

# 再生可能エネルギー型スマートグリッドのための 動学ゲーム理論による分散制御

矢野史朗\*, 谷口忠大 (立命館大学)

Dynamic game approach for decentralized optimization of self-sustained Renewable energy network  
Shiro Yano\*, Tadahiro Taniguchi, (Ritsumeikan University)

## Abstract

Recently, a large amount installation of the renewable plants produced a new problem called reverse power flow problem in Japan. As a countermeasure for this problem, we introduce i-Rene concept using a market based energy management system inside the regional area as a micro-grid. We consider the condition that residents have both of renewable generators and micro-batteries, so each of them plays both roles of an energy supplier and a consumer.

In this paper, we employ the dynamic game theory to analyze the property of this micro-grid such as optimal trading strategy, the efficiency of resource allocation via the market, and dynamical behavior of the market.

キーワード：スマートグリッド，再生可能エネルギー，最適資源配分，動学ゲーム理論，市場原理，自律分散システム，フィードバックナッシュ均衡，パレート効率性

(Keywords: Smart Grid, Renewable Energy, Optimal Resource Allocation, Dynamic Game theory, Market Mechanisms, Distributed Autonomous Systems, Feedback Nash Equilibrium, Pareto Efficiency)

## 1. 諸言

〈1・1〉再生可能エネルギーと分散的設備の利点 エネルギー問題の重要な観点の一つにエネルギー安全保障がある[1]. この観点から近年のエネルギー開発の動向を見た時、シェールガス等の石油代替エネルギーの開発、新たな化石燃料産出国の発生、新エネルギーのようなエネルギー源の多様化など、近年急速にエネルギー安全保障の構成要素である地政学的リスクが大幅に軽減しつつあるといえる。この中でも特に新エネルギー（再生可能エネルギー）は、地政学的リスクのみならず地質学的リスクをも大幅に軽減させる利点があるため、日本始め多くの国のエネルギー安全保障と経済発展の基盤として期待される。

また再生可能エネルギーは温暖化対策等への期待もあり、近年我が国においても導入が進んでいる。

〈1・2〉逆潮流問題 逆潮流問題とは、電力系統への再生可能エネルギー売電などにより、電力系統の運用が不安定化するような状況を指す。ドイツをはじめ、再生可能エネルギーを大量導入した国々が直面している、あるいは今後直面する課題の一つであり<sup>(1)</sup>、逆潮流による系統不安定化を軽減する方法が研究されている。

我が国においては平成24年に再生可能エネルギー特別措置法が施行され、一般家庭や工場等による再生可能エネルギー発電設備の設置や、企業によるメガソーラーの設置が進んできた。メガソーラーの設置は、地価や広域の用地確保が容易であることを理由に北海道で目立ったが、平成25年度には北海道電力における接続許容量の限界を理由として、経済産業省資源エネルギー庁によって接続受入条件の改正が行われ、その後、北海道電力により接続拒否が検討されている<sup>(2)</sup>。このような状況を踏まえ、今後、再生可能エネルギーの余剰あるいは全量を商用電力系統（特に一般電気事業者）に売電する方法に頼り続けるのではなく、余剰分を地域内の需要者に送電する等、逆潮流を減らす工夫を検討していくことが必要と考えられる。

〈1・3〉自律分散型スマートグリッド i-Rene の試み 我々はこれまで、逆潮流を行わず、発電した再生可能エネルギーをそのままその地域で消費することを目指すスマートグリッドとして i-Rene という構想を提案してきた。

図1に i-Rene の概略図を示す。i-Rene では各世帯が太陽光パネルなどの再生可能エネルギーに基づく発電装置と、その電力を一時的に貯蔵する小型蓄電池を持つと仮定する。その上で地域の電力取引市場の存在を仮定し、市場

