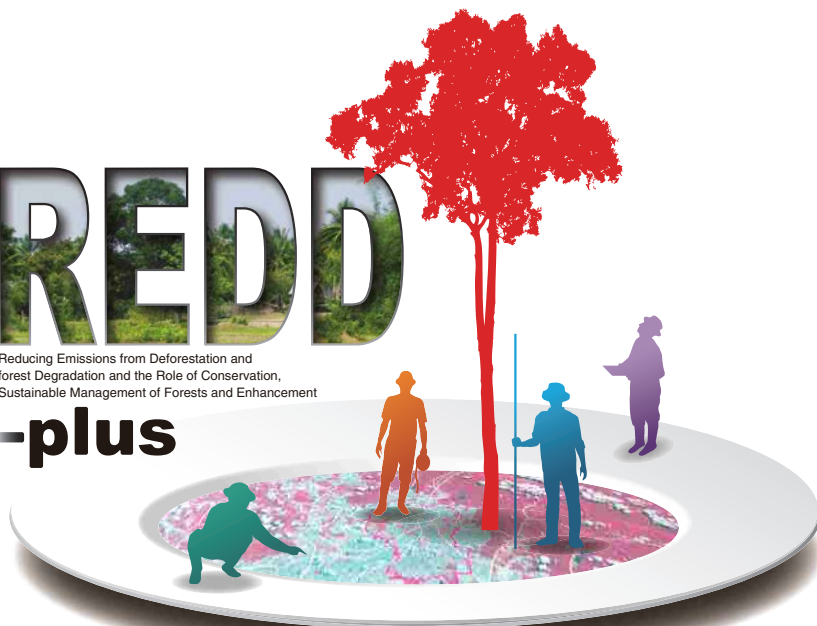


REDD

Reducing Emissions from Deforestation and
forest Degradation and the Role of Conservation,
Sustainable Management of Forests and Enhancement

-plus



COOKBOOK ANNEX

調査マニュアル Vol. 1

地上インベントリ調査法

佐藤 保・宮本 和樹

はじめに

REDD プラスは、途上国が行う森林減少・森林劣化を抑制する取組みによる CO₂ の排出削減、森林保全等（「プラス」活動）による CO₂ の排出防止および炭素固定による大気中の CO₂ の削減に対して、何らかの経済的インセンティブ（資金やクレジット）を与えるというのが基本的な考え方です。このため、排出削減量の評価には科学的なアプローチによって森林炭素の変化量をモニタリングすることが求められます。

森林総合研究所 REDD 研究開発センターでは、REDD プラスに取り組むための基礎知識や技術について、特に森林炭素モニタリングに注目して平易に説明した技術解説書「REDD-plus Cookbook」を 2012 年に発行しました。REDD-plus Cookbook は、REDD プラスの導入に取り組む政策立案者、REDD 活動の計画に取り組む実施者や技術者を読者と想定して、必要となる知識や技術に関する項目を、Recipe（レシピ）という解説の単位でとりまとめています。

一方で REDD-plus Cookbook は、基礎知識や技術について要点を絞って解説していることから、REDD 活動に携わる技術者が現場で活用するために必要な情報が十分に得られない可能性があると思定されます。そこで、REDD-plus Cookbook の各 Recipe で解説されている手法について、より詳しく学習でき、現場で実際に活用できる調査マニュアル「REDD-plus Cookbook Annex」を作成しました。本調査マニュアルでは、トピックスを絞って、計測手法をより具体的に解説しており、能力向上のための教材としても利用できるように作成されています。REDD-plus Cookbook と組み合わせて読んでいただくことで、トピックスに関する技術的な理解が深まるように構成されています。

本調査マニュアルを通じて、REDD 研究開発センターが、世界各地での REDD プラスの推進に貢献できればと願っております。

2016 年 1 月

国立研究開発法人 森林総合研究所
REDD 研究開発センター

目次

1	概要	1
1.1	本調査マニュアルの目的	1
1.2	本調査マニュアルの使い方	1
1.3	REDD-plus Cookbook との関係（関連する事項）	1
2	調査プロットの設定方法	2
2.1	何のために調査プロットを設定するのか	2
2.2	調査のデザイン	2
2.3	プロットのデザイン	4
2.4	必要な調査道具	5
2.5	調査チームの構成	6
2.6	現場でのプロット設定	6
3	プロットでの測定	9
3.1	必要な調査道具	9
3.2	調査チームの構成	9
3.3	DBH 測定	10
3.4	樹高測定	12
3.5	樹種同定	13
3.6	落葉層の測定	13
3.7	枯死木の測定	14
4	炭素蓄積量算定のためのデータ解析	17
4.1	地上部現存量	17
4.2	地下部現存量	18
4.3	落葉層量	18
4.4	倒木枯死量	19
4.5	炭素蓄積量への変換	21
	参考文献	22

1 概要

1.1 本調査マニュアルの目的

森林総合研究所が2012年に発行した「REDD-plus Cookbook」は、REDD プラスに取り組むための基礎知識や技術について、特に森林炭素モニタリングに注目して平易に説明した技術解説書である。本調査マニュアルは、REDD-plus Cookbook で示された森林炭素蓄積量の推定手法の中で、単位面積当たりの炭素蓄積量推定式作成に必要な地上調査に焦点を絞り、その調査手法を解説したマニュアルである。

本マニュアルは、主に現場で森林炭素蓄積量のデータを実際に取得する技術者を想定して作成している。また、林学や森林生態学を学ぶ学生、REDD プラスに関心のある NGO 等の組織にも有益な情報となれば幸いである。

