

(2) 地球的環境制約と持続可能な成長に関するフレームワークモデル

ON THE GLOBAL ENVIRONMENT AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT:
MODELING OF THE LONG-TERM SOCIOECONOMIC FRAMEWORK OF THE WORLD

濱村 剛* 矢野 康弘** 松本 亨*** 井村 秀文*
Tsuyoshi HAMAMURA* Yasuhiro YANO** Tohru MATSUMOTO*** Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; In order to assess the implications of the global warming for the future human society, it is necessary to analyze the long-term impacts which may be caused on the world economy and the environment. For this purpose this study presents a world dynamics model which predicts the future world development under the constraints imposed by energy, resource and environment. In so doing, it is especially important to examine the uncertainties involved in the prediction. For analyzing such uncertainties pertinent to the prediction of the global warming, this study adopts Verhulst's type growth model to project the future growth of the fossil fuel consumption. The growth rate parameter in Verhulst equation is treated as a stochastic variable subject to random changes. Then the changes in the future projection of the average temperature of the earth is examined in relation to the changes in the fuel consumption paths. Then model calculations are made on the interaction among population, energy, economic production(GNP), food production, land use, forestry management and other factors. Changes in the future growth paths are examined by altering the parameter values involved in the model. Based on these calculations, policy options for responding to global warming is discussed and their environmental and economic implications are examined.

KEY WORDS; global warming, climatic change, carbon dioxide, sea level rise, world dynamic model, sustainable development

1. はじめに

地球環境をめぐる、持続可能な成長のあり方が問われ始めている。21世紀を展望したグローバルかつ長期的な将来が問題となっている。このような議論を進める上で、地球環境と世界の社会経済システムのフレームワークに関する基本的な関係を巨視的に把握するためのモデルが有用と考えられる。このため、筆者らは、化石燃料等の有限な資源の消費をLogistic型成長曲線で予測するモデルを提案した [1]。本論文では、モデルをさらに改善することにより、既発表モデルの操作性をさらに高めるとともに、予測に含まれる不確実性、南北の地域連関等について考察を行おうとするものである。

* 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

** 野村総合研究所

Nomura Research Institute

***九州大学総合理工学研究科

Interdisciplinary Graduate School Engineering Sciences, Kyushu University

2. モデルの構造

2.1 世界モデル

- (1) GNP (Y) : 資本K、労働力L、エネルギーEの3要素を考え、LINEX型生産関数を採用する。

$$Y_U = Y_0 E \exp \left[a_0 \left(2 - \frac{L}{K} - \frac{E}{K} \right) + a_0 c_t \left(\frac{L}{E} - 1 \right) \right] \quad (1.1.1)$$

(2) エネルギー消費

化石エネルギー-E_f: 化石エネルギー累積消費量Z_fにVerhulst型成長曲線を仮定し、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項を加える。

α=0.2の場合を標準ケースとする(図2)。

$$\frac{1}{Z_f} \frac{dZ_f}{dt} = r_f \left[1 - \left(\frac{Z_f}{Z_{f\infty}} \right)^\alpha \right] \frac{1}{\alpha} - \Gamma \Delta T \quad (1.2.1)$$

原子力エネルギー-E_a、自然エネルギー-E_n

$$\frac{1}{E_a} \frac{dE_a}{dt} = \psi_a(I_a) \left[1 - \frac{E_{a0}}{E_{a\infty}} \right]; \quad \psi_a(I_a) = m_a I_a, \quad I_a = s_a Y + \Theta_a \Delta T \quad (1.2.2 \sim 4)$$

$$\frac{1}{E_n} \frac{dE_n}{dt} = \psi_n(I_n) \left[1 - \frac{E_{n0}}{E_{n\infty}} \right]; \quad \psi_n(I_n) = m_n I_n, \quad I_n = s_n Y + \Theta_n \Delta T \quad (1.2.5 \sim 7)$$

