

〈一般研究課題〉 東海地区を想定した需要家間電力市場取引

シミュレーション環境構築と影響評価

助成研究者 名古屋工業大学 中村 勇太



## 東海地区を想定した需要家間電力市場取引 シミュレーション環境構築と影響評価

中村 勇太  
(名古屋工業大学)

## Construction and Evaluation of Simulation Environment for Interregional Energy Market Transactions in Tokai Region

Yuta Nakamura  
(Nagoya Institute of Technology)

### Abstract :

Interregional energy market transactions to utilize surplus electricity from renewable energy sources such photovoltaic power generation (PV) have a high potential to encourage more effective energy utilization and smaller power delivery losses. Since the uniform wheeling charges without electrical proximity limits the potential due to insufficient promotion of inadequate spatial energy utilization, the author had designed an energy market transaction framework based on wheeling charges system considering electrical proximity. This paper proposes a strategy in each region to decrease calculation burden for bidding price to market in the framework. Moreover, this paper also constructs simulation environment and simulates interregional energy market transactions with actual data including household number, PV capacity, and solar radiation by municipality in Tokai region to reveal economic benefit of the interregional energy market transaction.

### 1. はじめに

近年は太陽光発電をはじめとする再生可能エネルギー(再エネ)電源の導入が進んでいるが、同時に、その導入を後押ししている固定価格買取制度終了後の再エネ電源の利活用に関する研究も数多くなされている。その中で、需要家間電力市場取引は一つの解決策とされている。需要家間電力市場取引は「電力市場を介して需要家間で電力の売買により、再エネ電源由来の余剰電力を別の需要

家が消費する」ことを示すが、現在は取引を行うために用いられるブロックチェーンなどの技術開発[1]や実証試験[2]が行われつつある。しかしながら、検討されている研究のほとんどが市単位相当(地域内)の近隣需要家間取引であり、気象条件が異なることで生じる需要家間の再エネ発電量の差異や送電損失などの電力系統への影響を考慮した、広域(地域間)での需要家間取引に関する研究はほとんどされていない。現行、需要家間での取引に発生する託送料金は全て一律の単価が想定され、取引相手との電氣的近接性は考慮されていないが、2024年度に導入された発電事業者が託送時に負担する発電側課金制度では、送電ロス削減を目的に、立地エリアによって単価が変化する[3]。そのため将来的には、需要家間の取引にも、近接性に応じた託送料金単価や各種割引の設定が求められるだろう。そこで本研究では、電氣的近接性を考慮した託送料金体系下における電力取引市場の枠組およびその市場枠組みの中で需要家が適切に入札する戦略法を提案する。さらに、東海地区を想定した需要家間電力市場取引のシミュレーション環境を構築するとともに、東海地区の気象データに基づくシミュレーションを実施し、電氣的近接性を考慮した需要家間電力取引が経済性に与える影響を評価する。

## 2. 距離別託送料金を考慮した需要家間電力市場取引

### 2.1 想定する状況

図1は、想定する状況を示している。地域A、地域Bといった地域は市町村単位で分けられ、各地域の需要家はPVを所有するプロシューマと所有しない消費者に分かれる。各地域のファシリテータ(FA)は統括する地域の取引可能量を把握し、その量を電力の買・売量として市場へ入札し、市場原理に従って約定された取引相手と電力

