

分割供給とデマンドレスポンスによる 大学施設の CO₂ 排出量削減

CO₂ Emission Reduction of University Facilities with Split Supply and Demand Response

柴田 義貴 *・蔡思楠 *・前匡鴻 *・松橋 隆治 *
Yoshiki Shibata Sinan Cai Masahiro Mae Ryuji Matsuhashi

Abstract

Increasing global concern regarding climate change necessitates effective strategies for reducing CO₂ emissions from institutional facilities, such as universities. The aim of this paper is to develop an optimization model for power procurement using split supply to effectively reduce CO₂ emissions and costs in university facilities. An optimization model for power procurement is constructed, incorporating split supply (e.g., from solar power generation) and, in a second scenario, the integration of battery energy storage systems (BESS). The effectiveness of these strategies is evaluated in the simulation model for reducing CO₂ emissions and cost. Simulation results confirm that split supply is effective for both CO₂ and cost reduction. Achieving a 50% CO₂ emission reduction requires 154.2 MW of solar PV without BESS, and 128.6 MW of solar PV combined with over 6 MWh of BESS. While effective, integrating significant solar PV and BESS presents challenges related to daytime power surplus and BESS installation area. Therefore, demand-side control, such as Demand Response (DR) via a regional balancing group with surrounding universities, is indispensable to reduce CO₂ emissions.

Key words : Split supply, Demand response (DR), University facilities, Battery energy storage systems (BESS), Solar power

1. 序論

近年、地球規模での気候変動問題への対策が喫緊の課題となっており、世界各国が温室効果ガス排出量の削減目標を掲げている。こうした国際的な潮流に呼応し、日本政府は2020年10月に、温室効果ガスの排出量を実質的にゼロにする2050年カーボンニュートラルの実現を宣言した¹⁾。この目標達成のため、政府は産業構造やエネルギー政策の抜本的な転換を図っている。特に、電力部門の脱炭素化が中核とされ、再生可能エネルギーの導入拡大や次世代送電網の構築、脱炭素燃料の活用などが主要な政策として推進されている。これらの政策は、化石燃料への依存度を低減し、持続可能な社会を構築するための重要な基盤となっている。

こうした国際的・国内的な潮流と並行し、国内の大規模大学施設においても、その社会的責任を果たすべく環境対策が求められている。特に、特定の自治体（例：東京都）では、大規模事業所を対象とした排出量取引制度（キャップ&トレード制度）が導入されており、施設管理者には具体的な削減目標達成が義務付けられている²⁾。多くの大規模大学施設は、地域内で最大のエネルギー消費主体の一つであり、その排出削減は地域全体の脱炭素化に大きく貢献する。この課題に対応するため、従来の省エネルギー化努力に加え、電力供給源そのものの脱炭素化を通じた排出量の抜本的な削減が不可欠となっており、膨大な電力需要を

賄いながら、再生可能エネルギー導入を効率的かつ安定的に拡大することが喫緊の重要課題となっている。

上記の背景を踏まえ、本論文は、大学設備におけるCO₂排出量削減と電力コスト低減の効率的な両立に貢献する新たな電力調達手法を提案することを目的とする。具体的には、近年見直された分割供給制度に着目し、化石燃料電源と再エネ電源から電力を調達する電力調達最適化モデルを構築する。

本論文の貢献は以下のとおりである。

- 電力調達および蓄電池の設備容量と電力需給運用計画の同時最適化モデルの構築
- 分割供給を活用することによる大学施設のCO₂排出量削減と電力コスト低減の両立

2. 手法

2.1 分割供給の仕組み

(1) 導入背景と制度の概要

近年のエネルギー政策の転換と電力システム改革の流れを受け、需要家がより柔軟かつ効率的に電力を調達できる仕組みが求められている。こうした背景のもと、2013年度に特定の建物や区画において小売電気事業者から電力の一部を供給する部分供給の制度が創設された。さらに、2024年度にはこの制度が発展的に見直され、分割供給制度が開始された³⁾。分割供給の概略図を図1に示す。図1に示すように、分割供給は、一つの需要場所に対して複数の小売電気事業者がそれぞれ個別に契約を結び、送配電網を介して同時に電力を供給する仕組みである。これにより、需要

