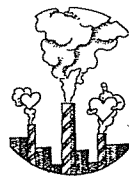


オゾン層の破壊と生態系の危機

遠山 益



一、プロローグ

一九七〇年頃、私はカリフォルニア大学デビス校の植物学教室で、「葉緑体の微細構造と機能との接点」という基礎研究に打ち込んでいた。ある日、中央図書館で日本からの新聞を読んでいると、大気汚染物質による植物の被害に関する記事に気付いた。それは東京都公害研究所によるもので、オートバイの排気ガスを直接植物に吹きかけるという手荒な方法による実験であった。日本においても大気汚染という新たな環境変化が生じ、生態

系にも影響が出始めているのかと想像した。

二年余の在米期間中に、私は日本における研究体制、その取り組み方、研究費など、さらに私自身の将来の研究進路などについても、アメリカの開放性を取り入れ、新しい展望に想いを巡らせていた。そして到達した結論は、これまでの基礎研究を基調として、応用研究に役立つような部分の研究を担当しようと心に決めた。基礎研究と応用研究とのかけ橋になろうと考えた。アメリカでは興味ある研究問題が取り上げられると、そこに学科や学部を越え、さらに他の大学からも、基礎や応用を

問わず研究者が集まる。日本ではなかなかできないことである。

大気汚染による植物被害の最初の可視症状は、緑葉に黄褐色の斑点が生じたり、あるいは葉全体にわたり緑色が減少することである。この現象はとりも直さず私が本来研究の対象としてきた葉緑体の変化に原因している。ここにおいて、私の基礎研究と環境汚染研究とがジョイントすることになった。

帰国後すぐに東京都公害研究所と協同研究をすることになった。当時日本における大気汚染研究は、植物の被害調査などの統計処理が主な内容であって、未だ科学的研究の段階には達していないように思われた。私は大気汚染物質による植物の生理的および微細構造的変化を調べることによって、植物被害の発現機構を明らかにすることを目的にした。当時の大気汚染物質は、亜硫酸ガスや窒素酸化物よりも、光化学オキシダントが中心課題であった。光化学オキシダントの成分は、九十数%がオゾンで、残り数%をパン(PAN)、パーオキシアセチルナイトレート)やその他の物質で占められる。私がこのオゾン

と出会うことになったのは、一九七一年九月であった。

二、オゾン層はどのようにして生成したか

オゾンの語源はギリシャ語でオザイン「においの意」で、実際ニンニクのような臭気がある。これに因んでドイツの化学者シェンカインは一八四〇年「オゾン」という語を作ったといわれる。オゾンは酸素原子三個から成る化合物で、空気中にもごく少量存在する。私の研究室では、空気に、強い紫外線を照射して、毎日多量のオゾンを作っている。このように、オゾンは酸素が多量の電気エネルギーや紫外線エネルギーを吸収して生成したものであるから、多量のエネルギーを含んでいて、不安定で、分解され易い性質がある。

このオゾンには二つの顔がある。すなわち、地上から十〜五十キロの成層圏では善玉として、地上では悪玉として作用している。生物にとって、オゾンは有益な性質と有害な性質とを共有している。私の研究室では、オゾンの悪玉としての作用を研究している。しかし、一九八八年八月トロントで開催された「大気変動に関する国際

会議」で、温室効果、酸性雨およびオゾン層破壊の三つを地球環境の三大脅威と位置づけているので、私もまたオゾンの善玉としての性質を、手許にある資料を中心に述べてみたい。オゾン層はどのようにして破壊されるか。その結果、地球の生態系はどのような影響を受けるか、などについて話題を提供して、読者の皆様の参考材料になれば幸甚に思う。

オゾン層の生成の前に、大気中の酸素がどのようにして生成したかについて述べなければならない。約四十五億年前に、地球が誕生した頃、原始大気は窒素、二酸化炭素、硫化水素、アンモニア、メタン、塩化水素、水蒸気などが主なもので、酸素は存在しなかった。地球に生物が発生したのは、三十〜三十五億年前であろうが、当時の生物は嫌気性の原始生物であつたと考えられる。地球誕生から原始生物が生まれるまでの十〜十五億年間、太陽から放射される強烈な紫外線が地球に到達し、そのエネルギーによって、海洋中では、簡単な化合物から生物体を構成する複雑な化合物、例えば、炭水化物、タンパク質、核酸などが作られてゆき、その結果、海洋中に

