

■研究論文■

レプリケーターモデルによる電源構成の最適化

A Best-Mix Configuration of Electricity Generating System Using Replicator Model

大久保 博生*・青柳 雅**・鈴木 篤之***

Hiroo Ohkubo Tadashi Aoyagi Atsuyuki Suzuki

(1994年1月11日 原稿受理)

Abstract

We explained how a diversification-oriented electricity configuration has been promoted during the last twenty years in Japan by calculating entropy values of electricity generation ratios and then identifying them by a kind of replicator system basically derived from an optimization problem including an entropy function as a driving force of diversification.

Next, using the concept of a replicator system, we made a simulation code of electricity best mixture which can quantitatively account for not only diversification but also various middle and/or long-term factors such as economics, environmental protection and resource availability of each electricity source, respectively, and then demonstrated that this model concept could be helpful for us to make an uncertainty analysis on factors which might influence on the ratio of nuclear power generation in future electricity configuration.

1. はじめに

日本の電源構成において考慮すべき目標として指摘されているものには、

- (1)多様化 (2)燃料供給安定性 (3)経済性 (4)運転特性 (5)供給弾力性 (6)安全性/信頼性 (7)国産性 (8)環境保全性 (9)立地円滑性 (10)行政的制約 (11)国際的役割

がある。これら全ての目標を考慮した上で電力需給バランスを満たすような最適電源構成を求める方法としては、例えば多目的最適化問題のフレームとして取り扱うことが考えられる。ところで、実際に世界で作成されている代表的な電源構成モデルに適用されているダイナミック・プログラミング (DP) や線形計画法 (LP) のような最適化フレームの多くは、燃料供給量、環境保全性、立地資金などを制約条件とし、トータルコストを最小化するモデルである¹⁾。

しかし、日本のように、石油ショックや原子力バブル・リック・アクセプタンスのような様々リスクや不確実要因を念頭に置かねばならない国にとっては、電源を多様化することが基本的理念として重要と認識されている。

そこで、ここでは、まず、過去数十年に亘る日本の電源構成の推移をエントロピー関数並びにエントロピー関数を目的関数に含む最適化モデルから導出されるレプリケーターモデル¹⁾によって分析する。次に、電源構成の長期的将来シミュレーションの一つの方法として、レプリケーターモデルが適用し得るかどうかを検討する。

脚註1) “レプリケーター”という言葉は、本来、社会生物学、数理生態学、集団遺伝学などの分野で作り出され、活用されている用語であり、具体的には後述の(3)式の連立微分方程式系で記述されるシステムを指す²⁾³⁾。そこで、本論文では、このレプリケーターシステムの概念を模倣した電源計画モデルのことを、特に“レプリケーターモデル”と呼ぶことにする。