1.2 調査マニュアルの使い方

地上インベントリ調査は、複数のプロットを設定して実施することから、プロット間の測定精度に差が生じないことが重要である。特に複数のチームが同時に調査を行う場合には、事前に調査方法の確認を入念に行う必要がある。したがって、地上インベントリ調査を計画する際は、本マニュアルを一読して、調査の工程を把握しておくことが望ましい。

本マニュアルの構成は、最初に地上調査に必要なプロットの設定方法の解説を示し(2章)、その後に具体的な調査手順の解説となる(3章)。最後に現場で得られたインベントリデータから単位面積当たりの炭素蓄積量の計算方法を具体的に示す(4章)。

これまでの地上調査の経験から、現場で気をつけるべき点などは **TIPS** として見出しを付けているので参考にされたい。

1.3 REDD-plus Cookbook との関係 (関連する事項)

本マニュアル内で関連する REDD-plus Cookbook 内のレシピは【 】で示し、Cookbook にてその解説を参照することができる。

REDD-plus Cookbook は以下の URL でダウンロードできる

http://redd.ffpri.affrc.go.jp/pub_db/publications/cookbook/index_ja.html

2 調査プロットの設定方法

2.1 何のために調査プロットを設定するのか

2006 IPCC GPG では、森林のバイオマスの炭素蓄積変化量の算定方法として、デフォルト法（成長量－損失量法（Gain-Loss Method））と蓄積変化法（Stock Change Method）という2つの方法を提示している。デフォルト法は成長による吸収から伐採や自然攪乱による排出を差し引いて炭素蓄積変化量を算出する方法である。一方で、蓄積変化法は、異なる時点の炭素蓄積量の差分から変化量（＝吸排出量（emission and removal））を求める手法である【Recipe-P04, P07】。

デフォルト法は、伐採量や攪乱による損失量を把握する必要があるが、多くの国でそれらを把握するための正確な統計情報が得られないのが実情である。したがって、多くの国では、二時点の炭素蓄積量の変化を吸排出量とする蓄積変化法がより広範に適用可能な手法であると考えられる【Recipe-P07】。国家レベルの炭素蓄積量変化の把握には、リモートセンシングを用いた面積推定（活動係数）と地上調査による単位面積当たりの炭素蓄積量（排出係数）の組合せが有効である。

単位面積当たりの炭素蓄積量の推定には、調査対象の森林の炭素量を直接測定する方法（固定調査プロット法）と、推定モデルを用いて間接的に推定する方法がある【Recipe-P09】。上記方法はそれぞれに長所、短所があり、適用できる条件がそれぞれ異なるが、固定調査プロットを用いた地上調査は農地転換や択伐などの様々な土地利用に幅広く適用できる【Recipe-P09】。これまでに国家レベルで固定調査プロットを多数設定するいわゆるPSP（Permanent Sampling Plot）法によって森林の炭素蓄積量を広域にモニタリングする取組が行われている【Recipe-P10】。そこで、本マニュアルでは技術的に実行可能性が高い固定調査プロットを用いた地上調査法について、その設定方法と測定方法について解説する。

なお、本マニュアルでは、森林の炭素プールのうち、土壌を除いた4つの炭素プール（地上部現存量、地下部現存量、落葉層量、枯死木量）を対象としている。

2.2 調査のデザイン

2.2.1 予備情報

単位面積当たりの森林炭素蓄積量を算出するためには、本マニュアルで扱う固定調査プロットを多数設定する必要があるが、対象国で国家森林資源調査（NFI: National Forest Inventory）【Recipe-T01】が行われていれば、その結果を用いることによって、求められる精度確保に必要なプロット数を求めることができる【Recipe-T12】。また、これまでに対象国で行われてきた森林炭素蓄積量に関する研究事例を収集するとともに、バイオマス推定に必要なアロメトリ式が独自に開発されているかなどを確認する必要がある【Recipe-T03】。

もし、これらの情報が十分でない場合、隣接する国や地域の文献値を参考にすることになる。

2.2.2 プロットの配置

固定調査プロットの配置については道路や集落の近くなどアクセスのよい場所に集中することのないよう、単純無作為抽出法や系統的抽出（systematic sampling）法によって偏りなく配置させる必要がある【Recipe-P10, T12】。また、リモートセンシング等によって何層かのグループに分類されることが事前にわかっている場合、それぞれのグループで標本抽出を行う層化抽出法（stratified sampling）が極めて有効である【Recipe-T12】。

効率的な層化のためには、森林タイプと森林の状態（劣化の度合いや遷移系列）をそれぞれの軸として層化マトリックス（図1）を作成すると良い【Recipe-T12】。

Forest type	Forest conditions			
Lowland forest	Mature	Selective logged	Secondary (medium age)	Secondary (young age)
Dry forest	Mature	Selective logged	Secondary (medium age)	Secondary (young age)
Plantation	Mature	Medium age	Medium age	Young age



図1 層化マトリックスの例

横軸は森林の状態、縦軸は森林タイプで構成されている

2.2.3 必要な個数

層化抽出法によって、 L 個に層化されるとすると固定プロットの必要数 n は以下の式で表される。

$$n = \frac{[\sum_{i=1}^L N_i * S_i]^2}{(N * \frac{E}{t})^2 + \sum_{i=1}^L N_i * (S_i)^2}$$

ここで i は階層、 L は階層数、 N は対象域での最大プロット数（対象域全体の面積を調査プロットの面積で割った値）、 N_i は各層の最大プロット数（各層の面積を調査プロットの面積で割った値）、 S_i は各層の標準偏差、 E は推定量の許容誤差（たとえばバイオマス平均値の 10%）、 t は t 分布の危険率 5% の値である。