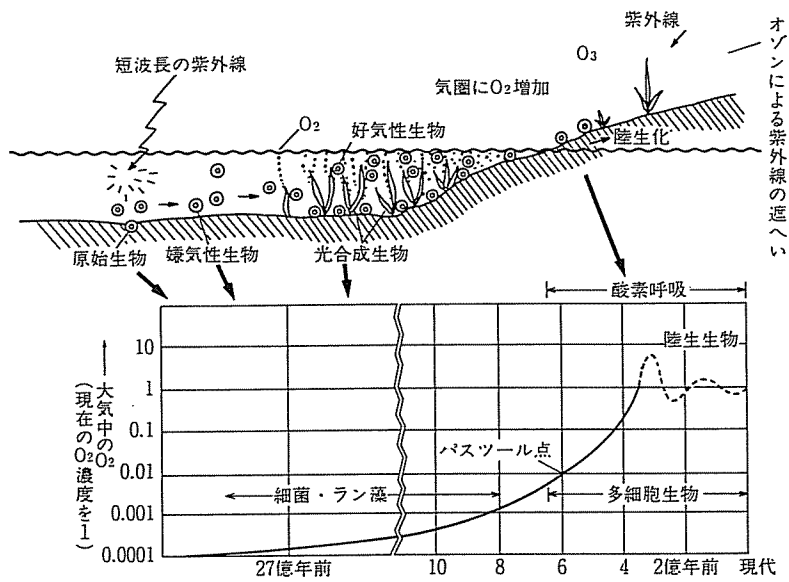


図1 生物の進化と大気の進化 (今堀宏三・田村道夫共著「系統と進化の生物学」より)

原始生物が発生したと考えられる。もし、この太陽からの紫外線エネルギーがなかったら、地球に生物は存在しなかったかもしれない。

海洋中に発生した原始生物は、長い進化過程の間に、嫌気性細菌へ、さらに藍藻へと進化した。今から約十億年前には、海洋中には藍藻が大繁殖した時代があったと考えられる。藍藻は高等な陸上の緑色植物と同様に、水を分解して酸素を発生させる機構の光合成を行なう。現在の地球を取り囲む大気中の酸素のすべてが、緑色植物の光合成の産物であることは確証されている。嫌気状態にあった原始大気中に酸素を含むようになったのは、藍藻による光合成の結果である(図1参照)。

発生した酸素のごく少量は水中に溶けたであろうが、大部分は気体として大気圏中に存在するようになった。大気中の酸素濃度は次第に高くなって、現在の大気中の酸素濃度の百分の一になったのは、約六億年前であろうと推定されている。大気中の酸素分子は、太陽から放出される強い紫外線によって、酸素原子と化合してオゾンとなる。大気中の酸素濃度の増大と並行して、オゾン濃

度も次第に高くなった。やがて、大気の流動にともなうて、オゾンは他の大気成分から分離して、地表から十・五十キロメートルに集合して、地球を取り囲むようになり、オゾン層が形成されたと考えられる。地表から二十五キロメートルあたりが最もオゾン濃度が高い。現在のオゾン層は太陽からの紫外線の約九十九%を吸収し、遮へいしてくれる。そのため、陸上の生物は生存できるのである。海洋中に発生した生物が陸上生活をするようになるのは、約四億年前のシルル紀末期であるから、オゾン層の形成も恐らくこの頃であろうと考えられる。

三、フロンとは何か

一九七四年に、カリフォルニア大学のF・シャーウッド・ローランド教授が発表した「ヘアスプレーなどに使うフロンガスが成層圏のオゾンを壊す」という論文が発端となって、フロンガスとオゾン層破壊との関係が全世界的な規模の緊急課題になった。

私たちの身の回りには化学製品があふれている。環境庁によると、日本では昨年約二万三千種の化学物質が生

産され、毎年約三百種の新物質が加わるという。フロンもまた合成化合物の一つで、現在、化学物質の悪玉の代表のように言われているが、実はすぐれた性質をもち、二十世紀に合成された最良の化合物とさえ評価されている。

そのため日常生活の中で広く使われている。熱しても冷やしても容易に分解しないし、毒性も少ない。フロンガスがなかったら、これほど安価な冷蔵庫やエアコンが普及しなかっただろう。安全で引火性のないヘアスプレーの噴射剤としても利用された。また、フロンは油をよく溶かす性質があるので、半導体、精密機械、ベアリングなどの洗浄剤として多量に用いられている。

