

(11) 環境・資源制約下における最適成長経路に関する研究

—地球環境問題と持続可能な開発をめぐって

OPTIMUM DEVELOPMENT PATH UNDER ENVIRONMENT AND RESOURCE CONSTRAINTS

—A CONSIDERATION ON THE GLOBAL ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

井村 秀文*

Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Economic development in most industrialized nations for the first two-thirds of this century was achieved without giving special attention to the limits to growth. They possessed their adequate resource supplies, or they could import resources in unlimited amounts from developing countries. Moreover, the earth was virtually large enough to assimilate the pollutants which were cogenerated and discharged into the environment when resources were utilized. With the magnificent growth of world population and rising standard of material consumption, however, future economic development crucially depends upon its long-term availability of energy and other resources as well as the assimilation capacity of the global ecosystem on the earth. The world must quickly design strategies to shift from its destructive processes of growth to sustainable development paths. In view of this, the present paper presents a theory to discuss the optimum path of resource utilization and associated economic development when the limited availability of resources and the damage cost caused by pollutants are both taken into account. The theory provides a hint for the optimum consumption of fossil fuels by balancing the economic production with the risk of global climate change by CO₂.

KEY WORDS; sustainable development, global climate change, limits to growth, optimum development path, exhaustible resource

1. はじめに

経済成長とともに、人類による資源・エネルギーの消費量は飛躍的に増大し、その結果として、膨大な量の汚染物質・廃棄物が環境中に蓄積されている。近代工業文明は、生産・消費活動のために必要な資源・エネルギーは無尽蔵であり、また、地球の環境容量は無限大であるとの仮定の上に成立してきた。もちろん、これらの仮定が厳密な意味で成立しないことは自明であるが、かなり長期の将来にわたって近似的に成立するものとの暗黙の希望的、楽観的期待が人類を支配してきたように思われる。これらの仮定に対して初めて体系的な疑問を呈したのが、ローマクラブによる「成長の限界」報告書である[1]。

その後、第一の仮定が成立しないことは、1970年代に生じた石油危機によって現実問題として示された。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター

Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University

そして、現在、第二の仮定が破綻する日も意外に早く訪れそうなのが明らかになりつつある。地球的規模で急速に進行しつつある様々な環境問題がその証左である。とりわけ、二酸化炭素による地球温暖化問題は、環境の有限性という意味から、世界経済の成長経路に大きな制約を課すものである。

本論文では、地球温暖化問題を念頭において、資源の有限性と地球環境容量の有限性という2つの制約下における最適成長経路に関するモデルを提示し、これに基づいて、将来の化石燃料消費と地球環境及び世界経済の長期的関係を考察する。ここにおける分析目的は、必ずしも現実の世界を精密にシミュレートすることではなく、1つの思考実験として、エネルギー、環境、経済の諸因子がどのように相互関連しあって将来世界を形成するかの基本的構造を洞察し、環境と調和した成長、すなわち「持続可能な開発 (sustainable development)」実現のための政策オプションを探ることである。

このため、汚染物質（廃棄物）が環境中に蓄積することによる被害関数を仮定し、長期的将来にわたっての、 $Y-D$ （ Y ：生産、 D ：被害）の現在価値を最大化するような最適成長経路を求め、このような経路を実現するための資源価格水準等について考察する。

2. 資源・環境制約下における最適成長経路に関するモデル

資源・エネルギーの消費によって環境中には様々な化学物質（汚染物質）が廃棄物として排出される。ある年 t における資源の消費量を X 、この資源の消費によって発生する廃棄物の環境中における存在量（ストック）を Q とすれば、多くの場合、

$$dQ/dt = -\mu Q + wX \quad (1)$$

が成立する。ここで、 μ は環境の自浄能力（化学的分解や拡散による環境中濃度の減少速度）を表わすパラメータ、 w は1単位の資源から発生する廃棄物の量である。この式は、線形近似の範囲で成立するものであり、廃棄物の蓄積量が多量になれば成立しなくなる。環境中に存在する廃棄物は、様々な形で人間社会に被害をもたらす。ここで注意すべきは、被害の蓄積性である。地球規模の環境変化によって一度発生した被害が修復されるには、長期の時間が必要である。このため、将来における被害（フロー）は、新たな環境悪化によって発生する被害とそれ以前に発生した被害の残存量の和となる。こうして、被害（フロー）は時間とともに蓄積的に増大する。そこで、ある年のフローとして勘定される被害コスト D について次式が成立するとしよう。

