

電力市場モデルを用いた大口需要家による DR シナリオの分析

Analysis of Demand Response Scenarios by Large Consumers Using an Electricity Market Model

若杉亮^{1*} 和泉潔¹ 平野正徳¹
Ryo WAKASUGI¹, Kiyoshi IZUMI¹, and Masanori HIRANO¹

¹ 東京大学大学院 工学系研究科
¹ School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract: In addition to the need for electricity consumers to take into account the complex behavior of the electricity market as a result of electricity deregulation, CO2 emissions from economic activities have also become an issue in response to recent calls for decarbonization, making the electricity procurement environment increasingly complex. In this study, we focus on electricity procurement by a factory as a large consumer in such a complicated electricity sector. We have conducted simulation experiments and evaluations using an electricity market multi-agent model for several scenarios, focusing on the benefits to the demand side of demand response (DR), which is attracting attention as a means of stabilizing supply and demand in the electricity system, in terms of cost and CO2 emission reduction effects. The results show the effectiveness of DR that takes into account the characteristics of the season and time of day, and the effectiveness of demand shifting that utilizes out-of-service hours.

1 はじめに

電力部門においては、電力価格の引き下げや技術革新の促進などを目的とした電力自由化の取り組みが世界的になされており、日本においても 2005 年に日本卸電力取引所 (JEPX) における電力取引が開始されるなど、段階的に自由化が進められている。この JEPX における取引量は増加傾向にあり、今後もさらなる拡大が見込まれる一方で、価格の乱高下が生じるなどの懸念点もあり、電力調達において電力需要家が市場の振舞いを考慮することは重要である。

また昨今地球温暖化や気候変動リスクが指摘されるようになり、脱炭素化の取り組みが広くなされてきた。電力需要家としての個々の企業にとっても脱炭素化の影響は大きく、ESG 投資の拡大なども相まって自身の経済活動において脱炭素化を考慮する必要性は高まっている。カーボンニュートラルを実現するためには省エネや再エネ発電、環境価値の購入など多様な手段をうまく組み合わせる必要があると考えられるが、先述の電力自由化も相まって複雑化する電力システムにおいて、カーボンニュートラル実現のための知見は十分ではない。また電力部門における再生可能エネルギー

の導入も拡大しているが、その中心である太陽光や風力などの電源は、出力の不安定性から電力システムの安定性への影響が懸念されている。そこで需給安定化の手段として、需要側が電力消費パターンを変化させるデマンドレスポンス (DR) が注目されている。例えば Kok ら [1] は電気機器の出力を制御するマルチエージェントベースの電力取引フレームワークを提案し、需給の同時同量性が高まったとしている。この DR については、価格高騰時の需要量削減によるコストカットや、高単価電源の出力を減らすことによる電力価格低下などといった需要側にとっての利益も指摘されている [2]。このような需要側の利益に着目した研究としては、商業ビルによる DR について電力市場マルチエージェントモデルによる実験を行い、DR による商業ビルの電力調達費用の削減効果を示した Zhou ら [3] の例があるが、脱炭素化の観点も含めた知見は不十分である。

そこで本研究では、電力市場における大口需要家による DR について、脱炭素化の観点も含めて分析を行う。具体的には、電力市場を模したマルチエージェントモデルを用いて、大口需要家としての工場によるいくつかの DR シナリオについてシミュレーション実験を行い、その電力調達費用および CO2 排出量の削減効果について評価を行う。

*連絡先：東京大学大学院工学系研究科
〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
E-mail: b2019rwakasugi@socsim.org

2 シミュレーション手法

本研究ではJEPXの1日前市場を模した、1日を30分ごとに分割した48の時間帯にそれぞれ対応する電力取引市場および、それらに参加するエージェントからなるマルチエージェントモデルを用いて実験を行った。実験は1日を1ステップとして、1年間にあたる365ステップを1試行とする。全体像は図1のようであり、各エージェントの詳細を以下で述べる。

