

地球規模環境問題の流れ

——その兆候と問題提起の経緯——

石谷 久

1. ローマクラブの問題提起： 問題の起源

「近年、宇宙船地球号と呼ばれる言葉が盛んに使われるようになった。これは有限な閉鎖系である地球上で増加しつつある人類が無制限にその活動を広げ、資源の消費を拡大し、その結果として環境破壊を続けるならば非常に近い将来、生存環境のいちじるしい悪化と食糧を含む広い意味での資源の不足をまねき、人類の生存自体が脅かされるであろうという意識の反映と見なすことができる。このような意識が現われたのは近年の特に先進諸国のいちじるしい経済成長により、限られた範囲における経済活動、したがってその結果発生する廃棄物の量がいじるしく増加してゆき、自然の浄化作用の限界を超過して、いわゆる公害の発生が顕著に現われつつあることと、他方で消費拡大のために資源確保が困難となってきたことが直接の理由であろう。さらに人類の活動圏もその活動量とともに一層拡大してゆき、従来人類の活動にとっては量的に無限と考えられてきた地球の容量の有限性がにわかにクローズアップされてきた。

このような状況に至った以上、従来と同様な成長を続けることが不可能なことは明らかである。このような問題意識にたって地球の有限性とこれが養うことのできる人口容量、または環境変化への影響を全地球的観点から研究検討する試みが多く成されている。このうち特にローマクラブと呼ばれる民間の国際的組織の委託を受けて、MITのMeadowsを中心とするグループの行なった定量的な限界探索の検討は著名である。(中略)

従来も食糧問題や鉱物資源の確保という観点からその利用の可能性、将来生じうる資源不足の状況の予測、これに対応する解決策(主として新たな資源探索と開発の技術の可能性)などはかなり調査検討も進められてきた。

一方で人口増加と消費の拡大による環境の劣化とこれに対する防除投資の算定なども行なわれている。このように個々の分野ではかなり定量的な研究が見られるが、その間の因果関係は十分に検討されず全体としては漠然とした危機感だけが感じられていたにすぎない。MITの研究はこのような状況をふまえて全地球の閉鎖系の問題として把握し、将来の危機が具体的にどのように現われ、いかに対応すればこれを避けることが可能かという問題を、はじめて数式モデルを用いて定量的に求めようとした点に、大きな意義が認められよう。

以上の記述は1973年に筆者らが医学のあゆみという医学関係の雑誌の人口問題に関する特集に寄稿した文[1]の冒頭である。現在の地球規模環境問題の意識としてもそのまま通用するかに感じられるが、当時かなり抽象的であった問題意識が、現在はより具体的な現象分析に裏づけられ、その結果として対象となる事象、問題意識や問題の分析手法、あるいは対応策に関する議論が具体化、精密化し、同時に説得力、危機感も一層増してきたことが特徴であろう。

しかしながら基本的な概念と分析手法については当時と共通のものが多くみられ、その意味では当時の問題提起とアプローチはこの種の研究分野の概念、意識、手法論の基本となっていることは否定できず、現在なお参考になることが多い。特に当時はじめて試みられたシステムの手法によるグローバル(地球)モデル化の流れは現在も一部のエネルギー分析等において引き継がれている。また上記の雑誌がこのような問題を取り上げたところで当時の問題意識を直ちに人口問題の一環としてとらえたという特徴もよく示されている。

本文ではまず当時の問題意識とその分析手法、ならびに現在に至る情勢や分析手法、態度の変化を要約し、さらに現在の問題意識との共通点や変化、また今後どのような対応が可能、あるいは予測されるかを簡単に示したい。

