

不確実性を考慮した環境将来予測モデルに関する研究

A CONSIDERATION ON UNCERTAINTIES IN ENVIRONMENTAL MODELING AND FORECASTING

金子 慎治*・松本 亨*・藤倉 良*・井村秀文*

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

ABSTRACT: Although a number of models to forecast future environmental changes have been developed, uncertainties hidden behind the models have not yet been fully discussed. Uncertainties are arising from insufficient knowledge about natural ecosystem and our own social, economic and political systems. They are also related to the mechanisms of macroscopic order formation as discussed by Haken and Weidlich in their theory of "synergetics". Microscopic fluctuations constantly occurring in the system are sometimes amplified and give rise to large-scale changes in macro systems. Paradigm shift, revolution, important scientific discovery and technology innovation are all conceived of as such changes. The first attempt of this paper is to streamline the discussion on uncertainties in environmental modeling and forecasting. It discusses the types of uncertainties and the methods to incorporate them into "semi-macro models". Then it presents two model examples concerning technology innovation and crop production in order to demonstrate how uncertainties can be dealt with in the model.

KEYWORDS: *uncertainties, environmental modeling, environmental forecast, synergetics,*

1. はじめに

偶然のみが支配するように見える不確実性も、そこに内在する法則性を何らかの形で記述することができれば、蓋然性の世界に取り込まれる。ただし、そうした法則性は、必ずしも伝統的な分析的思考方法では導き出されず、一定のデータ（経験法則）とある程度大胆な洞察の組み合わせが求められる。

著者らの最終的目標は、予測に内在する不確実要因をより明示的に表現し得るセミマクロレベルのトップダウン型の環境将来予測モデルの構築である。本論文では、その第一歩として、不確実性に対する考え方、不確実性の類型とモデルにおけるその取り扱い方法についての体系的整理を試み、次に、事例として技術進歩と穀物生産予測における不確実性についての検討・考察を行う。

2. 不確実性について

2. 1 長期環境予測モデルと不確実性

地球環境の将来予測については既に多くのモデルが開発されてきている¹⁾²⁾。これらの予測モデルは、地域別、セクター別のミクロな因子の詳細なデータの積み上げによるボトムアップ型モデルと、比較的少数のマクロ的変数の間に成立する大局的関係式をベースにするトップダウン型モデルとに大別できる。初期には、データが絶対的に不足していたこともあり、トップダウン型モデルが多く開発された（たとえば、ローマクラブによる「成長の限界」モデル³⁾）。しかし、この種のモデルでは、変数、データともにマクロ的なものに限られるため、現象の背後にある地域別やセクター別の細かな事情が考慮されず、限定された

*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

データから大胆過ぎる結論が導き出される場合もあり、牽強附会の批判を浴びることもある。このような反省もあり、最近ではマイクロなデータの着実な収集をベースとしたボトムアップ型モデルの構築に力が注がれるようになった（例えば、AIM Model⁴⁾）。

しかし、マクロの現象が必ずしもマイクロの和として説明できるとは限らない。一般には、マイクロな事象には空間的、時間的な変動（揺らぎ）があるが、マイクロの総和として成立するマクロの現象には一定の大局の秩序が成立している。同時に、絶えず発生するマイクロな揺らぎが増幅されて、大域的な構造変化、パラダイムシフトが生じている⁵⁾⁶⁾。社会システムと自然環境システムの両者にまたがるこのようなダイナミックな変動を、マイクロなデータの積み上げから説明しようとした場合、ボトムアップ型モデルにもなお大きな限界がある。これは、マイクロの現象とマクロの現象の間に存在する本質的な壁であって、マクロ経済学とマイクロ経済学の関係、力学と熱・統計力学の関係から考察できるように、マイクロのデータが大量に整備されさえすればやがてマクロの現象がすべて説明できるというものではなさそうである。

一方、従来のモデルに共通する考え方は決定論的である。すなわち、確定されたモデル（運動方程式）を前提とし、初期条件を与えれば将来は決定的なものとして予測されるというニュートン力学的な世界観がそこにある。したがって、社会現象、自然現象において発生する揺らぎが大域的な構造変化、パラダイムシフト（意識変化、革命、進化、突然変異など）につながるようなメカニズムは全く表現されていない。すべての将来予測には蓋然性と不確実性の2要素があるが、そのうちの蓋然性の側面に重点を置くのが従来の予測モデルであったとも言える。逆に言えば、多くの予測モデルは、当初から不確実性の問題を回避するか、分析枠組みの中で意識的にそれを排除してきた面がある。