上記式は、プロット設定のコストを考慮していない。プロット設定のコストを含めた式は異なるが、必要な数値情報に大きな違いはない **[Recipe-T12]**。

全体に必要なプロット数を上記式にて求めた後に、下記式で各層に必要なプロット数 n_i を求めることができる。

$$n_i = n \times \frac{N_i \times S_i}{\sum_{i=1}^L N_i \times S_i}$$

2.3 プロットのデザイン

2.3.1 プロットの面積

調査プロットの面積は、一般に0.1～1.0ヘクタール間であることが多い。面積が多くなれば炭素蓄積量の推定精度は高くなるが、測定のための時間と費用がかかる。一方で、面積が小さい場合、時間と費用は少なく済むが、炭素蓄積量の推定精度が低くなる問題が生じる **[Recipe-T13]**。過去に対象国で実施されたNFIや炭素蓄積量に関連する先行研究などは、プロット面積を決定する際に有用な情報となる。

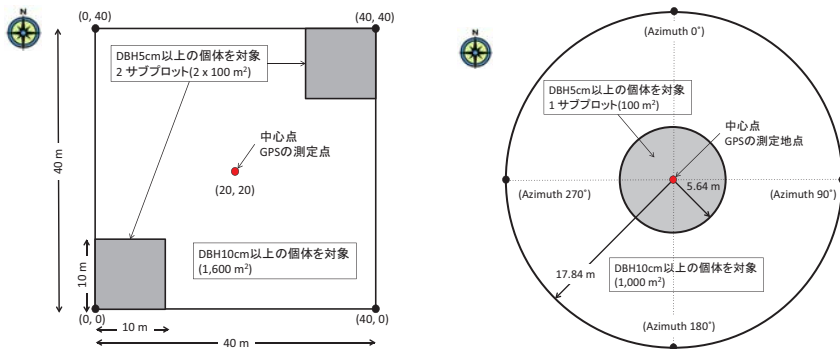


図2 調査プロットの形状

左は方形区 (0.16 ha)、右は円形 (0.1 ha) の例

2.3.2 プロットの形状

調査プロットの形状は、方形と円形の2つに分けられる(図2)。それぞれの形状に利点と欠点がある。例えば円形プロットの場合、杭の設定は中心点の一つだけで済むが、プロットの境界付近の樹木個体が測定対象なのかを判定するのは難しい場合がある。一方で方形プロットの場合、個体の根元の中心と直線である境界を比べることで容易に測定対象か否かを判定できるが、杭は少なくとも四隅に設定するので手間がかかる。

調査プロット内の林分構造を正確に把握するためには、枠内の全生立木を測定すれば良いが、時間と手間を考えれば非現実的なことも多い。いずれの形状を採用するにせよ、入れ子状のデザイン（図2の灰色の部分）を用いることによって、測定の効率が良くなる【Recipe-T13】。

2.4 必要な調査道具

プロット設定のために必要な調査道具は表1の通りである。林内で距離を計測することから、レーザー距離計や超音波距離計などの距離を測る機器があると効率的に作業を進められる。

表1 プロット設定に必要な道具

品名	数量	備考
レーザー距離計	1台	水平距離測定のため
巻き尺(30m～50m)	1～3本	レーザー距離計がない場合、まず最初に巻き尺で斜距離を計測する
傾斜計	1個	プロットの傾斜記録のため
方位コンパス	1～2個	プロットの設定および方位測定のため
GPS	1個	プロットの位置記録のため
目印となる杭	複数本	杭の材質はプロットを設定する場所によって異なる
デジタルカメラ	1台	プロットの林相を記録するため

TIPS

超音波距離計は、溪流の近くやセミの鳴き声などがあるときは使用できない場合があるので注意が必要である。

2.5 調査チームの構成

測定するポイントを決めた後に、プロットの区画を明確にしなければならない。そのためには、表2に示すチーム構成で測量が必要となるが、複数のチームが組めると効率的に作業を進められる。

表2 プロット設定に必要な人員

役 割	望ましい人員数	備 考
レーザー距離計を扱う人	1～2名	プロット設定のための指示（方向、距離測定）を行う
記録者	1名	設定したプロットの位置情報、傾斜、方位などを記録する
調査補助	2～4名	プロットの枠設定のための杭の設置など

2.6 現場でのプロット設定

2.6.1 記録すべき情報

調査プロットは、繰り返し測定を行うことを目的とした永久固定プロット（PSP: permanent sampling plot）と一度限りの調査プロット（one-shot plot）に区分されるが、いずれにせよ、設定した地点の位置情報をGPSで記録しておく。プロット設定時に記録しておくべき情報（表3）は多いが、その幾つかは事前に情報を得おく必要がある。

また、調査プロットがどのような森林なのかを、過去の攪乱履歴や周辺の状況を交えて記録しておく必要がある。攪乱の種類は、伐採や農地転換などの人為攪乱と、火災や気象害などの自然攪乱に区分されるので、それらを記録する。また、攪乱の強度や経過年数も、森林炭素蓄積量に影響を及ぼすことから、可能な限り詳しく記録する。

表3 プロット設定時に記録する情報

情報	備考
位置（緯度、経度）	GPSで記録。その際、使用した座標系の情報も記録する。
標高	基準点（中心点など）の標高
傾斜角	
森林タイプ	常緑林、落葉林、植林などの区分
斜面方位	
過去の攪乱履歴	火災や択伐などの攪乱履歴の有無。攪乱があった場合、その経過年数を分かる範囲で記録する。
周辺の状況	周辺の土地利用の記録。

2.6.2 プロット設定の手順

次に具体的なプロットの設定手順を一边40 mの方形プロットを例にして説明する。

予め定めた基準（林道からの距離など）に沿って、プロット設定の候補地を選定する。次に候補地において、基準点を定めてプロットを設定する。ここではプロットを中心点を基準点（図3a）として、GPSで位置情報を記録する。

