

研究論文

衛星観測で得られた植生指数に対する生理生態学的な考察

岐阜大学流域圏科学研究センター* 永井 信
 筑波大学農林工学系** 奈佐原(西田) 顕郎
 岐阜大学流域圏科学研究センター* 石原光則
 岐阜大学流域圏科学研究センター* 村岡裕由

要旨

衛星観測で得られた正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) から展葉開始日や落葉終了日を推定するためには、衛星観測で得られた NDVI のある値が毎年同じ地表面の植生状態をとらえていることを確認する必要がある。そこで本研究は、冷温帯落葉広葉樹林を対象に、地上の分光放射計で得られた NDVI と、Terra 衛星と Aqua 衛星に搭載した MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) センサで得られた NDVI から 2004 年から 2006 年の展葉開始日と落葉終了日を推定し、そのときに撮影した林冠写真を比較した。地上観測と衛星観測で得られた NDVI から推定した展葉開始日と落葉終了日に撮影した林冠写真は、それぞれ毎年ほぼ同じ地表面の植生状態をとらえていた。この結果、NDVI のある季節のある値は、毎年同じ地表面の植生状態をとらえていることが確認された。地上観測と衛星観測で得られた NDVI は、展葉期に増加し、落葉期に減少した。しかし、衛星観測で得られた NDVI の年最大値と年最小値の中間値を閾値として推定した展葉開始日は、実際よりも平均 20 日早く、落葉終了日は、実際よりも平均 32 日遅かった。

キーワード: MODIS、NDVI、地上検証、フェノロジー、冷温帯落葉広葉樹林

1. はじめに

陸域の炭素収支の高精度な評価は、地球温暖化に伴う気候変動のメカニズムを解明する上で、重要な課題のひとつである。陸域の炭素収支を高精度に評価するためには、陸域の植生の現存量の分布や生産量の変動を高精度に評価する必要がある。陸域の衛星観測は、植生の現存量の分布や生産量の変動を長期的かつ全球規模で評価している。とりわけ、衛星観測で得られた正規化植生指数 (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) は、現在まで約 26 年間に渡り、地球上のデータが毎日蓄積された利点があり、NDVI の長期的なトレンド (e.g., Kawabata *et al.* 2001, Xiao and Moody 2005)、全球規模の気候変動と NDVI の関連 (e.g., Myneni *et al.* 1998, Los *et al.*, 2001) 及び、展葉開始日の推定 (e.g., Schwartz *et al.* 2002, Delbart *et al.*, 2006) 等、数多くの研究が行われている。

けれども、これらの研究で得られた結果に対する地上

検証は不十分である。例えば、衛星観測で得られた NDVI から展葉開始日や落葉終了日を長期的かつ広域的に推定するためには (e.g., White *et al.* 2002)、NDVI のある値が毎年必ず同じ地表面の植生状態をとらえている必要がある。そのためには、まず、衛星観測で得られた NDVI のある値が毎年同じ地表面の植生状態をとらえているかどうかを地上で検証する必要がある。

そこで本研究は、NDVI から展葉開始日及び落葉終了日を推定し、そのときの地表面の植生状態との関連を日本の冷温帯落葉広葉樹林における野外観測によって明らかにした。はじめに、地上の林冠直上に設置した分光放射計と、米国の地球観測システム衛星の Terra 及び Aqua に搭載した MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) センサのそれぞれで NDVI を得た。つぎに、地上観測と衛星観測で得られた NDVI から、それぞれ展葉開始日と落葉終了日を推定し、そのときに自動定点撮影した林冠上部の写真と比較した。

2. 使用データ

2.1 対象サイトと解析期間

AsiaFlux (<http://asiaflux.net/>) に属する冷温帯落葉広葉樹林サイト高山 (北緯 36 度 08 分、東経 137 度 25 分、

* 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1

** 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1

(Correspondence: nagai@green.gifu-u.ac.jp)

