〈査読論文 2017年12月4日採択〉

不確実性下の投資戦略への確率的 MPEC アプローチ

- 各種発電テクノロジーへの最適投資ミックスの問題 -

A Stochastic MPEC Approach to Strategic Investment in Electricity Technologies

高森 寛 (早稲田大学) 呉 瑛禄 (株 シーエスデー) 長坂 研 (東京農工大学)

Hiroshi Takamori (Waseda University)

Eiroku Go (CSD Co., Ltd.)

Ken Nagasaka (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Summary: The strategic Investment involves expenditure decisions for technologies as well as short term operational decisions under the fixed set of technology capacities committed in the initial investments. The operational decisions are typically made in response to the actual realizations of uncertain external parameters. The model for such strategy usually takes the form of the bi-level problem in which some of the constraints is itself an optimization problem in addition to the global optimization objective for the long-term planning. An effective way for handling the lower-level optimization in the bi-level problem is what is known as MPEC (mathematical Programs with Equilibrium Constraints) approach. The MPEC modelling transforms the lower-level optimization into a set of equalities of the Kuhn-Tucker optimality condition. This paper looks into the equilibrium mix of generation technologies in the liberalized electricity market.

キーワード: 不確実性、インフラ投資、確率計画法、二段階問題、MPEC 法

1. はじめに

本研究では、自由化された電力市場を事業環境として、いくつかの異なる発電テクノロジーへの長期設備投資の決定の問題を例として、不確実性下の産業インフラへの投資戦略の問題のモデリングを行う。

このように、電力の取引が市場ベースでなされ、また、多くの発電事業者が、各種発電テクノロジーをもって参入できる事業環境において、どのような発電設備のミックスが実現されるかのモデリングを行う。ここで、各種発電テクノロジーとは、原子力発電、火力発電、調整用火力発電、太陽光発電、風力発電などの発電技術をいうが、これらは、設備投資の大きさと発電限界費用の違いで特性づけられる。また、再生可能エネルギー発電は、その出力が不確定で、コントロールできないなどの特性がある。

これら発電事業インフラへの設備投資は、長期の投資戦略の問題であるが、時々刻々の事業においては、需給関係と自然現象などの不確定性のゆえに、市場価格が大きく変動し、また、遊休化する設備などが生じ、事業性をいかに確保できるかなどが解決されねばならない。

本研究では、このような不確実性下の設備投資に関わる長期計画問題と短期運用問題が連結される問題を扱う。需要や風力発電等の不確実性は、いくつ

かのシナリオの集合として定義し、確率計画法の問題としてモデル化する。通常の最適化問題は、いくつかの制約条件のもとで、一つの目的関数を最大化あるいは最小化する問題として定式化され、制約条件は不等式および等式で与えられる。しかし、本研究で扱う問題は、長期計画問題と短期運用問題を包括的にモデル化するにあたり、制約条件自体が、最適化問題となる。この種の問題は、二段階問題 (Bi-Level Problem) と呼ばれている。

二段階問題 (Bi-Level Problem) を、通常の最適化問題として扱うために、下段の最適化問題については、Kuhn-Tucker の最適化条件を complementarity condition と呼ばれる方程式系に変換して扱う MPEC (Mathematical Programs with Equilibrium Constraints) 法が知られている。本研究では、この MPEC 法により、不確実な将来の電力市場へむけての最適発電インフラ・ミックスを見出すことを試みる。

本研究が参照している文献は、Conejo・他 (2016)、Maurovich-Horvat・他 (2015) および Wogrin・他 (2011) 等である。

2. 電力発電設備への投資戦略モデル

2.1 二段階 (Bi-Level) 問題の構造

ある一つの経済域を想定して、そこでの電力需要や、

再生可能発電設備からの供給量などは、時間や外的環境の条件によって変動する。そこで、これら不確実に変動する諸条件のパラメータ・ベクトルをシナリオと呼ぶことにする。本稿では、不確実事象は、以下の(2)式に仮定する需要関数のパラメータ E^s 、 α^s と、風力発電である発電タイプ1の稼働率 w^s とする。よって、シナリオ・ベクトルは、

$$H^s = (E^s, \alpha^s, w^s), \quad s \in \Omega \quad (1)$$

で表現できる。

シナリオ H^s の実現確率を θ^s と記述する。

シナリオ H^s が実現したときの電力需要は、線形の需要関数

$$d = E^s - \alpha^s p \quad (2)$$

d : 電力需要 (MW), p : 市場価格 (万円/MWh)

で記述することにする。ここで、 E^s および α^s は、シナリオ s における需要関数の y 切片および需要関数の傾きである。ここで、需要 d は、特定の時間区間あたり、例えば、1時間あたりの電力量 (MW) である。

このように、「長期の不確実性シナリオの展開が想定される経済域において、各種発電テクノロジーでの電力供給事業者が自由参入できるとき、どのようなテクノロジーミクスが均衡形成されるか」の問題を、ここでは、上段問題と呼ぶ。