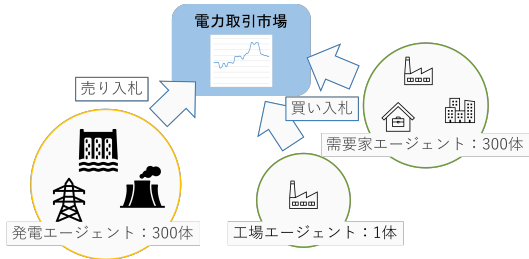


図1: モデルの全体像

2.1 需要家エージェント

予測価格を基に指値買い注文を行うエージェントとして300体生成する。エージェント i は、日付 t 、時間帯 k における市場 k の予測価格 $\hat{p}_t^{i,k}$ を、日付 t における市場価格 p_{t-1}^k から(1)式で算出する。

$$\begin{aligned} \hat{p}_t^{i,k} &= p_{t-1}^k \exp(\hat{r}_t^{i,k}) \\ \hat{r}_t^{i,k} &= \frac{w_F^i F_t^{i,k} + w_C^i C_t^{i,k} + w_N^i N_t^{i,k}}{w_F^i + w_C^i + w_N^i} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $\hat{r}_t^{i,k}$ はエージェントが算出する期待リターンであり、[4]を参考にファンダメンタル分析 $F_t^{i,k}$ 、テクニカル(トレンド)分析 $C_t^{i,k}$ 、ノイズ項 $N_t^{i,k}$ の加重平均として算出する。また注文量については、2021年現在日本における電力販売量の上位3社である東京電力[5]、中部電力[6]、関西電力[7]がそれぞれ公開している1時間ごとの需給実績データから外生的に与えた。

2.2 発電エージェント

発電単価に基づいて指値売り注文を行うエージェントとして300体生成する。各エージェントは水力、原子力、石炭火力、LNG火力、石油火力の5つの発電手段を持つ。

2.2.1 入札価格

エージェント i の日付 t における市場 k への、電源 s による発電量の(以下、電源 s の)入札価格 $\hat{p}_t^{k,i,s}$ は、日付 $t-1$ における市場 k の価格 p_{t-1}^k から、(2)式で決定する。

$$\begin{aligned} \hat{p}_t^{k,i,s} &= p_{t-1}^k \exp(\hat{r}_t^{k,i,s}) \\ \hat{r}_t^{k,i,s} &= \frac{w_B^i B_t^{k,i,s} + w_C^i C_t^{k,i,s} + w_N^i N_t^{k,i,s}}{w_B^i + w_C^i + w_N^i} \end{aligned} \quad (2)$$

$B_t^{k,i,s}$ は電源 s の発電単価から算出されるベース項、 $C_t^{k,i,s}$ はテクニカル(トレンド)項、 $N_t^{k,i,s}$ はノイズ項である。

2.2.2 入札量

エージェント i による、日付 t における市場 k への電源 s の入札量 $q_t^{k,i,s}$ は、(3)式で決定する。

$$q_t^{k,i,s} = \bar{q}_t^{k,i,s} + \Delta q_t^{k,i,s} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{q}_t^{k,i,s}$ は基準発電量、 $\Delta q_t^{k,i,s}$ は制御発電量である。水力および原子力はベースロード電源として $\bar{q}_t^{k,i,s}$ は固定、 $\Delta q_t^{k,i,s} = 0$ とする。また火力についてはピークロード電源として、直近の需要からの増減で発電量を考えるものとする。すなわち、前週同曜日同時間帯の発電量によって $\bar{q}_t^{k,i,s} = q_{t-7}^{k,i,s}$ とし、また $\Delta q_t^{k,i,s}$ は(4)式で決定する。

$$\Delta q_t^{k,i,s} = \eta_i \frac{(D_{t-7}^k - S_{t-7}^k) q_{t-7}^{k,i}}{S_{t-7}^k} \lambda_t^{k,i,s} \quad (4)$$

D_{t-7}^k 、 S_{t-7}^k はそれぞれ前週同曜日同時間帯における市場全体の総需要量、総供給量であり、(4)式は需要過多の場合は正、供給過多の場合は負の値をとる。また η_i は需給バランスへの鋭敏性を与える定数、 $\lambda_t^{k,i,s}$ は制御発電量の総量に占める電源 s の割合であり、発電単価と市場価格から決定される。

2.3 工場エージェント

本研究で対象とする電力需要家として1体生成する。工場エージェントによる各ステップにおける意思決定の流れを図2に示す。詳細を以下に述べる。

2.3.1 工場電力消費モデルの作成

工場による電力消費の特徴的な要素をモデル化するため、大手電機メーカーの保有する工場の電力消費データについて主成分分析を行った。各主成分の特徴および解釈を以下で述べる。