ここで、安易に「不確実性」という言葉を用いたが、その意味は多様である。その内容は、①自然システムに内在する不確実性、②人間社会に内在する不確実性、③自然システムと人間社会の関わり方についての不確実性に大別できる。②は人間の本性に関わる因子であり、③は人間の持つ本性が環境の破壊や保護にどう働くかである。

2. 2 トップダウン型セミマクロレベル

これらの不確実性をモデルで表現しようとする場合の障害としては、①データの不備（断片的に観測された自然科学データ、各国の統計データ自体が不十分である）、②知識の不備（因子間の相関（因果関係）や現象メカニズムが十分に解明されておらず、現象を定量的に記述する関係式や方程式が整備されていない）、③現在の知識では予想困難な因子や現象の存在（たとえば、過去におけるさまざまな発明・発見、AIDSのような病気の発生など）といった問題がある。したがって、現象解明を中心とする科学研究の重要性が指摘されるわけであるが、上述のとおり、マイクロの現象解明が進みさえすれば地球と人類社会の将来が自動的に予測できると思われる。ここには、常に人智を超えた自然と社会の変動メカニズムが内在されているように思われるのであるが、歴史は繰り返されると言うように、それらの変動にも一定のリズムや法則性があるようでもある。一見ランダムに見える変動も何らかの確率的法則に支配されていることは多く見られる。偶然に生まれる発明や発見も、人間集団の中である確率頻度で発生している見ることもできよう。

偶然によって支配されているかに見える不確実性も、そこに内在する法則性を何らかの形で記述することができれば、蓋然性の世界に取り込まれる。ただ、そうした法則性は、必ずしも伝統的な分析的思考方法では導き出されず、一定のデータ（経験法則）とある程度大胆な洞察の組み合わせが求められる。

著者らの最終的目標は、図1に示すセミマクロレベルのトップダウン型の環境将来予測モデルを構築することであるが、本論文では、その第一歩として、モデルにおける不確実性の類型とその取り扱い方法についての体系的整理を試み、次に、事例として技術進歩と穀物生産予測における不確実性についての検討検討・考察を行う。

社会システムのサブシステムとしての経済システムについては、計量経済モデル、一般均衡モデル、動学的最適モデルなどのマクロ経済予測のモデルが多数開発されている。これらの経済モデル

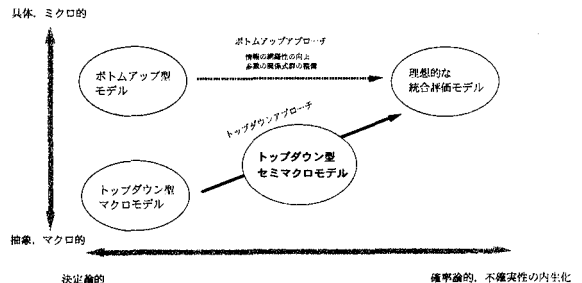


図1 地球環境統合評価モデルの
アプローチと不確実性

は、出来るだけ精緻な定量的予測に重点を置いている。しかし、さまざまな予測モデルの中では最も定量化の進んでいる経済モデルにおいてさえも、長期の将来予測は非常に難しい。

環境問題は、生態系と社会システムの相互関係から発生する。ここで、人口、食料、土地利用などを含む環境の総合モデルの開発が求められており、アジア地域に焦点をあてたモデル開発も行われている。こうした環境予測モデルのサブシステムとして経済予測はモデルの重要な柱の位置を占める。それゆえに、経済予測モデルの限界、経済予測の不確実性は、環境予測において不確実性をもたらす大きな原因となっている。経済予測の不確実性を回避する1つの方法は、その詳細を議論せず、将来にわたる経済成長パスをシナリオとして外生的に設定してしまうことである。これは、問題の本質的解決にはなっていないが、経済成長予測そのものに内在する不確実性の議論を巧妙に処理する1つの方法である。

経済予測そのものの不確実さに比してむしろ驚くべきは、経済指標、特に国民1人当たりGDP (GDP/c) と他のさまざまな環境指標との相関の高さである。著者らは、アジア地域に着目したトップダウン型の環境総合モデルを構築するため、まず、GDP/cを説明変数として世界各国の経験的関係から産業構造、環境衛生、都市化、メディア、エネルギー消費、食料消費について分析した。さらにアジア地域の各国の2025年の自動車保有台数と食料需要について概算した⁷⁾。次に、より詳細な要因を取り入れたトップダウン型モデルを構築し、アジア諸国についての人口と都市化、食料需給の予測を行った⁸⁾。このような簡便な予測方法によってもそれなりの蓋然性を持つ予測結果を提供することができると言える。しかし、ここでの予測モデルの基本的手法は、マクロの関係式によって過去の経験則（学習曲線）を将来に外挿することであった。経済発展の予測に潜む不確実性については、シナリオ（BaUシナリオなど）の設定によって回避している。