*東京大学工学部電子情報工学科

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

E-mail : shibata@enesys.t.u-tokyo.ac.jp

表1 モデルに使用するパラメータ

| 名称 | 記号 | 数値 | 単位 |
|----------------------------|------------------|--------|-------|
| 実需要電力量 | $D(t)$ | - | kWh |
| 化石燃料電源の CO_2 排出係数 | e_F | 0.452 | kg- |
| 再エネ電源の CO_2 排出係数 | e_R | 0 | kg- |
| 化石燃料電源価格 | c_F | 30 | 円/kWh |
| 再エネ電源価格 | c_R | 20 | 円/kWh |
| 年間 CO_2 排出量の上限 | CO_2_{max} | 45,000 | t |
| 蓄電池初期投資単価 | c_{BESS}^{inv} | 50,000 | 円/kWh |
| 蓄電池の充放電時間率 | T_{rate} | 4 | h |
| 蓄電池の充電効率 | η_{ch} | 0.95 | - |
| 蓄電池の放電効率 | η_{dis} | 0.95 | - |
| シミュレーション期間 | T | 17,520 | - |
| 時間刻み | Δt | 0.5 | h |
| 蓄電池の最大充電率 | SOC_{max} | 0.9 | - |
| 蓄電池の最小充電率 | SOC_{min} | 0.1 | - |
| 蓄電池の初期充電率 | SOC_{init} | 0.5 | - |

表2 最適化に用いる変数

| 変数 | 記号 | 単位 |
|----------------|---------------|-----|
| 太陽光設備容量 | C_{PV} | kW |
| 蓄電池エネルギー容量 | C_{BESS} | kWh |
| 化石燃料電源からの調達電力量 | $P_F(t)$ | kWh |
| 再エネ電源からの調達電力量 | $P_R(t)$ | kWh |
| 蓄電池への充電電力量 | $P_{ch}(t)$ | kWh |
| 蓄電池からの放電電力量 | $P_{dis}(t)$ | kWh |
| 蓄電池の残存電力量 | $E_{BESS}(t)$ | kWh |

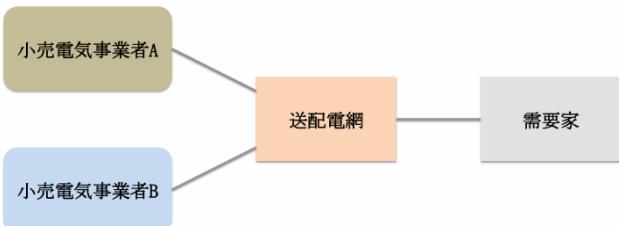


図1 分割供給の概略図



図2 分割供給の類型

家は CO_2 排出係数やコスト特性の異なる電源を組み合わせ、経済性と環境性の両面で最適な調達戦略を構築することができる。

(2) 分割供給の類型

図2に分割供給の類型を示す。図2に示すように、分割供給の契約形態は、各小売電気事業者が需要の変動にどのように追随するかによって分類される。まず「需要追随供給+非需要追随供給」の形態がある。これは、一方の事業者が需要変動への対応（需要追随）を行い、もう一方が一定量または計画値通りの供給（非需要追随）を行うものである。また「需要追随供給+需要追随供給」の形態があり、これには複数の事業者が同一の30分コマにおいて供給する「コマ分割型」と、時間帯によって供給事業者を分ける「時間分割型」が含まれる。本論文では、複数の電源を柔軟に組み合わせることを目的とし、各電源からの供給量を最適化変数として扱うことで、事実上「コマ分割型」の供給形態を活用したモデルを構築する。

