

講 演

1995年9月11日 (月)・第73回談話サロン (東京・弘済会館)

講師・題目

石井吉徳:「地球環境とエネルギー」

日本工学アカデミー

THE ENGINEERING ACADEMY OF JAPAN

地球環境とエネルギー

石井吉徳

1955年 東京大学理学部物理学科(地球物理)卒業

1955~70年 帝国石油、石油開発公団 (現石油公団)、石油資源開発 (株)

1971年 東京大学工学部資源開発工学科 助教授

1978年 同

1993年 東京大学定年退官、同名誉教授 1994年 国立環境研究所副所長 現在に至る

工学博士、日本学術会議会員(14期)、日本工学アカデミー会員。日本リモートセンシング学会・物理探査学会会長及び理事、石油技術協会副会長・評議員等を歴任。

専門:物理探査工学、リモートセンシング工学、地球システム工学、現在は地球環境科学の研究を基礎に[地球学]を提唱している。

著書:リモートセンシング読本、地殻の物理工学、エネルギーと地球環境

問題。



司 会(下郷地球環境専門部会長) お待たせい たしました。今回の談話サロンは、ご案内のよう に、国立環境研究所の副所長でいらっしゃいます 石井吉徳先生をお迎えしてお話を伺うことになり ました。

私は、地球環境専門部会を担当しております、 下郷でございます、よろしくお願いいたします。

石井先生は工学アカデミーの会員でいらっしゃいますし、よくご存知の先生方も多いかと思いますが、一通り先生のご略歴をご紹介したいと思います。

先生は、昭和30年に東京大学の理学部物理学科を卒業され、地球物理の専門でありますが、卒業後は、帝国石油株式会社、あるいは石油公団、石油資源開発株式会社にいらっしゃいまして、昭和46年に東京大学の工学部資源開発工学科の助教授に就任されました。その後教授に昇格され、平成5年に定年退官、東京大学をおやめになってから、平成6年、国立環境研究所の副所長に就任されまして、現在は環境研究の指導的立場でご活躍になっておられるわけでございます。

その間、昭和63年から、第14期日本学術会議の 会員を、また、学会方面では、日本リモートセン シング工学、地球システム工学、地球環境科学と いうふうに伺っておりますけれども、今日のお話は「地球環境とエネルギー」ということでございます。

先生からは、すでに、当アカデミーの地球環境 専門部会、あるいはエネルギー専門部会、それか ら政策委員会の場面で、地球環境とエネルギーと いう問題については非常に示唆に富んだお話を伺っ ているわけでございますが、今日はその辺のとこ ろもまとめまして、ぜひお話を聞かせていただき たい、というふうに存じております。

それではよろしくお願いいたします。

石 井 今ご紹介いただきました石井でございます。もっと少人数の談話会で、気楽にお話しできると思ってまいりましたが、事務局の宣伝がちょっとオーバーだったのか、このような大勢の方々にお越しいただきました。いろんなご専門の方がいらっしゃいますので、どのような話をすればいいか、ちょっと迷っております。

私は、ご紹介いただきましたように、もともと 地球物理学が専門で、実際に石油を探査する仕事 もしてまいりました。それから地熱等の自然エネ ルギーの仕事に関係し、また、日本リモートセン シング学会という学会もつくりました。このリモー トセンシングという技術を通して地球をモニター する、環境をモニターする研究をするようになりました。理学部の地球物理の専門から、自然にこのような仕事に移ってきたと思います。

東京大学の工学部におりました時には、主としてエネルギー資源論の立場から、いろいろとエネルギー、環境について持論を展開してきました。

また、東大の教養学部の一般教養として、「地 球環境と資源エネルギー」という正規の講義を二、 三年やってまいりました。教養学部の理科一類の 学生諸君を主な対象に、毎週講義をしたわけです が、常にあるスタンスで話をしてまいりました。 それは地球の環境、エネルギー問題のような将来 の難しい問題については、答えはまだないという ことであります。われわれ大人は、現在は答えを 持っていませんが、ただ、学生諸君よりは少し長 く生きているので、いろんな見聞を少しは多く持っ ている、というような話をして、一緒に考えよう ではないかと、問いかけるような講義をしてまい りました。その過程で、つくづく今の若い人は本 気で物を考えている、と実感しました。将来の問 題について今は確かな答えがないのではないかと、 若い学生諸君は実感しているようです。そして、 我々大人達、特に理工系の教育者達は、依然とし てハウツーだけを教えようとしていると思ってい るようです。

これから世の中をどのようにもっていくかについて、実際にはハウツーなど無いわけです。今は余り物が見えていませんが、それでもいろんな考え方がある、ということを伝えることは我々にも出来る筈です。そこで、学生達に、分からないことを一緒に考えようという姿勢で講義を行いました。学生達はこの姿勢に、共感をもってくれたようです。

今日も、このような趣旨でお話をしてみようと 思っていましたが、ここでお見受けしますと、錚々 たる方ばかりで、東大の理科の学生と同じように 話をするのは、大変おそれ多いと今思っています。 しかし、いろいろの考え方がありうる、というこ とをお伝えするという意味で、少し勝手なお話を させて頂きたいと思います。

ところで、今年の環境白書をご覧になった方は 多いと思いますが、これには文明と人類の発展の 歴史が論じられており、この種の白書で初めて文明論が展開されました。これには、私も若干アドバイスをした経過があります。この白書の最初には、主として文明の発展と森の喪失のことが述べられています。

実は、今年8月、私はブラジルに行っておりました。日本とブラジルの修好100周年の国際シンポジウムで、環境問題について一時間ほど話をしてまいりました。日本とブラジルでは環境問題も異なり、また認識も違うということを強く感じました。現在ブラジルでは経済の発展に重点が置かれており、サンパウロでは川の汚染はかなりひどい状態です。またアマゾンの森林破壊の問題についても認識はもちろん違います。アマゾンは人類最後の森と言われますが、いま急速に開発が進んでいることは皆さんご承知のことと思います。しかし単に開発を止めるべき、というだけでは解決しません。古代からの環境問題に、いまだに人類は答えを持っていないという感じがしました。

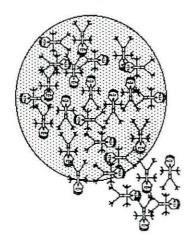
このようなことを念頭に、まず、私なりの文明 論の話をしてみたいと思います。そして現在、環 境問題が私にとってどのように見えるか。特に、 昔から関係してきたエネルギー問題をベースに、 今の環境問題、地球環境がどのように見えるかを お話ししてみたいと思います。

私は今まで、世界中のエネルギーの拠点をいろいろと見てまいりました。世界最大のエネルギー関係施設もいくつかを、紙芝居的にご紹介申し上げ、現在最も大きな命題である、いわゆるサステーナブル・デベロップメントはどのように理解すればよいか、本当に人類はデベロップしながらサステインできるのだろうか、私が前から気になっていることについて、私なりの感想を申し上げてみたいと思います。それではOHPを主体にお話をさせていただきます。

図1は、ここに書いてありますように、"Limited Earth"で、これが出発点であります。私が昔から繰り返し述べて参りました基本的な概念は、"地球が有限である"ということです。私の本来の専門は地球物理学ですが、この立場から地球を

見ますと、まず地球は有限であると見えます。こ

□ 1 Limited Our Forth



(Y.ISHII, 1984.6.27)

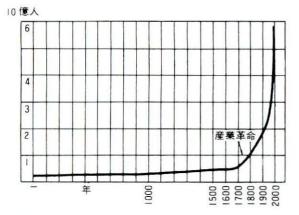


図2 人口増加の歴史

の地球から、人間がはみ出しつつある、と言いたいわけです。実はこの漫画を作りましたのは、1984年のある国際シンポジウムの時で、当時の人口はまだ44億人と言われていました。1984年から1995年までの11年の間に、人口は57億人に増えました。44億人の当時ですらいろいろな環境問題、資源、特にエネルギーの供給がこれから大変であろうと述べておりました。今、これが57億人になりましたが、解決の兆しは全く見えていないと思います。

このように未来を語るには、先ず人口の話からせざるを得ないわけであります。図2の横軸は年代でありまして、縦軸は10億人単位であります。これを見ていただきますと、非常にはっきりとした傾向があると言えます。例えば、18世紀には産業革命がありますが、その前の中世を通して、非常に長い間、人口はほとんど増えていないことが分かります。私は人口学者ではありあませんが、興味深いのは、18世紀頃から急速に人口が増えていることです。これは産業革命後の科学技術の進歩、化石燃料である石炭を使うようになったためで、このことを図は示しているのです。石炭を使う前は、当然のことながらエネルギーとして、材料として、人間は森を使っていたわけです。

人類の物質文明をたどった、著名な歴史学者で あるブローデが書いた、地中海文明の本に、図3

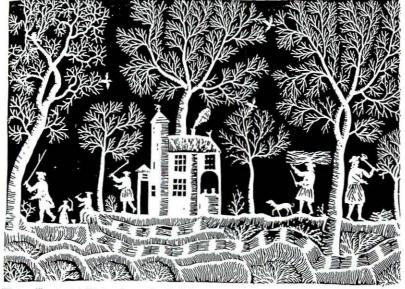


図 3 働いている木樵たち。白い切り抜き絵(紙)。たぶん,1800年ごろの低地ブルターニュ地方。Musée des Arts et Traditions populaires (民衆芸術・伝統博物館),Paris. (写真資料 A. Colin.)

