

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

ボルネオの熱帯泥炭林における炭素動態の広域評価システムの開発 (2-1504)

平成27年度～平成29年度

Development of the Regional-scale Assessment System of Carbon Dynamics in Bornean Peat Ecosystems

(英文パンフレット等 http://www.erca.go.jp/suishinhi/seika/pdf/seika_2_03/2-1504.pdf)

〈研究代表機関〉

北海道大学

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人 国立環境研究所

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 フィールド観測による熱帯泥炭林における炭素動態の解明 （北海道大学）	13
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 陸域生態系モデルによる炭素動態の広域評価システムの開発 （国立研究開発法人 国立環境研究所）	30
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 PALSAR-2による炭素動態の広域評価システムの開発 （国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構）	49
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	

- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

Ⅱ－4 熱帯泥炭地の空間分布データの構築 72

(一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構)

要旨

- 1. はじめに
- 2. 研究開発目的
- 3. 研究開発方法
- 4. 結果及び考察
- 5. 本研究により得られた成果
- 6. 国際共同研究等の状況
- 7. 研究成果の発表状況
- 8. 引用文献

Ⅲ. 英文Abstract 87

I. 成果の概要

課題名 2-1504 ボルネオの熱帯泥炭林における炭素動態の広域評価システムの開発
 課題代表者 平野 高司（北海道大学 大学院農学研究院 基礎研究部門 生態環境物理学研究室 教授）
 研究実施期間 平成27～29年度
 累計予算額 99,912千円（うち平成29年度：32,453千円）
 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード：温室効果気体，衛星リモートセンシング，地理情報システム（GIS），炭素収支，
 陸域生態系モデル，バイオマス，土地被覆変化，攪乱，合成開口レーダ

研究体制

- （1）フィールド観測による熱帯泥炭林における炭素動態の解明（北海道大学）
- （2）陸域生態系モデルによる炭素動態の広域評価システムの開発（国立研究開発法人 国立環境研究所）
- （3）PALSAR-2による炭素動態の広域評価システムの開発（国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構）
- （4）熱帯泥炭地の空間分布データの構築（一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構）

1. はじめに（研究背景等）

インドネシアとマレーシアを中心とした東南アジア島嶼部の低平地には、25万km²に及ぶ熱帯泥炭林が広がり、69 Gt（日本の年間排出量の約190年分に相当）におよび膨大な量の炭素を土壌有機物として蓄積してきた。しかし、近年の森林伐採や排水をともなう大規模農地（プランテーション）開発により、泥炭の好氣的分解が促進されるとともに泥炭火災が増加し、熱帯泥炭林・泥炭地は21世紀における巨大な二酸化炭素（CO₂）排出源（ホットスポット）として国際的な注目を集めるようになった（UNFCCC, Global Carbon Project）。インドネシアは、2020年までにCO₂排出量を大幅に削減することを国家目標としており、REDD+（途上国の森林減少・劣化による温室効果気体（GHG）排出の抑制）などの国際的枠組みを利用した泥炭林地域の保全・管理を削減活動の柱の一つと位置づけている。REDD+の実施には、州以上の広域スケールでGHGの収支を定量化（MRV：計測・報告・検証）し、参照排出レベルを設定することが不可欠であるが、主にフィールドでの実測データが不足しているため、熱帯泥炭地の地理的分布や泥炭地におけるGHG排出係数（IPCC）における不確実性の大きさが問題として残されている。また、広域のGHG収支を高精度で評価するには、高い空間・時間分解能を持つ衛星データを活用することが不可欠であるが、従来の衛星センサーによるリモートセンシングでは、このような要求を満たすことは困難である。

2. 研究開発目的

本研究では、熱帯泥炭地が広く分布し、またインドネシアとマレーシアにまたがるボルネオ島を対象とし、「REDD+等の森林吸収源対策の推進」に寄与するために、1) GHG収支に関するフィールド観測、2) フィールドデータを活用した陸域生態系モデルのカスタマイズと広域展開、3) 新しい高性能衛星センサー（PALSAR-2）を利用した評価システムの開発、4) 熱帯泥炭地の空間（地図）情報の高精度化を行い、得られた情報や知見を統合して、ボルネオ島の熱帯泥炭林および泥炭地に開発された大規模農地（プランテーション）などを対象に、炭素動態およびGHG収支（排出量）を高精度で定量化するシステムの開発を行う。さらに、開発した評価システムを利用して、熱帯泥炭林の保全などの対策技術のGHG排出削減効果を定量評価する。豊富な地上観測データと高精度な地図情報を基に、最新鋭の衛星観測システムと陸域生態モデルを組み合わせた本システムの独創性

は高く、また実用化への発展性は高いと考える。

3. 研究開発の方法

(1) フィールド観測による熱帯泥炭林における炭素動態の解明

ボルネオ島内のインドネシア・中部カリマンタン州(1: 未排水の泥炭林, 2: 排水された泥炭林, 3: 泥炭林の火災跡地, 4: ゴム園)とマレーシア・サラワク州(5: 未排水の泥炭林, 6: 排水の影響を受けた泥炭林, 7: オイルパーム園)の7つの熱帯泥炭生態系においてフィールド観測を行った。

ゴム園(サイト4)を除く6サイトには観測用のタワー(高さ20~40 m)が設置されており、各タワーサイトでオープンパス方式のガス分析計を用いた渦相関法を適用し、代表的なGHGであるCO₂とメタン(CH₄)のフラックス(大気と生態系の間の正味交換速度)のモニタリングを行った。なお、CO₂フラックスは全タワーサイトで、CH₄フラックスはサイト2とサイト3を除く4サイトで、それぞれ連続観測した。得られたデータの品質管理を行った後に欠測補間を行い、生態系スケールでの正味ガス交換量の年積算値を計算した。また、得られたCO₂フラックス(正味生態系CO₂交換量, NEE)を、経験的なモデルを用いて生態系光合成(GPP)と生態系呼吸(RE)に分離した。フラックス観測と同時に、気象環境(日射量, 気温, 湿度, 風向・風速, 降水量など)および土壌環境(地温, 土壌水分, 地下水位など)の連続観測も行った。

マレーシアの3サイトにおいて、自動開閉式チャンバーシステム(底面積 0.0491 m²、容積0.0177 m³)により、泥炭土壌表面からのCO₂とCH₄の放出速度(フラックス)を連続観測した。各チャンバーは、225秒ごとに順次、閉鎖して流路が切替わり(1時間で1周り)、閉鎖中のチャンバー内のガス濃度の上昇速度からCO₂とCH₄のフラックスを計算した。インドネシアの4サイトでは、マニュアルチャンバー(底面積0.0707 m²、容積0.0144 m³)による土壌CO₂フラックスの観測を約1ヶ月おきに行った。本研究では、泥炭の好氣的分解(微生物呼吸)にともなうCO₂放出量の測定を主な目的としたため、根呼吸を排除するための「根切り処理」を行った。したがって、区画内でチャンバーによって測定されるCO₂フラックスには根呼吸は含まれない。なお、東南アジアの熱帯泥炭地で問題になっているのは、短期間で回転する植物の炭素循環ではなく、数千年にわたって蓄積した泥炭炭素の不可逆的な分解である。泥炭分解を分離して評価することの科学的意義は大きい。

泥炭地では、排水によって地下水位が低下すると、物理的過程(圧密、収縮)と微生物過程(好氣的分解)の結果として、大きな地盤沈下が生じることが知られている。地盤沈下は比較的容易に測定することができ、過去からのデータの蓄積もあるため、地盤沈下速度から泥炭の好氣的分解にともなうCO₂放出量を推定することが試みられてきた。この方法を適用するには地盤沈下速度に対する好氣的分解の寄与を定量化して、地盤沈下を物理的過程と微生物過程に分離することが不可欠であるが、野外観測に基づく知見は乏しいのが現状である。そこで、ゴム園とオイルパーム園で地盤高の測定を行い、好氣的分解の寄与の定量化を試みた。具体的には、鉄パイプを泥炭層の下、鉄質土壌層まで打込んで固定し、毎月1回、パイプ上端と泥炭表面との距離を測定して1年間の地盤高の変化を求めた。さらに、泥炭のバルク密度と炭素含有率を測定し、土壌CO₂フラックスの観測結果を加えることで、泥炭の好氣的分解にともなう地盤沈下量を計算した。両者を比較することで、地盤沈下に対する好氣的分解の寄与を明らかにした。

(2) 陸域生態系モデルによる炭素動態の広域評価システムの開発

1) 熱帯泥炭生態系サブモデルの開発とVISITのカスタマイズ

熱帯泥炭林の炭素収支をシミュレートするため、生態系プロセスモデルVISITの土壌サブモデルのカスタマイズを行った。まず、サブテーマ1で得られたフラックス観測データとデフォルトのモデル出力値を比較し、その差を明らかにする。次に熱帯泥炭林用にカスタマイズした土壌サブモデルの出力値と実測値を比較した。比較は総光合成量(GPP)、生態系総呼吸量(RE)、正味生態系CO₂生産量(NEP)の3つの炭素収支の項目に対して行った。使用したフラックスデータは、インドネシア・中部カリマンタン州パラカラヤのタワー観測によって得られたものである(サブテーマ1で得られたデータ)。観測サイトは、水路が建設されて水位が低くなったサイト(PDFサイ

ト)と比較的高い水位が保たれたサイト(PUFサイト)の二つである。これら地下水位の異なるデータを用いることにより、より堅牢なモデル検証が可能となる。

土壌サブモデルの改良について述べる。サブテーマ1からの知見により、熱帯泥炭林における土壌呼吸は地下水位によって強く制御されていることが明らかとなっている。そこで、デフォルトの土壌呼吸サブモデルでは土壌水分を変数とした関数が採用されているところを、地下水位を変数とした関数に変更した。この関数では、地下水位が高いときに土壌呼吸が小さくなり、地下水位が低いときに土壌呼吸が大きくなる式を用いている。地下水位のシミュレーションにはタンクモデルを用いた。PDFサイトとPUFサイトの地下水位の違いはタンクモデルのパラメータを変えることでシミュレーションを行った。

2) 広域評価のための時空間データの整備とモデル・データインタフェースの開発

熱帯泥炭林の炭素収支を広域で評価するため、入力データセットの整備と入力のためのコーディングを行った。モデルへの入力データは主に①気象データ、②土地利用変化、③泥炭マップの3つである。このうち③の泥炭マップはサブテーマ4より提供される。ここでは土地利用変化と気象データについて説明する。ボルネオ島全体の広域評価は空間解像度4 km、時間解像度1日で行うこととした。モデル入力のために用意した気象要素は、気温、湿度、降水量、日射量、風速の5成分である。データは気象庁が提供する長期再解析データJRA-55 (Kobayashi et al., 2015; Harada et al., 2016)とWorldClim (<http://www.worldclim.org/>)を用いた。JRA-55の時間ステップは3時間であるが、空間スケールは約0.5°グリッドと粗い。対して、WorldClimは1970～1990年の長期平均の気象データで、気温と降水量が提供されており、空間スケールは1 kmである。そこで、JRA-55をWorldClimによってダウンスケーリングした。まず、JRA-55のデータを4 kmに内挿補間するとともに、WorldClimのデータを4 kmごとに平均した。次に、1970～1990年の平均を取り、その値がWorldClimと同じになるよう、差分(気温)もしくは比率(降水量)を取った。ただし、WorldClimは気温と降水量しかデータ提供がされていないので、その他のデータに関しては単純に内挿補間を行ったデータを用いた。

森林減少による土地利用変化データの作成について述べる。森林減少には、MODISの地表面反射率プロダクトMOD09A1の8日コンポジットデータから算出された植生指数NDII6を用いた。Local Maximum Filtering手法によりNDII6の雲除去処理を行った後、3カ月間のコンポジットデータを作成した。森林変化域の抽出における基準画像として、2000年のMODIS衛星画像を用いて教師付き画像分類手法により森林と非森林を分離した。教師データセットの作成には、GoogleEarthの高分解能衛星データを比較照合した。2000年以降の森林減少域は、NDII6変化を時系列的に解析することで検出した。すなわち、各植生指数が基準年に比べて低下している場所は森林から非森林に変化しているとした。

3) 広域評価システムの完成と研究エリアの炭素動態・GHG収支の推定、およびシナリオを用いた予測と対策の評価(感度解析)

(1)で改良したモデルに(2)で用意される気象データ、土地被覆変化マップ、サブテーマ4で作成された泥炭地マップを入力し、2001～2016年の炭素収支を算出した。得られた結果はサブテーマ3で算出されたGISベースの炭素収支と比較し、両手法の問題点を考察した。

また、モデルをもとに、土地利用変化の将来シナリオを作成し、泥炭林保全によるGHG排出量削減対策の効果を評価した(感度実験)。まず、土地被覆変化の時系列マップをもとに、マルコフモデルとセルラーオートマトンを組み合わせた土地被覆変化モデルを用いて森林減少の予測を行った。これをなりゆきシナリオ(business as usual: BAU)とした。まず、2005年と2010年の土地被覆マップを用いて2015年の土地被覆マップを予測する。予測の際、2005年と2010年の土地被覆変化を河川、傾斜度、高度、道路のパラメータで制御されるようにモデルを構築する。モデルで予測された2015年のマップと実際の2015年の土地被覆マップを比較、検証し、モデルのパラメータ値を確定させる。次に、そのモデルのパラメータ値を用いて2010年と2015年の土地被覆マップから2020年の土地被覆マップを作成する。同様に、5年ごとに2030年までの土地被覆マップを作成した。次に、森林・泥炭地保護対策を行った場合のシナリオを作成した。シナリオの作成には、インドネシア政府およびマレーシア・サラワク州政府から森林保護区の情報を収集し、その地域では森林減少が軽減されるという条件を入れて土地被覆の変化予想を行った。

(3) PALSAR-2による炭素動態の広域評価システムの開発

広域評価システムの入力とする衛星データとして、日本が2014年5月から運用する陸域観測技術衛星2号（ALOS-2）に搭載されたフェーズドアレイ型Lバンド合成開口レーダ2（PALSAR-2）による観測データを活用する。PALSAR-2の観測は、雲や雨を透過して地面を計測することができ、森林の地上部バイオマスに感度が高いことから、熱帯泥炭林の広域評価に必要となる土地被覆分類や変化の検出、バイオマスの推定などに有用である。本研究では、広域観測モード（50 m分解能、350 km観測幅、HHおよびHVの2偏波）による2014年～2017年の観測データを用いて、ボルネオ島全体のPALSAR-2後方散乱係数モザイク画像を作成し、各解析に用いた。観測頻度は最大年9回であり、各画像は映像化の後、オルソ変換、地形による倒れ込み補正、各観測画像間の後方散乱係数のバイアス補正、モザイク処理を施した。

炭素動態の広域評価システムは、IPCCによるガイダンス文書に従って構築した。すなわち、対象地の土地被覆変化情報から変化カテゴリごとの面積を求め、それに単位面積当たりのバイオマスや排出量（排出係数）をかけ合わせて和をとることで対象地全域としての炭素収支を算出する。まず、入力として必要となる土地被覆分類・変化と森林地上部バイオマス、および熱帯泥炭からの炭素排出量の評価において有用な指標となる泥炭地沈降量について、PALSAR-2データから計測するためのアルゴリズムの検討と実証を行った。その後、得られた土地被覆変化と地上部バイオマスの広域分布図、サブテーマ1で定量化された排出係数、サブテーマ4による泥炭分布図を組み合わせて、2015年のボルネオ島全体の炭素収支を算出した。

土地被覆分類には、機械学習（Random Forest法）を用いた。分類項目は、①森林、②低木林、③草地、④プランテーション（主にオイルパーム園）、⑤季節性湿地（水田を含む）、⑥火災により燃えた森林、⑦裸地（主に採掘地）、⑧都市、⑨水域の9種類である。教師・検証用データは現場GPS写真および高分解能衛星画像を用いて取得した。PALSAR-2の特徴である時系列観測を活かすために、機械学習の入力には、1年間の平均値、最大値、最小値、標準偏差を採用した。各時期の観測値をそのまま入力するのではなく平均などの統計量を用いた理由は、欠測などにより一部地域の観測データが抜けることが時々あり、その影響を抑えるためである。

森林地上部バイオマスの推定も同様に、機械学習（Random Forest法）による方法を開発した。PALSAR-2の後方散乱係数は地上部バイオマスと正の相関を持つが、高バイオマスでは後方散乱が飽和し、相関関係が失われるという問題がある。飽和に達する地上部バイオマスの値は概ね100 t ha⁻¹前後であり、熱帯泥炭林ではこの閾値を超える高バイオマスの森林が大半を占めている。この課題を解決するために、時系列情報や空間テクスチャ情報を活用する方法を検討した。教師・検証用データには、米国の衛星搭載ライダー（ICESAT GLAS）によるバイオマス推定値を用いた。

泥炭地の沈降量は、2時期の干渉SAR解析により推定される。泥炭地の地盤沈降のスケールは年間で数mm～数cmであるが、これを干渉SAR解析で捉えるには、電離層による位相変化などの各種ノイズを除去して検出精度を向上させることが必要であり、そのために時系列に複数のデータを重ね合わせる必要がある。より高精度に干渉SARを行うには、分解能が高くノイズ除去が容易な高分解能モードが好ましいことが知られているが、対象地では高分解能モードの時系列データ蓄積がまだ不十分であったため、観測頻度の高い広域観測モードを用いて、パランカラヤ付近の地盤沈降の抽出を試みた。

(4) 熱帯泥炭地の空間分布データの構築

ボルネオ島3州（マレーシア・サラワク州、インドネシア・中部カリマンタン州、西カリマンタン州）を対象に高精度泥炭分布図の作成を目的とし、1)既存の泥炭地分布データの収集と整備、2)泥炭地分布データの精緻化と高精度化、3)高精度データの構築を実施した。

1)ではインドネシアとマレーシア国内の関連機関にて、最新の泥炭分布図に関する情報収集、地形図や文献等の資料収集を行った。さらに、泥炭のみならず気候変動を含めた会議等に参加し、泥炭研究の関係者と最新情報について情報交換を行った。基本情報となる既存泥炭分布図は、サラワク州では、1968年に作成された紙ベースの土壌図のみが確認できた。そのため、大型スキャナーで読み取り後、QGISによってGISベースの泥炭分布図を作成し、そのデータを既存泥炭分布図とした。インドネシアでは、これまで様々な泥炭分布図が作成

され、現在広く利用されているものとして2004年にWetlands Internationalが作成した泥炭分布図(以下、WI2004)と2011年に農業省が作成した泥炭分布図(Ritung et al., 2011)が存在する。中部カリマンタン州及び西カリマンタン州の泥炭分布図としては、それらを既存泥炭分布図とした。

2)は、1)で整備した既存泥炭分布図で、泥炭の存在について信頼性が低い(不確実性が高い)と考えられる場所を選定し、ボーリング調査を行い泥炭の有無を確認した。ボーリング調査地点の選定作業には、最新の衛星データ(Landsat 8, ASTER, Sentinel-2)や標高データ(DEM: Digital Elevation Model)など各種地理空間データをもとに検討を行った。また、事前調査により、選定した候補地の中からアクセス状況、排水路、河川の発達状況や水の色調、植生の特徴等を検討し、泥炭分布の可能性を評価した。さらに、深さ1 m程度までは検土杖により簡易的に泥炭の有無を確認した。

3)ではボーリング調査の結果をもとに既存あるいは新規に作成した泥炭分布図をベースに修正を行った。前述の通り、既存の泥炭分布データは、サラワク州では州政府作成の土壌図を基本情報とし、中部カリマンタン州、西カリマンタン州では、Wetlands Internationalと農業省が2011年に作成した泥炭分布図(Ritung et al., 2011)の2つを基本情報として使用した。泥炭地分布データの高精度化及びボーリング調査の結果を反映した高精度泥炭分布図の泥炭面積の増減量を比較するため、修正前後の泥炭分布図の面積を州ごと、3州の合計面積について計算した。また、修正した泥炭分布図は他のサブテーマとの共有を行った。

4. 結果及び考察

(1) フィールド観測による熱帯泥炭林における炭素動態の解明

ボルネオ島内のインドネシア・中部カリマンタン州とマレーシア・サラワク州に存在する様々な土地利用の熱帯泥炭地において、チャンバー法を用いて好氣的分解にともなうCO₂放出量(フラックス)を定量化するとともに、主要な環境要因である地下水位との関係を明らかにした。泥炭の分解速度は地下水位に依存し、泥炭土壌が飽和して、さらに湛水するような高水位条件で分解速度は著しく低下した。地下水位の範囲が-0.4~-0.1 mくらいでは分解速度への影響ははっきりしなかったが、それ以下になると、分解速度は地下水位の低下にともなって直線的に上昇した。この傾向は地下水位が-1.7 mまで低下したゴム園で顕著であり、強力なエルニーニョ年であった2015年には年間の泥炭分解量(CO₂放出量)が1408 g C m⁻² yr⁻¹となった。また、ゴム園とオイルパーム園の2015年の地盤沈下量はそれぞれ5.96, 1.83 cm yr⁻¹であり、泥炭の好氣的分解の寄与率はそれぞれ25, 67%と計算された。このような大きなサイト間差の原因を詳細に検討する必要があるが、この大きなサイト間差は地盤沈下量から泥炭分解の広域推定を行うには、さらなるフィールドデータの蓄積が必要であることを示唆している。なお、中部カリマンタン州とサラワク州は降水量の季節変化のパターンが異なるとともに、泥炭の形成履歴が異なり、前者の研究サイトの土壌は内陸型泥炭、後者の研究サイトの土壌は沿岸型泥炭に分類される。このような異なる水文・泥炭・土地被覆条件で得られた知見は、炭素収支の広域評価の精度向上に大きく貢献することができる。

自動開閉式チャンバーシステムを用いて連続観測を行った結果、多孔質の泥炭土壌からのCO₂とCH₄の放出速度に同様の日変化が認められ、放出速度は夜間高く、昼間低くなった。このような日変化の原因として、以下の2つの理由が考えられる。まず、夜間は地温が気温よりも高くなり、泥炭土壌の表層の不飽和層において熱対流が生じる。結果として、マスフローによる上向きのフラックスが発生する。一方、昼間は地上付近の風速が上昇し乱流強度も上昇する。その結果、チャンバーが開いているときにチャンバー内の空気が流動して、チャンバー内と土壌表層の空隙との間で空気の交換(マスフロー)が生じる。このようなマスフローによるガス交換によって土壌中のガス濃度が低下し、チャンバーが閉じたときのフラックス(主に拡散による)を低下させることになる。間隙率の大きい多孔質な泥炭土壌では、このようなマスフローの効果が大きいと考えられる。夜間の熱対流によるフラックスの増加は自然現象であるが、昼間のフラックスの減少は測定原理(チャンバーによる閉鎖)に起因するものであり、泥炭のような多孔質土壌にチャンバー法を適用する限り、マニュアルチャンバーによる測定であっても避けられないと考えられる。また、マニュアル測定では一般的であるが、昼間のみの測定値から日積算値や年積算値を計算する場合には、過小評価はさらに大きくなる可能性がある。したがって、上述したインドネシア

でのマニュアルチャンバーによる測定結果は過小評価になっているかもしれない。

本研究では、熱帯泥炭地の4サイトにおいて、世界で初めて生態系スケールでのCH₄放出量を観測した。その結果、以下の新たな知見が得られた。①泥炭林における生態系スケールのCH₄放出量は土壌からのCH₄放出量を大きく上回った。これは、主に樹幹からのCH₄放出に起因すると考えられる。②土地被覆によってCH₄放出量は異なったが、サラワク州の3サイト(2つの泥炭林、オイルパーム園)では、地下水位とCH₄放出量の関係の一つの数式(指数関数)で近似できた。この数式(モデル)は、CH₄放出量の広域評価に有効であると考えられる。③排水を行ったオイルパーム園では、土壌からのCH₄放出量はほぼゼロであったが、生態系スケールでは正味のCH₄ソースであることがわかった。この差の原因として、園内に存在する小規模の水路からのCH₄放出が考えられる(ホットスポット)。④中部カリマンタン州の泥炭林では、地下水位が同じでも、サラワク州よりもCH₄放出量がかなり少なかった。サラワク州と中部カリマンタン州の間の地域差の解明は課題として残るが、以上の知見は、熱帯泥炭地のCH₄放出量推定における多大な貢献となる。

(2) 陸域生態系モデルによる炭素動態の広域評価システムの開発

1) 熱帯泥炭生態系サブモデルの開発とVISITのカスタマイズ

観測によれば、インドネシア・中部カリマンタン州の熱帯泥炭林は乾期に炭素を放出量していたが、この原因はGPPのみならず、REの放出も増えるためである。しかし、デフォルトのモデルでは乾期にREは低下し、観測と反対の季節変化を示した。このため、観測値とモデル出力値ではNEPにバイアスがあった。地下水位を考慮した土壌サブモデルの改良により、炭素収支に関するモデル出力値を観測値に近づけることが出来た。今回、地下水位の異なる二つの熱帯泥炭林の実測データを用いたことにより、モデルの堅牢さもある程度確認された。

2) 広域評価のための時空間データの整備とモデル・データインタフェースの開発

モデルへ入力データセットとして作成された土地利用変化マップについて説明する。2001～2015年にかけて、全森林の17%が失われた。しかし、泥炭林以外の森林の消失が14%だったのに対し、泥炭林は50%が失われた。ボルネオ島全体の年間の森林消失率は1.1%だった。これは既存の研究報告の範囲内である。森林減少は特にサラワク州、中部カリマンタン州、南カリマンタン州で大きかった。サラワクではプランテーションの開発(主にオイルパームとアカシア(パルプ材))、中部・南カリマンタン州では森林火災が、それぞれ森林減少の主な原因と考えられる。

2002、2006、2015年に特に泥炭林の減少が大きかった。これらの年はエルニーニョ現象により降水量が極端に少なく、森林火災が多発した年だった。泥炭林は森林火災により大面積が失われていた。2009年にもエルニーニョ現象が発生し、森林火災が多発した年だったが、この時は森林以外の土地被覆、例えば草地などの燃焼が大きく、森林減少面積は小さかった。また、2002～2007年の森林減少は比較的大きく、その後は森林減少に歯止めがかかる傾向にあった。

3) 広域評価システムの完成と研究エリアの炭素動態・GHG収支の推定、およびシナリオを用いた予測と対策の評価(感度解析)

(1)で改良したモデルに(2)で用意した気象データ、土地利用変化マップ、サブテーマ4の泥炭マップを入力することでボルネオ島における広域の炭素動態を評価することが可能となった。ボルネオ島の正味の生態系CO₂交換量(NEP)の広域的(面的)な分布を見ると、概ね-1～-2 t C ha⁻¹ yr⁻¹の範囲にあったが、10 t C ha⁻¹ yr⁻¹以上の大きな炭素吸収や炭素放出をする地点がパッチ状に分布していた。これは、森林が消失した直後には炭素放出量は大きくなるが、森林が消失した後10年ほど経過すると炭素吸収能力の高い若い樹木が生育し、大きな炭素吸収を示すためである。

ボルネオ島全体の熱帯泥炭地についてモデルの出力を積算すると、正味の生態系CO₂交換量(NEP)の年積算値は15.7±5.4 Mt C ha⁻¹ yr⁻¹(平均±標準偏差)と吸収だった。しかし、森林減少などの土地被覆変化による炭素損失量が17.5±10.4 Mt C ha⁻¹ yr⁻¹と非常に大きかったため、これを考慮するとボルネオ島の熱帯泥炭地はCO₂を1.8±12.9 Mt C ha⁻¹ yr⁻¹放出していたことになる。土地利用変化によるバイオマス消失を加味した炭素

収支は、特に大規模火災が発生した2002、2006、2015年に大きな炭素放出となった。

リモセン・GIS(サブテーマ3)による広域評価と比較することで様々な課題が浮き上がってきた。泥炭分解による炭素放出量はモデルベース(本サブテーマ)とGISベースで近い値を示したが、総炭素放出量(土地利用変化による炭素放出量、森林による炭素吸収量および泥炭分解による炭素放出量等の和)には大きな差があった。その原因の一つは、当該年に攪乱(土地利用変化)が発生しなかった森林における炭素収支にあった。リモセン・GISでは過去の攪乱履歴を考慮していないため、森林伐採数年後の植生回復過程における強い炭素吸収量を再現することができていなかった。ただし、本サブテーマの生態系モデルも植生回復過程時の検証を行っていないため、大きな不確実性があると考えられる。土地利用変化にともなう炭素放出量に関しても差が見られた。これは、モデル入力に用いたMODISベースの土地被覆変化(サブテーマ2)とPALSARベースの土地被覆変化(サブテーマ3)に差があること、モデル出力によるバイオマスがGISベースのバイオマスより大きいことが原因であった。今後はモデルベースの手法とGISベースの手法を組み合わせることにより、これらの点の改良が可能となると考えられる。

開発されたモデルによる広域評価システムを用いて、なりゆきシナリオ(BAU)と現在の森林保護シナリオによるCO₂吸収・放出量を2030年までシミュレートした。その結果、泥炭地での森林保全の炭素排出量削減効果は2030年で4.7 Tg Cとなり、2030年におけるインドネシアの炭素排出削減約束(NDC)である29%の0.6%に貢献できる可能性を示した。

(3) PALSAR-2による炭素動態の広域評価システムの開発

土地被覆変化の評価について、ボルネオ島全体の土地被覆分類精度は全体精度で約74%が得られ、特に森林、プランテーション(オイルパーム)、水域の分類を精度良く実現できた。一方、草地や低木林、都市域は分類精度が相対的に低く、今後のさらなる不確実性低減のためには、改善が必要である。ボルネオ島全体では、2015年から2016年にかけて森林の面積が減少しており、低木林、草地、プランテーション、森林火災域の面積が増加している。泥炭地の森林は全体の約4~10%程度であるにもかかわらず、2015~2016年に発生した森林火災のうち、その約40%が泥炭地で発生していた。2015年は強いエルニーニョ現象により火災が多発したが、この結果から泥炭林で特に発生しやすいと考えられ、炭素動態にも大きな影響を与えていると予想される。

森林地上部バイオマスの推定について、本研究により新たに提案した手法により、従来の検出限界(100 t ha⁻¹)を超え、おおよそ300 t ha⁻¹までの推定が可能となった。地上部バイオマスを300 t ha⁻¹まで推定できればボルネオ島の87%をカバーできるのに対し、100 t ha⁻¹までの推定では25%をカバーするのにすぎない。300 t ha⁻¹までの推定精度(RMSE)は74.3 t ha⁻¹であった。GLASの推定精度(38.7 t ha⁻¹)に比較すると劣るものの、地上部バイオマスの分布状況を面的に把握できる利点は大きい。2016年と2017年のPALSAR-2データを用いて年々変動の計測可能性も検討したが、年間の成長量に比べて推定誤差のほうが大きく、推定モデルの高精度化が今後の課題である。

泥炭沈降量の評価について、インドネシアのパランカラヤ市街周辺のデータ(2015年2月~2016年6月)を解析し、市街南部およびその付近の森林において市街中心部と比較して8 cm程度のPALSAR-2観測視線方向での延長(水平西側あるいは沈降する方向)を検出した。ただし、シーン内の他の領域ではまだばらつきが残っており、これらは主に、電離層や水蒸気によるノイズの残留成分によるものと考えられる。今回、時系列に多数の干渉ペアを解析したが、ほぼすべての干渉画像に電離層によるものと思われる長周期ノイズが重畳していた。実用的な精度を得るには、この長周期ノイズの除去を精度高く行う必要がある。今後、時系列データの蓄積やより高度なノイズ除去手法の開発が課題である。

以上の検討をベースに、他サブテーマの成果を組み合わせ2015年の1年間のボルネオ島全体の炭素収支を算出した結果、既存の評価手法と同じく放出の傾向が確認され、本研究の方が大きな値を示した。違いの生じた理由として、排出係数および泥炭面積が既存研究よりも大きいこと、評価対象とした2015年は火災面積が大きく他の年に比べて排出が大きくなったこと等が考えられた。サブテーマ2の生態系モデルによる結果との比較では、本研究の結果が過大となる地域があり、バイオマス成長量の算出方法の違いなどが要因として考えられた。炭素収支の推定結果から、ボルネオ島では中央カリマンタン州が特に放出に寄与しており、泥炭分解や

泥炭火災による放出が収支全体の3～4割を占めることが明らかとなった。本研究によって、IPCCガイドラインに準拠した炭素動態の広域評価手法にPALSAR-2データおよび他サブテーマによって得られた泥炭の最新情報の統合を達成することができ、ボルネオ島の熱帯泥炭地における炭素動態・収支に関するひとつの評価事例を提示することができた。手法間による評価結果には違いがあり、今後この不確実性低減のために、衛星データからの入力情報推定精度の向上（特にバイオマスの年々変化の推定の実現）や、衛星から泥炭分布やその水分量変化などを推定する手法の開発が必要である。

(4) 熱帯泥炭地の空間分布データの構築

1) 既存の泥炭地分布データの収集と整備

インドネシアの泥炭分布データに関連する機関について16カ所、マレーシアで4カ所訪問し、資料収集、意見交換を行った。特にマレーシアでは、GIS化された既存の泥炭分布データが存在しないため、新規泥炭分布図を作成する必要があったが、紙ベースではあるものの1960年代作成の詳細な土壌図を入手することができた。また、泥炭関連のワークショップや国際学会、COP（気候変動枠組条約締約国会議）21、22、23に参加し、最新の泥炭に関連する研究成果を聴講するとともに、関係者との意見交換を行った。

2) 泥炭地分布データの精緻化と高精度化

既存の泥炭分布図と衛星画像やデジタル標高モデル、さらには地質図や土壌図等を比較することによって、泥炭分布図の精緻化と高精度化を行った結果、泥炭分布域が明らかに誤りである箇所（例えば、デジタル標高モデルで50～100 mかつ、地質図で基盤岩の花崗岩等が分布）を容易に抽出できるようになった。さらに、これまで泥炭分布域に分類されていない場所で、直線的な排水路の建設や大規模伐採などが認められる場所では、泥炭が分布する可能性があり、高い精度で泥炭ポテンシャル域の抽出が可能となった。それら泥炭ポテンシャル地を対象にボーリング調査を行い、3)高精度データの構築につなげた。また、ボーリング調査地点の選定に先立ち、現地調査を行い、泥炭から溶出したタンニンを反映しているとされる薄茶～黒色の色調で特徴づけられる河川水の有無を確認した。また、泥炭の劣化と減少の要因の1つに挙げられる金の違法採掘が疑われる場所が、衛星画像上では、道路から少し森に入ったところで白いパッチ状に表現されていることを確認した。これらの現地調査の情報を元に、ボーリング調査地点を選定した。ボーリング調査は、2016年度にサラワク州で34地点、2016年と2017年の中部カリマンタン州でそれぞれ66地点と70地点で実施した。これらの結果から、泥炭の定義に基づき泥炭分布図の修正を行った。なお、衛星画像や地形特性とボーリング調査結果対応させることは、効率的かつ確実なボーリング調査計画の立案、また、泥炭地分布データの精緻化において重要である。

3) 高精度データの構築

サラワク州土壌局作成の土壌図では、泥炭を深い泥炭（厚さ1 m以上）と浅い泥炭（厚さ1 m未満）に分けられている。深い泥炭と浅い泥炭の面積の増減は、深い泥炭が1,528 haの減少、浅い泥炭は2,553 haの減少となり、浅い泥炭でより大きな泥炭面積の減少がみられた。さらに、減少した面積と修正前の総面積の増減率は、深い泥炭が-0.1%とわずかな減少だったのに対して、浅い泥炭では-2.7%と大きな減少を示し、浅い泥炭の方が消失の危険度が大きいことが分かった。また、浅い泥炭は低地や河川沿いに広く分布することが特徴で、深い泥炭に比べて開発圧が高いことが原因と考えられる。最終的に、深い泥炭と浅い泥炭を合計した泥炭面積の増減率は-0.3%となった。

中部カリマンタン州と西カリマンタン州における泥炭面積の増減をみると、いずれの州でもWI(2004)の泥炭面積の増減量が、最新の泥炭分布図とされる農業省(2011)よりも小さい結果となった。中部カリマンタン州では、WI(2004)に比べて農業省(2011)の泥炭面積がもともと小さいため、増減率は13.4%と大きく増加する結果となった。西カリマンタン州では、検土杖による簡易的な調査のみにとどめたことから、泥炭面積の増減率は-1.3%と小さな減少となった。また、西カリマンタン州では中部カリマンタン州と同様、WI(2004)では修正箇所が認められず、農業省(2011)に比較して精度が高いともいえる。

サラワク州、中部カリマンタン州、西カリマンタン州の修正前後の泥炭面積を合計した結果、サラワク州の土

壤図とWI(2004)の合計面積では2.7%の増加、サラワク州の土壤図と農業省(2011)の合計面積では5.6%の増加となった。-0.3%の減少しか見られないサラワク州の影響で、中部カリマンタン州の増加分が抑えられた結果といえる。

以上から、サラワク州における既存土壤図の精度は高く、詳細な調査が実施されていたと考えられる。また中部カリマンタン州では既存泥炭分布図(WI(2004)と農業省(2011))との増減が確認でき、さらに泥炭分布面積が増加する余地がある。一方、いずれの州においても開発によって泥炭が消失し続けていることを考えると、今後も空間分布データの整備と泥炭分布図の精緻化を継続することが重要である。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

1) 熱帯泥炭の好氣的分解にともなうCO₂放出量の定量化における精度向上

気候条件(降水量の季節変化)、泥炭タイプおよび土地被覆が異なる熱帯泥炭地において、好氣的分解にともなうCO₂放出量を定量化するとともに、主要な環境要因である地下水位との関係を明らかにした。また、自動開閉式チャンバーシステムを用いた連続観測により、多孔質の泥炭土壌からのCO₂とCH₄の放出速度が特徴的な日変化を示すことを明らかにした。その原因を考察した結果、チャンバー法の測定原理(チャンバーによる閉鎖)に起因して昼間の測定値が低くなった可能性があり、昼間のみの測定が一般的なマニュアルチャンバーによる測定結果が過小評価になることが示唆された。

2) 熱帯泥炭地のCH₄放出量の定量化

熱帯泥炭地における生態系スケールでのCH₄放出量を世界で初めて実測し、①生態系スケールのCH₄放出量は土壌からのCH₄放出量を大きく上回ること、②土地被覆によってCH₄放出量は異なったが、サラワク州の3サイト(泥炭林、オイルパーム園)では地下水位によってCH₄放出量のサイト間差をモデル化できること、③排水されたオイルパーム園も生態系スケールではCH₄ソースであること、④中部カリマンタン州の泥炭林では、地下水位が同じでも、サラワク州よりもCH₄放出量がかなり少ないこと、を明らかにした。

3) 陸域生態系モデルによる炭素動態の広域評価システムの開発

熱帯泥炭林を対象とした広域評価システムを開発した。これにより比較的長期の炭素動態を把握することが可能となった。また、システムを活用することで、将来の炭素動態や森林保護の炭素排出削減効果を評価することが可能となった。なお、IPCC準拠による広域評価では、過去の攪乱履歴が影響を及ぼす炭素動態を正しく評価できないという課題を見いだした。

4) 衛星リモートセンシングによる炭素動態の広域評価システムの開発

- ① 熱帯泥炭林におけるLバンドマイクロ波(PALSAR-2)の後方散乱強度の時系列特性を詳細に明らかにし、特に森林火災によって従来は知られていなかった変化が生じることを明らかにした。また、この特性を利用することで、森林火災域を高分解能かつタイムリーに把握可能なことを実証した。
- ② 熱帯泥炭林における土地被覆変化の解析および森林地上部バイオマス推定について、PALSAR-2の時系列観測を活かした新たな手法を開発した。バイオマス推定については、従来は一定の大きさまでしか推定ができなかったが、開発した手法によりその上限を大きく超えることが可能となった。
- ③ IPCCに準拠し、PALSAR-2のデータを炭素動態評価に活用するシステムを実証した。PALSAR-2による高分解能土地被覆分類の導入、新たな泥炭地の発見、排出係数の精緻化により、従来よりも炭素放出量が大きく見積もられる可能性を示した。一方、バイオマス成長量など、GISベースの手法では現状では十分に考慮されていないプロセスを課題として明らかにした。

5) 熱帯泥炭地の空間分布データの高精度化

既存の泥炭分布図と衛星画像やデジタル標高モデル、さらには地質図や土壤図とを比較することによって、

泥炭分布が明らかに誤りである箇所を容易に抽出できるようになり、また、泥炭分布検証のための現地調査計画の立案等に有効な情報を提供することが可能となった。さらに、現地調査結果を行ったことで、より精度の高い泥炭分布図を作成することができ、熱帯泥炭地のCO₂放出量推定の高度化に繋げることができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) IPCCやREDD+への貢献

「科学的意義」として上記した内容は、いずれもIPCCの「Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」を用いた温室効果気体排出量の推定における精度向上に貢献できる。例えば、泥炭分解とCH₄放出量の地域差や、それらの地下水位との関係性は、排出係数の高精度化(Tier 2以上)を意味するものである。また、泥炭地マップ(地理情報)の高精度化が炭素動態やGHG収支の推定精度向上に果たす役割は非常に大きい。同様に、本研究で開発した手法は、今後のREDD+等に必要となる熱帯泥炭林の炭素動態の評価において、インドネシア政府やGFOI(Global Forest Observation Initiative)などの国際的な枠組みを通じて世界各国に展開することが可能である。日本独自の技術として国際協力を行うこともでき、熱帯泥炭林の適切な管理を推進することができる。

2) インドネシア政府による熱帯泥炭地の保全・修復

2015年の強力なエルニーニョ現象にともなう干ばつにより、インドネシアでは広大な面積の泥炭地で火災が発生した。荒廃した泥炭地の修復と保全を目的として、インドネシア大統領直轄の政府機関として泥炭地復興庁が設立された。北海道大学は、京都大学、総合地球環境学研究所とともに泥炭地回復庁との間で研究協力に関するMOUを締結している。JICA等のサポートを受けて何度も会議を行っているが、泥炭地復興庁は本研究で用いた手法や得られた成果を評価しており、パイロットプロジェクト等で活用されることが期待できる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Wakhid N, Hirano T, Okimoto Y, Nurzakiah S and Nursyamsi D: *Science of the Total Environment*, **581–582**, 857–865 (2017) Soil carbon dioxide emissions from a rubber plantation on tropical peat.
- 2) Itoh M, Okimoto Y, Hirano T and Kusin K: *Science of the Total Environment*, **609**, 906–915 (2017) Factors affecting oxidative peat decomposition in different types of land use in a tropical peat swamp forest in Indonesia.
- 3) Kiew F, Hirata R, Hirano T, Xhuan W, Aries E, Musin K, Waili J, San L, Shimizu M and Melling L: *Agricultural and Forest Meteorology*, **248**, 494–501 (2018) CO₂ balance of a secondary tropical peat swamp forest in Sarawak, Malaysia.
- 4) Ishikura K, Hirano T, Okimoto Y, Hirata R, Kiew F, Melling L, Aeries E, Lo K, Musin K, Waili J, Wong G and Ishii Y: *Agriculture, Ecosystem and Environment*, **254**, 202–212 (2018) Soil carbon dioxide emissions due to oxidative peat decomposition in an oil palm plantation on tropical peat.
- 5) Wong G, Hirata R, Hirano T, Kiew F, Aeries E, Musin K, Waili J, Lo K and Lulie Melling: *Agricultural and Forest Meteorology*, **256–257**, 353–361 (2018) Micrometeorological measurement of methane flux above a tropical peat swamp forest.

