



REDD+

Reducing Emission from Deforestation
and Forest Degradation-plus

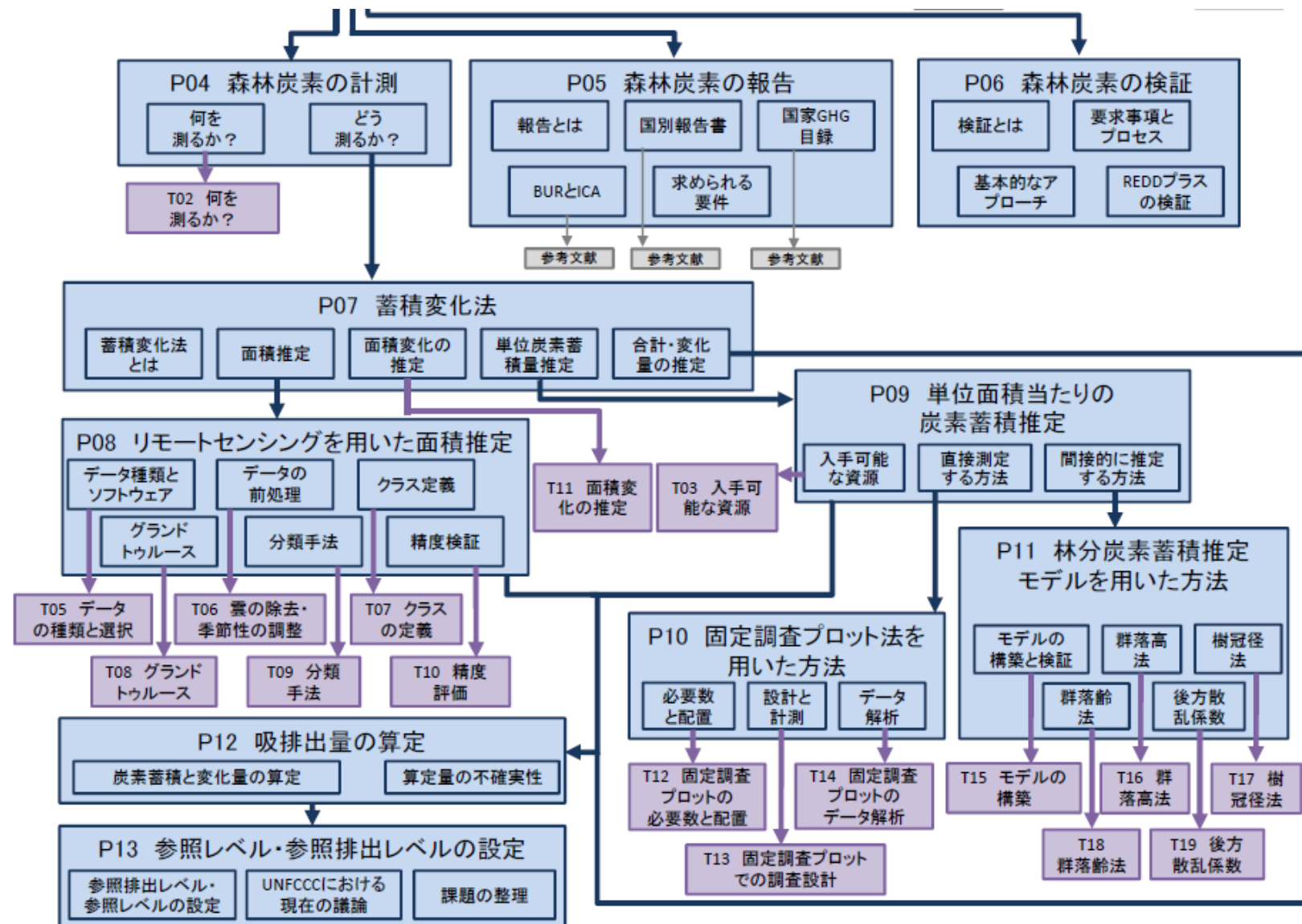
平成24年度 基礎講習

第5章

森林炭素量の把握

ベトナム国DienBien省における
バイオマス関連データの開発の事例

一般社団法人 日本森林技術協会
金森 匡彦





炭素蓄積変化把握の流れ

この時間の
講習

各森林被覆タイプ

森林被覆の時系列変化

リモートセンシングによる
森林被覆の時系列変化
の把握

次の講義で詳述

単位面積あたりの炭素蓄積の把握

〈現地調査〉

- (a) 立木調査（プロット調査）
- (b) 破壊調査（伐倒調査）

〈解析〉

単位面積あたりの
森林バイオマスの把握

単位面積あたりの炭素蓄積

炭素蓄積変化の把握



森林のバイオマスとは

- バイオマス（Biomass）：生物量
一般的に生物の乾燥重量で表される
森林の場合、樹木・植物の乾燥重量
- 森林炭素蓄積量（Carbon stock）は、
森林バイオマスの約半分
植物体を構成するセルロースなどの組成による



