大気中の CO₂ 変動と熱帯林のかかわり

農林水産省農業環境技術研究所 小 泉 博

The Effect of the Tropical Forest Ecosystem on Changes of CO₂ in the Atmosphere

Hiroshi Koizumi

Division of Plant Ecology, National
Institute of Agro-Environmental Sciences

The effect of deforestation or reforestation in the tropics on changes of CO₂ in the atmosphere was investigated. The deforestation area in the tropics was estimated as 1,100 to 2,000 × 10⁴ ha per year, and consequently the amount of carbon released annually would be 22 to 44 × 10⁸ ton. On the other hand, estimating the total carbon removed from the atmosphere during the period of recovery of the forests, the increment of storage of carbon amounted to 300 ton/ha during 35 years or 8.7 ton/ha per year.

Keywords : Carbon dioxide change, Tropical forest ecosystem, Sink, Source

1. はじめに

農耕の行われなかった約1万年前には、地球は62億haにおよぶ豊かな森林に覆われていた。しかし、その後の人口増加にともなう土地利用形態の変化により、地球上の森林面積は43億haに縮少し、近年その破壊は加速度を増している状態にある。さらに、ここ100年において人類は莫大な量の化石燃料を燃焼し、大量のCO₂を放出し続けたために、それまで植物の光合成によるCO₂の吸収、生物の呼吸によるCO₂放出、そして大気・海洋表面におけるCO₂交換によって保たれてきた大気中のCO₂濃度のバランスが大きく崩れ、その濃度は急速に増加しつつある。CO₂濃度の上昇は地表面付近に熱エネルギーをためる効果を持つことから、その濃度が高まると地球の気温が上昇することが予想され、遠からず地球環境に対して深刻な影響を与えるのではないかと懸念されている。

この問題に対処するためには、大気中のCO₂濃度に対して森林およびその破壊がどのように影響するのか、また人間活動によって放出されたCO₂が大気にどれだけ残留し、海洋および植物にどのような割合で配分・固定されるのか、といったことを知る事が重要である。

大気圏と陸上生物圏の炭素量はきわめて大まかに見積ると、大気の炭素が7,000億ton、植物体中の炭素量が6,000億ton、土壌中の有機物として蓄積している炭素が12,000億tonである¹⁾。すなわち、陸上生物圏には大気中のおよそ2.5倍の炭素が存在することになり、陸上に存在する現存量のわずかな増減が、大気中のCO₂濃度の変動として反映される可能性を持っている。そして陸上生態系の炭素量のうち80~90%は森林が保持しており、さらにそのうちの50~60%を熱帯林が占めているので、熱帯林の現存量の動態はきわめて重要である。そこで、ここでは熱帯林を中心に世界の森林植生の動態が地球上のCO₂の変動にどのように関わっているかを探してみたい。

2. 熱帯林破壊の現状

いま、最も急速な開発を受けているのは熱帯林であり、図1に示すように²⁾かなりの熱帯林がすでに消失している。FAO/UNEPの熱帯林資源調査によると³⁾、1980年代前半における1年当りの熱帯林の消失面積は1,130万haにのぼる(表1)。主要地域別にみると、減少率が一番高いのは熱帯アメリカの0.63%、ついでアジアの0.60%、アフリカが0.52%ということになる。一方、人工林の増加は全体で1年当たり約110