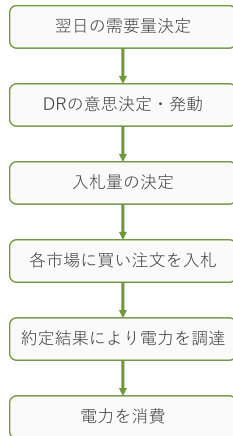


図 2: 工場エージェントの意思決定の流れ

- 主成分 1
寄与度 68.7%程度の成分である。平日の日中にスコアが大きくなる一方、夜間や休日には小さくなることから、ベース需要として解釈する。
- 主成分 2
寄与度 9.1%程度の成分である。春季や秋季と比較して、夏季や冬季にスコアが大きくなることから、空調需要として解釈する。
- 主成分 3 以降
上記 2 成分で説明できない要素であり、ノイズ需要として解釈する。

この結果から、工場の電力需要を式 (5) でモデル化する。

$$d_t^k = w_B B_t^k + w_A A_t^k + w_N N_t^k \quad (5)$$

ここで、 B_t^k 、 A_t^k 、 N_t^k はそれぞれベース需要項、空調需要項、ノイズ需要項であり、各主成分をモデル化したものである。各項への重みづけについて、 w_B 、 w_C は工場の電力消費データから決定し、また w_N は全体の 10% とした。なお市場に対する工場の需要規模は、データを使用した工場の需要が日本の電力需要に占める割合に準じて 2.26×10^{-6} とした。

2.3.2 DR

工場は式 (5) で決定する自身の電力需要について、需要量を変更する DR を発動することができる。本研究では、需要量を削減する需要カットと、需要量を減らし他の時間帯で同量を増やす需要シフトの 2 種類の DR を考える。

2.3.3 注文

DR を経て決定した市場に対する電力需要量を入札量として、工場は買い注文を行う。また入札価格について、電力を入手するのに十分に高い価格で入札するものとして、成行注文を採用する。すなわち本研究では、工場エージェントによる入札価格のとりかたについては研究対象としない。

3 実験

このモデルを用いて工場によるいくつかの DR シナリオを実施し、費用削減効果と CO2 排出量削減効果の評価を行う。

3.1 シナリオとパラメータ

電力市場がもつ時間帯や季節ごとの特徴を考慮して DR シナリオを考えるため、工場の電力調達費用および CO2 排出量に関する値を参考にする。具体的には、工場エージェントを除く需要家エージェントと発電エージェントが参加するモデルによるシミュレーション結果から、48 市場における価格および単位電力量あたりの CO2 排出量 (以下、排出係数とする) について、6~8 月に対応する 60~152 ステップ目を夏、12~2 月に対応する 244~334 ステップ目を冬とした各期間について平均を算出する。その結果を図 3 および図 4 に示す。

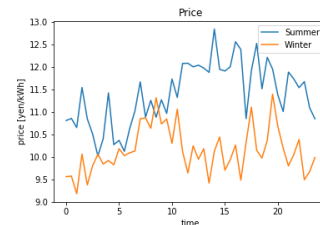


図 3: 価格推移の例

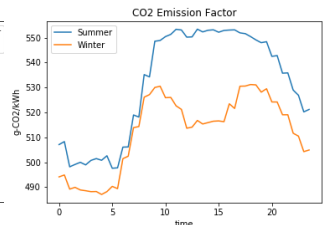


図 4: 排出係数推移の例

価格・排出係数ともに、夏季は日中は基本的に高い水準で推移する一方で、冬季に関しては朝方や夕方が高い値をとる一方で、午後の早い時間帯にはやや低い値で推移している。これは、市場全体の時間帯特性を与えていると考えられる、需要家エージェントの入札量を与える国内主要電力会社 3 社による電力需給の実績データがこのような特徴を持っているためである。これらの特徴を考慮して、工場による DR シナリオを以下のように設定した。

3.1.1 時間帯固定カット

決まった時間帯に、電力消費量を削減する需要カットのDRを行う。工場全体での大規模な節電の取り組みを想定している。具体的には、夏季に高い価格水準をとる日中(12:00~15:00)および、冬季に高い価格水準をとる夕方(17:00~20:00)の2通りの時間帯で、需要を割合 r だけ削減する。このパラメータ r の値を [0.05, 0.1, 0.15, 0.2] と変化させる。

