

(12) 地球温暖化対策の政策オプション に関する研究

STUDY ON THE POLICY OPTIONS FOR RESPONDING TO GLOBAL WARMING

井村 秀文*、松本 亨**、田川 晋作*、楠田 哲也*
Hidefumi IMURA*, Tohru MATSUMOTO**, Shinsaku TAGAWA*, Tetsuya KUSUDA*

ABSTRACT; Global warming by greenhouse gases has become the most urgent and critical environmental concern for the mankind. About half of current increases in commitment to global warming is due to carbon dioxide (CO₂) and majority of this is caused by the consumption of energy from carbon-based fossil fuels. As a consequence of international studies, it has become widely recognized that the nations as a whole should take measures to drastically reduce their use of fossil fuels and change their energy dependent growth patterns to sustainable development paths which will be more reliant upon renewable energy sources rather than fossil fuels. In order to seek for an optimal development path under such environmental and energy constraints, this paper presents a world dynamics model to describe the future world development by taking into account the interaction among population, energy, production (GNP), food production, land use, etc. Consumption paths of energy and other limited resources are studied by applying logistic type learning curves. Based on this model, policy options for responding to global warming is discussed and their environmental and economic implications are examined.

KEY WORDS; global warming, climatic change, sustainable development, world dynamics model
energy and environment

1. はじめに

産業革命後、世界の経済成長は化石燃料の大量消費によって達成されてきた。とりわけ、第二次世界大戦後の高度経済成長は、新たに発見された中近東等の豊富な石油資源によって実現されたと言っても過言ではない。しかし、化石燃料に依存した経済成長が長期的に持続し得ないことは今や明白である[1]。化石燃料は、将来必ず枯渇する有限資源であり、同時に、その大量使用によって発生するCO₂は地球の温暖化を引き起こす。「持続可能な開発(sustainable development)」を達成するためには、化石燃料以外のエネルギー源、とりわけ、太陽エネルギー・バイオマス等の再生可能エネルギーを効果的に利用するとともに、あらゆる資源の循環・再生利用を基本とした新しい技術文明を創造しなければならない。

地球温暖化防止のためには、人間活動に起因する温室効果ガスの排出をただちに60%以上削減すべきとの

* 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

**九州大学総合理工学研究科

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

議論さえ展開されている[2]。他方、世界の人口は急激に増加しつつあり、南北の経済格差是正のためにも世界の経済成長は必須である。それでは、化石燃料使用を抑制しつつ、一定の経済成長を実現するという目標を達成するために、人類社会として如何なる長期的政策シナリオが描けるであろうか。これは、とりもなおさず、持続可能な開発の内容とその実現方策に関する問いかけである。

本論文の目的は、このような問題意識に立って、人類社会の基本構造を定める人口、エネルギー消費、生産（GNP）等の相互連関を記述するモデルを構築し、これに基づいて、地球の温暖化防止と経済成長という2つの目標を同時達成するための政策オプションについて考察することである。

将来のエネルギー需給と世界経済の予測については、既に各種のエネルギー経済モデル（価格モデル）が開発されている[3]。これらのモデルでは、地域別、部門別のエネルギー需給モデルを結合し、価格をパラメータとする需給均衡から将来のエネルギー消費を予測する方法が取られている。しかし、こうしたモデルによって100年あるいはそれ以上の長期にわたる将来を予測するのは困難である。現時点では見通せない様々な社会・経済構造の変化が予想されるからである。また、現在我々に検討が求められているのは、過去からの単純な延長線上に実現する世界ではなく、むしろ、人類自身の政策的意志によってどのような世界が将来的に実現可能かである。既存モデルの多くは、精緻につくられているが故に、かえってモデルとしての操作性に乏しく、大胆な政策的思考実験には不向きな面がある。また、地球温暖化が経済・エネルギー政策に及ぼす影響（政策によるフィードバック効果）を考慮したモデルともなっていない。