標高 1420 m)を対象とした。高山サイトでは、高さ 25 m のフラックスタワーにおいて、CO₂フラックス、熱輸送及び、気象観測 (Yamamoto *et al.* 1993, Saigusa *et al.* 2002)、また、森林上部へ到達が可能な高さ 18 m のタワー (以後、生態系櫓と表記)において、樹木の生理観測 (個葉の光合成や呼吸) (Muraoka and Koizumi 2005) 及び、衛星データの検証を目的としたフェノロジー観測が行われている (土田ほか 2005, Nishida 2007)。高山サイトの年平均気温は 7.2 度、年平均降水量は 2275 mm (1980 年から 2002 年までの平均) である。12 月上旬から 4 月下旬まで積雪があり、最大積雪深度は 100-180 cm である (Mo *et al.* 2005)。林冠部の優占種は、ミズナラ (*Quercus crispula*) とダケカンバ (*Betula ermanii*) であり、林床は、ササ (*Sasa senanensis*) で被覆されている (Ohtsuka *et al.* 2005)。森林上部の樹高は、13-20 m である。

解析期間は、2004 年 1 月 1 日から 2006 年 12 月 31 日までとした。

2.2 地上観測データ

林冠上部のフェノロジーと衛星通過時刻の天空状態を観測するために、自動定点撮影した林冠写真と全天空写真を用いた。林冠写真と全天空写真は、自動撮像型魚眼デジタルカメラ (Automatic-capturing Digital Fisheye Camera: ADFC) システム (デジタルカメラ: Nikon Coolpix 4300/4500、魚眼レンズ: Nikon FC-E8) を用いて、撮影した (Nishida 2007)。生態系櫓の高さ 18 m において下向きに設置した ADFC システムは、日中 90 分毎に林冠上部を撮影している (林冠写真)。生態系櫓の高さ 18 m において上向きに設置した ADFC システムは、日中 2-10 分毎に天空を撮影している (全天空写真)。

雲被覆やエアロゾル等の影響が無い林冠上部の NDVI を得るために、半球分光放射計 (HemiSpherical Spectro-Radiometer: HSSR) システム (分光放射計: 英弘精機 MS-720、回転装置: 早坂理工 CHS-AR) を用いて、空と林冠の分光放射量を測定した (Nishida 2007)。生態系櫓の高さ 18 m に HSSR システムを設置した。10 分毎に、HSSR が上向きと下向きに回転し、その 10 分間で、林冠の分光放射量 (下向き) を 1 回、空の分光放射量 (上向き) を 4 回、2 分毎に測定した。林冠の分光放射量と、その前後に測定した空の分光放射量を用いて、林冠の分光反射率を 10 分毎に計算した。HSSR で得られた 10 分毎の林冠の分光反射率を用いて、MODIS の可視赤バンド (620-670 nm) と近赤外バンド (841-876 nm) に対応する反射率を計算し、日平均を求めた。これらの反射率データを用いて、式(1)により NDVI を求めた。

$$NDVI = (\text{近赤外} - \text{可視赤}) / (\text{近赤外} + \text{可視赤}) \quad (1)$$
以後、地上観測 (HSSR) で得られた NDVI を $NDVI_{HSSR}$ と呼ぶ。

全天空写真は、ADFC システムを導入する前の 2004 年 1 月 1 日から同年 3 月 28 日まで欠測を含む。また、地上観測データは、観測システムのトラブル等を原因とする欠測を時々含む。

2.3 衛星観測データ

衛星観測で得られた NDVI を得るために、高山サイトのデータを含んだ Terra/Aqua MODIS データを用いた。"NASA LPDAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center)" から配布されている日値の地表面反射率データ (MOD/MYD09GQK プロダクト; 可視赤バンドと近赤外バンド、空間分解能: 250m × 250m) を用いて、高山サイトのピクセル値を抽出した。衛星通過時刻の雲被覆を判定するために、MOD/MYD09GQK プロダクトに付属する品質保証データ ("MODIS 250m daily surface reflectance QA science (QC_250m)") を用いた。衛星通過時刻を判定するために、"NASA LAADS (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System)" から配布されている日値の MODIS L1B データ (2004 年と 2005 年は MOD/MYD02SSH プロダクト; 空間分解能: 5km × 5km、2006 年は MOD/MYD02QKM プロダクト; 空間分解能: 250m × 250m) を用いた。