森林バイオマス把握のための現地調査

(a) 立木調査（プロット調査）

- プロット設定
※方形、円形など調査設計に沿って適宜選択
- 樹種
- 胸高直径
- 樹高

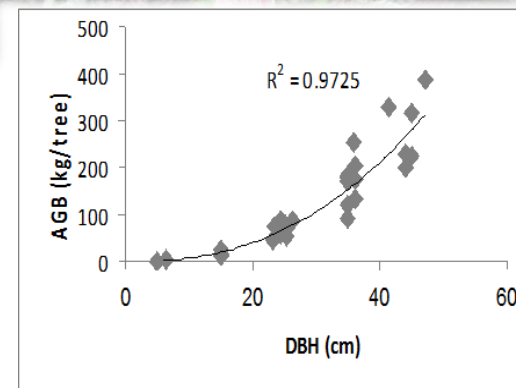
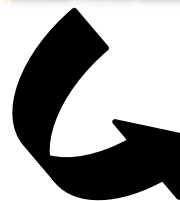


Tree ID	Species	DBH	height
A491	Quercus sp	16.5	15.0
A〇〇	□△sp	●●	▲▲
A800	Schima sp	31.2	28.5

バイオマス算出のための立木データの収集を行う



(b) 破壊調査（伐倒調査）



アロメトリー式の開発

$$y = ax^b$$



アロメトリー式(相対成長式、allomertic equation)

- 個体の一部のサイズから、別の部位のサイズを推定する式



- 正確な測定が容易な部位（例：胸高直径）のサイズから、個体の樹高やバイオマスなど測定の困難な情報を推定できる

パラメータ	式	精度	データ収集の容易さ
DBHのみ	$y = aDBH^b$	低	易
DBH ² と樹高	$y = a(DBH^2 \cdot h)^b$	↑	↑
材密度 DBH ² 樹高	$y = a(\rho \cdot DBH^2 \cdot h)^b$	↓ 高	↓ 難

yはバイオマス；DBHは胸高直径；hは樹高； ρ は容積重；a、bは係数



汎用式と樹種や地域に特化した推定式の特徴

- 地上部バイオマス（AGB：aboveground biomass）については推定式が多く提案・報告されている

世界中の樹木のデータを用いて森林タイプごとに考案された推定式（汎用式：generic model, generic equation）から、個別の樹種や特定の地域に成立する林分のための推定式（species-specific model, local model）まで様々なものが提案されており、それぞれに長所と短所がある。

項目	汎用式	樹種や地域に特化した式
式の基となるデータ	森林タイプ別に世界中から集められたデータ。	特定の地域や樹種から集められたデータ。
適用可能な地域	森林タイプが同じであれば適用可能。比較的広範囲な地域で適用できる。	式の基となるデータと同じ地域や樹種のみ適用可能。適用できる地域は限定的。
推定誤差	適用できる森林であれば、小～中程度の誤差が出る。	適用できる森林であれば、誤差は非常に小さい。そうでなければ誤差は大きい。
誤差が大きい場合の対処	個体サイズを反映する係数を増やすことで、ある程度の改善ができる（たとえば胸高直径と樹高を反映した式を使用する）	調査対象の地域に不適な場合は使用しない。



各種アロメトリー式

- 汎用式：generic model, generic equation
世界中の樹木のデータを用いて森林タイプごとに
考案された推定式

Generic models	モデルタイプ	バイオマス推定式	推奨する気象条件など		
Brown式	Wet model	$AGB=21.297 - 6.953 \times DBH + 0.740 \times DBH^2$	4,000mm以上	乾季無し	
	Moist model	$AGB=\exp(-2.134 + 2.530 \times \ln(DBH))$	1,500-4,500mm	乾季無しor短い乾季	
	Dry model	$AGB=\exp(-1.996 + 2.32 \times \ln(DBH))$	1,500mm未満	数か月の乾季	
Chave式*	Wet model	$AGB=WD \times \exp(-1.302 + 1.980 \times \ln(DBH) + 0.207 \times (\ln(DBH))^2 - 0.0281 \times (\ln(DBH))^3)$	3,500mm以上	乾季無し	多雨低地林
	Moist model	$AGB=WD \times \exp(-1.562 + 2.148 \times \ln(DBH) + 0.207 \times (\ln(DBH))^2 - 0.0281 \times (\ln(DBH))^3)$	1,500-3,500mm	5ヵ月未満	低地林
	Dry model	$AGB=WD \times \exp(-0.730 + 1.784 \times \ln(DBH) + 0.207 \times (\ln(DBH))^2 - 0.0281 \times (\ln(DBH))^3)$	1,500mm未満	5ヵ月以上	厳しい乾季がある
Kiyono式	Moist model	$Stem=2.69 \times ba^{1.29} \times WD^{1.35}$			
	Moist model	$Branch=0.217 \times ba^{1.26} \times WD^{1.48}$			
	Moist model	$Leaf=173 \times ba^{0.938}$			

AGB: 地上バイオマスAboveground biomass、DBH: 胸高直径Diameter at brest height、WD: 材密度Wood density(t/m³)

- WDの値は、IPCC(2003, 2006)やさまざまな研究論文の中で、種レベル、あるいは属レベルの値が示されている。
- 種の同定が困難な場合は、熱帯ではアジア0.57、アメリカ0.60、アフリカ0.58といった基準値(Brown, 1997)を使うことができる。

REDD+CookBookより



各種アロメトリー式

- 個別の樹種（species-specific） や特定の地域に成立する林分のための推定式（species-specific model, local model）

