



# 環境学的マクロモデルのSDモデリングに関する研究

## A Study on SD-Modeling of an Environmental Macro-Model

池田 誠 (Ikeda, Makoto)

東洋大学国際地域学部

ikedata@itakura.toyo.ac.jp

Abstract: This paper reports the results of research that converted a macro-model of the environmental education into a model of system dynamics. This original model is the model that Professor Tomonori Matsuo (Toyo University, Department of International Regional Studies) proposes. Prof. Matsuo showed this original model in Center for Sustainable Development Studies, Toyo University. I participated in a project the same as Prof. Matsuo in this center. I used statistics data and, on the basis of model and data of Prof. Matsuo, made functions of this model. Furthermore, on the basis of this model, I carried out policy simulation. In this paper, I used these trials with simulator software SimTaKN developed newly.

キーワード：システム・ダイナミックス、環境、GDP、CO<sub>2</sub>、政策、シミュレーション

**要旨：**本稿は、松尾友矩教授（東洋大学国際地域学部）が提案している環境学的マクロモデルをシステム・ダイナミックスのモデルに変換した研究の成果をとりまとめたものである。松尾教授と筆者は東洋大学国際共生社会研究センター（オープン・リサーチ・センター）において、地域開発データベースと計画作成・評価シミュレータの開発・整備という研究プロジェクトに参加している。本稿は、そこで開発された松尾教授のモデルとデータをもとに、実証モデルを作成した。さらに、そのモデルをもとに、政策シミュレーションを実施した。本稿では、これらの試みを池田の企画提案で新しく開発されたシミュレータ・ソフト SimTaKN を用いて実施した。

### 1. はじめに

本稿では、東洋大学国際共生社会研究センター（オープン・リサーチ・センター）の平成 16 年度報告書[1]に掲載されている松尾友矩著「環境学的マクロモデルによる温暖化対策の政策評価」の「環境学的マクロモデル」について、松尾教授から原データの提供を頂きながら、筆者がシステム・ダイナミックス（SD）を用いてモデルを作成し、シミュレーションを行った研究成果を報告することとする。

本研究において得られた成果として、独自に企画提案したシミュレータ・ソフト SimTaKN を用いて、理論的に構築された環境学的マクロモデルを SD モデルに置き換えることは比較的簡単なプロセスで可能であること、しかも、統計的なデータを用いて視覚的にも分かりやすい実証的な SD モデルに置き換えることが比較的容易であること、さらに、この SD モデ

を用いて政策のインパクトについてシミュレーションが可能であることが明らかになり、SimTaKN の有効性を示すことができた。

また、本研究において、ST / SD 入門ソフトとして開発した SimTaKN が、教育・研修用のみならず研究面においてもシミュレーションを含むモデルの操作可能性を広げることにより理論的・基礎的な研究用としても利用可能であることを例示することができたものといえよう。

### 2. 環境学的マクロモデルの概要

ここでは、本稿の内容に関する最新刊である松尾友矩著「環境学」[2]の第 2 章「文明の発展と 21 世紀の課題」から環境学的マクロモデルの基本的な位置づけとそのモデルの基本的な構造を紹介し、SD モデル作成の前提を明らかにすることとする。

#### 2.1 環境マクロ経済モデルの基本的な位置づけ

このモデルは、松尾友矩著「環境学」において記されているとおり「文明の発展を経済の拡大、当該国の GDP の増大におく現代社会のもつ価値観の抱える課題を考察する経済モデルの検討を行う」ために開発された。「このモデルにおいては、GDP の基本的な成長の過程の評価に対してこの経済成長に伴うエネルギー消費の増大の関係を明らかにし、経済成長と地球環境保全のための施策の関係を解析できるようにしている。（中略）そして、これまでの日本の経験における経済成長率とエネルギー消費の関係を解析を行い、エネルギー消費の増大を抑える持続可能性を求める条件を明らかにし、文明発展の評価軸の変換の必要性を示していきたい。」とされている。そのモデルの詳細は

「環境学」を参照して頂くこととし、ここでは SD によるモデリングの前提となる基本的な構造を簡潔に紹介することとする。

## 2.2 環境学的マクロモデルの基本的な構造

環境学的マクロモデルの基本方程式はマクロ経済学の次の基本方程式から出発している。

$$GDP = \text{民間消費}(C) + \text{民間総投資}(I) + \text{政府支出}(G) + (\text{輸出}(E) - \text{輸入}(M)) \dots\dots\dots$$

紙面の制約から松尾教授の詳しい説明を省略せざるをえないが、ここで扱われているモデルはいわゆるマクロ経済モデルではなく、物質・エネルギーの流れや技術的な変化を含んだ環境学的なモデルを背景にしているモデルであることに特別の留意が必要である。例えば、Amory Lovins による人口、豊かさ、技術の環境影響の方程式( I P A T ) [3]などを想起されたい。

A. Lovins による IPAT 方程式は、

$$\text{環境への影響}(I) = \text{人口}(P) \times \text{豊かさ}(A) \times \text{技術}(T)$$

という形で、環境は、人口、資本ストック、物質スループット、エネルギーの関数として表されている。

このような方程式を明示的に取り込むことは今後の課題であると思われるので、ここでは環境モデルの方程式の紹介にとどめておくこととする。

式において、世界経済が持続可能であるためには各国の輸出と輸入は均衡していることが望ましい。

持続可能な社会が求める政府支出 (G) は、国の税収分に見合うことが必要であり、民間消費 (C) に比例する関係として表すことが適切であるといえる。

$$\text{政府支出}(G) = C \text{ (は定数とする)} \dots\dots\dots$$

民間投資は、持続可能な社会においては民間消費に比例する関係と表すことが適切であるといえる。

$$\text{民間投資}(I) = C \text{ (は定数とする)} \dots\dots\dots$$

結論として 式は次のように示すことができる。

$$GDP = (1 + \dots) C = kC \dots\dots\dots$$

(ただし、 $k = 1 + \dots$  である)

GDP は民間消費の1次的近似関数として想定するのが適切であると考えられる。次に、最終的な消費を支えるのは国民1人1人であることから、民間消費は1人当たりの消費額(f)に全人口(P)を掛けて求めることにすると、その関係は 式のように変形することができる。

$$GDP = kC = k f P = FP \text{ (k : 比例定数)} \dots\dots\dots$$

GDP 当りのエネルギー消費という評価軸を導入し、その関係を解析する。また、エネルギー消費と地球大気の保全の関係は、エネルギー消費当りの CO2 排出量への換算により求めることができる。

エネルギー消費 (E) と GDP の関係は次式

$$E = A \times GDP \dots\dots\dots$$

(ただし A は GDP 当りのエネルギー消費効率)

$$CO_2 = BE = A \times B \times GDP \text{ (B はエネルギー消費量あ$$

たりの CO2 発生量を示す).....