従って、上段問題での決定変数は、図1に示すように、

G_i : 発電技術 i の設備設置容量 (MW)、 $i=1,2,\dots,N$ 。

である。この論文では、発電技術タイプ i として、 $I=\{1,2,3\}$ の集合があると仮定して、 $i=1$ は、風力発電、 $i=2$ は通常の火力発電、 $i=3$ は調整火力発電としている。

これら $\{G_1, G_2, G_3\}$ を決める上段問題での決定主体は、各発電テクノロジーで参入する事業者たちである。発電費用関数は、各技術タイプ i について、

$$C_i(q_i) = C_i^0 + c_i q_i, \quad i \in I \quad (\text{万円/h}) \quad (3)$$

q_i : 発電レベル (MW/h), 1時間あたり発電量。と仮定する。ここで、 C_i^0 は、1時間あたりの固定費用であり、タイプ i の発電設備への投資費用を1時間あたり費用に換算した資本回収費を含む。

図1 二段階(Bi-Level)問題の構造

上段での戦略投資において、発電タイプ i に大きな設備投資をすると固定費 C_i^0 が大きくなる。これは設備が稼働していないとき、すなわち、 $q_i = 0$ のときでもおおきな費用負担となる。

上段問題は、図1の下段問題と切り離して、独立に解くことはできない。

一方、下段問題では、上段での設備容量決定 $\{G_1, G_2, G_3\}$ は、所与の条件となる。加えて、各種の不確実事象が実現している条件の下での電力取引の均衡を求める問題である。

下段問題では、発電事業者間での価格競争の結果として、均衡価格や各発電タイプの供給量、事業者収益がきまるが、それらは上段問題での戦略決定と不確実事象の実現に依存する。一方、下段問題での収益性との関連で、上段問題の設備決定が可能となる。

2.2 電力取引の市場環境と市場均衡

下段の市場取引モデルでは、上段決定 $\{G_1, G_2, G_3\}$ およびシナリオ $H^s = (E^s, \alpha^s, w^s)$ を所与として、以下の運用変数の均衡値が求められる：

q_i^s : 発電事業タイプ i の発電供給量 (MW)、 $i=1,2,3$ 。

p^s : シナリオ s のときの電力価格 (万円/kWh)。

R_i : 発電事業タイプ i の運用収益 (万円/h)。

図2に、逆需要関数

$$p^s(d) = \frac{E^s}{\alpha^s} - \frac{1}{\alpha^s} d \quad (4)$$

を描く。次に、各発電タイプ i の限界費用関数

$$\frac{dC_i(q_i)}{dq_i} = c_i, \quad i=1,2,3 \quad (5)$$

を、小さい順番に並べて描く。この階段上の曲線は、すべての発電設備を合わせての市場全体の限界費用

関数であり、メリット・オーダー階段とも呼ばれている。各階段の横の長さはそのタイプの供給容量 $\{w^s G_1, G_2, G_3\}$ である。発電タイプ2と3については、上段で決められる G_2, G_3 であるが、風力発電の供給容量は、シナリオ実現に依存して $w^s G_1$ となる。

ミクロ経済学では、この限界費用関数の逆関数は、市場への電力供給関数になることが示されている。

図2に示すように、限界費用関数が階段状の形状になる場合には、限界費用の最も安いタイプ1の事業者群が、価格競争力のゆえに、その供給容量一杯の $w^s G_1$ まで供給する。すなわち、 $q_1^s = w^s G_1$ である。つぎに、安いタイプ2の事業者群が供給するが、その供給量 q_2^s は、市場で需要と供給が均衡するまでである。すなわち

$$q_1^s + q_2^s = d^s \quad (6)$$

が成り立つ点であるので、同図で、需要曲線と限界費用曲線が交わる点が、電力取引が均衡する点となる。同図のような形状の場合は、発電タイプ2は、供給容量が一部遊休化する。また、発電タイプ3は、すべての発電設備が遊休化することになる。

図2 シナリオsにおける電力取引の均衡

最適化問題としての下段問題

前節で図2によって、下段での市場均衡の解の求め方が図解で示された。

この節では、この均衡解を求めるための最適化問題を定式化する。

市場均衡解は、逆需要関数(4)と各タイプの発電限界費用(5)で構成される限界費用関数の交点にある。

逆需要関数(4)は、限界需要効用ともよばれ、需要効用 (demand utility) は、これを積分して

$$U^s(d) = \int_0^d p^s(x) dx = \frac{1}{\alpha^s} \left(E^s d - d^2 / 2 \right) \quad (7)$$

と定義される。

下段での市場均衡の求め方は、図2の図解で示しているが、それは、次の最適化問題を解くことに相当する：

下段問題

$$\max_{q_i^s, d^s} U^s(d^s) - \sum_i C_i(q_i^s) \quad (8)$$

制約：

$$\pi^s : \quad \sum_i q_i^s = d^s \quad (9)$$

$$\gamma_1^s : \quad q_1^s \leq w^s G_1 \quad (10)$$

$$\gamma_i^s : \quad q_i^s \leq G_i, \quad i=1,2 \quad (11)$$

ここで、目的関数の需要効用 $U^s(d^s)$ は(7)に定義され、供給費用関数 $\sum_i C_i(q_i^s)$ は、(3)に定義されるものである。この最適化問題において、各制約式の左端の記号 $\pi^s, \gamma_i^s, i=1,2,3$ は、各制約に関連づけられるシャドウ・プライス (ラグランジュ乗数) である。また、この最適化問題の決定変数として、均衡価格 p^s が陽表的に表れていないが、最適解 d^s, q_i^s 等が決まれば、(2)から電力の均衡価格 p^s が決まることは明らかである。

