

本田財団レポートNo.51

「エコ・テクノロジーの宇宙的観察」

コーネル大学天文学および宇宙科学教授

カール・セーガン

本田財団レポート

No.1	「ディスカバリー国際シンポジウム ローマ1977」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭53.5	No.28 「鍊金術 昔と今」 理化学研究所地球化学研究室 島 誠	昭57.4
No.2	異文化間のコミュニケーションの問題をめぐって 東京大学教授 公文俊平	昭53.6	No.29 「産業用ロボットに対する意見」 東京工業大学教授 森 政弘	昭57.7
No.3	生産の時代から交流の時代へ 東京大学教授 木村尚三郎	昭53.8	No.30 「腕に技能をもった人材育成」 労働省職業訓練局海外技術協力室長 木全ミツ	昭57.7
No.4	語り言葉としての日本語 劇団四季主宰 浅利慶太	昭53.10	No.31 「日本の研究開発」 総合研究開発機構(NIRA)理事長 下河辺 淳	昭57.10
No.5	コミュニケーション技術の未来 電気通信科学財团理事長 白根禮吉	昭54.3	No.32 「自由経済下での技術者の役割」 ケンブリッジ大学名誉教授 ジョン F. コールズ	昭57.12
No.6	「ディスカバリー国際シンポジウム パリ1978」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭54.4	No.33 「日本人と西洋人」 東京大学文学部教授 高階秀爾	昭58.1
No.7	科学は進歩するのか変化するのか 東京大学助教授 村上陽一郎	昭54.4	No.34 「ディスカバリー国際シンポジウム コロンバスオハイオ1982」報告 電気通信大学教授 合田周平	昭58.2
No.8	ヨーロッパから見た日本 NHK解説委員室主幹 山室英男	昭54.5	No.35 「エネルギーと環境」 横浜国立大学環境科学研究センター教授 田川博章	昭58.4
No.9	最近の国際政治における問題について 京都大学教授 高坂正堯	昭54.6	No.36 「第3世代の建築」 ㈱菊竹清訓建築設計事務所主宰 菊竹清訓	昭58.7
No.10	分散型システムについて 東京大学教授 石井威望	昭54.9	No.37 「日本における技術教育の実態と計画」 東京工業大学名誉教授 斎藤進六	昭58.8
No.11	「ディスカバリー国際シンポジウム ストックホルム1979」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭54.11	No.38 「大規模時代の終り—産業社会の地殻変動」 専修大学経済学部教授 中村秀一郎	昭58.8
No.12	公共政策形成の問題点 埼玉大学教授 吉村 融	昭55.1	No.39 「ディスカバリー国際シンポジウム ロンドン1983」の報告 電気通信大学教授 合田周平	昭58.9
No.13	医学と工学の対話 東京大学教授 濵美和彦	昭55.1	No.40 「日本人と木の文化」 千葉大学名誉教授・千葉工業大学教授 小原二郎	昭58.10
No.14	心の問題と工学 東京工業大学教授 寺野寿郎	昭55.2	No.41 「人間と自然との新しい対話」 プラッセル自由大学教授 イリヤ・プリゴジン	昭59.2
No.15	最近の国際情勢から NHK解説委員室主幹 山室英男	昭55.4	No.42 「変化する日本社会」 大阪大学教授 山崎正和	昭59.3
No.16	コミュニケーション技術とその技術の進歩 MIT教授 イシェル デ ソラ ブール	昭55.5	No.43 「ベルギー『フランドル行政産業使節団』講演会	昭59.7
No.17	寿命 東京大学教授 古川俊之	昭55.5	No.44 「新しい情報秩序を求めて」 電気通信大学助教授 小菅敏夫	昭59.7
No.18	日本に対する肯定と否定 東京大学教授 辻村 明	昭55.7	No.45 「アラブの行動原理」 国立民族学博物館教授 片倉もとこ	昭59.10
No.19	自動車事故回避のノウハウ 成蹊大学教授 江守一郎	昭55.10	No.46 「21世紀のエネルギーを考える」 イタリア国立エネルギー研究機関総裁 ウンベルト・コロンボ	昭60.1
No.20	'80年代—国際経済の課題 日本短波放送専務取締役 小島章伸	昭55.11	No.47 「光のデザイン」 石井デザイン事務所 石井幹子	昭60.7
No.21	技術と文化 IVA事務総長 グナー・ハンベリュース	昭55.12	No.48 「21世紀技術社会の展望」 第43回日経ハイテクセミナー	昭61.1
No.22	明治におけるエコ・テクノロジー 山本書店主 山本七平	昭56.5	No.49 「星をつぶす法」 文部省宇宙科学研究所所長 小田 稔	昭61.5
No.23	西ドイツから見た日本 電気通信大学教授 西尾幹二	昭56.6	No.50 「ひまわりVA太陽光は人間の生活にどう役立つか」 慶應義塾大学教授 森 敏	昭61.5
No.24	中国の現状と将来 東京外国语大学教授 中嶋嶺雄	昭56.9	No.51 「エコ・テクノロジーの宇宙的観察」 コーネル大学天文学および宇宙科学教授 カール・セーガン	昭62.2
No.25	アメリカ人から見た日本及び日本式ビジネス オハイオ州立大学教授 ブラッドレイ・リチャードソン	昭56.10		
No.26	人々のニーズに効果的に応える技術 GE研究開発センター・コンサルタント ハロルド・チェスナット	昭57.1		
No.27	ライフサイエンス （株）菱化成生命科学研究所人間自然研究部長 中村桂子	昭57.3		

Profile of Lecturer

Professor Carl Sagan

Carl Sagan is the David Duncan Professor of Astronomy and Space Sciences and Director of the Laboratory for Planetary Studies at Cornell University. He has played a leading role in the Mariner, Viking and Voyager expeditions to the planets, for which he received the NASA Medal for Exceptional Scientific Achievement; the Prix Galabert, the international aeronautics prize; the NASA Medal for Distinguished Public Service (twice); and the John F. Kennedy Astronautics Award of the American Astronautical Society. His scientific research has enhanced our understanding of the greenhouse effect on Venus, dust storms on Mars, the organic haze on Titan, the origin of life, and the search for life elsewhere. Dr. Sagan has served as Chairman of the Division for Planetary Sciences of the American Astronomical Society, as President of the Planetology Section of the American Geophysical Union, and as Chairman of the Astronomy Section of the American Association for the Advancement of Science. For 12 years he was Editor-in-Chief of *ICARUS*, the leading professional journal devoted to planetary research. He is currently President of the Planetary Society, a 100,000 member organization which is the largest space-interest group in the world; and Distinguished Visiting Scientist, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.

