

ブラジル・アマゾン熱帯林の炭素動態研究 —国際研究プロジェクト (CADAF) の現場から—

梶本卓也・石塚森吉

アマゾンの森林炭素動態を評価する

アマゾンの熱帯林は、その広大な面積と高い純生産力から地球規模の炭素循環に大きな影響を与える森林生態系と考えられている。また昆虫や動物、薬用植物なども豊富で、生物多様性や遺伝子資源の保全の点でもきわめて重要な地域である。しかし、その森林面積は1960年代以降の農牧地開発や商業伐採等で急速に減少し、最近ようやく減少に歯止めがかかりつつあるものの、いまだに毎年5千~1万km²の森林が失われている^{1,2)} (最新の情報は <http://blogs.nature.com/news> 等を参照)。このままアマゾンの森林が減少し続けると、地球規模のCO₂収支におけるバッファとしての機能の低下を招き、新たな気候変動の引き金になる可能性もある。こうした懸念に対処するために、森林減少や劣化に伴うCO₂排出を削減するための仕組み (REDD+など) が議論されているが、これらの整備をはかる上で、森林の減少・劣化に伴う変化を炭素量として正確に評価する手法の確立が求められている。

こうした背景のもと、ブラジル領アマゾンを対象に森林の炭素蓄積量とその変化の広域評価を目的とした研究プロジェクトがスタートした (略称 CADAF ;

¹Carbon Dynamics of Amazonian Forests in Brazil. 科学技術振興機構 (JST) と国際協力機構 (JICA) が実施する地球規模課題対応国際科学技術協力事業プロジェクト。詳細は、<http://cse.ffpri.affrc.go.jp/swrmp/index.html> を参照。

2010~2014)¹。森林総合研究所を中核機関に、東京大学生産技術研究所、ブラジルの国立アマゾン研究所 (INPA) と国立宇宙研究所 (INPE) が共同研究機関として参画するプロジェクトで、森林の構造やバイオマス (現存量) などを実際に野外で調査する地上班と、それらの結果と衛星データから広域の森林炭素分布マップなどを作成するリモセン班とで構成されている²⁾。ここでは、地上班の研究活動を中心に、あまり知られていないアマゾン奥地での野外調査の様子なども交えながらプロジェクトの概要を紹介する。

空白域を埋めるインベントリー調査

アマゾン川の流域面積 (約 650 万 km²) は、その約 60% がブラジル領に属し、アマゾナスやパラ、アクレなど9つの州で占められている (図1)。流域の植生は、南部のサバンナ (セラード) や一部湿地帯を除くと、その大半が熱帯林である。アマゾン川の流は緩やかで、中流のマナウス付近でも標高が100mに満たない低標高地帯が延々と続くが、そこには雨期 (12~4月) に川が増水しても冠水しない台地が広がっている。この台地を覆うのが、アマゾン特有の熱帯湿潤林 (テラフィルメ林) である (写真1)。

アマゾン全域を対象とした森林の炭素分布図や全炭素蓄積量の推定値は、すでに多数報告されている^{3,4,5)}。しかし、これらの先行研究は、数少ない毎

Takuya Kajimoto, Moriyoshi Ishizuka : Report of the Study by International Joint Research Project on Carbon Dynamics of Amazonian Forests in Brazil (CADAF)