最適化問題(8)~(11)の Kuhn-Tucker 最適解条件は、次のように表現される。Kuhn-Tucker 条件の説明は付録(A.1)に示す。また、以下の「問題(8)~(11)の K-T 条件」の導出は付録(A.2)に示す。：

問題(8)~(11)の Kuhn-Tucker 最適解条件

1. $\frac{E^s}{\alpha^s} - \frac{1}{\alpha^s} d^s = \pi^s$
2. $c_i + \gamma_i^s \geq \pi^s, \quad q_i^s \geq 0,$
 $q_i^s (c_i + \gamma_i^s - \pi^s) = 0, \quad i=1, 2, 3$
3. $\sum_i q_i^s = d^s \quad (12)$
4. $\gamma_1^s, \gamma_2^s, \gamma_3^s \geq 0, \quad q_1^s \leq w^s G_1, \quad q_i^s \leq G_i, \quad i=1, 2,$
5. $\gamma_1^s (w^s G_1 - q_1^s) = 0,$
 $\gamma_2^s (w^s - q_2^s) = \gamma_2^s (w^s - q_3^s) = 0$

この K-T 条件を、図 2 および図 3 の図解で確認する。各発電設備のスラック（遊休容量）を

$$y_1^s = w^s G_1 - q_1^s, y_i^s = G_i - q_i^s, i=2,3 \quad (13)$$

としよう。条件 6. は、各設備 i について、「スラック y_i^s か、その容量制約のシャドープライス γ_i^s のいずれかが、ゼロでなければならない」といっている。すなわち

$$\gamma_i^s \cdot y_i^s = 0, i=1,2,3 \quad (14)$$

シャドープライス γ_i^s は、発電設備 i の価値を示すもので、設備 i がフル稼働していなくて、スラックがあるとき ($y_i^s > 0$) は、もうこの設備容量 G_i を増加しても価値はないので、 $\gamma_i^s = 0$ でなければならない。図 3 では、 $y_1^s = w^s G_1 - q_1^s = 0$ であるので、 $\gamma_1^s > 0$ となっている。しかし、発電タイプ $i=2,3$ では $y_i^s = G_i - q_i^s > 0$ なので、 $\gamma_i^s = 0, i=2,3$ である。

条件 1. は、シャドープライス π^s が、この市場で電力の需要と供給が一致したときの均衡価格であることを示している。ここで、

$$x_i^s = c_i + \gamma_i^s - \pi^s, i=1,2,3 \quad (15)$$

なる変数 x_i^s を定義しよう。この x_i^s は発電タイプ i の発電単価 c_i とその設備価値 γ_i^s の和から、電力市場価格 π^s を引いたものである。条件の 2. は、この x_i^s が非負であると同時に、

$$q_i^s \cdot x_i^s = 0, i=1,2,3 \quad (16)$$

でなければならないといっている。いいかえれば、発電タイプ i が $q_i^s > 0$ で供給する場合は、 $x_i^s = 0$ 、すなわち、 $c_i + \gamma_i^s = \pi^s$ となる。

図 3 最適解条件の図解

図 3 では、発電タイプ $i=1,2$ については、 $q_i^s > 0$ であるため、 $x_1^s = x_2^s = 0$ 、すなわち

$$c_i + \gamma_i^s = \pi^s, i=1,2 \quad (17)$$

となる。しかし、発電タイプ $i=2$ では $y_2^s = G_2 - q_2^s > 0$ であるため、 $\gamma_2^s = 0$ となって、 $c_2 = \pi^s$ となる。最適解条件を理解するために導入した変数 y_i^s, x_i^s は、次のように、ベクトルとして定義する。

$$\mathbf{x}^s = (x_1^s, x_2^s, x_3^s), \mathbf{y}^s = (y_1^s, y_2^s, y_3^s) \quad (18)$$

最適解条件(12)は、これらの非負ベクトルを使って、簡潔に、

相補性 (complementarity) 条件 :

$$0 \leq \mathbf{q}^s \perp \mathbf{x}^s \geq 0 \quad (19)$$

$$0 \leq \mathbf{y}^s \perp \mathbf{y}^s \geq 0$$

と表わせる。ここで、記号“ $\perp$ ”は、二つのベクトルが直交していることを表す。「二つのベクトル $\mathbf{q}$ と $\mathbf{x}$ が直交している」とは、内積がゼロということであり、

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{x} = \sum_{i=1}^3 q_i^s x_i^s = 0 \quad (20)$$