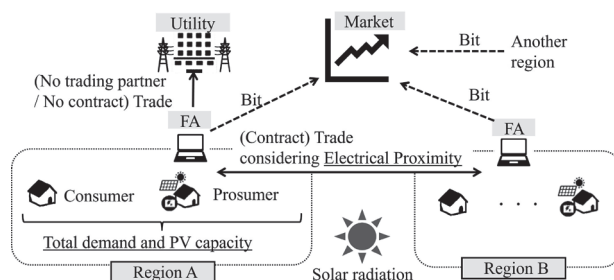


図1. 想定する状況

取引を行う。取引相手が存在しない場合や他の地域との競争に負けて落札されなかった場合は、電力の過不足分を賄うように、電力会社と取引を行う。

### 2.2 距離別託送料金

託送料金は電力の買側の地域が負担する。地域 $i$ ,  $j$ 間の取引における託送料金単価 [円/kWh]  $P_{WC}(i, j)$ は(1)式に示すように、地域間の電氣的距離 $d(i, j)$ の一次関数( $a_{WC}$ ,  $b_{WC}$ :係数)である。

$$P_{WC}(i, j) = a_{WC} \cdot d(i, j) + b_{WC} \quad (1)$$

### 2.3 距離別託送料金を考慮した市場取引

市場参加者である各地域のFAは、電力取引量および入札価格を提示し、市場原理に従って落札・約定された取引量・取引相手と電力取引を行う。図2は、距離別託送料金を考慮した市場原理を示しており、2つの実線が売(供給)および買(需要)の入札曲線をそれぞれ示している。供給曲線は、この入札曲線をそのまま用いるものの、(正味の)需要曲線は買の入札曲線(青実線)から託送料金分が差し引かれた青破線に相当する曲線となる。距離別託送料金単価 $P_{WC}(i, j)$ は(1)式に示すよ

うに取引相手によって異なるため、複数の地域からなる供給曲線に対して、一本の需要曲線を描くことができない。これは市場原理における均衡点(平衡価格)が取引相手によってシフトすることを意味しており、単純な入札価格の多寡で約定することができない。

## 2.4 市場原理に基づく取引量決定

市場原理に基づいた地域間の取引量 $Q_{pur}$ ,  $Q_{sell}$ を決定するために、各地域の売あるいは買の入札価格 $P_{pur}$ ,  $P_{sell}$ に基づき、(2)式に示す最適化問題を解く。

$$(2a) \quad \max(TS) = \max \left( \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N S(i, j) \right)$$

$$(2b) \quad S(i, j) = (P_{pur}(i) - P_{WC}(i, j)) \cdot Q_{pur}(i, j) - (P_{sell}(j)) \cdot Q_{sell}(j, i)$$

$$(2c) \quad \text{subj. to} \quad Q_{pur}(i, j) = Q_{sell}(j, i)$$

$$(2d) \quad 0 \leq \sum_{j=1}^N Q_{pur}(i, j) \leq u(ND_i) \cdot |ND_i|$$

$$(2e) \quad 0 \leq \sum_{j=1}^N Q_{sell}(i, j) \leq u(-ND_i) \cdot |ND_i|$$

$$(2f) \quad ND_i = D_i - PV_i$$

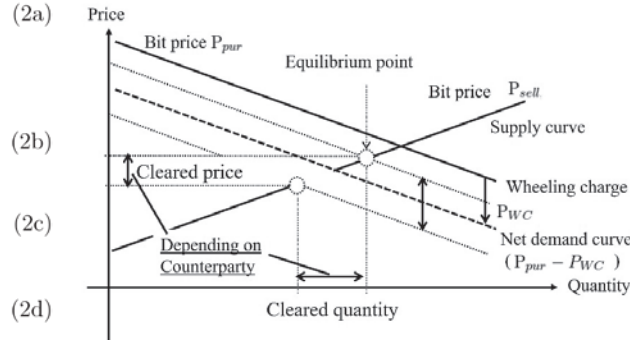


図2. 距離別託送料金を考慮した市場原理

$Q_{pur}(i, j)$  ( $Q_{sell}(i, j)$ )は、地域 $i$ が地域 $j$ に対する買い(売り)量を示す。 $N$ は市場に参加する地域数である。(2a)式に示す目的関数は社会余剰 $TS$ の最大化であり、1つの取引で得られる社会余剰 $S$ は(2b)式に示すように、生産者余剰および距離別託送料金を含めた消費者余剰の和である。(2c)式は、同一取引相手における売量と買量の等量制約を示している。(2d),(2e)式は各地域 $i$ の取引量制約を示しており、ステップ関数 $u(x)$  ( $u(x \geq 0) = 1, u(x < 0) = 0$ )を用いて、買量(売量)の合計が需要 $D_i$ から $PV$ 発電量 $P_i$ を差し引いた正味需要 $ND_i$ ((2f)式)以下に制約する。

