

電力自由化がグリーントランスフォーメーションに与える影響の評価 —デジタル技術を活用した電力の安定供給と脱炭素の両立—

小倉博行 (おぐら ひろゆき)

日本大学商学部

馬奈木俊介 (まなぎ しゅんすけ)

九州大学大学院都市システム工学講座

1. はじめに

この度、『経営情報学会誌』Vol. 32, No. 2に掲載された、小倉博行・馬奈木俊介「電力自由化がグリーントランスフォーメーションに与える影響の評価—デジタル技術を活用した電力の安定供給と脱炭素の両立—」に対して、2024年度論文賞をいただいた。AIを含む情報技術を活用した経済・社会・環境が持続可能な経営システムの研究者 [1-3] として、本学会の関係者の皆様に高く評価していただいたことに感謝の意を表します。本稿は、受賞報告として、本論文の背景、本論文の概要及び今後の研究の方向性について述べさせていただくものである。

2. 本論文の背景

2015年に成立した第3弾の改正電気事業法においては、検証規定が設けられている。具体的には、①2016年4月の小売全面自由化前、②2020年4月の送配電部門の法的分離前、③法的分離後、それぞれのタイミングにおいて、法施行の状況やエネルギー基本計画の実施状況、需給状況、料金水準等について検証を行い、その検証結果を踏まえ、必要な措置を講ずる旨を規定している [4]。

電力自由化政策が目指す市場メカニズムに基づく電力取引市場（卸電力市場）の整備 [5] は、データやデジタル技術を活用して、ダイナミック・プライシング (DP) やディマンド・レスポンス (DR) 等の節電行動を促し、電力ひっ迫時の電力の安定供給と脱炭素の両立（グリーントランスフォーメーション：GX）が可能となる。本稿では、2016年4月の電力小売全面自由化後2024年9月までの東京電力エリアの電力需給、気象及び卸電力市場のデー

タセットを用いて、卸電力市場が最大電力需要に与える影響評価モデルの構築及び分析を行う。そして、失策とされている電力自由化政策がGXに与える影響（経済及び環境へのインパクト）の再評価を行って、電力自由化政策 [6] が電力の安定供給と脱炭素の両立 = GX 推進 [7] に有効であることを示す。

2022年3月22日の電力需給ひっ迫に際しては、初の「需給ひっ迫警報」が発令されるなど、大規模な停電を回避するために、国及び一般送配電事業者から需要家に対する強力な働きかけが行われた。また、任意の協力を求める節電要請のみならず、需要家のインセンティブに働きかけて電力需要を制御するビジネスモデルである「ディマンド・レスポンス (DR)」¹⁾、ダイナミック・プライシング (DP) 及び業界の自主的なガイドラインなど節電行動を促す電力自由化のソフト・ロー (表1の2. 需要対策□) が、電力需給の緩和に大きな役割を果たした。結果として、東京電力エリアにおいては一日の総電力需要の6%にあたる44百万kWhに及ぶ節電がなされるなど、国民全般の多大な協力が得られ、停電を回避することができた。こうした経緯を受けて、電力需給対策を検討する上で、供給側のみならず需要側にも働きかける必要性があるということが強く認識されることとなり、需給ひっ迫警報の運用やDRの在り方、また2022年は発動に至らなかったものの、電気使用制限令、計画停電といった強制力を伴った手法の事前準備といった、電力需給ひっ迫に際して需要側に働きかける「法的な規制 (ハード・ロー)」²⁾ (表1の2. 需要対策■) の仕組みも必要であると言われている。

表2に示す通り、全国の卸電力取引価格（スポット価格）は、2016年度の全面自由化以降、年間平

均で10円/kWh弱であったが、2020年度冬期の需給ひっ迫や2021年度後半からのその後のウクライナ情勢も含む燃料価格の高騰等で価格高騰や変動が発生した。2023年1月以降は、燃料輸入価格の低下に伴い、市場価格は低下傾向である。また、太陽光などの再エネ出力抑制の影響で、2020年度頃から徐々に0.01円/kWhのコマが増加している。

