

# 気候変動統合モデルの研究

## ～気候変動と経済成長の長期シミュレーション解析～

### Long-term Analysis on Climate Change and Economic Growth

佐藤 正博

(Masahiro Sato)

**要旨** 地球環境問題の解決のために、地球科学的観点からのシミュレーションモデルによる将来の地上温度予測や、環境経済学の観点からの費用便益あるいは各種制約条件のもとで、効用関数の最大化を目的としてCO<sub>2</sub>の最適排出レベルを推定する各種モデルの研究が実施されてきた。近年、地球科学の分野と環境経済学の分野の垣根を越える統合モデルの研究が進められているが、2つの分野の情報が一方通行のケースが多く、二酸化炭素濃度の上昇が植物の生育を増進させ、二酸化炭素濃度を低下させる負のフィードバック効果等は正確な形では統合化されていない。このような問題を解くためには、2つの分野の定式化を見直し、シームレスに連立して解くことが要求される。本論文においては、NordhausのDICEモデルをベースとして、連立常微分方程式と動的計画法の手法を用いて、経済－生物－地球環境のシームレスな統合を図り、各種のフィードバック効果も含めた解析を実施し、最適な二酸化炭素排出の時間経路を求め「持続可能な経済成長」の実現可能性を検討した。この結果、「持続可能な経済成長」は現状では、かなり難しいという結論を得た。「持続可能な経済成長」を達成するためには、外的条件として「エネルギーの脱炭素化の進展」と「労働生産性（技術係数）の限りなき向上」といった技術的課題を解決していくことでしか達成できないようと思われる。

#### 目次

- はじめに
- 1. DICEモデルの構造
- 2. 本モデルの構造
- 3. モデルの検証
- 4. 最適経済成長
- 5. 結論
- 参考文献

#### はじめに

数十年前の学生の頃、ある本を読み、「人間は自然の一部であるにもかかわらず、自然を人間化する矛盾をもった存在である。」という一節が印象に残り、今でも覚えている。そして、「この矛盾は解決できない」とされていたように思う。当時は、人間と自然の原理的な係り合いを定義しているものとしてごく自然に受け入れられた。今、振り返ってみれば、含蓄のある言葉である。オゾ

ン層問題、地球温暖化問題など、地球環境問題が脚光をあびて早20年、これだけ人間活動が自然に脅威を与えるとは思いもよらなかった。まさに、自然を人間化する極限で、矛盾につきあたったような感触さえ持つ。しかし、この地球環境問題が本当に、「自然を人間化」する極限で起きてきている矛盾なのだろうか。人間が何らかの対策をとれば解決できる問題なのだろうか。この疑問に答えてくれる研究は皆無といってよい。本論文はこのような観点から、「持続的な経済成長（自然の人間化）」は可能かを解説する第一歩として、経済成長と気候変動モデルを統合して、どのような方策をとることができるかを計測するモデルの構築を行った。解明するにはまだ、まだ先が長そうだが、人間にとって永遠のテーマのようにも思われる。

### 1. DICEモデルの構造

Nordhaus (1994) の開発したDICEモデルは、気候変動と経済との統合モデルとして、最もシンプルであり、わかり易く、示唆に富むモデルであるが、以下のような問題点を含んでいる。

- ・DICEモデルの時間経路は制約条件よりも、最適化によって決まる。
- ・重要な海、森林などの吸収源が簡単に扱われているか対象外となっている。
- ・DICEモデルには幾つかのフィードバックがあるが、元来フィードバックでもあり、モデルを大きく決定する要因でもある人口増加や生産性の向上などが外生変数して与えられている。

以上のような要因によって、CO<sub>2</sub>排出から地球温暖化を経て、生産抑制に影響するフィードバックは、CO<sub>2</sub>大気への蓄積や輸送による遅れによって、弱いものになり、結果として将来の気候変動のコストを支払うため経済を成長させる必要が生じることになる。

### 2. 本モデルの構造

本論文で用いる経済成長モデルは、効用関数に

大気濃度を取り込んで、DICEモデルを組替えたものであり、一方、地球温暖化を推定するモデルは、拡散方程式を基本とする炭素サイクルモデルに、大気、海洋圏ばかりでなく、植物圏を考慮したモデルなどを結合して、地球温暖化を推定するものとなっている。経済成長のモデル化にあたっては、DICEモデルと同様に全世界を単一部門マクロ経済の成長モデルとして考え、気候変動モデルも全球モデル（必要に応じて細分化）として考えている。この全体像は図1のようなものとなる。この図では、一点鎖線の上部がマクロ経済モデルの構造となっており、下部が気候変動モデルの構造となっている。

マクロ経済モデルでは、次のように因果連鎖を構造化した。

労働力、資本や技術（進歩）を導入し、外部費用である損害額を内部化して生産を行い、生産は投資と消費に振り分けられる。さらに、投資は資本を増加させ、再び生産に寄与することになり、消費は個人の効用を増加させるものとした。

また、気候変動モデルでは、次のような因果連鎖を構造化した。

生産に対応して二酸化炭素が排出され、それが大気に蓄積される。そして、一部は海洋に吸収され、更に深海に輸送されて固定化される。また、一部は森林などの植生によって固定化され大気から除去される。大気に残留した二酸化炭素は温室効果によって、地上付近を暖め、海面上昇、砂漠化が進み、農産物収穫量の低下などをもたらし被害が生じるとした。