$$dD/dt = -\nu D + G(Q, \dot{Q}) \quad (2)$$

ここで、 $G(Q, \dot{Q})$ は、環境中の廃棄物ストックが Q であるところに新たに $\dot{Q}$ が追加された結果として限界的に発生する被害（フロー）であり、 ν は被害の修復速度を表わすパラメータである。あるいは、 $\tau = \nu^{-1}$ を被害の持続時間（ $1/e$ 時間）と考えてもよい。被害が完全に非可逆的で修復不能であれば、 $\nu = 0$ である。上式は、ある時間 t における被害はそれ以前の時間 t' において発生した影響の余効（after effect）の重ね合わせで表わされることを意味する：

$$D(t) = \int_0^t \exp\{-\nu(t-t')\} G(Q(t'), \dot{Q}(t')) dt' \quad (3)$$

以下では、 G は環境中廃棄物ストックの増加速度に比例するものと仮定し、

$$G(Q, \dot{Q}) = g(Q) \cdot \dot{Q} \quad (4)$$

と置く。関数 $g(Q)$ の形は、具体的な問題事象によって決定されねばならないが、基本的には2つのケースが考えられる。(1) $g'(Q) > 0$ の場合：廃棄物ストックの増大とともに被害が加速的に増大する（「加速型被害」）。(2) $g'(Q) < 0$ の場合：廃棄物ストックが増大するとともに、被害は飽和してきて、あまり増大しなくなる（「飽和型被害」）。一般に、汚染による一次的被害だけを考える場合、限界被害逓減（飽和型被害）が仮定されるケースが多いが、地球規模の問題の場合には、その影響は複合的であり、様々な連鎖的影響を引き起こすことによって、加速型被害をもたらす可能性がある。例えば、大気中 CO_2 濃度の上昇によって、気温が上昇し、さらに海洋の水温上昇や海面上昇が生じ、それが生態系に影響をもたらす過程で、様々な非線形的効果が働く結果、加速型被害となることが考えられる。

一般に、長期的将来にわたる最適成長経路は、式(1)、(2)及び資源が有限である条件：

$$\int_0^{\infty} X dt \leq S. \quad (5)$$

の下において、積分

$$I = \int_0^{\infty} U(X) e^{-rt} dt$$

を最大化する問題として設定される。 $U(X)$ は、最適性を評価するための目的関数であり、問題分析の視点によって、社会的厚生関数(social welfare function)、効用関数(utility function)等が用いられるが、ここでは、議論を具体的に進めるため、

$$I = \int_0^{\infty} \{F(X) - D\} e^{-rt} dt \quad (6)$$

としよう。すなわち、資源の消費によって得られる生産 $Y = F(X)$ からそれによる被害 D を差し引いた値の現在から将来に至る和を現在価値に割り引いた値 I を最大化するような資源の消費経路を求める。ここで、 r は割引率であり、 $F(X)$ は通常の生産関数の条件を満足するものとする：

$$F'(X) > 0, \quad F''(X) < 0 \quad (7)$$

なお、資源以外の生産要素（資本、労働力等）は一定と考える。

この問題における最大の論点は割引率の値をどのように設定するかである。割引率を大きな値に設定すれば、遠い将来に発生する被害の現在価値は小さく評価され、逆に、近い将来における生産の価値は相対的に大きく評価されることになる。通常のエネルギー政策の議論におけるタイムフレームは数十年程度であり、割引率としては2~10%の値がとられる例が多いが、これも確立された根拠があつてのことではない[4]。地球環境問題においては、100年単位の長期的将来において予測される被害を見越した最適政策を議論する必要がある、このためには、割引率の値は低めに設定しなければならない。しかし、具体的にどのような値を採用するかは、遠い将来において予測される被害（コスト）と近い将来における生産（ベネフィット）とを、社会としてどのように天秤にかけるかという政策的問題であり、容易に結論は出せない。むしろ、本論の目的は、割引率の値によって政策にどのような変化が生じるかを考察することである。

上記の最大化問題は、Hamiltonian、

$$H = [F(X) - D]e^{-rt} + \xi e^{-rt} [-\mu Q + wX] + \eta e^{-rt} [-\nu D + g(Q)(-\mu Q + wX)] - \lambda X \quad (8)$$