図 1 消滅した熱帯雨林と現在の熱帯雨林の分布²⁾

■：既に消滅した熱帯雨林；▨：現在の熱帯雨林

表 1 1981 年から 1985 年の 5 年間にける年平均の熱帯林消失面積と造林面積

地 域	熱帯林面積 (千 ha)	熱 帯 林 消 失 面 積			移動農耕 により減 少した割 合 (%)	その他の主な 要因	造林面積 (千 ha)	消失面積 と造林面 積の比
		閉 鎖 林 (千 ha)	疎 林 (千 ha)	合 計 (千 ha)				
熱 帯 ア ジ ア	336,000	1,826 (0.60)	190 (0.61)	2,016 (0.60)	49	移住入植	438	5 : 1
熱帯アフリカ	706,900	1,331 (0.61)	2,345 (0.48)	3,676 (0.52)	70	永久農業	126	29 : 1
熱帯アメリカ	890,600	4,339 (0.64)	1,272 (0.59)	5,611 (0.63)	35	過放牧・入植	535	11 : 1
合 計	1,933,500	7,496 (0.62)	3,807 (0.52)	11,303 (0.58)	49		1,099	10 : 1

村上⁴⁾の値をもとに作成した。()内は年平均の森林減少率 (%) を示す。熱帯林面積は森林減少率に基づき計算した値である。

万 ha にすぎず、1 ha の造林に対して 10 ha の森林が消失したことになる。森林の消失と造林の比を地域別にみると、アジアで 5 : 1、アフリカで 29 : 1、アメリカで 11 : 1 である (表 1)。

一方、1980 年に出た「西暦 2000 年の地球」という膨大なレポートでは⁴⁾、開発途上国の森林は西暦 2000 年までの間、毎年 1,800~2,000 万 ha の割合で減少すると予想している。森林の定義、分類の基準や調査者の考え方などの違いによって、試算される森林消失面積の値に大きな開きはあるが、ともあれ、熱帯地域では毎年かなりの速度で森林が破壊されているのは確かなことである。

熱帯林の破壊にはいくつかの原因があげられているが、最大の原因は農地への転換である (表 1)。従来の移動農耕法では何年かの周期で新たな森の開墾を行い、数年後にもとに戻ってくるが、それまでに森林は地力を回復していた。しかし人口の増加により農民は伝統的な移動農耕法をやめ、永久的に農地として利用した

ために多くの熱帯林が消失した。ついで、薪炭材の採取が森林破壊のもう一つの原因にあげられる。これは人口密度が高く、森林の成長の遅いアフリカの乾燥林地帯などでとくに深刻である。さらに、日本など温帯地域に位置する国の木材に対する需要も熱帯林の減少を加速する原因となっている。木材業者は市場価格の高い優良樹種を選抜するが、この種の樹木が森林面積に占める割合は 5% 以下である。しかし、これを伐採するときに不必要な木を 30~40% も破壊してしまうことが少なくない。森林破壊のもう一つの要因は、ラテンアメリカ諸国にみられるような牛の放牧地への転換である。ここでは 1961 年~1979 年の間に牧草地が 53% も増大したが、この間に森林は 39% も減少している⁵⁾。

3. CO₂ の供給源としての熱帯林

原生林のような極相に達した森林は CO₂ のソース (供給源) でもなければシンク (吸収源) でもない。す

なわち、森林によって固定される大気中のCO₂と樹木の呼吸や土壌中の有機物の分解によって大気中に戻っていくCO₂とのバランスが保たれた状態にある。ところが、このような森林が天災あるいは人手によっていったん破壊されると、たちまちCO₂のソースが変わる。伐採された樹木はいずれは燃やされCO₂となって大気中に戻っていく。また、森林土壌に蓄積されている有機物も分解されCO₂として大気中に供給される。

2節で述べたような森林破壊によって、大気中にどの程度の炭素がCO₂として放出されているのだろうか。単純な仮定をおいて推定してみよう。すでに述べたように、年々伐採される熱帯林の面積は1,100~2,000万haくらいである。いま、熱帯林の平均の地上部現存量を炭素換算で200 ton/haとし、これだけの森林が全部焼かれるものと考え、22~40億tonの炭素がCO₂として大気中に放出されることになる。この量は、現在化石燃料の消費によって1年間に発生している56億tonの炭素量⁶⁾の39~71%に相当する。この試算では、土壌中に蓄積している有機物(森林の地上部現存量の約2倍)の分解にともなう放出を全く考慮していないが、森林が破壊されて地面がむき出しになると、土壌有機物の分解が著しく促進され、多量のCO₂が土壌から放出されることになる。このことを考慮すると、上述の見積りはかなりひかえめな値ということになる。ともあれ、この推定値はとても無視することのできない膨大な値である。

