地球規模課題対応国際科学技術協力（SATREPS）

分野・領域「環境・エネルギー分野・気候変動の適応又は緩和に資する研究」

課題・案件名「**アマゾンの森林における炭素動態の広域評価**」
（相手国：ブラジル）

終了報告書

期間　平成22年5月～平成26年5月

代表者氏名：石塚森吉
（（独）森林総合研究所　客員研究員）

§1 プロジェクト実施の概要

アマゾンの森林は、2007 年時の破壊の現状から 2030 年までに最大でおよそ 60%が消失すると予測されている。一方、開発途上国の森林減少・劣化の防止による CO_2排出の削減を、地球温暖化緩和策としてポスト京都議定書の枠組みに組み込むことが検討されており、この実現とその利用には、森林減少・劣化の防止によって得られる CO_2排出削減量の評価方法とそれによる評価が必要である。そのために、本研究では、劣化した森林を含むアマゾン森林の炭素動態の定量的な評価技術の開発とそれによる評価を目指す。

本研究では、これまで森林総合研究所と国立アマゾン研究所(INPA)が共同でアマゾンの森林に設定した大面積プロットや長距離ベルトトランセクト等における詳細な現地観測モニタリングデータと INPA が主体となって実施する地上観測の森林インベントリデータ(多点プロットの調査)をひとつのシステムとして構築し、中央アマゾンを特徴づける台地ー浸水地のモザイク地形における、人為影響下を含む森林の炭素動態(炭素固定量を含む)を明らかにする。また、地上観測のデータを踏まえた地形と林分構造の関係から林分の炭素蓄積量とその動態を、レーダーリモセン等を介して広域衛星データへスケールアップしマッピングする手法を国立宇宙研究所(INPE)と東京大学で開発し、広域な森林の炭素動態を評価する。 以下、森林インベントリ(地上観測)と炭素蓄積量マッピング(リモートセンシング)、それぞれの具体的な実施概要を記す。

【森林インベントリ(地上観測)】

中央アマゾンにおける森林インベントリシステムの構築: これまで空白域であった中央アマゾン(アマゾナス州) 12 地域において約 1,200 の固定プロット(20m x125m)を設置し、インベントリ調査を実施した。具体的には、ソリモエス川(アマゾン川本流)流域と最大の支流ネグロ川流域を中心に、12 地域(Sao Gabriel da Cachoeira、Atalaia do Norte、Itacoatiara (MIL)、ZF2(INPA 実験林)、ZF5 (EMBRAPA 実験林)、Jutai、Resex Auati-Parana、Resex Capana Grandei、Resex do Baixo Juruá、Rio Unini, Rio Purus、Maués (Flona do Pau-rosa))で、それぞれ約 100 プロット相当の調査を行った。このうち 8 地域については、INPA の既設のプロットを確定し、2回目の調査を実施することで炭素蓄積量の動態を解析した。これらの調査データはアマゾンの空白域を埋めるもので、世界的にも貴重なデータベースの構築を進めている。なお、森林インベントリの対象とした調査項目は、林木の毎木調査データのほか、倒木(枯死木)、細根量バイオマス等を含む。

アマゾンの汎用アロメトリ式の開発: ネグロ川上流域の森林で初めて地上部・地下部のバイオマス測定を実施するとともに、これまで INPA がアマゾン中部、下流部で実施した地上部・地下部のバイオマス測定データと統合して、各地域の平均林冠高(上位 20%の平均樹高)をパラメータに導入した、アマゾンにおける汎用アロメトリ式[1]を開発した。森林インベントリの各プロットの炭素蓄積量は、全て本アロメトリ式を用いて推定した。この汎用式の開発により、アロメトリ式による炭素蓄積量推定の不確実性は 12.3%→11.1%に減少した。

【炭素蓄積量マッピング(リモートセンシング)】

森林立地環境区分手法の開発: 広域の炭素蓄積量推定の基盤となるデータセットとして、高頻度観測衛星データである MODIS の雲なし時系列データセットを整備した。これに各種の地図情報やスペースシャトル立体地形データ(SRTM)を統合して、アマゾンを特徴づける地形条件等を加味した森林立地環境区分手法を開発し、MODIS をベースにしたアマゾンの冠水期間、昼夜の地表面温度、植生指数の季節変化等、森林立地環境変量のデータセットを構築した。

林分構造パラメータの解析手法の開発: 中央アマゾンの森林の炭素蓄積量はインベントリデータ平均で約 160tC/haであり、光学センサ推定の飽和域にある。現時点で林分バイオマスの最も精度の高い推定パラメータは林冠高であり、当初、航空機ライダーによる林冠高の計測を計画した。しかし、ブラジル政府の許可が下りないことから、衛星ライダーGLAS/ICESat データを用いて林冠高

[1]林木の直径用いた地上部・地下部のバイオマス推定式。本プロジェクトでは、これに平均上層樹高(林冠高)を加えることでアマゾン地域間のバイオマスの推定精度を上げた。

のスケールアップを行った。具体的には full-wave 林分構造解析プログラムの開発により、ICESat/GLAS の LiDAR 波形データからフットプリント内の樹高(RH100)と関連する波形パラメータを計算し、その結果を森林立地環境変量データと連動させて広域の林冠高を推定する方法を開発した。この推定林冠高は、地上調査から得られた林冠高（上層樹高の 20%）とよく一致した。

アマゾンの炭素蓄積量（バイオマス）マッピング手法の開発： インベントリ調査によって得られたバイオマスの実測値を、ICESat/GLAS による推定林冠高および関連の波形パラメータを森林立地環境変量データと連動させてモデル化することで、広域のバイオマスマップを作成した。本プロジェクトならびに既存のインベントリプロットの GPS 測位座標から MODIS メッシュを単位にプロットを集計し、プロット合計面積が 1ha 以上となる約 700 メッシュのバイオマス・データに基づいてバイオマス推定モデルを構築した。同時にブートストラップ法を用いて、約 500m の画素毎に 5%～95%の信頼区間と不確実性を付与した。これに基づいたブラジル国・アマゾン地域の地上部バイオマスの総計は既報の推定値と比較して約 5%大きく、モデルの不確実性は 6.5%と既報よりかなり低くなった。ブラジル・アマゾン全域の炭素蓄積量は、地域により不確実性に差はあるものの、アロメトリ式の不確実性を含めた全体の不確実性が±12.0%の精度で 102.0Gt と評価された。

センサ搭載 UAV システムによる森林の立地解析： 当初予定した航空機 LiDAR 観測の代替として UAV（無人飛行機 Unmanned Aerial Vehicle）にカメラとレーザセンサを搭載したシステム（以下単に UAV システムとする）を開発した。本 UAV システムを用いて INPA の ZF-2 実験林において台地と谷地の計測を実施した結果、台地と谷地では平均樹高に大差はないものの、台地では林冠が所々突出していることが明らかになった。林冠高は森林のバイオマス推定の最も重要なパラメータであり、本 UAV システムを用いることにより、手軽に且つ小地形に応じた林冠高等の詳細なバイオマス推定パラメータの取得が可能になった。

§2. プロジェクト構想（および構想計画に対する達成状況）

（1） 当初のプロジェクト構想

サブ課題1. 森林の長期インベントリシステムの構築

1）森林インベントリ調査では、ブラジル・アマゾンの森林の炭素蓄積量とその動態を把握するため、異なる地域に多点の固定調査プロットを設置し、IPCC ガイドライン 2006 にもとづいた森林調査を実施する。これにより、ブラジル・アマゾンの森林の炭素蓄積量とその変動の地域的な傾向が明らかになる。

2）炭素蓄積推定用アロメトリ式の作成では、ブラジル・アマゾンの異なる地域の森林の地上部・地下部のバイオマス測定にもとづいて、個体サイズー個体重（炭素量）関係を比較解析し、アマゾンの熱帯雨林を広域にカバーする森林炭素量推定のアロメトリ（相対成長）式を作成する。

3）長期森林インベントリ（CFI）データベースの構築では、森林インベントリ調査で得られた情報をデータベース化し、さらにデータベースを GIS 化することにより LiDAR、PALSAR 等の高解像度リモセンへのリンクをはかる。データベースはプロジェクト終了後に一部を公開予定。

サブ課題2. 森林の構造と動態の解明

1）原生林の構造と炭素動態では、INPA の実験林（ZF-2）の原生林に設定した大規模試験地（18ha）および 2.5km ベルトトランセクト2本において、地形に対応した森林（台地林、浸水林、中間斜面林）の林分構造、粗大有機物量、細根現存量の動態を測定することにより、動的平衡（定常）状態にある極相林の地形別の炭素動態を明らかにする。

2）択伐施業林の構造と炭素動態では、中央アマゾンにおける商業利用の択伐施業林（managed forest）において、択伐後の林木の成長と林分構造、炭素蓄積量の経年変化を測定することにより、アマゾンの森林の炭素動態におよぼす択伐施業の影響を明らかにする。

サブ課題3. 森林の炭素動態のマッピング

1）アマゾンの立地環境の解析では、天然林は環境状況に応じて林分構造が異なるため、立地環境別の詳細な林分構造パラメータの解析と、広域の森林炭素・蓄積動態のマッピングのベース

となるアマゾン全域の立地環境区分図を作成する。
2) 林分構造パラメータの解析では、地上調査データ、航空機データ、高－中分解能衛星データなどを利用して、立地環境と炭素蓄積量を把握するための、スケールアップパラメータを特定する。これにより、立地環境に基づいた森林炭素量の推定とその推定精度の算定を可能にする。
3) 炭素蓄積マップの開発では、上記2)で得られた立地環境別の炭素蓄積推定法を利用して、広域での地域的な炭素蓄積特性を解析し、アマゾン全域での炭素蓄積評価を可能にする。

(2) 新たに追加・修正など変更したプロジェクト構想

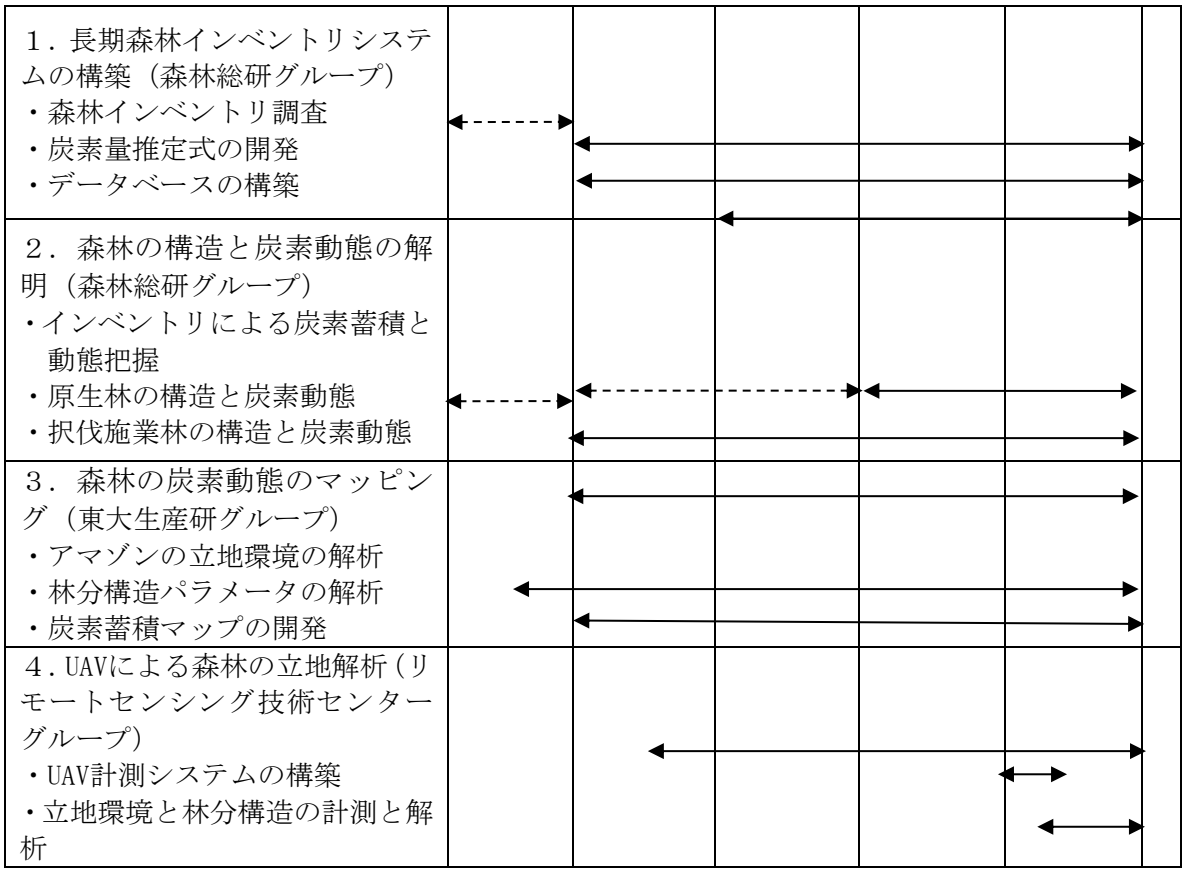
当初、バイオマス推定パラメータを得るために航空機 LiDAR 観測を実施する予定であったが、許可が下りないことから、これを断念した(2012 年)。その代替として、UAV(無人飛行機)にカメラセンサとレーザセンサとを搭載した UAV カメラ/レーザシステム(以下 UAV システム)を開発し、林分構造(バイオマス推定パラメータ)の解析手法の開発、測方法の確立、そして、当該 UAV システム用いて森林の立地解析を行うこうこと目標として下記の新たな研究課題を設定した。

UAV による森林の立地解析

a. UAV 計測システムの構築
UAV（Unmanned Aerial Vehicle）を用いて森林を計測するための計測システムを INPA に構築する。

b. 立地環境と林分構造の計測と解析
林分情報が取得されている INPA の実験林において、UAV を用いて立地環境と森林とを詳細に計測し、立地環境と林分構造との関係を解析する。

（3）活動実施スケジュール（実績）



§３ プロジェクト実施体制・投入実績

3．1 プロジェクト実施体制
(1)森林インベントリグループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職（身分）	研究参加期間				備考
				開始		終了		
				年	月	年	月	
○	石塚 森吉	独立行政法人 森林総合研究所	客員研究員	21	6	26	5	
	田淵 隆一	独立行政法人 森林総合研究所	上席研究員	21	6	24	3	
	梶本 卓也	独立行政法人 森林総合研究所	植物生態研究領域長	21	6	26	5	
	飯田 滋生	独立行政法人 森林総合研究所（北海道支所）	研究チーム長	21	6	25	3	
	佐藤　保	独立行政法人 森林総合研究所	研究チーム長	22	4	26	5	
	八木橋 勉	独立行政法人 森林総合研究所（東北支所）	研究グループ長	21	6	25	3	
	大谷達也	独立行政法人 森林総合研究所（四国支所）	研究員	24	4	26	5	
	諏訪 錬平	独立行政法人 森林総合研究所	研究員	21	8	26	5	
	野口 英之	独立行政法人 森林総合研究所	非常勤特別研究員	22	4	26	3	
	大橋 伸太	独立行政法人 森林総合研究所	非常勤特別研究員	25	4	26	3	

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職（身分）	研究参加期間				備考
				開始		終了		
				年	月	年	月	
○	Niro HIGUCHI	National Institute of Amazonian Research	Senior Researcher	22	5	26	5	
	Joaquim dos Santos	National Institute of Amazonian Research	Senior Researcher	22	5	26	5	
	Adriano J. N. Lima	National Institute of Amazonian Research	Post Doctral	22	5	26	5	
	Roseana Pereira da Silva	National Institute of Amazonian Research	Post Doctral	22	5	24	3	
	Cacilda Adelia S. Souza	National Institute of Amazonian Research	PhD Student	22	5	26	5	
	Gabriel H P M Ribeiro	National Institute of Amazonian Research	PhD Student	22	5	26	5	
	Marcio Rogerio	National Institute of Amazonian Research	Postgraduate	22	5	26	5	
	Gustavo Azeredo	National Institute of Amazonian Research	Postgraduate	24	2	24	9	
	Alberto Carlos Martins Pinto	Federal University of Amazonas	Professor	23	4	26	5	
	Fransisco Higuchi	Federal University of Paraná	PhD Student	22	5	23	4	

Fernando da Silva	National Institute of Amazonian Research	Postgraduate	24	10	26	5
Rosiane Oliveira da Silva	National Institute of Amazonian Research	Master'sStudent	24	3	26	5
Lucas Kosvoski de Ourique	National Institute of Amazonian Research	Master'sStudent	24	3	26	5

(2)リモートセンシンググループ

【日本側】

グループリーダー	氏名	所属	役職（身分）	研究参加期間				備考
				開始		終了		
				年	月	年	月	
○	沢田 治雄	東京大学生産技術研究所	特任教授	21	6	26	5	
	遠藤 貴宏	一般財団法人 リモートセンシング技術センター	研究員	21	12	26	5	
	澤田 義人	東京大学生産技術研究所	特任研究員	21	12	26	3	
	Pranab J. BARUAH	東京大学生産技術研究所	特任研究員	21	12	21	12	
	Ram Avtar	東京大学生産技術研究所	博士課程	21	12	24	3	
	徳永 冠哉	東京大学生産技術研究所	技術補佐員	22	1	24	5	
	沖 一雄	東京大学生産技術研究所	講師	22	4	26	3	
	山崎　大	東京大学生産技術研究所	博士課程	22	4	24	3	
	越智士郎	東京大学生産技術研究所	特任研究員	24	4	25	3	
	神藤恵史	東京大学生産技術研究所	特任研究員	25	7	26	3	

【相手国側】

グループリーダー	氏名	所属	役職（身分）	研究参加期間				備考
				開始		終了		
				年	月	年	月	
○	Dalton Valeriano	National Institute for Space Research	Senior Researcher	22	5	26	5	
	Yosio Shimabukuro	National Institute for Space Research	Senior Researcher	22	5	26	5	
	Moacir A. A. Campos	National Institute of Amazonian Research	Researcher	22	5	26	5	
	Carlos Henrique Celes	National Institute of Amazonian Research	Researcher	22	5	26	5	
	Egidio Arai	National Institute for Space Research	Researcher	24	4	26	5	
	Felipe de Souza Ramos	National Institute of Amazonian Research	PhD Student	24	4	26	5	

4．0 プロジェクト全体

(1) グループを統合した全体の成果

森林インベントリについては、これまで空白域であったアマゾナス州 12 箇所において約 1，200 のプロット調査を実施し、世界的にも貴重なインベントリデータが体系的に蓄積されている。さらに、アマゾンの森林バイオマスの汎用アロメトリ式を開発するなど、アマゾンの森林の炭素動態の広域評価のための、基盤的となる成果を得た。

リモートセンシングによる広域推定技術開発についても、高頻度観測衛星データである MODIS の元データの時間分解能と空間分解能の両方を保持した、雲なし時系列データセットを整備し、中央アマゾンを特徴づける地形条件等を加味した森林立地環境区分手法を開発するとともに、衛星ライダー等を用いて、MODIS の画素を単位に炭素量推定誤差（不確実性）を見積もることが可能な広域の炭素蓄積量のマッピング手法を開発した。

地上観測データをスケールアップする際に必要な航空機によるライダー (LiDAR)の観測許可が下りずに断念せざるを得なかったが、衛星ライダー・データを用いることで当初の目的を達成することができた。また、航空機ライダー観測を代替するものとして、UAVーライダーシステムの開発を行い、森林の構造解析技術の開発を進めた。

両国の若手研究者は、非常に困難な現地調査を積極的に行い、双方のコミュニケーションを積極的に図るなど、両国で国際的な人材として活躍できる人材が育成されつつある。

また、両国の科学技術の今後の発展についても、地上観測とリモートセンシングの統合による観測は、他の地域や他の事象についても応用可能な地球規模の研究課題であり、今後の発展性が大いに期待できる。

特に、森林特性の評価では、REDD-plus、二国間カーボン・オフセット・メカニズムやその MRV のデファクト化は日本にとって重要な課題であり、日本標準・規格の確立に向けての貢献へも大きい。

(2) 今後期待される効果

炭素蓄積量マッピングについては、さらに PRODES など INPE で稼働中の森林監視システムとの連携を進めており、森林減少の進行している地域における中解像度での炭素蓄積量の変化の推定が可能になる。これにより、従来の REDD プラスの手法で用いられている森林タイプ区分ごとのバイオマスの原単位量に基づいた炭素蓄積量の推定よりも、高精度化が図られる。

ブラジル政府自体の REDD-plus に関する考え方が積極的になり、本プロジェクトの MRV システムに強い関心を示しており、研究成果の活用への道筋が整いつつある。

4．1 長期森林インベントリシステムの構築（森林総合研究所）

(1) 研究実施内容及び成果

1) 森林インベントリ調査

実施方法：中央アマゾンには殆ど道路が無いため、主にボートを用いたキャラバンでインベントリ調査を実施した。調査は 20 m×125 m のプロットを単位とし、地形により十字型あるいはトランセクト状にプロットを設置した（図 4.1.1-1）。プロット内に生育する胸高直径 10cm 以上の樹木について、識別番号，直径，樹種名（不明なものは枝葉や樹皮等の標本を採取）などを記録するとともに、胸高直径 5cm 以上の樹木についても 2 つのサブプロット（10mx10m）で調査した。既存のプロット 861 か所については、最初の測定から 3～5 年後に樹木の直径を再測した。さらに、プロット周辺の倒木の直径や樹長（林冠高の推定に利用）、伐採の有無、土壌の表層 20cm 深の細根量などが調査された。

