

建築学専攻
都市環境工学研究

MJ22010 ^{いがらし かずき} 五十嵐 和樹
指導教員 栗島 英明

1. はじめに

2050年までのカーボンニュートラル達成のため、発電時に二酸化炭素（以下、CO₂）を排出しない再生可能エネルギー（以下、再エネ）の導入量が大幅に増加している。一方で、天候変化等による発電量の変動性が大きい太陽光や風力等の再エネは、電力需給の調整を目的とした出力制御が行われている。今後、再エネの導入量をさらに増加させるためには、蓄電システム等の電力需給の調整力の確保が必須である。

こうしたなか、電気自動車（以下、EV）を系統電力に接続して蓄電システムの代替として用いる Vehicle-to-Grid（以下、V2G）の可能性が指摘されている。昼間の余剰電力をEVに蓄電し、これを夜間に放電するV2Gの導入により、再エネの普及拡大とCO₂削減に大きく貢献できる可能性がある。

V2Gは欧米を中心に研究が進められている。Visal et al.¹⁾は、スペインのメノルカ島においてV2G導入時のCO₂削減効果を検証し、その有効性を示した。しかし、島内の限られた自動車のみを対象としており、導入効果の検証としては十分ではない。Christopher et al.²⁾は、アメリカの複数州を対象にV2G導入時のCO₂削減効果のシミュレーションを行った。しかし、各州の既存の電源構成での検討のため、再エネの導入可能量は検証できていない。五十嵐ら³⁾は、2040年の種子島を対象としたV2G導入の評価を行い、一定のCO₂削減効果があることを示した。しかし、EVの充電時間・台数、再エネの導入量等を固定して分析を行ったため、導入の最大効果を示せていない。

以上より本研究では、再エネ導入量とV2Gについて、エネルギーコストとCO₂排出量の2つの側面から最適化計算を用い、その効果を評価する。これにより、最適なEVの充放電時間や台数、再エネ導入量を推計し、その効果を示すことができる。研究対象地域は、本土とは独立した電力系統の離島であり、年間出力制御日数が100日を超える鹿児島県種子島とし、EVへの転換が十分に進むと予想される2050年を想定して分析を行った。

2. 研究方法

本研究は、線形計画法を用いてエネルギーコ

目的関数:

TC : 年間総エネルギーコスト(円), 年間総CO₂排出量(kg)

$$TC = \sum_{i=1}^3 \left(pf_i \times K_i + \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{24} pv_i \times X_{i,d,t} \right) + \sum_{j=1}^2 (pf_{S_j} \times Skwh_j)$$

pf_i : 発電所*i*のインシヤルコスト(円/kW・年), CO₂排出量(kg/kW・年)

pv_i : 発電所*i*のランニングコスト(円/kW), CO₂排出量(kg/kW)

pf_{S_j} : 蓄電設備*j*のインシヤルコスト(円/kWh・年), CO₂排出量(kg/kWh・年)

変数:

$X_{i,d,t}$: 発電所*i*の*d*日*t*時の出力(kW)

K_i : 発電所*i*の容量(kW)

$Cha_{j,d,t}$: 蓄電設備*j*の*d*日*t*時における充電(kWh)

$Dis_{j,d,t}$: 蓄電設備*j*の*d*日*t*時における放電(kWh)

$SS_{j,d,t}$: 蓄電設備*j*の*d*日*t*時における蓄電量(kWh)

$Skwh$: 蓄電池の容量(kWh)

$i \in \{1: 火力, 2: 太陽光, 3: 風力\}$

$j \in \{1: 蓄電池, 2: V2G\}$

$d \in \{1, 2, \dots, D\}$ D : 1年間の日数($D = 365$)

$t \in \{1, 2, \dots, 24\}$ 時間

図1 目的関数と変数

表1 各種原単位

		火力発電	太陽光発電	風力発電	蓄電池	V2G
エネルギー	pf_i, pf_j	7,050	4,000	6,000	6,000	0
コスト	pv_j	37.4	0	0	0	0
CO ₂ 排出量	pf_i, pf_j	378	68	40	17.7	0
	pv_j	0.714	0	0	0	0

ストやCO₂排出量が制約条件下で最小となる電力需給運用について最適化計算を行った。目的関数と変数を図1に示した。2050年の種子島の電源構成として火力、太陽光、風力の各発電設備及び蓄電池、V2Gの蓄電設備を想定し、各種設備容量、発電量、充放電量を最適化変数とした。なお制約条件は、小宮山ら⁴⁾を基に、電力需給バランス制約、設備容量制約、最低出力制約等を設定した。また独自の制約条件として、V2G充放電一致制約、1時間あたりのV2G最大充電量制約、V2G最小蓄電量制約等を追加した。また、電力需給の予測は、五十嵐ら³⁾のものを用いた。

モデル内で使用している各種コスト、CO₂排出量の原単位は、既往文献を基に独自に設定した。表1に設定した各種原単位を示した。

3. 結果と考察

表2に最適化計算の結果を示した。V2G未導入時のエネルギーコスト最適化をモデル1、V2G導入時のエネルギーコスト最適化をモデル2、V2G未導入時のCO₂排出量最適化をモデル3、V2G導入時のCO₂排出量最適化をモデル4とし、ベンチマークとして、現在の再エネの設備容量のまま、V2Gを導入せずに2050年に

