我が国のエネルギーと環境のセキュリティ 評価モデル

正員 森 俊 介 (東京理科大)

正員 荒 川 文 生 (電源開発)

A Model for the Evaluation of the Energy and Environmental Security in Japan
Shunsuke Mori, Member (Science University of Tokyo), Fumio Arakawa, Member (Electric Power Development Company Ltd.)

Nowadays, conventional energy systems face various kinds of problem, e. g. environmental issues, uncertainties, resource restrictions, etc. The purpose of this study is to develop an energy/economy model to evaluate the security of energy systems in Japan from the macro-social points of view. The term "Environmental Security" conceives the new idea to expand the "Environmental Protection" for positive response to the environmental issues. The effect of cogeneration systems is also taken into account.

This model is a macro-econometric model which involves five primary energy sources, seven secondary energy categories and three final demand sectors. Various scenarios in the future are studied by the cross impact method (X-I method) to evaluate the security through simulations.

In this frameworks, the model calculates the total volume of carbon dioxide emission, including the case of charging carbon emission tax, demand for each primary energy sources, the loss of consumers' surplus, etc. in the case of "oil crisis" (sudden and serious oil supply reduction) and of change in energy supply structure. The contribution of cogeneration systems are also studied.

The results of the study show the followings: (1) carbon emission tax will stabilize the carbon emission level of 1990, if initial value is set at 4,000 ¥/C-t in 1993 and then is increased by 1,000¥/C-t every year, (2) the loss of GDP by the carbon emission tax is calculated ¥450,000~500,000 per ton of carbon reduced, (3) the loss of consumer's surplus in the case of "oil crisis" is strongly influenced by supply price elasticity and yet it is recovered in a short period of time in the Japanese energy systems.

キーワード：エネルギーシステム、環境問題、計量経済モデル、不確実性、X-I法、消費者余剰

1. はじめに

エネルギーセキュリティとは、エネルギーの需要と供給の整合を図り、システムとしてその安定性を確保するという問題である。これは政治的・経済的そして社会的にみて、どの国の政府、関係企業を問わずその主要な課題の一つである。現在、国際情勢は変化しつつあり、特にその地政学的構造はエネルギーセキュリ

ティの問題を、より複雑で不確実なものとしている⁽¹⁾⁽²⁾。一方、環境問題はエネルギー需給の安定性を確保するうえでより重要なものとなっている。しかも、単に環境を保護するという従来の対応を拡張し、地球環境をエネルギーシステムを内包するより大きなシステムととらえ、その保全を積極的に図ること、すなわち環境のセキュリティが求められている。

本論文はエネルギーシステムを定量的に分析し、エ

エネルギーと環境のセキュリティを確保するための計画方法を確立しようとするものである。そこで、まずエネルギーシステムを巡る状況や、発生し得る危険とその影響を考慮しつつ、システムの実態をダイナミックに表現できるモデルの構築を検討している。具体的には、エネルギーシステムを供給から消費に至るセクタに分け、更に各セクタを需要関数によって表現した「エネルギーセキュリティモデル」によって問題の定量的かつ動的な分析を試みる⁽³⁾⁽⁴⁾。

これまでの定量的分析は過去のデータを外挿するか、シナリオによってある可能性を示すことで行われてきた。エネルギーセキュリティの検討は、定量的検討のみならず状況の戦略的判断を必要とするため、政策の立案者と意思決定者が共同してなされるべきものであるが、このような問題は相互影響が複雑に絡み合うことが多い。そこで、本論文ではこのような問題の分析に対処する方法として、クロスインパクト法(以下、X-I法と略記)を導入した⁽⁵⁾。

2. エネルギーフローモデルの基本構造

近年、地球温暖化問題⁽⁶⁾、規制緩和やコジェネレーションシステムなどの分散型エネルギーシステム⁽⁷⁾が注目され、エネルギーシステムを巡る状況はますます複雑化しており、これらの総合的な評価を行うにはモデルの開発が不可欠といえる。このため、世界的にエネルギー/経済/環境を評価するモデルが様々な開発されてきている^{(8)~(10)}。

しかし、これらのモデルの多くは市場における財の需給と価格の長期的な均衡解を求めることを一つの目的とするため、モデル内での1期とは5~25年とされる。このため、石油ショックや税制変化などの過渡的なエネルギーシステムの振舞いを記述するには必ずしも適していない。そこで、本研究では大規模多部門モデルでなく、短期の動的な挙動を重視するシミュレーション型モデルを開発し、このうえで供給ショックや税制の変化、また新技術導入の影響などの評価を行うこととした。更に、将来の不確実性を総合的に評価するため、X-I法⁽¹¹⁾の適用を行った。

なお、このようなシミュレーションモデルの目的は、必ずしも将来の予測的中度にはない。このような計画と評価の方法は予測的中度より、(i)過去の事実を合理的に反映しているか、(ii)そのうえで現時点での情報、例えば新しい技術や制度の導入の効果を評価できるかがより重要な要件と考えられる⁽¹²⁾。本モデルの構造方程式は、いずれも次章で詳述されるよう1970~87年までの過去の実績データを基に推定され

図1 エネルギーシステムモデルの基本的構造

Fig. 1. Skeleton of the energy system model.

