



# 2025<sup>年度</sup>

## サステナビリティ研究所

### 研究成果報告書

Sustainability Research Institute  
Business Report 2025

## 巻 頭 言

2025年度の研究成果報告書の発刊に際し、一言ご挨拶申し上げます。

まずは、日頃よりサステナビリティ研究所の研究活動に多大なるご支援とご理解を賜っております皆様に、心より深く感謝申し上げます。

本研究所は、地域・社会の持続可能性に貢献する実践的な研究の推進を柱として活動してまいりました。特に鳥取市を中心として推進する環境省「脱炭素先行地域プロジェクト」におきましては、本学が研究支援機関として深く参画し、学術的アプローチから地域課題の解決に向けた知見の提示に努めております。

本報告書は、2025年度に当研究所の研究員が取り組んだ、脱炭素社会の実現に向けた研究を取りまとめたものです。高温バイオ炭の農業利用に向けた養分の挙動や透水性の評価、施設内の利用状況を踏まえた電力需要予測、地域農業における脱炭素農法の導入に関する調査、鳥取市若葉台地区の人口・世帯構造の整理に加え、木質バイオマス発電に伴うバイオ炭の環境性・経済性評価に向けた予備調査や、本学の温室効果ガス排出量の算定・削減に関する検討など、地域と大学の課題に対して多角的に研究を進めました。

これらの研究成果は、昨年12月に開催いたしました「SDGs特別シンポジウム」等の場を通じて地域社会や関係事業者の皆様へ広く還元し、共創に向けた議論を深める一助となりました。また、こうした研究活動や環境意識の高まりは学内にも波及し、学生EMS委員会が企画・運営を担う「TUES Sustainability Week」の取り組みが「脱炭素チャレンジカップin鳥取」で優秀賞を受賞するなど、学生主体の実践的活動においても確かな成果が結実しております。

今後も当研究所は、これまでの研究成果と基盤をより深化させるとともに、鳥取県、鳥取市、地域企業および関係機関の皆様との産官学連携を強力に推進してまいります。現場の課題に即した質の高い研究成果を提示し、持続可能な地域社会の構築に貢献できるよう邁進する所存です。

最後に、日頃より当研究所の活動をご指導・ご支援くださっている関係者の皆様に重ねて御礼申し上げますとともに、今後とも変わらぬご愛顧を賜りますようお願い申し上げます。

2026年9月吉日

サステナビリティ研究所長

金 相烈



# 目 次

高温バイオ炭における養分イオンの溶出・交換・固定挙動の解明

— 前処理条件の違いに着目して — ..... 2

環境学部環境学科 金 相烈

環境学部環境学科 田中 弥生

施設内の混雑情報を用いた電力需要予測と行動変容によるエネルギーマネジメント ..... 8

人間形成教育センター 堀 磨伊也

環境学部環境学科 小林 碧志

地域農業における脱炭素農法導入に関する基礎的調査 .....18

環境学部環境学科 山口 創

鳥取市若葉台地区における地域脱炭素事業と人口・世帯構造の基礎的整理 .....24

環境学部環境学科 甲田 紫乃

木質バイオマス発電に伴う燃焼灰（バイオ炭）の環境性と経済性評価に関する研究／

大学における温室効果ガス排出量（スコープ3）算出とその低減に向けた研究 .....28

環境学部環境学科 松井 徹



## 研究成果報告

# 高温バイオ炭における養分イオンの溶出・交換・固定挙動の解明

## — 前処理条件の違いに着目して —

環境学部環境学科 金 相烈  
環境学部環境学科（令和7年度時点） 田中 弥生

### 1. はじめに

本研究は、本学と鳥取市、株式会社とっとり市民電力、株式会社山陰合同銀行による共同提案として採択された、環境省「脱炭素先行地域プロジェクト」の一環として実施したものである。

本プロジェクトでは、鳥取市佐治地域に導入が進められている木質バイオマス発電「Volter40」から発生する焼却灰（以下、高温バイオ炭）を、地域内で循環利用することを目指している。

鳥取県は日本有数の砂丘地帯を有しており、らっきょう、長ネギ、ながいも、ぶどうなど、砂質土壌の特性を活かした農業が行われている。

砂丘地農業は、排水性や通気性に優れることで病害虫が少なく、品質の高い農作物を栽培できるという利点がある。一方で、砂質土壌は保水力および肥料保持力が低いため、水分や養分が流亡しやすく、施肥回数や灌水回数が増加しやすいという課題を抱えている。

このような背景から、砂丘地農業では土壌の保水性・保肥性を改善できる土壌改良資材の導入が求められている。

これまでの研究では、木質バイオマス由来バイオ炭が多孔質構造を有し、水分保持や土壌改良に寄与する可能性が示されてきた。

一方、本研究で対象としたVolter40由来バイオ炭は、一般的な土壌改良用として製造される低温炭化バイオ炭とは異なり、800℃以上の高温熱分解条件下で発生した副産物である。

このような高温バイオ炭は、表面官能基や陽イオン交換容量（CEC）が低く、イオン性物質に対する吸着性能が低い可能性が指摘されている。

そのため、単純に施用した場合には期待される保肥効果が十分に得られない可能性があり、その特性を整理した上で適切な利用方法を検討する必要がある。一方、高温ガス化炉由来バイオ炭の農業利用に関する知見は限られており、特に前処理条件による養分挙動変化を整理した研究例は少ない。

### 2. 研究目的

本研究では、Volter40由来高温バイオ炭に対して蒸留水前処理および酸発酵液肥前処理を施し、養分イオンの溶出・交換・固定挙動を整理するとともに、砂丘地農業における土壌改良資材としての利用可能性を検討することを目的とした。

具体的には、以下の点について明らかにすることを目的とした。

- ① 高温バイオ炭施用率の違いが砂丘地土壌の透水挙動に与える影響を評価する。
- ② 未処理バイオ炭における $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ の溶出挙動を整理する。

③ 蒸留水前処理による可溶性成分除去の影響を評価する。

④ 液肥前処理による養分保持特性改善の可能性を検討する。

特に、高温バイオ炭はそのままでは吸着性能が低い可能性があるため、液肥との反応による表面改質および養分担持材としての機能付与の可能性について検討した。

### 3. 研究方法

#### 3.1 Volter40バイオ炭の特徴把握

2025年7月、津和野フォレストエナジー株式会社においてVolter40発電施設（図1）の見学およびヒアリング調査を実施した。

同施設では、主に杉を中心とした未利用木材を燃料として利用しており、含水率約50%の木材を乾燥後、約1000℃で運転されるダウンドラフト型ガス化炉に投入していることを確認した。

また、発電過程で発生した焼却灰は粉碎装置を通じて回収されており、本研究では実際に同施設で発生した高温バイオ炭を実験試料として使用した。

これらの情報は、実験で使用する高温バイオ炭の物理・化学的特性を理解するうえで重要な知見となった。



図1 Volter40発電施設の様子

#### 3.2 透水性評価実験

砂丘地農地土壌に対して、高温バイオ炭を0、3、5、7、10%混合したカラムを作成し、通水実験を実施した。各カラムには蒸留水を注入し、流出開始時間、水の通過時間、流出水pH、および実験終了後の含水率を測定した。

表2 バイオ炭施用率別カラム条件

| 施用率 | 砂丘地農地の土壌           | バイオ炭             | 密度        |
|-----|--------------------|------------------|-----------|
| 0%  | 200 mL (約 292.4 g) | 0 mL (0 g)       | 1.46 g/mL |
| 3%  | 194 mL (約 288.3 g) | 6 mL (約 2.0 g)   | 1.46 g/mL |
| 5%  | 190 mL (約 282.1 g) | 10 mL (約 3.3 g)  | 1.43 g/mL |
| 7%  | 186 mL (約 275.9 g) | 14 mL (約 5.13 g) | 1.41 g/mL |
| 10% | 180 mL (約 270.8 g) | 20 mL (約 7.33 g) | 1.40 g/mL |

図2はバイオ炭施用率の違いによる水の通過時間および流出水pHの変化を示す。

図2のように、バイオ炭施用率の増加に伴い、初回注水時の流出開始時間および通水時間が長くなる傾向が認められた。

特に10%施用区では、0%施用区と比較して流出開始までの時間が大きく延長され、水の通過速度が明確に低下した。一方、2回目以降の注水では流出開始時間は短縮される傾向が見られた。また、

実験終了後に測定した含水率はすべて約21%前後であり、施用率による顕著な差は認められなかった。

この結果から、高温バイオ炭は「水分保持量」を増加させるというより、水の移動速度を抑制する機能を有している可能性が示唆された。

さらに、流出水pHはバイオ炭施用区で高い値を示し、施用率増加に伴って上昇する傾向が確認された。しかし、注水を繰り返すことで徐々に低下したことから、高温バイオ炭中のアルカリ性成分が洗い流された可能性が考えられる。

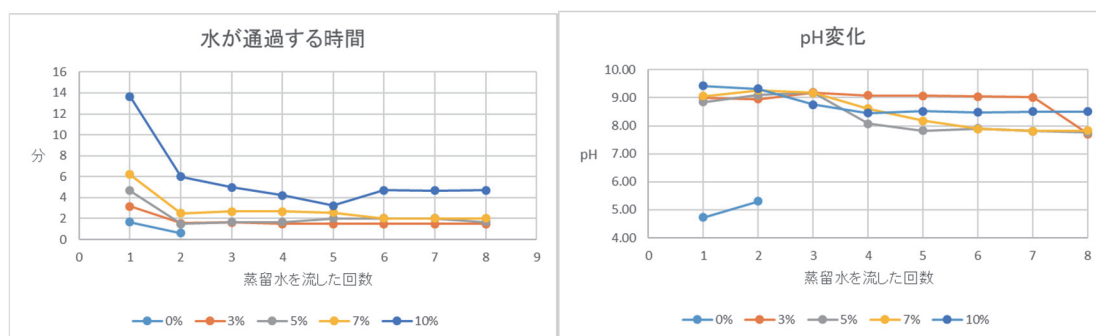


図2 バイオ炭施用率の違いによる水の通過時間および流出水 pH の変化

### 3.3 蒸留水前処理による溶出挙動評価

未処理高温バイオ炭に対して蒸留水前処理を行い、洗浄液中のイオン濃度を測定した。

図3は各イオンの平衡時間を示す。図3のように、 $K^+$ および $NH_4^+$ の濃度変化は1時間以降で大きな変化が見られず、溶出挙動は1時間程度で平衡に達すると判断した。そのため、以降の溶出・交換挙動実験では振とう時間を1時間に設定した。

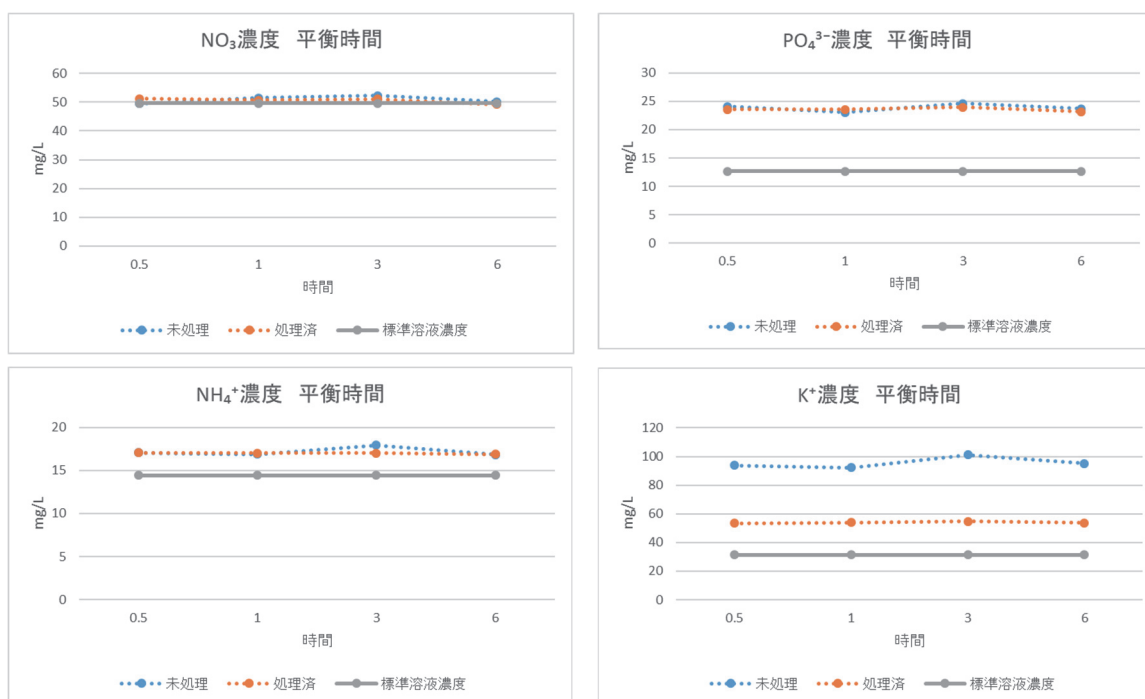


図3 各イオンの平衡時間

また、図4は蒸留水前処理後の洗浄液中の溶出イオン濃度を示す。図4のように、 $K^+$ 濃度が4017.1mg/Lと非常に高い値を示した。

一方、 $NH_4^+$ は低濃度であったことから、高温バイオ炭には可溶性カリウムが大量に含まれていることが明らかとなった。

この結果は、これまでの研究で指摘されていた「バイオ炭からの $K^+$ 溶出傾向」を支持する結果であり、高温バイオ炭が強いカリウム供給源となる可能性を示している。