そこで、本論文では、価格モデルではなく、資源、人口、土地等の「物理的制約モデル」を採用する。すなわち、地球の空間的大きさと資源の有限性という物理的制約の下での資源消費の推移をロジスティック型学習曲線で予測する[4]。これは、100年単位の将来ともなれば、利用可能な資源賦存量による物理的制約が資源消費量を大局的に決定する主要要因であるとの考えに立脚している。長期的将来にわたる予測においては、こうしたアプローチの方がむしろ大局を見誤らず、妥当性を持つと考えられる。その反面、価格メカニズムを明示的に考慮しないこの種のモデルでは、資源需給の微視的構造は分析困難である。このため、ここでは、精密な数値的予測よりは、関連因子間の相互連関を考察するための巨視的構造モデルの構築を目指す。このモデルの枠組みに立脚して、地球温暖化防止のための政策オプションとして何があり、モデルのどのパラメータにそれが反映されるか、また、パラメータ値の変化（政策の変更）によって将来経路が定性的にどのように変化するかの感度分析に重点を置いた検討を試みる。

2. モデルの構造

2.1 生産（GNP）

資本K、労働力L、エネルギーEの3要素の生産関数を考える（t：時間）。

$$Y(t) = F(K(t), L(t), E(t)) \quad (1.1)$$

数値シミュレーションには、Cobb-Douglas型生産関数を採用する：

$$Y = K^{\alpha} L^{\beta} E^{\gamma} e^{\delta t} \quad (\alpha + \beta + \gamma = 1) \quad (1.2)$$

ここで、 δ は生産の技術進歩率である。

2.2 エネルギー消費

化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの3種類を考え、各消費フローを、 E_f 、 E_n 、 E_r と置く：

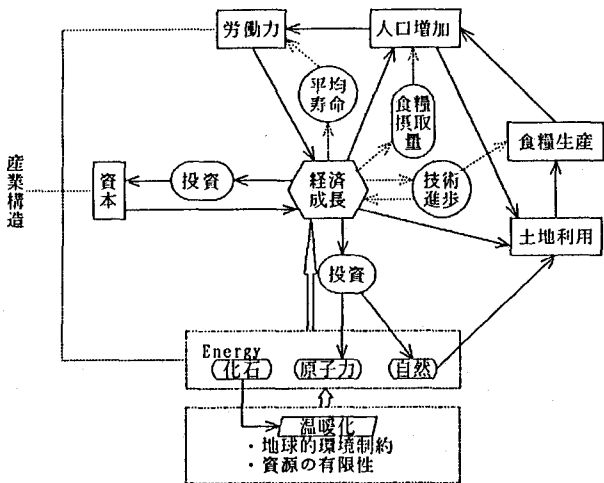


図1 モデルの構造

$$E_t = E_f + E_n + E_m \quad (2)$$

(A) 化石燃料

累積消費量 Z_f についてロジスティック型の増加曲線を仮定する。ただし、温暖化による温度上昇 ΔT に応じて、増加率を政策的に抑制するための項を加える。

$$\begin{aligned} \dot{Z}_f / Z_f &= r_f [1 - Z_f / Z_{f\infty}] - \Gamma \Delta T \\ E_f &= dZ_f / dt \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで、 $Z_{f\infty}$ は化石燃料の総ストック（大量消費が始まる以前における賦存量）である。右辺第二項が存在しない場合には、

$$Z_f = \frac{Z_{f\infty}}{1 + (Z_{f\infty} - Z_{f0} / Z_{f0}) \exp[-r_f(t - t_0)]} \quad (3.2)$$