本研究ではこの2つのモデルを次のように連結している。

- ① 経済成長モデルから気候変動モデルへは二酸化炭素排出量を介して連結。
- ② 気候変動モデルから経済成長モデルへは損害額を介して連結。

また、最適な経済成長を評価するものとして、地表温度を考慮した総割引効用を最大化する指標を用いた。

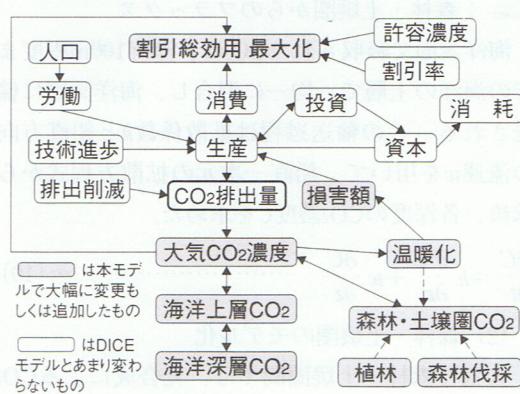


図-1 モデルの全体構造

## 2.1 マクロ経済モデル

## (1) 割引総効用関数最大化のモデル化

宇沢（1995）は「地球温暖化によってもたらされる気候変動、それに伴う自然環境およびエコロジカル環境の激変は我々の生活に大きな影響を及ぼす。それは究極的には効用や選好の基準の変化となって現れる。」としており、この考え方へ従って、選好基準の変化を効用関数(t)に組み込むと次式として定式化できる。

$$u(t)=u(c(t),L(t),m(t)) \quad \dots \dots \dots (1)$$

*c(t)* : 一人あたりの消費

*m(t)* : 二酸化炭素濃度

*L(t)* : 人口

ここで、*u(c, L, m)*は連続的に微分可能で、*c, L*に関して単純増大関数、*m*に関して単純減少関数とし、関数(c, m)は(c, L, m)=X(c, L)Y(m)のように変数分離が可能と仮定し、*Y(m)*に関しては以下の形の関数系を仮定する。この関数系は、温度許容水準の近傍まではなだらかに減少するが、近傍では急激に減少する関数となっており、人間の危機意識の表現としては納得のいくものと考えられる。

$$Y[m(t)] = \left\{ \frac{x_a - m(t)}{x_a} \right\}^\beta = \left\{ 1 - \frac{m(t)}{x_a} \right\}^\beta \quad \dots \dots \dots (2)$$

*x<sub>a</sub>* : 温度 (CO<sub>2</sub>濃度) 許容水準

*m(t)* : 温度 (CO<sub>2</sub>濃度)

$$0 \leq m(t) \leq x_a, 0 \leq Y[m(t)] \leq 1$$

ここで、*X(c, L)*はDICEモデルの効用関数(c, L)と同じとすれば、本論文での効用関数は以下のように定義される。

$$u[c(t), L(t), m(t)] = \frac{L(t)(c(t)^{1-\alpha}-1)}{1-\alpha} \left\{ 1 - \frac{m(t)}{x_a} \right\}^\beta \quad \dots \dots \dots (3)$$

*α, β* : 弾性値

この効用関数と割引率 *ρ* から、次式のように割引総効用関数を目的関数として最大化させるものとして定式化する。

$$\max_{[c(t)]} \left\{ \int_0^t u[c(t), L(t), m(t)] \cdot e^{-\rho t} dt \right\} \quad \dots \dots \dots (4)$$

## (2) 生産関数と消費

生産量*Q(t)*は、一般的による使われる規模に対して収穫一定のコブ=ダグラス型の生産関数を仮定する。式(5)で、*K(t)*は資本、*L(t)*は労働力、*A(t)*は労働生産性（技術係数）を意味する。労働生産性はDICEモデルと同様に、通減する外生変数とし与えている。この変数は、エネルギー効率の改善も陰に含まれており、排出係数とも連動している。このため、もし、労働生産性が持続的に高まっていけば、結果として省エネルギー生産が可能となり、二酸化炭素排出量も改善される。

$$Q(t) = A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad \dots \dots \dots (5)$$

消費は一国のマクロ経済として会計的にとらえれば、産出*Q*から投資*I*を差し引いたものであり、次の恒等式で与えられる。しかし、産出*Q*は温暖化の被害や、削減対策コストを含んでおらず、実際には、これらのコストを差し引いた正味の産出*TQ*から投資や消費に費やされる。

$$C(t) = TQ(t) - I(t) \quad \dots \dots \dots (6)$$

また、資本ストック*K*の時間変化は投資*I*と資本減耗 $\delta_k$ によって以下の方程式で表現される。

$$\frac{\partial K}{\partial t} = I - \delta_k \cdot K \quad \dots \dots \dots (7)$$

また、生産によって排出される二酸化炭素*E(t)*は生産と排出量との関係を表現する排出係数*σ(t)*

と、政策変数である排出削減率  $\mu(t)$  から次式で求めた。

以上が本論文で用いるマクロ経済成長モデルである。

## 2.2 気候変動のモデル化

### (1) 大気-海洋モデル

DICEモデルの炭素サイクルは非常に単純である。大気の炭素は、1つのボックス（ストック）と考え、排出量の入力と、大気からの除去機構による出力からなっている。大気と海洋上層では急速に平衡に達し、大気貯留係数により大気に残留するものとなっている。