[フェルナン・ブローデル:物質文明・経済・資本主義, 1989]

のような切り絵があります。これは1800年頃のフランスの低地、ブルターニュ地方の絵です。ご覧のように、たくさんの木こりが森で木を切っています。例えば、昔は鉄をつくるのに、燃料として森の木を使ったわけですが、二、三年の間切った木を貯えておき、ある程度たまったらそれを使って鉄をつくり、薪を使い果たすとしばらく休む、ということを繰り返したそうです。また、地中海周辺の木がほとんど切り尽くされた中世のある時期には、スペインでは煮炊きをする食物より、薪の方が高かったという話も残っているそうで、艦隊を一つ作ると大きな森がなくなった、という話もあるそうです。

図4 (カラー頁参照) はギリシャのポセイドンの神殿で、B.C.440年頃につくられたものです。これはもちろん石造りの神殿でありますが、この周辺の森が破壊され尽くして、現在でも復活していないのです。ギリシャ文明は森林破壊のプロセスでもあったわけです。このように人類の歴史は、森の破壊の歴史であるということが、今年の環境白書に書かれています。

これはまた別の話でありますが、よくご存知の イースター島の大きな石像です。イースター島は 小さな島ですが、昔のある時期には、7,000人ぐら いの人口があったそうです。その後、森をほとん ど切りつくして、現在ではたかだか二、三百人ぐ らいの人間が、昔に比べはるかに貧しい生活をし ているということです。これも、文明と森の関係 で、環境白書が取り上げたものであります。この ような森の破壊が、今でも続いているということ であります。

私も実際にアテネの神殿に行ったことがありますが、昔、森が欝蒼と茂っていたアテネ周辺の山々は今でも裸です。古代に破壊された森は、現在でも回復されていないということになります。このように、森は古代から人類の文明を支えてきたわけですが、地中海周辺ではこれがまだ回復せず、ほとんど破壊されたままと言えます。

最近の『ジャパン・タイムズ』によりますと、 日本の考古学者がリーダーシップをとって、イー スター島のモアイ石像を立て直したそうですが、 石像は戻っても、森は戻っていません。自然は一 旦壊されると、もとに戻すのは大変なのです。

これまでの話は、世界の森と人口増加の話でしたが、もう一つ、人口について重要なことは南北問題です。図5の上の方が先進工業国、要するに発展したところ、下が発展途上国で、それぞれの人口の構成分布であります。横が人数でありまして、右が女性、左が男性、先進工業国では人口分布が寸胴型であるのに対して、発展途上国等では富士山型をしています。この図から分かりますように、当然のことながら将来、人口は圧倒的に発展途上国で増えることが分かります。その上、資源、エネルギーは、主として発展途上国にあります。これが南北問題の原点でありまして、これから資源・エネルギー問題、あるいは環境問題に非常に大きな影響を与えるようになると思われます。

このような発展途上国の環境問題を、実際の例で見てみましょう。私は、先ほどご紹介いただきましたように、リモートセンシングの研究にも携わっております。例えば、インドネシアのスマトラなどでは、人工衛星から、森が大規模に燃えている様子がはっきり分かります。

また図6ですが、これをご覧になった方はほとんどいらっしゃらないと思いますが、ブラジルの例です。これは日本のJERS-1という人工衛星から撮ったものです。私は以前、この衛星の基本仕様の作成に関係しましたが、これには合成開口レーダー、つまりSARが搭載されています。これはユニークなマイクロ波センサーでありまして、地上分解度がほぼ18メートルのレーダーです。マイクロ波ですから雲を突き抜けるわけです。場所はブラジルのアマゾン、ロンドニア地方です。東西ほぼ1,000キロ、南北900キロをカバーする、99シーンで作ったモザイク映像です。

一般に、熱帯雨林には厚い雲が拡がっていますから、太陽光を観測するランドサット等々では、何年分もの映像から雲のないものを選んで、モザイク状に重ね合わせなければなりません。これに対して、SARでは非常に短い期間に、広い範囲をカバーすることができます。これをご覧いただきますと、このロンドニアでは独特なパターンが見られます。細い線、ちょうど魚の背骨のような、

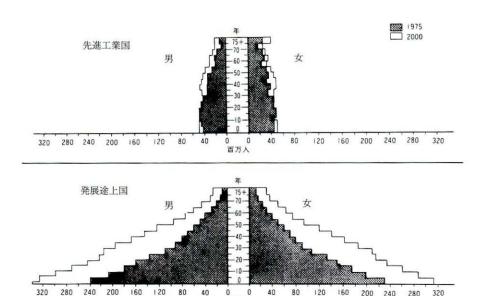


図 5 人口の年齢構成

JERS-1/SAR MOSAIC



図 6 Rainy Season(10~4)('93~'94) RONDONIA/Brazil

フィッシュ・ボーン・パターンが観測されます。 これは道路を作り、森を伐採したところです。

これを大きくしますと、図7(カラー頁参照)のようになります。これも同じロンドニア、アマゾンの南の方の映像です。この例は米国NASAのランドサット衛星による映像で、1975年から1986年への変化で、11年後にはご覧のように、川沿いの道路を中心に木がどんどん切られています。これがちょうど魚の骨のように見えるので、フィッシュ・ボーン・パターンと言っているわけです。1992年になりますと、状況はもっと悪くなってい

ます。

このアマゾンの森は世界最大の熱帯雨林で、世界の酸素の3分の1を供給していると言われています。このようにアマゾンは、地球の人類の非常に貴重な最後の財産なわけですが、ブラジルの人々にとってアマゾンは、自分達の森だからこれを使うのは自分達の権利であると主張します。立場によって論理が違ってきます。ご存知のとおり、ブラジルは今1,200億ドルの対外借款を持っていますが、それとアマゾンの環境保護の話がリンクしてくるようです。

これは一つの国の森の話ですが、生態系にとっては非常に大きな、地球規模の問題なのです。このように大規模なスケールの環境問題は、今では一国だけの問題に留まらなくなっているわけです。最近の地球環境問題というのは、こうした側面があるもので、特に強く南北問題と関係しているわけです。

図8 (カラー頁参照) は、アマゾンの森を切り 開いた場所の人工衛星映像を、もっと拡大した例 で、赤いところはリモートセンシングの色の付け 方で、健全な植物があるところです。白く抜けた ところは、植生がなくなった所、要するに切って しまった所です。今、こういう所がどんどん増え ていますが、図の下の規則正しいところは、まだ 政府機関が組織的に開発している所だそうですが、 不定形のところは勝手に開拓している所のようです。

このようにアマゾンの森の破壊には、いろいろな理由がありますが、本質的な原因は人口が増えるからで、人間と一緒に動物も移動してくるわけです。例えば、アマゾンの森を開拓して、大きな農場を作って牛を飼い、牛肉として今アメリカに輸出しているそうで、これはアマゾンの森がアメリカの安いハンバーグになっている、ということになります。

いずれにしても、そのような環境問題は人口が増え、生きていくために必然的に起こるものと言えます。増える人間が、森も含めた資源、エネルギーを大量に使い、この結果、当然のことですが、環境が悪化するのです。この人口、資源・エネルギー、環境の三つは分けて論ずることは出来ません。環境問題だけ、或いは資源問題だけを取り上げてもどうにもなりません。このむしろ当然なことを、私は大学におりました頃から繰り返し主張してまいりました。

また、資源についての理解にもいろいろな問題があり、一般に資源の意味が十分理解されているとは言えないようです。ここで先ず強調しておきたいことは、「資源とは、十分に濃縮されており、十分な量があり、しかも経済的に取り出せる場所にあるもの」ということです。この最低三つの条件を満たしていないものを、私は資源と思っておりません。

例えば、宇宙資源という言葉がありますが、これはSF的で、とても経済的な場所にあるとは思えません。また太陽エネルギーも、このままでは濃縮されていませんから、光を集めるのに工夫が要ります。また、海水そのものについても、例えば金など、あらゆるものが溶けているから、海は膨大な資源であるというような話があります。しかし、これも間違っていると思います。このように、資源としての最低限の条件を満たしているものが資源であるということです。このような、基本的な観点から我々は問題を見て行く必要があると思います。