よく知られているようにローマクラブの問題提起はきわめて個人的な感覚にもとづく危機意識、特に発展途上

いしたに ひさし 東京大学 工学部

〒113 文京区本郷7-3-1

国の悲惨な生存環境とその根源にある人口問題に刺激されてその帰結である食糧危機、資源枯渇や環境劣化など、人類の生存全体に関する危機意識から発生したものである。必ずしも科学的な根拠のあるものではなかったがそれだけに純粋な動機から問題提起が行なわれ、これを裏づけてそのメカニズムを説明しようとしたのが上記のワールドモデルによる問題提起である[2]。その基本手法は現在では特に目新しい試みではなくなったが、きわめて大胆に世界全体の人口、食糧、鉱物エネルギー資源の生産、消費、汚染などを表わすSDモデルを構成して、各種のシナリオのもとに人口爆発が進んだ状態で起こり得る状況を示した点に特徴がある。資源や環境容量が全世界で有限であるという枠組みのもとでこれを消費する人口が増加し続ける状況を想定すれば、当然悲惨な結果が現われるわけであって、そのモデルの構造やましてその精度には異論があったものの、発展途上国各地の現況と前記の因果関係から漠然といだかれてきた危機意識がより明確な思考モデルの上で論理的に示された点にその意義が認められる。

その基本的なモデル構造を図1に引用したが、前述のようにその問題意識から人口問題、エネルギー資源枯渇の恐れ、地球環境の汚染といったキーワードがきわめて抽象的で不明確な形ながら、適当な傾向を表わす関数として導入され、その当然の帰結として前記の危機的状況をグラフにより明示的に示した。

この報告は当然世界の注目を集める結果となって、本来の問題提起の意味は十分達成したが、同時にその接近法、手法、結論に対してきわめてホットな議論と批判を呼び起こし、特にこれを地球環境の数理的モデルとして眺めた分野からは厳しい批判を受けた。その主要な論点は以下に要約される。

a) Database が不十分で、しかも恣意的なモデル構造である。

b) 乱暴な aggregation (集約化) とこの結果として格差が議論できない。

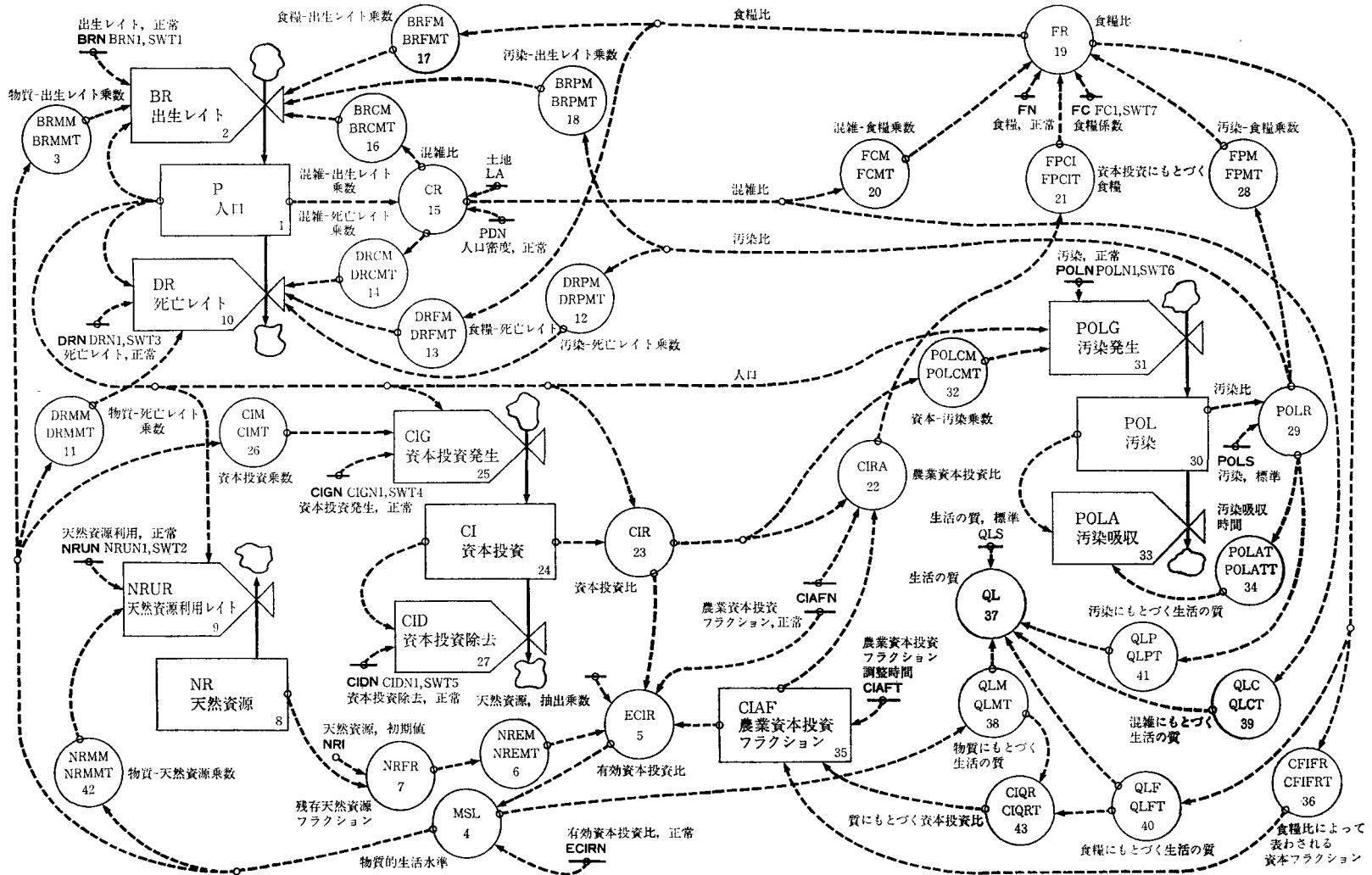
前者は System Dynamics(SD) に対する誤解にもとづくところもあって、その構造は現実との明確な対応は必ずしもない思考実験的モデルであり、当然そのパラメータも現実の物理量との対応がとれようもないことから、これを工学的センスのモデルと取り違えればモデルの定義からも容認できないことになる。しかしながらこれは前述のように1つのシナリオにもとづく危機意識の説明モデルであって、簡単明瞭に危機の因果関係を誇張

