

インドネシアにおけるアグロフォレストリーによる  
経済再生と環境構築への模索

大沼あゆみ研究室 森林パート

小池洋次 高橋佑介 遠山美帆 兵頭秀昭

# 目次

## 第1章 はじめに

## 第2章 インドネシア

### 第1節 概要

### 第2節 熱帯雨林

### 第3節 焼畑

## 第3章 プランテーション

### 第1節 プランテーションとは

### 第2節 プランテーションによる被害

## 第4章 アグロフォレストリー

### 第1節 アグロフォレストリーとは

### 第2節 インドネシアのアグロフォレストリー

## 第5章 農耕地土壌の特性と土壌動物

### 第1節 農耕地における土壌

### 第2節 土壌動物と土壌生態系

### 第3節 プランテーションにおける土壌生態系

### 第4節 土壌生態系とアグロフォレストリー

## 第6章 モデル

### 第1節 はじめに

### 第2節 純増殖

### 第3節 作物生産量関数

### 第4節 努力量 収穫量関数

### 第5節 動学モデル

### 第6節 現在価値の最大化

## 第7章 ケース・スタディ

### 第1節 基本モデル

### 第2節 アグロフォレストリーを導入したプランテーションの最適モデル

### 第3節 の変化と利潤の動向

## 第8章 まとめと考察

## 第9章 政府の政策に対する補足

## 第1章 はじめに

近年、経済活動と環境保全を両立させることは大きな課題となっている。「持続可能な発展」がその解決策であることは言うまでもないであろう。ここで私たちが注目したのは、経済発展を目指して努力する発展途上国である。特に東南アジアの国々は ASEAN を設立し、地域単位で経済発展を進めている。しかしそれには弊害が伴っている。近年では人口増加が進み、その人口に食物供給を追いつかせようと、農業のための土地開発が進んでいるのだ。東南アジアでは昔から農業中心の生活で、焼き畑による移動耕作が行われている。人口が少なかった頃は環境にほとんど負荷を与えず、農業活動を行うことができた。しかし人口増加により焼畑を行う耕作農民が増えると、土地の回復能力が追いつかなくなってしまう。土壌が回復しない土地には森林は育たない。ゆえに東南アジアでは近年、森林破壊が深刻化してしまっている。

	日本
世界	351,691
NAFTA	58,878
米国	52,064
EU15	45,206
東アジア	154,828
アジア NIES	50,939
韓国	17,251
台湾	11,905
香港	12,088
シンガポール	9,696
ASEAN4	44,466
マレーシア	11,888
タイ	11,435
フィリピン	6,117
インドネシア	15,027
中国	59,423
AFTA	59,035
メルコスール	3,000
APEC	238,549

(資料) "Direction of Trade Statistics", June 2004 (IMF)、台湾貿易統計

( <http://www.jetro.go.jp/ec/j/econ/data/matrix2003.xls> )

左の表は日本に対する各国、各連合の輸出額である。これを見ると、アジア諸国の日本に対する輸出額がいかに大きいか分かる。このように、東南アジアの国々は先進国への輸出品により大きな収入を得ている。輸出品の主なものは米・キャッサバ・とうもろこし・パーム油などの作物が中心である。その作物はプランテーションで大量生産されている。このような作物を生産するためには大規模なプランテーションが必要であり、その建設のためにその土地にある木を全て伐採しなければならない。その後には1種類の商品作物が植えられ、その土地の多様性は失われ、土壌は痩せていく。このような土地は回復が難しく、森林破壊の原因となっている。しかし、焼畑による農業は人々の食生活には欠かせないものであるし、プランテーションによる商品作物の栽培も国の収入源の多くを占めているため欠かせない。この2つは発展途上国にとって、切れない生活手段である。だからといってこのままの農業形態で森林破壊を続けてしまえば、砂漠化など将来はもっと大きな障害が

出てくることは間違いない。そうすると、人類の存続さえ危ぶまれる可能性も高い。ゆえに人類が存続し、持続可能な経済発展を遂げるためには、まず人々の生活手段である農業を環境負荷の少ないものに変えていかなければならないのだ。

以下は現在行われているインドネシアの農政である。

- I. 1968年以降、5次にわたる社会経済開発5カ年計画を実施し、これらの中で農業振興が最重点課題と位置付けられている。特に、基本食糧であるコメの安定供給が主目標とされ、1984年によく自給を達成したが、その後も気象災害による被害で輸入を迫られる状況が続いている。また、最近ではベトナム等から安いコメが輸入されるようになり、国内のコメ生産農家に大きな打撃を与えている。
- II. 現行の国家開発5カ年計画(2000～2004年)の中で、食料・農業・農村開発については、(1)アグリビジネスの振興、(2)食糧生産・流通の安定向上、(3)水資源の開発利用を大きな柱としている。

( [http://www.maff.go.jp/kaigai/gaikyo/f\\_z\\_indonesia.htm](http://www.maff.go.jp/kaigai/gaikyo/f_z_indonesia.htm) )

にあるような米の安手供給のために、焼畑農業や大規模なプランテーションの農場経営が推し進められ、森林伐採が続けられているという現状がある。食物の安定供給は人々の生活のために欠かせないことであるが、それは環境ダメージの少ないものであるべきだ。プランテーション農業では半永久的にその土地を使い続けるために、焼畑よりも土地へのダメージが大きい。よって等研究では、東南アジアのプランテーション農業の森林破壊に焦点を置き、プランテーション農業のもたらす環境負荷を削減することをテーマとする。その具体的な例としてインドネシアの森林伐採による環境問題と、その解決策を考えていくことにする。ここで我々が注目したのはアグロフォレストリーという土地の豊かさや生態系の豊かさがある程度維持できる農業形態である。昔行われていた焼畑は耕作した土地を一定期間休ませることで土壌を回復させ、繰り返し同じ土地で耕作活動を行うことができた。ゆえに、我々は土壌の豊かさを維持することができれば、持続可能な農業を行えると考えた。人口が増えてしまった今、焼畑農業で繰り返し同じ土地を使うことは不可能になってしまっている。それに代わる新しい農業形態が必要であり、それがアグロフォレストリーである。まずは現状を把握するためにインドネシアの環境問題の要因の一つであるプランテーション農業とその環境負荷をみとめることにする。そして、当研究で最も重要なポイントであるアグロフォレストリーという概念を説明し、その有効性について展開する。アグロフォレストリーはインドネシアでも少しずつ行われてきているとはいえ、コストの問題でなかなか普及していない。ここで我々はアグロフォレストリーが長期的に見れば、プランテーションよりも経済と環境にメリットがあるものであるということをモデルにより実証していく。アグロフォレストリーの有効性を説明するにあたり、土壌の劣化に焦点を絞る。

## 第2章 インドネシア

私達が論文を展開するにあたって、まず把握しておかなければならないのが、熱帯雨林の減少に伴う環境破壊である。そこで、アジアで最も森林破壊が進んでいるインドネシアを例に、その現状を把握したいと思う。

### 第1節 インドネシア概要



インドネシアの人口は約2億3132万人、人工増加率も1.54%(2002/7)と極めて高い発展途上国である。面積は191万9440km<sup>2</sup>で約日本の5倍の面積にあたり、東西5,100km、南北1,900kmにおよぶ。スマトラ、ジャワ、ボルネオ、スラウェンをはじめ、大小14000を超える島々からなる世界最大の島国でもある。

( <http://www.mofa.go.jp/mofaj/area/indonesia/index.html> )

そのような広範囲にわたる多様な土地条件から、農業は多彩なものとなっている。東南アジア最大の産油国であり、近年工業化が進んでいるが、労働人口率の65%は農林水産業に従事している。米やキャッサバ、トウモロコシなどの自給農業が主体で、輸出されているのはプランテーションで栽培されているゴムやパーム油、そして林産資源である。農業形態は、(1)ジャワ島を中心とする小規模な農業(稲作、キャッサバが中心)と、(2)スマトラ島等外領におけるエステートでの商品作物(パームオイル、コーヒー、ゴム等)栽培に大別される。コメの6割はジャワ島で生産されている。

年	1996	1997	1998	1999	2000
米(粳)	5,110	4,938	4,920	5,087	5,118
キャッサバ	1,700	1,513	1,470	1,646	1,535
トウモロコシ	931	877	1,017	920	935
パーム油	490	539	590	625	695
コーヒー	46	45	46	42	40

(注)FAO資料 [http://www.maff.go.jp/kaigai/gaikyo/f\\_z\\_indonesia.htm](http://www.maff.go.jp/kaigai/gaikyo/f_z_indonesia.htm)

インドネシアの農業の特徴は経営規模が様々であること、またジャワ島と外領の農業開発が不均衡であることである。ジャワ島には全人口の6割が集中しているため、現在国内移民政策や島々の開発が進んでいる。

(インドネシア)

労働力人口	144,034
就業人口	90,807
農林、狩猟、漁業	39,744(43.7%)
鉱業・採石業	N.A.
製造業	12,086
電気、ガス、水道業	N.A.
建設業	3,838(4.2%)
卸・小売業、飲食、ホテル	17,469(19.2%)
運輸、倉庫、通信業	4,448(4.8%)
金融、保険、不動産・事業サービス	1,128(1.2%)
地域・社会および個人サービス	11,003(12.1%)
その他	1,091(1.2%)

	インドネシア	タイ	マレーシア	フィリピン	イギリス
< 農林水産業の地位 >					
農林水産業/国内総生産	19.50%	11.20%	10.70%	17.40%	0.60%
< 農地の状況 >					
農地/国土全体	22.10%	36.60%	24%	37.80%	69.824%
< 農家人口 >					
農家人口/総人口	44.80%	49.70%	18.40%	40.00%	
農林水産就労人口/総就労人口	43.7%	57.20%	19.40%	40.20%	1.40%

出典

BSP Statistics Indonesia

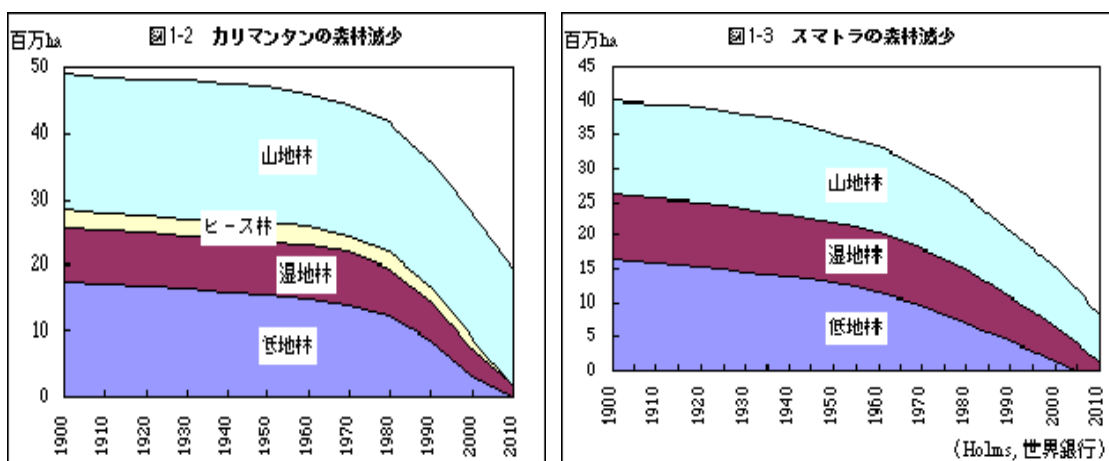
これはインドネシアにおける産業構造を示しているが、農林水産業が大きな割合を占めていることが分かる。

( [http://www.maff.go.jp/kaigai/gaikyo/f\\_z\\_indonesia.htm](http://www.maff.go.jp/kaigai/gaikyo/f_z_indonesia.htm) )

表を見ると、インドネシアは典型的な発展途上国であることが分かる。農林水産業がGDPに占める割合もイギリスに比べると高く、また農業就労人口を見ても、高い割合であることが分かる。しかし、だからと言って自由に焼畑を行う農業を続けてしまえば、森林はこれからも減っていく一方である。やはり、なんらかの形で森林を維持しながら生活を続けていく農業形態が必要である。

## 第2節 インドネシアの熱帯雨林

インドネシアでは近年大規模な森林減少が続いている。インドネシア林業庁の推計によると、1997年以降、年平均の森林減少面積は200万haであるとされている。1985年～1997年までの年平均減少面積が170万haであったのに比べると森林減少のスピードが速くなっていることがわかる。



(<http://jatan.org/genjou-indn.html>)

この図はインドネシアの主な島における森林面積を示している。このまま行くと2010年には1900年の半分以下の面積となってしまうことがわかる。このことから森林伐採は深刻な問題であることが分かる。インドネシアの熱帯雨林の破壊の要因は大きく2つ考えられる。まずは木材輸出に伴う資源としての伐採、そしてもう一つは焼畑やプランテーション建設による森林破壊である。最近では違法伐採も増加し、国内の木材総生産量のうち約8割が違法伐採によるものと推計されている。またインドネシアでは先進国によるプランテーションが労働需要の大きな糧となっていて、広大な面積の森林が焼畑として焼き払われてしまっている。今、インドネシアを含む東南アジアではアブラヤシのプランテーションが増加している。一見すると緑が豊かで森のように見えるが、植えられているものはアブラヤシの1種類だけである。ゆえに野生動物はその土地から追いやられ、生物多様性