を介した自由な売買に基づき効率的な電力融通を実現することを旨とする。一般家庭が電力取引に参加するとはいえ、常時、人手を介して取引を行うことはできない。そのため、学習し自動的に電力取引を行うエージェントを導入し、自動的な電力融通を実現する。ただし、地域の発電量と蓄電量の総和が地域の消費量に足りなかった場合には、融通のみで消費を賄うことは出来ず系外部からの買い入れを行う必要があり、その場合、系外部(電力会社)から即座に電力を買い入れることが出来る。

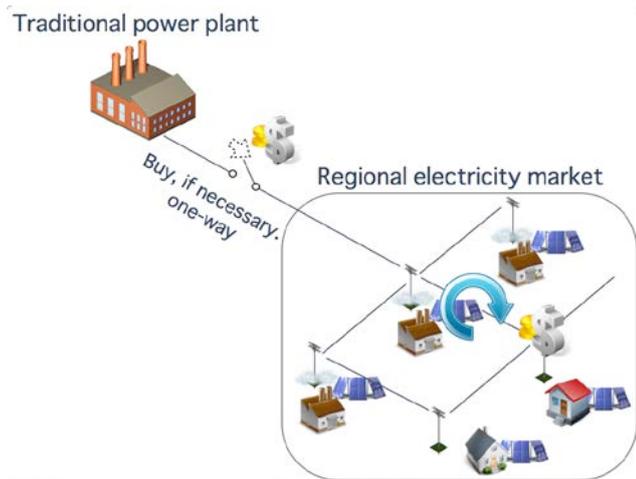


図1 i-Rene 概略図  
Fig. 1 i-Rene overview

〈1・4〉 関連研究 近年、自律分散型電力網に関する様々な構想が提案されてきている<sup>(3,4)</sup>。i-Rene の構想と関連の深いものに Kok らの構想と Vytelingum らの構想がある。

Kok らは各世帯が分散型電源および分散型蓄電池を設置していることを想定し、更に電力市場を介して電力を売買することで世帯の余剰電力を効率的に融通し合う off-grid な構想を提案した<sup>(3)</sup>。また Vytelingum らは各世帯が分散型蓄電池を設置していることを想定し、各世帯は蓄電池を用いながら外部電力システムから時々刻々電力を購入する構想を提案した<sup>(4)</sup>。Vytelingum らの研究はゲーム理論を用いており、一日の支払い価格を最小化するにはどのように外部電力システムから電力を購入すればよいか(どのように蓄電池を運用すればよいか)に関して、各世帯の最適戦略を解析的に求めている。この研究はゲーム理論を用いて分散制御則を導出した先駆的な研究ではあるが、電力供給は外部電力システムを想定している点で、逆流の問題は最初から問題視していないといえる。一方、Kok らの研究は発電も蓄電も分散であることを想定しているものの、電力購入量計画の最適化を解析できるような数理的表現は整備されていない。

Saad らの研究グループは近年の分散型電力システムの制御方法を幾つか解説した総説の中で、制御法の設計、分

析にとって、ゲーム理論的枠組みが強力なツールであり、今後一層分散システム設計において役割を増していくと解説している<sup>(6)</sup>。すでに述べたように Vytelingum らの研究はこのゲーム理論を用いた典型であり、ゲーム理論を有効に用いている。しかしエネルギー自立性の高いスマートグリッドを実現するという観点からは、この Vytelingum らの構想というより、Kok らの構想が望ましい。

我々の提案する構想 i-Rene は Kok らの構想に近いといえる。この i-Rene をゲーム理論的枠組みで表現することは、i-Rene の特性を理解し、設計をやすくすることのみならず、類似する他の理論的研究との関係を整理する上で重要である。特に i-Rene 構想の特殊な場合として Vytelingum の系を考えることができ、より一般的な理論を構築するという観点からも重要といえる。

