

A-0801 グローバルな森林炭素監視システムの開発に関する研究

(1) 国際監視システム構築に向けた炭素アカウンティング手法の開発に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

地球環境研究センター

山形与志樹

〈研究協力者〉	国立環境研究所	地球環境研究センター	伊藤昭彦
	国立環境研究所	地球環境研究センター	ハス・バガン
	国立環境研究所	地球環境研究センター	アンナ・ペレゴン
	国立環境研究所	地球環境研究センター	安立美奈子
	国立環境研究所	地球環境研究センター	庄山紀久子

平成20～22年度累計予算額：58,435千円（うち、平成22年度予算額：18,135千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕 森林減少・劣化に伴う炭素放出は、過去の大気中CO₂濃度上昇をもたらした原因の一つであり、ポスト京都の気候安定化策においてもその抑制が重要なメカニズムに挙げられている。そのためには、森林の面積と炭素ストックを高精度でモニタリングするシステムが必要であり、本課題では人工衛星による定期観測、現地のインベントリ、そして生態系モデルを融合した炭素アカウンティング手法の開発を目的としている。本課題では、自然状態の熱帯雨林と人為影響を受けたプランテーションが隣接し、発展途上国の熱帯雨林地域の典型的な状況を呈しているマレーシア・パソを対象として、衛星画像解析に基づく土地利用変化を検出・抽出し、土地利用転換が発生した部位における炭素放出量を簡便法や炭素循環モデルを用いて推定し結果を比較した。さらに、GE0のデモンストレーション領域の一つとなっているボルネオ島を主な対象として、人工衛星-生態系モデルによる森林モニタリングシステムのプロトタイプ開発を行った。NOAA/AVHRR、SPOT/VEGETATION、MODISによる森林被覆率の時系列データから森林減少域を抽出し、陸域生態系モデルによる森林減少後の炭素放出・吸収パターンを適用することで、ボルネオ島の炭素収支マッピングを試行した。これらのプロトタイプにおける結果を踏まえて、発展途上国を含む広域で温暖化抑制策にも応用可能な、炭素アカウンティング手法について総合的な検討を行った。水平/垂直偏波同時送受信の観測が可能な合成開口レーダーを多偏波（ポーラリメトリック）SARと呼んでいる。さらに、PALSARではそれぞれ2偏波同時受信によって観測対象の4偏波特性を取得するフルポーラリメトリック機能も有している。本課題では、ポーラリメトリックSARであるPALSAR画像の4偏波の画像(HH、HV、VH、VV偏波)と位相情報を用いて、東南アジアの森林蓄積推定の基礎となる土地被覆分類手法を開発した。

〔キーワード〕 ポスト京都、炭素収支、土地利用、森林バイオマス、部分空間法

1. はじめに

グローバルな人間活動によるCO₂排出のうち、森林減少による排出は約20%（年60億トンCO₂）を

占めており、人為起源の気候変動を引き起こす要因の一つとなっている。経済・産業活動に伴う世界的な森林減少・劣化の傾向は産業革命以降に激化して現在も継続しており、特に近年は東南アジア地域における森林減少が顕著である。

グローバルな温室効果ガス排出量を2050年までに現状比で50%削減する長期的な対策が、サミット等で国際的に議論されはじめている。また、再生可能エネルギーの使用によって化石燃料消費を大幅に減らすとともに、森林減少・劣化によるCO₂排出を抑制する対策を温暖化対策の一つとして実施することが国際的な枠組みで検討されている。これが実現した場合には、途上国等における目標が達成されたかどうかを判定する必要がある。このため、森林減少・劣化をモニタリングし、これに伴うCO₂排出量を算定する信頼性の高い国際的な監視システムの構築が不可欠である。そこで、雲を透過する合成開口レーダー（PALSAR）等を用いた森林炭素監視システム構築に関する研究が必要である。

また、天候や時間の影響を受けず地上の情報を得られるPALSARデータを十分活用するため、後方散乱強度だけではなく、位相情報をも活用できる新しい分類手法を開発する必要がある。例えば、ユーラシア大陸北部における森林は炭素の貯蔵庫としての役割を果たしていることから全球の生態系サービスにおいて重要であるにもかかわらず、その地上部バイオマス量の推定値については不確実性が高い。森林バイオマス量に対するSARの後方散乱強度の応答特性を明らかにするため、現地計測されたバイオマス量とレーダの後方散乱との関係式を決定する必要がある。これらを背景として本課題では、人工衛星による定期観測、現地のインベントリ、そして生態系モデルを融合した炭素アカウンティング手法の開発について研究を行った。

2. 研究目的

森林減少の防止による温暖化対策を次期（ポスト京都）枠組みにおいて実現するためには、森林減少に伴うCO₂排出量を算定するための信頼性の高い国際的な監視システムが不可欠である。本サブテーマでは、グローバルな森林炭素監視システム（Global Forest Carbon Monitoring System）の構築に関する科学的な検討を行うため、国際共同研究を実施するEUの共同研究センター（Joint Research Center: JRC）、豪州炭素アカウンティングオフィス（National Carbon Accounting System: NCAS）他と協力を進める。国際監視システムに必要となる機能の仕様とその開発手法を検討するため、各サブテーマにおける研究成果を総括して、森林減少や森林劣化を定量的に把握する手法と、森林減少の防止活動に伴うCO₂排出削減量のアカウンティング手法に関する研究を実施する。

特に我が国からの貢献が期待されているPALSARを活用した監視システムの構築にむけて、まず、多時期PALSAR画像により森林減少を高精度に把握する手法（サブテーマ2）を確立し、アジアを中心に森林インベントリ情報を収集、整備すること（サブテーマ3）で、IPCCデフォルト法による森林減少に伴うCO₂排出量の推定精度を向上させる（図1）。次に、本課題のサブテーマ4,5で開発される、リモートセンシングにより推計される植生攪乱や林分構造に関する情報を、高度化した陸域生態モデル（サブテーマ6）に入力して炭素収支を高精度に算定する手法を確立し、我が国独自の国際監視システムの提案を検討する。さらに、森林減少の防止による温暖化対策にはCO₂排出削減にとどまらず森林保全による副次的な便益（生態系サービス）があるため、環境ベネフィットを含めた対策効果の評価を総合的に実施するための評価ツールの開発にも取り組む。

また、リモートセンシング画像の土地被覆分類において、部分空間法は適用が容易であり、か

つ高精度という特徴を有しており有効な手法として期待される。本研究では、部分空間法のポーラリメトリックSARであるPALSAR画像への土地被覆分類を実施し、今後の課題を検討する。