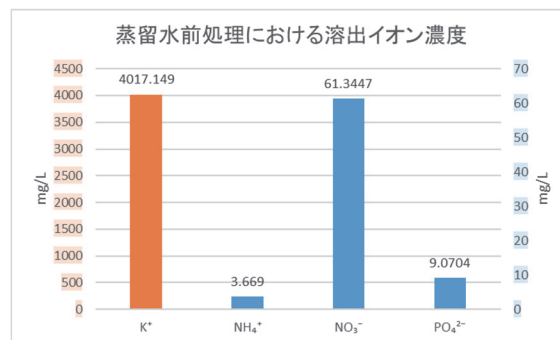


図4 蒸留水前処理前後の溶出イオン濃度

### 3.4 初期濃度別溶出・交換挙動実験

未処理高温バイオ炭を用いて、 $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $PO_4^{3-}$ の溶出・交換挙動を評価した。表2は溶液中に含まれる各イオンの濃度を示す。

表2 栄養塩標準溶液に含まれる各イオンの濃度

| 希釈           | $K^+$       | $NO_3^-$    | $NH_4^+$    | $PO_4^{3-}$ |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 原液(100 %)    | 312.80 mg/L | 496.00 mg/L | 114.30 mg/L | 126.80 mg/L |
| 5 倍希釈(20 %)  | 62.56 mg/L  | 81.2 mg/L   | 28.86 mg/L  | 25.36 mg/L  |
| 10 倍希釈(10 %) | 31.28 mg/L  | 40.60 mg/L  | 14.43 mg/L  | 12.68 mg/L  |
| 20 倍希釈(5 %)  | 15.64 mg/L  | 24.80 mg/L  | 7.22 mg/L   | 6.34 mg/L   |
| 50 倍希釈(2 %)  | 6.26 mg/L   | 9.92 mg/L   | 2.88 mg/L   | 2.54 mg/L   |

三角フラスコに各希釈標準溶液（5希釈、10希釈、20希釈、50希釈）100mLと未処理バイオ炭0.1gを投入し、1時間振後、溶液を0.45  $\mu$ mメンブレンフィルターでろ過して得られた溶液のイオン濃度

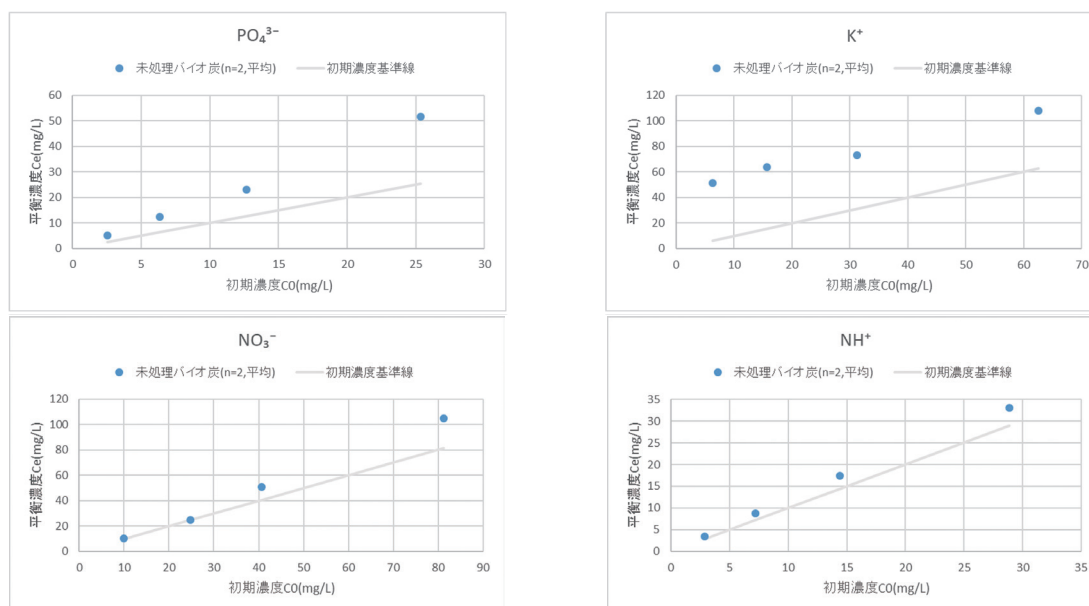


図5 各イオンの初期濃度と平衡濃度の関係

をイオンクロマトグラフィーで測定した。初期濃度 $C_0$ と平衡濃度 $C_e$ から各成分の吸着量 $q$ を算出し、等温線を作成した。図5は各イオンの初期濃度と平衡濃度の関係を示す。

その結果、すべてのイオンにおいて吸着量 $q$ は負の値を示し、「吸着」より「溶出」が卓越していた。特に $K^+$ は、初期濃度条件にかかわらず平衡濃度が著しく高くなり、多量の $K^+$ がバイオ炭から溶出していることが確認された。

$NO_3^-$ および $PO_4^{3-}$ についても、高濃度条件では平衡濃度上昇が確認され、溶出傾向が認められた。

これらの結果から、未処理高温バイオ炭は「養分保持材」というより、「養分供給源」としての性質が強いことが示唆された。

### 3.5 液肥前処理による養分保持特性の変化

液肥前処理による養分保持特性の変化を評価するため、液肥処理した高温バイオ炭を用いて溶出・交換挙動実験を行った。まず、三角フラスコに10倍希釈標準溶液100mLと液肥処理したバイオ炭を0.1g（乾燥重量換算）を投入し、試料は液肥処理時間24時間および72時間のdry試料およびwet試料とし、各条件2連で実施した。1時間振とう後、 $0.45\mu m$ メンブレンフィルターでろ過して得られた溶液のイオン濃度をイオンクロマトグラフィーで測定する。各実験におけるpHを表3に示す。

表3 各試料のpH

| 試料                | pH   | 試料                    | pH         |            |
|-------------------|------|-----------------------|------------|------------|
| 液肥原液              | 3.08 | 24時間液肥処理後の試料 (dry 状態) | 7.72 (1回目) | 7.83 (2回目) |
| 2倍希釈液肥            | 3.15 | 24時間液肥処理後の試料 (wet 状態) | 7.75 (1回目) | 7.52 (2回目) |
| 液肥前処理溶液<br>(24時間) | 5.69 | 72時間液肥処理後の試料 (dry 状態) | 7.62 (1回目) | 7.10 (2回目) |
| 液肥前処理溶液<br>(72時間) | 5.90 | 72時間液肥処理後の試料 (wet 状態) | 6.10 (1回目) | 6.19 (2回目) |

その結果を図6に示す。図6のように、液肥前処理試料では $NH_4^+$ および $PO_4^{3-}$ の保持傾向が確認された。

特に $K^+$ は、初期濃度条件にかかわらず平衡濃度が著しく高くなり、多量の $K^+$ がバイオ炭から溶出していることが確認された。

$NO_3^-$ および $PO_4^{3-}$ についても、高濃度条件では平衡濃度上昇が確認され、溶出傾向が認められた。

これらの結果から、液肥前処理によって一部養分の保持特性が改善される可能性が示唆された。一方で、 $K^+$ の溶出は依然として大きく、高温バイオ炭特有の可溶性カリウムの影響が強いことが確認された。

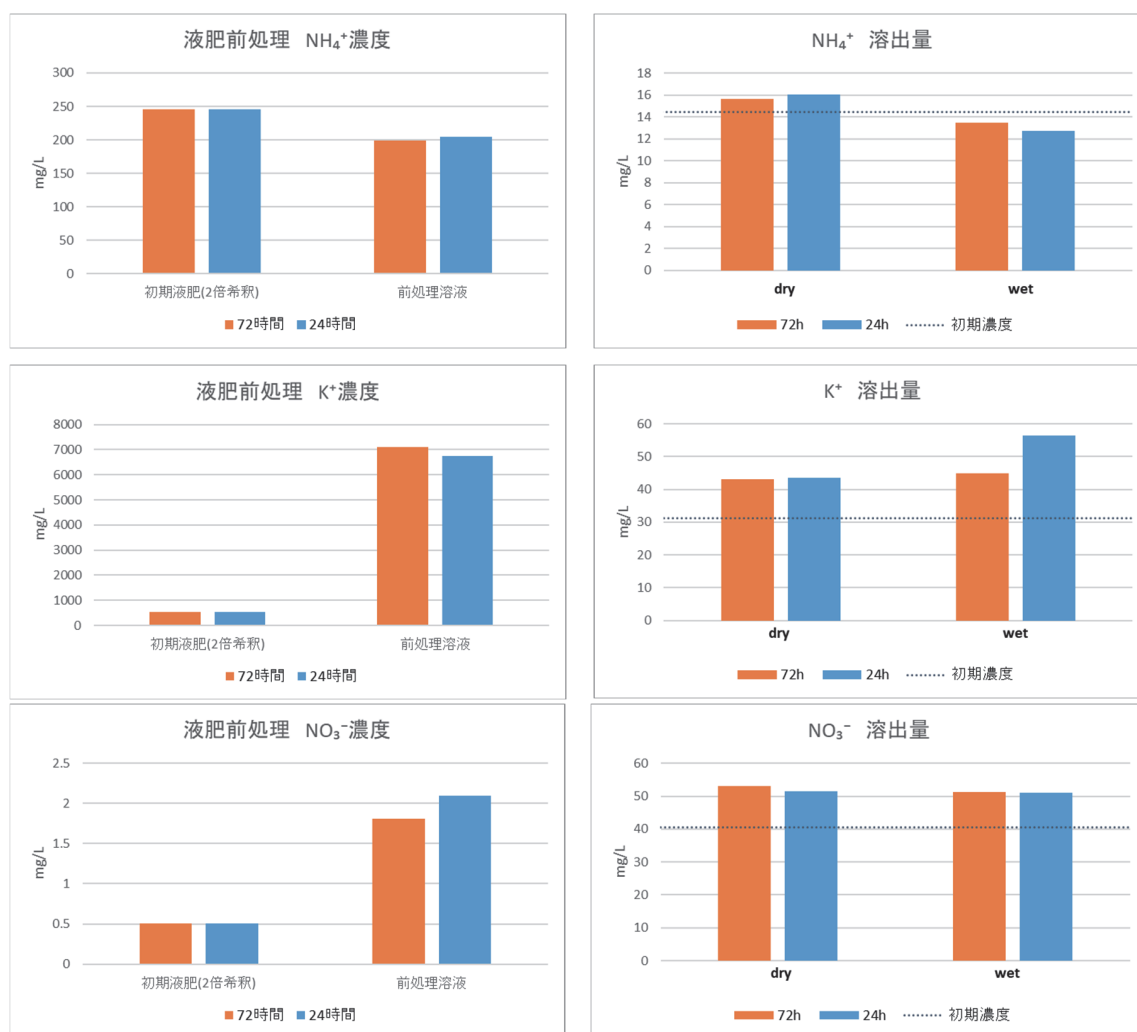


図6 液肥前処理における各イオン濃度および溶出量の変化

#### 4. 結論と今後の課題

本研究では、高温ガス化炉由来バイオ炭の施用率によって砂丘地土壤の通水挙動が変化し、前処理条件によって養分イオンの溶出・保持挙動が異なることを確認した。

高温バイオ炭は砂丘地土壤に対して一定の通水速度抑制効果を示す一方、未処理状態ではK<sup>+</sup>を中心とした養分供給源としての性質が強いことが確認された。

また、液肥前処理を施すことでNH<sub>4</sub><sup>+</sup>およびPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>の保持が確認され、高温バイオ炭の機能を調整できる可能性が示唆された。

以上より、高温バイオ炭は、通水速度の抑制と養分供給の両面から、砂丘地土壤の改良資材として利用できる可能性があると考えられる。

今後は、CECや表面官能基分析などの化学的評価に加え、実際の砂丘地農地における長期栽培試験を実施し、最適な施用量および前処理条件を検討していく必要がある。将来的には、木質バイオマス発電副産物を地域農業へ循環利用する地域循環型資源利用モデルへの展開が期待される。

