

B-11 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究

(3) 森林生態系の脆弱性に関する研究

③ 熱帯林生態系の森林域分類と脆弱性の評価

独立行政法人森林総合研究所

木曾試験地

長谷川元洋・岩本宏二郎

(研究協力機関)

京都大学生態学研究センター

北山兼弘

横浜国立大学

伊藤雅道

平成11～13年度合計予算額 16,286千円

(うち、平成13年度予算額 4,832千円)

[要旨] 土地利用変化が急激に進んでいる湿潤熱帯では、温暖化による影響は、広域な景観の中での生態系間の相互作用を通して複雑なプロセスの下に生じる。東南アジアでは、エルニーニョに伴う干ばつの影響が著しく、温暖化によって干ばつの規模はさらに大きくなると予測されている。このような状況で湿潤熱帯での温暖化予測をするために、時空間のスケールが問題となる。この研究では3年間に渡りキナバル山（ボルネオ島）の森林試験区の生態プロセスを精査すると同時に、ボルネオ島のマレーシア・サバ州を例に広域での土地利用変化の実体も調べ、長期的温暖化影響と、短期的干ばつ影響の予測を試みた。長期的予測に当たっては、森林生態系の炭素動態を植物の生産と分解のバランス変化から解析した。また、温暖化影響の指標として、土壌中の有機物動態と密接な関係にある土壌動物に着目し、その指標性を検討した。実測から求めた経験モデルを広域に適用した結果、比較的富栄養な土壌上の低地熱帯林が、高地熱帯林あるいは貧栄養な低地熱帯林に比べて、温暖化後により大きな炭素放出源になり、生態系の変動が大きくなると予測された。原生林のほとんどは保護区に残存し、州の大半には択伐後の二次林とプランテーションが広がっていた。これらの択伐後二次林は森林火災に対して立木延焼率が大きいと仮定すると、商業伐採によりサバ州全域に森林火災危険地域が広がっており、温暖化によるエルニーニョ干ばつの規模増大により、森林火災の危険性が高まると予測された。長期的な温暖化影響の指標として、土壌動物の有効性が確かめられた。熱帯にありながら高い標高のために低温環境にある土壌動物の群集はきわめて特異なものであり、地球温暖化に対してこれらの種の生息域が狭まり種の存続が危ぶまれると予測される。標高3100mの堆積岩地のササラダニを例にとると、平均気温2度Cの上昇は11%、4度Cの上昇は33%の種の生息に何らかの影響を与えることになると考えられた。

[キーワード] 熱帯雨林生態系、炭素動態、土壌動物・菌根菌、土地利用変化、干ばつ

1. はじめに

湿潤熱帯地域では、近年、急激に森林伐採と集約的農地の拡大が進んだ。かつて優占していた閉鎖林が減少し開放地が増加したことで、局地的な気象条件も変化していると考えられる。このような土地利用変化が急激に進んでいる湿潤熱帯では、温暖化による影響が広域な景観の中での生態系間の相互作用を通して、複雑なプロセスの下に生じると思われる。一般に、熱帯での温暖化影響は小さいとされるが、これは厳密な科学的データに基づいたものとは言えない。このような考えが持たれている1つの理由は、実験室培養下の高温域での有機物分解は温度上昇に対する反応性が低いとされていることである。しかし、これは熱帯林の植物及び生態系が温度の上昇に対して反応性が低いと言うことには決してならない。この研究で私たちが明らかにした大きな成果の1つは、熱帯景観の中でも特に温度が高い低地帯の熱帯林生態系は炭素動態や生物生産において、温度上昇への反応性が高いということである。また、森林生態系のパーツを細かく見ると、宿主と特異的な共生関係を持っている菌根菌などは、温暖化による宿主の分布や根の生産変化に応じてそのバイオマスや機能が変化する。このような温度上昇は、長期的に、数十年の単位で緩やかな増加傾向として現れ、生態系の反応も比較的緩やかと思われる。

一方、東南アジアの熱帯地域で近年大きな問題となっているものに、エルニーニョに伴う干ばつがあり、樹木の枯損や大規模火災による森林の消失は大きな社会問題となっている。エルニーニョ自体は温暖化によって頻度が高くなるとはされていないが、高い確率で1つ1つの規模は大きくなるものと予測されている。エルニーニョ干ばつの影響は、短期間で現れる。熱帯の森林生態系は、人為的な森林の開放による微気象変化を通して、干ばつへの脆弱性が高まるとされている。熱帯地域では、先に述べたように広い景観の中でモザイク状に、社会経済的な要因により森林の伐採（開放化）が進行している。このように、熱帯の温暖化影響を予測するためには、時間と空間のスケール性が問題になる。

この研究では、3年間に渡り、森林内のプロセスを精査研究すると同時に広域での脆弱性把握も試みた。また、時間のスケール性としては、比較的長期に現れる温度上昇の影響と、短期間に現れる干ばつ影響の予測も試みた。長期的な温度影響の予測に当たっては、森林生態系の炭素動態を植物の生産と分解と言う視点から解析した。また、温暖化影響の指標として、土壌中の有機物動態と密接な関係にある土壌動物に着目し、その指標性を検討した。

2. 研究目的

この研究の第1の目的は、長期及び短期の影響に対する熱帯林生態系の脆弱性を地理情報（図化）として明らかにすることである。この研究では、長期的な影響を予測する方法として、気温上昇によって生態系の炭素固定量（生産）と放出量（分解）の収支差が大きくなるほど脆弱性が高いものと仮定して、それぞれを実測とモデルによって計算し、収支を図示する。また、短期的なエルニーニョ干ばつの影響を予測する方法としては、伐採によって開放した森林ほど既に乾燥化が進んでおり、干ばつに対する脆弱性が高いものと仮定し、植生図（土地利用図）を作成することによって脆弱地（林冠開放地）を図示する。この研究では、特に、近年土地利用変化が激しい地域の例として、マレーシア・サバ州（北ボルネオ）を取り上げる。数年程度の短周期で繰り返され

るエル・ニーニョへの応答については、開放した森林ほど既に乾燥化が進んでおり、干ばつに対する脆弱性が高いものと仮定し、植生図（土地利用図）を作成することによって開放地を图示する。長期的な気温上昇に対する熱帯林生態系の応答については、気温上昇によって生態系の炭素固定量（生産）と放出量（分解）の収支差が大きくなるほど生物相への潜在的な影響が大きい（脆弱性が高い）ものと仮定して、収支差をモデルによって計算し、結果を图示する。モデルは回帰により実測値から構築する。

以上のような、森林レベルでの炭素収支を指標に温暖化影響を見る試みに加えて、生物間の相互作用がどのように変化するかを評価した。これには、植物と菌根菌の共生関係を例に用いた。植物と菌類の共生体である菌根は栄養塩の植物体への取り込みや炭素分配など生態系の物質動態において重要である。特に外生菌根を形成する外生菌根菌は有機態窒素などの利用能力を持ち、また分解の進んだ腐植層にマット状に発達することから、森林の分解過程にも大きく関与している。外生菌根は森林により発達程度が異なり、その違いは温度や土壤栄養塩状態の違いと関係があると指摘されている。そのため地球温暖化など長期的な気候変動により外生菌根の発達程度は変化すると考えられる。しかしながら、これらの指摘は主に温帯林における宿主樹木の分布の観察結果よりなされたものであり、熱帯における調査例は少ない。また、土中の外生菌根量の環境傾度に沿った変化については調査に労力がかかることなどから報告は少ない。そこで本研究では、熱帯山岳地において外生菌根量が気候変動に対しどのように変化するかを予測することを目的とする。

