

空港におけるEV売買を考慮した グリッド事業の成立可能性に関する研究

宮崎 優¹・屋井 鉄雄²

¹非会員 阪急阪神ホールディングス株式会社 (〒530-0012 大阪府大阪市北区芝田1-16-1)

E-mail: miyazaki.s.ad@m.titech.ac.jp

²正会員 東京工業大学教授 環境・社会理工学院 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町4259)

E-mail: tyai@enveng.titech.ac.jp

持続可能な社会に向けたエネルギー効率向上の促進のため、電動モビリティのV2G運用などの新たな取組みが活発である一方で、再生可能エネルギー発電の増加や分散型発電の拡大のように、エネルギーインフラ側の変化も活発である。本研究ではマイクログリッド構想の導入が考えられている空港に着目し、大規模太陽光発電導入や空港を取り巻く電動モビリティの蓄電池利用を考慮したグリッド事業の成立可能性を分析する。EV旅客と空港が電力売買や蓄電池貸借など独自の電力取引が可能な状況下でのシミュレーションを行った。分析の結果から、EV旅客との電力売買や蓄電池貸借を通じて一日当たりの消費電力コストやグリッド事業の初期投資のコストを削減することが可能になり、空港グリッド事業の成立可能性を高める可能性が示唆された。

Key Words : *electric vehicle, micro-grid, photovoltaic system, electricity transaction, airport*

1. 本研究の背景と目的

エネルギー効率向上の促進が世界的な流れになっている中で、世界のエネルギー消費の1/4を占める交通分野では、エネルギー効率向上の一つの策としてEV (Electric Vehicle) やBEBs (Battery Electric Buses) などの電動モビリティが着目されている¹⁾。近年ではエネルギーシステムとしてのV2G運用など新たな取組みも行われている²⁾なかで、電動モビリティの運用については電力取引等を考慮したさらに解像度を向上させた研究や実証が今後は必要である。

一方、エネルギーやインフラの面からは、再生可能エネルギー発電割合の増加/分散型発電の促進が進められていると同時に、再エネ発電/分散型発電/急速充電などによる電力網への影響が問題視されている³⁾。電力網への影響減や停電耐性向上などが期待されるマイクログリッド構想はそれらの問題解決の一つの方向性で導入が検討されている。マイクログリッドとは、複数の小さな分散型電源/電力貯蔵装置/電力負荷などがネットワークを形成する一つの自律的なエネルギー供給網のことを指す。

このようなマイクログリッド構想の導入が考えられている場所の一つに空港がある。環境の保全及び良好な環境の創造を推進する「エコエアポート化」⁴⁾に向けてEVや再エネ発電の導入、また空港駐車場のEVの蓄電池利

用の構想等が進められている。長期的には空港のカーボンニュートラル目標を達成したうえで、さらに導入を加速させ平常時/災害時ともに空港外に売電をすることで地域の再エネ拠点としての空港を目指している。

以上のような背景から、今後電力市場に関与するステークホルダーは多数化し、加えて、蓄電池を持つ電気自動車やエネルギーシステムとしての機能を有し、新たなステークホルダー間での電力取引といった電力市場の複層化が起こることが考えられる。

そこで本研究では、EVが電力売買や蓄電池貸借を行うような状況設定のもとで、グリッド事業を行った際の対環境面やインフラ面への効果や問題点について分析する。特に、「空港敷地内で着陸帯の一部を利用した大規模再エネ発電の導入」や「空港駐車場における旅客EVの蓄電池利用」を取り入れた空港マイクログリッド事業が成立することを示すのが目的である。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

近年EVのV2G運用についての研究は非常に活発化していて、その電力輸送における電線代替可能性や電力網への調整/予備電力としての潜在的な価値について分析されている⁵⁾。そしてそれら電動モビリティが移動先で

売電するといった、各ステークホルダー間で独自の電力売買が可能な状況を再現するシミュレータを開発した研究¹⁰⁾を本研究では先行研究として位置付けている。また空港マイクログリッドに関連して、空港の泊車EVの蓄電池に着目した電力取引による利益を算出する研究や¹¹⁾、V2G運用を通して空港マイクログリッドの性能が向上することを示した研究¹²⁾もなされている。

しかしそれらの電力取引で注目しているEVユーザーの交通手段選択を始めとした行動原理を分析している研究はほとんどない¹³⁾。またV2G運用において電力の売買を行っている研究⁹⁾¹⁴⁾はいくつか存在するが、EVの蓄電池そのものを貸借するようなシステムを考えている研究は見つからない。さらにそれらのユーザーの行動に紐づいて空港マイクログリッド事業の成立可能性について横断的に研究されたものは見当たらないのが現状だ。

そこで本研究では、空港マイクログリッド（以下「空港G」と称する）とEV世帯旅客間でEVの売電や蓄電池の利用まで考慮した電力取引を行っている状況を仮定する。そのような状況下での各ステークホルダー間のインタラクションを表現したシミュレータの開発を行い、それを用いて各世帯や空港の諸条件を変化させ空港マイクログリッド事業の成立可能性や効果の分析を行う。

3. 本研究の状況設定

(1) 本研究特有の状況設定

a) グローバルな電力取引とローカルな電力取引

近年の活発なV2G運用の取り組みや電力自由化の流れを受け、本研究では大手電力会社のような幹線グリッドとの電力売買（＝グローバル電力取引）が行われる一方で、その他のステークホルダー間でも独自の価格設定に基づいた電力取引（＝ローカル電力取引）が可能な状況を仮定する。図-1に示すように、グローバル電力取引での価格（＝定価）に対して、ローカル電力取引での価格（＝特価）は定価買取価格よりも高く、定価販売価格よりも安く設定される。つまり、売り手と買い手の双方が

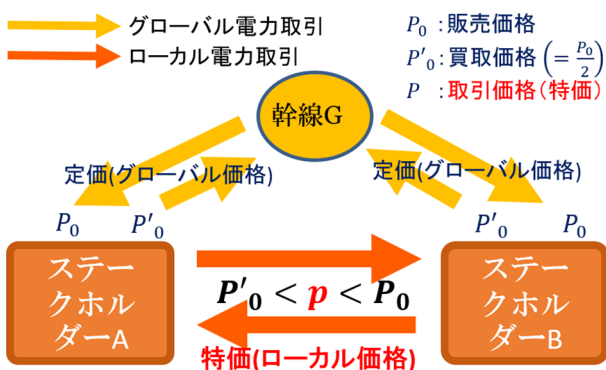


図-1 本研究でのグローバル電力取引とローカル電力取引

金銭的に得をする電力取引が発生してしまっている状況を仮定する。本研究では、空港GとEV世帯はローカル電力取引を行う主要なステークホルダーである。

b) 時間帯・天候変動型のグローバル価格

本研究では太陽光発電が主となった状況を前提とし、時間帯・天候変動型のグローバル価格を仮定する。図-2に示すように一日を4つの時間帯に区分し、太陽光割引料金時間帯(8:00~17:00)では、快晴時ほど電力の余剰が発生しやすいため電力価格が安価になる。一方で、実質需要（＝電力需要から変動型エネルギー源の供給を差し引いたもの）が急激に変化するダックカーブ料金時間帯(17:00~19:00)では、快晴時ほど電力価格が高騰するグローバル価格を仮定する。すなわち、天気の良いほど日中の電力価格は安く、夕方の電力価格は高いという電力価格がグローバル電力取引では用いられている。

c) 世帯取引積極性の導入

本研究ではステークホルダーの1つとして「EV世帯」を導入する。各EV世帯の電力取引に関する積極性というものは世帯ごとに異なると考えられる。例えば電力売買において、1円でも儲けるなら取引する世帯も存在すれば、10円以上儲けないなら取引しない世帯も存在するだろう。そこで本研究では「世帯取引積極性」という概念を用いることで各EV世帯の選択や行動のばらつきを表現する。

d) 着陸帯の一部を利用したPV設置

空港はカーボンニュートラル目標を達成したうえでさらなる再エネ拠点を目指すようなステークホルダーとなるため大規模な発電能力が必要である。従来の法律ではターミナルビル上や駐車場上に太陽光パネルを設置することができる。今後法整備が進むとともに技術が発展し、シート状のPVパネルや緊急時に瞬時に電気を遮断し発火を防止できるようなPVパネルが開発されることで、着陸帯にもPVを設置できるような状況を仮定する。既往研究のアンケート調査の結果¹⁵⁾から本研究では着陸帯にPVを設置することでのパイロットへの太陽光の反射の影響は少ないとして考慮しないが、空港でのマイクログリッド事業を実装する際などには、太陽光グレア被害の分析ツール¹⁶⁾などを用いて、パイロットへの影響が生じないように設置場所を設計することが必要である。