るが、その目的はこの(i)にある。また上記X-I法の適用も、予測的中のためではなく、(ii)の評価時点の情報の複雑な相互影響を分析する枠組みを与えることを目的としている。

本モデルの全体的なフローを図1に示す。まず、一次エネルギー源として、化石燃料に石油、LPG、石炭、LNGおよび水力と原子力を採用した。これらは、重油、灯油、都市ガス、軽油、ガソリン、コークスなどの製品を経て、熱需要として最終需要セクタに投入される。本モデルでは、簡単のため最終需要ブロックは産業セクタ、民生セクタ、輸送セクタの三部分に集約している。ただし、輸送セクタは用途の差を考慮し、ガソリン、軽油、LPG、ジェット燃料など個別に需要を求める。

また、電力供給は石炭、重油、LNG 3種の化石燃料による火力発電ブロックと、水力および原子力からなる非化石燃料発電ブロックから構成される。

図では省略しているが、国内総生産(GDP)は基本的に全エネルギー需要に影響する。

エネルギー需要、エネルギー価格、GDPは相互影響すると考えられ、モデル内に経済活動を評価するブロックが不可欠である。しかし、国際経済のメカニズムまでを一つのモデル内で取扱うことは到底不可能なうえに、必ずしも本モデルの目的ではないため、ここでは簡単な形で取扱っている。ただし、モデルの構造方程式はすべて過去の統計に基づき計量経済学的に推定されており、かつそのパラメータの意味に不合理がないことを条件とした。

エネルギーシステムの評価では、エネルギー価格の変化による燃料代替とエネルギー需要全体の変化の双方が重要である。そこで本モデルでは、まず各需要セクタの熱エネルギーの燃料別構成比を、各燃料のkcal当たり価格によって定まる多対ロジットモデル⁽¹³⁾で定式化した。次いで、この平均投入エネルギー価格に対して需要が定まるようにした。この結果、燃料別価格変化→燃料別構成比決定→平均エネルギー価格決定→エネルギー需要決定→燃料別需要決定、というプロセスにより、価格変化に対する燃料代替と需要変化双方を決定することができる。

次に、石油ショックなどによる供給途絶が価格上昇を引き起こし、我が国の経済に及ぼす損失の評価手順について述べる。

一般に、石油などの一次エネルギー供給が削減すると、価格が各種二次エネルギーに波及して上昇し、供給可能量とバランスするまで燃料代替や需要調整が行われる。また、価格が上昇すると、これに対応し供給量が増加することもある。本モデルではこのプロセスを、図2に示すよう供給関数の左側へのシフトで表している。価格 p に対する需要が $D(p)$ で表されるとき、 $\int_p^\infty D(p)dp$ は価格 P における消費者余剰⁽¹⁴⁾と呼ばれる。価格が P から P' に上昇すると、図中の斜線の面積だけ消費者余剰に損失が生じる。これはしばしば公共料金の経済的評価に用いられる指標である⁽¹⁴⁾。本研究でも供給途絶時の経済的損失の評価に用いることとした。

本モデルでは一次エネルギーの供給量と最終需要である二次エネルギー需要が直接結びついていないため、図2を直接適用することはできない。そこで、本モデルでは図3に示す手順を用いる。すなわち、当初の価格 P から一次エネルギー価格を ΔP だけ上昇させ、次いでこれに合せ関連するエネルギー価格を上昇させて燃料代替や需要の変化を計算する。詳細は〈3・4〉節に述べるが、本モデルでは石油供給途絶の場合、まず重油価格を基準とした化石燃料エネルギー価格の相互関係式を導いておき、原油価格の上昇と比例的に重油価格が上昇し、次いで石油製品およびLNG価格がこの関係式に従って上昇するというものである。こうして価格 $P+\Delta P$ 時の一次エネルギー需要を求めておく。次に、価格 p 時の供給量 $S(p)$ を用いて $S(P+\Delta P)$ を求め、両者が一致するような価格を求める。

なお、我が国では一次エネルギー供給のほとんどを輸入に依存しているため、本モデルでは生産者余剰を考慮していない。

図2 供給関数のシフトと消費者余剰の減少
Fig. 2. Supply function shift and the loss of consumers' surplus.

図3 供給途絶時に需給バランスを求める手順
Fig. 3. Procedure for the equilibrium between supply and demand under supply reduction.