- (3) 温暖化による温度上昇ΔT: 2層ボックスモデルを採用する。

化石燃料によるCO₂の排出量X(t)

$$X(t) = X_L(t) + X_S(t) + X_G(t) \quad (1.3.1)$$

CO₂大気中残存量Z(t)

$$Z(t) = (1 - \varepsilon) X(t) + (1 - \mu) Z(t - 1) \quad (1.3.2)$$

温室効果の強さΔq

$$\Delta q = A \log \left[\frac{X_0 + Z(t)}{X_0} \right] \quad (1.3.3)$$

気温T₁、海水温T₂の上昇

$$\frac{dT_1}{dt} + \theta T_1 + k_1 [T_1 - T_2] = Q, \quad \frac{dT_2}{dt} + k_2 [T_2 - T_1] = 0; \quad \theta = \frac{\lambda}{C_1}, \quad k_1 = \frac{\kappa}{C_2}, \quad k_2 = \frac{\kappa}{C_2}, \quad Q = \frac{\Delta q}{C_2} \quad (1.3.4 \sim 9)$$

海面水位ΔLの上昇

$$\Delta L = \beta (h_1 T_1 + h_2 T_2) \quad (1.3.10)$$

(4) 資本・投資

$$I_p = \frac{dK}{dt} = s_p Y - \mu K; \quad I_a = s_a Y, \quad I_n = s_n Y \quad (1.4.1 \sim 3)$$

(5) 人口・労働力

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = v(y) - \phi \left(\frac{F}{N}, f \right) \quad v(y) = r_0 \exp(-aY) \quad (1.5.1 \sim 4)$$

$$\phi \left(\frac{F}{N}, f \right) = \begin{cases} 0 & (\text{if } F/N \geq f) \\ b \left[f(y) \cdot F/N \right] & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad f(y) = \frac{f_\infty}{1 + \left(\frac{f_\infty - f_0}{f_0} \right) \exp(-\xi_f y)}$$

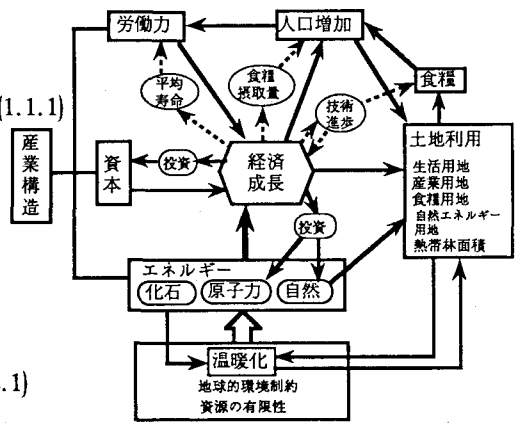


図1 モデルの構造図

Verhulst 曲線によるエネルギー消費量の近似及び将来消費量の予測

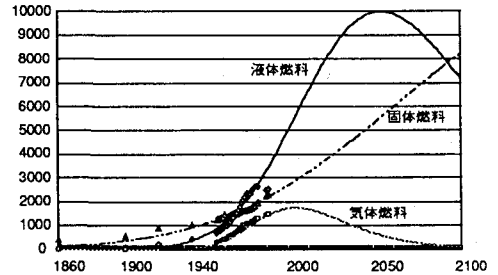


図2 Verhulst曲線による化石燃料消費の近似および予測 (標準ケース)

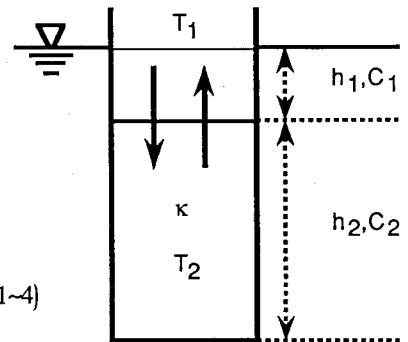


図-3 2層ボックスモデル

(6) 平均寿命と労働力人口

$$h(y) = \frac{h_{\infty}}{1 + \left(\frac{h_{\infty} - h_0}{h_0} \right) \exp(-\xi_h y)} \quad L = \left(\frac{h_w}{h(y)} \right) N \quad (1.6.1-2)$$

