

31. 地球環境将来予測のための経験的關係式の検討

STUDY ON EMPIRICAL EQUATIONS FOR LONG-TERM FORECASTS OF GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGES

金子 慎治*・小金丸 聡*・松本 亨*・藤倉 良*・井村 秀文*

Shinji KANEKO*, Satoshi KOGANEMARU*, Tohru MATSUMOTO*, Ryo FUJIKURA, and Hidefumi IMURA*

ABSTRACT; Forecasting of the future situation of global environment is a difficult task due to complex interaction among a number of economic, social, and natural factors. This paper aims an analysis of the relationships between the factors regarding economic development and environment for the Asian region. It examines the empirical formulas obtained from the past temporal data series of 24 countries for the last 30 years. A simple model is developed to analyze future trends on population and food balance based on a set of parameters obtained by the relationships. Regarding food balance, an insufficiency of food supply in some countries including China is expected become obvious in the next century due to the increasing demand for animal products resulting from income rise.

KEYWORDS; development and environment, environment in Asia, environmental forecast, environmental modelling, food balance

1. はじめに

1980年代以降のアジアの経済成長はめざましく、「世界の成長センター」とよばれるに至っている。しかし今後もこの成長カーブが持続するとすれば、世界人口の約半分を占めるこの地域の資源・エネルギー消費から発生する環境負荷も深刻なものになると予測される。人口増大や工業化にともない、公害、二酸化炭素排出量の増大、資源の枯渇などがこの地域における重大な問題となる可能性が高い。一方、経済発展、生活の豊かさの達成とともに、人々の環境意識は高まり、環境問題に対処するための技術や資金が確保されることも期待される。環境問題は、自然システムと社会システムとの複雑な相互関連から生じるものであり、その将来を確定的に予測することはほとんど不可能と言わざるを得ない。しかし、世界各国における過去の経験から一定の法則を導き出した上で、それに様々な仮説と推論を加えることによって、ある程度の蓋然性を持った将来を予想することは可能と考えられる。本研究は、こうした考えに基づき、経済発展と人口・食料、資源消費、環境負荷の発生の関係について、世界各国の過去の経験から一定の法則（経験的關係式；学習曲線）を導き出す。次に、これらの経験則を体系化することによって長期的な環境将来予測を行う基礎的なモデルを構築し、これによって今後のアジアの経済発展と環境との関係について分析する。

2. 経験的關係式の導出

2. 1 基本概念

図1は、経済成長にともなう環境負荷発生をマクロレベルで捉えた概念図である。ミクロレベルでは、経済成

*;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

長とともにさまざまな要因が相互に関連しあって複雑に変化する。しかし、マクロ的に見ると、資源・環境に関連したさまざまな指標が、経済成長にともなって一定のパターンで変化していることがわかる。ここで、国による自然条件、社会条件等による違いを適切に補正・評価すれば、これらの関係は各国共通の経験則として成立するものと考えられる。経済成長を表す指標、例えば国民一人当たりの所得によって、資源消費や環境負荷の発生の大局的な内容と量が決定されるとみることができる。

本研究ではこのような視点から、経験的關係（学習曲線）導出のプロセスを示したあと、国民一人当たりの所得との間に成立する関係によって人口と食糧について予測する。ただし、ここでは各国の経済成長率は外生変数として与える。ローマクラブの「成長の限界」報告書は、経済成長とともに環境への負荷や食糧、資源の制約が強まり、これは経済成長に負のフィードバックをもたらすと主張しているが、ここではその効果は明示的には取り入っていない。ただし、将来の経済成長速度を鈍化させるシナリオを設定することによって、間接的にその効果を入れることは可能である。また、国や地域による自然条件による関係については、各国・地域についてのグループ分けによって考慮することにする。

2. 2 因子間関係の分類

2.1で述べたように、社会や資源・環境の状態を示すいくつかの指標は、国民一人当たりの所得の変化に応じて、一定のパターンで変化する。しかし、所得の変化が指標に直接影響を及ぼすのか、あるいは所得の変化がいくつかのステップを経て、指標の変化となってあらわれるのかは明らかでない。

