

**地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)**  
**研究課題別終了時評価報告書**

**1. 研究課題名**

アマゾンの森林における炭素動態の広域評価 (2010年5月～2014年5月)

**2. 研究代表者**

2. 1. 日本側研究代表者：石塚 森吉 (森林総合研究所・客員研究員)
2. 2. 相手側研究代表者：Dr. Niro Higuchi (Instituto Nacional de Pesquisa Amazonia (INPA), Forest Researcher)

**3. 研究概要**

本プロジェクトの上位目標は、劣化した森林を含むアマゾンの広域炭素動態評価技術を開発し、途上国の森林減少・劣化によるCO<sub>2</sub>排出量を削減し、REDD+などへ活用されることにより、ブラジルおよびその周辺国における森林の適切な保全 (評価・保全地域の設定・違法伐採の監視) に貢献することである。

本プロジェクトでは、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、森林観測インベントリデータとリモートセンシングデータを活用することで、広域な森林の炭素蓄積量の動態の測定・評価技術を開発すること、およびREDD+などで求められている測定・報告・検証 (MRV) として活用できるシステムとして提言することを目的としている。

具体的には、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 (多点プロット調査) をひとつのシステムとし、中央アマゾンの特徴づける台地-浸水地のモザイク地形における森林の炭素動態を明らかにする。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動態を、レーザーリモートセンシング等を介して広域衛星データへスケールアップ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。

具体的な研究項目は以下の四つである。

1. 長期森林インベントリ・システムの構築
2. 森林の構造と炭素動態の解明
3. 森林の炭素動態のマッピング
4. UAVによる森林の立地解析

**4. 評価結果**

## 総合評価 (A : 所期の計画とほぼ同等の取り組みが行われ、目標通りの成果を挙げることに成功した)

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の森林における地上調査をINPAと共同で行い、得られた森林インベントリデータに生物多様性に関する情報もあわせたシステム化を行い、アマゾン地域の立地環境区分図を完成させ、INPA独自でも観測が持続出来るようにした点は高く評価出来る。

また、予定していた航空機LiDARは許可がおりず、実施できなかったものの、ICESatやUAV LiDARなどの手法を急ぎ導入し、バイオマスの推定精度を向上させたアマゾン地域の炭素蓄積量マップを完成させたことは、学術的にも、REDD+などへの今後の活用という面からも大きな成果である。

こうした成果をブラジル側でも高く評価しており、REDD+に関するブラジルのレファレンスに利用することが明言されるなど、社会実装面からも評価できる。

今後は、これらの研究成果を論文やREDD+の国際会議等で積極的に発表し、研究成果が広く使われるよう努力することを期待する。また、現地調査で得られたインベントリデータに関しては貴重なデータであるので早急に公表し、広く利用されることを望む。

以下に、評価項目における特筆すべき内容を列挙する。

### 4-1. 地球規模課題解決への貢献

#### 【課題の重要性とプロジェクトの成果が課題解決に与える科学的・技術的インパクト】

・衛星LiDARデータを用いる手法に決めることで、地上観測データとリモートセンシングデータの統合の方針が固まり、広域の炭素蓄積量分布図(バイオスマップ)が完成した。不確実性も既存研究と比較して大きく下げることが成功している。最終的に大統領の認可が下りず、広域レベルで航空機LiDARデータは使えなかったが、代替方策の採用により、予定していたアウトプットを実現することができた。

これはREDD+のMRV手法として、おそらく現時点で最も高い精度での推定方法を確立できたことを意味する。また、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である。

以上の意味で、本プロジェクトの貢献は極めて大きい。

#### 【国際社会における認知、活用の見通し】

・日本との共同研究で開発された手法が、REDD+の交渉におけるブラジル政府の炭素蓄積量のレファレンスとして利用されることがほぼ確実となるなど、相手国の認知度は高い。また、REDD+ではさまざまな推定精度に基づいたTierが予想されるが、この手法による精度が明確になったため、信頼性が高くかつ最も高い精度のシステムとして位置づけられる可能性があり、国際社会における今後のREDD+の議論にも大きく貢献するこ