In addition to more than 600 published scientific papers and popular articles, Dr. Sagan is author, co-author or editor of more than twenty books, including *Broca's Brain*, *Comet*, *Contact* and *The Dragons of Eden*, for which he was awarded the Pulitzer Prize. He was responsible for the Pioneer 10 and 11 plaques, and the Voyager 1 and 2 interstellar records, messages about ourselves sent to possible other civilizations in space. His Emmy and Peabody Award winning television series *COSMOS* became the most widely watched series in the history of American public television, and has now been seen in 60 countries by over 250 million people. The accompanying book also called *Cosmos*, is the best-selling science book ever published in the English language.

In recent years, Dr. Sagan and his colleagues have been engaged in research on the long-term consequences of nuclear war, uncovering previously unsuspected dangers for our civilization and our species. Partly for this work, he has been given the Annual Awards for Public Service of the Federation of American Scientists and of Physicians for Social Responsibility, as well as the Leo Szilard Award for Physics in the Public Interest of the American Physical Society. Dr. Sagan has also received the Explorer's Club 75th Anniversary Award "for achievements in furthering the spirit of exploration," the Joseph Priestley Award "for distinguished contributions to the welfare of mankind," and the Honda Prize "for contributions towards ... a new era of human civilization."

講師略歴

カール・セーガン

カール・セーガンは、コーネル大学天文学および宇宙科学のデービッド・ダンカン教授、同大学惑星研究所長である。同氏は、マリナー、バイキング、およびボイジャーの惑星探査において、指導的な役割を果たし、その傑出した科学的業績に対してアメリカ航空宇宙局(NASA)メダル、国際的な宇宙航行学賞であるガラベール賞、卓越した公共の福祉に対するNASAメダル(2度)、およびアメリカ宇宙航行学会のジョン・F・ケネディ宇宙航行学賞が贈られている。同氏の科学的研究は、金星の温室効果(greenhouse effect)、火星における砂塵あらし(dust storms)、タイタンの有機雲(organic haze)、生命の起源、および地球以外に存在する生物の探査に関するわれわれの知識を高めてきた。セーガン博士は、アメリカ天文学会・惑星科学部会会長、アメリカ地球物理学会・惑星学部会会長、および米国科学振興協会・天文学部会会長として奉職した。同氏は、12年間、惑星研究の国際的な専門雑誌『イカルス』の編集長であった。同氏は、現在、10万人の会員を擁し宇宙に関心をもつ人々の世界最大の組織である惑星協会(The Planetary Society)会長であり、カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所の特別客員学者である。

600編以上の科学論文、および一般記事の出版に加え、セーガン博士は、『ブロッカ博士の頭脳』、『彗星』、『異星人との知的交信』それにピューリッツァ賞を受けた『エデンの恐竜』を含め、20冊以上の書籍の著作者、共著者あるいは編集者となっている。同氏は、宇宙の他の文明にあてて、われわれのメッセージを伝えるパイオニア10号、および11号の金属板、ボイジャー1号、2号のレコードに関する責任者であった。同氏がエミー賞・ピーボディ賞を受賞したテレビ・シリーズ『コスマス』は、アメリカ公共放送の歴史の中で、最も広汎に視聴されたシリーズであり、現在まで60ヶ国、2億5千万人以上の人々によってみられている。同時に、『コスマス』と題された書籍は、これまで英語で出版された科学書のなかで、最高の売れ行きを示している。

最近では、セーガン博士とそのグループが、核戦争のもたらす長期的な影響に関する研究を進めてきた結果、われわれの文明、および人類に対して、これまで疑われもしなかったような重大な意味合いを明らかにすることになった。

この仕事の一部に対して、社会的責任に関するアメリカ科学者・物理学者連盟より公共の福祉に対する年間功績賞およびアメリカ物理学会よりレオ・スジラード賞を受賞している。セーガン博士はまた「探険家精神を発展させた功績」で探険家クラブ75周年記念賞を、また「人類の福利厚生に顕著な貢献をなした」としてジョセフ・プリーストリー賞を受けた。そして、「人類の文明に新しい時代をもたらした」として、本田賞を受賞した。

May 15, 1986

このレポートは昭和60年11月18日、ホテル・オークラにおいて行なわれた1985年度本田賞授与式の記念講演の記録です。

「エコ・テクノロジーの宇宙的観察」

1985年11月18日 第6回本田賞授与式に於ける記念講演

1. はじめに

大変有難うございます。本田賞受賞という名誉をたまわり本田財団および本田さんに御礼申し上げます。また本田さんの79才の誕生日を御祝い申し上げます。

本日の私のテーマはエコ・テクノロジーの宇宙的観察です。エコ・テクノロジーとは私にとってはそのテクノロジーが全地球的な規模に拡大されても何ら否定的な結果をもたらさないような人道的な目的にかなうように賢明に考案されたテクノロジーを意味しています。しかしそのような理想の実現は現在では程遠いと言えます。

現代においては、科学技術は我々の日常生活だけでなく、地球全体の気候や環境、生態系にも影響を与え、比較的近い将来には他の惑星にも影響を及ぼすと思われます。そのような壮大な規模の問題に対処するには惑星的な観点、すなわち地球を他の多くの天体の中の一つとして見る方法を取り入れる必要があります。他の天体を研究することによりこの問題に対する理解が深まり、事態を好転させ、我々の科学技術の内に潜んでいる真の破滅（カタストロフィ）を避けることができるのです。

原始時代の人間の技術でさえも気候に影響を与えていた可能性があります。例えば焼き畑農耕は地表の反射性を変化させて入射する太陽光線の大部分を吸収し、少ない光線で地球を暖めるようにすることが可能であったかもしれません。産業革命の後、人間は環境に大きな変化をもたらす新たな手段を、ほとんど思いもよらずに創り出しました。私はこの講演では人間が弱点を見い出した二つの事例、すなわち世界的な環境と惑星的な生態系における脆弱性に話を集中したいと思います。

2. 惑星の衝突と気候の大変動

ところでまず初めに、私は全ったく無関係と思われるような事柄から話を始めたいと思います。それは彗星です。現在、ハレー彗星が太陽系に周期的な接近をなしている所から、彗星は現在の我々の大き