このDICEモデルの炭素サイクルには発生源と吸収源の関係に問題がある。吸収源に関しては、確かに深海は大気に比べて60倍のストックがあり、無限に吸収するという仮定は合理的に見える。しかし、炭素の吸収には限界があり、吸収量はストックに比べてはるかに小さい。本論文では、深海を10層に区分する多重ボックスモデルを採用するとともに、海洋表面での大気の吸収は、陸生植物圏や排出量の大気濃度への影響に比べ迅速であることを考慮して、海洋表面と大気を混合層としてひとつのものと考えモデル化した。

$$\frac{dC_{mix}}{dt} = E(t) - F_{gas}^c + F_{forest}^c \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

$$C_{air} = \frac{C_{mix} - \left(1 - \frac{1}{\zeta}\right) C_{sea,0}}{1 + \frac{1}{\zeta} \frac{C_{sea,0}}{C_{air,0}}}$$

$$C_{\text{tot}} \equiv C_{\text{vis}} + C_{\text{irr}}$$

$C_{\text{mix}}$ ：産業革命以前からの混合層CO<sub>2</sub>変化量

$C_{air}$  : 大気CO<sub>2</sub>ストック

$C_{sea}$  : 海洋上層CO<sub>2</sub>ストック

$\beta$  : ルーベル係数

$C_{sea,0}$ ：産業革命以前の海洋CO<sub>2</sub>ストック

### $C_{air,0}$ ：産業革命以前の海洋CO<sub>2</sub>ストック

#### *E<sub>up</sub>*・海洋上層への吸収フラックス

$F_{forest}$  : 森林・土壤圈からのフラックス

海洋表面で吸収されたCO<sub>2</sub>は、深度100m程度までの海洋の上層で、均一に混合し、海洋深層に輸送される。この輸送過程は拡散係数 $k$ と鉛直方向の流速 $w$ を用いて、鉛直一次元の拡散方程式から求め、各深度のCO<sub>2</sub>濃度 $C$ を求めた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + w \frac{\partial C}{\partial z} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

## (2) 森林・土壤圏のモデル化

大気と森林・土壤圏間では、光合成によるCO<sub>2</sub>の消費と、呼吸によるCO<sub>2</sub>の排出、更には、枯死した葉、枝、幹は土壤有機物となり、微生物に分解されてCO<sub>2</sub>を大気に放出するといった経過を経て、循環サイクルを構成する。このように、大気圏のCO<sub>2</sub>の森林・土壤圏による正味の固定量は、純一次生産 (NPP) といわれる。もっとも単純な形で定式化すると、ある時点の森林・植物圏での純一次生産は、産業革命以前と現在のCO<sub>2</sub>比の $\beta$ 乗（弾性値）に比例して増加し、森林伐採面積比 $\alpha$ と植林面積比 $\lambda$ 及び森林自体の寿命 $\tau_0$ で減少するものとして次式で表現できる。

$$\frac{dB}{dt} = NPP_0 \left( \frac{C_{air}}{C_{air0}} \right)^{\beta} - \left\{ \alpha(t) - \lambda(t) + \frac{1}{\tau_0} \right\} B \quad \dots (11)$$

$B$  : 陸生植物圈に取り込まれるCO<sub>2</sub>

$NPP_0$ ：産業革命以前のNPP

$\beta$  : NPPの太気濃度に対する感度

### τ<sub>0</sub>：陸生植物の平均的ライフタイム

$\alpha$  : 森林面積に対する面積減少率

### (3) 地上温度の推定

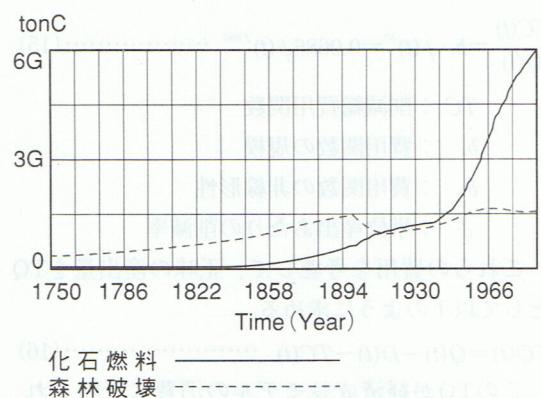
大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加は、温室効果により、大気から地表への放射を増大させる。大気から地表への放射の増加は、地表温度を上昇させ、大気圏外への放射を減少させる。しかし、大気上端から大気圏外への放射は太陽から大気圏への正味の放射と長期的にはバランスすると考えられるから、大気圏外への放射の減少分を、地球の放射量を増加させて、正味の大気圏外への放射を増加さ



知ることができれば、本モデルから推定できる。この推定値と実測値の大気CO<sub>2</sub>濃度を比較して、推定値の精度を評価できる。

大気に排出されるCO<sub>2</sub>は化石燃料の燃焼によるものと、森林破壊によるCO<sub>2</sub>吸収源の縮小によるものに分けられる。化石燃料からのCO<sub>2</sub>排出量は、WRI (1998) の1750年から1995年を用い、森林破壊起源のものとして、Bolin et al. (1986) が森林、草地の農耕地への転換から推定したものを用いた。図-2はこれらの排出量を図示したものである。