プロット内を入れ子状の構造にするため、10 m間隔の格子点を設ける必要がある。そこで中心点をから南北方向に10 mずつ合計20 mの測線を伸ばす（図3b）。20 m伸ばした後、90度方向を変えて20 mずつ東西方向に測線を伸ばす。20 m伸ばした点は境界点として杭を設定する（図3c）。10 m間隔の格子を作るために中心点に沿って魚骨上に測線を設けて（図3d）、最終的に境界点に向けて測線を伸ばして方形区を完成させる（図3e）。ここで格子の間隔に用いている距離は、水平距離であり、斜距離ではないことに注意が必要である。基準点とプロットの角にあたる境界点には、それぞれ杭を設置すると測定時の目印となる。永久固定プロットとして設定する場合、杭は耐久性のある素材を選ぶ必要がある（表4）。たとえば、火災が頻発するような場所では、耐火性のあるコンクリートの杭が望ましい【Recipe-T13】。

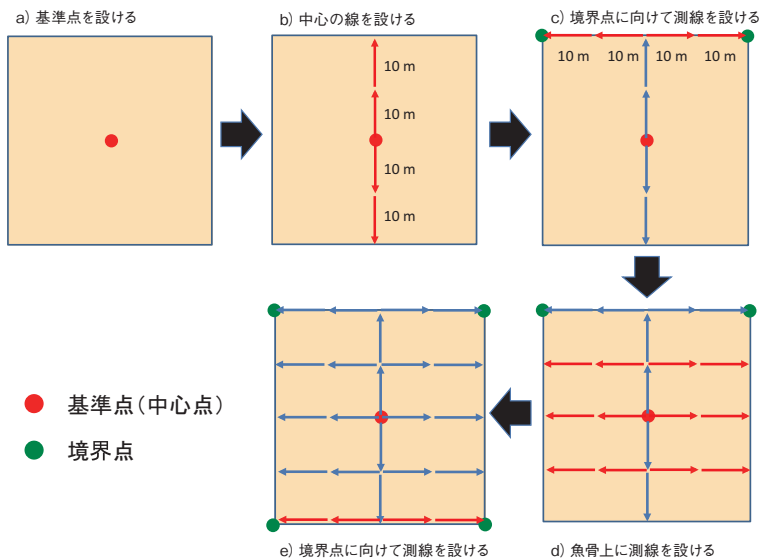


図3 調査プロット設定の手順例 (40 m × 40 m の方形の場合)

表4 プロット設定に用いる杭の素材

杭の素材	プロットの種類	特徴
PVC パイプ	永久／一時的	比較的安価で手に入りやすい。火に弱く、直射日光の当たる場所では劣化しやすい。
アルミなどの金属	永久	高価であるが、耐久性がある
コンクリート	永久	耐久性・耐火性はあるが、設置に労力がある
木材	永久／一時的	安価で入手しやすい。材によっては腐りやすいので耐久性は高くない。

TIPS

現在は、水平距離が簡単に計測できる機器が普及しつつあるが、そのような機器が使えない場合、設定したい水平距離に対応した斜距離がわかる換算表など作成しておくとう便利である。

3 プロットでの測定

3.1 必要な調査道具

森林炭素蓄積量を推定するためのインベントリ調査に必要な道具は表5の通りである。調査対象地によって、これ以外にも必要な道具はあるが、これらの道具があれば胸高直径(DBH)と樹高の測定は可能である。

表5 インベントリ調査に用いる道具

品名	数量	備考
巻き尺 (10 m 程度)	複数本	DBH を測定するため
レーザー距離計	1 台	樹高測定のため
ラベル	多数	計測する樹木個体の識別に用いる。材質はビニル製、プラスチック製、アルミ製など。
ガンタッカー	複数個	ラベルを樹木に固定するため
マーカー	複数個	直径の測定位置を記録するため。重複測定を避けるための印付けにも用いる
双眼鏡	複数台	樹種同定のため
高枝切りバサミ	1 丁	樹種同定のためのサンプル採取用
スリングショット	1 丁	高枝切りバサミで届かない場所でのサンプル採取用

3.2 調査チームの構成

インベントリ調査を実施するためには、DBH や樹高を計測する者とそのデータを記録する者の1チーム2名が必要である(表6、写真1)。通常、DBH の測定終了後に樹高測定に移行するが、同時に実施できるチームが編成できれば、調査時間の短縮になる

表6 インベントリ調査に必要な人員

役割	望ましい人員数	備考
毎木データを記録する人	1～2名	調査の流れを理解している人員が複数いると作業の効率が上がる
DBH を測定する人	1～2名	複数名いれば、DBH の測定とラベルの取り付けを分けて作業が可能となる
樹高を測定する人	1～2名	樹高測定器の台数による
植物が分類できる人	1～2名	データ記録員が兼ねることも可能



(1) 調査道具



(2) 1 チーム2名による調査

写真1 インベントリ調査の様子

3.3 DBH測定

DBHの具体的な測定の手順は以下の通りである。

- 対象木の位置記録
- 個体番号の確定（タグをつける）
- DBHの測定
- 測定位置のマーキング
- 種同定
- その他特記事項の記録

3.3.1 対象木の位置記録

2.6.2節で示した調査プロットは、16個の10 m四方のサブプロットに分割することができる。入れ子状の構造を採用しているので、サブプロットによって測定対象となるDBHのサイズが異なってくるので注意が必要である。

永久固定プロットとして設定した場合、二回目以降の再測定のために樹木の位置を記録し、測る順路を決めておく。それぞれのサブプロットにコード番号を付けることにより、樹木個体位置の記録が容易かつ明確になる。また、測定の順番も起点となる杭から反時計回りに移動するなど工夫すれば番号の並び方に規則性ができるので、再測定時に消失した個体を把握しやすい【Recipe-T13】。測定対象となる木がどのサブプロットにあるのかを記録するだけでも、重複測定を防止する効果がある。