を意味する。さらに、各要素について、 $q_i^s \geq 0, x_i^s \geq 0, i=1,2,3$ なら、(20)は、(16)を意味する。同様に、(19)の $0 \leq \mathbf{y}^s \perp \mathbf{y}^s \geq 0$ は(14)を意味する。よって、K-T 最適解条件(12)は、簡潔な相補性条件(19)で置き換えることが可能である。詳細は、付録 A.3 にまとめる。

2.3 上段問題：長期戦略投資問題

図 1 に示すように、各種発電テクノロジーをもっての発電事業者が、その発電設備への投資規模 (G_1, G_2, G_3) を策定するにあたり、重要な不確実事象は、将来の長期間において、各時間帯における需要曲線のパラメータ E, α および、風力発電設備の稼働係数 w などであるが、投資規模の決定は、これら事象の実現に先立つ決定である。

2.1 節では、これら不確実事象の可能集合は、(1)式のベクトル集合で表現できることを示した。

上段問題は、各種発電技術への設備投資に関わる意思決定であり、すでに述べたように、主たる決定変数は、(G_1, G_2, G_3) である。また、重要なパラメータとして以下がある。

投資費用パラメータ

β_i : 発電技術 i タイプの設備への投資単価 (1 時

間あたりの投資回収額) (万円/MW/h)。これは、単位時間あたり等価投資費用ともいう。

上段問題： 長期設備投資問題

上段問題での意思決定主体は、各タイプの発電事業者であり、発電事業への参入が自由な事業環境を想定している。各技術タイプ i について、多くの発電事業者がいると仮定する。しかし、各タイプの発電テクノロジーは社会で共有されており、どの事業者でも、その費用構造は同一である。決定変数 G_i は、各タイプ i のトータルの設置容量である。

以下のように、上段問題での目的関数(21)は、発電事業による単位時間あたりの運用収益期待値から、時間当たり投資単価を差し引いてのネットの利益である。

上段問題：

$$\max_{G_i} \sum_s \theta^s \left[U^s(d^s) - \sum_i c_i(q_i^s) \right] - \sum_i \beta_i G_i \quad (21)$$

制約： 下段問題：(8)から(11), $s \in \Omega$

ここで、制約部分は、2.2 節で定式化した最適化問題である。

以上のように、下段問題(8)および(11)は、上段問題での目的(21)を最大化するにあたっての制約条件としての最適化問題となる。シナリオ H^s が N^s 個あると、上段問題では N^s 個の下段最適化問題を包含することになる。

3. 二段階問題への MPEC アプローチ

本来、最適化問題は、複数の等式あるいは不等式の制約のもとで、一つの目的関数を、最大化あるいは最小化する問題である。しかし、ここで解きたい上段問題(21)、(8)および(11)では、その制約条件が、いくつかの最適化問題として定式化されている。

このような二段階問題を扱う方法として、MPEC 法 (Maurovich-Horvat 他 (2015)、Wogrin 他 (2011) 参照) が知られている。

MPEC 法では、下段の最適化問題の最適解が満たすべき条件を、「Kuhn-Tucker 条件 (あるいは、K-K-T 条件)」として知られる等式制約系に変換する。ただし、K-K-T 条件で導かれる等式制約は、相補性 (complementarity) 条件と呼ばれて、(19)のような非線形等式であり、「二つの変数の掛け算がゼロに等しい」という形になる。これは、通常の連続変数の最適化手法では扱えない。0-1 整数最適化の手法が有効になる。

以下に、下段問題(8)および(11)を、MPEC 法で、0-1 整数最適化問題に変換する。

この下段問題の最適解は、相補性(complementarity)条件(19)を満たす非負のベクトル $\mathbf{q}^s, \mathbf{x}^s, \boldsymbol{\gamma}^s, \mathbf{y}^s$ を見出すことであり、それは、以下の連立方程式を解くことに相当する。

$$\begin{aligned} q_i^s \cdot x_i^s &= 0, \quad i=1,2,3 \\ \gamma_i^s \cdot y_i^s &= 0, \quad i=1,2,3 \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、

$$x_i^s = c_i + \gamma_i^s - \pi^s, \quad i=1,2,3 \quad (23)$$

$$\begin{aligned} y_1^s &= w^s G_1 - q_1^s, \\ y_i^s &= G_i - q_i^s, \quad i=2,3 \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \sum_i q_i^s &= d^s \\ \frac{E^s}{\alpha^s} - \frac{1}{\pi^s} d^s &= \pi^s \end{aligned} \quad (25)$$

これら連立方程式(22)~(25)は、(22)を除いては、線形方程式である。そして、この(22)のタイプの非線形制約は、連続変数の数値解法では扱いが困難である。たとえば、 $q_i^s \cdot x_i^s = 0$ なる条件は、理論的には、

1. $x_i^s > 0$ なら、 $q_i^s = 0$ でなければならない
2. $q_i^s > 0$ なら、 $x_i^s = 0$ でなければならない