3.1.2 時間帯固定シフト

決まった時間帯に電力消費量を削減し、その削減分を別の決まった時間帯に増やす、需要シフトのDRを行う。夏季に電力需要がひっ迫する日中の時間帯について、空調需要を削減しその分を他の時間帯へシフトすることによって、空調による居室の快適さを大きく損うことなく価格や排出係数のピークを回避する取り組みを想定している。具体的には、工場需要モデルの作成に用いた用途別時系列データより、8月の居室における空調需要が大きい順に上位3時間である14:00~17:00の6市場で割合 r だけ空調需要を削減し、それ以外の稼働時間帯で削減分を均等に配分し空調需要を増やす。このパラメータ r の値を [0.25, 0.5, 0.75, 1.0] と変化させる。なお比較のため、冬季についても実施する。

3.1.3 時間帯選択シフト

時間帯を毎日選択して需要シフトを行う。電力消費の総量は変わらないことから、需要カットのDRよりも負担の小さい節電の取り組みとして想定している。具体的には、需要を増やす上げDRを発動する時間帯と、需要を減らす下げDRを発動する時間帯をそれぞれ6市場ずつ選択し、各時間帯における需要を割合 r だけシフトする。この r を [0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5] と変化させる。また時間帯の選択に際して、[価格, CO2 排出係数, 市場の総需要] の予測値が大きい上位6市場を減らす時間帯、下位6市場を増やす時間帯として都度選択する。ここで選択可能な時間帯の範囲として、工場の稼働時間である9:00~17:00から選択する「稼働時間帯選択シフト」と、稼働時間外も含め全ての時間帯を選択できる「全時間帯選択シフト」の2通りを行う。

3.2 評価指標

それぞれのシナリオ・パラメータにおけるシミュレーション結果について、(6)式および(7)式で算出される費用およびCO2排出量の削減効率によって評価を行

う。なお市場の季節性を考察するために、各シナリオは夏季にあたる60~152ステップ目と、冬季にあたる244~334ステップ目に分けて評価を行う。

$$\frac{1}{N} \sum_{\text{trial}} \left\{ \frac{\sum_t \sum_{k=1}^{48} (\bar{p}_t^k \bar{d}_t^k - p_t^k d_t^k)}{\sum_t \sum_{k=1}^{48} \bar{p}_t^k \bar{d}_t^k} \div \frac{\sum_t \sum_{k=1}^{48} \Delta d_t^k}{\sum_t \sum_{k=1}^{48} \bar{d}_t^k} \right\} \quad (6)$$

$$\frac{1}{N} \sum_{\text{trial}} \left\{ \frac{\sum_t \sum_{k=1}^{48} (\bar{e}_t^k \bar{d}_t^k - e_t^k d_t^k)}{\sum_t \sum_{k=1}^{48} \bar{e}_t^k \bar{d}_t^k} \div \frac{\sum_t \sum_{k=1}^{48} \Delta d_t^k}{\sum_t \sum_{k=1}^{48} \bar{d}_t^k} \right\} \quad (7)$$

p_t^k, d_t^k, e_t^k はそれぞれ日付 t の市場 k における価格、需要量、CO2 排出係数であり、また $\bar{p}_t^k, \bar{d}_t^k, \bar{e}_t^k$ はそれぞれDRを全く発動しないベースラインシナリオにおけるそれらの値である。また Δd_t^k は各シナリオでの需要の制御量である。なお各パラメータセットの試行回数 $N = 10$ とした。