フロンは常温では無色透明な液体で、見ただけでは水と区別しにくい。沸点は四十七・六℃であるから、揮発し易く、皮膚につくとアルコールのように冷たい感触を残して蒸発する。

このようにフロンは私たちの生活を快適に、産業を安全に、効率よく進めるために合成された「ミラクル物質」なのである。使用に先立って、環境への影響も十分に検

討され、安全性が確証されて、使用にふみ切ったのであった。しかし、予想もしないところに大きな落とし穴があった。なるほど、大気圏では何ら悪影響は観察されなかったが、分解されにくいフロンは次第に上空に昇り、地上約二十五キロメートルの成層圏あたりで、オゾン層を破壊しているらしいことが、わかってきた。

四、フロンはどのようにしてオゾンを分解するか

フロンを構成する成分元素は、炭素・塩素・フッ素および水素である。これらのうちオゾンを破壊するのは塩素である。化学物質審査規制法によって、最も厳しく規制されている第一種特定化学物質には八品目があるが、それらのすべてが有機塩素化合物である。例えばDDT、クロルデン、PCB、ダイオキシン、トリクロロエチレンなどは環境汚染物質として、しばしば耳にする物質である。これらに共通した性質は、燃えにくく、物を溶かす性質が強く、生物によって分解されにくい。物によっては、ベトナム枯葉作戦に使用された猛毒のダイオキシ

ンのようなものも含まれる。

二十年前頃まで、農薬として、あるいは殺虫剤として有機塩素系化合物が続々登場した背景には、食塩からソーダを作った残りの塩素を有効利用しようという大きな課題があった。塩素は安価でいつでも容易に入手できた。そのため、安価で、溶媒効力が大きく、効果が持続する有機塩素化合物が次々と世に出ることになった。ところが、長所とされた「生物的・化学的に安定で分解されにくい」という性質のため、これらの化合物が地球に蓄積し、環境汚染物質となった。

フロンもまた有機塩素化合物の一つである。炭素・塩素・フッ素・水素の組み合わせによって、無数ともいえるほどたくさんの種類のフロンを合成することができるが、それらのうち、モントリオール議定書で規制の対象になったフロン（これらを「特定フロン」という）は、フロンの11、12、113、114、115の五種類である。これらに共通した性質の一つは、寿命が非常に長いことである。

数十年かかって成層圏に到達してオゾン破壊すると思われる。例えば、フロン12の寿命は一三九年、

フロン113は九二年である。特定フロンのうちフロン113は界面活性作用が強く、洗浄力も強いなど他のフロンに比べて長所があるため、全フロン消費量の約五割を占める。日本では年間七十八万ト、世界で約二十万ト使用されている。

フロンは大気圏ではほとんど分解しないが、成層圏に上昇すると、強い紫外線をあびて分解し、塩素を放出する。この塩素はオゾン(O_3)を分解して、酸素分子(O_2)と酸素原子(O)にする。生じた酸素原子は塩素と化合して、一酸化塩素(ClO)となる。一酸化塩素の酸素原子は、オゾン分子中の酸素原子、あるいは成層圏中に存在する酸素原子と結合して、酸素分子となる。この際、再び塩素原子が放出されることになる。この塩素は、フロンから直接放出された塩素と同様に、オゾン分解することになる。

このような回路は、塩素原子が周囲の水と化合して塩化水素となって安定化するまで、何万回も継続する。このようにして、オゾンはつぎつぎと分解されることになる(次頁・図2参照)。

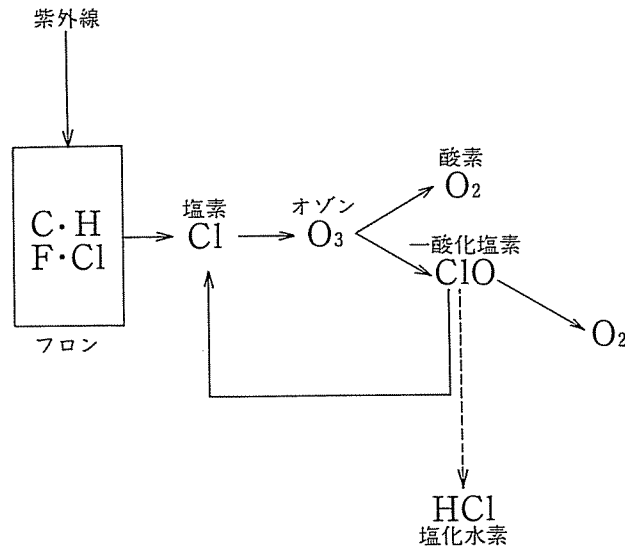


図2 フロンによってオゾンが分解される経路(原図)