である。

(B) 原子力

原子力については、立地点、安全管理、社会的アクセプタンスなどの面で様々な制約があり、世界全体で開発・利用可能な原子力エネルギー消費量には上限がある。この限度を $E_{n\infty}$ と置いて、ロジスティック型の増加曲線で推定する。ただし、その増加速度は、原子力エネルギー開発投資 I_n の増加関数とする。 I_n は、GNP に比例し、また、温暖化進行によって増大するものとする。

$$dE_n / dt = \Psi_n(I_n) \cdot [1 - E_n / E_{n\infty}] \quad (4.1)$$

$$\Psi_n(I_n) = m_n I_n \quad (4.2)$$

$$I_n = s_n Y + \Xi_n \Delta T \quad (4.3)$$

(C) 自然エネルギー（再生可能エネルギー）

自然エネルギーとして最も期待されるのは、太陽光発電とバイオマスであるが、これらはいずれも地球に降り注ぐ太陽エネルギーの総量と、エネルギー開発用に利用可能な面積によって決まる上限がある。この量を $E_{n\infty}$ と置いて、原子力の場合と同様の式を仮定する。

$$dE_n / dt = \Psi_n(I_n) \cdot [1 - E_n / E_{n\infty}] \quad (5.1)$$

$$\Psi_n(I_n) = m_n I_n \quad (5.2)$$

$$I_n = s_n Y + \Xi_n \Delta T \quad (5.3)$$

(D) 温暖化による温度上昇

化石燃料の消費増大による大気中 CO_2 濃度及び地球平均気温の上昇を予測する各種モデルが開発されている。最も簡単には、大気中 CO_2 濃度が化石燃料の累積消費量に比例するものとし、その対数によって温室効果の強さを評価し、最終温度上昇を求める方法がある[5]。

$$\Delta T = A \log Z_f(t) / Z_{f0} \quad (A \approx 3.0) \quad (6)$$

2.3 資本・投資・消費水準

GNPの一定割合 s_p が生産的投資に振り向けられるとすれば、

である (μ : 資本の減耗率)。

$$C = [1 - (s_a + s_n + s_p)] Y \quad (8)$$

(A) 人口

Figure 1 is a scatter plot showing the relationship between the rate of population increase (Y-axis, 0% to 5%) and GNP per capita (X-axis, 0 to 20 $\times 10^3$ US\$). The plot includes data points for various countries and a fitted curve labeled '式(9.2)'. The curve shows a negative correlation between population growth rate and GNP per capita. Data points include: Guinea, Nigeria, Ethiopia, India, Brazil, P.R. of Korea, Australia, Canada, USA, Japan, France, Italy, Greece, Norway, and West Germany. The fitted curve is labeled '式(9.2)' with parameters $r_0=2$ and $a=0.0001$. The legend indicates '■ 世界平均' (World Average).

図2 1人当りGNP('83; '78価格)と人口増加率('80/86)の関係

図 2 に示すように、一般に、 y の増大とともに人口増加率は減少する傾向にあり、次の式がかなり良く成立している。

食糧生産と人口との関係は簡単には論じられないが、ここでは総穀物生産量 F 及び 1 人当りの穀物摂取必要量 f をベースに、

とする。ただし $f(y)$ については、次のロジスティック型曲線で与える（動物性カロリーには換算率7を乗じて植物性カロリーに換算）。

(B) 平均寿命と労働力人口

一般に、世界各国民の間には、1人当り所得の増大とともに平均寿命も伸びる傾向がある。この関係もやはりロジスティック型曲線で表わす：

$$h(y) = \frac{h_{\infty}}{1 + (h_{\infty} - h_0 / h_0) \exp(-\zeta_h \cdot y)} \quad (10.1)$$

これを基に、労働力人口（ここでは、年齢20～60才の人口とした）を、

$$L = [h_w / h(y)] N \quad (10.2)$$

で近似する（ $h_w=40$ ）。人口の老齢化は、人口に占める労働力人口の割合を低下させる。

2.5 土地利用と食糧生産

(A) 土地利用

人類による世界の利用総面積 S_t を、生活用地（都市） S_c 、産業用地 S_i 、食糧生産用地（農地） S_a 、自然エネルギー（主にバイオマス）生産用地 S_n の4つに大別する。