図2は、このような因果関係をモデル化したものである。

主要因子A（一人当たりの所得）の変化が主要因子B（指標）の変化に及ぶプロセスには様々な経路が考えられる。図2では、主要因子Aの変化が因子1の変化を経て、主要因子Bの変化を導く状況を示している。図2の下部に示すように、主要因子Aの変化が複数の因子の変化を発生させ、これらの相互作用の結果として主要因子Bが変化する場合も多く存在すると考えられる。しかし、現実の因果関係がどのようなものであれ、主要因子間の関係は、経験的には図2の一番上に示した直接的な経験則として観測される。

ここで、図2の上部の経路、すなわち主要因子間に関連する因子（ステップ）の数が少ない場合を、より直接的な因果関係であるとし、図の下部のように関与する因子が多い関係を間接的因果関係とする。

また、主要因子間の関係には、国や地域のレベルを超えて普遍的に成立するものと、国情や地域の状況に強く影響される地域的

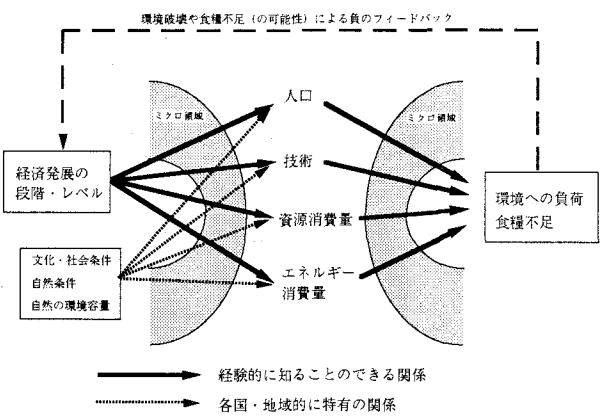


図1 概念図

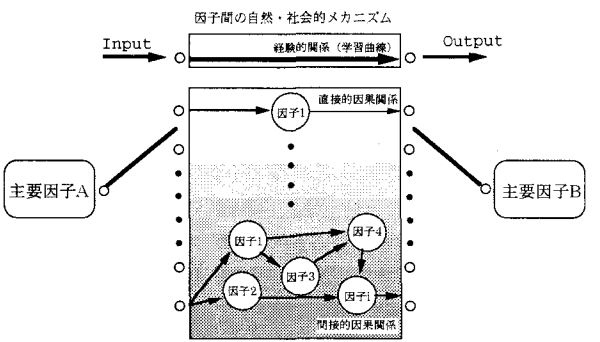


図2 因果関係のモデル化

一因果関係構造の複雑さによって
間接的、直接的因果関係とみる

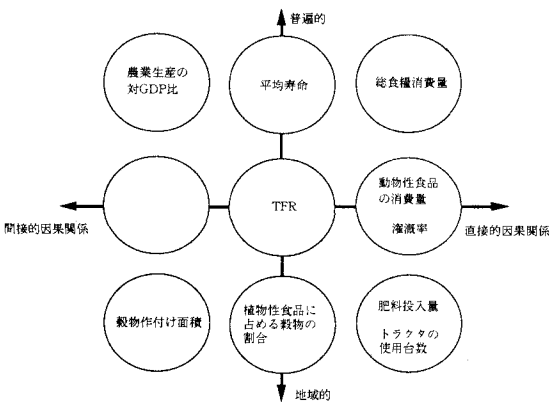


図3 主要因子の国民所得との関係の分類

なものがある。例えば、平均寿命や食料の総消費量などの生理的現象に関連する因子は前者の例であり、動物性食品の消費、乗用車の台数などは、地域の社会的バックグラウンドに影響されるので後者の例といえる。これらの関係を整理したものを図3に示す。

2. 3 学習曲線

図4、図5は、それぞれGDPに対する農業生産のシェアおよび平均寿命について、世界各国（国民所得、地域等に偏りがなように24ヶ国を選定）の過去約30年間のデータを一人当たりGDPとの関係でみたものである。いくつかの因子には、各国の地理的条件、歴史的背景、生活習慣等が異なるにもかかわらず、共通の成長過程が見い出せる。すなわち、長期的には途上国の将来の発展過程を決定するいくつかの因子については、先進諸国の過去の成長過程を手がかりに、その将来を経験的に知ることができる。

