

東南アジア湿润熱帯林の土壤

—その特性と森林荒廃にともなう変化—

太田 誠一

はじめに

熱帯林の危機が叫ばれてからすでに久しい。しかし FAO (1997) によれば、熱帯の発展途上諸国における 1990~1995 年の森林減少速度は、1980 年代よりはわずかに低下したとはいえ、依然として年間 1,300 万 ha に達するという。こうした中、熱帯林の保全や持続可能な管理に加え、すでに荒廃した生態系をどう修復・利用していくかが新たな重要問題としてクローズアップされ、そのための科学的根拠が必要になっている。しかし、熱帯林を支える土壤の特性や、森林の劣化・消失あるいは再生に伴うその変化に関する情報蓄積は、我が国はもとより世界的にも決して充実しているとは言えない。それは、農業が戦後、熱帯の食糧基地化に失敗し、その反省に立ってその後、熱帯農耕地の土壤学が急速に進展したのに対し、熱帯木材はつい最近まで一部は現在でも一収穫のための投資を除けば、あとはタダで入手できる天然資源であり、そこにどのような土壤が分布し、その生産性はどうであるかなどどうでもよかったですからに他ならない。しかし、目前に広がる広大な荒廃地の修復・再生・利用を進めようとする時、森林の基盤である土壤をその特性に応じて適切に区分し、管理・利用あるいはその機能を評価するための科学的情報が決して十分ではないことが明らかになった。特にアジアで顕著であった。こうした背景の下、筆者は、インドネシア東カリマンタンのサマリンダ市で国際協力事業団が実施した「熱帯降雨林研究計画」において、この地域の森林土壤の特徴とその劣化・消失に伴う変化について調査・研究を行う機会を与えられた。本稿では、筆者が東カ

本報告は 2001 年林学会賞受賞論文の一部を解説したものである。

Seiichi Ohta : Soils of Humid Tropical Forests in Southeast Asia—Their Characteristics and Changes with Forest Degradation—

独立行政法人 森林総合研究所 立地環境研究領域

リマンタンで得た知見を例示しつつ、熱帯林の劣化・消失に伴う土壤変化の様子を概観してみよう。

アジア熱帯雨林の土壤はどんな土壤か？

熱帯林の劣化・消失に伴う土壤変化について概観する前に、土壤からみてアジアの湿润熱帯林地域は世界の他の熱帯と比べてどのような特徴を備えているのだろうか。熱帯でも温帯と同様に、多様な地質・気候・地形等を反映して様々な土壤が出現するが、世界の熱帯全体でみればオキシソル（U.S. Soil Taxonomyによる、以下同）（FAO世界土壤図によるフェラルソルに相当、以下同）、ウルティソル（アクリソル、アリソル）、アルフィソル（ルヴィソル、リキシソル）等の風化の進んだ土壤の分布が大きく、全熱帯の7-8割がこの種の土壤で覆われている。このうち最も強い風化を受けたオキシソルは熱帯アフリカと熱帯アメリカを中心に世界の熱帯の2割強を占めているが、熱帯アジアでの分布はごく一部の塩基性岩地帯に限られている。一方、ウルティソルは熱帯アメリカ、熱帯アジアを中心に熱帯地域の約2割をカバーしており、特に東南アジア陸地面積の約64%がこの土壤で覆われ、低地常緑雨林とウルティソルの分布域はほとんど重なっている。このように、湿润熱帯アジアの森林土壤の代表がウルティソルである。この土壤は劣悪な化学性に加え、表層の粘土が下層に移動し砂質になった表層土は浸食に弱いというもう一つの重大な欠点を持っている。