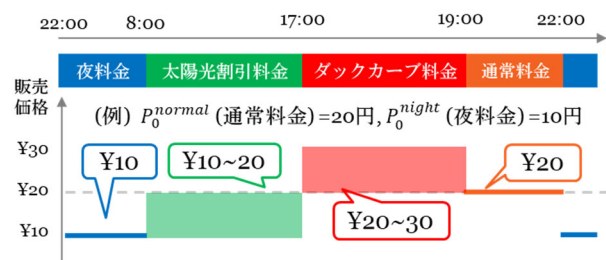


図-2 天候連動型・時間帯別グローバル電力価格の概要

(2) 問題定式化の範囲

本研究では、空港でのグリッド事業とEV世帯のインタラクションに着目して分析を行うため、図-3で示されるように、空港への移動需要がある都市エリアのバス乗降所と空港を幹線道路が繋ぎ、そこを始点/終点とした片道50kmのバスルートを想定し、空港への移動のついでに電力取引を行うという状況を仮定する。

都市エリアには種々の特性（世帯位置、EV有無、移動目的、世帯人数、その他交通手段選択係数など）を持つ世帯がランダムで配置されている。都市エリア内の配電網は各世帯、幹線Gを結んでおり、次節で述べるシナリオに従って各ステークホルダー間での電力取引を行う。なお本研究では、世帯が蓄電池を所有しておらず、全てのEV世帯が太陽光発電設備を所有していると仮定している。また移動時間算出の簡略化のため各世帯からは幹線道路に垂直に伸びる細街路が存在する状況を仮定する。

空港ではターミナルビル上や着陸帯の一部などにPVを設置し、蓄電池を活用して発電電力を運用するグリッド事業を行っている状況を設定している。

表-1に都市エリアの各種スケールを示す。各種参考文献から、バスルート総延長は50km、バス勢圏は500mとし、バス停までの距離が500m以内の世帯はバス停へは徒歩で移動するとし、500mを超える世帯はタクシーなどのモビリティを利用する。なお、分析における各種都市指標は広島県広島市と広島空港を参考としている。

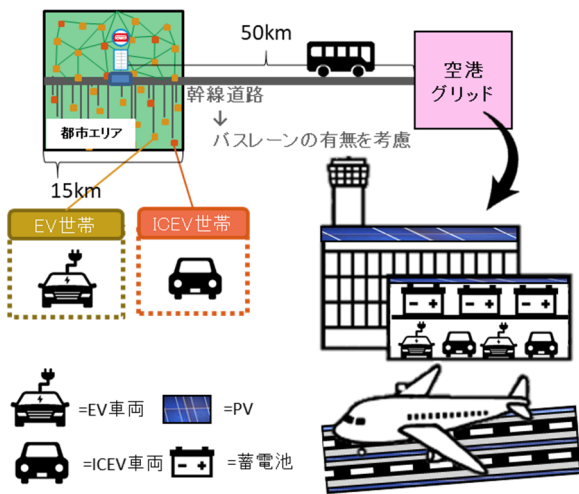


図-3 都市モデル全体概要と都市エリア内概要

表-1 都市モデルに関する各種数値

各種項目	数値（広島市，広島空港参考）
面積	225km ² (15 km 四方)
人口と世帯数	120万人, 50万世帯
空港への移動需要	2000トリップ/日
空港利用者	300万人（平成30年度）
空港敷地，駐車場台数	200ha, 3800台

図-4は本研究における問題定式化の範囲を示しており、各ステークホルダー間の関係性を人の流れと電気の流れを用いて表している。本研究では空港G、EV世帯、ICEV世帯の3つを着目ステークホルダーとして位置づけている。都市エリアには、EVと太陽光発電設備を持つEV世帯と、ICEVのみを持つICEV世帯が外生的に与えられた割合で存在する。毎日2000トリップ分の空港Gへの移動需要を有しており、トリップを行う各世帯は移動手段として自家用車かBEBsかの選択を行う。本研究では自家用車とBEBs以外の交通手段は考慮しない。

本研究では一般世帯内で生じる可能性のある種々のトリップのうち、自家用車を選択できるトリップは空港トリップのみであると仮定する。したがって空港トリップで自家用車が選択された場合、他のトリップでは自家用車は選択することができないのはもちろんのこと、BEBs選択の際もEVが自宅の電力運用に参加し特価での電力取引ができると想定して交通手段選択を行っているため、他のトリップでの自家用車選択はできないと仮定している。

(3) 各着目ステークホルダーの行動原理

a) EV世帯（表-2）

EV世帯は都市エリアと空港Gを往復する移動需要を有し、その移動手段としてBEBか自家用車かの二項選択を、それぞれの交通モードの時間的効用と金銭的効用を加味して行う。EV世帯の場合は自宅や空港Gでの売電行動や蓄電能力貸借が発生することから、走行に必要な電気の支出だけでなく、売電収入も金銭的効用に含まれる。

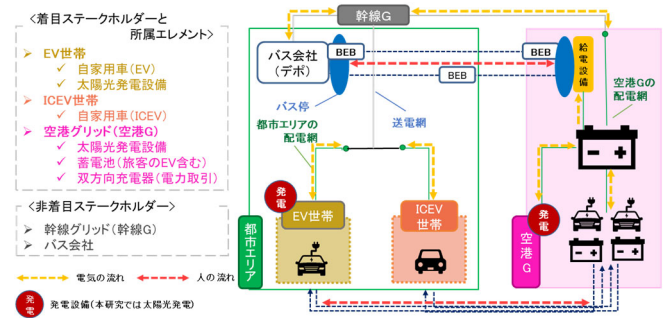


図-4 本研究における問題定式化の範囲とステークホルダー

表-2 EV世帯の行動理念と外生変数/金銭収支/電力収支

項目	内訳
行動理念	効用最大化（時間効用と金銭効用の最大化）
外生変数	電力取引積極性，世帯人数，旅行日数
収入	空港Gでの売電，空港Gでの蓄電池貸借収入，自宅での売電（特価，定価）
支出	運賃，駐車料金，幹線Gからの買電
電力供給	幹線Gからの買電，自宅での太陽光発電
電力支出	走行消費，空港Gでの売電，自宅での売電，家庭電力消費

本研究で記述されるEV世帯の売電/買電行動については、必要最小限の行動以外に関しては「移動ついで」の売電/買電行動に着目し分析を行う。従ってモビリティとしての運用を優先的に行い、エネルギーシステムとしての積極的な運用は行わない状況を分析対象とする。すなわち、売電/買電行動を行うためのEV世帯の新たな移動需要は考慮しない。

b) ICEV世帯 (表-3)

