

A-0802 PALSARを用いた森林劣化の指標検出と排出量評価手法の開発に関する研究

(3) PALSARを利用した熱帯林地の劣化過程と温室効果ガス排出量の評価手法の開発

a. 乾性遷移系列の熱帯林地における手法開発

(独) 森林総合研究所

植物生態研究領域 清野嘉之

齊藤哲

森林管理研究領域 高橋與明

企画部研究企画科 高橋正通

東北支所 平井敬三

九州支所 齋藤英樹

<研究協力者>

(独) 森林総合研究所

佐藤保・鳥山淳平・門田有佳子

西村千・伊藤江利子

岐阜大学

栗屋善雄

北海道大学

井上京

京都大学

神崎護

カンボジア国 森林局

Chann Sophal・Vanna Samreth

カンボジア国 環境省

Thy Sum・Hak Mao

インドネシア国 パランカラヤ大学

Suwido H Limin

インドネシア国 ボゴール農科大学

I Nengah Surati Jaya

マレーシア国 サラワク政府

Lulie Melling

平成20～22年度累計予算額 75,878千円（うち、平成22年度予算額 33,344千円）

上記の予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕 PALSARの技術的・基礎的解析と方法論全体の組立てのため、サブテーマ3 bと手法を共通させながらカンボジアの乾性遷移系列の熱帯季節林にテストサイトを設けた。また、サブテーマ1、2、3 bと連携して、カンボジアのテストサイトとインドネシアの泥炭湿地林のテストサイトで調査プロットの設定および再設定をおこない、バイオマス・群落高などのデータを収集した。これにより、森林被覆タイプ別土地面積と長期調査プロットデータから国レベルの森林の炭素蓄積量を一定精度でモニタリングする手法や、伐採等による森林高の低下からバイオマス減少を推定する際の汎用式の課題を明らかにした。カンボジアでは森林タイプとリンクさせながらバイオマス・土壌・枯死木を国内各地で計測し、カンボジアで入手可能な衛星観測や地質図、既存調査プロットの情報も利用して、季節林の生態系炭素蓄積量を推定する手法を開発し、国レベルの炭素蓄積量の分布図を作成した。また、劣化林の炭素蓄積や温室効果ガスのインベントリ作成へ向け、既存データとプロジェクトで新たに収集したデータを合わせて、カンボジアの季節林と

インドネシアの排水された泥炭湿地林の劣化にともなう温室効果ガスの排出可能量を推定した。これにより、乾性遷移系列の熱帯林ではバイオマスからのCO₂排出、排水された泥炭湿地林では泥炭からのCO₂排出が、それぞれ最も影響の大きい温室効果ガスの排出形態であり、森林劣化にともなう排出量増加の推定値の精度向上のためには、これらのデータを優先的に取得すべきであることを明らかにした。森林の劣化を広域でモニタリングするにはリモートセンシングと地上計測技術の組み合わせが必須である。雲の多い熱帯を対象に森林劣化による温室効果ガス排出量をモニタリングするには、PALSARで森林面積を計測し、影響の大きい排出を、PALSARと、地上計測（あるいはそれに代わる高解像度の航空機観測）を併用して把握するのが良いと考えられる。

[キーワード] モニタリング、熱帯林、気候変動、カンボジア、インドネシア

1. はじめに

国産衛星「だいち」に搭載された PALSAR (フェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ) は、雲を透過して地表の土地被覆やバイオマスを観測できるため、熱帯地域の森林変化のモニタリングに威力を発揮すると期待される。しかし、PALSAR を森林減少・劣化による排出量把握に用いるときの精度など技術的な課題があることから、PALSAR を利用したリモートセンシング技術と地上計測技術を結びつけ、泥炭湿地林を含む熱帯林地の温室効果ガス排出量をモニタリングする新手法の開発に取り組んだ。

2. 研究目的

本研究は、PALSARを利用して熱帯林の減少・劣化の指標の検出と温室効果ガス排出量評価の技術を開発することを目的とする。バイオマスの喪失によるCO₂排出だけでなく、湿地林の開発等による泥炭からのCO₂やN₂O等の排出も森林劣化の重要な過程と考えられることから、通常は冠水することのない一般の熱帯林地とともに、熱帯湿地林を対象に研究を行なう。このため、バイオマスの非破壊推定法に関するこれまでの知見をレビューし、PALSARデータの利用に適したバイオマス推定手法を選ぶ。また、熱帯林の劣化に伴う炭素吸収量・排出量を評価するうえで土壌、リター、枯死木も無視できない炭素プールであり、バイオマスとともに森林生態系全体の炭素蓄積量を森林タイプごとに把握する必要があることから、カンボジアを中心に土壌や枯死木のデータを収集して季節林の生態系炭素蓄積量(バイオマス、土壌、枯死有機物の合計)の広域マッピング手法の開発に取り組む。カウンターパートが経験の乏しい土壌・枯死有機物の調査作業についてはマニュアルを作成し、カウンターパートに指導する。また、熱帯林劣化にともなう温室効果ガスの排出量のモニタリングにおいて、データ収集を優先すべき重要な排出経路を明らかにするため、カンボジアの季節林とインドネシアの泥炭湿地林のテストサイトの森林について、劣化にともなうCO₂、N₂O、CH₄の林地面積当たりの発生可能量を推定する。

3. 研究方法

(1) 調査地の選定と現地調査

1) 乾性遷移系列

7ヶ月の乾季をもつカンボジアに乾性遷移系列のテストサイトを設けた。同国の面積の広い

森林タイプは常緑林(Evergreen forest)と落葉林(Deciduous forest) に大別され、それぞれ Tropical semi-evergreen rain forest、Tropical moist deciduous forest¹⁾に分類される。常緑林には *Dipterocarpus costatus* や *Irvingia malayana*、落葉林には *Dipterocarpus obtusifolius*、*Shorea siamensis* などが優占する。

コンポントム州の低地常緑林(北緯 12 度 40 分、東経 105 度 20 分を中心とする 50 km×50 km の範囲)に、リモートセンシングと連携したテストサイトを設定した。テストサイトの主要な森林は、常緑林(老齢段階 Old-growth stage、若齢段階 Young stage)と落葉林(成熟段階 Mature stage)である。林分成立段階 Stand initiation stage に当たる伐採跡地を含め、長期調査プロット(PSP: Permanent Sampling Plot, 30 m×40 m)を 20 個設置し、毎木調査等を行なった。後述するように、バイオマス推定は既存の汎用式を利用するが、推定誤差が大きい恐れがあることから、落葉林で大径木を含む 24 個体について地下部バイオマスを含む破壊調査を行い、個体バイオマスデータを追加した(本報告には間に合わなかったが、この追加データを使ってインドシナ地域の落葉林に適したバイオマス推定式を作り、バイオマス推定の精度を向上させることができる)。なお、テストサイト周辺の森林への人為攪乱として、農地転換、伐採、落葉林の火災が挙げられる。

2) 湿性遷移系列

インドネシアの泥炭湿地林のテストサイト(全面的に計画排水の影響を受けている)では平成 20 年度にリモートセンシングで土地被覆区分し、PSP を 20 個設けたが、大規模泥炭火災のためプロットやプロット追加予定地の約 3 分の 2 が平成 20 年 11 月までに類焼した。このため、11 月に補足調査を行って火災影響や枯死木データを収集し、火災が植生遷移や炭素貯留機能に及ぼす影響を分析した。また、類焼跡地を含め、平成 21 年度にプロットを再設定した。

このインドネシアの調査に加え、泥炭湿地林木のバイオマス推定式を開発するため、マレーシア国サラワク州の泥炭湿地林で破壊調査を実施し、15 個体を伐倒して 2 個体の根を秤量した。

(2) SAR指標を利用したバイオマス推定のためのバイオマスデータ整備

1) PSP によるバイオマス推定

PSP データを利用して、土地面積当たりのバイオマスをプロットごと、植生タイプごとに推定した。プロットごとの値は PALSAR の偏波値を利用した地上部バイオマス推定式の作成(サブテーマ 1)に利用した。また、植生タイプごとのバイオマス平均値は、リモートセンシングによる土地被覆区分の結果から求めた各植生タイプの土地面積とかけ合わせ、地域のバイオマス総量を推定するのに利用した。