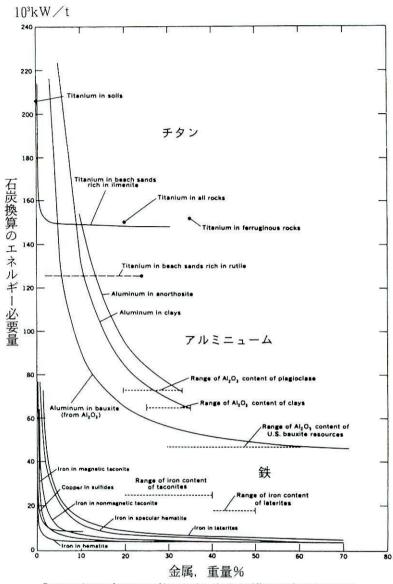
それでは、きょうの主題であるエネルギーです が、これについても、化石燃料、原子力、一次エ

ネルギー、二次エネルギー、水素エネルギーなど、 いろいろな言葉が飛び交います。しかし、エネル ギー問題を根元的に考えれば、第一に [一次エネ ルギー〕をどのように供給するかが大切です。し かも、環境を破壊しないで供給しなければならな いのです。今までのエネルギー問題とは、基本的 に"安定供給とコスト"で、この二つがエネルギー についての最重要な命題であったわけです。とこ ろが、地球温暖化問題が注目され始めて、エネル ギー問題にもう一つ新しい、しかも非常に難しい 問題が加わったことになります。それでなくても エネルギー問題は簡単ではありませんでしたが、 人類は従来とは違った、はるかに難しい地球温暖 化問題を抱えることになったわけです。しかも、 エネルギーは文明にとって不可欠です。今日もこ のエネルギーの重要さを繰り返しておりますが、 ここで趣を変え、少しやわらかい話をさせていた だくことにします。

図9 (カラー頁参照) は、エネルギーさえあれば、何でも出来るということを物語っている写真です。これは砂漠のなかに作られたゴルフ場で、中近東のアブダビから車で二、三時間東に行ったところ、ドバイ近くにあるゴルフ場で、全部本当の芝生で出来ています。砂漠の中に本格的な芝生のゴルフ場があるのです。海水から作った蒸留水で芝生を育てている、素晴らしいゴルフ場で、ここで私もゴルフをやって見ましたが、何となく罪の意識のせいか、良いスコアが出ませんでした。それからここには、おそらく海水を引いたものだと思いますが、ちゃんと池もありまして、ゴルフ場に必要なものは全て、日本並の立派なクラブハウスまでありました。

このように、水があれば、その水をエネルギーで作れば、砂漠の真ん中にさえ緑豊かなグリーンができるのです。当然のことながら、同じようにエネルギーがふんだんにあれば、砂漠で農業も可能になります。

このアブダビは、日本が最も多くの石油を輸入 している国です。アブダビの海岸には、ハワイの ホノルル海岸のように高い高層ビルが並び、本当 に緑豊かな美しい街です。水を作るには、油田か らの天然ガスが使われています。このアブダビの



Energy requirements for recovery of iron, titanium, aluminum, different grades, various sources. (U.S. Geological Survey Journal of Research, Jan. -Feb. 1975)

図10 鉱石の品位と必要エネルギー

海岸には国営石油公社のビルがあり、その最上階には総裁の部屋があります。私は1993年、ここを表敬訪問のつもりで訪ねましたが、環境問題と石油について総裁と1時間ぐらい話込んでしまった経験があります。総裁の話から、中東諸国にとって地球環境問題は、日本と違った意味で極めて重要であることが分かりました。環境科学者は科学的に、冷静に産油国と接する必要があると思います。

このような砂漠の産油国に来ますと、エネルギー がすべての原点であるということがよく分かりま す。隣のサウジアラビアでも、実際に天然ガスで 作った水を使ってハウス農業も行っています。

次に図10を見て下さい。これは鉱石から金属を取り出すのに、どれぐらいエネルギーが要るかを述べたものです。横軸はメタル・コンテントの重量%です。縦軸が石炭換算で、単位の金属を得るのにどのくらいエネルギーが要るかを示しています。鉱石品位が低いと、エネルギーがよけいに要るということです。これにはチタン、アルミニウム、鉄が書かれています。非常に品位が悪く、メタル・コンテントのパーセントがゼロに近いと、

表1 非再生的エネルギー資源

石			油	9634
天	然	ガ	ス	8663
固	体	燃	料	120854
油	母	頁	岩	20130
夕 ·	ール	サン	٢	-
ウ	3	ź	ン	1960
合			計	161241

(Qd Btu)

(1) 消費の伸び0%の場合:

資源の寿命=161250/250=645年

(2) 2 %の場合: 133年 (3) 5 %の場合: 70年

無限のエネルギーが要ることになります。これを 逆に言いますと、エネルギーさえふんだんにあれ ば、資源問題はないということにもなります。

このように、エネルギーと有用な資源は強く関連しており、よく海は無限の資源あり、ウラン、金など、何でもあるという人がいますが、これはエネルギーの面から間違っていると思います。

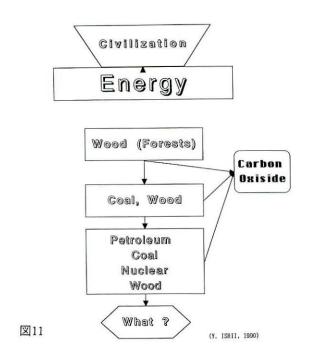
表1は、1980年頃にアメリカの政府機関から出 された報告書、『西暦2000年の地球』からの抜粋。 です。当時カーター大統領が、資源、エネルギー、 人口の問題について調査、分析させたものです。 3部作の10センチ程もある、非常に分厚い労作が、 当時、ワシントンでは17ドルで買えました。Recoverable World Nonrenewable Energy の表がこれ で、Nonrenewableというのは、非再生的という 意味です。エネルギーは10の15乗 Btu (ブリティッ シュ・サーマル・ユニット)単位で、地球にエネ ルギー資源がどのくらいあるかを比較をしたもの です。これは1980年頃の数字で少し古いものです が、この基本的な意味は現在も全く変わっており ません。例えば、通産省等々でお出しになってい る資料も基本的に同じものです。それぞれのエネ ルギー源について、大小を比較して下さるようお 願いします。

特に、ここでご理解いただきたいのは、エネルギーの量そのものよりは、エネルギーの消費量の伸びと寿命の関係です。例えば、消費量の伸びがゼロ%では、全てのエネルギーの寿命は、現在の消費量で単純な割算をすればよいわけで、表にあ

りますように、645年ということになります。ところが、2%の年率で使用が増えたときに、寿命は133年になってしまいます。このように、エネルギーの消費量が増えるかどうかが、エネルギーの寿命を決めます。

それでは5%ではどうなるでしょうか。この5% という数字は決して特別ではなく、最近の日本の エネルギー消費の伸びは4~5%ですし、発展途 上国、特に東南アジア等では10%ぐらいです。こ の5%で消費が伸びて行きますと、原子力も含め、 全ての地球エネルギーを使い切るのに70年しかか からない、ということになります。ここで数字が 70あるいは80年などと、細かいことを言っても切 りがありませんし、また本質的な意味はありませ ん。また、例えば石油がもっとある筈といっても、 余り本質的ではありません。基本的には、エネル ギーの消費量が右肩上がりで増えることが問題な のです。我々は経済成長率を%で考えることに慣 れていますが、実はこの幾何級数的な増加、複利 計算的な増加、際限の無さが問題なのです。これ から得られる教訓とは、基本的にエネルギーの消 費をいつまでも増やしてはいけない、ということ です。これが地球を守ることに通じます。

ところで、現在は石油、天然ガス、石炭などの 化石燃料がエネルギーを支えています。この石油、 天然ガスは、油ガス田から採ります。これを油田 の規模で考えますと、圧倒的に巨大油田の貢献が 大きいことが分かります。超巨大油田というのは、 例えば50億バーレル以上を指しますが、油田の数 の上では、全体の0.1%ぐらいにすぎません。しか し、埋蔵量は3分の1以上という高い数字になり ます。このように、巨大油田が世界の原油供給を 支えていると言っても過言ではありません。次の 10から50億バーレルぐらいでも、全体の0.3%にし かならないのです。通常巨大油田とは、5~50億 バーレルぐらいを言いますが、日本はこれ一つを 毎年消費している勘定になります。この大きさの 油田でも、0.4%ぐらいの数しかないのです。あと は5億バーレル程度以下の小さい油田で、全体の 99%以上です。このように石油の埋蔵量は、超巨 大油田、巨大油田など、大きなもので賄われてい ます。



よく世の中で、これからも油田がどんどん見つかるのではないか、と言う人がおります。昔から石油の寿命は30年と言っており、今でも30年と言っているではないか、このように考えると、これからいくらでも油田は見つかるのではないか、という意見すらあります。しかし、現実には近年巨大油田はなかなか見つかっておりませんし、第二の中近東も発見されておりません。エネルギー供給の未来は、それほどバラ色と言うわけではありません。今、未来のエネルギー供給について、いろいろなシナリオがありますが、現実には、かなり長い間、石油、天然ガス、原子力、それから一番多い石炭でエネルギーを賄うことになるのでしょう。

