不確実な需要の下での電源の最適規模構成

正員 松橋 隆治 (東京大)

正員 石谷 久 (東京大)

正員 林 武人 (東京大)

正員 茅 陽一 (東京大)

The Optimal Capacities of Large and Small Scale Power Plants
in the Uncertain Demand

Ryuji Matsuhashi, Member, Hisashi Ishitani, Member, Takehito Hayashi, Member, Yoichi Kaya, Member (The University of Tokyo)

The demand for electricity in the future is uncertain and difficult to forecast. But we have to forecast the demand in the future to construct power plants. In that sense a large scale power plant has a disadvantage, since it takes long to construct it. On the other hand, a small scale one is more expensive than a large scale one, although it takes less time to construct it. Therefore large and small scale power plants could complement the disadvantages of each other. In this paper we have developed a stochastic dynamic programming model to investigate the possibility. The model determines the capacities of large and small scale power plants in the uncertain demand to minimize the expected value of the total cost. Computed results have shown that small scale plants can play a significant role in the uncertain demand even if they are more expensive than large scale ones.

キーワード：需要の不確実性，大規模電源，分散形電源，電源構成，確率多段決定問題

1. はじめに

石油危機後，日本は低経済成長期に入り，エネルギー需要の伸びは極端に鈍化した，ここ数年では，好景気を反映して逆に需要が大きく伸びている。このようにエネルギー需要の伸び率は乱高下しているが，将来への需給見通しが極めて不透明になっていることは確かである。この需要の不確実性は，規模の経済性の問題と密接に関連している。例えば，電気事業は典型的な設備産業であり，スケールメリットを前提にして設備の大規模・集中化が進められてきた。しかし，石油危機後の，不透明な需給見通しの下で，こうした設備投資のあり方に疑問が開始した。また，機器単体もしくは，電気事業の構成要素ごとのスケールメリットは認めるとしても，それらを総合した形での経済性は必ずしも明らかでない，という指摘がなされた。著者の日本のデータによる分析⁽¹⁾においても，原子力

および石炭火力発電所の建設費についてはスケールメリットが存在するものの，それらの利用率についてはスケールデメリットがあり，送配電コストについても，明らかなスケールデメリットが観測された。そこで分散形電源によってこうしたデメリットを補う必要性が指摘されている。

ガスタービンや燃料電池などの分散形電源は，パイロットプラント段階のものもあるが，既に実用段階のものもあって，これらをいかにして電力系統に導入していくかを検討する時期にきている。また，中規模電源の典型的な例であるモジュール形原子炉の開発も進んでいる。現在のところ，これら分散形電源は大規模電源と比較して建設費が割高で，全面的に導入することは難しい。しかし，これらの電源技術の急速な進歩と量産効果を考えると，かなりの建設費の低減が期待できる。また，分散形電源は，大規模電源と比較して建設期間が短く(第2章で述べるように)，需要の不

確実性への対応が容易である。従って、規模の経済性を構成する様々な要因を考慮した場合、大規模電源と分散形電源が相補って、現在より柔軟で経済的な系統を構成できる可能性がある。

呂らはこの点を考慮し、電源種が単一で規模のみ異なる場合を想定して、建設コストを定量的に評価するシミュレーションを行った⁽²⁾。しかし、具体的な電源構成の中での分散形電源の導入可能性を評価し、大規模電源との協調のあり方を検討するためには、建設費だけでなく負荷持続曲線を基に算定した燃料費も考慮に入れ、モデルを最適化形にする必要がある。

本研究では、電力部門における大規模電源と分散形電源の協調によって需要の不確実性に柔軟に対応する可能性を検討する。実際には、大規模と分散形電源の二種で系統を構成し、需要の不確実性を考慮した確率モデルを構築し、非線形最適化の技法によって期待コストが最小となる組合せを求める。その後、動的な枠組みの中での大規模と分散形電源のシェアの変化を確率多段決定問題として定式化し、モデルにおける大規模電源の最適設備容量を求め、需要の不確実性と分散形電源導入量の関係を分析する。確率モデルと多段決定問題を組合せた手法は以前からあり、例えば長期電源計画の最適化のために、こうした手法を開発したBoothら⁽³⁾の例がある。またBloom⁽⁴⁾は、一期間内における確率的モデルと全期間にわたる線形計画法を組合せることにより、長期電源計画を解く方法を開発した。本研究の目的は、このような手法を開発することではなく、不確実な需要の下での分散形電源の価値を評価し、分散形電源の導入により、電源構成に柔軟性を与える可能性を検討することにある。その点で不確実な需要下での電源計画を確率計画問題として定式化し、求解にシナリオ統合アルゴリズムを用いた喜多らの研究⁽⁵⁾は注目に値する。本研究は文献(5)と比較して、多段決定問題として定式化している点や、確率モデルに対数正規分布を用いることにより需要の確率分布が連続的に与えられる点などの相違がある。