衛星データには、雲被覆やエアロゾル等を原因としたノイズが残存しているため、これらのノイズの影響が少ない NDVI を次の手順で得た。はじめに、QC_250m において、(1)すべてのバンドが理想的な品質で構成され、かつ、(2)雲被覆が無い MOD/MYD09GQK プロダクトの反射率データのみを抽出し、NDVI を計算した。以後、QC_250m によって品質が保証された NDVI を $NDVI_{QC}$ と呼ぶ。つぎに、 $NDVI_{QC}$ に対して、衛星通過時刻の前後 5 分以内に撮影した全天空写真を目視により判定し、快晴日に得られた $NDVI_{QC}$ のみを抽出した。全天空写真に、ほとんど雲が無い場合、もしくは、積雲がぼつぼつ浮かぶ程度を快晴、それ以外を曇天と判定した。以後、衛星通過時刻の天空状態が快晴であることが確認された $NDVI_{QC}$ を $NDVI_{QC+ADFC}$ と呼ぶ。

3. 方法

地上観測で得られた $NDVI_{HSSR}$ 及び、衛星観測 (Terra 及び Aqua) で得られた $NDVI_{QC+ADFC}$ から展葉開始日と落葉終了日を判定する閾値は、次の手順で推定した

(White *et al.* 2002)。はじめに、各年において、 $NDVI_m = (NDVI \text{の年最大値} - NDVI \text{の年最小値})/2$ を求めた。3年間の $NDVI_m$ の平均を閾値: $NDVI_t$ とした。つぎに、各年において、 $NDVI$ が初めて $NDVI_t$ を上回った(下回った)日を展葉開始日(落葉終了日)と推定した。 $NDVI_{QC+ADFC}$ は、日々の連続的なデータが得られないため、 $NDVI_t$ を前後する $NDVI_{QC+ADFC}$ を用いて線形補間し、展葉開始日及び、落葉終了日を推定した。2004年の1月から3月にかけて全天空写真の欠測があるため、2004年の $NDVI_{QC+ADFC}$ の最小値は、 $NDVI_{QC}$ の最小値に置き換えた。

また、実際に生じた展葉開始と落葉終了は、林冠写真を目視により判定した。展葉開始日は、展葉が早い樹種のひとつであるウリハダカエデ(*Acer rufinerve*) (図1にみられる白の丸)が芽吹いた日(図1(a))とした。落葉終了日は、落葉が最も遅いミズナラ(図1にみられる黒の丸)が完全に落葉した日(図1(f))とした。

4. 結果

はじめに、地上観測で得られた $NDVI_{HSSR}$ と衛星観測で得られた $NDVI$ ($NDVI_{QC}$ と $NDVI_{QC+ADFC}$) の時系列を日毎の時間スケールで示した。また、展葉開始日と落葉終了日を推定した閾値及び、それらの閾値から推定した展葉開始日と落葉終了日に撮影した林冠写真を示した(図2)。さらに、林冠写真から判定した展葉開始日と落葉終了日、地上観測と衛星観測で得られた $NDVI$ から推定した展葉開始日と落葉終了日を表1にまとめた。

QC_{250m} によって品質が保証された $NDVI_{QC}$ は、3年間のうち、Terra衛星で25%、Aqua衛星で19%得られた。また、 QC_{250m} によって品質が保証され、かつ、衛星通過時刻の天空状態が快晴であった $NDVI_{QC+ADFC}$ は、全天空写真の欠測期間(2004年の1月から3月まで)を除く3年間のうち、Terra衛星で15%、Aqua衛星で11%得られた。 $NDVI_{HSSR}$ と $NDVI_{QC+ADFC}$ は、3月から6月にか

けて増加し、9月から12月にかけて減少する季節変動のパターンを示した。 $NDVI_{QC+ADFC}$ に選択されなかった $NDVI_{QC}$ は、 $NDVI_{QC+ADFC}$ の季節変動から大きく外れたデータを含んだ。