* ㈱三菱総合研究所 地球環境研究センターエネルギー・資源研究部 エネルギー環境研究室長代理

** “ ” エネルギー・資源研究部長兼エネルギー環境研究室長

〒100 東京都千代田区大手町2-3-6タイムライフビル

*** 東京大学工学部システム量子工学科教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

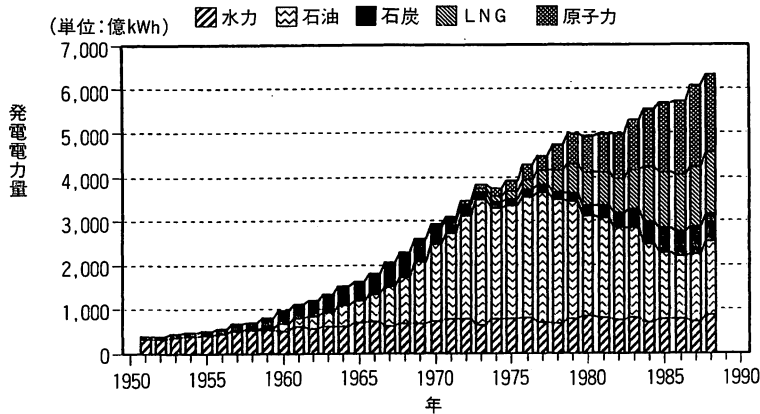


図-1 日本における電源別発電電力量の推移

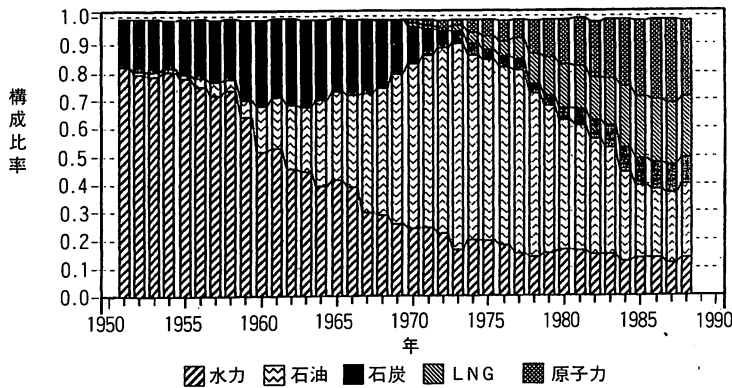


図-2 日本における発電電力量構成比率推移

2. エントロピー関数と電源多様化

1951年から1988年までの日本全体の主力5電源（ここで、LPGは石油火力に含め、地熱・その他ガスは除いた）別発電電力量並びにその構成比率の推移を、それぞれ図-1、図-2に示す。

また、電源多様化の様子を、エントロピー値 $S(t)$ ：

$$S(t) \equiv - \sum_{i=1}^{N(t)} x_i(t) \ln x_i(t) \quad (1)$$

ここで、 $N(t)$ ：時点 t における電源の数

$x_i(t)$ ：時点 t における電源 i の発電電力量構成比率

$$\left(\text{即ち、} \sum_{i=1}^N x_i = 1, x_i \geq 0 \right)$$

$$\text{for } i = 1, 2, \dots, N$$

の計算結果（図-3）によって示す。

これにより、

①初期の頃は、水力、石炭火力の主力2電源構成系に

石油火力が参入するにつれてエントロピー値が1965年頃まで上昇するが、

②その後、コスト安の石油火力への偏りが強過ぎたためにエントロピー値が次第に低下し、

③第一次石油ショック発生を契機に、それ以降は、石油代替源としての原子力並びにLNG火力の導入に伴うエントロピー値の上昇

といった3つのフェーズで特徴付けられる。

そこで、(1)式で定義されるエントロピー関数は、将来的な電源多様化の様子を示す定量的指標の一つとして使うことも可能と言える。この場合、エントロピー値に実際的な上限が存在するかどうかといった疑問が生ずる。今後、電源多様化がどの程度進むかは、トータルコスト最小化など、序で述べた他の目標（要因）との兼ね合いに依存するであろうことは上述の①～③の過去の傾向分析から類推される。即ち、既存の主力5電源構成系への新電源の導入が進む場合には、導入初期の速度上限制約を考慮すると、例えば、トータル

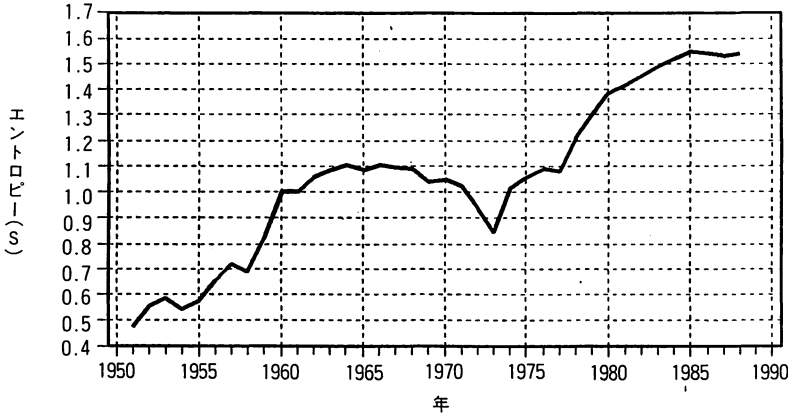


図-3 日本における発電電力量構成比率に対するエントロピー値の推移

コストを最小にし、かつ、多様化も促進された最適状態に到達するまでの過程においては、

(a)エントロピーが一時的にピーク値を有し、さらに新電源への偏りが進み、エントロピーが低下するケース（場合によっては、既存のエントロピーレベルを下回る可能性もある）

(b)エントロピーが単調に増大していくケース

の2ケースが存在し得ると考えられる。

(a)のケースは、新電源の限界発電コストが既存のどの電源よりも安い場合に出現し得るものであり、かつての石油火力への偏り（前述のフェーズ②）は、このパターンの典型的な例と考えられる。そこで、もし同じ考え方が成り立つならば、現在最も安いと言われている原子力についても、(a)のパターンの再来が予想される。

他方、(b)のケースは、逆に、新電源の限界発電コストが既存のどの電源よりも高い場合に出現し得るものであり、コスト高のため、エントロピーの低下をきたすほどの導入は行われないと考えられる場合に相当する。