2. 分散形電源の利点とモデルの前提条件

〈2・1〉 分散形電源の利点 一般的にいて、分散形電源の利点は以下の4点にまとめられる。

(1)送電コストが低減される。(2)熱供給によって総合効率が向上する。(3)供給規模調整に関し、融通がきく。単位電源規模が小さいと必要需要規模に対して小回りのきく対応ができる。(4)建設期間が短い。建設期間が短いので需要不確実性に対応しやすく、予期せぬ変動により生ずる損失が少ない。

本研究は需要の不確実性に焦点をあてており、(1)の送電費用の低減については現在のところ考慮されていない。しかし、送電費用の分析については森⁽⁶⁾のような研究があり、送電費用の低減は分散形電源の利点を評価するうえで重要である。従って、送電費用の低減を本研究の結果とどのように統合し総合的な評価を行うかは、今後の重要な課題である。(2)については文献(7)に従い、熱の便益が3円/kWh、基の燃料費(天然ガスを仮定)が10円/kWhであることを考慮し7円/kWhとした。(4)の建設期間の短期性については、電力需要の長期予測が非常に難しい現在の状況でこそ、第1章で述べた大規模電源と分散形電源の相補性が見られる可能性がある。そこで本論文では、(4)に焦点をあて((3)も考慮に入れて)、不確実な需要下での最適規模構成を求める。以下に計算の前提条件を説明する。

〈2・2〉 モデルの前提条件

(1) 電源の種類 まず、大規模電源と分散形電源の二種類があると仮定する。二種類の電源の前提条件としては以下のように仮定する。大規模電源の各条件は、その典型的な例である原子力発電(軽水炉)に基づいて設定している。ただし、分散形電源の建設単価は、電源の種類別と将来の技術開発動向により変動が予測されるため、パラメータとし、感度分析を行っている。

(2) 需要予測 ピーク需要規模は増加傾向にあって、各年の増加率は正規分布に従い、各年の増加率の間には相関がないと仮定する。また、ピーク以外の需要部分は、ピーク部分と同じ増加率で伸びていくと仮定する。その際の前提条件は、以下のとおりである。電力の供給規模としては、1985年のA電力会社程度の規模(表2参照)を考え、需要の伸び率と標準偏差は、1980～1987年の電力9社の全電力需要を基に算定した。電力の負荷持続曲線は1985年の電力9社のデータを基に図1のように折れ線近似している。

表 1 電源の種類別と前提条件
Table 1. Assumptions on power plants.

	大規模電源	分散形電源
単位規模	110万 kW	2,000 kW
計画期間	5 年	/
建設期間	7 年	1 年
耐用年数	30年	30年
建設単価	30万円/kW	a_2 万円/kW
利 子 率	8%	
年経費率	20%	20%

表 2 電力需要の増加に関する前提条件
Table 2. Assumptions on demands for electricity.

初期時点の電力需要規模(最大)	3,500万 kW
初期時点の供給設備容量	3,850万 kW
需要の平均伸び率 u	3.9%
需要伸び率の標準偏差 σ_c	3.2%

図 1 折れ線近似された負荷持続曲線
Fig. 1. The load duration curve for electricity demands.

ただし、 σ_c については、後に示すように値を変化させて感度分析を行っている。このとき、 t 年後の需要 $D(t)$ は $t-1$ 年後の需要 $D(t-1)$ を用いて (1) 式のように表される。

$$\left. \begin{aligned} D(t) &= D(t-1)e^{u+\varepsilon} \\ \varepsilon &\in N(0, \sigma_c^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

従って、ピーク需要規模は対数正規分布に従う。

この場合、 T 年後の需要の予測は、上式の対数正規分布の積となる。

$$\left. \begin{aligned} D(t+T) &= D(t)e^{u+\zeta} \\ \zeta &\in N(0, T\sigma_c^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここでは、 ζ が T 個の独立正規確率変数 ε の和であるため、 $\zeta \in N(0, T\sigma_c^2)$ となる。つまり、 T 年後の需要もまた対数正規分布に従う。従って、 T 年後のピーク需要規模を x とすると、需要の確率密度変数 $f(x)$ は、以下のように表される。