EV世帯と同様、ICEV世帯も都市エリアと空港Gを往復する移動需要を有し、その移動手段としてBEBか自家用車かの二項選択を行う。選択に当たってはEV世帯と同様に、各交通モードの時間的効用と金銭的効用を加味するが、EV世帯と異なりICEV世帯の電力取引は考慮しない。ICEV世帯は本研究において主要なステークホルダーではなく一種の定数項のような働きをするが、バスサービスや空港状況によって交通の分担率が変化するため、着目ステークホルダーの一つとして設定した。また、ICEV世帯のEVへの買い替えは考慮せず、外生的に与えられた比率に応じて各世帯数を設定する。

c) 空港G (表-4)

大規模PV導入による発電設備、ターミナルビルやモビリティの充電などの消費/負荷、空港初期蓄電池や旅客EV蓄電池などの貯蔵設備を備えた一種のマイクログリッドとして考える。EV世帯をローカルな電力取引先とし、そこからの買電や蓄電池借りによってマイクログリッドとしての発電電力や蓄電容量の一部を補う状況を

表-3 ICEV世帯の行動理念と外生変数/金銭収支/電力収支

項目	内訳
行動理念	効用最大化 (時間効用と金銭効用の最大化)
外生変数	(なし)
収入	(なし)
支出	運賃, 駐車料金, 燃料代, (幹線 G からの買電【考慮しない】)
電力供給	(幹線 G からの買電【考慮しない】)
電力支出	(家庭電力消費【考慮しない】)

表-4 空港Gの行動理念と外生変数/金銭収支/電力収支

項目	内訳
行動理念	総コスト最小化, SOC の安定化, 利益最大化, 環境負荷低減
外生変数	基本情報: 敷地面積, 利用人数, 駐車場台数 インフラ関連: 導入 PV 面積, 初期蓄電池容量, 駐車場双方向充電器数 コスト関連: 空港電気料金, 幹線 G 売電料金, その他インフラ設置費用
収入	駐車場料金, 幹線 G への売電
支出	幹線 G からの買電, 発電コスト, EV 世帯への取引コスト, インフラ初期費用
電力供給	空港での太陽光発電, 幹線 G からの買電, EV 世帯からの売電
電力支出	空港電力消費, EV 世帯/BEBs への充電

設定する。

本研究では空港での電力運用は『安定的電力運用ケース』と『積極的電力運用ケース』の2つのケースに分けて考えている (表-5)。設置するPV面積による発電量と消費量の大小から区別し、内部の消費電力を賅い空港の再エネ率を上げることから始まり、運用できる余剰電力が増えるごとに幹線Gや地域への売電を行う。EV世帯との電力取引による空港マイクログリッドの成立可能性について分析するにあたり、2種類のケースを比較することで、空港が今後再エネ拠点化を目指す際の各フェーズにおける政策などについても言及していきたい。

空港内に訪れたモビリティの動きを示したフロー図を図-5に示す。新しく空港に移動してきたモビリティが駐車利用か泊車利用かで場合分けを行い、駐車の場合は電力やり取りのみ、泊車利用の場合は電力やり取りに加え蓄電池貸借も行う可能性がある。

(4) EV世帯と空港Gのインタラクション

図-6に本研究で仮定しているEV世帯のローカル電力取引を示す。EV世帯, ICEV世帯の双方は、時間的/金銭的効用を考慮して自宅-空港G (空港) 間移動に用いる

表-5 本研究におけるケース分けと各ケースにおける状況

項目	ケース1	ケース2
シナリオ	安定的電力運用	積極的電力運用
行動理念	総コスト最小化 SOCの安定化	利益最大化 環境負荷軽減
発電/消費関係	発電<消費	発電>消費
PV導入箇所	駐車場やターミナルビル上など	(ケース1に加えて) 着陸帯上の一部
EV世帯との主要な取引	電力売買	電力売買 +蓄電池貸借

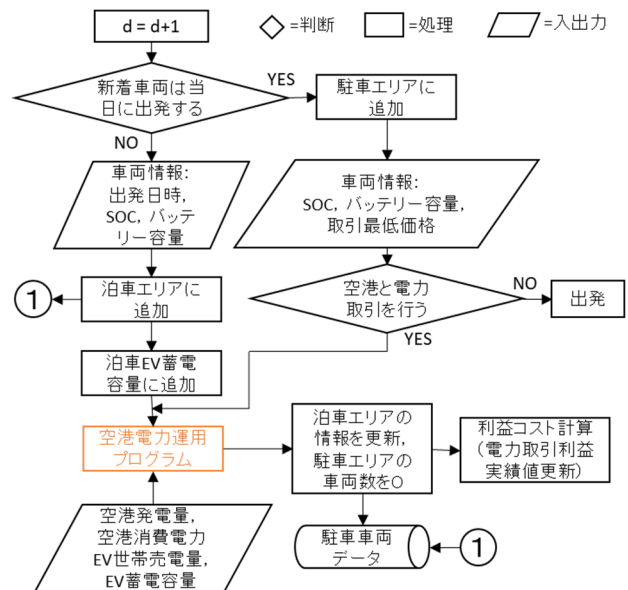


図-5 空港内旅客EV行動フロー

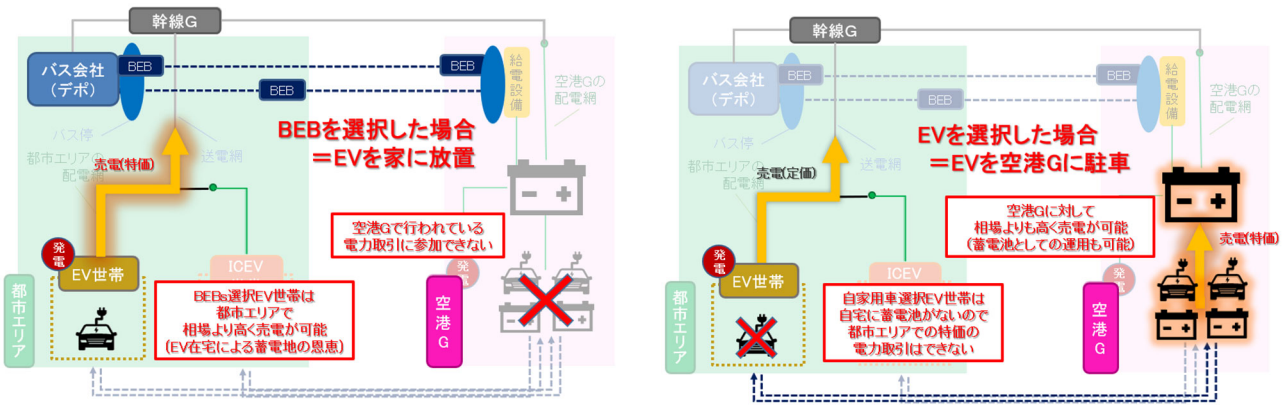


図-6 EV世帯の交通手段選択に応じた電力取引と制約 (左図: BEB 選択時, 右図: EV 選択時)

交通モードを選択する。移動手段としてBEBを選択するとEVが家に放置されるため、家庭電力消費分をEV蓄電池から放電したり(V2H)太陽光発電余剰分をEV蓄電池に蓄電したり(H2V)することが可能である。そして自宅での充放電の時刻を自由に調整できることで、幹線Gとのグローバルな電力取引の際に特価での売電が可能になるが、空港Gにおける電力取引には参加できない。一方で自家用車 (EV) を選択した場合は、空港でEVを駐車することにより空港Gに対して特価での売電や蓄電池貸しが可能になる。ただし、自宅でのV2HやH2Vを行うことはできず、常に幹線Gとは定価で電力取引が行われる。なお、EV世帯の電力売買による金銭的効用は期待値で算出され、期待効用をもとに各EV世帯が出発前に交通手段の選択を行うため、天候の不確実性や空港での電力状況などにより実際の効用とは誤差が生じることに注意が必要である。