PALSAR後方散乱係数で森林バイオマス量を推定できるとして期待される。本研究では、現地計測されたバイオマス量とレーダの後方散乱との関係式を決定するために、様々な回帰モデルを検討して、SARの信号強度と地上部バイオマス量との間の相関係数がより高くなるモデル開発を行った。

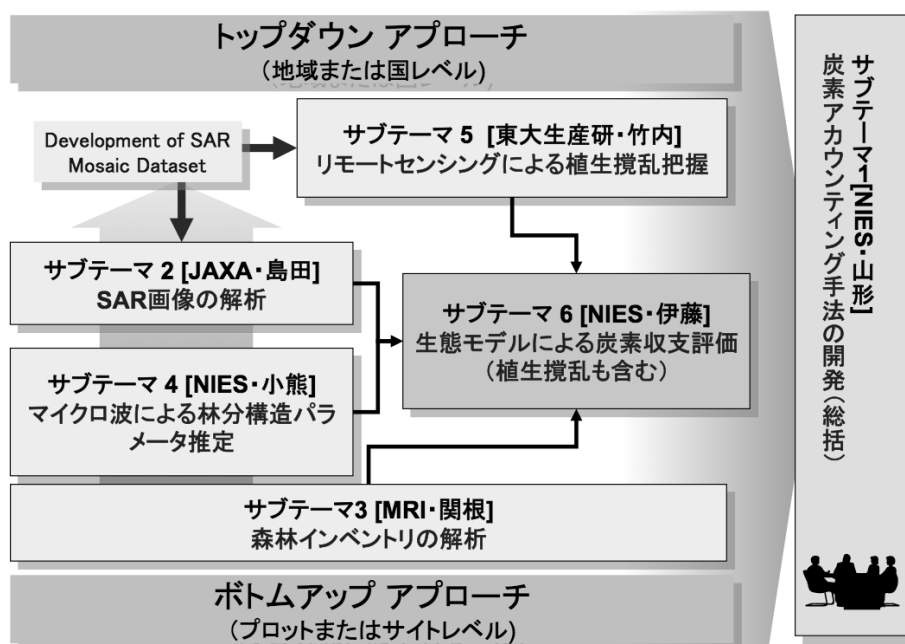


図1: 研究体制およびサブテーマ間連携の概要。

3. 研究方法

(1) 国際共同研究によるグローバル森林炭素監視システムの構築

森林減少の防止による温暖化対策を次期枠組みにおいて実現するためには、森林減少に伴うCO₂排出量を算定するための信頼性の高い国際的な監視システムが不可欠となる。本研究では、グローバルな森林炭素監視システム (Global Forest Carbon Monitoring System) の構築に関する科学的な検討を行っている。ALOS京都・炭素観測計画(K&C)の参加機関であるEUの共同研究センター(JRC)、豪州炭素アカウンティングオフィス(NCAS)を中心とした海外関連機関と協力し、国際監視システムに必要な機能の仕様とその開発手法を検討した。また、GEOSSの2009年～2011年のワークプランにおける新タスクである「CL-09-03: Global Carbon Observation and Analysis System」のサブタスク「Forest Carbon Tracking」における国際連携を軸として、GEOSSタスクにおける活動の設定および国際的な共通検証サイトの設定に係る調整・検討を行った。なお、調整は、全球地球観測システム(GEOSS)のAP(Asia-Pacific)会合を通じて実施した。

(2) フルカーボンアカウンティングのための森林モデル開発

森林における正味の炭素ストック変化は、幹をはじめとする地上部バイオマスだけでなく、地下部バイオマスおよび土壌有機物における全ての炭素フローを考慮し、人為活動および自然変動

による影響を適切に反映する、フルカーボンアカウンティング方式で評価を行う必要がある。しかし、ほとんどの場合に森林統計情報からは森林面積と幹材積データしか得られないため、それに基づく簡便推定法では高い信頼性の評価は行えない。サブテーマ6で開発される、主要な炭素ストック・フローを明示的に扱う生態系炭素循環モデル（VISIT）をベースとし、人為活動や自然変動の影響を反映するフルカーボンアカウンティング指向モデルを用いて、アカウンティング方式の違いが炭素放出量の推定結果にもたらす影響を検討した。

VISITは炭素循環スキームを軸に、大気中の温室効果ガス（CO₂、メタン、亜酸化窒素）を評価することができ、水収支に関しても簡単な蒸発散・流出スキームを用いて考慮することができる。各フローについては環境条件だけでなく、植生タイプ毎の生理生態特性（例えば最大光合成速度、呼吸活性、ターンオーバー速度など）の違いを扱うことで、森林からアブラヤシ園へといった土地利用転換の影響を評価することができる。しかし、土壌炭素動態については簡便なスキームで扱われていたため、サブテーマ6では現地観測に基づく改良を進めている。また、GEO-FCTのデモンストレーション領域の一つであるボルネオ島を対象に、人工衛星で観測された森林/非森林の分布データに基づいて森林減少域を抽出し、陸域モデル¹⁾で推定された炭素収支パターンを適用することでCO₂の放出・吸収マッピングを試みた。

（３）部分空間法の開発

本研究では、部分空間法土地被覆分類手法を開発し、検証サイトであるボルネオ（インドネシア側）において分類実験を行った。部分空間法では、まずトレーニングデータを使用し、カテゴリごとにそのカテゴリを表現できる部分空間を作る。次に、画像ピクセルを各部分空間へ射影させて、画像全体を分類する。おもな計算公式は以下の通りである。

ピクセルの次元（バンド数）は d 次元と仮定し、クラス i のトレーニングサンプルから構成する自己相関行列を

$$R_i = \frac{1}{p-1} \sum_{j=1}^p s_{i,j} s_{i,j}^T \quad (1)$$

とする。 P はトレーニングサンプル数である。

R_i の固有値を降順で並び替え、前の n 個の大きい固有値に対応する固有ベクトル

$\{V_{i,j} | j=1, \dots, n\}$ ($n < d$) を選んで部分空間を構成する。

そして、次式によりピクセル x を最大射影があるクラスに帰属する。

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^n [x^T V_{i,j}]^2 \quad (2)$$

これはCLAFIC (CLAss-Featuring Information Compression method) 部分空間法である。CLAFIC 部分空間法の欠点は、クラスとクラスの部分空間は互いに関係がないので、部分空間は互いに重なることがあり、分類精度が悪くなる場合がある。これを解決するためにALSM方法という部分空間法を提案した。この方法では部分空間を回し、部分空間の重なっている部分を減らすことによ

