**ブロックチェーンを用いた**

**P2P電力取引における**

**インバランス精算の検討**

2022年2月4日　提出

指導教員　近藤潤次　准教授

　　　　　小平大輔　助教

提出者

学籍番号 7318189　氏名　吉村　英

ブロックチェーンを用いたP2P電力取引におけるインバランス精算の検討

2022年2月4日　提出

指導教員　近藤潤次准教授　小平大輔助教

提出者　学籍番号 7318189　氏名　吉村　英

**Abstract**

The number of residential power generation facilities where the purchase period of the feed-in tariff system for solar power electricity, which began in 2011, will expire will occur from around November 2019, and there will be a large number of facilities known as "graduated FIT". It is said that the number will reach about 1.65 million by 2023. The only options left for these "graduates of FIT" are to have the power company purchase their electricity at a lower price, to consume it on their own, or to pretend that they did not generate electricity due to output control. In this context, it is said that "graduate FITs" can realize more efficient power trading by participating in the "P2P power trading network using blockchain," which has attracted attention in recent years and has been cited as a new possibility. However, since PV systems are dependent on weather conditions and other factors, the occurrence of imbalance settlements cannot be ignored. In this study, we estimate the fees consumed by imbalance settlements and examine how much imbalance should be allowed, taking into account the load on the network.

**内容梗概**

　2011年から始まった太陽光発電電力の固定価格買取制度の買取期間が満了する住宅用発電設備が2019年11月頃から発生し、「卒FIT」と呼ばれる設備が多発している。その数は2023年までに約165万件に達するといわれている。「卒FIT」に残された道は、「低価格で電力会社に買取してもらう」、または「自家消費」、あるいは「出力制御されて発電しなかったことにする」である。そんな中、近年注目を集め、新たな可能性として挙げられている、「ブロックチェーンを用いたP2P電力取引ネットワーク」に参加することで、「卒FIT」はより効率的に電力売買を実現できるといわれている。しかしながら、太陽光発電システムは気象条件等に依存するため、インバランス精算の発生を決して無視することはできない。本研究では、インバランス精算で消費される手数料を推定し、ネットワークの負荷を考慮した上で、インバランスをどれくらい許容すべきなのかを検討する。

**目次**

1. 序論 1
   1. 研究背景 1
   2. 再生可能エネルギーの普及促進策 1
      1. 電力自由化 1
      2. 固定価格買取制度 1
   3. インバランス制度 3
   4. 現在の電力取引と問題点 5
   5. 研究目的 6
2. ブロックチェーン技術 8

　　2.1　原理 9

　　2.2　パブリック型とプライベート型 10

　　2.3　ブロックチェーンの活用 11

　　2.4　スマートコントラクト 12

　　2.5　ブロックチェーンプラットフォーム比較 13

　　2.6　Ethereumブロックチェーン 14

　　　　2.6.1　手数料Gas 15

1. 電力取引モデル 16

　　3.1　システム概要 16

　　3.2　取引時間 16

　　3.3　電力取引価格の決定 17

　　3.4　P2P電力取引におけるマッチング 18

　　3.5　インバランス精算 18

1. 検証 20

　　4.1　実験条件 20

　　4.2　手数料の推定 21

　　4.3　測定結果 21

1. 結言 23
2. **序論**
   1. **研究背景**

18 世紀の産業革命以降、エネルギー用途の拡大や人口増加からエネルギー需要が急速に増加し、今後もさらに増加すると見込まれている。特にエネルギー依存度の高い石油や天然ガスなど の化石燃料資源の枯渇などのエネルギー問題が深刻化してきている。地球温暖化や二酸化炭素排出といった環境問題も2015年12月12日に気候変動を抑制するために温室効果ガスを削減するパリ協定が採択されるなど世界的に取り組みが行われてきている。このような背景から再生可能エネルギーの導入が重要視されている。再生可能エネルギーの増加の要因として電力自由化が挙げられる。電力自由化により電力会社を自由に選ぶことができるようになったため太陽光や風力などの再生可能エネルギーを扱う発電事業を選ぶことができるようになった。こういった背景から主にドイツを含むヨーロッパ諸国では再生可能エネルギーの発電比率が20％を超え現在も増加傾向にある。

* 1. **再生可能エネルギーの普及促進策**
     1. **電力自由化**

日本においても電力自由化は1995年から徐々に進められている。電力自由化の一部として電力小売自由化が挙げられる。電力小売自由化によりどんな家庭であっても電力を売ることができようになった。その影響から家庭用太陽光パネルの普及が進んでいる。