(7) 土地利用：利用総面積 S_t を生活用地 S_c 、産業用地 S_i 、食糧生産用地 S_a 、自然エネルギー生産用地 S_n 、熱帯林面積 S_f に分類した。

$$\frac{1}{S_t} \frac{dS}{dt} = \sigma \left(\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \right) \left[1 - \frac{S_i}{S_{i\infty}} \right] \quad (1.7.1)$$

$$S_c = \sigma_c(y) N, \quad S_i = \sigma_i(y) Y, \quad S_n = \sigma_n E_n \quad (1.7.2-4)$$

$$S_a = S_t - (S_c + S_i + S_n) \quad (1.7.5)$$

$$\sigma(y) = \frac{\sigma_{\infty}}{1 + \left(\frac{\sigma_{\infty} - \sigma_0}{\sigma_0} \right) \exp(-\eta_{\sigma} y)} \quad (1.7.6)$$

$$\frac{dS_f}{dt} = -S_{df} \eta_f \left(1 - \frac{S_{df}}{S_{df\infty}} \right) + S_{df}(Y) \quad (1.7.7)$$

$$S_{df}(Y) = \frac{S_{df\infty}}{1 + \left(\frac{S_{df\infty} - S_{df0}}{S_{df0}} \right) \exp(-\xi_s Y)} \quad (1.7.8)$$

(8) 食糧生産 F

$$\phi_f = \frac{\phi_{f\infty}}{1 + \left(\frac{\phi_{f\infty} - \phi_0}{\phi_0} \right) \exp(-\xi_h E_{cap})} \quad (1.8.1)$$

$$F = \phi_f S_a \exp(\xi_f t) \quad (1.8.2)$$

2.2 南北分割モデル

基本的な構造は、世界モデルと同じであるが、南側のエネルギー消費に関しては、北側より30年遅らせて評価した。また、南北間の資本移動を考慮して、次式を与える。

$$\frac{dK_1}{dt} = s_{11} Y_1 + s_{12} Y_2 - \mu_1 K_1 \quad (2.1)$$

$$\frac{dK_2}{dt} = s_{21} Y_1 + s_{22} Y_2 - \mu_2 K_2 \quad (2.2)$$

2.3 予測モデルにおける不確実性

化石燃料消費予測のVerhulst型成長曲線は、次の3つのパラメータに支配される。

- (1) 資源の有限性がもたらす消費抑制効果の強さ α
- (2) 化石燃料の総賦存量 Z_{∞}
- (3) 資源消費速度に確率変数を考慮した r_t

化石燃料として、特に液体燃料の消費経路の変化に着目して温暖化予測を行う。環境への影響について2層ボックスモデルにより気温、海水温、海水位上昇の予測を行い、予測に含まれる不確実性を評価する。

表1. 変数およびパラメータ

Zf:	化石エネルギー累積消費量
Ef:	化石エネルギー年間消費量
Ea:	原子力エネルギー消費量
En:	自然エネルギー消費量
X0:	産業革命以前の CO2 濃度
Δq :	温室効果気体に蓄えられる熱量
ϵ :	CO2 排出量の海中への溶解度
μ :	CO2 残存量の海中への溶解度
λ :	地球外への熱の放射量を表す値
C1, C2:	温室効果による上下層の熱容量
T1, T2:	温室効果による上下層の温度上昇
κ :	両層間の熱伝導係数
β :	水の熱膨張率
h1:	海洋表面層の厚さ
h2:	深海層の厚さ
Ip:	生産拡大投資
Ia:	原子力エネルギー開発投資
In:	自然エネルギー開発投資
Sp:	GNP のうち投資に向けられる割合
μ :	資本減耗率
N:	人口
y:	一人当たり GNP
$\nu(y)$:	人口増加率
F:	穀物生産量
f:	一人当たり穀物摂取必要量
h(y):	平均寿命
σ_c :	一人当たり生活用地
σ_i :	GNP 当り産業用地
σ_n :	自然エネルギー単位生産当り必要用地
Sdf:	熱帯林消失面積
Saf:	植林面積
ϕ_f :	単位面積当たりの収穫量
ξ_f :	技術進歩率
γ :	エネルギー消費の価格弾性値
Γ :	エネルギー消費の一人当たり GNP 弾性値
F(t):	ホワイトノイズ
p:	エネルギー価格

