

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25450208

研究課題名(和文) 衛星データを用いた森林植生季節変化パラメーターの詳細解析に関する研究

研究課題名(英文) Analysis of Forest Seasonal Change Parameters by using Satellite data

研究代表者

澤田 義人 (Sawada, Yoshito)

国立研究開発法人国立環境研究所・地球環境研究センター・特別研究員

研究者番号：50595767

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、衛星データを用いた森林植生季節変化パラメーターの詳細解析を行うとともに、それらの手法をシステム化することで、自動処理を実現した。本課題では我々が開発した衛星データモデル化手法を応用し、以下の2つについて開発を行なう：(1)環境変動にともなう季節変化パラメーター変動の解析手法開発およびシステム化、(2)環境変動現象の先行指標の抽出手法の開発およびシステム化である。さらには衛星ライダーデータを導入して、森林の三次元構造情報の解析手法の開発およびシステム化も実施した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we performed detailed analysis of seasonal change parameters of forest vegetation using satellite data, and realized automatic processing by developing system these methods. We apply the satellite data modeling method we developed and develop the following two: (1) development and systematization of analysis method of seasonal change of parameters due to environmental change, (2) environmental change phenomenon Development and systematization of the extraction method of leading indicators of. In addition, satellite lidar data was introduced to develop and systematize methods for analyzing forest 3D structure information.

研究分野：画像処理

キーワード：森林環境変動 植物季節情報 森林劣化 衛星ライダー 森林構造マップ 時系列モデル 高速演算処理 機械学習

## 1. 研究開始当初の背景

森林保全は緊急かつ世界的に取り組む必要性があると認識されており、REDD+の枠組みを具体的に実行するための国際会議が数多く開催され、森林をはじめとした植生域の種類と分布の把握の重要性が増している。植物季節(フェノロジー)による変化は植生環境や土地被覆と密接に関連しており、これまでも植物季節を用いた土地被覆・土地利用分類がなされてきた。広域での植物季節観測には、観測頻度の高さが非常に重要であり、全球をほぼ毎日観測可能なMODISなどによる高頻度観測衛星のデータが用いられている。

しかし、高頻度観測衛星データを利用する上では、雲やシステムノイズの影響が大きく、地表面の様子が観測できない場合が多い。これが高頻度観測衛星データの解析や利用を阻む大きな要因となっている。

我々は画素毎に時系列モデルを適用して雲やノイズのない地表面の状態を推定するLMF処理や状態空間モデルを導入したkalmfit処理を開発してきた。これらの処理は、特に植物の季節変動や地表面および海面の温度などの自然現象の把握に適した処理である。kalmfit処理によって雲の影響を取り除いた植生指数および輝度温度データセットを用いて1980年代からの約20年間の森林環境の変動やブラジルの森林からの農地転用の解析などが我々のグループで行われてきた。

この手法をさらに発展させた離散的状態空間モデルを我々は考案し、kalmfit処理と比較して10~100倍以上の高速処理を実現した。続いて、この離散的状態空間モデルと我々が開発したアミノ酸配列情報解析・分子設計手法を融合させ、観測スペクトルの違いに基づいた異状検出処理法を開発した。これにより数千キロ四方を対象とした、大規模森林火災や森林開発などの土地被覆変動の高速自動検出が可能となった。この離散的状態空間モデルは、GPGPUを用いた場合にCPU単独の処理と比較して26倍以上高速となる結果を我々は報告した。

森林開発に代表される土地被覆変化や乾燥、洪水などの環境変動に対して、衛星データに基づく季節変化パラメーターの変動として観測できることも明らかになりつつある。

現状では過去の大規模な土地被覆変化や環境変動についての研究は多くなされているが、土地被覆変化や異常乾燥に代表される環境変動の対策を講ずるために必要な先行指標を衛星から捉える試みは未だなされていない。

