地球にやさしく

茅 陽 一†

1. 地球環境問題の流れ

まず、地球環境問題の流れから話を始めたいと思います。環境問題は昔からあるわけです。私が最近、北九州の小倉へ行った折、森鷗外がしばらくいたというので、市の人に案内されてあちこち歩いておりましたら、そこに森鷗外の書いた文章が載っておりました。それによると、小倉市の上流に紙パルプ工場があって、そのために川が大変汚濁されていたそうです。つまり森鷗外時代でもそういう問題があったわけで、環境問題というのは、そういう意味でいうと、決して新しい問題ではないわけです。

しかし現在、これが大きな問題となっているのは、単なる環境問題というよりも、問題が拡大して、地球の規模、ひとつの入れ物の規模に至ったからです。

ひとつの例が森林の減少の問題です。図1は、1973年からあとの状態ですが、一番下の南米、その次のアフリカ、その次のアジアといった発展途上地域の森林がどんどん減っています。この発展途上国の森林減少というのは、いろいろなところで議論されています。また、テレビの画面、あるいはいろいろな雑誌などでしばしば衛星の写真が放映されますが、1年のある時期になると、大陸の半分ぐらいが煙に覆われているという状況が、アフリカあるいは南米でよく見受けられます。これが、ご承知の焼き畑農耕の結果で、これが森林減少の大きな原因だといわれているわけです。ただ、この話でも正直いってかなり以前からあり、1972年のストックホルム環境会議のかなりの議論は、この部分に割かれていたわけです。

つまり、こういった地球環境問題は昔からかなりあった。ただし当時は、もっぱらこういった発展途上国

(備考) 1 FAO「生産統計1989」より作成
2 1973年を100とした

図1 世界の森林面積の推移

の問題に目が向けられていて、それ以外の問題はまだまだ大きな問題とはなっていないかったというわけです。

しかし、1970年前後から地球大気をめぐるさまざまな問題が出てきました。

その第一の例が酸性雨です。酸性雨も、現象自身は非常に古くから知られており、その言葉も、19世紀にイギリスでつくられているわけです。ただ、その場合は範囲が限られていて、これが国境を越えた形で広がりましたのが1960年以降です。

ご承知のように、スカンジナビア諸国、特にスウェーデン、フィンランド、フィンランドはスカンジナビアではないわけですが、いずれにしても、この地帯は非常に湖が多い。この湖の魚、特にカワマス類が減るという現象が、1960年ごろから顕著に見えてきました。その原因が問題になりました。

† 東京大学 工学部 電気工学科
講演日 1993年7月22日(於 東京理科大学記念講堂)
“For better Earth” by Yoichi Kaya (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo)

図2 北ヨーロッパの降水のpHの変化(出典:岡本和人)

スウェーデンの場合には、こういった雨ないしは湖のモニタリングというのが1950年ごろから行われており、その意味では環境先進国といえるんですが、その結果のひとつが図2です。

左側の図、これが1957年の雨の平均のpHの分布です。pH、つまり、水素イオン濃度を対数で表したわけですが、これは7が中性で、数が小さいほど酸性になります。ただ、大気中に炭酸ガスがあるので、これがある程度溶け込み、普通の雨のpHは大体7から5.5ぐらい、若干酸性に寄るわけです。

この頃スカンジナビアに降っている雨の大部分は、5.5〜6ぐらいで、若干酸性に寄っているなという気はいたしますが、「自然の雨」といってもそれほどおかしくはありません。

ところが、右側、これは1970年の結果ですが、これは見事にpHが下がっておりまして、スカンジナビアの大部分はpH 4.5—これはオレンジジュースにかなり近い値ですが—の雨が降っているわけです。

こういったことにより、雨が原因であるということがかなり明確になりました。ところが、その雨が、自分たちが降らせたもの、つまり、スカンジナビアで排出された排気ガスによって起こったものであるならば、妙な言い方ですが、自業自得ともいえるんです。しかし現実には、スカンジナビアというのは人口が大変少ないわけです。スウェーデンですら900万人はいません。もちろん、産業活動はかなり盛んな国ですが、広大な地域に比べれば、あまりにもこの影響が大き過ぎるんです。

したがって、いろいろな調査の結果、西から吹いてくる風、これはヨーロッパ特有ですが、この偏西風によって、酸性雨がオランダ、イギリス、フランスから

(備考) UNECE 資料により作成、1988年調査
出典:環境白書

図3 ヨーロッパの森林の酸性雨や大気汚染による被害

運ばれてくるというのが、当時のスウェーデンの科学者の指摘であったわけです。これで問題が、いわゆる国境を越えた環境問題として大きく出てきたわけです。

ただこの議論は、ここまででしたら話としては世界的にあまり大きなインパクトを与えなかったと思います。と申しますのは、本当にこれが、 SO_x 、 NO_x 、いわゆる硫黄酸化物、窒素酸化物が原因なのかという声、いわゆる加害国側—イギリス、フランスといった国々—から上がりまして、なかなか簡単には決着が付きませんでした。