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \times x \times T^{1/2} \times \sigma_c} \\ &\times \exp \left\{ -\frac{(\log x - \mu)^2}{2 \times T \sigma_c^2} \right\} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ただし、 $\mu = 3,500 \times \exp(u \times T)$

3. 最適規模構成の評価基準

〈3・1〉 評価基準式 電気事業者が t 年後の必要な供給設備の規模を決めるために、需要の予測に基づいてその時点での系統の総費用、すなわち固定費と可変費、および需給調整コストの合計が最小になることを最適規模構成決定の評価基準とする。すなわち、コスト評価基準は次式のようになる。

$$\begin{aligned} TC &= \gamma_1 \times C_1 \times a_1 \times \alpha + \gamma_2 \times C_2 \times a_2 \\ &\quad + V_1 \times F(C_1) + V_2 \times G(C_2) + C_s \\ &\longrightarrow \min \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ただし、 a_1, a_2 : 大規模、分散形電源の建設単価 (円/kW), C_1, C_2 : 大規模、分散形電源の総設備容量 (kW), $F(C_1), G(C_2)$: 大規模電源、分散形電源それぞれの設備容量によって決まる発電量 (kWh), γ_1, γ_2 : 大規模電源、分散形電源の経費率, α : 建設中の金利によるコスト増加率[(10)式参照], V_1, V_2 : 大規模電源、分散形電源の可変費 (円/kWh), C_s : 需給調整コスト (円)

ただし、需給調整コストは需給関係が逼迫して供給が需要に追いつかないと予測されるときに発生する。

表 1 に示したように、大規模電源は計画から運用開始までのリードタイムが (計画期間と運用期間を合せて) 合計 12 年かかるとしている。従って、大規模電源の計画は運用開始の 12 年前に決定する必要がある。そこで、第 4 章で結果を示す静学的な分析では、12 年後の大規模電源の最適設備容量を決定する問題を取扱う。その場合、(4) 式における C_1 が決定変数となる。一方、分散形電源のリードタイムは 1 年と仮定しているため、11 年後にその年までの需要の伸びを見たうえで決定することになる。従って、大規模電源の設備容量を決定する段階では、分散形電源の導入量は確率変数として与えられることになる。また、需要に不確実性があるため、それぞれの電源の可変費および供給不足コストもまた確率変数となる。それゆえ、静学的な分析では (4) 式の期待値が最小になることが評価基準となる。すなわち、(5) 式のようになる。

$$\begin{aligned} E(TC) &= E[\gamma_1 \times C_1 \times a_1 \times \alpha + \gamma_2 \times C_2 \times a_2 \\ &\quad + V_1 \times F(C_1) + V_2 \times G(C_2) + C_s] \\ &= \{\gamma_1 \times C_1 \times a_1 \times \alpha + \gamma_2 \times E[C_2] \times a_2 + V_1 \\ &\quad \times E[F(C_1)] + V_2 \times E[G(C_2)] + E[C_s]\} \\ &\dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

動学的な分析では、計画期間を 12 年後～20 年後ま

とし、期間中の累積費用の期待値が最小になることを評価基準とする。すなわち、 i 期における総費用を TC_i とすると、(6)式のような評価基準が得られる。

$$\begin{aligned} E[\sum TC_i] &= \sum_i E[TC_i] \\ &= \sum_i \{ \gamma_1 \times C_1(i) \times a_1 \times \alpha + \gamma_2 \times E[C_2(i)] \times a_2 \\ &\quad + V_1 \times E[F(C_1(i))] + V_2 \times E[G(C_2(i))] \\ &\quad + E[C_s(i)] \} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

ただし、ここで各年の大規模電源の設備容量は非減少でなければならないから、(7)式の制約が加わる。

$$C_1(i+1) \geq C_1(i) \quad (1 \leq i \leq n-1) \dots\dots\dots (7)$$

一方、分散形電源の各年の設備容量は、上に述べたように、確率変数としてしか与えられない。そのため、分散形電源については、設備容量の期待値が非減少でなければならないという制約((8)式)を加えた。

$$\begin{aligned} E[C_2(i+1)] &\geq E[C_2(i)] \quad (1 \leq i \leq n-1) \\ &\dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