* + 1. **固定価格買取制度**

　家庭用太陽光パネルの普及には固定価格買い取り制度（FIT 制度）によるものが大きい。FIT制度とは太陽光で発電した電力の買電価格を売電価格より高くするというものである。図 1.1 は日本における再生可能エネルギーの増加を示した図である。このようにFIT 制度の導入から太陽光が増加している。しかし、太陽光の買電価格と売電価格の差は我々の電気料金に上乗せされている。 また、買取価格は年々低下しており、新規参入が難しくなっている。こういった問題から今後安定的に発電を継続していくためにコスト低減をする必要がある。

グラフ

自動的に生成された説明

出典: 資源エネルギー庁データなどからISEP作成

図1.1　日本国内の自然エネルギー発電設備の累積導入量の推移

Fig. 1.1 Cumulative Installation of Renewable Energy Power Generation Facilities in Japan

表1.1　太陽光電力買取価格の変化

Table 1.1 Changes in solar power purchase price

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 事業用太陽光(10kW以上) | 家庭用太陽(10kW未満) |
| 平成24年度 | 40円/kWh | 42円/kWh |
| 令和3年度 | 12円/kWh | 19円/kWh |

**1.3　インバランス制度**

　インバランスとは、需要量と供給量の差分のことである。日本における電力取引では、小売電気事業者等が、あらかじめ一般送配電事業者に提出する、電力の需要量や発電量を想定した計画値を需要（発電）計画、実際に対象地点で使用・発電された需要量や発電量の実績を需要（発電）実績といい、この需要（発電）計画と需要（発電）実績の差分をインバランスと呼んでいる。小売電気事業者等は、インバランスが発生した場合、不足なら電力量の補填、余剰なら電力量の買取が発生するため、一般送配電事業者とインバランス料金を精算する必要がある。

　電力の供給は3つのステップ（計画作成、需給調整、インバランス）で行われ、流れを図1.2に示す。1．計画作成では、ある30分需要予測から需要計画を、発電予測から発電計画を作成する。2．需給調整では、気象条件等の変化によって需要予測が増加（減少）した場合、それに見合う発電量を追加の発電あるいは市場からの調達により確保する。3．インバランスでは、需要計画と需要実績との差（需要インバランス）を一般送配電事業者と精算する。発電事業者は需要の実績に関わらず、発電計画と発電実績の差（発電インバランス）を一般送配電事業者と精算する。結果的に、需要と発電の実績の差は最終的に系統安定に責任を負っている一般送配電事業者が最終調整を行い、その調整コストは託送料金に反映される。

ダイアグラム

自動的に生成された説明

図1.2　計画作成からインバランス精算の流れ

Fig. 1.2 Flow of imbalance settlement from planning

　そもそも電力には、供給量と需要量は同量でなければならないという前提がある。この需給バランスが崩壊すると周波数が乱れ、安定した電力供給に支障をきたす危険性がある。そのような事態を防ぐための対策がインバランス制度である。小売電気事業者等が合理的に需要量を予測し、その予測に応じた供給量を調達する。小売電気事業者等にとってインバランス料金は極力発生しないほうが望ましい。理論上、需要（発電）計画と需要（発電）実績に差がなければインバランス料金は発生しない。しかし実際には、電気の需要量を正確に予測することは非常に困難であり、発電量に関しても太陽光発電（PV）、風力発電等の再生可能エネルギーによる発電が天候等により影響を受けることから、インバランスを完全に回避することは困難であるとされている。インバランス料金の算出方法を次式に示す。

　インセンティブ定数とは、経済産業大臣が定める額であり、系統全体が不足した場合は加算、余剰の場合は減算される。（1）式および（2）式より、インバランス料金はJEPXの市場価格をバースに算出される。つまり、市場価格の変動により、インバランス料金も変動する。

　ここでスポット市場と1時間前市場について説明する。

**スポット市場（一日前市場）**

　翌日24時間分を取引する市場を指す。ここで、一日は30分単位に区切った48商品である。小売電気事業者等は需要（発電）計画に対し、追加調達が必要な電量購入量や、余剰分を整理するための電力売却量を入札する。このとき、調達量や発電量に余裕があれば「売る」、不足があれば「買う」というように需要（発電）計画を調整する。

**1時間前市場（当日市場）**

　毎日17時から翌日の取引が行え、各商品について受け渡しの1時間前まで取引が可能な市場である。これも一日48商品である。スポット市場では一日の取引を一斉に行うが、1時間前市場では1商品ごとの取引である。口実の急激な気候変化や発電トラブル等の要因で需給の過不足が生じた場合に調整できる。