〈1・5〉 本研究の目的 本研究ではスマートグリッド i-Rene の資源配分効率を評価することを目的とし、以下の課題に順に取り組む。

- (1) 動学ゲーム理論の枠組みを用いた i-Rene のモデル化
- (2) プレイヤーが最適売買戦略および最適蓄電戦略を獲得するための学習方法の提案
- (3) 全プレイヤーの学習の収束性(=市場の収束性)の分析
- (4) 収束後の資源配分効率の分析
- (5) 市場の収束過程にともなう価格ダイナミクスの分析

## 2. 動学ゲーム理論による i-Rene モデル化

〈2・1〉 動学ゲーム理論 動学ゲーム理論では、マルチエージェント最適制御問題とも表現できるような問題を扱う。各エージェントはある発展方程式に従う状態量を持ち、ある期間に亘って積算される利得を最大化するように状態量を制御する<sup>(6)</sup>。特に、通常のゲーム理論と同様、プレイヤーの利得が他プレイヤーの戦略選択によって影響を受ける状況を扱う。

動学ゲーム理論における解析の基本的手順は、問題を制約条件付きの動学的最適化問題として定式化し、動的計画法あるいは最大値原理を用いて、各時刻の最適戦略を導出するという手順である。

動学ゲーム理論においても通常のゲーム理論と同様、Nash 均衡やパレート効率性は重要な概念であり、これらについては4章で述べる。

動学ゲーム理論は状態変数の時間発展が離散か連続かによって大きく差分ゲームと微分ゲームに分けられ、今回は差分ゲームとして定式化する。

〈2・2〉 モデルに用いる基本仮定 本稿では送電ロスに関する仮定、プライステーカーの仮定、発電と電力消費の予測精度に関する仮定の3つの仮定を用いる。以下ではまずモデルで用いる変数について説明した後、これらの仮定について順に説明する。

図2 は各世帯に設置された電力ルータにおける電力のフローを示している。電力ルータを中心に再生可能エネルギー

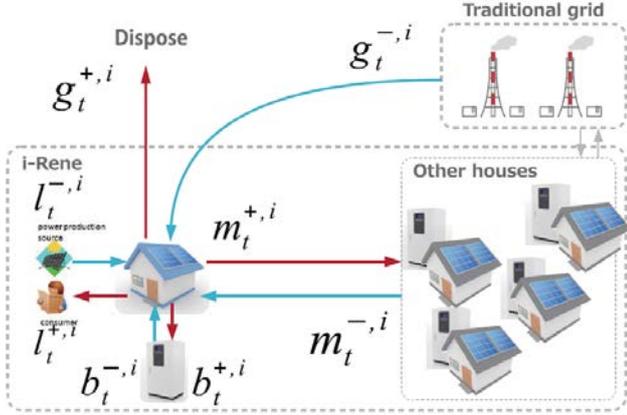


図2 各世帯における電力のフロー  
Fig. 2 Power flow at a specific home

一電源からの発電と、世帯主による電力消費、蓄電池への蓄電と放電、市場への売電と買電に伴う電力が流れている。世帯*i*の特性を表す変数を以下のように定義する。*t*は時間を指すとする。電力負荷  $l_t^i$  を消費量  $l_t^{+,i}$  と発電量  $l_t^{-,i}$  の差として定義する。蓄電池への充放電量  $b_t^i$  を、蓄電量  $b_t^{+,i}$  と放電量  $b_t^{-,i}$  の差として定義する。市場での取引量  $m_t^i$  を、市場への売電  $m_t^{+,i}$  と市場からの買電  $m_t^{-,i}$  の差として定義する。地域での再生可能エネルギーが不足した場合、電力系統から電力  $g_t^{-,i}$  を購入し、消費しきれない量  $g_t^{+,i}$  については廃棄する。まとめると以下ようになる。

$$\begin{aligned} l_t^i &= l_t^{+,i} - l_t^{-,i} \\ b_t^i &= b_t^{+,i} - b_t^{-,i} \\ m_t^i &= m_t^{+,i} - m_t^{-,i} \end{aligned}$$

