価 することを目的とする。そして,展葉時期の時空間変 動や気温の年々変化に対する応答を捉えるための手段 として,新たに提案する手法が有効であることを示す。 なお、大陸レベルでのフェノロジーの長期変動を観測 することを将来的な目標としているため、30年分近く のデータが存在する NOAA AVHRR データを用いて 解析を行う。本研究は衛星データによる展葉日の検出, 気象庁の生物季節観測値を用いた検証データの作成、 アルゴリズム評価から構成されている(図1)。以下で は、既存および新たに提案する展葉時期検出アルゴリ ズム、気象庁データからの検証データ作成手法、衛星 データの処理手法について順に述べる。最後に、展葉 時期の時空間変動と、気温変動に対する展葉時期の応 答が衛星データによって観測可能であるかを検証す る。





2. 解析手法

2.1 対象地域および対象とする植生

気象庁による植物季節データと比較できるように北 緯30-46度,東経128-146度の範囲に含まれる日本を対 象とした。九州地方から房総半島南端までの太平洋沿 岸部には常緑林が分布し,平野部では耕作地や都市域 が広がり,その他の地域では落葉樹林や草地などの落 葉植物が広く分布している。本研究では,展葉時期が 明確な北半球中高緯度帯の落葉植物を解析対象とし た。北半球中高緯度地帯の一般的な落葉植物では, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) は春から夏にかけて展葉するのに伴って上昇し,夏に 最大値となり,秋冬の紅葉,落葉に伴い徐々に低下す ると仮定する。

2.2 展葉時期の検出アルゴリズム

2.2.1 既存の検出アルゴリズム

植物の発芽や展葉のような瞬間的な現象を AVHRRの1km空間分解能センサで直接観測するこ とは困難であるが、衛星リモートセンシングによって 生態系のこのような特徴的な現象の結果として生じる シグナルの変化を検出することは可能である(Reed *et al*, 1994)。NDVIに代表される植生指標は植物の展葉 に伴って上昇するため、NDVIの1年間の変動におい てNDVIが上昇する特徴点を展葉時期として定義す ることができる。以下では、代表的な展葉時期の検出 アルゴリズムの概念を示す。なお、1月1日からの通 年日 *t* における NDVI を NDVI_t と表現する。

(1) 急上昇法(図2-a)

NDVI の1年間の時系列変化において,連続する二 時期の NDVI の上昇量 $NDVI_t - NDVI_{t-1}$ が最大とな る時期を検出する (例えば, Tateishi *et al.*, 2004)。 急上昇法は,植物が展葉すると NDVI が急激に上昇す るという仮定に基づいた手法である。

(2) 固定閾值法(図2-b)

対象地域全体に対して一定の閾値を設定し、NDVI と閾値が最初に交差する時期を展葉時期として検出す る(例えば、Suzuki et al., 2003)。すなわち、NDVI $_t$ \geq NDVI_{threshold} を満たす t の中で最小のものを展葉時 期とする。地表面が空間的に均質な被覆状態であれば、 展葉時期の NDVI も一定とみなすことができ、高精度



での検出が期待できる。

(3) 中間値法(図2-c)

画素ごとに NDVI の年最大値と年最小値から計算 した中間値を閾値とし,固定閾値法と同様に NDVI_t \geq NDVI_{threshold} を満たす t の中で最小のものを展葉時期 として検出する (White *et al.*, 1997)。画素の特性に 応じて閾値を設定できるため,対象地域の地表面が空 間的に非均質であっても高精度での検出が期待でき る。

これらの他にも NDVI の1 年間の変動をロジス ティック曲線などで近似した後に曲率などの特徴点を 展葉時期と定義する手法 (Zhang *et al.*, 2003) が存 在するが,関数近似をすると過補正により元々の時系 列変動特性が捉えられなくなる可能性があり,さらに はどの関数を適用すべきかについての明確な基準が現 時点では存在しないため,本研究では関数近似による 手法を対象としない。