とが予想される。

#### 【他国、他地域への波及】

・他の途上国においても、森林減少・劣化による二酸化炭素排出量の削減（REDD+）への貢献が期待される。具体的には立地環境が似ている南米隣国だけではなく、アジア、アフリカの熱帯林の評価技術としても普及が可能と思われる。とくに衛星によるリモートセンシング技術のレベルは高く、汎用性もある。より実際的で優れた調査手法として、他国への貢献も大きいので、この面での積極的な働きかけが望ましい。

#### 【国内外の類似研究と比較したレベル】

・他の地域に比べて調査が困難なため、これまで空白域だった中央アマゾンで、1200 か所以上の現地検証データを収集したことは、検証データとして非常に価値の高い成果と言える。さらに、これにリモートセンシング技術を組み合わせ、地形など他の影響要因を考慮しつつ、炭素蓄積量を精度よく推定する手法を開発できた点には新規性があり、高く評価できる。結果的に広域の炭素動態を高精度で推定、分析できる技術を確立することに成功した。

・空白域だった中央アマゾンで多くのインベントリデータを得、バイオマスマップの地点ごとの不確実性を、既存のものより大幅に小さくすることに成功した。バイオマスマップの不確実性の算定には、ノンパラメトリックブートストラップ法という統計的な方法を用いている。これは、衛星LiDARがはじき出す林冠高、波形パラメータ、MODISなどから求めた環境変数からなる、画素ごとのバイオマス蓄積量を計算する一次回帰式をつくり、300 地点以上のインベントリ調査データからのサンプリングとつぎ合わせて、係数を決める（画素ごとのバイオマス蓄積量の推定式）。このサンプリングを復元抽出により 1000 回繰り返すことで、バイオマス蓄積量の不確実性を計算した。この不確実性は統計的なもので、通常の誤差とは異なるが、既存研究でも同様の方法を用いている。

アマゾンの各地点のバイオマス蓄積量推定値の不確実性は0-40%で、インベントリデータの多いアマゾナス州については0-10%とかなり小さくなった。全体のバイオマス蓄積量(地上部)は102Gtで、モデル誤差は±4.46%。アロメトリ式の測定誤差が±11.3%のため、誤差を二乗して加え、平方根をとると±12.2%となり、不確実性は目標としていた20%以下となる。

## 4-2. 相手国ニーズの充足

#### 【課題の重要性とプロジェクト成果が相手国ニーズの充足に与えているインパクト】

・中央アマゾンにおける森林のインベントリ調査は、ブラジルの研究機関であるINPAと森林総研がこれまで行っていたものをよりシステム化したものであり、ブラジル側のニーズに沿ったものと判断できる。一方、航空機LiDARによる観測が出来なかったため、

INPEの要望にどこまで応えたかは不明確であるが、東大の開発した衛星データ等からのバイオマスの推定技術の価値は高いので、この点におけるINPEへのインパクトは大きいように感じる。

・REDD+に関連して、これまで現地検証データの無かった地域での炭素蓄積量が明らかになった点は大きい。また、こうした点をブラジル側も認識しており、プロジェクトメンバーで、IPCCの温室効果ガスインベントリやUNFCCCのREDD+の活動にブラジルを代表して関わってきた、INPEのTheIma 国際協力局長より、国全体の炭素蓄積量のレファレンスに利用すると発言があった。アマゾン地域の炭素固定量が正確に評価できるようになり、アマゾン地域の重要性が定量的に明確になったことは大きな成果である。

#### 【課題解決、社会実装の見通し】

・今回の研究成果がブラジル国内で定着し、利用されることは確実である。ただ、ブラジル国におけるREDD+の進展にどのように寄与するかは依然として不透明で、継続的な努力が必要と考えられる。