筆者らがカリマンタンで調査・分析した結果、一方でウルティソルの特徴にはかなり大きな幅があり、粘土含量がこれを強く規定している（Ohta & Effendi 1992 a, 1992 b and Ohta *et al.* 1993）。例えば細粒質な土壤と粗粒質の土壤で土壤構造や酸化・還元斑など形態的特徴に明瞭が違いが観察されるほか、容積重や孔隙組成など土壤の物理的性質にも、塩基交換容量や交換性塩基やアルミニウム、炭素、窒素、リンの量などの化学的性質にも粘土含量による明瞭な違いが観察された。一方で土壤水分環境は粘土含量に加えて斜面位置が強く影響することが観測から明らかになっている。したがって、アジア湿润熱帯林のウルティソル地帯では、立地環境は土性と地形の組み合わせによって決まり、例えば平井（Hirai *et al.* 1997）はマレイシア領ボルネオでの研究から、*Droybalanops aromatica* と *D. lanceolata* の2樹種の分布は、前者が上部斜面の砂質土壤に特異的に分布するのに対し、後者はそれ以外の土壤と地形の組み合わせに出現することを実証的に明らかにしている。粘土含量が熱帯雨林にお

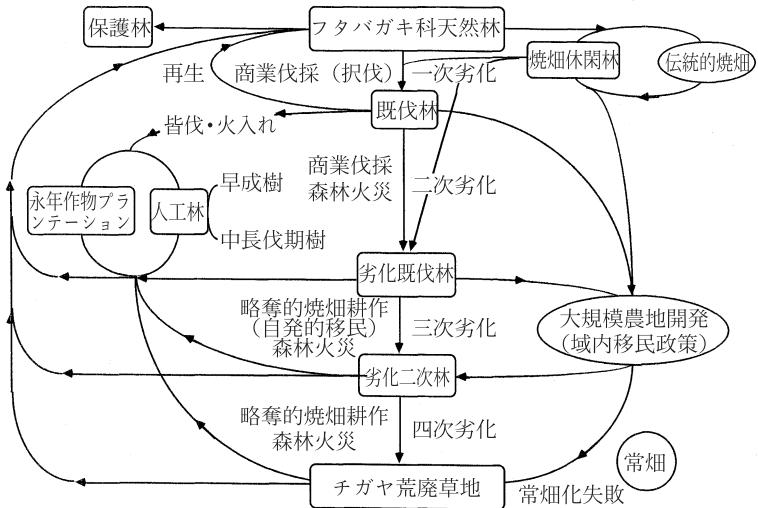


図 1 低地フタバガキ科林の変容過程

ける樹種分布の不均一性を解明するための重要な糸口となるかもしれない。このように粘土含量と地形の組み合わせによって、概略的な立地区分を野外で簡易の行う事が可能と考えられる。

熱帯雨林はどのように劣化・消失してゆくか？

それでは熱帯林の劣化・減少はどのように進むのだろうか。熱帯雨林は間違いない脆弱で傷つき易い。しかし「伐採によって熱帯雨林が一瞬にして不毛の荒れ地へ変わる」というのも誇張にすぎない。劣化・消失は段階的であり、その道筋、パターンも様々である。熱帯雨林の劣化・消滅プロセスを、東カリマンタンの低地フタバガキ科林について図1に例示した。熱帯雨林の変容は商業伐採によって端緒が切られる。多くの場合、熱帯林の伐採は択伐天然林施業によって、生物多様性の維持、土壤保全などを保証しながら持続的な木材生産を行おうとするが、現実には必ずしも成功しているとは言えない。択伐作業が残存木に与える被害は予想以上であるし、大型収穫機械の導入による土壤攪乱が広範囲に及ぶことも少なくない。更に、森林が自然回復する前に二度、三度の択伐が繰り返され、或いは盗伐が行われる時、森林は再生のための潜在的能力を急速に失って行く。加えて択伐を受けた森林は内部が乾燥し火に弱い。