五、南極におけるオゾンホール

オゾンホールとはオゾン層が南極大陸の上空で、毎年八月〜十月頃に、薄くなる現象である。地球全体を取り囲むオゾン層にポツカリと窓のように穴があくので「オ

ゾンホール(穴)」と呼ばれる。北極においても小規模なオゾンホールが存在するらしい。南極におけるオゾンホールは、一九七七年英国の南極研究所のジョナサン・シャクリン氏らによって発見されたが、当時はとても信じられない現象であったので、観測を積み重ねて、実際に発表したのは一九八三年であった。南極上空のオゾン層は毎年定期的に減少することは知られているが、一九八七〜一九八八年にかけて過去最大を記録したと英国南極研究所は発表している。すなわち、一九五七〜一九七二年までの平均したオゾンホール中のオゾン濃度は、三〇〇〜三五〇ドブリン(オゾン濃度の単位)であったのに、一九八七〜一九八八年にかけてのオゾン濃度は一五〇ドブリンにまで低下した(図3参照)。

このようなオゾンホールの出現にフロンがどのように関係しているのだろうか。未解決の問題も多く、議論のあるところであるが、大方つぎのように考えられている。冬には南極に極渦と呼ばれる大気の渦が生まれる。極渦の中はマイナス九〇℃にも冷えるので、細かい氷粒が集まった極成層圏雲ができる。成層圏まで上昇したフ

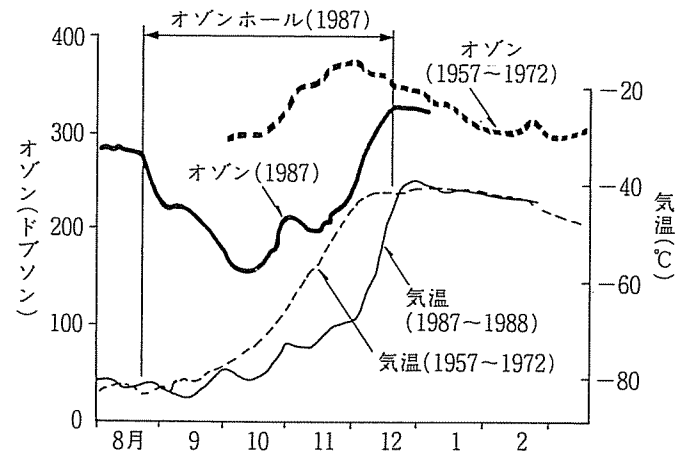


図3 英国ハレー基地のオゾンと気温の観測データ
(朝日新聞記事より)

ロンが分解して生じた塩素は、南極に春の陽光が照る頃、この雲の表面で急速にオゾンを分解する。

オゾンホール出現の犯人がフロンであるという前提に

う資料はない。また、地球全体の大気力学とオゾンホール形成との関係も明らかになっていない。さらに南極のオゾンホール内のオゾン濃度は毎年減り続けていくはずなのに、一九八八年九月～十月におけるオゾン濃度は、過去最低を記録した一九八七年の濃度に比べて高くなった。一九八五年、八六年の兩年の濃度よりも高い値を示した。このような観測データから、オゾンホールの出現は一時的な現象で、フロンによるとはいえないと疑問を投じている。これに対して、フロン犯人説を支持する側では、地球全体の大気の流れを支配する力学が働いたために、オゾンホールが小さくなったにすぎないと反論している。いずれにしても、このようにオゾンホール出現とフロンとの関係は、具体的な証拠が欠けているため、明確な結論を出すことができない。

一九八九年六月東京で開かれた「オゾン層保護アジア太平洋セミナー」において、ロバート・ワトソン博士は、「将来、北極にもオゾンホールの出現する可能性がある」と述べている。今のところ、北極では明らかなオゾンホールは観察されないが、「北極でもオゾンは確実に減少し

立てば、オゾン層の本格的な破壊はこれから始まるという。なぜならば、これまで世界中で生産され、大気中に放出されたフロンは約一五〇〇万ト、このうちオゾン層に到達したものは、わずか一〇%くらいと推定され、残り九〇%はこれから数十年かかってオゾン層に到達するからである。フロン規制に関するハーグ議定書が完全に守られたとしても、成層圏のフロンガスの蓄積量は、二〇三〇年には現在の約二倍になると予測されている。