して示したという意味で1つの重要なステップといえる。また手法的にもそれなりのデータを集め、パラメータの範囲を大きく変えて多様な感度分析を行なうなど、その限度のなかでは意欲的な試みであったことは認めざるを得ない。

このモデルの役割はあくまでも前記の思考の説明にとどまるものであるが、モデルの構造にもとづく第2の問題点はより本質的である。すなわち、このモデルがきわめて単純化した地球モデルであって、単に世界全体を1つの集約単位としてとらえたところに最大の非難が集められた。全世界を1つの代表変数で表現してそこに資源や環境の制約を加えれば、当然に人口を減少し、消費を削減して対応しなければ生き残る解は存在しないが、上のモデルはまさにそのような資源消費と人口の抑制以外に解がないということを示した。世界を単一の集団と考えることはその総計値、あるいはその平均値で状況を議論することに他ならず、現実には存在するいちじらしい地域格差のため平均値が制約にかかるはるか以前に貧しい地域は厳しい状況にいたることは明白である。そもそもこの問題意識が発展途上国の悲惨な状況をみた先進国側から提起されたこと自体が、地域格差を考慮しない議論は現実には成り立たないことを示している。

これに対して当時、あるいは現在もそれほど変化していないが、存在した代替的な分析手段は、データとしては各国の経済統計、国連、OECD 統計に限定されたが、いずれも先進国中心で、発展途上国については精度が悪いのが普通である。他方で分析モデルとしてはマクロ経済モデル、これを詳細化した多部門モデルやそのもととなるIO分析などが有効である。これらはいずれも計量経済モデルであって、統計にもとづいた分析である以上当然データベースもしっかりして信頼性もあるが、当時の分析態度はデータ指向的な分析モデルであって、将来シナリオについては関与しないこと、データも結局先進諸国に偏在するため発展途上国にはほとんど適用できないことなどにこの種の分析への応用の限界も感じられた。現実には上記のSDモデルに徐々に計量経済モデルの手法が取り込まれ、個別の部分の構造、信頼性が補強された。