従って、もし、“新エネルギー”が既存の主力5電源（水力、石油火力、石炭火力、LNG火力、原子力）システムに導入されるならば、その限界発電コストが最も安い電源のそれよりも安くなる可能性があれば、(a)のパターンとなり、他方、最も高い電源よりも高い状態で導入が続くならば、(b)のパターンの到来が考えられよう。

3. 日本の電源構成トレンド分析

2節で述べたように、N種の電源系での電源構成比率 x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) (但し、 $\sum_{i=1}^N x_i = 1$) が均

等化されるにつれて、エントロピー関数 $S(x_1, x_2, \dots, x_N)$ の値が増加することから、電源多様化を促すポテンシャル関数の一つとして、電源計画モデルの中にエントロピー関数を導入することが想起される。そこで、ここでは、ある電源に偏るリスクを低減する意味で、将来も電源多様化（エントロピー増大化）の目標が存続し、その他の複数の目標（要因）が何らかの多属性純効用関数 $U(x_1, x_2, \dots, x_N)$ で表現し得たとして⁴⁾、純効用とエントロピーの双方を最大化する（但し、純効用の重視度1に対してエントロピー（多様化）の重視度を a としてその加重和を最大化する）以下の最適化問題 (P) の解として電源構成比率を導出することを考える。

問題 (P)

正の定数 a 並びに凹関数 $U: R^N \rightarrow R$ かつ、 $U_{x_i} > 0$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 並びに凹関数 $S: R^N \rightarrow R$ に対し、

$$\begin{aligned} \Phi &= U(x_1, x_2, \dots, x_N) \\ &\quad + a \cdot S(x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow \max \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^N x_i &= 1, x_i \geq 0 \\ &\quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

問題 (P) の解 x_i^* は、 $S(x_1, x_2, \dots, x_N) \equiv -\sum_{i=1}^N x_i \ln x_i$ のとき、次の非線形連立方程式の解である。

$$x_i^* = f_i(x^*) / \sum_{i=1}^N f_i(x^*) \quad (2)$$

ここで、 $x^* \equiv (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*)$

$$f_i \equiv \exp(U_{x_i}/a)$$

for $i = 1, 2, \dots, N$

明らかに、 $a \rightarrow \infty$ のときには、エントロピー最大化の解： $x_i^* = 1/N$ ($i = 1, 2, \dots, N$)、即ち、純効用の大小に関係なく、均等比率解が得られ、他方

表1 最近の日本の発電電力量構成比率 (1988年以降)

	発電電力量構成比率 [%]					エントロピー値
	水 力	石油火力	石炭火力	LNG火力	原 子 力	
1988	13.8 (13.8)	26.6 (26.6)	9.9 (9.9)	22.0 (22.0)	27.7 (27.7)	1.543 (1.543)
1989	13.3 { 13.9 } 13.4	27.8 { 26.0 } 25.3	9.8 { 10.5 } 9.8	22.2 { 21.8 } 22.6	26.7 { 27.9 } 29.0	1.540 { 1.549 } 1.540
1990	12.1 { 13.9 } 13.1	28.1 { 25.5 } 25.5	9.9 { 10.8 } 9.8	22.5 { 21.7 } 22.3	27.4 { 28.1 } 29.3	1.531 { 1.551 } 1.537
1991	12.8 { 13.9 } 13.1	25.4 { 25.2 } 25.8	10.4 { 10.9 } 9.7	23.4 { 21.7 } 22.2	27.9 { 28.2 } 29.2	1.543 { 1.553 } 1.536
1992	10.7 { 14.0 } 13.1	26.9 { 25.0 } 25.9	11.2 { 11.1 } 9.7	22.7 { 21.7 } 22.2	28.5 { 28.3 } 29.1	1.532 { 1.554 } 1.536
1993	{ 14.1 } 13.1	{ 24.8 } 26.0	{ 11.1 } 9.7	{ 21.7 } 22.1	{ 28.3 } 29.0	{ 1.554 } 1.536
1994	{ 14.1 } 13.1	{ 24.7 } 26.1	{ 11.2 } 9.7	{ 21.7 } 22.1	{ 28.3 } 29.0	{ 1.555 } 1.536

注記) 実績値は、通産省「電源開発の概要」に基づき、1992年までの判明分 (1992年は推定値) のみ記載した。また () 内の上下の数値は、1次式 (上) 並びに2次式 (下) で同定されたレプリケーターモデル (本文(4)並びに(5)式) において1988年の実績値を初期値として解いた結果を示す。