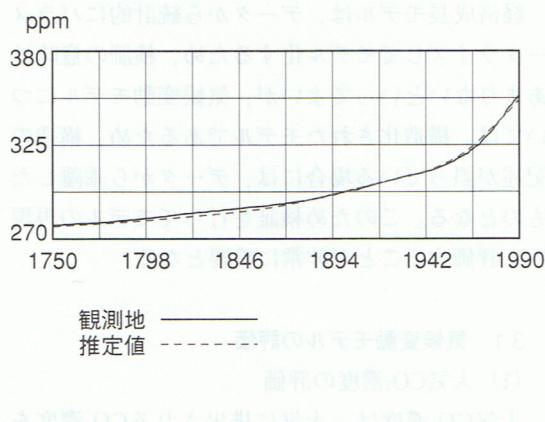
図-2 CO<sub>2</sub>排出量



また、検証用の大気CO<sub>2</sub>濃度データとして、Wigley et al. (2000) を用いた。

図-3は図-1の排出量を用いて、1750年から1990年までの大気CO<sub>2</sub>濃度を観測値と本モデルでの推定値を図示したものである。

図-3 大気CO<sub>2</sub>濃度の観測値と推定値



入力データの誤差や、観測データの精度を考えれば、ほとんど良い一致が読み取れる。

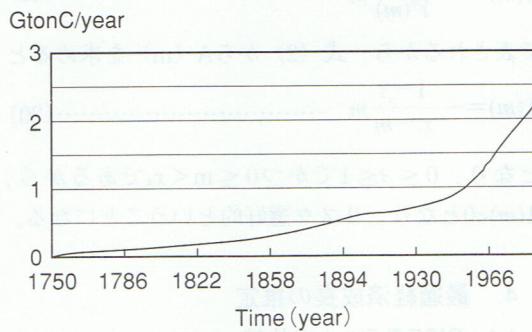
## (2) 炭素サイクルモデルの評価

図-2を見ると、1990年時点では、化石燃料からの大気圏への排出量は5.9GtonCとなっており、大気圏から森林・土壌圏へのCO<sub>2</sub>取込みフラックスは図-4のとおり1990年で、2.2GtonCとなっており、また、大気圏から海洋圏へのCO<sub>2</sub>フラックスは図-5に示すように1990年時点で2.2GtonCとなっている。1990年時点での大気へのCO<sub>2</sub>負荷は、図-2の森林破壊・土壌からのCO<sub>2</sub>を加えて、3.0GtonC (=5.9-2.2-2.2+1.5) となる。IPCC (2001) の1980年代の炭素サイクルでは、化石燃料及び森林・土壌からのものをあわせて7.1GtonCが排出され、森林・土壌圏の取込み1.9GtonC、海洋での正味の吸収1.9GtonCとなっている。本モデルで、1980年代の平均値から、排出量7.0GtonC、森林・土壌圏の取込み2.0GtonC、海洋での正味の吸収2.0GtonCとなっている。

若干本モデルでの、森林・土壌圏及び海洋圏での吸収が大きくなっているが全体的にはほぼ妥当な値と考えられる。

図-4 森林・土壌圏からのCO<sub>2</sub>フラックス  
TonC/year

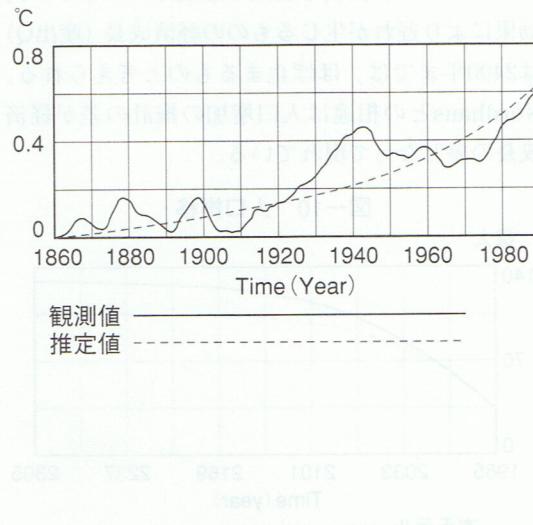


図-5 大気から海洋へのCO<sub>2</sub>フラックス

## (3) 地上気温の評価

図-6は地上気温の観測値と推定値である。実際の地表気温の変動は、各種要因により変動が大きく、モデルでこれらの要因をすべて含むことは容易ではない。本モデルは、本質を押さえた簡単なモデルの構築を基本としており、全体としての気温の動向を把握できればよいと考える。推定結果は、気温変動のほぼ中心を押さえている結果といえる。以上の気候変動については、ほぼ妥当な結果が得られ、統合モデルに使用するモデルとしては、十分な精度が得られているといえよう。

図-6 地上気温の観測値と推定値



## 3.2 経済成長モデルの評価

先にふれたように、経済成長モデルの直接的な評価はあまり意味はないが、各種パラメータによる変数の動きはチェックできる。

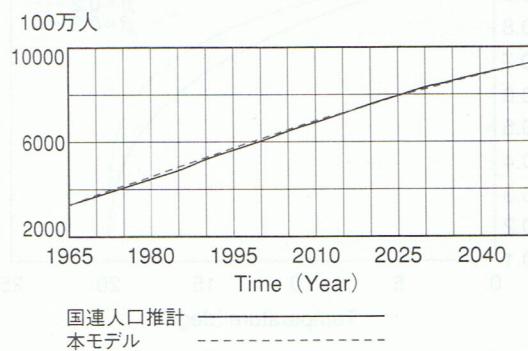
## (1) 人口

人口の推計は以下の式を用いて行った。人口Lは増加率r<sub>L</sub>、増加率の減少率αとして、時間のみの関数になっているため、外生変数とみなすことができる。ここで使われているパラメータは、2050年までの国連の人口推計に合うように設定した。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dr_L}{dt} = -\alpha \cdot r_L \\ \frac{dL}{dt} = r_L \cdot L \\ \alpha = 0.0165 \\ L_0 = 3.369 \times 10^9 \\ r_L = 0.0224 \end{array} \right\} \text{人口推計式} \quad (17)$$