ところが現実には、魚だけではなく、ヨーロッパ全域の森に被害が出たわけです。この被害の状況を、葉の喪失度（葉がどれだけなくなったか）で示したのが図3で、縦軸はヨーロッパ各国の名前です。横軸がその被害の程度で、一番右が70%ですから、2/3ぐらいの森が被害を受けているということがわかります。ちなみに、色が黒いほど被害の程度が大きいわけで、一番黒いところは葉が60%以上もありません。我々が見ましても明らかにおかしいという感じがする部分です。

ご覧いただきますとわかるんですが、一番上がチェコスロバキア—現在は2つの国に分かれておりますが一、その次がギリシャです。ですから、だれが考えてみても、その国自身の原因だけでこんなことが起きる

とは思えない。つまり、国を越えて酸性雨の被害が広がったということがわかります。

現在、チェコ、スロバキア、さらにハンガリー、ポーランドといった地域が一番被害が大きいといわれておりまして、私も見たことがあります。いずれにしても、こういった森林の被害というものが非常に目立ってきました。図3の数字は1988年、最近の数字です。

こういった状況になりますと、特に森というものを大事にするヨーロッパの人間—特にゲルマン民族ですが—にとっては、これは耐えがたく、一方、原因は普通の公害問題の常で、必ずしも明確ではないわけです。現実には酸性雨がどのような形で森に被害を与えるかという問題については、現在4つぐらい説があり、どれが一番エフェクティブかというのは、まだ明確ではありません。おそらく、この4つのどれか、あるいはそれらの全部の複合かといわれております。

このため1979年、今から14年前ですが、初めてヨーロッパに「国境を越えた汚染物質に関する条約」が成立いたしました。これが地球環境問題に関して国際的に合意が成立した最初で、しばしば1980年を「地球環境元年」と呼んでいるのはこのゆえんです。

この問題は、従来の形の公害が広域化したという意味で、我々の活動が拡大したことを示すひとつの良い例かと思いますが、性質的には、従来の公害と全く変わっておりません。そして我々の行動も、現実には被害が出てから対応に踏み切ったという点では同じです。

ところが、その次に出てきたオゾン層の問題というのは、従来とは全く違ったわけです。オゾン層は、ご承知のように成層圏に大部分存在しており、これが紫外線を吸収する役割を果たしています。

ところが、これがなぜ問題になってきたかという点、最初の発端は超音速旅客機、具体的にいいますとコンコルドで、1960年代にさかのぼります。

普通の飛行機と違って超音速旅客機の場合には成層圏を飛びます。そこで廃棄物、要するに排気ガスを出すわけですが、それが成層圏に存在するオゾン層を破壊するのではないかという告発を、アメリカの環境団体が指摘しました。

これで大分大きな騒ぎになりましたが、結果的には1970年代の初めになって、アメリカの航空宇宙局(NASA)が、実際にはこれを「承認する」というタイプの報告を提出しました。それは、常時、世界の空に100機ないし200機のコンコルドが飛ぶと、恐らくオゾン層の20%近くが破壊されるのではないかという結果でありました。このことがきっかけになって、コ

ンコルドの製造は中止されました。

地球というのは非常に大きい。ですから、成層圏に少しぐらい飛行機が飛んで排気ガスを出そうと、それが何かを破壊するなどとは考えられないというのが我々の常識だったんですが、わずかにその程度の数の飛行機で、地球のオゾン層が破壊されるということになりますと、これは、ひょっとすると、ほかのものが同じようなことをするかもしれないという疑いに至るわけです。それが、ご承知のフロン、外国名でいいますとCFCということになるわけです。

フロンは化学的に安定で、しかも大変蒸発し易い。いっぺん大気中に放出されますと、それが対流圏を生き長らえ、結局対流の結果で最終的には上ってしまう。そして成層圏に達したとき強い紫外線を浴びて、そこで塩基分を放出して、それがオゾンチェーンリアクショナルに食っていくという現象が起こります。

この現象を最初に解明した論文を出したのが、アメリカのローランドで、1974年のことです。彼は後に、日本国際賞をこれでもらっておりますが、このローランドの論文だけでは人は納得しませんでした。

しかし1984年に至って、オゾンホールが南極で発見されたわけです。実はこの現象は1980年ごろから起きていたんですね。

図4は、南極で測ったオゾンホールの大きさと厚さ、つまり、どれだけ破壊されたかというものが、経年的にどう変わっているかという計測結果です。

図4 オゾンホールの経年変化

1979～1991年のオゾンホールの面積、深さ、オゾン破壊量それぞれの年極値。図の上部の領域の点線が面積、実線が深さ、図の下部の領域の実線がオゾン破壊量。NASA提供のデータ(第6版)をドブソン計による観測値と比較検討の上作成。(出典：気象庁)

オゾンホールの定義は、平常の量の65%以下の厚さということだと思いますが、それで測ってみると、1981年ぐらいからずっと下がり、面積がふえてきています。これがトータルの積で、破壊量と見ていいと思いますが、これがどんどん下がってきているわけです。

