論文

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

Noise reduction algorithm for time-series NDVI data in phenological monitoring

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

Abstract : Vegetation phenology is closely related to seasonal dynamics of the lower atmosphere, and important elements in global models and vegetation monitoring. Time-series NDVI data based on imagery from AVHRR or MODIS are suitable for phenological monitoring, because these sensors provide data with a high temporal frequency. In order to reduce noises caused by cloud contamination or atmospheric variability, Maximum Value Composite (MVC) is applied to the data. However, composite data have undesirable noises due to remained cloud contamination and inequality of observation intervals. Though MVC technique is applied, these noises disturb phenological monitoring. This paper proposed new noise reduction algorithm which integrates Best Index Slope Extraction (BISE) and Maximum Value Interpolated (MVI) algorithms. Integrated algorithm was applied to time -series NDVI data consists of NOAA AVHRR composite images. This algorithm worked well in areas dominated by vegetation such as cropland including double cropping area, deciduous broadleaf forest and evergreen needleleaf forest. We confirmed that the algorithm reduced effects of cloud contamination, and equalized each observation interval. Therefore, applying developed algorithm to time-series NDVI data allows us to phenological monitoring more precisely.

1. はじめに

1.1 本研究の背景

展葉や落葉など季節特有の植物活動を意味する植物 フェノロジーは下層大気の季節変動と密接に関係して おり,炭素循環や水循環,熱輸送等における季節変動 をもたらすため,地球科学や大気科学における重要な 要素である(Running et al., 1991)。可視域と近赤外 域の反射率から計算される正規化植生指標(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)の変動は, 植物の葉量やバイオマス量の季節変化と高い相関関係 にあり,衛星データを用いた広域の植物フェノロジー

* 東京大学生産技術研究所

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

**国立環境研究所

National Institute for Environmental Studies 「写真測量とリモートセンシング」VOL. 47, NO. 1, 2008 観測に広く用いられている(Reed et al., 1994)。特に, 広範囲を高頻度で観測可能な AVHRR や MODIS は, 植物フェノロジー観測のための有用なセンサとして期 待されている。しかし、光学センサであるため、対象 地域が雲に覆われていると地表面の植物状態を観測す ることができないという欠点がある。大陸や国スケー ルの複数年に渡る大量の観測データを用いて植物フェ ノロジー観測を行う際には、毎日の観測データを用い るとデータ処理量が膨大になることや、対象領域が雲 に覆われていない画像を検索すると多大な労力を要す るという問題が生じる。そのため、Holben (1986) に よって提案された Maximum Value Composite (MVC) 法に代表される雲無し合成画像処理により、一定期間 内に観測されたデータの中から、大気の影響を最も受 けていない観測条件の良い画素を選択することで, データ量を時間的に圧縮し, 擬似的に雲域を除去した 画像を解析に用いることが一般的である(Teillet et al., 2000)。 雲や大気の影響を相対的に受けていない 観 測条件の良い画素は、影響を受けている画素と比較す ると、NDVI が高い、可視域の反射率が低い、輝度温

度が高い,衛星観測角が小さいといった物理特性を有 しているため,これらの基準を単独または複合的に用 いて雲無し合成画像処理が行われる(Cihlar *et al.*, 1994,竹内ら,2004)。

しかしながら,このような雲無し合成画像処理を適 用した場合でも、植物フェノロジー観測において問題 となる点が2つある。1つは、雲被覆の問題である。 雲無し合成画像処理を行っても、10日や15日、1ヶ月 といった期間内に観測条件の良いデータが存在しない 場合、雲域を除去することはできない。ここで、対象 領域の雲を除去することができた雲無し合成画像のみ を用いて解析することも考えられる。ところがこの場 合,解析に使用できるデータが少なくなり,観測の時 間分解能が低下してしまうため, NDVI がある一定の 閾値を超える時期を検出する展葉日観測(Suzuki et al., 2003)や, 多時期の NDVI を用いて年間の植物活 動を評価するような、高い時間分解能が要求される解 析を行うことが困難となる。したがって、植物フェノ ロジー観測では、観測の時間分解能を保持した状態で 雲被覆の影響による NDVI の低下を補正したデータ セットが要求される。このような背景を受けて、雲被 覆の影響に対しては、NDVI の1年間の時系列変化特 性を利用した雑音除去手法がいくつか提案されてい る。Viovy et al. (1992) は、NDVI が低下している 点を雲被覆による影響とみなして補正する Best Index Slope Extraction (BISE) 法を提案した。また, BISE 法を発展させ、NDVI の年変動の谷部の補正を 改良した手法(朴ら,1999)や、これらの手法とは異 なり、NDVI の1年間の変動を三角関数やフーリエ級 数, ガウス型関数等でモデル化し, 雲被覆の影響を補 正する手法も提案されている (Cihlar et al., 1997, Roerink et al., 2000, Jonsson et al., 2002, 原ら, 2003, Chen et al., 2004).