図-7は人口推計値である。

図-7 人口推計値



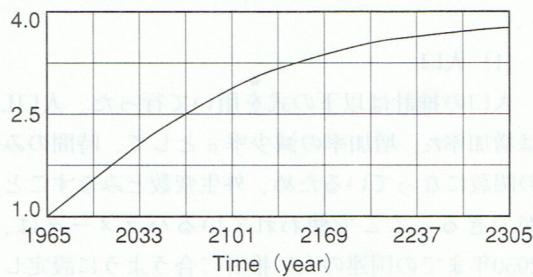
## (2) 技術係数

技術係数Aは増加率r<sub>A</sub>と増加率の減少率α<sub>A</sub>としてDICEモデルでの推計方法に従った。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dr_A}{dt} = -\alpha_A \cdot r_A \\ \frac{dA}{dt} = r_A \cdot A \\ \alpha_A = 0.011 \\ A_0 = 1 \\ r_A = 0.015 \end{array} \right\} \text{技術係数式} \quad (18)$$

図-8は2305年までの技術係数の経年変化を図示したものである。ほぼ、3.91倍程度の生産性向上で定常化するものと見ている。

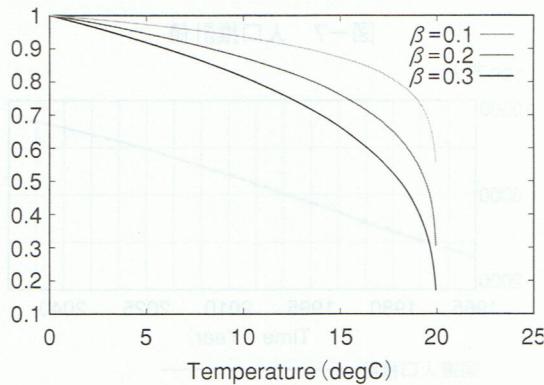
図-8 技術係数の推移



### (3) 効用関数の環境項

2.1で導入した効用関数の環境項の変化傾向を見るために、例として許容温度20°Cの時の感度パラメータ $\beta$ が0.1, 0.2, 0.3の時に大気温度の変化によってどのようなファクタとなるかを図-9に示す。

図-9 効用関数環境項のファクタの変化



この図から、 $\beta$ が小さければ、ファクタは1に近づき許容温度付近で急激に0になる関数である。これは、自然災害のときによく経験するように、災害が身近になったという情報が多くなると急激に不安になって対策をとろうとする傾向とよく似ている。

この効用関数の環境項がリスク回避的かどうかを調べるために、相対的危険回避度を求める。相対的危険回避度の定義は

で表されるから、式(2)からA(m)を求める

$$A(m) = -\frac{1-\beta}{x_a - m} m \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

となり、 $0 \leq \beta \leq 1$ でかつ $0 \leq m < x_a$ であるから、 $A(m) < 0$ となり、リスク選好的ということになる。

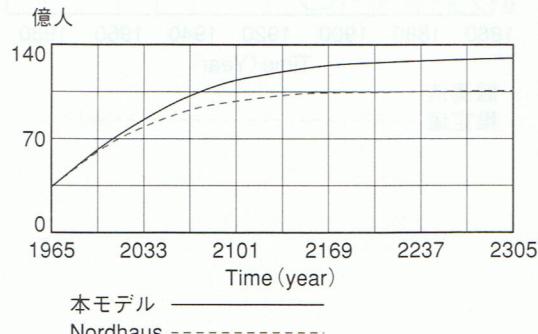
#### 4. 最適経済成長の推定

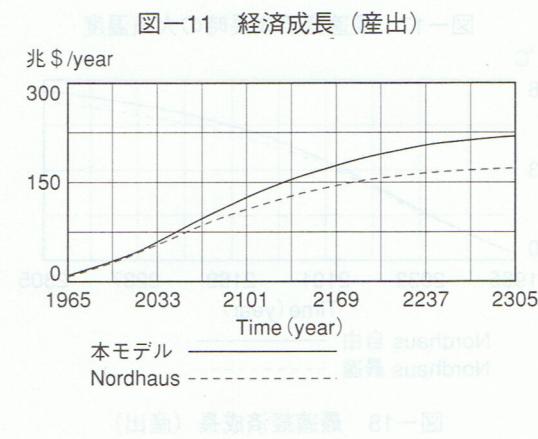
#### 4.1 DICEモデルとの比較

本モデルを用いて、2305年までの規制や制限のない状態での経済成長を考えると、経済成長（産出Q）の変化は基本的には人口増加と技術係数（労働生産性）の向上しかないといってよい。2305年までの人口増加の推計では、Nordhaus (1994) は図-10にあるように、2050年時点で国連推計を8億人程度下回っている。また、2150年以降では人口増加が止まり、この段階で23億人程度下回っている。また、図-11にあるように技術係数の向上も2250年以降は、ほとんど向上はないという仮定 (Nordhaus, 1994) となっている。