* 1. **現在の電力取引と問題点**

　電力小売の自由化により新たに電力事業者が多く参入している。現在日本での電力の流れは大まかに表せば、図1.3のようになる。それぞれの事業者はJEPX（日本卸電力取引所）での市場取引により電力を購入、販売するか直接需要家に販売するといった流れになっている。[2]しかし実際にJEPXで市場取引されている量は国内販売電力総量の約2％程度しかない。この理由として、決済時に現物受け渡し必要なため市場参加者が少ないことが挙げられる。こういった問題を解決するためにもより電力市場システムの見直しが必要となっている。[3]　また、インバランス料金は、不足インバランス発生時の方が高いために、事業者の中には余剰インバランス発生に伴う収入額より、不足インバランス発生に伴う支払額が大きかった事業者がいるという問題点がある。[4]

グラフィカル ユーザー インターフェイス, テキスト, アプリケーション

自動的に生成された説明

図1.3　日本における電力取引

Fig. 1.3 Electricity trading in Japan

　先行研究では、インバンスを低減するための事例がいくつかある。1つ目はEVを活用した事例である。EVを「動く蓄電池」として扱う。初期入札と約定からインバランスを予測し、そのインバランスを元にEVで給電あるいは充電情報を入札して約定することで、実績値と計画値とのインバランスを低減する、というものである。[7]2つ目は、バランシンググループのようなものを意図的に作り、インバランスを抑制するというものである。[10]3つ目は、発生したインバランスの余剰分を無料で系統に販売、不足分は系統価格で購入するというものである。[11]4つ目は、VPPの導入によってインバランスを回避するというものである。[12][13]本研究では、初期入札・約定後、インバランスに許容を設けることで、先行研究よりネットワークの負荷を低減されることである。

* 1. **研究目的**

　このような背景から家庭で発電した余剰電力を家庭間売買する電力取引モデルにおいて、インバランス精算についての検討を行う。インバランス発生時のインバランス精算で消費されるGasを推定し、ネットワークの負荷を考え、インバランス許容率どのように設定するのが適切かを検討する。

　ここで、インバランス許容率について説明する。

　インバランス許容率とは、インバランスを許容する範囲の割合のことである。つまり、需要（発電）計画に対する需要（発電）実績の誤差をどれくらいまで許容するか、ということである。なお、以下からは許容範囲内の差分については、インバランスとして扱わないこととする。

　このインバランス許容率を上げると、インバランス量とともに、インバランス精算の回数も減少する。したがって、ブロックチェーン上のトランザクション要求の回数も減少するため、ブロックチェーンネットワークの負荷が軽減する。ブロックチェーンについては第2章で説明する。反対にインバランス許容率を下げて0%にすると、現在の技術ではインバランスを取り除くことがほぼ不可能であるので、すべての取引でインバランス精算が発生し、ブロックチェーンネットワークに負荷をかけることになる。しかしながら、一般送配電事業者にとって、インバランス精算は重要な収入源である。

　日本国内におけるインバランス料金制度の変遷を図1.4に示す。2016年までは通常運用で想定されるインバランス許容率を3%未満とし、これを超過したインバランスに対しては別途料金設定を講じていた。

テーブル が含まれている画像

自動的に生成された説明

図1.4　日本におけるインバランス料金制度の変遷

Fig. 1.4 Changes in the imbalance rate system in Japan

　インバランスの変動範囲の割合（不足インバランス率または余剰インバランス率）を決定する算出式を以下に示す。

本研究では、(3),(4)式を用いて各インバランス率を算出する。

1. 時計と文字の加工写真

   低い精度で自動的に生成された説明**ブロックチェーン技術**

図2.1　中央集権型システムとブロックチェーンシステム

Fig. 2.1 Centralized systems and blockchain systems

　仮想通貨に用いられるブロックチェーン技術について説明する。ブロックチェーンとは、Satoshi Nakamotoによって提案されたBitcoinに用いられている分散型台帳システムである。図2.1に中央集権型システムとブロックチェーンシステムの概要図を示す。現在主流である中央集権型では、データは巨大な中央サーバにデータサーバとして保存され一括管理されている。そのため、サーバダウンの危険性やデータ改ざんの危険性がある。したがって、一般的な金融系システムではデータのバックアップを幾重にも取り、データの消失や破損を防止している。このようにして、信頼性のある取引を担保している。一方、ブロックチェーンでは、ブロックチェーンネットワークに接続された世界中に点在するコンピュータに同一、または緩着化されたデータを暗号化して保持させることにより、世界中にデータを分散させている。そのため、データを持つ全てのコンピュータを同時に破壊しない限り、データを破壊することは不可能である。一台でもデータを持つコンピュータが残っていれば、新たにブロックチェーンネットワークに接続したコンピュータに過去のデータを即座に複製させ、分散型システムを復旧することができる。したがって、ブロックチェーンではデータの改ざんが理論上不可能だと言われている。また、中央集権型システムでは第三者や代理店などを通す必要があり人件費などのコストがかかるが、ブロックチェーンシステムでは特定の組織が管理するわけではないので、人件費などのコストを削減することができる。