$NDVI_{HSSR}$ から推定した展葉開始日と落葉終了日は、林冠上部では葉が無く幹と枝のみで(落葉終了日には、ミズナラの黄葉が僅かに残る)、林床ではササが被覆した状態であった(但し、ミズナラの黄葉がかなり残る2006/10/31は除く)。 $NDVI_{QC+ADFC}$ から推定した展葉開始日は、林冠上部では葉が無く幹と枝のみで、林床では、残雪とササが被覆した状態、同じく、落葉終了日は、林冠上部では葉が無く幹と枝のみで、林床では、雪が被覆した状態であった。但し、Terra衛星で得られた $NDVI_{QC+ADFC}$ から推定した2005年の落葉終了日(9/21)は、青々とした葉がかなり残った状態であった。また、Aqua衛星で得られた $NDVI_{QC+ADFC}$ から推定した2005年の落葉終了日(11/28)は、林冠上部では葉が無く幹と枝のみで、林床では、ササが被覆した状態であった。Terra衛星で得られた $NDVI_{QC+ADFC}$ は、2005年9月23日に $NDVI_{QC+ADFC}$ の季節変動から大きく逸れたデータを含んだため、 $NDVI_{QC+ADFC}$ が再度、閾値を下回った日(11/30)の林冠写真を示したところ、他の年の落葉終了日と同様に、林冠上部では葉が無く幹と枝のみで、林床では、雪が被覆した状態であった。

つぎに、 $NDVI_{HSSR}$ と $NDVI_{QC+ADFC}$ から推定した展葉開始日(落葉終了日)と、実際の展葉開始日(落葉終了日)を比較した(図3)。 $NDVI_{HSSR}$ から推定した展葉開始日と落葉終了日は、2006年を除くと、実際とあまり差がみられなかった。けれども、 $NDVI_{QC+ADFC}$ から推定した展葉開始日は、Terra衛星で平均18日、Aqua衛星で平均23日、実際よりも早かった。同様に、落葉終了日は、Terra衛星で平均33日、Aqua衛星で平均31日、実際よりも遅かった(Terra衛星で得られた $NDVI_{QC+ADFC}$ から推定した2005年の落葉終了日(9/21)は明らかにおかしいので、再度推定した11/30を採用した)。

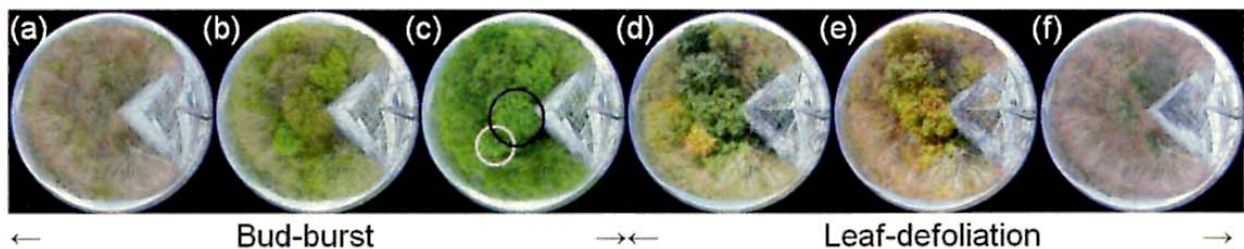


図1 林冠写真がとらえたフェノロジー(a: 展葉開始日、b: 展葉中、c: 展葉終了、d: 落葉開始、e: 落葉中、f: 落葉終了日)。展葉開始日は、図(c)の白丸で囲んだウリハダカエデが芽吹いた状態: 図(a)とした。落葉終了日は、図(c)の黒丸で囲んだミズナラの葉が完全に落葉した状態: 図(f)とした。