もう一つの問題は、雲無し合成画像処理を行うと、 時間的に連続する観測値の各観測日間隔が不均等にな ることである(Taddei, 1997)。雲無し合成画像処理は 1週間や10日,1ヶ月といった期間を設定して行うが、 選択された観測値が期間内の何日目の観測データであ るかを考慮しないため、各観測値の実際の観測日間隔 は一定とならない。例えば、4月1日から10日と、4 月11日から20日の期間で、それぞれ10日間雲無し合成 画像を作成したとする。前者の雲無し合成画像では4 月1日に観測された画素が選択され、後者では4月20 日に観測された画素が選択されたとすると、両者の実際の観測日間隔は19日となる。一方、前者では4月10日、後者では4月11日に観測された画素が選択されると、実際の観測日間隔は1日となる。よって、期間を10日間として、雲無し合成画像処理を行うと、連続する2時期の観測日間隔であっても、実際の観測日間隔は最短で1日、最長で19日となる。Taddei(1997)は、この問題を解決するために、観測日間隔を均等化してNDVIを補正するMaximum Value Interpolated (MVI) 法を提案した。MVI 法では、雲無し合成画像処理の際に、選択した画素の観測値だけでなく、選択した画素の観測日も抽出する。そして、抽出した観測日と観測値を対応づけることで、各観測日間隔が等間隔になるようにNDVIを補正する。

雲無し合成画像処理で問題となる雲被覆と観測日間隔の不均等に対して、このように個々の問題を補正する手法は提案されているが、両方の手法を統合し、2つの問題を解決したデータセットの有効性を評価した事例は見れらない。雲の影響と観測日間隔の不均等の2つの問題を補正することで、雲被覆に起因するNDVIの低下が補正され、観測日間隔が均等化された植物フェノロジー観測に適した時系列NDVIデータセットの構築が期待できる。

1.2 本研究の目的

本研究では、北半球の中高緯度帯の植物フェノロ ジー観測に適したデータセットを構築することを最終 的な目的とする。これらの地域では、春から夏にかけ て気温が高くなり、日射量も増加するため、落葉性の 木本植物や一年生の草本植物は、春から夏にかけて葉 量やバイオマス量が増加していき、夏に最大となり、 秋から冬にかけては減少すると考えられる。そのため、 葉量やバイオマス量と相関の強い NDVI についても 同様の変動が仮定できる。このような NDVI 変動特性 を前提として、本研究では、時間分解能を保持した状 態で、雲被覆と観測日間隔の不均等に起因する影響を 補正した時系列 NDVI データセットを作成するため の雑音除去手法を新たに提案する。具体的には、BISE 法と MVI 法を 2 つのアルゴリズムを統合すること で、新たな雑音除去手法を開発する。

1.3 解析手法の概要

図1は,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の解析概要を示してい る。毎日の観測データから時系列 NDVI データセット を作成する解析前処理,既存手法および提案手法を データセットに適用する補正処理,各データセットを 時間軸および空間軸の観点から各手法の優劣を判断す る各雑音除去手法の評価の3つから構成されている。 以下では,はじめに既存の雑音除去手法および提案手 法のアルゴリズムについて説明し,その後に実験方法, 評価結果について述べ,提案手法の有効性を示す。

2. 時系列 NDVI データの雑音除去手法

2.1 BISE 法による雲被覆の影響補正

はじめに、雲被覆や大気の影響による影響の補正に ついて述べる。これまでに、時系列 NDVI データに含 まれる雲被覆の影響を除去を目的とした多くの手法が 提案されている。近年は、NDVI の1 年間の変動を関 数近似し、補正を行う手法が多く提案されているが、 パラメータ決定の恣意性や原データと補正値のピーク が一致しない問題等が指摘されている。(原ら、2003)。 また、選択した関数に適合するように補正を行うため、 雲の影響を受けていなく観測条件の良い画素であって も、その観測値が用いられずに、過補正されてしまう 可能性がある。そのうえ、森林火災や森林伐採などに より、地表面が改変された場合であっても、NDVI 変 動が関数で表現されているために、そのようなシグナ ルが検出できない可能性も考えられる。一方, BISE 法 は, 植物活動を仮定する特定のモデルに依存しなく, 雲の影響を受けていると判定された観測値以外は生 データそのものを用いるため, 生データの時系列変化 特性を最も保持する補正手法であり, 植物の年間変動 を関数近似することによって生じる過補正の影響も受 けにくい。このような特性を有するため, フェノロジー 観測を行うためのデータセットを作成する際に, BISE 法はしばしば用いられる(例えば, White *et al.*, 1997)。 したがって, 本研究では BISE 法のこのような特性に 着目し, 雲被覆の影響の補正に BISE 法を用いる。

BISE 法では、対象画素が雲被覆や大気の影響を受けていると、それらの影響は常に NDVI を低下させる ように働き、また NDVI は線形に変動すると仮定し、 NDVI が低下している点をその前後の時期に観測さ れた NDVI を用いて補正する。補正するための探索範 囲を決定した上で、以下の順序で各処理を行う。