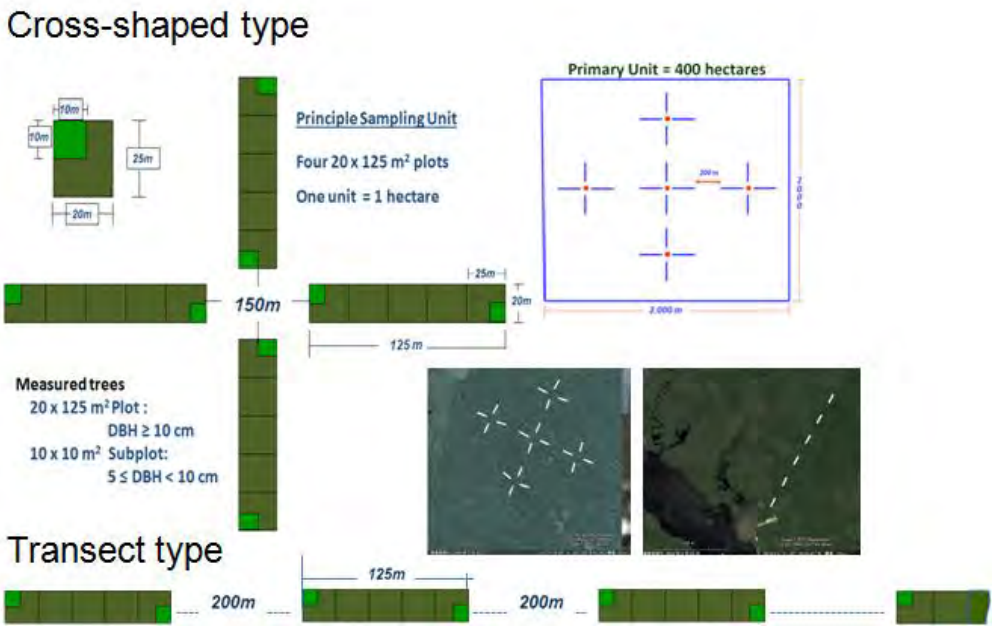


図 4.1.1-1.　調査プロットのデザイン．（上）十字型（基本型）、（下）トランセクト型

実施内容：本プロジェクトでは、20 m×125 m の調査プロットをネグロ川上流のヴェネズエラおよびコロンビアとの国境付近に位置する São Gabriel da Cachoeira 周辺に 100 か所、ソリモエス川上流のペルーおよびコロンビアとの国境付近に位置する Atalaia do Norte に 105 か所、Jutaí 周辺に 104 か所、ネグロ川上流の Unini 周辺に 135 か所、ソリモエス川上流の Fonte Boa 周辺に 130 か所、マデイラ川上流の Capana Grande 周辺に 120 か所、Purus 川に 146 か所、マナウス下流の Maués（Flona do Pau-rosa）に 132 か所、Itacoatiara の択伐施業林（Mil Madeireiras Itacoatiara Ltda）に 119 か所を設置し、インベントリ調査を実施した (図 4.1.1-2)。この他に、100 m x 100 m の調査プロットをマナウス北部の EMBRAPA 試験地（ZF5）に 18 か所インベントリ調査により得られた直径と上層樹高(H_{dom})のデータと、本プロジェクトにおいて開発したアマゾンの汎用アロメトリ式（後述）により、各プロットのバイオマスの測定を行った（表 4.1.1-1）。また、これらのプロットの一部では細根の現存量も測定し、地域間の比較を行った。

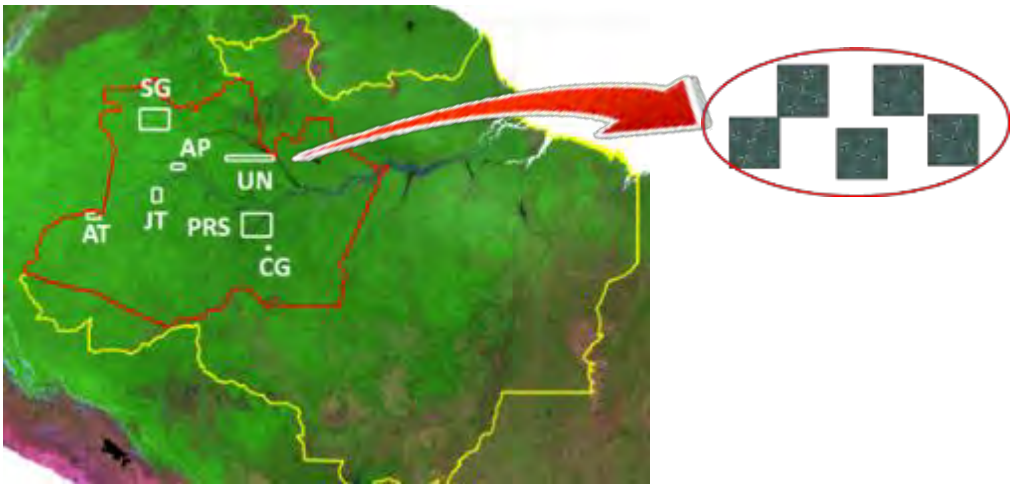


図 4.1.1-2.　調査地の位置図と設置した調査プロットのイメージ
（イタコアチアラ、マウエス、EMBRAPA は示されていない）

表4.1.1-1. 主なインベントリサイトの平均地上部バイオマス.

インベントリサイト	ID	地上部バイオマス (t.ha^{-1})
São Gabriel da Cachoeira	SG	305
Atalaia do Norte & Benjamin Constant	AT	365
RESEX of Jutaí River	JT	348
RESEX of Capanã Grande Lake	CG	363
RESEX of Unini River	UN	283
RESEX of Auati-Paraná	AP	347
RESEX of Purus River	PR	298

表4.1.1-2　本プロジェクトの全調査地、調査年とプロット数（n）
Before CADAF：本プロジェクト以前の調査プロット数
Under CADAF：本プロジェクトによる調査

Sites	year	n
Before CADAF		1272
São Gabriel da Cachoeira	2010	100
Mil Madeireira Ltda (Itacoatiara)	2010	119
Benj.Constant and Atalaia do Norte	2011	105
Jutaí	2011	104
EMBRAPA (Rio Preto da Eva)	2011	18
Resex Capanã Grande (Manicoré)	2012	118
Resex Rio Unini	2012	136
Resex Auati-paraná	2012	130
Flona do Pau-rosa (Maués)	2013	132
Resex do Baixo Juruá	2013	123
Reserva Biol.Abufari (Baixo Purus)	2013	146
Under CADAF		1231

成果：これまで地上データの空白地帯であったアマゾナス州の 12 の地域で、平均 100 程度の調査プロットを設定の上、プロットの位置情報とともに樹木の直径や樹種等を記録する森林インベントリ調査を行い、合計 1200 点を越える地上データを収集した。その結果、ネグロ川やプルス川流域のバイオマスが他の地域に比べ低いことが明かになった。インベントリ調査によって得られたバイオマスの推定値は、国際学術雑誌や国際学会などで発表されるとともに、衛星リモートセンシングから導かれた環境パラメータとの統合を通じて、アマゾン全域をカバーするバイオマスマップの作成に還元された。

カウンターパートへの技術移転の状況：　現地調査は INPA と森林総研が共同で実施するとともに、日本で行われたカウンターパート研修等において、データベースの設計を協議し、共同で GIS を用いたデータベースの構築を進めた。このような共同作業をとおして、フィールド調査からデータ整理、データベースの構築に至る全過程の技術が移転され、プロジェクト終了後もブラジル独自でインベントリ調査とデータベースの構築が継続されている。

成果の位置づけや類似研究との比較：これまで地上データの空白地帯であった中央アマゾン（ネ

グロ川、ソリモエス川流域）の炭素蓄積量のほぼ全容を明らかにすることができた。特に、同一の調査方法で統一された本プロジェクトの膨大な地上データは、アマゾンにおいて他に類をみない。

2) 炭素蓄積推定用アロメトリ式の作成

実施方法： アマゾンの森林の地上部・地下部のバイオマス推定を行うために、アロメトリ式の開発を行う。これまでにデータのなかった北西部地域において伐倒・根調査を行い、地上部・地下部バイオマス推定のためのアロメトリ式を作成し、アマゾンの他地域において作成されたアロメトリ式との比較を通じて、アマゾン全域に適用可能なアロメトリ式の開発を目指す。

実施内容：ネグロ川上流域に位置する北西アマゾンの Sao Gabriel da Cachoeira において、伐倒・根調査を実施し、101 本の個体について地上部・地下部バイオマスと直径 *D* および樹高 *H* との関係に関するデータを取得した（図 4.1.2-2）。得られたデータから地上部・地下部バイオマス推定のためのアロメトリ式を開発した。

図 4.1.2-1.　(左)伐倒した個体の幹直径の測定．(右)伐根作業の様子．

地上部バイオマス推定のためのアロメトリ式をアマゾンの異なる 3 地域間で比較解析を行った。結果として、上層木の樹高差がアロメトリ式の地域間差の一要因になっていることを明らかになった(図 4.1.2-2)。また、地上部と地下部バイオマスとの関係は、アマゾンの異なる 2 地域間において差はなく、2 地域間で共通の比例式を得た。結果として、樹木サイズにかかわらず、地下部は地上部の 13.6%で一定であると結論された。また、不確実性は 19.0%と計算された。

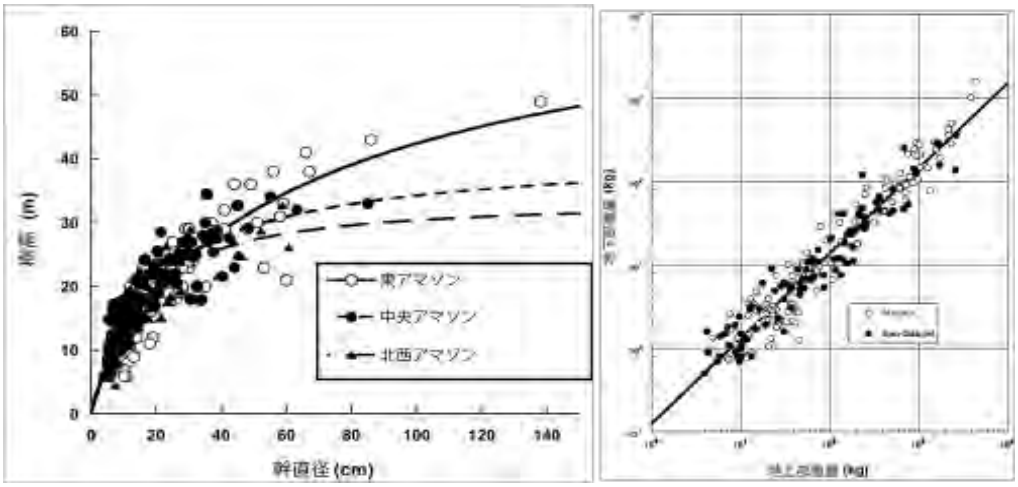


図 4.1.2-2.（左）ブラジル・アマゾンの3地域（東アマゾン, Tome Acu； 中央アマゾン, Manaus；北西アマゾン, Sao Gabriel da Cachoeira)における幹直径－樹高関係の比較解析．(右) Manaus (中央アマゾン)と Sao Gabriel da Cachoeira (北西アマゾン)共通の地上部―地下部重量の比例関係．

上記のように、地上部バイオマス推定のためのアロメトリ式の地域差は上層樹高の地域差によって、部分的に説明されたことから、上層樹高をアロメトリ式の変数に組み込むことで、アマゾン全体に適用可能なアロメトリ式の開発を試みた。

ここでは、中央アマゾン（マナウス近郊）で得られたアロメトリ式（1）をもとに、上層木20％の平均樹高を上層樹高（H_{dom}）と定義して、中央アマゾン（マナウス近郊）の上層樹高H_{dom} =28.5m との比を乗じたモデル式（2）をアマゾンにおけるアロメトリの汎用式として定義した。

$$AGW = 1.20 * D^{1.92} \quad (1)$$

$$AGW = (1.20* D^{1.92}) * (H_{dom}/28.5) \quad (2)$$

北西アマゾンと東アマゾンのサンプルをプールしてテストデータとして用いた結果、(1)式による地上部バイオマス推定の不確実性は12.3％であったが、(2)式を用いることにより、不確実性は11.1% に減少した。また、各テストサイトのサンプルについて、個別に不確実性を計算した結果においても、H_{dom}を組み込んだ式（2）を用いることにより、地上部バイオマス推定の不確実性は両サイトで明かに低下した（表4.1.2-1．）。

表4.1.2-1. 東アマゾンおよび北西アマゾンにおける，優占林冠高 H_{dom} を組み込んだアロメトリ式(2)と組み込まないアロメトリ式(1)によるバイオマス推定の不確実性の比較.

Sites	Models	サンプル数	*H*dom（m）	不確実性(%)
トメアス	*H*dom なし	59		24.0
(北西アマゾン)	*H*dom あり	59	25.7	**18.5**
サンガブリエル	*H*dom なし	127		14.2
(東アマゾン)	*H*dom あり	127	30.5	**13.1**
両地域プール	*H*dom なし	186		12.3
	*H*dom あり	186	25.7 or 30.5	**11.1**

成果： ネグロ川上流域における森林バイオマスの実測は初めてのもので、開発された地上部、地下部のアロメトリ式は国際誌などに発表され、既に論文引用されるなど一定の評価を得ている。とくに、ネグロ川上流域（アマゾン北西部）とマナウス近郊（アマゾン中部）における林木の胸高直径 *D* ー地下部バイオマス関係が同一のアロメトリ式で表現できることから、アマゾンの地下部バイオマスの汎用推定式として利用可能なことを示した。さらに、マナウス近郊（アマゾン中部）で得られたアロメトリ式に上層樹高をパラメータとして導入した地上部バイオマス推定の汎用アロメトリ式は、トメヤス（アマゾン東部）やネグロ川上流域（アマゾン北西部）におけるバイオマス推定の不確実性を低減するものであった。このような汎用アロメトリ式の開発はアマゾンにおいて初めての試みであり、この式は本プロジェクトのインベントリ調査（課題4．1）に基づく各プロットのバイオマス推定に適用された。

カウンターパートへの技術移転の状況： 現地調査は INPA と森林総研が共同で行った。また、日本で行われたカウンターパート研修q等において、研究成果を国際学術雑誌や国際学会などで発表することを目的に、バイオマス推定のアロメトリ式の解析と論文作成を共同で行った。このようにフィールド調査からデータの解析・とりまとめにいたる共同作業を通して、技術は移転され、現在は、ブラジルの研究グループが主体となって研究が推進できるようになっている。

成果の位置づけや類似研究との比較： 森林の上層樹高をパラメータとして導入した汎用アロメトリ式は、アマゾンの広域の森林を対象に適用可能な地上部バイオマス推定式であり、他に類を見ないものである。本汎用式は、森林の上層樹高をパラメータに加えてバイオマス推定の不確実性を低減するもので、上層樹高は地上調査から、また空からも LiDAR センサー（航空機・衛星搭載）を

用いた観測が可能であり、非常に実用性の高いものである。また、アマゾン北西部と中部において、林木の胸高直径 *D*ー地下部バイオマス関係に同一のアロメトリ式が成り立つことも、本研究によって初めて見いだされたものであり、アマゾンの地下部バイオマスの汎用推定式として実用性の高いものである。

3)長期森林インベントリ(CFI)データベースの構築

実施方法: リモセン画像から抽出される環境データと、インベントリ調査によって得られる林分構造・バイオマスに関するデータとのリンクを形成するために、森林インベントリ調査で得られた情報を、GIS を用いてデータベース化する。

実施内容: 各地域のインベントリ調査で得られた各個体の直径 *D* と現地名を CSV 形式にてまとめ、Arc/GIS および GRASS を通じて各プロットのGPS情報とのリンクを形成した(図 4.1.3-1)。

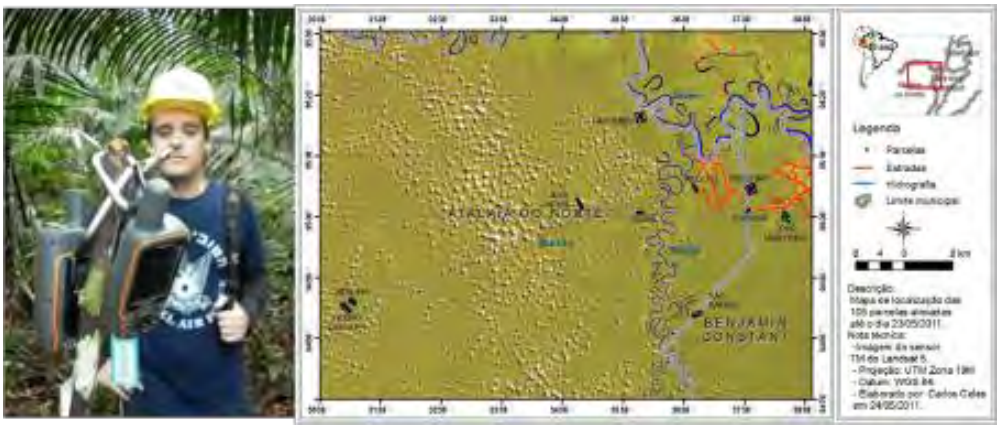


図 4.1.3-1. GPS によるインベントリプロットの位置情報の取得(左)とインベントデータのGIS化の一例(右)

成果: 森林インベントリ調査で得られた各プロットの情報(林木の胸高直径 *D*、樹種名、GPS 位置情報等)を GIS でデータベース化し、衛星データとリンクさせることで、点情報であるインベントリデータの広域へのアップスケーリングがおこなわれた。また、データベース化を通して情報が共有され、インベントリチームとリモセンチームのコミュニケーションがスムーズに行われた。

カウンターパートへの技術移転の状況: 現地でのインベントリ調査、ワークショップ、日本でカウンターパート研修をとおして、正確な GPS の使用方法、GIS を用いたインベントリデータベースの構築・解析手法の技術移転をおこなった。その結果、位置情報の精度向上、GIS化あるいはデータベース化を効率的に行うために、インベントリ調査方法の改良なども自発的に行われるようになった。

成果の位置づけや類似研究との比較: 本プロジェクトはフィールドサイエンスとリモートセンシングサイエンスの統合を核としていることから、必然的に異分野間の相互理解が求められる。特にデータベースの構築においては、インベントリデータとリモセンデータの統合を行うために、異なる分野の知識が必要とされるが、本研究プロジェクトにおいては、データベースの構築作業を通じて、インベントリチームとリモートセンシングチームのコミュニケーションが促進されたと考えられる。

(2) 研究成果の今後期待される効果

成果の今後の展開見込: これまで地上部のデータが極めて乏しかった中央アマゾン地帯で 1200 プロットを超える森林調査を INPA と共同で行うことにより、アマゾンにおける国際標準的な森林インベントリシステムが構築された。得られたデータは炭素蓄積情報だけでなく、未同定樹木の標本など、生物多様性に関する貴重な情報も含んでいる。種名の同定には時間がかかるが、今後、これらの樹種の同定・分類の研究、さらにその膨大な情報をもとにしたアマゾンの生物多様性に関する研

究が飛躍的に進展するものと考えられる。

社会への波及効果： アマゾンにおける森林のインベントリ調査には地域住民の承諾と協力が大前提であり、調査の実施にあたっては、調査地の安全な選定と案内のほか、プロットの維持と周辺森林の保全等の協力を得るために、事前にコミュニティとの周到な打ち合わせをおこなった。また、インベントリ調査には、先住民族等コミュニティの研究チームも加わり、生活、文化、教育等についての調査が実施された。このような、住民との接触、交流をとおして、アマゾンの森林の保全への波及効果が期待される。

4．2 森林の構造と動態の解明（森林総合研究所）

(1) 研究実施内容及び成果

1) 原生林の構造と炭素動態

実施方法： マナウス近郊の INPA 実験林に設置されたベルトトランセクト(2.5km x 20m：雨季に冠水しない台地と冠水する谷地（浸水地）を含み比高差約 80m)において、林木および枯死木のサイズ、頻度を測定し、台地～谷地の地形別の潜在最大樹高（H_{max}）、バイオマス（炭素蓄積量）を推定する。さらに、地形・季節別に細根（直径 < 2 mm）量を測定し、細根バイオマスとその季節動態を推定する。

実施内容： 地形に沿った比高の変化に伴う林木の幹直径 D と樹高 H の関係の変化を解析した結果、以下の式で表すことに成功した。

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{(a + bx_2)D} + \frac{1}{c + dx_2}$$

ここで a、b、c、d は係数、x_2 は比高。

結果として、潜在最大樹高 H_{max} は比高が低くなるにつれて低くなることが明らかになった。INPA 側で既に作成済みの樹高と直径を考慮に入れたバイオマス推定式(Silva 2007)と組み合わせて、バイオマスの分布様式を明らかにした（図 4.2.1-1）。結果として、樹高を変数に含まないバイオマス推定式で推定した値がおよそ 15%の過大評価になることが明らかになった。

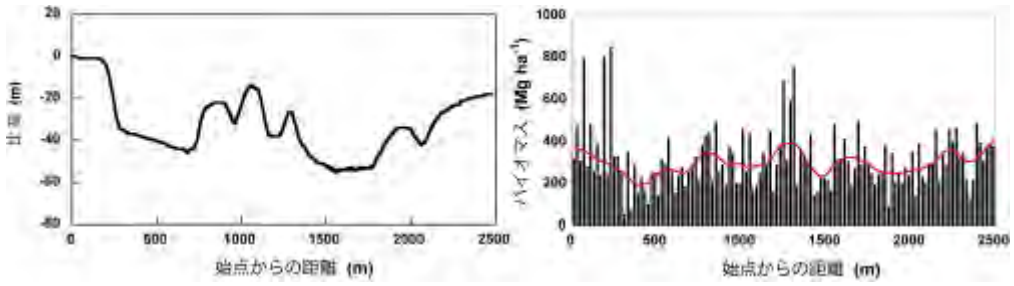


図 4.2.1-1 ベルトトランセクト内の比高プロファイル(左)とベルトトランセクト内のバイオマスの分布（右）
赤線はトレンドライン.