が失われてしまう。他にもこのプランテーションが抱える問題は低賃金労働者問題や危険な農薬の使用問題など様々である。

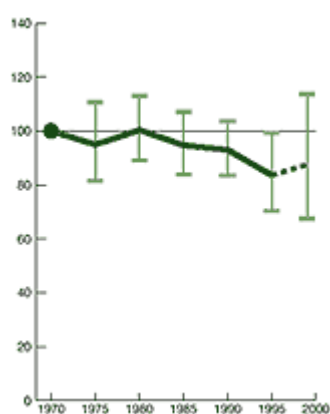
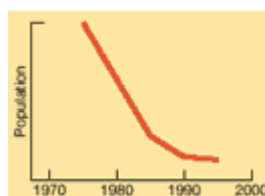


図 3.GLOBAL FOREST

ECOSYSTEMS INDEX, 1970-99

( <http://www.wwf.or.jp/activity/lpr/lpi.htm> )

### ギンイロテナガザル



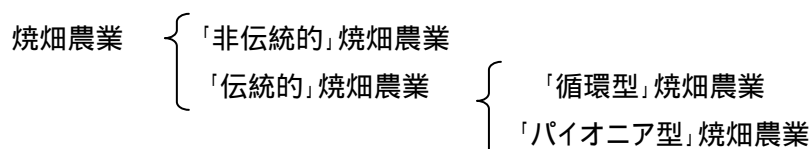
上の左のグラフは地球上の森林の生態系の豊かさや劣化の状況を数値化し、グラフで示したものである。このグラフからも分かるように森林の生態系の豊かさは年々減ってしまっている。これには森林伐採が大きく関係していると考えられる。また右図のギンイロテナガザルはインドネシアのジャワ島西部および中央部の熱帯雨林にのみ生息する固有種である。ジャワ島の人口増加に伴い、生息地である森林が急激に減少している。現在ギンイロテナガザルは、おそらく3000頭に満たないと推測されており、その大半が、ウジュン・クーロンとグヌン・ハリムンの自然保護区に生息している。グラフを見てもらうと、年々ギンイロテナガザルの個体数が減少しているのが分かる。このように熱帯雨林が伐採されてしまうと、豊かな生態系を維持することは難しくなってしまうのだ。森林伐採の問題は早急に解決すべき問題である。

### 第3節 インドネシアの焼畑農業

焼畑農業とは森林、草原を切り払い、倒れた樹木などを燃やして肥料にすることでイモ類、雑穀類などを栽培する農業のことを言う。火入れされた土地は 1,2 回作付けされた後、植生を回



復させるために一定期間放置される。そしてある程度森が回復してからまた耕作地として利用される。このような焼畑民族によって行われる伝統的な焼畑農業は持続可能なものであり、熱帯雨林減少の原因ではない。焼畑農業は「非伝統的」焼畑農業と「伝統的」焼畑農業とに分けられる。「非伝統的」焼畑農業とは言うまでもなくプランテーション農業のことを言い、「伝統的」焼畑農業とは昔から続いている自給農業のことである。また、「伝統的」焼畑農業も、集落を形成して定住する「循環型」焼畑農業と、移住しながら生活する「パイオニア型」焼畑農業に分けることが出来る。



ここで注意しなくてはならないことは、「非伝統的」焼畑農業であるプランテーションだけが森林破壊の要因ではないということである。「循環型」焼畑農業は、土壌の循環に合わせてうまく土地の利用をするが、「パイオニア型」焼畑農業は土壌の循環を乱し、土地を腐らせる要因となるのだ。東南アジアの山岳地帯には、多くの少数民族が「循環型」焼き畑農業を営んでいる。しかし最近では商業目的の換金農作物を安定して供給するために、森林を長期的に利用してしまうため土地の荒廃をひきおこしつつあるのである。また人口増加により都市を追い出された人々が焼畑を行うため、焼き畑面積を拡大させてしまっている。

年	人口(万人)
1930	6,100
1961	9,710
1971	11,920
1980	14,690
1990	17,860

左の表はインドネシアにおける年別の人口を表している。このデータによると、1年に約300万人、毎日1万人ずつ増える(生まれるではない)という計算となる。このように人口が増加しているにも関わらず、今までどおりのペースで焼畑を行ってしまっている。この人口増加に対応した農作物の生産量を求めた結果、休耕土地の期間が短くなり、10~15年の期間をおいて火入れをしてきた伝統的焼き畑耕作が、極端な場合は3年にまで短縮されている。ゆえに森林植生は回復せず、土壌の肥沃度は低下してしまっている。

これが「パイオニア型」焼畑農業の問題点である。一方プランテーションで問題となっているのは上記で記した低賃金労働者問題と危険な農薬の使用問題などである。プランテーションが作られる際には、皆採が行われ、そこに半永久的にプランテーションを経営する企業が居座る。ゆえに広大な土地が企業に独占され、住民のもとに戻ってこないのである。このようにプランテーション開発によって土地を追い出された住民はプランテーション農園で働くか、都市に出て職を探すかのどちらかである。しかしプランテーション農園で働く人は安い労働料で過酷な労働条件を強いられているのが現状である。また危険な農薬を使うことで土地は痩せ、かつては森だった場所に再び森林が形成されることは一切なくなってしまう。しかし単純にプランテーションを減らせばよい、焼畑をなくせばいいという結論は出せないのである。なぜならば大規模プランテーションには農園の他、加工施設な

ども併設されるため大量の雇用を生んでいることは否めないからである。しかし今私達には、環境に配慮した市場社会形成が求められている。森林破壊は、地球温暖化のみではなく、その土地の生物の生息地を脅かし、生態系の破壊にまで発展する危険性を備えていることから、早急に解決しなければならない環境問題の一つとなっているのである。

## 第3章 プランテーション

第2章ではインドネシアの焼畑について少し触れたが、第3章ではプランテーションとその被害状況について論じ、早急に解決すべき環境問題であることを再認識したいと思う。

### 第1節 プランテーションについて

プランテーションとは、大量の資本を投入し、先住民や奴隷などの安価な労働力を使い、広大な農地に単一の商品作物を栽培する大規模な農地経営のことである。16世紀頃からヨーロッパの強国がインドや東南アジアを侵略して、現地の人間を使ってコーヒー、さとうきび、茶、麻などを強制的に栽培させ、生活に困るような安値で買い叩くというプランテーションを次々につくらせた。国中を数種類の嗜好品やゴムなどの作物に頼る経済構造にされてしまうと、食糧の自給が難しいうえに相場次第で経済に大打撃を喰らうため、その国は自立が困難になる。第二次大戦が終わるまでアジアにおいて自力で独立した国が1つもないのも、その後東南アジア諸国の成長が遅れたのもそれが原因の1つであり、現在も新たな農地を作るために熱帯雨林が焼かれているのもその後遺症の1つと言えなくもない。東南アジアの多くの地域が、欧米諸国の植民地であった19世紀から20世紀前半にかけて、植民地の支配者たちが持ち込んだプランテーション栽培方式が、熱帯雨林を駆逐する先鞭をきいたのである。砂糖やコーヒー、ゴム、コショウのような世界市場向けの熱帯農産品の大規模な農園開発が、熱帯林におきかわって進められたからだ。この換金作物の栽培は大きな経済的利益をもたらしたので、その後も第二次世界大戦後に独立した東南アジア諸国の農業政策にも受け継がれた。

インドネシアでは20世紀に入ってからプランテーションの開発が急速に進み、資本はオランダだけでなくヨーロッパ、アメリカからスマトラ島に投じられた。特に北スマトラのデリ地方はタバコのプランテーションが開発され、後にゴムにも本格的に拡大された。このようなプランテーションの隆盛により、インドネシア地域からの輸出において、スマトラ島などの外島部の比重が増えた。これら外島の経済的優位を決定的にしたのは1920年代のゴム・ブームである。インドネシア独立後、イリアン問題の紛糾から植民地のシンボルでもあった外国人所有の大農園は国家に接收され、多くの農園経営者はインドネ

シアを脱出し、経済が混乱する中で熱帯作物の生産は減少した。また、戦後の一次産品である農産物価格の相対的割安によりプランテーション農業に対する魅力は減じた。しかし、ゴム、パーム油は今でもインドネシアの主要輸出品目であり、今日もゴムのプランテーションは健在である。しかしゴムの木が古くなり生産性が落ちるとアブラヤシに植え替えられ、さらに熱帯雨林が開発されてアブラヤシのプランテーション方式は拡大を続けている。

## 第2節 プランテーションによる被害

このようなプランテーション農業による単一栽培は、土壌の養分を吸収する一方であり、植生によるリター供給も見込まれないため、次第に土壌の肥沃度は衰えてしまう。これにより収穫量は次第に減少してゆき、最終的には土壌中の養分が枯渇し、農作物生産が不可能なほど地力が低下してしまう危険性がある。また、単一の作物栽培では、病虫害の被害を大きく受けやすいといった問題点もある。以下は、インドネシアのランポン州において同一耕地で2シーズン連続で行った作物収量試験の結果を示した表である。（出典 龍溪書舎「東南アジア農業生産の課題」滝川勉・廣瀬昌平著）

インドネシア・ランポン州の開墾初年度と2年目の収量比較 (kg/ha)

		Haduyang村		Bulusari村	
		1973/74	1974/75	1973/74	1974/75
無肥料区	陸稲	666	553	442	196
	とうもろこし	550	251	20	0
	キャッサバ	5,800	6,700	4,533	4,400
肥料区	陸稲	2,298	1,249	918	1,120
	とうもろこし	1,950	316	1,500	174
	キャッサバ	6,266	7,933	6,600	4,200

注)両村とも同一圃場における比較

このデータを見ても分かるとおり、施肥の場合は多少の収量増加を見せる場合もあるが、多くの場合農作物の連続耕作を行うと土壌の肥沃度が低下し、収量は徐々に減少していつてしまう。近年東南アジアにおいて拡大するプランテーション農業は、このような被害を更に深刻化し、ひいては砂漠化という最悪の状況を引き起こしかねない。

## 第4章 アグロフォレストリー

次に、当研究で私達が焦点を当て、経済と環境の双方にとって利点をもたらすと考えている「アグロフォレストリー」という概念について触れてみたいと思う。

## 第1節 アグロフォレストリーとは

Agriculture（農業）と Forestry（林業）を組み合わせた合成語で、熱帯雨林の生態系の特徴である生物多様性にならって、なるべく多彩な生物の生育を組み合わせる考え方がそれである。つまり、多種多様な樹木を育て、その間でさまざまな作物の栽培や畜産を行う複合経営である。アグロフォレストリーという用語は比較的新しいものであるが、その概念は農業の起源の時代から長年にわたって農民たちが身に付けてきた伝統的知識であり、先に記した「伝統的・循環型」焼畑農業も、熱帯雨林の生態系に学んで多彩な作物を巧みに組み合わせしており、アグロフォレストリーの先例と見なすことができる。最近の科学とその伝統知識を結合させ始めたのは20年前ごろだと言われている。国際農業研究協議グループ（CGIAR）のひとつである国際アグロフォレストリー研究センター（ICRAF）が1978年にケニアに設立され、国際的にもアグロフォレストリーの研究は進みつつある。国際共同研究人材育成推進事業（JIREC）のサイトによれば、現在、約12億人、世界人口の20%がアグロフォレストリーの生産物や機能に依存しているとも言われている。

（JIREC ホームページ URL：<http://ss.jircas.affrc.go.jp/kokyoke/jirec/icraf.html>）

また、日本においても、農家が農業経営の中に森林を組み込んで利用するという農用林と呼ばれる方法を古くから採用していた。新潟県山北村における伝統的な焼畑林業に代表されるように、アグロフォレストリーという農業形態は昔から存在していたと言える。また、魚付林、林内放牧などの伝統もあり、これらもアグロフォレストリーのひとつと言えるだろう。

アグロフォレストリーの栽培形式には、面的な土地利用の観点から、林地と農地を個別に配置する分離型配置、耕地の周りに植林する周辺植林型配置、樹木と作物を相互に植え込む条列型配置、混合型配置の四つに分類できる。



\* 樹木、多年生作物    : 穀物、野菜など一年生作物    農地と林地の平面的配置図

アグロフォレストリーの利点は、土壌の長期的な利用を可能にし得るよう土地を改善することができるということである。森林を伐採して農業だけを行うと、農産物はすぐに得られ収入につながるが、裸地となった農地の土壌は次第に悪化していかざるを得ない。一方、森林伐採後に林業だけを行うと、木が育つまで当分の間は無収入となる。ところが両者を組み合わせたアグロフォレストリーを実施する事で、同じ土地から農作物と木材の両方が、長期にわたって得られるようになり住民の収入は安定する。また、樹木が養分を補給した土壌の一部を農作物が吸収するという循環作用が永続的に行われ、長期にわたって土地の保全ができる。また、最近の研究では、アグロフォレストリーは炭素吸収能力や生物の多様性に関して、原生林の1/3~2/3程度の機能を持つという報告もあり、原生林が果たしていた役割をある程度復活させていると言える。また、商品樹木の栽培は、食用作物の栽培より雇用吸収力が高く、採算性も高い。

アグロフォレストリーは、地域の社会条件、自然条件、土壌条件や気象条件、そして住民たちが何を求めているかによって、植える作物も樹種も、その組み合わせ方もさまざまである。木材やパルプ材を採取するのか、農作物を直射日光から守る庇陰樹とするのか、薪炭材とするのか、あるいは果実を採取するのかなど、目的によって植える樹種も多彩であり、農作物にしても、香辛料、嗜好料、薬草、繊維と多くの組み合わせが考えられる。また、アグロフォレストリーは農業と林業の組み合わせのみではなく、多くの可能性がある。例えば次の例がある。