4. 競合シミュレーションの開発

(1) 分析手法について

第三章で述べたようにそれぞれのステークホルダーが利益最大化/コスト最小化の行動原理に基づいて個別に行動を行うことにより行動の不透明性が生じる点、行動が確率的に選択されランダム要素を含む点、最適化としては目的変数が多く複雑化することが予測される点などに加え、ネットワーク化や更なるステークホルダーの導入等の将来的な展開を考慮して、本研究ではシミュレーションによる分析を行う。なお、シミュレータは先行研究¹⁰⁾を参考に1から作成したものであり、使用言語はC++、解析ソフトはMicrosoft Visual Studio Community 2019を用いている。競合シミュレータは6,000行程度のコードで記述されており、1回のシミュレーション計算に要する時間は約4分程度である。

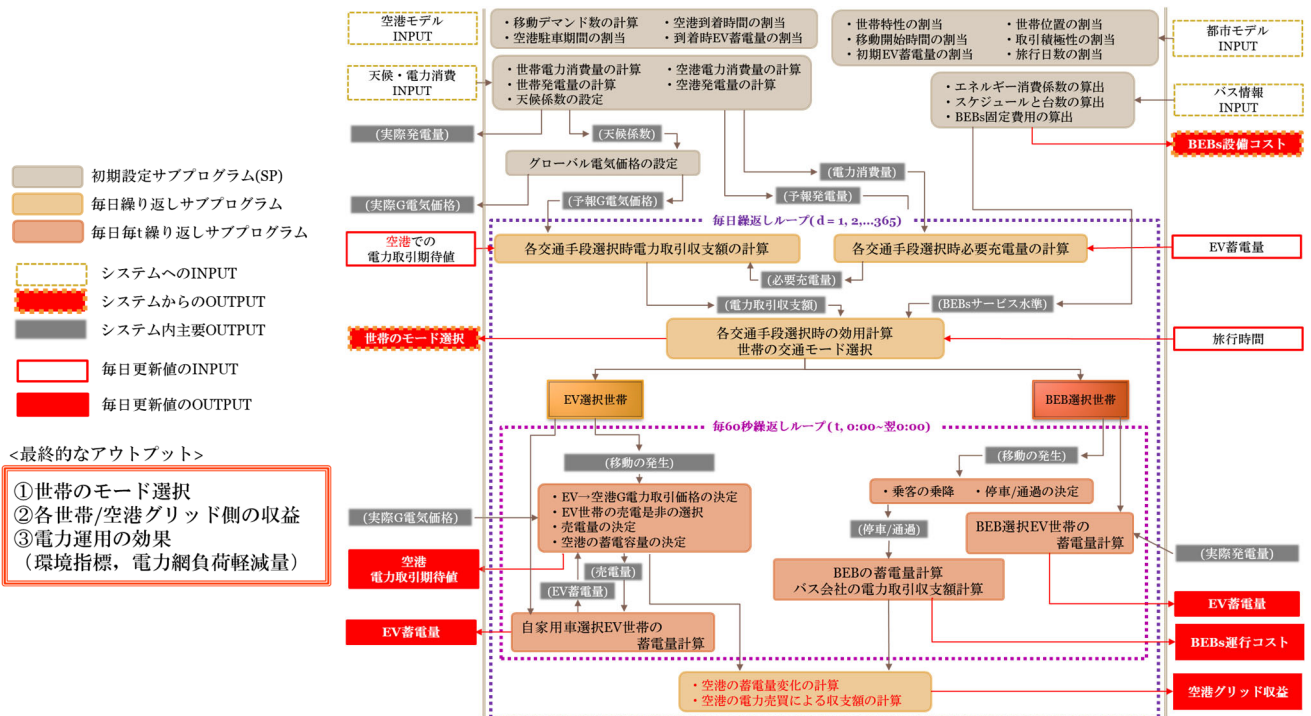


図-7 競合シミュレーションのフロー全体概要 (サブプログラムの依存関係)

(2) 開発したシミュレータのストラクチャー

図-7に本研究で開発した競合シミュレータのストラクチャーを示す。表-6に示すように、システムへのインプットは、都市モデルに関するデータ、空港モデルに関するデータ、天候/発電/電力消費に関するデータ、EV/BEBs 設定に関するデータ、その他のデータの5つに大きく分けられ、システムの最終的なアウトプットとしては、世帯のモード選択の結果、空港Gの収益、電力運用の効果を主な出力として位置づける。

シミュレーションは初期値の設定からスタートし、毎日の繰り返しループに進む。各日の数値設定終了後は毎日の繰り返しループに進み、一日が終了した後に各種数値を更新して翌日のシミュレーションが再度繰り返される。更新する初期値は空港G電力取引期待値、空港駐車場内の車両状態、EV 世帯充電上限量の3つである。空港は前日の電力取引の詳細、またそれによって決まるEV 世帯充電上限量、そして現在の空港の駐車場の状況を公開していると仮定するため、翌日の空港旅客の初期値として入力している。シミュレーションは初期値の影響が残る最初の7日間を除いて1ヶ月単位の空港の動きを見るため、40日経った時点でシミュレーションは終了させる。なお、シミュレーションにおける時間の最小単位は、60秒としている(1 ≤ t ≤ 1440)。

表-6 競合シミュレーションへのインプット一覧

項目	数値	備考
都市モデルに関するデータ		
人口密度	5333.3(人/km ²)	広島市市街地
世帯密度	2222.2(世帯/km ²)	同上
自家用車保有率	1.0(台/世帯)	(仮定)
世帯人員別世帯分布	MD	中国地方・全国 ¹⁷⁾
空港利用目的比(業務:観光)	6:4	広島空港 ¹⁸⁾
旅行日数	MD	同上
細街路表定速度	15(km/h)	細街路交通 ¹⁹⁾
幹線道路自動車表定速度	60(km/h)	ルート検索結果の所要時間から仮定
幹線道路バスレーン表定速度	78(km/h)	自動車の1.3倍の速度と仮定
ガソリン代	165.2(円/L)	広島県揮発油(レギュラー) ²⁰⁾
駐車場代	800(円/日)	広島空港駐車場料金 ²¹⁾
バス運賃	1300(円/回)	広島空港交通アクセス ²²⁾
空港モデルに関するデータ		
建造物の割合	4(%)	Google mapで計測
着陸帯の割合	50(%)	同上
滑走路の割合	46(%)	同上
空港発着便数	35(機/日)	広島空港