ベルトトランセクト内での比高に沿った樹高やバイオマスの変化パターンが、さらに広いスケールでも適用できるか確かめるために、マナウス付近の標高の異なる森林において林分構造とバイオマスの調査を行った。結果として、上層樹高は標高の低下に伴い低下した（図 9）。樹高を考慮に入れた場合にはバイオマスと標高との間に有意な正の相関（r = 0.82, p = 0.02）が確認されたが、樹高を考慮に入れない場合、バイオマスと標高との間に有意な相関関係は見られなかった（ r ＝0.59, p = 0.16）。

また、ベルトトランセクト内の地形タイプ別に粗大有機物の蓄積量を推定した(表 4.2.1-1)。粗大有機物量は、台地部で最も大きく、斜面下部に向かって減少する傾向にあった。また、中間斜面では根返りが多いなど、地形によって粗大有機物の形態の違いも認められた。粗大有機物量とその供給源となる地上部現存量の間には明確な関係は認められなかったが、その割合（粗大有機物量/地上部現存量）はおおよそ 5〜20%の範囲に収まっていた。

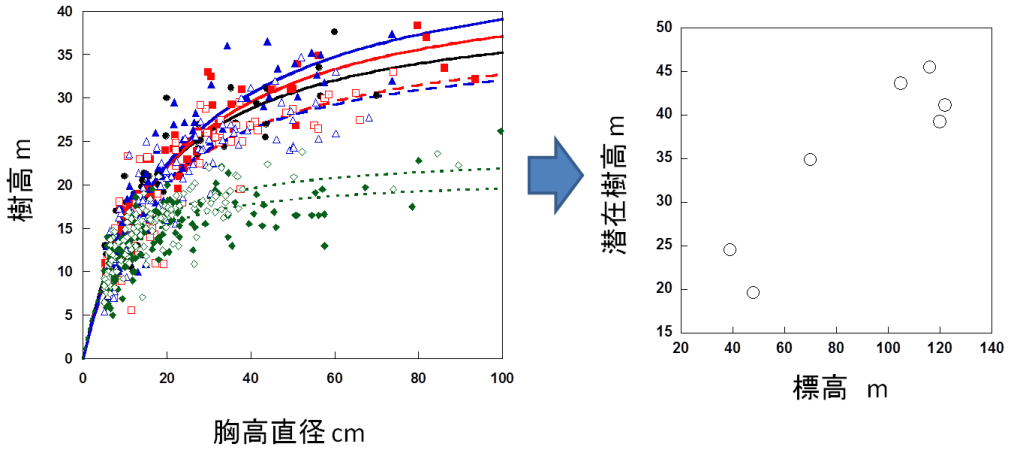


図 4.2.1-2. マナウス付近の 6 林分において取得された胸高直径と樹高との関係（左）とそれより推定された潜在樹高と標高との関係（右）

表 4.2.1-1. 地形別に推定された粗大有機物の蓄積量

地形タイプ	平均バイオマス±SE (Mg / ha)
台地林	60.5 ± 36.4
浸水林	29.8 ± 12.6
中間斜面林	55.5 ± 25.8

一方、細根の現存量は、谷部の浸水地のほうが、斜面上部の台地部よりも高い傾向が認められた（図 4.2.1-3 左）。ただし、この傾向は多雨期の後半にあたる 2010 年 6 月の測定値では顕著であったが、乾燥期の後半にあたる 2010 年 11 月時点ではあまり明瞭ではなかった（図 4.2.1-3 右）。その後も、谷部と台地部のそれぞれで細根現存量に経時変動が認められたが、この変動の幅は浸水林で大きく、台地林では比較的小さいことが分かった（図 4.2.1-4）。

地形単位ごとに細根現存量の深度分布をみると、斜面上部では約 7 割の細根が深さ 10cm 未満の浅い深度に集中していたが、斜面下部の浸水地および中腹では、より深い深度に、より多くの細根が分布する傾向が見られた（図 4.2.1-5）。なお、細根現存量と土壌の全窒素・全炭素との間には明瞭な関係は認められなかった。

イングロースコアによる測定の結果、細根の年間生長量は、浸水地で 4.7 ± 0.4 t ha^{-1} yr^{-1}、台地で 3.7 ± 0.3 t ha^{-1} yr^{-1} と推定された。また土壌断面画像の解析より、多雨期の前半に細根の成長率が増加しており、逆に多雨期の後半から少雨期の前半には細根の枯死率が増加していることが分かった（図 4.2-1-6）。

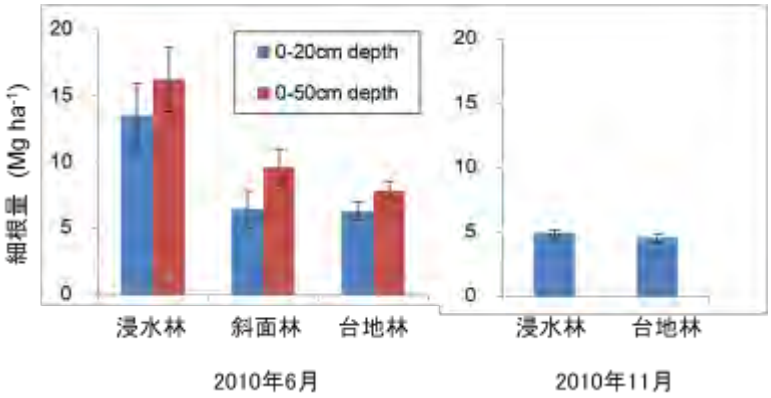


図 4.2.1-3 大面積調査区における 2010 年 6 月（左）と 2010 年 11 月（右）の地形単位ごとの細根現存量

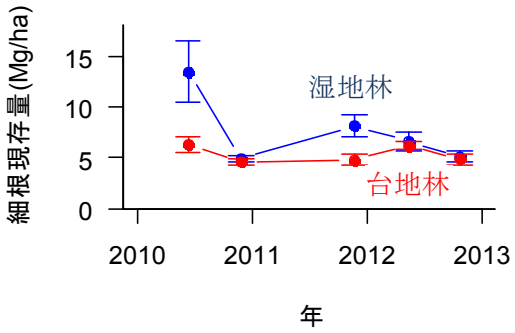


図 4.2.1-4 台地(赤)と谷地(青)の細根現存量の経時変動

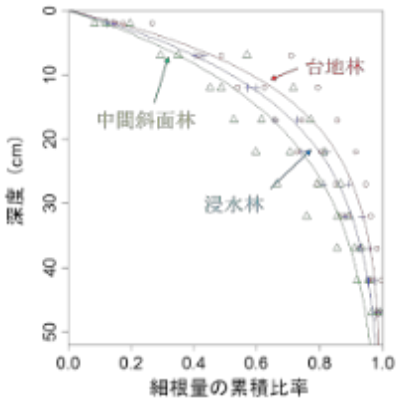


図 4.2.1-5 地形ごとの細根現存量の深度分布

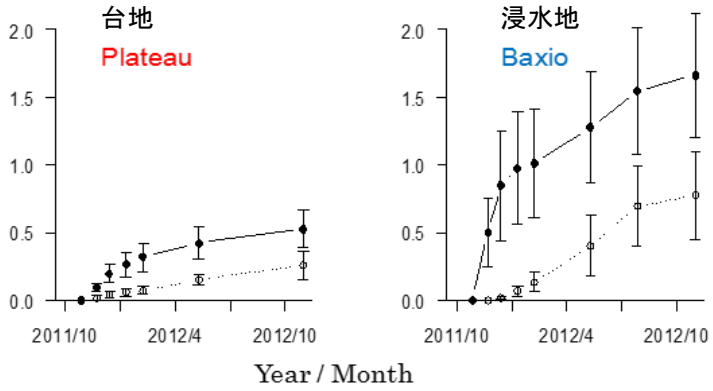


図 4.2.1-5 台地（左）と浸水地（右）においてスキャナで計測した細根の累積の長さ（cm /cm^2）の経時変化
実線は成長分、破線は枯死分をそれぞれ表わす.

成果: アマゾンを特徴づける台地～谷地の複合地形の比高に沿った樹高やバイオマスの変化パターンが明らかになり、さらに広い地形スケールにおいても、上層樹高は標高の低下に伴い低下し、標高（水面からの高さ）と林分バイオマスの間に正の相関が確認された。また、倒木など粗大有機物量も台地で最も大きく、斜面下部に向かって減少する傾向にあった。一方、細根の現存量は台地より谷地部の方が大きい傾向があり、その変動の幅や年間の成長量も谷地部で大きいことが明らかになった。このようなアマゾンの地形に沿った樹

高、バイオマス、粗大有機物量、細根量の分布や動態に関する知見は、国際誌や学会で発表されるとともに、森林インベントリの点情報を広域のバイオマスマップへスケールアップする際のパラメータ（浸水期間等）選択の根拠を与えている。

カウンターパートへの技術移転の状況： 現地調査およびデータ解析の共同実施を通じて、粗大有機物蓄積量や細根量の測定・解析手法等の技術が移転され、調査はプロジェクト終了後も継続されている。

成果の位置づけや類似研究との比較： これまで、アマゾン（テラフィルメ）の地形傾度に沿った森林のバイオマスの変化を調査した例はあるが、地形経度に沿った森林の樹高変化とその変化に対したバイオマスの変動を明らかにした例はなかった。とくに、アロメトリ式のパラメータとしての樹高の有無によるバイオマス推定値の変動幅を定量化したことは、アマゾンの森林の炭素蓄積量 MRV の不確実性の一因とその推定値を明らかにした点で重要である。また、地形別の細根量とその季節変化の体系的な観測は、アマゾンでは初めての試みであり、谷地（季節的な浸水地）における細根バイオマスのダイナミックな変動が見いだされた。

2) 択伐施業林の構造と炭素動態

実施方法： マナウス近郊の択伐林において、バイオマスの増加量と伐採後の経過年数、伐採による攪乱の程度との関係について検討した。試験地はマナウスの東近郊、イタコアチアラにあるプレシャスウッド社の択伐施業林である。ここでは 1995 年の創業以来、1年ごとに林班をかえて択伐がおこなわれている。ここでの択伐の方法は、持続的利用を目指した計画にもとづいており（FSC 取得済み）、伐採量は 30m^3/ha が上限、伐採対象とする樹種は約 40 種に限定するといった厳しい基準を設けて実施している（写真1）。

実施内容： この択伐林に、無施業林を含めた119のプロット（20×125m、0.25ha）を2010年に設置し、プロット内に出現する胸高直径 *D* が 10cm 以上のすべての立木を対象に、*D* の測定と樹種同定をおこなった。あわせてプロット内に出現する切り株の数と直径を記録した。2013 年には設置済みのプロットのうち 54 プロットを再測定した。それぞれの樹木の *D* を使って、地上部地下部の合計バイオマスを推定し、プロットごとにヘクタールあたりバイオマスを推定した。

成果： 2013 年における各プロットの現存量は 402 t/ha から 758 t/ha まで大きくばらついており、林分バイオマスやその増加量と伐採後の経過年数、伐採による攪乱の程度との間に明瞭な傾向がみられなかった（図 1、図 2）。

2010 年から 2013 年までの平均年間バイオマス増加量は、択伐林で 6.1±8.2 t/ha/yr (n=49)、無施業林で-7.4±10.8 t/ha/yr (n=5)と大きな差がみられた。バイオマスの変化を生立木の成長による増加と立木の枯死による減少にわけて算出すると、択伐林では 10.6±4.4 t/ha/yr の増加に対し枯死量が-5.5±6.2t/ha/yr、無施業林では 6.7±2.1t/ha/yr の増加に対し枯死量が-16.7±13.4t/ha/yr となった。無施業の成熟した天然林では、立木の成長が択伐林よりも低く、枯死木の発生が多い結果となった（図 1）。

伐採後の経過年数と林分バイオマスの関係をロジスティック回帰した結果、林分バイオマスの上限値は約 320t/ha（無施業林の平均バイオマス 321.5t/ha に匹敵）と推定され、このバイオマスまで回復するのに 12. 9 年かかると予想された。このように、本択伐施業林においては、一部を除いて、択伐後のバイオマス回復が進んでいると考えられた。

写真1. 左:択伐施業林全体の様子とプロットの位置。右:プロット内にみられた過去の切り株。板根をもつ樹種では斜めに切り込みが入っており、根本の部分が林内に捨てられている。

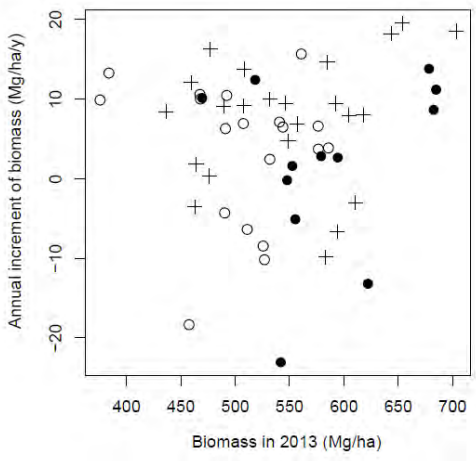


図１. 伐採後の経過年数と 2013 年の現存量との関係。●伐採による攪乱なし、○伐採による軽微な攪乱（切り株かトラクター道が１つ）、＋伐採による中程度な攪乱（切り株およびトラクター道が２つ以上）。

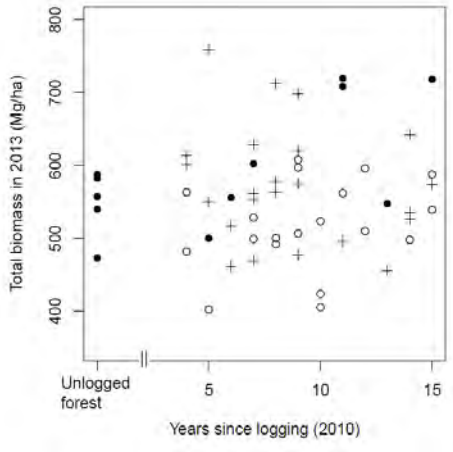


図２. 2013 年現存量と年間平均増加量との関係。凡例は図１と同じ。

カウンターパートへの技術移転の状況： 現地調査およびデータ解析の共同実施を通じて、択伐施業林の林分成長データベースの構築、択伐施業が森林の炭素蓄積量に及ぼす影響の解析手法、とくに時系列データの統計処理に関する技術移転がなされた。

成果の位置づけや類似研究との比較： 中部アマゾンにおける商業的択伐施業林の詳細な成長調査は今回初めておこなわれたものであるが、東部アマゾンのパラ州パラゴミナスにおいても択伐後のバイ オマス回復過程が調査されており、択伐後に元のバイオマスに回復するのに要する年数は、ha あたり 4.5 本の択伐で 16 年、ha あたり 3 本の択伐で 15 年という事例が報告されている。本調査林（イタコアチアラ プレシャスウッド社択伐施業林）では、択伐本数は平均 1.9 本/ha（切り株より）、バイオマスの回復に要する平均年数は 12.9 年と推定されたが、この年数はアマゾンにおけるこれまでの報告と類似した範囲にあるといえる。

(2) 研究成果の今後期待される効果

成果の今後の展開見込： アマゾンを特徴づける台地と谷地（季節的な浸水地）の複合地形の環境傾度に沿った森林のバイオマス、粗大有機物量、細根量の分布パターンとその動態の概要が明らかになり、森林インベントリの点情報を広域のバイオマスマップへスケールアップするパラメータ（標高や浸水期間など）の選択の根拠を与えおり、今後、さらに潜在的なバイオマスや純生産量が規定されるメカニズムの解明への展開が期待される。また、中央アマゾンにおける商業的択伐施業

林の林分動態の調査は、本研究によって先鞭がつけられたものであるが、INPA の研究者のインセンティブとなり、INPA 実験林でかつて実施された異なる択伐強度の施業実験の追跡調査が行われ始めており、今後、炭素蓄積を維持する持続可能な択伐施業のあり方の解明が期待される。

社会への波及効果： イタコアチアラのプレシャスウッド社の択伐施業林の調査は、プレシャスウッド社の理解と協力があって初めて可能になったものである。科学的なデータの収集とその解析結果を択伐施業林の経営に活かすことが重要で、共同研究者である INPA の Niro Higuchi 博士はプレシャスウッド社のアドバイザリーメンバーにはいっており、本研究成果の一部は施業計画に取り入れられる予定である。

4．3 森林の炭素動態のマッピング（東京大学生産技術研究所）

(1) 研究実施内容及び成果

1) アマゾンの立地環境の解析

実施方法： 2001 年～2009 年の Terra/MODIS の植生指数及び水分指数、昼と夜の表層温度データに対して独自に開発した時系列モデル処理法（LMF-KF および離散的状態空間モデル処理・DS4 法）を施し、雲やシステムノイズを除去した画像を生成して、森林地帯の季節変動を明らかにした。その処理の実用化のために、PC 上で高速処理が行える処理システムを開発した。これらのアマゾン全域データを最終的に確認して、クラスタリング処理を行い、アマゾン流域のクラスタ画像を生成した。また、クラスタ画像に対する林分カテゴリは高分解能衛星や地上調査で確認した。

実施内容： MODIS の植生指数と水分指数、温度画像に対して時系列処理を施したデータセットができ、クラスタリング処理によってクラスタ画像を生成した（図 4.3.1-1）。

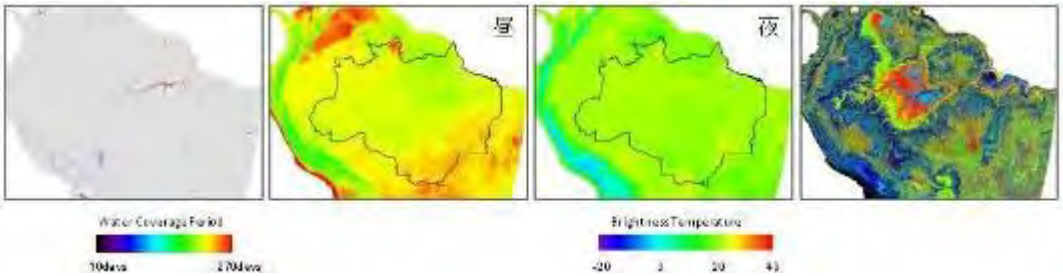


図 4.3.1-1 立地環境区分図作成に用いたデータセットおよび環境区分クラスタリング結果
左から冠水期間図、昼間輝度温度、夜間輝度温度、環境区分クラスタリング結果

MODIS の植生指数と水分指数、温度画像に対して時系列処理を施したデータセットに対して、これらをクラスタリング処理によってクラスタ画像を生成、これを基に森林環境区分図を作成した（図 4.3.1-2.・図 4.3.1-3）。MODIS の元データの時間分解能と空間分解能の両方を保持した雲なし時系列データセットは、世界に先駆けて当グループがソフトウェアとともに開発したものである。ただし、森林の分布については、MODIS データのみでは精度に問題があるため、INPE から提供されたデータを用いた。

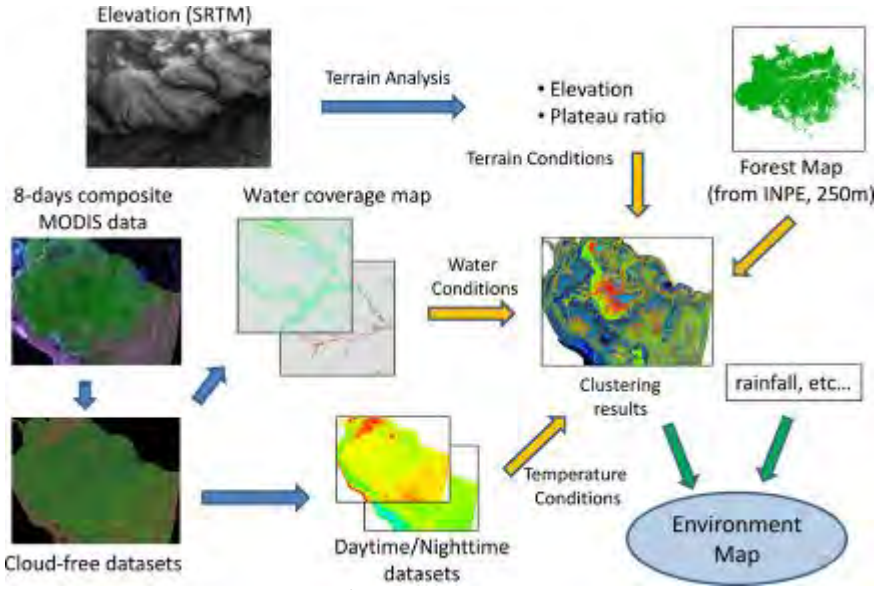


図 4.3.1-2　森林環境区分図作成の流れ

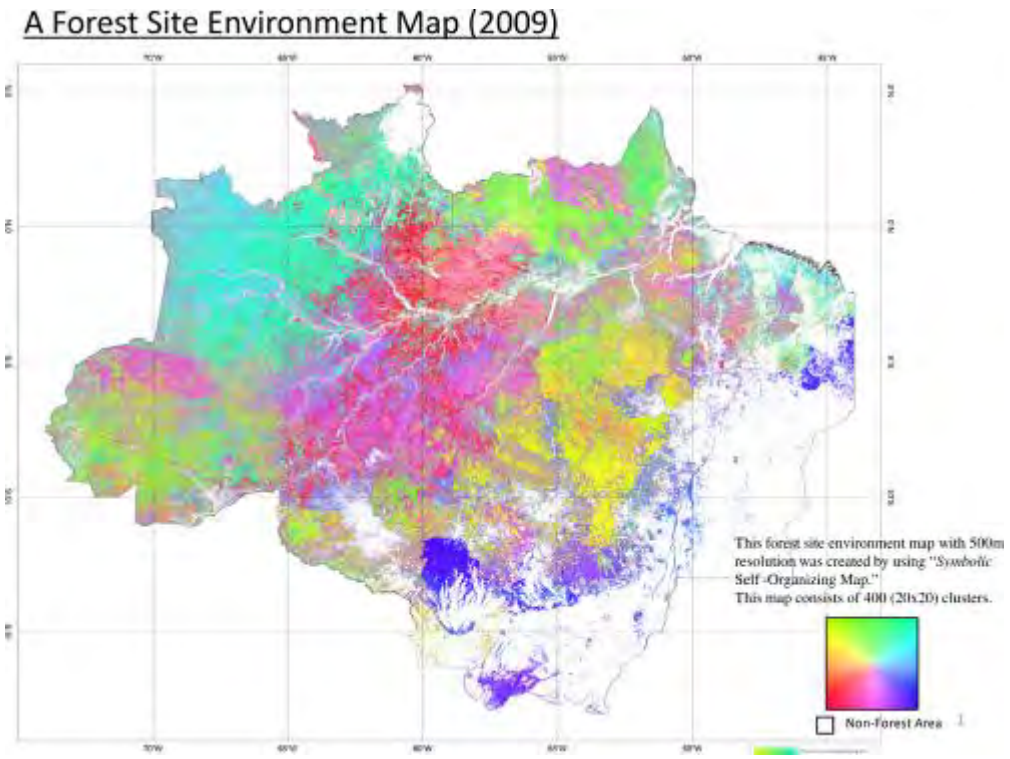


図 4.3.1-3　森林環境区分図

成果: Terra MODIS の植生指数、水分指数および温度画像に対して時系列処理を施し、立地環境区分図の基礎データセットを作成した。また、中央アマゾンの地形を特徴づける台地・斜面・谷地が、林分構造に強く関係することが明らかになったため、標高データである SRTM データを収集解析し、平均斜面と台地割合とを計算して立地環境区分の基礎データセットへ追加した。