消費速度に関するパラメータ r_f に大きさ σ の確率変動を考慮する。

$$r_f = \bar{r}_f + \sigma F(t) \quad \langle F(t) \rangle = 0 \quad \langle F(t) F(t+t') \rangle = 0 \quad (3.1-3)$$

式(121)と式(31)より 時間 t における累積消費量 Z_f の確率密度関数 P は、

$$P = \frac{\alpha}{(2\pi t)^{\frac{1}{2}} \sigma Z_f \left\{ 1 - \left(\frac{Z_f}{Z_m} \right)^\alpha \right\}} \exp \left[-\frac{1}{2t} \left\{ \frac{1}{\sigma} \ln \left(\frac{Z_f}{Z_m} \right)^\alpha - \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1 - \left(\frac{Z_f}{Z_m} \right)^\alpha}{1 - \left(\frac{Z_m}{Z_m} \right)^\alpha} - \frac{\bar{r}_f t}{\sigma} \right\}^2 \right] \quad (3.4)$$

この確率密度関数より累積消費量の平均値及び標準偏差を求め、それから液体燃料の消費経路の予測を行い、温暖化予測を行う。

2.4 エネルギー消費量と価格との関係

予測モデルで仮定している化石エネルギー消費量について価格との関係を調べることで、モデルの妥当性を検討する。このため、次式の需要関数を仮定する。

$$E = p^{\gamma} y^{\Gamma} Y \quad (4.1)$$

3. 数値シミュレーション実行例

3.1 世界モデル

予測の前提シナリオとして、次の3つのケースを設定した。

(1)温暖化への政策的対応が特に行われないケース、ここでは温暖化によるフィードバック効果を見逃し、図2で予測した化石燃料消費経路をたどり、原子力や自然エネルギーへの転換をほとんど考慮しない場合(図4)。

