

# 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)

平成 24 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

<平成 21 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。

平成 22 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、調査プロット(20m×125m)を 100 か所設置するとともに、林木の炭素量推定式(アロメトリ)開発のため、幹直径 5cm 以上の林木 101 個体の地上部・地下部バイオマス測定を実施した。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、Itacoatiara 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。平成 23 年度はソリモンエス川上流の Atalaia do Norte 周辺に 20m×125m の調査プロットを 105 か所、Jutai 周辺に 104 か所、さらに Manaus 北方の ZF-5 区域において、100m×100m の調査プロットを 18 か所設置し、インベントリを実施した。また、ZF-2 において、台地－谷地の地形傾度に沿って地上部および地下部バイオマスの推定を行い、粗大有機物現存量、細根現存量の追加測定を実施し、アマゾンの特徴づける起伏地形(台地－谷地)に沿ったバイオマスの分布様式を明らかにした。一方、林木の地上部および地下部バイオマス推定のためのアロメトリ式を開発し、アマゾンの異なる地域間でアロメトリ式の比較解析を行った。平成 24 年度はネグロ川上流の Unini 周辺に 20m×125m の調査プロットを 135 か所、ソリモンエス川上流の Fonte Boa 周辺に 130 か所、マデイラ川上流の Capana Grande 周辺に 120 箇所設置し、インベントリを実施した。あわせて、それぞれの地域で細根現存量の調査も行った。加えて、マナウス付近の森林において、異なる標高値における森林構造およびバイオマスの違いを明らかにした。なお、平成 22 年度より、本邦でのカウンターパート研修を毎年 2～3 月に実施した。

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さまざまな環境因子を組み合わせたアマゾン全域の環境区分図を試作し、リモートセンシングデータを用いて、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の精査を実施している。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 年から実施する予定であったが、ブラジル軍の許可が下りずに平成 24 年度においても実施に至っていない。そこで、平成 24 年度は森林インベントリデータをスケールアップする林分構造パラメータの解析のために、航空機搭載 LiDAR の代替として考案した LiDAR とデジタル空中カメラを搭載した無人飛行機(UAV)を導入するとともに、ブラジル政府機関が実施した既存の航空機搭載 LiDAR 観測データを入手して、森林インベントリデータとの照合分析を行った。これらによってブラジルアマゾンの炭素推定に関わるアップスケーリングの処理手順はほぼ整った。なお、本邦でのカウンターパート研修を平成 23 年 2～3 月、平成 24 年 10 月および平成 25 年 2～3 月に実施した。

## 2. 研究グループ別の実施内容

### 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  $D = 5$ 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。また、細根の現存量の測定も一部で実施した。

#### ③ 当初の計画 (全体計画) に対する現在の進捗状況

平成 22 年度、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。

平成 23 年度、当所の計画どおり、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 20 m×125 m の調査プロットを 105 か所、Jutai 周辺に 104 か所設置した (写真 1)。また、Manaus 付近の ZF5 と称される区域において、100 m×100 m の調査プロットを 18 か所設置し、インベントリを実施した。設置された調査区について、既存のアロメトリ式を用いて、炭素蓄積量を計算した結果、地上部および地下部を含めた平均炭素蓄積量は、Atalaia do Notre において、 $192.8$  (tC ha<sup>-1</sup>)、Jutai において  $189.4$  (tC ha<sup>-1</sup>) と推定された。

細根の現存量は、São Gabriel da Cachoeira、Jutai、および後述のマナウスの INPA 実験林 (ZF-2) の各調査地間で有意に異なり、それぞれ  $7.03 \pm 0.33$  Mg / ha、 $5.21 \pm 0.32$  Mg / ha、 $4.70 \pm 0.20$  Mg / ha であった。これらの結果を他の先行研究と比較すると、アマゾン東部から西部にかけて細根現存量が増加する地理的傾向が認められたが、この傾向は砂質土壌の立地でさらに顕著であった (図 1、図 2 左)。先行研究も含めて年降水量、地上部現存量と細根現存量の関係をみると、特に砂質土壌の立地で前者とは強い正の相関、後者とは負の相関が認められた (図 2 中、右)。今後、測定対象地域を増やし、他の環境要因との関係も含めて、さらに詳細に検討を行う予定である。

平成 24 年度、当所の計画どおり、20m×125m の調査プロットをネグロ川上流の 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 箇所設置し、インベントリを実施した (写真 1)。設置された調査区について、既存のアロメトリ式を用いて、炭素蓄積量を計算した結果、地上部および地下部を含めた平均炭素蓄積量は、Unini において、 $105.9$  (tC ha<sup>-1</sup>)、Fonte Boa において  $154.0$  (tC ha<sup>-1</sup>)、Capana Grande において  $149.7$  (tC ha<sup>-1</sup>) と推定された。同地域の細根現存量について

ては、現在カウンターパート側でサンプルの解析を進めている。

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。平成 23 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、研究成果を国際学会などで発表した。平成 24 年 2～3月に日本でカウンターパート研修を実施し、インベントリデータベースの構築方法の技術移転をおこなった。平成 24 年度のカウンターパート研修は平成 25 年 2～3月に実施し、GIS を用いたインベントリデータの解析手法の技術移転をおこなった。



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

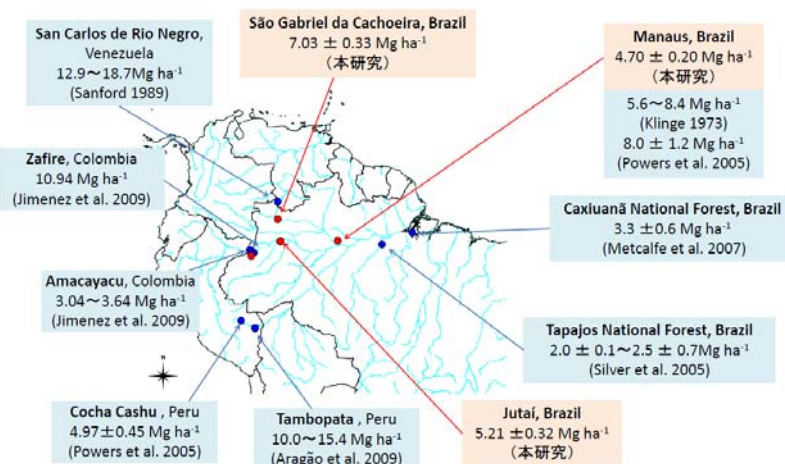


図1 本研究および他の先行研究におけるアマゾン広域での細根現存量の分布

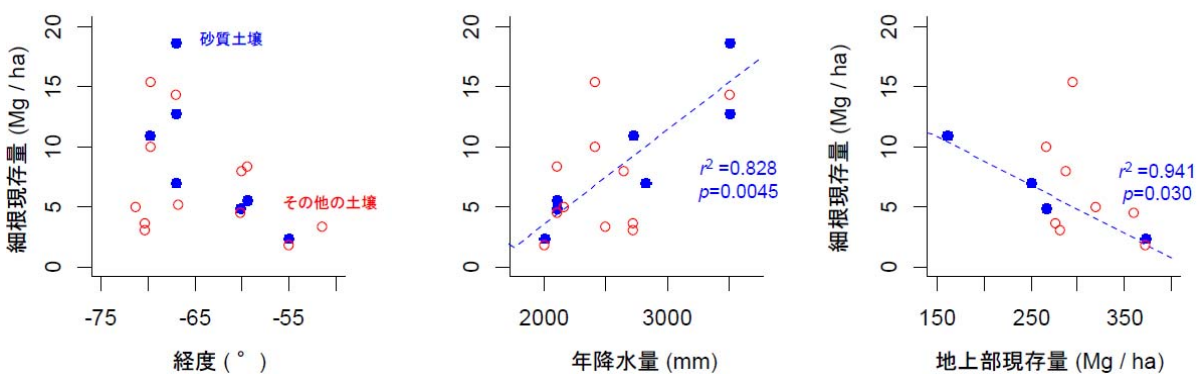


図 2 本研究および他の先行研究におけるアマゾン広域での(左)経度、(中)年降水量、(右)地上部現存量と細根現存量との関係

## 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、個体サイズー個体重(炭素量) 関係と比較解析し、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

平成 22 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。



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。

平成 23 年度は、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した(図 3 左)。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(図 3 右)。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。



