



Waseda-Bridgestone Initiative for Development of Global Environment

W-BRIDGE モデル

地域住民の収益を考慮した荒廃地緑化モデル
—インドネシア・ロンボク島におけるケーススタディー

W-BRIDGE Model

Reforestation Model of Degraded Land
for benefits to local people in Lombok Island, Indonesia

2010



川口尊男¹⁾, 仲摩栄一郎²⁾, 大角泰夫²⁾, Tejouran³⁾, Baderun⁴⁾, Ibu Hartina⁵⁾, Ginting⁶⁾, 森川 靖¹⁾

1) 早稲田大学大学院人間科学研究科、2) (財)国際緑化推進センター、3) マタラム大学、4) 前西ヌサテンガラ州林業局局長、5) 西ヌサテンガラ州林業局局長、6) 元インドネシア林業研究開発庁上級研究員

Takao Kawaguchi¹⁾, Eiichiro Nakama²⁾, Yasuo Osumi²⁾, Sri Tejowulan³⁾, Baderun Zainal⁴⁾, Hartina⁵⁾, A. Ngaloken Gintings⁶⁾ and Yasushi Morikawa¹⁾

1) Graduate School of Human Sciences, Waseda University、2) Japan International Forestry Promotion & cooperation center、3) Mataram University、4) Former Head of Forestry Service in West Nusa Tenggara Province、5) Head of Forestry Service in West Nusa Tenggara Province、6) Former Senior Researcher in Forest Research and Development Agency in Indonesia

研究目的

本研究では、かつて森林でありながら厳しい環境条件と人為影響によって荒廃地化した土地における緑化の具体的な方策を提案することを目的とした。プロジェクトの期間を 30 年としてその期間における CO₂ 吸収量およびバイオマスベースでの森林生産物による地域住民の収入や利益、また森林生産物の収穫による土壌養分の収奪について評価を行なった。

さらに、土地利用別に CO₂ 吸収量、地域住民への利益、土壌養分の収奪について評価を行い、どのような緑化プロジェクトを行うことが荒廃地修復と地域住民の利益に望ましいのかを考察した。

調査対象地

調査は、インドネシア共和国 西ヌサテンガラ州 東ロンボク県 Sambelia 郡 Labuhan Pandan 村で行った (図 1)。

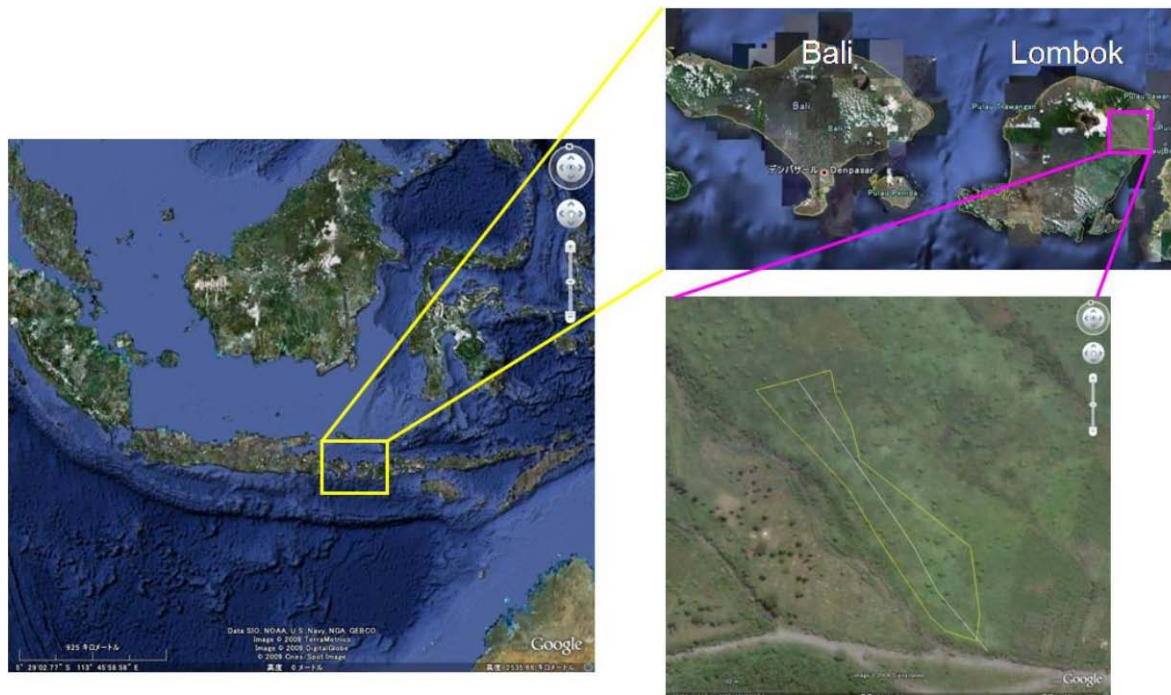


図 1、調査地の概要

* Google earth より作成

ロンボク島の北東部は、雨季と乾季が明瞭な半乾燥地域で年間降水量は 1000mm 前後である (表 1)。5 月～11 月が乾季に、12 月～4 月が雨季に該当する。

調査地域の Labuan Pandan 村は、面積 3897ha、人口 8402 人 (2007 年現在)、人口密度 2.2 人/ha の農村である (表 2)。東ロンボク県やロンボク島全体と比較すると人口密度が低く、西ヌサテンガラ州の人口密度と同じ程度である。こうした人口密度の低さは、土地生産性の低いことに起因しているものと思われる。

この地域は経済的に厳しく、2006年の平均年収は1,212,000Rpであった（国際緑化推進センター,2007）。また、西ヌサテンガラ州の人間開発指数（HDI：Human Development Index）は、インドネシア30州の中で30番目とかなり低い地域であった（BPS-Statics Indonesiaら,2004）。

調査地域の平均年収1,524,516Rpは微増しているが、西ヌサテンガラ州全体の貧困ラインの平均年収は1,570,404Rpであることから、依然として低い経済水準であり貧困下の住民が多い。

同地域は荒廃地化して草が広がっており、樹木として、*Zizyphus jujuba*（インドナツメ）や灌木が少数見られるような土地条件である（写真2）。また、パッチ状に頻りに火事の跡が見られる。乾季には、乾燥状態が続く中で住民の利用した火の延焼などによる火事が頻発している。過去に何度か植林が試みられたが、上述の厳しい環境条件や火事から成林していない。



写真2、調査地域の乾季と雨期（左：8月、右：2月）

表1、Sambelia 郡の降水量（mm）の推移

Year	Month												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1999	963	307	180	113	0	0	2	15	0	0	37	138	1755
2000	493	179	145	107	62	0	0	0	23	88	225	385	1707
2001	371	90	214	98	25	0	0	0	0	13	121	50	982
2002	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	35	70
2003	194	360	126	129	0	0	0	0	0	0	38	135	982
2004	207	237	321	37	39	0	0	0	0	0	14	252	1107
2005	140	213	187	204	0	0	84	35	20	18	17	191	1109
2006	658	181	257	370	21	0	0	0	0	0	0	121	1608
2007	128	348	277	147	21	61	0	0	0	0	11	39	1032
Total	3155	1917	1710	1244	173	67	93	58	52	129	474	1358	10352
Average	350	213	190	138	19	7	10	6	5	13	51	150	1150

表 2、調査地域の概要

administrative district	Total Area (ha)	Pupulation (people)	Density (people/ha)
Labuan Pandan village ^{*1}	3,897	8,402	2.2
Sambelia sub-district ^{*1}	24,522	30,829	1.3
East Lombok district ^{*1}	160,600	1,067,673	6.7
Lombok district Island ^{*2}	473,900	2,837,642	6.0
West Nusa Tenggara province ^{*3}	1,970,900	4,286,000	2.2
Indonesia ^{*3}	186,036,000	216,382,000	1.7

*1 : BPS-NTB (2008)

*2 : BPS-NTB (2004)

*3 : BPS (2006)

プロジェクトの概要

W-BRIDGE の一環として、持続可能な荒廃地利用を目的とした緑化の研究プロジェクトを早稲田大学環境生態学研究室と JIFPRO によって行っている。現地のカウンターパートは、西ヌサテンガラ州林業局とマタラム大学である。技術指導などの住民の能力開発は、現地の環境 NGO が行なっている (図 2)。

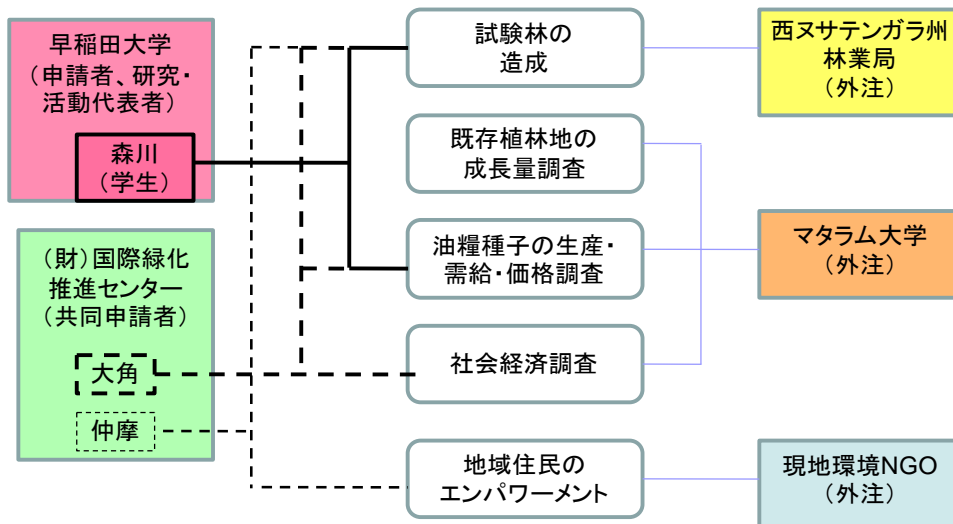


図 2、W-BRIDGE の実施体制

1. 植栽地

植栽地は、国有林地で土地利用区分は生産林地とされている。住民による土地利用はほ

とんど行なわれていないことから、他の地域で見られるような土地の所有権の問題はない。2008年12月～2009年1月にW-BRIDGEプロットして1.2haを設定し、植栽を行った。植栽樹種は、東西方向にラインを設定し、ラインに4樹種(*Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea*、*Jatropha curcas*、*Sesbania grandiflora*)、バウンダリー（プロットの周囲）に2樹種(*Spondias pinatta*、*Gliricidia sepium*)を植栽した。

①長期的にCO₂を吸収する長伐期樹木の植栽

- ・ *Swietenia macrophylla* : 100本/ha
- ・ *Gmelina arborea* : 80本/ha

②バイオ燃料の原料生産のための油糧樹木の植栽

- ・ *Jatropha curcas* : 2050本/ha

③燃材・飼料生産のための多目的樹種の植栽

- ・ *Sesbania grandiflora* : 720本/ha

④バウンダリーの設定、防火、fuel woodのための樹木の植栽

- ・ *Spondias pinatta*
- ・ *Gliricidia sepium*

2. 植栽ラインと植栽間隔

植栽は、*Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea*のラインと*Jatropha curcas*の3種類のラインを東西方向に設定して行った。植栽のイメージを図3、4に示す。

ライン間については、*Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea*のラインを10m間隔で交互に設定し、そのライン間に2m間隔で*Jatropha curcas*のラインを設定した。

各ラインにおける植栽間隔については、*Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea*のラインは、5m間隔に植栽し、その間に1m間隔に*Sesbania grandiflora*を植栽した。*Swietenia macrophylla*ラインでは1m間隔に*Swietenia macrophylla*1本・*Sesbania grandiflora*4本、*Gmelina arborea*のラインでは*Gmelina arborea*1本・*Sesbania grandiflora*4本という設定となった。*Jatropha curcas*のラインは、2m間隔に*Jatropha curcas*を植栽した。

調査方法

1. *Jatropha curcas*

試験地近傍の1×1m間隔で植栽されている*Jatropha curcas*の根元直径と樹高の調査を2008年8月13日、12月16日、2009年2月10日、8月9日の計4回行った。2009年2月以降の2回の調査では、樹冠の縦横幅の計測を行った。根元直径はノギス、樹高、縦横幅はメジャーを用いて計測した。

毎木調査と同じ場所で、20本の*Jatropha curcas*に対し2008年12月にマークを付けた。マークを付けた樹木の種子を採取し、2009年の4月および5月の収量を計測した。現地の収穫可能時期は、雨季の期間と一致する。そのため、収穫可能な期間は12月～翌年4月の

約 5 ヶ月である。計測した収量の値の一月あたりの平均値に 5 掛けして、年間の種子の収量を求めた。収量は、マークを付けた 20 本の収量の平均値を単木当たりの収量とした。本数比から ha 当たりの収量とした。

予測については、樹木成長と収量の増加に関連があると仮定し、計測した 20 本の合計の収量と胸高断面積合計から収量を予測した。

伐倒調査を行った。調査は、2009 年 8 月 10 日に行った。試料木は、植栽から 2 年後の樹木について根元直径の大きさが小から大となるように 6 本選択し、根から掘り起こした。付着した土を丁寧に取り除き、地上高 0m 部分を切断し、地上部と地下部（根部）に分けた。

地上部、根部それぞれの生重量をバネ秤で計測した。地上部バイオマスは、幹と枝を対象とした。枝別れが多いため、幹と枝は区別せずに合わせて地上部バイオマスとした。葉は、乾季に乾燥適応のために落とすことから対象から除外した。

バネ秤で計測後、地上部、根部についてそれぞれサンプリングを行い、サンプルの生重量を計測し、持ち帰った。持ち帰ったサンプルを通風乾燥機に入れ、乾燥重量を計測した。

手動搾油機で *Jatropha curcas* の乾燥種子を搾油し、種子のオイルの含有量を調査した。搾油は、小型手動搾油機（サン精機社）を用いて、squeeze method（圧搾法）で 9 回行った。

1) 種子の成分分析

（独）森林総合研究所で *Jatropha curcas* の乾燥種子と搾油した油の搾りかすについて、炭素（C）量と窒素（N）量を調査した。分析は、Elementar Analysensysteme GmbH（ドイツ、エレメンター社）の vario MAX CN を用いて dry combustion method（乾式燃焼法）で繰り返し行った。

その窒素量のデータをもとに、リン（P）とカリウム（K）について予測した。*Jatropha curcas* の種子における養分含有量は、その植栽地域や研究事例などによってパラメータが大きく異なるが、N、P、K の成分比は、ある程度一定であることから本研究でも一定であるとした。すなわち、Kumar. and Sharma(2008)や Openshaw(2000)の研究事例を踏まえ、*Jatropha curcas* の種子の N、P、K の比をそれぞれ 4 : 2 : 1 とし、P と K の量を算出した。

