

B-52 アジア太平洋地域における地球温暖化の局地植生への影響とその保全に関する研究  
(4) 湿潤熱帯山岳における森林植生帯閾値と地球温暖化のインパクト評価に関する研究

研究代表者 森林総合研究所企画調整部海外森林環境変動研究チーム 北山兼弘

農林水産省林野庁森林総合研究所

木曾試験地

伊藤雅道・岩本宏二郎

平成8～10年度合計予算額 14,130千円

(平成10年度予算額 4,688千円)

〔要旨〕森林生態系の温暖化への応答予測の大きな問題となっているのは、温度と栄養塩がどのような相互作用をみせるのかということである。私たちはこの問題に答えるためにボルネオ島のキナバル山において、異なる栄養塩（特にリン）の供給下にある熱帯降雨林生態系がどのように温度に制限されているのかを、温度を標高で代表させ、リンの供給能を地質（リン供給が比較的豊富な堆積岩と比較的貧弱な超塩基性岩）で代表させることによって、3年間に渡って調査した。材成長に落葉落枝量を加え地上部純一次生産（純炭素固定量）を表すと、リンの供給に関係なく温度と一次生産には有意な正の相関が見られた。一次生産の温度依存性は、予測に反し、リン供給が貧弱な超塩基性岩上で大きかった。葉のリンと窒素濃度を調べることにより、樹木は温度上昇に対して葉の窒素とリン（面積当）を減少させて適応するが、リンの供給が少ない条件下で温度が上昇すると炭素固定のためのリンへの要求量が急激に低下して温度上昇への反応性が大きくなることが示唆された。温暖化の応答シナリオとして、栄養塩の制限が無い場合、熱帯林の純一次生産の温度依存性は相対的に低く、温度1度Cの上昇に対して乾物生産量67(g/m<sup>2</sup>/yr)の増収となる。栄養塩の制限がある場合、温暖化に伴い単位炭素を固定するための栄養塩（酵素）要求が緩和され、見かけの熱帯林の温度依存性は相対的に高くなり、温度1度Cの上昇に対して乾物生産量104(g/m<sup>2</sup>/yr)の増収となる。しかし、リターの分解速度は純一次生産に対して指数関数的に増加し、温度の上昇に対する短期的な炭素収支はどのような栄養塩状態でもネットでマイナスになる可能性がある。これは短期的（推移的な）応答として熱帯林からの炭素放出を意味する。この短期的な炭素放出がどのようなフィードバック効果を引き起こすのかが、今後の正確な温暖化予測の鍵となろう。しかし、そのような短期的なフィードバックを無視し、生産と分解のバランスとして長期的な熱帯林の総炭素貯留量を予測すると：栄養塩の制限がない場合、平均気温が上昇して分解速度が生産速度を上回り土壤中の炭素貯留量が減少しても、長期的には減少分を地上部のバイオマス増加が補い、単位栄養塩当たりの炭素量は変わらずネットで生態系の炭素総量は変化しない。栄養塩の制限がある場合、平均気温が上昇すると生態系の単位栄養塩当たりの炭素量が増加することによって生態系の炭素貯留量は著しく増加する。