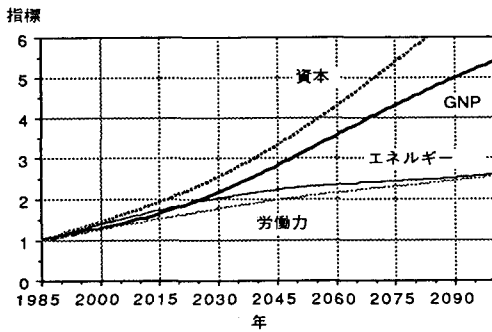


図4.1 世界モデル無対応ケース

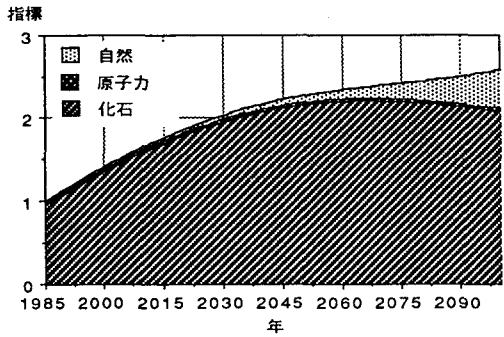


図4.2 エネルギー消費無対応ケース

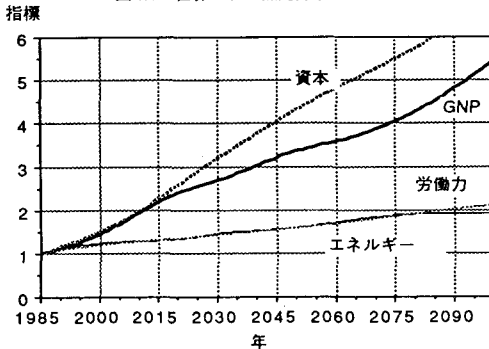


図5.1 世界モデル転換ケース

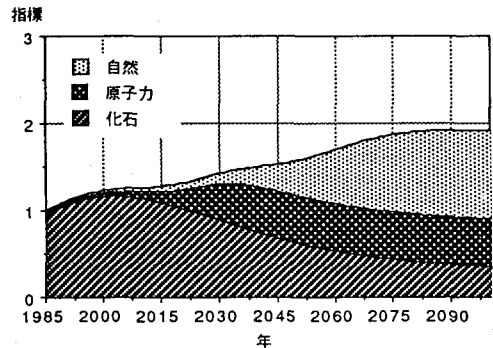


図5.2 エネルギー消費転換ケース

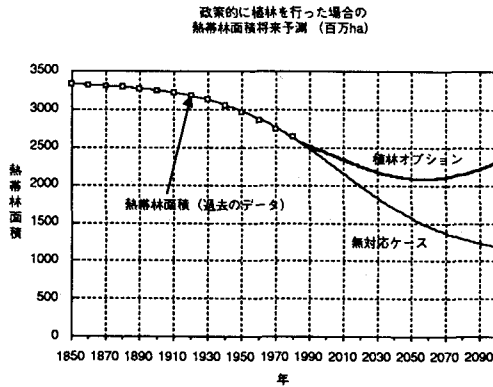


図6. 森林対策ケース

(2)温暖化に伴いエネルギー転換を積極的に進めるケース、ここでは化石燃料消費に温暖化によるフィードバックをかけ、原子力や自然エネルギーの消費限界や開発投資を大きく見積った(図5)。

(3)森林対策を積極的に進めるケース、ここでは森林面積の減少過程をLogistic型成長曲線を用いて将来予測を行い、その対策としてGNPの一定割合を植林に向けた場合の将来予測を表した(図6)。ただし、減少の著しい熱帯林を対象としている。

3.2 南北モデル

ここでは、南北間の資本移動を考慮して、化石燃料消費予測について南北間の比較を行った(図7)。

3.3 不確実性の評価

各パラメータの変化による液体燃料消費量の消費経路の予測と各消費経路に対する気温、海水温、海水位上昇等の温暖化予測を行った。図では、上から液体燃料の消費経路予測、気温、海水温の予測、海水位の予測の順とする。

(1)消費抑制効果を表すパラメータ α についてグラフ中の上から $\alpha=0.5, 0.2, 0.1$ の場合を表す(図8)。

(2)総賦存量を表すパラメータ Z_{∞} について上から2倍、標準、半分の場合を表す(図9)。

(3)確率変動の大きさ σ を、消費速度平均の2倍を与えた場合を表し、ここでは平均値と標準との幅を表している(図10)。

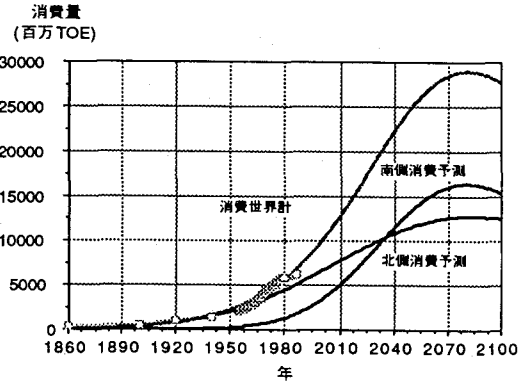


図7. 南北エネルギー消費予測

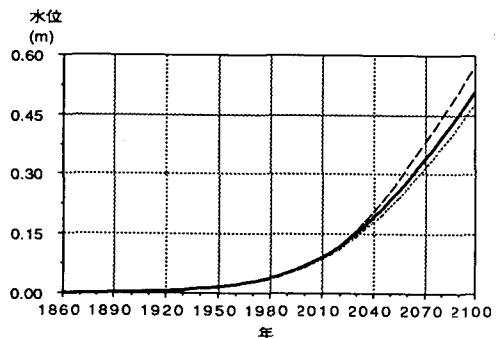
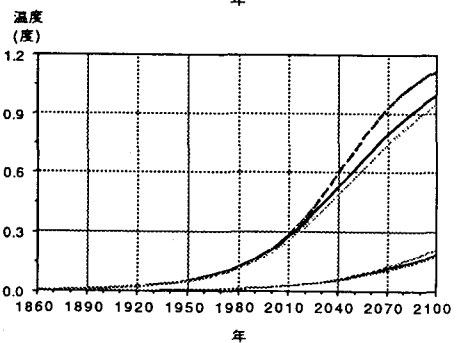
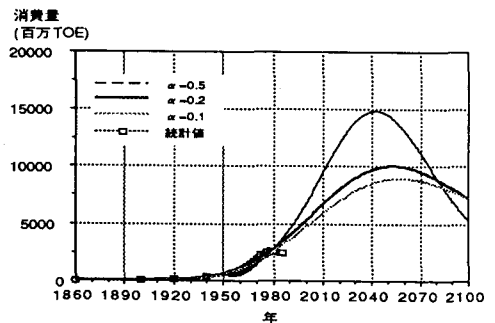