2.2 分割供給を用いた電力供給の最適化モデル

本論文では、以下の2つの仮想的な小売電気事業者からの電力調達と、蓄電池の運用を組み合わせた最適化モデルを構築する。

- ・ 化石燃料電源：旧一般電気事業者などを想定した火力発電主体の電源。供給安定性が高く需要追随能力を持つが、 CO_2 排出係数が高い。
- ・ 再エネ電源：太陽光発電（PV）を想定した電源。 CO_2 排出係数はゼロであり安価だが、供給可能量は日射量と設備容量に依存する。

本モデルは、年間の総コスト（運転コストおよび設備投資コスト）を最小化する線形計画問題として定式化される。モデルに使用するパラメータを表1に、最適化に用いる変数を表2に示す。表1に示すように、各定数は実際の電力市場で取り入れられているデータをもとに決定した^{4,5,6,7)}。

2.3 最適化における目的関数

年間の電力調達に伴う運転コストと、蓄電池導入に伴う初期投資コストの合計を年間の総コストとする。目的関数を式(1)に示す。ここで T は年間シミュレーション期間（17,520コマ）を表す。

$$\min\left\{\sum_{t=1}^T (c_F(t)P_F(t) + c_R P_R(t)) + c_{BESS}^{inv} C_{BESS}\right\} \quad (1)$$

2.4 制約条件

最適化問題を解くにあたっての制約条件を次に示す。需給バランス制約を式(2)に示す。式(2)に示すように、任意の時刻 t において、化石燃料電源および再エネ電源からの供給

量と、蓄電池の放電量の和から、蓄電池への充電量を引いたものが、当該時刻の電力需要 $D(t)$ と一致しなければならない。

$$P_F(t) + P_R(t) + P_{dis}(t) - P_{ch}(t) = D(t) \quad (2)$$

CO₂排出量制約を式(3)に示す。式(3)に示すように、年間の総 CO₂排出量が、大学の削減目標に基づき設定された上限値 $CO_2 max$ 以下でなければならない。

$$\sum_{t=1}^T (e_F(t)P_F(t) + e_R P_R(t)) \leq CO_2 max \quad (3)$$

PV 発電量に関する制約を式(4)、式(5)に示す。式(4)に示すように、各時刻の再エネ電源からの調達量は、その時刻の日射量に基づく単位容量あたりの発電ボテンシャル $\gamma_{PV}(t)$ と設備容量 C_{PV} の積を超えてはならない。さらに、過剰な設備投資を抑制する設計制約として、式(5)に示すように、太陽光発電の年間最大発電可能総量は、年間の総需要量を超えないものとする。

$$P_R(t) \leq \gamma_{PV}(t)C_{PV} \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T \gamma_{PV}(t)C_{PV} \leq \sum_{t=1}^T D(t) \quad (5)$$

蓄電池運用に関する制約を式(6)、(7)に示す。式(6)、(7)に示すように、充放電量は、設備容量 C_{BESS} と充放電時間率 T_{rate} で決まる最大充放電電力によって制限される。

$$P_{ch}(t) \leq \frac{1}{T_{rate}} C_{BESS} \Delta t \quad (6)$$

$$P_{dis}(t) \leq \frac{1}{T_{rate}} C_{BESS} \Delta t \quad (7)$$

蓄電池の残存電力量 (SOE) に関する遷移制約を式(8)、式(9)、式(10)に示す。式(8)に示すように、SOE の初期値は SOC_{init} を用いて式(8)のように設定される。以降の時間変化は、式(9)に示すように、前時刻の残量に充放電効率 η_{ch} 、 η_{dis} を考慮した充放電量を加減して算出される。また、式(10)に示すように、SOE は常に所定の SOE 範囲内に維持されなければならない。

$$E_{BESS}(1) = SOC_{init} C_{BESS} - \eta_{ch} P_{ch}(1) + \frac{1}{\eta_{dis}} P_{dis}(1) \quad (8)$$

$$E_{BESS}(t) - E_{BESS}(t-1) = \eta_{ch} P_{ch}(t) - \frac{1}{\eta_{dis}} P_{dis}(t) \quad (t \geq 2) \quad (9)$$