#### 【継続的発展の見通し（人材育成、組織、機材の整備等）】

・研究代表者であるINPAのNiro氏のラボは、組織的にプロジェクトの前後で大きな差が生じており、プロジェクトによって相手国のキャパシティ・ビルディングが個人だけではなく、組織にまで及んでいると言える。

関係者によると、プロジェクト以前には2人だった研究者(シニアを含む)の数が、4人に増え、部屋の数も4部屋から17部屋まで増えた(現在も新しい研究棟を増築中で、まだ増え続ける見込み)。INCT(The National Institutes of Science and Technology)による、研究助成を受ける際の目安となるラボのランキングも、レベル4から最高のレベル5まで上がり、INCTの研究者のランキングでも、Niro氏はブラジル全土で30人、INPAでは2人しかいないトップサイエンティストの地位を維持し続けている。また、Niro氏は2013年、相次いでブラジル国のサイエンス・アカデミー、エンジニアリング・アカデミーの委員に就任した。これらすべてがプロジェクトの成果とはいえないが、Niro氏自身が「CADAF(プロジェクト)のおかげ」と証言していることも考慮すると、プロジェクトの貢献は大きいと認められる。

・プロジェクトには、INPAのドクターコース、マスターコースの学生が関わり、日本の森林総研や東大、RESTECのポスドクなどの研究者と共同研究を行っている。森林総研が受け入れ機関として認定されなかったこともあり、文科省の国費留学生(地球規模枠)は皆無だったが、JICAの短期・長期研修制度を利用して12人の学生が来日し、森林総研や東大などで研修を積んだ。INPAや他の大学でドクターを取得する見込みの学生もおり、キャパシティ・ビルディングには確実に結びついたといえる。

・衛星データからのバイオマス推定に関してINPE研究者との密接な共同研究が行われたとは言えない。INPEではバイオスマップとPRODES、DETERの統合が予定されているものの、実装が継続的な連携が推進される見通しははっきりしない。INPEの貢献の重要性が薄れてきたこともあり、本プロジェクトに対するINPEの組織的参画はやや低かったと言えよう。

#### **【成果を基とした研究・利用活動が持続的に発展してゆく見込み（政策等への反映、成果物の活用など）】**

・インベントリ調査については、INPAが継続していくことを計画している。また、リモートセンシングなどの技術移転も進んでおり、アマゾンの炭素蓄積をモニタリングする手法として、有力なデータや手法として反映される見通しは立ったと言える。

### **4-3. 付随的成果**

#### **【日本政府、社会、産業への貢献】**

・REDD+やJCM（二国間カーボンオ・フセット・メカニズム）などの仕組みが進めば、この研究の成果を生かした形で炭素蓄積量に関するMRVが可能となる。少なくとも、この地域での標準化の基本となる。

#### **【科学技術の発展】**

・東大の開発した、衛星データと地上の環境情報を組み合わせ森林のバイオマス推定の精度を向上させる方法は、少なくともアマゾン流域では成功したと思われ、技術的なレベルも高い。この方法では、地上部での観測データと衛星データを組み合わせてモデル化することで精度を向上させており、一方で地上部での観測データは生物多様性の評価でも貴重なデータを得る点で優れている。一方で、バイオマスの蓄積量の動態を検討する課題に関しては繰り返し観測が出来たラインが限定的であり、動態がどこまで定量的に評価できたかは多少疑問である。5年間で動態解析まで行うことは難しいので今後の地道な継続が望まれる。

・新たに導入したUAV LiDAR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により、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、本研究の意義は大きい。

#### **【世界で活躍できる日本人人材の育成（若手、グローバル化対応）】**

・中心となってプロジェクトに参加した若手研究者（ポスドク）は、いずれも優れた業績を挙げ、ブラジル国内でも高い能力を発揮している。

#### 【知財の確保や、国際標準化への取組、生物資源へのアクセスや、データ入手方法】

・REDD+が実現すれば、REDD+のMRV手法として確立される可能性は高い。また、現地調査のデータはデータベストして整備・公開される予定であり、貴重なデータとして価値の高いデータセットとして評価できる。また、このデータセットは生物多様性保全や生物資源に関するデータとしても価値が高い。