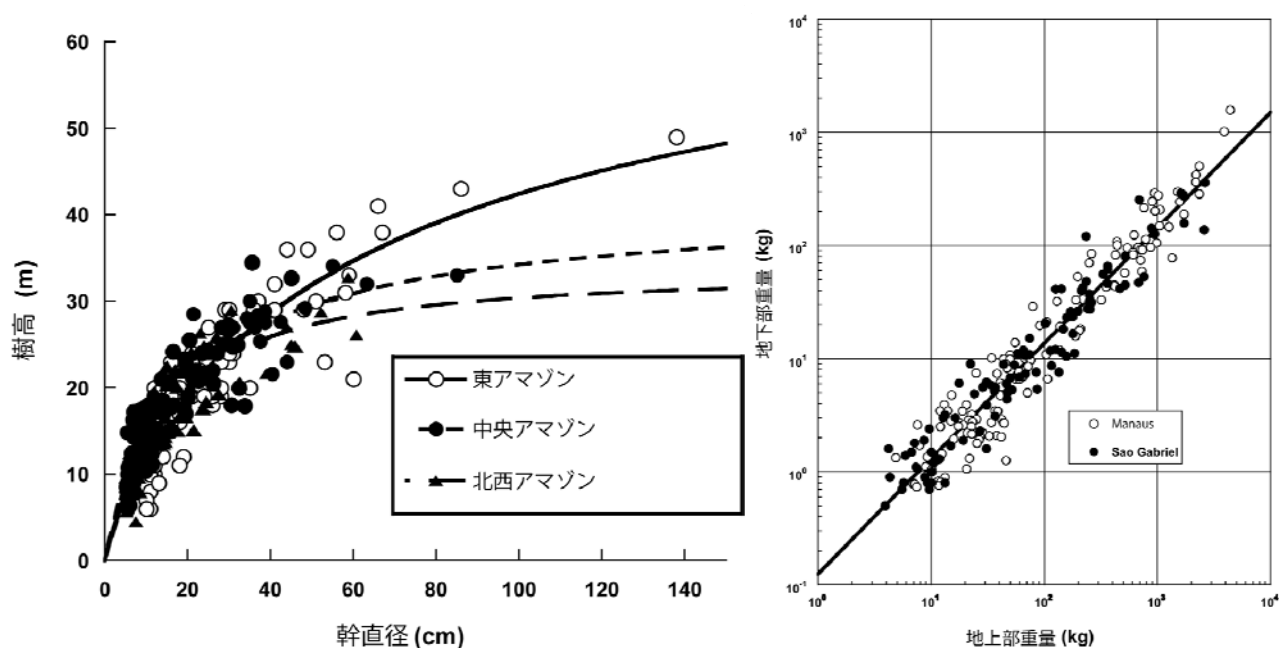


図 3 (左) ブラジリアマゾンの3地域 (東アマゾン, Tome Acu; 中央アマゾン, Manaus; 北西アマゾン, Sao Gabriel da Cachoeira)における幹直径—樹高関係の比較解析. (右) Manaus (中央アマゾン)と Sao Gabriel da Cachoeira (北西アマゾン)共通の地上部—地下部重量の比例関係.

平成24年度は、昨年度の結果を受けて、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高の地域差によって、部分的に説明されるとして、上層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。上層木20%の平均樹高を優占樹高( $H_{dom}$ )と定義して、アロメトリ式に組み込んだ結果、組み込まない場合と比較して、地上部バイオマス推定の不確実性が低下した(表1)。この成果は、米国のLBAが編纂している書籍に掲載される予定である。

表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と組み込まないアロメトリ式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(%) |
|--------|--------------|-------|---------------|---------|
| 北西アマゾン | $H_{dom}$ なし | 59    |               | 19.09   |
|        | $H_{dom}$ 有り | 59    | 25.7          | 14.43   |
| 東アマゾン  | $H_{dom}$ なし | 127   |               | 13.90   |
|        | $H_{dom}$ 有り | 127   | 30.5          | 12.91   |

#### 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。平成 23 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い、論文の投稿準備を進めた。平成 24 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。平成 25 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、共同でアマゾン全域に適用可能な地上部の相対成長関係の解析を行った。

### 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

平成 22 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 4)。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。

平成 23 年度には、データベースのリンク作業の前準備として、当該年度までに森林インベントリを実施した 7 地域におけるデータの入力を完了し、これらを統一されたフォーマットで単一のデータベースに統合した。その際、これまで現地名のみで記載されていた樹種名と、科名および属名の対照表を作成し、属レベルまでの樹種情報を参照できるようにした。平成 24 年 4 月現在、この森林インベントリのデータベースには、7 地域、720 プロットから得られた 57 科、196 属、91,761 個体の樹木が登録されている。このデータベースには、今後実施される予定の森林インベントリのデータも適宜追加し、拡充を図る。



図 4 これまでにデータベースとして整理した 7 地域のインベントリプロットの位置。

平成 24 年度には、データベースのリンク作業の前準備として、当該年度に森林インベントリを実施した 3 地域におけるデータの入力を完了し、これらを統一されたフォーマットで単一のデータベースに統合した。

#### ④カウンターパートへの技術移転の状況

平成 23 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、地形とバイオマスとの関係を解析した。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。平成 24 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、広域での植生の解析を行った。平成 22 年度に取りまとめた地形とバイオマスとの関係に着目した解析結果は、国際学会などでの発表を通じて、改良が進められ、論文の投稿準備を進めている。平成 25 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、広域でのバイオマスの分布について解析を行った。

### 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

22 年度においては、マナウス付近に設置されたベルトランセクト(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 ベルトランセクト内の台地林と浸水林の森林にそれぞれ 20×20m 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、それぞれ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、斜面上部と下部に 60m×60m の細根調査区を 3 か所ずつ設け、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)。これらの調査区内では、細根現存量の測定も毎年実施する。

23 年度においては、粗大有機物については、ベルトランセクト内の浸水林と中間斜面林に新たに 20×20m 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。細根については、前年度に大規模試験地内に埋設したイングロースコアの約 3 分の 1 にあたる 54 本を回収し、細根の成長量を測定した。また 23 年度以降の成長量を測定するために、18 本のイングロースコアを追加で埋設した。また、細根現存量の年次変動を測定するために、大規模試験地内の 18 か所で、前年度と同じ方法で細根現存量の測定を行った。スキャナを用いた非破壊的な細根の観察については、林内の 18 か所に埋設したアクリルケースを用いて、約 1 ヶ月おきに土壌の断面を撮影した。この手法による細根動態の解析は、24 年度以降も継続的に実施した。また、細根および林分全体の炭素蓄積とその動態に環境要因が与える影響を解析するために、前年度に採取した土壌のサンプルの全窒素量・全炭素量を測定した。また、水分センサーとデータロガーを設置し、土壌の含水率とその変動の計測を開始した。平成 24 年度もこれらの測定を継続しておこなった。

##### ③ 当初の計画(全体計画)に対する現在の進捗状況



平成 22 年度においては、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。

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

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。

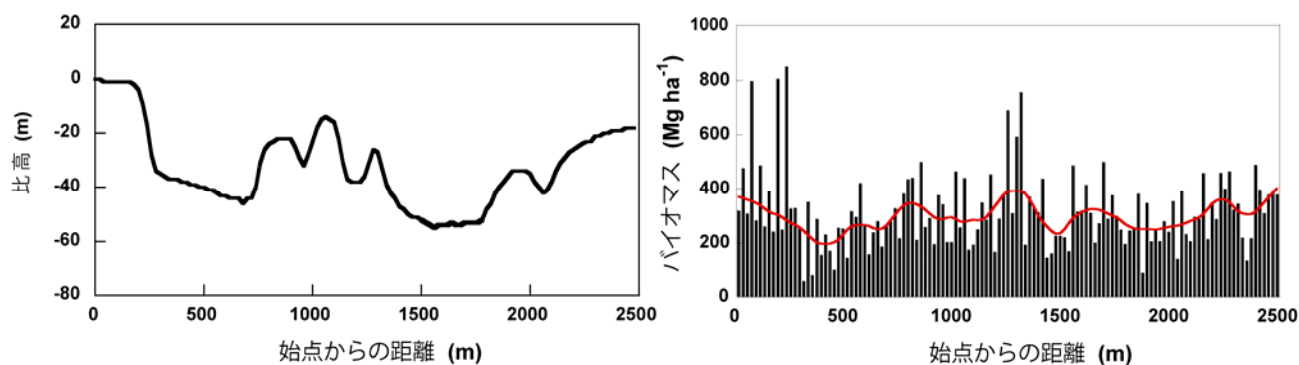


図5(左) ベルトランセクト内の比高プロフィール. (右) ベルトランセクト内のバイオマスの分布. 赤線はトレンドライン.



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.