## 2. 研究の目的

これまでの研究で森林開発に代表される土地被覆変化や乾燥などの環境変動は、高頻度観測衛星データに基づく季節変化パラメ

ーターの変動として観測できることも明らかになりつつある。現状では過去の大規模な土地被覆変化や環境変動についての研究は多くなされているが、土地被覆変化や異常乾燥に代表される環境変動の先行指標を衛星から捉える試みはなされていない。

本課題では我々が開発した衛星データモデル化手法を応用し、以下の2つについて開発を行なう：

- (1) 環境変動にともなう季節変化パラメーター変動の解析手法開発およびシステム化
- (2) 環境変動現象の先行指標の抽出手法の開発およびシステム化

## 3. 研究の方法

上記の背景およびこれまでの研究成果をふまえ、本研究課題では、植物季節や温度などの複数の季節変化パラメーターが森林開発などの土地被覆変化や森林劣化、水分環境変動などの環境変動とどのように関連するかを解析する。

次に、その結果を用いて環境変動イベントに先行して変動が観測される季節変化パラメーターの抽出を行なう。さらに、それらのパラメーターを準リアルタイムで予測できるアルゴリズムを開発し、広域の植物季節情報を準リアルタイムで提供可能なシステムを構築する。

なお、本課題において、モデル化された高頻度観測衛星データを用いた解析を行ったところ、数千キロ四方にもわたる皆伐などの大規模な事象については検知できるものの、森林劣化などについては広域での検出が困難であることが確認された。そこで、森林劣化を樹高などの森林構造情報を手掛かりとして検出することを考え、衛星ライダー(ICESat/GLAS)データを導入して、森林の三次元構造情報の解析手法の開発およびシステム化も実施することにした。

これまで我々が開発した方法では、可視バンドの地表面反射率データを時系列的に連続値として取り扱うことができなかった。そこで今年度は、放射伝達モデル計算とこれまで研究代表者が開発した状態空間モデルを用いた時系列モデル化手法を融合させたアルゴリズムを開発した。放射伝達モデル計算は計算負荷が大きいいため、機械学習法を用いた高速化の実装を行った。

## 4. 研究成果

- (1) 環境変動にともなう季節変化パラメーター変動の解析手法開発およびシステム化

### ① 環境変動にともなう季節変化パラメーターの変動解析

2012年までのMODISなどの高頻度観測衛星データを収集、スペクトルの時間変化や地表面温度などについて時系列モデル処理を行って水分環境および温度環境のモデル化・時空間解析を行った。特に、メコン川流域を含

むインドシナ半島全体を対象にして地表面の分光反射スペクトルの時間的変化について高頻度観測衛星データを用いて解析を行った。その結果、2011年のタイ国で発生した洪水について詳細な解析を行うとともに、地表面温度を用いた、地点毎の水分環境を推定する指数の開発を行った。植生の水分条件に関連するとされる地表面温度の昼夜差も、これまでのスペクトル的な解析と同様に森林開発等にもなう環境変動を反映していることを確認した。

② 季節変化パラメーターなどの自動配信システムの構築

時系列モデル処理および現象が起こった可能性のある画素を自動で抽出し、得られた画素の位置や現象の種類などの情報（植生変動関連地理情報）を配信するシステムを構築した。

今後は広域での植物季節関連プロダクトの自動配信を実現するため関係部署等と調整を行う予定である。

(2) 環境変動現象の先行指標の抽出手法の開発およびシステム化

① 環境変動にもなう先行指標の抽出

インドシナ半島地域については、現地からの情報などを手掛かりに ASTER などの中～高分解能衛星データによって森林劣化や森林開発、水分環境変動などの現象の起こった位置や規模、時間などを確認した。森林開発が著しいボルネオ全域を対象として MODIS などの高頻度観測衛星データの収集を行うとともに、研究代表者が開発した時系列モデル化手法による解析と森林季節変動パラメーターの抽出を行った。西カリマンタンなどでは、森林からプランテーションに転換した画素を明瞭に区別できることを確認した（図1）。