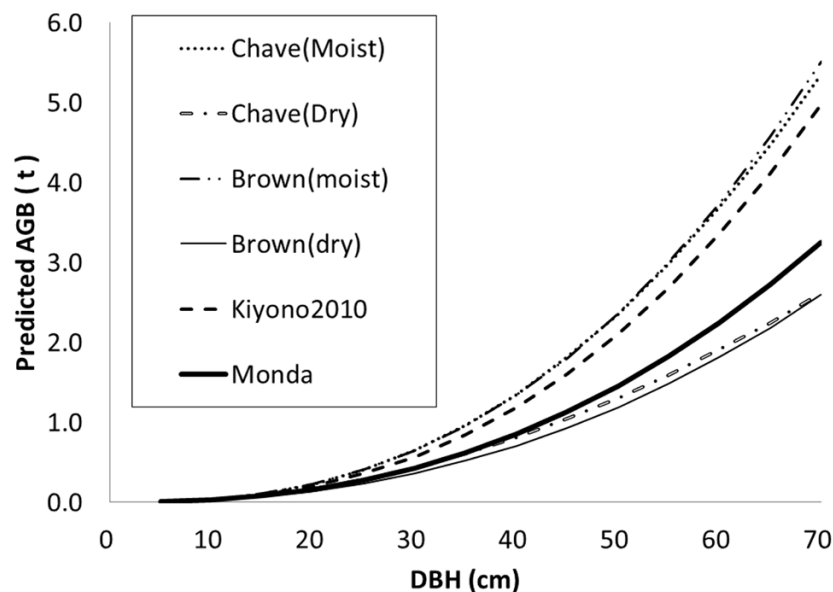
Local models	モデルタイプ	バイオマス推定式	推奨する気象条件など(カッコ内はデータを収集した地域)
Yamakura式	推定式A	$AGB = \exp(-2.30 + 3.62 \times \ln(DBH))$	熱帯雨林(ボルネオ)
Chambers式	推定式B	$AGB = \exp(-2.010 + 2.55 \times \ln(DBH))$	(中央アマゾン)
Dojomo式	推定式C	$AGB = \exp(-2.05 + 2.33 \times \ln(DBH))$	熱帯低地林(アフリカ)
Hozumi式	推定式D	$Stem = 0.072 \times (D^2 H)^{0.9326}$ $Branch = 0.01334 \times (D^2 H)^{1.027}$ $Leaf = 0.031 \times (D^2 H)^{0.7211}$	熱帯季節林の常緑林(カンボジア)
Monda式	推定式E	$AGB = 0.3510 \times DBH^{2.3855} \times WD^{1.7827}$	熱帯季節林の落葉林(インドシナ地域)
Kenzo式	推定式F	$AGB = 0.0829 \times DBH^{2.43}$	二次林(マレーシア・サラワク)
Ketterings式	推定式G	$AGB = \exp(-2.75 + 2.59 \times \ln(DBH))$	混交二次林(インドネシア・スマトラ)
Hashimoto式	推定式H	$AGB = \exp(-2.51 + 2.44 \times \ln(DBH))$	熱帯先駆種が優先する二次林(インドネシア・東カリマンタン)

*Chaveモデルは、このほかに独立変数としてDBH、H、WDを含む式もタイプごとに提案している。

それぞれの単位: バイオマス(AGB、Stem、Branch、Leaf): kg/tree, WD: t/m³ (ただしKiyono式はkg/cm³), DBH: cm, ba: m², D2H: DBH²(cm) × H(m)



アロメトリー式の選択



推定式による地上バイオマス（AGB: aboveground biomass）の推定値の違い

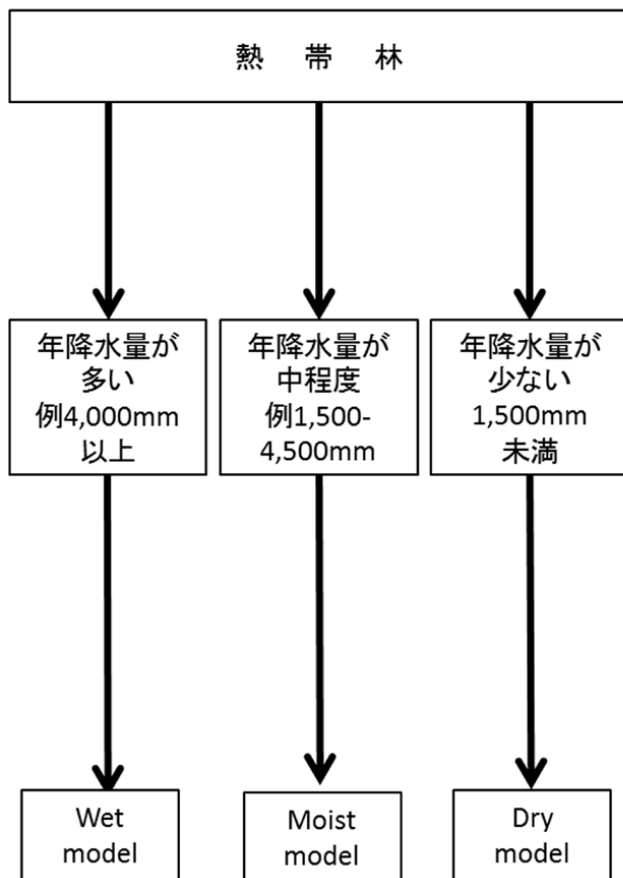
REDD+CookBookより

- アロメトリー式は、森林タイプ（forest type、常緑林evergreen forest や落葉林deciduous forest など）や生育地の環境によって推定結果が異なる
- 基本的に対象地域の森林タイプのものの中から選定する
- 該当するアロメトリー式が複数ある場合は、調査対象の森林での利用可能な既存文献などのバイオマス実測データや、樹木のサイズ（胸高直径、樹高）、優占樹種などの情報を推定式に当てはめ、推定誤差の大きさや傾向から判断して選定する。