自然エネルギーで小さく、化石燃料で大きい。

～ 式をセットとして環境学的マクロモデルと呼んでいる。これらの時間変化を次の式で表す。

$$d(GDP)/dt = d(FP)/dt = Pd(F)/dt + Fd(P)/dt \dots\dots$$

$$dE/dt = A \times d(GDP)/dt + (GDP) \times dA/dt \dots\dots\dots$$

$$d(CO_2)/dt = AB \times d(GDP)/dt + A(GDP) \times dB/dt \dots\dots$$

以上が、環境マクロ経済モデルの概要である。このような微分方程式による理論的なモデルを、SD によって操作可能なモデルに変換することとする。

## 3. SDによるモデリング

本稿では、筆者の企画提案により中村州男氏が開発したシミュレータ・ソフト SimTaKN [5]を用いて環境学的マクロモデルの SD 化を行うこととする。

本節では、本稿を理解して頂くために必要最小限の範囲で簡単に SimTaKN の機能や特徴を紹介する。

SimTaKN のアイコンの種類と機能

SimTaKN のフローにおけるアイコンの表示は図1のとおりである。左上から順に、関数計算を書き込む「変化箱」(フロー、レイトや補助変数)、統計データや政策変数などを入力する際に用いる「定数箱」、ストックを表す「蓄積箱」、図表で関数関係を表したり統計データなどを入力したりするための「関係箱」(テーブル関数やグラフ関数の入力用)、遅れの回数とその間の出力値を入力する「時の移動箱」(タイム・ラグ)、変数を複写する「場の移動箱」(複写元)、これをシート上の別の場所あるいは別のシートで受け取る「場の受け箱」(複写先)、文字の記入用の「コメント箱」となっている。

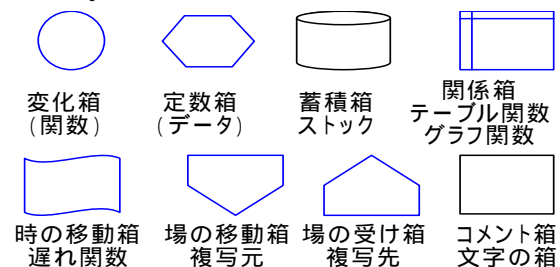


図1 SimTaKN において用いられるアイコン一覧

SimTaKN の作図

SimTaKN のモデルは、これらの箱を矢印で結ぶことによって図2のように作成される。箱を選択(左クリック)すると9つの点が表示されるが、中心の点にカーソルを合わせて左クリックしたままマウスをドロースると、矢印付きの線が引き出せる。それを、関係づけたい箱までドロースしてクリックを開放すると矢印が引かれる。

SimTaKN の操作は、選択している箱ごとに、その箱で操作や入力などが可能な機能が、画面の右側に自動的に表示されるので、分かりやすくなっている。

本論分は JSD の査読規定に沿って審査を受けたものです。

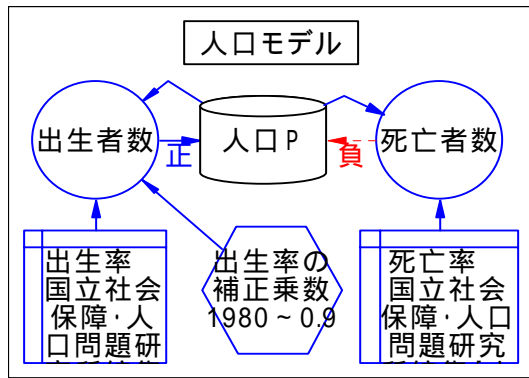


図2 SimTaKNのストック・フロー図

物理的イメージから因果関係中心の表示への変更

SimTaKNのモデルの最大の特徴は、ストックとインフロー、アウトフローという物理的なイメージの従来のSDソフトと異なり、因果ループ図がそのままSDモデルとなるようにアウトフローを負の矢印で物理的関係ではなく因果関係で表現している点である。例えば、図2はストック・フロー・ダイアグラムであるが、この因果ループ図は図3のように表現することができる。また、因果関係の方向に関する表現上の議論があることから正負、同反を使い分けたり同時に表現したりすることができるようになっている。

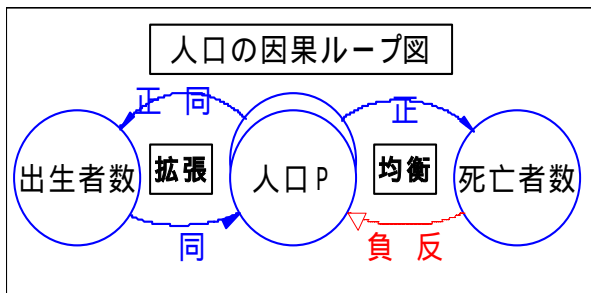


図3 SimTaKNの因果ループ図

SimTaKNでは、因果ループを作成していくと循環が生じた際に、線で結べないという警告が表示されるようになっている。このとき、それぞれの因果ループ上で、ストックに相当する変数が最低一つはあるとみなされるので因果ループ図を作成しながら、ストックを見分けていく作業にもなる。図3では、人口を重ねた円に表示しているが、このようにして因果ループ図を作成する途中で、循環が見つかり、その中でストックに相当する要因を特定していくことになる。このとき、ストックを意味するアイコンである円柱形の箱を使えば、因果ループ図がストック・フロー・ダイアグラムとして作成できるのである。

SimTaKNの箱の特殊な機能

また、SimTaKNの特徴は、それぞれのアイコンの箱が、その箱が作成された時点の時刻をもとにPC上で認識されていることにある。そのため、ネーミングにどのような記号や文字を使うことも可能であり、場合によっては文字の代わりに画像をはめ込むことも可

能である。また、この機能は、シミュレーション結果を保存するために、必要な計算結果を有しているアイコンの箱を単に複写しておくだけで、様々なシミュレーションの結果を保存できることである。アイコンの箱は、矢印で結ばれない限り、計算の対象とはされないため、特定の時点や特定のケース設定の計算結果を保存しておくことができる仕組みになっている。本稿の図では、それらの箱は表示されていないが、このような方法でデータを保存しグラフ化しているのである。

SimTaKNのデータの箱

人口のストックを表す蓄積箱には、初期値を入れる。関係箱を使って入力されている「出生率」には「国立社会保障・人口問題研究所編集「人口の動向：日本と世界」人口統計資料集1999」という注釈が付けられているが、印以降は計算式の出力時には表示されないためデータの出典等を記入しておく上で便利な機能となっている。

エクセルとのデータの互換やSD方程式

また、エクセル等の表計算の計算機能やグラフ機能を利用しやすいように、データの出力をこの形式で行っている。SD方程式も表形式で出力される。

ダイナミック・リプレイ・モード

SimTaKNの独特の機能として、計算結果を箱の大きさや色、位置などを変化させて表現する機能を有している。図4(上)はその例示であるが、図2と比較して箱の大きさの違いが見取れる。このように変化させることはストック・フロー図だけではなく、因果ループ図の段階でも可能であり、時間の経過と共にシステムが変化していく様子を把握することができる。計算結果をグラフにする図4(下)の機能もこれである。以上が本稿のためのSimTaKNの基礎知識である。