#### 1. シルボ・パストラル (Silvo-pastral)

林業と畜産業とを組み合わせたアグロフォレストリー。植林地で木材生産をしながら、一部に飼料用の草地を設けて、家畜、特にウシを飼育するというものであり、家畜の大規模な産業用造林を組み合わせたものから、農業に数頭の家畜を放牧するといったものまである。森林からの落葉や実などは家畜の餌として利用でき、森林の育成に障害となる下草や雑草は家畜の放牧により除去することができる。

#### 2. アクア (Aqua) フォレストリー

林業と漁業を組み合わせたアグロフォレストリー。マングローブ林の下でエビの養殖を行う例あり。これは、マングローブの枝根がエビの生育に格好の環境を与えていると考えられている。

#### 3. アグロシルボフィッシャリー (アグロシルボパストラル)

農・林・水産または畜産を組み合わせたアグロフォレストリー。代表的なものは、ホームガーデン (屋敷林、屋敷畑) など。これは、家庭菜園・養魚池・家畜小屋・家周りに有用樹を植えたもの。

#### 4. アクアポニクス (水耕栽培+養魚)

水槽のなかで養魚を、水面で野菜などを水耕栽培するというもの。

#### 5. アグロ・パストラル (農牧複合)

農作物の区画と家畜飼料用の草地区画を循環させたり並立させたりしたもの。

他にも様々な形態が存在するが、アグロフォレストリーには柔軟性や多様性が求められるのである。

## 第2節 インドネシアのアグロフォレストリー

インドネシアのアグロフォレストリーは湿潤熱帯に成り立っており、多様な樹木作物で構成されている。また、人口稠密なジャワ島では、水田および常畑システムの上に発達しており、19世紀の急激な人口増加により農地が開墾され、現在の森林率は約23%となっているが、農地のかなりの部分には果樹やそのほかの有用樹が植えられており、豊かな緑に覆われている。一方、人口密度の低いカリマンタン島などでは、焼畑システムが基本となり、ゴム、ニッケイ、カカオなどの樹園地が焼き畑をしながら造成されてきた。インドネシアは、基本的に森林が成立しやすい自然環境にあり、アグロフォレストリーを発達させるには都合がよい。

インドネシアの伝統的なアグロフォレストリーとして「トゥンパン・サリ (Tumpang Sari)」というものがある。「トゥンパン」は挿入、「サリ」はメイン作物という意味で、1856年にジャワ島に導入された人工造林の方法のことである。この当時は、耕地不足を補い余剰人口を養うための植民地政策の一環として考えられ、農耕用地を創出する事に主眼が置かれていたが、1881年の森林法規では樹木の生育を良くする手段としてのみ奨励されることになった。そして1953年には、トゥンパン・サリは本質的には林業であり、食糧増産のために支障を受けてはいけないとされ、木材生産のためのアグロフォレストリーであったが、人口の増加にともなって、徐々に林業ではなく地域開発のニーズに合わせるようになっていった。

現在のトゥンパン・サリは、主要樹木となるアフリカンマホガニーと多目的のギンネム、果樹のドリアンなどを植樹し、各世帯の希望や土地の事情に合わせてピーナッツ、コーン、キャッサバ、パパイヤ、コーヒーなどの農作物を植付け樹木と共に育てるといった方法がとられている。森林再生の傍ら、農地不足の小農民が農作物を2～3年間、間作するというもので、地主である国家は、植林・管理コストを節約できる。しかし、林冠の閉鎖後、農民は別の区画へ移動しなければならない、また、植えた樹木が自分のものにならないので、土地をもたない農民は再び伐採開墾したくなる、という短所もある。

## 第5章 農耕地土壌の特性と土壌動物

前述の通りアグロフォレストリーの最大の特徴は、いくつかの作物を同時に栽培することでその土地の肥沃度をある程度保持し、プランテーションのように土地を荒廃、ひいては砂漠化などの環境問題を引き起こさせないという点にあるといえる。ではアグロフォレストリーは具体的に土壌にどのよ

うな効果を与えるのであろうか。そこでこの章では、農耕地における土地の荒廃の原因、森林・アグロフォレストリーにおける土壌回復の一端を担っている土壌動物と土壌生態系、プランテーションにおける土地の荒廃、土壌保全の方法、というものに注目して考察することとする。

## 第1節 農耕地における土壌

最初にアグロフォレストリーやプランテーションに限らず、農耕地における土壌について考えていく。農耕地の土壌は、自然の土壌の場合と異なり、人間によってその土地・土壌を維持、管理されている。すなわち肥沃度と土壌の物理的な構造の状態に人間の管理が影響を及ぼし、人為が生産力を大きく左右することは言うまでもない。

植物の養分吸収量 (kg/ha/年)

	N	P	K	Ca	Mg
森林					
ブナ	80	5	32	56	11
ヒノキ	48	3	25	47	8
アカマツ	70	7	40	29	5
草原					
ススキ	23	2	30	5	3
農園					
イネ	120	28	130	19	11
コムギ	150	25	140	20	11
ジャガイモ	224	33	322	56	27
テンサイ	396	53	454	61	72

出典 木村真人, 土壌と地球環境問題 P8

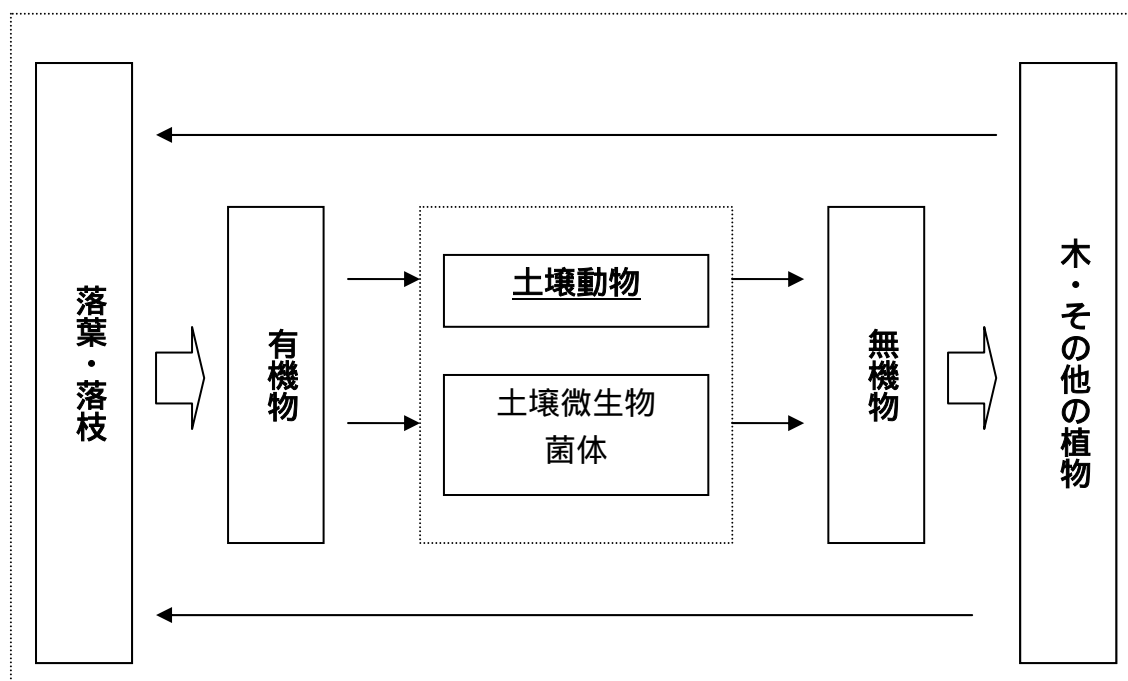
以上の表は植物の養分吸収量を森林・草原・農園別に見ている。この表は森林や草原における養分吸収量を、土壌から供給される養分量、すなわち養分の天然供給量の範囲の目安とすることができる。これによって農園においては、窒素、リン、カリについて天然供給量を大きく上回っていることがわかり、農園においては養分補給が必須であることがわかる。また、作物を栽培する農耕地の土壌では収穫による養分の収奪があるだけでなく、耕起や除草などの農業作業によって不可避免的に元来の土壌の構造を破壊し、有機物の分解を早めるため、排水や保水の機能をも弱めることになるのである。したがって土壌を回復させるためには、農耕地に施肥が必要となるばかりでなく、作物残渣をはじめする多量の有機物を施用し、あるいは牧草や緑肥作物を栽培するなど、土壌有機物の水準を高め、モグラ、ミズズメ、ヤスデ、ダニなどの各種『土壌動物』の働きを促して構造の回復させる必要が出てくるのである。このように、農耕地の土壌は自然の土壌とは異なり、人間

の注意深い管理がなければ、その肥沃度も構造も維持することができず、生産力も保ち続けることができないということになり、土壌は有限の資源になり得るということが言える。

## 第2節 土壌動物と土壌生態系

森林においてはどのようにしてその土壌の肥沃度は保持されているのだろうか。先に『土壌動物』の働きを促して構造の回復させる必要が出てくるのである、と書いたが、では土壌動物が土壌の回復にどのような役割を負っているのだろうか。そこでここでは森林において土壌動物と土壌生態系について見ていくこととする。

森林植物は土壌から吸収した各種養分や水分、大気から吸収した二酸化炭素を用いて光合成により有機物の生産を行っており、その一部を落葉落枝などとして土壌に還元している。それら落葉落枝は、土壌動物や、細菌、放線菌、糸状菌、担子菌、藻類などの各種微生物の栄養源かつエネルギー源として分解・無機化される。こうして土壌動物の生命活動によって最終的に分解・無機化された養分は、植物に必須な養分として供給され、一部は植物体内に蓄積されるが、残りは再び落葉落枝などの有機物として土壌生態系に還元されているのである。すなわち、土壌生態系と森林植物との間で絶え間ない物質循環が行われているのである。この生態的な物質循環過程によって、腐植などとして土壌に養分の蓄積が行われるとともに、土壌の生物学的、理学的、および科学的性質が徐々にではあるが向上し、ひいては土壌の肥沃度が向上する。そのため、そのような過程は森林の自己施肥作用とも呼ばれており、一般に森林下に発達している土壌の肥沃度が高い所以となっている。





### 第3節 プランテーションにおける土壤生態系

以上見てきたように、土壤の回復の一端を土壤動物が担っており、この物質循環において非常に大きな役割を持っていることがわかった。ではプランテーションのように森林が伐採されてしまったところでは土壤はどのような変化が起きているのであろうか。まず森林伐採などの森林消失は、森林と土壤生態系との間で定期的に行われている物質循環の破綻を意味し、すなわち土壤動物への落葉落枝の供給を断絶してしまう。これによって土壤の有機物の消耗が一方向的に進行する。また、日光が直接地表に到達することになると、日射エネルギーの増大により地温が上昇するため、腐植などの土壤有機物の分解無機化が一般的に促進される。そのため、落葉落枝の供給が停止してしばらくすると、土壤中の腐植の消耗が進行するとともに、それらを栄養源かつエネルギー源にしていた土壤動物の種数や生息数が減少してしまい、もはや土壤の回復が困難となってしまう。プランテーションは先に見たように森林を伐採し、さらに焼き払って農業を営むという焼き畑の形態を多く取っているわけだが、これは森林下で培われた土壤肥沃度、あるいは地力、すなわち森林と土壤生態系との間で行われる物質循環過程の一環として形成れた土壤表層の良好な生態学的、理学的、および化学的な性質を利用して、無施肥かつ無耕起で農作物の生産を行うものである。したがって、農作物の栽培や収穫を行うたびに各種養分を収奪され、地力が被弊してしまう一方である。ここで伝統的な焼き畑農業に則したならば、作物収穫量が減少すると、休閑・放棄し、長い養分蓄積期間をおくことで森林を再生させる方法をとるが、実際には土地の生産力が十分に回復しない短い休閑の繰り返しにより、土地は次第に痩せて耕地に適さなくなり、これが熱帯における草地化・裸地化、ひいては砂漠化につながっていくのである。

1平方メートルあたりの個体数

	森林	焼き畑後
ダニ	11,223	5,356
トビムシ	3,810	960
ミミズ・やすでなど	310,4	155,2

出典 木村真人, 土壤と地球環境問題 P127/128

### 第4節 土壤生態系保全とアグロフォレストリー

土壤生態系の各種の性質は、上物である森林が破壊され消失すると極めて損なわれやすく、またその劣化の程度が進み退化逆行すればする程、元の状態に戻すことが困難となる。したがって、いろいろな目的で森林になんらかの行為を及ぼす場合には、その成立基盤である土壤生態系の保全を第一義的に考えなければならないのである。これまで世界各地で行われてきた森林開発や林業活動は、必ずしもそのような考えにのみ基づいて行われてきたものばかりではないことは、近年急激な森林減少問題や、それに伴う地球環境問題が国際的な緊急課題とされていること

からも明らかである。

これまでは、プランテーションのように作業が比較的単純で効率的、しかも大量生産できるなどの利点があるため、同じ種類の作物を時を同じくして大面積に栽培・育成し、一斉に収穫する方法が採算性の最もよい施行方法として採用されてきたが、そういったプランテーションでは先に見たような土壌の荒廃が引き起こされてしまった。その反省から、近年は林地を大面積に裸にしない施行法として帯状皆伐法、画伐法、混交林法、複層林法、そしてその一環としてアグロフォレストリーが実行に移されつつある。アグロフォレストリーは第3章でも詳しく見た通り、様々な作物を組み合わせで行われる農業であり、その多くはある一定の間隔で樹木を植え、その間に農作物を植えるという形態が取られている。木を植えるということは、落葉落枝の供給がなされということを意味し、また木陰も創出されるため、土壌に直射日光が当たらなくなり、地熱上昇が抑制されるので、腐植などの土壌有機物の分解無機化が抑止される。これによって土壌動物や各種微生物の栄養源かつエネルギー源である有機物が確保されるため、先に見た土壌における物質循環がなされ、土壌が回復することが期待できるのである。しかしアグロフォレストリーを含むこれらの施行法は、いずれもコストが高くなることが避けられず、経営者を圧迫する恐れがある。そこで次の章では、アグロフォレストリー農園において土壌生態系を保全しつつも、経営者が利益を上げられるようなモデルを考えてゆくこととする。