4 結果と考察

シナリオごとの結果およびそれぞれに対する考察を以下に述べる。

4.1 時間帯固定カット

時間帯固定カットシナリオの結果を図5および図6に示す。

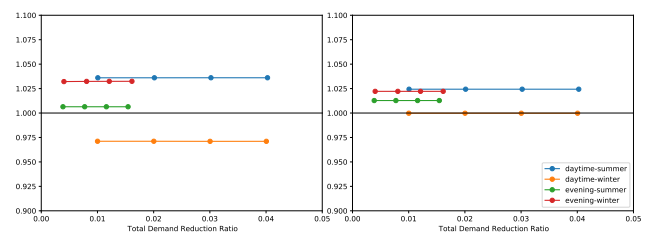


図5: 時間帯固定カットの結果：費用
図6: 時間帯固定カットの結果：CO2 排出量

図5より費用削減効率について、夏季日中および冬季夕方が優位であった。これらの時間帯は、それぞれの季節で相対的に価格が高い時間帯であるため、そのような時間帯を選択することで高い削減率が実現できる。一方で価格が極小となる傾向がある冬季日中におけるカットでは1.0を下回っているなど、季節性や価格変動の傾向によって適切なDR戦略を選択することが重要である。また図6よりCO2排出量についても同様に夏季日中および冬季夕方が優位であったため、本シナリオにおいてはこれらの時間帯を選択することで費用削減とCO2排出量削減を高い効率で両立できると言える。

4.2 時間帯固定シフト

時間帯固定シフトシナリオの結果を図7および図8に示す。

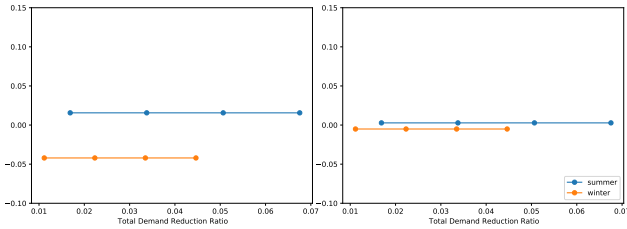


図7: 時間帯固定シフトの結果：費用
図8: 時間帯固定シフトの結果：CO2 排出量

図7より夏季は費用の削減に成功している一方で、冬季は費用が増加した。本シナリオは日中の電力需要をそれ以外の時間帯にシフトするシナリオであるため、夏季には価格についてのピークシフトになるが、冬季にはむしろ価格が安い時間帯から高い時間帯への需要シフトとなってしまったためと考えられる。本シナリオはそもそも夏季での実施を想定しており、冬季の実験は比較のためであったが、季節によって価格変動の特性を踏まえて適切なDRを検討しなければ、かえって費用が増加してしまう場合もあることが分かった。

また図8よりCO2排出量に関しては、夏季冬季ともに削減効率はほとんど0に近い結果となった。需要シフトでは時間帯による排出係数の差分を活用して排出量を削減しようとするが、図4より排出係数の変動は図3の価格変動と比較して小さく、特に本シナリオにおける工場の稼働時間内での変動は季節を問わず大きくないためと考える。

4.3 時間帯選択シフト

時間帯選択シフトの結果をそれぞれ図9、図10、図11および図12に示す。

費用削減効果、CO2排出量削減効果ともに、稼働時間内でのシフトと比較して全時間帯でのシフトのほうが、全体的に削減効率が高くなり、また全時間帯選択シフトでは特に冬季よりも夏季のほうが優位であった。費用に関して、時間帯を問わず価格の安い市場を活用できるためであり、特に夏季は工場が主に稼働する日中の時間帯における価格が全体的に高いため、そうでない深夜や早朝との価格差が冬季よりも大きいためと考えられる。またCO2に関して同様の考察ができるが、時間帯による排出係数の変化は価格と比較すると小さいため、その削減効率は費用と比較すると限定的であった。いずれにせよ全時間帯を活用できたほうが