このような学習曲線に共通にみられることは、一人当たりGDPが小さいときには、GDPの変化に対し各指標は大きく変化するが、最終的には一定の値に収束する傾向があるということである。したがって、経済成長にともない途上国と先進国との間の差は小さくなる。このような指標の場合、途上国は一般に一人当たりGDP5,000ドルのレベルを越えると、ほぼ先進国のレベルに達する。

2. 4 誤差

上記の学習曲線（マクロ的な関係）の導出にあたっては、主要因子間の関係を形づくるミクロなメカニズムは、基本的には考慮されていない。したがって、2.3で例示したように学習曲線が普遍的に成立すると考えられるような関係においても、考慮しなかった要因の違いが、実測値と学習曲線との間の乖離の原因となる可能性がある。したがって、予測結果の信頼性を検証するため、学習曲線の確率論的な検討が必要と考えられる。また、主要因子間にどのような因子が介在するのか、またそれが誤差にどのような形として反映されるのかについても、さらなる検討を必要とする。本研究においては、予測の大幅な変化は誤差によっては起こらないものとし、以下に示すシステムダイナミックスモデルを構築し、因子間の関係を把握する。

3. モデル構築

3. 1 モデルの概説

予測対象国は表1のように所得レベルごとに分類したアジア地域の代表的な7カ国とする。予測の対象期間は2050年までとする。モデルの検証は、1960年のデータを初期値とし、1993年までの計算値と過去の実績値との比較を行うことと将来予測値について既往の研究と比較することで確認する。経済成長は既往の予測値を参考にして設定した^{1),2)}。予測に用いた国別経済成長率を表2に示す。

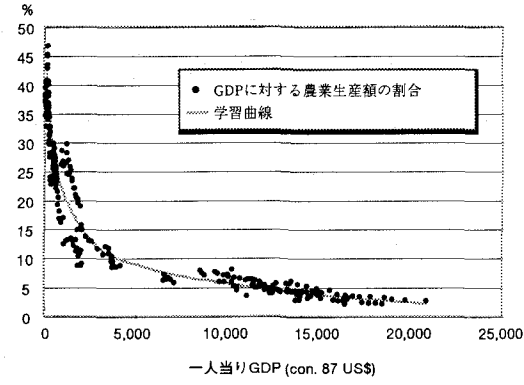


図4 GDPに対する農業生産の割合

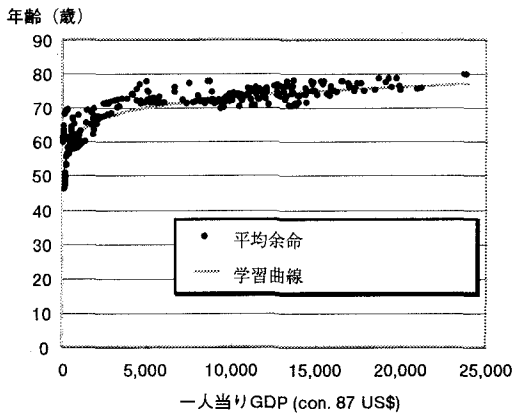


図5 平均寿命

表1 対象国

分類	国名（カッコ内は1993年の一人当たりGDP、1987年米ドル）
低所得国	中国（367）・インド（386）
中所得国	インドネシア（595）・フィリピン（610）・タイ（1,565）
高所得国	韓国（4,859）・マレーシア（2,749）

表2 経済成長率（％）

	中国	インド	韓国	その他
1993-2000	8.0	5.4	6.6	7.0
2000-2025	7.0	5.4	4.0	5.0
2025-2050	5.0	3.4	2.0	3.0