森林破壊によって放出される炭素の推定値は、今までにもいくつか提出されているが、これらは不十分なデータに基づいて、さまざまな仮定をおいて推定されているため、非常なばらつきをみせている。例えばWoodwellは熱帯林の消失率を年に1%とし、それに他地域の森林開拓を加えて、80億tonの炭素が放出されると推定しているが⁷⁾、この他にも、10億ton~26億tonの推定値が出されている。しかし、どの推定が正しいかを判断するのは、現時点ではむずかしいと言わざるをえない。

4. 熱帯林の生産力と成長速度

CO₂の吸収源として森林を考えると、生産量や成

長速度を正確に把握することは大変重要なことである。現在のところ、これらを信頼できる方法で測定した例は数少ないが、以下に簡単に紹介したい。

西マレーシアのPasohの熱帯雨林は樹高57~60mに達する巨大高木の存在する森林である。ここで行われた日本、マレーシア、イギリスの共同研究の結果⁸⁾によれば、この森林が光合成により1年間に生産する有機物の量(総生産量)は、1ha当り99.1 tonで、そのうち74%は樹木の呼吸によって消費され、残りの26%(25.7 ton/ha・年)が純生産量として植物体に残った(表2)。しかし、このうち75%は枯死する木や枯れ落ちる葉や小枝の再生に使われたので、現存量の増分は差引わずか6 ton/ha・年であった。この値は地上部現存量475 ton/haのわずか1.1%にすぎない。タイのKhao Chongの熱帯雨林における結果⁹⁾でも同様に、総生産量、純生産量はそれぞれ123 ton/ha・年、28.6 ton/ha・年の値を示し、現存量の増分は5.3 ton/ha・年で、現存量365 ton/haの1.5%と非常に小さかった(表2)。

年平均の現存量増加分が5~6 ton/haという数字は、胸高直径1mクラスの木が2年に1個体/ha、あるいは胸高直径32~33 cmの個体が1年当り1個体/ha余分に枯れると現存量の増分はゼロになる量である。この程度の枯死は熱帯雨林では十分に考えられる量であるので⁹⁾、これらの森林では現存量はほとんど増えることなく、ほぼ平衡に達していると考えてよい。

一方、温帯の原生林の生産力をみると⁸⁾、四国・九州に主に分布する照葉樹林の純生産量は15~30 ton/ha・年、大隅半島の原生照葉樹林では21 ton/ha・年という値を得ており、熱帯多雨林の生産力との差はあまり認められない。このように原生熱帯林に関する限り、温帯林に比べてきわめて高い生産力を持っているというわけではない。

熱帯雨林の樹木の成長速度を測定した結果もそれを裏づけるものとなっている。熱帯林の樹木には年輪がないので、木を切っただけでは成長速度を知ることはできないが、1年間の胸高直径増加速度を測ることにより、個々の木がある直径クラスに達するのに必要な年数を推定することができる。このようにして、胸高

表2 東南アジアにおける熱帯雨林の生産力と現存量

地 域	総 生 産 量 (ton/ha/yr)	呼吸消費量 (ton/ha/yr)	純 生 産 量 (ton/ha/yr)	地上部現存量 (ton/ha)	現存量の増分 (ton/ha/yr)
Pasoh (マレーシア) ¹⁾	99.1	73.4	25.7	475	6.0
Khao Chong (タイ) ²⁾	123.0	94.4	28.6	365	5.3