先ほど、南北問題について話しましたが、一番の関心事は環境問題とエネルギー供給の関連で、特に中国とインド、並びに東南アジアが気になります。ご存知のとおり、中国が石油の純輸入国になったのは去年のことでした。12億人の国民が大勢車に乗るようになり、生活水準を上げたとすると、今後世界の石油供給は大変になるかも知れません。その上、中国は穀物を輸入しなければならない状況になっているそうです。

以上の話をまとめますと、先ず、文明が消費するエネルギーは、古代から中世までは森が支えて、

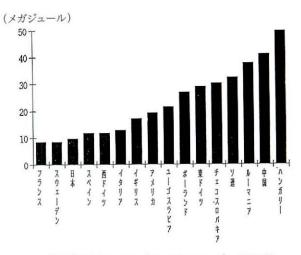


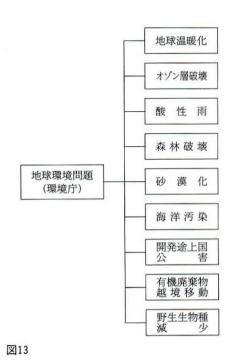
図12 国民総生産 1ドル当りのエネルギー使用量 (Lester R. Brown ed.(1987): STATE OF THE WORLD)

次いで森と石炭が支ました。そして現在ですが、 石油、石炭、原子力に加えて、今でも森がエネル ギー源として相当量使われているのです(図11)。

この流れに、新しく地球温暖化、二酸化炭素排出の問題が加わっています。これが非常に問題を難しくしています。将来のエネルギーとして何を使えば良いか明確な答えは現在ありません。もちろん、いろいろな考え方があり、楽観論と悲観論などが交錯しています。

環境論で有名なレスター・ブラウンは、彼の毎年の出版物、 [State of the World] レポートの中で、エネルギーの供給は、将来こうあるべきだと主張をしております。それは、2030年のエネルギーについて、米国中部、中東など太陽が強いところでは直接の太陽エネルギー利用を、東南アジアなど熱帯雨林地帯では農業廃棄物を使い、また太陽光も強いからこれも使うべきで、北ヨーロッパは風が強く、湖沼、河川が多いから、風と水力を使えば良いと主張しています。そして日本、フィリピンは火山国であるから、地熱エネルギーをと言っています。これがどの程度正当かについて、私はコメントをいたしません。皆様がよくお分かりのことと思います。

それでは実際に何ができるかですが、短、中期 的に我々に出来ることは限られています。図12は、 国民生産1ドル当たりのエネルギー使用量で、ど の国がエネルギー効率がよくどこが悪いかがすぐ 分かります。日本はエネルギー利用の面では優等 生で、ハンガリー、中国、旧ソ連などは非常に悪 く、こうした国が日本並みにエネルギーの使用効 率を上げれば、相当にエネルギーが節約出来るは ずです。



このように、省エネルギーはエネルギー政策の 根幹で、短、中期的には徹底した省エネルギー、 省資源が大切です。

図13は地球環境問題の一覧です。特に地球温暖化、オゾン層破壊、酸性雨等が今話題になっています。このような問題は、バラバラに考えていてはなかなか解決できません。プライオリティーも考えて、"人間が生きる"という前提で論理を整理をしていく必要があると私は思っています。例えば地球環境問題を、現在の現実的な問題と21世紀の可能性の問題に分け、論理的にどのように解決していくべきかです。これは国民、政府機関を含め我々全てのテーマだろうと思います。これについては、これ以上詳しく述べる時間がございませんので、この中から地球温暖化について、私見を交え、少し考えてみることにいたします。多くの方がもうよくご存じと思いますので、詳しいことは申し上げません。

図14の一番上は、二酸化炭素が増えるパターンです。一番下はメタン、中間はフロンです。これらが大気中の温暖化ガスと言われています。従って、何とかしなければならないということになります。いずれも重要な環境問題ですが、これを減

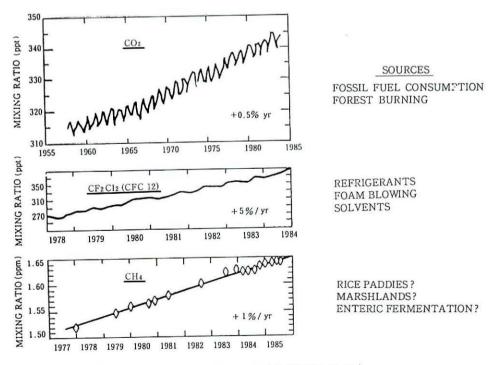


図14 大気中のトレースガスの変化(NASAによる)

らすのは実際にはとても難しいことです。

しかし、この地球温暖化にしてもいろいろな意見があり、CO₂が2倍になると地球の気温が2度、あるいは3度上がるなど、様々な数字が出されております。また、海水面がどのぐらい上昇するかが、もう一つの問題です。一頃は2、3メートル上がる、あるいは、5メートルも上がるという人もおりましたが、いつの間にか60センチ程度という数字になり、最近のIPCCの中間報告では、50センチ以下という数字も出ているようです。

ところが、そのような地球物理学的予測がどの程度正しいかは、実際のところ良くは分かっておりません。そこで、予測値にどの程度の不確実性があるかが話題になります。例えば図15では、過去100年間で大体0.6度ぐらい上がっていると言えるでしょうが、細かくは、いろいろな見方があります。100年間に気温は一旦上がって、また下がっており、そして今再び上がっています。

このパターンを地球物理学的に、どう説明するかが問題であります。一番上がったのは1940年頃で、これは太平洋戦争の終了前です。この当時、地球は温暖化するという議論があったと聞いています。しかしその後、気温は下がりました。そこで地球は寒冷化するという議論が起こりました。現在は地球は再び温暖化しているのです。このよ

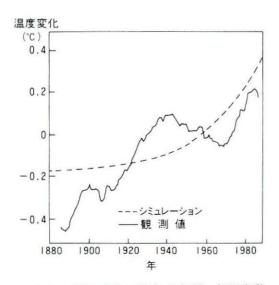


図15 観測時代の過去100年間の気温変動 (G.C. Marshall Institute: Scientific Perspectives on the Greenhouse Problem, 1989)

うに、過去のデータを我々は持っているわけです から、これがどうして起こったかを説明する必要 があると思います。

今から100年後の、未来予測のことはマスコミ等 で皆さんよくご存知と思いますので、もう少し過 去の話をしてみたいと思います。地球は我々に過 去の歴史として、さまざまな事を教えてくれてい ます。地球はいろいろの実験をしてくれているの です。それを非常に大ざっぱに振り返ってみます。 今から46億年前の生命のない、地球創生期には大 気中の二酸化炭素は98%で、大気はほとんどこの 気体で占められていたと考えられています。ご存 知のとおり、今の金星には生命がなく、二酸化炭 素は98%で、大気はほとんど二酸化炭素で出来て います。また火星でも95%程度です。このような 生命がない惑星では、大気の主な成分は二酸化炭 素です。それでは、生命がなかった太古の地球あ るいは生命のない惑星と、現在の地球では何が基 本的に違うかといいますと、それは現在の地球大 気には二酸化炭素が少なく、遊離酸素が非常に多 いということです。

これは何故かと言いますと、一口には、植物が 二酸化炭素を使って酸素を出しているからです。 これが現在の地球大気の異常なところです。大気 中に、大量の反応しやすい遊離酸素があるという ことは、極めて異常なことなのです。これは [地 球に生命がある] ためです。

図16(14頁)は過去70万年ぐらいの、地球の気温変化であります。このように 5 度ぐらいの振幅で、10万年ぐらいの周期で大きく揺れております。これには地球の自転、公転などの天文学的な理由を考える、ミランコビッチ説がありますが、今のところこの規模の変化に最も説得力があるようです。この一周期を大きくすると、左上のようになります。ほぼ16万年前から現在まで、気温の変化、 CO_2 の変化に良い相関があります。これにもいろいろの議論があります。典型的なものは、気温が上がったから CO_2 が増えたのか、 CO_2 が増えたから気温が変化したのか、今以て分からないとする、いわゆる "鶏と卵論"ですが、現在の主流の考え方は、 CO_2 によって気温が変わったというものです。これをもっと細かく、1,000年ぐらいで見ますと、

図 4



ギリシャ=スニオン岬 ポセイドン神殿 B.C.440年頃 大理石 床面 13.47×31.12 m ドーリア式 現存する神 殿は B.C. 5世紀後半に再建されたもの 周囲は一部の灌 木を除き、ほとんど禿山の状態である。



イースター島の現況 (1992年)