第3の目的として、熱帯生物による温暖化影響の指標性について検討する。これには、比較的季節的な気候変動の影響が少ない土壤動物を用いた。土壤動物は各種森林生態系の有機物分解過程において重要な役割を果たし、きわめて大きな種多様性を持って森林生態系の生物多様性にも貢献している。また、土壤動物の群集構造は軽微な環境変動にも比較的鋭敏に応答し、環境指標性が高いことが以前から指摘されている。温暖化に代表される地球環境変動は地上部の有機物生産と地下部の有機物分解を通して土壤動物群集にも大きく影響を与えることが予想される。ただ、この影響の現れ方は立地の栄養条件にも大きく左右されることが考えられる。本研究はこのような環境変動に対して土壤動物群集がどのように応答するかを解明、評価することを目的とする。そのために、キナバル山固定試験地における、標高（温度）および地質（堆積岩と超塩基性岩）が土壤動物の群集パターンにどのように影響を与えているかを立地の栄養条件を考慮しながら比較解明し、地球規模の温度上昇に伴う群集構造のパターンの変動を予測することを目的とする。

3. 研究方法

1991/92撮影のMOS衛星データ（1画素50x50m）を画像処理し、土地利用の状況を判読し画像上に境界線を書き込んだ（デジタル・データとして）。これについては、サバ州全域を対象に行った。判読のための参考資料の収集も行った。また、現地では図の検証のためにヘリコプターによる広域調査も行った。土地利用図に標高データを重ね、さらに温度の減衰率から標高を年平均気温に換算した。これから、気温と植生（土地利用）の組み合わせによる土地利用図が完成した。

生態系モデル構築のための現地調査では、キナバル山（4095m；マレーシア、サバ州）に設置し

た永久調査区9カ所で以下の測定を行った。これら永久調査区は、700~3100mまでの異なる4つの標高と、土壤栄養塩供給が異なる2つの地質の組み合わせでできている。各試験地に設置したリタートラップを使い、リター生産の2週間毎の変動をモニタリングした。試験地の胸高直径5cm以上の全樹木を対象に、胸高直径の再測定を行い、材の乾物増加量を決定した。地下部の純一次生産量を把握するために、土壤呼吸速度の測定をソーダライム法を用いて行った。この測定は過去6年間継続してきたもので、今回はこれまでの調査結果に基づき、得られた純一次生産と分解パラメータに対して、温度・光量子・水分条件・栄養塩との重回帰を行い、森林の炭素収支の回帰モデルを作った。回帰モデルをサバ州全域に適用し、現在の気候下での生産速度と分解速度を地理情報として図示した。また、年平均気温が2℃上昇した場合を想定し、同様に生産速度と分解速度を地理情報として図示した。さらに、現在と2℃上昇時の炭素収支の差を計算し、図示した。気象測器からは、気温湿度・土壤温湿度・光量子・風速の30分毎のデータを磁氣的に回収した。

ここで得られた温度と原生林の純一次生産の経験モデルを土壤タイプ毎に土地利用図に組込んで、現気候下での純一次生産量の広域分布を求めた。短期的な干ばつへの応答予測を行うために、1998年に起きたエルニーニョ干ばつ後の植生の枯損及びリター変動の状況を上記の試験地で調査した。

細根密度と菌根密度との関係については、これらのキナバル山固定試験地で、直径37mm深さ15cmのコアサンプルを10つつ採取し、細根を抽出して外生菌根の有無および細根と外生菌根の長さを測定した。その後、各区3個ずつの細根サンプルについて乾重を測定し、単位長さあたりの重量(比重)を計算し、これを用いて細根現存量を推定した。菌根については、最も多く出現した1調査区(1700m-超塩基性岩区)の3サンプルにおいて比重を計算し、菌根現存量を推定した。外生菌根性樹木の分布と菌根密度との関係については、試験地の複数の試験区において、主に稚樹を対象に樹種ごとに3個体ずつ細根を採取し外生菌根の有無を観察した。外生菌根性と考えられているフタバガキ科、ブナ科、フトモモ科の樹種を中心に観察を行った。Aiba and Kitayama(1999)の報告を元に各試験区における外生菌根性樹木の胸高断面積比を求め、菌根発達の調査結果と比較・検討した。細根成長量の温度・地質による違いや菌根量との関係を求めるため、2標高域(1700m、3100m)×2地質(堆積岩、超塩基性岩)の組み合わせからなる4試験区において、In growth core法を用いて細根生産量の推定をおこなった。さらに、細根成長量を見るために、標高1700m域の堆積岩区および超塩基性岩区において、細根増加量をRoot window法を用いて測定した。

大型土壤動物の指標性については、各調査地に25X25X10cm(6250ml)のリターを含む表層土壤を3サンプル採取し、現地でビニール上でハンドソーティングに採集した。土壤小型節足動物については、100cc土壤コアを用いて各試験区から15点ずつのコアサンプルを採集し、ツルグレン装置に72時間かけて動物を抽出した。得られたサンプルに対し、ササラダニに関しては種レベルの分類を行い、その他の動物は原則として目レベルまでの分類を行った。各サイトにおけるササラダニ群集に対し群集パラメーターを計算し、プロット毎のクラスタリングをおこなった。また、また、これまで得られた大型動物、中形土壤動物群集のデータと環境要因との関係を解析し、他データとの総合により気候変動に対する群集の変動予測を行った。

4. 結果・考察

干ばつによる短期的な影響について

異なる標高における1995年からの気象測定の結果(図1)、通常年と比べた1998年干ばつ時の降水量減少率と大気飽差増加率は、標高が上昇するほど大きくなった。どの標高帯でも、干ばつ直後にリター落下量(2週間値)が増加したが、標高と共に大きくなる乾燥度を反映して、リター増加率も標高と共に増加した(図2)。実測された分解速度とリター落下量を基に、地表でのリター現存量の経時変化を計算したところ、標高の高い森林ほど大量のリターが遅くまで残る傾向にあった(図3)。従って、土壤動物生息環境への攪乱や可燃物増加による火災に対する脆弱性は標高の上昇とともに強まった。

土壤リンや窒素が比較的多い堆積岩上の森林では、干ばつを挟む2年間(1997-99)における樹木の死亡率はその前の時期(1995-97)に比べて、標高600mでは胸高直径10cm以上の大径木で増加、1700mより上では5-10cmの小径木で増加した。これに対して、比較的に貧栄養である蛇紋岩では600mで大径木の死亡率が増加しただけで、高標高では死亡率の変化はなかった。従って、死亡率を指標とすると、干ばつに対する耐性は貧栄養で高標高における森林で高い。それ以外の土地では干ばつによる枯損影響が顕在化する可能性がある。