$a \rightarrow 0$ のときには、 $k \equiv \arg \max U_{x_i}$ (U_{x_i} の値が最大である i) に対し、 $1 \leq i \leq N$

$$x_i^* = \begin{cases} 0 & (i \neq k) \\ 1 & (i = k) \end{cases}$$

即ち、その電源の構成比率増分に伴う純効用増大が最大である電源のみの構成が最適となる。従って、実際には $0 < a < \infty$ であるので、多様化のウェイトを a だけ考慮した上で純効用増大率の大きなものの順に構成比率の大きな解が得られる。

問題 (P) は静態系での最適化問題であるが、2節で述べた日本の電源構成推移に示されるように、実際の電源構成は時間的に変化し得るので、(2)式の両辺を時間 t で全微分することによって得られる、

$$dx_i/dt = x_i (g_i - \sum_{j=1}^N g_j x_j) \quad (3)$$

$$\text{ここで、} g_i \equiv \dot{f}_i / f_i = \frac{d}{dt} (U_{x_i} / a) \quad (3')$$

for $i = 1, 2, \dots, N$

なるレプリケーター系の連立微分方程式の方が時系列データのフィッティングなどには有用と考えられる。

(3)式は、多様化を a だけ重視したときの電源 i の純効用時間変化率 g_i が、全電源に亘る平均純効用変化率 $\sum_{j=1}^N g_j x_j$ (但し、 $\sum_{j=1}^N x_j = 1$) よりも大きければ、電源 i の構成比率は時間的に増加し、逆に小さければ減少する、という動特性を表現したものとなっており、例えば、ロジスティック曲線による様々なエネルギー供給技術の市場参入率のトレンド分析⁵⁾や数理生物学への応用²⁾などの適用例がある。

そこで、原子力発電の導入が本格開始された1970年から1988年までの日本全体における主力5電源系の発電電力量構成比率推移データを用いて(3)式の同定を試みた。具体的には、 $\sum_{i=1}^N x_i = 1$ より x_N を消去し、

$$dx_i/dt = x_i (-B_i + \sum_{j=1}^{N-1} B_j x_j) \quad (4)$$

$$\text{ここで、} B_i \equiv g_N - g_i \quad (4')$$

for $i = 1, 2, \dots, N-1$

及び、 $x_N = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} x_i$ と変形した上で、(3')式、(4')式を通じて表される B_i と x_i の関係を(5)式のような2次式で近似的に表すものとし、

$$B_i = C_{0i} + \sum_{j=1}^{N-1} C_{1ij} x_j + \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=j+1}^{N-1} C_{2ijk} x_j x_k$$

for $i = 1, 2, \dots, N-1$ (5)

その係数 C_{0i} , C_{1ij} , C_{2ijk} を多重回帰分析により決定したところ、決定係数0.979, ダービン・ワトソン比2.75というフィッティング結果が得られた(ちなみに、(5)式を1次式で表した場合、決定係数0.805, ダービン・ワトソン比2.41となっている)²。そこで、これらの同定式を用いて1988年の電源構成比(実績値)を初期値とし、将来の電源構成比のシミュレーションを行ったところ、表1に示すように、2次の同定式の場合、6年後に平衡点(水力:石油火力:石炭火力:LNG火力:原子力=13.1:26.1:9.7:22.1:29.0)に到達し、そのときのエントロピー値 $S=1.536$ となった(同様に、1次の同定式の場合でも、1994年以降ほとんど変わらず、18年後に平衡点(水力:石油火力:石炭火力:LNG火力:原子力=14.3:25.3:11.2:21.3:27.9, $S=1.557$)に到達している)。即ち、1970年から1988年までの主力5電源系の構造が今後続くものとすると、現状は、すでに均衡点に近い状態にあるとも言える(表1を見ると、最近の実績値もほぼ横ばい状態にある)。

このように、電源多様化を基本的理念とする日本においては、多様化を促すエントロピー関数をポテンシャルに含む最適化問題の解軌道として、レプリケーター方程式系の適用可能性があり得ると言える。

4. 将来の電源構成シミュレーションへの適用

3節より、日本の電源構成をレプリケーターモデルで表現し得る可能性が示されたので、ここでは、将来シミュレーションへの適用に関する考察を試みる。

(4)式に示されるように、発電電力量比率 x_i の増減は、

$$B_i = g_N - g_i = \frac{d}{dt} \{ (U_{x_N} - U_{x_i}) / a \} \quad (6)$$

即ち、ある電源 N と電源 i の相対的な純効用増加率の差で支配される。この場合、序で述べたような様々な電源構成目標(要因)を純効用関数 $U(x_1, x_2, \dots, x_N)$ で表す必要がある。ところで、これは、表1に示されるように、短期的には(5)式に示す x_i の多項式に反映されていると解釈されるが、中・長期的には不確実事象の介入などによって、そのトレンド式が外挿し得るとは考えにくい。現に、2000年における日本