## 3. 提案する入札戦略手法

提案手法は、過去実績データから得られる最適入札価格を用いて学習した、機械学習モデルによって予測した入札価格を基に入札戦略を立てる手法である。具体的な手順を以下に示す。

### Step 0) 学習に用いる正味需要データセットの作成

実際の需要および $PV$ 出力データなどを用いて、全地域の正味需要データセットを作成する。

### Step 1) 全地域の入札単価を決定

乱数を用いて全地域の入札単価を決定する。乱数の範囲は、買の入札単価 $P_{pur,rand}$ が売の入札単価 $P_{sell,rand}$ よりも託送料金( $P_{WC}$ )相当高くなるようにする。実績の市場取引結果が存在する場合は、その入札単価をそのまま用いる。

Step 2) 地域毎に最適入札単価を算出

Step 1の入札単価を用い、各地域の最適入札単価 $P_{pur}^*$ あるいは $P_{sell}^*$ を算出する。具体的には、正味需要が正である地域 $k$ の場合、 $k$ 以外地域の入札単価はStep 1の入札単価とし、(2)式に示す最適化問題に基づく取引量 $Q_{pur}^*(k, j)$ の決定を下位問題、地域 $k$ の支出コスト $C_k$ 最小化問題を上位問題である、(3)式に示す2レベル最適化問題を解くことで最適入札単価 $P_{pur}^*(k)$ を算出する。

$$\min_{P_{pur}(k)} C_k(P_{pur}(k)) \quad (3a)$$

$$C_k(P_{pur}(k)) = P_{pur,u} \cdot Q_{pur,u} + P_{pur}(k) \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N Q_{pur}^*(k, j)$$

$$\text{subj. to} \quad Q_{pur,u} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^N Q_{pur}^*(k, j) = ND_k \quad (3b)$$

$$\text{where} \quad Q_{pur}^*(k, j) = \underset{Q_{pur}(k, j)}{\operatorname{argmax}}(TS) \quad (3c)$$

$$\text{subj. to} \quad (2d)-(2f), (3d)-(3f)$$

$$P_{pur}(i) = \begin{cases} P_{pur,rand}(i) & (i \neq k) \\ P_{pur,opt}(k) & (i = k) \end{cases} \quad (3d)$$

$$P_{sell}(i) = \begin{cases} P_{sell,rand}(i) & (i \neq k) \\ 0 & (i = k) \end{cases} \quad (3e)$$

$$P_{pur,u} \geq \max_i(P_{pur,rand}(i)) \quad (3f)$$

$P_{pur,u}$ は(3f)式に示すように他の地域の入札単価よりも高い、系統への買電単価であり、地域間取引が成立しない場合に系統側と取引する( $Q_{pur,u} > 0$ )。

正味需要が負である地域 $k$ の場合は、上位の問題を収入最大化問題に置き換え、対応する部分を変更した最適化問題を解くことで、最適入札単価 $P_{sell}^*(k)$ を算出する。これをStep 0で作成した正味需要データセットにある全地域、全時間断面で行う。

Step 3) 最適入札単価の学習

Step 2で算出した最適入札単価 $P_{pur}^*$ ,  $P_{sell}^*(k)$ および入力情報を用いた機械学習により、各地域をエージェントとした最適入札単価の学習を行う。入力情報は、自地域の正味需要 $ND$ および全地域の日射量 $SD$ とし、学習は学習精度向上のために、売と買の入札単価を分けて行う。