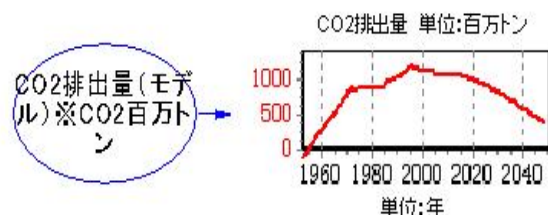
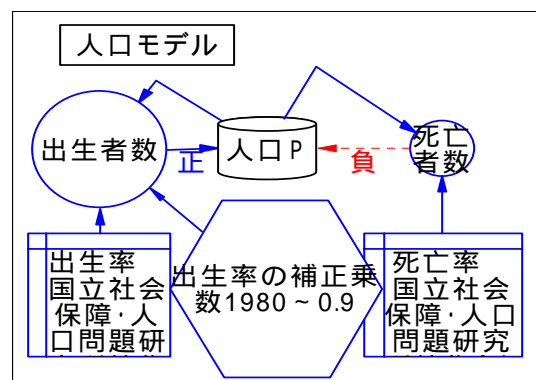


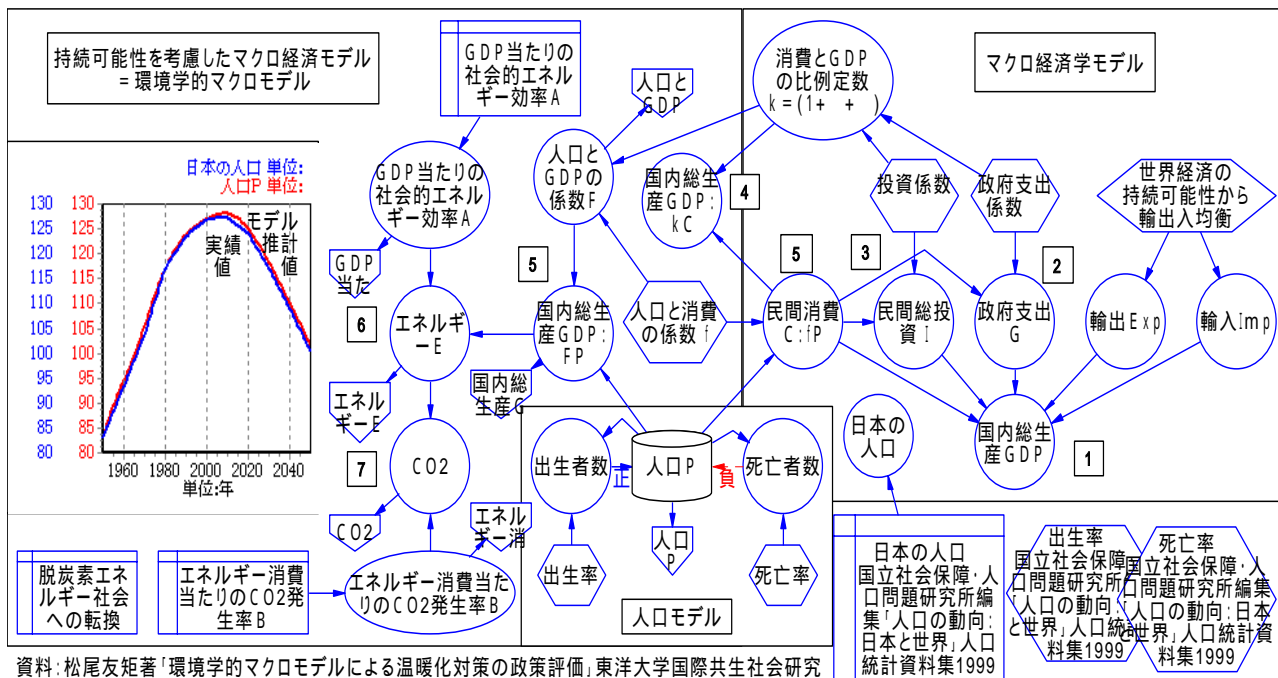
図4 ダイナミック・リプレイ・モードの例

### 3.1 環境学的マクロモデルのSD化

環境学的マクロモデルの基本方程式 ~ を SimTaKN で表すと図5のようなモデルとして表現できる。

図5の右側にマクロ経済学モデルの基本方程式を記述している。図5の中央下側には人口モデルである。この人口モデルは、図中に示す関係係にあるよう

に人口問題研究所の実績値と将来推計値を再現できるように作成している。人口の1950年から1995年までの実績値と2000年から2050年までの予測値に対するSDモデルの計算値は図5の左側にグラフとして示している。図5の残りの部分は、方程式の ~ を導出している仮定をモデル上で表現している。



資料: 松尾友矩著「環境学的マクロモデルによる温暖化対策の政策評価」東洋大学国際共生社会研究センター平成16年度報告書から池田誠作成

図5 SimTaKNによる環境学的マクロモデルの方程式 ~ のSDモデル化

図5のモデルの方程式は次のとおりである。SimTaKNでは、これらの方程式をデータや計算結果とともにエクセルに出力している。ここでは、エクセルの表形式をワードで見やすいように多少加工して提示している。

- 前期分=国内総生産GDP:FPの1回遅延 初期値:584
- GDPの増分  $d(GDP)/dt = \text{国内総生産GDP:FP} - \text{前期分}$
- 前期分=人口Pの1回遅延 初期値:81.7
- 人口Pの増分  $d(P)/dt = \text{人口P} - \text{前期分}$
- 国内総生産GDP:FP = 国内総生産GDP:FP
- 前期分=エネルギーEの1回遅延 初期値:59240
- エネルギーEの増分  $d(E)/dt = \text{エネルギーE} - \text{前期分}$
- 前期分=CO2の1回遅延 初期値:5834000
- CO2の増分  $d(CO2)/dt = \text{CO2} - \text{前期分}$
- 前期分=GDPエネルギー効率Aの1回遅延 初期値:100
- Aの増分  $d(A)/dt = \text{GDPあたりエネルギー効率A} - \text{前期分}$
- 前期分=エネルギーCO2発生率Bの1回遅延初期値:100
- Bの増分  $d(B)/dt = \text{エネルギーCO2発生率B} - \text{前期分}$
- 前期分=人口とGDPの係数Fの1回遅延 初期値:7
- Fの増分  $d(F)/dt = \text{人口とGDPの係数F} - \text{前期分}$

- $Fd(P)/dt = \text{人口とGDPの係数F} \times \text{人口Pの増分 } d(P)/dt$
- $Pd(F)/dt = F \text{の増分 } d(F)/dt \times \text{人口P}$
- $Pd(F)/dt + Fd(P)/dt = Pd(F)/dt + Fd(P)/dt$
- $d(GDP)/dt = Pd(F)/dt + Fd(P)/dt$  の確認 = GDPの増分  $d(GDP)/dt - Pd(F)/dt + Fd(P)/dt$
- 前期分=国内総生産GDP:FPの1回遅延 初期値:584
- GDPの増分  $d(GDP)/dt = \text{国内総生産GDP:FP} - \text{前期分}$
- $Ad(GDP)/dt = \text{GDP当たりの社会的エネルギー効率A} \times \text{GDPの増分 } d(GDP)/dt$
- $GDPd(A)/dt = \text{国内総生産GDP:FP} \times A \text{の増分 } d(A)/dt$
- $Ad(GDP)/dt + GDPd(A)/dt = GDPd(A)/dt + Ad(GDP)/dt$
- $d(E)/dt = Ad(GDP)/dt + GDPd(A)/dt$  の確認 = エネルギーEの増分  $d(E)/dt - Ad(GDP)/dt + GDPd(A)/dt$
- $d(CO2)/dt = ABd(GDP)/dt + AGDPd(B)/dt + BGDPd(A)/dt$  の確認 = CO2の増分  $d(CO2)/dt - ABd(GDP)/dt + AGDPd(B)/dt + BGDPd(A)/dt$
- $ABd(GDP)/dt + AGDPd(B)/dt + BGDPd(A)/dt = ABd(GDP)/dt + AGDPd(B)/dt + BGDPd(A)/dt$
- $ABd(GDP)/dt = \text{エネルギーCO2発生率B} \times \text{GDPエネルギー効率A} \times \text{GDPの増分 } d(GDP)/dt$
- $AGDPd(B)/dt = \text{GDP当たりの社会的エネルギー効率A} \times$