このような状況から、当然ながら、図-12に見られるように、投資を経由する資本のバッファ的効果により遅れが生じるもの（産出Q）は2400年までは、ほぼ止まるものと考えられる。Nordhausとの相違は人口増加の推計の差が経済成長の差となって現れている。

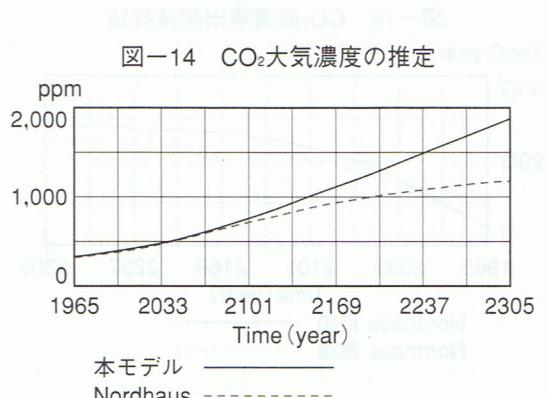
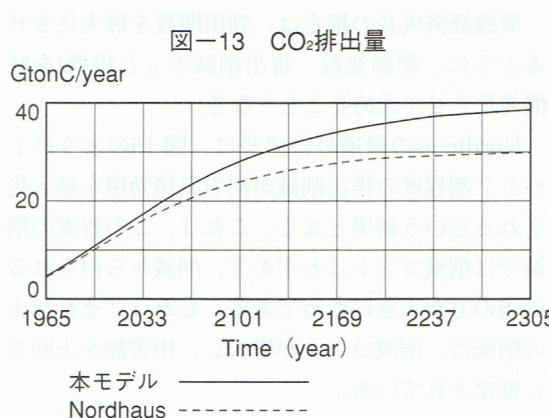
図-10 人口推移

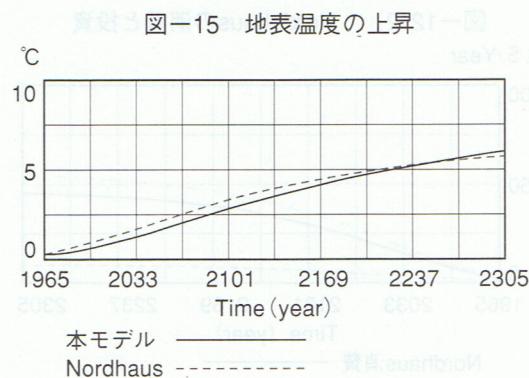




本モデル産出の投資と消費への配分は図-12のとおりである。また、Nordhausの投資と消費は図-13のとおりである。この2つのモデルでの相違は、産出を大きく牽引する人口の推計の相違によって、消費が大きく異なっていることがある。投資は基本的には相違はないと言える。

Nordhausに対する本モデルの産出は人口推計の相違から、本モデルでは大きく上回っている。このことから、本モデルではNordhausよりも、図-13のとおり排出量が増大している。更には、図-14のとおり大気濃度推定が増加へつながっている。しかし、図-15の地表温度の推定では、2200年程度まで、Nordhausの推定値よりも下回り、それ以降は上回るものとなっている。これは、CO<sub>2</sub>の放射強制力推定モデルのIPCC (2001) の採用によるものと考えられる。

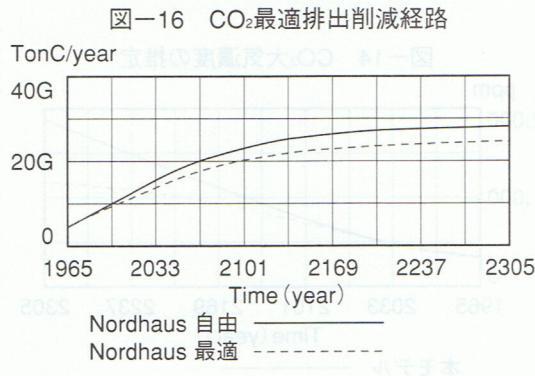




#### 4.2 Nordhausの最適経済成長

最適経済成長の推定は、効用関数を最大化せしように、制御変数、排出削減率 $\mu$ と投資Iを時間変化させて求めることになる。

Nordhausの最適経済成長は、図-16のように1から2割程度の排出削減が割引累積効用を最大化されるという結果となる。これは、この程度の削減では削減コストはわずかで、削減から得られる効用の方が大きいためである。しかし、それ以上の削減は、削減コストが増大し、損害額を上回ると推定されている。

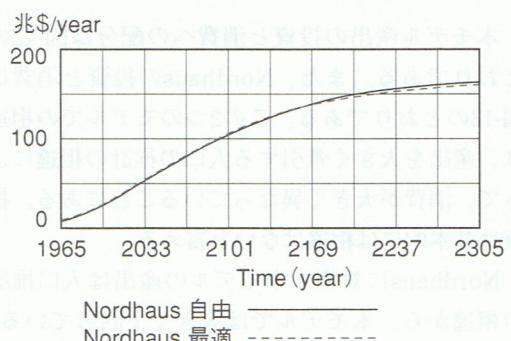


最適経済成長を達成したときの大気温度は図-17のとおりで、2305年時点でも0.4°C程度で、自由に放出したケースとの差異は小さい。更に、図-18に見られるように最適経済成長になると、ほとんど差異は見受けられないものとなっている。