完成した1992年現在のサバ州土地利用図から判断すると、原生林のほとんどは保護区に残存し、州の大半には択伐後の二次林とプランテーションが広がる。Woods (1988)に従いこれらの択伐後二次林は森林火災に対して立木延焼率が大きいと仮定すると、商業伐採によりサバ州全域に森林火災危険地域が広がっていると結論できる(図4)。

炭素収支の変化から推定される長期的温暖化影響について

標高を目安とした温度上昇に対して、実測された純一次生産の増加率は直線で近似された。比較的に土壤栄養塩の貧弱な蛇紋岩上の森林では堆積岩上の森林に比べて、純一次生産の温度依存性が高いため、同じ温度増加に対して純一次生産の増加が大きいと予測された。土壤有機物を温度依存性が均一な一つの画分から成ると仮定すると、温度(標高)に対する土壤有機物の分解速度(回転速度)は指数関数 $[k=\exp(-5.99+0.1520*AT)]$; AT, mean air temperature]で近似され、その速度には地質間で差が見られなかった。ある場所の分解の速度には、温度などの気候因子の他に、有機物基質の質自体も関わっている。分解速度に対する基質の影響を分離する目的で、同じ温度条件で異なる標高からのリターを分解したところ、標高間で分解速度の有意な差が見られなかった。以上から、同じ温度上昇を仮定すると、分解速度の上昇率は低標高ほど大きく、地質間では差が見られないことになる。生産と分解のバランスを求めると、長期的には堆積岩上の低地熱帯林が堆積岩上の高地熱帯林あるいは蛇紋岩上の低地熱帯林に比べて、より大きな炭素放出源となる可能性が示唆された(図5)。従って、温暖化の長期的影響は、低地帯堆積岩起源土壌上の森林での土壤有機物の減少として現れる可能性が示唆された。

1992年現在、易~中分解性の土壤有機物画分量を5000g炭素/m²と仮定すると、サバ州で2度C温度上昇した場合に、堆積岩上の原生熱帯降雨林(1.327百万ha)では土壤呼吸超過による1.90百万トンの炭素放出、蛇紋岩上の原生林(0.198百万ha)では純一次生産超過による0.087百万ト

ンの炭素吸収となる。地質による炭素収支への応答の違いが、大きな収支差となって現れることが示唆された（図5）。

樹木と菌根菌の共生関係から見た、温暖化の生物間作用に対する影響

1) 土中の細根密度と菌根密度との関係（図6-9）

外生菌根長密度は標高の上昇とともに増加し標高1700m域（年平均気温約18度）にて最大となった後急激に減少し、標高2700m域以上（年平均気温13度以下）ではほとんど見られなかった（図6, 図7）。地質の違いについては、1996年の調査結果からは堆積岩地よりも超塩基性岩地で外生菌根長密度が高くなっており、外生菌根発達と地質とは関係があることが考えられたが、1997年の調査結果および2回の調査を併せた解析からは地質との関連は定かではなかった。細根長密度と外生菌根長密度との関係をみると、標高1700m以下の区では有意な正の相関が見られ、標高2700m以上の区では菌根は細根密度に係らずほとんど存在しなかった（図8）。細根長密度は地質の違いとの関連は定かではなく、年平均気温と有意な相関をもち、気温減少とともに増加していた（図9）。

一方、細根長密度と比重より計算した細根現存量について、外生菌根長密度および温度との関係を検討すると、細根現存量と外生菌根長密度は、細根長密度の場合と同様に、標高1700m以下の区では正の相関が見られた。細根現存量と気温との相関は有意であったが係数は細根長密度と比べて小さかった。

2) 外生菌根性樹木の分布と菌根密度との関係（表1、図10）

フタバガキ科、ブナ科およびフトモモ科の *Tristaniopsis* 樹木では、観察したすべての個体に外生菌根が形成されていた（表1）。これらの樹木は主に1700m以下の区に分布した（図10）。*Tristaniopsis* 以外のフトモモ科樹種については、既存の報告より外生菌根性と予想されたが今回の調査では外生菌根形成は認められなかった。

3) 細根成長量の温度・地質による違い、菌根形成速度との関係（表2）

測定手法により推定値は異なるが、細根成長量は1700mにおいて地質間の差が有意であり、超塩基性岩区で小さかった。また、Ingrowth core法による結果においては標高×地質の交互作用が認められ、堆積岩区では標高による差が有意であったが超塩基性岩区では標高による有意差は認められなかった。このことから、標高1700m以上の区においては、細根成長量は気温と関係があり温度上昇とともに増加するが、その温度への依存性は、貧栄養である超塩基性岩地では小さいものと考えられた。細根成長量と菌根形成速度との関係については明らかでないものの、結果（1）で示した細根現存量と菌根長密度の関係と同様であると仮定すれば、1700mの2区では細根成長量と菌根形成速度とは相関があり、また3100mでは菌根はほとんど形成されないと考えられるため、菌根形成速度も細根現存量と同様に温度上昇とともに増加するものと考えられた。

4) 温暖化に伴う菌根密度と菌根形成速度の変化予測

上記の結果より、年平均気温の変化に伴った外生菌根長密度の変動パターンは、細根長密度お

よび外生菌根性樹木の分布と関係があり、その影響の現れ方は標高（温度）によって異なっていると考えられた。標高1700mと2700mの間（年平均気温13度から18度の間）を境にして低標高域では菌根は細根に一定の割合で形成されるため細根長密度の変化と相関を持って推移するが、高標高域では、外生菌根性樹木の分布が制限されるために菌根量が小さくなるものと考えられた。外生菌根性樹木の分布が温度によってのみ制限されていると仮定すれば、温暖化によって細根量の減少および外生菌根性樹木の分布拡大が起こると考えられ、低標高域では細根密度の減少に起因する菌根密度の減少、高標高域では外生菌根性樹木の分布拡大に起因する菌根量の急激な増大が起こることが予測される。さらに、低標高域において新規に成長した細根に菌根が一定の割合で形成されると仮定すれば、細根成長量と温度・地質との関係性から、菌根形成速度は温暖化に伴い増加するが、その温度への依存性は、貧栄養である超塩基性岩地では小さいものと考えられた。また、高標高域では細根成長量の増加と外生菌根性樹木の分布拡大が同時に起こると考えられることから、菌根形成速度は温暖化に伴い細根成長量よりもより急激に増加することが予測される。

熱帯における温暖化影響把握のための土壌動物の指標性について

大型土壌動物において、各標高で分解のキーストーン群は変化することが確認された、シロアリは低標高において優占し、ヨコエビ、等脚類、ヤスデ等は標高の上昇とともに個体数が増加した。ミミズは特異な分布を示し、低標高域と3100m域の塩基性岩地に特に増加する傾向があった（図 11、図 12）。高標高域で増加するヤスデの同定を専門家に依頼したところ、数種存在することまでは確認できたが、種の特定には至らなかった。ミミズについても同様の状況である。