な関心事となっています。

来年の三月にハレー彗星に遭遇する二十ヶ国から打ち上げられた五つの彗星探査機の中には、二つの日本の探査機「さきかけ」と「彗星」がありますが、これは日本で、あるいは実際に純粋にアジア諸国で最初の惑星間探査機です。それらの探査機は、他の天体の探査というめざましい人類の発展を象徴しており、これは全人類のために成功裡に遂行されるべきものです。

彗星はそれ程大したものではなく、本質的には最も遠い惑星である冥王星のはるか彼方からやって来る直径数キロメートルの汚れた雪玉にすぎません。いくつかの彗星は短周期の軌道に組み込まれて太陽系の惑星の一部としてとどまります。

図1のそれぞれの曲線は彗星の軌道を表していますが、ここに示したのは名前が知られている彗星のほんの一部分です。例えば、二人の日本人天文学者池谷氏と関氏が発見した彗星の軌道やハレー彗星の軌道が見受けられます。この図から大きな彗星がいかに多く存在するか分りますが、小さな彗星は更に多く存在するのです。地球の太陽を回る軌道は、彗星の軌道のこの集まりの丁度真中を通っているので、長時間の内には彗星は地球に大接近することがあることになります。

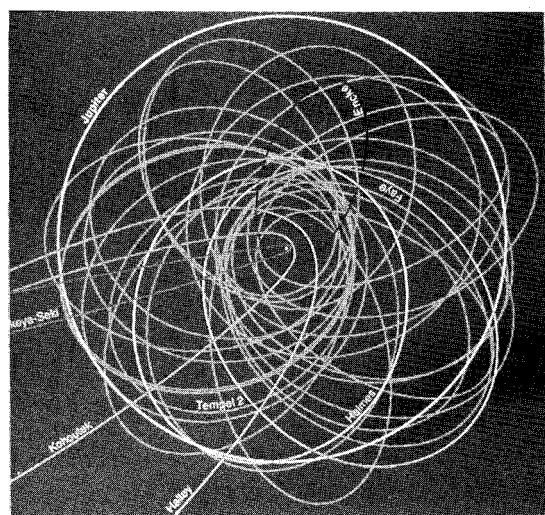


図1：名前が知られた少数の彗星の軌道を木星の軌道（大きな円）と関連させて表示している。表における彗星の中には、池谷・関彗星、エンケ彗星、ハレー彗星がある。地球の太陽を回る軌道は、この大量の彗星の中を通過している。アメリカ航空宇宙局提供

1910年にはハレー彗星の尾が地球をかすめる程に接近しました。昼食時にこの事を話していたのですが、本田さんは1910年には地球は彗星の有毒ガスに包み込まれてしまうのではないかと世界中で心配したということを回想しておられました。しかし彗星の尾は非常に拡散しているので、1910年の現象は重大な問題にはなりませんでした。しかしながら図1によると、遅かれ早かれ彗星が地球に衝突するという非常に心配すべき現実があります。太陽系内部に多数の彗星が存在することにより、直径が数キロメートル以上のかなりの彗星が数千万年毎に一度、地球に衝突するはずであるという計算ができるのです。

注目すべきことに、6,500万年前に同様の大きさの何物かが地球に衝撃を与えたという証拠があります。堆積層の中の当時の岩石には、イリジウムという小惑星や彗星のような地球以外の物体には非常に豊富に存在し、地球表面にはわずかしか存在しない特殊な化学成分の濃く含まれた地層が存在しています。そのイリジウムは世界中に散在しており、直径10km程の小惑星ないし彗星が地球に衝突したという有力な証拠になっているのです。地球上の陸地にはそれに相当するサイズや年代のクレーターは存在していないので、衝突は恐らく大洋で起ったと思われます(図2)。彗星は海の深さよりも大きいので、海底には大きなクレーターが堀られ、何億トンもの微粒子を大気中高く吹き上げました。塵は全地球に拡散して太陽光線を遮断し、そのため地球は長期間冷たく暗いものとなりました。しかし6500万年前のイリジウムを豊富に含んだ粘土層が形成された頃はまた、白亜紀末から第三紀にかけての変動、すなわち地球上の生物の歴史の中での一大絶滅があった時期でもあります。恐竜が地球の支配者となり、1億4000万年以上も存続し続け、陸海空を支配していました。我々の祖先の哺乳類は、彼らの陰にかくれて生き延びていました。それでも全ての恐竜が6500万年前の大滅亡で絶滅し、地球上の大部分の生物も共に絶滅しました。

図3は画家が描いた当時の想像図です。寒冷と暗黒がやがて全恐竜の死につながるのです。小さな哺乳動物が見受けられますが、これはおそらくその補食者が死滅したために、その後に生息地を拡大し進化した我々の祖先の一つでしょう。私達が今、存在できるのは恐竜の死、つまり白亜紀、第三紀の変動のおかげです。しかし、もし地球上で大規模な気候破滅が時どき起こるとすれば、いかなる生物種もこ

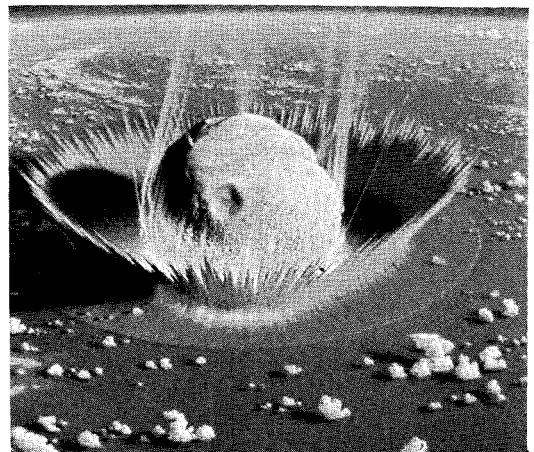


図2：直径10kmもの大きな彗星の核が、まさに地球に衝突しようとしている6500万年前の概略的な想像図。爆発の結果、粉々に碎かれた海底が巨大な雲となって地球全域の大気中に吹き上げられたと思われ、暗く寒い時代をもたらして恐竜およびほとんど全ての生物種の滅亡を招きました。核の冬には同様の影響がある。ドン・デービス画、カール・セーガンおよびアン・ドルーヤル著、『彗星』より、版権©1985（東京：集英社、ニューヨーク：ランダムハウス社）