表1 電力需給に関する検討会合で決定された今後の総合的な需給対策（2022年6月閣議決定）

1. 供給対策 ●電源募集（kW公募）の実施による休止電源の稼働 ●追加的な燃料調達募集（kW公募）の実施による予備的な燃料の確保 ●発電所の計画外停止の未然防止等の要請 ●再エネ、原子力等の非化石電源の最大限の活用 ●発電事業者への供給命令による安定供給の確保
2. 需要対策 <input type="checkbox"/> 節電・省エネキャンペーンの推進 <input type="checkbox"/> 産業界、自治体等と連携した節電対策体制の構築 <input type="checkbox"/> 対価支払型のダイヤモンド・リスポンス（DR）の普及拡大 <input type="checkbox"/> 需給ひっ迫警報等の国からの節電要請の高度化 <input checked="" type="checkbox"/> 使用制限令の検討、セーフティネットとしての計画停電の準備

表2 全国の卸電力取引価格（スポット価格）の推移

	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
平均価格（円/kWh）	8.5	9.7	9.8	7.9	11.2	13.5	20.41	10.74	12.10
最高価格（円/kWh）	40.0	50.0	75.0	60.0	251.0	80.0	100.0	52.90	45.01
200円/kWh超えの時間帯	0	0	0	0	0.3%	0	0	0	0
100～200円/kWhの時間帯	0	0	0	0	1.6%	0	0.046%	0	0
0.01円/kWhの時間帯	0	0	0	0.1%	1.5%	1.6%	3.3%	4.7%	3.3%
日平均標準偏差（円/kWh）	2.93	2.30	2.04	2.28	4.81	4.53	7.04	3.37	3.45

（出所）JEPX 取引市場データより

※1）時間帯は30分毎のコマ数

※2）2024年度は2024年9月30日時点までの価格

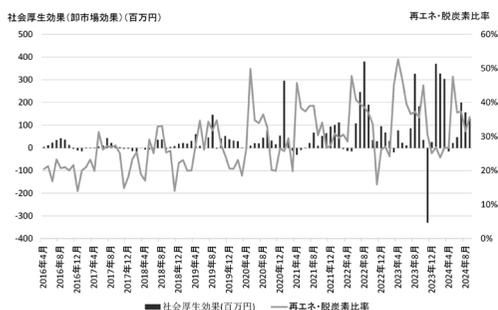


図1 東京電力エリアのDP節電行動による社会厚生効果と再エネ・脱炭素比率の推移

一方、図1に示す通り、

- 東京電力エリアのDP節電行動による社会厚生効果（卸市場効果）は、19年度以降一桁増加（16-18年度：年間1億円→19-21年度：年間5億円→22年度：年間11億円→23年度：年間14億円→24年度：上期5億円）している。
- 再エネ・脱炭素とは、月次日最大電力需要時の火力以外の水力、バイオマス、太陽光、風力、揚水及び連系線（原子力を含む）の再エネ・脱炭素関連の供給電力である。
- 月次日最大電力需要の再エネ・脱炭素比率は、16年度20%、17-18年度24%、19年度27%、20年度30%、21-22年度34%、23年度36%、24年度上期36%と徐々に増加している。

3. 本論文の概要（2024年9月までのデータを追加）

そこで筆者らは2016年4月以降の東京電力エリアの再エネ・脱炭素、気象及び卸電力市場のデータセットを用いて、卸電力市場が最大電力需要に与える影響評価モデルの構築を行った。本論文で構築した最大電力需要の機械学習モデルは、ブラックボックス的な機械学習に頼らず、要因が明確な回帰因子を説明変数に追加した、説明可能な時系列分析予測モデル[8-10]である。具体的には、時系列予測モデルに、日付（トレンド、年及び週の周期）の他に16項目（水力、太陽光、バイオマス、風力、揚水、連系線、気温、降水量、日照時間、風速、湿度、約定総量、約定価格、卸市場効果、価格弾力性及び休日）を入力データ（説明変数）に追加して、2016年4月1日-2024年3月31日の日最大電力需要（百万kWh）を時系列分析を行った。また16項目の説明変数については重回帰分析モデルを用いて要因分析を行った。そして、電力自由化政策がGXに与える影響（経済及び環境へのインパクト=経済価値及び環境価値）の評価を行った。

3.1 月次日最大電力需要の時系列予測結果

2016-22年度の東京電力エリアの再エネ・脱炭素、気象及び卸電力市場のデータセットを用いて、23年度東京電力エリアの月次日最大電力需要の時系列予測した結果を図2に示す。