を意味する。それでは、 $x_i^s = 0.05$ で、 $q_i^s = 0.0001$ の場合、 $x_i^s \cdot q_i^s = 0.000005$ で、ほぼ、ゼロと解釈してよいであろうか。そして、上の1.、2.の条件は満たされているのであろうか。数値計算の手続きでは、きわめて、あいまいな判定をしてしまう。

上の1.、2.のような論理関係を正確に表現するには、0か1の値しかとることを許されない変数、

$$X_i^s = 0, \text{ or } 1, \quad i \in I \quad (26)$$

を導入することである。これを使って、以下の線形不等式を定義できる：

$$\begin{aligned} x_i^s &\leq M \cdot X_i^s, \\ q_i^s &\leq M \cdot (1 - X_i^s) \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 M は、 $q_i^s, x_i^s, \lambda_i^s, y_i^s$ にくらべて、極度に大きい正の定数である。 $X_i^s = 1$ のときは、上の1.の論理関係が保証される。また、 $X_i^s = 0$ のときは、上の2.の論理関係が保証される。

4. 各種電源への投資ミクス問題の例

ある一つの経済域を想定する。

発電事業者タイプ i として、 $i=1,2,3$ があると仮定して、 $i=1$ は通常の火力発電技術、 $i=2$ は、調整火力発電、 $i=3$ は、風力発電技術をする。

各発電技術タイプの限界費用定数を次のように仮定する。

ここで取り上げている各種発電技術について、現在、妥当な固定費 β_i と発電経費（限界費用）と思われる値は、表 1 に示すような値である。しかし、これらの技術進歩が、かなり早く、将来へ向けての計画のためには、特に、再生可能エネルギー等は、これらより、廉価になった場合にむけての比較検討が望ましい。

表 1 発電技術タイプの費用構造 A

i	1	2	3
	風力発電	通常火力	調整用火力
β_i	0.6	0.55	0.22
c_i	0.01	1.6	2.0

β_i : 固定費 (万円/MW/h)

c_i : 発電限界費用 (万円/MW/h)

4.1 需要曲線変動のシナリオの作成について

本研究での発電設備への投資計画問題では、主たる不確実事象は、対象の経済域における需要関数の変動である。一年間、8,760 の時間帯があるが、各時間帯すべてにおいて、需要関数は異なるであろう。需要関数は、直線(2)および(4)式で表すが、まったくのランダムにいくつかを選ぶわけにいかない。そこで、ここでは、電力価格が $p=2.5$ (万円/MWh)における価格弾力性が、同じ $\eta=-0.5$ であるような需要曲線群の中から、各シナリオの需要曲線を選ぶことにした。

需要関数 $D(p)$ の価格弾力性 η は、次の式で定義される。

$$\eta = \frac{dD/D}{dp/p} = \frac{p}{D} \frac{dD}{dp} \quad (28)$$

すなわち、価格が 1% 変化したときに、需要が何% 変化するか概念である。本研究では、需要関数として直線(2)式を仮定しているので、 $dD/dp = -\alpha$ であるが、直線上の位置によって価格弾力性 η は異なる。

よって、 $p=2.5$ (万円/MWh)での価格弾力性が、

$\eta=-0.5$ であるような需要曲線群は、

$$\frac{2.5}{D} \cdot (-\alpha) = -0.5 \quad (29)$$

を満たす。

そこで、年間 8,760 時間において、どのくらいの比率で、需要レベルがどのレベルにあるかの観察が有用である。図 4 に示す曲線は、負荷持続曲線と呼ばれるもので、年間 8,760 時間の各時間帯における電力需要を大きい順番に並び変えたものである。この負荷持続曲線の形状自体は、異なる経済域においても、かなり安定的に、類似していることが観察されている。図 4 では、負荷持続曲線に重ねて、階段上の近似的な負荷持続レベル線 $\{L1=1500\text{MW}, L2=1000\text{MW}, L3=800\text{MW}, L4=300\text{MW}\}$ を描いている。それぞれの需要レベル L_i に対応する持続時間は、同図で、 $\{T1, T2, T3, T4\}$ として読み取ることができる。

たとえば、レベル線 $L1=1500\text{MW}$ に対応する需要関数を設定するには、 $D=1500$ を(29)式に代入して、

$$\frac{2.5}{1500} \cdot (-\alpha) = -0.5 \Rightarrow \alpha = 200$$

を得る。もう一つのパラメータ E は、(2)式に $d=1500$ を代入して、

$$E = 1500 + 300(2.5) = 2250$$

を得る。また、このようにして、 $L1$ 直線部分に対応する需要曲線

$$d = 2250 - 300p \quad (30)$$

が発生する確率は、

$$\pi^1 = T1/8760 \quad (31)$$

とすることができる。

図 4 負荷持続曲線から需要曲線シナリオへ
負荷持続曲線を分割する個数 N は、必要に応じて、

増やすことが望ましい。ここでは、 $N=1$ とした。

以上の手続きで、図4の四つの需要レベル L_i , $i=1,2,3,4$ に対応する需要関数シナリオを作成した。

すなわち、(1)式で定義されたベクトル H_s の実際の数値である。

表2 不確実事象についての四つのシナリオ

シナリオ s	1	2	3	4
E^s	2250	1500	1200	450
α^s	300	200	160	60
w^s	0.2	0.3	0.25	0.3
確率 π^s	0.25	0.25	0.3	0.2

