HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	授業書「環境科学」：「環境科学」教育の体系化の試み
Author(s)	丸山, 博
Citation	教授学の探究, 9, 1-148
Issue Date	1991-03-22
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/13570
Type	bulletin (article)
File Information	9_p1-148.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

授業書「環境科学」

～「環境科学」教育の体系化の試み

丸山　博
（北海道大学大学院教育学研究科修士課程）

0　問題意識

自然に対する人間の認識には，対象としての自然の認識の他に，人間との関係における自然の認識がある。前者には物理学，化学，生物学，地球科学など従来の自然科学が相当し，後者には環境科学が相当する。したがって，環境科学教育の内容は，自然を人間との関係において科学的に認識できるように再構成したものでなければならない。環境科学教育はこの意味において科学教育の新しい課題である。

1　環境科学の体系化の視点

環境科学の体系化は，自然の階層論を媒介として，環境に関する個別科学を総合化することによって可能になるもの[1]と思われる。環境科学の対象とする自然が人間との関係における自然の認識である以上，環境科学の体系化には人間という高い立場から全自然を位置づけ直すことが必要であり，そのための有効な概念として自然の階層論が考えられるからである。自然の階層論に基づく体系的な環境科学＝「環境科学」を構築するための基本的視点は次のように整理される[2]。

(1)　人間は，自然の歴史的発展過程において，自然の階層構造の最も高次な系列つまり3次系列に位置づけられる。

(2)　3次系列の出現後，3次系列の運動形態は，主系列及び2次系列の運動形態を規定し，自然を社会化したものと考えられる。

(3)　自然の社会化の結果生じた地球規模の自然変動は主系列と2次系列との相互作用が3次系列の介在によって地球化したものとしてとらえられる。

2　「環境科学」の教育内容の構造化の視点

高等学校における環境科学教育の内容としては，前述の「環境科学」の三つの基本的視点に対応して次の三つの領域を設定し，系列間の相互作用という視点を導入して，それらの統一的な理解を目指すものとする。

(1)　自然における人間の位置　　(2)　自然の社会化の過程　　(3)　地球規模の自然変動

(1)では自然の階層構造における人間の位置づけに関する科学的認識の形成をはかる。そのためには，自然の階層論に基づき主系列→2次系列→3次系列という自然の歴史的発展過程における系列の生成を示すとともに，各系列間の相互作用が新たな質を生成するという概念が必要であると思われる。この概念こそ，各系列の特質をより深く理解させ，以後系列間の相互作用を考えるときの基礎にもなるからである。

(2)では地球規模の自然の社会化に関する科学的認識の形成をはかる。そのためには，人間生活圏つまり人間中心の自然の形成に関する時間的かつ空間的な諸形態を具体的に示さなければならない。自然の社会化とは人間生活圏の形成に他ならないからである。

(3)では人間の経済活動による地球規模の自然変動に関する科学的認識の形成をはかる。地球規模の自然変動とは，人間生活圏が地球規模に形成された結果，主系列と2次系列との相互作用が地球的規模で質的・量的に新たな展開を示したもの（これを相互作用の地球化と呼ぶ）と考えられる。だとすれば，熱帯林の破壊，砂漠化・土壌流出，オゾン層の破壊，地球温暖化などの地球環境問題がそれにあたるものと思われる。

このような教育内容に基づく「環境科学」教育の授業書の骨子は次のようになる。

3　授業書「環境科学」の骨子

(1)　自然における人間の位置

①　宇宙がビッグバンによって始まり，その後100億年という長い時間を経て地球が形成され，やがて生物が生まれ，さらに人間が現われるまでには長い時間がかかったという，自然史の過程を理解させる。

②　自然史の過程において，生物が原始大気中に含まれる大量の二酸化炭素を減らして酸素を生成すると，その酸素の増加によって生物の進化が影響を受けるという，生成と地球大気との相互作用を理解させる。

③　自然史の過程において，人間は，道具を使って自然に積極的に働きかけ，自然の食物連鎖の頂点に立つとともに人工的生物世界を形成した結果，脳容積の飛躍的増大を獲得したという，人間と自然との相互作用を理解させる。

(2)　人間生活圏の形成

①　およそ1万年前に人間が農耕・牧畜を始めて以来，広大な森林が農耕地・放牧地に変えられ，その結果，洪水によって海岸線が前進したり，イギリスを代表する風土＝ヒースが形成されたりする例を示し，ローカルな人間生活圏の形成を理解させる。

②　20世紀に入り，工業化，都市化の波が世界各地に訪れると，その結果として生物種の絶滅が急速に進み，生態系が単純化されたことを，自然生態系ではシロナガスクジラやサンゴ，人工生態系では農薬による害虫の大発生によって理解させる。

③　今日では，人工生態系から排出された大気汚染物質や人工化学物質が，大気や水を媒介して自然生態系にまで到達し，そこにおける生物種を絶滅させ，その生態系を単純化していることを酸性雨やＰＣＢなどの動態によって示し，グローバルな人間生活圏の成立を理解させる。

(3)　地球規模の自然変動

熱帯林の破壊の場合は熱帯林と大気・水との相互作用の地球化，砂漠化・土壌流出は土と大気・水との相互作用の地球化，オゾン層の破壊は大気と生物との相互作用の地球化，地球温暖化は大気と海洋及び大気と植物との相互作用の地球化としてとらえ，いずれの場合も，①その原因は何か②人間社会にどんな影響があるのか③そのような影響を避けるためにはどうすればよいのかということを理解させる。こうして人間と自然との相互作用を体系的に把握させ，人間と自然との新しい関係の構築すなわち環境政策に対する科学的な基礎を形成することこそ，「環境科学」教育の目的である。

以上のことを踏まえて，環境科学の重要な概念や視点を質問や問題として授業書を構成する。上記の(1)(2)(3)にはそれぞれ授業書の　I　自然における人間の位置　II　人間生活圏の形成　III　地球規模の自然変動　が対応する。授業書における質問は本論の導入，因果関係の類推あるいは二つないし三つの対立的概念の選択のいずれかの形をとる。一方問題は重要な概念や視点を形成するために必要な一連の問題文の構成要素として位置づける。したがって，質問は，正解を求めるものではなく，むしろ多様な意見に基づき豊かな議論を導き出す前提を作り出すことを目的とするのに対し，問題は討論の時間を保証し，対立点を明確にしながら，正解を示すことを授業運営のなかに位置づけるのである。

授業書「環境科学」

I　自然における人間の位置 —— 4

1　自然の構造 …… 5
2　物質の起源 …… 10
3　生物の誕生 …… 15
4　人類の出現 …… 25

II　人間生活圏の形成 —— 33

1　地表の改変 …… 34
2　生物種の絶滅 …… 41

III　地球規模の自然変動 —— 69

1　熱帯林の破壊 …… 70
2　砂漠化・土壌流出 …… 90
3　オゾン層の破壊 …… 108
4　地球温暖化 …… 130

Ⅰ　自然における人間の位置

私たちは地球上に生きています。その地球は広大な宇宙の中にあります。宇宙は150億年前のビッグバンではじまりました。その後100億年という長い時間をへて，ようやく地球がつくられると，やがて生物が生まれました。人類が現われたのはごく最近のことです。このような自然はどうしてできたのでしょうか。私たち人間はその中でどういう位置にあるのでしょうか。

1　自然の構造 —— 1
1—1　原子より小さいものはあるか …… 1
1—2　宇宙はどこまで大きいか …… 5
1—3　自然をどう見るか …… 9

2　物質の起源 —— 11
2—1　宇宙はビッグバンからはじまった …… 11
2—2　四つの力から多様な物質が生じた …… 15

3　生物の誕生 —— 21
3—1　地球環境が生物を生んだ …… 21
3—2　生物とは何か …… 29
3—3　生物と大気との相互作用 …… 33

4　人類の出現 —— 41
4—1　人類は自然を変えた …… 43
4—2　人類の進化速度はなぜ速い …… 51

1　自然の構造

1—1　原子より小さいものはあるか

自然の中にはいろいろな物質があります。あらゆる物質はすべて原子からできています。では，原子は何からできているのでしょうか。原子より小さい物質はあるのでしょうか。

たとえば水を考えてみましょう。水は水素原子Ｈ２個と酸素原子Ｏ１個が結合した水分子H_2O（図1—1）が無数に集まったものです。水は温度を上げると水蒸気になります。水分子は，０℃以下の低温ではあまり動きませんが，それ以上の高温になると，一つ一つが非常に速い速度で空間を自由にとび回るようになります。この状態が水蒸気（図1—2）です。

水蒸気の温度が高くなるにつれて，水分子の動く速さは増していきます。

1500℃では，さらに速度を増した水分子が互いに衝突し，水分子から一部の原子がはぎとられて，H_2やHOなどの分子がつくられます。3000℃になると，これらの分子は，さらにはげしい衝突をくり返し，すべて水素と酸素の原子にまで分解します（図1—3）。

こうして高温では分子どうしの衝突などにより分子が原子に分解するわけです。

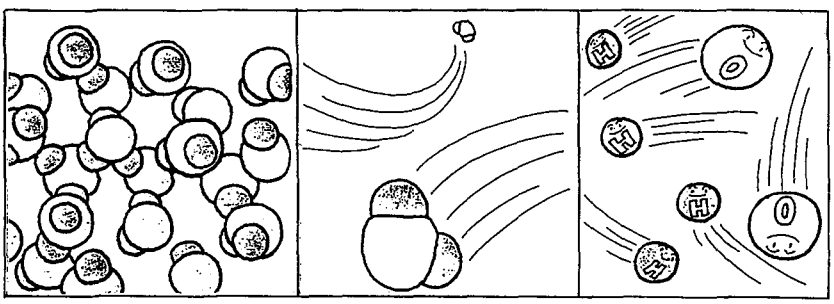


図1—1
水の構造

図1—2
水蒸気の構造

図1—3
水素と酸素の原子になる

（岩波ジュニア科学講座1『すがたを変える物質』，1985，Pp 2-5）

さらに温度を上げると，どんな変化が起こるでしょうか。1000万℃になると，原子さえも分解し，より小さな原子核と電子になります(図1—4)。数百億℃では，原子核は陽子と中性子に分解します(図1—5)。つまり，温度が上がり，物質の運動がはげしくなると，粒子どうしの結合力より粒子をひき離そうとする力が強くなり，物質はさらに小さな物質に分解していくのです。

質問1　これ以上温度を上げると，つぎにどんなことが起こると思いますか。

(1)　これ以上は変わらない。
(2)　すべてなくなる。
(3)　さらに小さい物質に分解する。

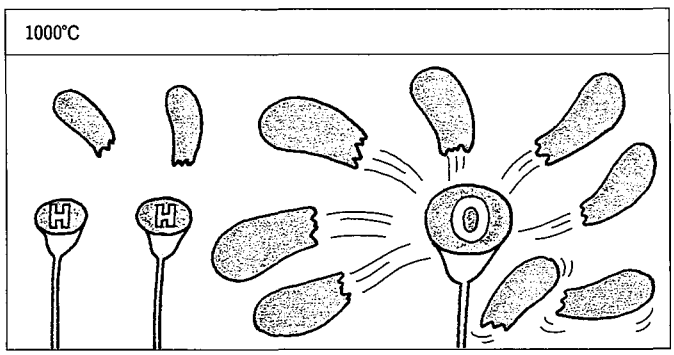


図1—4　水分子1個が原子核と電子に分かれる

（岩波ジュニア科学講座1，前掲書，P7）

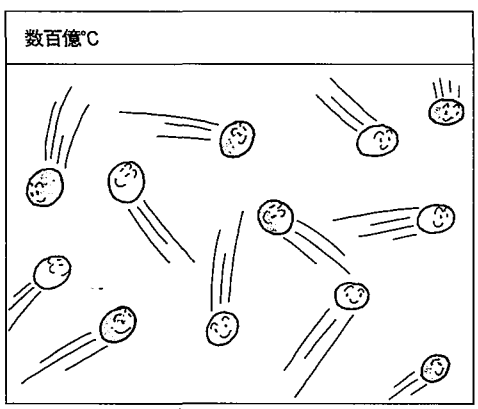


図1—5　すべての原子核は陽子と中性子に分解する

（岩波ジュニア科学講座1，前掲書，P9）

正解は(3)です。およそ2兆3000億℃で現われる物質をクォークとよびます。クォークとは海鳥の鳴声のことです。クォーク，クォーク，クォーク…とつづけていうと，海鳥の鳴声のように聞こえませんか。クォークーこれが現在知られているもっとも小さな物質です。

このように原子より小さなミクロの世界がつづいているのです(図1—6)。では，マクロの世界はどうなっているのでしょうか。

1—2　宇宙はどこまで大きいか

私たちの地球を出発して宇宙旅行にでかけてみましょう。

質問2　地球は太陽を中心として公転する太陽系の惑星の一つです(図1—7)。では，太陽はとまっているのでしょうか。それとも何かのまわりを公転しているのでしょうか。

(1)　公転していない。
(2)　公転している。

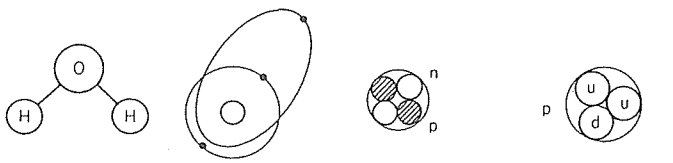


図1—6　ミクロの世界

(都築卓司『自然界の大きさ』，丸善，1988，P 12)

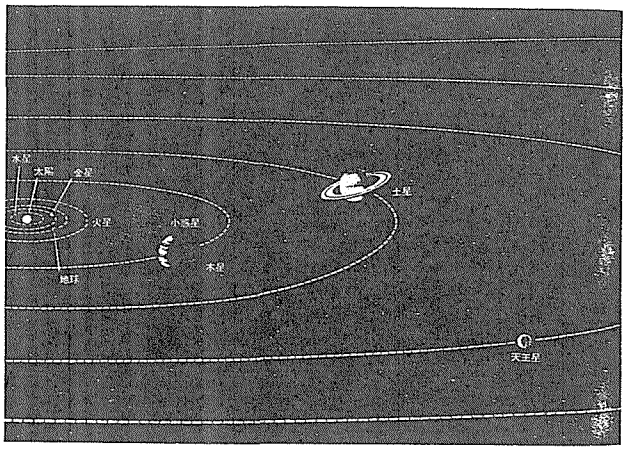


図1—7　太陽系

(ジャストロウ・トンプソン『天文学』，共立出版，1978，Pp 401-402)

(2)が正解です。太陽系は1000億個の星の集団のごく一部にすぎません。この集団を銀河といい，太陽系が属する銀河をとくに銀河系（図1—8）とよびます。太陽は，太陽系の惑星をひきつれて，この銀河系の中心から半径3万光年の円を描きながら，約2億5千万年ほどでひとまわりしているのです。

太陽以外の銀河系の恒星も，円盤のような面内で，回転運動しています。そのため，遠心力と互いの重力とがつりあい，銀河系全体は安定した形を保っているものと考えられます。

銀河も集団を形成しています。それを銀河集団とよびます。私たちの銀河系のすぐとなりには，大小のマゼラン星雲という銀河があり，それらは互いに相手のまわりをまわりながら，私たちの銀河系のまわりを10億年くらいかけてひとまわりしています。おとめ座銀河集団やかみのけ座銀河集団は，半径1000万光年の距離に銀河が1000個近くも集中していて，それぞれの銀河が50億年くらいかけてその集団内をまわる大きな銀河の集団です。このような銀河集団でも，銀河の回転運動による遠心力と互いの重力がつりあっています。

さらに視野を広げると，4億光年の空間に浮かぶ銀河集団（図1—9）がたくさん見えてきます。現在私たちが見通せる宇宙の範囲は100億光年の距離におよびますが，銀河集団はその宇宙空間をどこまでもとぎれずに連なっています。

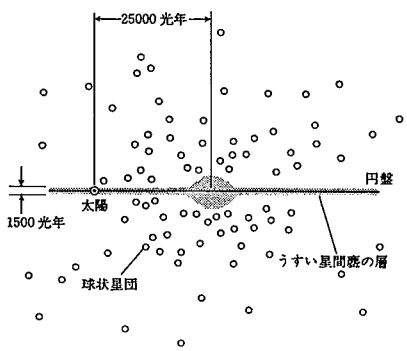


図1—8　銀河系を横から見た図

（池内了『宇宙のかたちをさぐる』，岩波ジュニア新書，1988，P 62）

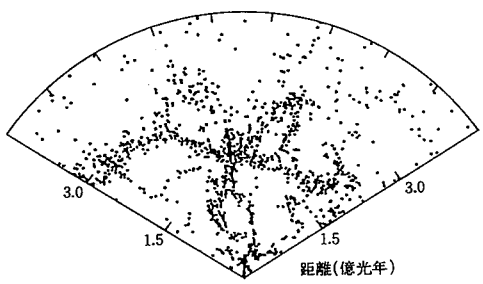


図1—9　北天の方向の銀河の奥行き分布の観測結果（池内了，同上書，P 127）

私たちの銀河系はこの扇のかなめのところにあります。

— 8 —

1—3　自然をどう見るか

こうして，自然の多様な物質をミクロ・マクロという次元で見ていくと，ミクロの世界ではクォークに到達しました。一方，マクロレベルには，銀河という超マクロスケールの基本単位があることがわかりました。このような自然を論理的に把握するには，自然をどのように見ればよいのでしょうか。

自然の物質は，小さいものが集まって大きいものをつくり，その大きいものが結合してより大きいものをつくっています。しかし，大きいものは，小さいものの単なる集合ではなく，固有の性質をもつようになります。その結果，このように多様な物質が自然界に生まれたのです。

たとえば，プラスの電気をもつ陽子１個とマイナスの電気をもつ電子１個が結合すると，水素原子になります。同じように陽子８個と電子８個が結合すると，酸素原子になります。それぞれの原子は，陽子や電子からできていながら，それらとは全く違う性質をもっています。水素原子２個と酸素原子１個からは水ができます。水は，水素原子と酸素原子をたして２で割ったようなものではなく，それらとは違う物質です。

自然は，このように連続的でありながらも，非連続的な物質がミクロにもマクロにもつづいているといえます。この非連続的な物質の集合の一つ一つを階層とよぶと，自然は階層構造（図1—10）をもつということができます。このような自然の見方を自然の階層論といいます。

問題１　つぎの語句をつかって，下の自然の階層構造図を完成させなさい。

銀河集団　　陽子・中性子　　銀河　　クォーク　　原子核

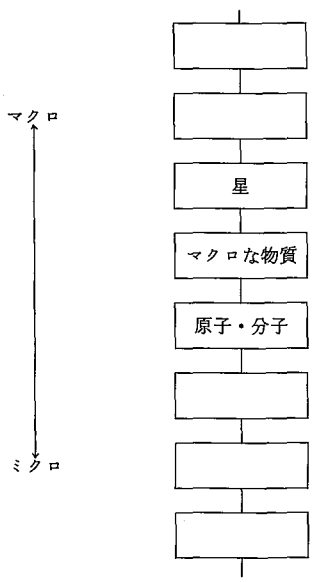


図1—10　自然の階層構造図

上から，銀河集団，銀河，原子核，陽子・中性子，クォークとなります。

それにしても，なぜ自然は階層構造をもつのでしょうか。このことを探るには，物質の起源，つまり宇宙のはじまりに思いをめぐらさなければなりません。

2　物質の起源

2—1　宇宙はビッグバンからはじまった

宇宙は昔から今のすがたをしていたわけではありません。このことにはじめて気がついたのはエドウィン・ハッブル（1929）です。

ハッブルは，長い間の天体観測の結果，「地球から遠くにある銀河ほど速い速度で地球から後退している」ことを発見しました。これは，私たちの宇宙が膨張していることを示すもので，今日ではハッブルの法則（図2—1）とよばれています。この法則によれば，今から150億年前には，すべての銀河が一点に集まっていたものと思われます。

かつて宇宙は一点だったとすれば，現在の宇宙の全質量が一点に集まるため，それは思いもよらない高温高圧の世界であることが予想されます。しかも，すべての銀河は今でも猛烈なスピードで遠ざかっているので，その一点では想像を絶するほどの大爆発が起こったものと考えられます。ジョージ・ガモフ（1948）は，この大爆発をビッグバンと名づけ，膨張宇宙論を提唱しました。

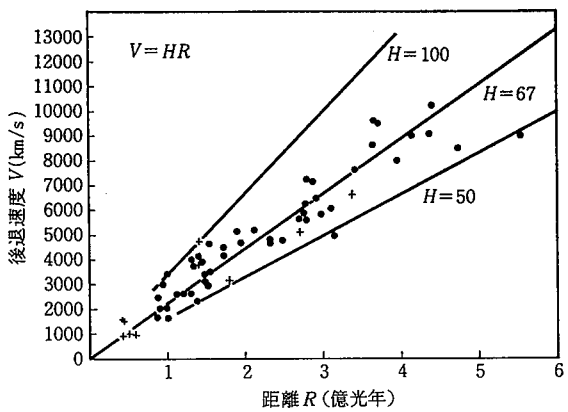
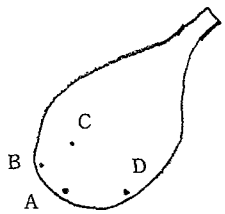


図2—1　ハッブルの法則（池内了，前掲書，P 75）

現在の観測データです。ハッブルの時代にくらべ100倍も遠い銀河まで観測されています。

では，風船をつかって，宇宙の膨張について考えてみましょう。

実験　風船を少しふくらませ，空気を入れる口とは反対側に一つの点を書きこみ，この点をAとします。つぎに，AB＝3 cm，AC＝5 cm，AD＝7 cm となるように，3点B，C，Dを風船上に書き，AB＝4.5 cm になるまで風船をふくらませます。



(1)　このときAC間の距離は何 cm になるでしょうか。

①　AB間と同じく 1.5 cm 増えて，およそ 6.5 cm になる。
②　AB間と同じ 1.5 倍の，およそ 7.5 cm になる。

(2)　つぎにAD間の距離は何 cm になるでしょうか。

風船はどの部分も同じ割合で膨張します。したがって，ABが3 cm から 4.5 cm になれば，ACは5 cm から 7.5 cm，ADは7 cm から 10.5 cm になります。このとき，AB間の距離は 1.5 cm，AC間は 2.5 cm，AD間は 3.5 cm 広がったことになります。

こうして風船が膨張すると，A点からの距離が遠い点ほどその距離が広がることがわかりました。同じ時間での距離の広がりは速度と考えられるので，この実験結果は，「A点から遠くにある点ほど速い速度でA点から遠ざかっている」といえます。A点を地球，他の点を銀河とすれば，これは，「地球から遠くにある銀河ほど速い速度で地球から後退している」という，ハッブルの法則に一致します。こうしたことから，宇宙は風船のように膨張していると考えることができるのです。

2—2　四つの力から多様な物質が生じた

宇宙のはじまりがビッグバンにあるとすれば，物質の起源もビッグバンにさかのぼることができます。物質はすべて力によってなりたっています。現在の宇宙では，物質にはたらく力は，「重力」・「強い力」・「弱い力」・「電気力」の4種類ある（図2—2）と考えられています。ビッグバンのときにはこれらの力はまだ混沌としていました。しかし，ビッグバンの直後に温度が低下し，それにともない四つの力が分化したのです。したがって，温度の低下による力の分化こそが物質の多様化を生み出したといえます。では，どんな物質がどのようにしてできたのでしょうか。

質問3　物質ができたのはどういう順序だと思いますか。

(1)　クォーク→原子→銀河
(2)　原子→クォーク→銀河
(3)　銀河→原子→クォーク

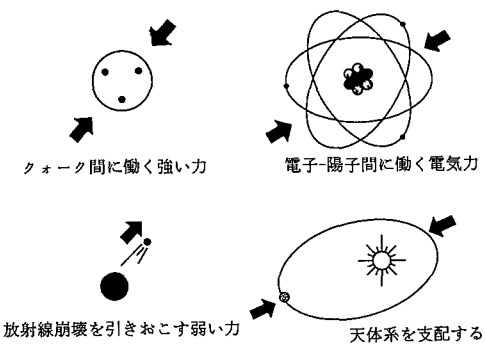
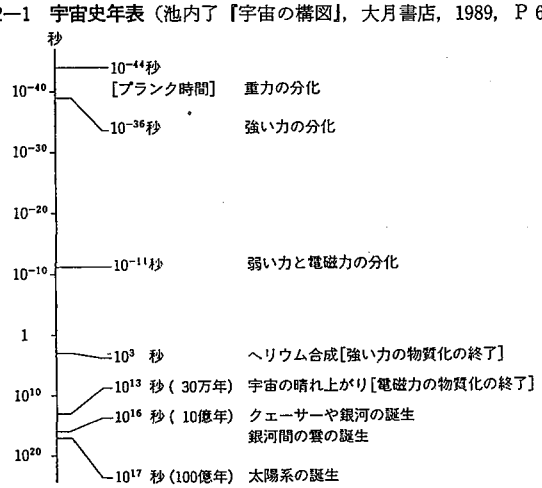


図2—2　自然界の四つの力（広瀬立成『自然のたまねぎ構造』，共立出版，1987，P 76）

表2—1　宇宙史年表（池内了『宇宙の構図』，大月書店，1989，P 67）



正解は(1)です（表2—1)。

ビッグバン以降，宇宙は急速な膨張によって，高温から低温の状態に向かいます。最初の混沌からクォークがつくられ，クォークから陽子と中性子ができ，陽子と中性子が結びついて原子核と電子が現われます。これらはいずれも「強い力」のはたらきによるものです。「強い力」は，きわめて短い距離でしかはたらきませんが，たいへん強い力をもっているので，高温状態の非常にはげしく動いている物質でも結合できるのです。

ビッグバンから30万年がすぎる頃になると，宇宙の温度は3000℃くらいにまで下がります。この時期には，原子核と電子が結びついて原子になりますが，これらを結びつける力は「電気力」です。原子核はプラスの電気，電子はマイナスの電気をもっているため，これらの間には「電気力」がはたらき，互いに引き合うのです。このときの宇宙はまるで原子の海のようです。

このように，クォーク→陽子・中性子→電子核・電子→原子という物質の生成の過程を見てくると，温度を上げたときに原子からクォークへと物質が分解する過程とは逆であることに気がつきます。つまり，宇宙の膨張によって宇宙の温度が下がり，物質の運動速度がおそくなると，「強い力」につづいて「電気力」までも物質をとらえるようになり，より大きい物質が現われてくるのです（図2—3)。

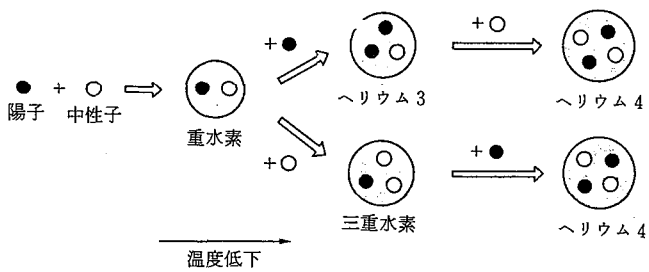


図2—3　原子の生成（広瀬立成，前掲書，P 136）

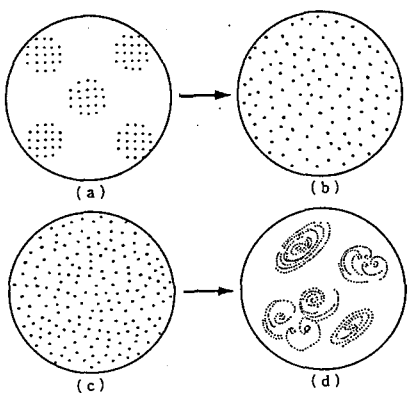


図2—4　銀河の誕生（広瀬立成，前掲書，P 139）

重力がないとき密度は時間がたつと平均化されますが，重力があると物質のかたまりは成長します。

しばらくすると，原子の密度のゆらぎ（凹凸）が生まれ，密度が少し高い部分では，「重力」が大きいため，まわりの原子を集めるようになります。質量が大きくなると，「重力」はますます強くなって，さらにたくさんの原子を集めることができるようになります。やがて，それらの原子はみずからの「重力」によって収縮し，銀河が誕生します（図2—4)。「強い力」がミクロスケールの原子の生成に作用するのに対し，「電気力」と「重力」はマクロスケールでも作用します。とりわけ「重力」は，二つの物体の質量の積に比例するため，小さな質量の物質の間ではあまり影響力をもちませんが，質量が大きくなればなるほど物質の生成に強い影響力をもつようになるわけです。

なお，「弱い力」は，中性子の崩壊によって新たな物質を生み出しますが，物質を結合するはたらきはありません。

銀河の誕生はビッグバンから10億年後のことでした。その銀河の中で，いくつもの星が，燃えつきては，小さくちぢんだり，爆発して吹き飛んだりしました。星の爆発によって放出されたガスは，星と星との間にただよう星間ガスとまじり，やがて「重力」によって星間雲となり，つぎの世代の星の材料を提供することになります。このように星の生成と爆発が何度もくり返されているうちに，太陽系が生まれ，地球が誕生しました（図2—5)。ビッグバン以来100億年も後のことです。

こうして，宇宙の温度が下がるにつれて，四つの力のはたらきがつぎつぎと現われ，小さい物質から大きい物質へと多様な物質が生成されてきたのです。その後，自然は物質から生物を生み出します。では，生物はどのようにして生まれたのでしょうか。

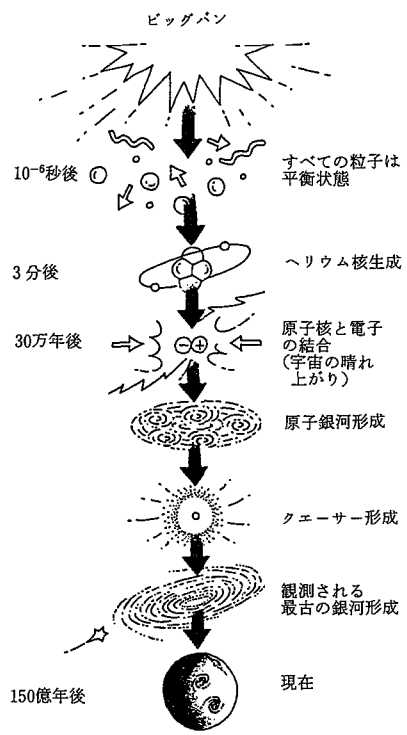


図2—5　ビッグバン宇宙の歴史

（朝日現代用語『知恵蔵』，朝日新聞社，1980，P 237）

3　生物の誕生

3—1　地球環境が生物を生んだ

生物が存在する星は，広大無辺な宇宙の中でも，今のところ地球しか知られていません。宇宙では，一見，何のへんてつもない地球に，生物が生まれたのはなぜでしょうか。

質問4　地球に生物が誕生したのはなぜだと思いますか。

(1)　地球に酸素があったから。
(2)　地球に海があったから。
(3)　地球の上空にオゾン層があったから。

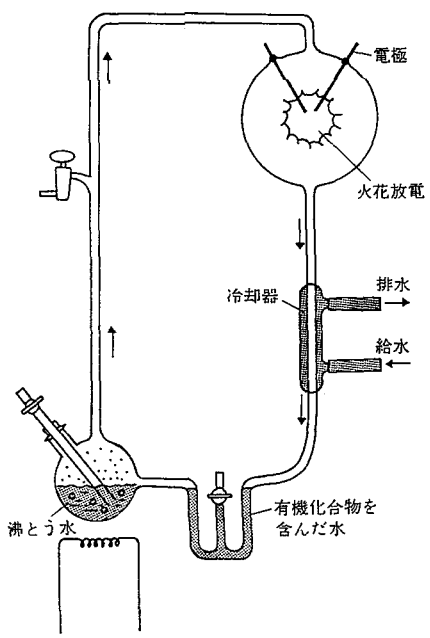


図3—1　ユーレー—ミラーの実験

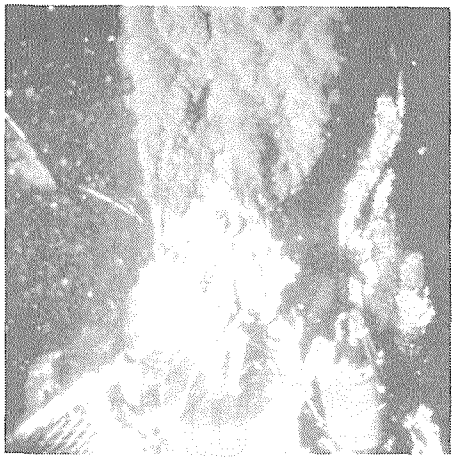
（水谷仁『宇宙人はいるだろうか』，岩波ジュニア新書，1986，P 99）

上部のフラスコは地球大気，下部のフラスコは海を表します。前者にはメタン・アンモニア・水素・水蒸気の気体が入っています。後者から沸騰した水蒸気は，上部のフラスコに入り，冷却されて水になって，放電による生成物を洗い流します。ミラーは，このような装置によって1日以上反応をおこなったところ，下部のフラスコの中にアミノ酸が生成されているのを発見しました。

(2)が正解です。地球大気の酸素は30～25億年前に生まれたラン藻という原核生物とその後現われた植物の光合成によってつくられたものです。オゾン層はその酸素が太陽の紫外線を吸収してできたものです。

ソ連のオパーリン（1924）は「原始大気から太陽の紫外線などのエネルギーによってつくられた簡単な分子が，海の中でつながってより複雑な分子になり，やがて生物に進化した」と考えました。アメリカのユーレーとミラー（1953）は実験（図3—1）によってオパーリンの説を裏づけました。彼らは原始大気としてメタン・アンモニア・水素・水蒸気を用いましたが，現在では，原始大気の主成分は二酸化炭素・窒素・水蒸気であると考えられているため、ユーレー—ミラーの実験は再検討をせまられています。

最近，海底熱水噴出孔（図3—2）が生物誕生のなぞを解く環境として注目されています。なぜなら，海底熱水噴火孔では，生物の構成分子であるアミノ酸の一種グリシンの濃度がまわりの海水にくらべて高いばかりでなく，温度が高く，規模も大きいので，化学反応を進めるためのエネルギーも十分にあると考えられるからです。日本の研究グループが海底熱水噴出孔を実験室で再現したところ，はたして生物の構成分子であるいくつかのアミノ酸が確認されました。



北緯21度の東太平洋海膨で発見された350度の黒い熱水を噴出するブラックスモーカーと呼ばれる熱水噴出孔（Baross博士撮影）

図3—2　海底熱水噴出孔

（柳川弘志『生命の起源を探る』，岩波新書，1989，目次）

熱水は，冷海水が地殻の裂目から入りこんで，マグマと接触してあたためられ噴き出したものです。

この他，生物の起源に関しては，つぎのような仮説も考えられます。

(1) 一酸化炭素・二酸化炭素・窒素・水などを主成分とする原始大気に宇宙線のエネルギーがはたらいてアミノ酸が合成され，原始海洋中で生物に進化した。

(2) 地球に落ちてくる隕石にはアミノ酸や核酸が存在すること，電波望遠鏡によって宇宙には多数の生物体の構成分子が観測されていることなどから，“生物のもと”が地球外から隕石によってもたらされ，それが原始海洋中で生物に進化した。

いずれにせよ，生物が地球で誕生したものとすれば，太陽，地球内部，宇宙線のいずれかのエネルギーによって，大気や海洋から生物体の構成分子であるアミノ酸や核酸がつくられ，海洋中で生物に進化したものと考えられます。

こうして生物の誕生には海が不可欠であることが明らかになりました。その海は原始大気中の水蒸気が雨となって降りそそいだものと考えられています。では，水蒸気を大量にふくんだ原始大気はどのようにできたのでしょうか。

質問5 地球の原始大気はどのようにできたと思いますか。

(1) 地球が重力によって原始太陽系星雲ガスを捕獲した。
(2) 原始地球の内部から放出された。

正解は(2)です。原始大気は，微惑星の衝突によって地球が形成されるときに，微惑星内部から水蒸気や二酸化炭素の気体として放出されたものと考えられています（図3—3)。

水蒸気と二酸化炭素は熱を吸収するので，衝突時に発生した熱は原始大気に吸収され，すぐには惑星空間に出ていきません。そのため，地球の温度は上昇します。やがて，岩石が溶けるほどの高温になり，マグマの海ができると，大気とマグマの海との間で水蒸気のやりとりがおこなわれるようになりました。微惑星の衝突がおさまりはじめると，大気と地表の温度はしだいに下がり，大気中の水蒸気がマグマの上に雨となって降りそそぎ，広大な海ができました。大気中の二酸化炭素は，海に溶けたり，大陸の風化作用によってとり除かれて，地表の温度はますます下がっていきました。

では，原始地球大気とよく似た大気組成をもつ金星や火星に海ができなかったのはなぜでしょうか。金星は太陽に近すぎて温度が高いため，原始大気中の水蒸気が，凝結できず，太陽によって分解されたからです。火星は，その大きさが地球の約半分であることから，微惑星の衝突が少なく，地球や金星のような厚い大気ができなかったものと思われます。したがって，太陽系の地球だけに海ができたのは，水と二酸化炭素をふくんだ大気がたくさんあったことと，太陽からの距離や地球の大きさがちょうどよかったことによるのです。

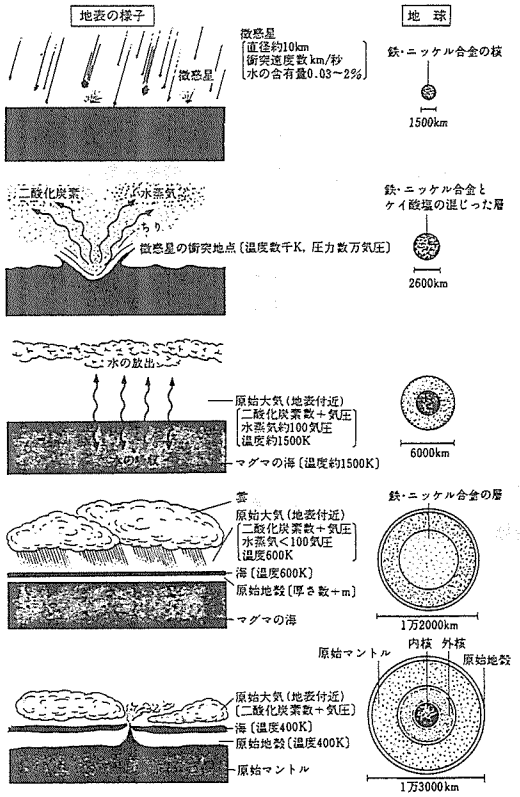


図3—3　原始地球形成のシナリオ

（松井孝典『地球＝誕生と進化の謎』，講談社現代新書，1990，P 191）

3—2　生物とは何か

原始の海はまるでアミノ酸や糖・塩基・リン酸からなるヌクレオチドのスープのようでした。やがて，アミノ酸どうしは互いに連なってタンパク質になり，ヌクレオチドどうしも連なって核酸をつくりました。タンパク質と核酸は，しだいに膜につつまれ，細胞になりました(図3—4)。こうして地球上に細胞を基本単位とする生物が誕生したわけです。ところで，生物とは何でしょうか。

質問6　生物を特徴づけるものは何だと思いますか。

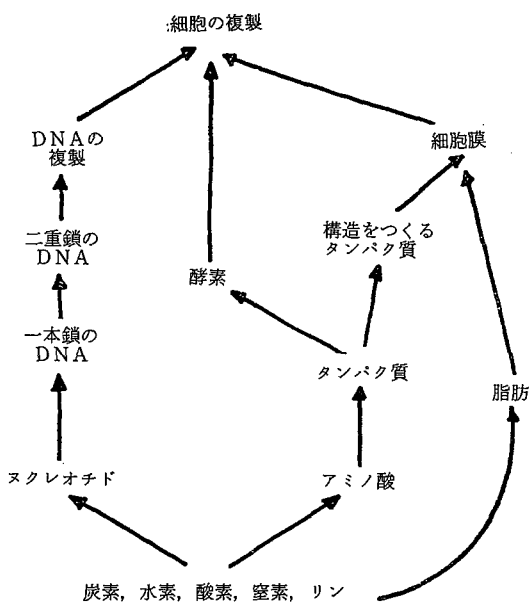


図3—4　原子から細胞ができるまで

(M. B. ホーグランド『遺伝子のはなし』，現代教養文庫，1981，P 77)

それは「外部の環境と物質のやりとりをしてエネルギーをひき出し（物質代謝），自分と同じものをつくる（半保存的自己複製）」ことにあります。細胞内のタンパク質は栄養物からエネルギーを引き出し，核酸は自分と同じ構造の分子を再生産するからです。つまり，生物は，いまから38億年前に物質から生まれ，物質と同じように原子・分子からできていながら，それまでの物質にはない新しい法則（物質代謝と半保存的自己複製）を獲得したということができます。だとすれば，生物は自然の中でどんな位置にあるのでしょうか。

問題2　自然の階層構造図（図3—5）の中で生物はどこに位置すると思いますか。

(1)　原子・分子とマクロな物質との間 [1]
(2)　原子・分子と原子核との間 [2]
(3)　クォークから宇宙までの系列とはまったく違う系列 [3]

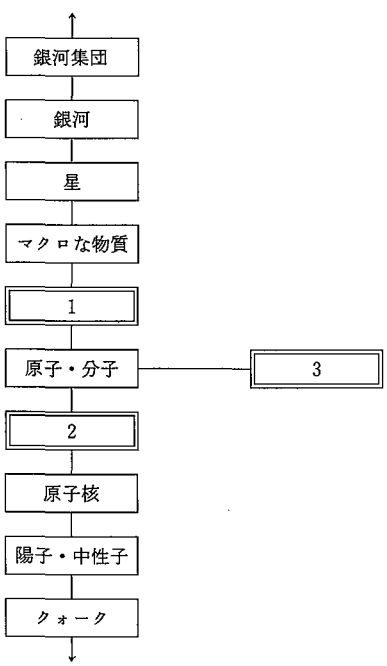


図3—5　自然の階層構造図

正解は(3)です。生物は，原子・分子からできていながら，それまでの物質とはまったく異なる法則にしたがうため，クォークから宇宙までの系列とは違う系列に位置するものと考えられるからです。

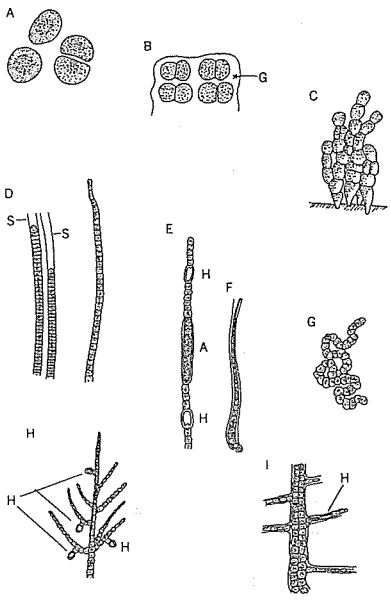
クォークから宇宙までの無生物の系列を主系列というのに対して，生物の系列を2次系列とよびます。なお，2次系列の階層は細胞，個体，種に分けられます。では，生物が誕生してから地球環境はどのように変化したのでしょうか。

3—3　生物と大気との相互作用

初期の生物の一種ラン藻（図3-6）は，35億年前に誕生すると，光合成によって二酸化炭素にとむ原始大気を酸素の多い地球独自の大気へと変えていきました。このような環境の変化は初期の生物にどんな影響をあたえたのでしょうか。

質問7　当時の地球上にはすでにたくさんの細菌がいました。それらの細菌は大気中の酸素の増加によってどのような影響をうけたと思いますか。

(1)　酸素は当時の細菌には猛毒だったので，多くの細菌が死んだ。
(2)　大部分の細菌は，すぐに酸素をうけ入れ，活動的になっていった。



拡大率は一定でなく，A, BはC-Iより拡大した図である．A：*Synechococystis aquatilis*，B：*Merismopedia elegans*（G：ゼラチン状粘液質），C：*Pleurocapsa minor*，D：*Pharmidium* sp.（左，S：鞘），*Oscillatoria splendia*（右，鞘が見られない），E：*Anabaena* sp.（A：胞子，H：ヘテロシスト），F：*Calothrix braunii*，G：*Nostoc muscorum*（分裂方向が不規則となり，塊状になったとき），H：*Nostochopsis lobatus*，I：*Stigonema muscicola*.