#### 【その他の具体的成果物（提言書、論文、プログラム、試作品、マニュアル、データなど）】

・アマゾン地域の現地調査データベース、広域の炭素蓄積量マップ、リモートセンシングに関する計算時間の短縮化など、評価されるべき点が多い。現地調査などに基づく論文の出版数は多くない。今後も発表を進めるべきである。

・森林総研、INPA、マックスプランク研究所が共同研究し、熱帯の樹木に関する dendrochronology (Dendrochronology、年輪年代学) について、新たな研究成果が出ている。熱帯の樹木でも、放射性および安定同位体を分析することで年輪が読める、という画期的な研究に発展する可能性がある。

・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PC上での計算に半年程度要するという問題があった。そこで研究グループは、処理時間の短縮を図るための並列化手法として、GPU (General Purpose Graphics Processing Unit) による処理を行い、結果的に最大で26.6倍の高速化を達成した。

#### 【技術および人的ネットワークの構築（相手国を含む）】

・森林総研、東京大ともにINPAと、20年以上にわたり良好な関係を築いているようであり、今回のプロジェクトでよりその関係が強化され、今後の共同研究の進展が期待できる。ただし、INPEとのネットワーク構築が最後まで十分でなかった点は残念である。これは航空機LiDARによる観測が許可されなかったことにもよる。

### 4-4. プロジェクトの運営

#### 【プロジェクト推進体制の構築（他のプロジェクト、機関などとの連携も含む）】

・JST評価チームは中間評価報告書において、INPEのプロジェクトへの貢献が3年目までほとんど見られなかったため、「日本側研究機関がイニシアティブをとり、日本側、INPA、INPEによるプロジェクト定例会議を開催するなどして、プロジェクト実施状況に関係者で共有すること」と要望した。これを受け、INPEは航空機LiDARを

実現させるために尽力したが、大統領の許可は得られなかった。結果的に I N P E の関与はかなり限定的になった。

しかし、I N P E の関与はむしろ今後の実用化段階にあるともいえる。I N P E が運用中のアマゾン森林監視システム(P R O D E S、D E T E R)にバイオマス蓄積量を組み合わせ、インクリメンタルに更新できるようにすれば、違法伐採やその防止により、どれくらいバイオマス蓄積量が減ったかを知ることができるからである。I N P E 国際協力局長の Thelma 女史は、終了時評価現地調査の聞き取りの中で、プロジェクトの作成したバイオマスマップを、P R O D E S、D E T E R に統合する作業にスタッフを出すことを約束しており、最終的な成果を社会実装する段階で I N P E のプロジェクトへの関与が高まることが予測されている。

### 【プロジェクト管理および状況変化への対処（研究チームの体制・遂行状況や研究代表者のリーダーシップ）】

・両国の研究代表者は最大限努力したと思う。その結果として大きな成果を得た。航空機ライダーの飛行許可が得られなかったことは残念ではあるが、U A V L i D A R である程度カバーされた。航空機 L i D A R と U A V L i D A R には一長一短があるようであるが、的確に対処されたと言える。

・相手国研究代表者の Niro 氏は、日本側研究代表者の石塚氏との信頼関係は強固である。背景には、20 年以上前からアマゾンフィールドに、インベントリ調査を共同で実施してきたことに加え、石塚氏が研究以外の雑務も一手に引き受け、プロジェクトを支えてきたことがある。少なくとも INPA のスタッフは絶大なリーダーシップを持つ Niro 氏を中心によくまとまっている。その Niro 氏と連携し、プロジェクトをうまく進めることができたという意味で、石塚氏のリーダーシップも高い評価に値する。

