



REDD+

Reducing Emission from Deforestation
and Forest Degradation-plus

平成26年度 応用講習a

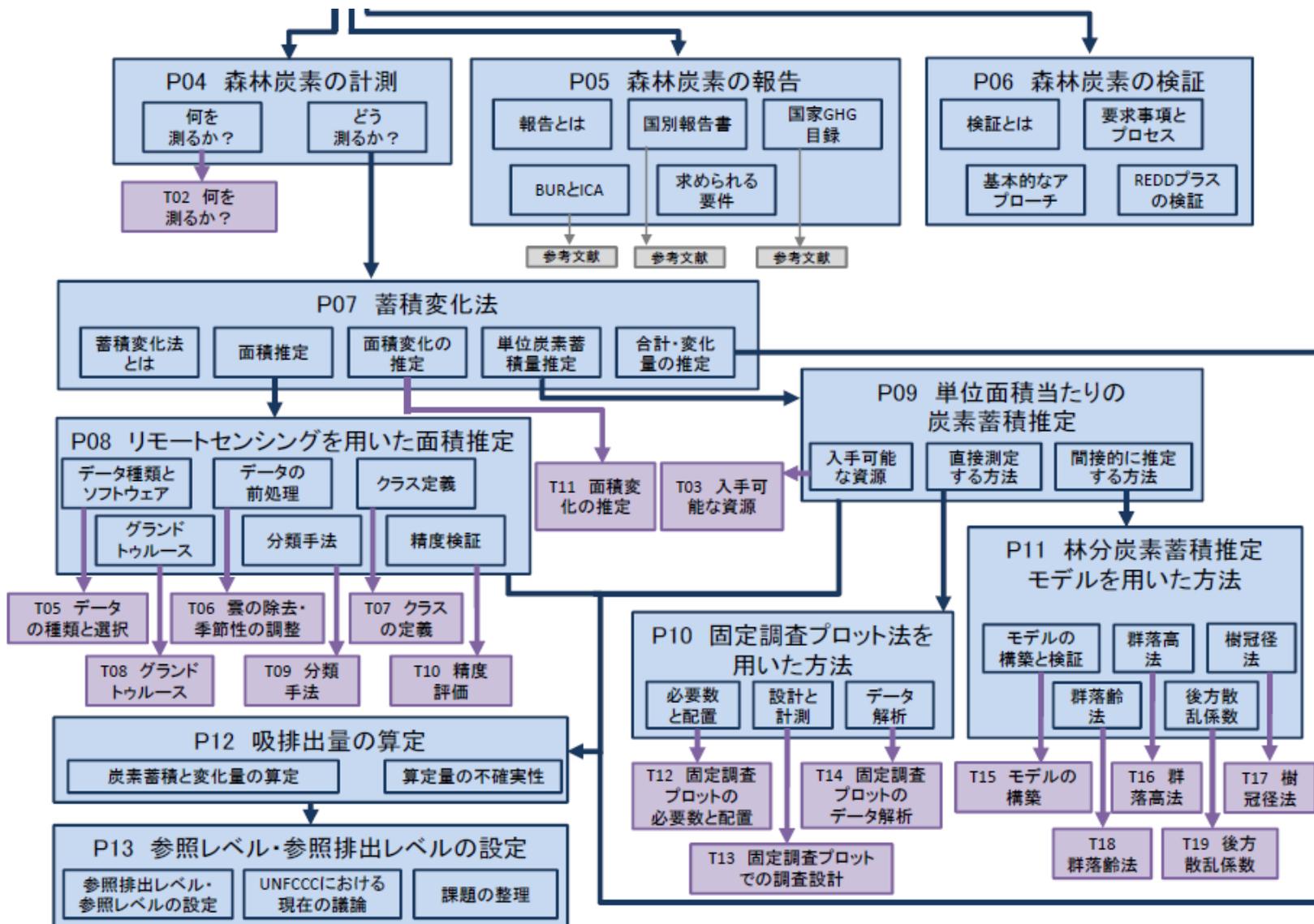
第4章

森林炭素量の把握

座学・実習

一般社団法人 日本森林技術協会
佐藤 顕信





REDD+CookBookより



炭素蓄積変化把握の流れ

各森林被覆タイプ

この時間の
講習内容

森林被覆の時系列変化

単位面積あたりの炭素蓄積の把握

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

< 現地調査 >

- (a) 標準地調査 (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。
- **森林炭素貯留量は、森林バイオマスの約半分**
 - ✓ バイオマスに0.5を掛けると炭素量になる。
 - ✓ 植物体を構成するセルロースなどの化学組成による。
- **森林炭素貯留量の算出に必要な森林のバイオマスは、直接的な計測が困難なことから、胸高直径など直接計測可能なデータから、アロメトリー式や係数を用いて算出する。**