$$SOC_{min} C_{BESS} \leq E_{BESS}(t) \leq SOC_{max} C_{BESS} \quad (10)$$

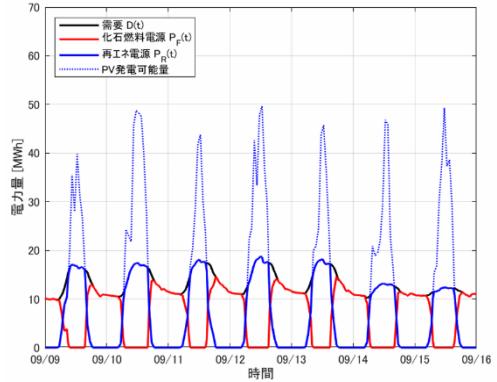


図 3 電力需給バランス(太陽光のみ)

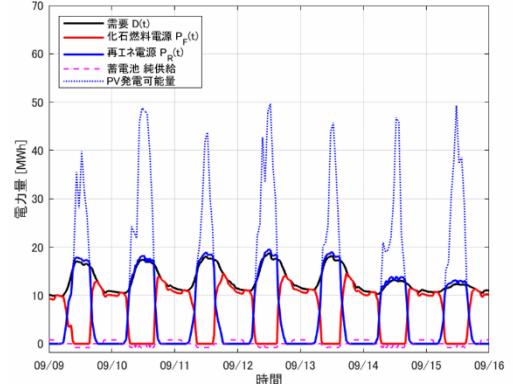


図 4 電力需給バランス(蓄電池あり)

表 3 各条件による CO₂ 削減率とコスト削減率

| | 太陽光 (MWh) | 蓄電池 (MWh) | CO ₂ 削減率 (%) | コスト 削減率 (%) |
|----------------|--------------|--------------|-------------------------------|-------------------|
| PVのみ (制約あり) | 128.6 | - | 48.5 | 15.0 |
| PVのみ (目標達成) | 154.2 | - | 50.0 | 15.5 |
| PV + 蓄電池 | 128.6 | 6.3 | 50.0 | 9.7 |

3. 結果

3.1 大学施設における電力コストと CO₂ 削減量の評価

本論文では、提案モデルの有効性を検証するため、東京都のある大学施設のキャンパスにおける 2024 年度の 30 分間隔の年間電力使用量データ、および栃木県の日射量データを用いてシミュレーションを実施した⁸⁾。ここでは、2006 年度比で CO₂ 排出量を 50% 削減することを目標とした場合の、必要な設備容量とコストへの影響を分析した。

蓄電池を導入せず、分割供給のみで再エネ比率を高めた場合について検討を行った。図 3 に、9 月 9 日から 9 月 16 日までの電力需給バランスのシミュレーション結果を示す。黒線は電力需要、赤線は化石燃料電源、青線は再エネ電源からの供給量を示している。図 3 に示すように、昼間(10:00 ~ 14:00 頃)は太陽光発電による供給が需要の大部分を賄っているが、夜間は化石燃料電源に依存している。

太陽光発電の年間最大発電可能総量が年間の総需要を超えないようにする制約条件の上では、CO₂排出量50%削減ができず、設備容量128.6MWでCO₂排出量48.5%削減となった。このときの年間総コストは約47.4億円となり、化石燃料電源のみの場合と比べて約15%の削減ができることが確認できた。また、制約を緩和し、50%削減を達成するためには、154.2MWの設備容量が必要であることが確認できた。しかし、この場合、昼間の余剰電力（出力抑制）がさらに増大する結果となった。

3.2 蓄電池導入時の電力コストとCO₂削減量の評価

次に、蓄電池を導入し、昼間の余剰電力を夜間にシフトすることを可能としたモデルでのシミュレーションを行った。図4に、蓄電池を併用した場合の同期間（9月9日から9月16日）のシミュレーション結果を示す。図4に示すように、破線で示される蓄電池の充放電挙動から、昼間の余剰電力が充電され、夕方から夜間の需要ピーク時に放電されていることが確認できる。

