

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710021

研究課題名(和文) 広葉樹林における衛星観測による生態系機能評価の高精度化

研究課題名(英文) Development of evaluation of ecosystem functioning in deciduous forests by satellite remote sensing

研究代表者

永井 信(NAGAI, Shin)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・主任研究員

研究者番号：70452167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：常緑広葉樹林と落葉広葉樹林を対象とした、衛星リモートセンシング観測の高精度化を目的として、ボルネオと日本の生態系観測サイトにおいて近接リモートセンシングによる長期連続的な植物季節(フェノロジー)観測をおこなった。その結果得た地上真値に基づいて、衛星リモートセンシングにより毎日観測された分光植生指数データを解析し、ボルネオと日本を対象に植生の時空間分布の変動を高精度に検出した。その結果、(1)デジタルカメラによるフェノロジー観測の有用性、(2)落葉期のリモートセンシング観測の不確実性、(3)日本の開葉と落葉の期日の時空間分布の特徴、(4)ボルネオの人間活動に伴う植生被覆の年々変動を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To develop the satellite remote-sensing in evergreen and deciduous broad-leaved forests, we performed long-term continuous phenological observations by near-surface remote-sensing techniques in ecosystem sites in Borneo and Japan. Based on the ground-truthing obtained from our field studies, we accurately detected the spatio-temporal variability of vegetation in Borneo and Japan by analyzing the satellite-observed daily vegetation index data. In consequence, we identified that (1) usability of phenological observations by using digital cameras, (2) uncertainties of remote-sensing observations in a leaf-fall period, (3) characteristics of spatio-temporal variability of the timing of leaf-flush and leaf-fall in Japan, and (4) year-to-year variability of land cover changes by human activities in Borneo.

研究分野：植生気候学、リモートセンシング、生態学、生気象学

キーワード：衛星リモートセンシング観測 地上検証観測 分光植生指数 生態変化 落葉広葉樹林 常緑広葉樹林  
フェノロジー(生物季節)画像 分光放射測定

### 1. 研究開始当初の背景

全球規模を対象とした炭素・水収支を高精度に評価するためには、全球の陸域炭素の約 20%、純一次生産量の約 30% を占める (Prentice et al. 2001) 常緑広葉樹林 (熱帯多雨林) と、開葉や落葉によって光合成生産量が変動する落葉広葉樹林の植物季節 (フェノロジー) の時空間分布の動態を高時間・空間分解能で観測することが重要な研究課題のひとつになる。これを遂行するためには、現在まで約 30 年間にわたり毎日の観測データが蓄積されている衛星リモートセンシング観測で得られた分光植生指数による解析・評価が有益である。

しかしながら、衛星観測データは雲被覆や大気のエアロゾルなどに起因したノイズを含むばかりではなく、衛星観測データがとらえる生態現象 (植物季節; フェノロジー) や植生の機能 (光合成や蒸発散など) との対応関係について十分な地上真値情報と生態学的な解釈が得られていないという問題点がある。この問題点を解決するためには、観測タワーに設置した観測機器による森林上部を対象とした連続的な分光特性とフェノロジー画像の取得・CO<sub>2</sub>フラックス観測・微気象観測および、人間による定期的な生態パラメータの観測を統合した地上検証を長期連続的におこない、その結果得られた観測データの対応関係を相互に解析・評価する必要がある。

このような統合的地上観測は、本研究の立案以前より、研究代表者が中心的かつ継続的に研究を推進している岐阜県の落葉広葉樹林サイト: 高山 (たかやま) など世界のわずか数地点のみでおこなわれている状況である。とりわけ、熱帯多雨林での統合的地上観測は、世界で類をみない挑戦的な研究となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) マレーシア (ボルネオ) の常緑広葉樹 (熱帯多雨) 林と日本の落葉広葉樹林の観測サイトにおいて、統合的地上観測をおこない、リモートセンシング観測で得られた分光植生指数の変動と、フェノロジー・植生の機能・気象値の時間変化との対応関係を個体から群落の空間スケールかつ、毎日から経年の時間スケールで明らかにすること。および、(2) 上述(1)の結果導きだされる、リモートセンシング観測に関する普遍性・特異性・不確実性に基づいて、アジアの広葉樹林の時空間分布の動態を衛星リモートセンシング観測で得られた分光植生指数データの解析・評価により高時間・空間分解能で明らかにすることである。

### 3. 研究の方法

本研究は、(1) ランビルヒルズサイト: マレーシア (ボルネオ) の常緑広葉樹 (熱帯多雨) 林と高山サイト: 日本の落葉広葉樹林において、衛星地上検証を目的とした長期連続

