

地域の土地利用における太陽光発電設置と農地の協調モデル

05001458 筑波大学 *綿引 由美 WATAHIKI Yumi 05000780 筑波大学 安東 弘泰 ANDO Hiroyasu
05001392 筑波大学 野口 宇宙 NOGUCHI Takahiro 05000694 筑波大学 高原 勇 TAKAHARA Isamu

1. はじめに

カーボンニュートラル実現に向けて再生可能エネルギーの利活用が期待されている。なかでも太陽光発電はFIT制度の導入に伴い急速に拡大した。昨今は需給バランスの調整が必要な事態となり、再生可能エネルギーと電力市場を統合するための段階的な措置として FIP 制度が 2022 年度から適用される[1]。

これまで地域の土地利用の一モデルとして、太陽光発電設置の利用面積の変動を有限の資源競争系の微分方程式で記述した[2]。本論文では、まず持続可能性の観点から、太陽光発電と農地の土地利用が協調的に進むような条件を考慮する。さらに、FIP 制度導入で各太陽光発電に対して適切な容量の蓄電池を伴うことを仮定し、蓄電池がネットワークとして電力を融通しあうモデルをコンセンサスダイナミクスによって表現する。これは、FIP 制度下でのアグリゲータによる電力統合に協調的な再生可能エネルギーの活用を目的とする地域に必要なエネルギー需給の集合単位を構成するための基礎モデルとして検討する。

2. モデル

2.1 土地利用モデル

これまでに土地利用の簡易モデルとして Lotka-Volterra 型の数理モデルを検討した。本論文では、太陽光発電用地と農地が協調的に利用されることを仮定するために、[2]の微分方程式を以下のように書き換える。

$$\frac{dy}{dt} = y(r_1 - \beta_1 y - \alpha_1 y(z - y))$$

$$\frac{dz}{dt} = z(r_2 - \beta_2 z - \alpha_2 (y - z)z)$$

ここで、変数 y は太陽光発電設置に要する土地面積、 z は農地に対応する土地面積であり、それぞれ時間と共に変動可能とする。また、ここでは簡単のために地域の土地総面積を S として固定する。従って、 $S > y + z$ を満たし、 $S - y - z > 0$ を耕作放棄地とする。パラメータ $r_1, r_2, \beta_1, \beta_2$ はそれぞれ、太陽光発電の増加率、農地の増加率、太陽光発電の設置の利用者間競争係数、農地の

利用者間競争係数である。また、 α_1, α_2 は共に太陽光発電の設置と農地利用間の競争係数であり、ここでは簡単のため、 $\alpha_1 = \alpha_2$ とする。適切な α_2 の値とともに $\frac{r_1}{\beta_1} = \frac{r_2}{\beta_2}$ が満たされれば、 $y = z$ となる

平衡解に至ることがわかる。協調モデルでは農地と太陽光発電の利用面積の差が大きいほど競争の効果が働き、差が小さくなることで競争の効果が小さくなっている。

さらに本論文では、資源を共有する土地が N 個の地区に分かれており、各地区の面積を S_i ($i = 1, 2, \dots, N$)として、各地区において上述の協調的な微分方程式が成立するとする。また一般的には地区ごとに S_i は異なるが、ここでは簡単のため $\forall i, S_i = S$ とする。他方、各地区における太陽光発電の普及速度が異なるとする。例えば、 $\frac{r_1}{\beta_1}$ の値が大きいほど普及が早く、小さいほど遅い。これにより各地区の電力供給力に差異が生じる。そこで各地区に蓄電池を設置し、太陽光発電により発電された電力を蓄えるシステムを考える。これにより太陽光発電の普及が遅い地区では、その他の地区からの電力融通などで補うことが考えられる。以下に蓄電池ネットワークにおける電力融通のモデルを考察する。

2.2 蓄電池ネットワークモデル

まず、太陽光発電に関する需給モデルはさまざまに検討されている。ここでは太陽光発電に需給調整を可能とする蓄電する電池を組み合わせたシステムを設置可能とする。各蓄電池に貯められる電気量を x と表してその充電に関するモデルを[3]を参考に以下のように定義する。

$$\frac{dx}{dt} = y\Delta K I_r f(x)$$

ここで、 $\Delta K, I_r$ はそれぞれ、気温、日照量に関わるパラメータである。これらは場所により異なるが、ここでは簡単のために $\Delta K I_r = 1$ とする。また、 $f(x)$ は、太陽光発電の電流-電圧特性を表す関数である。