このフロンが南極に及ぶというのは、ちょっと不思議に思いますが、ご承知のようにフロンはかなり長時間対流圏を対流して、成層圏に上がるので、その間に世界全体に拡散します。そして、南極の特殊な気候条件のもとで、さっきいったようなオゾンの破壊が起こりやすい。その結果、オゾンホールが、たまたま観測していたために測れたということになるわけです。

実際に世界では、極地域、特に南極が一番破壊が進んでいるんですね。そして、だんだん赤道に近くなりますと破壊が減ってきてまして、赤道あたりではほとんどオゾン層は減っていないというのが、現在、我々が知っている知識です。その意味では、南極に観測隊がいたというのは、ある意味では幸運だったかと思いますが、いずれにしても、その後、南極でのオゾンホールが、現実にはローランドが指摘したようなメカニズムでオゾンを破壊しているということが観測でわかりました。また実験室でも、ローランドのいう内容が確かに起きるということが、幾つかのところで証明され、現在、オゾンホールがCFC(フロン)のおかげで起きているというのは、まず間違いない定説だと考えられております。

そういった意味では、これは従来の環境問題に比べますと比較的早く因果関係が明確化した例ですが、このために1985年に、このCFCを制約するというウィーン条約が初めてつくられ、そして現在に至っているわけです。

ご承知のように現在は、1996年までにフロンの生産を全廃するということが合意されております。

いずれにしても、こういう現象が認知されて、それに対する対応策が1980年代半ばに出たということは世界的に大きなインパクトを持ったわけです。

このフロンの問題は、従来の問題に比べて2つの違った性質を持っています。ひとつは、いうまでもないことですが、問題が真のグローバルな問題だという点です。先ほどの酸性雨の例は、単に規模が大きくなったために国境を越えた形で現れたんですが、フロンの場合には、まさにどこで排出されたフロンでも、世界のほかのどこかの場所に影響を与えるという意味で、真にグローバルであります。したがって、対策というのは、グローバルに打たない限りは意味がないわけ

で、そういった意味ではグローバルだという点で第一の特徴があります。

第二の特徴は、これは被害が出る前に手を打ったという点です。これは今後のこういった問題を考える場合の非常に大きなポイントになると思うんです。どういうことかと申しますと、確かにオゾン層が破壊されているということは、現在、認知されております。また、現在、衛星技術がかなり伸びましたので、いろいろな形でオゾンの世界的な分布の状況がわかってきまして、確かに減っているということはいわれているんですが、それによって、例えば人間の皮膚癌が具体的にふえたかという、いまだかつて、ある地域で有意にふえたという報告はありません。

つまり、我々の体に直接被害が出たかといえ、これはまだわかっていないわけです。ただ、それを引き起こす可能性がある現象が明確に認知されたということで、人間が手を打ったわけで、そういう意味では従来の公害問題に比べて一段違っております。いうなれば、我々が科学的な知識を信じて、今後起こりそうな現象を防ぐために予防的に手を打ったということが、ここで初めて起きたわけです。

このことは、人類のひとつの進歩であると考えられますが、同時に、次の温暖化問題に手を打つことになるひとつのステップになったわけです。この温暖化問題というのは非常に昔から知られている問題です。

と申しますのは、炭酸ガスがふえれば大気中に何かが起こるといことは、だれでも考えられます。そして、我々は化石燃料を1800年から使い始めているわけです。石炭を1800年、石油を1850年から使い始め、現在の先進国のエネルギーの9割は化石燃料です。これを燃焼すれば炭酸ガスが否応なしに発生し、大気中にばらまかれる。それは簡単には吸収されないだろうから、たまるに違いないというのは、これは子供でも考えることでして、それが何かを引き起こすだろう。特に温室効果ということが明確にわかってきますと、温暖化の危険というものを警告する人が出てくるのは当然です。

ですから、こういった温暖化の警告というのは昔からあったんですが、これもやはり証拠がなかったわけです。ところが、よくご存じだと思いますが、1958年の地球観測年以降、世界各地で炭酸ガスの常時観測が行われるというようになりまして、図5が、ハワイ島のマウナロアでの計測の例です。振動は季節変動ですが、とにかく着実に平均値が上がっていつていきます。こういう証拠が出てきますと、「これでは心配だ」ということになるわけです。

(出典：Mitre Corporation, 1988)

図5 ハワイ・マウナロアにおけるCO₂濃度

図6 世界平均気温の推移(出典：J. Hansen, 1988)

この議論は、すでに1970年頃にも沢山出てきたんですが、2つの理由で、それに対する対策という議論までは行かなかったわけです。その理由のひとつは、当時は温度があまり上がっていなかったということがあります。図6は過去100年の地球の平均気温の推移ですが、1941～1970年の範囲では温度が下がっているんですね。