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) Hirano T, Sundari S and Yamada H: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 329–337 (2016) CO₂ balance of tropical peat ecosystems.
- 2) Takeuchi W, Hirano T, Roswintarti O: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 445–453 (2016) Estimation model of ground water table at peatland in Central Kalimantan, Indonesia.
- 3) Osaki M, Nursyamsi D, Noor M, Wahyunto and Segah H: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 49–58 (2016) Peatland in Indonesia.
- 4) Osaki M, Hirose K, Segah H and Helmy F: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 137–150 (2016) Tropical peat and peatland definition in Indonesia.
- 5) Hirose K, Osaki M, Takeda T, Kashimura O, Ohki T, Segah H, Gao Y and Muhammad E: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 421–433 (2016) Contribution of hyperspectral application to tropical peatland ecosystem monitoring.
- 6) 大崎満: 日本の科学者, 52, 314–320 (2017) 熱帯泥炭地－黄金の大地 <特集> 東南アジア島嶼部熱帯林の保全と再生.
- 7) 本岡毅・林真智: 生物の科学 遺伝, 71, 70–76 (2017) 人工衛星だいち2号による宇宙からの森林観測.

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Hirano T, Marpaung F, Kusin K and Limin S: AsiaFlux Workshop 2015, Pune, India 2015, “Regrowing tropical peat ecosystem changed from a CO₂ source to a CO₂ sink after fire.”
- 2) Hirata R, Ito A, Hirano T and Saigusa N: AsiaFlux Workshop 2015, Pune, India 2015, “Improvement of the soil submodel of the process-based terrestrial ecosystem model to apply tropical swamp forests.”
- 3) 本岡毅: 日本学術会議公開シンポジウム「生態系計測・モニタリングの最前線」(2015)「ALOS-2 PALSAR-2による森林分類・変化・バイオマスの観測」
- 4) Hirata R, Okimoto Y, Hirano T, Frankie K and Lulie M: 日本地球惑星科学連合2016年大会(2016) “Initial results of observations of soil CO₂ and CH₄ fluxes in three ecosystem types of tropical peatland in Sarawak, Malaysia.”
- 5) Hirano T: International Workshop on “Tropical Peatlands, Past and Future”, Nanyang Technological University, Singapore, 2016, “Carbon dioxide balance of tropical peat ecosystems.”
- 6) Hirano T: Joint Seminar on “Utilization of Sago Ecosystem for Peatland Restoration”, Jakarta, Indonesia, 2016, “Carbon monitoring in peatland restoration program.”
- 7) Hirano T: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Carbon balance of tropical peat swamp forest.” (基調講演)
- 8) Hirose K, Takeda T, Anshari G, Nuriman M, Tanimoto T, Christianto R, Takahara S, Kobayashi H and Hidayat GG: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Assessment of tropical peatland map in West Kalimantan, Indonesia.”
- 9) Hirata R, Okimoto Y, Hirano T, Kiew F and Melling L.: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Continuous measurements of soil CO₂ and CH₄ fluxes in two tropical peatforests with high and low ground water level in Sarawak, Malaysia, by using an automated murthi-chamber systems.”
- 10) 平野高司・Marpaung F・Kusin K・Limin S: 2016年度iLEAPS-Japan研究集会(2016)「熱帯泥炭地の森林跡地における火災によるCO₂収支の変化」
- 11) 平野高司・伊藤雅之・沖元洋介・Wakhid N・Kusin K: 第27回日本熱帯生態学会大会(2017)「熱帯泥炭の好氣的分解にともなう二酸化炭素排出量の評価」
- 12) 林真智・本岡毅・澤田義人: 第63回日本リモートセンシング学会学術講演会(2017)「ALOS-2/PALSAR-2時系列データを利用した森林バイオマス地図の作成」
- 13) Hirano T: International Workshop on “Forest Ecological Resources Security for Next Generation: Development and Routine Utilization of Forest Ecological Resources and their Domestication, Kyoto, Japan,

2018, “Developing an integrated system to evaluate the carbon dynamics of tropical ecosystems in Borneo.”

7. 研究者略歴

研究代表者: 平野 高司

北海道大学院農学研究科修士課程修了, 博士(農学)

現在, 北海道大学院農学研究院 教授

研究分担者:

1) 平田 竜一

北海道大学大学院農学研究科博士課程修了, 博士(農学)

現在, 国立環境研究所 主任研究員

2) 本岡 毅

筑波大学大学院生命環境科学研究科博士課程修了, 博士(環境学)

現在, 宇宙航空研究開発機構 主任研究開発員

3) 広瀬 和世

秋田大学大学院工学資源学研究科博士課程修了, 博士(工学)

現在, 宇宙システム開発利用推進機構宇宙産業本部 国際部長

II. 成果の詳細

II-1 フィールド観測による熱帯泥炭林における炭素動態の解明

北海道大学 大学院農学研究院 基礎研究部門

生態環境物理学研究室

平野高司

植物栄養学研究室

大崎 満（定年退職により平成29年度から研究協力者）

生態環境物理学研究室

山田浩之（職務多忙のため平成28年12月まで）

平成27～29年度累計予算額：48,213千円（うち平成29年度：12,303千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

本サブテーマでは、1) 陸域生態系モデル（サブテーマ2）のパラメータ化と検証のためのフィールドデータの提供、2) 衛星リモートセンシング（PALSAR-2）を用いたシステム（サブテーマ3）で利用される温室効果気体（GHG）排出係数の高精度化（地域性を考慮したTier 2以上）、を主な研究目的とした。そのため、ボルネオ島内のインドネシア・中部カリマンタン州とマレーシア・サラワク州の土地被覆が異なる7つの熱帯泥炭生態系（4つの泥炭林、泥炭林の火災跡地、ゴム園、オイルパーム園）において、土壌表面（チャンバー法）と生態スケール（渦相関法）における二酸化炭素（CO₂）とメタン（CH₄）の放出速度・交換速度を観測した。CO₂については、特に泥炭の好氣的分解に着目した。得られた観測データは、陸域生態系モデルで活用され、精度向上に貢献した。また、1) 土地被覆の違いによるGHG放出量の違い、2) GHG放出量の実地性（中部カリマンタン州とサラワク州での違い）、3) GHG放出量と地下水位との関係、4) 生態系スケールでのCH₄放出量、などを解明するとともに定量化し、GHG排出係数の高精度化を行った。

[キーワード]

土地利用変化、排出係数、二酸化炭素、メタン、泥炭分解

1. はじめに

東南アジア（特にインドネシアとマレーシア）の低平地には、総面積25万km²におよぶ熱帯泥炭地が湿地林（熱帯泥炭林）と共存して分布しており、数千年かけて69 Gt（日本の年間排出量の約190年分に相当）におよび膨大な量の有機炭素を泥炭として土壌に蓄積してきた¹⁾。しかし、最近の30～40年間に森林伐採や排水をともなう大規模な農地（オイルパームやパルプ材（アカシア）を中心としたプランテーション）開発が行われた結果、乾燥化（地下水位の低下）が進み、微生物による泥炭の好氣的分解（大気への二酸化炭素（CO₂）の放出）が加速してきている²⁾。泥炭の乾燥化は大規模火災のリスクを高めることもあり、東南アジアの熱帯泥炭地は生態系炭素動態のホットスポットとして国際的に認識されており、近い将来、巨大なCO₂ソース（排出源）になることが危惧されている（Global Carbon Project :<http://www.globalcarbonproject.org/activities/theme2.htm>）。熱帯泥炭林の農地など（主にプランテーション）への転換にともなう環境変化を評価し、泥炭分解によって生じるCO₂放出量を定量化することが地球温暖化抑制の観点から強く求められているが、科学的根拠に基づく成果は未だ限られている。例えば、1) マニュアルチャンバー法を用いて泥炭土壌からのCO₂放出量（土壌呼吸量）を測定する、2) 泥炭地の地盤沈下量（物理的過程（圧密、収縮）＋微生物過程（好氣的分解））から泥炭分解を推定する、などに関して研究が行われてきたが、それらは「土壌呼吸量における根呼吸と泥炭分解が分離できていない」、「地盤地下量に対する好氣的分解の寄与の変動特性が未解明」、「環境要因とCO₂放出量の関係に地域差があるのか？」といった問題を抱えており、不確実性を低減するには多くの

課題が残されている。また、樹木等の植物を含む生態系スケールでのCO₂収支を定量化した例は、研究担当者のグループを除いて例がない。さらに、CO₂に次いで2番目に重要な温室効果気体（GHG）であるメタン（CH₄）フラックスについては、土壌チャンバー法を用いたフィールド研究があるものの、報告されている熱帯泥炭からのCH₄放出量はいずれも小さく、インバース法などから推定された熱帯アジアの大きなCH₄放出量を説明できていない³⁾。植物を介するCH₄の放出の寄与が大きいことも報告されており⁴⁾、生態系スケールでのCH₄フラックスのモニタリングが不可欠であるが、これまで熱帯泥炭林における観測例はなかった。

研究担当者は、2001年よりインドネシア・中部カリマンタン州の熱帯泥炭地において、現地のパランカラヤ大学と共同で微気象学的方法（渦相関法）を用いた生態系スケールでのCO₂フラックス観測を継続し、① 泥炭生態系のCO₂収支の定量化、② CO₂収支の変動特性の解明、③ 環境攪乱（排水、火災）や気候変動（エルニーニョ現象にともなう干ばつ）がCO₂収支に与える影響評価、を行ってきた⁵⁾。また、マレーシア・サラワク州においても、サラワク州熱帯泥炭研究所と共同で、2010年から渦相関法を用いたCO₂とCH₄のフラックス観測を継続している。本研究では、このような研究ネットワークを活用して環境攪乱の程度が異なる熱帯泥炭地においてフィールド観測を行い、蓄積された長期間のモニタリングデータを用いて熱帯泥炭林における炭素動態を明らかにしたい。

2. 研究開発目的

本研究全体の開発目的は、ボルネオ島に分布する泥炭地を中心とした熱帯泥炭生態系の炭素動態およびGHG収支を定量化するシステムを、陸域生態系モデル（サブテーマ2）と衛星リモートセンシング（サブテーマ3）を用いてそれぞれ開発することである。そのために、本サブテーマでは、1) 陸域生態系モデルのパラメータ化と検証のためのフィールドデータの提供、2) 衛星リモセン（PALSAR-2）を用いたシステム（IPCCの方法に準拠）で利用されるGHG排出係数の高精度化（地域性を考慮したTier 2以上）⁶⁾、を主な研究目的とする。また、蓄積されたフィールドデータを活用し、熱帯泥炭の酸化分解（CO₂放出量）や生態スケールでのGHG収支（CO₂とCH₄）の時空間変動と環境要因との関係を明らかにすることも研究目的とする。

3. 研究開発方法

1) 観測サイト

ボルネオ島内のインドネシア・中部カリマンタン州（1～4）とマレーシア・サラワク州（5～7）の7つの熱帯泥炭生態系でフィールド観測を行った（図(1)-1、表(1)-1）。サイト1～3は州都パランカラヤ市郊外の熱帯泥炭地であり、現地のパランカラヤ大学と共同で管理してきた。サイト1（PUF）は国立公園内の泥炭林であり、排水の影響をほとんど受けていない。サイト2（PDF）は、泥炭林の大規模開発（Mega Rice Project: MRP）にともなって1990年代後半に掘削された運河により排水が進んでいる。また、サイト3（PDB）は泥炭林の火災跡地であり、2014年までに何度か火災が発生したため、現在はシダ類が優占している。サイト4（JRP）は、パランカラヤ市から約40 km離れたMRPの跡地に2007年に開発されたゴム園で、1997年の火災で泥炭表層が焼失した。排水路が掘削されたため、乾季にはかなり地下水位が低下する。サイト5（MLM）は国立公園内で保全されている泥炭林であり、排水の影響はほとんどない。サイト6（CMC）は泥炭林の二次林であり、周辺にオイルパーム園が広がっているため、排水の影響を少し受けている。サイト7（SBW）は2004年に開設されたオイルパーム園で、排水路と堰によって地下水位が-0.8～-0.4 m（年平均でほぼ-0.6 m）に調節されている。

サイト1～3はパランカラヤ大学、サイト4はインドネシア農業省・湿地農業研究所、サイト5～7はサラワク州熱帯泥炭研究所との共同研究である。



図(1)-1 観測サイトの位置

表(1)-1 観測サイトの概略

	略称	土地被覆条件	観測項目	樹高 (m)
1	PUF	未排水の泥炭林	渦相関法 (CO ₂ , CH ₄) , マニュアルチャンバー (CO ₂)	23
2	PDF	排水された泥炭林	渦相関法 (CO ₂) , マニュアルチャンバー (CO ₂)	26
3	PDB	排水された火災跡地	渦相関法 (CO ₂) , マニュアルチャンバー (CO ₂)	1
4	JRP	ゴム園	マニュアルチャンバー (CO ₂)	6
5	MLM	保全された泥炭林	渦相関法 (CO ₂ , CH ₄) , 連続チャンバー (CO ₂ , CH ₄)	35
6	CMC	泥炭二次林	渦相関法 (CO ₂ , CH ₄) , 連続チャンバー (CO ₂ , CH ₄)	25
7	SBW	オイルパーム園	渦相関法 (CO ₂ , CH ₄) , 連続チャンバー (CO ₂ , CH ₄)	8

2) 渦相関法

JRPを除く6サイトには観測用のタワー（高さ20～40 m）が設置されている。各タワーサイトで、オープンパス方式のガス分析計（CO₂/H₂O：LI7500，CH₄：LI7700；Licor社製）を用いた渦相関法を適用し、CO₂とCH₄のフラックス（大気と生態系の間の正味交換速度）のモニタリング（連続観測）を行った（図(1)-2）。インドネシアのサイトでは2001～2004年から、マレーシアのサイトでは2010年から観測を継続している。なお、CO₂フラックスは全サイトで、CH₄フラックスはPDFとPDBを除く4サイトで、それぞれ連続観測した。得られたデータの品質管理を行った後に欠測補間を行い、生態系スケールでの正味交換量の年積算値を計算した。また、得られたCO₂フラックス（正味生態系CO₂交換量、NEE）を、経験的なモデルを用いて生態系光合成（GPP）と生態系呼吸（RE）に分離した。フラックス観測と同時に、気象環境（日射量、気温、湿度、風向風速、降水量など）および土壌環境（地温、土壌水分、地下水位など）の連続観測も行った。



図(1)-2 渦相関法のシステム（PUFサイト）

3) 連続チャンバー法

マレーシアの3サイト（MLM，CMC，SBW）において、自動開閉式チャンバーシステム（北海道大学低温科学研究所技術部作製）により、泥炭土壌表面からのCO₂とCH₄の放出速度（フラックス）を連続観測した（図(1)-3）。チャンバーシステムは、不透明の塩ビ製チャンバー（高さ40 cm，内径25 cm，有効容積0.0177 m³，底面積 0.0491 m²）16台とコントロールボックスで構成され、コントロールボックス内には、エアポンプ、電磁弁（流路切替用）、ガス（CO₂，CH₄，H₂O）分析計（Ultraportable Greenhouse Gas Analyzer (915-0011)，



図(1)-3 自動開閉式チャンバーシステム（SBWサイト）

Los Gatos Research社製）およびデータロガー（CR1000，Campbell社製）が内蔵されている。各チャンバーは、225秒ごとに順次、閉鎖して流路が切替わり（1時間で1周り）、閉鎖中のチャンバー内のガス濃度の上昇速度からCO₂とCH₄のフラックスを計算した。なおCH₄フラックスについては、泥炭面からの蒸発にともなう「水蒸気による希釈効果」を補正した。同時に、チャンバー内気温、地温、土壌水分、地下水位などの環境要因の観測も行った。

本研究では、泥炭の好氣的分解（微生物呼吸）にともなうCO₂放出量の測定を主な目的としたため、根呼吸を排除するための「根切り処理」を行った。泥炭林の林床には凹凸のある微地形が発達し、樹幹の周りは根を基礎として盛り上がっており（凸部）、その周囲を窪地（凹部）が取り囲んでいる。凸部は

ハンモック，凹部はホローと呼ばれており，今回は主に樹木根が少ないホローで測定を行った。すなわち，40 cm×80 cmの区画をホローに設定し，区画の外周に沿って泥炭表面から深さ80 cmまで溝を切り，ステンレス板を挿入して周囲からの植物根の侵入を防いだ。なお，研究サイトは地下水位が高いため，80 cmの深さには植物根がほとんど存在していなかった。したがって，区画内でチャンバーによって測定されるCO₂フラックスには根呼吸は含まれない。しかし，根切りによって区画内に生じた枯死根が分解するため，根切り後しばらくは微生物呼吸が上昇することが知られている。このような人為的誤差を最小限にするため，根切り後8～9ヶ月経過した2015年からフラックス観測を行った。

4) マニュアルチャンバー法

インドネシアの4サイトでは，マニュアルチャンバーによる土壌CO₂フラックスの観測を行った。連続チャンバー法と同様に，泥炭の好氣的分解（微生物呼吸）を主な研究対象としたため，ゴム園（JRP）では2014年6月，他の3サイト（PUF，PDF，PDB）では2013年9月に，プラスチック板を用いて根切り処理を行った。各サイトに，面積1 m×1 m，深さ1 mの根切り区を3反復で設け，各根切り区内の4ヶ所にチャンバーベース（カラー）を設置した（カラー総数は3×4=12個）。チャンバーは不透明な塩ビ管製で，開口部の面積は0.0707 m²，容積は0.0144 m³であった。常設されたカラーにチャンバーを3分間密着させ（水密），内部空間のCO₂濃度の変化をチャンバーに装着した小型赤外線CO₂センサー（GMP343，Vaisala社製）で測定した（図(1)-4）。同時にチャンバー内気温も測定した。フラックスの観測は，根切り処理を行った6ヶ月後（JRPでは2014年12月，他の3サイトでは2014年3月）から2015年12月まで，ほぼ毎月1回の頻度で昼間（9～16時）に3反復で行った。なおJRPでは，根切りを行わない場所でも同様のフラックス観測を行い，根呼吸を含む土壌呼吸速度を求めた。観測期間を通じて，各サイトで地温と地下水位のモニタリングを行った。



図(1)-4 マニュアルチャンバーによる測定の様子（PUFサイト）

5) 地盤地下

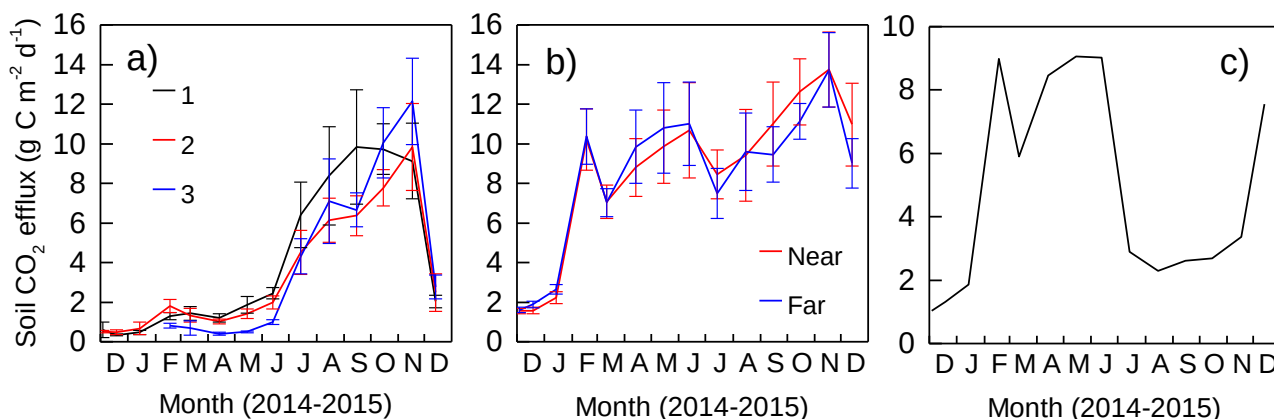
泥炭地では，排水によって地下水位が低下すると，物理的過程（圧密，収縮）と微生物過程（好氣的分解）の結果として，大きな地盤沈下が生じることが知られている。特に，排水初期には著しく地盤が沈下することもある。地盤沈下は比較的容易に測定することができ，過去からのデータの蓄積もあるため，地盤沈下速度から泥炭の好氣的分解にともなうCO₂放出量を推定することが試みられてきた⁷⁾。この方法を適用するには地盤沈下速度に対する好氣的分解の寄与を定量化して，地盤沈下を物理的過程と微生物過程に分離することが不可欠であるが，野外観測に基づく知見は乏しいのが現状である。そこで本研究では，ゴム園（JRP）とオイルパーム園（SBW）でのCO₂フラックス観測と同時に地盤高の測定を行い，好氣的分解の寄与の定量化を試みた。具体的には，根切り区と根切り区以外のそれぞれ（各3反復）で，鉄パイプを泥炭層の下の鉱質土壌層まで打込んで固定した。毎月1回，パイプ上端と泥炭表面との距離を測定して1年間の地盤高の変化を求めた。さらに，泥炭のバルク密度と炭素含有率を測定し，土壌CO₂フラックスの観測結果を加えることで，泥炭の好氣的分解にともなう地盤沈下量を計算した。両者を比較することで，地盤沈下に対する好氣的分解の寄与を明らかにした。

4. 結果及び考察

1) インドネシアのゴム園での実験（マニュアルチャンバーと地盤沈下の結果）

本サイト（JRP）は，1990年代の大規模開発（Mega Rice Project）にともなって湿地林の伐採が行われたエリアであり，2007年にゴムが植栽された。排水路が掘削されたため地下水位が低下しているが，地下水位の調節は行われていない。なお，インドネシアの泥炭地に開発されたプランテーションで最大

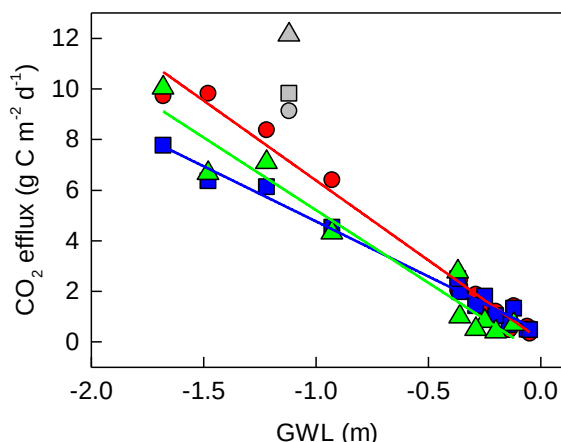
の面積を占めるのがオイルパームであり、アカシア（パルプ材）とゴム（第3位）が続く。オイルパームやアカシアのプランテーションに比べ、ゴムのプランテーションにおける炭素収支や泥炭分解に関する知見は非常に乏しい。



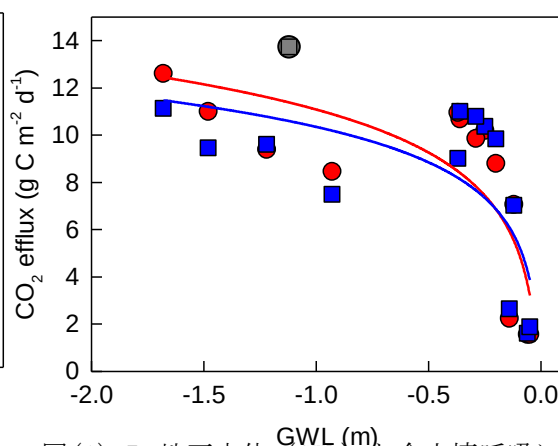
図(1)-5 泥炭分解によるCO₂放出速度 (a) , 全土壌呼吸によるCO₂放出速度 (b) および両者の差（根呼吸と落葉層の分解によるCO₂放出速度 (c) の季節変化（2014年12月～2015年12月）（エラーバーは標準偏差）

ゴム園内の3ヵ所で根切り処理を行い、根呼吸を排除して泥炭の好氣的分解（微生物呼吸）にともなうCO₂発生量のみを測定するためのチャンバーベースをそれぞれ4台ずつ設置した（泥炭分解）。泥炭分解のみを測定するために、チャンバーベース内のリーフリター（落葉層）を測定前に取り除いた。一方、根呼吸とリーフリターの分解も含む土壌呼吸速度を測定するためのチャンバーベースを12点に設置した（ゴムの樹幹の近く（near）と樹列の間（far）にそれぞれ6点ずつ）。各地点でクローズド方式のマニユアルチャンバー法を用いて、毎月、土壌CO₂フラックスを測定した。同時に、泥炭下の鉱物土壌に固定した鉄パイプを用いて地盤高の変動も測定した。測定は2014年12月～2015年12月に行ったが、2015年には大規模なエルニーニョ現象が発生したため8～10月の降水量が極端に少なかった。そのため、10月には地下水位が-1.7 mまで大きく低下した。

泥炭分解にともなうCO₂フラックスは非常に明瞭な季節変化を示し、雨季（6月まで）には0～2 g C m⁻² d⁻¹と低い値を維持したが、乾季（7～10月）には約10 g C m⁻² d⁻¹まで上昇した（図(1)-5a）。なお、泥炭分解の最大値は雨季が始まった直後の11月に生じた。これは、乾燥が継続した後の降水にともなう湿潤化によって土壌微生物の活性が一時的に上昇した（rain pulse）ことによると考えられる⁸⁾。一方、土壌呼吸速度の季節変化はそれほど明瞭ではなく、2月以降は比較的高い値が続いた（図(1)-5b）。その



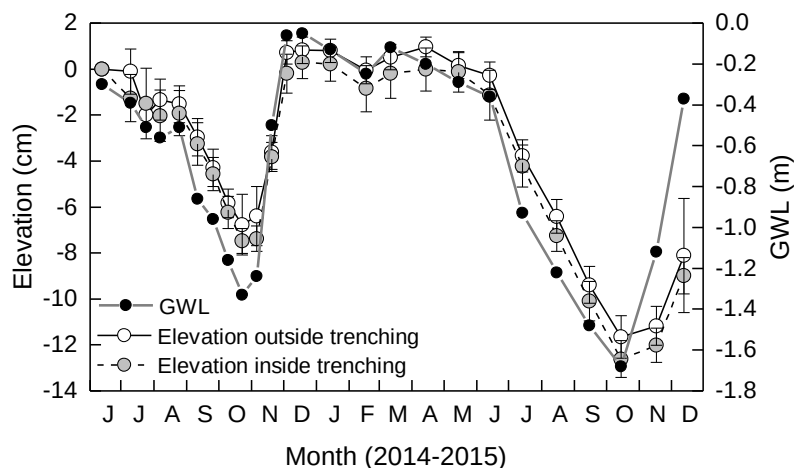
図(1)-6 地下水位（GWL）と泥炭分解によるCO₂放出量の関係（異なる色は異なる根切り区を表す。灰色のデータは雨季開始直後のデータであり、回帰分析から除かれている。）



図(1)-7 地下水位（GWL）と全土壌呼吸によるCO₂放出量の関係（異なる色は異なる根切り区を表す。灰色のデータは雨季開始直後のデータであり、回帰分析から除かれている。）

結果、土壌呼吸速度と泥炭分解速度の差（根呼吸とリーフリターの分解の和に相当）は異なる季節変化を示し、雨季に高くなった（図(1)-5c）。泥炭分解速度、土壌呼吸速度ともに地下水位との間に負の有意な相関関係が認められたが、泥炭分解が地下水位の低下にともなって直線的に上昇するのに対し（図(1)-6）、土壌呼吸は低水位において上昇速度が低下した（対数式で近似できた）（図(1)-7）。雨季が始まった直後の11月のデータを除くと、地下水位と泥炭分解の直線関係は大きく改善した（ $r^2 = 0.94 \sim 0.94$ ）。泥炭分解の負の直線的な変化は、土壌への酸素供給量の変化にともなう泥炭の好氣的分解の増減を表している。また、低水位での土壌呼吸の上昇率の低下は、ゴムの細根成長の季節変化（フェノロジー）や乾燥条件でゴムが水ストレスを受け、根呼吸が低下したことを示唆している。なお、ゴムは乾季に落葉量が増加する。これらの図に示された関係式を用いて、地下水位の連続データから泥炭分解と土壌呼吸によるCO₂放出量の2014年12月～2015年12月（エルニーニョ年）における年積算値を計算したところ、それぞれ炭素換算で 1408 ± 214 , 3293 ± 1039 g C m⁻² yr⁻¹（平均値±標準偏差）となった。両者の差（ 1885 g C m⁻² yr⁻¹）が根呼吸とリーフリターの分解の和となる。この結果から、泥炭分解が土壌呼吸に占める割合が46%であることがわかった。なお、土壌呼吸速度の値は、樹木の近くと中間（樹木から離れた地点）でそれぞれ 3398 ± 1266 , 3187 ± 864 g C m⁻² yr⁻¹であり、両者の間に有差はなかった。このことは、このゴム園の細根密度が樹木からの距離と無関係であることを示唆している。

地盤高は主に地下水位と連動した明らかな季節変化を示した（図(1)-8）。浮力の増減にしたがい、地盤高は乾季に低下し、雨季に上昇した。このことは、地盤沈下から泥炭分解を推定するには、地下水位を十分に考慮する必要があることを示している。地下水位がほぼ同じであった2014年12月と2015年12月の1年間で、さらに水位を補正して地盤沈下量を求めると、根切り区の外でそれぞれ 5.96 ± 0.43 , 5.64 ± 3.20 cm yr⁻¹（平均値±標準偏差）であり、根切り処理の地盤沈下への影響は有意ではなかった。排水が行われている泥炭地では大きな地盤沈下が生じるが、物理的要因（圧密+収縮）と微生物的要因（分解）の結果である。地盤沈下から泥炭分解にともなうCO₂発生量を推定するためには、地盤沈下に対する分解の寄与を定量化する必要がある。この研究サイトで2014年9月に採取した泥炭を分析して得られたバルク密度（ 0.23 g cm⁻³）と炭素含有率（42.3%）を用いて、上記の泥炭分解量（ 1408 g C m⁻² yr⁻¹）から年間の地盤沈下量に計算したところ 1.50 cm yr⁻¹となった。このことは、地盤沈下に対する泥炭分解の寄与が25%であったことを示している。現在、インドネシアでは、泥炭地でのゴム園の開発が進行している。しかし、泥炭地でのゴム園における泥炭分解や炭素収支などに関する知見はほとんどない。本研究で得られた泥炭分解に関する現地観測に基づく知見は全く新しいものであり、その社会的、科学的価値は高いと考えている。



図(1)-8 地盤高と地下水位（GWL）の季節変化（2014年6月～2015年12月、地盤高は2014年6月の値を基準にしている。エラーバーは標準偏差である。）

2) インドネシアの3サイトでの実験（マニュアルチャンバーの結果）

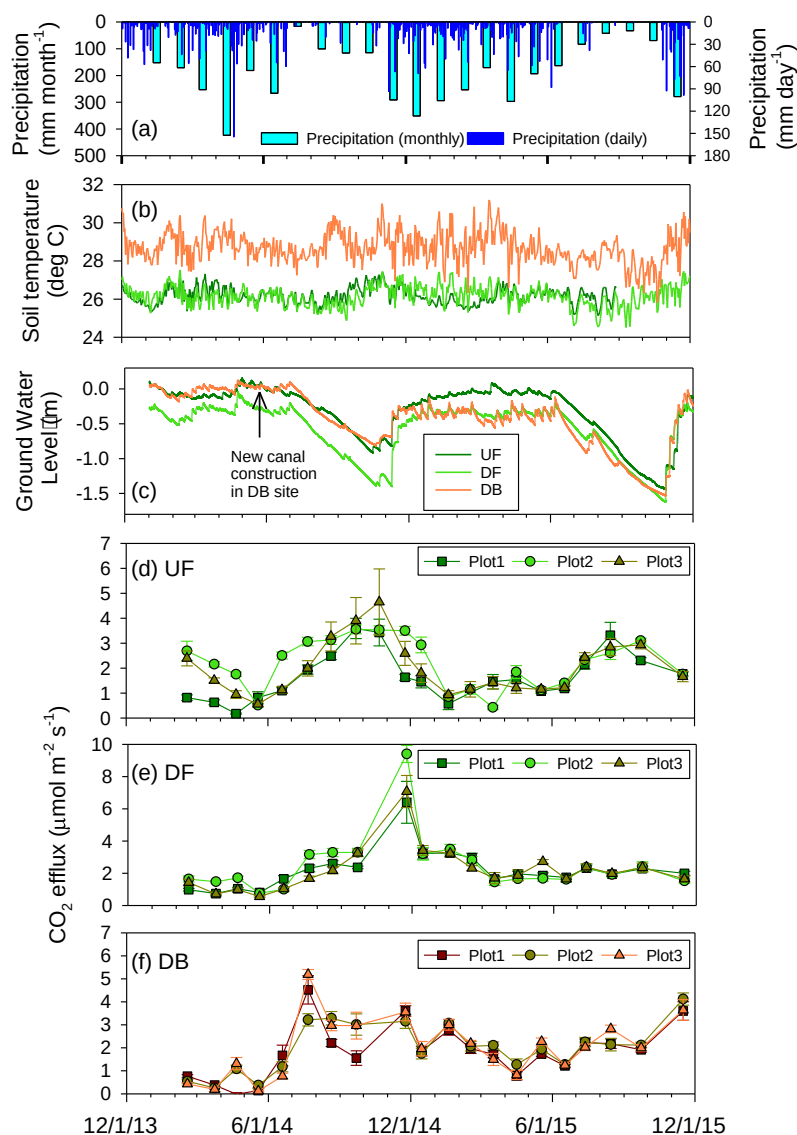
これらの3サイトは未排水の泥炭林（PUF）、排水された泥炭林（PDF）および排水後に焼失した泥炭林跡地（PDB）である。それぞれ15 km以内に分布し、本来は同じ条件の熱帯泥炭林であったが、1990年代の大規模開発（Mega Rice Project）とその後の泥炭火災によって植生と環境が異なるようになった。ゴム園（JRP）からは約40 km離れている。本実験では泥炭の好氣的分解を対象としたため、各サイトの3ヵ所で根切り処理を行い、根呼吸を排除して泥炭の好氣的分解（微生物呼吸）にともなうCO₂発生量のみを測定した。また、各根切り区にチャンバーベースを4台ずつ設置した。泥炭分解速度のみを測定する

ために、チャンバーベース内のリーフリター（落葉層）を測定前に取り除いた。ゴム園の場合と同様に、各地点でクロズド方式のマニュアルチャンバー法を用いて、毎月（2014年3月～2015年12月）、土壌CO₂フラックスを測定した。

泥炭分解速度は、雨季に低く乾季に高いという季節変化を示した（図(1)–9d–f）。観測期間を通じた泥炭分解速度の平均値（±標準誤差）は、それぞれ 1.90 ± 0.19 (PUF), 2.30 ± 0.33 (PUF), 1.97 ± 0.25 (PUF) $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ であった。全てのサイトにおいて、泥炭分解速度に最も重要な影響を与える環境要因は地下水位であったが、両者の関係は放物線（二次式）で近似することができた。これらの関係式を用いて地下水位の連続データから泥炭分解量の年積算値を2014年と2015年について計算したところ、PUFでは698, 745 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ （平均地下水位は、それぞれ-0.23, -0.39 m）、PDFでは775, 825 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ （平均地下水位-0.55, -0.59 m）、PDBでは646, 748 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ （平均地下水位-0.22, -0.62 m）となった。年積算値は、両年ともに、PUFとPDBに比べてPDFで有意に大きかった。強力なエルニーニョ現象が発生したため、2015年乾季の地下水位の低下は大きかったが、2014年と2015年の間には泥炭分解速度に有意差はなかった。また、3サイトにおける泥炭分解速度は、これまでに報告された値（オイルパーム園やアカシア植林地（パルプ材）など）に比べて小さいことがわかった。前述のゴム園の値（1408 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ ）に比べても、5～6割程度であった。この違いの理由として、施肥（窒素など）の有無を挙げることができる。本研究のサイトは未利用地であり、施肥などは行われていない。そのため貧栄養であり、他の農用地に比べて土壌微生物の活性が抑制されていた可能性が高い。なお、PUFとPDFで2004～2005年に行われた自動開閉式チャンバーシステムによる連続観測の結果によると、土壌呼吸の年積算値は、両サイトでそれぞれ1321, 1224 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ であった⁹⁾。この報告に示された地下水位との間の関係式から2014年と2015年の土壌呼吸量を計算すると、PUFで1662, 1864 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ 、PDFで1296, 1306 $\text{g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$ となり、泥炭分解が土壌呼吸に占める割合は、それぞれ39～40%、59～60%となった。上述のゴム園の結果（46%）と比べると、PUFでは低く、PDFでは高かった。

3) マレーシアの3サイトでの実験（連続チャンバー法による結果）

サラワク州の保全された熱帯泥炭林（MLM）、周囲が開発された泥炭二次林（CMC）および泥炭林を伐採して開発されたオイルパーム園（SBW）において、自動開閉式チャンバーシステムを用いて泥炭分解に



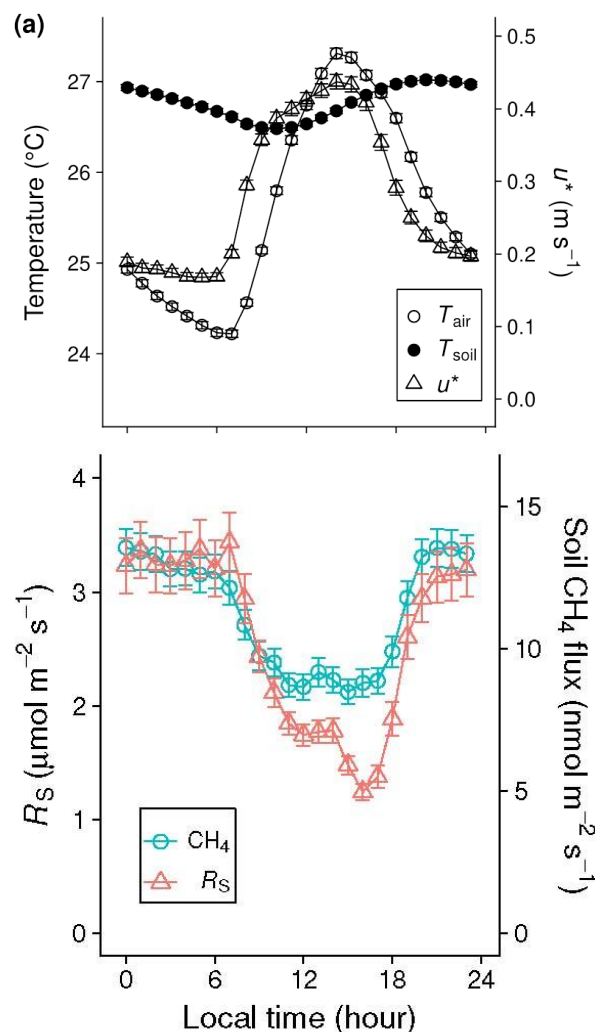
図(1)–9 降水量 (a), 地温 (5 cm深) (b), 地下水位 (c), 泥炭分解によるCO₂放出速度 (PUF: d, PDF: e, PDB: f) の季節変化 (2014年3月～2015年12月)

ともなう土壌CO₂放出速度と土壌CH₄放出速度を1時間間隔で連続観測した。観測開始は、MLMでは2015年8月、CMCでは2015年5月、SBWでは2015年1月であった。CO₂フラックスについては泥炭の好氣的分解を対象としたため、根切り区を設けて観測を行ったが、リーフリターの除去を行っていないため、MLMとCMCでは落葉層の分解を含んでいる。SBWではリターがほとんどないので、ほぼ泥炭の好氣的分解に等しい。3サイトは約130 kmの範囲内に存在し、気候条件（気温、降水量）はほぼ等しいが、攪乱（排水）の程度が異なるため、地下水位はMLM > CMC > SBWである。

(1) 土壌フラックスの日変化

土壌からの温室効果気体（CO₂やCH₄）の放出速度（フラックス）の測定は、様々な生態系において数多く行われてきたが、多くは上述のようなマニュアルチャンバーを用いたものであり、また、CH₄に関してはチャンバー内の空気を採取し、実験室に持ち帰ってガスクロマトグラフ等で分析することが普通であった。最近になって自動開閉式チャンバーシステムを用いた連続観測が普及してきたが、熱帯泥炭地に適用された例はこれまでほとんどなく⁹⁾、CH₄については本研究が初めてである。

