

地球環境の変化と生物

学長 田川日出夫

I 地球発熱す (1998. 09. 09)

1 環境とは

環境を論じる場合何の環境かをはっきりさせなければ論点がぼけてしまう。ここでは主体をヒトを含む生物とし、環境系をヒトを含む生物並びにそれらを取り巻いている外囲を環境ということにする。環境には主体が認識している主体的環境と、主体の認識に関係なく物理化学的に把握される実態を客体的環境とがある。主体的環境は生物によって認識され、反応を通して把握することができる。ここでは主体的環境を指すことにしたい。環境は生物を包む容れ物という考え方がある。しかし、環境は容れ物だけではなく、生物にとって資源でもある。光、水、空気、温度などは全て生物にとって資源となる。

光は植物の光合成のエネルギー源となり、動物が物を見るメディアであり、エネルギーともなる。高エネルギー電磁波*である紫外線やX線はエネルギー量が高くて生体では受け止められない。電波などはエネルギー量が小さくて、アンプを使わなければ利用できない。可視光線が生物にとって最も利用しやすい電磁波である。

*電磁波：周期的に変化する電場や磁場が、互いに影響しあいながら空間を伝わる現象で、ガンマ線、X線、紫外線 (UV)、可視光線 (VL)、赤外線 (IR)、電波などがある。電磁波のエネルギー量はアインシュタインの式で表される。 $E = h\nu = hc/\lambda$ 。E、h、 ν 、C、 λ はそれぞれエネルギー、プランクの定数、電磁波の振動数、光の速度、波長を表す。

生物のからだは多くの酵素によって化学反応が進んでいる。化学反応が進むためには、活性化エネルギーとしての温度が必要で、これは体温や気温から得ている。酵素が働くには酵素独特の温度特性があり、その範囲を超えると体の機能が低下し、変温動物では冬眠や夏眠をすることになる。

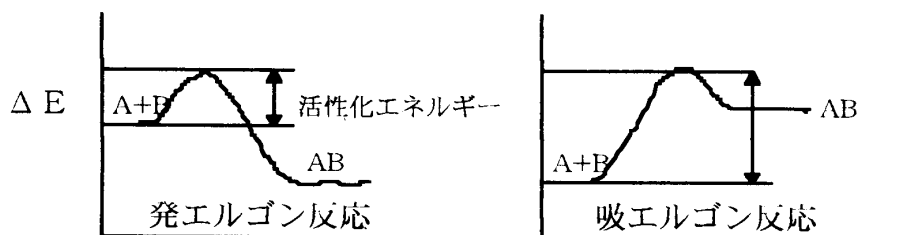


図1 化学反応の2型

水は生物の体の相当量を占めているが、それは体内で進む化学反応のほとんどが水溶液の状態でなければ進まないからである。したがって、水分があるところには必ず生物が存在することになる。地球以外の惑星で水分があることが証明されたら、生物が存在する可能性が高まる。生物は水分を排出することによって、体温の上昇を防いでいる。汗腺を持たない獣類は口をあけて呼吸し、水分の気化の潜熱を利用して体温を下げています。

空気は窒素80%、酸素20%、二酸化炭素350ppmから成り立っており、酸素は体内の有機物と結合して、酸化エネルギーを発生する酸素呼吸の資源となる。酸素を呼吸の材料として必要としない無酸素呼吸をするバクテリアもいるが、量的には問題にならない。二酸化炭素の濃度が低すぎると人類は生きていけない。過呼吸症の患者は血中の二酸化炭素の濃度が低くなって失神することがある。また、濃度が高くなると、麻酔効果を持っている。八甲田山で演習中の自衛隊員が死亡したのは二酸化炭素ガスが溜まっている噴気孔に入ったのが原因である。緑色植物は二酸化炭素を有機物合成の炭素源にしている。地球上の植物は光合成*によって、数年間で大気中の二酸化炭素を有機物に変える力を持って

* 光合成と酸素呼吸 緑色植物は太陽の光エネルギーを利用して、空気中の二酸化炭素を吸収して有機物に変え、酸素を排出する。この働きが光合成である。一方、合成された有機物は植物の呼吸によって分解されてできた炭素は、空気中の酸素と結合して二酸化炭素となり体外に排出されるが、その際にエネルギーを発生する。

二酸化炭素+水+光エネルギー → (光合成) → 有機物+酸素

二酸化炭素+水+化学のエネルギー ← (呼吸) ← 有機物+酸素

いるが、その大部分は動物、植物、バクテリアの呼吸によって再び二酸化炭素に戻される。地球規模で二酸化炭素が増えると、二酸化炭素が地球から反射する長波（熱線）のエネルギーを吸収して地球大気圏の温度が上昇し、地球の温暖化が進む。

2 地球温暖化現象

人類が自然生態系の一員であった間は環境問題はそれ程大きな問題にはならなかったであろう。草原の植物、ネズミやゾウなどの小型や大型の草食動物、これらを捕食する肉食動物は、一つの食物連鎖を造っていて、特定の生物だけが増えすぎることはない。このような自然の摂理が働いている自然生態系では、何らかの理由で一時的に破壊された森林や草原は再び回復する。

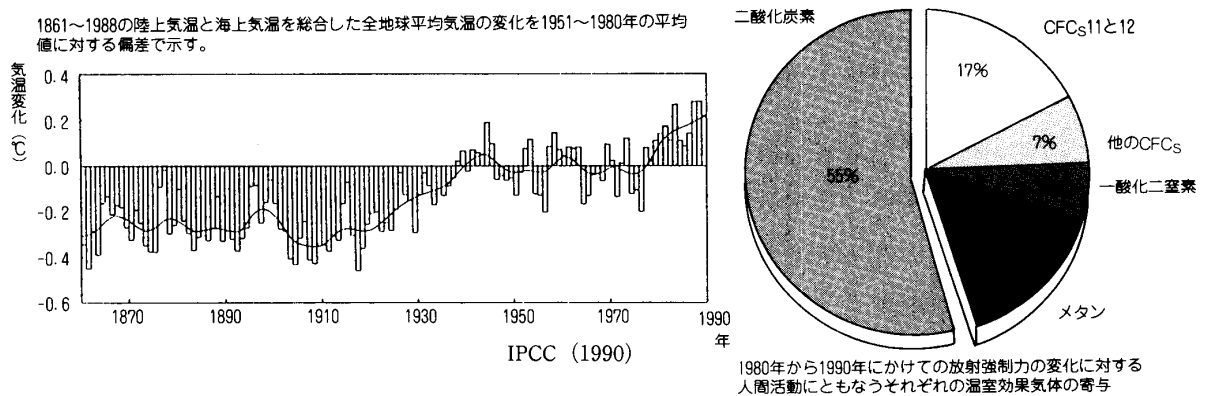
人類は自然との間に文化という衣を着て対応するようになった。最初は厳しい自然環境を克服するための物や知恵であったが、やがて発達してくる経済という仕組みの中で文化が自然環境とは完全に独立して存在し始め、より快適性、利便性、収益性を追求するようになり、自然環境を変化させ始めた。地球規模の変化を起こすようになるまでは多少の変化があっても許容範囲にあったが、現在は許容範囲の限界を超えつつある。地球環境のコントロールに失敗すると、宇宙船内の環境と同様に人類だけでなく、地球上の生物は存続の危機に立たされることになる。