平成 23 年度においては、これまでに得られたベルトランセクト内の林木のバイオマスの分布様式に関する解析結果を取りまとめた(図 5)。また、ベル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 2)。

一方、細根の現存量については、斜面下部において斜面上部よりも高い傾向が認められた(図 6)。この傾向は多雨期の終わりにあたる 6 月の測定値では顕著であったが、乾燥期の終わりの 11 月時点ではあまり明瞭ではなかった。また細根の現存量は 6 月の測定値のほうが 11 月の値よりも高く、季節変動が唆されたが、6 月はサンプル数が少なかったため、より詳しい検討が必要である。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7)。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。土壌水分やその他環境変数との関係について今後解析を行う予定である。平成24年度は、これまでの約3年間の細根のコアサンプルをとりまとめた結果、細根現存量は浸水林で経時変動が大きく、台地林では変動が小さいことが分かった(図8 論文投稿予定のためマスクを付けている)。また、浸水林のほうが台地林よりも細根現存量が多かった。イングロスコアおよび土壌断面画像による細根の成長量の調査結果は現在、データの整理および解析を進めている。

表2. 地形別々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          |

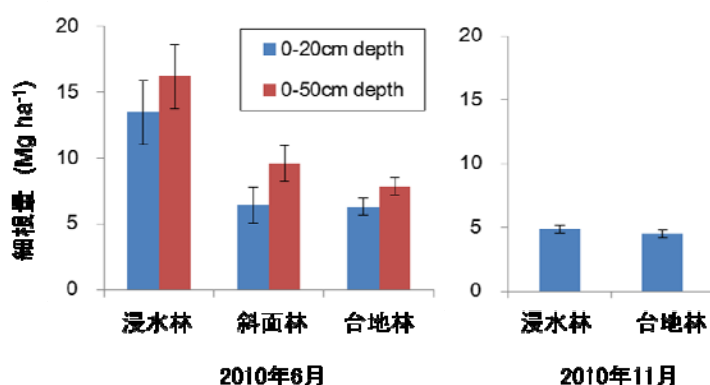


図6 大面積調査区における2010年6月(左)と2010年11月(右)の地形単位ごとの細根現存量。

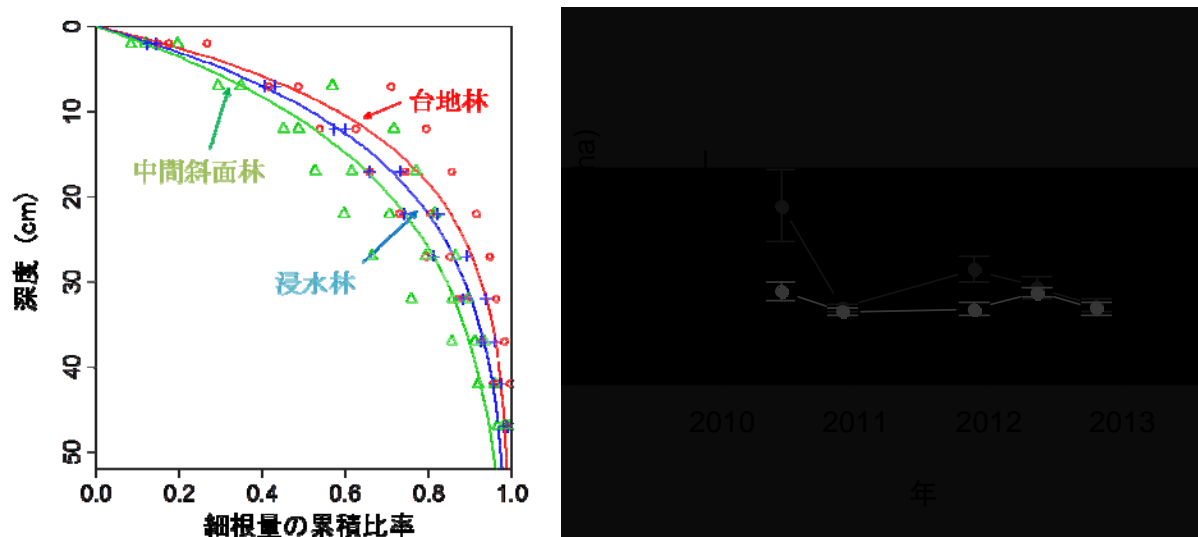


図7 地形単位ごとの細根現存量の深度分布。図8 地形単位ごとの細根現存量の経時変動。

平成24年度においては、平成23年度までに確認されたベル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( $r=0.59$ ,  $p=0.16$ )。

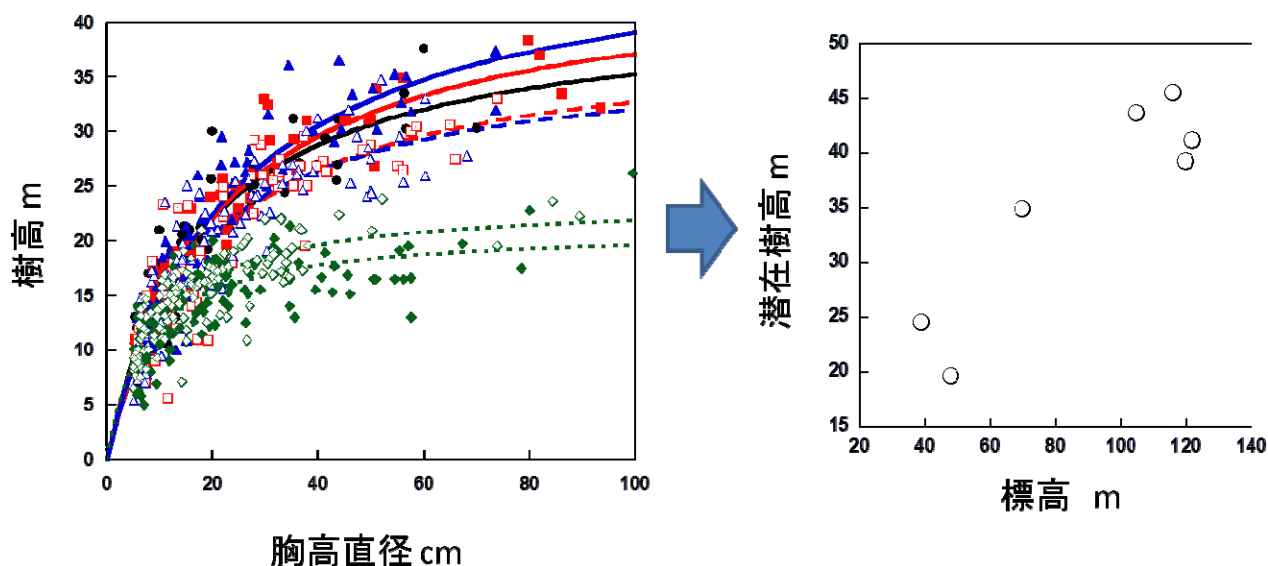


図9(左) マナウス付近の6林分において取得された胸高直径と樹高との関係。(右)左図より推定された潜在樹高と標高との関係。

#### 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、平成23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。平成24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った。平成25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った。

## 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

平成 22 年度は、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。平成 23 年度は、データベース化したインベントリ結果を元に、異なる 12 伐採時期およびコントロール区のバイオマスについて解析を行った。結果として、個体重量の頻度分布については、択伐後年数に沿った顕著な違いは認められなかった(図 10 左)。科ごとに解析を行った結果、いくつかの科においては、時系列に沿ったトレンドが認められた。例えば、Fabaceae のバイオマスは伐採時期が現在に近づくほど減少する傾向が認められた(図 10 右)。平成 24 年度は、択伐による影響の詳細を検証するために、異なる年(1995 年、2001 年、2005 年)に施業が行われた各林分において、切り株があるプロット一箇所と、切り株が無いプロット一箇所について、立木図を作成し、施行にかかわる痕跡やギャップを記述した(図 11)。



写真 4 (左) 幹直径の測定. (右) 調査風景.