土壌ガスフラックスは、CO₂、CH₄ともに明らかな日変化を示した（図(1)-10b）。これはMLMの例であるが、他のCMCとSBWでも同様の結果であった。すなわち、土壌フラックスは昼間低下した。土壌呼吸速度（CO₂フラックス）が地温の上昇とともに指数関数的に上昇することは良く知られているため、土壌呼吸速度は地温が上昇する昼間に高くなると予測していたが、この結果は逆である（図(1)-10a）。このような日変化の原因として2つの理由が挙げられる。まず、土壌内でのマスフローの発生である。夜間は地温が気温よりも高くなり、泥炭土壌の表層の不飽和層において熱対流が生じる¹⁰⁾。結果としてマスフローによる上向きのフラックスが発生する。一方、昼間は地上付近の風速が上昇し、乱流強度（摩擦速度 u^* ）も上昇する（図(1)-10a）。その結果、チャンバーが開いているときにチャンバー内の空気が流動し、土壌表層の空隙との間で空気の交換（マスフロー）が生じる（ポンピング効果）。このようなマスフローによって土壌中のガス濃度が低下し、チャンバーが閉じたときのフラックス（主に拡散による）を低下させることになる¹¹⁾。間隙率の大きな泥炭土壌では、このようなマスフローの効果が大きいと考えられる。夜間の熱対流によるフラックスの上昇は自然現象であるが、昼間のフラックスの過小評価は測定原理に起因するものであり、泥炭のような間隙率が大きい土壌に対してチャンバー法を適用する限り、マニュアルチャンバーによる測定であっても避けられないと考えられる。また、マニュアル測定では一般的であるが、昼間にのみ測定を行った場合には、過小評価はさらに大きくなる可能性がある。したがって、上述したインドネシアでの測定結果は過小評価になっているかもしれない。なお、今回は林床での測定であり、地温の日変化が非常に小さかった（図の例では約1℃）。そのため、温度の効果も小さかったと考えられる。裸地や農地などでは地温の日較差が大きいため、地温の効果にマスクされてこのような日変化は検出できないかもしれない。



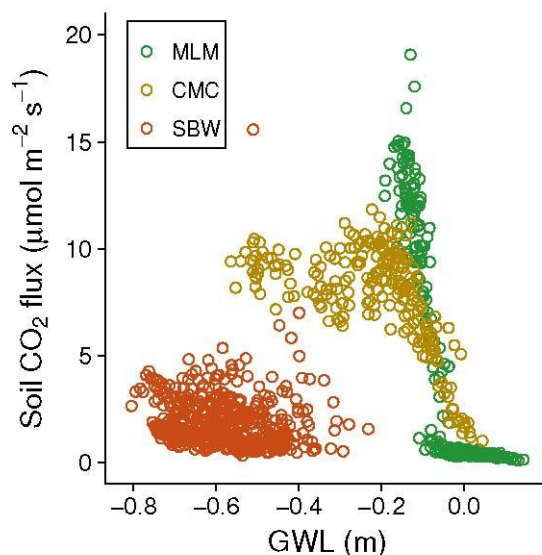
図(1)-10 チャンバー内地温、気温およびタワールで観測した摩擦速度 (u^*) (a) と泥炭分解によるCO₂放出速度 (R_s) および土壌CH₄放出速度 (b) の日変化 (MLMサイト) (全ての実測データのアンサンブル平均)

以下では、このような日変化の影響を除くため、日平均値を用いて解析を行った。1時間ごとのデータについて、閉鎖中のチャンバー内での濃度変化の直線性とフラックスの絶対値に閾値を設け、データの品質管理（スクリーニング）を行った。スクリーニングを通過したデータの数が多い（7～18時）、夜間（19～6時）ともに6個以上のときのみ日平均値を計算して、解析に用いた。

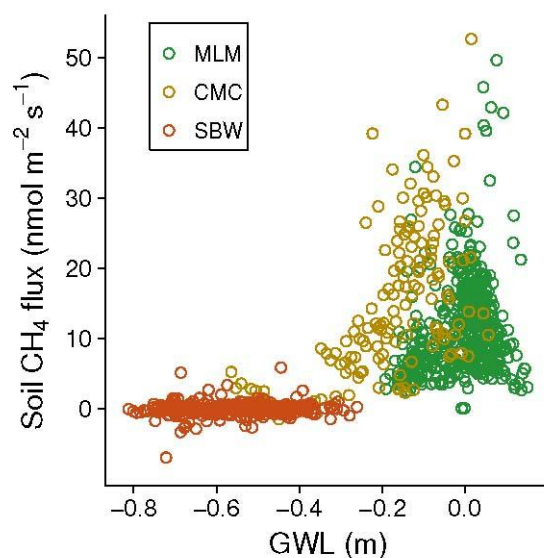
(2) 泥炭の好氣的分解速度 (CO_2)

インドネシア・中部カリマンタン州に比べて降水量の季節変化はそれほど明瞭ではないが、サラワク州では北半球中緯度の秋から春の時期が雨季に相当する。森林サイト（MLMとCMC）では雨季に地下水位が上昇し、 -0.1 m以上まで上昇すると CO_2 フラックスが大きく低下した（図(1)-11）。これは、土壌表面が飽和するとともに湛水条件になり、土壌中への酸素の供給が大きく制限されるとともに CO_2 の大気への拡散が抑制されるためである。MLMでは地下水位が -0.2 mを下回ることがほとんどなかったため、低水位による泥炭の好氣的分解の促進を観測することはできなかった。一方、CMCでは -0.6 m程度まで地下水位は低下したが、 -0.2 m以下において地下水位と CO_2 フラックスの間に明瞭な関係はみられなかった。MLMとCMCにおける地下水位と CO_2 フラックスの関係は、中部カリマンタン州の森林サイト（PUFとPDF）と同様であった。いずれのサイトにおいても、 CO_2 フラックスは、高水位条件では地下水位の上昇にしたがって低下したが、低水位条件における変化は小さかった。一方、オイルパーム園（SBW）では、地下水位が調節されているにもかかわらず、降水量の多寡に連動して地下水位は $-0.8 \sim -0.2$ mの範囲で変動し、地下水位の低下にともなって CO_2 フラックスが上昇する傾向を示した。しかし、中部カリマンタン州のゴム園（JRP）のような明瞭な直線的な関係は得られなかった。結果が異なった理由として、地下水位の変動幅の違いが挙げられる。地下水位が -1.5 m程度まで低下すれば、SBWでも CO_2 フラックスが大きく上昇していたかもしれない。

図(1)-11の関係を非線形混合回帰モデルで近似し、地下水位の連続データを用いて欠測値の補間を日単位で行い、各サイトで泥炭分解による CO_2 放出量を計算した。2年間（2015～2016年）の平均値は、MLM、CMC、SBWでそれぞれ910 (0.00), 2910 (-0.23), 690 (-0.60) $\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ であった。それぞれの括弧内は、年平均地下水位 (m) である。なお、MLMとCMCでは落葉層の分解による CO_2 フラックスも含んでいる。その量を評価することは難しいが、熱帯泥炭林のリターフォールの年間値の平均として $333 \pm 96 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ という報告がある¹²⁾。大まかではあるが、年間に同量のリターが分解する仮定すると、MLMとCMCの泥炭分解量は、それぞれ577, 2577 $\text{g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ と推定できる。MLMの分解量は、中部カリマンタン州の未排水の泥炭林（PUF: $698 \sim 745 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ）よりも少ないが、これは地下水位が高いことが主な原因だと考えられる。一方、SBWの分解量は、中部カリマンタン州の森林火災跡地（PDB: $646 \sim 748 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ）とほぼ等しかった。しかし、CMCの値は極端に大きいものとなった。この原因については、さらに検討が必要であるが、CMCの森林は葉面積が大きかったことから、リターフォールが多く、落葉層が厚かったと考えられる。また、チャンバ



図(1)-11 地下水位 (GWL) と泥炭分解による CO_2 放出速度の関係



図(1)-12 地下水位 (GWL) と土壌からの CH_4 放出速度の関係

一の位置が樹幹に近く、根切り処理にともなう枯死根の量も多かったのかもしれない。

SBWでは、鉄パイプによる地盤高の測定を毎月行った。その結果、年間の地盤沈下量は、2015、2016年でそれぞれ1.83, 1.27 cm yr⁻¹となった。2015年の結果は、中部カリマンタン州のゴム園（JRP）での2015年の測定値（5.64～5.96 cm yr⁻¹）に比べて1/3以下である。一方、泥炭分解にともなうCO₂放出量の2015年と2016年の年間値は、それぞれ760, 610 g C m⁻² yr⁻¹であり、泥炭のバルク密度（0.12 Mg m⁻³）と炭素含有率（52.8%）を使って変換すると、泥炭分解にともなう地盤沈下量は、それぞれ1.22, 0.99 cm yr⁻¹となる。したがって、1年間の地盤沈下量に対する泥炭の好氣的分解の寄与は、2015年が67%, 2016年が78%となった。これらの値は、ゴム園（JRP）での結果（25%）に比べてかなり大きい。地盤沈下量および泥炭分解の寄与におけるSBWとJRPの差は、主に乾季の地下水位の差（SBW > JRP）に起因すると考えられるが、サイトの攪乱履歴や、それに関連する泥炭の理化学性のサイト間の違いも関係しているだろう。

(3) 泥炭土壌からのCH₄放出速度

土壌CH₄フラックスは、森林サイト（MLMとCMC）では雨季に上昇した。しかし、MLMでは地表面が湛水する条件（地下水位>0.0 m）では低下した（図(1)-12）。地下水位が高く土壌の表層まで飽和した嫌気条件では、土壌中でのCH₄発生量が増加するとともに土壌表層でのCH₄の酸化が抑制されるため、土壌面からのCH₄放出速度が上昇する。ところが、湛水条件になると、地面の水がバリエーとなり土壌表面からのCH₄放出を低下させることになる。一方、地下水位が-0.2 m以上になることがなかったSBWでは、CH₄フラックスは地下水位に関係なくほぼ0であった。地下水位が低い条件でも、土壌にCH₄が吸収されることもなかった（負のフラックス）。図(1)-12の関係を非線形混合回帰モデルで近似し、地下水位を用いて欠測値の補間を日単位で行い、各サイトで土壌CH₄放出量の年間値を計算した。その結果、CH₄放出量（2年間の平均）は、MLM, CMC, SBWでそれぞれ4.32, 3.69, 0.05 g C m⁻² yr⁻¹となった。森林サイト（MLMとCMC）の間には有意差はないが、オイルパーム園（SBW）では有意に小さかった。

4) 渦相関法による生態系スケールでのCO₂フラックスの測定

中部カリマンタン州の3サイト（PUF, PDF, PDB）とサラワク州の2サイト（CMC, SBW）における正味生態系CO₂交換（NEE）、生態系光合成（GPP）および生態系呼吸（RE）の年積算値の平均は、データの品質管理と欠測補間の後、PUFで190, 3466, 3559 g C m⁻² yr⁻¹, PDFで424, 3166, 3591 g C m⁻² yr⁻¹, PDBで470, 1270, 1741 g C m⁻² yr⁻¹, CMCで-279, 3426, 3146 g C m⁻² yr⁻¹, SBWで934, 2629, 3563 g C m⁻² yr⁻¹となった。なお、MLMについては、共同研究者からの要請でCO₂フラックスのデータを公表しないこととなった。NEE = RE - GPPと定義され、NEEが負の場合は対象となる生態系が正味のCO₂シンクであることを意味する。5つのサイトでNEEの年間値を比較するとCMC > PUF > PDF = PDB >> SBWとなり、サラワク州の泥炭二次林（CMC）のみが負値（CO₂シンク）であった。

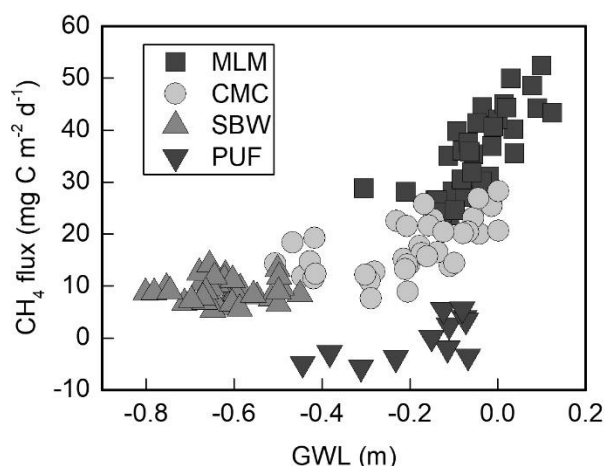
CMCと中部カリマンタン州の未排水の二次林（PUF）の地下水位は同程度であったが、REはCMCの方が小さく、この差がNEEの差となっている。なお、中部カリマンタン州のサイトでは、乾季の後半に煙霧に覆われることが多かった。これは、農家による火入れ（雑草防除や泥炭燃焼による施肥効果）や干ばつによる大規模泥炭火災による。その結果、太陽光が減衰し、GPPが低下していた可能性が高い⁵⁾。NEEが最大だったのはオイルパーム園（SBW）であり、大きなCO₂ソースであった。SBWのREはCMCやPDBに比べると大きい、PUFとPDFのREとは同程度であった。一方、SBWのGPPは森林サイト（CMC, PUF, PDF）に比べてかなり小さかった。樹齢6～12年のオイルパーム園は、森林に比べて葉面積が小さいため光合成量が少なく、このことが大きなCO₂ソースとなった主な理由である。

5) 渦相関法による生態系スケールでのCH₄フラックスの測定

サラワク州の3サイト（MLM, CMC, SBW）と中部カリマンタン州の1サイト（PUF）において、渦相関法によるCH₄フラックスの観測を行った。オイルパーム園（SBW）を除いて、生態系スケールでのCH₄放出速度は地下水位の上昇にともなって増加する傾向を示し、雨季において大きくなった。この傾向は、土壌CH₄放出速度と同様であった（図(1)-12）。PUFでは、地下水位が-0.1 mを境に、それ以下ではCH₄吸収、

それ以上ではCH₄放出になる傾向を示した。各サイトにおいて観測データの品質管理と欠測補間を行ってCH₄放出量の年間値を計算したところ、MLM, CMC, SBW, PUFでそれぞれ8.46, 4.13, 2.23, -0.07 g C m⁻² yr⁻¹ (MLM > CMC > SBW > PUF) となった。このサイト間差の考察するために、月平均値を用いて、地下水位とCH₄フラックスの関係を解析した(図(1)-13)。その結果、①サラワク州の3サイトの結果は、一つの指数関数で有意($p < 0.001$)に近似できた($y = 31.0 * \exp(2.02 * x)$, $r^2 = 0.76$)、②PUFの結果は他の3サイトの結果から大きく離れた。以上より、サラワク州におけるCH₄放出速度のサイト間差は、地下水位の違いによってほぼ説明できることがわかった。一方、中部カリマンタン州の泥炭林では、地下水位とCH₄放出速度の関係がサラワク州とは大きく異なり、同じ地下水位でも放出量が非常に少ないことが明らかとなった。この地域差の原因については未解明であるが、泥炭の特性の違いや気候条件の違いが関係していると考えられる。東南アジアの熱帯泥炭は、形成過程の違いにより沿岸型(coastal)と内陸型(inland)に大別できる¹³⁾。サラワク州のサイトの泥炭は沿岸型、中部カリマンタン州のサイトの泥炭は内陸型である。また、両地域では降水量の季節変化が異なり、中部カリマンタン州ではサラワク州に比べて乾季が顕著に現れるため、地下水位の低下が大きい。特にエルニーニョ年には、乾季の後半(10月くらい)に地下水位が著しく低下する。そのため、乾季の間に泥炭の不飽和層が深くまで広がり、泥炭内の易分解性の有機物が好氣的条件下で分解されてしまい、CH₄発生を引き起こす嫌気分解の基質が不足している可能性がある。現在、現地の泥炭試料を用いた室内培養実験を行っており、サイト間差の考察がさらに進むことを期待している。

生態系スケールでのCH₄放出速度は、上述の連続チャンバー法による土壌CH₄放出速度に比べてかなり大きかった。例えば、サラワク州の3サイトの年間値を比較すると、MLMで8.46 vs. 4.32, CMCで4.13 vs. 3.69, SBWで2.23 vs. 0.05 g C m⁻² yr⁻¹であった(渦相関法 vs. チャンバー法)。測定手法間のこのような差は、土壌表面から森林キャノピーの間にCH₄の排出源が存在することを示唆している。例えば、泥炭林を構成する樹木の幹からのCH₄の放出¹⁴⁾や森林の地上部に生息するシロアリからの放出¹⁵⁾である。前者については、かなり大きいことが報告されている。また、林床の水たまりやオイルパーム園の小規模な排水路からも、ホットスポットとしてかなりのCH₄が放出されることも報告されている¹⁶⁾。このような排出源からの放出量は、土壌に設置したチャンバーでは測定することができない。土壌チャンバーによる測定結果(多くは0.0~0.3 g C m⁻² yr⁻¹)¹⁷⁻¹⁹⁾から、熱帯泥炭林を中心とした熱帯泥炭地(農地などを含む)ではCH₄放出量が非常に少ないと考えられてきた。本研究においても、確かに連続チャンバーによる土壌CH₄フラックスはそれほど大きくないが、それでも従来のチャンバー法の結果よりは大きい。これは、これまでの研究がマニュアルチャンバーで測定した昼間のデータのみを用いていることに起因しているのかもしれない。MLMの生態系スケールのCH₄放出量の年間値(8.46 g C m⁻² yr⁻¹)を中高緯度の泥炭湿原での渦相関法による測定値と比較すると、中緯度の湿原に比べると少ないが、高緯度(亜北極圏)の湿原のCH₄放出量とは同程度である²⁰⁾。



図(1)-13 地下水位 (GWL) と生態系スケールのCH₄放出速度の関係 (月平均値)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 熱帯泥炭の好氣的分解にともなうCO₂放出量の定量化

ボルネオ島内のインドネシア・中部カリマンタン州とマレーシア・サラワク州に存在する、異なる土地被覆の熱帯泥炭地において、好氣的分解にともなうCO₂放出量(フラックス)を定量化するとともに、主要な環境要因である地下水位との関係を明らかにした。熱帯泥炭生態系における土壌CO₂フラックスに関する研究報告は少なくないが、多くは根呼吸などを含む土壌呼吸速度を対象にしており、泥炭

の分解に関する知見は少ない。東南アジアの熱帯泥炭地で問題になっているのは、短期間で回転する植物の炭素循環ではなく、数千年にわたって蓄積した泥炭炭素の不可逆的な分解である。泥炭分解を分離して評価することの科学的意義は大きい。さらに、泥炭地の地盤沈下に対する泥炭分解の寄与を定量化することができた。このことは、近い将来に期待される泥炭分解の広域推定に対する基礎的知見となる。なお、中部カリマンタン州とサラワク州は降水量の季節変化のパターンが異なるとともに、泥炭の形成履歴が異なり、前者の研究サイトは内陸型泥炭、後者の研究サイトは沿岸型泥炭に分類される。このような異なる水文・泥炭・土地被覆条件で得られた知見は、炭素収支の広域評価の精度向上に貢献することができる。

2) 土壌ガスフラックスにみられた日変化

自動閉鎖式チャンバーシステムを用いて連続観測を行った結果、多孔質の泥炭土壌からのCO₂とCH₄の放出速度に日変化が認められ、放出速度は夜間高く、昼間低くなった。昼間の測定値は、チャンバー法の測定原理に起因して低くなった可能性があり、昼間のみの測定が一般的なマニュアルチャンバーによる測定結果は過小評価になっていることが示唆された。以上の知見は、泥炭地における土壌ガスフラックスの定量化の精度向上に貢献する。

3) 熱帯泥炭地のCH₄放出量の定量化

世界で初めて熱帯泥炭地の4サイトにおける生態系スケールでのCH₄放出量を実測し、以下の新たな知見が得られた。①生態系スケールのCH₄放出量は土壌からのCH₄放出量を大きく上回った、②土地被覆によってCH₄放出量は異なったが、サラワク州の3サイト（泥炭林、オイルパーム園）では地下水位によってCH₄放出量をモデル化できることがわかった（図(1)-13）、③排水を行ったオイルパーム園も正味のCH₄ソースであることがわかった、④中部カリマンタン州の泥炭林では、地下水位が同じでも、サラワク州よりもCH₄放出量がかなり少なかった。これらの知見は、熱帯泥炭地のCH₄放出量推定における多大な貢献となる。

（2）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) IPCCへの貢献

「科学的意義」として上記した内容は、いずれもIPCCの「Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories」を用いた温室効果気体排出量の推定における精度向上に貢献できる。例えば、泥炭分解やCH₄放出量の地域差や、それらの地下水位との関係性は、排出係数の高精度化（Tier 2以上）を意味するものである。

2) インドネシア政府による熱帯泥炭地の保全・修復

2015年の強力なエルニーニョ現象にともなう干ばつにより、インドネシアでは広大な面積の泥炭地で火災が発生した。荒廃した泥炭地の修復と保全を目的として、インドネシア大統領直轄の政府機関として泥炭地回復庁が設立された。北海道大学は、京都大学、総合地球環境学研究所とともに泥炭地復興庁との間で研究協力に関するMOUを締結している。JICA等のサポートを受けて何度も会議を行っているが、泥炭地復興庁は本研究で用いた手法や得られた成果を評価しており、パイロットプロジェクト等で活用されることが期待できる。

3) マレーシア政府によるオイルパーム園の持続的管理

研究代表者の平野は、マレーシア政府のパームオイル庁（MPOB）の研究諮問委員会（PAC）委員を務めている。MPOBでは、持続可能なオイルパーム園の経営を研究テーマの一つとして掲げており、泥炭地に開発されたオイルパーム園における温室効果気体の収支を全国8か所で観測することになった。この観測ネットワークの設立およびネットワークを利用した研究に、本研究の成果が活用される。

6. 国際共同研究等の状況

既に記載したが、本研究は以下のようにインドネシア、マレーシアとの国際共同研究として実施した。

- 1) 課題名 : Effects of disturbances on the carbon balance of tropical peat ecosystems
 カウンターパート : Ichi Piter Kulu・パランカラヤ大学・インドネシア
 国際的な位置付け : AsiaFluxおよびFLUXNETのデータベースに登録する予定
- 2) 課題名 : Soil CO₂ emissions from a rubber plantation on tropical peat
 カウンターパート : Dedi Nursyamsi・Indonesian Agency for Agricultural and Development (IAARD)・インドネシア
 国際的な位置付け : 特になし
- 3) 課題名 : Greenhouse gas balance of tropical peat ecosystems
 カウンターパート : Lulie Melling・サラワク州熱帯泥炭研究所・マレーシア
 国際的な位置付け : AsiaFluxおよびFLUXNETのデータベースに登録する予定

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Wakhid N, Hirano T, Okimoto Y, Nurzakiah S and Nursyamsi D: *Science of the Total Environment*, **581-582**, 857-865 (2017) Soil carbon dioxide emissions from a rubber plantation on tropical peat.
- 2) Itoh M, Okimoto Y, Hirano T and Kusin K: *Science of the Total Environment*, **609**, 906-915 (2017) Factors affecting oxidative peat decomposition in different types of land use in a tropical peat swamp forest in Indonesia.
- 3) Kiew F, Hirata R, Hirano T, Xhuan W, Aries E, Musin K, Waili J, San L, Shimizu M and Melling L: *Agricultural and Forest Meteorology*, **248**, 494-501 (2018) CO₂ balance of a secondary tropical peat swamp forest in Sarawak, Malaysia.
- 4) Ishikura K, Hirano T, Okimoto Y, Hirata R, Kiew F, Melling L, Aeries E, Lo K, Musin K, Waili J, Wong G and Ishii Y: *Agriculture, Ecosystem and Environment*, **254**, 202-212 (2018) Soil carbon dioxide emissions due to oxidative peat decomposition in an oil palm plantation on tropical peat.
- 5) Wong G, Hirata R, Hirano T, Kiew F, Aeries E, Musin K, Waili J, Lo K and Lulie Melling: *Agricultural and Forest Meteorology*, **256-257**, 353-361 (2018) Micrometeorological measurement of methane flux above a tropical peat swamp forest.

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) Hirano T, Sundari S and Yamada H: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 329-337 (2016) CO₂ balance of tropical peat ecosystems.
- 2) Takeuchi W, Hirano T, Roswintiarti O: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 445-453 (2016) Estimation model of ground water table at peatland in Central Kalimantan, Indonesia.
- 3) Osaki M, Nursyamsi D, Noor M, Wahyunto and Segah H: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 49-58 (2016) Peatland in Indonesia.
- 4) Osaki M, Hirose K, Segah H and Helmy F: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 137-150 (2016) Tropical peat and peatland definition in Indonesia.
- 5) Hirose K, Osaki M, Takeda T, Kashimura O, Ohki T, Segah H, Gao Y and Muhammad E: *Tropical Peatland Ecosystems* (eds. Osaki M and Tsuji N), Springer, 421-433 (2016) Contribution of

hyperspectral application to tropical peatland ecosystem monitoring.

- 6) 大崎満：日本の科学者，52，314-320（2017）熱帯泥炭地－黄金の大地 ＜特集＞東南アジア島嶼部熱帯林の保全と再生.

（2）口頭発表（学会等）

- 1) Hirano T, Marpaung F, Kusin K and Limin S: AsiaFlux Workshop 2015, Pune, India 2015, “Regrowing tropical peat ecosystem changed from a CO₂ source to a CO₂ sink after fire.”
- 2) Okimoto Y, Hirano T, Itoh M, Yamada H, Kusin K and Limin S: AsiaFlux Workshop 2015, Pune, India 2015, “CO₂ emissions through oxidative peat decomposition from three different tropical peat ecosystems.”
- 3) Marpaung F and Hirano T: International Symposium on Agricultural Meteorology 2016, Okayama, Japan, 2016, “Tower- and satellite-based monitoring of vegetation recovery in tropical peatland after a series of fires.”
- 4) Wakhid N, Hirano T, Okimoto Y, Yamada H, Nurzakiah S and Nursyamsi D: International Symposium on Agricultural Meteorology 2016, Okayama, Japan, 2016, “Carbon dioxide emissions through the oxidative peat decomposition of tropical peat.”
- 5) 大崎満・高橋英紀・広瀬和世・濱田洋平・辻宣行：第26回日本熱帯生態学会大会（2016）「熱帯泥炭地における統合的MRVシステム」
- 6) Hirano T: International Workshop on “Tropical Peatlands, Past and Future”, Nanyang Technological University, Singapore, 2016, “Carbon dioxide balance of tropical peat ecosystems.”
- 7) Hirano T: Joint Seminar on “Utilization of Sago Ecosystem for Peatland Restoration”, Jakarta, Indonesia, 2016, “Carbon monitoring in peatland restoration program.”
- 8) Hirano T: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Carbon balance of tropical peat swamp forest.”（基調講演）
- 9) Kiew F, Hirata R, Hirano T, Wong GX, Aries E, Kemudang K, Wenceslaus J and Melling L: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Carbon dioxide balance of a secondary tropical peat swamp forest in Sarawak, Malaysia.”
- 10) Okimoto Y, Hirano T, Hirata R, Melling L, Ishii Y, Kiew F and Wong GX: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Carbon dioxide emissions from peat soil of oil palm plantation in Sarawak, Malaysia.”
- 11) Wong GX, Hirata R, Hirano T, Aeries E, Musin K, Waili J, Kiew F and Melling L: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Eddy covariance measurement of methane flux above a primary tropical peat swamp forest in Sarawak, Malaysia.”
- 12) Sundari S, Hirano T and Yamada H: The 15th International Peat Congress, Kuching, Malaysia, 2016, “Effects of drainage on the carbon loss from soil ecosystems in tropical peatlands of Central Kalimantan.”
- 13) 平野高司・Marpaung F・Kusin K・Limin S：2016年度iLEAPS-Japan研究集会（2016）「熱帯泥炭地の森林跡地における火災によるCO₂収支の変化」
- 14) 平野高司：第126回ウェットランドセミナー（2016）「熱帯泥炭生態系の炭素動態に関するフィールド研究」
- 15) 石倉究・沖元洋介・平野高司・平田竜一・Wong GX・Kiew F・Melling L・石井吉之：日本農業気象学会2017年全国大会（2017）「熱帯泥炭地のオイルパームプランテーションにおけるCO₂排出量とその制限要因」
- 16) 伊藤雅之・沖元洋介・Kusin K・平野高司：日本農業気象学会2017年全国大会（2017）「熱帯泥炭湿

地林の環境変化が泥炭分解呼吸に及ぼす影響」

- 17) 坂部綾香・伊藤雅之・Kitso K・平野高司：日本農業気象学会2017年全国大会（2017）「熱帯泥炭湿地林における群落スケールメタンフラックスの解明」
- 18) Kiew F, Hirata R, Hirano T, Wong GX, Aeris EB, Kemudang K, Wenceslaus J, San LK and Melling L: International Symposium on Agricultural Meteorology 2017, Towada, Japan, 2017, “Carbon dioxide dynamics in a secondary tropical peat swamp forest in Sarawak, Malaysia.”
- 19) Wong GX, Hirata R, Hirano T, Aeris EB, Kemudang K, Wenceslaus J, Kiew F and Melling L: International Symposium on Agricultural Meteorology 2017, Towada, Japan, 2017, “Micrometeorological measurement of methane flux above a tropical swamp forest.”
- 20) 平野高司・伊藤雅之・沖元洋介・Wakhid N・Kusin K：第27回日本熱帯生態学会大会（2017）「熱帯泥炭の好氣的分解にともなう二酸化炭素排出量の評価」
- 21) 石倉究・平田竜一・平野高司・沖元洋介・Wong GX・Kiew F・Melling L・石井吉之：第27回日本熱帯生態学会大会（2017）「熱帯泥炭林におけるCO₂排出量とその制限要因」
- 22) Osaki M, Kohyama T, Hirano T, Takahashi H and Setiadi B: 第27回日本熱帯生態学会大会（2017）“ABCDEFs Security Enhancement by Tropical Peatland Restoration.”
- 23) Wong GX, Hirata R, Hirano T, Kiew F, Aeris E, Musin K, Waili J, San L and Melling L: AsiaFlux Workshop 2017, Beijing, China, 2017, “Micrometeorological measurement of methane flux above tropical swamp forests.”
- 24) Kiew F, Hirata R, Hirano T, Wong X, Aeris EB, Kemudang K, Wenceslaus J, San LK and Melling L: AsiaFlux Workshop 2017, Beijing, China, 2017, “CO₂ flux above an oil palm plantation on tropical peat in Sarawak, Malaysia.”
- 25) Osaki M, Kohyama T, Hirano T, Takahashi H and Setiadi B: 4th World Conference on Climate Change, Rome, Italy, 2017, “ABCDEFs Securities in High Carbon Reservoir Ecosystem of Tropical Peatland.”
- 26) 石倉究・平田竜一・平野高司・沖元洋介・Wong GX・Kiew F・Melling L・石井吉之：日本土壌肥料学会2017年度大会（2017）「熱帯泥炭地の自然林および二次林におけるCO₂排出量とその制限要因」
- 27) 石倉究・沖元洋介・平田竜一・平野高司・Kiew F・Wong GX：日本土壌肥料学会北海道支部2017年度秋季大会（2017）「熱帯泥炭地の二次林における土壌CO₂・CH₄排出量とそれらの制限要因」
- 28) 石倉究・平田竜一・沖元洋介・平野高司・Kiew F・Melling L・Aeries EB・Lo KS・Musin KK・Wong GX・Waili JW・石井吉之：日本農業気象学会北海道支部2017年度大会（2017）「熱帯泥炭地の二次林における土壌CO₂・CH₄ fluxの日変化および季節変化の制限要因」
- 29) 石倉究・平田竜一・平野高司・沖元洋介・Wong GX・Kiew F・Melling L・Aeries EB・Lo KS・Musin KK・Waili JW・石井吉之：日本農業気象学会2018年全国大会（2018）「熱帯泥炭林の微地形が土壌CO₂・CH₄排出量に与える影響」
- 30) Kiew F, Hirata R, Hirano T, Wong GX, Aries EB, Musin KK, Waili JW, Lo KS and Melling L: International Symposium on Agricultural Meteorology 2018, Fukuoka, Japan, 2018, “Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an oil palm plantation on tropical peat”.
- 31) Wong GX, Hirata R, Hirano T, Kiew F, Aeries EB, Musin KK, Waili JW, Lo KS and Melling L: International Symposium on Agricultural Meteorology 2018, Fukuoka, Japan, 2018, “Comparison of methane flux measured by eddy covariance technique among three different tropical peat ecosystems.”
- 32) Hirano T: International Workshop on “Forest Ecological Resources Security for Next Generation: Development and Routine Utilization of Forest Ecological Resources and their Domestication, Kyoto, Japan, 2018, “Developing an integrated system to evaluate the carbon dynamics of tropical ecosystems in Borneo.”

- 33) Osaki M, Kohyama T, Hirano T, Takahashi H, Setiadi B, Oide A and Matsui K: International Workshop on “Forest Ecological Resources Security for Next Generation: Development and Routine Utilization of Forest Ecological Resources and their Domestication, Kyoto, Japan, 2018, “Natural capital estimation for SDGs and restoration in tropical peatland -Gold Carbon Mechanisms.”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 市民セミナー（北海道大学サステナビリティ・ウィーク2015）「脆弱な巨大炭素貯蔵庫－熱帯泥炭林－を監視する，温暖化緩和のために」（主催：北海道大学大学院農学研究院，共催：環境省環境研究総合推進費（2-1504），平成27年11月3日，北海道大学学術交流会館，観客54名）を開催し，当課題の担当者および博士研究員が研究成果に関する講演を行った（本サブテーマから3名が講演）。
- 2) 一般公開シンポジウム（第64回日本生態学会大会）「巨大な炭素プールである熱帯泥炭林の現状と保全に向けた取り組み」（主催：環境省環境研究総合推進費（2-1504と4-1506），平成29年3月15日，早稲田大学早稲田キャンパス3号館，観客32名）を開催し，当課題の担当者が研究成果を報告した（本サブテーマから2名が講演）。
- 3) 一般公開シンポジウム「SDGs時代を迎えた北海道の国際貢献－気候変動とインドネシア泥炭火災対策へのチャレンジ」（主催：JICA北海道国際センター，平成30年2月15日，北海道大学百年記念会館，観客60名）において，研究協力者（大崎）が研究成果に関する報告を行った。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 第19回尾瀬賞受賞（公益財団法人 尾瀬保護財団，平成28年6月9日，受賞者：平野高司，受賞研究：熱帯泥炭生態系の炭素動態に関するフィールド研究）

8. 引用文献

- 1) Page S et al.: Global Change Biology, 17, 798-818 (2011) Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool.
- 2) Miettinen J et al.: Environmental Research Letters, 12, 24014 (2017) From carbon sink to carbon source: extensive peat oxidation in insular Southeast Asia since 1990.
- 3) Tian H et al.: Ecosystem Health and Sustainability, 1, 1-20 (2015) Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes.
- 4) Pangala SR et al.: Nature, 552, 230-234 (2017) Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget.
- 5) Hirano et al.: Global Change Biology, 18, 3410-3422 (2012) Effects of disturbances on the carbon balance of tropical peat swamp forests.
- 6) IPCC: 2013 supplement to the 2006 guidelines; wetlands, 2013 (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands>)
- 7) Hooijer A et al: Biogeosciences, 7, 1505-1514 (2010) Current and future CO₂ emissions from drained peatlands in Southeast Asia.
- 8) Huxman TE et al.: Oecologia, 141, 254-268 (2004) Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems.

- 9) Sundari S et al.: *Journal of Agricultural Meteorology*, 68, 121-134 (2012) Effects of groundwater level on soil respiration in tropical peat swamp forest.
- 10) Ganot Y et al.: *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 12-24 (2014) Impact of thermal convection on CO₂ flux across the earth-atmosphere boundary in high permeability soils.
- 11) Lai et al.: *Biogeosciences*, 9, 3305-3322 (2012) The effects of atmospheric turbulence and chamber deployment period on autochamber CO₂ and CH₄ flux measurements in an ombrotrophic peatland.
- 12) Sjoigerstem et al.: *Biogeochemistry*, 104, 147-163 (2011) Biogeochemical processes along a nutrient gradient in a tropical ombrotrophic peatland.
- 13) Dommain R et al.: *Quaternary Science Review*, 30, 999-1010 (2011) Development and carbon sequestration of tropical peat domes in south-east Asia: links to post-glacial sea-level changes and Holocene climate variability.
- 14) Pangala SR et al.: *New Phytologist*, 197, 524-531 (2013) Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands.
- 15) Vaessen T et al.: *Journal of Tropical forest Science*, 23, 196-203 (2011) Comparison of termite assemblages along a landuse gradient on peat areas in Sarawak, Malaysia.
- 16) Jauhiainen J and Silvennoinen H: *Suo*, 63, 93-105 (2012) Diffusion GHG fluxes at tropical peatland drainage canal water surfaces.
- 17) Melling et al.: *Soil Biology and Biochemistry*, 37, 1445-1453 (2005) Methane fluxes from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia.
- 18) Jauhiainen J et al.: *Global Change Biology*, 11, 1788-1797 (2005) Carbon fluxes from a tropical peat swamp forest floor.
- 19) Jauhiainen J et al.: *Ecology*, 89, 3503-3514 (2008) Carbon dioxide and methane fluxes in drained tropical peat before and after hydrological restoration.
- 20) Wong GX et al.: *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257, 353-361 (2018) Micrometeorological measurement of methane flux above a tropical peat swamp forest.