REDD+対象国・地域に適したアロメトリー式、係数が必要。

アロメトリー式(相対成長式、allometric 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 高	 易 難
DBH ² と樹高	$y = a(DBH^2 \cdot h)^b$		
材密度 DBH ² 樹高	$y = a(\rho \cdot DBH^2 \cdot h)^b$		
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）を推定する計算式は、多数提案されている。
 - ✓ 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汎用の推定式（generic model, generic equation）や、個別の樹種や特定の地域に成立する森林のための推定式（species-specific model, local model）など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	気候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	各式の推奨する気候条件に合致する地域であれば適用可能。 適用対象地域は比較的広範囲。	式が開発された地域、式が対象としている森林タイプおよび樹種に対して適用可能。 適用対象地域は限定的。
推定誤差	適用対象地域に対して用いたとしても、小～中程度の誤差が出る。	適用対象の地域、森林タイプ、樹種に対して用いれば、誤差は小さい。
	適用対象地域、樹種以外のバイオマス推定に用いると誤差が大きくなる。	
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）。	調査対象の地域に合致しない場合は使用しない。

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。
- ✓ Brown式、Chave式がよく知られている。

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	$Leaf=173 \times ba^{0.938}$			

*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)

AGB : 地上バイオマスAboveground biomass、DBH : 胸高直径Diameter at breast 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。