人類は文化を維持するために多様な「物」を生産してきた。生産するためのエネルギーは薪や水から石炭、石油、原子力へと変化し、空気を汚染するとともに、二酸化炭素濃度を高め地球の温暖化を招き、同時に放射性物質の廃棄物処理という難題に直面している。空気の汚染は二次的にオゾン層の破壊を招き、高エネルギー電磁波、例えば紫外線の地上への到達を招いている。これは古生代にオゾン層ができて、生物が水中の生活から陸上へ

生活圏を移した方向とは全く逆の方向で、このままいくと地上生活をする生物は水中生活に戻らなければならないが、それは不可能である。

地球に大気圏がないと地球表面は -18°C になるといわれている。実際には大気圏のために平均 15°C に保たれている（昨年は 15.6°C であったという）。宇宙からくる波長の短い放射線は大気圏であまり吸収されずに地球表面に到達して長波長の反射波となり、水蒸気、二酸化炭素、メタンガスなどの温室効果ガスに吸収されて地球を暖めている。温室効果といわれる現象である。

図2 全地球表面気温と温室効果ガスの温暖化に寄与する割合



IPCC（気候変動に関する政府間パネル）では地球温暖化の①科学的評価、②環境的、社会経済学的評価、③対応戦略を検討している。科学的に二酸化炭素濃度が今後どの程度上昇し、それによってどれだけ気温が上昇し、海進がどれだけ進むかを予測するには多くの仮定をしなければ解けない。仮定の仕方によって推定値が異なる。二酸化炭素濃度が現在（350ppm）の2倍になるのは、現在のような二酸化炭素の排出を続け、森林伐採を続ける場合、2050年頃と推定されている（シナリオA）。21世紀初めに再生可能なエネルギーや原子力エネルギーへの移行が済み、温室効果ガスの排出規制が行われ、二酸化炭素濃度を1985年レベルの半分に減らすことができれば、等価二酸化炭素濃度（多くの温室効果ガスの濃度を二酸化炭素ガス濃度に換算した値）は21世紀末に現在の2倍となって安定する

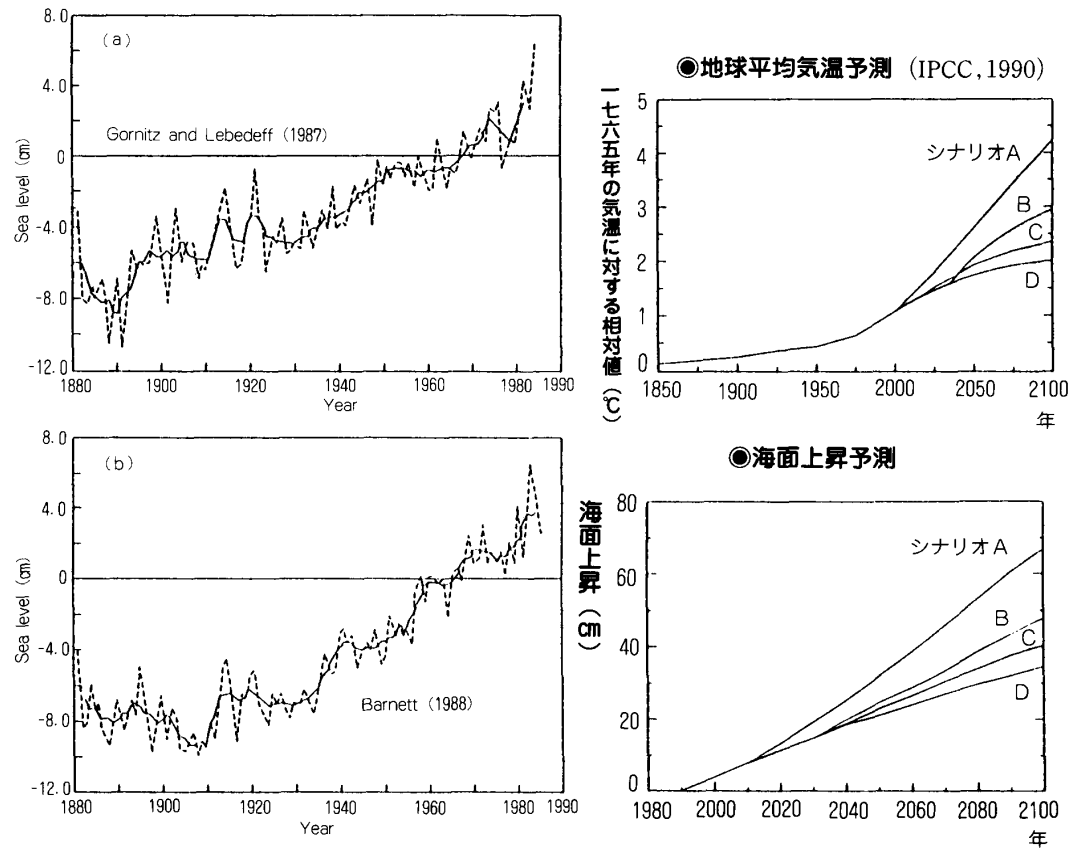
表1 五つの大気循環モデルによる二酸化炭素倍増時の気候変化の予測（地球平均）（Karlら、1989）

モデル	地表面気温上昇	降水量増加率
NOAAの地球流体力学研究所	4.0 ($^{\circ}\text{C}$)	8.7 (%)
NASAのゴダード宇宙研究所	4.2	11.0
米国大気研究センター	3.5	7.1
オレゴン州立大学	2.8	7.8
英国気象局	5.2	15.8

(シナリオD)。気温の上昇は地球全体が平均的に上昇するのではなく、熱帯域はほとんど変化がなく、極地方が大きいと考えられている。従って、極地方の水が解けて海面が上昇する（海進）ことになる。

海進は上掲のA、D両シナリオでも上昇し続けるが、シナリオAでは10年間で約6cm上昇、21世紀末では65cm上昇すると推定されている。シナリオDでは環境悪化に対する対応

図3 1880-1990年の海面上昇実測値と四つのシナリオでの地球平均気温と海面上昇予測



があるので、海面上昇は30cm台に留まる。海面上昇によって浸食される土地は海岸線を持たない岐阜県、長野県、山梨県、群馬県、埼玉県、栃木県を除いて被害を受け、島嶼からなる沖縄県はその影響を最も大きく受ける。