本論分は JSD の査読規定に沿って審査を受けたものです。

GDP :  $F \times P \times B$  の増分  $d(B)/dt$   
 $B \times GDPd(A)/dt = \text{エネルギー} - CO_2 \text{ 発生率} B \times \text{国内総生産} GDP$   
 $P : F \times P \times A$  の増分  $d(A)/dt$   
 前期分 = GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A の 1 回 遅延 初期値 : 100  
 $A$  の増分  $d(A)/dt = GDP$  当たりの社会的エネルギー効率 A - 前期分  
 前期分 = 国内総生産  $GDP : F \times P$  の 1 回 遅延 初期値 : 584  
 $GDP$  の増分  $d(GDP)/dt = \text{国内総生産} GDP : F \times P$  - 前期分

### 3.1 環境学的マクロモデルの微分方程式モデル

次に、図6において、SimTaKN による微分方程式モデルの定差方程式への変換を説明することとする。

図6(上)は、式の左辺  $d(GDP)/dt$  と右辺  $Pd(F)/dt + Fd(P)/dt$  をデータの入手可能性とも合わせて  $dt = 1$  (1年ごと) の定差方程式モデルとして表現したものである。(上記のアイコンをコネクターで結んで方程式を入力した。)なお、国内総生産 GDP、人口 P、

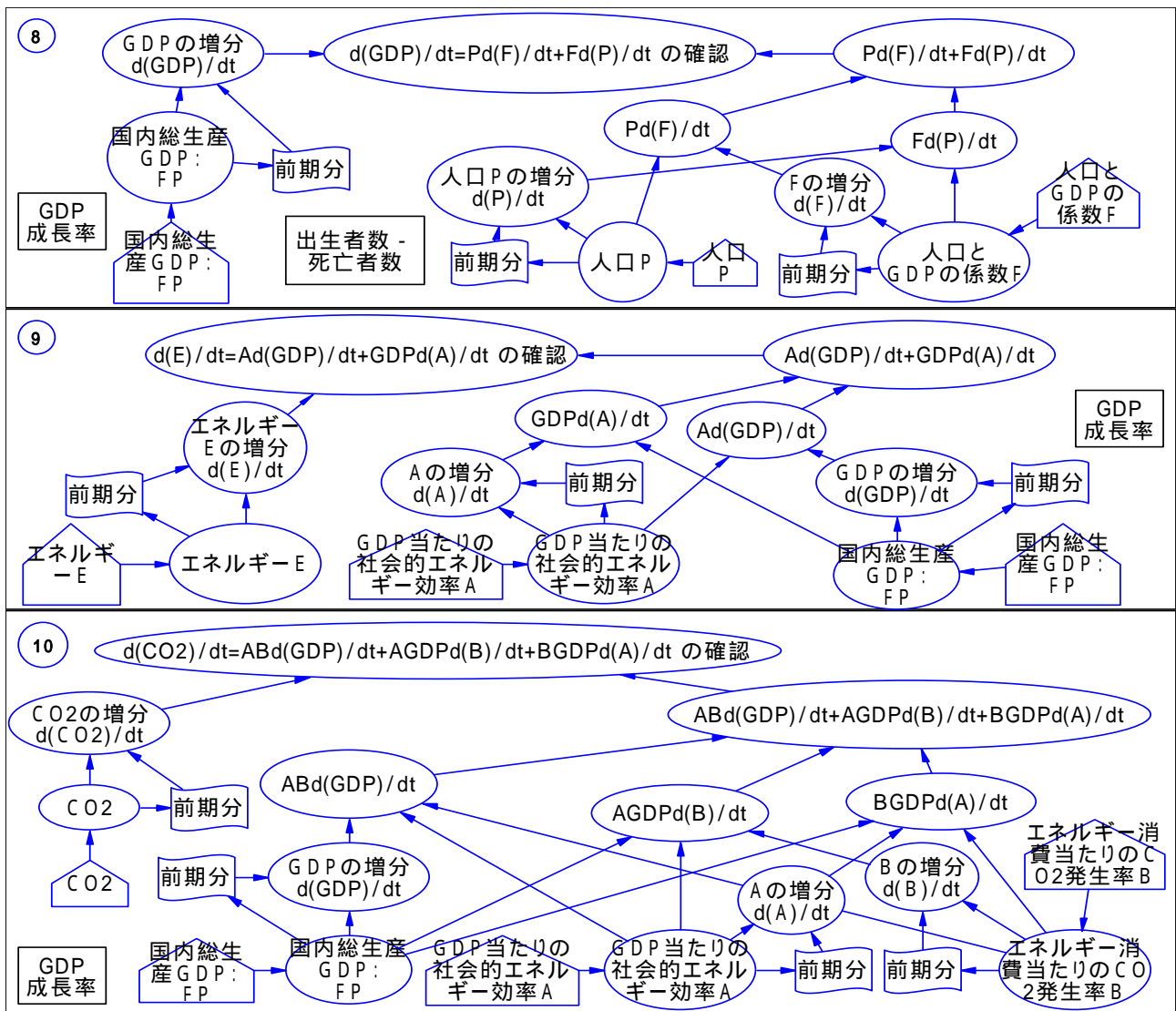
人口と国内総生産の係数 F は、それぞれ図1のモデルの計算結果を「場の受け箱」で取り込んで計算に利用していることを示している。

方程式の確認の箱では、左辺と右辺をそれぞれ別々に計算した結果が等しくなるか否かを確認している。

同様に、図6(中)は、式の右辺  $dE/dt$  と左辺  $A \times d(GDP)/dt + (GDP) \times dA/dt$  をモデル化したものである。

さらに同様に、図6(下)は 式の右辺  $d(CO_2)/dt$  と右辺  $AB \times d(GDP)/dt + A(GDP) \times dB/dt$  をモデル化したものである。

図6のこれらのモデルでは、それぞれ左辺と右辺とが等しくなることの確認を行っている。



資料: 松尾友矩著「環境学的マクロモデルによる温暖化対策の政策評価」, 東洋大学国際共生社会研究センター 平成16年度報告書から池田誠作成

図6 SimTaKN によるモデル方程式のフロー図化

### 3.2 環境学的マクロSDモデルの実証モデル化

「環境学的マクロモデル」について、松尾教授から原データの提供を頂き、人口、GDP、一次エネルギー、CO<sub>2</sub> 排出量の関係をエクセルの近似関数機能を用いて構造変化した区分ごとの方程式を算出した。