次のステップとしては南北問題を明確にする努力が払われ、これは手法的には当然多地域分割モデルとなり、モデル構造も精密化されたが[4]、その時点でやはりデータと構造上の精度の問題は避けられない状況であった。ここで得られた結論も結局は先進国から発展途上国



5つのレベル変数——人口、天然資源、資本投資、農業用資本投資、および汚染——が相互に関係している世界モデルの完全なダイアグラム
 出所：ワールド・ダイナミクス，システム・ダイナミクスによる人類危機の解明，ジェイW・フォレスト著，小玉陽一訳，日本経営出版会，1972年

図1 成長の限界モデルの基本構造(SDの表記法による)

© 日本システム・ダイナミクス・リサーチ学会，無断転写・複製・転載を禁ず。

への食料と資本援助が不可欠であることと、発展途上国側の人口抑制が緊急に必要なものであるというきわめて常識的なものである。個別的にはかなり斬新なアイデアも盛り込まれており、エネルギー政策についても核エネルギーへの全面的な依存の危険性、砂漠地帯を中心とする太陽エネルギーへの転換、さらに熱帯雨林の乱伐に対する危惧の念など現在議論されている話題はすでに提示されていた。特に炭酸ガス放出による地球温暖化問題は絶対的な外部制約条件として強調されている。

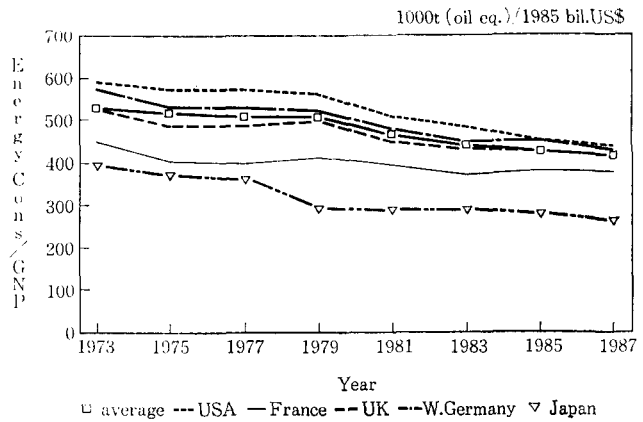
さらに第3世界からの提言[5]としてより積極的に先進国から発展途上国へ具体的にGNP 2%の援助を必要とするとしたレポートが続いた。これはその分析目的から地域分割よりもGNP軸上の分割を重視した4地域モデル（前者は10地域モデル）で、より所得格差を強調したモデルである。

以上のようにローマクラブの活動は世界中に地球の有限性と人類の生生活活動の成長の限界、将来の危機に関して警鐘をならす役割を果たし、それと付随して全地球的観点からの長期的、総合的な計画、将来発生し得る状況の分析などにシステム的手法の導入を促進した。しかしながら、ローマクラブそのものは非政府機関の任意団体に徹した姿勢をとり、その影響力にはおのずから限界があって、ローマクラブ自身が認めていたように問題提起に徹することになった。

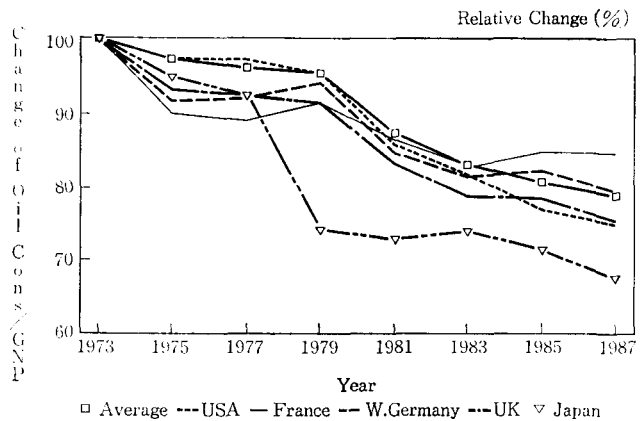
さらに重要なことはこの活動全体が先進国を中心に進められ、手法的にも関心となる話題、問題意識ともに先進諸国中心のものとならざるを得なかったことが問題提起以上に踏み込めなかった原因と考えられる。発展途上国からみればそれ以前に解決すべき問題が山積しているという意識であった。