図8. α による温暖化予測

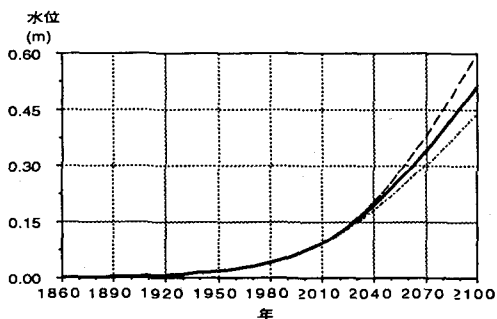
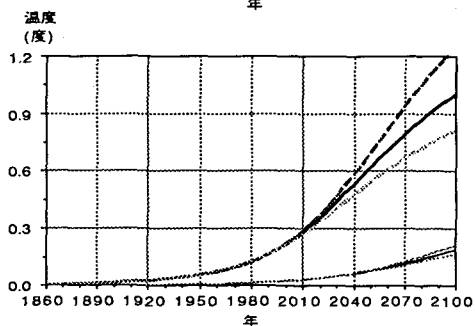
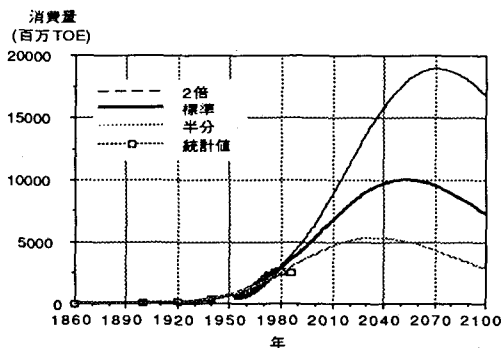


図9. 総賦存量による温暖化予測

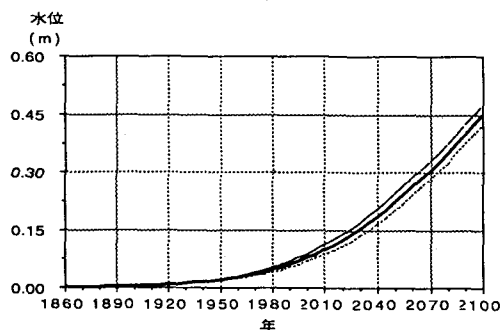
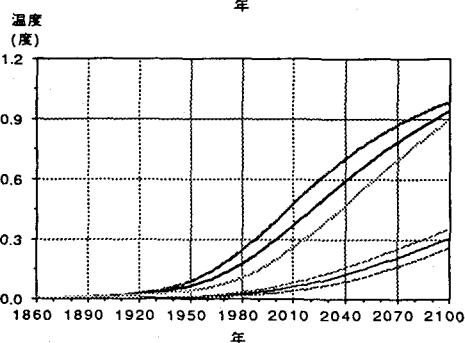
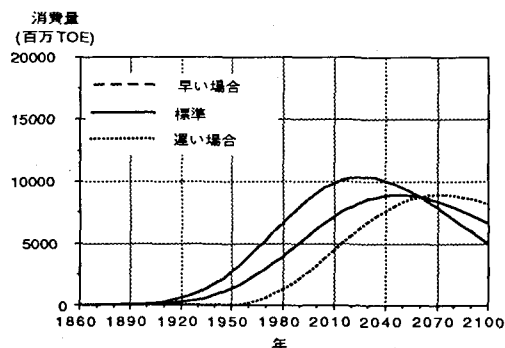