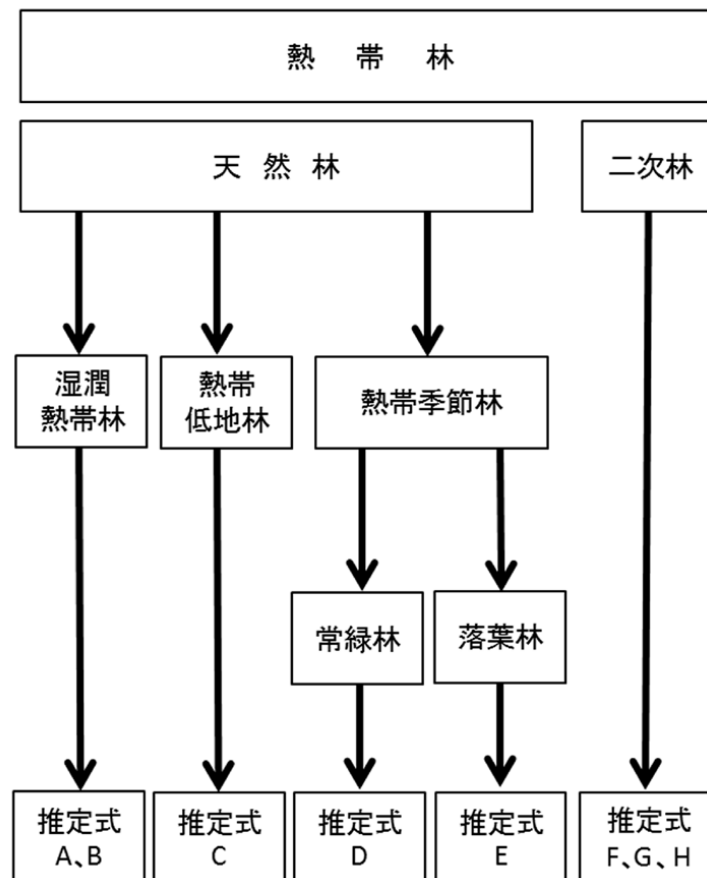


アロメトリ式の選択フロー

Generic models



Local models



REDD+CookBookより



単位面積あたりのバイオマス、炭素蓄積の算出

立木調査データ（例えば
0.1畝プロットの調査データ）

Tree ID	Species	DBH
A491	Quercus sp	16.5
A〇〇	□△sp	●●
A800	Schima sp	31.2

立木ごとに
バイオマス
計算

その地域に適合した
アロメトリー式

汎用式（Brown式Wet model）の計算例
 $AGB = 21.297 - 6.953 \times DBH + 0.740 \times DBH^2$

Tree ID	Species	DBH	AGB(kg)
A491	Quercus sp	16.5	108
A〇〇	□△sp	●●	△×△
A800	Schima sp	31.2	524.7

Total

仮に0.1畝あたりのバイオマスが**5 t**であった場合
ヘクタールあたりの地上バイオマスは **“50 t”**

炭素蓄積 = **50 × 0.5* = 25 t/ha**

*0.5は炭素係数（Carbon Fraction; CF）



アロメトリー式の独自開発が必要な場合

- REDDプラス対象国・地域に合う適当な式が無い場合
- Tier2、3レベルで炭素蓄積の把握を目指す場合
 - Tier：Tier1～3の3段階
 - 温室効果ガスの排出/吸収の分析のデータ要件が異なる
Tier1では要件が少なく、Tier2、3では要件が増える
 - Tier1；バイオマス計算に関して汎用式・値を使用、など
 - Tier2；国・地域に特化した計算式の使用、インベントリによるデータ収集、など
 - Tier3；国・地域に特化した計算式の使用、インベントリによるデータ収集が繰り返されていること、など
 - Tierごとにそれぞれ透明性、完全性、一貫性、比較可能性、正確性が求められる



ベトナム国ディエンビエン省でのアロメトリー式開発

VN国のバイオマス計算式およびバイオマス調査の現状

バイオマス計算式に関して

- アロメトリー式
- R-S ratio：地下バイオマスを推定する係数
- 材積式（表）：樹種、人天、地域
— 天然林は簡易な式のみ存在
- 容積密度：300種のリストあり
- バイオマス計算式の知見は、人工林では多いが、天然林では少ない

汎用式・値
使用

調査手法に関して

- 破壊調査の多くは、重機の使用を前提としている
- × 国、地域によっては重機の使用が困難
 - 反面、人力は豊富に活用できる可能性

- より高いTierを目指した計算式の開発を求めている
- かつ、条件の悪い調査地であっても、簡易・安全でなおかつ正確なデータを収集できる手法が必要

このような条件の下、VN国のバイオマス調査を行った。

ディエンビエン省の概要

- ベトナム国ディエンビエン省
- ベトナム北西部、ラオス・中国と国境を接する
- 省の面積9,563 km²
- 森林率39%（森林計画上は保全林が林地の約55%、生産林が約40%）
- 省の91%が海拔500m～1,500m
- 土地の54%が傾斜30%以上
- 流域保全が重要な課題となっている