表2 海面上昇による侵食量の予測

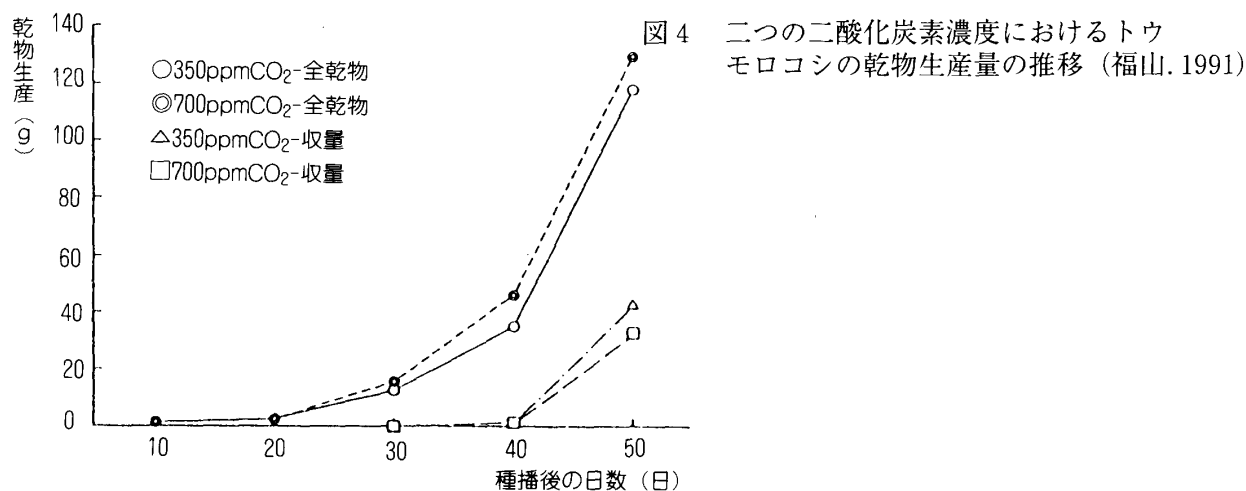
都・県名	海面上昇30cm			海面上昇65cm			海面上昇1m		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
鹿児島県	336	67	68.5	619	1081	89.2	807	1150	94.9
沖縄県	883	831	97.0	1030	1080	99.5	1060	1083	99.8
東京都	27	1052	80.7	54	82	80.7	68	83	100.0

A：水没面積（ha） B：侵食面積（ha） C：侵食率（%）
(環境庁地球環境部，1994)

3 温暖化と農業との関係

これらの地球規模の環境変化による影響はもろに農業を直撃することになる。その主なものは、①気温上昇による影響：水・地温の上昇、蒸発量の増大、水資源の不足、降水量、分布や時間の変動、土壤水分の不足、積雪期間の短縮、土壤有機物の速い分解速度（土壤劣化）、熱帯域からの害虫の移動（マラリアなどの衛生昆虫などを含む）、生物分布の上下限・南北限界の移動（例えば西日本の稲の大部分は温帯型で亜熱帯条件では収量が少なくなる、現在よりも4-4.5℃高い気温に適応する稲の品種がない）、熱中症、熱射病などの高温障害（熱ストレス）の頻発、光化学オキシダントによる障害など。

②二酸化炭素濃度の増加による影響：植物の乾物生産量の増加



③海水面の上昇による影響：海岸域の浸水と土壤流亡、耕作地の減少など

纏めると北日本より西日本が受ける影響が甚大である。標高の高いところに移動すればいいが、山岳地は傾斜地であるため耕作が困難であること、森林を伐採するという温暖化を促進する方向に変化が進む。

地球温暖化に伴って、森林がどうなるかを考えて見たい。水分不足のため雨水貯蔵効果を持つ森林を伐採することは二酸化炭素濃度を減らすためにも避けなければならない。気温が5℃上昇した場合、現在暖かさの指数で144℃月ある鹿児島市は、204℃月になって明かに亜熱帯に入る。そして照葉樹林の上限は屋久島で凡そ800m上昇し、宮の浦岳の頂上付近まで照葉樹林があることになり、夏緑樹林は日本からは北海道や本州の高山を除いてほとんどなくなることになる。年平均気温5℃上昇ということは、それほど大きい影響を持つことを示している。

これまで主として地球温暖化に関して考えて来たが、このほかにも人類がもたらした地球環境の変化については、酸性雨、オゾン層の消失などがある。

Ⅱ 天に唾する人類 (1998. 09. 16)

4 酸性雨

1952年にロンドンのスモッグで硫酸ミストにより4000人の死亡者を出したことから研究

が始まった。二酸化炭素も水に解けるとpH5.6*の弱い酸である炭酸になる。雨滴は空気中の二酸化炭素を吸収して弱い酸性を示すが、これは酸性雨とはいわない。pH5.6よりも

*pH：溶液の酸性度を表わす指数で、7が中性を表し、7より大きい値はアルカリ性の強さを、7より小さい値は酸性の強さを示す。胃液の主成分は塩酸（HCl）でpH1-1.5の強酸性を示し、口から侵入する細菌類などの殺菌の役目を果たしているが、胃潰瘍や胃癌を起こす原因と考えられているピロリ菌は、これを中和する力があるといわれている。

強い酸性を示す場合に酸性雨というが、その主な原因はやはり化石燃料を燃やしたときに生ずる二酸化硫黄（亜硫酸ガスSO₂）や窒素酸化物（NOとNO₂とを指し、NO_xで表わす）などである。二酸化硫黄は火山の火口、硫気孔からも噴出され、九州では全国に比べて圧倒的に多く（表3参照）、国別での発生量をみると（表4参照）、中国が圧倒的に多い。

表3 日本の主要火山からの二酸化硫黄の噴出量推定値

桜島	723x1000t／年	雌阿寒岳	121	三原山	141
阿蘇	135	十勝岳	37	浅間山	49
諏訪之瀬島	115	樽前岳	37		
薩摩硫黄島	73	有珠岳	2		
久重山	7				
霧島	4				
九州	1057	北海道	197	本州	190

出典：藤田・外岡・太田（1992）

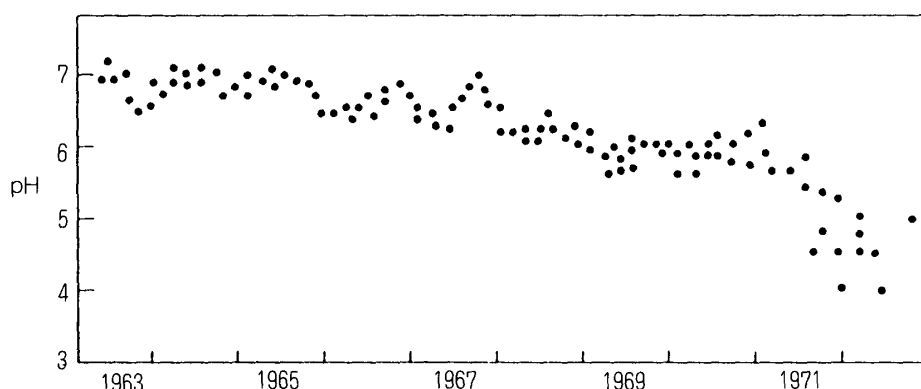
表4 東アジアにおける国別二酸化硫黄と窒素酸化物の排出量

	日本	中国	台湾	韓国	北朝鮮	露細亜	蒙古
SO ₂	989	20951	583	1611	676	247	62
Nox	1602	6722	599	925	0	89	40

出典：環境庁地球環境部（1997）

二酸化硫黄は大気中で無水硫酸（SO₃）となり、水滴に溶けて硫酸（H₂SO₄）になる。二酸化硫黄は直接水に溶けて亜硫酸になり、オゾンや過酸化水素（H₂O₂）によって無水硫酸となる。無水硫酸は雲を作る微細な水滴に溶け込み、大気の流れに伴って移動し、風下で霧となったり雨として落下する。モデルによる分析で分かったことは、冬に中国大陸の高気圧支配下で形成される高濃度汚染物質が冬型の気圧配置に伴う北西気流に乗って日本域に輸送されるパターンが明らかにされている。