〔キーワード〕熱帯雨林、純一次生産、分解、炭素貯留量、温度依存性

## 1.序

森林生態系への温度上昇の長期影響予測（推移的な応答ではなく、長時間後の定常状態）は、以下の

3点が機能的に明らかにされない限り困難と思われる。第1に温度上昇が土壌からの栄養塩供給能とどのように相互影響するのか？この場合、これまで頻繁に取り上げられてきたのが植物の光合成能力を支配するといわれている窒素であるが、実際には他の栄養塩も光合成を支配する。特にリンは光合成回路において窒素と同じくらい重要な栄養塩である。多くの熱帯降雨林生態系はリンが貧弱で比較的この栄養塩のサイクルが閉じており、貧弱なリンを有機物を分解して再利用することによって光合成を支えている。この分解過程も温度が大きく支配しているはずであるが、逆に分解の温度依存性は有機物中のリンなどの栄養塩によって異なってくる。第2に生産（つまり炭素固定）と分解（つまり炭素放出）にどのようなフィードバックがあるのか？これは、植物が温度上昇に反応して生産速度を変化させた場合、生産される有機物の質（例えば高分子のリグニン量や窒素の濃度など）が変化することが予想されるが、この変化した有機物が分解系に入った場合にどのような分解過程の違いを誘発するのかということである。さらに、分解過程の違いが生産過程の違いを誘発するフィードバック機構が考えられる。しかし、これに関しては研究例がほとんど知られていない。第3に、菌根菌と土壌動物がどのように温度上昇に応答するのか？これまでの、生態系の温度上昇への機能モデルは例外なく生産者である植物と分解者である細菌を2つの軸にしたモデルである。細菌の温度への依存性（つまり分解速度）は予測的であるが、菌根菌や土壌動物の場合、温度上昇にどのように応答するのかはよくわかっていない。最近の研究では、菌根菌が植物の栄養塩取り込みを大きく助けるバイパスの役割を果たしていることがわかっている。

以上のように森林生態系への温暖化影響は土壌系の反応から樹木への反応へと（あるいはその逆の）複雑なフィードバック・プロセスを通して顕在化するはずである。そのような複雑なプロセスを通して顕在化する生態系レベルでの温暖化への応答は、実験室レベルでの個々のプロセスの生理的な研究を積み上げて決して理解することができない。生態系レベルでの温暖化影響を予測する最も確かな方法の1つが、異なる温度条件下において進化適応して体制を作り上げてきた生態系を比較的調べる方法である。この目的のために湿潤熱帯の山岳は極めて有効な実験系である。そこでは温度の季節性が無い、生物活動を強く制限するような乾燥が入らない、低地から森林限界まで同じ生活形の常緑広葉樹が優占するなどの点で整った条件を持ち、標高を平均温度に置き換えることで生態系と温度の関係を明らかにすることができる。

これまで、湿潤熱帯雨林生態系は常に高い温度条件にあるために北方林などと比べて地球温暖化の影響は比較的弱いと一般的に言われている。例えば、Kirschbaum(1994)によれば、生態系の基本的な素過程である純一次生産（炭素の純固定量）と分解（炭素の放出）は、北方林のような低温域で温度への依存性が高く、熱帯のような高温域では温度への依存性が低いとしている。これは、同じ温度上昇を想定した場合、初期状態に対する変動後の割合が低温域の森林でより大きいことを意味している。果たして、これは生態系レベルの応答を考える時に本当であろうか？反証の1つの根拠として、例えば、温暖な条件の良い気候下で植物によって生産される有機物は分解されやすく、この易分解性が植物生産の栄養塩供給を支えていることがあげられる。これもまた、実験室レベルでの結果解釈を生態系レベルでの応答予測にどこまで適用することができるのかの限界を示している例と思われる。

私たちは以上のように実験室レベルでの温暖化予測実験に大きな限界を感じ、生態系レベルでの温暖化影響予測を目指してこの研究を開始した。

## 2. 研究目的

この研究の目的は、熱帯雨林の炭素固定を支配する栄養塩の供給が異なるときにその炭素固定速度が

温度上昇にどのような反応性を示すのかを明らかにすることである。また、炭素固定速度ばかりではなく、有機物の分解速度や熱帯雨林の構造や生態系の総炭素貯留量も栄養塩の供給が異なる時に、温度上昇にどのような反応性を示すのかを明らかにすることである。この目的を達成するために東南アジアの最高峰キナバル山（ボルネオ島）に試験地を設定し、現地調査を継続することによりモデル予測ではなく生のデータを使って、熱帯林純炭素固定速度（生産速度）、炭素放出速度（分解速度）、炭素貯留量、構造諸特性（樹高、種多様性、個体密度など）を温度の関数で表すことを目的とした。その際に、栄養塩の供給が良く炭素固定に栄養塩の制限が無い場合と、逆に栄養塩の制限がある場合の2つのシナリオに基づき、これら諸パラメータを温度の関数として表した。