2.2.2 本研究で提案する検出アルゴリズム

地表面が空間的に非均質な広域における展葉時期を 検出するためには、2.2.1による考察から画素の特性に 応じた閾値を設定することが有効であると考えられる ので、本研究では中間値法を基礎とした手法を新たに 提案する。中間値法を適用する際には、NDVIの年最 大値と年最小値が必要となるが、どちらかの値もしく は両方の値が雲被覆などの影響を受けると閾値となる 中間値が大きく変化し、結果として展葉時期の検出が 不安定になるという欠点がある。そこで本研究では、 閾値を安定させるために年平均値を閾値とする平均値 法を提案し、図3にその概念を示す。NDVIが0.1より 小さい時は雲被覆などの雑音の影響を受けており、地 表面状態を捉えられていないと定義する。平均値法の 手順は以下の通りである。

 各画素ごとに NDVI_t≥0.1 を満たす NDVI の 年平均値を計算し、NDVI_{threshold} を求める。



NDVIt≥NDVIthreshold を満たすtの中で、最小のtを展棄時期として検出する。

2.3 気象庁の生物季節観測データを用いた評価手法2.3.1 アルゴリズムの評価基準

日本の気象庁は、全国各地の気象観測所において植物種目、動物11種目の生物季節観測を1953年より行っており*1、現在までに50年分以上の観測データを収集している*2。植物季節については、観測所内もしくは観測所周辺に生育している標本木が目視によって毎年観測されている。気象庁よる各植物季節の観測基準は表1のように定義されている(国立天文台編,2007)。

表1 気象庁による植物季節観測の定義。

観測項目	定義
発芽日	芽の総数の約20%が発芽した最初の日
開花日	花が数輪以上開いた状態となった最初の日
満開日	花が咲きそろったときの約80%以上が咲いた
	状態となった最初の日
紅(黄)	全体として眺めたときに,葉の色が紅(黄)
葉日	葉系統の色に変化し、緑色系統の色がほとん
	ど認められなくなった最初の日

*1 観測所により観測項目は異なる。

*2 これらの観測データは生物季節観測累年表として気 象庁が編集し, (助気象業務支援センターが発行している。



本研究ではこの中で代表的な春の植物季節現象であ り、データ量が最も豊富かつ欠損値も少ないサクラ開 花日を検証データとして用いる。衛星観測による展葉 時期と検証データのサクラ開花日では観測対象が異な るが、春の生物季節現象は積算温度をはじめとした環 境条件に大きく依存しているため(Chuine, 2000), 樹 種が異なっても両者には空間的および時間的に強い相 関があると考えられる。実際、各気象観測所で1996年 から2000年にかけて観測されたサクラ開花日とイチョ ウ発芽日を比較すると、バイアスが存在するがサクラ 開花日とイチョウ発芽日の間には強い線形性(R2= 0.75) が確認できる (図4)。そこで本研究では、衛星 観測による展葉時期と地上観測によるサクラ開花日の 間にも線形性が存在すると仮定し、両者の線形性が強 いほど精度が高いとみなして解析を行う。

2.3.2 展葉時期検証データの作成

通常、地上観測値を用いた検証は地上観測点とそれ に対応した数画素の衛星観測値を対応付けて行うが, 低空間分解能データと地上観測による検証データを直 接比較することは、空間的代表性の問題から困難であ ることが指摘されている (Fisher et al., 2007)。そこ で本研究では、各気象観測所のサクラ開花日データか らサクラ開花日モデルを作成した後に、対象地域全体 のサクラ開花日の空間分布図を作成し、その分布図と 衛星観測による展葉時期を比較する。

日本のサクラ開花日は、緯度、経度、標高を説明変

数とした重回帰分析により、高い説明力を有する回帰 式が得られることが報告されている(増田ら、1999)。 そこで、本研究でもこれに従い、式1に示す線形回帰 モデルを各年ごとに構築した。モデル構築には沖縄県 と離島の観測データを除き、サクラ開花日データが存 在する地点のデータを使用した。

$$DOY = a + b \times Lat + c \times Lon + d \times Alt \tag{1}$$

ここで、DOYはサクラ開花日(通年日)、Latは緯度 (度), Lon は経度 (度), Alt は標高 (m), a, b, c, d は各パラメータである。

2.4 NOAA AVHRR データの処理手法

1996年から2000年にかけて東京大学生産技術研究所 でほぼ毎日受信した NOAA AVHRR データを使用し た。NOAA-14号に搭載された AVHRR/2による観測 データであり, High Resolution Picture Transmission(HRPT)フォーマットであるため衛星直下での 空間分解能は1.1km である。本研究で対象とする東経 128-146度、北緯30-46度の範囲は、幾何補正後の画像 では2160×1920画素に相当する。