図5 熊本市における雨水の酸性度の変化（西、1971）

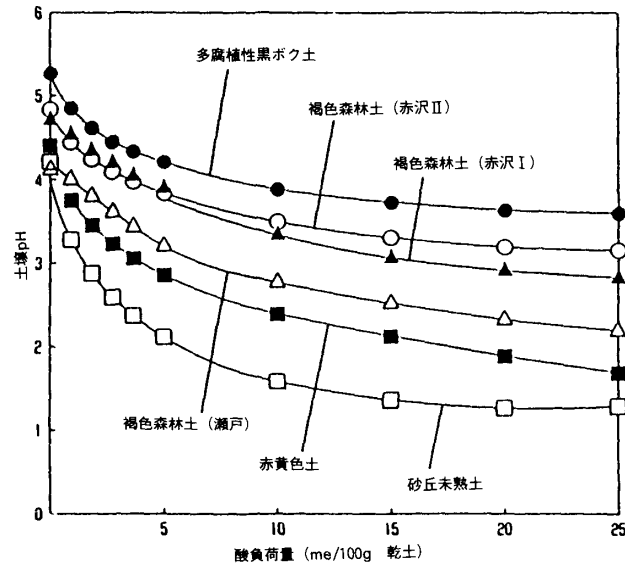


一方、化石燃料の燃焼によって発生する NO_x ガスの主成分は二酸化窒素 NO_2 で、日中は空気中のラジカル OH と結合して硝酸になるが、夜間では別の過程で硝酸が作られる。硝酸は水に溶け易く、移動は二酸化硫黄と同じである。

酸性雨が生態系に与える影響は直接間接を問わず広範に亘っている。

- ① 植生への影響 酸性雨や酸性霧のpHが3.0以下になると植物の葉や芽が枯れたりする障害が起きる。直接植物体への影響ではないが、土壌（通常pHは4-6の範囲）の酸性化による影響の方が大きいとされる。
- ② 土壌への影響 酸性物質が土壌に継続して加わっても、土壌はある程度は酸性を中和する能力を持っている。しかし、酸性物質の降下が続けば中和力は減退し、酸性化が進む。進み方は母岩や土壌中の有機物量によって異なり、図6に示すとおりである。土壌が酸性化すると、水素イオンの直接的害のほかに、カリウム、カルシウム、マグネシウム、リンなどの吸収障害、マンガン、アルミニウム、鉄、銅などの重金属などが溶け易くなるための障害、体内でのリンの不活性化、土壌細菌の不活性化による分解障害と有機酸の蓄積など、作物にとっては重大な変化をもたらすことになる。対策としては石灰で酸性化を防ぐなど、森林の衰退については針葉樹と広葉樹とが混生する森林を造成するなどの工夫が必要である。
- ③ 陸水への影響 湖沼の酸性化が進み、氷河が残した氷堆石でできた湖沼から生物がいなくなったという報告が相次いでいる。河川が流入する湖沼では流域から運ばれ、溶解している炭酸化合物や底に堆積しているシルトのため酸性を中和する緩衝作用がある。北欧の湖沼ではこの緩衝能力が小さく、酸性化が進んでいるため、石灰などの散布で中和を行っている。淡水と海水とを回遊する魚類は、陸封種に比べて半数致死濃度（ LC_{50} ）が低い。酸性化は魚類だけでなく、その餌となる微生物に対しても影響を与え、フロラやファウナを変えてしまうことが最も大きい変化である。一方海水は弱アルカリ性を示し、中和能力が高いため、酸性雨による影響は陸水ほど深刻ではない。
- ④ 文化財や家屋への影響 大理石でできた石像や神社仏閣など、金属、塗料などは酸性物質やオキシダントに弱く、徐々に分解され、溶解されてその価値を失ってしまう。また、

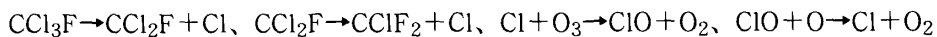
図6 各種土壌における酸負荷量と土壌酸性度の変化との関係 (戸塚、1990)



コンクリートは石灰石を原料にしているため酸には弱く、家屋、橋梁などに影響がでる。桜島の降灰を受ける鹿児島市周辺では、鉄製の屋根、フェンスの寿命は他の都市に比べると極めて短い。

5 オゾン層の消失と紫外線入射量の増大

フロンによるオゾン層の破壊は1974年に指摘され、1985年に南極のオゾンホールが発見、1987年にはその原因についての論争が決着した。オゾン層を破壊する原因となるフロンは特定フロンと呼ばれ、フロン-11 (CCl_3F)、フロン-12 (CCl_2F_2)、フロン-113 ($\text{CCl}_2\text{FCClF}_2$) が主なものである。排出された特定フロンは対流圏から成層圏へと移り、極地では短波長の紫外線により分解され、塩素を発生する。塩素はオゾンと結合して酸素ガスを発生、オゾンが減少する。



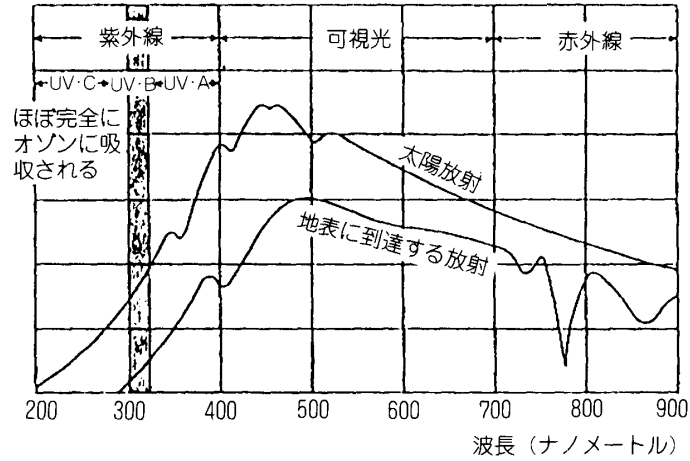
極地以外の成層圏では塩素はオゾンと反応する以外に、オゾンとは反応しない塩化水素や硝酸塩素 (CClONO_2) などの塩素貯留物質を作るためオゾンの分解は緩やかであるが、極地の成層圏ではその低温のため、活性塩素を生産し、それが春先の日光でオゾン層を破壊すると考えられている。オゾン層破壊の原因物質の排出を今停止しても、完全にオゾン層が修復されるのは50年以上後の二十一世紀後半になると予想されている。

オゾン層が破壊されると、高いエネルギーを持った紫外線その他の電磁波が地表面に到達し、生態系に大きな影響を与える。紫外線はオゾン層に吸収される波長が280-315nm (nmは 10^{-9}m , UV-B) と315-400nm (UV-A) とに分けられる。UV-Bの到達量はオゾンの濃度だけでなく、日射量、緯度、季節、天候によっても左右される。UV-AはUV-Bほど生物に大きな影響を与えない。

赤外線 (IR) はエネルギー量が小さいため目では感知できず、皮膚で温度として感知するだけである。可視光線 (VL) は光エネルギーを網膜で電気エネルギーに変え、脳で映