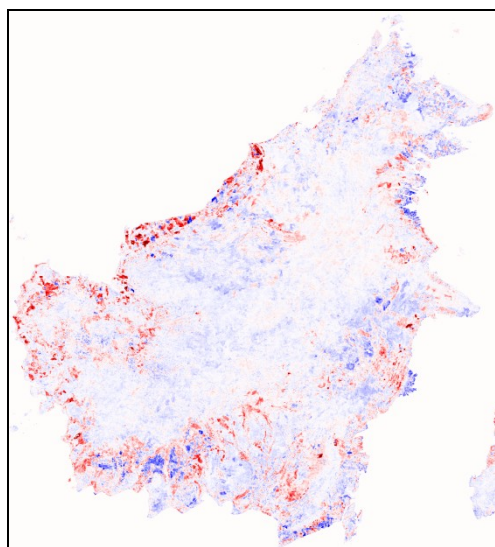


図1 植物季節変化情報(植生水分指数 NDII)によるボルネオ全域での植生変動状況 (赤：植生が減少・青：植生が増加、2000年～2014年のMODISデータによる)

これに加え、新たに整備した衛星ライダー(ICESat/GLAS) 全球データセットから当該地域のデータを抽出し、高解像度の森林構造マップの作成を目的として解析を行った。

また、メコン川流域や中央アマゾンなどのMODIS や CAI などの高頻度観測衛星データを確認したところ、雲がない場合でもヘイズや水蒸気などの影響で地表面の状態が観測できない画素がしばしば現れる。これまで我々が開発した方法では、可視バンドの地表面反射率データを時系列的に連続値として取り扱うことができなかった。そこで今年度は、放射伝達モデル計算とこれまで研究代表者が開発した状態空間モデルを用いた時系列モデル化手法を融合させたアルゴリズムを開発した。放射伝達モデル計算は計算負荷が大きいので、機械学習法を用いた高速化の実装を行った。

② 広域での森林構造情報解析とそのシステム化

モデル化された高頻度観測衛星データを用いて解析を行ったところ、数キロ四方にもわたる皆伐などの大規模な事象については検知できるものの、森林劣化などについては広域での検出が困難であることが確認された。そこで、森林劣化を樹高などの森林構造情報を手掛かりとして検出することを考え、衛星ライダーである ICESat/GLAS プロダクトの導入を行った。ICESat/GLAS プロダクトは、森林構造の情報を含んでいるとされるライダー波形と、ライダーフットプリント座標が別のプロダクトに含まれているため、全データを入手してサーバー上で展開、ライダー波形とフットプリント座標の対応付けを行って二次データセットとして整備した。研究代表者が別のプロジェクトで開発した方法を基にしてライダー波形解析の高度化を行い、メコン川流域の森林構造に関するマップを作成した（図2）。