### 【成果の活用に向けた活動】

・論文の発表により自然に認知が進むところもあるが、研究者らが国際機関などにも積極的に働きかけていくことが重要と思われる。

### 【情報発信（論文、講演、シンポジウム、セミナー、マスメディアなど）】

・学術論文としての発表数は多くない。プロジェクトで得られたデータは学術的にも価値が高いものが多いので、今後の公表を効果的に行うことを期待する。また、プロジェクト終了前後に、技術者向けセミナーや一般向けのアウトリーチが計画されている。

・研究グループによるシンポジウムやワークショップは 2014 年 4 月下旬に開催され、研究成果の活用、普及のために、論文や書籍の出版が予定されている。さらに、ホームページなどさまざまな機会を利用し、ブラジル政府関係機関や一般市民向けの情報を整理し、普及を図ることも、ブラジル側の評価委員の提案で J I C A のプロジェクト後の提言に盛り

込まれており、実行される見通しが高まっている。

#### 【人材、機材、予算の活用（効率、効果）】

・ JICAによると、一機目のUAVが2013年10月中に試験運用中に落下し、大破した。メーカーに委託して原因究明および再発防止の対策が練られた結果、UAV落下の原因は、運転ミス以外に見当たらず、再発防止は保険に入ることくらいしかないことがわかった。JICAはこれを受け、調査団としての提言として、INPAにおけるUAV LIDARの運営体制を強化するよう要望した。

### 4-5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

#### ・ 学術的な成果のアウトプット、成果の公表を加速させるべき

学術的に多くの成果を出しているわりに、論文などの発表が少ない。論文、シンポジウム、書籍などあらゆる手段を使ってすべきである。プロジェクトのシンポジウムが、プロジェクト終了直前の2014年4月にマナウスで開催されるが、研究グループではそのときの各メンバーの発表内容をまとめ、シュプリンガー社から本に仕立てることを検討している。

#### ・ データベースの早期公開を行うべき

地上観測調査やリモートセンシングで得られた大量のデータは、研究チームによる論文発表などが終われば公開されることが約束されている。また、アマゾンの生態系の特徴をとらえたアマゾン立地環境区分図も完成しており、炭素動態のみならず、生物多様性などさまざまな研究にも使えるような形で、データが整備されつつある。これらのデータベースをできるだけ早く公開してもらいたい。可能であれば、その前にも、メタデータベースのような形でデータの存在を公にするべきである。現地調査の継続が可能になるように、そうしたデータの有用性を明らかにするような学術論文も、生物多様性や生物資源など関連分野への波及も考慮して、出版されるべきである。

データの公開によって国際的な認知、活用は大きく高まることが期待される。

#### ・ 国際機関、政府関係者へ積極的に働きかけを行うべき

研究チームが開発したバイオマスマップが、ブラジル政府のレファレンスに利用されることは確実となったものの、今後の世界的なスタンダードとして他の地域でも使われるかどうかはまだ不透明である。日本の政府関係者や他の研究機関が活用することも含め、気候変動枠組条約締約国会議(COP)関連の会議におけるPRが必須であり、REDD+のデファクトスタンダードとするための道筋を探る必要がある。書籍や論文の発表とあわせ、シンポジウム開催時などにブラジル政府機関やNGOなどと協働することはもちろん、日本のさまざまな機関にも働きかけ、その方策を検討していくべきである。

#### ・ 交渉の経緯を残すべき



航空機 L i D A R を使った観測が出来なかったことは軍との関係と説明されているが、今後も同様なケースは起こりうるので、今回の折衝にどこに問題があったのかに関して、記録に残しておくことが今後のために必要と思われる。

以上。

研究課題名	アマゾンの森林における炭素動態の広域評価
研究代表者名 (所属機関)	石塚 森吉 (森林総合研究所 客員研究員)
研究期間	H21採択(平成22年5月19日～平成26年5月18日)
相手国名/主要相手国 研究機関	ブラジル連邦共和国/ブラジル国立アマゾン研究所、 ブラジル国立宇宙研究所