このようなレベルのマクロモデルでは、個別の政策や影響評価などの詳細な予測が不可能なことは言うまでもない。したがって、次の段階として、さらに多くの因子や関係を取り入れたモデル、いわばトップダウン型のセミマクロモデルの構築が考えられる。しかし、よりミクロな（セミマクロの）メカニズムを取り入れることによってマクロ的な現象を説明しようとする、相互に作用が相殺しあっていた諸因子が表面に出てくる。しかも、着目した因子以外にも多くの因子があり、寄与度の大きないくつかの因子だけを考慮しても全体の説明がつかない事態が生じる。

食糧生産予測に例をとってこの事情を考察してみよう。食糧の単収（単位面積当たり収穫量）に関しては、土地集約度（投入肥料・農薬、投入エネルギー、農業機械）によって飛躍的に向上してきた。ここで、土地集約度は経験的にGDP/cとの間にマクロ的相関関係がある。したがって、GDP/cと土地集約度のマクロ的関係により、単純な単収予測が可能となる。しかし、このレベルでは、GDP/cの増大が如何なるメカニズムで食糧増産につながるのかのそれ以上詳しい説明は不明のままである。もう1つの例は人口予測である。所得が上昇するほど合計特殊出生率が減少することは確立した法則である。しかし、豊かになれば何故子供の数が減るのかについては、医療水準の向上、教育レベルの向上、女性の社会進出、価値観の変化など色々の因子が介在し、それらが実際にどのように作用しあうのかの定量化はまだ不十分である。こうした状況において、もう一段ブレイクダウンしたモデルが必要となり、本論文ではこれを「セミマクロモデル」と称することにする。

このようなセミマクロモデルの構築のためには、上記の食糧生産予測の例では、単収を決定する要因についてさらにブレイクダウンして分析する必要がある。ここでは、品種、二期作・二毛作、気候、土壌、農業政策などの多様な要因が相互に複雑に関連しあって影響する。これらの個々の因子の役割、因子相互の関係には極めて不確実な部分が多く、容易にモデル化できない。しかし、これらの要因の将来推移や相互関係をあらかじめシナリオによって与えてしまうのでは、そもそも予測モデルとして意味が薄れてしまう。したがって、セミマクロモデル構築のためには、まずそこで問題となる不確実性について統一的視点から考察してみる必要がある。

2. 3 不確実性の分類

従来のモデリング手法における不確実性への対処方針を大別すると、①無視、②簡単化・近似、③仮定・シナリオの設定、のいずれかの処理を行っている。すなわち、これらの手法によってさまざまな不確実性を取扱いの容易な確定的な形に変えてモデルに取り入れているにすぎない。また、モデル構築の際の各因子及び因子間における不確実性を論じたものはほとんどなく、巨視的な不確実性に対する議論が中心である。例えば、気候変動における不確実性に関するこれまでの争点は、①CO₂の排出量における不確実性、

②排出されたCO₂の温暖化及び地球環境に与える影響の不確実性、③対策コスト及び経済成長に与える影響の不確実性、④不確実性の下での意思決定、という政策とその相互関係周辺の議論に集約されている(9)(10)(11)(12)。

図2はモデル化の流れに沿って不確実性の原因を整理した図である。本研究では、予測モデルの結果に影響を及ぼす不確実性として、モデル化による不確実性のみならず現象自体や知識データベースにおける不確実性も含めて定義する。

従来、予測モデルについての不確実性の検討とは、種々のシナリオに対する予測結果の違いを論じるものがほとんどであった。また、現象と知識データベースにおける不確実性についての個別のモデル化はさまざまに提示されてはいるものの、総合的な予測モデルに組み込まれるまでには至っていないのが現状である。したがって、本研究はいかに総合モデルに取り入れるかに主眼を置いた上で、現象と知識データベースにおける不確実性を明らかにする。

まず、自然システムおよび社会システムの場合、現象自体に含まれる本質的な不確実性がいくつか指摘できる。さらにこれらは、①気象現象や穀物価格などにみられる変動・振動・揺らぎ、②政府の投資政策や法律・条約による規制など人間自体が決定し対応する問題、③災害・戦争・歴史的発明など突発的事象に大別できる。

