

# 地球規模課題対応国際科学技術協力

(環境・エネルギー研究分野 「気候変動の適応又は緩和に資する研究」領域)

## アマゾンの森林における炭素動態の広域評価

(ブラジル連邦共和国)

平成22年度実施報告書

代表者:石塚 森吉

(独)森林総合研究所・研究コーディネータ

<H21 年度採択>

## 1. プロジェクト全体の実施の概要

途上国の森林減少・劣化による CO<sub>2</sub> 排出の削減(REDD+)を、気候変動枠組条約の次期枠組みに位置づけることが検討されているが、その実現には、森林減少・劣化にともなう森林の炭素量の測定・報告・検証(MRV)の仕組みが不可欠である。そのため、本プロジェクトは、現存する熱帯雨林の最大の面積を有するブラジルアマゾンを対象に、劣化した森林を含む広域な森林の炭素量の動態の測定・評価技術を開発することを目的とし、2010年より4カ年の実施期間で発足したものである。

本年度は、アマゾンの森林インベントリシステムの構築に向け、ネグロ川上流の São Gabriel da Cachoeira 周辺を新たな森林インベントリの対象地域とし、20m×125mの調査プロットを100か所設置するとともに、森林炭素量推定式(アロメトリ)の開発のため、幹直径5cm以上の樹木101個体の地上部・地下部バイオマスの測定を実施した。また、原生林の炭素動態を明らかにするため、国立アマゾン研究所(INPA)実験林(ZF-2)において、谷地-台地の地形傾度に沿って、林木の直径-樹高関係の解析、粗大有機物現存量、細根現存量の測定をおこなった。さらに商業的な択伐が森林の炭素動態に及ぼす影響を明らかにするため、イタコアティアラの択伐施業林において、択伐後年数の異なる林分に時系列的にプロットを設定し、林分構造、炭素蓄積量の測定をおこなった。森林の炭素動態のマッピングについては、MODIS 衛星データ等を用いて炭素量推定のベースとなるアマゾン全域の環境区分図を試作し、この環境区分図のカテゴリに対応する森林生態系の特徴を精査する調査を始めた。そのための重要な情報源となる航空機搭載 LiDAR 観測を平成23年2~3月に実施する予定であったが、ブラジル軍の許可が下りずに当年度は実施することができなかった。なお、本邦でのカウンターパート研修を2~3月に実施した。

## 2. 研究グループ別の実施内容

### A. 森林総研グループ「長期森林インベントリ(CFI: Continuous Forest Inventory)・システムの構築」

#### 1) 森林インベントリ調査

##### ① 研究のねらい

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 研究実施方法

国立アマゾン研究所(INPA)では既に、中央アマゾン十数カ所の地域を対象に約1,000カ所の固定調査プロット(20m x 125m)を設定し森林資源調査をおこなっている。本プロジェクトでは、対象地域として新たに2地域(各地域約100プロット)を加えるとともに、既存の6地域について2回目(5~6年間隔)の調査をおこない、調査林分の炭素蓄積量とその動態を推定する。調査は、プロット内の幹直径( $D$ : 高さ1.4m)が10cm以上の全ての立木を対象に $D$ の測定と種同定を行うもので、さらに各プロット内2か所に10m×10mの更新調査区を設置し、ここでは $D = 5\text{cm}$ 以上の立木を調査対象とした。一部の地域、プロットにおいては、倒木の直径、長さを測定し、粗大有機物(CWD)量を推定するとともに、林分の上層樹高の算出に加えた。

##### ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

本年度8月、当所の計画どおり、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 周辺を対象地域とし、森林に20m×125mの調査区を100か所設置した(写真1)。設置された100か所の調査区をGIS上にマッピングし、SRTM データを用いて基本的な地形パラメータを算出して解析を行った。上述の調査のほか、一部のプロットにおいて、非破壊的に葉面積指数(LAI)を推定するために Canopy Imager による全天写真の測定を行った。

## ④カウンターパートへの技術移転の状況

現地調査は INPA と FFPRI との共同で行った。2011 年2～3月に日本でカウンターパート研修を実施し、インベントリーデータベースの構築方法、GIS を用いた解析手法の技術移転をおこなうとともに、地形とバイオマスの関係の解析を共同で行い、結果の取りまとめを行った。現在、連絡を密に取り合い、論文の投稿準備を進めている。