南極にオゾンホールが出現する季節に、地上の紫外線量はふだんの約二倍になると、最近全米科学財団が発表した。すなわち、シカゴ大学のフレデリック教授は、オゾンホールのない季節に比べて、南極の春にあたる昨年の十月には、二倍量の紫外線を観察した。紫外線がこれ程強いと、少なくとも海洋中のプランクトンなどには影響がはじめるであろうと述べている。

しかし、オゾンホールの出現とフロンとの関連には疑問があると考え研究者も少ない。実際にフロンによってオゾン層が破壊されている現象を直接観察したとい

つつあって、オゾンホールが出現する懸念は南極と同じである」と報告している。

六、オゾン層の減少に伴う紫外線量の増大は生態系にどんな影響をもたらすか

紫外線とは波長において四〇〇～一八〇〇オングストローム(Å)の光をさすのが一般的であるが、下限は必ずしも明らかではなく、一〇Åまでを紫外線とみなす研究者もいる。太陽から放射される紫外線の九九%はオゾン層で吸収されて、地上に到達する量はごくわずかで、しかも近紫外線(波長三〇〇Åまで)に限られる。近紫外線が生体に大きな被害を与えないことは、地上に数百万種類の生物が発生し、子孫を残し、生命を継続させていることから納得できる。しかし、オゾン層の減少によって、より短波長の紫外線が多量に地上に降り注ぐことになるれば、生態系は激変するであろう。生物体を構成する最も重要な成分、例えば、タンパク質や核酸は二五〇〇～二八〇〇Åの紫外線を非常によく吸収する。その結果、DNA(遺伝子本体)分子は、切断したり、一部分を

欠失したり、あるいは傷ついたりというような損傷を受ける。そのため、突然変異が生じたり、あるいは死に到るようになる。私も研究室において、紫外線照射によって、細菌や微小藻類などに突然変異を起こさせる方法を、一般的に採用している。

タンパク質もまた、紫外線をよく吸収して、変性する。すなわち、一次構造(アミノ酸配列)は変らないが、タンパク質の二次・三次・四次構造などの立体構造が変化するため、タンパク質としての正常な機能を發揮することができなくなり、結局のところ、生命を維持できなくなる。太陽の放射する紫外線の一〇%が地表に到達したら、紫外線防護装置の中に生活しない限り、地球の全生物は死滅するであろうと考えられる。

オゾン層の破壊と皮膚ガンとの因果関係は完全には明らかにはされていないが、現実には、皮膚ガンが増加しつつあることは確かなことである。「オゾン層の濃度が一%減少すると、皮膚ガン発生の可能性は四一六%高まる」ということから、カナダ政府は他国に先がけて、フロン使用の削減および全廃にふみきった。米国でも、女性の

肺ガンを除けば、最も急増しているのは悪性皮膚ガンで、これは紫外線の透過量が増えたためであろうと、専門家の間では理解されている。

フロンは十年以上もかかって成層圏に到達し、オゾン層を破壊するという前提に立てば、これまで人間が使用したフロン量は、二十三世紀まで残存して、オゾン層を破壊し続けるであろう、とローランド教授は述べている。この間、紫外線量は次第に増大し、じわじわと真綿で締められるように、生物界に被害が及ぶのではないだろうか。まず微生物から、やがて高等生物へと。

七、フロン全廃へ

オゾン層保護への国際的な関心の高まりを反映して、つぎつぎと国際会議が開かれ、その度ごとにフロン規制の強化が呼びかけられた。フロン規制の国際的取り決めは、一九八七年九月モントリオールで開催された「議定書」である。規制の対象は、五種類の特定フロンで、一九八六年の生産および消費量を基準値として、八九年から九二年までは基準値以下に、九三年度から九七年度ま

では基準値の八〇%以下に、九八年度以降は基準値の五〇%にと段階的にフロン使用量を減少させる内容になっていた。ローランド教授が四月十二日の日本国際賞受賞のために来日された時の話でも、モントリオール議定書による「十年後に五〇%削減では不十分で、一〇〇%削減が必要だ」と述べている。

