

博士学位論文

地理情報システムを利用した電力
スポット市場価格予測システムの構築

Construction of Electricity Market Spot Prices
Forecasting System Using GIS

令和6年3月

九州工業大学大学院 工学府 工学専攻

電気エネルギー工学コース

中山 俊太郎

概要

近年、電力の自由化が進んでおり電力の取引の場として、電力市場の取引量が增大している。電力市場には先渡市場、スポット市場、時間前市場などの市場があり、それぞれの特徴に応じて取引が行われているが、取引量が最も多いのがスポット市場である。スポット市場は一日前市場とも呼ばれており、翌日の電気の取引が行われている市場である。スポット市場の価格は需要と供給のバランスで決定されるため、日時により価格が大きく異なるといった特徴がある。そのため、小売電気事業者においては入札前に価格の予測が可能であれば、安い時間帯に電力を購入し蓄電池等のため、高い時間帯に放電することで電力購入コストを低減することが可能である。

本研究において、スポット市場の価格予測を高精度に行うことを目的に研究をおこなった。スポット市場価格は需要と供給のバランスで決定されるため、価格予測システムの構築にあたり、需要と供給を詳細に説明できる説明変数の導出が必要である。筆者は需要と供給を説明する説明変数の一部が地理的な位置と関係があることに着目し、地理情報システム(GIS)を利用した価格予測システムの構築を行った。また、スポット市場価格予測システムの構築にあたり、ランニングコストを抑えることが必要となる。そのため、安価な気象予報とオープンデータの活用により、価格予測システムの構築を行った。

需要の要因としては、エアコンの消費電力量があげられる。エアコンの消費電力量は気温と関係を持つ一方、地域全体のエアコンの消費電力量を考慮する場合には人口も関係してくる。人口が多い地域ではエアコンの設置台数が多く、例えば夏場に気温が高いと消費電力量が大きくなり、地域全体の需要へ影響を及ぼす一方、人口が少ない地域ではこの影響が少ないためである。このエアコンの消費電力量を説明するために、GIS上で気温予報データと市町村ごとの人口データを重ね合わせることで「人口気温データ」の導出を行った。

供給の要因としては、近年導入量が増加している太陽光発電の発電量があげられる。特に電力需要の少ない春、秋においては太陽光発電の余剰によりスポット市場価格の下落が発生している。太陽光発電の発電量には、日射量が関係する一方、地域全体の太陽光発電の発電量を予測するためには、太陽光発電の導入量も関係してくる。そのため、GIS上で日射量予報と、市町村ごとの太陽光発電導入量を重ね合わせ、「予測太陽光発電量」の導出を行った。

太陽光発電の余剰と関連し、JEPXの最低取引価格である0.01円/kWhで電力が取引されることがある。これは、低需要期に太陽光発電の発電量が過剰な場合、供給過多に陥りこの最低価格で取引されるために発生する。筆者はこの最低価格の出現に着目し、最低価格の出現傾向を分析し、最低価格の出現傾向には、月の要素、曜日の要素、太陽光発電量の要素、出現傾向の要素があることを明らかにした。そのうえで、これ

らの要素を使用し「最低価格出現予測変数」の導出を行い、最低価格の出現を予測できる変数を導出した。

これらの三要素に加え、需要を説明する説明変数として日付と曜日データ、供給を説明する説明変数として、燃料価格と発電所の稼働状況を準備した。また、気象とスポット市場価格に関係があることに着目し雲量を、原子力発電所の稼働状況とスポット市場価格に関係があることに着目し、原子力発電所の稼働状況を加え価格予測システムの構築を行った。価格予測システムは、価格の予測を行う回帰モデルと、最低価格の出現を予測する分類モデルで構成されている。予測対象日前日までの説明変数とスポット市場価格でモデルの学習を行い、予測対象日の説明変数を利用することで予測を行うモデルとなっている。また、分類モデルが最低価格の出現を予測した場合、回帰モデルの出力を最低価格である 0.01 円/kWh とすることで最低価格の予測を可能としている。

本予測モデルで、九州エリアのスポット市場価格を対象に予測を行った。予測シミュレーションの結果、従来の手法よりも高精度に予測が可能であることを示すことができた。また、最低価格の出現を予測できるモデルであるため、小売電気事業者にとっては電気を購入するタイミングを検討しやすい予測モデルとなっている。また、高精度な気象予報である MSM を使用した場合の価格予測シミュレーションも行い、誤差が低減されることも確認した。本予測モデルの利用により、小売電気事業者は蓄電池等との組み合わせで需要家に対し安価に電気を提供することができ、需要家の電力コストの抑制が期待される。また、発電事業者にとっても、売電する時間帯を蓄電池等との組み合わせで安い時間帯から価格の高い時間帯にずらすことで売電収益の向上が期待される。

目次	
目次	I
図の一覧	IV
表の一覧	VII
略語	VIII
第 1 章 緒論	1
1.1 序論	1
1.2 小売電気事業者、発電事業者における課題	2
1.3 研究目的	4
1.4 本論文の構成と各章の概要	5
参考論文	6
第 2 章 電力市場と GIS の概要	8
2.1 まえがき	8
2.2 電力の歴史と電力市場の概要	8
2.2.1 電力の歴史	8
2.2.2 電力の自由化	8
2.2.3 発電事業者と小売電気事業者	9
2.2.4 各国の電力自由化への取り組み	9
2.3 電力市場について	14
2.3.1 欧州における電力市場	14
2.3.2 アメリカの電力市場	17
2.4 日本における電力市場	20
2.4.1 JEPX の概要と商品	20
2.4.2 JEPX のスポット市場について	23
2.4.3 JEPX のスポット市場価格の変動について	26
2.5 GIS の概要	27
2.5.1 GIS の特徴	28
2.5.2 GIS で利用するデータとその特徴	29
2.5.3 GIS と Python	30
2.6 使用する気象予報データ	31
2.6.1 GRIB2 形式とその処理について	33
2.6.2 GSM の概要	34
参考文献	35
第 3 章 GIS 利用の説明変数の導出とスポット市場価格予測システムの構築	39
3.1 まえがき	39
3.2 GIS を利用した人口気温データの導出	39

3.2.1	気温とスポット市場価格の関係性	3 9
3.2.2	GIS を利用した人口気温データの導出	4 0
3.3	GIS を利用した予測太陽光発電量の導出	4 5
3.3.1	日射量とスポット市場価格の関係性	4 5
3.3.2	GIS を利用した予測太陽光発電量の導出	4 6
3.4	予測に使用する説明変数の取得	4 8
3.5	機械学習によるスポット市場価格予測システムの構築	5 0
3.6	予測の評価	5 3
3.7	まとめ	5 8
	参考文献	5 8
第 4 章	最低価格の出現傾向の分析と価格予測への応用	6 0
4.1	まえがき	6 0
4.2	JEPX の最低価格について	6 0
4.3	最低価格の出現傾向の分析と最低価格出現予測変数の導出	6 3
4.4	最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築	6 7
4.5	予測の評価	6 9
4.6	まとめ	7 0
	参考文献	7 0
第 5 章	さらなる予測誤差低減に向けた検討	7 2
5.1	まえがき	7 2
5.2	雲量の影響について	7 2
5.2.1	雲量と価格予測誤差の関係性	7 2
5.2.2	雲量を追加した場合の予測精度への影響	7 5
5.3	原子力発電の影響の考慮	7 6
5.3.1	原子力発電の稼働状況が及ぼすスポット市場価格への影響	7 6
5.3.2	原子力発電所の稼働状況を追加した場合の予測精度への影響	8 1
5.4	MSM の利用による予測誤差の低減	8 2
5.4.1	MSM の概要と GSM との比較	8 2
5.4.2	GSM と MSM での太陽光発電量予測精度の比較	8 4
5.4.3	MSM を利用した場合のスポット市場価格予測システムの 予測精度について	9 0 9 0
5.5	まとめ	9 1
	参考文献	9 1
第 6 章	予測の評価と既存手法との予測精度の比較	9 3
6.1	まえがき	9 3
6.2	予測の評価	9 3

6.3	既存のスポット市場価格予測システムとの比較	95
6.3.1	メリットオーダーを使用した予測システムとの比較	95
6.3.2	実際に価格予測ビジネスを行っている事業者との比較	96
	参考論文	100
第7章	結論	101
	謝辞	103
	研究業績	104

図の一覧

図 1-1	JEPX スポット市場取引率の推移[4]	1
図 1-2	新電力の電力の調達状況[8]	3
図 1-3	FIT 制度と FIP 制度[11]	3
図 2-1	イギリスにおける電力の販売量シェア(2015 年) [15]	1 0
図 2-2	ドイツにおける電気、ガス事業者の変遷[14]	1 1
図 2-3	アメリカにおける電力の自由化[19]	1 2
図 2-4	小売り電気事業者数の推移[21]	1 3
図 2-5	新電力のシェアの推移[21]	1 4
図 2-6	EPEX の取引エリアと価格[24]	1 5
図 2-7	EPEX の取引における概要[25]	1 6
図 2-8	マイナス価格が発生した場合の EPEX 前日市場価格[27]	1 7
図 2-9	米国の電力市場[29]	1 8
図 2-10	米国のプール型の電力市場[30]	1 8
図 2-11	米国の卸電力市場の取引の流れ[30]	1 9
図 2-12	JEPX のスポット市場取引量が日本全体の電力需要に占める割合[34]	2 0
図 2-13	JEPX での主要な取引商品の一覧[35]	2 1
図 2-14	ベースロード電源のイメージ[38]	2 2
図 2-15	非化石価値の取引イメージ[40]	2 3
図 2-16	2023 年 5 月 25 日のエリアプライス[41]	2 4
図 2-17	需給曲線の例[42]	2 4
図 2-18	市場分断の発生率[43]	2 6
図 2-19	2021 年 5 月の平日における九州エリアプライスの例	2 7
図 2-20	ArcGIS Pro の画面の例	2 8
図 2-21	レイヤ重ね合わせによる現実世界のモデル化の例	2 9
図 2-22	ラスタ型[46]	3 0
図 2-23	ベクター型[47]	3 0
図 2-24	ArcPy のイメージ図[48]	3 1
図 2-25	GIS 上での気象予報値の例	3 2
図 2-26	気象予報配信の月額比較	3 3
図 2-27	pygrib でデコードした日射量データ	3 4
図 3-1	csv ファイルにした気温データ	4 1
図 3-2	GIS 上の気温ポイントデータ	4 1
図 3-3	IDW 後の気温データ	4 2
図 3-4	九州エリアの人口マップ	4 2
図 3-5	人口マップの属性テーブル	4 3

図 3-6	北九州エリアの人口データと気温データ	4 3
図 3-7	GIS 上での空間結合の例	4 4
図 3-8	属性テーブルへの気温データの結合	4 4
図 3-9	csv ファイルにした日射量予報データ	4 6
図 3-10	市町村別の太陽光発電設備導入量データ	4 6
図 3-11	九州エリアの予測太陽光発電量マップ	4 7
図 3-12	属性テーブルへの日射量予報値の結合	4 7
図 3-13	HJKS からダウンロードした発電所停止情報	4 9
図 3-14	2020 年度の日本の電源構成[20]	4 9
図 3-15	学習用データの例	5 0
図 3-16	予測用データの例	5 1
図 3-17	Random Forest のイメージ図[27]	5 2
図 3-18	構築したスポット市場価格予測モデルの概要	5 3
図 3-19	各予測モデルにおける重要度	5 5
図 3-20	2022 年 4 月における予測の評価	5 6
図 3-21	使用した地点の情報	5 6
図 4-1	通常時の需給曲線	6 1
図 4-2	最低価格が出現した場合の需給曲線	6 1
図 4-3	FIT 制度と FIP 制度の比較[11]	6 2
図 4-4	最低価格の月ごとの出現回数	6 3
図 4-5	月ごとの電力需要の変化[13]	6 4
図 4-6	大傘田メガソーラー発電所の推定発電電力量[14]	6 4
図 4-7	曜日ごとの出現割合	6 5
図 4-8	2020 年から 2023 年度の 7 月における最低価格の出現回数	6 6
図 4-9	最低価格の出現を考慮した予測モデル	6 8
図 4-10	2023 年 3 月 13 日の予測の評価	7 0
図 5-1	雲量データの例	7 3
図 5-2	雲量を利用した学習用データの例	7 5
図 5-3	限界費用の順番[5]	7 7
図 5-4	発電方式ごとの発電コスト[6]	7 7
図 5-5	2022 年度における九州電力の電源構成	7 8
図 5-6	2023 年現在の原子力発電所の稼働状況[10]	7 9
図 5-7	九州エリアの原子力発電所の稼働状況	7 9
図 5-8	発電所の稼働状況	8 0
図 5-9	原子力発電所の稼働状況を含んだ学習用データ	8 1
図 5-10	気象データの一覧[13]	8 2

図 5-11	使用する気象予報データの例.....	8 4
図 5-12	デコード後の MSM 日射量予報データ.....	8 4
図 5-13	GIS 上での GSM と MSM 日射量予報データ.....	8 5
図 5-14	太陽光発電量実績値の例.....	8 5
図 5-15	2023 年 7 月 27 日の比較.....	8 7
図 5-16	2023 年 9 月 1 日の比較.....	8 7
図 5-17	2023 年 9 月 14 日の比較.....	8 8
図 5-18	2023 年 7 月 27 日の比較.....	8 9
図 5-19	2023 年 9 月 1 日の比較.....	8 9
図 5-20	2023 年 9 月 14 日の比較.....	9 0
図 6-1	月別の予測精度.....	9 3
図 6-2	曜日ごとの予測精度.....	9 4
図 6-3	メリットオーダーの例[1].....	9 5
図 6-4	D-Price のサービス詳細[4].....	9 7
図 6-5	D-Price で配信されている価格予測.....	9 7
図 6-6	一週間単位での D-Price の価格予測.....	9 8
図 6-7	本論文での予測結果.....	9 9
図 6-8	D-Price の予測結果.....	9 9

表の一覧

表 2-1 GSM の予報時間、予報時間間隔[55].....	3 5
表 3-1. 使用するモデルによる予測精度への影響.....	5 3
表 3-2. 時間帯によって分割した場合の予測精度.....	5 3
表 3-3 GIS を使用した場合と使用しない場合の比較.....	5 7
表 4-1 各係数と最低価格の出現の関係性.....	6 7
表 4-2 評価期間による精度の比較.....	6 9
表 4-3. 全時間帯での評価.....	6 9
表 4-4. 昼間の時間帯(9:00~17:00)での評価.....	6 9
表 5-1 朝夕の予測誤差 [円/kWh].....	7 2
表 5-2 昼の予測誤差 [円/kWh].....	7 3
表 5-3 夜の予測誤差 [円/kWh].....	7 3
表 5-4 朝夕の予測誤差の雲量での評価 [円/kWh].....	7 4
表 5-5 昼の予測誤差の雲量での評価 [円/kWh].....	7 4
表 5-6 夜の予測誤差の雲量での評価 [円/kWh].....	7 4
表 5-7 全時間帯での評価.....	7 6
表 5-8 昼間の時間帯(9:00~17:00)での評価.....	7 6
表 5-9 原子力発電所が停止している期間の平均価格.....	8 1
表 5-10 原子力発電所の要素を追加した場合の評価.....	8 1
表 5-11 評価期間における GSM, MSM での予測太陽光発電量の誤差.....	8 6
表 5-12 月ごとの予測精度[万 kWh].....	8 6
表 5-13 2023 年 7 月 27 日の比較.....	8 7
表 5-14 2023 年 9 月 1 日の比較.....	8 7
表 5-15 2023 年 9 月 14 日の比較.....	8 8
表 5-16 雲量とそれぞれの予測太陽光発電量の関係性.....	8 8
表 5-17 MSM を使用した場合の予測精度.....	9 0
表 6-1 月別の予測精度.....	9 4
表 6-2 曜日ごとの予測精度.....	9 4
表 6-3 簡易メリットオーダーを用いた既存予測手法との比較.....	9 6
表 6-4 D-Price との価格予測精度の比較.....	9 8
表 6-5 D-Price と本論文の比較.....	9 9

略語

GIS	Geographic Information System (地理情報システム)
JEPX	Japan Electric Power Exchange (日本卸電力取引所)
EPEX	European Power Exchange (欧州電力取引所)
ISO	Independent System Operator (独立系統運用機関)
RTO	Regional Transmission Organization (地域送電機関)
PJM	Pennsylvania-New Jersey-Maryland (パンシルバニア- ニュージャージー-メリーランド)
GRIB2	GRIdded Binary version 2 (二進形式格子点資料気象通報式(第二版))
GSM	Global Spectral Model (全球数値予報モデル)
GPV	Grid Point Value (格子点値)
MSM	Meso Scale Model (メソ数値予報モデル)
IDW	Inverse Distance Weighted (逆距離加重)
HJKS	Hatsudensho Joho Kokai. System (発電所情報公開システム)
LNG	Liquefied Natural Gas (液化天然ガス)
MAE	Mean Absolute Error (平均絶対誤差)
NMAE	Normalized Mean Absolute error (正規化平均絶対誤差)
FIT	Feed-in Tariff (固定価格買取制度)
FIP	Feed-in Premium (フィードインプレミアム)
RE100	Renewable Energy 100 % (再生可能エネルギー100%)
EV	Electric Vehicle (電気自動車)

第1章 緒論

1.1 序論

電気事業は長い間一部の電力会社に独占されてきた。これは、規模の経済性が大きいためであり、自然独占を認める代わりに料金規制などが行われてきた。一方、少数の電力会社による独占は産業の硬直化という問題を内包しており、経営効率化のためのインセンティブが働きにくくなる、原価に関する情報が電力会社しか把握できないなどといった問題も抱えていた。そのため、1989年のイギリスにおける電力の自由化を皮切りに、世界各国で電力の自由化が進んでいる[1]。電力の自由化が進むと、発電事業者、小売電気事業者の双方に新規参入する事業者が増加するが、発電事業者にとっては発電した電力を売電する場、小売電気事業者にとっては需要家に対し電力を供給するために、電力を買電する場が必要となる。特に、新規参入した小売電気事業者は発電所を自己所有していない事業者も多く、日本においては小売電気事業者のうち、自己で発電所を保有する小売電気事業者は約7.5%に過ぎない[2]。このような背景から電力を取引するための市場である電力市場の整備が進んでいる。電力自由化が進む欧米において、電力市場は複数設立されているが、日本においても、唯一の卸電力取引所である、JEPXが2003年に設立され、2005年に電力取引を開始した[3]。日本の電力自由化が段階的に進行したこともあり、設立初期の取引量は多くなかったが、2016年の小売り全面自由化を皮切りに取引量は増え続け、図1-1が示すようにJEPXのスポット市場取引率は2022年10月時点で約45%となっている[4]。このスポット市場という

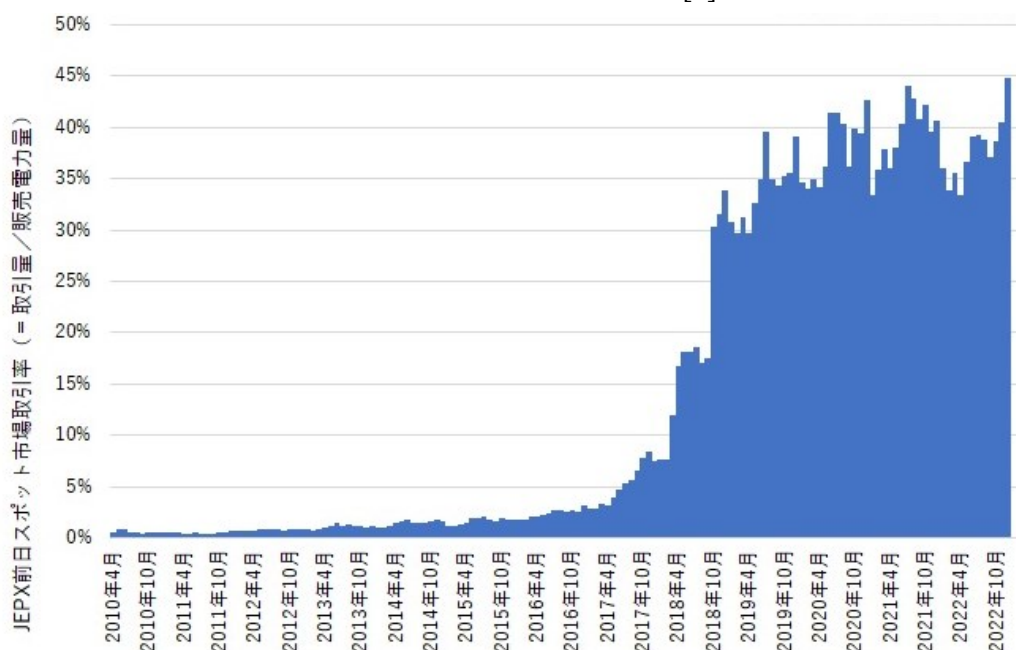


図1-1 JEPX スポット市場取引率の推移[4]

市場が JEPX のメインの市場となっている。スポット市場以外にも、先渡市場や時間前市場などもあるが、スポット市場の取引量が最も多く 2019 年度においては JEPX 全体の取引量の 99.14% を占めている[5]。スポット市場では、取引日の前日に取引日に受け渡しを行う電力の取引を行う。入札を行う発電事業者、小売電気事業者は取引日前日の午前 10 時までに入札する必要がある。入札の結果、売り札と買い札を積み上げ、需給曲線を作成し、その交点が実際のスポット市場の価格となる。30 分ごとに価格が決定されるため、一日当たり 48 コマ分の価格が存在する。需給曲線から価格が決定されるため、スポット市場価格は需要と供給のバランスで決定される。そのため、需要が多い時期、時間帯には価格は高騰し、需要の少ない時期、時間帯には価格は下落する。近年においては、再生可能エネルギーのような自然変動電源の普及の影響がスポット市場価格にも表れている。特に、需要の規模に対し太陽光発電量の多い九州エリアにおいては需要の少ない春、秋において太陽光発電の出力制御が多発している[6]。出力制御が発生する場合、電力の供給過多に陥っているので電力価格は下落する。一方で、近年の異常気象による冷暖房需要の増加や燃料価格の高騰により、電力は高騰する場合もある。実際に 2020 年 12 月から 2021 年 1 月にかけてはスポット市場価格の高騰が発生していた。この高騰は、想定以上の気象条件の悪化や LNG 在庫の緊迫が原因とされている[7]。最高でスポット市場価格が 251 円/kWh まで上昇するなど、これまでにならぬほど異常に価格が上昇した。このように、スポット市場の価格は常時変動しており、場合によっては急激に高騰、下落する場合もある。

1.2 小売電気事業者、発電事業者における課題

このように、電力市場が形成され小売電気事業者、発電事業者は電力市場を通じて電力の売買を行っているが、電力市場を通じた売買には課題もある。小売電気事業者においては、電力の需要家に対し電力を供給する義務を負っている。そのため、電力を供給するために自社で発電所を保有するか、発電事業者と相対取引で電力を購入するか電力市場から電力を購入する必要がある。電力の自由化以降、旧一般電気事業者以外の電気事業者が増えており、そのような旧一般電気事業者以外の電気事業者は新電力と呼ばれている。図 1-2 に示すように、新電力における販売電力量は 2016 年の小売電力全面自由化以降年々増加している[8]。新電力においては、電力の調達を前述のいずれかの方法で行う必要があるが、自己で発電所を保有する小売電気事業者は前述の通り少ない。また、相対取引についても一部では行われているが。多くの発電所を保有する旧一般電気事業者においては新電力などの社外に卸売を行えばより高く売れる状況においても、こうした比較、判断をせずに自社の小売から需要家への販売を優先する場合も多く、新電力においては旧一般電気事業者から相対契約による電力の調達は難しい状況にある[9]。そのため、新電力においては電力市場からの電力の調達に頼らざるを得ない状況にある。図 1-2 が示す通り、2020 年 8 月には新電力による販売電力量に対する JEPX 買い約定量の比率は 90% を超えており、新電力の電力調達が

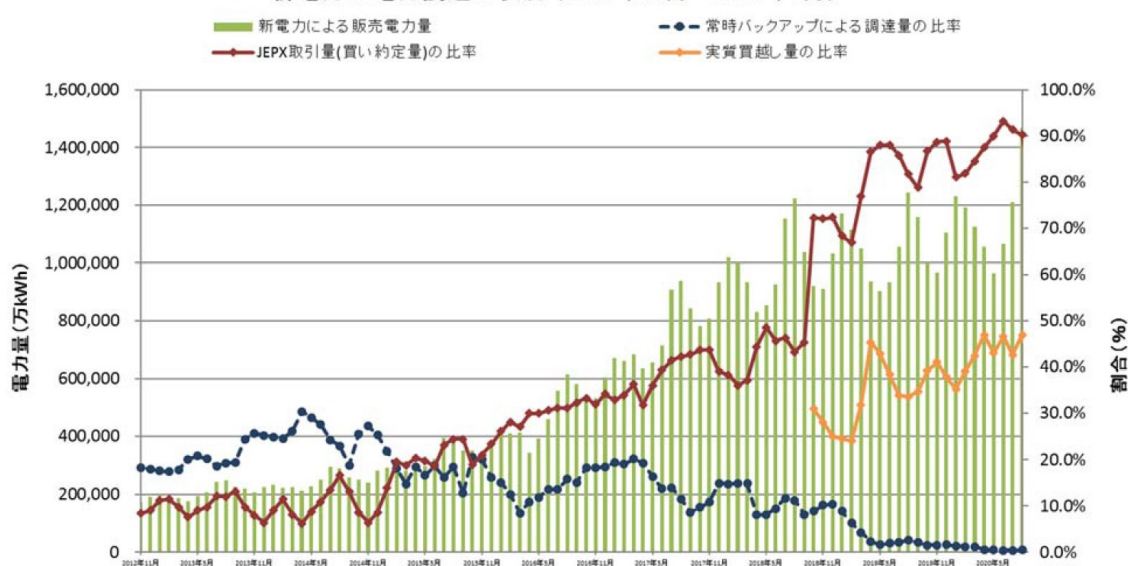


図 1-2 新電力の電力の調達状況[8]

大きく電力市場に依存していることがわかる。しかしながら、前述の通り JEPX の取引量の大半を占めるスポット市場の価格は需要と供給のバランスによって変動する。そのため、スポット市場からの調達に依存する新電力は常にスポット市場価格高騰のリスクと向き合っている。実際に 2020 年 12 月から 2021 年 1 月に発生した電力価格の高騰、近年の燃料価格高騰によるスポット市場価格の高騰により、新電力の 4 分の 1 以上が倒産や撤退、契約停止に陥っている[10]。

一方で、発電事業者においても電力市場取引における課題はある。近年、太陽光発電の買い取り制度は FIT 制度から FIP 制度へと移行している。FIT 制度においては、再生可能エネルギー由来の電力は、固定価格で送配電事業者に買い取られていた一方、FIP 制度においては、固定の価格で買い取られず発電された電力に対し一定のプレミアムが加算される。そのため、FIP 制度において発電された電力は相対での取引あるいは市場での取引が必要となる。図 1-3 に FIT 制度と FIP 制度の比較を示す[11]。この図が

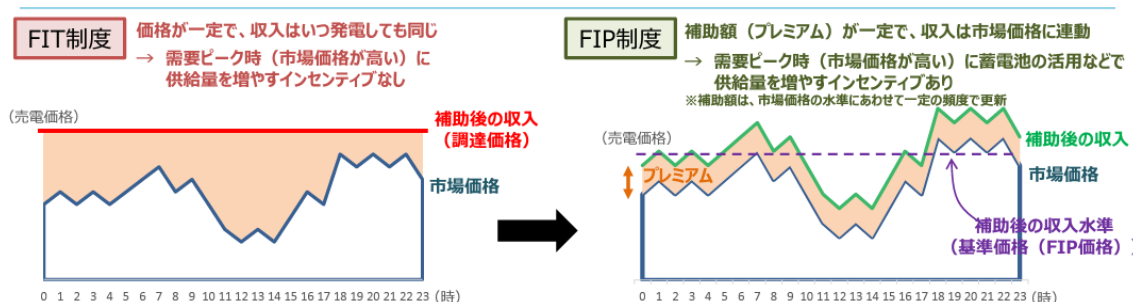


図 1-3 FIT 制度と FIP 制度[11]

示すように、FIP 制度においては固定価格で買い取りが行われなため市場取引あるいは相対取引を行う必要がある。市場取引を行う場合、市場価格が発電事業者における収益に直結するため、市場価格が安い時間帯に売電を行うと収益は減少する。特に、太陽光発電を保有する発電事業者においては、先述の通り、太陽光発電量が多い時間帯においては出力制御が発生しており価格が下落するため、収益も減少する。また、FIP 制度におけるプレミアムは、市場価格が 0.01 円/kWh となった時間帯には付与されない[12]。そのため、発電事業者にとってもスポット市場価格が収益に大きな影響を与えている。

1.3 研究目的

以上のことから、研究の目的を発電事業者の売電収益最大化、小売電気事業者の電力調達コストの削減のための JEPX スポットプライスの予測システムの構築とした。スポット市場価格予測が可能となれば、蓄電池やEVとの組み合わせにより小売電気事業者、発電事業者の収益を向上することができる。小売電気事業者においては、電力の安い時間帯を予測し、安い時間帯に購入し蓄電池やEVに電力を蓄え、電力の高い時間帯に放電することで電力コストを低減することができる。一方、発電事業者においても電力の安い時間帯に売電を行わず蓄電池やEVに電力を蓄え、電力の高い時間帯に売電することで収益を向上させることができる。また、先述の通り最低価格が出現した場合には FIP 制度におけるプレミアムは付与されないため、この時間帯を予測できれば、最低価格が出現する時間帯を避けて取引を行えばプレミアムを取得することができる。価格予測を行い、発電事業者が入札行動を変更すれば昼間の時間帯に出力制御を受け売電することができなかつた電力が市場へと流出する。電力の価格は需要と供給のバランスで決定されるため、市場への電力の流入量が増えれば当然電力価格も下落するため電力の消費者にとっても電力コストの低減が可能となり、再生可能エネルギーへの投資も進むことが予想され、電力の再生可能エネルギー率の向上も期待される。

このような目的のもと、筆者は GIS を利用した電力スポット市場価格予測システムの構築を行った。先述の通り、スポット市場の価格は需要と供給のバランスにより決定される。そのため、スポット市場の価格予測のために需要と供給を説明するための変数の導出が必要となる。筆者は、その説明変数が地理的な情報と関連することに着目し、GIS 上で気象予報と関連する情報を重ね合わせることにより、スポット市場価格と関連の深い説明変数の導出を行った。また、最低価格の出現には傾向があることに着目し最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築を行った。先行研究においてもスポット市場価格予測についての研究は行われているが、地理情報と最低価格の出現に着目した研究は行われていない。例えば、大村らはオープンデータを活用し、スポット市場と関係する様々な情報を説明変数とし、複数の予測スキ

ームを組み合わせることでスポット市場価格の予測を可能としている[13]。また、菊池らは簡易的にメリットオーダー曲線を作成し、需要予測と組み合わせることでスポット市場価格の予測を可能としている[14]。上記のように様々な手法が提案されているが、地理的なアプローチによるスポット市場価格予測、また最低価格の出現に着目したスポット市場価格予測は行われていないのが現状である。また、電力市場は海外にも設立されている。そのため、海外の市場に着目した研究もおこなわれているが、海外市場の予測においても、電力価格と関係のある説明変数を準備し、ニューラルネットワークの利用や時系列モデルの構築による手法が採用されているが、本論文で構築するような手法は提案されていない[15]。本手法のようにスポット市場価格と関係の深い説明変数を導出し機械学習による予測手法を構築することで、高精度な価格予測が可能となることが期待される。

1.4 本論文の構成と各章の概要

本論文は以下のように構成されている。

第2章では、本研究の背景となる世界各国における電力の自由化と電力市場の成り立ちについて説明する。また、本研究で着目する日本の電力市場である JEPX について、主要な市場であるスポット市場を中心に説明する。本研究で使用する GIS と気象予報の概要についても説明する。

第3章では、GIS を利用した JEPX スポット市場価格予測システムの説明変数の導出と価格予測システムの構築について説明する。スポット市場価格と関係の深い説明変数を導出するために GIS を使用する。GIS 上で気温予報データと人口の分布を重ね合わせることで人口気温データを、日射量予報データと太陽光発電の導入量データを重ね合わせることで予測太陽光発電量を導出する。その後、それらの説明変数とスポット市場価格と関係する説明変数を使用してスポット市場価格予測システムの構築を行う。

第4章では、最低価格の出現傾向の分析とスポット市場価格予測システムへの応用について説明する。最低価格の出現には傾向があることに着目し、最低価格の出現を予測するための説明変数の導出をおこなった。また、最低価格の出現を予測するための分類モデルの構築を行い、第3章で構築した価格予測システムと組み合わせることで、最低価格の出現の予測を可能とするシステムの構築を行った。

第5章ではさらなる予測精度向上のため、雲量、原子力発電の要素の追加、MSM の利用をした場合のシステム構築について説明する。気象と予測精度に関係があることに着目し、価格予測システムの説明変数として雲量予報を追加した場合の精度に対する影響について分析を行う。また、原子力発電の稼働状況とスポット市場価格に関係があることに着目し、価格予測システムの説明変数として原子力発電所の稼働状況を追加した場合の精度に対する影響について分析を行う。最後に気象予報データとして GSM ではなく MSM を使用した場合の、太陽光発電量予測精度への影響と、スポット

市場価格予測への影響について分析を行う。

第6章では、構築した価格予測システム利用した予測結果の評価と既存の予測手法との比較の結果について述べる。

最後に、第7章で本研究のまとめと今後の展望について述べる。

参考論文

- [1] 一から学ぶ電力自由化(第三回), スターメンテナンスサポート(2019)
<https://www.ecopu.net/769/>
- [2] 小売電気事業者一覧(2023年12月時点), 新電力ネット
https://pps-net.org/ppscompany_reg/retail
- [3] 日本卸電力取引所 沿革, JEPX 公式サイト
<https://www.jepx.jp/company/history/>
- [4] 統計 電力市場, 自然エネルギー財団
<https://www.renewable-ei.org/statistics/electricitymarket/>
- [5] 時間前市場の活性化について 第51回制度設計専門会合事務局提出資料,
経済産業省(2020)
https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/051_06_00.pdf
- [6] 2023年度出力制御見通し他について, 九州電力送配電(2023),
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/047_02_02.pdf
- [7] 草薙真一, 2020年度冬季における JEPX スポット市場価格高騰の要因分析,
先物・オプションレポート 2021年7月号(2021)
- [8] 電力市場における競争状況, 経済産業省(2021)
https://www.emsc.meti.go.jp/info/activity/report_05/20210122_15.pdf
- [9] 電力・ガス取引監視等委員会における取組について, 資源エネルギー庁(2022)
<https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20220131/220131energy08.pdf>
- [10] 新電力、4分の1以上が倒産や撤退・契約停止に, 電気新聞(2023)
<https://www.denkishimbun.com/sp/276824>
- [11] エネルギー基本計画の概要, 資源エネルギー庁(2021)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_02.pdf
- [12] FIP 制度下における基準価格とプレミアム, 資源エネルギー庁(2022)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/fip_2020/fip_seido_gaiyou.pdf
- [13] 大村愛花, 藤本悠, 林泰弘, 澤敏之, 佐々木浩人, 福山直人, 西野由高,
オープンデータに基づく電力スポット市場のエリア価格予測
-複数予測スキームの統合アプローチの検討-

- 電気学会論文誌 B, 141 巻, 5 号, pp.366-373(2020)
- [14] 菊池恒太, 若尾真治, 原田耕佑, 星野優子, 簡易メリットオーダーモデルを用いた JEPX スポット市場価格予測の汎用性検証, 令和 4 年電気学会全国大会, pp.215-216(2022)
- [15] r. weron , “electricity price forecasting: a review of the state-of-the-art with a look into the future”, international journal of forecasting, vol.30, no.4, pp.1030-1081(2014)

第2章 電力市場と GIS の概要

2.1 まえがき

第1章において、研究背景と小売電気事業者における課題、研究目的について述べた。本章では、電力市場の成り立ちと概要について述べ、研究で使用する GIS と気象予報データの概要を述べる。

2.2 電力の歴史と電力市場の概要

2.2.1 電力の歴史

世界で初めて発電、送電施設を設計し、電灯用の送電を開始したのはエジソンである [1]。ニューヨークに設置した発電所からウォール街の半径約 1 マイルにある白熱電球に電力を供給した [2]。エジソンが設立した電気事業は直流方式であり、送電ロスによる問題から徐々に交流方式が主流となっていった。初期の電力系統は個別に供給されるものであったが、個別供給よりも相互に接続する方式の方が集中のメリットが得られるため、電気事業は次第に系統連系を広げていくこととなった。

日本においては、1883 年に設立された東京電燈が、近隣の郵便局や銀行に電灯の一般供給を開始したのが電気事業の始まりである [3]。次第に電気事業者の数は増え、1907 年には 116 社、1919 年には 611 社の電気事業者が存在していた。この日本における電気事業の黎明期に東京で採用された発電機が 50 Hz、大阪で採用された発電機が 60 Hz であったため、東日本は 50 Hz、西日本は 60 Hz といった周波数で現在も電力系統が存在している。その後の 1939 年に既存の電気事業者から強制的に設備出資をさせて日本発送電が誕生し、電力は日本発送電と 9 つの配電会社による国家管理の時代となった [4]。戦後、電気事業再編成の機運が高まる中、GHQ により日本発送電と 9 つの配電会社は集中排除の指定を受け、1951 年に日本発送電が解散すると同時に発送配電一貫経営の北海道・東北・東京・中部・北陸・関西・中国・四国・九州の 9 電力会社が誕生し、民営 9 電力体制が成立した [5]。その後に沖縄電力も設立され、民営による独占的な地域別 10 電力体制が構築されることになった。

2.2.2 電力の自由化

このように、電気事業は多くの国で少数の電力会社によって独占されてきた。電気事業のような大規模な資本設備が必要となる産業においては生産量を増やすほど、単位当たりの生産費用が逡減されていく。そのため、複数の企業が少量ずつ生産するよりも規模の大きい少数の会社が生産を行う方が効率的な供給が可能であり、電気事業においても、少数の電力会社における独占が認められていた [6]。

しかしながら、少数の電力会社による独占は産業の硬直化というデメリットも内包していた。電力のような公共事業において、料金の設定には統括原価方式と呼ばれる方式が採用されている。統括原価方式とは、最大限の経営効率化を踏まえたうえで、商品を安定的に供給するために必要であると見込まれる費用に利潤を加えた額と収入が釣り合うように価格を設定する方式である [7]。この統括原価方式の採用により、電気事業者は損失を生じることがなくなり、安全性やサービス向上のための設備投資が可能となり、長期的に安定した経営が可能となるなどメリットを享受することができる [8]。一方で、経営効率化のためのインセンティブが働きにくくなる、原価に関する情報が電力会社しか把握できないなどといった問題も抱えていた。

この問題に対し、1989年にイギリスにおいて電力の自由化が始まった。自由化とは、国が決めた規制をなくすことを意味し、電力の自由化は料金規制と参入規制をなくすことを表す [9]。先述のとおり、日本においては地域別 10 電力体制が構築されており地域独占が認められており、参入規制が生じていた。また、電力価格においても国が料金を審査し、適正な水準で認可するといった料金規制も設けられていた。これらを撤廃することで、市場競争を導入し電気料金の抑制や電気の安定確保を行うことを目的として電力の自由化が進められてきた。