2. ローマクラブ以後： 石油危機の発生と対応

このローマクラブの活動に続いていわゆる石油危機が発生し、その背景には成長の限界の問題意識が作用したともいわれる。周知のように石油危機の直接原因は政治的に不安定な中東情勢を背景とした中東戦争やイラン革命であるが、結果として低価格安定供給に慣れた先進石



(1) 絶対値の比較 (石油換算 1000 t / 1985年10億US\$)

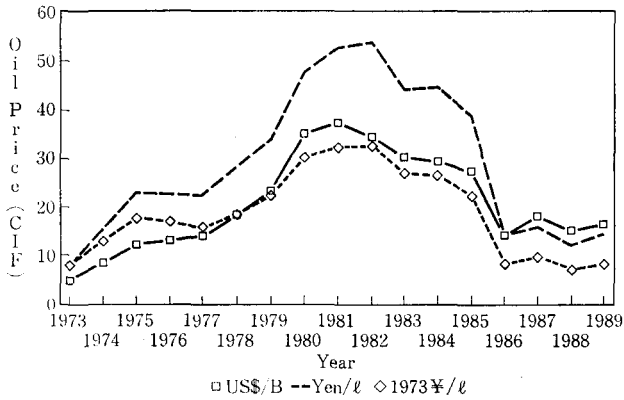


(2) 各国の相対変化 (1973年に対する比, %)

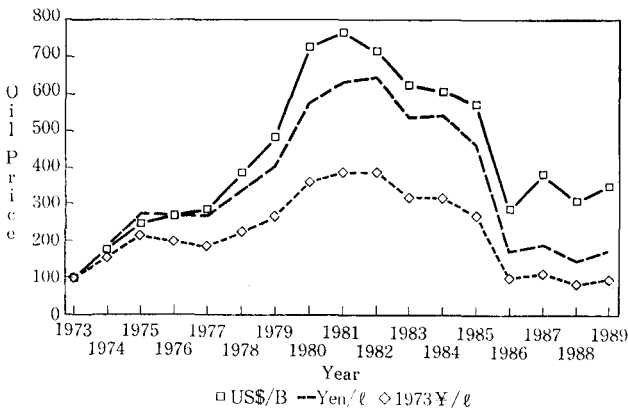
出所：OECDエネルギーバランス表による

図2 OECD諸国のGNP当たりエネルギー消費量の変化

油消費国に対して戦略的な資源としての石油の重要性和産油国主導による価格の高騰をもたらした。短期間の急騰は消費国の国際収支の極端な悪化、成長抑制、経済的混乱等をもたらしたが、その結果として不安定な石油依存の危険性、エネルギー消費の効率化等、資源保存の考え方を世界中に普及させたのは事実であって、その意味では正しくローマクラブの問題提起に応えるものであった。しかしながら、石油価格高騰に伴う経済的混乱はこれに対応可能な先進諸国よりも技術力、経済力のない発展途上の非産油国を直撃し、世界的な貧富の差をますます拡大する結果となったことはよく知られている。世界規模の資源枯渇の代わりに価格高騰による資源利用制約が働き、他に価格転嫁不能、あるいは省エネ技術に劣る発展途上国がますます悲惨な状況に陥った結果は、環境問題と同様に格差を残したまま価格上昇という経済原則



(1) 絶対価格の変化



(2) 相対変化(1973年に対する比, %)

出所: 大蔵省「日本貿易月表」による

図3 石油価格の変化 (US\$/B, ¥/ℓ, 1973年 実質¥/ℓ)