図-17 最適経済成長時の大気温度



図-18 最適経済成長（産出）



#### 4.3 本モデルの最適経済成長

本モデルの最適経済成長を4つのケースで推計した。(参照ケースとして、何も制御せずに、自由に経済成長した場合も求めている。)

- ①効用関数に環境項を含めず、排出削減だけを制御して最適経済成長を求める。
- ②効用関数に環境項を含めず、排出削減と投資を制御して最適経済成長を求める。
- ③効用関数に環境項(許容温度5°C、感度0.2)を導入して、排出削減だけを制御して最適経済成長を求める。
- ④効用関数に環境項(許容温度5°C、感度0.2)を導入して、排出削減と投資を制御して最適経済成長を求める。

図-19は産出を最適経済成長として表したものである。何の制御もしないケースと排出削減①とは、ほぼ同じ経路で、排出削減+投資抑制②は若干低めの成長となる。また、効用関数に環境項を考慮した③、④では、2300年に制御なしのケース

より2から3割程度低い成長となる。

図-19 最適経済成長（産出）

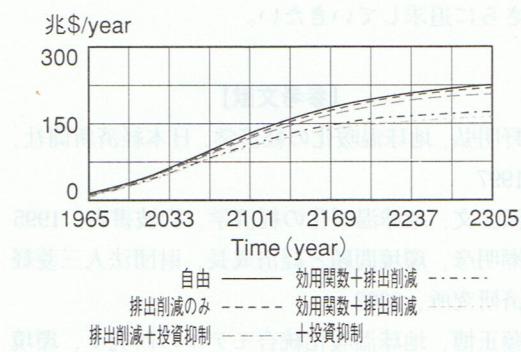


図-20の投資では投資抑制②, ④のケースで、排出制御①, ②より成長が若干低くなる。また、効用関数に環境項を含めた③, ④のケースが許容温度を越える温度推定が生じた場合、大幅に投資を抑制することが効用を最大化させることになる。

図-20 投資の抑制

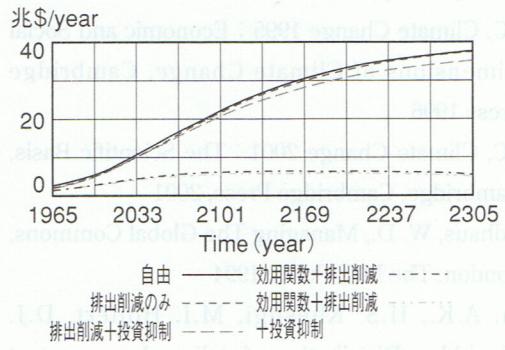


図-21の最適CO<sub>2</sub>排出経路も同じような傾向を示すが①, ②, ③, ④の順にCO<sub>2</sub>排出量を抑制する結果となった。特に、効用関数に環境項を考慮したケース、すなわち温度上昇5℃以内のケースでは、CO<sub>2</sub>排出量は現在よりも削減した方がよいことになる。

図-22, 図-23は最適経済成長を達成したときのCO<sub>2</sub>濃度と地表面温度の変化を示したものである。これらの図はいずれも効用関数に環境項を入れたケースがほぼ横ばい（定常）の濃度や温度を実現することになる。

図-21 最適CO<sub>2</sub>排出経路

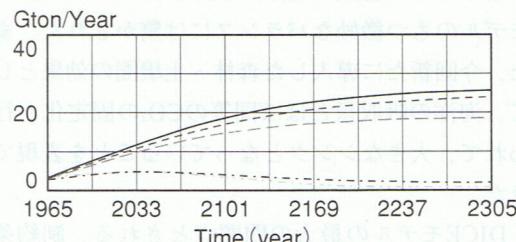


図-22 CO<sub>2</sub>濃度の推移

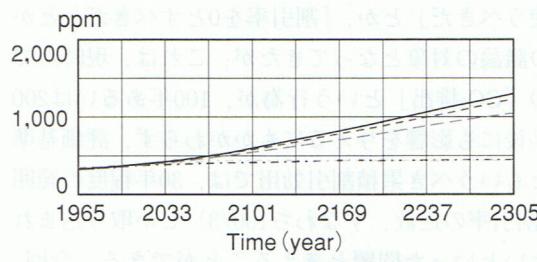
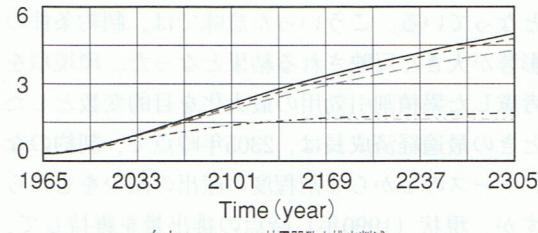


図-23 地表温度



## 5. 結論

NordhausのDICEモデルに基づき、モデルに修正、追加を行って、より現実を表現できるモデルへと改良を試みた。その結果、DICEモデルでの人口の過少推定や放射強制力算出式の改善で、大気濃度はDICEモデルよりも高めに推定し、地表面温度は、2250年以前は過少推定、以降は過大推定となった。しかし、DICEモデルと本モデルの評