図3—6　今日のラン藻

（藤田善彦，大城香『ラン藻という生きもの』，東京大学出版会，1989，P 10）

正解は(1)の方です。ラン藻の光合成によって大気中に酸素が増してくると，細菌の絶滅がはじまりました。当時の生物にとって酸素は猛毒だったからです。それでも，酸素の増加はゆっくりと進んだので，生物の一部は酸素を無毒化する酵素をつくり出し，やがて酸素を積極的に利用する，つまり酸素呼吸をする今日の生物が現われてきました（図3—7)。

この他には地中や湖底など酸素のない環境に逃れるものもいました。それらは，破傷風などの病原菌ですが，今でもどろや土の中のように酸素にふれないところにすんでいます。

ラン藻やその後出現した植物の光合成によって放出された酸素は，長い時間をへて大気中にたまり，オゾン層をつくりました。オゾン層とは太陽の紫外線によって酸素 O_2 からつくられたオゾン O_3 が上空にたまったものです。オゾンは生物にとって有害な紫外線を吸収するため，オゾン層の形成は，それまで海の中で紫外線から身を守っていた生物の上陸を可能にし，生物の新たな進化をすすめました。

では，生物はどのように進化したのでしょうか。

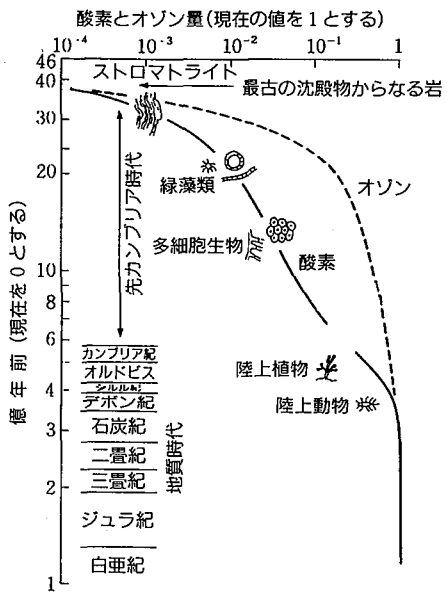


図3—7　大気中の酸素とオゾン量と生物進化

（岩坂泰信『オゾンホール』，裳華房，1990，P 26）

今日のオゾン層は何十億年の歴史をへてつくられました。

質問8　大気中の酸素量の変化と生物進化との間にはどのような関係があると思いますか。表3—1と図3—8を参考にして答えなさい。

表3—1　生物の進化

オルドビス紀	海生の無セキツイ動物の出現
デボン紀	魚類，両生類，ハ虫類の出現
石炭紀	
三畳紀	ホニュウ類の出現
ジュラ紀	鳥類の出現

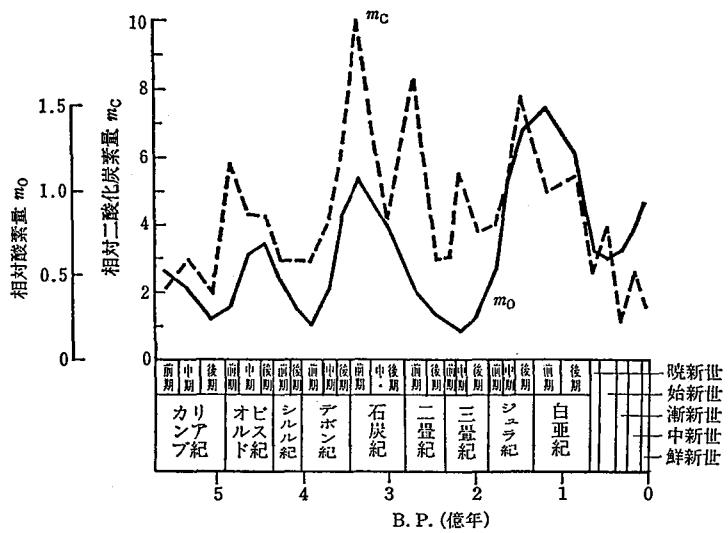


図3—8　大気中の酸素量の変化

（ブディコ，ロノフ，ヤンシン『地球大気の歴史』，朝倉書店，1988，P 129）

過去５億年の間に３回のいちじるしい酸素量の増加があり，それらの時期は新しい種の出現時期に一致します。オルドビス紀には海生の無セキツイ動物が生まれました。魚類，両生類，ハ虫類はデボン紀と石炭紀に，ホ乳類は三畳紀とジュラ紀の間，鳥類はジュラ紀に生まれています。したがって，生物進化は酸素量の増加に強く影響をうけているものと考えられます。

このような一致は偶然ではありません。なぜなら，酸素濃度が高くなると動物の獲得するエネルギー量は増加し，その増加分のエネルギー量が動物の個々の器官や組織の複雑化のために利用できるようになるからです。なお，大気中に酸素量が増えるのは，気候変動や火山活動による大気中の二酸化炭素量の増加のため，植物の光合成速度が速まるからだと考えられています。

こうしてラン藻や植物が，長い時間をかけて，大気中の二酸化炭素を酸素に変える一方，オゾン層は生物の上陸を可能にし（図3—9），酸素は生物の進化をうながしたのです。

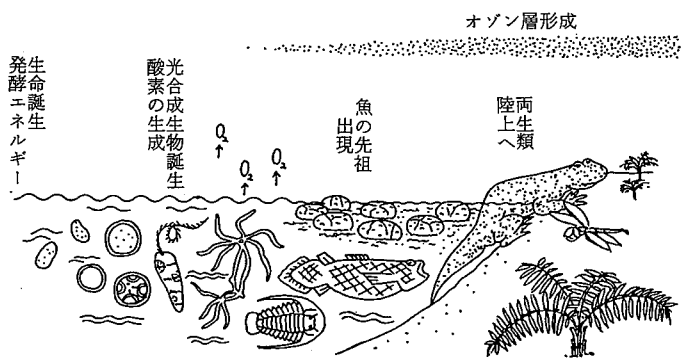


図3—9　生物の上陸

（山田國広『フロンガスが地球が破壊する』，岩波ブックレット，1989，Ｐ７）

4　人類の出現

地球の歴史は生物の進化によっていろどられています。単細胞生物からホニュウ類にいたる生物進化の過程で，さまざまな動物や植物が登場しては消えていきました。人類が現われたのは宇宙カレンダー（図 4—1）の 12 月 31 日のことです。では，人類は，どのように自然界に出現し，現在の人間になったのでしょうか。

質問 9　人類はサルから進化したものですが，人類といえるのはいつからだと思いますか。

(1)　火をつかったときから。
(2)　ことばをつかったときから。
(3)　直立二足歩行をして道具をつくったときから。
(4)　死者を埋葬するようになったときから。
(5)　洞窟絵画を残したときから。

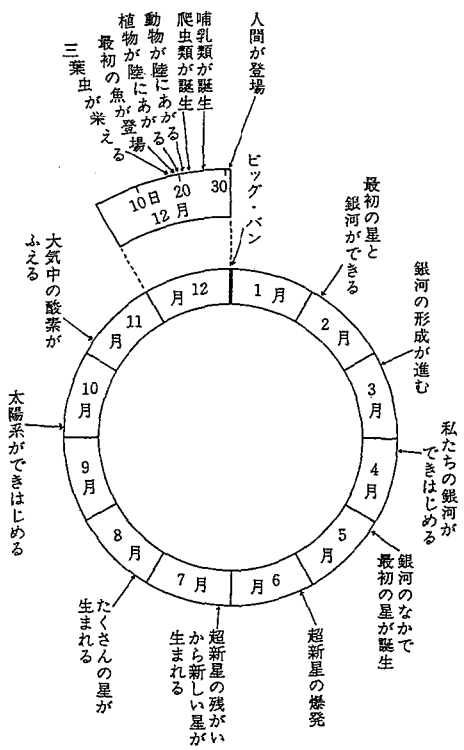


図 4—1　**宇宙カレンダー**（水谷仁，前掲書，P 149）

ビッグバンから今日までの時間を 1 年間に縮小すると，宇宙の時間に対して人類の誕生はごく最近の出来事であることがよくわかります。

人類が生まれたのは直立して道具をつくったときです。ことばや火をつかうようになったのはそのあとです。死者の埋葬や洞窟絵画の制作は人類の歴史ではごく最近のことです。なぜそういえるのか，人類誕生のみちすじをたどってみましょう。

4—1　人類は自然を変えた
木にのぼったホニュウ類

最初のホニュウ類は地上をはいまわるだけの小さな生物でした。やがて，その中から木にのぼるものが現われました。樹上には，恐竜はいないし，鳥の卵，昆虫，果実などの食物が豊富にあるからです。しかし，目がよくないため，枝から枝へ飛び移るときに距離感がつかめず，木から落ちて死ぬこともありました。しばらくすると，大きな両眼が前方に向き、すぐれた視力をそなえ，しかも握力の強いホニュウ類（図4—2）が現われました。この新しいホニュウ類が霊長類，いわゆるサルでした。彼らは，樹上生活をしているうちに，そこでの生活に適した生物に進化したといえます。これはいわゆる「環境に適応した個体が生き延びて子孫を残していく」という自然選択のはたらきによるものです。

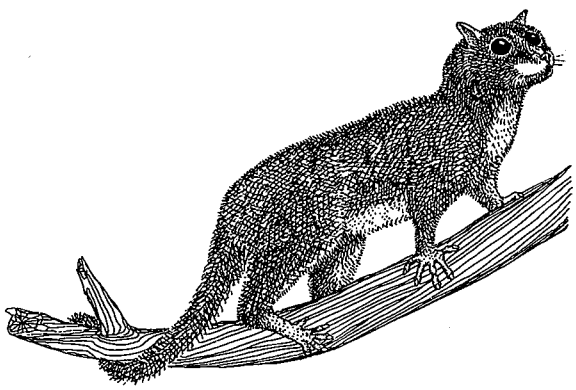


図4—2　原始的キツネザル

（J. C. マクローリン『動物進化の物語』，岩波書店，1984，P 135）

原始的キツネザルは，大多数の霊長類の属性—前方に開いた両眼，木のてっぺんでもいろいろの操作ができ，ものを握ることもできる手—をそなえています。

直立二足歩行

霊長類は，しだいに行動範囲を広げ，たくさんの種に分化していきました。その中に，木からおりて，草原に進出した種がありました。それがヒヒとヒト科の動物でした。草原には危険な肉食動物がいたるところにいました。ヒヒは鋭い犬歯でそれらの動物から身を守りましたが，ヒト科の動物（図4—3）は非力でした。彼らは，多少すぐれた知能はあるものの，犬歯もほとんど発達していません。そのため，大型の肉食動物から逃れ，小動物や植物を食べて暮らしていました。やがて彼らは直立するようになります。その方が敵を早く発見できるし，自由になった手で棒をつかんで振り回したり，石を投げたりすることができるからです。そうなると，直立二足歩行はますます促進され，手が歩行から開放されて道具の制作などにつかわれるようになりました。そのことが，大脳，とくに連合野（記憶・学習・言語・思考などの中枢）を発達させました。この直立二足歩行をはじめたヒト科の動物が最初の人類でした。

生態的地位の変化

やがて人類は火を発見しました。この火の発見によって人類の生活は大きく変わります。彼らは，熱帯のアフリカをはなれて，アジアやヨーロッパの寒冷なところにも住めるようになりました。火は，暖をとるだけではなく，食物を柔らかくし，生肉を殺菌するため，人類の食生活はいちじるしく豊かで安全なものになりました。しかし，その反面，歯は急速に退化していきました。火は，マンモスのような超大型動物を谷や沼のようなところに追いこむときにも，つかわれました。大きな獲物の狩猟には大勢の共同作業が必要なので，人類はこのときすでに相当の言語能力をもっていたことが想像されます。かつてライオンやハイエナから逃げまわっていた人類がもうそれらの生存をおびやかすほどになりました。彼らは生態的地位を変えたといえます。このような動物は人類だけです。

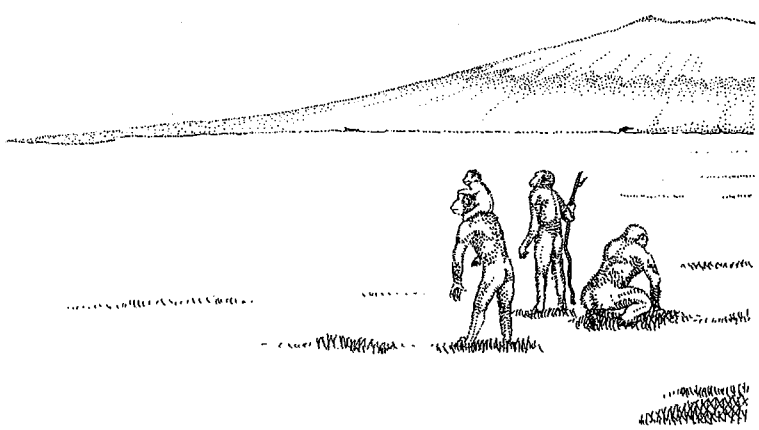


図4—3　最初の人類（J.C. マクローリン，前掲書，P 137）

霊長類の中で地上生活をためしたのはヒヒとヒトだけでした。どちらもその実験をうまくやりとげました。

食物連鎖の頂点

やがて，死者の埋葬をする人類（図 4—4）が現われました。彼らは，石を割ってつくった道具や武器によって，クマ・サイ・マンモスなどの大型ホニュウ類を完全に制圧し，自然界の食物連鎖の頂点に立ちました。この時代の人類はもう私たちと形態的な違いがないほど進化しています。

質問 10　このあと人間は他の動物には見られないことをはじめました。それは何だと思いますか。

(1)　洞窟から出て平地に小屋をたてた。
(2)　トイレやゴミ捨て場をつくった。
(3)　家畜を飼育したり，作物を栽培したりした。

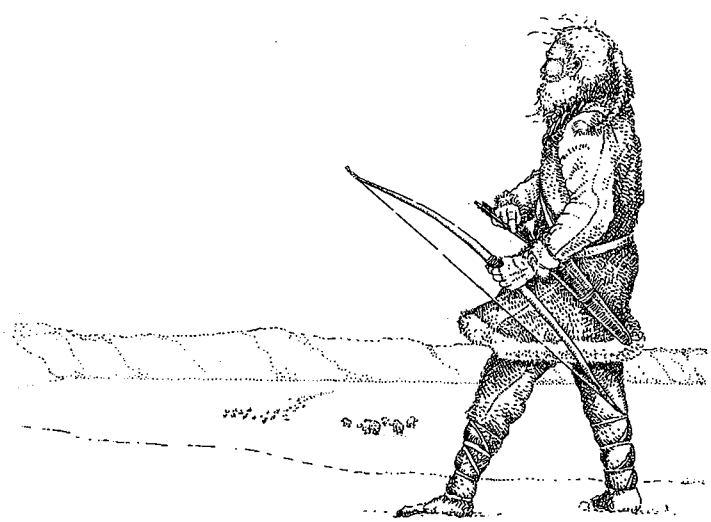


図 4—4　道具や武器によって自然界の食物連鎖の頂点に立つ人類

（J. C. マクローリン，前掲書，P 143）

いまから 4 万年前の人類—もう私たちと本質的な違いはありません。

(1)と(2)は火を発見した人類がすでにおこなっていましたので，(3)が正解です。西アジアの乾燥地など，自然のめぐみの少ない地域の人間が，植物の種をまいて，栽培をはじめたり，動物を捕獲してもすぐには食べず、囲ってエサをあたえるようになったのです。このような作物の栽培と家畜の飼育は，新しい食物連鎖を生み，人工的な生物世界をつくり出しました。今からおよそ1万年前のことです。一方自然のめぐみのゆたかな地域では，人工的な生物世界をつくることなく，自然と共存していきました。いまでも原始の生活を守りつづける民族がいるのはそのためです。

こうして人間は，道具をつかって自然にはたらきかけ，その生存に必要なすべての物質を自分自身で生産し，自然全体を人間中心の世界，つまり人間生活圏（図4—5）へと変えてきたのです。

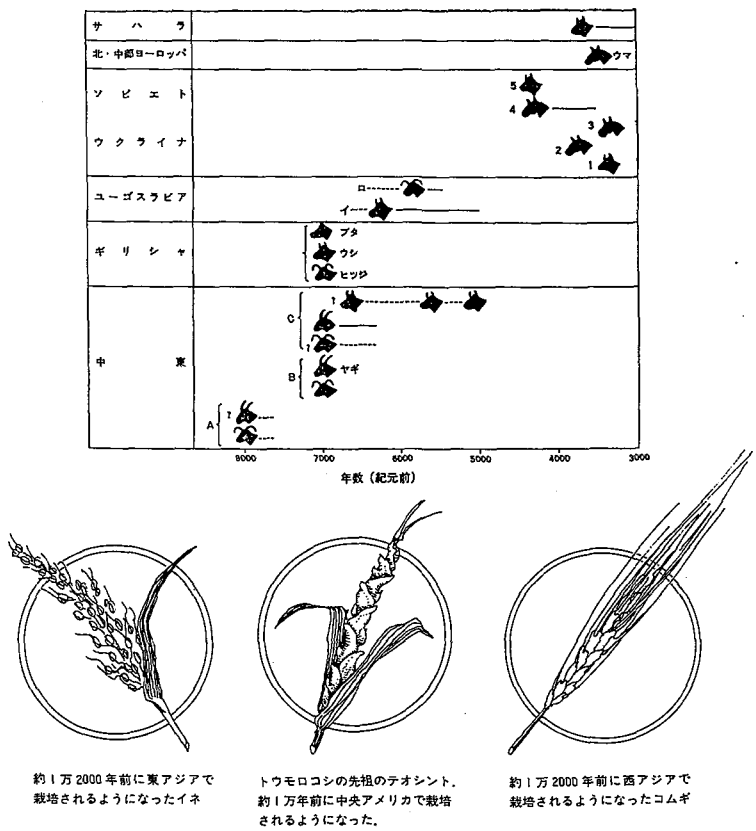


図4—5　人工的生物世界

家畜の飼育（上）（宮下和喜『絶滅の生態学』，思索社，P 86）

作物の栽培（下）（J.C. マクローリン，前掲書，P 143）

4—2　人類の進化速度はなぜ速い

人類の出現から今日まで500万年という短い時間です。しかし，その間，人類の脳容積は3倍になりました（図4—6）。これほど速い進化は他の動物には見られません。これはなぜでしょうか。

質問11　人類の脳が他の動物には見られないような速い速度で進化したのはなぜだと思いますか。

(1)　食物連鎖の頂点に立ったので，栄養状態がよかったから。
(2)　道具によって自然に積極的にはたらきかけたから。

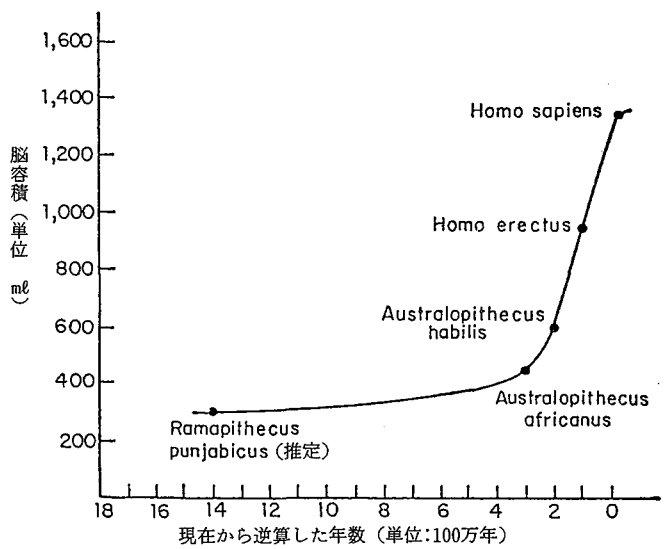


図4—6　人類の脳容積の進化

（E. O. ウィルソン『社会生物学5』，1985，P 1073）

正解は(2)です。人類の脳容積はその出現から今日までに3倍も大きくなっています。しかも，人類の大脳は，他の動物に比べて連合野（記憶・学習・言語・思考などの中枢）がいちじるしく発達しています。(図4—7)。したがって，人類の進化は，他に類を見ない記憶力や思考力の獲得にあったといえます。これは，手が歩行から開放され，道具をつくることによって器用さを増すと，大脳の発達がうながされるからだと考えられています。つまり，道具による自然への積極的なはたらきかけが脳を進化させ，その結果，道具が改良されるとともにことばも発達すると，人類の自然へのはたらきかけはますます強くなり，それはまた，よりいっそう人類の脳を進化させることになったものと考えられるのです。

このように道具による人類の自然への積極的なはたらきかけがその進化速度を速めることにつながったといえます。だとすれば，人間は自然の中でどんな位置にあるのでしょうか。

質問3　人間は自然の中でどのような位置にあると思いますか。

(1)　生物の一種にすぎない。
(2)　生物をこえた存在である。

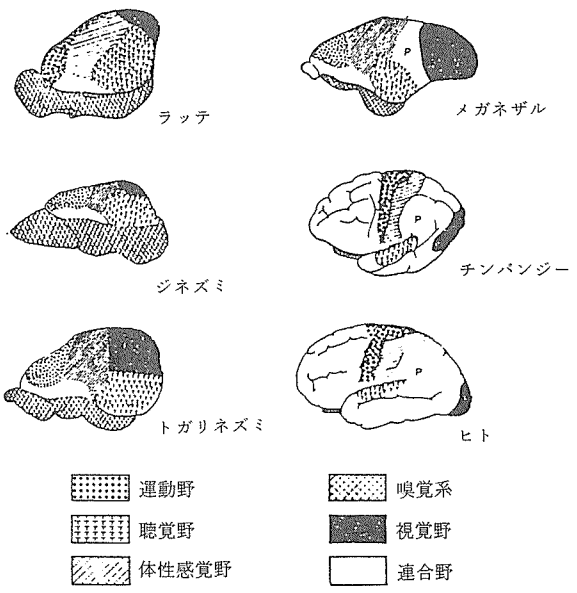


図4—7　いろいろな動物の脳における連合野の割合

(時実利彦『人間であること』，岩波新書，1970，P 44)

連合野の面積は，進化した動物ほど広くなり，人間において最大になります。ネズミのように連合野の面積が非常にせまいと，その行動は反射的で紋切り型になります。

(2)が正解です。人間は他の生物と同じように自然に依存して生きています。しかし人間だけは，道具をつくって自然にはたらきかけ，自然を人間生活圏として支配するようになりました。この点で人間は他の生物とはまったく違う存在であるといえます。したがって，人間は自然の階層構造において2次系列の生物から生成された3次系列として位置づけられるのです（図4—8)。

宇宙はビッグバンにはじまりました。四つの力によって物質が生成され，その物質から生物が誕生しました。生物は大気との相互作用によって地球独自の大気をつくり出しました。やがて，生物の中から人間が現われ，自然を人間生活圏へとつくり変えてきたのです。

では，人間生活圏はどのように形成されたのでしょうか。第II部でじっくり考えることにしましょう。

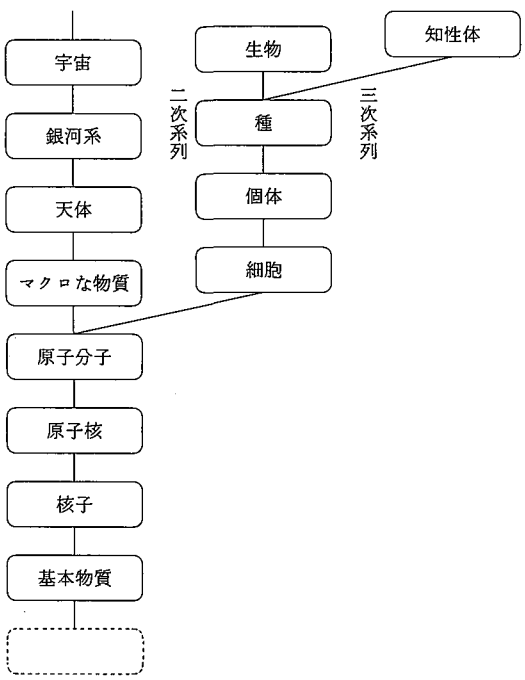


図4—8　自然の階層構造

（田中一『未来への仮説』，培風館，1985，P 103）

知性体とは人間のことです。

II　人間生活圏の形成

1万年ほど前から人間が農耕や牧畜をはじめるようになると，それまで地表をおおっていた森林はしだいに農耕地や放牧地に変えられていきました。20世紀に入り，工業化・都市化の波が世界各地に訪れると，地表はますます人工物でおおわれるようになりました(図1—1)。その結果，生物種の絶滅が急速に進み，生態系が単純化されました。では，生態系の単純化はどこまでおよんだのでしょうか。

1　地表の改変 —— 58
1—1　気候変動による森林の変化 …… 58
1—2　人間活動による森林の消失 …… 62

2　生物種の絶滅 —— 72
2—1　生物種の絶滅＝生態系の単純化 …… 72
2—2　自然生態系の単純化 …… 79
2—3　人工生態系の単純化 …… 90
2—4　地球規模の人間生活圏の成立 …… 102

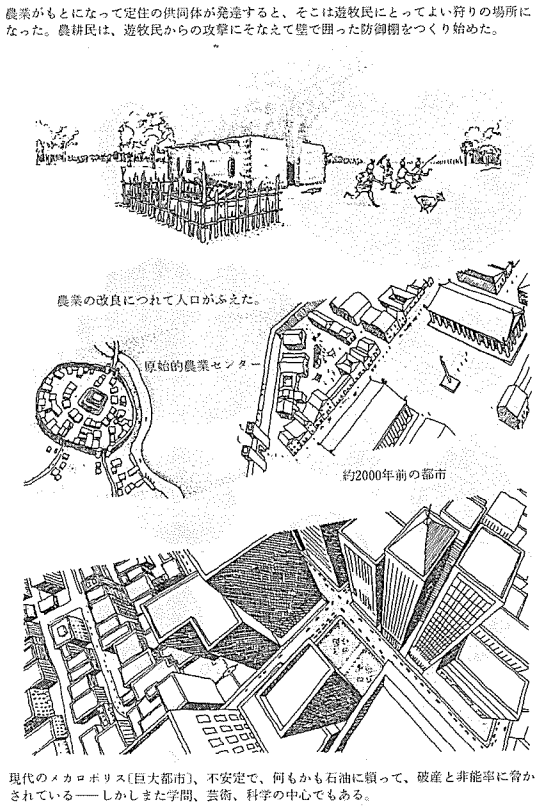


図1—1　人間生活圏の発展

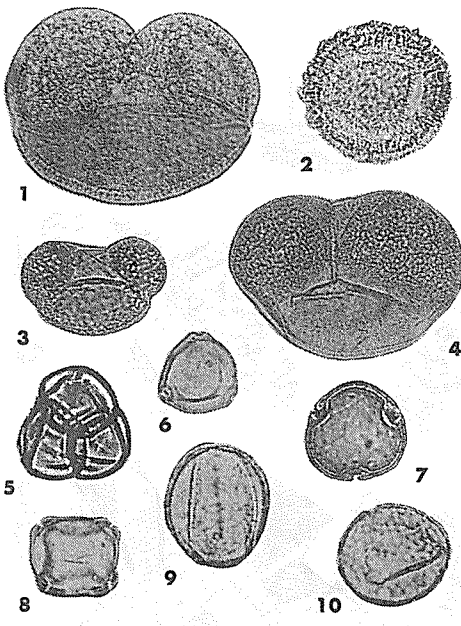
(J. C. マクローリン，前掲書，P p146-147)

1　地表の改変

1—1　気候変動による森林の変化

植物の種類は温度や降水量などの気候の変化や人間のはたらきかけによって変わっていきます。したがって，過去から現在までの植物の種類の変化をつかめば，気候変動や人間活動を推定することができます。では，このような植物の変化を知るにはどうすればよいのでしょうか。

それには花粉分析という方法があります。花粉の直径はわずか0.1～0.01ミリ程度しかありませんが，植物の種類によって形が違うため，花粉化石（図1—2）から植物の種類をわり出すことができます。花粉は，たった一本の木から何万～何十万個と放出され，湖底や湿原のように紫外線を受けにくいところでは，何百万年でも残ります。花粉はスポロポレニンとよばれる化学的に大変強い外膜につつまれているからです。したがって，湖底あるいは湿原から堆積物を柱状に採取し，「どの時代にどんな種類の花粉がどれだけふくまれているのか」を調べれば，その地域における植物の変遷がわかるのです。こうしてある地域の花粉の出現率を図に表したものを花粉ダイアグラムとよびます。



1　モミ属(250倍)　　6　カバノキ属(500倍)
2　ツガ属(300倍)　　7　シナノキ属(500倍)
3　マツ属(400倍)　　8　ハンノキ属(500倍)
4　トウヒ属(250倍)　　9　コナラ属(500倍)
5　ツツジ科(400倍)　　10　ニレ属(500倍)

図1—2　いろいろな花粉化石

（札幌学院大学公開講座・北海道文化論『北海道・森と木の文化』，1989，P 12）

では，私たちの祖先はどのような気候を経験し，私たちは今どんな気候のもとで生きているのか，花粉ダイアグラムから推定してみましょう。

最近，北海道大学の研究グループによって，十勝平野における過去400万年間の花粉ダイアグラム(図1—3)が得られ，240万年くらい前にはブナやコナラなどの冷温帯性広葉樹が姿を消し，それにかわって耐寒性の強いマツ・モミ・トウヒが現われ，カラマツとともに針葉樹林を形成していることが明らかになりました。6500万年前からはじまった新生代は，200万年前を境にして，第三紀と第四紀にわけられることから，この花粉ダイアグラムは第三紀から第四紀にかけて温暖な気候から寒冷な気候へと移り変わったことを示しています。では，最近1万年間の気候はどんなものでしょうか。

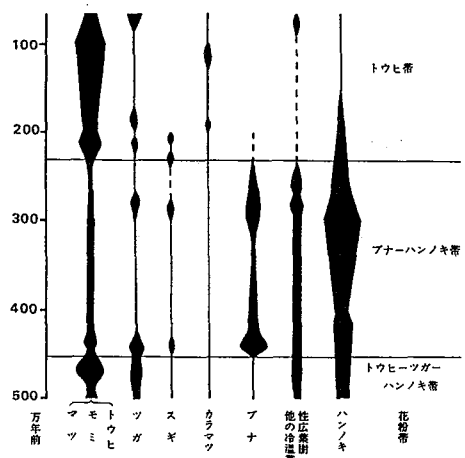


図1—3　十勝平野における500万年～100万年前の花粉ダイアグラム

（札幌学院大学公開講座，前掲書，P 16）

質問1　およそ1万年前に大きな気候の変動がありました。それはどのような変動だったと思いますか。下図（図1—4）から推定しなさい。

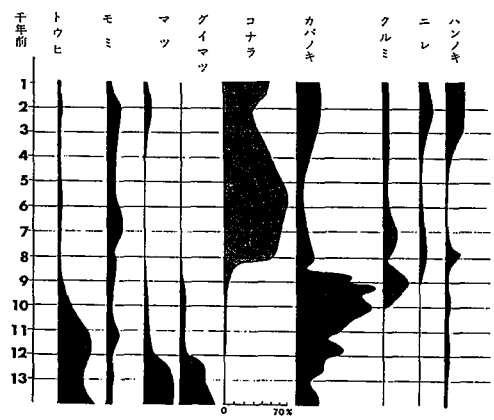


図1—4　北海道中富良野町字文の花粉ダイアグラム

（札幌学院大学公開講座，前掲書，P 38）

花粉ダイアグラム（図1—4）によれば，8000～9000年前を境にして，マツ・モミ・トウヒのような耐寒性の強い樹種からコナラのような耐寒性の弱い樹種へと，樹種の変化が見られます。これは寒冷な気候から温暖な気候への変化を示しています。こうして，今日は，氷河時代とよばれる寒冷な第四紀において，比較的温暖な時期，つまり間氷期にあるといえます。では，人間の活動は植物をどのように変えたのでしょうか。

1—2　人間活動による森林の消失

エーゲ海の周辺には，エフェソス（図1—5），ミレトスなどギリシャ・ローマ時代に繁栄を誇った古代都市がたくさんあります。それらの都市は，ギリシャ・ローマ時代には海岸に面した港でしたが，現在では海洋から数キロメートルも内陸に動いています。最近の地質調査からこの“移動”は海岸線の前進によることがわかりました（図1—6）。では，海岸線が前進したのはなぜでしょうか。

質問2　エフェソスの海岸線の前進の原因は何だと思いますか。

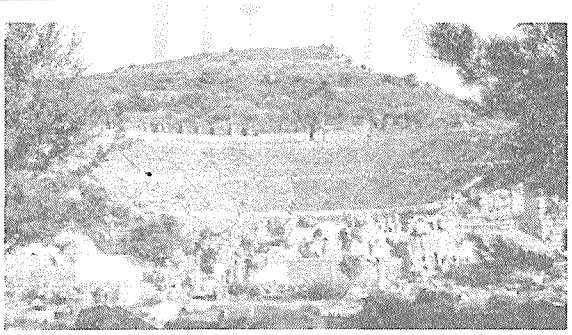


図1—5　エフェソス遺跡の大円形劇場

（安田喜憲『森林の荒廃と文明の盛衰』，思索社，1988，P 209）

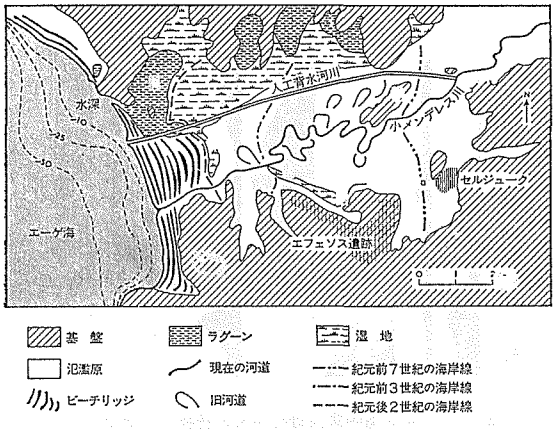


図1—6　小メンデレス川の沖積平野の海岸線の前進

（安田喜憲，同上書，P 212）

それは，小メンデレス川の上流部における森林の伐採によって洪水がたびたび起こり，上流や中流の土砂が下流に大量に運ばれたからです。

小メンデレス川の上流のチブリル湿原の花粉ダイアグラム（図1—7）によると,紀元前2000年～紀元1年の時代には，単位体積あたりの樹木花粉数が減り，イネ・キク・ヨモギのような栽培植物やオオバコ・ギシギシのように農耕地・牧草地に特有な植物が急増しています。これは，紀元前2000年から紀元1年にかけて，人間が森林を切り開いて，農耕や牧畜をいとなんでいたことを表しています。地表から森林が失われると，雨が地表面を流れ，土壌の侵食が起こります。とりわけ，川の上流の森林が伐採されると，川が増水しやすくなって，大量の土砂が下流に運ばれることになります。したがって，エフェソスでは，洪水がたびたび起こるようになり，大量の土砂が上流から下流に運ばれて海岸線が前進したものと考えられます。なお，紀元1年ごろを境とするイネやオオバコなどの花粉の減少はそれまで住んでいた人間が何らかの原因で他の地域に移住したことを示すものです。

こうして人間が農耕や牧畜をはじめると，気候変動よりも人間活動の方が森林の消失を進め，森林の消失は，まわりの環境にまで影響をおよぼし，地形を変えていったのです。

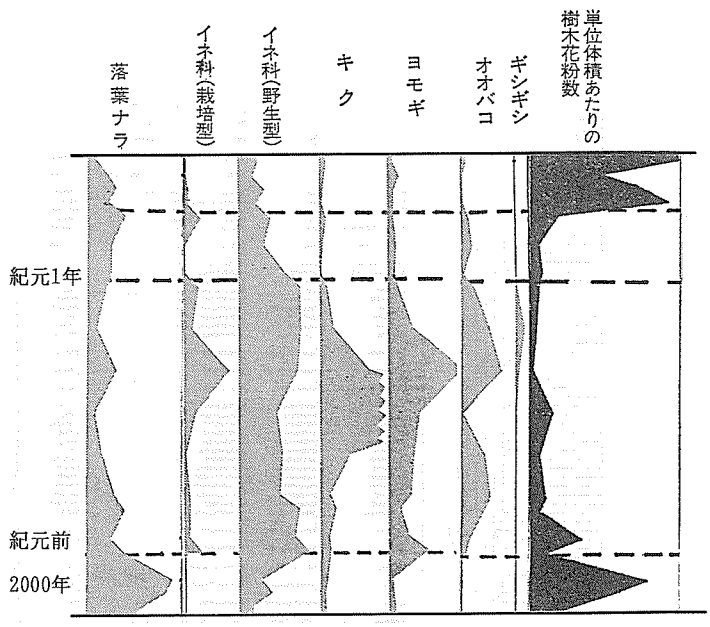


図1—7　トルコ・チブリル湿原の花粉ダイアグラム

（安田喜憲『文明は緑を食べる』，読売新聞社，1989，P 53の図をもとにしました）

ギリシャ・ローマ時代には辺境の地であったヨーロッパに都市が成立したのは9～10世紀ごろのことです。都市が発達するにつれて，農耕地・牧草地の拡大による森林伐採に加えて，造船・冶金・製鉄などによる木材の消費が進み，ヨーロッパをおおっていた森林はしだいに姿を消していきました。

今日のイギリスには，ヒースという，地をはうように生えるツツジ科の植物におおわれた荒野が広がっています。ヒースは，いつごろ，どのようにして形成されたのでしょうか。

問題1　つぎのことを花粉ダイアグラム（図1—8）から読みとり，ヒースがつくられた原因を推定しなさい。

(1)　カバノキ・ハンキ・ハシバミなどの森林の減少しはじめたのはいつごろですか。
(2)　ツツジ科のヒースが増えはじめたのはいつごろですか。
(3)　イネ科やヘラオオバコなどが急増したのはいつごろですか。

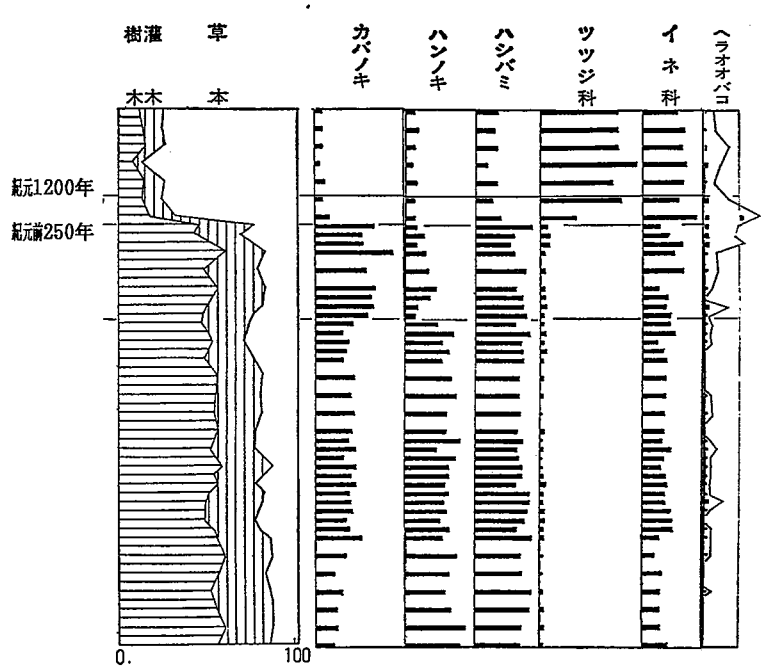


図1—8　北ヨークシャー・ハンブレトン丘陵の花粉ダイアグラム

（安田喜憲『森林の荒廃と文明の盛衰』，思索社，1988，P 246の図をもとにしました）

(1)(2)(3)はいずれも紀元前250年以降です。花粉ダイアグラム（図1—8）は，紀元前250年から中世にかけて，カバノキ・ハンノキ・ハシバミなどの森林が減少し，それらにかわってツツジ科の花粉が急増するとともに，イネ科やヘラオオバコのように農耕や牧畜に関連する花粉が増加していることを示しています。したがって，農耕牧畜活動によってカバノキ・ハンノキ・ハシバミなどの森林が伐採された結果，ヒースを構成するツツジ科の植物が増加したものと思われます。

こうして中世には，今日のイギリスを代表する植生すなわちヒースが，人間の活動をきっかけとして，形成されたわけです。産業革命以後，人間活動の中心が農耕・牧畜から工業へと移り，人間の自然へのはたらきかけがますます強まると，森林はさらに減少していきました(図1—9)。しかし，19世紀以降，一部の地域では大規模な森林の再生が見られました（図1—10)。これはなぜでしょうか。

質問3　近代に入り，イギリスの一部の地域において，森林が大規模に再生した原因は何だと思いますか。

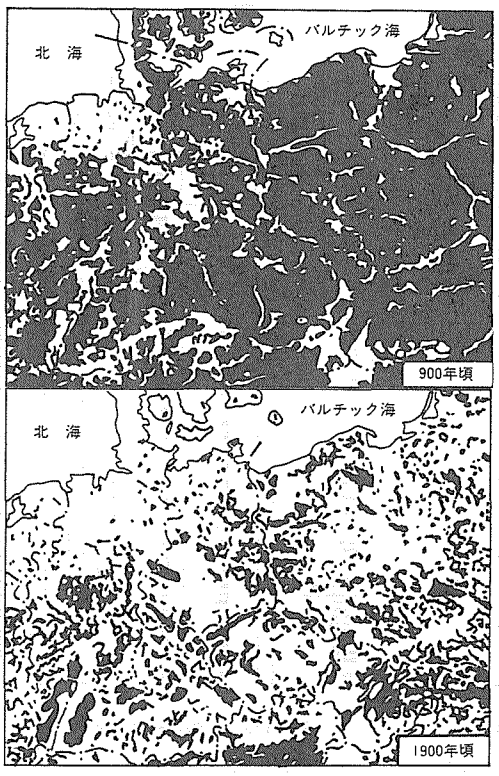


図1—9　中世以降のヨーロッパにおける森林の衰退

（内嶋善兵衛『ゆらぐ地球環境』，合同出版，1980，P 76）

それは植林です(図1—10)。人間は，農耕や牧畜や工業のために，長い間，森林を伐採してきました。その結果，洪水やかんばつなどの災害が増えました。そうしてはじめて人間は，森林の重要性に気づき，植林という自然へのはたらきかけをはじめたのです。しかし植林は，イギリスに限ったことではなく，ヨーロッパの他の国々でも大規模におこなわれるようになりました。

こうして人間は，森林を伐採して農耕地や放牧地に変えたばかりか，森林という自然さえもつくり出し，人間生活圏を形成していきました。しかし，その過程の中で，多くの生物が姿を消していきました。つぎの章では生物種の絶滅について考えてみることにしましょう。

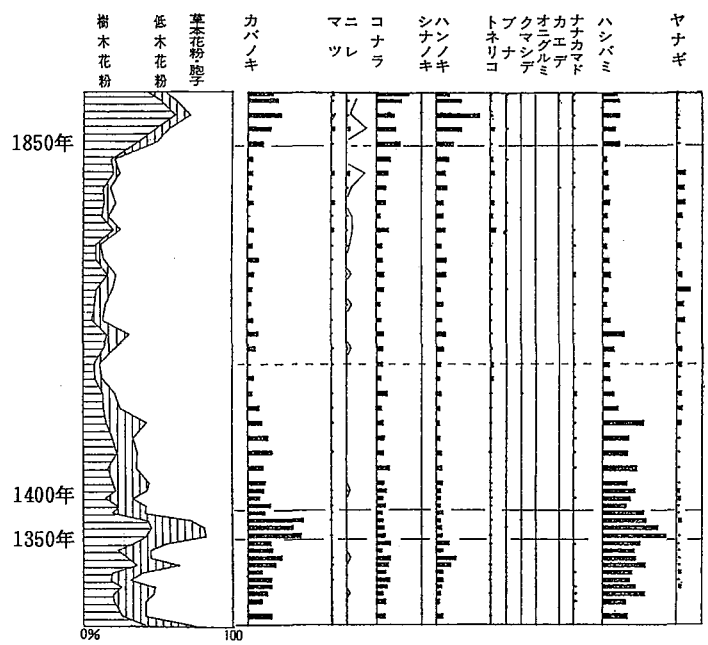


図1—10　北ヨークシャー・ナースギルウッドの花粉ダイアグラム

（安田喜憲『森林の荒廃と文明の盛衰』，思索社，1988，P 245 の図をもとにしました）

14 世紀における森林の増加の原因は，ペストの流行や気候悪化による農作物の不作のため，人口が減少したことにあると考えられています。

2　生物種の絶滅

2—1　生物種の絶滅＝生態系の単純化

人間は，農業や牧畜などによって，人工的な生物世界をつくり，食糧の安定的な供給を確保してきました。それはまた，森林のように複雑な自然生態系をはぎとって，人工林や畑や水田のように単純な人工生態系におきかえるという過程でもありました。このような人間生活圏の形成過程の中で，たくさんの生物種が地球上から姿を消していきました。とりわけ，20世紀に入り，世界各地に工業化や都市化の波がおしよせるようになると，人間の経済活動によって種の絶滅が急速に進みました(図2—1)。今日の種の絶滅速度は，恐竜時代の100万倍以上ともいわれ，今後ますます速くなることが予測されます（表2—1)。では，種の絶滅は人間にとってどんな意味をもつのでしょうか。

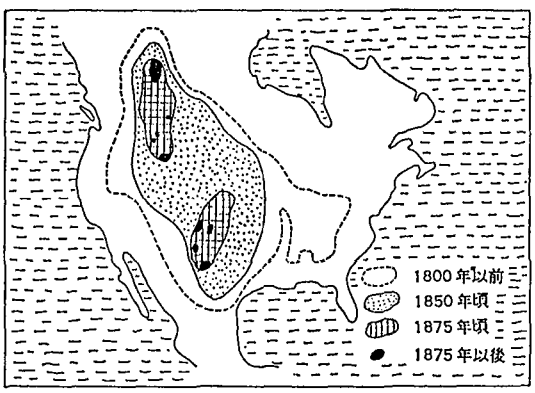


図2—1　アメリカバイソン生息域の人為的な縮小（宮下和喜，前掲書，P 55）

体重1500 kgにも達するアメリカバイソンは，1830年ごろには北アメリカ大陸全土でおよそ7500万頭もいましたが，人間による大量虐殺によって，1889年にはわずか200頭になってしまいました。

表2－1　過去の絶滅速度の推定と今後の予測

（環境庁長官官房総務課『地球環境キーワード事典』、中央法規、1990、p75）

◉種の絶滅速度（推定）	
区　　分	速度(種／年)
恐竜時代	0.001
1600～1900年	0.25
1900年	1
現在(1975年)	1,000
2000年までの25年間平均	40,000

生物は，互いにかかわりをもつとともに，まわりの環境とも深い関係をたもち，一つのまとまりをつくっています。このまとまりを生態系とよびます。

わずか500 cc のフラスコでも，その中に水と竹の煮汁を入れて，野外に放置しておくといろいろな生物（図2—2）が入ってきて，一つの生態系をつくります。1カ月後には，バクテリア，原生動物，クロレラ，ラン藻，ワムシなどの生物が見つかりました。その後，これらの生物はどうなるでしょうか。