Step 4) 落札失敗リスクを考慮した市場への入札

Step 3で得られる入札単価 $P^{bit}$ は、自地域の収益のみを最大化するような入札単価であるが、実際には、他の地域も同様に利益を最大化するような入札単価が提示されるため、落札が失敗するリスクは大きい。そのため、落札失敗リスク回避パラメータ $\gamma_{pur}, \gamma_{sell} \in 0, 1$ を設定し、(4)式で得られた入札単価 $P_{pur}(k)$ ,  $P_{sell}(k)$ を入札する。

$$\begin{aligned} P_{pur}(k) &= (1 + \gamma_{pur}) \cdot P^{bit}(ND_k > 0) \\ P_{sell}(k) &= (1 - \gamma_{sell}) \cdot P^{bit}(ND_k < 0) \end{aligned} \quad (4)$$

## 4. シミュレーション条件

本研究では、東海地区の市町村別各種データに基づく地域間電力市場取引シミュレーションを行う。地域間取引に参加する地域は119自治体とし、需要家はその自治体に属する、一般家庭とする低圧需要家とする。

### 4.1 地域データ

各地域の需要は、そのトレンドが20軒数分の家庭における15分値電力需要データ [4]の平均値、1年間の総需要量(需要の大きさ)が2022年度の市町村別総需要量[5]に一致するように設定する。PV導入量は、将来的な増加により電力余剰が発生し、地域間取引が多く行われるように、2022年3月末時点における実績の市町村別PV導入量(10kW未満)[6]を3倍した容量とする。なお、総需要量[5]およびPV導入量[6]データの最小区分が市単位であるため、名古屋市など、区が存在する自治体は各区の世帯比[7]で案分する。PV発電量は、気象庁気象業務支援センターが作成したデータを基にした1時間毎の日射量データ[8]を基に、期間全体のピークがPV定格出力に一致するように設定する。

### 4.2 位置情報と取引距離

各地域の位置情報は、各自治体の役所の緯度・経度情報とする。地域間の電氣的距離 $d(i, j)$ はそれぞれの役所最寄の変電所間の総送電線距離とする。送電線は、中部電力が公表している154kV以上の送電系統[9]を対象とし、複数の送電線を辿ることで変電所間の送電経路を構築する。多くの地域間で複数の送電経路が存在するが、総送電線距離は最短経路の総距離とする。役所や変電所といった各地点の緯度・経度情報はgeocoding[10]を用いて取得する。2地点間の距離は、各緯度・経度情報から求まる、地球の赤道半径6378kmを半径とする球体の対地距離である。

### 4.3 学習に用いる各種条件と学習法

託送料金単価 $P_{wc}(i, j)$ は、全体平均10円/kWh程度[11]となるように、係数 $a_{wc}=0.5$ 円/(km・kWh),  $b_{wc}=5.0$ 円/kWh, 上限15円/kWhとする。提案法(Step 1)における各需要家の入札単価の乱数は、買電は平均20円/kWh, 売電は平均5円/kWh, 標準偏差は2円/kWhとする正規分布に従うが、系統への買電単価30円/kWh, 売電単価1円/kWhを超えないように上下限をそれぞれ設ける。

学習に用いる正味需要データセットは、実際の需要およびPV出力を乱数で変化させた、正味需要が正・負である地域がともに存在する500時間断面分のデータセットとする。学習モデルを作成するための機械学習アルゴリズムとして、SVM(Support Vector Machine)を用いる。落札失敗リスク回避パラメータ $\gamma_{pur}, \gamma_{sell}$ はいずれも0.2とする。

## 5. シミュレーション結果と影響評価

### 5.1 代表時間帯の取引

ここでは、シミュレーションの中で最も取引量が多い代表時間帯(2023/2/20 12:15)について着目する。図3は、入札金額の高低(プロットの大きさ)と地域間取引の関係を地図上に示している(左上枠は名古屋市近郊を拡大)。矢印は主要な地域間取引の向き(売→買)を示しており、その矢印