って分類精度を向上する。計算方法に循環方法を使うことで、部分空間の重なりを減少させる。具体的には、循環 k ($k>0$) で、次の行列を計算する。

$$R_k^{(i,j)} = \sum_x \left\{ x x^T \mid x \in \omega^{(i)}, x \mapsto \omega^{(j)} \right\} \quad (3)$$

次に自己相関行列

$$R_k^{(i)} = R_{k-1}^{(i)} + \alpha \sum_{j \neq i} R_k^{(i,j)} - \beta \sum_{j \neq i} R_k^{(j,i)} \quad (4)$$

を計算する。このように、事前に指定した循環条件を達成するまで計算を繰り返す。

部分空間法を改良し、式(2)の代わりに、複合類似度法手法を拡張した次式を用いることで、分類精度が更に高くなることを確認した。

$$g_i(x) = \sum_{j=1}^n \left(\lambda_i^{(j)} / \lambda_i^{(1)} \right)^\rho [x^T V_{i,j}]^2 \quad (5)$$

ここで、 $0 \leq \rho \leq 1$, $\lambda_i^{(1)}$ と $\lambda_i^{(j)}$ は一番大きい固有値と j 番目に大きい固有値である。

更に、最適なパラメータを自動的に選べる循環計算手法を導入し、式(4)と(5)の最適な β 、 ρ を自動的に選ぶことで、分類精度は更に向上できる

改善した部分空間法によって、パラメータを手動で調整する手間を省き、完全な自動化を実現した。部分空間法の主な計算は内積計算であることから、少ないバンド数の衛星画像に対しても訓練・分類の速度が速い。また、最新の固有値と固有ベクトル計算手法を使うことでより早い計算が可能である。

(4) PALSAR後方散乱係数で森林バイオマス量を推定するモデルの開発

1) 対象地域、参照用の実測データ、ALOS/PALSARデータ

本研究のテストサイトは、ロシアの西シベリアにあるノヴォシビルスク地方の北緯 $56^\circ 51'$ 、東経 $78^\circ 53'$ 付近に位置している(図2)。本研究では、300の計測プロット(1プロットの面積は 100 m^2)において、現地の専門家による森林の特徴量の計測をおこなった。地上の計測プロットの配置を、図2に示す。このデータセットは、生態系タイプに応じて層化した上で、プロット数がほぼ同数となるよう2つのグループに分割した。1つのグループは後方散乱モデルの係数を決定するために利用し、もう1つは確立されたモデルを検証するために利用した。

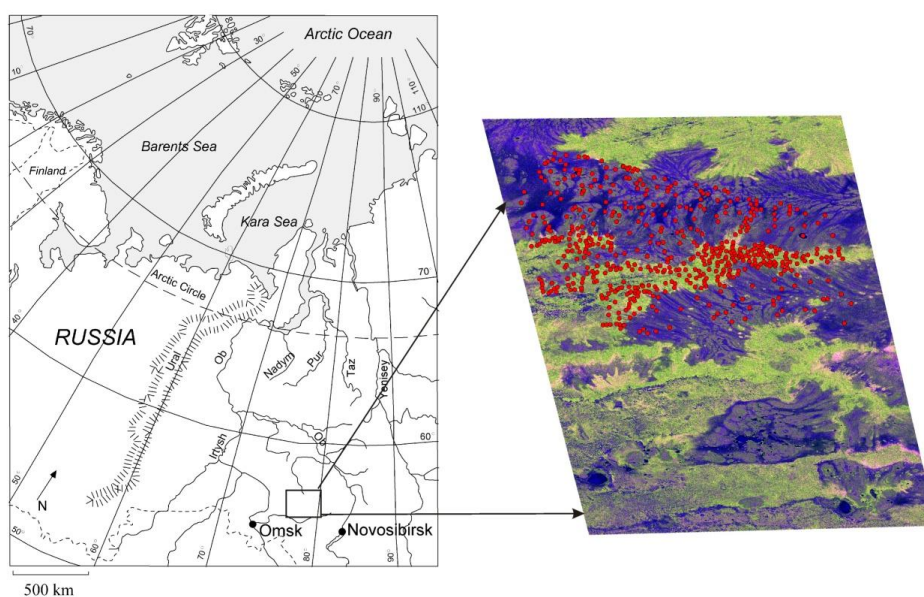


図2: 対象地域と地上計測プロットの配置（右図の点）。

合計で5シーンの二偏波（HH/HV）Lバンド衛星レーダのデータを利用した。これは、ALOS/PALSARの高分解能モード（FBDモード）により取得された、画素サイズ12.5 mのデータで、2007年と2008年の植生繁茂期にテストサイトを対象に観測されたものである（詳細を表1に示す）。

表1: 対象地域におけるALOS/PALSARデータ。

ID	観測日	気象条件
1	2007-07-16	気温18° C, 乾燥 (5日前に7 mmの降水)
2	2008-07-01	気温19° C, 乾燥 (2日前に3 mmの降水)
3	2008-07-18	気温23° C, 乾燥 (6日前に4 mmの降水)
4	2008-08-16	気温15° C, 乾燥 (1日前に6 mmの降水)
5	2008-09-02	気温18° C, 乾燥 (3日前に8 mmの降水)

表2: 異なる関数を用いて地上バイオマス量からPALSARの後方散乱(σ^0)を推定した際の、

全5シーンのPALSARデータ（HH偏波/HV偏波）それぞれの決定係数 R^2 。

後方散乱モデル	2007- 07-16	2008- 07-01	2008- 07-18	2008- 08-16	2008- 09-02
(a) $\sigma^0 = \beta_0 + \beta_1 \text{AGB}$	0.31/0.44	0.18/0.36	0.38/0.47	0.24/0.38	0.37/0.44
(b) $\sigma^0 = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{AGB})$	0.63/0.76	0.34/0.55	0.47/0.65	0.39/0.55	0.45/0.59
(c) $\sigma^0 = \beta_0 + \beta_1 \ln(\text{AGB}) + \beta_2 (\ln(\text{AGB}))^2$	0.64/-	-/-	0.49/0.66	-/-	0.45/0.59
(d) $\sigma^0 = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{\text{AGB}}$	0.45/0.62	0.26/0.49	0.46/0.60	0.32/0.50	0.43/0.53
(e) $\sigma^0 = \beta_0 + \beta_1 \exp(\beta_2 \text{AGB})$	0.65/0.78	0.38/0.61	0.52/0.69	0.43/0.61	0.46/0.62