Ⅱ－２ 陸域生態系モデルによる炭素動態の広域評価システムの開発

国立研究開発法人国立環境研究所

地球観測研究センター

平田竜一・三枝信子（平成27～29年度）

平成27～29年度累計予算額：28,816千円（うち平成29年度：14,300千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

本研究の目的は、陸域生態系プロセスモデルを用い、熱帯泥炭林を対象とした炭素動態の広域評価システムを開発することである。また、シナリオをモデルに入力し、火災防止や森林保護によるCO₂放出削減を評価することである。まず、サブテーマ1より得られたフラックス観測データを元に熱帯泥炭林を対象としたモデルの改良を行った。改良前は特に雨期において観測値とデフォルトのモデル出力値が真逆の季節変動を行っていた。地下水位を考慮した土壌呼吸コンパートメントの改良により、モデルの推定精度が向上した。続いて、広域で数値シミュレーションを実施するための気象データおよび土地被覆変化の時系列マップの整備を行った。なお、入力値の一つである泥炭マップはサブテーマ4から提供を受けた。土地被覆マップはMODISをベースに2001～2016年まで用意した。ENSOの際に大規模な森林火災が発生し、森林消失が大面積になることが分かった。また、2008年以降、森林減少率が減少気味であった。改良されたモデルを用意した入力データを用いて数値シミュレーションを実施することができ、熱帯泥炭を対象とした広域の炭素動態システムが完成した。ボルネオ島の正味の生態系CO₂交換量（NEP）の広域的（面的）な分布を見ると、概ね-1～-2tC/haで広がっていたが、10tC/ha以上の大きな炭素吸収や炭素放出をする地点がパッチ上に分布していた。これは森林が消失した直後は炭素放出量は大きくなるが、森林消失後10年ほど経つと炭素吸収能力の高い若い樹木が生育し、大きな炭素吸収を示すためである。土地利用変化によるバイオマス消失を加味した炭素収支は特に大規模火災が発生した2002、2006、2015年に大きな炭素放出が見られた。正味の生態系CO₂交換量は 15.7 ± 5.4 MtC/haと吸収だったが、森林減少などの土地被覆変化による炭素損失量が 17.5 ± 10.4 MtC/haと非常に大きかったため、これを考慮するとボルネオ島のCO₂を 1.8 ± 12.9 MtC/ha放出していた。リモセンGISの広域評価と比較することで様々な課題が浮き上がってきた。まず、リモセンGISでは過去の攪乱履歴を考慮していないため、森林伐採数年後の植生回復過程における強い炭素吸収量を表すことが出来ていなかった。ただし、モデルの方も植生回復過程時の検証は行っていないため、大きな不確実性があると考えられる。また、モデル入力に用いたMODISベースの土地被覆変化とPALSARベースの土地被覆変化に差があるため、土地被覆変化に伴う炭素放出量にも差が発生した。今後はこれらの点の改良が必要となる。一方で泥炭に関してはモデルとリモセン・GISで近い値を示していた。ただし、モデルが泥炭分解の広域分布を算出出来たのに対し、リモセン・GISは排出係数を使用しているため一定値であった。開発されたモデルによる広域評価システムを用いて、なりゆきシナリオ（BAU）と現在の森林保護シナリオによるCO₂吸収・放出量を2030年までシミュレートした。その結果、泥炭地での森林保全の炭素排出量削減効果は2030年で4.7 Tg Cとなり、2030年におけるインドネシアの炭素排出削減約束（NDC）である29%の0.6%に貢献できる可能性を示した。

〔キーワード〕

陸域生態系モデル、土地被覆変化モデル、炭素収支

1. はじめに

熱帯泥炭林は地表面の0.25%を占めているに過ぎないが、有機質土壌に蓄積されている炭素は3%になる（Hergoualc’h and Verchot, 2011）。このような熱帯泥炭林は特に東南アジアのインドネシア、マレーシアに広がっている。しかし、近年、1年に1%という速さで森林が失われており、蓄積されている炭

素が放出し、温暖化を加速させる要因となることが懸念されている。そこで、森林火災や森林伐採などの森林減少に伴い、CO₂がどのくらい排出されるのか、広域的に評価することが求められている。広域に炭素収支を評価する方法の一つとして、生態系モデルを用いた数値シミュレーションがある。この方法では、広域に用意された気象データや土地被覆変化を入力データとし、炭素収支を算出する方法である。本方法のメリットとして、陸域生態系に関わる主要な生物化学的プロセスが含まれているため、炭素収支に関わる各種コンポーネント（光合成、植物呼吸、土壌呼吸、バイオマスなど）を算出できると、気候変動に対する応答を検出できることが上げられる。ただし、モデルであるので、実際の観測値を用いた検証が必須である。本研究で採用する陸域生態系モデルVISITは様々な生態系で得られたフラックス観測データをもとに検証やパラメタリゼーションを行い、精度を高めてきた。しかし、これまで検証に用いられてきた生態系は全て鉱質土壌を対象としていた。一方、Sulmanら(2012)が北方の泥炭地を対象とした研究によると、鉱質土壌を対象としたモデルでは泥炭地の炭素収支を正しくシミュレートすることが出来ないと報告されている。そこで、本研究ではまず熱帯泥炭林を対象としたモデルの開発を実施する。その際、使用する観測データはサブテーマ1より提供を受ける。続いて改良されたモデルを広域に展開するため、気象データの整備ならびに土地被覆変化マップの作成を実施する。特に土地被覆変化マップは、CO₂放出に大きな影響を与えるため重要である。なお、泥炭分布マップはサブテーマ4より提供を受ける。改良したモデル、準備された入力データを元に炭素動態の広域評価システムが完成し、泥炭地を考慮したボルネオ島における広域の炭素収支を評価した。また、サブテーマ3で実施されたりモセン・GISベースの広域評価システムで算出された炭素収支を比較することで、それぞれの手法の問題点を議論する。さらに土地被覆変化モデル(マルコフモデルとセルラーオートマトン)を用いて2030年までの森林減少シナリオを5年毎に作成し、広域評価システムによりシナリオ分析を行う。シナリオはなりゆきによる森林減少と現在の森林保護計画に基づく森林減少の二つを用意した。これにより、ボルネオ島の熱帯泥炭林保護がインドネシアのINDCへどれくらい貢献出来るか評価する。

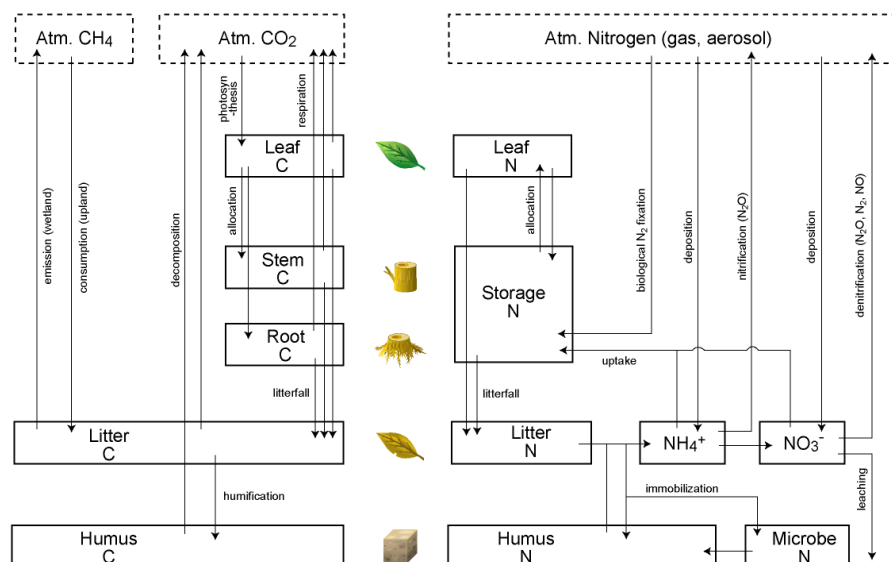
2. 研究開発目的

本研究では、熱帯泥炭林の炭素収支を広域に評価するため、ボルネオの熱帯泥炭林を対象に、陸域生態系モデルを用いた炭素動態の広域評価システムを開発する。また、泥炭林の保護や火災防止を講じた際のCO₂発生量の抑制効果を評価するため、森林減少シナリオを用意し、開発した広域評価システムを適用することで対策効果の評価を行う。

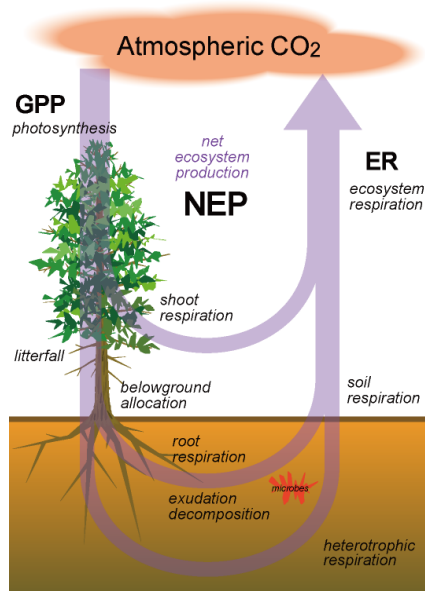
3. 研究開発方法

(1) 熱帯泥炭生態系サブモデルの開発とVISITのカスタマイズ

本研究では炭素収支の数値シミュレーションを行うため、陸域生態系プロセスモデルVISIT (Vegetation Integrated Simulator for Trace gases) を用いた(Ito et al., 2010)。VISITは陸域生態系を対象とし、CO₂、CH₄、N₂Oなどの温室効果ガスをシミュレートするモデルで、光合成、植物呼吸、土壌呼吸、フェノロジー、アロケーションなど生物化学的なプロセスを数学的に表現したモデルである。陸域生態系は、葉、幹、根、土壌（リター層）、（腐食層）のコンパートメントに分かれる（図(2)-1）。今回はCO₂のみを対象とした。CO₂フラックスの出力は主に総光合成量（GPP）、総呼吸量（RE）、その差分である正味CO₂吸収量（NEP）である（図(2)-2）。REは植物呼吸量と土壌呼吸量（リター分解と泥炭分解の和）の和である。



図(2)-1 陸域生態系モデルVISITの概念図



図(2)-2 陸域生態系モデルVISITの概念

熱帯泥炭林の炭素収支をシミュレートするため、生態系プロセスモデルVISITの土壌サブモデルのカスタマイズを行った。まず、サブテーマ1で得られたフラックス観測データとデフォルトのモデル出力値を比較し、その差違を明らかにする。次に熱帯泥炭林用に土壌サブモデルをカスタマイズされたモデルの出力値とフラックス観測データを比較した。比較は総光合成量(GPP)、生態系総呼吸量(RE)、正味生態系CO₂生産量(NEP)の3つの炭素収支の項目に対して行った。

使用したフラックスデータはインドネシア・中央カリマンタン・パランカラヤのタワー観測によって得られたものである(サブテーマ1において得られたデータ)。観測サイトは水路が建設され、水位が低くなったサイト(DFサイト)と比較的高い水位が保たれたサイト(UFサイト)の二つがある。これら水位の異なるデータを用いることにより、より堅牢なモデル検証が可能となる。DFサイトは2002年1月～2008年7月、UFサイトは2004年7月～2008年7月のデータを使用した。気象データ(日射量、気温、湿度、降水量)はパランカラヤ空港の気象データをタワー観測による気象データを用いて補正し、二つのデータを合わせて1980～2012年までの気象データセットを作成し、モデルの入力データとした。

土壌サブモデルの改良について述べる。サブテーマ1からの知見により、熱帯泥炭林における土壌呼吸は地下水位によって強く制御されている事が明らかとなっている。そこで、デフォルトの土壌呼吸サブモデルでは土壌水分を変数とした関数が採用されているところを、地下水位を変数とした関数に変更

した。この関数では、地下水位が低いときに土壌呼吸が小さくなり、地下水位が高いときに土壌呼吸が大きくなる式を用いている。地下水位のシミュレーションにはタンクモデルを用いた。DFサイトとUFサイトの地下水位の違いはタンクモデルのパラメータを変えることでシミュレーションを行った。

(2) 広域評価のための時空間データの整備とモデル・データインタフェースの開発

熱帯泥炭林の炭素収支を広域で評価するため、入力データセットの整備と入力のためのコーディングを行った。モデルへの入力データは主に①気象データ、②土地利用変化、③泥炭マップの3つがある。このうち③の泥炭マップはサブテーマ4より提供される。ここでは土地利用変化と気象データについて説明する。ボルネオ島全体の広域評価は空間解像度4km、時間解像度1日で行う事とした。モデル入力のために用意した気象要素は気温、湿度、降水量、日射量、風速の5成分である。データは気象庁が提供する長期再解析データJRA-55(Kobayashi et al., 2015, Harada et al., 2016)とWorldClim (<http://www.worldclim.org/>)を用いた。JRA-55は時間ステップは3時間であるが空間スケールは約0.5°グリッドと粗い。対してWorldClim (<http://www.worldclim.org/>)は1970～1990年の長期平均の気象データで気温と降水量が提供されており、空間スケールは1kmである。そこでJRA-55をWorldClimを用いてダウンスケーリングを行った。まず、JRA-55のデータを4kmに内挿補間、WorldClimのデータを4kmにアップスケールし、空間分解能を一致させた。次に1970～1990年の平均を取り、その値がWorldClimと同じになるよう、差分(気温、湿度、日射量)もしくは比率(降水量)を取った。

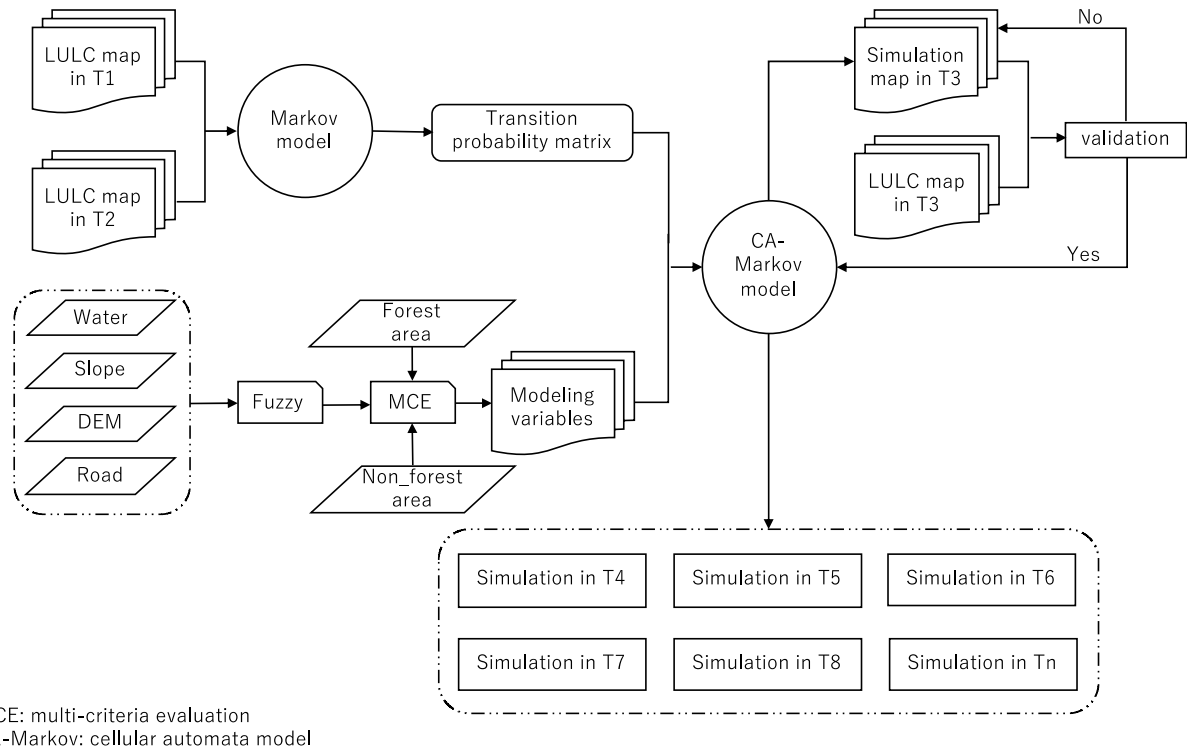
本研究における土地利用変化は森林減少を意味する。熱帯泥炭林以外の森林を含むボルネオ島の森林減少域を3ヶ月ごとに評価した。森林減少はMODISの地表面反射率プロダクトMOD09A1の8日コンポジットデータから算出された植生指数NDII6を用いた。NDII6はLocal Maximum Filtering手法により雲除去処理を行った後、3カ月間のコンポジットデータを作成した。森林変化域の抽出における基準画像として、2000年のMODIS衛星画像を用いて教師付き画像分類手法により森林非森林を作成した。教師データセットの作成には、GoogleEarthの高分解能衛星データを比較照合した。インドネシア・中央カリマンタンやマレーシア・サラワク州において現地へ赴き、実際の土地被覆データを100箇所程度取得した。2000年以降の森林減少域はNDII6変化を時系列的に解析することで検出した。すなわち、各植生指数を基準年に比べて低下している場所は森林から非森林に変化しているとした。森林火災による森林減少域は、MODISの火災のプロダクトMOD14A2が森林減少域を重ねている領域とした。

(3) 広域評価システムの開発とボルネオ島の炭素動態の推定およびシナリオを用いた予測や対策の評価(感度解析)

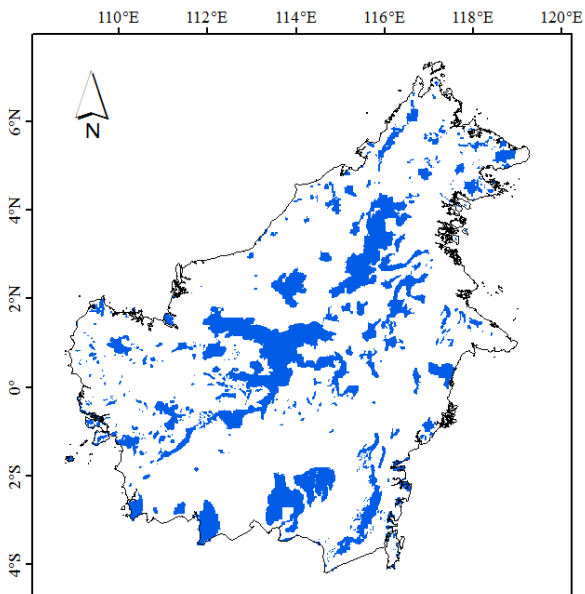
1)で改良したモデルに(2)で準備した気象データ、土地被覆変化マップ、サブテーマ4で作成された泥炭地マップを入力することで広域の炭素動態を算出することが可能となった。ここでは2001～2016年までの炭素収支を算出した。得られた結果はサブテーマ3で算出されたGISベースの炭素収支と比較し、両手法の問題点を考察した。

土地利用変化の将来シナリオを作成し、それを広域の炭素動態評価システムにインプットすることで、泥炭保護対策の評価(感度実験)を行った。マルコフモデルとセルラーオートマトン(図(2)-3)を用いた土地被覆変化モデルを用い、森林減少の予測を行った。2005年と2010年の土地被覆マップを用い、2015年の土地被覆マップを予測する。予測の際、2005年と2010年の土地被覆変化を川、傾斜、高度、道のパラメータで制御されるようモデルを構築する。モデルで予測された2015年のマップと実際の2015年の土地被覆マップを比較、検証を行い、モデルのパラメータ値を確定させる。次にそのモデルのパラメータ値を用い、2010年と2015年の土地被覆マップから2020年の土地被覆マップを作成する。同様に5年ごとに2030年まで土地被覆マップを作成した。これをなりゆきシナリオ(business as usual)とした。次に森林・泥炭地保護対策を行った場合のシナリオを作成した。シナリオの作成には、インドネシア政府およびマレーシア州政府から森林保護区の情報を収集し(図(2)-4)、その地域では森林減少が軽減される条件を入れて土地被覆予想を行った。なお、今回準備した将来の土地被覆変化マップはあくまでモデルによる感度解析を行うためのシナリオであり、実際の森林変化を予測するものではない。ただ

し、より多くの関連データを収集することで将来的にはより信頼度の高い森林減少予測は可能となる。



図(2)-3 マルコフモデルとセルラーオートマトンを用いた土地被覆変化モデルの流れ

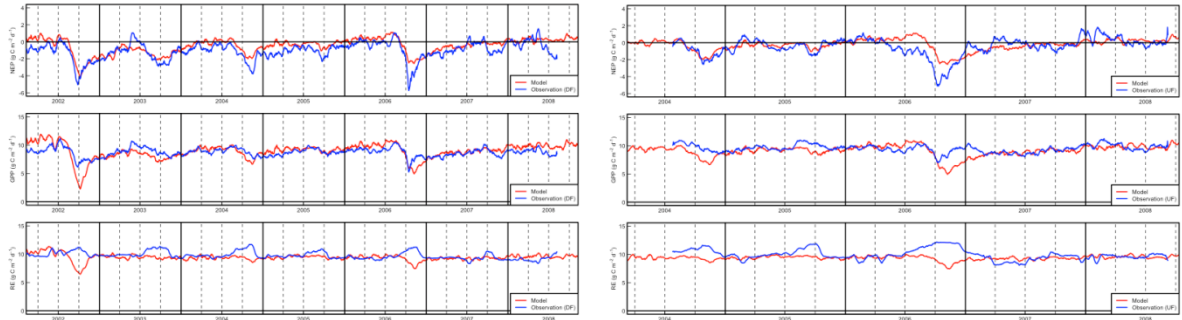


図(2)-4 ボルネオ島の森林保護領域。

4. 結果及び考察

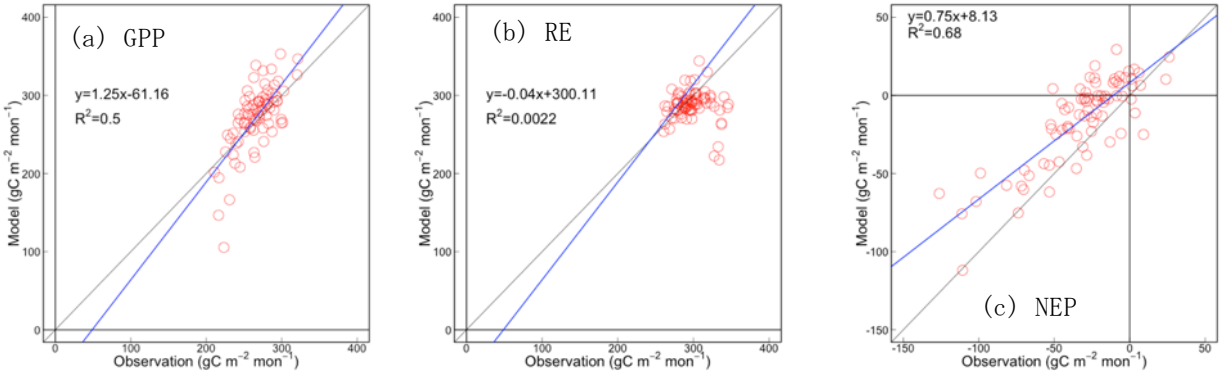
(1) 熱帯泥炭生態系サブモデルの開発とVISITのカスタマイズ

図(2)-5に改良前のモデルの出力値と観測値の季節変化・年変動の比較を示す。両サイトとも、ほとんどの期間においてNEPは負となり、特に乾期において大きく炭素を放出する季節変化を示していた。乾期の降水量が特に少なかった2002年と2006年は他の年より炭素放出量が大きく、モデルもおおよそそれをよく再現していた。これは降水量の少ない時期にGPPが減少するためである。ただし、観測によれば乾期の炭素放出量の原因はGPPのみならず、REの放出も増えるためである。しかし、モデルでは乾期にREは低下し、観測と反対の季節変化を示した。このため、観測とモデル出力値ではNEPにバイアスがあった。



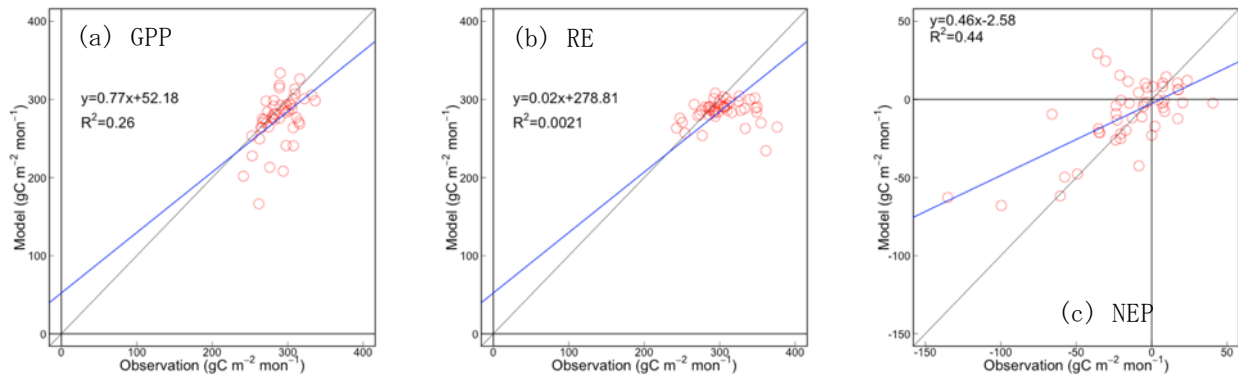
図(2)-5 改良前のモデルによるDFサイト(左)およびUFサイト(右)の各種炭素フラックスの季節変化・年変動。赤線がモデルの出力値、青線が観測値。観測値の比較(月値)。NEPは正が炭素吸収、負が炭素放出を表す。上段：正味生態系CO₂生産量 (NEP)、中段：総光合成量 (GPP)、下段：生態系総呼吸量 (RE)

続いて図(2)-6に水位の低いDFサイトの観測値と改良前のモデル出力値の比較を示す。GPPの傾きは1.25とほぼ1に近かったのに対し、REは傾きが負となり、R²もほぼ0と相関がなかった。その結果、NEPは決定係数こそ比較的高いものの、傾きは0.75とモデル出力値と観測値に大きな剥離が見られた。



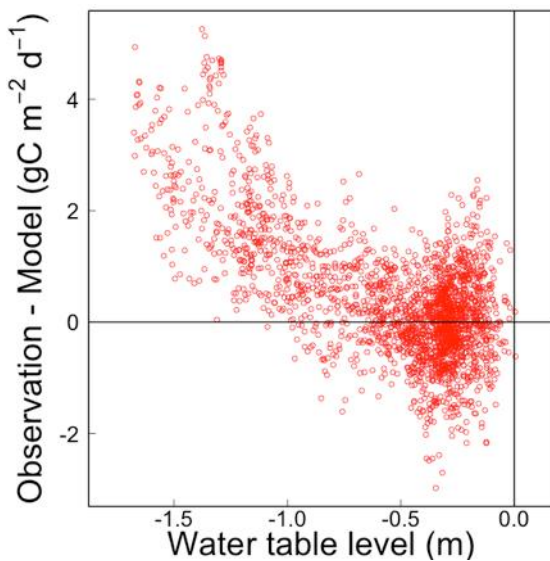
図(2)-6 改良前のモデルによる出力値とDFサイトの観測値の比較(月値)。(a)総光合成量 (GPP)、(b)生態系総呼吸量 (RE)、(c)正味生態系CO₂生産量 (NEP)

水位が高いUFサイトの観測値と改良前のモデル出力値との比較を行う (図(2)-7)。GPPの傾きは0.77と比較的1に近かったが、R²は0.26と低かった。REはDFサイトと同様に傾きとR²は0に近く、相関がなかった。NEPは傾き0.46、R²は0.44とモデルは観測値をシミュレート出来ていなかった。

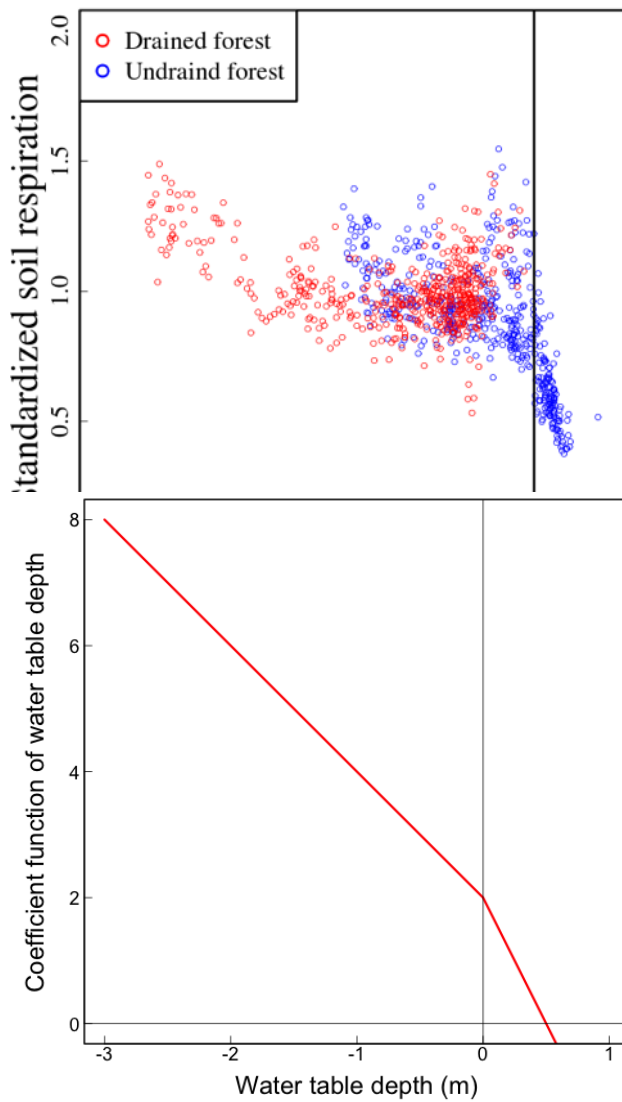


図(2)-7 改良前のモデルによる出力値とUFサイトの観測値の比較(月値)。(a)総光合成量 (GPP)、(b)生態系総呼吸量 (RE)、(c)正味生態系CO₂生産量 (NEP)

図(2)-8に観測値とモデル出力値の差と地下水位の関係を示す。地下水位が低くなるほど観測値とモデル出力値の差が大きくなっており、その差が地下水位に起因することが分かる。また、サブテーマ1の知見より、REは地下水位により制御されている事が明らかになっている。しかし、デフォルトのモデルでは地下水位の影響は考えられていない。



図(2)-8 観測値とモデル出力値の差と地下水位の関係

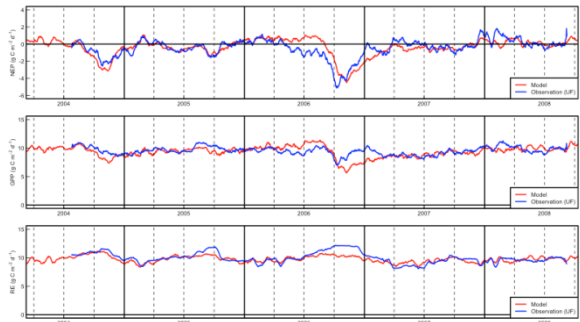


そこで地下水位と土壌呼吸の関係を観測値を元に数式化し、モデルの改良を行った。図(2)-9に地下水位とUF、DFサイトで観測された土壌呼吸の関係を示す。これをもとに図(2)-10のような土壌呼吸の強度に関する地下水位の関数を作成した。地下水位のシミュレーションにはタンクモデルを採用した。

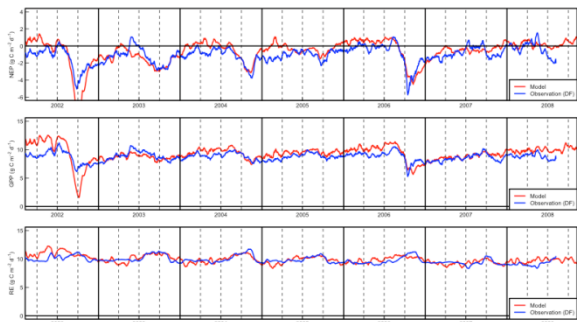
図(2)-9 地下水位と土壌呼吸の関係

図(2)-10 地下水位と土壌呼吸の強度に関わる係数の関係

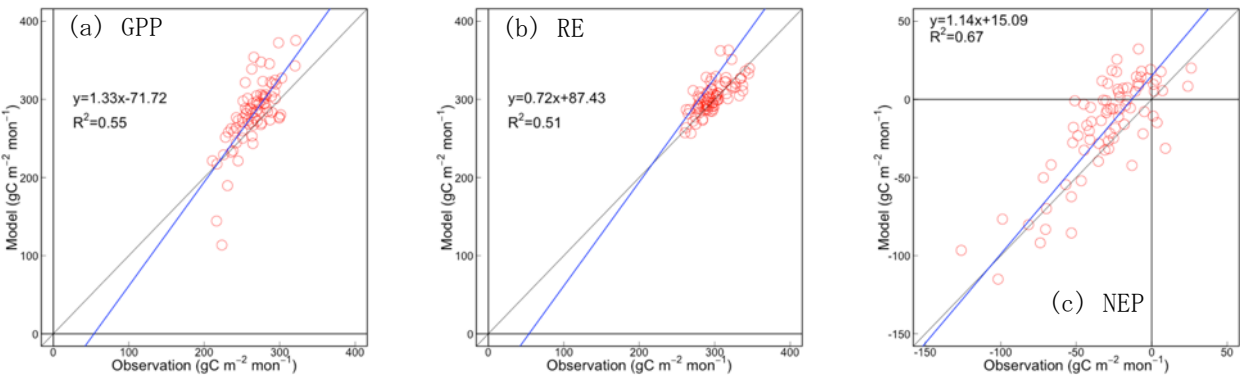
以下に改良したモデル出力値と観測値との比較を行う。図(2)-11に改良前のモデルの出力値と観測値の季節変化・年変動の比較を示す。DF・UFサイトともにREのモデル出力値が観測値に追随出来るようになった。ただし、UFサイトでは2006年7月～2007年3月にかけて観測とモデルで若干の剥離が見られた。



図(2)-11 改良後のモデルによるDFサイト(左)およびUFサイト(右)の各種炭素フラックスの季節変化・年変動。赤線がモデルの出力値、青線が観測値。観測値の比較(月値)。NEPは正が炭素吸収、負が炭素放出を表す。上段：正味生態系CO₂生産量 (NEP)、中段：総光合成量 (GPP)、下段：生態系総呼吸量

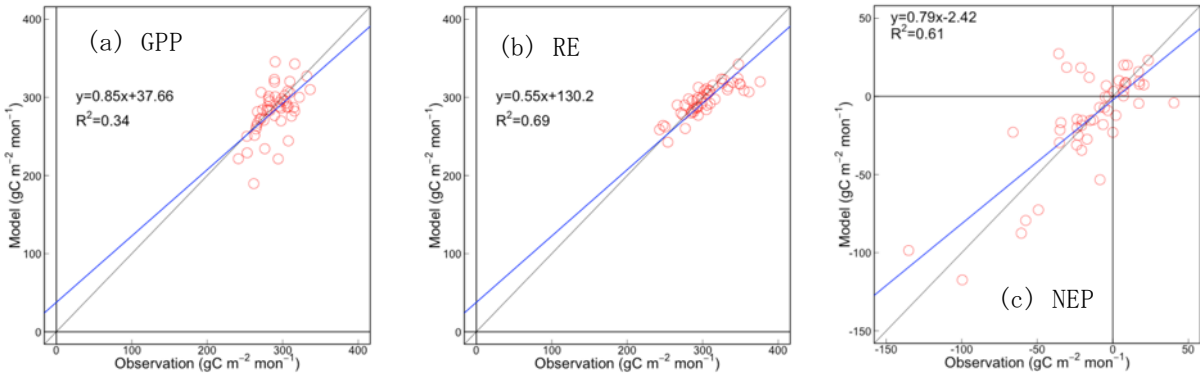


改良後のモデル出力値とDFサイトの観測値を比較する (図(2)-12)。GPPの傾きは1.33と若干悪くなったものの、REは傾きが0.72、R²が0.51と大幅に改善された。その結果、NEPの傾きは0.75から1.14へと大きく改善された。



図(2)-12 改良後のモデルによる出力値とDFサイトの観測値の比較(月値)。(a)総光合成量 (GPP)、(b)生態系総呼吸量 (RE)、(c)正味生態系CO₂生産量 (NEP)

続いて改良後のモデル出力値とUFサイトの観測値を比較する (図(2)-13)。GPPの傾きは0.85とモデル改良前に比べて改善された。R²も0.34と改良前より改善されたが、まだ低い値だった。REは傾き、R²と



もに大きく改善された。NEPも傾きが

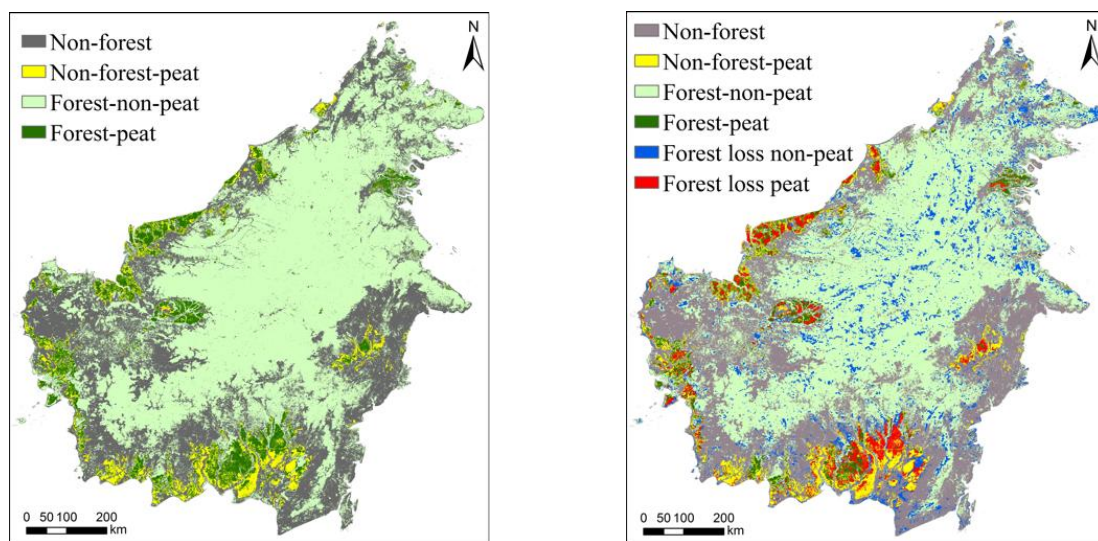
0.46から0.79、 R^2 が0.44から0.61と改善された。

図(2)-13 改良後のモデルによる出力値とUFサイトの観測値の比較(月値)。(a)総光合成量 (GPP)、(b)生態系総呼吸量 (RE)、(c)正味生態系CO₂生産量 (NEP)

地下水位を考慮した土壌サブモデルの改良により、炭素収支に関するモデル出力値を観測値に近づける事が出来た。今回、水位の異なる二つの熱帯泥炭林を用いたことにより、モデルの堅牢さもある程度確認された。ただし、改良後もDFサイトよりUFサイトの出力値の方が観測値より剥離が大きく、バラツキが大きかった。これは観測データの長いDFサイトのデータを中心にパラメタリゼーションを行い、両サイトにおいて共通のパラメータを用いたためである。今後、本モデルを用いて広域化を行う際、UFサイトで見られた程度の不確定性は存在すると考えられる。

(2) 広域評価のための時空間データの整備とモデル・データインタフェースの開発

図(2)-14に入力データとなる土地被覆マップの内、2001年と2015年のマップを示す。2001～2015年にかけて、全森林の17%が失われた。泥炭林以外の森林の消失が14%だったのに対し、泥炭林は50%が失われた。ボルネオ島全体の年間の森林消失率は1.1%だった。これは既存の研究報告の範囲内である(表(2)-1)。森林減少は特にサラワク州、中央カリマンタン州、南カリマンタン州での森林消失が大きかった。サラワクでの森林消失は主に森林伐採による植林(主にオイルパームとアカシア)、中央・南カリマンタン州では森林火災が減少の原因と考えられる。

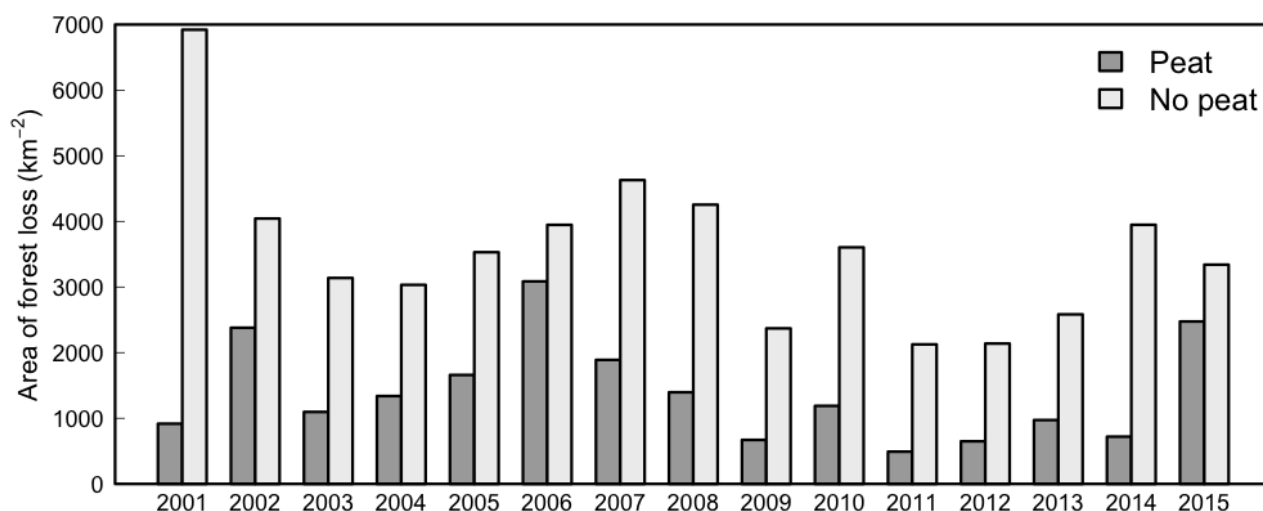


図(2)-14 2001年(左)から2015年(右)までの森林減少マップ

表(2)-1 本研究と既往の研究のボルネオ島の森林減少率

References	Forest loss rate (% y^{-1})	Period	Data
Ties study	1.1	2000-2015	MODIS
Langner et al., 2007	1.7	2002-2005	MODIS
Miettinen et al., 2011	1.3	2000-2010	MODIS
Bontemps et al., 2012	1.3-2.7	2000-2008	MODIS
Hansen et al., 2013	1.1	2000-2012	Landsat
Hayashi et al., 2015	1.6	2004-2007	ICESat

図(2)-15に2001～2015年の森林減少面積を泥炭、非泥炭別に示す。2002、2006、2015年に特に泥炭林の減少が大きかった。これらの年はENSOにより降水量が極端に少なく、森林火災が多発した年だった。泥炭林は森林火災により大面積が失われていた。2009年もENSOが発生し、森林火災が多発した年だったが、この時は森林以外の土地被覆、例えば草地などの燃焼が大きかったため、森林減少面積は小さかった。また、2002～2007年の森林減少は比較的大きく、その後は森林減少に歯止めがかかる傾向にあった。



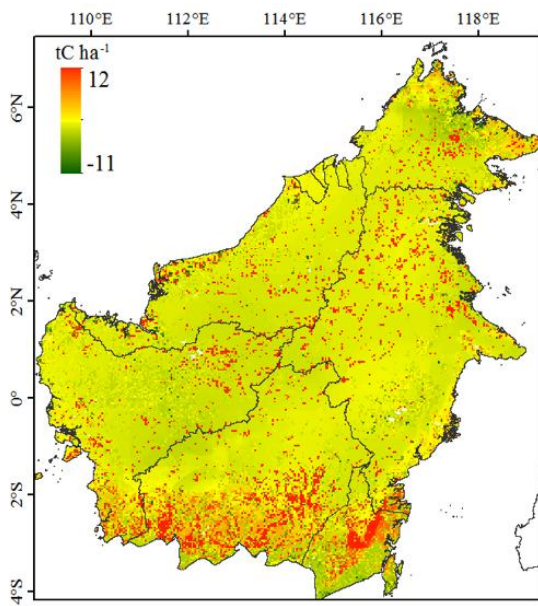
図(2)-15 泥炭、非泥炭別の年々の森林減少面積

(3) 広域評価システムの開発とボルネオ島の炭素動態の推定およびシナリオを用いた予測や対策の評価(感度解析)

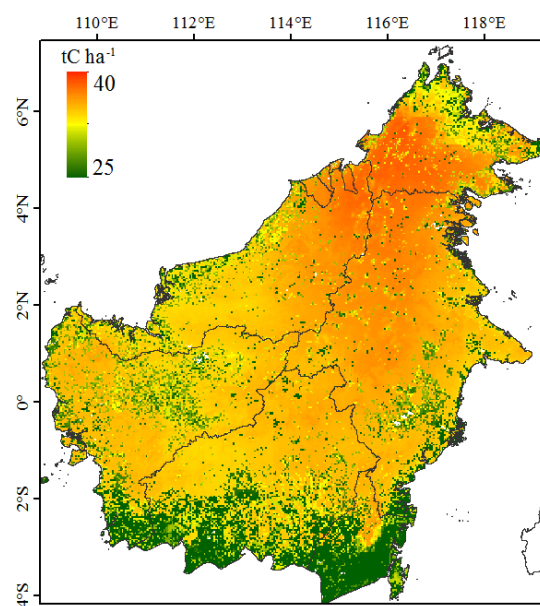
(1)で改良したモデルに(2)で用意した気象データ、土地利用変化マップ、サブテーマ4の泥炭マップを入力することでボルネオ島における広域の炭素動態を評価することが可能となった。図(2)-16に陸域生態系モデルVISITによって計算された2016年のNEPを示す。正がCO₂の吸収、負が放出を示す。薄緑が0tC/haである。1～2tC/ha程度の吸収域が島全域に渡って広がっているが、所々パッチ上に10tC/haを超える強い吸収が見られる。特にボルネオ島南方は強い吸収帯が広がっている。また、所々-10tC/ha以下の大きな放出を示す点が見られる。強い放出を示す点は近年、攪乱を受け、土地被覆変化が発生し、地上部バイオマスが消失し、光合成による吸収量がほぼ0から大きく減少した場所である。攪乱を受け

た後、植物は回復し、再成長する。若い植物は個葉の光合成能力が高いため、攪乱を受けて数年するとその土地は高いCO₂吸収力を示す。すなわち、10tC/haを超える強い吸収が見られる地点は攪乱から回復していることを示す。熱帯では中高緯度に比べて樹木の生長力が高いため、CO₂吸収能力も高く、その回復能力も高いと考えられる。特にこの15年は数年に一度火災による大規模な森林消失があったため、最新年では回復過程にある地域が広がった。