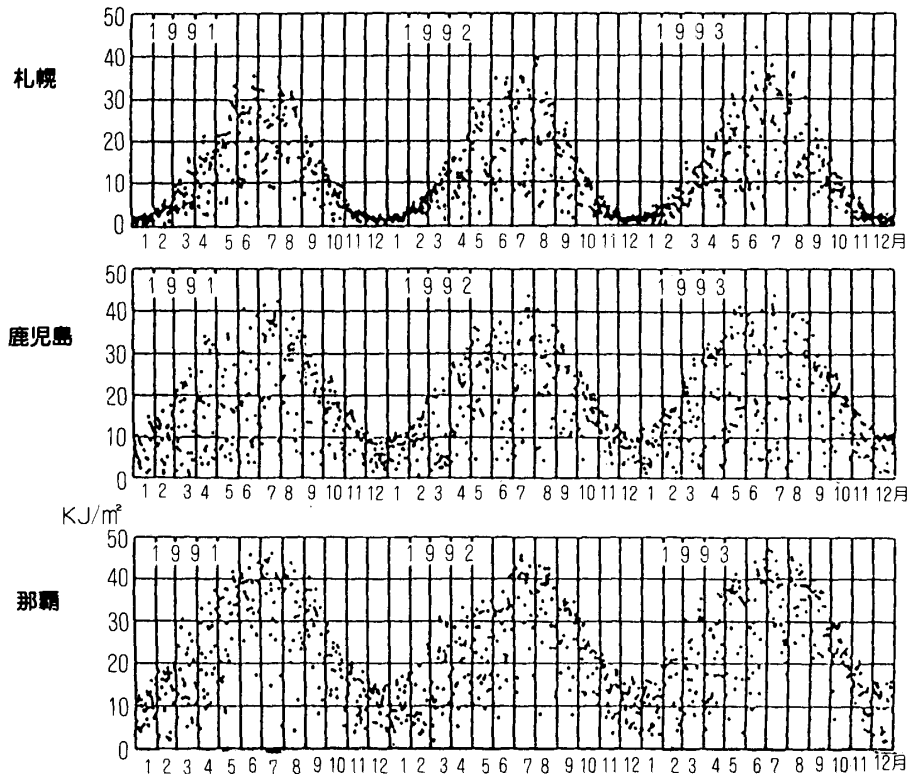
像化することができる。UV-BやUV-Cはエネルギー量が高く、細胞ではそのエネルギーを生理的に変換できず、細胞を透過する際に細胞の微細構造が破壊される。更にエネルギー量の高いX線は生物の体を通してしまう。海水中で発生した植物の光合成でできた酸素

図7 太陽光の地球への入射量 (UNEP, 1987)



が、やがてオゾン層を作り、紫外線の入射が少なくなって始めて、生物の陸上への進出が始まったと考えられている。UV-Bの日本各地での入射量は赤道に近づくほど高くなる。夏が高く冬が低い、夏の高さにばらつきがあるのは雨天、曇天が影響している。紫外線は水によって吸収されるので、雲はその吸収剤としての役割を果たしている。

図8 札幌、鹿児島、那覇のUV-Bの日積算値 (環境庁地球環境部, 1995)



UV-Bの生態系への影響はその高いエネルギーが生物の外皮細胞まで透過し、遺伝子などの高分子化合物を破壊または変化させることにある。したがって、表皮、眼に異常を起こす確率が高い。遺伝子をつくるDNAは260nmの紫外線を最も良く吸収し、320nmまで吸収するので、紫外線の影響を受けやすい。日焼け、皮膚癌（基底細胞癌、扁平上皮癌、黒色腫）、白内障、網膜剥離などのほか、抗原情報をT細胞に伝える表皮のランゲルハンス細胞が破壊され、免疫機能が低下し、紫外線によってウイルス（ヘルペスウイルス、皮膚に乳頭腫を起こすヒトパピローマウイルス、エイズウイルス）が活性化することも報告されている。

植物の紫外線特にUV-Bに対する感受性は単子葉植物よりも双子葉植物の方が高い。したがって麦、稲、トウモロコシなどの穀物より野菜や果菜類が弱い。遺伝子が障害を受けると突然変異が起きたり、光合成で光エネルギーを化学エネルギーに変換する電子伝達系や、二酸化炭素を固定する過程が障害を受けて、成長障害がおき枯れることになる。C₄植物（ジカルボン酸回路を持つ植物で低緯度に多い、サトウキビ、トウモロコシ、アワ）はC₃植物（還元型ペントース回路を持つ植物で高緯度に多い、ムギ、イネ等多くの作物）より紫外線に抵抗力を持つ傾向がある。しかし逆の例証も挙げられており、今後の研究に待たなければならない。

植物は紫外線に対して防御機構をもっている。表皮細胞に多く含まれている色素であるフラボノイドは紫外線を吸収し、体内部を紫外線から保護している。冬に杉や桧の葉が赤くなるのは、湿度が低下し、紫外線照射量が多くなるため、赤い色素を生産して、葉を保護するためである。

人類でも黒人は表皮細胞に紫外線を吸収する黒色色素メラニンが散布し、色素が一箇所に凝集して分布する白人より紫外線耐性を持っている。黄色人種はメラニンの分布が両者の中間である。目の角膜にはメラニンは含まれていない。

6 環境ホルモン（内分泌攪乱化学物質）

最近、日本近海の浅海水域で、雄の陰茎が退化し、中性または雌化している巻貝類が知られ、アメリカではワニ類でも同様の現象が知られている。その原因として指摘されている物質は二ブチルスズ、三ブチルスズ、DDTである。ブチルスズは海中の付着生物が船底や魚網などに付かないように塗料に混ぜてある物質である。DDTは昆虫の防除剤として開発されたものであるが、米国南部の湖水に蚊が発生することを防ぐために多量に用いたことが原因であるとされている。

最近男性の精子の数が少なくなっている現象が報告されている。この原因ははっきり究明されていないが、性ホルモンの分泌異常だけでなく、ストレスなども関係しているといわれている。生物のホルモンに似た働きをする物質（内分泌攪乱化学物質）には、日常用いられているプラスチック類の軟化剤も入るといわれている。多くの人工物質を調べると、更に多くの物質のホルモン類似の作用を明らかにできるかもしれない。現在のところ、環

境ホルモンに関する研究は始まったばかりで、真相はまだはっきりしないが、真相が明らかになるまで放っておいてよいという訳にはいかない。問題は人類や生物の存続に関わる、つまり生物の将来を規定する課題であるからである。慢性毒作用を持つ物質の性質が明らかにされないままに、利便性だけが強調されてきた結果が、今われわれに戻されてきているのである。

酸性雨やオゾン層の破壊は原因となる物質は天然物質ではなく、人工的に合成された物質が原因であるから、これらの物質を排出しないようにすれば、解決される問題である。生態系の論理では自然物質から作り出した物質は、生態系の生物の力で、元に戻すことを行って、地球環境を維持するような機能をもっている。人類は多くの人類に不適な環境の下で生活するために文化を育ててきたが、生態系を維持するためというよりは、その文化を維持するために多くのものを作り出し、その結末は自らに返ってくることを予測できながら、後始末をしないで放置してきた。生物の体の中でこのようないろいろな生理活性を持つ安定性のある有機物は、残留性有機汚染物質（persistent organic pollutants：略してPOPsポップス）と呼ばれ、国連環境計画（UNEP）では強い排出規制を打ち出す予定である。今後は、非天然性物質を素材とした物を作るときには、どのようにして回収し、リサイクルし、分解して元の素材または分解の終局物質（二酸化炭素など）にするかを考えて作る必要がある。農薬などは散布後、自然界で自然物質に変化する方向の化合物が考えられつつある。利便性だけでもの作りをすれば、人類はその排出したゴミの蓄積で亡びることになる。