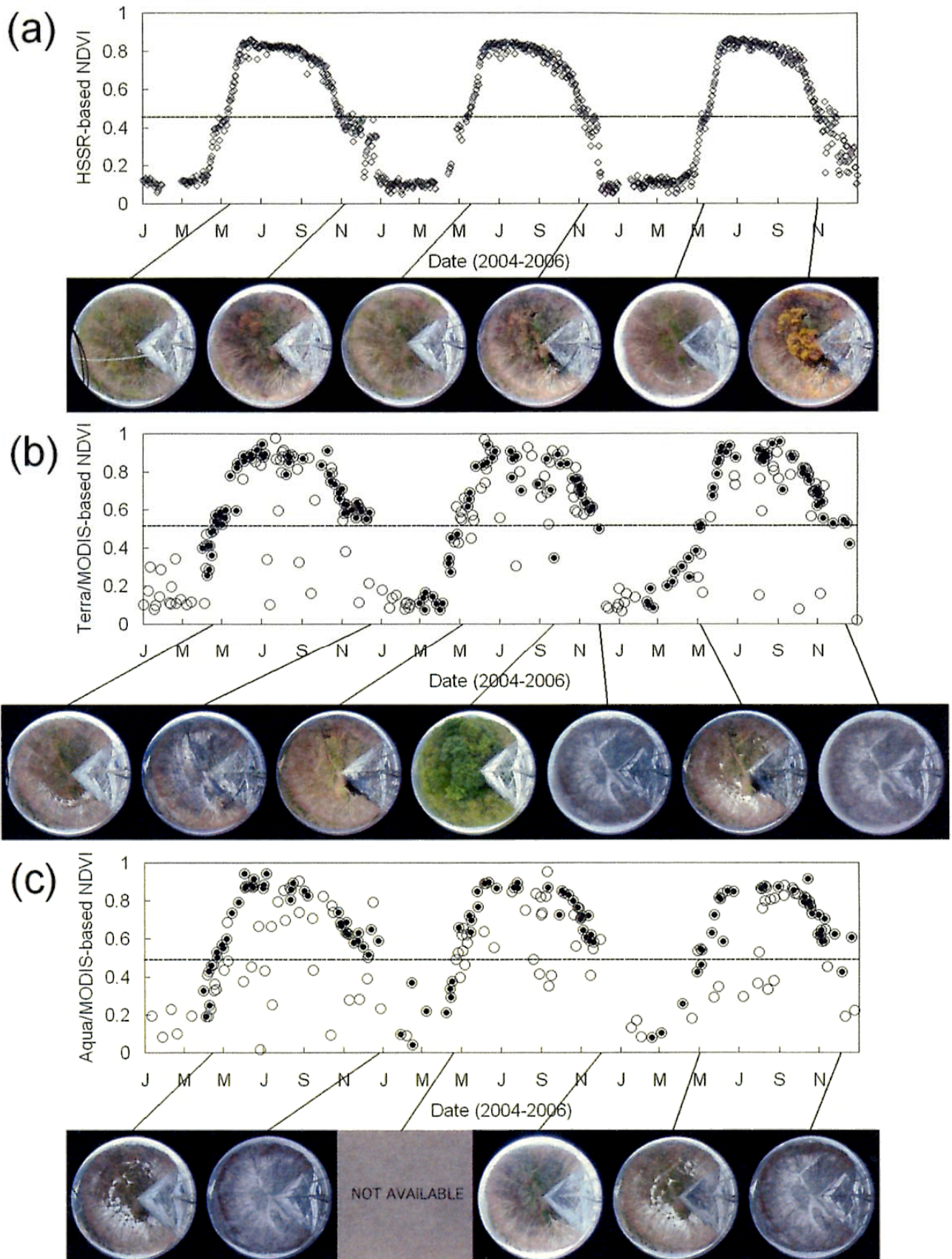


図2 (a)地上観測で得られた $NDVI_{HSSR}$ と、(b)Terra 及び(c)Aqua 衛星観測で得られた $NDVI_{QC}$ (白丸)と $NDVI_{QC+ADFC}$ (黒丸)の時系列のまとめ。展葉開始日と落葉終了日を推定する閾値を点線で示した。また、地上観測と衛星観測で得られた NDVI から推定した展葉開始日と落葉終了日に撮影した林冠写真をそれぞれ示した。