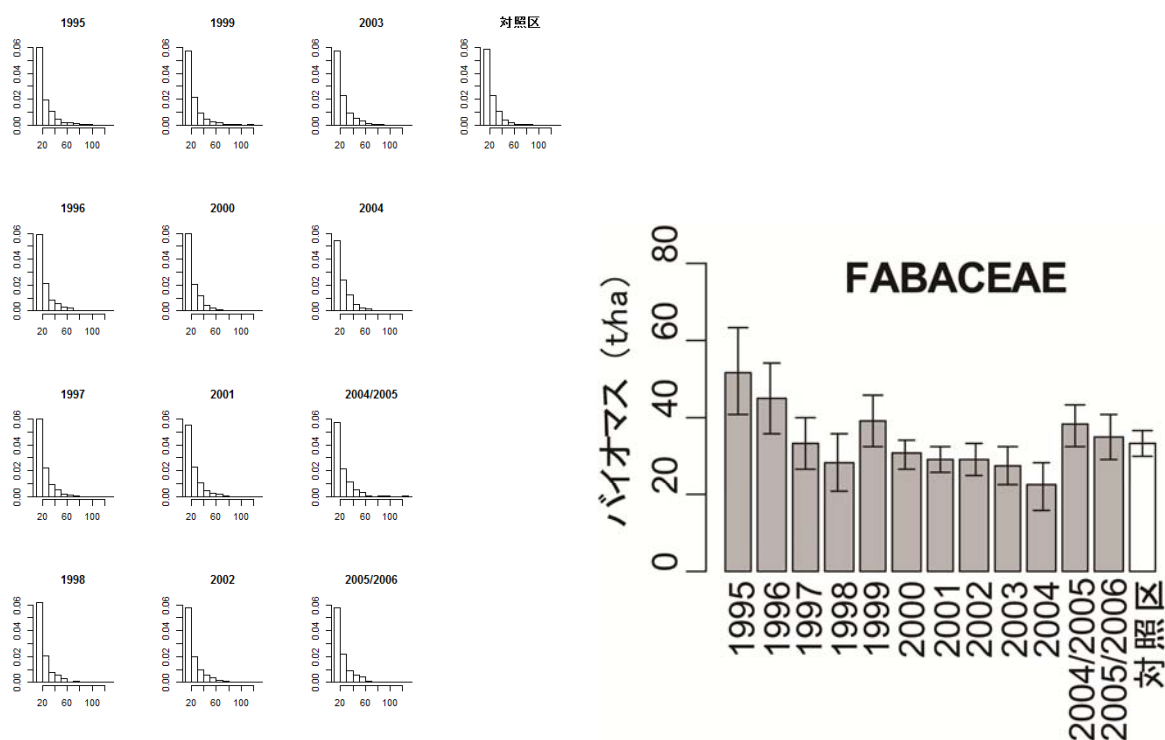


図 10 (左) 伐採時期の異なる林分と対象区林分における幹直径の頻度分布図. 横軸は幹直径のサイズクラス



(cm)を示す。(右) 伐採時期の異なる林分と対象区林分における Fabaceae のバイオマス。

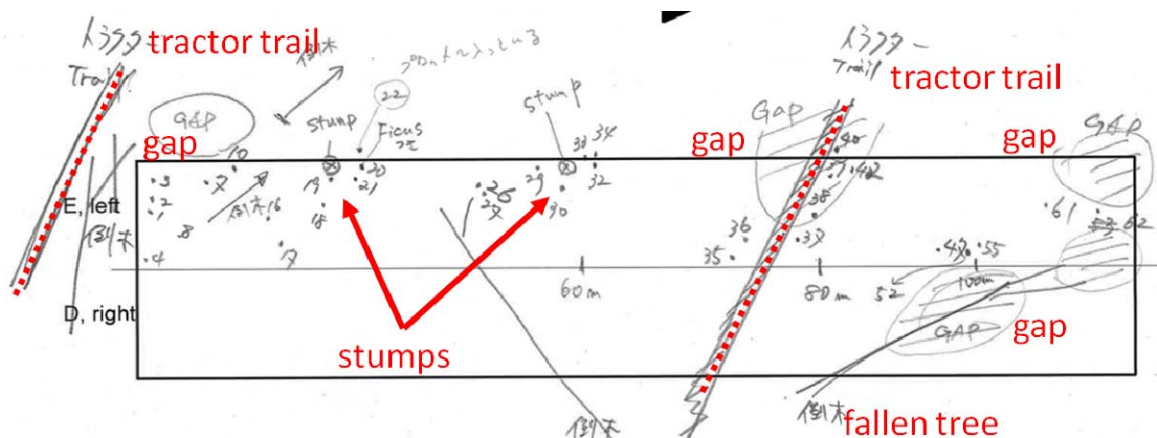


図 11 択伐林における、施業にかかわる痕跡やギャップの記載例。

#### ④カウンターパートへの技術移転の状況

平成 22 年度には、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。平成 23 年度においては、インベントリデータのデータベースの構築作業を通じて、択伐施業林の基本的な林分構造を定量化した。平成 24 年度においては、現地調査の共同実施を通じて、択伐施業林における施業の痕跡の記載方法について技術移転をおこなった。

### 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）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12）。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。



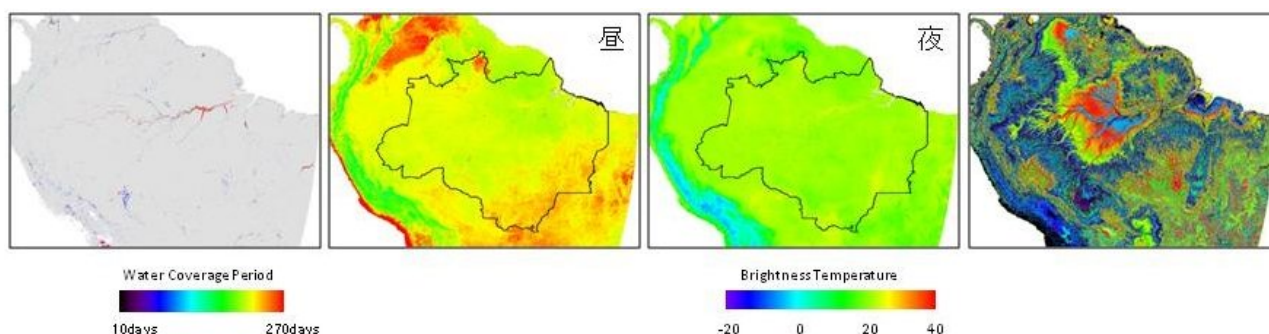


図12 立地環境区分図作成に用いたデータセットおよび環境区分クラスタリング結果  
 左から冠水期間図、昼間輝度温度、夜間輝度温度、環境区分クラスタリング結果。

平成23年度は、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完成したことから、これらをクラスタリング処理によってクラスター画像を生成、これを基に森林環境区分図の第一版を作成した(図13・図14)。それに必要なソフトウェアはすべて独自に開発を行なった。入力データのうち詳細な森林分布は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ている。冠水期間や浸水林の分布などの水分環境はPALSARデータやその他の高分解能の衛星データ等によって検証を行なっている。また、森林分布の変化履歴をLandsat/TMデータを用いて自動的に解析が可能となる手法を開発した。