この表で、 w^s の行は、発電タイプ（風力発電）の稼働率である。この w^s は、需要曲線の不確実性との相関があるかは不明であるので、ここでは、統計的に独立であると仮定して、シナリオ数値を設定した。

表2に示した各シナリオの需要関数を図5に描く。

これらは、いずれも、価格が $p=2.5$ （万円/MWh）のときに、需要の価格弾力性は $\eta=-0.5$ である。また、図5に示されているように、価格が $p=2.5$ （万円/MWh）のときの需要レベルは、 $s=1$ で、 $d=1500$ MW, $s=2$ で $d=1000$ MW, $s=3$ で $d=800$ MW, $s=4$ で、 $d=300$ MW である。

図5 各シナリオの需要曲線

4.2 計算結果：発電技術と最適電源構成

各種発電テクノロジーについて、標準的な投資単価と運用費用の標準的な構造Aとして表1のように仮定して、また、シナリオ集合としては、表2のセットを設定した。

上段問題(21)と下段問題(8)から(11)の二段階問題を、混合整数計画問題として解いた結果として、次が得られた。

発電技術の費用構造Aでの分析

均衡の各設備の設置規模として、表3が得られた。

この費用構造Aの状況では、風力発電の技術G1は、まだ、コスト高であり、この発電技術は電源ポートフォリオに含まれるには、経済性が成立しない。この発電技術がコスト高である理由は、一つは、表1に見るように、投資費用に依存する固定費 $\beta_1=0.6$ （万円/MWh）が、他の技術の固定費 β_2, β_3 と比較して高いことがいえるが、もう一つは、自然現象に依存しての稼働率 w_s が、表3のどのシナリオにおいても、 $w_s=0.2\sim0.3$ の低いレベルであることによる。

表3 費用構造Aでの設備容量投資

	風力発電	通常火力	調整火力
設置容量(MW)	0	330	196.5

表3の発電設備G2,G3からの供給量は、各シナリオにおいて、表4ようになる。

表4 費用構造Aでの各シナリオでの均衡

シナリオ s	1	2	3	4
G1 供給(MW)	0	0	0	0
G2 供給(MW)	330	330	330	330
G3 供給(MW)	196.5	196.5	196.5	0
価格(万円/MWh)	5.7	4.9	4.2	2.0
期待利益(万円/h)	2,104	1,642	1,295	132

表4の各シナリオでの均衡供給と価格は、図6に示す需用曲線と供給曲線のバランスから得られていることになる。

図6 費用構造A：各シナリオでの需給均衡と価格

これは、(8)~(11)でモデル化した下段問題での均衡が、各シナリオ下で、どのように実現しているかを

示している。

これら表 4、図 6 での各均衡の特色は、シナリオ 1、2、3 において、設置されている設備 G2, G3 がフル稼働状態であることである。しかも、均衡が運用費用 $c_3 = 2.0$ のフラットな部分で需要曲線と交わるのではなく、フル稼働からの垂線と需要曲線が交わり、電力価格がかなり高い水準で均衡がなりたっている。

これらのことは、上段問題での設備投資が、極めて低めに抑えられていて、設備の遊休が生じないような設備投資がなされていることが観察される。表 4 から、発電設備に遊休が生じるのは、シナリオ 3 においてのみである。

発電技術の費用構造 B での分析

現在、再生可能エネルギーの活用技術が急速に進んでいて、風力発電の投資固定費が表 1 における $\beta_1 = 0.6$ (万円/MW/h) よりも廉価になっている状況を想定する。加えて、公的な政策により、風力発電への投資助成などにより、表 5 の費用構造 B では、 $\beta_1 = 0.342$ (万円/MW/h) と、費用構造 A と比較して、顕著に廉価に設定した。他の技術についても、若干、費用を調整した。

表 5 発電技術の費用構造 B

i	1	2	3
	風力発電	通常火力	調整用火力
β_i	0.342	0.55	0.27
c_i	0.01	1.5	2.0

費用構造 B における各発電タイプ事業者の利益最大化の投資規模は、表 6 のように得られた。この場合、風力発電規模が $G1=2,235.8\text{MW}$ 、通常火力は $G2=19.1\text{MW}$ 、調整火力は $G3=0$ である。

表 6 費用構造 B での設備容量投資

	風力発電	通常火力	調整火力
設置容量(MW)	2035.8	19.1	0

この設備構成での各シナリオでの需給均衡の実現は、表 7 の通りである。

表 5 の各シナリオでの均衡供給と価格は、図 7 に示す需用曲線と供給曲線のバランスから得られていることになる。これは、(8)~(11)でモデル化した下段問題での均衡が、各シナリオ下で、どのように実現しているかを示している。

表 7 費用構造 B での各シナリオでの均衡

シナリオ s	1	2	3	4
G1 供給(MW)	240	360	300	360
G2 供給(MW)	230	230	230	0
G3 供給(MW)	0	0	0	0
価格(万円/MWh)	5.9	4.6	4.2	1.5
期待利益(万円/h)	2,441	2,336	1,871	536.4