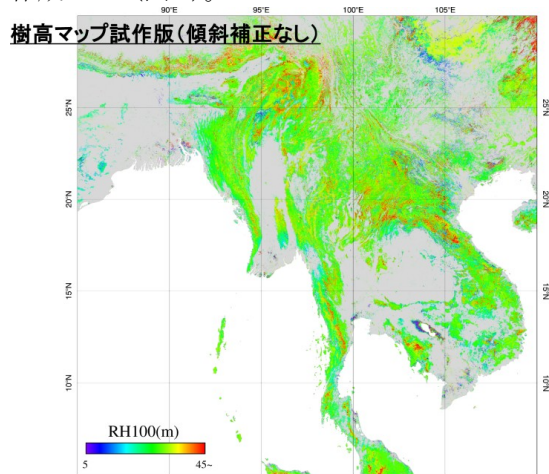


図2 インドシナ半島全域を対象とした樹高マップ

また、森林劣化の詳細な情報を得る目的で、高分解能衛星データ(RapidEye)と衛星ライダーデータを用いた森林構造マップ作成法

の開発を行った。この方法で作成した中央アマゾンの 100m 分解能樹冠高マップを図 3 に示す。

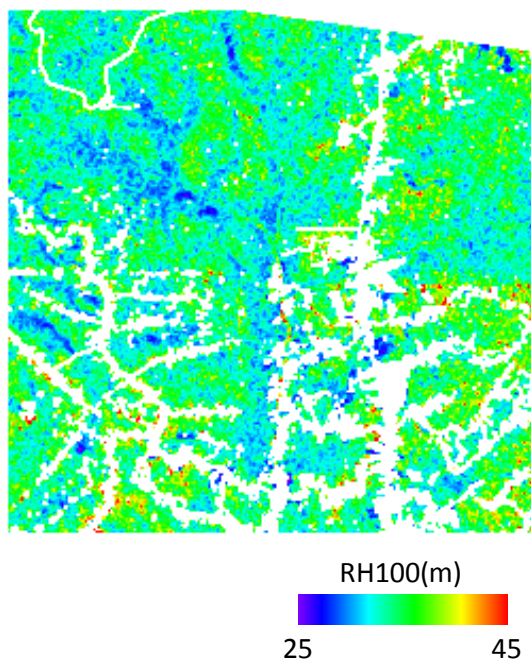


図 3 衛星 LiDAR と RapidEye 画像データによる中央アマゾン森林の樹冠高マップ。空間分解能は約 100m。

RMSE は 6.98m、 $R=0.486$  となるが、データを 10 階級に区分する 10bin 法では  $R=0.954$  となる。したがって、図 3 作成の方法では樹冠高の傾向は再現できているものの、約 100m 画素での樹冠高推定を行った場合にはばらつきが大きく、手法のさらなる改善が必要であることを示している。

ライダー波形データの解析において、逆行列を用いず、GPGPU 処理とも親和性の高い新規手法の開発を行い、実装を行った。

### ③ 季節変化パラメーターを予想するための高速処理アルゴリズム開発

連続値の時系列モデルについて GPGPU 化作業を実施した。この作業はこれまで我々が開発した fotran プログラムから GPGPU 処理に適した部分を解析し、該当部分を改変することで対応した。

これについては当初計画していた程度の高速度が実現できていないため、今後も実装処理を続ける。

### (3) その他の成果

#### ① 季節変化パラメーターの解析手法と関連プロダクトに関する研究集会開催

これまでに研究代表者が開発した時系列モデル化手法とスペクトル異状検知手法について、他の植生研究者への利用拡大を図ることを目的として、時系列処理手法の講習会を実施するとともに高頻度観測衛星データ解析に関連する国際ワークショップを各 1 回

開催した。

#### ② 他プロジェクトへの波及効果および他研究機関との協働

本研究課題で開発された広域での植物季節情報解析および森林構造解析手法の一部は、ブラジル国立アマゾン研究所 (INPA)、ブラジル国立宇宙航空研究所 (INPE)、森林総合研究所等との共同研究課題にも取り入れられ、アマゾン森林全体の樹高推定マップが作成された<sup>1)</sup>。

そのほかにも米国サウスダコタ州立大学との共同研究立案 (3 件) や、タイ国アジア工科大学が主体となるモザンビーク国の森林火災早期警戒システムへの共同提案 (1 件)、民間企業からの国レベルの防災情報システムへの処理モジュール組み込みおよびシステム共同開発の提案もあった。

JAXA で計画中の植生ライダーミッション (MOLI) の地上データ処理系への導入も検討中である。

### <引用文献>

- ① Sawada Y., et al., "A new 500-m resolution map of canopy height for Amazon forest using spaceborne LiDAR and cloud-free MODIS imagery", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 43, December 2015, Pages 92-101, ISSN 0303-2434, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.04.003>.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 澤田義人, 沖 一雄, 遠藤貴宏, 沢田治雄, 「MODIS データを利用した広域洪水自動監視システムの開発」, 査読有, 生産研究, 65(4), 251-261 (2013) <http://doi.org/10.11188/seisankenkyu.65.517>