(独) 森林総合研究所

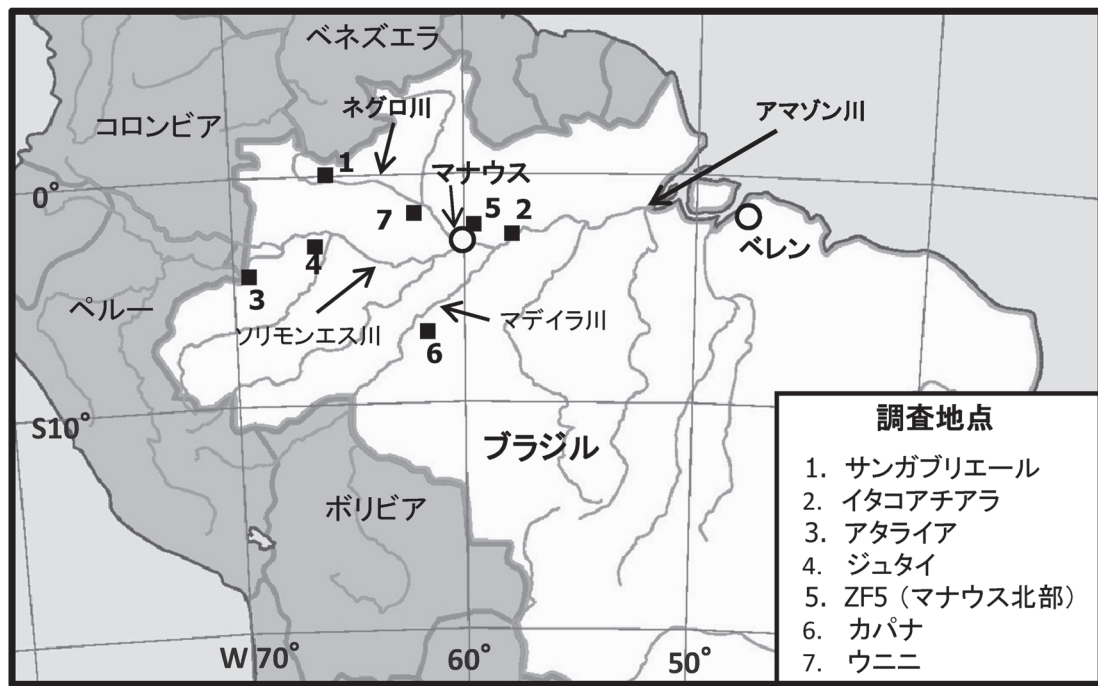


図 1 アマゾン川流域とインベントリー調査地点。



写真 1 アマゾンの典型的な熱帯林（テラフィルメ林）。マナウス近郊，INPA の実験林（ZF-2）。

木や伐倒調査データから広域評価を試みたり，またそれらの実測データも特定の地域に偏るといった欠点を抱えていた。とくにブラジル・アマゾンの中核をなすアマゾナス州（157.8 万 km^2 ）の場合，従来のデータのほとんどがマナウス近郊の森林（INPA の試験地 ZF-2 など）で得られたものである。そこ

で，この研究プロジェクトではアマゾナス州内を広くカバーするように7つの地域を選び，インベントリー調査を行うことにした（図1，表1）。調査の方法は，INPA のニーロ・ヒグチ博士らのグループが用いていたいわゆる森林資源モニタリング調査の手法に基づくもので，まず1ヶ所に長方形のプロット（各 $20 \times 125 \text{m}^2$ ）を20プロット十字状に配置する。それを1セットとして4～5ヶ所をひとつの調査地域に設定し，合計100プロット以上を測定するシステムである。プロットの幅がやや狭いきらいはあるが，見通しの悪い林内でプロットの中央線に沿って左右の樹木（10cm 以上対象）の同定や直径の測定をしながら奥へと進んで行くにはちょうど効率が良い幅で，また十字上にこのプロットを複数配置することで，平坦部や斜面，谷部など微地形の違いも反映できるようになっている。

インベントリー調査は，ひとつの場所に総勢20人ほどで1～2ヶ月がかかる。その間，大きなボートを寝泊まりの基地にして，そこから毎日小さな

表 1 インベントリー調査地の概要

	調査地名	プロット数	測定年	本数密度 + (ha^{-1})	断面積合計 + ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	優占木樹高 # (m)
1	サンガブリエール (São Gabriel da Cachoeira)	100	2010	548	25.4	27.2
2	イタコアチアラ (Itacoatiara)	119	2010	462	25	—
3	アタライア (Atalaia do Norte and Benjamin Constant)	105	2011	521	26.6	29.6
4	ジュタイ (Jutai)	104	2011	542	26.4	28.9
5	ZF-5* (Preto da Eva, EMBRAPA)	18	2011	588	27.9	—
6	カパナ (Largo do Capanã Grande)	118	2012	458	26.9	29.4
7	ウニニ (Rio Unini)	136	2012	521	25.4	23.2

*ZF-5 のみプロット面積は 1 ha ($100 \times 100 \text{m}^2$)。他はすべて 0.25 ha ($20 \times 125 \text{m}^2$)。

+ 対象個体は直径 10 cm 以上。値は、各調査地のプロットの平均値を示す（一部データは未発表）。

林冠層に達した個体の平均樹高。

ボートで調査地を往復する（写真 2）。筆者ら日本人研究者も、INPA の研究者ら（大学院生が多い）とともにこうした野外調査の一部に参加し、これまでに合計約 700 プロットの測定を終えている（表 1）。例えば、ネグロ川上流のサンガブリエール周辺の調査では（2010 年夏）、約 100 プロットの測定に 1 ヶ月半ほどかかっている。なおこのサンガブリエールは、マナウスからネグロ川を遡航すると花崗岩の岩場があらわれ早瀬（滝）ができる場所で、かつて 19 世紀半ばにここを訪れた A. ウォーレスや R. スプルスといった博物学者らも船旅の難所として記述している。このあたりまで来ると、ひたすら平坦だったアマゾン中流域とは様子も異なり、周囲には数百 m の岩峰や山々が見られるようになる。