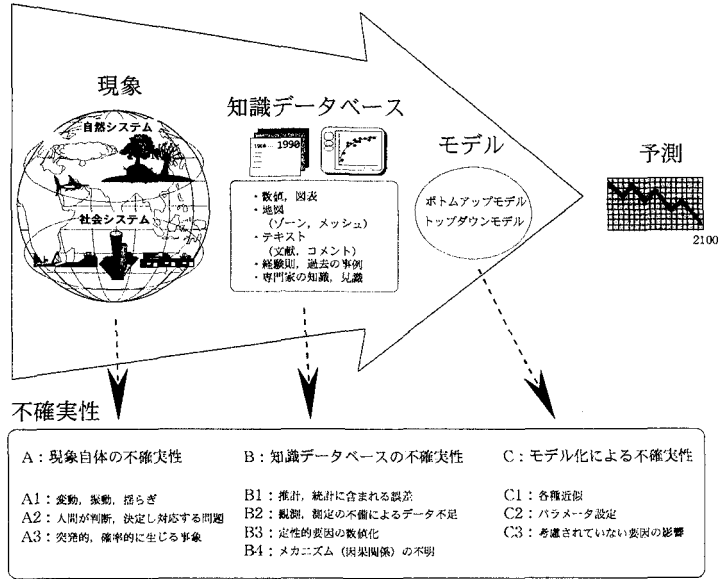


図2 モデル化のフローと不確実性

表1 現象による不確実性の分類とその対処法例¹⁾⁽⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾

現象による分類項目		原因による分類	対処法例
(1) 平均的なトレンドのまわりをある確率をもって変動する現象			
項目	具体的な事例	図2との対応	不確実性への対処
気候	気温、降水量、日射量、ENSO	A1	確率過程、統計処理
一次産品の生産高	作物の生産高、漁獲高	A1	
一次産品の価格	トウモロコシの価格、原油価格	A1,A2,B4	
金融商品の価格	株価、為替変動	A2,B4	
推計値	化石燃料賦存量、漁業資源	B1,B2	
統計誤差	サンプル調査、途上国のデータ	B1	
(2) 一定の確率で起こる突発的現象			
項目	具体的な事例	図2との対応	不確実性への対処
戦争、内乱	地域紛争、世界大戦、クーデター	A2,A3	モンテカルロ法
災害	地震、火山活動、洪水	A3	
異常気象	冷害、熱波、干ばつ、豪雨	A1,A3	
疫病の流行	ペスト、AIDS、エボラ出血熱	A3,B4	
(3) ある時期を境に状態を大きく変化させる現象			
項目	具体的な事例	図2との対応	不確実性への対処
技術革新	産業革命、輸送革命、医療革命、農業革命	A3	カタストロフ理論、モンテカルロ法、確率過程
個別の新規技術開発	BT技術の開発／普及、計算機的能力向上	A3,B4	
環境容量の超越	砂漠化、土壌劣化、有害物質の蓄積、生物種の絶滅	B2,B4	
(4) 人間による判断が大きなウェイトを占めるため予測が困難な現象			
項目	具体的な事例	図2との対応	不確実性への対処
国際条約	国際条約への批准、国内法化	A2	ゲーム理論、学習曲線
政策（制度）	法制化、規制強化、経済的手段の実施（税制含む）	A2	
政策（その他）	途上国援助政策、減反政策、産業政策	A2	
(5) 現象自体が定性的であるため定量化に不確実性がともなう現象			
項目	具体的な事例	図2との対応	不確実性への対処
対策レベル	各国の環境対策レベル	A2,B3	シナジェティクス、数値化理論
意識	各国の環境保全意識	A2,B3	
質的変量	都市の快適環境指標、環境の価値評価	A2,B3	

このような複雑で多様な情報を整理し蓄積したものを知識データベースという¹³⁾。ここでは、学習曲線に見られるような個別の因子間関係や簡単なサブモデルおよびその結果、専門家による知見なども知識データベースに含むものとする。知識データベース整備の段階での不確実性は、自然システムと社会経済システムに対する人類の知識のあいまいさに起因するものであり、今後不確実さが減少する可能性の最も大きい領域であると考えられる。これらの不確実性を分類すれば、推計・統計に含まれる誤差、データ不足、定性的要因、因果関係の不明などが挙げられる。特に、アジア地域など開発途上地域では情報が絶対的に不足しがちであり、この不確実性がこの地域に着目したモデル開発を容易でないものになっている。