本報告では、現地調査に加え、カンボジア森林局の全国 113PSP データを入手し、バイオマス推定精度の向上に活用した。まず、同国の森林を常緑林と落葉林の二つの植生タイプに階層分けし、各植生タイプにおけるプロットデータを調整した。各プロット内の樹木の胸高直径と容積密度を用いたアロメトリ式²⁾により単木バイオマスを推定し、それからプロットごとに単位面積あたりの値(Mg ha^{-1})に積算した。容積密度は、近隣諸国の同条件における種ごとあるいは似た種のグループごとの値を、また近隣諸国でのデータがない場合は国際的な種またはグループごとの値を用いた。PSP 法では、国家レベルのバイオマス推定に必要な各植生タイプのプロット数 n_i が推定でき、固定プロットが使用不能のときに新しいプロットを補充する場合、下式で表される³⁾。そ

ここでプロット数を増やしたときの n_i を比較した。

$$n_i = \left(\frac{t_\alpha}{E} \right)^2 \cdot \left[\sum_{h=1}^L \frac{N_h}{N} \cdot st_h \cdot \sqrt{C_h} \right] \cdot \left[\frac{N_i \cdot st_i}{N \cdot \sqrt{C_i}} \right] \quad (1)$$

E は推定量の許容誤差（バイオマス平均値の10%）、 t_α は信頼水準0.05におけるStudent's t-分布値（=1.98）、 L （=2）は階層数、 N_i は各植生タイプの面積（常緑林：3,668,902ha、落葉林：4,692,098ha）をプロット面積（0.2ha）で割った値（両者の合計が N ）、 st_i は各植生タイプのバイオマス平均値のSD、 C_i はプロット設定コスト（常緑林：800US\$、落葉林：700US\$）である。

2) 高さ法によるバイオマス推定

a 上層高とバイオマスの関係を表す汎用式

PALSAR のインターフェロメトリ機能を利用して森林高を推定できる（サブテーマ2）可能性があることから、森林高とバイオマスの関係を表す手法の開発に取り組んだ。熱帯、亜熱帯の高木や竹、低木が優占する植生について公表データ（インドネシア林業省 CDM 植林支援データベース、Murali and Bhat 2005⁴⁾、Kiyono *et al.* 2009⁵⁾）や未発表資料を整理し、分析に利用した。これらのバイオマス（地下部も含む）の値は破壊法による推定、胸高直径など地上毎木調査で得られる情報にもとづく推定など、さまざまな直接・間接的方法で得られている。植生の属性（生活形、気候条件、自然林・人工林の別など）によって適宜データを区分し、分析に供した。文献や資料によって上層高の定義はさまざまあり、最大樹高や平均樹高しか得られない場合もあった。そのような場合ここでは加工はせず、そのまま上層高と見なして解析を行った。

また、インドネシアのテストサイトでインターフェロメトリ機能による森林高計測の検証のため、22 プロットの群落高データを整備した。

b 樹高変化を用いた森林劣化による排出量推定の可能性

解析はパプア・ニューギニア・フィンシュハーフェンの熱帯雨林に設定した 1 ha 試験地（以下、PNG 試験地と略）にて取得されたデータ⁶⁾を用いた。また、鹿児島県伊佐市の大口試験地（0.44 ha）は、PNG 試験地同様に常緑広葉樹が優占する暖温帯林であり、かつ林分構造に関するデータが整備されていることから解析に用いた。各試験地とも 10 m 間隔のグリッドを設定しており、10 m × 10 m のサブ方形区ごとに毎木調査のデータ（根元位置、DBH および樹高）の整理を行い、さらにこれらサブ方形区を 4 つまとめたものを方形区として後述の解析の単位とした。方形区数は PNG 試験地で 25 個、大口試験地で 11 個である。樹高によるバイオマス推定の精度検証のために、各方形区の最大樹高と方形区内の胸高断面積合計（以下、BA と略）との関係を求めた。なお、BA はバイオマスを表す指標として用い、最大樹高は各サブ方形区で最も樹高の高い個体を平均した値として求めた（各方形区で $n = 4$ となる）。次に森林劣化に伴う排出量の推定精度検証のために伐採後の BA の減少量を排出量と見なし、樹高を用いた推定値と毎木調査による実測値の差を比較した。PNG 試験地では、商業伐採後の 1999 年 2 月に伐採に伴う樹木個体の生残状況が確認されており、この時点で伐採された個体だけではなく、伐採の際に巻き添えで枯死した個体も排出量

に加えた。一方、大口試験地では初期値（1989年の毎木データ）に対して、以下の仮想伐採シナリオに沿って伐採後の林分構造の変化を模擬計算した。

中度伐採シナリオ：4つのサブ方形区のうち、ランダムに選択した2つのサブ方形区から最大樹高の個体を1本ずつ伐採（伐採本数＝2本/1方形区）。

強度伐採シナリオ：各サブ方形区の最大樹高の個体を1本ずつ伐採（伐採本数＝4本/1方形区）。大口試験地では上記シナリオ上で仮想伐採した個体のみを排出量とした。

（3）熱帯季節林を対象とした生態系炭素蓄積量のマッピング

1) 土壌・枯死有機物のデータ収集

熱帯季節林生態系において、土壌・枯死有機物の炭素プールはSAR指標による直接推定が困難であり、バイオマス炭素と別に推定する必要がある。生態系炭素蓄積マッピング手法構築に必要な土壌・枯死有機物の炭素蓄積データを文献調査とカンボジア現地調査により収集した。またカンボジアの土壌・枯死有機物調査マニュアル（英文）を日本の森林土壌炭素インベントリマニュアルをもとに作成し、カンボジア森林局と環境省から2名のカウンターパートを日本に招聘して手法を指導した。現地調査ではカウンターパートと共に森林局管轄の生産林（コンポントム州、20サイト）および環境省管轄の保護林（全国、12サイト）および民間企業管轄のゴム林（コンポントム州、6サイト）において土壌・枯死有機物のサンプリングを行い、試料を日本で分析した。

2) 生態系炭素蓄積量のマッピング

H20-21年度のSAR指標調査およびPSP調査の結果から、熱帯季節林を常緑・落葉で区分することがバイオマス炭素の推定向上に寄与することが明らかになったため、H22年度は土壌・枯死有機物炭素データを用い、常緑・落葉区分に着目した土壌炭素の推定手法を構築した。

（4）熱帯林のモニタリングと温室効果ガスの排出量評価

1) 森林のモニタリング手法とPALSARにより計測可能な森林変化

排出量評価には土地利用ごとの土地面積と単位面積当たりの排出量のデータを利用する。熱帯林の劣化を広域でモニタリングするにはリモートセンシングと地上計測技術の組み合わせが必須であることから、複数の手法について技術的難易やコスト、精度を分析して利用可能な方法を示した。また、他のサブテーマの成果も合わせ、PALSARにより計測可能な森林の変化を明らかにした。

2) 劣化林から排出される温室効果ガスの重要な排出経路

森林から発生する主要な温室効果ガスは CO_2 、 N_2O 、 CH_4 の三つである。森林減少・劣化に由来する主要な温室効果ガスとは、具体的にはこれらのガスを指す。 CO_2 はおもに植物や落葉、土壌中の炭素が分解したり、燃焼したりすることにより発生する。また、森林火災が起こると N_2O や CH_4 が発生する。 N_2O は土壌有機物の分解時に発生する。このように温室効果ガスの種類や発生様式は複数あり、また、ガスの発生は土地利用やその変化により異なるので、地球温暖化影響の大きい排出経路を優先して計測することが大切である。IPCC（2003）⁷⁾の手法を参考にバイオマス、枯死木、リター、土壌を細区分し、伐採と火災、泥炭湿地林では排水影響も考慮して CO_2 、 N_2O 、 CH_4 の

林地面積当たりの発生可能量を主要森林タイプごとに見積もり、サブテーマ 1 で求めた土地被覆区分ごとの土地面積を考慮して、温室効果ガスの総排出量への影響の大きい排出経路（サブカテゴリ）を求めた。また、手法全体の精度を評価した。