## 第6章 モデルによる分析

### 第1節 はじめに

モデルでは、モグラ、ミミズ、ヤスデ、ダニなどの土壌動物を再生可能資源とする。また、土壌の肥沃度が土壌生物の個体数に比例するという強い仮定を持つものとして話を進めていく。

### 第2節 純増殖

今、 $R_t$  を各種土壌動物の個体数を表すことにする。

関数  $F(R_t)$  は、新規バイオマスの純量または土壌生物の追加的個体数が、現在のバイオマスまたは現在の生物個体数の関数。つまり  $R_t$  の関数になっていることを示している。

ここで、ロジスティック関数を

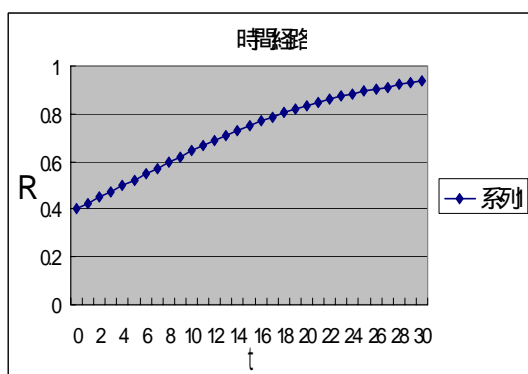
$$F(R_t) = rR_t(1 - R_t/K) \quad (1.1)$$

と表すことにする。 $r > 0$  は内的増殖率、 $K > 0$  は環境容量を意味する。

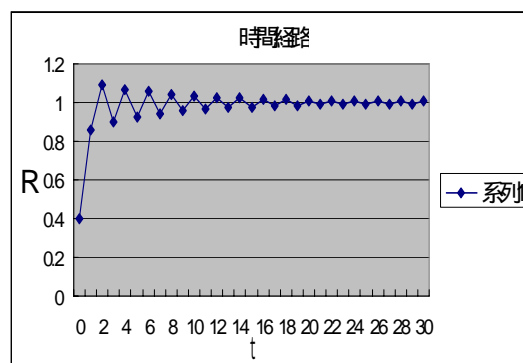
$F(R) = 0$  が、作物を栽培していない状態、あるいは「手付かずの」土壌生物資源の定常状態的均衡解に対応している。 $F(R) > 0$  の時、増殖率は正である。 $R = 0$  と  $R = K$  で定常状態となる。

下の図は、 $K = 1$  の時の  $t = 0, 1, 2, 3, \dots, 30$  についてのシミュレーションの結果を表している。 $r$  の

値に関係なく環境容量に収束していることを確かめてもらえると思う。

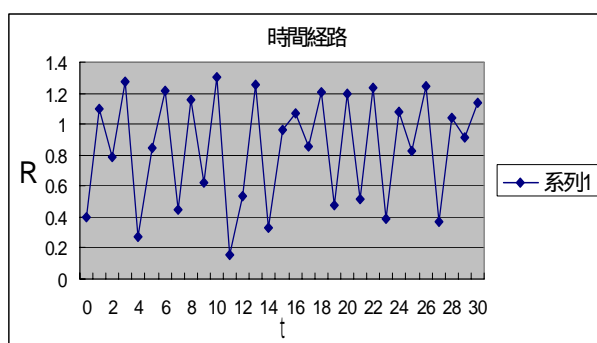


$r = 0.1$  の場合



$r = 1.9$  の場合

ただし、 $r = 2.9$  を超えると、内的増殖率が環境容量を超えてしまい、カオス常態が起きる結果となった。



プランテーション農業では、土壌は劣化をしていく一方で土壌改良の見込みがないことから、土壌生物は増殖しないと仮定をおいて話を進めることにする。

### 第3節 作物生産関数

本研究では、作物生産関数は、 $t$ 期の収穫量を、 $t$ 期の土壌生物資源と収穫努力とに関連づけると考える。収穫が産出であり、土壌動物資源と収穫努力とが投入である。つまり、開墾地を増やし、農作業を増やそうとする(努力量の増加)と、土壌動物の個体数が変動し、農業の収穫量に影響を及ぼすのである。

一般に生産関数は  $Y_t = H(R_t, E_t)$  と表される。ここにおいて、努力量とは、生産にかかる手間と考えることにする。努力量を増やせば増やすほど開墾地の面積は増え、土壌生物の個体数は増えることになり、結果として生産量は高まる。

生産関数は凹関数で、正の1階の偏微分 ( $\partial H(\bullet)/\partial R_t > 0, \partial H(\bullet)/\partial E_t > 0$ )、非負の2階の交差

偏微分 ( $\partial^2 H(\bullet)/\partial R_t \partial E_t = \partial^2 H(\bullet)/\partial E_t^2 = 0$ ) 非正の 2 階偏微分 ( $\partial^2 H(\bullet)/\partial R_t^2 = 0$ ,  $\partial^2 H(\bullet)/\partial E_t^2 = 0$ ) を持つ。

当研究では生産関数  $Y_t = qR_t^\alpha E_t^\beta$  で、 $\alpha = \beta = 1$  であるようなケースを考える。つまり、 $Y_t = qR_t E_t$  である。この関数は、努力量あたりの収穫量 ( $Y_t/E_t$ ) が土壌生物のストック水準  $qR_t$  に比例するという仮定から生まれている。

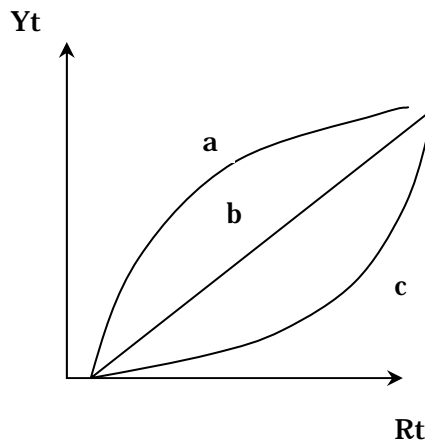
#### 第4節 努力量 作物収穫量関数

t期の生産量が第2節で考えた生産関数  $Y_t = qR_t E_t$  によって与えられる作物栽培を考えてみる。収穫を行うと、資源ストックが

$$R_{t+1} - R_t = -sY_t \quad (1.1)$$

$$R_{t+1} - R_t = F(R_t) - sY_t \quad (1.2)$$

に従って変化する。(1.1)は単一栽培のプランテーション農業、(1.2)はアグロフォレストリーを導入したプランテーション農業である。



土壌動物の数は生産量によって大きく変化する。土壌動物が増加すれば、土壌中の栄養の循環がよくなり、生産量も増加する。つまり、 $R_t$  と  $Y_t = H(R_t, E_t)$  の関係は左の図のようになる。a, b, c のどれに当てはまるかは分からないが、形のような比例の関係となると考えられる。

そして、生産量の単位あたりの増加量に対する土壌生物の減少分を  $s > 0$  という記号で表している。(1.1)の方程式に生産関数を代入し、定常状態 ( $R_{t+1} = R_t = R$ ) で評価すると、 $F(R) = sH(R, E)$  となる。これで  $s$  が生産量と純増殖量との比率を表すことを再認識できる。また、定常状態において生産量が純増殖量に  $s$  を掛け合わせたものと等しくなるということも示している。

## 第5節 動学モデル

### 4-5-1 単一栽培のプランテーションのモデル

作物栽培の動学モデルは、2つの差分方程式からなる。

生産資源に伴う資源の変化を記述する式

式(1.1)に、生産関数を代入する。

$$R_{t+1} - R_t = -sH(R_t, E_t) \quad (1.3)$$

努力量の変化を示す式

単位あたりの価格を  $p > 0$ 、単位あたりの努力に要する費用を  $c > 0$  とすると、

$t$  期における利潤または純利益は  $\pi_t = pH(X_t, E_t) - cE_t$  と表すことができる。

$t$  期における利潤が正であれば、 $t + 1$  期における努力量は拡大されると考える。

反応が線形であると仮定すれば次のように表せる。

$$E_{t+1} - E_t = \eta[pH(R_t, E_t) - cE_t] \quad (1.4)$$

ここで  $\eta > 0$  は、調整パラメーターと呼ばれる。

この(1.3)と(1.4)の差分方程式を繰り返すことで、一つの「動学系」として表現することが出来る。

作物栽培の動学体系がどうふるまう可能性があるのかを示すために、ロジスティック増殖関数と生産関数を使って(1.3)(1.4)を次のように書き換えてみる。

$$R_{t+1} = R_t - sH(R_t, E_t) = R_t - qsR_tE_t = [1 - qsE_t]R_t \quad (1.5)$$

$$E_{t+1} = E_t + \eta[pH(R_t, E_t) - cE_t] = E_t + \eta[pqR_tE_t - cE_t] = [1 + \eta(pqE_t - c)]E_t \quad (1.6)$$

変数  $r, s, q, \eta, p, c$  と初期値  $R_0, E_0$  が揃えば、このシステムを前向きに繰り返し計算すれば、 $R_t, E_t$  の振る舞いを観察することが出来る。

### 4-5-2 アグロフォレストリーを取り入れたプランテーションの動学モデル

単一栽培のプランテーションモデルと同様のプロセスで2つの差分方程式を表す。

生産資源に伴う資源の変化を記述する式

式(1.2)に、生産関数を代入する。

$$R_{t+1} - R_t = F(R_t) - sH(R_t, E_t) \quad (1.7)$$

1 努力量の変化を示す式

努力量は単一栽培のプランテーションにおいても、アグロフォレストリーにおいても同等なので、

(1.4)と同じであると考えることができる。

$$E_{t+1} - E_t = \eta[pH(R_t, E_t) - cE_t] \quad (1.4)$$

(1.7)を書き換えると

$$R_{t+1} = R_t + F(R_t) - sH(R_t, E_t) = R_t + rR_t(1 - R_t/K) - qsR_tE_t = [1 + r(1 - R_t/K) - qsE_t]R_t \quad (1.8)$$

と表すことが出来る。(1.4)の変形は(1.6)となることは上記で示したので省略する。

## 第6節 現在価値の最大化

### 4-6-1 単一栽培のプランテーションの現在価値の最大化

無限の計画期間のわたる純便益の現在価値を最大にすることは、制約条件

$$R_{t+1} - R_t = -sY_t$$

$R_0$  は所与

の下で

$$\pi = \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t \pi(R_t, Y_t)$$

を最大化するという問題によって表現される。

ラグランジュ関数は

$$L = \sum_{t=0}^T \rho^t \{ \pi(R_t, Y_t) + \rho \lambda_{t+1} [R_t - sY_t - R_{t+1}] \} \quad (1.9)$$

ラグランジュ乗数は、資源の追加 1 単位の価値を測定する影の価格と解釈されるので、ラグランジュ関数に陰伏的に含まれた差分方程式は、 $t+1$  期に存在する  $R_{t+1}$  の水準を定義するものである。追加的(限界的)な  $R_{t+1}$  の 1 単位の価値が  $\lambda_{t+1}$  である。 $t$  期における純便益と現在価値で比較可能にするために、 $\rho$  でこの値は 1 期間分割り引かれる。

次に、一変数関数の 1 階の条件とちょうど同じような 1 階の必要条件を決定する。それぞれの 1 階の偏導関数をゼロとおくことで必要条件は満たされる。

$$\frac{\partial L}{\partial Y_t} = \rho^t [\partial \pi(\bullet) / \partial Y_t - s \rho \lambda_{t+1}] = 0 \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R_t} = \rho^t \{ \partial \pi(\bullet) / \partial R_t + \rho \lambda_{t+1} \} - \rho^t \lambda_t = 0 \quad (1.11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial [\rho \lambda_{t+1}]} = \rho^t [R_t - sY_t - R_{t+1}] = 0 \quad (1.12)$$

ここで、1 階条件を簡素化して書き直すと次のように表せる。

$$\frac{\partial \pi(\bullet)}{\partial Y_t} = s \rho \lambda_{t+1} \quad (1.13)$$

$$\lambda_t = \frac{\partial \pi(\bullet)}{\partial R_t} + \rho \lambda_{t+1} \quad (1.14)$$

$$R_{t+1} = R_t - sY_t \quad (1.15)$$

定常状態の最適は  $R_t$ 、 $Y_t$  および  $\lambda_t$  が変化しないという条件下をおくと上の 3 式は次のように書き換えることが出来る。

$$s\rho\lambda = \partial\pi(\bullet)/\partial Y \quad (1.16)$$

$$\rho\lambda[1 - (1 + \delta)] = -\partial\pi(\bullet)/\partial R \quad (1.17)$$

$$sY = 0 \quad (1.18)$$

(1.17)の式は、若干の代数計算と $\rho = 1/(1 + \delta)$ であることを使って導出されたものである。さらに変形を加えると、

$$\rho\lambda\delta = \partial\pi(\bullet)/\partial R \quad (1.19)$$

となる。この式を(1.16)に代入すると

$$s \cdot \frac{\partial\pi(\bullet)/\partial R}{\partial\pi(\bullet)/\partial Y} = \delta \quad (1.20)$$