　また、ブロックチェーンは金融以外の多くの分野での活用が見込まれる。ブロックチェーンはデータ改ざんが困難という点から本人証明や所有証明など権利証明のプラットフォームとしての有用性が高いと考えられる。既に、エストニアやアメリカでは電子投票としてブロックチェーンを利用した実験を行っている。[9]

**2.1　原理**

　図2.2に基本的なブロックチェーンの構造を示す。AさんからBさんへ仮想通貨を送金したとする。その取引データは暗号化されブロックチェーン上のブロックに書き込まれる。ここで言う取引データのことをトランザクションといい、誰でもトランザクションは見ることができる。このブロックはトランザクションがある程度貯まると新しいブロックが追加される。ブロックが鎖状に繋がっていくためブロックチェーンと呼ばれる。またブロックの中にはハッシュ値と呼ばれるものが含まれている。これはハッシュ関数と呼ばれるもので生成される文字列のことである。ハッシュ値はブロックのトランザクションと一つ前のブロックによって決まる。よってもし仮にどこかのブロックが改ざんされた場合それ以降のブロックのハッシュ値が全て変わってしまうため、全てのブロックを改ざんすることは理論上不可能と言われている。

抽象, 挿絵 が含まれている画像

自動的に生成された説明

図2.2　ブロックチェーン構造

Fig. 2.2 Blockchain structure

**2.2　パブリック型とプライベート型**

表2.1　パブリック型とプライベート型

Table 2.1 Public type and private type

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | パブリック型 | コンソーシアム(プライベート型) |
| 管理主体 | なし | 複数企業・組織 |
| 参加者 | 自由 | 許可制 |
| コンセンサスアルゴリズム | Proof of Work | 分散型コンセンサスアルゴリズム |

**パブリック型**

ブロックチェーンへの参加者が特定されない，つまり誰でも参加できるブロックチェーンを指す。 典型的な例では，BitcoinやEthereumが挙げられる。パブリック型では不特定多数が参加可能であるから，悪意のある参加者も存在し得るという前提に立っている。このため，参加者には膨大な計算を行わせる仕組みを取り入れている。これをマイニングといい，特定の条件を満たす値を最初に発見した参加者に対し，トランザクションの正当性を検証したりブロックを追加したりする権利と，報酬を一定量の仮想通貨を与える。しかし，トランザクションの確定までに時間を要してしまうといったデメリットがある。パブリック型は一部の個人・組織による恣意的改ざんや操作が困難，もしくはほとんど不可能である。これはパブリック型の非常に大きなメリットであり，取引の正当性の担保を中央管理者に依存しないとい点で、非中央集権型の実現に向いていると言える。

**コンソーシアム型（プライベート型）**

コンソーシアムとは共同事業体などの意味合いである。コンソーシアム型は，この共同事業体に参加する企業や組織だけが使えるブロックチェーンである。例えば，複数の金融機関で決済用のブロックチェーンを構築する，あるいはバリューチェーン上の複数の企業間で商品トレーサビリティ用ブロックチェーンとして使うなどの活用がある。コンソーシアム型は共同事業体を構成する信頼のおける企業がブロックチェーンに参加するため，不特定多数が参加するパブリック型より分散化の利点が細作なるというデメリットがある。しかし，特定の企業や組織の参加を前提としており，PoWとは異なる軽量なコンセンサスアルゴリズムを採用されているため，取引検証のスピードを大きく向上させることが可能である。また，取引検証のためのインセンティブが不要といったメリットある。

**2.3　ブロックチェーンの活用**

　ブロックチェーンは仮想通貨のみならず、多くの分野への応用が進んでいる。その一つに「サプライチェーン」がある。ブロックチェーンネットワークの取引履歴を活用し、製品情報の追跡を高次元で実行することができる。これまで偽装問題が頻発していた食品の産地や原材料、消費期限などを、改ざんのできないブロックチェーンで管理することにより、食の安全をもたらすことも可能になった。製品に貼り付けられたNFCタグやQRコードからアクセスし、製品情報を簡単に追跡できるようになることで、消費者も安心して買い物ができる。その他にも，権利や資産の管理にも活用が期待されている。これまで、ものや権利を所有していることの証明は、実際に持っているという事実か、政府や自治体、業界団体による承認によってなされていた。これらの管理が十分ではなかった業界も多かったが、ブロックチェーンにより、権利や資産などの管理を迅速かつ透明性を担保して行えるようになった。二次流通にあたって、元の所有者や著作権者に還元される仕組みなど、新たな所有権を成立させることもできる。

