電源計画における不確定因子の数量化と それに基づく最適化手法

正員 藤井 康正 (東京大)

正員 茅 陽一 (東京大)

A New Method for Power Generation Planning and Problems of Uncertainty

Yasumasa Fujii, Member, Yoichi Kaya, Member (University of Tokyo)

This paper presents a new method for power generation planning which takes into account uncertainties of various system parameters as a part of the criterion function. The criterion function involves both the expected values of total system costs and the cost variances of different power plants.

Previously the authors proposed to evaluate these cost variances from the existing power system plans in the form of the solutions to the inverse optimization problem and then applied this procedure to the planning of power system in Japan. However because of the correlation between fuel and facility costs, the costs variances couldn't be determined as specific values.

To overcome this difficulty here, the authors now introduce hydro-power plants into the model as the so-called non-risky elements and focus on the expenditure shares rather than the plant capacity shares, which enables us to obtain more reasonable results.

This improved methodology is applied and the derived cost variances are shown. Further, using the resultant cost variances the authors make Pareto-optimal power generation plans and also demonstrate the robustness of the method to price fluctuations.

キーワード：電源計画，不確定性，コスト分散，最適化

1. ま え が き

近年エネルギー問題が、我々の将来に対する大きな課題として再び注目を集めている。従来のエネルギー問題が主に石油資源の枯渇や供給不安定性への危機感から生じていたのに対し、今回は原子力発電所をめぐるパブリックアクセプタンス問題や化石燃料の燃焼に伴う二酸化炭素による地球温暖化問題もその原因となっている。こういった状況下で、将来の電源計画の策定にあたっては、石油を中心とする燃料価格の変化やその調達、更には電源の立地条件および環境問題などのコスト以外の因子を考慮することが必要とされ、そしてそのための新しい計画手法の構築が要求されている。

このような不確定な因子を考慮する方法として、著者らは、これらの因子が将来の発電コストの分散として明示的に表現されるとし、計画の評価基準として総発電コストの期待値と分散の二次加重和を採るという手法を提案した⁽¹⁾。そこでは既に策定された電源計画がこの評価基準下での最適解であるとみなすことにより、計画立案者が暗黙裡に見積もったコスト分散の逆算を試み、更に得られた結果を基にこれらの分散が計画値に及ぼす影響などの比較検討を行った。しかしながら、コスト分散の逆算にあたっては、各種の分散間の関係式こそ得られたものの、それぞれの分散の値自身は特定することができないという問題が残されていた。

そこで本論文では、まずこの問題を解決するため

に、いわゆる無危険要素のモデルへの導入や、逆問題における変数の削減などにより、各コスト分散を数値として求めることを試みる。そして、新たに一般化された評価基準を用いてコスト分散の理論的な解釈を行う。更に論文の後半では逆算されたコスト分散を基にパレート最適な電源計画を策定すると共に、計画値のロバスト性に関して期待値のみを考慮した純経済的な計画との比較を実証的にを行い本手法の有効性を検討する。

2. コスト分散の推定とその解釈

〈2・1〉 コスト分散の定義 各種電源に関する将来の不確定性が、それぞれの発電コストの分散で等価的に表現されると考える。すなわち、ここで述べる分散とは、過去の燃料価格の分散そのものや、主に水力発電所の建設単価に見られる立地条件の違いによるばらつきなどの、いわゆる統計的なデータから算出される分散ではなく、計画立案者が経験的に抱いた各種電源に関する将来像を反映するパラメータと定義する。具体的には、(1)計画立案者が想定した将来コストの予想値のばらつき、(2)計画立案者が考慮にとった社会経済的な制約、を表現するものである。