放射量補正および幾何補正は, AVHRR データの解 析前処理用フリーソフトである PaNDA (PaNDA 委 員会、1993)を用い、可視・近赤外チャンネルは大気 上端での反射率(%),熱赤外チャンネルは輝度温度 (K) に変換した後に等緯度経度座標系に幾何補正し た。そして,幾何補正精度が1画素以内の画像につい て輝度温度および NDVI 制約付最小衛星観測角法 (雷 ら、2001)を適用し、10日間雲無し合成画像を作成し た。それぞれの合成画像について NDVI を計算し、5 年分 (36×5=180シーン)の時系列 NDVI データセッ トを構築した。

次に、フェノロジー観測のための雑音除去手法(大 吉ら, 2008) を各年ごとの時系列 NDVI データセット に適用することで、雲無し合成画像処理で除去しきれ なかった雲被覆や大気状態に起因する雑音を除去し, また各合成画像の隣り合う時間間隔を全て10日に補正 し、時系列 NDVI データセットの高品質化処理を行っ た。図5は、森林域の1画素における雑音除去前後の 1998年の NDVI 変動を示している。 NDVI が低下した 後に急上昇している雲被覆の影響と考えられる点が補 正されている。また、雑音除去前は10日間の値が一定 となっている一方, 観測値が合成画像作成期間の最終



図 5 雑音除去手法による時系列 NDVI データの補正。 1998年の森林域の1 画素の変動を示している。

日の値に補正されていることが確認できる。例えば130 日であると、補正後の NDVI は130日目の値を計算し ており約0.41となっているが、生データは121日から 130日の値が一定となっており約0.38である。

この雑音除去手法を適用した時系列 NDVI データ に対して、急上昇法、固定閾値法、中間値法、平均値 法を適用し、展葉時期を推定した。なお、急上昇法を 適用する際には、あらかじめ NDVI が年間最大となる 時期を検出し、その時期以前で10日間の NDVI 増加量 が最も大きい時期を展葉時期と定義した。固定閾値法 を適用する際には、Suzuki et al. (2003) と同様に NDVIの閾値を0.2とした。また,NDVIの雑音除去手 法は,前後の時期の NDVI を用いて補正を行ってお り、1年の最初と最後の時期のデータ補正ができない ために1年の最初と最後のデータは除外して計算し た。また、雑音除去手法を適用することで、観測値と 観測日を1対1で対応づけることができるため、固定 閾値法,中間値法,平均値法については,NDVI は線 形に変化すると仮定して日単位で NDVI を計算し, 展 葉時期を日単位で推定した。

本研究では, 展葉時期を対象としているため, MOD12 (Friedl *et al.*, 2002)のPlant Functional Types (PFT) Scheme において, Broadleaf deciduous tree, Needleleaf deciduous tree, Shrub, Grass に分 類される落葉植物域のみを対象とする。また,気温変 化に対する展葉時期の応答が観測可能であるかを評価 するために, University of East Anglia が作成した0.5 度空間分解能のCRU2.1データ (Mitchell *et al.*, 2005)を1kmに変換して用いた。

表2 緯度,経度,標高を説明変数とした重回帰分析により得られたサクラ開花日の回帰式および決定係数。 DOY はサクラ開花日,Lat は緯度(度),Lon は 経度(度),Alt は標高(m)を示している。

年	サクラ開花日の回帰式	R^2
1996	DOY = 85.15 + 6.36 * Lat - 1.59 * Lon + 0.02 * Alt	0.93
1997	DOY = 85.52 + 6.06 * Lat - 1.56 * Lon + 0.01 * Alt	0.92
1998	DOY = 87.40 + 4.81 * Lat - 1.25 * Lon + 0.01 * Alt	0.85
1999	DOY = 85.15 + 6.36 * Lat - 1.52 * Lon + 0.02 * Alt	0.92
2000	DOY = 92.68 + 5.81 * Lat - 1.50 * Lon + 0.02 * Alt	0.92