表1は不確実性を現象によって分類し、その対処方法の例を示したものである。分類項目は、
 (1) 平均的なトレンドのまわりをある確率をもって変動する現象、
 (2) 一定の確率で起こる突発的現象、
 (3) ある時期を境に状態を大きく変化させる現象、
 (4) 人間による判断が大きなウェイトを占めるため予測が困難な現象、
 (5) 現象自体が定性的であるため定量化に不確実性がともなう現象、である。
 それぞれの項目は互いに必ずしも独立ではなく相互に影響しているため、これらの対処法は組み合わせてモデル化する必要がある。

3. 事例検討

3. 1 技術進歩予測

3.1.1 技術進歩の視点

技術進歩が社会経済および自然環境へ及ぼす影響は大きい。また、産業公害のように環境問題が技術によって解決される場合もある。したがって、長期環境予測に技術進歩を取り入れることが必要である。しかし、技術進歩は不確実要素が究めて多い課題であり、モデル化は容易ではない。

表2に技術進歩に関する視点をまとめた。技術については家電製品などの大衆化技術と公害対策や発電などの社会的技術とを区別する必要がある。大衆化技術は経済性や市場ニーズが普及の大きな要因である。また、社会的技術は政策に影響されるところが大きいと考えられる。

進歩の指標には大きく分けて2種類が考えられる。一つは効率や機能などの質的技術進歩であり、いま一つは普及による量的技術進歩である。この両者を同時に評価することにより、社会や自然への影響や効果をモデルにフィードバックすることができる。

技術進歩の段階には効果の比較的效果の小さい改良型の技術進歩が連続的に起こる場合と、画期的なアイデアや発見によって突発的に大きな進歩を遂げる場合とがある。短期・中期的な予測または研究段階にある個別の技術案が既知の場合には前者の進歩形態を対象とすべきである。しかし、長期的な予測の場合、環境悪化とともに大幅な意識改革が起こり、これが劇的な技術進歩に結び付く可能性は無視できない。

技術進歩に欠かせない投資には、研究開発への投資と普及のための投資がある。投資と普及の関係には家電製品の習熟曲線（大量生産→投資→コストダウン→普及→大量生産）にみられるような、ある程度の規則性がある。これに対して、投資と研究開発の関係にはさまざまなケースがあり規則性を解明することは容易ではない。

最後に、普及のモデル化について、実用化に成功した技術が従来の技術とどう置換されるかという視点が必要となる。これは技術の種類、市場規模や市場占有率、政策などによって個別に対応する必要がある。

3.1.2 技術進歩のプロトタイプモデル

図3は改良型技術進歩を考察するためのプロトタイプモデルの計算結果である。このモデルの背景には累積投資（人的、知的投資を含む）に応じて技術は進歩するといった考えがある。ここでは、研究開発プロセスと普及プロセスのそれぞれに投資と技術進歩をモデル化する。

研究開発プロセスでは技術進歩は0か1で評価される。つまり、実用化に成功するか否かである。ただし、最も大きな不確実性である成功確率は累積研究投資に応じて高まることとし、確率的にモデルに取り込む。また、普及投資に対する技術進歩はVerhulst成長曲線によって以下のように表現する。

$$\frac{dL}{dI} = r_1 L (1 - (\frac{L}{L_{\infty}})^{\alpha}) / \alpha$$

表2 技術に関する視点

◆技術の種類	大衆化技術 社会的技術
◆技術進歩の指標	機能・効率 普及
◆技術進歩の仕方	突発型進歩 改良型進歩
◆技術投資の種類	研究投資（R & D） 普及のための投資
◆技術交代	衰退型技術 持続型技術

ここで、 L :技術進歩、 I_t :累積普及投資、 r_t :技術進歩

速度、 L_{∞} :限界レベル、 α :普及抵抗である。

このモデルでは次のことが仮定されている。①限界レベルは累積研究開発投資に応じて大きくなる、②普及抵抗 $=1$ 、③技術進歩速度は累積普及投資に応じて小さくなる、④技術開発の成功確率は累積研究開発投資に応じて大きくなる、⑤次世代技術への研究開発投資はVerhulst成長曲線の変極点を境に開始される、⑥次世代技術の開発に成功すると同時に従来技術進歩は停止する。