となる。

(1.18)の式は $Y = 0$ を表している。これは生産量がゼロである状態を示しており、定常状態においてはプランテーションは生産活動をやめてしまうことが読み取れる。これは、単一栽培のプランテーションが長期的に利潤を拡大しえないことを示していると言える。これは最初の仮定で、単一栽培のプランテーションにおいては土壌生物は増殖しないことから当然の結果といえる。

#### 4 6 2 アグロフォレストリーと取り入れたプランテーションの現在価値の最大化

無限の計画期間のわたる純便益の現在価値を最大にすることは、制約条件

$$R_{t+1} - R_t = F(R_t) - sY_t$$

$R_0$  は所与

の下で

$$\pi = \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t \pi(R_t, Y_t)$$

を最大化するという問題によって表現される。

ラグランジュ関数は

$$L = \sum_{t=0}^T \rho^t \{ \pi(R_t, Y_t) + \rho\lambda_{t+1} [R_t + F(R_t) - sY_t - R_{t+1}] \} \quad (1.21)$$

以下、式の展開方法は単一栽培のプランテーションのモデルで示したものと同じであるため、説明は省略する。

それぞれの1階の偏導関数をゼロとおくことで必要条件は満たされる。

$$\frac{\partial L}{\partial Y_t} = \rho^t [\partial\pi(\bullet)/\partial Y_t - s\rho\lambda_{t+1}] = 0 \quad (1.22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial R_t} = \rho^t \{ \partial\pi(\bullet)/\partial R_t + \rho\lambda_{t+1} [1 + F'(\bullet)] \} - \rho^t \lambda_t = 0 \quad (1.23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial [\rho\lambda_{t+1}]} = \rho^t [R_t + F(R_t) - sY_t - R_{t+1}] = 0 \quad (1.24)$$

1 階条件を簡素化して書き直すと次のように表せる。

$$\frac{\partial \pi(\bullet)}{\partial Y_t} = s\rho\lambda_{t+1} \quad (1.25)$$

$$\lambda_t = \frac{\partial \pi(\bullet)}{\partial R_t} + \rho\lambda_{t+1}[1 + F'(\bullet)] \quad (1.26)$$

$$R_{t+1} = R_t + F(R_t) - sY_t \quad (1.27)$$

定常状態の最適は  $R_t$ 、 $Y_t$  および  $\lambda_t$  が変化しないという条件下をおくと上の 3 式は次のように書き換えることができる。

$$\rho\lambda = \frac{\partial \pi(\bullet)/\partial Y}{s} \quad (1.28)$$

$$\rho\lambda[1 + F'(R) - (1 + \delta)] = -\partial \pi(\bullet)/\partial R \quad (1.29)$$

$$Y = \frac{F(R_t)}{s} \quad (1.30)$$

(1.29) の式を変形すると

$$-\rho\lambda[\delta - F'(R)] = -\partial \pi(\bullet)/\partial R \quad (1.31)$$

両辺に -1 を掛けてから、式(1.28)を代入すると

$$F'(R) + s \cdot \frac{\partial \pi(\bullet)/\partial R}{\partial \pi(\bullet)/\partial Y} = \delta \quad (1.32)$$

となる。方程式(1.32)は「再生可能資源の基本方程式」と呼ばれる。

式(1.30)と式(1.32)が定常状態における  $R$ 、 $Y$  の最適値を定義する。

純増殖関数  $F(R_t) = rR_t(1 - R_t/K)$

利潤関数  $Y_t = H(R_t, E_t) = qR_t E_t$

費用関数  $C_t = cE_t$

の場合、生産関数を  $E_t = Y_t/(qR_t)$  と解くことができ、これを費用関数に代入すると  $C_t = cY_t/(qR_t)$  という費用関数を得ることができる。これによって利潤関数は

$$\pi_t = pY_t - cY_t/(qR_t) = [p - c/(qR_t)]Y_t \text{ となり、その偏微分 } \partial \pi(\bullet)/\partial R_t = cY/(qR^2)、$$

$\partial \pi(\bullet)/\partial Y_t = p - c/(qR_t)$  を得る。純増殖関数の 1 階微分は  $F'(R_t) = r(1 - 2R_t/K)$  となる。これらの偏微分を定常状態で評価し、(1.32)に代入すると、下の式が得られる。

$$r(1 - 2R/K) + s \cdot \frac{cY}{R(pqR - c)} = \delta \quad (1.33)$$

(1.33) を  $Y$  について解くと

$$Y = \phi(R) = \frac{R(pqR - c)[\delta - r(1 - 2R/K)]}{sc} \quad (1.34)$$

が得られる。 $\phi(R)$  が、生物学的パラメーター、つまり  $c, \delta, K, p, q, r, s$  に依存していることが分



かる。このことはどの変数が変化しても、 $X$ - $Y$  平面上で  $Y = \phi(R)$  がシフトする。 $Y = rR(1 - R/K)$  を(1.34)式の左辺に代入すると、下記のように  $R$  について解ける 1 本の式を得る。

$$\frac{2pqr}{K}R^2 + \left\{ pq(\delta - r) - \frac{cr(s+2)}{K} \right\}R + c(r - \delta - sr) = 0 \quad (1.34)$$

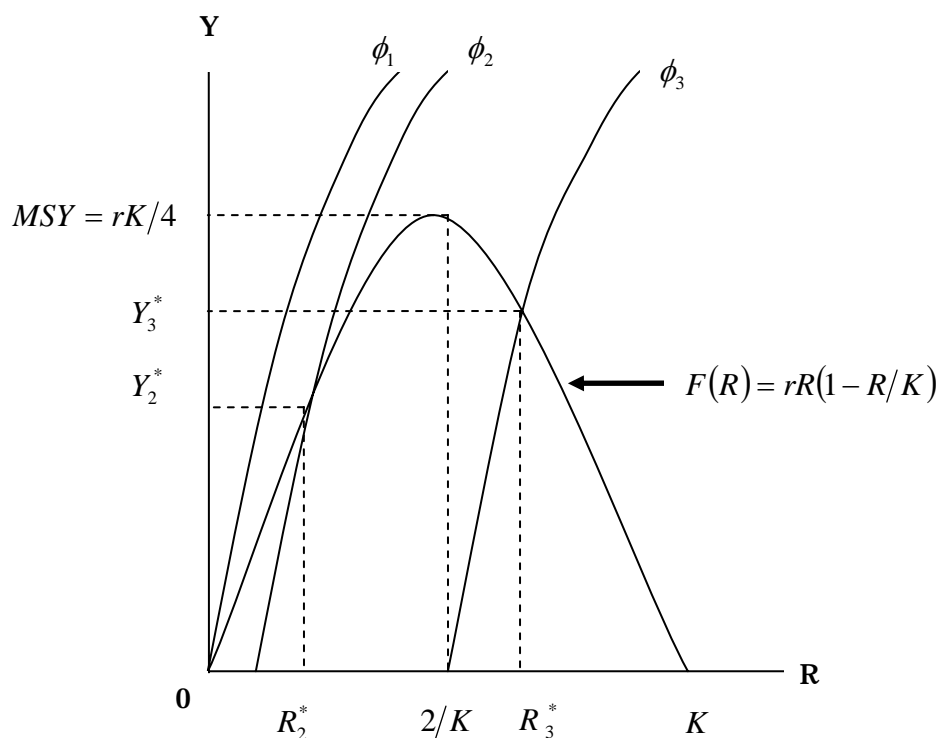
$\frac{2pqr}{K} = \alpha$ 、 $pq(\delta - r) - \frac{cr(s+2)}{K} = \beta$ 、 $c(r - \delta - sr) = \gamma$  とおくと(1.34)式の解の正の根は、

2 次方程式の解の公式より

$$R^* = \frac{1}{2\alpha} \left( -\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma} \right) \quad (1.35)$$

と表すことが出来る。

$R^*$  が分かれば、 $Y^* = rR^*(1 - R^*/K)$ 、 $E^* = Y^*/(qR^*)$ 、 $\lambda^* = [(1 + \delta)/s][p - c/(qR^*)]$  を求めることが出来る。つまり、定常状態における最適な変数の値を全て求めることが出来る。



最大持続可能性量 (MSY) と 3 つの生物経済学的解

## 第7章 ケース・スタディー

では、以上のモデルを用いて、実際に実数値を入れて比較していきたいと思う。

### 第1節 基本モデル

基準ケースの変数を  $\rho = 0.952380952$ 、 $r = 0.1$ 、 $K = 1$ 、 $p = 200$ 、 $c = 1$ 、 $\delta = 0.05$ 、 $s = 0.5$ 、 $\eta = 0.3$ 、 $E_0 = 1$ 、 $R_0 = 1$ とする。また、単一なプランテーション栽培の時の  $q_p$  を 0.015、アグロフォレストリーを導入した時の  $q_a$  を 0.01 とする。モデルは 50 期までの動学モデルを見ていくことにする。これらを前節で作成したモデルに当てはめて、エクセルを用いて、動学的な動向を確認していこうと思う。以下の(表 7-1)が、基本的なモデルの動向である。

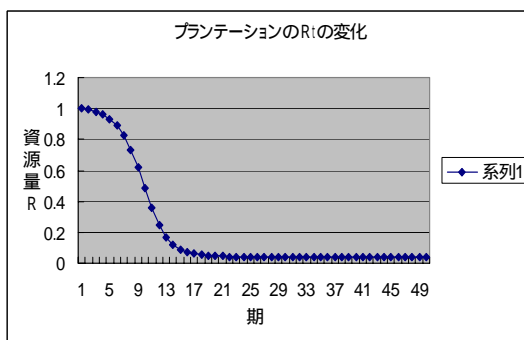
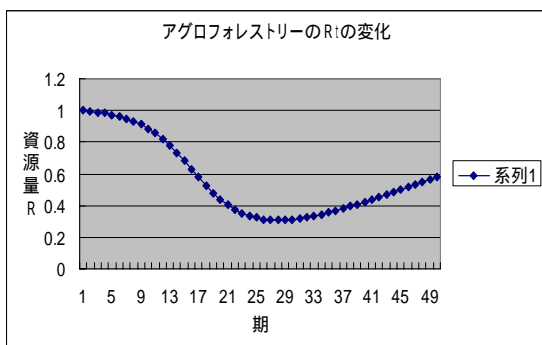
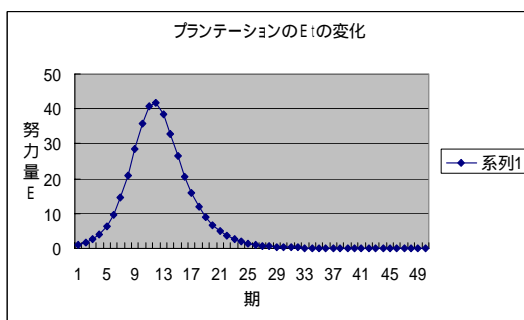
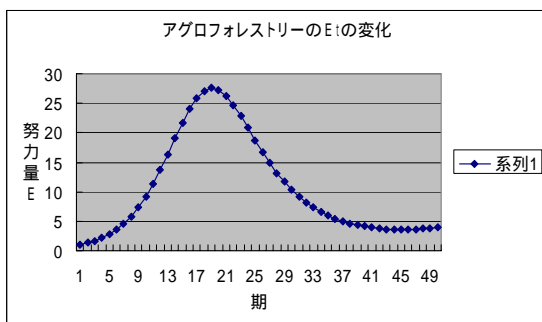
Rta、Eta、 ta はアグロフォレストリーの資源量、努力量、利潤を表している。

Rtp、Etp、 tp は単一栽培のプランテーションの資源量、努力量、利潤を表している。

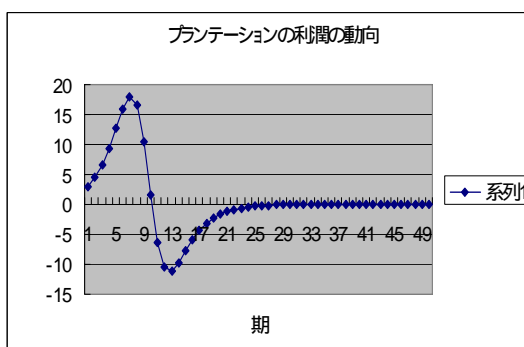
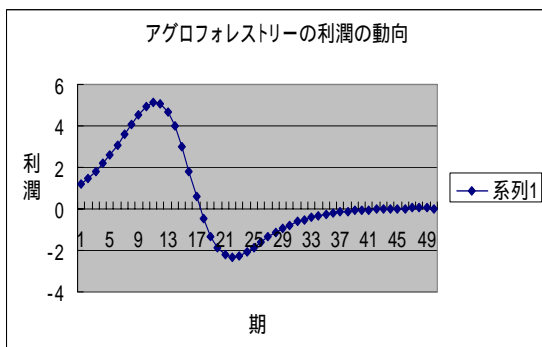
t	Rta	Eta	ta	Rtp	Etp	tp
0	1	1	1	1	1	1
1	0.995	1.3	1.225714286	0.9925	1.6	3.013333333
2	0.98903	1.6861	1.495788631	0.98059	2.5492	4.489759713
3	0.981776948	2.18083209	1.815224497	0.9618421	4.034188025	6.570839104
4	0.972860592	2.811236867	2.187274858	0.932740211	6.316158311	9.344128168
5	0.961826171	3.608830746	2.611731662	0.888555199	9.723512167	12.69008359
6	0.94814249	4.608822236	3.082480101	0.82375612	14.58234808	16.00971355
7	0.93121022	5.848067679	3.584316385	0.733663881	21.01871228	17.93994046
8	0.910387093	7.36111561	4.089337308	0.618008856	28.59170162	16.52711282
9	0.885038013	9.17365971	4.553785162	0.48548442	35.91712347	10.5680332
10	0.854617398	11.29298433	4.917062962	0.354705391	40.83546989	1.607356308
11	0.818786144	13.69579756	5.105455205	0.246071181	41.62093411	-6.370546761
12	0.777554037	16.31541586	5.043175745	0.169258338	38.35219505	-10.51192592
13	0.731419825	19.03246158	4.671589036	0.120572622	32.68882245	-11.06499129
14	0.681460713	21.67515493	3.973055502	0.091012294	26.42941505	-9.703976617
15	0.629314081	24.03506838	2.990072303	0.072971782	20.66545206	-7.764321857
16	0.577013833	25.89991205	1.827545675	0.06166182	15.82301181	-5.907799172
17	0.526697683	27.09670295	0.631250778	0.054344252	11.95421641	-4.365273816
18	0.480267553	27.53075445	-0.451462496	0.04947193	8.952630142	-3.167895592
19	0.439117975	27.20480496	-1.31089533	0.046150151	6.665454604	-2.272549497
20	0.404016719	26.21103479	-1.896373042	0.043843063	4.942668785	-1.617822064