各標高におけるササラダニ群集の多様性および種数を調べた結果、標高が高くなるにつれて減少した。また、堆積岩区に比べて超塩基性の試験区でササラダニの多様性および種数が少なくなった。個体数は高標高では減少したが中標高と低標高の比較は明瞭でなかった。堆積岩と超塩基性岩の比較では堆積岩で大きくなる傾向があった（表3）。ピアンカの類似度指数を元に大型土壌動物でクラスターを求めたところ、およそ標高毎にまとまる傾向があったが、中標高（1700m）区の2試験区では類似度が低かった（図 13）。ササラダニ群集のクラスターをもとめたところ、大型土壌動物と同様におよそ標高毎にまとまる傾向が見られたが、やはり中標高（1700m）区の2試験区では類似度が低かった（図 14）。

ササラダニ群集を分類上大きく3つのグループにわけこれらのグループの構成比を、温帯の照葉樹林のササラダニ群集と比較した（図 15）。この結果、キナバル山のササラダニ群集は、温帯照葉樹林と比べ、有翼団と呼ばれるグループの比率が高く、温帯において50%以上を占めることが普通なG群の割合が低かった。また気温の減少する高標高においては、G群の割合がさらに減少することから、温帯における群集構成とは異なるものであることがわかった。

各調査地の気温、土壌中の養分量、有機物量、植物の多様性、リター量などを環境要因として、土壌動物群集の正準対応分析（CCA）を行った結果、大型土壌動物群集、ササラダニ群集の双方で有意な変数として気温のみが残り、気温が群集の形成において重要な要因であることが示唆された（図 16, 17）。

以上の研究により、熱帯山岳において、標高の上昇に伴い土壌動物群集の構造は大きく変化す

ることがわかった。高標高の土壤動物群集が、きわめて特異なものであることがわかり、地球温暖化に対して、これらの熱帯でありながら低温域に生息する種の生息域が狭まり種の存続が危ぶまられると考えられた。例えば、3100m域の堆積岩地に生息するササラダニの内11%の種はこの地点特産であり、33%が2700m以上の地点でしか分布を持たない種である。したがって、単純にこの温度域にのみ生息可能と仮定するならば、平均気温2度の上昇は11%、4度の上昇は33%の種の生息に何らかの影響を与えることになると考えられる。33%の種のうちには、優占種をも含んでおり、個体数の割合では全体の41%を占めることになる。

5. 本研究により得られた成果： 湿潤熱帯における温暖化影響

- 1) 温暖化により、樹木（宿主）と菌根菌の共生関係・分布に変化が予測される。低い標高域では宿主樹木の細根密度の減少が起こると考えられ、それによる菌根密度の減少が予測される。一方、高標高域では温度上昇により外生菌根性樹木の分布が単純に拡大すると仮定すると、それに起因する菌根量の急激な増大が起こると予測される。
- 2) 熱帯にありながら高い標高のために低温環境にある土壤動物の群集はきわめて特異なものであり、地球温暖化に対してこれらの種の生息域が狭まり種の存続が危ぶまられると予測される。単純に現在分布する温度域にのみ生息可能と仮定するならば、標高3100mの堆積岩地のササラダニでは、平均気温2度Cの上昇では11%、4度Cの上昇は33%の種の生息に何らかの影響を与えることになると考えられる。
- 3) ある仮定の下に、長期的な温度上昇に対する生産と分解のバランス変化から炭素動態を評価すると、低地帯堆積岩起源土壤上の森林では土壤有機物の減少が予測される。長期的には比較的富栄養な堆積岩上の低地熱帯林が堆積岩上の高地熱帯林あるいは貧栄養な蛇紋岩上の低地熱帯林に比べて、より大きな炭素放出源になると予測される。
- 4) 1992年現在、易～中分解性の土壤有機物画分量を5000g炭素/m²と仮定すると、サバ州で2度C温度上昇した場合に、比較的富栄養な堆積岩上の原生熱帯降雨林（1.327百万畝）では土壤呼吸超過による1.90百万トンの炭素放出、貧栄養な蛇紋岩上の原生林（0.198百万畝）では純一次生産超過による0.087百万トンの炭素吸収となる。土壤栄養に対する応答の違いが、大きな炭素収支差となって現れること予測される。
- 5) 完成した1992年現在のサバ州土地利用図から判断すると、原生林のほとんどは保護区に残存し、州の大半には択伐後の二次林とプランテーションが広がる。これらの択伐後二次林は森林火災に対して立木延焼率が大きいと仮定すると、商業伐採によりサバ州全域に森林火災危険地域が広がっており、温暖化によるエルニーニョ干ばつの規模増大によりそれらの脆弱性は増すと予測される。