3. モデルの構造方程式

〈3・1〉 エネルギー最終需要関数 財の価格や所得と需要の関係を表す需要関数には、トランスログ型⁽¹²⁾をはじめ、様々な形式が提案されている。本モデルでは、 t 期のエネルギー最終需要関数を、基本的に時間的遅れ調整項をもつ次の形式とした⁽¹⁵⁾。

$$\ln D_t = \alpha \ln D_{t-1} + \beta \ln Y_t + \gamma \ln P_t + C \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D : 需要, Y : 実質 GDP, P : 1985年実質価格

この形式は、価格や所得は短期的には β, γ で左辺に影響するが、長期的な均衡解に対しては影響が $\beta/(1-\alpha), \gamma/(1-\alpha)$ になるというように、影響の時間的な差異を区別できる特長を有する⁽¹⁵⁾。

なお、コークス需要とナフサ需要に対してはGDPでなく鉄鋼業生産指数と化学工業生産指数を用いた。またコークス需要では、右辺第1項の説明変数を

表 1 推定された需要関数のパラメータ
Table 1. Estimated parameters of the energy demand functions.

需要セクタ	α	β	γ	C	R^2
産業用熱	.738 (6.80)	.116 (1.20)	-.162 (4.74)	4.16 (2.36)	.939 6.55
産業用電力	.490 (3.44)	.392 (4.05)	-.162 (2.83)	4.73 (3.08)	.905 1.57
ナフサ	.524 (2.53)	-.139 (1.58)	===	6.10 (2.33)	.512 1.84
コークス	-.005* (2.30)	.633 (6.37)	.083 (2.24)	10.14 (28.5)	.766 1.26
民生用熱	.700 (6.02)	.139 (1.23)	-.034 (.750)	3.32 (3.47)	.923 2.80
民生用電力	.773 (7.09)	.296 (1.84)	-.032 (.532)	1.30 (2.34)	.994 2.14
民生用重油	.255 (1.49)	.052 (.492)	-.153 (3.19)	8.12 (4.43)	.711 1.83
民生用石炭	.381 (1.47)	-1.48 (2.23)	-.04 (.249)	12.33 (2.12)	.872 2.04
輸送用軽油	.227 (1.99)	1.038 (7.43)	-.154 (3.80)	3.75 (8.13)	.990 2.08
揮発油	.796 (6.99)	.1049 (1.26)	-.045 (.710)	2.11 (3.76)	.983 2.57
LPG	.294 (1.09)	.0560 (.317)	.0146 (.204)	4.74 (2.55)	-.05 1.74
輸送用電力	.812 (6.77)	.1326 (2.19)	-.059 (1.65)	1.28 (1.41)	.978 2.86
ジェット燃料	.922 (9.40)	.113 (.808)	-.098 (1.98)	1.26 (3.81)	.978 2.59
輸送用重油	.815 (6.65)	.1294 (.871)	-.145 (2.33)	2.41 (2.00)	.752 1.59

(注:1) 下段 () 内は t 値。ただし R^2 列では D.W.比。

(注:2) コークスの α は年次に対する係数。

(注:3) ナフサ、コークスの β はそれぞれ化学工業と鉄鋼業生産指数に対する係数。

ln D_{t-1} ではなく t (年次)とした。技術の変化が具体的には明示されていない問題点が残るが、ここではモデルシミュレーションの操作性に主眼を置いた。

表 1 に各需要セクタの推定されたパラメータをまとめて示す。推定に用いたデータは総合エネルギー統計⁽¹⁰⁾ による 1970 年から 1987 年のものである。

輸送用 LPG 需要はほとんど一定のため、自由度調整済み重相関係数 R^2 が負となっている。表中の幾つかの推定パラメータは統計的有意度が低い、符号と数値に解釈が可能なため、ここではそのまま用いることとした。

〈3・2〉 燃料間代替のロジットモデル 本モデルでは、電力セクタのうち火力発電、産業用および民生用熱需要セクタにおいて、価格変化に対する燃料代替

表 2 推定されたロジットモデルのパラメータ
Table 2. Estimated parameters of the Logit share function models.

		石炭	灯油	重油	ガス計
産業用熱需要	A	1.000	.762 (2.52)	1.246 (3.32)	.534 (2.72)
	α	-.207 (.672)	-.519 (2.36)	-.736 (2.99)	-.465 (2.59)
	β	.765 (8.55)			
				$R^2 = .962$	
火力発電用		石炭	重油	LNG	
	A	1.000	.878 (7.75)	.285 (1.317)	
	α	-.238 (1.60)	-.605 (8.93)	-.255 (1.847)	
	β	.848 (18.2)			
				$R^2 = .974$	
民生用熱需要		灯油	ガス計		
	A	1.000	-.352 (2.26)		
	α	-.275 (1.98)	-.140 (1.42)		
	β	.437 (1.63)			
				$R^2 = 0.855$	

(注:1) () 内は t 値。

(注:2) ガス計とは LNG と LPG 合計である。

を多対ロジットモデル⁽¹²⁾ で表した。ここでは、以下のような定式化を用いた。

$$S_{i,t} = \frac{A_i \exp(\alpha_i P_{i,t}) S_{i,t-1}^\beta}{\sum_k A_k \exp(\alpha_k P_{k,t}) S_{k,t-1}^\beta} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $S_{i,t}$ 、 $P_{i,t}$: 各々 t 期 i 種エネルギーの構成比と価格