的な近接リモートセンシング観測をおこない、(2) その結果得た地上真実に基づいて、ボルネオと日本を対象に、衛星リモートセンシングにより毎日観測された分光植生指数データの解析をおこない、植生の時空間分布の変動を高精度に評価した。次節で述べる研究成果を得るために、次の(1)から(5)項をおこなった。

(1) 落葉広葉樹林における開葉と落葉の期日の長期的変動と気象変化の対応関係:

高山サイトにおいて、群落全体を対象に 2004 年から 2011 年の毎日撮影されたフェノロジー画像から抽出した赤・緑・青のデジタルナンバー (RGB 値) の季節変化を調査し、開葉と落葉の期日を検出した。これらの期日と気温との対応関係を調査し、群落全体を対象とした開葉と落葉の期日を推定するモデルを構築した。フェノロジー観測史前を含む、1961 年から 2011 年の開葉と落葉の期日を過去の気温データを用いて推定した。

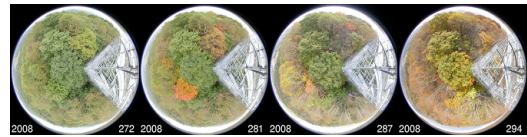


図 1. 高山サイトにおいて毎日撮影されたフェノロジー画像の例 (2008 年の落葉期)

(2) 常緑広葉樹林におけるデジタルカメラによる樹種ごとのフェノロジーの特徴検出:

ランビルヒルズサイトにおいて、群落全体と各樹種を対象に 2013 年から 2014 年の毎日撮影されたフェノロジー画像から抽出した RGB 値の時間変化の特徴を調査した。これらの特徴と群落全体を対象に分光センサーで観測された分光反射率や植生指数の対応関係を調査した。



図 2. ランビルヒルズサイトのクレーン観測タワーの地上高 76m に設置された自動撮像型定点カメラシステム

(3) 落葉広葉樹林におけるリモートセンシング観測による落葉の期日の検出の高精度化:

高山サイトにおいて、落葉期を対象に、地上と衛星リモートセンシングにより毎日観測された分光反射スペクトルや植生指数データ、フェノロジー画像および、リター (落葉落枝) の時空間分布の対応関係を調査した。

(4) 衛星リモートセンシング観測による日本の落葉林の開葉と落葉の期日の時空間分布の特徴の検出：

上述(3)で得られた地上真値に基づいて、日本を対象に、500mの空間分解能を持つ Terra と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーにより毎日観測された GRVI を用いて、2003年から2012年の開葉と落葉の期日（機能的な着葉期間）の時空間分布を検出し、緯度と標高に沿った環境傾度との対応関係を調査した。

(5) 常緑広葉樹林における衛星地上検証と衛星リモートセンシング観測による植生の時空間分布の変動の検出：

ランビルヒルズサイトにおいて、群落全体を対象に、2013年の毎日撮影されたフェノロジー画像や衛星観測時刻に撮影された天空写真を用いて、Terra と Aqua 衛星に搭載された MODIS センサーにより毎日観測された分光植生指数データに関する地上検証をおこなった。また、ボルネオを対象に、快晴条件下における衛星観測の頻度の時空間分布の特徴を調査した。加えて、GRVI が 0 未満は緑の葉が無い状態であるという特性を利用して、植生被覆の空間分布の年々変動を検出した。

#### 4. 研究成果

前節で述べた研究手法により、次の5項を明らかにした。

(1) 落葉広葉樹林における開葉と落葉の期日の長期的変動と気象変化との対応関係：

落葉の期日は1年あたり0.27日晩期化しているのに対して、開葉の期日には長期的な変動はみられないことが明らかになった。既存研究でも指摘されている、日本は北米やヨーロッパとは異なり、開葉の期日の早期化と比べて、落葉の期日の晩期化が明瞭であるという温暖化に対する植生フェノロジーの応答性の特徴を詳細かつ長期連続的な観測データに基づいて裏付けた。

以上の結果は、Nagai et al. (2013)として出版された。

(2) 常緑広葉樹林におけるデジタルカメラによる樹種ごとのフェノロジーの特徴検出：

群落全体を対象とした RGB 値や分光反射率と植生指数は年間を通してほぼ一定の値を示したのに対して、樹種ごとを対象とした RGB 値は、樹種ごとに異なる開花や開葉の期日や様式に起因した季節変化の特徴を検出可能であることが明らかになった。

今後は、常緑広葉樹林の多地点あるいは様々な樹種を対象にデジタルカメラによるフェノロジー観測を積極的におこなうことによって、これまで十分に解明されていない常緑広葉樹林（熱帯多雨林）の植生フェノロジーや機能と気象気候変動の対応関係の理解が促進されることが期待される。