[学会発表] (計 8 件)

- ① 澤田義人, 遠藤貴宏, 高久淳一, 林 真智, 今井 正, 室岡純平, 三橋 怜, 境澤大亮, 水谷耕平, 石井昌憲, 浅井和弘, 梶原康司, 本多嘉明, 「宇宙機搭載植生用ライダーのプロダクト生成システムの構築」, 第 25 回生研フォーラム「宇宙からの地球環境・災害のモニタリングとリスク評価」, 2017 年 3 月 3 日, 東京大学生産技術研究所 (東京都・目黒区) .
- ② 澤田義人, 林 真智, 遠藤貴宏, 小林高士, 「衛星画像と衛星 LiDAR データの融合による森林構造マップ作成システムの開発」, 日本写真測量学会 平成 27 年度年次学術講演会, 2016 年 5 月 27 日, 東京

- 大学生産技術研究所（東京都・目黒区）。
- ③ 澤田義人, 林 真智, 遠藤貴宏, 小林高士, 「衛星 LiDAR と衛星画像データの融合による高頻度森林構造変動検知システムの構築」, 第 24 回生研フォーラム「宇宙からの地球環境・災害のモニタリングとリスク評価」, 2016 年 3 月 2 日, 東京大学生産技術研究所（東京都・目黒区）。
  - ④ Y. Sawada, M. Hayashi, T. Kobayashi and T. Endo, "The wide-area forest structure monitoring system by the fusion of LiDAR and imager data", International Workshop on Vegetation Lidar and Application from Space, Jan. 6, 2016, 京都大学楽友会館（京都府・京都市）。
  - ⑤ 澤田義人, 林 真智, 小林高士, 遠藤貴宏, 「衛星画像および衛星 LiDAR データを用いた樹高マップ作成システムの開発」, 日本写真測量学会 平成 27 年度年次学術講演会, 2015 年 5 月 20 日, 東京大学生産技術研究所（東京都・目黒区）。
  - ⑥ 澤田義人, 小林高士, 林 真智, 遠藤貴宏, 「fullwave 衛星 LiDAR 波形データ解析の高度化」, 第 23 回生研フォーラム「宇宙からの地球環境・災害のモニタリングとリスク評価」, 2015 年 3 月 3 日, 東京大学生産技術研究所（東京都・目黒区）。
  - ⑦ 澤田義人, 遠藤貴宏, 小林高士, 沢田治雄, 「二波長 LiDAR システムのデータ解析アルゴリズム」, 日本写真測量学会 平成 26 年度年次学術講演会, 2014 年 5 月 22 日, 東京大学生産技術研究所（東京都・目黒区）。
  - ⑧ 澤田義人, 「MODIS データを用いた広域洪水監視システムの構築」, 日本写真測量学会 平成 25 年度年次学術講演会, 2013 年 5 月 21 日, 東京大学生産技術研究所（東京都・目黒区）。

〔その他〕

- ① 研究集会開催
  - 時系列解析手法講習会、2014 年 10 月 1 日、国立環境研究所地球温暖化研究棟 1 階会議室 1（茨城県・つくば市）
  - 国際ワークショップ、「高頻度観測衛星データ時系列処理と森林三次元計測の展開」、2014 年 12 月 4 日、（一財）リモートセンシング技術センター会議室（東京都・港区）
- ② 他プロジェクトへの波及効果および他研究機関との協働
  - 米国サウスダコタ州立大学研究者との共同研究提案（NASA Carbon Monitoring System）, 2014 年, 2016 年, 2017 年. (2014 年と 2015 年は不採択、2017 年については審査中)
  - タイ国アジア工科大学が主体となるモザンビーク国の森林火災早期警戒シス

テムへの提案, 2016 年（審査中）。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

澤田 義人 (Yoshito Sawada)

国立環境研究所・地球環境研究センター・特別研究員

研究者番号：50595767