を用いて定式化できる（正準方程式[2]、[3]）：

$$d(\xi e^{-rt})/dt = -\partial H/\partial Q \quad (9.1)$$

$$d(\eta e^{-rt})/dt = -\partial H/\partial D \quad (9.2)$$

$$\partial H/\partial X = 0 \quad (9.3)$$

$$dQ/dt = \partial H/\partial(\xi e^{-rt}) \quad (9.4)$$

$$dD/dt = \partial H/\partial(\eta e^{-rt}) \quad (9.5)$$

計算により、

$$d\xi/dt = (r+\mu)\xi - \eta[-\mu\{Qg(Q)\}' + wXg'(Q)] \quad (10)$$

$$d\eta/dt = (r+\nu)\eta + 1 \quad (11)$$

$$\lambda = [F'(X) + w\{\xi + \eta g(Q)\}]e^{-rt} = \text{const.} \quad (12)$$

となる。式(11)は容易に積分され、

$$\eta(t) = Ce^{(r+\nu)t} - 1/(r+\nu) \quad (C = \text{定数; adjustable parameter}) \quad (13)$$

となる。ここで、 λ は資源の潜在価格の現在価値である。また、式(12)を微分することによって次式が得られる：

$$dX/dt = [\lambda re^{rt} - w\{d\xi/dt + g(Q)d\eta/dt + \eta g'(Q)dQ/dt\}]/F''(X) \quad (14)$$

上の微分方程式の組の解の中、不等式(5)を満足するものが求める解である（資源を完全に消費し尽くすものとすれば等号が成立する）。式(5)の左辺の積分が収束するには、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} X(t) \rightarrow 0 \quad (15.1)$$

このためには、 t が十分大きな領域において

$$dX/dt < 0 \quad (15.2)$$

でなければならない。上の微分方程式には非線形項が含まれていて解析的には解けないので、数値シミュレーションによって解の特性を検討する。ただし、現実の問題として、時間の範囲を $t \rightarrow \infty$ まで考える必要は無いので、ある十分大きな時間 T までの範囲で考える。

3. 資源の有限性と成長経路

上のモデルにおいて、環境への影響を全く考えないことにすれば、単に現在から将来にわたる生産の現在価値を最大化するような資源消費経路を求める問題に帰着する。Cobb-Douglas型の生産関数を仮定し（他の生産要素は1と置く）、

$$F(X) = X^\alpha \quad (0 < \alpha < 1) \quad (16)$$

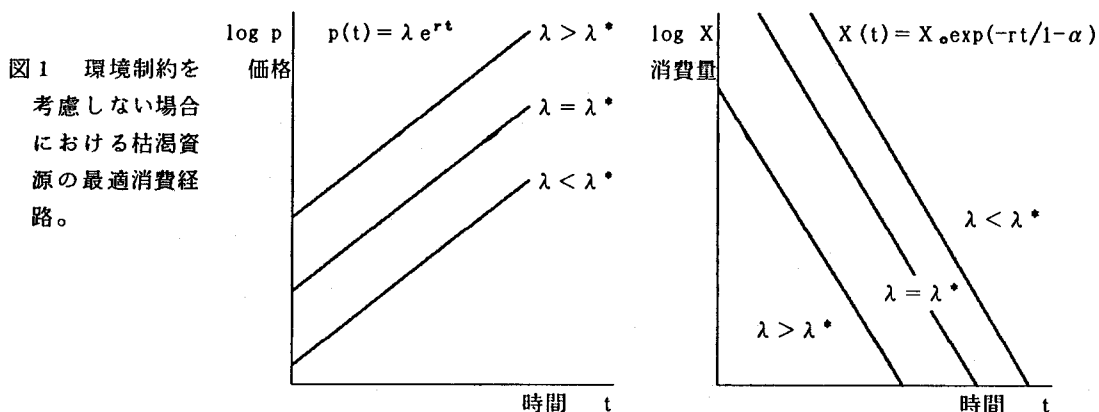
と置けば、解として、

$$X(t) = X_0 \exp(-rt/(1-\alpha)), \quad X_0 = (\alpha/\lambda)^{1/(1-\alpha)} \quad (17.1)$$