* - Water Cloud モデル； (-) 自然対数の2乗項は重要ではない

2) PALSAR 後方散乱の前方回帰モデル

表2の式(e)はWater Cloudモデルであり、後方散乱とバイオマス量との関係を解析するためには最も適していることがわかった。このモデルでは、相関係数が0.78 - 0.88の範囲、決定係数

が 0.61 - 0.78 の範囲の値となり、他のモデルに比較して高い値を示している。

4. 結果・考察

(1) 国際共同研究によるグローバル森林炭素監視システムの構築

米国の Woods Hole Research Center、FAO、欧州の Joint Research Center 等の各国機関・国際機関においては、森林減少に関するリモートセンシング研究が開始している。また、豪州政府から提案された森林減少防止を国際的に監視するためのグローバル炭素監視システム (Global Carbon Monitoring System) が、同国の炭素管理システム (National Carbon Accounting System) を基に検討が開始されている。これらの国際的な取組みでは主にランドサット等の光学センサーによる手法が検討されており、PALSARを活用した森林炭素監視システム開発に関する研究としては本提案が国際的にも先駆的なものとなる。

今後開発する国際的な森林炭素監視システムにおいては、これらの海外関連機関との連携・協力が不可欠となる。本研究においては、ALOS 京都・炭素観測計画 (K&C) の森林分野の研究機関と中心とした本プロジェクトとの連携体制を構築するとともに、全球地球観測システム (GEOSS) の AP (Asia-Pacific) 会合を通じた海外研究者との調整を実施した。この結果、本研究は、GEOSS の 2009 年～2011 年のワークプランにおける新タスクである「CL-09-03: Global Carbon Observation and Analysis System」のサブタスク「Forest Carbon Tracking」として位置づけることとなり、国際連携のもとで森林炭素監視システムに必要となる機能の仕様とその開発手法の検討を行う体制を整備した。

(2) フルカーボンアカウンティングのための森林モデル開発

マレーシア・パソサイトにおいて異なる時点の合成開口レーダ (JERS1 および ALOS/PALSAR)、可視画像データ (Landsat TM) を収集し、土地被覆状態変化の検出・抽出法を検討した。まず、森林とその他の耕作地・居住地を分離するため最尤法を用いて土地被覆分類マップを作成した。これにより、生態系調査サイトであるパソ保護林の周辺で大規模なアブラヤシ園への土地利用転換が発生している状況を明らかにした。このデータの空間分解能は約 12m であり、非常に高い精度で森林減少を検出・監視できる可能性が示されている。サブテーマ 6 で開発された森林の炭素収支評価モデルをパソ周辺域に適用し、炭素収支の時間変化をシミュレートした。ここでは気象変動による自然要因と、大気 CO₂ 濃度上昇や土地利用転換による人為要因が考慮されている。図 3 は天然の熱帯多雨林が伐採されてアブラヤシ園に転換された場合の、森林減少に伴う炭素ストックの時間変化を示している。

また、衛星観測による森林/非森林の時系列マップから、ボルネオ島における森林減少の実態を明らかにした。光学センサーを用いた衛星観測では、1982 年から 2008 年にかけて、南西部を中心に森林減少が発生していることが分かる (図 4)。このデータには雲影響などのノイズが残っていることが考えられ、ある年に大幅な森林減少が生じた次の年に、逆に同じ地域で相当の森林増加が見られるなどの不自然な挙動が残されている。これについては、光学センサーによる観測データの雲・ノイズ除去処理アルゴリズムを高度化することに加え、利用時にも何らかのフィルタを

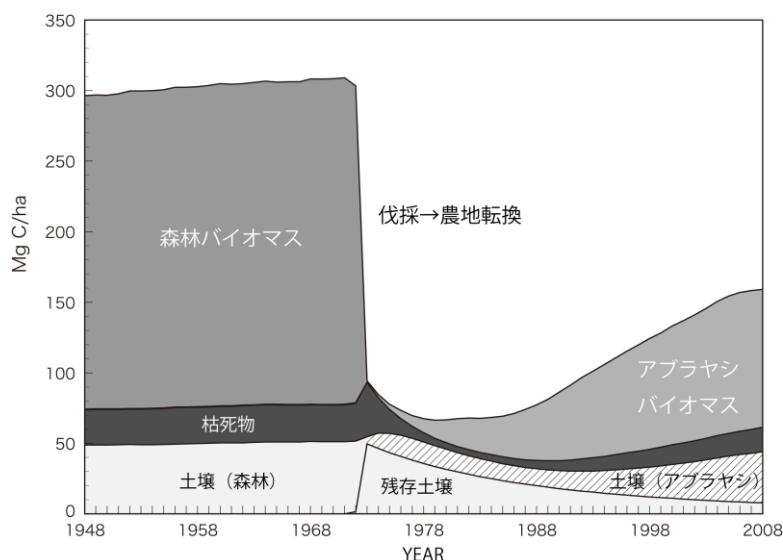


図3: パソサイトにおける土地利用転換に伴う炭素ストックの時間変化のシミュレーション例.
(1972年にアブラヤシ園に伐採され転換された場合)

かけることで異常値に影響されない推定法を検討する必要がある。同時に、雲影響を受けない PALSARなどのマイクロ波センサーによる観測データを整備していく。今回の推定では、利用可能な光学センサーデータのみによる初期的な試行として、観測データをそのまま使用して炭素収支パターンを適用したため、そのようなノイズの直後には放出量を過大評価、ある程度の時間経過後には吸収量を過大評価している可能性がある点には注意が必要である。