松尾教授のオリジナル論文では図7のように5年ごとの平均成長率をグラフ化しており、SimTaKN で5年ごとの成長率を移動平均として作成した。

移動平均を計算するモデルは図8、実績値は図9(上段)移動平均値の計算値は図9(下段)のとおりである。

また、人口、GDP と一次エネルギー、一次エネルギーと CO<sub>2</sub> 排出量の関係は図10に示すとおりである。これらの作業によって得られた基本係数と構造変化の補正乗数をSDモデルに導入して実証モデルを作成した。

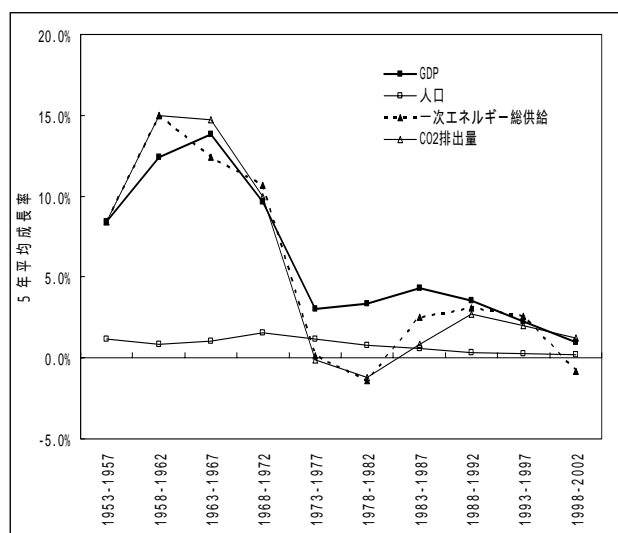


図7 GDP と一次エネルギーと CO<sub>2</sub> 排出量の関係

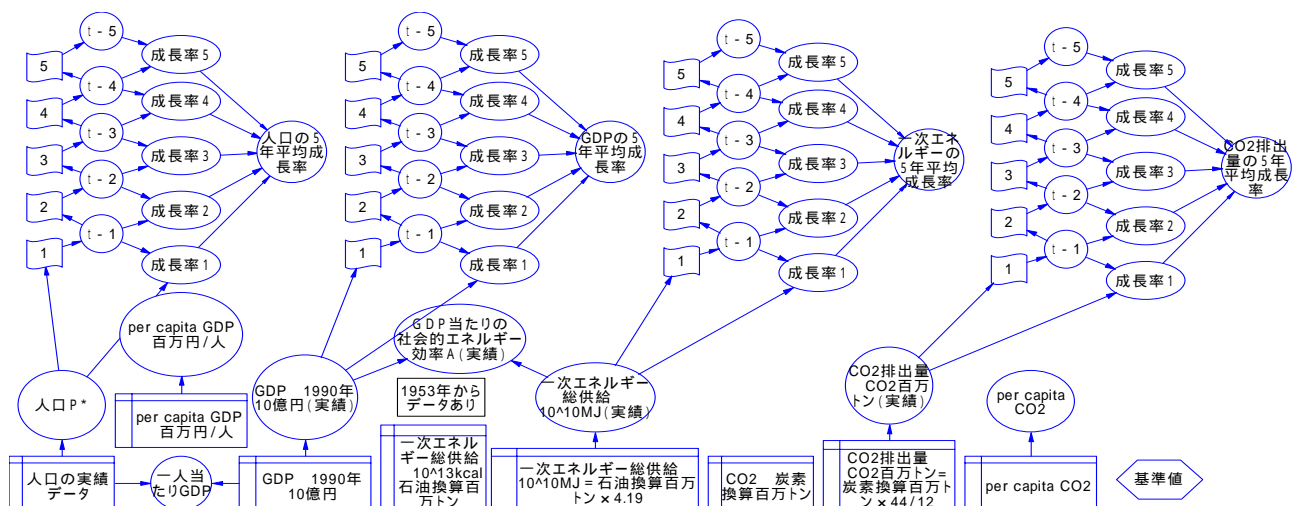


図8 人口、GDP、一次エネルギー、CO<sub>2</sub> 排出量の5年間移動平均値の計算モデル

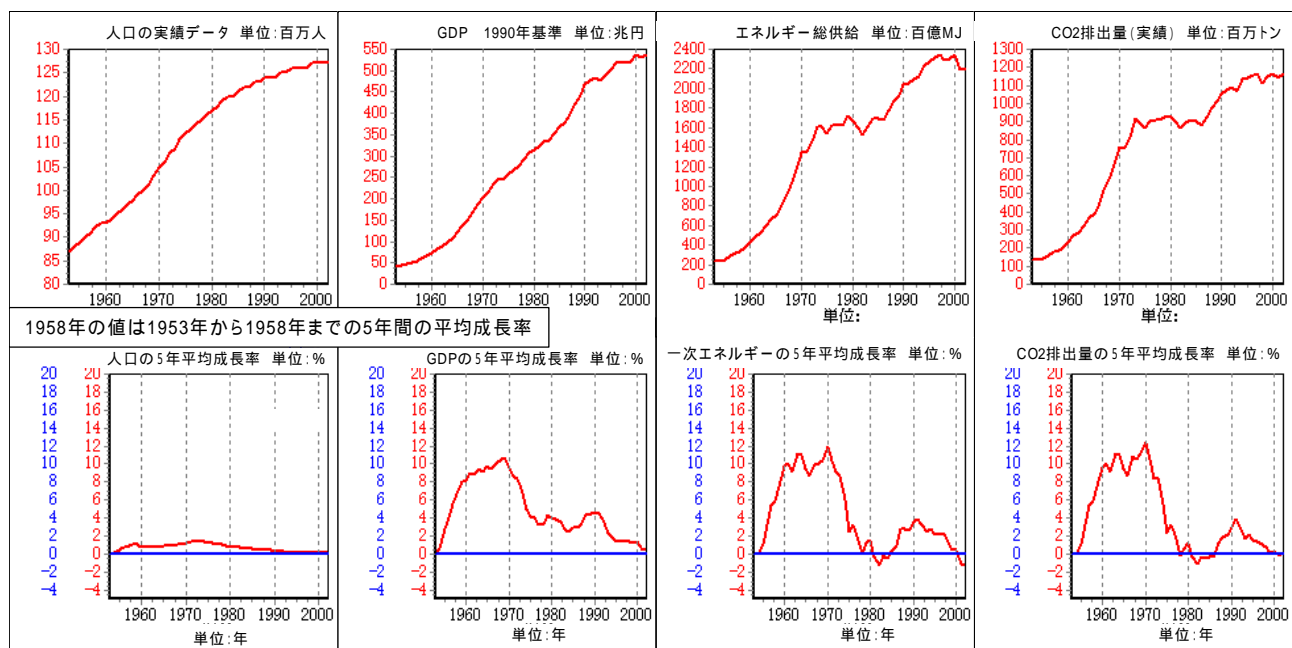


図9 人口、GDP、一次エネルギー、CO<sub>2</sub> 排出量の5年間移動平均値の計算モデル

本論分は JSD の査読規定に沿って審査を受けたものです。

ギョー・経済統計要覧 2004 年版 p.321 参照)