利用総面積は、人口増大にともなう開発圧力によって増大するが、自然的制約による上限がある。そこで、その増大を

$$\dot{S}_t / S_t = \sigma \cdot (\dot{N} / N) [1 - S_t / S_{t\infty}] \quad (11)$$

で予測する。

1人当りの生活用地 σ_c をやはり所得のロジスティック関数で評価すれば、

$$S_c = \sigma_c(y) N \quad (12.1)$$

$$\sigma_c(y) = \frac{\sigma_{c\infty}}{1 + (\sigma_{c\infty} - \sigma_{c0} / \sigma_{c0}) \exp(-\eta_c \cdot y)} \quad (12.2)$$

である。産業用地は、

$$S_i = \sigma_i(y) Y \quad (13.1)$$

$$\sigma_i(y) = \frac{\sigma_{i\infty}}{1 + (\sigma_{i\infty} - \sigma_{i0} / \sigma_{i0}) \exp(-\eta_i \cdot y)} \quad (13.2)$$

自然エネルギー生産用地は、 E_n の生産に見合うだけ面積として必要になる：

$$S_n = \sigma_n E_n \quad (14)$$

ここで太陽光とバイオマスを比較すると、単位エネルギー生産当りの必要面積 σ_n には 1:100以上の差がある。したがって、実際にどれだけの面積が自然エネルギー生産に利用可能かは、その国（地域）の自然条件と燃料需要特性によって決まる。

各用地の需要は互いに競合しあう。将来の世界が、現在の我が国におけるような都市化、工業化、エネルギー消費拡大のトレンドで推移するとすれば、不足の土地は農地からの転用によって供給される可能性が強い。その反面、食糧生産のため不足する農地は、森林伐採等によって開拓される。ここでは、農地として利用される土地を、

$$S_a = S_t - (S_c + S_i + S_n) \quad (15)$$

で予測する。

(B) 食糧生産

世界の食糧生産は、単位面積当りの収穫量を ϕ_t 、農業生産の技術進歩率を f_t として、

$$F = \phi_t \cdot S_a \cdot \exp(f_t \cdot t) \quad (16)$$

で表わす。

3. 政策オプションとパラメータの関係

温暖化防止のための政策オプションは極めて多岐にわたるが、本モデルにおいて操作可能な政策とそれに対応する政策パラメータを以下に整理してみる。なお、これらの政策パラメータ以外にも幾つかの構造パラメータが用いられており、その値によって将来予測は影響を受ける。

- (1) 生産構造、産業構造……生産関数に反映される(Cobb-Douglas型関数の指数 α, β, γ)。将来の世界の生産構造は、現在よりさらに資本・労働集約的になるはずである(α, β は大に、 γ は小になる傾向)。
また、産業構造が土地集約的であるかどうかについては、 $\sigma_1(y)$ で表わされる。
- (2) 技術進歩……省エネ型技術によるエネルギー効率の向上。ただし、Cobb-Douglas型生産関数の場合には、エネルギーの生産性向上と労働力・資本の生産効率向上が1つの指数 δ にまとめて表わされる。
- (3) 生産的投資……GNPの一定割合(s_p)が、省エネ設備投資も含めた生産設備投資 I_p に向けられることによって、資本ストック K が増大し、生産 Y は拡大する。生産拡大は、再び生産的投資を促すとともに、原子力・再生可能エネルギーへの開発投資も促進させる。
- (4) エネルギー開発投資……GNPの一定割合($s_a + s_n$)が、原子力・再生可能エネルギーの開発投資に向けられることによって、化石燃料に替わるエネルギー源が増大する。地球温暖化が進行すれば、それに比例して投資は更に促進される。
- (5) 温暖化への政策的対応……温暖化の進行(ΔT)とともに、化石燃料の消費は抑制される(パラメータ Γ)。また、上述のように、原子力及び再生可能エネルギーの開発投資が増大する(パラメータ Ξ_a 及び Ξ_n)。政策的フィードバックのかけ方としては、現実実現した温度上昇を確認してから行なう方法と将来予測に基づいて予見的に実施する方法がある。
- (6) 土地利用と再生可能エネルギーの生産……人口増大による都市の拡大と産業用施設建設のために大量の土地が消費される。