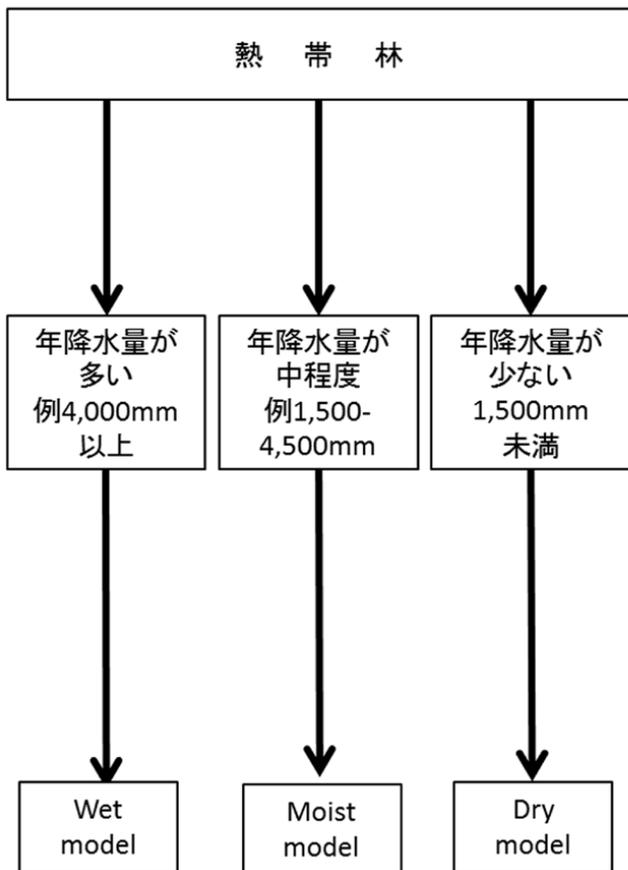
各種アロメトリー式

- 個別の樹種のための推定式 (species-specific model)
 および特定の地域に成立する森林のための推定式 (local model)。

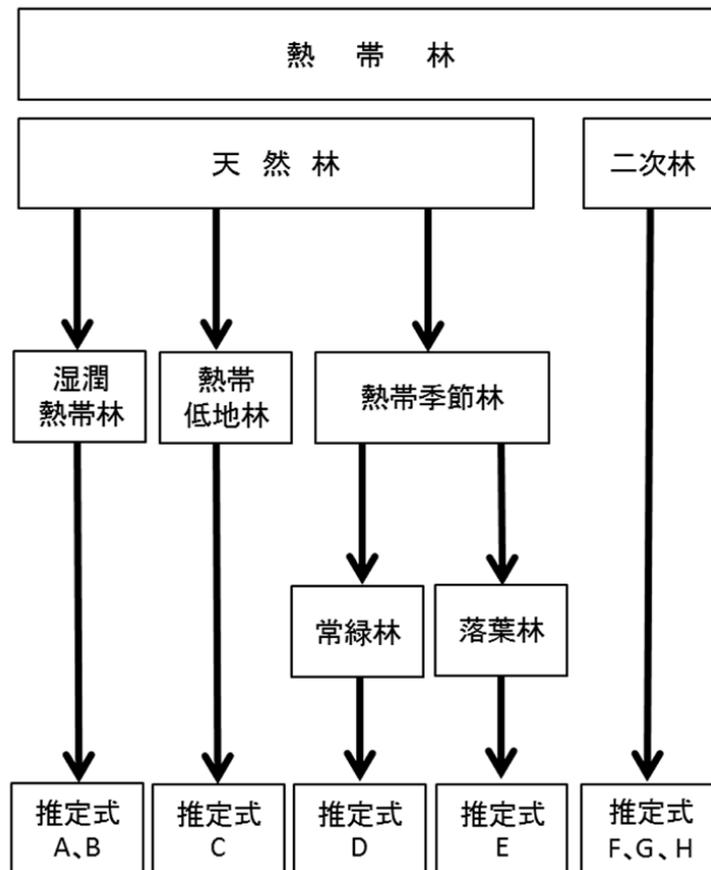
Local models	モデルタイプ	バイオマス推定式	推奨する気象条件など(カッコ内はデータを収集した地域)
Yamakura式	推定式A	$AGB = \exp(-2.30 + 3.62 \times \ln(DBH))$	熱帯雨林(ボルネオ)
Chambers式	推定式B	$AGB = \exp(-2.010 + 2.55 \times \ln(DBH))$	(中央アマゾン)
Dojomo式	推定式C	$AGB = \exp(-2.05 + 2.33 \times \ln(DBH))$	熱帯低地林(アフリカ)
Hozumi式	推定式D	$Stem = 0.072 \times (D^2 H)^{0.9326}$ $Branch = 0.01334 \times (D^2 H)^{1.027}$ $Leaf = 0.031 \times (D^2 H)^{0.7211}$	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)

アロメトリ式の選択フロー

Generic models



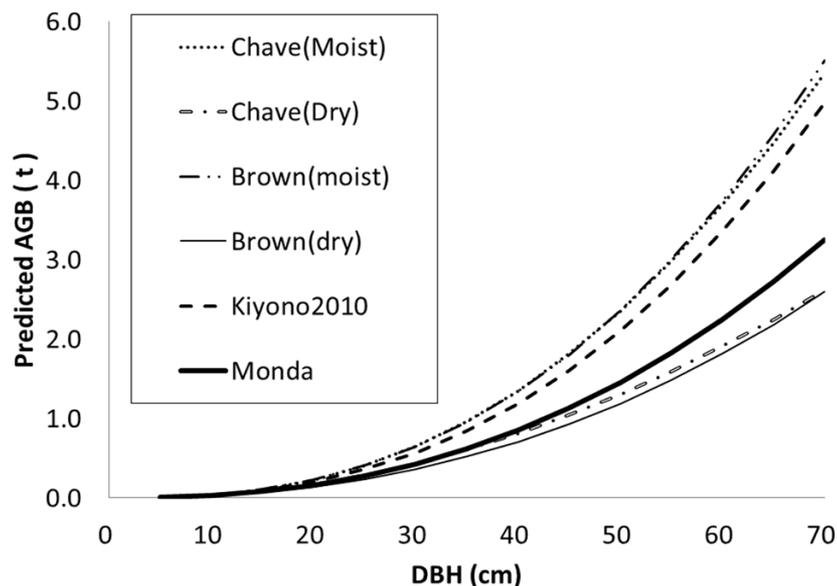
Local models



REDD+CookBookより

アロメトリー式の選択

- アロメトリー式は、式によって推定結果が異なる。
 - ✓ アロメトリー式を作成するために用いられているデータがそれぞれ異なっている。
 - ✓ そのため、式の係数がそれぞれ異なっている。
- バイオマスを推定する地域の気候や森林のタイプに合わせて適切な式を選択する必要がある。



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

アロメトリー式の独自開発が必要なケース

- REDDプラス対象国・地域で、Tier2、3レベルで炭素蓄積の把握を目指しているが、その国や地域に適合する既存の式が無い場合。
 - ✓ 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や汎用係数を使用、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