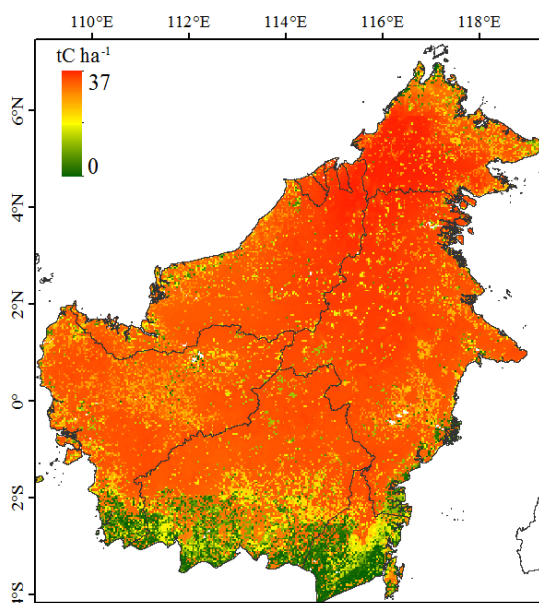
同年のGPP、REを図(2)-17、18に示す。GPP、REともに攪乱を受けたパッチ上の地域は値が大幅に減少している。すなわち、火災や森林伐採など攪乱を受けた後は、GPPやREは下がるが、攪乱直後はGPPがREより小さいため正味ではCO₂を放出する。数年経つとGPPがREを上回るため、正味ではCO₂を吸収する。ただし、成育初期段階の検証は行っていないため、攪乱後何年でCO₂を吸収し始めるかなど、今回のシミュレーション結果は不確定性が大きいと考えられる。



図(2)-16 2016年のボルネオ島のNEP



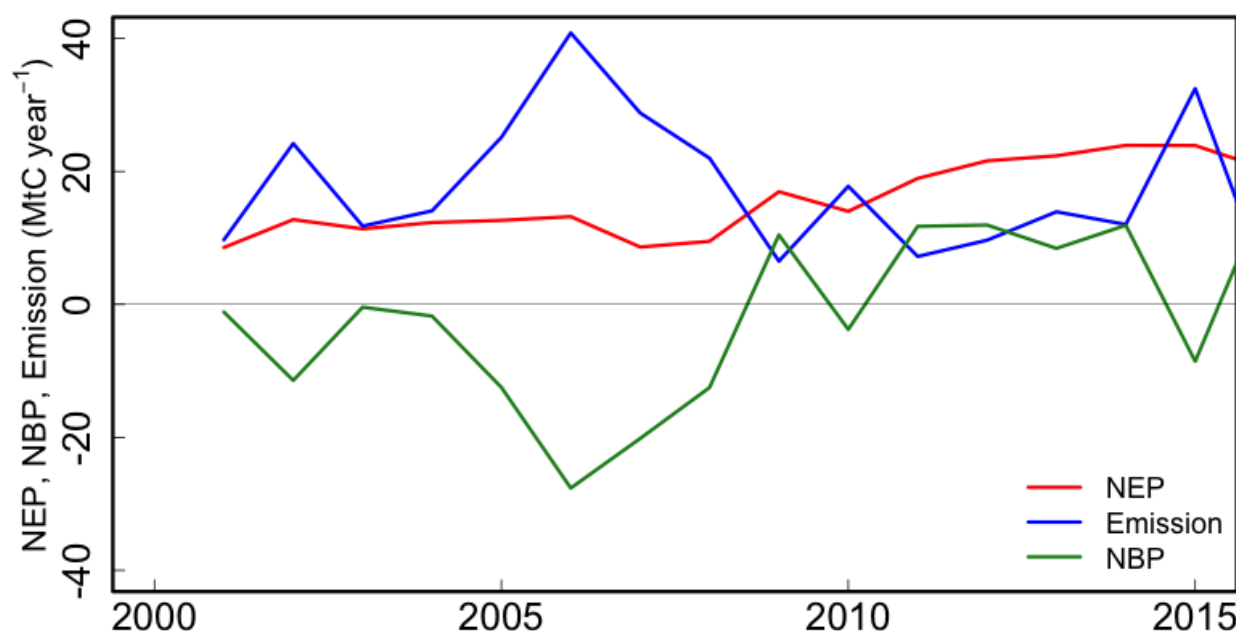
図(2)-17 2016年のボルネオ島のGPP



図(2)-18 2016年のボルネオ島のRE

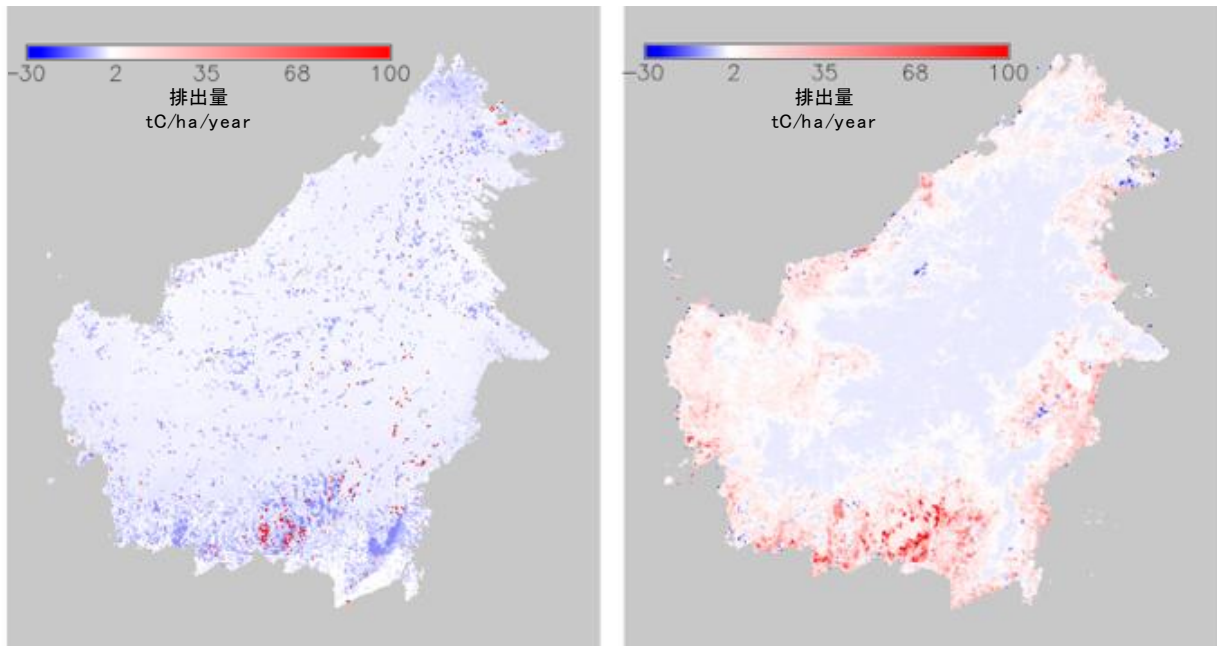
ボルネオ島の泥炭地におけるNEP、土地利用変化に伴う炭素損失量(Emission)、その差分である正味のCO₂収支(NBP, net biome production)の年次変動を図(2)-19に示す。熱帯泥炭地の生態系は全期間を通してCO₂を吸収していた(NEPが正)。特に2012年からCO₂吸収量が次第に増加する傾向にあった。これは2002～2008年に発生した、比較的大きく長期間の森林減少からの回復によるものと考えられる。大きな炭素損失量は2002、2005～2008、2015年に見られた。そのような年の直後にNEPの下落が見られた。今回のシミュレーションでは気象要因がNEPの年々変動に与える影響より攪乱の影響の方が大きく見られた。この15年間は炭素損失量がNEPを上回る年が多いため、炭素吸収・放出の総量であるNBPが負になる年が多かった。2001～2016年のNEP、炭素損失量、NBPの平均は 15.7 ± 5.4 、 17.5 ± 10.4 、 -1.8 ± 12.9 MtC/haだった。すなわち、植生の回復によってNEPが増加しても、火災や森林伐採による炭素損失量がそれを上回るため、正味の炭素は放出していることが分かった。

このように、モデルを用いた広域評価システムでは比較的長期の炭素動態とその要因について明らかにする事が出来た。



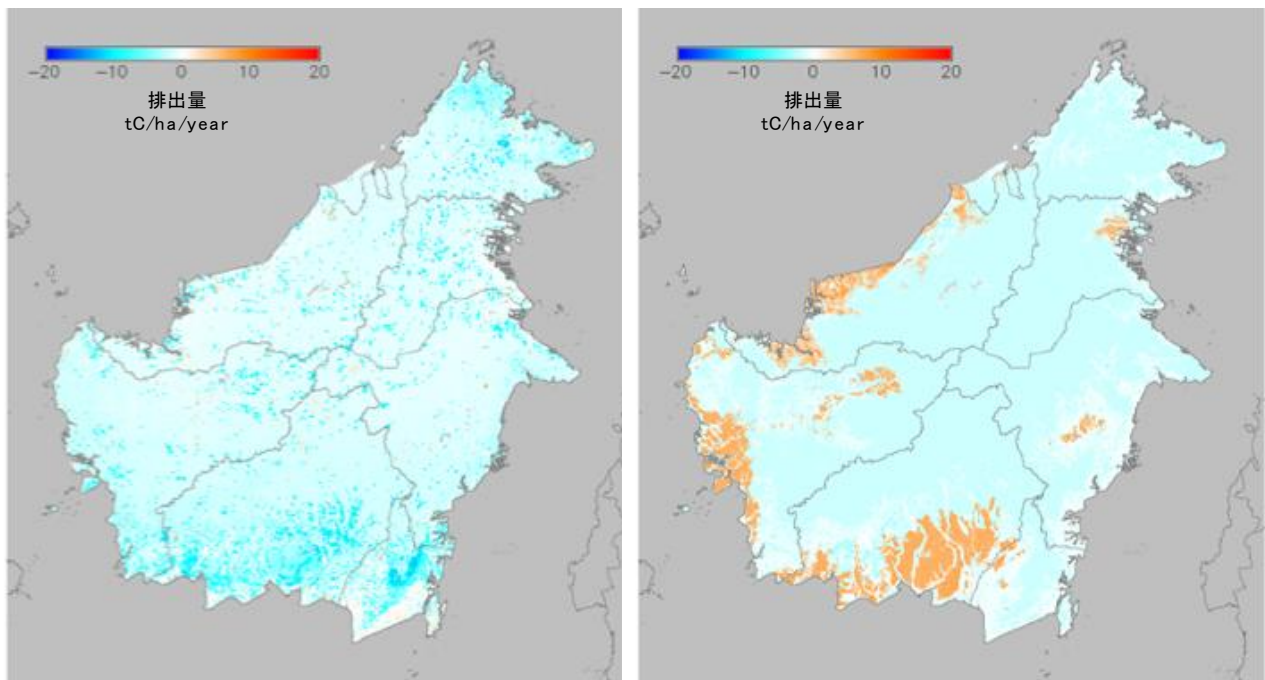
図(2)-19 NEP、土地利用変化による炭素損失量、NBPの年次変動。NEP、NBPは正が吸収。

本サブテーマにおいて生態系モデルによって評価された炭素収支とサブテーマ3においてリモセン・GISを用いて評価された炭素収支の比較を行い、問題点を考察する。ここからはCO₂の吸収を負、放出を正として説明を行う。図(2)-20にCO₂の総排出量(-NBP)の比較を示す。なお、これはサブテーマ3の図(3)-17と重複する図である。モデルでは島全般が-2tC/ha程度の小さな吸収とパッチ上の大きな吸収、また所々に大きなCO₂放出が見られた。一方、リモセン・GISベースでは島中央はCO₂をわずかに吸収しているものの、沿岸部、特に泥炭地は大きなCO₂の放出源となっていた。主要な排出州である中央カリマンタン州およびボルネオ島全体において、モデル、リモセン・GISともにCO₂を排出していたが、その量は10倍の差があった(表(2)-2)。この原因を明らかにするため、炭素収支の主要なコンポーネントの比較を行う。



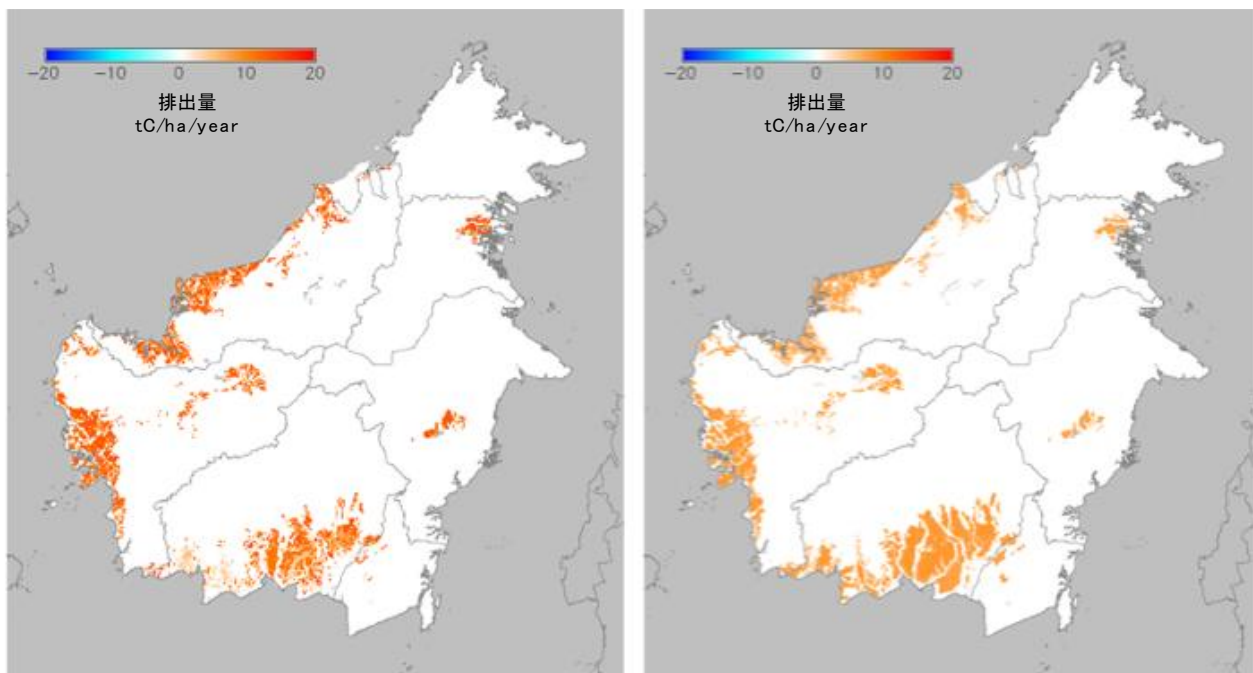
図(2)-20 2015年のCO₂の総排出量(-NBP)の比較。左がモデル出力値、右がリモセン・GISベースの算出結果。

図(2)-21に土地被覆変化の影響を除いた陸域生態系のみによるCO₂放出量(-NEP)の比較を示す。泥炭地において、モデル出力値はCO₂を吸収していたが、リモセン・GIS算出値ではCO₂を排出しており、真逆の傾向にあった。



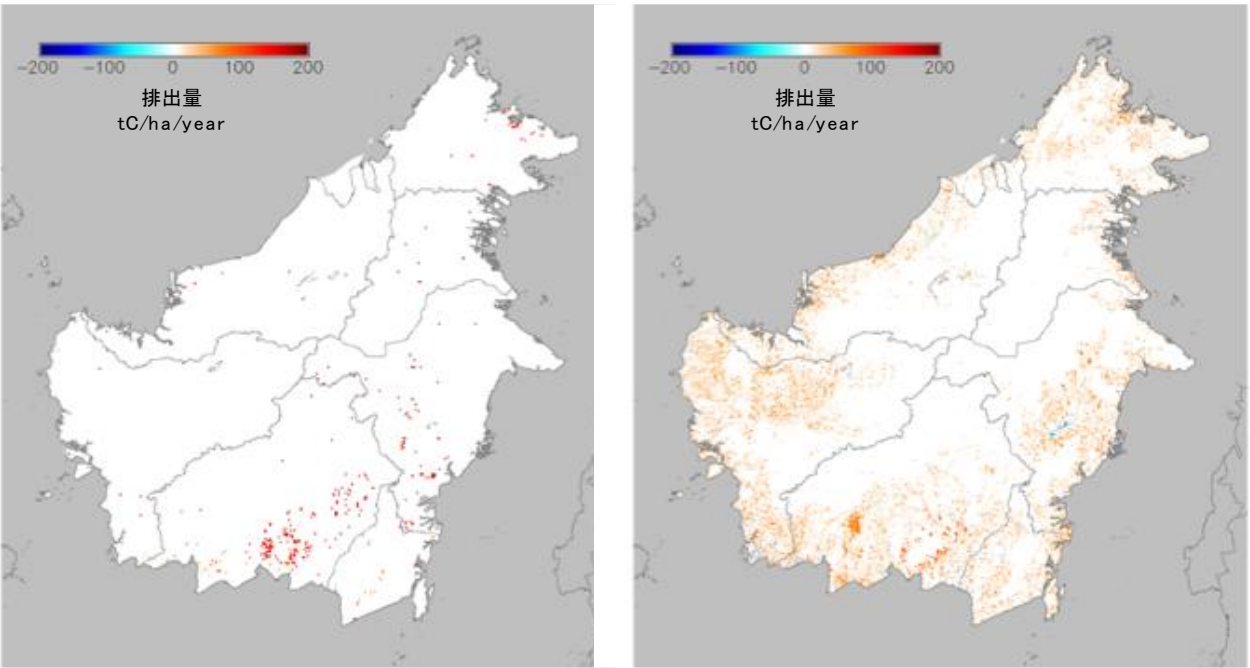
図(2)-21 2015年の陸域生態系のみによるCO₂の総排出量(-NEP)の比較。左がモデル出力値、右がリモセン・GISベースの算出結果。

図(2)-22に泥炭分解量の比較を示す。泥炭分解量はモデル出力値が若干大きい傾向にあるものの両方ともにほぼ近い値だった(図(2)-2)。また、リモセン・GISは一定の排出係数を与えるため空間分布がほぼないものの、モデルによる泥炭分解量は地下水位の差による空間分布を算出していた。また、泥炭分解量に大きな差がないということは、先の陸域生態系のみによるCO₂の総排出量(-NEP)の差は植生による吸収量の違いに起因することが分かる。すなわち、モデル出力では過去の攪乱からの回復による植生の高いCO₂吸収能力を示しているが、リモセン・GISでは過去の履歴によるCO₂吸収能力の変化を再現できず、毎年一定の値となるため、植生によるCO₂吸収・放出量に差が生じた。また、モデル出力値では攪乱による影響がパッチ上に見られるのに対し、リモセン・GISベースでは画一的な空間分布を示していた。



図(2)-22 2015年の泥炭分解量の比較。左がモデル出力値、右がリモセン・GISベースの算出結果。

続いて火災や森林伐採など土地被覆変化による炭素排出量の比較を図(2)-23に示す。中央カリマンタンの強い火災による炭素放出量は一致したものの、他の地域では、モデルでは土地被覆変化が非常に小さかったのに対して、リモセンGISでは沿岸域や泥炭域において土地被覆変化の影響が幅広く見られた。ただし、土地被覆変化の大きい中央カリマンタンとボルネオ島全体に関しては、その差は2倍程度に収まっていた(表(2)-2)。これはモデルの入力データである土地被覆変化マップはMODISデータを元に行っているため、空間分解能が500mと粗いのに対し、リモセンGISベースはPALSAR-2を元に行っているため空間分解能が60mと高く、小さな火災や土地利用変化も検出することが可能であるためと考えられる。



図(2)-23 2015年の土地利用変化による炭素放出量の比較。左がモデル出力値、右がリモセン・GISベースの算出結果。

表(2)-2 モデル・リモセンGISベースの炭素収支の比較

GISベース 単位: MtC/yr	泥炭地				
	NBP (符号が逆、排出が正)	NEP (符号が逆、排出が正)	NPP相当 (符号が逆)	土地被覆変化によるバイオマス変化	泥炭分解
中央カリマンタン	64.7	18.3	N/A	46.3	23.7
西カリマンタン	23.4	10.0	N/A	13.4	13.6
サラワク	20.3	7.0	N/A	13.2	10.1
ボルネオ全体	120.0	44.3	N/A	75.7	57.1

生態系モデル 単位: MtC/yr	泥炭地				
	NBP (符号が逆、排出が正)	NEP相当 (符号が逆、排出が正)	NPP相当 (符号が逆)	土地被覆変化によるバイオマス変化	泥炭分解
中央カリマンタン	12.5	-16.0	-41.5	28.5	25.5
西カリマンタン	-3.1	-4.7	-25.9	1.6	21.2
サラワク	-0.7	-2.5	-22.1	1.7	19.6
ボルネオ全体	8.4	-23.9	-96.0	32.3	72.1

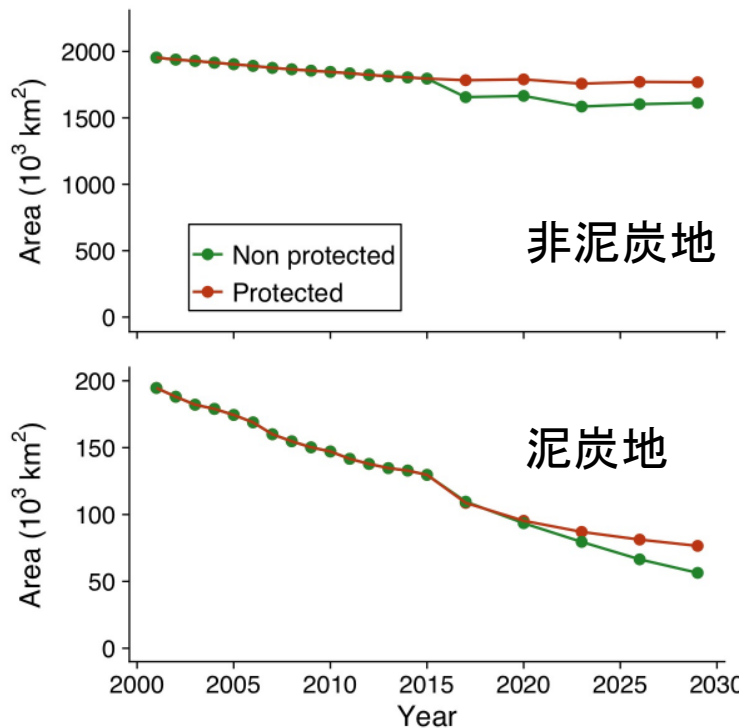
モデルとリモセン・GISによる炭素動態の差についてまとめる。まず、泥炭の分解に関しては両手法で大きな差はなかった。リモセンGISでは過去の攪乱の影響による植生のCO₂吸収能力の変化を考慮することが出来てなかった。一方、モデルに関しても攪乱直後の非常にセンシティブな変化をする時期の炭素収支の検証は行っていないため不確定性は大きいと考えられる。この差が両者の総排出量の大きな差を生むため、今後改良と検討の必要がある。また、バイオマスについて、モデルがリモセン・GISに比べて過小評価していた。モデルの入力データである土地被覆に関しても差が見られた。PALSAR2は高精度に土地被覆変化を捉えることができるが、観測期間が短いため、現段階ではモデルの入力とはなりにくい。今後はMODISベースの土地被覆変化を整合性を取りつつ、そのようなデータをモデル入力と出来るよう工夫を行う必要がある。すなわち、モデルにリモセン・GISの土地被覆変化やバイオマスをデータ同化させることにより、より精度の高い炭素動態の推定が可能となると考えられる。

次に本モデルを用いたシナリオ分析により、森林の保護活動による炭素放出量低減効果について評価

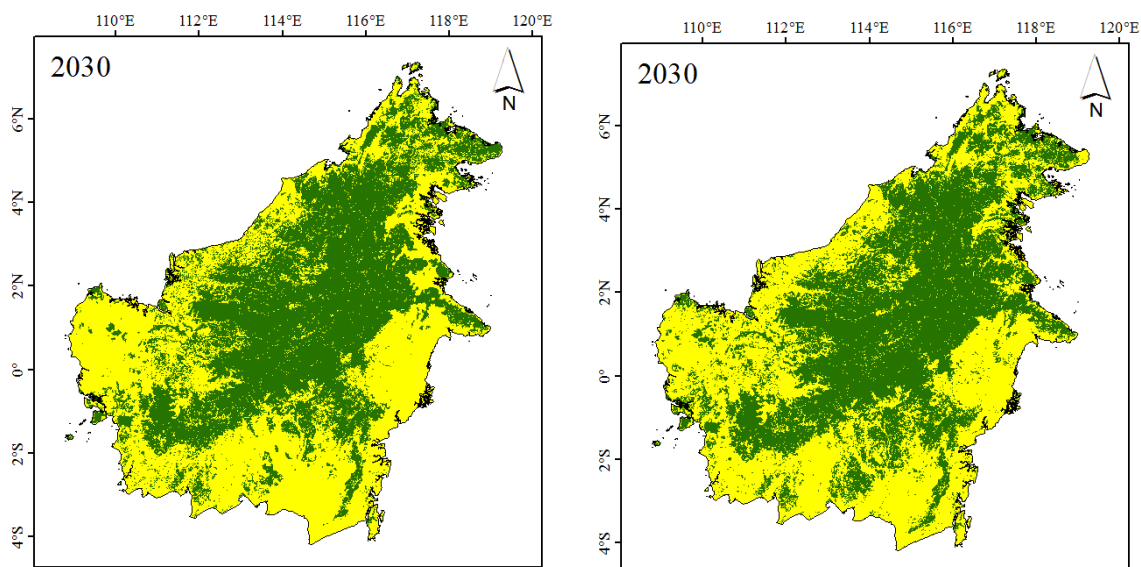
を行った。図(2)-24に今回の分析で使用したなりゆきシナリオ(non protected)と保護シナリオ(protect)による森林面積の変化を示す。

泥炭地においては2020年まではなりゆきシナリオと保護シナリオに大きな差はなかったが、2025年を過ぎるとその差が次第に開いてきた。

図(2)-25に2030年のなりゆきシナリオと保護シナリオによる森林面積を示す。保護シナリオでは中央カリマンタンにおいて大きな面積の森林が残ることがわかる。一方、西カリマンタンで保護される森林は離散的である。

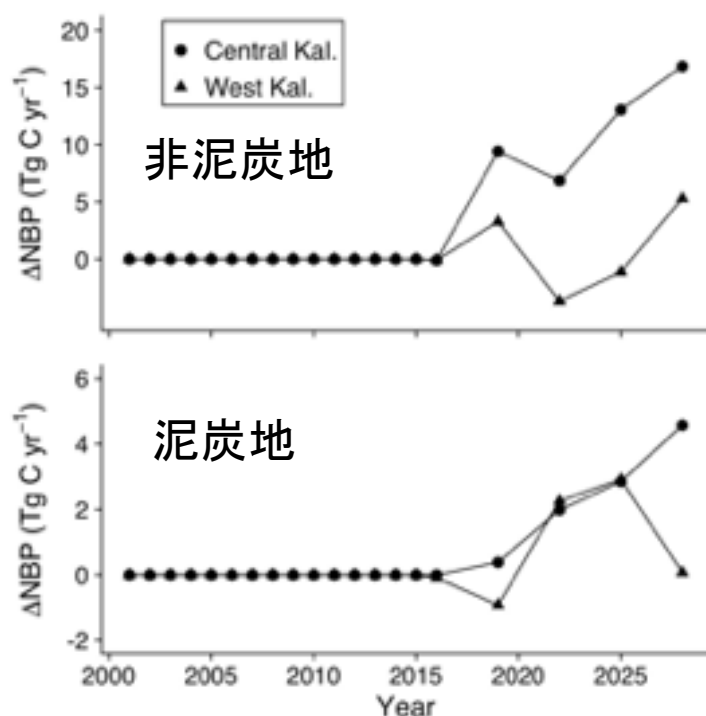


図(2)-24 なりゆきシナリオ(non protected)と保護シナリオ(protect)による森林面積の変化



図(2)-25 なりゆきシナリオ(non protected) (左)と保護シナリオ(protect) (右)による2030年の森林面積(緑が森林、黄色が非森林)

図(2)-26になりゆきシナリオと保護シナリオの差の年変化を示す。正に大きいほど保護によるCO₂放出量の減少効果大きいことを示す。ここではインドネシア政府のINDC(Intended Nationally Determined Contributions:各国が自主的に決定する約束草案)と比較するため、中央カリマンタンと西カリマンタンの結果を示す。面積の大きい中央カリマンタンにおいて保護の効果が顕著に見られたが、面積の小さい西カリマンタンでは小さかった。泥炭地での森林保全の効果は2030年で4.7TgCで、インドネシアのNDC(2030年に29%削減)の0.6%に貢献していた。



図(2)-26 になりゆきシナリオと保護シナリオによるCO₂吸収・放出量の差。正に大きいほど保護シナリオによるCO₂放出削減量大きい。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- これまで開発されてきた熱帯泥炭林のモデルは1地点のシミュレーションは詳細に可能であるものの、入力データやパラメータが膨大で広域の炭素動態を評価するには不向きであった。今回、開発されたモデルにより、初めて広域に熱帯泥炭林の炭素動態をシミュレートすることが可能となった。
- 今回開発されたモデルにより、長期の炭素動態を把握し、気候変動や森林減少などの土地被覆変化が炭素吸収・放出量に与える影響について評価することが可能となった。
- 土地被覆モデルと陸域生態系モデルを用いる事で、将来の炭素動態や森林保護の影響などの評価が可能となった。
- 現在標準的な方法となっているIPCC準拠による炭素吸収・放出量の推定において、過去の攪乱履歴が影響を及ぼす炭素動態を正しく評価できないという課題を見いだされた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発した手法は、REDD+などにおける熱帯泥炭林の炭素吸収・放出量の評価にTier3レベルで使用出来る可能性がある。特により多くの情報を集め、将来シナリオの精度を高めることが出来れば、ベースラインの算出や効果的な熱帯泥炭林保護計画などに役に立てることが出来る。

6. 国際共同研究等の状況

本研究でモデルや土地被覆変化の検証のために使用したデータの一部はマレーシアのサラワク州熱帯泥炭研究所のLulie博士との共同研究として実施し、取得したものである。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Hirata R., Ito A., Hirano T., Saigusa N. (2015) Improvement of the soil submodel of the process-based terrestrial ecosystem model to apply tropical swamp forests. Joint conference of the AsiaFlux Workshop 2015 and ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) TC WG VIII/3: Weather, Atmosphere and Climate Studies Weather, Atmosphere and Climate Studies on Challenges and Significance of Ecosystem Research in Asia to Better Understand Climate Change, Abstracts, 26, Pune, India, 2015
- 2) Hirata R., Okimoto Y., Hirano T., Frankie K., Lulie M. (2016) Initial results of observations of soil CO₂ and CH₄ fluxes in three ecosystem types of tropical peatland in Sarawak, Malaysia. 日本地球惑星科学連合2016年大会
- 3) Hirata R., Okimoto Y., Hirano T., Kiew F., Melling L. (2016) Continuous measurements of soil CO₂ and CH₄ fluxes in two tropical peatforests with high and low ground water level in Sarawak, Malaysia, by using an automated murthi-chamber systems. 15th International PEAT Congress 2016
- 4) Hirata R. (2016) Developing an integrated system to evaluate the carbon dynamics of tropical peat ecosystems in Borneo. 5th Annual Meeting Low Carbon Asia Research Network (LoCARNet)
- 5) Hirata R., Pingchun, Ito A. (2017) The effects of forest loss on regional carbon balance of tropical peat forests in Borneo island. 10th International Carbon Dioxide Conference,
- 6) Hirata R. (2018) Evaluation of greenhouse gas fluxes of tropical peat lands in Borneo island. 3rd International Forum on Sustainable Future in Asia, クアラルンプール

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 平田竜一 (2015) 熱帯林の二酸化炭素吸収量の変化～気候変動と土地利用変化の影響～. 北海道大学 サステナビリティ・ウィーク 2015 市民公開セミナー『脆弱な巨大炭素貯蔵庫－熱帯泥炭林－を監視する』 (平成27年11月3日、北海道大学)
- 2) 平田竜一, 伊藤昭彦 (2017) 気候変動と土地利用変化がボルネオ島熱帯林の二酸化炭素吸収・放出量の時空間変動に及ぼす影響. 日本生態学会第64回全国大会 シンポジウム・巨大な炭素プールである熱帯泥炭林の現状と保全に向けた取り組み (平成23年3月15日、北海道大学)
- 3) 平田竜一、国立環境研究所 (つくば)、2018年、国立環境研究所・春の環境講座における「環境カフェ」において、本事業の成果を紹介した。(平成29年4月22日、北海道大学)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Bontemps et al, (2012) Monitoring forest changes in Borneo on a yearly basis by an object-based change detection algorithm using SPOT-VEGETATION time series. International Journal of Remote sensing. 33, 4673-4699
- 2) Hansen, M. C., et al. (2013). "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." Science 342(6160): 850-853.
- 3) Hergoualc'h and Verchot, (2011) Stocks and fluxes of carbon associated with land use change in Southeast Asian tropical peatlands: A review. Global Biogeochemical Cycles, 25, GB2001, doi:10.1029/2009GB003718,
- 4) Ito, A. (2010) Changing ecophysiological processes and carbon budget in East Asian ecosystems under near-future changes in climate: implications for long-term monitoring from a process-based model, J. Plant Res., 123, 577-588
- 5) Langner et al., (2009). Spatiotemporal fire occurrence in Borneo over a period of 10 years. Global change biology 15, 48-62
- 6) Miettinen, J., et al. (2011). Deforestation rates in insular Southeast Asia between 2000 and 2010. Global Change Biology 17(7): 2261-2270.
- 7) Sulman, B. N., et al. (2012). Impact of hydrological variations on modeling of peatland CO2 fluxes: Results from the North American Carbon Program site synthesis. Journal of Geophysical Research 117(G1).

Ⅱ－３ PALSAR-2による炭素動態の広域評価システムの開発

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

第一宇宙技術部門 地球観測研究センター 本岡毅・林真智・島田政信・田殿武雄・夏秋嶺（平成27～28年度）

平成27～29年度累計予算額：10,090千円（うち平成29年度：1,300千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

本研究の目的は、ボルネオの熱帯泥炭林を対象に、日本の地球観測衛星（ALOS-2 PALSAR-2）を用いた炭素動態の広域評価システムを開発することである。PALSAR-2は、Lバンドマイクロ波を用いる日本のみが有する特徴的なセンサであり、その高い時空間分解能、全天候性、森林への高い感度は、熱帯泥炭の観測に有用である。IPCCが標準化する評価手法にPALSAR-2を組み込むことができれば、炭素動態評価の精緻化による的確な温室効果ガス管理や対策の実現だけでなく、調査の効率化も期待できる。広域評価システム構築のために、①土地被覆分類と変化の評価、②森林地上部バイオマスの評価、③泥炭地沈降量の評価、について、PALSAR-2データを利用するアルゴリズムの検討と実証を行った。土地被覆分類と地上部バイオマス評価について、PALSAR-2の特徴である時系列データを活用して作成するアルゴリズムを新たに開発した。いずれも時系列のデータを用いることで単時期の結果よりも精度が向上し、土地被覆分類の精度は全体精度で約75%が得られ、特に森林やオイルパームの分類を精度良く実現できた。特にバイオマス推定については従来の検出限界（100～200 t/ha）を超え、およそ300 t/haまでの推定が可能となった。泥炭沈降量の評価について、干渉SAR解析を行ってマイクロ波の位相変化を計測し、時系列の平均化を行うことで泥炭の微小な沈降傾向を検出しようと試みたが、当該地域では電離層による長周期ノイズが多く、ノイズ除去に必要な時系列データの蓄積も十分ではなかったことから、広域への適用に十分な精度は得られなかった。今後、データ蓄積と共に、より高精度なノイズ除去が課題である。以上の検討によって得られた土地被覆やバイオマスのデータと、サブテーマ1による排出係数、サブテーマ4による泥炭分布図を組み合わせ、IPCCガイダンスに基づいて炭素収支の計算を行うシステムを構築した。2015年の1年間のボルネオ島全体の炭素収支を算出した結果、既存の評価手法（インドネシアINCAS等）と同じく放出の傾向が確認され、本研究のほうが大きな値を示した。違いの生じた理由として、排出係数および泥炭面積が既存研究よりも大きいこと、評価対象とした2015年は火災面積が大きく他の年に比べて排出が大きくなったこと等が考えられた。サブテーマ2の生態系モデルによる結果との比較では、本研究の結果が過大となる地域があり、バイオマス成長量の算出方法の違いなどが要因として考えられた。炭素収支の推定結果から、ボルネオ島では中央カリマンタンが特に放出に寄与しており、泥炭分解や泥炭火災による放出が収支全体の3-4割を占めることが明らかとなった。本研究によって、IPCCガイドラインに準拠した炭素動態の広域評価手法にPALSAR-2データおよび他サブテーマによって得られた泥炭の最新情報の統合を達成することができ、ボルネオ島の熱帯泥炭における炭素動態収支に関するひとつの評価事例を提示することができた。手法間による評価結果には違いがあり、今後この不確実性低減のために、衛星データからの入力情報推定精度の向上（特にバイオマスの年々変化の推定の実現）や、衛星から泥炭分布やその水分量変化などを推定する手法の開発が必要である。

【キーワード】

衛星観測、合成開口レーダ、土地被覆変化、バイオマス、炭素収支

1. はじめに

インドネシア等で進められているREDD+（Reducing Emission from Deforestation and forest Degradation+）の実施には、州以上の広域スケールで、温室効果ガス（GHG）の収支あるいはGHGの主

要な構成元素である炭素の動態を定量化（MRV：計測・報告・検証）することが不可欠である。炭素動態の広域評価手法については、これまでに多くの研究開発がなされており、行政や実務者が利用できるように、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change）がガイダンスをまとめている^{1),2)}。IPCCガイダンスの手法は、土地被覆変化を基礎情報として、土地被覆変化の種類ごとに面積を求め、それに単位面積当たりのバイオマスや排出量（排出係数）をかけ合わせて和をとることで炭素動態を算出する。例えばインドネシアでは、このIPCCガイダンスに基づいてINCAS（Indonesia National Carbon Accounting System）^{3),4)}という評価システムを構築し、REDD+に向けたMRV活動を実施している。この手法を用いて精度の高い評価を行うには、入力情報となる土地被覆変化や排出係数を高い精度で把握する必要がある。州レベル、国レベルの広域全てを時系列的に現地調査することは労力的に非現実的であるため、人工衛星によるリモートセンシングの活用が必要であり、特に熱帯泥炭林を対象にする場合は、大小多様なスケールかつダイナミックに土地被覆の変化が発生するため、高性能の衛星観測が必要となる。近年、新型の衛星やセンサが次々に開発され、衛星観測から得られる情報は分解能や情報量が向上しつつある。

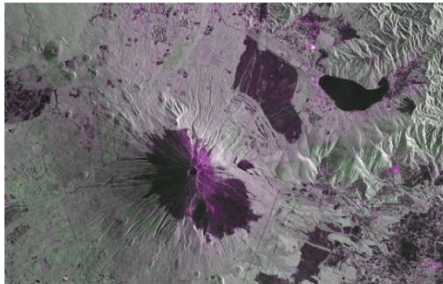
本研究では、衛星データとして、日本が2014年5月から運用する陸域観測技術衛星2号（ALOS-2）に搭載されたフェーズドアレイ型Lバンド合成開口レーダ2（PALSAR-2）⁵⁾による観測データを活用する。図(3)-1にPALSAR-2の概要を示す。PALSAR-2は、地表に向けてマイクロ波を照射し、地表からの後方散乱を計測し、画像にするセンサである。PALSAR-2が用いるマイクロ波はLバンドと言われる約1.2 GHz付近の周波数帯である。Lバンドのような波長が比較的長いマイクロ波は、雲や雨を透過して地面を観測できるため、ボルネオ島のように頻繁に雲や煙に覆われる地域の観測に有用である。また、PALSAR-2は異なる偏波での観測が可能であるが、そのなかでもHV偏波（水平偏波で送信、垂直偏波で受信）の後方散乱強度は森林の地上部バイオマスと正の相関があることが知られており、土地被覆分類や変化の検出、バイオマスの推定などに有用な指標になる。PALSAR-2は、JAXAが定める観測計画に基づいてデータを取得しているが、ボルネオ島などの熱帯地域では、1.5か月～3か月程度の頻度で空間分解能50 mの観測を行っている。この観測頻度は、2006年から2011年まで運用された前号機のALOS PALSARよりも向上しており、PALSARはHV偏波の観測の場合、年2～4回程度の頻度であった。このように、PALSAR-2は熱帯泥炭林の観測に有用な特徴を有している。これまで、PALSARの観測データを用いた土地被覆や森林変化の判別、泥炭沈降による地盤沈下の測定、バイオマス推定などのアルゴリズムが研究されてきたが、これらをPALSAR-2へ適用可能とし、炭素動態評価への有効性を実証することが必要である。また、PALSAR-2で向上した性能を活かして、新たな情報抽出や不確実性低減の可能性がある。現在、地球観測用にLバンド合成開口レーダを運用しているのは我が国だけであるが、アルゼンチンや米国など各国が次々に打上げを計画しており、日本も後継機を開発中である。Lバンド合成開口レーダの観測は今後も世界的に増加していくと考えられ、その炭素動態評価への有用性を実証することは、継続的な温室効果ガス評価を行う上で、重要な知見となりうる。



Ｌバンドマイクロ波（波長24cm）を地表に向けて放射し、返ってくる後方散乱の強度と位相を測定し、画像を得る。

特徴：

- ・ 高分解能（1 m～50 m）
- ・ 天候や昼夜に関係なく観測可能
- ・ Ｌバンドは、森林変化・地盤変動の観測に有利



富士山周辺の画像(2014/6/20観測)

世界の観測に用いられる観測モード

	高分解能	広域観測	フルポラリメトリ
観測幅	70 km	350 km	40 km
分解能	10 m	50 m	6 m
偏波	2偏波 (HH, HV)	2偏波 (HH, HV)	4偏波
観測頻度*	年1-2回以上	年9回程度	5年に1回

* ALOS-2基本観測計画にて規定される頻度

図(3)-1 PALSAR-2の概要

2. 研究開発目的

本研究では、REDD+等の森林吸収源対策の推進に寄与するため、ボルネオの熱帯泥炭林を対象に、日本の地球観測衛星センサ（PALSAR-2）を利用した炭素動態の広域評価システムを開発する。最終的には、開発した衛星観測手法を、サブテーマ1のフィールド観測による排出係数、サブテーマ4の泥炭分布情報の高度化を組み合わせ、IPCCガイダンスに基づいて広域の炭素動態を高精度に定量化するシステムの実現を目指す。また、得られた結果と数値シミュレーションモデルによる計算結果とを比較し、2つの手法による違いと課題を明らかにする。