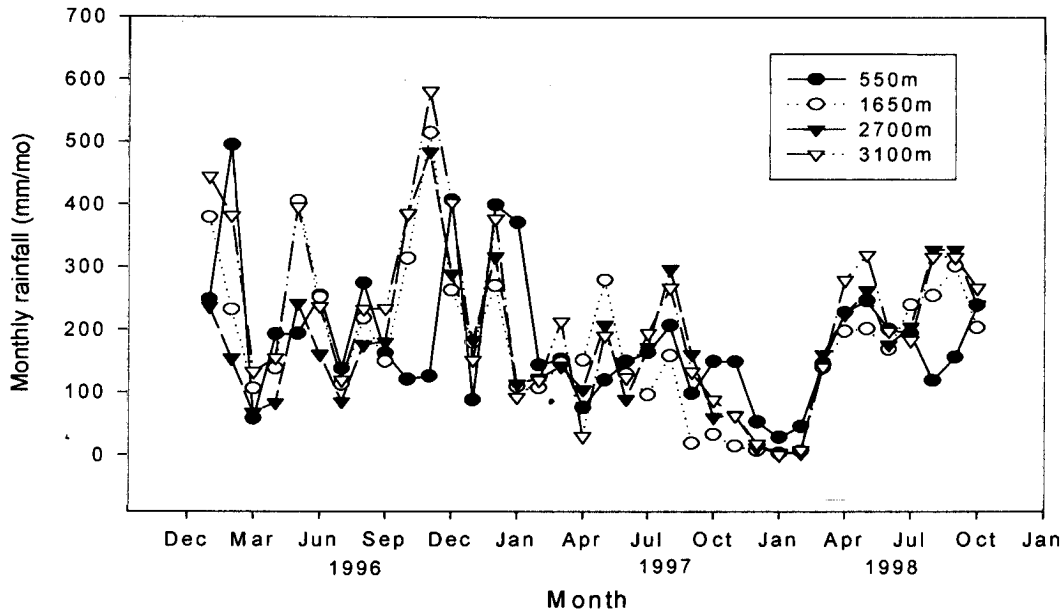


図1. 1996年から3年間のキナバル山4標高における月降水量の変動。

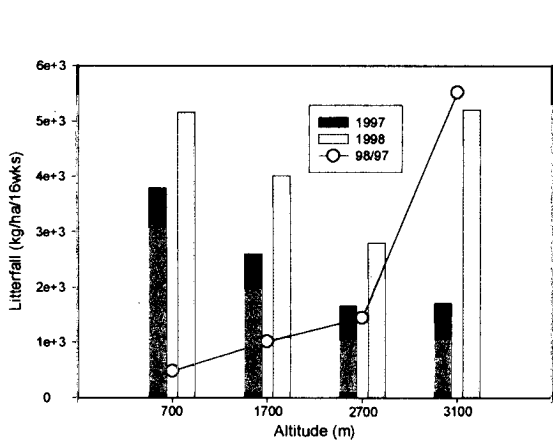


図2. 干ばつ前(1997年)と干ばつ時(1998年)の滞留リター変動量の標高間比較。標高が高いほど、干ばつ時のリター増加率が高い。

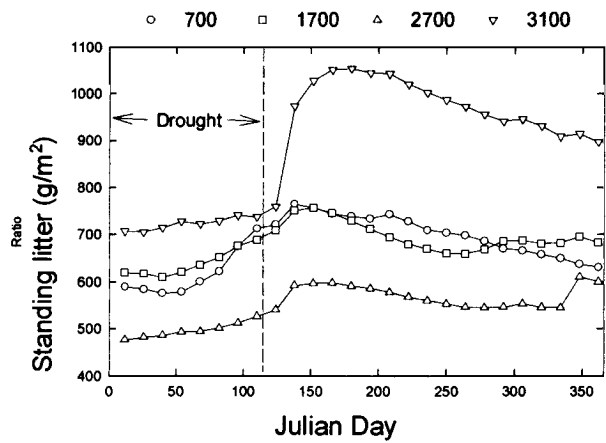


図3. 干ばつ後の地表におけるリターの経時変化。4つの標高間の比較。

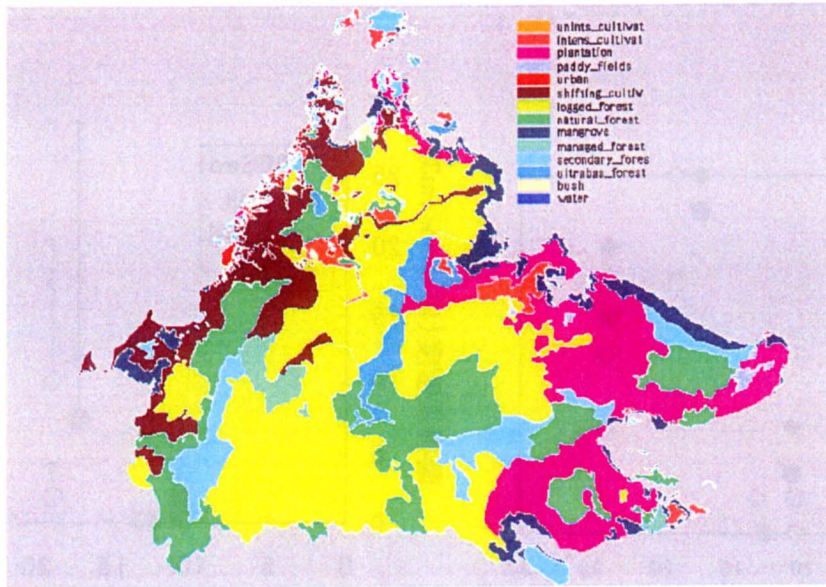


図 4. MOS衛星データから判読して作成した1992年現在のサバ州の森林分布及び土地利用図。

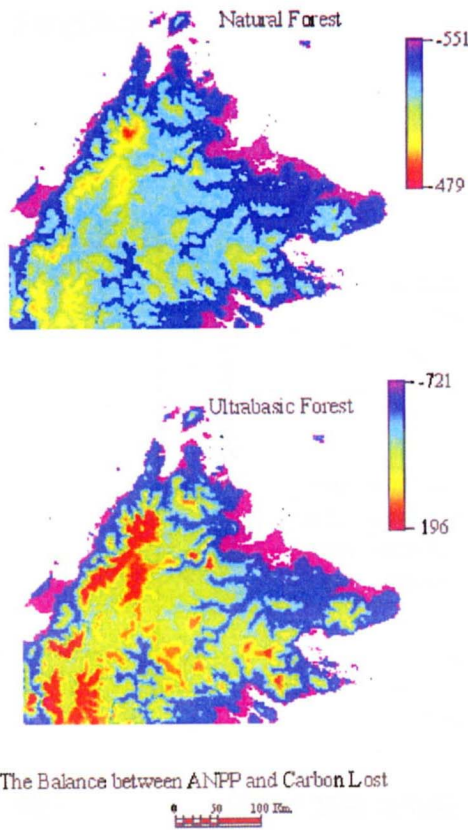


図 5. 均質な土壌有機物画分と一定の有機物量を初期状態として仮定し、温度が2度C上昇した場合に、サバ州での地上部純一次生産と土壌有機物分解のバランスを計算した結果。上図は堆積岩型熱帯降雨

林が、下図は蛇紋岩型熱帯降雨林が広がっているものと仮定して計算。両ケースとも、低地で収支がマイナスに、高地でプラスになるが、プラスになる面積比は蛇紋岩型熱帯降雨林で大きい。