熱帯アジアの森林消失の最大の元凶は焼畑だとされる。しかし、短期作付—長期休閑によって生産性の回復が保証される限り、焼畑耕作は低肥沃度土壤条件に対する優れた適応であり、半永久的に食糧生産が可能な農法である。これに対し、焼畑慣行を持たない農民が、新しく開かれた道路沿いに休閑期間の短い焼畑を無秩序に繰り返す時、天然林は急速に劣化二次林へ姿を変えてゆく。そして更に、休閑期間の短い略奪的な焼畑が繰り返えされたり、常畑が放棄されれば、やがて悪名高いチガヤ (*Imperata cylindrica*) 草原へ姿を変えて行く。ひとたびチガヤ草原に変われば、繰り返す火災のために草原は草原として安定し、森林の自然回復は絶望的でさえある。

このような劣化した生態系を食糧や木材生産のために再生・利用できるかは今後の熱帯林保全と密接に関連し、その土壤の取扱いが重要な課題になっている。一方でまた、これら劣化生態系の炭素貯留能など環境保全機能がどれほどであるかも明らかにしなければならない。しかし図1でみた様々な森林の変容ステージにおける土壤变化には多く不明な点が残されている。筆者が行ったインドネシア東カリマンタンの劣化二次林や荒廃草地土壤の特徴及び物質貯留量に関する検討結果の一部を紹介しながら、熱帯雨林の劣化・消失に伴う土壤変化の様子を概観してみよう。

劣化二次林の土壤

インドネシア・東カリマンタンの低地フタバガキ林地帯では1970年代に本格的な商業伐採が開始され、新たに定住した入植者による焼畑耕作や度重なる大規模な森林火災(1982, 91, 94, 98年)などによって、特に1980年以降森林劣化が急速に進み、現在では多くの地域が二次林やチガヤ草原で覆われている。この地域には攪乱履歴によって多様な二次林が成立しているが、ここでは清野(1994)に従って、既伐林が1982年の火災被害を受け *Macaranga gigantea* とフタバガキ科樹木から成る攪乱程度の弱い二次林(Aタイプ)、と、1982年以降も1年栽培—5年前後の休閑による焼畑が行われフタバガキ科を含まない強く攪乱を受けた低木の二次林(Cタイプ)の土壤を天然林の土壤と比較してみよう。

化学性についてみれば、短期休閑焼畑による強い攪乱履歴を受け若い(3~5年)低木からなるCタイプ二次林のほうが、天然林や攪乱程度の弱いAタイプ二次林よりも、表層土のpH、交換性塩基レベルが高い(図2, 3)。この知見は一見、「焼畑跡地の土壤は劣化している」また「焼畑跡に森林が再生・成熟して

いく過程で土壌は肥沃になる」という一般的仮説に反する様に見える。しかしこの最初の仮説には誤解が含まれている。バイオマスの燃焼は窒素の気化による一部消失を除けば、バイオマス中のその他養分は灰として土壌へ付加される。こうして上昇した表層土壌の養分レベルが焼畑農耕の生産を支える。確かに灰として添加された養分は栽培期間中に表土流失の増加や作物の収穫などにより土壌系から徐々に失われる。したがって短いサイクルで焼畑が繰り返され、こうした養分の損失が、岩石風化や降雨など大気由来の一次的給源からの付加を上回れば、土壌中の養分プールも徐々に涸渇していく。しかし実際には、天然林を対象とした焼畑の場合、2~3年の栽培期間中に、作物収量は低下するにもかかわらず土壌中の養分ストックが著しく減少することはなく、伐倒・火入れ前よりもしばしば高いレベルで維持されるのが通常のようである (Jordan 1985)。タイ国での焼畑の実験的研究でも同様の結果が示されている (Tulaphitak *et al.* 1985)。