以上の結果は、Nagai et al. として投稿中である。

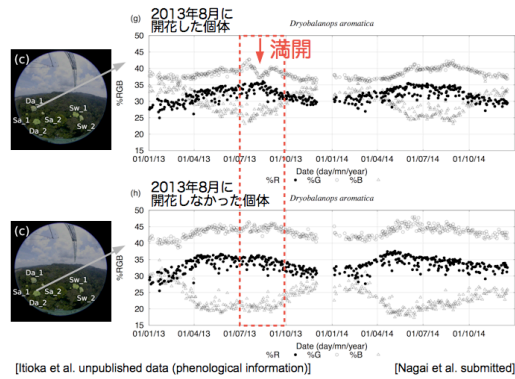


図3. RGB 値による植生フェノロジーの検出 (R・G・B 値それぞれの全体に対する割合の時間変化を示している)

(3) 落葉広葉樹林におけるリモートセンシング観測による落葉の期日の検出の高精度化：

可視赤と可視緑の観測バンドから構成される Green-Red Vegetation Index (GRVI) は、既存研究で良く利用されている、近赤外と可視赤や可視青の観測バンドから構成される Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) や Enhanced Vegetation Index (EVI) と比べて、落葉の期日を高精度に検出可能であることが明らかになった。

落葉期は、開葉期と比べて、リモートセンシング観測の不確実性が大きいことは以前より指摘されていた。本研究の結果、その詳細な原因が地上真値に基づいて明らかになり、落葉期におけるリモートセンシング観測が高精度化された。

以上の結果は、Nagai et al. (2014a)として出版された。

(4) 衛星リモートセンシング観測による日本の落葉林の開葉と落葉の期日の時空間分布の特徴の検出：

500mの空間分解能をもって、日本の開葉と落葉の期日（機能的な着葉期間）の空間分布の年々変動を高精度に図化することが可能となった。また、落葉の期日は、開葉の期日と比べて、緯度と標高に沿った環境傾度が小さく、気温に対する感度が低いことが明らかになった。

本研究の結果、植生の機能や生態系のサービスの変動を推定・評価するために必要な基盤情報のひとつである植生フェノロジーの時空間分布の動態を既存研究と比べてより高精度に得ることが可能となった。

以上の結果は、Nagai et al. (2015a)として出版された。

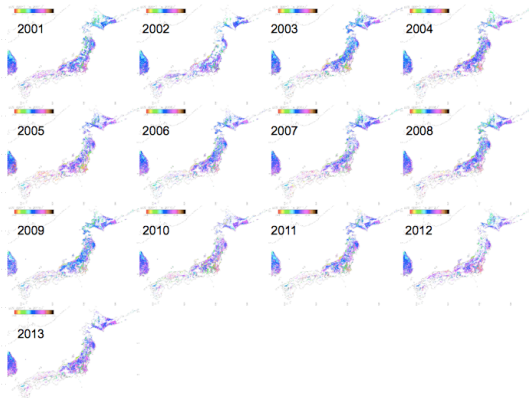


図4. 2001年から2013年の落葉の期日の時空間分布の変動

(5) 常緑広葉樹林における衛星地上検証と衛星リモートセンシング観測による植生の時空間分布の変動の検出：

快晴条件下における衛星観測の頻度の空間分布には、地理的かつ時間的な特徴がみられること。快晴条件下で得られた衛星観測データは、南西のモンスーン期（5から10月）では1-5日/月、北西のモンスーン期（11から4月）では0-2日/月それぞれ得られること。そして、マレーシア国サラワク州の低地やインドネシア国の西・中央カリマンタンの低地では、森林伐採後のオイルパームやアカシアへのプランテーション化にともなう植生被覆の年々変動がみられることが明らかになった。

本研究の結果、熱帯多雨林を対象に、詳細かつ長期連続的な地上観測データに基づいた衛星地上検証がはじめて達成された。また、既存研究ではみられない、ボルネオ全土を対象とした植生被覆の年々変動の検出は、気象気候変動下における熱帯域の植生の機能（光合成や蒸発散）の時空間分布の変動を広域的に推定・評価する研究の発展におおいに貢献することが期待される。