写真1 (左) São Gabriel da Cachoeira の位置図。(右) 調査地にアクセスするための大型船と小型ボート。

## 2) 炭素蓄積推定用アロメトリ式の作成

## ①研究のねらい

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-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。

## ②研究実施方法

アマゾンの森林の地上部・地下部のバイオマス推定については、東部、中部、南部の森林について既に 100 本以上のサンプル調査がなされ、アロメトリ式が作成されている。そのため、データのなかった西部地域において地上部・地下部のバイオマス測定にもとづいて、個体サイズ別に、材の容積重、炭素含有率等を測定し、森林の炭素蓄積推定のためのアロメトリ式を開発する。最終的には、異なる地域のアロメトリ式の比較をおこない、アマゾンの熱帯雨林を広域にカバーするアロメトリ式の開発をめざす。

## ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

2010 年度は、当初の計画どおり、São Gabriel da Cachoeira の森林において、バイオマスの測定を実施した。幹直径 5cm 以上の樹木 101 個体を伐倒・根調査を行い、各器官(葉・枝・幹・根)について、サイズおよび生重量を測定した(写真 2)。加えて、幹直径 5cm 以下の稚樹・実生についても、60 個体について伐採・根調査を行った。また、葉面積指数の推定を行うために必要なアロメトリ式の開発を目的として、一部の個体については個体の葉面積の測定を行った。幹直径 5 cm 以上の個体に関しては、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、中部地域の森林について作成されたアロメトリ式との比較解析を行った。

## ④カウンターパートへの技術移転の状況

São Gabriel da Cachoeira における調査は INPA と FFPRI との共同で行われ、相互に情報を交換しながら調査が進められた。2011 年2～3月に日本でカウンターパート研修を実施し、データ解析に関する技術移転をおこないつつ、共同で地上部・地下部の相対成長関係の解析を行った。現在、連絡を密に取り合い、論文の投稿準備を進めている。



写真 2 (左)伐倒した個体の幹直径の測定. (右)伐根作業の様子.

### 3) 長期森林インベントリ(CFI)データベースの構築

#### ① 研究のねらい

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。なお、データベースは最終年度に一部公開することを予定している。

#### ② 研究実施方法

本プロジェクトの森林インベントリでは、 $D = 10\text{cm}$  以上の立木を対象に  $D$  の測定と樹種を同定するほか、林床の粗大有機物、GPS による位置情報、林冠上層高、伐採の有無等が調査する。これらの情報をデータベース化し、さらに Arc/GIS や GRASS 等を用いてデータベースを GIS 化することにより、樹種組成、林分構造、バイオマス蓄積等の情報と地形、冠水期間などとの関係の解析を行う。また、LiDAR、PALSAR 等の高解像度リモセンへのリンクをはかる。

#### ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

2010 年度においては、当初の計画どおり、INPA がこれまでに設置したインベントリプロットの位置座標の提供を受けて、データベース作成のためのデータ整理を始動させた (図1)。また、リモセングループとの協議を重ね、リモセンデータとのリンクに必要な情報の抽出と整理をおこなった。