質問4　フラスコを野外においてから半年後，バクテリア，原生動物，クロレラ，ラン藻，ワムシなどの生物の個体数はどうなると思いますか。

(1)　それぞれ食べたり食べられたりしながら一定の数に落ち着いている。
(2)　他の生物に食べられないワムシだけが生き残っている。
(3)　もっとも繁殖率の高いバクテリアだけになっている。

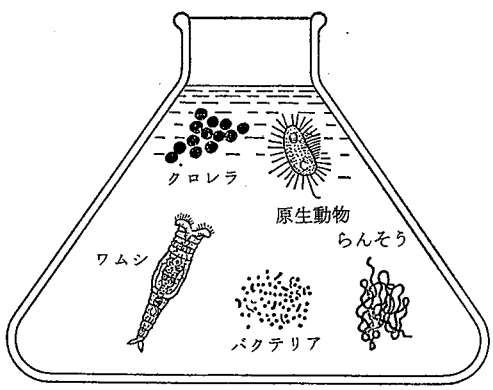


図2—2　フラスコの中の生物

（栗原康『有限の生物学』，岩波新書，1975，P 5）

☞バクテリア～原核生物（核が核膜で包まれていない原始的な生物）
ラン藻～原核生物，地球上で最初に光合成をはじめた生物
原生動物～真核生物（核が核膜で包まれている生物），単細胞生物
（例）　アメーバ，ゾウリムシ
ワムシ～真核生物，多細胞生物
クロレラ～緑藻植物

正解は(1)です（図2—3)。これらの生物間の相互作用を調べてみると，「食べる—食べられる」だけではなく，「おさえる」「生産する」「競争する」「自己抑制する」という相互作用（図2—4）が複雑にからみ合って，それぞれの生物の個体数が一定に保たれ，フラスコの生態系が成り立っていることがわかります。たとえば，バクテリアは原生動物やワムシに食べられますが，その排泄物は反対に原生動物やワムシの個体数をおさえるというように，それらの間には「食べる—食べられる」と「おさえる」の相互作用があるというわけです。

では，この生態系においてバクテリア以外の種を絶滅させ，バクテリアだけの状態をつくり出したら，どういうことになるのでしょうか。

質問5　実験室の中で，500 cc の水と栄養物を加えたフラスコに一種類のバクテリアを入れて，しばらく放置したら，バクテリアの個体数はどうなると思いますか。

(1)　一定の割合で増えつづける。
(2)　はじめは急速に増えるが，その後は一定になる。
(3)　はじめは急速に増えるが，その後急速に減る。

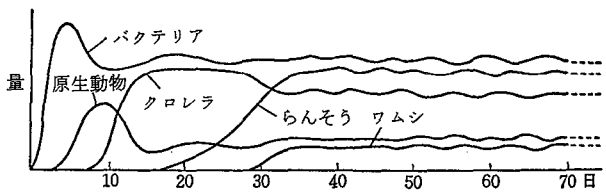


図2—3　フラスコの中の遷移（栗原康，前掲書，P 8）

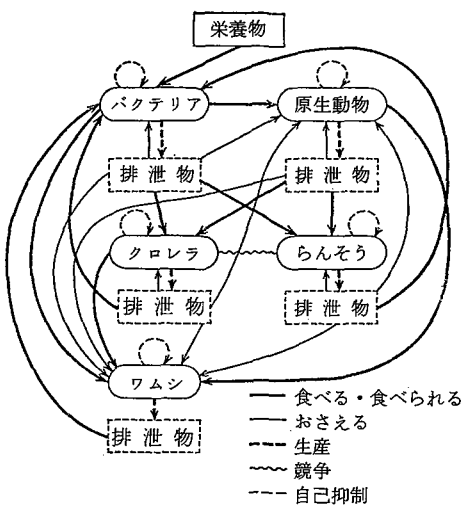


図2—4　フラスコ内の相互作用（栗原康，前掲書，P 55）

正解は(3)です(図2—5)。バクテリアは，はじめは食糧を食べてふえていきますが，やがて食糧が不足し，自らの排泄物によって環境が汚染されるようになると，急速に個体数を減らしていくのです。

こうして極端に単純化された生態系では，物質循環が起こらず，生物は資源枯渇と環境汚染によって死滅していきます。つまり，種の絶滅は，その種の死滅にとどまらず，生態系を単純化することによって他の種もまきぞえにするものと思われます。したがって，生態系の単純化は，生物に依存する人間の生存基盤を危うくすることを意味することになります。

では，種の絶滅による生態系の単純化は，具体的にはどのような人間活動によって起こっているのでしょうか。

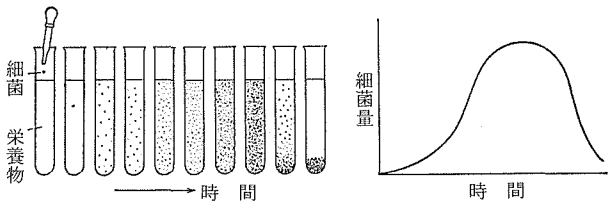


図2—5　1種類のバクテリアの増殖（栗原康，前掲書，P 3）

2—2　自然生態系の単純化

2—2—1　シロナガスクジラが見つからない

人間は，人工生態系をつくりながらも，いまなお野生生物に依存している部分もあります。とりわけ魚をはじめとする水産資源の場合は，養殖技術が開発されてはいるものの，まだその収獲の大部分は自然にたよっています。日本のように海に囲まれた国ではなおさらです。近年漁業の中心が沿岸から遠洋に移るようになると，私たちの食卓は世界中の海の魚でにぎわうようになりました。しかし，かつて日本人の重要なタンパク源の一つだったクジラが最近手に入りません。これはどういうことなのでしょうか。

質問6　近ごろ店頭でクジラの肉が見つからないのはなぜだと思いますか。

(1)　現在捕鯨は国際的に全面禁止されているから。
(2)　日本人の食生活が牛肉・豚肉・鶏肉などの家畜を主とするようになったから。

正解は(1)です。20世紀に入り，トロール漁船による漁法の近代化がはじまると，漁獲高は飛躍的に伸びていきました。その結果，南および東シナ海のキダイやマダイのように，とりすぎによって勢力がおとろえる魚が見られるようになりました。クジラのようにもともと個体数が少なく繁殖率の低い生物は，人間の乱獲をうけると，たちまち数が減ります。体重150トンにもおよぶ史上最大の動物＝シロナガスクジラはかつて広く世界の海に分布していました。ところが，日本をはじめとする捕鯨国が母船式の捕鯨船をくり出してクジラの増加率をはるかにこえる数のクジラを捕獲するようになると，その勢力は急速におとろえていきました(図2—6)。他のクジラも同様に減少しました。やがて，クジラの捕獲数を国際的に管理しようという気運が生まれ，1937年には国際捕鯨取締協定ができ，51年からは資源保存に必要な規制措置を決める機関として国際捕鯨委員会（IWC）ができました。82年IWCは，クジラを絶滅の危機から救うため，エスキモーやシベリアの少数民族以外の捕鯨の全面禁止を決定しました。世界一の捕鯨国＝日本でも，87年には南極海母船式捕鯨を，88年には沿岸捕鯨をやむなく中止しました。しかし捕鯨再開につよい意欲を示す日本は，87年以降も資源量の調査と称して南極海で合計900頭のミンククジラを捕獲し，欧米を中心とする反捕鯨国の非難をあびています。

クジラの個体数をもとにもどすためには，いますぐ捕獲をやめても，50年あるいはそれ以上かかるといわれています。今日の人間は短時間でクジラのような巨大な生物まで絶滅させるほどの力をもつようになりましたが，生物がその勢力を回復するには大変長い時間がかかるのです。

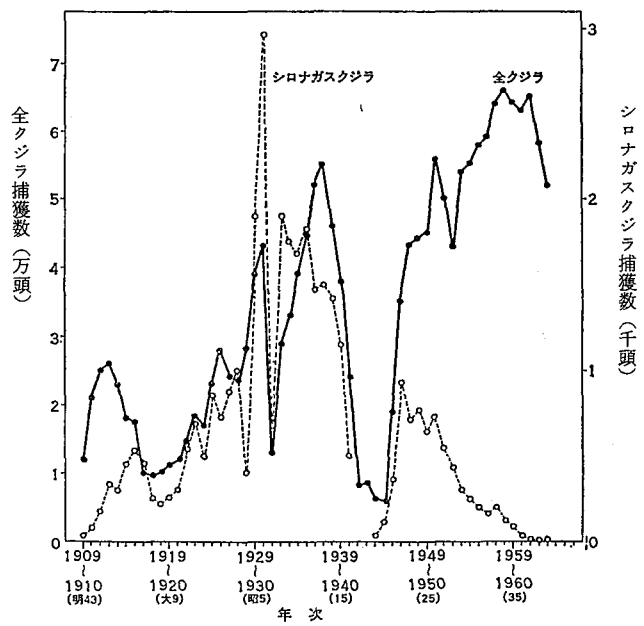


図2—6　シロナガスクジラの捕獲数の推移（宮下和喜，前掲書，P 211）

こうして人間は，かぎられた野生生物の乱獲によって，貴重な生物資源をつぎつぎと失っています。人間生活に必要な生物種が失われることは人間の生存の基盤をあやうくします。しかし，人間生活とは直接関係のない生物種の絶滅も，生態系の単純化という意味で，人間の生存に大きな影響をあたえるものと思われます。

2—2—2　海の熱帯林が砂漠になった

サンゴ礁の主体は造礁サンゴというイソギンチャクと同じ腔腸動物の骨格や殻の堆積物すなわち石灰岩からできています(図 2—7)。造礁サンゴは植物の褐虫藻から酸素や栄養分をとり入れ，褐虫藻は造礁サンゴの排出した老廃物や二酸化炭素を得ています。このように造礁サンゴは褐虫藻と共生しているため，その生息地は，褐虫藻の光合成が可能な地域，つまり暖かくてきれいな海の水深 100 m 以内に限られています。

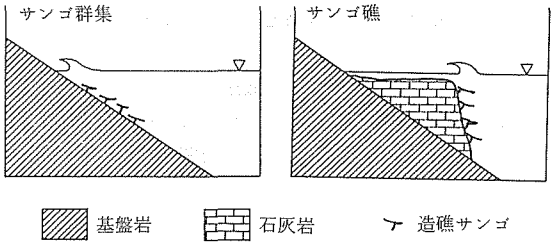
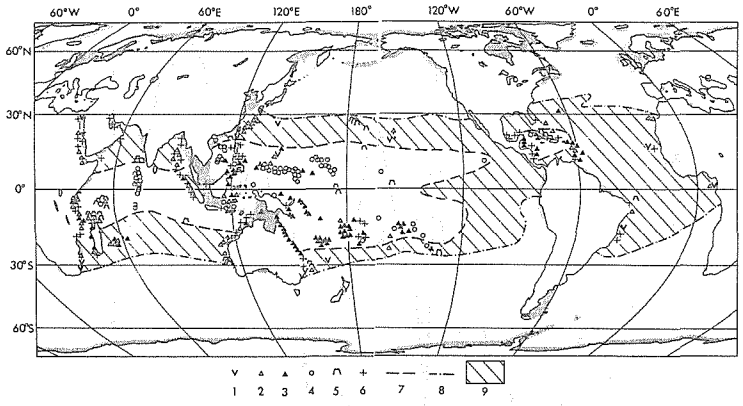


図 2—7　サンゴ礁とサンゴ群集

（サンゴ礁地域研究グループ『熱い自然』，古今書院，1990，P 64）



1～6：サンゴ礁のさまざまなタイプ

7：氷期におけるサンゴ礁の海域　8：間氷期におけるサンゴ礁の海域

図 2—8　世界のサンゴ礁（サンゴ礁地域研究グループ，前掲書，P 12）

したがって，サンゴ礁は熱帯の海を象徴する生物地形といえます。しかし，亜熱帯の沖縄にもサンゴ礁は存在します(図2—8)。それは，北西太平洋を北上する黒潮の影響のため，この海域の水温が緯度のわりには高いからです。ところが，沖縄のサンゴ礁は1972年の本土復帰とほぼ同時に死滅しはじめ，現在ではその90パーセント以上が壊滅状態にあるといわれています(図2—9)。最後の氷期の終わった今から1万年前に発達しはじめたサンゴ礁がわずか10数年間でほとんど破壊されてしまったというわけです。この原因にはオニヒトデ(図2—10)の大発生による食害があげられます。しかし，それだけではありません。

質問7　沖縄のサンゴ礁を破壊したもう一つの原因は何だと思いますか。

(1)　サンゴ礁に群がる魚をとるためにダイナマイトを利用したから。
(2)　開発工事にともなう埋め立てや河川からの土砂の流入のため。

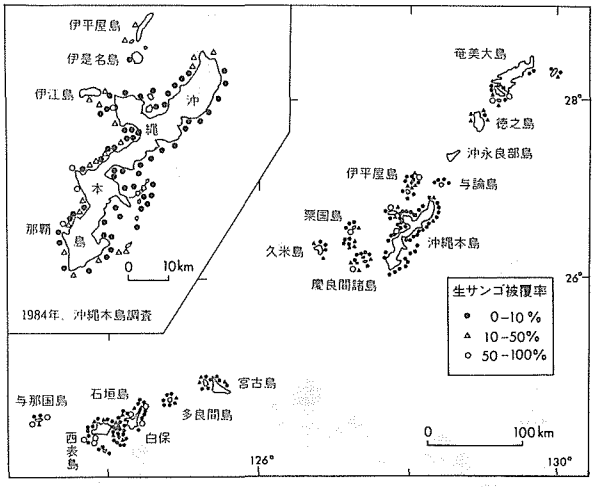


図2—9　琉球列島の生サンゴ被度（1981～85年）

（小橋川共男，目崎茂和『増補版・石垣白保サンゴの海』，高文研，1988，P 104）

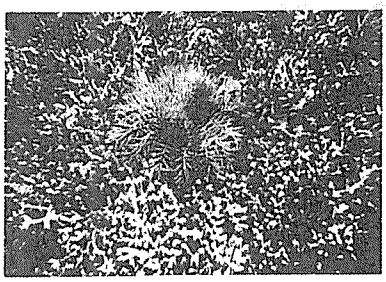


図2—10　サンゴを食べるオニヒトデ

（サンゴ礁地域研究グループ，前掲書，P 273）

(2)が正解です。(1)はフィリピンの漁法です。沖縄では本土復帰とともに大規模な開発がはじまり，港湾，空港，道路などが急ピッチで整備されました。しかし，環境保全と地域住民を無視した開発のやり方は自然環境の大規模な破壊をもたらしました。サンゴ礁はその一例です。

サンゴ礁はまず埋め立て（図2—11）によって消失しました。農地の造成や道路・ゴルフ場の建設などにともなう土砂の流入によっても，サンゴ礁は破壊されました。土壌の流入によって海水がよごれると，造礁サンゴの体内に共生している褐虫藻の光合成ができなくなるため，褐虫藻から酸素や栄養を得ているサンゴが死滅するからです。なお，オニヒトデの大発生の原因についても，単なる自然要因というより，人為的要因が深く関与している可能性が高いものと考えられています。開発によって陸地から大量の土砂とともに栄養塩が供給されると，植物プランクトンが増え，オニヒトデ幼生の生存率が高まることが報告されているからです。では，サンゴ礁が破壊されると，どんなことが起こるのでしょうか。

質問8　サンゴ礁が破壊されると，どんなことが起こると思いますか。

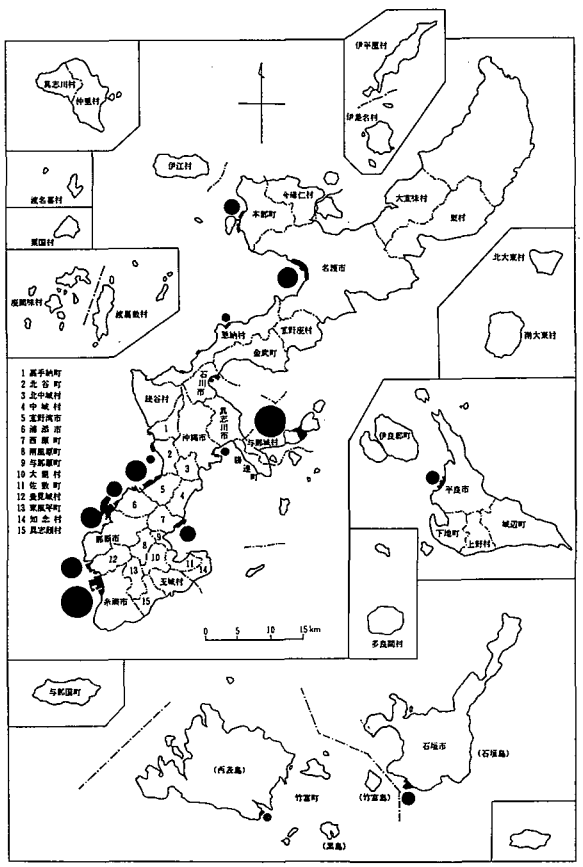


図2—11　沖縄の埋めたて事業分布（1972～85年）

（サンゴ礁地域研究グループ，前掲書，P 292）

サンゴ礁は，「海の熱帯林」とよばれるほど，多様な生物種が生息しています。したがって，サンゴ礁が破壊されると，その生態系を構成する魚類や甲殻類，貝類など多くの生物が姿を消し，まるで「海の砂漠」のようになります。サンゴ礁の破壊は，とりもなおさず，サンゴ礁に生息する魚に依存してきた住民の生活の破綻を意味します。サンゴ礁の破壊が大規模になると，大気中の二酸化炭素の増加をひき起こす可能性もあります。サンゴは大気中から海にとけこんだ二酸化炭素を石灰質の骨格に変えているからです。

こうしてサンゴ礁が破壊されていく中で，奇跡的に生き残っていた石垣島の白保地区のサンゴ礁が，新石垣島空港建設のために国によって埋め立てられようとしています。しかし，1987年の国際自然保護連合（IUCN）の調査によって，そこに生息するアオサンゴが北半球で最大，最古であること，巨大なハマサンゴが高密度で存在することなどが明らかになると，国の内外でその保護運動が高まってきました。翌88年IUCNは白保のサンゴ礁を保護するよう日本政府に勧告しました。これは以前から空港建設に反対してきた多くの地元住民を勇気づけ，その運動の正しさを裏づけるものでした。それにもかかわらず，国は，十分な環境影響評価（アセスメント）もおこなわず，空港の位置を少しだけずらして，計画を強行しようとしています（図2—12）。

このように自然生態系では，人間による直接的な生物の乱獲とともに，自然生態系を人工生態系へとおきかえることにともなう生息地の破壊によって，生物種が急速に失われ，生態系が単純化されているのです。

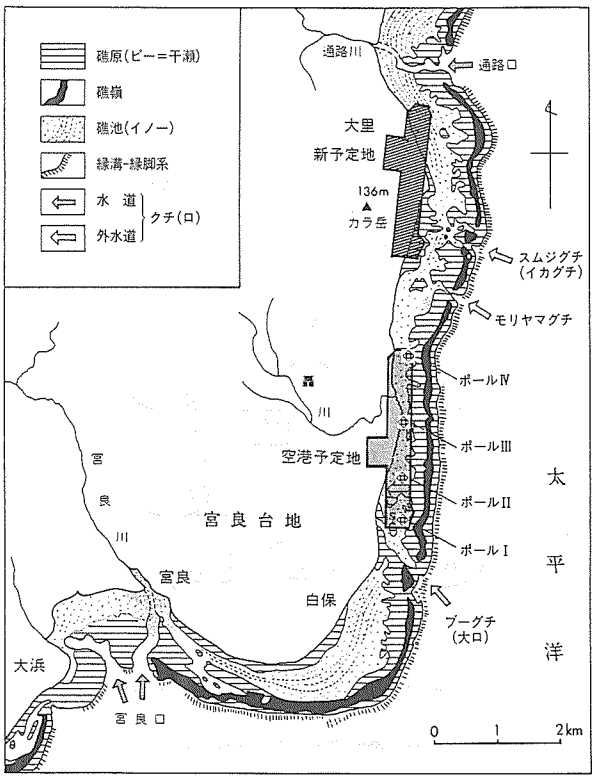


図2—12　石垣島白保地区周辺のサンゴ礁と新空港建設予定地

（小橋川共男，目崎茂和，前掲書）

2—3　人工生態系の単純化

2—3—1　キンモンホソガの大発生

今日人間は，生態系がすでに単純化された農耕地においてさえ，殺虫剤の散布などによって種を減らし，生態系をさらに単純化しています（図2—13）。生態系の単純化は，生態系を不安定なものにし，ある種の動物の大発生を誘発することがあります。

1959年，長野県須坂市のリンゴ園でリンゴの害虫キンモンホソガの大発生が起こり，約2千ヘクタールのリンゴ園が大打撃をうけました。この原因を調べたところ，意外な事実が明らかになりました。大発生は，農薬をひんぱんにつかったリンゴ園で起こり，農薬をあまりつかわなかったリンゴ園ではほとんど起こらなかったというのです。これはなぜでしょうか。

質問9　害虫の大発生が農薬をひんぱんにつかったリンゴ園に集中したのはなぜだと思いますか。

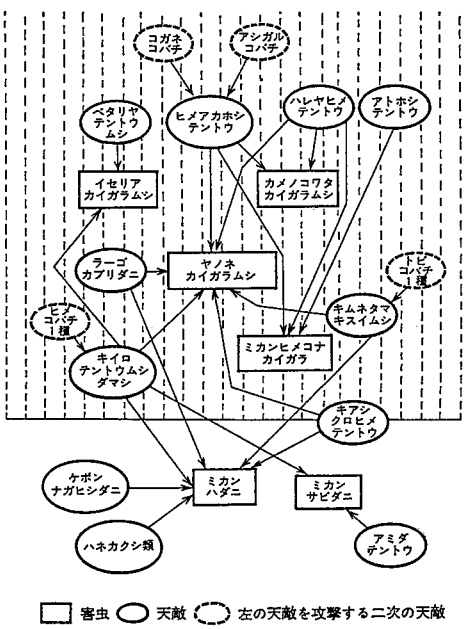


図2—13　ミカン園の害虫（宮下和喜，前掲書，P 204）

カイガラムシを駆除しようとして殺虫剤をひんぱんにまくと，破線の部分が消失し，横線から下に示すような単純な関係だけになります。このため，ミカンハダニやミカンサビダニの急激な増加が起こり，これらの被害に悩まされます。

園芸試験場の調査によれば，農薬をあまりつかわなかったリンゴ園で少しづつ増えたキンモンホソガが，風にのって農薬をひんぱんにつかっていたリンゴ園に侵入し，そこで大発生したということでした（図2—14）。つまり，あまり農薬をつかわなかったリンゴ園では，天敵が生き残り，キンモンホソガの大発生をおさえていたのに対し，農薬をひんぱんにつかったリンゴ園では，大量の農薬によってキンモンホソガの天敵の昆虫まで殺したため，外部から侵入したキンモンホソガが爆発的に増えていったというわけです。

これと同じようなことは1989年北海道の仁木町でも起こり，現在農薬農家と無農薬農家との間で農薬使用の是非をめぐって裁判がおこなわれています（資料2—1）。

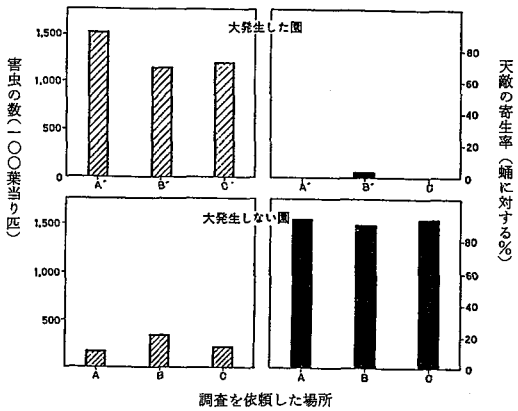


図2—14　キンモンホソガの大発生した園としない園

（宮下和喜，前掲書，P 147）

リンゴ裁判 1年7カ月

栽培管理が無責任 原告主張
農薬の代償大きい 被告反論

「リンゴが黒星病にかかったのは、無農薬栽培をしている隣の農家が、農薬を散布しなかったからだ」――後志支庁仁木町の農業、山下忠さん(63)が、隣家の農業、江本雄悦さん(同)を相手取り、約百七十五万円の損害賠償を求める民事訴訟を起こしてから、約一年七カ月がたった。裁判ではこれまでに、双方の主張が一通り終わり、証人等問に入ったところ。一方、江本さんを支援するグループは、来年一月にシンポジウムを開こうと、準備を始めた。無農薬農業への関心が高まる中、そのあり方や消費者の姿勢を問う「リンゴ裁判」の今は――。

〈裁判〉札幌地裁小樽支部で行われた過去九回の口頭弁論で、江本さん側は「農家には、農法選択の自由がある。農薬の有益性はわかるが、代償は大きい。自分の試みをつぶさないでほしい」と主張。また、「無農薬栽培は現代の潮流。今後、無農薬栽培と黒星病発生との因果関係だけでなく、農薬使用の是非を正面から問うことなどに、日本の農業の問題点を、具体的に明らかにしていく」との見解も示した。

一方、山下さん側は「江本さんの栽培方法は、悪くいえば放置しているだけ」と反論。この裁判は、「農薬か無農薬か」を裁判するものではない、と江本さん側とのスタンスの違いを強調したうえで、「なるべく農薬をかけないようにするのがいい。ただ、今回の問題は、前の年の黒星病の病原菌が越冬するのを防ぐため、病のついた落ち葉を処分するなど、栽培管理を江本さんがしなかったことにある」と、責任論を展開している。

〈問われているもの〉江本さんの弁護団は、「黒星病に一部やられただけのリンゴは、外見が悪いだけ。それを買いたがらない消費者がいるから、流通側も売れない、と判断してしまう。そうした消費者側の意識についても、この裁判は問うていく、と考えている」と話す。

江本さんを支援する会が発行している裁判ニュース「林檎(りんご)だより」には、こんなくだりがある。「この裁判で教われるべきは、原告でも被告でもなく、我が国の農業を化学肥料と農薬漬けにしてはばからない、現在の農業政策のあり方だ、と弁護団はいう。もっとも、国の農業政策ばかりで農薬漬け農業が生まれたものでもない。むしろ、(叱られるべきは)美しいもの、規格に合ったものしか流通(販売)に乗らない社会そのものだ、というべきではないか……」

資料2—1　朝日新聞　90年10月30日

もともと農薬は天敵を殺し害虫を増やすものです。農作物を食べる害虫は草食性昆虫で，その天敵は肉食性昆虫であるため，害虫の方が，天敵より数が多く，抵抗力が繁殖力にすぐれているからです。したがって，農薬によって害虫を完全におさえるには，農薬を大量にしかもひんぱんにつかうしかありません。このような農薬の大量散布にともなって農民の農薬中毒事故が増えたこともあり，日本では1958年から農薬の空中散布がはじまりました。

2—3—2　農薬の空中散布がはじまった

85年現在日本における農薬の空中散布は650万ヘクタールに達しました(図2—15)。これは水田と畑をあわせた総面積をこえています。松くい虫や野ネズミの防除として森林にも農薬が空中散布されているからです。たしかに70年代から日本全国で松枯れがひどくなってきました。その原因には大気汚染，富栄養化，病原菌などが考えられますが，農水省は，科学的な根拠もないままに，松枯れの原因をマツノセイザンチュウという線虫と決めつけ，その線虫を伝播するマダラカミキリムシを松くい虫として駆除することにしたのです。87年には松くい虫防除のための空中散布だけでも25億円の国家予算が計上されています。

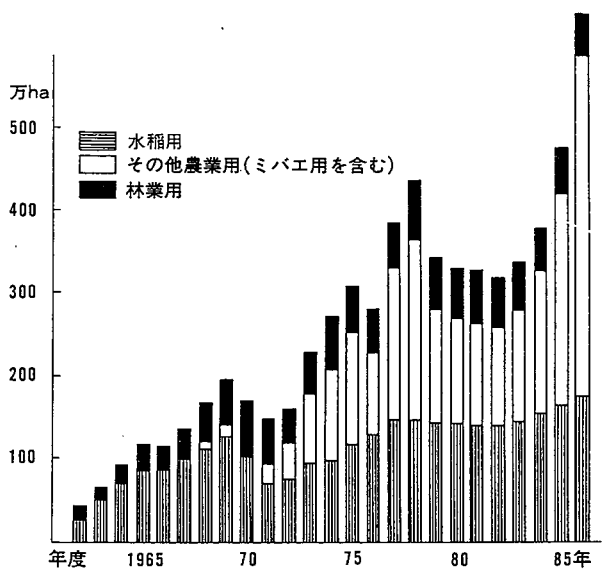


図2—15　空中散布面積の推移

(谷山鉄郎『恐るべきゴルフ場汚染』，合同出版，1990，P 108)

86年群馬県沼田市で松くい虫防除のためにスミチオンという農薬の空中散布がおこなわれました。そのときの調査では，スミチオン散布によって殺された虫の中にはクモなどの益虫が多く，目的とするマダラカミキリは一匹も見つかりませんでした。これには，マダラカミキリムシがスミチオンをかぶってもすぐには死なないとか，その場で死なずに他の場所で死ぬということも考えられないことはありません。しかし，たとえそうだとしても，他の多くの生物をまきぞえにすることによって生態系を単純化していることには違いありません。

ところで，農薬の空中散布によって大気はどれくらいの期間汚染されているのでしょうか。

質問10　空中散布後農薬は大気中をどのくらい浮遊しつづけると思いますか。

(1)　数時間
(2)　2～3日
(3)　1週間以上

(3)が正解です。福島市における調査では農薬は散布された付近の大気中を空中散布後1週間浮遊していました（図2—16）。これは測定期間が1週間だったからそうなので，もっと長い間調査がおこなわれていれば，それどころではないはずです。空中散布された農薬は，一度樹木や地面に落ちても，気温の上昇とともに気体となって大気中にもどるため，昼間は気温が高いので濃度が上がり，夜間は気温が低いので濃度が下がるという状態をくり返して，大気を汚染するからです。その結果，散布地周辺の住民は下痢や頭痛，はき気，腹痛などにおそわれています。スミチオンの場合，わずかな量でも長い間吸っていると，視神経や自律神経が侵され，脳波に異常をきたすこともあります。このような調査結果がNHKで報道されると，市民の間から反対運動が起こり，福島市では農薬の空中散布が中止されました。

こうして農薬の空中散布は，生態系の単純化はもとより，人間の健康障害もひき起こしているのです。しかし，農薬の大量使用はこれにとどまるものではありません。

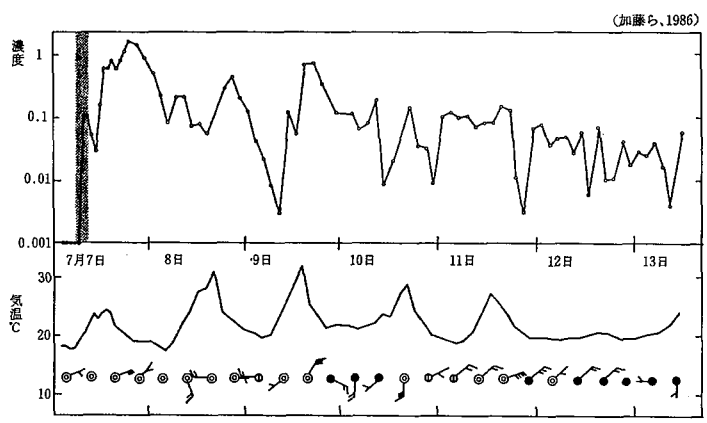


図2—16　福島市信夫山のスミチオン大気濃度日変化（1986年）
（谷山鉄郎，前掲書，P 125）

2—3—3　農薬まみれのゴルフ場

1990年現在日本のゴルフ場の総面積は東京都の面積に相当するほどになりました。ゴルフ場造成による自然破壊もさることながら，農薬による水汚染がいま大きな社会問題になっています。

89年11月，北海道恵庭市のゴルフ場付近の養殖場で，ヤマベなど9万匹の魚が一晩で死んだ事件はまだ記憶に新しいところです(資料2—2)。この原因は前日にゴルフ場で散布された農薬がその晩の雨とともに養殖場で取水していた川に流れこんだことにありました。水田や畑でも，農薬をつかっていながら，このようなことはめったに起こりません。それにもかかわらず，どうしてゴルフ場の農薬は，雨が降るとすぐ河川に流れ出し，水汚染を起こすのでしょうか。

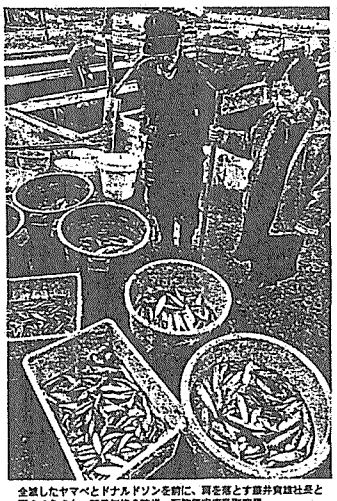
質問11　ゴルフ場の農薬が雨によってすぐ河川に流れ出すのはなぜだと思いますか。

(1)　ゴルフ場の地下には排水管が埋設されているから。
(2)　ゴルフ場には排水のよい土地が選ばれるから。

養殖魚死 9万匹に

広島町の養魚池 ヤマベなど全滅

上流ゴルフ場で農薬散布
道、因果関係を調査



全滅したヤマベとドナルドソンを前に、肩を落とす藤井貴雄社長と妻のやえさん＝20日午後2時半、石狩管内広島町南黒

【広島】二十日午前、石狩管内広島町郊外の養魚場で、ドナルドソンなどの養殖魚が大量に死んでいるのが見つかった事件で、死んだ魚の数は推計約九万匹にのぼることが四日までの道と石狩管理部の調べで明らかになった。また、養魚場付近のゴルフ場が十八日に芝張り用の農薬を散布しており、道は魚の大量死の原因について、農薬などの影響が水路の川から養魚池に入りふ化の能性も考えられるとして、死んだ魚のサンプルや水を採取するとともに、因果関係について関係者から詳細聴取、本格的に調べ出した。

魚が大量死したのは、魚山開発が経営する養魚場。約二千トンの養魚池があり、約九万匹（時価四百万円相当）が放流されていた。石狩管理部などによると、十八日午前十時ごろ、同社の藤井貴雄社長（七〇）、本社・札幌市白石区）から、ドナルドソン約一万五千匹とヤマベ約四万匹の「ように、魚が死んでいる」と届け出があった。

藤井社長によると、十八日午前七時ごろ、池の水が白く濁っているのに気付いた。池にはヤマベやドナルドソンが泳ぎ回っていたが、ほとんどが死んでいた。

藤井社長は「農薬による被害なら補償してもらう」と話すが、近くの水路から流れ込んだ可能性もあるという。

藤井社長によると、死んだ魚は体長十センチ前後のヤマベやドナルドソンなどで、全滅したという。池には十八日午後から二十日午後にかけて次々と死に、水路の農薬散布後に大量の魚が一度に死んだとみられるという。

藤井社長は「ヤマベやドナルドソンなどを、来春の放流用に育てていた。ショックで声にならない」と話している。

藤井社長によると、死んだ魚は体長十センチ前後のヤマベやドナルドソンなどで、全滅したという。池には十八日午後から二十日午後にかけて次々と死に、水路の農薬散布後に大量の魚が一度に死んだとみられるという。

藤井社長は「ヤマベやドナルドソンなどを、来春の放流用に育てていた。ショックで声にならない」と話している。

資料2—2　北海道新聞　89年11月21日

正解は(1)です。ゴルフ場造成の第一条件はいかにして排水をよくするかということです。そのため，ゴルフ場の地下は，地表から30センチまでが砂主体の混合土壌，その下15センチまでが砂，さらにその下に排水管がうめられています。したがって，芝生に降った雨は，芝生にまかれた農薬といっしょに砂の中へ浸透し，排水管を通って貯水池にためられますが，大雨が降ると池の水があふれ，外部の河川に流れ出してしまうのです。

一方，水田や畑の土壌は，粘土質が多く，散布された農薬や化学肥料を吸着します。水田には水や土が流出しないようにまわりに畦があり，畑にも土手があります。つまり，水田や畑の工法は閉鎖系であるのに対し，ゴルフ場は開放系であるといえるのです。

ゴルフ場の農薬による水汚染の根源は，ゴルフ場の造成方法だけでなく，農薬の大量使用とそれを見過ごしてきた環境行政にもあります。最近の調査によれば，1ゴルフ場あたり使用される農薬は，年間2.2トンに達し，単位面積当たりの量は農地にまかれる農薬(表2—2)(日本が世界でとびぬけて多い！)の2倍にもなっています。一見，さわやかに見えるゴルフ場は，化学肥料や芝につかう除草剤と着色剤あるいは樹木類につかう殺虫剤などによって維持されているのです。これらの農薬の中には発ガン性のあるものも多くふくまれており，河川から水道水への混入や食物の残留農薬による人体被害も予想されることから，ゴルフ場造成への反対運動が全国各地で起こりました。こうしてはじめて農水省はゴルフ場の農薬に農薬取締法を適用するようになったのです。1988年のことです。したがって，それまでゴルフ場の農薬は野放しだったというわけです。

このように人工生態系では，農薬の大量使用によって食糧の増産や雑草の駆除が実現された反面，鳥や昆虫も姿を消し，人間自身も直接農薬の被害をうけているのです。しかし，農薬の毒性が人々に知れわたるにつれて，消費者の間には反農薬の意識が高まり，その結果，無農薬や減農薬の農作物の生産量がしだいに増えはじめています。

表2－2　農薬使用量と主要農作物収穫量

(谷山鉄郎、前掲書、p88)　　Edwards 1986

	農薬使用量(kg／ha)	農作物収穫量(ton/ha)
日本	10.8	5.5
ヨーロッパ	1.9	3.4
アメリカ	1.5	2.6
ラテン・アメリカ	0.22	2.0
オセアニア	0.20	1.6
アフリカ	0.13	1.2

2—4　地球規模の人間生活圏の成立

2—4—1　湖の魚が消えていく

ノルウェーの湖では1960年以降魚が急速に姿を消しはじめ，80年代にはその20%以上の湖で，魚の種が減少したり，絶滅したりしています（図2—17）。スカンジナビア半島のスウェーデンやフィンランドでも同じようなことが起こっています。これらの湖のまわりには人は住んでいません。しかも，水は澄んでいて，とても美しく見えます。それにもかかわらず魚が姿を消していったのは湖の酸性化が原因でした。では，湖が酸性化すると，どうして魚が死ぬのでしょうか。

質問12　湖が酸性化すると魚が死滅するのはなぜだと思いますか。

☞酸性かどうかは，水の中の水素イオン濃度によって決まり，水素イオン指数pHによって表されます。pHは0～14まであり，pH＝0～7を酸性，pH＝7を中性，pH＝7～14をアルカリ性とよびます。清浄な雨水でも，大気中の二酸化炭素がとけているため，そのpHは5.5程度です。したがって，雨の場合は，PH＝5.5以下の雨水を酸性化された雨，つまり酸性雨といいます。

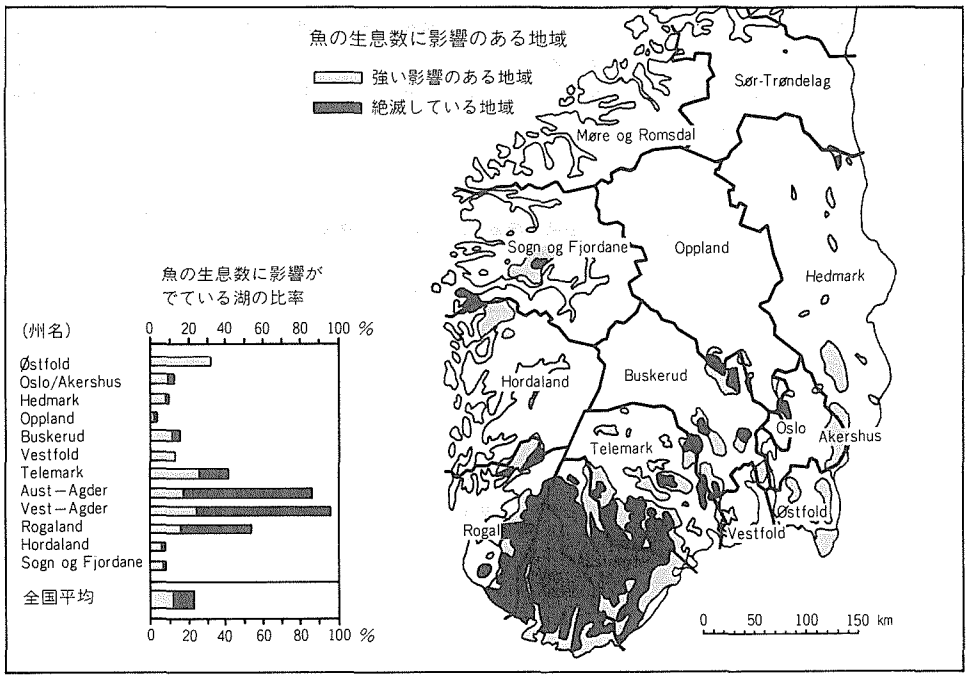


図2—17　ノルウェー南部の湖における魚の生息状況

（和田武『地球環境論』，創元社，1980，P 109）

湖の酸性化による生物への影響には，酸そのものによる生体組織の破壊と，土壌から溶け出した有毒な金属による中毒とがあります。したがって，湖の中ではつぎのようなことが複合的に起こり，魚が死滅したものと考えられます。

(1) 食物連鎖の崩壊

湖が酸性化すると，植物プラクトン，動物プランクトン，水生昆虫などの生体組織の破壊によって湖の生物種が減少し，水中の食物連鎖が切断されます。

(2) 世代交代のメカニズムの破壊

酸による生体組織の破壊は直接魚にもおよびますが，とくに抵抗力の弱い稚魚や受精卵に致死的な影響をあたえます。

(3) 有毒金属による中毒死

湖が酸性化してくると，川底や湖底の土壌中からカルシウムやマグネシウムなどの溶出が起こり，やがてアルミニウムや水銀などの有毒金属が水中に溶け出してきます。アルミニウムは魚の代謝や呼吸活動を阻害し，水銀は魚の染色体に損傷をあたえます。

こうして湖の酸性化が進むと魚が姿を消していくのです（図2—18）。その結果，魚を通した食物連鎖によって，鳥類，ホニュウ類や人間にまで影響がおよぶことは確実です。なお，酸性の湖が澄んでいるのは，微生物の活動がおさえられて，生物の遺体がくさらないからです。

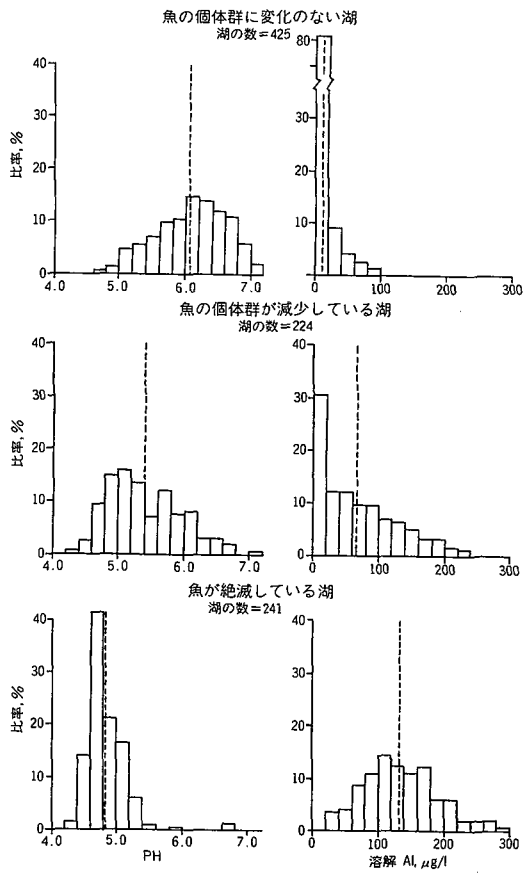


図2—18　1988年のノルウェーの湖における魚の生存状況

（和田武，前掲書，P 120）

さて，北欧の湖は，1960年以降，急激に酸性化しています（図2—19）。これはなぜでしょうか。

質問13　湖が酸性化する原因は何だと思いますか。

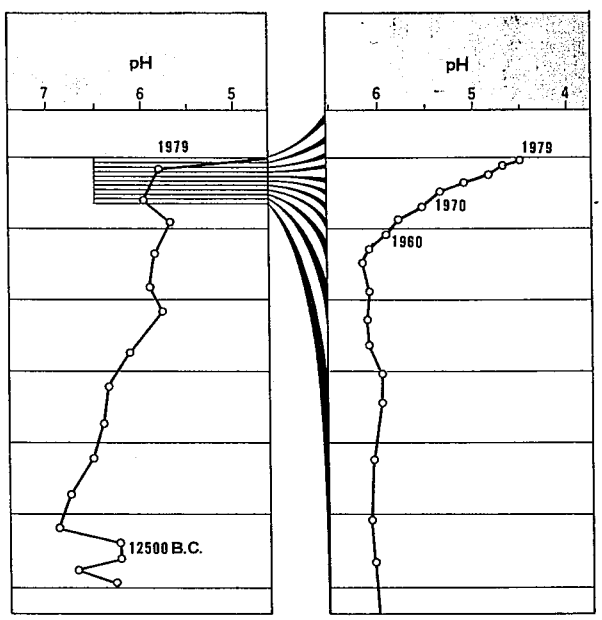


図2—19　湖水のpHの変化（スウェーデン）

（人類とエネルギー研究会編『地球環境と人間』，財団法人・省エネルギーセンター，1989，P 158）

それには雨と土壌の酸性化が考えられます。1950年代，雨水の観測網がヨーロッパ全域に設置され，雨の水素イオン指数pHの観測がはじまりました。その結果，ヨーロッパでは雨が年々酸性化していることが明らかになりました。しかし，酸性の雨が降るだけで湖が酸性化するとは限りません。湖の水や湖に流れこむ水は土壌からの影響をうけるからです。つまり，酸性土壌では，中和が起こらず，湖の酸性化が進行しますが，石灰分にとんだアルカリ性土壌では，酸性雨がある程度まで中和されるため，湖の酸性化が起こりにくくなるというわけです。はたして北欧はポドソルという酸性土壌におおわれています。こうして湖の酸性化をはじめとする酸性雨被害は酸性雨と酸性土壌が重なり合った地域で起こるのです（図2—20）。では，どうして酸性雨が降るのでしょうか。