2. 植栽樹種の調査

Biomass

Jatropha curcas 以外の樹種については植栽後間もないことから、十分な実測データを取れなかった。そのため、熱帯樹木の先行研究を基に、植栽樹種のバイオマスと N、P、K の含有率を算出した。

1) 植栽樹種のバイオマス

Swietenia macrophylla、*Gmelina arborea* は、これまでの人工林で行なった調査結果

から、成長予測を行った（図 5）。予測される胸高直径を Morikawa（2007）の相対成長式に代入し、バイオマスを推定した。

Sesbania grandiglora は、Jama ら（1989）の 6 年生の *Sesbania grandiglora* の直径データを元に Morikawa（2007）の相対成長式に代入して、バイオマスを推定した。

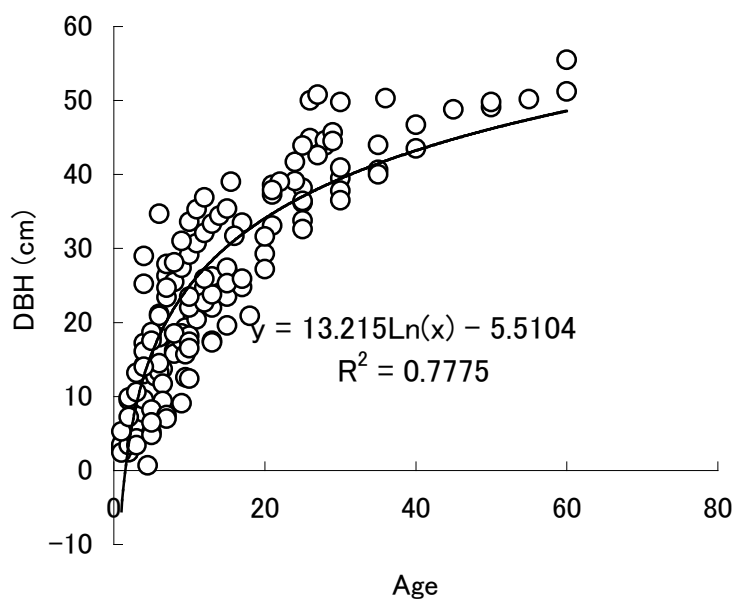
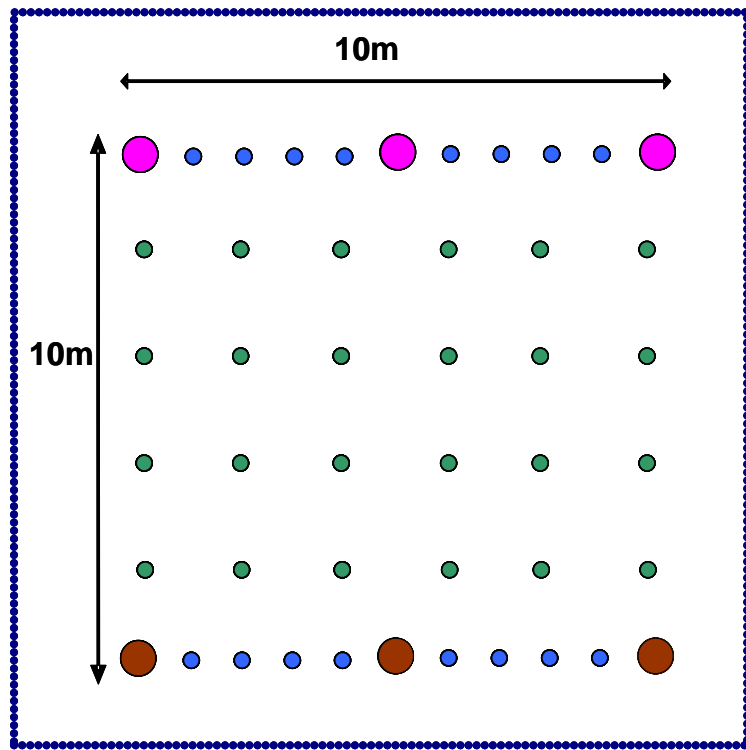


図 5、熱帯の人工林の樹齢と胸高直径の相対成長式

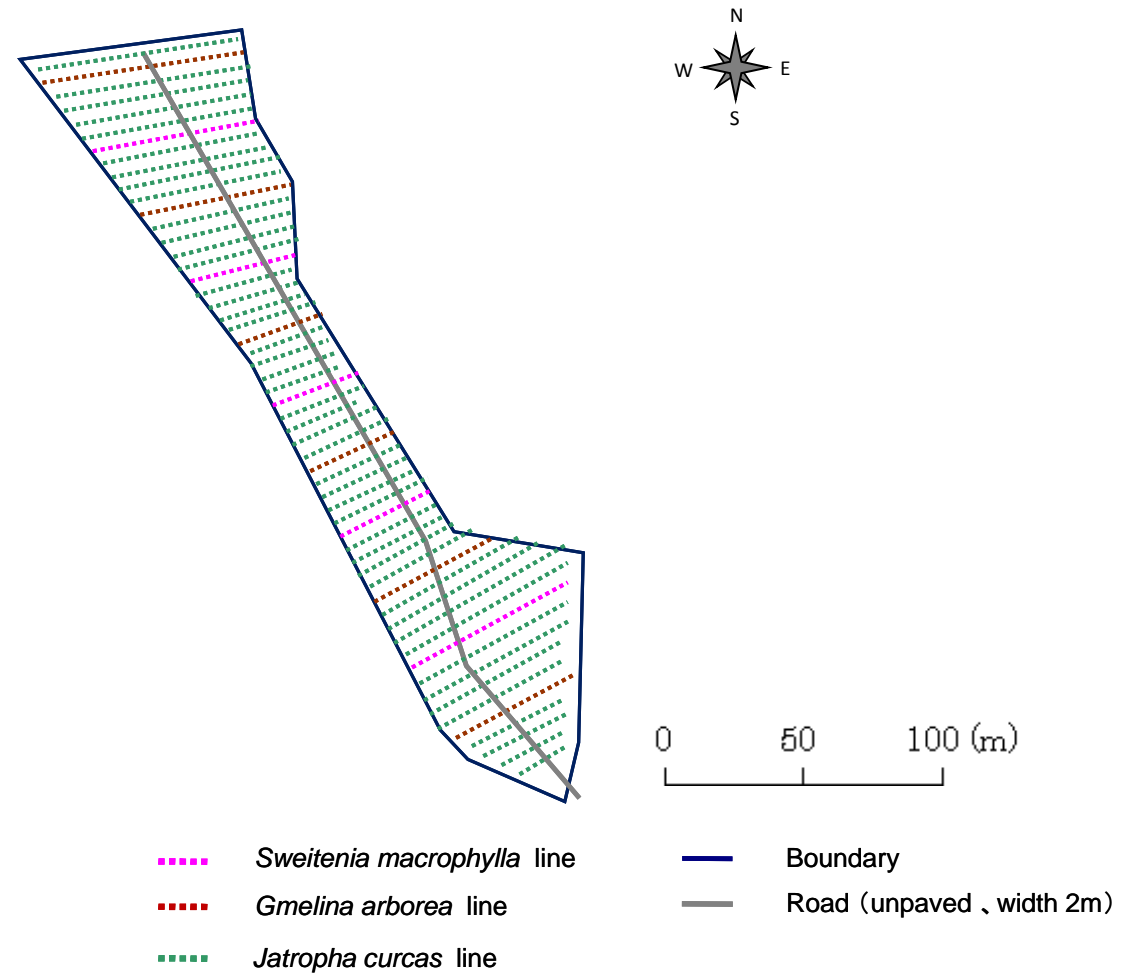
2) 植栽樹種の養分含有量

算出したバイオマスデータと Yamada ら（2004）の *Acacia mangium* の葉を除く地上部バイオマスの N、P、K の含有濃度を基に植栽樹種の地上部バイオマスの養分量を推定した。



- *Swietenia macrophylla*
- *Jatropha curcas*
- *Gmelina arborea*
- *Sesbania grandiflora*
- Boundary

図 3、植栽のイメージ (10×10m プロットの場合)



- ⋯ *Swietenia macrophylla* line
- ⋯ *Gmelina arborea* line
- ⋯ *Jatropha curcas* line
- Boundary
- Road (unpaved, width 2m)

図 4、プロジェクトサイトのライン設定

3. 予測評価

プロジェクト対象地において、植栽から 30 年間における *Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea*、*Jatropha curcas*、*Sesbania grandiglora* を吸収源としての CO₂ 吸収量を推定した。それぞれ、先に算出した単木当たりのバイオマスに ha 当たりの植栽本数をかけて算出した。その値を炭素量に変換し、さらに CO₂ に変換して算出した。炭素量の割合は、バイオマス量の 0.5 とし、CO₂ は分子量から炭素に 44/12 をかけて算出した。

また、fuel wood として利用される *Sesbania grandiglora*、*Jatropha curcas* の材は、fuel wood の、*Jatropha curcas* の種子は、石油代替としての CO₂ 排出削減量としてカウントした。*Sesbania grandiglora*、*Jatropha curcas* の材は地上部バイオマス量を CO₂ 削減量とした。

Jatropha curcas の CO₂ 排出削減量は、搾油したオイルを石油の代替として燃焼させた場合の排出量から推定した。計算式を以下に示す。①式で搾油したオイル量を算出し、②式でオイル量から発熱量を算出し、③式で石油（ケロシン）代替した CO₂ 排出量、すなわち排出削減量を算出した。

$$V_{oil} = W_h \times S \times P_C \dots \textcircled{1}$$

$$EV_J = V_{oil} \times EV_0 \dots \textcircled{2}$$

$$E_{CO_2} = EV_J \times CEF_{fuel} \dots \textcircled{3}$$

V_{oil} : 搾油したオイル量 (kl /ha /30year)

W_h : 種子収穫量 (t /ha /30year)

S : オイルの搾油率 (kg/kg)

P_C : 容量 (ℓ) / 重量 (kg)

EV_J : オイルの発熱量 (GJ /ha /30year)

EV_0 : オイルの発熱係数 (MJ/kg)

E_{CO_2} : 代替した石油量の CO₂ 排出量

CEF_{fuel} : ケロシンの排出係数 (kgCO₂/MJ)

2) 森林生産物の便益

① *Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea* は、バイオマスの値をベースに材積を算出し、材積から木材として利用可能な材積を算出して木材とした場合の価格を算出した。

Swietenia macrophylla の材積は、森川 (2004) の、*Gmelina arborea* の材積は、国際緑化推進センター (1996) の結果に基づいて算出した (④式)。材積に対する木材としての利用可能な材積の割合については、現地の西ヌサテンガラ州林業局の担当者から 45.5% とした (⑤式)。

$$V_a = B_{AGB} \times V_0 \dots \textcircled{4}$$

$$V_T = V_a \times 0.455 \dots \textcircled{5}$$

$$I_{Rp} = V_T \times PL \quad \dots \textcircled{6}$$

V_a : 材積 (m³/ha)

B_{AGB} : 地上部バイオマス量 (t / ha)

P_v : 材積 / 地上部バイオマス量 (m³/t)

V_T : 木材利用可能な材積 (m³/ha)

I_{Rp} : 木材からの収入

PL : 木材の原単位価格 (Rp / m³)

Jatropa curcas の種子は、搾油した場合ではなく種子のまま取引した場合について算出した。*Sesbania grandiglora* は、現地で伐採可能なサイズにおいて概算価格の本数単位で取引されている。6年で取引可能なサイズに成長すると想定し、樹木の1本当たりの価格で算出した。*Jatropa curcas* の幹は、現在市場において取引はされていないため、経済的な収入としての換算は行わなかった。しかし、fuel wood としては利用できるという記述 (Openshaw,2000) も見られることから、住民が利用できる fuel wood として考慮した。

3) 土壌への影響

Gmelina arborea、*Sesbania grandiglora* の材と *Jatropa curcas* の種子を外に持ち出した場合の土壌養分の収奪量を算出した。*Jatropa curcas* は、成分分析の結果の原単位の値に予測した収量を掛けて算出した。

Jatropa curcas の樹木部分は、切断した枝を補植用や新規植栽用に挿し木と利用する場合もあり、正確なアウトプットを算出することが難しいことから対象から除外した。また、*Spondias pinatta*、*Gliricidia sepium* はベースとなるバイオマス量を推定できないため、対象から除外した。

対象地に持ち込まれる養分は、降雨による養分の供給をインプットとした。降雨については、過去の降雨の成分分析の結果 (国際緑化推進センター,1995) と同地域の降水量 (表1) の平均より算出した。

同地域において土壌流入や地下水脈による土壌養分の供給については、想定される可能性が低いことから考慮しなかった。

4. 土地利用別の予測評価

伐期、植栽樹種の異なる土地利用において予測を行なった。長伐期のものを植林モデル、短伐期のものをプランテーションモデルと定義した。各モデルについて、2パターンを想定し、それぞれ W-BRIDGE、生産林（Productive forest）、薪炭林（Coppice forest）、Jatropha プランテーション（Jatropha plantation）とした。

1) 植林モデル

Forestation model

- ・ W-BRIDGE
- ・ 生産林（Productive forest）

プランテーションモデル

Plantation model

- ・ 薪炭林（Coppice forest）
- ・ Jatropha プランテーション（Jatropha plantation）

各土地利用における植栽樹種は、いずれも W-BRIDGE において植栽されている樹種に該当する。ha の当たりの植栽本数・密度を各々の土地利用ごとに換算し、該当する樹種についてIV-3 と同様の計算方法で CO₂ 吸収量・削減量、森林生産物の便益、土壌養分の収奪について算出した。

結果・考察

1. *Jatropha curcas* の調査

Jatropha curcas の毎木調査の結果を表 3 に示す。植栽から 1~2 年の *Jatropha curcas* の根元直径の平均成長量は、2.04cm/year となった (表 4)。

直径と樹高の相対成長関係では、2008 年 8 月の調査では相関係数が 0.71 あったものが、その後の調査では低くなっており、1 年後の 2009 年 8 月の調査では 0.37 となっている

(図 6)。これは、*Jatropha curcas* の幹が枝分れし、真っ直ぐ縦に成長しない個体が出てきたためと思われる。成長の傾向の異なる個体が増加したことが、相関の低くなった要因と考えられる。

次に、2009 年 8 月に現地で行った現地での抜倒調査の結果を表 5 に示す。試料木 6 本における根元直径と全バイオマスの相対式成長式では、0.95 と非常に高い相関を示した (図 7)。根元直径に対して、地上部、根部のバイオマスについても 0.91、0.94 と高い相関を示した (図 8、9)。根元直径と樹高に高い相関関係が見られなかったのに対して、根元直径とバイオマスについては高い相関関係が見られた。

また、*Jatropha curcas* の含水率は、地上部、根部ともにおよそ 295%であった (表 6)。2008 年 8 月に同地域で早生樹種を対象に行ったバイオマス調査では、対象樹種の試料木の乾燥重量に対する含水率が約 73~122%であった (表 7)。この結果から、*Jatropha curcas* は、他の樹木よりも樹木内の含水率が高いといえる (表 6)。