2.2.3 発電事業者と小売電気事業者

電力の自由化について述べる前に、電気事業を行う発電事業者と小売電気事業者についての説明を行う。発電事業者とは、その名の通り発電所を保有し電力の供給を行う事業者である。発電事業者に該当するためには次の3つの要件いずれにも該当したうえで、小売電気事業者等の用に供する電力の合計が1万kWを超える必要がある。①出力1000kW以上、②託送契約上の同時最大受電電力が5割超、③年間の逆潮流量(電力量)が5割超[10]。現在、日本には1123社の発電事業者が届けられている[11]。電力の自由化以降、発電事業への参入が容易になったため発電事業者数は増加している。これは、太陽光発電のように莫大な設備投資が不要な発電方式の普及とFIT、FIP制度の普及によることが大きい。次に小売電気事業者について説明する。小売電気事業者とは、電力の消費者と契約を行い電力の販売を行う事業者である。小売電気事業者として事業を行うためには、電力広域的運営推進機関への加入が必要となる[12]。小売電気事業者においても、電力の自由化に伴い様々な業種から参入が続いており、現在869社が小売電気事業者として登録されている[13]。また、旧一般電気事業者以外に電力自由化以降に参入した小売電気事業者を新電力と呼んでいる。

2.2.4 各国の電力自由化への取り組み

先述のとおり、電力の自由化はイギリスを発端として広がっている。本項では、イギリス、アメリカ、ドイツ、日本を例に電力の自由化の取り組みについて述べていく。

2.2.4.1 イギリスの電力自由化

イギリスにおける電気事業は1957年から発電・送電を担う国営の中央電力公社と12の地域配電局によって行われていた[14]。しかしながら、時代が進むに従い過剰な発電設備の建設や電力価格の高騰等様々な問題が出てきたため、1990年には国営の中央電力公社を3つの発電会社に分割、民営化し運営体制を変更した。1999年には、家庭用の電気を含めた全面的な電力の自由化が行われ、それ以来、各社は顧客獲得に向け競争を続けている状況である。図2-1にイギリスにおける電力の販売量のシェアを示す[15]。図が示す通り上位6社が70%程度のシェアを持っている状況である。この6社のうち、「RWE nPower」、「E.ON UK」、「EDF Energy」、「Scottish Power」の4社は外資系企業であり、エネルギーの安定供給や環境への適合のために外資系企業を利用している。また、イギリスにおいては電力自由化以前にガスも自由化されているので、ガスと電気の販売をセットにしているケースも多くなっている。イギリスにおいては、電力自由化直後の電気料金は下がったが、近年電力価格の上昇が続いており上位6社による市場独占も続いているなど、課題を残している状況である[16]。

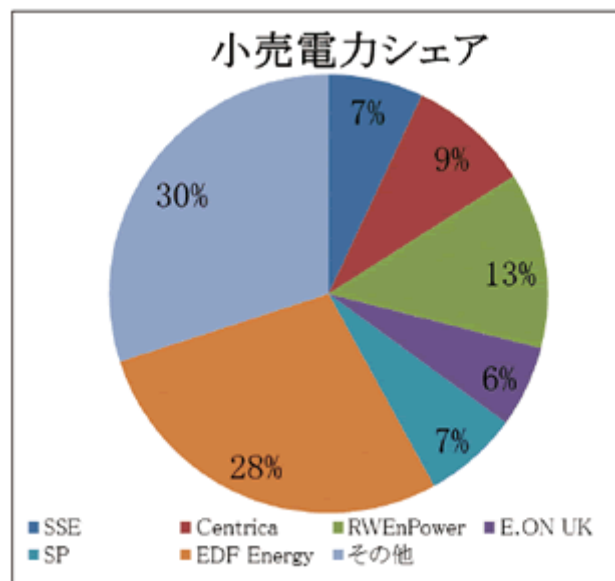


図 2-1 イギリスにおける電力の販売量シェア(2015年) [15]

2.2.4.2 ドイツの電力自由化

次にドイツにおける電力自由化について述べていく。ドイツにおいては、イギリスのような一つの国有の電気事業者による独占ではなく、発電、送電、小売を担う大手電力会社8社と小規模の地域密着型事業者であるシュタトベルケによる電気事業体制を敷いていた[14]。イギリスを発端とした電力自由化により、1996年には電力自由化について定めたEUの指令である欧州電力域内市場指令が制定され、ドイツにおいても

1998年に小売りの全面自由化を開始した。しかしながら、ドイツにおける電力自由化の問題点として発送電の分離が厳格に行われなかったことがあげられる。通常、電力自由化において新規参入を行ったものは、コストがかかりすぎるため、自ら送電網を建設することではなく、送配電事業者に対し、託送料金を支払うことで送電網を使用する。そのため、電力自由化において発送電分離を厳格に行うことが重要となり発送電分離が厳格に行われないと、新規参入の電気事業者に対し託送料金のつり上げを行うなど公正な事業が行われなくなる。ドイツにおいては、この発送電分離が厳格に行われず、会計分離にとどめられたため新規参入の電気事業者に対し託送料金のつり上げが行われた。託送料金の設定方法については、政府が規制機関を通じて各社の託送料金を比較して監視する方法と電力会社と送電会社が交渉して決定する方式があるが、EU内ではドイツ以外の国が前者を採用した一方で、ドイツは後者の方法を採用し規制機関も設置されなかった。それにより、大手電力会社は電気料金を低価格に設定する一方で高額な託送料金を設定することで新規参入事業者の電力コストを上昇させた。そのため、自由化当初は約100の新規事業者が参入したが、この高い託送料金の設定により次第に姿を消していった[17]。しかしながら、高額な託送料金を是正するために、ドイツは2005年に送配電料金の認可制を導入し、2009年にはさらなる公平性の担保のために発電事業者と送電事業者の法的な分離が行われた。その後、統合が進み。現在では「Big4」と呼ばれる4大エネルギー企業に集約されている。図2-2にドイツにおける電気、ガス事業者の変遷を示す。

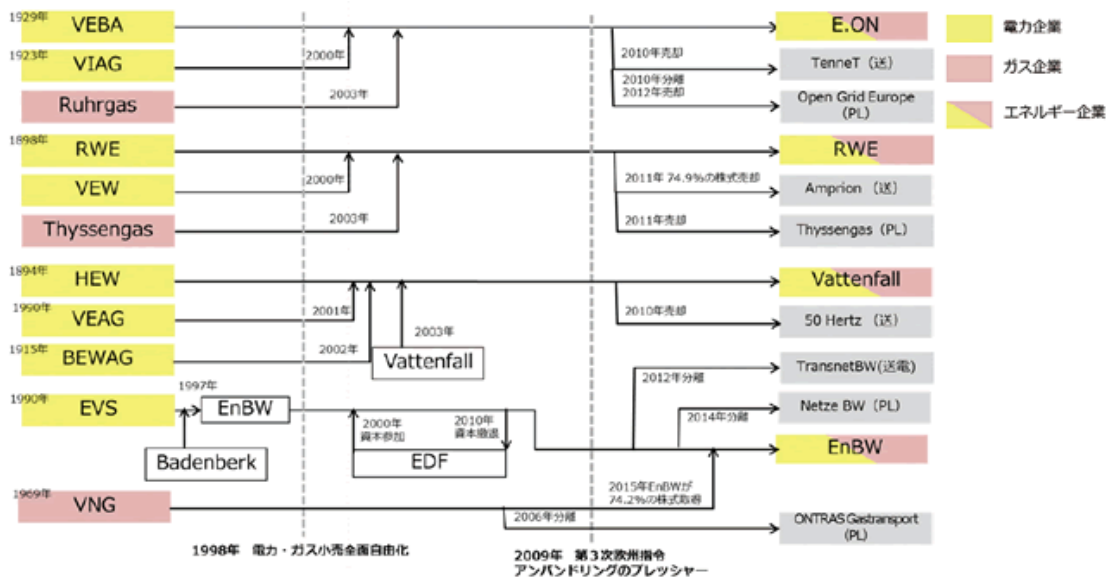


図 2-2 ドイツにおける電気、ガス事業者の変遷[14]

2.2.4.3 アメリカの電力自由化

次に、アメリカにおける電力の自由化について述べていく。アメリカにおいては1990年代から電力の自由化が始まった。アメリカは連邦国家であるため、電気事業に対する規制権限は各州の公益事業委員会がもっているため、電力自由化は国家単位ではなく州単位で検討されてきた[14]。当時のアメリカは電力水準の州ごとの格差が非常に大きく、ニューハンプシャー州やニューヨーク州の電力料金は、ワシントン州やケンタッキー州の電力料金に比べて約3倍に達していた。そのため、電力自由化はこの電力料金の格差を是正すべく導入されることとなった。しかしながら、市場設計のミスから深刻なトラブルも発生しており、2000年度にはカリフォルニア州で電力危機が発生している[18]。2000年6月以降にカリフォルニア州の一部地域で小売価格が2倍程度まで上昇した。さらに12月以降にはカリフォルニア州内の2つの大手電力会社の経営状態が悪化し、卸電力の調達が困難となり、1月17日、18日には停電を実施する事態に陥っている。これには様々な要因があり、予測以上のピーク負荷があったこと、発電設備容量の不足、他州からの受電設備の不足などがあげられるが、市場設計及び市場規則の重大な欠陥により需給バランスの崩れが増幅されたためであるとも報告されている[18]。このようにカリフォルニア州での電力危機発生以降は自由化の流れは中断され、2017年以降では、ニューヨーク州、メリーランド州などの東部とテキサス州の15州およびワシントンD.C.のみが自由化されている[19]。

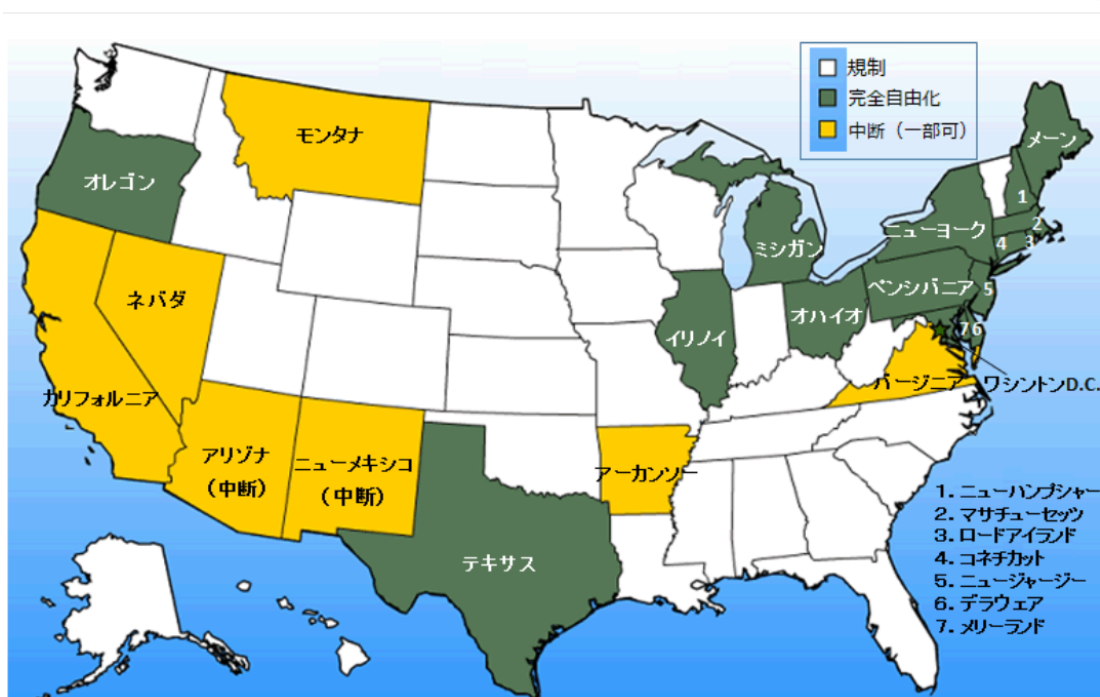


図 2-3 アメリカにおける電力の自由化[19]

2.2.4.4 日本の電力自由化

最後に日本における電力自由化について述べる。日本においては、自由化以前の電気事業は先述の10電力会社に地域独占が認められており、地域ごとに電力の供給が行われていた。自由化以前の電気料金については経済産業省の認可を得て決定される仕組みがとられており、電気事業に対する競争が働かない状況であった。その後各国が電力の自由化を進める中で、日本における電力自由化の第一歩として、1995年に電気事業法が改正され、発電事業への新規参入が認められるようになった[20]。これにより、独立系発電事業者が誕生し、一般電気事業者は他の一般電気事業者や卸電気事業者以外からも電力を購入できるようになった。続いて、2000年3月には「特別高圧」区分の大規模な工場やオフィスビル等の大口の需要家向けの電力小売自由化が実施された。その後も順次小売の自由化が進んでいき、2004年4月からは高圧の契約電力500kW以上、2005年4月からはすべての高圧の需要家の小売自由化が行われ、2016年4月には小売の全面自由化が行われた。低圧の小売自由化が始まって以降、小売電気事業に対する新規参入が進んでいる。図2-4に日本における小売電気事業者数の推移を示す[21]。図2-4が示す通り、近年は頭打ちになっているが、2016年の小売全面自由化以降小売電気事業者数は年々増加していることがわかる。また、このような新規参入の小売電気事業者のことを「新電力」と呼んでいる。図2-5に新電力のシェアの推移を示す。こちらも2016年4月の小売全面自由化以降着実にシェアを伸ばしてきており、日本の全販売電力量における新電力のシェアは約20%となっている。このように、日本においては小売全面自由化以降、新規参入が進んでいる状況である。なお、電気料金については、消費者保護のために料金規制経過措置が取られている。小売電気事業者間の競争が十分に進展するまでは、規制料金が適応されている。規制料金とは電力小

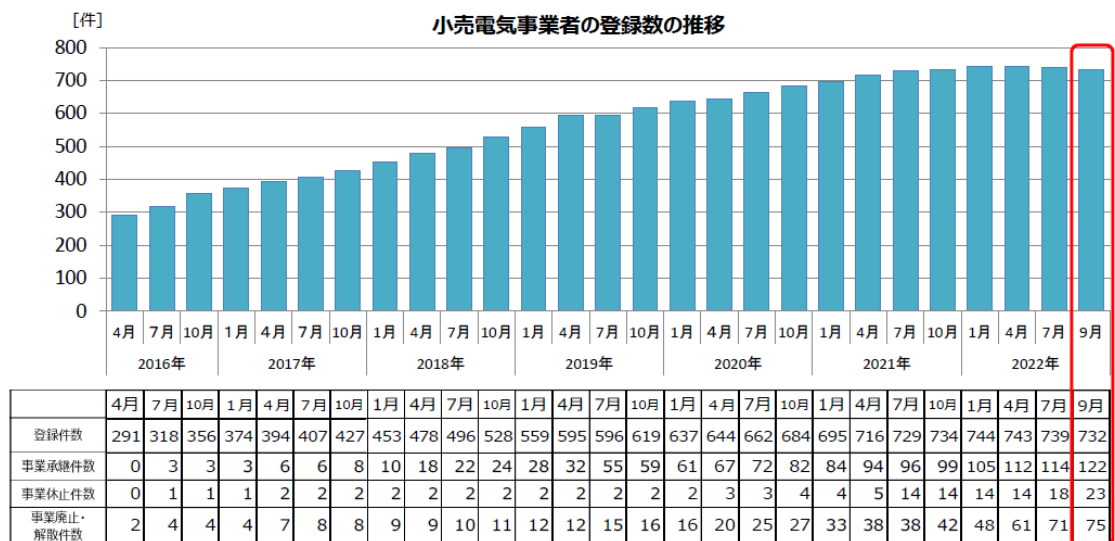


図 2-4 小売り電気事業者数の推移[21]

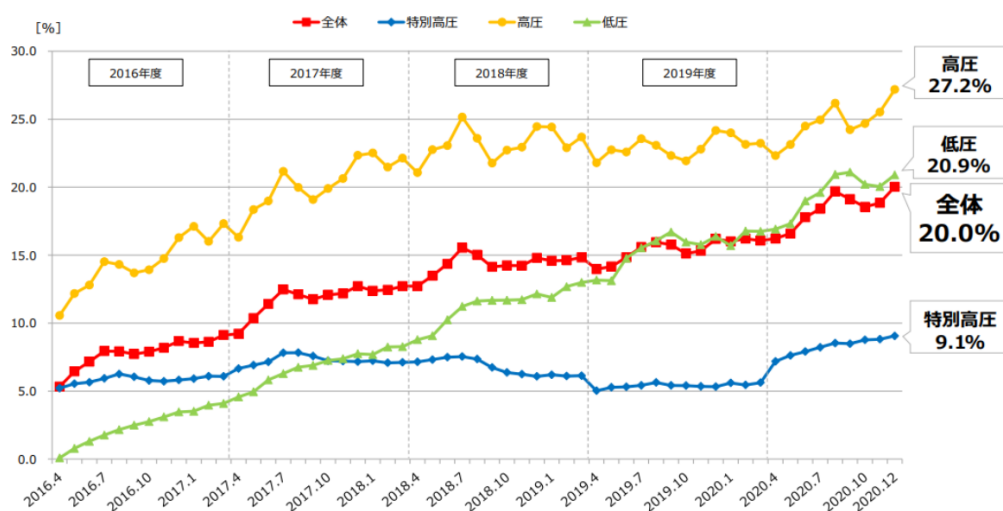


図 2-5 新電力のシェアの推移[21]

売自由化以前から大手電力会社で提供されている電力料金の中で、値上げには国の許可が必要であり、料金の上限が設定されている。一方、自由料金というのは小売電気事業者が自由に決定できる料金のことである。規制がないため自由料金の方が安いとされているが、近年のエネルギー価格の高騰を受け、上限が設定されている規制料金に対し、上限が設定されていない自由料金の方が高くなるといった逆転現象も起きている[22]。

2.3 電力市場について

電力の自由化の進展にあたり、発電事業者と小売電気事業者の間で電力の取引が必要となる。特に新規参入した小売事業者においては、その大半が自社発電所を保有していないため卸電力を取り扱う電力市場が必要となる。このように、発電事業者と小売電気事業者間の電力の売買を行う場として、電力市場の整備が進んでいる。本項では、各国における電力市場の成り立ちと仕組みについて述べていく。なお、日本の電力市場である JEPX については別に次の項で説明を行う。

2.3.1 欧州における電力市場

欧州における電力網の特徴として、相互接続が進んでいることがあげられる。EU は電力の相互接続目標を設定しており、国内で生産した電力の 15%以上を近隣諸国に送電できるよう、EU 加盟各国に送電網の整備を義務付けている[23]。このように、欧州では電力網の相互接続が進展しているため、電力市場も国ごとに存在するのではなく、欧州全体を取引市場とした電力市場が形成されている。ノルドプールや EXAA 等複数の電力市場が存在しているが、その中でも取引量が最大となっている EPEX について

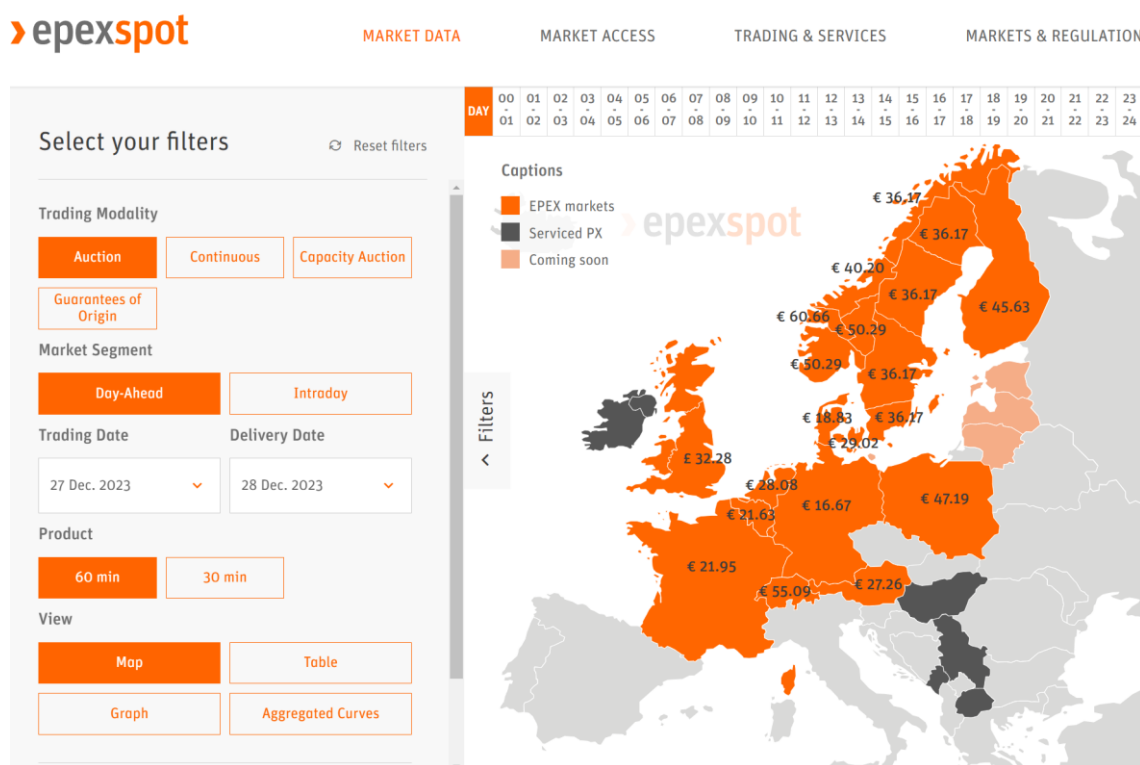


図 2-6 EPEX の取引エリアと価格[24]

本論文では取り扱うこととする。EPEXはドイツを中心とする欧州最大の電力取引市場で、13 か国をカバーしている。図 2-6 に EPEX のカバーするエリアと取引状況を示す[24]。図 2-6 に示すように、EU の広範囲にわたって市場を形成していることがわかる。図 2-6 が示す通り、バルト三国(リトアニア、ラトヴィア、エストニア)においても取引が開始される予定であり、今後取引国も増加していく。

EPEXの取引量は年々増大しており、ドイツ、オーストリア、ルクセンブルクにおける電力消費量に占める EPEX スポット市場のシェアは 2017 年には 50%に達している[25]。EPEX では二つの商品が取引されている。一つが Day-Ahead Market であり、前日市場を意味する。この前日市場においては、1 時間ごとの商品と、30 分ごとの商品(イギリスのみ)が取引されている。前日市場においては、取引日前日の 12:00(CET)までに入札が必要であり、入札結果の公表は 12:57(CET)以降となっている。なお、EPEX の前日市場は欧州全体の前日市場取引量の約 45%を占めている[26]。この前日市場がメインの取引市場となっており、EPEX 全体の取引量の約 87%を占めている[25]。もう一つの市場が Intraday Market であり、時間前市場を意味している。前日市場で取引できなかった分、あるいは需給見通しの変化で過不足が発生する場合に電力の取引を行う市場である。1 時間単位、30 分単位、15 分単位の商品が取引されており、実需給の 30 分前まで入札が可能であるが、一部のエリアでは 5 分前まで入札が可能である。EPEX の時

間前市場の取引量は、EU 全体の時間前市場の取引量の約 50%を占めている。図 2-7 に EPEX の取引の概要を示す。図 2-7 が示すようにメインの市場は前日市場であり、時間前市場は需給のバランスを時間前に調整する補助的な市場となっている。

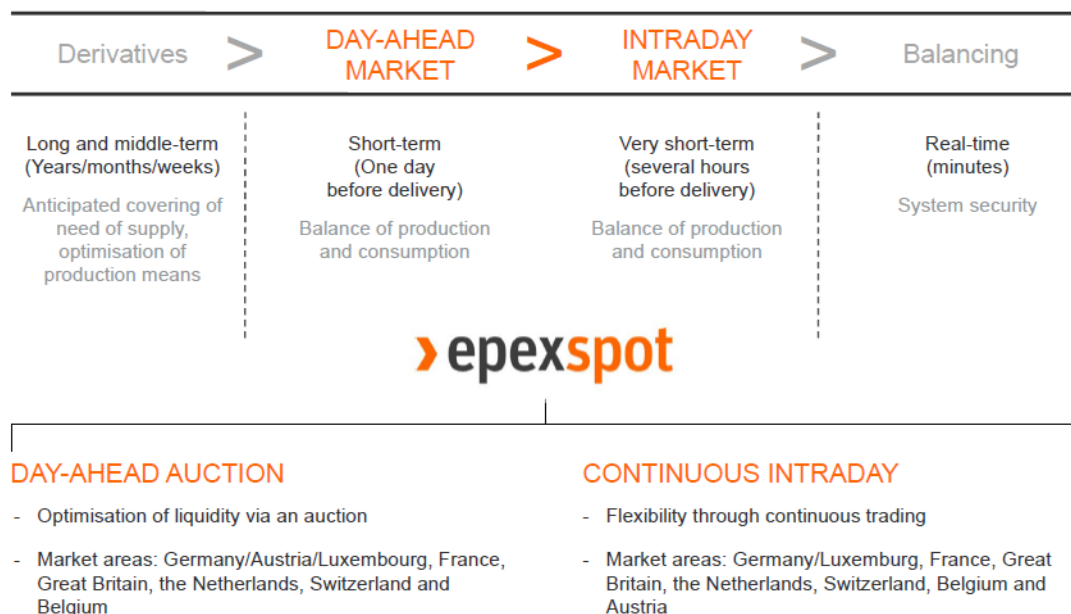


図 2-7 EPEX の取引における概要[25]

EPEX における取引の特徴として、マイナス価格が許容されている点にある。図 2-8 にマイナス価格が発生した場合の EPEX 前日市場価格を示す[27]。2008 年まではマイナス価格は存在せず、供給過多に陥った場合は 0 円で電力が取引されていたが、再生可能エネルギーの普及に伴い、市場参加者にも需給バランスの調整が求められる中で、不要な電力を市場に出回らせたくないといった目的でマイナス価格が導入された。マイナス価格の導入により、発電側はマイナス価格の発生時に発電を控えるようになり、買い手側はマイナスの時間帯に購入すると電気を購入したうえでお金までもらえてしまうわけであるので、その間に電力需要が発生させたい。そのため、マイナス価格は供給を下げる作用と需要を上げる作用があるため、需給バランスの調整が可能であるといったものである。実際に、休日などで電力需要が少なく、快晴で太陽光発電量が多く、風も強くて風力発電も多いような日にマイナス価格は発生している。2023 年 5 月におけるマイナス価格の発生率は、ドイツ、フランス、オランダ、デンマークでそれぞれ 4.4%、3.4%、6.6%、4.7%となっている[28]。それでは、マイナス価格になった場合に、発電事業者がどのように利益を上げるのかについて説明する。近年、再生可能エネルギーの導入促進のために、FIT 制度から FIP 制度への転換が進んでいる。なお、FIT 制度、FIP 制度の詳細については後述する。欧州における FIP 制度では①デンマーク方式と②ドイツ方式の二つが採用されている。デンマーク方式においては、

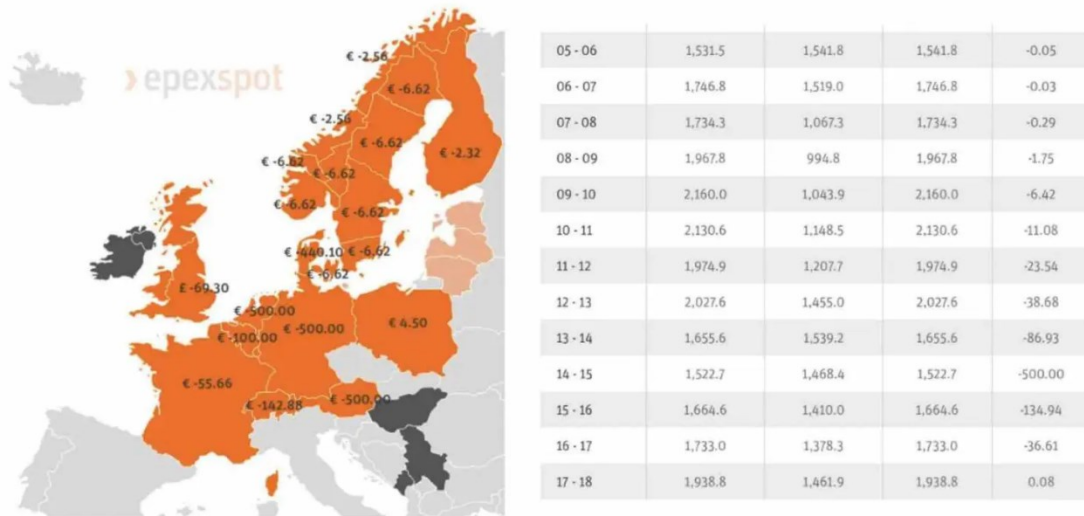


図 2-8 マイナス価格が発生した場合の EPEX 前日市場価格[27]

市場価格が負になった場合には FIP 交付金が付与されない一方で、ドイツ方式においては市場価格が負になっても FIP 交付金が付与される。そのため、ドイツ方式を採用している国においては、たとえ市場価格が負になっても市場価格+FIP 交付金が正である間は発電を続ける。そのため、マイナス価格が存在するといった理由がある。しかしながら、火力発電等の電源は完全に発電を停止することができず、マイナス価格で売電しなければならない。また、停止にも費用がかかるため、停止、起動を考慮したうえで発電所の稼働を検討する必要がある。このように、マイナス価格が続くと長期的な発電所への投資が委縮してしまうため、将来の供給力を確保するための容量市場の導入が進んでいる。

2.3.2 アメリカの電力市場

次に、アメリカの電力市場について説明する。先述の通り、アメリカにおいては電力の自由化の進展が州ごとに異なるといった特徴がある。そのため、電力市場についても複数の電力市場が存在している。図 2-9 にアメリカにおける電力市場の一覧を示す [29]。このように地域ごとに複数の市場が存在していることがわかる。このうち、米国内で比較的早くから電力の自由化が進んだ北東部の RTO である PJM について説明を行う。アメリカにおいては、電力の自由化が進んだ 1990 年代後半に電気事業者から送電システムの運用機能が分離され、ISO や RTO が中立的な送電事業者として設立された。電力市場の運営もこの RTO、ISO が行っており、先述の PJM もこの RTO である。ISO は独立系系統運用機関と呼ばれ、送電網の所有権は電力会社に残したまま、送電網の運用、管理を行う電力会社から独立した組織である。ISO は管轄した域内の電力需給バランスを調整する責務を負っている。一方で、RTO は ISO の範囲を広域化したもの

であり、複数にまたがって事業を行うものである。図2-9が示す通り、PJMも複数の州で広域的に事業を行っているため、RTOの一種である。PJMはその名の通り、ペンシルバニア州、ニュージャージー州、メリーランド州の三つの州から発足され、現在ではデリウェア州やイリノイ州など近隣の州でも事業を行っているRTOである。

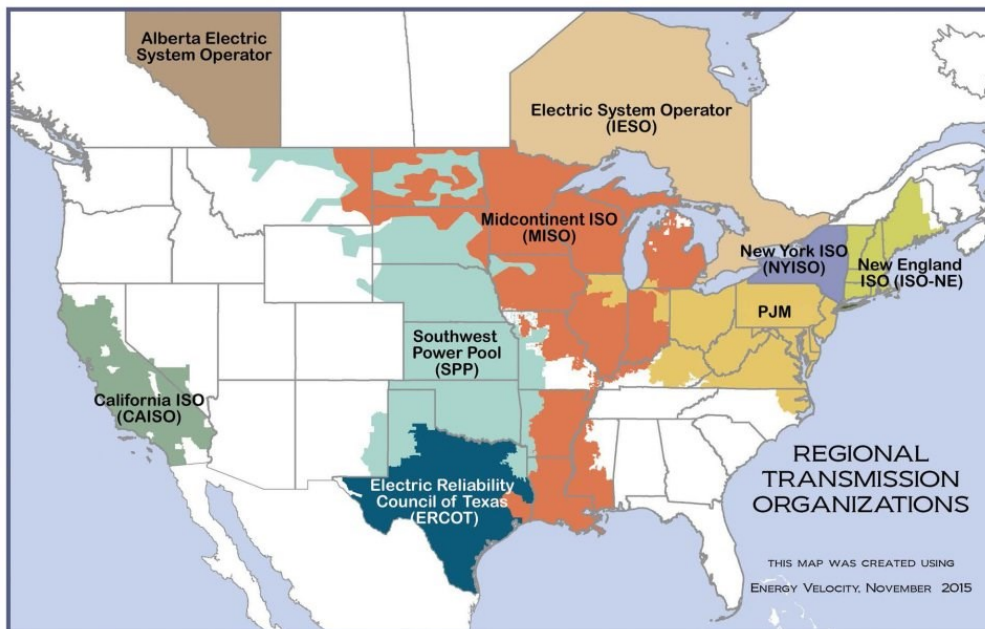


図 2-9 米国の電力市場[29]

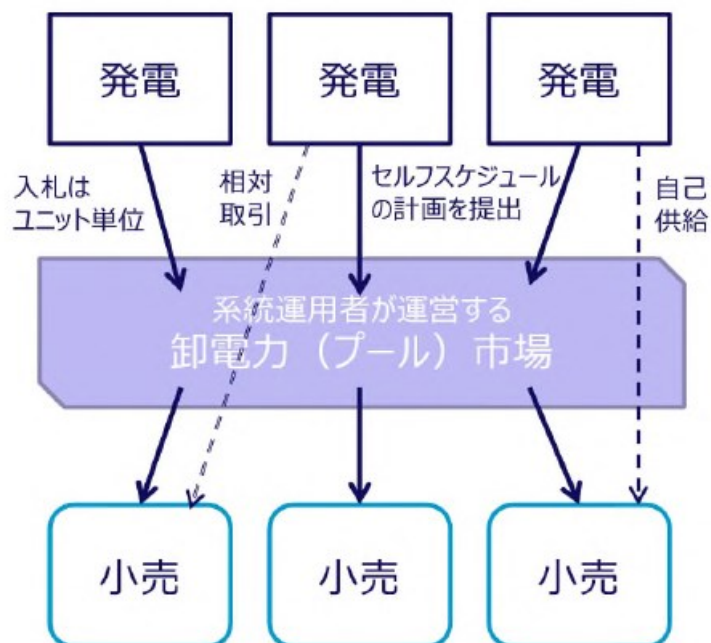


図 2-10 米国のプール型の電力市場[30]

PJMの卸電力市場では、卸電力を取引するための前日市場、リアルタイム市場といったエネルギー市場、周波数調整や予備力を調達するためのアンシラリーサービス市場、地点別の価格変動リスクをヘッジするための金融的送電権市場、供給力確保を目的とする容量市場が運営されている。PJM地域の系統を利用する事業者はPJMが運営する市場に入札するか、前日までに自社供給あるいは相対契約に基づいた計画をPJMに提出する必要がある。図2-10にそのイメージ図を示す[30]。2013年のデータでは、その比率は、スポット取引が約24%、自社供給が約66%、相対契約が約11%となっている[31]。米国の電力市場の取引の流れは欧州と異なる。図2-11に取引の流れを示す[30]。前日市場の役割については欧州と変わらず、翌日に取引される電力の売買のための市場であり、入札締め切りは前日の11時である。その後の流れが欧州とは異なり、前日市場での過不足、需給予測の変化による過不足についてはリアルタイム市場で取引される電力を用いて調整される。リアルタイム市場は時刻ごとに5分間隔で実行され、前日市場よりも少ない量の電力が取引される。欧州の時間前市場とことなり、リアルタイム市場においては系統運用者が、瞬動予備力を持つ発電所をあらかじめ入札で募集しておく。実際の需給断面になったら、応札したものの中から価格の安い順に、必要量を満たすまで給電指令を出す。追加給電指令された電源のうち、最も高い入札価格が「リアルタイム価格」となり、精算は事後的に行われる。そのため、時間前市場では実需給の前に価格が決定されていたが、リアルタイム市場では実需給の後に価格が決定されるといった特徴を持つ。このように、米国の電力市場は欧州と一部異なる電力市場構造となっている。

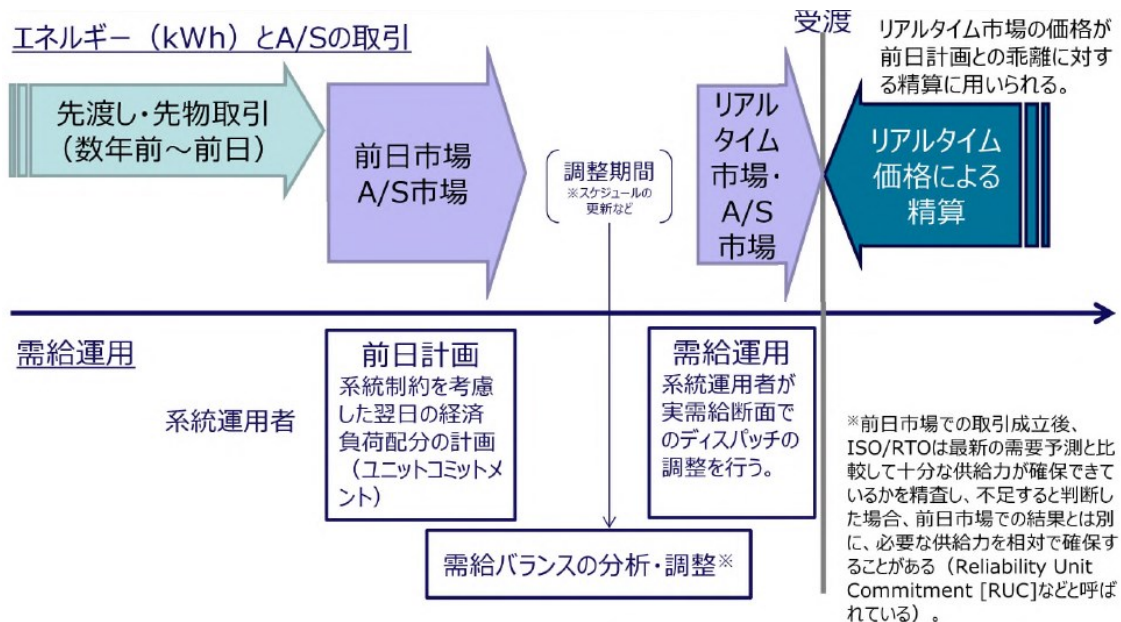


図 2-11 米国の卸電力市場の取引の流れ[30]

2.4 日本における電力市場

このように、電力自由化に電力市場は必要不可欠であり、電力自由化が進んでいる各国において電力市場が形成されている。本項においては、日本における電力市場である JEPX に着目し、JEPX についての説明を行う。

2.4.1 JEPX の概要と商品

先述の通り、日本においては 1995 年に電気事業法改正を皮切りに順次電力の自由化が進んでいった。電力の自由化にあたり、小売電気事業者と発電事業者の間で電力の取引の場が必要となり、2003 年に日本で唯一の電力市場である JEPX が設立された。JEPX で取引を行うためには会員登録が必要であり、2023 年 12 月時点の取引会員数は 294 社となっている[28]。電力自由化の対象が順次拡大されていくのにもとない、JEPX の取引量も年々増加しており、2021 年 12 月時点で、JEPX における取引量が日本の電力需要に占める割合は 41.5%となっている[33]。また、図 2-12 に JEPX の主要な市場であるスポット市場の取引量が日本全体の電力需要に占める割合を示す[34]。図 2-12 が示す通り、JEPX のシェアは年々増加していることがわかる。特に、2016 年の小売全面自由化以降は、特に JEPX のシェアが急激に増加していることがわかる。