単位時間当たりGPU消費電力	0.72(kWh/分)	B474 ²³⁾
一機当たりGPU使用時間	30(分/機)	広島空港 ²³⁾
双方向充電器設置コスト	60(万円/台)	nichiconカタログ ²⁴⁾
PV出力あたり設置コスト	22(万円/kW)	資源エネルギー庁 ²⁵⁾
太陽光発電運転維持費	5000(円/kW/年)	同上
蓄電池容量当たり導入コスト	9.8(万円/kWh)	三菱総合研究所 ²⁶⁾
天候/発電/電力消費に関するデータ		
年間特別日射量	MD(kWh/m ²)	広島県広島市,平均年,傾斜角34度,方位角0度
日射量予測誤差データ	MD(kWh/m ²)	全天日射量,当日6時
標準試験条件における日射強度	1.0(kWh/m ²)	既往研究
太陽光発電システムの定格出力	4.67(kW)	広島県平均設置容量
大規模太陽光発電の定格出力	0.085(kWh/m ²)	国土交通省 ⁷⁾
温度補正係数	0.825	タイプ平均,各月平均
その他のシステム補正係数	0.80	既往研究
月別時間帯別世帯消費電力	MD(kWhh/世帯)	首都圏
EV/BEBs設定に関するデータ		
EV蓄電池容量	40(kWh)	EVカタログ ²⁷⁾
EVの電費	0.10872(kWh/km)	同上
EV最大SOC	100(%)	(普通充電を仮定)
EV最小SOC	10(%)	既往研究 ²⁸⁾
ICEVの燃費	12.33(km/L)	既往研究 ²⁹⁾
バス頻度	20(分)	(広島空港運用より仮定)
バス定員	50(名)	同上
バスの電費	2.5(kWh/km)	既往研究 ³⁰⁾
BEBs最大SOC	90(%)	同上
BEBs最小SOC	30(%)	同上
停車型充電出力	500(kW)	(各資料より仮定) ³¹⁾³²⁾
停車型充電器送受電効率	90(%)	既往研究 ³⁰⁾
その他のデータ		
定数項パラメータ	1.07	空港アクセス評価 ³³⁾
時間項パラメータ	-0.02128	同上
費用項パラメータ	-0.0003315	同上
収入の効用調整パラメータ	0.5	先行研究 ¹⁰⁾
自家用車選択効用調整パラメータ	MD	-1.0~-0.5の範囲で一様分布
通常電力料金	20(円/kWh)	(東京電力価格より仮定)
夜間電力料金	10(円/kWh)	(東京電力価格より仮定)
空港電気料金	20(円/kWh)	(仮定)

※MD = マトリックスデータ

P_{BEB}^{EV} : EV世帯のBEB選択確率 P_{CAR}^{EV} : EV世帯の自家用車選択確率 V_{BEB}^{EV} : EV世帯のBEB選択時の期待効用 V_{CAR}^{EV} : EV世帯の自家用車選択時の期待効用 C_{BEB}^{EV} : EV世帯のBEB選択時の支出(円) C_{CAR}^{EV} : EV世帯の自家用車選択時の支出(円) I_{BEB}^{EV} : EV世帯のBEB選択時の収入(円) I_{CAR}^{EV} : EV世帯の自家用車選択時の収入(円) β_0 : 効用パラメータ(定数項) β_1 : 効用パラメータ(時間項) β_2 : 効用パラメータ(費用項) γ_1 : 支出に対する収入の効用調整パラメータ β_{CAR} : 自家用車選択効用調整パラメータ t_{move} : 最寄りバス停までの移動時間(分) t_{wait} : バス停での待ち時間(分) t_{BEB} : 乗車時間(BEB)(分) t_{CAR} : 乗車時間(自家用車)(分) $c_{BEB}^{night}, c_{EV}^{night}$: 各交通手段選択時の夜間充電による支出(円) $c_{BEB}^{hh}(t), c_{CAR}^{hh}(t)$: 時刻(t)での各交通手段選択時の家庭不足電力の買電支出(円) $fare_{BEB}$: バス運賃(円) n_{trip} : 旅行人数 $c_{parking}$: 駐車料金(円) d_{park} : 旅行日数 $i_{BEB}^{hh}(t), i_{CAR}^{hh}(t)$: 時刻(t)での各交通手段選択時の家庭余剰電力の売電収入(円)	$i_{EV \rightarrow APT}^{ex}$: EV選択時の電力取引による期待収入(円) $vol_{park}^{EV \rightarrow APT}$: 前日の空港駐車場におけるEV台数 $V_{APT}^{EV \rightarrow APT}$: 空港内駐車場電化済み台数(台) $i_{EV \rightarrow APT}^{battery}$: 空港への売電による期待収入(円) $i_{EV \rightarrow APT}^{battery}$: 空港への蓄電池貸しによる期待収入(円) $I_{T,max}(t)$: 時刻(t)における日射量の最大値(kW/m ²) p_0^{normal} : 通常料金(円/kWh) ϵ : 日射量誤差(kW/m ²) p_0^{night} : 夜料金(円/kWh) $I_T(t)$: 時刻(t)における予測日射量(kW/m ²) p_0^{pv} : 太陽光割引料金(円/kWh) $I_T'(t)$: 時刻(t)における実際日射量(kW/m ²) (大文字=販売価格, 小文字=買取価格) α_w : 予測天候係数 A_{APT}^{gnr} : 空港内の太陽光発電設置面積(m ²) α_w' : 実際天候係数 $e_{gnr}(t)$: 時刻tにおける家庭予測発電量 $e'_{gnr}(t)$: 時刻tにおける家庭実際発電量 $e_{APT}^{gnr}(t)$: 時刻tにおける空港予測発電量 $e'_{APT}^{gnr}(t)$: 時刻tにおける空港実際発電量 P_{AS} : 太陽光発電システムの定格出力(kW) P_{APT} : 大規模太陽光発電システムの定格出力(kW/m ²) G_s : 標準試験条件における日射強度(kW/m ²) K_{pt} : 温度補正係数 K' : その他のシステム補正係数 p_{min+}^m : 世帯(m)の電力取引利益最小額 pr_o^m : 世帯(m)の電力取引積極性 $\delta_{EV \rightarrow APT}^m$: 世帯(m)の電力取引実施スイッチ $P_{EV \rightarrow APT}$: 空港での電力取引価格 $e_{EV \rightarrow APT}^m$: EVの空港への売電総量 E_{APT}^{req} : 空港Gの電力需要
---	---

図-8 サブプログラム内の記述における定義

(3) 主要なサブプログラム内の記述 (図-8)

a) 各交通手段の選択確率と効用の算出

各世帯の交通手段選択は、各交通手段の期待効用から、ロジットモデルで各選択確率を求め決定される。各交通手段の期待効用は時間項と費用項から算出されるが、EV世帯の場合は下式のように売電による収入も加味された効用式で記述される。

$$V_{BEB}^{EV} = \beta_1 T_{BEB} + \beta_2 (C_{BEB}^{EV} - \gamma_1 I_{BEB}^{EV}) \quad (1)$$

$$V_{CAR}^{EV} = \beta_{CAR} + \beta_0 + \beta_1 T_{CAR} + \beta_2 (C_{CAR}^{EV} - \gamma_1 I_{CAR}^{EV}) \quad (2)$$

自家用車の所要時間は乗車時間のみで記述され、バスの所要時間は徒歩時間、待ち時間、乗車時間の和で記述される。なお、バスの待ち時間はバス間隔の半分として簡潔に表現する。

$$T_{BEB} = t_{move} + t_{wait} + t_{BEB} \quad T_{CAR} = t_{CAR} \quad (3)$$

ICEV世帯の場合、自家用車の費用は燃料費と駐車場費、バスの費用は運賃のみで記述されるが、EV世帯の場合は燃料費の要素がなくなり、自家用車/バス双方の費用に電気代が加算される。

$$C_{BEB}^{EV} = fare_{BEB} \times n_{trip} + c_{BEB}^{night} + \sum_t c_{BEB}^{hh}(t) \quad (4)$$

$$C_{CAR}^{EV} = c_{parking} \times d_{park} + c_{CAR}^{night} + \sum_t c_{CAR}^{hh}(t) \quad (5)$$

またEV世帯の場合のみ、売電などの電力取引による収入も考慮される。その収入のうちローカル電力取引による売電収入は、各種ランダムネスに左右されるため、前日までの空港での電力取引実績を既知としてその平均を用いてそれぞれ期待値として算出される。

$$I_{BEB}^{EV} = \sum_t i_{BEB}^{hh}(t) \quad (6)$$

$$I_{CAR}^{EV} = \sum_t i_{CAR}^{hh}(t) + i_{EV \rightarrow APT}^{ex} \quad (7)$$

$$i_{EV \rightarrow APT}^{ex} = (i_{EV \rightarrow APT}^e + i_{EV \rightarrow APT}^{battery}) \times \frac{vol_{park}^{d-1}}{V_{APT}^{epar}} \quad (8)$$