経済発展にともない、都市と農村との間に所得・生活格差が生じる。したがって、各指標について、両者における成長過程は異なったものになると考えられる。本モデル（図6）では、都市と農村の成長過程の違いを考慮するため、全国を都市と農村の2つに分割する。人口、食糧需要については、都市部、農村部をそれぞれの所得水準に応じた別々のサブモデルとし、両者の合計を全国値として扱う。また、都市と農村のGDPは、産業別就業者構成と成長の成果の分配という視点を考慮しながら、次のように求める。すなわち、農業生産はすべて農村の所得に帰するとする。また、工業生産、サービス生産は、都市化（全人口に対する都市人口の比率）の進行と国全体の生活水準の向上を考慮して都市と農村の配分率を変化させる。この配分率は、生活や所得レベルの面で都市とは異なる農村社会がある程度の規模で維持されている国（例：韓国）とそうした差が消滅しつつある国（例：韓国）とで異なる。人口については、都市と農村の所得格差による社会移動も考慮する。表3は、本研究で対象とした主要指標とその説明変数をまとめたものである。

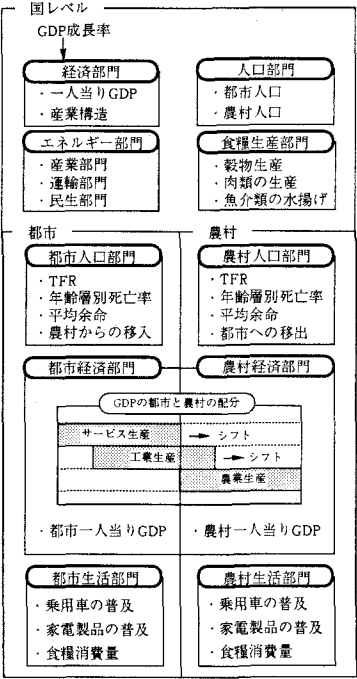


表3 対象指標と説明変数

分類	対象指標	説明変数	説明変数	説明変数
経済	一人当たりGDP	GDP	人口	
	農業生産	産業構成比	GDP	
	工業生産	産業構成比	GDP	
	サービス生産	産業構成比	GDP	
	産業構成比	一人当たりGDP	サービス生産	サービス生産
人口	都市の一人当たりGDP	工業生産	一人当たりGDP	
	農村の一人当たりGDP	農業生産	一人当たりGDP	
	総人口	平均余命	TFR	
食糧需要	平均寿命	一人当たりGDP		
	TFR	平均寿命		
	人口移動	都市の一人当たりGDP	農村の一人当たりGDP	
	一人当たり食料の総消費量	一人当たりGDP		
	一人当たり動物性食品の消費量	一人当たりGDP		
	一人当たり植物性食品消費量	一人当たり食料の総消費量	一人当たり動物性食品の消費量	
	一人当たり穀物消費量	一人当たり植物性食品消費量	植物性食品に占める穀物の割合	
	植物性食品に占める穀物の割合	一人当たりGDP	飼料用穀物消費量	
	穀物の総消費量	食用穀物消費量	人口	
	食用穀物消費量	肉類の消費量	飼料原単位	
食糧生産	飼料用穀物消費量	肉類の消費量	人口	
	肉類の消費量	一人当たり肉類の消費量	動物性食品に占める穀物の割合	
	一人当たり肉類の消費量	一人当たり動物性食品の消費量		
	動物性食品に占める肉類の割合	一人当たりGDP		
	穀物生産	単収	作付け面積	
	単収	肥料投入量	一人当たりトラクター使用台数	灌漑率
	肥料投入量	一人当たりGDP		
	一人当たりトラクター使用台数	一人当たりGDP		
	灌漑率	一人当たりGDP		
	作付け面積	耕作地面積	品目別作付け構成比	
	耕作地面積	農業用地		
	品目別作付け構成比	時間（年）		
	農業用地	市街地		
	市街地	時間		
	森林			