。調査時期である 8 月は、乾季の中でも最も乾燥のすすむ月であり、降水量の状況 (表 1) から分かるようにほとんど降雨がない。土壌から水分を多く取り込むことが困難な条件であることから、水分を内部に貯留することに優れていると考えられる。また、乾季に葉を落とすことから、蒸散を抑制させていると考えられる。このような点から乾燥への適応能力が高いと考えられる。

表 3、*Jatropha curcas* の毎木調査結果

Species	<i>Jatropha curcas</i>			
	Aug-08	Dec-08	Feb-09	Aug-09
Date				
Number of trees	80	63	63	63
Diameter(cm)				
Max	6.4	7	8.3	9.1
Min	2.2	3.2	4	4.1
Average	4.3	4.8	5.9	6.4
Height(cm)				
Max	165	197	206	215
Min	42	54	90	100
Average	111	135	160.0	170
Crown Width(cm)				
Max			168	125
Min			63	13.5
Average			105	59.3

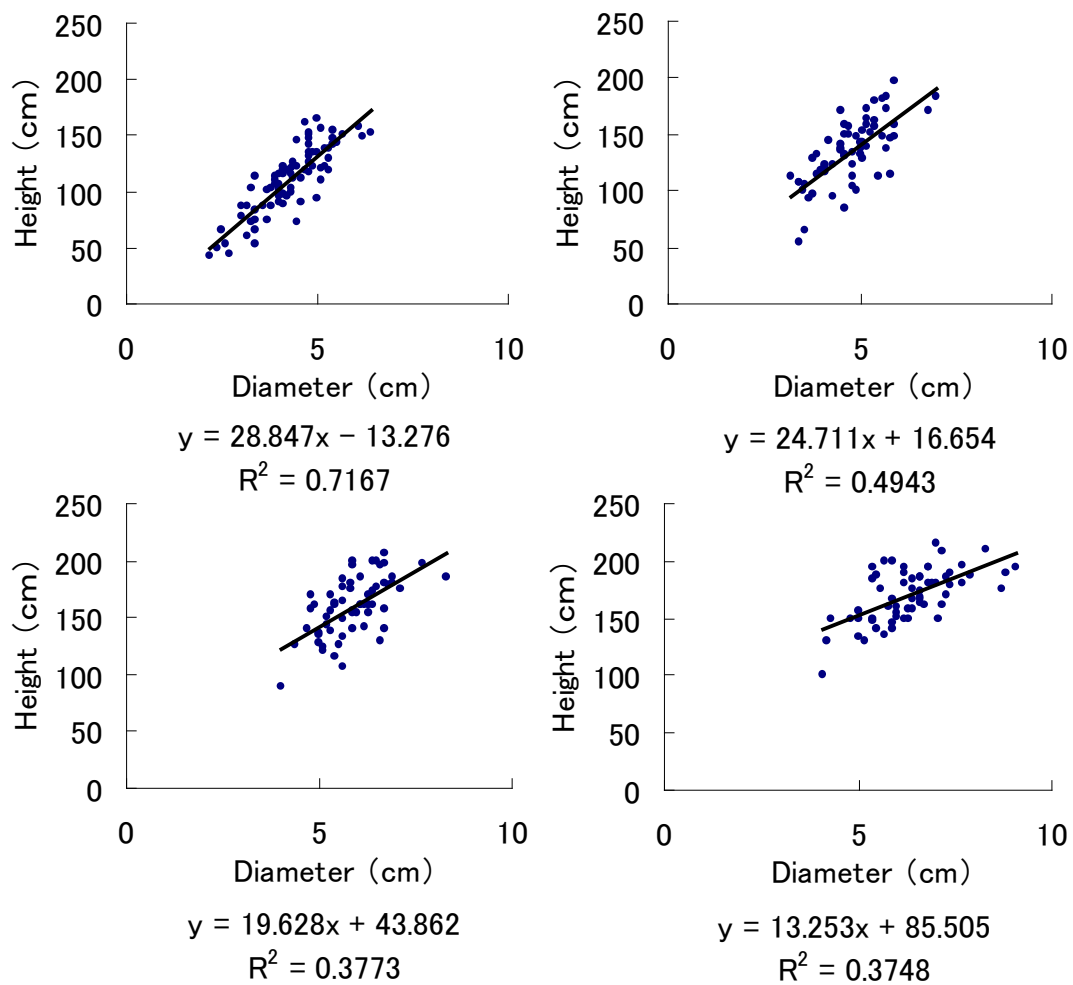


図 6、*Jatropha curcas* の根元直径と樹高の相対成長

(左上：2008年8月、右上：2009年12月、左下：2009年2月、右下：2009年8月)

表 4、植栽1年後から2年後の年間成長

Amount of growth	Aug-08 to Aug-09
Diameter (cm/year)	2.04
Height (cm/year)	58.7

表 5、防火帯の伐倒試料木の詳細

Species	<i>Jatropha curcas</i>					
Sample No,	1	2	3	4	5	6
Age(year)	2	2	2	2	2	2
Diameter(cm)	8.6	7.5	7.1	6.4	5.9	4.6
Height(cm)	290	195	200	175	144	113
Crown Width 1(cm)	93	80	65	55	40	40
Crown Width 2(cm)	69	55	80	55	30	30
Dry mass(kg)						
Above ground	2.20	0.85	0.95	1.00	0.42	0.18
Root	0.65	0.58	0.57	0.34	0.22	0.09
Total	2.85	1.44	1.52	1.34	0.64	0.27

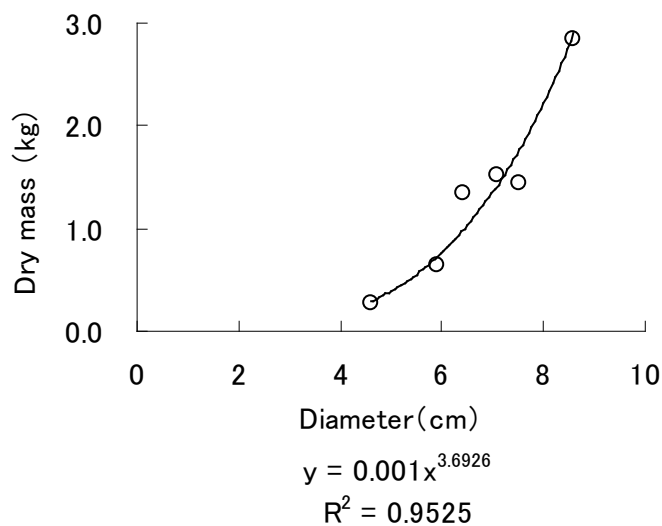


図 7、*Jatropha curcas* の根元直径と全バイオマスの相対成長

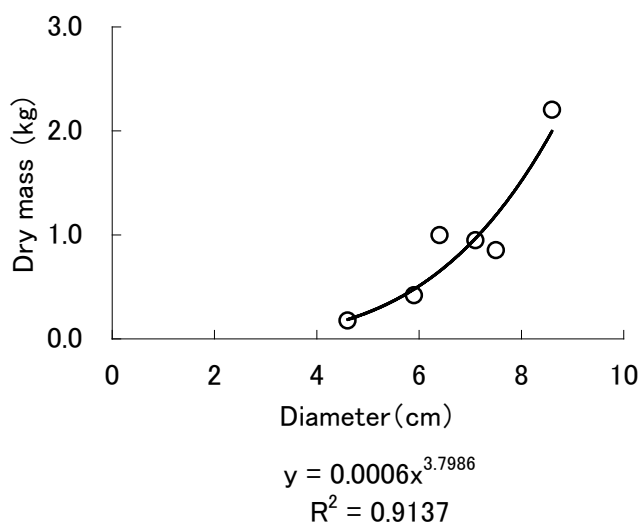
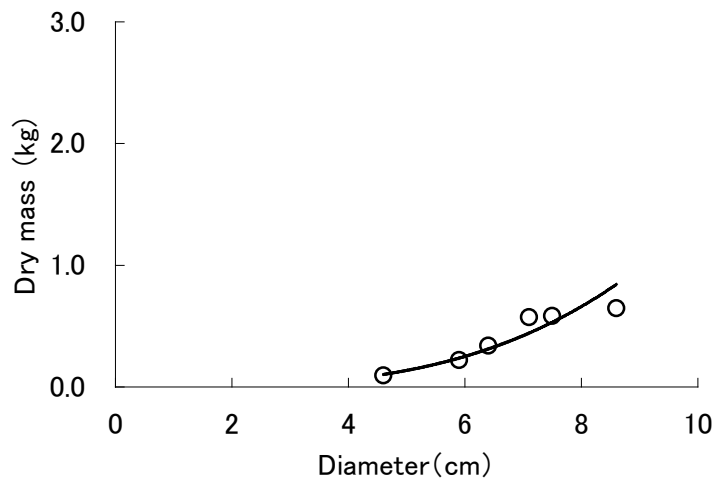


図 8、*Jatropha curcas* の根元直径と地上部バイオマスの相対成長



$$y = 0.0006x^{3.3623}$$

$$R^2 = 0.9413$$

図 9、*Jatropa curcas* の根元直径と地下部（根部）バイオマスの相対成長

表 6、伐倒試料木のサンプルの生重量、乾燥重量および含水量

	Fresh mass (g)	Dry mass (g)	Water content (g)	Water content (%)
Above ground	502	127.1	374.9	295.0
Root	537	135.5	401.5	296.3
Total	1039	262.6	776.4	295.7

表 7、Sambelia 郡に自生する早生樹種の含水量

Species	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i>	<i>Samanea samman</i>	<i>Azadirachta indica</i>
Water content (%)				
Above ground	122.0	112.6	73.3	78.9
Root	104.6	126.1	72.5	80.8
Total	117.0	116.6	73.1	79.5

* 国際緑化推進センター（2009）より作成

2. 搾油量の調査

乾燥種子に含有する油は、種子のサンプルで搾油を 9 回行い、投入量 1080g に対して重量で 314g、容量で 252ml であった。搾油結果の詳細については、表 9 に示す。乾燥種子 1kg 当たりに対して油は、重量で 0.29kg、容量で 0.23l であった。

表 9、*Jatropha curcas* の種子サンプルの搾油結果

Sample(g)	Marc (g)	Oil		Oil / Sample		
		Weight (g)	Volume (ml)	Weight (g/g)	Volume (ml/g)	
1	120	91.5	28.5	23	0.24	0.19
2	120	82.2	37.8	30	0.31	0.25
3	120	82.8	37.2	30	0.31	0.25
4	120	85.8	34.2	27	0.28	0.23
5	120	82.1	37.9	30	0.32	0.25
6	120	76.9	43.1	35	0.36	0.29
7	120	82.1	37.9	30	0.32	0.25
8	120	86.8	33.2	27	0.28	0.22
9	120	95.7	24.3	20	0.20	0.17
Total	1080	765.8	314.2	252	0.29	0.23

3. 種子の成分分析

Jatropha curcas の種子の C と N の成分分析において、種子では炭素濃度が約 57%、窒素濃度が約 2.2% という結果となった (表 10)。種子に対して搾油した搾りかすは、炭素の割合が減少し、窒素の割合が増加した。炭素が搾油した油分の骨格となるため、搾りかすでは減少し、窒素が増加したと考えられる。

N : P : K が 4 : 2 : 1 であること (Kumar and Sharma, 2008. Openshaw, 2000) から、窒素濃度に対する比から対象地で収穫される *Jatropha curcas* の乾燥種子に含まれる P と K の割合は本研究ではそれぞれ、P が 1.1%、K が 0.55% とした。

表 10、*Jatropha curcas* 種子サンプルの CN 分析

	Weight(mg)	C (%)	N (%)
Sanmple 1			
Seed	293	57.2	2.2
Marc	240.3	51.3	2.8
Sample 2			
Seed	259.8	57.2	2.2
Marc	229.4	51.1	2.8

4. *Jatropha curcas* のバイオマス、種子の収量の推定

2年生の *Jatropha curcas* の種子の年間の収量は、0.48t/ha であった。植栽から10年間における収量の予測値は、一般的に植栽から5、6年で収量が最大となることから5年後を最大としてそれ以後の収量は一定とした。

Jatropha curcas の種子の収量の予測を表11に示す。予測される収量の最大値は、1本当たり平均で0.9kgとなった。これを一般的に植栽されている2500本/haとすると、2.3t/haとなる。インドの事例では、植栽から6年後の年間の収量は5.3t/ha/yearで、マリの垣根利用の事例では、垣1m当たりの収量が0.8~1.0kgで、2.5~3.5t/ha/yearである(Openshaw 2000)。これらと比較すると収量は少ない。対象地が乾季の乾燥が激しいことや貧栄養土壌であること、灌水や施肥を行っていないことが主な要因と考えられる。10年間での収量の累計量の予測値は、単木で6.8kgとなった。

表 11、*Jatropha curcas* の成長および収量の予測

Age	Diameter (cm)	Basal area (cm ²)	Above ground biomass (kg)	Harvest (kg)
1	4.3	14.6	0.2	0.1
2	6.4	31.7	0.7	0.2
3	8.4	55.3	1.9	0.4
4	10.4	85.4	4.4	0.6
5	12.5	122.1	8.7	0.9
6	12.5	122.1	8.7	0.9
7	12.5	122.1	8.7	0.9
8	12.5	122.1	8.7	0.9
9	12.5	122.1	8.7	0.9
10	12.5	122.1	8.7	0.9
Total				6.8

Swietenia macrophylla、*Gmelina arborea*、*Sesbania grandiflora* の胸高直径とバイオマスの予測はそれぞれ図10、11に、植栽樹種の地上部バイオマスに対する養分量を表12に示す。PNGとインドネシアの *Acacia Mangium* のデータをまとめると、バイオマス1tに対してのNPKは、それぞれN: 2.22 (kg/t)、P: 0.19 (kg/t)、K: 1.25 (kg/t) となった(Yamadaら,2004)。