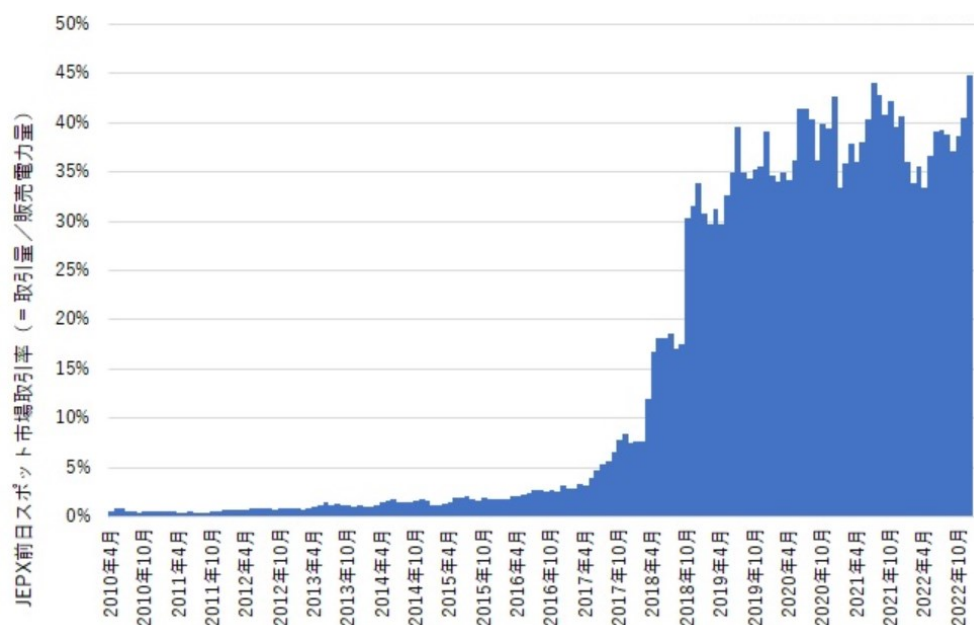


図 2-12 JEPX のスポット市場取引量が日本全体の電力需要に占める割合[34]

卸電力市場		期間	名称	特徴	目的	取引比率	
卸電力市場	数年～数日	↓	先物市場 (新設予定) 【TOCOM】	<ul style="list-style-type: none"> 価格変動リスクをヘッジする場 スポット市場とリンクし、将来の価格指標性を作成 	経済性	リスクヘッジ	—
			先渡し市場 【JEPX】	<ul style="list-style-type: none"> 現物のみ取り扱い 自社電源・相対取引の補完的役割だが、取引量は僅か 受渡期間が同一であれば、先物と同一になる筈 	経済性	リスクヘッジ	0.1% 未満
	↓	前日	スポット市場 【JEPX】	<ul style="list-style-type: none"> 一日前市場 現状の市場取引の中心 経済性を重視した調達 自社電源・相対取引の余剰/不足分を当該市場で取引 	経済性	リスクヘッジ	95% 以上
			1時間前市場 【JEPX】	<ul style="list-style-type: none"> インバランス(調達量の過不足)の調整 経済性の追求 取引の中心はスポット市場であるため、スポット市場より活況させることは目指さない(経産省) 	経済性	リスクヘッジ	5% 以下

図 2-13 JEPX での主要な取引商品の一覧[35]

先述の通り、欧米においても複数の種類の電力市場が運営されているが日本の電力市場である JEPX においても複数の市場が準備されている。図 2-13 に JEPX での主要な取引商品の一覧を示す[35]。JEPX では先渡し市場、スポット市場、1時間前市場と呼ばれる商品が取引されており、欧州と同一の市場構造となっている。先渡し市場においては将来的に取引される電力の取引が行われている。リスクヘッジを主要な目的としており将来的に電力価格の高騰、下落が起きても問題がないようにあらかじめ電気の取引を行っておく市場となっている。3年前から3日前まで入札が可能で、週間24時間型、週間昼間型、月間24時間型、月間昼間型、年間24時間型の5つの商品が取引されている。先渡し市場においては、株式市場と同様にザラ場取引が導入されており、売り手と買い手双方の条件がマッチした場合に約定となる。2022年度における先渡し市場における取引量は0.2億kWhとなっており、取引量は限定的であり、さらなる市場の活性化が求められている[36]。JEPXの主要な市場となっているのがスポット市場である。スポット市場は前日市場や一日前市場ともよばれ、取引日の前日に取引日に受け渡しを行う電力の取引を行う。スポット市場においては30分を一区切りとして取引が行われるため、一日当たり48コマの商品が存在する。前述のように、スポット市場が取引の中心となっており、本研究もスポット市場価格の予測を目的としている。そのため、スポット市場の詳細については後述する。次に、1時間前市場について説明する。1時間前市場においては、スポット市場での取引終了後から実需給の1時間前までの間に生じる計画値とのずれを調整するための市場である。あくまでインバランスの調整を目的とした市場であり、2019年度においてはJEPX全体の取引量のうち約0.84%を

占めている[37]。時間前市場の開場時刻は受け渡し日の前日 17 時で、実需給の 1 時間前まで入札が可能である。また、取引はスポット市場と同様に 30 分単位で行われる。先渡市場と同様に、ザラ場取引が導入されており、売り手と買い手双方の条件がマッチした場合に約定となる。また、JEPX ではほかの市場として、ベースロード市場と非化石価値取引市場も開設されている。ベースロード市場とは、その名の通り、ベースロード電源からの電力の取引を行うための市場である。ベースロード電源とは、発電コストが比較的低廉で、安定的に電力を供給できる電源のことで、石炭火力発電や原子力発電などがこれに該当する。ベースロード電源は安定的に一定の出力での運転が可能だが、出力の大幅な調整は得意ではない。そのため、ベースロード電源が昼夜問わず一定の電力を生み出し、石油火力や LNG 火力、揚水発電等で出力の変化に対応している。図 2-14 にベースロード電源の役割のイメージ図を示す[38]。ベースロード電源は比較的安価であり、ベースロード電源の確保が小売電気事業者にとって重要となる。しかしながら、ベースロード電源は初期投資が高くベースロード電源を所有しているのはほとんどが旧一般電気事業者である。そのため、新電力がベースロード電源由来の電力を調達するのは非常に難しく、参入のハードルになっていた。そこで、2019 年にベースロード電源由来の電力のやり取りを行うベースロード市場が開設された。ベースロード市場においては、一定の発電規模(200 万 kW 以上)の最大出力を有する事業者に対し、ベースロード市場への供出が求められている[39]。取引の規模は限定的であり、2021 年 12 月における日本の電力需要に占めるベースロード市場の取引量の割合は 0.4%となっている[33]。取引は年に 4 回行われており、2022 年度においては 1 月、7 月、9 月、11 月の 4 回取引が行われている。次に非化石価値取引市場について

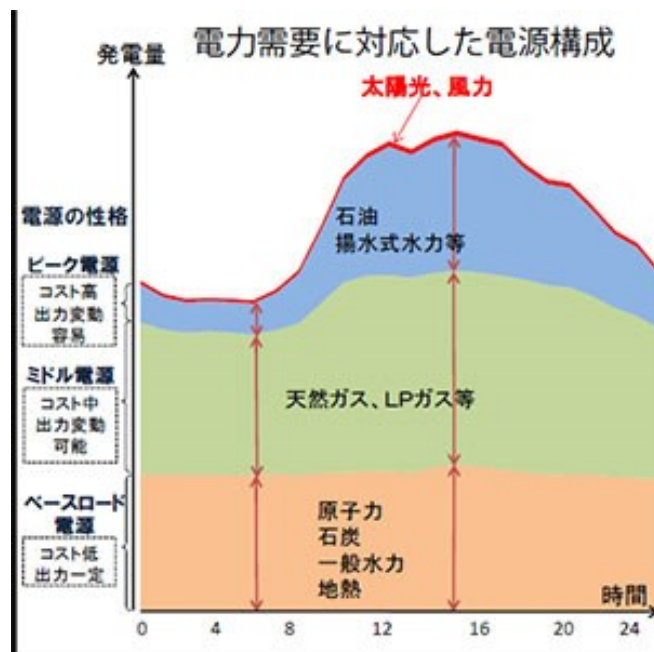


図 2-14 ベースロード電源のイメージ[38]

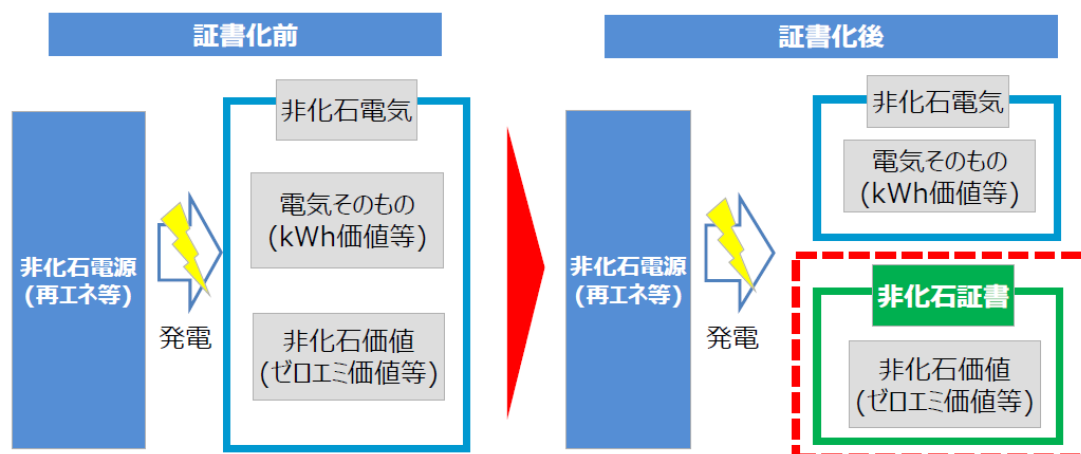


図 2-15 非化石価値の取引イメージ[40]

説明する。非化石価値取引市場においては非化石電源を用いて発電された電力の非化石価値を非化石証書として取引する市場である[40]。図 2-15 に示すように、電気そのものと、非化石価値を切り分けて取引を行い、非化石価値分を取引するのが非化石価値取引市場である[40]。RE100 等の再エネ電力への需要家ニーズの高まりに対応するために 2021 年に開設された。非化石証書を購入することで、需要家は電力の使用に伴い CO₂ を排出していないと対外的に表明することができる。企業に対し、今後も使用電力の非化石化が要求されており今後も取引量の増大が期待される市場である。

2.4.2 JEPX のスポット市場について

次に JEPX のメインの市場となっているスポット市場について説明する。スポット市場は前述の通り、取引日の前日に取引日に受け渡しを行う電力の取引を行う。JEPX の市場の中で最も取引量の多い市場で、2019 年度においては JEPX 全体の取引量の 99.14%を占めている[37]。取引日前日の 10 時までに入札が必要で、価格の決定は「シングル・プライス・オークション」という方式で行われる。シングル・プライス・オークションにおいては、入札価格に関係なく、約定価格で取引が行われる。一日に 48 コマ分の商品が設定されているため、一日に 48 個の価格が決定され取引が行われている。価格については 0.01 円/kWh 単位で入札が可能で、最低取引量は 1 コマ当たり 500 kWh となっている。そのため、スポット市場の最低価格は 0.01 円/kWh である。スポット市場においては、システムプライスと呼ばれる全国の売買から算出した指標価格と、9つのエリアごとに決定されるエリアプライスが存在する。エリアプライスの9つのエリアは、北海道、東北、東京、中部、北陸、関西、中国、四国、九州である。システムプライスはあくまでも指標価格であるので、実際に取引されるのはエリアプライスである。このエリアプライスの特徴として、エリアごとに異なった価格をつけること

である。図 2-16 に 2023 年 5 月 25 日における各エリアのエリアプライスの一覧を示す [41]。このように、エリアごとに異なった価格となっていることがわかる。しかしながら、図 2-16 を見ると、いくつかのエリアにおいては似たような価格の傾向があることがわかる。



図 2-16 2023 年 5 月 25 日のエリアプライス [41]

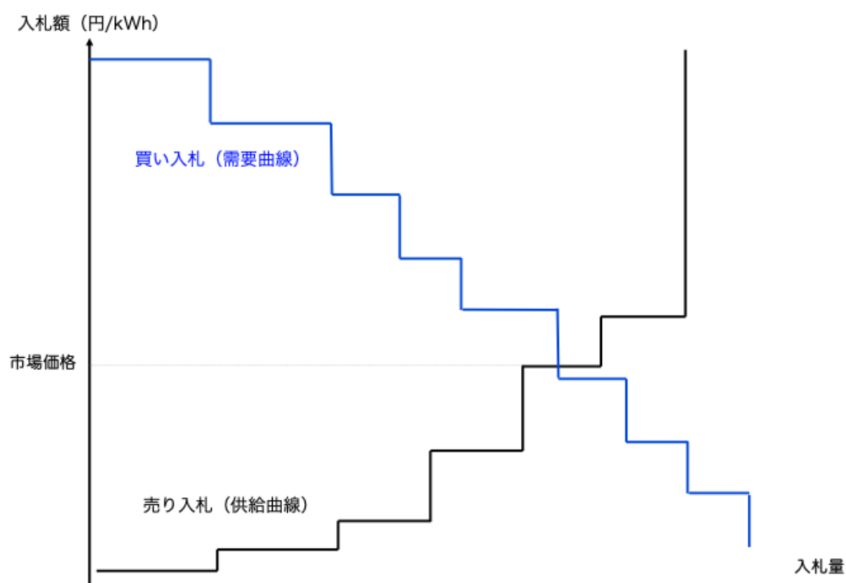


図 2-17 需給曲線の例 [42]

この理由について説明する前に、スポット市場の価格の決定プロセスについて説明する。スポット市場の価格は需要と供給のバランスで決定される。図 2-17 に需給曲線の例を示す[42]。需要側は買い入札量と希望価格を、供給側は売り入札量と希望価格を入札する。それらから、図 2-17 のような需給曲線を作成し、需要と供給の交点が、実際の市場価格となる。需要が供給に対し多い場合の価格は高騰し、供給が需要に対し多い場合の価格は下落する。そのため、スポット市場価格は需要と供給のバランスで決定されるといえる。約定処理にあたり、この需給曲線をまずは全国で作成する。しかしながら、連系線の容量の制約などによりエリア間での電力の融通には限界がある。そのため、エリアごとに供給信頼度の計算をおこない、基準から不足しているエリア、過剰なエリアを確認する。その際、基準から不足しているエリア、過剰なエリアについては、市場分断を行う。さらに、市場分断の際に落札結果の供給信頼度が同等の場合、同じブロックとする。その後、市場分断のブロックごとにエリアプライスを決定する。このブロックの決定には、連系線の制約が関係してくる。特に、東京—中部間の周波数変換所、北海道—本州間、中国—九州間の連系線の容量が限られているため、この区間を境に市場分断が発生する回数が多い。図 2-18 に 2017 年 7 月から 12 月の市場分断発生率を示す[43]。この図が示す通り、上記の区間で市場分断が多発していることがわかる。そのため、エリアプライスについても、市場分断されたそれぞれのエリアで約定処理が行われる。そのため、エリアプライスについてはおおまかに、北海道エリア、東北—東京エリア、中部—関西—北陸—中国—四国エリア、九州エリアの 4 つのエリアごとに約定処理が行われることが多い。図 2-16 においてもそのような傾向があることがわかる。また、JEPX スポット市場価格予測についての先行研究においても、このエリア分けで市場価格予測が行われている[44]。

各地域間連系線の月別分断発生率

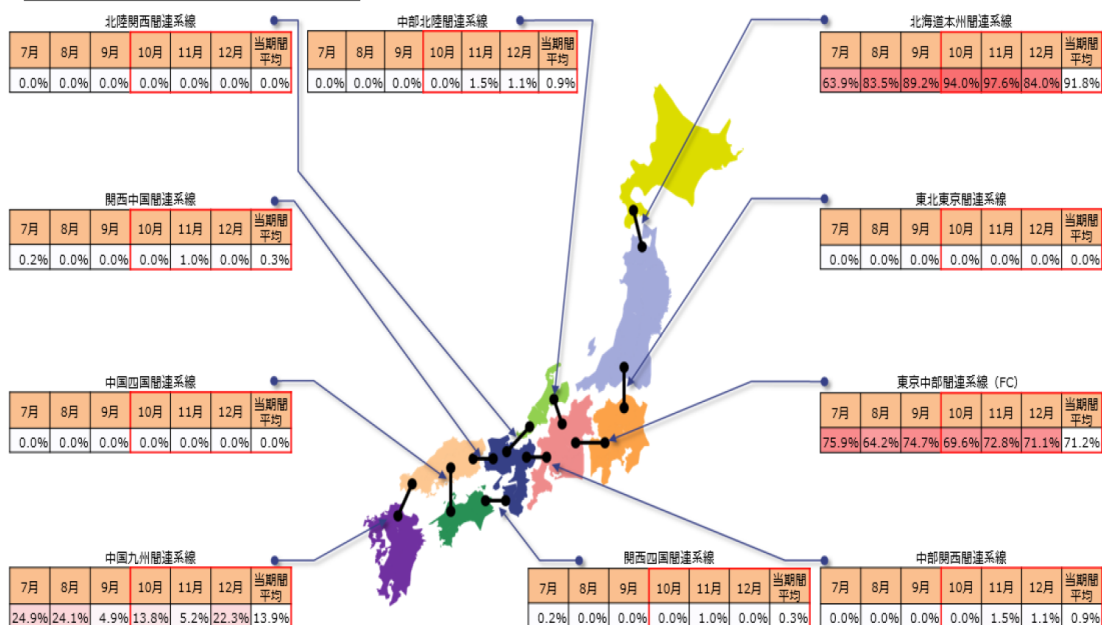


図 2-18 市場分断の発生率[43]

2.4.3 JEPX のスポット市場価格の変動について

前項において、スポット市場価格はエリアごとに決定され、需要と供給のバランスによって決定されることを述べた。電力の需要と供給は時々刻々と変化しているため、スポット市場価格についても時々刻々と変化する。図 2-16 においても、時間帯により価格が大きく異なっていることがわかる。一般的に、昼間の時間帯については快晴時の場合、太陽光発電の余剰により供給過多になり、価格は下落する。また、夜間においては電力需要が少ないので、価格は下落する。一方で、朝夕の時間帯については太陽光の発電量が少なく、需要が多いので価格は高騰しやすい。図 2-16 をみても、おおむねそのような傾向がある。また、休日と平日を比較しても休日の方が工場やオフィスが稼働せず電力需要が少ないので価格は下落する。しかしながら、日射量や気温等によりこのような傾向に当てはまらない場合もある。図 2-19 に 2021 年 5 月のある平日における九州エリアプライスを示す。図中の赤丸がその一日における最高価格の時間帯を、青丸がその時間帯における最低価格の時間帯を示す。図 2-19 が示すように、同じ月の平日においても価格の傾向が大きく異なることがわかる。これは、前述の通り需要と供給のバランスが時々刻々と変化するためである。このように、スポット市場の価格は需要と供給のそれぞれの要素により変化するため、本論文の目的にあるように利益の最大のために予測を行うことが重要となる。



(a) 2021年5月11日



(b) 2021年5月17日



(c) 2021年5月21日

図 2-19 2021年5月の平日における九州エリアプライスの例

2.5 GISの概要

先述の通り、JEPXのスポット市場価格は需要と供給のバランスで決定される。筆者は需要と供給を表す要因の一部が地理情報と関連することに着目してスポット市場価格予測システムの構築を行った。本項においては、研究で使用したツールで地理的な

情報を取り扱うことのできるGISについて説明を行う。

2.5.1 GISの特徴

GISとは、日本語では地理情報システムの意味であり、地理的位置を手掛かりに、位置に関する情報を持ったデータの管理、加工、分析を行うツールであり、現実世界をPC上にモデル化することができる。様々なGISソフトウェアが普及しているが、本研究においてはEsri社のArcGISを使用している[45]。ArcGISは世界で最も普及しているGISであり、様々な分野において使用されている。GIS機能も豊富であり、データの取得から管理、解析までの様々なツールがそろえられている。図2-20に本研究で使用しているArcGIS Proの画面例を示す。図2-20の右側にジオプロセッシングウィンドウがあるが、この中に様々なツールが含まれている。このツールを使用して様々な地理情報に係る処理が可能である。たとえば、「Spatial Analyst」ツールには内挿処理や抽出処理、日射量解析などに関するツールが含まれている。また、画面左側のコンテンツウィンドウには現在アクティブなデータを示している。解析に使用する地理データの管理がこのウィンドウから可能である。画面の中央は解析に使用するマップを示しており、解析の結果やデータの確認を中央のウィンドウから行うことが可能である。

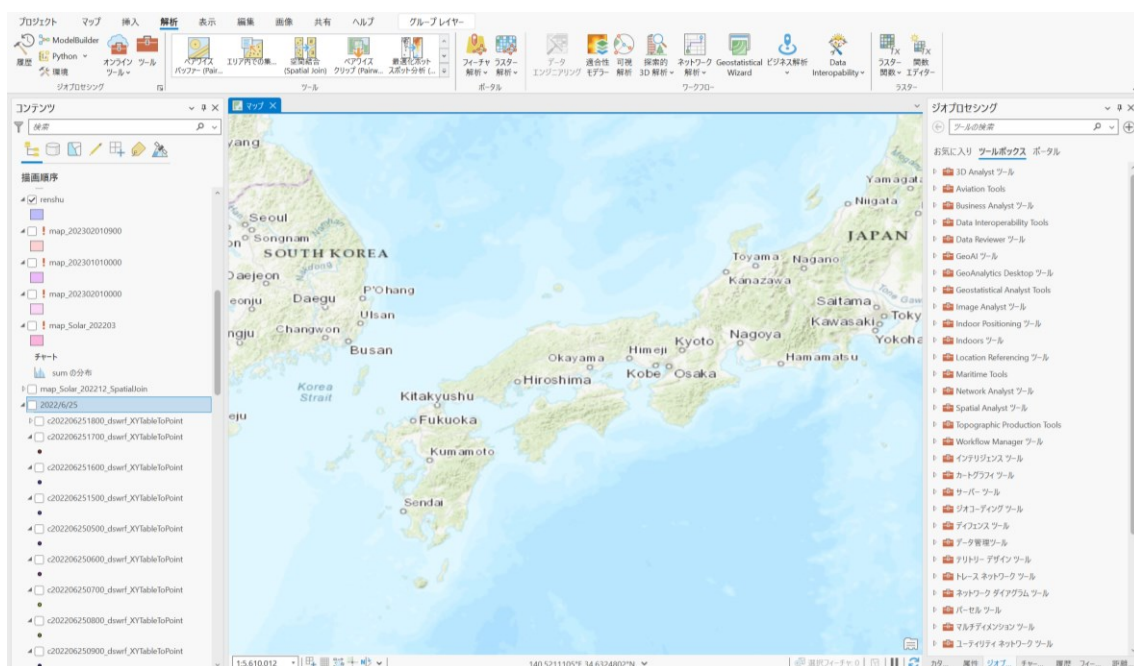


図 2-20 ArcGIS Pro の画面の例

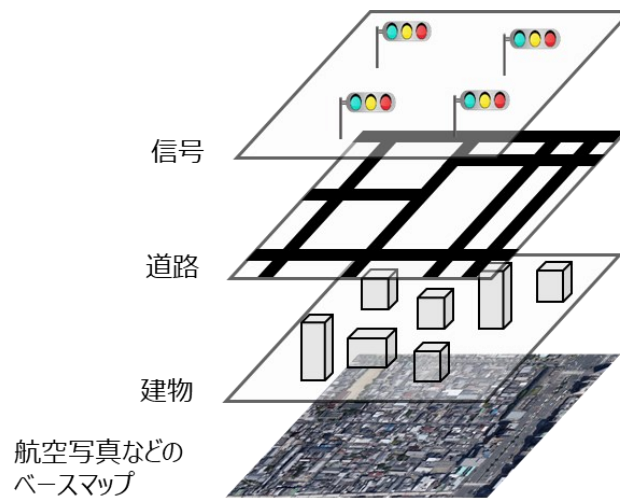


図 2-21 レイヤ重ね合わせによる現実世界のモデル化の例

次に、GISでのデータの管理方法について述べる。先述の通り、GISはPC上への現実世界のモデル化が可能である。現実世界のモデル化にあたり、1データを1枚のフィルムと見立てたレイヤを利用する。そのレイヤを複数重ね合わせることで現実世界をモデル化する。図 2-21 にそのイメージ図を示す。このイメージでは、航空写真などのベースマップの上に建物や道路、信号の情報をレイヤごとに分けて重ね合わせることで現実世界をモデル化している。このように、GISはレイヤを用いて現実世界をモデル化することができるが、そのことで、以下の2つの特徴を有する。

- ① 地図上でデータの分布状況を把握することができる
- ② 地図上で他のデータとの関係性を把握することができる

GISでは異なるスケール・時間・形式で得られる空間データをレイヤ別に管理することで、現実世界をモデル化し多様な情報を一挙に扱うことができる。

2.5.2 GISで利用するデータとその特徴

次に、GISで使用するデータの種類について説明する。GISで使用するデータは、現実世界の構成要素をどのように抽象化して表現するかによって、ラスタ型とベクター型の2種類に大別される。

ラスタ型は図 2-22 のように空間を連続的に変化する(境界が明確でない)現象を表現するのに適したデータ形式である。例としては、航空写真や高度データ(DEM : Digital Elevation Model、DSM : Digital Surface Model)などが該当する。本研究においては、後述する内挿処理後の気象予報データや市町村ごとの人口分布データ、市町村ごとの太陽光発電設備導入量データなどが該当する。

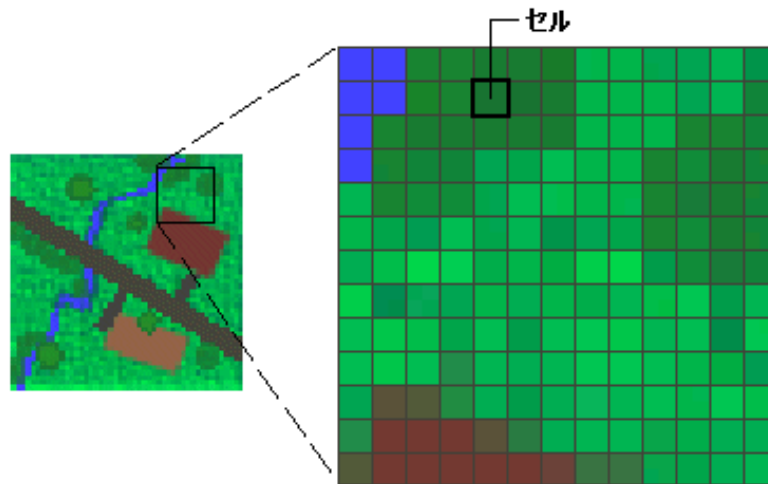


図 2-22 ラスター型の例[46]

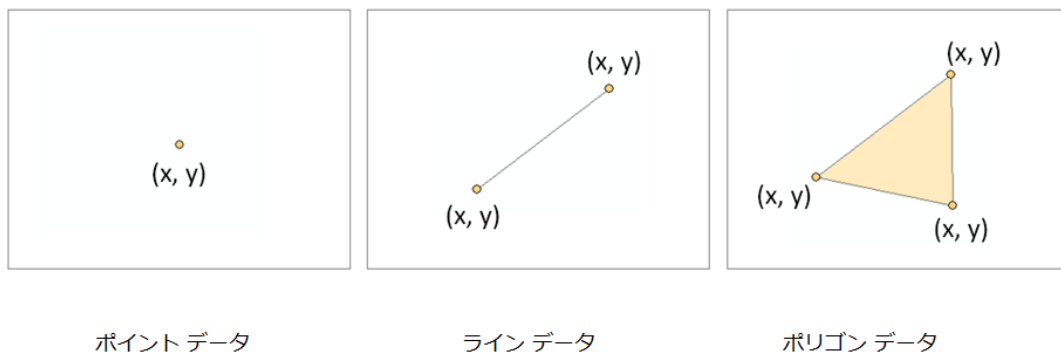


図 2-23 ベクター型の例[47]

もう一つのデータ形式であるベクター型について説明する。ベクター型は、位置や境界が明確な地物を表現するのに適したデータ形式である。ベクター型データは図 2-23 のように、ポイント(点)、ライン(線)、ポリゴン(面)に大別され、個々の事物はフィーチャと呼ばれる。本研究においては、気象予報のポイントデータがベクター型に該当する。

2.5.3 GIS と Python

本研究においては、後述の通り GIS を使用して気象データと関連するデータを組み合わせることによりスポット市場価格と関係の深い説明変数の導出を行う。説明変数の導出にあたり大量のデータの処理が必要となる。大量のデータ処理においては一つのデータを手作業で処理するのは現実的ではない。そこで、GIS 上での処理を自動で行う必要がある。ArcGIS では ArcPy を使用することができる。ArcPy とは、Python スクリプトから地理的データの解析、変換、管理などを実行できる関数やクラスの集

まりである。ArcPy の利用により、ArcGIS に用意されているジオプロセシングツールを Python スクリプトから実行することができる。Python とは、汎用的なプログラミング言語であり、様々なアプリケーションやシステム管理ツールとして幅広く使用されている。図 2-24 に ArcPy のイメージ図を示す[44]。ArcPy の利用により本研究で使用するような繰り返し作業の自動化が可能であり、データ処理の大幅な時間短縮が可能である。また、Python スクリプトの利用により、結果を csv として出力することができる。Python は機械学習の分野でも利用されている言語であり、本研究においても機械学習でスポット市場価格の予測を行う。そのため、データの取得から、GIS 上でのデータ処理、学習用データや予測用データの作成、機械学習の実行まで一つの言語でプログラミングを行い結果の出力が可能である。



図 2-24 ArcPy のイメージ図[48]

2.6 使用する気象予報データ

本研究においては、気象予報データを活用する。本項においては使用する気象予報データとその処理方法について説明する。本研究においては気象業務支援センターが配信する気象予報データを使用する。気象業務支援センターとは、質の高い気象情報サービスの実現を目指し、官・民の役割分担による総合的な気象事業の展開を図るため、気象庁と民間気象事業を結ぶセンターとしての役割を担うべく設立された法人である[49]。気象庁の保有する各種気象情報の提供や気象予報士試験の実施等を行っている。本研究においては、気象業務支援センターの提供する GSM を気象予報データとして使用する。GSM の詳細については後述するとして、ここでは気象業務支援センターで提供される気象予報データの特徴について述べる。気象業務支援センターにおいては複数の気象予報データが配信されており、GSM、MSM、MEPS、LFM などが配信されている。これらのデータは GRIB2 とよばれるバイナリーデータとして配信される。データの配信については、本研究で使用するファイル形式データについては、FTP(put)、SFTP(put)方式で配信される。また、このファイル形式データについては GPV と呼ばれる格子点値データとして配信される。GPV はある決められた間隔ごとに

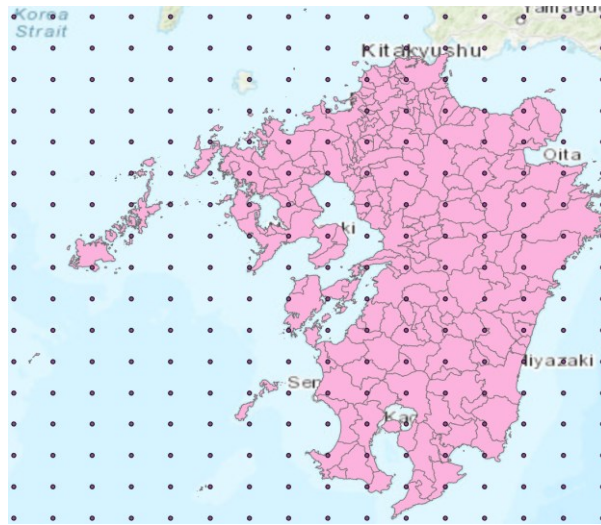


図 2-25 GIS 上での気象予報値の例

気象予報値が存在しており、その格子間隔は使用する気象予報データの種類によって変わる。図 2-25 に GIS 上に気象予報データを載せた際の例を示す。このデータは GSM であり、格子間隔は約 24 km となっている。

気象業務支援センターが提供する気象予報データの特徴として気象予報データが非常に安価に利用できることがあげられる。図 2-26 に気象予報配信の月額と比較を示す。なお、比較対象として独自の気象予報を提供している KCCS API を利用した[50]。KCCS API では、気象予報やリアルタイム気象観測データを独自に提供している。この KCCS API を気象業務支援センターで提供している GSM と同じデータを同じ配信頻度で提供してもらうとすると、月額 612,000 円かかる一方で、気象業務支援センターから GSM を配信してもらうとすると、基本負担金も含め月額 11,400 円で済む。このように、気象業務支援センターから配信される気象予報データは非常に安価な気象予報となっている。このことにより、実際にスポット市場価格を使用する際のランニングコストの大幅な低減につながる。なお、本研究においては、京都大学生存圏研究所が運営する生存圏データベースによって収集・配布された気象予報データを使用している[51]。京都大学生存圏データベースにおいては、GSM や MSM などの気象予報データが教育研究機関向けに無償で提供されている。本研究においては、このデータを使用し、スポット市場価格予測システムの構築を行う。

基本負担金

これは各配信サービスにおける共通経費を賄うための費用です。
同一機関であっても、複数事業所への配信では、事業所数分の課金となります。

基本負担金	(月額)
1 事業所あたり	4,200円

数値予報

データ名	負担金 (月額)
全球数値予報モデルGPV (GSM全球域)	8,400円
全球数値予報モデルGPV (GSM日本域)	7,200円
メソ数値予報モデルGPV (MSM)	8,400円
メソアンサンブル数値予報モデルGPV (MEPS)	8,400円
局地数値予報モデルGPV (LFM)	9,600円
週間アンサンブル数値予報モデルGPV (日本域データ及び台風アンサンブル数値予報モデルGPVを含む)	8,400円

(a)気象業務支援センター

【合計】

配信サービス	全税込	
	1日 円	1ヶ月 円
[1] 気象予報配信機能		
①気象予報データ配信	20,400	612,000
②天気予報データ配信	0	0
③週間天気予報データ配信	0	0
④衛星指数データ配信	0	0
⑤リアルタイム地上気象観測データ配信	0	0
⑥リアルタイム衛星気象観測データ配信	0	0
⑦船舶用データ配信	0	0
⑧連絡船用データ配信	0	0
⑨海水短時間予報データ配信	0	0
⑩海水15時間予報データ配信	0	0
⑪連絡船用海水短時間予報データ配信	0	0
⑫雷ナウキャストデータ配信	0	0
⑬気象警報データ配信	0	0
⑭短期注意警報データ配信	0	0
⑮過去気象予報データ配信	0	0
⑯Pass Connect機能	0	0
計	20,400	612,000
[2] 気象実績データ配信機能		
気象実績データ配信 基本ポイント (10,000pt/月)	-	0
①気象実績データ配信	0	0
②気象実績データ配信	0	0
③気象実績データ配信	0	0
小計	0	0
[3] 気象データPUSH配信機能		
①気象実績データPUSH配信機能	-	0
②気象実績データPUSH配信機能	-	0
③気象実績データPUSH配信機能	-	0
④気象実績データPUSH配信機能	-	0
⑤気象実績データPUSH配信機能	-	0
⑥気象実績データPUSH配信機能	-	0
小計	0	0
1ヶ月合計		612,000

(b)KCCS API

図 2-26 気象予報配信の月額比較

2.6.1 GRIB2 形式とその処理について

先述の通り、気象業務支援センターから配信される気象予報データは GRIB2 と呼ばれるバイナリーデータである。そのため、配信データから情報を取り出すためにはバイナリーデータをデコードしたうえで使用する必要がある。GRIB2 は世界気象機関が定めるデータフォーマットである。GRIB2 データのフォーマットについては気象庁が公開しており、このフォーマットに沿って復元も可能である[52]。本研究においては、Python のライブラリであり、GRIB2 形式のデコードが可能な pygrib を使用して GRIB2 形式のデータを使用する[53]。pygrib の利用により、データの中から必要なデータだけを取り出すことができる。pygrib では、必要な気象データの種類、範囲、何時間先の予報値かを指定することで、GRIB2 形式のデータのデコードが可能である。pygrib でデコードし、その出力を csv ファイルとして出力する。本研究においては、気温予報データと日射量予報データ、雲量予報データを使用する。また、九州エリアを対象としているため、九州をカバーする緯度、経度を指定しデータのデコードを行った。図 2-27 に pygrib でデコードした日射量予報データを示す。デコードしたデータには、緯度、経度、日射量予報値が格納されている。デコード後のデータに緯度、経度の情報が含まれているため、GIS 上に緯度、経度を指定したうえでデータをのせることができる。GIS 上にのせたうえで、他のデータと組み合わせスポット市場価格予測の説明変数として利用する。

緯度	経度	日射量
50	120	836.9762
50	120.25	836.9762
50	120.5	836.9762
50	120.75	836.9762
50	121	852.2262
50	121.25	852.2262
50	121.5	852.2262
50	121.75	852.2262

図 2-27 pygrib でデコードした日射量データ

2.6.2 GSM の概要

最後に、研究で使用する気象予報データである GSM について説明する。GSM は日本語で全球数値予報モデルであり、地球全体の大気を対象とした数値予報である[54]。ある地点の数日先の予報には、そこから離れた地点の気象も予報に影響してくるため、地球全体の大気を対象とした予報により、長期間の予報を可能としている。そのため、配信時間により最大で 264 時間先までの気象予報が可能である。表 2-1 に予報時間と予報時間間隔を示す[55]。表 2-1 が示すように、初期値により、予報時間、予報時間間隔が異なることがわかる。この表中の初期値とは予報が行われる時間であり、世界標準時で表記されている。GSM は GPV データであるため格子点ごとに予報値が存在する。本研究で使用する日本域の GSM の格子点の間隔は緯度方向が 0.2 度、経度方向が 0.25 度となっている[56]。なお、2023 年 3 月 14 日分の予測から GSM の高解像度化が行われており、高解像度版の GSM の格子点の間隔は緯度方向が 0.1 度、経度方向が 0.125 度となっている。表 2-27 が示す通り、日本域の GSM の地上面の予報値は 1 日に 4 回配信される。また、地上面の日本域 GSM で提供されている気象予報は、海面更正気圧、風（2 要素）、気温、相対湿度、積算降水量、雲量（4 要素）、地上気圧、日射量となっている。なお、風については東西成分と南北成分が、雲量については全雲量、上層雲、中層雲、下層雲が提供されている。なお、日射量については、2017 年 12 月 5 日分から配信が始まっているため、それ以前のデータには日射量の予報値は含まれていない。なお、本研究においては、日本時間 3 時配信分の日本域 GSM を使用し、気温、日射量、全雲量をスポット市場価格予測システムの説明変数として使用する。

表 2-1 GSM の予報時間、予報時間間隔[55]

提供地域	初期値 (UTC)	予報時間	予報時間間隔
全球域	00, 06, 12, 18	0~132 時間	6 時間
	00, 12	138~264 時間	6 時間
日本域 (地上面)	00, 06, 12, 18	0~132 時間	1 時間
	00, 12	135~264 時間	3 時間
日本域 (気圧面)	00, 06, 12, 18	0~132 時間	3 時間
	00, 12	138~264 時間	6 時間

参考文献

- [1] 「電球を発明しなかった」エジソンが成し遂げたこと, 日本経済新聞(2022)
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUD10CWB0Q2A510C200000/>
- [2] がいしの歴史, 日本がいし
<https://www.ngk.co.jp/gaishi-h/chapter3/>
- [3] 三井恒夫, 電気技術史研究への誘い, 電気学会学会誌, 118 巻, 1 号,
pp.38-41(1998)
- [4] 明治維新後のエネルギーをめぐる我が国の歴史/第2節, 資源エネルギー庁
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/1-1-2.html>
- [5] 明治維新後のエネルギーをめぐる我が国の歴史/第3節, 資源エネルギー庁
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2018html/1-1-3.html>
- [6] 舩岡紅実, 経済学から見た電力システム改革の課題①
エネルギー地域経済レポート, 495 巻, p.20(2015)
- [7] 料金設定の仕組みとは?, 資源エネルギー庁(2023)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/fee/structure/pricing/
- [8] 一から学ぶ電力自由化(第一回), 株式会社スターメンテナンスサポート(2019)
<https://www.ecopu.net/724/>
- [9] 電気事業の仕組みを読み解く, 東北エネルギー懇談会(2013)
<https://www.t-enecon.com/cms/wp-content/uploads/2014/06/denki.pdf>
- [10] 発電事業者について, 資源エネルギー庁(2017)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electricity_measures/004/pdf/004shiryo_01.pdf
- [11] 発電事業者一覧(令和5年12月1日時点), 資源エネルギー庁
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electricity_measures/004/list/
- [12] 小売電気事業者の登録申請・届出, 資源エネルギー庁