3. 結果および考察

3.1 サクラ開花日モデルの構築

表2は、各年のサクラ開花日モデルと決定係数を示 している。決定係数は各年とも0.9程度の高い値を示 し、説明力の非常に高いサクラ開花日の回帰式が得ら れた。サクラ開花日は、北または東に行くほど、そし て標高が増すほど遅くなる傾向であった。そして、対 象地域に含まれる全ての1km格子について、緯度経 度とGTOPO30*3による標高データを回帰式に代入 し、1996年から2000年までの各年ごとの1km空間分 解能のサクラ開花日の空間分布図を作成した。

3.2 展葉時期の空間分布図の比較

図6は、各アルゴリズムにより検出した展葉日とサ クラ開花日の1996年から2000年までの平均値の空間分 布図を示している。展葉は気温の高い南から北に向 かって北上し、隣接した画素であれば環境条件が同様 であるために展葉日は近い値になると考えられ、この ような特徴は検証データであるサクラ開花日(図6-e) で確認できる。このような観点に基づき、以下順に各 アルゴリズムを評価する。

急上昇法(図6-a)は、隣接する画素間でも展葉日 が大きく異なっていた。この理由としては、急上昇法 は NDVIの年変動において微分値が最大の時期を検 出する手法であり、大気状態や地形効果等の影響によ る NDVI 変動に対して脆弱であるために空間的に非 均一な検出結果となったと推察される。

固定閾値法(図6-b)は、北陸地方から東北地方、 北海道にかけて展葉前線が北上していく様子が検証

^{* 3} http://edcdaac.usgs.gov/gtopo30/gtopo30.html

データと一致しているが、その他の地域では展葉日は 年間積算日数で60日以前の早い時期に検出されている か、展葉日が検出できていない。固定閾値法は、NDVI が閾値(本研究の場合、NDVI=0.2)を超える時期を 検出するため、NDVIの年最小値が0.2以上の画素で は展葉時期を検出することができない。また、NDVI が年間を通じて高い南方域では、NDVIが0.2を超え る時期が早いために検出される展葉日も早くなってい る。このような問題を解決するために閾値を高く設定 することも考えられるが、地表面が非均質な広範囲を 対象として単一の閾値で展葉時期を検出することは困 難である。

中間値法(図6-c)は、急上昇法や固定閾値法と比 較すると展葉前線が北上する様子が検証データと一致 していた。中間値法は、各画素の1年間の植物活動を 考えた時に活性度が中間となる時期を検出する。した がって、画素ごとの特徴を捉えることができ、展葉が 南から北に進んでいく様子が観測できたと考えられ る。しかしながら、中間値の計算に必要な最小値は、 雑音除去手法で除去しきれなかった雲被覆などの影響 によって不安定になるため、空間的にばらつきの大き い場所が存在することも確認できた。

平均値法(図6-d)は、展葉前線が北上する様子が 最も良く捉えられており、空間的にも滑らかである。 これは中間値法と同様に各画素の地表面特性を反映す るように閾値を設定したことによると考えられる。ま た、*NDVI*≥0.1となる時期の平均値を計算すること で雲被覆等の影響による NDVI の異常値が除外され、 雑音が含まれているとしても平滑化されるので、中間 値法と比較するとより安定した閾値が設定できた。