本研究では理論的な分析に重点を置くため、近似的に送電ロスや蓄電ロスを考えない。そのため各世帯が持つ電力量は以下のエネルギー保存則を満たす。

$$l_t^i + m_t^i + b_t^i = 0$$

この仮定は、専ら近距離送電を行うスマートグリッドにおいては妥当と考えることも出来る。

また市場の性質として完全競争市場（プライステーカー）を仮定する。この仮定は、各世帯が市場取引量  $m_t^i$  を変化させても、電力市場価格  $p_t^*$  に対する影響が無視できるという仮定である。市場全体の取引量と比較して各世帯の財の保有量が十分小さい場合、この仮定は妥当となる。

また各世帯における電力需要時系列と電力発電時系列は、不確実性無く予測可能であり、一日の周期で周期性をもつという仮定を設ける。このような仮定を現実的な条件に緩和していくことは5章で議論するように今後の課題であるが、近年のスマートグリッド研究においても利用されているような仮定であることを付記しておく<sup>(4)</sup>。

### 〈2・3〉 各エージェントの最適戦略学習アルゴリズム

各世帯の蓄電池残量  $s_t^i$  の発展方程式は、

$$\begin{aligned} s_{t+1}^i &= s_t^i + b_t^i \\ &= s_t^i - (m_t^i + l_t^i) \end{aligned}$$

として表される。蓄電池は蓄電上限  $S_{max}^i$  をもち、上記の発展方程式は  $0 < s_t^i < S_{max}^i$  の制約を持つ。

また、世帯*i*は目的関数として一日の収益  $u^i$  を最大化することを目的とする：

$$u^i = \sum_0^T p_t^* m_t^i$$

ここで、 $p_t^*$  は各時刻の市場取引価格であり、正の  $m_t^i$  は市場への売電量を表すことから、 $u^i$  は各時刻で市場を介して売電し獲得した資金を表す。

整理すると i-Rene は以下の動学ゲームとしてモデル化できる。

$$\text{maximise } u^i = \sum_0^T p_t^*(m_t^1, m_t^2, \dots, m_t^N) m_t^i$$

$$\text{subject to } s_{t+1}^i = s_t^i - (m_t^i + l_t^i)$$

$$0 < s_t^i$$

$$s_t^i < S_{max}^i$$

先述した通り、 $p_t^*(m_t^1, m_t^2, \dots, m_t^N)$  は地域内電力市場における電力価格であり、各世帯の取引戦略の集合  $\{m_t^i\}$  の関数である。世帯*i*は日々  $l_t^i$  を予測し、その下で上記の問題を解くことで最適な取引  $m_t^i$  を求める。また、地域内で電力が不足した際に、外部の系統から電力を購入する。本稿ではプライステーカーの仮定を用いるため、市場価格は外生変数として扱え、 $p_t^*(m_t^1, m_t^2, \dots, m_t^N) = p_t^*$  というように所与としてよい。

今回は線形戦略のクラスに限定して最適戦略を求める。線形戦略は、プレイヤーの観測量に関する重み付き線形和：

$$m_t^i = \alpha_t^i s_t^i + \beta_t^i p_t^* + \gamma_t^i$$

として表現される。この線形戦略を用いると発展方程式は

$$s_{t+1}^i = (1 - \alpha_t^i) s_t^i - l_t^i - \beta_t^i p_t^* - \gamma_t^i$$

となる。さらに  $p_t^* = 0$  のときは上限  $S_{max}^i$  まで蓄電するのが自明の最適戦略であることから、 $\gamma_t^i$  として、

$$\gamma_t^i = (1 - \alpha_t^i) s_t^i - l_t^i - S_{max}^i$$

が要請される。この  $\gamma_t^i$  を用いると線形戦略は

$$m_t^i = s_t^i + \beta_t^i p_t^* - l_t^i - S_{max}^i$$

という記述になる。この線形戦略の下では

$$s_{t+1}^i = S_{max}^i - \beta_t^i p_t^*$$

となる。

以上から、最適取引戦略  $m_t^i$  と最適蓄電戦略  $s_t^i$  を導出する問題は一つのパラメータ  $\beta_t^i$  を決定する問題に帰着することが分かった。さて、