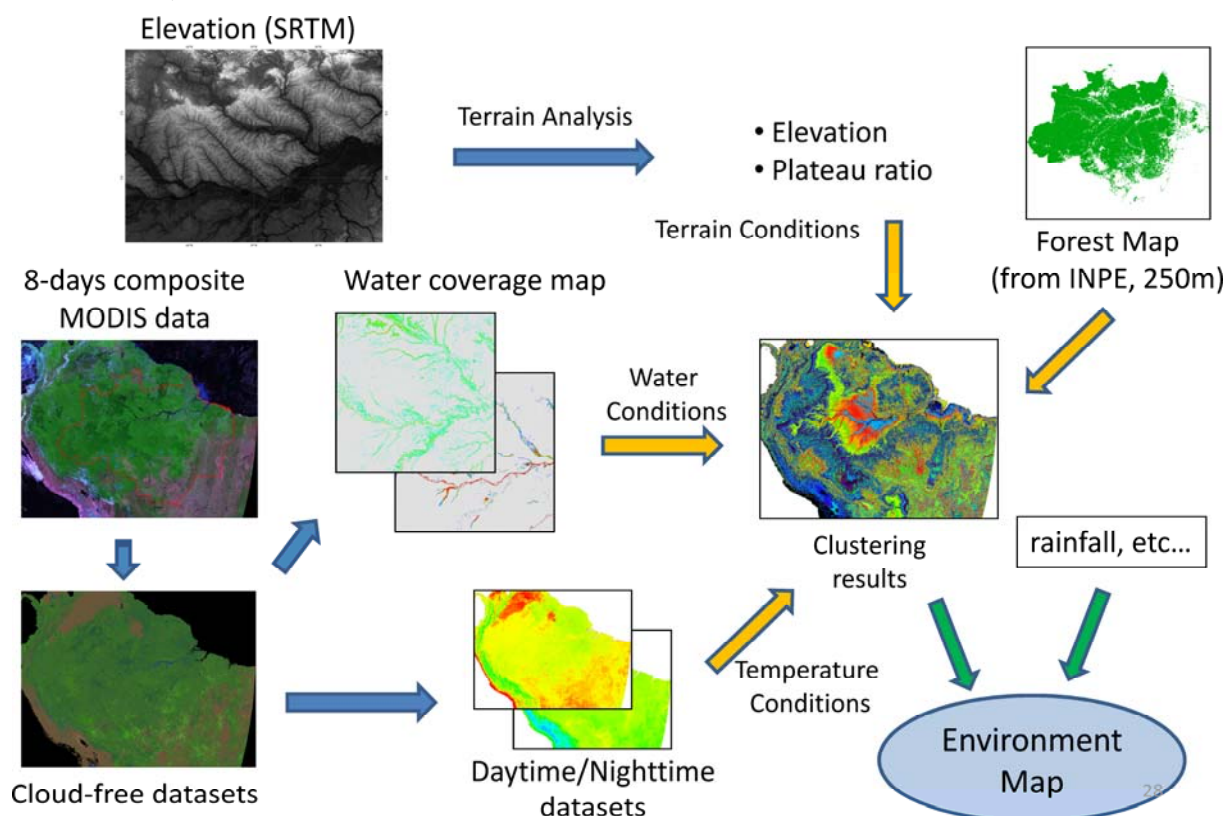


図13 森林環境区分図作成の流れ。

## A Forest Site Environment Map (2009)

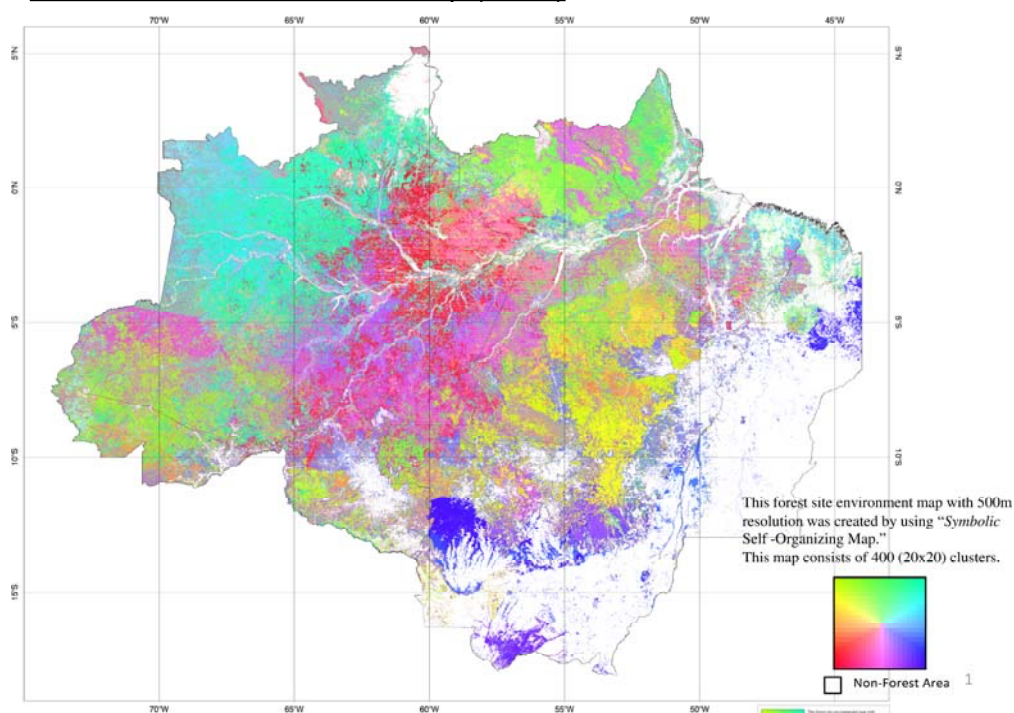


図14 森林環境区分図（第一版）.

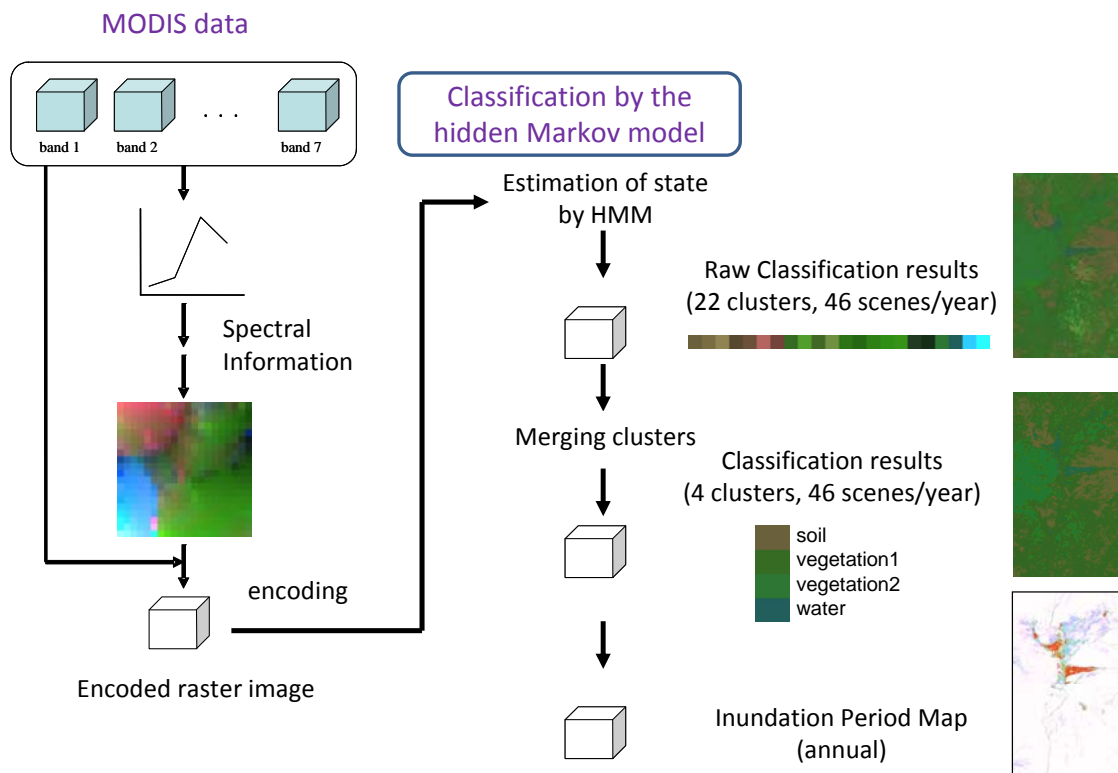
## ④カウンターパートへの技術移転の状況

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。

平成24年3月から2ヶ月間共同研究者を日本に招聘することで、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ているが、インベントリ調査にも同行して林分構造についても深い知見を有し、能力が極めて高く、技術取得が進んだ。

平成24年10月には約1ヶ月間国立宇宙研究所(INPE)の共同研究者を日本に招聘することで、MODISデータの時系列処理やSAR等の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。特に、環境区分図作成に用いたMODISデータ処理技術には共同研究者は非常に強い関心を示し、その中でも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」は、ブラジル国全域を対象とした新しい森林環境自動監視システムの中核として導入を検討したいとの要望が寄せられた。そこで、本邦研修期間にはアマゾン地域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データを用いて作成した(図15)。

## Flow of MODIS data processing (Discrete time-series modeling)



## Inundation Period Maps

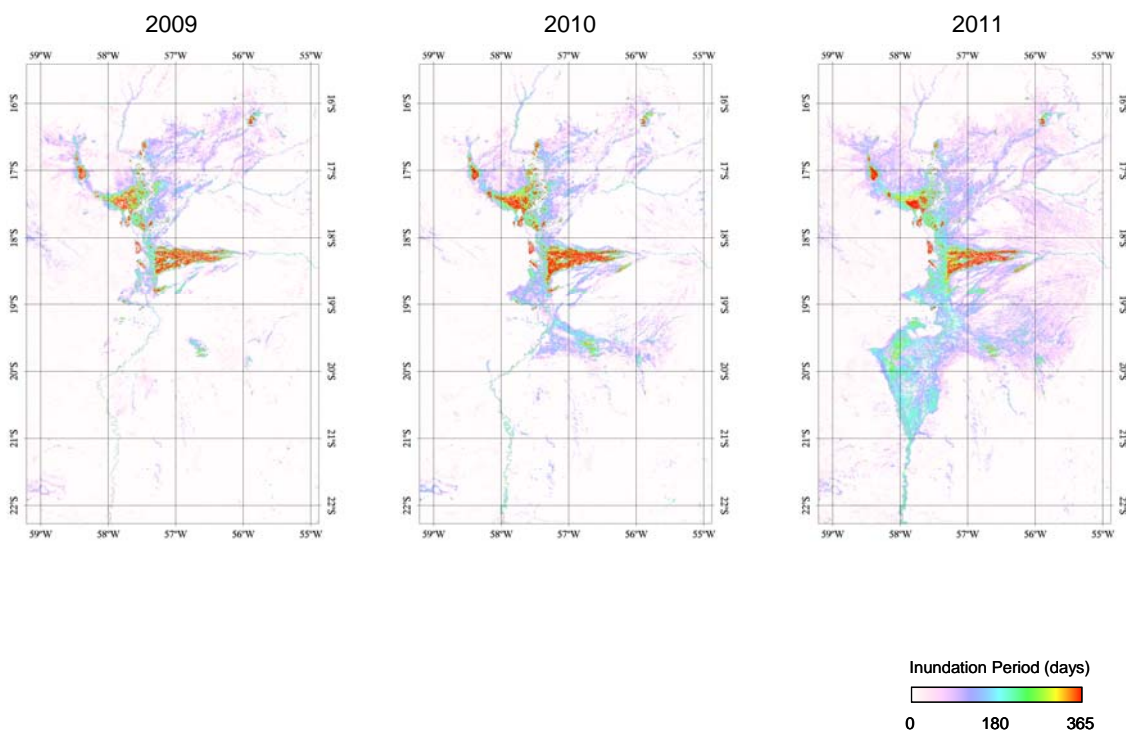


図15 パンタナル湿原の冠水域マップの作成手法(上)と冠水期間図(下)