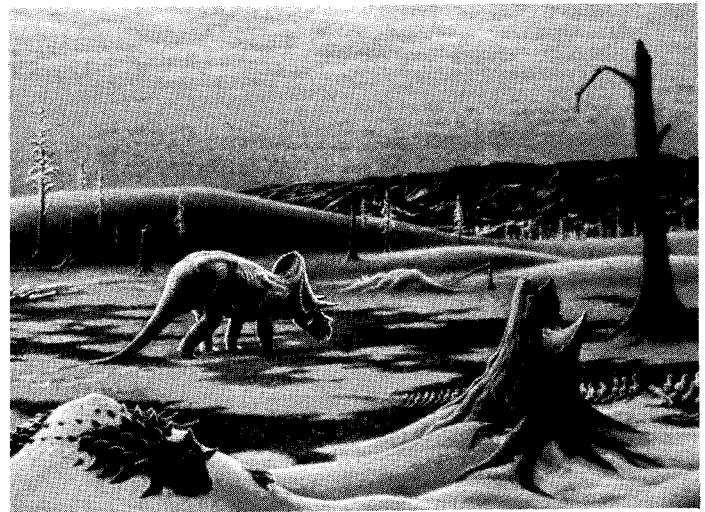


図3：この想像図では、6500万年前の、白亜紀末期の彗星の衝突により暗く凍りついた風景の中を、三角竜（トリケラトプス）がさびしくうろついている。ドン・デービス画、カール・セーガンおよびアン・ドルーヤン著、『彗星』より、版権©1985（東京：集英社、ニューヨーク：ランダムハウス社）

の地球上で生存できるものではありません（事実、かつて地球上で生存した大多数の種は現在、絶滅しています）。また大気中に放出された大量の微粒子が、気候に重大な変化をもたらし得るという結論が得られます。これは我々にとって重要な教訓です。それは近い将来に彗星が地球に衝突する可能性があるというのではなく、恐竜を死滅させたのと同量の微粒子を大気中に放出させるような行動が我々人間の力で充分可能であるからです。この問題は後に述べることにしましょう。

3. 温室効果

気候の変化は何千万何億年の規模だけではなく、絶え間ない規模で起こっています。最近の一万年を考えてみましょう。今日、大部分の北半球の中緯度地方は森林で覆われています（人間はこの森林地帯を恐るべき早さで破壊しています）。グリーンランドと南極大陸の大部分は一年中氷に覆われていますが、これは地表のわずかな部分にしかすぎません。しかし一万年前の様相は大変違ったものでした。当時地球上で森林に覆われた部分はほんのわずかで、（日本はその森林地帯の一部でした）、氷河に覆われた部分は非常に大きかったです。今のシカゴ市のある所は1kmもの厚さの雪と氷に埋もれました。このウィスコンシン氷河期から現在の温暖な状態への変化は大変劇的ですが、6500万年前に推測される気候の変化ほど衝撃的ではありませんでした。

これらの気候の変化はどちらも生物の活動によってもたらされたと考えることはできません。ウィスコンシン氷河は、地球の軌道と地軸の傾斜の準周期的な変動によるものと考えられます。人類は一万年前にはすでに存在していましたが、現在のような科学技術文明はありませんでした。しかし世界の気候にそのような変化があるということは、地球の生態系の脆弱性についての疑問を私たちに投げかけます。地球の環境はどれ程変動に耐えうるものでしょうか。そして、人類は今日、驚くべき科学技術の能力を持っていますが、意図的あるいは不注意により我々の文明、あるいは人類の存続を危くし得るほどに地球の気候を変える力を持っているのでしょうか。残念ながらその答えは「イエス」のようです。

ここでしばし地球の気候がどのように作用するか簡単な方法で説明してみたいと思います。図4は宇宙から見た地球の写真で、現代に色どりをそえる美

しい宇宙船からの写真の一枚です。これらの写真により地球を宇宙から見ることができ、その脆弱性をはかり知ることができます。またこれらの写真では少なくとも国境がないということを知ることができます。

さて、地球の気候は主に太陽光線により、もたらされます。太陽光線がこの世界を暖めています。我々は太陽光線がほとんどない夜がいかに冷たく、北極や南極の冬がどれ程寒いか知っています。もし太陽がなくなってしまったならば、地球の温度は、大気中の酸素と窒素が凍結して、凍った酸素と窒素が10m程の厚さの層になるほどに低下します。

地球には大気と雲があるので、入射した全ての太陽光線が地表に当たるわけではありません。多少の太陽光線は雲に当たり、そして宇宙に向けて反射されます。また地上に届く全ての太陽光線が地面に吸収されるわけではありません。例えば砂漠に届く太陽光線の大部分は吸収されますが、一部は宇宙に反射されます。したがって地球がどれほど反射的であり、どれほどの光が宇宙に戻っていくかは、地球の気候の重要な決定要因です。もし雲を多く発生させたり、地上をもっと明るくしたりすると更に多くの太陽光線を宇宙に向けて反射させ、地球を冷すことになります。もし、雲を少なくし、地上を暗くするならば、太陽光線は実際に多く吸収されて地球は暖まることになります。ですから雲の量や地球の反射性に影響を与えるような人間の活動は、地球の気候に変動を与えることが可能です。地球の平均気温にわずかな変動があっても、生態学的、農業的に重大な