前述の通り、太陽光発電の年間最大発電可能総量が年間の総需要を超えないようにする制約条件の上では、太陽光発電のみではCO₂排出量50%削減が達成できないため、調整力として蓄電池を導入することを考えると、太陽光の設備容量128.6MW、蓄電池容量6.3MWhでCO₂排出量50%削減が可能となった。また、このときの年間総コストは約50.3億円となり、化石燃料電源のみの場合と比べ、約9.7%の削減が可能であることが確認できた。

太陽光発電のみでコスト最小化を行った場合、CO₂削減制約を満たすために必要な設備容量は需要ピークの約2倍に達する規模となった。これは、夜間の需要を賄えない太陽光発電の特性上、昼間に大量の余剰を発生させてでも再エネ電源からの供給量を稼ぐ必要があるためである。また、分割供給の場合、太陽光発電を余剰（出力抑制）させることに対する明示的なペナルティが存在しない。そのため、蓄電池を利用可能な設定とした場合でも、コスト最小化を目的関数とすると、投資コストのかかる蓄電池は積極的には導入されず、余剰電力を捨てる運用が経済的に有利と判断される傾向が見られた。

4. 結論

本論文では、大学施設におけるCO₂排出量削減とコスト低減の両立を目指し、分割供給を用いた電力調達最適化モデルを構築・評価した。結論として、分割供給はCO₂排出量と電力供給コストの両面で削減効果をもたらすことが確認された。しかし、CO₂排出量50%削減を達成するためには、154.2MW以上の大規模な太陽光発電設備、あるいは蓄電池を併用する場合でも128.6MW以上の太陽光発電と

6.3MWh以上の蓄電池が必要であることが示された。

今後の展望について、まず、単独施設での対策には限界があるため、周辺の大学や施設と連携した地域バランスシンググループを形成し、デマンドレスポンスによって需要を柔軟に制御することが不可欠である。これにより、再エネの有効活用と設備容量の適正化を図ることが可能となる。

次に、制度設計の観点からは、分割供給における太陽光発電の容量に対し、適切な電気料金設定を行うことが重要である。現状のコスト最小化では余剰電力が大量に発生するため、余剰電力に対する適切なインセンティブやペナルティを設定することで、蓄電池の導入や負荷移行が経済的にも有利となるような仕組みを検討する必要がある。

さらに、より現実的な導入モデルの構築に向け、蓄電池の設置面積（フットプリント）を考慮することが求められる。本シミュレーションでは容量（MWh）のみを考慮したが、実際には大学キャンパス内の設置スペースが大きな制約となる。したがって、今後は蓄電池のエネルギー密度や物理的な設置面積を制約条件に加えた、より現実性の高い最適化モデルへと拡張していく予定である。

参考文献

- 1) 環境省；カーボンニュートラルとは、
https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/ (アクセス日 2025.11.30)
- 2) 東京都環境局：排出量取引制度(2025)：
<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/documents/d/kankyo/torihikinyuumon202506-1> (アクセス日 2025.11.30)
- 3) 資源エネルギー庁：分割供給の導入について (2024),
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/076_11_00.pdf (アクセス日 2025.11.30)
- 4) 東京電力エナジーパートナー：託送料金相当額等について：
<https://www.tepco.co.jp/ep/private/plan2/chargelist06.html> (アクセス日 2025.11.30)
- 5) 日本卸電力取引所：取引市場データ：
<https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/> (アクセス日 2025.11.30)
- 6) 資源エネルギー庁：なっとく！再生可能エネルギー：
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/fit_kakaku.html (アクセス日 2025.11.30)
- 7) 東京電力エナジーパートナー：環境への取り組み：
<https://www.tepco.co.jp/ep/company/warming/keisuu> (アクセス日 2025.11.30)
- 8) 気象庁：過去の気象データ検索：
<https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/> (アクセス日 2025.11.30)