図6 モデルの基本構造

3. 2 経済成長と産業構造の変化

各国の経験から得られた一人当たりGDPの変化にともなう産業構造の変化（GDPに対する農業生産、サービス生産、工業生産のシェア）は、次の学習曲線（1）～（3）によって表される。また、これらの関係を図7に図示する。

$$\left\{ \begin{array}{ll} F = -8.819 \ln(\sigma) + 82.416 & 0 \leq \sigma \leq 3321 \\ F = -4.696 \ln(\sigma) + 48.979 & 3321 < \sigma \leq 18791 \\ F = \frac{1.979}{1 - \exp(-0.00559 - 0.000067 \sigma)} & 18791 < \sigma \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} S = 7.6979 \ln(\sigma) - 10.503 & 0 \leq \sigma \leq 14121 \\ S = \frac{69.40}{1 + \exp(-0.1355 - 0.000153 \sigma)} & 14121 < \sigma \end{array} \right. \quad (2)$$

$$I = 100 - S - F \quad (3)$$

ただし、 σ は、一人当たりのGDPである。

一人当たりGDPの増大とともに、まず農業が減少し、工業が急速に成長をする。その後ある程度の成長を遂げた段階で、工業は相対的に減少に転じ、サービス業の比率が増大する。長期的には、産業構造は経済成長にともない、サービス業69.4%、工業28.6%、農業2.0%に収束する。現在のアジア諸国では、日本、韓国、シンガポールを除いた国々が初期段階の工業化時代であり、今後の数10年間に急速な工業成長が予想される。一方、農業の相対的シェアは減少し続ける。

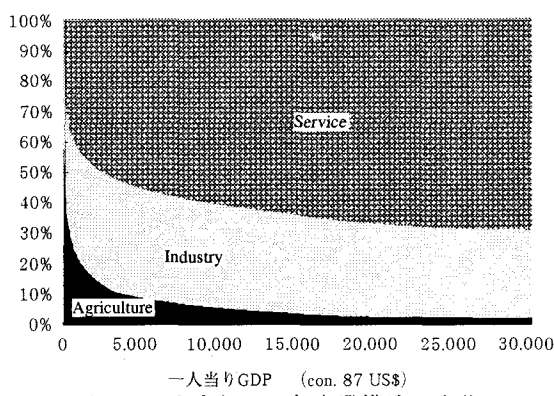


図7 一人当たりGDPと産業構造の変化

3. 3 人口予測

人口成長は自然増と社会増で決定される。自然増を左右する要因は、出生率と死亡率、そして平均寿命である。生活水準の向上とともに医療技術、衛生状態が改善され、死亡率は低下し、平均寿命は伸びる。また、生活水準の向上に従って、女性の教育レベルが上がり社会進出が促進される。同時に子供一人当たりの教育費も増大する。その結果、一人の女性が一生の間に出生する子供の人数（TFR：合計特殊出生率）は減少する。図8で示すように本モデルでは、まず生活水準の向上により説明される平均寿命を決定し、平均寿命から各年齢層における死亡率を求める。また、TFRは一人当たりGDPとの関係から求める。

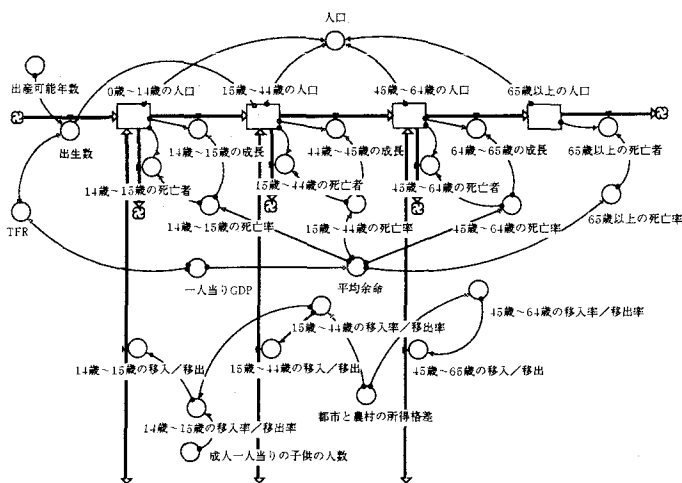


図8 人口セクタのモデル図

図9は、それらをもとにした人口の予測結果である。都市人口の急増は、都市と農村の所得の格差による農村から都市への人口移動による社会増加によって起こる。既に都市人口が農村人口を上まわっている韓国を除いて、いずれの国においても、今後都市と農村の人口の逆転が予想される。フィリピン、マレーシアは比較的早期にこの逆転が起こり、タイ、中国は比較的遅い。タイ、中国の農業は、ある程度の規模を維持しつつ、他の国に比べれば比較的緩やかに衰退していくものと推察される。また、これらの国々では、いずれも高い経済成長を背景に、2050年までには総人口の成長率は緩やかなものとなる。本モデルの予測による2025年における各国の総人口は、既存の予測^{3),4)}におおむね近い水準となっている。