図 7 費用構造 B：各シナリオでの需給均衡と価格

これら表 7、図 7 での各均衡においても、シナリオ 1、2、3 において、設置されている設備 G1, G2 がフル稼働状態であることが見られる。しかも、均衡が運用費用 $c_3 = 1.5$ のフラットな部分で需要曲線と交わるのではなく、フル稼働からの垂線と需要曲線が交わり、電力価格がかなり高い水準で均衡がなりたっている。

これらのことは、やはり、上段問題での設備投資が、極めて低めに抑えられていて、設備の遊休が生じないような設備投資がなされていることが観察される。表 4 および表 7 から、発電設備に遊休が生じるのは、シナリオ 3 においてのみである。

4.3 計算結果のまとめ

表 6 に見られるように、費用構造 B と、表 2 のシナリオのもとでは、調整火力の設置はゼロというような非現実的な投資案が得られている。これは、やはり、シナリオが 4 つしかない状況では、現実の不確実性が十分に反映され、モデル化されていないことを意味している。とくに、図 4 の負荷持続曲線をベースに需要曲線のシナリオを作成する過程で、ピーク需要の部分での持続曲線部分については、その分割をきめ細かく行うことが、重要と思われる。

もうひとつ、観察された顕著な現象は、電力価格の均衡が、どのシナリオにおいても、かなり、高いレベルに収まっていることがある。しかも、設置されている発電設備がすべてフル稼働して、もうこれ以上の供給ができない状況での需給ギャップが、価格の高騰になってあらわれている。

5. まとめと今後の課題

この研究では、規制緩和されて、市場ベースで、参入が自由な事業環境を仮定して、各種の発電テクノロジーでの事業投資戦略の問題を扱った。この種の投資決定は、参入しようとしている経済域での需要の不確実性や、再生可能エネルギーの不確実性などに直面しての意思決定となる。

ここでは、確率計画法の問題としてモデル化した。また、モデルは2段階問題 (Bi-Level Problem) の構造となるので、それに関しては、MPEC 法として知られる手法を試みた。

簡単な数値例で、風力発電を含む三つの発電技術の間で、どのような発電技術タイプの構成での均衡が成り立つかの算定を行った。

結果の一つとして、各発電タイプへの設備投資は、一様に、控えめに抑えられて、いくつかの不確実性シナリオにおいて、供給容量不足が生じた。結果として、電力価格が高いレベルに落ち着くことになった。

この問題は、確率計画法と MPEC 法の手法そのものに起因するものではない。むしろ、上段問題での目的関数として、発電事業者群の利益を設定して、それを最大化する設備投資レベルを求めていることにある。

電気事業の規制緩和を早くから進めてきた欧米では、競争導入のゆえに電気の価格が低くなるという命題に反して、逆に、電気の価格が高くなるというパラドクスが経験されてきた。本研究のモデル計算の結果は、それはパラドクスではなく、論理的に説明できる事象であることを示唆している。このパラドクスは、電気事業の規制緩和と市場ベースへの転換は、発電事業者の自然な投資抑制により、電源不足を招く問題として知られており、高森(2017)で、“ミッシングマネー問題”として論じられている。

本研究のモデルで、もう一つ分析できるテーマは、RPS (Renewable Portfolio Standard) として、知られる問題である。4.2 節の費用構造 A においては、風力発電事業者の市場参入はゼロであった。ここで、「この経済域での発電供給は、 α の比率で再生可能エネルギーでなければならない」という制度が導入された場合、それをどのように、市場ベースで実現できるだろうか、という問題である。

参考文献

1. Conejo, A. J., Carri'on, M. and Morales, J. M. (2010). *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, Springer
2. Conejo, A. J., Barigo, L., Kazenpour, S.J. and Siddiqui, A. F. (2016). *Investment in Electricity Generation and Transmission*, Springer.
3. Maurovich-Horvat, L., Boomsma, T. K., and A. S. Siddiqui (2015). Transmission and Wind Investment in a Deregulated Electricity Market, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No.3.
4. Wogrin, S., Centeno, E., and J. Barquin (2011). “Generation Capacity Expansion in Liberalized Electricity Markets: A Stochastic MPEC Approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26, No.4.
5. 椎名 孝之 (2015).『確率計画法』朝倉書店.
6. 高森 寛, 呉 瑛禄, 長坂 研. (2017). “不確実性下の戦略策定のためのモデリング ～ シナリオ戦略法 (1) ,” 「リアルオプションと戦略」 Vol.9, No.1. pp.66-72.
7. 高森寛, 横山隆一, 山下大樹, 新村隆英 (2016). “不確実性下の戦略的電力需給マネジメント—フォワードおよびオプション契約の活用とシナリオ戦略技法,” 「リアルオプションと戦略」, 8(2), 34-43.
8. 高森 寛, 呉 瑛禄, 長坂 研 (2016). “コミュニティのエネルギーマネジメント事業のシステム・デザイン—シナリオ戦略技法のアプローチ,” 「リアルオプション研究」, Vol. 8 p. 1-21.
9. 高森寛 (2017). “電力事業の市場への移行と電力不足： ミッシングマネー問題 —電気事業取引の市場ベースへの移行が電力不足を招く問題の本質,” 「オペレーションズ・リサーチ」, Vol.62, No.9., pp.560-566.