### 3.研究方法

キナバル山の南面に700m, 1700m, 2700m, 3100mの4つの標高を選び、さらにそれぞれの標高には堆積岩地と超塩基性岩の試験地を1対づつ置き、合計8カ所の試験地を設定した。土壌分析の結果、堆積岩由来の土壌は超塩基性岩由来の土壌に比べて、可溶性のリン、様々な抽出法に基づく可給態のリン、全リンすべてにおいて濃度が高いことがわかっている。従って、地質の違いはリンの供給条件が異なることを表す（リンが豊富な堆積岩と貧弱な超塩基性岩）。各試験地には永久調査区を設定し、その中で樹木の種多様性、組成、葉面積を含む構造の諸特性、純一次生産、落葉落枝（リター）の分解速度、土壌と樹木中の炭素量、生葉のミネラル濃度の計測を行った。このうち特に重要な測定項目は純一次生産量であり、その測定方法はリター量に木部の成長量を積み上げるものである。リター量については、リタートラップ（開口部0.5平方メートル）を各区に合計20個あるいは10個設置し、中にたまったリターを2週間毎に回収し、通風乾燥後に秤量して求めた。このリター量の測定は1995年2月から欠損無く継続した。木部の成長量については、胸高直径5cm以上の樹木の胸高直径を1年毎に再測定して求めた。生長量の乾物量への換算は、乾物量と樹木の胸高直径・樹高の相対成長関係式によった。リター分解については、mass balance法を用いて求めた。これは森林内の土壌上にある未分解のリターを数カ月毎に定期的に採集し通風乾燥後に秤量して年間の平均的なリターの貯留量を求め、それをリターの年間加入量で割る方法である。土壌中の有機態炭素量は各森林内に土壌断面を4つ掘削し、層毎に土壌のサンプルを採集し化学分析によって濃度を求めた。面積当たりの土壌炭素量は濃度に土壌密度をかけて求めた。樹木中の炭素量は乾物量に0.5をかけてもとめる簡便法を用いた。

温度と実測された諸変数（純一次生産速度など）の関係は、地質毎に試験地の年平均気温との直線回帰によって求めた。温度に対する変化様式は、諸変数を対数変換した場合としない場合の相関係数を比べることによって決定した。これら諸変数の温度依存性に対するリン供給の影響は、回帰直線を地質間で共分散分析により検定し有意な違いをみることによって明らかにした。

### 4.結果

各調査区の年間リター量、木部成長量、地上部純一次生産量、リターの分解速度、土壌中の有機炭素量、樹木中の炭素量、生態系の総炭素量は表1のようになった。地上部純一次生産速度は、堆積岩上では標高700m地点で1913g/m<sup>2</sup>/yr、3100m地点で816g/m<sup>2</sup>/yrであった。一方、超塩基性岩上のそれは標高700m地点で1715g/m<sup>2</sup>/yr、3100m地点で199g/m<sup>2</sup>/yrであった。従って、どちらの地質条件（異なるリン供給速度）でも標高上昇に対して炭素固定量は直線的に減少する傾向がみられ、その減少パターンは次の回帰式で表された。

ANPP=2097-0.464ALT(堆積岩上、 $r^2=0.914$ ,  $P=0.04$ )

ANPP=2063-0.578ALT(超塩基性岩上、 $r^2=0.92$ ,  $P=0.04$ )

ANPP は地上部純一次生産量、ALT は標高(m)を表す。回帰に対する地質の影響を共分散分析で調べたところ(表2)、2つの線の傾きは地質間で有意に異ならず、切片だけが地質間で有意に異なった。つまり、標高(温度)への依存性(回帰線の傾き)はリン供給の良し悪しに関わらず同じであり、切片だけがリン・レベルの高い地質で有意に大きい結果が示された。