ところで、発電コストは主に燃料費と建設費の二つの要素から構成され、そして両者の不確定性は異なる要因から生じていると考えるのが普通である。従って、コスト分散を定義するにあたり、燃料費と建設費のコスト分散を独立に取扱うことが理論的には望ましい。しかし、各種電源の発電電力量は負荷持続曲線を介して各種電源の設備容量と密接にリンクしており、燃料費と建設費との関係は決して独立ではないため、これらの分散を独立に分析することは極めて困難である。文献(1)の推定結果が、各分散間の関係式を求めただけにとどまったのは、まさにこの理由によるのである。その後著者らは、この問題の解決のために複数時点の計画値の分析を行い⁽²⁾、利用可能な情報を増やして各種電源の燃料費と建設費の両分散の分離を試みた。しかし、そこでの結果は燃料費と建設費との相関、すなわち共分散の考慮の必要性を示唆するものであった。このことは推定されるべき変数の更なる増加を意味しており、事実上、燃料費と建設費の両分散を分離して論ずることが不可能であるという結論を得た。

そこで本論文では視点を変えて、計画立案者は各種電源別に燃料費と建設費の両者を総合して、それぞれの電源の経済性を評価しているものと仮定する。これは、電源構成それ自体よりも、各種電源別のコストシ

ェアに焦点を当てることを意味している。従って、ここでは燃料費と建設費のコスト分散の区別は行わず、燃料費と建設費の和である各種電源別に要するコストに注目する。そして、その不確定性を反映する分散を変数として導入し分析を試みる。

〈2・2〉 モデルの定式化 本論文では、後述の逆問題の適用対象として電力中央研究所が1986年に発表した我国の電源計画⁽³⁾を選び、2000年の電源構成に対して分析を施す。2000年に至る経過時点の電源計画が明らかではなく、動学的な分析が困難なため、ここでは静学的なモデルを定式化して分析を行う。

ここで、最適電源計画とは、所与の総供給力の下で、以下の評価基準 J が最小となる電源構成を求めることと解釈する。

[評価基準]

$$J = J(E[C_i], \text{Var}[C_i]) \longrightarrow \min \dots\dots\dots (1)$$

[制約条件] n 種の電源があるとする

$$F_t (\equiv \sum_{i=1}^n F_i) = F_{to} \quad (\text{一定}) \dots\dots\dots (2)$$

$$F_i = u_i(K_{oi} + K_i) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $E[C_i]$: 総発電コストの期待値、
 $\text{Var}[C_i]$: 総発電コストの分散、 F_i : 第 i 種電源の供給力、 F_t : 総供給力、 K_{oi} : 既設設備容量、 K_i : 新設設備容量、 u_i : 稼働率

$E[C_t]$, $\text{Var}[C_t]$ (以後、それぞれ E , Var と表記) は、種別発電コスト C_i を用いると、次のように書ける。ここでは既設設備に要するコストには不確定性はないものと想定している。

$$C_i = g_i K_i \mu_{hi} + D_i \mu_{di} \dots\dots\dots (4)$$

$$E = \sum_{i=1}^n C_i + C_o \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Var} = \sum_{i=1}^n C_i^2 \sigma_i^2 \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 g_i : 年経費率、 D_i : 年間発電電力量、 μ_{hi} : 建設単価の期待値、 μ_{di} : 燃料単価の期待値、 C_o : 既設設備費、 σ_i^2 : 規格化コスト分散

ここで、(1)式中の評価関数 J は、この段階では具体的な関数は考えず一般化したままで議論を進める。なお、必要な条件は後述する。

次に、(4)式の種別発電コスト C_i を計算するためには対象時点の各種電源の運用法を決める必要がある。揚水発電所の運用や、各種電源の補修率の季節変化を考慮すると、日負荷持続曲線に基づく算定が望まれる。だが本論文では、後述するコスト分散の理論的解釈やそのための解析的演算を容易にするため、年負

図 1 年負荷持続曲線と電源運用
Fig. 1. Annual load duration curve and plants operation.