# 施設内の混雑情報を用いた電力需要予測と 行動変容によるエネルギーマネジメント

人間形成教育センター 堀 磨伊也  
環境学部環境学科（令和7年度時点） 小林 碧志

## 1. はじめに

近年、気候変動対策や脱炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギー導入が急速に進んでいる。とりわけ太陽光発電や風力発電は大規模施設のエネルギー確保の選択肢として拡大しているが、これらは天候や季節変動の影響を受けやすく、出力の不確実性が高いという課題を抱えている。その結果、需要側の消費変動と供給側の再生可能エネルギー変動とが同時発生し、電力の需給バランスが乱れやすくなる。この需給調整のためには、発電側の調整だけでなく、需要側が自らの電力使用を柔軟に変化させるデマンドレスポンスが重要視されている。しかしながら、現状のデマンドレスポンスは一律的な節電要請が中心であり、各利用者が置かれている状況差や行動調整に伴う負担を十分に考慮できていない。その結果、なぜ今節電が必要なのか、どの程度行動が求められるのかといった合理的根拠が利用者に伝わりにくく、単なる義務的対応に留まってしまうという課題がある。利用者が納得して主体的に行動を選択できる形でデマンドレスポンスを成立させるためには、行動要請の根拠と必要性とを明確に示す仕組みが必要である。実効性の高いデマンドレスポンスを実現するには、電力需要を事前に高精度で予測し、その結果に基づいた適切な介入タイミングを特定する必要がある。

## 2. デマンドレスポンスに関する従来手法と提案手法の位置付け

デマンドレスポンスは、電力需給が逼迫する時間帯において、需要側が電力使用量を調整することで、電力系統の安定化を図る手法である。再生可能エネルギーの導入拡大に伴い、発電量の変動性が増大する中、供給側の調整のみでは需給バランスを維持することが困難となっており、需要側の柔軟な対応を促すデマンドレスポンスは重要な役割を担っている。近年では、太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギーの大量導入を背景として、電力需要を抑制する下げデマンドレスポンス（需要抑制型デマンドレスポンス）だけでなく、発電余剰が生じる時間帯に需要を積極的に増加させる上げデマンドレスポンス（需要増加型デマンドレスポンス）の重要性も指摘されている。特に昼間に太陽光発電の出力が集中する環境では、需要側が電力使用の時間帯を調整することにより、再生可能エネルギーの有効活用と系統安定化を同時に実現できる可能性がある。

一方で、これらのデマンドレスポンス方式は、需要家を一つの集合として捉える設計となっている場合が多く、大学キャンパスやオフィスビルのように、多様な利用者が異なる活動を行う施設においては課題が生じやすい。大学では、講義、研究活動、自習、事務作業など利用形態が時間帯や場所によって大きく異なるにもかかわらず、一律の節電要請や制御が行われる場合が多い。その結果、すでに電力使用を抑制する余地の少ない利用者にも同様の要請が届くなど、行動負担の偏りが生じ、協力意欲

の低下を招く可能性がある。さらに、上げデマンドレスポンスの観点においても同様の課題が存在する。発電余剰が生じている時間帯において、需要増加が望ましい場合であっても、「なぜ今電力を使用した方がよいのか」「どのような行動が需給調整に寄与するのか」といった根拠が利用者に十分に伝達されなければ、意図した行動変容を引き出すことは困難である。多くの場合、利用者は需給状況を具体的に把握できず、結果として上げデマンドレスポンスの潜在的な効果が十分に発揮されない。

このように、従来のデマンドレスポンス方式は制度的・技術的には成熟しつつある一方で、利用者の行動状況を踏まえた柔軟な運用や、行動要請の根拠を明確に示す仕組みが十分に整備されているとは言えない。利用者の理解と納得感を伴う形で、下げデマンドレスポンスおよび上げデマンドレスポンスの双方を適切に機能させるためには、電力需要の変動要因を明示し、行動判断を支援する新たなデマンドレスポンスの枠組みが求められている。一律的なデマンドレスポンス施策の限界を補完する手段として、電力需要を事前に高精度で予測し、需給状況に応じた判断を支援する技術が注目されている。電力需要予測は、電力系統の運用計画や設備制御、需給調整の高度化を目的として、これまで長年にわたり研究が進められてきた。初期の電力需要予測研究では、回帰分析や自己回帰移動平均モデルなどの統計的手法が主に用いられてきた。これらの手法はモデル構造が比較的単純で解釈性に優れる一方で、需要の非線形性や複雑な時間依存関係を十分に表現できないという課題があった。これに対し、機械学習手法の導入により、気象条件や時間属性など多数の説明変数を同時に扱う予測モデルが提案され、予測精度の向上が報告されている。近年では、深層学習を用いた電力需要予測が主流となりつつある。特にLSTMをはじめとする深層学習を用いた時系列モデルは、電力需要が有する周期性や長期的な時間依存関係を学習可能であり、高精度な需要予測を実現している。これらのモデルは、気温や湿度といった気象条件に加え、曜日や時刻などの時間的特徴を組み合わせることで、従来手法を上回る性能を示すことが報告されている。深層学習モデルは高い予測精度を有する反面、モデル内部の計算過程が複雑であり、予測結果の根拠を人間が理解することが困難であるというブラックボックス問題を抱えている。電力需要予測の結果を単に数値として提示するだけでは、「どのような状況が需要増加に寄与しているのか」「なぜ特定の時間帯で需要が高いと予測されたのか」といった問いに答えることができず、利用者への説明や行動要請への活用が難しい。

このような背景から、近年では機械学習モデルの予測根拠を明示する説明可能なAI（XAI）に関する研究が進展している。XAIは、ブラックボックスモデルの予測結果に対して、入力特徴量がどの程度影響を与えたかを定量的に示すことを目的とした枠組みである。中でもSHapley Additive exPlanations（SHAP）[1]は、協力ゲーム理論に基づき、各特徴量の寄与度を一貫性のある形で算出できる手法として広く用いられている。SHAPは、回帰モデルや決定木モデルだけでなく、深層学習モデルに対しても適用可能であり、電力需要予測分野においても、寄与分析やモデル妥当性の検証を目的とした応用が報告されている。これにより、気象条件や時間属性などが需要予測に与える影響を可視化し、モデルが学習した需要構造を解釈することが可能となる。しかしながら、既存研究の多くは、予測モデルの精度評価や特徴量の重要度分析を主目的としてXAIを適用しており、得られた説明結果を需要家や施設利用者への情報提供に活用する枠組みは十分に検討されていない。特に、デマンドレスポンスにおいて重要となる下げデマンドレスポンスおよび上げデマンドレスポンスの意思決定

に対し、予測根拠を用いて利用者の行動判断を支援する研究は限定的である。

以上により、電力需要予測技術は高精度化が進展しているものの、その予測根拠を利用者に理解可能な形で提示し、行動変容や需給調整に結びつけるための枠組みは未だ確立されていない。この課題を解決するためには、電力需要予測と説明可能なAIを組み合わせ、予測結果の背景にある要因を明示したうえで、利用者の意思決定を支援する手法が求められている。ただし従来のデマンドレスポンス施策は、一律的な行動要請に基づく運用が中心であり、利用者の行動状況や負担の差を十分に考慮できていないという課題を有している。また、近年の電力需要予測研究では、深層学習を用いた高精度な予測が可能となっている一方で、予測根拠がブラックボックスとなり、利用者への説明や行動要請への活用が困難であるという問題が指摘されている。このような背景を踏まえ、本研究は、利用者の行動由来の説明変数を導入し、電力需要予測とその根拠の可視化に基づく情報提供の枠組みを構築することで、デマンドレスポンスの実効性を高めることを目指す。

### 3. デマンドレスポンスのための電力需要予測根拠の可視化

本章では、デマンドレスポンスのための電力需要予測根拠の可視化手法について述べる。事前に決定された要因に基づく需要をベース予測モデルで表現し、実際の在室状況や利用者行動に起因する変動を、行動由来のデータを用いた残差学習モデルによって補正する2段階予測モデルを採用する。この構成により、定型的な需要変動と、利用者の行動に起因する非定型的な変動を分離して評価することが可能となる。さらに、本研究ではSHAPを用いて、予測に寄与する要因を定量的に可視化する。これにより、下げデマンドレスポンスおよび上げデマンドレスポンスの双方において、予測の背景にある行動の根拠をエビデンスとして利用者に提示できる。単なる数値的な予測を超え、利用者の納得感を伴う行動変容を支援し、施設全体のエネルギーマネジメントの実効性を高める点に本手法の独自性がある。まず**3.1.**にて、予測精度の向上と行動変容を支える行動由来の情報の収集プロセスおよびその手法について述べる。次に**3.2.**では、具体的な電力需要予測モデルの構築と予測根拠の可視化について述べる。

#### 3.1. 予測精度の向上と行動変容を支える行動由来の情報の収集

本研究では、利用者の行動状況を反映した情報提供を実現するため、センサノードを施設内に設置し、人流や室内の占有状況といった利用者の行動由来の情報の収集を行う。電力需要は設備仕様のみならず、施設内における利用者の活動密度や滞在時間に大きく依存するため、これらの指標を正確かつ継続的に取得することが重要である。本研究では、プライバシーに配慮した簡潔かつ匿名性の高いデータとして、BLE端末検知数と室内環境指標との二つを採用する。

人流の検知には、Bluetooth Low Energy (BLE) のアドバタイズ信号を用いる。これは、デバイスの存在を周囲に通知するために一定間隔で送信される信号であり、空間内に存在する端末数を把握することが可能である。本研究の目的は個人の特定や動線の追跡ではなく、施設全体の利用規模が電力需要に与える影響の把握にあるため、一定時間内に検知された端末数のみを人流の代表指標として抽出する。これにより、個人を特定せずに人の存在規模を定量化することが可能となる。

一方、室内の占有状況の把握には、温湿度・二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）センサを用いる。センサが計測するCO<sub>2</sub>濃度は、室内の換気量と滞在人数とに応じて変動するため、在室推定の指標として広く用いられている。CO<sub>2</sub>濃度が上昇する傾向は滞在人数の増加を示唆し、逆に換気後の急減は滞在人数の減少と対応する。本研究では、これらのCO<sub>2</sub>濃度の時間変動を基に室内占有状況を間接的に推定し、BLEによる端末検知数と組み合わせて、利用者の行動を表す説明変数として利用する。BLE端末検知数が「人の存在規模」を表すのに対し、CO<sub>2</sub>濃度は「滞在の継続性」を反映する指標であり、両者を併用することで施設利用状況を多面的に捉えることが可能となる。BLE端末検知数および温湿度・CO<sub>2</sub>濃度データは、一定周期で取得され、ネットワークを介してサーバに送信する。これにより、施設内の利用者の行動を連続的かつ非侵襲に観測するセンシング基盤を構築する。

以上のように、本研究では端末検知数および室内環境指標といった簡潔かつ匿名性の高いデータを用いることで、行動由来のデータを反映した電力需要予測モデルの構築を可能とする。本研究における利用者の行動由来の情報の収集は、手法Aでは、温湿度センサとCO<sub>2</sub>センサを用いて室内の占有状況を把握する。手法Bでは、温湿度センサやCO<sub>2</sub>センサに加えBLEによる人流センシングを統合し、センサノードを構築する。これにより、人流および占有状況を同一ノードで同時に取得可能なセンシング基盤を実現する。

### 3.2. 電力需要予測モデル構築と予測根拠の可視化

本節では、前節で収集した利用者の行動由来のデータを活用し、電力需要予測モデルを構築する具体的な手順、および予測結果の妥当性を検証するための手法について述べる。

電力需要予測に用いるデータとして、電力使用量、気象データ、行動由来のセンサデータ、および時間属性データを収集する。電力使用量および気象データは時刻情報を基準として各データを統合する。一方、行動由来のセンサデータは異なる間隔で収集されているため、時刻情報を基準として集約し、平均値などの統計量として特徴量化する。これにより、すべての説明変数を同一の時間解像度で扱うことを可能とする。

どの曜日の授業が実施されているかといった授業実施情報を、事前に決定された利用スケジュールを表す変数として扱い、後述するベース予測モデルに入力する。大学の授業カレンダーおよび祝日情報を用い、以下のフラグを作成する。

- 授業実施日フラグ
- 曜日別授業フラグ
- 休日フラグ（週末または祝日）
- 施設閉鎖フラグ

気象データとしては、鳥取地方気象台で観測された1時間ごとの気温、湿度、降水量、日照量、風速を用いる。時系列データの欠測については、気象データなど時間的連続性を仮定できる変数に対しては時間方向の線形補間を適用する。また、長期間にわたり欠測が継続するセンサについては、モデル学習への影響を考慮し、該当する特徴量を分析対象から除外する。