表1 キナバル山の各森林試験地における純一次生産速度、地上リターの分解速度及び炭素貯留量

標高(m)	700	1700	2700	3100	700	1700	2700	3100
地質	堆積岩				蛇紋岩			
リター生産(g/m <sup>2</sup> /yr)	1110	780	532	631	1113	628	594	164
木部生産(g/m <sup>2</sup> /yr)	803	423	248	185	602	185	131	35
純一次生産(g/m <sup>2</sup> /yr)	1913	1222	780	816	1715	813	725	199
分解係数K(yr <sup>-1</sup> )	1.69	1.18	1.00	0.87	1.67	0.71	0.80	0.44
土壤炭素量(ton/ha)	61.5	93.1	151.1	262.4	94.13	85.48	84.24	66.67
地上炭素量(ton/ha)	245.5	147.5	154.0	111.5	276.0	120.0	63.5	19.0
総炭素貯留(ton/ha)	307.0	240.6	305.1	373.9	370.1	205.5	147.7	85.7

リターの分解速度(K)に関しても、どちらの地質でも標高上昇に対して有意に直線的に減少するパターンが見られた( $r^2=0.93$ ,  $P=0.04$ , 堆積岩;  $r^2=0.84$ ,  $P=0.08$ , 超塩基性岩)。共分散分析の結果は(表2)、分解速度に対する地質の影響は回帰直線の傾きと切片どちらに対しても有意な影響は認められなかったが、実測値自体を同じ標高で比べると常にリンのレベルが高い方の堆積岩上で高い傾向にあった。両地質を込みにしてリターの生産速度に対するリターの分解速度を見ると、生産速度の上昇に対して分解速度が有意に指数関数的に上昇する傾向が認められた( $r^2=0.91$ ,  $P=0.0002$ )。生態系中の総炭素量は、堆積岩上で標高に関係なく約300(ton/ha)で一定の値を保持したのに対して、超塩基性岩上では標高の上昇に対して370(ton/ha)から85(ton/ha)に直線的に減少する顕著な差異が認められた。

一方、土壤中の炭素貯留量に関しては堆積岩上で標高の上昇とともに指数関数的に増加する傾向にあったのに対して、超塩基性岩上では標高に対する変化はあまり見られなかった(表1)。以上の2つ関係から、生態系中の炭素総貯留量に対する土壤中の炭素量の比はどの地質でも標高上昇つまり気温低下と共に指数関数的に上昇する傾向が見られ、そのパターンに関しては傾きも切片も地質の影響が認められなかった( $P>0.1$ , ANCOVA)。

樹冠葉のミネラル濃度と標高の関係を2つの地質で比較すると、図1に見られるように、どちらの地質でも標高上昇に対してリンと窒素の面積当たりの含量が有意に直線的に上昇するパターンが認められた。この回帰直線に対する地質の有意な差は窒素の場合で認められなかったのに対して、リンの面積当

表2 地質毎の各パラメータと標高の直線回帰の結果と回帰直線に対する地質の影響(ANCOVA共分散分析) AGB (地上部現存量), ANPP (地上部純一次生産), LMA (leaf mass per area), QUE (ANPP/吸収光子量), LAI (葉面積指数) and NAR (純同化量). 同化に対する栄養塩利用効率:PUE (リン利用効率), NUE (窒素), CaUE (カルシウム), MgUE (マグネシウム), and KUE (カリウム). 標本数n=4

Indep.	Depend.	Sedimentary			Ultrabasic			ANCOVA (F)		
		Intercept	Slope	r <sup>2</sup>	Intercept	Slope	r <sup>2</sup>	Slope	Intercept	
Alt.	AGB	46.3	-0.00759	0.802*	68.3	-0.0214	0.981***	16.305**	8.313**	
Alt.	ANPP	2097	-0.464	0.914**	2063	-0.578	0.921**	0.296	3.865*	
Alt.	Litterfall	1194	-0.216	0.857*	1348	-0.348	0.879*	1.431	1.142	
Alt.	Litter/ $\Delta$ wood	0.799	7.149E-4	0.807*	1.020	0.00125	0.992***	4.088	17.630***	
Alt.	Ln(PUE)	8.59	8.87E-6	0.004	8.090	6.783E-4	0.855*			
Alt.	Ln(NUE)	4.602	1.027E-4	0.602	4.543	2.708E-4	0.915**			
Alt.	Ln(CaUE)	5.831	-1.554E-4	0.080	5.594	-2.347E-4	0.356			
Alt.	Ln(MgUE)	6.161	1.125E-4	0.345	6.035	2.083E-4	0.983***			
Alt.	Ln(KUE)	5.775	1.364E-4	0.639	5.895	5.146E-4	0.662			
Alt.	LMA	120.5	0.0345	0.974**	128.2	0.0512	0.849*	1.147	8.098**	
Alt.	Foliar N (area)	1.596	1.198E-4	0.468	1.382	2.397E-4	0.905**	1.261	0.079	
Alt.	Foliar P (area)	25.859	0.00486	0.868*	10.397	0.00539	0.927**	0.094	99.918***	
Alt.	LAI	5.334	-8.676E-4	0.907**	6.505	-0.00138	0.792	0.372	5.256*	
Alt.	QUE	0.261	-0.0486	0.998***	0.248	-5.954E-5	0.843*			
Alt.	NAR	401	-0.0406	0.361	361	-0.071	0.949**			
Alt.	Decomp. K	1.816	-3.201E-4	0.930**	1.874	-4.664E-4	0.839*	0.885	2.810	
PAR	NAR	-231	0.060	0.963**	-66.7	0.030	0.225			
LAI	ANPP	-507	466	0.765	-510	377	0.943**			