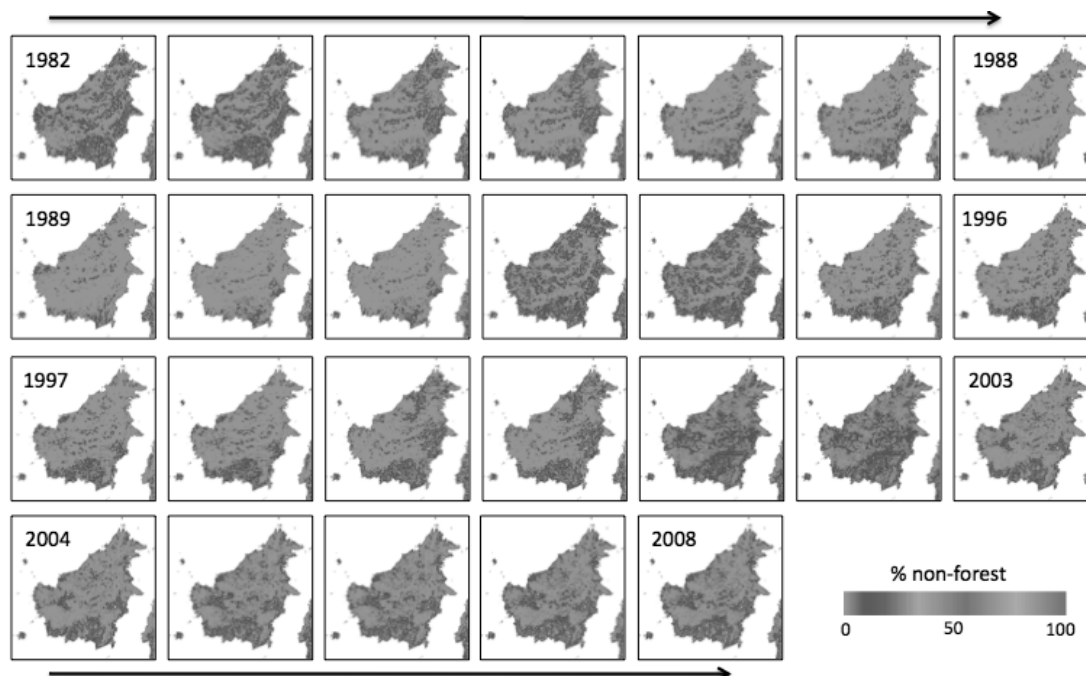


図4: 人工衛星観測によるボルネオ島の森林/非森林被覆率に関する1982～2008年の時系列マップ。

また、図5に示されたように、衛星観測による森林被覆の増減時系列データと、生態系モデルに

よる炭素収支パターンを組み合わせることで広域的な炭素収支マッピング (図6) が可能となった。森林減少が顕著に進行してきた南東部は、かなり強い炭素放出源になっている可能性が示された。