また、ここでは価格を対数変換して用いている。

民生用熱需要セクタでは、灯油とガス(LNG と LPG 合計値)間の代替にロジットモデルを適用した場合のみ意味のあるパラメータが得られたので、電力、石炭、重油は表 1 に示すよう別個推定した。

パラメータの推定結果を表 2 に示す。いずれも符号条件を満たす意味のある結果である。

〈3・3〉 電力供給ブロック 電力供給ブロックでは、化石燃料のほか、原子力、水力、地熱発電の供給を扱わねばならない。しかし、これらの設備は価格メカニズム以外の要因が主と考えられるので、設備の成長率を外から与えることとした。また、電力供給価格 P_e は、火力発電へ投入した化石燃料の kcal 当たりの平均化石燃料価格 P_f と過去のトレンドにより以下のように簡単な形で定式化した。以下、() 内は t

表 3 化石燃料価格間の相互関係
Table 3. Relations among fossil fuel prices.

化石燃料	重油価格	定数	R^2	D.W.
石炭	.190 (1.06)	7.64 (4.20)	.104	1.24
コークス	.213 (2.46)	7.30 (8.08)	.230	.482
灯油	.856 (20.7)	1.83 (4.26)	.962	.801
軽油	.529 (15.5)	5.72 (16.1)	.934	.446
揮発油	.423 (17.0)	7.31 (28.2)	.944	.769
ナフサ	.982 (10.3)	.088 (.089)	.861	.290
LPG	.800 (7.20)	2.30 (1.99)	.749	.684
LNG	.954 (16.4)	.557 (.919)	.940	.852

(注) () 内は t 値。

値である。

$$\left. \begin{aligned} \ln P_e &= 0.314 \times \ln P_f + 0.0355 \times \text{年} + 0.0591 \\ &\quad (5.94) \quad (7.86) \quad (0.149) \\ R^2 &= 0.960 \quad D.W. = 1.72 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

〈3・4〉 化石燃料間の価格相互関係

石油ショックのような短期的な供給途絶の場合、化石燃料の価格は互いに独立ではなく連動して上下すると考えられる。そこで表3のように、重油価格を基準として化石燃料間の実質価格の相互関係を対数単回帰モデルで求めた。

ここでは、石油上昇時のみを扱い、それ以外は想定していない。LNGがかえってLPGよりも高い相関を示すという結果が得られた。これから、石油製品およびLNGのみ価格を連動させることとした。短期的な価格変動をこのような枠組みで扱うモデルは、ほかにも例を見ないものである。

〈3・5〉 経済活動ブロック

本モデルでは経済活動ブロックを以下のように定式化した。推定された方程式の係数はいずれも経済学的に納得できるものではあるが、財政ブロックや資本収支ブロックがないことからわかるように、必ずしも経済学の理論を反映させたモデルではない。あくまで過去の事実を先験的な知識に矛盾のない形で式に当てはめ、将来へ外挿したものである。

$$\left. \begin{aligned} \ln DD &= -0.058 \times \ln PH + 0.364 \times \log PL \\ &\quad (2.77) \quad (3.45) \\ &\quad + 0.0250 \times \text{年} + 5.53 \\ &\quad (6.28) \quad (29.2) \\ R^2 &= 0.0986 \quad D.W. = 0.997 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \ln PL &= 0.741 \times \ln PL(-1) + 0.154 \times \ln Y(-1) \\ &\quad (16.8) \quad (3.39) \\ &\quad - 0.585 \\ &\quad (2.76) \\ R^2 &= 0.998 \quad D.W. = 2.39 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} \ln(Y/DD) &= 0.319 \times \ln(Y/DD)(-1) + 0.140 \\ &\quad (8.91) \quad (5.00) \\ &\quad \times \ln(\text{¥}/\$)(-1) - 2.51 \\ &\quad (7.44) \\ R^2 &= 0.871 \quad D.W. = 1.50 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \ln(\text{¥}/\$) &= 0.816 \times \ln(\text{¥}/\$)(-1) - 1.78 \\ &\quad (5.60) \quad (1.90) \\ &\quad \times \ln(Y/DD)(-1) + 0.924 \\ &\quad (1.17) \\ R^2 &= 0.899 \quad D.W. = 1.62 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 PH ：重油価格、 DD ：国内需要、 PL ：実質賃金、 Y ：実質GDP、 $(\text{¥}/\$)$ ：為替レート、 (-1) ：1期前の値

(6)式は、円安が輸出主導型になることと、これが為替レートによって調整が行われることを示す。(7)式は輸出主導型になると円高となり、貿易収支が均衡した場合($Y=DD$)では150.8 $\text{¥}/\$$ の為替レートで均衡することを意味する。

なお、将来の経済成長のシナリオの設定はシミュレーションの最も決定的な要因となる。本モデルでは、(4)式の第3項の年に対する係数を調整することでこれに対処している。

以上のようにして推計されたモデルは、 R^2 が示すよう実績値と良好な適合度を示した。一例として、図4に電力用化石燃料シェアの実績値と推定値を示す。

以上の表1～表2および(3)～(7)式が示すように、本モデルでは各推定パラメータは基本的に過去の事実を整合的に反映しているといえよう。しかし、最も決定的な要因である経済成長とエネルギー価格のシ

図 4 電力用化石燃料シェアの実績値と推定値

Fig. 4. Historical and theoretical fossil fuel demand shares for electric power generation.