質問4　酸性雨が降るのはなぜだと思いますか。

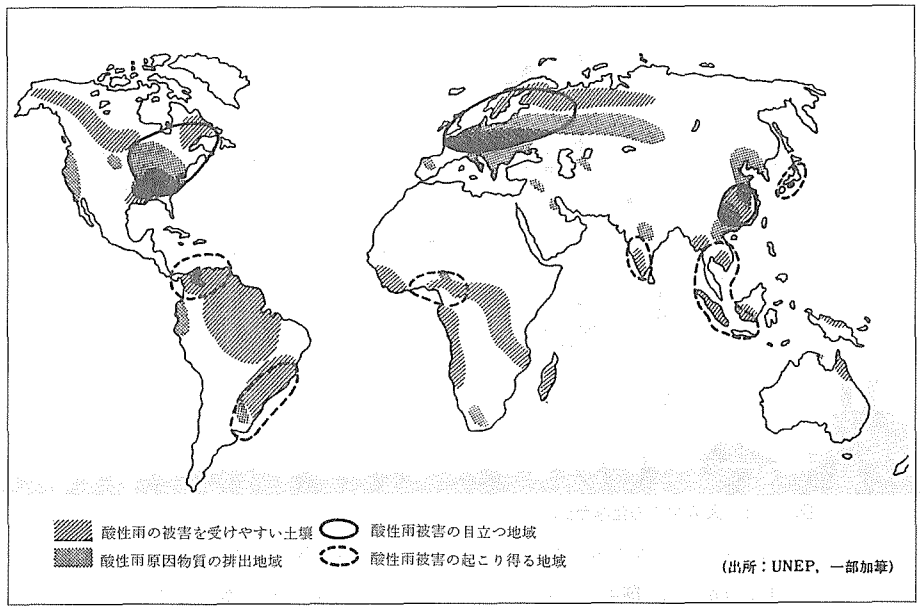


図2—20　世界の酸性雨被害

（石弘之『地球破壊七つの現場から』，朝日新聞社，1990，P 125）

それは大気汚染物質が，大気中で酸性物質に変化し，雨となって地上にもどるからです。湖の酸性化に関係する大気汚染物質は二酸化イオウ SO_2 と窒素酸化物（NO，NO_2 など）の二つに大別されます。これらの供給源としては自然的なものと人為的なものとがあり，現在量的にはほぼ等しくなっています。（つまり，人間は地球全体の酸性降下物の総量を二倍にしたわけです。）前者には火山の噴火やバクテリアによる動植物の分解，後者には発電所，工場，自動車における化石燃料の燃焼などが考えられます。大気中に排出された二酸化イオウと窒素酸化物は，対流圏での化学反応によって，それぞれ硫酸や硝酸などの酸性物質に変化します（図2—21）。こうして大気中で生成された硫酸と硝酸は，そのまま地上に落ちることもあれば，雨滴の核としてとりこまれたり，落下する雨滴に吸収されて，雨や霧として地上に降ることもあります。これらをまとめて酸性降下物といい，雨や霧として落ちてくる酸性降下物をそれぞれ酸性雨，酸性霧とよんでいます。

北欧には大量に大気汚染物質を排出するような都市は多くありません。それにもかかわらず，北欧の雨水の酸性度が高い（pH が低い）のはなぜでしょうか。

質問 15　北欧の雨水の酸性度が高いのはなぜだと思いますか。

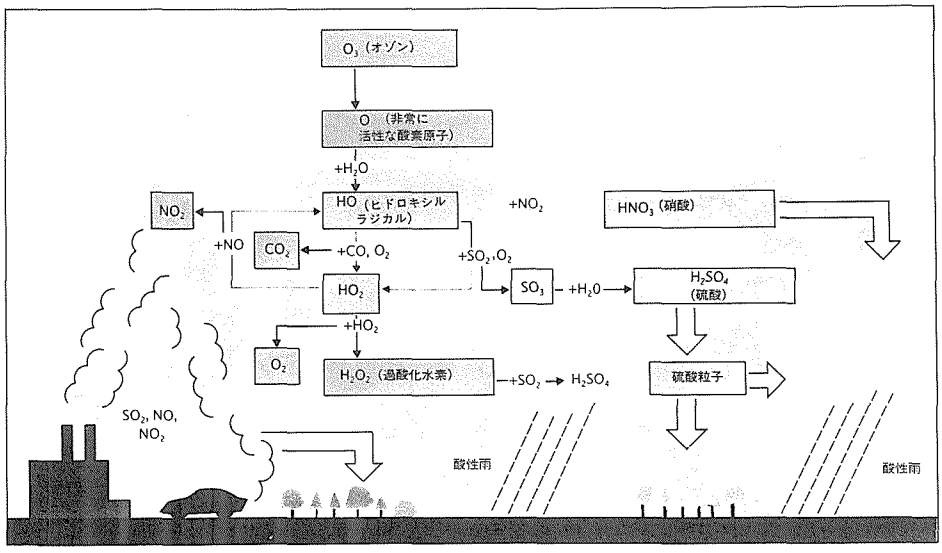


図2—21　大気中での化学反応

（V. A. モーネン「酸性雨の脅威」，サイエンス，Vol. 18, No. 10, 1988, P 10）

オゾン O_3 の分子が分解して，酸素原子 O をつくり，これが水蒸気 H_2O と反応してヒドロキシルラジカル HO という反応性の高い物質が生まれます。ヒドロキシルラジカル HO は，二酸化窒素 NO_2 を硝酸に二酸化イオウ SO_2 を硫酸に変えると，自身は HO_2 に変わりますが，一酸化窒素 NO によって再生されます。二酸化イオウ SO_2 は，雲の中の水にふくまれる過酸化水素 H_2O_2 と反応して，硫酸に変化することもあります。

それはイギリスやドイツなどのヨーロッパ諸国が煙突を高層化して大気汚染物質の排出量を増大させてきたからです。

1960年代スウェーデンの気象化学者エリクソンらは，スカンジナビア半島南部の観測地点での一雨ごとの雨水の成分と風向との関係を調べた結果，西ないし西南の風の時に硫酸が多くなり，酸性度が高くなることをつきとめました。今日では，北欧における酸性降下物，とりわけイオウ降下物のおよそ90パーセントは，他のヨーロッパ諸国からのものであることが明らかになりました（表2—3）。

かつてイギリスのロンドンでは数日間の酸性霧による呼吸困難のため8000人が死亡するという事件がありました。52年12月のことです。56年にも同じようにして1000人以上の死者を出しました。こうした事件が先進工業国であいつぐと，世界各地で公害反対運動が激化し，企業側は，工場周辺の汚染濃度を下げざるをえず，煙突を高層化してその場をしのぎました。このことが大気汚染物質を酸性降下物として広範囲にまき散らす結果を生み出したというわけです。

酸性降下物の被害をうけるのは湖沼の生物ばかりではありません。では，その他には，どんなことがあるのでしょうか。

表2－3　ヨーロッパにおけるイオウ汚染（1988年）

（レスター・R・ブラウン『地球白書'90-'91』、ダイアモンド社、1990、p186）

国	硫黄排出量(1)	降下量	排出量に占める越境流出量の割合(2)	降下量に占める越境流入の割合
	(1000トン)	(1000トン)	(%)	(%)
ノルウェー	37	210	76	96
オーストリア	62	181	74	91
スウェーデン	110	302	69	89
スイス	37	65	81	89
オランダ	145	104	80	72
フランス	760	622	67	59
西ドイツ	750	628	63	56
チェコスロバキア	1,400	659	75	47
ポーランド	2,090	1,248	68	46
ソ連(3)	5,150	3,201	61	38
イタリア	1,185	510	72	36
東ドイツ	2,425	790	75	22
スペイン	1,625	590	72	22
イギリス	1,890	636	71	15

1980年以来，ヨーロッパや北米では広範囲にわたる森林の被害が，目立つようになり，88年現在，オランダ，西ドイツ，スイスではいずれも全森林面積の50%を越えました(図2—22)。さらに青銅・石像・遺跡などの腐食，地下水の酸性化，内湾の富栄養化なども深刻な社会問題になっています。

こうした背景のもとで，79年にはヨーロッパ諸国を中心にして「長距離越境大気汚染条約」が締結され，80年の二酸化イオウの排出量の30パーセントを93年までに削減するということが定められました。アメリカ合衆国とカナダとの間でも80年には「国境をこえて移動する大気汚染物質に関する覚え書き」がとりかわされ，両国政府は越境酸性物質の監視とその削減に努力することを約束しあいました。しかしながら，発展途上国では，環境基準の改正がおこなわれないため，先進国の多国籍企業は，大気汚染に配慮せず経済活動をおこない，周辺の住民の健康に多大な被害をあたえてます。

こうして人工生態系から排出された大気汚染物質は，酸性降下物として湖沼・森林・内湾などの自然生態系にも降りそそぎ，その生態系を単純化しているのです。

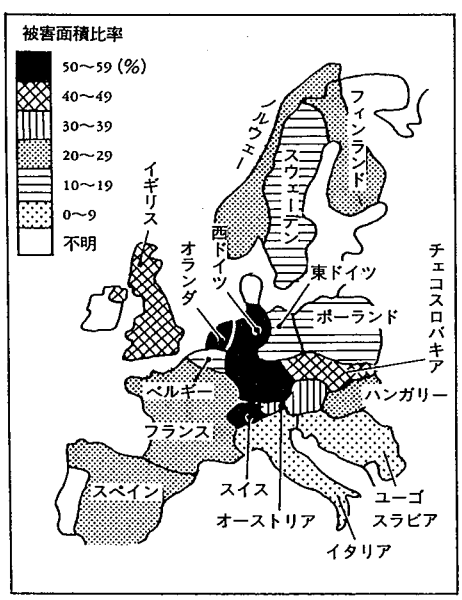


図2—22　ヨーロッパにおける森林被害の分布

(講座・地球環境1『地球規模の環境問題Ⅰ』，中央法規，1990，P 234)

2—4—2　アザラシが海岸に打ち上げられた

1987年西ドイツ政府が発表した『北海環境白書』によれば，北海には年間1億トンもの廃棄物が，大気や河川を経由して流しこまれたり，投棄されたりしています（図2—23）。この中には，窒素化合物をはじめとして，鉛・亜鉛・カドミウム・水銀などの重金属やDDT・PCBのような人工化学物質がふくまれています。水中に窒素化合物が多くなると，それを栄養分とするプランクトンや藻類が大発生します。では，これらの大発生は海洋生態系にどのような影響をもたらすでしょうか。

質問16　プランクトンや藻類の大発生は海洋生態系にどんな影響をあたえていると思いますか。

(1)　プランクトンや藻類の大発生による酸欠のため，魚類やエビ類などが死ぬ。
(2)　プランクトンや藻類が増えると，それらを食べる魚類やエビ類なども増加する。

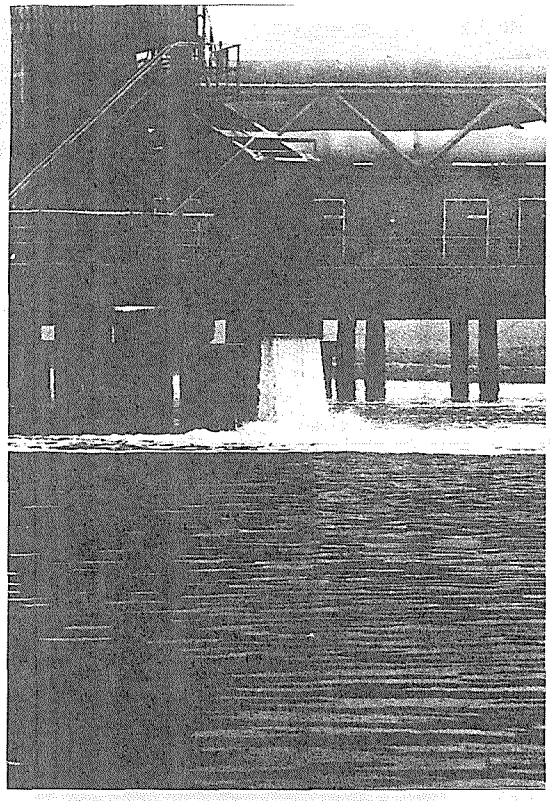
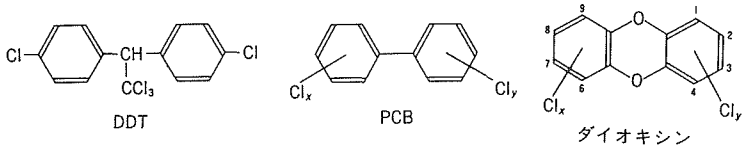


図2—23　大量の工場廃水を北海に直接流すオランダの化学工場

（NHK取材班『NHK地球汚染②』，日本放送出版協会，1989，P 46）

(1)が正解です。窒素やリンなどが大量に海洋や湖沼に流しこまれると，それらを栄養分とするプランクトンや藻類が爆発的に増えます。やがて，その死骸をバクテリアが分解しますが，そのときに大量の酸素を消費するため，酸欠状態が生じ，他の生物が死んでいくのです。北海沿岸でも，藻類が異常発生し，酸欠で魚類やエビ類など多くの生物が死滅しました。ゼニガタアザラシが北海沿岸一帯に無残な姿で打ち上げられたのはその後まもなくのことでした（図2—24，25)。

1988年4月北海沿岸の各地にアザラシの死体がつぎつぎに漂着し，89年2月末日現在，その数は1万7千頭に達しました。それまで北海には2万頭前後のアザラシが生息するものと推定されていました。したがって，わずか10カ月あまりの間に，およそ85パーセントのアザラシが死亡したことになります。死んだアザラシの体内からは，水銀・鉛・カドミウムなどの重金属類やDDT・PCB・ダイオキシンなど毒性の強い人工化学物質*が150種あまりも検出されました。とくにPCBは14年前の調査にくらべて2倍にふえています。こうしたことから，アザラシの大量死は，PCBによって免疫系が破壊されたアザラシがウィルスに感染していったものではないかと考えられています。



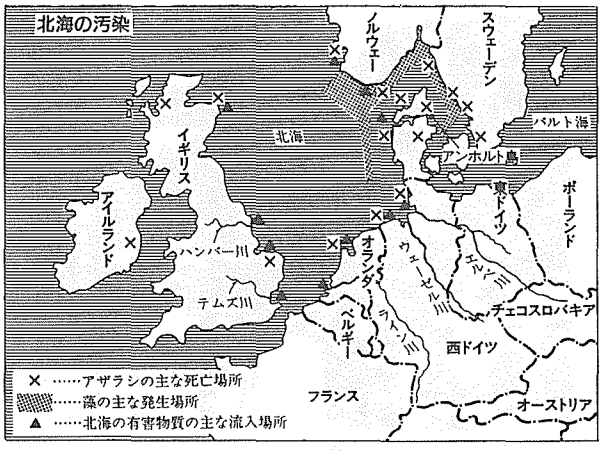


図2—24　北海の汚染（石弘之，前掲書，P 135）

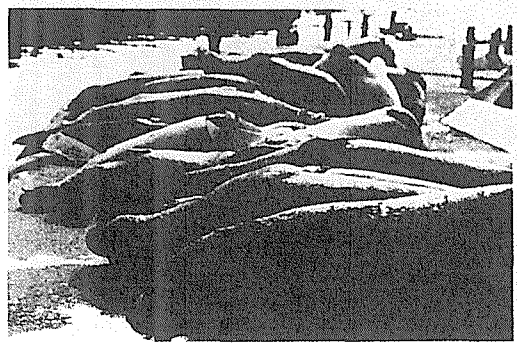


図2—25　海岸に打ち上げられたアザラシの死体（NHK取材班，前掲書，P 7）

北海の死んだアザラシ（図2—25）の体内に蓄積されていたPCBは，26頭分のデータしかありませんが，平均43.8 ppmでした（表2—4）。それにくらべて海水中のPCB濃度はその1千万分の1程度しかありません。これは一体どういうことなのでしょうか。

質問17　アザラシ体内のPCB濃度が海水にくらべて異常に高いのはなぜだと思いますか。

表2－4　西ドイツ北海沿岸のアザラシに蓄積された化学物質の分析値
（NHK取材班、前掲書、p35）

	個体数(頭)		最小値		最大値		平均	
	1974	1988	1974	1988	1974	1988	1974	1988
BHC	7	26	0.02	0.003	0.1	0.04	0.07	0.02
DDT	7	26	0.9	0.2	3.0	1.4	1.7	0.7
PCB総量	7	26	13.4	13.4	31.0	135.2	21.3	43.8

（単位ppm）

PCBのような有機塩素化合物は，脂肪にとけやすいので，体内にとりこまれるとその中の脂肪組織に入り，外部に排出されません。したがって，海の中にPCBがわずかな量でもふくまれていると，PCBは直接吸収によってプランクトンの体内にまず蓄積され，プランクトン体内のPCB濃度は海水の何千倍にもなります。そのプランクトンを食べる魚はPCBもいっしょに摂取するため，魚の体内のPCB濃度はプランクトンの10～100倍にもなります。このようにPCBは，水→プランクトン→魚へと伝わるにつれて濃縮されるため，その魚を食べるアザラシの体内では異常に高くなるというわけです。

こうして海にとけこんだ微量の化学物質は直接吸収や食物連鎖を通してすべての生物に高濃度に蓄積されていきます。これを生物濃縮とよびます。人間も生物濃縮から逃れることはできません。その証拠に極北に住むイヌイット（エスキモー）の体内からも高濃度のPCBが検出されています。

PCBは，耐熱や絶縁性にすぐれているため，コンデンサーなどの絶縁体，印刷インキの添加剤，塗料などにつかわれていました。しかも，その生産や使用は先進国にかたよっています(表2—5)。それにもかかわらず，PCBは，北海にかぎらず，世界中の海から検出されています(図2—26)。これはなぜでしょうか。

問題2　PCBはどのようにして世界中の海に広がったと思いますか。

表2－5　ＰＣＢの国別生産量と現在の使用量

（ＮＨＫ取材班、前掲書、ｐ119）

（愛媛大学・田辺助教授調べ）

	生　産　量 (単位:トン)	現在使用中と考えられる量 (トランス、コンデンサー用途分)
フランス	201,679	56,109
ドイツ	123,552	67,953
イタリア	27,360	24,046
日　本	59,119	36,956
スペイン	27,482	27,482
イギリス	66,748	23,779
アメリカ	569,690	437,700
合　計	1,075,630	674,023(63%)

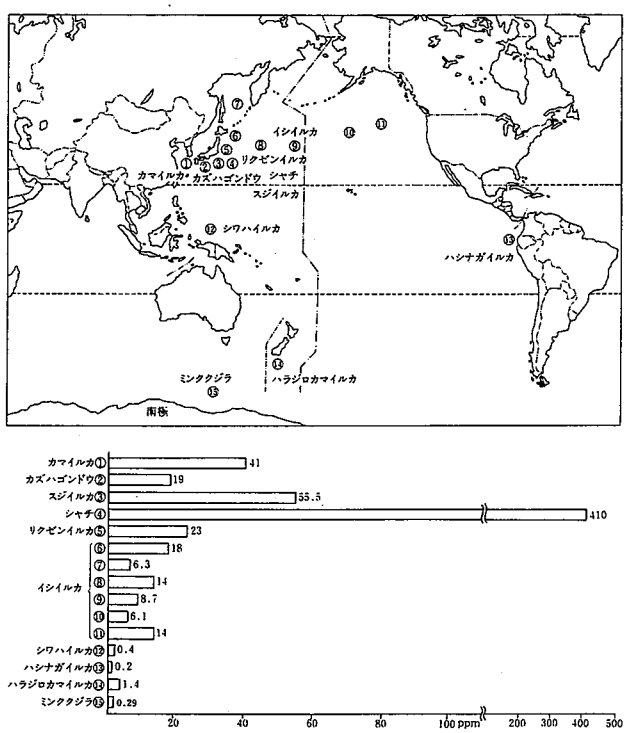


図2—26　北海以外の海洋における生物のPCB汚染

（NHK取材班，前掲書，P 123）

それはPCBが水や大気の運動によって世界中の海にはこばれたからです。

PCBは，雨にとけて河川に入り，海に流れこむと，インクが水中を広がるように海の中を広がります。海には海流があるため，その速度はかなりのものになります。たとえば，東京沖にある種の化学物質を放出しつづけたとすると，それは1年間でアメリカ西海岸に到達し，10年間ではインド洋から大西洋まで達するものと考えられています(図2—27)。PCBは気化して大気中にも広がります。大気中には気流があるため，またたく間に海にはこばれます。アメリカ本土で大気中に放出された化学物質は，わずか8～12時間で，アメリカ東海岸から1千キロもはなれたバミューダ島につくことがわかっています。

こうしてPCBは大気や海水中にも存在することになるわけです。1970年のアメリカの場合，環境へ排出されたPCBのうち8パーセントは大気中に，20パーセントは淡水および沿岸水域に，残りの72パーセントは埋立地にあるものと推定されています。

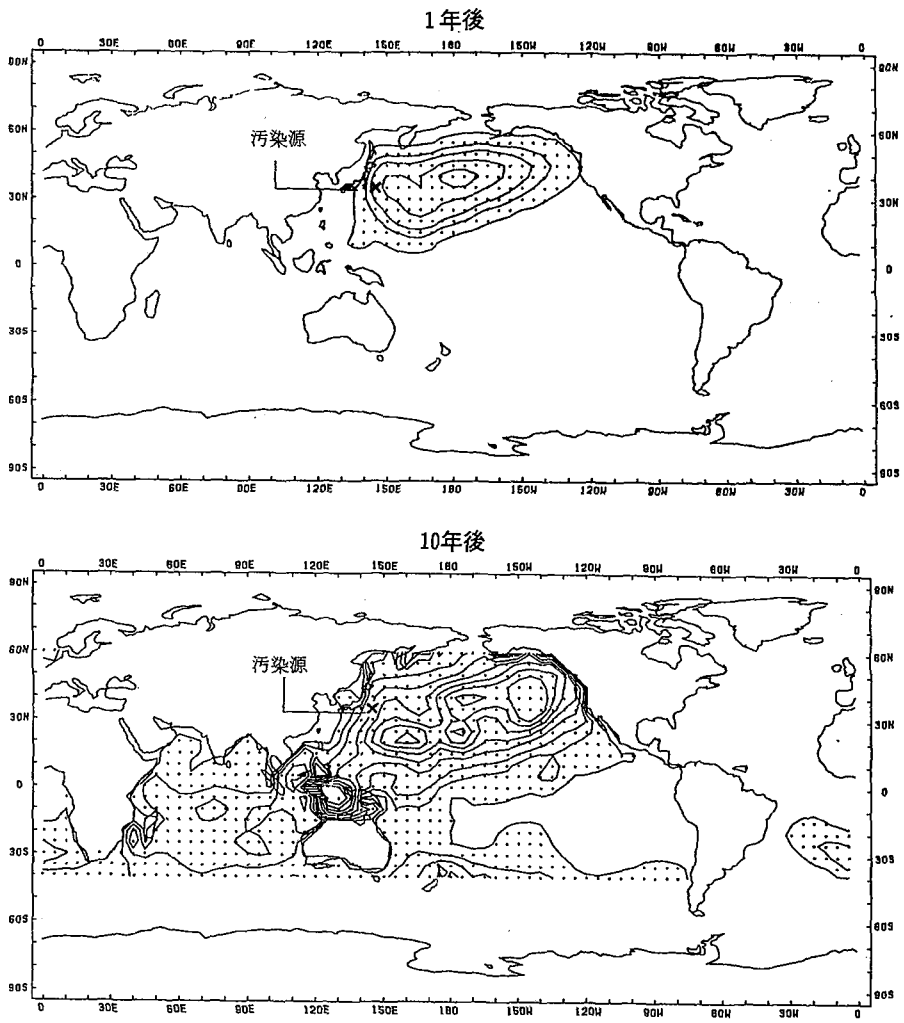


図2—27　海洋における化学物質の拡散

(NHK取材班，前掲書，P 140-141)

人間によってつくられたPCBは，このように大気や水による拡散と生物による濃縮をくり返しながら人間の体内にもどり，地球上を循環しています（図2—28）。海に入ったPCBの一部は，海底に沈んで，その循環からぬけ出し，大気中では光化学反応，土壌中では微生物によって少しずつ分解されます。しかし，海底への沈降や自然の分解には時間がかかるため，PCBの製造は20年ほど前に中止されているにもかかわらず，それまでにつくられたPCBの放置による海洋汚染はまだ当分つづくものと思われます。

しかし，アザラシの大量死をきっかけに，1990年には北海の沿岸国によって，北海保護国際会議が開かれ，水銀，鉛，カドミウム，ダイオキシンの4種の有害物質の流入量を95年までに70パーセント削減し，PCBの海洋投棄を99年までに完全に禁止することが定められました。海洋汚染防止のための具体的な国際協力が今ようやくはじまったのです。

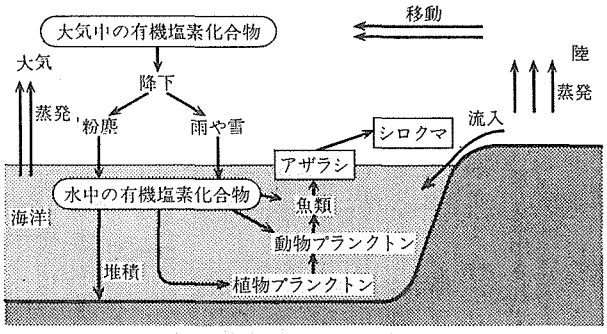


図2—28　有機塩素化合物の環境中の移動

（石弘之『地球環境報告』，岩波新書，1988，P 195）

こうして生態系の単純化は地域全域で起こっています。つまり，人間の経済活動が高まると，その影響が地球全域にまでおよび，人間生活圏が地球規模になったのです。では，その結果，地球規模の自然にどのような変動が起きているのでしょうか。第Ⅲ部で考えてみることにしましょう。

III　地球規模の自然変動

20世紀後半，人間の経済活動がさかんになり，エネルギーの大量消費がはじまると，一部の生態系が破壊され，気候にまで影響をあたえるようになりました。その結果，地球規模の自然変動がひき起こされ，人間の生存が危うくなってきました。人間の経済活動にもとずく地球規模の自然変動とはどんなものでしょうか。今後私たちはそれをどのようにコントロールしていけばよいのでしょうか。

1　熱帯林の破壊 128

1—1　熱帯林の危機……128

1—2　熱帯林と大気・水との相互作用の地球化……138

1—3　熱帯林破壊の原因……144

2　砂漠化・土壌流出 168

2—1　砂漠化と土壌流出の加速……168

2—2　土と大気・水との相互作用の地球化……182

2—3　人間社会への影響……190

3　オゾン層の破壊 204

3—1　オゾンホールの発見……204

3—2　生物と大気との相互作用の地球化……228

3—3　フロン全廃への過程……236

4　地球温暖化 248

4—1　地上気温の上昇……248

4—2　大気と海洋・植物との相互作用の地球化……256

4—3　二酸化炭素排出量の削減……266

1　熱帯林の破壊

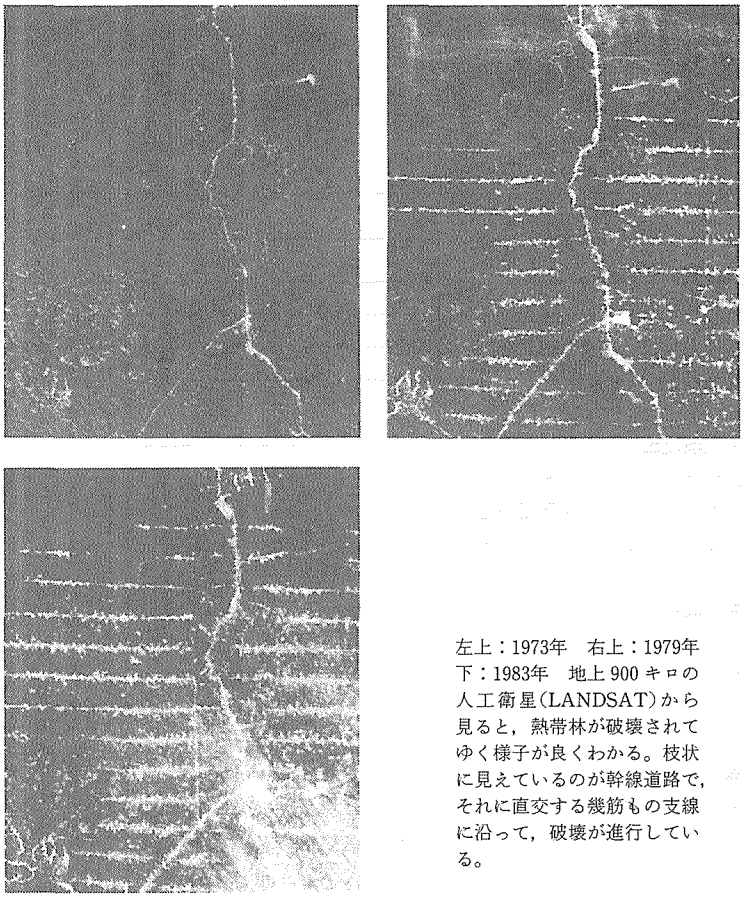
1—1　熱帯林の危機

1—1—1　破壊の速度

過去50年の間に熱帯林は半減しました。これほど速い森林の伐採速度は人類史上はじめてのことです。世界最大の熱帯林のアマゾンでは，1987年の1年間だけで，2000万ヘクタールの森林が伐採されたといわれています(図1—1)。このスピードで伐採が進めば，たった2年間で日本全土に相当する面積の森林が消えることになります。

質問1　このままの速度で森林が伐採されると，アマゾンの熱帯林はあと何年で消滅すると思いますか。

(1)　25年　　(2)　50年　　(3)　100年



左上：1973年　右上：1979年
下：1983年　地上900キロの人工衛星(LANDSAT)から見ると，熱帯林が破壊されてゆく様子が良くわかる。枝状に見えているのが幹線道路で，それに直交する幾筋もの支線に沿って，破壊が進行している。

図1—1　アマゾンの熱帯林の破壊

(地球の環境と開発を考える会『破壊される熱帯林』，岩波ブックレット，1988，P 29)

アマゾン熱帯林の総面積は全体では約5億ヘクタールです。したがって，

5億ヘクタール÷2000万ヘクタール/年＝25年

となり，わずか25年で消滅してしまうのです。

熱帯林は，80年現在，地球上の森林総面積の44パーセントを占めています(図1—2)。しかし，アメリカ環境保護庁の研究報告（1989）によれば，地上からすべての熱帯林が消滅するのは2075年であると予測されています。消滅までのタイムリミットはあと85年しかありません。

ところで，熱帯林はどんな特徴をもっているのでしょうか。

1—1—2　熱帯林の特徴

熱帯林は熱帯地域に分布する森林です。降水の量と期間の違いによって，森林のタイプは異なり，熱帯雨林，熱帯季節林，サバンナの三つに大別されます。

年間を通じて降水量の多い地域では，常緑広葉樹の高木が幾層にもかさなりあい，最上部には高さ50メートル以上にもなる巨大高木層をもつ雨林が発達します。しかし，乾季が長くなるにつれて，落葉樹のある季節林が現われ，やがて，まばらな小高木の下に草本が密生するサバンナに変わります(図1—3)。

この他，海岸や河口など塩水のまじる潮間帯に生育するマングローブ林も熱帯林の一種です。

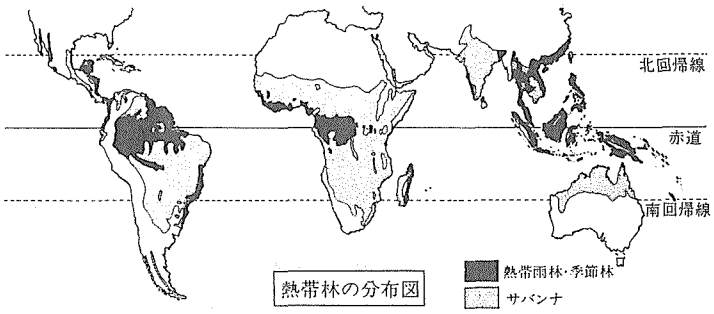


図1—2　**残された熱帯林**（地球の環境と開発を考える会，前掲書，P 13）

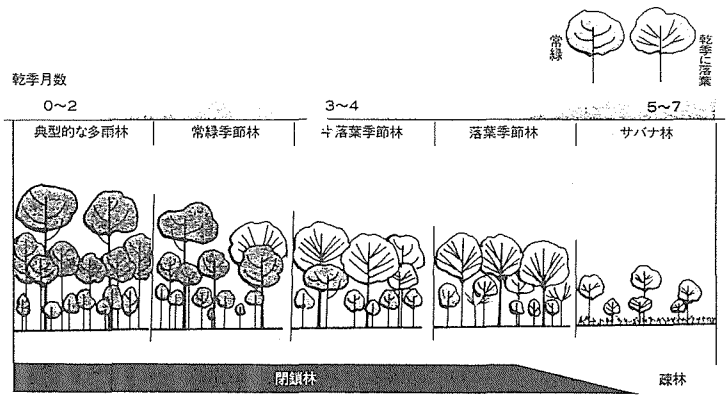


図1—3　**熱帯林の森林型**（環境庁長官官房総務課，前掲書，P 63）

(1) 養分貯蔵庫

熱帯林は地球上の植物の現存量の50パーセント以上を占めています。とりわけ熱帯雨林は，植物の成長の速さ，植物体の総量とも，地上のどの生態系よりまさっています(表1—1)。それは太陽と水にめぐまれているためです。では，植物の生長に必要なリンやカリウムなどの養分は一体どこにあるのでしょうか。

質問2　熱帯雨林の養分がもっとも多くたくわえている場所はどこだと思いますか。

(1) 土壌
(2) 地上部の植物体

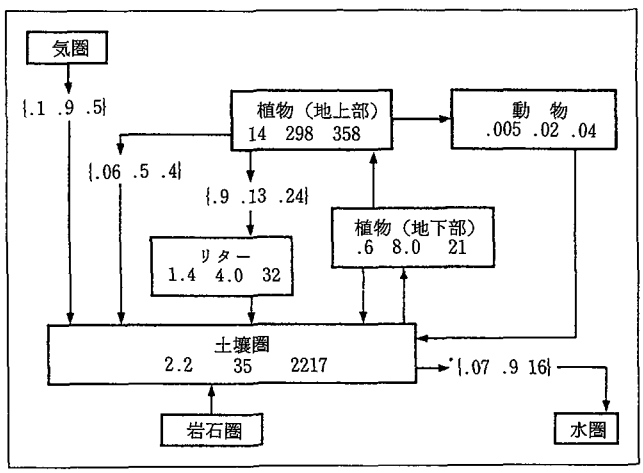
表1－1　生態系の一次生産力と現存量

(岩田進午『「土」を科学する』、NHK市民大学、1989、p99)

生態系	一次生産力 (乾物トン／ha・年)	現存量 (乾物トン／ha)
熱帯多雨林	21.9	450
温帯常緑林	12.9	351
北方森林	8.0	200

(2)が正解です。温帯林では土壌に大量の養分がたくわえていますが，熱帯雨林ではむしろ植物体そのものが養分の貯蔵場所になっているのです（図1—4)。

高温多湿な気候条件下では，バクテリアの活動が活発なので，落ちた葉や枝などは急速に分解され，リンやカリウムなどの養分になります。これらの養分は，もしそのまま放置されれば，大量の雨によって流されてしまうため，熱帯雨林の植物は，養分をすばやく吸いあげ，樹木自体にたくわえるようにします。その結果，生育速度が速くなるわけです。つまり，熱帯雨林では，地上部はゆたかであるにもかかわらず，土壌は意外に貧弱だといえます。したがって，熱帯雨林の破壊は生態系の養分貯蔵庫までうばうことになるため，いったん森林が破壊され土が露出すると，たちまち不毛の地＝砂漠へと変わっていくのです。



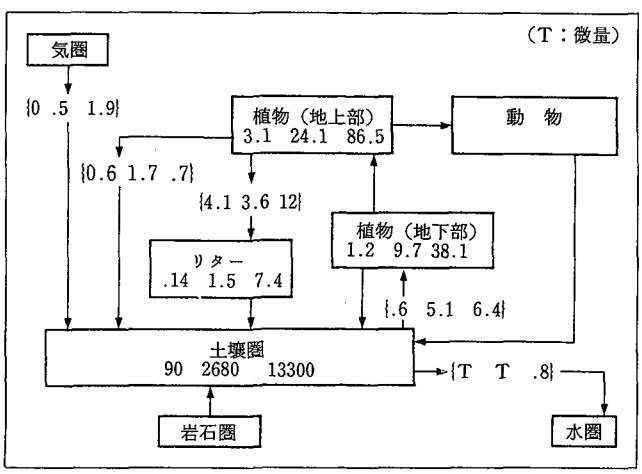


図1—4 熱帯雨林（上）と温帯混合林（下）における養分の循環

（斉藤巧，野上道男，三上岳彦『環境と生態』，古今書院，1990，Pp 130-131）

(2)　生物の多様性

熱帯雨林生態系には3000万種とも推定される地球上の生物の大部分が生息しています。インドネシアのカリマンタンの熱帯林では10ヘクタール中に700種の樹木が発見されました。これは北アメリカ全体の樹木の数に相当します。ペルーでは1本のマメ科の木から43種のアリが見つかりました。これはイギリス全土のアリの種の数にほぼ匹敵します。では，これほど多くの生物種が熱帯雨林，とりわけアマゾンに存在するのはなぜでしょうか。

質問3　アマゾンの熱帯雨林が植物の宝庫であるのはなぜだと思いますか。

(1)　氷河期のような時代でも，熱帯雨林では気候の変化がないため，昔からの植物が絶滅しないで，保存されてきたから。

(2)　氷河期には，熱帯雨林でも乾燥期・湿潤期という気候変動があり，この気候変動が種の分化を促進したから。

かつては(1)のようにアマゾンの気候の安定性が種の多様性を守ってきたと考えられていましたが，現在では(2)の考え方が有力です（図1—5）。

第4紀の氷期・間氷期のくり返しは熱帯地域では乾燥期・湿潤期の交替をもたらしました。乾燥期になると，それまで一面に広がっていた熱帯雨林は切れ切れになり，ついには条件のよい場所に島状に残るようになります。こうして長い間，それぞれの島に遺伝子がとじこめられると，島ごとに種の分化が起こり，多数の固有種が形成されます。やがて乾燥期から湿潤期に移ると，乾燥期に島状に点在していた森林は合体して，大森林が回復します。現在のアマゾンのような広大な熱帯林は，このようなプロセスが何度もくり返されて，できあがったものと考えられます。なお，動物種についても同じように考えることができます。

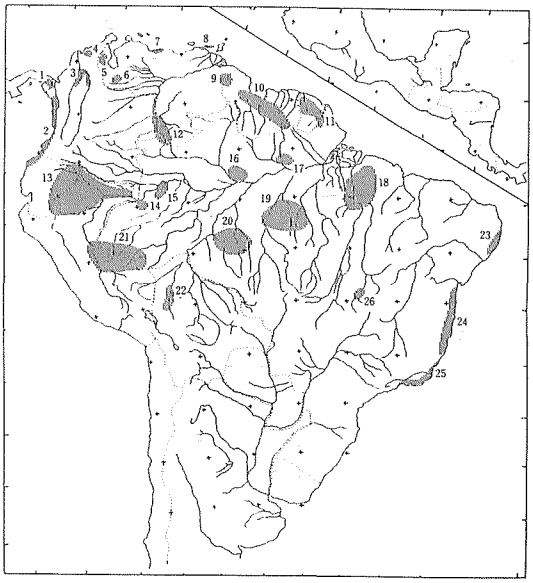


図1—5　ラテンアメリカにおける固有植物の分布中心地

（斉藤巧，野上道男，三上岳彦，前掲書，P 134）

したがって，熱帯雨林の破壊は，森林資源のみならず，このように多様な生物種の消失を意味します。しかし，熱帯林の破壊が人間生活圏におよぼす影響はこれだけではありません。

1—2　熱帯林と大気・水との相互作用の地球化

植物は，光合成によって二酸化炭素を吸収し，酸素をつくり出しています。とりわけ熱帯林は，温帯林や寒帯林とは違って，一年中ゆたかな緑を保っているため，地球の二酸化炭素の重要な吸収源であるとともに，酸素の供給源でもあります。アマゾンの熱帯林だけで，化石燃料によって世界中から放出される二酸化炭素の25%を吸収し，地球全体の酸素の30%も供給しているものと考えられています。

では，熱帯林の破壊がこのままつづくと，大気にどんな変化がひき起こされることになるのでしょうか。

大気中の酸素量の減少や二酸化炭素量の増加が起こります。酸素は大気中に大量にあるので，少しくらいの減少では問題はありませんが，二酸化炭素は，温室効果があるため，わずかな量でも増えるとその温室効果によって地球の気温を上げることになります。今日熱帯林破壊によって放出される二酸化炭素は化石燃料の燃焼による放出量の20～50%に相当するものと推定されています。

ところで，熱帯雨林は雨量の多い熱帯地方にありました。では，アマゾンの熱帯雨林に降る雨は一体どこからくるのでしょうか。

質問4　アマゾンの熱帯雨林地帯に降る雨はおもにどのようにして供給されると思いますか。

(1)　北東貿易によって大西洋からもちこまれる。
(2)　一度降った雨が森林の蒸発散によって大気にもどる。

正解は(2)です。マナウス付近の調査（1985）によれば，一度降った雨が土壌水や地下水になったあと河川に流出する水量は総降水量の26%にすぎず，残りの74%は蒸発散で大気にもどっています(表1—2)。したがって，熱帯雨林に降る雨の多くは森林の蒸発散によって供給されるものと考えられます。

このように熱帯雨林は水循環においても水の貯蔵庫として重要なはたらきをしているのです。では，熱帯林の破壊がこのままつづくと，河川や気候にはどんな影響があるのでしょうか。

問題1　熱帯林が破壊されていくと，河川や気候にはどんな影響があると思いますか。予想されることをすべてあげなさい。

表1－2　アマゾン・マナウス郊外における水収支
（斉藤巧、野上道男、三上岳彦、前掲書、p150）

観測項目	観測期間合計 (mm)	%
降水量	2,088.9	100.0
遮断量*	533.9	25.6
流出量	540.9	25.9
発散量	1,014.3	48.5
蒸発散量	1,548.2	74.1

* 降水が地表に到着する前に樹木の葉などに付着し蒸発する量。降水量－樹冠通過雨量で算出。
出典：Leopoldo *et al.*（1985）

降水量＝流出量＋蒸発散量，蒸発散量＝遮断量＋発散量

(1)はじめは洪水やかんばつが起こり，(2)つぎに砂漠化が進み，(3)やがて地球全体の降水量の変化や地球温暖化が起こるものと思われます。

森林では雨が降っても水がすぐに流れ出すことはありません。森林の土壌は，やわらかく，スポンジのように雨を吸収して，たくわえる能力をもっているからです。したがって，森林の土壌中にたくわえられた水は長い時間をかけてゆっくりと森林の外へ流れ出ます。ところが，森林が破壊されると，降った雨の大半は地表を流れ，土壌が浸食されていきます(図1—6)。こうして森林が破壊されたところでは，一度雨が降ると洪水になり，日照りがつづくとかんばつになるのです。実際にインドでは，1980年以降毎年のように，日本を上回る面積の土地が洪水によって水浸しになり，多数の死者が出ています。83年にはかんばつによって1200万人が被害をうけました。こうした慢性的な大洪水と大かんばつの原因はヒマラヤ山麓の水源地帯の森林が伐採されたことによるものと考えられています。

今後，熱帯林の破壊が進み，多くの水が河川水として流失し，森林による蒸発散が減少すれば，降水量が減少するとともに土壌浸食もはげしくなります。しかも，地表から緑がなくなると，太陽の熱が地表で反射されて地上の温度が下がるため，下降気流が生じやすくなり，水分をふくんだ空気がもち上げられないので降水量はますます減り，砂漠化していくことが考えられます。そうなると地球全体の降水量分布まで変わることが予想されるのです。

では，熱帯林破壊の原因は何なのでしょうか。

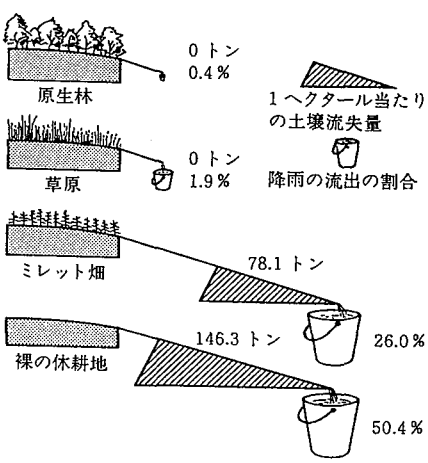


図1—6　緑の喪失によって加速する土壌浸食

（石弘之『地球環境報告』，岩波新書，1988，P 91）

1—3　熱帯林破壊の原因

熱帯林はおもに東南アジア，ラテンアメリカ，アフリカの三つの地域に広がっており，その破壊の原因はそれぞれの地域によって違います。ここでは前二者について考えてみましょう。