4. 食糧需給バランス

アジア地域では人口も大幅に増加しつつあり、増大

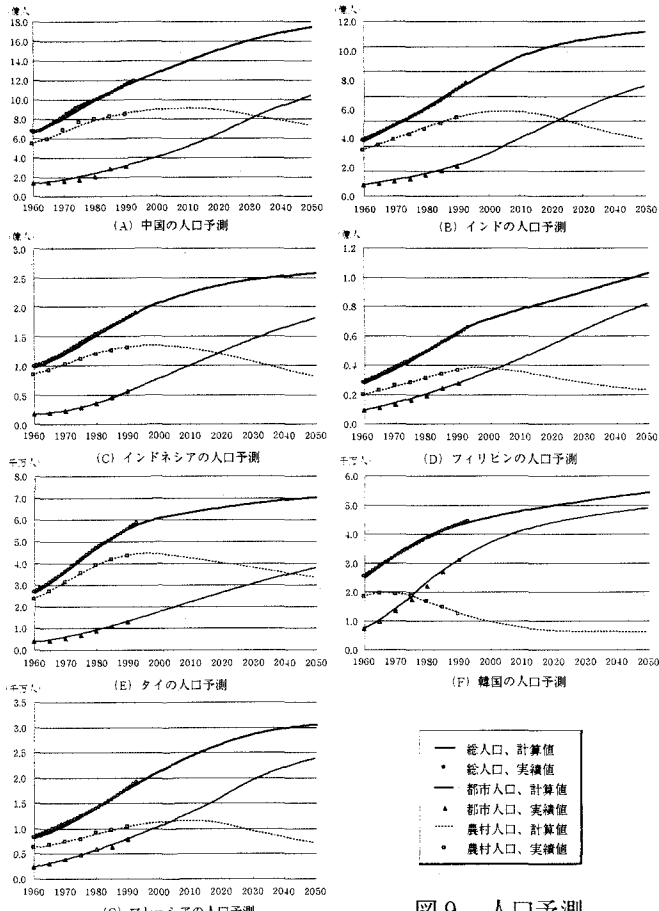


図9 人口予測

する穀物需要を賄えるだけの穀物生産が可能か否かが同地域の今後食糧自給を考える上での鍵となる。

4. 1 穀物需要

本モデルでは、穀物（米、小麦、大麦、トウモロコシ、その他雑穀類を対象とする）の消費量について予測する。一般に、生活レベルの向上とともに、食生活は量的に、次いで質的に変化する。図10は、一人当りGDPに対する一人当り、一日の全食料消費量と動物性食品の消費量の関係である。Group-Iは、中国、インド、フィリピン、マレーシアの、Group-IIは、インドネシア、韓国、タイの動物性食品の消費量である。ここでは、飼料として重要な穀物についても考慮する。

図11は、一人当りGDPに対する植物性食品に占める穀物の比率を各国について推計した結果である。現在の先進諸国におけるこの比率は30%～50%である。図10、11の関係式から食用穀物消費量の予測が可能となる。飼料用穀物については、まず動物性食品の消費量に占める肉類の割合から肉類の消費量を予測し、次に食肉生産のための飼料の必要量を各国別の畜産形態に応じて飼料用穀物消費量を予測する。ここで求められた穀物消費量については、カロリーベースで積み上げたあと重量ベースに換算して求めた。動物性食品に占める肉類の消費量の割合、カロリー・重量変換係数、飼料の必要量は、主要国食糧需給表³⁾から求めた。