ナリオが外部から与えられることから明らかなように、このモデルは単独で将来予測を行うものではなく、技術、経済、制度などの様々な情報を過去の事実の延長上に乗せることで意思決定に役立てようとするものである。

〈3・6〉 コージェネレーションシステム コージェネレーションシステムの導入効果のモデル内での取扱いを述べる。

(1) コージェネレーションシステムの導入規模をシナリオとして設定する。ここでは2000年時点および2020年時点の規模を入力し、1989年の規模実績値1.28 GW⁽¹⁷⁾とこの2点のデータを通るような二次関数を求め、補間を行う。

(2) コージェネレーションの稼働率、熱効率、発電効率、ボイラ熱効率などを与え、発電電力量と熱供給量を求める。最適な稼働率は熱と電力の需要パターンによって大きく変動することが知られている⁽¹⁸⁾。ここでは燃料電池を想定し、与えるべき率をそれぞれ50, 80, 40, 90%と設定した。

(3) コージェネレーションシステムの熱供給の民生用需要と産業用需要のシェアを与える。ここでは、現状が主にホテル、オフィスなど民生用に導入されているため、すべて民生用に用いられるとしている。

(4) 民生用熱需要セクターで与えられる熱需要から、コージェネレーションシステムの供給熱需要を差し引く。

(5) 電力需要合計値からコージェネレーションシステム電力供給を差し引く。

(6) コージェネレーションシステムの燃料をすべてLNGと仮定し、LNG需要合計値に加える。

表 4 事象間の生起確率と相互関連確率 $P(i \rightarrow j)$
Table 4. Occurrence probabilities and interrelations $P(i \rightarrow j)$.

	A	B	C	D
A	.3	.1	.35	.75
B	.25	.15	.6	.73
C	.5	.12	.5	.75
D	.25	.20	.55	.7

表 5 一次元生起確率および二次元結合確率
Table 5. Single and second order occurrence probabilities.

	A	B	C	D
A	.300	.034	.184	.210
B	.034	.150	.079	.119
C	.184	.079	.500	.379
D	.210	.119	.379	.700

4. X-I 法による不確実性シナリオの設定

エネルギー問題では、将来の様々な不確実性の評価が重要である。ここでは、例として

A: 石油の供給が途絶する

B: 化石燃料消費に対する税制が実施される

C: 原子力発電所に対する規制が強化される

D: コージェネレーションシステムが大幅に導入される

の4項を将来のエネルギー・環境問題に重要な不確実事象として取上げる。これらの相互関係は複雑に絡み合うと考えられる。本論文では、そのような問題の分析の枠組みとしてX-I法を用い⁽⁵⁾⁽¹¹⁾、2000年を予測年次として複合シナリオの設定を試みた。

X-I法は、事象間の相互関連を専門家の主観確率で表し、確率論の基準を用いて事象の組合せにランキングを行うものである。

以下の手順は文献(5)に従う。まず、各事象生起確率の予測値および事象間の相互影響をもとに、「予測期間の当初事象*i*のみが生起した場合、予測の目標時点で事象*j*が生起している確率」 $P(i \rightarrow j)$ を表4のように与えた。これをX-I法の手順により結合確率 $P(i, j)$ に変換し(表5)、最小自乗法によって高次元での整合性を与える。今の場合、この手順による数値の変化は見られなかった*。

この修正二次元結合確率をもとに四次元結合シナリオの確率の順位付けを行う。ここではエントロピーを最大化する値を基準とした⁽¹¹⁾。更に、それらの値域

*これらの数値は将来の不確実性を分析するための一例であり、いかなる個人、団体の公式見解とも無関係であることを断っておく。

を求めた。結果を表6に示す。

表6の結果から、生起の可能性の高いシナリオはまず(9)と(13)、次いで(1)と(14)であるといえる。(9)と(13)については供給途絶と化石燃料規制は生ぜず、コジェネレーションシステム導入が進む、ただし原子力発電所への規制は五分五分、と解釈できる。

これらに次ぐ値を示すシナリオは(1)、「何も生じない」と、(14)「石油供給途絶と原子力発電所規制が強まるが化石燃料への規制は遅れ、コジェネレーションシステムが導入される」である。ここで、後者(14)と、(14)から事象C「原子力発電所に対する規制強化」

表6 高次シナリオ確率の値域と最大エントロピー値

Table 6. Range of scenario probabilities and maximized entropy probabilities.