測定対象とした個体はすべて独自の番号（unique number）を割り振る必要がある。市販のアルミタグなどを用いて測定した個体ごとに番号を付けることが望ましい（写真2）。樹木にタグを付けるのが難しい場合、ペンキなどで幹に直接番号を書きこむか、あるいは上述の樹木個体の位置記録を残すようにする。

3.3.2 DBHの測定基準

DBHは通常、地面から高さ1.3 mのところでは計測する。幹に巻き尺を巻いた際には、必ず数回しごいて緩みがないようにする。各個体の直径を測る前に必ず測定位置の状態を確認する。具体的には、瘤 (swelling) があつた場合はその場所を避けた位置で測定し、ツル (Climber) が巻き付いている場合、可能な限りツルを外した状態で測定する。このような状況になつた場合、野帳の備考欄 (remarks) に「ツル抜きで測定」(measured without climber) や「瘤のため、測定位置変更」(measuring position moved to avoid swelling) などの注釈を忘れずに書き留めるようにする。雲霧林では幹に蘚苔類が厚く付いている場合があるが、その場合もDBHの測定位置の蘚苔類は丁寧に取り除くようにする。板根 (buttress) の場合も測定位置の決定に注意を要する。板根の影響がなくなつたところから50 cm上のところを測定場所にするという決まりを徹底する (写真3)。



写真2 ラベルと測定位置のマーキング



写真3 梯子を使った板根での直径測定

測定する個体の幹は、必ずしも通直かつ単独とは限らない。傾斜した幹では、高さ1.3 mの位置ではなく、幹長が1.3 mの位置でDBHを測定する (図4 a)。二次林では複数幹の個体が多いが、その場合は高さ1.3 mの位置にある幹を測定対象とする (図4 b)。主幹が枯れ、もしくは折れているが枯死していない場合、通常の場合と同じく1.3 mの位置でDBHを測定する (図4 c)。また、DBHの測定は必ず斜面上側から行うようにし、次回の計測のために測定位置をペンキなどでマーキングすることが望ましい (写真2)。

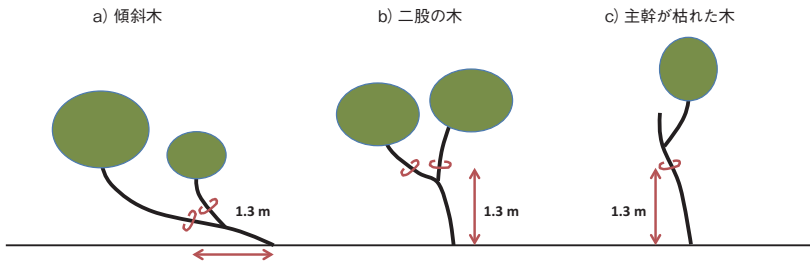


図4 傾斜や複数の幹がある場合のDBH測定例

3.3.3 使用する道具の統一

DBHの測定のための道具についても注意が必要である。たとえば輪尺 (caliper) を使用する場合は、一回の測定だけではなく、必ず直交する二方向で計測を行い、その平均値を使用する。巻き尺を使用した場合、GBH (胸高周囲長: girth of breast height) とDBHが混在する可能性がある。記録する場合、どちらの値なのか随時確認する必要がある。なお、調査実施にあたっては、使用する用具を統一し、巻き尺とノギス、あるいは直径巻き尺 (diameter tape) とふつうの巻き尺を混在して使わないようにする。

TIPS

DBH測定を2チーム以上で行う場合、必ず事前に調査方法の確認を行うこと。調査方法を確認することで、測定チーム間の測定値の違いを少なくすることができる。

3.4 樹高測定

熱帯林の場合、梢端が見えづらいことから樹高の測定は困難な場合が多い。したがって、全個体の樹高を測定するのではなく、サンプリングによる測定を行い、D-H曲線から未測定木の樹高を計算すると良い。たとえば、図5に示したように選択したサブプロット内でのみ樹高を測定するようにすれば省力化できる。

樹高と一口に言っても一部の技術者は採材できる高さ (commercial height) を想定している場合もあり、事前に定義の確認が必要である。

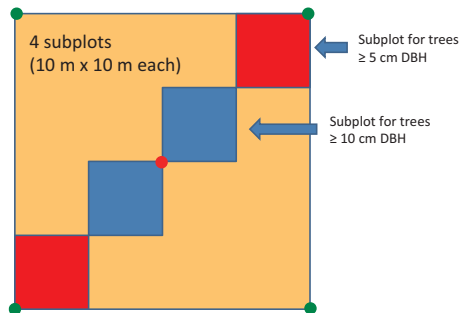


図5 サブプロットを用いた樹高測定の効率化の例
赤のサブプロットはDBH5 cm以上、青のサブプロットではDBH10 cm以上の個体が樹高の測定対象となる。それ以外のサブプロット (黄色) では樹高は測定しない。

3.5 樹種同定

DBHや樹高を測定した樹木は、樹種の同定を行う必要がある。炭素蓄積量の計算に用いるアロメトリ式には、材密度を用いるものがあり、そのために樹種を把握しておく必要がある。熱帯林では、構成する樹種が多いため、その同定は困難を伴う。種レベルの同定が困難な場合、可能な限り属レベルまでの同定を目指すようにする。

現場での調査で不明な樹種があった場合、葉のつき方（互生、対生、複葉など）、樹皮や樹液の色などの特徴を記録しておくが良い。可能な限り葉のサンプルを採取し、後日、樹種同定ができる者に同定してもらう。

3.6 落葉層の測定

落葉層とは、鈣質土壌の上に堆積した落葉および落枝で構成されている。この中には枯死木も含まれるが、直径10 cm以上のサイズの大きな枯死木は、次節に説明する別の方法で測定する。