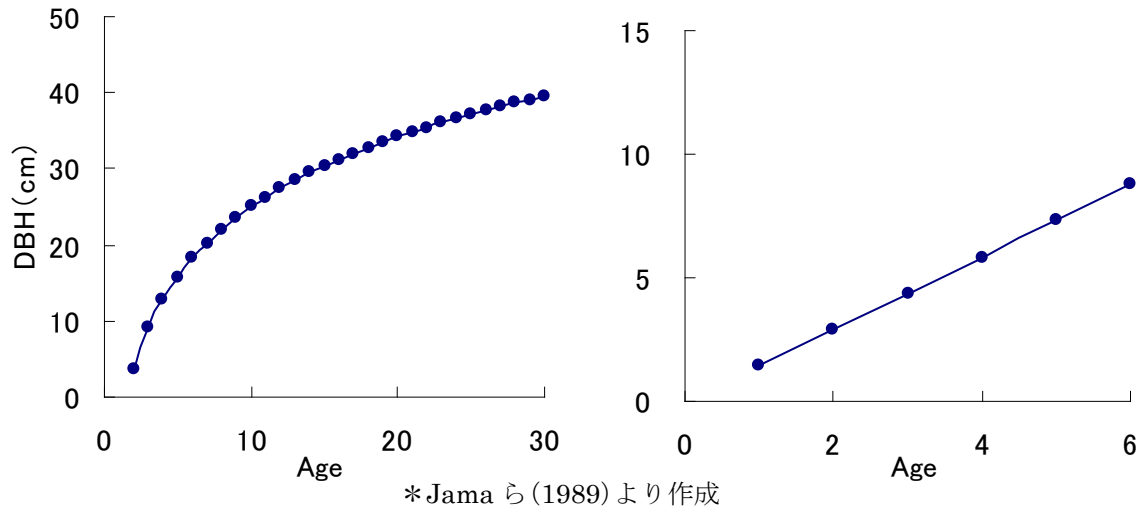


図 10、胸高直径の成長予測

(左 : *Swietenia macrophylla*・*Gmelina arborea*、右 : *Sesbania grandiflora**)

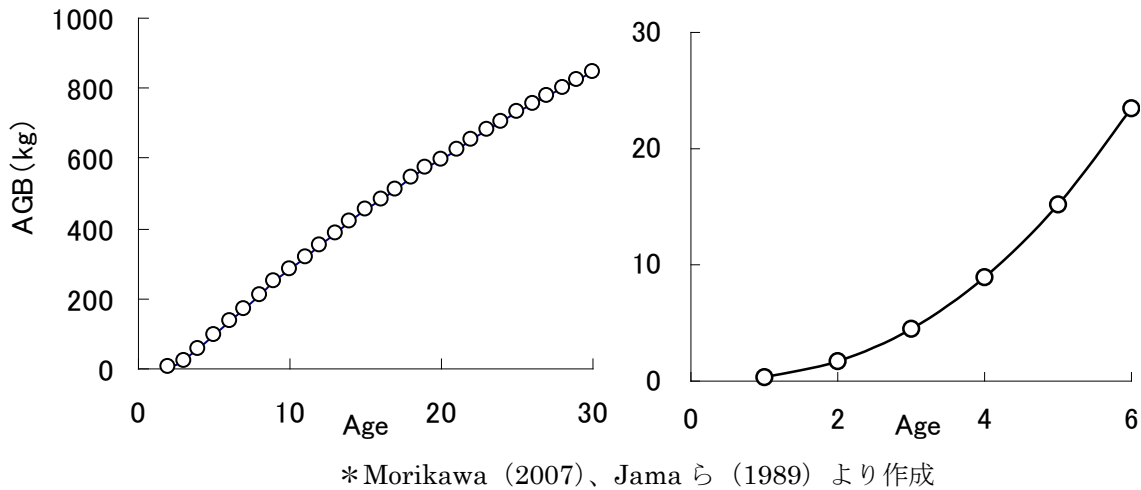


図 11、地上部バイオマスの推定

(左 : *Swietenia macrophylla*・*Gmelina arborea*、右 : *Sesbania grandiflora*)

表 12、植栽樹種のバイオマスに対する養分量

Species	<i>Acacia mangium</i>			
	PNG	Indonesia	Indonesia	Average
N /Dry mass (kg/t)	2.52	2.39	1.76	2.22
P /Dry mass (kg/t)	0.13	0.05	0.37	0.19
K /Dry mass (kg/t)	1.48	1.76	0.51	1.25

*Yamada ら (2004) より作成

V-3. W-BRIDGE の予測評価

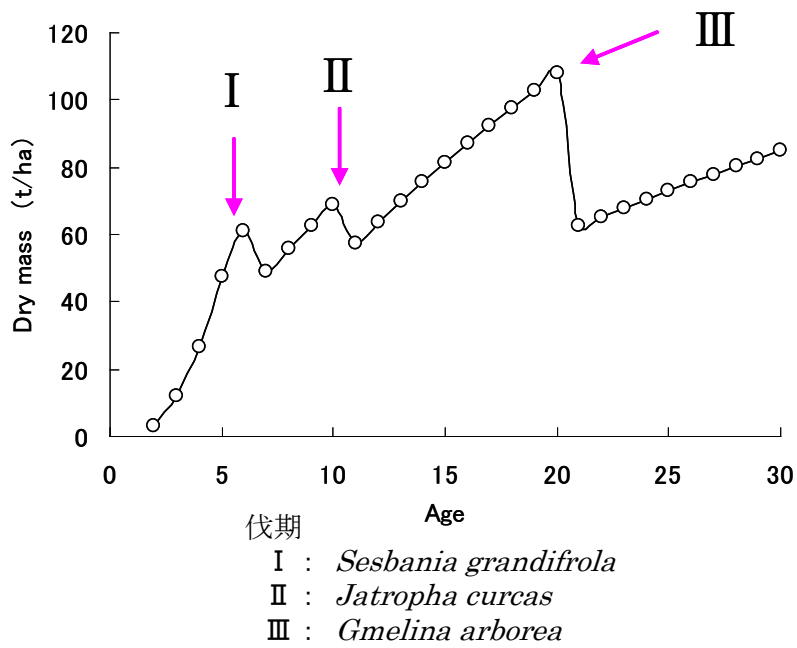
本項では、*Jatropha curcas*、*Swietenia macrophylla*、*Gmelina arborea*、*Sesbania grandiflora* におけるそれぞれの結果から W-BRIDGE のライン設定や植栽間隔、設定した伐期の伐採を想定し、30年スパンでの将来予測を行なった。伐期は、*Sesbania grandiflora* を6年、*Jatropha curcas* を10年、*Gmelina arborea* を20年、*Swietenia macrophylla* を30年で設定した。植栽樹種の相対成長式は、Morikawa(2007)の式を採用した。Morikawa (2007) の式と Brawn(1989)の式で算出を行なったが、Brawn (1989) の式は、天然林のデータであることや地上部バイオマスの初期成長の値がマイナスになるため、対象から外した。

1. 地上部バイオマス量の予測

植栽から30年間における調査地のha当たりの地上部バイオマス量の予測を図12に示す。バイオマス量は、それぞれ植栽から6年で *Sesbania Grandiflora*、10年で *Jatropha curcus*、20年で *Gmelina arborea* の伐採を行うため、その翌年の地上部バイオマス量はそれぞれ減少している。植栽から30年時点での地上部バイオマス量は、約85t/haとなった。

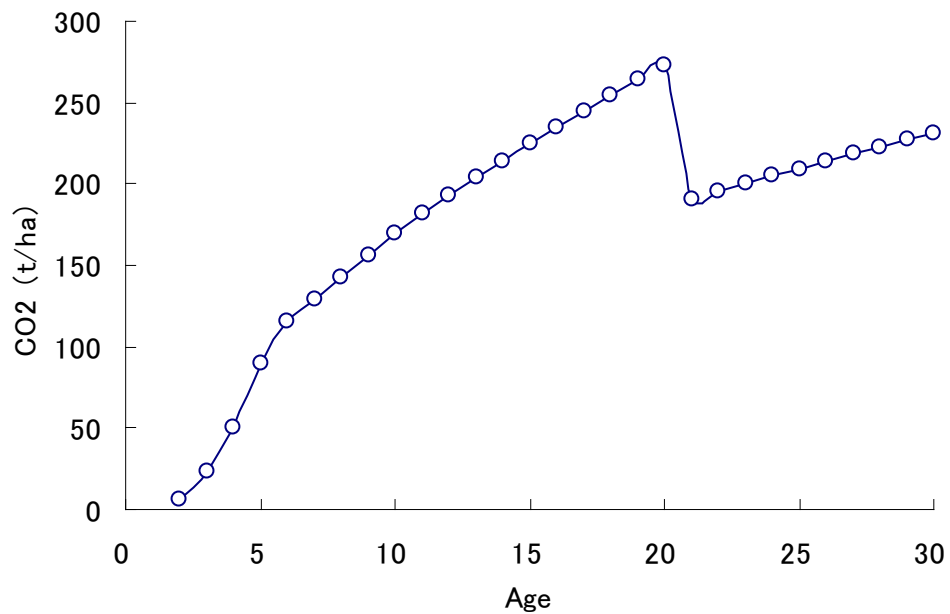
2. CO₂削減量の予測

植栽から30年間における調査地のha当たりのCO₂削減量の予測を図13に示す。植栽から30年後の地上部バイオマス量は84.8 t/haで、CO₂に換算すると155.5 t/haがCO₂の吸収量と予測される。加えて、*Sesbania grandiflora* と *Jatropha curcas* の幹を fuel wood として、*Jatropha curcas* の種子から搾油したオイルを石油代替として利用すると75.8 t/haの削減効果が予測される。そのため、CO₂削減量としては、30年間で231.3 t/haと予測される。



*Jama ら (1989)、Morikawa (2007) より作成

図 12、対象地における植栽から 30 年間の地上部バイオマス量の推移の予測



*Jama ら (1989)、Morikawa (2007)、Openshaw (2000) より作成

図 13、CO2 削減量の推移

3. 森林生産物による便益

樹種ごとに見ると、木材生産を目的としている *Sweitenetia macrophylla*、*Gmelina arborea* の材積は、*Gmelina arborea* の伐期が 20 年であることや地上部バイオマスに対する材積比が小さいことから *Sweitenetia macrophylla* の方が材積は大きくなった (表 13)。

fuel wood としての *Sesbania grandiflora*、*Jatropha curucas* は、バイオマス量がそれぞれ 18.8t/ha/6year、17.9 t/ha/10year であり、*Jatropha curucas* の種子の収量は 10 年間で 14t/ha/10year となった (表 14、15)。

表 13、バイオマスベースでの材積および総収入

Species	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Swietenia macrophylla</i>
Age	20	30
Above ground biomass (t/ha) * ¹	47.9	84.8
Timber products (m ³ /ha)	51.4* ^{1,2}	127.5* ^{1,3}
Revenue (mil Rp/ha)	102.9~128.6 * ^{1,2}	765* ^{1,3}

*1 : Morikawa (2007) より作成

*2 : 国際緑化推進センター (1996) より作成

*3 : 森川 (2004) より作成

表 14、*Sesbania grandiflora* のバイオマスおよび総収入

Species	<i>Sesbania grandiflora</i>	
Number of Tree (tree/ha)	800	
Above ground biomass (t/ha/6year)	18.8	
Price (Rp/tree)	4500	6000
Revenue (mil Rp/ha/6year)	3.6	4.8

*Jama ら (1989)、Morikawa (2007) より作成

表 15、*Jatropha curcas* の森林生産物および総収入

Species	<i>Jatropha curcas</i>
Age	10
Above ground biomass (t/ha/year)	17.9
Harvest (t /ha/year)	1.86
Total Harvest (t /ha/10year)	14
Revenue from timber (mil Rp /ha)	—
Revenue from seed (mil Rp /ha/10year)	7~21
Seed price :500 (Rp /kg)	7
Seed price :1000 (Rp /kg)	14
Seed price :1500 (Rp /kg)	21

現地でのそれぞれ木材としての取引価格は、現地の西ヌサテンガラ州林業局の担当者によると（表 16）、*Gmelina arborea* が約 200～250 万 Rp/m³、*Swietenia macrophylla* が、約 600 万 Rp/m³、*Sesbania grandiflora* は伐採可能なサイズになった場合 1 本当たり 4,500～6,000Rp/tree で買い取られている。

表 16、ロンボク島での木材取引価格（2009 年 2 月現在）

Species	<i>Swietenia macrophylla</i>	<i>Gmelina arborea</i>	<i>Tectona grandis</i>
Timber price (mil Rp/ m3)	6	2～2.5	7～7.5

Species	<i>Samanea samman</i>	<i>Azartica indica</i>
Timber price (mil Rp/ m3)	5～6	3.5～4

* 西ヌサテンガラ州林業局

プロジェクト全体での 30 年間での総収入について、図 14、表 17 に示す。10 年ごと（図 15）に見ると、植栽から 10 年間は、*Jatropha curcas* の種子や *Sesbania grandiflora* の伐採などによって短期的に収入が入る。その後、20 年で *Gmelina arborea* の伐採、30 年後に *Swietenia macrophylla* を伐採したときの収入が入る。この結果、成林し、木材として売却した場合の収入が *Jatropha curcas* の種子や fuel wood の収入と比較して非常に大きいことが分かる。また、伐期を早め、サイズの小さい樹木で取引した場合、胸高直径 10～15cm の *Swietenia macrophylla* だと 10 万～12.5 万 Rp/tree と価格が大きく下がること（西ヌサテンガラ州林業局）からも、木材として搬出できるサイズまで樹木の伐採を行わない方が長期的な視点での便益は大きいといえる。*Swietenia macrophylla* と *Gmelina arborea* の伐期をずらしたことは、収入をコンスタントにすることと皆伐を避ける意図もある。

表 17、W-BRIDGE における 30 年間での森林生産物による総収入の予測

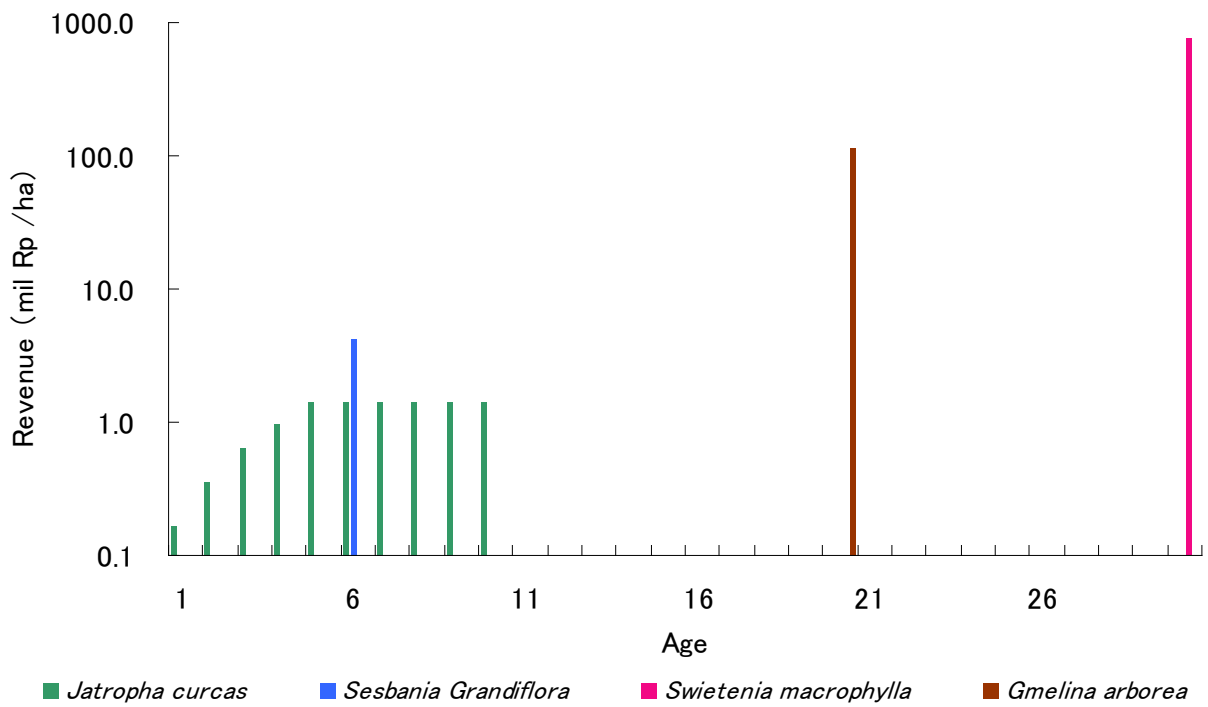
Species	Total	<i>Gmelina arborea</i> *1,2	<i>Swietenia macrophylla</i> *1,3	<i>Jatropha curcas</i>	<i>Sesbania grandiflora</i> *1,4
Revenue (mil Rpp)					
1～10 year	10.6-25.8	0	0	7.0-21.0	3.6-4.8
11～20 year	102.9-128.6	102.9-128.6	0	0	0
21～30 year	765	0	765	0	0
Total	879-919	102.9-128.6	765	7.0-21.0	3.6-4.8
Average	29.3-30.6				