本研究では式(1), (2)のように費用項に支出と収入が存在することが特殊な状況であるが、収入を考慮した交通

選択モデルを推定している研究は見当たらないため、先行研究¹⁰⁾を参考に $\gamma_1 = 0.5$ として計算を行っている。

b) 発電量の算出とグローバル電力価格設定

各月の日射量データの最大値に天候係数を乗じて、各時刻における日射量を算出する。また算出された日射量に対し、各月固有の日射量誤差を加え、予測値と実際値に誤差を生じさせることで天候の不確実性を表現する。

$$I_T(t) = \alpha_w \times I_{T,max}(t) \quad (9)$$

$$I_T'(t) = I_T(t) + \epsilon = \alpha_w' \times I_{T,max}(t) \quad (10)$$

世帯の発電量は一世帯あたりの定格出力を4.67(kW)を元にPV容量ベースの推定式を用いて予測発電量と実際発電量を算出する。空港の発電量は国土交通省のPV設置面積目標と出力の関係を参考に、面積当たりの定格出力の値を用いて算出する。

$$e'(t)_{gnr}(t) = \frac{I'(t)_T(t)}{G_s} \times P_{AS} \times K_{pt} \times K' \quad (11)$$

$$e'(t)_{gnr0}^{APT} = \frac{I'(t)_T(t)}{G_s} \times P_{APT} \times A_{APT}^{gnr} \times K_{pt} \times K' \quad (12)$$

グローバル電力取引における販売価格のうち、天候連動型となる太陽光発電料金とダックカーブ料金は、外生的に与えられた通常料金と夜料金の販売価格を基準として算出される。なお、本研究では簡単のためグローバル電力取引における買取価格は、各時間帯における販売価格の半額であると仮定する。

$$P'(t)_0^{pv} = P_0^{normal} - \alpha_w(t) \times (P_0^{normal} - P_0^{night}) \quad (13)$$

$$P'(t)_0^{dc} = P_0^{normal} + \alpha_w(t) \times (P_0^{normal} - P_0^{night}) \quad (14)$$

$$p'(t)_0(t) = P'(t)_0(t)/2 \quad (15)$$

c) EV→空港ローカル市場均衡価格

各世帯固有の取引積極性から、各世帯が売電を行う場合に満たされる必要のある、単位電力量当たりの最小収益を求める。その後、提示された暫定の取引価格と大小比較を行い、各EV世帯の空港Gへの売電実施の是非を決定する。なお必要最小収益は、グローバル電力取引における通常料金と夜料金の販売価格を基準としている。

$$p_{min+}^m = (1 - pro^m) \times (p_0^{normal} - p_0^{night}) \quad (16)$$

$$\delta_{EV \rightarrow APT}^m = \begin{cases} 1 & (p_0^{night} + p_{min+}^m \leq Pp_{EV \rightarrow APT}) \\ 0 & (p_0^{night} + p_{min+}^m > Pp_{EV \rightarrow APT}) \end{cases} \quad (17)$$

EV世帯の総売電量を算出し、空港Gの電力需要と一致するまで暫定の取引価格を最低値の夜料金から上昇させ、一致した価格をその日のEV→空港G ローカル取引価格として設定する。なお、空港電気料金を超えても、電力需要が満たされない場合はその料金を取引価格として設定する。

$$\sum_m \delta_{EV \rightarrow APT}^m \times e_{EV \rightarrow APT}^m = E_{APT}^{req} \quad (18)$$

d) 空港Gの電力運用効果

本研究では空港Gによる電力運用の効果の定義はケースごとに異なる。安定的電力運用ケースでは、1日あたりの消費電力量のうち、発電電力とEVからの買電電力で相対的に安く賄うことができた量のコスト分から発電と買電にかかった費用を差し引いた額を「幹線G買電削減額」として電力運用の効果指標としている。そして空港Gの初期投資（双方向充電器設置コスト、PV設置コスト、蓄電池導入コスト）を買電削減コストで割り初期投資回収年数を算出することで空港Gの成立可能性を表す指標とする。積極的電力運用ケースでは、EVと蓄電池貸借を始めたりPV設置面積を増やし大規模発電とその電力の運用を始めたりする。そのため、初期投資から蓄電池導入削減コストが引かれたり、幹線G買電削減コストに加えて売電による収入が加わったりすることで、電力運用の効果や成立可能性に変化が生じる。

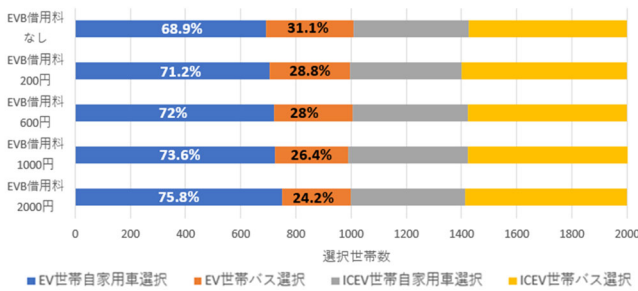


図-9 EVB借用料と各交通手段選択世帯数の変化

表-7 本研究の分析における主な可変条件

項目	数値	備考
EV世帯比率 (%)	20%, 30%, 40%, 50%	都市エリアに存在する全世帯中のEVを所持している世帯の割合
EVB (EVバッテリー) 借用料 (円/日)	0円(蓄電池取引なし), 200円, 600円, 1000円, 2000円	空港にEVで来て、かつ空港利用日数が2日以上(泊車利用)の旅客EVからバッテリーを借用した際の1日あたりの借用料。
着陸帯PV割合 (%)	0%~100% (発電電力量によってケース分け)	着陸帯のうちPVを設置した面積の割合。現状の技術や法律では設置が難しいが、将来設置が可能になると仮定
駐車場電化率 (%)	0%~50%	空港駐車場のうち双方向充電器が設置されている台数の割合 (=空港Gが電力取引できるEV台数上限) (100%=3800台)
蓄電容量 (kWh)	20000, 30000, 40000	空港が所持する蓄電池容量の上限。このうちEVの蓄電池借用分を除いた容量は空港が自前でコストを支払って設置。

5. 分析結果とその考察

本研究ではいくつかの可変条件を変化させることによる電力運用の効果や成立可能性の変化の分析を行う。表-7に本研究での主な可変条件を示す。

(1) 世帯の交通手段選択の変化

図-9に、EVB借用料を変化させた場合の世帯の交通手段選択の変化を示す。まず旅客動態調査¹⁸⁾で示されている広島空港アクセス手段の自家用車とバスの選択確率比 34.5% : 50% (2 : 2.89)と ICEV世帯の交通手段選択世帯数比 (およそ 2 : 3) を比較することでシミュレータの一定の整合性が確認された。なお ICEV世帯の交通手段選択世帯数に多少の変化が生じているのは、都市エリアの世帯から空港へ移動する世帯をランダムに選んだ際の世帯位置の偏りなどのサンプル抽出の問題が原因である。

次に空港での売電行動や蓄電池売買による収入により ICEV世帯に比べてEV世帯の方が自家用車選択割合が大きいたことが分かる。また EVB借用料が増加し蓄電池を貸すことでの期待収入金額が増えるとEV世帯の自家用車選択が増加する。一方で、EVB借用料の変化に対して世帯の交通手段選択確率の変化の感度が小さい点については、(1)収入効用削減パラメータ $\gamma_1 = 0.5$ が効いている、(2)効用パラメータの時間価値が65円と高いことの2つが影響していると考えられる。

