

半乾燥地におけるアグロフォレストリー研究

飯 田 繁

1. 問題の所在

アグロフォレストリーは、農作物と林産物を同じ土地で同時に（または連続的に）生産し、両者の総収入が農産物単独または林産物単独の収入に比べて多くなることを前提にした技術である。特にアフリカでは極貧の農民が多く、通常の場合、肥料や農薬を買えない。また、人口の急増（年率3%以上：20年ごとに2倍以上になる）で農地が酷使され、単位面積当たりの収穫量が減少する傾向にある。そのため、部族対立が発生していない地域でも食料不足が現実のものとなりつつある。アグロフォレストリーはこうした発展途上国における零細農民の農業生産の向上と環境保全（樹木の増加）の観点から、技術開発が行われ、その普及・拡大が期待されている。

しかし、アグロフォレストリーの実態は、農作物と樹木の混植に伴う弊害によって、収入を減少させてしまう例が多くみられる。特に①乾燥地域では地中水分が多年生の樹木に摂取され、農作物は水分不足を生じ、生産の減退が顕著になるという問題が発生している。また、②アフリカのような遅れた社会ではアグロフォレストリーの科学的な知識が十分に理解されていないため、期待した成果をあげることが出来ない。こうした問題に理解を示さず、単に農作物と樹木を同時に育成することがアグロフォレストリーだと解釈し、それを農民に強要する普及関係者がいないではない。そこで、本稿ではアグロフォレストリーの理解を深めるために原理的な問題と最近の半乾燥地における試験結果について述べてみたい。

林産物の収入が縦軸OAで表示され、農産物の収入が横軸ODで表示されるものとする（図1参照）。両者を同じ土地に混植し、その総収入が単作の収入を

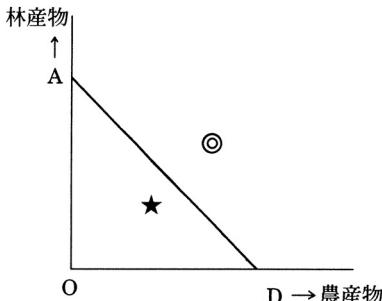


図 1 期待されるアグロフォレストリーの効果

や管理等が適切に行われておらず、眞の意味でのアグロフォレストリーが実行されたとは言えない。

2. アグロフォレストリーの経済学的原理

(1) 生産限界線 (PPF)

アグロフォレストリーによって収入が本当に AD 線の外側 (◎印) に位置するであろうか。まず、この点について言及しなければならない。

図 2<A>は、アグロフォレストリーを理論的に説明するために教科書等で使われるものである^(注1)。図 1 では AD 線しか描かれていないが、図 2<A>では直線 AD、曲線 AD (点線 AD) 及び ABCD 線が描かれている。つまり、アグロフォレストリーは ABCD 線上の収入が期待できるような生産行為だと言いたいのである。

AD 線及び ABCD 線は厚生経済学 (Welfare economics) において生産限界 (Production Possibility Frontier, 以下単に PPF という) という名前で呼ばれる線である。AD 線と ABCD 線が同じ名称で呼ばれる理由は、同じものがある条件のもとでは AD 線となり、ある条件の下では ABCD 線になるという性質をもっているからである。

厚生経済学の考え方は次のようである。1 国に存在するあらゆる資源 (資源の総量は一定という仮定が含まれている) を利用し、林産物を生産するとその

超えるためには、混植の収入の合計が AD 線の外側に位置しなければならない (例えば◎印の位置に)。これがアグロフォレストリー成立の最低の条件である。しかし、科学的知識を欠くと、意図とは裏腹に総収入が AD 線の内側に入ってしまう (例えば★印の位置に)。収入が★印に位置した場合、表面的にはアグロフォレストリーを採用したように見えても、作目の組み合わせ