*1 : Morikawa (2007) より作成

*2 : 国際緑化推進センター (1996) より作成

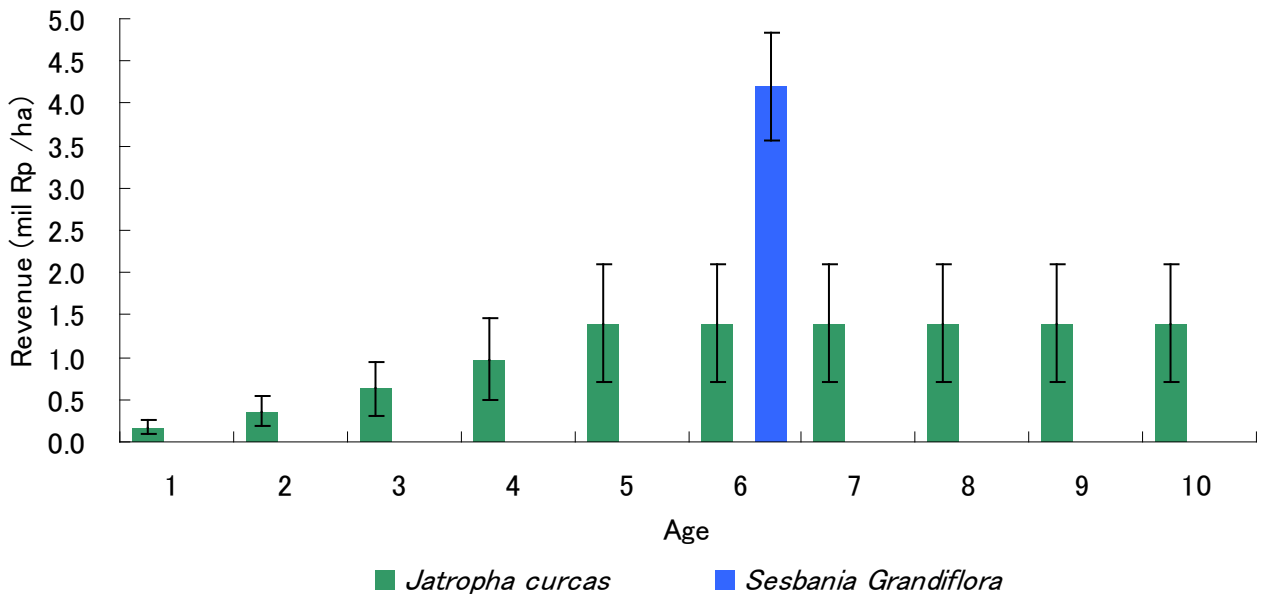
*3 : 森川 (2004) より作成

*4 : Jama ら (1989) より作成



■ *Jatropha curcas* ■ *Sesbania Grandiflora* ■ *Swietenia macrophylla* ■ *Gmelina arborea*
 * Morikawa(2007)、国際緑化推進センター(1996)、森川(2004)、Jama ら(1989)、西ヌサテン
 ガラ州林業局より作成

図 14、植栽から 30 年間で森林生産物由来の総収入の推移



■ *Jatropha curcas* ■ *Sesbania Grandiflora*
 * 誤差範囲は、それぞれの価格の最大値と最小値。
 * Morikawa(2007)、Jama ら(1989)、西ヌサテンガラ州林業局より作成

図 15、植栽から 10 年間に於ける短期的な総収入の推移

次に、成林するまでの、植栽から 10 年での収入の推移を図 15 に示す。植林プロジェクトを行なった場合、5 年間の面積当たりの人件費は、約 130 万 Rp/ha かかる。ワーカーとして住民 1 人が 1ha の植栽地を担当した場合、賃金として得られる収入も 130 万 Rp/ha で、1 年間では平均で 26 万 Rp/ha/year となる（国際緑化推進センターデータ）。表 17 から分かるように、仮に、*Jatropha curcas* の種子や *Sesbania grandiflora* の価格が想定した場合の中で最も低い場合でも、年平均で 100 万 Rp/ha/year が収入として得られる。

また、本研究で行なった地域住民の平均年収が約 150 万 Rp/year であった。年収の 2/3 に相当する額が 1ha から得られることから、森林生産物による収入は地域住民にとって大きな収入源となると考えられる。植栽地の管理における時間や手間は、ワーカーとしての作業従事と時間的には変わらないことから、住民がそのことを理解し、便益を認識することでプロジェクトに参加するインセンティブとなると考えられる。

しかし、木材や fuel wood などは伐採によって一括的に収穫するが、*Jatropha curcas* の種子は結実のタイミングが樹木によって異なることなどから散発的に収穫を行なわなければならない。そのため、種子の取引価格が低い場合、作業に対しての収穫からの収入が見合わないという状況が起こることを考慮する必要がある。

4. 土壌養分への影響

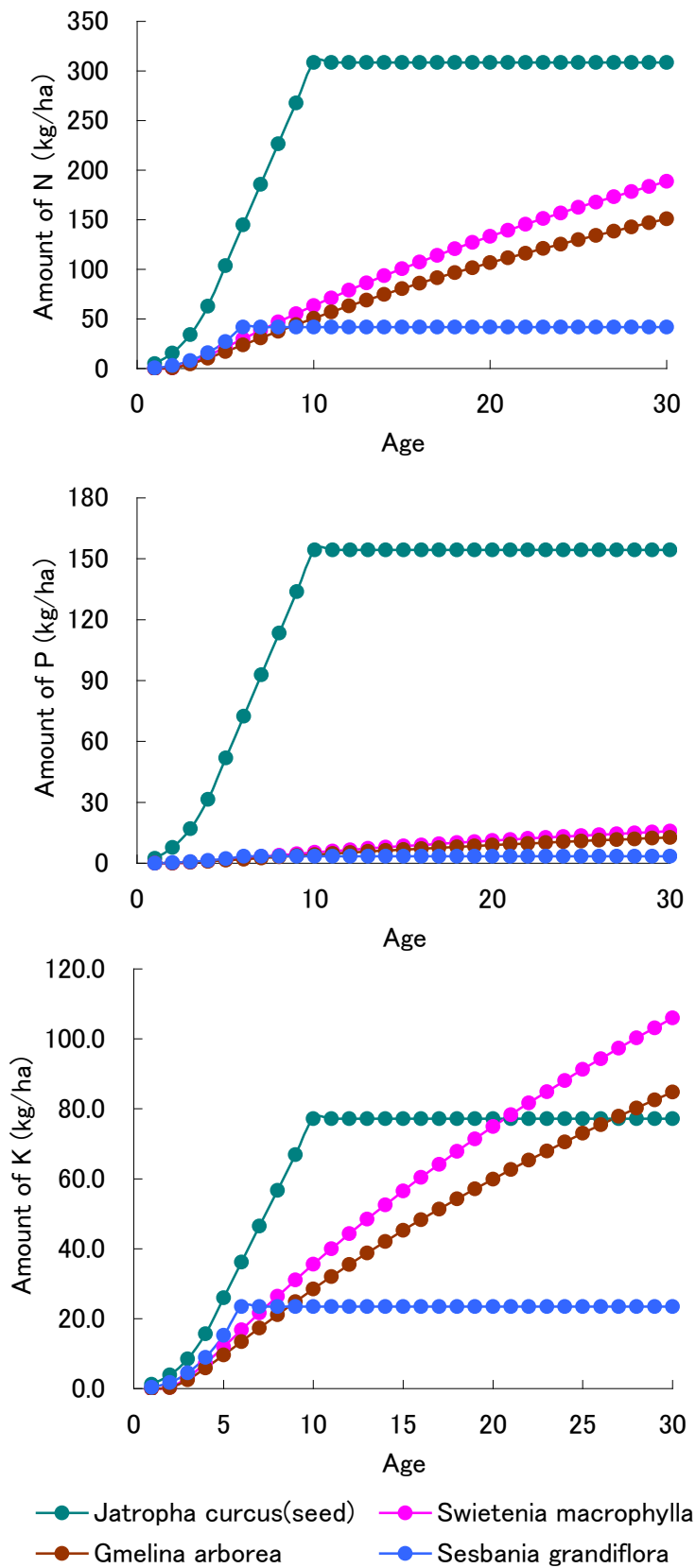
自然に土壌に供給される養分については、降雨による養分の補給をインプットとして仮定した。降雨内の N、P の含有率については国際緑化推進センター(1995)の結果から算出を行った。Sambelia 群における 1999 年～2007 年の降水量の平均が 1150mm (表 1) であり、降雨による養分のインプットについて、表 18 に示す。30 年間での累計は、N が 1.5-3.8kg/ha/30year、P が 0.4-1.5kg/ha/30year であった。

対象地における 30 年での土壌栄養における N、P、K の収奪量の推移を図 16 に示す。全体的に *Jatropha curcas* の種子の収奪量が多いことが分かる。特に P の収奪量を比較すると、他の樹種の樹木に対して *Jatropha curcus* の種子の収奪量は 10 倍近い。K については、図 16 では *Gmelina arborea*、*Sweitenetia macrophylla* の方が高い値ではあったが、*Jatropha curcas* を伐採するまでの 10 年間では、*Jatropha curcas* の方が高い値であった。降雨による供給量と比較して収奪量が非常に多いことが分かる。

表 18、降雨による N、P の土壌への供給量（降水量：1150mm/year）

Species of Nutrient	Nitrogen	Phosphorus
Supply from rainfall		
Unit requirement (mg /mm)	46 - 111	11.3 - 44.3
per year (g/year)	53 - 128	13 - 51
30years total (kg /30years)	1.5 - 3.8	0.4 - 1.5

*DINAS Kehunantan (2008)、国際緑化推進センター (1995) より作成



*Yamada ら(2004)、Morikawa(2007)、Jama ら(1989)より作成

図 16、樹種別における土壌からの N、P、K の収奪量

V-4. 社会経済調査

1. ロンボク島のエネルギー情勢

現状において、調査地域あるいはロンボク島では fuel wood の需要が高く、またさらに高まっているといえる。Sambelia 郡の世帯ごとの主要エネルギーを村別に見ると、ほとんどの村において 80%以上の世帯が fuel Wood を利用していることから、その需要の大きさが伺える (表 19)。また、ケロシンを利用している世帯についても今後 fuel wood を利用する可能性がある。2009 年 5 月現在、燃料のケロシンに対し、2500Rp/l の補助が出ている。そのため、約 6500Rp/l で販売されているケロシンを 4000Rp/l で購入することが可能である。しかし、この補助は 2010 年で打ち切られることから、実質的に燃料価格は高騰する見通しといえる。そのため、現在はケロシンを利用している世帯も fuel wood に転換することも考えられる。

また、予想される燃料価格の高騰は当然産業部門においても影響を与えられると考えられる。そのため、家庭レベルと同様に産業レベルでも石油から fuel wood への転換する動きが見られる。

表 19、Sambelia 郡の村別の世帯の主要エネルギー

No	Village	Number of family			% of Fuel wood
		use Fuel wood	use Kerosene	Total	
1	Sambelia	1300	505	1805	72
2	Belanting	1629	123	1752	93
3	Obel-Obel	954	168	1122	85
4	Sugien	1448	76	1524	95
5	Labuan Panda	1958	319	2277	86
	Total	7289	1191	8480	86

*国際緑化推進センター (2007)

V-5. 土地利用別の比較

プロジェクトの予測の評価として、異なる土地利用を行なった場合の予測の比較を行った。土地利用は、伐採までのサイクルの長いものを植林モデルとし、短いものをプランテーションモデルとして二つに大別し、定義した。そこから、植林モデルとプランテーションモデルについて、各々 2 パターンの土地利用における CO₂ 吸収量、森林生産物による便益、土壌栄養の収奪について比較を行った。

1) 植林モデル

・ W-BRIDGE

・ 生産林 (Productive forest)

5×5m の植栽間隔で、列状での *Sweitenetia macrophylla* と *Gmelina arborea* の交互

の植栽を想定した。ラインは、19 ラインとし、植栽密度は 380 本/ha (*Sweitenetia macrophylla* 200 本/ha、*Gmelina arborea* 180 本/ha) とした。*Gmelina arborea* は、W-BRIDGE と同様に 20 年の伐期とした。

2) プランテーションモデル

・薪炭林 (Copice forest)

植栽間隔 2×2m で *Sesbania grandiflora* の植栽と、植栽密度は 2500 本/ha とした。W-BRIDGE と同様に植栽から 6 年を伐期で 1 サイクルとし、6 年×5 サイクルで想定した。

・Jatropha プランテーション (*Jatropha* plantation)

植栽間隔 2×2m で、植栽密度は 2500 本/ha とした。W-BRIDGE と同様に植栽から 10 年を伐期で 1 サイクルとして、10 年×3 サイクルでの場合を想定した。