さらに第2の「森林の再生・成熟に

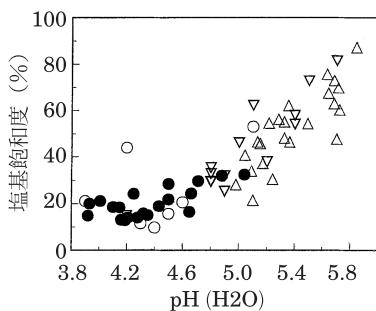


図 2 各種林分ならびにチガヤ草原における表層土壌の pH (H₂O) と塩基飽和度の比較

天然林 (●), A タイプ二次林 (○), C タイプ二次林 (▽), チガヤ草原 (△)

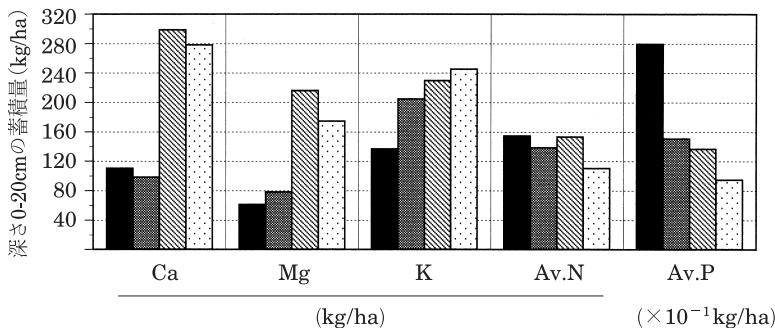


図 3 各種林分ならびにチガヤ草原の表層土壌 (0-20 cm) における養分蓄積量の比較

天然林 (黒 : n=20), A タイプ二次林 (灰色 : n=7), C タイプ二次林 (斜線 : n=14), チガヤ草原 (斑点 : n=13)

伴い土壤は肥沃になる」という仮説に関連して言えば、森林の成熟過程は下層土をも含む土壤全体の養分が樹木によってポンプアップされ、樹木の成長に伴いバイオマス中へ移行して行く過程であり、

同時に樹木によって吸収された養分の一部が落葉枝や脱落した根などの形で表層土壤へ徐々に再配分される過程であるといえる。した

がって、土壤最表層の養分レベルが森林の成熟に伴って徐々に上昇することはあり得、表層土壤の肥沃度を問題とする農業的立場からすれば「森林の再生・成熟は土壤を肥沃にする」とするのもあながち間違いではない。しかし、土壤全体で見れば、森林の成熟—バイオマスの増加—は、Jordan (1985) も例示するように土壤中の養分量を減少させる方向であるという点で、第2の仮説も誤りを含んでいる。ちなみに、土壤養分プールが森林の成熟に伴う土壤養分の減少に比べ十分に大きく、加えて風化などによる養分の一次給源が大きい場合は、土壤養分の顕著な減少は検出されないかもしれない。温帯土壤では恐らくそういう例が多く、その場合はむしろ森林成熟による表層土壤の養分上昇というプラス面に目が向けられることになろう。しかし、養分プールが本来的に小さく、しかも養分の一次給源をほとんど大気だけに頼らざるを得ない熱帯の強風化土壤の場合、森林の成熟は土壤養分の減少を顕在化させることにつながる。筆者はフィリピンにおいて、荒廃草地と *Acacia auriculiformis* および *Pinus kesiya* 植栽地の土壤を比較し、表層土の交換性塩基類の蓄積量は植栽5~8年を経た植栽地のほうが未植栽地より低いことを見出している(図4)(Ohta 1990 b)。したがって、上のカリマンタンの例で見た強い攪乱履歴を持つCタイプ二次林で土壤中の交換性塩基のレベルが高いのは、焼畑により一旦上昇した塩基レベルが維持されていると共に、若齢であるため土壤養分のバイオマス中への移行・蓄積に伴う土壤養分レベルの低下が起こっていないためと解釈することができる。また一方、林齢の進んだAタイプ二次林や天然林では土壤養分のバイオマス中への移行蓄積に伴う土壤養分レベルの低下が起こっている可能性を示唆している。