荷持続曲線を用いて計算を行う。揚水を除く電源は、可変費の安価なものに、より高い優先順位を付け、順に稼働させるものとする。また、各種の火力発電所に関してはそれぞれの最低出力分を考慮し、原子力発電所については負荷追従運転も行われるものと想定する。

揚水発電所は、ピーク時の負荷対応揚水と軽負荷時の余剰揚水のみを考慮し、いわゆる経済揚水はモデルには導入していない。それは、実際の貯水池の容量を考えると経済揚水が行えるほどの余裕はあまりなく、揚水発電所の運転要因のほとんどが余剰対応と考えられるからである。揚水発電所の特性としては、揚水時の消費電力と揚発時の発電電力の定格値は等しいと考え、その一方で電力量に関しては、途中の損失を考慮してその運用効率は 70 % と想定する。

ところで、文献(1)において考慮した供給不足コストは、このコンパクトなモデルによっては評価が困難なため、その導入は見合わせることにした。

負荷持続曲線の形状は昭和 58 年度のものを参考に、西暦 2000 年でも同形と仮定して、先端部は三次曲線、その他は直線で表現する。(図 1) この負荷持続曲線を介して、発電電力量 $\{D_i\}$ は、供給力 $\{F_i\}$ の関数として表され、更に(4)式より、各種発電コスト $\{C_i\}$ もその関数として表記される。すなわち、

$$C = C(F) \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$C = (C_1, C_2, \dots, C_n)^T$$

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_n)^T$$

と書ける。ここで、ヤコビアンが次のようになるとき、

$$\frac{\partial(C_1, C_2, \dots, C_n)}{\partial(F_1, F_2, \dots, F_n)} \neq 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

計画値の近傍では逆関数が存在して、

$$F = F(C) \quad \dots\dots\dots (9)$$

と書ける。

結局、評価基準(1)式が制約条件(2)式の下で極小となるには、ラグランジアン関数 L を次のようにおくと、

$$L(C, \lambda) = J\{E[C], \text{Var}[C]\} + \lambda\{s^T F(C) - F_{to}\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 λ : ラグランジュ未定乗数、 $s^T = (1, 1, \dots, 1)$

L が以下の連立方程式を満足することが

$$\frac{\partial L}{\partial C} = 0 \quad \text{および} \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

必要条件となる。

ここで注意すべきことは、(11)式より求められる最適解は、立地制約や燃料入手制約などの社会経済的な制約条件を、不等式などを用いて陽には考慮していないことである。本論文では、これらの制約条件も(6)式中のコスト分散 σ_i^2 の大きさで等価的に表現されると考えるのである。

〈2・3〉 逆問題によるコスト分散の推定 本論文における逆問題とは、既に策定された電源計画が(1)式の評価基準 J を最小にする最適解であると想定して、逆に評価基準 J のパラメータである各種電源のコスト分散を推定することをいう。

ここで分散の逆算に先立ち、重要な想定を行う。評価基準として、期待値と分散の両者を考慮することは、現代の投資理論では常識となっている。ところで、この理論は資産選択の分析に広く用いられているが、そこでは無危険資産(現金)の概念を導入することで、最適解が一意に定まる特殊な系が形成されている⁽⁴⁾。

そこで本論文では、資本市場における現金のように効用は少ないがリスクをもたない要素、いわゆる無危険要素として、一般水力発電所を想定する。一般水力発電所は他種電源と比較して、その建設単価は割高であり経済的意味では効用は少ないものの、純国産であるためセキュリティ面では問題はなく、立地に関しても地域の合意形成は比較的容易で社会経済的な制約を受けにくいといった特徴を有しているからである。

次に、コスト分散の逆算を行う。最適解の必要条件である(11)式は、次のように書ける。

$$\frac{\partial L}{\partial C} = \frac{\partial J}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial C} + \frac{\partial J}{\partial \text{Var}} \frac{\partial \text{Var}}{\partial C} + \lambda \left[\frac{\partial F}{\partial C} \right] s \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、総コストの期待値 E は

$$E = \sum_{i=1}^n C_i + C_o = s^T C + C_o \quad \dots\dots\dots (13)$$

であるから、(12)式の右辺第1項は、

$$\frac{\partial J}{\partial E} \frac{\partial E}{\partial C} = \frac{\partial J}{\partial E} s \dots\dots\dots (14)$$