4. 2 穀物生産

農作物の生産予測を決定する要因は、作付け面積と単収である。作付け面積は、各地固有の土地利用や農業政策などに強く支配され、普遍的なモデル化は困難である。そこで、本モデルでは次のような方法を採用した。まず、穀物に豆類、芋類を加えた各国別・品目別作付け面積の構成比を求め、これの時系列による回帰推計をする。全作付け面積は、土地利用の変化から推計した全耕作地面積の変化と同様の比率で変化するものとして求めた。

単収の説明変数として、土地集約度を表す単位面積当たり肥料投入量、農村人口一人当りトラクター使用台数、灌漑率を選定した。単収の予測曲線は、これらを説明変数とした各国別、品目別のロジスティック型の重回帰曲線を用いた。このロジスティック曲線における上限値については、以下の3つのシナリオを設定した。すなわち、現在からの単収の増加量として過去30年間の単収の伸びの10割（シナリオ1）、5割（シナリオ2）、2割（シナリオ3）を仮定し、それぞれの上限值とした。

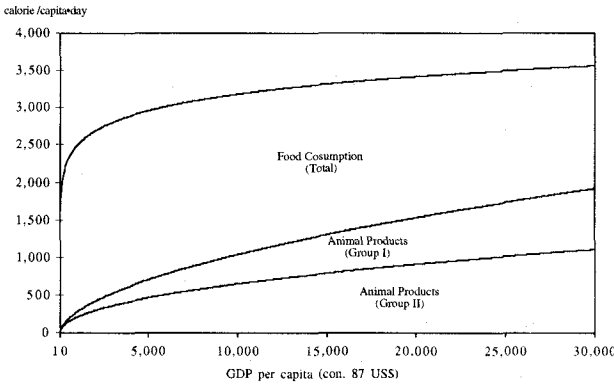


図10 食料総消費カロリーと動物性食品の消費カロリー

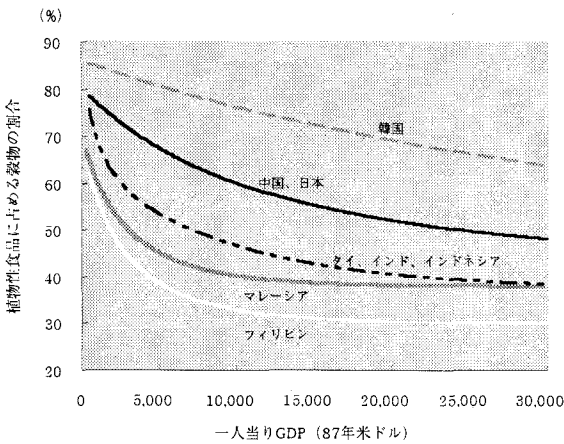


図11 植物性食品に占める穀物の割合

表4 穀物の需給予測（1,000MT）

シナリオ		1990	2000	2025	2050
中国	1	30,520	37,170	▲89,526	▲139,781
	2	28,727	424	▲181,685	▲239,551
	3	25,972	▲33,170	▲240,034	▲299,916
インド	1	23,402	29,303	33,691	57,218
	2	20,770	18,148	▲2,317	▲11,459
	3	18,213	8,049	▲26,273	▲16,374
インドネシア	1	8,625	12,225	13,785	18,786
	2	7,698	5,833	▲950	▲2,218
	3	6,820	420	▲10,884	▲8,806
韓国	1	▲2,109	▲4,495	▲11,294	▲17,767
	2	▲2,648	▲5,208	▲11,965	▲18,381
	3	▲3,164	▲5,861	▲12,577	▲18,941
マレーシア	1	▲2,158	▲3,209	▲6,559	▲10,002
	2	▲2,152	▲3,295	▲6,876	▲10,392
	3	▲1,937	▲3,261	▲7,083	▲10,639
フィリピン	1	5,032	7,643	5,180	3,148
	2	4,975	4,287	330	▲1,763
	3	4,899	2,834	▲2,592	▲4,712
タイ	1	14,985	15,879	14,997	12,991
	2	13,406	13,568	12,445	10,426
	3	12,008	11,919	10,912	8,886