表 2 最適化計算の結果

	年間コスト (億円)	年間CO ₂ 排出量 (kt-CO ₂)	火力発電 設備容量 (MW)	太陽光発電 設備容量 (MW)	風力発電 設備容量 (MW)	蓄電池 設備容量 (MWh)	火力 発電量 (GWh)	出力 制御量 (MWh)
モデル0	28.1	56.5	14.0	15.1	4.2	1.2	70.0	5
モデル1	24.1	45.8	10.0	37.4	9.1	16.6	54.4	16,404
モデル2	22.6	44.3	8.7	44.7	7.8	1.2	52.7	19,795
モデル3	26.4	44.6	8.3	31.7	20.2	63.7	52.3	28,626
モデル4	22.9	43.8	8.4	34.3	22.2	1.2	52.3	35,185

なった場合をモデル0とした。

モデル1, 2では, V2Gの有無にかかわらず, モデル0より再エネ導入量が増加した。これは化石燃料価格の上昇によって火力発電のコストが大幅に増加するため, 再エネ導入によりコストを抑えようとしたためである。V2G導入時は, 再エネをさらに活用できるために, 年間コストはモデル0と比較して約5.5億円減少した。モデル3, 4では, 発電時にCO₂を排出しない再エネを最大限活用しようとするため, モデル0より出力制御量が大幅に増加した。また, V2G未導入のモデル3では, 再エネを活用するために蓄電設備が必要となって年間コストが増大する。しかしV2Gを導入したモデル4では, 年間コストを抑えつつ, CO₂排出量も大幅に削減された。

一方でV2G導入時の2つのモデルでは, コスト, CO₂排出量ともに大きな差は見られなかった。これは制約条件の1つである最低出力制約が原因と考えられる。最低出力は, 火力発電の電力供給を維持するために最低限必要な出力である。V2G導入時, 火力発電はモデル2では年間で93%, モデル4では95%の時間で最低出力運転をしており, コストとCO₂排出量に大きな差が生じなかった。最低出力は現在でも再エネの普及を阻害しており, 最低出力の引き下げの検討が行われている。しかし, 独立した電力系統の離島地域ではさらに抜本的な解決が必要であることが示された。

また, 図2にモデル4のV2Gの時間別年間充放電割合を示した。日中の8時~17時は年間の5割以上の日数で充電が行われ, 電力需要が集中する18時~22時の時間帯では5割以上の日数で放電が実施されていることが分かった。これは帰宅後に充電を行う現在のEV利用者の充電行動とは異なっており, 利用者の充電行動の移行を促す施策が必要であることが示された。

4. おわりに

本研究では, 2050年の種子島を対象に再エネとV2G導入の最適化計算を行い, その効果を検

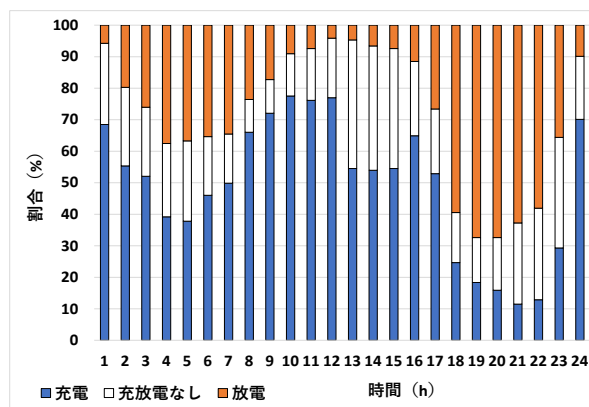


図 2 モデル4のV2G時間別年間充放電割合

証した。その結果, V2G導入により, 年間コスト, CO₂排出量ともに大幅に減少し, 再エネ導入量も増加することが示された。一方で, V2Gには逆潮流に伴う送電線の強化コストやEVの充放電マネジメントシステムのコスト等, 間接的に必要となるコストについて, 金額を設定できなかったため, 考慮できていない。V2G導入に伴うコストを明確にすることが今後の課題である。

文献

- 1) Visal Raveendran, Carlos Alvarez-Bel, Manjula G. Nair (2020) "Assessing the ancillary service potential of electric vehicles to support renewable energy integration in touristic islands: A case study from Balearic island of Menorca" *Renewable Energy*, Vol.161, pp495-509.
- 2) Christopher G. Hoehn, Mikhail V. Chester (2016) "Optimizing plug-in electric vehicle and vehicle-to-grid charge scheduling to minimize carbon emissions" *Energy*, 115-1, pp646-657.
- 3) 五十嵐和樹, 栗島英明, 菊池康紀 (2022) 種子島における再生可能エネルギーを用いた Vehicle-to-Grid システムの評価, 環境情報科学学術論文集, 36, pp87-92.
- 4) 小宮山涼一, 柴田紗英子, 中村洋祐, 藤井康正 (2011) 出力変動を考慮に入れた太陽光発電と蓄電池の最適電源構成からみた導入可能性分析, 電気学会論文誌 C, 131-10, pp1705-1