図6 各アルゴリズムにより検出した展葉日と気象庁データから作成したサクラ開花日の空間分布図。各画素ごとに1996年 から2000年までの平均値を計算した。

3.3 各アルゴリズムの定量的評価

次に,地上観測値との定量的評価を行う。図7は, 各アルゴリズムにより検出した展葉日と,地上観測に よるサクラ開花日の散布図を示している。各点は対象 地域の落葉植物における1996年から2000年までの各年 の各緯度帯ごと(北緯30-35度,35-40度,40-45度)の 平均値と標準偏差を示している。急上昇法(図7-a) と固定閾値法(図7-b)については, R²がそれぞれ 0.64,0.79と比較的高い値を示しているが,図6で指 摘したように中間値法や平均値法と比較すると検出結 果の標準偏差が大きく空間的なばらつきが大きいこと が確認できる。一方,平均値法(図7-d)は, R²が0.85, 平均二乗誤差(RMSE)が12.2日であり,検証データ と最も良く一致した。しかし,検証データはどの緯度 帯においても標準偏差がほぼ一定であるが,平均値法 は展葉日の早い低緯度になるにつれて値が大きくなっ ている。このばらつきの原因は,低緯度では画素内に 常緑林が含まれるためであると考えられる。本研究で は,MOD12において落葉植物と分類されている画素の みを用いて検証を行っているが,その画素内には常緑 林が含まれている,もしくは落葉植物と分類されてい るが実際は常緑林である可能性がある。常緑林は年間



図7 衛星観測による展葉日と地上観測によるサクラ開花日の関係。1996年から2000年までの各年の各緯度帯ごと(北緯 30-35度,35-40度,40-45度)の落葉植物域における平均値を標本として散布図を作成した(n=15)。各点上の横線, 縦線は各標本の標準偏差を示している。

表3 対象地域の落葉植物全体における衛星観測によ る展葉日と地上観測によるサクラ開花日のバイ アス(日),バイアス補正後の RMSE(日)。

検出手法	バイアス	バイアス補正後の RMSE
急上昇法	12.6	10.1
固定閾值法	29.7	19.9
中間值法	-8.7	9.9
平均值法	-10.4	6.6

を通じて NDVI が高く, NDVI が春に上昇して夏に最 大となるという本研究で仮定した植生モデルと一致し ないために誤検出が発生したと推測される。落葉林と 常緑林の混合画素に関しては, 混合の割合によりその 時系列 NDVI 形状が変化するため, 展葉日が検出可能 であるかについてはさらなる検討が必要である。

また、平均値法による展葉日はサクラ開花日よりも 遅いことが確認できる。これは、樹種が異なることに よるバイアスであると考えられる。ここで、衛星観測 値と地上観測値のバイアス(日)は式(2)で計算され、

$$bias = \frac{\sum_{i=1}^{n} (DOY_i^{ground} - DOY_i^{satellite})}{2}$$
(2)

バイアス補正済 RMSE は式(3)で計算できる。

$$RMSE_{bias} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (DOY_{i}^{ground} - DOY_{i}^{satellite} - bias)^{2}}{n-1}}$$
(3)

DOY^{pround}は地上観測値,DOY^{satellite}は衛星観測値, nは標本数を示す。本研究の場合,3つの緯度帯で5年 間を対象としているため n=15 である。表3は,衛星 観測値と地上観測値のバイアス補正後の RMSE を示 している。平均値法が6.6日で検証データと最も良く一 致し,以下,中間値法,急上昇法,固定閾値法の順に 検証データと良く一致した。これは,10日間合成画像 を用いて解析を行ったことを考慮すると十分な精度が 得られたと考えられる。

3.4 気温の年々変動に対する展葉時期の応答検知

最後に, 展葉時期の気温の年変動に対する応答が衛 星観測により検知可能であるかを検討するため, 気温 と衛星観測による展葉時期の関係を解析した。図8は, 落葉植物全体における衛星観測による展葉日および地 上観測値と気温の各年ごとの平均値を示している。気 温は1月から5月までの平均気温を用いた。植物の展 葉時期は,最も単純なモデルではある基底温度以上の 積算温度で記述され, 一般的に気温が高いほど展葉時 期が早まることが知られている(Chuine, 2000)。実際,



図8 展葉日と気温の関係。1996年から2000年までの各年 ごとの対象地域全体の落葉植物域における平均値を 示している。気温は1月から5月までの平均値であ る。

地上観測値と気温では、気温が高い年ほど開花日が早 まる傾向があり、開花時期が気温に依存している傾向 が確認できる。衛星観測においても、急上昇法、中間 値法,平均値法では地上観測値と同様の傾向が見られ、 気温に応じて展葉時期が変化する様子が捉えられてい る。