そのために、温度が下がっているときに「温かくなるのではないか」という予測をするのは、科学者といえども非常に冒険であるということもあって、なかなか大きな声が出なかったというのが第一点です。

第二点は、今申し上げたように、我々が化石燃料を燃せば否応なしに炭酸ガスが出るわけです。つまり、我々が何かの方法でこれを出さなくてすむのならば対策があり得るわけですが、どのような形で燃焼するにせよ、例えば不完全燃焼するにせよ、最終的には炭酸ガスという安定な化合物の形になるわけですから、我々自身が炭素を燃やしてエネルギーを得るという活

動をすれば、否応なしに炭酸ガスが出ます。

したがって、これを出さず、温暖化を防げ、といわれますと、これをやめろということになります。それはできるはずがないというのが当時の考え方です。したがって、我々自身としては、こういう現象は知っていましたが、まだ手当てをするところまではいかなかったわけです。

特に、実際に温度が高くなっているというのならば、そして被害が出ているというのならば手が打てるんですが、現実にはそれはありませんでした。

ところが、オゾン層によって初めて、因果関係のみで、我々への直接の被害がなくても、手を打つということに踏み切ったんです。このことが世界的に大きなインパクトを与えまして、特に国際機関その他では、「温暖化の問題にも手を打つべきだ」という議論が非常に広まったわけです。それに加えて、その後の20年間、温度は上がりっ放しに上がってきているわけです。

これが本当に人工的な温暖化なのか、たまたまの自然のサイクルなのか、正直いってはつきりいたしません。過去の歴史をずっとひもといてみますと、1000年間での温度変化というのは1°内外でございます。その意味でいいますと、今我々が経験している温度変化、実は過去100年で大体0.6°から0.8°なんですが、自然の温度変化と考えると、全くあり得ない話ではないという状況です。

別な言葉で申し上げますと、人工的な温暖化がなかったと仮定しても、今の現状はあり得る。しかし、今度は逆に、人工的な温暖化で温度が上がったのだと思っても否定はできないという、大変微妙な状況にあるわけです。

こういう状況ですと、我々自身、証拠という意味で「温かくなっているか」ということについては、何とも言いようがありません。したがって、もし手を打つとすれば、依然として我々が本当にこういった温暖化の因果関係を信じるか、そして温暖化が起きたら困ると思うかということにかかっているわけです。

現実には、これはやはり問題であるということに世界中が結論いたしまして、1992年、昨年の6月、リオの環境サミットで「気候変動に関する枠組み条約」と称する条約が調印され、具体的に炭酸ガスの排出抑制を行うことに世界中が同意をしたわけです。

この条約は50ヵ国の批准を経て90日後に発効することになっておりますが、現在の見通しでは、恐らく1994年春ぐらいで発効すると考えられております。

いずれにいたしましても、こういう状況ですので、

我々自身は、ある程度因果関係がはっきりすれば、被害がなくても手を打つという状況まで来たわけです。これが現在の状況なのですが、ここで問題なのは、今私は、たまたま地球大気の問題に中心を置いたんですが、問題は決して地球大気だけの話ではないということです。

今から10ヵ月ぐらい前、日本でアメリカと日本の財界人—大体20人ぐらいだったと思いますが—により小さな会合が開かれまして、環境の議論をしたことがあります。たまたま私はそれに招かれていたんですが、そのときに、この温暖化問題というのが問題として出て、アメリカのある機械会社の社長が、さっき私がいったことの裏返しなんです、「過去を見ると1000年の範囲でも1°ぐらい、それより前だったら2°や3°温度が上がったときがあるのではないか。今、我々は温暖化によって2°上がるとか何とかと騒いでいるけれども、それがそんなに大事なことなんだろう。我々は過剰に騒いでいるのではないか」という発言をしたわけです。

これはよく出てくる議論で、ある意味では自然な意見ともいえるんですが、日本側のある石油会社の社長が直ちに反論しました。何をいったかといいますと、「おまえの考え方は基本が違うのではないか」といったわけです。つまり、「炭酸ガスが排出されて、それによって温暖化する。それが本当かどうかということは今の場合、問題の本質ではなく、我々が使っているもの、例えばエネルギーがふえて、それによって廃棄されるもの、炭酸ガスというのはその廃棄物のひとつの例で、それが地球の容量を超えてきているということが現実なんだ。だから仮りに炭酸ガスがなくても、ほかのところで同じ問題が起きているはずだ。つまり我々が問題としているのは、我々の活動の拡大が地球の容量とぶつかってきているということであって、単に炭酸ガスが温暖化を加速し、それが我々に耐えきれぬかというだけの問題ではない。だから、問題の本質を見誤ったらとんでもないことになる。」という議論を展開したわけです。

私はまことにもっともだと思いましたし、さすがにそれにはアメリカ側の発言者はグーの音も出ませんでした。そのために、そのあとの議論の流れがずいぶん変わったのを覚えておりますが、まさに、今の発言というのが一番重要なポイントかと思えます。