- https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/summary/entry/
 [13] 登録小売電気事業者一覧(令和5年12月15日時点), 資源エネルギー庁
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/summary/retailers_list/
- [14] 一から学ぶ電力自由化(第三回), 株式会社スターメンテナンスサポート(2019)
<https://www.ecopu.net/769/>
- [15] 平成28年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2017) HTML版,
 第1部, 第3章, 第1節, 資源エネルギー庁(2017)
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2017html/1-3-1.html>
- [16] 野村宗訓(2015), イギリスにおける電力自由化後の実態と課題,
 IEEJ Journal, Vol. 135, No.12
- [17] 八ッ橋武明, ドイツ再生可能エネルギー導入の経緯
 特集エネルギー政策を考える, pp.19-27
- [18] 小笠原潤一, カリフォルニア州電力危機について, pp.1-14
- [19] 原子力百科事典 ATMOMICA, アメリカの電気事業及び原子力産業
https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_14-04-01-06.html
- [20] 一から学ぶ電力自由化(第二回), 株式会社スターメンテナンスサポート(2019)
<https://www.ecopu.net/767/>
- [21] 電力・ガス小売全面自由化の進捗状況について, 資源エネルギー庁(2021)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/064_04_00.pdf
- [22] 大手電力10社、規制料金の上限到達 自由料金との逆転現象で顧客移動も
 産経ニュース(2022)
<https://www.sankei.com/article/20220830-WBKW5FPFGBMP5G3D47EYCDYSXY/>
- [23] 欧州の電力市場展望, PICTET
<https://www.pictet.co.jp/investment-information/market/global-market-watch/20230111.html>
- [24] EPEX 公式サイト, <https://www.epexspot.com/en/market-data>
- [25] Sandrine Wachon, EPEX SPOT Power for Today. Power for Tomorrow (2018)
- [26] 諸外国の卸電力市場における時間前市場及び先渡市場・先物市場に係る調査
 報告書, 三菱 UFK リサーチ&コンサルティング(2021)
- [27] Giles Parkinson, “Crazy world” of EU power – negative prices across western
 Europe, all day in Germany (2023)
<https://reneweconomy.com.au/crazy-world-of-eu-power-negative-prices-across-western-europe-all-day-in-germany/>
- [28] 大林ミカ、川本明、高橋洋、八田達夫, 再エネ提言「負の価格」(2023)

- <https://www8.cao.go.jp/kisei-kaikaku/kisei/conference/energy/20230629/230629energy07.pdf>
- [29] Power Market Structure, United States Environmental Protection Agency
<https://www.epa.gov/green-power-markets/power-market-structure>
- [30] 服部徹, 古澤健, 欧米の卸電力市場の役割・機能について(2022)
電力中央研究所卸電力市場、需給調整市場及び需給運用の在り方勉強会資料
- [31] 遠藤操, 井上智弘, 電力市場の整備が進んだ米国北東部 市場運営者と事業者
に求められる新たな対応
- [32] JEPX 公式サイト,
<https://www.jepx.jp/>
- [33] 第71回制度設計専門会合事務局提出資料, 電力・ガス取引監視等委員会(2022)
https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/071_09_00.pdf
- [34] 統計 電力市場, 自然エネルギー財団
<https://www.renewable-ei.org/statistics/electricitymarket/>
- [35] 伊藤走馬, 電力市場レポート:なぜエリア価格は存在するのか(2019)
<https://energy-shift.com/news/ef83dbe2-cb4d-464d-8293-97da798ddc11>
- [36] 電力先物の活性化について, 経済産業省商品市場整備室(2023)
- [37] 時間前市場の活性化について, 経済産業省(2020),
https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/051_06_00.pdf
- [38] LPガスはミドル電源/エネ基本計画政府案を決定, プロパン産業新聞(2014)
<http://www.sekiyusangyo.co.jp/news/kiji/2711/2711.html>
- [39] ベースロード市場について, 資源エネルギー庁(2022)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/063_04_00.pdf
- [40] 非化石価値取引について, 資源エネルギー庁(2023),
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/seido_kento/pdf/084_03_02.pdf
- [41] 環境市場 HP, <https://kankyo-ichiba.jp/>
- [42] 伊藤公一朗, 電力卸価格高騰の原因と市場設計への教訓(2021)
https://www.rieti.go.jp/jp/special/special_report/130.html
- [43] 先渡市場の活性化について, 電力・ガス取引監視等委員会(2018)
https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/029_05_00.pdf
- [44] 大村愛花, 藤本悠, 林泰弘, 澤敏之, 佐々木浩人, 福山直人, 西野由高, オープン
データに基づく電力スポット市場のエリア価格予測 -複数予測スキームの統合
アプローチの検討-, 電気学会論文誌 B, 141 巻, 5 号, pp.366-373(2020)
- [45] ArcGIS, esri ジャパン, <https://www.esri.com/products/arcgis/>

- [46] GIS 基礎解説 ラスターデータ, esri ジャパン
<https://www.esri.com/gis-guide/gis-datamodel/raster-data/>
- [47] GIS 基礎解説 ベクターデータ, esri ジャパン
<https://www.esri.com/gis-guide/gis-datamodel/vector-data/>
- [48] GIS 基礎解説 ArcPy, esri ジャパン
<https://www.esri.com/gis-guide/arcgis-basic/arcpy/>
- [49] 一般財団法人気象業務支援センターについて, 気象業務支援センター
<http://www.jmbisc.or.jp/jp/aboutus.html>
- [50] KCCS API 公式 HP, <https://www.energy-cloud.jp/>
- [51] 京都大学生存圏研究所, <http://database.rish.kyoto-u.ac.jp>
- [52] GRIB2 データについて, 気象庁 情報基盤部(2021)
- [53] Qiita, pygrib で気象庁の GRIB2 ファイルを読む
<https://qiita.com/kurukuruz/items/6fc0be9efa34a2fd6741>
- [54] GPV・GSM・MSM, 一般社団法人 電力土木技術協会
https://www.jepoc.or.jp/tecinfo/library.php?_w=Library&_x=detail&library_id=327
- [55] 配信資料に関する仕様 No.12501 ～全球数値予報モデル GPV～,
気象庁情報基盤部(2023)
<https://www.data.jma.go.jp/suishin/shiyou/pdf/no12501>
- [56] 全球数値予報モデル GPV (全球域・日本域), 気象業務支援センター
<http://www.jmbisc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>

第3章 GIS利用の説明変数の導出とスポット市場価格予測システムの構築

3.1 まえがき

第2章において、電力市場の概要について述べた。本章においては、日本の電力市場であるJEPXに着目し、スポット市場価格を予測するためのシステムの構築を行う。

第2章で述べた通り、電力市場の価格は需要と供給のバランスで価格が決定される[1]。そのため、スポット市場の価格予測システムの構築にあたり、需要と供給を説明するための説明変数の導出が重要となる。本研究では需要と供給を説明する要素が地理的な情報と密接に関係することに着目し、GISを利用した説明変数の導出を行った。具体的には、対象となる地域全体のエアコンの消費電力量は気温と人口に依存して変化する。例えば、夏場に人口が多い地点で気温が高い場合、エアコンによる消費電力量は大きく増加する。一方、人口が希薄な地域では気温が高くても、消費電力量は大きく増加しない。そのため、人口で加重した気温とスポット市場価格には密接な関係があると考え、「人口気温データ」をGISの利用により導出した。また、太陽光発電の発電量もスポット市場価格と密接に関係がある。そのため、「予測太陽光発電量」をGISの利用により導出した。これら2つのGISを利用した説明変数に加え、スポット市場価格と密接に関係する発電所の停止情報、燃料価格情報、カレンダー情報等を利用し、スポット市場価格予測システムの構築を機械学習により行った。本予測システムにより、高精度にスポット市場価格の予測が可能となった。

3.2 GISを利用した人口気温データの導出

3.2.1 気温とスポット市場価格の関係性

電力の需要要因として様々な要素があるが、エアコンによる消費電力量も電力需要の一つの要因となっている。家庭の年間電力消費量のうちの約15%をエアコンの消費電力量が占めている[2]。また、家庭だけでなく、事業者においてもエアコンは普及しており、一般的なオフィスビルでは夏季における電力消費の約49%をエアコンの消費電力量が占める[3]。このように、エアコンからの需要が占める割合は大きく、エアコンの保有台数も年々増加しているため、今後もエアコンからの電力需要は増加していくことが予想される[4][5]。

エアコンの消費電力量は、一般に気温と相関をもつことが知られている[6]。夏場に気温が高ければ、エアコンを使用する台数が増え、かつ設定温度も外気温と比較し低めに設定されるため消費電力量が増えるためである。日本においては、エアコンの消費電力量は季節的な特徴も持っている。夏場と冬場に主に使用されるため、エアコンの消費電力量は夏と冬に大きくなる一方、春と秋の期間にはエアコン由来の消費電力

量は少ない。

また、対象となる地域全体のエアコンによる消費電力量には気温だけでなく人口も関係してくる。例えば、夏場に人口密集地で気温が高くなった場合、その地域のエアコンによる消費電力量が増加し、地域全体の消費電力量に影響を及ぼす。一方、人口が希薄な地域で気温が高かったとしても、地域全体の消費電力量への影響は小さい。冬場にも同様のことが言えるため、エアコンの消費電力量には気温と人口が関係することがわかる。

エアコンによる消費電力量はスポット市場価格にも影響を及ぼす。夏場に気温が高く、エアコンの消費電力量が多くなれば、電力需要が増えるためスポット市場価格も上昇する。森平は、エアコンの消費電力量と気温に関する関係に着目し、とスポット市場価格と気温の関係を分析し、平均気温を主要な説明変数とすることで予測精度の高いモデルを構築している [7]。このように、スポット市場価格とエアコンの消費電力量には関係があるといえる。

筆者は、エアコンの消費電力量を価格予測システムに組み込むために人口で加重した気温データである人口気温データの導出をGISの利用により行った。GIS上で、対象地域の人口データと気温データを重ね合わせることで人口気温のデータの導出を行い、スポット市場価格予測システムの説明変数とする。

3.2.2 GISを利用した人口気温データの導出

本項では、GISを利用した人口気温データの導出方法について説明する。なお、本予測システムの対象地域は九州エリアであるため、九州エリアを対象に導出を行う。

気温データとしては、第2章で説明したGSMを使用する。GSMデータを、第2章で示すpygribを使用し、バイナリーデータからcsvファイルに出力する。図3-1に出力されたcsvファイルを示す。本csvファイルには、緯度、経度、気温の情報が含まれており、GIS上に気温のポイントデータとしてのせることができる。図3-2に、GIS上に気温のポイントデータを乗せた図を示す。本データの間隔は緯度方向が約22km、経度方向が約24kmとなっている。これは、気象予報データの位置の単位が度で与えられるためであり、緯度0.2度、経度0.25度で与えられる[8]。なお、第2章で述べた通り、2023年3月14日の予報分から、GSMの高解像度版の提供が開始されており、メッシュサイズが緯度0.1度、経度0.125度で提供されている。

このままのデータでは、データの間隔が広いと、GISの機能の一つであるIDWを利用して、データの補間を行う。IDWは逆距離加重法というもので、距離の逆数を重みとし、データの補間を行う手法である[9]。式(3.1)に示す数式により、補完したい点の補間値を決定する。式(3.1)中の z_p は補間値を、 z_i は各点の値を、 w_i は評価点と各点の逆数を示す。なお、内挿にはさまざまな種類があり、ArcGISでもクリギングやスプ

	A	B	C	D
1	緯度	経度	気温	
2	50	120	278.0415	
3	50	120.25	277.1196	
4	50	120.5	276.4555	
5	50	120.75	275.6821	
6	50	121	274.4946	
7	50	121.25	274.5571	
8	50	121.5	274.8149	
9	50	121.75	274.9633	
10	50	122	275.5962	
11	50	122.25	276.104	
12	50	122.5	276.893	

図 3-1 csv ファイルにした気温データ

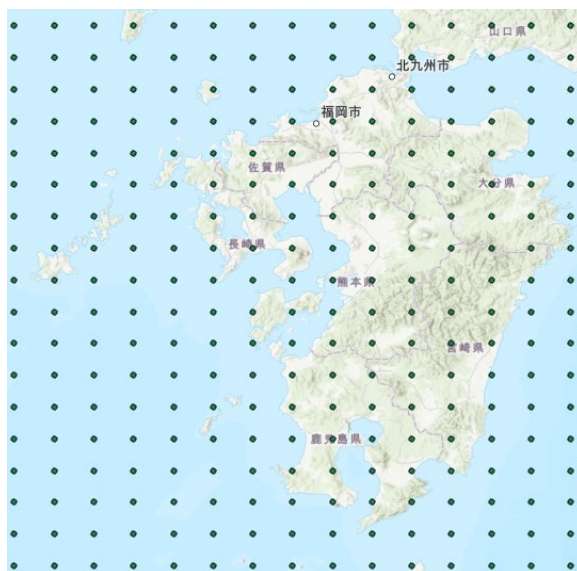


図 3-2 GIS 上の気温ポイントデータ

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i z_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3.1)$$

ラインなど様々な手法が準備されている。その中でも、IDWはGSMデータのような間隔が均等なデータの補間に用いられる手法であるため、本研究ではIDWを使用している。

図 3-3 に IDW 後の九州エリアの気温データを示す。IDW により内挿処理が行われ、元の気温ポイントデータから、面的な広がりを持ったラスターデータへ変換されていることがわかる。なお、セルサイズはデフォルトの設定である経度 1.3 km、緯度 1.5 km としている。

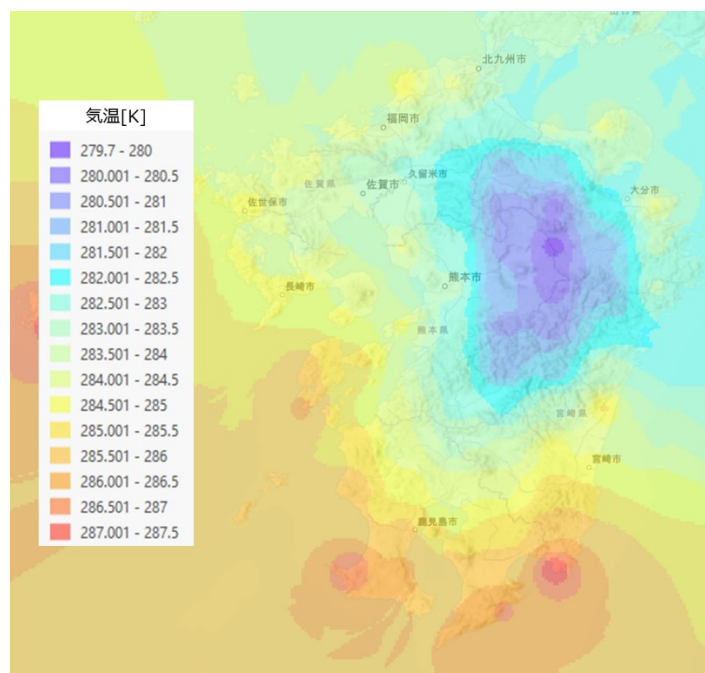


図 3-3 IDW 後の気温データ

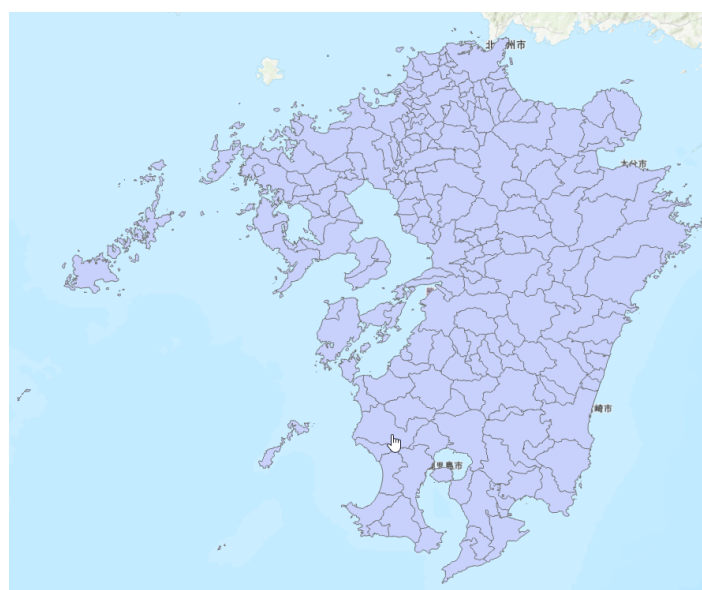


図 3-4 九州エリアの人口マップ

次に、気温データを人口データと結合していく。人口データとしては、2015 年度に実施された国勢調査の人口データを使用した[10]。本人口データには昼間人口と夜間人口が含まれている。人口気温データの導出にあたり、人の動きも考慮するために、8～18 時の間の処理には昼間人口を、それ以外の時間帯には夜間人口を使用した。また、GIS 上で人口データと気温データを組み合わせるためには、市町村区画データも必要となる。市町村区画データは ESRI ジャパンが提供している、全国市区町村界データを

使用した[11]。この全国市区町村界データと人口データを結合し、GIS上に市町村ごとの人口マップを作製した。図3-4に九州エリアの市町村ごとの人口マップを示す。図3-5のように、本データの属性テーブルには、市町村ごとの昼間人口、夜間人口が含まれている。なお、離島の自治体においては、九州本土と系統で連系されている自治体のみを使用している。

次に、人口マップと気温データの結合を行う。気温データはラスターデータであるが、ラスターデータのままだと結合ができないため、「ラスターto ポイント」ツールを使用し、ラスターデータからポイントデータへ変換を行う[12]。なお、この時のポイント間の間隔は、IDWで設定したセルサイズと同一となる。図3-6に、GIS上に人口マップと、ポイントデータへ再度変換した気温データの北九州エリアを拡大した図を示す。IDW前と比較し、ポイントの密度が密になっていることがわかる。

SIKUCHOSON	CITY_ENG	KEY_CODE	CITYNAME	夜間人口	昼間人口	Shape_Length	Shape_Area
北九州市	Kitakyushu-shi, Moji-ku	40100	北九州市	0.075079	0.076871	2.855966	0.047928
福岡市	Fukuoka-shi, Higashi-...	40130	福岡市	0.120175	0.1332	2.504318	0.033384
大牟田市	Omuta-shi	40202	大牟田市	0.009166	0.009587	0.550639	0.007866
久留米市	Kurume-shi	40203	久留米市	0.023786	0.023696	1.302913	0.022268
直方市	Nogata-shi	40204	直方市	0.004463	0.004696	0.453007	0.00597
飯塚市	Iizuka-shi	40205	飯塚市	0.010087	0.010246	1.057559	0.020778
田川市	Tagawa-shi	40206	田川市	0.003783	0.004126	0.54772	0.005299
柳川市	Yanagawa-shi	40207	柳川市	0.005294	0.004895	0.50408	0.007448

図 3-5 人口マップの属性テーブル

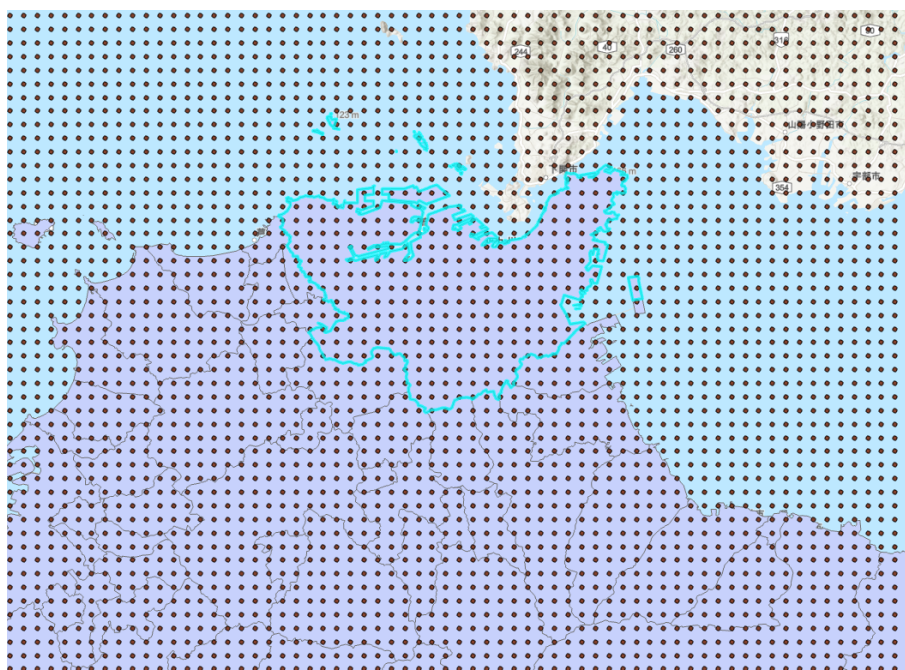


図 3-6 北九州エリアの人口データと気温データ

次に、人口データと気温データの結合を行う。結合には「空間結合」ツールを使用した[13]。空間結合ツールは、地理的に重なり合うフィーチャの属性を結合するツールである。図3-7に人口データと気温データのマップを拡大した図を示す。空間結合では、ターゲットフィーチャと結合フィーチャを設定する。今回は、人口データに気温データを結合したいので、ターゲットフィーチャを人口データ、結合フィーチャを気温データとした。また、空間結合では、マージルールを設定することができる。マージルールとは、結合の方法のことで、平均値や中央値、最頻値などを設定することができるが、今回は平均値を使用した。これにより、各自治体の範囲に重なる気温ポイントデータの平均値を、その自治体の気温として結合することが可能となる。図3-8に結合後の各自治体の人口データの属性テーブルを示す。図中の「mean_city_」 [K]は各自治体の気温を示すため、各自治体の気温が結合されていることがわかる。

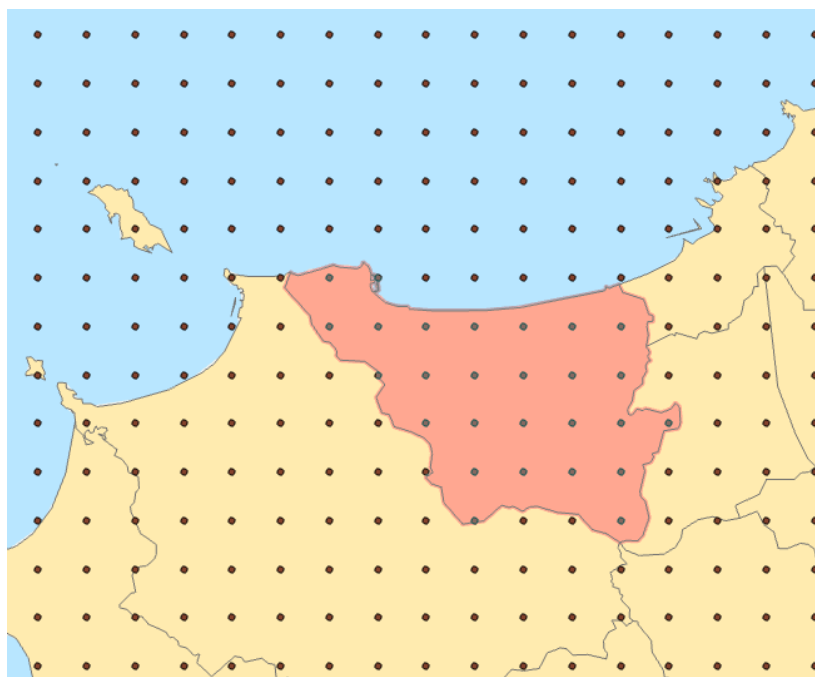


図 3-7 GIS 上での空間結合の例

KEY_CODE	CITYNAME	夜間人	昼間人	Shape_Leng	Shape_Area	pointid	mean_city_
40100	北九州市	0.075079	0.076871	2.855966	0.047928	5131	283.629
40130	福岡市	0.120175	0.1332	2.504318	0.033384	11152	283.961
40202	大牟田市	0.009166	0.009587	0.550639	0.007866	23259	283.462
40203	久留米市	0.023786	0.023696	1.302913	0.022268	17765	282.806
40204	直方市	0.004463	0.004696	0.453007	0.00597	9248	283.991
40205	飯塚市	0.010087	0.010246	1.057559	0.020778	11174	283.436
40206	田川市	0.003783	0.004126	0.54772	0.005299	11182	283.21
40207	柳川市	0.005294	0.004895	0.50408	0.007448	21326	283.362

図 3-8 属性テーブルへの気温データの結合

上記の処理により、九州エリアの各自治体の人口、気温を同一データ内に格納することができた。このデータを使用し、人口気温データの導出を行う。人口気温データは人口で加重した気温データであり、式(3.2)に示す数式で定義される。式中の T_p [K]は対象エリアの人口気温データを、 P_i 人は*i*番目の自治体における昼間人口あるいは夜間人口を、 T_i [K]は*i*番目の自治体における気温を、 P_{all} 人は対象エリアの総人口を示す。この数式により、人口で加重した気温である人口気温データの導出を行う。なお、気温予報データは1時間ごとの予報値として提供されるため、1日あたり24個の人口気温データの導出を行う必要がある。

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i \times T_i)}{P_{all}} \quad (3.2)$$

3.3 GISを利用した予測太陽光発電量の導出

3.3.1 日射量とスポット市場価格の関係性

次に、日射量とスポット市場価格との関係について述べる。近年、地球温暖化への対策などから再生可能エネルギーの導入量が増加している。特に日本においては、太陽光発電が主要な再生可能エネルギーとなっており、2022年における日本全体の太陽光発電量は全体の9.9%となっている[14]。今後も、太陽光発電の導入量は増加が期待され、2021年に発表された第6次エネルギー基本計画においては、2030年度の電源構成目標は太陽光発電が14~16%を占めることを目標としている[15]。特に本研究において対象としている九州エリアにおいては、電力需要に対する太陽光発電の導入が進んでおり、九州エリアの電力需要は日本全体の1割程度であるが、太陽光発電の導入量は日本全体の17%にもなる[16]。

このように、太陽光発電の発電量が占める全体の発電量の割合は増加しており、スポット市場価格へも影響を及ぼすことがわかる。太陽光発電の発電量は気象に依存しており、日射量により発電量は変動する。そのため、日射量の大きさが太陽光発電量に影響を及ぼす。また、着目する地域全体の太陽光発電量を考慮する場合、どの地域にどれだけ太陽光発電設備が導入されているかも重要となる。太陽光発電設備が大量に導入されている地域で日射量が多ければ、地域全体の太陽光発電量も大きくなるが、太陽光発電設備があまり導入されていない地域で日射量が多くても地域全体の太陽光発電量に及ぼす影響は大きくない。そのため、筆者は太陽光の発電量を価格予測システムに組み込むためにGIS上で予測太陽光発電量の導出を行った。GIS上で、太陽光発電設備の導入量と日射量予報を重ね合わせ、予測太陽光発電量を導出することで、スポット市場価格予測システムの説明変数とする。

3.3.2 GIS を利用した予測太陽光発電量の導出

本項では、GIS を利用した予測太陽光発電量の導出について説明する。日射量予報については、第2章で説明したGSMを使用し、気温予報と同様に、pygribを使用してcsvファイルへと変換する。図3-9にcsvファイルにした日射量予報データを示す。図3-9が示す通り、気温と同様に緯度、経度、日射量予報値が含まれていることがわかる。気温予報と同様にして、日射量予報もポイント間の補間を行うためにIDWを行い、ラスタデータからポイントデータへの変換を行う。なお、使用するデータの間隔は同じである。これにより、密な日射量予報ポイントデータの作成が可能である。

次に、この日射量予報値と太陽光発電設備の導入量の重ね合わせをGISの利用により行う。太陽光発電設備の導入量データについては、資源エネルギー庁が公開している市町村別の導入量データを使用する[17]。このデータは資源エネルギー庁が公開する、市町村別の太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入量であり、4か月おきにデータが更新される。図3-10にダウンロードした導入量データを示す。図3-10が示すように、市町村別に太陽光発電設備の導入量が公開されている。予測対象日において

	A	B	C	D
1	緯度	経度	日射量	
2	50	120	508.346	
3	50	120.25	508.346	
4	50	120.5	508.346	
5	50	120.75	508.346	
6	50	121	522.096	
7	50	121.25	522.096	
8	50	121.5	522.096	
9	50	121.75	522.096	

図3-9 csvファイルにした日射量予報データ

	太陽光発電設備							
	10kW未満		10kW以上					
		うち自家発電設備併設	うち50kW未満	うち50kW以上500kW未満	うち500kW以上1,000kW未満	うち1,000kW以上2,000kW未満	うち2,000kW以上	
福岡県北九州市	66,447	6,023	219,334	40,068	13,365	14,189	85,712	66,000
福岡県福岡市	69,719	8,427	58,652	33,414	7,194	5,786	12,259	0
福岡県大牟田市	10,246	163	94,289	16,744	3,910	5,925	10,960	56,750
福岡県久留米市	37,196	1,224	60,932	39,354	9,083	5,411	7,074	0
福岡県直方市	6,132	125	33,343	10,072	2,110	2,443	10,798	7,920
福岡県飯塚市	14,257	215	185,870	28,015	9,001	14,417	73,061	61,376
福岡県田川市	4,077	33	44,000	12,650	3,242	9,319	12,790	6,000

図3-10 市町村別の太陽光発電設備導入量データ

公開されている最新の導入量データを使用し、市町村別の太陽光発電設備導入量マップの作成を行う。人口データと同様に、全国市区町村界データと太陽光発電設備導入量データを組み合わせることで、市町村別の太陽光発電設備導入量マップの作成を行う。

日射量予報データと太陽光発電設備導入量データの結合については、人工気温データと同様に、空間結合により行う。太陽光発電設備導入量データに日射量予報データを結合したいので、ターゲットフィーチャを太陽光発電設備導入量データ、結合フィーチャを日射量予報データとし、空間結合を行う。図 3-11 に空間結合後の九州エリアの太陽光発電量マップを、図 3-12 にその属性テーブルを示す。図 3-12 中の「sum」[kW]がその自治体の太陽光発電設備導入量を、「mean_city_」[Wh/m²]がその自治体の平均日射量を示している。図 3-12 が示す通り、属性テーブル内に太陽光発電設備導入量と日射量予報が格納されていることがわかる。

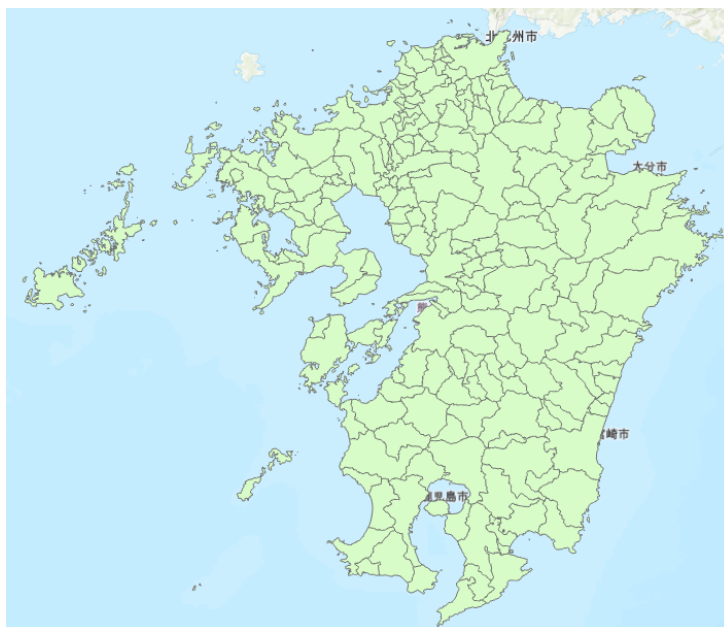


図 3-11 九州エリアの予測太陽光発電量マップ

市町村	new	continue	sum	Shape_Leng	Shape_Area	pointid	mean_city_
北九州市	277700.2	30797.68	308497.88	2.855966	0.047928	13692	463.819
福岡市	119876.5	31854.547	151731.047	2.504318	0.033384	17428	369.9
大牟田市	103184.4	8303.19	111487.59	0.550639	0.007866	25220	343.883
久留米市	92050.4	20354.161	112404.561	1.302913	0.022268	21710	331.256
直方市	38668.3	3324.61	41992.91	0.453007	0.00597	16194	416.152
飯塚市	192500.5	8116.069	200616.569	1.057559	0.020778	17446	382.393
田川市	46949.1	2497.468	49446.568	0.54772	0.005299	17455	389.227
柳川市	29209.6	5219.053	34428.653	0.50408	0.007448	23960	340.476

図 3-12 属性テーブルへの日射量予報値の結合

上記の処理により、九州エリアの各自治体の太陽光発電設備導入量、日射量予報値を同一データ内に格納することができた。このデータを使用し、予測太陽光発電量の導出を行う。予測太陽光発電量は対象地域全体の太陽光発電量の予測値であり、式(3.3)に示す数式で定義される。式中の P_s [kWh]は対象エリアの予測太陽光発電量を、 G_i [kW]は i 番目の自治体における太陽光発電設備の導入量を、 I_i [kWh/m²]は i 番目の自治体における日射量を、 S [kW/m²]は標準日射強度を示す。この数式により、予測値の導出を行う。なお、日射量予報データは1時間ごとの予報値として提供されるため、1日あたり24個の予測太陽光発電量の導出を行う必要がある。

$$P_s = \sum_{i=1}^n (G_i \times I_i \div S) \quad (3.3)$$

3.4 予測に使用する説明変数の取得

前項までで、スポット市場価格の予測に使用する説明変数として人口気温データ、予測太陽光発電量の導出を行った。スポット市場価格は様々な要因によって変動するため、その要因を示す説明変数の取得について、本項では説明する。

第2章において、スポット市場の価格は需要と供給のバランスで決定されることを述べた。そのため、需要と供給を説明する説明変数をスポット市場価格予測システムに利用することで、スポット市場価格の予測が可能となる。需要を表す要因として、カレンダー情報があげられる。需要は平日と休日で異なるためであり、平日と比較し、休日は工場やオフィス等が稼働しておらず電力需要が少ないことが一般的に知られている[18]。そのため、需要の変化を表すカレンダー情報として、年、月、日の数値データと、曜日を表すダミー変数、平日か祝日かを表すダミー変数をスポット市場価格の説明変数とした。

次に、供給を表す説明変数について述べる。供給の要因として、発電所の稼働状況があげられる。発電所が稼働している場合には供給に余裕があるため価格は安くなる一方、発電所がトラブル等で稼働を停止しており、その数が多いのであれば供給に余裕がなくなり価格は高くなる。発電所の停止要因には、定期点検等の事前に停止状況がわかるものと、トラブル等の突発的な停止で事前に停止状況がわからないものがある。そのため、スポット市場価格を予測するタイミングで、判明している停止情報のみを価格予測システムの説明変数とすることとした。なお、発電所の稼働状況については、発電所情報公開システム(HJKS)が公開しているデータを使用した[19]。HJKSは発電所の停止情報を公開するシステムで、エリアや発電事業者、発電形式や期間を指定して、発電所の停止情報をダウンロードすることが可能である。図3-13にHJKSからダウンロードした九州エリアの発電所停止情報データを示す。図3-13が示すように、発電事業者や発電所名、停止区分や停止日時と復旧予定日が記載されている。先述の

第3章 GIS利用の説明変数の導出とスポット市場価格予測システムの構築

発電事業者	発電所コード	発電所名	発電形式	ユニット名	認可出力	停止区分	種別	低下量	停止日時	復旧見直し	復旧予定日
九州電力株式会社	91061	新小倉発電所	火力(ガス)	3号機	60000	出力低下	低下・その他	150000	2023/12/4 18:00	あり	#####
九州電力株式会社	93062	新大分発電所	火力(ガス)	1号系列第6軸	120000	計画停止	停止・その他		2023/12/9 9:00	あり	#####
九州電力株式会社	93062	新大分発電所	火力(ガス)	1号系列第4軸	120000	計画停止	停止・その他		2023/12/9 9:00	あり	#####
大分共同火力株式会社	932PC	大分共同発電所	火力(ガス)	3号機	147000	計画停止	停止・燃料制約		2023/12/8 0:00	あり	#####
戸畑共同火力株式会社	65749	戸畑共同発電所	火力(石炭)	5号機	110000	計画停止	停止・定期検査等		2023/10/3 0:00	なし	
株式会社響灘火力発電所	H709	響灘火力発電所	火力(石炭)	1号機	112000	計画停止	停止・定期検査等		#####	あり	#####

図 3-13 HJKS からダウンロードした発電所停止情報

通り、スポット市場価格予測を行う時点で判明している発電所の停止情報を価格予測の説明変数とする必要がある。停止区分が計画停止の場合は事前にわかっているものとして、計画外停止の場合は突発的なトラブルであり、事前にわからないものとして処理を行った。計画外停止については、停止日時が予測を行うタイミングより前であった場合は、予測配信時点で停止が判明しているもので、停止しているものとして処理を行った。最終的に予測対象日に停止が判明している発電所の認可出力の合計値を発電所停止情報として扱い、スポット市場価格予測システムの説明変数とした。なお、出力低下の場合については、出力の低下量を発電しないものとして処理を行った。これにより、予測対象日の発電所の停止情報の利用が可能である。

次に、供給を表す要因として燃料価格をスポット市場価格予測システムへ利用する。図 3-14 に 2020 年度における日本の電源構成を示す。図 3-14 が示すように、日本においては LNG 火力が火力発電における主力電源となっている。そのため、LNG 価格を予測に使用するものとした。

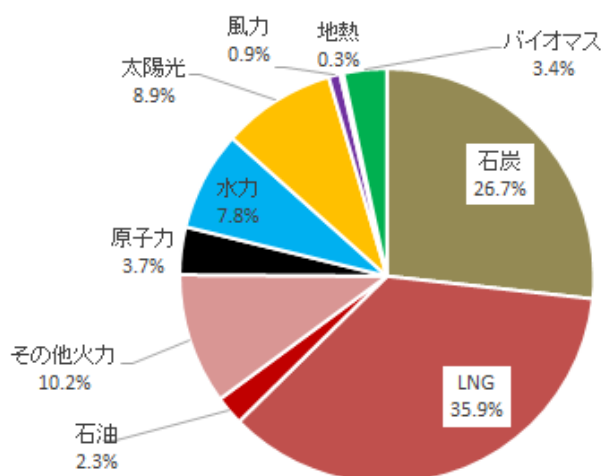


図 3-14 2020 年度の日本の電源構成[20]

燃料価格を予測へ利用するためには、予測対象日の燃料価格の予測値を取得する必要がある。しかしながら、燃料価格の一日ごとの予測値は提供されておらず、予測値をスポット市場価格に利用することができない。一方、日本向け LNG の価格決定には、原油価格が参照されている[21]。これは、LNG 導入初期においては、LNG 市場が原油市場と比べ未成熟であり、市場形成にあたり原油の価格を指標としたためである。一般的に、LNG 価格は原油価格に対し数か月程度の遅れをもっている[22]。そのため、予測対象日の数か月前の原油価格を LNG 燃料価格の予測値として利用することで、スポット市場価格予測システムの説明変数とした。なお、本論文においては、九州エリアのスポット市場価格と最も相関が大きかった、1か月前の原油価格を予測に使用している。また、原油価格の入手先については、米国エネルギー情報局が公開している原油 WTI スポット価格を利用している[23]。本データは無償で提供されるものであり、パブリックドメインであるため商用利用も可能である。

3.5 機械学習によるスポット市場価格予測システムの構築

これらのデータを取得し、スポット市場価格を目的変数、取得したデータを説明変数とすることで、スポット市場価格予測システムの構築を行う。なお、スポット市場価格については、JEPX の公式サイトで公開されている情報を利用している[24]。機械学習を利用して予測を行うにあたり、学習データと予測データを準備する必要がある。そのため、予測対象日のデータを予測用データ、2020年1月1日から予測対象日前日までのデータを学習用データとし、機械学習に使用するデータの準備を行った。図 3-15 に実際の学習用データ、図 3-16 に予測用データを示す。図 3-15, 3-16 が示す通り、学習用データには価格の情報が含まれているが、予測用データには価格の情報が含まれていないことがわかる。また、曜日を表すダミー変数は月曜日を1とし、日曜日を7とした曜日ごとに連続して割り振られたダミー変数としている。