しかし、地球温暖化の問題はその原因となる物質が天然物質である二酸化炭素を主とする気体であることが、問題の解決を困難にしている原因である。ではどうやって温暖化を防ぐかについて考えて見たい。

Ⅲ 新しいシステム作り（1998. 09. 24）

7 地球温暖化をどうやって防ぐか

温暖化の原因となる温室効果ガス（二酸化炭素、メタンなどの天然性ガス、フロンなどの合成ガス）の排出を減らすことと、排出された温室効果ガスを減らすことにつきる。そのためには、排出源をなくし、排出量を制限またはゼロにすること、排出した二酸化炭素ガスを別の形に変化させなければならない。生物が生産した有機化合物の自然分解、動植物の呼吸による二酸化炭素の排出は止められない。火力発電、自動車、諸工業、日常生活などで排出される二酸化炭素を排出しない別の方法のものに置き換えることはかなり難しいことであるが、実行しなければ人類の未来はない。日常生活で二酸化炭素の排出を減らすには、燃やさないこと、腐らせないこと、木材はリサイクルして長い期間人間界に留め置くこと、つまり物を大事に使うことに尽きる。この方法はつい先ごろ、終戦後までは日本人が誰でも行っていた生活様式であったのである。例えば、家を建て変える場合、瓦、

煉瓦、太い柱、金具、畳、ガラスなどは全部再利用していた。今はブルで壊して、全部が粗大ごみになっている。物を大事にという躰は、環境教育の躰でもある。

排出した二酸化炭素を減らすには、工業的方法と森林など植生の光合成により酸素に置換する生物的方法とがある。前者の方法ではエネルギーが必要であり、そのためには化石燃料を燃やさなければならないので、ジレンマに陥る。後者の場合はエネルギー源は太陽であり、その副産物は生物にとってなくてはならない酸素である。

植生の中で光合成速度が最も高いのは熱帯多雨林である。その理由は、70mに達する森林が多くの葉層からなり、光エネルギーを効率良く吸収していること、冬の低温季や乾燥季がないからであると説明されている（表5 参照）。

表5 いろいろな生態系における生産量と現存量（Whittaker and Likens, 1975）

生 態 系	面 積 (10^6 km^2)	生 産 者						消 費 者		
		純生産量 (乾量)			現存量 (乾量)			被食量 (10^6 ty^{-1})	生産量 (10^6 ty^{-1})	現存量 (10^6 t)
		平均値 ($\text{t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$)	総量 (10^9 ty^{-1})	比 (%)	平均値 (t ha^{-1})	総量 (10^9 t)	比 (%)			
熱 帯	17.0	22	37.4	31.8	450	765	41.6	2600	260	330
温 帯	7.5	16	12.0	10.2	350	260	14.2	720	72	90
亜寒帯	5.0	13	6.5	5.5	350	175	9.5	260	26	50
寒 帯	7.0	12	8.4	7.1	300	210	11.4	420	42	110
森林	12.0	8	9.6	8.2	200	240	13.1	380	38	57
開 林	8.5	7	6.0	5.1	60	50	2.7	300	30	40
ササ	15.0	9	13.5	11.5	40	60	3.3	2000	300	220
テ	9.0	6	5.4	4.6	16	14	0.8	540	80	60
ツンドラ	8.0	1.4	1.1	0.9	6	5	0.3	33	3	3.5
高山草原	18.0	0.9	1.6	1.4	7	13	0.7	48	7	8
砂漠	24.0	0.03	0.07	0.1	0.2	0.5	0.0	0.2	0.02	0.02
無植生に近い砂漠、氷雪地	14.0	6.5	9.1	7.7	10	14	0.8	90	9	6
耕地	2.0	30	6.0	5.1	150	30	1.6	320	32	20
湿地	2.0	4	0.8	0.7	0.2	0.05	0.0	100	10	10
河 川										
陸 地 計	149	7.82	117.5	99.9	122	1837	100.0	7810	909	1005
海 域	332.0	1.25	41.5	75.5	0.03	1.0	25.6	16600	2500	800
昇 流	0.4	5	0.2	0.4	0.2	0.008	0.2	70	11	4
大洋	26.6	3.6	9.6	17.5	0.01	0.27	6.9	3000	430	160
藻 群	0.6	25	1.6	2.9	20	1.2	30.8	240	36	12
河口	1.4	15	2.1	3.8	10	1.4	35.9	320	48	21
水 域 計	361	1.55	55.0	100.1	0.1	3.9	99.4	20230	3025	997
総 計	510	3.36	172.5		36	1841		28040	3934	2002

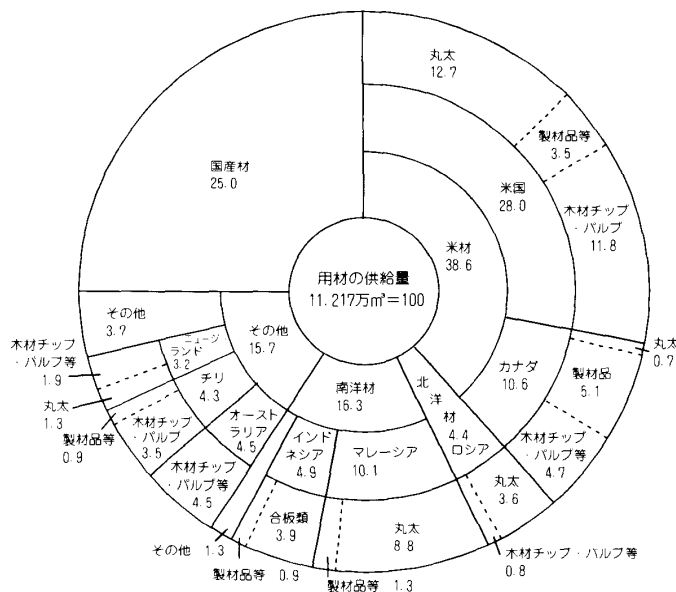
現在の森林面積だけでは、産業革命前後の大気圏の二酸化炭素濃度と釣合がとれているだけであり、地中より取り出した石炭、石油、天然ガスを燃やして出た二酸化炭素の濃度を減らすことにはならない。裸地は凡そ1000年かけて自然林に変化して行くが、その際に二酸化炭素を吸収して樹木が成長していく。樹木は二酸化炭素の塊であるが、寿命が来ると分解され元の二酸化炭素に戻る。つまり今の森林があるだけでは長い時間単位で見ると二酸化炭素濃度は±0となって減らすことにはならないが、森林の面積を増やせば、その面積の森林に蓄えられた有機物量として二酸化炭素を蓄積することができる。森林が極相になればそれ以上の蓄積は増えない。

最近、鹿児島ではハイビスカスの一種であるケナフを栽培すれば、温暖化を防ぐ一助になるのではといわれ、多くの方が栽培しているが、繊維として人間界に残っている間は微量ながら二酸化炭素を増やさない貢献をしているが、その期間は極めてわずかで、ほとんどの部分は繊維を採ったあとは分解されて二酸化炭素となるので、地球的な規模から見れば効果はない。繊維が粗いので、古くはジュート（ツナソから得られる繊維で麻袋を作り、