- 探索範囲内において、始点よりも NDVI が高い 点が存在する場合は、植物の成長期で NDVI が単 調増加する時期であるとみなし、始点よりも NDVI が高く、かつ始点に最も近い点を選択す る。
- 2. 探索範囲内において、始点よりも NDVI が高い 点が存在しない場合は、植物活性が低下する時期 で NDVI が単調減少する時期であるとみなし、探 索範囲内で最も NDVI が高い点を選択する。

- 3. 始点と選択した点を結ぶ線分を求め、それらの 間に観測点が含まれる場合は、各時期の NDVI を 線形内挿により計算する。
- 1もしくは2で選択した点を始点として、処理 を繰り返す。

図2は、ある画素における BISE 法による雲被覆の 影響の補正概念を表している。期間 T-1, T, T+1 は各合成画像作成期間を意味し、丸点は各期間内で選 択された画素の観測値と観測日を意味している。なお, 期間 T は t−1<T≤t を満たす。 また, 通常の雲無し 合成画像処理では、選択した画素の観測日を考慮しな いため、各期間内の NDVI は一定とみなされる。例え ば、 $t-1 < T \le t$ の NDVI は *NDVI*_T で一定となる。 BISE 法では、探索範囲内に始点より高い NDVI が存 在すれば単調増加時期,始点より高い NDVI が存在し なければ単調減少時期であると仮定する。期間 T では NDVI が減少しているが、その後に上昇し、探索範囲 内に始点より高い NDVI が存在しているため単調増 加時期であり、期間 T での NDVI の低下は雲被覆な どの非植生起源の要因によるものであるとみなされ る。そして、期間 T での NDVI の低下は、BISE 法に よって以下のように補正が行われる。点(T-1, $NDVI_{T-1}$)を始点とし、始点より NDVI が高く、かつ 最も近い点を探索する。この条件を満たすのは点(T +1, NDVI_{T+1}) であり, 期間 T の補正後の NDVI は 点 $(T-1, NDVI_{T-1})$ と点 $(T+1, NDVI_{T+1})$ の2 点から線形内挿した点 $(T, NDVI_{T})$ となる。このよ うに, BISE 法では, NDVI の時系列変動特性を利用 し、 雲被覆や大気状態に起因する NDVI の低下を補正 する。



2.2 MVI 法による観測日間隔の均等化

2.1では, BISE 法による雲や大気状態に起因する NDVI の低下の補正について述べたが、ここでは雲無 し合成画像処理により生じる観測日間隔の不均等を補 正する手法について述べる。一般的な雲無し合成画像 処理では、10日や1ヶ月といった期間内の何日目の観 測データを選択したかを考慮していない。例えば, Delbart et al. (2006) によるフェノロジー観測では、10 日間雲無し合成画像を用いているが、期間内の何日目 に観測された観測データであっても、10日間の真ん中 の日の観測データとみなし、観測日間隔を10日として いる。だが、連続する各観測値間の実際の観測日間隔 は、最短で1日、最大で19日であり、均等でなくばら ついている。MVI 法では、このような観測日間隔の不 均等による雑音を補正するため、雲無し合成画像を作 成する際に,選択した画素の観測値のみでなく,選択 した画素の観測日も抽出し, 観測値と観測日が一対に なったデータから線形内挿により、期間内の最終日に おける観測値を推定することで、観測日間隔を均等化 する。処理手順は以下の通りである。

- 1. 雲無し合成画像処理を行う際に, 観測値と観測 日が一対になったデータセットを作成する。
- 2.各画素の時系列変動において、観測値と観測日 が対になった連続する2点を通る線分を求め、2 点間に存在する雲無し合成画像作成期間の最終日のNDVIを線形内挿により計算する。
- 3.2の処理を繰り返し、全ての期間について期間 内の最終日の NDVI の値を計算する。

図3は、MVI法による観測日間隔の均等化の概念を 示している。連続する2時期であっても、実際の観測 日間隔は各期間でばらついており等間隔でない。例え ば、期間 T-1 で選択された画素の観測日 t-1' と期 間 T で選択された画素の観測日 t' の観測日間隔は、 観測日 t' と期間 T+1 で選択された画素の観測日 t+1' の観測日間隔と比較すると間隔が短くなっている ことが確認できる。この観測日間隔の不均等を補正す るのが MVI 法であり、各観測値間の観測日間隔が一 定となるように NDVI を補正する。ここで、期間 T を 例として、MVI 法による補正手順を述べる。通常の雲 無し合成画像処理から作成したデータセットである と、時期 t の NDVI は期間 T に含まれるため NDVI となるが、時期 t は t' よりも t+1' に近いため、NDVI も NDVI_{t+1} に近い値であると推測できる。そこで、時



期 t の前後の観測値である点 (t', $NDVI_t$), (t+1', $NDVI_{t+1}$)の 2 点から, 期間 T の最終日 t の NDVI の 値を線形内挿により計算する。すべての期間について 期間内の最終日での NDVI を計算することにより, 観 測日間隔を均等化することができる。また, MVI 法は, 各期間の最終日の NDVI を計算するこで, 観測値と観 測日を 1 対1に対応づけることが可能となる。