前処理後のデータを用いて、電力需要予測モデルを構築する。本研究では、電力需要を構成する要

因を段階的に扱うため、ベース予測と残差補正から成る2段階予測モデルを採用する。まず、気象条件や時間的周期性、授業実施といった事前に決定された利用スケジュールに基づく定型要因を考慮するため、ベース予測モデルを構築する。ベース予測モデルの説明変数として、気象データ・時刻および周期特徴量・授業実施情報および休日情報・過去の電力使用量を用いる。これらを用いて、説明変数ベクトル  $x_t^{(base)}$  を定義し、過去  $k$  時間分の系列  $x_{t-k:t}^{(base)}$  を入力とする。ベース予測モデルには、時系列データの時間的依存関係を学習可能なLSTMを用い、時刻  $t$  における電力需要の予測値  $\hat{y}_t^{(base)}$  を式 (1) により算出する。

$$\hat{y}_t^{(base)} = f_{LSTM}(x_{t-k:t}^{(base)}) \quad (1)$$

このモデルにより、電力需要の周期性や気象条件に加え、授業実施など予定された利用状況に起因する需要変動を系列として表現することを目的とする。次に、ベース予測モデルでは表現しきれない利用者の行動由来の非定型要因を扱うため、式 (2) に示す実測値  $y_t$  とベース予測値との差を残差  $r_t$  として定義する。

$$r_t = y_t - \hat{y}_t^{(base)} \quad (2)$$

この残差は、実際の利用者行動のばらつきなど、時々刻々と変化する非定型要因を含む成分と位置付ける。残差  $r_t$  を予測するために、行動由来の情報を直接的に反映するセンサデータを入力とした残差学習モデルを構築する。残差学習モデルの入力として、室内CO<sub>2</sub>濃度・室内環境データ・BLE端末検知数を用いる。これらを用いて、説明変数ベクトル  $x_t^{(res)}$  を定義し、決定木ベースの回帰モデルを用い、残差の予測値  $\hat{r}_t$  を式 (3) により算出する。

$$\hat{r}_t = f_{GBDT}(x_t^{(res)}) \quad (3)$$

最終的な電力需要予測値は、式 (4) に示すベース予測値と残差予測値を加算することで求める。

$$\hat{y}_t^{(2st\ stage)} = \hat{y}_t^{(base)} + \hat{r}_t \quad (4)$$

この構成により、予定された利用スケジュールに基づくベース需要と、実際の行動由来の変動需要を構造的に分離して扱うことを可能とする枠組みを構築する。

また、本研究では電力需要予測モデルの予測根拠を明示するために、SHAPを用いる。SHAPは、協力ゲーム理論に基づき、ある予測結果に対して各説明変数がどの程度寄与したかを定量的に評価する説明可能なAI手法である。SHAPでは、機械学習モデルを複数の特徴量が協力して予測値を決定するゲームとみなし、各特徴量をプレイヤーとして扱う。ある特徴量の寄与度は、その特徴量をモデルに追加したときに予測値がどれだけ変化するかを、すべての特徴量の組み合わせに対して平均するこ

とで算出される。この考え方に基づく指標はシャープレイ値と呼ばれ、特徴量集合  $N = \{1, \dots, M\}$  に対し、特徴量  $i$  のシャープレイ値は、式 (5) で算出される。

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|! (M - |S| - 1)!}{M!} [f(S \cup \{i\}) - f(S)] \quad (5)$$

$f(S)$  は、特徴量集合  $S$  のみ使った予測の期待値である。SHAPにより得られる予測値は、式 (6) に示すように、基準値と各特徴量の寄与の総和として表現される。

$$\hat{y} = \phi_0 + \sum_{i=1}^M \phi_i \quad (6)$$

ここで、 $\hat{y}$  はモデルの予測値、 $\phi_0$  は全データにおける予測値の平均（基準値）、 $\phi_i$  は特徴量  $i$  が予測値に与える寄与度を表す。正の寄与度は予測値を増加させる方向に作用し、負の寄与度は予測値を減少させる方向に作用させることを意味する。

まず、残差学習モデルに対してSHAPを適用することで、特定の時間帯や条件において、どの行動由来の情報や環境情報などの非定型要因が残差予測に寄与しているかを定量的に評価する。残差学習モデルは決定木ベースの回帰モデルであるため、TreeSHAP[2]を適用し、各特徴量の寄与度を算出する。TreeSHAPは、SHAPの枠組みを決定木モデルに特化して、効率化した手法であり、勾配ブースティング決定木（GBDT）などに対して厳密なシャープレイ値を高速に算出できる点に特徴がある。これにより、人流や室内環境といった行動由来の説明変数が、電力需要予測の補正にどのように関与し得るかを分析可能とする。一方で、ベース予測モデルであるLSTMに対してもSHAPを適用し、気象条件、時間属性、および授業実施情報といった事前に決定された利用スケジュールに基づく寄与が、電力需要の基礎的な予測にどのように寄与しているかを評価する。ベース予測モデルであるLSTMは、時系列の長期依存関係を学習可能な非線形モデルであり、内部状態の解釈が困難であることから、本研究ではモデル非依存な手法であるPermutation SHAP[3]を採用する。これは入力特徴量の値を置換した際の予測値の変化から寄与度を近似的に算出する枠組みであり、これによりベースモデルが捉える定型的な需要構造を、説明可能性の観点から整理することが可能となる。

最終的には、SHAPによって得られた予測根拠を利用者への情報提供や行動要請に活用することを目指す。単に電力需要の予測値を提示するのではなく、「なぜ需要が高いのか」「どの行動や環境情報が影響しているのか」といった根拠を併せて提示することで、利用者や場所の状況に応じた柔軟な行動要請を実現する。これにより、デマンドレスポンスの実効性向上に寄与することが期待される。

#### 4. 実験

本章では、前章で提案したデマンドレスポンスのための行動変容を想定した電力需要予測モデルの有効性を検証するため、実施した実験の結果について述べる。本実験の主な目的は、行動由来の情報の導入による予測精度の向上効果を明らかにすること、およびSHAPを用いて予測根拠の妥当性を評価することにある。本章の構成は以下の通りである。

まず4.1.において、実験の対象となる施設や観測環境、使用したデータの詳細および前処理の手順を説明し、本研究で提案する2段階予測モデルの精度検証を行う。従来のベースモデルと行動由来の情報を導入した提案モデルの予測精度を比較することで、利用者の行動由来の情報が予測に与える補正効果を定量的に明らかにする。最後に4.2.では、SHAPを用いた予測根拠の提示の妥当性や説明性について評価する。

#### 4.1. 実験条件およびデータ概要および2段階予測モデルによる予測精度の向上効果

本研究では、公立鳥取環境大学のキャンパスを対象とし、当該施設における電力需要データおよび室内環境・人間活動に関する観測データを用いて分析を行った。対象施設は、主として講義室および研究室として利用されている。平日昼間の利用が多い一方で、時間帯や曜日によって利用状況が大きく変化する。このような施設では、照明、空調、情報機器等の使用が人間の在室状況や行動に強く依存するため、電力需要は人の行動の影響を受けやすいと考えられる。電力需要データとして、対象施設において取得された電力データを用いた。観測期間は、2023年4月1日0:00から2025年12月10日23:00までであり、実験には1時間あたりの電力量[kWh]を使用した。期間中の電力需要は平均203.14kWh、標準偏差105.19kWhであった。気象データとして、鳥取地方気象台において1時間間隔で観測されたデータを使用した。使用した気象変数は、気温、湿度、降水量、日照時間、風速である。これらは空調・照明需要に影響を与える代表的な外生要因であり、電力需要予測において重要な説明変数と考えられる。

利用者の行動を表す指標として、2024年11月14日から2025年8月23日において、学内の講義室5室の7か所、執務室2室の2か所、計9か所に設置したセンサ（SCD41）から10分間隔で取得したCO<sub>2</sub>濃度および温湿度データを使用した。さらに、2025年11月12日から同年12月10日では学内の講義室4室の8か所で、前述センサをRaspberry Pi 5に接続するとともにBLE信号を用いた人流データを10分間隔で取得した。

本研究では、行動由来のデータの取得条件の違いを考慮し、分析期間をBLEによる人流データが存在する期間（2025年11月12日から同年12月10日）とした。本実験は、利用者の行動由来の情報を説明変数として用いた電力需要予測の予測精度を評価する。式（2）において定義した残差を予測するモデルとして、行動由来の情報を説明変数として用い、LightGBM[4]による残差予測モデルを構築した。

訓練期間を2025年11月12日14:00から同年12月5日11:00まで、評価期間は、2025年12月5日12:00から同年12月10日23:00までとした。目的変数は、実測値と構築したベースモデルの予測値との差である。説明変数として表1に示す特徴量を用いた。式（4）に示すベース予測値と残差予測値とを加算した電力需要値は、評価期間において、RMSE 20.45kWh、MAE 13.42kWh、MAPE 6.16%の性能が得られた。予測値と実測値のグラフを図1に示す。一部昼間の時間帯において、2段階予測モデルによる補正が行われていることが確認できる。しかしながら、12月8日昼間はベースモデル、2段階予測モデル共にピークを予測できていない。

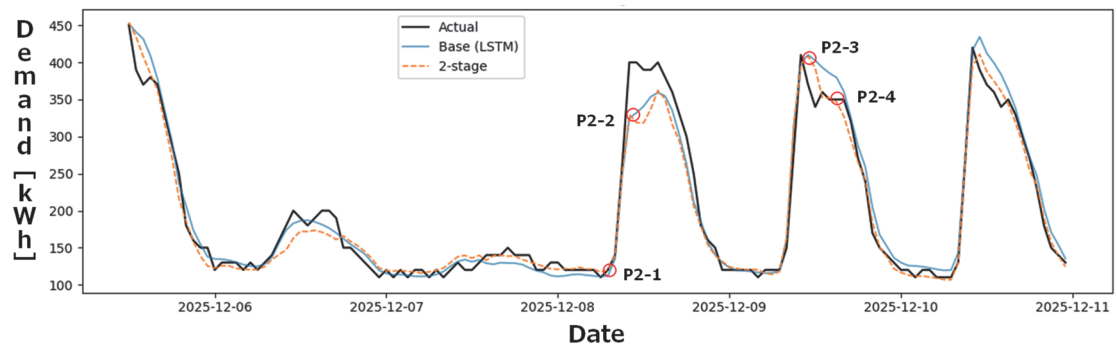


図1. 評価期間における実測値と予測値の比較

表1. 2段階予測モデルにおいて使用した説明変数

| 分類  | 特徴量名             | 説明              | 期間 |
|-----|------------------|-----------------|----|
| センサ | 100b_tem         | 100講義室温度        | ①  |
| センサ | 100b_hum         | 100講義室湿度        | ①  |
| センサ | 100b_co2         | 100講義室CO2濃度     | ①  |
| センサ | 30_tem           | 30講義室温度         | ①  |
| センサ | 30_hum           | 30講義室湿度         | ①  |
| センサ | 30_co2           | 30講義室CO2濃度      | ①  |
| センサ | 17_tem           | 17講義室温度         | ①  |
| センサ | 17_hum           | 17講義室湿度         | ①  |
| センサ | 17_co2           | 17講義室CO2        | ①  |
| センサ | gkm_tem          | 学務課執務室温度        | ①  |
| センサ | gkm_hum          | 学務課執務室湿度        | ①  |
| センサ | gkm_co2          | 学務課執務室CO2濃度     | ①  |
| センサ | co2__100f        | 100講義室前方CO2濃度   | ②  |
| センサ | ble_count__100f  | 100講義室前方BLEカウント | ②  |
| センサ | temperature_100f | 100講義室前方温度      | ②  |
| センサ | humidity__100f   | 100講義室前方湿度      | ②  |
| センサ | co2__100b        | 100講義室後方CO2濃度   | ②  |
| センサ | ble_count__100b  | 100講義室後方BLEカウント | ②  |
| センサ | temperature_100b | 100講義室後方温度      | ②  |
| センサ | humidity__100b   | 100講義室後方湿度      | ②  |
| センサ | co2__200f        | 200講義室前方CO2濃度   | ②  |
| センサ | ble_count__200f  | 200講義室前方BLEカウント | ②  |
| センサ | temperature_200f | 200講義室前方温度      | ②  |
| センサ | humidity__200f   | 200講義室前方湿度      | ②  |
| センサ | co2__200b        | 200講義室後方CO2濃度   | ②  |
| センサ | ble_count__200b  | 200講義室後方BLEカウント | ②  |
| センサ | temperature_200b | 200講義室後方温度      | ②  |
| センサ | humidity__1200b  | 200講義室後方湿度      | ②  |
| センサ | co2__30f         | 30講義室前方CO2濃度    | ②  |
| センサ | ble_count__30f   | 30講義室前方BLEカウント  | ②  |
| センサ | temperature_30f  | 30講義室前方気温       | ②  |
| センサ | humidity__30f    | 30講義室前方湿度       | ②  |
| センサ | co2__30b         | 30講義室後方CO2濃度    | ②  |
| センサ | ble_count__30b   | 30講義室後方BLEカウント  | ②  |
| センサ | temperature__30b | 30講義室後方温度       | ②  |
| センサ | humidity__30b    | 30講義室後方湿度       | ②  |
| センサ | co2__17f         | 17講義室前方CO2濃度    | ②  |
| センサ | ble_count__17f   | 17講義室前方BLEカウント  | ②  |
| センサ | temperature_17f  | 17講義室前方温度       | ②  |
| センサ | humidity__17f    | 17講義室前方湿度       | ②  |