(注1) Dan M. ETHERINGTON and Peter J. MATTHEWS : "ECONOMICS FOR AGROFORESTRY"; Ester ZULBERTI 編「Professional Education in Agroforestry」所収 113~121 頁, 1987; 及び A.M. FILIUS : "Economic aspects of agroforestry", 「agroforestry systems」誌 vol. 1 所収 29~39 頁, 1982 を参考に作成した図である。

生産額は OA になり、同じように農産物を生産するとその生産額は OD になるというものである(図 2<A>参照)。すなわち、使用される資源の価値は双方が同じであり、OA と OD は同じ価値を示すことになる。OA が 100 億円なら OD も 100 億円であり、AD 線は 45 度の傾き(Trade-off の関係)になる。しかし、生産量は生産物によって異なり、例えば、林産物 10 万 m³ と農産物 50 万 t ということになるかも知れない。鉄と布であれば 10 万 t と 50 万 m² かもしれない。

直線 AD で示されるように、PPF の傾きが 45 度(一定)であれば、A 単独、B 単独あるいは AB 両者を生産した場合の生産額の合計は AD 線上にあり、一定になる。要するに、AD の傾きが 45 度(一定)の場合には、単作もアグロフォレストリーも同じ経済効果しか得られないであり、アグロフォレストリーを強調する意味はないことになる。

(2) 効率的生産による PPF の変化

生産活動には常に適正規模や最適な資源の組み合わせといった問題がつきまとっている。一般的に、適正な資源の組み合わせは、生産性を上昇させ、生産の増加と収入の拡大をもたらす。生産効率の上昇を前提とした PPF が ABCD 線であり、これこそアグロフォレストリーが期待する姿である。しかし、AD 線は常に外側へ広がるものではない。二つの産物を組み合わせたため生産効率が悪化することも考えられる。その場合には、PPF は点線 AD(原点に近づく曲線)になってしまい(図 2<A>参照)。このような姿はアグロフォレストリーの悪い組み合わせということになる。

図 2<A>における AB 間(ABCD 線上)は、林産物の生産を少し減らして農

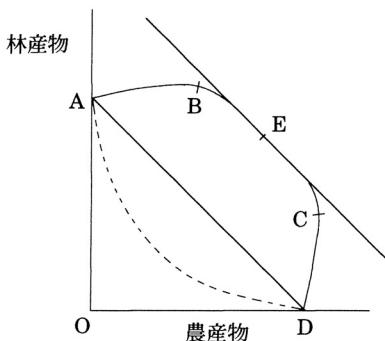


図 2<A> 生産限界線

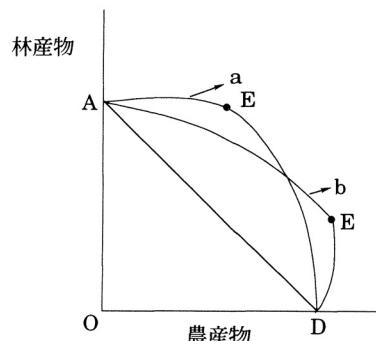


図 2 生産限界線のパターン

産物を混植したところ、双方がプラスに働き、収入が著しく増加したという関係を示している。この関係を相互補完関係（Complementary）という。根粒菌を持った低木と穀物を組み合わせることによってこの様な関係が形成されるものと期待されている。ただし、この関係もB点を過ぎた頃から生産の増加はあまり望めなくなり、E点において収入総額が最大となり、それ以上収入を増大させることは出来ない。収入が限界（E点）に近づくということは、BE間において林産物と農産物が資源（水や光や土壤栄養素など）を奪い合うようになったことを意味しており、こういう状況を競争的関係（Competitive）という。EC間、CD間は農産物の立場からみれば、BE間、AB間とおなじ関係であり、結局、AB間及びCD間が相互補完的関係、BC間（BE間とEC間）が競争的関係になる。