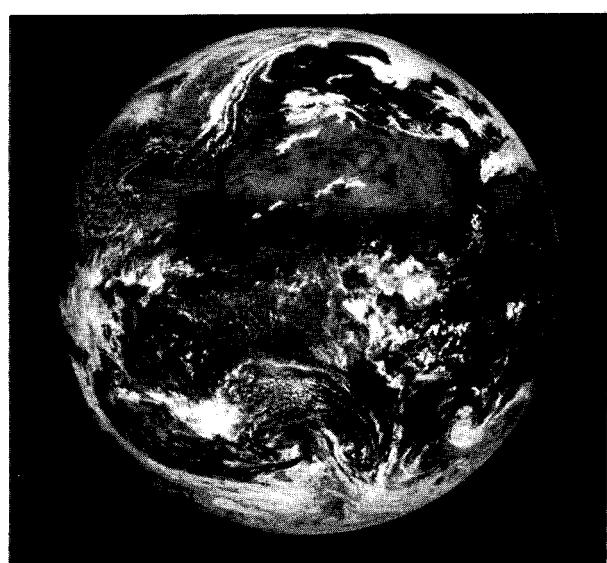


図4：地球静止軌道からの通常の可視光線による地球の写真。メテオサット写真、欧州宇宙機関提供。

結果を招くことになるのです。

地表が太陽光線を吸収する量のみから、地球の暖かさを計算するならば、地球の温度ははるか氷点以下になるという結論を得るでしょう。海も凍ってしまいます。

ではこの計算はどこが間違っているのでしょうか。その間違いは「温室効果（グリーンハウスイフェクト）」と呼ばれるものを見逃した点にあります。つまり地球の大気による熱の保存を無視していたのです。我々の目の前の空気は通常の可視光線では透明です。それ故に我々は互いに見ることができます。しかし、もし我々の目が例えば赤外線の15ミクロンの波長に敏感であるならば、誰も数cm以上先を見ることはできず、この講演もとてもできなかつたでしょう。空気は赤外線のある波長域では黒色です。通常の太陽の可視光線はほとんど透明な大気を通過して地球に当たり、地面を暖めますが、地面が赤外線により宇宙に向けて輻射する時は大気中の水蒸気や炭酸ガスその他のがスはそれを通さなくなり、地面の宇宙への輻射は妨げられ、熱は保存されて地球の表面は暖かになります。温室効果はこのようにして作用します。

図5は赤外線スペクトルのある一部分の不透明領域により宇宙から見た地球の写真です。この眺望は図4のものと全く同じものですが、この波長域では地球の表面は何も見ることはできません。私たちは高度の大気層のガスや雲を見ているのです。以上のように主に大気中のわずかな水蒸気と毒性のないわずかな炭酸ガスによる温室効果があることにより、地球上の生命はその存在が可能なのです。大気中の

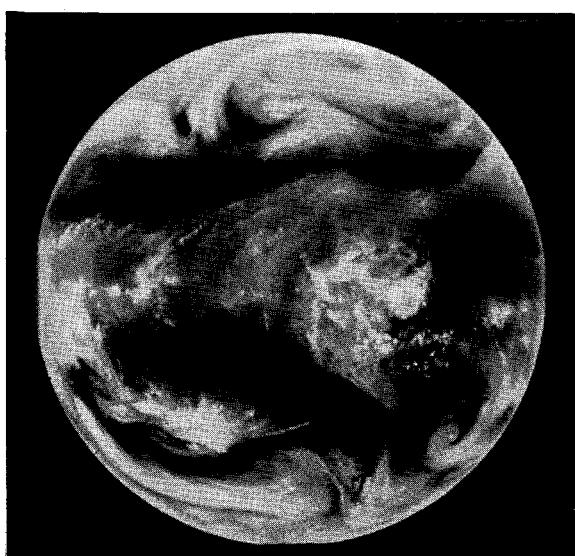


図5：地球静止軌道からの近赤外線水蒸気帯による地球の写真。メテオサット写真、欧州宇宙機関提供。

わずかな構成物が地球の環境に重要な影響を及ぼすのです。この事実は再び、人間は地球の気候に大きな変動をもたらし得るという警告を与えていました。

ある人は、温室効果に関し、それは間違いであり、科学者はよく分っていないし、それ程重要なものではないというように考えるかもしれません。しかし自然が我々に与えてくれた非常に有用で、強力な温室効果の実例があります。それは丁度、我々の隣にあるのです。

我々に最も近い惑星は金星です。金星は濃縮された硫酸の雲に覆われており、その表面ははるか下にかくれています。金星の大気は膨大な量の炭酸ガスを含み、地球の大気中の炭酸ガスの30万倍にも達しています。太陽光線の一部は金星の大気を通過しますが、何千km下の地面が赤外線を輻射しようとしてもその大部分の赤外線輻射は強大な大気により吸収されてしまいます。その結果、地表の温度は摂氏約470度まで上昇します。錫や鉛が溶ける温度です。金星は、強力な温室効果によってそのように熱くなっているのです。金星は温室効果により文字通り、西欧で古くから描寫されている地獄のようになっています。温室効果がわずかにあることは良いことです。地球の海が凍結しないのは温室効果がある故です。しかし強力な温室効果はこのように極めて危険なものなのです。

大気中の炭酸ガスの濃度は一定しておらず、時と共に増加しています。それは石油、石炭、木、泥炭天然ガスなどの化石燃料を燃やしているからです。石炭が燃える時は、言うならば石炭の中の炭素と大気中の酸素が結合して熱を出します（その熱のために私たちは石炭を燃やすわけですが）。しかしその石炭を燃やすことにより炭酸ガス、すなわち石炭からの炭素一原子と空气中からの酸素二原子は大気中に拡がり、そこに滞留するようになります。現在のあるいは将来の科学技術では大気中から大量の炭酸ガスを排除することはできません。炭酸ガスは一度大気中に拡散すると樹木により吸収されるか、あるいは海で炭酸塩として沈殿するまで非常に長期間大気中に残ります。

我々は産業の成長と暖房のためというまぎれもなく良心的な目的で、大気中の炭酸ガスの量を増加させてきていました。それが気候に否定的な結果をもたらすとは誰も想像しなかったのです。しかしその結果、炭酸ガスの量は着実に増加しており、温室効果が更に作用して、地球の温度は徐々に上昇している

のです。現在の世界の工業成長率でいくとどれ程地球の温度が上昇するか計算することができます。次世紀の中頃迄には、温度は数度上昇し、非常に重大な世界的な温度変化をもたらします。一世紀ないし一世紀半の間には、温度の変化はさらに大きくなつて相当の氷河の氷が溶け、そしてついには南極大陸西部の氷床が倒壊する可能性が現実的に出てきました。この氷床は巨大で、もしこれが海にくずれ落ちれば海面の水位が数メートルから十数メートル上昇するほどです。このことは水が一杯入った浴槽にうっかりつかり、水が浴槽から溢れて、浴室の床に流れ出することにちょっと似ています。海面の水位が十メートル程も上昇すれば地球上のほとんど全ての沿岸都市は水浸しになり、重大な規模の破滅を招きます。これは福田元首相が先ほど語られた経済破滅よりも更に重大な経済的打撃を招くものです。