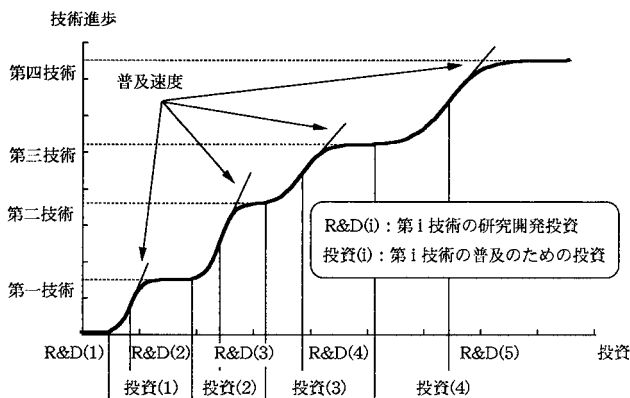


図3 プロトタイプモデルによる投資と技術進歩

このプロトタイプモデルの結果は代表的

な技術進歩を結んだ包絡曲線 (envelope curve) として解釈される。一般に技術が高度化し市場が成熟されると普及に対する投資効果は小さくなり、包絡曲線は収束すると考えられる。しかし、現実のカーブは複数の技術が複合的に進歩し、個々の技術に対する導入インフラ、技術の特殊性、市場などが普及に及ぼす影響などの不確実性があるため、このような理想的なカーブにはなり得ない。また、開発投資と開発成功のメカニズムを解明することは困難であり、実用化の時期は確率的に扱うことが一つの方法である。

3.1.2 わが国の経験した技術進歩の例と作図法による予測

技術に関する投資は公共投資を中心にデータが整備されているものの長期間に個別の技術に関して整備されているものは少ない。ここでは、長期にわたりデータが整備されており、かつ環境に関係の深い技術の中で、わが国における排煙脱硫装置への投資²²⁾と処理能力²³⁾、電力投資と発電能力の関係²⁴⁾から実績データの分析・検討を行う。

図4はわが国における発電の投資と発電源別最大出力のシェアとの関係である。技術進歩の視点からみると発電源別発電量(最大出力)のシェアは質的变化、発電源別最大出力は量的変化(普及)ということになる。

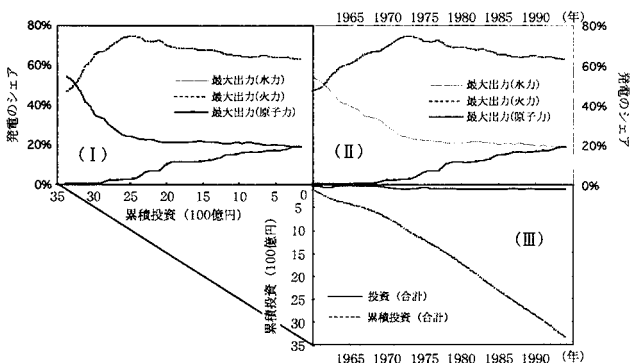


図4 発電の投資とシェア

一般に発電は水力、火力、原子力の順で技術開発が行われてきたといえる。したがって、技術的に発電能力のみを考えるとこの順序によって技術交代が行われ、それが発電源別発電量のシェアに反映されるはずである。しかし、総電力需要の増加や電力の安定供給、資源問題、環境問題等の理由から、実際には投資に対するそれぞれの発電源のシェアは複雑な関係になる。最大出力は投資に対して着実に伸びるが、発電のシェアは多分に政策的影響を受ける。

わが国は、高い石油の海外依存度とエネルギーの低自給率による脆弱なエネルギー体制を改善するため、積極的な石油代替エネルギー導入政策をとってきた。その結果火力発電のシェアは減少しつつある。このように、技術進歩は投資によって達成され、投資は政策によって決定され、政策は

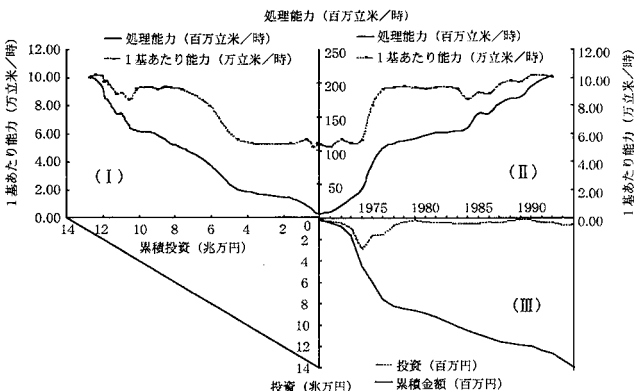


図5 排煙脱硫装置の投資と技術進歩

不確実な影響因子の相互関係の総体として決まる、といった図式がみえてくる。

図5は排煙脱硫装置の投資と処理能力の関係を表している。図5の(Ⅲ)は投資および累積投資の経年変化である。排煙脱硫装置への投資の特徴は、1970年代の急速な公害対策費の増大にともなって短期間に集中的に投資されていることである。図5の(Ⅰ)は累積投資に対する総処理能力・一基あたりの処理能力の関係であり、(Ⅱ)は総処理能力・一基あたりの処理能力の経年変化である。総処理能力は現在も投資に応じて増加傾向にあるのに対して、一基あたりの処理能力は1980年代より大幅な向上はみられない。