3. 研究開発方法

(1) 開発する炭素動態の広域評価システムの概要

IPCCガイダンス^{1), 2)}が定める炭素動態の評価方法は、以下の式で表すことができる。

$$\Delta C_{LU} = \sum \Delta C_{Lui} \quad \cdots \text{式(1)}$$

$$\Delta C_{Lui} = \Delta C_{AB} + \Delta C_{BB} + \Delta C_{DW} + \Delta C_{LF} + \Delta C_{SO} + \Delta C_{HWP} \quad \cdots \text{式(2)}$$

各項の定義は以下の通りである。

- ΔC_{LU}： 土地被覆変化情報に基づいて計算された、対象地全体の炭素量変化。
- ΔC_{Lui}： 各土地被覆変化クラスの炭素量変化。
- ΔC_{AB}： 地上部バイオマスの変化による炭素量変化。
- ΔC_{BB}： 地下部バイオマスの変化による炭素量変化。
- ΔC_{DW}： 倒木など粗大有機物の変化による炭素量変化。
- ΔC_{LF}： リターフォールによる炭素量変化。

ΔC_{SO} : 土壌の炭素量変化。泥炭の分解や泥炭火災などによる二酸化炭素やメタンの放出が含まれる。

ΔC_{HWP} : 収穫等の系外への持ち出しによる炭素量変化。

式(2)の右辺各項は、対象地の各土地被覆の面積に、単位面積当たりのバイオマス変化量や泥炭分解などの代表値をかけ合わせることで計算する。必要となる入力情報をまとめると、以下の通りである。

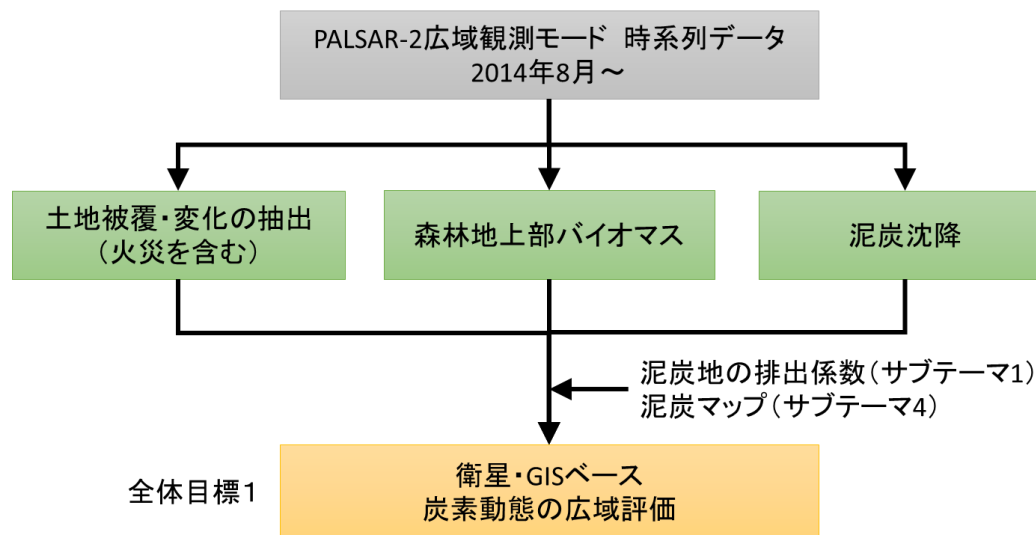
① 土地被覆分類図とその変化。1年間の炭素動態を調べる場合、 n 年と $n+1$ 年の2つの土地被覆分類図が必要である。熱帯泥炭では、火災による放出量も大きな寄与を持つため、火災の発生分布図も必須である。本研究では、PALSAR-2の観測データを解析することで取得する。

② 各土地被覆の地上部バイオマスとその変化。地下部バイオマス、粗大有機物、リターフォールによる炭素量変化は、文献から地上部バイオマスとの比を調べ、それを用いて推定することが可能である。文献や現地調査などから代表値を求めることが多いが、本研究ではPALSAR-2の特長を生かして、衛星からの広域評価を試みる。

③ 泥炭分布図とその変化。サブテーマ4による結果を用いる。

④ 単位面積あたりの吸収・放出量の代表値（排出係数）。サブテーマ1による結果を用いる。

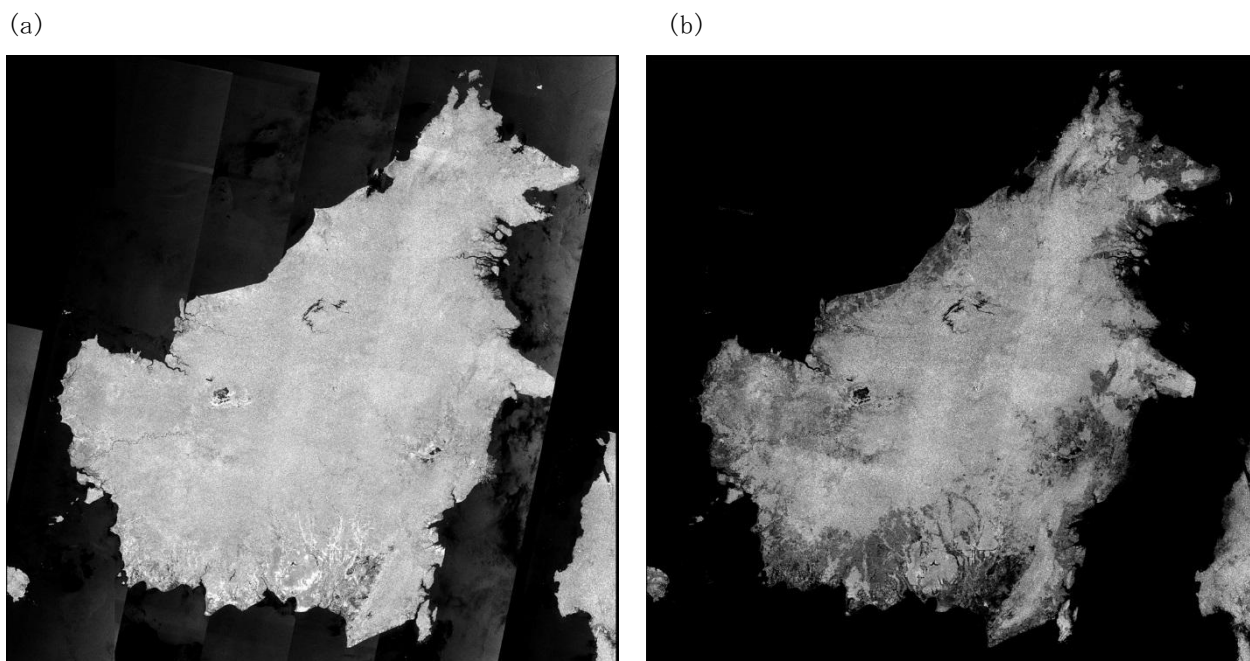
したがって、本研究ではまず、①土地被覆および②地上部バイオマスについて、PALSAR-2観測データを解析して分布図を得るためのアルゴリズムを開発する。泥炭からの炭素放出は、泥炭の地盤沈降や土壌水分と関連があることから、これらを測定できると、より高精度に炭素放出を推定できる可能性がある。合成開口レーダのデータ解析手法の一つに、干渉SAR（インターフェロメトリ）という解析があり、2時期の観測データにこの手法を適用すると、その間の地盤の変位量を調べることができる。そこで、PALSAR-2を用いた泥炭地の地盤沈降計測についても検討を行う。図(3)-2に、全体の流れを示す。



図(3)-2 本研究における炭素動態の広域評価までの流れ

(2) 土地被覆分類とその時間変化の検出

入力データとして、ボルネオ島全体のPALSAR-2後方散乱係数モザイク画像を作成した。広域観測モード（50 m分解能、350 km観測幅、HHおよびHVの2偏波）による観測データであり、観測頻度は観測計画において年9回であるが、災害発生時の観測などにより、場所によって欠測が生じている。各画像は映像化の後、オルソ変換、地形による倒れ込み補正、各観測画像間の後方散乱係数のバイアス補正、モザイク処理を施した。図(3)-3に画像の一例を示す。



図(3)-3 ボルネオ島のPALSAR-2画像の一例。(a) HH偏波画像、(b) HV偏波画像。

土地被覆分類には、機械学習(Random Forest法)を用いた。分類項目は、①森林、②低木林、③草地、④プランテーション(主にオイルパーム林)、⑤季節性湿地(水田を含む)、⑥火災により燃えた森林、⑦裸地(主に採掘地)、⑧都市、⑨水域の9種類である。各項目の定義を、表(3)-1に示す。教師および検証用のデータは、現場GPS写真および高分解能衛星画像を用いて取得し、全数の半分を分類器の学習のための教師として、残り半分为精度検証用として用いた。現場GPS写真は、2015年8月26日から29日にかけて、インドネシアボルネオ島のパラカラヤ周辺において収集した。高分解能衛星画像は、Google EarthやLandsat等の公開データを使用した。分類の入力とする特徴量には、PALSAR-2の時系列観測を活かすために、1年間のデータの平均値、最大値、最小値、標準偏差を採用した。対象時期は、2015年(2014年8月から2015年6月の観測データ)、2016年(2015年7月から2016年6月の観測データ)の2年分である。各時期の観測値をそのまま入力するのではなく平均などの統計量を用いた理由は、欠測などにより一部地域の観測データが抜けることが時々あり、その影響を抑えるためである。一年間の統計値の計算後、HH偏波およびHV偏波の年平均値を用いてセグメンテーション処理を行い、近い値を持つ画素をグループ化した。セグメンテーション処理はSLIC(Simple. Linear Iterative Clustering)法を用い、一度小領域に分割を行った後、RAG(Region Adjacent Graph)法によって再度隣接する小領域の結合を行った。以上のセグメンテーション処理の後に、各小領域の平均値を用いて分類器の学習を行い、画像全体に分類器を適用した。以上の処理コードは、全てプログラミング言語Pythonおよびそのライブラリを用いて作成した。

ボルネオ島の炭素動態評価を行っている既往研究⁶⁾やインドネシアの評価システムINCAS³⁾では、森林をさらに原生林(intact or pristine forest)と劣化林(degraded forest)に区別し、異なる排出係数を割り当てている。ボルネオ島については、CIFOR(Center for International Forestry Research)が原生林/劣化林のマップを作成して公開しているが、数十年に及ぶ長期間の地図情報蓄積や光学衛星画像の判読を行い、手作業にて原生林のマップを作成している。PALSAR-2データを用いて同様の作業を行おうとすると、同じく長期間のデータから人間の活動の痕跡を確認して判別を行う必要があるが、PALSAR-2の運用期間はまだ短いため不可能である。そのため本研究では、PALSAR-2データを用いた分類は森林までとし、それ以降の原生林の区別は、CIFORのデータを重畳して区別を行うこととした。

表(3)-1 土地被覆分類項目の定義とIPCC分類との対応関係

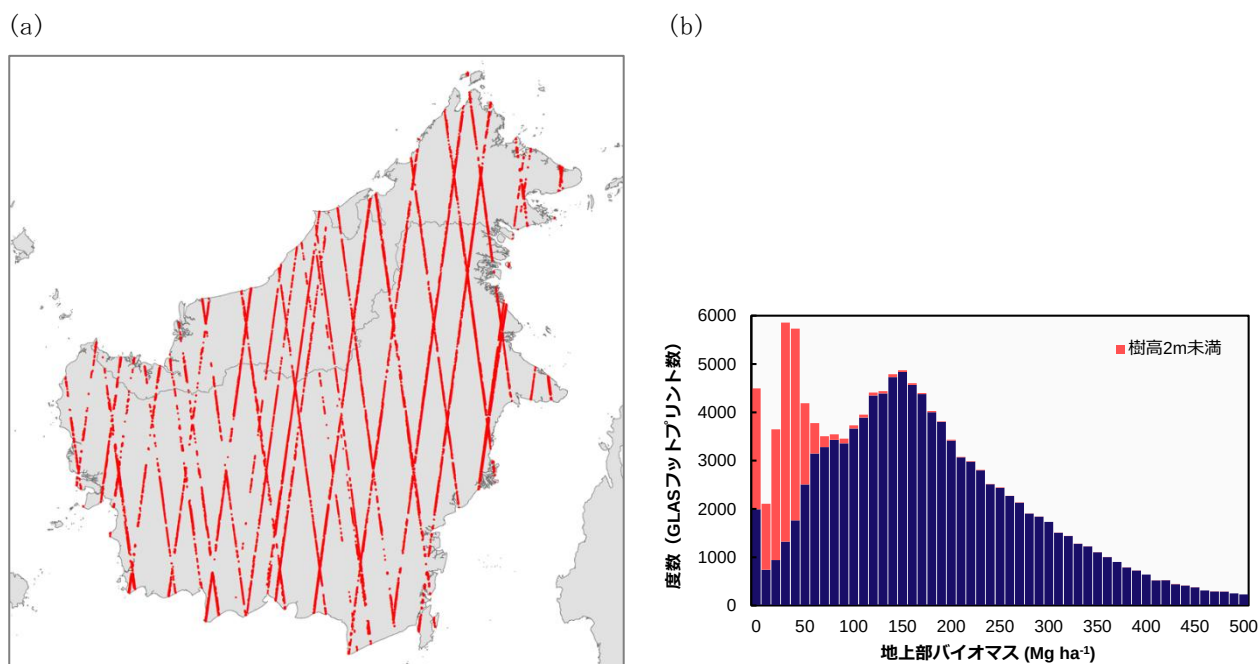
ID	分類カテゴリ名	定義	IPCC分類
1	森林	高木が多く占める場所。	① Not logged, no drainage (Pristine PSF) ② Forest land and cleared forest land (shrubland), drained (Degraded PSF)
2	低木林	低木及び草本が生育。	Forest land and cleared forest land (shrubland), drained
3	草地	木本が少なく、主に草本に覆われる。	Grassland, drained
4	プランテーション	主にオイルパーム林。	Plantations, drained, oil palm
5	季節性湿地	季節的に冠水のある場所。湿地や水田など。	Cropland, drained, paddy rice (水田)
6	火災により燃えた森林	火災の被害を受け、燃え残りがある森林(火災直後)。完全に地上部が消失した森林は、草地や裸地に分類。	- (Peat burningを計算する際に面積として必要)
7	裸地	土壌表面が露出している場所。採掘場など。	-
8	都市域	建造物が多く占める場所。	-
9	水域	通年にわたって水で覆われる場所。海、河川、湖沼など。	-

(3) 森林地上部バイオマスの推定

既往研究により、Lバンド合成開口レーダが計測するHV偏波の後方散乱強度が、森林地上部バイオマスと正の相関を有することが知られている。しかし、高バイオマス林分では後方散乱強度が飽和し、相関関係が失われるという課題がある。飽和に達する地上部バイオマスの値は、森林タイプによって異なるが、およそ100 t ha⁻¹前後である。ボルネオ島では、この閾値を超える高バイオマスの森林が大半を占めているため、後方散乱強度と地上部バイオマスを結びつけるだけの単純な経験モデルでは、精度を得ることが難しい。この課題を解決するために、近年の研究では、PALSAR-2とは異なる波長の合成開口レーダ画像と組み合わせたり、画像のテクスチャ（空間的な特徴量）を利用したりするなど、推定の入力となる情報量を増やすことによって、より高いバイオマスの森林まで計測可能とするような試みがなされている。そこで本研究でも、複数時期のPALSAR-2画像の利用やテクスチャ情報の利用により入力とする情報量を増やし、ボルネオ島のような高バイオマスな森林が多い地域でも有効な手法を開発することができないかと考えた。

PALSAR-2画像から地上部バイオマスを推定するためには、ボルネオ島の一部を計測した高精度なバイオマス情報が、教師データおよび検証データとして必要になる。本研究では、Hayashi et al. (2015)⁷⁾が衛星搭載ライダーであるGLASデータより推定した地上部バイオマスのデータを利用した。ライダーとは、レーザ光を地表面に照射することで樹高や地上部バイオマスを高精度に計測できるセンサのことで、GLASは2003～2009年にNASAが運用するICESat衛星に搭載されていた。ライダーは、高精度な計測が期待できる反面、レーザ光が照射されたフットプリント（GLASでは直径約60mの範囲）における離散的な情報しか得られないという欠点がある。図(3)-4に、使用したGLASデータのフットプリントの分布と、ボルネオ島の地上部バイオマス推定値のヒストグラムを示す。各フットプリントでの推定精度（平均平方二乗誤差RMSE）は 38.7 t ha⁻¹、ボルネオ島全体での平均地上部バイオマスは 190.2 ± 131.6 t ha⁻¹ である。なお、GLASの観測年（2003～2009年）とPALSAR-2の観測年（2016年）との間には開きがあるため、その間の地上部バイオマスの変化が推定モデル構築の誤差要因となる可能性がある。

る。そこで、フットプリント毎に観測期間の長さに応じて、年率 2 t ha^{-1} の成長を仮定¹⁾してGLASデータを補正した。



図(3)-4 教師データ・検証データとして利用したICESat/GLASデータ。(a) GLASフットプリントの分布、(b) ボルネオ島の地上部バイオマス推定値のヒストグラム（赤色は非森林）。

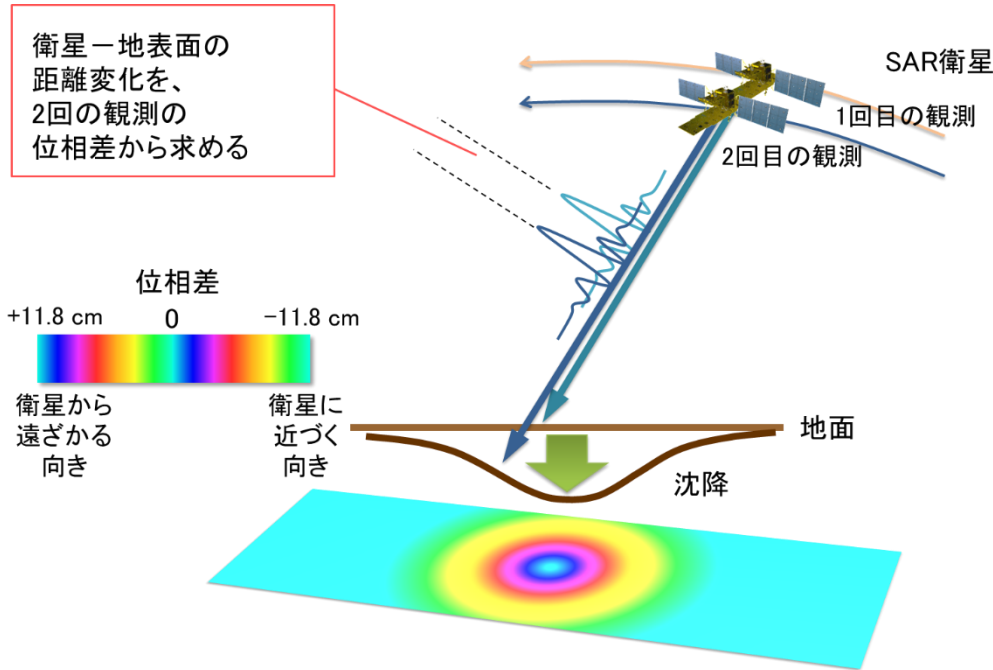
PALSAR-2データは、前述(2)土地被覆分類で作成したPALSAR-2後方散乱係数モザイク画像から、2016年の9回帰分の時系列データ（HH偏波、HV偏波）を使用した。9回帰全てのPALSAR-2データが存在する点のGLASデータは、約22,000点であった。このGLASデータを9:1に分割し、前者はPALSAR-2データから地上部バイオマスを推定するモデルを構築するための教師データ、後者は構築したモデルの検証データとして利用した。ここでは、機械学習の一種であるRandom Forest法を利用し、説明変数をPALSAR-2データ、目的変数をGLASデータの地上部バイオマスとして推定モデルを構築した。なお、PALSAR-2データは画素ごとに時間方向の統計量を計算し、それらを説明変数とした。具体的には、平均値、中間値、最大値、最小値、標準偏差、レンジ、歪度、尖度の8つの統計量を計算した。また、説明変数として画像のテクスチャ情報も利用した。テクスチャの計算には、画像解析ソフト ERDAS Imagine および ENVI を利用してグレーレベル同時生起行列（GLCM）と呼ばれる手法で、分散、均質性、エントロピー、2次モーメントなど6つの特徴量を計算した。これらの値を、HH偏波画像とHV偏波画像のそれぞれで計算し、さらにPALSAR-2の観測日の情報を加えた29の説明変数を準備した。なお、PALSAR-2画像にはスペckルと呼ばれるごま塩状のノイズがあるため、いずれの値もGLASのフットプリント中心から半径200mの範囲の平均値を計算することで、ノイズの影響を低減するようにした。このように推定モデルを構築した後、それをPALSAR-2画像に適用することで、ボルネオ島全域の地上部バイオマス地図を作成した。

(3) 泥炭地の地盤沈降の評価

地盤沈降は、2時期の干渉SAR解析により推定される。図(3)-5に概要を示す。泥炭地の地盤沈降のスケールは年間で数mm～数cmであるが、これを干渉SAR解析で捉えるには、電離層による位相変化などの各種ノイズを除去して検出精度を向上させることが必要であり、そのために時系列に複数のデータを重ね合わせる必要がある。より高精度に干渉SARを行うには、分解能が高くノイズ除去が容易な高分解能モードが好ましいことが知られているが、対象地では高分解能モードの時系列データ蓄積がまだ不十分であったため、観測頻度の高い広域観測モードを用いて、パラカラヤ付近の地盤沈降の抽出を試みた。

使用したPALSAR-2データは、表(3)-2に示す通りであり、シングルルック複素画像（Level 1.1）のフォーマットである。処理の流れは以下の通りである。

- ① 各観測につき、その次の観測を干渉ペアとして毎回の干渉画像を作成した。
- ② 結果に重畳される、電離層によるとと思われる長周期の干渉縞を、一次近似により除去する。
- ③ 泥炭地以外の場所から不動点（変位=0）を選択し、干渉縞のアンラップ処理を行い、干渉画像ごとに変動量を求める。
- ④ 変動量を時間方向に足し合わせることで、観測ごとに重畳される時系列的に無相関な成分（水蒸気や電離層によるノイズ成分）を除外する。
- ⑤ パランカラヤ市付近を拡大し、市街中心の変動をゼロとして周囲の解析期間中の変位を計算する。



図(3)-5 干渉SAR解析の概要

表(3)-2 干渉 SAR 解析に使用した PALSAR-2 データ

シーン番号	観測日
ALOS2040963650-150225	Feb. 25, 2015
ALOS2047173650-150408	Apr. 8, 2015
ALOS2053383650-150520	May, 20, 2015
ALOS2059593650-150701	Jul. 1, 2015
ALOS2063733650-150729	Jul. 29, 2015
ALOS2076153650-151021	Oct. 21, 2015
ALOS2082363650-151202	Dec. 2, 2015
ALOS2088573650-160113	jan. 13, 2016
ALOS2100993650-160406	Apr. 6, 2016
ALOS2107203650-160518	May. 18, 2016
ALOS2113413650-160629	Jun. 29, 2016

(5) 炭素動態の広域評価

PALSAR-2 データの解析によって得られた土地被覆変化やバイオマスの情報を用いて、前述の式(1)および(2)によりボルネオ島の炭素収支を計算した。排出係数などのパラメータ設定は以下の通りとした。

① 各土地被覆のバイオマス代表値および成長量

表(3)-3に、地上部バイオマス、地下部バイオマス、粗大有機物、リターフォールの炭素量について各土地被覆カテゴリに設定した値を示す。単位は tC ha^{-1} であり、炭素換算の重量へ変換する係数は、IPCCガイダンスに基づき0.47を用いた。土地被覆が変化した場合、この代表値の差分が炭素量の変化として集計される。森林、低木林、プランテーションについては、PALSAR-2データから推定した地上部バイオマス（2016年）をそれぞれの土地被覆カテゴリで集計し、その平均値を地上部バイオマスの代表値とした。その他の土地被覆の地上部バイオマスや、地下部バイオマス、粗大有機物、リターフォールについては、IPCCガイダンスや文献に記載される値を用いた。

表(3)-4に、各土地被覆のバイオマス成長量として設定した値を示す。単位は $\text{tC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ である。IPCCガイダンスに記載される値を用いており、粗大有機物、リターフォールについては0とした。

② 排出係数

表(3)-5に、今回使用した排出係数の設定値を示す。単位は $\text{tC ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ である。サブテーマ1による現地調査の成果や、IPCCガイダンス及び文献を参考にして値を設定した。なお、中央カリマンタン、西カリマンタン、サラワク以外の地域については、それぞれの排出係数の平均値を使用した。

表(3)-3 各土地被覆のバイオマス代表値

土地被覆カテゴリ	AGB (地上部バイオマス)		BGB (地下部バイオマス)		DW (粗大有機物)		LF (リターフォール)	
森林 (Intact)	104.647	PALSAR-2推定値 (2016年) より計算	23.022	BGB/AGB = 0.22 (Krisnawati et al 2014; Verwer & van der Meer 2010)	19.412	DW/AGB = 0.1855 (一次林、Krisnawati et al., 2014; Verwer & van der Meer, 2010)	20.929	LF/AGB = 0.2 (0.16-0.23, 一次林・二次林, Krisnawati et al., 2014; Verwer & van der Meer, 2010)
森林 (Degraded)	103.063	同上	22.674	同上	24.632	DW/AGB = 0.239 (Krisnawati et al., 2014)	20.613	同上
森林 (小規模、河畔林、等)	93.223	同上	20.509	同上	22.280	同上	18.645	同上
低木林	77.632	同上	10.558	BGB/AGB = 0.136 (Logged forest, Hergoualch & Verchot, 2011)	5.590	DW/AGB = 0.072 (Logged forest, Hergoualch & Verchot, 2011)	5.500	5.5 Mg C ha ⁻¹ (Logged forest, Hergoualch & Verchot, 2011)
草地	2.914	IPCC 2006	0.775	BGB/AGB = 0.266 (Mixed croplands and shrublands, Hergoualch & Verchot, 2011)	0.000	0 (Mixed croplands and shrublands, Hergoualch & Verchot, 2011)	4.200	4.2 Mg C ha ⁻¹ (Mixed croplands and shrublands, Hergoualch & Verchot, 2011)
プランテーション	68.873	PALSAR-2推定値 (2016年) より計算	17.907	BGB/AGB = 0.26 (Oil palm, Hergoualch & Verchot, 2011)	3.420	3.42 Mg C ha ⁻¹ (プランテーション以前の森林の枯死木, Khasanah et al., 2015)	1.720	1.72 Mg C ha ⁻¹ (fond & empty fruit bunch, Khasanah et al., 2015)
季節性湿地・水田	2.914	草地と同じとする	0.775	草地と同じとする	0.000	草地と同じとする	4.200	草地と同じとする
森林火災域 (燃え残り立木あり)	51.532	二次林の1/2を想定	7.060	BGB/AGB = 0.137 (Fire damaged forest, Hergoualch & Verchot, 2011)	4.000	4.0 Mg C ha ⁻¹ (Fire damaged forest, Hergoualch & Verchot, 2011)	4.600	4.6 Mg C ha ⁻¹ (Fire damaged forest, Hergoualch & Verchot, 2011)
裸地	0.000		0.000		0.000		0.000	
市街地	0.000		0.000		0.000		0.000	
水域	0.000		0.000		0.000		0.000	

表(3)-4 各土地被覆のバイオマス成長量

土地被覆カテゴリ	AGB成長量 tC/ha/year	BGB(地下部バイオマス)
森林 (Intact)	1.6	0.352
森林 (Degraded)	1.6	0.352
森林 (小規模、河畔林、等)	0.5	0.103
低木林	0.5	0.064
草地	0.0	0.000
プランテーション	2.4	0.611
季節性湿地・水田	0.0	0.000
森林火災域	0.0	0.000
裸地	0.0	0.000
市街地	0.0	0.000
水域	0.0	0.000

表(3)-5 泥炭地における排出係数の設定値

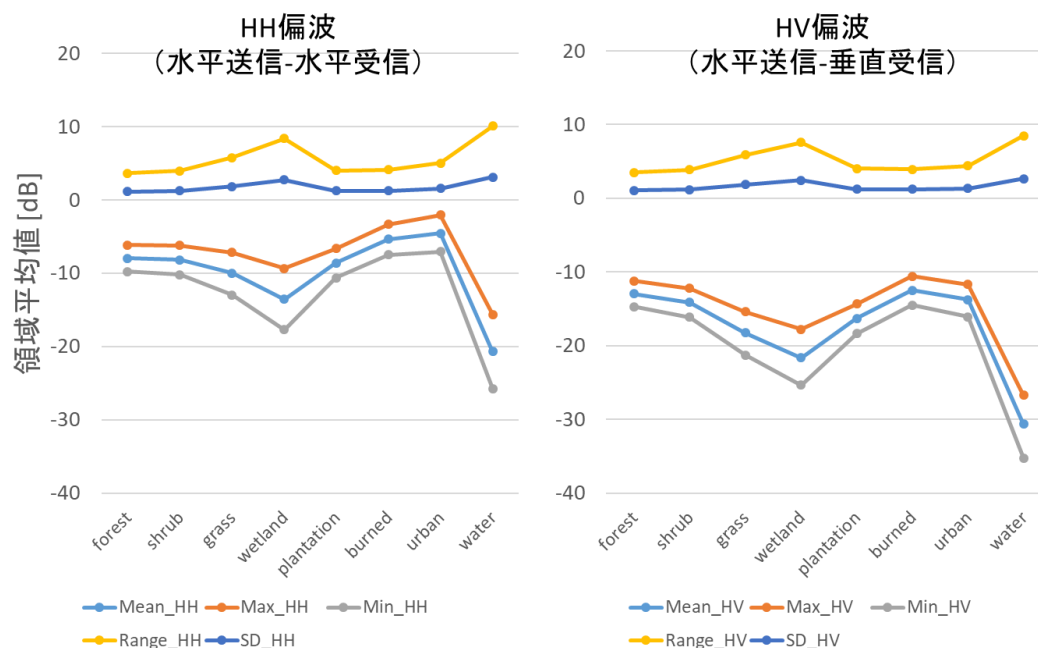
土地被覆カテゴリ	泥炭土壌の好氣的分解 (CO ₂ 排出)			CH ₄ 排出		
	ボルネオ全体	中央・西カリマンタン	サラワク	ボルネオ全体	中央カリマンタン	サラワク・西カリマンタン
森林 (Intact)	6.91	8.24	5.58	0.0435	0.0020	0.0850
森林 (Degraded)	6.79	8.00	5.58	0.0220	0.0020	0.0420
森林 (小規模、河畔林、等)	6.79	8.00	5.58	0.0220	0.0020	0.0420
低木林	6.97	6.97	6.97	0.0220	0.0020	0.0420
草地	6.97	6.97	6.97	0.0005	0.0005	0.0005
プランテーション	7.67	8.43	6.90	0.0250	0.0250	0.0250
季節性湿地・水田	9.40	9.40	9.40	0.1076	0.1076	0.1076
森林火災域 (燃え残り立木あり)	3.72	3.72	3.72	0.0020	0.0020	0.0020
裸地	6.97	6.97	6.97	0.0005	0.0005	0.0005
市街地	9.60	9.60	9.60	0.0005	0.0005	0.0005
水域	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000

	流水に伴う炭素排出			泥炭火災による排出		
	ボルネオ全体	中央・西カリマンタン	サラワク	CO ₂	CH ₄	CO
森林 (Intact)	0.51	0.51	0.51	164.000	5.600	31.770
森林 (Degraded)	0.82	0.82	0.82	164.000	5.600	31.770
森林 (小規模、河畔林、等)	0.82	0.82	0.82	164.000	5.600	31.770
低木林	0.82	0.82	0.82	71.900	2.441	13.950
草地	0.82	0.82	0.82	71.900	2.441	13.950
プランテーション	0.82	0.82	0.82	71.900	2.441	13.950
季節性湿地・水田	0.82	0.82	0.82	71.900	2.441	13.950
森林火災域 (燃え残り立木あり)	0.82	0.82	0.82	164.000	5.600	31.770
裸地	0.82	0.82	0.82	71.900	2.441	13.950
市街地	0.82	0.82	0.82	71.900	2.441	13.950
水域	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000

4. 結果及び考察

(1) ボルネオ島におけるPALSAR-2後方散乱強度の時系列特性

土地被覆分類やバイオマス推定のために作成したPALSAR-2広域観測モードのモザイク画像を用いて、まずボルネオ島の熱帯泥炭地における後方散乱係数（ガンマノート、以降 γ_0 と記す）の時系列特性を確認した。図(3)-6に、各土地被覆における時系列の統計値を示す。これまでに知られている通り、森林や都市域で γ_0 の値が大きく、水域や低バイオマス域で低い値を示しており、モザイク画像が正常に作成できていることを確認した。HV偏波では特にバイオマスの大小に感度が大きく、森林、低木林（shrub）、草地の順にバイオマスは低下するが、それと同じく γ_0 の値も低下している。また、草地や湿地ではレンジや標準偏差が大きく、これは季節変化が大きいことを示している。一方、プランテーションは季節変化が小さいことがわかる。このように、PALSAR-2後方散乱係数の時系列特性は土地被覆ごとに異なる特徴を持っており、土地被覆分類や変化の検出に有用な指標である。



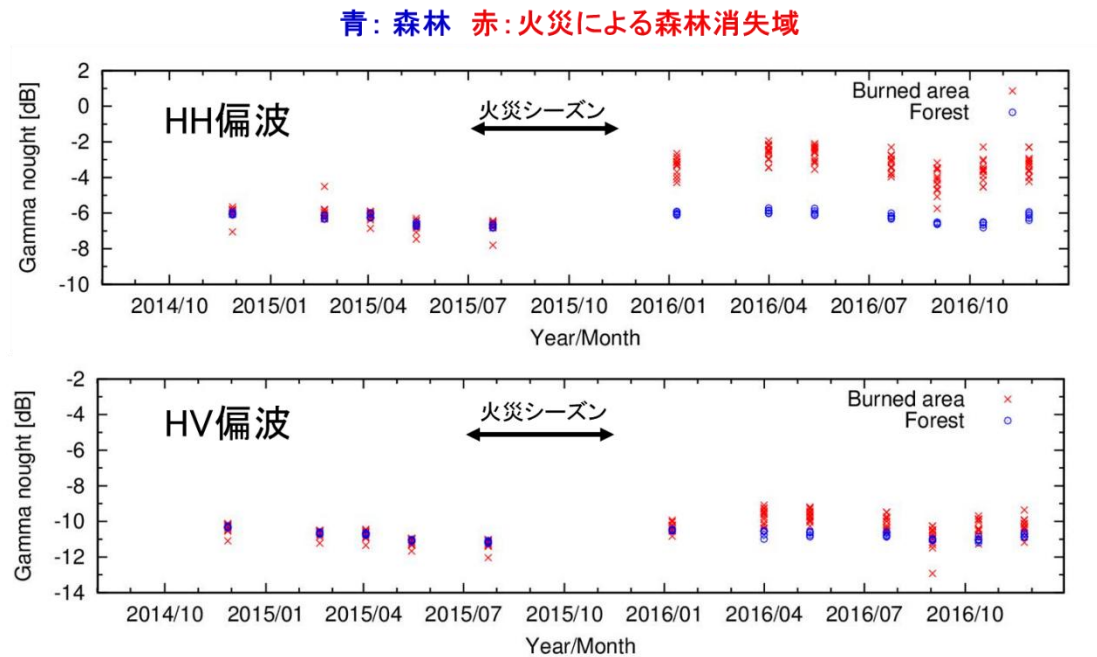
図(3)-6 ボルネオ島全体のPALSAR-2後方散乱係数 (γ_0) の時系列統計値 (平均、最大、最小、レンジ、標準偏差)。2016年の1年間のデータを使用。

図(3)-6の時系列特性のなかでも、森林火災域 (burned) は、樹木が燃えて地上部バイオマスが低下したのにも関わらず、 γ_0 が低下しなかった。むしろ、HH偏波の γ_0 は、火災域のほうが森林よりも大きな値を示した。PALSARを用いた研究では、伐採や火災に伴ってHV偏波の γ_0 が大きく減少することが明らかにされていたが、今回の結果はそれとは異なるものであった。図(3)-7に、パランカラヤ周辺域の森林域と火災域の γ_0 の時系列変化を示す。この地域では火災は主に乾季にあたる7月から11月にかけて多く発生し、特に2015年は強いエルニーニョによる高温と少雨により、他の年に比べて火災が多発した。図(3)-7によると、森林火災の発生後に、HH偏波では2-4 dB程度の γ_0 上昇、HV偏波においても1 dB程度の γ_0 上昇が見られた。また、上昇した γ_0 はすぐに減少することではなく、しばらく上昇した値を維持していたことがわかった。

この森林火災による変化の原因としては、火災後の燃え残った幹枝の処理が関係していると考えられる。図(3)-8にパランカラヤ周辺を現地踏査した際に撮影した写真を示す。伐採域では樹木はすぐに運び出される一方、森林火災域で燃え残った幹枝は、すぐに除去されずに残されたままであった。また、燃え残りも多く存在した。そのため、火災域では樹木密度が減ることでPALSAR-2の送信電波がより地面まで到達しやすくなると同時に、地面 (あるいは雨季であれば冠水面) と燃え残った樹木間での二回反射が卓越し、HH偏波の γ_0 が大きく増加したと考えられる。一方、既往研究のスマトラ島の事例は、主にプランテーション拡大による火災であり、燃え残った幹枝がすぐに除去される場合が多い。そのため、地面からの表面散乱が主となり、火災後にHV偏波の γ_0 がすぐに減少したと考えられる。HV偏波の γ_0 は森林の地上部バイオマスと相関を持つと言われるが、今回のような火災発生時には、その関係は成り立たないため、バイオマス推定に γ_0 を用いる際には考慮する必要がある。

上記の特徴を利用して、PALSAR-2の時系列画像からHH偏波の γ_0 が大きく増加する箇所を抽出し、火災発生箇所をマップ化したものを図(3)-9に示す。抽出結果はLandsat画像から判読した森林変化領域と良い一致を示しており、精度良く抽出できていると考えられる。また、HV偏波が減少した箇所を同時に抽出することで、伐採域や草地の火災域も同時に区別して検出することが可能である (図(3)-9中央)。さらに、本抽出結果と、一般によく用いられているMODIS熱赤外センサによる火災情報を重ねたところ、両者の分布は概ね一致しており、内挿等の処理を施して重ねることで、火災発生時期をより詳細に示すことができた。一部、PALSAR-2では検知しているが、MODISでは検知できない火災発生域も存在し、おそら

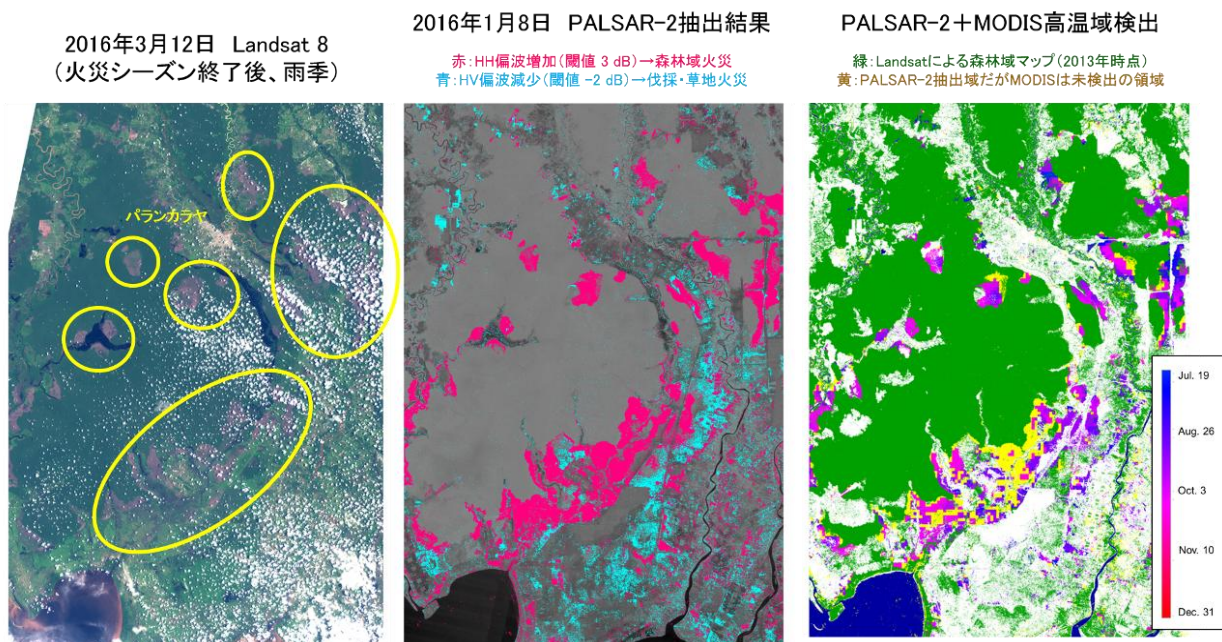
く雲や火災による煙の影響でMODISの観測が遮られたためにミスマッチが生じたと思われる。MODISに加えてPALSAR-2のデータを用いることで、PALSAR-2の高い分解能と全天候性を活かしてより詳細に森林火災や減少を把握することが可能である。