\*P<0.1; \*\*P<0.05; \*\*\*P<0.01

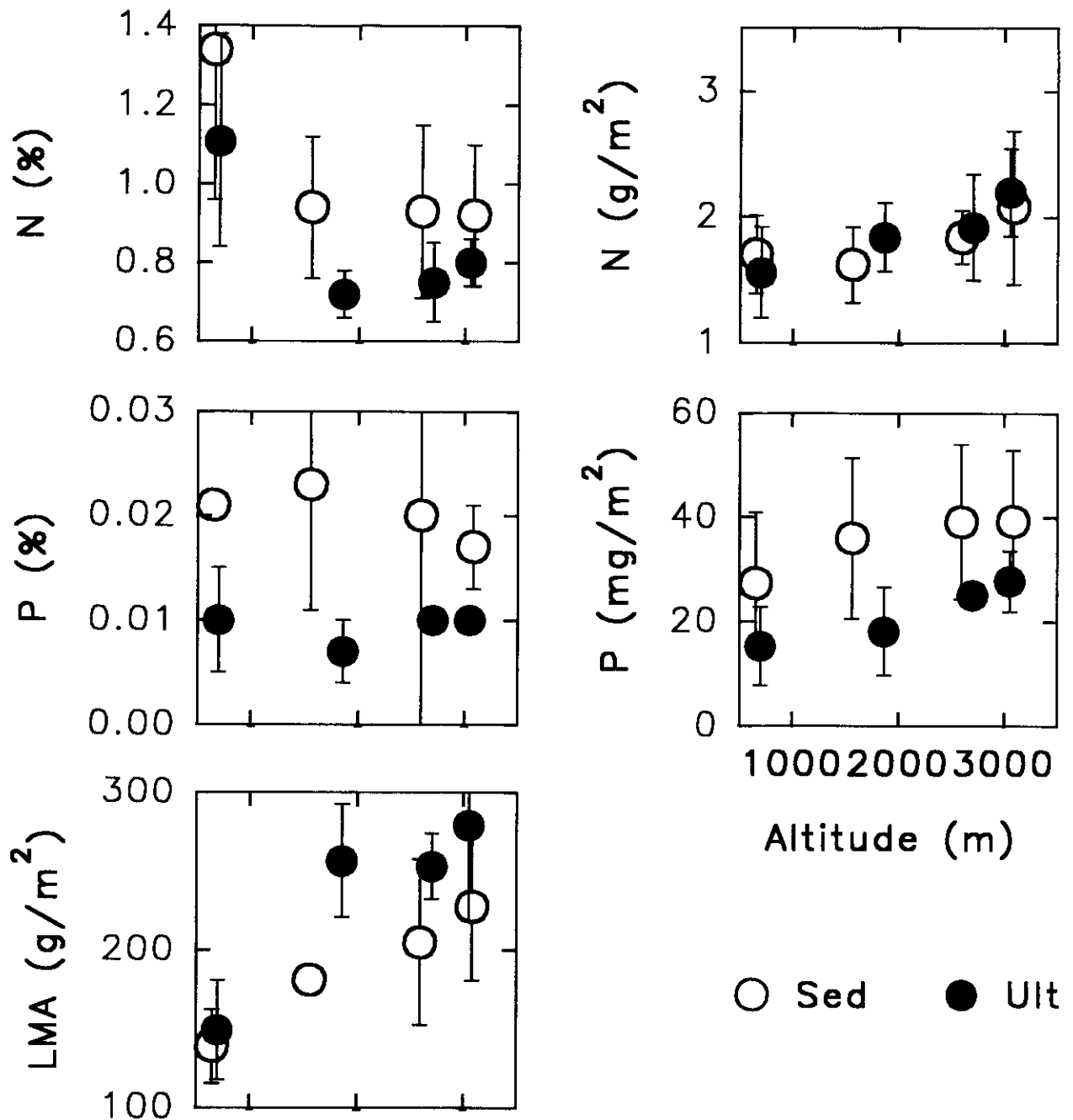


図1 樹冠葉のミネラル濃度の標高変化

白丸は堆積岩上樹木、黒丸は超塩基性岩上の樹木を表す

たり含量の場合は土壌中のリン供給差を反映して常に堆積岩上で有意に高かった (表2)。

純炭素固定に対する各種栄養塩の利用効率をリター中の栄養塩濃度の逆数で表すと、リンの利用効率に関しては超塩基性岩上で標高上昇に伴う指数関数的な増加が見られたのに対して、堆積岩上ではそのようなパターンは見られなかった (表2)。ある栄養塩の利用効率はその栄養塩が乏しくなるときに増加

することが経験的に知られており、キナバル山で見られた地質間の対照的なパターンも超塩基性岩でリンの供給が制限されているために起こる現象と解釈できる。

## 5. 考察

表1の結果は3年間という比較的長期の継続観測から得られた精度の良い結果であり、年毎の変動を考慮しても十分に信頼できるデータと思われる。これらのデータに従えば、標高と純炭素固定速度（純一次生産）は生態系の栄養塩レベルに関係なく非常に直線的である。この直線性が果たして温度変化だけを反映したものであるのか、それとも他の気象要因も反映した総合的な結果であるのかが問題になる。標高上昇と共に直線的に減少する気象因子としては気圧とそれに伴うCO<sub>2</sub>の分圧があげられる。