なお、この見積もりにおいては文献やプロジェクトのデータ（地上部バイオマス、下層植生、枯死有機物、土壌、泥炭の無機化にともなう $\text{CO}_2 \cdot \text{N}_2\text{O}$ フラックス、火事による泥炭焼失深など）を可能な限り利用し、利用できない場合は IPCC（2003）のデフォルト値を使用した。 N_2O と CH_4 は地球温暖化係数を用いて CO_2 量に換算した。試算期間は 10 年とし、火災頻度はカンボジアでは落葉林で毎年、インドネシアの泥炭湿地林では 5 年に 1 回とし、1 回の類焼面積割合は高木林 10%、低木林 70% とした。伐採と火災によりカンボジアの落葉林では地上部バイオマスと深さ 0.3m までの土壌の炭素が失われること、インドネシアの泥炭湿地林では火災によりバイオマスの一定割合が失われることを仮定した。

4. 結果・考察

（1）SAR 指標を利用したバイオマス推定のためのバイオマスデータ整備

1) PSP 法によるバイオマス推定

a 乾性遷移系列

カンボジア環境省のモニタリングプロットなどのデータのうち、二次林や湿地林など常緑林・落葉林の区別がつかなかったプロットを除き、H20 年度までに常緑林では 32 プロット、落葉林では 20 プロットのデータを収集できた。H20 年度は、これらのデータを用いて各植生タイプのバイオマスを推定した結果、平均値（±標準偏差）は、常緑林：401.7（±205.5） Mg ha^{-1} 、落葉林：213.4（±86.9） Mg ha^{-1} となり、常緑林が落葉林の約 1.9 倍の値であった。また、このときの標準偏差をもとに推定した信頼しうるバイオマス推定のために必要なプロット数は、常緑林で 43 プロット、落葉林で 25 プロットであった。H20 年度までに収集したデータにさらに 16 プロット（常緑林 11 プロット、落葉林 5 プロット）を追加することで、国家レベルのバイオマスを比較的信頼しうる精度で推定できることが示された。このように比較的省力で国家レベルの推定ができ、PSP 法はバイオマス推定の有効な手法の一つであるといえる。ただ、信頼しうる推定にはプロット配置も影響する。H20 年度までに収集したプロットの配置には地域的偏りがみられるため、H21 年度の解析では、20 年度までに収集できた 52 プロットに、カンボジア環境省・森林局などのデータを加え、計 155 プロット（常緑林 117、落葉林 38）のデータを収集し、同様の解析をおこなった。各植生タイプのバイオマス平均値（±標準偏差）は、常緑林 280.0（±179.0） Mg ha^{-1} 、落葉林 149.0（±99.9） Mg ha^{-1} で、カンボジア全域では常緑林：10 億 Mg、落葉林：7 億 Mg と推定された。このときの標準偏差をもとに推定した信頼しうるバイオマス推定のために必要なプロット数は、常緑林 66 プロット、落葉林 50 プロットで、常緑林については必要数の 1.8 倍と十分なデータ数が得られている。一方、落葉林に関しては、昨年度 20 プロットのデータから必要数 25 と推定されたが、プロット数を 38 まで増やして再計算したところ、必要数は 50 と増加した。式 (1) ではプロット間のばらつきが増大すれば必要数も増加する構造になっており、今年度の落葉林の必要数の増加はプロット間のばらつきの増大に起因する。また、推定式の構造には反映されないが、信頼しうる推定には地域的偏りのないプロット配置も重要である。落葉林において、調査したプロット数を増やした結果、ばらつきが増大し必要数が増加したという結果は、地域的な

偏りが十分是正されていないことを示唆する。なお、式(1)から逆算すると、現在のプロット数で国レベルのバイオマス量を推定する場合の誤差範囲(11.6%)を推定できる。必要プロット数は、各植生タイプのバイオマス平均値の標準偏差 sti の値によって大きく変動することから、階層内のばらつきを小さくすることが出来ればより省力的な推定が可能となる。本報告では暫定的に常緑林と落葉林のふたつの階層に区分けしたが、将来的には PALSAR から入手可能な情報をもとにした適切な階層化により、階層内のばらつきを抑え、より省力的あるいは高精度な推定が出来るものと期待される。

H22年度は、現在あるデータでのバイオマス推定の精度の向上を目指し、データの精査と、材積密度の属レベルへの細分化を図った。その結果、1998年のカンボジア全域の森林バイオマスは、常緑林 11 億 Mg、落葉林 5.1 億 Mg と推定された。この推定値は、容積密度の見直し以前の推定値より、常緑林で約 1 億 Mg、落葉林で約 1.9 億 Mg 多い。バイオマス推定をおこなううえで係数として用いる材積密度は、樹種によって大きく異なる。このことから適切な材積密度を使用することで、より精度の高い推定が可能であると考えられる。

森林劣化を理解する上で、バイオマスの推移を明らかにすることは重要である。そこでカンボジア林業局によって 1998 年と 2000 年に調査された PSP プロットのデータを用いて、常緑林と落葉林のバイオマスの推移を明らかにした。1998 年のバイオマス推定と同様の方法で 2000 年もバイオマス推定をおこなったところ、常緑林で 12 億 Mg (増加率 3.1%)、落葉林で 5.2 億 Mg (同 1.8%) と推定され、2 年間でカンボジアの森林バイオマスが増加していることを示した。1998 年と 2000 年の標準偏差を用いて、信頼しうるバイオマス推定のために必要なプロット数を算出したところ、常緑林 46-50 プロット、落葉林 21 プロットであった。常緑林については、これまでの解析結果と同様に十分なプロット数が確保されている。落葉林については、上記のデータの精査を追加することによって、必要追加プロット数は 6 か所であることが示された。この不足分の補完については、これまでの解析で指摘したように地域のばらつきを考慮してプロットを設置することが望ましい。

現在、熱帯林のバイオマス推定のための相対成長式がいくつか発表されている。それらの式の多くは、世界中の熱帯地域から得られたバイオマスの実測値を基にしている。しかし樹形は地域や森林タイプによって異なることから、タイ⁸⁾とカンボジア⁹⁾の常緑樹と落葉樹の実測値データを用いて、インドシナ地域への適用を検証した。その結果、落葉樹では推定誤差が大きいことと、大径木の実測値データが不足していることが明らかになった¹⁰⁾。先述の通り、H22年度にカンボジアの落葉林で大径木を含む 24 個体の破壊調査を実施済みで、このデータを利用してインドシナ地域の乾性遷移系列の落葉林に適したバイオマス推定式を作ることが可能である。

b 湿性遷移系列

テストサイトの森林は地上部バイオマス (Mg ha^{-1}) の違いにより、高(約 200)、中(約 50)、低(10 以下)バイオマス林に分けられ、低バイオマス林は枯死木の多寡で 2 つに細分できる(20 年度報告書)。高バイオマス林は択伐影響があり、火災に遭っていない。中バイオマス林は 1997 年前後に起きた火災後の再生二次林である。低バイオマス林 1 は 2002 年前後の火災後再生低木で枯死木を殆ど欠く。低バイオマス林 2 は 2006 年前後の火災後再生低木林で、立ち枯れ木と大量の倒木がある。21 年度調査により、高バイオマス林は一次林樹種で構成されていること、中・低バ

イオマス林には耐火性種や外来の *Acacia* 属の種が多いことが分かった。ただし、低バイオマス林 2 には一次林樹種も少なくない。低バイオマス林は林床にシダと低木の *Ficus* 属の 1 種が多かった。中・低バイオマス林における一次林樹種の脱落、耐火性樹種や高温が発芽促進する *Acacia* 属の種の個体数の多さは、火災に対する植物の適応の結果と考えられる。そのため低バイオマス林 2 で一次林樹種が少なくないのは、この林が高バイオマス林の状態から火災に遭って間もないことを、低バイオマス林 1 は繰り返し火災に遭っている植生であることを示唆する。中バイオマス林の遷移の方向は高バイオマス林にあるが、現在の高バイオマス林と同じ機能をもつ森林にはならない可能性が高い。排水された泥炭湿地林の火災影響には、①木が倒れ、材の分解・燃焼が進む②一次林種が減り、耐火性種や外来樹種が増加する③立地や種組成の変化により遷移が偏向するといった段階がある。その間に、炭素・水循環や生物多様性への不可逆的な影響が起きており、ミスマネジメントと、その後に発生する火事は泥炭湿地林の永続的劣化をもたらしている。