ロゴ, 会社名

中程度の精度で自動的に生成された説明

図2.3　ブロックチェーンの活用

Fig. 2.3 Utilization of blockchain

**2.4　スマートコントラクト**

　本研究で用いるブロックチェーンプラットフォームであるEthereumには、「スマートコントラクト」というブロックチェーン上で実装できるプログラムがある。これは自由にブロックチェーン上に書き込むことが可能である。スマートコントラクトは、その名前の通り、コントラクト（契約）をスマートに行えるプロトコルのことである。つまり、スマートコントラクトとは契約の自動化であり、契約の条件確認や履行までを自動的に実行させることができる。図2.4にスマートコントラクトが実行され、決済されるまでの流れを示す。スマートコントラクトの利用者は契約の事前定義さえしていれば、その後の実際に契約が発生したとき実行、決済までが自動で行われる。取引プロセスを自動化できるため、決済期間の短縮や不正防止、仲介者を介さないことによるコスト削減にも寄与すると期待されており、各国で取り組みが行われている。

タイムライン

自動的に生成された説明

図2.4　スマートコントラクトの概要

Fig. 2.4 Overview of smart contracts

**2.5　ブロックチェーンプラットフォーム比較**

　表2.2に主要なブロックチェーンプラットフォームの比較を示す。

　BitcoinはSatoshi Nakamotoにより投稿された論文に基づき、2009年より運用された。現在時価総額一位を占めている仮想通貨である。Bitcoinは主に送金用として利用されているため、スマートコントラクトの実装がされていない。比較的低コストで決済することが可能で、約10分程度で行われる。

　CordaはR3社が主体となって開発されているブロックチェーンプラットフォームの一つである。主に金融分野での活用が進められている。

　Hyperledger FabricはIBMが主体となって開発されているビジネス向けの許可制ブロックチェーンプラットフォームである。財務や医療、製造などの幅広い分野で活用されている。

　本研究では、汎用型の用途で用いられ、プライベート型のブロックチェーンを実装されているEthereumを用いた。

表2.2　ブロックチェーンプラットフォーム比較

Table 2.2 Comparison of blockchain platforms

テーブル

中程度の精度で自動的に生成された説明

**2.6　Ethereumブロックチェーン**

　本研究ではEthereumを用いた。Ethereumブロックチェーンについて解説する。

　Ethereumとは2013年にVitalik Buterinによって示され，開発されたプラットフォームである。このプラットフォーム内で使用される仮想通貨をether（単位：ETH）という。2021 年現在，bitcoin（BTC）に次ぐ時価総額を占めている。参加者の合意を形成するコンセンサスアルゴリズムには，マイニングによって通貨が発行されるProof of Work（PoW）が用いられている。また，スマートコントラ クトは独自言語であるSolidityを使用して開発する。Proof of Work（PoW）とは，（仮想通貨の）取引や送金データを正しくブロックチェーン（block chain）につなぐための仕組みである。一般的な金融商品と異なり、ビットコインなど暗号資産（仮想通貨）の多くを支えるシステムは中央に管理機関を持っているわけではない。そのため、間違いなく売買や送金を成立させるためには、中央の監視者がいなくても容易に改ざんできないような仕組みが必要である。PoWでは、必要な「計算」を成功させた人が、そのデータを「承認」して正しくブロックチェーンにつなぎこむ役割を担う仕組みとなっている。ある取引や送金が発生したとき、そのデータは他の人によって承認されることで初めてブロックチェーンにつながれる。この承認作業とは、ブロックチェーンにデータをつなぐのに適したパラメータの値を計算する作業である。まず、いくつかの取引や送金のデータがブロックとしてまとめられる。ブロックをブロックチェーンにセットするためには、ナンス（Nonce）と呼ばれる答えの値を計算で発見する必要があり，いち早くナンスを求められた人は、他の計算者に答えを発表して正しいかどうか判断してもらう。計算結果が正しいと認められれば、計算を行った人がブロックチェーンへのつなぎこみの権利を得て、報酬として暗号資産（仮想通貨）を手に入れることができる。この計算およびデータ承認の作業のことをマイニング（mining）、作業を行う人や組織をマイナー（miner）と呼ぶ。PoW とは、マイナーによるマイニングによってデータの正しさについての合意（＝コンセンサス）を得る仕組みであり、「コンセンサスアルゴリズム（consensus algorithm）」の一つである。