次に、蓄電池が構成するネットワーク上で電力を融通するためのモデルとして、以下のよう

なコンセンサスダイナミクスを検討する。地区*i*の太陽光発電に設置した蓄電池に蓄えられた電気を x_i で表すとき、 x_i の従うルールは以下の通りである[4]。

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j \in N_i} k(x_j - x_i)$$

ここで、 N_i は地区*i*に隣接する地区の集合である。

3. シミュレーション結果

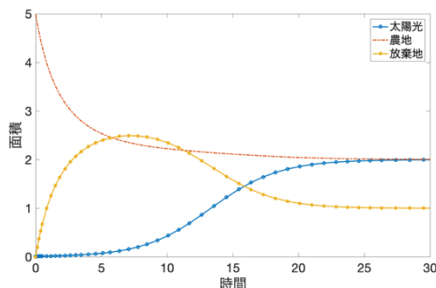


図 1: 利用面積の遷移 (協調的利用)

図 1 には、ある地区における協調的な土地利用をシミュレーションした結果を示す。太陽光発電用地と農地が同一面積となるように収束している。生産性の観点から、必ずしも同一面積になる必要性はないが、ここでは簡単のため同一とした。

次に、図 1 のように太陽光発電の普及が収束する過程において、各地区が有する太陽光発電数のばらつきを蓄電池への充電容量のばらつきとして表現する。特に、太陽光発電の土地利用が多い地区から少ない地区へ電力融通を行うことにより、地区間の蓄電電気量のばらつきが小さくなるようにする。単位時間あたりの太陽光発電量が異なる 4 地区の蓄電池の電気量の変化をシミュレーションした結果を図 2 に示す。ここでは太陽光発電用地面積 y_i に応じて蓄電池に蓄えられた電力を隣接地区で相互に融通し、蓄電量の少ない地区においては多い地区からの供給が起きていることがわかる。このシミュレーションでは全ての地区が相互に融通可能であることから最終的な蓄電量が同一となっている。ここで、図 2 のシミュレーションの時間スケールは図 1 のスケールに比べて十分に短いことを想定している。

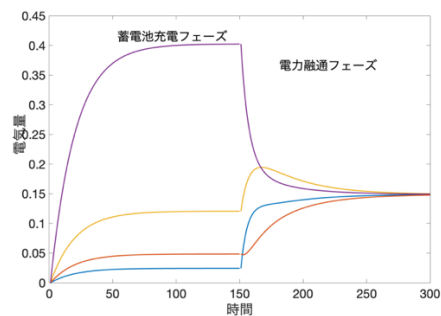


図 2: 蓄電池の電気量の変化。

4. 終わりに

本論では、農地と太陽光発電と耕作放棄地に着眼した土地利用の簡易モデルから FIP 制度について検証を試みている。土地利用からすれば、発電量や収量といった生産性の向上は期待できるが、区域指定で太陽光発電と農地の比率を同一とする土地利用規制をしたものとみなすことができる。FIP 制度に土地利用規制に係る政策を付加することで、太陽光発電と農地の土地利用における協調モデルの成立性を示している。さらに、隣接地域の蓄電地の投資促進や実装のばらつきが平衡状態に収束する結果を示した。これは FIP 制度の狙いである再生可能エネルギーと電力調整の実現や電力市場統合の可能性を示唆しており、FIP 制度の有用性を示すことができた。脱炭素社会に向けたエネルギーの地産地消や里山保全などを担保するポスト FIP 制度に向けた制度設計や政策は今後の課題である。今後は、地域の土地利用における太陽光発電、農地、耕作放棄地の本モデルによるシミュレーション結果を具体的な参照事例とともに比較検証する。

参考文献

- [1] 変動性再生可能エネルギー大量導入時の電力部門の経済性評価—モデル分析からのインプリケーション, 日本エネルギー経済研究所, 松尾雄司
- [2] 綿引, 安東, 野口: 「競争系による太陽光発電パネル設置数変動の数理モデル」 日本 OR 学会 2021 秋季研究発表会
- [3] Marcelo Gradella Villalva et al., "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays" (2009)
- [4] Reza olfati-Saber et al., "Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems" (2007)