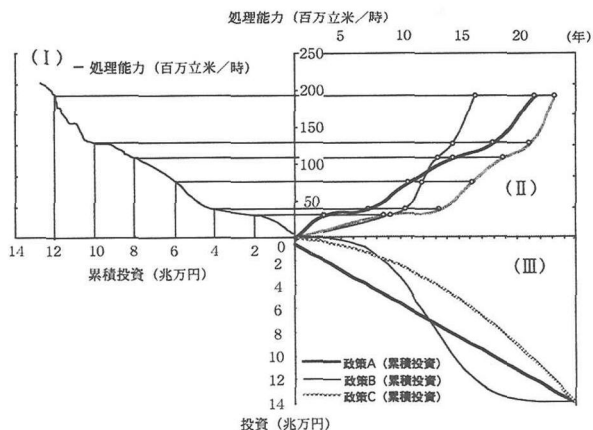


図6 作図法による技術予測

総投資に対する技術進歩の普遍的関係が計

算あるいは実績によって得られるならば、投資政策を入力することによって技術進歩の予測が可能である事を図6は示している。図6の(Ⅰ)は図4の累積投資に対する総処理能力である。図6の(Ⅲ)は時間に対する累積投資であり、25年間の総額が図4での総額、約14兆円となる3種類の政策を与えた。投資政策については、毎年の投資額を一定とした政策A、正規分布とした政策B、線形とした政策Cとした。その結果、作図法によって図6の(Ⅱ)にそれぞれの投資政策に対する総処理能力の予測が得られる。政策A、B、Cを比較すれば、同額の投資に対してはできる限り早期にしかも短期に投資(政策Bに近い形)すべきであることが定量的に判断できる。わが国の排煙脱硫装置に関する経験は結果的に理想的な投資パターンであったといえる。この方法は投資を中心とし、技術進歩と政策を分けて考えることができ、先に示したプロトタイプモデルと組み合わせることにより技術進歩の予測モデルとすることができる。

3. 2 気象変動と農業政策を考慮した中国の穀物需給モデルによる検討

ここでは、われわれが先に開発したトップダウン型マクロモデルによる食糧需給予測モジュールを基本モデル(Basic Model)⁸⁾とし、これに気候変動と農業政策を考慮した試験的変更を行った。ここで農業政策とは、不作の翌年は作付け面積を増加させ、豊作の翌年は作付け面積を減少させるといった作付け調整、穀物需給バランスがプラス時には、備蓄しマイナス時に備えるという2種類の政策である。

図7に計算結果を示す。基本モデルに対する過去(1960年~1990年)の穀物生産量²⁵⁾の分散 σ は約2,100万MTである。この分散 σ を用い、気候等の影響で平均0、分散 σ の正規分布 $N(0, \sigma)$ の変動を基本モデルの穀物生産量に与える。次に、作付け調整として穀物需給バランスの正負に応じて政策的に作付け面積を変化させる。このとき一年間に調整可能な作付け面積の最大変化量は、最近の10年間での最高値 ± 200 万haとする。また、作付けの調整は前年の穀物需給バランスによって年ごとに行われ、恒常的にマイナスが続く場合は作付け面積は連続して増加することとする。ただし、作付け面積の限界と見積もられている1,000万haを超えないこととする。作付けの調整政策の開始時期は2000年とする。

その結果を図7のModel Aに示す。さらに、Model Aに穀物需給バランスがプラスの場合は供給過剰分を備蓄し、不作および生産量の減少に備えることを加味したモデルの結果をModel Bに示す。ここでも、同様に穀物備蓄政策の開始を2000年としている。以上のモデルを検討すると、基礎モデルで