のみで資源保存を図ろうとすることがいかに困難かをよく示したものである。

他方で価格高騰が短期間に省エネ努力を促進したことも事実であって、その極端な例が日本の産業のエネルギー単位の削減に顕著に見られる(図2)。また価格高騰は一方では資源転換を促し、他方で経済構造に本質的な変化がなければ結局は価格転嫁が一巡して産油国の輸入にも跳ね返り、需給バランスからも絶対的な価格は最高時の1/2程度に反落した。特に省エネ技術の実現に先行した日本は石油価格上昇の影響をいち早く切り抜け、競争力は一層強化した結果円の価値も上昇し、日本の実質石油価格に至っては石油危機以前の水準に戻るといった結果に終わった(図3)。

結局ローマクラブの問題提起のうちエネルギー問題のみが注目され、資源節約の努力が進んだ反面で、発展途上国は破滅的な打撃を受け、他方で先進諸国も自国の対応に追われて有効な援助が実現困難であったというのが

この間の経緯と要約されよう。

またこの間には当然石油(代替)資源の開発と石油依存度の減少努力が進められ、システム分析手法の上からはエネルギーモデルの開発がきわめて熱心に行なわれた。特に原子力関連のエネルギーモデルの開発はめざましいものがある[6]。基本的なエネルギーモデルとしてはIO分析にもとづく積み上げ型のエネルギーフローモデルとこれにもとづいた最適原料選択などのLPモデルから、長期的なエネルギー需要モデルと資源開発可能性を推計した供給モデルを組み合わせたややSDのモデルまで多様なものがあるが、全体的には計量モデル的な色彩が濃い。

3. 地球温暖化問題

このような経緯を振り返って、すでに指摘されているがほとんど手をつけられなかった地球規模環境問題が再び現われてきた事情ならびに前回との相違に注目して地球環境問題を眺めると以下の点が指摘される。詳細については本特集別稿、あるいはその他多数の解説がある[7-10]のでこれを参照されたい。

今回の問題も話題になったのは最近であるが、1970年代から継続して問題提起が続けら

れ、危険性が高まってゆく推移が物理観測により確認された点特徴的である。特にフロンガスの問題などは前の漠然とした不安感に比べて原因、対策も明確となり、経済的に比較的余裕のある先進諸国における人工的化合物の製造停止といった対応が速やかに行なわれた。この意味ではこれは典型的な公害問題のパターンに近いが、影響範囲が国境を越えて地球規模となり、被害が直接人類におよぶ前に対処できた例といえる。

これに関連して酸性雨や温暖化問題が挙げられてきたわけであるが、前者は被害も原因で明白で、ローマクラブの時期よりもかなり深刻になっている。したがって緊急に対応する必要が叫ばれており、しかも日本など一部の国ではその対応技術もほぼ確立しているにもかかわらず、その実施には経済的な障害がでてくる。温暖化問題になるとその被害程度や時期、さらに対応技術とコストが不明確になるうえ、より本質的なエネルギー消費にかかわってきて、その対応の負担は一層大きくなる。全般

に現在の問題はローマクラブで指摘された将来の危機が現実に兆候を示しはじめた時期に当たり、一部の問題はすでに対応まで進んだものといえる。

手法的には、上記のように物理観測による裏づけが最初にある点で、分析や解決の困難な人口問題からスタートした前回よりもかなり客観的な手法が中心となっている。これには計算手段の飛躍的な進歩や問題意識の浸透など周辺の技術あるいは社会的な環境変化も無視できない。詳細は別稿に示されると思われるので、その分析の枠組みを要約すると

超長期的エネルギー需要ならびに CO₂ 発生量予測 (SD 的モデル)

⇒ ⇒⇒ 大気中 CO₂ 濃度 (大気海洋大循環物理的モデル)

⇒⇒⇒⇒ 気候変動 (全地球規模気候モデル (平衡値))