2) 高さ法によるバイオマス推定

a 上層高とバイオマスの関係を表す汎用式

解析に供したデータによる上層木の高さとバイオマス（地下部も含む）の関係は、高木が優占する多雨林と季節林の間で特段の傾向の違いは認められなかった（図 1）。同様に常緑林と落葉林の間でも明らかな違いは認められないことが Murali and Bhat (2005)⁴⁾により示されている。また、早生樹か非早生樹か、あるいは自然林か人工林かといった区分間でも明らかな違いはなかった。これら解析に用いたデータを見る限り、高木林については一つの式を当てはめても良いようである。一方、竹林は季節林のデータしかないが群落高 20 m 近くに発達した竹林は、高木林と比べてバイオマスが少なかった。また、低木群落は群落高の割にバイオマスが大きかった。このように高木種と竹、低木種といった優占種の生活形によっては群落高とバイオマスの関係が異なった。図 1 中の全データを用いて汎用式を作成すると次式が得られる。

$$\text{Biomass} = 9.2967 \times \text{Community height} \quad (n = 103, r^2 = 0.8353, P < 0.001)$$

ただし、Biomass: バイオマス (Mg ha⁻¹)、Community height: 上層高 (m)

上記式を群落バイオマス推定の簡易モデルとして用いたとき、残差（推定値－実測値の差）は過半のケースで±30%以内、7割強で±50%以内に収まると考えられる。また、竹林では最大 100Mg ha⁻¹ 程度の過大推定、低木群落では最大 60 Mg ha⁻¹ 程度の過少推定となる可能性がある。したがって、優占種の生活形が既知の場合は、バイオマス推定に際し優占種の生活形の違いを考慮することが精度向上にむすびつくであろう。一方で竹林や低木群落など優占種の生活形が高木とは異なる群落に適用する場合は、推定誤差が大きくなる可能性があるので注意が必要である。

なお、インドネシアのテストサイトの森林高は約 20 m と推定された。

b 樹高変化を用いた森林劣化による排出量推定の可能性

伐採などの攪乱による森林劣化に伴う排出量推定に樹高変化を用いた際の推定精度を検証すべく、PNG および大口試験地で最大樹高と BA の関係を個別にそれぞれ求めた。両試験地共に伐採前に計測された最大樹高 (Hmax) と BA の関係は下記のべき乗式で近似できた（図 2）。

$$\text{PNG 試験地} : \text{BA} = 0.0029 \times \text{Hmax}^{2.0956} \quad (n = 25, r^2 = 0.1941)$$

$$\text{大口試験地} : \text{BA} = 0.0010 \times \text{Hmax}^{1.9658} \quad (n = 11, r^2 = 0.2512)$$

毎木調査データから求めた BA 実測値による排出量を基準にして、関係式から推定した排出量との残差を見ると、その値は-100%~156%の範囲を示した。中央値は-42%（平均値は-33%）ほどであり、過小推定となる場合が全体の約8割を占めていた（図3）。また、伐採強度の違いによる残差を大口試験地の伐採シナリオ間で比較すると、いずれの場合も過小推定となる傾向に変わりなく、残差の幅も明瞭な差は認められなかった。樹高変化を用いた推定に誤差が生じる要因のひとつとして、立木密度や樹木個体の形状の違いなどが考えられる。たとえば樹高の割には DBH が大きな個体が多い場合には、高さの変化による排出量推定はより過小評価になりやすいと考えられる。また、木材利用の面からの不嗜好木が最大樹高を占める場合、その下に位置する樹種が選択的に伐採されるため、劣化による排出量の検出が困難となり、不確実性が増すことも考えられる。これらの問題点を解消するためには、関係式から求めた推定値の過小推定を補正する係数を乗じるなどの方策が必要であり、そのためには林分構造データが整った林分での解析事例を増やす必要がある。

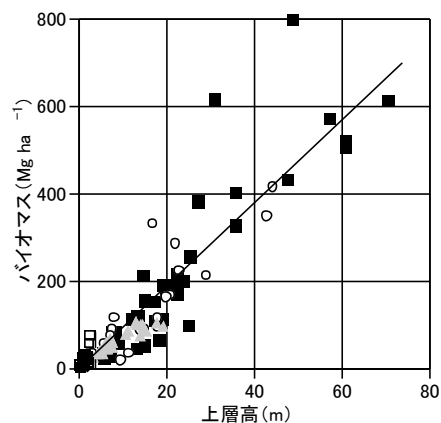


図1 上層高とバイオマスの関係

回帰直線は汎用式を示す。■：高木種が優占する雨林（人工林を含む）；○：高木種が優占する季節林（人工林を含む）；▲：竹が優占する季節林；□：低木群落

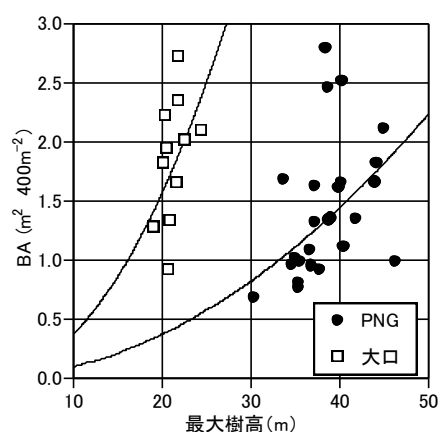


図2 樹高とBAとの関係

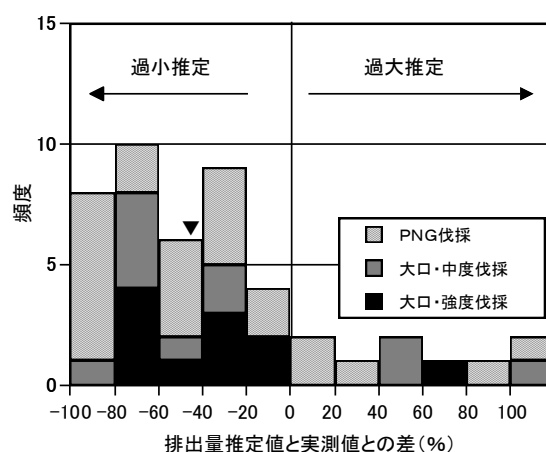


図3 PNGおよび大口試験地の樹高変化からの求めた排出量推定値と排出量実測値との差の頻度分布
マイナスの値は実測値よりも推定値が過小であったことを示す。▼印は中央値を示す。

(2) 季節林を対象とした生態系炭素蓄積量のマッピング

1) カンボジアの土壌・枯死有機物のデータ収集

常緑林は落葉林と比べ土壌炭素蓄積量が大きい傾向が明らかとなった。森林局管轄林の既存の土壌断面データの平均値では、深さ0-30 cmでは常緑林と落葉林でそれぞれ 56.9、34.9 MgC ha⁻¹ (n=9)であった(表1)。現地調査から得られた環境省プロットも同様に、常緑林と落葉林の平均値がそれぞれ53、35 MgC ha⁻¹ (n=6)となり常緑林で大きかった。また同じ森林タイプ内でも、地質間差が極めて大きいことが明らかとなり(表1)、生態系炭素マッピングの分類指標として検討された。環境省プロットの保護林リター量の平均は4.2 Mg ha⁻¹、T(落枝)とL、F(落葉)の平均はそれぞれ2.1、2.1 Mg ha⁻¹であった。一方、ゴム林4林分のリター量は0.4-3.5 Mg ha⁻¹の範囲にあり、平均値は2.0 Mg ha⁻¹であった。したがってゴム林のリター量は天然林より少なく、特に2年生林分で少なかった。ゴム林のT、L、Fの値から、1年目の森林伐開で供給されたリターが2年目で殆ど分解し、6年目ではゴムの落葉、9年目ではゴムの落枝が供給されていると考えられた。深さ0-30cmの土壌炭素蓄積量は6年生林分が低いほかは、林齢の増加にともなう特段の傾向は見られなかった(表2)。