2.3 BISE 法と MVI 法を統合した雑音除去手法

これまでに BISE 法と MVI 法による補正手法を述 べてきたが,ここでは,これら2つの手法を統合した 提案手法ついて述べる,BISE 法と MVI 法を統合する ことで,雲被覆の影響を補正し,かつ観測日間隔を均 等化することが期待できる。図4は,BISE 法と MVI 法の統合化手法における各段階の処理を示しており, 以下の3段階の処理を行う。

- 1. 雲無し合成画像処理の際に,選択した画素の観 測値のみでなく,選択した画素の観測日も取得す る(図4-a)。
- 1 で取得した各時期の観測値と観測日が一対に なったデータに対して, BISE 法を適用する(図 4 -b)。
- BISE 法を適用したデータに対して、各合成画 像作成期間の最終日の値を線形内挿により計算す る(図4-c)。

ここで、図4における期間 T の NDVI の補正を例 として示す。期間 T の NDVI は、期間 T-1'の観測 値よりも低く、期間 T+1'では期間 T よりも高いた め、雲被覆の影響を受けているとみなされる。はじめ に、観測日データを用いて、観測値と観測日を1対1







図4 BISE 法と MVI 法を統合した雑音除去手法の概念

で対応づけることにより, 観測値と観測日はそれぞれ, 期間 T-1では点 $(t-1', NDVI_{t-1})$, 期間 Tでは点 $(t', NDVI_t)$, 期間 T+1では点 $(t+1', NDVI_{t+1})$

-- 8 ---

と特定できる (図 4-a)。次に, 観測値と観測日が一 対になった観測データに対して BISE 法を適用し, 点 $(t-1', NDVI_{t-1})$ と点 $(t+1', NDVI_{t+1})$ の2点を結 ぶ線分を求める (図 4-b)。最後に, この線分から期 間 T の最終日である時期 t の NDVI を線形内挿によ り計算し, 点 $(t, NDVI'_{t})$ を求める (図 4-c)。補正 後の点 $(t, NDVI'_{t})$ は, 雲被覆の影響と考えられる NDVI の低下が補正されており, また, 雲無し合成画 像作成期間 T の最終日である t の NDVI が計算され ている。このように, BISE 法と MVI 法を統合したア ルゴリズムを時系列 NDVI データに適用することで, 雲被覆と観測日間隔の不均等に起因する雑音の除去が 期待できる。

3. 実験方法

3.1 使用データおよび対象地域

これまで,提案する補正手法について述べてきたが, ここでは提案手法の有効性を確かめるために,実際の 観測データを用いた実験方法について述べる。使用 データは,1998年の1月1日から12月31日にかけて, 東京大学生産技術研究所において受信した NOAA/ AVHRRの昼間の観測データである。これらは NOAA-14に搭載されている AVHRR/2による High Resolution Picture Transmission (HRPT)フォー マットのデータであり,衛星直下での空間分解能は1.1 km である。対象地域は当該受信局で受信できるほぼ 全範囲に相当する北緯30-50度,東経120-150度の範囲 とした。この範囲には,日本,韓国,北朝鮮と,中国 およびロシアの一部が含まれ。画像では2400×3600画 素に相当する。

3.2 データ処理

はじめに、AVHRRの前処理用のフリーソフトウェ アである PaNDA (PaNDA 委員会、1993)を用いて、 放射量補正、幾何補正を行った。チャンネル1、2は 大気上端での反射率(%)、3、4、5は輝度温度(K) に変換した。そして、等緯度経度座標系に幾何補正を 行い、GCP 周りの平均誤差が1 画素未満の画像のみを 用いて、以降の解析を行った。次に、1ヶ月につき3 シーン(1-10日、11-20日、21-31 [28、30])、1年間 で36シーンの雲無し合成画像を作成した。雲無し合成 画像の作成には、アジア域に最も適しているとされて いる、 雷ら (2001) によって提案された、 輝度温度及 び NDVI 制約付最小衛星観測角法を使用した。また、 MVI 法や統合化手法を適用する際には、選択した画素 の観測日も必要となるため、 雲無し合成画像処理時に、 選択した画素の観測日を抽出するようにした。そして、 式(1)により、各時期の雲無し合成画像から NDVI を計 算し、 1 年分の時系列 NDVI データセットを構築し た。

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \tag{1}$$

ここで、 ρ_{NIR} は近赤外域(チャンネル2)の反射率、 ρ_{Red} は可視域(チャンネル1)の反射率を意味する。 最後に、時系列 NDVI データセットに対して、3種類 の雑音除去手法(BISE 法、MVI 法、統合化手法)を 適用し、評価対象とするデータセットを作成した。