を得る。つまり、遠い将来における生産は現在価値としては低く評価されるため、出来るだけ早い時期に資源を消費し、将来に行くほどその消費量を減らすことになる。ここで、資源を完全に消費しきるためには、

$$X_0 = (r/1-\alpha) S_0 \quad (17.2)$$

であり、このときの λ を λ^* と置く。パラメータ λ は $t=0$ における資源の価格に他ならず、 $t>0$ における資源の消費経路は初期価格 λ によって決まる。 $\lambda = \lambda^*$ のとき、資源は完全に消費し尽くされるが、 $\lambda < \lambda^*$ の場合、資源は有限時間で枯渇し、 $\lambda > \lambda^*$ の場合、資源は消費し尽くされずに余ってしまう。この特性を図示したのが、図1である。明らかに、 $\lambda = \lambda^*$ のときに将来にわたる生産の現在価値は最大になる。すなわち、有限な資源を最適に消費するためには、初期価格が正しく設定されねばならない。また、資源の価格は $p(t) = \lambda e^{rt}$ に従って上昇する（ホテリングの定理[5]）。ただし、このような議論が成立するためには、資源の量が既知であり、それを取り引きする「先物市場」が存在するとの前提が必要である[6]。



4. 環境の有限性を考慮した成長経路

4.1 資源価格と成長経路

次に、当初の問題に戻って、資源の有限性と環境の有限性という2つの制約を考慮した場合の成長経路について考察してみよう。

ここで、

$$\pi(t) = \lambda e^{rt} + \zeta(t) \quad (18)$$

$$\zeta(t) = -w[\xi + \eta g(Q)] \quad (19)$$

と置けば、式(12)より、ある時間 t における最適資源消費量は

$$F'(X) = \pi(t) \quad (20)$$

によって決定される。すなわち、 π が最適資源消費を決定する資源価格である。

第3章に述べたように、被害を全く考慮しない場合の最適資源価格は $\lambda(t) = \lambda e^{rt}$ であるから、 ζ は被害を考慮することによる最適価格の変化である。ある初期価格 $\pi = \lambda$ から出発したとして、A：被害を全く考慮しない場合と、B：被害を考慮する場合の2つの経路を比較してみよう。消費可能な資源量が一定という条件下で積分(6)を最大にするという要請からは、Bの方がAに比べて、近い将来により多くの資源を消費

することになる。これは、将来大きな被害が発生することが予見出来たとしても、それを現在価値に割り引いて評価すると小さな値にしかならず、 $(Y-D)$ の現在価値については、 Y を大きくした方が有利になるからである。式(20)は、このような資源消費経路が実現されるための価格水準を与える。

将来にわたる最適な資源消費を実現するための計画機関(PB: Planning Board)の存在を想定しよう。PBは、上の計算に基づいて年々の π を決定し、資源の価格をこの水準になるように誘導すればよい。その具体的な方法として各種の税制や課徴金の利用が考えられる。

4. 2 被害関数と成長経路

地球的規模の環境問題による将来被害を正確に予測することは至難である。それにもかかわらず予見的な未然防止策をとることが不可欠とすれば、何らかの被害関数を仮定し、しかも、リスク回避の立場から被害は大きめに想定する必要がある。ここでは、関数 g として、

(I) 加速型被害のケース: $g(X) = g_0 \log(Q/Q_0)$,

(II) 飽和型被害のケース: $g(X) = g_0(Q/Q_0)^c$
($c < 0$)

の2ケースを仮定してみよう(Q_0 : Q の初期値)。

加速型被害においては、遠い将来においてより大きな被害を予測し、逆に、飽和型被害の場合には、近い将来における被害を大きく予測する傾向になる。この結果、(II)の方が(I)に比べて、早期に多くの資源を消費することになる(図2(a)及び(b))。つまり、早い時期に資源を消費し、大きな被害を発生させるが、資源を消費し尽くせば、やがて被害は修復する。これは、被害修復(速度 ν)を仮定しているからである。

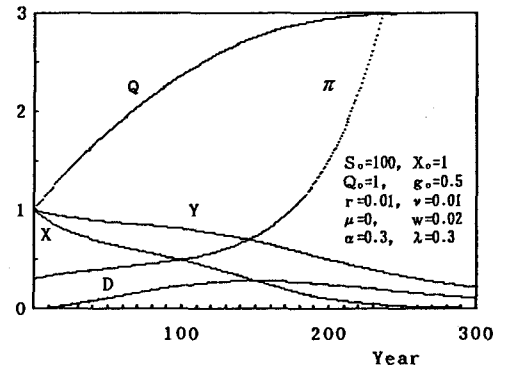
いずれの場合においても、被害を大きく予測するほど、近い将来においてより多くの資源を消費し、より多くの生産を上げた方が有利となる。これは、遠い将来における被害の現在価値は割り引きのため小さく評価されるからである(図2(a)及び(c))。