	シナリオ	最小値	最大値	X*
(1)	(0000)	.0572	.1783	.1192
(2)	(1000)	.0000	.0906	.0409
(3)	(0100)	.0000	.0306	.0153
(4)	(1100)	.0000	.0306	.0031
(5)	(0010)	.0000	.1210	.0652
(6)	(1010)	.0000	.0906	.0431
(7)	(0110)	.0000	.0306	.0093
(8)	(1110)	.0000	.0306	.0039
(9)	(0001)	.1340	.2809	.2034
(10)	(1001)	.0000	.1163	.0641
(11)	(0101)	.0063	.0709	.0447
(12)	(1101)	.0000	.0340	.0087
(13)	(0011)	.1164	.2714	.1950
(14)	(1011)	.0593	.1840	.1184
(15)	(0111)	.0145	.0791	.0474
(16)	(1111)	.0000	.0340	.0183

を非生起としたシナリオ(10)を比較すると、表4で $P(C)=0.5$ という一次確率データを与えたにもかかわらず両者の生起確率には明らかな差が認められる。これは、事象間の高次の相互関連が反映された結果といえる。そこで、シミュレーションに際してはこの(14)を複合シナリオ(case-7)として取上げることとした。

5. シミュレーションについて

本章では、本システムが意思決定者の様々な条件設定に対しどのような情報を提供できるか、その特徴を示すため、第3章で求めた構造方程式に第4章で求めたシナリオをもととしたケースを幾つか設定し、シミュレーションを行うこととする。

〈5・1〉 シミュレーションのシナリオ設定 第3

章に述べた構造方程式に基づきシミュレーションが可能となる。まず、基準ケースのGDP成長率がおおよそ2000年まで3.5%/年、それ以降2.5%/年となるよう、(4)式の第3項、国内需要の年次に対する係数を設定した。表7の2000年まで2.5%/年、それ以降1.75%/年という国内需要の成長率はこのような意味をもつ。二次エネルギーの炭素排出原単位に比例して課税した、炭素排出税およびその他のパラメータの設定は表7にまとめる。なお、炭素排出税の値の意味は次節で述べる。

石油供給途絶シナリオは、1995～96年にかけ15,000 MI 石油供給関数がシフトするものとした。これは1990年原油輸入量が約7%減少することに当た

表7 シミュレーションの各シナリオのパラメータ設定値

Table 7. Parameters of simulation cases.

対応するシナリオ	(1)-1	(2)-1	(2)-2	(3)	(5)	(9)	(1)-2	(14)
事象	CASE-0 基準ケース	CASE-1 供給途絶-1	CASE-2 供給途絶-2	CASE-3 税制導入	CASE-4 原子力発電 規制	CASE-5 コジェネ 促進	CASE-6 低成長	CASE-7 複合シナ リオ
国内需要年成長率	2.5% 1.75%	←	←	←	←	←	1.8% 1.2%	2.5% 1.75%
非化石燃料発電成長率	3.45% 3.45%	←	←	←	2.0% 2.0%	3.45% 3.45%	←	2.0% 2.0%
石油供給途絶 (供給価格弾性値)	×	○ (0.0)	○ (0.3)	×	×	×	×	○ (0.1)
コジェネレーション(GW) 上:2000 下:2020	5 GW 15 GW	←	←	←	←	8 GW 30 GW	5 GW 15 GW	8 GW 30 GW
炭素税導入	×	×	×	○	×	×	×	×
消費者余剰損失 (石油供給途絶時)	—	72.5 兆円 96.6¥/l	24.1 兆円 32.1¥/l	—	—	—	—	41.7 兆円 55.6¥/l

(注1) 共通シナリオ:石油,石炭,ガスの実質価格は各々年率3%,1%,3%で上昇するものとする。

(注2) 数値は上段が2000年まで,下段が2000年以降を示す。

(注3) 最下段は消費者余剰損失を石油1l当たり年平均で表したものである。

る⁽¹⁶⁾。ここで、図2の供給関数の傾きは石油供給途絶の影響に大きく作用することは明らかである。そこで価格弾性値 $\partial(\ln S)/\partial(\ln P)$ に0と0.3の2種を設定した。複合シナリオ(case-7)では0.1とした。この場合、第2章で述べた消費者余剰を各年で計算し、基準ケースのそれとの差を石油供給途絶の経済的損失の指標とする。表7の最下段の数値はこの損失を2025年まで累積した値とその平均値である。

〈5・2〉 シミュレーション結果 以下は、本モデル構造に対し、表7の条件設定を行った場合の結果であり、あくまで一つの数値試算例であることを断っておく。紙面の都合上ここでは各ケースにおける我が国全体の二酸化炭素放出量、石油供給途絶時の消費者余剰損失の推移のみを図5～図7に示す。