となる。第2項に関しても V を共分散行列とすると、

$$Var = C^T V C \dots\dots\dots (15)$$

であるから、従って、

$$\frac{\partial J}{\partial Var} \frac{\partial Var}{\partial C} = \frac{\partial J}{\partial Var} 2VC \dots\dots\dots (16)$$

そして、第3項については

$$\left[\frac{\partial F}{\partial C} \right] s^T = \left[\frac{\partial F_t}{\partial C_t}, \dots, \frac{\partial F_t}{\partial C_n} \right]^T \dots\dots\dots (17)$$

となる。ここで、各種電源間の共分散は無視できるものとする、行列 V は対角行列となり、(12)式は各種電源別に以下のように書ける。

$$\frac{\partial J}{\partial E} + 2 \frac{\partial J}{\partial Var} \sigma_i^2 C_i + \lambda \frac{\partial F_t}{\partial C_i} = 0$$

$$(i=1, \dots, n) \dots\dots\dots (18)$$

そして、第 n 種電源が一般水力であるとする、すなわちコスト分散が0である無危険要素であるとして、(18)式からラグランジュ未定乗数が求められる。

$$\lambda = - \left[\frac{\partial J}{\partial E} \right] / \left[\frac{\partial F_t}{\partial C_n} \right] \dots\dots\dots (19)$$

更に評価基準 J は極値をとるのであるから、

$$dJ = \frac{\partial J}{\partial E} dE + \frac{\partial J}{\partial Var} dVar = 0 \dots\dots\dots (20)$$

が成立し、次式が導かれる。

$$\left[\frac{\partial J}{\partial Var} \right] / \left[\frac{\partial J}{\partial E} \right]$$

$$= - \frac{dE}{dVar} = - \frac{1}{2E} \frac{dE^2}{dVar} \dots\dots\dots (21)$$

(19)、(21)式を(18)式に代入すると以下のようになる。

$$\frac{\partial F_t}{\partial C_i} = \frac{\partial F_t}{\partial C_n} \{ S_i w \sigma_i^2 + 1 \} \dots\dots\dots (22)$$

$$S_i = \frac{C_i}{E} \dots\dots\dots (23)$$

$$w = - \frac{dE^2}{dVar} \dots\dots\dots (24)$$

ただし、 S_i : i 種電源のコストシェア、 w : 期待値の2乗と分散との間の限界代替率

ここで、 w はこの計画がコストの期待値と分散を共に小さくしようとする多目的計画であることから、正值である必要がある。またこのことは、(21)式より一般化された評価基準 J の形に対して、ある種の制約を課すことがわかる。しかし、 w に関しては符号はともかく、その値を特定することは不可能なため、以降 $w \sigma_i^2$ をもって“コスト分散”と呼ぶことに

する。

(22)式において $w \sigma_i^2$ 以外の変数の値を、既に策定された計画の値を用いて計算することにより、コスト分散を算出することができる。

〈2・4〉 我が国の電源計画への適用

電力中央研究所が1986年に発表した西暦2000年の電源構成の展望(現実シナリオ)を対象にこの逆問題を適用する。ただし、ここでは揚水発電所および地熱発電所は最適化の対象から除外して考える。揚水発電所はエネルギー貯蔵設備であるため、他種電源とはかなり異なった視点からその開発計画が立案されていると考えられるからである。また地熱発電所に関しては、電源容量も小さく、その本格的な運用は西暦2000年以降になると考えられるからである。

そこで、まず(22)式の意味するところを考えてみる。この式の左辺は、効用が総供給力 F_t に比例すると考えると、これはその導関数であるから、 i 種電源へ投資することの限界効用と解釈できる。また、電源種別のコストシェアとコスト分散の積は、それぞれの限界効用が大きいほど大きな値をとることがわかる。

次に、図2には表1の前提条件の下で各種電源の限界効用を計算した結果を示す。もし、電源構成が経済的に最適であるなら、全種類の電源に関してこの限界効用は次式に見るように互いに等しくなるはずで

図2 電源別の限界効用
Fig. 2. Marginal utilities by plant type.