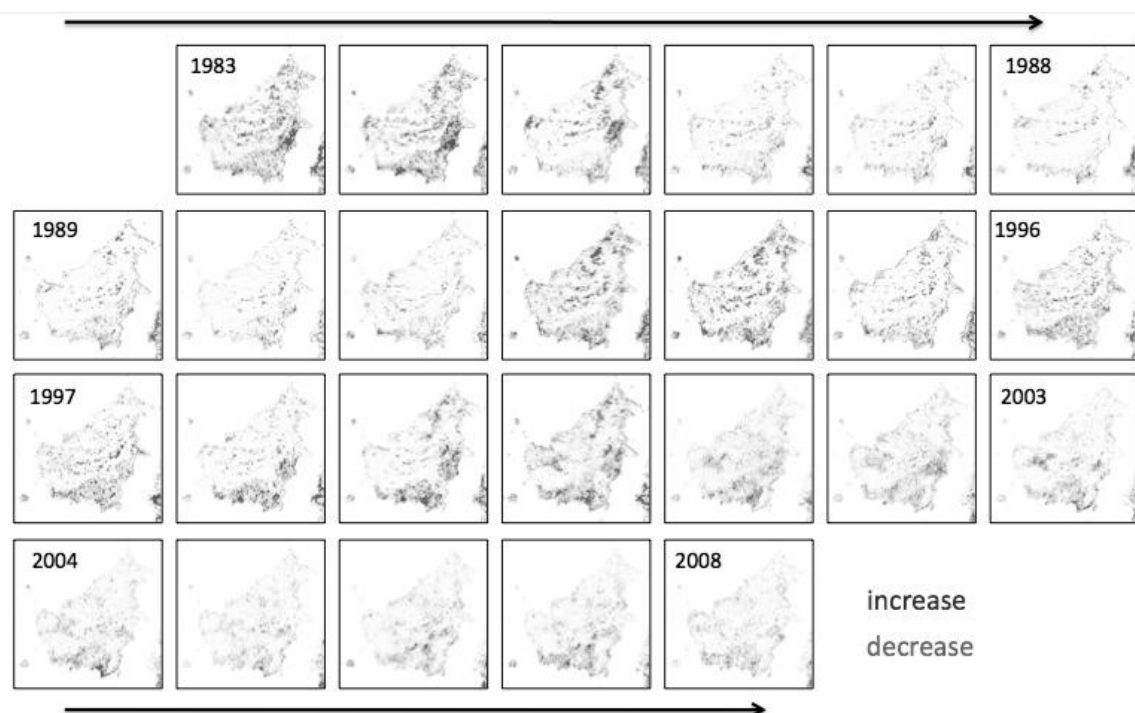


図5：衛星観測の森林/非森林時系列マップに基づく森林被覆の増減分布。

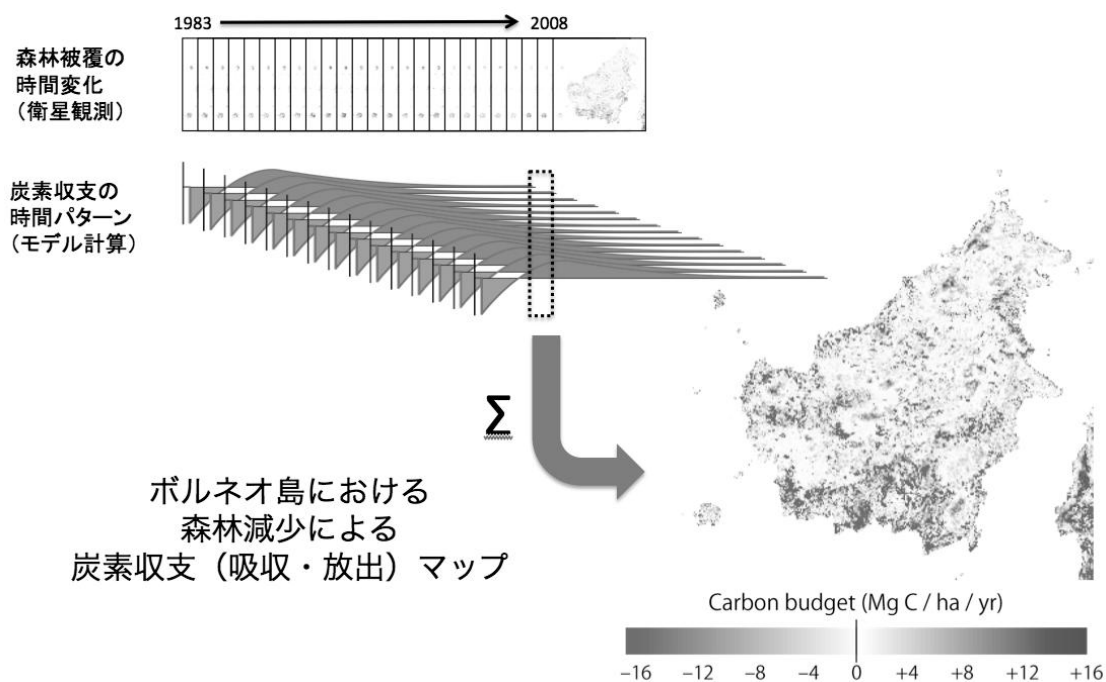


図6：衛星観測による森林被覆の増減と陸域生態系モデルによる炭素収支変化パターンを用いて推定された炭素収支マップ（2008年のボルネオ島の例）。

一方で、衛星観測による時系列のほかにもいくつか問題が残されている。第1に、衛星観測データが入手可能になった1982年以前の森林減少の影響評価法である。今回の推定では1981年の時点では領域全体が森林で被覆されていると仮定した計算となっており、それ以前の土地利用変化影響が考慮されていない。産業革命以降の耕作地・牧草地分布に関するグローバルデータ²⁾を代替に用いることにより、20世紀に入ってから土地利用履歴を考慮するよう改良を加える予定である。第2に、今回の推定では森林からアブラヤシ園への転換を想定しており、ゴム園や農地など実際の多様な土地利用形態を考慮した評価を行う必要がある³⁾。加えて、熱帯林には相当な面積の泥炭林が含まれており、土地利用変化に伴って土壌が乾燥化した際に大量の炭素を放出することが最近の研究から明らかにされているので、そのような局地的な土壌タイプの不均質性も加味するよう高度化していく。

このシミュレーション結果からストック量変化と一致する炭素放出量を直接求めることが可能であるが、さらに便宜的な仮定を置く簡便法による計算を行うことで、アカウンティング手法による誤差を評価することができる。森林減少を受けた地点からは年間20 t C/ha程度の炭素が放出される可能性があることから、伐採面積割合が小さくとも領域全体の炭素収支に大きな影響を及ぼす可能性がある。伐採された材が10年程度にわたり消費されるタイムラグや、伐採時に生じた大量の残滓が土壌に残留して継続的に炭素放出源となること、また植生の回復とともに新たな土壌が生成されることから、森林全体の炭素収支は植生バイオマスのみのもとは異なる挙動を示していた。すなわち、伐採直後の放出量を過大評価し、植生回復期の炭素吸収量を過小評価していた。また、生態系CO₂収支（NEP）のみの評価では、伐採された木材の燃料としての消費などが考慮されないため、伐採直後の放出量を過小評価していた。このように便宜上の仮定を設けることで計算は簡単化されるが、場合によっては大きな評価誤差の原因になり得る。従って、本課題で開発された生態系モデルに基づく炭素収支評価手法はより有用性が高いことが示された。

（3）部分空間法によるPALSAR土地被覆分類

フルポーラリメトリックPALSARは送信と受信で異なる偏波を使えるので、シングルSARと光学画像で取られない情報を提供できる。行列要素が複素数であるSinclair⁴⁾ 2×2 散乱行列は

$$S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} = e^{j\phi_{HH}} \begin{pmatrix} |S_{HH}| & |S_{HV}|e^{j(\phi_{HV}-\phi_{HH})} \\ |S_{VH}|e^{j(\phi_{VH}-\phi_{HH})} & |S_{VV}|e^{j(\phi_{VV}-\phi_{HH})} \end{pmatrix} \quad (6)$$

であり、これによりCoherency行列が作られる

$$T_3 = \langle \underline{k} \cdot \underline{k}^{*T} \rangle = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{HH} + S_{VV}|^2 \rangle & \langle (S_{HH} + S_{VV})(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 2\langle (S_{HH} + S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ \langle (S_{HH} - S_{VV})(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & \langle |S_{HH} - S_{VV}|^2 \rangle & 2\langle (S_{HH} - S_{VV})S_{HV}^* \rangle \\ 2\langle S_{HV}(S_{HH} + S_{VV})^* \rangle & 2\langle S_{HV}(S_{HH} - S_{VV})^* \rangle & 4\langle |S_{HV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (7)$$

Coherency行列は3×3のエルミート行列であり、三つの対角線要素が実数で、非対角線要素は複

素数のため、独立要素としては合計9個となる。また、複素数要素は位相情報を保存している⁵⁾。

次にHH, HV, VH, VVと式(7)の9個の独立要素を合わせた合計13次元のデータを使って、部分空間法による土地被覆分類を行った。その結果を図7に示す。

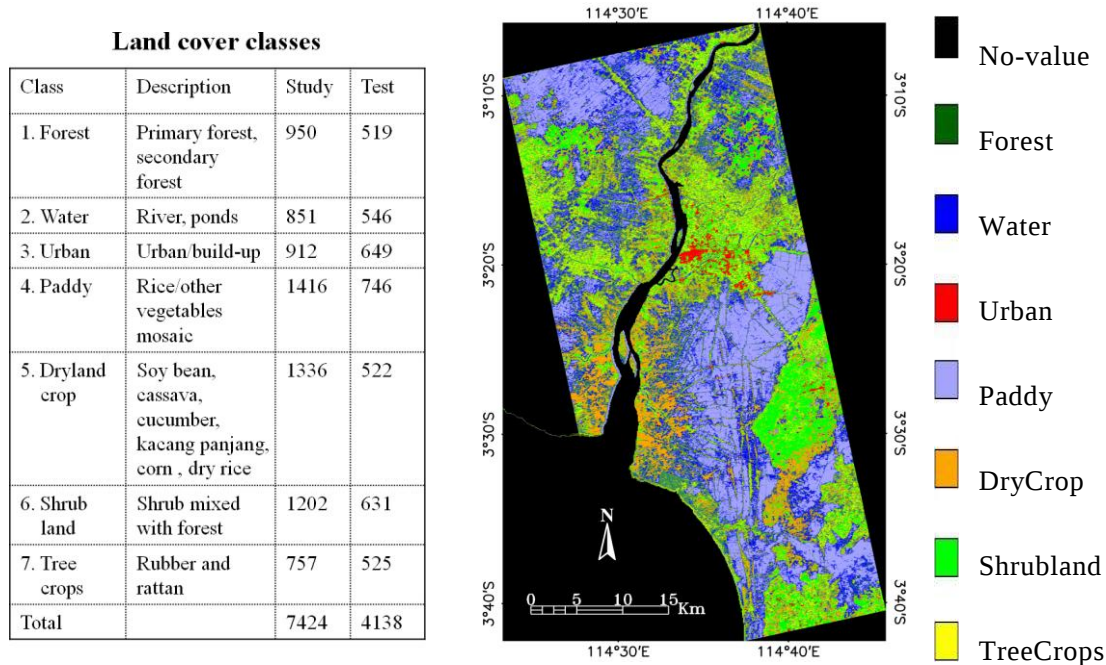


図7: 土地被覆カテゴリ (左) と土地被覆分類図 (右) .

