

半乾燥地の生態系を活かした 二酸化炭素固定増大の可能性

角 張 嘉 孝

1. はじめに

IPCC 京都会議の後、森林における二酸化炭素固定システムに関する期待感が世界的なレベルで高まっている。と同時に自国の環境資源評価と保全に関して、発展途上国を含めた新しいルール作りに関する標準化が迫られている。

温暖化の進行を抑制するには排出ガスそのものを減らすか、固定するしかない。具体的には、①二酸化炭素排出量の少ない燃料へ転換し、省エネルギーを進めて排出量を削減する。②排出された二酸化炭素を海洋および森林を利用して固定する。この2つの方法しかない。排出箇所（たとえば火力発電所）から二酸化炭素を分離し地中や海中深く貯留する方法は問題解決上直接的だが、さらなるエネルギーの消費を生み、あらたな環境影響も危惧される。環境への負荷の少ない多機能なコンセプトをもち、かつ持続可能な方法が望まれている。

本稿は石油産業活性化センター英文雑誌「Green Age」に発表した論文（Kakubari 2001）に具体的なデータを付け加えて論じたものである。具体的なデータは科学技術庁プロジェクト「砂漠緑化による炭素固定（代表者 山田信州大学教授）によって得られたものである。

2. なぜ生産性の低い乾燥地の生態系が研究の対象なのか？

地球上のおもな生態系の面積、炭素保持量と生産量の関係を表1に示す。熱帯雨林では1haあたり1年間で8t（トン）程度の炭素を固定する能力があり、温帯林周辺でもその値は6tと高い。これらの生産性の高い土地で森林を保全したり、大規模に植林をすれば二酸化炭素固定促進に役に立つ。しかし、実際

Yoshitaka Kakubari : Possibilities for Increasing Carbon Dioxide Sequestration
Taking Advantage of Arid-land Ecosystem.

所属：静岡大学農学部

表 1 陸域各種生態系の面積、炭素保持量および一次生産量

生態系	面積（億 ha）	炭素保持量（tC/ha.yr）	一次生産量（tC/ha.yr）
熱帯雨林	18~24	200~248	7.5~9.1
温 带 林	12	225~240	5.6~5.9
針葉樹林	12~13	220~260	3.3~3.6
草 地	22~24	110	1.9~3.5
低 木 林	8~8.5	150	3.0~3.2
農 地	14	70	2.9~3.0
半乾燥地	42~45	7	0.2
ツンドラ	8	205	0.5~0.6

※生物的 CO₂固定法の横並び評価（平成 8 年度 日本化学工学会報告書一部抜粋）

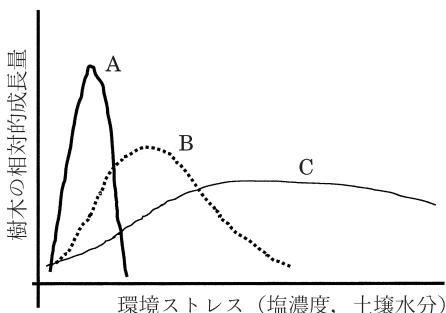


図 1 灌水中の塩濃度（土壤水分）と導入に適した樹木の相対的な成長関係の模式図

耐塩性・耐乾性樹種の選抜の手順は

第 1 段階：現地調査によるネーティブな種への各種実験。

第 2 段階：現地実験あるいはモデル実験結果による技術レベルの選択。

実験結果によるモデル化、それによって植林の立地区分。

緑化するのになにが足りないか、なにを持ち込まなくてよいのかの判断。

第 3 段階：実証研究を経てスケールアップ導入可能な技術の確認。

研究目的および予算規模に応じた、多様な現実的な提案および回答。

当面は、CO₂固定量の試算と大規模緑化技術の評価。

問題これらの生産性の高い土地はすでに耕作地や人工林になっていたり、熱帯林ではより付加価値の高い産業（たとえば、ゴム園、パイン畑などのプランテーション）に利用されている。これらの土地を二酸化炭素抑制対策に利用するには、植林自体による副次産物がもっと付加価値の高いものでなければならぬ。