直径 10 cm の個体が 100 cm に成長するのに必要な平均速度を推定すると、およそ 300 年⁸⁾ということになる。また、Brown がフィリピンで測定した結果によると、林内で芽生えた実生苗が胸高直径 10 cm になるまでの平均年数は 90 年⁹⁾である。これより熱帯原生林の直径 100 cm の樹木の年齢は 400 年前後と推定され、成長速度も温帯林と大きな差は認められない。

一方、熱帯には急成長樹種が存在することも知られている。熱帯林の伐採跡地には原生林を構成しているのとは全く別の樹種が出現し、これらの中には 3 年で平均樹高 10 m といった驚異的な速さで成長するものもある。現在のように、森林の伐採速度が更新可能速度をはるかに越えた時代においてこれを救うのは、このように成長が速く人工造林に適した急成長樹種なのかも知れない。

5. CO₂ の吸収源としての熱帯林

現存する植生は CO₂ のシンクとして働いている。伐採後 CO₂ のソースとなった森林も、数年のうちに植生の回復が始まり、新しいシンクとして働くようになる。原生熱帯林が伐採されると、もとの森林の種類組成と構造を持つ森林に回復するまでには、数百年かかると考えられている。しかし、現存量の回復だけについて言えば、最近開発された熱帯雨林モデルのシミュレーションによって¹⁰⁾、40～50 年で定常状態に達し、もとの森林の現存量に回復する（もとの原生林に戻るわけではない。）と推定されている。

それでは熱帯林現存量の回復過程で森林はどの程度の CO₂ を吸収するのであろうか。この問題に対し、明確に答えることはきわめてむずかしい。それは推定を行うために必要なデータ、例えば若い木の造林面積や成長速度といったものの蓄積が少ない上に、成長速度のように森林のタイプや生育段階によって変異が大変大きいという、取扱いの難しい問題を持っているためである。このような複雑さを内在させた森林を対象として、数十年から数百年にわたる長期的な見通しを立てることはきわめて困難なことである。こうした困難な問題に対し、科学的に対処するには、樹木の生産過

程に立脚した森林モデルを構築し、それにより森林の動態を予測することが有効であると考えられる。

こうした視点から Monsi und Saeki¹¹⁾ の物質生産理論を基礎に、熱帯林の生産力と炭素循環をシミュレートしたのが Oikawa のモデル¹⁰⁾である。このモデルの中で Oikawa は生態系純生産 (En) という概念を導入している。En は純生産量 (Pn) から土壌有機物の分解量 (R_M) を差し引いたものとして定義されている。つまりこの En が大気と陸上生態系との間の真の炭素フラックスを表している。したがって陸上生態系が炭素のシンクであるかソースであるかの問題は、地球規模においてこの En の値が、正 (シンク) なのか負 (ソース) なのかの問題に帰着する¹²⁾。

熱帯林の伐採後、100 年にわたる遷移過程をシミュレートしたこの研究によって示された En の経時的な変化は表 3 に示す通りで、En の値は森林伐採後 4～5 年で最大になり、その後徐々に減少し、40～50 年で CO₂ のフラックスは平衡状態に達する。すなわち、若い樹木が成長を開始して 5 年目あたりが最もシンクとしての働きが強く、50 年もたつとこの森林はシンクでもソースでもなくなるとことを示している。また、この森林の 50 年間における年平均の En 値は炭素換算で 8.7 ton となり、この森林は伐採後 40～50 年でおおよそ 300 ton/ha の炭素を大気中から吸収することが予測される。仮に熱帯原生林 1 ha を焼いて、200 ton の炭素の CO₂ が放出されるとすると、それに見合うだけの CO₂ の吸収を期待するためには、このような育ちざかりの若い森林が 22～23 ha も必要であるということになる。