(7)、(8)式の制約の下で、(6)式を最小にする大規模電源の設備容量 $[C_1(i), 1 \leq i \leq n-1]$ を決定する問題は多段決定問題に帰着し、最適性の原理より次式が成り立つ。

$$\begin{aligned} &\left\{ \sum_{i=1}^n E[TC(i)] \right\}_{\min} \\ &= \left[\left\{ \sum_{i=1}^{n-1} E[TC(i)] \right\}_{\min} + E[TC(n)] \right]_{\min} \\ &\dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

第5章で結果を示す動学的な分析においては、(6)式のような評価基準の下での多段決定問題を解くことになる。以下に、(4)～(9)式で変数として用いられた固定費、可変費、供給不足コストの算定方法を説明する。

〈3・2〉 固定費、可変費および供給不足コストの算定方法

(1) 金利計算 電源の固定費算出に際しては、建設中の金利によるコスト増加分(いわゆる建中利子)を算定しなければならない。この建中利子の算定には、表1に掲げたような建設期間と耐用年数の値を用いている。なお、分散形電源は建設期間が1年としているため、建中利子は発生しない。大規模電源の場合、建設開始後完了まで毎年同額の投資コストが必要であるとして、複利計算で以下のように金利によるコスト増分を算出している。

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{T-1} \frac{C_1}{T} \times a_1 \times (1+r)^j &= \frac{C_1}{T} \times a_1 \times \frac{(1+r)^T - 1}{r} \\ &= C_1 \times a_1 \times \alpha \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここで、 T : 建設年数、 r : 年利子率

図2 需要に対する大規模電源と分散形電源の分担
Fig. 2. Shares of large and small scale plants.

(2) 固定費、可変費および供給不足コストの算出 固定費および可変費の算定は以下の筋道で行う。まず、電力の負荷持続曲線を、1985年のA電力会社のデータを基に図1のように近似し、同図で表される電力需要を賄うことを考える。前述したように、大規模電源のリードタイムは12年と仮定しているから、12年後を考慮してその年の最適な建設(計画)容量を決定しなければならない。ただし、実際には計画の前倒しや建設期間の延長でリードタイムをある程度可変とすることができる。このような融通性は大規模電源の相対的価値を高めると考えられるが、この点をモデルに入入れることは今後の研究課題である。この場合、大規模電源のほうが分散形電源より可変費が低いので、図2のように大規模電源はベース部分を賄う。

一方、分散形電源のリードタイムは1年と仮定しているから、目標年の前年にその年の最適な設備容量を決定すればよい。従って、計画開始時点から11年後のピーク電力需要を x とすると、分散形電源の目標年(計画開始時点から12年後)における設備容量 C_2 は、 x の関数となる。系統全体の固定費は、 C_1 と $C_2(x)$ を用いて(11)式のように表される。系統全体の可変費は、 C_1 、 $C_2(x)$ および目標年におけるピーク電力需要 y を用いて、(12)式のように表される。ただし、関数 $S(y, C_1)$ は、図2においてピーク需要規模が y であるときのハッチ部分の面積を表し、それは、大規模電源による発電量(kWh)を意味する。

$$\begin{aligned} \text{固定費: } &a_1 \times C_1 \times \alpha \times \gamma_1 + a_2 \times C_2(x) \times \gamma_2 \\ &\dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{可変費: } &S(y, C_1) \times V_1 + \{ S(y, C_1 + C_2) \\ &\quad - S(y, C_1) \} \times V_2 \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

目標年におけるピーク電力需要 y は、11年後のピー

ーク電力需要 x の関数となる。 x, y の確率密度関数は、(3)式を基に(13), (14)式のように表される。

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \times x \times T^{1/2} \times \sigma_c} \times \exp \left\{ \frac{(\log x - \mu_1)^2}{2 \times T \sigma_c^2} \right\}$$

ただし、

$$\mu_1 = 3,500 \times \exp(u \times T), T = 11 \dots \dots (13)$$

$$g(y) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \times y \times \sigma_c} \exp \left\{ \frac{(\log y - \mu_2)^2}{2 \times \sigma_c^2} \right\}$$