⇒ ⇒⇒ 各種の環境変化, 被害の推定

となる。このうち過去から現在までの CO₂ 発生量と大気中の濃度は直接的に確認されており、これが問題提起の動機となっている。

上記のようにこの問題の分析手法は、自然環境を対象とした物理モデルが中心であるが、相手が大きすぎてパラメータはむろんのこと、メカニズムにも不明な点が残されている。特に上記の矢印が切れた部分の因果関係には不明瞭な点が多く、現象観測と理工学分野の研究による精度の向上が期待される領域である。

これに対して炭酸ガス排出抑制は省エネ、燃料転換、CO₂ 固定、CO₂ 回収貯蔵等しか考えられず、しかも具体的な解決策はもっか模索中である。いずれも現在の経済的最適性を無視して対応をとれば当然、経済性の低下をまねくので、その被害と対応策の犠牲との二者択一の状況に直面しなければ進展しにくい性格を持つ。特に炭酸ガス発生の大きい国ほど経済的に困難な状況にある現状では、不明確な将来不安のために炭酸ガス発生を抑制することは大きな議論を呼ぶことになり、再び南北問題が再燃することは明白である。

4. 地球環境問題の一般的な取扱いと問題点

一般に環境問題を国内でどのように解決してきたかを振り返ってみると、よく指摘される外部不経済とその内生化するにつれて、すなわち制御論的に考えれば、短期的経済性に代表される局所的、あるいは短期的な最適化と、汚染の蓄積などの全体的、長期的な最適化の評価基準の乖離があって、被害の顕在化につれて次第に強制的、

あるいは自発的にそのマイナス面が発生源への負担という形で経済構造に内生化されて解決に向かっている。環境問題のもう一つの側面は一般に発生源と被害者が体制・組織的にも地理的にも分離していることで、これが解決を困難にすることは国内でもすでに経験済みである。この場合も、被害あるいは損失が非常に明確となった場合、代替手段が容易に見つかる場合、あるいは発生源側に十分な経済的、技術的対応能力がある場合には比較的容易に解決できる。また同じ国内であれば公的機関や国内の法的な規制が可能であって、強制的な解決手段も不可能ではないが、国際間では強い強制力はなく、少なくとも同一水準の認識、環境保護に対するモラルが必要であって、ヨーロッパの国際河川の環境は上記の条件により維持されてきたといえる。

前述のローマクラブの理想論では人口、南北格差、資源保存など提起された長期的課題は実質的にほとんど解決できなかったが、その根底には上記の具体性、強制力、経済的価値基準の欠如があり、国際的な地球規模環境問題に限れば現在も同じ状況にある。特にエネルギー問題が根底にある酸性雨、温暖化問題はいずれも上記の条件が満たされない。特に温暖化は被害を受ける地域の他に利益を得る地域すらあり、別に抑制策の負担に耐えられぬ地域もできるなど、各国の利害は複雑に交錯する。また今後の経済成長を望む発展途上国には、過去の蓄積も影響する温暖化問題で、不明確な被害に対して経済的負担を伴う対応策を強いられることには非常な不公平感が残ることになる。酸性雨については発生源でも直ちに被害を受けるので比較的理解しやすいが、これも技術の裏づけを要し経済上の犠牲を伴う。

こういう場合にしばしば技術と経済で解決するという漠然とした期待が得るが、温暖化問題では経済的に成立しにくい技術まで動員せざるを得ないところに最大の問題がある。一般に省エネ、環境保護技術なども経済性のないものは実現しないが、価値観まで考慮すれば現在実現していない対応策は必ずなんらかの負担を伴うものであるから補助・課徴金など適当な手段により経済性を持たせることが不可欠となる。ただし無理に過大な罰則を設けると、すでに見たようにエネルギーのような根源的な需要に対しては経済的に弱い地域が破綻する。前述の被害の不確定性も内部経済化への障害になる。また経済への内生化は一国の中では考えやすいが、国際的な利害が衝突する温暖化問題では、現在議論された CO₂ 排出権、炭素税なども equity (公正) の基準をどう考える