表1 2000年における電源計画と諸単価
Table 1. Power generation plan in the year 2000 and the unit costs of fuels and facilities of each type.

電源種類	2000年の電源計画		各種単価(名目値)	
	電源容量 (万kW)	発電電力量 (億kWh)	燃料単価 (円/kWh)	建設単価 (万円/kW)
石油火力	4500	1170	22.1	18.6
LNG火力	4550	1800	18.6	24.3
石炭火力	2550	1560	9.3	28.6
原子力	5600	3680	5.1	38.6
一般水力	2200	930	—	84.4

図3 推定された規格化コスト分散
Fig. 3. Estimated values of normalized cost variances.

ある。

$$\frac{\partial F_t}{\partial C_1} = \frac{\partial F_t}{\partial C_2} = \dots = \frac{\partial F_t}{\partial C_n} \quad (25)$$

ところが、図2のグラフの高さに見るように、各種電源の経済的圧力は、実際の計画では必ずしも平衡がとれているわけではない。しかし、計画立案者がこの電源構成を最適構成と考えているとするならば、逆に経済性に優れている電源（石炭火力、原子力）の限界効用を、実際には最も経済性に劣る電源（この場合、新設の一般水力）と同程度とみなしていると解釈できる。

図2中の棒グラフの薄色の部分は、(22)式の σ_i^2 を含む項に相当し、従ってコスト分散はこの限界効用の割引の程度を示すパラメータであると解釈できる。(22)式からこれらのコスト分散($w\sigma_i^2$)を計算した結果を図3に示す。

図3の値は分散としてはかなり大きく思われるが、実際には限界代替率 w を含んでおり、そのために大きく見積られていると考えられる。この結果からわかることを簡単に取りまとめると次のようになる。

(1) 石炭火力、原子力の両コスト分散は相対的に大きく算出されている。このことは、計画立案者がそれぞれ環境問題、パブリックアクセプタンス問題を考慮にとって、純経済的な視点から見て望まれる値よりも小さめに計画したことを反映していると考えられる。

(2) LNG火力のコスト分散は他の電源よりも比較的小さく出ているが、これはコストの不確定性が小さく見積られていることを意味しており、LNGが“take or pay”の原則に従って輸入されていることを考えると理解できる。

3. 不確定性を考慮した電源計画

〈3・1〉 順問題の定式化 前章において推定されたコスト分散を基に、不確定性を明示的な形で考慮した電源計画の立案を試みる（前章の逆問題に対比して

順問題と呼ぶ）。

(1) 評価基準 順問題においては、評価基準 J の関数形を特定する必要がある。ここでは、(24)式の期待値と分散の限界代替率 w が、期待値と分散の関数ではなく、ただの定数となる最も簡便な形である期待値と分散の二次加重和を評価基準として採用する。

$$J = E^2 + wVar \rightarrow \min \quad (26)$$

(2) 一般水力発電所 将来の不確定性に起因するコスト分散をもたない要素として、一般水力発電所をモデルに取入れた。順問題では、その建設単価に関しては他の電源とは異なり、開発が進むにつれてエスカレートしていくことも考慮に入れる。これは、建設単価の平均値がおよそ60万円/kWである現時点においても、単価が270万円/kWもする発電所が建設されつつあること⁽⁵⁾、そして今後ますます小規模なものの建設が増えることを考慮すると、開発可能な水力資源の減少に伴いその建設単価は最終的には現在の数倍のレベルに達すると考えられるからである。本論文では、開発容量の増加に従い、その建設単価は指数関数的に増加し、最終的には約5倍になると想定している。