**2.6.1　手数料Gas**

　Gasとは、Ethereum上でトランザクションを利用するための手数料の単位である。Gasは、トランザクションの送信やスマートコントラクトのデプロイ、ストレージ領域の利用にかかる。スマートコントラクト実行時のGasは、実行するプログラムコードの計算ステップ数により決定される。Ethereumではすべての計算ステップや領域に対して手数料が課されるため、ネットワークの乱用や攻撃を防止し、チューリング完全性を保つことができる。以下に、3つの用語を説明する。

**Gas Price**

　1Gasあたりの料金、つまりGas（仕事量）の単価である。1Gasの値段は、GasとEtherの交換レートのなかでGasの需要と供給に応じて変化する。1Etherよりずっと小さい値であるため、weiという単位で数えられる。

**Gas Fee**

　Gas Fee（ガス手数料）は、トランザクションやスマートコントラクト実行に必要な手数料のことである。一般に、以下の式で算出される。

**Gas Limit**

　Gas Limitは、トランザクションやスマートコントラクト実行にかかるGasの最大量のこと。Gasは基本的にはトランザクション送信者の残高から消費される。送信者がスマートコントラクトを実行する場合などに、想定しているよりも多くのGasを消費しないように上限値を定める。

**第3章　電力取引モデル**

**3.1　システム概要**

　本研究で使用するシステムの概要図を図3.1に示す。電力取引を行うProsumerおよびConsumerは同じブロックチェーンシステムに取引情報を反映する。また、そのブロックチェーンシステムは電気事業者が管理する。

ダイアグラム

自動的に生成された説明

図3.1　電力システム概要

Fig. 3.1 Power system overview

　ここで、ProsumerとConsumerについて説明する。

**Prosumer**

　生産消費者と呼ぶこともある。太陽光発電（PV: Photo Voltaic）システムによって発電する機能を持ち電力を供給できる、かつEV（Electric Vehicle）や蓄電池のような充電等の需要がある家庭のこと。

**Consumer**

　需要家とも呼ぶ。EV（Electric Vehicle）や蓄電池のような充電等の需要がある家庭のこと。

**3.2　取引時間**

　図3.2に電力取引システムの取引時間に関する図を示す。一般に時間前市場では30分を単位として取引されている。まず、ConsumerとProsumerを募集する。Consumerは購入したい電力量と1kwhあたりの価格を入札し、ブロックチェーン上に格納する。同様にProsumerは、取引したい電力量と1kwhあたりの価格を入札し、ブロックチェーン上に格納する。その後P2Pで取引するためのマッチングを行い、マッチングと同時に約定処理で1kwhあたりの価格を決定する。その後、マッチング結果と1kwh当たりの価格を各家庭に通知する。ここまでを30分人単位とり、ブロックチェーン上に取引情報を反映する。

タイムライン

低い精度で自動的に生成された説明

図3.2　取引時間の設定

Fig. 3.2 Setting trading hours

**3.3　電力取引価格の決定**

　約定処理をするコントラクトで実行する。約定方式は、株式取引でも採用されている「板寄せ方式」を採用した。図3.3を参照して説明する。買い手と売り手はそれぞれ取引したい数量と価格をコントラクトに送信する。売り手、買い手をそれぞれ価格順に並べ替える。今回の場合は、売り手をAからEの5家庭、買い手をFからJの5家庭とした。売り手は価格が一番低い家庭から、買い手は価格が一番高い家庭から取引される「価格優先の原則」に則り、約定価格を決定する。今回の約定価格は売呼値と買呼値が一致する3が約定価格となる。この場合、売り手はC,D,Eが売ることができ、買い手はF,G,Hが買うことができる。

テーブル, カレンダー

自動的に生成された説明

図3.3　板寄せ方式

Fig. 3.3 Itayose method

**3.4　P2P電力取引におけるマッチング**

　約定処理によって決定された結果から、取引するProsumerとConsumerをマッチングさせる。約定処理によって取引する相手は決定しているため約定処理後にブロックチェーンシステムから通知される。通知された相手同士でP2P電力取引を行う。

**3.5　インバランス精算**

　マッチングした同士でP2P電力取引している際、気象条件等の変化によって発生したインバランスについてインバランス精算を行う。方法しては、Consumerがコントラクトでスマートメータのデータ等などから、実際に受け取った電力の実績値を入力して、マッチングで確定していた約定量との差分の割合とマッチング相手をブロックチェーン上に格納する。その情報を元にインバランス料金精算を行う。