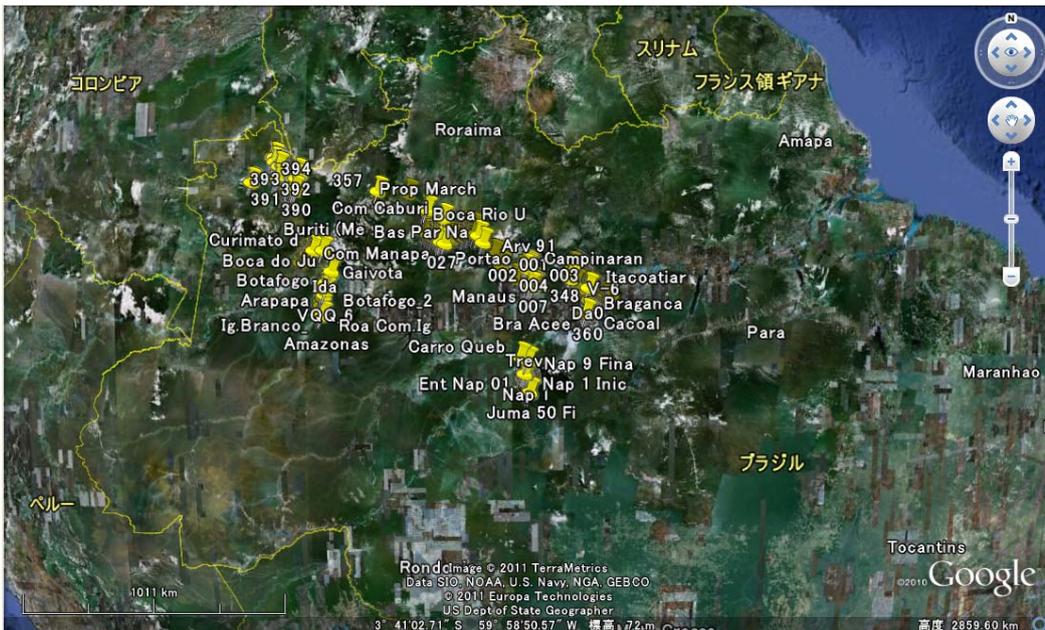


図1 これまでに設置したインベントリープロットの位置.

#### ④カウンターパートへの技術移転の状況

2011年2～3月に日本でカウンターパート研修を実施し、GISを用いたインベントリーデータベースの構築・解析手法の技術移転をおこなうとともに、地形とバイオマスの関係を解析した。現在、連絡を密に取り合い、結果の一部を用いて論文の投稿準備を進めている。

### B. 森林総研グループ「森林の構造と動態の解明」

#### 1) 原生林の構造と炭素動態

##### ① 研究のねらい

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 研究実施方法

2010年度においては、マナウス付近に設置されたベルトトランセクト(2.5km x 20m : 約80mの比高差が存在し、雨季に冠水を伴う浸水地と伴わない台地の両地形を含む)内に出現した樹木個体の胸高直径( $D$ )および樹高( $H$ )の測定結果(サンプル数 = 1309)を用いて  $D - H$  関係を解析し、バイオマスの分布様式を解析した。

粗大有機物については、2.5km ベルトトランセクト内の斜面上部の台地林と斜面下部の森林にそれぞれ  $20 \times 20$ m の調査枠を9か所ずつ設置し、枠内の枯死木のサイズを計測してそれらの炭素蓄積量を推定した。細根現存量については、地形ごと、深度ごとの細根現存量とその分布を解明するために、一定の容積で細根を含む土壌をサンプリングし、細根をより分けて測定した。また、細根の動態解明のために、イングロースコア(写真3左)を土壌中に埋設し、それらを1年ごとに3回収して細根の成長量を測定する予定である。また、スキャナを用いて、非破壊的により短い間隔で土壌中の細根の動態を直接観察する予定である(写真3右)。

##### ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

解析の結果、比高の変化に伴う、幹直径  $D$  と樹高  $H$  の関係の変化を以下の式で表すことに成功した。

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{(a+bx_2)D} + \frac{1}{c+dx_2} \quad \text{ここで } a, b, c, d \text{ は係数、} x_2 \text{ は比高。}$$

結果として、潜在樹高  $H_{\max}$  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、バイオマスの推定を行ったところ、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。



写真3 (左) 細根の成長量を測定するためのイングロスコア。(右) 細根をスキャナで直接観察するためのアクリルケース。

#### ④カウンターパートへの技術移転の状況

上記の成果は、カウンターパートと共同でデータの取得と解析処理をおこなって得られたものである。さらに、2011年2～3月に日本でカウンターパート研修を実施し、データ解析手法に関する技術移転をおこない、今後の炭素蓄積量推定における本成果の利用について協議した。

## 2) 択伐施業林の構造と炭素動態

### ①研究のねらい

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。

### ②研究実施方法

マナウスの西方 230km のイタコアティアラ郊外の Precious Woods Amazon (PWA)社(スイス資本の林業会社)の択伐施業林(managed forest)において、択伐後年数の異なる林分に時系列的にプロットを設定し、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。これをもとに、アマゾンの択伐施業林における森林の炭素動態を明らかにする。

### ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

2010年は、当初の計画どおり、イタコアティアラのPWA社が管理する択伐施業林において、1995年から2008年までの各年に伐採がおこなわれた林分に、20m×125mの調査区を設置し、GPSを用いてプロットの位置座標を記録するとともに、調査区の  $D = 10\text{cm}$  以上の全ての個体について、幹直径および樹種同定を実施した(写真4)。また、各調査区内の2か所に10m×10mの林分更新調査区が設置され、この林分更新調査区においては  $D = 5\text{cm}$  以上の個体も調査対象に加えられた。また、一部の調査区においては、葉面積指数の推定を目的として

Canopy Imager を用いた全天写真の撮影を行った。

#### ④カウンターパートへの技術移転の状況

Canopy Imager を用いた全天写真の撮影と林冠構造、葉面積指数の推定方法について、現地調査を共同で実施するなかで技術移転をおこなった。今後、イタコアティアラ以外の他の地域のインベントリ調査についても、調査項目に組み込まれていく予定である。



写真 4 (左) 幹直径の測定. (右) 調査風景.

### C. 東大生産研グループ 「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

##### ①研究のねらい

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研究実施方法

約10年分の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の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)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する。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する。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する。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する。

##### ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

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2)。このカテゴリに関して林分構造情報を対応させる作業が残っているが、概ね計画通りに進捗している。

##### ④カウンターパートへの技術移転の状況

オンサイトトレーニングで、現地調査方法に関しては、技術移転を進めることができた。また、平成23年2月には1ヶ月間共同研究者を日本に招へいすることで、データ処理の技術取得を促した。共同研究者はリモートセンシングを専門とし、博士号を持つ者であり、能力が極めて高いため、技術取得が格段に進んだ。

## ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況

時系列処理ソフトウェアの処理スピードの向上に関して、GPGPUユニットを搭載したPCを利用し、ソフトウェアをGPGPU向けに最適化することで、1枚のGPGPUユニットで5倍以上の高速化を実現した。4枚のGPGPUユニットをPCに組み込んで並列動作させることで、これまでの20倍以上高速な処理を可能にした。これによって、時系列処理の汎用性を一層高めることができた。

中央アマゾンの地形を特徴づける台地 (plateau) - 斜面 (slope) - 谷地 (baixo) に成立する森林は、樹種構成 (種組成)、階層構造、立木密度、直径-樹高関係などバイオマス (炭素蓄積量) に関する林分構造の構成要素が連続的な変化を示すことが地上調査からも明らかになったため、SRTMの全球90mメッシュの標高データをアマゾン全域で収集し、MODISデータの空間分解能に対応する500mメッシュでの平均傾斜と台地割合を算出し、森林立地環境区分の入力データとして用いた。

森林立地環境区分のためのクラスタリング処理についても、標高等の連続値データ、冠水期間などの整数値データおよび土壌図等のカテゴリデータを統一的に取扱い、分類するアルゴリズム・ソフトウェアが必要となるが、既存の方法では、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は一般的でない。そこで、連続値・整数値・カテゴリデータを統一的に取り扱い、クラスタリングを可能にするアルゴリズムとソフトウェアの開発を行った。

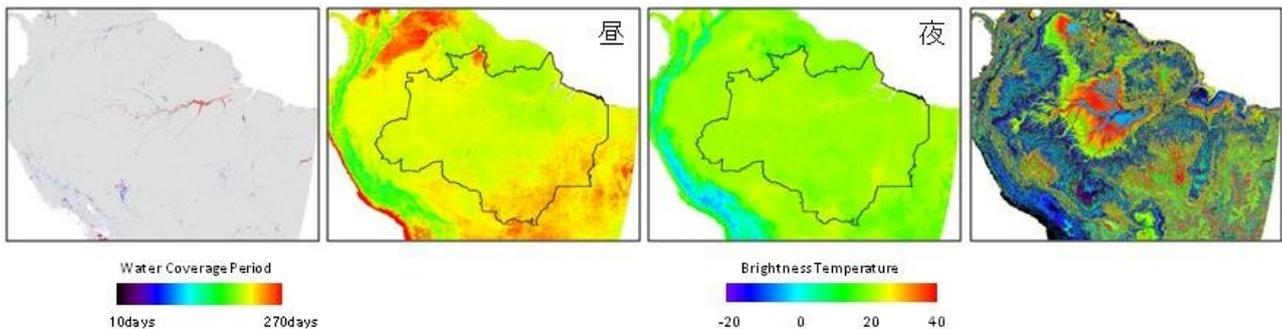


図2 立地環境区分図作成に用いたデータセットおよび環境区分クラスタリング結果

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

## 2) 林分構造パラメータの解析

### ①研究のねらい

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、立地環境区分別の炭素状況を把握するための、スケールアップパラメータを特定する。これによって、立地環境カテゴリごとに森林炭素量の推定とその推定精度の算定を可能にする。