また、再生可能エネルギー(自然エネルギー)を大量に利用するためには、広大な土地が必要となる。特に、エネルギー生産用バイオマスの場合には、食糧生産との競合が生じる。今後、遺伝子工学の進歩などにより、単位面積当り生産性の高いエネルギー生産用作物が開発される可能性もある。また、太陽光発電については、現在のソーラーハウス等よりも一段と進歩した技術が開発され、都市の土地利用にエネルギー生産が効率的にビルトインされる可能性もある。これらの要素はすべて、エネルギー生産に必要な面積を表わすパラメータ σ_n に集約される。

- (7) 人口増大と食糧生産……地球的環境問題の根源は世界の人口増大である。人口抑制が可能か否か、様々な議論があるが、一般に認識されつつあるのは、経済的豊かさの実現とともに人口抑制が進むという事実である(図2)。環境に悪影響を及ぼしてもとにかく経済成長を達成し、実現された豊かさを基盤に、人口抑制、環境保全に取り組みたいという一部の発展途上国の主張にも一定の合理性が認められる。人口成長率の直接的制御政策はパラメータ r に反映されるが、モデル上興味深いのは、所得増加による間接的制御である(式(9.1))。

世界の食糧生産が人口増大に対する抑制因子となるか否かは、農地面積の推移と単位面積当りの収量に依存する(式(16))。過去に実現したような生産性向上(パラメータ f_t)が今後も、見込まれるかどうか

かの問題もある。さらに、地球温暖化そのものが、世界の農業生産にマイナス影響をもたらすとの指摘がある[6]。ただし、現在のところ知見が不十分なため、この影響はモデルに取り入れていない。

4. シミュレーション結果及び政策の評価(試算例)

まず、温暖化への政策的対応による経路の変化について、次の3つのケースについて考える。

(a)温暖化に対し無対応のケース(図3(a))

(b)緩やかな対応のケース(図3(b))

(c)急速対応のケース(図3(c))

(b)及び(c)において、温暖化に対応し化石燃料の消費を抑える場合、自然エネルギーの使用をただちに大幅に増加させることは考えにくいため、それを補うために原子力エネルギーの上限をアップさせて考えている。

表1 (a)における各パラメータ値

初期値	パラメータ値
$Z_f(0)=1$	$Z_f=5.05157, r_f=0.027067, \Gamma=0$
$E_f(0)=0.9561$	
$E_n(0)=0.0184$	$E_{n\infty}=1.7014 \times E_n(0)$
	$s_n=0.00476, m_n=55.3, \Xi_n=0$
$E_n(0)=0.0255$	$E_{n\infty}=40 \times E_n(0)$
	$s_n=0.0043, m_n=2.5, \Xi_n=0$
$K(0)=1$	$s_p=0.08, \mu=0.05$
$N(0)=1$	$r_o=2, a=0.0001, b=3$
	$f_o=3500, f_{\infty}=10500, \zeta_f=0.0003$
	$h_o=30, h_{\infty}=76, \zeta_h=0.001$
$Y(0)=1$	$\alpha=0.3, \beta=0.3, \gamma=0.4, \delta=0.01$
$S_t(0)=1$	$S_{t\infty}=3, \sigma=0.5$
$S_c(0)=0.1614$	$\sigma_{c\infty}=0.13, \sigma_{c\infty}=0.2, \eta_c=0.0003$
$S_l(0)=0.0716$	$\sigma_{l\infty}=0.2, \sigma_{l\infty}=5 \times 10^{-5}, \eta_l=2 \times 10^{-7}$
$S_n(0)=0.0116$	$\sigma_n=0.05$
$F(0)=1$	$\phi_f=1.324, \xi_f=0.01$