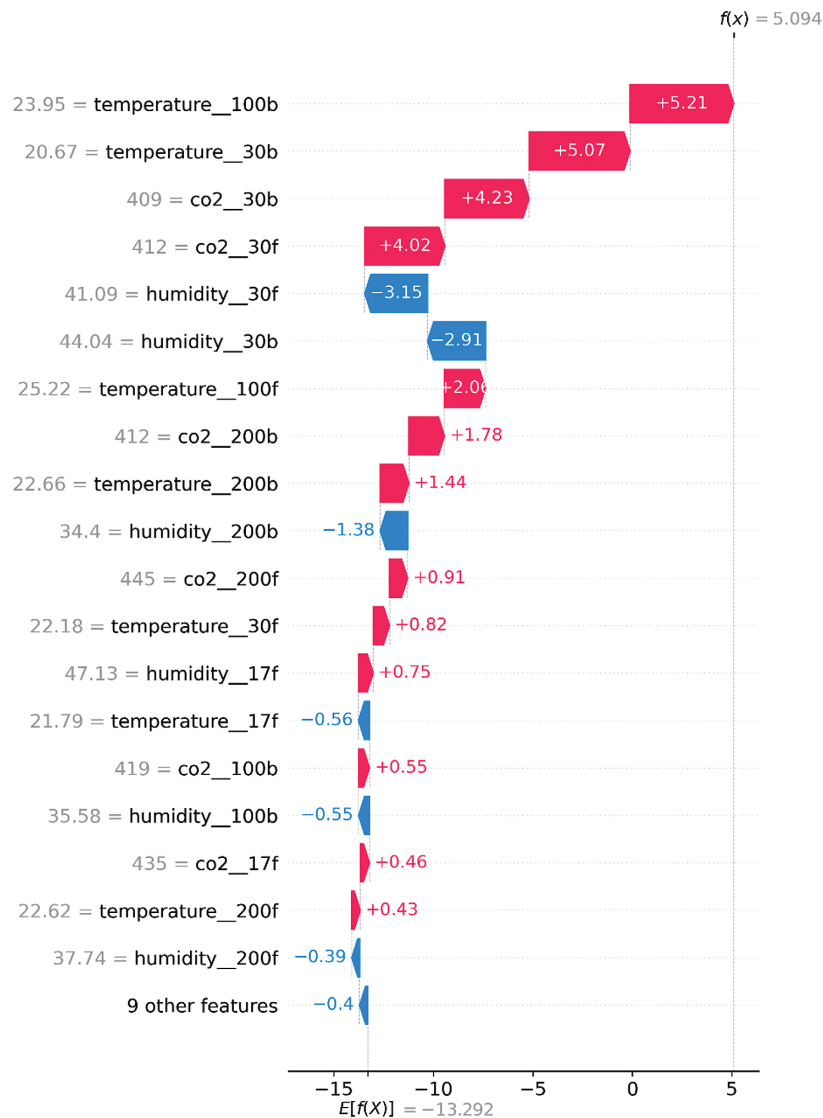


図2. P2-1(12/8 8:00)における予測値に対する局所解釈の結果

#### 4.2. SHAPを用いた予測根拠の妥当性と説明性の評価

予測根拠の可視化の有用性を検証するため、4.1. で構築したベースモデル、残差モデルに対して、SHAPを適用し、局所的な解釈を確認した。図1の時系列データにおける各時点の局所解釈結果を図2に示す。P2-1（12月8日8時）では、100講義室（temperature\_100b）および30講義室の室温（temperature\_30b）が強い正の寄与を示しており、空調の立ち上げに伴う電力需要の増加が確認される。授業開始前における空調稼働が需要増加としてモデルに捉えられていることが分かる。しかしながら、当日は1限の時間帯に30講義室および100講義室で講義は予定されていない。設備稼働フラグがモデルに与えられていないため、わずかな変動を根拠として提示してしまっている可能性がある。

デマンドレスポンスでは、電力需要の予測精度に加えて、需要変動がどのような要因によって生じているかを理解可能であることが重要である。特に大学キャンパスのように利用者の行動や授業運営が電力需要に大きく影響する環境では、予測結果の説明性が運用判断の妥当性を左右する。本研究で用いたSHAPによる説明結果からは、室温、CO<sub>2</sub>濃度、BLEによる在室指標といった行動に由来する

特徴量が、時間帯や利用状況に応じて電力需要へ異なる寄与を示すことが確認された。これにより、需要増加が人の流入に伴う不可避な変動なのか、あるいは空調設定や運用方法による調整可能な変動なのかを区別して把握することが可能となる。このような説明性は、デマンドレスポンス発動時の制御対象の選定や抑制余地の判断を支援するだけでなく、運用者や利用者へのフィードバックとして活用できる点に特徴がある。需要増加の根拠が具体的に示されることで、教職員や学生に対して行動や利用方法の見直しを促す材料を提示でき、単なる強制的な制御ではなく、自発的な行動変容につなげることが期待される。したがって、説明可能な需要予測モデルは、デマンドレスポンスを一時的な需要抑制手段にとどめず、継続的な省エネルギー行動を誘発する仕組みとして機能し得る。

## 5. おわりに

本研究では、大規模施設におけるデマンドレスポンスの実効性を高めることを目的として、利用者の行動に由来する情報を導入した電力需要予測モデルの構築と、SHAPを用いた予測根拠の可視化に基づく情報提供の枠組みを提案・検証した。まず、施設内の環境データ（温度・湿度・CO<sub>2</sub>濃度）に加え、BLE端末検知数を用いた非侵襲な人流検知システムを構築し、利用者の行動状況を反映したデータセットを整備した。次に、気象条件やカレンダー情報等の定型要因を学習するLSTMベースモデルと、非定型要因による変動需要を補正する残差学習モデルとから成る2段階予測モデルを構築した。実験の結果、2段階予測モデルはMAPE 6.16%という高い予測精度を達成し、ベースモデル単体と比較して精度の向上が確認された。また、SHAPを用いた寄与分析により、気象条件やスケジュールによるベース需要の増減と、利用者の行動に由来する情報が予測値に与える影響を定量的に分離・可視化できることを示した。これにより、単なる数値提示ではなく、気温上昇による負荷増や高密度な在室状況といった納得感のある根拠に基づいた行動要請の可能性を提示した。

## 参考文献

- [1] Scott M. Lundberg and Su-In Lee, “A unified approach to interpreting model predictions,” Advances in Neural Information Processing Systems, 2017.
- [2] Scott M. Lundberg, Gabriel G. Erion, and Su-In Lee, “Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles,” arXiv preprint arXiv:1802.03888, 2019.
- [3] Erik Štrumbelj and Igor Kononenko, “An Efficient Explanation of Individual Classifications using Game Theory,” Journal of Machine Learning Research, Vol.11, pp.1-18, 2010.
- [4] Guolin Ke, Qi Meng, Thomas Finley, Taifeng Wang, Wei Chen, Weidong Ma, Qiwei Ye, and Tie-Yan Liu, LightGBM: “A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree,” Advances in Neural Information Processing Systems, Vol.30, No.30, 2017.

# 地域農業における脱炭素農法導入に関する基礎的調査

環境学部環境学科 山口 創

## 1 はじめに

2050年のカーボンニュートラルの実現に向け、農山村においても脱炭素化が求められている。著者はこれまで取り組んできた一連の研究において、農山村の脱炭素を推進するには、脱炭素化の流れを農山村の社会経済の発展に結びつけることが最も重要との問題意識を持ち、農山村の基幹産業である農業を対象に、バイオ炭導入による農業への影響を調査、分析してきた。事例調査の結果、カーボンクレジットはバイオ炭の購入費用が重いため現実には利益は生まないことや、脱炭素の取り組みによる農作物価格の向上も難しい現実があることが示された（山口、2024）。そして、中山間地域農業において脱炭素化をすすめるには、収益向上以外の点から導入する意義を示すことが必要という認識を強めるに至った。

こうした現状整理から、本年度は、多角的な視点から脱炭素農法導入の地域農業への影響を検討するため、第一にバイオ炭推進地域における普及実態、第二に農業者のバイオ炭を含む脱炭素農法の導入が消費者の選好に及ぼす影響に関する基礎的調査を実施することにした。

## 2 研究の方法

バイオ炭の普及実態については、地域単位で未利用資源を活用したバイオ炭の製造と農業利用をすすめているA町、B町を対象として選定した。A町では自治体担当者、B町ではバイオ炭製造者および利用者に対してバイオ炭の製造、供給の背景や仕組み、実態についてのインタビュー調査を実施した。実施期間は2026年3月である。

消費者選好に関する調査は、webアンケート調査にて実施した。なお事前スクリーニングを行い、web直売サービスで農作物を購入した経験のある消費者に回答者を限定した<sup>注1</sup>。主な調査項目は表1に示す通りであり、農業者の脱炭素農法の実践を含む営農面の特徴に対する評価を尋ねた11項目、農作物の購入状況に関する2項目、脱炭素農法の認知度に関する1項目である。農業者の営農面に関する評価については、各項目についてリピーターになりたいと思うかを6段階（リピーターになりたい、ややリピーターになりたい、どちらでもない、あまりリピーターになりたくない、リピーターになりたくない、わからない）で尋ねた。そしてこれらの結果を用い、消費者の脱炭素農法の評価を明らかにした。調査はマクロミル社に委託し、有効回答数は206部であった。調査時期は2026年2月末である。

## 3 地域レベルにおけるバイオ炭導入に関する事例調査

### 3.1 A町におけるバイオ炭の導入状況

事例対象は自治体A町、B町である。A町は人口約13,000人、中山間地域に位置しており主要産業は第一次産業である。A町では、地球温暖化対策実行計画において竹林整備と竹や林業由来の未利用資

源を活用したバイオ炭の製造と農業利用を掲げている。A町では太陽光パネルの設置を中心とした脱炭素推進を考えていたが、農業分野での適用が限定されることから、バイオ炭の推進を加えることになった。

バイオ炭の製造には令和5年頃から取り組んでいる。当初、果樹の剪定枝や食品残渣を用いて製造しようと考えていたが、竹林整備によって生じた竹の処分が課題となっていたことから、竹を原料とすることになった。またバイオ炭の製造は、活動開始時は竹林の管理組織が担っていたが、翌年からは第三セクターが委託を受け製造するようになった。なお、バイオ炭の製造は可搬式の簡易炭化機で行なっている。利用については、調査時点では計画通りに進展していない。計画段階では町が委託製造している畜産廃棄物を原料にした有機堆肥をもとにバイオ炭堆肥を製造し、販売する計画であった。しかし、簡易製造機で製造するバイオ炭は品質が安定せず、商品化が難しい状況となっている。

以上のようにA町のバイオ炭の製造、普及は滞っている。町として推進するには、バイオ炭施用の作物への影響や経済性を説明する必要があると考えられており、この点が大きな障壁となっている。ただし地域で課題となっていた未利用資源の有効活用という点は評価されている。

### 3.2 B町での導入状況

B町は人口約11,000人、主要産業は第一次産業である。B町では令和4年頃から竹を利用したバイオ炭の製造と利用に取り組んでいる。B町では、地域おこし協力隊員が住民組織、福祉事業所と連携して放棄竹林整備とバイオ炭の製造、農地施用という資源循環モデルを構築している。また、収穫した若竹を用いたメンマ製造にも取り組んでいる。竹林整備とバイオ炭製造は夏季を除く約8ヶ月間、週に1回程度のペースで行われている。当初は住民組織のみで行なっていたが、現在は地域の福祉事業所と連携して取り組まれており、こうした活動は地域住民からは住民同士や福祉事業所作業員との

表1 アンケート調査項目

|                |           |                                                                  |
|----------------|-----------|------------------------------------------------------------------|
| 農業者の営農特性に対する選好 | 脱炭素       | (1) 温室効果ガスの発生を抑える農法、または吸収する農法を実践している                             |
|                | 環境保全      | (2) できる限り自然環境に優しい農法を実践している                                       |
|                | 減・無農薬     | (3) 農薬を出来るだけ使わないようにしている<br>(4) 無農薬で栽培している                        |
|                | 減・無化学肥料   | (5) 化学肥料を出来るだけ使わないようにしている<br>(6) 化学肥料を使わずに栽培している                 |
|                | スマート農業    | (7) ドローンなど先進的な農業技術を積極的に導入している                                    |
|                | 伝統農法      | (8) 地域で代々作られてきた品種を守っている<br>(9) 地域固有の伝統的な農業のやり方を守ろうとしている          |
|                | 地域農業      | (10) 地域の農地を守ることに貢献している                                           |
|                | 営農環境      | (11) 自然豊かな環境で農業を営んでいる                                            |
| 農作物の購入状況       | 特定の購入先の有無 | (12) 継続的に農作物を購入している農家がありますか                                      |
|                | 農家情報参考状況  | (13) 農作物を購入する際、農作物の産地、品質、価格以外に、農家の情報も重視していますか                    |
| 脱炭素農法の認知度      |           | (14) 近年、農業分野では温室効果ガスの発生を抑えたり、吸収する農法が開発されています。このような農法があることをご存知ですか |

交流機会として高く評価されている。また福祉事業所側も地域住民との交流機会が作業者の生きがいに繋がっていると評価している。なお、バイオ炭の製造には可搬式の簡易製造装置を3機にて行われており、令和6年度は約60aの放棄竹林の管理で生じた竹が使用された。

製造されたバイオ炭は、農福連携に取り組む福祉事業所に出荷され、さつまいも栽培（約30a）の土壌改良剤として活用されている。福祉事業所では、疫病対策のための土壌改良剤として活用しているが、竹資源の循環というストーリー性をより重視し営農に取り入れている。