現在、すでに何らかの産業に利用されている土地と違って半砂漠に代表される乾燥地は他の土地産業との競合は少ないと考えられる。塩湖などの特殊な場所を除けば十分な未利用地が控えており、もっと現実的な技術開発が適用できる土地として期待できる。図1は水資源など樹木に必要な環境条件の良否の程度と樹木の成長特性との関係を模式的に示している。太線（A）で示したように、成長能力（二酸化炭素吸収能力）は高いが限られた環境でしかその能力を発揮できない樹木、細線（C）のように、成長能力は比較的低いが広範な環境に生育できる可能性が高い樹種。その中間の性質を有する樹種（破線）を示す。このように、樹種特性によって植栽可能な場所を選択しなければならない。

3. 乾燥地の生態系制御でどのくらい炭素固定できそうか？

最近の気候変動に関する政府間パネルの報告（IPCC, 1995）によると、世界中の年間二酸化炭素排出量は7Gt（ギガトン、炭素換算）を超える。このままの傾向が続ければ、100年後の二酸化炭素排出量は現在の3倍になると予想されている。これにともない、気温の上昇が 2.5°C と見込まれている。シナリオによって、100年後の排出量は5~36Gtの幅がある。仮に100年後の二酸化炭素濃度を550ppmに設定すると気温の上昇は 1.5°C の上昇に留まるという。

手元にある資料による（Law, 1998）と、西オーストラリアの乾燥地は100万km²および。この地域の現存量の平均は6.764t/haと仮定できる。その炭素含有率を仮に50%とすれば3.382t/ha固定できる。これを生むのに仮に20年を要したとすれば年間に固定できる炭素量は169.1kg/haと見込まれる。これを生態系制御によって高度化し、仮に現在の2倍にすることが可能となれば、西オーストラリア全体では年間約3,382万t前後の炭素が固定できる計算になる。現在の工業ベースにおける炭素固定コストがトンあたり4万円と見積もられることから、この値は13.5億円に相当する。しかも地球上には4,500万km²の乾燥地（表1）があると推定されるから、この考え方の応用可能な面積をその20%と見込めば、年間120億円相当分の炭素を固定できることになる。乾燥地全域で炭素量換算では約30.4億t固定できそうである。この量は二酸化炭素の

年間排出量 70 億 t のなんと約 44% をまかなうことができる。しかも一度生態系ができれば数十年は持続できると期待されるから、生態系制御による大面積乾燥地緑化は二酸化炭素固定手段としてかなり期待できそうである。

4. 生態制御のため、なにをどう調べなければならないか？

樹木の光合成や蒸散、樹木の呼吸によって放出される量、根や微生物による分解によって土壤から放出される量も調べて、生態系全体の純二酸化炭素固定速度を知る必要がある。これらは炭素固定能力の高い樹種の評価と植栽木の選択に不可欠な情報である。平行して植栽予定地となるであろう対象地の立地条件を調べる。乾燥地における樹木の評価は光合成の能力だけでなく、その能力を維持するために多量の水を消費するようでは意味がない。また、光合成の能力は高いがその能力を発揮できる条件が限定されるような樹種（たとえば、土壤水分とか塩濃度の程度で極端に光合成の能力が低下するような樹種）では、大規模に植栽面積を確保できないため、結果として炭素固定総量を増やせない。

乾燥地に生育する植物の成長を規定する環境要因、たとえば光、気温、飽差（大気の乾き具合）、土壤水分、栄養塩類などとの相互関係をモデル化する。植物の炭素固定はどんな環境要因によって支配されるか？ 蒸散はいかほどか？ それらに關係する要因をどの程度制御することが可能か？ 要因間の感度特性を調べる。そして最終的にはもっとも経済的かつ永続的で、生態系に負荷を懸ける範囲で物質収支量が最大になるような最適解を求ることになる。図 2 に示したように、樹木の個葉から樹冠などの個体レベル、林冠などの群のレベルを経て、より大規模なスケールまで、情報の高度化を計りながら異なる次元でのデータ互換性を維持しなければならない。また、得られた詳細データの適用範囲と誤差の議論が不可欠である。現地でいろいろな実験や観察を通して自然から何らかのヒントを引き出せないか？ 何らかの具体的な造林法の提案ができるないか？ 最適解を得るためにには、さらに注意深く経験を積み重ねて行かなければならぬ。その具体的な手法をオーストラリアでの観察と実験の例で説明しよう。