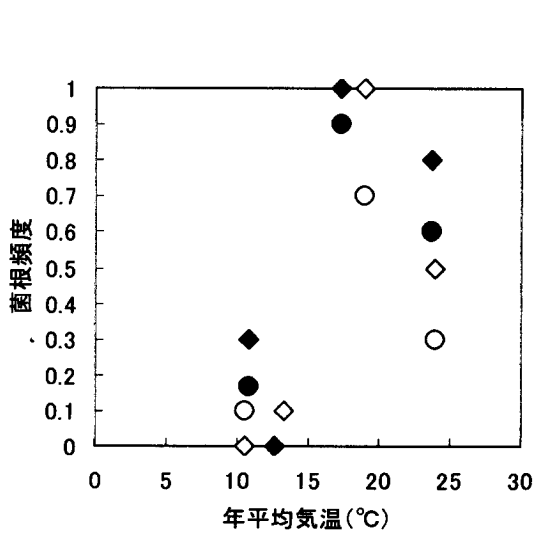


図 6. 各調査区における外生菌根出現頻度と年平均気温との関係

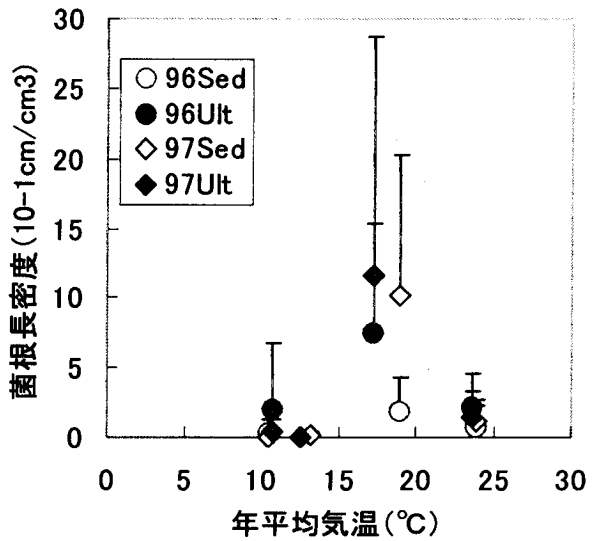


図7. 各調査区における外生菌根長密度と年平均気温との関係

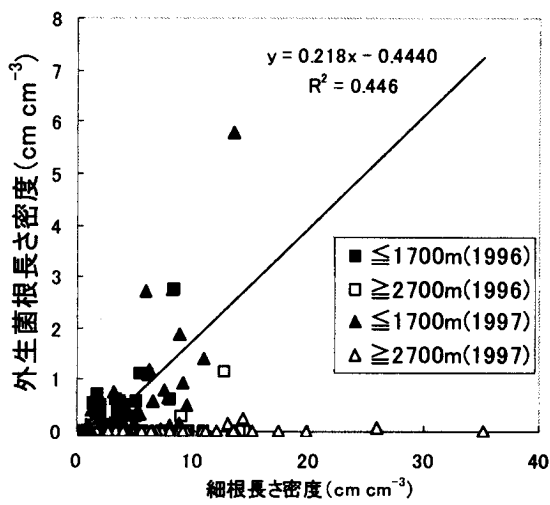


図8. 各土壌コアにおける外生菌根長密度と細根と密度との関係

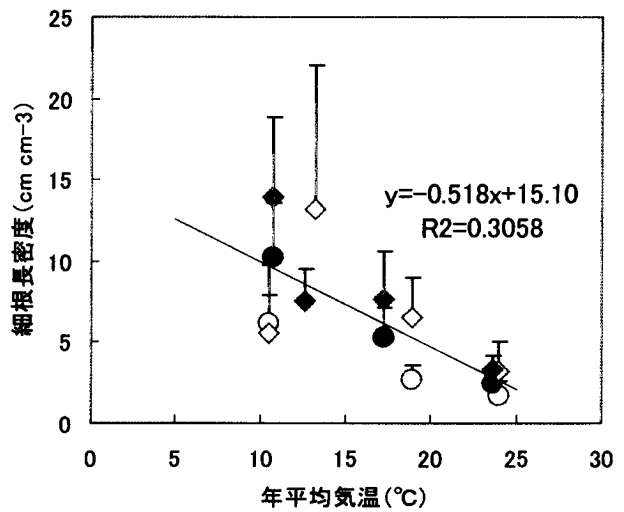


図9. 各調査地における細根長密度と年平均気温との関係

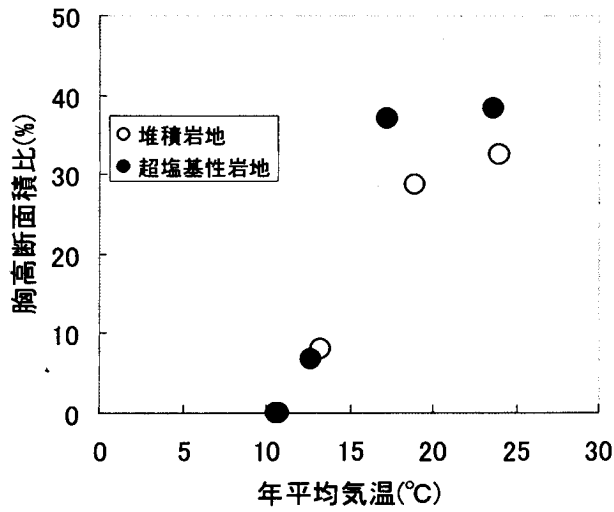


図 10. 各調査区における外生菌根性樹木の胸高断面積比

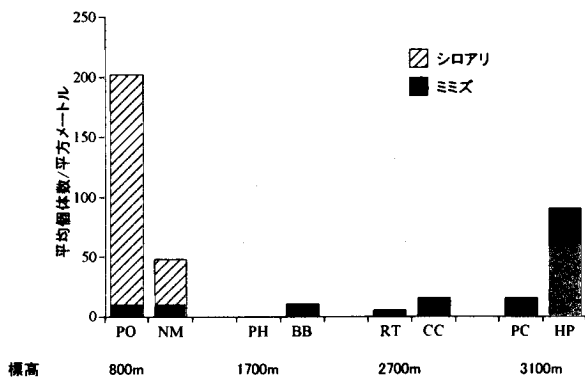


図 11. シロアリ、ミミズの個体数

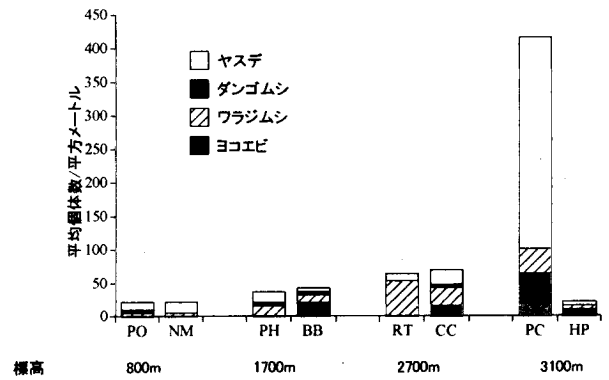


図 12. ヤスデ、等脚類、ヨコエビの個体数

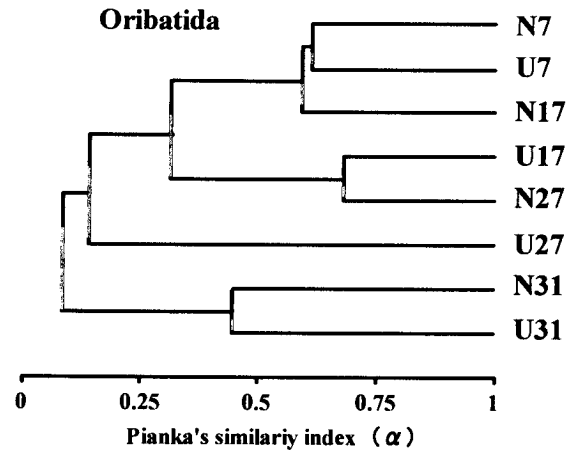
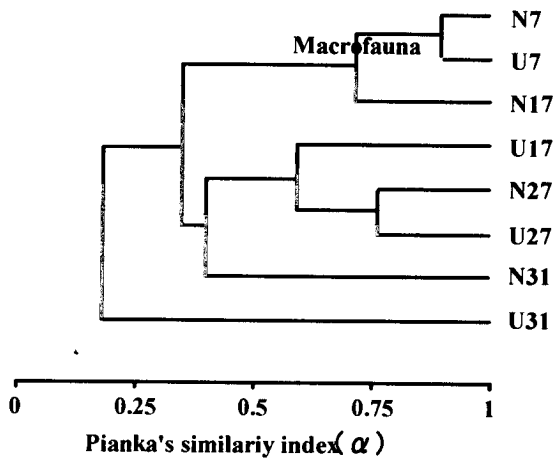