### ②研究実施方法

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、蓄積する。

### ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

地上インベントリは現在継続中であるが、これまでの調査データは集積されつつある。この課題では、

インベントリ位置情報を入手して、LiDAR の観測計画に取り入れた。計測業者との契約も 1 月に終わったが、LiDAR による森林計測は当初の計画より遅れており、年度内にはデータ収集と前処理結果が得られない予定である。計測地点の概要を図 3 に示す。

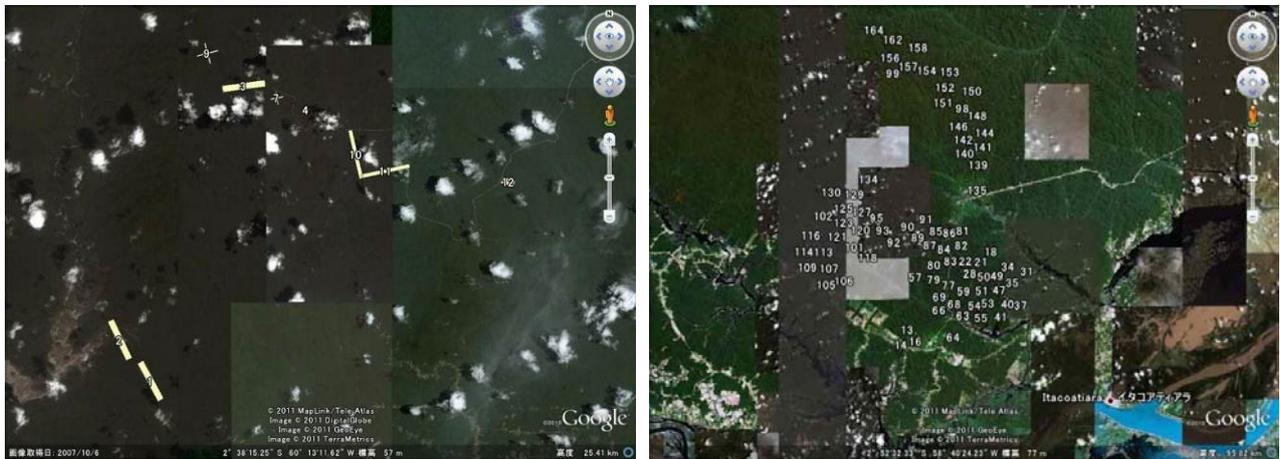


図 3 今年度の航空機 LiDAR 観測地点の概要  
左：ZF-2 試験地周辺 右：イタコアティアラ周辺

#### ④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。PALSAR データの処理の基礎的な技術移転は、2 月の招へい期間中に実施した。

#### ⑤当初計画では想定されていなかった新たな展開があった場合、その内容と展開状況

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。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ている。

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。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、森林開発地において、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 (図 4)。

研究のメイン対象地である INPA の森林 ZF2 と、計画的な森林伐採が進むイタコアティアラの森林地帯の TerraSAR-X 衛星画像を入手できた。空間分解能 1 m であり、観測角度が 2 種類である。これによって林分 3 次元構造の取得が期待できる。