コメント：図 2 は目的とした樹木（植物）の大きさに応じた、推定手段の関係をグラフィカルに記述したもので、 2 cm^2 程度の個葉から、樹冠モデル（第 2 のレベル）を経て、より大きなレベルに展開、最終的には $10\sim100\text{ km}^2$ までスケールアップする際に必要な留意点を述べたものである。

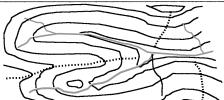
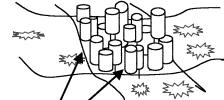
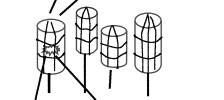
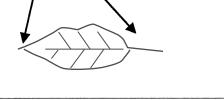
レベル	レベルの名称	調査研究対象模式図	スケール (ha)	調査研究対象 (手法形態)	調査研究手法 (解析手段)
4	流域レベル		$10^{3\sim 4}$	流域分割 林班・小班 尾根・沢筋	リモートセンシング 航空写真 地理情報システム (GIS)
3	生態系レベル		$10^{1\sim 2}$	各種生態系 (森林, 果樹, 畑, 草原) 単純一齊林 針広混交林	航空写真 地理情報システム (GIS)
2	樹冠レベル		$10^{-4\sim -1}$	樹冠内空間情報 (樹高, 枝下高, 最下葉高, 樹冠半径, 樹木位置) 樹冠オーバーラップ(競合)	樹冠内生理特性 樹冠内光減衰 葉の角度 太陽の軌跡 斜面傾斜など
1	個葉レベル		$10^{-8\sim -7}$	個葉 環境要因, 生理反応 (生態・生理学)	光合成・蒸散モデル 気象要因 (気温, 鮎差, 日射量, 土壌水分), 季節変化, 日変化

図 2 二酸化炭素固定に関するスケールアップ手法の模式図

5. オーストラリアにおける研究内容および手法 :

5.1 調査地概説

西オーストラリアの州都パースから、東へおよそ 800 km 離れたところに金鉱山町カルグリ (Kalgoorlie) がある。さらに北北西に 250 km 離れたところにはレオノラ (Leonora) がある。300,000 ha におよぶ牧草地で、沖積層と輝緑岩や珪酸質のハードパンの上に赤色のローム砂質土壌が堆積している。また周辺には塩湖も散在している。植生は灌木を含むムルガ (*Acacia aneura*) と呼ばれる広葉をもつアカシアが主として分布している。過去 100 年の平均降水量は 208 mm で、最大 561 mm である。最低は 54 mm で、不規則でしかも極めて局所的な降り方をする (Allen, 1994)。Pringle によると推定された年間蒸発散量は 3,035 mm である (Pringle *et al.*, 1994)。冬雨型の地中海性気候の特徴を有する。降水量自体は多くはないが年間を通して毎月 20~30 mm 程度の降雨がある。ひとたび降雨 (2000 年 1 月中旬, 150 mm) があると写真 1 のように、クリークを越えて一帯が水害のように表流水で覆われる。

5.2 方法と材料

主としてクリーク沿いにユーカリ (*Eucalyptus camaldulensis*) が分布し、クリークとクリークとの間の平坦な場所にアカシアが分布している。これらを対象に、光合成・蒸散、クロロフィル蛍光反応、葉の水ポテンシャルなどを年 3



写真 1 ユーカリ林の大洪水

中央に見えるのはユーカリ林。その林を上下に挟んで、ワジを溢れた洪水が左から右に向かって流れる。手前のユーカリの大木（樹高 20 m）のそばには小さなクリークがある（水没）。新しいクリークが洪水のたびに流路が変わる。

回、2週間ほど現地に滞在し測定している。日射量、気温、湿度、地温、土壤水分等の環境要因を30分ごとに計測している。このほか、ドイツ・バイロイト大学（テンフネン教授、ティンマーマン博士）の協力を得て樹液流量（樹木による水消費量）をヒートバランス法（Granier *et al.*, 1987）によって調べている。また、各種生態系の現存量、生産量を推定するため、伐倒調査をおこない、樹木の各器官ごとの重量や葉面積などを測定し、相対成長関係を調べた。最終的には生態系全体の現存量（枝や幹の重さ、枯れ枝の重さ、葉量など）を推定、生態系ごとの炭素固定速度や立地条件の違いに応じた要素技術の体系化に利用する。