図 13. 大型土壌動物群集のクラスター

図 14. ササラダニ群集のクラスター

N: 堆積岩、U: 超塩基性岩、7: 標高700m、17: 1700m、27: 2700m、31: 3100m

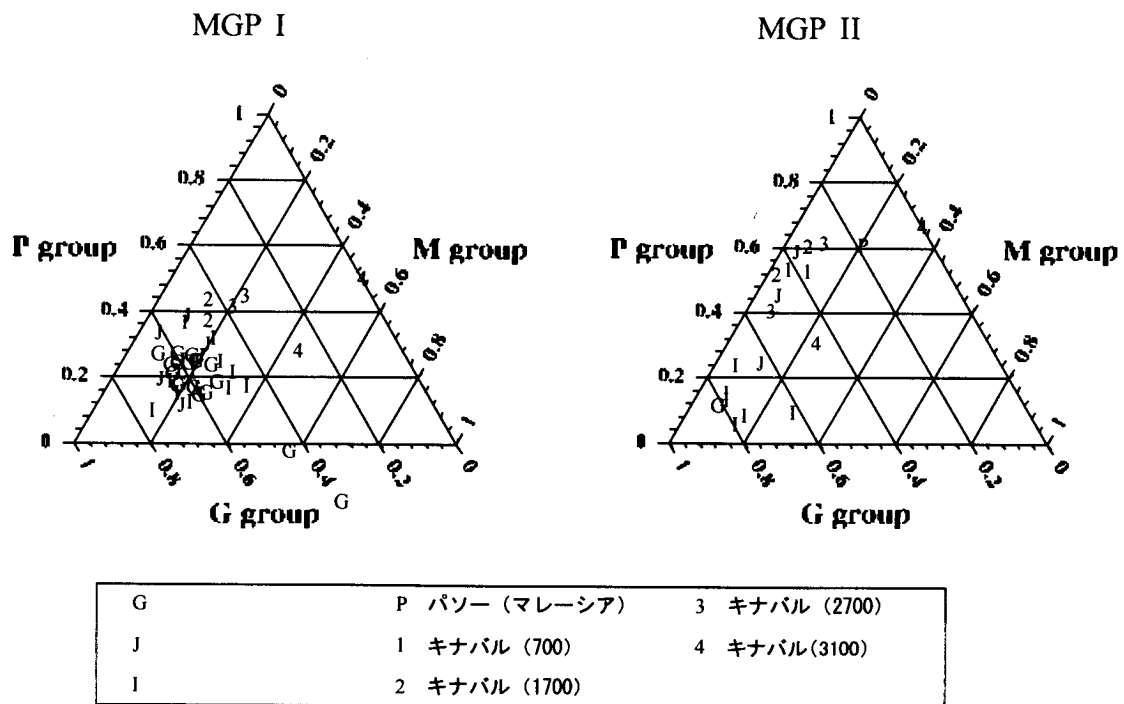


図 15. キナバル、日本の照葉樹林、落葉広葉樹林のササラダニ群集におけるM、G、P各群の構

成比

MGP I (種数の比)、MGP II (個体数の比)

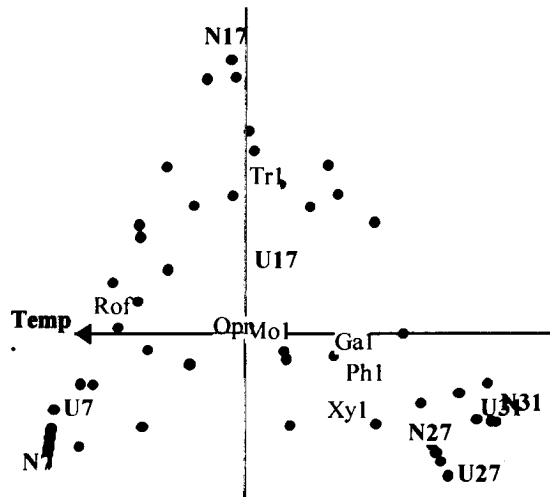
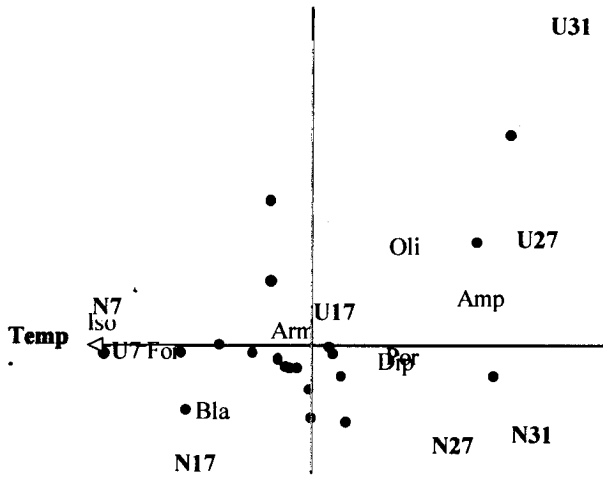


図 16. 大型土壌動物群集における CCA 分析図

図 17. ササラダニ群集における CCA 分析図

Temp; 気温、
 Iso; シロアリ、For; アリ、Bla; ゴキブリ、
 Arm; ダンゴムシ、Oli; ミミズ、Dip; ヤスデ、
 Por; ワラジムシ、Amp; ヨコエビ

表 1. 調査した各樹種における外生菌根の有無

	Plots	外生菌根
Dipterocarpaceae		
<i>Shorea laevis</i>	07U	+
Fagaceae		
<i>Castanopsis</i> sp.	17S	+
<i>Lithocarpus havilandii</i>	17S	+
<i>L. lampadalius</i>	17S	+
<i>Trigonobalanus verticellatus</i>	17S	+
Myrtaceae		
<i>Tristaniopsis 'clementis'</i>	17S	+
<i>T. 'elliptica'</i>	17U	+
<i>T.</i> sp.	17S	+
<i>Syzygium napiforme</i>	17S	-
<i>Syzygium kinabaluensis</i>	17U, 31U	-
<i>S. houttuynii</i>	31N	-
<i>Eugenia</i> sp.	17S	-
<i>E. subdecussata</i>	17U	-

	plots	外生菌根
Rosaceae		
<i>Prunus arborea</i>	17S	-
Elaeocarpaceae		
<i>Elaeocarpus knuthii</i>	17S	-
Theaceae		
<i>Adinandra clemensiae</i>	17S	-
Meliaceae		
<i>Aglaiia squamulosa</i>	17S	-
Magnoliaceae		
<i>Magnolia</i> sp.	17S	-
Oleaceae		
<i>Olea</i> cf. <i>javanica</i>	17S	-
Podocarpaceae		
<i>Dacrycarpus imbricatus</i>	17S	-
<i>Dacrydium pectinatum</i>	17S	-

<i>E. petrophilum</i>	17U	-
<i>E. sandakanense</i>	17U	-
<i>Leptospermum recurvum</i>	31U	-

表2. 2つの方法によって求めた各区の細根成長量

標高域	地質	Ingrowth core法	Root window法	
		細根成長量 (mg cm ⁻³ year ⁻¹)	ガラス面上の長さ増 加速度 (cm cm ⁻² year ⁻¹)	細根成長量* (mg cm ⁻³ year ⁻¹)
17S 1700m	堆積岩	2.6±2.0	1.3±1.4	2.7-4.0
17U 1700m	超塩基性岩	0.27±0.18	0.54±0.32	1.3-1.9
31S 3100m	堆積岩	0.14±0.12		
31U 3100m	超塩基性岩	0.12±0.09		