しかし、CO<sub>2</sub>分圧が減少したとしても純一次生産の減少を説明できるわけではない。その理由は、CO<sub>2</sub>の分圧が減少して光合成速度の低下を来すのと同時に気圧低下に伴いCO<sub>2</sub>の拡散係数が上昇して光合成速度の減少を補償するように働くからである。さらに、気圧低下に伴う酸素分圧の低下までも考慮した場合、光呼吸の減少率が炭素同化の減少率を上回ってしまい、ネットでの気圧低下に伴う炭素同化減少率は数パーセントにしかならないと推測される。以上の考察から、表1と2に示した熱帯林の純一次生産の標高に伴う減少は温度減少に起因していると結論される。

しかし、温度が減少するとなぜ熱帯林の純一次生産が減少するのかに関してのメカニズムは栄養塩レベルの差により異なると思われる。2つの地質の共通して見られる森林構造の変化は、標高上昇に伴い葉面積指数が減少することであるが、これが純一次生産の減少の一因であることは疑いない。しかし、さらに単位葉面積当たりの純同化率を見ると、堆積岩上では標高との相関がなくむしろ年間の積算光量子入射量と有意な正の相関がある（表2）。逆に超塩基性岩上では、純同化率が標高上昇に伴い直線的に有意に減少する（表2）。従ってリン・レベルの低い超塩基性岩上では葉面積指数の減少に加えて単位面積当たりの純同化率の減少も純一次生産の減少の一因となっている。