図2<A>は林産物と農産物が同一の影響力（相互補完関係/効率性）を持つ場合を想定しているが、現実には図2に示されるように林産物または農産物のどちらかに片寄った形でE点が現れるものと推定される。その際、a線におけるED間及びb線におけるAE間を付随的関係（Supplementary）と認識する見解もある。以上の説明から明らかなように、資源の最適利用が問題となり、合理的な組み合わせを見つけることが課題となる。同時共存型アグロフォレストリーは、そのような効率性や相互補完関係をいかに上手に発見するか、創造するか、それを追求する科学だと言い換えることも可能である。なお、直線ADは、相互補完関係も競争的関係も付随的関係も存在しない状況下におけるPPFである。

(3) 機会費用 (Opportunity cost)

生産に供される資源量が一定の場合、同時に二つの製品を作ろうとすると一方の生産の増加は他方の利用可能資源の減少につながる。この関係を厚生経済学では、一方の減少を他方のコストとして認識し、機会費用（Opportunity cost）と呼んでいる。つまり、林産物10円の減少が農産物生産のコストになるという解釈である。

AD線が直線で示されるのは、機会費用に対する収入が一定の割合で変化するということを意味している。当然のことながら10円の機会費用に対して9円の収入しか得られない場合もあり、逆に11円以上の収入がある場合も想定されるだろう。しかし、通常、損をすることがわかっているような投資は行われないから、機会費用≤収入という関係が確実視される組み合わせにおいて投資（アグロフォレストリー）が行われることになる。

3. 理論と現実の間

前述したようにアグロフォレストリーを実行するためには少なくとも、二つの生産物の価値が同じ程度でなければならない。それは失われる収入（機会費用）以上の収入を得なければ損失が発生するという単純な理由からも明らかである。しかし、現実に“これぞアグロフォレストリー”として実行されている組み合わせでも、相対的に高価な農作物（または樹木）と格段に安い樹木（または農作物）の組み合わせであることが多い。

例えば1ha当たり1万円の収入が期待できる林産物と5千円の収入しか得られない農産物を組み合わせたとしよう。この場合、農民が農産物の割合を増やすべば増やすほど1ha当たりの収入は減少し、農産物だけの生産になってしまえば、林産物単独に比べて1ha当たり5千円の損失を被ることになる。仮に林産物生産を半減したと仮定すると、林産物価値の減少は5千円であるので、それが農産物の機会費用となる。その際、農産物の収入は（相互補完関係が形成されていないと仮定すると）2,500円であり、AD線の内側に入ってしまう（図3の★印）。また、この場合のPPFはAD線ではなくAE線として解釈することもできなくはない。ただし、AE線を採用した場合、OAとOEではトレード・オフの関係が成立しない。

AE線で示されるような生産物価値の著しく違う農産物と林産物をアグロフォレストリーの対象として採用し、経済的に成立させるためには農産物（低い価値の生産物）の生産性を2倍以上に上げなければ釣り合わない（図3のAD線）。土地生産性を急に2倍に上昇させることはほとんど不可能である。

従って、アグロフォレストリーを容易に成立させるためには同じ程度の収入が得られるような作物と樹木を組み合わせる方が合理的な判断となる。これがアグロフォレストリーを確実に成立させるための第1の条件である。

アグロフォレストリー成立の第2の条件は、関連する作物と樹木に価値的な差が著し

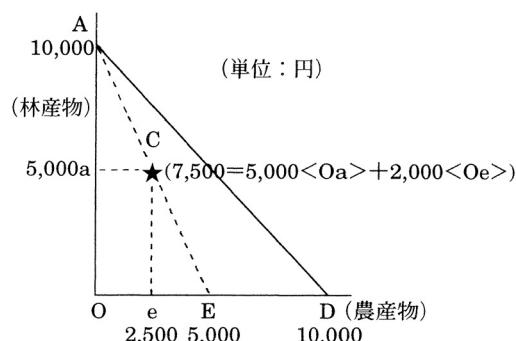


図3 生産価値の異なる産物の組み合わせ

い場合の対策である。高い価値を生み出す産物を主産物に据え、相対的に価値の低い産物を副産物とし、主産物の生産を阻害しない程度に副産物を作るという方法が考えられる。要するに副産物の生産は余った資源（光、水、土壤栄養素など）を利用するという形になる。