アマゾン地域ではその面積に対して気象観測点の数が少なく、森林環境区分図の入力データとして用いる降水量の情報が面的に得られない問題があった。そこで、2001 年～2009 年の GSMaP プロダクトを入手し、降雨量の季節変化や年々変動に関するデータセットを作成した。Legal Amazon 全体では、MODIS による年間平均冠水期間と GSMaP による年間総降雨量が相関

する結果を得た。このことは、各年で森林環境区分図を作成できることを示しており、気候変動等のような攪乱要因に対する森林環境の頑健性指標を年毎の森林環境区分の揺らぎに基づいて計算することが可能となった。

アマゾン全域での 8 日間合成 MODIS データは 2001 年～2009 年の総計で約 500GB 以上のデータ量があり、雲除去等のための状態空間モデルを用いた時系列処理だけでも半年程度要するのが現状である。そこで、処理時間の短縮を図るための並列化手法として、GPGPU(General Purpose Graphics Processing Unit)処理に着目した。

状態空間モデルによる時系列処理は画素毎の独立性が高い部分が多く並列処理に適していると考えられる。特に、離散的状態空間モデル（DS4）の場合には単精度実数および整数演算が主体であり、GPGPU の高い演算性能を活用した高速化が可能であるとして「HMM（隠れマルコフモデル）による状態推定」について GPGPU 化を行った。

使用した離散的状態空間モデルのソースコードは倍精度実数演算を主としているが、GPGPU の特徴を生かすために確率計算には対数を用い、単精度実数演算でも十分な精度が得られるようにした。その結果、最大で 26.6 倍の高速化が達成できた（澤田ら, 2012）。離散的状態空間モデルのプログラム全体でも 16 倍の高速化が達成できた（図 4.3.1-4.）。

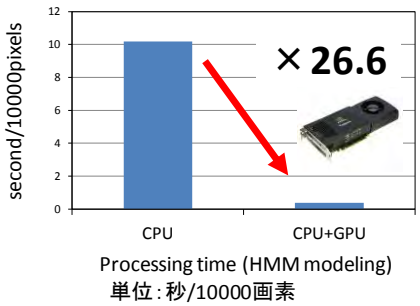


図 4.3.1-4　GPGPU による時系列処理の高速化結果

カウンターパートへの技術移転の状況：　リモートセンシングに関わる現地調査方法に関しては、主に INPA の研究者を対象に現地で技術移転を進めた。リモートセンシングのデータ処理技術については、共同研究者（INPA、INPE）を日本に招へい（研修）し、アマゾンの立地環境のデータ処理技術、MODIS データの時系列処理や SAR 等のデータ処理技術を移転した。なお、INPE の共同研究者は、MODIS データによる「森林開発地自動抽出システム(ADD-MODIS)」や「広域洪水監視システム」をブラジルに導入する目的から、研修期間中にアマゾンに隣接するパンタナル湿原を対象として 8 日毎の冠水域マップを MODIS データによって作成した（図 4.3.1-5.）。

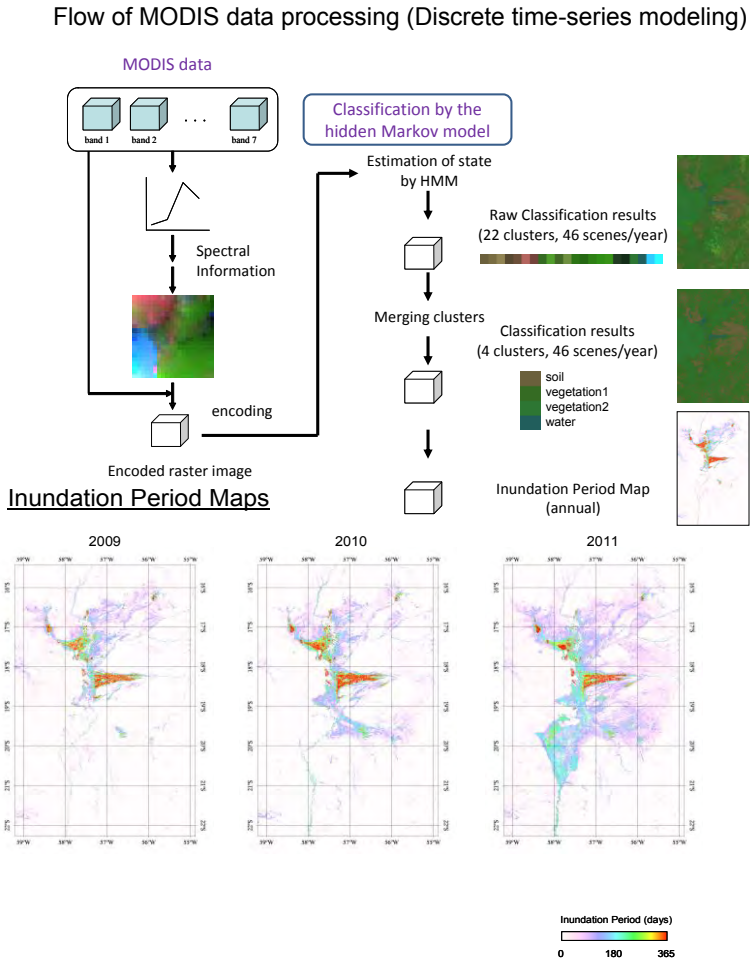


図 4.3.1-5　パンタナル湿原の冠水域マップの作成手法（上）と冠水期間図（下）

成果の位置づけや類似研究との比較： アマゾンを含む既存の広域バイオマス推定研究の問題点として、ここでは人工衛星データ取り扱いの問題点を3つ挙げ、本研究におけるそれらの解決法について述べる。

①バイオマス推定における立地環境の季節性

Saatchi ら(2007、2011)は、MODIS の NDVI と LAI(葉面積指数)データについては、月合成データから季節性を考慮して「年間最大値」「年間平均値」「乾季の平均値」「雨季の平均値」を抽出し解析に用いている。NDVI や LAI はバイオマス推定において重要な変数であるが、1 ヵ月合成データでも熱帯地域では雲の影響が残っており、推定誤差の原因となり得る。また、彼らのバイオマス推定モデルには降水量の季節性が含まれていないが、Keith ら(2009)はインベントリプロットのバイオマスデータを解析して、気温と降水量が重要なパラメータである結果を得ていることから、気温と降水量を取り入れることが適切と考えられた。

Baccini ら(2008, 2012)は、16 日間合成の MODIS 反射率データを用いているが、画素毎に雲のないデータを選んで合成しているため、季節性については考慮されていない。

②人工衛星データの位置ずれがプロダクトに及ぼす影響

Saatchi ら(2007)では、人工衛星データの画素の位置ずれがバイオマス推定誤差に与える影響を論じているが、25 回のブートストラップ法では十分でなく、5km 四方での誤差評価となっている。また、Saatchi ら(2011)では、ICESat/GLAS LiDAR 計測地点と対になるべきインベントリプロットの位置ずれを論じている。一方、Baccini ら(2007)はこの問題に言及しておらず、Baccini ら(2012)でも、他の誤差要因と分けずに近似的に誤差の評価を行なっている。Baccini ら(2012)のバイオマス推定結果(プロダクト)は彼らのサイトからダウンロードが可能であり、当グループはブラジルおよび東南アジア(主にメコン河流域)のバイオマス推定プロダクトを入手したところ、そのプロダクトには、用

いたMODISデータに存在する画素の位置ずれなどに起因すると考えられる現象が至るところで確認された。例えば、本来は1本しか存在しないはずの河川が複数見えている部分がある。
③衛星観測条件の違いがプロダクトに及ぼす影響
　また、Bacciniら(2012)のプロダクトでは、用いたMODISデータのモザイク処理で発生する不連続性などに起因すると考えられる現象も確認された。すなわち、観測日時や観測条件(衛星軌道や大気の状態、太陽高度など)が異なる複数のデータを合成した結果生ずるバッチ状や直線状の不連続性がバイオマス推定結果にも認められた。

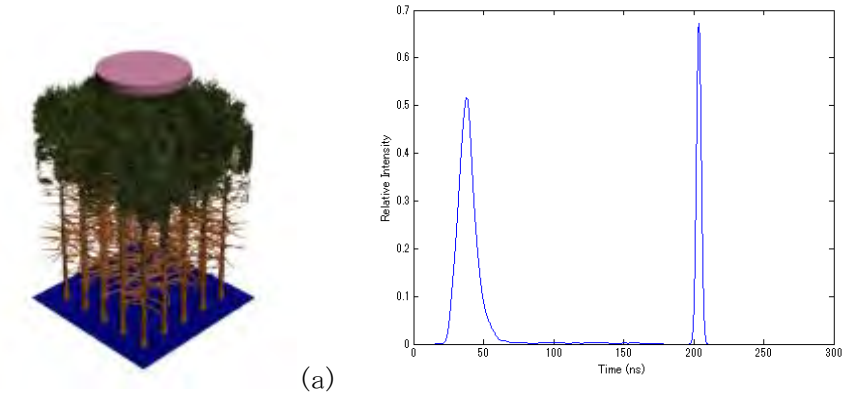
上記の問題の解決策
①バイオマス推定における立地環境の季節性の考慮
　研究グループで開発した時系列処理手法を用いることにより、MODISデータの雲除去が可能となり、NDVIやNDIIに加えて地表面温度や冠水期間などの季節性もバイオマス推定モデルに取り入れ、高精度化している。これらの雲なし時系列データセットを用いることで、、乾季や雨季の長さに関連する値もモデルに取り入れている。また、降雨データにGSMaPを用いて季節変化や年々変動を考慮したより精密なモデルを構築した。
②人工衛星データの位置ずれがプロダクトに及ぼす影響の考慮
③衛星観測条件の違いがプロダクトに及ぼす影響の考慮
　②および③は、地理補正の誤差や観測条件の違い、雲の存在が原因となっており、MODISデータを広域で利用する際の障害となっている。本研究では、これらの障害を解決する目的から独自の時系列処理手法(kalmfit法およびDS4法)を開発した。なお、この手法では、雲除去だけでなく、地理補正の誤差や観測条件の違いなども統計的モデルで平均化されるため、結果として画素ずれの軽減と観測条件の均一化の効果がもたらされることが報告されている(沢田ら、2002)。
　このように本研究では、時系列処理済のデータを用いてバイオマスの推定を行なうため、先行研究と比較して画素の位置ずれや観測条件の不連続性に起因する誤差の軽減がなされていると考えられる。

2) 林分構造パラメータの解析

実施方法: 大面積プロット、2.5km ベルトトランセクト、地上インベントリによる多点プロット(千数百)の情報をGIS 上に展開したデータベースを利用する。その地域を含む森林を対象にして、LiDAR観測を実施する。また、同林分に対して、ALOS・PALSARデータを集積し、バイオマス計測に有効な画像処理を施してデータを蓄積する。

実施内容: これまでの調査データは集積されて GIS データセットとして展開した。この課題では、インベントリ位置情報とLiDAR観測とを用いて林分構造パラメータの解析を行う計画であった。さらに、当プロジェクトで利用する予定であったLiDARシステムはfullwave formと呼ばれる最先端の機器であったため、解析に当たって、データの読み取りソフトウェアおよび解析アルゴリズムの開発を行った。しかし、プロジェクト期間内には航空機LiDARの観測に関してブラジル政府から撮影許可が下りず、データの収集が実施できなかった。対案として、カメラとレーザー測距器を搭載したUAV(Unmanned Aerial Vehicle)を利用した森林構造計測を行った(後述)。経時的な実施内容は以下のとおりである。

① 当プロジェクトで開発したFullwave form読み取りソフトウェアにより、Fullwave form計測形式のLiDAR データの解析が可能になった。しかしながら、林分の垂直構造が複雑なため、どのような素過程でFullwave formが生成され、それが林分パラメータとどのような関係にあるのかを解析すること、実際のFullwave formデータからでは難しい。そこでFullwave formシミュレータを開発した。本シミュレータは、3DCG 空間に森林の 3 次元ポリゴンを作製し、レイトレーシング技術を用いた波形の生成および素過程の可視化が可能となった。図4.3.2-1・図4.3.2-2にシミュレーションの一例を示す。



(a) (b)

図 4.3.2-1　開発した波形シミュレータで利用する場(a)とシミュレートした波形(b).

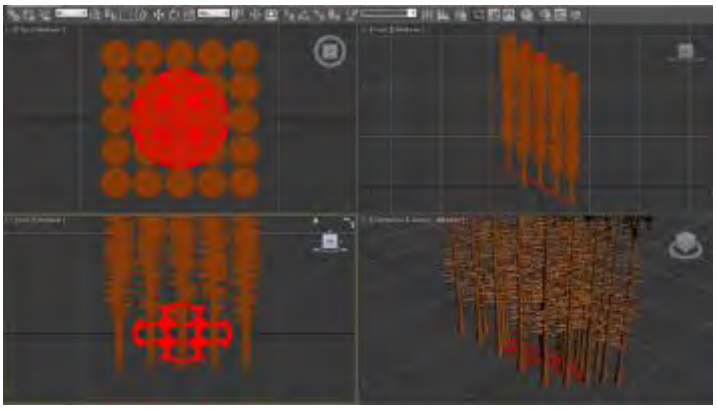


図 4.3.2-2　開発した波形シミュレータによる素過程の可視化

また、既存の航空機 LiDAR データを入手して森林インベントリデータと照合し、林分材積の推定方法を検討した。LiDAR データから地面の標高と林冠の高さを求めた（図 4.3.2-3）。標高データと地上測量データとの良い一致を確認した。

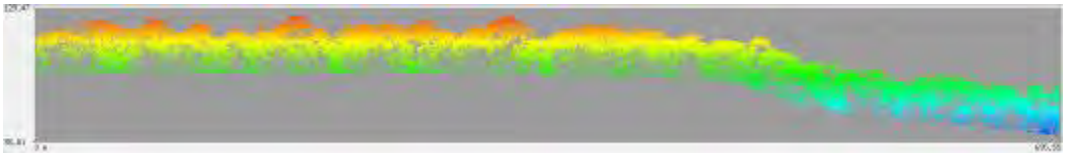


図4.3.2-3.　国立アマゾン研究所試験地のLiDARデータによる樹高と標高計測

さらに、当プロジェクトでの LiDAR 計測はレーザー光の反射波形を記録する新しい方式のため、得られるデータの解析アルゴリズムおよびソフトウェアが存在しないことが調査の結果明らかとなった。そのため、現地での LiDAR 計測に先だって、日本国内でのサンプルデータを用いて、レーザー反射波形の読み取りおよび波形解析・分類ソフトウェアの試作を行い、林分構造解析のためのアルゴリズムの検討を行った。

なお、航空機 LiDAR 計測は高精度で樹高計測が可能であるが、アマゾン全域と比較しても測定範囲が限定されてしまうことは避けられない。そのため、LiDAR 計測を補完する意味で、ASTER データによる DSM(数値地表モデル)による樹高推定についても試みた。 その結果、森林の開発が進んでいる地域において、開発前後の DSM の値を比較し、高さの差を計算することで樹高推定が可能である結果が得られた。

② 研究のメイン対象地である INPA の実験林 ZF-2 と、計画的な択伐林施業がおこなわれているイタコアティアラの森林地帯の TerraSAR-X 衛星画像（空間分解能1m、観測角度が2種類）を入手することができ、これによって林分 3 次元構造の取得を試みた。

TerraSAR-X 衛星画像を用いて、ZF-2 地域の林道沿いの樹高および林道周辺の地盤高の推定を試みた。その結果、過少推定ではあるが、合成開口レーダ画像を用いての樹高推定および地盤高の推定がともに可能であることが確認できた。ただ、樹高および地盤高の推定精度を高度化するために、合成開口レーダ画像に特有のスペックノイズの除去手法およびステレオ画像からの 3 次元化手法の高度化が必須であり、そのためには、航空機 LiDAR データのようなより詳細な 3 次元データが必要であるという結果が得られた(図 4.3.2-4.)。

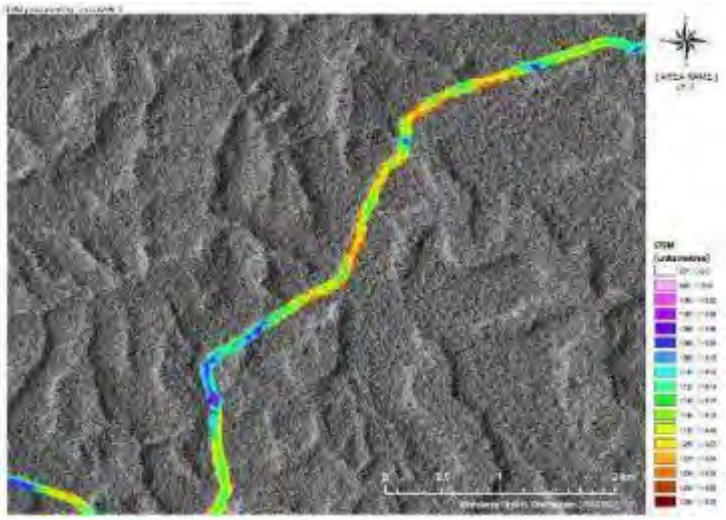


図 4.3.2-4　ZF-2 周辺の林道沿いの樹高推定結果

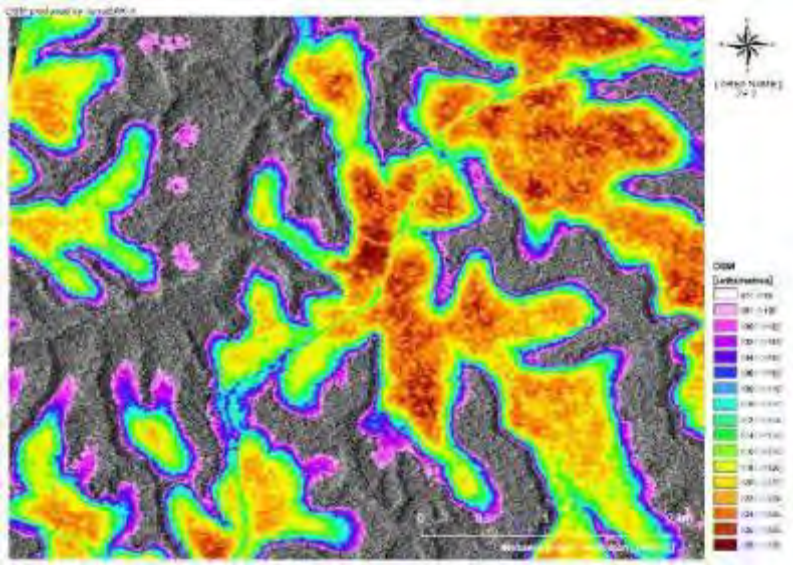


図 4.3.2-5　ZF-2 周辺の林道周辺の地盤高の推定結果

③ full-wave LiDAR 観測で得られる大量の波形データの前処理を迅速化するため、自己組織化マップ(SOM)アルゴリズムによる波形分類ソフトウェアを独自に開発した（図 4.3.2-6.）。これは地盤面のみのフットプリントとそれ以外の高速判別を行なうものである。今までは、すべての波形データを解析し、該当する波形を抽出してから地盤高を推定していたため、地盤高の計算だけに限って

も膨大な時間と労力を必要としていた。しかしながら、本波形分類ソフトウェアを利用することで、地盤高を短時間に計算することが可能となり、地盤高を必要とするバイオマス推定までの計算時間が短縮できるようになった。

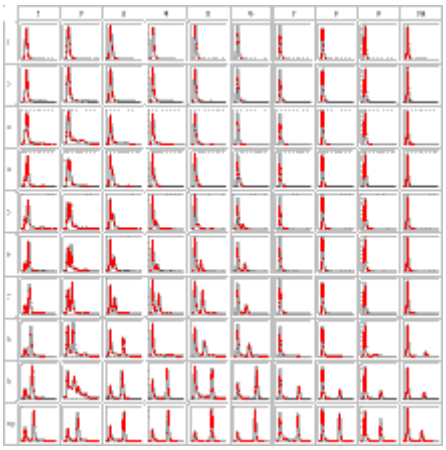


図 4.3.2-6　独自に開発した full-wave LiDAR 波形分類システムの結果
地盤面からの反射のみの波形とそれ以外を明確に分離することができる.