1	人口_気温	太陽光発電予測量	年	月	日	曜日	時刻コード	休日	発電停止総容量[MW]	原油価格	エリアプライス九州(円/kWh)	
2	275.7961856		0	2020	1	1	3	1	1	2974	55.97	5.41
3	275.7961856		0	2020	1	1	3	2	1	2974	55.97	5.16
4	275.7267501		0	2020	1	1	3	3	1	2974	55.97	5.16
5	275.7267501		0	2020	1	1	3	4	1	2974	55.97	5.16
6	275.6790049		0	2020	1	1	3	5	1	2974	55.97	5.16
7	275.6790049		0	2020	1	1	3	6	1	2974	55.97	5.16
8	275.6492845		0	2020	1	1	3	7	1	2974	55.97	5.16
9	275.6492845		0	2020	1	1	3	8	1	2974	55.97	5.16
10	275.6348356		0	2020	1	1	3	9	1	2974	55.97	5.16
11	275.6348356		0	2020	1	1	3	10	1	2974	55.97	5.16
12	275.681667		0	2020	1	1	3	11	1	2974	55.97	5.16
13	275.681667		0	2020	1	1	3	12	1	2974	55.97	5.16
14	275.7451355		0	2020	1	1	3	13	1	2974	55.97	5.16
15	275.7451355		0	2020	1	1	3	14	1	2974	55.97	5.16
16	275.7340796	182049706.4	2020	1	1	3	15	1	2974	55.97	5.16	
17	275.7340796	182049706.4	2020	1	1	3	16	1	2974	55.97	5.16	
18	275.9295831	1620125966	2020	1	1	3	17	1	2974	55.97	4.71	
19	275.9295831	1620125966	2020	1	1	3	18	1	2974	55.97	5.16	

図 3-15 学習用データの例

1	人口_気温	太陽光発電_年	月	日	曜日	時刻コード	休日	発電停止総	原油価格	
2	296.8264	0	2023	9	19	2	1	0	7195	81.25
3	296.8264	0	2023	9	19	2	2	0	7195	81.25
4	296.6516	0	2023	9	19	2	3	0	7195	81.25
5	296.6516	0	2023	9	19	2	4	0	7195	81.25
6	296.4825	0	2023	9	19	2	5	0	7195	81.25
7	296.4825	0	2023	9	19	2	6	0	7195	81.25
8	296.3303	0	2023	9	19	2	7	0	7195	81.25
9	296.3303	0	2023	9	19	2	8	0	7195	81.25
10	296.1709	0	2023	9	19	2	9	0	7195	81.25
11	296.1709	0	2023	9	19	2	10	0	7195	81.25
12	296.0567	0	2023	9	19	2	11	0	7195	81.25
13	296.0567	0	2023	9	19	2	12	0	7195	81.25
14	295.9431	4.11E+08	2023	9	19	2	13	0	7195	81.25
15	295.9431	4.11E+08	2023	9	19	2	14	0	7195	81.25
16	296.5007	2.06E+09	2023	9	19	2	15	0	7195	81.25
17	296.5007	2.06E+09	2023	9	19	2	16	0	7195	81.25
18	297.9315	3.87E+09	2023	9	19	2	17	0	7195	81.25
19	297.9315	3.87E+09	2023	9	19	2	18	0	7195	81.25

図 3-16 予測用データの例

次に、実際に予測モデルの構築を行う。本論文では機械学習を利用した予測モデルの構築を行っている。データ処理等の言語については `python` を利用しており、予測モデルについても `python` を利用して構築する。`python` には複数の機械学習ライブラリが準備されているが、その中でも `scikit-learn` と呼ばれるライブラリを使用して予測モデルの構築を行う[25]。`scikit-learn` は、豊富な機械学習を備えたライブラリであり目的に応じて最適な機械学習の手法を選択することができる。また、機械学習モデルだけでなく、データの前処理の段階における豊富なツールが提供されているのも特徴である。今回は、スポット市場価格を予測するため、数値を予測する必要がある。そのため、機械学習の手法のうちの回帰を利用してモデルを構築する。回帰は数値の予測を目的とした機械学習である。回帰の手法にも複数の手法があり、`scikit-learn` においても、SVM(Support-Vector Machine)回帰や、RF(Random Forest)回帰等複数の回帰手法が準備されている。この中でも、アンサンブル学習と呼ばれる学習法の一つである `Random Forest` を利用してスポット市場価格予測システムの構築を行った。アンサンブル学習とは、いくつかの性能の低いモデルを組み合わせることで性能の高いモデルを構築する手法である[26]。その中でも `Random Forest` はバギングと呼ばれる学習データを抜けや重複を許して複数個のグループに分割し、学習データのグループごとにモデルを生成する手法を利用したアルゴリズムである[26]。図 3-17 に `Random Forest` のイメージ図を示す[27]。`Random Forest` を本予測システムに利用した理由は二つある。一つ目は、先行研究においてスポット市場価格予測に最適な手法の比較が行われており、`Random Forest` を利用した場合が最も予測精度が高かったからである。大村らは、オープンデータを活用したスポット市場価格の予測手法の構築を行っており、最適な機械学習手法の検討も行っている[28]。その中で、九州エリアにおいて単一の手法を利用する場合には、`Random Forest` の予測精度が最も高いと結論づけている。そのため、本論文においても

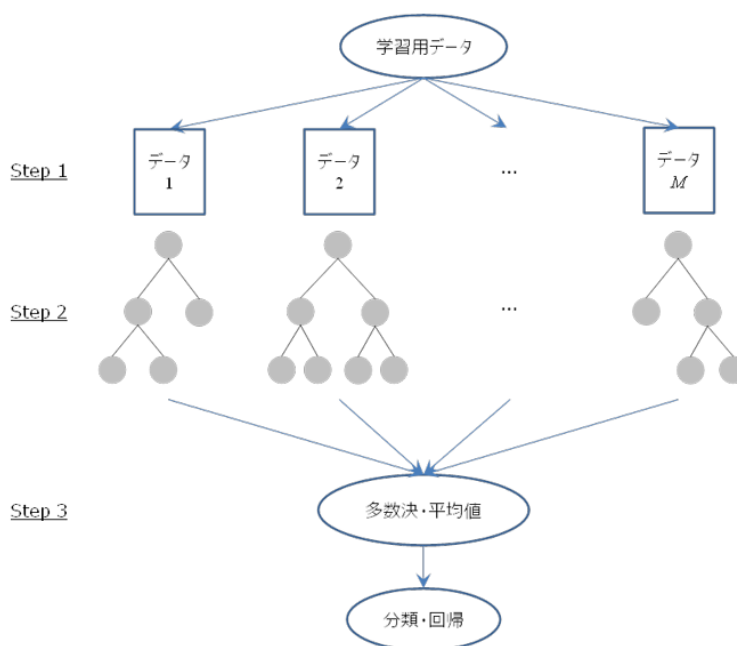


図 3-17 Random Forest のイメージ図[27]

Random Forest を利用して機械学習モデルの構築を行った。二つ目の理由として、実際に複数の手法を比較した結果、Random Forest が最も予測精度が高かったからである。比較においては、Random Forest, SVM(Support Vector Machine), LSTM (Long Short-Term Memory)の三種で比較を行った。SVM は機械学習の手法の一つで、マージン最大化とカーネル関数の利用により非線形に対応した回帰の手法である[29]。また、LSTM は再帰型ニューラルネットワークの一種で、時系列データの予測に適した手法で、隠れ層内に LSTM ブロックと呼ばれる回路のような仕組みを備えたものである[30]。特に LSTM は、時間的な傾向を持った数値の予測に適した手法であり、スポット市場価格もある程度の時間的な傾向を持っているため、比較対象に入れている。比較の結果については次項で述べるが、Random Forest が最も予測精度が高かったため、Random Forest を利用して予測を行った。

また、スポット市場の価格の決定に寄与する大きな要因は時間帯によって異なる。例えば、昼間は太陽光の発電量によって価格は大きく変化し、朝夕の時間帯は起床後、帰宅後の冷暖房需要により電力需要が大きく変化するため、人口気温データが支配的であると考えられる。また、夜間については日によって変動が少ないといった特徴がある。そのため、時間帯により価格を決定する要因が異なるため、時間帯ごとにモデルを構築することで予測精度の向上を行うことができると考え、時間帯によって予測モデルを分割しスポット市場価格予測システムの構築を行った。具体的には、9:00~17:00 を昼間モデル、5:00~9:00, 17:00~19:30を朝夕モデル、その他の時間を夜モデルとし、予測システムの構築を行った。図 3-18 に構築した予測モデルの概要を示す。

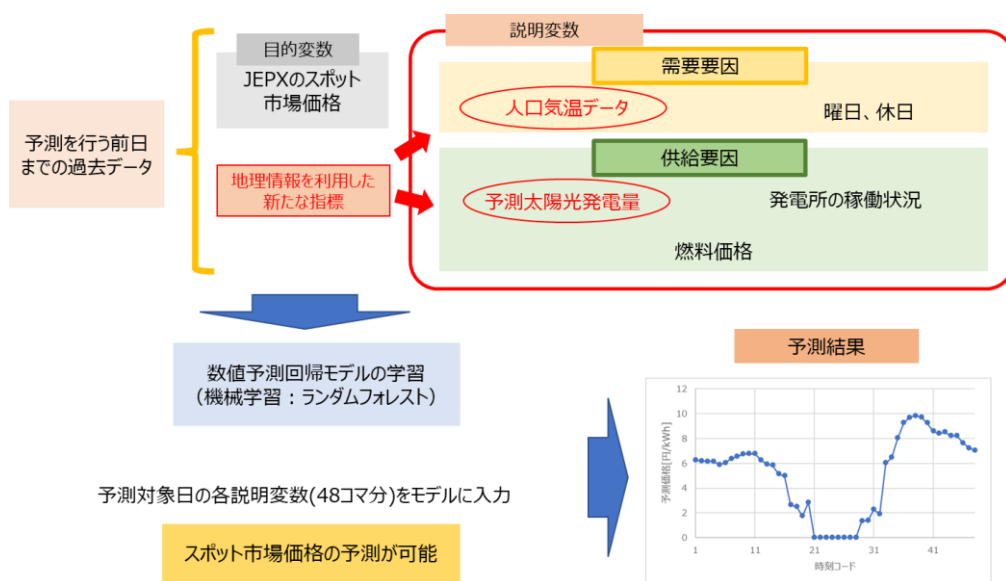


図 3-18 構築したスポット市場価格予測モデルの概要

3.6 予測の評価

本項では、これまでに構築したスポット市場価格予測システムを利用して実際にスポット市場価格を予測した場合の予測精度の評価を行う。なお、予測対象は九州エリアプライスとし、予測対象期間については 2022 年度、学習に利用するデータの期間については 2020 年 1 月 1 日から予測対象日前日までとした。また、予測の評価には平均絶対誤差(MAE)を利用する。

最初に、前項で述べた使用する機械学習モデルの違いによる予測精度への影響について述べる。表 3-1 にモデルごとの予測精度をまとめた表を示す。表 3-1 が示すように、Random Forest が最も予測精度が高いことがわかる。これは、SVM が基本的には線形の回帰分析手法であり、本予測モデルのような非線形の予測モデルに対し予測精度が向上できなかったためであると考えている。また、LSTM は周期的な変化に対し高い予測精度を持つ一方、Random Forest は説明変数と目的変数の関係に着目した手法であり、本予測モデルは価格に対し関係の深い説明変数を利用しているため、Random Forest の予測精度が高くなったと考えている。

表 3-1. 使用するモデルによる予測精度への影響

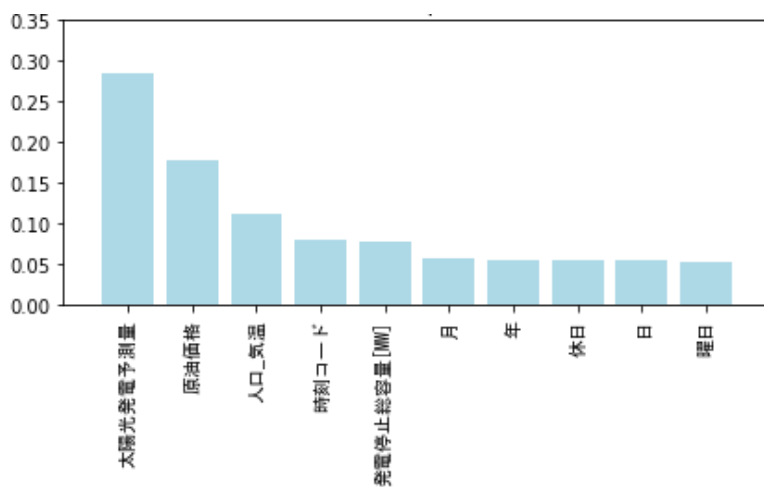
使用したモデル	Random Forest	SVM	LSTM
MAE [円/kWh]	4.27	5.12	4.74

表 3-2. 時間帯によって分割した場合の予測精度

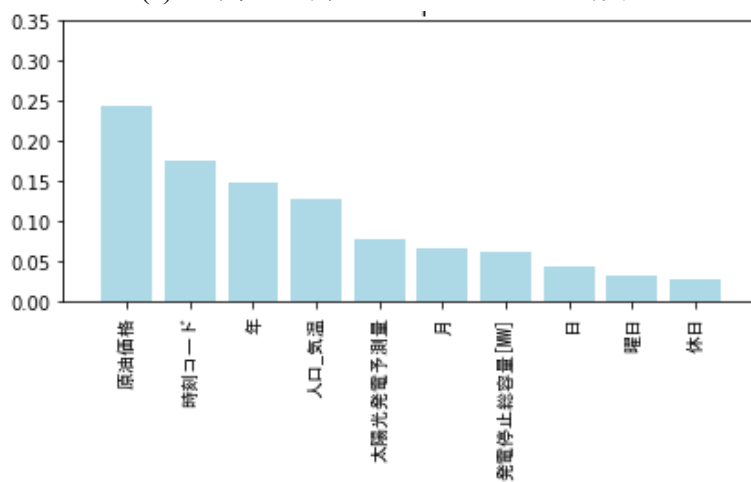
	分割無し	分割あり
MAE [円/kWh]	4.32	4.27

次に、時間帯ごとに分割した場合の精度への影響も確認する。表3-2に時間帯ごとに分割した場合の予測精度を示す。表3-2が示すように時間帯によって予測モデルを分割した場合に、予測精度が高くなっていることがわかる。これは時間帯によって、重要な説明変数が異なり、時間帯によって予測モデルを分割したほうが最適な学習ができたためであると考えている。また、モデルを時間帯ごとに分割することにより、各時間帯に対しどの説明変数が重要であることを示すことができる。図3-19に各時間帯の予測モデルの説明変数の重要度を示す。重要度はその説明変数が目的変数の予測に対しどれだけ影響を与えるかを数値化したものであり、重要度が高いほどその説明変数が予測モデルに対し重要であるということを示す。Random Forestにおいては、決定木を作成し、ノードにおいて条件によってデータの分割を行う。その際に、その説明変数で分割することにより誤差をどれだけ低減できたかによって、重要度は決定される。つまり、その説明変数の利用により誤差の低減が大きくなれば、重要度も大きくなる。なお、回帰モデルにおいては、誤差の二乗和で評価を行う。式(3.4)に重要度の創出式を示す。式中の I_j は説明変数 j の重要度を、 k は決定木の数を、 m はサンプル数を、 T はある決定木を、 t は T におけるあるノードを、 ΔE_t はその決定木における評価関数の変化を示す。なお、各説明変数の重要度の合計値は1となっており、その数値の大きさが、予測モデルに対しその説明変数がどの程度重要かを示している。図3-19が示す通り、それぞれの時間帯におけるモデルの重要度は異なっていることがわかる。昼間の予測モデルは太陽光発電予測量の重要度が高くなっている一方、夜間に太陽光発電は発電しないため重要度は0となっている。また、朝夕についても昼間と比較し太陽光発電量は少なくなるため太陽光発電予測量の重要度は低くなる一方、人口気温の重要度が若干上がっていることがわかる。朝夕の時間帯について、人口気温データが支配的でないのは春と秋にはエアコンの消費電力量が少なくなるため、1年を通じて人口気温データが予測に対し重要であるわけではないためであると考えている。このように、時間帯ごとに予測モデルを分割することにより、予測精度の向上とモデルの特性を理解することが可能となる。

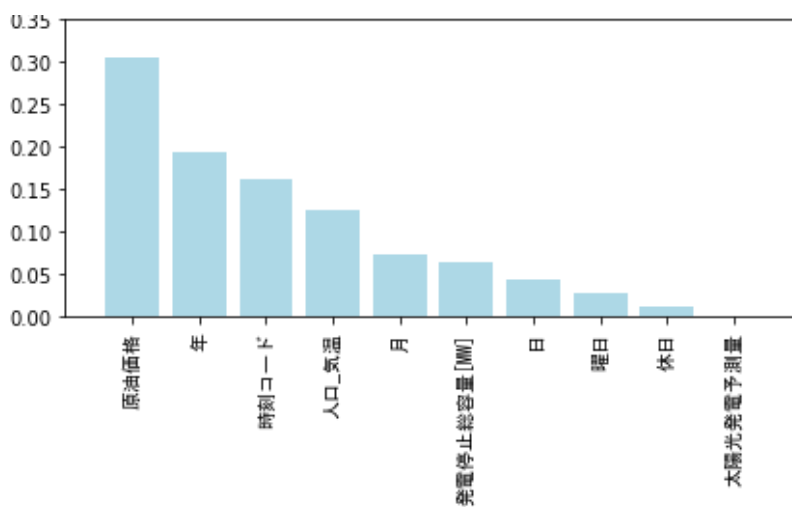
$$I_j = \frac{1}{k} \sum_T \sum_{t \in T, j} \frac{m_t}{m} \Delta E_t \quad (3.4)$$



(a) 昼間の予測モデルにおける重要度



(b) 朝夕の予測モデルにおける重要度



(c) 夜間の予測モデルにおける重要度

図 3-19 各予測モデルにおける重要度

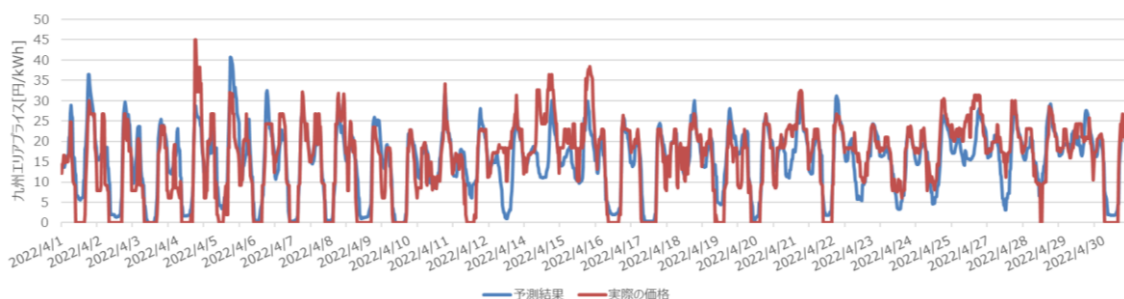


図 3-20 2022 年 4 月における予測の評価

次に、ある一か月に着目した予測の評価を行う。図 3-20 に 2022 年 4 月における予測結果と実際の価格の比較を示す。図が示すように、ある程度の価格の傾向を追えていることがわかる。なお、この期間の絶対平均誤差は 3.84 円/kWh であった。このように、精度よくスポット市場価格の予測が可能となる予測システムの構築を行うことができた。

最後に、気温と日射量を GIS の使用による他の情報との紐づけを行わず、単純に気温、日射量として使用した予測結果との比較を行う。先行研究においては、価格予測システムの構築にあたり、そのエリアの代表地点の気温、日射量が使用されている [28]。これを模擬し、代表地点の気温、日射量を GSM データから取得した。なお、本研究は九州エリアを対象としているため、九州エリアの代表地点として、福岡市に最も近い地点の気温、日射量予報値を使用した。対象地点の緯度は北緯 33.6 度、経度は東経 130.5 度となっている。使用した地点の情報を図 3-21 に示す。この地点の気温予報、日射量予報を 2020 年 1 月 1 日から 2023 年 3 月 31 日まで取得した。なお、GSM の配信時刻としては人口気温データ、予測太陽光発電量を導出した時と同様に電力の受渡日前日の午前 3 時としている。

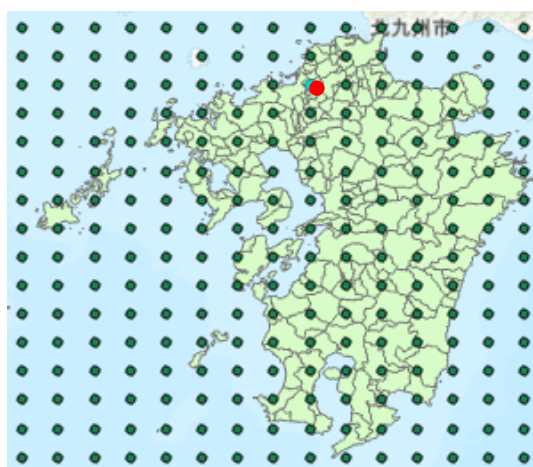


図 3-21 使用した地点の情報

このように取得したデータを、前項で作成した学習用データ中の人口気温データ、予測太陽光発電量と置き換え、価格予測を行うことにより GIS 上での重ね合わせによる効果について確認を行う。なお、学習用データの期間については人口気温データ、予測太陽光発電量を利用した場合と同様に 2020 年 1 月 1 日から予測対象日前日までとし、機械学習の手法も同様に Random Forest を使用した。表 3-3 に GIS を使用した場合と使用しない場合の比較を示す。なお、時間帯による差異を確認するために、朝夕モデル、昼間モデル、夜間モデルと全期間について比較を行った。また、誤差の評価には MAE を使用している。表 3-3 が示す通り、全ての時間帯において予測精度を向上できていることがわかる。なお、精度向上率については式(3.5)に示す数式で計算を行った。式(3.5)中の P_a は精度向上率を、 a_{GIS} は GIS を利用した際の予測精度、 a は GIS を使用しない場合の予測精度を示す。表 3-3 が示すように昼間モデルの予測精度向上率が著しく高いことがわかる。これは、昼間の時間帯においては、図 3-19(a)に示す通り、予測太陽光発電量、人口気温データの双方が予測精度に影響を与えるため予測精度が向上したためであると考えられる。また、太陽光発電設備は福岡市のような都市部ではなく郊外に多いため、福岡市の日射量だけでは九州全体の太陽光発電量を表現するのに不十分であるためであると考えられる。このように、GIS を利用することによる予測精度向上を確認することができた。一日分のデータの GIS 上の処理にかかる時間はおよそ 8 分と短く、実際の運用においても GIS 上の処理が予測配信時間に与える影響はわずかであるため、GIS を利用することによるメリットは大きい。このように、既存の予測手法を模擬した比較においても、高精度な予測が可能であることを示した。なお、実際の既存の予測手法との比較については、第 5 章において行うこととする。

表 3-3 GIS を使用した場合と使用しない場合の比較

	朝夕モデル	昼間モデル	夜間モデル	全期間
GIS 利用 [円/kWh]	4.56	4.73	3.63	4.27
GIS なし [円/kWh]	4.87	5.32	3.68	4.57
精度向上率 [%]	6.37	11.1	1.36	6.56

$$P_a = \frac{(a_{GIS} - a)}{a} \times 100 \quad (3.5)$$

3.7 まとめ

本章において、スポット市場価格の高精度な予測を目的とし、GISの利用により人口気温データ、予測太陽光発電量の導出を行った。また、スポット市場価格と関連するデータの取得を行い、スポット市場価格予測システムの構築を行った。先行研究と実際の予測誤差の比較から、Random Forest が最適な手法であることを確認、さらに時間帯ごとに予測モデルを分割することにより予測誤差を低減できることを確認した。時間帯ごとに予測モデルを分割することで重要度の測定も可能となり、それぞれの時間帯における特性も確認することができた。本予測モデルの利用により、実際のスポット市場価格を高精度で予測できることを確認した。

参考文献

- [1] 國松 亮一, 一般社団法人日本卸電力取引所, 卸電力取引所の仕組みと取引の現状, p.5(2019)
- [2] 令和3年度家庭部門のCO2排出実態統計調査業務委託業務, 株式会社インテージ, p.47(2021)
- [3] 夏季の省エネ・節電メニュー, 経済産業省(2022)
https://www.tohoku.meti.go.jp/s_shigen_ene/topics/pdf/220630_4.pdf
- [4] 家庭部門におけるエネルギー起源CO2, 環境省, p.14
<https://www.env.go.jp/content/000098696.pdf>
- [5] 国際エネルギー機関、冷房による電力需要が2050年に3倍増と予想, 電気事業連合会(2018)
https://www.fepc.or.jp/library/kaigai/kaigai_topics/1258019_4115.html
- [6] 平成30年度電力需給対策広報調査事業, 一般財団法人日本エネルギー経済研究所(2020), pp.210-211
- [7] 森平爽一郎, 気温オプションによる電力価格予測, 日本リアルオプション学会機関紙, 11巻, 1号, pp.35-45(2020)
- [8] 「全球数値予報モデルGPV(全球域・日本域)」, 一般財団法人気象業務支援センター
<http://www.jmbasc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>
- [9] 「内挿とは」, esri ジャパン
<https://www.esri.com/gis-guide/spatial/interpolation/>
- [10] 平成27年国勢調査 従業地・通学地による人口・就業状態等集計, 政府統計の統計窓口(e-Stat)
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/filedownload?statInfId=000031586670&fileKind=1>

- [11] 全国市区町村界データ, esri ジャパン
<https://www.esri.com/products/japan-shp/>
- [12] ラスター→ポイント(Raster to Point), esri
<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/latest/tool-reference/conversion/raster-to-point.htm>
- [13] 空間結合(Spatial Join), esri
<https://pro.arcgis.com/ja/pro-app/3.0/tool-reference/analysis/spatial-join.htm>
- [14] 2022年の自然エネルギー電力の割合, 環境エネルギー政策研究所
<https://www.isep.or.jp/archives/library/14364>
- [15] エネルギー基本計画の概要, 資源エネルギー庁(2021), p.12
- [16] 再エネ先進地・九州 太陽光の大量受け入れはこうして実現した, 日経エネルギーNext(2022),
<https://project.nikkeibp.co.jp/energy/atcl/19/feature/00002/00019/>
- [17] 再生可能エネルギー電気の利用の促進に関する特別措置法情報公表用ウェブサイト, 資源エネルギー庁
<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>
- [18] 今中 健雄, 時刻、休日、連休シフトによる下記ピーク負荷削減効果, (財)電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー
- [19] 発電所情報公開システム, <https://hjks.jepx.or.jp/hjks/outages>
- [20] 国内の2020年度の自然エネルギー電力の割合と導入状況, 環境エネルギー政策研究所
<https://www.isep.or.jp/archives/library/13427>
- [21] 木船久雄, 天然ガス(LNG)の価格形成に関する考察, 名古屋学院大学論集社会科学篇, 39巻, 4号, pp.39-60
- [22] 小山 堅, 原油価格とLNG価格のタイムラグ, IEEJ特別速報レポート(2015)
- [23] PETROLEUM&OTHER LIQUIDS, U.S. Energy Information Administration
<https://www.eia.gov/dnav/pet/hist/rwtcD.htm>
- [24] 取引市場データ, JEPX, <https://www.jepx.jp/electricpower/market-data/spot/>
- [25] scikit-learn, <https://scikit-learn.org/stable/>
- [26] Pythonによる機械学習入門, 株式会社システム計画研究所, p.60
- [27] 調査・統計用語集 ランダムフォレスト, 株式会社日経リサーチ
<https://service.nikkei-r.co.jp/glossary/random-forest>
- [28] 大村愛花, 藤本悠, 林泰弘, 澤敏之, 佐々木浩人, 福山直人, 西野由高, オープンデータに基づく電力スポット市場のエリア価格予測手法-複数予測スキームの統合アプローチの検討-, 電気学会論文誌 B, Vol. 141, No. 5, pp.366-373(2020)
- [29] 金子 弘昌, サポートベクター回帰, p.1
- [30] 巢籠 悠輔, 詳解ディープラーニング 第2版, p.279

第4章 最低価格の出現傾向の分析と価格予測への応用

4.1 まえがき

前章において、スポット市場価格予測システムのベースとなる部分の構築を行うことができた。本章においては、スポット市場の最低価格の出現に着目し価格予測システムの構築を行った。日本の電力市場である JEPX では、電力の供給過多に陥った場合には、最低価格である 0.01 円/kWh で電力が取引される場合がある。この最低価格の出現にはある程度の傾向があることに着目し、最低価格の出現傾向を分析したうえで予測システムの構築を行った。出現傾向の分析の結果、最低価格の出現には月の要素、曜日の要素、太陽光発電量の要素、直近の出現傾向の要素があることを発見した。これらの要素を考慮し、最低価格を予測するための変数である最低価格出現予測変数の導出をおこなった。最低価格出現予測変数と前章で構築したスポット市場価格予測システムを組み合わせ、最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築を行った。本予測システムは前章のような回帰予測モデルと、最低価格の出現を予測する分類モデルの組み合わせにより構築されている。本予測システムの利用により、最低価格の出現の予測が可能となり、精度の向上が可能となった。

4.2 JEPX の最低価格について

近年、太陽光発電設備の導入量は増加しており今後も導入量は増加していくことが予測されている[1]。スポット市場の価格は電力の需要と供給のバランスで決定されるため、太陽光発電量もスポット市場価格にも影響を及ぼす。特に、太陽光発電は自然変動電源であるため気象によって出力が変動する特徴を持つ。この変動がスポット市場価格に影響を及ぼしており、今後太陽光発電などの再生可能エネルギーの導入量の増加により、電力市場価格の変動が激しくなるという見込みも報告されている[2]。この傾向は海外市場においても同様であり、再生可能エネルギーの導入促進により電力市場価格の変動が激しくなるという見込みが同様に報告されている[3]。特に、九州エリアにおいては、電力の需要に対する太陽光発電の導入割合が日本の他エリアに比べ多いため、今後もスポット市場価格の変動は激しくなると考えられる[4]。九州エリアにおいて、春と秋の低需要期において太陽光発電の発電量の過剰により、太陽光発電の出力制御がしばしば行われている[5]。2023年4月～6月においては53日間出力制御が実施されており、この期間の半分以上の日数において出力制御が実施されている計算になる[6]。このように、電力の供給過多に陥ってしまった場合に、JEPXにおいては最低価格である0.01円/kWhで電力が取引される場合がある[7]。最低価格が出現しない場合の実際の需給曲線を図4-1に、最低価格が出現した場合の実際の需給曲線を図4-2に示す。先述のとおり、需給曲線の交点が電力市場価格となるが、図4-2においては買

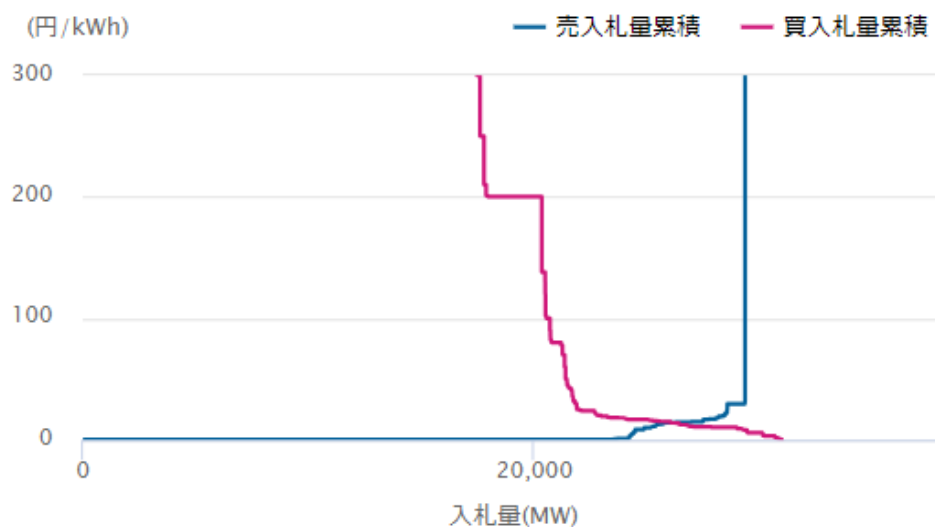


図 4-1 通常時の需給曲線

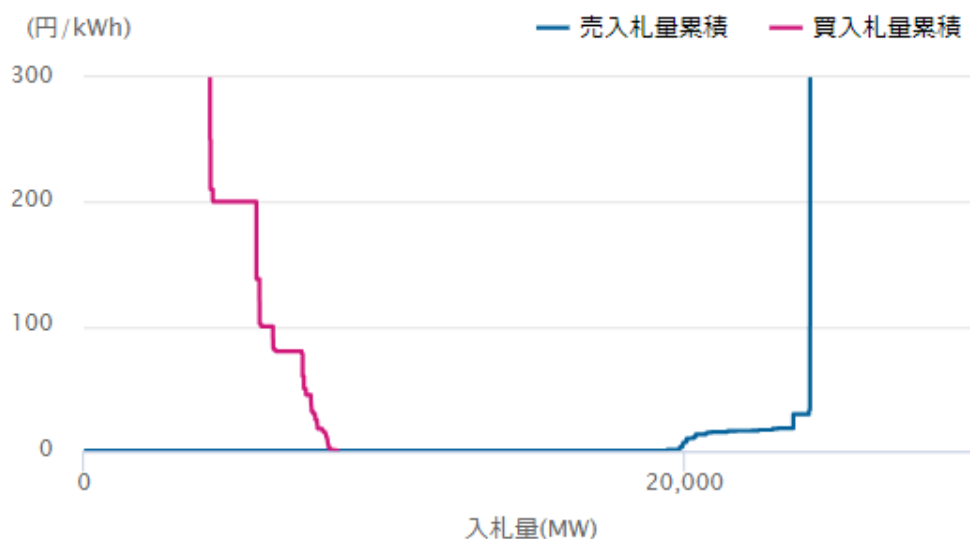


図 4-2 最低価格が出現した場合の需給曲線

入札量に対し売入札量が多すぎるため、需給曲線の交点が 0.01 円/kWh となっている。このように、需要に対し供給が多すぎる場合には、0.01 円/kWh が出現する。この 0.01 円/kWh の電力は再生可能エネルギーの導入量の増加に伴い出現が増加しており、2020 年 3 月には 2019 年 3 月と比較し 5.84 倍の時間帯で 0.01 円/kWh が出現している[8]。このように、今後も 0.01 円/kWh の出現は増加していくと考えられる。

この最低価格の出現は小売電気事業者、発電事業者の双方にとって重要となる。小

売電気事業者において、最低価格の出現が予測可能であれば蓄電池やEVとの組み合わせにより、最低価格が出現する時間帯に電力を購入し蓄電池に貯蔵し、高い時間帯に放電し需要家に供給することで電力コストを低減することが可能となる。また、最低価格が出現する時間帯に購入し、蓄電池に貯蔵していた電力を市場で取引することで収益を上げることも可能となる。一方、発電事業者においても最低価格の出現予測は重要となる。再生可能エネルギーの買取制度において、これまでのFIT制度からFIP制度への移行が2022年4月から始まっている[9]。FIT制度においては、再生可能エネルギーで発電した電力を電力会社が一定価格で一定期間買い取られていたが、FIP制度においては、再生可能エネルギーで発電した電力を電力市場や相対取引で自由に売電し、そこに「あらかじめ決めたFIP価格と参照価格の差(=プレミアム)×売電量」の収入を上乗せする仕組みで再生可能エネルギーに対するインセンティブが付与されている[10]。図4-3にFIT制度とFIP制度の比較を示す。図4-3が示す通り、FIT制度では一定の価格で電力を売電できるが、FIP制度においては、状況により売電収入が大きく変化することがわかる。とくに、電力市場を利用し再生可能エネルギーで発電した電力を売電する場合は、売電収益に電力市場価格が大きく影響してくる。太陽光発電が最も発電する時間帯は昼間であり、スポット市場価格が安い時間帯も昼間であるため、売電収益の最大化には安い時間帯に発電した電力を蓄電池等に貯蔵し、高い時間帯に売電することが必要である。これには、スポット市場価格の予測が必要不可欠である。また、プレミアムの付与にも最低価格の出現がかかわってくる。FIP制度におけるプレミアムは、FIP事業の電力供給量に応じ付与されるが、最低価格が出現した時間帯において供給された電力供給量に対してはプレミアムの付与はされないことになっている[12]。そのため、最低価格が出現した時間帯に市場を通し売電を行うと、0.01円/kWhで電力が買い取られたうえ、プレミアムも付与されない。そのため、発電事業者においても売電収益の最大化のために、最低価格の出現予測が重要となる。

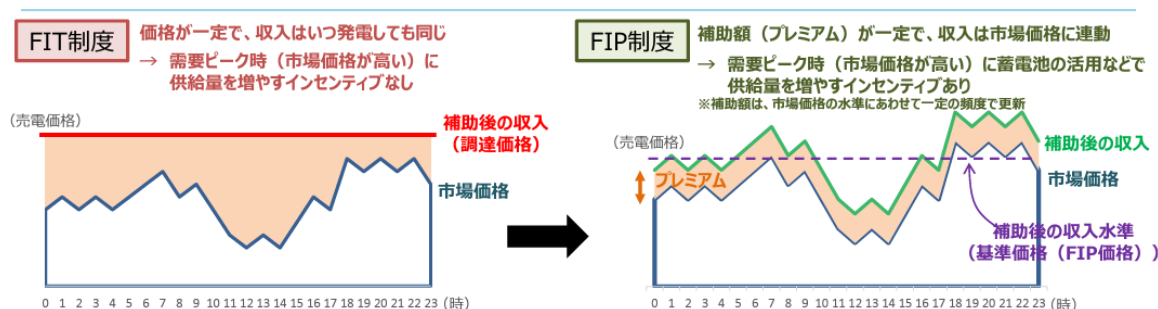


図4-3 FIT制度とFIP制度の比較[11]

4.3 最低価格の出現傾向の分析と最低価格出現予測変数の導出

前項で、最低価格の出現予測の重要性について説明した。この最低価格の出現を予測するためには最低価格の出現傾向の分析が必要となる。そのため、過去のデータを活用し、どのような条件で最低価格が出現しやすいかの分析を行った。

前述のとおり、電力市場価格は需要と供給のバランスで決定される。そのため、電力需要が低く、供給が多い場合に最低価格は出現しやすくなると考えられる。そのため、需要の大小によって最低価格の出現傾向には差があると考え、月ごとの最低価格の出現傾向について分析を行った。月ごとの最低価格の出現傾向の分析にあたり、使用するデータとしては、2018年1月1日から2023年3月31日までのデータを使用した。図4-4に月ごとの最低価格の出現回数を示す。図4-4が示すように、月ごとに最低価格の出現回数が大きく異なることがわかる。3月から5月の春と9月から11月の秋に最低価格の出現回数は増加する一方、12月から2月の冬、6月から8月の夏には最低価格の出現回数が減少していることがわかる。これには電力需要と太陽光の発電量が大きく関係してくる。電力需要は季節に依存し変化する。冷暖房需要により夏季と冬季の電力需要は春季、秋季と比べ多くなることが知られている[13]。図4-5に月ごとの電力需要の変化を示す。図4-5が示す通り、春季と秋季の電力需要は夏季、冬季の電力需要よりも少ないことがわかる。時代が進むに伴い、冷暖房の普及率も向上し月ごとの電力需要も変化していることもわかる。また、太陽光発電量も季節によって変動する。図4-6に九州電力大牟田メガソーラー発電所の推定発電電力量を示す[14]。図4-6から、月ごとに太陽光の発電量が異なり、春から秋にかけての発電量が多く、冬場