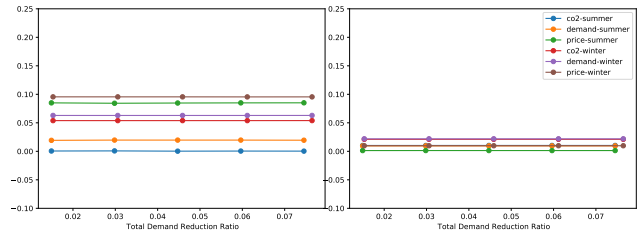


図9: 稼働時間帯選択シフトの結果：費用
図10: 稼働時間帯選択シフトの結果：CO2 排出量

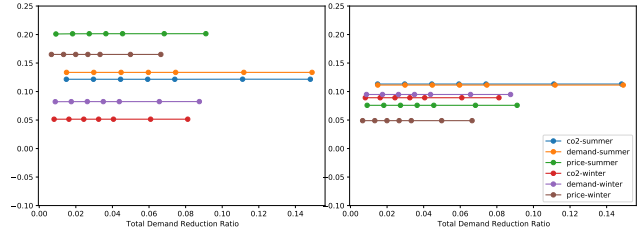


図11: 全時間帯選択シフトの結果：費用
図12: 全時間帯選択シフトの結果：CO2 排出量

高い削減効率を実現できるため、稼働時間外の活用は費用およびCO2排出量の削減に非常に有効であると言える。

また使用情報間の差異について、費用削減効果については、価格を用いる場合が季節によらず最も優位であった。一方でCO2排出量の削減効率については、総需要や排出係数を用いる場合が優位な結果となった。これは、需要の変化に対してはCO2排出を伴う火力電源の出力を変えることで発電量が調節されることから、総需要とCO2排出係数は比較的連動している一方で、それらと価格とでは変動を与える要因が異なるためと考えられる。すなわち、実社会においても価格の大小によって電力消費量は多少調節されると考えられるが、電力という商品の特性上大幅な増減は難しく、また経済動向や気候など価格以外の要因も需要への大きな影響を持つと考えられ、一方で価格についても需給だけでなく価格変動や市場参加者による予測や心理などの要因で形成されると考えられる。そのため、本シナリオにおいては費用削減とCO2排出量削減の効率はトレードオフの関係にあると言える。

5 むすび

5.1 まとめ

本研究では電力市場を模したマルチエージェントモデルを使用して、需要家にとってのDRの効果について脱炭素化の観点も含めてシミュレーション実験およ

び評価を行った。具体的には、工場による3つのDRシナリオを設定し、費用削減効果およびCO₂排出量削減効果の2つの指標で評価を行った。その結果、夏季の日中や冬季の夕方を避けたり、冬季の日中を活用するなど季節性や時間帯特性を考慮することの重要性が示された。また季節を問わず、工場の稼働時間外である深夜や早朝の時間帯を活用することは、費用及びCO₂排出量の削減に有効であった。実際には工場の稼働時間を大きく変更することや、稼働時間内であっても電力消費パターンを大きく変化させることには大きなコストを伴うと考えられるので、蓄電設備の導入やスポット市場以外からの電力調達手段を検討するなど、目的に応じた複数の手段を組み合わせる必要があると言える。

5.2 今後の展望

本研究で対象とした1日前市場以外にも、JEPXには当日の電力過不足の最終調整を目的とした当日市場や、価格変動リスクに備えるための先渡市場などが存在する。これらの市場についてもエージェントベースでモデル化することで、電力市場における安定した電力調達について、市場間の相互作用も考慮した示唆を得られると考える。さらに、分散型・グリーン売電市場や非化石価値取引市場など、脱炭素化を背景とした新しい市場制度も今後拡大していくことが予想されるため、これらの市場を導入することで脱炭素化の観点についてもより多角的な実験や考察が可能になると考える。

また本研究では対象とする大口需要家を1体の工場エージェントとしてモデル化したが、次の段階として、電力消費パターンが異なる工場や、工場以外のオフィスビルや商用施設など複数の拠点を連携させた電力調達および脱炭素化の手段を考慮する展望が考えられる。

参考文献

- [1] J.K. Kok, C.J. Warmer, and I.G. Kamphuis: PowerMatcher: Multiagent control in the electricity infrastructure, *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents*, pp. 115–122, (2005)
- [2] Albadi, M. H., and El-Saadany E. F.: A summary of demand response in electricity markets, *Electric Power Systems Research*, Vol. 78, No. 11, pp. 1989–1996, (2008)
- [3] Zhou, Z., Zhao, F., and Wang, J.: Agent-based electricity market simulation with demand response from commercial buildings, *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 4, pp. 580–588, (2011)
- [4] Carl Chiarella, and Giulia Iori. A simulation analysis of the microstructure of double auction markets. *Quantitative finance*, Vol. 2, pp. 346–353, (2002)
- [5] 東京電力パワーグリッド エリアの需給実績公表について (https://www.tepco.co.jp/forecast/html/area_data-j.html)
- [6] 中部電力パワーグリッド 中部エリアの電力需給(送電端)のお知らせ (<https://powergrid.chuden.co.jp/denkiyoho/>)
- [7] 関西電力送配電 関西エリアの需給実績の公表 (<https://www.kansai-td.co.jp/denkiyoho/area-performance.html>)