雑音除去手法を適用するにあたって, BISE 法や統 合化手法を適用する際には,探索範囲を設定する必要 があり、慎重な検討が必要となる。探索範囲が長すぎ ると植物フェノロジー特性に関する情報が失われ、短 すぎると雲の影響を補正することができない。また, 対象画素の地表面の植物フェノロジー特性や気候特性 により、最適な探索範囲は異なると考えられる。本来 は画素ごとの特性に応じた最適な探索範囲を決定すべ きであるが、本研究においては、BISE 法および統合化 手法を適用する際には、概ね2ヶ月間継続する雲被覆 の影響を補正し、2ヶ月以上の期間の植物フェノロ ジー特性は保持できるように、探索範囲を2ヶ月(6) 時期)に設定した。そして、雑音除去手法を適用して いないデータセットおよび、各雑音除去手法を適用し た3種類のデータセットについて、時間軸、空間軸の 観点から評価を行った。さらに,種々の土地被覆にお ける提案手法の補正効果を評価することで。各土地被 覆に対する提案手法の適用可能性について検討した。

4. 結果および考察

4.1 統合化手法の時間軸での評価

はじめに,特定の画素の1年間のNDVI変動に着目 し,提案手法の有効性を時間軸の観点から検討する。 図5は,各雑音除去手法を適用したデータセットと, 適用していないデータセットにおける1画素の1年間 のNDVI変動を示している。この画素は,北緯43度16 分00秒,東経142度26分30秒に位置しており,北海道の



富良野市付近の森林と考えられる画素である。図5-a は、通常の雲無し合成画像の観測値であるが、雲無し 合成画像処理を行っても、NDVI が楔状に変動する点 (DOY=180, DOY=230から DOY=250) が存在する ことが確かめられる。10日や20日の間に植物のバイオ マス量や葉量が減少した後に元の状態まで増加するこ とはないため、これらの点は雲被覆による影響である と考えられる。また、選択された画素の観測日は考慮 されておらず、期間内の何日目に観測されたデータで あるかが不明であるため、雲無し合成画像の作成期間 である10日間の NDVI は一定とみなされている。した がって、観測値と観測日は1対1で対応していなく、 観測日間隔も不均等である。図 5-bは, BISE 法のみ を適用した結果である。図5-aで見られる雲の影響に よる NDVI の急激な低下 (DOY=180, DOY=230から DOY=250)は補正できているが、観測日を考慮してい ないため,観測値と観測日は1対1で対応していなく, 観測日間隔は同一でなくばらついている。





ここで、この観測日間隔のばらつきを評価するため に、実際に観測日間隔を求めた。図6は、図5と同じ 画素における、観測日間隔の均等化を行っていない データセットの観測日間隔を示している。110日と120 日、200日と210日、250日と260日における観測データ の観測日間隔はわずか1日である一方,80日と90日は 18日,240日と250日の間隔は19日であった。観測日を 考慮せずに10日間雲無し合成画像処理を行った場合, 連続する2時期の観測日間隔は10日間とみなすが,実 際はこのように観測日間隔が大きくばらついているこ とが確認できる。そして,対象とした画素に限っては, この観測日間隔のばらつきに規則性は見られない。こ のように,観測日間隔は大きくばらついているため, 季節特有の植物活動のタイミングを対象とする植物 フェノロジー観測においては誤差要因となる。

図5-cは、このような観測日間隔のばらつきを補正 する MVI 法を適用した結果である。観測値と観測日 は1対1で対応し、観測日間隔が不均等になる問題は 解決されているが、180日目や、230から250日目付近に NDVI が楔状に変化している点が存在し、雲被覆の影 響が残っている。図5-dは、BISE 法と MVI 法を統合 した雑音除去手法を適用した結果である。統合化手法 では、選択した画素の観測日を考慮して補正を行って いるため、観測値と観測日が1対1で対応し、観測日 間隔が均等化されている。さらに。雲被覆の影響と考 えられる NDVI の低下も補正できており、BISE 法と MVI 法の利点を活かした補正ができたことが確認で きる。

このように、時間軸の観点から評価すると、個々の 手法を時系列 NDVI データに適用した場合には、それ ぞれ雑音が残るが、BISE 法と MVI 法を統合した雑音 除去手法を適用することで、雲被覆と観測日間隔の不 均等の問題を同時に補正することが可能となった。

4.2 統合化手法の空間軸での評価

次に,各データセットを空間軸の観点から評価する。 図7は,雑音除去処理を適用していないデータセット と,各雑音除去処理を適用した3種類の時系列NDVI データセットの1998年9月21-30日(DOY=270)にお けるNDVI画像を示している。図7-aは,雑音除去処 理を適用していない画像を示しているが,近畿から北 陸地方にかけてはNDVIが0.1以下で非常に低い値と なっていることが確認できる。ここで,図8は,図7 と同じデータ(DOY=270)による擬似カラー画像を示 しているが,近畿地方から北陸地方にかけて白く帯状 に広がっている雲が確認できる。これは,図7-aにお けるNDVIが低い地域と一致している。また,この時 期は、雲に覆われていない北海道地方のNDVIが0.4 以上の値であることから分かるように、植物が繁茂し ている時期であるため、雲被覆の影響により NDVI が 低くなっていることが確認できる。図7-cは, MVI 法 のみを適用した画像を示しているが, 図7-aと同様に 近畿から北陸地方にかけて NDVI が0.2以下となって おり、雲に覆われていない北海道地方と比較すると NDVI が0.3から0.4程度低く、雲被覆の影響を受けて いることが確認できる。一方, 図7-b, dの画像は, 図7-a, cとは異なり, 近畿地方から北陸地方にかけ ての NDVI であっても0.4以上となっているため、雲 被覆の影響による NDVI の低下を補正できていると 考えられる。