(4)CO2 排出量：

1965-2002：「エネルギー・経済統計要覧 2004 年版」日本エネルギー経済研究所計量分析部編、(財)省エネルギーセンター

1953-1964：1965 年の一次エネルギー供給量と CO2 排出量の関係を元に算出した値

図 10 の統計データは、松尾教授から提供して頂いた。それぞれの出典は次のとおりである。

(1) 人口：総務省統計局データ

(2) GDP：経済社会総合研究所データによる 1990 年基準実質 GDP (但し、1953-54 年データについては 1958 年基準 GDI データを元に換算したもの、2001-2002 年データについては 1995 年基準 GNP データを元に換算したもの)

(3)一次エネルギー供給量

1965-2002：「エネルギー・経済統計要覧 2004 年版」日本エネルギー経済研究所計量分析部編、(財)省エネルギーセンター

1953-1964：「総合エネルギー統計」昭和 42 年度版通商産業研究社 (但し、各燃料からのエネルギー供給量への換算原単位は年によって異なる。詳細はエネルギー

これらの統計データから、人口、GDP、一次エネルギー、CO2 排出量の相互の関係を近似曲線として推計した。これらのグラフ化や近似曲線の推計にはエクセルの機能を用いた。人口と GDP の関係は、図 10 の左上のグラフのように複雑な変化をしているが、長期的に推計される傾き (人口あたり GDP の平均値) をベースに減速と加速として算出した。以下同様。

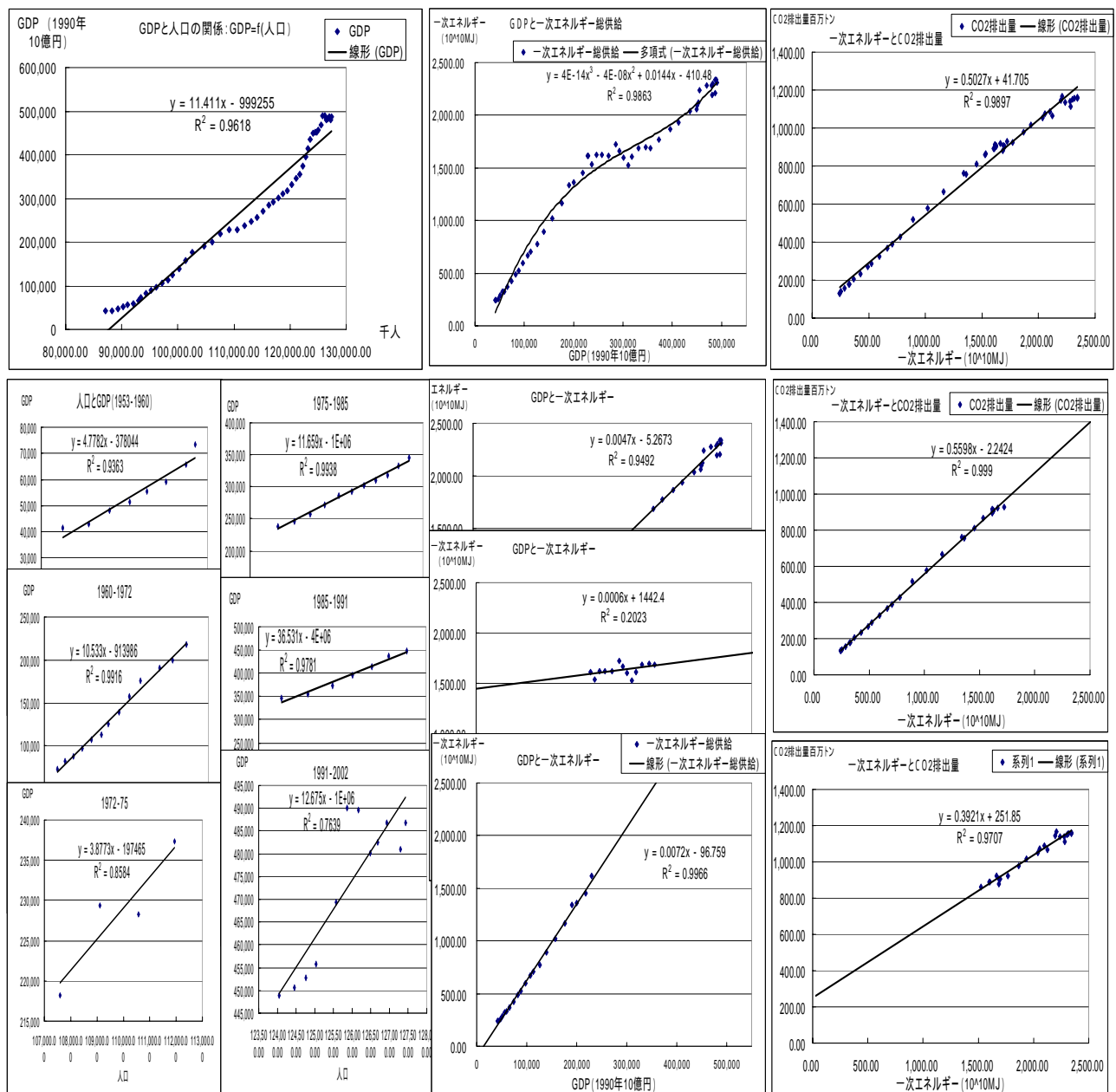


図 10 人口と GDP と一次エネルギーと CO2 排出量の関係 (近似曲線の推計)