この超塩基性岩での純同化率の減少は樹冠葉のミネラル濃度から説明できる。葉の面積当たりのリン含量はどちらの地質でも標高と共に増加したが、同じ標高では土壌のリン供給パターンを反映して超塩基性岩で常に少なかった。これらの結果から、樹木は温度低下に対して葉の窒素とリンを増加させて適応するが、リンの供給が少ないと適応できず、葉の光合成能が温度低下（標高上昇）に追いつけず純同化率が低下している可能性が示唆される。

従って、純一次生産の温度減少に伴う低下の大きなパターンは、リンが規定しなければ主に葉綿製指数の低下によって説明でき、リンが規定すると葉面積指数と純同化率両方の低下によって説明される。堆積岩では窒素とリンのの利用効率は標高変化せず、やはり超塩基性岩だけに標高上昇に伴うリン利用効率の急激な高まり（i. e. リン欠乏）が見られ、このことから先のメカニズムが指示される。さらに、堆積岩上では個葉の光合成能が栄養塩によって制限されないために逆に光量子によって規定され、超塩基性岩上では個葉の光合成能がリンによって強く制限されるために純同化率は光量子量によって規定されないものと解釈できる。以上から、熱帯林の純一次生産は、平均気温と年間光量子量の2変数あるいは年平均気温のみを使い、次の重回帰式によって説明される：

$$\text{栄養塩の制限が無い場合： } ANPP=67*AT + 0.15*Q -1282$$

$$\text{栄養塩の制限がある場合： } ANPP=104*AT -773$$

ANPP=地上部純一次生産量(g/m<sup>2</sup>/yr)、AT=平均気温（度C）、Q=年間光量子量(mol/m<sup>2</sup>/yr)。これに従うと、平均気温1度Cの上昇は、栄養塩の制限が無い場合乾物生産67g/m<sup>2</sup>/yrの増収、栄養塩の制限があ

る場合乾物生産  $104 \text{ g/m}^2/\text{yr}$  の増収につながる。

純一次生産の標高パターンと同様に、地質間で対照的な生態系の炭素貯留量のパターンもまた温度と制限する栄養塩の相互作用の結果と考えられる。つまり、リンが制限しないと、異なる温度体制下でも生態系の炭素総量は一定の値をとる。リンが欠乏した状態では温度が上昇するとリンの欠乏から解放されて生態系の炭素総量が増加すると考えられる。

## 6. 温暖化に対する熱帯林の応答

以上の結果から以下の温暖化シナリオが演繹的に導き出される。栄養塩の制限が無い場合、熱帯林の純一次生産の温度依存性は相対的に低く、温度  $1 \text{ 度C}$  の上昇に対して乾物生産量  $6.7 \text{ (g/m}^2/\text{yr)}$  の増収となる。栄養塩の制限がある場合、温暖化に伴い単位炭素を固定するための栄養塩（酵素）要求が緩和され、見かけの熱帯林の温度依存性は相対的に高くなり、温度  $1 \text{ 度C}$  の上昇に対して乾物生産量  $10.4 \text{ (g/m}^2/\text{yr)}$  の増収となる。しかし、リターの分解速度は純一次生産に対して指数関数的に増加し、温度の上昇に対する短期的な炭素収支はどのような栄養塩状態でもネットでマイナスになる可能性がある。これは短期的（推移的な）応答として熱帯林からの炭素放出を意味する。この短期的な炭素放出がどのようなフィードバック効果を引き起こすのかが、正確な温暖化予測の鍵となろう。しかし、そのような短期的なフィードバックを無視し、生産と分解のバランスとして長期的な定常状態に達する熱帯林の総炭素貯留量を予測すると： 栄養塩の制限がない場合、平均気温が上昇して分解速度が生産速度を上回り土壤中の炭素貯留量が減少しても、長期的には減少分を地上部のバイオマス増加が補い、単位栄養塩当たりの炭素量は変わらずネットで生態系の炭素総量は変化しない。栄養塩の制限がある場合、平均気温が上昇すると生態系の単位栄養塩当たりの炭素量が増加することによって生態系の炭素貯留量は著しく増加する。