ただし、

$$\mu_2 = x \times \exp(u) \dots \dots \dots (14)$$

最後に、 $C_1, C_2(x)$ および目標年におけるピーク電力需要 y から供給不足コストを導く。電力需要が、供給規模を上回ると予測した場合、電気事業者は大口需要家に負荷調整を要望し、調節する。その際のコストとしては、例えば厚生経済学における消費者余剰の概念を用いて、著者らが算出した例がある⁽²⁾。これは、大口産業需要家の規模、件数、需要の価格弾性値から需要曲線を与えることによって、算出できる。しかし、実際には価格弾性値は需要家によって異なること、需要量が0に近づくとき需要曲線が定義できないなど問題もある。そこで、ここでは単位供給不足量に対するコスト、 C_{su} (円/kWh) を仮定する。電力の供給不足コストに関しては多くの調査があり⁽⁸⁾、需要の種類などにより異なる。ここでは、すべての需要での供給不足コストを平均した現実的な値として $C_{su} = 1,000$ 円/kWh とする⁽⁹⁾。本研究では、需要の増加率の不確実性に焦点をあてているため、供給不足コストに関する感度分析は行っていないが、この点は今後の研究課題である。この場合、系統全体としてのある時点における供給不足コストは(14)式で表される。

$$C_s = \text{sgn}\{S(y, y) - S(y, C_1 + C_2)\} \{S(y, y) - S(y, C_1 + C_2)\} \times C_{su} \dots \dots \dots (15)$$

$$\text{ただし、sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \geq 0 \\ 0 & \text{if } x < 0 \end{cases}, C_{su} = 1,000$$

系統全体の固定費、可変費、供給不足コスト[それぞれ(11), (12), (15)式]と x, y の確率密度関数より、(5)式で示した総費用の期待値は、実際には(16)式のように表されることがわかる。

$$E(TC) = \int dx \left[f(x) \times \int dy \{ g(y) \times [a_1 \times C_1 \times \alpha \times \gamma_1 + a_2 \times C_2(x) \times \gamma_2 + S(y, C_1) \times V_1 + \{S(y, C_1 + C_2) - S(y, C_1)\} \times V_2 + \text{sgn}\{S(y, y) - S(y, C_1 + C_2)\} \{S(y, y) \right. \right.$$

$$\left. - S(y, C_1 + C_2)\} C_{su} \right\} \dots \dots \dots (16)$$

(13), (14)式を(16)式に代入することにより、静学的分析における評価基準値が得られる。また、各期における(16)式の値を算定することにより、動学的分析における評価基準値が得られる。

4. 静学的分析

以上のような定式化の下で、まず静学的な分析を行った。ただし、計算に用いたパラメータの値は表3のとおりである。

計算の結果、大規模電源の設備容量と分散形電源を含めた総費用の期待値の関係は、図3のようになった。図中で総費用の期待値が最小になる点が大規模電源の最適設備容量を与える。

分散形電源の建設単価を変化させた場合の結果を、図4に示す。また、総費用の期待値が最小となるときの大規模電源の総設備容量に対する比率の期待値を、図5に示す。分散形電源の建設単価が大きいくほど大規模電源の最適設備容量が大きくなり、その比率が高くなる。

表3 パラメータ値
Table 3. Values of parameters.

a_1	大規模電源の建設単価	300,000 ¥/kW
a_2	分散形電源の建設単価	パラメータ ¥/kW
γ_1	大規模電源の年経費率	0.20
γ_2	分散形電源の年経費率	0.20
α	建中利子によるコスト増加率	1.27
V_1	大規模電源の可変費	3.26 ¥/kWh
V_2	分散形電源の可変費	7.0 ¥/kWh
C_{su}	供給不足コスト	1,000 ¥/kWh
u	需要の平均伸び率	3.9%
σ_c	需要伸び率の標準偏差	3.2%

分散形電源の建設単価が 40 万円/kW の場合

図3 大規模電源の設備容量と総費用の期待値の関係

Fig. 3. The expected values of total costs as a function of the number of large scale plants.

図 4 大規模電源の設備容量と総費用の期待値の関係

Fig. 4. The expected values of total costs as a function of the number of large scale plants.

図 5 最適大規模電源の比率の期待値と分散形電源の建設単価の関係

Fig. 5. The optimal shares of large scale plants as a function of construction costs for small scale plants.