前述した二つの条件の他に、農家経営全体からアグロフォレストリーを評価する視点も必要である。つまり、現実の経営は、同じ資源を用いても多様な産物が生産され、獲得できる収入は生産物の種類、品質、数量等が絡んで無数である。一般に農民は土地規模、自家労働力、自己資金、道具等を与件（利用可能な総資源）とし、全体で収入を最大にするような経営を指向するだろう。とすれば、1万円の林産物と5千円の農産物を50対50で混植し、2,500円の損失を被ったとしても、労働力や資金等を他に転用し2,500円以上の収入を得ることができればバランスが取れることになる。特にアフリカの農民は近代的な機械や道具を使用しておらず労働生産性はきわめて低く、収穫期、植え付け期には大量の労働力を必要とし、それが経営のネックになっている。そのネックをアグロフォレストリーによって削減し、他の生産を活性化して2,500円の収入を獲得することができれば釣り合うことになる。

以上の説明から明らかなように、アグロフォレストリーを経済的に成立させるためには二つの条件と一つの視点が不可欠なのである。

4. 半乾燥地における栽培試験

(1) ICRISAT の試験

ICRISAT : International Crops Research Institute for Semi-Arid Tropics はインドにおいてアグロフォレストリーに関する試験を行った。農作物と樹木を同じ土地で並列的に栽培した場合、バイオマスの総生産量が樹木単独または農作物単独のものに比べて多くなるか否かを確かめる試験である。

表1はその結果の一部を再掲したものである。1984年にギンネム (*Leucaena leucocephala*) が植えられ、それとパール・ミレット及びピジョンピーが並列して3mと5.4mの幅で植えられた。84年はギンネムが小さかったためバイオマスの生産は行われず、農産物だけの生産になっている。2年目の85年にはカスターオイルがアグロフォレストリーの相手であった。この年にギンネムのバイオマスが初めて生産された。以下同じような方法で、農産物を変えつつ88年まで試験が行われた。その結果、ギンネム単独のバイオマス（枝葉）生産量がアグロフォレストリーを採用した場合に比べて多くなることが明

表1 ギンネムと農産物のアグロフォレストリーにおけるバイオマス生産量の変化

区分	1984	1985	1986	1987	1988	合計
Total biomass (t/ha)						
農産物単独	3.82	1.27	7.18	1.60	—	13.87
ギンネム単独	—	5.04	11.02	11.34	6.17	33.57
農作物 (3.0 m)	2.66	3.28	11.35	9.10	5.13	31.52
農作物 (5.4 m)	3.17	2.18	10.25	6.66	4.19	26.45
Off-season biomass (t/ha)						
ギンネム単独	—	0.40	3.30	4.85	6.13	14.68
農作物 (3.0 m)	—	0.22	2.77	3.94	5.13	12.06
農作物 (5.4 m)	—	0.09	2.02	3.01	4.21	9.33
年間雨量 (mm)	655	557	713	879	115	
アグロフォレスト リーの農作物	ミレット ピジョンピー	ヒマ ビジョンピー	ミレット ビジョンピー	ラッカセイ ヒマ	大干ばつで 収穫なし	

資料: ICRISAT 年報 1988, 185 頁, 表 17 より。

らかにされている。

試験地（半乾燥地）ではオフ・シーズン（乾季）に飼料が不足するので、ギンネムのバイオマスは乾季における重要な飼料となる。それを念頭にギンネムが選択され、試験後において経済評価が行われた。

当然のことながら、土壤の違いによってバイオマスの生産量に違いが生ずるため、アグロフォレストリーの評価もそれに応じて異なってくる。図4はVertic Inceptisol（土壤のタイプ）の土地で試験をした場合の結果を示している（違った土壤タイプのデータ