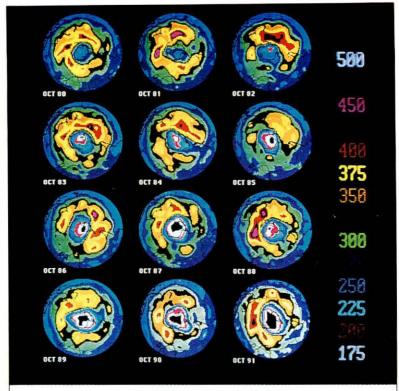
図7 Humid Tropical Forest Project Rondonia, Brazil



図 9

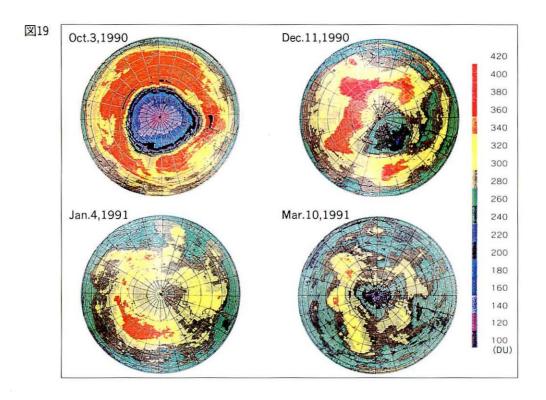


図18



OZONE DEPLETION

THE ANTARTIC OZONE HOLE IS A POLLUTION STIMULATED ANNUAL PHENOMENON THAT ATTAINS ITS MAXIMUM INTENSITY IN MID-OCTOBER. DATA FROM NOAA'S POLAR ORBITING TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) IS USED TO DISPLAY THE RAPID DECLINE IN PROTECTIVE STRATOSPHERIC OZONE OVER ANTARCTICA DURING THE PAST DOZEN YEARS. THE GROWING BLACK SPOT REPRESENTS THE LOWEST TOTAL OZONE VALUES.



右上のようになります。変化の振幅は1.5度ぐらいありますが、1,600年頃、中世に小氷期、リトル・アイス・エイジといわれる時がありました。この頃地球は寒く、飢饉が繰り返し起こりました。そして現在地球はこのように再び暖かくなっているのです。

それでは、もっと昔に遡ります。図17はカンブ

リア紀、大体、数億年前から現在まで、どのよう に地球の気温が変動し、海水面がどのように変動 したかを研究した結果であります。主な点を申し 上げますと、図の上に海水準のフラクチュエーショ ン、変動が書かれており、その上にはグリーンハ ウス、アイスハウスと気候変動が書かれています。 当然のことながらグリーンハウスの時に海水面が

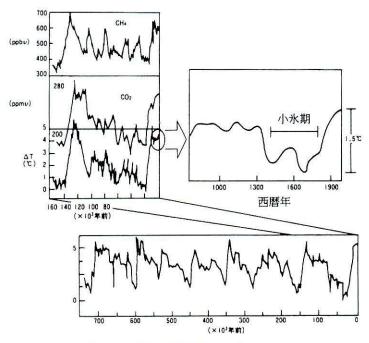


図16 過去70万年間の気候変化

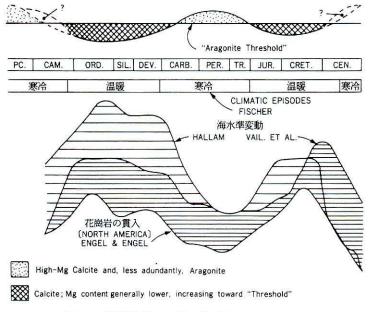


図17 地質時代の気候と海水準の変動

上がり、アイスハウスの時に下がっています。

これについては面白い事実があります。この最初のグリーンハウスの時、現在我々が使っている石炭が作られているようです。当時、植物が大量に繁茂したのです。それからもう一つ、白亜紀の2億年から7,000万年前くらいの時のグリーンハウス時代に、二酸化炭素量が増えたことが分かっていますが、その頃中近東の石油が大量に生産されたと考えられます。大気中の二酸化炭素の量が非常に増え、地球が温暖化したこの時期には、両極と赤道下の気温の差が少なくなりましたから、冷たい水がもぐり込む深層流が減退していたようで、海が攪拌されにくかったようです。このため、当時海に沈澱した大量の生物が、酸化されにくかったと言われています。そして石油になったのです。このように、地球の過去の歴史に見る限りにお

表 2 地質時代の二酸化炭素の容積濃度の変化

(ブディコらによる, 1985)

時 代	時代の長さ (100万年)	二酸化炭素(%)
前期カンプリア紀	570-545=25	0.064
中期カンブリア紀	545 - 520 = 25	0.087
後期カンブリア紀	520 - 490 = 30	0.057
前期オルドビス紀	490 - 475 = 15	0.175
中期オルドビス紀	475 - 450 = 25	0.129
後期オルドビス紀	450 - 435 = 15	0.127
前期シルル紀	435 - 415 = 20	0.087
後期シルル紀	415 - 402 = 13	0.086
前期デボン紀	402 - 378 = 24	0.087
中期デボン紀	378 - 362 = 16	0.123
後期デボン紀	362 - 346 = 16	0.180
前期石炭紀	346 - 322 = 24	0.299
中・後期石炭紀	322 - 282 = 40	0.122
前期二畳紀	282 - 257 = 25	0.247
後期二畳紀	257 - 236 = 21	0.088
前期三畳紀	236 - 221 = 15	0.090
中期三畳紀	221 - 211 = 10	0.166
後期 三畳 紀	211 - 186 = 25	0.112
前期ジュラ紀	186 - 168 = 18	0.120
中期ジュラ紀	168 - 153 = 15	0.158
後期ジュラ紀	153 - 133 = 20	0.231
前 期 白 亜 紀	133 - 101 = 32	0.148
後期白亜紀	101 - 67 = 34	0.178
暁 新 世	67 - 58 = 9	0.076
始 新 世	58 - 37 = 21	0.120
漸 新 世	37 - 25 = 12	0.032
中 新 世	25 - 9 = 16	0.076
鮮 新 世	9-2=7	0.045
現代		0.034

いては、二酸化炭素の量が多く、そして気温が上 昇した時、地球上では植物、生物の生産量が多く なったようです。このようなことと現在の地球温 暖化、気候予測をどのように整合し、論理を展開 すればいいか、地球の学問上、見過ごすことの出 来ないことと思います。

表 2 は、地球大気の二酸化炭素量を研究した例です。カンブリア紀、5.7億年から5.4億年には、二酸化炭素の濃度は640ppmであったと言っています。そして、石炭紀の頃には2,990ppmで今の340ppmより一桁も多かったというのです。先ほども申し上げましたように、この当時の樹木が石炭になったわけです。それからジュラ、白亜紀ですが、中近東の石油の源となった生物の生産が盛んなこの時期には、石炭紀と同じように1,700ppmあるいは2,300ppmと今より一桁も大気の二酸化炭素が多かったようです。

このような事実は、二酸化炭素の多い時には、 植物、生物の生産量が多かったということを物語っ ています。これは近年の地球が温暖化すると植物 の成育が影響を受け、地球は砂漠化するという話 と矛盾します。地球温暖化、気候予測理論の不確 定性を、出来るだけ少なくする研究が必要です。

このような気候の歴史、地球の歴史は、我々に 地球の未来をどのように考えればいいか教えてく れます。いろいろの事実を自分の目で見、自分の 頭で考える必要があると言うべきでしょう。

もう一つの地球環境問題はオゾンホールです。 図18(カラー頁参照)はアメリカのNOAAによるオゾンホールの観測です。1980年から91年まで、南極上のオゾン層に穴があいているという、有名な、一連のリモートセンシング画像です。今、これが少しずつ拡がっているというのが、おそらく大方がご存知のオゾン問題だと思います。ところが、このオゾン層の穴は南極の春にはなくなるようです。つまり、オゾンホールは地球本来の自然現象として、季節変化をしているのです。これは余り知られていません。

図19(カラー頁参照) はそのような画像を並べたもので、左上が10月のオゾン層の穴、それから12月、1月と、オゾンホールは消滅していきます。右下は3月です。3月にはホールはなくなってい

ます。この季節変化のメカニズムは基本的には単純でして、オゾンという気体は本来不安定なものですから、南極の冬、太陽が出なくなれば次第に減って行きます。そして南極に春が来て、夏になると太陽の光によってオゾンがつくられ増えてゆきます。

今話題のオゾンホールによる環境問題とは、オゾン層の減少で地表に到達する紫外線が増え、これが人間、生態系に害を与えるというものです。それでは紫外線がどのくらい増えるのかということになりますが、例えば、10%ぐらいと考えられています。ところが、元々地球上の紫外線の量は同じではありません。例えば、北欧と赤道直下とでは数百%も変わっているのです。もちろん赤道下で強いわけです。それから、山など高いところに行きますと、紫外線は増えます。このような地球本来の自然の変化と、フロンの影響で10%紫外線が増加するということを、環境問題としてどう位置づけるかが問題です。これから論理をきちんと整理する必要があると思います。