以上のようにB町の事例では、農福連携事業と資源循環という文脈でバイオ炭の製造と利用が行われている。主要なアクターである住民組織、2つの福祉事業所では、資源循環という共通の価値観を共有しつつ、住民交流の場の形成に価値を見出し活動が継続されていると考えられる。

### 3.3 バイオ炭導入の論理の違い

A町、B町ともに放棄竹林の解消の過程で生じた竹資源を活用してバイオ炭を製造している点は共通しているが、バイオ炭導入の論理が異なっている点は注目に値する。A町の場合、バイオ炭製造段階では未利用資源の活用といった点を評価しているが、普及段階ではバイオ炭の製造経費や農地施用によるメリットといった経済性を評価指標として、普及に取り組もうとしている。一方、B町の場合、資源循環を意図して竹林整備とバイオ炭の製造を開始した経緯があり、バイオ炭の経済性は重視されていない。また資源循環に加え、製造段階では竹林整備活動によるコミュニティ形成、利用段階では資源循環というストーリー性が重視されている。

## 4 脱炭素農業に対する消費者選好

### 4.1 回答者の属性

脱炭素農法に対する消費者の評価を明らかにするためwebアンケート調査を実施した。表2に回答者の属性を示す。回答者の性別は、男性54.9%、女性45.1%でほぼ均等な割合であり、年代は50代、60代がともに30.1%で最も高く、高年代に回答者が偏っている傾向にあった。また、「農作物を購入する際、農作物の産地、品質、価格以外に、農家の情報も重視していますか」との設問を6段階（重視している、やや重視している、どちらでもない、あまり重視していない、重視していない、わからない）で尋ねた結果、重視している：14.1%、やや重視している：

32%の回答が得られ、合わせて46.1%の回答者が農作物や農業者に関する幅広い情報を参考にしている結果となった。次に、「継続的に農作物を購入している農家がありますか」という設問には、いる：18.4%、過去にいた：14.6%であり、全体で33%が特定の農家から農作物を購入した経験があった。これらの結果から、農作物に対するこだわりが強く、農業者からの直接購入など実際の購買行動にも現れている回答者が一定程度含まれていることが示された。

表2 回答者の属性

|    |       | n   | %    |
|----|-------|-----|------|
| 性別 | 男性    | 113 | 54.9 |
|    | 女性    | 93  | 45.1 |
| 年代 | 20代   | 11  | 5.4  |
|    | 30代   | 36  | 17.4 |
|    | 40代   | 35  | 17.0 |
|    | 50代   | 62  | 30.1 |
|    | 60代以上 | 62  | 30.1 |
| 計  |       | 206 | 100  |

加えて、「近年、農業分野では温室効果ガスの発生を抑えたり、吸収する農法が開発されています。このような農法があることをご存知ですか」という問いについては、具体的な内容を知っている：7.8%、具体的な内容はわからないが、存在は知っている：39.3%の回答であり、合計で47.1%の回答者が脱炭素農法の存在を認識している結果であった。

## 4.2 農業者の特性に対する消費者選好の比較

図1は、農業者の営農上の特性に対する消費者の選好を尋ねた結果である。農業者が脱炭素、減農薬・無農薬、減化学肥料・無化学肥料、スマート農業、伝統農業の実践などに取り組んでいると想定し、それぞれの特性を有する農業者のリピーターになりたいかどうかを6段階（リピーターになりたい、ややリピーターになりたい、どちらでもない、あまりリピーターになりたくない、リピーターになりたくない、わからない）で尋ねた。

結果、まず農業者の特性のうち「脱炭素農法を実践している」については、リピーターになりたい：12.1%、ややリピーターになりたい：41.3%であり合計53.4%が肯定的に評価していた。この結果は脱炭素農法に取り組むことは消費者の購買獲得につながる可能性を示している。一方、他の項目と比較すると、環境保全に関する項目である「自然環境にやさしい農法を実践している」はリピーターになりたい、ややリピーターになりたい、合計で67%、減農薬・無農薬に関する項目である「農薬を出来るだけ使わない」は73.8%、「無農薬で栽培している」は65.0%、減化学肥料・無化学肥料に関する項目である「化学肥料を出来るだけ使わない」は64.0%、「化学肥料を使わずに栽培している」は59.7%、地域農業の保全に関する項目である「地域の農地を守ることに貢献している」では62.6%、営農環境に関する項目である「自然豊かな環境で営農している」は62.5%であり、これらの項目は脱炭素農法の実践よりも高いリピーター意向が示す結果となった。

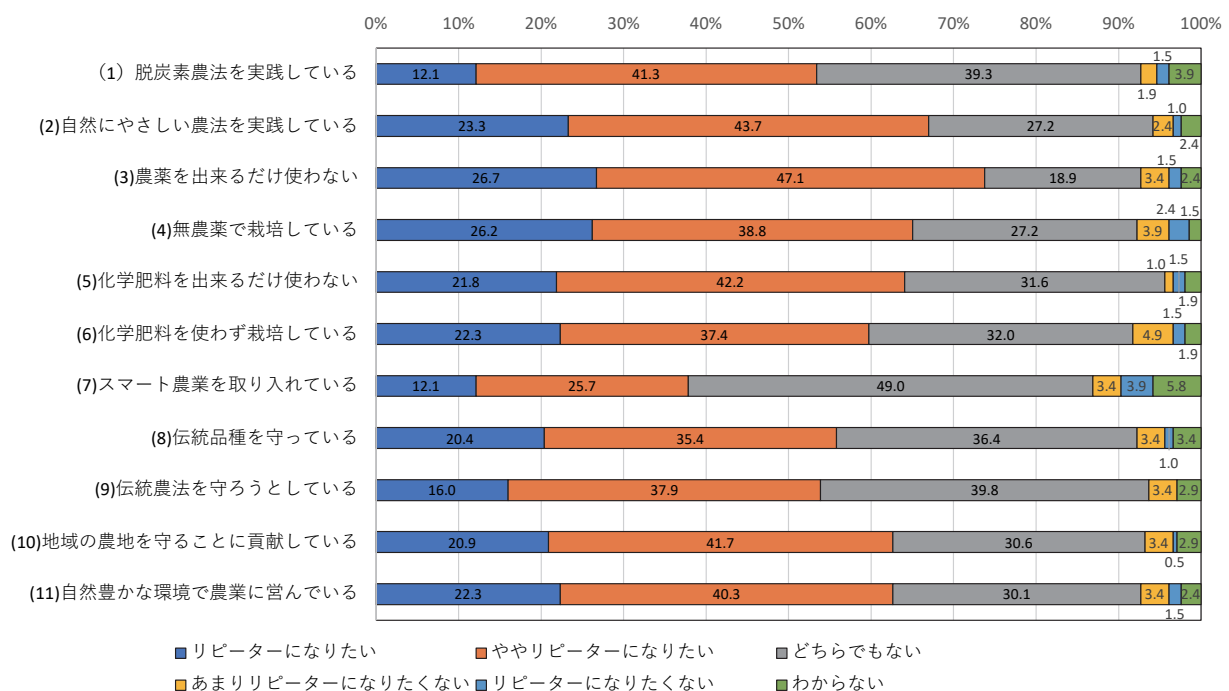


図1 農業者の営農特性に対する消費者評価

一方、伝統農法に関する項目である「伝統品種を守っている」のリピーター意向は53.9%、「伝統農法を守ろうとしている」は52.9%、スマート農業に関する項目「スマート農業を取り入れている」は37.8%であり、これらの営農上の特性は脱炭素農法の実践と同程度か低いリピーター意向を示していた。

#### 4.3 脱炭素農法を評価する消費者の特徴

脱炭素農法を評価する消費者の特性を明らかにするため、性別、年代、農家情報の参考状況、脱炭素農法の認知度と脱炭素農法の実践に対する評価とのクロス分析をおこなった。結果、性別、年代間で差は確認できなかったが、農家情報の参考状況とのクロス分析では（図2）、農家情報を「重視している」との回答者のリピーター意向は、リピーターになりたい、ややリピーターになりたい、合計で79.3%、「やや重視している」で68.2%であり、「どちらでもない」、「あまり重視していない」、「重視していない」の回答者に比べて、高いリピーター意向を示した。

また、脱炭素農法の認知状況とのクロス分析（図3）では、脱炭素農法に対し「具体的な農法を知っている」の回答者のリピーター意向は62.4%、「具体的な内容はわからないが存在は知っている」で68.2%であり、「知らない」を選択した回答者よりも高いリピーター意向がみられた。

### 5 結論

本稿の目的は、第一にバイオ炭推進地域における普及実態、第二に農業者のバイオ炭を含む脱炭素農法の導入が消費者の選好に及ぼす影響、以上2点に関する基礎的な知見を示すことである。まず、バイオ炭の普及実態に関して2つの自治体を調査した結果、A町はバイオ炭の経済性、B町は資源循環という異なる論理で普及に取り組んでいることが示された。そしてA町よりもB町でバイオ炭の製造と利用が進んでいる理由は、資源循環という地域で認識されている課題とバイオ炭が整合的であるとともに、地域コミュニティベースの小規模な活動であるため経済性を評価軸と設定していないことが大きな理由と考えられる。このことは、経済性以外のバイオ炭普及の論理が存在していることを示しており、今後の中山間地域農業の脱炭素化の推進に向けて示唆に富む結果といえる。

次に、脱炭素農法の導入が消費者の選好に及ぼす影響を明らかにするため、脱炭素農法を含む農業者の営農面の特性と消費者のリピーター意向の関係性を分析した。結果、回答者のうち約53%が脱炭素農法に取り組む農業者のリピーターになってもよいと回答しており、脱炭素農法自体が消費者に肯定的に捉えられていることを示す結果となった。ただし、この評価は減農薬・無農薬、減化学肥料・無化学肥料、地域農業の保全の取り組みに対するリピーター意向よりも低いことも留意する必要がある。また、脱炭素農法に対しリピーター意向が高い回答者は、農作物の品質や価格、産地といった農作物自体に由来する特性だけでなく、栽培方法や農業者の考えのような農業者に由来する情報も重視していることが示された。これらの結果から、オンライン直売などこだわりが強い消費者が利用する販売形態では、脱炭素農法の取り組みが利用者に肯定的に評価され、顧客獲得につながる可能性があると考えられた。

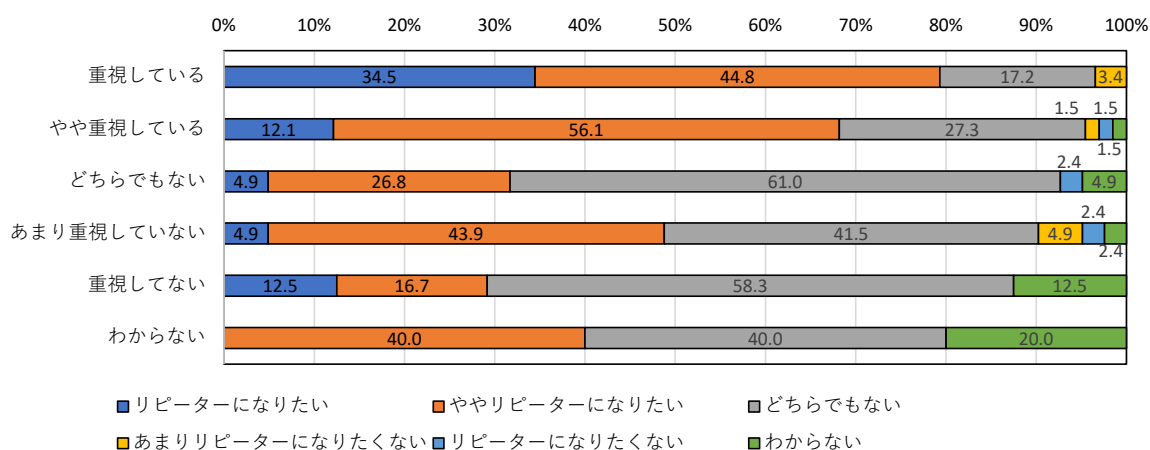


図2 消費者の農家情報の参考状況と脱炭素農法実践に対するリピーター意向のクロス分析

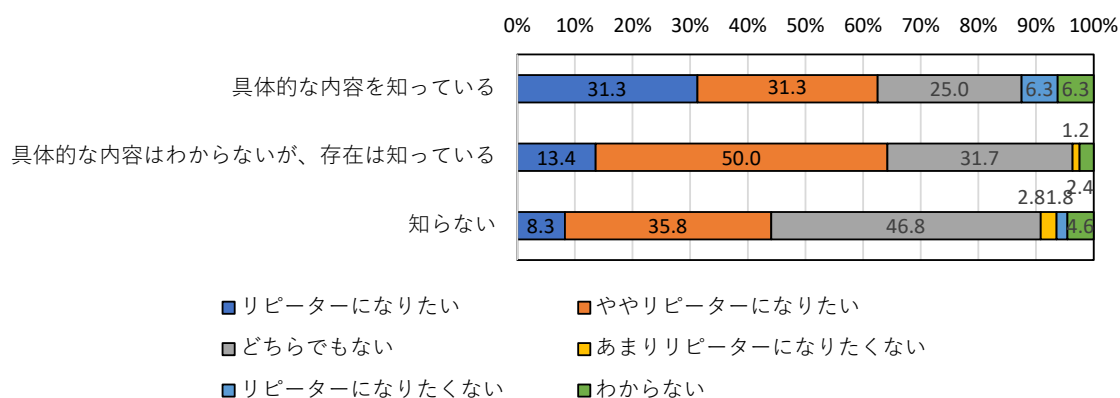


図3 脱炭素農法の認知度と脱炭素農法実践に対するリピーター意向のクロス分析

## 注釈

注1) 消費者は農作物の種類、品質、価格そして産地等で購買を判断することが一般的であり、脱炭素農法に代表される農業者の営農上の特徴を検討材料に含めるのは、一部のこだわりの強い消費者のみと考えられる。本調査では、こだわりの強い消費者の脱炭素農法への評価を得るため、web直売サービスでの農作物購入経験の有無をスクリーニングとして用いた。近年、農作物の購入手段として認知されつつあるweb直売サービスでは、農作物が比較的高価格で取引されており、かつ小売店では購入が難しい珍しい品種や農業者のこだわりを訴求点とした農作物も販売されている。こうしたweb直売サービスの特徴から、農作物へのこだわりの強い回答者を得る上で、適したスクリーニング指標となると考えた。

## 引用

山口 創 (2024)「農業者のバイオ炭の導入背景と農業経営への影響に関する研究」、2024年度サステイナビリティ研究所事業報告、22-26.