2. 問題への対応

さて、このような地球規模の問題に対してどうしたらいいのか、いろいろな議論があり得ます。このよう

表1 Herman Daly の3原則

1) 再生可能資源の消費量 < 再生能力
現在の砂漠化・森林減少はこの原則を犯している典型。
2) 非再生可能資源の消費量 < 新しい再生可能資源の開発
現在は全くこの原則を無視。
3) 汚染の排出 < 環境の吸収能力
CO ₂ 大気中濃度の増大は、この原則を犯している典型。

な状況から我々人類が脱却するにはどうしたらいいか。いわゆる持続可能な社会というものををつくるにはどうしたらいいかという議論が、世間を賑わせております。

表1は、有名なデリーの3原則と呼ばれるものです。彼は、我々が環境を持続可能なものとするためには何が必要かという条件を3つ掲げているんですが、ものすごく当たり前のことなんです。

一番上にあるのは、再生可能資源の消費量が再生能力を下回らなければいけない。つまり、使ったら使っただけ、再生するだけのものがなければいけないというわけです。例えば魚がいい例ですけども、魚を取っても、ある限界まで取らなければ、魚が新しくふえて、そしていつまでも我々は魚を取ることができる、という原則で、これは当たり前のわけですね。

二番目は、非再生可能資源の消費量が新しい資源の開発量を下回らなければいけないという議論で、これも当たり前で、我々自身、非再生可能資源、例えば化石燃料ですが、使ったら使っただけ新しいものを開発しておけば、必ずネットでプラスになりますので、問題はない。これもよくわかる議論です。

三番目は、汚染を排出したら、その量は環境の吸収能力を上回ってはならないというので、これもだれでも当然であります。

したがって、このハーマン・デリーの3原則というのは、だれが考えてもよくわかる原則なんです。我々はこれを見事に全部犯してしまっているわけです。例えば、森林の減少という問題ひとつ考えますと、森林を切ったならば切っただけ再生させればよい、あるいは植林すればいいわけですが、現実に現在の世界の数字を見ますと、1700万ヘクタールの森林が年間なくなり、植林している面積は年間100万ヘクタールにすぎません。ですから、左辺と右辺のギャップは非常に大きいわけです。

二番目の問題にしましても、化石燃料を我々は使っているわけですが、では、使っただけのエネルギーを別に開発しているか。例えば長期的に見れば太陽である、あるいは地熱であるといったものを開発している

かといったら、全然そんなことはありません。

三番目、汚染の排出ということですが、炭酸ガスの大気中濃度が図5のように一率にふえていっている。ということは、要するに炭酸ガスが植生なり、あるいは海なりが吸収する能力を上回る量を我々が放出しているということを意味しているわけで、まさに三番目も見事に犯されています。

考えてみますと、こんな当たり前の法則を我々は全部犯しているわけです。ですから基本的にいえば、この3つの条件を回復しない限りは、我々は持続可能な社会というのはつukれないことになります。

これをどのようにして回復するか。これが恐らく我々の今後の大きな課題だろうと思います。それも、単に5年、10年で回復できる問題ではありませんから、当然、100年計画で何とか回復する方向へ向かわなければいけません。

その場合に、問題としてしばしば言われますのは、技術開発です。技術開発が重要だということは、私も工学部に身を置く人間のひとりとして常々そう思っておりますが、問題点は、どのような技術ならばどこまでできるかということと、技術だけで答えが出るかという問題があります。

かつて、ローマクラブの「成長の限界」が出ましたとき、世の中では賛否両論が非常に出てきましたが、その中で一番強い反応を示したのが、亡くなられましたが、未来学者のハーマン・カーンでした。彼は、過去の歴史を見ても、このようなマルサス流の理論というのは実は成立しなかった。なぜ成立しなかったかというと、我々人間の知恵がこれを上回ったからだということを主張しまして、ローマクラブというのが、いわばドゥームスデイ・ピープルの集まりで、故意に将来を悲観的に見て、人を惑わすものであると、大変な攻撃をしたわけです。

この考え方は、現在でも決して否定されているわけではなく、かなりあります。確かに技術の発展というものがある問題の解決にプラスになることは疑いありませんが、問題は、すべてできるかという点です。

こういう問題に対して、いろいろなアプローチの仕方があります。ひとつの例をまずお見せいたしますが、では、マクロに見たら、本当に技術がどこまできたのだろうか、あるいはできるだろうかという問題があります。先ほどいろいろなファクタと言いましたが、中心になりますのはエネルギーです。エネルギーというのが、消費を我々自身が抑える、あるいは減らすことができれば、それに関連したもの、例えば汚染の排出は沢山抑えることができます。

そういった意味で、例えばエネルギーの消費の抑制というのは非常に大きなポイントなんです。同時に我々は、自分たちは経済発展を遂げたいという欲望を持っているわけです。先ほどのハーマン・カーンの議論も同様でして、要するに、我々が経済発展というものを遂げつつ、しかも充分資源の消費あるいはエネルギーの消費を抑えることができるというのが議論だったわけですが、数字で見ると、どの程度できるのだろうか。これは数字で単純に考え得る問題なんです。