出典

ベトナム農村社会における社会経済開発のための地場産業振興に係る能力向上プロジェクト（JICA）

http://www.taybac.net.vn/taybac/dienbien_detail_jp.html

北西部水源地域における持続可能な森林管理プロジェクト（JICA）

<http://www.jica.go.jp/project/vietnam/004/outline/index.html>





Dien Bien province

Muong Nhe district

モンニエ郡

ハノイ





● 調査地：

ディエンビエン省モンニェ郡、
モンニェ森林保護区；MuongNhe Nature Reserve (MNNR)





MNNRの林相



林分の遠景



Rich forestの林内

- 総面積169,962 ㍊ (MNNR内には、耕作地も存在)
- 天然林82,200 ㍊ (森林保護区の約48%)
- 優占樹種はシイ、カシ、ヒメツバキなど常緑広葉樹 (村落跡地にはBambooも生育)
- 天然林は蓄積ごとにPoor forest ($100\text{m}^3/\text{㍊}$ 未満)、Medium forest ($100\sim 200\text{m}^3/\text{㍊}$)、Rich forest ($200\text{m}^3/\text{㍊}$ 以上)に分けられている



Bamboo



調査方法

- 立木調査（プロット調査）

90プロット：3つの森林タイプ（Poor, Medium, Rich）にそれぞれ30プロット設置

- 森林図上で候補地点を選点定し、現地の林相を確認して最終決定
- プロットサイズは50m×50m
- 胸高直径5cm以上の立木の樹種名、胸高直径、樹高を測定



MNNR 管理事務所での調査地選定作業



- RichForestは奥山にあるため選定に慎重を期していた
- GISも使用しているが現地では紙地図で作業



プロット設定



- 現地でのプロット設定はオリエンテーリングコンパス、巻き尺などを使用
- バータックスなどの先進測定機器は、導入されていても数が少ないため、調査チームが持ち出せない場合もある



毎木調査



- 胸高位置の幹周囲長を測定して、集計時に直径に変換
- 板根を持つ樹種のDBHを正確に測定するには脚立なども必要
- 樹高はクリノメーターなどを用いた方法で測定
(日本人スタッフが滞在した期間はバーテックスを使用)



調査実施上の問題点 1

ー 地理的要因、アクセス ー

- 車道から調査地まで最大8km離れている
- 川を遡行などで到達に2時間程度要する
- スタッフ（特に日本人技術者）の安全管理に留意

その他

- 調査以前に、入林の許諾を得ることに時間を要することがある
 - FPD ; Forest Protection Department、SubDOF ; Department of Forestの地方事務所、さらに国境地帯の場合は軍との調整が必要であった。
- 紛争などで退去勧告が出ることも念頭に置いた準備が必要
 - カウンター機関に調査を任せることも必要となる
 - 信頼できる機関をカウンターパートにできるか（ベトナムでは、FSIV ; Forest Science Institute of VietnamをCPとすることができた）



調査実施上の問題点2

－ 調査地選定、立木調査 －

調査地選定

- GISはあっても最終的には紙地図での調査地選定作業となった
- 日本側が調査地選定しても諸事情で実際には行けない場合もある

立木調査

- MNNRでの調査は50×50mのプロットだったが、林相次第でプロット形状やサイズを変更する余地はある
- 調査に高精度を期すならば、日本からの機材持ち込みが不可欠



- 破壊調査（伐倒調査）

供試木30本を選定：優占樹種3種×10本

Dẻ : *Castanopsis indica* (Roxb.) A. DC.

Chẹo Tía : *Engelhardtia roxburghiana* Lindl er Wall.

Vối Thuộc : *Schima wallichii* (DC.) Korth.

プロット調査結果を基に3樹種を決定。

- 各胸高直径階から満遍なく供試木を選定
- 樹冠投影した範囲を深さ1mまで掘り、根を露出させたうえ引倒し、抜根
- 器官（根、幹、枝、葉）に分別し、器官別の生重量測定
- 各器官の乾重測定用サンプル採取、サンプル生重量測定



根の掘り出し



- 供試木は、概ね樹冠の範囲の根を掘り出したうえ、ロープをかけて引き倒した
- 地中に残った根については、可能な限り掘り出した
- 掘り出せない根は切断面の直径を計測し、完全に掘り出した根の直径と重量の回帰式から生重量を推定した