また,図7-a, bでは, 雲無し合成画像処理におい て選択した画素の観測日を用いた補正を行っていない ため、画像中の各画素の観測日は1998年9月21から30 日のいずれかの日に観測された値であり、画素によっ て観測日は異なる。これに対して,図7-c, dは,観 測日を用いて観測日間隔の均等化を行うことで,画像 中の全ての画素について、9月30日の NDVI に補正し ているため、画像中の全ての画素の観測日は同一であ る。BISE法(図7-d)と統合化手法(図7-d)によ る結果を比較すると、酷似しているが、全体的にわず かに統合化手法の方が NDVI が小さい。DOY=270は 紅葉・落葉が始まる時期であり、日ごとに NDVI が低 下していく。そして, BISE 法は 9 月21-30日のいずれ かのNDVIである一方,統合化手法は9月30日の NDVI を推定しているため、観測日の遅い統合化手法 による NDVI の方が小さくなったと考えられる。

このように,統合化手法は,前後の時期の NDVI を 利用して,雲被覆の影響を受けている地域の NDVI を 空間的に補正し,画像中の全ての画素について同一観 測日の NDVI を推定することができた。

4.3 様々な土地被覆への適用可能性

最後に,提案手法の各土地被覆への適用可能性について検討した。図9は,畑作地,二期作(二毛作)地,水田,落葉広葉樹林,常緑針葉樹林,都市域と考えられる画素における NDVI の1年間の時系列変化を示している。それぞれの土地被覆について,雑音除去手法なし,BISE 法のみを適用,統合化手法を適用した結果を示している。畑作地(図9-a),水田(図9-c),落葉広葉樹林(図9-d)では,植物繁茂期である100日から280日目付近において,BISE 法と統合化手法





図7 各雑音除去手法を適用した DOY=270(1998年9月21-30日)における NDVI 画像の比較



は、NDVIが低下している点を補正できていることが 確認できる。また、二期作地(図9-b)では、100日 目と230日目付近の2つのピークが捉えられている。探 索範囲を適切に設定することで、二期作地にも本手法 を適用することができる。しかし、120日目付近で刈り 取りが行われた後は、NDVIが低い状態が一定期間続 くと考えられるが、探索範囲内に存在する NDVIが高



0.1

0 -0.1

0

50

MVI+BISE ----

100

200

BISE -----

Day of Year

(e) 常緑針葉樹林

150

250

300

350

Original ······

い時期 (DOY=210) の値を用いて補正を行っているた め,150から200日目付近の谷部の NDVI が過大に補正 されている可能性がある。これについては,朴ら(1999) の手法を適用することにより,谷部の NDVI を補正す ることが考えられるが,本研究では NDVI のピークが 2 つある土地被覆の谷部の補正については対象としな かった。



図9 各土地被覆の1年間の NDVI 変動における BISE 法と統合化手法の効果



図10 統合化手法と BISE 法をそれぞれ適用した時系列 NDVI データセットにおける各時期の NDVI の差異 (統合化手法-BISE 法)の時系列変動。(CRP:畑作 地, DCRP:二期作地, PAD:水田, DBF:落葉広葉 樹林, ENF:常緑針葉樹林, URB:都市域)

これらの4つの土地被覆とは異なり,常緑針葉樹林 (図9-e)や都市域(図9-f)では,NDVIの明確な 季節変動が見られない。常緑針葉樹林は1年を通して 葉が茂っているため,年間を通じてNDVIが高い状態 が継続する。よって,雲被覆の影響によるNDVIの低 下が明確であり,雲被覆の影響を補正することができ る。一方,都市域では地表面の大部分が人工構造物に 覆われており,植物の割合が少ないため,年間を通し てNDVIが低い。したがって,雲被覆の影響により NDVIが低い。したがって,雲被覆の影響により NDVIが低い。したがって,雲被覆の影響により とが困難であるため,BISE法や統合化手 法によって都市域における雲被覆の影響を補正するに は慎重な検討が必要である。