地下部も含めたバイオマス調査

上述のサンガブリエールでは、毎木調査以外に伐倒調査も行われた。2 カ所の方形枠（各 20×20

m^2 ）で樹木すべて（直径 5 cm 以上）を皆伐、伐根する方法で、現場は遠隔地なため、作業は重機を用いずにすべて人力で行われた（写真 3）。なかなか大変な作業ではあったが、最大直径約 60 cm の個体を含む約 100 本分のデータから、地上部と地下部（粗根）のバイオマス推定用のアロメトリー式が作成された。その結果、このアマゾナス州北西部のテラフィルメ林の地下部も含めた総現存量は平均で約 250Mg ha^{-1} と推定されている⁶⁾。この値は、マナウス近郊の森林で平均 300Mg ha^{-1} 以上に達するのとは比べると明らかに少なく、同じアマゾナス州でもバイオマスに地域差があることを示している。こうした平均的なバイオマスの地域差は、同州の 7 つの調査地について断面積合計や優占木の樹高など林分構造の特徴を比べても違いがあることからもうかがえる（表 1）。一方、地上部と地下部バイオマスの関係（T/R 比）については明瞭な地域差がみられず（図 2）、地下部を含めた炭素量を広域推定する



写真 2 インベントリー調査の基地にしたボート（左）。各調査地点へは、さらに小型のボート（右）に便乗して向かう。それぞれアタライア、ウニニの調査地付近。



写真 3 サンガブリエールの伐根調査の様子。

ために、例えばこの平均の T/R を使うといった手がかりも得られている。

森林回復に伴う炭素蓄積速度

このプロジェクトでは、森林伐採後の回復に伴う炭素蓄積速度の評価も目的のひとつに掲げている。研究は、マナウス東方のイタコアチアラで Precious Wood 社（現地では単にミル・マディレイラ＝製材工場と呼ばれている）が択伐施業により天然林の持続的経営を行っている社有林（約 12 万 km²）で進められている。ここでは、択伐が一回りする回帰年

数を 20 年とし、伐採年次別に区画を分けて、1995 年以降、試算した伐採後の総成長量分に見合う本数だけを毎年伐採している。択伐対象は、商業材約 25 樹種の胸高直径 50 cm 以上の個体である。なおこの民間会社は、製材工場を併設して木材（FSC 認証）はおもにヨーロッパ方面へ輸出し、その一方で廃材やチップを使ったバイオマス発電を行ってその電力を町へ供給するなどユニークな多角的経営を行っている。

イタコアチアラでは、他のインベントリー調査地と同様、伐採年次別の各区画にプロットを設定して

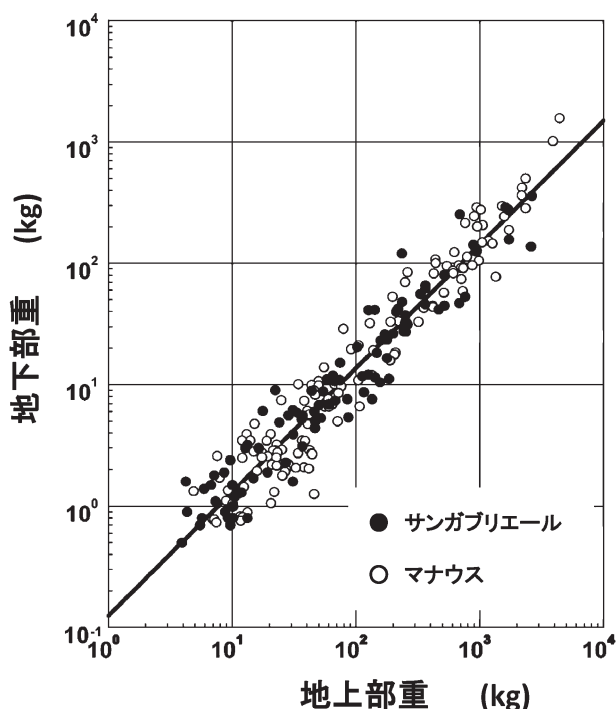


図 2 サンガブリエールの試料木における地上部重と地下部（粗根）重のアロメトリー関係。図中、白丸データは、比較のために示したマナウス近郊の調査地で得られた既報値。（文献6の原図を一部改変）。

択伐後の成長量評価を行う計画で、一部のプロットはすでに INPA のグループが事前（2005～2006 年）に設定、測定済みなので、その 5～6 年後にあたる本プロジェクト期間中に再測を実施した。現在、大谷達也氏（森林総研）を中心にそれらのデータ解析が進められており、今後は、森林修復に伴う年平均の炭素蓄積速度を推定し、択伐時のインパクトや伐採後の経過年数との関係などが検討される予定である。