1—3—1　東南アジア

日本は過去20年間熱帯木材の世界最大の輸入国となっています(図1—7)。日本一国だけでEC(ヨーロッパ共同体)に匹敵するほどです。しかし，ECがさまざまな地域から輸入しているのにくらべて，日本の輸入相手国は東南アジアに集中しています。1970年までの最大輸入相手国は，フィリピン，71年から75年までがインドネシア，そのあとはマレーシアで，86年現在，熱帯木材の87%をマレーシアのサバ，サラワクの両州から輸入しています(図1—8)。このように日本が熱帯木材の輸入相手国をつぎつぎと変えていくのはなぜでしょうか。

各国の熱帯木材の輸入量(一九八八年)。日本は全体の四〇パーセントを輸入する、世界最大の消費国である。

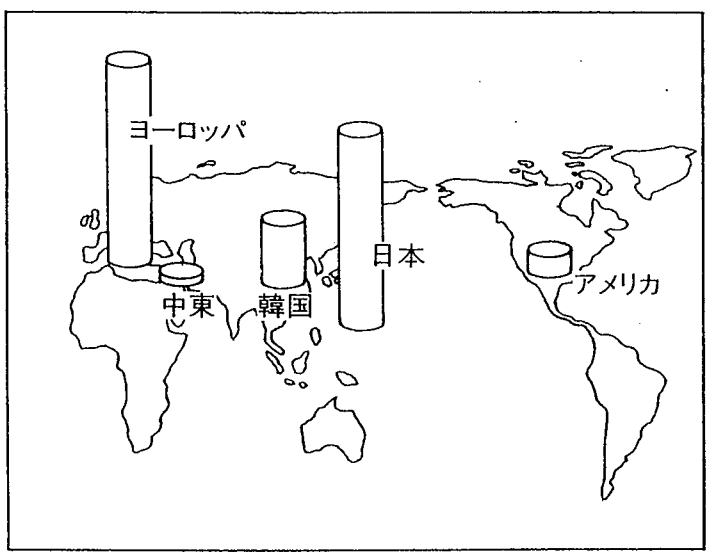


図1—7　世界各国の熱帯木材輸入量（1988年）

（NHK取材班『地球は救えるか1』日本放送出版協会，1990，P 46）

質問5　日本が熱帯木材の輸入相手国をつぎつぎと変えていくのはなぜだと思いますか。

(1)　それぞれの国の森林資源が枯渇しないような配慮から。
(2)　一国の森林がなくなるまで伐採してしまうから。

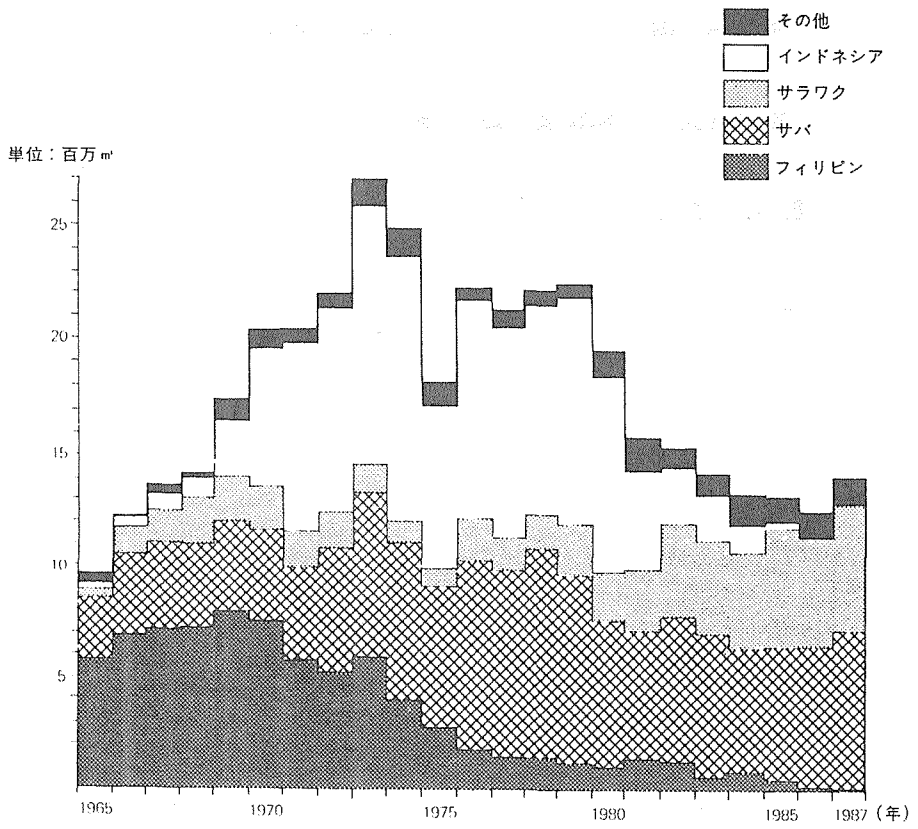


図1—8　日本の熱帯木材輸入国の地理的推移

（黒田洋一，フランソワ・ネクトゥー『熱帯林破壊と日本の木材貿易』，築地書館，1989，P 73）

正解は(2)です。日本では熱帯木材の生産と輸入は商社がおこなっていますが，日本の商社は，森林更新の努力をまったくせず，ブルドーザーやトラクターによる破壊的な方法で一国の森林を食いつぶしてはつぎの国の森林に触手をのばしていきます。したがって，このような日本の商社による商業的伐採が東南アジアにおける熱帯林破壊の最大の原因になっているといえます。

1960～84年にかけてフィリピンで生産された木材の65%は日本向けに輸出されています。その結果，60年には国土の60%を占めた森林は85年には27%にまでおちこみ，洪水やかんばつなどの災害がひんぱつして，フィリピンはインドにつぐ世界第2の災害多発国になりました。インドネシアの災害数も世界の第4位を占めています。こうしたことからフィリピンとインドネシアは，森林資源保護のために，80年代後半，丸太の輸出を禁止しました。(しかし，不法伐採による密輸は依然としてつづいており，日本政府はそうした取引に目をつぶっています(図1—9)。)こうして現在日本の商社による熱帯木材の輸入は輸出規制のおだやかなマレーシアのサバ州とサラワク州に集中しているのです。

東南アジアのマングローブ林(図1—10)は熱帯地方の沿岸低地特有の森林です。そこでは海と陸の生物が入りまじって生息し，複雑でゆたかな生態系がつくられています(図1—11)。マングローブ林は住民を海岸浸食や高潮による災害から防ぐ役割もはたしています。しかし，そのマングローブさえも，日本の商社はパルプ用材として，漁業会社はエビ養殖池をつくるために，根こそぎにしています。

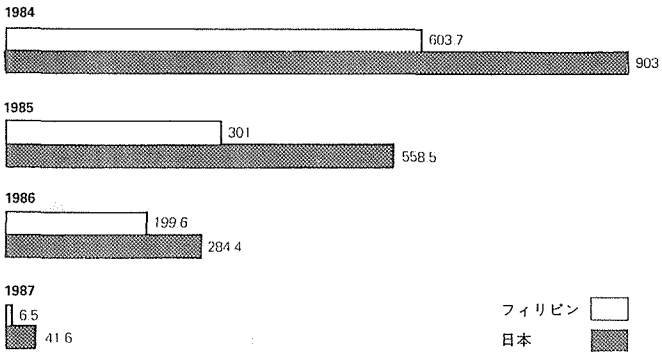


図1—9　フィリピンの日本への丸太輸出における貿易上の相違（千 m^3）

（黒田洋一，フランソワ・ネクトゥー，前掲書，P 155）

表1－3　世界のエビ貿易（1985年）

（村井吉敬『エビと日本人』、岩波新書、1988、p196）

単位：千トン、100万ドル

輸入			輸出		
国ないし地域	量(%)	金　額(%)	国ないし地域	量(%)	金　額(%)
日　本	183(32.9)	1,330(41.8)	インド	49(9.8)	256(9.3)
アメリカ	141(25.3)	1,040(32.7)	デンマーク	35(7.0)	94(3.4)
デンマーク	39(7.0)	90(2.8)	メキシコ	30(6.0)	327(11.9)
香　港	28(5.0)	131(4.1)	インドネシア	30(6.0)	196(7.1)
フランス	27(4.8)	111(3.5)	グリーンランド	27(5.4)	73(2.6)
イギリス	19(3.4)	76(2.4)	タイ	24(4.8)	127(4.6)
シンガポール	17(3.1)	38(1.2)	中　国	22(4.4)	149(5.4)
イタリア	16(2.9)	72(2.3)	エクアドル	20(4.0)	161(5.8)
マレーシア	14(2.5)	7(0.2)	香　港	19(3.8)	133(4.8)
ノルウェー	14(2.5)	14(0.4)	ブラジル	16(3.2)	98(3.6)
その他の先進工業国	59(10.6)	254(8.0)	その他の第三世界	96(19.3)	611(22.2)
先進工業国合計**	498(89.4)	2,987(93.8)	第三世界合計	368(73.7)	2,225(80.8)
総　輸　入	557(100.0)	3,183(100.0)	総　輸　出	499(100.0)	2,755(100.0)

こうしてフィリピンのマングローブ林はすでに75%が失われました。インドネシアのスマトラとカリマンタンは世界でも最大級のマングローブ林に囲まれていましたが，いまではほとんど残されていません。マレーシアでは，サバ州の全マングローブ面積の40%が日本への輸出向けチップ生産用に指定され，サラワク州最大のマングローブ林も69年に皆伐されました。日本は世界一のエビ消費国（表1—3）ですが，そのエビの87%は輸入品で，そのうちの90%がマングローブ地域の産物といわれています。

それにしても，どうして東南アジアの国々はこれほどの犠牲をはらってまで木材を輸出するのでしょうか。

それは熱帯木材が経済的に重要な資源だからです。つまり，輸出国政府は熱帯林の破壊を環境問題ではなく経済問題として考えているのです。ところが，熱帯林の輸出から得られる収益は国民のもとにはあまり入っていません。これらの国々の木材伐採権の大部分が少数の有力政治家や政府の役人などに集中しているからです。

質問6　では，熱帯林破壊でもっとも直接的な被害をうける人は誰でしょうか。

図1—10　海辺の森林—マングローブ林

（講座・地球環境2『地球規模の環境問題II』，1990，P 47）

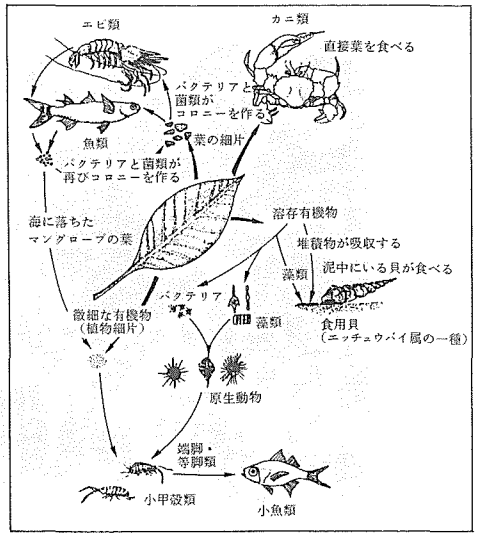


図1—11　マングローブの生態系

（向後元彦，『緑の冒険』，岩波新書，1988，P 161）

それは森林に依存して生活をする人々とくに先住民です。日本の国際協力事業団（JICA）と日本の商社によるマレーシアのサラワク林道の建設は，住民の生活と福祉の向上のためとしながらも，実際にはプナン族など森林に住む先住民を無視して，進められました。1987年先住民たちはこのことに抗議して道路封鎖をおこないましたが（図1—12），マレーシア政府は，軍隊を派遣して，リーダーたちを逮捕するという強行手段に出ました。こうして熱帯林の先住民は生存権さえもうばわれているのです。

この事件がヨーロッパに報道されると，熱帯林に住む先住民の人権をまもれという市民運動が高まり，ヨーロッパ議会は「EC加盟国はサラワク州からの木材輸入を停止すべきである」という決議を採択しました。ヨーロッパの家具業界は維持可能な方法で生産された熱帯木材のみを使用する方針をうち出しました。89年西ドイツではハンブルグ以下400の地方自治体が公共施設に熱帯木材を使用しないことを決めました。ところが，日本の商社は，サバ州とサラワク州の森林が近いうちになくなることを見越して，つぎはパプァ・ニューギニアとブラジルの熱帯林にねらいをつけているのです。

ところで，マングローブ以外の熱帯木材は日本ではどのように利用されているのでしょうか。

図1—12　先住民の道路封鎖

（地球の環境と開発を考える会，前掲書，P 11）

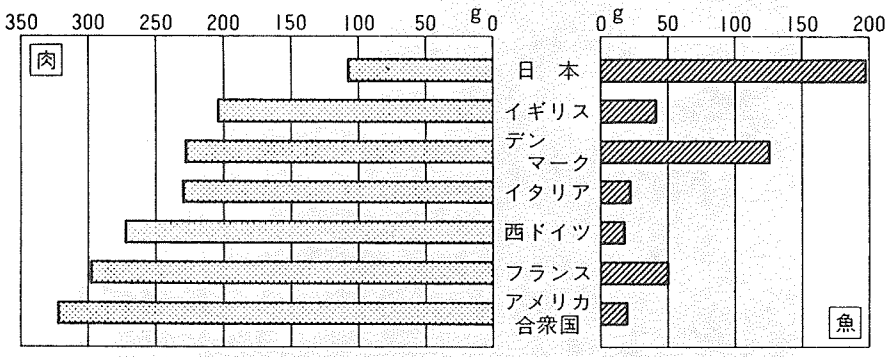
おもな用途は合板です。合板はその半分が建築土木資材としてつかわれます。その中にはつかい捨てのコンクリート型枠も入ります。残りの半分は家具や建具などにつかわれています。

1—3—2　ラテンアメリカ

75年アメリカの人工衛星の赤外線センサーがアマゾン上空で異常な高熱地帯を発見しました。アメリカ政府からの連絡でブラジル政府が調査団を送りこんだところ，西ドイツの多国籍企業が牛の放牧場をつくるために東京都の2倍ほどの森林を一度に焼いていた現場でした。先進国の企業は，ハンバーガーやフランクフルトソーセージを安くつくるために，このように広大な熱帯林を焼きはらって牧場を造成しました。その結果，ブラジルの牛肉生産量は世界一になり，先進国の人々は安い牛肉をたくさん食べることができるようになりました(表1—4)。しかし，ブラジル国民の牛肉消費量は，79年現在，1日44グラムにすぎません。

質問7　このような牧場の造成はブラジル国民に何を残したのでしょうか。

表1—4　主要国の肉と魚の消費比較（1人1日）



（矢野一郎監修『日本国勢図会』，国勢社，1990，P 211）

それは経済的損失以外の何ものでもありません。牧場造成のための熱帯林の焼失(図1—13)でも，1979年までに1兆1550億円の損失にのぼります。それ以外にもブラジル政府の企業に対する10年間の所得税の免除や低利の融資などによって3兆7500億円の歳入損失が生じています。

こうして広大な熱帯林を消失させた牧場は1年間に1ヘクタールあたり30～50キロの肉しか生産できません。これは北ヨーロッパや日本にくらべて10分の1程度の生産性の低さです。しかも，熱帯林の土壌は貧弱であるため，牧場はせいぜい10年ほどでつかいものにならなくなります。一定面積あたりの収入でも，牧場は熱帯林から野生ゴムとブラジルナッツを採取する場合の4分の1ぐらいしかありません。こうした熱帯林での牧場経営のツケはすべてブラジル国民にまわされるのです。

このようにアマゾンでの牧場造成は，人類全体にとって環境の質の低下をもたらすばかりでなく，ブラジル国民には経済的に大きな損失をあたえ，熱帯林で生活している先住民には生命の危険さえおよぼすのです。なお，ブラジル以外のラテンアメリカ諸国でも，熱帯林破壊の最大の原因は，先進国の多国籍企業による牧場の造成です。

図1—13　牧場の造成のための山焼きの煙

（稲葉一郎『アマゾン発・熱帯林破壊報告』，朝日新聞社，1990，P 40）

熱帯林の破壊はブラジル政府のアマゾン入植計画によってもひき起こされています。

1970年以来，ブラジル政府は，「土地なき人々に，人々なき土地を」というスローガンをかかげて，ノルデステ地方の土地のない人々をロンドニア州や大カラジャス地域などのアマゾン奥地に入植させてきました。アマゾン横断ハイウェー（図1—14）はそのために建設されたものです。このハイウェーにそって北海道とほぼ同じ広さの800万ヘクタールの入植地が用意されました。しかし，熱帯林を伐採して開拓された土地は農業には不向きなために，入植者たちは，当初の入植地を数年のうちに放棄し，新たな土地を求めて，熱帯林をつぎつぎに焼きはらっていきました。その結果，イギリスの国土面積に匹敵するロンドニア州全域の熱帯林が姿を消そうとしています。

質問8　ブラジル政府がアマゾン入植計画を立てたのはなぜだと思いますか。

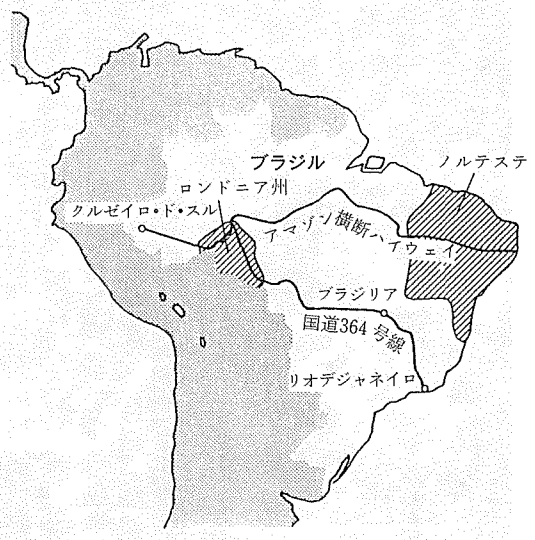


図1—14　アマゾン横断ハイウェイ

（石弘之『地球環境報告』，岩波新書，1988，P 63-64）

ブラジル政府が，土地所有の不公正の問題を解決せずに，土地のない人々の不満をそらすためです。ノルデステ地方では日本の国土の半分くらいの広さの土地にブラジルの人口の4分の1にあたる3000万人が住んでいます。したがって，土地の所有が公正におこなわれていれば，過密というほどではありません。しかし，ブラジルでは，70%の農民が土地をもたず，わずか4.5%の地主が81%の農地を所有しています。それにもかかわらず，ブラジル政府は，農地改革をおこなわずに，人口過密という名目で土地のない人々をアマゾンに追いやったのです。

その結果，その人々がアマゾンの森林とそこにすむ先住民（図1—15）の生活を圧迫するはめになりました。こうして1900年ごろには100万人はいたといわれる先住民はすでに20数万人にまで減ってしまったのです。土地所有の不公正が是正されなければ，これからも熱帯林の無意味な消失と先住民の滅亡がつづくことは間違いありません。

このような土地所有の不公正は，ブラジルに限らず多くの途上国で見られ，食糧危機や環境破壊のきっかけをつくり出しています。

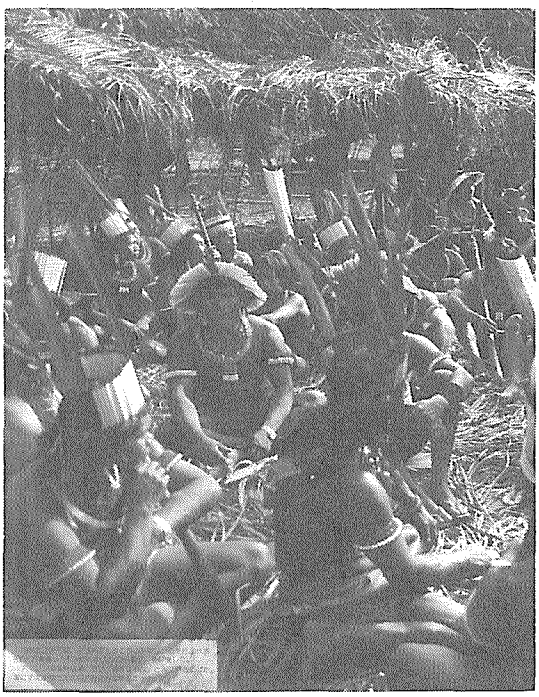


図1—15　アマゾン先住民（稲葉一郎，前掲書，P 68-69）

1989年2月，アマゾンの先住民代表が600人集まり，アマゾンの森林破壊に反対し，「森を切るな」という声を上げました。

日本もアマゾンの熱帯林の破壊に加担しています。

ブラジルの北東部に位置する大カラジャス地域はアマゾン熱帯林の17%を占めています。これは日本が二つ入ってもまだあまるほどの広さです。この広大な熱帯林が，大カラジャス計画（図1—16）とよばれる大規模開発計画によって，いま失われようとしています。

大カラジャス計画は，日本のJICAによってつくられ，日本の金融機関や世界銀行などの融資によって進められてきました。JICAの計画は，カラジャス鉄鉱山の開発を中核として，鉄鉱石搬出のための鉄道および港湾の建設，さらにはダムの建設，木材の生産，農場・牧場の造成などからなる総合的な開発計画です。カラジャス鉄鉱山は1984年に採掘をはじめ，カラジャス鉄道は85年に完成しました。「木炭を基礎にした銑鉄の生産が輸出産品として期待できる」というJICAの計画にしたがって，銑鉄工場の一部もすでに操業をはじめています。この計画が実現すると，どんなことになるのでしょうか。

問題2 「大カラジャス計画」が実現すると，どんな事態が予想されますか。

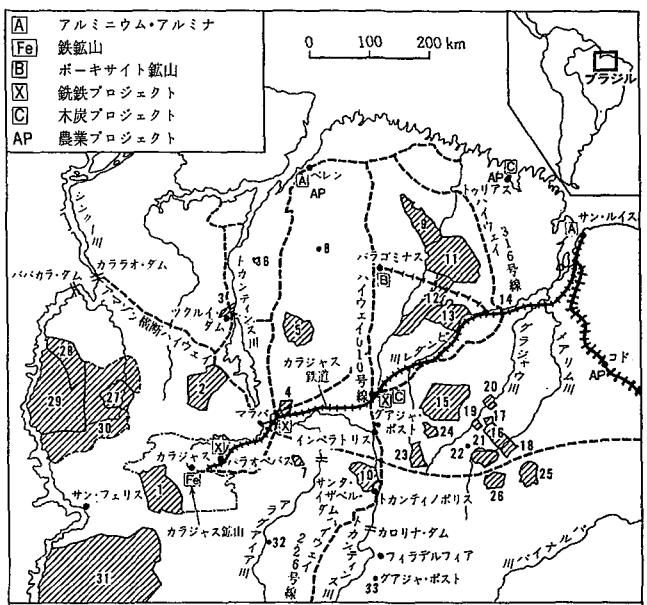


図1－16 大カラジャス計画とインディオ居住地区
（鷲見一夫『ODA援助の現実』，岩波新書，1989，P 62）

鉄鉱石の生産や搬出による熱帯林の破壊はいうまでもなく，つぎのような事態も予想されます。

(1) 農場や牧場の造成のため，広範囲にわたって森林が伐採されます。しかし，熱帯林の土壌の貧弱さを考えると，農業や牧畜は長続きしません。

(2) 木炭の生産によって広大な森林が失われます（図1—17）。1トンの木炭を生産するのに，およそ3トンの木材が必要だからです。現在，カラジャス地方では年間9万トンの木炭が生産されていますが，将来的には，年間220万トンの木炭の生産が見込まれています。これに対して，1988年の世界銀行融資に関する国際市民会議では，「ブラジルがこのような木炭生産をただちに中止すべきこと，および世界銀行はこれを支援するのをやめるべきこと」が決議されました。

(3) このような森林破壊やダムの建設などによって，そこに住む先住民の生活基盤がうばわれることは明らかです。この計画では，およそ40あまりの先住民の集落が開発の犠牲になり，1万3千人以上の先住民がその生活基盤を失うことになります。しかし，JICAの計画書はこのことについてまったく触れていません。

(4) 生物種や大気や水への影響については前述のようなことが予想されます。

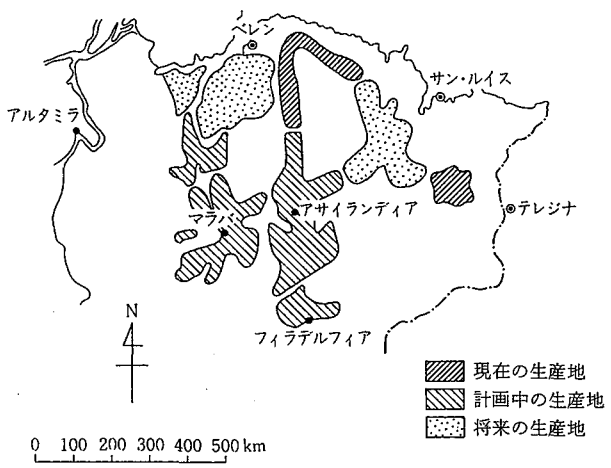


図1—17 カラジャス地方の木炭生産対象地

（鷲見一夫，前掲書，P 73）

大カラジャス計画は日本のODA（政府開発援助）の典型例の一つです。1989年現在，日本のODAは1兆5千億円をこえ，いまや日本は世界一の援助大国になりました。しかし，日本のODAは，人道的援助というよりは経済的（打算的）援助に傾いており，日本の企業の海外進出を支援するようなプロジェクトが多くなっています（表1—5）。しかも，日本国民や現地住民に援助の内容を知らせないばかりか，環境アセスメントもしないため、環境破壊や現地住民とりわけ先住民の人権侵害をまねいています。このようなことから，89年の国際NGO*（民間援助団体）フォーラムでは，日本政府に対し，「途上国における社会・環境問題を悪化させるようなODAをおこなってはならない」というアピールが採択されました。それにもかかわらず，89年建設省は，グローバル・スーパー・プロジェクト（図1—18）のように大規模な開発構想を打ち出しています。

こうして熱帯林は，先進国の政府，商社，企業あるいは途上国政府の土地政策の失敗などによって，自然の回復力をそこなうような収奪をうけ，破壊されているのです。これでは熱帯林が地上から姿を消すのも無理はありません。もともと森林は更新可能な資源です。現に先進国の温帯林や寒帯林では，森林の伐採量に見合う分の植林をしているため，森林面積は過去20年間ほとんど変わりません。だとすれば、熱帯林の持続的な利用も不可能ではないはずです。

NGO*とは自然保護・環境保全・人権・第三世界などの問題とかかわりのある市民組織または団体のことを意味します。国連は，国の代表者だけでは国際問題を解決できないとして，NGOの有用性を積極的に認めています。

表1－5　主要援助国の供与分野別比較（1986－87年）

（鷲見一夫、前掲書、p59）　（約束額ベース、単位：%）

分野＼国名	日本	米国	英国	フランス	西独	イタリア	カナダ
社会インフラのシェア	15.4	20.2	22.5	41.6	32.8	20.6	9.0
経済インフラのシェア	43.9	4.1	18.9	17.7	22.3	23.6	22.7
農業分野のシェア（除食糧援助）	10.0	10.0	8.8	9.7	10.5	17.1	27.2
工業等その他生産分野のシェア	7.6	0.5	14.4	6.1	7.7	8.7	6.1
食糧援助のシェア	1.3	14.0	1.2	0.8	3.1	5.8	12.9
プログラム援助のシェア	21.8	51.2	34.2	24.1	23.6	24.2	22.1
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

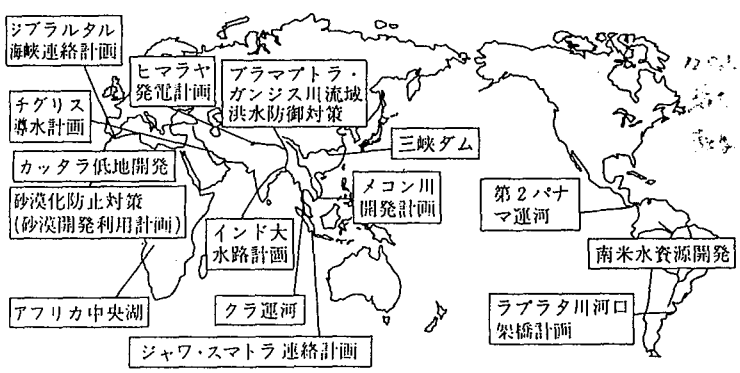


図1—18　グローバル・スーパー・プロジェクト

（鷲見一夫，前掲書，P146）

2　砂漠化・土壌流出

2—1　砂漠化と土壌流出の加速

2—1—1　進行速度と原因

UNEP（国連環境計画）は，現在世界の砂漠地周辺において，毎年日本の全耕地面積（540万ヘクタール）を上まわる600万ヘクタールの放牧地や農地が砂漠化*しており，地球上の陸地面積の約3分の1が砂漠化の危険にさらされている（図2—1）と警告しています。（とりわけサハラ砂漠は，1年間で岩手県の面積に相当する150万ヘクタールの土地をのみこみながら，南下しています。）これはなぜでしょうか。

質問9　現在世界の砂漠が急速に拡大しているおもな原因は何だと思いますか。

(1)　気候の変動
(2)　人間による地表面の改変

☞砂漠化*～砂漠の周辺部には，乾燥地（サバンナ）や半乾燥地（ステップ）が広がっており，それらの地域は，いずれも生態系の再生力が弱いので，人間によって一度破壊されると生物生産力が低下し，砂漠に変わります。このように砂漠あるいは砂漠のような状態にいたると思われる土地の荒廃を砂漠化とよびます。

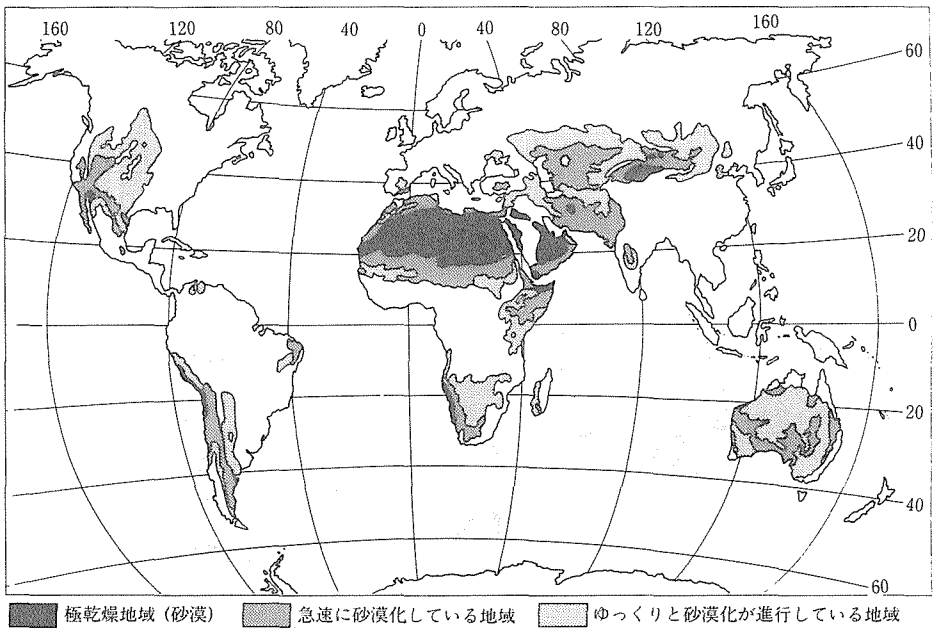


図2—1　世界の砂漠化地域

（斉藤巧，野上道男，三上岳彦，前掲書，P 157）

正解は(2)です。砂漠化は，降水量の不足という気象上の自然的要因と，土地の不適正な利用という人為的な要因とによって進行しますが，最近の調査では現在の砂漠化への寄与は前者が13%，後者が87%であるといわれています。

砂漠化のプロセスは地面をおおっている植物の消失からはじまります。植物の消失は，草地の再生能力をこえた家畜の放牧（過放牧）（図2—2），休耕期間の短縮による地力の低下（過耕作）および薪炭材の過剰な援助などの人間活動がきっかけとなって，起こります。すなわち，サバンナやステップでは降水量に変動があるため，雨の多い年は草種も多いので，家畜数を増やすと，雨が少なく草量が減少したとき，増えた家畜が草地を荒廃させることになるというわけです。耕地についても同じことがいえます。しかも，砂漠の周辺部では，このような人間の過度のはたらきかけに加えて，乾季には強風，雨季には豪雨が土をはげしく浸食するため，砂漠化が加速されていくのです。

ところで，サハラ砂漠が急速に砂漠化していることはサハラ砂漠はかつて緑におおわれていたということを意味するのでしょうか。

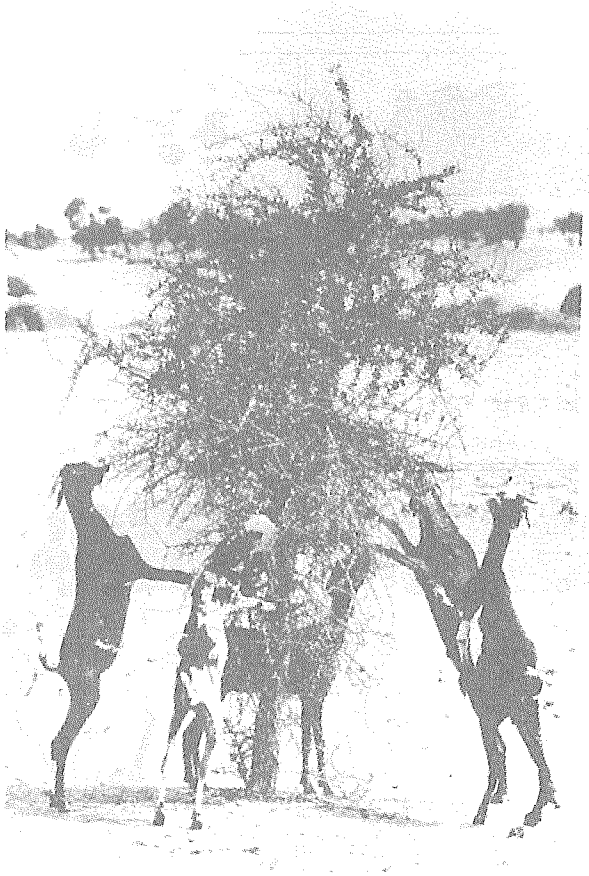


図2—2　若芽を食べるヤギ

（地球の環境と開発を考える会，前掲書，P 37）

そういう時期もありましたが，それ以前は砂漠が広がっていました。つまり，サハラ砂漠は昔から拡大と縮小をくり返してきたというわけです(図2—3)。しかし，それは数千年の時間スケールでした。拡大の証拠には熱帯林の地層に厚い砂の層が堆積していることがあります。縮小を裏づけるものとしては，タッシリ・ナジェールで発見された8000年前の岩絵に，ゾウ，カバ，サイ，魚など水がないと生きていけない動物が描かれていたことがあげられます。この他，チャド湖の水位や堆積物の花粉分析などもサハラ砂漠の変動を物語っています。このようなサハラ砂漠の拡大・縮小のおもな原因は太陽のまわりを回る地球軌道の変化にともなう気候変動にあると考えられています。

今日の人間活動による砂漠化の特徴は，このような自然の変動にくらべて，数十年という短い時間スケールで起こることにあるといえます。こうした砂漠地周辺の砂漠化は，耕地面積をせばめ，食糧生産を困難なものにしています。一方，砂漠地周辺以外の耕地でも，土壌流出という深刻な事態が起こっています。

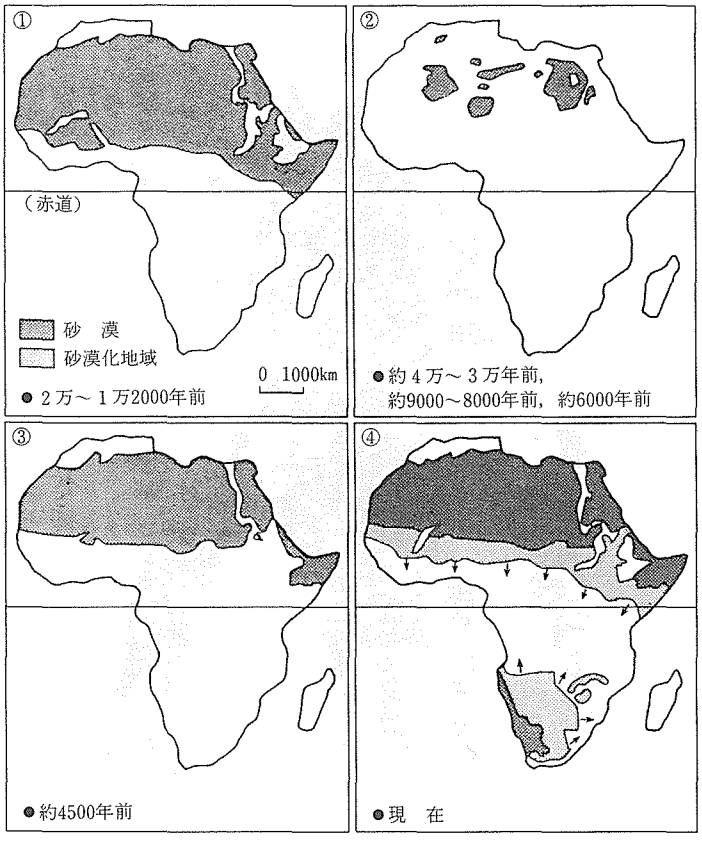


図2—3　サハラ砂漠の変動

（石弘之『地球生態系の危機』，ちくまライブラリー，1987，P 42）

アメリカ・国務省によれば，現在毎年230億トンにのぼる土壌が世界全体で失われていると推定されています(図2—4)。これは全世界の地表面から毎年1.3ミリメートルの土壌が失われる計算になります。世界の土壌の厚さは平均18センチメートル前後とみなされるので，

18センチメートル÷1.3ミリメートル／年≒140年

となり，このまま土壌の流出がつづくと，あと140年で全世界から土壌がすべて失われることになります。土壌流出は，エチオピアなどの砂漠化地域はもちろんのこと，世界一の農業国アメリカでも農地の44%で起こり，毎年64億トンの土壌が失われています。これを日本にもってきて，全耕地に敷きつめると8センチの厚さになるほどです。これほど深刻な土壌流出が起こっているのはなぜでしょうか。

質問10　アメリカ合衆国の土壌流出の要因は何だと思いますか。

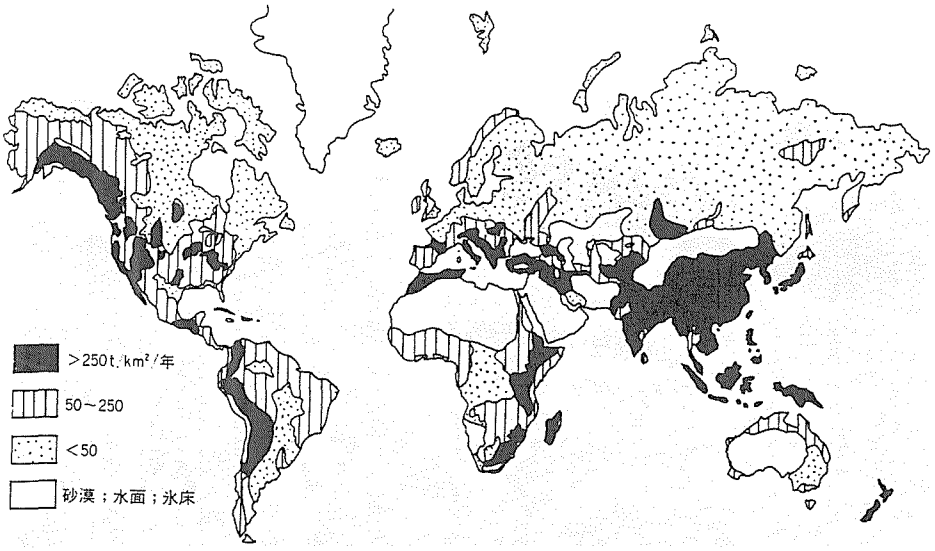


図2—4　土壌浸食速度の地理的分布

（佐久間敏雄「土壌浸食と保全対策」，科学，10，1988，P 627）

最大の要因はアメリカ農業が企業農場によって支えられていることにあります。企業農場では，大量の化学肥料が投下され，トウモロコシやダイズなど利潤のあがる作物が連作されています。作業効率を高めるために巨大なトラクターがつかわれ，土の表面のすき間がうめられます。その結果，土の浸透能が大きく下がり，多量の雨があると，表面の肥沃な土が浸食をうけて失われていきます。しかも，アメリカの畑は，機械力によって森林や草原を切り開いて拡大されたので，水平ではありません。このことも雨による土壌流出を速めています。

今日アメリカ政府は，このような土壌流出による食糧生産の低下を防ぐために，持続的農業(図2—5)を促進していく方針をうち出そうとしています。持続的農業とは，①植える作物を毎年変える②有機肥料を活用する③農薬の代わりに害虫の天敵をつかうこと，などによって特徴づけられます。

ところで土は，どのようにしてつくられ，どんなはたらきをもっているのでしょうか。

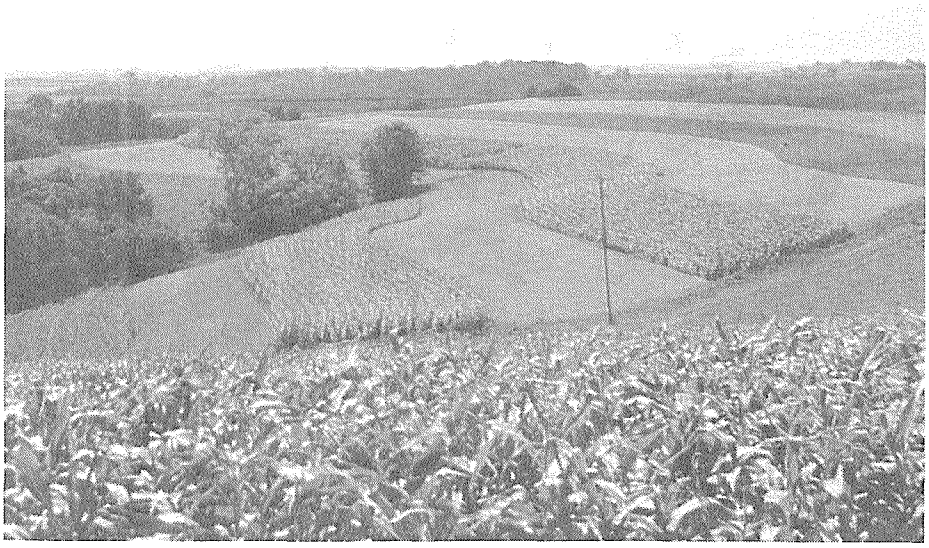


図2—5　アメリカの持続的農業
(J. P. レガノルド，R. I. パペンディック，J. F. パール『自然に帰る米国農業』，サイエンス，8，1990，P 13)

等高線の境界で農地を区切り，オート麦，トウモロコシ，アルファルファを輪作しています。こうすると，雑草や害虫や病害が減り，土壌浸食も大幅に少なくなります。

2—1—2　土のなりたちとはたらき

1センチの厚さの土ができるには100～1000年ぐらいはかかるものと考えられています。では，土はいつごろできたものでしょうか。

質問11　土はいつごろできたと思いますか。

(1)　地球誕生後まもなく
(2)　生命誕生後
(3)　生物上陸後

正解は(3)です。土は岩石の崩壊や風化作用などの物理的・化学的な作用と動植物による生物的作用によって生成されたものだからです。

岩石が風化されて砂や粘土ができると，そこにはまず養分をほとんど必要としない地衣類やコケ類が生えてきます。これらの生物の遺体は，微生物のはたらきによって分解され，有機物となって表層に堆積します。このように砂や粘土と有機物がまじりあったものを土とよびます。やがて，これらの有機物を利用して光合成をする大型の植物が生育すると，大量の葉や枝などが土の表面に堆積し，それらが微生物によって分解され，さらに肥沃な土がつくられるようになるのです。

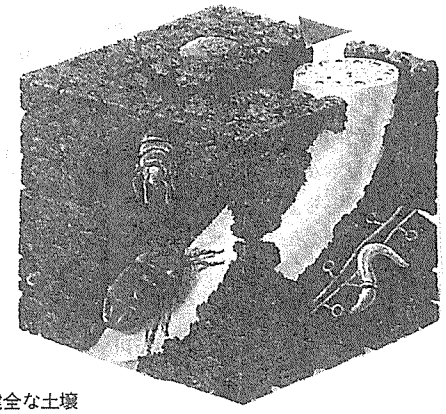


図2—6　健全な土壌

(J. P. レガノルド，R. I. パペンディック，J. F. パール，前掲書，

こうして長い年月をかけてつくられた土は食糧生産の基盤として人間の生存に欠かせないものです。ところが，1985年，筑波で開催された科学万博で水耕栽培の巨大トマトが現われました。作物は，土がなくても，水，養分，光，空気，湿度さえ十分にあたえられれば，立派に育つことが証明されたのです。しかし，水耕は，小規模では成立しても，大規模になるとまだ問題があります。大規模な水耕を維持するには大量のエネルギーや資源が必要になるばかりではありません。土でなければできないことがあるからです。それは何でしょうか。