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) に関係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。

アマゾン全域の時系列処理にはその処理だけで数週間を要するが、GPGPUユニットを搭載したPCを利用し、ソフトウェアをGPGPU向けに高度に最適化することで、1枚のGPGPUユニットで26倍以上の大幅な高速化を実現した。これは昨年度と比較して4倍以上高速化された。この技術は高頻度観測衛星データ処理に要する時間を大幅に短縮できるため、新しい衛星観測データを用いた炭素動態マップの更新を迅速に行うことを可能にするものである。

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する手法である。

## 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平成23年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。

本年度も航空機 LiDAR の観測に関してブラジル政府から撮影許可が下りず、データの取集ができていない。そこで、航空機 LiDAR の撮影許可を次年度以降も申請し続ける一方、カメラとレーザ測距器を搭載した UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の利用も考慮することにし、現在、機器購入に向けて準備を進めている。

22 年度に開発した 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、今年度は、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 16・図 17 にシミュレーションの一例を示す。

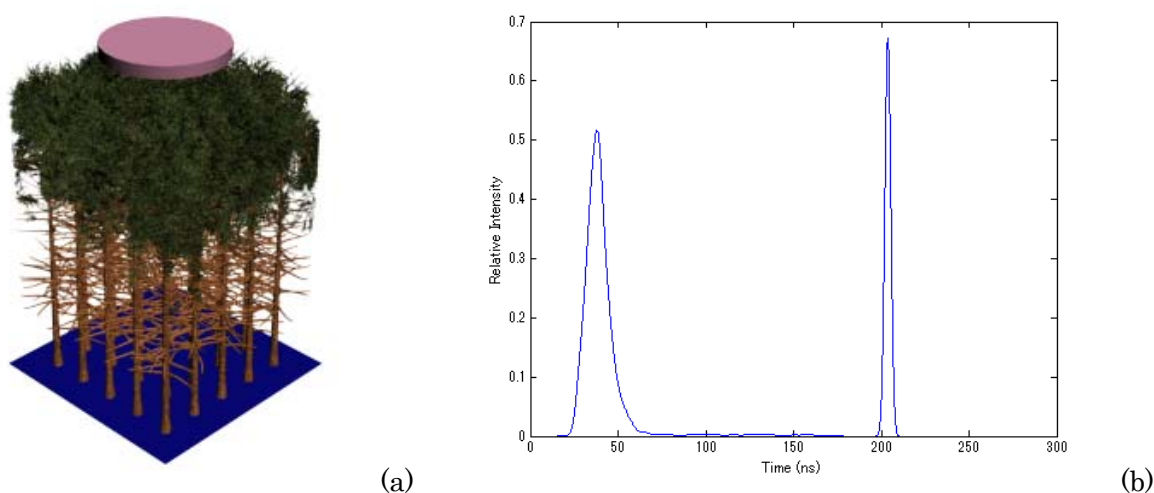


図 16 開発した波形シミュレータで利用する場(a)とシミュレートした波形(b).

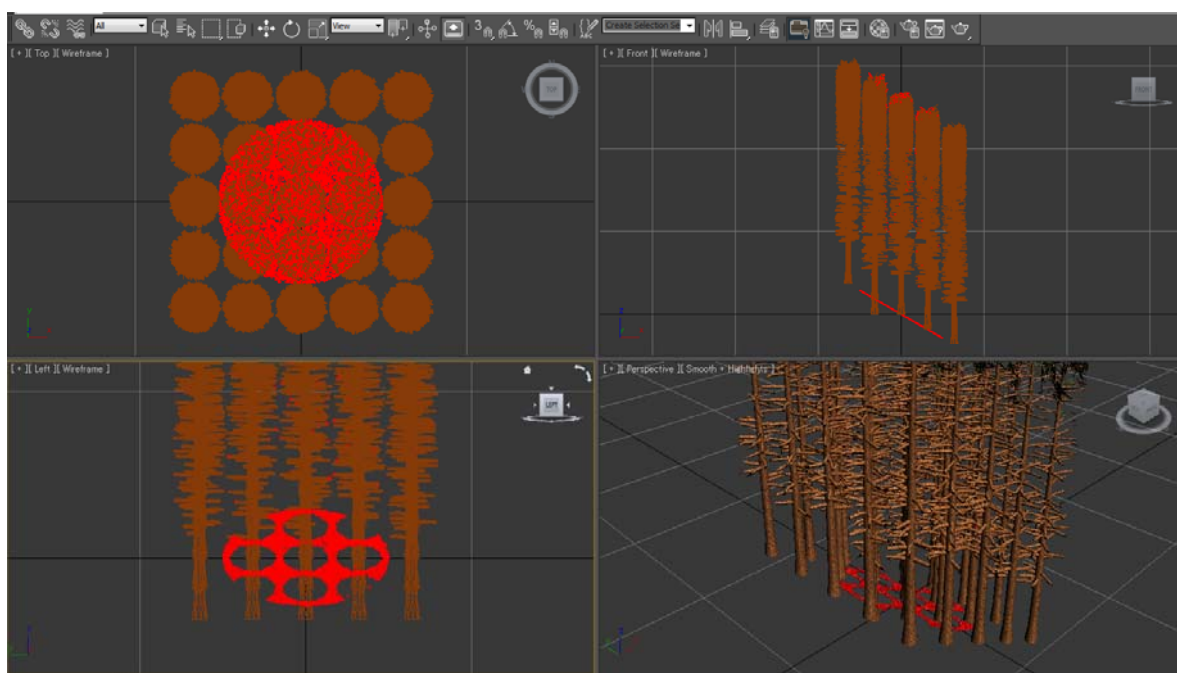


図 17 開発した波形シミュレータによる素過程の可視化.



Full-wave の LiDAR 観測が非常に遅れているため、当初計画通を変更して無人飛行機 (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 (図 18)。標高データと地上測量データとの良い一致を確認した。現在の進捗は当初より遅れているが、概ね挽回できる見込みである。

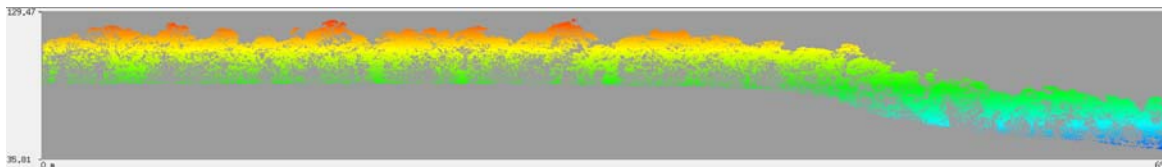


図18 国立アマゾン研究所試験地のLiDARデータによる樹高と標高計測

#### 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、平成 23 年 2 月の招へい期間中に実施した。

平成 23 年 9 月に 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。

平成 24 年 2 月から 45 日間、国立アマゾン研究所研究員を招聘することで、PALSAR 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ており、能力が極めて高く、技術取得が進んだ。

平成 25 年 2~3 月には国立アマゾン研究所 (INPA) の共同研究者を招聘し、空中写真測量技術および航空機 LiDAR 技術を習得した。インベントリ調査にも同行しており、林分構造についても深い知見を有しており、技術取得が進んだ。