さらに生態系の炭素動態を

以上述べてきた野外調査以外にも、この研究プロジェクトでは生態系を構成する樹木由来の炭素量評価を目指して、林床の粗大有機物（CWD）の量や細根量の研究も行っている。粗大有機物量については、佐藤保氏（森林総研）を中心にマナウス近郊



写真 4 ネグロ川沿いの浸水林（イガッポ）。バルセロス付近。

INPA の試験地（ZF-2）で倒木、立枯れ木などを測定し、地上部バイオマスとの対応関係が示唆されている。また細根量については、野口英之氏（森林総研、ポスドク研究員）らが上述のサンガブリエールなどインベントリー調査地も複数含めてサンプリングを行って推定し、地上部バイオマスで見られるような地域差が細根量でも存在する可能性を指摘している（投稿中）。

おわりに

現在、リモセン班を中心に広域で森林炭素量を推定する作業が進められている。地上部の調査から、アマゾン中核部（アマゾナス州）における森林の実測データ不足の問題はかなり解消されつつある。しかし、多点調査をしたとは言えアマゾンは大変である。例えば、流域の川岸には雨期に冠水する浸水林が発達するが（写真4）、こうしたセラフィルメ林以外の森林タイプをどう扱うかという課題が残されている。また同じ森林タイプであっても、平均的なバイオマスにみられたような地域差とともに、局所的な地形の影響による差も考える必要がある。冒頭、アマゾンを代表する熱帯林（セラフィルメ林）は台地上に成立していると述べた。しかし、この台地には、実際には斜面や谷部など比高数 10m 程度で微地形が複雑に入り組んでいる。こうした局所的

な地形に応じてか、種組成や本数密度も異なり、例えば諏訪練平氏（森林総研，ポスドク研究員）らの解析から、台地上の平坦地に比べると、谷部では最大樹高も低く、バイオマスも少ないことがわかっている⁷⁾。局所性と地域性という2つの空間スケールで森林の構造的特徴の違いを明らかにすることは、アマゾン全域での正確な森林炭素量の推定には欠かせないであろう。また、こうした異なるスケールで森林の構造を変化させる要因についてはまだよくわかっていない。アマゾンは、熱帯林のなかでも数多くの研究が行われてきた場所だが、こうした疑問を含めて生態学的研究の余地がまだ多く残されているように思う。

〔参考文献〕 1) 西澤利栄ほか (2005) アマゾン—保全と開発—。朝倉書店。 2) 石塚森吉 (2012) 公開セミナー報告「地球の肺 —アマゾンの森をはかる—」

海外の森林と林業, 83 : 48-51. 3) Houghton R.A. *et al.* (2000) Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature* 403 : 301-304. 4) Saatchi S.S. *et al.* (2007) Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology* 13 : 816-837. 5) Nogueira, E.M. *et al.* (2008) Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon : New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management* 256 : 1853-1867. 6) Lima, A.J.N., Suwa, R. *et al.* (2012) Allometric models for estimating above- and below-ground biomass of Amazonian forests at Sao Gabriel da Cachoeira in the upper Rio Negro, Brazil. *Forest Ecology and Management* 277 : 163-172. 7) Suwa, R. *et al.* Significance of topographic gradient in stem diameter – height allometry for precise biomass estimation of a tropical moist forest in the central Amazon. *JARQ* (印刷中)

海外林業研究会のご案内

本研究会は海外森林・林業・林産業に関心のある技術者、研究者、教官等からなる団体で、年1～2回の研究会、講演会、セミナー等の開催のほか、「海外の森林と林業」誌（年3回、1、6、9月）及び国際緑化推進センターの広報誌「緑の地球」（年3回、1、6、9月）を会員に配布しております。

本会の年会費は3,500円です。入会申し込み等の問い合わせは、下記事務局へお願いします。

（公財）国際緑化推進センター内 海外林業研究会事務局

〒112-0004 東京都文京区後楽1-7-12 林友ビル3F

電話：03-5689-3456 Fax：03-5689-3360 e-mail：office@jifpro.or.jp

本誌購読希望の皆様へ

「海外の森林と林業」誌は、地球の緑化に関心のある方々に、海外の森林と林業に関する最新の情報をお知らせするわが国唯一の雑誌です。本誌（年3回発行）は、実費（年2,500円）にて、海外林業研究会会員以外のご希望の皆様にも配布しております。希望される方は下記へご連絡ください。

（公財）国際緑化推進センター 〒112-0004 東京都文京区後楽1-7-12 林友ビル3F

電話：03-5689-3450, Fax：03-5689-3360

e-mail：jifpro@jifpro.or.jp 題名に 海外の森林と林業 と明記ください。