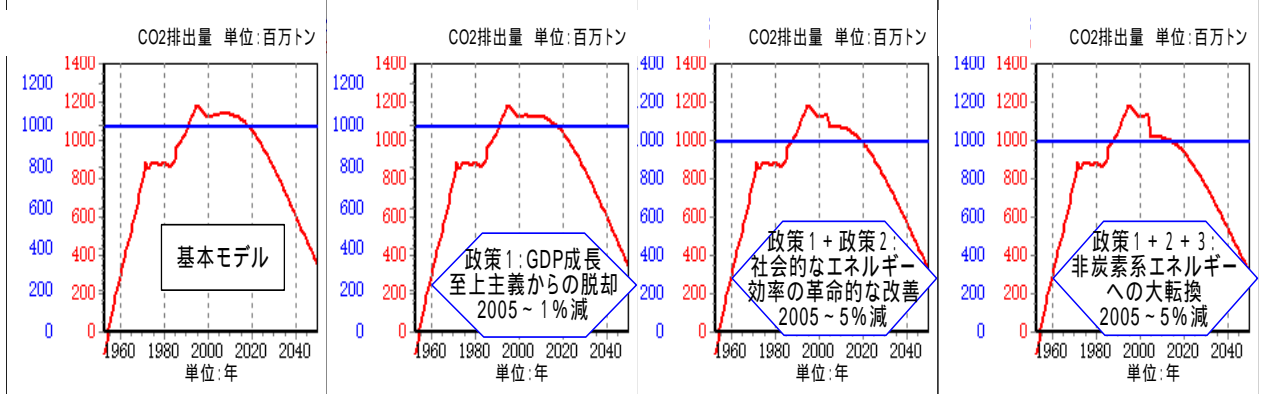
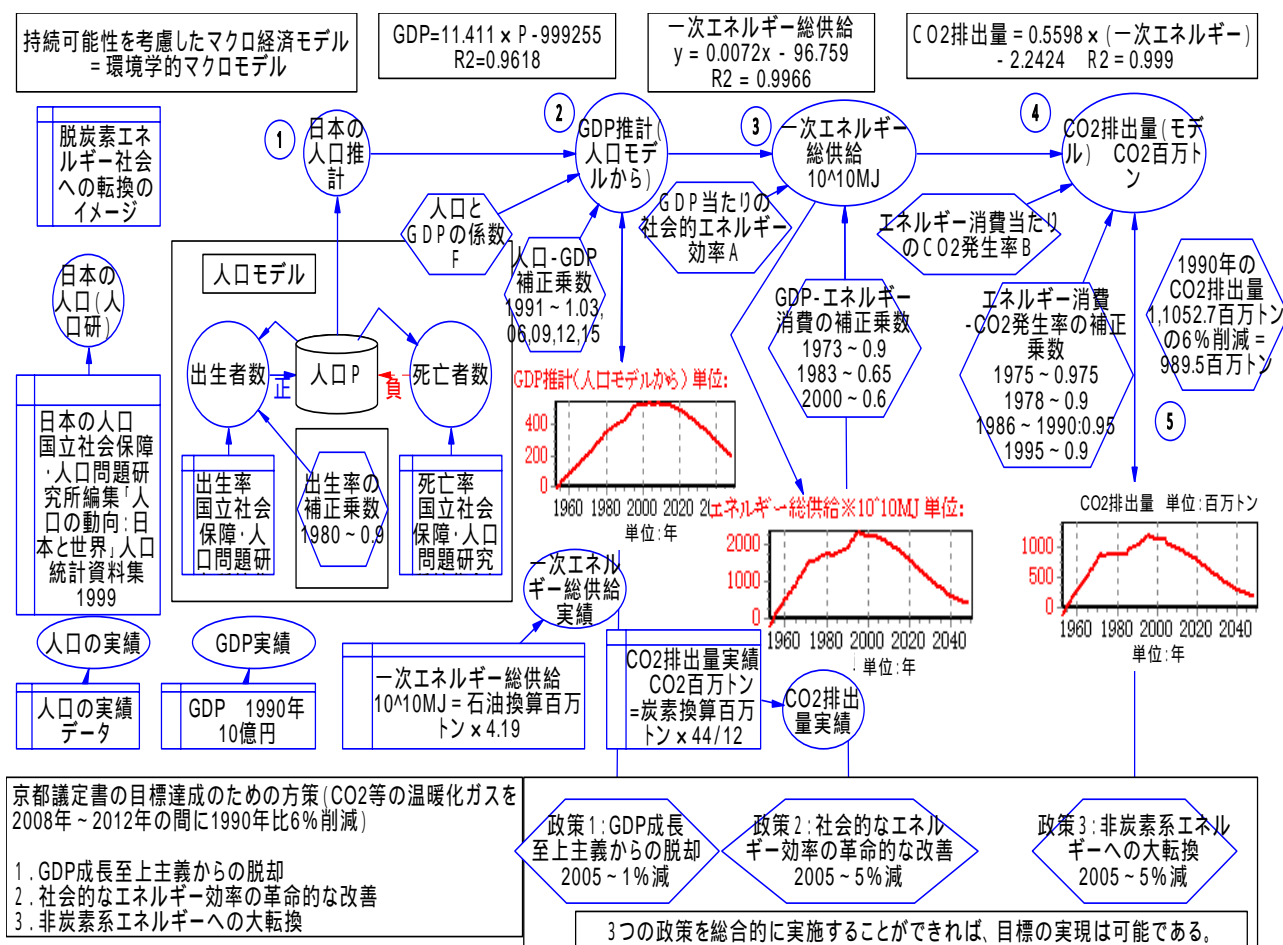
### 3.3 環境学的マクロモデルのシミュレーション

京都議定書の目標 (CO<sub>2</sub> 等の温暖化ガスを 2008 年 ~ 2012 年の間に 1990 年比 6% 削減) 達成のための方策として、GDP 成長至上主義からの脱却、社会的なエネルギー効率の革命的な改善、非炭素系エネルギーへの大転換次の 3 つのシナリオを想定してシミュレーションを行った。

シミュレーションの結果は図 11 の 4 つのグラフで示されている。左が基本モデルであり、左から 2 番目は「GDP 成長至上主義からの脱却」のシナリオであり、具体的には GDP 成長率を 2005 年から 1% 減

として想定した。さらに 3 番目のグラフは「社会的なエネルギー効率の革命的な改善」としてに加えて 2005 年からエネルギー消費 5% 減を入力した計算結果である。一番右側のグラフは「非炭素系エネルギーへの大転換」というシナリオをに加えて実施したという想定で、2005 年から 5% 減とした。

これらの結果から、環境学的マクロ SD モデルでは、京都議定書の目標を達成するために、3 つのシナリオを同時に積極的に実施することが必要であることが明らかになった。



資料: 松尾友矩著「環境学的マクロモデルによる温暖化対策の政策評価」東洋大学国際共生社会研究センター平成16年度報告書から池田誠作成

図 11 環境学的マクロ SD モデルとシミュレーション結果



本論分は JSD の査読規定に沿って審査を受けたものです。

環境学的マクロ SD モデルの方程式 (図 11 のモデル)

人口  $P(t) = 人口 P(t - dt) + (出生者数 - 死亡者数) \times dt$  単位: 百万人 初期値: 83.2  
 民間消費  $C = f P = 人口と消費の係数 f \times 人口 P$   
 民間総投資  $I = 投資係数 \times 民間消費 C : f P$   
 政府支出  $G = 政府支出係数 \times 民間消費 C : f P$   
 $CO_2 = エネルギー消費 CO_2 発生率 B \times エネルギー E$   
 エネルギー  $E = GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A \times 国内総生産 GDP : F P$   
 人口と GDP の係数  $F = 消費と GDP の比例定数 k = (1 + \dots) \times 人口と消費の係数 f$   
 国内総生産  $GDP = 民間消費 C : f P + 民間総投資 I + 政府支出 G + (輸出 E \times p - 輸入 Imp)$   
 $輸出 E \times p = 世界経済の持続可能性から輸出入均衡$   
 $輸入 Imp = 世界経済の持続可能性から輸出入均衡$   
 世界経済の持続可能性から輸出入均衡 = 1  
 消費と GDP の比例定数  $k = (1 + \dots) = 1 + 政府支出係数 + 投資係数$   
 政府支出係数 = 0.25 投資係数 = 0.15  
 国内総生産  $GDP : k C = 消費と GDP の比例定数 k = (1 + \dots) \times 民間消費 C : f P$   
 人口と消費の係数  $f = 5$   
 国内総生産  $GDP : F P = 人口と GDP の係数 F \times 人口 P$   
 出生率 = データ(time)  
 出生者数 = 出生率  $\times 人口 P / 100$   
 死亡者数 = 死亡率  $\times 人口 P / 100$   
 死亡率 = データ(time)  
 $GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A = 入力値未定の図表による変換$  単位: 百万人  
 $GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A = GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A$   
 $エネルギー消費当たりの CO_2 発生率 B = 入力値未定の図表による変換$  単位: 百万人  
 $エネルギー消費当たりの CO_2 発生率 B = エネルギー消費当たりの CO_2 発生率 B$   
 $GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A = GDP 当たりの$