#### 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

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。

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。

22 年度、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 19・図 20)。

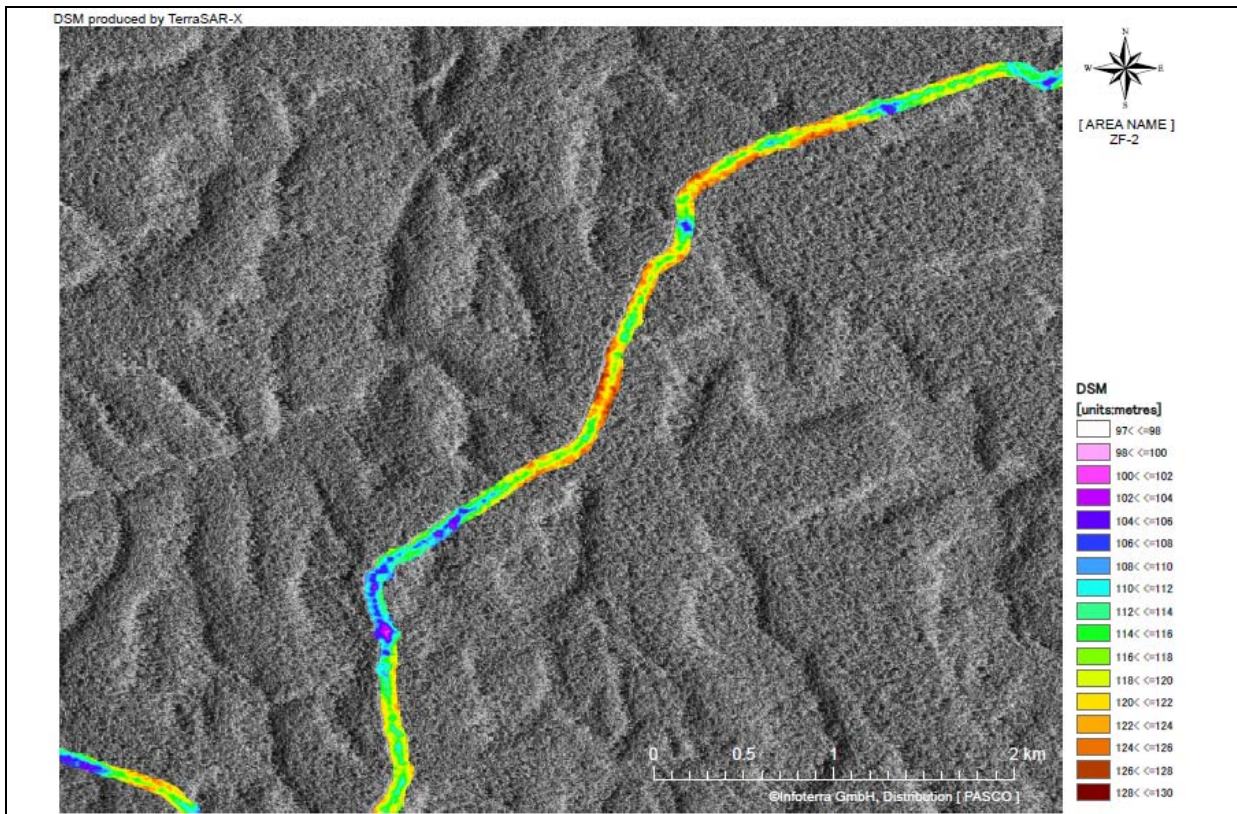


図 19 ZF-2 周辺の林道沿いの樹高推定結果.

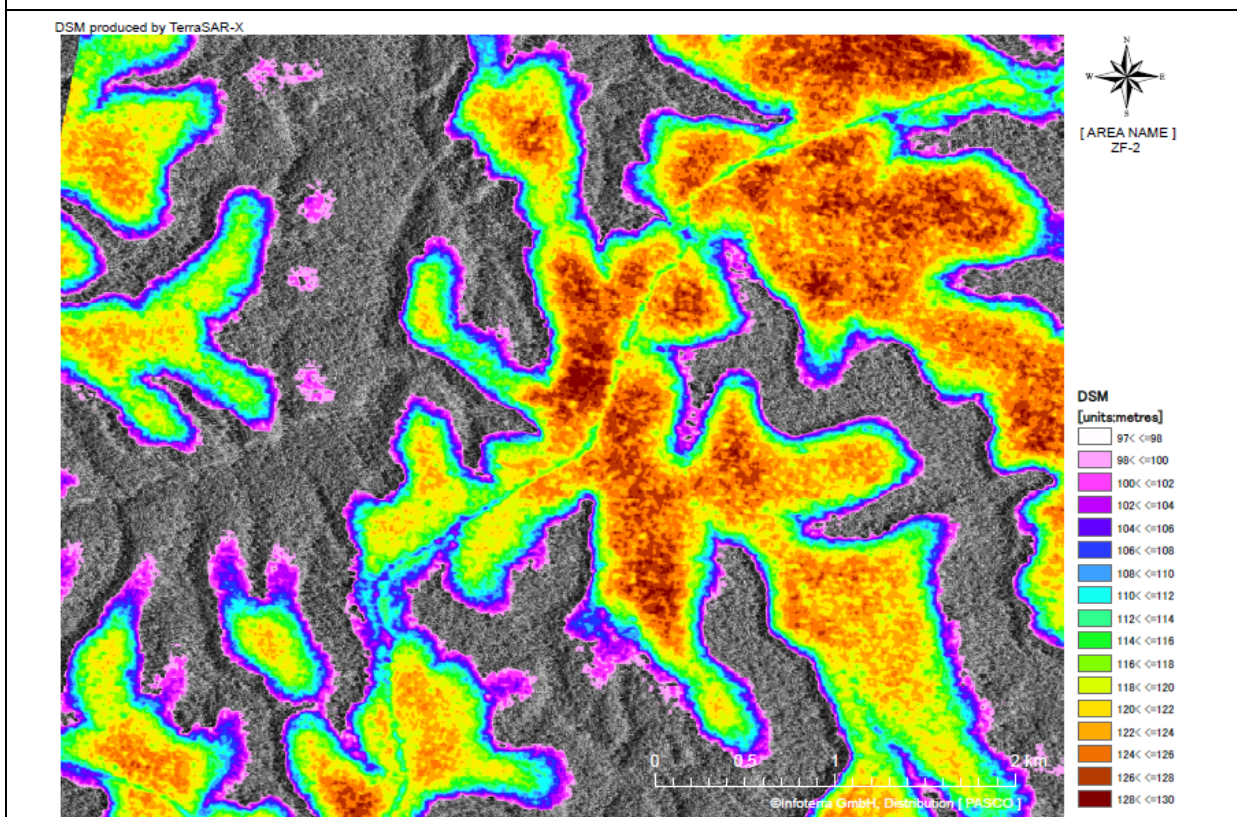


図 20 ZF-2 周辺の林道周辺の地盤高の推定結果.

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 21)。これは地盤面のみのフットプリントとそれ以外的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。

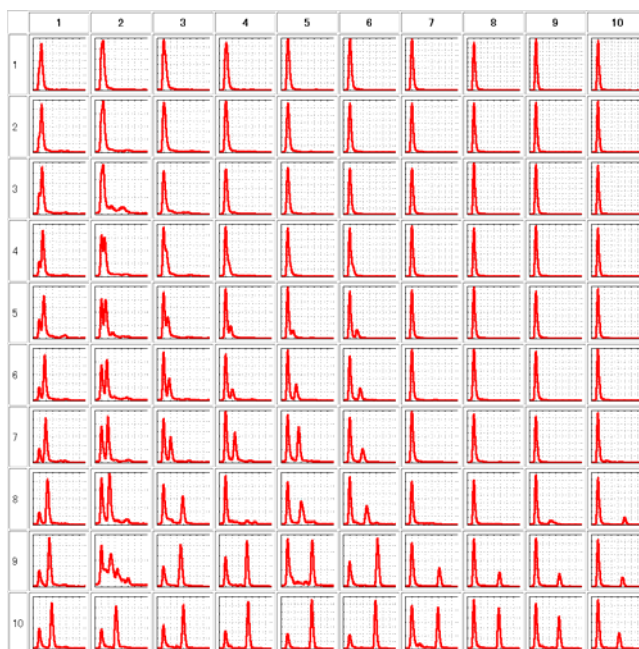


図 21 独自に開発した full-wave LiDAR 波形分類システムの結果  
地盤面からの反射のみの波形とそれ以外を明確に分離することができる。

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 22)。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。

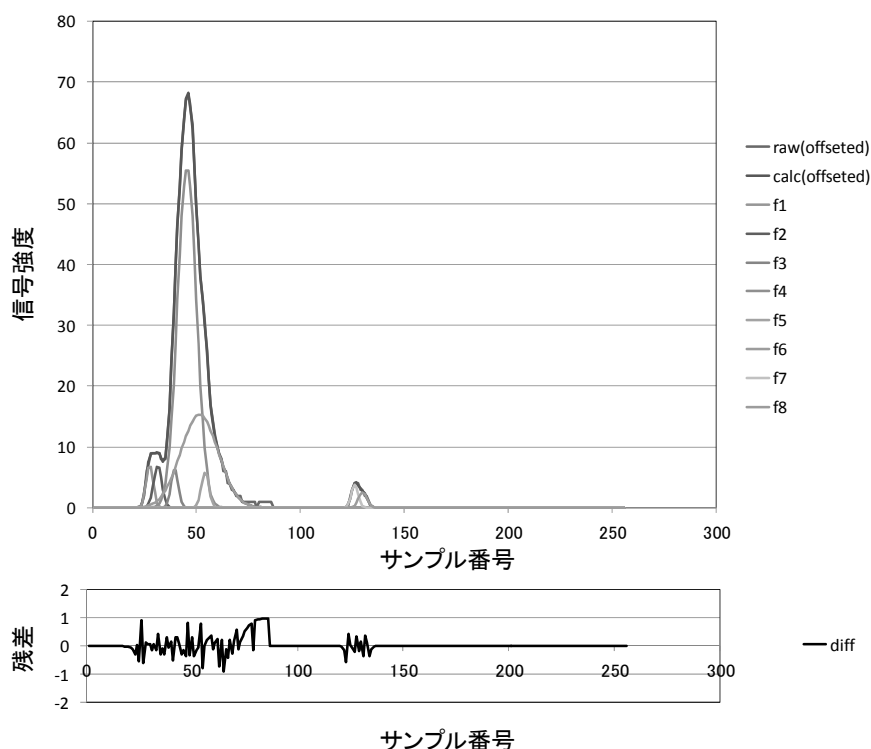


図 22 fullwave LiDAR 波形データのピーク位置精密決定の結果例  
 上段はピークフィット結果、下段は元データとフィッティング結果の残差.