4. 3 割引率の値による経路の変化

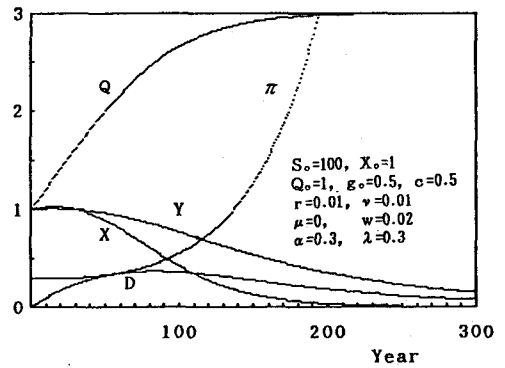
割引率の値による経路変化の計算例を図3に示す。ここでは、変化特性が顕著に現れるように、大きめの被害を仮定している。この計算結果によれば、割引率による経路変化の特性は、被害関数によって対照的に異なる。すなわち、加速型被害の場合には、 r が大なほど、毎年の資源消費フローは小さくなり、資源枯渇

図2 シミュレーションによる最適経路

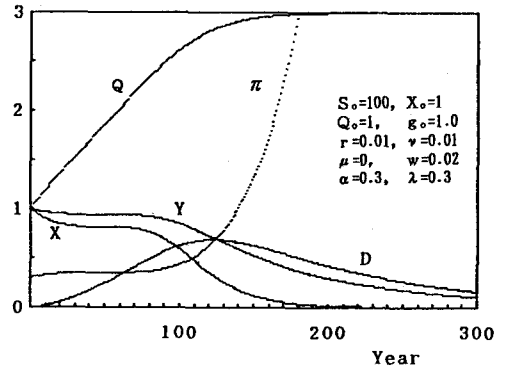
(a)加速型被害ケース



(b)飽和型被害ケース



(c)加速型被害ケース(被害を大きく予測した場合)



の時期は先に延ばされる。これに対し、飽和型の場合には、逆の傾向が示されている。ただしこれらの特性は、ここで採用した被害関数及び生産関数の形状とパラメータ値に依存していると考えられるので、ここで示した計算例だけから一般的結論を導くのは慎むことにする。

4. 4 資源賦存量による経路の変化

本論は、資源の賦存量 S_0 はあらかじめ既知であるとの前提に立っている。石油資源の例では、次々に新油田の開発があり、現在の確認埋蔵量以上の資源が将来的に利用可能との期待がある。この意味で、現実の政策を左右するのは、既に確認されている埋蔵量ではなくて、今後の開発見込みも入れた期待消費可能量である。将来の資源消費可能量による経路の差を見たのが図4である。

5. 考 察

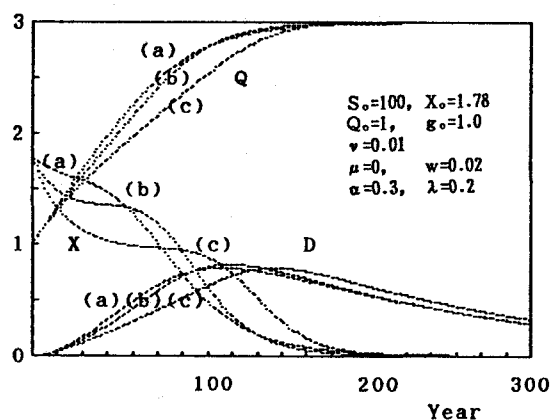
長期的将来にわたる資源消費と、その結果として環境中に生じる廃棄物の蓄積及び被害を考慮した場合の最適成長経路を簡単な数学的モデルによって検討した。資源として化石燃料を、廃棄物として CO_2 を取れば、ここでの議論は地球温暖化問題にそのまま当てはまる。これは、やがて枯渇する運命にある化石燃料を、地球的環境制約の下で最適に消費するための経路を論じることである。しかし、エネルギー源として化石燃料だけしか考えない本モデルでは、化石燃料の枯渇とともに将来の生産はやがて確実に低下してしまう。現実には、化石燃料以外の原子力、太陽エネルギー、バイオマス等の使用が拡大することによって生産が維持されるはずである。人類にとっての真に持続可能な成長経路は、太陽熱等の再生可能資源の利用と資源の循環・再生利用によって達成されるはずである。化石燃料に代わるエネルギー源の利用が促進されることによって、将来どのような技術文明が創造されるか、新しい資源・エネルギー利用構造を考慮した議論が必要である。