　インバランス精算におけるフローチャートを図3.4に示す。図中の①～④については以下で説明する。

ダイアグラム

自動的に生成された説明

図3.4　インバランス精算フローチャート

Fig. 3.4 Imbalance Settlement Flowchart

* 1. コントラクトで申請されたインバランスが不足か余剰かを判断
  2. (3)(4)式により不足（余剰）インバランス率を算出
  3. ②の不足（余剰）インバランス率が設定された許容率より大きいかを判断
  4. インバランス料金の算出や精算を実行する（インバランス精算が必要であれば、ここでトランザクションが送信される。必要がないならばトランザクションは送信されない）

**第4章　検証**

**4.1　実験条件**

　使用するデータについて説明する。使用するデータは日本の10の電力会社が公開しているインバランス実績の確報値である。[8]そのデータの中の2021年8月1日～8月10日までの10日間分のデータを使用する。ここで、10日間の全データ（480コマ分）のインバランス率の分布を図4.1に示す。図4.1より、不足インバランスは全体の4分の1程度であった。本研究では、不足インバランスが最も多く発生していた18:00の時間帯10コマ分と、余剰インバランスが最も多く発生していた11:00の時間帯10コマ分のみのデータを使用する。

図4.1　インバランス率の分布（8月1日～8月10日）

Fig. 4.1 Distribution of imbalance rate(8/1~8/10)

　18:00の時間帯10コマ分と11:00の時間帯10コマ分のインバランス率を図4.2、図4.3に示す。図4.2、図4.3より、18:00の時間帯では不足インバランスが6コマ、余剰インバランスが4コマであり、11:00の時間帯では、不足インバランスはなく余剰インバランスのみであった。

：不足

：余剰

図4.2　インバランス率の分布（18:00の時間帯10コマ分）

Fig. 4.2 Distribution of imbalance rate(18:00)

図4.3　インバランス率の分布（11:00の時間帯10コマ分）

Fig. 4.3 Distribution of imbalance rate(11:00)

　スマートコントラクトを実装するIDEはRemix-ideを用いた。アカウントについては、Remix-ide上の仮想マシン（ハードフォーク：London）でアカウントを作成し、1アカウント=1Prosumer(Consumer)とした。また、ブロックチェーンを管理する電力会社も同じ仮想マシン上のアカウントとした。

　使用データをもとに板情報を作成した。

測定の方法としては、始めにProsumerとConsumerをコントラクトに入札し、約定処理を行った後にインバランス精算を行う。Remix-ideのコンソールからGasを抽出する。

　測定に使用した板情報を表4.1、表4.2に示す。

表4.1　板情報（18:00の時間帯）

Table 4.1 board information(18:00)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Prosumer | | 入札価格  [ETH/kwh] | Consumer | | |
| 合計入札量 [Mkwh] | 入札量[Mkwh] | 入札量  [Mkwh] | 合計入札量  [Mkwh] | 取引実績量  [Mkwh] |
|  |  | 70 | 23.39 | 23.39 | 22.54 |
|  |  | 49 | 23.37 | 46.76 | 23.82 |
|  |  | 39 | 22.96 | 69.73 | 21.63 |
|  |  | 36 | 22.72 | 92.44 | 22.51 |
|  |  | 34 | 22.58 | 115.0 | 21.46 |
|  |  | 32 | 22.01 | 137.0 | 24.42 |
|  |  | 31 | 23.07 | 160.1 | 27.82 |
|  |  | 23 | 21.37 | 181.5 | 23.39 |
|  |  | 22 | 21.53 | 203.0 | 21.40 |
| 223.8 | 223.8 | 20 | 20.79 | 223.8 | 20.71 |

表4.2　板情報（11:00の時間帯）

Table 4.2 board information(11:00)

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Prosumer | | 入札価格  [ETH/kwh] | Consumer | | |
| 合計入札量  [Mkwh] | 入札量  [Mkwh] | 入札量  [Mkwh] | 合計入札量  [Mkwh] | 取引実績量  [Mkwh |
|  |  | 28 | 27.68 | 27.68 | 30.61 |
|  |  | 28 | 27.66 | 55.35 | 27.99 |
|  |  | 27 | 26.84 | 82.19 | 27.32 |
|  |  | 26 | 26.37 | 108.6 | 28.58 |
|  |  | 26 | 25.84 | 134.4 | 26.79 |
|  |  | 24 | 27.14 | 161.5 | 32.23 |
|  |  | 23 | 22.86 | 184.4 | 27.46 |
|  |  | 22 | 23.15 | 207.5 | 26.02 |
|  |  | 20 | 22.79 | 230.3 | 26.17 |
| 253.8 | 253.8 | 16 | 23.48 | 253.8 | 25.35 |