'88～'89 の地球白書によれば⁵⁾、土地の生産性、水資源の維持および薪炭材用樹木のために 11,000 万 ha の造林の必要性が示唆されている。前述のように、1 ha 造林することにより年間 8.7 ton の炭素を吸収する効果があるとなると、11,000 万 ha の造林は樹木が成木に達するまでに毎年約 10 億 ton の炭素を吸収することになる。これにより、現在熱帯林の破壊に伴い放出されている 31 億 ton の炭素の純増のうち 32% が抑制されることになる。また、併せて森林の伐採を 1/4 削

表 3 熱帯林伐採後の生態系純生産 (En) の変化

伐採後の年数 (year)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	平 均
En 有機物量 (ton d.w./ha/yr)	40	30	20	13	9	6	3	0	0	0	17.3
En 炭素量 (ton C/ha/yr)	20	15	10	6.5	4.5	3	1.5	0	0	0	8.7

Oikawa⁹⁾ の図から読み取り作成した。

減したとすると、熱帯から放出される炭素は全体で60%近くも削減できる。いかなる方策をとるにしても、大切なことは森林の消失を少しでも遅らせることと、それぞれの環境に適した樹木を造林するよう努力することである。こうした努力によって、大気中のCO₂蓄積が軽減されることが期待される。

6. 熱帯林のその他の役割

熱帯林はCO₂の吸収源以外にもいくつかの働きを持っており、なかでも環境保全機能や種の保存機能は重要である。

環境保全機能とは、熱帯林が存在することによって土壌および土壌中の養分の流失を防ぎ、水の供給量を調節する作用のことである。一般に森林があると、豪雨にみまわれても、何層にも被われた葉や枝によって緩和され、地上に達するときには小滴となるので、雨は土壌にゆるやかに吸収され土壌が流失することもない。しかし、樹木が失われて裸地になると、豪雨とともに表土が流されることになり、土地の生産性が著しく低下していくことになる。スウェーデンの研究者グループがタンザニアで行った、土壌流失実験によると¹³⁾、原生林の場合は降った雨のうち流失したのはわずか0.4%で、流失土壌は全く認められなかったのに対して、畑地の場合には、雨の26%が、土壌については1 ha 当たり80 tonの流失がみられた。さらに裸地になると雨の50%がそのまま地表を流れ、150 tonもの土壌が失われた。

熱帯林における水の動態についても推定が行われている。アマゾンの熱帯林を対象にSalatiが計算した結果によると¹⁴⁾、降った雨の50%がアマゾンの広大な河

川系に流入し、残りの50%が樹木等から大気中に蒸発散として戻っていく。こうして森林内の湿度は保たれ、蒸発散によって大気中に放出された水は雲となり、再び雨となって降るというように、森林を通じて循環することになる。一方、森林の破壊が水の供給に及ぼす影響についても調査されている。アマゾンの源流地帯のペルーでは、年間2,600 mmもあった雨量が、熱帯林を広範囲に伐採した地域では1,500 mmに減少していた。西アフリカの象牙海岸でも大規模な伐採跡地の雨量が年間300 mm減少したことが報告されている。すなわち、森林から大気への水の再循環が少なくなるために、降雨量そのものが減少するのである。

熱帯林の消滅によって進行する危機は、気象変動ばかりではない。もう一つ、種の絶滅があげられる。地球上の生物は存在が明らかになっているものだけで、130~160万種、未知の物を含めれば500~1,000万種といわれている(表4)^{15),16)}。そのうちの少なくとも50%の生物は熱帯林に生息していると推定されており、熱帯林は言わば多種多様な生物の宝庫といえる。

最近の遺伝子工学の発達に伴って、早い成長、病気への抵抗性、有用な化学物質の生産、環境への適応といった生物の持つ遺伝情報そのものが、資源として注目されるようになり、熱帯林の保有する莫大な未知の種が、重要な資源として見直されるようになっている。