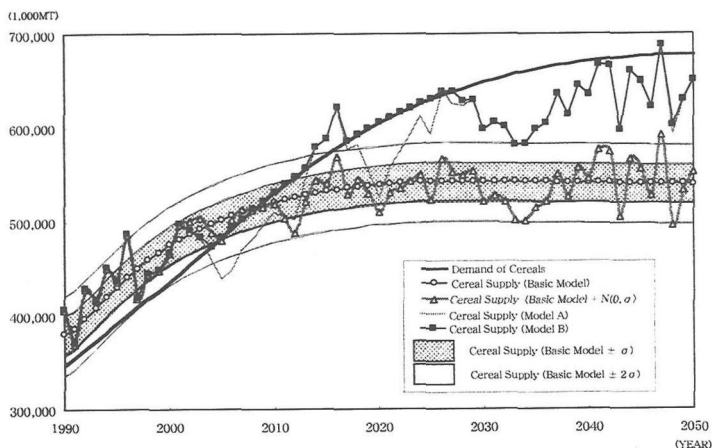


図7 気象変動と農業政策を考慮した中国の穀物需給予測

は2010年までに穀物不足が起こるといった予測結果に対して、Model Aによると2017年、Model Bでは2027年までは自給可能であるといった結果を得た。すなわち、不確実要因である適切な判断と政策を考慮したモデルにより、深刻な食糧不足を回避・緩和することが可能であることが示された。本研究では、食糧不足に対する危機感や世界的穀物価格の変動など、需要に影響する不確実性を考慮していない。したがって、その他の要因として需要の抑制効果や輸入などの対外関係を考慮すれば、中国が直ちに深刻な食糧不足に陥るとは必ずしも言い切れない。ここに決定論的予測の不完全さの一端が示されたと捉えることができる。

4. まとめ

本研究では環境将来予測について影響を及ぼす不確実性について検討し、原因による分類と対処方法の例示を行った。また、不確実性をモデル化する方法論について、技術進歩と食糧生産を例にとり検討した。技術進歩については、政策を投資に反映させること、投資が技術進歩とのあいだに普遍的関係があることをモデル化することによって不確実性のモデル化の一例を示した。また、食糧生産については、気候の影響による収穫の変動を確率的に与え、それによる作付け調整や政策による食糧備蓄を取り入れることにより、従来の決定論的モデルとの違いを示した。

地球環境を予測する際、本研究で議論した不確実性が予測結果を左右する可能性が否定できない限り、このような視点からモデル構築を捉える必要がある。今後はトップダウンモデルにおける柔軟なフレーム設定が可能であるという有利な面を生かし、従来、十分にモデル化できなかった要因についてモデルに組み込んでいく予定である。

参考文献

- 1) Lawrence R. Klein and Fu-chen Lo: Modeling Global Change, United Nations University Press, 1995
- 2) 森田恒幸：政策科学の最新動向，環境科学，No.100，pp.34-39，1996
- 3) Donella H. Meadows et al.: The Limits to Growth, Universe Books, 1972
- 4) AIM Project Team: AIM Interim Paper, 1995
- 5) W. Weidlich and G. Haag：「社会学の数学モデル」，東海大学出版会，1986
- 6) 井村秀文，二渡了・大平晃司：環境保全意識・態度形成の動学発展過程モデルについて，環境科学会誌，Vol.6，pp.335-342，1993
- 7) 金子慎治ほか：アジア諸国における開発と環境の将来予測のための諸指標に関する研究，国際開発学会，1996 (to be published)
- 8) 金子慎治ほか，地球環境将来予測のための経験的關係式の検討，第4回地球環境シンポジウム講演集，pp.227-233，1996
- 9) 森田恒幸ほか：地球温暖化対策に関するシナリオとモデル解析，土木学会論文集，No.449/IV-17，pp.1-17，1992
- 10) A. K. Duraipah: Global Warming and Economic Development, Kluwer Academic Publishers, 1993
- 11) 森俊介：地球環境と資源問題，pp.160-166，岩波書店，1992
- 12) 井村秀文，小林 光：「科学的不確実性の下における意思決定」，環境研究，Vol.68，pp.17-35，1988
- 13) 小金丸聡ほか：アジア地域の長期的環境将来予測のためのデータベースの開発研究，土木学会第51回年次講演概要集第7部，1996（印刷中）
- 14) 鈴木栄一：「気象統計学」，地人書館，1968
- 15) 濱村剛ほか：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，環境システム研究，Vol.19，pp.8-14，1991
- 16) 小坂弘行：グローバル・システムのモデル分析，有斐閣，1994
- 17) J. M. T. Tompson：「不安定性とカタストロフ」，産業図書，1985
- 18) 小幡範雄：環境コンフリクト実験ゲーム，技報堂出版，1992
- 19) N. S. ゴエル，N. リヒタ・ディン：生物学における確率過程の理論，産業図書，1988
- 20) G. ニコリス，I. プリゴジン：複雑性の探究，みずす書房，1993
- 21) シルヴァン・ウィットモア，余友泰，孫頌，王連錚：「10億人を養う」，農文協，1989
- 22) 日本産業機械工業界：環境装置の生産実績，1970-1994
- 23) 環境庁：平成8年度版環境白書
- 24) 電気事業連合会：電力事業便覧，1960-1994
- 24) FAO: FAOSTAT PC, 1995