表1 熱帯季節林下における森林タイプ
および地質別の土壌炭素蓄積量

Forest Type	Geology	n	Soil Carbon Stock (MgC ha ⁻¹)			
			0-30cm		0-100cm	
Evergreen	Basalt	5	71.1	(32.7)	131.0	(57.3)
	Sedimentary rock	4	39.2	(15.3)	80.8	(35.3)
	Mean	9	56.9	(30.1)	108.7	(53.0)
Deciduous	Basalt	3	57.6	(29.8)	79.0	(41.1)
	Sedimentary rock	6	23.6	(7.9)	40.2	(14.2)
	Mean	9	34.9	(23.5)	53.2	(30.4)

表2 ゴム林の土壌炭素蓄積量

Age	Soil Carbon Stock (MgC ha ⁻¹)			
	0-5 cm	5-15 cm	15-30 cm	Sum
1	8.4 (2.8)	17.0 (6.5)	20.2 (7.0)	45.6 (7.0)
2	8.9 (2.0)	18.6 (5.7)	20.9 (6.2)	48.4 (13.4)
6	7.2 (1.3)	12.5 (2.8)	14.7 (7.8)	34.3 (11.4)
9	8.5 (2.8)	16.5 (3.2)	20.1 (14.0)	45.1 (16.3)

()内はSD

()内はSD

2) 生態系炭素蓄積量のマッピング

森林の常緑・落葉タイプは、劣化する以前の天然林の常緑・落葉区分をランドサットで判読可能で、ランドサットデータにより作成された既存の植生図も利用できる。地質タイプは既存のデジタル地質図を使用する。土地利用変化は、上記の天然林の伐採・プランテーション化等の変化をPALSARによりモニタリングし、求められる期間(例えば1年)ごとにオブジェクトを区分する。図4に、上記の手法にもとづいたカンボジア国の生態系炭素量マップの作成例を示した。図中の生態系炭素蓄積量は本課題の研究成果にもとづくが、将来的にカンボジア森林局・環境省が独自にデータ改訂を行うことにより、より高い精度でマッピングすることが可能である。

表3 森林からの人為排出量を計測する非破壊的手法の長短 (Kiyono *et al.* 2011b¹¹⁾ に加筆)

目的変数	方法		要件	コスト	広域データ取得	技術的困難	人為活動の種類と方法の適用可能性						住民参加による評価精度向上の期待
							農地転換	焼畑短休	択伐	燃料採取	火災	植林	
森林面積	土地被覆分類		中解像度以上の衛星光学センサ	中	易	・雲があると使えない	限定的に可能	限定的に可能	ある程度可能	ある程度可能	限定的に可能	限定的に可能	小
			Lバンド以上の衛星SAR	中	易	・急傾斜地に適用できない	限定的に可能	限定的に可能	?	?	限定的に可能	限定的に可能	小
			航空機LiDAR・空中写真	高	中	・特になし	可能	可能	ある程度可能	ある程度可能	可能	可能	小
単位面積当たりの炭素蓄積量・OHGフ ラックス	増加量-損失量法	成長・持出し速度	地上計測	?	難	・手法が未確立	?	?	?	?	?	?	大
	蓄積変化法	後方散乱係数	Lバンド以上のSAR	低	中	・急傾斜地に適用できない ・高バイオマスに適用できない	限定的に可能	限定的に可能	不可能	不可能	不可能	?	小
		上層高	多偏波SAR	高	中	・手法が未確立 ・データを利用できる地域が限られる	?	?	?	不可能	?	?	小
			航空機LiDAR	高	難	・特になし	可能	可能	可能	不可能	可能	可能	小
			衛星立体視センサ	中	易	・雲があると使えない ・手法が未確立	?	?	?	不可能	?	?	小
			地上計測	?	難	・手法が未確立	可能	可能	可能	不可能	可能	可能	大
		樹冠径	高解像度衛星センサ、空中写真	高	中	・雲があると使えない ・樹冠判別の難しい林がある	限定的に可能	不可能	限定的に可能	不可能	不可能	不可能	小
		群落齢	中解像度以上の衛星センサ	中	易	・裸地ステージを持つ循環土地利用に適用	不可能	可能	不可能	不可能	不可能	可能	小
		長期調査プロット	地上計測	高	難	・プロットの代表性、秘密性に限界がある	可能	可能	可能	可能	可能	可能	大
	湿地林以外の森林(dry land forest)に適用する。												

(3) 熱帯林のモニタリングと温室効果ガスの排出量評価

1) 森林のモニタリング手法と PALSAR により計測可能な森林変化

森林の劣化にともなう人為的排出量を非破壊的に計測する手法の選択肢は限られかつ不十分ではあるが、複数あるので、対象とする国や地域の条件（気候、森林の種類、森林減少や劣化のドライバ、利用可能な資源など）に適った計測方法を、利用可能な技術や精度・コストのかねあいを選ぶことができる（表3）。

単位面積当たりの排出量を評価する方法には成長量-損失量法と蓄積変化法がある。前者は、成長による吸収量と伐採など攪乱による損失量との差を吸排出量とするもので、林地生産力や伐採量・森林火災などのデータを必要とする。しかし、違法伐採などによる森林劣化では伐採量の把握は難しい。このため、炭素蓄積量の変化を吸排出量と捉える蓄積変化法が適切と考え、複数の手法について技術的難易やコスト、精度においてどのレベルのものであるのかを比較して利用可能な方法を示した。

まず、森林タイプ・土地利用タイプをリモートセンシングなどで区分し、各区分の森林面積を把握する。つぎに、各タイプの単位面積当たり炭素蓄積量をいずれかで推定する。そして、両者を乗じてタイプ別の炭素蓄積量を把握して合計する。これを、時間をおいて繰り返し、炭素蓄積量の差分から吸排出量を推定する。さらに、計測を繰り返すことでトレンドを把握できる。

森林の区分や面積の計測は、中解像度以上のリモートセンシングセンサを用いて実施できる。ただし、光学センサ（太陽光の反射を計測して地上の状態を知る方法。一般のカメラなどと同じ原理）は一年を通して雲が多い熱帯雨林などでは利用可能な時が非常に限定されている。また、

合成開口レーダ（上空からマイクロ波を発生し、地上からの反射を計測して地上の状態を知る方法）も急斜面にある森林には使えないため、複数の方法を組み合わせ、弱点を補い合う工夫が必要である。それでも不足の場合は、航空機計測が必要になる。