以上の結果は、Nagai et al. (2014c)として出版された。

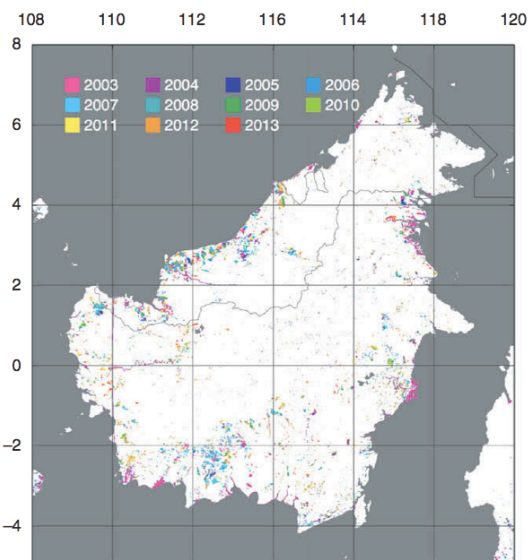


図5. ボルネオにおける森林伐採の年々変動

(各色は、各年にGRVI<0の割合が80%以上であった地点を示している；Nagai et al. 2014c)

#### <引用文献>

Prentice IC, et al. (2001) The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (Eds), pp. 183-237 (Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2001).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

① 永井 信, 井上智晴, 鈴木力英 (2015b) 秋の衛星季節学におけるウェブサイト上で公開されている紅葉情報の有用性. 日本生気象学会雑誌, 査読あり, 印刷中.

② Nagai S, Saitoh TM, Nasahara KN, Suzuki R (2015a) Spatio-temporal distribution of the timing of start and end of growing season along vertical and horizontal gradients in Japan. International Journal of Biometeorology, 査読あり, 59:47-54. DOI:10.1007/s00484-014-0822-8

③ Nagai S, Ishii R, Suhaili A, Kobayashi H, Matsuoka M, Ichie T, Motohka T, Kendawang J, Suzuki R (2014c) Usability of noise-free daily satellite-observed green-red vegetation index values for monitoring ecosystem changes in Borneo. International Journal of Remote Sensing, 査読あり, 35:7910-7926. DOI:10.1080/01431161.2014.978039

④ Nagai S, Yoshitake S, Inoue T, Suzuki R, Muraoka H, Nasahara KN, Saitoh TM (2014b) Year-to-year blooming phenology observation using time-lapse digital camera images. Journal of Agricultural Meteorology, 査読あり, 70(3):163-170. DOI:10.2480/agrmet.D-13-00021

⑤ Nagai S, Inoue T, Ohtsuka T, Kobayashi H, Kurumado K, Muraoka H, Nasahara KN (2014a) Relationship between spatio-temporal characteristics of leaf-fall phenology and seasonal variations in near surface- and satellite-observed vegetation indices in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. International Journal of Remote Sensing, 査読あり, 35:3520-3536. DOI:10.1080/01431161.2014.907937

⑥ Nagai S, Saitoh TM, Kurumado K, Tamagawa I, Kobayashi K, Inoue T, Suzuki

R, Gamo M, Muraoka H, Nasahara KN (2013) Detection of bio-meteorological year-to-year variation by using digital canopy surface images of a deciduous broad-leaved forest. SOLA, 査読あり, 9:106-110. DOI:10.2151/sola.2013-024

〔学会発表〕(計14件)

① 永井 信, インターバル撮影カメラによる様々な樹種のフェノロジーの特徴検出. 2015/3/20, 鹿児島大学(鹿児島県・鹿児島市)

② Nagai S, In situ and satellite observations for accurate monitoring tropical ecosystem structure and functioning: Knowledge gained from Phenological Eyes Network (PEN). Phenology Symposium (in Zurich University), 2014/10/24, Zurich, Switzerland

③ Nagai S, Ishii R, Matsuoka M, Ichie T, Motohka T, Kobayashi H, Suzuki R, Suhaili AB, Kendawang JJ, Itioka T, Detection of interannual variations in northern Borneo forests by noise-free daily satellite-observed green-red vegetation index. ISRS2014. 2014/4/16, Busan, Korea

④ Nagai S, Multidisciplinary in situ and satellite observations for accurate detection of vegetation phenology: Ecological knowledge gained from long-term continuous studies at Takayama site. Synthesis Workshop on the Carbon Budget and Forest Ecosystem in the Asian Monitoring Network. 2013/10/24, Takayama, Gifu, Japan

⑤ Nagai S, "Phenological Eyes Network: PEN" from Japan. NEON PhenoCam workshop, 招待講演, 2013/10/10, Boulder, Colorado, USA

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.pheno-eye.org>

(毎日の植物季節画像や分光観測データを公開している。一部は制限付き公開をおこなっている。)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永井 信 (NAGAI, Shin)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球表層物質循環研究分野・主任研究員

研究者番号: 70452167