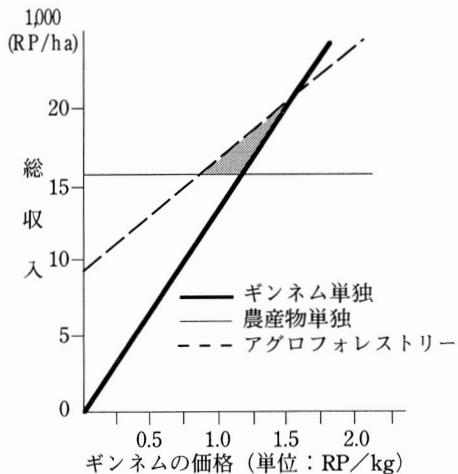


図4 Vertic Inceptisol（土壤のタイプ）におけるアグロフォレストリーの経済評価

資料: ICRISAT 年報, 1988 年, 186 頁

もあるが省略する)。1 kg のギンネム飼料価格が 0.8 ルピー以下では、1 ha 当たりの収入は、農産物単独の場合がもっとも多く、次いでアグロフォレストリー、

最後にギンネム単独になる。しかし、0.8 ルピーを超えるとアグロフォレストリー > 農産物単独 > ギンネム単独の順にかわり、さらに価格が 1.6 ルピーを超えるとギンネム単独 > アグロフォレストリー > 農産物単独の順で収入が多くなるという。要するに構成する産物の価格がアグロフォレストリー評価を変えることを具体的に示している。

(2) ICRAF の試験

ICRISAT における試験や農民の経験から乾燥地におけるアグロフォレストリーは技術的に困難であるという問題提起があり、ICRAF はその問題に別の角度から光をあてることになった。

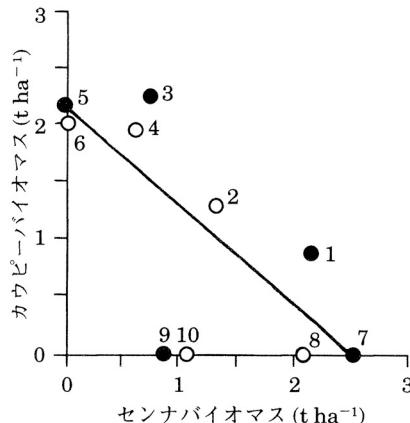


図 5 バイオマス生産量比較

資料：ICRAF 年報、1993, 66 頁

センナ (*Senna spectabilis*) と

カウピー (Cowpea) の組み合わせ

- ① カウピー十多数枝のセンナ (深い土壤)
- ② カウピー十多数枝のセンナ (浅い土壤)
- ③ カウピー+1本枝のセンナ (深い土壤)
- ④ カウピー+1本枝のセンナ (浅い土壤)
- ⑤ カウピー (深い土壤)
- ⑥ カウピー (浅い土壤)
- ⑦ 多数枝センナ (深い土壤)
- ⑧ 多数枝センナ (浅い土壤)
- ⑨ 1本枝センナ (深い土壤)
- ⑩ 1本枝センナ (浅い土壤)

ICRAF の仮説は、農作物と樹木間の水の奪い合いが軽減されれば問題は解決されるというもので、根の浅い農作物は地表に近い水を、多年生の樹木は深いところの水を使用できれば問題は発生しない、というものであった。

つまり、土壤の浅い乾燥地の農地ではアグロフォレストリーは困難であるが、深ければ成り立つという仮説を設けたのである。その結果、土壤の深い

3 ところでは半乾燥地 (Machakos KENYA) でもバイオマスの生産が増加し、アグロフォレストリーの効果が確認できるという結論に至った (図 5 参照)。