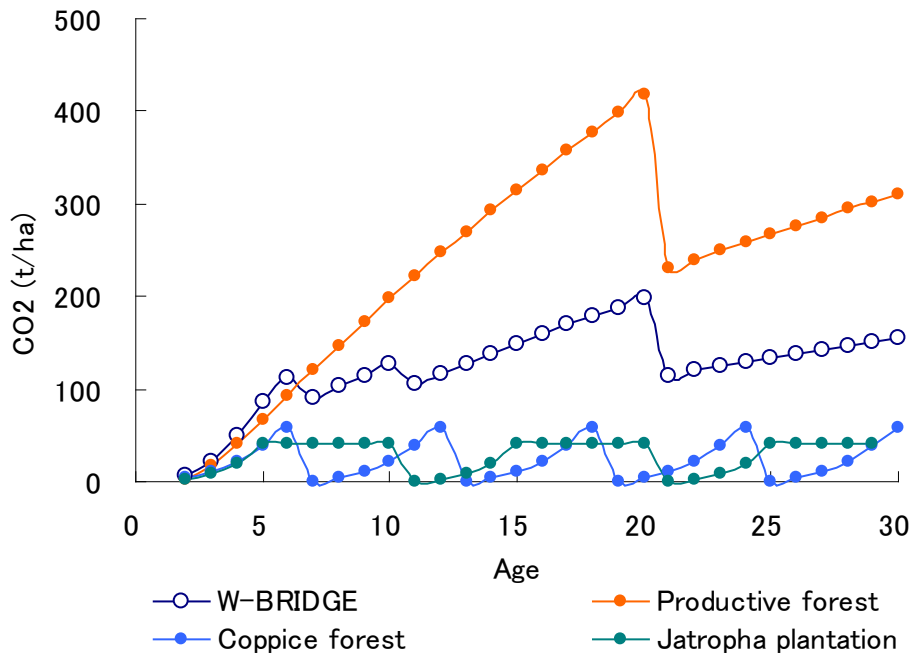
1. 土地利用別の比較

(1) CO₂ 吸収量、削減量について

それぞれの土地利用における 30 年スパンでの CO₂ 吸収量について、図 17 に示す。CO₂ 吸収量は、長期間炭素固定している植林をベースとした生産林と W-BRIDGE の吸収量が多いことが分かる。

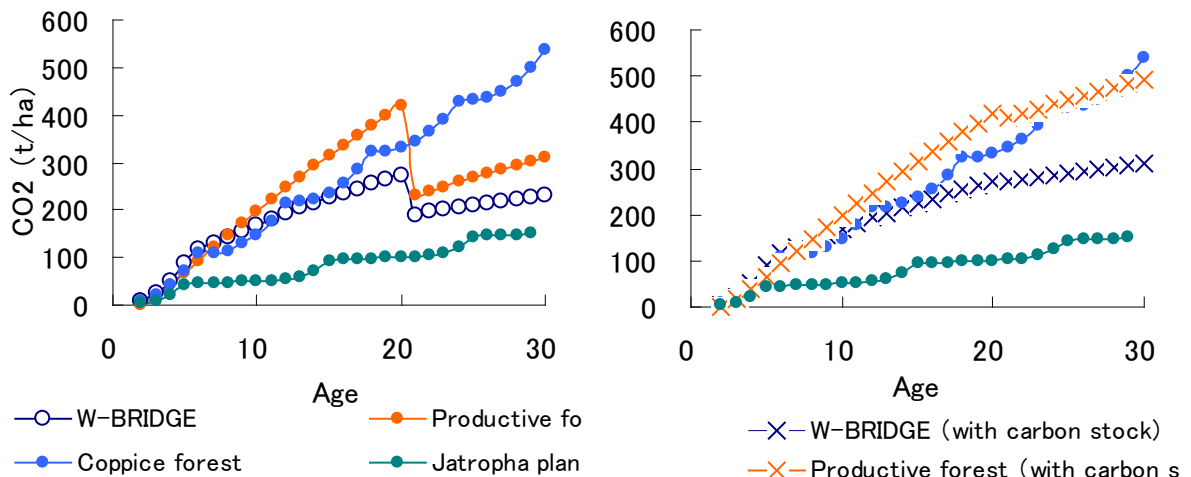
樹木の CO₂ 吸収量に加えて、代替エネルギーとして fuel wood として利用した場合と *Jatropha curcas* の種子を搾油して、オイルを燃焼用のケロシンの代替として利用した場合の代替効果を排出削減量として加えた場合を図 18 に示す。図 18 から薪炭林が最も削減量の多いことが分かる。植栽密度が高いことに加えて *Sesbania grandiflora* は、成長が非常に早く、短伐期でサイクルを回せることや fuel wood として利用することからバイオマス量がすべて削減量にカウントされることが要因といえる。*Jatropha* プランテーションは、CO₂ の削減量という面での機能は他の土地利用と比較すると低いといえる。

W-BRIDGE や生産林では、現在の温暖化スキームでは木材利用による Carbon stock は認められていないため、本研究では木材利用される分は削減量にカウントしなかった。そのため、*Gmelina arborea* の伐採で吸収量が大きく減少する結果となった。しかし、木材を Carbon stock として考慮すると、W-BRIDGE は約 80t、生産林では約 180t、CO₂ 削減量が増加する。



* Morikawa(2007)、Jama ら(1989)より作成

図 17、土地利用別の CO₂ 吸収量の推移



* Morikawa(2007)、Jama ら(1989)、Openshaw(2000)、IPCC より作成

図 18、土地利用別の CO₂ 削減量の推移

(2) 森林生産物の便益

a) 総収入 (Revenue)

30年スパンでの総収入の合計と年平均を表20、図19に示す。植栽樹種の木材利用を考慮した。W-BRIDGEと生産林は、金額ベースで見るとプランテーションモデルとは、10倍以上の差があることが分かる。*Sweitenetia macrophylla*の木材がm3当たりで6mill Rppと高値で取引されていることや生存率を100%と想定していることに依る部分が多いと言える。しかし、生存率を50%とし、*Sesbania grandiflora*や*Jatropha curcas*の種子の取引価格を現状で取引される最高額で想定した場合でも、表20のようにW-BRIDGEや生産林の方が収入は多い。

一方で、プランテーションモデルは、収入の額としては少ないが短いスパンで継続的に収入機会がある点がメリットといえる。植林モデルは植栽から20年間で収入が得られないのに対し、植栽から10年以内での短期的な収入が見込める(図20)。しかし、全体量としての収入が少ないことや*Jatropha curcas*の場合価格の変動が大きく、収入として不安定な点が問題といえる。

表20、土地利用別の森林生産物による総収入の予測

Land use	W-BRIDGE *1,2,3	Productive forest *1,2,3	Coppice forest *1,4	Jatropha plantation
Revenue(mil Rpp)				
1~10 year	10.6-25.8	0	11.3-15	8.6-25.7
11~20 year	103-129	232-290	22.6-30	8.6-25.7
21~30 year	765	1529	22.6-30	8.6-25.7
Total	878.6	1760-1819	56.5-75	25.7-77.0
Average (mil Rp /year)	29.3-30.7	58.7-60.6	1.9-2.5	0.9-2.6

*1: Morikawa (2007) より作成

*2: 国際緑化推進センター (1996) より作成

*3: 森川 (2004) より作成

*4: Jama ら (1989) より作成

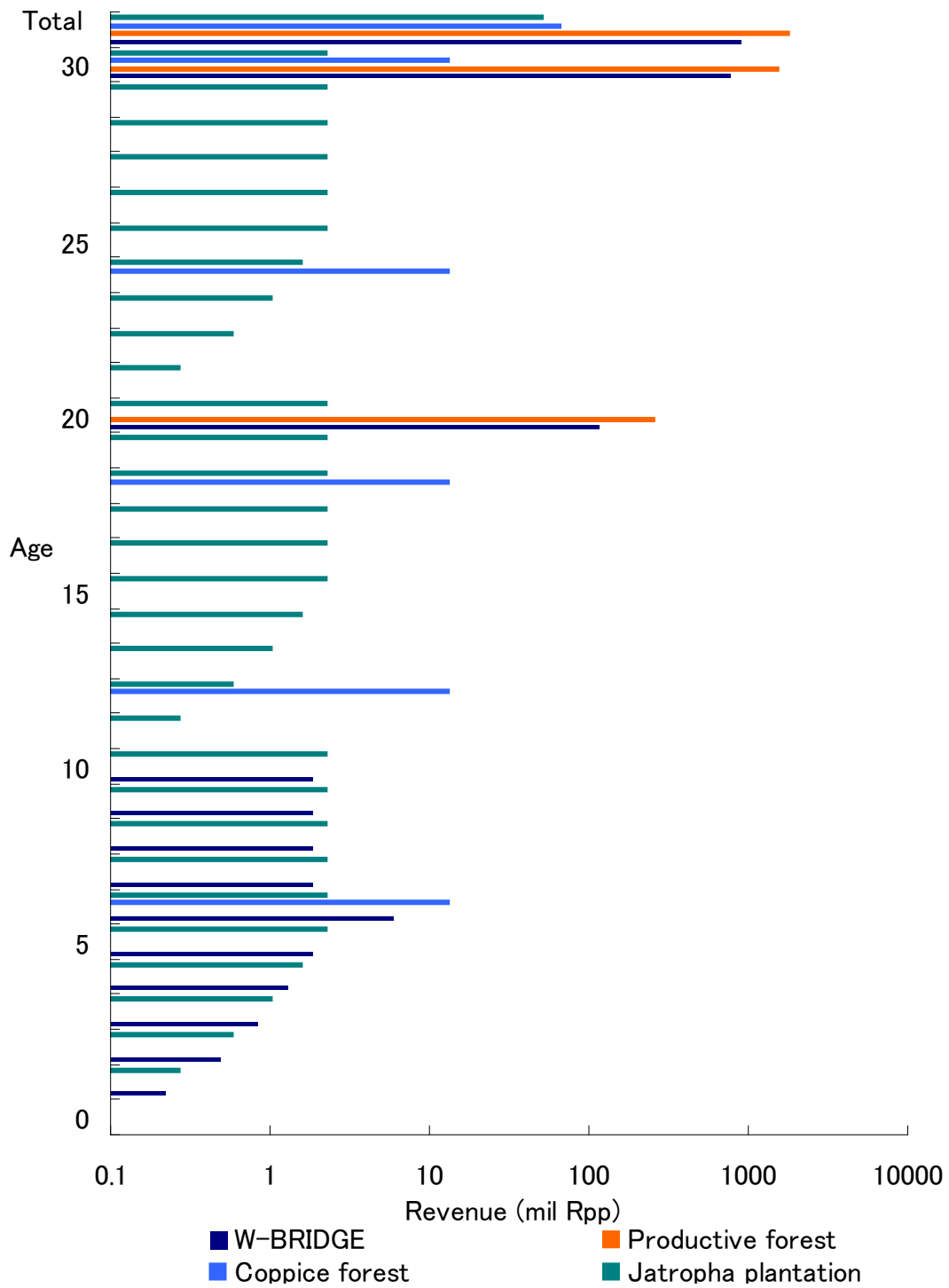
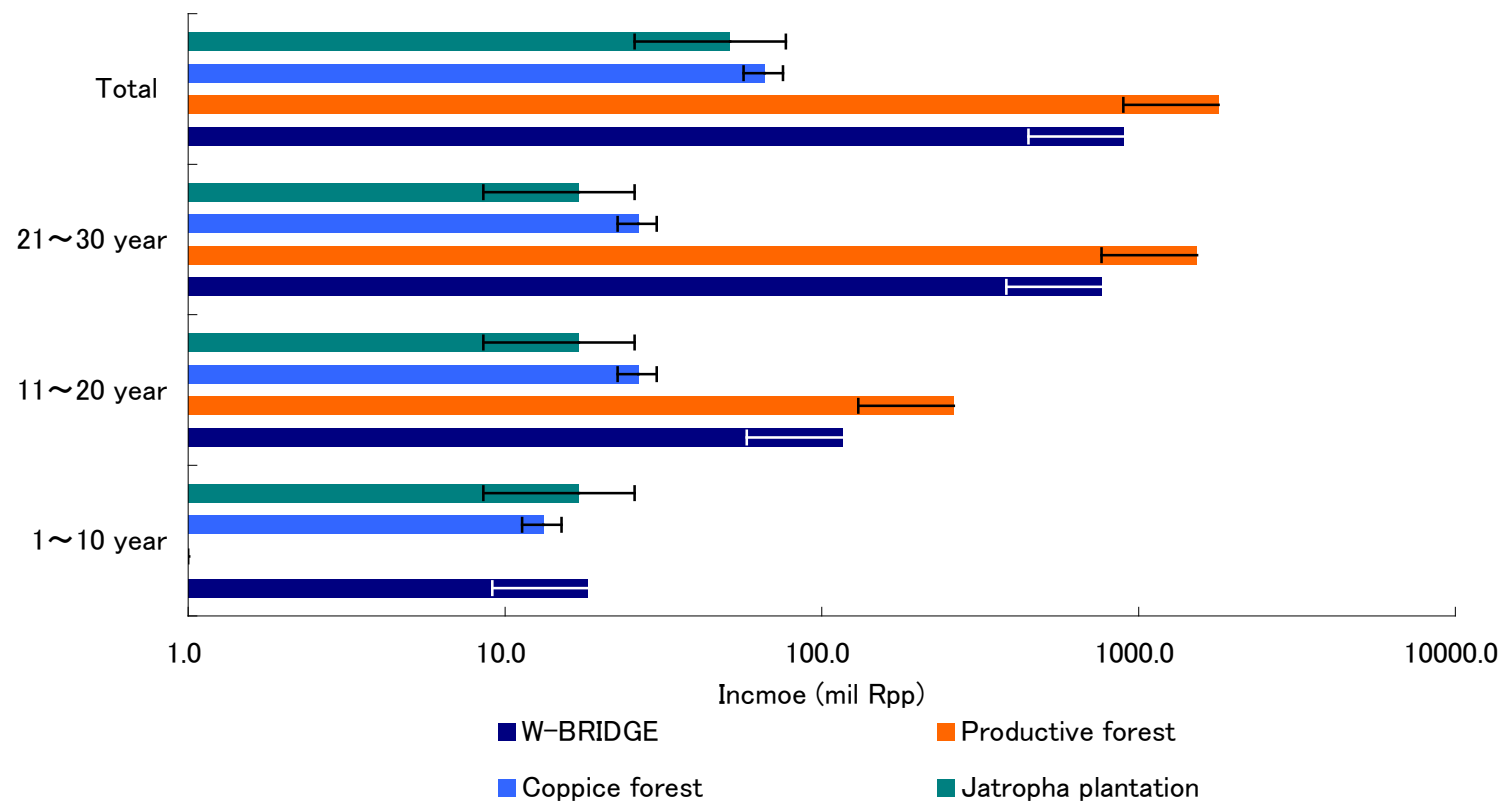


図 19、土地利用別の収入の推移

*Morikawa(2007)、国際緑化推進センター(1996)、森川(2004)、Jama ら(1989)、西ヌサテンガラ州林業局より作成



*Morikawa(2007)、国際緑化推進センター(1996)、森川(2004)、Jamaら(1989)、西ヌサテンガラ州林業局より作成

図 20、10年ごとの土地利用別の収入

b) 内部収益率 (Internal Rate of Return)