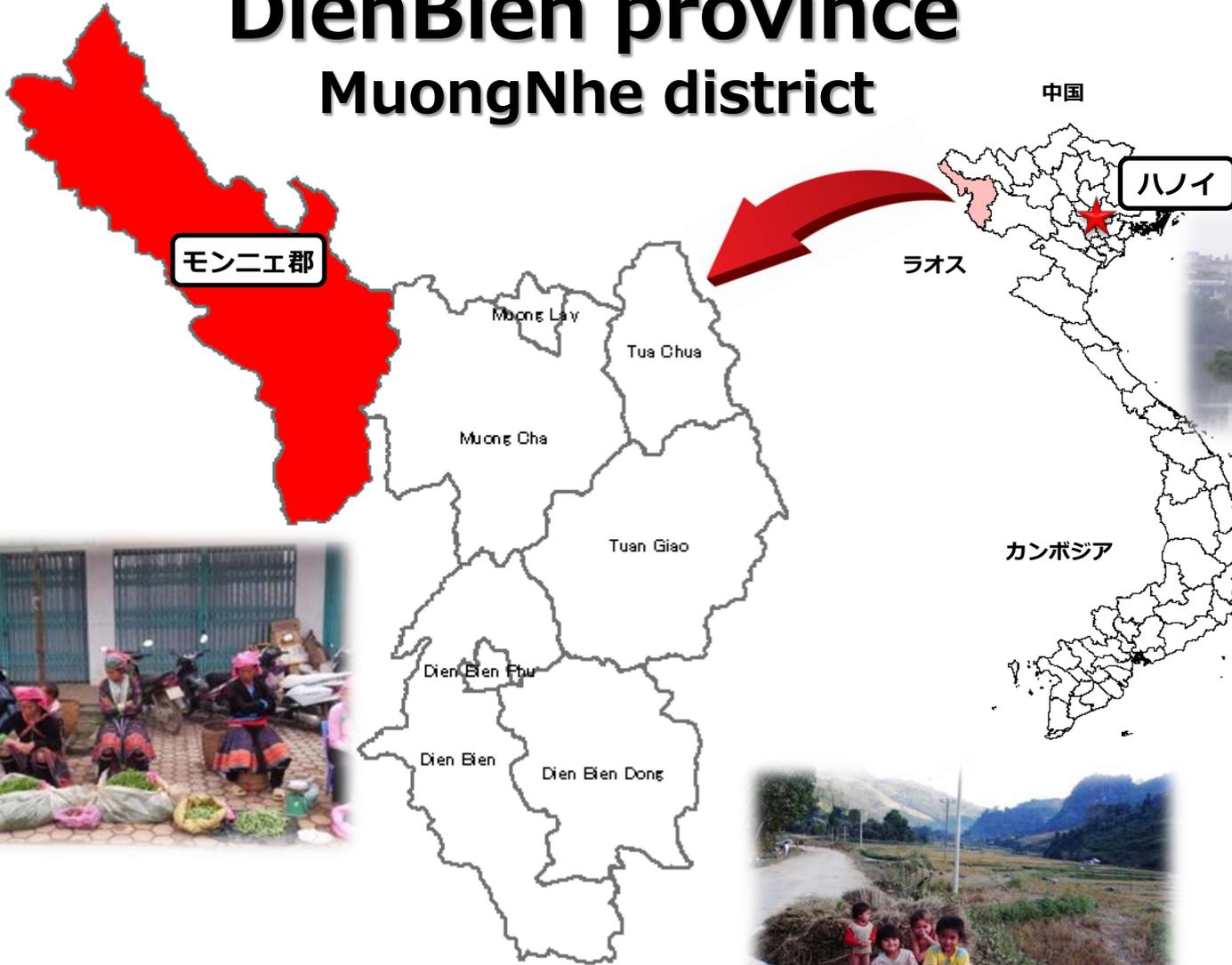
- アロメトリー式
- R-S ratio : 地下バイオマスを推定する係数
- 材積式 (表) : 樹種、人天、地域— 天然林は簡易な式のみ存在
- 容積密度 : 300種のリストあり
- バイオマス計算式の知見は、人工林では多いが、天然林では少ない