脚註2) なお、 t 値についても、1次式、2次式とも各係数毎に算出、比較しており、これについては、1次式の方が良好な結果が得られている。

(電事審需給部会)の発電電力量構成比率目標(地熱分散型電源を除く主力5電源)は、水力:石油火力:石炭火力:LNG火力:原子力=10.8:17.4:16.6:20.1:35.1(これに対するエントロピー値=1.533)、即ち、発電コストの最も安い原子力の比重の増加が大きく、次に安価な石炭火力が続いて増大傾向を示し、逆に、石油依存度低減化の一環として石油火力の比率低下の傾向が示されている。つまり、中期的な目標としては、多様化を意識しつつも、経済性並びに燃料供給安定性が重視された結果となっている。そこで、ここでは中期的要因の一例として、時点 t における電源 i の発電コスト $M_i(t)$ のみ考慮し、 $U(x_1, x_2, \dots, x_N) = - \sum_{i=1}^N M_i x_i$ とにおいて、 $U_{x_i} = -M_i$ を(6)式の右辺に代入して得られる項:

$$B_i = \frac{d}{dt} \{ (M_i - M_N) / a \} \quad (7)$$

for $i = 1, 2, \dots, N-1$

を中期的な電源構成支配因子と考える。さらに、長期的には、燃料資源の有限性に基づく消費速度制限が考えられるので、ここでは、ここ30年間の石油に対する全世界平均 R/P 比 $\approx 30 \sim 40$ 年(ほぼ一定)(ここで、 R は確認可採埋蔵量、 P は経済的資源消費速度)という実績⁶⁾から考えて、他の資源(水力、石炭、天然ガス、ウラン)についても R/P 比=一定となるような適正消費速度に対応する発電電力量構成比率 z_i ($i=1, 2, \dots, N$)を求め、(2)式において $x_i^* = z_i$ とおきかえて得られる関係:

$z_N/z_i = f_N/f_i$ を用いて得られる B_i 、即ち、

$$B_i = g_N - g_i = \dot{f}_N / f_N - \dot{f}_i / f_i = \frac{d}{dt} \{ \ln(z_N/z_i) \} \quad (8)$$

for $i = 1, 2, \dots, N-1$

を長期的な電源構成支配因子と考える。

以上より、電源構成支配因子 B_i を(5)、(7)、(8)式で表される3因子のウェイト付け平均で与えるものと仮定する。即ち、仮に短期的要因として(5)式の B_i (これを $(B_i)_0$ 、その重視度を w_0)を、同様に、中期的要因として(7)式の B_i (これを $(B_i)_1$ 、その重視度を w_1)、長期的要因として(8)式の B_i (これを $(B_i)_2$ 、その重視度を w_2)として、

$$B_i = \sum_{j=0}^2 w_j (B_i)_j \quad (9)$$

for $i = 1, 2, \dots, N-1$

但し、 $B_i = \sum_{j=0}^2 w_j = 1$, $w_j \geq 0$

$$\text{for } j = 0, 1, 2$$

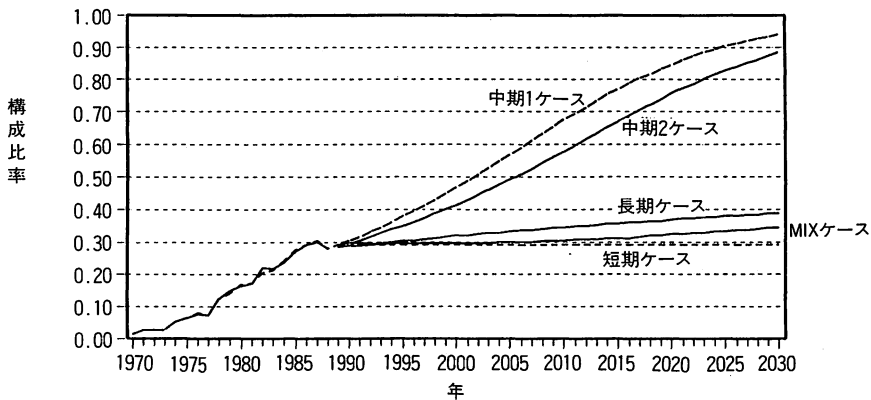
と定義し、(9)式を代入した(4)式のレプリケーター方

程式系を数値的に解くマイコンレベルの計算コード (TESCOM) を作成し、いくつかのケース・スタディを実施した³⁾。まず、新エネルギーの導入を考慮しない場合の主力5電源系における原子力発電量構成比率推移の計算例を図-4に示す。日本における原子力発電は、中期的には最も発電コストが安く、しかもCO₂発生による炭素税の負担がほとんど発生しないと考えられるので、図-4の中期1、2ケースでは従来通りの高い導入率で構成比率が増加し続け、他方、コスト高の石油火力、LNG火力の構成比率は減少し続けるので、結果的にエントロピー値は低下し続けると考えられる。しかし、他の化石燃料同様に長期的資源制約を考慮するとき、本計算で設定したように天然ウランの