質問12　大規模な作物の栽培が土でしかできない理由は何でしょうか。

土の中には無数の微生物がすんでいるため，土は生産した余剰物質をみずから分解処理する能力と有害な物質や生物に対する解素作用をもっているからです。

多くの植物は自己や他の植物に対して毒性をもつフェノール性酸をつくります。しかし，それらは土の中の微生物のはたらきによって解毒されます。植物の病原菌の多くも同じように土の中ではすみやかに死滅していきます。有害な重金属が土の上にまかれても，土はそれらが地下水にまじらないように捕捉することもできます。こうした土の能力のおかげで，人間は農作物を長時間にわたって栽培することができたのです。しかし，水にはこのような浄化能力がないので，大規模な水耕栽培は不可能なのです。もっとも，薬品の開発や排水濾過の向上が可能になれば，大規模な水耕栽培も現実味をおびてくるかもしれません。このようなことから，砂漠化や土壌の流出は，大規模な水耕栽培が可能にならないかぎり，人間の食糧生産の基盤を失うことを意味します。

では，土が人間の過度なはたらきかけをうけると，人間生活圏にどんな影響をおよぼすのでしょうか。

2—2　土と大気・水との相互作用の地球化

2—2—1　一酸化二窒素 N_2O の放出

1950年から84年にかけて世界の穀物生産量（図2—7）はかつてないほどの増加を示しました。世界各地の耕地面積の拡大はピークに達しているので，生産量の増大はとりわけ先進国での化学肥料の大量投下（図2—8）によって実現されたものです。その結果，主要な化学肥料である窒素肥料から大気中に大量の一酸化二窒素が放出され，大気に重大な影響をおよぼすようになりました。これは何でしょうか。

質問13　一酸化二窒素が大気におよぼす影響とは何だと思いますか。

(1)　大気汚染
(2)　オゾン層の破壊

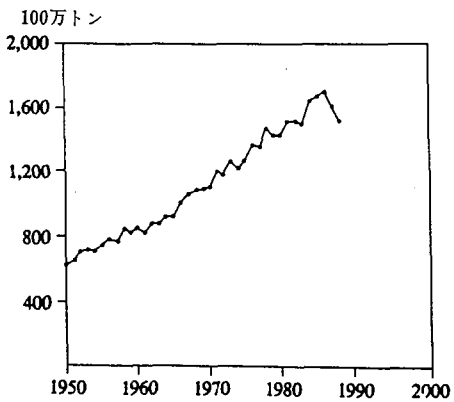


図2—7　世界の穀物生産量（1950—88年）

（レスター・R・ブラウン『地球白書'89-'90』，ダイヤモンド社，1989，P 71）

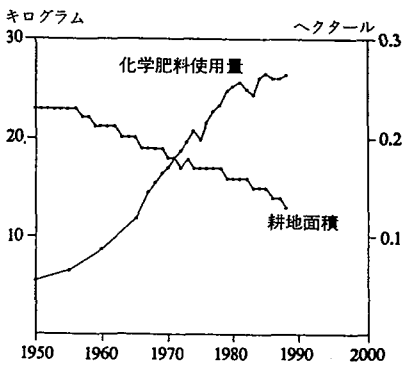


図2—8　世界の1人あたりの化学肥料使用量と耕地面積（1950—88年）

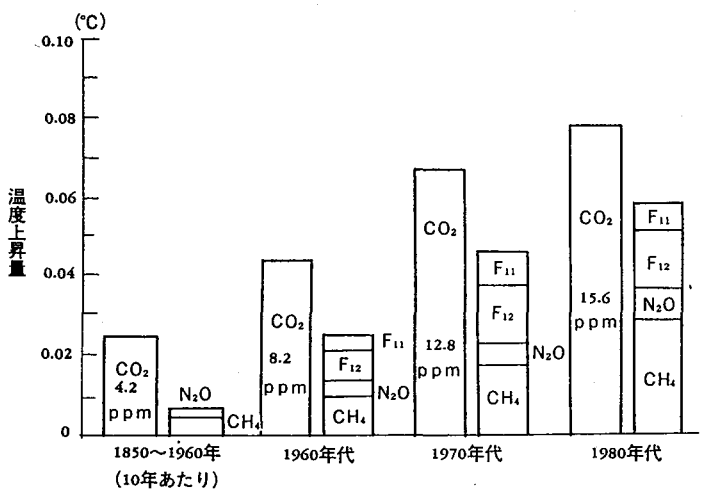
（レスター・R・ブラウン，同上書，P 86）

(2)が正解です。オゾン層の破壊の原因は，おもにフロンガスですが，一酸化二窒素も関係しています。一酸化二窒素 N_2O は対流圏では安定した気体として存在します。しかし，成層圏に入ると一部は酸素原子 O との反応によって一酸化窒素 NO に変わり，一酸化窒素がつぎのようにオゾンを分解するのです。

$$NO+O_3 \rightarrow NO_2+O_2$$

一酸化二窒素は，波長 7.8 μm の赤外線領域につよい吸収帯をもつため，二酸化炭素，メタン，フロンガスなどと同じように地表面から放射される赤外線の一部を吸収し，温室効果による地球温暖化にも影響をおよぼしています（図 2—9）。

大気中の一酸化二窒素は 1975 年から 85 年の 10 年間に毎年 0.3 パーセントの割合で増加しています。放出量としては，窒素肥料ばかりでなく，森林，草原などバイオマス（生物体）の燃焼や土および海洋などが考えられています。しかし，窒素肥料は同じ 10 年間に 70 パーセントの増加率を示していることから，窒素肥料による一酸化二窒素の放出量は今後さらに多くなることが予想されます。



注） CO_2＝炭酸ガス，CH_4＝メタン，N_2O＝一酸化二窒素，F_{11}，F_{12}＝クロロフルオロカボーン

図 2—9　種々の温室効果気体の年代ごとの増加による地表面温度上昇量

（講座・地球環境 1，前掲書，P 110）

2—2—2　かんばつの発生

サハラ砂漠の南側にそって東西にのびる地域をサヘル地域といいます（図2—10）。ここは年間降水量100～500ミリのサバンナ地帯です。これまでサヘル地域は断続的なかんばつに見舞われてきました。ところが，1969年以降，かんばつの度合いが強まっています。しかし，サヘル地方では，雨のばらつきが地域的，時間的に大きいことは普通のことであると見る学者もたくさんいます。80年の世界気象機関（WMO）の報告書でも「70年代のアフリカのかんばつは深刻なものではあっても，この地域の気象からすれば正常なものである」との結論を下しています。今日では，一体どちらが正しいのでしょうか。

質問14　サヘル地域の最近のかんばつについてどう思いますか。図2—11を参考にして答えなさい。

(1)　自然変動の枠内にある。
(2)　自然変動の枠をこえている。

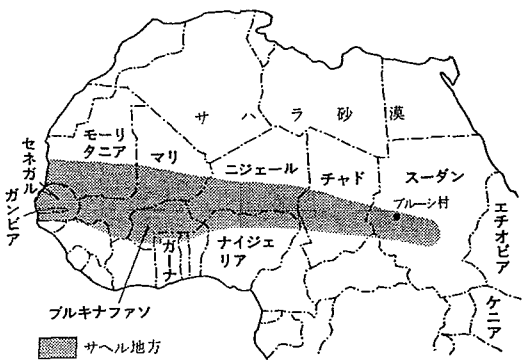


図2—10　サヘル地方

（石弘之『地球環境報告』，岩波新書，1988，P 5）

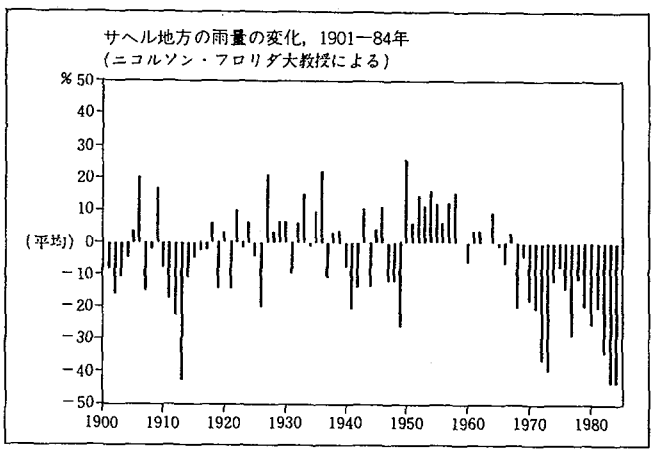


図2—11　サヘル地方の雨量の変化

（石弘之『地球生態系の危機』，ちくまライブラリー，1987，P 75）

(2)が正解です。80年にはそれほど目立っていなかったかんばつが，80年以降さらに強まり，ミレット（キビの一種）栽培限界の年降水量300ミリの等雨量線（飢餓前線）もかつてないほどの速度で南下しているからです（図2—12）。サヘル地方の樹木の年輪の分析から，今回のように十数年も断続的につづく例が発見されなかったことも，最近のかんばつの異常さを裏づけています。

アフリカでも熱帯林の破壊はすさまじい速さで進みました。エチオピア，モーリタニア，ルワンダなどでは過去30年間に熱帯林がほとんどなくなりました。アフリカ最大の木材産出国のコートジボアールでは熱帯林は国土の12パーセントしか残っていません。このような地表の植生の破壊によって，土地が水分の保水力を失い，蒸発量が減少してサヘル地域の雨量が低下したものと思われます。一方砂漠化はアルベドつまり太陽光の反射率の増大をもたらします。アルベドが増大すると地表面の吸収する日射量が減少して温度が下がるため，地表面付近は冷たい空気，上空は暖かい空気となって，大気中の対流活動が弱められ，雲の形成と降水の頻度が少なくなるものと考えられます。しかし，かんばつの原因は，熱帯林の破壊や砂漠化ではなく，雨をもたらす熱帯収束帯の南下のように大規模な気候変動の結果とする見方もあります。

陸地の表面をおおうきわめて薄い土の層とそのうえに広がる薄い大気の層とが互いに強く影響をおよぼしあっていることは間違いありません。では，かんばつは人間社会にどのような影響をもたらしたのでしょうか。

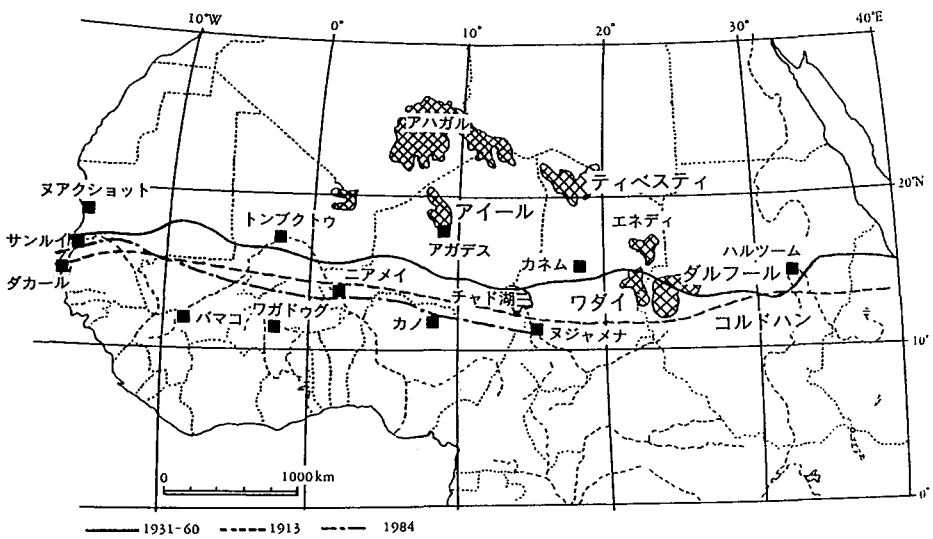


図2—12　年降水量300ミリ等雨量線（飢餓前線）の南下

（講座・地球環境2，前掲書，P 89）

2—3　人間社会への影響

2—3—1　サヘル地域の食糧危機

1969年以来のはげしいかんばつによってサヘル地域では多くの人間や家畜の命がうばわれています。とりわけ84年からの3年間では，サヘル地域を中心に3000～3500万の人々が食糧不足のため生死の境をさまよい，多数の死者を出しました。一人あたりの穀物生産量も70年からは下がる一方で(図2—13)，多くの人々が慢性的な栄養不足に苦しんでいます。

質問15　セネガルでも一人あたりの穀物生産量が70年以降下がっています。これはなぜだと思いますか。

(1)　かんばつによって穀物生産量が落ちているにもかかわらず，急速な人口増加がいぜんとしてつづいているから。

(2)　かんばつで足りなくなった穀物を輸入するために，穀物の栽培地を換金作物のピーナツに変えたから。

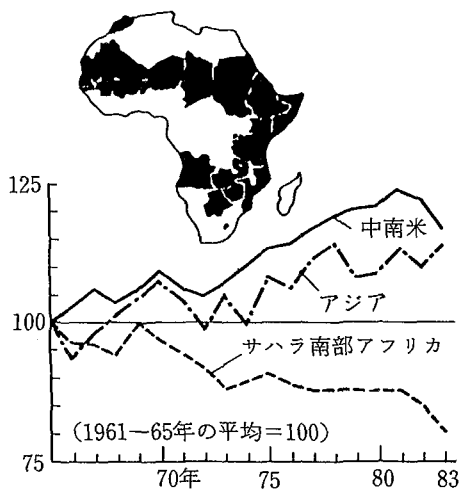


図2—13　84年のかんばつのときの食糧不足国（上）
減りつづけるアフリカの一人あたりの食糧生産（下）
（石弘之『地球生態系の危機』，ちくまライブラリー，1987，P 167）

正解は(2)です。セネガルのピーナツ栽培は，19世紀半ば，当時植民地支配していたフランスのピーナツ油の需要をまかなう換金作物として作付けがはじまり，いまではセネガルの重要な産業の一つになっています。かんばつで食糧の輸入が急増すると，その代金をまかなうために，ピーナツの作付けがふやされました。その結果，いまやセネガルの全耕地の3分の2がピーナツ畑になっています。ピーナツの増産は休耕期間の短縮やピーナツの連作によってもおこなわれ，その結果，土地はすっかりやせてしまいました。このような乾燥地帯では，一度作物を植えつけるとそのあと何年も畑を休ませないかぎり，土壌中の水分や栄養分がもどらないため，ミレット→ピーナツ→休耕，という輪作が伝統的な農法だったからです。

かんばつはこのように輸出用の換金作物の増産を生み，それによってますます土地を荒廃させていますが，土地所有の不公正の問題もその一因として見過ごすわけにはいきません。なぜなら，土地のない人々は，砂漠周辺の草地に追いやられ，そこで自分たちの食糧すなわち穀物（ミレット）を生産するために森林を伐採して農耕地に変えざるをえないからです。

これはセネガルに限ったことではありません。ニジェールでは最近10年間に耕地面積が40パーセントも拡大しているのに，その大部分はピーナツなどの換金作物にあてられ，穀物の生産量は4パーセントしか増えていません。サヘル地域以外のケニアでも，紅茶の栽培用に1984年1年間だけで1万7千ヘクタールもの森林が開墾されましたが，急傾斜地が多いため，土壌流出がひどくなっています。

こうしてアフリカの途上国は，穀物の輸入量を増やすために換金作物の増産をはかりましたが，思ったほどは外貨を獲得することができませんでした。それはなぜでしょうか。

質問16　途上国は，いずれも換金作物の生産量を増やしたにもかかわらず，外貨を獲得できなかったのはなぜでしょうか。

第1の理由は換金作物の生産量を増やすとかえって価格が低迷することです。第2は，換金作物の市場は多国籍企業によって動かされているため，生産国が得られる収入がごくわずかしかないことです。（ラテンアメリカのバナナの場合，生産国の手に入るのはバナナの価格の12パーセントにすぎません。）

途上国では，こうした国際価格の低迷を量で補うため休耕地にまで作付けされ，土壌流出や砂漠がさらに広がるという悪循環がくり返されています（図2—14）。一方先進国では，途上国の安価な一次産品によってますます生活がゆたかになっています。つまり，先進国のゆたかな生活は途上国の貧困の上に成り立っているといえるのです。

それにもかかわらず，途上国政府が換金作物の生産を優先するのは，換金作物は政府直営の公社か大土地所有者によって生産される場合が多く，いずれも政府の特権階級と結びついているためです。しかし，換金作物で得られた外貨の大部分は都市に投資され，農村の貧困はいっこうに改善されません。したがって，農村では毎日のように大勢の人が餓死しているというのに，都市では穀物以外にもトウガラシや食用油などが山のように積まれているというありさまです。飢餓が貧困の一形態といわれるのはこのためです。

こうしてサヘル地域のかんばつは人間社会のもっとも弱い階層にもっとも大きな影響をあたえているのです。しかし，このような食糧危機は今はじまったことではありません。

図2—14　スーダンの棉花畑

（石弘之『地球生態系の危機』，ちくまライブラリー，1987，P 165）

2—3—2　古代メソポタミアの崩壊

世界最古の農業の発祥地として知られるメソポタミアでは，紀元前4000年ごろ，チグリス川やユーフラテス川から水路をひいて，灌漑農業がはじめられました（図2—15）。その結果，降水量の少ないメソポタミア南部では，小麦の収量が増大し，やがて数十の都市国家が成立するようになりました。しかし，小麦の収量は，紀元前2500年に1ヘクタールあたり2トン前後だったのをピークにして少しずつ減りはじめ，紀元前1700年にはほとんど採れなくなりました。こうして食糧基盤を失ったメソポタミア南部の都市文明はその中心的地位を中部のバビロンにうばわれていったのです。

質問17　メソポタミア南部において灌漑をはじめたのにやがて小麦がとれなくなったのはなぜでしょうか。

(1)　河川にふくまれる塩類が土中に集積したから。
(2)　河川水によって土が流出したから。

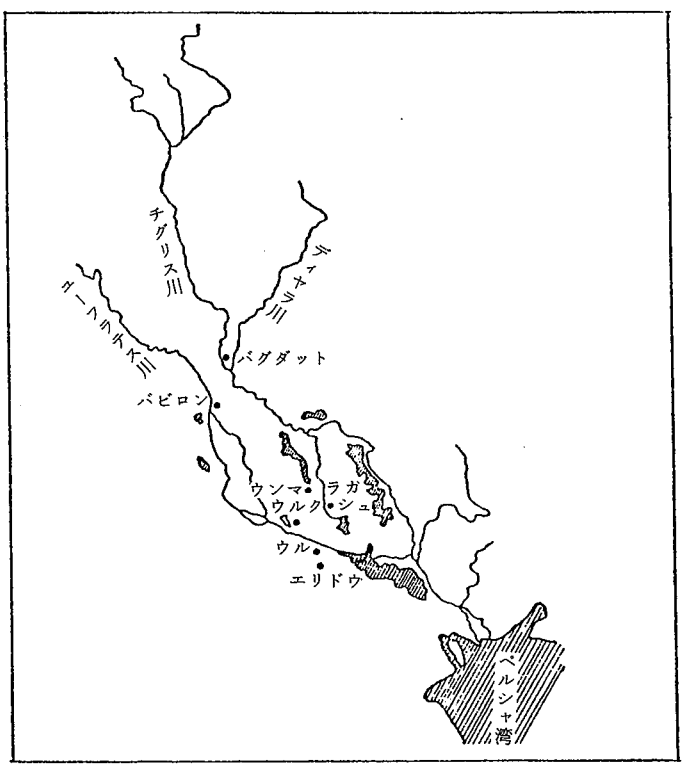


図2—15　メソポタミア南部の都市国家（B. C.3000年頃）

（大場英樹，『環境問題と世界史』，公害対策技術同友会，1979，P 10）

正解は(1)です。中近東やアフリカの河川水の塩類濃度は一般に日本の河川にくらべて非常に高い（図2—16)ので，潅漑がおこなわれると，土中にナトリウム，カルシウム，カリウムなどの塩類がたまります。しかも供給された水は土の中の大きなすき間から浸透するため，地下水位が少しずつ上昇し，地下水にとけだしていた塩類も毛細管現象によって地表近くの土の中にたまるようになります。熱帯地方では，水分の蒸発率が温帯地方の４～５倍であることから，塩分の濃縮度が急速に高まります。こうして土中の塩分の集積度が0.5～1.0パーセントに達すると，植物は生育できなくなるのです。

このように河川水や地下水にふくまれる塩類が地表に集積されて土地の生物生産力が低下することは塩類化とよばれ，砂漠化の典型的な現象の一つと考えられています。しかし，潅漑をしても，暗渠によって排水すれば，地下水位が高くならず，塩類化をある程度防ぐことはできます。

メソポタミアに限らず，ナイル川流域，インダス河口など古代文明の発祥地は現在いずれも砂漠や荒野と化しています。農耕や牧畜によって人間がすでに不毛化した土地は北アメリカ大陸の面積に相当するとまでいわれています。しかも，今日農耕地の拡大は限界に近づいています。したがって，私たちは，砂漠化を防止するとともに，砂漠の緑化にとり組んでいかなければなりません。

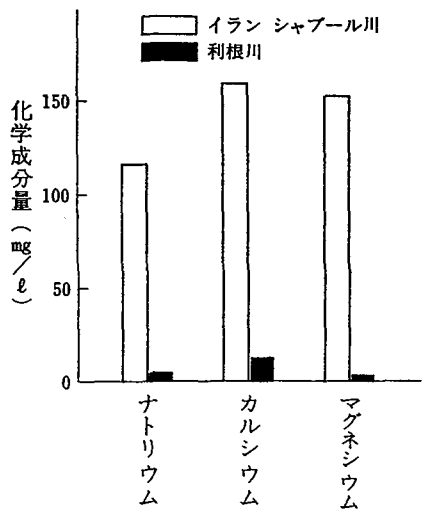


図2—16　日本とイランの河川の化学成分の比較（mg/l）

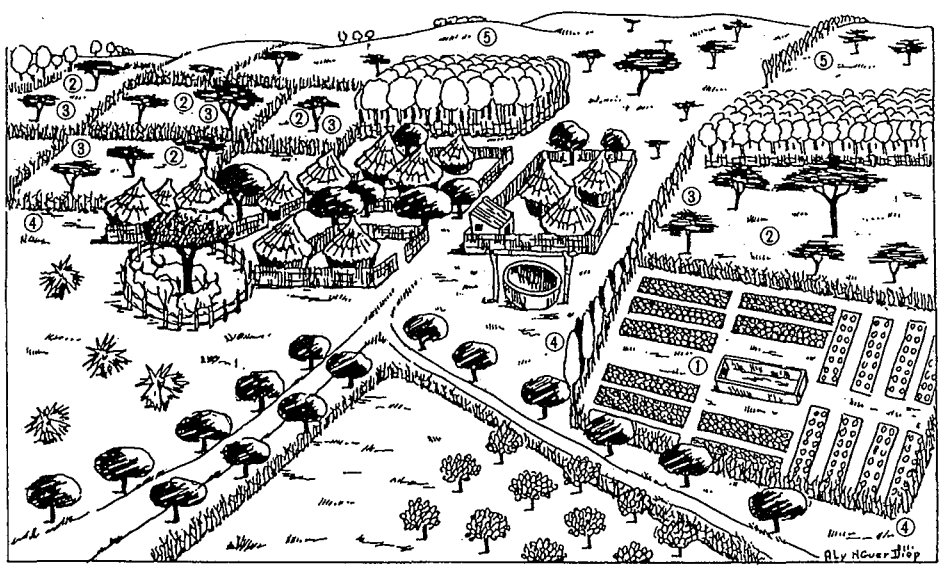
（岩田進午「地球砂漠化・不毛化と農地の消失」，前衛，11，1989，P 229）

2—3—3　サヘル地域の緑化の試み

国連の統計によれば，アフリカに対する世界各国の援助計画は，1985年ごろから食糧援助についで，植林援助が目立つようになってきました。食糧援助では根本的な解決にならないからです。しかし，世界銀行やUNEPなどによる「サハラ南下防止のための緑の長城計画」のように壮大な計画を上から下へとおろす形で実施したものはことごとく失敗しました。それに対して，NGOが地域の共同体と密着してスタートさせたプロジェクトの多くは成功しています。したがって，植林援助が成功するためには，長い時間ときめ細かい手入れ，それに住民の理解が必要だといえます。

最近，援助の専門家たちは，農業と林業を調和させたアグロフォレストリー（図2—17）の必要性を説き，アラビアゴムなどの有用樹をくみこんだ輪作を提唱していますが，これはもとはといえば伝統的農業でした。しかし，伝統的農業は，環境的に安定していても，生産性が低いという欠点があります。これを近代的農業でどのようにおぎなっていくかが今後の科学技術の課題だと思われます。だとすれば，サヘル地域を緑化するにはどうすればよいのでしょうか。

問題3　サヘル地域を緑化するための科学技術的条件は何だと思いますか。



①村落苗畑，②アカシアアルビダの保護・育成，③農地への多目的樹種の植林，④生垣・防風林，⑤村落林

図2—17　アグロフォレストリーの形態

（講座・地球環境2，前掲書，P 232）

それには，水の確保，潅漑，防風対策，樹種の選択，土地の改良などがあげられます。それぞれの必要性や問題点は以下のとおりです。

(1) 水の確保

ツンドラは例外として，陸上に生存する生物の量はその土地の水の量に比例します。だとすれば，水を確保することが植林の第一条件であると考えられます。水は河川，湖以外にも地下水や海水として存在します。湖や地下水は，貯まるまでに時間がかかるので，とりすぎに気をつける必要があります。海水の淡水化は，半透膜からなる容器に海水を入れ，電力でその海水に圧力をかけて，真水だけを外にだすという方法でおこなうことができます。

(2) 潅　　漑

農業で栽培する作物に水をやることを潅漑といいます。年間300ミリ以下の降水量では潅漑が必要になります。しかし，潅漑は塩類化を起こしやすいので，排水に気をつけなければなりません。現在の大規模な潅漑の方法にはおもにスプリンクラー潅漑と点滴潅漑とがあり，前者は植物の上から水をまくのに対し，後者は根の近くだけにまきます。いずれも電力をつかいます。(1)と(2)に必要な電力は砂漠では太陽エネルギーが最適です。

(3) 防風対策

砂漠は朝晩の気温差が大きいため大気の対流活動がさかんです。しかも，さえぎるものがないため，秒速10メートルぐらいの風は日常茶飯事です。これを防がなければ，植物は飛砂ですぐ埋まってしまいます。

(4) 樹種の選択

表土が残されていれば，アカシア・アルヒダ，ユーカリ，アラビアゴムの木が適しています。アルヒダは，西アフリカの自生種で，乾期に葉をつけ，雨期に葉を落とすため，つよい日射で土地の乾燥する乾期に日陰をつくり，作物に日光の必要な雨期に日差しがよくなります。そのタネや葉は栄養価が高く，家畜の飼料にはうってつけです。ユーカリは，吸水がはげしく，周辺の畑地を乾燥させますが，生長が速く病害虫につよいという特徴をもっています。アラビアゴムは換金できるという利点があります。

(5) 土地の改良

砂の砂漠でも野菜や果物の栽培は可能です。砂は，水はけがよいので，水が速く下方に移動するという欠点もありますが，土より粒子が大きいために毛細管現象が起こりにくく，あまり塩類化が生じないという長所をもつからです。紙おむつにつかわれる高分子樹脂の保水剤を砂にまぜれば，砂の欠点を解決することもできます。

こうしてエチオピアのモジョではユーカリやアカシアなどの木がすでに1000万本植えられました。マリのセグーには2000ヘクタールのユーカリの植林地が広がっています。ニジェールのマジア谷ではインドセンダンの防風林の延べ延長がすでに400キロメートルに達しました。ケニア，セネガル，タンザニア，チャド，ソマリアなどでも，アルビダなどの植林が，少しずつではありますが，着実におこなわれています。

3　オゾン層の破壊

3—1　オゾンホールの発見

3—1—1　人工衛星がオゾンホールを見落とした

1982年10月，忠鉢繁と梶原良一の南極越冬隊員は，昭和基地上空のオゾン全量の観測値が例年にくらべてかなり低いことに気がつきました。二人は，器械の故障ではないかと思いながらも，それを確かめることもできず，不安な気持ちで観測をつづけました。南極から日本に帰り，さっそく器械を調べてもらったところ，どこにも故障はありませんでした。84年忠鉢は南極のオゾン全量についての観測結果(図3—1）を国際オゾン・シンポジウムで発表しました。これが世界ではじめての南極上空のオゾン量の減少に関する研究発表でした。しかし，そのときの会場はいたって静かなものでした。ところが，翌85年，イギリスのジョー•ファーマン博士を中心とする研究グループが，過去27年間にわたる南極の春(10月）のオゾン全量の観測値を示し，南極のオゾン全量がフロンによって劇的に減少していることを明らかにすると(図3—2)，世界中の研究者たちはあっと驚きました。74年アメリカのローランドとモリナによって理論的に明らかにされたフロンによるオゾン層の破壊が現実となって現われたからでした。

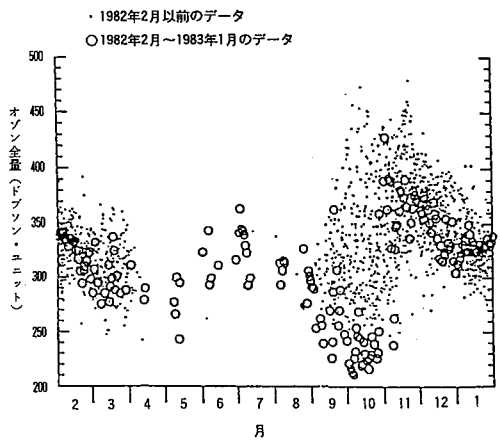


図3—1　昭和基地のオゾン全量

（川平浩二，牧野行雄『オゾン消失』，読売新聞社，1990，P 15）

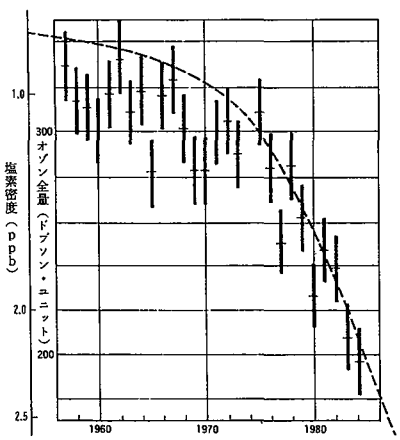


図3—2　南極ハーレーベイ基地での10月の月平均オゾン全量の変化

（川平浩二，牧野行雄，同上書，P 23）

アメリカ航空宇宙局（NASA）でも78年以来気象衛星ニンバス7号から全世界のオゾン量を観測していました。しかし，南極のオゾン全量の急激な減少を発見することはできませんでした。それは，異常に低いオゾン量は，エラーとして除外するように，NASAのコンピュータをプログラムしていたからです。ファーマンの発表後ただちに，除外されていたデータの再検討がなされ，その視覚的な映像（図3—3）が発表されると，その映像は世界中の人々に大きな衝撃をあたえました。まるで南極の成層圏のオゾン層に大きな穴があいたように見えたからです。このオゾン層の穴を「オゾンホール」といいます。

では，どうしてオゾンホールができたのでしょうか。このことについて考えるために，まずオゾン層とは何かを見てみましょう。

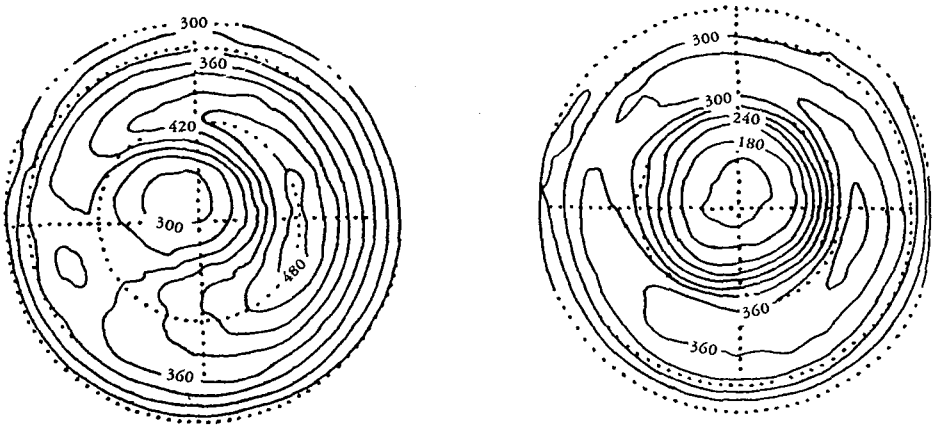


図3—3　ニンバス衛星から観測されたオゾンホール

（講座・地球環境1，前掲書，P 57）

中心は南極，外側の円は赤道を示します。左側は1979年，右側は1987年の観測結果です。単位はドブソン・ユニット（1ドブソン・ユニットは0.01 mm）です。

3—1—2　オゾン層は成層圏にある

酸素分子 O_2 が高いエネルギーをもつ紫外線と衝突して二つの酸素原子 O に分解すると，酸素原子はまわりの酸素分子と結合してオゾン O_3 になります。オゾンは紫外線や酸素原子の他にも窒素酸化物 NO_x，水素酸化物 HO_x，塩素酸化物 ClO_x などの微量物質によって分解されます（図 3—4）。

成層圏のオゾン層ではこうしたオゾンの生成反応とオゾンの分解反応とが共存しています。オゾン層が成層圏にある（図 3—5）のは，成層圏より上空では，紫外線は強くても酸素分子の濃度は低く，成層圏より低い対流圏では，酸素分子の濃度は増えるものの紫外線が弱くなるからです。

地球を緯度別に見ると，紫外線が強いのは赤道です。したがって，オゾンは，赤道上の成層圏では多く，極地方の成層圏では少ないものと考えられます。ところが，観測の結果，その逆であることがわかりました。これはなぜでしょうか。

質問 18　成層圏のオゾンが赤道で少なく極で多いのはなぜだと思いますか。

(1)　赤道でつくられたオゾンが大気の循環によって極に運ばれるから。
(2)　オゾン破壊物質 NO_x，HO_x，ClO_x が大気の循環によって赤道上に集まるから。

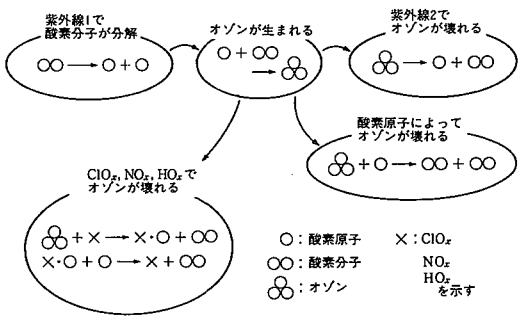


図 3—4　オゾンの生成と分解

（岩坂泰信，前掲書，P 33）

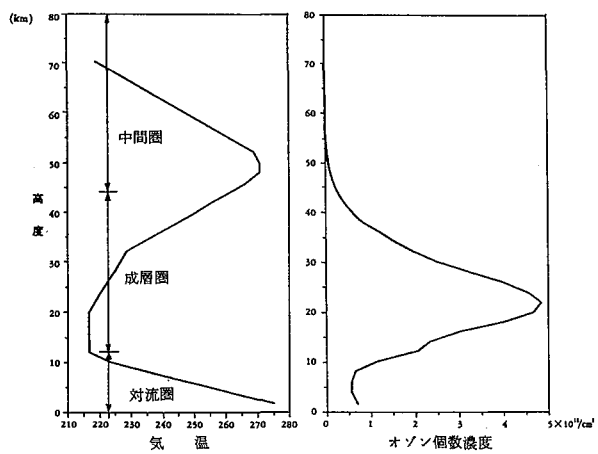


図 3—5　標準的なオゾン濃度プロファイル（右）と気温構造（左）

（講座・地球環境 1，前掲書，P 45）

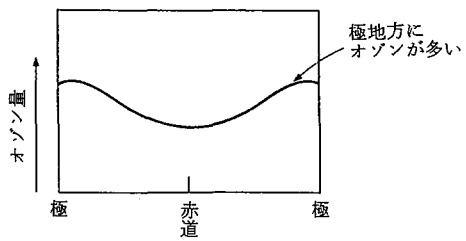
正解は(1)です。赤道では，太陽光線が強いため，成層圏の下部でもオゾンがつくられています。赤道でつくられたオゾンは，赤道付近から極に向かう大規模水平対流にのって，極方向に運ばれます。極付近まで運ばれたオゾンは，対流圏へと降りていき，地表近くで他の物質と反応して消滅します。こうしてオゾンは，主として赤道でつくられ極付近で消滅するという，一つの大きなサイクルをつくっているのです（図3—6)。

このように生成と消滅をくり返し，たえず赤道から極へと流れているオゾン層を地上にしきつめると，わずか3ミリメートルにしかなりません。オゾン量は1ミリを100ドブソン・ユニットとして表すため，平均的なオゾン層の厚さは300ドブソン・ユニットということになるわけです。

3—1—3　どうしてオゾンホールができるのか

1987年のオゾンホールの中心部のオゾン全量は150ドブソン・ユニット以下まで下がり，とりわけオゾン濃度がもっとも高いはずの高度15—20キロメートルではオゾンがほとんど見られませんでした(図3—7)。オゾンホールがフロンによるものだとしても，オゾンホールは，なぜ南極の春（9〜10月）に出現し，しかも年々拡大しているのでしょうか。この謎を解くために，多くの研究者がいろいろな仮説を出しました。

人工衛星で観測した平均的なオゾン量の分布



成層圏には赤道から極へ向けて物を運ぶしかけがある。

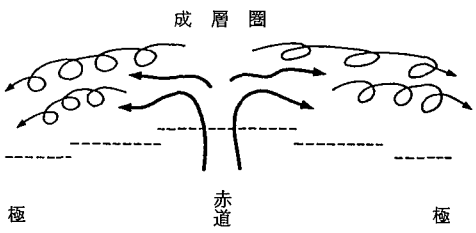


図3—6　オゾンのサイクル

（岩坂泰信，前掲書，P 35）

人工衛星で測られたオゾン量は，赤道で少なく，極で多い。成層圏では赤道から極へ向かう物質の流れが存在します。

質問 19　つぎの仮説の問題点を指摘しなさい。

(1)　太陽の黒点活動に関連して太陽活動のさかんなときは，紫外線が強まり，大量の窒素酸化物 NO_x が生じる。したがって，高濃度の NO_x をふくんだ空気が南極成層圏の下部まで降りれば，NO_x によって南極にオゾンホールができるものと考えられる。

(2)　何らかの原因で大気の循環が乱され，オゾンが赤道から南極に運ばれないならば，オゾンホールが南極に出現するものと考えられる。

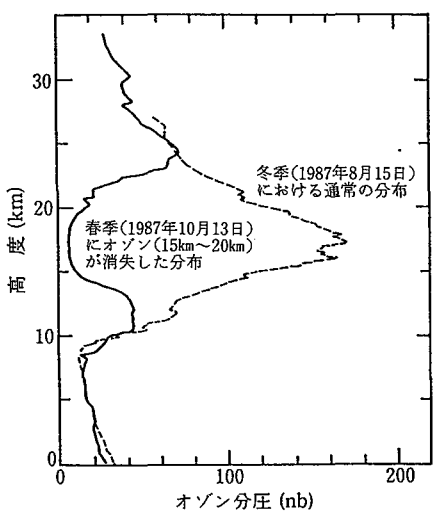


図 3—7　オゾン量の高度分布

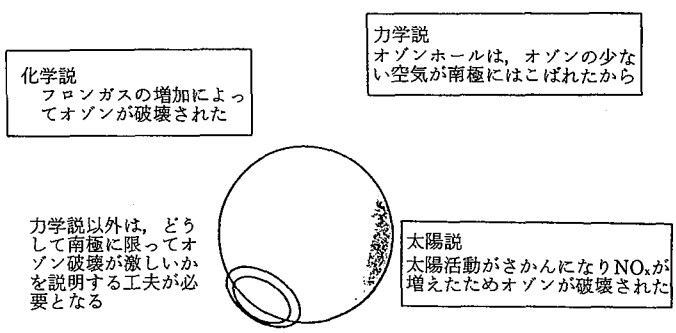
（富永健，巻出義紘，F. S. ローランド『フロン地球を蝕む物質』，1990，P 77）

(1)の仮説では，太陽活動には周期性があるため，オゾンホールが拡大しつづけていることを説明できません。(2)の場合は，大気循環の乱れが起こるとすれば，南極だけでなく，他の場所でもオゾンホールが見られなければなりません。

こうしてこれらの仮説は破壊されました。最後まで残ったのはつぎのようなフロン説でした(図3—8)。しかし，この仮説が正しいとするにはいくつかの証拠が必要です。それは何でしょうか。

質問20　つぎの仮説を証明するにはどんな証拠が必要だと思いますか。

フロン起源のオゾン破壊物質 ClO_x が NO_x と反応するとオゾンを破壊しない塩素貯蔵物質 $ClONO_2$ になる。それが春先になって太陽光をうけると塩素 Cl を急速に放出し，その塩素によって連鎖反応的にオゾンが破壊されてオゾンホールができる。



南極上空のオゾン層のあな

図3—8　オゾンホールの生成に関する仮説

（岩坂泰信，前掲書，P 96）

そのためには実際のオゾンホールにおいて塩素 Cl がオゾンを破壊したという証拠がなければなりません。このようなオゾン破壊反応は気体中ではオゾンホールができるほど急速に進むとは考えにくいという疑問も残ります。

1987 年の 8 ～ 9 月，NASA は，この仮説を検証するため，直接オゾンホールの内部および周辺の観測を試みました。その結果，オゾン濃度が高いところでは一酸化塩素 ClO 濃度が低く，オゾン濃度が低いところでは逆に一酸化塩素濃度が高くなっていることがわかりました(図 3—9)。一酸化塩素は，本来あるはずのない物質であり，塩素がオゾンを破壊した証拠ともいうべき物質です((1)式)。しかも，オゾンは壊疑的に減少しています。したがって，塩素がオゾンを破壊したことは動かしがたい事実といえます。

$$Cl+O_3 \rightarrow ClO+O_2 \qquad (1)$$

では，どうして塩素によるオゾン破壊反応がオゾンホールのできるほど速く進んだのでしょうか。

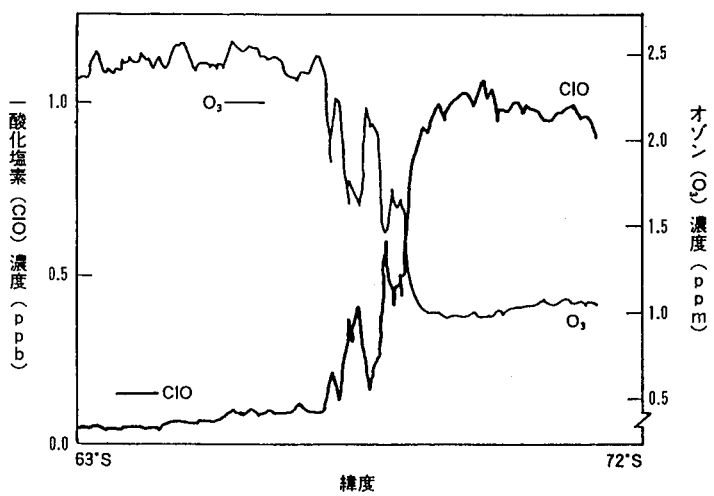


図 3—9　オゾンホールの一酸化塩素とオゾンの量的対比

（川平浩二，牧野行雄，前掲書，P 129）

これは 1987 年 9 月 16 日観測器具を積んだ飛行機がプンタアレナス（53° S）から南極半島（72° S）までを高度 18 km で飛行して得られたものです。

南半球の高緯度地帯では対流圏から成層圏にかけて「極渦」とよばれる強い偏西風が吹きます。これは，南極大陸をとりまくように一周し，とくに冬に発達するため，極渦の内側にある南極大陸上空の大気は孤立し，気温はマイナス90℃にも達します。このような低温下では，成層圏大気中の水蒸気は，氷となり，極成層圏雲を生じます。この表面で塩素化合物 $ClONO_2$ は HCl や H_2O と反応して，

$$ClONO_2 + HCl \rightarrow Cl_2\uparrow + HNO_3 \qquad (2)$$

$$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HOCl\uparrow + HNO_3 \qquad (3)$$

Cl_2 および HOCl を大気中に放出します（図3—10）。これらの反応は気体中でも起こりますが，極成層圏雲では，雲をつくっている氷の表面が触媒となり，その1万倍以上の速さで反応が進みます。こうして $ClONO_2$ や HCl から放出された大量の Cl_2 と HOCl は，春の太陽光によってたちまち Cl に分解すると，1個の Cl が10万個のオゾン O_3 を破壊する連鎖反応（(4)(5)式）が起こり，オゾンホールが南極の春に出現するものと考えられます。

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2 \qquad (4)$$

$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2 \qquad (5)$$

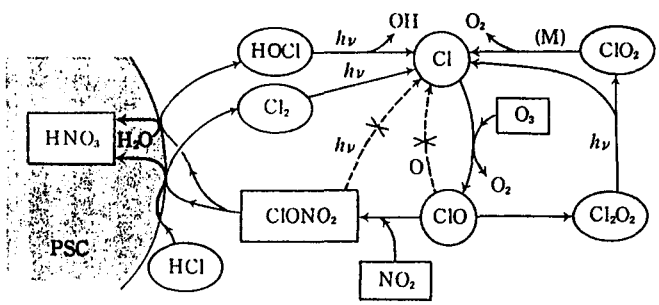


図3—10　オゾンホール内で進行する化学反応

（富永健，巻出義紘，F.S. ローランド，前掲書，P 84）

PSC は極成層圏雲，hν は太陽光を表します。

さて，塩素貯蔵物質（$ClONO_2$，HCl）から放出される塩素 Cl はもともと人間のつくり出したフロンの一部でした。では，どうして地上でつくられたフロンが成層圏で塩素貯蔵物質に変化するのでしょうか。

質問21　フロンが成層圏で $ClONO_2$ や HCl に変化するのはなぜだと思いますか。

(1)　フロンは紫外線の強い成層圏で分解して Cl を放出し，その Cl がオゾン O_3，窒素酸化物 NO_X，メタン CH_4 などと反応する（(6)(7)(8)式）から。