図(3)-7 パランカラヤ周辺の森林域と火災域におけるPALSAR-2後方散乱係数 (γ_0) の時間変化。



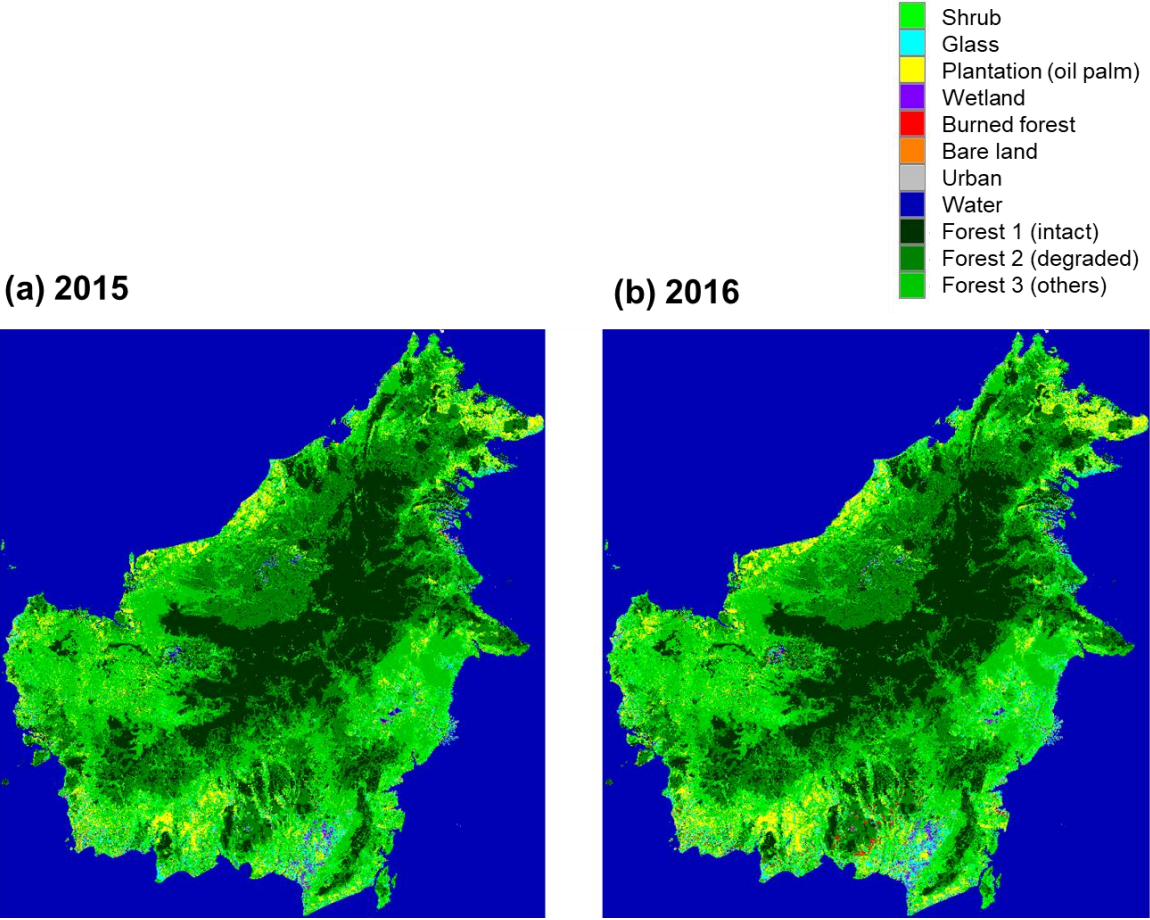
図(3)-8 パランカラヤ周辺の森林伐採域および火災域の現地写真。2014年8月に撮影。



図(3)-9 パランカラヤ周辺における(左) Landsat光学トゥルーカラー画像、(中央) PALSAR-2広域観測モードによる変化抽出結果、(右) PALSAR-2による抽出結果にMODIS赤外線センサによる高温域検出を統合したマップ。左図の黄色で囲んだ領域は、2015年の大規模火災による森林消失域。中央の図の赤色で示す部分はHH偏波の γ_0 が大きく増加した箇所であり、森林火災域を示す。青色で示す部分はHV偏波の γ_0 が大きく減少した箇所であり、伐採や草地火災の発生域を示す。

(2) 土地被覆分類とその時間変化の評価

PALSAR-2時系列データを用いた土地被覆分類の結果を、図(3)-10に示す。また、表(3)-6に、高分解能光学画像の判読による検証データとの比較による精度検証結果を示す。精度評価は、2016年の結果に対して行った。全体精度は約74%となったが、土地被覆カテゴリ間で違いがある。森林、プランテーション(オイルパーム林)、水域の分類精度は、User's accuracyとProducer's accuracy共に比較的高く、75%以上を示した。PALSAR-2の観測は、これらの土地被覆カテゴリの分類が得意であると言える。一方、湿地や火災域は50~70%の精度であり、低木林や草地はさらに低く20~40%の精度となった。低木林は森林やプランテーションとの誤分類が多く、草地はプランテーションとの誤分類が多い。低木林や草地は、光学画像からの判読が他のカテゴリに比べて難しく、また、年内の時間変化も大きいことがあるため、精度が相対的に低くなったと考えられる。つまり、教師データおよび検証データ自体の精度も改善の余地がある。都市域は、Producer's accuracyは高いものの、User's accuracyが低くなった。これは、都市部と森林の後方散乱係数は両者とも他のカテゴリに比べて大きく、インドネシアの都市部は建造物と森林のモザイクで構成されることが多いため、都市部を森林と誤認識してしまうことが度々発生していると考えられる。



図(3)-10 PALSAR-2時系列データによるボルネオ島の土地被覆分類結果。

表(3)-6 PALSAR-2土地被覆分類（2016年）の精度評価結果

		Satellite data									User's Accuracy
		Forest	Shrub	Grass	Plantation	Flooded	Burned	Bareland	Urban	Water	
Validation data	Forest	1306	84	7	30	2	1	1	1	0	91.2%
	Shrub	251	81	4	40	1	1	3	1	1	21.1%
	Grass	8	8	18	30	2	1	4	0	2	24.7%
	Plantation	36	40	10	321	0	1	3	0	0	78.1%
	Flooded	0	2	4	0	12	0	0	0	1	63.2%
	Burned	7	2	0	1	0	13	0	0	0	56.5%
	Bareland	0	2	9	0	0	0	7	0	0	38.9%
	Urban	12	2	0	1	0	2	0	9	0	34.6%
	Water	0	0	0	0	1	0	0	0	24	96.0%
Producer's accuracy		80.6%	36.7%	34.6%	75.9%	66.7%	68.4%	38.9%	81.8%	85.7%	74.3%

表(3)-7に、ボルネオ島全体の各土地被覆面積の2015-2016年間の変化を示す。全域（“All”列）に加えて、サブテーマ4の泥炭マップを用いて集計した泥炭地（“Peatland”列）の集計値を示しており、パーセンテージは全域に対する泥炭地の割合である。2015年から2016年にかけて、森林では面積が減少しており、低木林、草地、プランテーション、火災により燃えた森林の面積が増加している。この傾向は、全域と泥炭地のどちらも同じである。これは、主に2015年に多発した火災や、伐採によるプランテーション拡大による影響で発生したと考えられる。特に着目すべき点は、泥炭地の森林は全体の約4~10%程度であるにもかかわらず、2015-2016年に発生した森林火災のうち、約40%が泥炭地で発生していることである。2015年の火災は強いエルニーニョにより森林地帯へ火災が延焼して拡大したが、このような状況は泥炭林で特に発生しやすいと考えられ、炭素動態にも大きな影響を与えていると予想される。

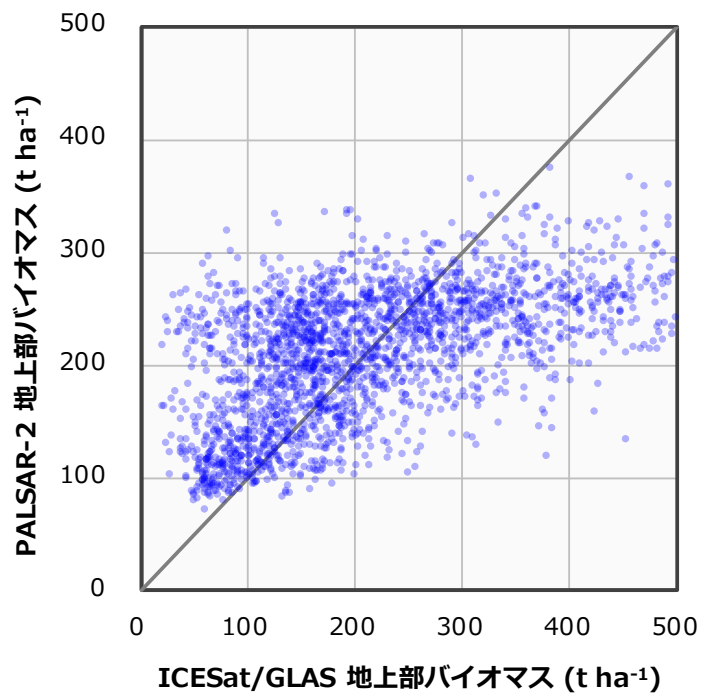
表(3)-7 ボルネオ島全体の各土地被覆の面積（単位：1000 ha）

Area	Land cover category	All		Peatland			
		Year 2016	Year 2015	Year 2016		Year 2015	
Borneo	Intact forest	19936	20157	778	4%	802	4%
	Degraded forest	16025	16209	1678	10%	1727	11%
	Small/mosaic forest	18545	21744	1408	8%	1918	9%
	Shrub	11892	9935	1294	11%	1159	12%
	Glassland	3012	2330	414	14%	316	14%
	Plantation (oil palm)	4968	4359	1052	21%	841	19%
	Wetland	441	448	29	6%	26	6%
	Burned forest	329	88	141	43%	17	19%
	Bareland	457	356	23	5%	14	4%
	Urban	62	51	6	9%	3	5%

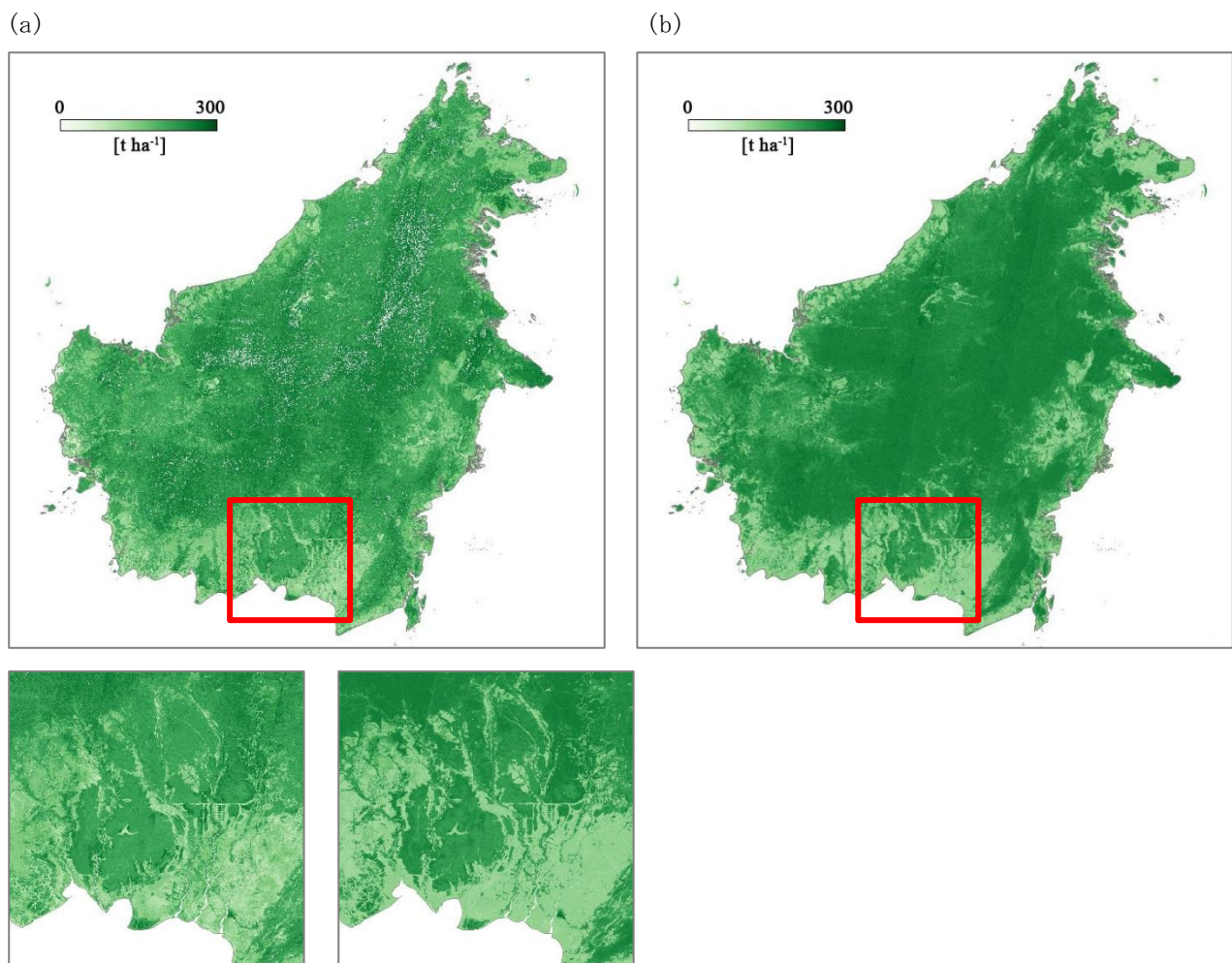
(3) 森林地上部バイオマスの推定

構築したモデルにもとづいてPALSAR-2画像から地上部バイオマスを推定した値と、検証用のGLASデータとを比較したものを、図(3)-11に示す。およそ300 t ha⁻¹を超える高バイオマス林分では推定値が飽和してしまい、適切に推定できていない。しかし、時系列データやテクスチャ情報を利用しない従来の方法であれば100 t ha⁻¹程度で飽和していたため、それに比較すると大幅に改善されることがわかる。図(3)-4に示すヒストグラムによると、地上部バイオマスを300 t ha⁻¹まで推定できればボルネオ島の87%をカバーできるのに対し、100 t ha⁻¹までだと25%をカバーできるにすぎない。この推定モデルでは、300 t ha⁻¹までの推定精度（RMSE）は74.3 t ha⁻¹であった。GLASの推定精度（38.7 t ha⁻¹）に比較すると劣るものの、地上部バイオマスの分布状況を面的に把握できる利点は大きい。

次に、構築した推定モデルにもとづいて、PALSAR-2画像からボルネオ島の地上部バイオマス地図を作成した（図(3)-12）。画像ノイズ（スペックル）の影響を低減するため、空間分解能を250mに低下させている。また、2016年と同様の手順で、2017年観測の9回帰分のPALSAR-2画像から作成した地図も併記してある。ボルネオ島中央に分布する山岳地域に高バイオマス林分が分布している様子や、2016年から2017年にかけて伐採や森林火災などによって森林バイオマスが失われたと見られるエリアの様子などが把握できる。しかし、2016年に比べて2017年の地図では全体的にバイオマスが10 t ha⁻¹以上増加しており、これは自然の成長量ではなく推定誤差の影響と考えられる。推定モデルの高精度化は、今後の課題と言える。



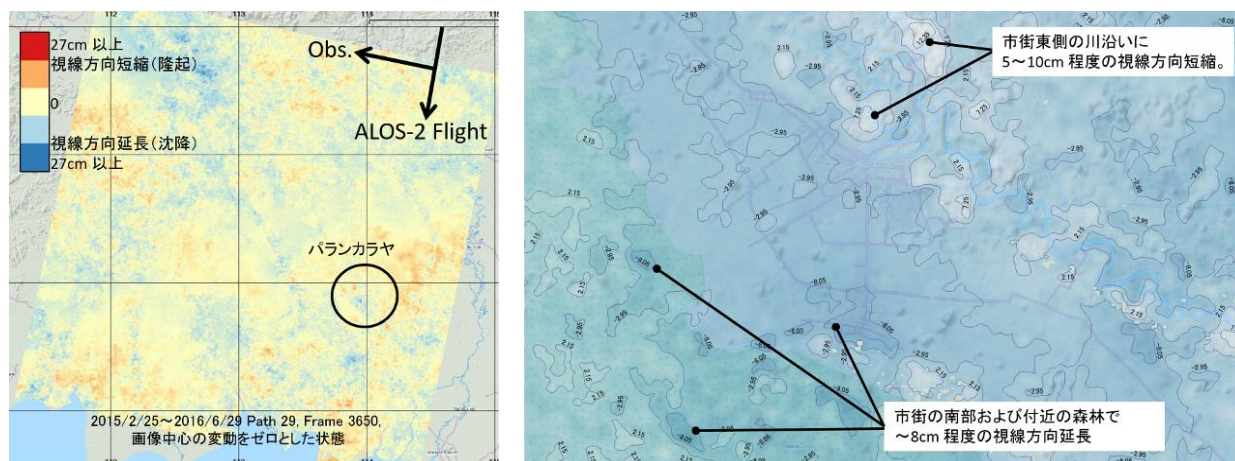
図(3)-11 GLASデータから推定された地上部バイオマスとPALSAR-2画像から推定された値の比較。



図(3)-12 PALSAR-2画像から作成したボルネオ島の地上部バイオマス地図と中央カリマンタン州付近の拡大図。(a) 2016年、(b) 2017年。

(4) 地盤沈降分布の評価

図(3)-13に、PALSAR-2広域観測モードの干渉SAR解析による地盤沈降の推定結果を示す。パランカラヤ市街南部およびその付近の森林において、市街中心部と比較して 8 cm程度のPALSAR-2観測視線方向での延長（水平西側あるいは沈降する方向）の傾向が示された。ただし、シーン内の他の領域では、大きく沈降したり隆起したりするなど、現実的でない結果となる箇所も一部見られた。これらは主に、電離層や水蒸気によるノイズの残留成分によると考えられる。今回、時系列に多数の干渉ペアを解析したが、ほぼすべての干渉画像に電離層によるものと思われる長周期ノイズが重畳していることがわかった。実用的な精度を得るには、この長周期ノイズの除去を精度高く行う必要がある。例えば、地盤変動が既知であるコントロールポイントをシーン内に複数点用意する、あるいはより高度なノイズ除去手法を開発する、等が必要である。また、これまでのALOS-2の運用経験によると、広域観測モードは観測幅が広いためにこのような長周期ノイズを除去しにくく、一方で高分解能モードでは長周期ノイズを除去しやすい傾向にある。今回は時系列のデータ蓄積数が少なかったために高分解能モードの解析を実施できなかったが、今後データが蓄積することで、実用的な精度が得られる可能性がある。



図(3)-13 (左) 広域観測モードの時系列画像による地盤沈降傾向の推定結果（2015年2月25日～2016年6月29日の約17か月の変位傾向）、(右) パランカラヤ市街地周辺の拡大図。

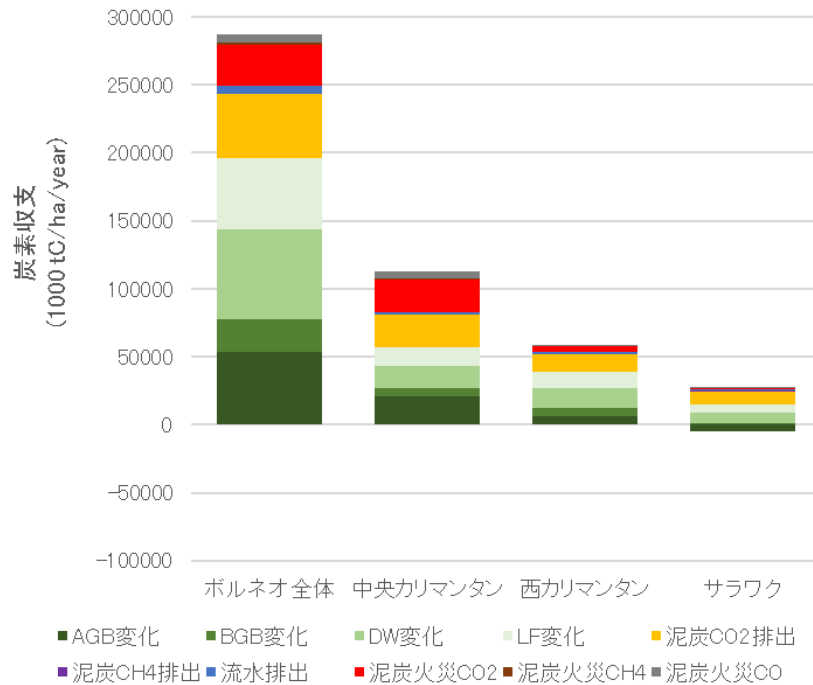
(5) 炭素動態の広域評価

図(3)-14に、PALSAR-2土地被覆をベースとして算出したボルネオ島の炭素動態評価結果を示す。泥炭地と非泥炭地を含めた結果である。ボルネオ全体としては約290 MtC/年の放出となり、そのうち約7割が土地被覆の変化に伴うバイオマス変化による炭素排出、約2割が泥炭土壌の分解、約1割が泥炭火災による排出となった。なお、火災による植生バイオマスの燃焼による炭素排出は、土地被覆の変化に含まれる。ボルネオ全体に対し、中央カリマンタンは約39%、西カリマンタンは約20%、サラワクは約8%の寄与率となった。一方、ボルネオ全体に対する各州の面積割合は、中央カリマンタンが約21%、西カリマンタンが約20%、サラワクが約17%である。またボルネオ全体（泥炭地＋非泥炭地）に対する泥炭地の面積割合は、中央カリマンタンが約3.9%、西カリマンタンが約2.3%、サラワクが約2.1%である。上記3州の間で面積割合が大きく変わらないのにも関わらず、中央カリマンタン州の炭素排出量は他の州に比べて多いことがわかる。これは、泥炭地の面積が他の州よりも大きいこと、泥炭火災の発生数が他の州に比べて多いことが原因である。中央カリマンタン州の泥炭火災による炭素放出量は、ボルネオ全体の泥炭火災による放出量に対して約78%を占めている。一方、サラワク州で炭素放出量が他の州よりも小さいのは、火災が少なかったこと、非泥炭地の土地被覆の変化が他の州よりも少なかったことが要因である。

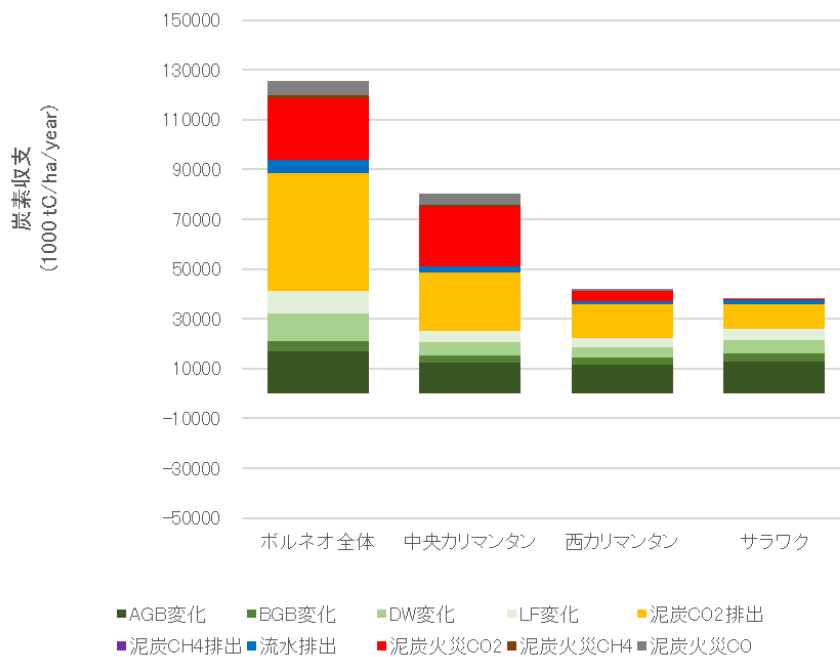
図(3)-15は、泥炭地のみについて同様の集計を行った結果である。3州の結果を比べると、土地被覆変化に伴うバイオマス変化による放出量は大きな違いが無いが、泥炭の分解、泥炭火災に大きな違いが

ある。

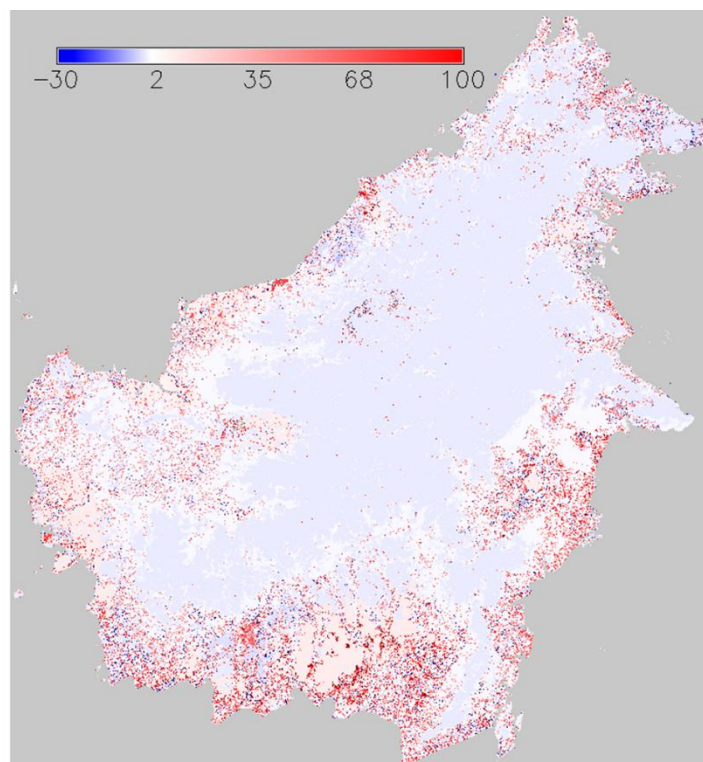
図(3)-16は、PALSAR-2土地被覆に基づくボルネオ島全体の炭素収支マップである。ボルネオ島の周辺部で土地被覆変化が多く、炭素の放出が多く見られる。特に南側の中央カリマンタン州では火災による影響で大きな放出が発生していることがわかる。



図(3)-14 PALSAR-2土地被覆をベースとしたボルネオ島の炭素動態評価結果（全域）。
2015年から2016年の変化。



図(3)-15 PALSAR-2土地被覆をベースとしたボルネオ島の炭素動態評価結果（泥炭地のみ）。
2015年から2016年の変化。



図(3)-16 PALSAR-2土地被覆をベースとしたボルネオ島の炭素動態マップ。
2015年から2016年の変化。赤が放出、青が吸収であり、単位はtC/ha/year。

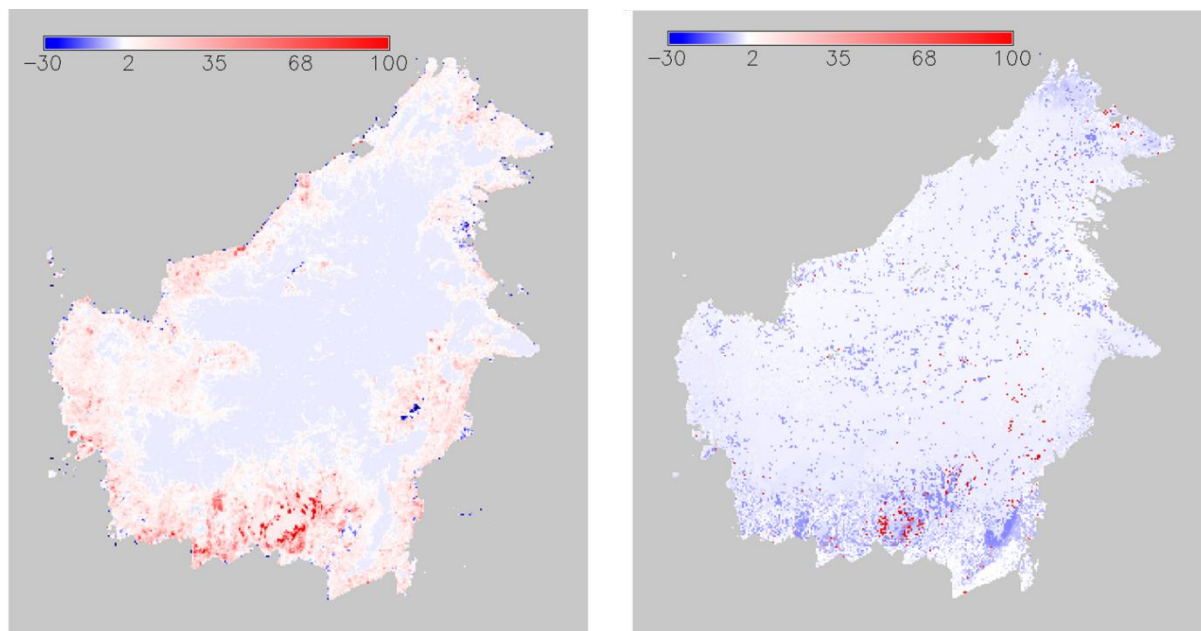
INCASによる炭素収支の評価結果^{3),4)}では、2000-2011年の中央カリマンタン州において、収支は約20～53 MtC/年の放出であり、特に火災のあった年は大きな値となる傾向にある。インドネシア全体としては約220～380 MtC/年の放出と計算されている。本研究の結果は、中央カリマンタン州において2倍程度過大であり、ボルネオ島全域の値は直接比較できないものの、同様に過大傾向にあると推察される。

泥炭土壌の分解による放出量(CO₂)については、INCASの中央カリマンタンに対する評価では、約16 MtC/年の放出である。また、Miettinen et al. (2017)⁶⁾では、2015年の評価を行っており、中央カリマンタンで約18.5 MtC/年、西カリマンタンで約12.9 MtC/年、サラワクで約15 MtC/年の放出と算出している。中央カリマンタンは、本研究が他の事例に比べて多少過大であり、西カリマンタンはほぼ同規模、サラワクは過少となっている。

本研究と既往研究で結果に違いが生じた理由としては、主に土地被覆分類や排出係数の違いが影響していると考えられる。INCASの計算結果と詳細を比較したところ、バイオマス変化や泥炭火災による放出について本研究のほうが大きく、土地被覆変化がINCASよりも大きく見積もられていると思われる。土地被覆はINCASと比較ができないため精度検証が難しいが、土地被覆の精度が最終的な炭素動態評価の精度に大きく寄与していることを示している。一方、泥炭分布図については、本研究によって新たな泥炭地が発見されており、本研究の泥炭面積は他の研究よりも大きくなっている。また、森林域の泥炭分解に対する排出係数についても、INCASでは5.3 tC/ha/yrとしているのに対して、本研究の現地調査によって明らかにした排出係数は8.00～8.24 tC/ha/yrと大きな値となっている。そのため、既往研究よりも炭素放出量が大きく評価されているのは、本研究で反映した新たな知見による影響も含まれている。

図(3)-17は、サブテーマ2による生態系モデルによる炭素収支の計算結果と本研究のPALSAR-2土地被覆をベースとした炭素収支の計算結果の比較である。PALSAR-2の結果でボルネオ島周辺部が放出傾向となっているが、生態系モデルでは火災域以外はほぼ吸収の傾向となっている。この違いの要因として考えられるのは、バイオマス成長量の計算方法の違いや、入力として与える土地被覆変化の違いなどが考えられる。特に、生態系モデルの計算結果では南側で吸収が多く発生しているが、これは攪乱の生じた

箇所で成長する過程を表現したものである。一方、PALSAR-2の結果ではその効果を考慮できておらず、生態系モデルの結果と異なる傾向となっている。PALSAR-2などの衛星観測から直接バイオマスの年々変動を計測することができればより正確な炭素収支の推定が可能になるが、本研究では十分な精度が得られておらず、今後の研究開発が必要である。



図(3)-17 (左) PALSAR-2土地被覆をベースとした炭素収支の計算結果(2015-2016年)。生態系モデルの計算条件と合わせて土地被覆分類カテゴリを5クラスに統合し、4 kmメッシュに平均化した。

(右) 生態系モデルによる炭素収支の計算結果(2015-2016年)。NBPに-1をかけた値であり、放出が正の値を示す。いずれも単位はtC/ha/yrである。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- 熱帯泥炭林におけるLバンドマイクロ波の後方散乱強度の時系列特性を詳細に明らかにし、特に森林火災によって従来は知られていなかった変化が生じることを明らかにした。また、この特性を利用することで、森林火災域を高分解能かつタイムリーに把握可能なことを実証した。
- 熱帯泥炭林における土地被覆変化の解析および森林地上部バイオマス推定について、PALSAR-2の時系列観測を活かした新たな手法を開発した。バイオマス推定について、従来は一定の大きさまでしか推定ができなかったが、開発した手法によりその上限を大きく超えることが可能となった。
- IPCCのガイダンスをベースに、PALSAR-2のデータを炭素動態評価に活用するシステムを実証した。PALSAR-2による高分解能土地被覆の導入、新たな泥炭地の発見、排出係数の精緻化により、従来よりも炭素放出量が大きく見積もられる可能性を示した。一方、バイオマス成長量など、GISベースの手法では現状では十分に考慮されていないプロセスを課題として明らかにした。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発した手法は、今後のREDD+等に必要となる熱帯泥炭林の炭素動態の評価において、インドネシア政府や、GFOI (Global Forest Observation Initiative) やIPCCなどの国際的な枠組みを通じて世界各国に展開することが可能である。日本独自の技術として国際協力を行うこともでき、熱帯泥炭林の適切な管理を推進することができる。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 本岡毅、林真智：生物の科学 遺伝、71、1、70-76 (2017) 「人工衛星だいち2号による宇宙からの森林観測」

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) Thapa, R. B., Watanabe, M., Motohka, T., and Shimada, M.: IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), pp. 672-675, Singapore. (2015)
“Texture analysis of PALSAR mosaics for forests carbon stock estimation in central Sumatra”
- 2) Thapa, R. B., Watanabe, M., Motohka, T., Shimada, M., Suzuki, S. and Itoh, T.: ACRS Conference, Manila (2015)
“Examining texture parameters of ALOS PALSAR-2 data for estimating tropical forest carbon stocks: a preliminary result.”
- 3) 本岡毅：日本学術会議公開シンポジウム「生態系計測・モニタリングの最前線」(2015)
「ALOS-2 PALSAR-2による森林分類・変化・バイオマスの観測」
- 4) Masanobu Shimada, Takuya Itoh, Takeshi Motohka, Manabu Watanabe, Rajesh Thapa: AGU Fall Meeting (2015)
“Global Forest/Non-Forest coverage and the change between 2007 and 2015 using the PALSAR and PALSAR-2”
- 5) 林真智、本岡毅、段理沙子、伊藤拓弥、島田政信：日本生態学会第64回全国大会(2017年3月、東京)「PALSAR-2を用いた熱帯泥炭林における土地被覆変化域および森林火災域の検出」
- 6) 林真智、本岡毅、澤田義人、第63回日本リモートセンシング学会学術講演会(2017) ALOS-2/PALSAR-2時系列データを利用した森林バイオマス地図の作成
- 7) Shimada, M., Itoh, T., Motohka, T., IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (2017) REGENERATED ALOS-2/PALSAR-2 GLOBAL MOSAICS 2016 AND 2014/2015 FOR FOREST OBSERVATIONS

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 北海道大学サステナビリティ・ウィーク 公開セミナー 「脆弱な巨大炭素貯蔵庫ー熱帯泥炭林ー

を監視する：温暖化緩和のために」（2015年）にて講演。

「宇宙から熱帯泥炭林を精密検査する～人工衛星だいち2号による観測～」

2) 日本学術会議公開シンポジウム「生態系計測・モニタリングの最前線」（2015年）にて講演。

「ALOS-2 PALSAR-2による森林分類・変化・バイオマスの観測」

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) IPCC (2003), Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry (GPG-LULUCF). IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme
- 2) IPCC (2014), 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands,
- 3) Krisnawati, H., Imanuddin, R., Adinugroho, W.C. and Hutabarat, S: (2015), Standard Methods for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Forests and Peatlands in Indonesia.
- 4) Krisnawati, H., Adinugroho, W.C., Imanuddin, R., and Hutabarat, S: (2015), Estimation of Annual Greenhouse Gas Emissions from Forest and Peat Lands in Central Kalimantan.
- 5) 本岡毅、林真智：生物の科学 遺伝、71、1、70-76 (2017) 「人工衛星だいち2号による宇宙からの森林観測」
- 6) J. MIETTINEN, A. HOOIJER, R. VERNIMMEN, S. C. LIEW, and S. E. PAGE: Environment Research Letters, 12 (2017), From carbon sink to carbon source: extensive peat oxidation in insular Southeast Asia since 1990
- 7) M. HAYASHI, N. SAIGUSA, Y. YAMAGATA and T. HIRANO: Carbon Management, 6, 1-2, 19-33 (2015), Regional forest biomass estimation using ICESat/GLAS spaceborne LiDAR over Borneo

Ⅱ-4 熱帯泥炭地の空間分布データの構築

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

宇宙産業本部国際部 広瀬 和世

研究開発本部利用研究部 武田 知己

平成27～29年度累計予算額：12,793千円（うち平成29年度：4,550千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】

本研究は、精度の高い熱帯泥炭分布図の作成を目的とし、1) 既存の泥炭分布データの収集と整備、2) 泥炭分布データの精緻化と高精度化、3) 高精度データの構築に分かれる。1) では、既存の文献、報告書、web等から泥炭分布データを収集しGIS上で統合した。2) ではGIS上に統合した泥炭分布データ及び関連情報を精査し、泥炭分布の可能性が高い地点でボーリング調査を実施した。さらに、ボーリング調査の結果をもとに、既存の泥炭分布データの検証および修正による泥炭分布データの精緻化を図った。3) では、さらに高精度な泥炭分布データを構築するためのボーリング調査を実施し、高精度泥炭分布図を構築した。その結果、本研究により修正したサラワク州の泥炭分布図の面積は、既存土壤図と比較すると0.3%の減少となった。西カリマンタン州では、Ritung et al. (2011)と比較すれば1.3%が減少した。一方、中部カリマンタン州では、WI (2004)と比較すると5.7%の増加、Ritung et al. (2011)と比較すると13.4%増加した。サラワク州の減少率が小さいのは、サラワク州における既存土壤図の精度は高く、詳細な調査が実施されていたと考えられる。いずれの州も泥炭分布図が作成されてから現在までに、開発による泥炭の面積が大きく変化していることを考えると、今後も泥炭分布データの整備を継続することが重要である。

【キーワード】

GIS, リモートセンシング

1. はじめに

泥炭とは、有機物が腐敗せずに堆積した状態の土壌であり、地球上では寒帯から熱帯まで広く分布している。本研究で対象とする熱帯の泥炭地は、全世界で約44百万ヘクタールとされ (Page et al., 2011), そのうち約52% (23百万ヘクタール) がインドネシアとマレーシアに分布する。ボルネオ島には約7百万ヘクタール (約15%) の泥炭地が分布するが (Ritung et al., 2011, Melling, 2016), 近年の森林伐採や農地転換、商業植林 (オイルパーム、アカシア等) によって急速に泥炭が消失している。泥炭は大量の炭素を蓄積していることから、泥炭地の消失は、気候や生態系に深刻な影響を及ぼすことが懸念されている。

泥炭の消失による気候への影響を評価し保全に役立てるためには、泥炭の現状を正しく把握することが重要であり、そのためには正確な泥炭分布図の作成が必要不可欠である。正確な泥炭分布図が手に入れば、泥炭の炭素蓄積量の推定や単位面積当たりの炭素排出量の推定、将来予測のための陸域生態系モデルへの入力パラメータとしても利用できる。

インドネシアでは、2004年にWetlands International (以下、WI2004) が作成した泥炭分布図や2011年に農業省が作成した泥炭分布図等が存在する。現在、この2つの泥炭分布図が広く利用されているが、Ritung et al. (2011)で報告されたインドネシア全土の泥炭面積は、WI (2004) と比較すると約70%も減少している。これは、2000 年後半に農業省がボーリング調査を実施したことによって、これまで泥炭が存在すると思われていた場所に、泥炭が存在しないことが確認されたためである。このように、泥炭分布図は、既存情報の整備状況に大きく依存するため、比較的アクセスが容易な場所ではボー

リングデータも多く、泥炭分布図の精度は高い。一方、アクセスが困難な場所ほどボーリングデータが不足するため不確実性が高く、泥炭分布図の精度は低くなる。

アクセスが困難な場所での土地利用変化の解析には衛星画像が有効である。例えば、インドネシアの泥炭湿地林は1980年代から急速な開発が行われたが、開発前の泥炭湿地林の分布状況は1970～1980年代の衛星画像に特徴が見られる場合が多い。また、全球のデジタル標高モデル（DEM）を利用することで泥炭湿地林の特徴を捉えることが可能である。このように、泥炭分布図の高精度化を図るためには、ボーリングデータ等の情報とともに、衛星画像やDEMを活用した空間分布データの活用が重要となる。

2. 研究開発目的

本サブテーマでは、ボルネオ島の炭素蓄積量と炭素排出量の推定を行うため、既存の泥炭分布図を修正して高精度化を行った。また、陸域生態系モデルの入力パラメータとして利用できるようにするため、泥炭分布図をGISデータとして整備し、サブテーマ間で容易にデータを共有できるようにした。

本研究で対象としたのは、ボルネオ島でも泥炭面積が大きく気候変動に対して影響が大きいと考えられるマレーシアのサラワク州とインドネシアの中部カリマンタン州及び西カリマンタン州の3つの州とした。

3. 研究開発方法

(1) 情報収集

(1)-1 概要

ボルネオ島の泥炭に関する最新情報を収集するため、泥炭だけでなく気候変動に関連するワークショップや学会、会議等にも参加した。また、インドネシアとマレーシア国内で泥炭に関係のある機関を訪問し、泥炭関連の専門家にヒアリングを行った。さらに、泥炭分布図の高精度化を行うために参考となる資料の収集を行った。

(1)-2 ワークショップや会議等への参加

以下は、情報収集のため、プロジェクト実施期間中に参加したシンポジウム等の概要である。

泥炭ワークショップ 2016年5月30日にインドネシアのジャカルタで開催されたワークショップ。インドネシアの泥炭に関連した研究発表が行われた。

第15回国際泥炭学会 2016年8月16日～19日の4日間、マレーシアのクチンで開催された国際会議。低緯度の熱帯泥炭だけでなく高緯度に分布する泥炭も含めた最新の研究成果が発表された。

気候変動枠組条約締約国会議（COP） 2015年にフランスのパリ（COP21）、2016年にモロッコのマラケシュ（COP22）、2017年にドイツのボン（COP23）で開催された温室効果ガス排出削減策等を協議する会議。泥炭も重要なCO2排出源としてテーマに取り上げられている。