落葉層の測定は、林床にある一定の大きさの枠を設定し、その枠内の落葉、落枝を回収して、実験室にて乾燥重量を計測する手順を取る。通常、50 cm四方の枠を設定すれば十分なサンプルが採取できる（写真4）。

直径10 cm未満の枯死木については、少し大きめの枠（たとえば2 m四方）を設定し、その枠内の枯死木をすべて回収し、実験室で乾燥重量を測定する。通常、このような手順で枯死木（多くは枯枝）を回収した場合、実験室へ持ち帰るには多すぎる量となるので、現場にて生重を計測した後に、乾燥重量測定用のサブサンプルを作成して乾燥重量測定用にする。

TIPS

枠内の回収したサンプルは、紙袋に入れるとそのまま乾燥器に入れることができるので便利である。



(1) 50 cm 四方の枠の設定



(2) 枠内の落葉量の採取後の状態

写真4 落葉層の測定法

3.7 枯死木の測定

本マニュアルで枯死木とは、プロット内にある直径 10 cm 以上のものを指し、その形態は「切り株」、「立枯れ（幹折れを含む）」、「倒木」の3つに分類することとする。以下、それぞれの形態別に測定方法を解説する。

3.7.1 分解度の定義

枯死木の重量（ネクロマス）は、いずれの形態でも材積を求めることから始める。材積から重量への変換には材密度を用いるが、個々の枯死木は分解の度合いが大きく異なることから、材密度も大きな幅がある。したがって、測定する枯死木は、以下に示す基準に照らして分解度を判定する必要がある。枯死木の分解度は、3～5段階に区分されることが多いが、ここでは Chao et al. (2008) が定義した3段階の区分を用いる。

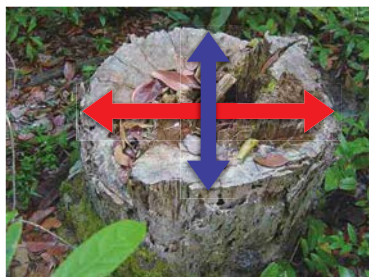
- クラス1：最近枯死したもの。75%以上の樹皮が残り硬い状態のまま、時に小枝が残っていることがある。
- クラス2：損傷が見られ、材はある程度分解している。あるいは心材は残っているが、樹皮が無くなっているもの。
- クラス3：枯死木全体の少なくとも75%が柔らかく腐っている。ナタの刃が容易に入り、踏んだら容易に崩れる状態のもの。

TIPS

釘を用いるとクラス2とクラス3の区分が容易になる。クラス3の材では、力を入れなくても釘が容易に入る。したがって、力をいれても釘が材の中に入りにくいようであればクラス2と判別できる。

3.7.2 切り株

劣化した森林では、しばしば林内に切り株が見られることから、その量の把握は重要である。まず、切り株の切り口面の直径を直行する2方向で測定する（写真5）。次に切り口面から地面までの高さを測定する。切り口面に段差がある場合、高い面と低い面の中間の辺りで高さを測定する。



(1) 直径の測定方向



(2) 測定の様子

写真5 切り株での直径測定法

3.7.2 立枯れ木

立枯れ木の場合、DBHと樹高を測定する。樹高の測定は、DBH—樹高曲線を使うことによって省略することも可能である。分解度の判定も必要であるが、立枯れ木の場合、枯れた直後で細い枝まで残っている場合はクラス1とし、細い枝が脱落して太い枝しか残っていない場合はクラス2とする。

幹折れの場合、折れた箇所までの高さとその中間に位置する箇所の直径を測定する。高さが4 m未満の幹折れ木であれば、中間位置での直径測定は可能であるが、それ以上に高い幹折れ木では直径測定は困難となる。そのような場合、胸高直径を代替値として使用する。

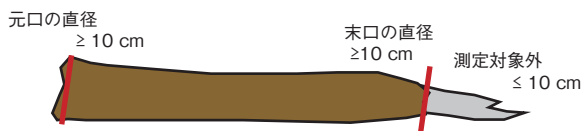


図6 倒木の測定基準

3.7.3 倒木

倒木量の測定方法は、プロットインベントリ法とライントランセクト法が代表的な手法である。本マニュアルでは、プロットインベントリ法を用いた測定法を説明する。

枠内にある直径10 cm以上の倒木（根返り木を含む）は、すべて測定の対象とする。一つの倒木の中でも10 cm未満の部分は測定の対象とはならない（図6の灰色の部分）。また、根元位置が枠内であっても、枠の外に出た部分は測定対象外とする（図7の赤線の部分）。逆に根元位置が枠外であっても、枠の内部にある部分は測定対象とする（図7の青線の部分）。

これらの判断基準をもとに枠内にある倒木は、その両端の直径と長さを測定する（写真6）。

個々の倒木の分解度も記録する。

TIPS

一部の倒木は土に埋もれていることもあるので、直径の測定には輪尺を用いると便利である。



(1) 直径の測定



(2) 長さの測定

写真6 倒木測定の様子

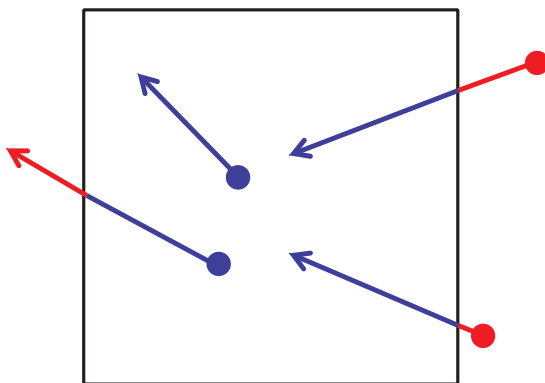


図7 プロット内の倒木測定基準

青は測定対象、赤は測定対象外。●印は倒木の根元位置を表す。

4 炭素蓄積量算定のためのデータ解析

ここでは、調査プロットから得られたデータを用いて炭素蓄積量の計算方法を説明する。

4.1 地上部現存量

植物体の炭素蓄積量を計算する際、最初にすることはアロメトリ式を用いて地上部現存量 (AGB) を求めることである。たとえば、Chave et al. (2014) が開発したアロメトリ式は熱帯で広く利用できる汎用式である。