# 鳥取市若葉台地区における地域脱炭素事業と 人口・世帯構造の基礎的整理

環境学部環境学科 甲田 紫乃

## 1. 本研究の背景と目的

環境省は、2030年度までに民生部門の電力消費に伴う二酸化炭素排出の実質ゼロを目指す「脱炭素先行地域」を選定している。鳥取市は2023年4月に「脱炭素先行地域」に選定され、若葉台地区と佐治町を対象に事業を進めている（環境省2026、鳥取市2026a）。

なお、住民参加・合意形成、経済的便益等に関する詳細な分析は国際学術誌等への投稿を予定しているため、本稿では扱わず、公開資料と地域統計に基づく基礎的整理にとどめる。

## 2. 使用資料と集計方法

本研究では、環境省および鳥取市の公表資料と、鳥取市の町丁目別人口統計を用いた。なお、佐治町固有の取組は本稿の対象としていない。

人口・世帯構造の比較には、鳥取市「町別世帯数、年齢（5歳階級）別人口」の2021年12月分と2025年12月分を用いた（鳥取市2022、2026b）。対象は若葉台南一～七丁目および若葉台北一～六丁目の13丁目である。2021年の合計は世帯数1,680世帯、人口4,478人、高齢化率22.0%で、計画提案書の記載と一致したため、両年を同一区域で比較した。

## 3. 若葉台地区における地域脱炭素事業の概要

### 3.1. 主なエネルギー需要家

計画提案書に示された主なエネルギー需要家は表1のとおりである。

表1 若葉台地区における主なエネルギー需要家

| 区分     | 計画上の対象数  |
|--------|----------|
| 戸建住宅   | 1,343 戸  |
| 集合住宅   | 337 世帯   |
| 住宅合計   | 1,680 世帯 |
| 民間業務施設 | 28 施設    |
| 公共施設   | 2 施設     |
| 大学施設   | 1 施設     |
| 工場     | 9 施設     |

注：鳥取市（2026a）を基に筆者作成。

表1の住宅1,680は計画上の需要家数であり、表3の住民登録世帯数とは概念が異なる。2021年には数値が一致するが、2025年の登録世帯数は1,694世帯である。

### 3.2. 住宅向け設備導入計画

計画では、既存戸建住宅1,343戸のうち750戸に、合計3,000kWの太陽光発電設備を新たに導入することが掲げられている。太陽光発電設備に加え、蓄電池やエネルギーマネジメントシステム等の導入も計画されている（鳥取市2026a）。これらは計画値であり、導入実績ではない。

## 4. 実施体制

鳥取市、とっとり市民電力、山陰合同銀行および公立鳥取環境大学の共同提案が2023年4月に選定され、同年6月に推進協議会が設立された。2024年12月には鳥取市と民間企業の共同出資により株式会社スマートエネルギーとととりが設立され、2025年1月に事業を開始した。同年4月には、鳥取市と東京電力ホールディングス株式会社が連携協定を締結した（鳥取市2023、2025a、2025b）。主な経過を表2に示す。

表2 実施体制の形成と事業計画に関する主な動き

| 年月       | 出来事             | 本稿における位置づけ     |
|----------|-----------------|----------------|
| 2023年4月  | 脱炭素先行地域に選定      | 共同提案4者の計画が選定   |
| 2023年6月  | 推進協議会を設立        | 事業推進体制を設置      |
| 2024年12月 | スマートエネルギーとととり設立 | 地域エネルギー事業会社を設立 |
| 2025年1月  | 事業開始            | 地域エネルギー事業を開始   |
| 2025年4月  | 東京電力HDと協定       | 外部連携の枠組みが加わる   |
| 2026年3月  | 計画提案書改定         | 設備計画等を更新       |

注：鳥取市（2023、2025a、2025b、2026a）を基に筆者作成。

## 5. 人口・世帯構造の変化

### 5.1. 若葉台地区全体

2021年と2025年の人口・世帯構造を表3に示す。本稿では、65歳以上人口が総人口に占める割合を高齢化率とする。

表3 若葉台地区の人口・世帯構造の変化

| 指標        | 2021 年 12 月 | 2025 年 12 月 | 変化              |
|-----------|-------------|-------------|-----------------|
| 世帯数       | 1,680 世帯    | 1,694 世帯    | 14 世帯増 (0.8%増)  |
| 人口        | 4,478 人     | 4,133 人     | 345 人減 (7.7%減)  |
| 1 世帯当たり人口 | 2.67 人      | 2.44 人      | 0.23 人減         |
| 0～14 歳人口  | 484 人       | 372 人       | 112 人減 (23.1%減) |
| 15～64 歳人口 | 3,010 人     | 2,609 人     | 401 人減 (13.3%減) |
| 65 歳以上人口  | 984 人       | 1,152 人     | 168 人増 (17.1%増) |
| 高齢化率      | 22.0%       | 27.9%       | 5.9 ポイント上昇      |

注1：両年とも、若葉台南一～七丁目および若葉台北一～六丁目を筆者が合計した。

注2：1 世帯当たり人口は小数第3 位を四捨五入して小数第2 位まで、高齢化率と増減率は小数第2 位を四捨五入して小数第1 位まで表示した。

出典：鳥取市（2022、2026b）を基に筆者作成。

2021年から2025年に、人口は7.7%減少した一方、世帯数は0.8%増加した。1 世帯当たり人口は2.67 人から2.44人へ低下し、高齢化率は22.0%から27.9%へ上昇した。

## 5.2. 若葉台南と若葉台北

若葉台南と若葉台北の人口・世帯構造を表4 に示す。

表4 若葉台南・若葉台北の人口・世帯構造の変化

| 区分   | 年    | 世帯数 | 人口    | 1 世帯当たり<br>人口 | 0～14 歳 | 15～64 歳 | 65 歳以上 | 高齢化率  |
|------|------|-----|-------|---------------|--------|---------|--------|-------|
| 若葉台南 | 2021 | 903 | 2,191 | 2.43          | 216    | 1,361   | 614    | 28.0% |
| 若葉台南 | 2025 | 910 | 2,048 | 2.25          | 190    | 1,133   | 725    | 35.4% |
| 若葉台北 | 2021 | 777 | 2,287 | 2.94          | 268    | 1,649   | 370    | 16.2% |
| 若葉台北 | 2025 | 784 | 2,085 | 2.66          | 182    | 1,476   | 427    | 20.5% |

注：世帯数の単位は世帯、人口および年齢区分の単位は人である。鳥取市（2022、2026b）を基に筆者集計。1 世帯当たり人口は小数第3 位を四捨五入して小数第2 位まで、高齢化率は小数第2 位を四捨五入して小数第1 位まで表示した。

2025年の高齢化率は若葉台南35.4%、若葉台北20.5%で、14.9ポイントの差があった。その要因については、別途分析を進めているため、本稿では扱わない。

## 6. まとめと今後の課題

公開資料の整理の結果、脱炭素先行地域への選定後、推進協議会と地域エネルギー事業会社が設立され、東京電力ホールディングス株式会社との連携協定が締結されたことを確認した。住宅向けには、750戸、合計3,000kWの太陽光発電設備導入が計画されている。

人口統計では、人口減少、1世帯当たり人口の低下、高齢化率の上昇および地区内の差が明らかになった。人口・世帯構造の変化の背景や事業の実施状況については、別途収集した資料および調査データに基づき分析を進めており、国際学術誌等への投稿を予定しているため、本稿では扱わなかった。本稿は、公開資料と地域統計から確認できる事項の基礎的整理に限定したものである。

## 謝辞

本研究は、公立鳥取環境大学令和7年度特別研究費、サステイナビリティ研究所推進プロジェクト「鳥取市脱炭素先行地域プロジェクト」による助成を受けて実施した。資料提供および情報収集にご協力いただいた関係各位に謝意を表する。

## 参考文献

- [1] 環境省：脱炭素先行地域、脱炭素地域づくり支援サイト、<https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/preceding-region/>、最終確認2026年7月20日、2026
- [2] 鳥取市：町別世帯数、年齢（5歳階級）別人口（令和3年12月分）、<https://www.city.tottori.lg.jp/page/1082.html>、最終確認2026年7月20日、2022
- [3] 鳥取市：「鳥取市脱炭素先行地域づくり事業推進協議会」を設立しました、<https://www.city.tottori.lg.jp/site/houdou/5263.html>、最終確認2026年7月20日、2023
- [4] 鳥取市：地域エネルギー事業会社「株式会社スマートエネルギーとっとり」設立式について、<https://www.city.tottori.lg.jp/page/5241.html>、最終確認2026年7月20日、2025a
- [5] 鳥取市：鳥取市脱炭素先行地域づくり事業に関する連携協定の締結について、<https://www.city.tottori.lg.jp/site/houdou/5259.html>、最終確認2026年7月20日、2025b
- [6] 鳥取市：RE:Birth（再エネ創出）で進める地域脱炭素と地域のRebirth（進化・再生）、脱炭素先行地域計画提案書、提出2023年2月17日、改定2026年3月2日、<https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/assets/preceding-region/3rd-teiansyo-09.pdf>、最終確認2026年7月20日、2026a
- [7] 鳥取市：町別世帯数、年齢（5歳階級）別人口（令和7年12月分）、<https://www.city.tottori.lg.jp/page/30328.html>、最終確認2026年7月20日、2026b

# 木質バイオマス発電に伴う燃焼灰（バイオ炭）の環境性と 経済性評価に関する研究／大学における温室効果ガス排出量（スコープ3） 算出とその低減に向けた研究

環境学部環境学科 松井 徹

## 1. 木質バイオマス発電に伴う燃焼灰（バイオ炭）の環境性と経済性評価に関する研究

### 1.1. はじめに

2021年6月に策定された「地域脱炭素ロードマップ」では、地方自治体や地元企業・金融機関などが中心となり、環境省を中心に国も積極的に支援しながら、少なくとも100か所の「脱炭素先行地域」で、2025年度までに、脱炭素に向かう地域特性等に応じた先行的な取組実施の道筋をつけ、2030年度までに実行し、これにより、農山漁村、離島、都市部の街区など多様な地域において、地域課題を同時解決し、住民の暮らしの質の向上を実現しながら脱炭素に向かう取組の方向性を示すこととしている。

「脱炭素先行地域」とは、2050年カーボンニュートラルに向けて、民生部門（家庭部門及び業務その他部門）の電力消費に伴うCO<sub>2</sub>排出の実質ゼロを実現し、運輸部門や熱利用等も含めてそのほかの温室効果ガス排出削減についても、我が国全体の2030年度目標と整合する削減を地域特性に応じて実現する地域で、「実行の脱炭素ドミノ」のモデルとなるものである。2026年2月13日時点で、全国45都道府県113市町村の102提案が「脱炭素先行地域」に選定された。[1]

鳥取市は、株式会社とっとり市民電力、株式会社山陰合同銀行、本学との共同提案として、2023年4月に「脱炭素先行地域」に採択された。鳥取市の脱炭素先行地域では、若葉台地区と佐治町全域を対象エリアとして、地域の再エネ由来電力を最大限活用して脱炭素化を実現すべく取り組みが進められている。その中で、佐治町エリアでは、その取り組みの一つとして、木材チップを用いた小型ガス化炉による熱電併給が検討されている。これは、小型ガス化炉にて木材チップを高温で部分酸化し、可燃性ガス（一酸化炭素、水素、メタン等）を生成し、それを小型ガスエンジンの燃料として発電を行うとともに、排熱を木材チップの乾燥等に用いるものである。小型ガス化炉から排出される燃焼灰（バイオ炭）には炭素成分が含まれているため、本学においては、これを地域内の農業において土壌改良資材として活用する可能性について研究を進めている。