*コアサンプリングにより求めた細根の長さ当たり重量を用いて換算した。また、ガラス面から観察できる幅を0.2から0.3cm(Smit et al.2000)とし、土壌体積当りに換算した。平均値の幅を示した。

表3. キナバル山各試験区におけるササラダニ群集の多様性指数および種数

標高	母岩	多様性指数 (H')	種数	均衡度指数 (J')	個体数密度 (/m ²)
PO	700 堆積岩	4.74	49	0.84	14200
NM	700 超塩基性岩	4.42	44	0.81	8450
PH	1700 堆積岩	4.83	51	0.85	13550
BB	1700 超塩基性岩	3.37	31	0.68	10450
RT	2700 堆積岩	3.99	34	0.78	15400
CC	2700 超塩基性岩	3.39	18	0.81	3000
PC	3100 堆積岩	3.51	18	0.84	4900
HP	3100 超塩基性岩	1.79	4	0.90	300

[国際共同研究等の状況]

この研究は、日本が提案し、IBGP国際共同研究プロジェクトコアリサーチとして採択された「モンスーンアジア陸域生態系における地球変化のインパクト；通称TEMA」の一環として国際的に位置づけられている。分担者の北山は、平成11年5月に開催された第2回IBGP国際会議において、日本の陸域生態系研究の代表として、本研究の成果を発表し大きな反響を得た。成果の一部は、IPCC第3次報告書

に引用された。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ①S. Aiba and K. Kitayama: *Pl. Ecol.*, 40, 139-157 (1999) "Species composition, structure and species diversity of rain forests in a matrix of altitudes and substrates on Mt. Kinabalu, Borneo."
- ②K. Kitayama, M. Lakim and M.Z. Wahab: *Sabah Parks Nature J.*, 2, 85-100 (1999) "Climate profile of Mount Kinabalu during late 1995-early 1998 with special reference to the 1998 drought."
- ③G. Kudo and K. Kitayama: *Sabah Parks Nature J.*, 2, 101-110 (1999) "Drought effects on the summit vegetation on Mount Kinabalu by an El Nino event in 1998."
- ④K. Kitayama and S. Aiba: *Proceedings of the Second International Symposium on South-east Asia Rain Forests*. September 1999, PSREFUT, Samarinda, Indonesia (1999) "Responses of tropical rain forests to the 1997-98 drought in standing litter fuel load and litter flux on a slope of Mt. Kinabalu, Borneo."
- ⑤K. Kitayama, N. Majalap-Lee and S. Aiba: *OECOLOGIA*, 123, 342-349 (2000) "Soil phosphorus fractionation and phosphorus-use efficiency of tropical rainforests on Mt. Kinabalu, Borneo."
- ⑥K. Kitayama and K. Iwamoto: *Pl. Soil*, 229, 203-212 (2001) "Patterns of natural ^{15}N abundance in the leaf-to-soil continuum of tropical rain forests differing in N availability on Mount Kinabalu Borneo."
- ⑦M. Takyu, S. Aiba and K. Kitayama: *Pl. Ecol.*, 159, 35-49. (2002) "Effects of topography on tropical low er montane forests under different geological conditions on Mount Kinabalu, Borneo."
- ⑧K. Kitayama and S. Aiba: *J. Ecol.*, 90: 37-51(2002) "Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil P pools on Mount Kinabalu, Borneo."
- ⑨K. Kitayama and S. Aiba: *Sabah Parks Nature J.*, 5, (2002) "Control of organic carbon density in vegetation and soils of tropical rain forest ecosystems on Mount Kinabalu."
- ⑩S. Aiba and K. Kitayama: *Sabah Parks Nature J.*, 5, (2002) "Species composition and species-area relationships of trees in nine permanent plots in altitudinal sequences on different geological substrates of Mount Kinabalu."
- ⑪M. Takyu, S. Aiba and K. Kitayama: *Sabah Parks Nature J.*, 5, (2002) "Beta diversity and forest structural changes along topographical gradients on different geological substrates in tropical montane forests on Mt. Kinabalu."
- ⑫K. Kikuzawa, S. Suzuki, K. Umeki and K. Kitayama: *Sabah Parks Nature J.*, 5, (2002) "Herbivorous impacts on tropical mountain forests implicated by fecal pellet production."
- ⑬N. Nomura, T. Yumoto, K. Kikuzawa and K. Kitayama: *Sabah Parks Nature J.*, 5, (2002) "Leafing phenology of trees on Mt. Kinabalu in El Nino year: in relation to environmental factors."
- ⑭S. Aiba and K. Kitayama: *J. Trop. Ecol.*, 18, 215-230 (2002) "Effects of the 1997-98 El Nino drought on rain forests of Mount Kinabalu, Borneo."

- ⑮M. Ito, M. Hasegawa, K. Iwamoto, and K. Kitayama: Sabah Parks Nature J., 5, (2002) “Patterns of soil macrofauna in relation to elevation and geology on the slope of Mt. Kinabalu, Sabah, Malaysia.”
- ⑯K. Iwamoto and K. Kitayama: Sabah Parks Nature J., 5, (2002) “Abundances of ectomycorrhizas on the slope of Mount Kinabalu, Borneo.”

(2) 口頭発表

- ①岩本宏二郎, 北山兼弘: 第48回日本生態学会大会(2001) 「キナバル山試験地における細根成長量」
- ②島野智之、伊藤雅道: 日本ダニ学会 (1999) 「キナバル山 (マレーシア、サバ州) の各標高で採集されたイレコダニ類 (ササラダニ亜目)」
- ③佐藤大樹、長谷川元洋、伊藤雅道、岩本宏二郎、北山兼弘: 第23回日本土壌動物学会大会 (2000) 「ササラダニの体表に付着する孢子状構造物について」
- ④長谷川元洋、伊藤雅道、北山兼弘: 第48回日本生態学会大会 (2001) 「キナバル山における土壌動物群集の研究- 標高および地質条件の異なる森林間での群集構造の比較」
- ⑤長谷川元洋、伊藤雅道、岩本宏二郎、北山兼弘: 第24回日本土壌動物学会大会 (2001) 「キナバル山下部山地林における根系の切断が土壌動物群集に与える影響」
- ⑥長谷川元洋、伊藤雅道、岩本宏二郎、北山兼弘: 第49回日本生態学会大会 (2002) 「根系の切断が落葉分解過程における土壌動物群集の遷移に与える効果-キナバル山下部山地林における調査」

(3) 出願特許
なし

(4) 受賞等
なし

(5) 一般への公表・報道等

- ①Science 誌 (Vol. 295, 22 March 2002) の編集委員による紹介欄において、最も話題性の高い最新成果として本研究プロジェクトが紹介された。

(6) その他の成果普及、政策的な寄与、貢献について

- ①成果の一部は、IPCC第3次報告書に引用された。引用数2本。