か、その負担と利益をどう配分すべきか、また本当に強制力があるかといった問題解決は困難が多く、国家間の駆引きも予想され、国際的なコンセンサスが得られるまでに紆余曲折が見込まれる。

以上の困難を早急に解決するのは困難であっても以下のような考慮は重要である。

1) 温暖化のメカニズム、影響、特に経済的損失などを速やかに明確にして対応策との経済的な利害特質を明らかにすることは絶対条件であり、このためには特に科学的な現象監視と解析による早期の現象把握が重要なキーとなる。

2) 炭素税等の負担可能性、経済発展段階におけるエネルギー弾力性と頑健性の差、排出権の売買市場などという形での国際援助等を利用して発展途上国の経済的負担を軽減し、公平感を保つ努力が必要である。

3) 発展途上国への援助もいちじるしい国内格差と前近代的な体制等の社会的後進性により効率がいちじるしく悪く、その悪循環を断ち切ることが必要である。エネルギー問題ではあまり表にでないが、ローマクラブの時の中心の問題であった人口問題は温暖化のように総量が問題となるときには最も重要であって、先進諸国のみがCO₂抑制を行なっても無意味に近い。人口問題はむしろ国際的流動性の増加とともに人口流動の形で一部、格差解消が現実に進みつつあるが、これ自体格差の産物であって、経済的混乱では悲惨な状況につながる恐れも多く、抜本的な解決が必要である。

4) エネルギー消費を絶対的に減少可能な省エネ策は無条件に進める必要があり、たとえ一国内のみで先行しても効果が実証されれば経済的にも全世界に普及することは日本の例でも示されている。ただし先進諸国には価値観の変化が必要な部分もまだかなり残っており、長期的な資源不足や価格の上昇によって徐々に省エネ化が進むと予測される。

これらの問題は直ちに解決できるものでもなく、過去の例をみてもエネルギー危機を含む政治経済的な危機や環境問題は繰り返し発生し、その度にすべてではなくても少しずつエネルギー源と需要の分散、省エネ、新資源

開発など技術的な進歩による対応力と、社会的理解が深まってゆくというパターンを繰り返している。今回の地球規模環境問題も一般の理解が深まり、ある程度の技術的対応が期待できるが、提起された問題すべてが完全に解決されるまでには、新たなエネルギー問題や経済的混乱等が繰り返し発生することを覚悟する必要がある。

参考文献

- [1] 成長の限界モデルと今後の日本、石谷、茅、医学のあゆみ、Vol. 85, No. 13, 1973. 6.
- [2] 成長の限界 (The Limits to Growth) ローマクラブ「人類の危機」レポート、デニス・メドウズ他、大来佐武郎監訳、ダイヤモンド社、昭和47年5月
- [3] 新しい世界像を求めて—ローマクラブ東京シンポジウム—、大来佐武郎監訳、ダイヤモンド社、昭和49年3月
- [4] 転機に立つ人間社会ローマクラブ第2レポート、M. メサロビッチ他、大来佐武郎他監訳、ダイヤモンド社、昭和50年2月
- [5] 新しい社会の創造—ラテンアメリカから見た世界モデル—、A. O. エレラ他、茅陽一他訳、ダイヤモンド社、昭和51年11月
- [6] エネルギー・モデル開発の現状とその機能、N I R A (総合開発機構) レポート、N R O-53-2, 昭和54年6月
- [7] Greenhouse Warming : Abatement and Adaptation, editors : N. J. Rosenberg. W. E. Easterling, P. R. Grosson and J. Darmstadter, Resources for the Future, 1988.
- [8] 小特集—地球規模の環境問題—、日本シミュレーション学会誌、Vol. 8, No. 3, 1989. 9.
- [9] 特集、CO₂問題と化学工学の役割、化学工学、Vol. 54, No. 1, 1990. 1.
- [10] 特集、地球環境の変容と保全、エネルギー・資源学会誌、Vol. 12, No. 1, 1991. 1.