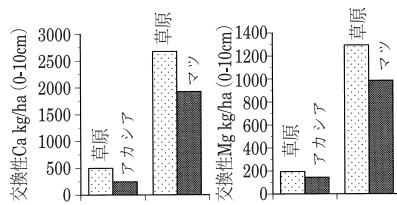


図4 フィリピン、ルソン島中部における荒廃草地と *Acacia auriculiformis* (5年生) および *Pinus kesiya* (8年生) 造林地の表層土壤における交換性塩基の蓄積量 (Ohta 1990 b)

チガヤ荒廃草原の土壤

一方チガヤ草原の土壤はどの様に変化しているのだろうか。同じく東カリマンタンの例でみると (Ohta *et al.* 2000), 地表に多量のミミズの糞が認められること、表層土に多量のチガヤの地下茎が分布し暗色を呈すること、A層～E層に顕著な酸化・還元斑が発達することなど、天然林と著しく異なる形態的特徴が観察される。これらの特徴はチガヤ地下部の有機物生産の大きさの反映であり、その分解にミミズが深く関わっているほか、微生物分解もきわめて旺盛であり、そのため時として還元的環境が形成されることを示している。

一方化学性をみれば、チガヤ草原土壤は前出の強い攪乱を受けた若い二次林と同様、天然林や攪乱程度の弱～中程度の二次林に比べ、表層土でpH、交換性塩基含量、塩基飽和度が明らかに高い傾向を見て取れる(図2、3)。このpHと他の塩基濃度の高さは先述の「焼畑後も土壤養分レベルは高く維持される」とする文脈において説明される。少なくともこの地域のチガヤ草原土壤についてみると、天然林に比べ塩基状態は劣化していないように見える。ただし表層土の有効態の窒素やリンのレベルはフィリピン(Ohta 1990a)やスマトラ(太田、未発表)の荒廃草地と同様に天然林や攪乱程度の弱いAタイプ二次林よりも明らかに低く(図3)，これら元素の存在様式の点でみれば荒廃草地は普遍的に天然林よりも劣っている可能性が高い。しかし、それがどのようなメカニズムによるか、更には荒廃草地の修復においてどのような実際的意味を持つのかは明らかではなく、今後解明すべき課題の一つといえる。

このように、東カリマンタンの劣化生態系の土壤は少なくとも塩基状態からみると地力が低下している訳でもなさそうである。しかし一方で、森林の劣化・消失の歴史が長いフィリピン(Ohta, 1990a)やスマトラ(太田、未発表)のチガヤ草原では、表層土壤の塩基状態や炭素、窒素の蓄積が周辺の天然林よりも劣っている。同様の傾向がペルーのチガヤ草原土壤でも認められている(Scott, 1978)。こうした事例間での違いは、草地化に伴う土壤変化には気候や土壤、地形、土地利用の履歴などによって大きな幅のあることを示している。ここで例として取り上げた東カリマンタン地域は比較的なだらかな丘陵地であり、森林劣化の歴史も10～20年と短く、このことが極端な土壤劣化を招いていないことと無関係ではないかもしれない。しかし、いずれにせよここで注意しなければならない点は、劣化生態系の土壤養分ストックが少なくないとしても、バイオマスをも含めた土壤一植物系全体での養分ストックが天然林に比べ

表 1 降水による元素の供給量と成熟した熱帯湿潤雨林のバイオマス中の存在量の比較 (Golley, 1983)

元素	バイオマス中の存在量 (kg/ha)	降水によるインプット (kg/ha)	降水インプットがバイオマス存在量に等しくなる時間 (年)
P	164	1.0	164
K	3,103	9.5	327
Ca	4,103	29.0	141
Mg	429	4.9	88
Na	55	31.0	2
Co	12	2.0	6
Cu	2	0.5	3
Fe	18	3.0	6
Mn	29	0.4	73
Sr	21	0.1	210
Zn	8	0.9	9