み利用の場合、R/P比≒60年程度なので、もし、プルトニウム利用によるウラン枯渇化遅延効果 (FBRが最も有効でR/P比≒900年) が期待できなければ、石炭火力の優位性 (石炭のR/P比≒300年) のため、長期ケースに示されるように、原子力の比率の伸びはさほど大きくはならず、従って、中期ケースのウェイトを比較的小さく設定したMIXケースにおいても同様の傾向を示すが、エントロピー値は、短期ケースが示す1970~1988年間の電源多様化が目指した均衡点に近い状態に対応して比較的大きな値が維持される。

ここで留意すべき点は、以上の計算結果は、多様化重視度パラメータ a や短・中・長期要因間のウェイト w_0, w_1, w_2 の設定いかんによって変化し得ること、並びに、主力5電源以外の6番目の電源 (ここでは、新エネルギーとして、燃料電池、ソーラーを考慮) の導入の影響を、量産効果などによる発電コスト低減効果については中期要因 ((7)式) により、また、導入率目標値については長期要因 ((8)式) により、それぞれ考慮することによって、本計算フレームにおい

脚註3) 今回開発したレプリケーターモデルのフレームにおいて、適切な過去の時系列データ情報等が収集・整備されるならば、発電コストや資源量などの中・長期的要因をもトレンド式として重回帰分析の対象に組み込むことにより、短・中・長期的要因間の重視度並びに多様化重視度パラメータを同時に決定する方法も一般には考えられるが、今回は収集データが不十分なため、そのようなアプローチを行っていない。



— 実績値 — 短期ケース — 中期1ケース — 長期ケース — MIXケース — 中期2ケース

注記) 各ケースの意味は以下の通りである。

- 実績値 : 1970年から1988年の日本の発電電力量構成比率実績値
- 短期ケース : 1970年から1988年の実績値を2次のレプリケーター系で多重回帰分析によりフィッティングした式を用いたケース ($w_1 = 1, w_0 = w_2 = 0$)
- 中期1ケース : 1989年から2005年までの発電コスト見通しに炭素税 $b (=0.15)$ [¥/g・炭素] × CO₂発生量 c_i [g・炭素/kwh] を加えたケース ($w_1 = 1, w_0 = w_2 = 0$) (発電コストについては、水力は近年の通産省データ値一定と仮定し、水力以外については文献⁷⁾のデータを指数関数でフィッティングした式を用いている。又、炭素税については、文献⁸⁾等の解析結果を参考に設定した。)
- 中期2ケース : 中期1ケースで $b = 0$ とおいたケース
- 長期ケース : R/P比一定ケース ($w_2 = 1, w_0 = w_1 = 0$) (水力については、包蔵水力の値 (通産省データ) を用い、石油、石炭、天然ガス、ウラン資源 (Oil and Gas Journal, 総合エネルギー統計, 原子力ポケットブック, Coal Information, Natural Gas in the world Outlook to 2000, Energy Statistics Yearbook, world Energy Statistics and Balances, その他 OECD/NEA, IIASA データを使用) とともに、[確認 (可採) 埋蔵量] / [経済的資源消費速度] = 一定となるような資源消費経年変化曲線をベースとしている。)
- MIXケース : 短期ケース, 中期1ケース, 長期ケースの混合ケース (時点 t に対し, $w_0 : w_1 : w_2 = 2e^{-0.2t} : e^{-0.1t} : 0.5$)

図-4 原子力発電量構成比率の推移 (新エネルギーを含まないケース)