汎用式・汎用値
を使用 = Tier1

VN国では、国に特化したアロメトリー式が無く、森林炭素蓄積量の推定のために、より高いTierレベルで推定を行うための計算式や係数の開発が求められていた。このような背景の下、REDDプロジェクトの対象地域としたディエンビエン省の天然林に適したアロメトリー式の開発を行った。

Dien Bien province

Muong Nhe district



ディエンビエン省の概要

- 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%（うち約55%が森林計画上の保全林、約40%が生産林）。
- 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>



MuongNhe Nature Reserve (MNNR) の林相



林分の遠景



Rich forestの林内

- MNNRの総面積は169,962^{ha} (保護区内に耕作地も存在)。
- うち天然林の面積は82,200^{ha} (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 (100m³/^{ha}未満)、Medium forest (100~200m³/^{ha})、Rich forest (200m³/^{ha}以上)に分けられている。



Bamboo

森林バイオマス把握のための現地調査

a. 標準地調査（プロット調査）

- 現地の森林の優占樹種、直径階分布、立木密度などを把握。
- 標準地調査結果を基に破壊調査の供試木を選定。
 - ✓ 各直径階から満遍なく供試木を選定する。
 - ✓ 調査対象の森林のバイオマスに占める割合の高い樹種、出現頻度の高い樹種を供試木とする。

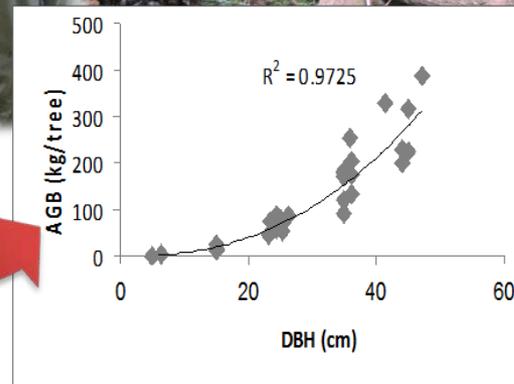
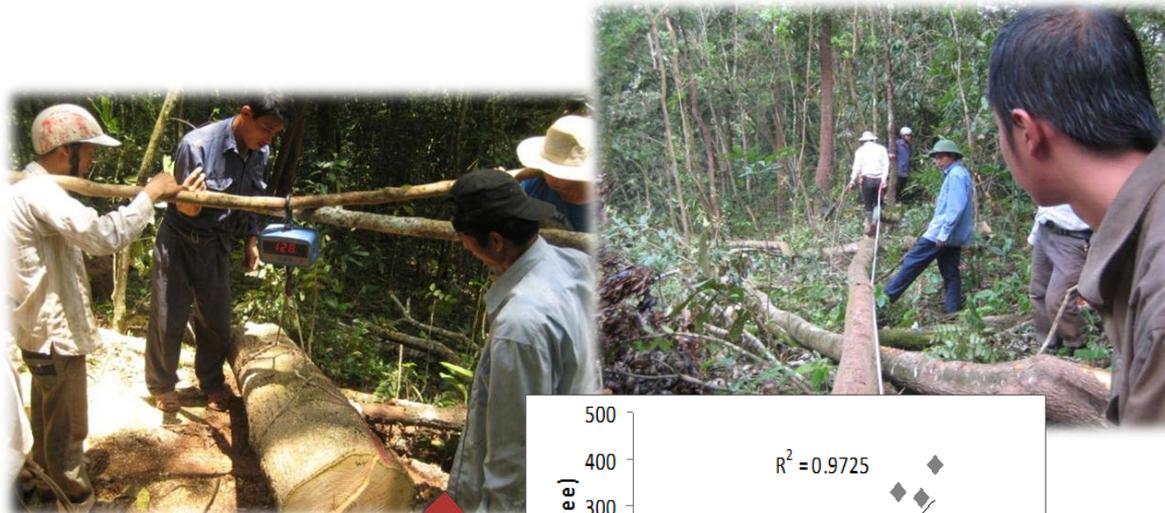
- プロット設定
 - ※ 方形、円形など適宜選択
- 樹種
- 胸高直径
- 樹高

Tree ID	Species	DBH	height
A491	Quercus sp	16.5	15.0
A00	□△sp	●●	▲▲
A800	Schima sp	31.2	28.5