LiDAR 観測の波形データから樹高および林分構造の推定を行なうには、ピーク位置と高さ、半値幅を精密に決定する必要がある。まずデコンボリューション処理後にピーク個数とそれぞれのピークパラメータの推定を行ない、続いてピークパラメータを最適化するソフトウェアを開発した。樹高推定のためには地盤面の反射ピークをとらえる必要があるが、林内での地盤面からの反射光は一般的に微弱で、しきい値のみでピーク位置を定める従来の手法ではノイズに埋もれてしまうのが欠点であった。しかし、このソフトウェアを用いれば地盤面のピークも自動検出でき、さらには大量の波形データでもピーク位置の全自動精密決定が可能になった（図 4.3.2-7）。さらに、本ソフトウェアを用いて出力するパラメータは、樹冠形状や林内の垂直構造に関して情報を有していると推察され、森林の構造に関する情報を自動的に抽出できる可能性を有している。

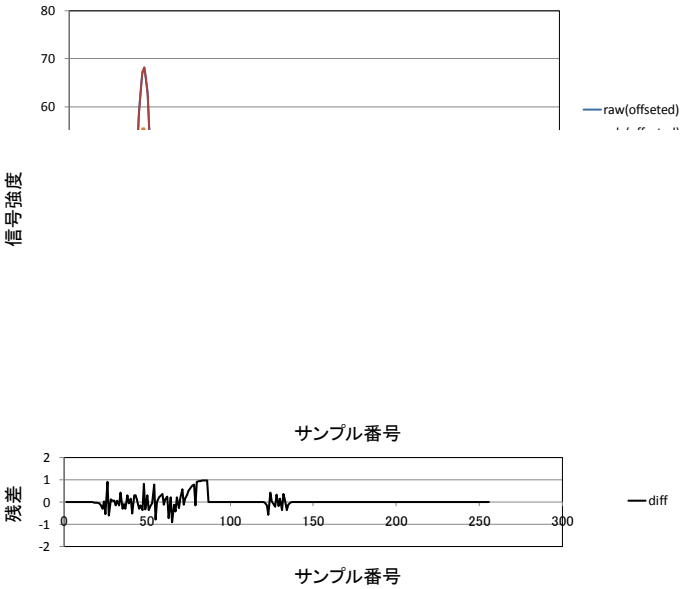


図 4.3.2-7　fullwave LiDAR 波形データのピーク位置精密決定の結果例
上段はピークフィット結果、下段は元データとフィッティング結果の残差.

成果： INPA と共同で LiDAR 観測のプロットを決定し、LiDAR 計測の飛行コースを作成した。並行

して LiDAR データの解析をブラジル側の研究者が行えるよう、Matlab 言語の講習会を INPA にて実施した。この講習を通じて、基本的なプログラム開発の流れと頻度高く利用する関数群に関して技術移転ができた。

しかし、当プロジェクトで予定していた LiDAR 観測が実施されなかったため、サンプルデータを用いて林分構造解析のためのアルゴリズムの検討を行い、Fullwave LiDAR 波形シミュレータを開発した。本シミュレータではレイトレーシング技術を用いた波形の生成および素過程の可視化を可能にした。

一方、LiDAR 計測を補完する意味で、Terra ASTER デーから推定された DSM を利用して樹高推定を試みた。その結果、開発前後のデータを比較することで樹高の推定が可能であるとの結果が得られた。さらに、高頻度観測衛星データの処理に用いる状態空間モデルを発展させ、林分および土地被覆などのカテゴリの時間変化を直接検出するアルゴリズムを導出、粒子フィルタによる実装を行った。これは高頻度観測衛星データの 1 画素（500m 四方）内のカテゴリ割合を推定可能にするものであり、1 画素中の環境変動の速度等、従来得られなかった情報を抽出し、モニタリングの精度を大幅に向上できる可能性がある。当グループで独自に開発した、画素分解法のひとつであるパターン展開法によって森林変化を自動抽出する方法を同一地域の 26 シーンの Landsat/TM データに適用し、MODIS データを用いた時系列モデル化手法の妥当性を確認する目的で森林開発時期のマップを作成した。航空機による Full-wave LiDAR 観測が実施されなかったため、当初計画通を変更して UAV による LiDAR とカメラ観測システムを考案し、導入した。また、既存の LiDAR データを入手して森林インベントリデータと照合し、林分材積の推定方法を検討した。LiDAR データから地面の標高と林冠の高さを求めた。標高データと地上測量データとの良い一致を確認した。

カウンターパートへの技術移転の状況： 地上インベントリデータに対する GIS データの作成は、相手側機関もすでに技術取得しており、利用されている。

LiDAR データの解析技術については、Matlab 言語の講習会を INPA にて実施した。この講習を通じて、基本的なプログラム開発の流れと頻度高く利用する関数群に関して技術移転ができた。また、INPA の共同研究者を招聘し、PALSAR データ処理の技術、空中写真測量技術および航空機 LiDAR 技術の移転をおこなった。

3）炭素蓄積マップの開発

実施方法： アマゾン全域での推定には PALSAR モザイクデータや ICESat/GLAS、MODIS の時系列データ等を利用してアップスケールを行い、メッシュ単位で炭素蓄積量推定とその誤差評価を行い、マッピングした。また、その結果を INPE が管理する DETER や PRODES から得られる森林減少情報と統合して、アマゾンでの森林炭素蓄積量の動態を把握し、中央アマゾン熱帯林における炭素の蓄積図、動態図を作成した。

実施内容： 2）で開発した航空機 full-wave LiDAR データ解析プログラムを利用して、ICESat/GLAS の LiDAR 波形データからフットプリント内の樹高(RH100)とそれに関連する波形パラメータを計算し、その結果を MODIS などの雲除去済衛星データを用いてスケールアップを行う方法を開発、推定樹高マップを作成した。同時に、現地調査で得られた樹高計測結果と比較を行った。

当グループでは森林環境区分図作成に用いた分類アルゴリズムにクラスタ内での最尤推定の機能を付加し、ICESat/GLAS の波形データから精度よく推定された樹高を基に、広域で樹高推定を行う手法を開発した（図 4.3.3-1.）。

Data Processing Scheme

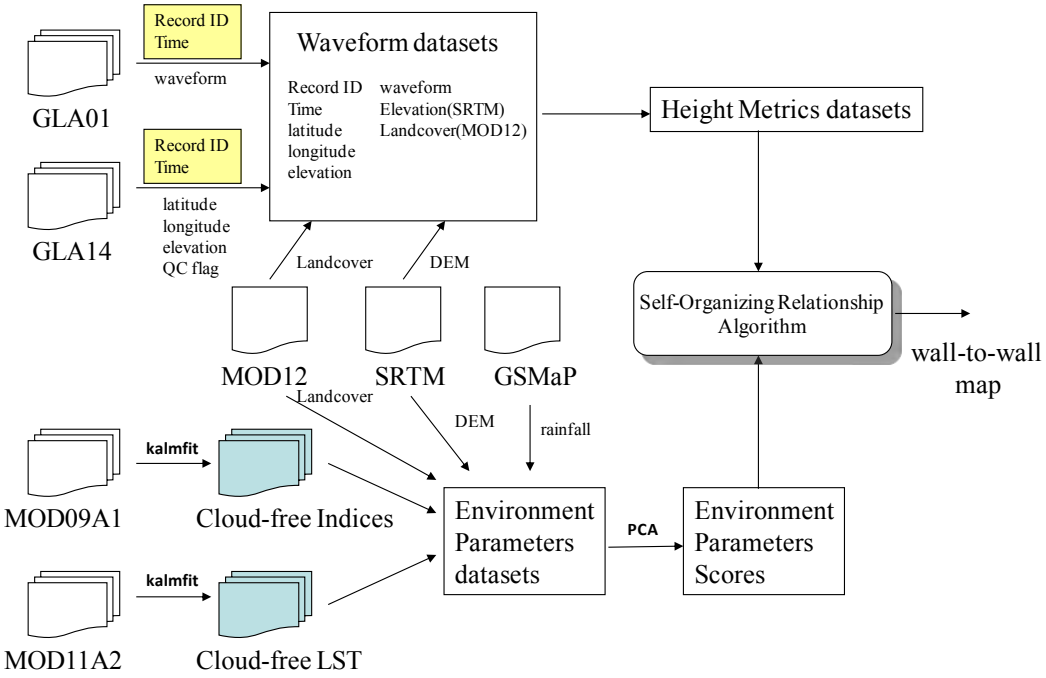


図 4.3.3-1　広域樹高推定法のフロー

図 4.3.3-2.の環境データの空間分解能は異なるため、最終的なプロダクトの分解能（約 500 m、1/240 度）と異なるデータはバイリニア法によってリサンプリングを行った。次に、これら 21 個の変数の主成分分析を行い、主成分画像を作成した。スケールアップには第 1～第 12 主成分（PC1～PC12）を用いた。

スケールアップには、Yamakawa ら(1995, 2006)の Self-Organizing Relationships (SOR)を用いた。この SOR 法は、Self-Organizing Map を利用した機械学習法である（Yamakawa ら、2006）。SOR 法の動作モードは 2 つあり、まず、”Learning Mode”で GLAS フットプリントの RH100 とその地点の主成分スコア（PC1～PC12）の 13 次元のベクトルを学習させる。つぎに、”Execution Mode”で、RH100 データがない画素の値を、PC1～PC12 から推定する。

SOR のパラメータは予備実験によって決められた。スケールアップ処理は、森林域画素のみについて行った。RH10～RH90 に関しても RH100 と同様の方法でスケールアップを行なった。

森林環境区分でも用いられた自己組織化マップ(SOM)は、アマゾン全域の樹高と森林環境の関係を二次元平面に非線形射影していると解釈が可能で、類似した樹高かつ類似した森林環境の地点は SOM 上でも近傍に位置すると考えられる（図 4.3.3-2）。

クラスタの作成と相対樹高推定（3）

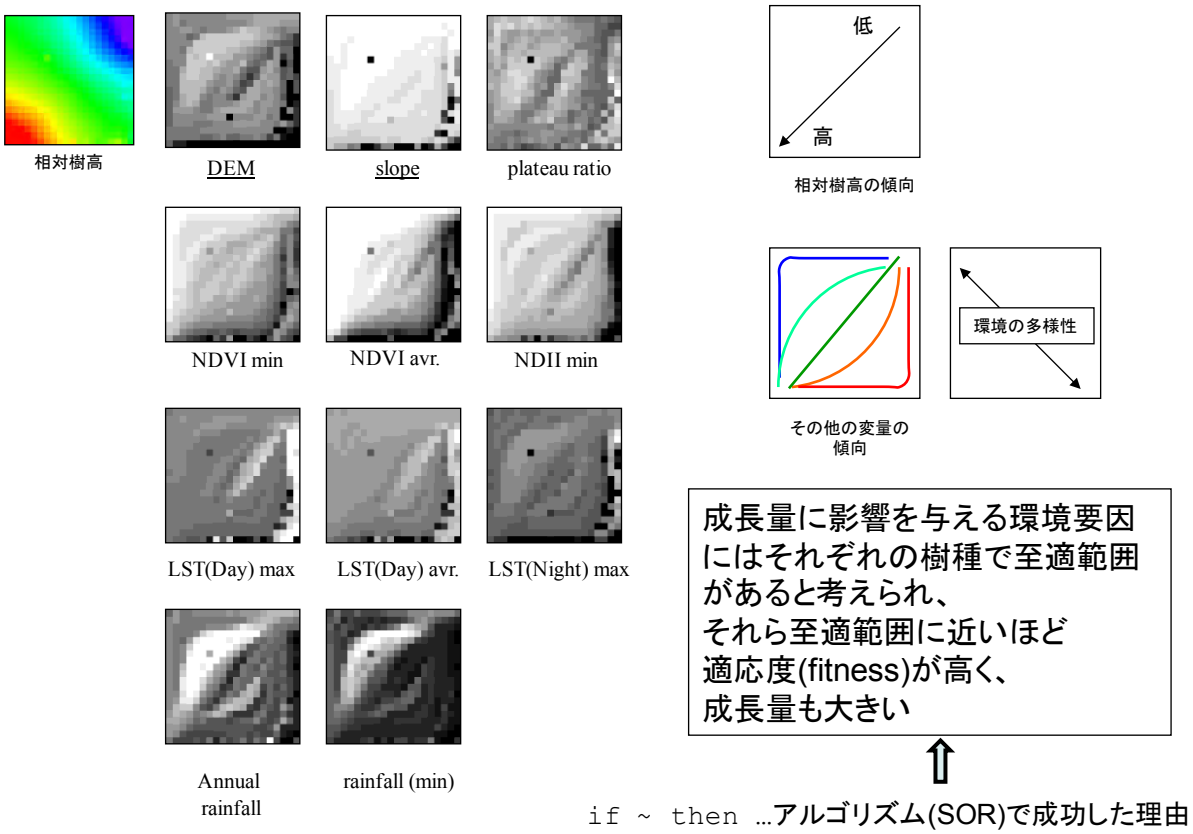


図 4.3.3-2　樹高と環境変量の関係の SOR による可視化

アマゾン全域の推定樹高マップを図 4.3.3-3.に示す。

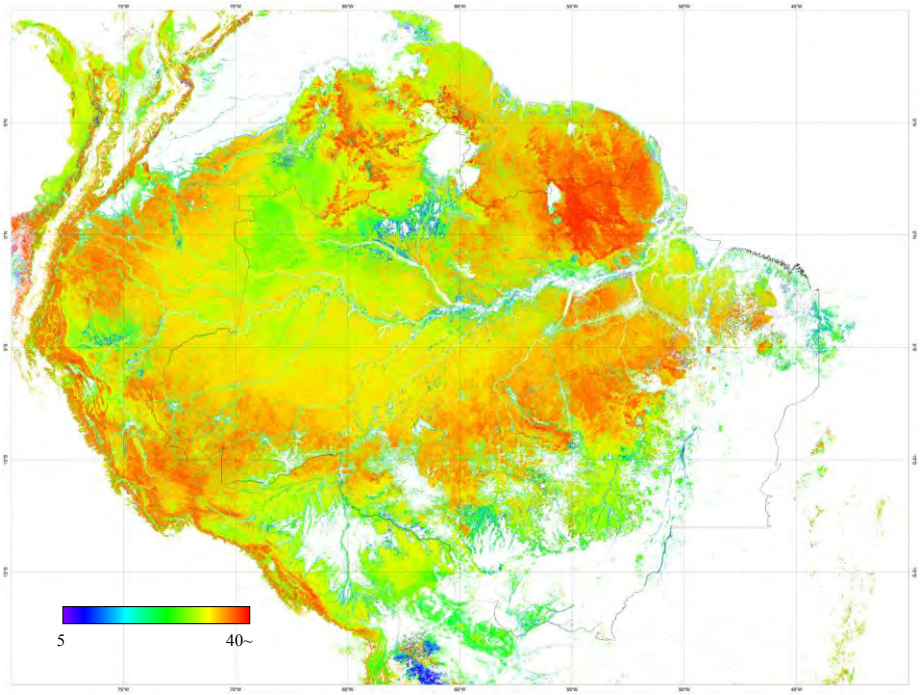
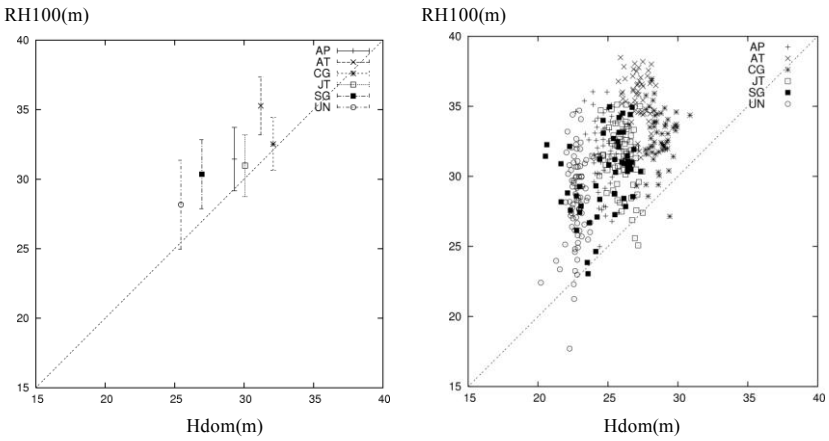


図 4.3.3-3　アマゾン全域の推定樹高マップ

衛星データによる樹高推定結果と、インベントリ調査での倒木による樹高計測の結果および胸高直径から求めた樹高（Hdom）とを比較したグラフを図 4.3.3-4.に示す。倒木による結果はインベントリ調査が行われた 6 つの地域の平均値で、胸高直径から推定される樹高（Hdom）では画素毎で比較を行っている。



- Hdomはインベントリ調査からの値
- RH100はICESat/GLASとMODIS等、衛星データのみを使って計算した値
- エラーバーは1σ
- バイアス値は2.3m（ICESat/GLAS本来の樹高推定精度は∓3m程度）

図 4.3.3-4　衛星による樹高推定結果と地上計測結果との比較

つぎに、ICESat/GLAS による樹高および波形パラメータ、1）で作成した環境変量データセットとインベントリ調査によって得られたバイオマスの実測値をモデル化し、広域のバイオマスマップを作成した。インベントリグループによるこれまでの地上調査地点の毎木調査データと GPS 測位による地理座標データを結合させデータベースの整備を行った。これにより、約 900 地点以上の調査データをリモートセンシングデータの解析に取り入れて解析を行うことができた（図 4.3.3-5）。

- バイオマスを各画素の環境変量とRH50あるいはRH100の関数として書けると仮定

$$AGB = f(\mathrm{RH10},\cdots,\mathrm{RH100}) + g(\mathbf{x})$$

f(RH10,…,RH100)とg(x)を順次決定する

1. f(RH10,…,RH100)の決定
   - 定数項は持たない
2. ΔAGB=AGB-f(RH10,…,RH100)を計算
3. ΔAGB=g(x)を決定
4. AGB(model)=f(RH10,…,RH100)+g(x)とする

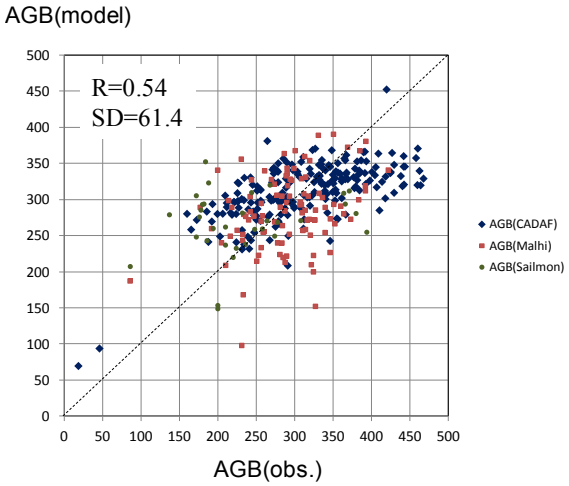
関数f()、g()は一次関数を仮定、
AIC最小基準によって変数選択した

表　環境変量

	レイヤー	変数名	単位
1	DEM	full_dem_HK	m
2	傾斜角	slope_HK	deg.
3	曲率	cuminus_HK	%
4	NDVI最小値	min_ndvi	
5	NDVI最大値	max_ndvi	
6	NDVI年間平均	avr_ndvi	
7	NDII最小値	min_ndii_2_7	
8	NDII最大値	max_ndii_2_7	
9	NDII年間平均	avr_ndii_2_7	
10	年最小温度（昼）	max_Day	K
11	年平均温度（昼）	avr_day	K
12	年最大温度（昼）	min_Day	K
13	年最小温度（夜）	max_Night	K
14	年平均温度（夜）	avr_night	K
15	年最大温度（夜）	min_Night	K
16	年間降水量	GSMaP_M_avr_sum	mm
17	月間降水量最大値	GSMaP_M_avr_max	mm
18	月間降水量最小値	GSMaP_M_avr_min	mm
19	band7最小値	min_b7	
20	band7最大値	max_b7	
21	band7年間平均	avr_b7	
22	PALSARモザイク	P_HH	db

図 4.3.3-5　バイオマス推定モデルの構築

構築されたモデルによる結果を図 4.3.3-6.に示す。誤差の標準偏差は 61.4t/ha となり、推定結果と実測値の差はほぼ±100t/ha の範囲に存在している。



f(RH10,…,RH100)+g(**x**)

図 4.3.3-6　モデルによるバイオマス推定結果

同時に、ブートストラップ法を用いて、約 500m の画素毎に、2.5%～97.5%の信頼区間と不確実性を付与した（図 4.3.3-7.）。最終プロダクトの画素毎（約 500m メッシュ）の炭素推定誤差を見積もりには、ノンパラメトリックブートストラップ法を用いる。

アマゾン全域でのバイオマス量の分布の真値をF_{true}とし、インベントリプロットや ICESat/GLAS の LiDAR データ、高分解能衛星データから推定されたバイオマス量の分布（サンプリングでの分布）をF_{sample}とする。F_{true}を知ることは不可能だが、F_{sample}からランダムな復元抽出を多数回（回数を B）繰り返すことで F_{true}を近似するのがブートストラップ法である。この方法の利点は、得たい推定量の分布が画素毎に直接求まることであり、さらに、その分布を用いて、期待値だけでなく推定量の信頼区間や誤差なども計算が可能なことである（Sawada et al., 2006）。

まず、インベントリプロットや LiDAR データ、衛星データから推定されたバイオマスデータのランダムな復元抽出を行うことでブートストラップサンプルを作成する。このブートストラップサンプルとリモートセンシング・GIS データを用いてバイオマス量推定を行う。

この「ブートストラップサンプル作成→バイオマス量推定」の過程を、乱数を変えながら独立に B 回繰り返すことで、B 個のバイオマス量推定結果を得る。これら B 回分の結果について画素毎に推定量の分布を計算、平均値（期待値）とα%信頼区間を求める（図 4.3.3-6）。推定量の分布の見積もりが可能となるため、それらの分布を用いて誤差の計算を行うことも可能である。