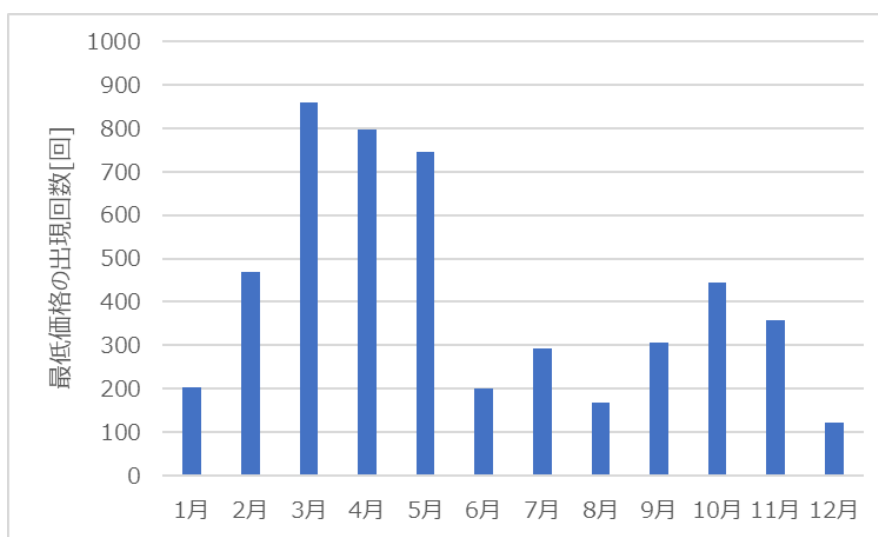
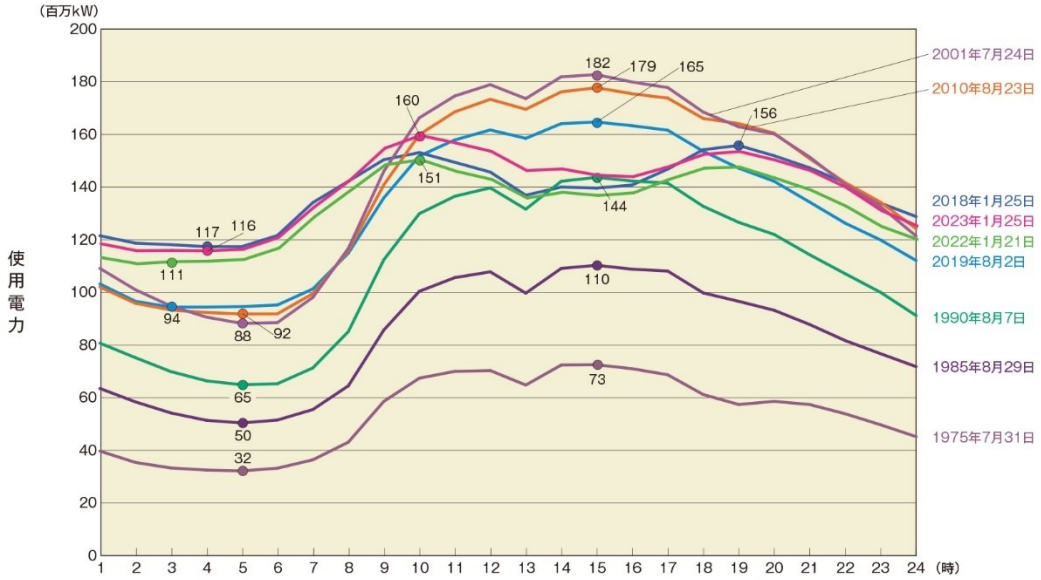


図4-4 最低価格の月ごとの出現回数

最大電力発生日における1日の電気の使われ方の推移



(注) 1975年のみ9電力合計・発電端、1985~2015年は10電力合計・発電端、2016年以降は10エリア合計・送電端

図 4-5 月ごとの電力需要の変化[13]

大牟田メガソーラー発電所 推定発電電力量 (万kWh)

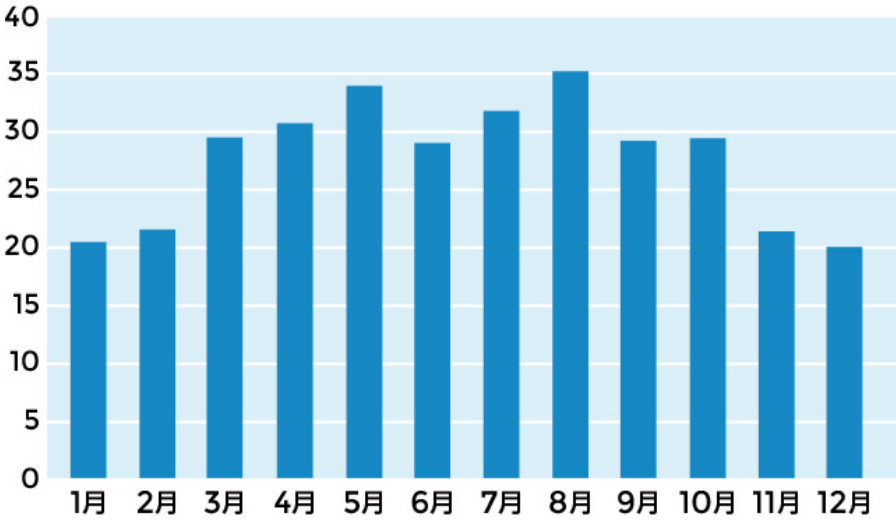


図 4-6 大牟田メガソーラー発電所の推定発電電力量[14]

は日照時間が少ないため、発電量が少なくなっていることがわかる。このように、電力需要と太陽光の発電量の関係から、月ごとの最低価格の出現に変動が生じていると考える。電力需要が少なく太陽光発電量の多い春季と秋季は最低価格が出現しやすい、

太陽光発電量は多いが電力需要も多い夏季と、太陽光発電量が少なく電力需要が多い冬季には最低価格が出現しにくくなっている。以上の結果から、月の係数として、式(4.1)を定義する。式中の M が月の係数を示す。式(4.1)により、予測対象日の月による最低価格の出現傾向の定量化が可能となる。

$$M = \frac{\text{予測対象月の最低価格の出現回数}}{\text{最低価格の最大出現月の出現回数}} \quad (4.1)$$

次に、曜日ごとの最低価格の出現傾向についての分析を行う。電力需要は曜日により異なる。例えば、休日は平日と比較し電力需要は少なく、休日の中でも日曜日の方が土曜日よりも電力需要は少ない[15]。これは、休日においてはオフィスや工場が稼働しておらず、土曜日と比較し日曜日の方が稼働していないオフィス、工場が少ないためである。そのため、曜日により需要が変動し、最低価格の出現傾向も変化すると考え曜日による最低価格の出現傾向の分析を行った。図4-7に曜日ごとの出現割合を示す。出現割合で評価したのは、曜日により母数が異なるためである。図4-7より、曜日により大きく出現傾向が異なることがわかる。前述のとおり、平日は電力需要が多くなるため最低価格の出現割合は少なくなる一方、休日は電力需要が少なくなるため最低価格の出現割合は多くなっている。また、休日中では土曜日が最も出現割合が少なくなっているが、土曜日に稼働するオフィス、工場が多いためであると考えられる。このように、曜日による出現傾向が確認できた。以上の結果から、曜日の係数として、式(4.2)を定義する。式(4.2)により、予測対象日の曜日による最低価格の出現傾向の定量化が可能となる。

$$W = \frac{\text{予測対象日の曜日の最低価格の出現割合}}{\text{最低価格の最大出現曜日の出現割合}} \quad (4.2)$$

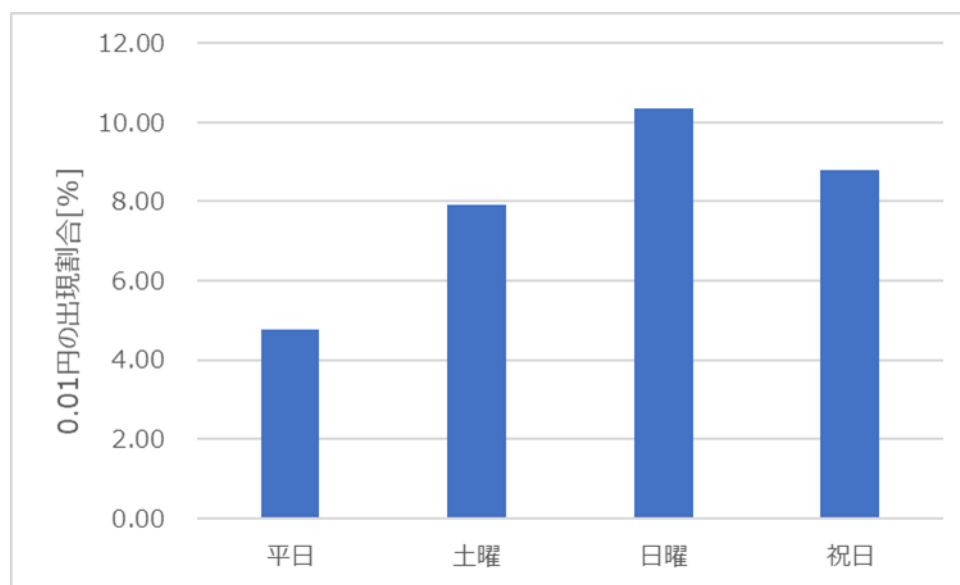


図 4-7 曜日ごとの出現割合

次に、太陽光発電量による最低価格の出現傾向についての分析を行う。先述のとおり、最低価格の出現には太陽光発電量が密接に関係している。特に太陽光発電量の多い九州エリアにおいては、大幅な電力余剰が発生し、最低価格が多く出現している[16]。このように、太陽光の発電量が多い場合には、最低価格は出現しやすく、逆に太陽光発電量が少ない場合には、最低価格は出現しにくくなると予想される。前章で、GISを利用して予測太陽光発電量の導出を行っているため、これを使用し太陽光発電量による最低価格の出現傾向の定量化を行う。式(4.3)に太陽光発電量の過去平均との比較による係数を示す。過去の太陽光発電量よりも予測対象日の太陽光発電量が多ければ最低価格が出現しやすく、逆に予測対象日の太陽光発電量が過去平均よりも少なければ最低価格は出現しにくいため、このような式で定義した。なお、比較対象の過去データとしては、一年前の同月、同時刻における平均太陽光発電量を利用した。式(4.3)により、予測対象日の最低価格の太陽光発電量による出現傾向の定量化が可能となる。

$$S_c = \frac{\text{予測対象日時}の\text{予測太陽光発電量}}{\text{過去の予測太陽光発電量}} \quad (4.3)$$

最後に、直近の最低価格の出現傾向についての分析を行う。最低価格の出現傾向は年度により大きな違いを見せる。図4-8に2020年から2023年の7月における最低価格の出現回数をグラフ化したものを示す。図4-8が示すように、同じ月でも年度により最低価格の出現回数は大きく異なっていることがわかる。これは、太陽光発電設備の増加による太陽光発電量の増加や、燃料価格の変動などの要素がかかわってくるため、このような傾向が生じると考えている。そのため、直近の最低価格の出現傾向を考慮するため、式(4.4)により過去の出現傾向との比較による係数の導出をおこなった。

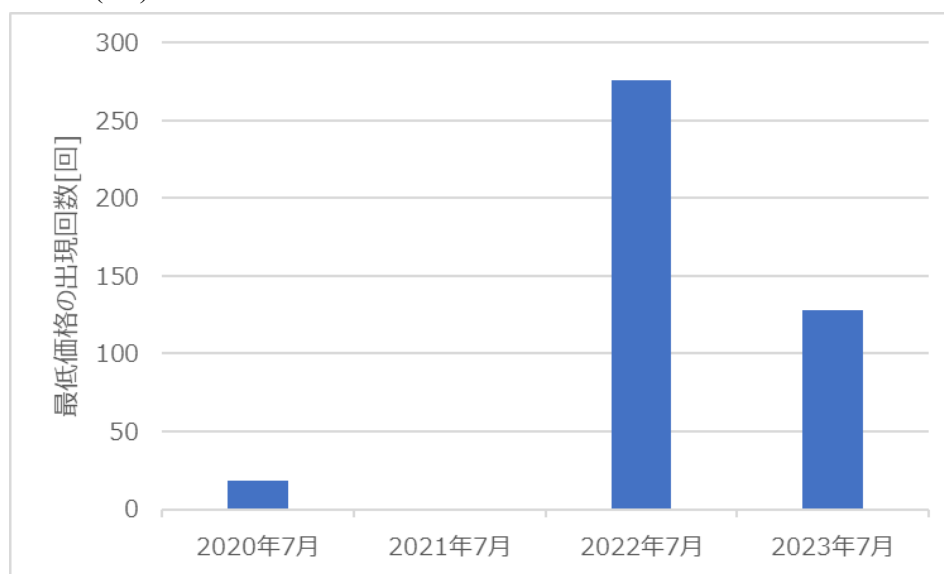


図4-8 2020年から2023年度の7月における最低価格の出現回数

$$A_c = \frac{\text{直近の最低価格の出現回数}}{\text{過去の同一期間における最低価格の出現回数}} \quad (4.4)$$

式(4.4)により、直近の最低価格の出現傾向の定量化が可能となる。なお、本論文においては直近一か月の出現傾向で係数の導出を行っている。直近一か月とした理由については、4.5項で説明を行う。

これらの結果から、最低価格の出現傾向を把握することが可能となった。これらの係数を利用することで、最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築を行う。これらの係数をそのまま説明変数として利用してしまうと、煩雑なモデルとなってしまい、どの要素が最低価格の出現に寄与するかがわからなくなってしまい予測精度の低下が懸念されたため、式(4.5)に示す最低価格出現予測変数を定義することで最低価格の出現を一つの係数で表すこととした。式中の L は最低価格出現予測変数を、 M は月の係数を、 W は曜日の係数を、 S_c は太陽光発電量の過去平均との比較による係数を、 A_c は過去の最低価格の出現回数との比較による係数を示す。

$$L_c = M \times W \times S_c \times A_c \quad (4.5)$$

式(4.5)は数値が大きければ最低価格の出現が期待され、数値が小さければ最低価格の出現が期待されないといった意味を持つ。表4-1に各係数と最低価格の出現回数の関係性を示す。表4-1が示す通り、各係数が大きいくほど最低価格は出現しやすく、各係数が小さいほど最低価格が出現しにくくなっている。そのため、最低価格出現予測変数も大きいほど最低価格の出現が期待され、最低価格出現予測変数が小さいほど最低価格の出現が期待されなくなる。なお、最低価格出現予測変数は導出後に標準化を行う。そのため、最低価格出現予測変数は平均0、分散1のデータとなっている。このように、最低価格出現予測変数により、最低価格の出現を定量化することが可能となった。

表 4-1 各係数と最低価格の出現の関係性

最低価格の出現回数	S_c	A_c	M	W
多い	大	大	大	大
少ない	小	小	小	小

4.4 最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築

前項までで、最低価格出現予測変数の導出を行った。本項においては、導出した最低価格出現予測変数を使用し、最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築を行う。

本予測モデルの構築にあたり、最低価格である 0.01 円/kWh の出現を予測する必要がある。そのため、機械学習モデルのうち、分類を使用して最低価格出現予測モデルの

構築を行った。前章で構築したスポット市場価格予測システムは回帰であり、数値を出力していたが、分類は様々なものを分類するものであり、データが属するクラスを予測するものである。最低価格出現予測モデルにおいては、最低価格が出現する、しないの二値分類で分類モデルの構築を行った。

図4-9に構築した最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測モデルのイメージ図を示す。本予測モデルは先述の分類モデルと前章で説明した回帰モデルから構成されている。説明変数としては、前章で説明したものに加え、本章で説明した最低価格出現予測変数を使用している。それらの説明変数を使用し、価格予測のための回帰モデルと、最低価格出現予測のための分類モデルの学習を行った。回帰モデルについては予測価格を出力し、分類モデルについては最低価格の出現が予測されるか否かを出力する。図4-9で示すように、分類モデルが最低価格の出現を予測したコマの予測結果のみ0.01円/kWhへ出力を変換することで、最低価格の出現を予測するシステムの構築を行う。最終的に、分類モデルが最低価格の出現を予測した時間すべての予測結果を0.01円/kWhとし、最低価格の出現を考慮できる予測システムの構築を行った。なお、分類モデル、回帰モデルともに Random Forest を利用して予測モデルの構築を行った。

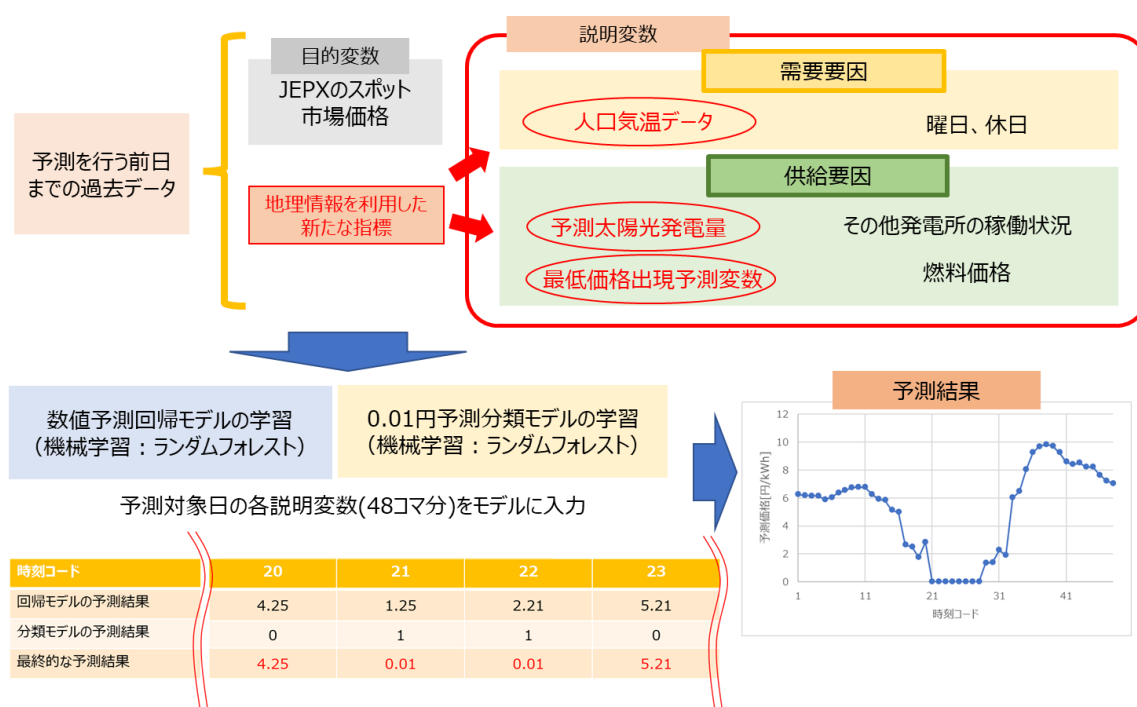


図4-9 最低価格の出現を考慮した予測モデル

4.5 予測の評価

前項までで構築した予測モデルを使用してスポット市場価格予測を行った場合の予測精度の評価を行う。なお、前章と同様に予測対象は九州エリアプライスとし、予測対象期間については2022年度、学習に利用するデータの期間については2020年1月1日から予測対象日前日までとした。また、予測の評価には平均絶対誤差(MAE)と正規化平均絶対誤差(NMAE)を利用する。正規化平均絶対誤差は平均絶対誤差を評価期間の平均スポット市場価格で割ったものである。先述のとおり過去の最低価格の出現回数との比較による係数の導出において、評価を行う期間を設定する必要がある。評価を行う期間を2週間、1か月とした場合の予測精度の比較を表4-2に示す。表4-2が示す通り、1か月を利用した場合に予測精度が高くなったため、1か月を使用する。表4-3に2022年度における価格予測シミュレーションの結果を示す。表4-3では、回帰のみを利用した場合と本章で説明した最低価格出現予測分類モデルと回帰モデルを利用した場合の比較を行っている。表4-3が示すように回帰のみと比較し本章で提案した回帰+分類モデルの方が予測精度を向上できていることがわかる。また、最低価格の出現には太陽光発電量が密接に関係するため、最低価格が出現しやすいのは昼間の時間帯である。そのため、昼間の時間帯についても別途評価をおこなう。表4-4に、昼間の時間帯(9:00~17:00)での予測精度の評価を行った結果を示す。表4-2が示す通り、昼間の時間帯については大幅に予測精度を向上できていることがわかる。また、図4-10に2023年3月13日の予測結果の比較を示す。図4-10が示す通り、昼間の最低価格の出現を高精度で予測することができている一方で、夜間については最低価格が出現しにくいので大きな予測精度の変化はないことがわかる。

表 4-2 評価期間による精度の比較

	MAE [円/kWh]	NMAE [%]
2週間	4.16	28.86
1か月	4.14	28.71

表 4-3. 全時間帯での評価

	MAE [円/kWh]	NMAE [%]
回帰のみ	4.27	29.61
回帰+分類	4.14	28.71

表 4-4. 昼間の時間帯(9:00~17:00)での評価

	MAE [円/kWh]	NMAE [%]
回帰のみ	4.73	45.81
回帰+分類	4.37	42.38

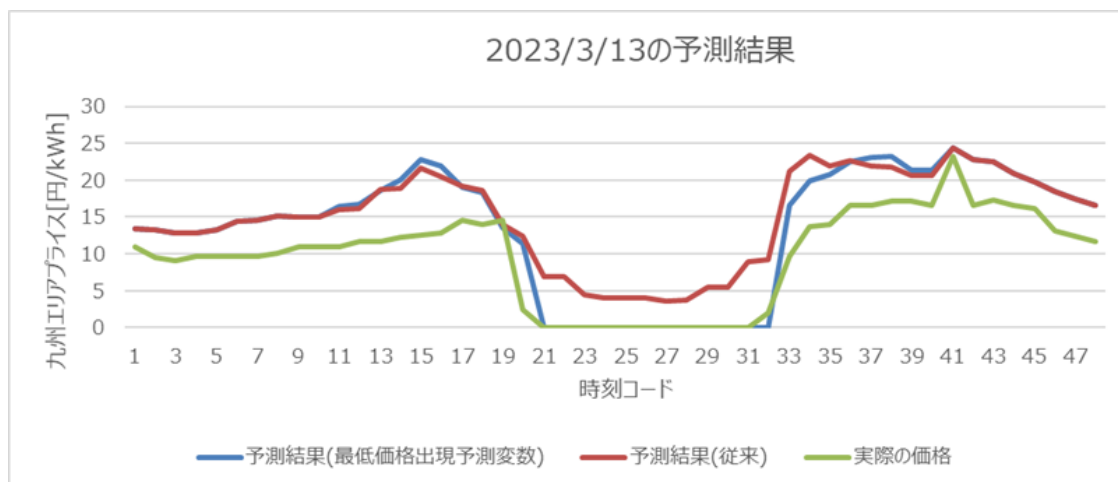


図 4-10 2023 年 3 月 13 日の予測の評価

4.6 まとめ

本章において、最低価格の出現に着目し、最低価格の出現を予測するために予測システムの改良を行った。最低価格の出現傾向の分析を行い、最低価格の出現には月の要素、曜日の要素、太陽光発電量の比較の要素、過去の最低価格の出現回数との比較の要素があることを実際のデータから確認した。それらの要素の導出を行い、最終的に掛け合わせることで最低価格出現予測変数の導出を行った。最低価格出現予測変数は、数値が大きいほど最低価格の出現が期待され、数値的に小さいほど最低価格の出現が期待されないといった意味を持つ。この最低価格出現変数と前章で導出した各種説明変数を利用し、最低価格出現予測モデルの構築を行った。最低価格出現予測モデルは最低価格の出現を予測するモデルであり、予測結果として最低価格が出現する、しないを出力する。そのため、従来の価格予測モデルと組み合わせることで、最低価格の出現を考慮した価格予測モデルの構築を可能とした。最低価格の出現の考慮により、予測精度の向上が可能であり特に最低価格が出現しやすい昼間の時間帯の予測精度を向上することが可能である。最低価格の出現は発電事業者、小売り電気事業者の双方にとって重要であるため、本予測モデルの利用により、双方の収益向上を見込むことができる。

参考文献

- [1] エネルギー基本計画の概要, 資源エネルギー庁, p.12(2021)
- [2] 荻本和彦, 岩船由美子, 占部千由, 東仁, 磯永彰, 再エネ大量導入時のスポット市場価格分析, 令和 3 年電気学会全国大会, pp.212-213(2021)
- [3] I. Milstein and A. Tishler, Can price volatility enhance market power? The case of renewable technologies in competitive electricity markets, Resource Energy Economics, Vol.41, pp.70-90(2015)

- [4] 九州本土における再生可能エネルギーの出力制御について,九州電力(2018)
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/017_s01_00.pdf
- [5] 2023年度出力制御見通し他について,九州電力送配電(2023),
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/shin_energy/keito_wg/pdf/047_02_02.pdf
- [6] 九州エリアにおける再生可能エネルギー発電設備(自然変動電源)の出力抑制の
検証結果,電力広域的運営推進機関, p.3(2023)
- [7] 一般社団法人日本卸電力取引所取引規定,一般社団法人日本卸電力取引所,
p.4
- [8] 九州エリアにおける太陽光・風力発電の出力制御に関する分析結果と出力抑
制電力量率の低減策,自然エネルギー財団, p.2(2020)
https://www.renewable-ei.org/pdfdownload/activities/Analysis_CurtailmentofSolarandWindpowerinKyushu2020.pdf
- [9] 馬上 丈司, FIT 制度と FIP 制度の違いを知る, p.16(2023)
- [10] FIP 制度の最新状況の把握, 環境省, p.347(2022)
- [11] FIP 制度の詳細設計とアグリゲーションビジネスのさらなる活性化④, 資源エ
ネルギー庁, p.3(2021)
- [12] FIP 制度下における基準価格とプレミアム, 資源エネルギー庁(2022)
https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/dl/fip_2020/fip_seido_gaiyou.pdf
- [13] 「原子力・エネルギー」図面集, 一般社団法人 日本原子力文化財団, 1-2-10
- [14] 太陽光発電 Q&A, 九州電力
https://www.kyuden.co.jp/effort_renewable-energy_photovoltaic_faq.html
- [15] 今中 健雄, 時刻、休日、連休シフトによる夏季ピーク負荷削減効果, (財)電
力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー, p.3(2011)
- [16] 再生可能エネルギーと電力市場, 三菱総合研究所(2020)
<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20200327.html>

第5章 さらなる予測誤差低減に向けた検討

5.1 まえがき

前章までの内容により、最低価格の出現を考慮したスポット市場価格予測システムの構築を行うことができた。また、価格と関連のある情報を説明変数として扱うことで高精度な予測システムの構築が可能となった。本章においては、さらなる予測精度の向上のため、スポット市場価格と関連のある情報の整理を行い、価格予測システムに組み込んだうえでシステムの改良を行う。具体的には、雲量の影響、原子力発電の影響、予測誤差の小さい気象予報データを利用した場合の影響についての評価を行い価格予測システムに組み込んだ。これらの情報の利用により価格予測精度の向上が可能となり、高精度なスポット市場価格予測システムの構築が可能となった。

5.2 雲量の影響について

5.2.1 雲量と価格予測誤差の関係性

前章までで構築したスポット市場価格予測システムを利用し、毎日価格予測を配信するプログラムを作成し日々価格予測精度の検証を行った結果、気象により価格予測精度が変動することが確認できた。そのため、実際に気象データと予測誤差の評価を行った。評価の方法としては、2022年度の価格予測データを使用し、朝夕モデル、昼モデル、夜モデルそれぞれの予測精度と気象データの比較を行う。気象データとしては、tenki.jpが提供している過去の気象データを利用した[1]。過去の気象データを参考に、九州エリアの気象が晴れであった場合と曇りあるいは雨であった場合の二つに予測結果を分類し、晴れの場合と曇りあるいは雨の場合の予測精度の差についての調査を行う。表 5.1, 表 5.2, 表 5.3 に気象別の時間帯ごとの予測モデルの予測誤差の比較を示す。なお、予測期間は 2022 年度とし、予測精度の評価には MAE を使用した。また、予測モデルの学習期間は 2020 年 1 月 1 日から予測対象日の前日までとしている。

表 5-1 朝夕の予測誤差 [円/kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
晴	3.91	3.94	5.88	5.70	4.56	5.10	4.75
曇、雨	4.36	3.51	4.04	6.23	4.38	5.45	5.96
	11月	12月	1月	2月	3月	平均	
晴	4.86	5.16	4.14	2.06	2.44	4.63	
曇、雨	5.70	5.76	3.61	2.84	2.51	4.53	

表 5-2 昼の予測誤差 [円/kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
晴	2.21	2.54	4.84	4.35	4.18	4.56	4.48
曇、雨	6.67	4.70	4.24	7.57	5.43	5.39	7.91
	11月	12月	1月	2月	3月	平均	
晴	4.58	4.40	4.77	2.72	0.93	3.71	
曇、雨	4.92	5.86	4.17	3.32	2.29	5.21	

表 5-3 夜の予測誤差 [円/kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
晴	3.36	3.37	3.90	4.60	3.94	3.88	4.05
曇、雨	3.09	2.73	1.83	4.46	2.60	3.66	4.20
	11月	12月	1月	2月	3月	平均	
晴	5.36	5.90	4.30	2.54	2.45	3.97	
曇、雨	5.58	5.64	2.51	2.19	2.62	3.43	

表 5-2 が示す通り、昼間の予測誤差については晴と曇あるいは雨の場合との比較で大きく誤差が違ってくる。一方で、朝夕、夜モデルについては晴と曇あるいは雨の日の予測誤差に大きな差はないことがわかる。このように、昼間の予測精度に気象により大きな差があることが分かった。本評価では、実際の気象データを使用しているが、予測にこの影響を考慮するためには予報データを使用する必要がある。これまで使用してきた気象庁が提供する GSM データでは雲量の予報も提供される [2]。雲量の予報は四種類の予報(全雲量、上層雲量、中層雲量、下層雲量)が提供されているが、全雲量を使用して評価を行うこととする。雲量予報データは、気温予報、日射量予報と同様、気象業務支援センターから入手したバイナリーデータを ArcPy の利用によりデコードし、位置情報、雲量情報を取り出して利用する。図 5-1 にデコードした雲量予報データを示す。なお、雲量予報データについては、デコードの際に使用する範囲の位置情報を指定して取得している。今回は九州エリアを対象としているため、九州エリアの雲量データを取得している。

1	緯度	経度	雲量
2	34	129.25	66.94336
3	34	129.5	68.89648
4	34	129.75	74.85352
5	34	130	84.17969
6	34	130.25	91.69922
7	34	130.5	97.26563
8	34	130.75	97.60742

図 5-1 雲量データの例

図5-1が示す通り、百分率で提供されている。本雲量データを使用し予測誤差の評価を行う。評価対象エリアを九州エリアとし、雲量はその時間帯の九州エリア全体の雲量の平均値を使用した。気象データでの評価と同様に、雲量予報と予測誤差の評価を時間帯別のモデルごとに行う。なお、評価においては雲量が50%以上、50%未満の二つにデータを分けたうえで、誤差の評価を行う。

表 5-4 朝夕の予測誤差の雲量での評価 [円/kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
50%以上	3.59	4.06	4.03	5.11	4.56	4.52	5.91
50%未満	4.36	2.93	6.34	5.75	4.39	5.99	4.94
	11月	12月	1月	2月	3月	平均	
50%以上	5.44	5.13	3.81	3.07	3.58	4.37	
50%未満	4.90	5.65	5.16	3.25	3.23	4.70	

表 5-5 昼の予測誤差の雲量での評価 [円/kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
50%以上	7.11	4.66	4.14	6.84	4.66	5.19	7.67
50%未満	1.20	1.96	4.10	5.45	4.55	3.88	4.62
	11月	12月	1月	2月	3月	平均	
50%以上	4.69	5.65	4.04	2.93	3.16	5.07	
50%未満	3.90	5.38	4.48	2.82	1.17	3.67	

表 5-6 夜の予測誤差の雲量での評価 [円/kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
50%以上	2.70	3.09	2.42	4.71	2.53	3.53	4.23
50%未満	4.04	2.25	2.91	3.73	4.12	4.00	4.05
	11月	12月	1月	2月	3月	平均	
50%以上	4.71	6.34	2.54	2.79	2.39	3.42	
50%未満	5.94	5.34	3.90	2.09	2.70	3.89	

このように、雲量で評価した場合においても昼間の予測精度において雲量が多い場合と少ない場合において差があることがわかった。気象、雲量によって予測精度が昼間の時間帯に変化する理由については以下のように考察する。一つ目の要因として、照明需要の変化があると考えられる。室内の照明等の照明需要は一般的に気象によって変動する[3]。例えば、気象が曇りや雨の場合には室内が暗くなるため、照明を点灯する一方、晴れの場合には照明を点灯しなくても室内の明るさはある程度確保できるので照明を点灯しない場合もある。そのため、昼間においては気象により照明需要が変化するため、予測精度への影響があったと考えられる。また、太陽光発電量についても雲量と関係があるため、現状で日射量予報データのみを使用して太陽光発電量を予測

しているが、雲量も太陽光発電量へ影響を及ぼしている可能性があるため、雲量と予測精度に関係があるかと思われる。このように、予測精度と雲量に関係があったため、雲量予報をスポット市場価格予測に組み込む。

5.2.2 雲量を追加した場合の予測精度への影響

前項で、予測精度に対し、雲量が影響することを述べた。本項では雲量を前章で利用した学習用データに組み込むことで、雲量を利用したスポット市場価格予測システムの構築と予測精度への影響についての評価を行う。

使用した雲量データとしては、前項で使用したのと同様に GSM 気象予報データをデコードした九州エリアの雲量データを使用する、また、気象予報のタイミングについても、第3章で利用した気温データ、日射量予報データと同様に予測対象日前日3時に配信される気象予報データを使用した。取得した雲量予報データの平均値をその時間帯の九州エリアの平均雲量予報値として使用する。図5-2に雲量予報データを組み込んだ場合の学習用データを示す。このように、新しく雲量予報の項目が追加されていることがわかる。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	人口_気温	太陽光発電年	年	月	日	曜日	時刻コード	休日	発電停止総	原油価格	エリアプライス	雲量
2	275.7962	0	2020		1	1	3	1	1	2974	55.97	5.41 21.10596
3	275.7962	0	2020		1	1	3	2	1	2974	55.97	5.16 21.10596
4	275.7268	0	2020		1	1	3	3	1	2974	55.97	5.16 19.4219
5	275.7268	0	2020		1	1	3	4	1	2974	55.97	5.16 19.4219
6	275.679	0	2020		1	1	3	5	1	2974	55.97	5.16 18.69125
7	275.679	0	2020		1	1	3	6	1	2974	55.97	5.16 18.69125
8	275.6493	0	2020		1	1	3	7	1	2974	55.97	5.16 18.45245
9	275.6493	0	2020		1	1	3	8	1	2974	55.97	5.16 18.45245
10	275.6348	0	2020		1	1	3	9	1	2974	55.97	5.16 19.68791
11	275.6348	0	2020		1	1	3	10	1	2974	55.97	5.16 19.68791
12	275.6817	0	2020		1	1	3	11	1	2974	55.97	5.16 20.79493
13	275.6817	0	2020		1	1	3	12	1	2974	55.97	5.16 20.79493
14	275.7451	0	2020		1	1	3	13	1	2974	55.97	5.16 21.55889
15	275.7451	0	2020		1	1	3	14	1	2974	55.97	5.16 21.55889
16	275.7341	1.82E+08	2020		1	1	3	15	1	2974	55.97	5.16 22.61378
17	275.7341	1.82E+08	2020		1	1	3	16	1	2974	55.97	5.16 22.61378

図 5-2 雲量を利用した学習用データの例

本データを使用し、価格予測のシミュレーションを行った。予測対象期間についてはこれまで同様 2022 年度とし、学習期間についても 2020 年 1 月 1 日から予測対象日前日までとした。予測に使用する機械学習モデルは、これまでと同様に回帰モデル、分類モデルともに Random Forest とした。表 5-7 に全時間帯での予測精度の評価を示す。なお、比較対象としては、前章で構築した最低価格の出現を考慮した予測モデルとし、評価指標として MAE と NMAE を使用した。表 5-7 が示す通り、予測精度の向上を図れていることがわかる。雲量と予測精度の関係から、特に昼間において予測精度に雲量に関係していた。そのため、昼間の時間帯についても予測精度の評価を行う。表 5-8 に昼間の時間帯(9:00~17:00)における予測精度の比較を示す。なお比較対象としては最

表 5-7 全時間帯での評価

	MAE [円/kWh]	NMAE [%]
雲量なし	4.14	28.71
雲量あり	4.08	28.29

表 5-8 昼間の時間帯(9:00~17:00)での評価

	MAE [円/kWh]	NMAE [%]
雲量なし	4.37	42.38
雲量あり	4.16	40.36

低価格の出現を考慮した場合の予測モデルとしている。表 5-7 が示すように、全時間帯には少しの差であるが、予測精度を改善できていることがわかる。一方、表 5-8 が示すように、昼間の時間帯においては大きく予測誤差を低減できていることがわかる。これは、先述の通り雲量の影響は昼間に大きく作用しているため、昼間の予測精度に大きな差が生まれたためであると考えられる。このように、雲量の要素を追加することで予測精度を改善することができた。

5.3 原子力発電の影響の考慮

5.3.1 原子力発電の稼働状況が及ぼすスポット市場価格への影響

第3章で説明した通り、発電所の稼働状況については HJKS から情報を取得し稼働停止している発電所の総発電量を発電所停止容量とすることでスポット市場価格予測システムの説明変数としている。また、燃料価格については原油価格を火力発電所の燃料価格と仮定することで、スポット市場価格予測システムの説明変数としている。東京電力や九州電力等の旧一般電気事業者においては、JEPX のスポット市場へ入札する際に限界費用での入札が求められている[4]。限界費用とは、発電量を 1 kWh 増加させるのに必要なコストであり、固定費を含まない発電コストであるため、おおよそ燃料費に相当するコストである。一般的に、再生可能エネルギーは燃料費がかからないので限界費用は低く、火力発電は燃料費がかかるので限界費用は高い。図 5-3 に限界費用を発電方式順に並べた場合のイメージ図を示す[5]。図 5-3 が示すように、水力や太陽光発電等の再生可能エネルギーは限界費用が低く、天然ガスや原油等の火力発電は限界費用が高くなっていることがわかる。また、原子力発電については再エネと火力発電の間程度の限界費用となっている。この限界費用の細かい数値を見ていく。図 5-4 に発電方式ごとの発電コストの一覧を示す[6]。なお、図 5-4 中の数値は 2014 年度における試算値である。図 5-4 中のオレンジ色の部分が燃料費であり、おおよその限界費用を示している。この図中では、太陽光発電や水力発電、風力発電の燃料費がほとんど 0