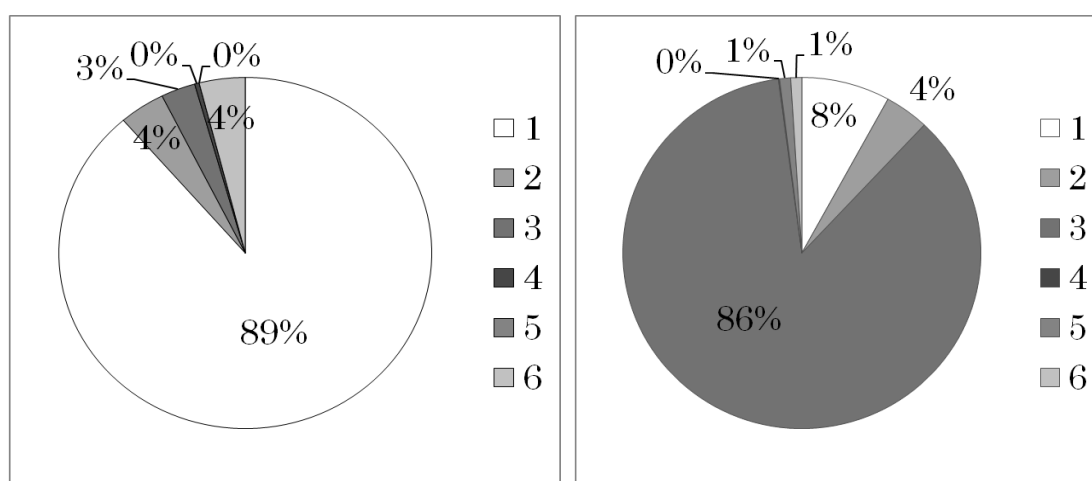
単位面積当たりの炭素蓄積量のモニタリングは、森林タイプや森林減少・劣化の原因によって適切な手法が異なってくる。すなわち、抜き伐りが行われる大木林に対しては、一つ一つの樹冠を判読できる高解像度のリモートセンサを用い、樹冠をモニタリングすることによって炭素蓄積量の変化を把握できる。焼畑が盛んな地域では、休閑地に成立した二次林に対して、中解像度以上のセンサで焼畑の土地とサイクルを把握し、休閑年数（収穫後の年数）をパラメータにして炭素蓄積量を推定できる（例えば、Inoue *et al.* 2010¹²⁾）。この他、条件は限られるが、合成開口レーダの後方散乱係数や群落高、固定調査プロットの毎木調査データも炭素蓄積量の推定に利用できる。樹冠径のアプローチは航空機や高解像度衛星センサの利用が必須で、コストがかさむ難点がある。また、光学センサのため、雲があると使えない。この方法は対象とする森林の状態によって成績が異なり、個々の樹冠を判別しやすい大径木林や疎林に適している。一方で竹林や若い二次林ではこの方法の適用は難しく、したがって、この方法は焼畑休閑林には向かない。林冠下で行われる燃材採取などによるバイオマス減少もこの方法では検出できない。群落齢を用いるアプローチは、焼畑や人工林造成など、群落の成立初期に裸地化する時期を持つ土地利用システムで有効である。中解像度以上のセンサを用いて裸地の発生時期と場所をモニタリングすることにより、群落齢と群落の炭素蓄積量の関係式を利用して炭素蓄積量変化を推定できる。こうした場所では土地利用は住民によってコントロールされており、変化の予測が比較的し易く、地上データ取得のためのアクセスも比較的良い。しかし、年1回以上のモニタリングが必要で、リモートセンシングによる裸地検出の失敗は炭素推定の精度を下げる。手法の実施コストは中程度である。固定調査プロットを用いるアプローチは様々な森林タイプおよび森林減少・劣化形態に適用可能な汎用的手法である。系統的に設置された多数の固定調査プロットを利用することで精度の高い森林減少・劣化のモニタリングが可能となる。農地転換や択伐といった全ての事象に対して、他の手法よりも幅広く適応できる。しかし設置が系統的でない場合は、プロットの代表性に難が出る。また、プロットの設置の仕方によっては、シークレット性に難が出る（プロットの存在が知られる結果、林産物が採取されてなくなる、調査が妨害されるなど、プロット内の森林の生育が周囲と異なるものになる場合がある。プロットの存在が知られていないことが望ましい）。プロットの設置やモニタリングのアクセスの経費が高価になる場合は、広域を対象とすることが難しくなる。適切な簡素化手法の開発と訓練された住民のモニタリングへの参加は、この手法によるモニタリング精度の向上とコストの削減を可能にするであろう。

以上をふまえて、森林からの温室効果ガス吸排出量をモニタリングする手法として、現時点で最も現実的と考えられるのは、中解像度のセンサによるリモートセンシングと固定調査プロットデータにもとづく蓄積変化法である。そして、雲の多い熱帯林では、PALSAR の利用が欠かせない。サブテーマ1～3bの成果を合わせ、PALSARにより計測可能な変化と不可能な変化を示した（図6）。PALSARのHH、HV偏波を利用して、中程度以下の地上部バイオマスの把握が可能である（サブテーマ1）。この方法はバイオマスが大きい森林には適用できない。また、PALSARのインターフェロメトリ機能を利用した森林高計測は、うまく行かない場合が多く（サブテーマ2）、高バイオマス林の計測にはまだ使えない。土壌炭素については先に述べた通り、地質図や森林タイプな

表4 森林劣化による温室効果ガスの排出量可能量 (Kiyono *et al.* 2011b¹¹⁾)

(上：乾性遷移系列の季節林、下：排水された泥炭湿地林)

Subcategory	Estimates with the project data (Mg-CO ₂ ha ⁻¹ 10 y ⁻¹)	Importance
Dry land forest in the test-site in Cambodia		
Biomass (aboveground and belowground)	377 (108-517)	89%
CO ₂ Deadwood, litter	16 (0-19)	4%
SOM	13 (5-22)	3%
N ₂ O Fire	2 (0.3-3)	0.4%
SOM mineralization	0	0%
CH ₄ Fire	17 (3-31)	4%
Total	425 (116-592)	100%
Drained peat swamp forest in the test-site in Indonesia		
Biomass (aboveground and belowground)	60 (39-83)	8%
CO ₂ Deadwood, litter	37 (29-43)	4%
SOM	762	86%
N ₂ O Fire	1 (1-1)	0.1%
SOM mineralization	9 (0-37)	1%
CH ₄ Fire	9 (7-11)	1%
Total	878 (838-937)	100%

図7 森林劣化による温室効果ガスの排出可能量の割合 (Kiyono *et al.* 2011 b¹¹⁾)

(左：乾性遷移系列の季節林、右：排水された泥炭湿地林)

1: バイオマスからのCO₂排出、2: 枯死木からのCO₂排出、3: 土壌有機物からのCO₂排出、4: バイオマス燃焼によるN₂O排出、5: 土壌有機物の無機化によるN₂O排出、6: バイオマス燃焼によるCH₄排出

なお、温室効果ガスの主要な出所は、森林タイプによって異なるだけでなく、人為攪乱の種類や森林劣化の段階によっても異なると考えられる。対象地域の森林減少・劣化のドライバを把握し、多様な条件に沿ってデータを収集する必要がある。

なお、表4のデータに未発表データを加え、テストサイトの地上計測における排出量評価の標準誤差を求めたところ、乾性遷移系列の季節林では7%、排水された泥炭湿地林では47%であった。後者では泥炭からの排出量が多いことから、泥炭の炭素蓄積量データの充実が全体の誤差（推定の不確実性）の軽減に有益である。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

熱帯季節林と排水された泥炭湿地林の劣化にともなう温室効果ガスの排出可能量を推定し、劣化が進む乾性遷移系列の熱帯林ではバイオマスからのCO₂排出、排水された泥炭湿地林では泥炭からのCO₂排出が最も影響の大きい温室効果ガスの排出形態であり、森林劣化にともなう排出量増加の推定値の精度向上のためには、これらのデータを優先的に取得すべきであることを明らかにした。熱帯湿地泥炭の無機化によるN₂O排出量はIPCCのデフォルト値も仮値の状態であり、計測値にもとづいて総排出量ポテンシャルに占める割合を示したことに意義がある。また、熱帯林の劣化過程を広域でモニタリングするにはリモートセンシングと地上計測技術の組み合わせが必須で、雲の多い熱帯を対象に森林劣化による温室効果ガス排出量をモニタリングするには、PALSARで森林面積を計測し、影響の大きい排出を、PALSARだけでなく、地上計測を併用して把握するのが現実的であることを示した。これらは、森林のインベントリ情報が限られている途上国において、広域の森林を対象に、温室効果ガス排出量の信頼できるデータを効率的に収集するときの科学的な判断材料として役立つ。

（2）環境政策への貢献

本課題はPALSARによる熱帯林観測の利用・実用化の道を開いた。PALSARによる計測を含め、リモートセンシングと地上調査を組み合わせる森林の炭素蓄積量をモニタリングする諸手法の長短を明らかにした成果情報は、環境省の情報交換会やUNFCCC事務局に提供され、林野庁の国際セミナーや国内外の研究集会で公表され、学術誌でも公表されてREDDを始めとする熱帯林減少・劣化の国内外の議論に貢献している。また、推定式や係数の一部はIPCCの排出係数データベースに収録され、林野庁やJICAの海外技術協力事業で活用されている。リモートセンシングと地上調査を組み合わせる森林の炭素蓄積量をモニタリングする手法をカンボジア国に適用した成果は、同国が作成したREDDプラスロードマップで利用され、同国の政策に貢献している。

6. 引用文献

- 1) Forestry Administration : Forestry Administration, Phnom Penh, (2010)
“Forestry statistics of Cambodia 2009”
- 2) Y. Kiyono, S. Saito, T. Takahashi, J. Toriyama, Y. Awaya, Y. Asai, N. Furuya, Y. Ochiai, Y. Inoue, T. Sato, C. Sophal, P. Sam, B. Tith, E. Ito, Siregar C. A, and M. Matsumoto : JARQ 45, 2, 233-242 (2011a)

“Practicalities of non-destructive methodologies in monitoring anthropogenic greenhouse gas emissions from tropical forests under the influence of human intervention”

3) CDM Executive Board2008 : UNFCCCホームページ、CDM Governance :

http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/CDM_AMSPQJQCRZJJIIIM93FVKV5CM89NXS,JN5A

” CDM-Executive Board AR-AMS0004/version01.”