BISE 法と統合化手法を適用したデータセットの NDVI の時系列変化は、どの土地被覆においても非常 に良く似ているが、両者の NDVI は等しくない。統合 化手法は雲無し合成画像作成期間内での観測日を考慮 した補正を行っているため, NDVI の変化が大きい展 葉時期や紅葉・落葉時期において、特に両者の差は大 きくなると予測できる。図10は、図9と同一の画素に おける,統合化手法と BISE 法をそれぞれ適用した時 系列 NDVI データセットにおける NDVI の差異の時 系列変動を示している。統合化手法を適用したデータ セットの NDVI から, BISE 法を適用したデータセッ トの NDVI を減ずることで、その差を計算した。実際、 NDVI が大きく変化する展葉時期(DOY=100から DOY=200) や紅葉·落葉時期 (DOY=250から DOY= 300)における両者の差異が顕著であり、最大で0.1程 度の違いがある。BISE 法では合成画像作成期間内の いずれかの日の NDVI である一方, 統合化手法は最終

日の NDVI を計算しているため, NDVI が増加する展 葉時期は統合化手法の NDVI の方が大きく, NDVI が 減少する紅葉・落葉時期は統合化手法の NDVI の方が 小さい。なお、二期作地では展葉、落葉時期が他の土 地被覆と異なるため, 差異が最大となる時期が異なっ ている。展葉や紅葉・落葉時期は、植物状態の変化が 大きく、植物フェノロジーを観測する上で重要な時期 であるため, BISE 法と MVI 法の統合化による効果は 大きいと考えられる。また,衛星データによる植物フェ ノロジー観測では、ある一定の NDVI を超える時期を 展葉日として検出する解析 (Suzuki et al., 2003) が 行われることがある。このような解析を行う際に、統 合化手法による NDVI と BISE 法による NDVI の間 に閾値が存在すると、検出される展葉時期は両者で異 なり、10日間雲無し合成画像を用いて解析する場合に は、結果に10日の差異が生じることとなる。

BISE 法や統合化手法では、探索範囲を設定して雲 被覆の影響を除去するが、探索範囲内に観測条件の良 い画素が存在しない場合には、正しく補正ができない 点に留意する必要がある。しかしながら、秋山ら(2003) による Landsat データを用いた快晴データの取得頻 度の研究によると、快晴日データが最も取得しにくい 日本の梅雨から初秋であっても、平均18日間隔で雲に 覆われていないデータが取得できる。したがって、本 研究のように探索範囲を2ヶ月(約60日)に設定して, BISE 法や統合化手法を適用した場合,日本と同等の 快晴率であれば雲の影響は十分に補正できると考えら れる。また、雲被覆の影響でなく植物自体が急激に変 化する森林火災や森林伐採のような突発的な現象が発 生した場合には、数ヶ月から数年単位で NDVI が低い 状態が続き、その期間は探索範囲を超えるため、森林 火災や森林伐採の影響は補正されずに観測することが 期待できる。統合化手法の欠点としては、MVI 法を適 用するために,最大値が原データの最大値よりも低く なることや、2つのピークを持つ二期作地などで谷部 の NDVI を過補正してしまう点が挙げられる。しかし ながら、統合化手法は、BISE 法を単独で用いた場合と 比較すると、雲無し合成画像処理時に選択した画素の 観測日を考慮することで、観測日間隔が均等になるよ うに NDVI を補正することができ、その効果は植物 フェノロジー観測において重要な展葉や紅葉・落葉時 期において顕著であったため、植物フェノロジー観測 に有効であると考えられる。

-14-

5.結論

衛星データによる植物フェノロジー観測では、非植 生起源の NDVI 変動が補正された高頻度の観測デー タが要求される。本研究では、時系列 NDVI データに 含まれる雲被覆と観測日間隔に起因する雑音に着目 し, 雲被覆の影響を補正する BISE 法と, 観測日間隔を 均等化する MVI 法の2つの手法を統合した雑音除去 手法を提案した。AVHRR データを用いて実験を行っ たところ、提案手法は雲被覆の影響を受けた地域の NDVI を空間的に補正することができ,NDVIの時系 列変動においては雲被覆の影響と考えられる NDVI の低下を補正することができた。さらに、各合成画像 作成期間の最終日の NDVI を計算することで、時系列 NDVI データの観測日間隔を均等化することができ た。また,提案手法は,観測値と観測日を1対1で対 応づけることができ, BISE 法と比較すると, 植物フェ ノロジー観測で重要な展葉や紅葉・落葉時期において, その効果が顕著であった。このように、提案手法は、 高頻度での観測が要求される植物フェノロジー観測に おいて重要な観測データの量を保持しつつ、雑音除去 を行うことが可能である。

本手法は、北東アジアを対象として評価を行ったが、 北東アジアと同様の植物活動を仮定できる地域であれ ば、北東アジア以外の地域にも提案手法を適用するこ とができる。また、AVHRR以外にも現在運用中の Terra・Aqua/MODISや、運用が計画されている NPOESS/VIIRS、GCOM-C/SGLIといった高時間分 解能型センサの観測データへの適用や、Enhanced Vegetation Index (EVI)や Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) などの NDVI 以外の植生指標について も提案手法の有効性が期待できる。