フロン規制をさらに強化しようとの意見は米国・英国・欧州共同体などから提出された。その主な理由は、オゾン層の減少が予想をはるかに上回る速さで進んで来たことによる。したがって、モントリオール議定書の規制ではオゾン層の破壊をくい止められないことが明らかになった。もう一つの理由は、代替品の開発が進んできたことによる。

このような理由から、四月二十六日から五月五日まで、世界八十九カ国の代表による、フロン削減に関する会合がヘルシンキで開かれた。「ヘルシンキ宣言」の骨子はつぎのようなものである。

(一) モントリオール議定書が規制しているフロンの生産と消費をできるだけ早く、しかし西暦二〇〇〇年より遅

くない時期に全廃する。

(二) 可能な限り早くハロンを全廃し、その他のオゾン層破壊物質を規制し、削減する。

(三) 環境を破壊しない代替物と技術開発に努力する。

(四) 開発途上国が科学情報や研究成果を入手できるようにし、技術移転や装置の機械が最低のコストですむように適切な資金供給の仕組みを開発するよう努力する。

右のような宣言が空念仏に終わらないようにするには、先進諸国の大きな努力が不可欠であろう。これからフロンを生産しようとしている諸国、あるいは開発途上国への資金の調達、技術の援助を提供しなければならない。「われわれはオゾン破壊による皮膚ガンで死ぬか、飢えて死ぬかのどちらかだ」というような発言を放置しておくことは許されない。フロンの全廃は地球環境保全の第一歩なのだから。

八、エピローグ

私は十二月二十一日から、研究室の学生数名と共に、恒例になっている年末の小旅行に出かけた。大雄山の道

了尊最乗寺の杉の巨木群にも心うたれ、心洗われる想いをしたが、伊東市郊外の一碧湖の周遊小路では、また別の心なごも想いがあった。東京近郊では少なくなったコナラを中心とした雑木林がここには残っていた。葉はすっかり落ちて、小路の上にふわふわと積み重なって、靴が見えなくなる程であった。私は子供の頃、長靴で雪をかきわけながら歩いたように、ラッセル車のように落葉を押し分けながら、自然の感触を満喫したことであった。

大げさに言えば「まだこんな自然そのままの場所が地球の一隅に残っていたのか」と、その有難さを嬉しく思った。何が因果かわからないが、私は「自然」を相手に、とくに「植物の緑」を対象として、もう四十年も仕事を続けてきた。子供の頃の希望とは大きくかけ離れた職業についてしまった。しかし、今では植物を生涯の友として生きることできる幸せを神仏に感謝している。

今、人間社会では、人間が快適で便利な生活を求めて、あくなき努力をした結果として、地球は汚染され、地球環境が危機にさらされている。一度汚された環境を元にもどすことは容易なことではないし、場合によっては不

可能でもある。見識のある人々は、以前から現代のような物質や金銭が大通りを闊歩する社会をにがにがしく感じていた。私は欧州で勉強していた時、「日本人は世界の成り上り者」だという言葉に耳にしたことがある。これを全部否定できないほど、われわれの回りには、金銭のためには環境破壊など、ものともしない人々がいるように思う。

法によってフロン生産や消費を規制しても、環境保全は難しいと思われる。法や規約よりも大切で、より基本的な重要さは、「人類は如何に生きるべきか」という哲学に帰着すると考える。具体的には人類が物質的な豊かさを、これまで通りに、求め続けるかどうかの選択にかかっている。つまり人間生活の発想の転換が求められているように思う。

毎日の生活を考えてみると、急ぎの用でもないのに車を利用したり、十分快適な室温なのにさらに暖めたり、冷やしたり、というようなこと。食物などについても、種々な反省が生まれてこよう。こんなにも「物」があふれている社会が、人間にとって幸せなのだろうか。地球

から生まれた「物」はやがて再び地球に帰る。しかし、人間は新しい物を合成するという技術を持った。合成された物質は大部分は地球には帰らず、これらは大方、環境汚染源となる。これからは、新しい物質を合成するときには、その化合物の将来の運命をも十分に考慮に入れなければならない。

私は多少不自由しても、これ以上物質的充足を求めるような生活はしたくない。人間を取り巻く動物と植物と共に、この地球に生を受けたすべての生きものと一緒に、手足を動かし、頭脳を使って生きて行きたい。そしてかけがえのないこの地球を、よりよい環境状態で子孫に渡したいと願っている。人類の英知を集集すれば出来ないことではない。

(とおやますすむ・お茶の水女子大学教授)