これらの図から、本シナリオ設定の場合、我が国のエネルギーシステムについて本モデルが以下のような興味深い情報を提供したことがわかる。

(1) CASE-0とCASE-5を比較すると、コジェネレーションシステムの導入は、稼働率50%として設備1kW当たり年間0.96～0.99C-tほどの二酸化炭素排出削減に寄与する。

(2) CASE-0とCASE-4の比較から、原子力発電所の規制は、他のエネルギー需給構造が不変なら二酸化炭素排出量を増加させる。

(3) CASE-0とCASE-1、CASE-2を比較した場合、石油の短期的な供給途絶の影響は図5のように短期的なもので、すみやかにもとのトレンドに復帰する。しかし、経済的な影響は、図7のように将来まで継続する。その2020年までの損失額累積値を年当たり石油途絶量1t当たりに単純平均すると、表7に示すよう供給の価格弾性率が0(CASE-1)では96.6¥/1と極めて高額になる。価格弾性率が0.3、すなわち価格の10%上昇に対し供給量が3%増加できれば損失は32.1¥/1に抑えられる。このことから、必ずしも現在価格競争力がなくとも、石油代替エネルギーはエネルギーのセキュリティに寄与することが示唆される。

(4) CASE-0とCASE-6を比較すると、経済成長率は二酸化炭素排出に大きく影響する。

なお、CASE-3で扱った炭素排出税の問題は重要と思われるので、次節で更に論じる。

〈5・3〉 炭素排出税のシミュレーション 炭素排出税のマクロ経済への影響を明らかにするため、4,000¥/C-tを初期値として、各年の増加分を400¥/C-tから4,000¥/C-tまで変化させてシミュレーションを行った。

我が国全体の二酸化炭素排出量の推移と結果を図8

図5 シミュレーション結果 二酸化炭素排出量合計1

Fig. 5. Simulation result on total CO₂ emission of Japan(1).

図6 シミュレーション結果 二酸化炭素排出量合計2

Fig. 6. Simulation result on total CO₂ emission of Japan(2).

図7 石油の供給途絶時の消費者余剰損失の推移

Fig. 7. Consumer's surplus loss change under oil supply crisis.

図 8 税額の変化に対する二酸化炭素排出量の変化
Fig. 8. Changes of CO₂ emission corresponding to the changes of carbon emission tax.

図 9 税額の変化に対する炭素排出量 1 t 当りの GDP 損失額の変化
Fig. 9. The changes of loss of GDP per carbon ton CO₂ emission reduction (thousand ¥/MC-t).

に示す。炭素排出量合計は、課税額 1,000¥/C-t の上昇でほぼ横ばい、2020 年でほぼ 1988 年排出水準まで下降させるには 2,000¥/C-t の課税が必要であるという結果が得られた。

このほか産業用ブロックでは毎年 400¥/C-t の課税額上昇でも排出量が減少するのに対し、民生用は毎年 1,000¥/C-t の課税額上昇でも横ばい程度であった。輸送用の炭素排出は、毎年 4,000¥/C-t の税額の増加に対しても減少しないという結果が得られた。

税制による炭素排出量削減の社会的費用を、炭素排出量 1 C-t 当たりの GDP の減少額により評価すると、図 9 に見られるよう約 45 万～50 万円/C-t となった。これは山地らのシミュレーション(対 GDP 減少額で 38 万円/C-t)⁽⁹⁾ とほぼ同様の結果と考えられ、炭素排出量削減を税制のみに頼ることの困難さを示すものと考えられる。

以上の数値は様々な留保条件のもとでの一試算例に過ぎないが、本システムが技術や制度の変化に対し有益な情報を提供し得ることは示せたといえよう。

6. おわりに

本研究は、エネルギー/経済/環境の相互関連の問題を取扱い、現状の延長の枠組みに様々な想定を施した場合に、それぞれのケースのセキュリティを定量的に評価し、意思決定に役立てるようなシステムの開発を行ったものである。このシステムが取扱った評価項目は、以下のような点である。

- (1) 短期の「石油ショック」の影響とその代替エネルギー源の評価
- (2) コージェネレーションの炭素排出削減への寄与
- (3) 炭素排出税の影響評価

本研究は、エネルギーセキュリティの定量的分析にあたり必要とされる様々な要求項目、例えば過去の事実を十分に反映しているか、新しい技術や制度の導入の効果を容易に取入れられるか、石油危機のような突発的な事態をシミュレートできるか、またそれらの間の複雑な相互影響を分析し得るか、という諸問題に対し、一つの回答を与えたものといえよう。

更に、本システムが政策立案者と意思決定者との「対話」の場を提供できるように、意思決定支援システム構築に向けての充実・改善を進めることが今後の課題である。

なお、ここで用いたエネルギーフローモデルは文部省科学研究(重点 1・エネルギー)の一環であり、予測と意思決定支援システムは電源開発(株)が(社)システム総合研究所に委託した研究の一部であることを付記する。

(平成 4 年 1 月 29 日受付, 同 4 年 5 月 11 日再受付)