(2)　フロンは対流圏の可視光線で分解して Cl を放出するが，Cl は成層圏まで上昇し，オゾン，窒素酸化物，メタンなどと反応する（(6)(7)(8)式）から。

$$Cl+O_3 \rightarrow ClO+O_2 \qquad (6)$$

$$ClO+NO_2 \rightarrow ClONO_2 \qquad (7)$$

$$Cl+CH_4 \rightarrow HCl+CH_3 \qquad (8)$$

(1)が正解です。フロンは，他の物質とは化合しないため，対流圏から成層圏に上昇し，オゾンが吸収する紫外線によってこわされます。つまり，フロンは，対流圏ではこわされず，オゾンの少ない上空40キロメートル以上の成層圏で分解され，塩素をつくり出しているのです（図3—11）。

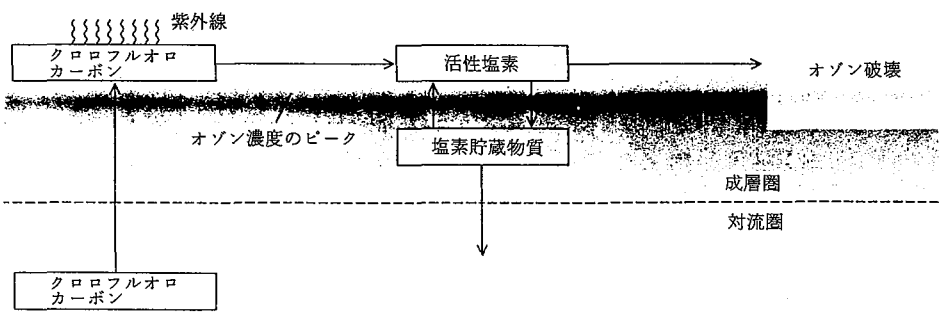


図3—11　フロンの行方

（R. S. ストラルスキー「南極のオゾンホール」，サイエンス，3，1988，P 14）

塩素貯蔵物質は，熱や光によって分解し，塩素を成層圏にもどしますが，塩素貯蔵物質の一部は，対流圏まで下降し，そこでの大気浄化作用によって大気からのぞかれていきます。

ところで，オゾン層破壊のきっかけとなるフロンとはどういう物質でしょうか。

フロンは，1928年，アメリカのゼネラル・モーターズ社の技師トーマス・ミッジリーによって合成された物質です。フロンの正式名称はクロロフルオロカーボン（CFC）といいます。「クロロ」は塩素Cl，「フルオロ」はフッ素F，「カーボン」は炭素Cのことです。つまり，クロロフルオロカーボンとは，塩素とフッ素のついた炭素を意味します。フロンにはいろいろな種類（表3—1）がありますが，いずれも人体に無害であり，揮発しやく，化学的に安定であることなどから，冷却剤，発泡剤，洗浄剤として広く使用されています。現在では年間100万トンのフロン（表3—2）が先進工業国の位置する北半球中緯度で生産されています。その結果，北半球の大気中におけるフロン11，12の平均濃度はいずれも毎年4％ずつ増加し，ICの洗浄剤＝フロン113の場合は毎年10～20％という速い速度で増加しています。北半球で放出されたフロンは大気の循環によって1～2年で南半球にも広がっています。

このように大気中のフロンが毎年増加するため，成層圏で放出される塩素も多くなり，オゾンホールが年々拡大していくものと考えられます。

表3－1　いろいろなフロン（講座・地球環境1、前掲書、p83）

コード番号	化学式	寿命（年）	ODP	GWP
CFC11	CCl_3F	60	1.0	1.0
CFC12	CCl_3F_2	120	0.9—1.0	2.8—3.4
CFC113	CCl_2FCClF_2	90	0.8—0.9	1.3—1.4
HCF22	$CHClF_2$	15	0.04—0.06	0.32—0.37
HFC134a	CF_3CH_2F	16	0	0.24—0.29
HCFC123	CF_3CHCl_2	2	0.013—0.022	0.017—0.020
HCFC141b	CH_3CCl_2F	8	0.07—0.11	0.084—0.097

注）ODPはCFC11を基準とした重量当たりの相対的オゾン破壊係数
　　GWPはCFC11を基準とした重量当たりの相対的温室効果係数

CFC 11，12，113はモントリオール議定書規制対象の特定フロン，それ以外は有望な代替フロン。

表3－2　世界のフロン生産量（1985年）
（環境庁オゾン層保護検討会、前掲書、p62）

アメリカ	37.5万トン	35％
E　C*	40.0　〃	39〃
東　欧*	12.1　〃	11〃
日　本	16.2　〃	15〃
合　計	105.8万トン	100％

＊規制対象フロン（CFC）のみの量でフロン-22(HCFC)

3—1—4　南極以外のオゾン層に変化はないか

1989年ニンバス7号はついに北極圏でも小規模なオゾンホールをとらえました（図3—12）。しかし，北極周辺には大陸があり，北極上空の極渦は不安定で長続きしないため，真冬の成層圏の気温は南極ほどには下がりません。したがって，塩素Clによるオゾン破壊反応の触媒である極成層圏雲があまり発達せず，南極ほど巨大なオゾンホールがつくられる可能性は少ないものと思われます。では，両極以外の地域のオゾン層はどうなっているのでしょうか。

質問22　両極以外の地域の成層圏のオゾン全量には変化があると思いますか。

(1)　いまのところ変化はない。
(2)　両極ほどではないが，減少傾向にある。

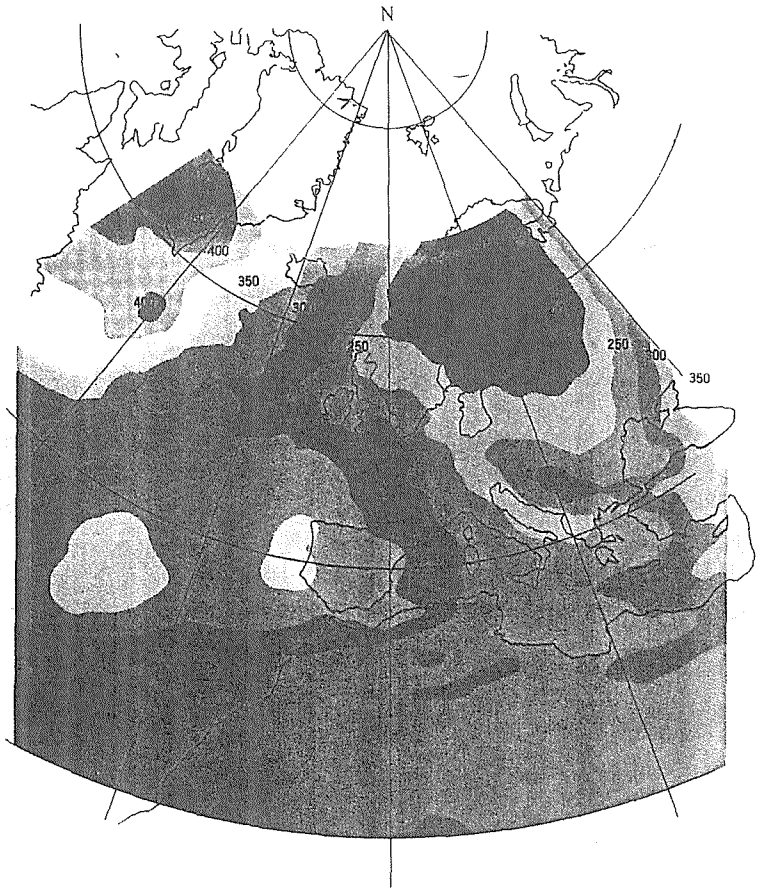
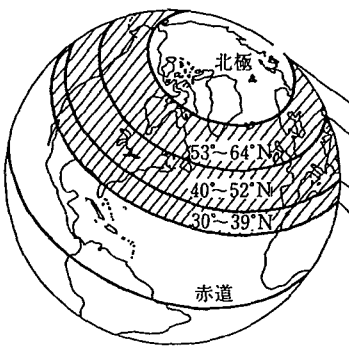


図3—12　北極圏のオゾンホール（1989年2月）
（川平浩二，牧野行雄，前掲書，口絵）

正解は(2)です。1986年NASAやUNEPは,「オゾン・トレンズ・パネル」を設置し,いままでのデータを再検討して,地球全体のオゾン量の経年変化を調べました(図3—13)。その結果,北半球全域でオゾン全量が予想以上に減少していることが明らかになりました。

地球をとりまくオゾン層は,植物の光合成から生じた酸素が紫外線を吸収してつくられたものですが,今日のようになるまでには20億年以上の長い時間がかかっています。しかも,オゾン層によって生物に有害な紫外線が地上に到達しなくなったからこそ,生物の上陸が可能になったのです。それにもかかわらず,オゾン層がわずか20年くらいの間に人工化学物質フロンによって地球全域から失われようとしています。このままフロンなどオゾン層破壊物質が大気中に放出されたら,21世紀半ばには高度40～50キロメートルの成層圏のオゾン量がところによっては半減することが予想されています(図3—14)。だとすれば,それは人間生活圏にどんな影響をあたえるのでしょうか。



緯度	年平均変化 1969→86年	冬季 (12～3月)	夏季 (6～8月)
53°–64°N	−2.3%	−6.2%	+0.4%
40°–52°N	−3.0	−4.7	−2.1
30°–39°N	−1.7	−2.3	−1.9

図3—13　北半球における緯度別のオゾン量変化

(富永健,巻出義紘,F.S.ローランド,前掲書,P 86)

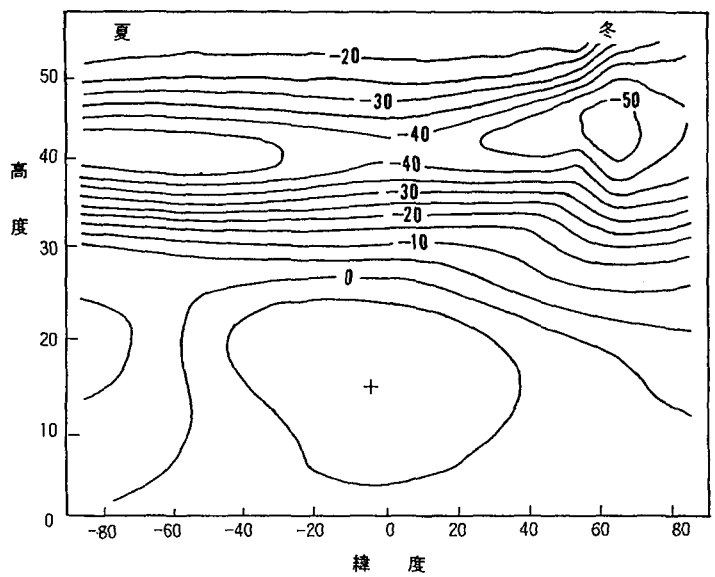


図3—14　21世紀半ばのオゾン減少率の予想

(川平浩二,牧野行雄,前掲書,P 177)

3—2　生物と大気との相互作用の地球化

3—2—1　オゾン層の破壊は生物を死滅させる

紫外線は，成層圏の酸素分子やオゾンによって吸収されるため，地上に到達しません（図3—15）。このことは，成層圏のオゾン量が少なくなれば，地上に到達する紫外線が強くなることを意味します（図3—16）。最近，南氷洋では，成層圏のオゾン量の減少にともなう植物プランクトンの減少が実際に観察されたといわれます。では，植物プランクトンの減少は人間生活圏に対しどんな影響をおよぼすでしょうか。

問題4　植物プランクトンが地球全域で減少したら，どんなことが起こると思いますか。

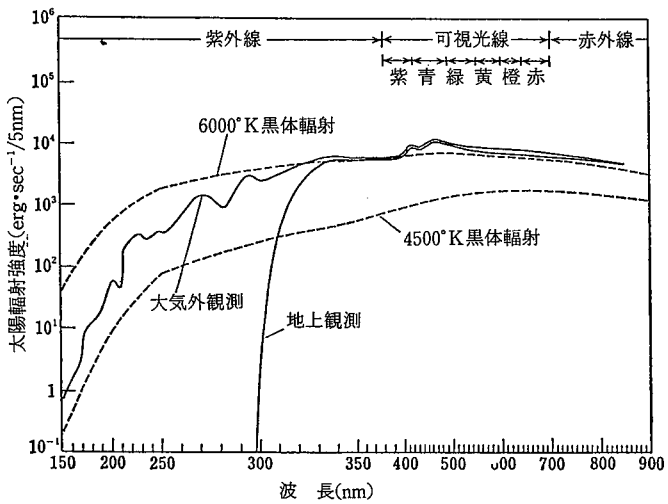


図3—15　地上と大気外における太陽光

（島崎達夫『成層圏オゾン』，東京大学出版会，1989，P 14）

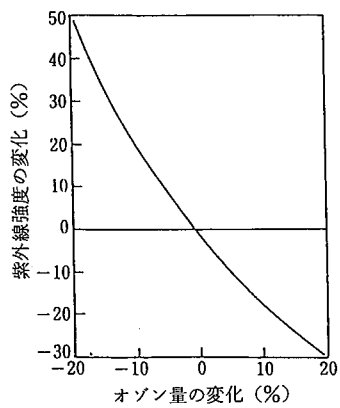


図3—16　成層圏オゾンの減少にともなう地上の紫外線の増加

（富永健，巻出義紘，F.S. ローランド，前掲書，P 90）

植物プランクトンは，海面近くで光合成をおこない，海の食物連鎖の出発点にあります。したがって，植物プランクトンの減少は，これをエサとする他の海中生物に影響をあたえるため，海洋生態系全体が狂うものと考えられます。しかも，植物プランクトンは大気中のかなりの量の二酸化炭素を除去するため，その減少は大気中の二酸化炭素の増加，ひいては地球温暖化をひき起こすことも予想されます。

栽培植物の多くも，紫外線の増加によって遺伝子DNAの構造が変わるため，光合成に関係する酵素に変化が起こり，植物の生長そのものが妨げられることがわかっています。ダイズの中には25%のオゾンの減少に対して収量が25%も減少する種が報告されています。したがって，オゾン層の破壊にともなう紫外線の増加が地球規模での食糧不足をひき起こすのは明らかです。

こうしてオゾン層の破壊によって紫外線が強まると，人間生存の物質的基盤が失われるだけでなく，人体への直接的な影響として皮膚ガンの増加が考えられます。紫外線によって皮膚細胞のDNAが破壊されると，正常な細胞がガン細胞に変わるとともに皮膚の上に存在する免疫細胞のはたらきまで弱まるため，ガン細胞が増殖するからです。いまでも紫外線が強い地域ほど皮膚ガンの発生率が高くなっています（図3—17）。しかし，オゾン層破壊の影響は生物だけにとどまるものではありません。

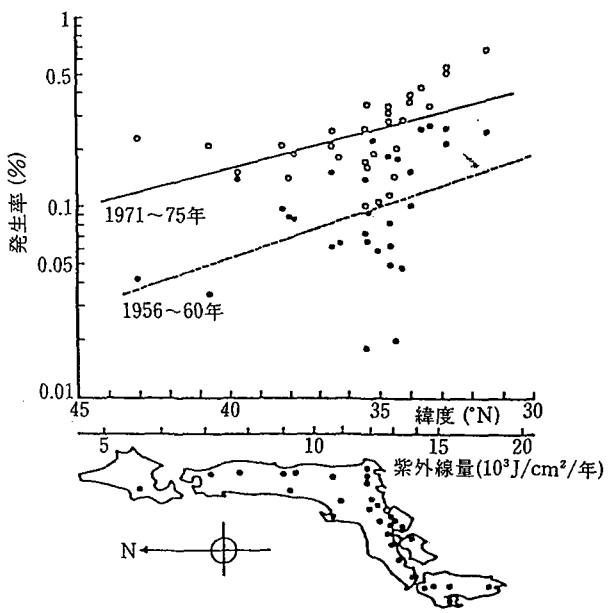


図3—17　日本における皮膚ガン発生率の地域差

（富永健，巻出義紘，F.S. ローランド，前掲書，P 94）

3—2—2　オゾン層の破壊は気候変動をひき起こす

地球の大気の99.9%は，高度50キロメートル以下にあり，地球の半径6400キロメートルにくらべるとうすい膜のようなものです。地上から8～15キロメートルまでの対流圏では，地上であたためられた空気が上昇して，対流がたえず生じています。成層圏では，上空ほど温度が高くなるため大気の層は安定し，対流はあまり起こりません。中間圏で温度が下がるのは温度を上げるような光化学反応が弱いからです。熱圏では太陽光線が物質の原子や分子を分解して熱を出させるため，温度が数千度に達します。熱圏より上を外圏といいますが，そこではほとんどが水素原子か，それが分解された陽子か電子になっています。では，オゾン層が破壊されたら，大気の温度分布はどうなるのでしょうか。

質問23　成層圏のオゾン層が破壊されたら大気の温度はどのように変化すると思いますか。予想される温度分布を図3—18に描きなさい。

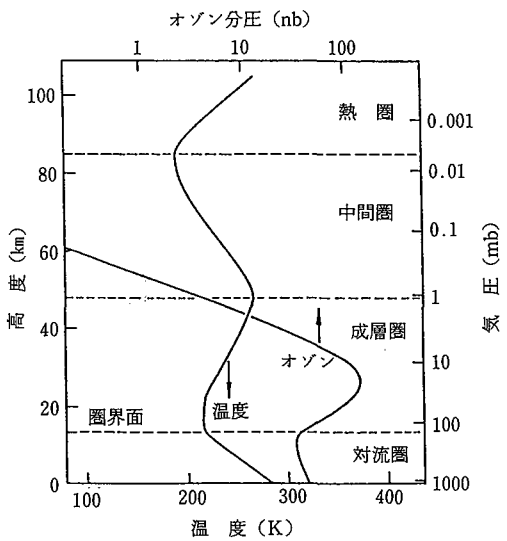


図3—18　地球大気の温度，気圧，オゾン分圧の高度分布

（富永健，巻出義紘，F.S. ローランド，前掲書，P 68の図をもとにしました）

成層圏の温度が高度とともに高くなるのは成層圏にあるオゾンが太陽からの紫外線の一部を吸収して熱に変えるためです。したがって，オゾン層が破壊されると，成層圏の温度は下がることが予想されます（図3—19）。じっさい，地球の全オゾン量の減少とともに，成層圏上部の気温もやや低下する傾向にあることが観測されています。こうして成層圏の温度分布が変わると，成層圏の大気の流れに変化が生じ，地球規模の気候変動が起こる可能性もあります。

さらに成層圏のオゾン層の破壊によって対流圏に到達する紫外線量が増え，地表近くの大気中で光化学反応が促進されて光化学スモッグが発生しやすくなることも考えられます。光化学スモッグとは自動車の排ガスや工場からの煤煙などにふくまれる窒素酸化物 NO_x が紫外線を吸収してオゾンやOHラジカルのような物質に変化する現象のことです。これらの物質は強い酸化作用があるため，眼に痛みをあたえたり，植物の葉を枯らしたりします。したがって，成層圏オゾンは紫外線のバリアーとして重要な役割を果たしていますが，対流圏のオゾンは汚染物質といえるのです。

フロンによる地球規模の自然変動は，オゾン層の破壊のみならず，フロン自身の温室効果による地球温暖化も指摘されるほどになりました。では，フロンによる地球規模の自然変動を解決するために，いままでどのような努力がはらわれ，今後どんな課題が残されているのでしょうか。

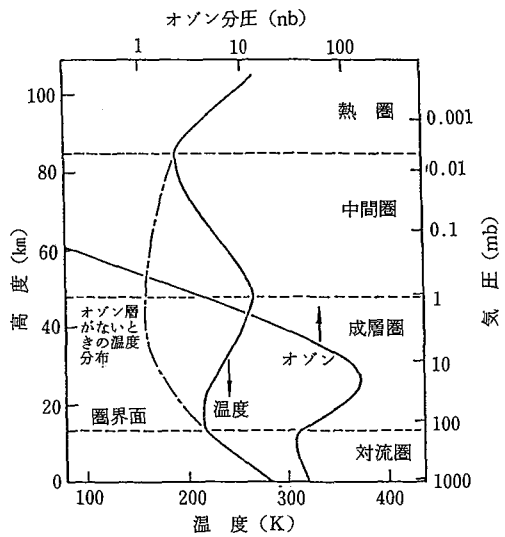


図3—19　地球大気の温度，気圧，オゾン分圧の高度分布

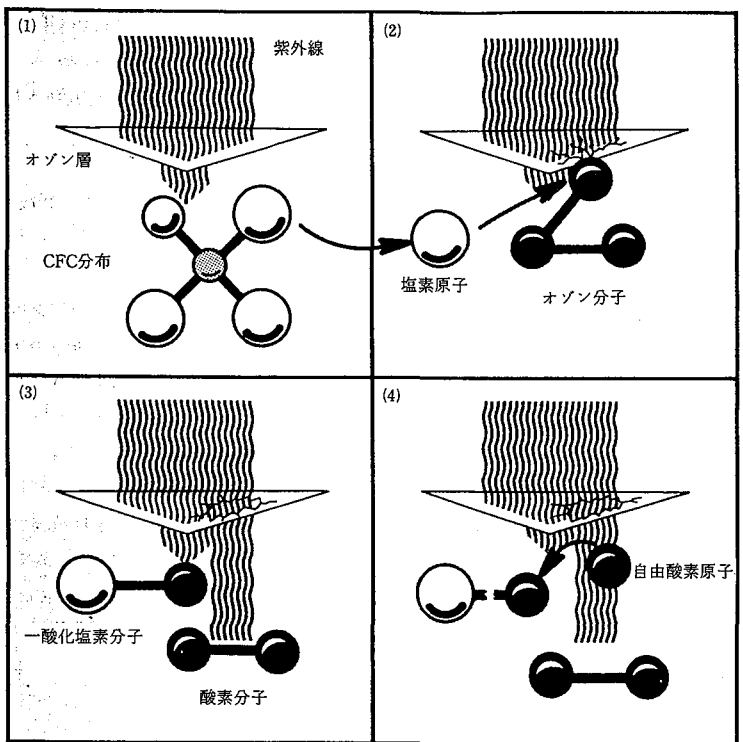
（富永健，巻出義紘，F.S. ローランド，前掲書，P 68）

3—3　フロン全廃への過程

3—3—1　フロン—オゾン論争をめぐって

1974年アメリカのローランドとモリナの両博士が，フロンによる成層圏オゾンの破壊を理論的に明らかにし(図3—20)，このままフロンの大気中への放出がつづけば，2000年にはオゾン層の7～13%が失われるだろうと警告しました。それに対してフロンメーカーは，「まだ成層圏でフロンが検出されたこともなければ，フロンが成層圏まで上昇するメカニズムも解明されていない」として，ローランドとモリナの理論を批判しました。

その後，ローランド—モリナ説は少しずつ解明されましたが，決定的な証拠が得られるまでにはいたりませんでした。フロンによるオゾン破壊の問題は議会の公聴会に何度もとりあげられ，ローランド—モリナ説を支持してフロン生産の早期中止を求める科学者たちと「はっきりとした証拠がないかぎりローランド—モリナ説は認められない」と主張する世界最大のフロンメーカー＝デュポン社側の科学者たちとの間で激しい論争が展開されました。この論争は，証拠の有無という議論に終始し，決着がつきませんでした。しかし，問題の重大性からして，フロン生産に対するイエスかノーかの選択をしなければなりません。では，どうすればよいのでしょうか。



(1) CFC分子は，オゾン層に達すると、紫外線によって分解される。
(2) 遊離した塩素原子はオゾン分子にぶつかり，オゾンを分解する。
(3) 一酸化塩素分子と普通の酸素分子が生成し，より多くの紫外線がオゾン層を貫通するようになる。
(4) 自由酸素原子は一酸化塩素分子を分解し，塩素が再びオゾン層破壊プロセス(2)を開始する。

図3—20　フロンによるオゾン破壊反応

(D. G. Cogan『地球環境の危機』，産業公害防止協会，1989，P 35)

質問24　つぎの主張のうちどちらかを選び，もう一方を批判しなさい。

(1)　フロンなしで私たちの社会生活は機能しない（図3—21）。しかもフロン生産にはアメリカだけでも何万人もの人々が従事している。このため，フロンの生産中止が今日の生活や経済にあたえる影響には，はかりしれないものがある。したがって，フロンによるオゾン破壊の確証がえられず，フロンに代わる物質の開発のメドが立たないかぎり，フロンの生産中止をきめるべきではない。

(2)　フロンが成層圏に達し，分解してオゾンを破壊するまでには長い時間を要する。成層圏のフロンはいまは少ないが，今後は多くなることが予想される。そのときになってフロンを規制しても，手遅れである。私たちがとる行動は，私たちの世紀ではなく，つぎの世紀に関わりをもつからである。したがって，フロンによるオゾン破壊が科学的に完全には立証できなくても，フロンの生産はすみやかに中止されるべきである。

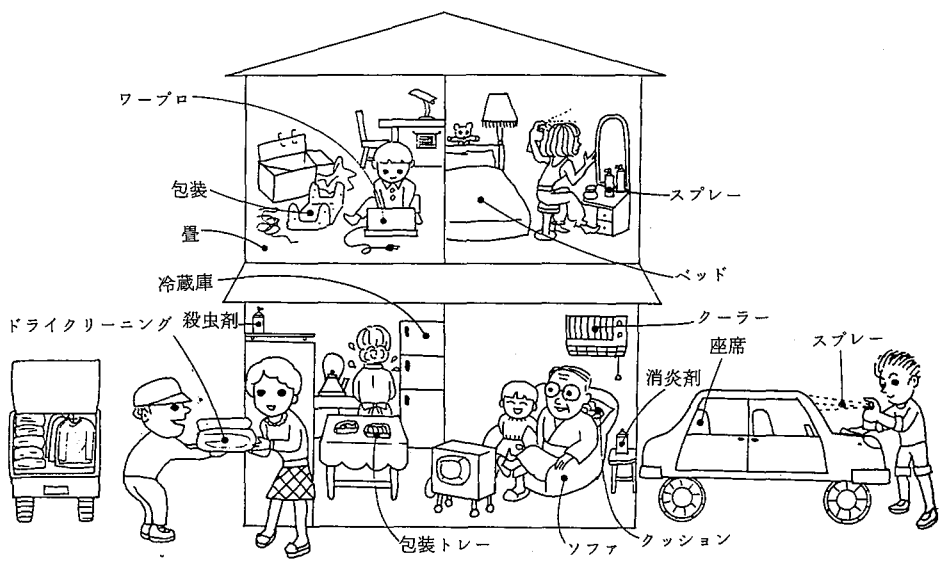


図3—21　暮らしの中のフロンガス

（山田國廣，前掲書，裏表紙）

この問題の決着までにはつぎのような経過をたどりました。

ローランド―モリナ説をめぐる論争はアメリカ科学アカデミーにゆだねられました。その結果，ローランド―モリナ説を大筋では認めながらも，まだ不確かな部分も残されているとしてフロン規制には2年以内の猶予が必要である，という裁定が下されました。当時のアメリカ政府は，このようなあいまいな裁定にもとづいてフロンの中でも重要ではない用途だけを規制することを決定し，78年フロンのスプレーへの使用を禁止しました。フロン入りスプレーはフロン反対の市民運動によってすでに売れなくなっていたので，フロンメーカーはその規制をすぐにうけ入れました。メーカーが噴出剤をフロンから炭化水素系の物質に切り替えたのはその後間もなくのことです。メーカーは，論争を長引かせて時間をかせぎ，その間ひそかにフロンの代替物質の開発をすすめていたからです。

こうしてフロン生産の50%を占めるスプレーへの使用が禁止されたため，アメリカのフロンの生産量は一時半減しました。フロン反対の市民運動も，フロン入りスプレーが禁止されたことによって，しだいに下火になっていきました。そのため，メーカーは，フロンの活路をプラスチックの発泡剤や電子部品の洗浄剤などに見いだし，再びフロンを増産しはじめたのです（図3―22）。

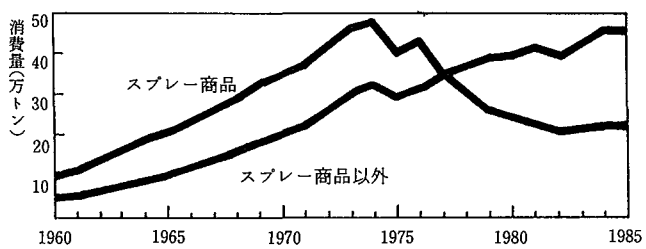


図3―22　世界全体のフロンの消費量の推移

（泉邦彦『恐るべきフロンガス汚染』，合同出版，1987，P 68）

やがて，フロン規制の中心は国連環境計画(UNEP)へと舞台を移し，85年UNEP主催の外交会議において，欧米諸国を中心にしてオゾン層保護条約が採択されました。これは，ウィーン条約とよばれ，オゾン層破壊物質を規制するための総則となるものです。87年9月にはウィーン条約に基づく具体的な内容がモントリオールの会議で採択されました。そのとき，オゾン層への影響の大きい5種類の長寿命のフロン（特定フロン）と3種類のハロン（特定ハロン）がオゾン層破壊物質として規定され，これらを今世紀中に半減するためのタイム・スケジュールがきめられました（図3—23)。これがモントリオール議定書です。しかし，同年10月，過去最大のオゾンホールが南極で観測されると，「地球の友」や「グリンピース」などの環境保護団体が，フロンの即時撤廃を要求し，モントリオール議定書の見直しをせまりました。こうして再びフロン反対の市民運動が世界各地で展開された結果，オゾン層破壊物質の今世紀中の全廃が90年6月のモントリオール議定書第2回締約国会議で決定されました（表3—3)。その会議の閉幕後ただちにヨーロッパ諸国など13カ国*は，この決定でも遅すぎるとして，97年以前のできるだけ早い時期にオゾン層破壊物質を全廃するという共同声明を発表しました。

---

* 西ドイツ，カナダ，スイス，デンマーク，オランダ，オーストリア，リヒテンシュタイン，ノルウェー，フィンランド，スウェーデン，ベルギー，オーストラリア，ニュージーランド

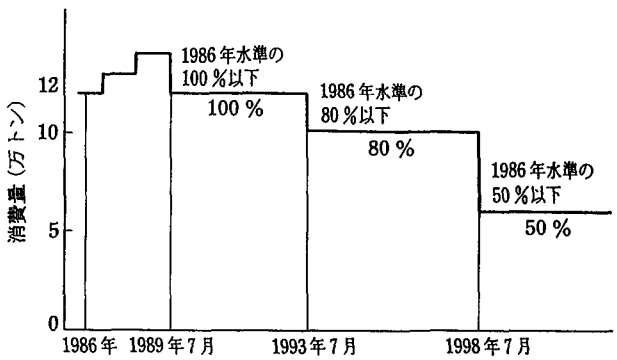


図3—23　モントリオール議定書にもとづくオゾン層破壊物質の削減スケジュール

（環境庁「オゾン層保護検討会」，前掲書，P 167）

表3－3　オゾン層破壊物質の新たな削減スケジュール

（朝日新聞　90年6月30日）

（カッコ内は削減量の基準となる年）

	1995年	1997年	2000年	2005年
特定フロン(1986年)	50%	85%	100%	
特定ハロン(1986年)	50%		100%	
四塩化炭素(1989年)	85%		100%	
メチルクロロホルム(1989年)	30%		70%	100%

特定フロン～フロン（CFC）11，12，113，114（CCl_2F～$CClF_2$），115（$CClF_2$～CF_3）

特定ハロン～ハロン1301（$CBrF_3$），2402（$CBrF_2$～$CBrF_2$）

こうしてフロン全廃が決定されたのはローランド―モリナ説の発表から16年も後のことでした。フロンをつかうことによって地球規模の環境問題が生じることにくらべれば，フロンを規制した場合の経済的な損失や生活上の不利益の方が小さいことは明らかです。したがって，時間がたてばもっとよいデータがえられるからといってフロン規制の時間をのばすことはさけるべきでした。証拠だけをいたずらに要求することは科学的態度とはいえません。科学には実証性がともないますが，実証的であることだけが科学ではないからです。とりわけ，環境科学は現在から未来を予測しなければならないため，環境科学には実証性をのりこえた論証が求められるのです。危険の存在が人体によって実証されたときはすでにとり返しのつかない事態になることはいうまでもありません。

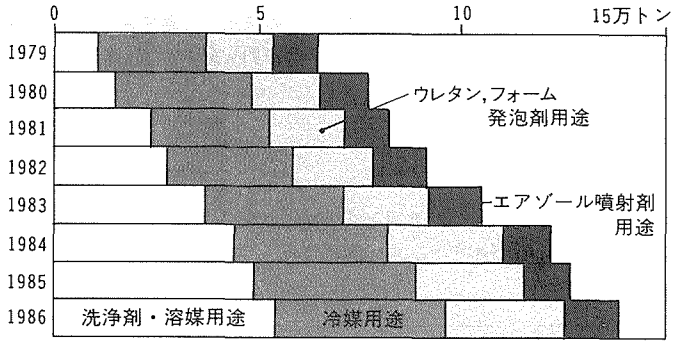


図3―24 日本におけるフロンの生産量の推移

（NHK取材班，『NHK地球汚染①』，日本放送出版協会，1989，P 93）

3―3―2 日本の対応はなぜ遅れたか

このような世界の動きに対して日本のフロン生産は増加の一途をたどり(図3―24),日本はいまや世界の特定フロンの生産量の15%をしめるフロン大国になりました。これほど生産量の急増した国は世界中どこを見ても他にありません。85年ヨーロッパ諸国を中心にウィーン条約が締結されてからも，日本のフロンメーカーの中にはフロン113の生産設備を新設し，その増産を強行したところもありました。日本の環境庁に「成層圏オゾン保護に関する検討会」が発足したのは87年2月，日本政府がウィーン条約に調印したのは88年9月のことです。このように日本が世界的なフロン廃止の動きに逆行してきたのはなぜでしょうか。

問題5 日本のフロン規制が遅れたのはなぜだと思いますか。宮本憲一氏の意見を参考にしてもっとも適切だと思われる原因をあげなさい。

後退著しい日本の環境政策～第1回日欧環境会議に参加して

大阪市立大学教授　宮本憲一（環境経済学）

欧米の住民運動は，それぞれの地域で，CO_2削減や特定フロンガス使用禁止など地球規模の問題を日常の健康や生活の問題と結びつけ，企業や自治体に具体的対策をとらせている。工場の中には「フロンガスを使っていません」と看板をかかげねばならなぬほど，住民にせめられて具体的な公害防止協定をすすめているところもある。(中略)ヨーロッパ環境会議(EEB)はEC加盟12カ国の主要な環境団体126組織，約1500万人の加盟者からなる巨大組織で，ブリュッセルのビルを事務局としている。いまヨーロッパでは環境保全の市民団体は経営者団体や労働者団体とならぶ社会団体として法的に公認され，司法上・行政上の交渉団体としての権利をもちはじめている。(中略)EEBのメンバーが日本の状況の中で一番わからなかったことは，日本環境会議のように，EEBに匹敵するような専門家集団をもちながら，それが社会的に権利をもたず，基金も常設事務局もないということであった。市民団体が法的に公認されず，十分な資金を集められないというのは，日本が企業社会であり市民社会ではないためである。環境政策は住民参加がなければ一歩も進まない。にもかかわらず，日本の政府も企業も住民参加はみとめない。89年9月のUNEPと環境庁の開いた環境会議では，市民団体の参加をみとめなかった。この硬直した態度は欧米に衝撃をあたえ，日本は民主主義国ではなく「異質社会」だという印象をつよめた。(中略) 地球規模の環境政策をすすめるにはNGOの国際的連帯が必要である。

――――――朝日新聞　1990年9月11日夕刊

―246―

その原因としては，日本でのフロン反対の市民運動や世論が，スプレーの自粛という消費の段階にとどまり，企業，自治体，国に対して全面的にフロンの生産を禁止するという要求に結びつかなかったことがあげられます。つまり，フロン反対の声が，企業や自治体や国の責任を問わず，スプレーを使うか使わないかという市民一人一人の倫理観にいつのまにか置き換えられたことが日本でのフロン規制を遅らせた原因であると思われるのです。フロンに限らず，他の地球環境問題に対しても，日本はことごとく世界の潮流にとり残されています。その根源は，日本の非民主的な社会制度，つまり環境問題に対する情報の公開，公聴会，国民投票などがいまだに十分におこなわれないという，およそ民主主義国家とはいえないような前近代的な社会制度にあるものと考えられます。したがって，政策決定にあたっては，欧米諸国では国や自治体とNGOとが協力しあっているのに，日本では一部の自治体での試みはあるものの，一般的にはNGOは排除されているのです。これでは環境政策が，役所の都合や企業の利益によって左右され，前進するわけがありません。

このように地球環境問題の解決をはかるためには人間社会のあり方を根底から問い直さなければならないのです。それとともに，有効な科学技術の開発も今後の人類的課題といえます。今日までに排出された1500万トンのフロンのうち90%はまだ成層圏に達していません。今世紀中にフロンなどオゾン破壊物質が全廃されたとしても今後長い間オゾン層が破壊されつづけることが予想されます。したがって，フロンやハロンなどの代替物質の開発はもとより，使用済みフロンの回収・分解技術の開発を急がなければなりません。

―247―

4　地球温暖化

4—1　地表気温の上昇

4—1—1　地球が熱くなっている

地表の平均気温は，世界各地の観測データの分析から，最近100年の間に0.5℃上昇していることがわかりました(図4—1)。1988年現在，観測史上気温の高い年をあげていくと，88年，87年，83年，81年，80年，86年の順に80年代が上位6位までを占めています。過去15万年の地表平均気温の変動幅は5℃程度です(図4—2)。とりわけ，気温変動の大きいアメリカ北東部でも，氷期から間氷期にかけての1000年間に1～2℃上昇したにすぎません。したがって，地表全体の平均気温が100年間に0.5℃も上昇したのはかつてないことです。この原因は何なのでしょうか。

質問25　最近100年間に気温が急上昇しているのはなぜだと思いますか。

(1)　地球の公転軌道が変化して，地球に入射する太陽エネルギー（日射量）が強くなってきたから。
(2)　人間の経済活動にともない都市部を中心に大量の熱が大気中に放出されたから。
(3)　人間の経済活動によって多くの気体が大気中に放出されたから。

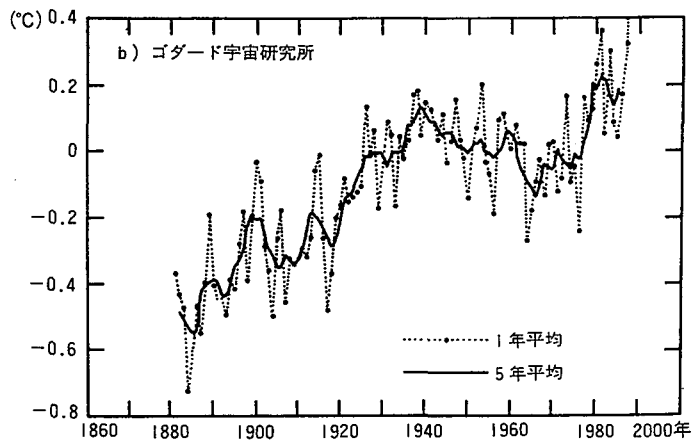


図4—1　地表温度の推移

（スティーブン・H・シュナイダー『地球温暖化の時代』，ダイヤモンド社，1990，P 99）

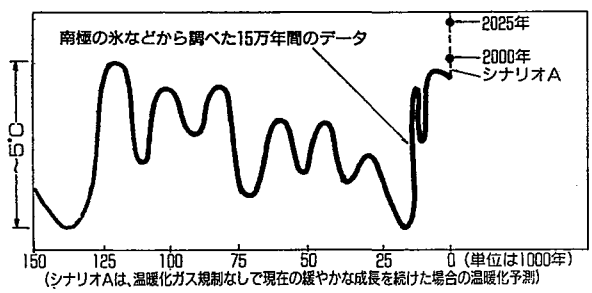


図4—2　過去15万年間の地表気温の変化

（朝日ジャーナル　90年9月21日号　P 103）

正解は(3)です。地球の公転軌道はおよそ10万年周期で円と楕円をくり返しています。地軸の傾きも約4万年の周期で22.5～24°の間を行き来しています。このような地球の周期運動にともなう日射量の変化は，第四紀における氷期と間氷期の交代の原因であると考えられていますが，最近100年間の急速な気温上昇を説明することはできません。(2)は，都市特有のヒート・アイランド現象なので，地球規模では起こりません。

1988年6月，アメリカ上院のエネルギー委員会の公聴会において，NASA・ゴダート宇宙研究所のジェームズ・ハンセン博士は，「最近100年間の地表気温の上昇の原因は，人間の経済活動によって放出された二酸化炭素，メタン，フロン，一酸化二窒素などの気体が大気中にたまり，地球からの放熱をさまたげたことにあるとし，これから夏になると高温と乾燥がくり返される」と証言しました。はたしてその年の夏，高温と深刻なかんばつがアメリカをおそうと，地球の温暖化はたちまち世界中の人々の強い関心をよびました。では，それらの気体が大気中にたまると，どうして地球の放熱がさまたげられるのでしょうか。

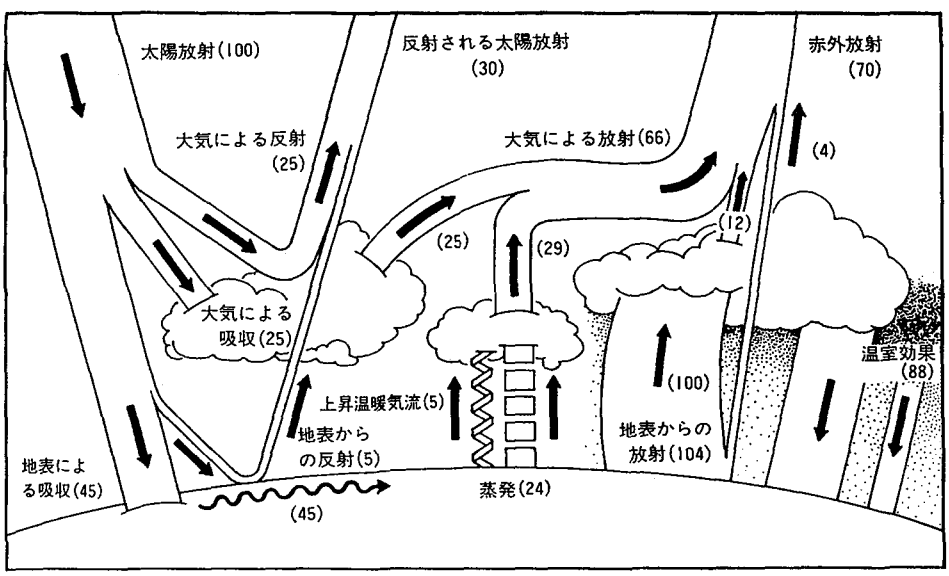


図4—3　地球のエネルギー・バランス

（スティーブン・H・シュナイダー，前掲書，P 21）

4—1—2　大気が地球を熱くする

地球には紫外線や赤外線などさまざまな光が太陽から入射しています。そのうちの約半分が地表面にとどき，地表を暖めます。それだけなら，地球はしだいに温度が上がって，日増しに暖かくなっていくはずです。しかし，地球は，太陽のエネルギーをうけるとともに赤外線を宇宙空間に放射するため，1年間の平均気温はほぼ一定に保たれています。この赤外線量から地表気温の平均を計算すると，−18.5℃という値が得られますが，実際は15℃にもなっています。それは大気が，地表面から放出される赤外線を吸収して，宇宙への放熱をさまたげているからです(図4—3)。つまり，地球をとりまく大気が，ビニール・ハウスのような役割をして，地球全体が温室であるかのように，地球の温度を高めているというわけです。このように大気が地球の赤外放射をさまたげて地表の温度を上げることを「温室効果」とよび，温室効果をもつ気体のことを「温室効果ガス」といいます。

太陽から放出される光つまり太陽放射のうち，波長0.3ミクロン以下の紫外線は，オゾン O_3 によって完全に吸収され，地表面にはとどきません。そのため，生物が海から上陸し，進化をとげたのでした。一方，地球から放出される赤外線つまり地球放射の多くは，大気中の水蒸気 H_2O，二酸化炭素 CO_2，オゾン O_3 などの温室効果ガスによって吸収されます（図4—4)。では，メタン，フロン，一酸化二窒素などの気体はどの波長の光を吸収するのでしょうか。

質問26　メタン，フロン，一酸化二窒素の吸収する光の波長は図4—4のどのあたりにあると思いますか。

(1)　10ミクロン前後　　(2)　0.3〜1ミクロンの間

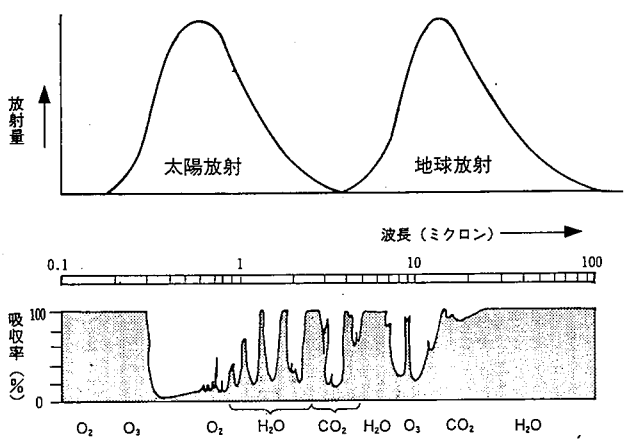


図4—4　太陽放射と地球放射（上）それぞれの波長での地球大気の吸収率（下）
（田中正之『温暖化する地球』，読売新聞社，1989，P 21）

(1)が正解です。10 ミクロン前後の赤外線は，水蒸気や二酸化炭素に吸収されずに地球から宇宙に放出されることから，「大気の窓」とよばれています。メタン，フロン，一酸化二窒素などの気体は，この付近の赤外線を吸収するため，微量であるにもかかわらず，強い温室効果をもつのです。1分子当たりの温室効果を比較すると，メタン，一酸化二窒素，フロンはそれぞれ二酸化炭素の 20 倍，100 倍，1万倍に達するといわれています。しかも，これらの気体は，一酸化二窒素をのぞき，二酸化炭素よりも急速に増えているため，地球温暖化にあたえる影響は今後ますます大きくなるものと予想されます(表 4—1)。それでも地球温暖化の最大の原因は二酸化炭素濃度の増加にあります。大気中の二酸化炭素濃度が増えると，赤外線を吸収する大気の厚さが増し，地球から宇宙へ逃げる熱がさらに減ることになるからです。