しかし、誤解のないように申し上げますが、これで私はフロンが無害である、あるいはフロンがオゾンを破壊しない、などと言っているのではありません。フロンがオゾンを壊すことははっきりしており、例えば、国立環境研究所にある大きな光化学反応チェンバーで実際に観測できます。チェンバーにオゾンを入れておいて、フロンを入れますとオゾンが急速に減るようです。これは科学的事実です。

同じように、大気中の二酸化炭素が赤外線をトラップして、温度を上昇させることも実験的な事実です。環境問題として大切なのは、このような現象と人間、社会との関係で、実社会にどのように影響するかです。これを我々は研究しているのです。そして、人間生活と自然環境の調和をどう考え、どのような対策を取るかです。

図20は、新しい環境基本法の重要な概念です。 これは1993年にできたものですが、従来の公害対 策基本法に比べて、概念的に理解しやすい、優れ た基本法であると言えます。従来型の公害問題は 今でもありますが、地球規模の新しい問題に取組 み、[持続的発展] が可能な社会を構築しようとい

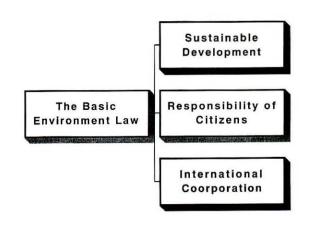


図20

うものです。このためには [国際協調] も不可欠です。もう一つの重要な概念は [国民の責務] で、この三つが、新しい環境基本法の最も重要なポイントであると思います。

英語の"Sustainable Development"とは、1992年のブラジルサミット以来の命題で、環境を守りつつ、人類が如何に持続可能な発展をするかです。どうすればそれが可能かということが、これからの本当の問題です。しかも、このような地球環境問題は、一国では解決出来ることではないので、国際協調が特に求められます。

今年8月、ブラジルで国際的なシンポジウムがあり、この図を見せましたら、私の話が終わったあとで、サンパウロ大学の人が [Responsibility of Citizens] が非常に印象的であると言ってくれました。そして、どのように社会に教えているのかと質問されました。私は繰り返し社会に述べるしかないと答えました。

これからの環境問題は、従来までの公害問題と 違い、我々自身、国民全体に責任がある問題で、 もう加害者と被害者の区別はなくなっており、問 題は地球規模で大きくなっているということです。

それでは時間も迫ってまいりましたので、いろいろな写真をお見せすることにします。これは中近東のアラビア石油の海上プラットフォームです(写真省略)。日産30万バーレルを30年間生産し続けて、なお減退しないということです。それくらい、中近東の油田は信じられないぐらい大きいのです。ところが、この我々が頼りにしている中

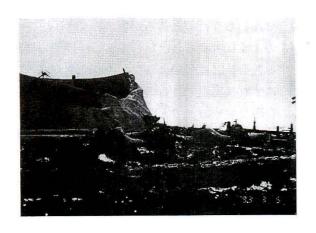


図21

近東でありますが、政治的に非常に不安定であります。それは中東が世界のエネルギーの拠点だからでしょう。

図21はヘリコプターから、中近東のサウジとクウェートの間にある、アラビア石油の地上タンクがイラクのロケット弾で炎上した跡を撮ったものです。当時、何百発というロケット弾が基地に打ち込まれたそうです。巨大な中東の油田地帯は、非常に国際紛争の起きやすい不安定なところです。現在、人類はこのようなところのエネルギーに依存しています。

私は今迄、世界最大といわれるエネルギー拠点、 資源地帯をかなり見てまいりました。例えば、現 在の世界最大の水力発電所は、ブラジルとパラグァ イの国境にありますが、これは(写真省略)万里 の長城のように大きなダムで1,260万キロワットの 発電能力を持っています。このダムが今世界最大 で、エジプトのアスワン・ハイ・ダムがこの次で すが、中国が建設中の三峡ダムが出来れば、それ が最大となるはずです。しかし近年、このような 巨大プロジェクトは環境問題との関係で難しくなっ ております。

また、日本の動燃事業団の「もんじゅ」の中も見たことがあります。これはプルトニウム利用の高速増殖炉です。勿論建設中の時です。エネルギー問題、原子力問題を資源論から見ますと、ウランの有効利用のための高速増殖炉、プルトニウム利用に触れないわけに行かないからです。この[もんじゅ]もやはり百聞は一見にしかずで、その後

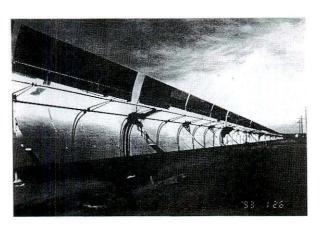


図22

エネルギーと環境問題を考えるため、非常に参考 になりました。

また、石油産出国のベネズエラの南部を流れるオリノコ河周辺に拡がる、重質油地帯にも行ったことがあります。地下1,000メートルぐらいの重質油層から、約400メートル間隔に作られた巨大なポンピング・ステーションで生産していますが、飛行機から遥か地平線まで、点々と規則正しくステーションが展開しているのが見えました。採集した粘性の高い、真黒な粘土のような重質油に水を30%混ぜて、エマルジョン状にして出荷していました。これは中近東の石油の8割もあるということです。ただこれは重質油ですから、炭素の多いエネルギー源であります。

図22はアメリカのカリフォルニアのモハベ砂漠にある、世界最大の太陽発電所です。全部で30万キロワットで、一つのユニットが5万キロワット、半円筒系のパラボラ鏡面で太陽光を焦点に合わせて、循環する熱交換用の流体を熱します。これには太陽を追いかける追尾装置もついています。この太陽発電所には、天然ガスを使う火力発電施設、出力25%も作られています。これは出力を安定化させるためだそうです。これが現在世界最大の商用太陽発電所ですが、残念ながらコストが高く企業としては成り立ち難いようです。

また、このモハベ砂漠は世界最大の風力発電地帯でもあります。カリフォルニア全体では一万数千個の風車があるとのことで、出力は全体で百何十万キロワットもあるそうですが、風が無いと風



図23

車は止まります。図23の写真で、風車の大きなものは柱が30メートル、風車の半径が28メートルもあります。これが1分間に45回転ぐらいで回ります。この時の低音の風切り音と、発電用の高速回転から出る高音とが混って、当たり一面、異様な音がしています。

このような風車は再生的な自然エネルギーですから、これからどんどん増えることが望まれますが、風車の間欠性、騒音が問題でしょう。しかし、これを受け入れなければ、風力エネルギーの利用は成り立ちません。モハベ砂漠の例で分かりますが、風車は条件の良いところに集中的に建設する必要があります。これもかなり煩わしい風景で、社会がどう受けとるか気になるところです。究極的には人類は、いずれはこのような自然エネルギーに頼らざるを得ませんが、国民に自然エネルギーの実態、本当の姿を知ってもらう必要があると思います。

今は人類の未来は見えていません。図23の私は、 風車の前で迷っているドンキホーテのようなもの です。

最後に今までの話をまとめますと、古代から人間は森を破壊しながら成長してきました。周りの森がなくなりますと、新しい森を求めて移住して行ったのです。例えば、アメリカへ、ニューフロンティアへ先住民を追い立てながらヨーロッパ人は進出し、アメリカの森をどんどん消費していったのです。人間にとってのニューフロンティアとは、結局のところ、森のある広い場所であったということになります。

しかし、人類にはこのような新天地は残されていません。もう行くところが無いのです。

このように考えると、いわゆる [持続型の発展をする社会] とはどのようなものか、また、どのようにすれば実現できるのか今は全く分かりません。有限な地球の上で人間だけが無限に増え、右肩上がりの経済成長をし、生活水準は上げながら永久に発展しようとするのは不可能なことなのです。

今の世界の現状を見ますと、発展途上国では石油の消費量が増えています。中国はすでに石油輸入国になりましたし、インドネシアも近くそうなると見る人がいます。アジアのエネルギー需給が今後どうなるのか、大きな問題です。

今から、人類がエネルギー供給の面で袋小路に入るのを避けるにはどうすれば良いか、真剣に考える必要があるでしょう。我々人間は、"何かを思い切って変えない限り"生存は出来ないのではないかと私は考えています。しかし、このようなことに答えられる総合的な学問はありません。勿論、"部分の学問"はいろいろありますが、それでは全体が見えません。これからは微分型よりも[積分型の学問]が大切になるのでしょう。私の年来の主張は「地球学」です。

以上、環境研究に携わっていながら、答えらしいものを申し上げられないのは残念ですが、今は誰も答えを持っていないのだと思います。それだけに、これからは人類の抱えている[問題の本質]をできるだけ正しく理解することが、先決であると思います。そして人類にはどのような選択肢がありうるかを良く考える必要があると思います。