ごく簡単に申しますと、過去100年間、世界のGNPの成長というのを見てみますと、平均して年3%です。ところが、エネルギーの方はどうかといいますと、エネルギーは3%ではふえなかったんですね。もちろん、例えば19世紀の時期は非常に早くふえたんですが、20世紀に至ってから少しおさまってきました。平均値だと約2%なんです。エネルギーの伸びの方がGNPより低いんですが、この状況というのは、世界の長期傾向で見ることができます。

図7は、単位GNP当たりのエネルギーが世界各国でどう変わったかという図で、1850年を基点にしたのです。ここにはアメリカ、イギリス、ドイツ、日本といった国々が書いてありますが、細かいことはともかく、これはみんな下がっていきまして、下がり出してからはほとんどが1%ずつ改善するという状況を見せられているんです。

この1%というのは、要するに単位経済生産するのに必要なエネルギーが毎年1%ずつ少なくてすむようになっていくということ。もちろん、産業構造の変化といった要因もありますが、ひとつは技術の進歩、効率化ということがあったということのはっきりいえます。例えば、発電の効率ひとつを取りまして

図7 単位GDP当たり1次エネルギー消費の変遷

も、火力発電の効率というのは、昔 20% ぐらいであったものが、現在、例えば我が国は 40% 近い高い水準にまでなっています。

工学技術というものが効率化をひとつの大きなターゲットにしている以上、こういった技術的な進歩というのは充分考えられます。

では、将来はどうか。将来を考えた場合に、世界の経済成長率がどうなるかということが当然問題になりますが、先進国は、正直いって 3% で伸びる必要はないわけです。我が国が現在、政府の目標が 3.5% で、これを 3% に修正するといった議論がいろいろ出ておりますが、これは先進国では高い方です。まして 21 世紀になれば、こんな高い成長率は要らないよという議論が出てきます。

それでいいんですが、ところが発展途上国があります。発展途上国は 3% などとはとんでもない、もっとはるかに高い成長率をということをいっているのはご承知のとおりです。事実、彼らの所得のレベルは非常に低いわけです。ですから世界の 3% レベルの成長というのは、それが 2.5 になるとかいった変化はあるかもしれませんが、望ましい方向としては、まだ当分続きそうです。数十年は続くということはいわざるを得ません。

そうしますと、もし過去と同じようであれば、エネルギーはやはり 1.5 から 2% に伸びてしまうというこ

とになります。そうしますと、それに付随して発生する例えば炭酸ガスは、エネルギーの中身がよほど変わらない限りは、やはりふえることになってしまいます。これでは問題の解決にならないわけです。

そこで解決策は何かといえば、第一は経済成長。第二は、省エネルギーという形の技術を加速して、単位経済生産当たりのエネルギーの消費を急速に減らす。第三は、エネルギー源を非化石燃料に脱却する、この 3 つのどれかということになります。

そこで、技術の持つ意味ということになるわけですが、少なくとも我々自身、省エネルギーという問題をひとつ考えてみますと、確かにいろいろなもので可能性はあるんですが、現在の状況の中で、今までの 1% という動向を大幅に改善できるかどうかが問題です。

図 8 は、アメリカの電力でどれだけ省エネルギーができるかということを調査した図で、2 本、線があるのは、2 つの研究所が行った例ですが、横軸がどれだけ減らせるか、要するに省エネルギーのポテンシャルで、縦軸に kWh の値段が書いてあります。1 本の線のロッキーマウンテン研究所の方は 70% ぐらいのエネルギーが、わずか 4 セント/kWh の値段で低減できるというバラ色の話で、本当にこんなことができるのなら、我々、省エネルギーに全部答えが出るということになるわけです。

一方、電力研究所の方は、4 セントでできるのは

効率改善による電力消費量の評価 効率改善技術によって長期的に米国の電力消費量を減らすことが可能である。グラフは、電力研究所 (太線) と、ロッキーマウンテン研究所 (細線) の費用の評価である。価格は 1990 年の米ドルで表示した。

図 8 電力における効率改善の可能性 (出典：日経サイエンス)

30%で、それ以上は減らないという結果を出しております。どっちが正しいということは簡単には申しませんが、保守的な方だけを見ても、30%も減らせるんですから、これなら大変いいということになりそうですね。しかし果たしてそうでしょうか。

実は、現実をもう少し細かく見てみると、例えば、できる国とできない国とがかなり差がついております。例えば、図9は鉄鋼業においてどれだけエネルギーが減らせるだろうかとこのを技術的に調査した例です。縦軸は、1トンの鋼鉄をつくるためにどれだけの石油換算のエネルギーが要するかという軸で、横軸は、いくらお金をかけたらどれだけ減るかという軸です。アメリカ、ヨーロッパ、日本と3つの地域を比べますと、日本などはかなり下のほうに来てしまっていることがわかります。