5.3 ユーカリ林とアカシア林の現存量

葉を含めた地上部現存量はユーカリ林で 28.9 t/ha、アカシア林でおよそ 9.1 t/ha、葉面積指数は前者が 2.66、後者が 0.43 である（表 2）。この値は乾燥地の現存量としては驚異的な多さである。その理由としてあげられるのは、夏期の平均気温が 30°C 前後で、冬季には比較的高温でしかも降水量が多いこと。雨量自体は絶対的に少ないが、他の乾燥地帯と比べると極端な乾季・雨季の区別がないことが挙げられよう。9月～10月前後に乾季と言えそうな時期があるが、気温もそれほど上昇しないので分布を左右するほどの理由にはならないと思われる。

5.4 アカシア林の分布および生態学的特性

表 2 ユーカリおよびアカシアの現存量

		幹と枝 (t/ha)	葉重量 (t/ha)	葉面積 (ha/ha)
Site 1-a	ユーカリ	11.97	1.43	1.07
	その他	15.50	4.94	1.59
	計	27.47	6.38	2.66
Site 7	アカシア	6.68	1.05	0.43
	枯死枝	1.42	0.31	0.12
	計	8.01	1.36	0.52

Site 1-a はユーカリとアカシアの混交林

Site 7 は枯れ枝の多いアカシアの純林



写真 2 アカシア林

冬季から春にかけて数十ミリの降雨があると、クリークから離れたこのアカシア林でも、洪水に襲われることがある。洪水の効果は長いときでも数ヶ月におよぶ。

アカシア林の分布はクリークから遠く離れた、洪水時の末端で一時的に滯水するような地形のところにみられる（写真 2 参照、立木密度 4,000 本 /ha）が、その株の多くは複数の幹で、枯死枝が目立つ。樹高は 7 m 程度に達するが、水不足の程度は最大 8 MPa 程度である（図 4）。年間を通して水不足で、水を利用できる期間は降雨直後の洪水時に限定される（図 3）。光合成速度は $5 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ sec}$ 前後である。降水直後には $25 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ sec}$ 程度まで回復することがある。季節を通してどの程度の光合成能力を有するかを判断するには、さらなるデータの集積が必要である。アカシアの光合成速度はユーカリのそれよりも低いが、土壤の水不足状態（3 MPa 以上）における光合成速度の減少が少ない（図 4）。したがってアカシアの植栽が期待される面積はかなり多いと考えてよい。

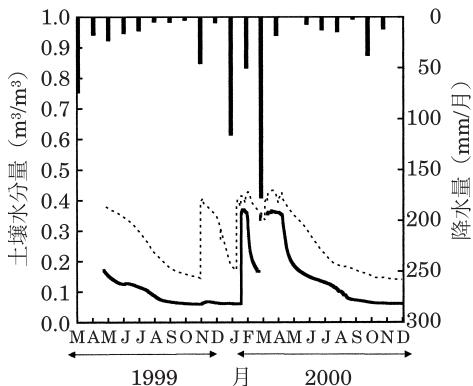


図 3 土壤水分と降水量の季節変化

土壤センサー (Delta-T 社製) は試験地の 50 cm の深さに埋めてある。アカシア林は太線、ユーカリ林は細線で示す。土壤水分量が $0.4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の場合、1 MPa 前後、 $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ の場合、4 MPa 前後を示す。図上の棒グラフは降水量を示す。ユーカリ林とアカシア林では、土質が前者は砂質なため最大容水量に違いがある。