（▲はマイナス値（需要過多））

4. 3 穀物需給バランス

4.1, 4.2で求めた穀物消費量と生産量の予測から、穀物の需給バランスについて考察する。表4は各国について求めた穀物需給バランスの予測である。来世紀初頭にはタイ以外の国で、穀物の自給ができなくなる可能性がある。韓国は、日本と同様にすでに穀物輸入国であり、来世紀前半には、約1億トン／年の穀物輸入が必要となる。インド、インドネシアは、農地政策・単収の向上次第によっては、現在の経済成長を維持しながらも、穀物の自給達成の可能性は残されているといえる。

来世紀後半の同地域全体の穀物の需給バランスを決定するのは、中国の動向である。同国の穀物需給予測については、World Watch Instituteおよび海外経済協力基金の最近の報告^{6),7)}があり（表5）、いずれも2010年には穀物の自給が不可能になるという結果を予測している。本モデルも同様な傾向を示している。図12は中国における穀物の消費量と生産量の予測である。シナリオ1～3に対し、それぞれ2008年、2001年、1996年に穀物需要量は供給量を上回る。ただし、本モデルでは既存の2報告よりやや楽観的な見通しを示している。これは本モデルでは、食生活の変化による主食としての穀物消費量の減少を他より大きく評価したためと考えられる。

表5 中国の需給予測の比較（1,000MT）

	1993	2000	2005	2010
シナリオ1	33,251	37,170	16,505	▲12,312
シナリオ2	25,689	424	▲38,141	▲81,195
シナリオ3	15,161	▲33,170	▲81,249	▲130,750
比較：海外経済協力基金	24,420	▲203,840	▲69,060	▲136,310
比較：World Watch Institute	▲28,000	▲81,000	▲118,000	▲156,000

（▲はマイナス値（需要過多））

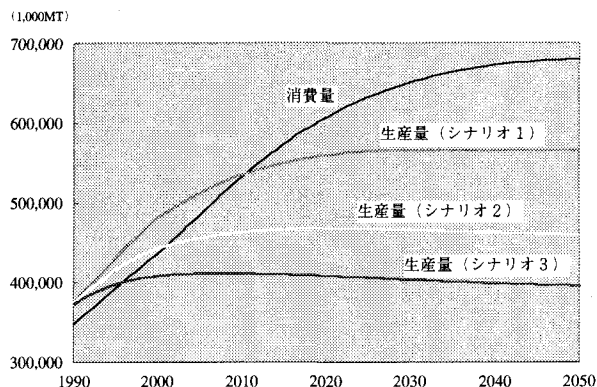


図12 中国の穀物消費量と生産量の予測

5. 結論・考察

本研究による分析内容と結果を以下にまとめる。

- ① 経済成長と産業構造・人口・食糧の関係について、世界各国の過去の経験から学習曲線を求めた。
- ② ①で求めた経験則を用いたモデルを構築し、アジア地域の人口・食糧を予測した。
- ③ 対象7カ国全体で、2050年までに人口は約1.45倍となり、都市人口は農村人口を上回ると予想された。
- ④ 中国の穀物需給バランスは、現在の作付け面積の減少が続けば、単収がかなり向上した場合でも、近い将来、需要超過に転向されると予測された。

本研究では、各国の経済成長率は既存の予測値を所与のものとして使用した。すなわち、経済成長に伴う経済構造自体の質的变化や、資源、環境問題の経済成長へのフィードバックは考慮していない。今後は、予測結果による資源および環境へのインパクトを定量化し、それらの経済への影響をモデル化することが課題である。また、アジア地域特有の因子についてさらに多くのデータを整備し、モデルに組み込む予定である。

参考文献

- 1) 科学技術庁：アジア地域のエネルギー利用と環境予測，pp.22-24，1992
- 2) World Bank:Global Economic Prospects and The Developing Countries 1995,p.23,1995
- 3) United Nations:World Population Prospects(the 1992 revision),1993
- 4) World Bank:World Population Projections 1994-95,1994
- 5) 国際食料農業協会：主要国食糧需給表，1991
- 6) レスター・R・ブラウン:だれが中国を養うのか，pp.109-112,185-187，1995
- 7) 辻 一人他：中国の食糧需給の見通しと農業開発政策への提言，開発援助研究，Vol.2，No.4，pp.38-75，1995