供試木を倒した後の作業



樹幹長の測定と切断位置決定



各器官の切断
写真は樹幹と根



各器官の生重量測定



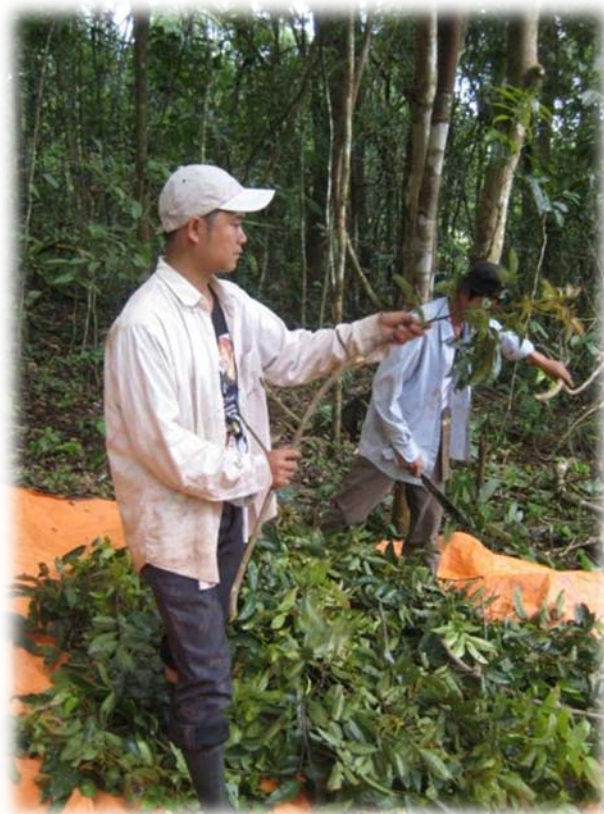
樹幹



根



各器官の生重量測定 2



葉と枝の分別作業



枝の生重量測定



樹幹のサンプル採取



サンプル採取後、サンプル生重量測定



枝および葉のサンプル採取



サンプル採取後、サンプル生重量測定



根のサンプル採取



サンプル採取後、サンプル生重量測定



供試木データの取りまとめシート

ID	Scientific name of sample trees	Sample tree size		Sample plot No.	Coordinates of sample trees		Fresh biomass of sample trees by tree organs (kg)				
		DBH (cm)	H (m)		Latitude	Longitude	Stem	Branch	Leave	Root	Total
1	<i>Schima wallichii</i>	6.5	8.4	58	230639	2469436	18.6	10.1	2.5	6.5	37.7
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11	<i>Castanopsis indica</i>										
12											
15											
13											
14											
16											
17											
18											
19											
20											
21	<i>Engelhardtia roxburghiana</i>										
22											
23											
24											
25											
26											
27											
28											
29											
30											



調査実施上の問題点 3

－ 伐倒調査 －

- 調査地の立地条件次第で調査の難易度が大きく変わる
- 現地作業員を確保できるか、重機搬入できるかなど確認が必要
 - － 作業員の日当支払いも予算に織り込む（チェーンソー技術者などは日当が高い）
- 調査地が車道から遠いとサンプルの運び出しが困難
- 伐倒調査においても精度を期すならば日本からの測定機材の持ち込みが必要
- 解析で外れ値発生を防ぐためにも、樹木の形状のチェックは不可欠



- ラボ作業

サンプルは順次FSIV (Forest Science Institute of Vietnam)
本部に送り、ラボで乾燥処理、乾重量測定

- ラボでサンプル生重量を再測定
- 105℃で72～168時間乾燥し、乾重量を測定





サンプルの乾燥処理と乾重量測定



調査実施上の問題点4 ー ラボ作業 ー

- 乾燥作業ができるラボ（研究所や大学）などがREDDプラス対象国にあるかどうかの事前確認が必要



解析：供試木の全乾重量計算

- 全乾重量の計算 $TDW = TFW * \frac{SDW}{SFW}$

TDW：各器官の全乾重量

TFW：各器官の全生重量

SDW：各器官のサンプル乾重量

SFW：各器官のサンプル生重量

全乾重量 = バイオマス

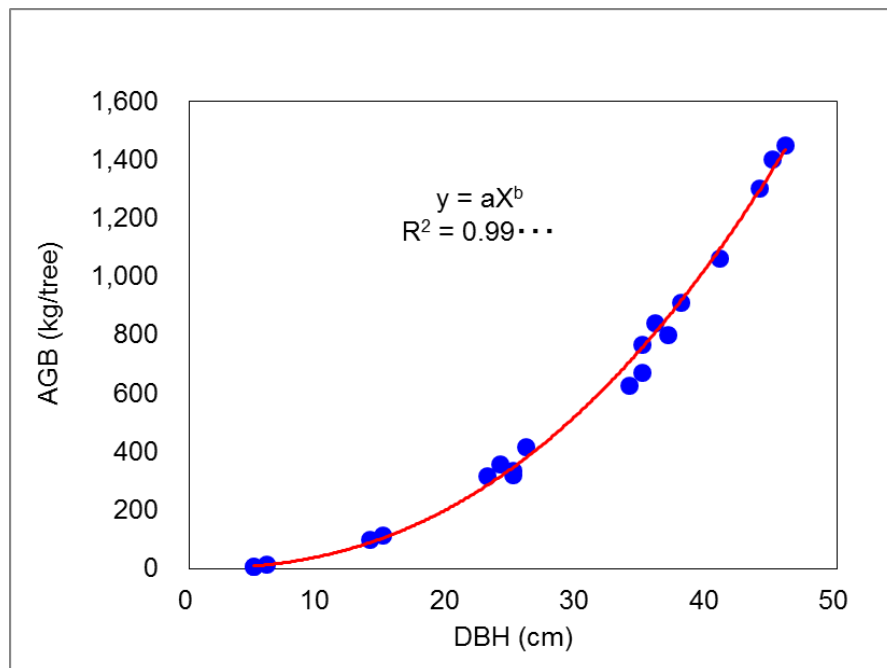


供試木乾重量の取りまとめシート

ID	Name of sample trees	Sample tree size		Dried mass by tree organs (kg/tree)				
		DBH (cm)	H (m)	Stem	Branch	Leave	Root	Total
1	<i>Schima wallichii</i>	6.5	8.4	9.01	4.67	0.88	2.81	17.37
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11	<i>Castanopsis indica</i>							
12								
15								
13								
14								
16								
17								
18								
19								
20								
21	<i>Engelhardtia roxburghiana</i>							
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								