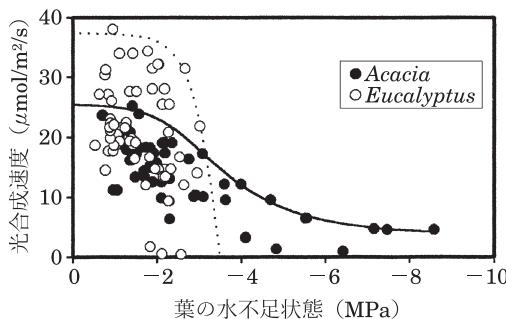


図 4 葉の水ストレスと光合成速度の関係
実線・点線はそれぞれの分布限界

図 5 に示したように、アカシアの樹液流量の季節変化は降雨量の季節変化とよく対応している。胸高直径 19.6 cm の個体の場合、1999 年 4 月から 1999 年 12 月の 8 ヶ月で約 2.4 t の水を消費していることがわかった。それに対して、直径 6.1 cm の個体では、同じ期間で 0.2 t であった。このように個体のサイズによって相当の開きがあることがわかった。樹液流量を季節的に見ると、1999 年 3 月のハリケーンによってもたらされた 30~40 mm 前後の雨 (図 5 の太線で示す) によってフラッド (洪水、写真 2 参照) が生じ、それらが浸透して土壤水

分を涵養し樹液流量が増えたものと考えられる。9月から10月末まで極端に樹液流量が低下する傾向がみられた。

5.5 ユーカリ林の分布および生態学的特性

ユーカリ林はクリーク沿いに多く見られる（写真1）。ユーカリ林（立木密度2,000本/ha）の樹高は最大19m程度に達する。年間を通して水条件がよいところに限られる。葉の水ポテンシャルは午後をピークとする上に凸の日変化をするが、季節を通して0.5～2.0 MPaの範囲にある。光合成速度は $35\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{sec}$ 前後で、アカシアよりもはるかに高いが、葉の水不足状態によっては光合成の減少が激しい（図4）。したがってユーカリが分布（あるいは植栽できる）可能な面積は極端に限定される。ユーカリを植栽した場合には、クリーク内と同じような土壤水分状態（少なくとも葉の水ポテンシャルを2 MPa前後に保持する）になるよう常に灌水し続けないと期待した生育は望めない。

ユーカリの樹液流量は降雨量の時期（図5の太線棒グラフ）とは関係なく、ほぼ一定の樹液流量が確認されている。これは、クリーク内の土壤水分条件が比較的安定した条件で推移することを示している（図3）。ユーカリの胸高直径27cmの個体の場合、1999年4月から1999年12月の8ヶ月で約6.8tの水を消費していることがわかった。それに対して、直径14cmの個体では、同じ期間で2.6tであった。このように個体のサイズによってアカシアほど顕著な差を認めにくい。

クリークの周辺（洪水の末端部）では天然更新（自然の力で世代交代する）による若木が多く見られる。その多くは枯死に至るが、いくつかはそのまま成長を続ける。その水分と栄養塩類の供給源はフラッドにはかならない。ユーカリの若木の周辺には、おびただしいリター量があり、過剰な蒸発散による土壤の急激な乾燥を防ぐ一方、栄養塩類にとむ新鮮な土砂の供給を容易にしている。天然のマルチングといっていいだろう（Kakubari, 2001）。

5.6 今後

ユーカリ林とアカシア林の調査区における個葉レベルの生態・生理学的情報の収集に重点を置きモデリング化の研究を進めるとともに、今後は樹冠レベルから林冠レベルに、そして流域レベルへと拡張したいと考えている。幸い詳細な航空写真や衛星データも入手できる見通しなので、地理情報システムとのドッキングを計り、スケールアップすることによってより精度の高い生態系制御の手法の確立を目指して努力したいと考えている。最終的には、より大きな規模での展開に応用できるようIGBP/GCTE等とのレベルにおける環境整備