### 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 23 年度から実施している。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た。

22 年度までの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。これにより、森林立地環境とバイオマスの関係を解析することが可能となった(図 23)。

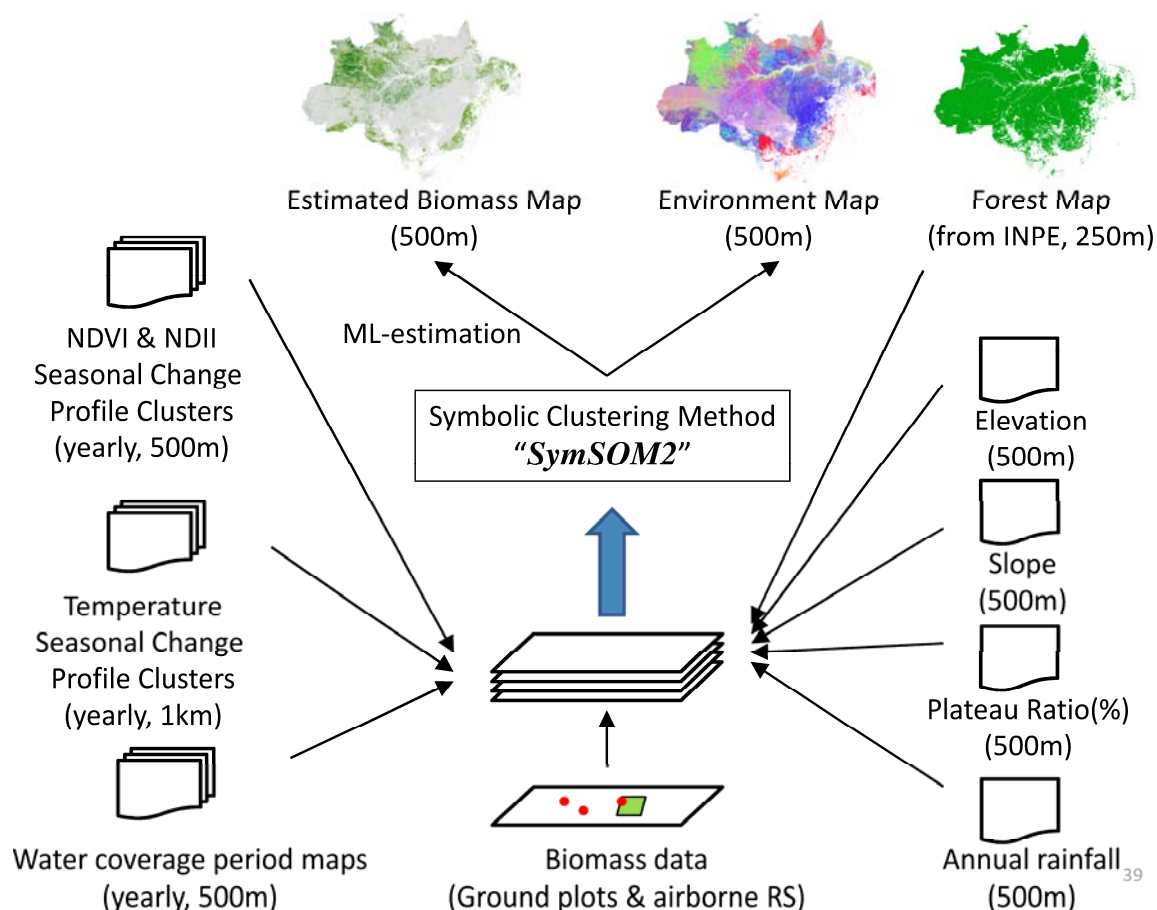


図 23 広域でのバイオマス推定処理の流れ.

24 年度初めから、インベントリー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の結合作業を行ってデータベースの整備を行っている。これにより、約 700 地点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ることが可能となった。

#### ④カウンターパートへの技術移転の状況

平成24年10月には約1ヶ月間国立宇宙研究所 (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。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

本研究項目では、非階層的クラスタリング手法を基にして炭素量推定を行うためのアルゴリズムと専用ソフトウェアを独自に開発しているが、これに精度評価に必要な機能を付加するための改良を行っている。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る(図 24)。



## バイオマス推定量の信頼区間算出

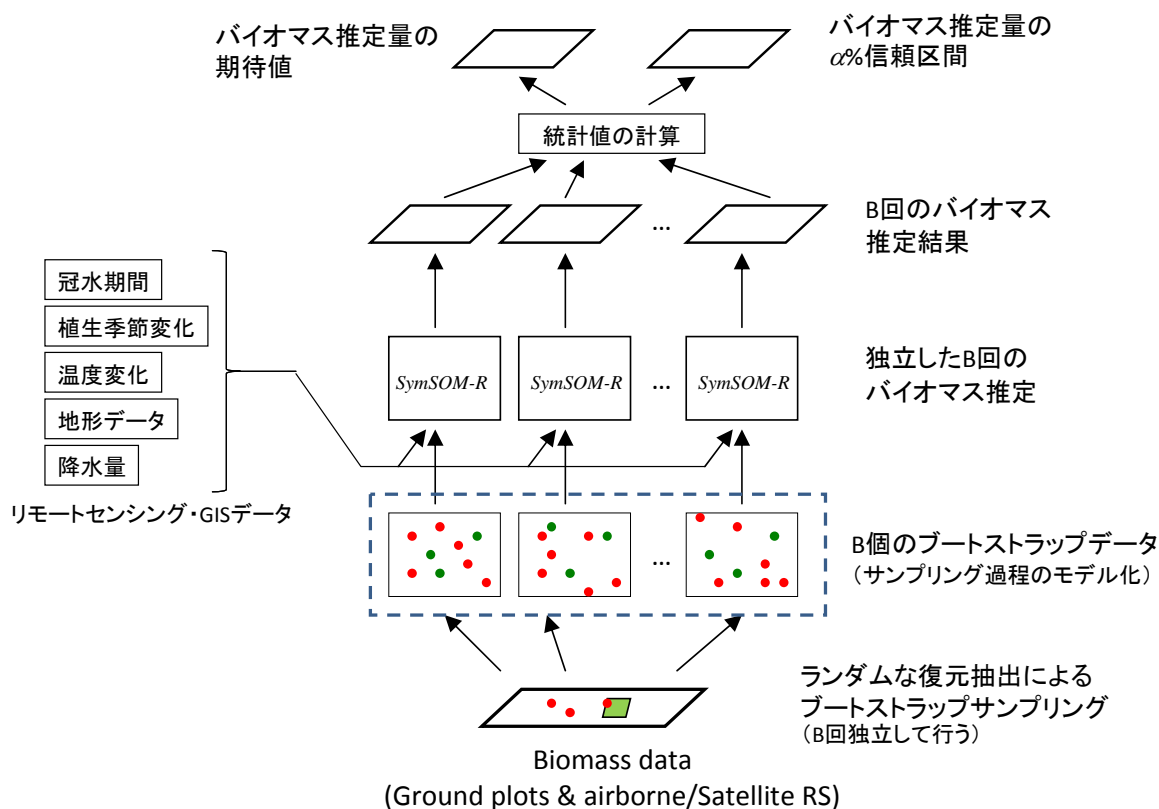


図 24 画素毎に信頼区間の付与された広域バイオマスマップ作成手法

### 3. 成果発表等

#### (1) 原著論文発表

- ① 本年度発表総数(国内 2 件、国際 1 件)
- ② 本プロジェクト期間累積件数(国内 5 件、海外 2 件)
- ③ 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

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), 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 (2012) 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

Suwa R., Sakai T., Santos J., Silva R.P., Kajimoto T., Ishizuka M., Higuchi N (2013) 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

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

## (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」

- 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」

- 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