3.5 アルゴリズムの評価のまとめ

本研究で対象とした地域では、平均値法が最も頑健 性が高く、地上観測値とも一致することが明らかと なった。しかしながら、常緑林が多く分布している北 緯30-35度の緯度帯においては、検出した展葉時期の空 間的なばらつきが大きく、検出結果が不安定になるこ とが確認された。これは、本研究では北半球の中高緯 度帯における落葉植物を対象としており、常緑林が混 在している地域での NDVI 変化は仮定した変化と異 なることに起因している。平均値法では、0.1より小さ い NDVI は雑音とみなして使用せずに展葉日検出の 閾値を計算したが、常緑林では年間を通して NDVI が 高いため雑音とみなす閾値をより高く設定するなど対 象画素の特性に応じた閾値設定が必要と考えられる。 また,NOAA 衛星は位置精度が悪く,幾何補正精度が 低いことが指摘されているため (Parada et al., 2000),幾何補正精度の向上も根本的な課題である。

平均値法で検出された展葉日は、気温が高い年ほど

展葉時期が早まる傾向を捉えることができており, 年々の気象変化に対する植物の応答を検知することが できた。今回は1月から5月までの平均気温をそのま ま用いたが,展葉時期に影響を与えるのはある基底温 度以上の気温であり,冬の低温やその他の気象要素も 展葉時期に影響を与えることが知られている (Chuine, 2000)。気温に加えてこれらの様々な気象要 素と展葉時期の関係を解析することにより,気候変動 に対する植物活動の詳細な応答特性を明らかにするこ とが期待できる。

また Delbart *et al.* (2005) は, SPOT-VGT データ を利用して固定閾値法, 関数近似法, 中間値法と Normalized Difference Water Index (NDWI) を用いた 手法の評価を行い, NDWI 法に次いで中間値法の精度 が高いことを報告している。式(3)で計算される中間値 法の誤差は7.5日であり,本研究の中間値法による結果 (9.9日)よりも2日程度精度が高い。本研究で用いた AVHRR/2は短波長赤外の観測波長帯を有していない ために, NDWI 法と比較することはできないが,本研 究の結果においても中間値法は平均値法に次いで検証 データと良く一致していた。さらに, 固定閾値法によ る推定結果の空間的なばらつきが大きいことも同様で あった。使用データも対象地域も異なるので一概に比 較することは難しいが, アルゴリズム評価の整合性は これらの点では一致していた。

4. 結 論

本研究では衛星リモートセンシングによるフェノロ ジー観測手法を体系的に評価し、これまでの問題点を 克服する新しい手法を提案した。データが豊富な日本 の気象庁による生物季節観測累年表に含まれるサクラ 開花日データを検証データとすることで広域、多時期 における検証を可能とし、既存の展葉時期観測アルゴ リズム(急上昇法、固定閾値法、中間値法)と新たに 提案した平均値法の評価を行った。日本を対象として AVHRRデータによる解析を行った結果、本研究で新 たに提案した平均値法が検証データと最も良く一致 し、衛星観測による展葉時期とサクラ開花日の差はバ イアスを考慮すると、日本の落葉植物域全体で6.6日で あり、高い精度での展葉日観測が可能であった。また、 提案手法では気温が高いほど展葉日が早まる傾向が検 証データと同様に見られ、気温変化に対する展葉時期 の応答が検知可能であることも確認できた。本研究で 仮定した植生モデルは日本だけでなく,北半球中高緯 度地帯の一般的な落葉植物を表現しているので,同様 の植生活動が仮定できる地域への適用が期待できる。 しかし,検証データと最も良く一致した平均値法で あっても,常緑林の含まれる北緯30-35度においては検 出結果のばらつきが大きく,検出精度の低下が認めら れたため,改良の余地がある。今後は,展葉時期の検 出精度向上のための手法開発に加えて,AVHRRの長 期データに本手法を適用し,20-30年スケールでの展葉 時期の時空間変動を解析したいと考えている。

謝 辞

本研究は文部科学省による新世紀重点研究創世プラ ン(Research Revolution 2002)「人・自然・地球共生 プロジェクト」の研究課題である「陸域生態系モデル 作成のためのパラメタリゼーションに関する研究」(研 究代表者:安岡善文東京大学教授)の一環として実施 されたものである。ここで改めて、関係者各位に感謝 の意を表する。