表2 感度解析の前提条件（新エネルギーを含むケース）

ケース		各 ケ ー ス の 前 提 条 件
要 因	ケース番号	
短期要因 ^(注1) (トレンド, 多様化) のみ考慮するケース	1	replicator system (1st order系) によるトレンド, 上限制約なし
	2	replicator system (2nd order系) によるトレンド, 上限制約なし
中期要因 ^(注2) (発電コスト, 炭素税) のみ考慮するケース	3	石炭火力, 原子力, 新エネルギー (燃料電池レベル) の各コスト単調減少, 炭素税なし, 上限制約なし
	4	石炭火力, 原子力のみ将来コスト減少から上昇へ変化, 炭素税なし, 上限制約なし
	5	石炭火力, 原子力のみ将来コスト減少から上昇へ変化, 炭素税あり (b=0.05円/g・炭素), 上限制約なし
	6	石炭火力, 原子力のみ将来コスト減少から上昇へ変化, 炭素税あり (b=0.2), 新エネルギー (ソーラー等レベル), 上限制約なし
	7	石炭火力, 原子力, 新エネルギー (ソーラー等レベル) の各コスト単調減少, 炭素税あり (b=0.2), 上限制約なし
	8	石炭火力, 原子力, 新エネルギー (ソーラー等レベル) の各コスト単調減少, 炭素税あり (b=0.2), 上限制約あり (水力0.3, その他0.6)
長期要因 ^(注3) (資源, 需給目標値) のみ考慮するケース	9	各電源消費燃料資源の究極埋蔵量が上限, 上限制約なし
	10	各電源消費燃料資源の究極埋蔵量が下限, 上限制約なし
混合ケース (上記各ケースの ウェイト付け)	11	短期(ケース2)&中期(ケース3)&長期(ケース9) = 2 : 6 : 2 (経時変化なし)
	12	短期(ケース2)&中期(ケース8)&長期(ケース10) = 2 ^{-0.4t} : 6 : 2

注1) 1次のレプリケーターシステムとは、本文中(5)式において B_i を x_i の一次式として同定した結果を用いたものを意味する。
 注2) コストが減少から上昇へ反転する曲線は、社会的コスト増の影響を想定し、指数関数フィッティング式をベースに設定した。
 注3) 新エネルギー（分散型電源）の導入量については、電事審需給部会（1990.6）の電力供給目標に近いガイドラインを与えた。
 注4) 表中の「上限制約」とは、各電源に対する発電量の上限制約を意味する。
 注5) その他の前提条件は、新エネルギーを含まないケース（図-4）と同じとしている。

表3 モデル（TESCOM）における感度解析（新エネルギーを含むケース）の結果
 (2000年, 2030年における我が国全体の発電量構成比)

ケース番号	水		石 油		火 力		石 炭		火 力		L N G		火 力		原 子		力		新エネルギー	
	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030	2000	2030		
1	0.142	0.142	0.250	0.253	0.113	0.112	0.214	0.213	0.281	0.279	0.000	0.000								
2	0.131	0.131	0.261	0.261	0.097	0.097	0.221	0.221	0.290	0.290	0.000	0.000								
3	0.130	0.045	0.190	0.008	0.103	0.054	0.163	0.009	0.414	0.883	0.000	0.000								
4	0.130	0.296	0.190	0.055	0.103	0.276	0.163	0.062	0.414	0.311	0.000	0.000								
5	0.150	0.446	0.154	0.015	0.074	0.043	0.145	0.027	0.476	0.468	0.000	0.000								
6	0.196	0.391	0.070	0.000	0.024	0.000	0.088	0.001	0.622	0.410	0.000	0.199								
7	0.196	0.047	0.070	0.000	0.024	0.000	0.088	0.000	0.622	0.928	0.000	0.024								
8	0.207	0.167	0.074	0.000	0.025	0.000	0.093	0.001	0.600	0.600	0.000	0.232								
9	0.126	0.111	0.229	0.176	0.105	0.133	0.223	0.171	0.315	0.373	0.003	0.036								
10	0.131	0.132	0.223	0.132	0.110	0.158	0.208	0.133	0.325	0.405	0.003	0.041								
11	0.127	0.122	0.251	0.203	0.103	0.116	0.218	0.232	0.301	0.328	0.000	0.000								
12	0.175	0.299	0.285	0.010	0.081	0.006	0.069	0.007	0.390	0.600	0.000	0.075								

注) ここで、ケース2, 3, 9は、それぞれ、図-4の新エネルギーを含まないケースの短期ケース, 中期2ケース, 長期ケースにほぼ匹敵し得るケースである。

て評価可能である、ということである。

前者については、例えば、過去の傾向から逆問題的に推計する客観的方法⁹⁾や階層分析法¹⁰⁾のような一対比較手法によって専門家の意見を評価要因間のウェイト付けに反映する主観的方法の適用なども考えられる。また、後者については、新エネルギーの導入の将来見通しを考慮する場合として表2に示す12ケースのシナリオ(多様化重視度はいずれのケースも同じ)を設定し、計算を実行したところ、中期ケース($w_1 = 1$)で環境安全性が重視されている(ここでは、炭素税を増加させた)ときに、原子力の将来コストが低減傾向から一転して上昇に転ずるかもしくは発電量構成比率上限制約が6割に設定されたときに、2030年で20%前後の構成比率が得られている(表2、表3のケース6、ケース8参照)¹¹⁾。