若芽や葉はモロヘイヤと呼ばれ食料になる)の代用品として使われていたものである。工業的に処理しようとするれば、繊維をとるためにはエネルギーが必要で、そのエネルギーは電気、即ち化石燃料である。今ケナフを植えてあるところは、ケナフを植える前は他の植物が生育していたのであり、その植物も二酸化炭素を吸収していたのである。ケナフを植える面積に他の植物を育てたり、自生していても効果は同じである。

戦後、広葉樹をパルプ生産の原料とする方法が開発され、熱帯多雨林の伐採が始まった。中米ではあと20年で熱帯多雨林が消失すると予測されている。アマゾナスの森林も家畜の飼料を得るための草原化が進み、林道が魚の骨のように幹線道路から横に広がっている。東南アジアの熱帯多雨林は用材、パルプ原料として伐採され、主に日本に輸出されている(図9参照)。先進諸国では建築用材は既に人工的に植えられた人工林から得られるが、東南アジアから輸入されるラワン(フタバガキ科のショレア属の樹木の総称)やトウ(ヤシ科の蔓植物の総称)は自然林からの産物である。熱帯多雨林や世界の森林が二十世紀初頭の状態が残っていれば、二酸化炭素濃度の上昇はそれ程問題にはならなかったと思われる。光合成速度は二酸化炭素濃度の増加につれてある程度上昇することが知られているからである。表5によると熱帯林の有機物現存量は陸地総量の55.8%,つまり二酸化炭素貯蔵量の半分以上を占め、影響が大きいことを示している。

図9 わが国における木材供給状況



(平成4年度林業白書より)
丸太以外については、丸太材積に換算したものである。
合計と内訳の計が一致しないのは、四捨五入による。

熱帯多雨林の伐採は、二十世紀になるまではほとんど行われていなかった。また、熱帯多雨林はそのほとんどが沖積平野にあり、斜面崩壊などの大規模破壊がなかったためと、台風や強い季節風もないため種子や果実を遠隔地にまで散布する戦略を採るよりも、その場で落下発芽成長をする方向に進化した。そのため種子は暗い林床でも発芽成長できるように、親植物からの遺産である種子を大きく、重たくする戦略を採ったために、森林が大規模に破壊された場合、その修復は極めて困難である。ボルネオ島の固有植物であるボルネオテツボクはクスノキ科の

植物で、材が水に強いいため水上家屋の基礎部分や屋根葺きの材料に需要が高い。高いところから落下するその種子の直撃を頭に受けると、まず命はない。このような植物は母樹が近くにない限り遠隔地から侵入することは困難である。したがって温帯のように放置して完全に元の森林に回復を期待することはできない。手を入れることが必要となる。

人為的に植林する方法はこれまで日本で大々的に行ってきた方法である。広い面積で伐

採された森林を早急に森林化するには人工造林しかない。先進国では造林樹種が自然林から選抜され（日本では、クロマツ、アカマツ、カラムツ、トウヒ、トドマツ、エゾマツ、スギ、ヒノキ、アスナロ、ハンノキ、ドロノキなど枚挙に暇がないほど多様な種をもっている）、品種改良が進んでいるが、熱帯多雨林域では植林が始まったのは最近のことである。現在早生樹種として注目されているのはネムノキ（*Paraserianthes falcatalia*）やアカシア（*Acacia mangium* いずれも日本の種とは異なる）などのマメ科植物である。これらの早生樹種を植えても、その後に元の森林を構成していた樹種が侵入して回復過程を辿るかどうかわからないが、回復の速さは伐採された面積に依存する。温帯の樹種は萌芽力が高く、伐採しても残った根系から新芽が出て回復が行われるが、熱帯多雨林では萌芽力を持った種はボルネオテツボクなどわずかな樹種に限られる。

8 熱帯林の修復

破壊された熱帯林を修復するにはどのような方法があるか。それには①自然更新にまかせる、②人為的に植林する、③早生樹種を植えて自然更新を促進する、の三つの方法がある。

自然更新は植生の遷移に任せて自然林の回復を待つ方法で、日本では里山で伝統的に行われてきた方法である。表6から暖温帯林では母樹のないところにも多くの種子が運ばれてきていることがわかる。その大部分は鳥によるもので、風によるものは多くないが、冷温帯や亜寒帯の森林では風散布種子が多くなり、地域の気候や動物をうまく利用していることがわかる。

表6 水俣国際生物学事業計画地及び霧島栗野岳遺伝子源保存地域における
落下種子或いは実生と母樹との関係（Tagawa, 1979）

調査地域	母樹を持つ落下種子*	母樹を持たない落下種子*
水俣 アカガシ林	32.2%	67.8%
コジイ林	31.1	68.9
栗野 タブノキ-イスノキ-モミ林	65.4	34.6

*栗野では落下種子を実生に読み替える。

人工林はほとんどが経済林として活用されていて、これを自然林に戻すことはあまり行われていないが、日本ではマツ類の人工林がマツノザイセンチュウの被害を受け全部が枯れた後、山林従事者が少ないこともあり放置されているので、自然に自然林に復帰する過程にある。しかし、熱帯では早生樹種を植えた森林を放置しても既に述べたように種子の侵入が困難なため早急には回復しないだろうという見方がほとんどである。そこで人による種子の散布や実生の植樹による促進が必要となる。

表7 土壌有機物分解率 μ と分解時間 T_0 . μC は有機態炭素、 μN は有機態窒素を基にした値

森 林 型	μC (y^{-1})	μN (y^{-1})	T_0 (年)	年平均 気 温 ($^{\circ}C$)
Dipterocarpus サバナ林 (タイ)	0.20	0.09	5.0	—
混 生 サ バ ナ 林 (タイ)	0.22	0.10	4.5	—
常 緑 河 畔 林 (タイ)	1.05	0.41	0.95	25.5
照 葉 樹 林 (タイ)	0.08	0.03	12.5	19.5
ト ド マ ツ 林 (北海道)	0.041	—	24.4	4.0
ヨーロッパアカマツ林 (英国)	0.025	—	40.0	9~10
ヨーロッパパナナ林 (英国)	0.024	—	41.7	
スズメガヤ草原 (タイ)	0.12	0.04	8.3	—
メカルカヤ草原 (タイ)	0.13	0.05	7.7	—
ダン チ ク 群 落 (タイ)	1.93	0.36	0.5	—

出典: Ogawa et al., 1961

熱帯林の修復が困難な事情は土壌にもある。熱帯の高温と高湿度の下で、土壌の風化が進み、赤色のラテライトとなっており、その主な成分は酸化鉄、酸化アルミニウム、無水珪酸からなり、植物の成長に必要な塩類や磷酸が少なく、痩せた土壌である。土壌中や林床に堆積した有機物は、熱帯多雨気候の下で短い時間で分解されてしまう(表7)。更に重要なことは、伐採されて裸地になると、多雨による土壌侵食が激しくなり、一気に土壌の劣化が進む(図8)。したがって、伐採直後に植樹を行うことが望ましい。

図10 土壌表層の侵食率の比較 (Shimokawa, 1988)