次に、土地利用別の内部収益率を表 に示す。純利益では、生産林が最も高いが、内部収益率で見た場合、最も高い価格で取引されることを想定すると W-BRIDGE と *Jatropha* プランテーションが高い値を示した。内部収益率の場合、純総収入に加えて、投資額、時間軸が関係してくることから植栽から短期間で種子の収穫によって収入を得られる *Jatropha curcas* によって内部収益率が高くなった。

しかし、上述のように *Jatropha* は価格の変動が激しいため、種子価格によって内部収益率も同様に大きく変動する。そのため、種子の価格が安定していれば高い収益率だが、価格が暴落すると内部収益率も低い値となる。

表 21、土地利用別の内部収益率 (IRR)

Land use	W-BRIDGE *1,2,3	Productive forest *1,2,3	Coppice forest *1,4	<i>Jatropha</i> plantation
Investment (mil Rp/ha)				
Seedling	1.45	1.45	2.5	1.25
Planting up keep	1.3	1.3	1.3	1.3
IRR (%)	29~50	28~29	20~26	22~54

*1 : Morikawa (2007) より作成

*2 : 国際緑化推進センター (1996) より作成

*3 : 森川 (2004) より作成

*4 : Jama ら (1989) より作成

(3) 土壤養分の収奪量

土地利用別の土壤養分の収奪量について、図 21 に示す。N、P、Kそれぞれについて見ると、*Jatropha* プランテーションの N、P の収奪量が最も多い。K は、薪炭林利用が最も収奪量が多いが、N や P と比較すると全体的に大きな差は見られない。

全体的に *Jatropha curcas* の植栽地に対するインパクトが大きいといえ、特に P の収奪量が多い。

土壤養分の収奪量における農作物との比較を表 21、22 に示す。N、K の収奪量は、農作物の方が大きい。しかし、P については *Jatropha* プランテーションの方が大きくなった。調査地のように乾燥の厳しい地域でも栽培が可能で生産性が高く、収奪性の高いといわれるトウモロコシよりも高かった。N は、マメ科植物の植栽などによって供給が可能であるが、P は降雨や風化など以外では自然に供給されることがない。そのため、土壤養分の収奪では P が問題となる場合が多い。農作物と同水準と考えられる P の収奪量は、荒廃地において *Jatropha curcas* を単樹種で大面積に植栽することの危険性や持続的な土地利用のためには施肥などのメンテナンスが必要であることを示唆していると考えられる。予測において P の収奪量を過大評価している場合も考えられるが、図 21 のように *Jatropha curcas* を植栽した場合 (*Jatropha* プランテーション、W-BRIDGE) としていない場合 (生産林、薪炭林) の収奪量の差は歴然としており、その収奪性は否定できないと考えられる。

表 22、*Jatropha curcas* と農作物の生産量および養分含有率

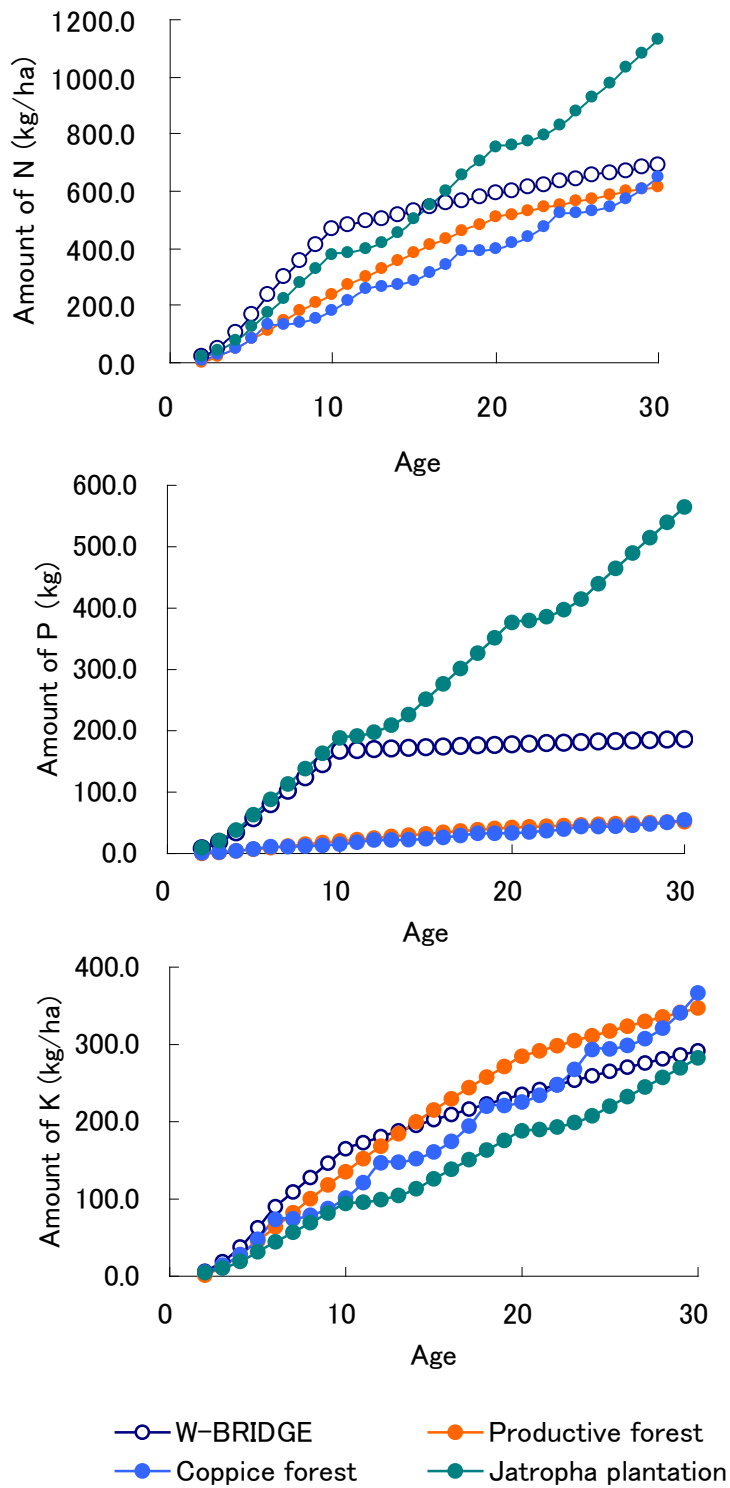
Species	<i>Jatropha curcas</i>	Corn	Soybeans	Rice
Productivity (t/ha)	1.7	5 ^{*1}	0.7 ^{*1}	9 ^{*1}
Nurient content (%)				
N	2.2	1.38 ^{*2}	5.78 ^{*2}	1.03 ^{*2}
P	1.1	0.27 ^{*2}	0.48 ^{*2}	0.09 ^{*2}
K	0.55	0.29 ^{*2}	0.18 ^{*2}	0.09 ^{*2}

*1 : 文部科学省 (2005) *2 : Barbier (1989)

表 23、*Jatropha curcas* と農作物の養分収奪量の比較

Species	<i>Jatropha curcas</i>	Corn*	Soybeans*	Rice*
Nurient deprivation (kg/ha /year)				
N	38	69	40	93
P	19	14	3	8
K	9	15	13	8

* 文部科学省 (2005)、Barbier (1989) より作成



*Yamada ら(2004)、Morikawa(2007)、Jama ら(1989)より作成

図 21、土地利用別の土壌養分の収奪

2. 植林モデルとプランテーションモデルの比較

調査地域においてそれぞれの土地利用を想定した場合、森林生産物から得られる総収入や土壌へのインパクトからの視点での土地利用の継続性という点で見た場合、植林をベースとした植林モデルの方が望ましいと考えられる。

ただ、CO₂の吸収量あるいは削減量という観点で見た場合の評価は難しい。CO₂削減量という点では、薪炭林利用によって短伐期でサイクルを回して利用する場合が大きい。しかし、削減量は予測される fuel wood や化石燃料の排出の代替量であり、カーボンニュートラルであることから、実際には大気中の CO₂ を削減してはいない。一方で、植林モデルでの樹木の CO₂ 吸収量や木材での Carbon stock の量は、実質的に大気中の CO₂ を削減している量といえる。吸収源 CDM における Carbon credit の価格の問題や Carbon stock を認めるかといった議論は、現在も国際的な枠組みの場で議論をされている段階である。そのため、本研究では吸収量と削減量について土地利用ごとの比較は行なったが、どちらにプライオリティを置くかについて言及はしない。

また、植林モデルとプランテーションモデルの大きく異なる点として、森林の公益的機能が挙げられる。植林モデルは、伐採までの間に森林であることから物質循環、水収支の変化や林冠の形成などの森林機能が期待できる。

植林モデルの場合、物質循環のシステムがプランテーションモデルと比較して機能すると考えられる。成林すれば樹木が大きな根系で土壌に深く沈降した無機栄養を吸い上げる。さらに、落葉などによって地表面にリターが蓄積され、それが分解されることによって環境によって異なるものの多かれ少なかれ表層の土壌に無機栄養が還元されるといえる (Larcher, 2004)。

木材の伐採を行なうにしても、少なくとも植栽から伐採までの期間にリターが蓄積されるといえる。

一方、プランテーションモデルの場合、図 21 の結果以外の面でも物質循環の視点で見ると養分の収奪の問題が介在していると考えられる。Jatropha プランテーションは、図 21 のように土壌養分の収奪量が多い。さらに、それは種子による収奪のみで、材を fuel wood に利用したり、種子を果実ごと収穫した場合の量をカウントすると、収奪量はさらに増加する。

薪炭林利用の場合においても問題がある。*Sesbania grandiflora* は、材を fuel wood、葉を家畜の飼料、花や種子を食用など多目的に利用できる非常に有用な樹種である。しかし、材以外にも葉、花、種子を利用するため、結果としてリターが土壌に無機栄養として供給されない。そのため、いずれの器官も収奪されることによって森林の物質循環としてのシステムが機能しない。また、現地では、上述の fuel wood の需要の増加という背景もあり、*Sesbania grandiflora* が盛んに植栽されている。本研究の設定した伐期 (6 年) よりも短い 3 年の伐期で植栽を行なっている場所もある。葉を飼料として利用し、短伐期での伐採による収奪を繰り返し行うことは、長期的に見ると土地を劣化させる可能性があるといえる。

また、森林の公益的機能の実例として、調査地と同様に荒廃地であったロンボク島のスカラー地域で JIFPRO が行なった日本・インドネシア友好の森の事例が挙げられる。1996 年～2001 年に植林が行なわれた同地域は現在一次緑化に成功している。直近では、同地域の枯れ井戸から水が出るようになったという報告があった。明確な因果関係の証明は難しいが、森林の水源涵養機能によるものだと考えられる。水源涵養機能の恩恵は、同地域の住民の農業など生活に直接影響するため、乾季に乾燥の厳しい地域において非常に有益な機能であるといえる。

このような点から植林をベースとした土地利用の有効性が分かる。しかし、現実に植林を行なっても成林が難しいという当初の問題に直面する。その問題の主要因のひとつが、成林するまでの間に地域住民が短期的に享受する便益がないという点である。

3. プランテーションモデルについて

前項で植林モデルの有効性とプランテーションモデルの問題点について指摘した。しかし、短期的な収入やケロシンの補助金の廃止や石油価格の変動から代替エネルギーの導入の必要性から *Sesbania grandiflora* などの fuel wood となる樹種や *Jatropha curcas* が脚光を浴びている。実際、世界各地の半乾燥地や荒廃地で *Jatropha curcas* の植栽が進められている。その土地当たりの生産量などは、プロジェクトごとに予測やモニタリングが行なわれているが、その生産性について他の土地利用を想定した場合などの比較は行なわれていない。

本項では、それぞれのバイオマスや種子の収量から面積当たりのエネルギー生産量を推定し、エネルギー資源としての *Sesbania grandiflora*、*Jatropha curcas* の評価を行なう。

(1) タバコ事業における代替エネルギーとしての可能性について

上述の社会経済調査の背景から、現在、ケロシンの代替エネルギー *Jatropha curcas* の種子から搾油したオイルをタバコの葉の乾燥に利用することが検討されている。

そこで、石油の代替エネルギーとして燃料利用する場合における薪炭林と *Jatropha* プランテーションについて発熱量の比較を行なう。代替エネルギーとして評価する際に、発熱量が一つの指標といえる。薪炭林は、*Sesbania grandiflora* の地上部バイオマスに木材の発熱量の係数をかけて発熱量を推定した (IPCC)。*Jatropha curcas* は、種子から搾油したオイルと搾りかす、地上部バイオマスにそれぞれの発熱量の係数 (Openshaw,2000) をかけ、発熱量を推定した。それぞれの発熱の係数および発熱量を表 23 に示す。

表 23 から ha 当たりでの *Jatropha curcas* のオイルの発熱量は、*Sesbania grandiflora* よりも大きく低いことが分かる。タバコ乾燥に使用する場合、オイルと搾りかすや幹と一緒に燃焼させることは出来ないが、単純に樹種同士の面積当たりの発熱量を比較しても *Sesbania grandiflora* の 4553GJ/ha/30year に対して、*Jatropha curcas* は全体でも 2550GJ/ha/year と大きく下回る。燃料としての熱利用の場合、単位面積当たりの熱量は、薪炭林の方が大きいといえる。コストも *Jatropha curcas* の場合、ここに種子の収穫や収穫

した種子の搾油などの間接的なプロセスやコストが加わることから、*Sesbania grandiflora*の方が安価であり、タバコ事業者サイドから見た場合、薪炭林利用の方が有用であると考えられる。

本研究でも *Jatropha curcas* のオイルをタバコの乾燥に使うことを想定し、30年周期で土地のローテーション利用を行ない、*Jatropha curcas* の種子の安定供給や恒常的に地域住民が収入を得られることを考慮していた。しかし、結果的に収量が低く、面積当たりの発熱量は *Sesbania grandiflora* の方が大きかったことに加えて、*Jatropha curcas* の土壌養分の収奪量が大きかったことから持続的に *Jatropha curcas* を栽培し、オイルをタバコ乾燥に利用することは、困難であると思われる。

そのため、荒廃地において燃料での代替エネルギーとしては *Jatropha curcas* よりも *Sesbania grandiflora* による土地利用の方が事業者目線では有効であると考えられる。ただ、上述のように長期的に見ると、収奪を繰り返すことで土地の劣化や樹木成長の悪化・病害虫の被害などが懸念されることから、土地の状態やメンテナンスについて留意しておくことが必要であるといえる。

これらから、ビジネスにおいて *Jatropha curcas* の栽培する意義は、オイルがバイオディーゼルとしてガソリンの代替エネルギーに利用できるという点に集約される。次項では、バイオディーゼルの生産する目的での *Jatropha curcas* の土地利用の問題について考察する。