※場合によっては、標準地調査が省略されることもある。

b. 破壊調査（伐倒調査）

- 供試木の生重量を計測。
- 乾燥試験を経て供試木の乾燥重量を推定。



アロメトリー式の開発

$$y = ax^b$$

標準地調査（プロット調査）の内容

プロットをMNNRの森林の90箇所に設置。

- 森林図上で候補地点を選点定し、現地の林相を確認して決定。
- プロットは、50m×50mの正方形。
- 胸高直径5cm以上の立木を対象。
- 樹種を同定。
- 胸高直径（地上高1.3mの部分の直径）を計測。
- 樹高を計測。



標準地調査



破壊調査（伐倒調査）の内容

標準地調査を行った林分で破壊調査を実施。

- 標準地調査結果に基づき、供試木とする樹種を決定。
 - 各胸高直径階から満遍なく供試木を選定。
 - 供試木の伐倒および抜根。
 - 各器官の生重量測定。
 - 各器官のサブサンプル採取。
- ※破壊調査では、重機の使用を前提としているが、MNNRの調査地では重機の使用が困難であった（林道等が未整備）。そのため、現地の住民を雇い、根の掘り出しなど重作業を行う必要があった。



根の掘り起こしと抜根

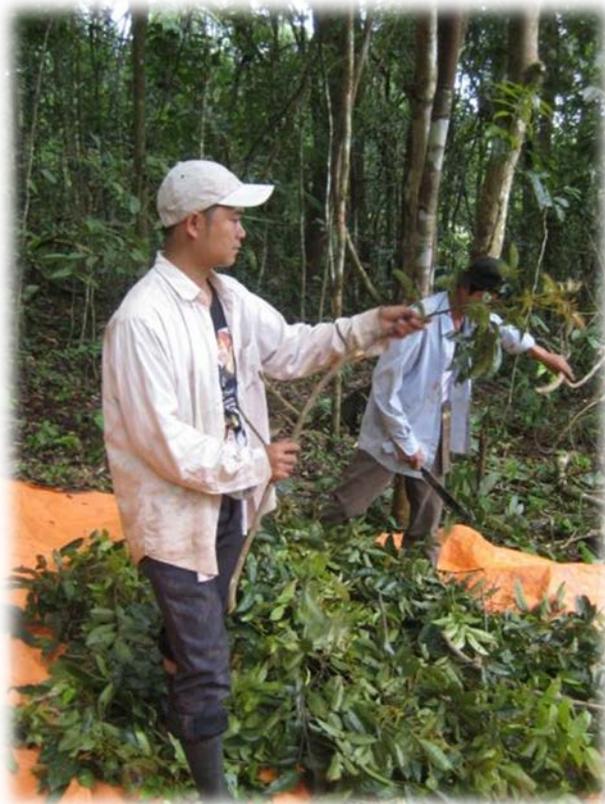


各器官の切断。写真は樹幹と根。



樹幹の生重量測定。

各器官の生重量測定



葉と枝の分別作業



枝、葉それぞれ生重量測定



各器官のサブサンプル採取



乾燥実験（ラボでの作業）