点線が書いてあるのは、溶融還元鉄という、現在実験中のシステムで、まだ実用化されているわけではありません。そう考えると、日本の場合には、あまり余裕が残っていません。つまり、日本のような国は、かなり省エネルギーをやってしまっていて、とりあえず思いつくものはあまり残っていない。アメリカは反対に、非常に残っているという状況があるわけです。

そういったことで、世界の中を見てみますと、省エネルギーというのは、産業にしても、あるいはほかの分野にしても、可能性がかなりある国と、かなりない国がある。かなりない国、実は日本がそうなんです。そういった国の場合には、いろいろな方法を考えてみても、省エネルギーはなかなかできそうにありません。にもかかわらず、日本の場合には、ご承知のように省エネルギーの努力というのは随分したので、今でもやろうという努力を続けているわけです。一方に

において、従来、あまり省エネルギーをしなかった国、アメリカなどはその例なんですが、ポテンシャルはあるんですが、具体的にやろうとすると、なかなか難しいという問題があります。

というのは、これは政治的な問題もあって、現実的に省エネルギーを行おうとすると、何らかの形でインセンティブが要ります。何か「こういうことがあるから省エネルギーをやろうか」という気になるものが必要なのですが、一番考えられるのは物の値段です。エネルギーの価格が高くなれば、エネルギーは節約するというのが常識なんです。このエネルギーの場合には、政策的な対応としては課税が一番考えやすいんです。ところが、その税金というのが非常に導入しにくく、アメリカの場合、従来からガソリン税の議論が随分ありますが、現在の進歩的といわれるクリントン・ゴア政権になっても、非常にわずかの額の税金、ガソリン1リッター当たり2円ぐらいの税ですら、議会が抵抗してなかなか入れられないというのが現状です。

そういった意味で、省エネルギーというのは、技術的には国によって可能性が残っているんですが、世の中で現実に行おうとすると、果たして過去に比べてどれだけ加速できるだろうかという不安が残ります。

実は、10年ぐらいのスパンでエネルギーの原単位が一番減った例が日本で、日本は年間2.8%原単位が減るという記録をつくったんですが、これは100m9秒9みたいなものでして、世界記録であるわけです。しかし、世界全体が仮りにこの世界記録を保ち続けたとしても、2.8%以上の経済成長を世界が続けたら、やはりエネルギーはふえたことになるわけです。

図9 エネルギー原単位と必要資本コストの関係
(出典：茅ほか、1990)

その意味で省エネルギーの可能性はあります。しかし、省エネルギーだけでは問題の解決にならないということは、おわかりになるかと思います。

では、エネルギーの転換はどうか。化石燃料に代わって太陽熱、光はどうかという議論がよくあります。事実、世界的にそういう議論は随分やっておりますが、確かに太陽のエネルギーはポテンシャルは大きいんですが、現実に行おうとすると相当大変だといことが、いろいろな形で出てきます。

詳しいことは省きますが、例えば太陽光発電ですが、図10は、一体どのくらいのポテンシャルが各地域であるかという計算をした例です。太陽光発電の場合、ご承知のように太陽電池をどこかに敷きつめるわけですが、正直いって先進国の場合には、アメリカの一部を除きますと、土地のコストがめっちゃくちゃに高いものですから、一般の土地を利用することはほとんど不可能です。

考えられておりますのが住宅の屋根なんですが、住宅の屋根を使った場合、どれだけの発電が可能かと言ったのが図10です。確かに、日本では電力需要の4割とかいったオーダーまではカバーできるポテンシャルを持っておりますが、全電力需要にはとうてい足りません。

しかも、電力需要そのものは伸びますので、そういった意味では、将来を考えると、太陽光発電、それを例えば瓦を使って発電するというだけでは答えにならないというのは、これだけでもわかります。

また、おわかりかと思いますが、これはあくまでも物理的なポテンシャルで、全部の住宅が屋根に全部太陽電池を敷くなどというのは、とうてい考えられない状況です。そういうことから考えると、太陽の光を

使うということは、望ましいことではありますが相当に限界があります。

では、原子力はどうかということになりますと、ご承知のように、原子力は大事ですが、世界的なアクセプタンスというのは決して良くはありません。今後数十年のスパンで考えた場合には、原子力と太陽だけでエネルギーをカバーすることには、とうていなりそうもないというのが現在の段階です。

そうすると、では答えがないじゃないかということになるかと思えます。

そこで私が申し上げたいのは、技術的にこうしていろいろなことを考えてみますと、いろいろな形での限界がある。そこで必要なのは、我々自身の考え方を変えることがひとつと、もうひとつは、技術でも従来型の技術ではなくて、思い切った革新的な技術、場合によってはSF的なものでも具体的にやっていくべきだということことです。

ひとつの例は、エネルギーのカスケード利用です。我々はエネルギーの利用というのを、今までほとんど1つの用途に対して1つのエネルギーを全部使って、いっぺんで終わりという、我々の言葉でいいますと、ワンスルー型の利用をしてきたわけです。例えば、我々が天然ガスを使って、都市ガスにいたしますと、その都市ガスを家庭で炊いて、暖を取って、それで終わりということになるんですが、よくよく考えてみると、これは大変にもったいない。