表1 林冠写真から判定した展葉開始日と落葉終了日及び、地上観測(HSSR)と衛星観測(Terra/Aqua)で得られたNDVIから推定した展葉開始日と落葉終了日のまとめ。括弧内は、1月1日を1日目としたときの通算日を示した。

	2004		2005		2006	
	展葉開始日	落葉終了日	展葉開始日	落葉終了日	展葉開始日	落葉終了日
林冠写真	5/9 (130)	11/4 (309)	5/18 (138)	11/14 (318)	5/22 (142)	11/8 (312)
NDVI _{HSSR}	5/10 (131)	11/3 (308)	5/13 (133)	11/10 (314)	5/7 (127)	10/31 (304)
Terra/NDVI _{QC+ADFC}	4/20 (111)	12/17 (352)	5/3 (123)	9/21 (264)	5/3 (123)	12/17 (351)
Aqua/NDVI _{QC+ADFC}	4/17 (108)	12/27 (362)	4/22 (112)	11/28 (332)	5/1 (121)	12/3 (337)

5. 考察

地上観測で得られた NDVI から推定した展葉開始日(落葉終了日)は、実際の展葉開始日(落葉終了日)とほぼ一致したが、衛星観測で得られた NDVI から推定した展葉開始日は、実際よりも約 20 日早く、落葉終了日は実際よりも約 15 日から 50 日遅かった。けれども、地上観測と衛星観測で得られた NDVI は、ともに同じような季節変動のパターンを示した。地上観測と衛星観測で得られた NDVI から推定した展葉開始日(落葉終了日)に大きな差がみられた原因として、センサの計測範囲と感度の違いが考えられる。林冠直上に設置した分光放射計の計測範囲は、生態系櫓の近傍であるのに対して、MODIS センサの空間分解能は 250 m × 250 m である。衛星データのピクセル値は、生態系櫓を常に中心としたものではなく、生態系櫓を中心とする半径約 100-500 m 以内の植生の平均をとらえていると考えられる。生態系櫓から半径 500 m 以内には、優占種であるミズナラやダケカンバよりも展葉が早いブナ (*Fagus crenata*) や常緑林が僅かに含まれる。従って、衛星観測で得られた NDVI は、林冠写真でみられた樹種ばかりではなく、ブナや常緑林のフェノロジーもとらえている可能性がある。また、過去の研究 (Schwartz *et al.* 2002, White *et al.* 2002, Delbart *et al.* 2006) では、NOAA 衛星に搭載した Advanced Very High-Resolution Radiometer (AVHRR) センサを用いたのに対して、本研究では、林冠直上に設置した分光放射計と MODIS センサを用いた。センサの違いは、波長分解能と空間分解能の違いを生むため、同一の植生であっても異なる感度でフェノロジーをとらえている可能性がある。

我々は、展葉開始日等、限定した地上観測データのみを用いて衛星データの検証を行ったのではなく (Schwartz *et al.* 2002, Delbart *et al.* 2006)、林冠上部のフェノロジーや分光放射量を長期連続的に観測した上で、衛星観測で得られた NDVI のある季節のある値が、毎年ほぼ同じ地表面の植生状態をとらえていることを明らか