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

- ラボでサブサンプル生重量を再測定。
- 105℃で72～168時間乾燥。
- サブサンプルの乾燥重量を測定。



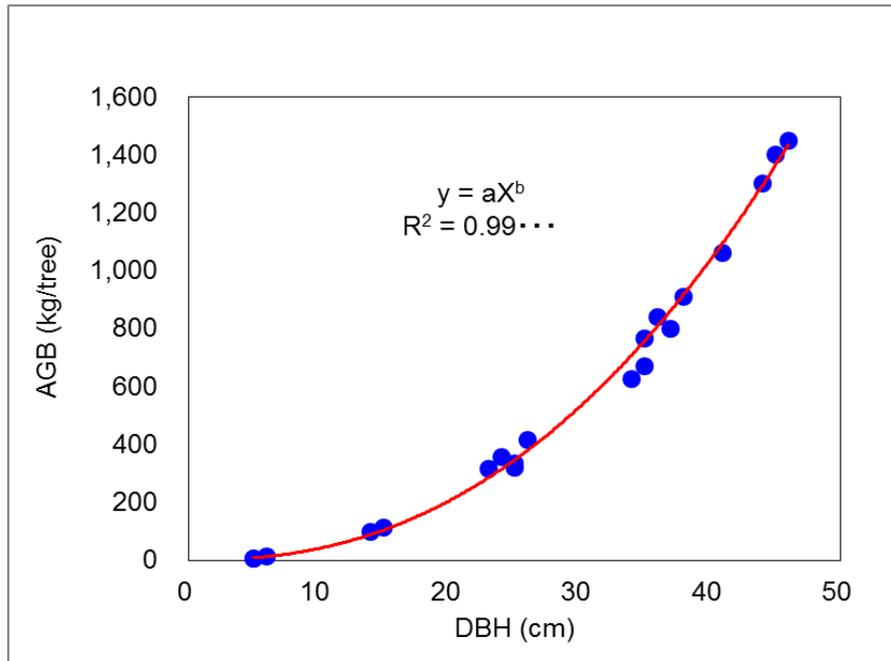
解析：供試木の全乾燥重量計算

➤ 全乾燥重量の計算 $TDW = TFW * \frac{SDW}{SFW}$

- ✓ TDW：各器官の全乾燥重量
- ✓ TFW：各器官の全生重量
- ✓ SDW：各器官のサブサンプル乾燥重量
- ✓ SFW：各器官のサブサンプル生重量

全乾燥重量 = バイオマス

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。

- ✓ x軸：胸高直径、y軸：地上部バイオマス
- ✓ DBH；胸高直径
- ✓ AGB；地上バイオマス

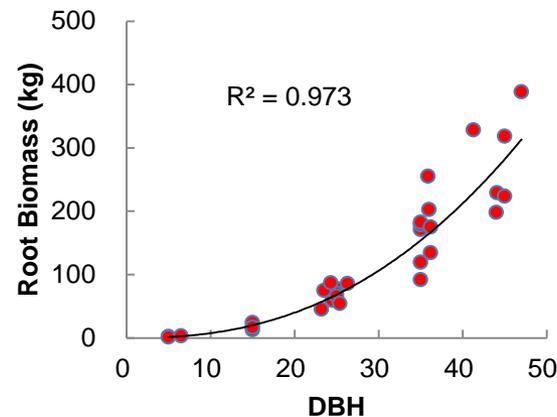
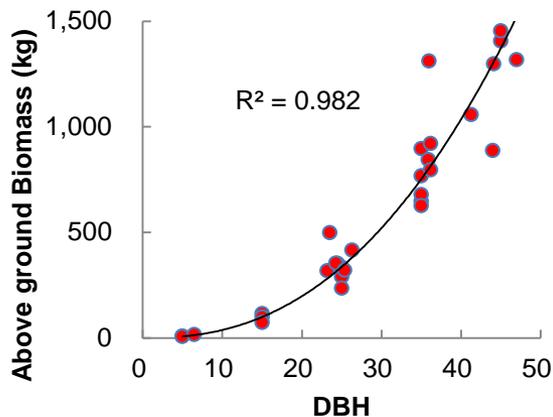
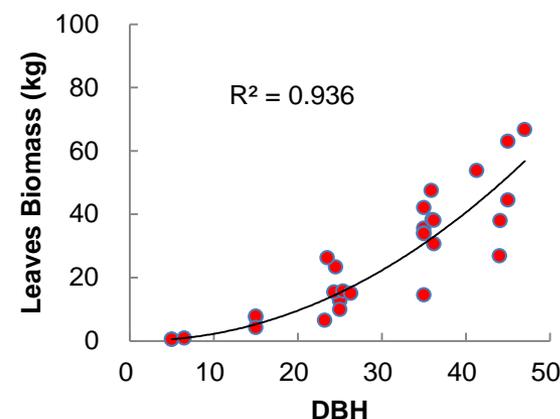
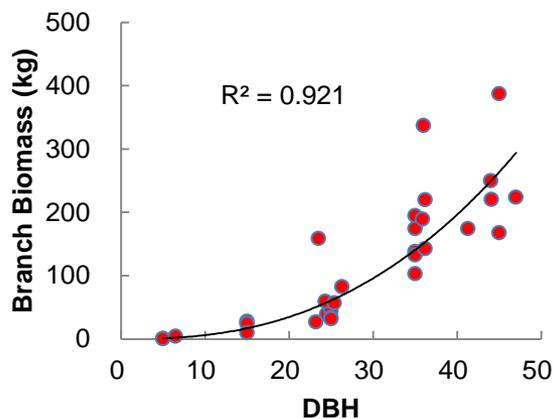
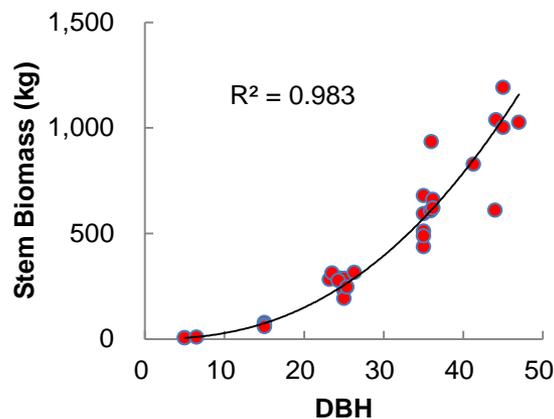
➤ 散布図の近似線の式 $y = a X^b$