百万kWh 月次日最大電力需要への影響分析 R2 score:0.7633

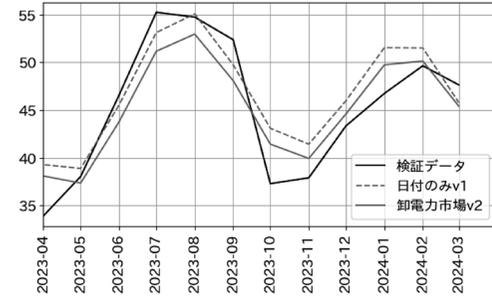


図2 23年度東京電力エリアの月次日最大電力需要の時系列予測結果 (v1, v2)

23年度の月次日最大電力需要は、時系列予測モデルに「卸電力市場（卸市場効果、約定価格、約定総量及び価格弾力性）データ」（v2）を追加することによって、決定係数 $R^2=0.703$ (v1) から $R^2=0.763$ (v2) へと予測精度が6%向上した。

重回帰モデルの検定結果とあわせて考えると、23年度の月次日最大電力需要は、日付（トレンド、年周期）の影響に加えて、再エネ・脱炭素ならびに卸電力市場（卸市場効果、約定価格、約定総量及び価格弾力性）の順で影響があることが統計的に確認できる。

3.2 節電行動 (DP) による社会厚生増大効果及び CO_2 削減効果

16年度上期~24年度上期の東京電力エリアにおける節電行動による社会厚生増大効果及び CO_2 削減効果の試算を表3に示す。

表3から、電力自由化に伴う卸電力市場の活用度合い（JEPX スポット比率=約定総量/販売電力量総量）の推移（16~18年度：11%→19~21年度：38%→22年度：40%→23年度：33%）と連動して、23年度には14億円を超える節電効果を達成するとともに、 Δ 約定総量 Q (kWh) とこれと比例する CO_2 削減効果も19年度以降約5~6倍に増加（16~18年度：年間3.6万トン→19~21年度：年間18.2万トン→22年度：年間22.4万トン→23年度：年間18.9万トン）している。同様に、 Δ 約定価格 P (円/kWh) 及び価格弾力性 (ϵ) = $\Delta \ln Q / \Delta \ln P$ と連動した社会厚生増大効果 = DP 節電効果 = 卸市場効果 = $\frac{1}{2} \cdot \Delta Q \cdot \Delta P$ (円) も、19年度以降一桁増加（16~18年度：年間1億円→19~21年度：年間5億

表3 節電行動による社会厚生増大効果と CO_2 削減効果の試算（16年度上期~24年度上期：東京電力エリア）

年度		合計 Δ 約定総量 Q MWh		日平均 価格弾力性 ($\epsilon = \Delta \ln Q / \Delta \ln P$)		合計 DP節電効果 $\frac{1}{2} \cdot \Delta Q \cdot \Delta P$ 百万円		合計 DP節電による CO_2 削減効果 万t- CO_2	
		上期	下期	上期	下期	上期	下期	上期	下期
2016年度	上期	6.8	7.2	20.29	1.78	151	130	2.9	3.1
	下期	0.4	—	0.83	—	▲21	—	0.2	—
2017年度	上期	7.5	6.5	5.40	0.40	92	54	3.3	2.8
	下期	▲1.0	—	▲0.58	—	▲38	—	▲0.4	—
2018年度	上期	3.1	11.0	8.29	0.68	48	145	1.4	4.8
	下期	7.9	—	▲0.33	—	97	—	3.4	—
2019年度	上期	22.7	40.0	2.58	0.52	270	461	9.8	17.3
	下期	17.3	—	3.65	—	192	—	7.5	—
2020年度	上期	21.1	38.3	0.54	0.25	166	578	9.2	16.6
	下期	17.1	—	2.51	—	412	—	7.4	—
2021年度	上期	30.9	47.8	0.30	▲1.06	55	474	13.4	20.7
	下期	16.9	—	▲12.85	—	419	—	7.3	—
2022年度	上期	35.1	51.8	▲4.07	▲0.73	895	1,129	15.2	22.4
	下期	16.7	—	▲4.61	—	235	—	7.2	—
2023年度	上期	▲54.7	43.6	0.37	▲0.69	703	1,436	▲23.7	18.9
	下期	98.3	—	▲8.85	—	732	—	42.6	—
2024年度	上期	▲31.8	—	3.51	—	537	—	▲13.8	—