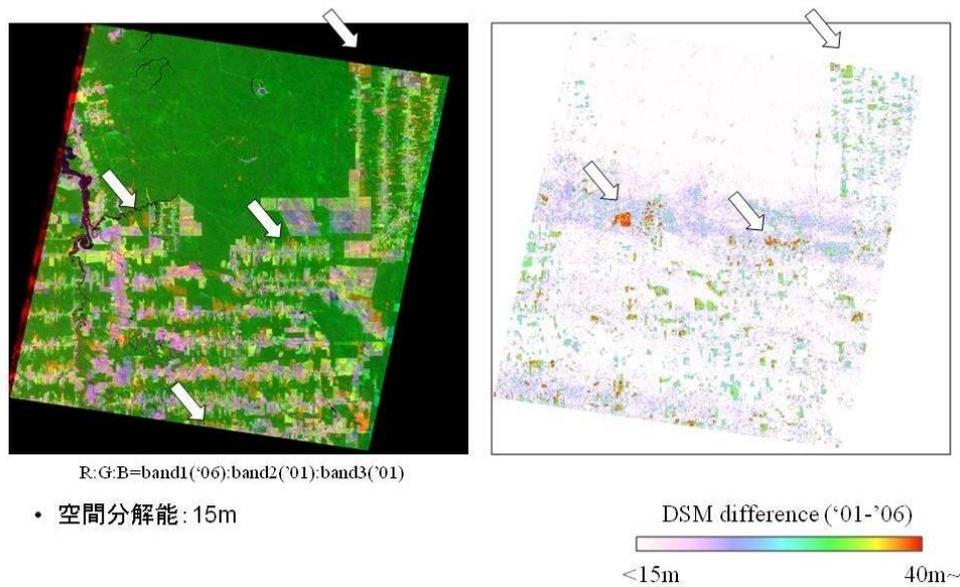


図4 二時期の ASTER DSM データによる樹高推定結果 (ブラジル・ Rondônia 州)  
白矢印は森林開発が行われた地点を示す

### 3) 炭素蓄積マップの開発

#### ①研究のねらい

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研究実施方法

アマゾン全域での推定には PALSAR モザイクデータや MODIS の時系列データ等を利用して、1) で得られた立地環境別に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、マッピングする。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、動態図を作成する。

#### ③当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況

本研究項目は平成 23 年度から実施する予定である。研究の主体となる INPE とは会合を開いて協議を行い、DETER や PRODES の成果を本研究に導入することで研究計画を練っている。

## 3. 成果発表等

### (1) 原著論文発表

- ① 発表総数(国内 2件、国際 0件)
- ② 論文詳細情報

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)、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)、2010

## (2) 特許出願

- ① 本年度特許出願内訳(国内 0 件、海外 0 件、特許出願した発明数 0 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 0 件、海外 0 件)

## 4. プロジェクト実施体制

(1) 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

- ① 研究者名： 石塚森吉（森林総合研究所・研究コーディネータ  
Niro Higuchi（国立アマゾン研究所・上席研究員）

## ② 研究項目

- 1. 長期森林インベントリシステムの構築
  - 1.1 森林インベントリ調査
    - 1.1.1 各地域における林分調査
    - 1.1.2 スケールアップのための林分構造パラメータ抽出
  - 1.2 炭素蓄積推定用アロメトリ式の作成
    - 1.2.1 各地域における地上部・地下部アロメトリ作成
    - 1.2.2 地域間におけるアロメトリの比較
  - 1.3 長期森林インベントリ(CFI) データベースの構築
    - 1.3.1 GIS を用いたインベントリデータのマッピング
- 2. 森林総研グループ「森林の構造と動態の解明」
  - 2.1 原生林の構造と炭素動態
    - 2.1.1 微地形に沿った林分構造解析
    - 2.1.2 微地形に沿った炭素動態解析
  - 2.2 択伐施業林の構造と炭素動態
    - 2.2.1 択伐施業林における林分調査

(2) 東大生研グループ「森林の炭素動態のマッピング」担当

- ① 研究者名： 沢田治雄（東京大学・教授）  
Moacir Campos（国立アマゾン研究所・室長）

## ② 研究項目

- 3. アマゾン森林の炭素動態のマッピング
  - 3.1 アマゾンの立地環境の解析
    - 3.1.1 NDVI および温度の長期衛星情報の生成【国内】
    - 3.1.2 衛星データによる浸水期間の推定【国内】
    - 3.1.3 アマゾン全域の立地環境図の作成
  - 3.2 林分構造パラメータの解析
    - 3.2.1 LiDAR による林分構造パラメータ推定
    - 3.2.2 高分解能衛星による林分構造パラメータの推定
  - 3.3 炭素蓄積マップの開発
    - 3.3.1 アマゾン熱帯林の炭素量推定
    - 3.3.2 アマゾン熱帯林の炭素量減少傾向の把握

以上