また学者は地球環境問題、エネルギー問題など の実態を国民に出来るだけ正しく伝えるべきでしょ う。特に [何が分かって、何が分からないか] を 国民に正しく伝える義務があると思います。

時間を少し超過し、また結論のない話をして恐縮ですが、これで終わりたいと思います。ご清聴ありがとうございました。(拍手)

司 **会** 少々時間が過ぎておりますので、お食事の時間が短くなるかも知れませんが、後ほど質問等お受けいたしたいと思います。

- 休憩 -

秋 元 三菱マテリアルの秋元でございます。大変広範囲な問題につきまして、いろいろな視点からのお話で、感激しているわけですが、先生がお使いになりました例のカーターのリカバブル・エネルギーの表ですが、実はこの中のウラニウムの量について、私、異議があるんです。軽水炉で使った場合には、結局、ウランの問題、現在は天然資源の中のほんの5、6%ぐらいしか使えない。あと、99.何%は全部廃棄物として捨ててしまえば、こういうことになると思いますので、カーターさんは自分で、そういうポリシーをお出しになったから、こういう数字になるわけですが、非常にバイアスされた数字じゃないかと思います。

石 井 全くおっしゃるとおりです。カーターさんの時代の、軽水炉で使った場合の話です。それで、似たようなデータというのは、例えば通産省の資源量の評価である赤本があります。これに出てくる量と大体似ているのです。ご意見のとおり、プルトニウムの有効利用ということは、資源の有効利用という意味では大切です。きょうは持ってきませんでしたが、高速増殖炉ではどのくらいのエネルギー量になるかというふうな図を作っております。

秋 元 ええ。先生の「もんじゅ」の写真を見せていただきましたので、当然、先刻ご承知のことだと思いますけれども。日本がそういう意味で、本当にリサイクルでウラン資源を有効に使うということを先に出しているものですから。やはり、日本としての資源利用というのでしょうか、そういったビジョンをぜひ出せるのではないかというふうに。

石 井 大体、私の理解では、石炭と同じぐらい のエネルギー量になると思いますが、それでよろ しいですか。

秋 元 はい。燃やしてその程度だと思います。 ただ、高次のプルトニウムまで燃やせるともうちょっ と増えるのですが、今の高速炉の現実でそのくら いのところであると。

石 井 私は、エネルギー資源論から、このようなことを言っていましたが、それが期せずして、 高速増殖炉の応援をしていたらしいのです。「もん じゅ」のシンポジウムで特別講演を頼まれたこと もあります。

冨 永 埼玉工業大学の冨永でございます。先ほどの表について、一度確認をしておきたいのですが、あれは確認可採埋蔵量でしょうか、それとも究極可採埋蔵量でしょうか。

石 井 あれは究極の量だと思います。

冨 永 これから見つかるであろうという期待は

石 井 期待も含めていると思います。

富 永 もう一つ、地質学といいますか、専門の 先生に伺いたいのですが、可採ということの意味 です。リカバブルということは、おそらく技術と 経済の関数である、技術が進歩する、あるいは値 段が上がるという時に、その埋蔵量がきっと増え るのではないかと思うのですが。石油ショックの 時に、それまで数ドルだった原油が、20倍になっ たり30倍になった時に、確認可採埋蔵が増えなかっ たのです。それがどういうことになるのか教えて いただきたいと思います。

石 井 価格が高くなっても、埋蔵量は増えなかったというお話ですね。

富 永 可採埋蔵量。

石 井 私にはこういうふうに見えます。先ほど も申し上げましたけれども、中近東の埋蔵量が他 に比べてあまりにも膨大なのです。

富 永 石油だけでなくて、石炭その他もお伺い したいのですが。

石 井 石炭は石油と違い、いろんな場所に分布していますが、おそらく石油よりも、石炭の方がまだまだ息が長いのではないでしょうか。ところが、当面、石油が主な燃料になっていますので、よく石油についていろいろとご意見を聞きます。30年前にも、寿命は30年と言っていたのに今もそうである。このように、いつも30年以上の寿命があると言うのはどうしてか、まだまだあるのではということになる。しかし、30年前の地下を調べる技術と、今の技術では雲泥の違いがあり、多くの堆積盆地は大体分かっているのです。そういうふうに見ますと、中近東は神のいたずらと思いたくなるほど巨大なのです。中近東の中程度の油田が、北海の油田全体と同じぐらいかも知れない程

です。よく新聞に、新しい油田が見つかったという話が載りますが、多くは中近東と較べものにならないほど小さい。日本の中近東依存は突出していますから、日本のファンデーションは弱く、将来のことが心配になります。東南アジアのエネルギー消費量が10%ぐらい増えておりますし、中国はもう石油の純輸入国になっていますが、これからのエネルギー需要の急速な伸びは、間違いなく石炭で賄うだろうと思います。そして、石油を大量に輸入するほどの外貨を持っておりませんから。しかし、車は石炭では走りませんし、おそらく石油を輸入せざるを得ない。難しい問題です。石炭を大量に使う中国の環境問題は、今後大変です。酸性雨の影響は日本にも来るでしょうし、また国内でもこの環境問題は大き課題となっています。

そこで再び、一般論として石油がどの程度あるか、という話に戻りますが、消費の伸びが急ですから、このまま行きますと、それほど余力はないのではないかと、個人的には感じています。おそらく残っている所として、シベリアなどのまだ分かっていない所などでしょうか。

富 永 一番大きな中東の油田の産油のメカニズムが、ガス押しか又は水押しか。もし、水押しだとガタッと来る説が……。今の十数%、20%、30%、産油のメカニズムとの関連で、リカバリー・レートをどう考えているのか。それをさらに増大させる技術開発は可能性としてあり得るのか、その辺りをちょっと教えて下さい。

石 井 そうですね。私は生産関係のエンジニアではないので間違っているかも知れませんが、例えば、世界最大の油田であるサウジのガウール油田では、あそこは生産可能量として、大体数百万パーレル/日は出せる能力があるそうですが、圧力を維持するため、油田周辺から水をどんどん圧入しています。結果として水で押すということになっています。油田の生産を維持するというのは大変な作業で、10万トンの石油を毎日採るということなのです。それで、圧力を維持するわけです。例えば、アブダビにあります日本が作業している、長さ400メートルぐらいの巨大な海の生産基地では、水圧入の仕事として、海水をフィルターで濾し、

多くの井戸に水を送って圧入する作業をしています。これはプラットフォーム上の大規模なプラントです。そういうことで、中東で基本的に圧入を キープしているのは水なのでしょう。

しかし、中近東の深いところの油ガス層は、まだまだ十分には解明されていません。中近東の深部には、ガスが大量にあるのではないかと思います。それは地下は、深くなればなるほど地温が高くなりますから、ガスリッチとなるのです。中近東の天然ガスは膨大なものであろうと考えるのが、今の常識だと思います。その程度でよろしいでしょうか。

冨 永 分かりました。

市川(眞人) 市川でございます。南極、ソ連 のボストーク基地の氷柱試料の研究によって16万 年遡り、現在までの気温と大気中炭酸ガス濃度と の二つの変化が対照的に示されております。それ によれば、最後の氷河期の終わりから現在の温暖 期の始めまでの間に、気温が約6度ぐらい上がっ ております。その説明をこの前の本席で北大の先 生に伺ったところ、ご回答としてミランコビッチ の仮説を持ち出されました。定性的には、氷河期 間中の炭酸ガス濃度と気温の変化は非常に良く周 期的には仮説と合っているものですから、それに 結び付けて答えられました。気温の上昇は炭酸ガ スが元凶だと言われているのですが、量的には両 者は合いません。すなわち、氷河期が終わり、温 暖期に移る間の炭酸ガスの変化は60pm程度となっ ており、それに対して気温は約6、7度も上がっ ておりますので、量的にはどうしても合わず、お かしいと言うことで申し上げたのでした。

ミランコビッチの仮説は有名ですが、イスラエルの文献に出ている由で手に入りませんので原文を見ておりません。しかし、地球の約10万年の氷河期周期に応じて、仮説に従って地球の公転軌道が変わったとし、それに応じて太陽からの地球への放射が増減し、地球上の気温が上下すると言うのは分かるのですが、この仮説によっても量的には合いそうにありません。北大の先生には軽くいなされて終わったのですが、石井先生にきちんとこの辺のご説明を頂けるかどうか、大変ぶしつけな質問ではございますが。

石 井 北大のその道の専門の先生が答えられなかったのですから、私も答えられませんが、ミランコビッチの説が一番説得力があるようです。

地球というものを一つのシステムとして眺めますが、一般に安定な生きているシステムというものは、平衡点の周囲で振動しています。これに対して完全に死んでいるものは動かない。安定なシステムとは振動する、揺らぐものである、これが私の地球観で、ダイナミックに振動しているということが地球が生きている証拠であると思っています。ただ、その振幅がどの程度かは良く分かりませんが。