※卸市場効果 = $\frac{1}{2} \cdot \Delta Q \cdot \Delta P$
 $\Delta Q = Q_p - Q_a$ $\Delta P = P_p - P_a$
 P_p : 日最大電力時約定総量価格
 P_a : 日平均約定総量価格
 Q_p : 日最大電力時約定総量
 Q_a : 日平均約定総量
 ※価格弾力性 (ϵ) = $\Delta \ln Q / \Delta \ln P$
 $\Delta \ln Q = (\ln(Q_p) - \ln(Q_a))$
 $\Delta \ln P = (\ln(P_p) - \ln(P_a))$

円→22年度：年間11億円→23年度：年間14億円）している。

また上期下期を分けて見てみると、 Δ 約定総量 Q (kWh) とこれと比例する CO_2 削減効果は、23年度上期：▲23.7万トン→23年度下期：42.6万トン→24年度上期：▲13.8万トンと大きく乱高下している。一方で、価格弾力性 (ϵ) = $\Delta \ln Q / \Delta \ln P$ は、21年度以降年間でマイナスに転じており、23年度上期：0.37→23年度下期：▲8.85（23年度合計：▲0.69）となっている。そしてこれと連動した社会厚生増大効果 = DP 節電効果 = 卸市場効果 = $\frac{1}{2} \cdot \Delta Q \cdot \Delta P$ (円) は、23年度上期：703百万円→23年度下期：732百万円（23年度：合計1,436百万円）と増大している。

3.3 節電行動による需給調整の経済価値及び環境価値の試算

電力自由化政策の節電行動に基づく、21~23年度における東京電力エリアの節電行動の経済価値及び環境価値は表4のように試算することができる。

表4 節電行動による需給調整の経済価値と環境価値の試算（21-23年度：東京電力エリア）

経済価値	内容	21年度	22年度	23年度
電力の安定供給	DP/DR 節電行動による長期社会厚生効果	42.3 百万円/年間 (2.82 MW ピークカット)	同左	同左
卸電力市場	DP 節電行動による社会厚生効果	474 百万円/年間 (年間 47.8 MWh 節電)	1,129 百万円/年間 (年間 51.8 MWh 節電)	1,436 百万円/年間 (年間 43.6 MWh 節電)
環境価値	内容	21年度	22年度	23年度
CO ₂ 排出削減	DP 節電行動による CO ₂ 削減効果	20.7 万 t-CO ₂ /年間 (年間 47.8 MWh 節電)	22.4 万 t-CO ₂ /年間 (年間 51.8 MWh 節電)	18.9 万 t-CO ₂ /年間 (年間 43.6 MWh 節電)

表4より、21-23年度の東京電力エリアにおける電力自由化政策の節電行動による需給調整は、電力の安定供給、経済価値（卸電力市場の社会厚生効果）：約30億円/3年間、及び環境価値（CO₂削減効果）：約62万t-CO₂/3年間をもたらしたことが分かる。

3.4 筆者らが考える貢献

本論文において、市場メカニズムに基づく電力取引市場の整備は、再エネ・脱炭素技術ならびに、データ及びAIを含む情報技術を活用したGXイノベーションを促し、電力の安定供給と脱炭素の両立=GX推進に有効であることを統計的に確認した。つまり、任意の協力を求める節電要請のみならず、需要家のインセンティブに働きかけて電力需要を制御するビジネスモデルであるディマンド・レスポンス（DR）、ダイナミック・プライシング（DP）及び業界の自主的なガイドラインなど節電行動を促す電力自由化のソフト・ローが有効であることを統計的に確認した。

4. 今後の研究の方向性

本年8月に施行された欧州連合（EU）AI法のように、AIについては、個人情報やプライバシーの保護で採用されているハード・ロー（法的拘束力による規制）のアプローチが必要という方向に向かっている。しかしながら、現時点で揺籃期にあるAIビジネス市場を適正な巨大市場に発展させていくためには、AIに対する規制（ハード・ロー）とソフト・