また、長期的将来にわたって、式(20)の生産関数が成立するとの仮定も現実的ではない、

図3 割引率 r による最適経路の変化

(a) $r=0.01$, (b) $r=0.02$, (c) $r=0.03$

[1] 加速型被害の場合



[2] 飽和型被害の場合

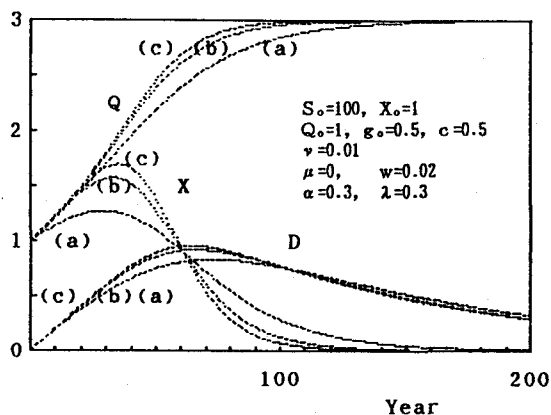
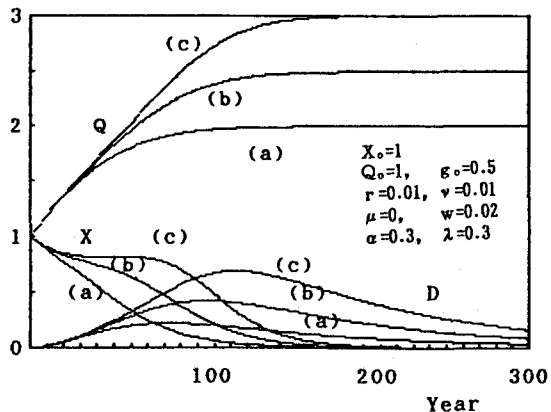


図4 消費可能資源量による経路の変化

(a) $S_0=50$, (b) $S_0=75$, (c) $S_0=100$



エネルギー以外の生産要素の将来変化を考慮することも必要である。

図示したシミュレーション結果は、幾つかの計算例に過ぎない。非線形方程式は、時として思いがけない解を出す。パラメータの値による解の特性については、試行を繰り返して検討する必要がある。

政策決定にあたっての目的関数として式(6)を採用したのは、議論を具体化するための1つの作業仮説に過ぎない。分析の観点によって他の目的関数を採用することも自由である。しかし、「経済」と「環境」という2つの要素を対置的に衡量するという視点に立てば、本論で採用した目的関数は最も簡明であり、現実の政策論において合意も得られやすいと言えよう。

本論の議論が成立する大前提として、資源消費にともなう環境変化とその被害が長期的将来にわたって正しく予測・計算されねばならない。このためには、被害関数が明らかにされねばならない。また、資源の賦存量があらかじめ明らかになっていなければならない。こうした前提が満足されたとして、最適経路が正しく選択されるか否かは、価格調整が合理的に行なわれるか否かによる。また、最適性の評価は、長期的将来の被害を現在価値に見積もるための割引率 r の値に大きく依存する。これは、長期的将来におけるリスク、将来世代が蒙る被害を、現在時点においてどう認識し、評価すべきかの基本的問題である。

人類の将来は、ここで論じたような「どうあるべきか」の規範的分析と、過去の経験や現実的判断に立って「どうなるであろうか」を論じる帰納的分析の両面から検討する必要がある。後者の発想に立って、世界のエネルギー消費、再生可能エネルギー開発への投資とそれによる利用可能エネルギーの増大、人口増大と、食糧需給、生産(GNP)等の関連因子間の相互作用を考慮した世界モデル構築の試みも行なっているところである[7]。

文 献

- [1] D.H. メドウズ他：「成長の限界」(ダイヤモンド社、1972)
- [2] ポントリャーギン他：「最適過程の数学的理論」(文一総合出版、1967)
- [3] 近藤次郎：「最適化法」(コロナ社、1984)
- [4] R.C. Lind and others: "Discounting for Time and Risk in Energy Policy" (Resources for the Future, 1982), p. 2
- [5] 室田泰弘：「エネルギーの経済学」(日本経済新聞社、1984)、pp. 129-131
- [6] P.S. Dasgupta & G.M. Heal: "Economic Theory and Exhaustible Resources" (Cambridge University Press, 1979), pp. 153-192
- [7] 松本、田川、井村、楠田：環境システム研究 Vol. 18 (in print, 1990)