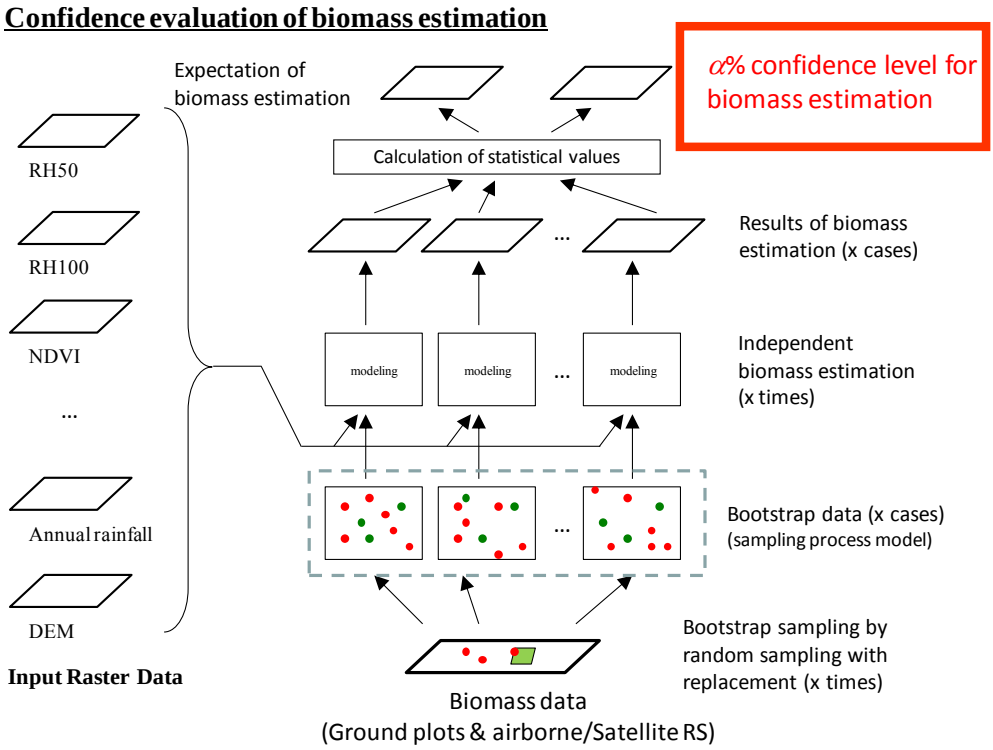
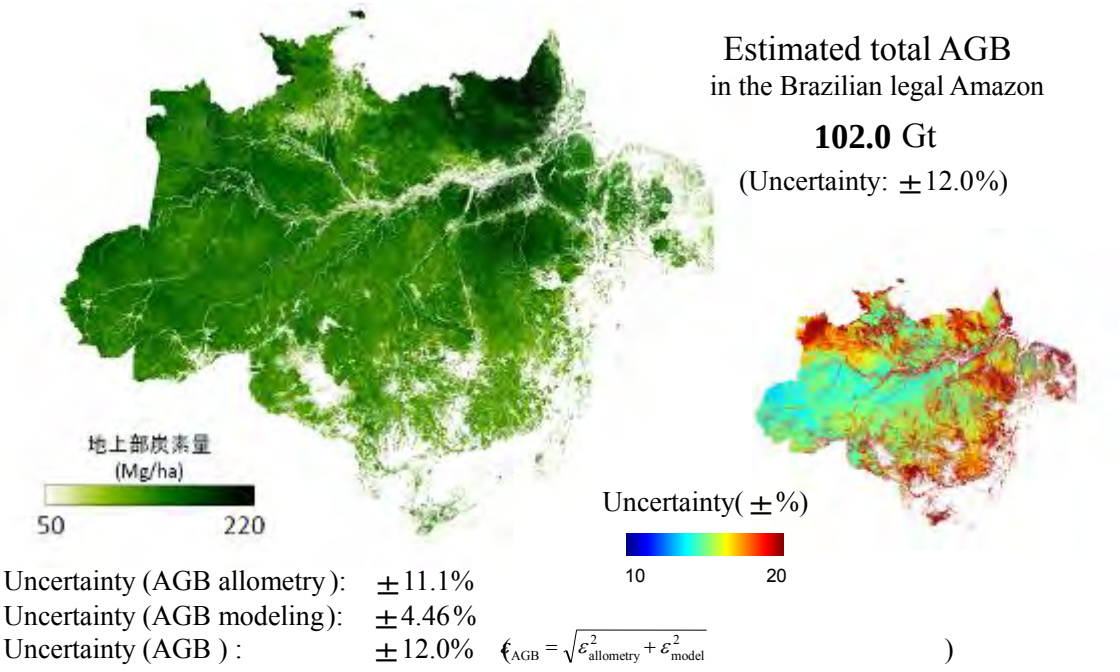


図 4.3.3-7　ブートストラップ法の流れ

得られたバイオマスマップを図 4.3.3-8 に示す。ブートストラップサンプリングサイズ B は 1000 として計算を行った。

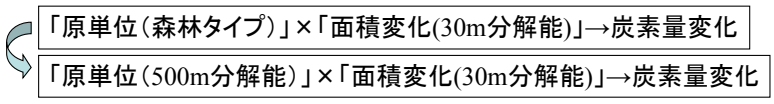


Uncertainty (AGB allometry): ±11.1%
Uncertainty (AGB modeling): ±4.46%
Uncertainty (AGB) : ±12.0% ($\varepsilon_{AGB} = \sqrt{\varepsilon^2_{allometry} + \varepsilon^2_{model}}$)

図 4.3.3-8　地上部バイオマスマップと不確実性マップ

さらに、上記の推定結果と PRODES などのブラジル国で稼働中の森林監視システムからの結果を組み合わせることで、従来の森林区分ごとの原単位量に基づいた炭素動態把握よりも高精度化することができた。

- PRODESシステムとの連携
  PRODESは30m分解能で森林面積変化を監視（ブラジル全土対象）



成果： 森林インベントリ調査によって得られたバイオマス量のデータに基づいて、高頻度観測衛星データを用いて広域で炭素量推定を行うためのアルゴリズム開発を行った。さらに開発したバイオマス推定アルゴリズムに精度評価に必要な機能を付加するための改良を行った。具体的には、地上調査によるデータ取得過程を統計的にモデル化し、バイオマス推定モデルの精度評価をノンパラメトリックブートストラップ法によって実行するためのモジュールを開発した。このモジュールを用いることで、炭素量推定の信頼区間や推定量の分布を求めることが可能となった。

最終成果品として得られた信頼区間つきバイオマスマップに基づいたブラジル国・アマゾン地域の地上部バイオマスの総計は既報の値と比較してほぼ同じである。また、モデルそのものの不確実性は±13.1%となった。

カウンターパートへの技術移転の状況： INPE の共同研究者を日本に招聘することで、SAR 等のデータ処理の技術取得を促した。また、当プロジェクトで整備したデータセットを活用して、バイオマスマップおよび不確実性マップを作成するシステムを 2014 年春に国立宇宙研究所（INPE）に導入した。これにより、当プロジェクト終了後も、インベントリ計測データが得られた時点で、INPE の研究者がバイオマスマップを更新することが可能となった。

成果の位置づけや類似研究との比較： 当研究課題で開発されたリモートセンシングデータを用いた広域バイオマス推定手法の特徴について先行研究と比較する。

Baccini らのグループからは、当該地域を含む 2011 年にバイオマスマップが、2012 年に樹高推定マップが公開されている。それらとは独立に、Saatchi らのグループは 2011 年に全球熱帯域のバイオマスマップを作成した報告がされている。これら二つの研究グループのプロダクトと当プロジェクトで作成した樹高およびバイオマスマップとの比較を行った。さらに、面的なバイオマス推定の先行研究で頻繁に用いられている ALOS/PALSAR データを用いた場合との比較も行った。

●推定樹高マップの比較

Baccini らのプロダクトの空間分解能は 1km 相当であり、さらに、一部には雲の影響や、衛星データの幾何補正エラーによる位置ずれなどが散見される。一方、本研究での推定樹高マップは、元になる MODIS データ等の雲除去処理を行っているため、画素の抜け落ちや位置ずれなどのないプロダクトとなっている。

中央アマゾンに関しては、3～5m 程度の差にとどまっている。ちなみに、ICESat/GLAS の樹高計測精度誤差は 3m 程度と言われている。胸高直径より推定される Lorey's Height と当プロジェクトによる成果および Baccini らの結果を比較してもほぼ同等の結果が得られている。しかし、河畔林に関しては大きな違いがあり、アマゾン州以外に関しては地域的に 10m 程度の差となっている。今後、航空機 LiDAR などのデータで詳細な検証を行う必要がある。

●バイオマスマップでの比較

樹高推定マップと同様、Baccini らのプロダクトには雲の影響による欠損画素や位置ずれが散見された。一方、Saatchi ら(2011)と比較した場合は、かなり広範囲で当プロジェクトで作成したマップで高い推定値となっている。地下部バイオマスも含めた炭素量換算時の不確実性は、Saatchi らよりも低い結果が得られた。当然のことながら、Baccini らや Saatchi らのプロダクトには中央アマゾン地域のインベントリ調査の結果を用いておらず、他地域の結果からモデルによって推定している。

●PALSAR データによるバイオマス推定結果との比較

これまで、PALSAR データ（500m 分解能、HH 偏波）の後方散乱係数を用いてバイオマス推定が行われる例が多数報告されてきた。しかし、PALSAR のような SAR 画像では、約 200t/ha 以上の高バイオマス域では信号が飽和してしまい推定精度が低下することが問題となっていた。この確認のため、当プロジェクトの地上インベントリ調査で得たバイオマスを PALSAR データからモデル化してバイオマスを推定した結果と、当プロジェクトで開発されたモデルによる推定結果を比較した結果、当プロジェクトの手法による推定が明らかに良好であることが示された。

社会への波及効果： 本プロジェクトの森林インベントリとマッピング手法は、アマゾンにおける REDD+の MRV 手法として、おそらく現時点で最も高い精度のものである。熱帯林の中で大きな炭素蓄積を持つと推定される地域での研究成果は地球規模での炭素循環、温暖化等の研究や政策に大きなインパクトを与えるものと考えられる。

4） UAV による森林の立地解析

実施方法： 国立アマゾン研究所（INPA）に UAV カメラ/レーザシステムのハードウェアを導入し、INPA およびブラジル国立宇宙研究所（INPE）の研究員に対しシステムの運用技術の移転を行う。運用技術の移転後、INPA 試験林である ZF-2 にて、ブラジル国研究者の運用の下、UAV カメラシステムおよび UAV レーザシステムを利用したアマゾン森林計測方法を確立する。

実施内容： 当該プロジェクトに UAV カメラ/レーザシステムを 2013 年 6 月に導入した（図 4.3.4-1、図 4.3.4-2、図 4.3.4-3）。初期動作確認時において、磁気センサ異常により UAV が起動しない不具合が発生したが、ハードウェアの問題ではなく、ソフトウェアの問題であることが分かった。そのため、センサの初期値を初期化することにより不具合を解決した後、INPA のカイキ氏、フィリップ氏および INPE のアライ博士らへ運用技術および保管方法に関して技術移転を行った（図 4.3.4-4）。その後、INPA 試験林である ZF-2 にて、ブラジル国研究者の運用の下、試行錯誤を繰り返しながら、UAV カメラシステムおよび UAV レーザシステムを利用したアマゾン森林計測を実施した。

成果： ZF-2 にて UAV システムの運用技術および保管方法に関する技術移転を行った結果、ブラジル国研究者だけで当該 UAV システムを運用管理できるようになった。その後、アマゾンジャングルにおける森林計測方法の検討を試行錯誤しながら検討した結果、次に示す計測条件が安全かつ効率的であるとの結論を得た。計測実施の判断は、風速を基準とし、5m 以下の場合のみ計測を実施する。それ以上の風速の場合は、計測の延期、さらに、計測途中に基準以上の風速を観測した場合、計測開始点に帰還させることで合意した。計測高度は、地上から 80m、樹冠から 40m が運用上最適であると結論し、カメラシステムの場合は、計測開始始点の高度 80m を計測終了まで維持、レーザシステムの場合は、地盤高からの高度が 80m で一定になるように地盤変化に合わせて高度を変化させることとした。カメラシステムの場合の飛行速度は、写真から Digital Surface Model（DSM）とオルソ写真を作成するために 4m/s、レーザシステムの場合、単位面積当たりのレーザ計測点数が 20 点/m^2 以上になるように、往路は 2m/s、復路は 4m/s とした。レーザシステムにおいて往路と復路とが異なる飛行速度とした理由は、電池残量由来の飛行時間と最遠計測距離から結論した。

カウンターパートへの技術移転の状況： アマゾン国立研究所（INPA）とブラジル国立宇宙研究所（INPE）研究者への UAV 運用技術の移転は、当初の計画通りに実施され、現在、ブラジル国研究者だけでカメラ/レーザシステムの運用が可能となった。

成果の位置づけや類似研究との比較： アマゾンの森林を計測するためのリモートセンシング機器として UAV を導入した既存研究は存在しない。また、UAV にレーザセンサを搭載し、森林を計測する研究は、世界的に見てもユニークである。アマゾンの森林は、INPA のニーロ博士らによるインベントリによってデータが取得されているが、広域を同一な基準で評価・推定可能なリモートセンシ

ングデータを用いてインベントリデータをスケールアップする際、両者の時空間的な整合を確保することは極めて困難であった。しかしながら、当該 UAV システムがインベントリを実施している INPA に導入されたことにより、この問題が解決できる可能性があり、森林のパラメータを科学的な根拠に基づいてスケールアップ可能な仕組みを構築した意義は大きい。

図 4.3.4-1 UAV 本体の外観

図 4.3.4-2 カメラシステムの外観

図 4.3.4-3 レーザシステムの外観

図 4.3.4-4 INPA 試験林の ZF-2 にて INPA 研究員らによる UAV カメラ/レーザシステムの運用トレーニングの概況

②立地環境と林分構造の計測と解析

実施方法： 多くのインベントリデータを有する INPA 試験林、特に、300x600 プロットおよび EW トランセクトを UAV カメラ/レーザシステムにて計測を行い、水平方向および垂直方向の森林形状を取得する。UAV カメラ/レーザシステムから得られたデータを一般的な商用ソフトウェアで解析もしくはビュアーとして利用するためには、前処理および高次処理が必要である。そのため、まず、前処理および高次処理のプログラムを開発する。UAV カメラシステムは、広く世界に広がっているシステムである一方、レーザシステムはユニークなシステムであるため、精度検証を行う必要ある。そこで、レーザシステムにて計測した EW トランセクトのデータから推定した地盤高（Digital Elevation Model（DEM））とインベントリによって計測された DEM とを比較することによって、本システムの精度検証を行う。前処理および高次処理済みのカメラおよびレーザシステムで計測されたデータを用いて、plateau（台地）および baixio（谷地）エリアにおける林分構造について解析を行い、それぞれ、どのような特徴があるのか知見を得る。

実施内容： 2013 年 7 月 21-22 日に 300x600m プロット、7月 23 日に EW トランセクトを UAV カメラ/レーザシステムにて計測を行った。300x600m プロットにおけるカメラシステムは、DSM およびオルソモザイク画像を作成するために、オーバーラップおよびサイドラップ率をそれぞれ 80%、60%とし、計 6 つの飛行コースとして計測を行った。一例として UAV カメラシステムで計測した写真から作成した DSM とオルソモザイクとを重ね合わせた結果を図 4.3.4-5 に示す。レーザシステムは、500m の最遠計測距離を 1 飛行コースとして計測を行った。一方、EWトランセクトにおけるカメラおよびレーザシステムは、どちらも最遠計測距離 750m を 1 飛行コースとして計測を行った。図 4.3.4-6 に UAV レーザシステムで計測したデータから計算した対象物の点群の一例を示す。その後、計測さ

れたデータに基づいて、UAV データの一般的な前処理および高次処理用のプログラムを開発した。カメラシステムのための処理プログラムは、撮影された写真が保存されているフォルダを読み、それぞれの写真のタグ情報に埋め込まれている記録時刻を抽出する一方、UAV の姿勢情報データから時刻とその時刻の UAV の位置情報、ロール角、ピッチ角、ヨー角の角度情報を抽出し、時刻を基準に計算を行い、最終的に写真と姿勢情報とを関連づけたテキスト形式のデータを出力する（前処理）。このデータを用いて、DSM およびオルソモザイク画像を作成した。

一方、レーザシステム用の処理プログラムは、3 つで構成されている：1）計測された UAV の位置情報、レーザ光線の照射角度、1 つのレーザ光線が対象物に当たって返ってきた時の距離とを用いて、対象物の 3 次元位置座標を計算しテキスト形式で出力する（（前処理））、2）出力された対象物の 3 次元位置座標には、機器由来のノイズが混入しているため、ノイズを除去しテキスト形式で出力する（前処理）、3）ノイズを含まない対象物の 3 次元位置座標から、DSM、DEM および Digital Canopy Model (DCM)を作成し、画像として出力する（高次処理）（図 4. 3. 4-7）。

成果： EW トラセクトにおけるplateau および baixio エリアの画像をランダムサンプリングし、影の面積率をそれぞれ解析した結果、18.9%および 24.2%であり、baixio エリアの方が影の割合が高いことが分かった（図 4. 3. 4-8）。ただし、目視判読の結果、影が生成する原因は、両者の間で異なっていた。plateau エリアでは、樹冠の高低差が大きく、影は、樹冠と樹冠の高低差とカメラの画角との関係で起きている反面、baixio エリアでは、ヤシの木の周辺で起きていた。一方、レーザシステムの DEM による精度評価を行った。インベントリデータは、開始点を基準に相対距離と相対地盤高で記録されているため、現地観測のデータを使って、UAV の計測始点および標高データに変換した値を解析に利用した。解析の結果、重相関係数は、0.99 ととても高く、UAV レーザシステムで得られたデータから DCM 等を計算し、解析を行うことができることが結論された（図 4. 3. 4-9）。この結果から開発した前処理および高次処理プログラムの地盤高の形状は精度高く推定されていることが示された。plateau および baixio エリアの樹冠形状を平均樹高および分散で比較した場合、平均樹高は、21.82m および 21.31m とほぼ同じであった。しかしながら、樹冠の高低差には大きな違いがあり、それぞれの分散は、35.83m と 27.97m であった（表 4. 3. 4-1）。この結果は、plateau および baixio エリアにおける森林の体積はほぼ同じであるが、空間的な特徴が異なることを示している。

カウンターパートへの技術移転の状況： INPA および INPE 研究者に対し、前処理および高次処理プログラムのアルゴリズムの公開を行った。INPE 研究者は公開したアルゴリズムに基づいて任意のプログラム言語にてプログラムを開発および機能向上ができる状況にある。

成果の位置づけや類似研究との比較： 導入した UAV システムは、立地環境と林分構造の計測と解析のための空間情報データを詳細に計測することができる。アマゾンの森林の立地環境と林分構造との関係に関する既存研究は、インベントリデータによる解析が主であり、本研究のように詳細に空間情報として構造を考察した事例は存在しない。今後、当該 UAV システムを利用することで立地環境と林分構造に関しての研究が一段と進むことが期待され、本研究成果の意義は大きい。

図 4.3.4-5 UAV カメラシステムで計測した写真から作成した DSM とオルソモザイクとを重ね合わせた結果の一例 （場所:300x600m プロット、使用画像枚数:1200 枚、空間分解能:2.0cm）

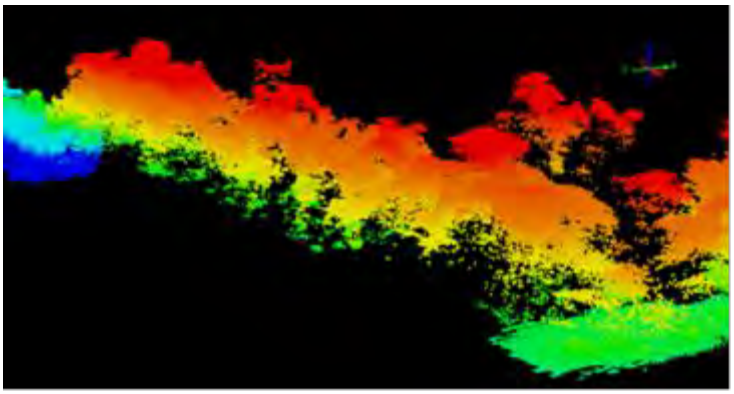


図 4.3.4-6 UAV レーザシステムで計測したデータから計算した対象物の点群の一例
（場所:EW トランセクト、飛行速度:2m/s、空間分解能（直下視）:約 20 点/m2）