アロメトリー式（器官別回帰式）作成



- 供試木の胸高直径と各器官のバイオマスとの関係を散布図に表す

- 左の図は胸高直径をx軸に、地上バイオマスをy軸に取った場合のイメージ
- DBH；胸高直径
- AGB；地上バイオマス

- 散布図の近似線の式 $y = a X^b$

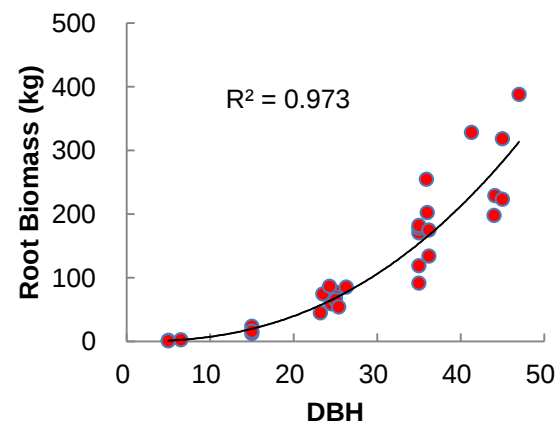
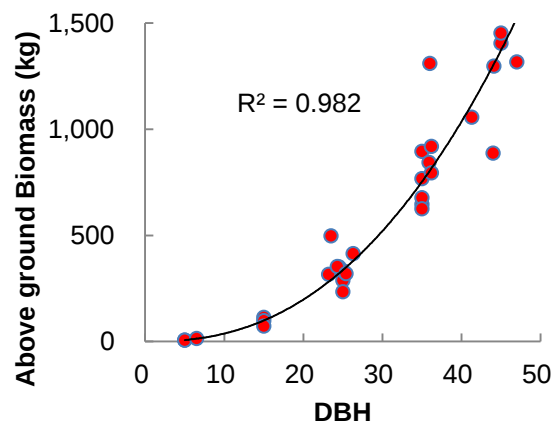
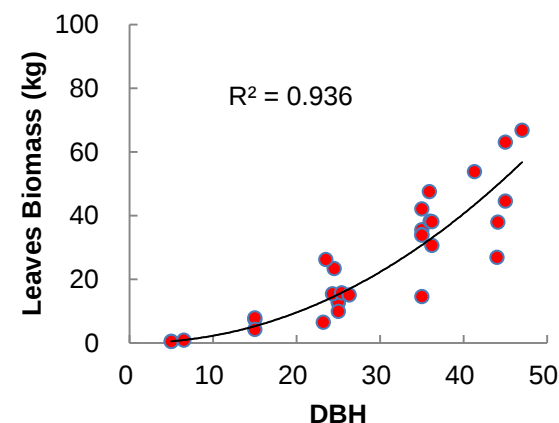
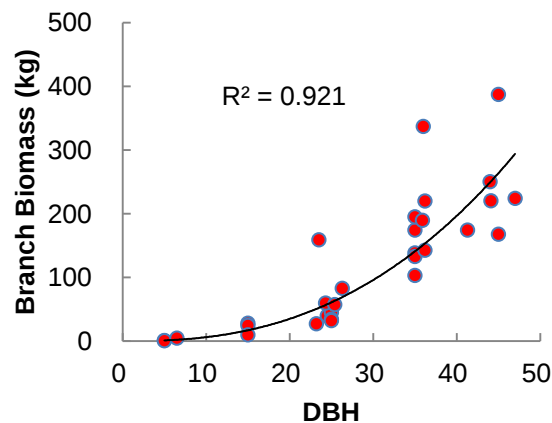
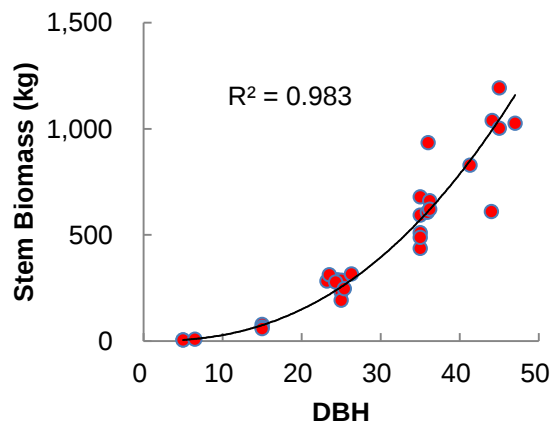
対数を取った場合 $\text{Ln}(y) = a \text{Ln}(X) + b$