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。

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
AOO	□△sp	●●
A800	Schima sp	31.2

立木ごとに
バイオマス
を計算

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
AOO	□△sp	●●	△×△
A800	Schima sp	31.2	524.7

プロットごとに合計し、
ha当たりのバイオマス
に換算

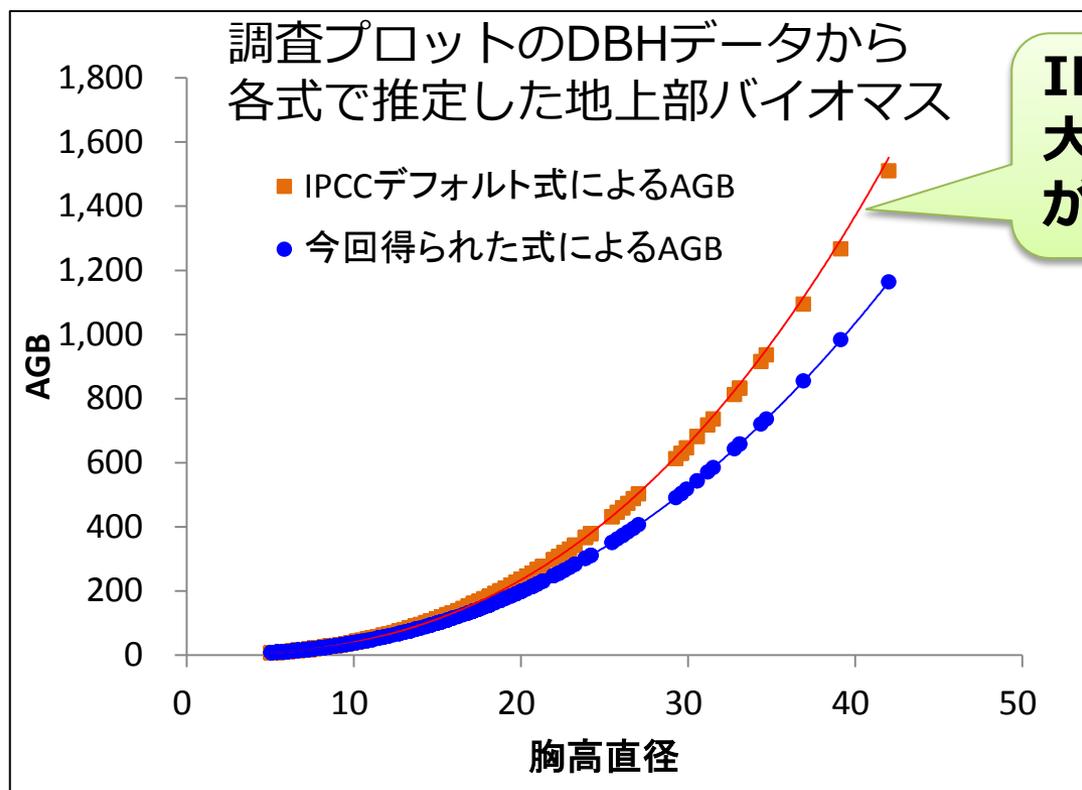
仮に0.1畝あたりのバイオマスが**5t**であった場合
ヘクタールあたりの地上部バイオマスは**"50t"**



炭素蓄積 = 50 x 0.5* = 25t/ha

*0.5は炭素係数 (Carbon Fraction ; CF)

IPCC汎用式とディエンビエンでのバイオマス調査によって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、大径木ほどバイオマスが過大推定される。

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部バイオマス、地下部バイオマスを計算・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集計例（90箇所の標準地のデータから計算）

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。

午後の演習

～ Excelを用いたバイオマスの計算 ～

- ① 実際^に供試木の生重量データやサブサンプルのデータから、単木のバイオマスを算出。
- ② 林分1^{ヘクタール}あたりの地上部および地下部のバイオマスを算出。
- ③ 炭素貯留量の算出。