$$u^i = \sum_0^T p_t^* (\beta_t^i p_t^* - \beta_{t-1}^i p_{t-1}^* - l_t^i),$$

$$\frac{\partial u^i}{\partial \beta_t^i} = p_t^* (p_t^* - p_{t+1}^*)$$

であり、 $u^i, \beta_t^i$  の微小変化  $\delta u^i, \delta \beta_t^i$  について

$$\delta u^i = \sum_0^T \frac{\partial u^i}{\partial \beta_t^i} \delta \beta_t^i$$

が成り立つ。すなわち、 $\partial u^i / \partial \beta_t^i > 0$  のとき、 $\beta_t^i$  を増加させるように学習することで、効用を改善することができる、

$$\beta_{t+\tau}^i = \beta_t^i + \tau \frac{\partial u^i}{\partial \beta_t^i}$$

という学習ルールで日々  $\beta_t^i$  を更新することにより、効用を最大化できる。

〈2・4〉 **市場価格の形成** 市場価格の決定方式は複数考える事ができる。ゲーム理論の派生分野であるオークション理論を用いる場合、Double auction を用いた価格決定メカニズムが標準的だと考えられるが、本稿では、解析、実装の両面で扱いが簡単なメカニズムとして、Market make 式の価格決定メカニズムを説明する。

Market make 式の取引では、Market maker は市場価格  $p_t^*$  をプレイヤーに提示し、プレイヤーはそれに基づいて取引  $m_t^i$  を行う。電力市場においては、取引が成立しない財（電力）の保存が困難という理由から、売り手と買い手の取引量が同時同量にならなければならない。すなわち常に需要量と供給量が一致する必要がある。つまり、Market maker は、条件

$$0 = \sum_0^N m_t^i$$

を満たすように  $p_t^*$  を決定する必要がある。すでに述べたように市場取引量  $m_t^i$  は  $p_t^*$  に応じて決定されるため、Market maker は 市場価格  $p_t^*$  を様々に変化させプレイヤーに提示する、という探索的で再帰的な方法により上式を満たす適正価格を見つけ出すことができる。

図3は価格決定を行う Market maker の選定方法に関する2つの案を示している。案(a)は Market maker を担当するプレイヤーを全時刻固定する状況を示しており、案(b)は Market maker を担当するプレイヤーが持回り制によって更新される案、あるいはランダムサンプリングにより各時刻更新する案を示している。前者に比べ後者は分散的であり、計算精度については同等であるにも関わらずロバスト性の面で優れている。

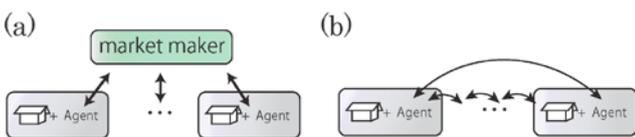


図3 価格形成アルゴリズム  
Fig. 3 Pricing algorithm

上では需給の一致条件を満たす  $p_t^*$  の決定方法として探索的な方法を紹介したが、この  $p_t^*$  は簡単な計算により一

意に決定できて

$$p_t^* = \frac{\sum_0^N (S_{max}^i - s_t^i + l_t^i)}{\sum_0^N \beta_t^i}$$

となる。この関係式を用いると、図3のどちらの方法においても市場価格の決定に必要な計算を一回で済ますことができる。上で述べた探索的な方法との違いは、後者では Market maker が各プレイヤーの戦略に相当する  $\beta_t^i$  の情報を収集する必要がある点である。市場における財の流通量と比較して各プレイヤーの財が少なく、Price taker の仮定が近似的に成立する場合はどちらの方法でも問題がないと考えられるが、市場が小規模な場合は検討が必要となる。