次にその他の政策オプションに関して、以下(a)のケースを基本に、パラメータによる経路の変化を見てみる。

(1) 産業構造による経路の変化(図4)

① (a)のケースに同じ

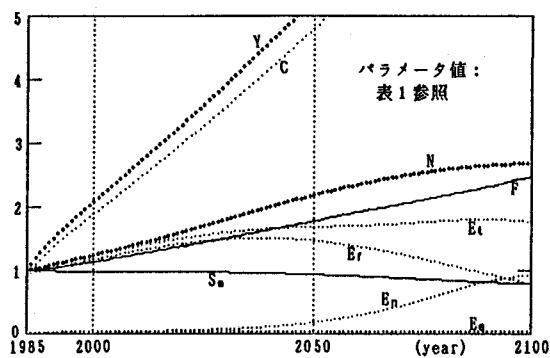
② (a)より資本・労働集約になった場合

(2) 技術進歩による経路の変化(図5)

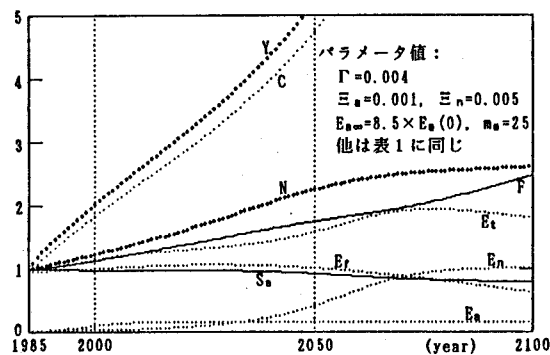
① (a)のケースに同じ

② 技術進歩率 δ を大きくとった場合

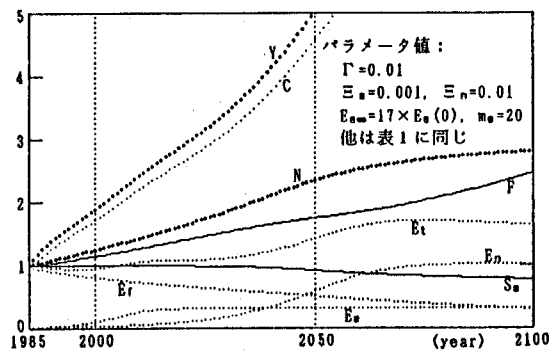
(3) 生産的投資による経路の変化(図6)



(a) 無対応ケース



(b) 緩慢対応ケース



(c) 急速対応ケース

図3 温暖化への政策的対応による経路の変化

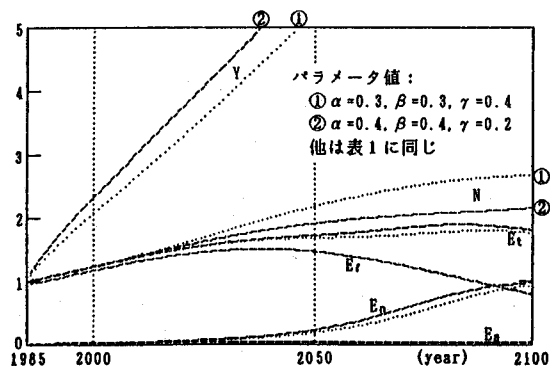


図4 産業構造による経路の変化

- ① (a)のケースと同じ
 ②生産投資 s_p を大きくとった場合
 ③生産投資 s_p を小さくとった場合
 (4) エネルギー開発投資による経路の変化 (図7)
 ① (a)のケースと同じ
 ②エネルギー開発投資 s_a, s_n を大きくとった場合