社会的エネルギー効率 A

エネルギー消費当たりの  $CO_2$  発生率  $B = エネルギー消費当たりの CO_2 発生率 B$

出生率 国立社会保障・人口問題研究所編集「人口の動向: 日本と世界」人口統計資料集 1999 = データ(time)

死亡率 国立社会保障・人口問題研究所編集「人口の動向: 日本と世界」人口統計資料集 1999 = データ(time)

日本の人口 国立社会保障・人口問題研究所編集「人口の動向: 日本と世界」人口統計資料集 1999 = 入力値未定の図表による変換 単位: 百万人

脱炭素エネルギー社会への転換 = 入力値未定図表による変換

図表関数によるデータの出力例

日本の人口 = 入力値未定の図表による変換 単位: 百万人

脱炭素エネルギー社会への転換 = 入力値未定の図表による変換は、エクセルによるデータ出力では次のとおりである。

シート No.	5	シート No.	5
シート名	5.シミュレーション	シート名	5.シミュレーション
Key	5.06E+13	Key	5.06E+13
名称	日本の人口※国立社	名称	脱炭素エネ
⇔<表値	83	⇔<表値	83
⇔表<値	100	⇔表<値	100
⇔桁	1	⇔桁	1
⇔×単位	年	⇔×単位	年
⇔×Min	1950	⇔×Min	1950
⇔×Max	2050	⇔×Max	2050
⇔間隔	10	⇔間隔	10
⇔Y単位	百万人	⇔Y単位	
⇔YMin	80	⇔YMin	0
⇔YMax	130	⇔YMax	130
⇔×軸	⇔Y軸	⇔×軸	⇔Y軸
	1950 83.2		1950 48.8
	1960 93.4		1960 51.6
	1970 103.7		1970 55.6
	1980 117.1		1980 65.2
	1990 123.6		1990 78.9
	2000 126.9		2000 94.8
	2010 127.3		2010 115.2
	2020 124.1		2020 123.1
	2030 117.1		2030 127.1
	2040 109		2040 128.8
	2050 100.5		2050 130

表 1: 入力値未定の図表による変換の例

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	種類・区分	シート No.	シート名	名称	式	単位	初期値	エラー値	小数桁数	データ	
2	◎	1	1.環境マク	人口 P(t)	= 人口 P	百万人	83.2			(1953, 83.2) (1954, 83.2)	
3	○	1	1.環境マク	民間消費 C: fP	= 人口と消費の係数 f × 人口 P				1	(1953, 416) (1954, 416)	
4	○	1	1.環境マク	民間総投資 I	= 投資係数 β × 民間消費 C: fP				1	(1953, 62.4) (1954, 62.4)	
5	○	1	1.環境マク	政府支出 G	= 政府支出係数 α × 民間消費 C: fP				1	(1953, 104) (1954, 104)	
6	○	1	1.環境マク	CO2	= エネルギー消費当たりの CO2 発生率 B				1	(1953, 5924000) (1954, 5924000)	
7	○	1	1.環境マク	エネルギー E	= GDP 当たりの社会的エネルギー効率 A				1	(1953, 59240) (1954, 59240)	
8	○	1	1.環境マク	人口と GDP の係数 F	= 消費と GDP の比例定数 k = (1 + α + β)				1	(1953, 7) (1954, 7)	
9	○	1	1.環境マク	国内総生産 GDP	= 民間消費 C: fP + 民間総投資 I + 政府支出 G + (輸出 E × p - 輸入 Imp)				1	(1953, 582.4) (1954, 582.4)	
10	○	1	1.環境マク	輸出 Exp	= 世界経済の持続可能性から輸出入均衡				1	(1953, 1) (1954, 1)	
11	○	1	1.環境マク	輸入 Imp	= 世界経済の持続可能性から輸出入均衡				1	(1953, 1) (1954, 1)	

表 2: SimTakN による SD 方程式の出力例 (「エクセルデータ書込」機能)

#### 4. 結び

本稿は筆者が参加して行っている東洋大学国際共生社会研究センタープロジェクト3の研究成果の一部をとりまとめたものである。本研究は、松尾友矩著「環境学」<sup>2)</sup>などを基礎とした今日的な地球規模の環境問題をはじめとする問題群を総合的に研究する研究の一環であり、研究全体のごく一部分である。従って、本稿に紹介した環境学的マクロモデルだけでは非線形フィードバックループを基本構造とみる立場からはSDモデルとしても不十分であり、政策的な現実的モデルとしても経済循環だけでなくエネルギー・物質循環なども本モデルには含まれていないため不十分なものとなっている。これらの課題は、「環境学」に含まれるこれらのモデルのSD化という形で国際共生社会研究センター今後の活動の一環として継続的に発展させていくこととしたい。なお、「環境学」を契機として環境問題を文明の興亡という視点から捉えるためのSDの応用研究も末武透氏と協同して進めている。

「環境学」の中で松尾教授が自ら述べているように今回の試みは「文明の発展を経済の拡大、当該国のGDPの増大におく現代社会のもつ価値観の抱える課題を考察する経済モデルの検討を行う。このモデルにおいては、GDPの基本的な成長の過程の評価に対してこの経済成長に伴うエネルギー消費の増大の関係を明らかにし、経済成長と地球環境保全のための施策の関係を解析できるようにしている。そのための解析モデルとして、これまでのマクロ経済モデルが示す指標を消費を基本とするモデルに組み替えることの重要性を指摘し、そのモデルを基にした経済成長の内容に関わる評価の試みを示す。この中で、経済成長と人口増加の関係、経済成長とエネルギー消費の関係を示すモデルの提示を行う。そして、これまでの日本の経験における経済成長率とエネルギー消費の関係を解析を行い、エネルギー消費の増大を抑える持続可能性を求める条件を明らかにし、文明発展の評価軸の変換の必要性を示していきたい。」としているような壮大な試みの小さなサブモデルの一つを検討に過ぎない。しかし、SDモデリングを行うことで操作性を持ったサブモデルを積み重ねることが可能となり、このような壮大な試みの一助になることができれば幸いである。

本研究の実施に当たっては、松尾友矩教授に多大なご協力を賜りました。また同研究センターの研究メンバーや国際システム・ダイナミクス学会の末武透氏、SimTaKN 開発の中村州男氏など多くの方々からご指導やご助言、ご協力を頂きました。本研究において理解が不十分な箇所や統計的処理・モデリング等の誤りなどがあるとすれば筆者個人の責任であります。

最後になりますが、ご協力を頂きました方々に心から感謝の意を表して結びの言葉とさせていただきます。

#### 参考文献

- [1] 松尾友矩著「環境学的マクロモデルによる温暖化対策の政策評価」東洋大学国際共生社会研究センター平成16年度報告書、p.131
- [2] 松尾友矩著「環境学」、岩波書店、2005
- [3] D.メドウズ他著、枝廣淳子訳「成長の限界」ダイヤモンド社、2005年、p.158
- [4] 池田誠のホームページのURL(操作マニュアルやSimTaKNのモデルDBなどがある。) <http://www2.toyo.ac.jp/~mikedal/>
- [5] SimTaKNのVectorダウンロードサイト <http://www.vector.co.jp/soft/win95/business/se302464.html>
- [6] SimTaKNのオンラインヘルプ <http://hp.vector.co.jp/authors/VA017379/Help/SimTaKN.html>