この問題を解決するには我々はどうすればよいでしょうか。まず第一に我々がこの問題を確実に把握し、国家の指導者に理解させなくてはなりません。しかしそれだけでは不充分です。なぜならばこの問題は我々の代にはそれほど影響はなく、主に我々の子供や孫に影響を及ぼすからです。したがってこの問題は重要な倫理的問題を提起しています。我々は後の世代のために次世紀の破滅を避けるための高価な手段を今進んで取ることができるでしょうか。あるいは現在と我々自身にだけしか関心がなく、短期的な利益を追って地球の長期的な将来には無関心でいられるのでしょうか。あるいは破滅に関してどれほどの確信を持ってその防止や改善のためにどれ程の資金を投入しなければならないのでしょうか。これらは重要な質問であり、そして私にとっては、これがエコ・テクノロジーの中心的課題に思われます。

もし我々が真に子孫に責任を持つならば、温室効果にどう対処すれば良いのでしょうか。まず第一に、化石燃料をもっと効率的に使用するようにすることです。ある国では「省エネ」を口先で唱えて同時に、政府が化石燃料に助成金を拠出しており、化石燃料の使用を非効率的なものにしています。もし燃料がもっと高ければもっと効率的に使用されるのです。長期的に問題の少ないもう一つの可能性は、太陽エネルギー、潮力エネルギー、地熱エネルギーから安全な原子炉エネルギー、そしていずれ核融合技術へと代替エネルギー源に適宜に移行することです。我々の子孫に危険性を残す、寿命の長い放射性廃棄物はまた深刻な問題ではありますが、これら代替エネ

ルギー源の問題が何であれ赤外線吸収ガスで大気が汚染されるということではなく、温室効果を高めることはないのです。代替エネルギー源の探求が速やかに行なわれるならば、確実な長期的解決法になります。

この問題は我々の世代と将来の世代の間だけでなく、国家間の問題でもあります。大気中の炭酸ガスには国境はありません。例えば世界で石炭の埋蔵量が最も多いのは米国、ソ連、中国です。そこで、膨大な石炭埋蔵量を利用して野心的な工業化計画を進めている中国の場合を考えてみましょう。もし化石燃料を中国の工業化のために燃やした場合、それは結果として、アメリカの中西部やソ連のウクライナ地方を灌木地帯に変えてしまうのですが、中国を押しとどめることのできる誘因は一体何でしょうか。温室効果により地球が暖かくなるのは全地球次元の問題であり、一国だけでは解決できません。

ソ連が石炭を燃やせば南アメリカの気候に影響を及ぼし、アメリカで石油を使えば南アフリカの気候に影響を及ぼすのです。この問題は、全工業国が一致協力して努力することによってしか解決できません。しかし残念ながら現在の国際体制は人類全体のためのこのような行動に適したものではなく、各国はほとんど自国にのみしか関心を持っていません。この種の問題は他にも多くあります。例えば酸性雨あるいはビールス性伝染病、冷蔵庫やエアゾルスプレー缶のハロゲン含有炭素化合物によるオゾンの保護層の減退化などがあり、これらにより人類は更なる危険に直面していますが、その長期的な解決法は、イデオロギー的に互いに対立する、しないにかかわらず全工業国の協力体制を必要としているのです。

4. 核の冬

人間が引き起こすことも防ぐことも可能なもう一つの宇宙規模の気候破滅の類例が考えられますが、これは核戦争の結果生じるもののです。アメリカとソ連は55,000発もの核兵器を保有して世界に悪影響を与えていますが、それらのほとんどは1945年に広島と長崎を破壊した原爆よりも更に強力な破壊力を持っています。何と55,000発もの核兵器です。都市の定義を人口10万人以上とすれば、地球上にはわずか2300ほどの都市しか存在しません。アメリカとソ連は約20,000発の戦略核兵器を保有しています。それは敵国の領土に攻撃を加えることのできるものです。

これはアメリカとソ連が地球上の全ての各都市をそれぞれ2発の核兵器で破壊しても、さらに15,000発の戦略核兵器を残すことになります。問題はおそらくこの残りをどうするかということでしょう。この計算に含まれていない35,000発の戦術兵器についても言います。

そこで私は核戦争の地球的規模の影響の一部および特に、多くの国の多くの科学者グループの協力によりなされ、アメリカ国防総省が重大な問題であると認めている最近の発見事例を概略的に述べたいと思います。

核戦争の直接的な影響はよく知られており、ここでは勿論、その内容を詳しく説明する必要はありません。主要交戦域(セントラル・エクスチェンジ・レンジ)と呼ばれる地域での即死者の数は数億人にのぼると推定されています。最近の世界保健機構の推定では、5000メガトンの核戦争、すなわちアメリカとソ連の戦略核兵器保有量の三分の一から半分を使う戦争では、11億人が即死し、更に11億人が直ちに医療手当を受けなければ死亡するということです。しかし医者や病院も標的の範囲に入っていますから、当然医療手当は受けられません。したがって日本を含む、北半球の中緯度の標的地域での核戦争の即座の結果として、地球上の人口の40%が殺されることになります。では残りの60%はどうなるのでしょうか。

全面核戦争では何万もの標的があることを考慮に入れて下さい。一部の標的是高エネルギーの地上爆発により破壊され、莫大な量の粉じんが直接成層圏に吹き上げられます。他の標的は爆風によって破壊され、これは火災を引き起こし、大量の黒くすすけた煙を大気圏の低部、すなわち対流圏にもたらします。都市が延焼することが最も端的な煤煙の原因となります。攻撃された都市の約半数に火事による暴風の発生が予想されますが、もしこれが起れば煤煙は急速に成層圏に吹き上げられます。さもなければ降雨で取り除かれなかった煤煙の雲は太陽光線に加熱されるだけで黒煙を空高く運び上げ、そこに一年以上滞留するようになります。一方、チリと煙はまず経線に沿って拡がり、次に緯度線に沿って拡散し、一部は赤道を越えて南半球に入ります。

これらの雲は平均的に非常に光を通しにくく、地表に届く太陽光線をかなり弱めます。これだけでも地球を暗く冷たくするのに充分ですが、他にも別の作用が働くのです。温室効果は水蒸気や炭酸ガスのような気体によるものですが、大部分の赤外線は

地球の大気の地表から数キロメートル以内の部分で吸収されます。しかし核戦争の後、もし太陽光線の大部分が高空で遮ぎられてしまうと、太陽光線がこれらの温室効果をもたらす気体まで届かないことになります。したがって核戦争により生じるチリとススは少なくとも部分的には温室効果を止めてしまうことになります。こうして地球の気温は更に下がります。おそらくこの相乗効果は破滅的なものになり、核戦争によるこの破滅的な気候の結末を「核の冬」と呼んでいます。