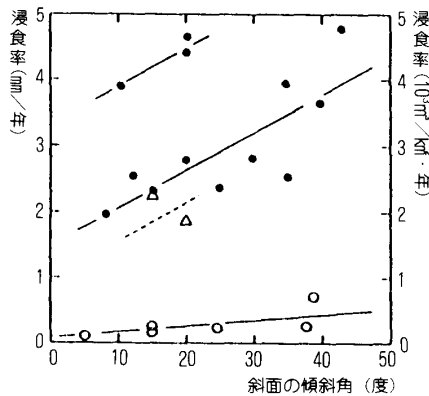
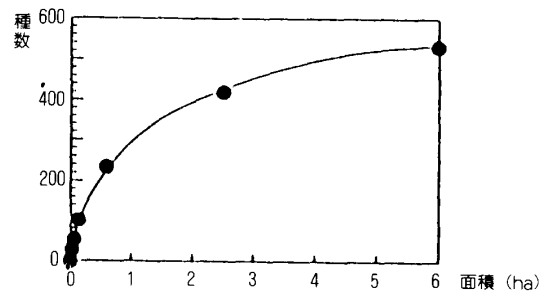


図11 丘陵フタバガキ林の種数一面積曲線 (Niiyama et al., in press)



熱帯多雨林は種の多様性が最も高い森林である。しかも、東南アジア島嶼部は島であるだけに多くの固有種を育んでいる。このような多様な、多くの固有種を持つ熱帯多雨林を人為で修復するのは困難であり、可能だとしても相当に長い時間を要する。植林技術はこれまで単一の樹種を植栽する方向で発達してきたので、多くの樹種を植えるノウハウや、樹種の組み合わせについてはほとんど知識がない。

パプアニューギニアではネッタイスギ (*Araucaria*) の広面積に互る一斉植林が日本の企業で行われている。多くの種が共存し、たとえ害虫被害が発生しても、天敵集団の働きで時間の経過とともに被害は収まり、特定の種の絶滅が回避されるのが自然生態系の論理である。大隅の照葉樹林にカシノナガキクイムシの被害が大発生しマテバシイやカシ類の樹木で枯れるものが出たが、対策を講じる前に被害は目立たなくなっている。一方、モノカルチャである吹上海岸のクロマツ林は長期に互る営林署の防除事業にもかかわらず惨たる状況になっている。

害虫集団も多様性が高く、樹木1種について数十種の害虫集団がいる熱帯で、単一樹種の植樹が、果たして日本のマツで起きた全滅に近い被害を起こさないか自信が持てない。被害が出たからといって、直ちに全滅を目論む化学的防除法を適用することは、多様性の

世界である熱帯では考えなければならない。熱帯はモノカルチュアが存在できない環境にあるのではないだろうか。

最も望ましい方法は裸地の状態をなくすために早生樹種で早急に地表を覆って土壌の流亡を抑え、腐植の喪失を防ぎながら、徐々に極相種と置き換えていく方法しかない。用材目的の造林でも裸地で放置するよりは、二酸化炭素を減らすことに貢献する。用材がそれぞれの目的に使われ、永久に(?)人間界に留まるとすれば、それは“現代の”石炭や石油に戻すことである。ボルネオの山地にすむダヤク族は、古い時代に中国南部から移住してきた民族であるが、焼畑地にイジュ(ツバキ科)を植え、その萌芽再生を図り、日本の里山のように森林への回復を促進させている。古い時代に広く行われていた焼畑は土壌の瘦悪化を進めるので常畑化する必要がある。

最近自動車の燃料として水素を使うことも考えられている。水素は酸素と結合する際に爆発的な大きなエネルギーを放出するので、これを利用しようというのである。水素ガスを燃料タンクに入れて走り回るのは非常に危険であるから、水素吸収合金に吸収させて、少しずつ水素を放出して空気中の酸素と混合、エンジン内で爆発させて車を走らせるのである。水の電気分解か光分解(現在では実用段階に入っていない)で水素を取り出す。確かにこの方法では二酸化炭素は出ないが、水素と同時に発生する酸素は多分別の用途に使われることになるであろうから、大気中の酸素濃度が変化する可能性があることと、水の電気分解に必要な電力が必要となる。

9 人と自然との共存

人類は文化を維持するために自然を破壊しなければならない動物である。このまま行けば人類絶滅か、少数生き残って再び文化を創造していくかのどちらかである。環境に排出された生理機能物質による精子数の減少は人類への警告でもあろう。全体が生き残るためには現在の資源消耗型、利便追及型、飽食型、後はどうなとキヤーなりたい型の生活を変えていかなければならない。

自然の破壊を最小にするには、自然生態系の生物が主であって人間はそのお客様である自然保護地域;自然生態系を農耕、人工林生態系に変えるが、自然環境を残す人工林、里山、耕作地などの保全利用地域;完全に自然生態系を破壊するが、生態系の構成員はペット(動物だけでなく、庭木や草花または都市公園など)として共存する市街化地域にゾーンを分けて住み分けることが大切である。温暖化防止京都会議では二酸化炭素排出量と森林の吸収量との取り引きも問題になったが、森林面積を増やすことは前二者のゾーンでも重要なことである。

生物学的には人口が更に増えれば絶望的である。ローマクラブによる資源量、エネルギー量、廃棄物量、公害疾病の発生、食糧などから推定した地球が維持できる最大人口は80億人であった。現在は既に56億人に達しており、限界に近づきつつある。生態学の論理によると、生物個体群の数が増えれば増えるほど、環境抵抗(食料不足、疾病の流行、増殖率

の低下など）がはたらき、数が減少することになっているが、人類の場合でもこの論理からはずれることはないであろう。地球温暖化、オゾン層の消失、酸性雨、環境ホルモン、廃棄物の増加やその他の公害病の進行などは、環境抵抗の始まりである。

人口を減らす努力は、中国で実施されている「一人っ子政策」、発展途上国で行われている産児制限などがある。古くはわが国でも姥捨山や子殺しの慣行があった。医学の進歩によって寿命が長くなれば、一人っ子政策が2世代続くと、中国の場合新夫婦はその両親4人とわが子1人、計5人の面倒を見なければならないし、3世代続くと、更に8人の祖父母、計13人を抱えることになるので、社会保障費を負担する世代が年を追って少なくなることもあり、やがては破綻をきたすことになるが、即効的な初期の結果は得られる。

戦争が人口を減らす主な原因となっていたが、世界大戦のような大きな戦争は今後起りそうもない。疫病としてはHIV（エイズウイルス）、ATL（成人T細胞白血病ウイルス）などがあるが、これらのウイルスも人と共存してこそ種（ウイルスは種の段階というよりは、遺伝子群といった方がいいのかも知れないが）の維持が図られるので、人を殺さないで生き延びる方向を辿るであろう。これらの環境抵抗のうち、最もありそうな要因は食料不足であると考えられる。食料の自給率を上げることは大切であるが、数年以上にわたって食料の備蓄をすることは不可能であり、備蓄も根本的な解決にはならない。

現在わが国では少子化が進みつつあり、教育機関は生徒や学生数が少なくなることによって大きな影響を受け始めている。また、緩やかな形で人口を減らすことは望ましいが、一方で近くに人口が爆発的に増えている国（中国の13億人とインドの8億人）があると、人口を減らすことには国力の面から問題がある。だからといって、国を閉じて自分達だけで閉鎖的な桃源郷を作る訳にはいかない。さてどうすればいいのだろうか。

（この文章は、阿久根市公民館で行われた県民マスターコースでの講義の記録である）