(3) 最適化手法 本モデルでは評価基準 J の偏導関数が解析的に得られるのでDavidon-Fletcher-Powell (DFP)法により最適化を行う。

この問題は、(2)式の等号制約条件下の最適化問題であるが、この式よりある一つの変数を残りの変数の線形結合として表現することで、この問題は独立変数が一つ減った無制約の最適化問題へと帰着できる。

また、順問題では次の(27)式に見る不等式制約条件も考慮する必要があるが、最適解はほとんどの場合端点になることから、収束計算の過程で境界にある程度接近した変数があれば、それには境界値(=0)を代入し、以後その変数は定数として扱う方法で対処する。

$$K_i \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (27)$$

〈3・2〉 パレート最適な電源構成 この順問題モデルと前章で推定されたコスト分散を用いて、パレート最適となる電源構成を導く。この問題は、総発電コストの期待値と分散に関する多目的計画であり、そのパレート解は、(26)式の評価基準 J の限界代替率 w を変化させて最適化を行うことで算出できる。ここでは、分析対象とした電源計画が最適解となるような w を基準として、それを1/20倍から20倍まで変化させて計算を行った。図4には最適電源構成の推移を、図5には総発電コストの期待値と分散の関係を示

図 4 パレート最適な電源構成
Fig. 4. Pareto-optimal generation mix.

図 5 パレート最適となる総発電コスト
の期待値と分散
Fig. 5. Pareto - optimal solutions of
expected value of the total cost and its
variance.

す。ただし、図 5 中の○印の点は、分析対象とした電源計画の総発電コストの期待値と推定された分散を表している。

これらの結果から以下のことがわかる。

(1) 限界代替率 w が大きくなると、すなわち不確実性を重視すると、当然のことながらコスト分散が小さく推定された LNG 火力や石油火力のシェアが増大し、逆に分散が大きく推定された原子力や石炭火力のシェアは減少する。また図 5 より、総発電コストの期待値は増加し、コスト分散は減少する。

(2) 計算結果より判断すると、図 5 に見るように、分析対象とした電源計画はほとんど期待値しか考慮に入れない計画 (w を 1/20 倍にしたとき) に比べ、総発電コストの分散を約半分 (標準偏差では約 7 割) にまで抑制していることがうかがえる。

以上、推定されたコスト分散に基づいてパレート最適な電源構成を導いたが、このことにより、従来漠然となされることの多かった、将来の不透明さの増加に伴う計画値の修正などに対して、ある一定の論理を提供することが可能となったと言える。

〈3・3〉 計画のロバスト性 次に、燃料費などの

図 6 原子力発電所の建設単価が変動した場合の各種電源別コストの変化
Fig. 6. Change in total costs of power plants of each type when the unit facility cost of nuclear power varies from 70 % to 130 % of the value listed in Table 1.

各種単価の変動に対する最適解の挙動を調べる。そこで、本手法による計画と純経済的な計画 (評価基準は $J=E^2$) との比較を行う。ここでは、コスト分散が大きく推定された原子力の建設単価と、それとは対照的に小さく推定された LNG 火力の燃料単価の変動に関して実証的に検討を行う。

まず図 6 には、原子力発電所の建設単価の期待値を表 1 に記載された値の 70% から 130% まで変化させたときの最適解の推移を示す。これより以下のことがわかる。

(1) 本手法による計画は、価格の変化に対して比較的緩やかな推移を示している。一方純経済的な計画では、本論文の数値例では石炭火力と原子力の経済性が接近しているため、途中急激な変化が見られる。

(2) 純経済的な計画では、最も安価な電源だけに投資を行うという、いわゆる all or nothing 的な結果となりがちであるが、本手法による計画は必ずしも経済的ではない電源に対しても、コスト以外の面で優れていれば、ある程度のシェアが与えられる結果となる。

このように本手法による計画は、前提条件の変化に対して比較的安定した結果をもたらす、また投資が特定の種類の電源に集中することを回避し、リスク分散の効果も持合せていることがわかる。