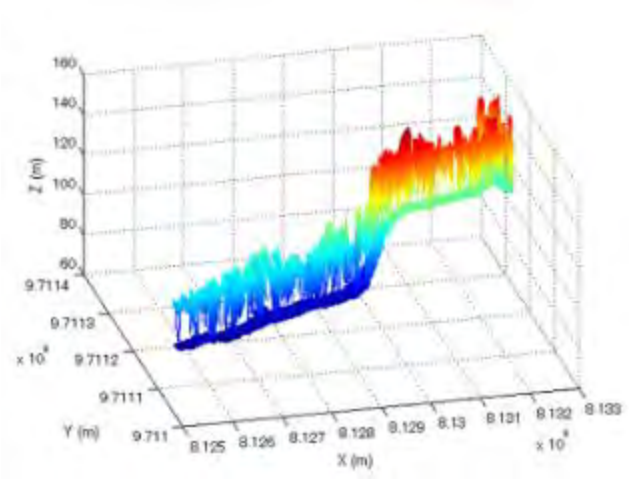


図 4.3.4-7 高次処理後の DSM と DEM

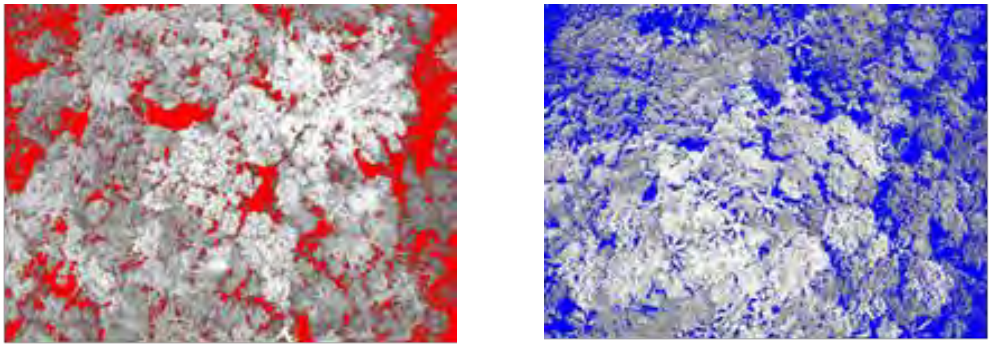


図 4.3.4-8　UAV カメラシステムで計測した写真から解析した影の割合の一例
（左図が plateau、右図が baixio。赤色と青色のエリアが影の領域を示す）

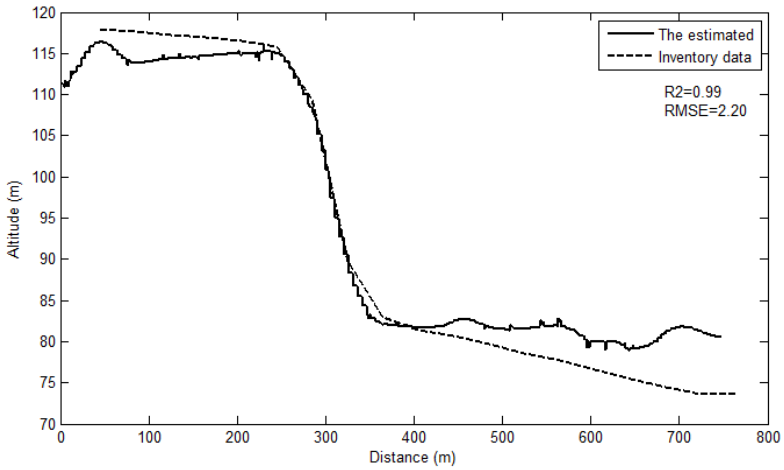


図 4.3.4-9　DEM の精度評価 （実線は、UAV レーザシステムで計測されたデータから推定した DEM。点線は、インベントリデータを現地調査に基づき UAV の計測始点および標高データに変換した値）

表 4.3.4-1　Plateau と Baixio エリアの平均樹高と分散

	Plateau エリア（m）、 サンプリング面積：3,594m^2	Baixio エリア（m）、 サンプリング面積：7,938m^2
平均樹高	21.82	21.31
樹高の分散	35.83	27.97
体積	78,028m^3	169,259m^3
単位面積当たりの体積	21.82m^3	21.31m^3

(2) 研究成果の今後期待される効果

成果の今後の展開見込（想定される科学技術）： インベントリと時空間を同期させて UAV システムにより森林を計測すれば、時空間に整合された物理量と空間データとのデータセットを作成することが可能となる。このようなデータセットが増えることにより、リモートセンシングによる森林の物理量推定の不確実性を小さくすることができる。さらに、詳細な立地環境と林分構造に関する空間情報は、森林生態学を研究する上での貴重なデータセットとなる。

社会への波及効果： 開発した UAV システムは、レーザセンサを有するユニークな装置である。本研究により、UAV レーザシステムの有用性が示されたことから、今後、同様な仕組みを有した UAV システムが、森林研究の分野だけでなく、防災や災害などの分野で普及していくことが予測さ

れる。

§５ 成果発表等

(1)原著論文発表　(国内(和文)誌４件、国際（欧文）誌６件(投稿中＋4件))

遠藤貴宏、沢田治雄、森林計測のための LiDAR シミュレーションシステムの開発、生産研究、62(4)、445-448、2010

澤田義人、沢田治雄、高頻度観測衛星を利用した準リアルタイム土地被覆変動自動抽出システムの開発、生産研究、62(4)、449-453、2010

澤田義人、遠藤貴宏，沢田治雄、広域バイオマス推定のための森林立地環境時系列データセットの作成および環境区分ソフトウェアの開発、生産研究、63(4)、431-435、2011

徳永冠哉、澤田義人、遠藤貴宏、沢田治雄、ブラジルアマゾン森林における ALOS/PALSAR を用いた浸水季節林の判定、生産研究、64(4)、151-154、2012

Lima JNA, Suwa R, Mello HPG, Kajimoto T, Santos J, Silva PR, Souza SAC, Barros CP, Noguchi H, Ishizuka M, Higuchi N. Allometric models for estimating above- and below-ground biomass of tropical rainforests at São Gabriel da Cachoeira in upper Rio Negro, Brazilian Amazon. Forest Ecology and Management 277: 163–172, 2012

Suwa R., Sakai T., Santos J., Silva R.P., Kajimoto T., Ishizuka M., Higuchi N. Significance of topographic gradient in stem diameter - height allometry for precise biomass estimation of a tropical moist forest in central Amazon. JARQ. 47 : 109–114, 2013

Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, Pinto CMA, Trindade SA, Silva OR, Higuchi N. Comparative study of forest structure between plateau and valley bottom in a central Amazonian forest. Kanto Journal of Forest Research 63 : 85–88, 2013

Riebeiro H.P.M.G., Suwa R., Marra M.D., Lima J.N.A., Kajimoto T., Ishizuka M., Higuchi N. Allometry for juvenile trees in an Amazonian forest after wind disturbance. JARQ 48: 213 - 219, 2014

Noguchi H, Suwa R., Souza C.A.S., Silva R.P., Santos J., Higuchi N., Kajimoto T., Ishizuka M. Examination of Vertical Distribution of Fine Root Biomass in a Tropical Moist Forest of the Central Amazon, Brazil, JARQ 48: 231 - 235, 2014

Noguchi, H., Souza C.A.S., Silva R.P., Suwa R., Kajimoto T., Ishizuka M., Ribeiro G.H.P.M., Lima N.A., Silva R.P., Santos J., Higuchi N. Fine root biomass in a tropical moist forest in the upper Negro River basin, Brazilian Amazon. TROPICS 22: 179-183, 2014

Higuchi, F.G., Lima, A.J.N., Higuchi, N., Suwa, R., Ishizuka, M., (in press). Evaluation of Carbon Stocks in Amazonas State, Brazil. In: Nagy, L., Forsberg, B., Artaxo, P. (Eds.), Biosphere, atmosphere and land use interactions in Amazonia. Ecological Studies series, Springer.

Sawada, Y., Suwa, R., Jindo, K., Endo, T., Oki, K., Sawada, H., Arai, E., Shimabukuro, Y.E.., Celes, C.H., Campos, M. A. A., Higuchi, F., Lima, A. J. N., Higuchi, N., Kajimoto, T., Ishizuka, M. A new 500-m resolution map of canopy height for Amazon forest using spaceborne LiDAR and cloud-free MODIS imagery. Submitted.

Fernando, S., Kunert, N., Suwa, R., Kajimoto, T., Ishizuka, M., Higuchi, N. Allometric equations for estimating biomass including roots for Euterpe precatoria the most abundant palm species in the Amazon. Submitted.

Otani, T., Lima, A.J.N., Suwa, R., Amaral, R. M. R. M., Ohashi, S., Pinto, A. C. M. Santos, J., Kajimoto, T., Higuchi, N., Ishizuka, M. Recovery of tree biomass after selective logging with moderate intensity in a central Amazonian forest. Submitted.

Ohashi, S., Durgante, F. M., Kagawa, A., Trumbore, S.E., Kajimoto, T., Xu, X., Ishizuka, M., Higuchi, J. Isotopic tree-ring analysis of trees with indefinite annual rings in Amazonian terra firme forests. Submitted.

(2)研修コースや開発されたマニュアル等

① 研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数

平成 22 年 2-3 月にカウンターパート研修を実施し、INPA の研究者 3 名を日本に招へいした。

研修生は本プロジェクトで必要となる統計手法、GISの操作方法およびリモートセンシング技術などを習得した。

平成 23 年 2-3 月にカウンターパート研修を実施し、INPA の研究者 3 名を日本に招へいした。研修生は本プロジェクトで必要となる統計手法、GISの操作方法およびリモートセンシング技術などを習得した。さらに、平成 23 年 9 月に渡伯し、INPA にて Matlab 言語を用いたプログラム講習会を実施した。

② 開発したテキスト・マニュアル類

1. Forestland classification of the Amazon region - MODIS data processing technique“, 2011
2. A Forest Environmental Map of Amazon ver. 1.0 (Manual), 2011
3. Cloud-free MODIS Time-series Data (2001-2009) (Manual), 2011
4. Matlab 言語を用いた LiDAR データ解析のための基礎(テキスト)、2011 年
5. Manual of Fusion for LiDAR data processing, 2013
6. CADAF Biomass Mapping System Manual, 2014

(3)その他の著作物(総説、書籍など)

① 詳細情報

沢田治雄、遠隔探査と GIS を活用していくために、林業技術、No. 826, 15-21, 2011.

沢田治雄、国際森林年に期待されるリモートセンシング技術、第 20 回生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」論文集, 2011.

澤田義人、遠藤貴宏、沢田治雄、GPGPU による離散的状態空間モデルの高速化、第 20 回生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」論文集、2011.

石塚森吉、公開セミナー報告「地球の肺 ーアマゾンの森をはかるー」、海外の森林と林業、83、48-51、2012.

梶本卓也、アマゾンの森林で炭素の量や動きを調べる、季刊 森林総研、16、9-11、2012

梶本卓也、石塚森吉、ブラジル・アマゾン熱帯林の炭素動態研究 ー国際研究プロジェクト(CADAF)の現場からー、海外の森林と林業、86、3-8、2013.

石塚森吉、ブラジルの REDD プラスの動向―マナウスにおけるセミナーから―、海外の森林と林業、89、15-19、2014.

梶本卓也、飯田滋夫、野口英之、諏訪錬平、大橋伸太、八木橋勉、大谷達也、石塚森吉、沢田治雄、澤田義人、神藤 恵司、遠藤貴宏、ブラジル・アマゾンの森林炭素を測る、森林総合研究所 平成 26 年版 研究成果選集、p36-37

Endo, T. Use of Unmanned Aerial Vehicles (drones) technology for local scale validation studies. A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation. GOFC-GOLD Report version COP20-1, (GOFC-GOLD Land Cover Project Office, Wageningen University, The Netherlands). Sourcebook Download Version COP 20 (November 2014),GOFC-GOLD, 2014,

Lima, A.J.N., Durgante, F.M., Campos, M.A.A., Sntos, J. Ishizuka, M., Higuchi, N. Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (Carbon dynamics of the Amazon Forests: Results of CADAF Project), Editora INPA, Manaus, 87pp, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)

Amaral, M.R.M., Celes, C.H., Gaui, T., Ribeiro, G.H.P.M, Noguchi, H., Lima, A.J.N., Santos, J., Higuchi, N. Composição florística de nove diferentes sítios amostrados no estado do Amazonas. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A. J. N. et al.), p3-19, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)

Higuchi, F. G., Lima, A.J.N., Ribeiro, G.H.P.M, Santos, J. Higuchi, N. Equações alométricas específicas: estimativas de biomassa para diferentes sítios da Amazônia Brasileira. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p20-27, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)

Higuchi, F. G., Pinto, A.C.M, Ishizuka, M., Kajimoto, T., Lima, A.J.N., Sntos, J., Higuchi, N. Estoque e dinâmica de biomassa acima do solo, das florestas de terra-firme do estado do

Amazonas. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p28-34, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Silva, R.O., Souza, C.A.S., Ourique, L.K., Noguchi, H., Santos, J., Higuchi, N., Ishizuka, M. Dinâmica de raízes finas em uma floresta de terra firme na Amazônia central. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p35-48, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Souza, C.A.S.., Silva, R.O., Ourique, L.K., Noguchi, H., Santos, J., Higuchi, N., Ishizuka, M. Distribuição vertical da biomassa de raízes finas em uma floresta de terrae firme na Amazônia central. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p49-54, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Ohashi, S., Durgante, F.M., Kagawa, A., Trumbore, S., Kajimoto, T., Xu, X., Ishizuka, M., Higuchi, N. Isotopic tree-ring analysis of trees with no distinct annual rings in Amazonian terra firme forests: a preliminary report. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p55-64, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Otani, T., Lima, A.J.N., Suwa, R., Amaral, M.R.M., Ohashi, S., Kajimoto, T., Ishizuka, M., Higuchi, N. Recovery process of tree biomass in selectively logged terra firme forest: a case study in the Precious Woods Amazon. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p65-71, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Suwa, R., Sakai, T., Sasntos, J., Silva, R.O., Kajimoto, T., Ishizuka, M., Higuchi, N. Topographic gradient in stem diameter–height allometry for biomass estimation of a terra-firme forest in the central Amazon. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p72-81, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Celes, C.H.S., Araujo, R.F., Campos, M.A.A. Influência da cobertura vegetal na coleta de coordenadas geográficas com GPS. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p83-86, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)
Celes, C.H.S., Oliveira, M.V.N., Endo, T., Sawada, H., Campos, M.A.A. Estimativa de carbono combinando imageamento a laser (LiDAR) e inventário florestaL. *In* Dinâmica do Carbono das Florestas da Amazônia: Resultados do Projeto CADAF (eds. Lima, A.J.N. et al.), p87-92, 2014 (ISBN 978-85-211-0133-8)

(4)国際学会発表及び主要な国内学会発表

① 招待講演 （国内会議2件、国際会議 1 件）

1．発表者（所属）、タイトル、学会名、場所、月日

Sawada H. Integrated use of geo-spatial information for monitoring forest fire and forest carbon tracking、「地理空間情報の統合利用が拡げる安全・安心」に関する国際シンポジウム：Geo-Intelligence の実現、横浜、2010.9.21

石塚森吉、アマゾンの森林、アマゾンの環境と開発に関する横浜会議（アマゾン エバーグリーン ソサエティ主催)、横浜、2009.12.14

石塚森吉、森林の炭素蓄積と土地利用による温室効果ガス（GHG)排出、バイオマス産業社会ネットワーク研究会、東京、2010.5.11

② 口頭発表 （国内会議 13 件、国際会議6件）

1．発表者（所属）、タイトル、学会名、場所、月日

澤田義人 (東京大学生産技術研究所)、高頻度観測衛星の時系列モデリング -準リアルタイムの土地被覆変動検出を目的として-、日本リモートセンシング研究会第 8 回勉強会、東京、2010.4.22（依頼講演）

遠藤貴宏、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、LiDAR データによる曲面形状の屋根の 3D レンダリング、日本写真測量学会平成 22 年度年次学術講演会、東京、2010.5.18

澤田義人 (東京大学生産技術研究所)、離散的状態空間モデルを用いた地表面冠水率分布の推定、日本写真測量学会平成 22 年度年次学術講演会、東京、2010.5.18

野口英之、諏訪錬平、梶本卓也、石塚森吉（森林総合研究所）、Cacilda Adélia Sampaio de Souza、Niro Higuch（アマゾン国立研究所）、ブラジル・アマゾン中央部の熱帯林における細根現存量の垂直分布の地形ごとの差異、第 62 回日本森林学会関東支部大会、栃木、2010.10.22.

澤田義人、遠藤貴宏、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、GPGPU による離散的状態空間モデルの高速化、第 20 回生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」論文集

澤田義人、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、エンドメンバー自動推定機能付パターン展開法の開発、日本写真測量学会 平成 23 年度年次学術講演会、東京、2011.5.24

澤田義人、遠藤貴宏、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、連続値・整数値・カテゴリデータを統一的に取り扱うクラスタリングソフトウェアの開発、日本写真測量学会 平成 23 年度年次学術講演会、東京、2011.5.24

Endo, T., Sawada, Y., and Sawada, H., 2011. The effect of moisture on the ground surface for LiDAR DEM generation, Proc. USMCA 2011 – 10th International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in ASIA. Chan Mai, Thailand, CD-ROM.

澤田義人、遠藤貴宏、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、粒子フィルタを用いたマルチバンド対応時系列モデルの開発、第21回生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」、2012.3.13

遠藤貴宏、澤田義人 (東京大学生産技術研究所)、小林高士（JAXA）、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、衛星 LiDAR シミュレータの開発、第 21 回生研フォーラム「広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム」、2012.3.13

澤田義人・遠藤貴宏・沢田治雄、GPGPU を用いた MODIS データ時系列処理の高速化、日本写真測量学会平成 24 年度年次学術講演会、2012.

遠藤貴宏・澤田義人・沢田治雄, Waveform LiDAR シミュレータの開発, 日本写真測量学会平成 24 年度年次学術講演会、2012.

ENDO, T., SAWADA,Y., KOBAYASHI, T., and SAWADA, H., 2012, Developing a 3d waveform LiDAR simulator for forest, Proc. ISPRS 2012, Aug. 25-Sep. 1, 2012. Australia – Melbourne USB.

Sawada, Haruo, Yoshito Sawada, Shiro Ochi, Moriyoshi Ishizuka, Rempei, Suwa, Niro Higuchi, Moacir Campos, Carlos Henrique Celes, Observation of forest structure parameters for mapping Amazon forest, Proceedings of Earth Environment and Disaster Risk Information, 22, 59-62, 2013.

越智士郎、澤田義人、沢田治雄、PALSAR を利用した森林パラメータ推定手法の検討、広域の環境・災害リスク情報の収集と利用フォーラム論文集、22、73-74、2013.

Suwa R, Ribeiro GHPM, Lima AJN, Santos J, Silva RP, Souza CAS, Barros PC, Kajimoto T, Ishizuka M, Higuchi N. Allomtry for estimating above- and below-ground biomass of tropical forests in the Amazon. 第 22 回日本熱帯生態学会大会. 神奈川. 2012 年 6 月 16-17 日.

Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, Pinto ACM, Amaral MRM, Silva F, Lima AJN, Higuchi N. Forest structure and biomass of the Terra-firme forests in the central Amazon. 第 60 回日本生態学会大会. 静岡. 2013 年 3 月 5-9 日.

野口英之, Souza CAS, Silva RO, Ourique L, 諏訪錬平, 梶本卓也, 石塚森吉, Pinto ACM, Lima AJN, Dos Santos J, Higuchi N. アマゾン中央部の熱帯林におけるスキャナを用いた細根動態の測定. 第 124 回日本森林学会大会. 盛岡. 2013 年 3 月 27 日.

Sawada, H., Endo, T., Sawada, Y., Ochi, S., Shimabukuro, Y.E., Arai, E., Campos, M.A.A. Zoning of Amazon forest based on environmental data using MODIS. Proceedings of “Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR”, p3068-3073, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13-18 April, 2013

③ ポスター発表　　（国内会議15件、国際会議14件）

1．発表者（所属）、タイトル、学会名、場所、月日

Endo T., Sawada H. Development of an individual tree crown delineation method using LIDAR

data. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol.38(8), 675-678, Kyoto, Japan, 11th Aug., 2010
Sawada Y., Sawada H. Development of a discrete time-series model for vegetation monitoring. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Vol.38(8), 719-724, Kyoto, Japan, 11th Aug., 2010
Suwa R., Sakai T., Kajimoto T., Noguchi H., Ishizuka M. (FFPRI), Silva R.P., Lima A.J.N., Higuchi F.G., Higuchi N. (INPA). Biomass in a Central Amazonian forest considering a tree height gradient along an edaphic gradient. Joint Japanese-Finnish Forest Research Seminar. Ibaraki, Japan. 30th, Aug., 2010.
Suwa R., Sakai T., Kajimoto T., Noguchi H., Ishizuka M. (FFPRI), Silva R.P., Lima A.J.N., Higuchi F.G., Higuchi N. (INPA). DBH-height relationship for biomass estimation along a topographic gradient in a Central Amazonian forest. Forest dynamics and carbon monitoring in forest ecosystems in East Asia. Tokyo, Japan. 7th, Oct., 2010.
Suwa R., Noguchi H., Kajimoto T., Ishizuka M. (FFPRI), Tabuchi R. (JIRCAS), Ribeiro G.H.P.M, Lima A.J.N., Higuchi F.G., Souza C.A.S., Higuchi N. (INPA). Allometry for estimating biomass of an Amazonian forest using a stem diameter at a relative height. The 58th Annual Meeting of Ecological Society of Japan, Tokyo, Japan. 10th Mar., 2011.
野口英之、諏訪錬平、梶本卓也、石塚森吉（森林総合研究所）、Cacilda Adelia Sampaio de Souza、Niro Higuchi （国立アマゾン研究所）、ブラジル、ネグロ川上流域およびアマゾン川中流域における熱帯雨林の細根現存量の比較、第 58 回日本生態学会、北海道、2011.3.10.
梶本卓也、諏訪錬平、野口英之、石塚森吉（森林総合研究所）、田淵隆一（国際農林水産業研究センター）、Nogueira Adriano Jose Lima、Gabriel Henrique Pires de Melo、Francisco G. Higuchi、Niro Higuchi （国立アマゾン研究所）、地下部現存量と根系分布、第 58 回日本生態学会、北海道、2011.3.10.
飯田滋生、八木橋勉、田内裕之、久島宏道（森林総合研究所）, Niro Higuchi（国立アマゾン研究所）、アマゾン天然林における林冠ギャップ動態、第 58 回日本生態学会、北海道、2011.3.10.
諏訪錬平、野口英之、梶本卓也、石塚森吉（森林総合研究所）、田淵隆一（国際農林水産業研究センター）、Gabriel Henrique Pires de Melo Ribeiro、Nogueira Adriano Jose Lima、Francisco G Higuchi、Cacilda Adélia Sampaio de Souza、Niro Higuchi（国立アマゾン研究所）、相対高における幹直径を用いたアマゾン熱帯林のバイオマス推定、第 122 回日本森林学会大会学術講演集.
野口英之、諏訪錬平、梶本卓也、石塚森吉（森林総合研究所）, Cacilda Adélia Sampaio de Souza, Niro Higuchi（国立アマゾン研究所）、ブラジル, ネグロ川上流域の熱帯雨林における細根現存量の局所変動、第 122 回日本森林学会大会学術講演集.
佐藤保, 田淵隆一, 八木橋勉, 飯田滋生, 諏訪錬平, Adriano Jose Nogueira Lima, Niro Higuchi, 石塚森吉. アマゾン熱帯林における粗大有機物（CWD）の現存量について. 第 21 回日本熱帯生態学会大会. 沖縄. 2011 年 5 月 29 日.
Noguchi H, Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, de Souza CAS, Higuchi N. Fine root biomass and its spatial, topographical, and regional variations in tropical rain forests of Brazilian Amazon, XVIII International Botanical Congress. 23-30 July, 2011.
Suwa R., Ribeiro, G.H.P.M., Lima, A.J.N., Santos, J., Silva, R.P., Souza, C.A.S., Barros, P.C., Kajimoto, T., Ishizuka, M., Higuchi, N. Non-linearity of allometry on log – log coordinates for estimating stem weight with stem diameter: a case study in a tropical rainforest. The 2nd International Symposium of Biological Shape Analysis. Okinawa, Japan. 6th Sep., 2011.
諏訪錬平, 梶本卓也, 石塚森吉, Adriano J.N. Lima, Gabriel H.P.M. Ribeiro, Joaquim dos Santos, Roseana P. da Silva, Cacilda A.S. de Souza, Priscila C. de Barros, Niro Higuchi .北西ブラジルアマゾンの森林バイオマスと地形との関係. 森林総合研究所 REDD 研究開発センター 平成 23 年度第 1 回公開セミナー 実践から学ぶ REDD プラス―国際交渉・現場と研究開発をつなぐ. 東京. 2011 年 10 月 13 - 14 日.
Suwa, R., Kajimoto, T., Ishizuka, M., Pinto, A.C.M., Trindade, A.S., Silva, R.O., Higuchi, N.

