

不確実性下でのエネルギーシステム計画のための数理モデルの開発

富山県立大学 学生会員 ○田中 良賢

富山県立大学 正会員 立花 潤三

株式会社環境総合テクノス 非会員 浦 和哉

富山県立大学 非会員 榊原 一紀

1. はじめに

我が国では、2050年までにCO₂排出量80%削減を掲げている。このような長期目標に向けたロードマップ作成が必要だが、長期計画では多岐にわたる社会状況の変化を予測するのは困難である。確率計画法は、将来の不確実性を直接モデルに組み込んでおり、それを考慮した最適解を導出することが可能である。

本研究では、2段階確率計画法を用いて、富山県におけるエネルギー供給システムを対象とした長期計画モデルの開発、実証的検討を行った。

2. 研究手法

2.1 モデル概要

計画期間は2016～2050年とする。目的関数はエネルギー供給システムの建設、維持管理、廃棄に係る期間内総費用の最小化である。制約条件は、中・長期のCO₂排出量の削減目標値、各再生可能エネルギー利用可能量、エネルギー需要量、電源構成に占める変動性再エネの比率そして財源である。

2.2 目的関数

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^T \sum_{i \in I} \{ (IC_{i,t} \cdot x'_{i,t} + SC_{i,t} \cdot x''_{i,t}) / (1+r)^{5(t-1)} \\ & + \sum_{s=1}^5 (MC_{i,5(t-1)+s} - FI_{i,5(t-1)+s}) \cdot x_{i,t} / (1+r)^{5(t-1)+s} \} \\ & + \sum_{t=1}^T \left(\sum_{j=1}^{J_t} p_{1,t}^j q_{1,t}^j y_{1,t}^{j+} + \sum_{k=1}^{K_t} p_{2,t}^k q_{2,t}^k y_{2,t}^{k-} + \sum_{l=1}^{L_t} p_{3,t}^l q_{3,t}^l y_{3,t}^{l-} \right) \rightarrow \text{Min} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 IC_i, MC_i, FI_i, SC_i : 導入技術*i*の建設費、維持管理費、収益、設備廃棄費 (円/kW), *i* : 導入技術種, $x_{i,t}, x'_{i,t}, x''_{i,t}$: *t*期に稼働、新設、廃棄される*i*の設備容量 (kW), *t* : 期 (5年), *r* : 割引率 (0.03), *j, k, l* : 北陸電力のCO₂排出係数, 電力需要, 熱需要に係るシナリオ, $p_{1,t}^j, p_{2,t}^k, p_{3,t}^l$: *j, k, l*の生起確率, $q_{1,t}^j, q_{2,t}^k, q_{3,t}^l$:

CO₂排出量制約の超過分, 電力需要制約, 熱需要制約の不足分に係るリコース単価 (円/t-CO₂), $y_{1,t}^{j+}, y_{2,t}^{k-}, y_{3,t}^{l-}$: CO₂排出量制約の超過量 (t-CO₂/期), 電力需要, 熱需要制約の不足量 (TJ/期)。

計画期間は2050年までT=7期となる。また、各施設の耐容年数は20年 (地熱は15年) とする。

2.3 計画変数

$$x_{i,t} = x_{i,t-1} + x'_{i,t-1} - x''_{i,t} \quad (2)$$

$x_{i,t}, x'_{i,t}, x''_{i,t}$: 技術*i*の施設立地, 施設の*t*期での建設, 施設の*t*期での廃棄を示す状態変数 (kW)。なお, 建設中及び廃棄中の期は使用不可とした。

2.4 制約条件

(a) CO₂排出量の制約

$$y_{i,t}^{j+} = UE_t^j \cdot \eta_t + \sum_{p=1}^P UP^p \cdot \theta_{p,t} - TA_t \quad (3)$$

UE_t^j : 北陸電力のCO₂排出係数 (kg-CO₂/kWh), η_t : 北陸電力の電力供給量 (kWh/期), UP^p : 化石燃料*p*のCO₂排出係数 (kg-CO₂/kWh), $\theta_{p,t}$: 化石燃料*p*の供給量 (TJ/期), TA_t : CO₂排出量目標値 (t-CO₂/期)。

(b) 電力需要の制約

$$y_{2,t}^{k-} = DE_t^k - \sum_{i \in I_e} (x_{i,t} + x'_{i,t}) - \eta_t \quad (4)$$

DE_t^k : *t*期における*k*の電力需要 (TJ/年), I_e : 発電技術の集合。

(c) 熱需要の制約

$$y_{3,t}^{l-} = DH_t^l - \sum_{i \in I_h} (x_{i,t} + x'_{i,t}) - \sum_{p=1}^P \theta_{p,t} \quad (5)$$

DH_t^l : *t*期における*l*の熱需要量 (TJ/年), I_h : 熱供給技術の集合。

(d) 各種エネルギーの利用可能量の制約

$$x_{i,t} + x'_{i,t} \leq P_i \quad (6)$$

P_i : 導入技術*i*の域内ポテンシャル。

(e) 不安定な再エネによる発電量の上限制約

$$\sum_{i \in I_e} (x_{i,t} + x'_{i,t}) \leq DE_t^k \cdot rv \quad (7)$$

rv : 電力需要量に対する変動再生可能エネルギー発電 (太陽光, 風力) の発電割合上限値.