21	0.375146959	24.70154212	-2.21400149	0.0422178	3.654899715	-1.14574196
22	0.352254588	22.85110452	-2.308270044	0.041060536	2.697301443	-0.80848982
23	0.334824686	20.82541702	-2.239829529	0.040229891	1.987788389	-0.569060504
24	0.322232079	18.76151013	-2.068273676	0.039630128	1.463423532	-0.399812896
25	0.313844133	16.76039334	-1.842716198	0.03919516	1.076592568	-0.280537903
26	0.309077977	14.88836601	-1.598863117	0.038878681	0.791592294	-0.19666155
27	0.307424525	13.18285583	-1.35997023	0.038647861	0.581813063	-0.137769276
28	0.308452327	11.659639	-1.139440377	0.038479217	0.427506391	-0.096465204
29	0.311801062	10.31961297	-0.943671632	0.038355841	0.314059574	-0.06752001
30	0.317170847	9.154328852	-0.774502779	0.038265496	0.230683119	-0.047247624
31	0.324310766	8.150121938	-0.631060476	0.038199292	0.169422667	-0.033055505
32	0.333008234	7.290988729	-0.511038842	0.038150753	0.12442051	-0.023123118
33	0.343079812	6.560467678	-0.411525494	0.038115153	0.09136642	-0.016173503
34	0.354363598	5.942785787	-0.329498806	0.038089034	0.067090694	-0.011311726
35	0.366713067	5.423494222	-0.262102574	0.038069869	0.049263364	-0.007910967
36	0.379992195	4.989765675	-0.206778258	0.038055803	0.036172259	-0.005532387
37	0.394071648	4.63047918	-0.161311037	0.038045478	0.02655949	-0.003868855
38	0.408825863	4.336179762	-0.123827062	0.0380379	0.019501064	-0.002705471
39	0.424130879	4.098971294	-0.092765665	0.038032337	0.014318347	-0.001891892
40	0.439862765	3.912380085	-0.066840937	0.038028252	0.010512947	-0.001322954
41	0.455896565	3.771212253	-0.045000996	0.038025254	0.007718873	-0.000925101
42	0.47210564	3.671418203	-0.026389411	0.038023053	0.005667372	-0.000646891
43	0.488361344	3.609971087	-0.010310903	0.038021436	0.004161102	-0.000452346
44	0.504532947	3.58476196	0.003797885	0.03802025	0.003055161	-0.000316307
45	0.520487739	3.594511681	0.016392511	0.038019379	0.002243155	-0.00022118
46	0.536091268	3.638697732	0.027840073	0.038018739	0.001646964	-0.000154662
47	0.55120764	3.717492862	0.0384342	0.038018269	0.001209228	-0.000108148
48	0.565699865	3.831711283	0.04840619	0.038017925	0.000887835	-7.56229E-05
49	0.579430225	3.982757032	0.057932724	0.038017672	0.000651863	-5.28796E-05
50	0.683012702		0.000691062	0.038017486	0.000478608	-3.69763E-05
		PVNBa=	30.97163434		PVNBp=	32.15400442

(表 7-1)



単一栽培のプランテーションでは、資源量がゼロになってしまうため、作物は取れなくなり、努力量もゼロとなっていることがわかる。それに対して、アグロフォレストリーを導入した場合、資源量は一旦は減るものの、土壌の再生効果で再び増加し、それに伴って努力量も変化していることが分かる。この結果は私たちの目指す、土壌の資源を保全しつつも利益を上げるという結果に一致すると考える。



$E_{ta} = 1$  における 50 期までのアグロフォレストリーのトータル利潤: 30.97163434

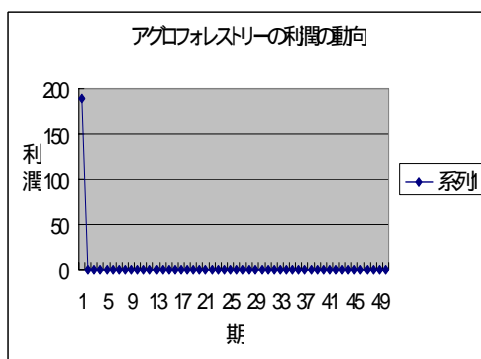
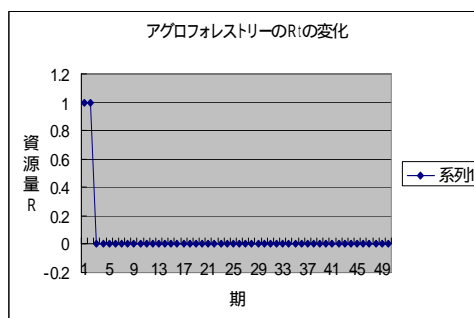
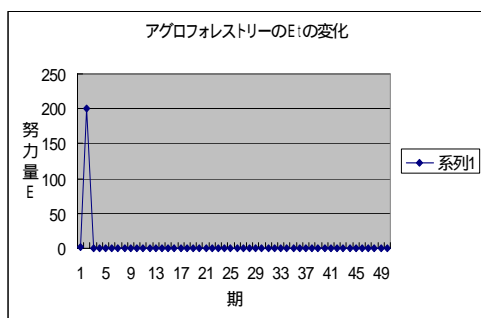
$E_{tp} = 1$  における 50 期までのプランテーションのトータル利潤: 32.15400442

利潤についても、やはりアグロフォレストリーを導入したほうが長い期間の利益が見込める。ただ、一期あたりの利潤は明らかに単一栽培のプランテーションの方が大きく、トータルの利潤もプランテーションの方がわずかではあるが多くなっている。これでは農業経営者にプランテーションからアグ

ロフォレストリーに移行するというインセンティブを与えることはできないため、次節において努力量を変化させることで利潤最大化を考えることとする。

## 第2節 アグロフォレストリーを導入したプランテーションの最適モデル

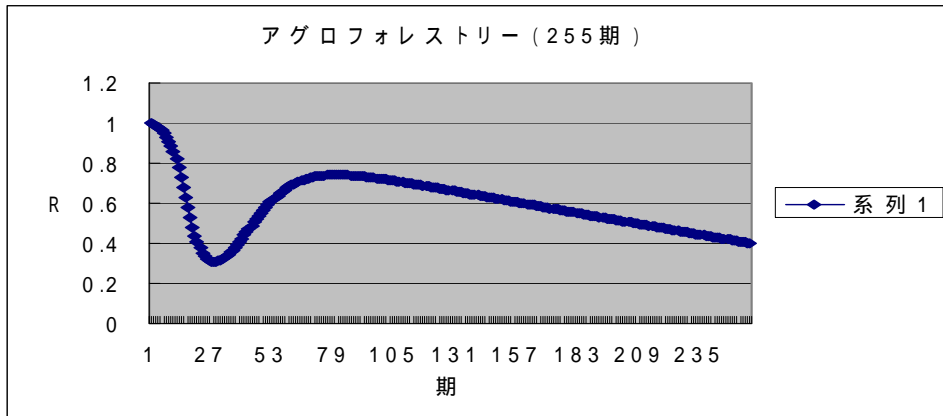
では、アグロフォレストリーを導入した場合の最適な動学モデルを検証していきたいと思う。 $R_t = 0$ 、 $E_t = 1$ 、 $R_t = 0$  制約条件という制約条件の下、努力量の変化によって利潤を最大化する最適モデルをソルバー機能を用いて求めていく



この条件下における 50 期までのアグロフォレストリーのトータル利潤：**188.6664064**

結果は以上のようになる。最初に最大限の努力量をつぎ込むことで、利潤の最大化を図っていることが分かる。一気にまとめて努力量を追加してしまうと、その分だけ資源量が減ってしまうため、土地の荒廃は著しく、回復不可能な状態に陥ってしまっている。トータルの利潤は189.6664064となり、ソルバーをかける前のトータル利潤より6倍近い利潤を上げられた。しかしこれだけ多くの生産に対する努力量を、1 期だきにつぎ込むことができる地域は、労働人口の制約などにより現実的でないと言える。よってもう少し努力量を細かくしてより具体的に考察していきたいと思う。

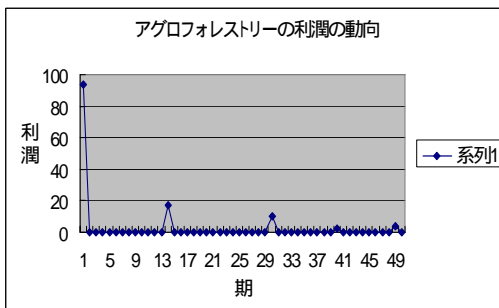
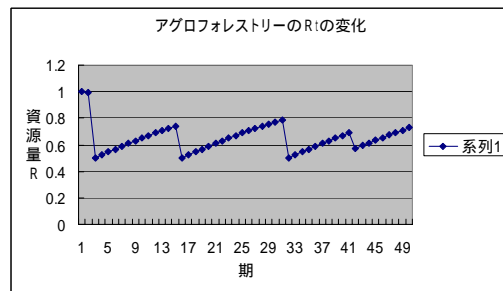
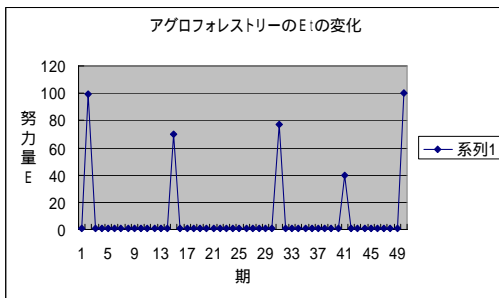
- 50 周期という単位ではなく、エクセルのグラフで表すことのできる最大の数、255 周期で試してみるとどうだろうか。



上記のグラフより、アグロフォレストリーを継続的に続けていくことで、いずれは資源量が枯渇することがうかがえるが、一度も休閑していないにもかかわらず、225 期まで資源が存在していることはアグロフォレストリーの有用性を示していると言える。

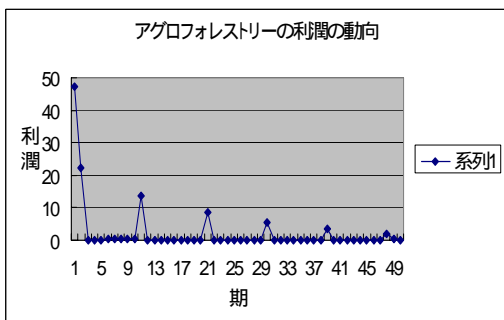
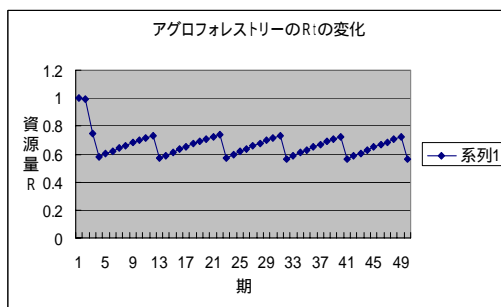
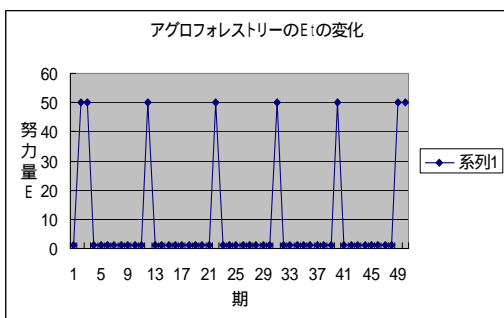
- 先にも述べたが、現実問題として地域によって生産に投入できる努力量には違いがある。そこでここでは様々な地域における努力量を想定し、場合分けして考察することとする。