表 24、*Sesbania grandiflora* と *Jatropha curcas* の発熱量 (Density : 2500 tree /ha)

Species Part	<i>Sesbania grandiflora</i>		<i>Jatropha curcas</i>	
	Above ground mass	Oil	Marc	Above ground mass
Energy value (MJ/kg)	15.5 * ¹	40.7 * ³	25.5 * ³	15.5 * ³
Harvest (t /ha /30year)	293 * ²	14.9	36.4	65.4
Energy value (GJ /ha / 30year)	4553 * ^{1,2}	606* ⁴	930* ⁴	1014* ⁴

*1 : IPCC

*2 : Jama ら(1989)、Morikawa (2007) より作成

*3 : Openshaw (2000)

*4 : Openshaw (2000) より作成

(2) バイオディーゼル生産目的の *Jatropha curcas* のプランテーションについて

上述の結果から *Jatropha curcas* の種子による土壌養分の収奪量が多いことが分かった。そのため、土地のメンテナンスを行なわなければ、樹木成長は悪くなり、種子の収量も低下していくことが考えられる。荒廃地において成長が良い *Jatropha curcas* の結実した種子を外に持ち出すことは荒廃地をさらに荒廃させる危険性も持っているといえる。

ビジネスの場合、土壌条件の良い土地で生産するか荒廃地で持続的に種子の安定した収量を確保することが条件といえる。土壌条件の良い土地で *Jatropha curcas* の栽培を行うこ

とは、農業生産が可能な土地で栽培を行うことを意味し、オイルパームなど他のバイオ燃料と同様に食物との競合という問題の二の舞が生じる。

荒廃地で持続的に安定した収量を確保することは、施肥の必要性を指し、化学肥料を投入する場合、当然それに起因して CO₂ を排出する。CO₂ 削減のための代替エネルギーの生産のために CO₂ 排出を伴うため、厳密にはカーボンニュートラルではない。

この問題も大きな問題であるが、最も大きな問題はその地域の住民の享受する利益が少ないことである。*Jatropha curcas* の種子の取引価格は安価であり、種子の収穫後、搾油を行い、粗油を精製し、さらに脱エステル処理をすることでバイオディーゼルとなる。当然、その間接的なプロセスにコストとエネルギーがかかるほか、プラント建設などインフラ整備に大きな資金が必要となる。そのため、技術面や資金面から外部資本が入る必要性が生じることから、ODA 以外ではその生産した種子やバイオディーゼルは先進国や新興国の事業者サイドに流れるケースが多い。

そのプロセスで地域住民に利益が入れば問題はないが、ガソリンの代替エネルギーという側面からガソリン価格に対応する必要性があり、高い価格での販売は難しい。そのため、価格を低くするために生産段階でのコストを低くする必要がある。そのため、結果的にその地域の住民が安い人件費や価格で買い叩かれるという状況を招く。それでも、現実的には荒廃地に住む地域住民には現金収入を得る手段が少ない。そこに *Jatropha curcas* を導入し、安い人件費によって生産を行い、バイオディーゼル生産や CDM によるクレジットによって事業者が利益を得るという構造はこれまでの資本主義の搾取の構造と変わらない。

このような問題は、今後表面化していくことが考えられる。

V-6. W-BRIDGE の導入について

前項では、*Jatropha curcas* の問題点について指摘してきた。本研究でも、*Jatropha curcas* の植栽を行なっているが、活着率が良い点、初期に現金収入となる点、防火機能が期待できる点からによるもので、あくまで森林再生のツールとして捉えている。

通常の植林の問題を踏まえ、短期的な現金収入や fuel wood を確保できる *Jatropha curcas* と *Sesbania grandiflora* を植栽していることが成林までの地域住民のインセンティブとなり、緑化を促進するのではないかと考えられる。また、含水率が高く、防火機能が期待される *Jatropha curcas* の植栽によって植栽樹種の生存率を向上させることが出来ると考えられる。

本項では、現在、ロンボク島の国有林において約 5,565ha あるとされている生産林地に区分されている荒廃地において、実際にスキームを導入した場合の運用について考察を行う。

プロジェクト進行の時間軸で考えると、植栽から 10 年までは、*Jatropha curcas* の種子生産によって短期での継続的な現金収入と *Sesbania grandiflora* による fuel wood や家畜の飼料、現金収入など短期的な便益を地域住民が得ることが可能である。ただ、上述した

ように *Jatropha curcas* 種子の価格は変動が大きい。種子の取引の価格が低い場合、労働に見合わないという点から種子の収穫が行なわれず、*Jatropha curcas* の種子生産が住民のインセンティブとして機能しないという点がある。2009年2月には、石油価格が安定したこともあり、それに比例して *Jatropha curcas* のコストも下がったことから種子の取引価格は、前年12月は1500Rp/kg だったものが、700Rp/kg まで下落した。そのため、防火帯の *Jatropha curcas* の種子は作業に見合わないという理由から収穫はされていなかった。住民の話では、現地で1日土木作業に従事することによって得られる現金収入は2万Rp/day である。調査地において、1日で収穫できる種子の量は10kg/day ということであり、種子価格が2000Rp/kg でなければ、割りに合わないということであった。

この状況の要因は、価格の低さと不安定さに加えて面積あたりでの収量の低さがいえる。実際、結果からも初期の収量は一般的な収量よりも低い水準であり、植栽を行なう前に現地のカウンターパートの意見などから想定していた収量より低かった。

この問題へのアプローチとしては、プロジェクトのドナーあるいはカウンターパートが植栽からの10年間種子を安定した価格で住民から買い取るなどの措置が挙げられる。価格の不安定な面をフォローすることで、それがインセンティブとなると考えられる。実際の価格よりも高いことから損失が出るが、始めからプロジェクト予算に組み込むことや木材に対するロイヤリティを設定し、成林した後に回収することでそれが可能になると考えられる。

次に、植栽後10年～20年では *Gmelina arborea* の設定した伐期までの10年間に経済的な便益はない。その期間は、伐採後のライン間(5m)において、fuel wood やマメ科植物など住民のニーズの高い樹種の間作などの土地利用の権利を認め、そこから便益を得ることがインセンティブになると思われる。植栽から20年後の *Gmelina arborea* の伐採後のラインには、住民が自由に選択した樹種を植栽し、伐採後も持続的に森林の状態が保たれるようにする。

植栽から30年経った段階で、皆伐の禁止や面積あたりに10年生以上の樹木のライン数や樹木数など最低限の森林利用としての条件を設定するのみで、住民に土地利用全般を委任する。皆伐の禁止については、皆伐を行なうと緑化によって土壌条件が改善されても、強い日照量や厳しい乾燥などによるストレスによって、新規植栽などで再び緑化を行なうことが困難であることや森林の公益的機能が得られなくなるためである。

そのため、*Sweitenetia macrophylla* と *Gmelina arborea* の各ラインの植栽樹種の伐期をずらし、複層林のような形で常にある程度の林冠の形成された状態を保つことで、厳しい気候条件のリスクを軽減することが望ましいと考えられる。そのことによって、伐採後に新たに植栽する苗木の生存率や活着率が良くなり、持続的に土地利用を行うことが可能になると考えられる。

最終的な形としては、住民が Community forest として自発的に森林を管理し、運用していくことが望ましい。しかし、最初から住民主導で行なうには気候条件などの緑化におけ

るバリエーションに対する知識や技術的なハードルが高く、また住民の意識や理解も低い。住民の意見を汲んだ上でドナーとカウンターパートが初期植栽のプロジェクト設計を行い、並行して住民の組織化やエンパワーメントによる能力向上を行なう。緑化による厳しい土地利用条件の緩和を行なった状態から、徐々にイニシアチブを住民にシフトしていくことが、同地域のような荒廃地の緑化および持続的な森林利用において有効な方策の一つになるのではないかとと思われる。

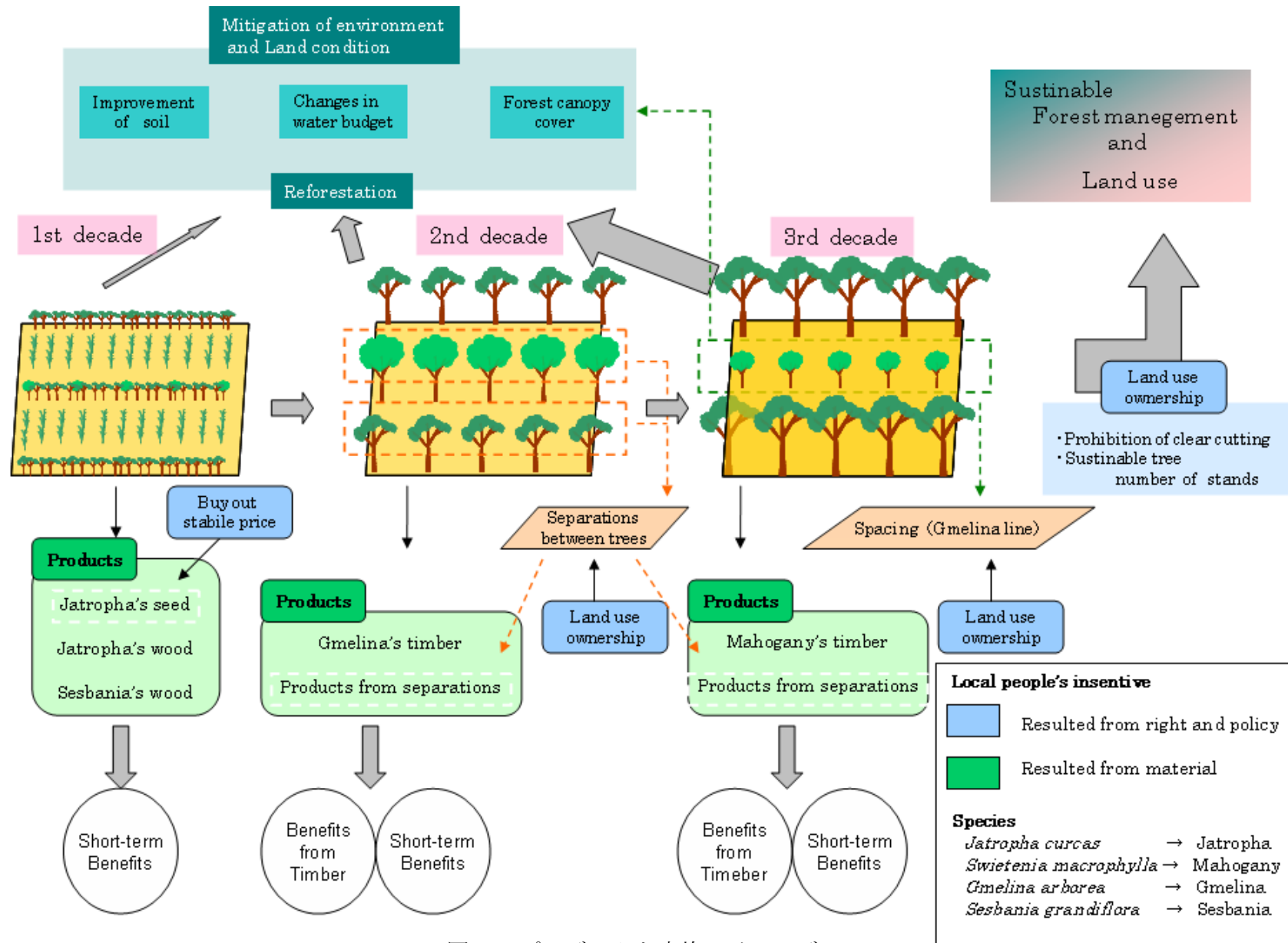


図24、プロジェクト実施のイメージ

引用文献

- Barbier, Edward, B. 1989. Cash crops, food crops, and sustainability: the case of Indonesia. *World Development*, Vol17, No, 6. 879-895
- BPS. 2006. Statistical yearbook of Indonesia 2005/2006
- BPS-NTB. 2004. Nusa Tenggara Barat Dalam Angka Tahun 2004. Kantor Badan Pusat Statistik Provinsi NTB, Mataram
- BPS-NTB. 2008. Nusa Tenggara Barat Dalam Angka Tahun 2008. Kantor Badan Pusat Statistik Provinsi NTB, Mataram
- BPS-Statistics Indonesia, Bappenas and UNDP Indonesia. 2004. National Human Development Report 2004, The Economics of Democracy : *Financing Human Development in Indonesia*
- Brawn, S. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data . *Forest Science*, 35 : 881-902
- DINAS KEHUNANTAN. 2008. Meteorological data of East Lombok
- FAO. 2007. State of world's forests 2007. 109-115
- Google earth
- IPCC. Emission factor database, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/main.php>
- IPCC. 2007. Climate change 2007 : Synthesis report
- Jama , B. Nari, P.K.R. and Kurira, P.W. 1989. Comparative growth performance of Some multipurpose trees and shrubs grown at Machakos, Kenya. *Agroforestry Systems* 9 : 17-27
- 国際緑化推進センターデータ
- 国際緑化推進センター. 1995. 海外森林酸性雨被害対策調査事業 (平成 6 年度調査事業報告書)
- 国際緑化推進センター. 1996. 熱帯林の成長データ集録 (その 2)
- 国際緑化推進センター. 2006. 小規模モデル林造成事業 (平成 17 年度調査報告書)
- 国際緑化推進センター. 2007. 小規模モデル林造成事業 (平成 18 年度調査報告書)
- 国際緑化推進センター. 2009. 小規模モデル林造成事業 (平成 20 年度調査報告書)
- Kumar, A. and Sharma, S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha Curcas* L.): A review. *Industrial crops and products*, 28 : 1-10
- Larcher, W. 2004. 植物生態生理学第 2 版. シュプリンガー・フェラーク東京株式会社
- 文部科学省 科学技術・学術審議会・資源調査分科会. 2005. 五訂日本食品標準成分表
- Morikawa, Y. 2007. Development of Forest Carbon Sink Mensuration Methods for First Commitment Period of the Kyoto Protocol in JAPAN. *B-60 Development of*

*Evaluation Model for Carbon Sink Global Environment Research Fund of the
Ministry of the Environment, Japan*

森川 靖. 2004. 森林の CO2 吸収源としての評価と問題点. 環境資源工学第 51 巻 : 228-233
西ヌサテンガラ州林業局データ

Openshaw, K. 2000. A review of *Jatropha curcas* : an oil plant of unfulfilled promise.
Biomass and Bioenergy **19** : 1-15

只木 良也. 1996. 森林環境科学 : 151, 朝倉書店

只木 良也ほか. 1984. 人間と森の文化史. NHK 市民大学テキスト : 138. 日本放送出版,
東京

Yamada, M. Toma , T. Hiratsuka, M. and Morikawa, Y. 2004. Biomass and Potential
Nutrient Removal by Harvesting in Short-rotation Plantations. *Site Management
and Productivity in Tropical Plantation Forests* (CIFOR.2004) : 223-226