(1)-3 ヒアリング調査

ヒアリング調査の訪問先は、過去にインドネシアやマレーシアで行った調査等で築いたネットワークを利用し、泥炭の調査や保護活動の実績を持つ機関や知見を持つ機関の中から選定した。訪問先は表(4)-1の通りである。

ヒアリング調査では、最初に当機構から調査の目的やボーリングによる現地調査の概要等を説明し、その後、先方機関の専門家から最新の泥炭分布の状況や泥炭の開発と保全に関連した情報を収集した。

表(4)-1 泥炭に関するヒアリング調査の訪問先

年度	訪問先	所在都市名
2015年度	Global Environmental Centre	クアラルンプール
	天然資源環境省測量地図局	クアラルンプール
	熱帯泥炭調査研究所	クチン
	サラワク州土壌局	クチン
	農業省土壌研究所	ボゴール
	Wetlands International	ボゴール
	鉱物資源エネルギー省鉱山局	バンドン
	西カリマンタン州農業局	ポンティアナック
	西カリマンタン州開発計画局	ポンティアナック
	タンジュンプラ大学	ポンティアナック
	JICAオフィス	ジャカルタ
2016年度	鉱物資源エネルギー省鉱山局	ボゴール
	農業省土壌研究所	ボゴール
	パランカラヤ大学	パランカラヤ
	タンジュンプラ大学	ポンティアナック
2017年度	農業省土壌研究所	ボゴール
	鉱物資源エネルギー省鉱山局	バンドン
	応用技術評価庁 (BPPT)	ジャカルタ
	パランカラヤ大学	パランカラヤ
	西カリマンタン州林業局	ポンティアナック

(1)-4 関連資料収集

はじめに述べたように、インドネシアではWetlands Internationalが泥炭分布図をデジタルで一般公開しており、これを修正することで高精度化を実現した。一方、マレーシアではデジタルで一般公開された泥炭分布図が存在しなかったため、泥炭の情報を含んだ地図を現地で入手し、新規に作成することにした。地図の入手先として、マレーシアのSurvey and Mapping Departmentを訪問し、サラワク州とサバ州の地質図と水文地質図のソフトコピーを購入した。また、サラワク州のSoil Departmentを訪問し、同州の土壌図の紙地図を入手した。

泥炭分布図の高精度化に必要な衛星データには、観測幅が185kmと広く、空間分解能が30mと比較的高いLandsat 8を使用した。また、対象地は被雲率が高く、平坦地であるため、DEMにはSRTMを使用した。いずれのデータも、アメリカ地質調査所のWebサイトであるEarthExplorerからダウンロードした。

(2) ボーリング調査

(2)-1 調査概要

既存の泥炭分布図の高精度化を実現するため、泥炭分布図で不確実性が高いと思われる場所でボーリング調査を行い、泥炭の有無を確認した。ボーリング調査は、これまでに泥炭調査の実績がある現地の研究機関に作業を依頼した。2016年度のボーリング調査は、サラワク州と中部カリマンタン州で行い、それぞれ熱帯泥炭研究所 (TPRI: Tropical Peat Research Institute) とパランカラヤ大学の熱帯泥炭持続的管理国際協力センター (CIMTROP: Center for International Cooperation in Sustainable Management of Tropical Peatland) に作業を依頼した。2017年度のボーリング調査は、中部カリマンタン州でのみ行い、2016年度と同じCIMTROPに作業を依頼した。

(2)-2 ボーリング調査手順

ボーリングの調査地点は、事前に泥炭分布図と最新の衛星画像およびDEMとを比較し、泥炭分布図で泥炭が存在する可能性が低い場所を候補地として抽出した。具体的には、衛星画像上で土地利用が農地

や市街地などに变化した場所、新規に直線的な排水路が作られた場所、河川の流路が变化した場所、標高の高い場所など、泥炭が存在するには不自然な場所を抽出した。

候補地の決定後、泥炭分布図と他の土地被覆・土地利用との境界付近にボーリング調査地点を定め、座標をTPRIとCIMTROPに送付した。なお、調査社が現地にはアクセスできない場合に備えて、調査地点の数を多めに用意した。

ボーリング調査では、GPSをもとに調査地点に移動し、各地点において泥炭の深さを測定するとともに、土壌サンプラーを使って土壌を採取し、採取した土壌を実験室に持ち帰ってバルク密度を測定したのち、炭素および窒素の含有量と灰分の測定を行った。灰分は、土壌サンプルを550度で6時間燃焼して有機物を完全に燃焼させた残りの重量として求めた。なお、すべての調査地点において、GPSを用いて緯度経度を測定するとともに、土壌採取地点周辺の様子を写真で記録した。採取した土壌が泥炭かどうかの判定基準として、インドネシア政府が定めた土壌中の炭素含有量12%以上かつ厚さ50cm以上の基準を用いた。

(3) 現地調査

前述の通り、ボーリング調査地点は、衛星データやDEMを参考にして決定するが、画像上での見え方と現地の状況の対応関係を事前に把握しておくことは、効率的かつ確実なボーリング調査計画の立案において重要である。そこで、ボーリング調査を行う前に、画像上で選んだ候補地の中からアクセスが容易な場所を選んで周辺を調査した。

現地調査は道路沿いの水路の水の色が薄茶から黒の場合や植生の状態から泥炭の有無を判断した。また、判断に迷うような場所では、深さ1m程度まで検土杖により簡易的に泥炭の有無を確認した。

(4) 泥炭分布図の高精度化

(4)-1 概要

高精度化に使用するベースとなる泥炭分布図として、インドネシアではWetlands Internationalと農業省が作成した既存の泥炭分布図を使用した。一方、マレーシアでは、一般に利用できる泥炭分布図が入手できなかったため、泥炭の情報を含んだ地図を元に新規作成した泥炭分布図を使用した。泥炭分布図の新規作成と高精度化の作業には、オープンソースのGISソフトウェアであるQuantum GIS (QGIS)を使用した。

(4)-2 泥炭分布図の新規作成方法

Soil Departmentで入手した土壌図の分類カテゴリに泥炭が含まれていたため、本土壌図を元にしてサラワク州の泥炭分布図を作成することにした。本土壌図は、1968年に作成されたものであり、50万分の1のスケールで作成されている。なお、本土壌図では、泥炭のカテゴリが「深い泥炭」と「浅い泥炭」の2つに分かれており、それぞれ深さが1m以上の泥炭（多くは3m以上）と、深さが1m未満の泥炭を表している。新規の泥炭分布図作成においても、泥炭を「深い泥炭」と「浅い泥炭」に分けて作成することにした。本土壌図は紙地図だったため、デジタルスキャナで画像ファイルに変換して使用した。変換した時点で、画像ファイルは地図情報（緯度経度等の地球上での座標情報）を持っていないため、GISデータとして他の衛星データやDEMと重ねて使用することはできない。画像ファイルに地図情報を付与するため、QGISのGeo-reference機能を使用して幾何補正を行った。

幾何補正した泥炭分布図はラスターデータであり、そのままでは修正が困難なため、QGISのDigitizing機能を使用し、「深い泥炭」と「浅い泥炭」の2つのカテゴリのベクタデータを作成し、その後の解析に使用した。

(4)-3 泥炭分布図の修正手順

泥炭分布図の高精度化は、QGISに泥炭分布図とボーリング調査地点を重ねて表示させ、ボーリング調査の結果に応じてベクタデータを修正するという手順で行った。具体的には、泥炭が存在しなかった調査地点が泥炭ポリゴンの中に含まれていた場合は、該当する泥炭ポリゴンを縮小するか削除し、逆に泥炭が存在していた調査地点が泥炭分布図に含まれていなかった場合は、近接する泥炭ポリゴンを拡大

するか新規に作成した。

(5) 泥炭面積の変化

泥炭分布図の高精度化の効果を確認するため、修正前後の泥炭分布図の面積の違いを州ごとに計算した。また、修正した泥炭分布図を他のサブテーマと共有した。

4. 結果及び考察

(1) 情報収集の結果

(1)-1 ワークショップや会議等

泥炭ワークショップ

5月30日に、インドネシア泥炭復興庁、インドネシア森林環境省、JICA、北海道大学、京都大学、Riau大学、総合地球環境研究所（RIHN）、人間文化研究機構（NIHU）が共同で開催したシンポジウムに出席し、インドネシアの泥炭復元や泥炭火災に関する活動や研究成果について情報収集を行った。シンポジウムには、北海道大学の太崎満先生等、多数の日本の研究者が発表していた。また、過去に西カリマンタン州でボーリング調査を行った経験のあるタンジュンプラ大学グスティ氏も発表者に名を連ねていた。

発表内容は、泥炭からのCO2排出と地下水位の関係、衛星を使った水位モニタリング、エル・ニーニョと泥炭火災の因果関係、火災発生危険度マップの作成、UAV等を使った火災の早期発見や消火技術の開発、PM2.5による健康被害、等々、非常に多岐にわたるものであった。

第15回国際泥炭学会

マレーシアで開催された15th International PEAT Congress 2016に参加し、ポスター発表を行った。ポスター発表では、参加者から泥炭分布の具体的な調査方法やWetlands Internationalとインドネシア農業省が作成した泥炭分布図の違いに関する質問を受けた。また、マレーシアの熱帯泥炭研究所の職員と現地調査の打ち合わせを行った。

COP21

2015年11月にパリで開催されたCOP21に参加し、インドネシア・マレーシア・ブルネイ3国により実施されている「ハート・オブ・ボルネオイニシアティブ」プロジェクトのインドネシア代表、Mr. Wibobo経済担当調整省副大臣補佐と意見交換を行った。また、HE. Flaviaウガンダ環境大臣と情報交換を行い、同国の泥炭湿地の分布及び炭素動態の把握などに関して相談を受け、本研究で開発される技術への期待が示された。

COP22

2016年11月にモロッコで開催されたCOP22に参加し、Mr. Sofyan A. Djalil氏（インドネシア国家土地庁長官）と本研究に関する意見交換を行った。また、Dr. Nur（インドネシア国内の地理空間情報を統括する“One Map Initiative”のBIG担当者）と、次回インドネシア訪問時に最新の泥炭分布に関するデータについて情報交換することを約束した。さらに、Mr. Paul Mafabi氏（ウガンダ環境省環境局長）と同国泥炭湿地管理について本研究の成果を適用できないか相談を受けた。

COP23

2017年11月にドイツで開催されたCOP23に参加し、One Map Policyの責任者Dr. Nurwadjedi（BIG）、及びIndonesia Second National CommunicationのリードオースーRizaldi Boer（IPB）と、泥炭マッピングのアップデートについて意見交換を行った。また、GCFで初めて認証されたPROFONANPEプロジェクトのAlberto氏（Executive Director）と泥炭マッピングについて意見交換を行った。さらに、Ministry of Environment and Sustainable Development / コンゴ民のEkumbaki氏（Secretary General）と日本の技術について意見交換を行った

(1)-2 ヒアリング調査結果

2015年度

- 鉱山局

- LANDSATから作成した泥炭分布図が存在することを確認。
- 次回必要な地質図を用意してもらうよう依頼。
- ポンティアナックの各機関
 - パームオイル林の拡大によって泥炭面積が縮小している現状を聞くことができた。
- タンジュンブラ大学
 - 次年度の現地調査（泥炭サンプリングと分析）で協力が得られるよう打ち合わせた。
- Global Environmental Center
 - 独自にサラワク州とサバ州の泥炭分布図を作成している。
- Survey and Mapping Department
 - マレーシア国内の様々な地図が入手可能で、地質図と水文地質図のデジタルデータを購入。
- Soil Department
 - 1968年に作成された土壌図を借用し、日本でスキャンすることができた。
- Tropical Peat Research Laboratory
 - 次年度以降の現地調査（土壌サンプリングと分析）で協力してもらえを確認。

2016年度

- 農業省（Kusumo氏、Sasa氏）
 - 泥炭地の劣化に関する定義づくり、および泥炭マッピングに関するリモートセンシング技術について、共同研究の申し出を受けた。
- パランカラヤ大学（Segah氏）
 - ボーリング調査の打ち合わせを行った。
 - 泥炭地マッピングに関するリモートセンシング、および泥炭地の各種スペクトルデータベースの構築に関する共同研究の申し出を受けた。
- タンジュンブラ大学（Gusti氏）
 - 泥炭調査の依頼を行い、調査の内容や分析項目等を打合せた。

2017年度

- 農業省（Kusumo氏、Sasa氏）
 - 現在も、泥炭分布図のアップデートを毎年継続している
 - 泥炭ドームを中心とした3点でドリリングを行い、ドームを決定している
 - 泥炭ドームの中心から少し離れた、泥炭の薄い場所をKHG（泥炭水利単位、泥炭地を取り囲む河川で囲まれた水系単位）と呼び、この範囲を保護しようとしている（KHG: kesatuan hidrologis gambut）
 - 泥炭の薄い場所は企業が侵入しようとしてくるため、そういう場所から（ドナー資金で）ドリリングを行っている
- 鉱山局（Asep氏、Dwi氏）
 - 現在もインドネシア各地でボーリング調査を行っており、2017年はスマトラ（リアウ、パララワン）とカリマンタンを対象に調査を行っている
 - 測定は10mの深さまで行っている
 - 2020年にはジャンビとパランカラヤの情報をオープンにする予定
 - 違法採掘に関する情報はDINASから入手できる
- BPPT（Agustan氏、Arief氏）
 - BPPTでは現在、内部プロジェクトとして泥炭分布図の作成を行っている
 - 技術開発要素が強く、リモセンと物理探査を組み合わせた測定を行い、土壌水分の水平分布を推定する方法を開発している
 - スマトラのRiau州で、Sentinel-1を使って泥炭を抽出しようとしている
 - 将来的には、電気探査とSARを組み合わせてモデルを作り、泥炭の厚さをSARのみで推定したい
- CIMTROP（Ici氏、Kitso氏、Tampang氏、Segah氏）

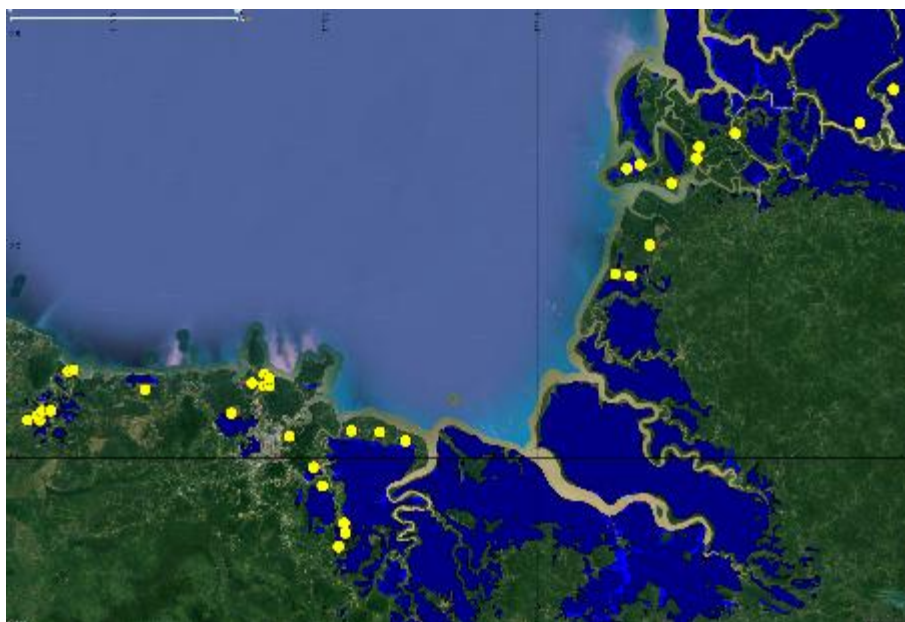
- 泥炭分布調査を依頼した
- CIMTROPでは現在、JICA/IJ-REDDの業務も行っている
- 現在も、市内に泥炭が存在すること、最近は毎年火事が起きていること、火事が理由で市民が南の方に居住地を拡大していること、中部カリマンタン州の泥炭はスマトラや東ジャワに比べて異なる特徴であること、今でも違法伐採で木材の売買をしている企業がある
- 市民は泥炭の価値を理解していないため、環境教育が必要である

(1)-3 関連資料の収集

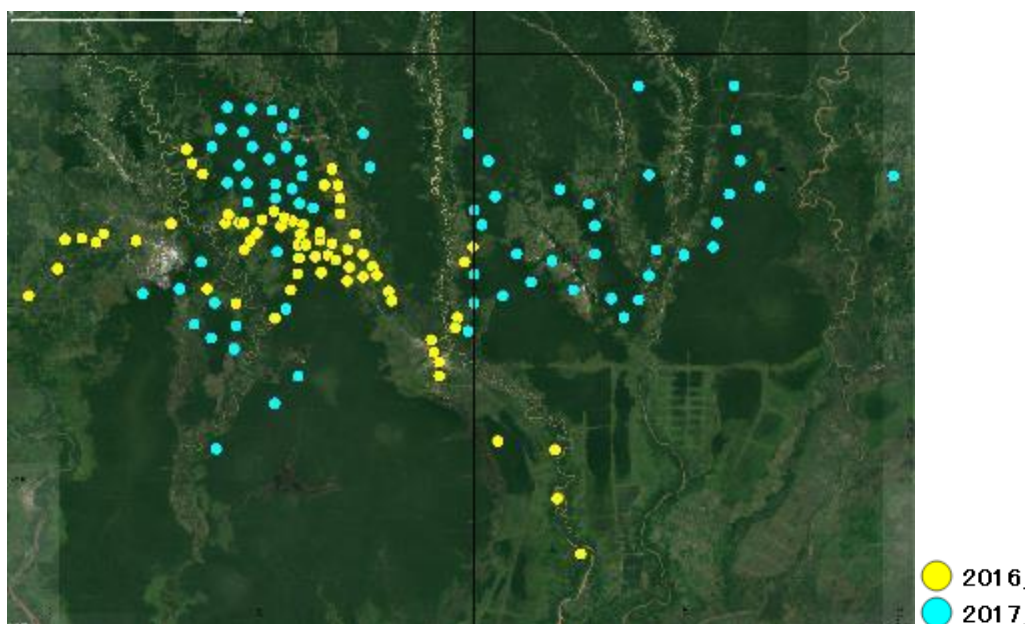
マレーシアのSurvey and Mapping Departmentから、サラワク州とサバ州の地質図と水文地質図のソフトコピーを購入した。また、サラワク州のSoil Departmentから、同州の土壌図の紙地図を借り受け、デジタルスキャンして後の解析作業に使用した。

(2) ボーリング調査の結果

図(4)-1と図(4)-2に、2016年度に実施したサラワク州、および2016年度と2017年度に実施した中部カリマンタン州のボーリング調査地点を示す。調査地点の数は、2016年度のサラワク州が34地点、2016年度と2017年度の中部カリマンタン州がそれぞれ66地点と70地点だった。

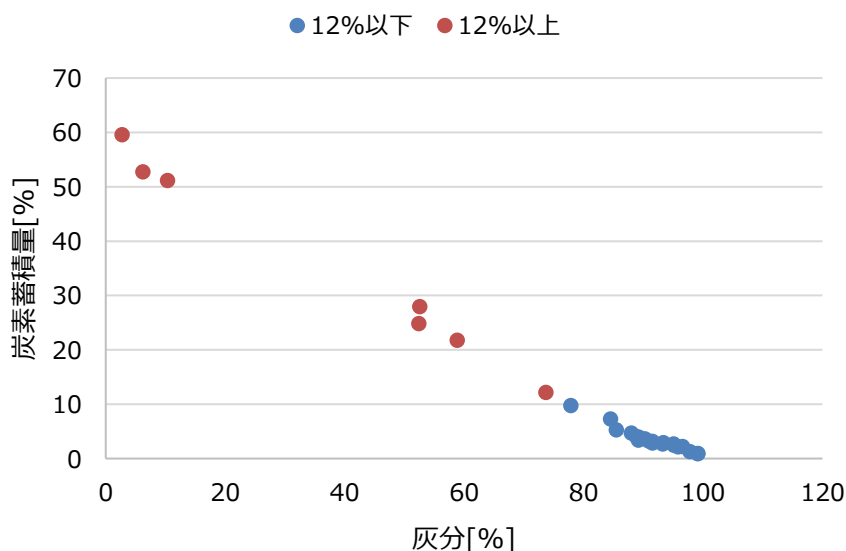


図(4)-1 サラワク州で実施したボーリングの調査地点。青色は深い泥炭、水色は浅い泥炭の範囲を表す。背景はGoogle Earthである。



図(4)-2 中部カリマンタン州で実施したボーリングの調査地点（黄色は2016年度，水色は2017年度の調査地点）。背景はGoogle Earthである。

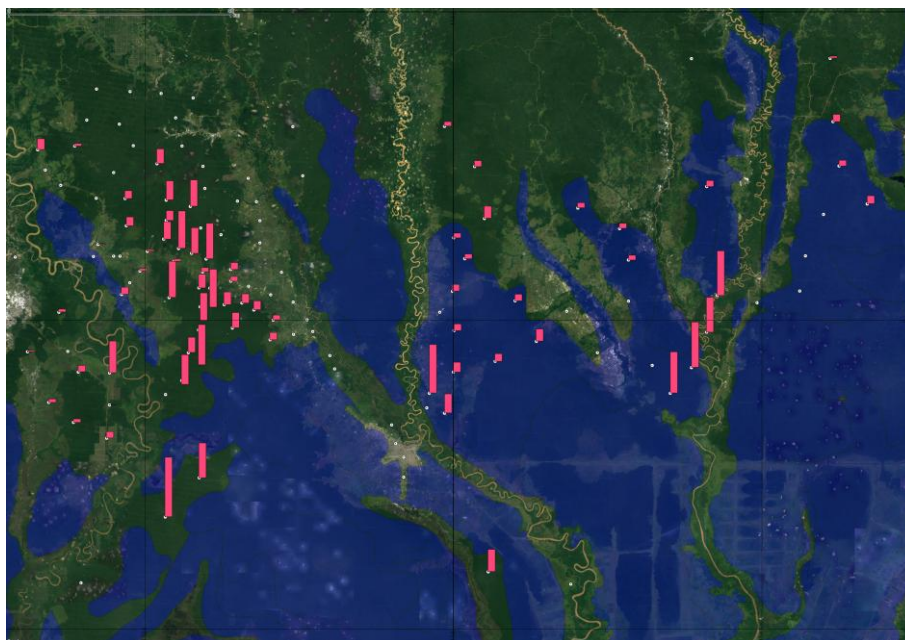
図(4)-3は，2016年度にサラワク州で実施したボーリングの調査結果から求めた，地表面50cm以内の土壌の灰分と炭素蓄積量の関係である。図(4)-3に示したように，炭素蓄積量と土壌を燃焼させた後に残った灰分との間には高い負の相関がみられる。一般に，炭素蓄積量を測定するためにはCN分析を行う必要があり，時間とコストが必要となる。一方，灰分は土壌サンプルを高温で燃焼させた残りの質量を測定するだけなので簡便な方法といえ，今後同様の測定を行う場合には有効な方法と考えられる。



図(4)-3 ボーリング調査で採取した土壌の灰分と炭素蓄積量の関係

図(4)-4は，2016年度と2017年度の中部カリマンタン州でのボーリング調査結果を統合し，泥炭の深さを可視化した結果である。図(4)-4の西側では，既存泥炭分布図では泥炭が存在しない場所に，今回のボーリング調査で数多くの泥炭を確認した。従って，これらの場所には膨大な量の炭素が蓄積されているもの考えられる。一方で，図(4)-4の中央付近では既存の泥炭分布範囲の周辺部を確認したため，泥炭層の厚さは比較的薄い結果となった。今回の調査では，泥炭が最も深い場所で12m以上あったが，

50cm以下の地点数が全体の60%以上で、何らかの保全を行わないと消失する危険度の高い場所が多いと考えられる。



図(4)-4 ボーリング調査による泥炭深さの空間分布

(3) 現地調査の結果

衛星画像と現地の状況を比較するため、現地調査を行った。図(4)-5は、既存泥炭分布図には泥炭が存在しないとされた場所の水と植生の写真である。薄茶～黒色の色調で特徴づけられる河川水は、泥炭から溶け出したタンニンの色と言われており、泥炭地を流れる河川に特有のものである。



図(4)-5 泥炭の存在を示唆する証拠。左：薄茶～黒色の水，右：泥炭地に特徴的な植生

泥炭の劣化と減少の要因の1つに挙げられる金の違法採掘が疑われる場所の現地調査を行った（図(4)-6）。左図は、元々森林だったと思われる場所の泥炭が取り除かれ、栄養分の乏しい下層のケランガスが露出している状況である。右図は、砂金を含むケランガスを手で流し、金を分離している現場である。こうした場所は、衛星画像上では、道路から少し森に入ったところで白いパッチ状に表現されており、現地調査を行うことでその状況を確認でき、泥炭分布図の高精度化に役立てることができる。

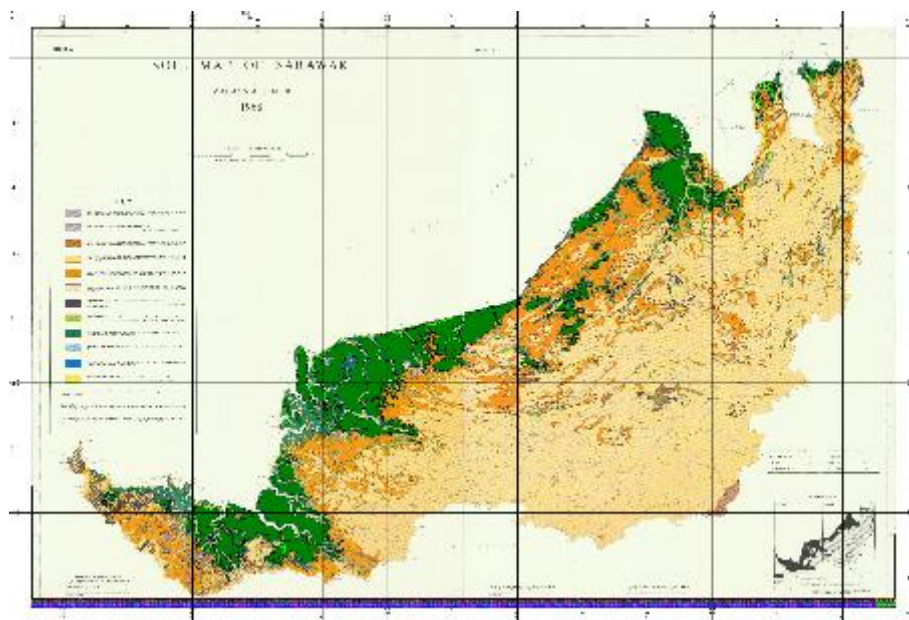


図(4)-6 金の違法採掘現場の様子。左：泥炭層が取り除かれ、砂金胚胎層（砂岩）が露出している場所、右：砂金胚胎層から金を分離している様子

(4) 泥炭分布図高精度化の結果

(4)-1 サラワク州における泥炭分布図の新規作成結果

図(4)-7は、サラワク州のSoil Departmentから入手した土壌図をデジタルスキャンして地図座標を付けたラスターデータと、土壌図をもとに泥炭部分のみを抽出したベクタデータを重ねた結果である。地図は左右2枚に分かれていたので、1枚に結合した後Geo-Referenceを行った。図の濃い緑色で示した場所は深い泥炭、明るい緑色で示した場所は浅い泥炭である。最終的に、深い泥炭は317ポリゴン、浅い泥炭は172ポリゴン、トータルで489ポリゴンを作成した。別途、Global Environmental Centerから入手した泥炭のベクタデータ（非公開）と比較しても遜色のない泥炭分布図が完成した。



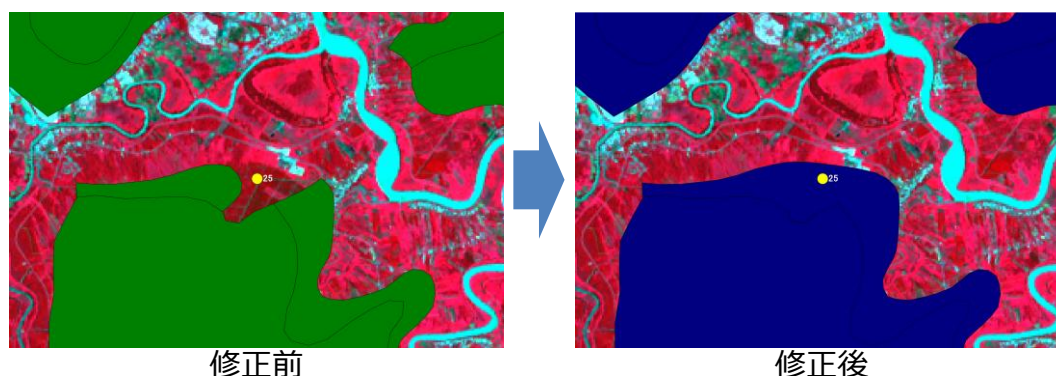
図(4)-7 地図座標を付与したサラワク州の土壌図と泥炭のベクタデータ

(4)-2 泥炭分布図の修正結果

サラワク州の泥炭分布図でボーリング調査結果をもとに泥炭分布図を修正した結果について以下に述べる。

図(4)-8は、元の泥炭分布図に泥炭が無い場所でボーリング調査を行った結果、泥炭の存在が確認された場合を示している。修正前は、地点25の周囲の泥炭だけ不自然に切り取られており、背景図の

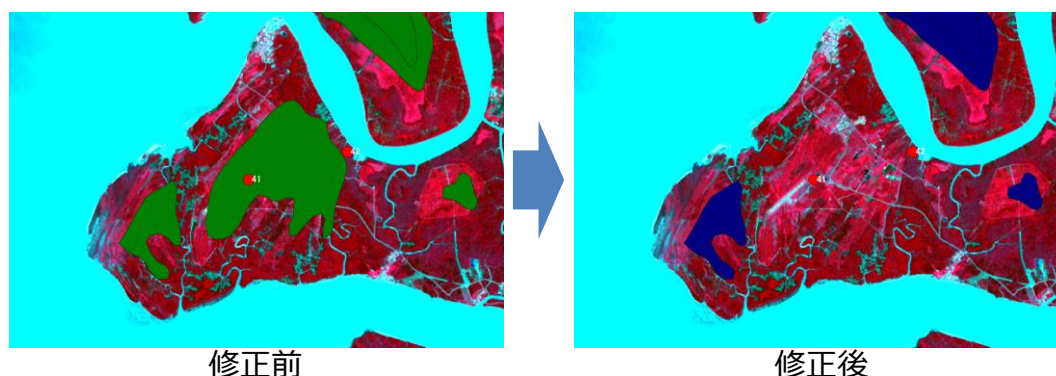
Landsat 8を見ても色の違いから植生タイプが異なることが推察された。そこで、植生の境界に合わせて泥炭部分を拡張するように泥炭分布図の修正を行った。



図(4)-8 泥炭分布図の修正結果。元の泥炭分布図において泥炭が無い場所に、ボーリング調査で泥炭の存在が確認された場合

図(4)-9は、元の泥炭分布図に泥炭が有る場所でボーリング調査を行った結果、泥炭の存在が確認されなかった場合を示している。修正前は、地点41の周囲に独立した泥炭のまとまりが存在しており、背景図のLandsat 8では、このまとまりと一致する植生の境界がみられた。そこで、この植生境界内部は地点41と同じように泥炭が消失した植生と考え、このまとまりを全て削除した。

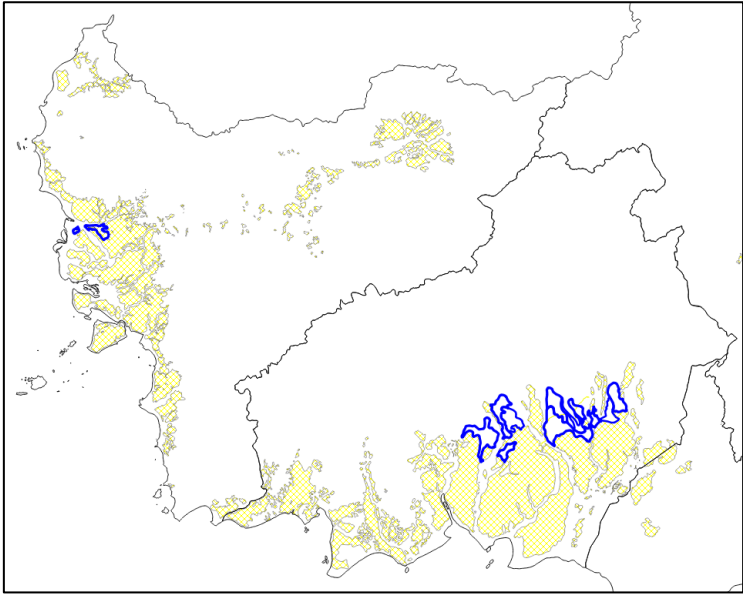
なお、周囲の泥炭のまとまりも、Landsat 8上では地点41を含む植生と良く似た傾向を示していたが、ボーリング調査によるデータが存在しないため、そのままにしてある。今後の調査によって、周囲の泥炭の有無を確認していく必要がある。



図(4)-9 泥炭分布図の修正結果。元の泥炭分布図において泥炭が有る場所に、ボーリング調査で泥炭の存在が確認されなかった場合

(4)-3 中部カリマンタン州及び西カリマンタン州における泥炭分布図の修正結果

図(4)-10には、ボーリング地点と泥炭の厚さ (cm) を示し、それらを元に泥炭の境界線を修正した。また、図(4)-11には、西カリマンタン州の修正箇所を示した。青色の範囲が今回修正した箇所ので、この場所はWI (2004) には含まれないため、修正前後の面積増減は無い。一方、Ritung et al. (2011) では21,668haの減少となった。



図(4)-12 中部カリマンタン州及び西カリマンタン州の泥炭分図の修正箇所（青線の範囲）

(5) 泥炭面積変化量の推定

(5)-1 サラワク州の泥炭面積の変化

修正前後の泥炭分布図を使い，サラワク州における深い泥炭と浅い泥炭の面積を計算した結果を表(4)-2に示す。深い泥炭の面積は，浅い泥炭の面積と比較して約15倍であり，1m以上の深さの泥炭が大部分を占めていることが分かった。泥炭の増減をみると，深い泥炭の方は1,528haの減少なのに対して，浅い泥炭の方は2,553haの減少となっており，浅い泥炭でより大きな泥炭面積の減少がみられた。さらに，減少した面積と修正前の総面積との比率として計算した増減率では，深い泥炭が-0.1%とわずかな減少だったのに対して，浅い泥炭では-2.7%と大きな減少を示しており，浅い泥炭の方が消失の危険度が高いこと示されている。泥炭の分布している場所をみると，浅い泥炭は低地や河川沿いに多く分布しており，深い泥炭に比べて開発圧が高いことが原因と考えられる。

表(4)-2 泥炭分布図の高精度化によるサラワク州の泥炭面積

	深い泥炭	浅い泥炭	合計
修正前	1,457,708 ha	95,458 ha	1,553,166 ha
修正後	1,456,180 ha	92,905 ha	1,549,085 ha
増減	-1,528 ha	-2,553 ha	-4,081 ha
増減率	-0.1 %	-2.7 %	-0.3 %

(5)-2 中部カリマンタン州及び西カリマンタン州の泥炭面積の変化

中部カリマンタン州と西カリマンタン州における本研究の修正前後の泥炭面積を表(4)-3，(4)-4に示す。いずれの州でも WI(2004)の泥炭面積の増減量が，最新の泥炭分布データとされるRitung et al. (2011)よりも小さい結果となった。中部カリマンタン州を詳しくみると，WI (2004) に比べてRitung et al. (2011)の泥炭面積がもともと小さいため，増減率は13.4%と大きく増加する結果となった。

西カリマンタン州では，検土杖による簡易的な調査のみにとどめたことから，泥炭面積の増減率は-1.3%と小さな減少となった。また，中部カリマンタン州と同様，WI(2004)では修正箇所が認められず，Ritung et al. (2011)に比較して精度が高いともいえる。

表(4)-3 泥炭分布図の高精度化による中部カリマンタン州の泥炭面積

	泥炭 (Wetlands International, 2004)	泥炭 (Ritung et al., 2011)
修正前	3,010,640 ha	2,659,234 ha
修正後	3,182,347 ha	3,015,809 ha
増減	171,707 ha	356,575 ha
増減率	5.7 %	13.4 %

表(4)-4 泥炭分布図の高精度化による西カリマンタン州の泥炭面積

	泥炭 (Wetlands International, 2004)	泥炭 (Ritung et al., 2011)
修正前	1,729,980 ha	1,680,135 ha
修正後	1,729,980 ha	1,658,467 ha
増減	0 ha	-21,668 ha
増減率	0.0 %	-1.3 %

(5)-3 対象地全体の泥炭面積の変化

本研究の対象地とした、サラワク州、中部カリマンタン州、西カリマンタン州の泥炭面積を合計した結果を表(4)-5に示す。サラワク州の土壌図とWI(2004)の合計面積では、2.7%の増加、サラワク州の土壌図とRitung et al. (2011)の合計面積では、5.6%の増加となった。-0.3%の減少しか見られないサラワク州の影響で、中部カリマンタン州の増加分が抑えられた結果である。

表(4)-5 泥炭分布図の高精度化によるボルネオ島全体の泥炭面積

	泥炭 (Wetlands International, 2004)	泥炭 (Ritung et al., 2011)
修正前	6,293,786 ha	5,892,535 ha
修正後	6,461,412 ha	6,223,361 ha
増減	167,626 ha	330,826 ha
増減率	2.7 %	5.6 %a

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

既存の泥炭分布図と、衛星画像やデジタル標高モデル、さらには地質図や土壌図とを比較することによって、泥炭分布が明らかに誤りである箇所を容易に抽出できるようになり、また、泥炭分布検証のための現地調査計画の立案等に有効な情報を提供することが可能となった。さらに、現地調査結果を行ったことで、より精度の高い泥炭分布図を作成することができ、熱帯泥炭地のCO2放出量推定の高度化に繋げることができた。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

泥炭分布を正確に把握することによって、REDD+などで必要とされる土地被覆別の炭素蓄積量は排出量を正確に推定できるようになる。

<行政が活用することが見込まれる成果>

特に記載すべき事項はない。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) Kazuyo Hirose, Tomomi Takeda, Ici Piter Kulu, Hendrik Segah, Kitso Kusin and Tampung Saman (2017): Satellite image utilization for tropical peatland's mapping in Central Kalimantan, Indonesia, The proceedings of the twenty-seventh symposium on geo-environments and geo-technics
- 2) Kazuyo Hirose, Tomomi Takeda, Gusti Anshari, Muhammad Nuriman, Tetsuo Tanimoto, Ronny Christianto, Shigeru Takahara, Hiroshi Kobayashi and Gun Gun Hidayat (2016): Assessment of Tropical Peatland Map in West Kalimantan, Indonesia, 15th International PEAT Congress 2016.

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) シンポジウム「巨大な炭素プールである熱帯泥炭林の現状と保全に向けた取り組み」（主催：日本生態学会，2017年3月15日，早稲田大学早稲田キャンパス，観客約100名）にて講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Wetlands International, 2004, Maps of peatland distribution and carbon content in Kalimantan, 2000-2002. 51.
- 2) Ritung et al., 2011, Peta Lahan Gambut Indonesia, Skala 1:250,000, Edisi 2011, 11.

III. 英文Abstract

Development of the Regional-scale Assessment System of Carbon Dynamics in Bornean Peat Ecosystems

Principal Investigator: Takashi HIRANO

Institution: Hokkaido University

N9, N9, Kita-ku, Sapporo-City, Hokkaido 060-8589, JAPAN

Tel: +81-11-706-3689 / Fax: +81-11-706-3689

E-mail: hirano@env.agr.hokudai.ac.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), and Japan Space Systems

[Abstract]

Key Words: Biomass, Carbon balance, Disturbance, Geographic information system (GIS), Greenhouse gases, Land cover change, Satellite remote-sensing, Synthetic aperture radar (SAR), Terrestrial ecosystem model

Tropical peat swamp forest (PSF) is widely distributed in Southeast Asia's lowlands. The ecosystem has accumulated a huge amount of organic carbon in peat over millennia. However, PSF has been reduced and degraded by logging, drainage and burning mainly because of land conversion to plantations. Such human disturbances potentially increase carbon dioxide (CO₂) emissions through enhanced oxidative peat decomposition and the increased risk of peat fires. Thus, tropical peatlands are recognized as a vulnerable massive carbon pool. It is very important to evaluate the current carbon status of tropical peatlands and quantify the disturbance effects on the carbon balance. In order to evaluate the carbon dynamics and the greenhouse gases (CO₂ and methane (CH₄)) balance of tropical peat ecosystems in Borneo Island, we have developed two integrated systems based on terrestrial biosphere modeling and satellite remote-sensing, respectively, in collaboration with the field flux monitoring and the improvement of tropical peat mapping.

In seven peat ecosystems with different soil types, precipitation patterns and land cover, CO₂ emissions through oxidative peat decomposition have been measured by the chamber technique. The soil CO₂ efflux increased as groundwater level decreased, but the relationship between them depended on sites. Above four sites, ecosystem-scale CH₄ flux has been measured by the eddy covariance technique for the first time in the world. All three sites in Malaysia, including a drained oil palm plantation, functioned as CH₄ sources on an annual basis, though an undrained PSF in Indonesia was almost CH₄ neutral. Existing peat maps were improved synthetically using up-to-date satellite images, digital elevation model, geological survey maps and soil maps along with field surveys with new peat boring. These outcomes improved the evaluation systems below.

A terrestrial biosphere model (VISIT) was customized for tropical peat ecosystems using the field data. Using the customized model, the carbon balance of whole peatlands in Borneo was evaluated for 15 years from land-cover maps prepared from satellite images (MODIS) and grid meteorological data sets. The model-based evaluation system was also used to quantify PSF protection policy as the countermeasure for the reduction of carbon emissions. On the other hand,

the phased array type L-band synthetic aperture radar (PALSAR-2) was used for the satellite remote-sensing based evaluation system according to the IPCC protocol. The comparison of performance between the two systems shows that further studies are necessary to incorporate some parameters, such as disturbance history and biomass growth.