なることは当然である。図で、分散形電源の建設単価が36万円/kW以上になると、建中利子を考慮に入れても固定費が大規模電源を上回り、また可変費も〈3・2〉節で述べたように、分散形電源のほうが高い。しかし、図4、図5は、このような場合でも、将来の需要に不確実性がある場合には、大規模電源を総供給容量より若干少な目につくり、残りを分散形電源で補うほうが、経済的に有利であることを示唆している。

この結果が不確実性を考慮したためであるということを確認するために、 σ_c を変化させ結果を比較する。最適大規模電源の比率と σ_c の関係を図6に示す。 $\sigma_c=0$ で、分散形電源の建設単価が高い場合（40万円/kW以上）には、大規模電源の比率が100%となっても不思議ではないが、図6で100%となっていない。大規模電源は一基あたりの規模が110万kWであるため、需要増加量を大規模電源の単位規模である110万kWで除した剰余分（この場合は49万

図 6 最適大規模電源の比率の期待値と σ_c との関係

Fig. 6. The optimal share of large scale plants as a function of σ_c .

kW)を補うために一基増設するとむだが生ずる。そのために、わずかではあるが高コストの分散形電源が導入されているのである。

5. 動学的分析

実際の電源計画は20年程度の動的枠組みの中で議論されることが多い。静学的分析の結果として得られた大規模電源と分散形電源の分担は、動学的分析においても同様であろうか。この点を確認するため、第3章で述べた定式化の下での多段決定問題を解く。需要の増加については静学的分析と同様に $u=3.9\%$ 、 $\sigma_c=3.2\%$ と設定し、分散形電源の建設単価を変化させた場合の多段決定問題の解を図7に示す。

図7より、12年後の大規模電源の設備容量を、静学的分析の結果（図4参照）と比較すると、両者は等しくなっていることがわかる。従って、12年後の一断面のみにおける大規模電源と分散形電源の分担を考える場合には、静学的分析の結果は有効であるといえる。しかし、静学的分析では12年後以降の電源構成については、示唆を得ることはできない。図8は、大規模電源の最適比率の期待値の推移を表すが、これより最適比率の期待値は徐々に増加していくことがわかる。

次に、静学的分析と同じように不確実性がない場合と比較してみる。需要の不確実性がない場合の大規模電源の最適設備容量を求める問題は通常が多段決定問題に帰着する。基本的な定式化は不確実性がある場合と同様であり、前の定式化で期待値として扱っていた分散形電源の固定費、総可変費、供給不足コストを確定値として扱うことになる。分散形電源の建設単価が40万円/kWの場合について、確率的多段決定問題の解と（確定的）多段決定問題の解を比較した結果を図

図 7 大規模電源の最適設備容量の推移
Fig.7. The optimal capacity of large scale plants.

図 8 大規模電源の最適な比率の期待値の推移
Fig.8. The optimal share of large scale plants.

9に、各々の場合の累積費用の期待値を図10に示す。

図9より、大規模電源の最適規模は、 σ_c が1.6~4.8%ではあまり変化しないことがわかる。これは、需要の不確実性が大きいほど必要な電源の総供給容量が大きくなることと、大規模電源が相対的に不利になって、その全体に対する割合が小さくなることが相殺するためである。また、当然のことながら、不確実性が大きいほど総費用の期待値が劣化することが図10よりわかる。目標最終年次(計画開始から20年後)における大規模電源の最適比率の期待値と σ_c の関係を図11に示す。需要の不確実性を考慮した計画と考慮しない場合の計画では、特に分散形電源の必要性に相当の差がでることがわかる。〈2・2〉節(2)項で述べたように、1980~1987年の電力需要のデータでは $\sigma_c=3.2\%$ であるから、それに対応する分散形電源の比率は20年後において約28%になる。

これらの結果から、需要の不確実性を考慮した計画では、将来需要の中で不確実性の大きい部分を分散形電源で補い、確実な部分を大規模電源で賄うという、直観的に理解しやすい解が得られていることがわかる。すなわち、低コストだがリードタイムの長い大規模電源と、高コストだがリードタイムの短い分散形電

図 9 σ_c が変化した場合の最適設備容量の推移

Fig.9. The optimal capacity of large scale plants as a function of σ_c .

図 10 需要の不確実性が変化した場合の累積費用の期待値の推移

Fig.10. The expected values of accumulated total costs as functions of σ_c .

図 11 目標最終年次における大規模電源の最適比率の期待値と σ_c の関係

Fig.11. The optimal share of large scale plants as a function of σ_c .