しかし、熱帯林に生息する生物の大半は、その地域にしか生息できない固有種であるので、熱帯林の破壊とともに、その種も絶滅しているのが現状である。

7. おわりに

熱帯林がCO₂のシンクかソースかを評価し、将来お

表4 現在地球上に生息している生物種の数

	現在知られている種の数 ($\times 10^3$)	未知の種を含めた全体の種類の予測
昆虫などの節足動物	874	不明
高等植物	248	28万種~40万種、少なくとも10~15%が未知の種
無脊椎動物	117	数百万種
菌類、藻類	74	不明
微生物	37	不明
魚類	19	全体の10%が未知と仮定して、約2万種
鳥類	9	全体の約98%が既に知られている。
爬虫類、両生類	9	爬虫類、両生類、哺乳類を合わせて約95%が既に知られている。
哺乳類	4	爬虫類、両生類、哺乳類を合わせて約95%が既に知られている。
合 計	1,391	約1,000万種

こるべき気候環境の変化を予測するためには、次に述べるようなきわめて困難な問題がある¹⁷⁾。まず、正確な統計の不足があげられる。世界の残存林の多くは開発途上国にあり、しかも森林の破壊は個々の住民によって無計画に行われている場合が多いので、年々どのくらいの面積の森林が破壊されているのかと言ったことは、ほとんど正確に把握されていない。次に、ソースとしての働きを把握するためには、森林破壊の程度とその内容、つまり、伐採作業にともなう破壊の程度、伐採された木材の用途(焼却される時期の問題)、非合法的無秩序な焼畑耕作や牧野造成による伐採量といった入手しにくいデータを得る必要があるということである。さらに、シンクとしての働きを量的に評価するためには、森林の面積を地域別、年齢別に評価したり、地域および森林タイプごとの樹木の成長速度や光合成速度と言った、きめの細かいデータが多量に必要であるが十分なデータが出されていない。

このような困難を伴うために、陸上生態系の植生を中心とした、炭素の循環は未だ完全に解明されていないのが現実である。ここであげたさまざまな数値や推定値も、一応の参考であって、今後多くの研究者によって検討されて行くべきものであることを最後に付け加えておきたい。

引用文献

- 1) Bolin, B.: in 'The Greenhouse Effect, Climatic Change, and Ecosystem', John Wiley & Sons. pp 541, (1986)
- 2) Repetto, R.: Deforestation in the tropics, Scientific American, 262 (4), 18-24, (1990)
- 3) 村上公久: 熱帯・亜熱帯林の消失, 森林総合研究所研究会報告 No.2, 8-13, (1989)
- 4) アメリカ合衆国政府, 逸見謙三・立花一雄監訳: 西暦 2000 年の地球, 家の光協会, 1, pp 435, 2, pp 526, (1981)
- 5) Brown, L.R. *et al.* 松下和夫監訳: 地球白書, ダイヤモンド社, pp 336, (1988)
- 6) 田中正之: 科学, 56 (9), 556-573, (1989)
- 7) Woodwell, G.M. *et al.*: Science, 199, 141-146, (1978)
- 8) 吉良 竜夫: 熱帯林の生態, 人文書院, pp 251, (1983)
- 9) 小川房人: 熱帯の生態 I - 森林 -, 生態学講座 16 巻, 共立出版, pp 98, (1974)
- 10) Oikawa, T.: Bot. Mag. Tokyo, 98, 225-238, (1985)
- 11) Monsi, M. und T. Saeki.: Jap. J. Bot. 14, 22-52, (1953)
- 12) 及川武久: 気象研究ノート, 第 160 号, 121-130, (1987)
- 13) 石 弘之: 地球環境報告, 岩波新書, pp 258, (1988)
- 14) Pearce, F. 平澤正夫ら訳: 地球は復讐する, 草思社, pp 265, (1989)
- 15) Newton 別冊: 地球クライシス, 教育社, pp 241, (1989)
- 16) NHK 取材班: 地球は救えるか 1, 日本放送出版協会, pp 236, (1990)
- 17) 只木良也・吉良竜夫編: ヒトと森林, 共立出版, 310-319, (1982)