### 1.2. 研究の目的と背景

バイオ炭（Biochar）とは、完全燃焼させないように制御された条件下で、生物資源（バイオマス）を加熱して作られる固形物のことを言う。多孔質体で保水性や通気性を高めることで、土壌改良の効果があると言われている。炭化することで、炭素が分解されにくい形となるため、土壌中に施用しても大気中に放出されず、炭素貯留に繋がると考えられている。近年ではこの炭素貯留効果が注目され、J-クレジットの制度では、「バイオ炭の農地投入（AG-004）」という方法論が定められ、バイオ炭を農地に散布・埋設することで、大気中の二酸化炭素を削減したとみなす仕組みが作られている。バイオ炭の農地施用は、農業生産者が取り組むことができる地球温暖化対策であり、クレジット化して販売

収益を得るだけでなく、農地の土壌改良効果などのメリットが期待されている。

バイオマスのガス化においては、原料を完全燃焼せず、熱分解させることで可燃性ガスを生成する。この際には、炭素分を多く含む残渣（燃焼灰）が発生するため、この残渣はバイオ炭として利用できる可能性がある。そこで、小型ガス化炉から排出される燃焼灰（バイオ炭）による環境性や経済性のメリットを試算することを本研究の目的とした。

### 1.3. 研究方法と進捗

小型ガス化炉から排出される燃焼灰（バイオ炭）による環境性や経済性を算出するにあたり、2025年度は予備調査を実施した。予備調査では、小型ガス化炉を用いた発電事業者へのヒアリング、webや文献調査を実施した。

ヒアリングを行った発電事業者では、杉を中心とした木材チップを原料として、固定床ガス化炉によるガス化を行っている。約50kWのガスエンジンを10台以上並列に設置し、ガス化ガスを燃料とした発電を行い、排熱は木材チップの乾燥に用いている。木材チップの含水率が運転に影響を及ぼすため、規定値になるよう含水率が管理されている。ガス化装置では、クリンカやタールの発生が問題となることがあるが、本発電所においてはそのようなトラブルは発生していないとのことであった。燃焼灰は燃料投入量の約2%程度であり、貯留場所においては灰の飛散防止のための措置が施されていた。現在、燃焼灰は外部で石炭代替の燃料として利用されている。燃焼灰の性状については、現在分析中である。ここで得られたマスバランス、エネルギーバランス等を今後の環境性試算に活用する。

バイオ炭の炭素貯留量は、「プロジェクト実施後のCO<sub>2</sub>貯留量－プロジェクト実施によるCO<sub>2</sub>排出量」から算定される。バイオ炭を農地に施用してクレジット化するためには、まずJ-クレジット制度にプロジェクトとして登録する必要がある。申請者は、方法論AG-004「バイオ炭の農地施用」に基づき、プロジェクト計画書を作成する。計画書には、使用するバイオ炭の原料、炭化温度、炭素含有率、施用場所、施用量、モニタリング方法等を記載する。プロジェクト登録後、モニタリングとして、申請者は計画書に沿ってバイオ炭を農地に施用し、その内容を記録する。記録すべき項目は、施用日、施用場所、施用量、バイオ炭のロット情報、炭素含有率、炭素残存率等である。モニタリングが完了すると、申請者は第三者検証機関に検証を依頼する。検証機関は、施用記録、分析結果、算定方法が方法論に適合しているかを確認し、削減量の妥当性を評価する。検証報告書をもとに、J-クレジット制度の事務局が削減量を審査し、問題がなければクレジットが認証される。認証されたクレジットは、企業や自治体などに販売することができる。クレジットは、一般的にはCO<sub>2</sub>1トンあたり2,000～5,000円程度のケースが多いが、現在バイオ炭の取引価格はこれをかなり上回るものとなっている。今後経済性試算を行うにあたり、取引価格の動向調査を引き続き進めていく。

### 1.4. 今後の展開

予備検討や調査から得られた情報を基に、今後、環境性や経済性の試算を行っていく。バイオ炭の環境性に関しては、LCA手法を用いた解析が進められている。農研機構では、文献調査により、18文献から計62セットのGHG排出量データを抽出し、これらを炭化設備、バイオマス原料、排熱利用

の有無の組合せ別に整理して、計24のGHG排出原単位を算出している[2]。これら既往研究を参考に、地元産木材チップを原料とした小型ガス化炉のバイオ炭のライフサイクルGHGの算出に取り組んでいく。経済性に関しては、J-クレジットの取引価格の動向を参考にそのメリットを算出していく。

## 2. 大学における温室効果ガス排出量（スコープ3）算出とその低減に向けた研究

### 2. 1. はじめに

前章で示したように、鳥取市の「脱炭素先行地域」での取り組みは、若葉台地区と佐治町全域を対象エリアとしている。若葉台地区では、既存戸建住宅・民間施設を対象としたPPAモデル（Power Purchase Agreement、発電事業者が設置した太陽光発電等の設備から、利用者が発電事業者と直接電力購入契約を結び、電気を購入する仕組み）、群制御技術を活用したVPP（Virtual Power Plant、複数の分散電源や蓄電池等を統合的に制御し、1つの大規模発電所のように機能させる仕組み）によるエネルギーマネジメント等を進めるとともに、当該地域に位置する本学においては、太陽光発電設備導入や省エネ設備改修を通じて、施設のネット・ゼロ・エネルギー・ビル（ZEB）化を推進していく。

本学は2023年からRace to Zeroの取り組みにも参画している。Race to Zeroは、世界中の企業、自治体、大学などの非政府アクターに対し、2030年までに温室効果ガス排出量を半減し、遅くとも2050年までに実質ゼロを達成するための行動を早急に開始することを促す国際キャンペーンであ

表1 2025年度 公立鳥取環境大学 脱炭素実行計画

| Scope | 分類、内容               | 備考                      | 2023<br>実績 | 主なもの                                                                       | 2030目標<br>[2023との差] | 2025                                                                                                                            | 2026～2027                          | ～2030 |
|-------|---------------------|-------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------|
| 1     | 燃料の燃焼               | 冷暖房:LPG,灯油<br>車:ガソリン、軽油 | 283 t      | LPG 278 t                                                                  |                     | 太陽光発電 21.2kW<br>照明のLED化工事                                                                                                       | 70.2kW<br>LED化                     |       |
| 2     | 他者が供給する<br>電気の使用    |                         | 798 t      |                                                                            |                     | 熱源・空調改修<br>ZEB改修 認証・工事（学生センター）<br>再エネ電力調達                                                                                       | 設計・工事 ～2028<br>～2028<br>再エネ電力調達の継続 |       |
|       |                     | 合計                      | 1,081 t    |                                                                            | 620 t<br>[▲461 t]   |                                                                                                                                 |                                    |       |
| 3     | カテゴリ1<br>購入製品・サービス  | 事務用品、印刷物、複<br>写機賃借料など   | 621 t      | 対事業所サービス 202 t<br>用品、消耗品等 173 t<br>修理、修繕 69 t<br>書籍、印刷物 68 t<br>コピー用紙 24 t |                     | 大学事務のDX化・ペーパーレス化<br>（出張旅費システム、全学システム導入、運用）<br>削減策を検討し、可能なものから実施<br>（例 グリーン購入など）                                                 |                                    |       |
|       | カテゴリ2<br>資本財        | 試験研究機器等の固<br>定資産        | 682 t      | 建物附属設備 336 t<br>工具、器具等 149 t<br>建物 124 t                                   |                     | 削減策を検討し、可能なものから実施<br>（例 環境配慮工事発注など）                                                                                             |                                    |       |
|       | カテゴリ3<br>燃料、エネルギー活動 | 調達燃料、電力の上<br>流工程（採掘等）   | 175 t      | 電力 124 t<br>LPG 50 t                                                       |                     | ※Scope 1, 2の削減に連動して減少                                                                                                           |                                    |       |
|       | カテゴリ5<br>事業から出る廃棄物  | 廃油、廃プラ、紙ゴミな<br>ど        | 8 t        | 廃油 3 t、廃プラ 3 t、<br>紙ゴミ 2 t                                                 |                     | ウォーターサーバ（廃プラ削減）、大学事務のDX化・ペーパーレス化                                                                                                |                                    |       |
|       | カテゴリ6<br>出張         | 教職員、学生の出張               | 62 t       | 教職員 42 t<br>学生 21 t                                                        |                     | 削減策を検討し、可能なものから実施<br>（例 出張の交通手段指定など）                                                                                            |                                    |       |
|       | カテゴリ7<br>雇用者の通勤     | 教職員の通勤<br>学生の通学         | 274 t      | 学生 232 t<br>教職員 42 t                                                       |                     | 削減策を検討し、可能なものから実施<br>（例 ノーマイカーデー、EV利用など）                                                                                        |                                    |       |
|       |                     | 合計                      | 1,822 t    |                                                                            | 1,405 t<br>[▲417 t] |                                                                                                                                 |                                    |       |
| その他   |                     |                         |            |                                                                            |                     | 脱炭素研究<br>（特別研究費助成「鳥取市脱炭素先行地域」～2028）<br>啓発イベントの実施（TUES Sustainability Week等）<br>脱炭素教育の充実検討、新たな脱炭素教育の実施<br>エネルギー使用量、CO2排出量の見える化検討 |                                    |       |

※実線は取組内容が決まって実施中、点線は具体的な取組内容、実施が未定

\*学生の通学による排出の影響が大きいことから、本学ではこれをScope3のカテゴリ7に含めて算出している。

り、UNFCCC（国連気候変動枠組条約事務局）が2020年6月に開始したものである。参加団体は約17,000、そのうち大学は約1,200校、うち日本の大学は3校（千葉商科大学、東京大学、本学）である。Race to Zeroでは、CO<sub>2</sub>削減目標を2030年：2022年度を基準としScope1と2は-44%・Scope3は-20%、2050年：Scope1～3：ネットゼロとしており、本学ではそれを達成すべく脱炭素実行計画を策定している（表1）。

## 2.2. 研究の目的と背景

Race to Zeroの削減目標はScope1～3を対象としており、本学の脱炭素実行計画はその要件に沿って策定されている。Scope1（直接排出）は、事業者自身が燃料の燃焼や自社設備の運転などにより直接排出する温室効果ガスを指す。Scope2（間接排出）は、事業者が購入した電力・熱・蒸気の利用に伴う排出であり、発電事業者など供給側で発生したCO<sub>2</sub>を利用者の排出として計上する。Scope3（その他の間接排出）は、事業者の活動に関連するScope1・2以外のすべての間接排出を含み、サプライチェーン全体の排出を対象とする。本学の場合、購入した製品の製造や運搬等に伴い発生するCO<sub>2</sub>がScope3に該当する。

Scope1・2については、燃料使用量や電力使用量に基づき直接排出量を算定できる。一方、Scope3は対象範囲が広く、算定作業に多くの手間を要するうえ、製造事業者等から製品のCO<sub>2</sub>排出に関する情報が開示されていない場合が多いため、正確な排出量を把握し難く、削減策の立案が困難となっている。そこで、本研究では、Scope3の算定作業を効率化するとともに、本学において有効な削減策を検討することを目的としている。

## 2.3. 研究方法と結果

本研究を行うにあたり、2025年度は本学の排出量算定作業の調査と他大学へのヒアリングを実施した。

本学においてScope1は、冷暖房用のLPG使用量および業務用車両で使用されたガソリン・軽油の使用量に基づき算定している。Scope2については、電力使用量と電力会社が公表する排出原単位を用いて算定している。Scope3については、購入した品目を規定されているカテゴリに分類し、環境省の「排出原単位データベース」に掲載された排出原単位を用いて算定している。なお、品目の分類は手作業で行っており、金額ベースの排出原単位を用いて算定しているため、直接的な排出量を計測したものではない。

Scope1～3の算定方法について他大学へヒアリングを行った結果、本学とほぼ同様の手法が採用されていることが確認された。購入品目数が多いためカテゴリ分類に多くの労力を要している点、また排出量が少ないと推定される品目であっても価格が高い場合には金額ベースの排出原単位により排出量が大きく算定され、実態との乖離が生じる点が課題として挙げられていた。

## 2.4. 今後の展開

Scope3について、カテゴリの分類作業に手間を要していることが確認されたことから、今後、AI

等を活用した作業の効率化を検討していく。排出量削減については、実排出量の反映と削減策について、引き続き検討を進めていく予定である。

## 参考文献

[1] 環境省：脱炭素先行地域づくり支援サイト

<https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/preceding-region/#about>

[2] 農研機構：文献調査により推計されるバイオ炭製造のライフサイクルGHG排出原単位

[https://www.naro.go.jp/project/results/5th\\_laboratory/niaes/2024/niaes24\\_s02.html](https://www.naro.go.jp/project/results/5th_laboratory/niaes/2024/niaes24_s02.html)

[3] 鳥取市経済観光部スマートエネルギータウン室：鳥取市脱炭素先行地域選定モデルについて、鳥取市脱炭素先行地域キックオフセミナー、2023年

2025年度サステナビリティ研究所研究成果報告書  
2026年9月

発行 公立鳥取環境大学サステナビリティ研究所  
〒689-1111 鳥取市若葉台北一丁目1番1号  
TEL (0857) 32-9100 (代)  
FAX (0857) 32-9108  
印刷 中央印刷株式会社