フルポーラリメトリックPALSAR から得られて13次元のデータを使った分類精度 (72%) は HH, HV, VH, VVの4チャンネルのみを使用した土地被覆分類より遥かに向上できることが確認された。また、この高次元データセットに対して、部分空間法が更に有効であることが分かった。

(4) 森林バイオマス量推定のための逆モデルとその検証

表2の比較結果に基づいて、森林バイオマス量を従属変数、後方散乱係数を独立変数として、逆の関係式を構築することができる。

本研究では、地上バイオマス量 (AGB) の逆回帰モデルとして、次の式を用いた。

$$AGB = a_1 \times DN_{PALSAR} + a_2 \quad (8)$$

表3に、地上バイオマス量に対するALOS/PALSARの各シーンに関する回帰分析の結果を示す。ALOS/PALSARデータを利用したバイオマス量推定の精度については、二乗平均平方根誤差 (RMSE) により評価した。

ALOS/PALSARデータをすべて統合した夏期データセットによる逆回帰モデルは、次のように表される。

$$AGB = 0.041 \sqrt{10^{((\sigma - 0.83)/10)}} - 42.18 \quad (9)$$

式(8)および表3に示した係数を用いてSAR信号値から計算された森林バイオマス量と実測データとの相関のグラフを図8に示す。この図は、式(9)に示したように係数を定数として置いた線形モデルを用いて、気象条件がおおよそ類似している観測日のALOS/PALSARの夏期のシーンを対象とすれば、森林バイオマス量を推定することが可能であることを意味している。

表3. 森林バイオマス量とALOS/PALSAR各シーンとの間の回帰分析結果.

シーン	n	a_1	a_2	r	R^2	RMSE (tons/ha)
2007-07-16	275	0.040	-42.97	0.68	0.47	32.92
2008-07-01	170	0.037	-34.02	0.59	0.35	35.04
2008-07-18	267	0.047	-58.24	0.70	0.49	31.78
2008-08-16	179	0.042	-45.15	0.62	0.39	34.14
2008-09-02	268	0.047	-52.82	0.67	0.45	33.63
2007年データセット	444	0.037	-36.71	0.64	0.41	34.33
2008年データセット	884	0.043	-47.49	0.65	0.42	33.62
全シーン統合	1328	0.041	-42.18	0.64	0.41	34.04

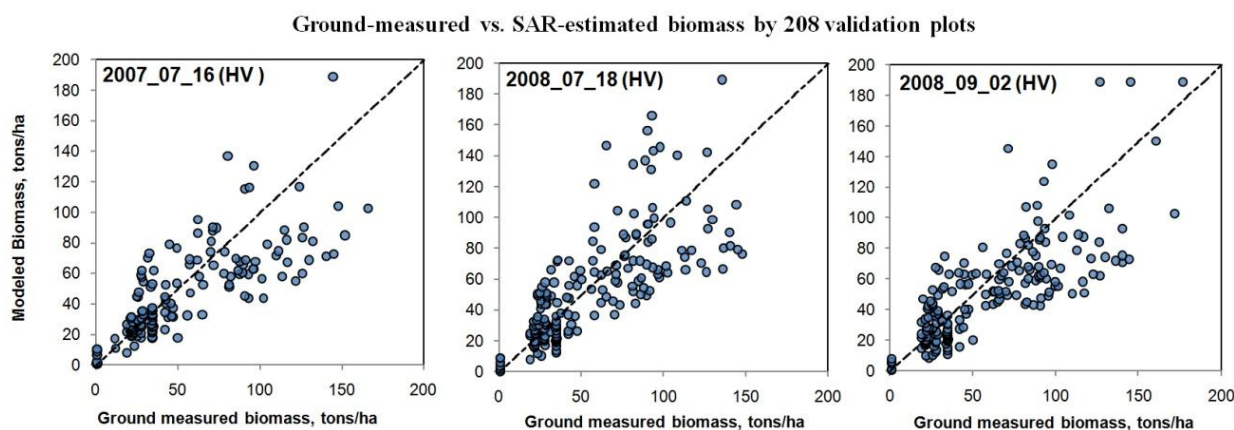


図8: 208の検証プロットにおけるバイオマス量の地上計測とSARによる推定値との比較.

本研究によって確立された回帰モデルは、今回のテストサイトの樹種構成に類似している森林——主として西シベリア低地における、乾燥した高原地域に分布する小葉の落葉樹（カンバやアスペン）の森林や、含水量の多い地域に分布する針葉樹（マツ）の優占する混交林——に対して有効であることが示された。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

インドネシア・ボルネオ島のような広域を対象として、人為的な森林減少を考慮した炭素収支マッピングを行う手法のプロトタイプを開発した。この手法は、代表的な熱帯林サイトにおける土壌まで含めた炭素収支に関する観測データを用いた検証を経ている。また、最近の衛星観測と組み合わせることで、これまで実施が困難であった広域評価への道筋をつけることができた。この手法は、森林における土地利用変化に伴う排出量の広域評価を高精度化し、グローバル炭素循環の理解に貢献すると期待される。今後、モデル高度化を進めるとともに、泥炭地やマングローブ林、さらにゴム園など多様な植生情報を加えることにより、さらに信頼性の高い評価が可能になると考えられる。

部分空間法という新しい土地被覆分類手法を開発して、フルポーラリメトリックPALSARデータとそのCoherency行列の要素を用いる土地被覆分類の手法を提案した。この手法によって、雲の影響を受けないフルポーラリメトリックPALSARは東南アジアの熱帯林等における森林減少・劣化の高精度観測に貢献すると期待される。