てどれほど不足しており、森林の回復・成熟期間中の一次的給源からの正味の付加により、不足している養分がどの程度補填されるのかを見極めることである。

湿潤熱帯での短伐期造林の課題—終わりにかえて—

湿潤熱帯の植物生産力を規定する最大・重要な要因は植物養分の欠乏であり、それはあたかも水が乾燥地域における最大の生産力規定要因であると似ている。東南アジアの貧栄養ウルティソル地帯で、熱帯林を持続的に経営・管理しあるいは再生・利用するためには、養分面からみて適切な立地区分を行うと共に施業に伴う養分環境の変動を予測し、これらの情報を基に貧栄養土壤環境にふさわしい森林管理はどうあるべきかを考えなければならない。言い換えればそれは、土壤中の養分は無限ではないという意味で土壤もまた有限の資源であり、これを消耗・枯渇させることなく利用するための視点に他ならない。

これに対する一つの回答は、貧栄養土壤地帯ほど中～長伐期施業や特用林産物の生産を基幹とすることで、生産に伴う養分収奪が一次給源から付加される量ができるだけ上回らないようにすることである。ではオキシソルやウルティソル地帯での一次給源からの養分供給量はどれほどなのだろうか。こうした強風化土壤地帯では養分供給を風化に求めることは難しく、大気がほとんど唯一の給源と考えざるをえない。そこで例えば、表1で大気から供給される養分量

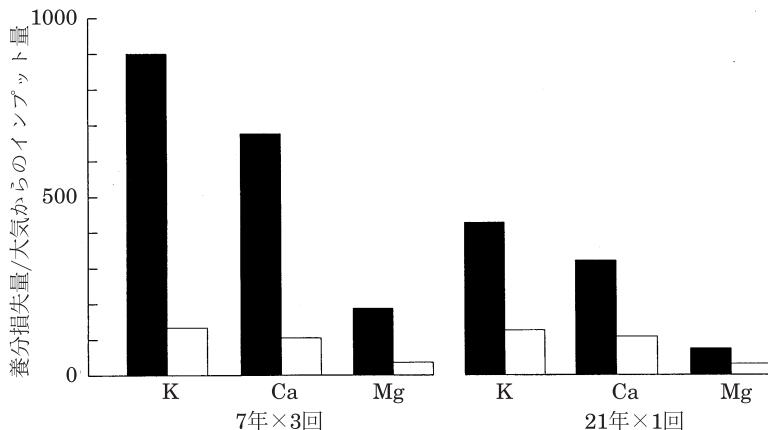


図 5 東カリマンタンの *Eucalyptus deglupta* 造林地における収穫、焼却、溶脱による塩基類の損失量（左側の黒抜き棒）と大気からのインプット量（右側の白抜き棒）：7年輪伐期3回ローテーション（左側）と21年輪伐期1回ローテーション（右側）の比較（Folster & Khanna 1997）

と成熟した熱帯雨林の植物体中に含まれる量との比較してみると、植物体中の養分がもっぱら大気から蓄積されるためには数十～数百年を要する計算になる。しかし一方、湿潤熱帯林そのものが成熟するにも数百年を要するから、大気からの供給だけで森林の養分を賄いうると考えても不自然ではない（Golley 1983）。従って、ローテーションを充分に長く設定できれば一次給源だけに頼っても養分の減退を招くことなく持続的な森林経営が可能である。しかし現実には、湿潤熱帯アジアの貧栄養土壤地帯の多くは、早生樹種の短伐期ローテーションによる木材生産基地としての歩みを既に開始している。上で見たように、森林の成熟は土壤中の養分がバイオマス中に移行・蓄積する過程であるから、木材の収穫は土壤養分の収奪を伴わずには置かない。そして他方、例えば図5に一例を示したように（Folster & Khanna 1997），数年～十数年の短い伐期間中に大気からの養分供給によって木材収穫による持ち出し分を補うことは、貧栄養土壤地帯では通常、困難と思われる。