源が、相補って需要の不確実性に対応しているわけである。

6. む す び

本研究では、電源における規模の経済性の問題に着

目し、近年燃料電池など技術の進歩が目覚ましい分散形電源によって規模の不経済を補うことを考えた。特に将来の電力需要に不確実性がある場合に、リードタイムが長い大規模電源に対し、比較的短期間で建設できると考えられる分散形電源の利点を定量的に評価した。具体的には、大規模と分散形電源の二種で成り立つ単純化された電源構成モデルを構築した。まず、静学的な分析において目標年度の電源の総費用の期待値を最小化するような電源構成を求めた。これを需要の不確実性がない場合と比較し、不確実性がある場合に分散形電源が割高でも重要な役割を果たし得ることを確認した。次に、動学的な枠組みにおいて累積費用の期待値を最小化する電源構成の推移を確率的多段決定問題の解として求めた。これらの分析から、低コストだがリードタイムの長い大規模電源と、高コストだがリードタイムの短い分散形電源が、相補って需要の不確実性に対応しうることが確認された。

現実には電源は二種類以上あり、需要の不確実性への対応策も、本研究で示した以外に様々なものが考えられる。その場合でも、リードタイムの短い分散形電源は重要な役割を果たし得るであろう。また、現在ピーク用電源としては石油火力発電などが用いられているが、分散形電源をコージェネレーションとして用い、一部でも石油火力に代替することにより、システム全体としても効率が高まり、地球温暖化問題への対策にもつながる。その意味からも分散形電源の系統への導入を検討しなければならない。本研究の結果は、このような特色をもつ分散形電源を、積極的に導入する一つの有効な根拠を与え得るものである。

今後は、電源構成のモデルをより現実に近いに近づけていきたい。また、需要のみならず（電源の計画外事故などによる）供給の不確実性が電源構成に与える影響も検討していく予定である。

（平成2年12月25日受付、同3年4月8日再受付）

文 献

- (1) 松橋・武智・林・茅：「発電所における規模の経済性について」、エネルギー資源研究会第7回講演論文集(昭63)
- (2) Y. Kaya, T. Hayashi & X. Lu: "Economic Evaluation of Flexibility of Small Scale Electric Power Plants", IFAC 10th World Conference(1987)
- (3) R. R. Booth: "Optimal Approach to Generation Planning Considering Uncertainty", IEEE, Trans. Power Apparatus Syst., PAS-91, 70(1972)
- (4) J. A. Bloom: "Long Range Generation Planning Using Decomposition and Probabilistic Simulations", *ibid.*, PAS-101, 797(1982)
- (5) 喜多・手塚・西川・中野：「不確実な需要下での小規模電源の可能性について」、第7回エネルギーシステム経済コンファレンス講演論文集, p. 171 (平2)
- (6) 森：「電源設備のスケールメリットと最適配置について」、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, p.41(昭63)

- (7) 近藤・茅：「季時別料金制度下での自家発電最適運用の基礎的検討」, 平元電気学会会大, 1094
- (8) 西野・植木・牧野：「わが国における停電コストの評価」, 電中研報告, 582007(昭57)
- (9) K. Yamaji: "Applications of the Over/Under Model to a Japanese Electric Utility", CRIEPI Report, 電力中央研究所, E 584005(昭59)

松橋 隆 治 (正員)

平成2年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。平成2年4月同大学資源開発工学科助手。工学博士。エネルギーシステム、地球温暖化問題を対象とした研究に従事。エネルギー資源学会会員。

石 谷 久 (正員)

昭和44年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年同大学宇宙航空研究所勤務。同研究所講師、助教授を経て56年より同大学工学部、63年同大学先端科学技術研究センター勤務。64年東京大学工学部資源開発工学科教授。工学博士。制御、システム理論の応用に関する研究に従事。計測自動制御学会、エネルギー資源学会、IEEE 会員。

林 武 人 (正員)

昭和49年3月東京都立大学工学部電気工学科卒業。39年4月東京大学工学部電気工学科勤務、49年4月同助手。システム制御工学、特にエネルギーシステムを対象とした研究に従事。エネルギー資源学会会員。

茅 陽 一 (正員)

昭和37年3月東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科講師、38年4月同助教授。53年7月同教授となり、現在に至る。工学博士。システム制御工学、特に社会システム、エネルギーシステムを対象とした研究に従事。電子情報通信学会、計測自動制御学会、エネルギー資源学会、IEEE 会員。