の太さは取引量の大きさを示している。愛知県南部や静岡県南部で生じている余剰電力を、名古屋市内や岐阜県を中心に消費されている。この時間帯は、愛知県の南部や静岡県で日射量が強く、愛知県北部や岐阜県での日射量が少ないといった、地域間の日射量の偏りによって、全体として取引量が多くなっていると考えられる。

## 5.2 年間の取引傾向

図4は、地域間取引が発生する期間全体の平均正味需要と取引量の関係を示している。傾向としては、郊外地域で生じた余剰電力を都市部である、名古屋市内各区や静岡市、岐阜市、高山市の周辺地域で消費するように取引されている。

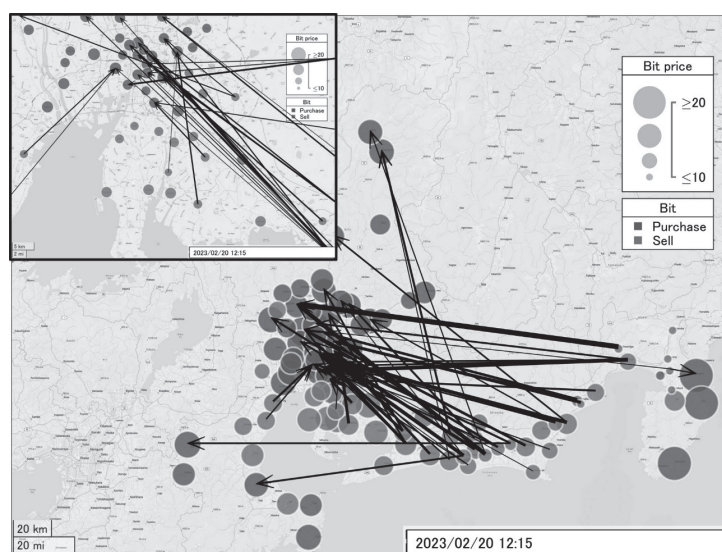


図3. 代表時間帯における取引

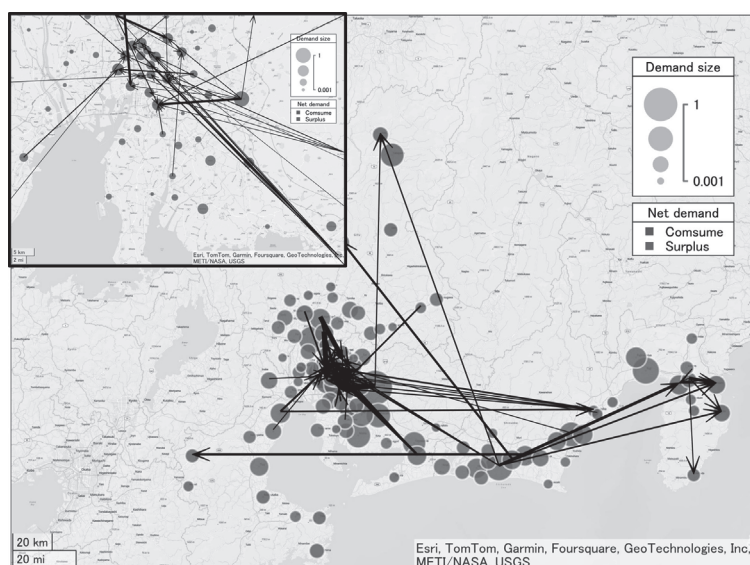


図4. 取引期間全体の平均取引傾向

図5および図6は取引が成立した地域間取引のヒストグラムを示している。図5に示す入札単価は、売は10円程度、買は17円程度を中心に分布している。一方で、取引が難しい地域や時間帯では、取引が成立しやすい価格である、買は上限価格、売は下限価格での入札も多くみられる。同様の傾向は、図6に示す地域取引が成立する地域間の託送料金単価からも読み取ることができ、6円前後の近距離の取引と、最大託送料金15円付近での長距離取引に分かれている。