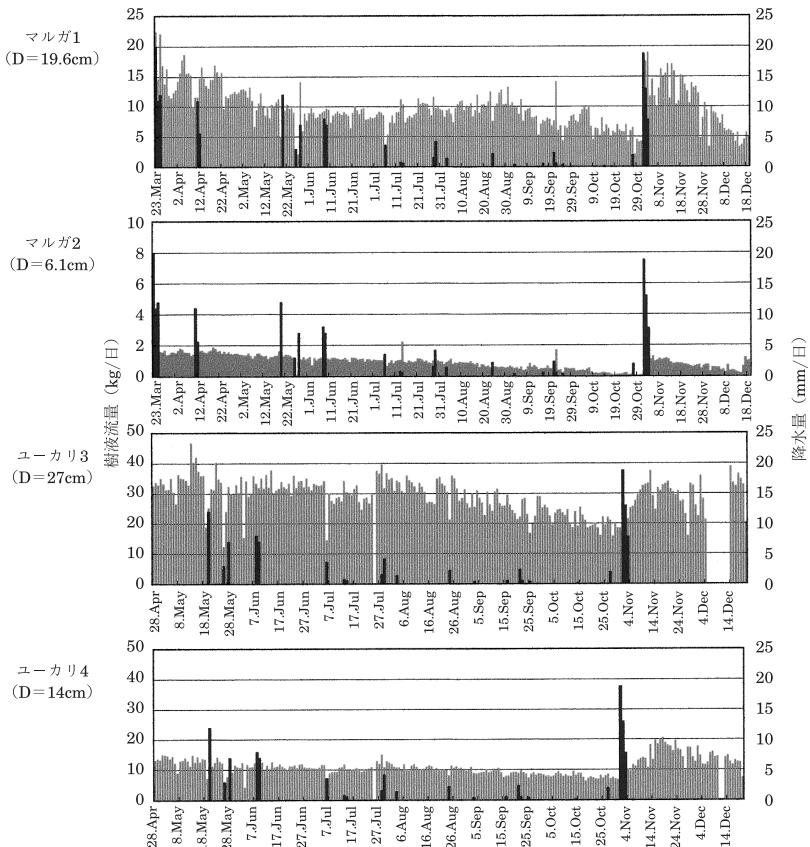


図 5 アカシアとユーカリの樹液流量の季節変化

ユーカリの測定期間は1999年4月28日から1999年12月20日まで、アカシアの測定期間は1999年3月23日から1999年12月19日まで。現在も継続測定中。各試験地では6個体、樹液流センサーおよび配電装置はバイロイト大学テンフネン教授による。太線は降水量。

を計りたい。

〔参考文献〕 1) Allen, A.D. (1994) Hydrogeology in an inventory and condition survey of range lands in the north-eastern Goldfields, Western Australia. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 87 323 pp. 2) Granier, A. (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements Tree Physiology 3 : 309-320. 3) Pringle, H.J.R., A.M.E. van Vreeswyk and S.A. Grillian (1994) An inventory and condition survey of range lands in the north-eastern

Goldfields, Western Australia. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 87 323 pp 4) IPCC 1995 報告, J.A. Lakeman 編集 (1996), IPCC 第一作業部会報告, 気象庁訳, 597 P, 東京. 5) Law, J. Lod & Cindy Hurst and A. Williams (1999) Sturt meadows carbon fixation project using arid vegetation. 32 pp. 6) Law, J. (1998) A summary of the biomass & soil sampling. Sturt meadows carbon fixation project. 97 pp. 7) 化学工学会報告書 (1998) 生物 CO₂ 固定法の横並び評価 (平成 8 年度) 日本化学工学会報告書 8) Kakubari, Y. and Odaka, N (1995) Eco-physiological approach to the arid-land afforestation. J. Arid Land Studies 5S : 69-72. 9) Kakubari, Y (2001) Possibilities for increasing carbon dioxide sequestration taking advantage of scale merit in a semi-arid ecosystem. Green Age, vol 23 : 3-9

熱帯林業関係テキスト

国際緑化推進センター刊行

- 1 : 热帯の造林技術 浅川澄彦著 1999 年改訂 117p.
- 2 : 実践的アグロフォレストリ・システム 内村悦三著 2000 年改訂 116p.
- 3 : 热帯地域における育苗の実務 山手廣太著 1994 年補訂 130p.
- 4 : 热帯の土壤—その保全と再生を目的として— 八木久義著 1994 160p.
- 5 : 热帯の非木材産物 渡辺弘之著 1994 109p.
- 6 : 热帯の森林病害 小林亨夫著 1994 166p.
- 7 : 热帯の森林害虫 野淵 輝著 1995 263p.
- 8 : 热帯樹種の造林特性 1~3 卷 森 徳典ほか編 1996/97 255~300p.
- 9 : マングローブ植林のための基礎知識 馬場繁幸, 北村昌三著 1999 139p.
- 10 : 社会林業—理論と実践— 野田直人著 2001 126p.

- 11 : Handbook for Reafforestation in the Tropics Sumihiko Asakawa (1 の英語版) 1998. 119p.
- 12 : Diagnostic Manual for Tree Diseases in the Tropics Takao Kobayashi 2001. 178p. Color photographs of symptoms : 426 plates