(f) 財源制約

$$\sum_{i=1}^I \{IC_{i,t} \cdot x'_{i,t} + SC_{i,t} \cdot x''_{i,t} + (MC_{i,t} - FI_{i,t}) \cdot x_{i,t}\} + \lambda_t \leq \mu_t + \xi_t + fb_{t-1} \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T (\xi_t + fr_t - \lambda_t) = 0 \quad (9)$$

λ_t : t 期における地方債返済額 (円/期), μ_t : t 期における投入財源 (円/期), fb_t : t 期からの繰越金 (円/期), ξ_t : t 期における地方債発行額 (円/期), fr_t : t 期における利子額 (円/期).

2.5 確率変数

エネルギー需要量及び北陸電力のCO₂排出原単位の2つを確率変数とする. ベースシナリオとして, エネルギー需要量は, 資源エネルギー庁の2030年までの需要見通し¹⁾を用いて2050年までの需要量を推計した場合とし, 北陸電力のCO₂排出原単位は, 電力事業者連合の目標値²⁾を2050年に達成する場合を想定した. これらの確率変数に, 1期経つにつれてベースシナリオ含む3シナリオに分かれ, 第七期に確率変数の上下限がベースシナリオの確率変数から±20%となるようにシナリオを作成した.

3. 研究結果

本モデルで導出された富山県における2050年までのエネルギー供給計画の内訳を図1に示す. 水力発電は第一期に3,800 (TJ/期), 第七期に10,000 (TJ/期) 供給する結果となった. また, 一方で, 第一期に184,500 (TJ/期) であった北陸電力供給量は第七期に72,500 (TJ/期) まで減少した. 最終期の電源構成 (図2) では水力発電が9.2%, 地熱発電19.3%, 北陸電力供給量64.1%となっており, 富山県が保有する再エネの特色が出たと言える. 図3に各期の費用・利益と地方債償還のグラフを示す. 借入金, 第一期に1760億円, 第六期に570億円となった. また, 設備投資は初期から中期に借金をして行い, 中期から後期にかけてその

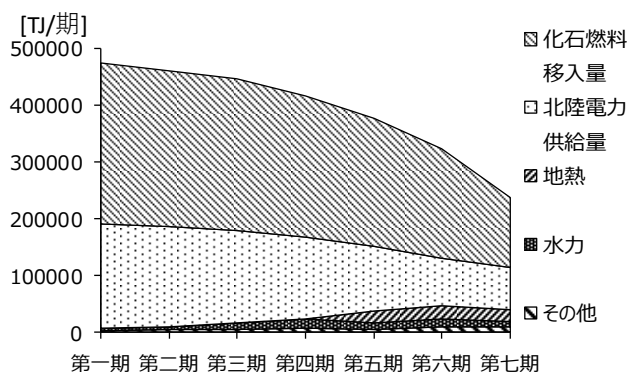


図1 富山県におけるエネルギー供給計画

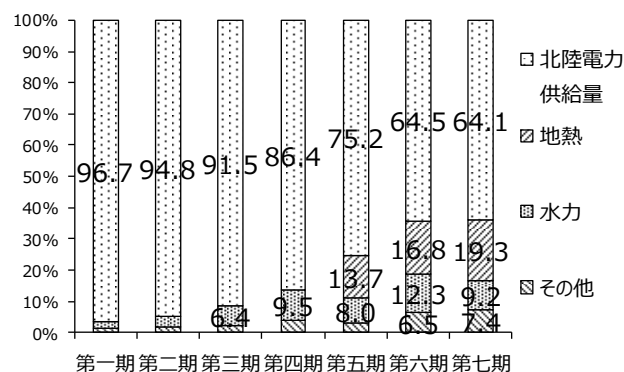


図2 各期の電源構成

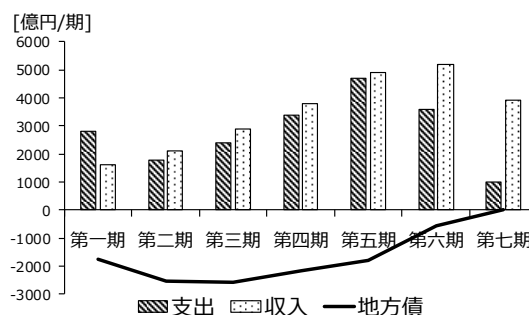


図3 各種費用・利益及び地方債の償還経緯

収益でさらなる設備投資と借金の返済を行う結果となった. 地方債は最大で第三期に2570億円になるが, その後の利益で計画期間内に完済する結果となった.

4. おわりに

本研究では, 2段階計画確率法を用いたエネルギーシステム計画モデルの開発を行った. 本研究のシナリオ分析は, 長期計画における不確実要素を捉えたロードマップを描ける点が特徴である.

参考文献

- 1) 経済産業省: 長期エネルギー需要見通し, 2015.
- 2) 電気事業者連合会: 電気事業における低炭素社会実行計画の策定について, 2015.