文 献

- (1) F. Arakawa: "From Thoughtness to Flexibility", CIGRE, 37-87(JP)06(E) (1987)
- (2) F. Arakawa, S. Mori & T. Torigoe: "Energy Security Model", T-2-3 ESME '89
- (3) 荒川・森: 「エネルギーセキュリティの定量的分析」, 平 2 電気学会 B 部門大会, No. 36
- (4) 荒川・森: 「環境問題を考慮して拡張したエネルギーセキュリティの定量的分析」, 平 3 同上, No. 128
- (5) 茅, 他: 社会システムの方法 (昭 60) オーム社
- (6) 茅: 「地球環境問題と経済発展」, 計測と制御, 29, No. 7, 1 (平 2)
- (7) 公害資源研究所地球環境特別研究室編: 地球温暖化の対策技術 (平 2) オーム社
- (8) W. D. Nordhaus: "The Cost of Slowing Climate Change: A Survey", *Energy J.*, 12, No. 1, 37 (1991)
- (9) J. Edmonds & J. Reilly: "A Long-term global energy economic model of carbon dioxide release from fossil use", *Energy Economics* (1983-4)
- (10) 山地, 他: 「市場機構を利用したグローバル二酸化炭素抑制

- 方策のシミュレーション解析」, 電中研報告, Y 90301 (平 3)
- (11) 森: 「不完全な主観的データからの高次結合確率密度関数の抽出—連続変量型 X-I 法—」, 電学論 C, 109, 234 (平元-4)
- (12) 北川: 研究開発のシステムズアプローチ (昭 52) コロナ社
- (13) R. S. Pindyck: The Structure of World Energy Demand (1979) MIT Press
- (14) 細江: 応用ミクロ経済分析 (平 2) 有斐閣
- (15) 室田: エネルギーの経済学 (昭 59) 日本経済新聞社
- (16) 通産省平成 2 年度版総合エネルギー統計
- (17) 梶屋: 「日本の二酸化炭素削減のシナリオ」, 日経サイエンス, No.11 (平 2)
- (18) 藤井, 他: 「都市エネルギー計画からみたコジェネレーションシステム」, エネルギー・資源研究会第 5 回エネルギーシステム・経済コンファレンス, p.167 (昭 63)

森 俊 介 (正員)

昭和 28 年生。56 年東京大学電気工学博士課程修了。同年東京理科大学理工学部経営工学科助手, 58 年同講師, 平成元年同助教授, 現在に至る。この間

61~62 年 IASA 客員研究員。工学博士。社会システム, エネルギーシステムモデル化の研究に従事。計測自動制御学会, IAEE 会員。

荒 川 文 生 (正員)

昭和 15 年生。40 年東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月電源開発(株)入社。55 年ワシントン駐在, 59 年工務部技術課長, 62 年企画部調査室次長, 平成 3 年技術開発部参事役。CIGRE SC37 国内委員。IEEE, 資源・エネルギー学会会員。著書(共著): 「電力システム」, 「転機に立つエネルギー産業」。

書面討論

討 論

辻 毅 一 郎 (大阪大)

発電部門が重要な位置を占めるエネルギーフローを適度に簡略化し, 経済メカニズムを含めてエネルギーと環境のセキュリティに関する定量的評価を可能とするモデルを構築された点, 意義のあるものと考えます。

以下の 2 点について質問いたします。

(1) シミュレーションの「シナリオ」の設定に, クロスインパクト法による「シナリオ」評価の結果を利用している点が, 本論文の一つの特徴であると考えますが, 両者の対応関係が明らかではありません。確率の高いシナリオだけを上げる必要もないと思いますが, 対応をとるべきではないでしょうか。

(2) 原子力発電の規則は取上げられていますが, コジェネなどの分散電源の導入も十分考慮するに値するシナリオと考えます。このモデルのシミュレーションに加えることは困難でしょうか。

須 藤 剛 志 ・ 鈴 木 浩 (三菱電機)

本論文は, エネルギーシステム全体についてモデル化し, 定量的検討を行ったものであり, これまで電気学会ではあまり取扱われていなかった分野のものです。電力システムの計画, 運用を研究対象とする者にとっても, 環境問題, コジェネ問題などの観点から, 今後よりいっそうの検討を必要とすべき課題と考えます。電気学会論文に新しい分野を開拓されたことに賛辞を送りたいと思います。

ご提案のモデルはエネルギーシステムのダイナミクスを取扱っており, システムの柔軟性(フレキシビリティ), 経済との関連を評価するのに適したものです。

今後のご研究の発展のため, 以下の 3 点につき討論申し上げます。

(1) コジェネのモデリングについて 本論文は第 1 回電力・エネルギー部門大会において発表された論文を基にしたものですが, その討論においてコメントいたしましたコジェネのモデリングを取上げていただき, ありがとうございます。本論文ではコジェネの導入規模を将来の想定値との外挿により求めています