Comparative study of forest structure between plateau and valley bottom in a central Amazonian forest. 第 1 回関東森林学会. 群馬. 2011 年 10 月 21 日.

Kajimoto T, Suwa R, Noguchi H, Ishizuka M, Tabuchi R, Lima AJN, Melo GHP, Higuchi FG, Santos J, Higuchi N. Evaluation of belowground carbon stocks of Amazonian rainforests in Brazil. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. Ibaraki, Japan. 24th October, 2011.

Noguchi H, Souza CAS, Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, Lima AJN, Ribeiro GHPM, Barros PC, Silva RP, Pinto ACM, Dos Santos J, Higuchi N. Carbon stocks and dynamics of fine roots in tropical rain forests of Brazilian Amazon. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. Ibaraki, Japan. 24th October, 2011.Sato T, Tabuchi R, Yagihashi T, Iida S, Suwa R, Lima AJN, Higuchi N, Ishizuka M. Stocks of coarse woody debris (CWD) in a tropical rain forest, Brazilian Amazon. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. Ibaraki, Japan. 24th October, 2011.

Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, Lima AJN, Ribeiro GHPM, Santos J, Silva RP, Souza CAS, Barros PC, Higuchi N. Forest biomass along topographic gradients in northwestern Brazilian Amazon. Workshop on Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests. Ibaraki, Japan. 24th October, 2011.

Noguchi H, Souza CAS, Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, Lima AJN, Ribeiro GHPM, Barros PC, Silva RP, Martins Pinto AC, Dos Santos J, Higuchi N. Local variation of fine root biomass in tropical rain forests of the Brazilian Amazon. The 5th East Asian Federation of Ecological Societies International Congress. Shiga, Japan. 20th March, 2012.

Suwa R, Kajimoto T, Ishizuka M, Lima AJN, Ribeiro GHPM, Amaral MRM, Santos J, Silva RP, Souza CAS, Barros PC, Higuchi N. Distribution of forest biomass of the upper Rio Negro in the Brazilian Amazon. The 5th East Asian Federation of Ecological Societies International Congress. Shiga, Japan. 19th March, 2012.

野口英之, Souza CAS, 諏訪 錬平, 梶本 卓也, 石塚 森吉, Lima AJN, Ribeiro GHPM, Barros PC, Silva RP, Martins Pinto AC, Dos Santos J, Higuchi N. ブラジル・アマゾンの熱帯雨林における細根現存量の地域差. 第123回日本森林学会大会. 栃木. 2012年3月26-29日.

澤田義人、遠藤貴宏、沢田治雄 (東京大学生産技術研究所)、GPGPU を用いたグローバル森林環境監視システムの高速化、2012 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム、名古屋、2012 年 1 月 25 日

Noguchi H, Souza, CAS, Silva R, Suwa R, Silva RP, Ribeiro GHPM, Lima AJN, Pinto ACM, Kajimoto T, Ishizuka M, Santos J, Higuchi N. Local variation of fine-root biomass in a tropical forest at São Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. Yokohama, Japan. 16th Jun 2012.

澤田義人・遠藤貴宏・沢田治雄、GPGPU を用いた準リアルタイムグローバル環境監視システムの構築、2012 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム、2012 年 7 月 26 日.

野口英之, Souza CAS, Silva RO, Ourique L, 諏訪錬平, 梶本卓也, 石塚森吉, Ribeiro GHPM, Pinto ACM, Lima AJN, Dos Santos J, Higuchi N. アマゾン中央部の熱帯林における細根動態の地形単位間での差異. 第 60 回日本生態学会大会. 静岡. 2013 年 3 月 7 日.

飯田滋生, 八木橋勉, 諏訪錬平, 田内裕之, 九島宏道, Higuchi N. アマゾン天然林の小地形区分における森林の構造とギャップ動態. 第 60 回日本生態学会大会. 静岡. 2013 年 3 月 7 日.

諏訪錬平、梶本卓也、野口英之、石塚森吉(森林総研)、Lima J.N.A., Ribeiro H.P.M.G.、Santos J.、Silva P.R.、Souza C.A.S.、Barros C.P.、HiguchiN. 北西ブラジルアマゾンにおける森林バイオマスと樹木相. 第 23 回日本熱帯生態学会大会. 福岡. 2013 年 6 月 14-16 日.

野口英之, Souza CAS, Silva RO, Ourique L, 諏訪錬平, 梶本卓也, 石塚森吉, Ribeiro GHPM, Pinto ACM, Lima AJN, Dos Santos J, Higuchi N. アマゾン中央部の熱帯林における細根動態の地形と土壌による差異. 第 23 回日本熱帯生態学会大会. 福岡. 2013 年 6 月 14-16 日.

Sawada, Y., Jindo, K., Endo, T., Suwa, R., Shimabukuro, Y.E., Higuchi, N., Ishizuka, M., Sawada, H. Carbon dynamics in Amazonian Forest. (Poster presentation) Global Vegetation Monitoring and Modeling. Avignon, France. 3rd February, 2014.

(5)知財出願

① 国内出願（0件）
② 海外出願（0件）
③ その他の知的財産権(0件)

(6)受賞・報道等

① 受賞

・遠藤貴宏、国際写真測量学会優秀ポスター発表賞、2010.8
・Niro Higuchi、2011 年 JICA 理事長表彰受賞、 2011.10
・アマゾナス州議会による本プロジェクトへの表彰状、2014.6.2
「世界環境週間」の一貫として森林保全活動を表彰

Poder Legislativo

HONRA AO MÉRITO

"Em todas as coisas da natureza existe algo de maravilhoso." (Aristóteles)

A ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DO AMAZONAS
presta honrosa homenagem ao
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
pelo Projeto Dinâmica de Carbono da Floresta Amazônica e pela passagem da *Semana Mundial do Meio Ambiente*, bem como, em reconhecimento aos incontáveis feitos desta renomada Instituição, em prol da qualidade de vida do povo amazonense.

Manaus, 02 de junho de 2014

Deputado Josué Neto - PSD
PRESIDENTE

Deputado Luiz Castro - PPS
1º SECRETÁRIO

② マスコミ(新聞・TV等)報道

日本経済新聞 2009.6.1 朝刊
温暖化研究で途上国支援 ＜森林総研▶ブラジル 熱帯雨林と CO_2＞

③ その他

援助の現場から8: アマゾン奥地での調査と衛星データで炭素量を解明～ブラジルの熱帯林保全に協力～、2012 年版政府開発援助（ODA）白書、p88
Stories from the field 8: Satelite Data and Surveys in the Depth of the Amazon Reveal Carbon Stock、Japan's Official Development Assistance White Paper 2012、p88
「地球の肺」の炭素量はいかに？アマゾン熱帯雨林を地上・上空から調査 「アマゾンの森林における炭素動態の広域評価（CADAF）」、在ブラジル日本大使館トピクス2014 年 3 月号
二酸化炭素を吸収・蓄積する森を守れ、JICA World March 2012, p14-15

(7)成果展開事例

①実用化に向けての展開

＜公開可能なもの＞

- 航空機 full-wave LiDAR 解析アルゴリズムは、現在 JAXA がすすめている「JAXA ISS 植生 LiDAR ミッション(MOLI)」で、汎用波形解析ソフトウェア(FLAP)として採用された。
- 開発した「冠水域自動抽出システム」に関する研究は、JSPS 科学研究費助成事業「衛星データを用いた森林植生季節変化パラメーターの詳細解析に関する研究」（基盤研究(C)、研究課題番号:25450208）として採択され、現在実施中（研究代表者:澤田義人）。

① 社会実装(研究成果の社会還元)への展開活動

- 本プロジェクトの成果(アマゾンのバイオマスマップ)は、気候変動枠組条約締約国会議(UNFCC-COP)のブラジル政府交渉官である国立宇宙研究所の Thelma Krug 国際協力局長から、「REDD-plus の交渉で、ブラジル国全体のバイオマス蓄積量のレファレンスデータとして、米国の二つののマップと共に使用したい」との意向が示された。なお、Thelma Krug 氏はIPCC の国別温室効果ガスインベントリー作業部会の共同議長でもあり、ブラジルのREDD＋等温暖化対策政策に関わる中心的な存在である。
- 相手国および日本の若手研究者がそれぞれが担当する課題(アロメトリ式の開発、立地環境とバイオマス分布の解明、細根動態の解明、森林インベントリデータベースの構築、UAV システムを用いた林分構造の解析、バイオマスマップの開発)に関する成果を、国際学術誌、国際学会、日伯両国における本プロジェクトの成果報告セミナー、WS 等において発表し、本プロジェクトにおいて人材育成に貢献した。
- 広域の樹高推定およびバイオマス推定手法について、現在 JAXA がすすめている「JAXA ISS 植生 LiDAR ミッション(MOLI)」で、高次プロダクトの作成法のひとつとして採用が検討されている。
- LiDAR センサー搭載 UAV システムを用いた森林の構造解析に関する成果は、REDD+のMRV に関する国際的な報告書 Sourcebook Download Version COP 20 (November 2014), GOFC-GOLD, 2014 に掲載された。
- イタコアチアラのプレシャスウッド社の択伐施業林の林分成長解析の成果は、今後、同施業林の施業計画の立案に取り入れられる予定である。

§6 プロジェクト期間中の主なワークショップ、シンポジウム、アウトリーチ等の活動

①ワークショップ、シンポジウム等

年月日	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘者数)	概要
2010 年 3 月 1-2 日	Carbon Dynamics of Amazonian Forests 特別セミナー	日本 (森林総研、東大生研)	約 100 (1)	アマゾンの森林研究で著名な Jeffrey Q. Chambers 氏の講演会と情報交換。
2010 年 10 月 24 日	Carbon Stocks and Dynamics in Tropical Forests	日本 (森林総研)	約 50 (1)	熱帯林の炭素動態研究の国際ワークショップでアマゾンのセッション実施。
2011 年 10 月 25 日	公開セミナー 地球の肺―アマゾンの森をはかる	日本 (東京国際フォーラム)	約 100 (1)	プロジェクトの中間報告会。Niro Higuchi 氏の JICA 理事長賞授賞式・講演も兼ねて行われた。
2011 年 11 月 18 日	CADAF seminar	ブラジル (マナウス)	約 250 (7)	ブラジルにおいて、公開セミナー形式で中間報告を行った。
2012 年 10 月 17 日	CADAF セミナー アマゾンの森をはかる	日本 (東大生研)	60(2)	本プロジェクト成果の一般への公表
2012 年 11 月 5 日	CADAF シンポジウム	ブラジル (マナウス)	約 100 名 (4)	本プロジェクト成果の一般への公表
2012 年 11 月 26 日―30 日	アジアリモートセンシング学会	パタヤ (タイ)	ブース立ち寄り者 120 名	ブースを借り本プロジェクトの成果を 5 日間展示説明

2013 年 10 月 28 日 —30 日	CADAF seminar	ブラジル （マナウス）	約 200(3)	ブラジルにおいて、公開セミナー形式で報告を行った。
2013 年 12 月 1 日	公開講演会 アマゾンの森林を守る	日本 （JICA 国際会議場）	約 120 名(4)	アマゾンの森林の炭素蓄積、違法伐採、生物多様性に関わる講演会を開催
2013 年 12 月 2 日 -3 日	International Workshop Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?	日本 （東大生研）	約 60 名	熱帯林の炭素動態研究の国際ワークショップにおいて CADAF のセッションを実施。
2013 年 12 月 5 日	NWU Envioronmental Science Colloquium: Amazon moist forest and it's carbon stock: ground-based forest inventory for carbon stock estimation	日本 （奈良女子大）	約 100 名(3)	奈良女子大において学生を対象にニーロ・ヒグチ氏の講演会と情報交換会を開催
2014 年 4 月 27 日 —29 日	2014 CADAF Final seminar	ブラジル (マナウス)	約 200 (5)	ブラジルにおいて、公開セミナー形式で報告を行った。
2014 年 5 月 2 日	CADAF Workshop	ブラジル （アマパ州）	25 名	EMBRAPA(農牧研究公社)および州立森林研究所で成果の普及と情報交換
2014 年 5 月 7 日	CADAF Workshop	ブラジル （アクレ州）	20 名	同上

マナウスにおける国際セミナー
左） 2013 年 10 月の CADAF Seminar におけるプロジェクトメンバー
中） 2014 年 4 月の CADAF Final Seminar の Panel Discussion
右） 同上 パネリストの集合写真

② 合同調整委員会開催記録
（開催日、出席者、議題、協議概要等）

年月日	出席者	議題	概要
2011 年 3 月 28 日	**Brazilian side** 1) Chairperson：Adalberto L. Val, Diretor INPA; 2) Officers: Sérgio Guimarãesm & Magali Henriques, INPA; Rozane F. Silva, INPE, 3) CADAF Manager: Niro Higuchi,	2010 年度の実施報告と 2011 年の実施計画の承認	開催地：マナウス（INPA） 1年目の実施内容と2年目の計画が各責任者から報告され承認された。供与機材の購入手続き、コミュニケーション

	INPA; 4) Sub-manager: Dalton M. Valeriano, INPE; 5) Joaquim dos Santos, INPA; 6) Moacir A. Campos, INPA; 7) Yosio E. Shimabukuro, INPE. **Japanese side** 1) K. Haga, Director of JICA Brazil; 2) I. Sato, JICA Brazil; 3) J. Inoue, JICA Brazil; 4) M. Ishizuka, FFPRI; 5) H. Sawada, IIS/UT		の問題などが議論され、メーリングリストの作成、11 月にプロジェクトの戦略を議論する内部 WS を開催することが決まった。
2012 年 8 月 24 日	**JCC members** 1) Chairperson: Reinaldo F.F. Lourival, MCTI; 2) CADAF Manager: Niro Higuchi, INPA; 3) Sub-manager Dalton M. Valeriano, INPE; 4) Fabrício G. Araújo, MRE; 5) M. Ishizuka, FFPRI; 6) H. Sawada, IIS/UT; 7) Maria Cordélia Machado, MCTI; 8) Y. Saito, Japan Embassy; 9) I. Sato, JICA Brazil; 10) Julio A. Inoue, JICA Brazil; 11) Milton Sakurai, CADAF Cordinator. **Midterm evaluation team** 1) H. Takata, Leader, JICA Japan; 2) T. Sekiguchi, JICA Japan; 3) M. Ishida, JST -Washington; 4) T. Iwaki, JST – Japan; 5) Rodrigo da Silva, UFOPA; 6) Y. Hirouchi, consultant	プロジェクト中間評価結果の報告、検討、承認	開催地:ブラジリア(MCTI) 第2回合同委員会の主目的は中間評価の承認であり、JICA の高田課長から、中間評価結果の報告がなされた。中間評価では、今後活動が本格化する成果 3 に関わる P/O の精緻化と、INPE 側の関与をより高めることを念頭に実施体制の変更(INPE 側担当者の拡充/強化)と相互の調整会議の設置が決定している。本合同委員会において、これらの修正案が提案され、承認された。

§7 国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など

(1) 共同研究全体

- プロジェクト全体の現状と課題、相手国側研究機関の状況と問題点、プロジェクト関連分野の現状と課題。

  本プロジェクトは日本−ブラジル間の国際共同研究であるとともに、フィールドサイエンスとリモートサイエンスの融合が核とする学際的研究でもあることから、異なる考えを持つ研究者間の相互理解が課題であった。2 国間での情報の共有化を図り、コミュニケーションを英語に統一したことや、情報の錯綜を避けるために研究課題別に連絡経路を固定化するなどした結果、効率的な情報交換システムが構築された。また、異なる分野の研究者間の相互研究を促進するために頻繁にセミナー形式の打ち合わせなどを行った結果、グループ間の連携が促進された。今後も日本の研究グループが積極的にブラジルの現地調査に参加し情報交換を行うことや、カウンターパート研修などを通じてブラジルの研究グループが日本で共同作業として解析を行うことなどが積極的に進められることで、より高度かつ長期的な共同研究が実現できると考えられる。
- 各種課題を踏まえ、研究プロジェクトの妥当性・有効性・効率性・自立発展性・インパクトを高めるために実際に行った工夫。

  ブラジルでの現地調査に日本人グループが積極的に参加したことや、カウンターパート研修を設けてブラジル人グループが日本で共同作業として解析を行ったことなどが、双方向のコミュニケーションを促進させる重要な役割を担った。また、プロジェクト関係者内で、セミナー形式での打ち合わせを頻繁に実施したことによって、異分野に属する研究者間の相互理解が深

められた。一方で、国内外での研究発表の機会を積極的に活用し、研究成果の報告を行ったことが、プロジェクト内外での有効な情報交換手段となった。ホームページを公開したことで、プロジェクト内外とのコミュニケーションが促進された。SATREPS のコミュニティーサイト Friends of SATREPS においてコミュニティー[地球の肺―Amazon Rainforest Monitoring from Ground and Space]を立ち上げた結果、プロジェクト外の人たちからの意見を多く収集することができた。

- プロジェクトの自立発展性向上のために、今後相手国(研究機関・研究者)が取り組む必要のある事項。

  カウンターパートの研究チームが本プロジェクトを通じて得たノウハウが、プロジェクト終了後も活用されていくためには、得られた技術を用いて研究が継続され、国際学術誌や国際学会などでの発表を通じて、外部の評価を受けていくことが必要であると思われる。本プロジェクトを通じて、そのような必要性が、カウンターパートの研究チームにも認識されたと考えている。

(2) 森林総研グループ「長期森林インベントリシステムの構築」および「森林の構造と動態の解明」担当

- 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

  緊密な協力体制のもと、明瞭な役割分担にもとづいて、共同研究を円滑に実施することができた。また、先行研究の状況を把握し、相手国側機関による研究活動とニーズの理解に努めた結果、修士課程や博士課程の学生が各自の研究課題としてプロジェクトに積極的に参画してくれるようになった。

- 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等

  本プロジェクトには、異なる文化・研究背景を有する研究者間のコミュニケーションが不可欠であるが、お互いの考えを理解することに努めた結果、プロジェクトが良好な状態で進められていると考えている。

(3) 東大生産研グループ 「森林の炭素動態のマッピング」担当

- 相手国側研究機関との共同研究実施状況と問題点、その問題点を克服するための工夫、今後への活用。

  UAV は、日本でもリモートセンシング分野で利用がやっと始まった段階にある最先端の計測機器であるため、機器の運用およびデータ処理に関して最先端の知識が求められる。INPA および INPE に UAV を保有している部門が存在しなかったため、UAV に関して基礎から解析まで技術供与する必要が生じた。しかしながら、UAV に関して INPA および INPE の研究者らは、UAV に対して強い関心を有していたため、緊密な協力体制のもと、共同研究を円滑に実施することができた。

- 類似プロジェクト、類似分野への今後の協力実施にあたっての教訓、提言等。

  UAV のような最先端機器の運用から解析までに必要な知識の技術移転には、個人ベースの良好なコミュニケーションが大変重要であり、全ての過程において情報を互いに共有し、それぞれの能力を加味して業務を分業しながら進めていくことが重要であると考えている。

§8 結び

プロジェクトメンバーと活動の様子

INPA 実験林で　2009.11.25

Itacoatiara　択伐林で　2013.11.2

細根動態観測　2012.8.17(ZF-2)

インベントリチーム　Jutai 2011.6.23

LiDAR を搭載した UAV システム

写真（右）　UAV 運用チームのブラジル国メンバー(左からアライ博士（INPE）、カイキ氏（INPA）、ニーロ博士（INPA）、フィリップ氏（INPA））、（中）UAV を離陸させるカイキ氏、（左）レーザ計測モードで飛行する UAV