4) KS. Murali, DM. Bhat : Governance and Ecology, 4, 1, 81-92 (2005)

“Biomass estimation equations for tropical deciduous and evergreen forests. Int. J. Agricultural Resources”

5) Y. Kiyono, S. Saito, T. Sato, T. Takahashi and Y. Awaya : Kanto Journal of Forestry, 60, 151-154 (2009) [In Japanese]

“Issues in estimating chronosequential changes in carbon stock of forest through overstory height”

6) H. Abe, N. Sam, M. Niangu, K. Damas, P. Vatnabar, Y. Matsuura, and Y. Kiyono: PNG FRI Bulletin 17, 1-79 (2000)

“Preliminary results of the study on the effect of logging at Mongi-Busiga, Finschhafen, Papua New Guinea”

7) IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme : Technical Support Unit IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Hayama, 2003

“Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change, and Forestry”.

8) 荻野和彦、D. Ratanawongs、堤利夫、四手井綱夫 : 東南アジア研究、5, 1, 121-154 (1967)

「タイ国森林の第一次生産力」

9) K. Hozumi, K. Yoda, S. Kokawa, and T. Kira : Nature and Life in SE Asia, 6, 1-56 (1969)

“Production ecology of tropical rain forests in southwestern Cambodia I. Plant biomass”

10) Y. Monda, S. Saito, J. Toriyama, T. Takahashi, T. Sato, Y. Kiyono, and T. Sum : Kanto Journal of Forestry, 62, 163-166 (2011)

“Validation of allometric equations used for estimating aboveground biomass in Indochina”

11) Y. Kiyono, S. Saito, T. Takahashi, K. Hirai, H. Saito, T. Sato, J. Toriyama, Y. Monda, Y. Awaya, M. Shimada, T. Inoue, R. Hatano, C. Sophal, V. Samreth, T. Sum, M. Kanzaki, Limin I SH, and I Nengah SJ : Kanto Journal of Forestry, 62, 167-170 (2011b)

“Important subcategory of greenhouse gas emissions from degraded forestland: CO2 emissions from biomass in a seasonal forest in Cambodia and soil organic matter in a peat swamp forest in Indonesia”

12) Y. Inoue, Y. Kiyono, H. Asai, Y. Ochiai, J. Qi, A. Oliosio, T. Shiraiwa, T. Horie, K. Saito and L. Dounagsavanh : International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 12, 4, 287-297 (2010)

“Assessing land-use and carbon stock in slash-and-burn ecosystems in tropical mountain of Laos based on time-series satellite images”

7. 国際共同研究等の状況

森林総合研究所はカンボジア森林局、環境省、インドネシアのボゴール農科大学、林業省研究所とそれぞれに共同研究の覚書を締結しており、それらのもとに本研究を実施した。また、サラワク州政府とも研究協力を行った。21年度にボゴール農科大学と国際ワークショップを共催、22年度は同大とJICA（国際協力機構）、CIFOR（国際林業研究センター）と国際シンポジウムを共催した。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上发表

＜論文（査読あり）＞

1) M. Takahashi, S. Ishizuka, S. Ugawa, Y. Sakai, H. Sakai, K. Ono, S. Hashimoto, Y. Matsuura, and K. Morisada : Soil Sci Plant Nutr, 56, 19-30 (2010)

“Carbon stock in litter, deadwood and soil in Japan’s forest sector and its comparison with carbon stock in agricultural soils”

2) Y. Kiyono, S. Saito, T. Takahashi, J. Toriyama, Y. Awaya, H. Asai, N. Furuya, Y. Ochiai, Y. Inoue, T. Sato, C. Sophal, P. Sam, B. Tith, E. Ito, C. A. Siregar, and M. Matsumoto : JARQ, 45, 2, 233-242 (2011)

“Practicalities of non-destructive methodologies in monitoring anthropogenic greenhouse gas emissions from tropical forests under the influence of human intervention”

3) J. Toriyama, S. Ohta, Y. Ohnuki, M. Araki, M. Kanzaki, S. Det, S. Lim, S. Pol and P. Pith : Pedologist, 54, 2-10 (2010)

“Physicochemical characteristics of plinthic and non-plinthic soils in dry deciduous forests on the east bank of Mekong, Cambodia”

4) Y. Kiyono, S. Saito, T. Takahashi, K. Hirai, H. Saito, T. Sato, J. Toriyama, Y. Monda, Y. Awaya, M. Shimada, T. Inoue, R. Hatano, C. Sophal, V. Samreth, T. Sum, M. Kanzaki, Limin I SH, and I Nengah SJ : Kanto Journal of Forestry, 62, 167-170 (2011)

“Important subcategory of greenhouse gas emissions from degraded forestland: CO₂ emissions from biomass in a seasonal forest in Cambodia and soil organic matter in a peat swamp forest in Indonesia”

5) Y. Monda, S. Saito, J. Toriyama, T. Takahashi, T. Sato, Y. Kiyono, and T. Sum : Kanto Journal of Forestry 62, 163-166 (2011)

“Validation of allometric equations used for estimating aboveground biomass in Indochina”

6) S. Nishimura, T. Yoneda, S. Fujii, E. Mukhtar, M. Kanzaki, and S. Ohta : J Trop. Ecol, 27, 107-110 (2011)

“Sprouting traits of Fagaceae species in a hill dipterocarp forest, Ulu Gadut, West Sumatra”

7) 鳥山淳平、平井敬三、清野嘉之、チャン・ソファル、ケスナン・ペロ、神崎護、齋藤英樹、高橋正通 : 関東森林研究, 62, 203-206 (2011)

「カンボジアの林齢の異なるゴム林における炭素蓄積」

8) J. Toriyama, S. Ohta, M. Araki, K. Kosugi, T. Nobuhiro, N. Kabeya, A. Shimizu, K. Tamai, M. Kanzaki, and C. Sophal: Hydrological processes (accepted)

“Soil pore characteristics of evergreen and deciduous forests of the tropical monsoon region in Cambodia”

〈その他誌上発表（査読なし）〉

1) 清野嘉之：平成21年度独立行政法人森林総合研究所公開講演会講演要旨集、32-35（2009）

「衛星「だいち」搭載のPALSARで熱帯林を調べる」

2) J. Toriyama, S. Ohta, Y. Ohnuki, E. Ito, M. Kanzaki, M. Araki, C. Sophal, B. Tith, S. Keth, N. Keth, K. Hirai, and Y. Kiyono: Proceeding of International Workshop on Forest Research in Cambodia, 41-42（2010）

” Soil carbon stock in tropical monsoon forests in Cambodia: A case study in Kampong Thom, Kratie and Mondulhiri”

3) 清野嘉之：森林科学、60, 6-9(2010)

「REDD+のために森林からの温室効果ガス吸排出量をモニタリングする」

4) 清野嘉之、松本光朗、佐藤保、高橋與明、伊藤江利子、古家直行、栗屋善雄：平成22年度 研究成果選集 2010, 12-13(2010)

「REDD+実現のため、衛星リモートセンシングと地上観測を組み合わせ、熱帯林からの炭素吸排出量をモニタリングする」

（2）口頭発表（学会）

1) 清野嘉之、佐藤保、齊藤哲、高橋正通、平井敬三、伊藤江利子、高橋與明、齋藤英樹、西村千、栗屋善雄、島田政信、井上京、波多野隆介、S. Thy、C. Sophal、I. Nengah SJ、Suwido HL、神崎護：第19回日本熱帯生態学会年次大会(2009)

「熱帯林の劣化過程における生態系炭素蓄積量インベントリ作成のための試算」

2) Y. Kiyono, S. Saito, and S. Thy: Workshop on exploring the use of ALOS PALSAR for forest resource management, Bogor.Indonesia（2009）