$$AGB = 0.0673 * (\rho D^2 H)^{0.976}$$

ここで D (cm) は胸高直径、 H (m) は樹高、 ρ (g cm^{-3}) は材密度をそれぞれ表す。

材密度は、有用な樹種については種ごとのデータが揃っているが、多くの種でデータが整備されていないのが現状である。まずは、以下に示す全球レベルの材密度データベースを参考に種ごとのデータを検索すると良い。

Global Wood Density Database

(<http://datadryad.org/repo/handle/10255/dryad.235>)

種の材密度データがない場合、属レベルの平均値、科レベルの平均値と括りを大きくしていき、関連するデータが見つからない場合には大陸別のデフォルト値 (表7) を使用する。

表7 異なる熱帯地域における材密度デフォルト値

地域	材密度 (g cm^{-3})
Tropical Asia	0.57
Tropical America	0.60
Tropical Africa	0.58

出典: Reyes et al. (1992)

胸高直径 20.5 cm、樹高 16.1 m の個体を上記汎用式で計算すると、適切な材密度データが見つからなかったと仮定して材密度 0.6 g cm^{-3} を用いることから以下の結果が得られる。

$$\begin{aligned} AGB &= 0.0673 * (0.60 * (20.5)^2 * 16.1)^{0.976} \\ &= 0.0673 * (4059.6)^{0.976} = 223.8 \text{ kg} \end{aligned}$$

プロット内の全ての樹木個体について上記の方法で AGB を計算した後に、ヘクタール当たりの AGB へ換算を以下の式で行う。

$$AGB_h = (\text{Area}_h / \text{Area}_{\text{plot}}) * AGB_{\text{plot}}$$

ここで AGB_h はヘクタール当たりの AGB (Mg ha^{-1})、 Area_h は 1 ヘクタール、 $\text{Area}_{\text{plot}}$ はインベントリに用いたプロットの面積、 AGB_{plot} はプロットレベルの AGB となる。

たとえば 0.16 ha のプロットで 25 Mg の結果が得られた場合、 $156.25 \text{ Mg ha}^{-1}$ となる。

$$\begin{aligned} AGB_h &= (1 / 0.16) * 25 \\ &= 6.25 * 25 = 156.25 \text{ Mg ha}^{-1}. \end{aligned}$$

4.2 地下部現存量

地下部バイオマス (BGB) は、AGB 同様に推定式を用いて計算することができる。ここでは Mokany et al. (2006) による計算式を紹介する。

$$BGB_h = 0.489 * AGB_h^{0.890}$$

ここで BGB_h はヘクタール当たりの BGB、 AGB_h はヘクタール当たりの AGB である。すなわち、 AGB_h を求めた後は、上記式を用いて簡単に BGB_h を求めることができる。

その他にも AGB のアロメトリ式同様に胸高直径などから個体ベースで求める方法 (Niiyama et al. 2010) や、地下部を含めたアロメトリ式 (Sato et al. 2015) などがある。

4.3 落葉層量

落葉層のサンプリングはある一定の枠内にて回収されているため、サンプリング面積をヘクタール当たりに変換する係数を求めれば良い。たとえば、50 cm 四方の枠内から、乾燥重量 150g の落葉落枝量があった場合、ヘクタール当たりの値 (Lt_h) は以下のとおりである。

$$Lt_h = Lt_s * (10000 / A_s) = 150 * (10000/0.25) = 150 * 40000 = 6,000,000 \text{ g} = 6,000 \text{ kg}$$

ここで Lt_s はサンプルの乾燥重量 (g)、 A_s はサンプル採取枠の面積 (m^2) をそれぞれ示す。

4.4 倒木枯死量

倒木枯死量の測定は、まずプロット内の枯死木の材積を求めることから始める。最終的にこれら材積を重量（倒木枯死量）に変換しなければならないが、その際に材の分解度ごとに求めた材密度を用いる。3.7.1 節で示した3段階の分解度の場合、表8に示すような材密度が示されている。理想は各プロジェクトで固有の材密度データを得ることであるが、既往の文献値などから使用するのが現実的である。

表8 アマゾン熱帯林における分解度ごとの材密度の例

分解度	材密度 (g cm ⁻³)
1	0.55
2	0.41
3	0.23

出典: Chao et al. (2008)

以下、枯死木の形態別にネクロマスの計算方法を示す。

4.4.1 切り株

切り株の材積は、Huber 式を用いて計算する。

$$V = A * L * 100$$

ここで V は材積 (cm³)、 A は切り株の断面積 (cm²)、 L は切り株の高さ (m) をそれぞれ示す。仮に断面の形状が楕円形の場合、以下の式で断面積を求める。

$$A = (d_1/2) * (d_2/2) * \pi$$

ここで d_1 と d_2 は直交する位置の直径である。

たとえば、64 cm と 70 cm の直交する直径を示す断面の高さ 0.7 m の切り株の材積は以下の計算結果が得られる。

$$V = A * L * 100 = (64/2) * (70/2) * \pi * 0.7 * 100 = 246,301 \text{ cm}^3$$

仮にこの切り株の分解度が2とした場合、そのネクロマスは以下のとおりである。

$$\text{Mass} = V * \text{WD}_{\text{decomposition class}} = 246,301 * 0.41 = 100,983 \text{ g} = 100.98 \text{ kg}$$