(2) ケース別の空港G電力運用結果の変化

a) 安定的電力運用ケース

図-10にEV旅客と電力のみを取引する状況下で、着陸帯PV割合と駐車場電化率を変化させた際の空港Gの収支の変化を示す。着陸帯PV割合が増加すると、その初期投資の増分に比べて、日々の消費電力における幹線G買電削減額の増分が多いため、初期投資回収年数は減少する。本研究では着陸帯PV割合5%で空港の再エネ率はほぼ100%になる。一方で、駐車場電化率が増加すると初期投資回収年数は増加する。これはEV旅客と取引するものが電力だけでは、駐車場の電化にかけた初期投資の増分が日々の削減額を上回るためである。

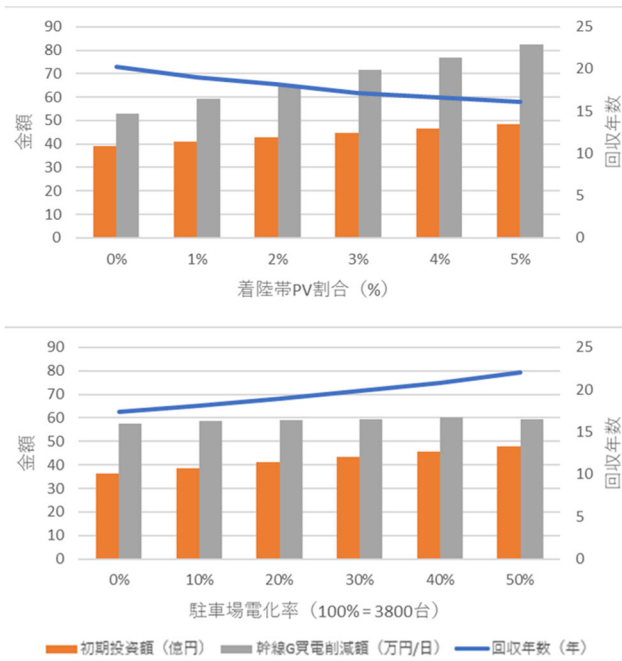


図-10 空港 G の収益の変化

(EVB 借用料 0円, EV 世帯比率 50%, 蓄電容量 20000kWh)
 (上図: 駐車場電化率 20%, 下図: 着陸帯 PV 割合 4%)

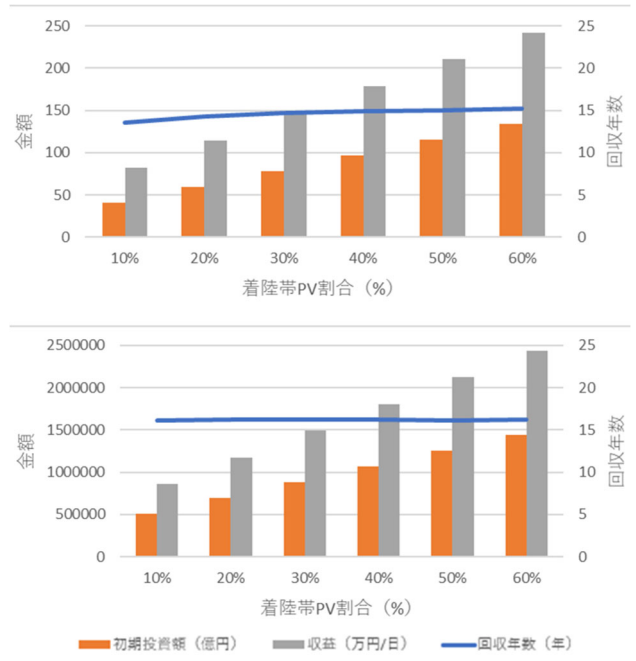


図-12 空港 G の収益の変化

(EVB 借用料 200円, EV 世帯比率 50%, 駐車場電化率 20%)
 (上図: 蓄電容量 30000kWh, 下図: 蓄電容量 40000kWh)

b) 積極的電力運用ケース

図-11 に EV 旅客と電力取引と蓄電池貸借をする状況下で、駐車場電化率を変化させた際の空港 G の収支の変化を示す。EVB 借用料が 200 円の時は EV 世帯から蓄電池を借用することで相対的に安い蓄電容量を確保できるので、初期投資の回収年数は減少していく。しかし借用料を 600 円にすると回収年数は増加してしまうので、空港マイクログリッド事業において適切な EVB 借用料設定

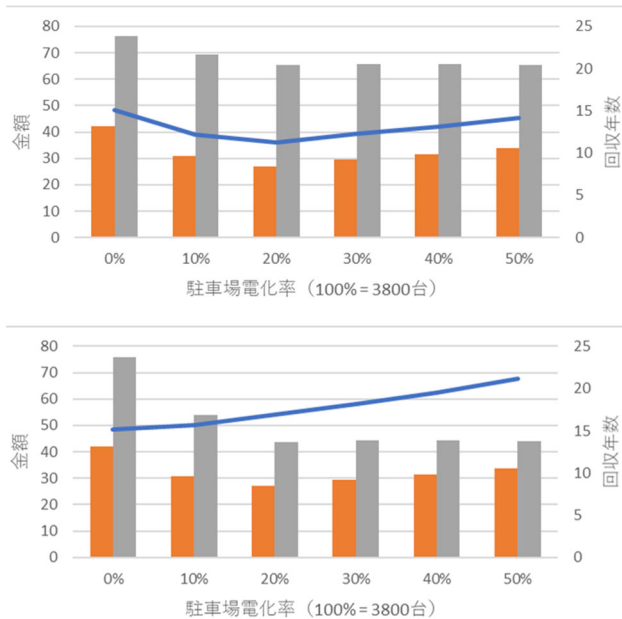


図-11 空港 G の収益の変化

(着陸帯 PV 割合 4%, EV 世帯比率 50%, 蓄電容量 20000kWh)
 (上図: EVB 借用料 200円, 下図: EVB 借用料 600円)

が重要であることが示唆された。

次に図-12 に EV 旅客と電力取引と蓄電池貸借をする状況下で、さらに空港での大規模発電導入が進んだことを想定して、着陸帯 PV 割合を変化させた際の空港 G の収支の変化を示す。本研究では空港の蓄電容量分を超える発電電力は相対的に安価な定価で幹線 G に充電するため、着陸帯 PV 割合を増加させても回収年数は微増する傾向にある。ただしその分の再エネ発電電力も増加しているので、その分の環境的な効果を評価する必要がある。本研究では着陸帯 PV 割合が 20% の時は一日当たりおよそ 60000kWh の余剰発電電力があり、これは 5000 世帯分の発電量に匹敵する。また CO2 換算で 27.72t-CO2/日の排出量削減効果が見込まれる。

最後に表-8 に EV 世帯比率が変化した場合に回収年数が短くなるように設計した空港 G の諸条件を示す。EV 世帯比率を変化させると空港駐車場に駐車している EV の平均台数が増加する。そしてその台数と過不足ないように駐車場に双方向充電器を設置することで駐車場電化率

表-8 各 EV 世帯比率で回収年数を短くする空港 G の諸条件

項目	変化前	変化後
EV 世帯比率(%)	30	40
駐車場平均駐車 EV 台数(台/日)	720	955
駐車場電化率(%)	18.9	25.1
蓄電容量(kWh)	30000	40000
着陸帯 PV 割合 (%)	9	11
初期投資(億円)	40.2	47.1
回収年数(年)	15.2	15.8

が設定される。そして取引する EV 台数分の蓄電容量を全て活用できるような蓄電容量を設定し、そのような条件下で回収年数がもっとも短くなるような着陸帯 PV 割合を算出する。この空港マイクログリッドの諸条件の設定手順は一例に過ぎないが、社会における EV の普及率に合わせて空港マイクログリッド事業の諸条件を設定することが回収年数を短くし事業の成立可能性を高めるためには重要であることが示唆されている。