では，どうして二酸化炭素が大気中に増えつづけているのでしょうか。

表 4－1　温室効果ガスの今後100年間の温暖化への寄与率
（講座・地球環境 1、前掲書、p 111）

温室効果気体	GWP（期間100年）	1990年放出量（Tg）	100年間の温暖化への寄与率(%)
二酸化炭素（CO_2）	1	26,000	61
メタン（CH_4）	21	300	15
亜酸化窒素（N_2O）	290	6	4
CFC11	3,500	0.3	2
CFC12	7,300	0.4	7
HCFC22	1,500	0.1	0.4
その他（NO_2 の O_3 生成等間接効果も含む）			10.6

GWP（Global Warming Potential）値～各気体を 1 kg 放出したときの温暖化効果。二酸化炭素を 1 とした相対値。

4—2　大気と海洋・植物との相互作用の地球化

4—2—1　二酸化炭素は地球をめぐる。

極地方の氷床中の気泡には過去の大気が閉じこめられています。したがって，氷床をボーリングして氷のコア（柱）をとり，その中の大気を分析すると，過去の時代の二酸化炭素濃度がわかります。南極の氷床のコアによれば，二酸化炭素濃度は，過去16万年の間170～299 ppmの範囲にありましたが（図4—5），18世紀中葉以降急増し，現在では350 ppmをこえようとしています（図4—6）。この原因は，産業革命以降の化石燃料の燃焼や森林破壊によって，二酸化炭素が大量に放出されたことにあります。もし，人間の経済活動による二酸化炭素がそのまま大気中に蓄積されるものとすれば，大気中の二酸化炭素濃度はその分だけ増加していくはずです。しかし，実際の観測データでは，人間の経済活動による二酸化炭素の45%しか大気中に残っていません。だとすれば，あとの55%はどこに消えたのでしょうか。

質問27　人間の経済活動によって大気中に放出された二酸化炭素の55%はどうなったと思いますか。

(1)　生物や海洋に吸収された。
(2)　大気の浄化作用によって大気中からとりのぞかれた。

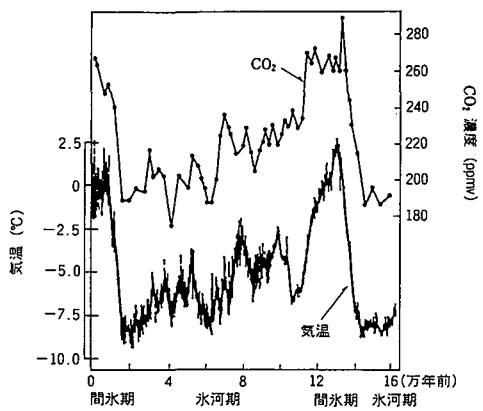


図4—5　過去16万年間の大気中の二酸化炭素濃度の変化

（和田武，前掲書，P 70）

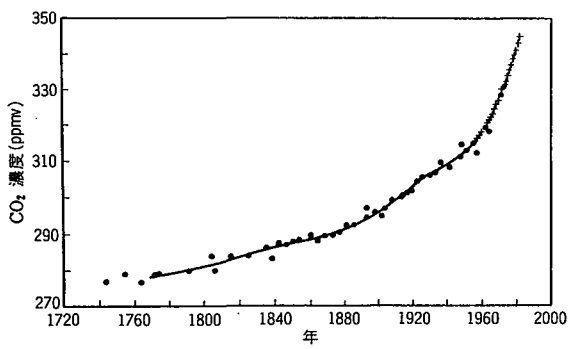


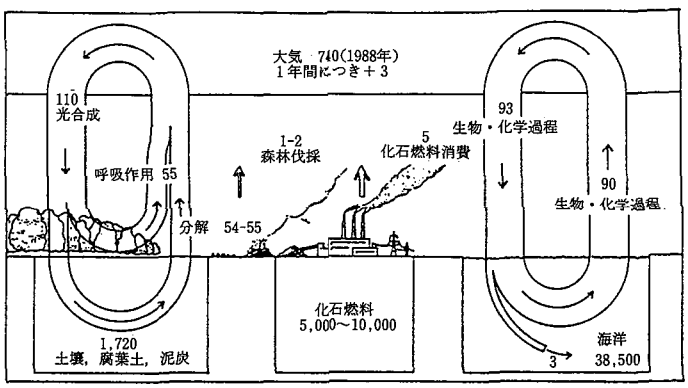
図4—6　過去220年間の大気中の二酸化炭素濃度の変化

（和田武，前掲書，P 71）

(1)が正解です。二酸化炭素は，生物の呼吸や微生物の分解によって放出されますが，植物の光合成によってそれと同じだけ吸収され，植物体内でブドウ糖などの炭素化合物に変えられるため，植物は二酸化炭素の吸収源であると同時に炭素の貯蔵庫でもあります（図4—7)。しかし，18世紀中期以降，大規模な森林破壊のため，植物全体としては差し引き二酸化炭素を放出しているものと考えられています(図4—8)。だとすれば，二酸化炭素の吸収源は海しかありません。

しかし，海ならどこでも二酸化炭素を吸収するわけではありません。海水中にとけることのできる二酸化炭素は海水温が高くなればなるほど少なくなるからです。すなわち，海水の温度が高く，湧昇流のある海域では二酸化炭素が海から大気に放出され，海水の温度が低く，植物プランクトンの光合成がさかんな海域では二酸化炭素が大気から海に吸収されています。水中にとけた二酸化炭素の一部は，炭酸塩 $CaCO_3$ や生物の石灰質の殻 $CaCO_3$ となって海底に沈み，炭素化合物として岩石中に閉じこめられていきます。海は大きな炭素貯蔵庫でもあるわけです。こうして人間によって大気中に放出された二酸化炭素は大気や海の中を広がりますが，海における二酸化炭素の拡散には長い時間がかかるため，海の二酸化炭素の吸収速度は，人間の二酸化炭素の放出速度にくらべると，かなり遅いものと考えられます。

では，このまま大気中の二酸化炭素濃度が増えつづけると，人間生活圏はどうなるのでしょうか。



（単位：Gt）

図4—7　炭素の循環

（環境庁「地球温暖化問題研究会」『地球温暖化を防ぐ』，NHKブックス，P 60）

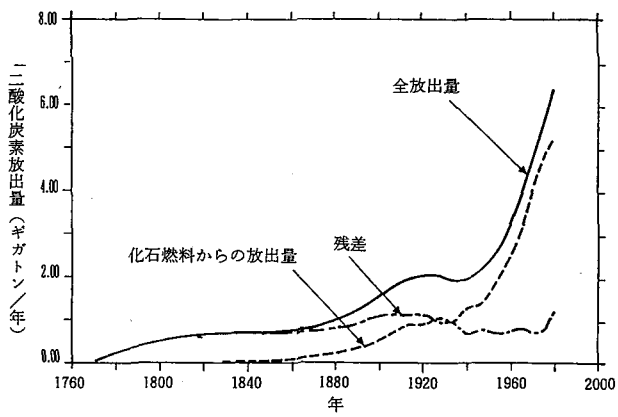


図4—8　森林破壊による二酸化炭素の放出

（田中正之，前掲書，P 93）

4—2—2　フィードバックが起こる

人間による大気中への二酸化炭素の放出がこのままつづくとすれば，大気中の二酸化炭素濃度が産業革命以前の2倍になるのは今から40年後の2030年だといわれます。もちろん，二酸化炭素以外の温室効果ガス（メタン，フロン，一酸化二窒素など）も無視できないので，それらをすべて二酸化炭素とした上での話です。シュタウアーら（1988）の予測では，そのときの地球全体の地上気温の平均は産業革命以前より1.2～3.0℃上昇することになります（図4—9）。このような急速な気温の上昇は，温室効果がきっかけではありますが，それだけでは起こりません。すなわち，温室効果によって気温が上がると，人間生活圏に何らかの変化が起こり，さらに気温が上がるというわけです。これはなぜでしょうか。

質問28　温室効果によって気温が上昇すると，人間生活圏の気温がますます上昇していくのはなぜだと思いますか。

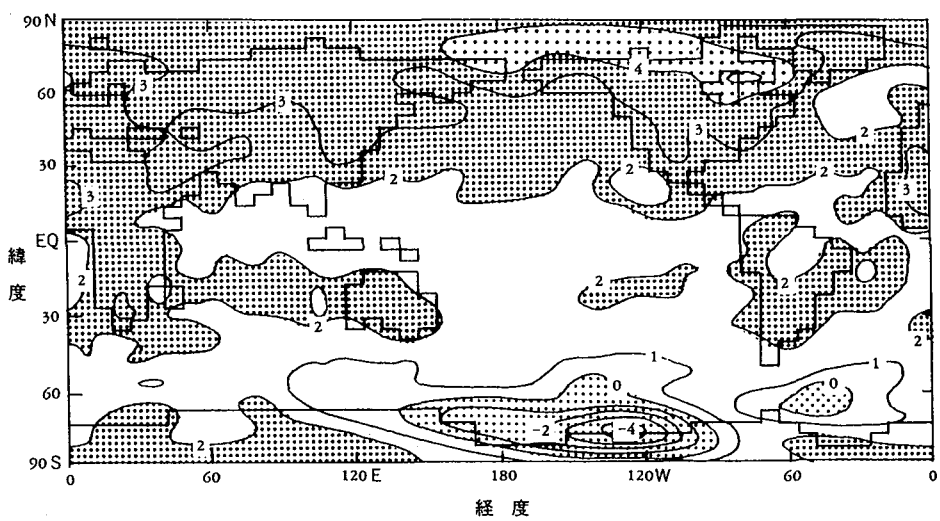


図4—9　地上気温変化の地理的分布

（講座・地球環境1，前掲書，P 147）

大気中の二酸化炭素濃度が増加して，温室効果によって気温が上昇すると，温暖化に関係するさまざまなフィールドバックが起こるためです。おもなフィードバックはつぎの通りです。

(1) 水蒸気のフィードバック

気温が上昇すると，大気中の水蒸気量が増すため，海からの蒸発がさかんになります。その結果，水蒸気による温室効果がさらに強まり，気温が上昇します。

(2) 雪氷のフィードバック（図4—10）

雪や氷は太陽からの光を強く反射します。地球が温暖化し，高緯度地方の雪や氷がとけると，雪氷による太陽光の反射が少なくなります。その結果，太陽エネルギーがより多く地表面に吸収されることになり，気温が上昇します。

(3) 植生のフィードバック

地球が温暖化すると，高緯度地方も植物におおわれるようになります。植物は太陽光を吸収するので，植生の面積が広がると，より多くの太陽光が吸収されるようになり，気温が上昇します。

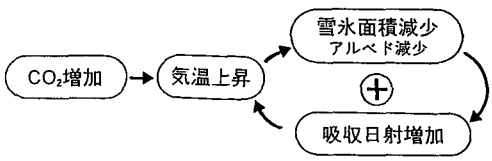


図4—10 雪氷のフィードバック

（田中正之，前掲書，P 124）

こうして気温が上昇すると水の状態変化や植生の変化が起こり，それがまた気温の上昇に大きな影響をあたえるため，気温がさらに上昇するというわけです。では，今から40年後の2030年に地上気温の平均が1.2～3.0℃上昇するとすれば，人間生活圏はどうなるのでしょうか。

質問29 2030年に気温が1.2～3.0℃上昇するとすれば，そのとき人間生活圏にはどんな変化が現われると思いますか。

およそつぎのようなことが予想されます。

(1) 食糧の減産

1,2～3.0℃の気温上昇が起こると，蒸発量が2～9%増加するものと予想されています。これは，水の循環速度を速め，降雨の分布，強度，パターンに大きな変化をひき起こします。そのため，土壌流出や砂漠化などが進み，食糧生産に大きな被害ができるものと考えられます（図4—11)。

(2) 陸上生態系の崩壊

かりに地上気温が今後40年間で2.0℃上昇すれば，現在の植生は160 km（4000 m/年）も北上しなければなりません。植物の移動能力は，種子の散布能力によって制約され，1年間では約40～2000 mと推定されています。したがって，植物の多くの種が気候変化について行けず，陸上の生態系は崩壊するものと思われます。

(3) 海面の上昇

大陸氷河や氷床がとけたり，海水そのものが膨張して，海水面は2030年に10～60 cm上昇することが予想されます。UNEPの予想によれば，その結果、もっとも大きな影響をうけるのは，二酸化炭素など温室効果ガスの蓄積にわずかな責任しかない発展途上国です（図4—2)。

(1)～(3)以外にも酷暑や病原菌の繁殖による死亡者の増加などが考えられます。では，このような事態を避けるにはどうすればよいのでしょうか。

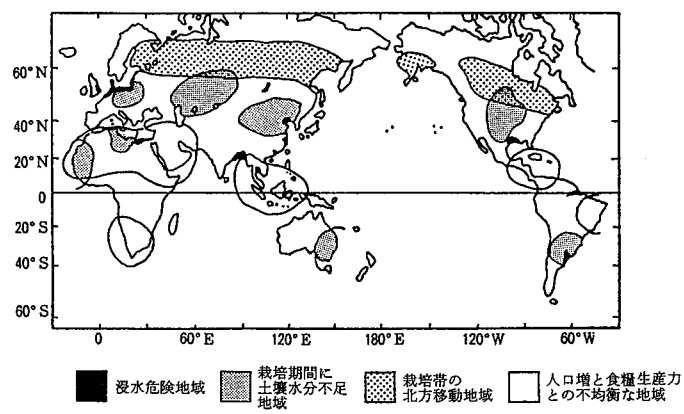


図4—11 地球温暖化による世界の食糧生産への影響

（北野康，田中正之『地球温暖化がわかる本』，マクミラン・リサーチ研究所，1990，P 138）

表4－2 海面上昇によりもっとも被害をうけやすい

（レスター・R・ブラウン『地球白書'90-'91』，ダイヤモンド社、1990、p 143）

国	人口	1人当たり収入
	（100万人）	（ドル）
バングラデシュ	114.7	160
エジプト	54.8	710
ガンビア	0.8	220
インドネシア	184.6	450
モルジブ	0.2	300
モザンビーク	15.2	150
パキスタン	110.4	350
セネガル	5.2	510
スリナム	0.4	2,360
タイ	55.6	840

4—3　二酸化炭素排出量の削減

4—3—1　どんな対策が考えられるか

地球温暖化の最大の原因が化石燃料の燃焼によって生じる二酸化炭素にある以上，温暖化を防止するためには，大気中に二酸化炭素を出さないようにしなければなりません。それには大きく分けて予防と防除の二つの対策が考えられます。予防とは，二酸化炭素をこれ以上出さないようにすること，つまり二酸化炭素排出量の削減を意味します。防除は排出された二酸化炭素をとり除く対策です。では，どうすれば予防や防除ができるのでしょうか。

質問30　どうすれば二酸化炭素の予防や防除ができると思いますか。

(1)　予防対策としては

①森林破壊の停止②大規模な植林③エネルギー＝エネルギー効率の改善（たとえば，自動車の燃費の向上，冷暖房の効率化やコジュレーション＝図4—12など）④現在世界全体の1次エネルギー源の約90%を占める化石燃料（図4—13）を太陽・風力・バイオマス（木材・林産廃棄物、農業廃棄物）などの自然エネルギーに転換すること，などが考えられます。

(2)　防除対策としてはつぎのようなものがあります。

①メタノール合成：工場や火力発電所から排出される二酸化炭素を分離回収するとともに，水力エネルギーや太陽エネルギーなどを利用して水から水素をつくり，二酸化炭素と水素を反応させてメタノールを合成します。したがって，メタノール合成は，二酸化炭素の除去や化石燃料の使用量の抑制を可能にします。

②海洋利用による除去：分離回収した二酸化炭素を深海へ廃棄したり（図4—14），海藻やサンゴを増殖して二酸化炭素を除去します（図4—15）。しかし，いずれの場合も海洋生態系への影響が心配されます。

大気中の二酸化炭素濃度の増加を防ぐためには予防対策を実行しながら防除対策の技術開発を急がなければなりません。これはとりわけ二酸化炭素をたくさん排出している先進工業国に要求されることです。「環境汚染は汚染者自身が除去する」ということが環境保全対策の原則だからです。

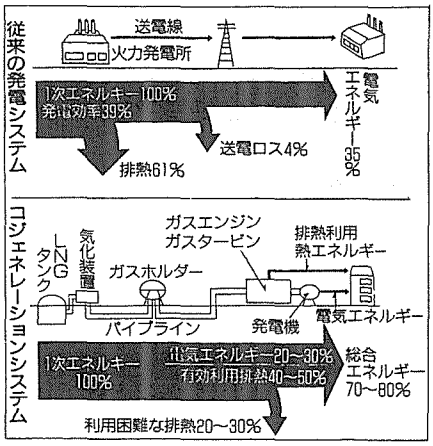


図4—12　従来の発電システムとコジェネレーションシステム

（朝日新聞　90年10月29日）

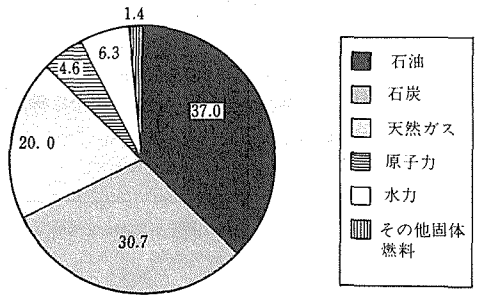


図4—13　世界の1次エネルギー源の種別シェア

（公害資源研究所・地球環境特別研究室『地球温暖化の対策技術』，オーム社，1990，P 68）1次エネルギーとは自然から直接得られるエネルギーのことです。

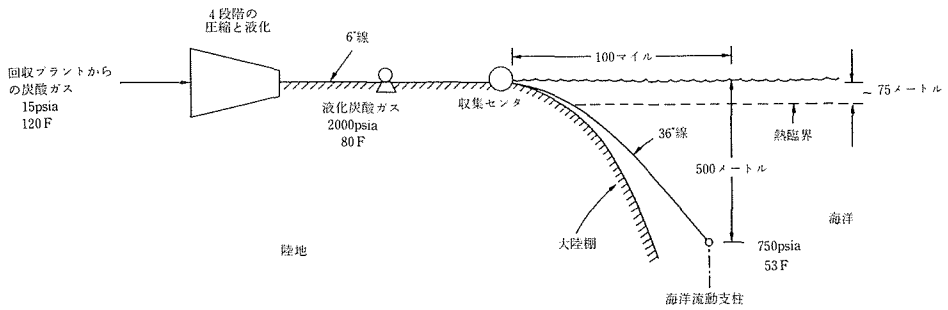


図4—14　二酸化炭素の海洋投棄模式図

（生田，茅，唐沢，田中『温室効果ガスと地球温暖化』，アグネ承風社，1989，P 68）

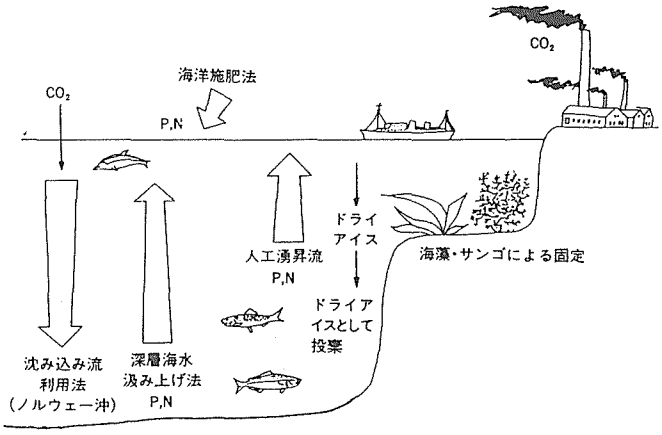


図4—15　海洋利用による二酸化炭素の除去

（環境庁「地球温暖化問題研究会」，前掲書，P 148）

4—3—2　私たちはどんな社会をつくっていくのか

88年6月，カナダ政府主催の専門家会議（トロント会議）において，先進国は，2005年までの当面の政策目標として，88年の二酸化炭素排出量の20%を削減することが提案されました。89年7月フランスのアルシュ・サミットでは先進国首脳が二酸化炭素の排出の抑制に合意しました。同年11月のオランダ・ノルトベイクにおける大気汚染と気候変動に関する環境大臣会議では「世界各国は二酸化炭素の排出の抑制のための行動を開始すべきである」という宣言が採択されました。しかし，90年10月現在，二酸化炭素の削減値を発表した国は11カ国にとどまっています（表4—3）。二酸化炭素排出量の上位3カ国＝アメリカ・中国・ソ連（表4—3）は，政策決定が遅れ，同4位の日本もヨーロッパほど積極的な政策をうち出していません。二酸化炭素のきびしい削減は経済成長の低下につながるとして企業が強く抵抗しているからです。温暖化防止は経済成長をさまたげるのでしょうか。

討論1　環境政策は経済成長をさまたげると思いますか。つぎの吉田文和氏の意見を参考にして，自分の意見をのべなさい。

表4－3　世界各国の二酸化炭素削減目標値

（毎日新聞　90年10月27日）

ドイツ	2005年に87年レベルの25%削減
デンマーク ニュージーランド	2000年に現在の20%削減
オーストリア	2005年に現在の20%削減
オランダ	2000年に現在の3－5%削減
フランス イギリス	2005年に現在のレベルに安定化
カナダ スウェーデン ノルウェー	2000年に現在のレベルに安定化
日本	2000年にほぼ現在のレベルに安定化

表4－4　世界各国の化石燃料の燃焼にともなう二酸化炭素の排出量

（ワールドウォッチ『地球白書'90-'91』、ダイヤモンド社、1990、p31）

国	炭素排出量		GNP1ドル当たり排出量		1人当たり排出量	
	1960年	1987年	1960年	1987年	1960年	1987年
	（100万トン）		（グラム）		（トン）	
アメリカ	791	1,224	420	276	4.38	5.03
カナダ	52	110	373	247	2.89	4.23
オーストラリア	24	65	334	320	2.23	4.00
ソ連	396	1,035	416	436	1.85	3.68
サウジアラビア	1	45	41	565	0.18	3.60
ポーランド	55	128	470	492	1.86	3.38
西ドイツ	149	182	410	223	2.68	2.98
イギリス	161	156	430	224	3.05	2.73
日本	64	251	219	156	0.69	2.12
イタリア	30	102	118	147	0.60	1.78

経済発展と環境問題

北海道大学経済学部助教授　吉田文和（環境経済学）

（前略）日本自身の経験からみても，たとえば自動車の排気ガス規制をめぐって，自動車業界と通産省が技術的に不可能とした規制は，世論におされて1978年実施され，それが結果として日本の技術水準を高め，輸出を増やしたことは記憶に新しい。このように厳しい環境規制こそが科学・技術を前進させ，経済発展の内実を高めてきたのである。考えてみれば，経済成長とは，単に商品の生産量で表示されるものではなく，人間生活の営みの内容を高めるものである。

いままた，たとえば家庭からのゴミの40%近くが包装関連であり，これも「商品価値」を高め，GNPを増やしてきたのである。ゴミに埋もれてしまう「豊かさ」などは，「豊かさ」に値しないことは，いうまでもない。だが，直接目に見えないものはこの世に存在しないと思いやすい日本人は，ゴミを過疎地へ運べば問題を忘れ，放射性廃棄物は北海道の最北の地に埋めれば，無事に処理したと錯覚する。これと同じことは，国際的規模の自然資源の乱獲でおきている。東南アジアの熱帯雨林の輸出先は6割が日本であり，光合成と気候安定作用によって地球環境保全にかけがえのない熱帯雨林の破壊に，日本は大きな役割をはたしてきた。

こうした面から見れば，従来のGNPを指標とする経済発展は不十分なのであって，イギリスの環境経済学者D. パースは自然環境などの価値を加味した「実質的な成長」を示す指標を提起している。（後略）

——「きぼうの虹」北海道大学生活協同組合　1990年6月20日

アメリカ環境保護庁（EPA）の試算によれば，大気中の二酸化炭素濃度を現状レベルに凍結するには，二酸化炭素の排出量を50～80%削減する必要があります。だとすれば，現在設定されている11カ国の削減値でも地球温暖化を遅らせるだけにすぎません（図4—16）。90年11月の世界気候会議では，地球温暖化防止のための国際的な合意が期待されたにもかかわらず，各国の見解の不一致が大きく，合意には達しませんでした。では，世界や日本において地球温暖化防止の政策をさらに前進させていくためには，どうすればよいのでしょうか。

討論2　地球温暖化を防止する政策をさらに前進させるには，どんな方法があると思いますか。

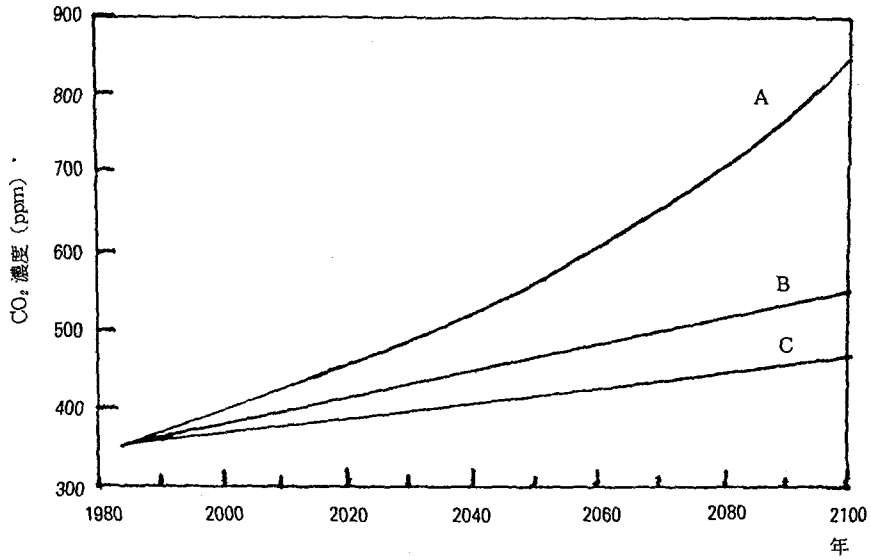


図1－6　大気中CO_2濃度の増加傾向の推定
A…今後，対策を講じない場合
B…1990年の放出量を維持した場合
C…1990年の放出量の1/2を維持した場合

図 4—16　二酸化炭素濃度の予測（北野康，田中正之，前掲書，P 37）

5　授業書の評価

授業書「環境科学」のⅠ部「自然における人間の位置」とⅡ部「人間生活圏の形成」の授業については，1990年8～12月の2学期，札幌藻岩高校3年生の理科Ⅱおよび札幌工業高校定時制2年生の理科Ⅰの時間に行なった。授業者はそれぞれ山田大隆教諭と松井伸一教諭にお願いした。なお，Ⅲ部「地球規模の自然変動」の授業は3学期に札幌工業高校定時制で行なう予定である。一方，札幌西高校・社会科学研究会のメンバー10数人を対象とした放課後のゼミでは「環境科学」をすべて読み終えた。このゼミでは筆者が授業者の立場になった。札幌藻岩高校と札幌工業高校ではＮＨＫ「地球大紀行」「銀河宇宙オデッセイ」などのビデオも使った。時間数は授業の進め方によって変わるが，参考までに言えば，札幌藻岩高校24時間，札幌工業高校25時間，札幌西高校20時間であった。また授業書の評価は授業過程の分析，アンケート，感想文などによって行なった。その詳しい分析は修士論文[3]に譲るとして，「環境科学」は，3校の生徒いずれにも好意的に受け入れられ，自然史的視点，グローバルな視点，環境科学への共感，自然や社会に対する問題意識，問題意識の発展などが形成されたものと考えられる。

6　今後の課題

(1)　授業書の構成に関してはⅠ部の位置づけが問題である。Ⅰ部は，直接環境問題を扱わないので，生徒たちの気勢をそぐという指摘が担当の先生や生徒の一部にあったからである。彼らは，Ⅰ部を否定しているわけではなく，Ⅱ部とⅢ部の後に置いた方がよいというのである。本論文では，Ⅰ部は，環境科学の視点を準備するということから，Ⅱ部・Ⅲ部の基礎として位置づけられている（P 8）が，それが生徒たちにはかえってまだるっこいようである。したがって，授業書の論理的構成からすれば，Ⅰ部の位置はⅡ部・Ⅲ部の前提になるが，授業運営上はⅡ部・Ⅲ部の後に置いたほうがよいのかもしれない。このことを検証するために，今後，Ⅱ部→Ⅲ部→Ⅰ部の順序で授業を行なう必要があるものと思われる。

(2)　授業書の改訂すべき点は問題や質問に関して多々ある[4]。しかし，いずれも授業書の根幹にかかわるものではなく，それぞれの問題や質問の再構成をすればよいものと思われる。

(3)　授業過程については，授業者と筆者が綿密なコミュニケーションをとっていたにもかかわらず授業が必ずしも授業書の意図したとおりに進まなかったことがあげられる。これは教師用のマニュアルをつくらなかったことによるものと思われる。したがって，今後，授業書「環境科学」の授業が行なわれる場合には教師用マニュアルを用意しなければならない。

(4)　授業書「環境科学」は環境政策の前提となる科学的基礎を形成するものである。したがって，発展的な課題として，環境政策に関する教授プランの作成が考えられる。環境科学は，人間生活圏における人間と自然との相互作用の認識に基づき，環境政策を提示することによって，完結するものと思われるからである。

7　謝　　辞

本授業書の作成にあたっては指導教官の高村泰雄教授に多くの有益な示唆をいただいた。授業書の検討は須田勝彦助教授をはじめ大竹政美，岡野勉，裴崢，成田雅博，梅津徹朗さんら教育方法研究室の大学院生にしていただいた。授業書にもとづく授業は札幌藻岩高校の山田大隆先生と札幌工業高校の松井伸一先生にしていただき，その都度授業書の不十分な点を指摘して

いただいた。札幌西高校の社会科学研究会のゼミが成功したのは仲介の労をとってくれた八島弘典先生と顧問の橋本順子先生のご尽力の賜であった。札幌藻岩高校の3年理科II選択者，札幌工業高校機械科の2年生および札幌西高校社会科学研究会の生徒諸君は積極的に授業に参加してくれた。最後になったが，鈴木秀一北海道大学名誉教授にはいつも励ましていただいた。これらの方々がいなければ，授業書「環境科学」は生まれなかった。この場をお借りして皆様に衷心より感謝申し上げる。なお，本授業書に不適切なところがあるとすれば，その責任は全面的に筆者にある。

8 引用文献

(1) 丸山 博「高等学校における環境教育の体系化に関する基本的枠組みの考察」教授学の探求，8：46—47，1990
(2) 丸山 博「自然の階層論に基づく「環境科学」教育の体系化について」環境教育，1：1—8，1991
(3)〜(4) 丸山 博「自然の階層性に基づく「環境科学」教育の体系化」，北海道大学大学院教育学研究科，修士学位論文，1991

9 参考文献

I 自然における人間の位置

1 自然の構造
(1) 広瀬立成『自然のたまねぎ構造』，共立出版，1987
(2) 池内了『宇宙の構図』，大月書店，1989
(3) 岩波ジュニア科学講座『すがたをかえる物質』，岩波書店，1985
(4) 田中一『未来への仮説』，培風館，1985
2 物質の起源
(1) 池内了『宇宙のかたちをさぐる』，岩波ジュニア新書，1988
(2) 池内了『宇宙の構図』，大月書店，1989
(3) 岩波ジュニア科学講座『ひろがる宇宙』，岩波書店，1985
3 生命の誕生
(1) Будыко, М. И., А. Б. Ронов and А. Л. Яншин, История Атмосферы, 邦訳 内嶋善兵衛『地球大気の歴史』，朝倉書店，1989
(2) Hoagland, M. B., The Roots of Life: A Layman's Guide to Genes, Evolution, and the Ways of Cells., 邦訳 市場泰男，『遺伝子の話』，社会思想社，1981
(3) 岩波ジュニア科学講座『生命とはなにか』，岩波書店，1985
(4) 小林憲正，柳川弘志，大島泰郎，土器屋正之「超高温熱水環境下でのアミノ酸の全生物的合成」，Viva Origino，第12回学術講演会講演要旨集，1987，196—197 Pp
(5) 増淵法之「自然発生説と生命の起源」『現代科学への道』，北大図書刊行会，1984
(6) 松井孝典「水惑星「地球」の起源と進化」，サイエンス，1，1987
(7) 松井孝典『地球＝誕生と進化の謎』，講談社現代新書，1990
(8) 宮下和喜『絶滅の生態学』，思索社，1989
(9) 水谷仁『宇宙人はいるだろうか』，岩波ジュニア新書，1986
(10) 柳川弘志『生命の起源を探る』，岩波新書，1989
4 人類の出現
(1) McLoughlin, C. J., The Tree of Animal Life., 邦訳 八杉竜一『動物進化の物語』，岩波書店，1984
(2) 小原秀雄『人（ヒト）に成る』，大月書店，1985

II　人間生活圏の形成

1　地表の改変

(1) 五十嵐八枝子「氷河時代からの森林の変遷」『北海道・森と木の文化』, 札幌学院大学, 1988, 1-45 Pp
(2) 安田喜憲『森林の荒廃と文明の盛衰』, 思索社, 1988
(3) 安田喜憲『文明は緑を食べる』, 読売新聞社, 1989

2　生物種の絶滅

(1) Bright, M., Saving The Whale., 監訳　小原秀雄『クジラの保護と捕鯨』, 佑学社, 1990
(2) 広瀬弘忠『酸性化する地球』, NHK ブックス, 1990
(3) 石弘之『地球環境報告』, 岩波新書, 1988
(4) 石弘之『地球破壊七つの現場から』, 朝日新聞社, 1990
(5) 加藤龍夫『農薬と環境破壊56話』, 光雲社, 1990
(6) 小橋川共男, 目崎茂和『増補版・石垣島・白保さんごの海』, 高文研, 1988
(7) 小山雄生『土の危機』, 読売新聞社, 1990
(8) 栗原康『有限の生態学』, 岩波新書, 1975
(9) Myers, N., The Sinking Ark., 邦訳　林雄次郎『沈みゆく箱舟』, 岩波現代選書, 1981
(10) 目崎茂和「滅びゆく日本のサンゴ礁」, Newton, 8, 1989
(11) 宮本憲一『足元から地球環境を考える』, 自治体研究社, 1990
(12) 宮下和喜『絶滅の生態学』, 思索社, 1989
(13) Mohnen, A. V., " The Challenge of Acid Rain.", 邦訳　鈴木伸「酸性雨の脅威」, サイエンス, 18(10), 1988, 8-19 Pp
(14) 永田恵十郎「水田はどれだけの水を貯え養うか」, 現代農業, 11, 1989, 146-153 Pp
(15) NHK 取材班『地球汚染②』, 日本放送出版協会, 1989
(16) 野池元基「島の畑を守ることはサンゴ礁を守ること」, 現代農業, 11, 1989, 165-175 Pp
(17) 野池元基『サンゴの海に生きる』, 農山漁村文化協会, 1990
(18) 大喜多敏一「世界の酸性雨」, 現代化学, 6, 1990, 16-22 Pp
(19) 崎村久夫「地球的規模の環境問題と日本の役割」,『自然への共鳴3～地球規模の創造的なかかわり』, 思索社, 1990, 391-412 Pp
(20) サンゴ礁地域研究グループ編『熱い自然』, 古今書院, 1990
(21) 「商業捕鯨再開への糸口を探る」, 朝日新聞 1990年6月23日夕刊
(22) 玉置元則「日本の酸性雨監視体制と降水酸性化の現状」, 現代化学, 7, 1990, 44-50 Pp
(23) 谷山鉄郎『恐るべきゴルフ場汚染』, 合同出版, 1990
(24) 鶴田治雄「酸生雨はどうして生じるのか」, 現代化学, 8, 1990, 16-22 Pp
(25) 植田洋匡「酸性雨」『地球環境の自然変動 I』, 中央法規, 1990, 185-244 Pp
(26) 和田武『地球環境論』, 創元社, 1990
(27) Willson, O. E., " Threats to Biodiversity.", 邦訳　伊藤秀三「急速に減少する生物論」, サイエンス, 19(11), 1989, 62-69 Pp

III　地球規模の自然変動

1　熱帯林の破壊

(1) 朝日新聞「地球環境」取材班『地球環境最前線』, 朝日新聞社, 1990
(2) 地球の環境と開発を考える会『破壊される熱帯林』, 岩波ブックレット, 1988
(3) Colinvaux, A. P., " The Past and Future Amazon." 邦訳　山田勇「アマゾン多雨林の危機」, サイエンス, 19(7), 1989, 7-15 Pp
(4) 稲葉一郎『アマゾン発・熱帯林破壊報告』, 朝日新聞社, 1990
(5) 石弘之『地球環境報告』, 岩波新書, 1988
(6) 岩崎駿介『地球人として生きる』, 岩波ジュニア新書, 1989
(7) 科学朝日特派員報告「熱帯アジア」, 科学朝日, 8, 1982, 42-73 Pp
(8) 神足勝浩『熱帯林のゆくえ』, 築地書館, 1987
(9) 向後元彦「世界のマングローブ林」『地球規模の環境問題II』, 中央法規, 1990, 45-60 Pp
(10) 黒田洋一, フランソワ・ネクトゥー『熱帯林破壊と日本の木材貿易』, 築地書館, 1989

(11) 松本栄次「熱帯の森林破壊」『環境と生態』，古今書院，1990，128-155 Pp
(12) Myers, N., The Sinking Ark., 邦訳　林雄次郎『沈みゆく箱舟』，岩波現代選書，1981
(13) NHK 取材班『地球は救えるか 1』，日本放送出版協会，1990
(14) 鷲見一夫「書評　熱帯木材輸入大国の責任」，赤旗評論特集版，675，1989，25-35 Pp
(15) 鷲見一夫『ODA 援助の現実』，岩波新書，1989
(16) 高田達二「破壊される東南アジアの熱帯林」，赤旗評論特集版，649，1989，26-30 Pp
(17) Repetto, R., "Deforestation in the Tropics.", 邦訳　松下和夫「政策が加速する熱帯林破壊」，サイエンス，20(6)．1990，8-15 Pp
(18) 渡辺桂「林業協力の動向」『地球規模の環境問題II』，中央法規，1990，61-74 Pp

2　砂漠化・土壌流出

(1) George Susan, How the Other Half Dies: The Real Reasons for World Hunger., 邦訳　小南祐一郎，谷口真里子『なぜ世界の半分が飢えるのか』，朝日選書，1984
(2) Glantz, H. M., "Drought in Africa.", 邦訳　門村浩「アフリカの干ばつ」，サイエンス，17(8)，1987，10-18 Pp
(3) 平田照「深刻化する「土」の地球環境危機」，現代農業，11，1989，42-56 Pp
(4) 石弘之『地球生態系の危機』，ちくまライブラリー，1987
(5) 石弘之『地球環境報告』，岩波新書，1988
(6) 岩田進午「地球砂漠化・不毛化と農地の消失」，前衛，11，1989，224-241 Pp
(7) 岩田進午『土を科学する』，NHK 市民大学，1989
(8) 門村浩「熱帯アフリカの環境変遷」『地球規模の環境特題II』，中央法規，1980，75-93 Pp
(9) 気象庁『異常気象レポート '89』，大蔵省造幣局，1989
(10) 向後元彦『緑の冒険』，岩波新書，1988
(11) 小山雄生『土の危機』，読売新聞社，1990
(12) 松本聰「砂漠化の背景」『地球規模の環境問題II』，中央法規，1990，94-115 Pp
(13) 三輪叡太郎，和田信一郎「われわれは土をどこまで理解できたか」，科学，58(10)，1988，602-610 Pp
(14) 西川潤『食糧』，岩波ブックレット，1983
(15) 西川潤『人口』，岩波ブックレット，1983
(16) 西川潤『貧困』，岩波ブックレット，1983
(17) 西川潤『世界経済入門』，岩波新書，1988
(18) 大場英樹『世界史と環境問題』，公害対策技術同友会，1979
(19) 大森博雄「人間がひきおこす砂漠化」『環境と生態』，古今書院，1990，156-185 Pp
(20) 佐藤一郎『地球砂漠化の現状』，清文社，1985
(21) 遠山柾男『砂漠緑化への挑戦』，読売新聞社，1989
(22) Reganold, P. J., R. I. Papendick and J. F. Parr, "Sustainable Agriculture." 邦訳　松本聰「自然に帰る米国農業」，サイエンス，20(8)，1990，8-15 Pp
(23) 陽捷行「大気循環への土壌のかかわり」，科学，58(10)，1988，651-654 Pp

3　オゾン層の破壊

(1) Cogan, G. D. Stones in a Glass House: CFCs and Ozone Depletion, 監訳　産業公害防止協会『地球環境の危機―フロンガスとアメリカの対応』，1989
(2) Dotto, L., H. Schiff., The Ozone War., 邦訳　見角鋭二，高田加奈子『オゾン戦争 1・2』，社会思想社，1982
(3) 「フロン全廃へ規制強化」，朝日新聞，1990 年 6 月 15 日朝刊
(4) 「フロン 2000 年に全廃」，朝日新聞，1990 年 6 月 30 日朝刊
(5) Gribbin, J., The Hole in the Sky: Man's Theat to the Ozone Layer., 邦訳　加藤珪『オゾン層が消えた』，地人書館，1989
(6) 石弘之「オゾン層を守れ」，科学朝日，1，1991，96-97 Pp
(7) 岩坂泰信『オゾンホール』，裳華房，1990
(8) 泉邦彦『恐るべきフロンガス汚染』，合同出版，1987
(9) 泉邦彦『地球汚染を考える』，かもがわブックレット，1990
(10) 環境庁「オゾン層保護検討会」編『オゾン層を守る』，NHK ブックス，1990
(11) 川平浩二，牧野行雄『オゾン消失』，読売新聞社，1989

(12) 宮本憲一「後退著しい日本の環境政策」，朝日新聞，1990年9月11日夕刊
(13) NHK取材班『地球汚染①』日本放送出版協会，1989
(14) 島崎達夫『成層圏オゾン』，1989
(15) Stolarski, S. R., "The Antarctic Ozone Hole.", 邦訳　福西浩「南極のオゾンホール」，サイエンス，18(3)，1988，7-17 Pp
(16) 富永健，巻出義紘「ハロカーボンと成層圏オゾンⅠ」，科学，54(8)，1984，460-467 Pp
(17) 富永健，巻出義紘「ハロカーボンと成層圏オゾンⅡ」，科学，55(9)，1984，563-569 Pp
(18) 富永健「クロロフルオロカーボンと成層圏オゾン」，科学，59(9)，1989，602-609 Pp
(19) 富永健，巻出義紘，F. S. ローランド『フロン　地球を蝕む物質』，東京大学出版会，1990
(20) 山田國廣『フロンガスが地球を破壊する』，岩波ブックレット，1989

4　地球温暖化

(1) 秋本肇「微量温室ガスの濃度変化とその原因」，科学，59(9)，1989，574-582 Pp
(2) 浅井富雄「大気と海洋の相互作用を探る」，科学，54(3)，1984，166-173 Pp
(3) 坂東博「気候変化」，『地球規模の環境問題Ⅰ』，中央法規，1990，128-148 Pp
(4) 畠山史郎「温暖化に関与する大気微量成分の発生源」，『地球規模の環境問題Ⅰ』，中央法規，1990，112-127 Pp
(5) Houghton, A. R. and G. M. woodwell, "Glogal Climatic Change.", 邦訳　秋本肇，光本茂記「実測データが示す地球温暖化」，サイエンス，19(6)，1989，7-17 Pp
(6) 人類とエネルギー研究会編『地球環境と人間』，省エネルギーセンター，1989
(7) 環境庁「地球温暖化問題研究会」編『地球温暖化を防ぐ』，NHKブックス，1990
(8) 気象庁編『異常気象レポート』，大蔵省印刷局，1989
(9) 気象庁編『温室効果気体の増加に伴う気候変化（II）』，大蔵省印刷局，1990
(10) 増田富士雄「過去6億年間の気候変動にみる周期」，科学，59(7)，1989，456-463 Pp
(11) 松野太郎「温室効果ガスの効果による気候変動の推定」，科学，59(9)，1989，583-592 Pp
(12) NHK取材班『地球は救えるか2』，日本放送協会，1990
(13) Schneider H. S., Global Warming : Are We Entering the Greenhouse Century., 邦訳　内藤正明，福岡克也，『地球温暖化の時代』，ダイヤモンド社，1990
(14) 田中正之「二酸化炭素の変動」，科学，59(9)，1989，566-573 Pp
(15) 田中正之『温暖化する地球』，読売新聞社，1989
(16) 田中正之・北野康『地球温暖化がわかる本』，マクミラン・リサーチ研究所，1990
(17) 角皆静男「炭素などの物質循環と大気循環」，科学，59(9)，1989，593-601 Pp
(18) 和田武『地球環境論』，創元社，1990
(19) 鷲田伸明「温室効果の機構」，『地球規模の環境問題Ⅰ』，中央法規，1990，102-111 Pp
(20) Woodwell. M. G.「森林の減少と二酸化炭素の増加」，サイエンス，8，1978，21-31 Pp