#### Et < 100 の場合



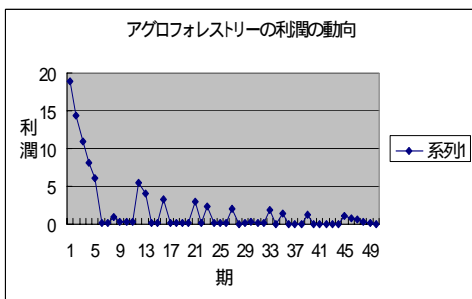
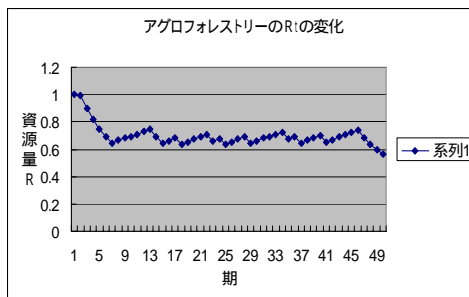
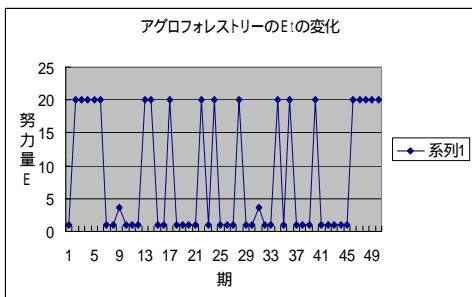
Et < 100 における 50 期までのアグロフォレストリーのトータル利潤：  
**138.5075589**

Et < 50 の場合



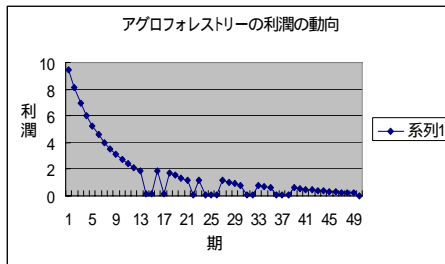
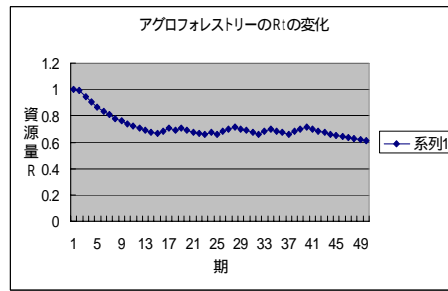
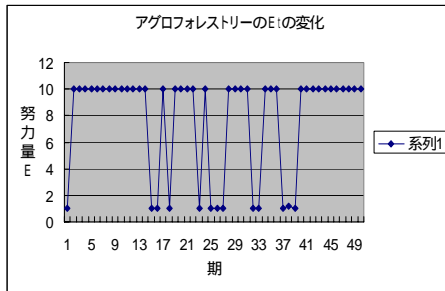
Et < 50 における 50 期までのアグロフォ  
 レストリーのトータル利潤：  
**109.1504781**

Et < 20 の場合



Et < 20 における 50 期までのアグロフォ  
 レストリーのトータル利潤：  
**90.63226048**

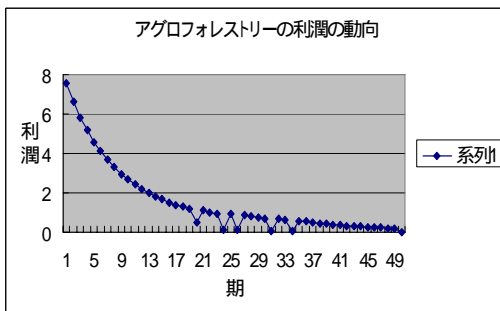
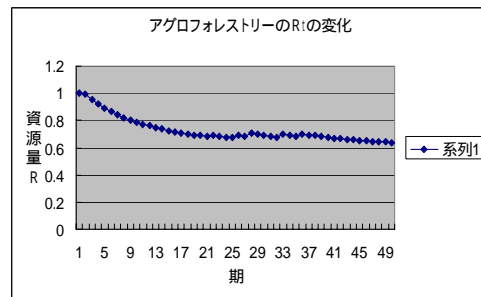
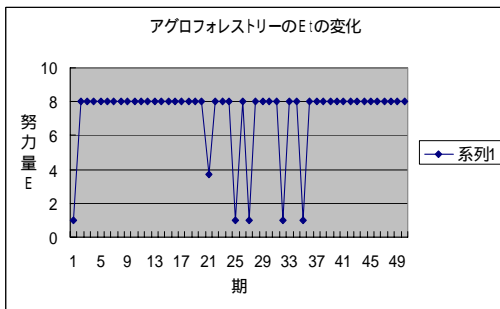
Et < 10 の場合



Et < 10 における 50 期までのアグロ  
フォレストリーのトータル利潤：  
**80.60936055**

以上の Et < 100 から Et < 10 において、努力量の変化を見ると、ある期間において多く収穫した場合、その後一定期間努力量を条件  $E_t = 1$  ぎりぎりの努力量で収穫していることがわかる。これは実質休閑にあたりと考えられ、ソルバーが休閑期間を利潤最大化のためにおいたことは興味深い。

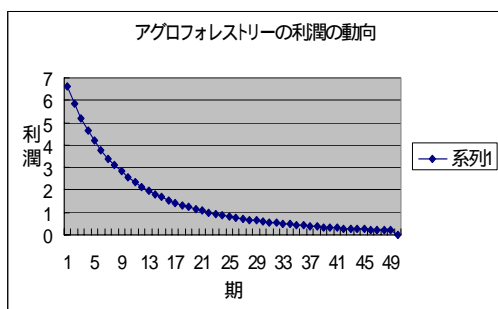
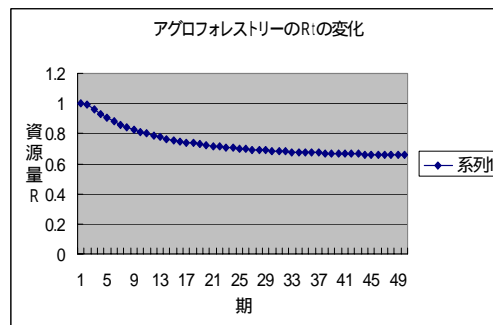
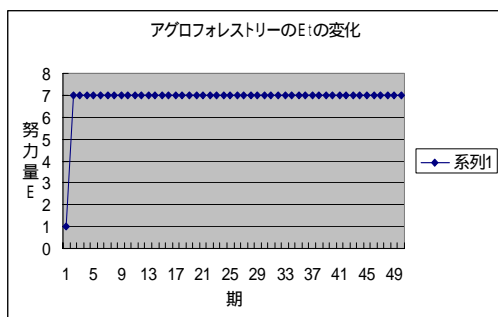
Et < 8 の場合



Et < 8 における 50 期までのアグロ  
フォレストリーのトータル利潤：  
**76.49579187**



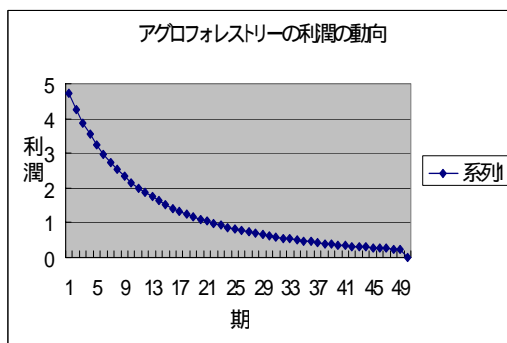
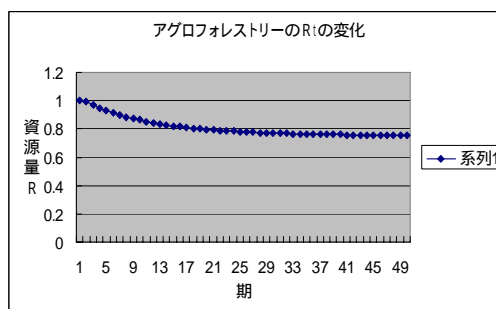
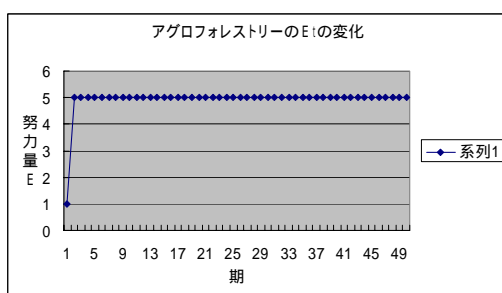
### Et < 7 の場合



Et < 7 における 50 期までのアグロフォレストリーのトータル利潤：  
73.54876071

努力量が 8 以下の場合と、7 以下の場合においては動向が異なっている。よって、 $E_t = 7$  が大きな境界となっていると言える。努力量が 7 以下の場合には努力量と資源の減少量が丁度よい比率で動き、每期一定の利潤を出すことが出来る。

### Et < 5 の場合



Et < 5 の場合もやはり Et < 7 の場合と同じようなモデルの動向が見られる。

努力量	188.6664064
Et < 100	138.5075589
Et < 50	109.1504781
Et < 20	90.63226048
Et < 10	80.60936055
Et < 8	76.49579187
Et < 7	73.54876071
Et < 5	62.88236752
Eta=1	30.97163434
Etp=1	32.15400442

各期における努力量が小さくなるにつれて、利潤が減少していることが分かるが、それでもプランテーションにおける Etp=1 の利潤より大きく上回っており、土壤資源を保全しつつ利益を上げるという本研究の目的は達しているといえる。

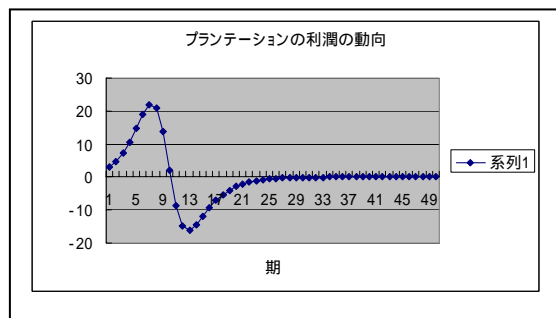
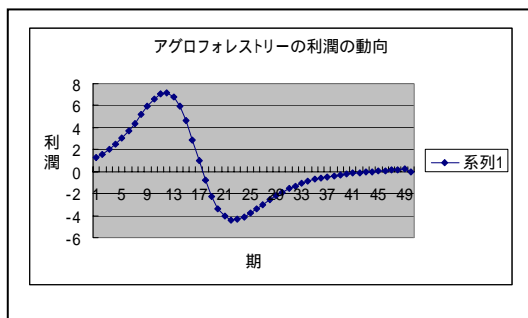
土壤資源の枯渇は、有限期間で利潤の最大化をはかっているモデルを考えていたために起こってしまったことと考えられる。土壤資源の枯渇を防ぐには、利潤の最大化ではなく、資源利用の効率化の観点から考察が必要となってくることに注意してもらいたい。

しかし、資源の効率的利用のみを考慮すると、利潤の点から不都合が生じてくることは目に見えていることであり、農業経営者のアグロフォレストリーへのインセンティブを与えることは出来ない。資源の効率的配分と、利潤の最大化の両方の観点を取り入れることが必要となるのである。

### 第3節 の変化と利潤の動向

以上、プランテーションとアグロフォレストリーを、利潤の観点から考えてきた。そして、利潤の最大化モデルを、周期の視点と努力量の視点からケース・スタディを行ってきた。第3節では、生産者のインセンティブには関係なく利潤に関わってくる割引率  $\delta$  の視点からケース・スタディを行っていかうと思う。

割引率のみの比較をするために、プランテーションとアグロフォレストリーの場合とで努力量を一定にした第1節で扱った基本モデルを考えていくことにする。まずは  $\delta$  を下げて考えていく。最初は  $\delta = 0.02$  の場合を考えてみることにする。

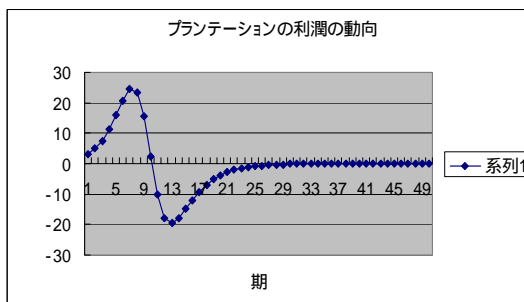
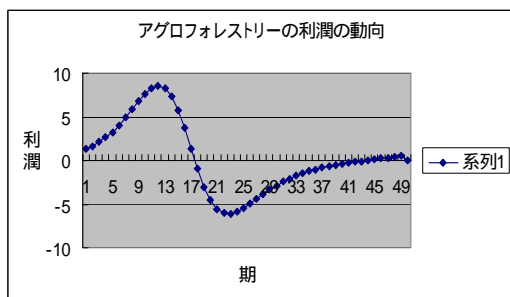


$\delta = 0.02$  の場合のアグロフォレストリーのトータル利潤 : 24.39262447

$\delta = 0.02$  の場合のプランテーションのトータル利潤 : **15.26315808**

アグロフォレストリー、プランテーションの両者に言えることは、最高利潤と最低利潤との幅が大きくなっていること、そしてトータル利潤が低くなっていることである。

次は  $\delta = 0.005$  の場合を考えていく。

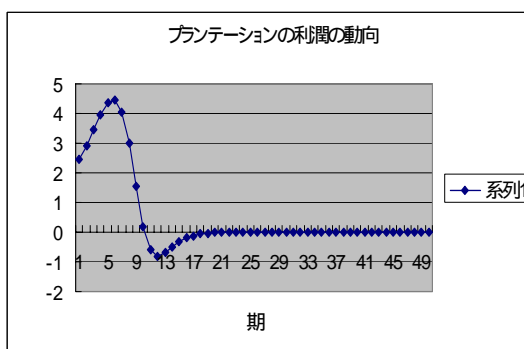
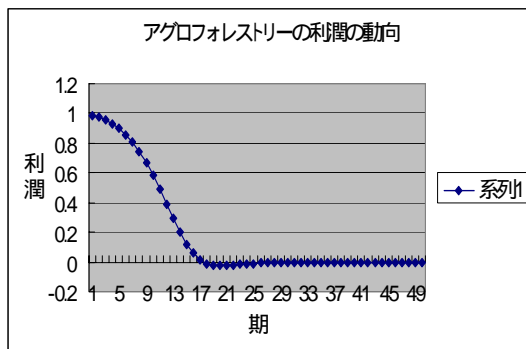