6. まとめと考察

シミュレータの開発を行い、EV 世帯と空港マイクログリッドのインタラクションを表現し、空港でのマイクログリッド事業の効果と成立可能性を分析した。空港が EV 旅客と電力取引や蓄電池貸借を行うことによって、一日当たりの消費電力コストや全体の初期投資コストの削減が可能になり、初期投資回収年数という指標において成立可能性を高めることが明らかになった。また都市における EV 世帯の割合に応じて蓄電容量や駐車場電化率、着陸帯 PV 割合を適切に設計することが空港グリッド事業の成立可能性を高めるうえで重要であることが示唆された。

今後の課題としては、売電収入や蓄電池貸借に係る効用のパラメータの吟味を行うことがあげられる。電力取引による収入を考慮した交通選択モデルの推定を行い本研究のパラメータとして用いることで更なる精度向上が見込まれる。また、さらに着陸帯 PV 割合を増やし余剰発電電力を増やした状況下での電力運用については、その運用方法に多くの可能性があるため、更なる分析結果の多様化と時間をかけた考察が重要となっていく。

参考文献

- 1) Global EV Outlook 2019, IEA, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>
- 2) Simulation of an electric transportation system at The Ohio State University, Giovanni De Filippo et al., Applied Energy, 2014
- 3) The Parker Project Final Report, Energy Technology Development and Demonstration Program, https://parker-project.com/wp-content/uploads/2019/03/Parker_Final-report_v1.1_2019.pdf
- 4) London bus garage becomes world's largest vehicle-to-grid site, SSE Enterprise, <https://www.sseutilitiesolutions.co.uk/insights/press-releases/london-bus-garage-becomes-worlds-largest-vehicle-to-grid-site/>
- 5) Renewables 2018 Global Status Report, REN 21, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2018_Full-Report_English.pdf
- 6) NEDO 再生可能エネルギー技術白書第二版, NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100544824.pdf>
- 7) 空港分野における CO2 削減に関する検討会 - 国土交通省, https://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk9_000046.html
- 8) 一井啓介・御手洗陽・谷口守: サテライト型スマートタウンへの電力への運び方 - 電気自動車電線が電線を代替する可能性 -, 都市計画論文集, Vol.55, No.3, Oct, 2020
- 9) T.W. Hoogvliet, G.B.M.A. Litjens, W.G.J.H.M. van Sark, "Provision of regulating- and reserve power be electric vehicle owners in the Dutch market", Applied Energy, 190, 1008 - 1019, 2017
- 10) 川島真之介, 宮崎優, 屋井鉄雄 (2021) 「EV 世帯と公共電動モビリティとの電力売買を考慮した競合シミュレーション」 土木計画学研究講演集, 63 巻, 38-1
- 11) Maiga and M. L. Crow "A Transactive Operating Model for Smart Airport Parking Lots", October 2018 IEEE Power and Energy Technology Systems Journal PP(99):1-1
- 12) Guo, Z., Zhang, X. and Zhang, R. (2021) 'A Multi-agent Microgrid Energy Management Solution for Air Transport Electrification', Proceedings of The 10th International Conference on Renewable Power Generation (RPG), Beijing, China [Online], 14-15 October pp. 1-7.
- 13) Benjamin K. Sovacool, Jonn Axsen, Willet Kempton, "Annual Review of Environment and Resources The Future Promise of Vehicle-to-Grid (V2G) Integration: A Sociotechnical Review and Research Agenda", ANNUAL REVIEWS, 2017
- 14) Hiroshi Irie, "Japan - U.S. Collaborative Smart Grid Demonstration Project in Maui Island of Hawaii State: A case study", New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) Smart Community Case Study, 2017
- 15) "Guidebook for Energy Facilities Compatibility with Airports and Airspace" AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM REPORT 108, Sponsored by the Federal Aviation Administration, Transportation Research Board of the National Academies, 2014
- 16) Clifford K. Ho, "Solar Glare Hazard Analysis Tool (SGHAT)" Sandia National Laboratories Concentrating Solar Technologies Dept, SAND2013-1800P, <https://share-ng.sandia.gov/glare-tools/>
- 17) 地方, 世帯人員別の世帯数分布 (100 万分比) (2018 年 1 月) - 総務省統計局, https://www.stat.go.jp/data/kakuei/setai_bunpu.html
- 18) 航空旅客動態調査 (平成 29 年度) - 国土交通省, <https://www.mlit.go.jp/common/001266970.pdf>
- 19) 細街路交通量推計モデルの作成, 茂木高嶺, 2016

- 20) 給油所小売価格調査(令和 4 年 1 月 19 日版), 経済産業省資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/petroleum_and_lpgas/pl007/results.html#headline1
- 21) 駐車場のご案内, 広島空港 <https://www.hij.airport.jp/access/parking.html>
- 22) 広島空港, 交通アクセス, アクセス時刻表 <https://www.hij.airport.jp/access/timetable/1.html>
- 23) 丹生清輝・磯部賢, 空港からの二酸化炭素排出量の策定と削減効果の推計, 国土技術政策総合研究所資料, No.524, March,2009 https://dl.ndl.go.jp/view/download/digidepo_10166540_po_ks0524.pdf?contentNo=1&alternativeNo=
- 24) EV パワーステーション, nichicon <http://www.nichicon.co.jp/products/v2h/>
- 25) 太陽光発電について, 2020 年 11 月, 資源エネルギー庁, https://www.meti.go.jp/shingikai/santeii/pdf/063_01_00.pdf
- 26) 蓄電システムをめぐる現状認識, 株式会社三菱総合研究所 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/storage_system/pdf/001_05_00.pdf
- 27) 電気自動車日産リーフカタログ, 日産 <https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf/charge/battery.html#>
- 28) Optimal fast charging station locations for electric ridesharing with vehicle-charging station assignment, Tai Yu Ma et al., Transportation Research Part D, 2021
- 29) Scenarios for transitioning cars from ICEV to BEVs and PHEVs using household level GPS travel data, Wei Ji et al., Transportation Research Part D, 2020
- 30) Integrated transit route network design and infrastructure planning for on-line electric vehicles, Christina Illopoulou et al., Transportation Research Part D, 2019
- 31) 電気バス普及に向けたワイヤレス充電技術, 鈴木勝宜ら, 東芝レビュー
- 32) 2017 年度活動報告・2018 活動方針, CHAdeMO, 2018, <https://www.chademo.com/wp2016/wp-content/japan-uploads/2018GA/CHAdeMO2018GA.pdf>
- 33) 空港アクセス交通機関選択モデル, パラメータ推定結果, JRTT 鉄道運輸機構, 令和 2 年度事業評価監視委員会 (付属資料) <https://www.jrtt.go.jp/construction/committee/jkr2-08-01.pdf>

(2022.3.6 受付)

RESEARCH ON THE FEASIBILITY OF GRID BUSINESS CONSIDERING ELECTRIC VEHICLE POWER SELLING AT AIRPORT

Suguru MIYAZAKI and Tetsuo YAI

In order to promote energy efficiency in a sustainable society, new initiatives such as V2G operation of electric mobility have been active, while changes on the energy infrastructure side such as the increase in renewable energy generation and the expansion of distributed generation have also been active. This study focuses on airports where the introduction of the microgrid concept is considered, and analyzes the feasibility of grid business considering the introduction of large-scale solar power generation and the use of storage batteries for electric mobility surrounding the airport. The simulator was developed under the situation where electricity can be traded between EV passengers and airport, such as selling electricity and lending storage battery. The results of analysis showed that it would be possible to reduce the daily power consumption cost and the initial investment cost of the grid business by buying electricity and renting storage batteries with EV passengers, which could increase the feasibility of the airport grid business.