### [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チームとして採択された「モンスーンアジア陸域生態系における地球変化の影響」外；通称 TEMA」の一環として国際的に位置づけられている。これまで、サブ課題主査（北山）は、H8年 SARCS,IBGP,IHDP,WCRP 会議(バンコク)と H9年太平洋学術会議(フィジー)の国際会議に出席し、成果発表を行い、生態系比較ネットワーク計画の策定を主導した。また、H11年5月に神奈川県国際湘南村で開催された第2回 IBGP 国際会議においては日本の陸域生態系研究の代表として、本研究の成果を基調講演で発表し大きな反響を得た。

### [研究発表の状況]

#### (1) 口頭発表

北山・相場・Majalap・大沢(1996)キナバル山の標高一地質マトリックスにおける土壌窒素の無機化速度. 第43回日本生態学会、東京。

大沢・朱宮・北山(1996)キナバル山の標高一地形マトリックスにおける植生分化. 第43回日本生態学会、東京。

相場・北山 (1997) キナバル山の標高一地質マトリックス (4 \* 2) における森林構造と種組成. 第44回日本生態学会、札幌。

岩本宏二郎(1998)キナバル山 (マレーシア) の標高一地質マトリックスにおける外生菌根の発達 程



度、第45回日本生態学会、京都。

Kitayama, K. (1998) Long-term ecological research on Mt. Kinabalu, Borneo. シンポジウム、長期変動下における土地利用と生物多様性(北大、環境庁)、札幌。

伊藤・岩本・北山(1998)キナバル山(マレーシア、サバ州)の土壤動物 1. 大型土壤動物およびサラダニ群集構造。第21回土壤動物学会大会、徳島。

北山・相場(1999)熱帯林の純一次生産と生態系の構造は標高と土壌リンによってどのように変わるのか。第46回日本生態学会、長野

伊藤・岩本・北山(1999)マレーシア、キナバル山における外生菌根と土壤動物  
第46回日本生態学会、長野

相場・北山(1999)熱帯山地で幹断面積合計値と地上部現存量が異なる標高変化を示す理由  
第46回日本生態学会、長野

Kitayama, K. & S. Aiba (1999) Net carbon fixation and storage of tropical rainforest ecosystems under contrasting soil P supplies. 2<sup>nd</sup> IGBP International Congress.

(2) シンポジウム等の開催

北山・相場(1998)熱帯山岳(キナバル山)における比較生態系生態学: 熱帯林生態系の属性と機能を温度と栄養塩の関数で表す試み。第45回日本生態学会自由集会、京都

相場慎一郎、林木群集

北山兼弘、生産と分解のバランス

伊藤雅道、土壤動物調査の概要

岩本宏二郎、菌根菌の発達

(3) 原著論文

○ Kitayama, K. (1996) Patterns of species diversity on an oceanic versus a continental island mountain: a hypothesis on species diversification. *Journal of Vegetation Science* 7: 879-888.

○ Kitayama, K., Aiba, S., Kimura, K. and Kikuzawa, K. (1998) Fine-litterfall dynamics in hill and montane forests on Mount Kinabalu in the 1996 mast year. *TROPICS*

○ Aiba, S. and Kitayama, K. (1999) Structure, composition and species diversity in an altitude-substrate matrix of rain forest tree communities on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology* 140: 139-157.

○ Kitayama, K., Aiba, S., Majalap, N. and Ohsawa, M. (1998) Soil nitrogen mineralization of rainforests in a matrix of elevations and geological substrates on Mount Kinabalu, Borneo. *Ecological Research* 13: 301-312.

Kitayama, K., Lakim, M and Wahab, MZ (1998) Climate profile of Mount Kinabalu during late 1995-early 1998 with special reference to the 1998 drought. *Sabah Parks Nature Journal*.

Kudo, G and Kitayama, K (1998) Drought effects on the summit vegetation on Mount Kinabalu by an El Nino event in 1998. *Sabah Parks Nature Journal*.

○ Kitayama, K., Majalap, N and Aiba, S (accepted) Soil phosphorus fractionation and phosphorus-use efficiencies of rain forests on altitudinal gradients of Mount Kinabalu, Borneo. *OECOLOGIA*.

- Kitayama, K and Aiba, S (submitted) Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients under contrasting soil P pools on Mount Kinabalu, Borneo. *Ecology*.