気温は、戦争が主として行われる北半球の中緯度の標的地域で最も低下します。日本はこの中緯度地帯に属し、ソ連および中国での核爆発により生じた微粒子は、優勢な偏西風に乗って東方へ運ばれ、日本は核戦争による気候災害の初期の被災国となります。

核の冬がどれほど続くかは不明であり、様々な計算の中でも最も不確実な点の一つです。ある人は、我々が最初に計算したように、一年か二年だけしか続かないと思っています。しかし別の人々は気候のフィードバック作用があると言っています。すなわち、氷の反射作用や海の氷と大洋の熱不活性作用であり、これが核の冬の存続期間を大きく延長させる可能性があると言うのです。

核貯蔵量のほんの一部分だけでもこのような破滅をもたらします。実際、百の都市が同時に燃えるだけで破滅をもたらすには充分なのです。気温の低下、局部的な暗黒、放射性生成物、近代都市の火災により生ずる有毒ガス、オゾン層の衰退の後で起こる通過する太陽光線の紫外線の増加、放射能で免疫システムが弱体化することによる病気への抵抗力の低下、そして伝染病や疾病の起こる可能性、これは核戦争が地球文明を破壊してしまうということを示しています。核戦争はまた間違なく農業を破壊し、農作物輸出を止めてしまいます。

日本のような国を考えて下さい。奇跡的に日本はどこも攻撃されず、中国からの放射能も落下して来ず、暗黒の煙が日本を覆わなかつとしましょう。しかしそれでも日本への影響は壊滅的です。なぜなら日本はその食料の半分以上を輸入に頼っているからです。北半球の中緯度地帯の大食料生産地であるアメリカの中西部やソ連のウクライナ地方などは破壊されてしまっているでしょう。その上に、核の冬が日本にもたらす影響と、核兵器が日本で爆発した時の即座の状況と大陸からの放射能を含んだ雲の漂流を考えてみて下さい。そうすればアメリカとソ連

の紛争に深くかかわらなかった国であったとしても、核戦争で完全に破壊し尽くされてしまうことが分ります。ナイジェリア、インドネシア、ブラジルなどの国についても同じことが言えます。核戦争の影響は今や世界中に及ぶのです。国際学術会議連合に委託された最近の主要な研究では、農業破壊とその結果起こる世界的な集団飢餓は二次的災害の主な原因となり、死者は数十億人に達すると見積もられています。これが残りの60%の人々に起こることなのです。

人間は真実を知らないままに、地球の気候を壊滅的に変動させ、我々の文明あるいはおそらく人類の存在をも破壊できる手段である核兵器を考え出しました。また地球上の人々は、工業国、特に核保有国でなされる決定に極めて脆弱であるということになります。科学技術は恐しくすさまじい力を我々にもたらしました。

アメリカとソ連の戦略核兵器保有量は時と共に着実に増加しています(図6)。表の底部の水平の帯域は戦略兵器の数が少ないので、たとえ都市が優先的に標的になっても、おそらく核の冬は起らないこと

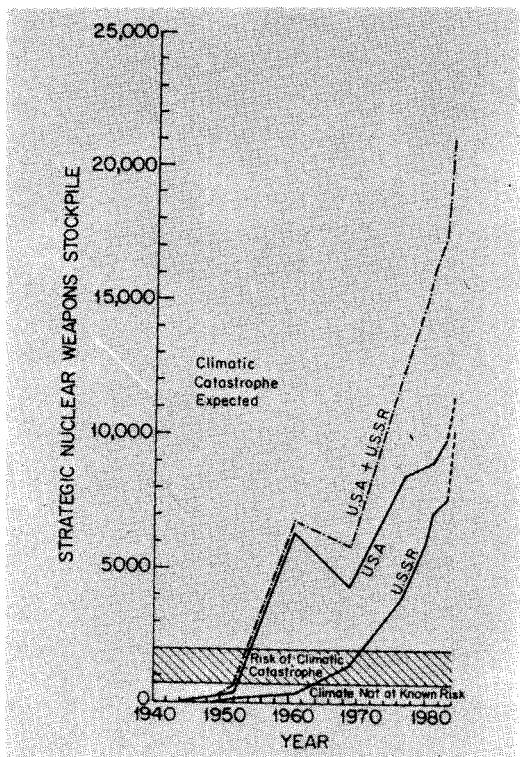


図6：アメリカおよびソ連の戦略兵器保有量の時と共に増加。アメリカ国防総省出所のデータ、カール・セーガン、『Nuclear War and Climatic Catastrophe: Some Policy Implications』(「核戦争と気候破滅、政治への示唆」)『フォーリン・アフェアーズ誌』冬、1983/4, 257頁

を示しています。しかしそれでも核戦争を引き起こすには充分なのです。その上は移行期ゾーンで、核の冬は続いて起こるかもしれませんし、起こらないかもしれません。その上の大きな領域は、核戦争がほぼ間違いなく核の冬を引き起こす領域です。三つの曲線はそれぞれ時間を関数にしてアメリカの戦略核兵器保有量、ソ連の戦略核兵器保有量、および両者の合計を表わしています。比較的少ないイギリス、フランス、中国の戦略兵器保有量はこの表では示されていませんが、それらも核の冬をもたらすのに充分であるかもしれません。

この表から、アメリカはおよそ1950年代初期に、地球の気候破滅をもたらし得る領域に入ったことが分かり、ソ連はおよそ1960年代中期に同領域に入ったことが分かります。核の冬は1982年まで発見されなかったので、どちらの国もその行動が環境にどのような影響を及ぼすかというような概念はありませんでした。アメリカおよびソ連は両者共、核兵器の大幅削減に賛成すると言しながら、その主張とは裏腹に、お互いの戦略兵器保有量を毎年増加させています。どのような合理的な目的にせよ、これは了解したい事です。福田元首相が先にある一つの視点から述べ、また私が今、別の角度からお話ししているように、両国の核兵器保有量は、敢えて言うならば地球の文明を破壊するのに、必要な量をはるかに越えているのです。