図10. 確率変動による温暖化予測

3.4 エネルギー消費と価格

ここで、エネルギー消費量と価格の関係を検討する。統計データより重回帰分析を行い、価格弾性値 γ 及び一人当たりGNPに対する弾性値 Γ を検討した結果、日本の1960年代(高度経済成長期)から1980年代にかけて、 γ は微増し、 Γ は大きく減少している。このことを参考に弾性値 γ 、 Γ を時系列的に変化させ、需要曲線を決定している。(図11)

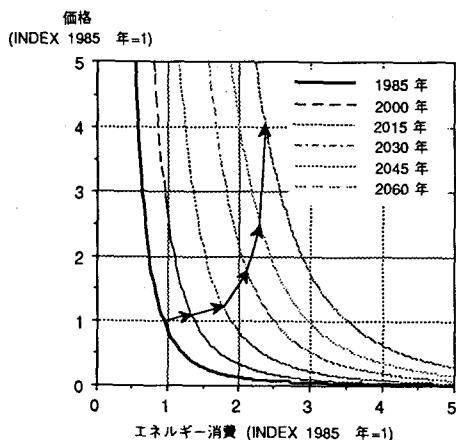


図11. エネルギー消費と価格

4. シミュレーション結果の考察

4.1 ケース(1)の場合は、2100年時点で、化石燃料消費が、1985年の約2倍になるのに対し、ケース(2)の場合は、2100年時点で、1985年の約30%に削減できるというシナリオになる。

原子力エネルギーは、社会的な問題からも非常に制約が強く上限値の設定が重要になる。これをパラメータとして与えているが、地球環境の変化によるフィードバックを受ける関数として定義すれば、さらに改善されたシミュレーションが可能となる。

ケース(3)については、森林減少を抑制し、なおかつ森林面積の回復も可能であるという結果になっている。

4.2 北側先進工業国は、エネルギー転換および省エネルギー化を進めるため、化石燃料消費が少なくなる。これに対し南側発展途上国は消費量が増大し、やがて北側の消費量を上回る。

4.3 ここでは、液体燃料の消費経路の変化に限定しているため温暖化予測の幅は比較的小さいものになっている。3つのパラメータの変動のうち化石燃料の総賦存量による変動は、抑制効果や消費速度の変動と比較して最も大きな影響を与えることが分かる。

5. まとめ

モデルの改善点として挙げていた予測に含まれる不確実性として、液体燃料の消費経路とそれに伴う温暖化予測について検討した。短期的には消費経路により変動幅が生じるが、長期的には、予測結果に大きな差はない。南北モデルに関しては、ここでは化石エネルギーの将来予測のみを検討し、簡単であるが南北間の関係を表わすことができた。エネルギー消費量は、本来は市場における需要均衡点から決定されるはずであり、マクロ経済モデルによってそれを予測する試みもなされているが、超長期的予測の信頼性には疑問も多い。このため、本研究では、エネルギー消費量のカーブを外生的に仮定し、それによって予測されるGNP等の推移から、それと対応して実証するはずの需要曲線を求めることによって、エネルギー価格の評価を行った。

シミュレーションにより、モデルに含まれる各構成要素間の感度特性を評価した。本モデルのような巨視的フレームワークモデルの予測では、短期的には種々の要因により誤差が生じ得るにしても、長期的にはむしろ大局を見失わない分析が行えると思われる。

<参考文献>

- [1] 松本、田川、井村、楠田：環境システム研究Vol.18、pp.74-81、1990
- [2] 田川、井村、楠田：環境システム研究Vol.17、pp.58-63、1989
- [3] Narendra S.Goel、Nira Richer-Dyn：「生物学における確率過程の理論」(産業図書、1978)、pp.5-105
- [4] R.Haberman：「個体群成長の数学モデル」(現代数学社、1981)、pp.1-43
- [5] Interim Report of Working Group I, IPCC (May, 1990)
- [6] L.R.Brown and others: "States of the World 1990" (W.W.Norton & Company, NEW YORK)