(受付日2008.3.11, 受理日2008.9.5)

参考文献

- 【1】 大吉 慶,竹内 渉,安岡善文,2008. 植物フェ ノロジー観測における時系列 NDVI データの雑 音除去手法.写真測量とリモートセンシング,47
 (1), pp.4-16.
- [2] 土田 聡,西田顕郎,岩男弘毅,川戸 渉,小 熊宏之,岩崎 晃,2005. Phenological Eye Network-衛星による地球環境観測のための地上検 証ネットワークー.日本リモートセンシング学会 誌,25(3), pp.282-288.
- [3] 雷 莉萍,横山隆三,2001. 全アジア地域 NOAA/AVHRR 10日間モザイク画像の合成法 (II)-最適観測画素抽出法の検討-.日本リモー トセンシング学会誌,21(2),pp.168-178.
- [4] 国立天文台編, 2007. 理科年表. pp.171, 丸善.
- [5] Chuine, I., 2000. A unified model for budburst of trees. *Journal of Theoretical Biology*, 207, pp. 337–347.
- [6] Delbart, N., Kergoat, L., Toan, T.L., Lhermitte, L. and Picard, G., 2005. Determination of

phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 97, pp.26–38.

- [7] Fisher, J.I. and Mustard, J.F., 2007. Crossscalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. *Remote Sensing of Envi*ronment, 109, pp.261-273.
- [8] Friedl, M.A., Mclver, D.K., Hodges, J.C.F., Zhang, X.Y., Muchoney, D., Strahler, A.H., Woodcock, C.ff., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F. and Schaaf, C., 2002. Global land cover mapping from MODIS : algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp.287-302.
- [9] Mitchell, T.D. and Jones, P.D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, pp.693-712.
- [10] Myneni, B.R., Keeling, C.D., Tucker, C.J., Asrar, G. and Nemani, R.R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981–1991. *Nature*, 386, pp.698–702.
- [11] Parada, M., Millán, A., Lobato, A. and Hermosilla, A., 2000. Fast coastal algorithm for automatic geometric correction of AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*, 21(11), pp.2307-2312.
- [12] Reed, B.C., Brown, J.F., VanderZee, D., Loveland, R.R., Merchant, J.W. and Ohlen, D.O., 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*, 5, pp.703-714.
- [13] Sakamoto, T., Yokozawa, M., Toritani, H., Shibayama, M., Ishitsuka, N. and Ohno, H. Monitoring phenological key stages and cycle duration of temperate deciduous forest ecosystem with NOAA/AVHRR data. *Remote Sensing of Environment*, 96, pp.366-374, 2005.
- [14] Running, S.W. and Nemani, R.R., 1991.

Regional hydrologic and carbon balance responses of forests resulting from potential climate change. *Climatic Change*, 19, pp.349-368.

- [15] Stöckli, R. and Vidale, P.L., 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20year AVHRR land-surface parameter dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 25(17), pp.3303-3330.
- [16] Suzuki, R., Nomaki, T. and Yasunari, T., 2003. West-east contrast of phenology and climate in northern Asia revealed using a remotely sensed vegetation index. *International Journal of Biometeorology*, 47, pp.126-138.
- Tateishi, R. and Ebata, M., 2004. Analysis of phenological change patterns using 1982-2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), pp.2287-2300.
- [18] White, M.A., Thornton, P.E. and Running, S. W., 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11(2), pp.217-234.
- [19] Yu, Y., Price, P.K., Ellis, J., Shi, P. Response of seasonal vegetation development to climatic variations in eastern central Asia. *Remote Sensing of Environment*, 87, pp.42-54, 2003.
- [20] 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 Sensing of Environment*, 84, pp.471-475.
- [21] Zhou, L., Tucker, C.J., Kaufumann, K.R., Slayback, D, Shabanov, V.N. and Myneni, B.R. Variations in northern vegetation activity inferred from satellite data of vegetation index during 1981 to 1999. *Journal of Geophysical Research*, 106(D17), pp.20069–20083, 2001.