次に、各種単価の変動に対する総発電コストのロバスト性について検討する。ここで、計画手法のロバスト性の指標として以下の関数 R を提案する。(28) 式中の P は、各種電源の燃料単価と建設単価を要素とする価格ベクトルであり、 K は各種電源の設備容量を要素とする電源構成ベクトルである。ここでも、各種電源の電力量は電源容量 K の関数として表され

るとする。

$$R(P; P_e) = C_i[P, K(P_e)] - C_i[P, K(P)] \dots (28)$$

ただし、 P :各種単価の将来における実現値、 P_e :各種単価の期待値、 $K(P)$:各種単価 P の下で評価基準 J を最小にする電源構成、 $C_i[P, K]$:各種単価 P の下で電源構成が K であるときの総発電コスト

この $R(P; P_e)$ (以後、 R 値と表記) は、ある評価基準 J の下で、将来の各種単価を P_e と予想したにもかかわらず、実際には P となってしまったことによる損失であり、これはいわば計画立案者が予測を外したために感じる後悔の程度を示すものと考えられる。すなわち、この R 値が小さく、その変動が少ないほどロバストな計画手法であると言える。

図7には原子力の建設単価の実現値を、図8にはLNG火力の燃料単価の実現値をそれぞれ期待値の70%から130%まで変化させたときの R 値の推移を示す。ただし、ここでは残りの各種単価の実現値はそ

図7 原子力発電所の建設単価の実現値を変化させた場合の R 値の推移
Fig.7. Variations in the values of R when the future facility cost of nuclear power varies from 70% to 130% of the expected value.

図8 LNG火力発電所の燃料単価の実現値を変化させた場合の R 値の推移
Fig.8. Variations in the values of R when the future price of natural gas varies from 70% to 130% of the expected value.

れぞれの期待値と一致したものとしている。

図7に見るように、原子力発電所の建設単価の上昇に対して、本手法による計画はかなり良い応答を示している。計算した範囲内において、 R 値はほぼ一定値に保たれ、しかも負値となっている。しかし建設単価の下落に対しては、その R 値の増加は著しく、純経済的な計画のほうが良い挙動を示している。このように、本手法による計画は、価格の変動に対して非対称な応答を示し、建設単価の下落による損失よりも上昇によるそれを重視する、いわゆる危機回避形の計画となっていることがわかる。

次に、図8からはLNG火力の燃料費の変動に対して、純経済的な計画の R 値がほとんど一定であるのに比べ、本手法による計画の R 値は大きく変化してしまっていることがわかる。しかしながら、本論文では前述したように、LNG火力のコスト分散は小さく、従ってその価格変動も小さいと想定しているので、実際には本手法による計画が不利になる事態が起こることは極めて少ないと考えられる。よって、ここでの結果は、決して本手法の有効性を減ずる理由とはなり得ないのである。

また、図7、図8に見るように、価格変動に対するロバスト性を議論するにあたっては、 R 値の $P=P_e$ 付近での導関数の値が重要な情報となることがわかる。

R 値の第 i 種の単価についての2階の導関数が正となるとき(本手法による計画では、すべての種類の単価について成立している)。

$$\partial^2 R / \partial P_i^2 > 0 \dots \dots \dots (29)$$

その1階の導関数が、次のように負値となれば、

$$\partial R / \partial P_i < 0 \dots \dots \dots (30)$$

図7の実線のグラフに見るように、 P_i の上昇に対して比較的広範囲で、 R 値の増加と変動との制御が期待できることがわかる。表2には、(31)式を用いて計算した R 値の1階の導関数の $P=P_e$ における値を示す(各値はそれぞれの対応する単価と C_i とで規格化されている。また、純経済的な計画では当然のこと

表2 規格化された R の1階の導関数
Table 2. Normalized derivatives of R with respect to prices of each kind.