4.4.2 立枯木および幹折れ

立枯木および幹折れ個体の材積は、切り株と同様に Huber 式を用いて計算する。

$$V = A * L * 100$$

ここで V は材積 (cm^3)、 A は中間位置の断面積 (cm^2)、 L は木の高さ (m) をそれぞれ示す。

例えば、高さ 6.5 m、中間位置の高さの直径が 25.6 cm の幹折れ個体の材積は、以下の結果となる。

$$V = A * L * 100 = (25.6/2)^2 * \pi * 6.5 * 100 = 334,567 \text{ cm}^3$$

仮にこの幹折れ個体の分解度が2とした場合、そのネクロマスは以下のとおりである。

$$\text{Mass} = V * \text{WD}_{\text{decomposition class}} = 334,567 * 0.41 = 137,172 \text{ g} = 137.17 \text{ kg}$$

4.4.3 倒木

倒木の材積は、Smalian 式を用いて計算する。

$$V = 100 * L * \left[\frac{\pi \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \pi \left(\frac{D_2}{2}\right)^2}{2} \right]$$

ここで L (m) は倒木の長さ、 D は両端の直径 (cm) をそれぞれ示す。

たとえば、両端の直径がそれぞれ 10 cm と 20 cm の長さ 1.8 m の倒木の場合、その材積は、以下の結果となる。

$$V = 100 * 1.8 * ((\pi (20/2)^2 + \pi (10/2)^2)/2) = 180 * (314.2 + 78.5)/2 = 35,343 \text{ cm}^3$$

仮にこの倒木の分解度が2とした場合、そのネクロマスは以下のとおりである。

$$\text{Mass} = V * \text{WD}_{\text{decomposition class}} = 35,343 * 0.41 = 14,491 \text{ g} = 14.49 \text{ kg}$$

倒木の断面の形状は必ずしも円形とは限らない。仮に方形の断面（伐採後、製材されたものの放置された材など）の場合、断面積に長さを乗じる計算をする。たとえば、長辺 20 cm、短辺 10 cm の長方形の断面を持つ長さ 1.8 m の倒木（分解度 2 と仮定）の場合、計算結果は以下のとおりである。

$$V = 100 * 1.8 * 20 * 10 = 36,000 \text{ cm}^3$$

$$\text{Mass} = V * \text{WD}_{\text{decomposition class}} = 36,000 * 0.41 = 14,760 \text{ g} = 14.76 \text{ kg}$$

4.4.3 単位面積当たりの倒木枯死量

地上部現存量同様に倒木枯死量もヘクタール当たりに変換して示す必要がある。たとえば、0.16 ヘクタールのプロットで 800 kg の倒木枯死量があった場合、ヘクタール当たりの値は以下のとおりになる。

$$\text{Dead Wood Mass} = 800 * (1/0.16) = 5,000 \text{ kg} = 5.00 \text{ Mg ha}^{-1}$$

4.5 炭素蓄積量への変換

ここまでの計算方法はいずれもバイオマスやネクロマスの乾燥重量であり、これらの数値を炭素量 (Mg C ha^{-1}) へ変換しなければならない。一般にその計算には、IPCC 2006 GPG に示された “carbon fraction for dry matter (CF)” を用いる。

AGB_h が 125 Mg ha^{-1} の場合、炭素蓄積量 (AGB_{h-c}) は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{AGB}_{h-c} &= \text{AGB}_h * \text{CF} \\ &= 125 * 0.47 = 58.75 \text{ Mg-C ha}^{-1} \end{aligned}$$

参考文献

- Chao K-J, Phillips OL, Baker TR (2008) Wood density and stocks of coarse woody debris in a northwestern Amazonian landscape. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 795-805.
- Chave J, Réjou-Méchain M, Búrquez A, Chidumayo E, Colgan MS, Delitti WBC, Duque A, Eid T, Fearnside PM, Goodman RC, Henry M, Martínez-Yrizar A, Mugasha WA, Muller-Landau HC, Mencuccini M, Nelson BW, Ngomanda A, Nogueira EM, Ortiz-Malavassi E, Pélissier R, Ploton P, Ryan CM, Saldarriaga JG, Vieilledent G (2014) Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20: 3177-3190.
- Mokany K, Raison RJ, Prokushkin AS (2006) Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12: 84-96.
- Niiyama K, Kajimoto T, Matsuura Y, Yamashita T, Matsuo N, Yashiro Y, Ripin A, Kassim AR, Noor NS (2010) Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology* 26: 271-284.
- Reyes G, Brown S, Chapman J, Lugo AE (1992) Wood Densities of Tropical Tree Species. United States Department of Agriculture, Forestry Service, Southern Forest Experimental Station, New Orleans, Louisiana.
- Sato T, Saito M, Ramirez D, Pérez de Molas LF, Toriyama J, Monda Y, Kiyono Y, Herebia E, Dubie N, Duré Vera E, Ramirez Ortega JD, Vera de Ortiz M (2015) Development of allometric equations for tree biomass in forest ecosystems in Paraguay. *JARQ* 49: 281-291.



発 行 日 平成 28 年 3 月 10 日
発 行 者 国立研究開発法人 森林総合研究所 REDD 研究開発センター
執 筆 者 佐藤 保 (国立研究開発法人 森林総合研究所)
宮本 和樹 (国立研究開発法人 森林総合研究所 四国支所)
企画・構成・編集 佐藤 保・高橋 正義
本書の引用記載 佐藤 保・宮本 和樹 (2016) REDD-plus Cookbook Annex.
調査マニュアル Vol.1. 地上インベントリ調査法
(研) 森林総合研究所 REDD 研究開発センター, 22pp.