$\delta = 0.005$  の場合のアグロフォレストリーのトータル利潤 : **14.51196483**

$\delta = 0.005$  の場合のプランテーションのトータル利潤 : **0.759014802**

結果は、 $\delta = 0.02$  の場合よりさらに最高利潤と最低利潤との幅が大きくなり、トータル利潤も低くなっている。

では  $\delta$  を増やして考えるとどうであろうか。  $\delta = 0.3$  の場合をみる。

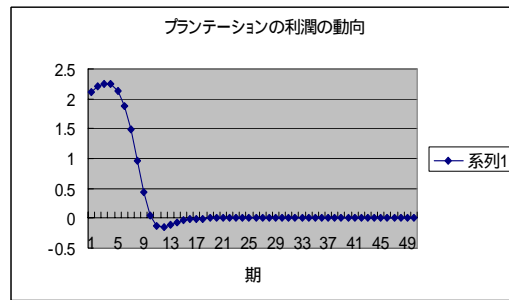
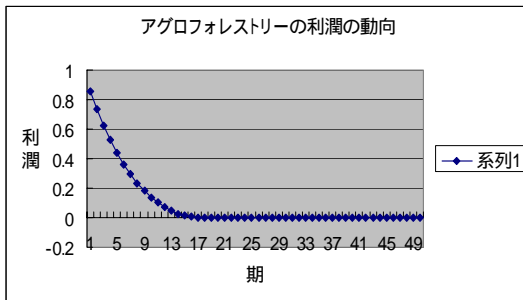


$\delta = 0.3$  の場合のアグロフォレストリーのトータル利潤 : **9.80171021**

$\delta = 0.3$  の場合のプランテーションのトータル利潤 : **26.98143912**

$\delta = 0.1$  の場合に比べて、プランテーションとアグロフォレストリーの場合双方とも、利潤がマイナスとなる期が減少していることがわかる。

$\delta = 0.5$  の場合はどうであろうか。

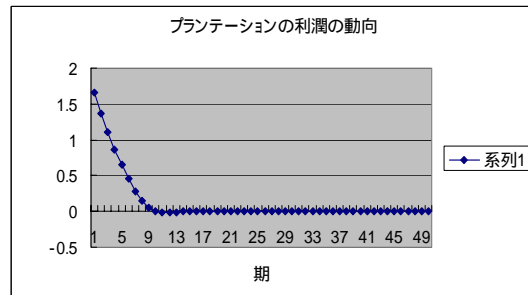
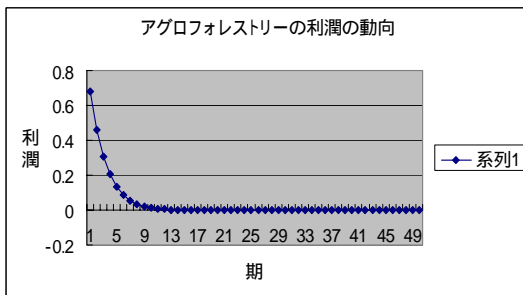


$\delta = 0.5$  の場合のアグロフォレストリーのトータル利潤 : **4.651111407**

$\delta = 0.5$  の場合のプランテーションのトータル利潤 : **15.20359676**

アグロフォレストリーにおいては利潤のマイナス期がなくなっていることが分かる。

最後に  $\delta = 0.9$  の場合を考えてみる。



$\delta = 0.9$  の場合のアグロフォレストリーのトータル利潤 : **2.009114682**

$\delta = 0.9$  の場合のプランテーションのトータル利潤 : **6.581287765**

プランテーションにおいても利潤のマイナス期がなくなっていることが分かる。

以上、 $\delta$  の変化による利潤の動向を見てきた。プランテーションの場合もアグロフォレストリーの場合も  $\delta$  が小さくなればなるほど、最高利潤と最低利潤との幅が大きくなり、トータル利潤が低くなっていた。つまり、期によって利潤が多く出る場合と、大きくマイナスになってしまう期が出てきてしまうのである。これでは、経営者は運営をしづらくなってしまふ。

逆に  $\delta$  が大きくなればなるほど利潤のマイナス期がなくなり、経営はしやすくなるものの、トータルの利潤から考えると  $\delta$  の増加に伴い、利潤は減少していた。

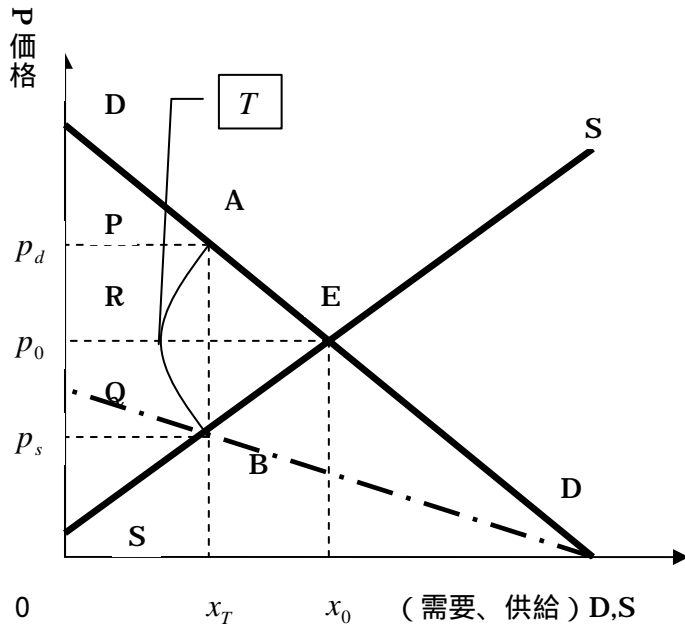
$\delta$  を上下に変化させてしまうと、どちらにしてもトータル利潤の減少が見られ、基本モデルの  $\delta = 0.05$  が高い利潤を生むことが分かった。

## 第8章 まとめと考察

以上、アグロフォレストリーの有効性を検証してきた。インドネシアでは今も、プランテーション栽培が盛んに行われており、国の主要な産業を担っている。この産業を制度によって取り締まることは困難に近く、経済と環境の両立はなかなか難しいとされる。プランテーション農業は発展途上国において重要な雇用需要源、そして外貨取得源であり、先進国にとっても低コスト、高利潤という重要な資本源である。いまや、経済を構成する一つの重要な要素となっているのである。しかし、焼畑によってもたらされる環境問題をそのまま放置することは、今後の地球環境問題に大きな影響をもたらすことは間違いない。当研究においては、アグロフォレストリーを土壌の荒廃という観点から様々な制約条件の下、その有効性について考察してきた。結果はケース・スタディで見えてきた通り、プランテーション農業よりもある程度土壌の荒廃を遅らせることが出来た。この点からすれば、農業経営者がプランテーション農業からアグロフォレストリーを導入した農業へと移行するインセンティブは与えられると考えられる。しかし、2つの点で問題があることもわかった。まずは利潤の問題である。土壌の肥沃という観点からすればアグロフォレストリーの方がプランテーション農業よりも長期的な農業経営が可能であったが、逆に利潤はアグロフォレストリー農業よりもプランテーション農業の方が大きく、アグロフォレストリーへと移行させる動機付けにはならない。また、第7章第2節でみてきた通り、利潤のみを追求してしまうと、資源の効率的な配分という観点から環境負荷が生じてしまうことは免れない。この2点を考慮して、アグロフォレストリーへと移行させる政府の政策を考えていかなければならない。まず一つはプランテーションとの利潤格差をなくすための補助金・税金という観点である。そしてもう一つは一定の資源(資源が枯渇せず、回復可能である最低ライン)を保つことを法律で定めることで、土壌動物資源の枯渇を防ぎ、環境に配慮した農業経営が可能となるであろう。

## 第9章 政府の対策に対する補足

### ● 課税について

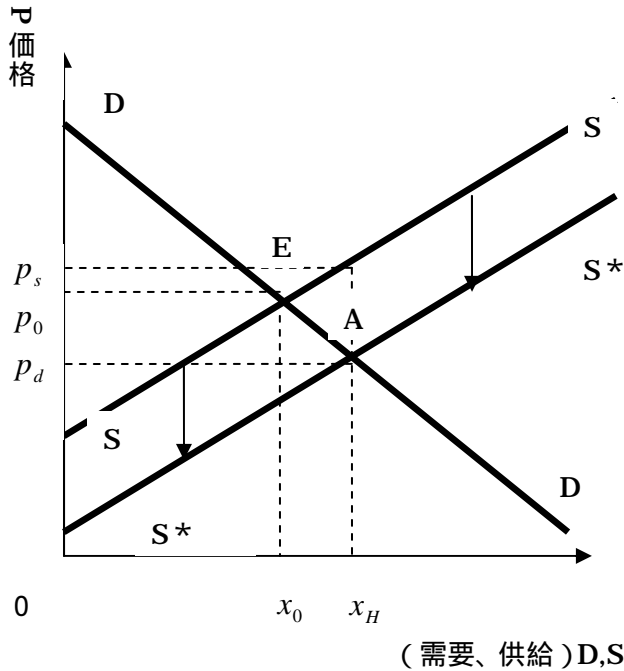


プランテーションで生産された作物の取引の供給・需要の関係を左の図のように表すとする。課税がない時点における均衡点は点 E で示される。もし課税がなされると、需要者が払う金額の一部は税として徴収され、その残りを供給者が受け取るから、財の価格は需要者と供給者とで違いが生じてくる。課税がされた時の需要者にとっての価格を  $p_d$ 、供給者にとっての価格を  $p_s$ 、さらにプランテーション作物 1 単位あたりの税を  $T$  とする。

すると、 $p_d = p_s + T$  という関係になる。ここで、 $T$  はプランテーション農業で得られる利潤と、アグロフォレストリーで得られる利潤の差以上の税設定が必要となる。そうすることで、アグロフォレストリー農業経営者の得られる利潤がプランテーション農業経営者の得られる利潤を上回り、アグロフォレストリーへと転換するインセンティブが生まれるのである。例えば、第7節の基本モデルにおいてはトータル利潤の差が 1.18237008 あったので、50 周期で割ることによって、1 期あたり 0.0236474 以上の税金をプランテーション農業者に課すことで、政府の政策は達成できると考えられる。

ちなみに、プランテーション作物とアグロフォレストリー作物の価格が同一である場合は、重量税よりも従価税のほうが道理に合っていると見える。理由はプランテーションとアグロフォレストリーとは、同一期における作物の収穫量に大きな違いが出てくるわけではなく、長期的な収穫に違いが出てくるためである。

● 補助金について



補助金の場合にはアグロフォレストリーの生産物における取引を考えていく。政府がアグロフォレストリ農業者に対して補助金を支払うことによって、アグロフォレストリー作物の価格が下がり、供給曲線が  $S$  から  $S^*$  へとシフトする。これによってアグロフォレストリー農業者の利潤を下げることなく、市場における均衡点を点  $E$  から点  $A$  へシフトすることができる。

この場合も、課税政策の場合と同様に、基本モデルの市場を対象とすると、1期あたり  $0.0236474$  以上の補助金をアグロフォレストリー農業者に出すことで、政策目標は達成できると考えられる。

## (参考文献)

- J. M. コンラッド(2002),「資源経済学」第3章 岩波書店
- 武隈慎一(2002),「ミクロ経済学 増補版」新世社
- 安富 六郎,「環境土地利用論」 (社)農山漁村文化協会
- 木村真人,(1997)「土壌圏と地球環境問題」 8,98-100,127-128 名古屋大学出版会,
- 西尾道徳・守山弘・松本重男,(2003)「環境と農業」 (社)農山漁村文化協会
- 滝川勉・廣瀬昌平,「東南アジア農業生産の課題」 龍溪書舎
- 嘉田 良平(1993),「OECD レポート 環境と農業」 (社)農山漁村文化協会
- アンデリューク、ドラーゲン、クレム・ティスデル(2001),「持続可能な農業と環境」  
(社)農山漁村文化協会
- 頼 平,(1991)「農業経営学」 明文書房
- 竹中 久二雄,(1992)「農業経済学」 明文書房
- 国際技術交流会(2002), <http://www.sakura.cc.tsukuba.ac.jp/tropics/index.files/Page930.html>
- 富田健太郎(2001) 2000年度帰国隊員支援プロジェクト報告書  
<http://www.tuat.ac.jp/tropical/afreport.htm>
- JAIAN 熱帯林行動ネットワーク <http://www.jca.apc.org/jatan/index.html>
- 大槻重之「インドネシア専科」 <http://www.jttk.zaq.ne.jp/bachw308/index.html>
- 独立行政法人森林総合研究所四国支所「地球温暖化と森林の二酸化炭素吸収」  
<http://www.ffpri-skk.affrc.go.jp/co2/index.html>
- 環境省・地球環境・国際環境協力(地球環境局) <http://www.env.go.jp/earth/index.html>
- NPO 法人 森のバイオマス研究会 <http://ww4.tiki.ne.jp/mim-san/biomass/index.htm>
- 国際共同研究人材育成推進事業 <http://ss.jircas.affrc.go.jp/kokyoke/jirec/index.html>