ロー（法的拘束力のないガイドライン）アプローチであるAIの利活用を有効にするガバナンス・イノベーション（経済産業省「AI原則実践のためのガバナンス・ガイドライン Ver. 1.1」（2021）参照）の促進が必要である。また「AI制度のアプローチとして、ハード・ローかソフト・ローか、個別法かAI法か、という論点があるが、個別法ベース+ソフト・ローという話が納得感がある」[11]。つまり、AIの国際規格、業界の自主的なガイドラインなどと政府などによる規制との組み合わせを企業が取り組む必要がある[12]。AI適用事業を円滑に推進していくためには、AIガバナンス・マネジメントの仕組み構築が必須である。その技術的拠り所となる国際標準化については、組織ガバナンスの国際規格ISO 37000、AIガバナンスの国際規格ISO/IEC 38507 [13]、AIマネジメントの国際規格ISO/IEC 42001などが発行されている[11]。今後、AIを含む情報技術を活用した経済・社会・環境が持続可能な経営システムの研究者として、これらの国際標準規格を活用してAIのリスクと機会（事業上のリスク・チャンス含む）に対処するAIガバナンス・マネジメントの実務標準の研究を行ってゆく所存である。

5. おわりに

本論文の原型となる論文は、2021年12月と2022年7月に2度投稿し、いずれも不採択であったが、匿名査読者から本論文をよくするための多くの貴重な査読コメントをいただきました。今回3度目のチャレンジで2023年9月に投稿した本論文も採録に至るまでには、3名の匿名査読者から、多くの有益なコメントやご示唆をいただきました。特に「電力最大需要を予測的に把握すること、ならびにブラックボックス的な機械学習に頼らず要因が明確なモデルを構築しようという考え方に賛同いたします。」「経済価値と環境価値の分析につなげる評価フレームワークはオリジナリティがあり、この論文の内容とも一致している。」などのコメントにはとても励まされました。査読者の方々にこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 小倉博行・馬奈木俊介・石野正彦「人とITと企業との共創による持続可能なスマートシティ実装評価方法」『経営情報学会誌』第25巻, 第4号, 2017年, 39-67ページ.
- [2] 小倉博行・馬奈木俊介「持続可能なスマートシティ実装」『人工知能の経済学』ミネルヴァ書房, 2018年.
- [3] 小倉博行・馬奈木俊介「AIを活用した都市と企業のガバナンス」『人工知能の経済学II』ミネルヴァ書房, 2021年.
- [4] 経済産業省「資料3: 電力システムが目指すべき方向性について～電力システム改革の検証～」第79回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会, 2024年.
- [5] 日本卸電力取引所「日本卸電力取引所 (JEPX) 取引ガイド」, 2019年.
- [6] 経済産業省「資料3: 電力・ガス小売全面自由化の進捗状況について」第71回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会, 2024年.
- [7] 内閣官房「資料1: GX実現に向けた基本方針(案)～今後10年を見据えたロードマップ～」第5回GX実行会議, 2022年12月22日.
- [8] Imbens, G. W., Rubin, D. B., "Causal Inference for Statistics, Social, and Biomedical Sciences: An Introduction," Cambridge University Press, 2015.
- [9] Nielsen, A., "Practical Time Series Analysis: Prediction with Statistics and Machine Learning," O'Reilly Media, 2019.
- [10] Taylor, S. J., Letham, B., "Forecasting at Scale," September 27, 2017.
- [11] 内閣府AI制度研究会 (第3回)「資料3: AIの国際標準の現状」「議事要旨」2024. 9. 10.
- [12] 原田要之助・小倉博行「AIの社会実装に向けたガバナンスの課題と取り組み: 3. AIガバナンスに関する国際標準動向」『情報処理』第63巻, 第9号, 2022, e12-e18, 496.
- [13] 小倉博行ほか「JIS Q 38507: 情報技術—ITガバナンス—AI (人工知能) の利活用が組織のガバナンスに与える影響/解説」日本規格協会, 2024年 (予定).

略歴

小倉博行 (おぐら ひろゆき)

日本大学商学部非常勤講師。1979年九州大学大学院修士課程修了, 同年三菱電機(株)入社, 主席技師長を務める。2020年九州大学大学院博士課程単位修得退学, 同年より現職。2022年度JIS Q 38507委員長。現在, 情報規格調査会SC 40 (ITガバナンス・マネジメント) 幹事, SC 42 (AI) 委員。

馬奈木俊介 (まなぎ しゅんすけ)

九州大学大学院都市システム工学講座教授。1999年九州大学大学院修士課程修了。2002年米国ロードアイランド大学大学院博士課程修了 (経済学博士)。2015年～現在, 九州大学主幹教授・都市研究センター長。九州大学大学院都市システム工学講座教授。