“A simplified method to monitor GHG emissions from forestland -A case study for biomass carbon stock in Cambodia”

3) T. Sato, Y. Kiyono, S. Saito, T. Takahashi, and Y. Awaya: Workshop on exploring the use of ALOS PALSAR for forest resource management, Bogor.Indonesia（2009）

“Estimation trial of emission due to logging using community height in an evergreen forest”

4) Y. Kiyono: Workshop on the Project “Changes of Forest Cover and Biomass in Lao PDR” -Forest Monitoring and Policies for REDD-, Vientiane.Laos(2010)

“Outline of monitoring methods for REDD”

5) Y. Kiyono: International Seminar on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries (REDD), Tokyo.Japan(2010)

“Findings in REDD related research programs in terms of the link between remote sensing and ground measurement”

6) Y. Kiyono, and Y. Yokota : ISAP 2010, Engagement of Japanese organization in REDD-plus, Yokohama. Japan(2010)

“REDD+ -related endeavors of FFPRI”

7) 鳥山淳平、太田誠一、大貫靖浩、伊藤江利子、神崎護、荒木誠、C. Sophal、B. Tith、S. Keth、N. Keth、平井敬三、清野嘉之：第121回日本森林学会大会学術講演集CD-Rom、Pb2-04（2010）

「カンボジア熱帯季節林域における土壌炭素蓄積様式」

8) 清野嘉之、鳥山淳平、平井敬三、齋藤英樹、チャンソファール、ケスナン、ペロ：第20回日本熱帯生態学会年次大会(2010)

「ゴム林の齢とバイオマス、枯死木量－カンボジアの低地常緑林地の一事例－」

9) K. Hirai, M. Takahashi, P. Limtong, S. Sukusawang, J. Toriyama, and Y. Kiyono : Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia ~ Findings from Forest Dynamics Network, Tokyo. Japan, 2010

“Soil carbon stock of tropical monsoon forest in western Thailand”

10) J. Toriyama, K. Hirai, C. Sophal, S. Ohta, Y. Onuki, E. Ito, M. Kanzaki, M. Araki, H. Saito, Y. Kiyono, and M. Takahashi : Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia ~ Findings from Forest Dynamics Network~, Tokyo. Japan, 2010

“Soil carbon stock in tropical monsoon forests and rubber plantations in Cambodia”

11) V. Samreth, C. Kimsun, J. Toriyama, S. Saito, Y. Monda, H. Saito, and Y. Kiyono : Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia ~ Findings from Forest Dynamics Network, Tokyo. Japan, 2010

“Monitoring forest biomass carbon stock using permanent sample plots (PSPs) in Cambodia”

12) T. Sato, Y. Kiyono, T. Takahashi, S. Nishimura, H. Saito, Y. Awaya, J. Toriyama, AR. Susanto, and HL. Suwido : Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia ~ Findings from Forest Dynamics Network~, Tokyo. Japan, 2010

“Relationship between community height and aboveground biomass in peatlands, central Kalimantan”

13) Y. Kiyono : Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia ~ Findings from Forest Dynamics Network~, Tokyo. Japan, 2010

” Outline of the forest monitoring methods using remote sensing and ground-based measurement”

14) Y. Kiyono, T. Sato, J. Toriyama, T. Takahashi, H. Saito, Y. Awaya, HL. Suwido, RS. Agung, P. Yuda, and F. Darma : Forest Dynamics and Carbon Monitoring in Forest Ecosystems in East Asia ~ Findings from Forest Dynamics Network~, Tokyo. Japan, 2010

“Fire impacts on carbon pools in tropical forests: Post-fire succession in peat swamp forest under drainage influence in Central Kalimantan, Indonesia”

15) Y. Kiyono, N. Furuya, E. Ito, Y. Awaya, T. Takahashi, T. Sato, J. Toriyama, and S. Saito : International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR, Bogor. Indonesia, 2010

“Outline of the forest monitoring methods using remote sensing and ground based

measurement: a challenge of PALSAR”

16) N. Furuya, S. Bunthabandit, Y. Kiyono, Y. Awaya, and H. Saito : International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR, Bogor. Indonesia, 2010

“Estimating carbon stock changes in slash-and-burn systems of Northern Laos”

17) K. Hirai, J. Toriyama, M. Hak, T. Sum, Y. Kiyono, and M. Takahashi : International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR, Bogor. Indonesia, 2010

“Measurements of soil carbon stock in Cambodian forest using the Japanese system of forest soil carbon monitoring method”

18) H. Saito, T. Takahashi, Y. Awaya, Y. Kiyono, T. Sato, J. Toriyama, M. Shimada, and C. Sophal : International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR, Bogor. Indonesia, 2010

“Above ground biomass estimation and forest cover mapping of Tropical seasonal forest in Cambodia using ALOS PALSAR data”

19) J. Toriyama, K. Hirai, C. Sophal, S. Ohta, Y. Ohnuki, E. Ito, M. Kanzaki, M. Araki, H. Saito, Y. Kiyono, and M. Takahashi : International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR, Bogor. Indonesia, 2010

“Ground-based study on soil carbon stock in forests and rubber plantations in Cambodia”

20) T. Sato, Y. Kiyono, T. Takahashi, S. Nishimura, H. Saito, Y. Awaya, J. Toriyama, RS. Agung, HL. Suwido, K. Niiyama, and Abd. Rahman bin Kassim : International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR, Bogor. Indonesia, 2010

“Relationship between community height and plant biomass in lowland dipterocarp forests and peatland forests”

21) Y. Kiyono, and Y. Yokota : REDD+ -Related Endeavors of FFPRI ISAP 2010, Yokohama. Japan, 2010

“Engagement of Japanese organization in REDD-plus”

22) 清野嘉之 : 第122回日本森林学会大会 (2011)

「REDD+は熱帯林を救えるか?—その議論と現状—モニタリング」

23) 浅井英利、清野嘉之、古家直行、サムソン ベンジャミン、ソンギィカンスール カムドーク ラオス、井上吉雄、本間香貴・白岩立彦 : 第122回日本森林学会大会 (2011)

「ラオス北部における、地域住民による家屋建築用木材伐採に伴う森林炭素減少速度の推定」

24) 鳥山淳平、太田誠一、大貫靖浩、荒木誠、神崎護、平井敬三、清野嘉之、M. Hak・T. Sum、C. Sophal : 第122回日本森林学会大会 (2011)

「カンボジア南東部の熱帯季節林における土壌理化学特性-標高との対応-」

25) 平井敬三、鳥山淳平、M. Hak・T. Sum、清野嘉之、高橋正通 : 第122回日本森林学会大会 (2011)

「カンボジアにおける森林劣化にともなう土壌炭素蓄積の変化」

26) 門田有佳子、齊藤哲、鳥山淳平、伊藤江利子、T. Sum、V. Samreth・C. Sophal、清野嘉之 :

第122回日本森林学会大会(2011)

「カンボジア熱帯林における森林タイプ間の成長量の比較」

27) 伊藤江利子、鳥山淳平、荒木誠、清野嘉之、神崎護、B. Tith、S. Keth、Chandararity Ly、C. Sopha1：第122回日本森林学会大会(2011)

「リター除去が表層土壌の炭素貯留量に及ぼす影響」

28) 清野嘉之 熱帯林の減少とREDD NPO日本気候政策センター・森林カーボンクレジット研究会講演要旨提出

(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)

1) Workshop on Exploiting The Use of ALOS PALSAR for Forest Resource Management (2009年11月3日、インドネシア国ボゴール市ボゴール農科大学国際会議場、約50名参加、ボゴール農科大学・森林総合研究所共催)

2) International Symposium on Forest Monitoring Methodologies for addressing Climate Change using ALOS PALSAR (2010年11月9-10日、インドネシア国ボゴール市ボゴール農科大学国際会議場、約130名参加、ボゴール農科大学・森林総合研究所・国際協力機構・CIFOR共催)

(5) マスコミ等への公表・報道等

インドネシア全国紙(KOMPAS 2009年11月4日版)に上記国際ワークショップが紹介された。

(6) その他

バイオマスや枯死有機物の推定式・係数10点をIPCC排出係数データベースに収録した。