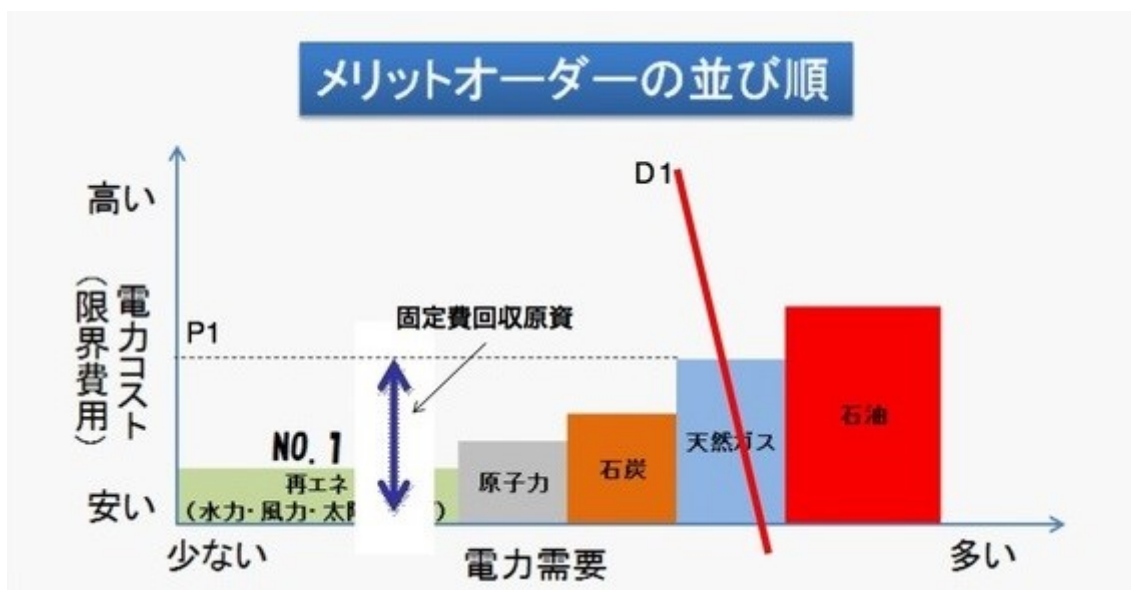


図 5-3 限界費用の順番[5]

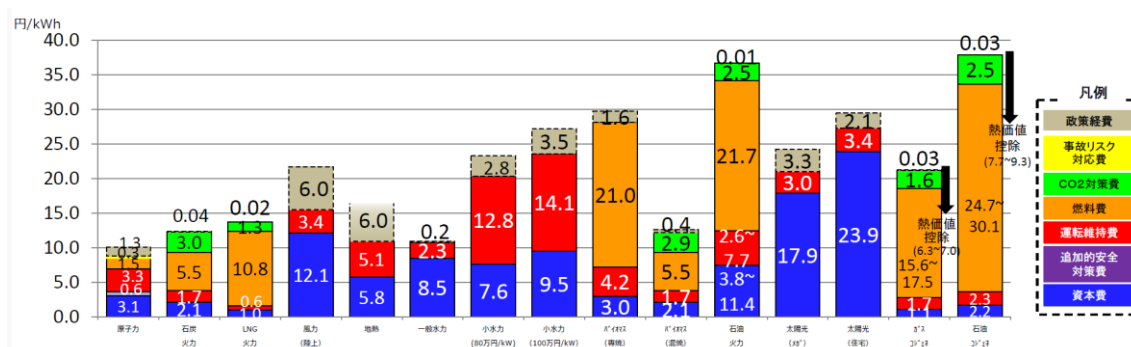


図 5-4 発電方式ごとの発電コスト[6]

になっており、再生可能エネルギーの限界費用は非常に低いことがわかる。また、石油火力発電は燃料費が非常に高くなっており、限界費用も高くなっていると考えられる。火力発電は、石油、LNG、石炭の順に燃料費は安くなっていく。一方で、原子力発電は火力発電と比較すると燃料費が非常に安くなっている。LNG 火力の燃料費が 10.8 円/kWh である一方で、原子力発電の燃料費は 1.5 円/kWh となっている。また、資本費や運転維持費を含んだ総額で比較しても原子力発電は非常に安い発電方式であることがわかる。このように、発電方式によって燃料費が異なるため、限界費用も異なることがわかる。先述の通り、旧一般電気事業者においては限界費用での入札が求められている。例として、2021 年 1~3 月期における JEPX 売り入札量に占める旧一般電気事業者のシェアは約 59%となっている[7]。そのため、ある時間帯においてどの発電所由来の電力が市場に売り入札されているかによりスポット市場価格も異なることが

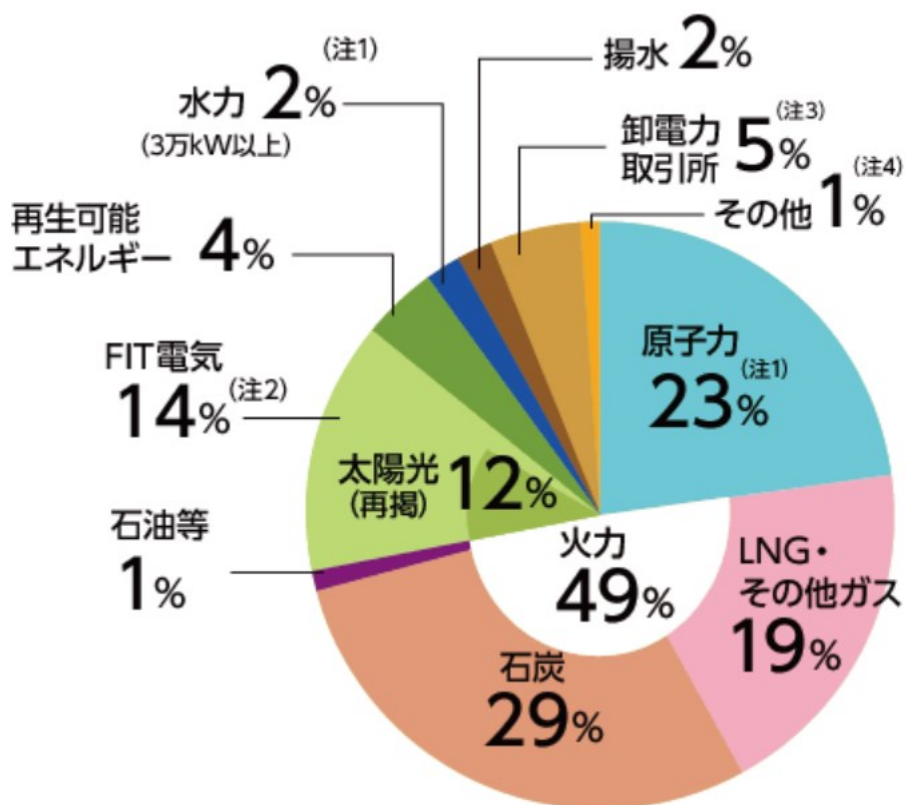


図 5-5 2022 年度における九州電力の電源構成

予想される。図 5-5 に九州電力の 2022 年度における電源構成を示す[8]。図 5-5 が示すように、火力発電が 49%と大半を示す一方、原子力発電も 23%を占めている。2011 年の東日本大震災による福島第一原発の事故以降、日本において原子力発電は停止していた。一方で、安全性を確認できた原子力発電所から順次再稼働を始めており、2015 年に初めて、事故後の新規規制基準に合格した川内第一原発の稼働が再開した[9]。その後も順次新基準に適応した原発から再稼働を進めており、審査中の原発も含め、これからは再稼働は進んでいくものと考えられる。図 5-6 に現在の原子力発電所の稼働状況を示す[10]。このように、順次再稼働が進んでいるが、東京、東北電力管内ではあまり再稼働が進んでいない一方、九州、四国、関西の西日本エリアでは再稼働が進んでいることがわかる。このように、今後も原子力発電所の再稼働が進んでいき、スポット市場に原子力発電由来の電力が売電されることでスポット市場価格に影響を及ぼすことが予想される。



図 5-6 2023 年現在の原子力発電所の稼働状況[10]

実際に、原子力発電所の稼働状況がスポット市場価格に影響を及ぼすかどうかの確認を実際のスポット市場価格と原子力発電所の稼働状況を利用して行う。対象エリアは九州エリアとし、対象年度は2018年1月1日から2023年3月31日までとした。第3章で発電所の稼働状況を取得するために使用したHJKSでは、発電所の種類ごとに発電所の稼働状況を取得することができる。そのため、対象期間を設定し、原子力発電所の稼働状況を取得することが可能である。図5-7に取得した原子力発電所の稼働状況の例を示す。

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	エリア	発電事業者	発電所コード	発電所名	発電形式	ユニット名	認可出力	停止区分	種別	低下量	停止日時	復旧見通し	復旧予定日	停止原因 最大低下 量: 1,121,000 最少低下 量: 295,000?	最終更新日時
	九州	九州電力株	95001	玄海原子力系原子力	原子力	4号機	1180000	出力低下	低下・その他	556000	2023/2/9 15:00	あり	2023/2/12?		2023/2/3 14:37
2	九州	九州電力株	95001	玄海原子力系原子力	原子力	4号機	1180000	計画停止	停止・定期検査等		2022/9/12 1:00	あり	2023/2/9	定検	2023/2/3 14:28
3	九州	九州電力株	98001	川内原子力系原子力	原子力	1号機	890000	計画停止	停止・定期検査等		2023/2/16 9:00	あり	2023/4/23	定検	2023/1/31 19:13
4	九州	九州電力株	95001	玄海原子力系原子力	原子力	3号機	1180000	出力低下	低下・その他	556000	2022/12/12 15:00	あり	2022/12/15	最大低下 量: 1,121,000 MW 最少低下 量: 295,000M W	2022/12/7 13:49
5	九州	九州電力株	95001	玄海原子力系原子力	原子力	3号機	1180000	計画停止	停止・定期検査等		2022/1/21 0:00	あり	2022/12/12	定検	2022/12/7 13:36
6	九州	九州電力株	95001	玄海原子力系原子力	原子力	3号機	1180000	計画停止	停止・定期検査等		2022/1/21 0:00	あり	2022/12/12	定検	2022/12/7 13:36

図 5-7 九州エリアの原子力発電所の稼働状況

この原子力発電所の稼働状況を使用し、スポット市場価格と原子力発電所の稼働状況の関係の評価を行う。評価の方法としては、九州エリアの4つの原子力発電所(川内原子力発電所一号機、川内原子力発電所二号機、玄海原子力発電所三号機、玄海原子力発電所四号機)のある日の稼働状況を図5-8のように1と0で表した表を作成し、それぞれの発電所が停止していた日時の九州エリアプライスの平均値を求めることで、それぞれの原子力発電所が停止していた時のスポット市場価格に及ぼす影響を分析する。なお、図5-8中の1は停止を示し、0は稼働を示している。表5-9に原子力発電所の停止情報と停止期間における九州エリアプライスの平均価格を示す。なお、先述のとおり2020年12月から2021年1月にかけてスポット市場価格の高騰が発生している。そのため、この期間に原子力発電所が停止している場合、評価においてその原子力発電所が停止している場合に価格が高騰するといった結果が出てくる恐れがある。そのため、表5-9においては、この高騰期間を除いた状態で評価を行った。表5-9が示すように、どの原子力発電所が停止しているかにより、平均価格が変化していることがわかる。特に、玄海原子力発電所が停止している期間においては、平均価格は高くなっている一方で、川内原子力発電所が停止している期間における平均価格は低くなっている。このように、どの原子力発電所が停止しているかにより、価格に影響を及ぼすことが分かった。また、先述のとおり、高騰期間は除いた評価であるため原子力発電の影響が価格に現れていると考える。川内原子力発電所と玄海原子力発電所、それぞれの稼働状況でスポット市場価格に差異が現れた理由について考察を行う。スポット市場価格に差が表れた要因として、出力の差異が影響しているためであると考えられる。玄海原子力発電所の出力は、一機あたり118万kWである一方、川内原子力発電所は玄海よりも小型で89万kWとなっている[11]。そのため、より出力の大きい玄海原子力発電所が停止した場合にはスポット市場価格が高騰しているのではないかと考える。このように、原子力発電所の稼働状況とスポット市場価格に関係があることが確認できたため、スポット市場価格予測システムの説明変数に原子力発電所の稼働状況を新たに使用することで、スポット市場価格予測システムの改良を行う。

	A	B	C	D	E
1		玄海原子力発電所3号機	玄海原子力発電所4号機	川内原子力発電所1号機	川内原子力発電所2号機
2	2018/1/1	1	1	0	0
3	2018/1/2	1	1	0	0
4	2018/1/3	1	1	0	0
5	2018/1/4	1	1	0	0
6	2018/1/5	1	1	0	0
7	2018/1/6	1	1	0	0
8	2018/1/7	1	1	0	0
9	2018/1/8	1	1	0	0
10	2018/1/9	1	1	0	0
11	2018/1/10	1	1	0	0

図5-8 発電所の稼働状況

表 5-9 原子力発電所が停止している期間の平均価格

	平均価格[円/kWh]
玄海3号機が停止している期間	12.24
玄海4号機が停止している期間	12.04
川内1号機が停止している期間	8.18
川内2号機が停止している期間	8.92

5.3.2 原子力発電所の稼働状況を追加した場合の予測精度への影響

実際に説明変数として原発の稼働状況を利用した場合の予測精度への影響を確認する。前項で作成した雲量を含んだ学習用データに対し、原発の稼働状況を追加することで原発の影響を考慮した学習用データの作成を行う。図 5-9 に原発の稼働状況を追加した場合の学習用データを示す。先述の比較の場合と同様、それぞれの原子力発電所の稼働状況をダミー変数で表したものを説明変数としている。

図 5-9 が示す通り、学習用データに説明変数として原子力発電所の稼働状況が追加されていることがわかる。本データを使用して、価格予測のシミュレーションを行う。予測対象は 2022 年度とし、学習期間はこれまでと同様、2020 年 1 月 1 日から予測対象日前日までとした。また、回帰モデル、分類モデルともに Random Forest を利用し予測モデルの構築を行った。表 5-10 に原子力発電所の稼働状況を追加した場合の予測精度の比較を示す。なお、比較対象としては、前項で構築した雲量を追加した場合の価格予測システムとし、評価指標として MAE と NMAE を使用している。表 5-10 が示すように、原子力発電所の稼働状況を追加することで予測誤差を低減することができている。原子力発電所の稼働状況を追加することで、原子力発電所の限界費用を考慮することが可能となり、予測誤差が低減されたためであると考えている。

人口_気温	太陽光発電予測値	年	月	日	曜日	時刻コード [休日]	発電停止総容量[MW]	原油価格	Lリアライズ九州(円/kWh)	雲量	玄海原子力発電所3号機	玄海原子力発電所4号機	川内原子力発電所1号機	川内原子力発電所2号機
278.116657	0	2019	1	1	2	1	1	3989	53.2	8.76	30.27521769	0	0	0
278.116657	0	2019	1	1	2	2	1	3989	53.2	8.21	30.27521769	0	0	0
278.0260824	0	2019	1	1	2	3	1	3989	53.2	8.39	35.21296183	0	0	0
278.0260824	0	2019	1	1	2	4	1	3989	53.2	7.84	35.21296183	0	0	0
278.1178313	0	2019	1	1	2	5	1	3989	53.2	7.84	39.88138835	0	0	0
278.1178313	0	2019	1	1	2	6	1	3989	53.2	7.84	39.88138835	0	0	0
278.2015257	0	2019	1	1	2	7	1	3989	53.2	7.8	45.94243368	0	0	0
278.2015257	0	2019	1	1	2	8	1	3989	53.2	7.31	45.94243368	0	0	0
278.2866895	0	2019	1	1	2	9	1	3989	53.2	7.29	49.80723063	0	0	0
278.2866895	0	2019	1	1	2	10	1	3989	53.2	6.4	49.80723063	0	0	0
278.3763364	0	2019	1	1	2	11	1	3989	53.2	6.4	54.26050822	0	0	0
278.3763364	0	2019	1	1	2	12	1	3989	53.2	6.01	54.26050822	0	0	0
278.4241063	0	2019	1	1	2	13	1	3989	53.2	6.78	55.7182312	0	0	0
278.4241063	0	2019	1	1	2	14	1	3989	53.2	6.78	55.7182312	0	0	0
278.431901	114308750.4	2019	1	1	2	15	1	3989	53.2	6.78	56.56229655	0	0	0
278.431901	114308750.4	2019	1	1	2	16	1	3989	53.2	6.78	56.56229655	0	0	0
278.613087	1007042141	2019	1	1	2	17	1	3989	53.2	6.78	56.33443197	0	0	0
278.613087	1007042141	2019	1	1	2	18	1	3989	53.2	6.01	56.33443197	0	0	0
279.3683543	2187971851	2019	1	1	2	19	1	3989	53.2	3.72	55.43263753	0	0	0

図 5-9 原子力発電所の稼働状況を含んだ学習用データ

表 5-10 原子力発電所の要素を追加した場合の評価

	平均絶対誤差 [円/kWh]	平均絶対誤差率 [%]
原子力発電所の要素なし	4.08	28.29
原子力発電所の要素あり	4.04	28.01

5.4 MSM の利用による予測誤差の低減

5.4.1 MSM の概要と GSM との比較

これまでのスポット市場価格予測システムの気象予報データとして GSM を使用してきた。GSM はメッシュサイズが緯度方向 0.2 度×経度方向 0.25 度(2023 年 3 月 14 日以降は緯度方向 0.1 度×経度方向 0.125 度)の気象予報データで、最大 264 時間先の気象予報を提供する[12]。GSM を使用してきた理由としては、①最大 264 時間先の気象予報が可能であり、長期のスポット市場価格予測に使用できること、②気象庁が提供する気象予報データで非常に安価に気象予報が使用できることの二点である。特に①については現状で気象庁が提供している気象予報データで、スポット市場の入札締め切りである前日の 10 時までに入手が可能で、予測対象日の全時間帯をカバーする気象予報として GSM しか使用できないため、GSM を使用している。GSM 以外にも気象庁は複数の気象予報を提供している。図 5-10 に提供されている気象予報データの一覧を示す[13]。本研究で使用してきた GSM は全球モデルと呼ばれる気象予報データで、地球全体の気象予報を提供している。予報時間は他の予報データと比較し、長期の予報が可能となっている一方で、水平解像度が粗いことがわかる。図中の局地モデル LFM は日本周辺を対象とした気象予報データで、水平解像度が 2km と細かい一方で、予報時間は 10 時間と短くなっている。LFM は Local Forecast Model の略で、日本語にすると


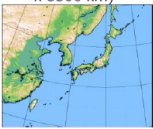
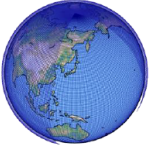
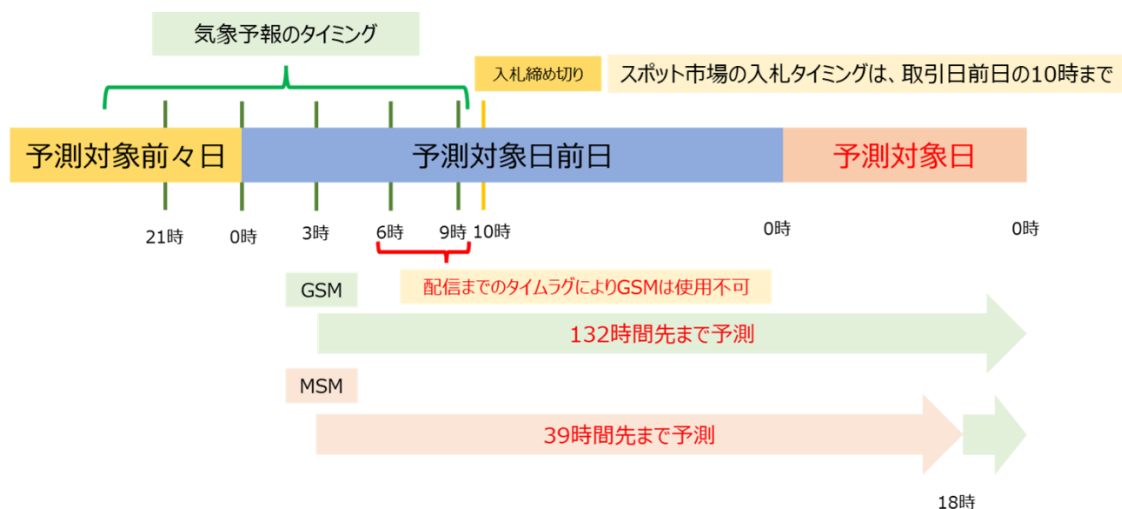
	局地モデル LFM	メソモデル MSM	メソアンサンブル MEPS	全球モデル GSM	全球アンサンブル GEPS
目的	航空気象情報 防災気象情報 降水短時間予報	防災気象情報 降水短時間予報 航空気象情報 天気予報 LFM側面境界条件	防災気象情報 航空気象情報	天気予報 週間天気予報 台風進路・強度予報 MSM側面境界条件	台風進路予報 週間天気予報 早期天候情報 2週間気温予報 1か月予報
予報領域	日本周辺 (3160 km x 2600 km) 	日本周辺 (4080 km x 3300 km) 	地球全体 		
水平解像度	2 km	5 km		約20 km	約40 km (～432時間) 約55 km (432時間～)
鉛直層 (上端高度)	58 層 (約20 km)	76 層 (約22 km)		100 層 (0.01hPa)	
予報時間 (初期時刻)	10 時間 (毎正時)	51時間(00,12UTC) 39時間(03,06,09, 15,18,21 UTC)	39時間 (00,06,12,18UTC)	132時間 (00, 06, 18 UTC) 264 時間(12 UTC)	最長816 時間(00,12 UTC) 132 時間(06,18 UTC)
メンバー数	-	-	21	-	264時間先まで27、その後は13

図 5-10 気象データの一覧[13]

局地予報モデルとなり、局地的な高解像度の気象予報となっている[14]。予報提供時間は毎正時となっているため、一日に24回予報が提供される。LFMは気象予報の時間が短いため、短時間先の気象予報に使用されており、スポット市場価格予測に使用するような長期の気象予報は提供していないので不向きである。次に、メソアンサンブルMEPSについて説明する。MEPSはMeso-scale Ensemble Prediction Systemの略で、日本語ではメソアンサンブル予報システムとなる。アンサンブル予報はばらつきを加えた予報モデルであるため、予測に対する信頼度の把握や複数シナリオの抽出などが可能となる。そのため、大雨や暴風等の災害をもたらす激しい気象現象が発生する可能性について、メソアンサンブルのような複数の予測を用いることによって早い段階で把握することができる。メソアンサンブルMEPSは水平解像度が約6km、予報時間は39時間となっている。上記のような特徴から、防災気象情報等に使用されている。一つの時間帯に対し、複数の予測が出力されるため、スポット市場価格のばらつきを考慮したモデルを構築する際には有効となるが、今回は単一のスポット市場価格の予測を行うことを目的としているため、今回は使用しない。最後にメソモデルMSMについて説明する。MSMはMeso Scale Modelの略である。予測対象エリアは日本周辺となっておりメソアンサンブルMEPSと同様である。水平解像度は約6kmで、予報配信時間により予報時間は異なり、39時間予報あるいは78時間予報が提供されている。GMSと比較し、水平解像度が細かいため、局地的な気象予報に使用されており、防災気象情報や降水短時間予報に使用されている。一般的にMSMはGSMよりも気象予報の精度は高いといわれている[15]。GSMと比較し、MSMは空間解像度が細かく、地形表現等が精緻化されている。そのため、集中豪雨等の激しい気象現象の予測精度が高いといわれている。また、気温予報をGSMとMSMで比較した場合に、MSMを利用した場合の予測精度が高かったことが報告されている[16]。そのため、MSMを利用した場合にスポット市場価格予測システムの予測精度の向上を行うことが可能であると考えたため、MSMを利用した場合のスポット市場価格予測システムの構築をおこなう。しかしながら、MSMはGSMと比較し、予報時間が短いといった特徴を持っている。そのため、スポット市場価格予測を配信する時間帯によっては、一部の時間帯においてMSMを使用することができない。これまで、スポット市場の入札締め切りである10時に間に合うよう、3時に配信のGSMを使用してきたので、これに合わせ、3時に配信されるMSMを使用するものとする。先述の通り、MSMの予報時間は39時間と78時間があるが、3時に配信される予報は39時間である。そのため、翌日の18時以降の気象予報はMSMを使用することができない。そのため、MSMを使用することができない時間帯においては、かわりにGSMを使用するものとする。18時まではMSMを使用できるので、太陽光発電量の予測にはほとんどの時間帯でMSMを使用することができる。図5-11に使用する気象予報データの一例を示す。



3 時配信のMSMを利用し、予測が存在しない時間帯はGSMを代わりに利用する

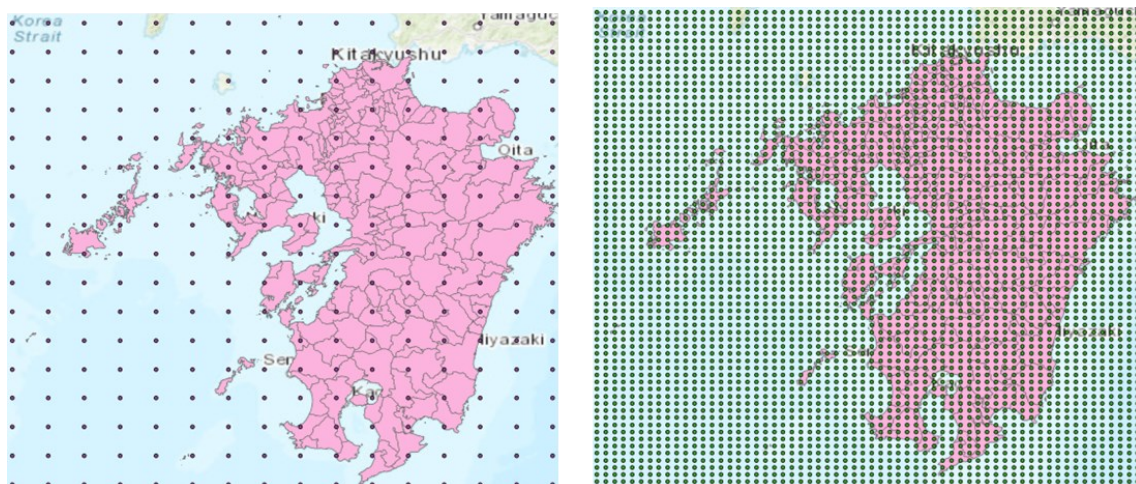
図 5-11 使用する気象予報データの例

5.4.2 GSM と MSM での太陽光発電量予測精度の比較

前項で、時間帯によっては GSM よりも高精度な MSM をスポット市場価格予測システムに利用することができることを示した。本項では、第 3 章で導出した予測太陽光発電量を MSM で導出した場合に、MSM と GSM でどのような差異が現れるかについての評価を行う。MSM も GSM と同様に grib2 形式でデータが提供される。そのため、GSM と同様、python のモジュールである ArcPy を使用して、バイナリーデータのデコードを行う。デコードした後のデータには、GSM の場合と同様、緯度、経度、日射量の情報が含まれている。図 5-12 にデコード後の MSM 日射量予報データを示す。図 3-9 と比較し、メッシュサイズが細かくなっていることがわかる。

1	緯度	経度	日射量
2	47.6	120	86.93811
3	47.6	120.0625	87.93811
4	47.6	120.125	89.06311
5	47.6	120.1875	90.06311
6	47.6	120.25	90.68811
7	47.6	120.3125	91.56311
8	47.6	120.375	92.81311
9	47.6	120.4375	93.68811

図 5-12 デコード後の MSM 日射量予報データ



(a) GSM 日射量予報データ

(b)MSM 日射量予報データ

図 5-13 GIS 上での GSM と MSM 日射量予報データ

図 5-13 に GIS 上に乗せた GSM 日射量予報データと MSM 日射量予報データを示す。図 5-13 が示す通り、メッシュサイズが大きく異なることがわかる。MSM はメッシュサイズが約 6km、GSM はメッシュサイズが約 24km であるため、空間解像度が約四分の一となっている。この MSM 日射量予報データを使用し、九州エリアの予測太陽光発電量の導出を行う。手順としては、GIS 上に MSM の日射量ポイントデータをのせ、市町村ごとの太陽光発電設備導入量との紐づけを行った後に、式(3.3)により九州エリア全体の予測太陽光発電量の導出を行う。本手法を利用し、MSM を利用した場合の太陽光発電量を導出したうえで、GSM との比較を行う。なお、比較にあたり実際の太陽光発電量データが必要となる。本論文での比較においては、九州電力が公開している九州エリアの太陽光発電量の実績値を使用する[17]。図 5-14 にダウンロードした太陽光発電量の実績値を示す。図 5-14 が示すように 5 分間隔での実績値となっている。

DATE	TIME	当日実績(5分間隔)	太陽光発電実績(5分間隔値) (万kW)
2023/3/1	8:00	995	112
2023/3/1	8:05	1002	125
2023/3/1	8:10	996	143
2023/3/1	8:15	1010	157
2023/3/1	8:20	1000	164
2023/3/1	8:25	1003	185
2023/3/1	8:30	1007	210
2023/3/1	8:35	1006	225
2023/3/1	8:40	1007	236
2023/3/1	8:45	1002	250
2023/3/1	8:50	992	257

図 5-14 太陽光発電量実績値の例

この実績値を使用して、予測太陽光発電量と比較する。GSM、MSMともに予報間隔は1時間となっている。そのため、太陽光発電実績についても1時間間隔での実績値に変換の上、評価を行うものとする。なお、評価対象期間は2022年度とし、評価対象は九州エリアとしている。表5-11に評価対象期間におけるGSM、MSMそれぞれの日射量予報データを使用した場合の予測太陽光発電量と実際の太陽光発電量の比較を示す。なお、評価指標にはMAEとRMSEを使用している。表5-11が示す通り、評価期間においてMSMの方がGSMよりも予測精度が高いことがわかる。また、表5-12に月ごとの予測誤差を示す。なお、評価指標にはMAEを使用している。表5-12が示すように、どの月においてもMSMの予測精度が高くなっている。また、図5-15～5-17にある日のGSM、MSMの予測太陽光発電量と九州電力の実績値の比較を示す。また、表5-13～5-15にその日のGSMとMSMそれぞれの予測誤差を示す。予測精度がほとんど変わらない日もある一方で、GSMだと精度よく予測できていないものが、MSMだと精度よく予測できる場合もあることを示している。このように、MSMを気象予報データとして使用することで、予測太陽光発電量の予測精度の向上が可能である。

表 5-11 評価期間における GSM, MSM での予測太陽光発電量の誤差

	MAE [万 kWh]	RMSE [万 kWh]
GSM	86.70	128.77
MSM	69.43	108.64

表 5-12 月ごとの予測精度[万 kWh]

	4月	5月	6月	7月	8月	9月
GSM	115.08	115.04	88.26	100.74	93.44	81.13
MSM	109.13	94.53	69.58	75.89	45.80	53.33
	10月	11月	12月	1月	2月	3月
GSM	64.40	58.45	49.30	49.31	73.40	124.52
MSM	46.32	51.49	41.71	44.64	67.89	117.51

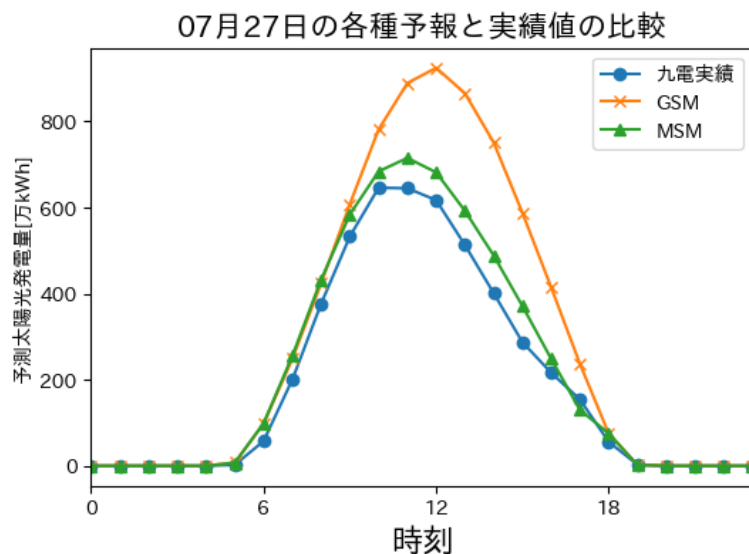


図 5-15 2023年7月27日の比較

表 5-13 2023年7月27日の比較

	MAE [万 kWh]	RMSE [万 kWh]
GSM	147.10	194.50
MSM	47.26	54.21

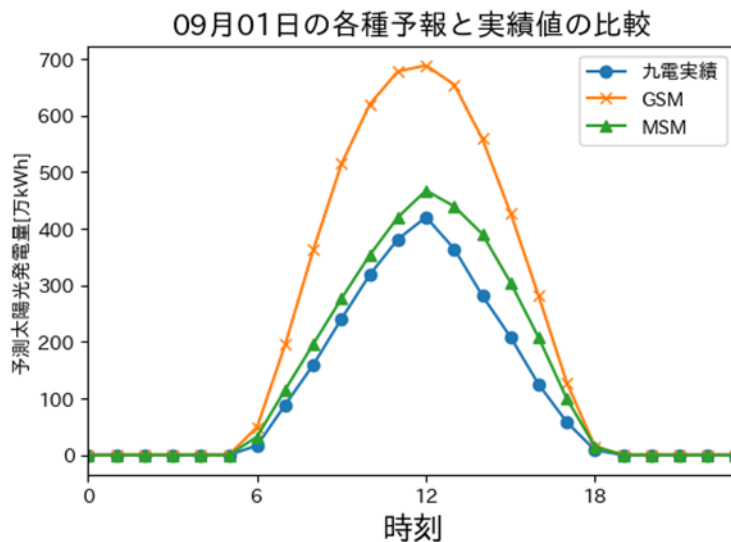


図 5-16 2023年9月1日の比較

表 5-14 2023年9月1日の比較

	MAE [万 kWh]	RMSE [万 kWh]
GSM	192.40	218.00
MSM	49.67	58.07

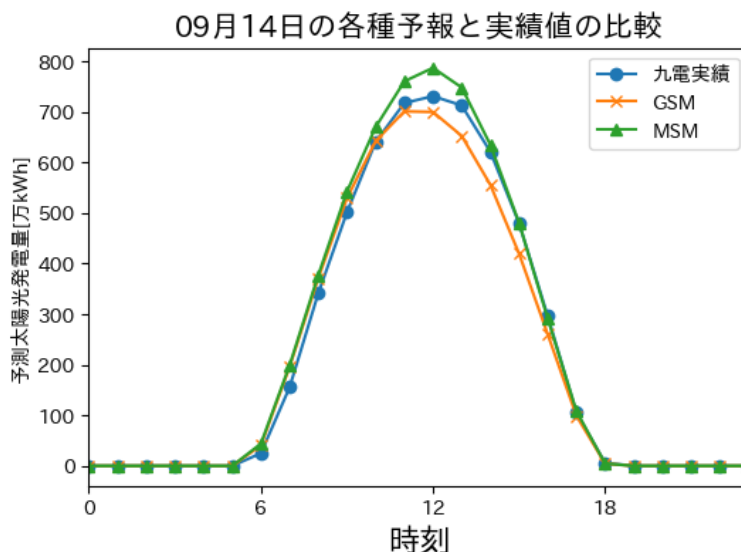


図 5-17 2023 年 9 月 14 日の比較

表 5-15 2023 年 9 月 14 日の比較

	MAE [万 kWh]	RMSE [万 kWh]
GSM	30.13	36.81
MSM	25.14	31.04

このように、GSM と比較し、MSM の予測精度が高くなった理由について考察を行う。GSM や MSM といった気象予報データを作成する際には、地形データも併せて使用されている。この地形データの水平解像度は、各モデルの水平解像度にあっており、GSM では約 24km、MSM では約 6km となっている[18]。そのため、地形の影響を受ける雲の発生の予測が水平解像度の低い GSM では上手く予測できないのではと考えたため、予測精度と雲量の関係性を確認する。

評価の方法としては、評価期間の一日ごとの太陽光発電予測誤差を GSM と MSM それぞれで導出し、一日ごとに MSM と GSM の予測精度の比較を行う。その後、GSM の予測精度が良かった日と、MSM の予測精度が良かった日の平均雲量を導出することで、予測精度と雲量の関係性を検証する。なお、評価期間は 2022 年度とし、雲量には前項で導出した雲量予報を使用している。また、予測太陽光発電量の誤差には MAE を使用している。表 5-16 に比較の結果を示す。表 5-16 が示すように、MSM の予測精度が高かった日が多く、MSM の予測精度が高い、つまり GSM の予測精度が低かった日には

表 5-16 雲量とそれぞれの予測太陽光発電量の関係性

	日数	平均雲量 [%]
MSM の予測精度が高い	219	59.52
GSM の予測精度が高い	146	44.62

雲量が高くなっていることがわかる。つまり、雲量が多い(=天気が悪い)日にはGSMの予測精度が悪くなっていることがわかる。では、実際の天気と太陽光発電量の予測精度の比較を行っていく。比較日は、図 5-15~17 に示す 3 日間とした。図 5-18~20 にそれぞれの日における九州エリアの実際の天気を示す。図 5-15~17 と図 5-18~20 との比較により、天気の変化が予測精度に表れていることがわかる。図 5-15 と図 5-18 を比較すると、午後から雨など天気が悪くなっており、図 5-15 においても、午後から GSM の予測が外れていることがわかる。また、図 5-16 と図 5-19 の比較では、一日中天気が悪いため、一日を通じて GSM の予測精度が低くなっている。最後に、図 5-17 と図 5-20 の比較では、一日を通じて晴れであり、図 5-17 の通り GSM と MSM の予測精度には大きな差が表れていないことがわかる。このように、GSM と MSM の予測精度には雲量、つまり天候が関係していることがわかる。

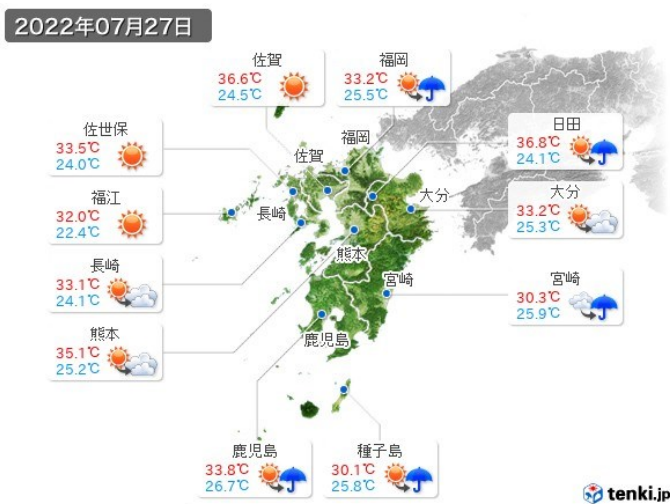


図 5-18 2023 年 7 月 27 日の比較

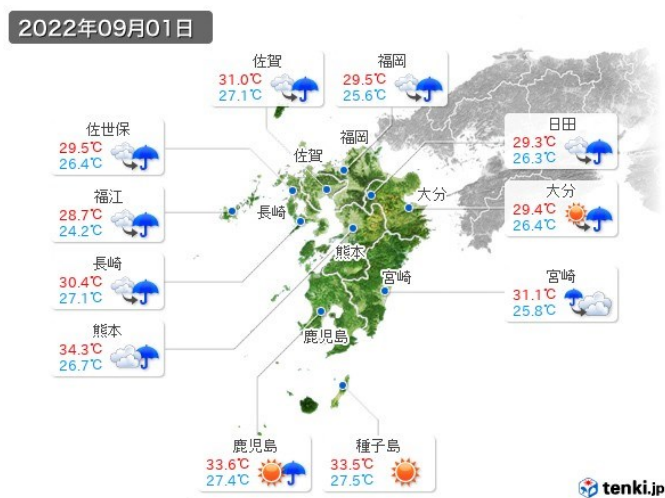


図 5-19 2023 年 9 月 1 日の比較

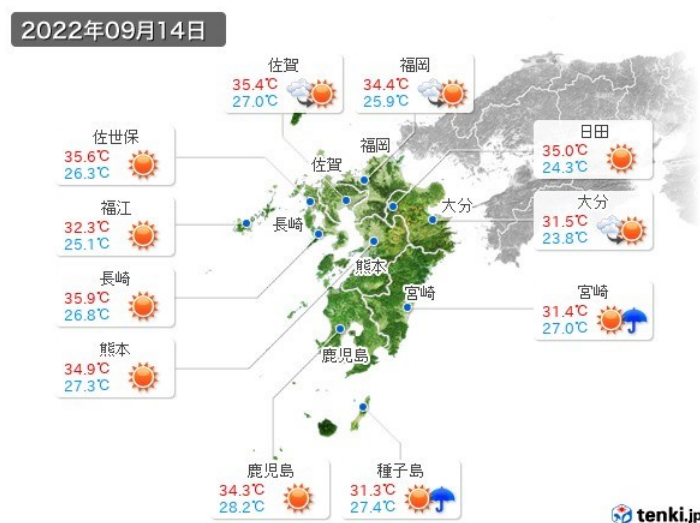


図 5-20 2023 年 9 月 14 日の比較

5.4.3 MSM を利用した場合のスポット市場価格予測システムの予測精度について

前項で説明した通り、MSM の利用により気象予報の高精度化が可能であり、予測太陽光発電量と実際の太陽光発電量の予測誤差の低減が可能となった。本項では実際にスポット市場価格予測システムの説明変数を導出する際に MSM を使用した場合の予測誤差に及ぼす影響についての分析を行う。実際に MSM を利用して予測太陽光発電量、人口気温データの導出をおこなった。また、最低価格出現予測変数についても、MSM を使用して導出した予測太陽光発電量を使用し、再度導出を行った。予測対象期間は 2022 年度とし、学習期間はこれまでと同様、2020 年 1 月 1 日から予測対象日前日までとした。比較対象は前項で構築した原発を考慮した場合のスポット市場価格予測システムとした。表 5-17 に MSM を利用した場合の予測精度の比較を示す。表 5-17 が示すように、気象データとして MSM を利用することで予測誤差を低減することができている。MSM の利用により気象予報精度の向上が可能となり、スポット市場価格予測システムの精度も向上したためと考えている。今後、発電事業者や小売り電気事業者が使用する気象予報精度が高くなれば、入札時の発電量、需要量の予測の精度が高くなることが予想される。そのため、MSM の利用により今後も価格予測精度は向上していくと考えられる。