しかし、土壤の浅いところ (一般的な農地と考えてよい) におけるアグロフォレストリーが全般的に困難であることは ICRAF においても確認されることになった。従って、半乾燥地においてアグロフォレストリーを成功させようとする深根性の樹種の開発・発見なくしてありえないということになる。また、灌漑によって少量の水を補

給することも有力な対策の一つと考えられる。なお、バイオマスの量だけでアグロフォレストリーを評価するのは片手落ちである。なぜなら、農産物のバイオマスと樹木のバイオマスの価値に差があるからである。同じ程度の価値ならば問題ないが、どちらかが著しく安ければ、その安い産物の生産に傾斜するほど損失が大きくなる。その理由は既に述べたところである。

ICRAF の研究で明らかになったもう一つの重要な点は、根粒菌を保有する樹木（上述したギンネム、カリアンドラ、モクマオウなど）に対する評価である。従来の見解では、その種の低木は根粒菌が空中の窒素を根に固定するため、農作物と相互補完関係を形成する樹木であり、アグロフォレストリーに最適なものと考えられてきた。しかし、それらは根が地表近くで相当広い範囲に広がるため、半乾燥地では農作物から水を奪い、成長を著しく阻害することが実証された。そのためこの種の樹木は半乾燥地において歓迎されない樹種と結論づけられるようになった。その影響もあって ICRAF の試験（図 5）でも *Senna spectabilis* (*Cassia spectabilis*) が採用された。センナは根粒菌をもつ植物ではない。しかし、ギンネムのように浅根性ではないので農作物との競合を軽減できる。とは言え、センナが飼料木ではないのでその利用方法を考えなければならない。利用方法がなければ価値のきわめて低い樹木ということになり、アグロフォレストリーに適しているかどうか疑問が生ずることになる。

もう一つの問題点は「半乾燥地」の定義である。雨の降り方や気温等と関連して一概に言えないが、一応の目安として年間雨量 500～1,000 mm の地域を想定する。年間降雨量がこの範囲の地域では、同時共存型のアグロフォレストリーは難しい。しかし、1,000 mm 以上の雨が期待できるところでは、低木が浅根性であったとしても地中に十分な水分があると予測されるので競合関係は深刻なものではない。従って、湿潤地帯では依然として根粒菌をもつ低木がアグロフォレストリーにおける重要な樹木であることに変わりはない。

おわりに

アグロフォレストリーの技術は産物の価格によって変化して行かねばならない。例えば、1 ha 当たりの穀物収入が 1 千円である段階には、それと同じ程度の価値を生み出す樹木が配置されることになる。しかし、5 千円の収入を得られる産物が導入されるとそれとペアを組むべき産物を見つけねばならない。つまり、産物の価格が上昇するにつれ組み合わせが変わり、管理技術が変わっていくのがアグロフォレストリーだということである。当然のことながら、高収