湿潤熱帯の貧栄養土壤地帯で早生樹種の短伐期ローテーションによる木材生産を行うとすれば、その持続可能性を長期にわたって保障するための養分資源の管理・保全あるいは補填をどのようにして実現するかという視点が不可欠である。短伐期ローテーションによる木材収穫でどれほどの養分が持ち出されるか？大気や風化など一次給源によりそのどれほどの養分補填が見込めるか？枝

葉や樹皮の林地への残置など施業によりどの程度養分の保全が可能か？そもそも土壌養分プールがどれほどでどれくらい生産を維持できるか？生育期間中に溶脱・流失などで失われる養分はどれほどか？施肥などによる補填はどういう体系で行うべきか？等々、まだまだ多くの解決すべき課題が残されている。

- 〔参考文献〕
- ・ FAO (1997) State of the World's Forest, 1997. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
 - ・ Folster, S. and Khanna, P.K. (1997) Dynamics of nutrient supply in plantation soils. In Management of soil, nutrient and water in tropical plantation forests. Ed. Nambiar, E.K.S. and Brown, A.G., p. 365, ACIAR, Canberra.
 - ・ Golley, F.B. (1983) Nutrient cycling and nutrient conservation. In F.B. Golley ed. "Tropical Rain Forest Ecosystems", pp. 148, 152, Elsevier, Amste.
 - ・ Jordan, C.F. (1985) Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems, pp. 31, 37-43, 104-107, 127-128, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
 - ・ Hirai (1997) Soils and distribution of *Dryobalanops aromatica* and *D. lanceorata* in mixed dipterocarp forests.—A case study at Lamibir Hill National Park, Sarawak, Malaysia, Tropics, 7 : 21-33.
 - ・ 清野嘉之（1994）東カリマンタンの熱帯降雨林の人為による変質、一焼畑休閑林の事例一. 热帯林業, 29 : 46-54.
 - ・ Ohta, S. (1990 a) Influence of deforestation on the soils of the Pantabangan area, Central Luzon, the Philippines. Soil Sci. Plant Nutr., 36 : 561-573.
 - ・ Ohta, S. (1990 b) Initial changes associated with afforestation with *Acacia auriculiformis* and *Pinus kesiya* in denuded grassland of the Pnatabangan area, Central Luzon, the Philippines. Soil Sci. Plant Nutr., 36 : 633-643.
 - ・ Ohta, S. and Effendi, S. (1992 a) Ultisols of "Lowland Dipterocarp Forest" in East Kalimantan, Indonesia. I. Morphology and physical properties. Soil Sci. Plant Nutr., 38 : 197-206.
 - ・ Ohta, S. and Effendi, S. (1992 b) Ultisols of "Lowland Dipterocarp Forest" in East Kalimantan, Indonesia. II. Status of carbon, nitrogen, and phosphorous. Soil Sci. Plant Nutr., 38 : 207-216.
 - ・ Ohta, S., Effendi, S., Tanaka, N. and Miura, S. (1993) Ultisols of "Lowland Dipterocarp Forest" in East Kalimantan, Indonesia. III. Clay minerals, free Oxides and exchangeable cations. Soil Sci. Plant Nutr., 39 : 1-12.
 - ・ Ohta, S., Morisada, K., Tanaka, N., Kiyono, Y. and Effendi, S. (2000) Are soils in degraded dipterocarp forest ecosystem deteriorated? In Rainforest Ecosystems of East Kalimantan, Ecological Studies Vol. 140, Ed. E. Guhardja, M. Fatawi, M. Sutisna, T. Mori and S. Ohta, p. 49-57, Springer-Verlag Tokyo.
 - ・ Scott, G.A.J. (1978) Glassland development in Gran Pajonal of eastern Peru. PhD Dissertation, Department of Geography, University of Hawaii.