などの回帰式が得られる

- y ：各器官のバイオマス
- X ：変数（DBH、DBH²、D²H など）
- a 、 b ：係数



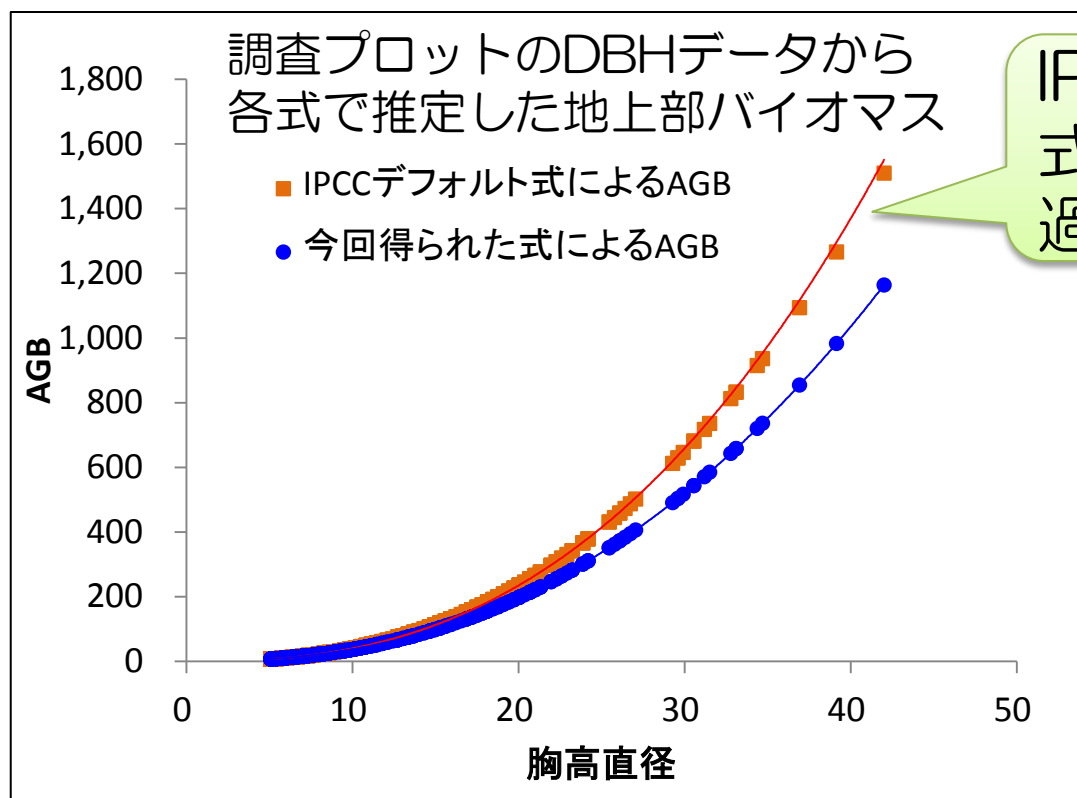
器官別の胸高直径とバイオマスの関係



これらの散布図から、器官別にアロメトリー式を作成することができる



IPCCデフォルト式と開発したアロメトリー式による地上部バイオマス（AGB）の比較



IPCCデフォルト式は、大径木ほど過大推定になる

IPCCの式: $Y = \exp[-2.289 + 2.649 * \ln(\text{DBH}) - 0.021 * (\ln(\text{DBH}))^2]$

Tropical moist hardwoods

Y = aboveground dry matter, kg (tree)⁻¹, DBH = diameter at breast height (cm), ln = natural logarithm, exp = "e raised to the power of"



毎木調査データからバイオマスを試算

- プロットごとに全立木の地上バイオマス、地下バイオマスを計算・集計し、ヘクタールあたりバイオマスに換算
- さらに炭素量を算出

プロットごとの計算結果の例

Plot No.	Wood volume m ³ /ha	Forest Type	AGB t/ha	BGB t/ha	Carbon in AGB	Carbon in BGB
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
22	195	medium	169	32	84.5	16.0
23	123	medium	132	25	66.0	12.5
24	225	rich	200	40	100.0	20.0
25	205	rich	182	35	91.0	17.5
26	37	poor	54	11	27.0	5.5
27	391	rich	351	70	175.5	35.0
28	53	poor	65	13	32.5	6.5
29	29	poor	46	9	23.0	4.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮



MNNRにおける各森林タイプの炭素貯留量

森林 タイプ	プロット 数	蓄積 m ³ /ha	AGB t/ha	BGB t/ha	地上炭素 貯留量 t/ha	地下炭素 貯留量 t/ha	炭素貯留量 (地上+地下) t/ha
Poor	29	75.5	92.1	18.1	46.0	9.1	55.1
Medium	31	156.0	164.1	32.5	82.0	16.3	98.3
Rich	30	254.6	205.1	39.6	102.5	19.8	122.3

※各森林タイプの平均値を示した



まとめ

- 高い精度でバイオマス推定を行いたいならば、REDDプラス対象国・地域に特化したアロメトリー式を破壊調査によって得ることが必須
- REDDプラス対象国・地域の周辺国・周辺地域に、似たような森林タイプがあるならば、開発したアロメトリー式を適用できる可能性がある
 - e.g. ベトナムおよびインドシナ半島の常緑広葉樹林
- REDDプラス対象国・地域内であっても全く異なる森林タイプについては、別にアロメトリー式を開発する必要がある
 - e.g. Re-Growthフォレスト、バンブー