地球規模のエコ・テクノロジーの中心となるべき課題はこの問題です。世界の人々は現在、重大な倫理的義務を負っています。核兵器保有量の曲線を逆転させることによって核兵器の数を毎年急速に削減し、たとえ核戦争が起った場合でも、少なくとも核の冬はもたらされない程の数量にしなければならないのです。核戦争の結末は非常に深刻であり危険性が非常に高いので、政府が全てをコントロールしており、つまらない質問はすべきではないと保証されても充分ではありません。この40年間、核戦争はなかったのだから核戦争は起こり得ないと言われても不充分です。アメリカ、ソ連およびその他の国々の戦略核兵器保有量が非常に少くなり、世界の指導者が陰謀を企てても核の冬をもたらし得なくなれば、それは本当に安全な状況と言えます。この状況だけが人間の文明が安全な状況であり、直面する危機にも対応できるのです。さもなければ我々は我々の命を、全核保有国の軍人ないし民間人指導者の正気と冷静さと、核兵器技術の信頼性に賭けていること

になります。我々は通信に誤りがなく、命令系統に誤解がなく、高官の精神が正常であるということに賭けている訳です。しかしそのような賭けは非常に危険なものなのです。明白にそして早急に必要なことは、これらの恐しい破壊的な核兵器の、大幅で立証の可能な二大強国の並行的な削減です。

温室効果の増大や核の冬の可能性の発見は予想されていたものではなく、ほとんど偶発的でした。核の冬は、核保有国の巨大な軍事組織が見い出したのではありません。このことは更に気になる問題を提起しています。すなわち、我々がまだ十分知らないような環境破壊が起こる可能性はないのでしょうか。人間の科学技術が地球の環境を弱体化している状況を見い出して、その解決法を探求する努力が国際的に一致協力してなされることが早急に必要です。私の知る限りでは、世界中でこの広汎な問題を体系的に研究している科学研究所は、民間であれ政府系であれ一つもありません。

5. エコ・テクノロジーと他の惑星

他の惑星を研究することによって、地球上で人間が引き起こす可能性がある環境災害について深い理解が得られます。金星の表面温度は摂氏470度もあり、膨大な炭酸ガスがもたらす温室効果の作用への警告となっています。核の冬のようなものがあり得るということの最初のヒントの一つは、1971年にアメリカのマリナー9号宇宙船が、大量の大砂嵐が火星の表面温度を相当下げているということを発見したことにありました。

火星について他にも非常に興味深いことがあります。すなわち火星の以前の気候が、地球の気候に非常に近かったことです。今日、火星の大気は希薄で温度は低く、液体状の水は存在できません。水は直ちに凍り、もし氷点以上になると直ちに蒸発してしまいます。今日の火星には液体状の水はありません。

それでも古代の火星には莫大な量の水があったという証拠があります。火星は現在、昔の河の渓谷のネットワークで覆われています。今日では火星には液体状の水はあり得ないのですが、かつては水が流れていたのです。我々地球の気候に近かった火星の気候を厳しい氷河時代の環境のように変えてしまつた何事かが火星で起こったのです。

火星は金星と同様に、当初は我々の地球とさほど

違わない天体でも、いかに厳しい環境の変化が起こり得るかという具体的な実例です。勿論、誰もかつて火星で核戦争があったとか、金星で大量の石炭が燃やされたなどとは言いません。私はそのようなことを言いたいのではありません。しかし、地球のような天体が比較的小さな混乱にもこうした脆弱性があったということは、現代の惑星研究による重要な冷静な発見なのです。地球の温室効果と核の冬の研究と、白亜紀、第三紀の大滅亡の変動は丁度同じ方向性を持っています。

この数百万年の間に、人類は非常な科学技術的進歩をなしました。ここ数千年、ここ数百年、そして特にここ数十年間の科学技術進歩のペースは急速になりました。科学技術は様々な驚異をもたらしました。大きな進歩は例えれば医薬品は、人間の恐しい苦しみをやわらげ、誰もが人道的で好ましいものであると受け留めています。しかし科学技術はまた暗い側面も兼ね備えています。抑制を受けない無分別な科学技術の進歩は、文明と人類の存続に重大な危機をもたらします。人間の科学技術の強大な力は現在全ての天体の環境、特に地球の環境を改造する機会を提供しています。ほとんど神のような力を持ちながらそれが分らないというのは途方もなく愚かなことですが、更に悪いのは、それを理解しながらその力を悪用することです。

人間が核戦争をするほど愚かではなく、また炭酸ガスその他の気体で大気を汚染し続けるほど愚かでないならば、それらに関する技術を完全に理解してコントロールし、人間の知恵が我々の小さな地球の環境を保ち、豊かにしていくこうという自然に対する偉大な挑戦をする時代を期待することができます。そうして人間や地球上の他の生命体が居住できるよう他の天体を変えてしまう「新天地形成」(Terra-forming) の実際的な手段を考えることが可能になります。これは勿論、それらの惑星に固有の生命がないことを確かめ、それらの惑星の自然環境を完全に理解した後に考えるようにしなければなりません。温室効果が暖める作用があり、核の冬に相当する微粒子が冷却作用をするということにより、現在の人間の能力から遠くかけ離れることなく、人間がもつて居住しやすいように充分火星を暖ため、金星を冷やす方法があるように思われます。金星では、約1億トンの小惑星や彗星の細かく碎かれた有機物質で、金星の強力な温室効果を止めることができるでしょう。

う。火星では、まず火星の反射性を低下させた上で、温室効果を増すために地中に埋もれて凍結し、化学的結合をしている揮発性物質を大気中に放出させることが主要な課題となるでしょう。いずれの場合も、その目的に合わせて遺伝学的技術を施した微生物および肉眼で見える植物が重要な媒介体となるでしょう。いずれ、他の更に遠い天体の新天地形成がなされ、人類は多くの天体に居住する生物種となるでしょう。しかし我々はまず最初に、この地球を救わなければなりません。

6. 終わりに

新しい人道的なエコ・テクノロジー的な倫理が必要な時代が来ました。工業諸国がそのような倫理を守ることが彼らの利益になるということを納得させる方法を、我々は見い出さなくてはなりません。科学技術は、短期的な一部の利益だけでなく、来たるべき世代と全ての国々、地球上の全ての人間を含んだ長期的な利益のため用いられなければなりません。

謝辞

“核の冬”の発表に際し、多くを学ばせていただいた私の同僚のリチャード・P・タルコ氏、O・B・ツーン氏、T・P・エッカーマン氏、ジェームス・B・ポラック氏、および絶え間ない勇気と洞察を与えてくれたアン・ドルヤン女史に感謝いたします。