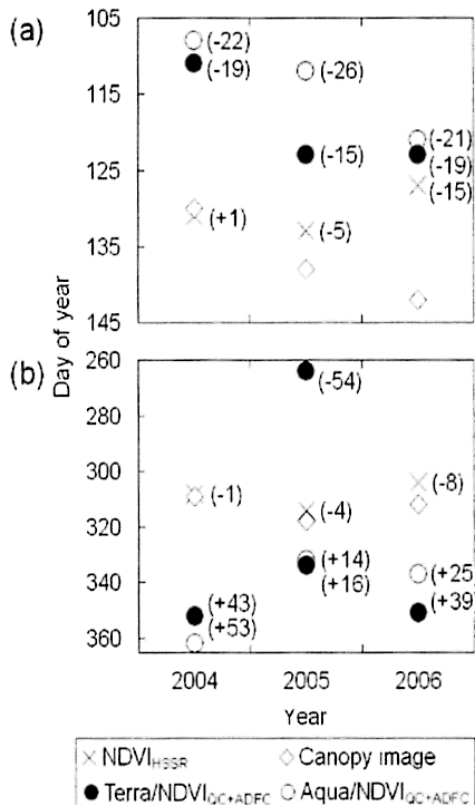


図3 林冠写真で判定した実際の展葉開始日と落葉終了日(ひし形印)及び、NDVIから推定した展葉開始日と落葉終了日のまとめ。地上観測で得られた NDVI_{HSSR} の結果を×印、Terra 衛星で得られた NDVI_{QC+ADFC} の結果を黒丸印、Aqua 衛星で得られた NDVI_{QC+ADFC} の結果を白丸印で示した。括弧内は、林冠写真で判定した実際の展葉開始日(落葉終了日)と NDVI から推定した展葉開始日(落葉終了日)の差を示した(−が早く、+が遅い)。Terra 衛星で得られた NDVI から推定した 2005 年の落葉終了日(9/21: 264 日目)は、衛星データに含まれるノイズの影響を受けているため、再度推定した日(11/30: 334 日目)も示した。

にした。この結果は、衛星観測で得られた NDVI のある季節のある値から地表面の植生状態を一意的に推定する可能性を示唆する。

現在、我々は、衛星データがとらえた生理生態現象は何であるかを明らかにするために、本稿で述べた林冠上部の定点観測や分光放射測定以外にも、様々な地上観測を長期的に行っている。例えば、樹種のシュートを対象としたフェノロジー観測(葉の枚数、大きさ、角度、色素量の測定)、個葉の分光測定、光合成有効放射量 (Photosynthetically Active Radiation: PAR) 等がある。これらのデータが意味する生理生態現象を一つずつ明らかにすることで、分光、すなわち衛星がとらえた、生理生態現象とは何であるかを現在よりも定量的に示すことが可能になるであろう。

けれども、衛星観測で得られた NDVI には、主に雲被覆に起因したノイズが残存し、これらのノイズが原因で地表面の植生状態を誤って推定する可能性があることに十分注意しなければならない。

6. 結論

本研究は、衛星観測で得られた NDVI のある値が、毎年同じ地表面の植生状態をとらえているかどうかを日本の冷温帯落葉広葉樹林における野外観測で検証した。地上観測と衛星観測で得られた NDVI は、同様な季節変動のパターンを示した。地上観測と衛星観測で得られた NDVI から推定した展葉開始日と落葉終了日に撮影した林冠上部の写真は、それぞれ毎年ほぼ同じ地表面の植生状態をとらえていた。この結果、NDVI のある季節のある値は、毎年同じ地表面の植生状態をとらえていることが確認された。けれども、衛星観測で得られた NDVI の年最大値と年最小値の中間値を閾値として推定した展葉開始日は実際よりも平均 20 日早く、落葉終了日は実際よりも平均 32 日遅かった。

謝辞

高山サイトの観測では、車戸憲二氏、宮本保則氏をはじめとする岐阜大学流域圏科学研究センター及び、Phenological Eyes Network (PEN)の協力を得た。本研究は、環境省地球環境研究総合推進費「21 世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の総合的炭素収支研究」と、文部科学省研究拠点形成費補助金(21 世紀 COE プログラム「衛星生態学創生拠点」)の支援を受けた。以上の協力及び、2 名の匿名の査読者と編集者に感謝の意を表す。