それぞれ、 $\alpha, \beta, \delta, s_p, s_a, s_n$ を大きくとることにより、経済成長がより大きくなっている。

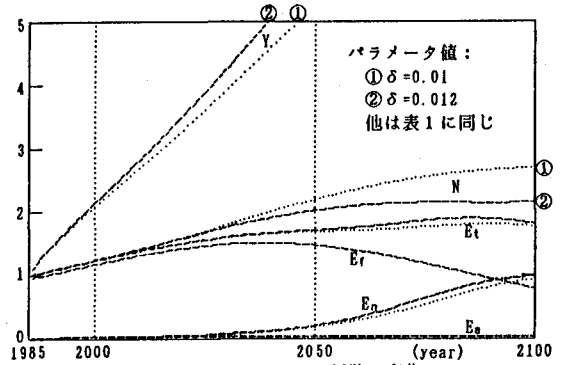


図5 技術進歩による経路の変化

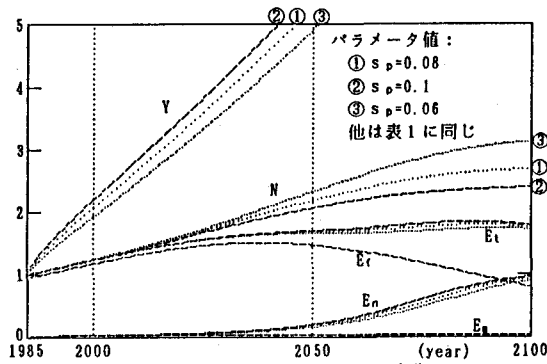


図6 生産的投資による経路の変化

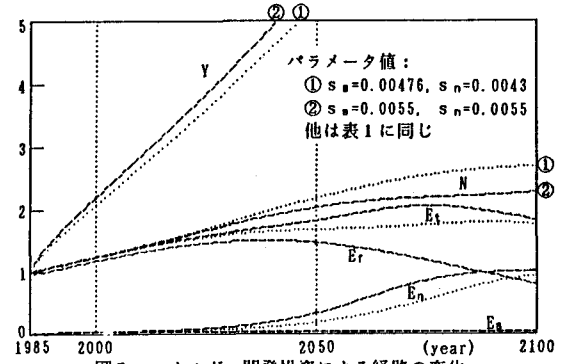


図7 エネルギー開発投資による経路の変化

5. 考 察

有限資源の消費に関する物理的制約モデルによって、地球温暖化と将来世界の経済、エネルギー消費の間の巨視的な相互連関構造を検討した。シミュレーションについては、現在のところデータ不足のため、仮の数値を入れている部分もあり、調整を必要とする部分が多く残されているが、システム構成要素間の相互作用や因果関係、パラメータ値による予測の感度特性は把握できた。

今後、より正確なデータの入手を図るとともに、システムの構成方程式を更に精緻化し、分析フレームの拡大も含めてモデル全体を改良していきたい。また、世界を複数地域に分割し、地域ごとのエネルギー・資源消費、地域間の相互依存関係なども取り入れていきたい。

エネルギー需給の微視的構造については、各構成要素ごとに価格モデルとの整合性を評価していく必要がある。あるいは、要素ごとの価格モデルを統合するための指針として本モデルを発展させることも有意義と思われる。

文 献

- [1] D.L.Meadows and D.H.Meadows: "Toward Global Equilibrium: Collected Papers" (Wright-Allen Press, 1973)
- [2] Interim Report of Working Group I, IPCC (May, 1990)
- [3] J.Edmonds & J.Reilly: The IEA/OARU Long-Term Global Energy-CO₂ Model (Carbon Dioxide Information Center, Environmental Sciences Division, Oak Ridge National Laboratory, 1986)
- [4] 佐藤總夫: 「自然の数理と社会の数理 I」 (日本評論社, 1984)、pp.24-52
- [5] 田川、井村、楠田: 環境システム研究 Vol.17, pp.58-63 (1989)
- [6] L.R.Brown and others: "State of the World 1989" (W.W.Norton & COMPANY, NEW YORK), pp.12-16