現地計測されたバイオマス量とレーダの後方散乱との関係式を決定するために、様々な回帰モデルを検討した。そのようにして得られた関係式は非常に有効なものであり、しかも夏期の5シーンのいずれにおいても類似した結果を示すことがわかった。回帰分析の結果が安定しているということは、関係式の係数を定数として置いた1つのモデル式を利用することで、対象地域における森林バイオマス量の推定が可能であることを意味している。ライク偏波（HH）のPALSARデータに比較してクロス偏波（HV）のデータは、SARの信号強度と地上部バイオマス量（AGB）との間の相関係数がより高くなることが示された。本研究により、森林バイオマス量に対するSARの後方散乱強度の応答特性は、線形の単回帰分析により十分にモデル化することが可能であることが確かめられた。これは、初めにフィンランドの研究グループによって確立された手法である⁶⁾。このモデルを検証用データセットに適用することで検証したところ、森林バイオマス量の推定値と現地実測データとの間の相関係数は0.59 - 0.73の範囲の値となった。さらに、地上バイオマス量（AGB）が90 トン/ha未満の場合には相関係数は0.65 - 0.83の範囲にまで上昇した。ALOS/PALSARの信号は0 - 120 トン/haの範囲のバイオマス量に反応していること、また、70 トン/ha付近より高いバイオマス量に対しては信号強度の増加は頭打ちになることがわかった。なお、今回用いた手法には±40 %程度の大幅な推定誤差が含まれている。SARデータを利用した推定は、成熟した森林に対しては不確実性が大きくなるが、生産量の低い生態系における木質バイオマス量の評価には有効である可能性が示された。具体的には、疎林、幼齢林、森林性泥炭地といった生態系がこれに該当し、この手法によって炭素の総量を集計する際に必要となる詳細な情報を得ることができるだろう。

（２）環境政策への貢献

本課題の実施により、これまで雲の影響などで観測が困難であった熱帯林について、合成開口レーダ画像を用いることにより、熱帯林等における森林減少・劣化を高精度に観測する手法、および、森林減少・劣化の防止に伴うCO₂排出量削減の効果を定量的に評価する手法が開発される。SARデータを始めとする衛星データ利用技術開発、インベントリ情報の解析、陸域生態系モデルの開発を統合的に行うことにより、森林減少・劣化の防止を京都議定書の次期枠組みにおける新たな温暖化対策として実現するために必要となる、グローバルな森林炭素監視システムの構築に関する検討に直接的に貢献する。

特に、森林減少・劣化の防止に関する国際監視システムの開発に際して、我が国の陸域観測衛星（だいち）に搭載された合成開口レーダ「PALSAR」の利用に対する国際的な関心が高いため、本研究により得られる最新の研究知見をベースとして、国際監視システム開発に関する研究をリードし、得られた研究知見によって日本からの直接的な提案に貢献する。

本研究においてグローバル森林炭素監視システムの開発に関する国際共同研究を実施することで、研究成果を国際的に共有するネットワークが構築される。現在、気候変動枠組み条約のもとで行われている、途上国の森林減少・劣化に伴う排出抑制に関する議論では、方法的・技術的

課題として、モニタリング方法やアカウンティング方法が挙げられており、国際ネットワークのもとで収集された科学的知見は、IPCCやUNFCCにおける科学技術的な検討に貢献することが可能となる。

6. 引用文献

- 1) 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. *Journal of Plant Research*, 123(4), 577-588.
- 2) Ramankutty, N., Gibbs, H. K., Achard, F., DeFries, R., Foley, J. A. & Houghton, R. A. (2007) Challenges to estimating carbon emissions from tropical deforestation. *Global Change Biology*, 13, 51-66.
- 3) Adachi, M., Bekku, Y. S., Rashidah, W., Okuda, T. & Koizumi, H. (2006) Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. *Applied Soil Ecology*, 34, 258-265.
- 4) 山口芳雄：レーダポーラリメトリの基礎と応用—偏波を用いたレーダリモートセンシング、社団法人電子情報通信学会、pp182、東京、2007.
- 5) Lee, J.S. & Ainsworth, T. L. (2011) The effect of orientation angle compensation on coherency matrix and polarimetric target decompositions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1):53-64.
- 6) Shvidenko, A., Schepaschenko, D., Nilsson, S. & Bouloui, Y. (2007) Semi-empirical models for assessment biological productivity of Northern Eurasian forests. *Ecological Modeling*, 204:163-179.

7. 国際共同研究等の状況

活動はGEO/GEOSSのサブタスク（Global Carbon Tracking）の一環に位置づけられている。欧米の研究機関（米国のWood Hole Research Center、FAO、欧州のJoint Research Center等）において森林減少に関するリモートセンシング研究がスタートしており、本研究提案の準備段階から国際共同研究についての打ち合わせを実施している。また、豪州政府から提案された森林減少防止を国際的に監視するためのグローバル炭素監視システム（Global Carbon Monitoring System）の構想とも、研究レベルでの連携について議論を開始した。これらの国際的な取組みでは主にランドサット等の光学センサーによる手法が検討されており、PALSARを活用した森林炭素監視システム開発に関する研究としては本提案が国際的にも先駆的なものとなる。

8. 研究成果の発表状況

<論文（査読あり）>

- 1) Peregon, A., Maksyutov, S., Yamagata, Y. (2009) “An image-based inventory of the spatial structure of West Siberian wetlands” *IOP PUBLISHING*, 4, 1-6.

- 2) Hasi, B., Takeuchi, W., Yamagata, Y., Wang, X. & Yasuoka, Y. (2009) “Extended averaged learning subspace method for hyperspectral data classification” Sensors (9), 4247-4271.

＜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）

- 1) Yamagata, Y. & Held, A. “WG6. Necessity and Possibility of Observation, Forecasting, and data sharing through the interdisciplinary collaboration of “Ecosystem-climate change-disaster” The Third GEOSS Asia-Pacific Symposium, Kyoto, 2009年2月.
- 2) Hasi, B. & Yamagata, Y. “Land cover/land use mapping and change detection in Mongolian Plateau using remote sensing data” International Symposium on The Impact of Climate Change on Region Specific, Hokkaido, 2009年11月.
- 3) Yamagata, Y. “Forest Carbon Monitoring using Remote Sensing and Terrestrial Ecosystem Modeling” GEO-Asia-Pacific Symposium, Bali, 2010年3月.
- 4) 山形与志樹 「温暖化と生物多様性の共通指標は可能か」日本生態学会第57大会、東京、2010年3月.

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない

（４）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

山形与志樹、伊藤昭彦、安立美奈子「生態系サービスの総合的指標化」日本生態学会第57回大会企画集会、東京、2010年3月.

（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