5. 結 言

1970～1988年の日本の電源構成の傾向として、石油ショックを契機に原子力、LNG火力といった石油代替源の導入が促進され、電源多様化政策が進められてきたことが、エントロピー関数を基盤とするレプリケーターモデルにより明らかとなった。

そこで、このモデル体系に、そのトレンド式を短期的要因とし、その他、発電コストを中期的要因に、また、資源の有限性に基づく燃料等消費速度制約条件を長期的要因として、それぞれに重視度ファクターを乗じて加重平均化してレプリケーターモデルに組み込んだシミュレーション型モデルを作成し、ケース・スタディを通じ、将来の発電量構成比への影響要因分析に適用し得ることを示した。

その解析結果をまとめると、およそ次のようになる。

- ①1970年以降の我が国の電源構成(発電量)は、多様化を強調する傾向があったため、短期要因(トレンド)を重視するほど、経済性の優劣に関係なく、将来の構成比が電源間で平坦化の様相を呈する。この傾向は、3節でも述べたように、多様化重視度パラメータ α を増やすほど、顕著になると考えられる。
- ②炭素税導入の効果は、水力、原子力の優位性がかなり強く出るため、石油・石炭火力に比べれば、LNG火力、新エネルギー(燃料電池レベル)の優位性は相対的には高まるが、強いインセンティブにはなりにくい。
- ③原子力の順調な伸びを支えるためには、社会的コストを含む将来コスト増を抑制する必要がある。

④新エネルギーが既存の主力5電源系に参入するためには、技術進歩効果及び量産効果に基づく強いコスト・ダウン傾向の維持と政策的支援等が必要となろう。今後の課題としては、前記の脚註に示したように、トレンド式の詳細検討、及び短期・中期・長期要因間のウェイトや多様化重要度パラメータも過去のデータから同定するアプローチ法を検討した上で、負荷曲線ベースの最適化モデル例¹²⁾などを参考に、主力5電源系に参入し得る新電源の導入タイミングやテンポなどが内生的に決定できるフレームに拡張・改良していくことが考えられる。

謝 辞

本研究は、(株)三菱総合研究所の自主研究テーマ「不確実性定量評価新手法の開発(I)(II)—電源構成のあり方—」(1990年、1991年)の研究成果の一部を整理し直したものである。本研究を進めるにあたり、委員会での有意義な議論並びに計算コード開発の協力が得られたことに対し、委員各位に深く謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 内山洋司; 総論—エネルギー技術の評価手法, エネルギー・資源, Vol. 10, No. 3, 23～31 (1989).
- 2) ホッフバウアー/シグムンド著(竹内訳); 生物の進化と微分方程式, 現代数学社 (1990).
- 3) Aubin, J.P.; Viability Theory, Birkhäuser (1991).
- 4) 中村豊, 田村坦之; 多属性効用関数の凸分解表現, 計測自動制御学会論文集, Vol. 16, No. 3, 442～447 (1980).
- 5) Marchetti, C.; On the Generation of Nuclear Energy during the Last Twenty Years, Nuclear Science and Engineering, 90, 521～526 (1985).
- 6) 津村光信; 国際エネルギー情勢の変化と石油需給展望, 化学経済, 1990, 5月号, 10～15.
- 7) 木野内彰; 電源別発電コストの試算・分析, エネルギー経済, Vol. 15, No. 11, 2～13 (1989).
- 8) 山地憲治; 地球大気環境保全のための経済メカニズム, 計測と制御, Vol. 29, No. 7, 67～72 (1990).
- 9) 呂 新一, 茅 陽一; 電源計画における不確実性の数量的検討, 第5回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 29-34 (1988).
- 10) 刀根 薫; ゲーム感覚意志決定法, 日科技連 (1986).
- 11) 大久保博生, 青柳 雅, 吉田直樹, 西村邦幸; 不確実性定量評価新手法の開発(II)—電源構成のあり方—, 三菱総合研究所 所報No. 19, 106～137 (1991).
- 12) 大庭靖男, 七原俊也; 電源構成における電力貯蔵設備の役割の評価—原子力と電力貯蔵設備の組合せの最適化—, 電気学会論文誌B, 105巻5号, 427～434 (1985).