また、最近のカオス理論による自然観によりますと、決定論的な見方では非線型システムは説明がつかないと言います。複雑な地球システムについても、このようなことが言えるのではないでしょうか。地球の温暖化についても分からないことが多く、特に大気と海の関係がはっきりしないようです。海面で全く波がないときの相互作用の理論はありますが、波が立っているときはかなり違うようです。海に吸収される二酸化炭素もかなり多くなるらしいという研究もあり、環境研のスーパーコンピュータが大量に使われています。膨大な数値計算ですけれども、状況によって一桁ぐらい違うとも言います。

分かっていないことが、まだまだあるという感じがします。しかし、分からないとだけ言ったのでは環境についての政策、行政ができません。社会に役立つ環境研究とは何かと言うことになります。私は地球、自然は分からないのがむしろ本質ですから、学問の深さと学問の幅が重要だと思っているわけです。

ところが世の中には、限られた考えだけが選択されて伝えられる傾向があります。例えば、オゾンホールの問題でも、その本質はあまり一般に理解されていないようです。多くの人は、オゾンホールは一年中あきっ放しと思っているようです。オゾンホールは人工衛星からの映像でご覧のように、季節変動しているもので、年中あきっ放しではないわけです。そこで一番大きく減少している10月を継続的に捉えているわけです。これによるとオゾンは減少傾向にあります。これが大きな自然の

変動の中で、どういう意味を持っているかが学問 的に大切なのでしょう。

次の問題は、この変化が人間、生態系にどのような影響をもたらすかです。オゾン問題とは地表に達する紫外線の、ほぼ10%ぐらいの増加です。そして、これによって皮膚癌が増えるのではないかと懸念されています。また植物への影響があるとも言われます。これが人間にとっての環境問題です。

しかしながら、地球上の紫外線照射量は緯度によって違い、北欧などの高緯度から赤道直下まで、もともと数百%も違うのです。そして10%という値は、100マイルほど南北方向に移動した時に変わる値です。そうしますと、人間が起こす10%の紫外線の増加を、自然本来の平均的な数百%の変動場の中で、どのように理解すればよいかが問題となります。例えば、疫学的に赤道直下と、北欧に住んでいる人達によって、皮膚癌発生の程度がどのような違いがあるかですが、実際には違いがないそうです。今後の研究が必要なのでしょう。

また、環境の政策と環境の学問は、そのまま直結しているわけではありませんから、これから環境科学とは何かを問う必要があるのでしょう。学問、科学的な知見を国民に正しく理解していただくことが先ず大切で、その上で国民は何をすべきか、どのような選択肢があるか自分で考えていただくことが大切なのでしょう。分かっていること、分からないことを科学的に伝えてどのような選択肢をとるかは、国民が決めることなのではないでしょうか。

市 川 レスポンスビリティー・オブ・シティズ ンということを伝えるお話かと思いました。あり がとうございました。

谷 下 きょうは答えのないお話だそうでございますが、私共は気が短いので答えが欲しいのですが。私はエネルギー問題に非常に関心を持っておりますが、化石燃料はいずれは近いうちになくなる、その後はどうしたらいいのかというのですが、最近、東北大学の西澤先生なんか、今あちこちで講演されまして、世界中の水力を使えば、今我々が使っているエネルギーのほとんど全部は賄えるのだというような、これは確かなデータで、起き

た水力は直流で送電すれば1,000キロメートルぐらい送電できるし、また、それで水素燃料をつくり、遠くに運べばいい、その他いろいろな方法があると思います。

それから、最近、地方で随分温泉を掘りまして、 これは、竹下内閣の時に、各市町村に一億円ずつ の贈り物をいたしまして、その金でかなりのとこ ろが温泉を掘って、大体掘り当てております。我々 は、非常に薄い地殻の上に住んでいるわけですか ら、少し地面を掘れば無尽蔵の地熱が出てくるは ずだと、そういう気がいたしました時に、東北大 学の人が、えらい長期計画のプロジェクトで地殻 にひびというか、割れ目を作り、地熱を取り出す 研究をやっておられるという話を聞きまして、こ れは大変面白いのではないかと思っておりました (Information No.39 参照)。 きょう、どこかの国 の人が、日本は将来は地熱を使えばいいのではな いかというような提案があるということでしたが、 これはまあ、そういう点も大変面白いのではない かと思いますが、何としても、この食糧生産のた めには、やはり相当液体燃料がいるのではないか と。地方の農村に行きましても、ほどんど機械力 で農作業をやっております。それからまた、漁業 にいたしましても、みんな動力で船を動かしてお りますので、とにかく若干の長期にわたって液体 燃料がいるのではないか。そういうために、余り 大きな自動車をとばさないで、節約して、後世の ために液体燃料を残しておくようにする必要があ るのではないかと思いまして、答えのないお話だっ たものですから、つまらないことを申し上げまし

石 井 今のお話について二つの感想があります。 地熱の話については、先ほど時間がなく話しませんでした。実は世界最大の地熱発電地帯というものは、アメリカのカリフォルニアのガイザースというところにあるのです。このガイザースには、前世紀から温泉があるのが分かっておりました。ここで盛んな地熱開発が行われ、最盛期の頃は、200万キロワット以上までになったのです。一つのユニットが大体14、5万キロワットで、点々とガイザースの丘陵地帯にできました。

私はその上をヘリコプターでも飛びましたが、

地熱発電所があちこちに見えました。しかし、近年急速に蒸気が出なくなりました。200万に対して130万キロワットまでに落ちたそうです。それは、地下の蒸気を人間が採るスピードと天然の供給能力のバランスがとれなくなったためです。再生的エネルギーの有力候補である筈の地熱も、結局のところ非再生的であったということです。地熱は上手に使わないとならないわけです。世界最大のガイザースがそれを教えました。イタリアには、長く続いているラルデレロ地熱地帯があります。これは上手に利用しているのでしょう。長続きしています。急速に開発した米国のガイザースは、約200万キロワットの発電容量に対して、蒸気が130万キロワットで頭打ちになりました。

これは多くの再生的資源が、人間があまりに早く採ってしまうと再生的でなくなるということです。今言われた地熱のフラクチュアリングについても同じです。技術のめどはたっていません。せっかく勇気づけていただいたわけですが、悲観的な例の方が多いようです。再生的、非再生的について、よく考える必要がありそうです。

司 会 それでは、私が一つだけ。環境問題の指導的立場にいらっしゃる先生から、3年ぐらい前ですか、文部省のほうの調査で、現在の我々の生活はどこまで圧迫されても、将来の環境のそれこそサステーナブル・デベロップメントのために我慢するか、どこまでを見るかというのはもちろん人によって違うわけですけれども、その調査を見ますと、せいぜい100年ぐらいというところなんです。先生の個人としてのお考えですと、何年後の立場を考えて現在の生活をやっているとお考えでしょうか。

石 井 個人の立場に立っても難しい問題です。 どうすればサステーナブル・デベロップメントが 可能か。歴史を振り返りますと、江戸時代に非常 に貴重な実験をやっているようです。日本列島の 原理的な容量というものは3,000万人と言われます。 江戸時代に戻れば3,000万人は生きていけるという ことです。しかし、今の自由経済で、徳川独裁の ようなことができるとは思えません。ところが、 世界規模で計画経済を行うには、いわば世界政府 がいるのですね。 人間が無限とも言える発展をしつつ、地球環境を守るのは基本的に困難な問題です。地球の原理的容量はどのくらいかを研究するのも必要です。また、何をもって幸福と思うかを考える必要があるのではないでしょうか。今の大量生産、大量消費、大量放棄の仕組みが、環境を守りつつできる筈がありません。しかし、この日本型の先進工業国型を、東南アジアの諸国が今追いかけているように見えますが、これがいつまでも可能とも思えません。先進工業国として、日本のこれからの姿勢は大切だと思います。

司 会 どうもありがとうございました。(拍手)

追記

非常に大きな、21世紀へのテーマですが、もともと非力の上、限られた時間で私の考え、思想を十分ご理解いただくのはやはり難しいことであったと、出席者のご質問から、改めて認識しているところです。しかも、私のこのような考え方は、マスコミ等で報道されているいわゆる常識とは違うところが多々あります。このような見地からも、[環境と人間]、[持続型の発展]などについて、いろいろな立場からの本質的な議論が、自由に世に出されることを心より願っています。

私の年来の持論は最近、新書版の小冊子として 世に出しました。お暇な折にでもご一読下されば 幸いです。書名は「エネルギーと地球環境問題」 1995年8月、愛智出版(TEL 0425-85-1014)、定 価1,240円です。

1995年12月25日

編集 発行 日本工学アカデミー

〒100 東京都千代田区丸の内 I - 5 - I 新丸ビル 4 - 007

> TEL: (03) 3211-2441 ~ 2 FAX: (03) 3211-2443