	燃料単価	建設単価
石油火力	0.0559	0.0136
LNG火力	0.1649	0.0698
石炭火力	-0.0524	-0.0528
原子力	-0.0733	-0.1388
一般水力	—	0.0116

ながら0となるので省略する)。

$$\frac{\partial R}{\partial P} = \left[\frac{\partial C_t}{\partial K} \right]^T \left[\frac{\partial^2 J}{\partial K^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial^2 J}{\partial K \partial P} \right] \dots\dots (31)$$

コスト分散が大きいと想定した石炭火力と原子力に関する諸値はすべて負となっている。石炭火力に関しても図7に見るような応答が期待できることがわかる。

以上のことから、本手法による計画では不確実性をコスト分散として明示的に取入れることにより、それぞれの電源がもつ不確実性の大きさに応じて、必要とされるロバスト性がそれぞれに対して与えられることがわかる。

4. ま と め

本論文では、将来の不確実性が各種電源のコスト分散として明示的に表現できるとし、計画の評価基準に総発電コストの期待値と分散をとる手法を提案した。そこではまず、逆問題によって既に策定された電源計画から、各種電源のコスト分散を逆算し、計画立案者が暗黙に考慮に入れた不確実性を数値として明らかにした。そして、これらの推定されたコスト分散に基づき、通常の最適化問題を解くことにより、パレート最適な電源計画を導出した。更に、各種単価の変動に対する計画値のロバスト性の検討を行い、本手法の有効性を示した。

これらの成果により、不確実性下の電源計画手法の確立に幾らかの貢献ができれば幸いである。

なお本研究において、電力中央研究所 山地憲治氏、東京理科大学 森 俊介氏、埼玉大学 室田泰弘氏には、有益な御助言を受けたことを記して謝辞に代える。

(平成元年12月25日受付)

文 献

- (1) 茅・林・呂：「不確実性を考慮した新しい電源計画モデル」, 電学論C, 109, 253 (平元-4)
- (2) 藤井・茅：「不確実性を考慮した電源計画」, 平元電気学会大会, p. 1021
- (3) 電力中央研究所：21世紀経済社会の展望とエネルギー・電力需給 (昭61)
- (4) 桐谷：資産選択の現代理論, p. 68 (昭61) 東洋経済新報社
- (5) 通産省資源エネルギー庁公益事業部：電源開発の概要, p. 136 (昭63)

付 録

(31)式の導出過程

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial P} &= \frac{\partial C_t}{\partial P} + \left(\frac{\partial C_t}{\partial P} + \left[\frac{\partial C_t}{\partial K} \right]^T \left[\frac{\partial K}{\partial P} \right] \right) \\ &= - \left[\frac{\partial C_t}{\partial K} \right]^T \left[\frac{\partial K}{\partial P} \right] \dots\dots\dots (付1) \end{aligned}$$

ところで、 K は J を最小にするのであるから

$$\frac{\partial J(P, K)}{\partial K} = 0 \dots\dots\dots (付2)$$

が成立する。ここで、(付2)式を P で微分すると

$$\frac{\partial^2 J}{\partial K \partial P} + \left[\frac{\partial^2 J}{\partial K^2} \right] \left[\frac{\partial K}{\partial P} \right] = 0 \dots\dots\dots (付3)$$

を得る。これより、

$$\frac{\partial K}{\partial P} = - \left[\frac{\partial^2 J}{\partial K^2} \right]^{-1} \left[\frac{\partial^2 J}{\partial K \partial P} \right] \dots\dots\dots (付4)$$

となり、これを(付1)式に代入すると(31)式を得る。

藤 井 康 正 (正員)

昭和40年4月12日生。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修士課程修了。同年4月同博士課程進学。エネルギーシステムを対象にした研究に従事。

茅 陽 一 (正員)

昭和9年5月18日生。37年3月東京大学大学院電気工学専攻博士課程修了。同年4月同大学工学部講師, 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, 最近はエネルギー・電力システムの計画・分析に従事。過去に電気学会論文賞2回, 機械学会論文賞などを受賞。