本研究では, 雲被覆と観測日間隔の不均等の影響に 起因する雑音のみを対象としたが, AVHRRの観測 データには, その他にも大気の影響や, センサ劣化 (Rao et al., 1995), センサ交代による応答関数の相 違(Trishchenko et al., 2002), BRDFの影響(Los et al., 2005)等による雑音が含まれているため, これ らの影響を補正した後に本手法を適用することで, データの品質をより向上させることが期待できる。今 後は, 提案手法を適用する際に問題となる探索範囲の 決定手法の検討や, 提案手法により構築した時系列 NDVIデータセットを用いた植物フェノロジー観測 を行う予定である。

謝 辞

本研究は,文部科学省による科学技術振興調整費「地 球観測データ統合・情報融合基盤技術の開発」(代表: 柴崎亮介,東京大学教授)の一環として実施されまし た。ここで改めて関係者の皆様に深謝致します。

(受付日2007.7.4, 受理日2008.1.9)

参考文献

- 秋山 侃,川村健介,2003. Landsat5号の快晴データ 取得率に関する農林業分野からの一考察.写真測量 とリモートセンシング, Vol. 42(3), pp.29-34.
- 竹内 渉, 安岡善文, 2004. MODIS データを用いた合 成画像作成手法の開発, 写真測量とリモートセンシ ング, 43(5), pp.36-48.
- 朴 鍾杰,建石隆太郎,松岡真如,1999. AVHRR NDVI 時系列データの高周波ノイズ除去のための TWO 法の提案,写真測量とリモートセンシング,38 (5), pp.36-47.
- 原 政直,岡田周平,八木 浩,森山 隆,重原好次, 杉森康宏,2003.時系列衛星画像のノイズ除去アル ゴリズムの開発と評価,写真測量とリモートセンシ ング,42(5), pp.48-59.
- PaNDA 委員会, 1993. PaNDA アルゴリズムリファレンス.
- a 莉萍,横山隆三,2001. 全アジア地域 NOAA/ AVHRR10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.
- Chen, J., Jonsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushiba, B. and Eklundh, L., 2004. A simple method for reconstructing a high-quiality NDVI timeseries data set based on the Savitzky-Golay filter, *Remote Sens. Environ.*, 91, pp.332-334.
- Cihlar, J., Manak, D. and DIorio, M., 1994. Evaluation of compositing algorithm for AVHRR data over land, *IEEE Trans. Geosci.*, 32(2), pp.427-437.
- Cihlar, J., Ly, H., Li, Z., Chen, J., Pokrant, H. and Huang, F., 1997. Multitemporal multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies-

artifacts and correctons, *Remote Sens. Environ.*, 60, pp.35-57.

- Delbart, N., Toan, T.L., 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.*, 81, pp.1-18.
- Holben, B.N., 1986. Characteristics of Maximum Value Composite images from temporal AVHRR data, *Int. J. Remote Sens.*, 7, pp.1417-1434.
- Jonsson, P. and Eklundh, L., 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data, *IEEE Trans. Geosci.*, 40(8), pp.1824-1832.
- Los, S.O., North, P.R.J., Grey, W.M.F. and Barnsley, M.J. 2005. A method to convert AVHRR normalized difference vegetation index time series to a standard viewing and illumination geometry, *Remote Sens. Environ*, 99, pp.400-411.
- Rao, C.R.N. and Chen, J., 1995. Inter-satellite calibration on linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on the NOAA-7, -9, and 11 spacecraft, *Int. J. Remote Sens.*, 16, pp.1391-1942.
- Reed, B.C., Brown, J.F., VanderZee, D., Loveland, T. R., Merchant, J.W. and Ohlen, D.O., 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery, *J. Vege. Sci.*, 5, pp.703-714.
- Roerink, J.G. and Menenti, M., 2000. Reconstructing cloud free NDVI composites using Fourier analysis of time series, *Int. J. Remote Sens.*, 21(9), pp. 1911–1917.

- Running, S.W. and Nemani, R.R., 1991. Regional hydrologic and carbon balance responses of forests resulting from potential climate change. *Clim. Change*, Vol. 19, pp.349–368.
- 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, *Int. J. Biometeo.*, 47, pp.126-138.
- Taddei, R., 1997. Maximum Value Interpolated (MVI): a Maximum Value Composite method improvement in vegetation index profiles analysis, Int. J. Remote Sens., 18(11), pp.2365-2370.
- Teillet, P.M., Saleous, N. EL, Hansen, M.C., Eidenshink, J.C., Justice, C.O. and Townshend, J.R.G. 2000. An evaluation of the global 1-km AVHRR land dataset, *Int. J. Remote Sens.*, 21(10), pp.1987-2021.
- Trishchenko, P.A., Cihlar, J. and Li, Z., 2002. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors. *Remote Sens. Environ.*, 81, pp.1– 18.
- Viovy, N.C., Arino, O.C. and Belward, A.S., 1992. The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducting noise in NDVI time-series, *Int. J. Remote Sens.*, 13(81), pp.1585-1590.
- White, M.A., Thornton, P.E. and Running, S.W., 1997. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability, *Global Biogeochem. Cycles.*, 11(2), pp. 217-234.