図7は全地域の総負荷容量1p.u.に対する地域間取引量を示している。地域間取引量は若干ではあるものの、冬季では少なく、春先では多いといった季節性を有している。

図8は日射量と地域間取引量の2変量ヒストグラムを示している。日射量0.2~0.8p.u.で取引量が多く、これより日射量が多い場合には買い手(需要)不足、日射量が少ない場合には売り手(発電)不足となることが推察できる。

図9は時間帯別の地域間取引による(経済的)収益を各地域をサンプルとする箱ひげ図で示している。地域間取引により、最大8円/kWh、平均3円/kWh程度の収益を得ることができることが明らかになった。

## 6. まとめ

本研究では、電氣的近接性を考慮した託送料金体系下における電力取引市場の枠組およびその市場枠組みの中で需要家が適切に入札する戦略法を提案した。市場の枠組みとしては、電力市場取引を行う需要家間の電氣的な距離に応じて託送料金(送配電網の利用料)の単価が変動する距離別託送料金を考慮した需要家間電力市場取引を想

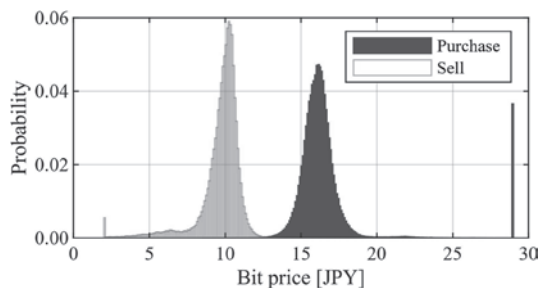


図5. 入札価格のヒストグラム

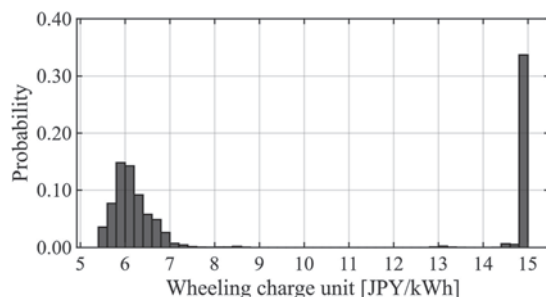


図6. 託送料金入札価格のヒストグラム

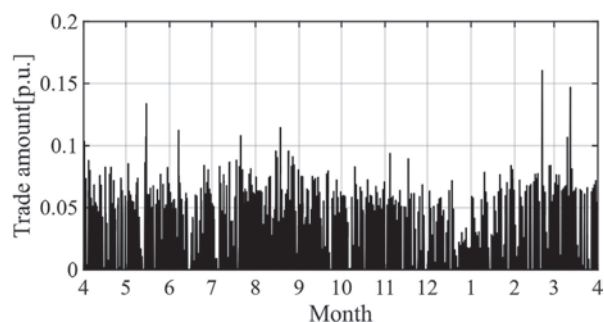


図7. 年間の取引量の推移

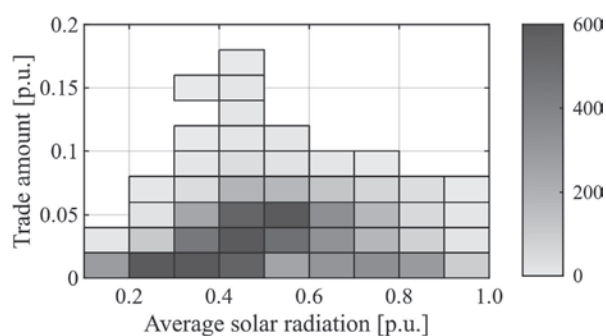


図8. 日射量と平均取引量の関係

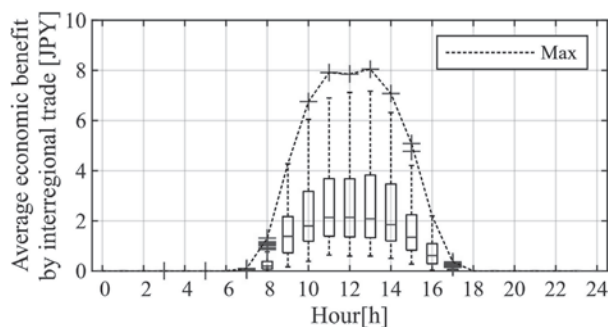


図9. 時間別の経済的収益

定し、この取引に従う金融理論・市場原理に基づく約定および取引量決定法を確立した。提案した各需要家の入札戦略手法は、地域単位で市場を模擬し、地域単位・時間単位に最適入札単価を独立して計算するが、その単価を算出には2レベルの最適化問題を解く必要がある。しかしながら、2レベル最適化問題の下位は線形計画問題であるため、上位変数(入札単価)を逐次的に変えて、上位の目的関数を最善とする解を探索すれば良く、汎用ソルバーを用いることで、この最適化問題を比較的容易に解くことができる。これにより、本手法を適用することで多数の地域における需要家間電力市場取引シミュレーションが可能になった。また、本研究では東海地区全体の市町村別各種データに基づき、地域間電力市場取引シミュレーション環境を構築するとともに、シミュレーションにより電氣的近接性を考慮した需要家間電力取引が経済性に与える影響を評価した。

今回は低圧需要家(一般住宅)の地域間取引に着目しているが、商業施設などの高圧以上の上位系統に連系された需要家も含めた地域間取引も考えられるため、今後は需要家を拡張したシミュレーションを行い、地域間取引の効果を明確化していく。

## 参考文献

- [1] W. Hua and H. Sun: "A Blockchain-Based Peer-to-Peer Trading Scheme Coupling Energy and Carbon Markets" 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, pp. 1-6 (2019)