価基準となる温度の差異は比較的少なく、DICE モデルのもつ微妙なバランスには驚かされた。また、今回新たに導入した森林・土壤圏の効果として、海洋の吸収量とほぼ同等のCO<sub>2</sub>の固定化が行われて、大きなシンクとなっていることを表現できた。

DICE モデルの最大の問題点とされる、制約条件よりも最適化で決定される傾向は、同じ効用関数で、同じ割引率を使う限り付きまとう現象である。この点は、旧来から「割引率を利子率（平均的には0.03）よりも小さな値（たとえば0.01）を使うべきだ」とか、「割引率を0とすべきだ」とかの議論の対象となってきたが、これは、現時点での「CO<sub>2</sub>排出」という行為が、100年あるいは200年後にも影響を与えるにもかかわらず、評価基準ともいるべき累積割引効用では、30年程度の範囲（割引率の逆数、すなわち100/3）しか取り込まれないといった問題を考えることができる。今回、提示した効用関数に環境項を付加した割引累積効用では、現在の温度が許容される（目的とされる）温度に対してどのレベルにあるかを常に判断しているため、割引率の値には影響を受けにくいものとなっている。こういった意味では、制約条件の影響が大きく反映される結果となった。環境項を考慮した累積割引効用の最大化を目的変数としたときの最適経済成長は、2305年時点では、制約のないケースの2から3割程度の产出の減少をもたらすが、現状（1990年）時点の排出量を維持して、投資を大幅に削減して、消費を高めれば達成できる結果となっている。しかし、投資を制約のないケースの1ないし2割程度に抑制（8ないし9割の税金で、それを消費に再配分）することは現実的問題としては不可能で、「持続可能な経済成長」の難しさを表している。おそらく「持続可能な経済成長」を達成するためには、外的条件として「エネルギーの脱炭素化の進展」と「労働生産性（技術係数）の限りなき向上」が必要になってくるものと思われる。

今日は対象にしなかったが、植林の効果や炭素

税の効果の評価、技術係数の内生化などのモデル化を行い、「持続可能な経済成長」の実現可能性をさらに追求していきたい。

### 【参考文献】

- 天野明弘、地球温暖化の経済学、日本経済新聞社、1997
- 宇沢弘文、地球温暖化の経済学、岩波書店、1995
- 柳瀬明彦、環境問題と経済成長、財団法人三菱経済研究所、2002
- 佐藤正博、地球温暖化統合モデルの研究Ⅰ、環境経済政策学会大会報告要旨集、1999、228-229
- 佐藤正博、地球温暖化統合モデルの研究Ⅱ、環境経済政策学会大会報告要旨集、2000、10-11
- 佐藤正博、地球温暖化統合モデルの研究Ⅲ、環境経済政策学会大会報告要旨集、2001、122-123
- Bolin, B. ed., The Greenhouse effect climatic change and ecosystems (SCOPE; 29) , New York, J. Wiley, 1986
- IPCC, Climate Change 1995 : Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge Press 1996
- IPCC, Climate Change 2001 : The Scientific Basis, Cambridge, Cambridge Press, 2001
- Nordhaus, W. D., Managing The Global Commons, London, The MIT Press, 1994
- Jain, A.K., H.S. Kheshgi, M.I. Hoffert, D.J. Wuebbles, Distribution of radiocarbon as a test of global carbon cycle models, Global Biochemical Cycles, 9 (1), 153-166, 1995
- Matthews, E., Global Vegetation and Land Use: New High-Resolution Data Bases for Climate Studies, Journal of Climate and Applied Meteorology 22, 474-487, 1983
- McGuire, A.D., L.A. Joyce, W. Kicklighter, J.M. Melillo, G. Esser, C.J. Vose, Productivity Response of Climax Temperate Forests to Elevated Temperature and Carbon Dioxide: A North American Comparison Between Two

- Flobal Model, Climate Chang, 24, 287-310, 1993
- Ogawa, T., Simulation of Forest Carbon Dynamics  
Based on a Dry-Matter Production Model, Bot.  
Mag. Tokyo 98, 225-238,1985
- Peng, TH., W.S. Broecker, H.D. Freyer, S.  
Trumbore, A Deconvolution of the Tree Ring  
Based  $\delta$  13C Record, J. Geo. Res.,88, 3609-3620,  
1983
- Sato, M. Kinoshita, M., One-Dimensional  
Photochemical-Radiative Convective Model of  
Atmosphere, Chemical Manufacturers  
Association (U.S.A) ,1986
- Sato, M., A Study of the Economic Impact Analysis  
on Regulation for CFC/Halon. Montreal Protocol  
1989 Assessment Report, Economic Committee,  
UNEP,1989,pp108-109
- Sato, M., Integrated Modeling for Physical and  
Economic Assessment on Climate Change, 21'st  
RESES Symposium, 1-8, 1999
- Schelling, T.C., Integral discounting, Energy  
Policy, 23 (4/5) , 395-401, 1995
- Tol, R.S.J., Communication: The damage costs of  
climate change: a note on tangibles and intangi-  
bles, applied to DICE, Energy Policy, 22  
(5) ,436-438, 1994
- Toth, T.H., Discounting in integrated assessments  
of climate change, Energy Policy, 23 (4/5) ,  
403-409, 1995
- WRI ed., World Resources 1998-99, NewYork,  
World Resouces Institute
- Wigley T.M.L., D.S. Schimel ed., The Carbon  
Cycle, Cambridge Press, 2000