付録

付録 A.1 Kuhn-Tucker の最適化条件について

最適化問題は、通常、次のように記述できる。

$$\text{目的: } \max_{x_1, \dots, x_n} f(x_1, \dots, x_n) \quad (\text{A1})$$

$$\text{制約: } g_i(x_1, \dots, x_n) \geq 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A2})$$

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (\text{A3})$$

ただし、(A2)については、いくつかの制約 i は等式

条件の場合がある。また、(A3)については、いくつかの x_j は、非負条件がない場合がある。

ラグランジェ関数

$$L(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}) = f(x_1, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i g_i(x_1, \dots, x_n)$$

を定義する。関数 f, g_i について、偏導関数が連続的に存在するなどの諸条件が成り立つ仮定のもとで、問題 (A1) ~ (A3) の最適解は次の条件 1. および 2. を満たす変数 $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ が存在することが必要である。そして、(A2) の不等式制約に対応づけられる λ_i については、非負であることが必要である。

Kuhn-Tucker の最適化条件

1. $\frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_j} \leq 0$, かつ $x_j \cdot \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial x_j} = 0, j = 1, \dots, n$
2. $\frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial \lambda_i} \leq 0$, かつ $\lambda_i \cdot \frac{\partial L(x, \lambda)}{\partial \lambda_i} = 0, i = 1, \dots, m$

ただし、1. については、 x_j が負値をとってもよい条件のときは、最初の不等号は等号 $\partial L(x, \lambda) / \partial x_j = 0$ になる。また、2. については、第 i 条件が、等式 $g_i(x_1, \dots, x_n) = 0$ の場合は、 λ_i は負の値でもよい。

付録 A.2 最適化条件(12)の導出

ラグランジェ関数は、

$$L = \frac{1}{\alpha^s} \left(E d^s - (d^s)^2 / 2 \right) - \sum_i c_i q_i^s + \pi^s \left(\sum_i q_i^s - d^s \right) + \gamma_1^s (w^s G_1 - q_1^s) + \gamma_2^s (G_2 - q_2^s) + \gamma_3^s (G_3 - q_3^s)$$

となる。ここで、 d^s, π^s は、負値をとってもよい変数である。

1. $\frac{\partial L}{\partial d^s} = d^s \left(\frac{E^s}{\alpha^s} - \frac{1}{\alpha^s} d^s - \pi^s \right) = 0$
よって、 $\frac{E^s}{\alpha^s} - \frac{1}{\alpha^s} d^s = \pi^s$
2. $\partial L / \partial q_i^s = -c_i + \pi^s - \gamma_i^s \leq 0, q_i^s \geq 0,$
よって、 $q_i^s (\pi^s - c_i - \gamma_i^s) = 0, i = 1, 2, 3$
3. $\partial L / \partial \pi = \sum_i q_i^s - d^s = 0$
4. $\partial L / \partial \gamma_1^s = w^s G_1 - q_1^s \leq 0, \gamma_1^s \geq 0, \gamma_1^s (w^s G_1 - q_1^s) = 0$
5. $\partial L / \partial \gamma_i^s = G_i - q_i^s \leq 0, \gamma_i^s \geq 0, \gamma_i^s (G_i - q_i^s) = 0, i = 2, 3$

付録 A.3 相補性(complementarity)条件の導出

次の変数を定義する。

$$y_1^s = w^s G_1 - q_1^s, y_i^s = G_i - q_i^s, i = 2, 3$$

$$x_i^s = c_i + \gamma_i^s - \pi^s, i = 1, 2, 3$$

これらを使うと、付録 A.2 の諸条件は、次のように表せる。

条件 2. は、 $x_i^s \geq 0, q_i^s \geq 0, x_i^s \cdot q_i^s = 0, i = 1, 2, 3$ と表せる。また、条件 4. および 5. は、 $y_i^s \geq 0, \gamma_i^s \geq 0, \gamma_i^s \cdot y_i^s = 0, i = 1, 2, 3$ と表せる。いま、ベクトル

$$\mathbf{q}^s = (q_1^s, q_2^s, q_3^s), \mathbf{x}^s = (x_1^s, x_2^s, x_3^s)$$

$$\boldsymbol{\gamma}^s = (\gamma_1^s, \gamma_2^s, \gamma_3^s), \mathbf{y}^s = (y_1^s, y_2^s, y_3^s)$$

を定義すると、最適化条件は、

$$0 \leq \mathbf{q} \perp \mathbf{x} \geq 0$$

$$0 \leq \boldsymbol{\gamma} \perp \mathbf{y} \geq 0$$

ここで、記号 $\perp$ は、二つのベクトルが直交していることを表している。