- [2] 松岡武彦, 坂井寛久, 石田文章, 三枝功典, 行木弥鈴, 武永直哉, 中村誠吾, 佐川大志, 田中謙司: 「ブロックチェーン技術を活用したP2P環境価値取引実証」, 第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 10-3(2021)
- [3] 発電側課金の導入に向けた対応について  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\\_gas/denryoku\\_gas/pdf/065\\_04\\_01.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/denryoku_gas/pdf/065_04_01.pdf)
- [4] 日本建築学会: 「住宅におけるエネルギー消費量データベース」  
<http://tkkankyo.eng.niigata-u.ac.jp/HP/HP/database/index.htm>
- [5] 市町村別発電・需要実績(2022年度)  
[https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric\\_power/ep002/results.html](https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html)
- [6] 経済産業省「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(B表 2022年3月末時点)」  
<https://www.fit-portal.go.jp/PublicInfoSummary>
- [7] 政府統計の総合窓口(e-Stat)「22-03【総計】市区町村別人口、人口動態及び世帯数」(2022)  
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200241&tstat=000001039591>
- [8] 京大大学生存圏研究所「数値予報GPV」  
<https://database.rish.kyoto-u.ac.jp/>
- [9] 中部電力「電力系統利用ルールおよび当社系統情報等の公表」  
[https://powergrid.chuden.co.jp/goannai/hatsuden\\_kouri/takuso\\_kyokyu/rule/](https://powergrid.chuden.co.jp/goannai/hatsuden_kouri/takuso_kyokyu/rule/)
- [10] Geocoding.jp <https://www.geocoding.jp/>
- [11] 中部電力ミライズ「託送料金相当額について」  
<https://miraiz.chuden.co.jp/home/electric/contract/consignment/>