表 5-17 MSM を使用した場合の予測精度

	MAE [円/kWh]	NMAE [%]
GSM 利用	4.04	28.01
MSM 利用	3.99	27.67

5.5 まとめ

本章では、スポット市場価格予測システムのさらになる予測精度向上のため、雲量の要素の追加、原子力発電所の要素の追加、MSM を気象予報データとして使用することで学習用データの作成を行った。気象予報と予測精度の関係性から、雲量と予測精度に関係があったため、雲量予報を説明変数として追加することで、予測精度の向上が可能となった。また、これまで発電所の稼働状況として原子力発電所の要素を追加していなかったため、それぞれの原子力発電所の稼働状況を説明変数として追加することで、予測精度の向上が可能となった。最後に、これまで使用してきた GSM よりも予測精度の高い気象予報である MSM を使用し、人口気温データ、予測太陽光発電量、最低価格出現予測変数を導出し、説明変数として使用することで予測精度の改善が可能となった。結果として、要素を一つ追加するごとに予測精度の向上が可能となっており、最終的にこれら三つの要素の適用により、予測精度を大きく改善することができた。

参考文献

- [1] 過去の天気, 日本気象協会, <https://tenki.jp/past/weather/>
- [2] 全球モデル, 気象庁, https://www.data.jma.go.jp/add/suishin/cgi-bin/catalogue/make_product_page.cgi?id=ZenModel
- [3] 丸山 泰廣, 需要想定精度向上に関する研究, エネルギア総研レビュー, No.24
- [4] 旧一般電気事業者のスポット市場における自主的取り組みについて, 電力・ガス取引監視等委員会, pp.1(2021)
- [5] 再エネは「安い」のか?, 国際環境研究所(2015)
<https://ieei.or.jp/2015/06/sawa-akihiro-blog150625/>
- [6] 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する 発電コスト等の検証に関する報告 (案), 発電コストワーキンググループ, p.10(2015)
- [7] 第 62 回 制度設計専門会合事務局提出資料, 電力・ガス取引監視等委員会, p. 6(2021)
https://www.emsc.meti.go.jp/activity/emsc_system/pdf/062_10_01.pdf
- [8] 当社の電源構成・非化石証書使用状況・CO2 排出係数[小売供給分], 九州電力
https://www.kyuden.co.jp/rate_adj_power_composition_co2.html
- [9] 川内原発 1 号機が再稼働 原発ゼロ、約 2 年ぶり解消, 日本経済新聞(2015)
https://www.nikkei.com/article/DGXLASFB10HH1_R10C15A8000000/
- [10] 日本の原子力発電所 稼働状況一覧, 電気事業連合会(2023)
<https://www.fepc.or.jp/sp/re-operation/>
- [11] 原子力発電所の概要, 九州電力
https://www.kyuden.co.jp/nuclear_outline_index.html

- [12] 全球数値予報モデル GPV (全球域・日本域), 気象業務支援センター
<http://www.jmbasc.or.jp/jp/online/file/f-online10100.html>
- [13] 気象予測の現状について, 気象庁(2019)
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/damchousetsu_kentoukai/dai01kai/2-5_kisyoyuosoku.pdf
- [14] 川島泰史, 内田考紀, 複雑地形における気象庁局地数値予報モデルデータ(LFM)を用いた簡易風況推定法の試み: 串木野れいめい風力発電所を例として, 九州大学応用力学研究所所報. 149, pp.51-63(2015)
- [15] 猪股 広典, GSM、メソ気象モデル、MSM、WRF, 財団法人土木研究センター
https://www.pwrc.or.jp/yougo_g/pdf_g/y1402-P053-053.pdf
- [16] MSM ガイダンスの概要と特徴, 気象庁予報部 数値予報課, p.38(2013)
- [17] でんき予報(電力のご使用状況), 九州電力
https://www.kyuden.co.jp/td_power_usages/pc.html
- [18] 令和3年度数値予報解説資料集, 気象庁(2021)
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwpkaisetu/R3/1_8_1.pdf

第6章 予測の評価と既存手法との予測精度の比較

6.1 まえがき

前項までにおいて、スポット市場価格予測システムの構築を行った。本項においては、予測の評価と既存の予測手法との比較を行うことで、構築した予測システムの予測精度の検証を行う。

6.2 予測の評価

本項では、これまでに構築した予測手法の評価を行う。なお、評価には第5章で構築したMSMを利用した場合のスポット市場価格予測システムとした。初めに、月別の予測精度の評価を行う。本評価においては、学習データの期間を2020年1月から予測対象日前日までとし、評価期間は2022年度とした。図6-1と表6-1に月別の予測精度を示す。なお、JEPXのスポット市場価格は月により平均価格が異なるため、評価指標にはNMAEを使用した。図6-1が示す通り、月によって予測精度が変化していることがわかる。特に、7月の予測精度がほかの月と比較し悪化していることがわかる。これは、2022年の7月にこれまで見られなかった0.01円/kWhの出現が多発しているためであると考えられる。図4-8に示す通り、2021年度まではあまり7月に0.01円/kWhの電力は見られなかったが、2022年度においては多発していることがわかる。そのため、過去に見られなかった0.01円/kWhの予測がうまくできず、予測精度が悪化していると考えられる。

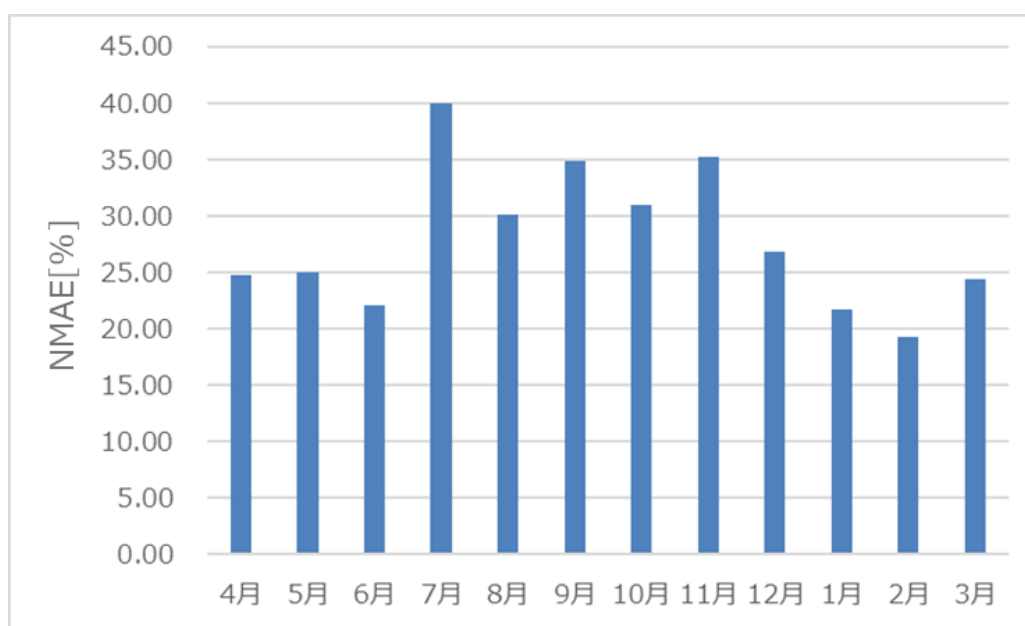


図 6-1 月別の予測精度

表 6-1 月別の予測精度

	4月	5月	6月	7月	8月	9月
NMAE [%]	24.68	24.94	22.06	39.96	30.10	34.84
	10月	11月	12月	1月	2月	3月
NMAE [%]	30.89	35.23	26.76	21.67	19.28	24.39

次に、曜日ごとの予測精度について評価を行う。なお、本評価においても学習データの期間は 2020 年 1 月 1 日から予測対象日前日までとし、評価期間は 2022 年度とした。また、曜日によってスポット市場の平均価格は異なるため、NMAE での評価を行う。図 6-2 と表 6-2 に曜日別の予測精度を示す。図 6-2 が示す通り、曜日によって予測精度が変化していることがわかる。特に土曜と日曜日といった休日に予測精度が悪化していることがわかる。この点について考察を行う。第 4 章で述べた通り、土曜や日曜日といった休日には 0.01 円/kWh が多く出現する。0.01 円/kWh の予測を外すと、予測誤差は 0.01 円/kWh が出現しない場合と比べ大きくなる。休日には 0.01 円/kWh の出現が多く、休日と比較し誤差が大きくなっているのではないかと考える。また、平日と比較し休日は電力需要が少なくなるため、スポット市場価格の平均価格は安くなる。NMAE を計算する際に、平均価格で割るといった処理を行うため、平均価格の低い休日は相対的に NMAE が大きくなるため、このような結果になったのではないかと考える。

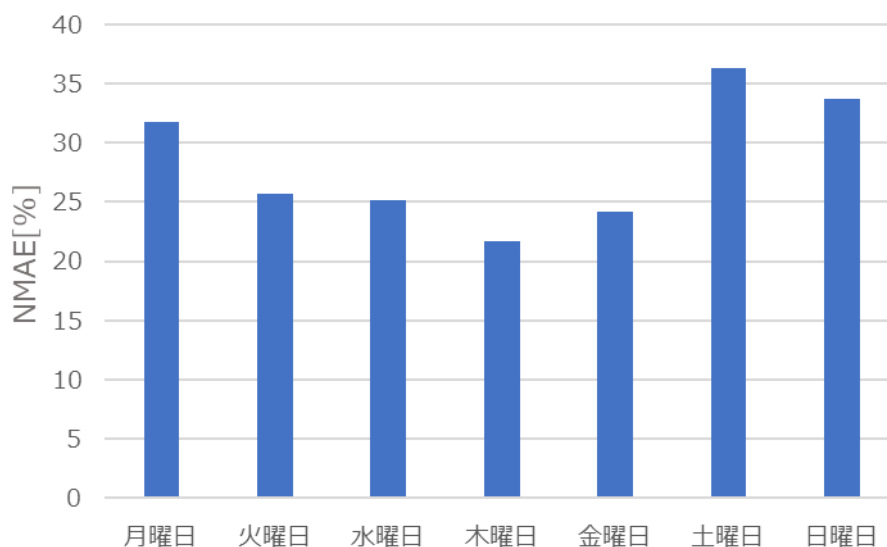


図 6-2 曜日ごとの予測精度

表 6-2 曜日ごとの予測精度

	月曜日	火曜日	水曜日	木曜日	金曜日	土曜日	日曜日
NMAE [%]	31.75	25.70	25.19	21.64	24.20	36.28	33.73

6.3 既存のスポット市場価格予測システムとの比較

前章までで、スポット市場価格予測システムの構築を行ってきた。本項においては既存のスポット市場価格予測システムの予測精度と本予測システムの予測精度の比較を行う。比較対象としては、本予測システムと同様に JEPX の九州エリアのエリアプライスを予測対象としている二つの手法を選択した。

6.3.1 メリットオーダーを使用した予測システムとの比較

本項においては、メリットオーダーを使用して構築されたスポット市場価格予測システムとの比較を行う。メリットオーダーとは様々な発電所を発電コストの低い順に並べたものである[1]。この発電コストというのは先述の限界費用であり、おおよそ燃料コストに相当するものである。図6-3にメリットオーダーの例を示す。燃料費の高い石油や LNG の限界費用は高いため図中の右側に並んでいる一方、再生可能エネルギーは限界費用が低いため、左側に並んでいる。このメリットオーダーに対し、電力会社は特別な理由がない限り安い順に稼働を行う。安い順に稼働をしていき、需要との交点で価格は決定される。例えば、図6-3中の赤線が需要のラインを示しており、需要が少ない場合には赤線が左に動き、限界費用の低い点で価格は決定される。逆に需要が多い場合には赤線が右に動き、価格は上昇する。菊池らはこのメリットオーダーを使用してスポット市場価格の予測を行っている[2]。手法としては、メリットオーダー曲線を作成するために本研究でも使用している HJKS から予測対象日の発電所の稼働状況を取得する。さらに、太陽光発電予測と風力発電予測を行い、メリットオーダー曲線を作成する。需要については、気温とカレンダー情報、直近の電力需要から需要を予測する。作成したメリットオーダー曲線と電力需要の予測量から、スポット市場価格

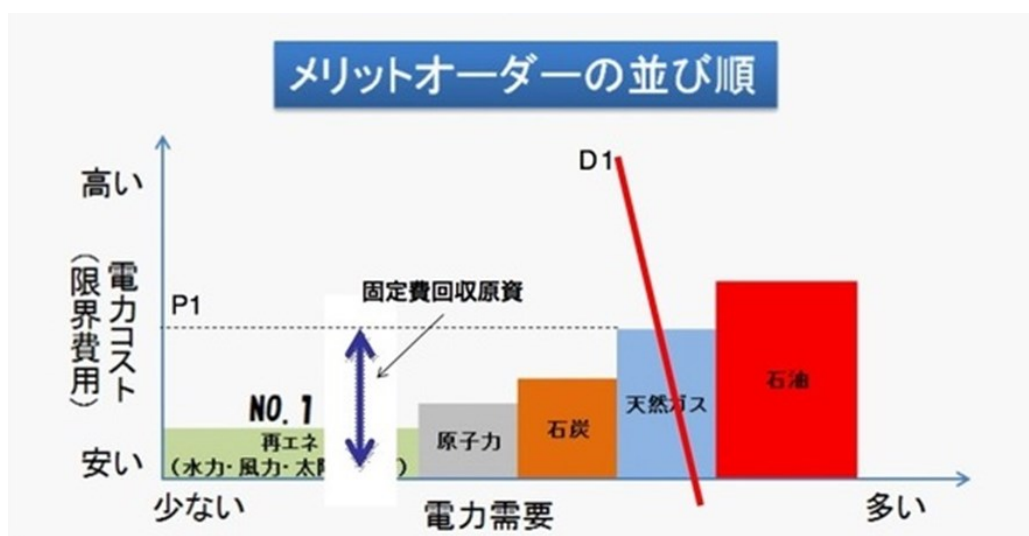


図 6-3 メリットオーダーの例[1]

を予測する。本手法は4エリアでの予測を行っており、九州エリアも価格予測の対象としていたため、本論文で構築した予測手法との比較を行う。比較を行う予測期間は、菊池らの論文に合わせ2019年度、2020年度とし、評価には絶対平均誤差を使用した。表6-3に比較の結果を示す。なお、2020年度にはスポット市場価格の高騰が発生していた。この高騰は、想定以上の気象条件の悪化やLNG在庫の緊迫が原因とされている[3]。最高でスポット市場価格が251円/kWhまで上昇するなど、これまでにないほど異常に価格が上昇しており、現在までにおいてこれほど価格が情報したことはこの期間以外にはない。そのため、予測が困難であるため菊池らの手法においても高騰した期間である2020年12月15日から2021年1月31日までの期間は除いて評価を行っている。表6-3が示す通り、既存の予測手法と比較しても高精度で予測が可能となっている。予測精度の向上により、発電事業者、小売り電気事業者の収益の向上を向上させることができる。

表6-3 簡易メリットオーダーを用いた既存予測手法との比較

	菊池らの手法	本論文の手法	絶対平均誤差の比較
2019年度	1.20 [円/kWh]	1.04 [円/kWh]	0.16 [円/kWh]低減
2020年度 (高騰期間を除く)	1.53 [円/kWh]	1.08 [円/kWh]	0.45 [円/kWh]低減

6.3.2 実際に価格予測ビジネスを行っている事業者との比較

次に、実際にスポット市場価格予測ビジネスを行っている事業者の予測精度との比較を行う。今回比較対象としたのはD-Priceという価格予測を配信しているサイトである[4]。D-Priceは東大発のベンチャー企業である、ARNE Technologiesが提供しているスポット市場価格予測システムである。会員登録した事業者に対し、スポット市場価格予測を配信しており、システムプライスと9つのエリアプライスを予測の対象としている。図6-4にD-Priceの配信しているサービスの詳細を示す。D-Priceにおいてはスポット市場価格予測のために、価格変動や季節、気象条件等の関係性をディープラーニングの利用により学習することで高精度なスポット市場価格予測を可能としている。また、価格予測は確率分布として提供されている。

予測種類	翌日予測	10日間予測
予測対象	翌日受渡分	翌日～10日先受渡分
予測更新タイミング	1日4回 (受渡日の前々日午後3時、午後9時、 前日午前3時、午前9時)	1日1回 (毎日午前10時頃の更新)
予測内容	スポット市場の予想約定価格 (30分、1日48コマ) ・システムプライス ・エリアプライス (全国9エリア)	
データ提供形式	会員専用ページでの予測値表示・csvダウンロード・API連携に対応	

図 6-4 D-Price のサービス詳細[4]

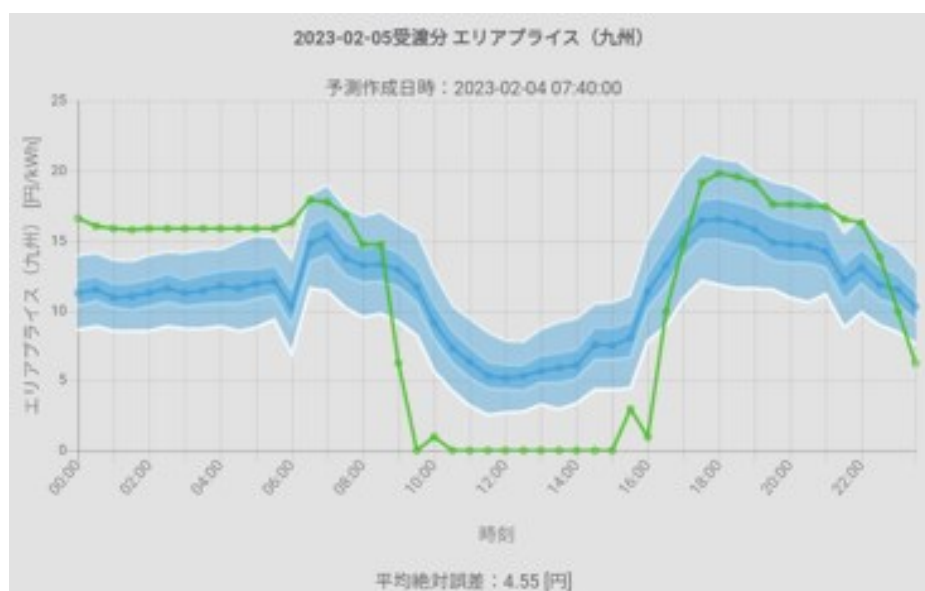


図 6-5 D-Price で配信されている価格予測

実際に配信されている九州エリアの価格予測を図 6-5 に示す。図 6-5 が示す通り、価格予測が確率分布として提供されていることがわかる。このように毎日図 6-4 に示す時間において価格予測が配信される。D-Price も九州エリアプライスの予測を提供しているため、比較対象とした。比較を行う期間は連続して D-Price から価格予測の入手が可能であった 2023 年 4 月 15 日から 2023 年 8 月 14 日とした。この期間までは、無料会員登録を行えば毎日一日単位で価格予測を取得することができていたが、評価期間以降において、図 6-6 が示す通り一週間単位での価格予測となった。そのため、一日単位での予測精度の比較が不可能となったため、本期間において、予測精度の比較を行う。比較方法については、評価期間の絶対平均誤差、絶対平均誤差率の二つの指標で評価を行う。

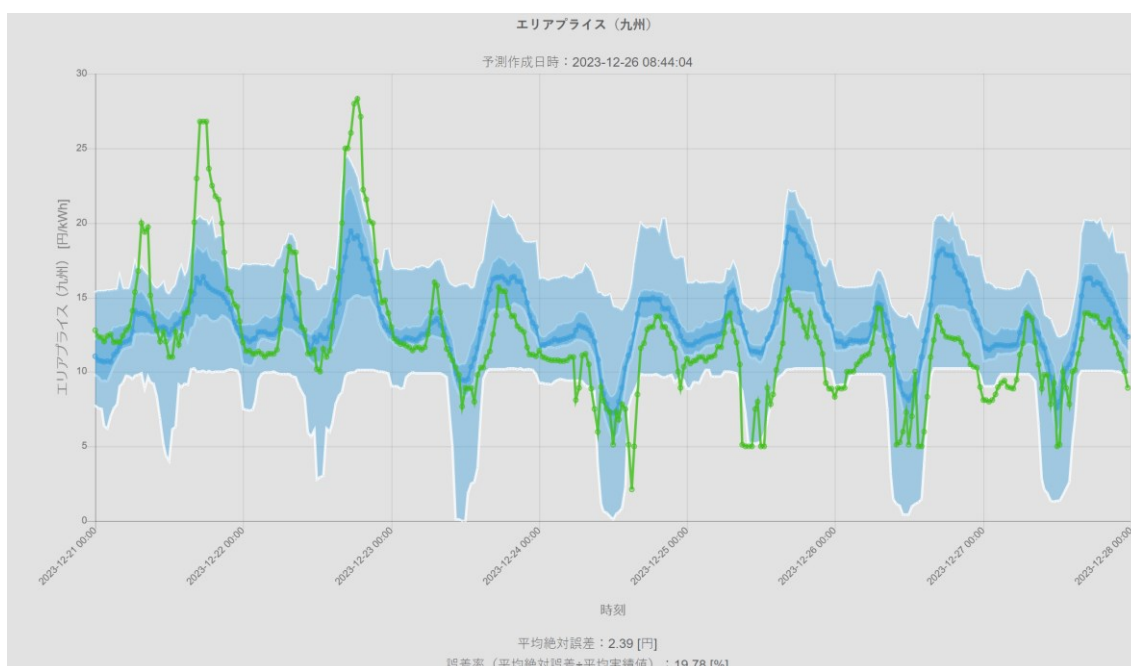


図 6-6 一週間単位での D-Price の価格予測

表 6-4 D-Price との価格予測精度の比較

	D-Price	本論文の手法	誤差の比較
MAE [円/kWh]	3.00	1.83	1.17 [円/kWh]低減
NMAE [円/kWh]	46.7	27.0	19.7 [%]低減

表 6-4 が示す通り、予測誤差を大きく低減することができている。このように、本論文で構築した手法はすでに販売されている予測システムと比較しても誤差の低減が可能であり、高精度で予測を提供できる手法であることが確認できた。

次に、実際に本価格予測手法を利用した場合と D-Price の予測結果を使用した場合の小売り電気事業者における利益の向上率についての簡易的なシミュレーションを行う。想定したシチュエーションとしては、価格予測を参照し一番安い時間帯で購入し、一番高い時間帯で放電した場合を考える。その時間帯に買い入札、売り入札を行う、約定をしたとし、実際のスポット市場価格で購入できたとする。すると、買電時のスポット市場価格と売電時のスポット市場価格の差が利益となる。実際には託送料等も考慮しなければならないが、今回はあくまで既存の手法と比較し何%利益の向上が見込めるかについての評価を行うので、託送料等は考慮せず単純な利益の比較での評価をおこなう。

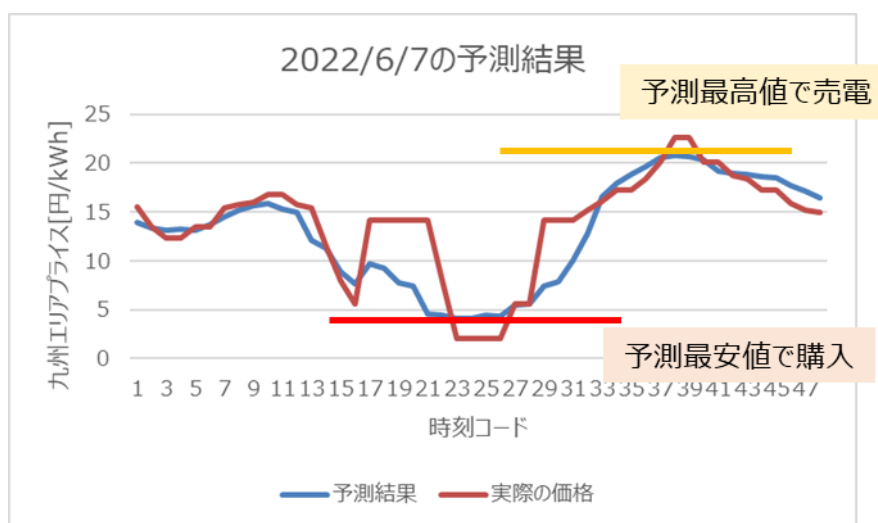


図 6-7 本論文での予測結果

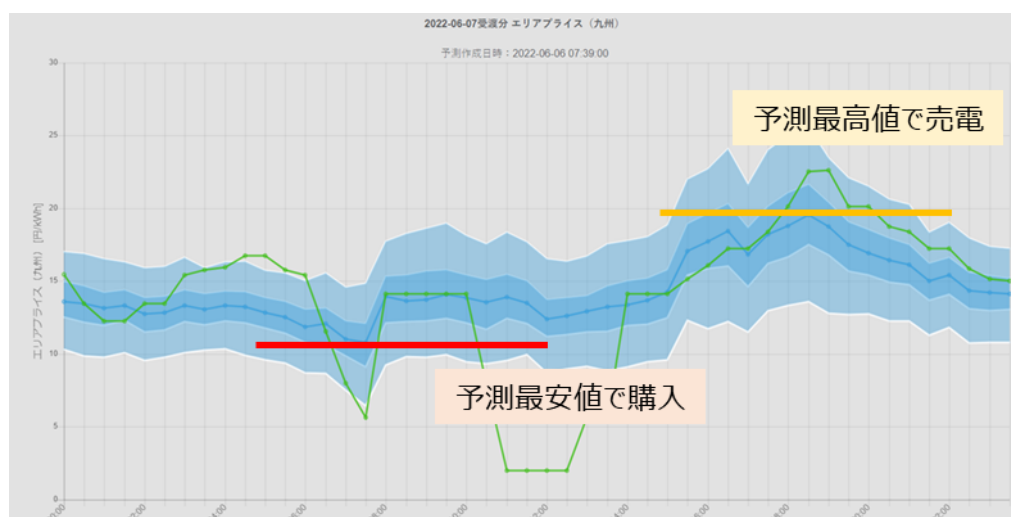


図 6-8 D-Price の予測結果

表 6-5 D-Price と本論文の比較

	D-Price	本論文の手法
MAE [円/kWh]	2.80	2.02
利益 [円/kWh]	16.92	20.55

図 6-7 に本論文での予測結果を、図 6-8 に D-Price の予測結果を示す。なお、予測結果は両方とも 2022 年 6 月 7 日の予測結果を用いた。表 6-5 に本論文での手法と D-Price の比較を示す。表 6-5 が示す通り、MAE は本論文の手法の方が低い。一方、利益についても本論文の手法の方が高く、本論文の手法の利用により、利益を約 21%向上できていることがわかる。

参考論文

- [1] 再エネは「安い」のか?, 国際環境研究所(2015),
<https://ieei.or.jp/2015/06/sawa-akihiro-blog150625/>
- [2] 菊池恒太, 若尾真治, 原田耕佑, 星野優子, 簡易メリットオーダーモデルを用いた JEPX スポット市場価格予測の汎用性検証, 令和4年電気学会全国大会,
pp.215-216(2022)
- [3] 草薙真一, 2020年度冬季における JEPX スポット市場価格高騰の要因分析, 先物・オプションレポート 2021年7月号(2021)
- [4] D-Price, <https://d-price-jepx.net/>

第7章 結論

本研究では、小売電気事業者の電力調達コストの削減、発電事業者の売電収益の改善を目的とし、JEPX スポット市場価格の予測システムの構築を行った。スポット市場の価格は需要と供給のバランスで決定される。そのため、電力の需要と供給と関係の深い説明変数を導出するため GIS を利用し気象予報データと各種情報の組み合わせを行った。電力需要の一つであるエアコンの消費電力量は気温と人口の分布と関係があることに着目し、GIS 上で気温予報データと市町村ごとの人口データを組み合わせることで人口気温データの導出を行った。また、電力の供給の一つである太陽光発電量は日射量と太陽光発電設備の分布に関係があることに着目し、GIS 上で日射量予報と市町村ごとの太陽光発電設備導入量を組み合わせることで予測太陽光発電量の導出を行った。さらに、スポット市場価格と関係する説明変数の導出を行い、機械学習によるスポット市場価格予測システムの構築を行った。

次に、近年の太陽光発電導入量増加に伴い、スポット市場価格の最低価格である 0.01 円/kWh の出現が増加していることに着目し、最低価格の出現傾向の分析を行った。うたえで価格予測システムへの応用を行った。最低価格が出現した日の条件を分析することにより、最低価格の出現には、月の要素、曜日の要素、太陽光発電量の要素、直近の出現傾向の要素があることを示した。これらの要素から、最低価格出現予測変数の導出を行い、最低価格出現予測のための分類モデルの構築を行った。最終的に、分類モデルの予測結果と第3章で構築した回帰モデルの予測結果を組み合わせ、最低価格の出現を可能とする予測システムの構築を行った。

さらに、スポット市場価格と関係する要素として、雲量の要素、原子力発電所の要素、MSM の利用の検討を行い、最終的にこれらの要素を組み合わせることで価格予測誤差を低減できることを示した。最終的に既存の予測手法との比較を行い、本論文において提案した手法は、既存の予測手法と比較しても精度よく価格の予測が可能であることを示した。

本予測システムと蓄電池やEV等の利用により、小売電気事業者、発電事業者の事業に対し貢献を行うことができる。例えば、小売電気事業者においては電力の安い時間帯に電力を購入し、電力の高い時間帯に需要家に対し電力を供給することで電力調達コストを低減することができる。一方、発電事業者においても電力の安い時間帯に発電した電力を蓄電池やEVなどにため、電力の高い時間帯に放電することで利益を最大化することができる。特に、FIP 制度において発電事業を行う事業者にとっては、最低価格が出現した時間帯以外に売電することで、FIP 制度のプレミアムを受け取ることができる。また、本予測システムの利用によりそれまで出力制御等により売電されていなかった電力を市場へ流入させることができる。このことは発電事業者の利益となる一方で、市場への電力の流入量が増えることで電力の価格が下がり、電力の需要家に

とってメリットとなる。このように、本予測システムと蓄電池、EV 等との組み合わせにより小売電気事業者、発電事業者、最終的には電力の需要家にとっても利益を出すことができる。本論文においては、九州エリアに着目したがスポット市場価格の決定の方法は他のエリアでも変わらない。そのため、他のエリアについても同様の手法でスポット市場価格の予測が可能である。今後の発展としては、風力発電の要素の考慮により予測精度の改善が期待される。現状として、日本において風力発電の導入量が少ないため、本予測手法には風力発電の影響は考慮しなかった。しかしながら今後、風力発電の導入量の増加が期待される。そのため風力発電の要素を考慮する必要があるが、本研究で使用した気象予報データには風力予測も含まれている。そのため、GIS 上で風力予測と風力発電設備の導入量を組み合わせることで将来の予測精度の向上が期待される。また、欧州においては風力発電の導入が進んでいる。そのため、風力発電の要素の追加により、海外の電力市場へ応用も可能である。

謝辞

本研究の遂行並びに本論文の作成にあたり、懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました九州工業大学大学院工学研究院電気電子工学研究系、渡邊政幸教授に心から感謝するとともに厚くお礼申し上げます。

本研究・本論文の審査に際し、貴重なご意見、ご鞭撻を賜りました九州工業大学大学院工学研究院電気電子工学研究系、大塚信也教授、小迫雅裕教授、佐竹昭泰准教授、九州大学工学研究院 機械工学部門、宮崎康次教授に厚くお礼申し上げます。また、研究遂行のために様々な面でご助言、ご協力いただいた九州工業大学学長三谷康範教授、北九州市保健福祉局総務部総務課給付金担当係長塩田淳様に厚くお礼申し上げます。

本研究のシステム化についての共同研究においてお世話になりました、東京センチュリー株式会社 小林克宏様をはじめとする職員の皆様、ランテックソフトウェア株式会社 庄司裕一様をはじめとする職員の皆様、九州工業大学先端研究・社会連携本部産学イノベーションセンター産学連携担当 諫山宗敏様、研究推進担当 渡辺晃太郎様に厚くお礼申し上げます。

本研究の特許化にあたりサポートいただいた、先端研究・社会連携本部 産学イノベーションセンター知的財産担当 尾崎正様、中前国際特許商標事務所弁理士 清井洋平様に厚くお礼申し上げます。

博士後期課程において研究面、生活面においてサポートいただいた先端研究フェロシップ事業と九州工業大学先端研究・社会連携本部産学イノベーションセンター研究推進担当 佐藤梨都子様、豊嶋藍子様に厚くお礼申し上げます。

研究の遂行にあたり、研究生活を共に過ごしました山本修平様、荒牧祐輔様、今田善紀様、山口龍成様と三谷研究室、渡邊研究室、佐竹研究室の皆様、三谷研究室時代に秘書としてサポートいただきました徳森美希様に厚くお礼申し上げます。

最後に、生活面でいろいろとサポートいただきました家族、そして公私にわたり大きくサポートいただいた BUNME PAWITA 様に厚くお礼申し上げます。

令和 6 年 3 月
著者 中山 俊太朗

研究業績

① 査読付き論文

- 1) **Shuntaro Nakayama**, Hiroki Iwai, Thongchart Kerdphol, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, “Construction of the electric vehicle driving support system considering the personal driving characteristics using geographic information system”, International Journal of Smart Grid and Clean Energy, vol. 10, no. 4, pp. 304-309, October 2021, DOI: 10.12720/sgce.10.4.304-309
- 2) **Shuntaro Nakayama**, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, “JEPX spot prices forecasting system using GIS”, Energy Reports, Volume 9, Supplement 1, pp. 329-336, March 2023, DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.419
- 3) **Shuntaro Nakayama**, Shinpei Oie, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, “Construction of PHEV driving support system using GIS for optimal operation”, Energy Reports, Volume 9, Supplement 3, pp. 533-542, May 2023, DOI: 10.1016/j.egy.2023.01.070
- 4) **Shuntaro Nakayama**, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, “GIS Based JEPX Spot Prices Forecasting System Using Solar Power Generation Focusing on Lowest Prices” Energy Reports, Volume 9, Supplement 12, pp. 240-244, November 2023, DOI: 10.1016/j.egy.2023.10.001

② 国際会議プロシーディングス

- 1) Atsushi Shiota, **Shuntaro Nakayama**, Hiroki Iwai, Keita Tsuruhara, Thongchart Kerdphol and Yasunori Mitani, “Construction of Standardization Method of Estimated Power Consumption System by Driving of EV using Geographic Information System and User's Driving Data”, EEET 2019: Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Electronics and Electrical Engineering Technology, pp. 62-67, 2019. DOI: 10.1145/3362752.3362754

③ 国際会議発表

- 1) **Shuntaro Nakayama**, Yasunori Mitani, Atsushi Shiota, “Driving Support System for Electric Vehicle with Electricity Expense Information Using Geographic Information System”, 5th International Symposium on Applied Engineering and Science, Kuala Lumpur, Malaysia, November 2017
- 2) **Shuntaro Nakayama**, Yasunori Mitani, Atsushi, “Energy Evaluation for Electric Vehicle Using Geographic Information System”, International Conference on Electrical Engineering, Seoul, Korea, June 2018

- 3) Atsushi Shiota, **Shuntaro Nakayama**, Hiroki Iwai, Keita Tsuruhara, Thongchart Kerdphol, Yasunori Mitani, “Construction of Standardization Method of Estimated Power Consumption System by Driving of EV Using Geographic Information System and User’s Driving Data”, The 2019 2nd International Conference on Electrics and Electrical Engineering Technology, Penang, Malaysia, September 2019
- 4) **Shuntaro Nakayama**, Hiroki Iwai, Thongchart Kerdphol, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, “Construction of the Electric Vehicle Driving Support System Considering the Personal Driving Characteristics Using Geographic Information System”, 7th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, Fukuoka Japan (Online), September 2020
- 5) **Shuntaro Nakayama**, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, “The Verification of the Relationship Between JEPX Spot Price and the Population-Weighted Temperature Data Using GIS”, 9th International Symposium on Applied Engineering and Science, Kuala Lumpur, Malaysia (Online), December 2021
- 6) **Shuntaro Nakayama**, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, “JEPX spot prices forecasting system using GIS”, 9th International Conference on Power and Energy Systems Engineering, Kyoto, Japan (Online), September 2022
- 7) **Shuntaro Nakayama**, Shinpei Oie, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, “Construction of PHEV driving support system using GIS for optimal operation”, 3rd International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering, Barcelona, Spain (Online), November 2022
- 8) **Shuntaro Nakayama**, Atsushi Shiota, Yasunori Mitani, Masayuki Watanabe, “GIS Based JEPX Spot Prices Forecasting System Using Solar Power Generation Focusing on Lowest Prices”, 8th International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering, Nice, France (Online), May 2023
- 9) **Shuntaro Nakayama**, Atsushi Shiota, Masayuki Watanabe, “Factor Analysis of JEPX Spot Prices Fluctuation using GIS”, The 2023 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Orland, USA, July 2023

④ 国内会議発表

- 1) **中山 俊太郎**、塩田 淳、三谷康範、「EV 電費情報を付加した地理情報システム (GIS)利用による走行支援システム」、平成 29 年度 電気・情報関係学会九州支部 連合大会、沖縄県沖縄市、2017 年 9 月
- 2) **中山 俊太郎**、塩田 淳、三谷康範、「渋滞の影響を考慮した電気自動車電力輸送支援システム」、平成 30 年度 電気学会全国大会、福岡県糸島市、2018 年 3 月

- 3) 中山 俊太朗、塩田 淳、三谷康範、「地理情報,EV 走行データを活用した消費電力量推定システムの標準化手法の提案」、平成 30 年度 電気学会 電力・エネルギー部門大会、徳島県徳島市、2018 年 9 月
- 4) 中山 俊太朗、塩田 淳、渡邊政幸、「過去データとの比較を考慮した JEPX 最低価格出現予測手法の構築」、令和 5 年度 電気・情報関係学会九州支部連合大会、熊本県熊本市、2023 年 9 月

⑤特許

- 1) 三谷 康範、中山 俊太朗、塩田 淳、電力約定価格予測装置及び電力約定価格予測方法、特願 2022-40333、2022 年 3 月 15 日出願