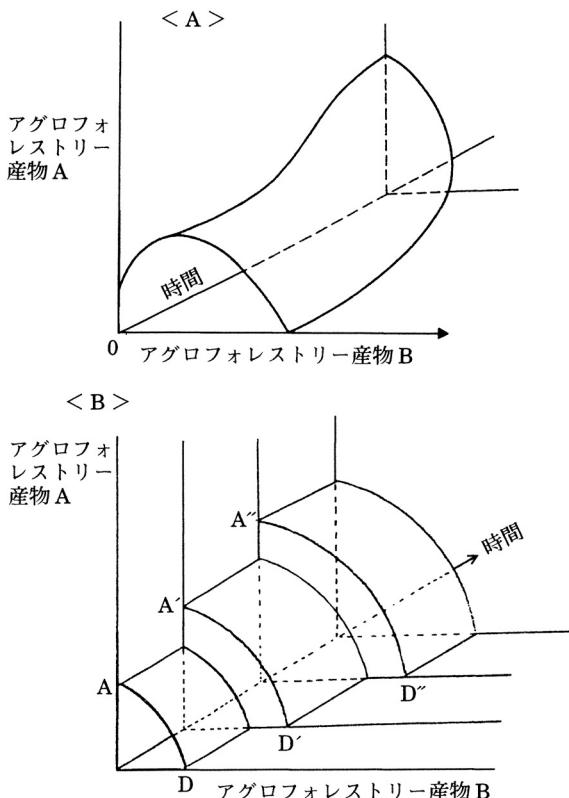


図 6 アグロフォレストリーの発展について

入の産物はペアとなるべき産物の数や種類を減少させ、かつより高度な栽培技術が要求されるようになる。したがって、アグロフォレストリーは図6<A>に示されるように徐々に発展するのではなく、収入の高い産物の開発・発見に併せて階段状に発展していく技術である（図6参照）。

収入の高い作物または樹木（林業）が発見され、それと組むべき適当なペアが見つからない場合にはアグロフォレストリーは解消され、林業（樹木）単独あるいは農作物の単

作にかわる。先進国においてもアグロフォレストリーの研究が行われている。特に畜産と林業の組み合わせはシルボパストラル（日本では「混牧林」）と呼ばれ、日本、アメリカ、オーストラリア等で実験してきた。アメリカ、オーストラリア等の実態は知らないが、日本の経験では成功したとは言えない。その理由は、推測ではあるが、両者の価格がペアを組むのに適当ではなかったように思われる。つまり、畜産物か林産物の価格が相対的に著しく高い点に問題があって（図3のような関係が存在して）、全体として単作に比較して有利な土地利用にならなかったところに問題があったのではないかろうか。勿論、先進国における小規模経営の場合、単作の方が労働生産性が高いと推測される。アグロフォレストリーは土地利用を複雑にし、労働生産性を低下させる危険性をはらんでいる。労働市場が拡大し、1日当たりの賃金水準が上昇するにつれ、労働生

産性も重要な課題になっていくことは確かであり、先進国のアグロフォレストリーを考察する場合に欠かせない視点である。

ともあれ、アグロフォレストリーは形態重視の時代から組み合わせを科学する時代、経済合理性を追求する時代に入っていることは事実である。

(注) アグロフォレストリーには様々な形態がある。その内、本稿で取り扱ったのは Alley crops のような同時共存型アグロフォレストリーについてである。連続型アグロフォレストリー(例えば焼畑造林のようなアグロフォレストリー)、樹木を利用した土壤保全、パークランド・システム等については論じていない。両者は多くの点で共通性があると思われるが、今後の検討課題として残すことになった。

《お知らせ》

日本熱帯生態学会の第6回大会が6月22~23日に筑波研究学園都市で開催されます。その中で下記のような森林総合研究所と共催の公開シンポジウムが企画されています。非会員の方も含め、多数の方々の参加をお待ちしております。

日 時：6月23日(日)午後1時~5時

場 所：農林水産省森林総合研究所(常磐線牛久駅下車バス15分)

参加費：無料(但し、一般研究発表参加の場合には大会参加費が必要です)

「熱帯低湿地の人と自然—アジア・太平洋地域」

古川久雄(京都大・東南アジア研)：熱帯低湿地の地形発達

海津正倫(名古屋大・文)：ベンガル低地の地形と環境変化

藤本 潔(森林総研)：太平洋島嶼におけるマングローブ林の立地形成と海水準変動

阿部健一(京都大・東南アジア研)：拓かれる泥炭湿地林—スマトラの開発移民—

八木一行(納環研)：水田からのメタン発生—食糧生産と地球環境保全とのバランス—

向後元彦(マングローブ研)：ベトナムにおけるマングローブ植林支援

問い合わせ先：〒305 茨城県稲敷郡茎崎町松の里1

森林総合研究所森林環境部立地評価研究室 藤本 潔

電話 0298-73-3211 内線359 FAX 0298-73-1542

E-mail : fujimoto@ffpri.affrc.go.jp

tropics@ffpri.affrc.go.jp