エネルギーそのものが減らないということを考えますと、温度が高いところで使った排熱を低温で使うという使い方をすれば、エネルギーの重複利用ができるわけです。ちょうど水を田んぼから引いて何べんも使うのと同じです。

ただ、これを実行しようとする、今のシステムではほとんどできません。というのは、熱の輸送あるいは貯蔵というのに大変お金がかかる、あるいは効率が悪いのです。それでは現実化しない。では、どうしたらいいのかといいますと、現在ある産業の立地、あるいは住宅の立地というものを、エネルギーのカスケード利用がやりやすいように変えなければいけないわけです。

例えば産業であれば、普通の工業製品についてコンビナートができておりますが、同じように、エネルギーを有効利用するような熱のコンビナートができなければなりません。これは従来、そういうコンセプトでできたものはほとんどないわけです。

そういった形で、今までのタイプではできなかった。しかし従来、本当にエネルギーを思い切って有効

図10 住宅の屋根を用いた太陽光発電ポテンシャル
(出典：茅ほか、1990)

に使用すれば、こういったものを具体的なコンセプトとして今後考えていくべきだというのが、私に限らず、この分野の人間の主張になっているわけです。

いずれにしても、こういった技術はすぐできるわけではありませんので、従来の省エネルギーにはなじみません。ただ、今申しましたように、長期的に問題を本当に解決しようと思ったら、こういう新しい技術も考えていかなければいけないということです。

と同時に、申し上げたいのは、この技術ひとつを考えてみますと、単に技術というよりは、みんなが協力しなければいけないということがよくわかります。というのは、そのような立地というものを皆がアグリーしなければいけないわけです。

そして、もうひとつは、民生用、つまり家庭、ビルのエネルギーの問題ですが、これについても最近非常に強く出ておりますのは、我々がいかにこういう分野でむだな形でエネルギーを使ってきたかという反省です。住宅のエネルギーというのは、ご承知のように調理でもせいぜい 200℃ぐらいの温度ですし、ほかのものは数十℃がせいぜいといった低熱需要です。ですから、そういったものをカバーする方法というのはいろいろ考えられます。特に一番ポイントになるのは、太陽エネルギーそのものです。

我々は太陽エネルギーを直接太陽から放射で、あるいは風、その他の形で変換した形で得ているわけです。ところが、現在の都市あるいは住宅ではこれを全く利用していない。これをもっと利用したらどうかというのが最近非常に強く出てきている考えで、日本の官庁のコンセプトの中にも、そういう考え方が大分出てきております。例えば、建設省の環境共生住宅というプロジェクトもこれですし、環境庁のエコポリス、あるいは通産省のエコエネルギー都市というコンセプトも同じです。

ポイントは何かといいますと、我々の持っている住宅を、単にその住宅だけを考えるのではなく、自然と調和し、自然エネルギーあるいは自然の環境をうまく利用していくというのが一番望ましいというコンセプト

トなんです。

わかりやすく申し上げますと、我々自身、夏の冷熱需要というものを考えた場合に、我々の家は木に囲まれていません。したがって、非常な冷熱需要が要るわけです。しかし、もし家の周りが木に囲まれていれば、葉の蒸発機能と、そして日陰で冷熱需要は大幅に下がります。自然というのはそういった形で、エネルギー需要に対して歯どめをかける作用を持ち得るわけです。

そういった形で、従来の都市に代わって環境調和型—この意味はエネルギーも減らし、実は廃棄物も減らす—ということが入っているんですが—そういった形で新しい都市を考えていくべきだというのが、最近出てきている考えで、従来のガーデンシティといったタイプの都市構造の考え方とは大分違っているわけです。

そういったことで、私が申し上げたいのは、これから本当の意味で「地球にやさしく」というのは、単に技術の開発だけではなくて、その技術を自分たちがアクセプトできるような感覚を持ってほしい。例えば、木の葉っぱが落ちるのをいやだといえれば、こういう町は成立しません。

こういったいろいろなコンセプト、これは技術が非常に大きなファクタですが、その技術を自分たちが進んで受け入れるという体制ができれば、結局は我々の地球というのはサステナブルな形になります。そういった意味で、技術と、それに合わせたような我々の考え方の調和というものが、まさに「地球にやさしく」という言葉に適合するのではないかと私は考えております。

(1993年11月18日受付)

かや とういち
茅 陽一 昭和32年、東京大学工学部電気工学科卒業。37年、同数物系大学院修了。同年、東京大学工学部電気工学科講師、38年、同助教授、53年、同教授となり、現在に至る。この間、米国MIT航空宇宙工学科講師、同カリフォルニア大学研究員、スイスパッテル研究所研究員を併任。専門はシステム制御工学、特にエネルギー・環境システムを対象。工学博士。