**4.2　手数料の推定**

　実際にブロックチェーンシステムを動かし、以下についてインバランス精算で消費されるGasの測定をした。

・不足インバランス許容率を0%、2%,4%,6%のそれぞれについて、余剰インバランス許容率を0%,5%,10%と変動させて測定した。

**4.3　測定結果**

図4.4　測定結果（18:00の時間帯）

Fig. 4.4 result(18:00)

図4.5　測定結果（11:00の時間帯）

Fig. 4.5 result(11:00)

　測定結果を図4.4および図4.5に示す。図4.4および図4.5中のAgreement Costとは、約定処理で消費されるGasのことである。図4.4より、不足インバランス許容率が0％、余剰インバランス許容率が0％のとき、不足インバランス許容率が0％、余剰インバランス許容率が5％のときにAgreement Costを超えていることがわかる。また、図4.5より、余剰インバランス許容率を10%に設定していても、Agreement Costを超えてしまっている。これは、インバランス精算で消費されるGasは、インバランス精算の回数に比例するため、不足インバランスが多い時間帯であれば不足インバランスを許容する、余剰インバランスが多い時間帯であれば余剰インバランスを許容しないと、Gasがより多く消費されるためである。また、Agreement Costを超えてしまうと、ネットワークを圧迫しかねない。そのため、ネットワークの負荷を考慮すると、インバランスに適切な許容を設けてインバランス精算を行う必要がある。

**第5章　結言**

　本研究では、ブロックチェーンを用いたP2P電力取引におけるインバランス精算の検討を行った。インバランスに許容を設けてインバランス精算を行うことで、新たに入札・約定をするよりも消費するGasを抑えることができることを確認した。

　今後は、時間帯別でのインバランスの許容を設けてインバランス精算の検討をしていく必要がある。

**謝辞**

　本研究を進めるにあたって、ご指導してくださった近藤潤次准教授、小平大輔助教授、そして近藤研究室の伊藤大翔さん・バグスサントソさん、先行研究者の内藤貴生さんに、この場をお借りして感謝の意を表し、謝辞を述べさせて頂きます。皆様の今後のご健康と益々のご活躍を心よりお祈り申しあげます。

**参考文献**

1. 平 竜也 再生可能エネルギーの 普及促進策と技術課 科学技術動向 2005 年 8 月号
2. 固定価格買取制度-経済産業省・資源エネルギー庁
3. 法貴 慶一 日本卸電力取引所の概要 電学論 B，125 巻 10 号，2005 年
4. 第40回 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 電力・ガス基本政策小委員会　資料4-5

　　https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku\_gas/denryoku\_gas/040.html

1. Satoshi Nakamoto Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System
2. 内藤貴生　ブロックチェーンを用いた電力取引システムの構築と性能評価
3. The Demonstration Experiment of Blockchain-based P2P Electricity Trading in University Faculty Housing(Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 42, No. 5)
4. <https://www.hepco.co.jp/network/con_service/supply_charge/unitprice/imbalance.html>

<https://nw.tohoku-epco.co.jp/consignment/retailservice/imbalance/>

<https://www.tepco.co.jp/pg/consignment/retailservice/imbalance/index-j.html>

<https://powergrid.chuden.co.jp/takuso_service/hatsuden_kouri/takuso_kyokyu/ryokin/imbalance/>

<https://www.rikuden.co.jp/nw_soden/imbalance/tasa030_s010.html>

<https://www.kansai-td.co.jp/consignment/agreement/imbalance.html>

<https://www.energia.co.jp/nw/service/retailer/consign/imbalance/>

<http://wsc7.yonden.co.jp/imbalance/>

<https://www.kyuden.co.jp/td_service_wheeling_imbalance_index.html>

<https://www.okiden.co.jp/business-support/service/consignment/imbalance/index.html>

1. <https://trade-log.io/column/1259>
2. Experimental Repost of Oneself-to-oneself Surplus Electricity Transaction Scheme between Remote Points introducing Power Exchange System
3. Bidding Agent Model for P2P Energy Trading
4. イノベーションを誘発する電力システムの実現に向けた課題(参議院常任委員会調査室・特別調査室　立法と調査　2019. 12　No. 419)
5. 需要家側VPPシステム～計測の正確性が信頼を生むスケーラブルシステム～(バーチャルパワープラント構築普及に向けた最新動向―3)