引用文献

- 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 Sensing of Environment*, Vol. 101, pp. 52-62.
- Kawabata, A., Ichii, K., and Yamaguchi, Y., 2001, Global monitoring of interannual changes in vegetation activities using NDVI and its relationships to temperature and precipitation. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22, pp. 1377-1382.
- Los, S. O., Collatz, G. J., Bounoua, L., Sellers, P. J., and Tucker, C. J., 2001, Global interannual variations in sea surface temperature and land surface vegetation, air temperature, and precipitation. *Journal of Climate*, Vol. 14, pp. 1535-1549.
- Mo, W., Lee, M-S., Uchida, M., Inatomi, M., Saigusa, N., Mariko, S., and Koizumi, H., 2005, Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural Forest and Meteorology*, Vol. 134, pp. 81-94.
- Muraoka, H., and Koizumi, H., 2005, Photosynthetic and structural characteristics of canopy and shrub trees in a cool-temperate deciduous broadleaved forest: Implication to the ecosystem carbon gain. *Agricultural Forest and Meteorology*, Vol. 134, pp. 39-59.
- Myneni, R. B., Nemani, R. R., and Running, S. W., 1997, Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transaction Geoscience Remote Sensing*, Vol. 35, pp. 1380-1393.
- Myneni, R. B., Tucker, C. J., Asrar, G., and Keeling, C. D., 1998, Interannual variations in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. D6, pp. 6145-6160.
- Nishida, K., 2007, Phenological Eyes Network (PEN) — A validation network for remote sensing of the terrestrial ecosystems. *AsiaFlux Newsletter Issue*, Vol. 21, pp. 9-13 (available online at <http://www.asiaflux.net/>).
- Ohtsuka, T., Akiyama, T., Hashimoto, Y., Inatomi, M., Sakai, T., Jia, S., Mo, W., Tsuda, S., and Koizumi, H., 2005, Biometric based estimates of net primary production (NPP) in a cool-temperate deciduous forest stand beneath a flux tower. *Agricultural Forest and*

- Meteorology*, Vol. 134, pp. 27-38.
- Saigusa, N., Yamamoto, S., Murayama, S., Kondo, H., and Nishimura, N., 2002, Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural Forest and Meteorology*, Vol. 112, pp. 203-215.
- Schwartz, M. D., Reed, B. C., and White, M. A., 2002, Assessing satellite-derived start-of season measures in the conterminous USA. *International Journal of Climatology*, Vol. 22, pp. 1793-1805.
- 土田聡・西田顕郎・岩男弘毅・川戸渉・小熊宏之・岩崎晃, 2005, Phenological Eyes 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-. 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 25, No. 3, pp. 282-288.
- White, M. A., Nemani, R. R., Thomton, P. E., and Running, S. W., 2002, Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest. *Ecosystems*, Vol. 5, pp. 260-273.
- Xiao, J., and Moody, A., 2005, Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982-1998. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 26, No. 11, pp. 2371-2390.
- Yamamoto, S., Murayama, S., Saigusa, N., and Kondo, H., 1999, Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus*, Vol. 51B, pp. 402-413.

Contributed paper

Ecophysiological consideration on the satellite-based vegetation index

Shin NAGAI*, Kenlo Nishida NASAHARA**, Mitsunori ISHIHARA* and Hiroyuki MURAOKA*

River Basin Research Center, Gifu University*

Institute of Agricultural and Forest Engineering, University of Tsukuba**

(Received 27 December 2007; in final form 2 April 2008)

Summary

In order to evaluate the dates of bud-burst and leaf defoliation by using the satellite-based Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), we need to identify that a certain value of the satellite-based NDVI showed the same phenological stage for every year. In the present study, we estimated the dates of bud-burst and leaf defoliation from 2004 to 2006 in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest by using the ground-based NDVI, which was observed by the spectroradiometer situated above the canopy, and the satellite-based NDVI, which was obtained by the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) sensors onboard Terra and Aqua satellites. Then we confirmed thus estimated dates of bud-burst and leaf defoliation with the canopy photographs taken in the forest. The canopy photographs taken on the estimated dates of bud-burst and leaf defoliation showed the similar phenological status of the forest canopy for every year. This means that a certain value of NDVI may indicate the similar phenological stages for every year. The ground- and the satellite-based NDVIs increased in the bud-burst period and decreased in the leaf defoliation period. However, when we estimated the dates of bud-burst and leaf defoliation by using the threshold value, which was the midpoint between the annual maximum NDVI and the annual minimum NDVI, the estimated date of bud-burst was 20 days earlier than the ground observation and the estimated date of leaf defoliation was 32 days later than the ground observation.

Key Words: MODIS, NDVI, ground-truth, phenology, cool-temperate deciduous broad-leaved forest

* 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193, Japan

** 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan

(Correspondence: nagai@green.gifu-u.ac.jp)