## 上位目標

ブラジルおよびその周辺国における森林の適切な保全(評価・保全地域の設定・違法伐採の監視)に貢献する。

ブラジル政府その他アマゾン保全管理関係機関の施策に採用されるとともに、国際的なルール作りに活用される。

## 付随的成果

日本政府、 社会、産業 への貢献	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球規模の気候変動枠組への活用</li> <li>REDD+事業等における日本/ブラジル企業による成果の活用</li> </ul>
科学技術の 発展	<ul style="list-style-type: none"> <li>アマゾンの森林保全(生態系・生物多様性の保全)</li> <li>今後の後継機(H-LOVE等)へのフィードバック</li> </ul>
知財の獲得、 国際標準化 の推進、生 物質源への アクセス等	<ul style="list-style-type: none"> <li>アマゾンの森林インベントリ・データベース</li> <li>林冠高を用いた高精度汎用バイオマス推定式</li> <li>リモセンを活用したアップスケールリング技術</li> <li>低コスト・汎用型大容量データ処理技術</li> <li>UAVライダの開発</li> </ul>
世界で活躍 できる日本 人材の育 成	<ul style="list-style-type: none"> <li>国際的に活躍可能な日本側の若手研究者の育成 (国際会議への指導力、レビュウ付き雑誌への論文掲載など)</li> </ul>
技術及び人 的ネット ワークの構 築	該当なし
成果物(提 言書、論文、 プログラム、 マニュアル、 データなど)	<ul style="list-style-type: none"> <li>森林インベントリ・データベース</li> <li>アマゾンの汎用バイオマス推定式(アロメトリ)</li> <li>アマゾンのバイオマス(炭素蓄積量)推定マップ</li> <li>UAVライダによる林分構造解析プログラム</li> </ul>

## プロジェクト目標

劣化した森林を含むアマゾン広域炭素動態評価技術を開発する。

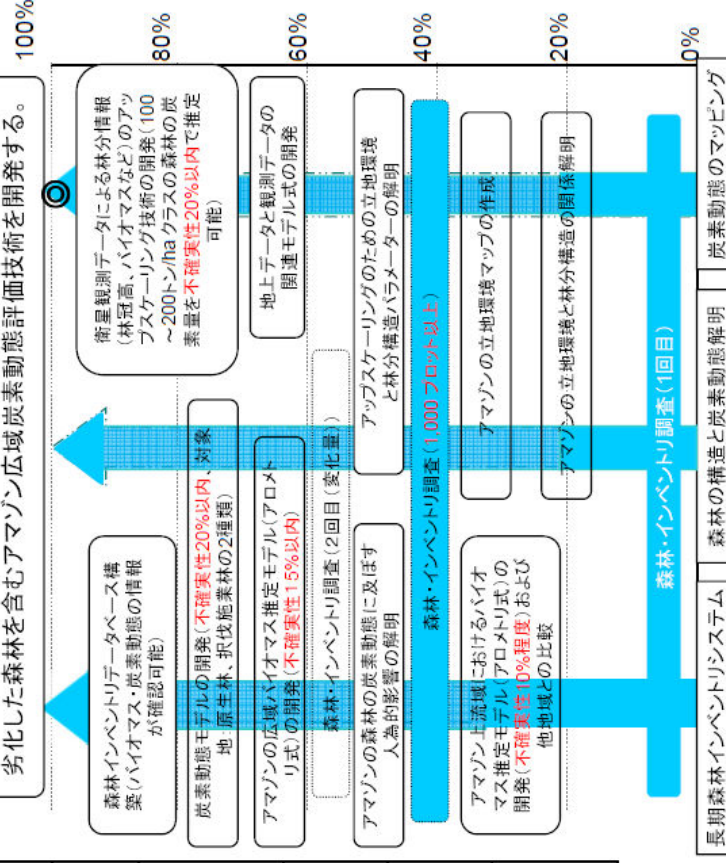


図1 成果目標シートと達成状況(2014年4月現在)