### 3. 地域電力市場の資源配分効率評価と動態分析

〈3・1〉 **資源配分の効率性評価** 地域電力市場の資源配分効率性を評価する基準として、本稿ではパレート効率的な均衡とその均衡への可到達性を分析する。社会の均衡状態がパレート効率的であることは、その社会の社会厚生が最適化されるための必要条件であり<sup>(7)</sup>、その意味で社会的均衡のパレート効率性を分析すること、その均衡への可到達性を示すことは重要である。パレート効率的均衡への可到達性の分析手順としては、その均衡が局所安定的であるか、すなわち Nash 均衡であるかを分析し、その後、大域的に安定といえるか（初期値依存性）を分析する。

パレート効率性の定義と、動学ゲームにおける Nash 均衡（Feedback Nash 均衡）の定義は以下<sup>(6)</sup>

#### (1) パレート効率性

N 人ゲームにおいて、i 番目のプレイヤーの効用  $u^i$  を、可能な戦略集合  $\pi_t = (\pi_t^1, \pi_t^2, \dots, \pi_t^N)$  の関数  $u^i(\pi_t)$  と記述する。このとき、ある戦略集合  $\pi_t^* = (\pi_t^{1*}, \pi_t^{2*}, \dots, \pi_t^{N*})$  に対し、N 個の広義不等式

$$\forall i; u^i(\pi_t) \geq u^i(\pi_t^*)$$

のうち少なくとも1つの不等式が狭義に成り立つような戦略集合  $\pi_t^*$  が存在しない場合、戦略集合  $\pi_t^*$  をパレート効率的と呼ぶ。

#### (2) Feedback Nash 均衡

ある戦略集合  $\pi_t^* = (\pi_t^{1*}, \pi_t^{2*}, \dots, \pi_t^{N*}) = (\pi_t^{1*}, \{\pi_t^{j*}\}_{-i})$  について、

$$\forall i; u^i(\pi_t^i, \{\pi_t^{j*}\}_{-i}) \leq u^i(\pi_t^i, \{\pi_t^{j*}\}_{-i})$$

となるとき、すなわちプレイヤー i がどの時刻の戦略も変更するインセンティブを持たないとき、戦略集合  $\pi_t^*$  を Feedback Nash 均衡と呼ぶ。

さて、本稿ではプライステーカーの仮定を置いている。この性質を利用すると、以下のことが容易に証明できる。

#### (1) パレート効率的な均衡状態の一意性

証明) 本稿で用いた i-Rene モデルでは、他者の戦略は市場価格を介してプレイヤー i の効用に影響する。プライステーカーの仮定が成立するとき、プレイヤー i にとって価格は外生変数として振る舞うため、

$$u^i(\beta_t^1, \beta_t^2, \dots, \beta_t^N) = u^i(\beta_t^i)$$

となる。各プレイヤーの最適制御問題は線形であるため、

各プレイヤーの最適化の結果、最適戦略は一意に決まる。定義から、この最適戦略の集合は明らかにパレート効率的でありまた一意である。□

(2) パレート効率的な均衡状態への可到達性

証明) 証明 (1) と同様、 $u^i(\beta_1^i, \beta_2^i, \dots, \beta_T^i) = u^i(\beta_1^i)$  という性質から、各プレイヤーが、最適化した戦略を変更するインセンティブを持たないことは明らかである。すなわち、最適制御問題の解から構成される戦略集合は Feedback Nash 均衡となる。証明 (1) と合わせると、そのような戦略集合は Pareto 効率的な Feedback Nash 均衡であることが分かる。

各プレイヤーの状態の初期値に依存せず、プレイヤーの最適化の結果、解の一意性により常にこの Pareto 効率的な Feedback Nash 均衡に到達することが分かる。□

〈3・2〉 数値計算実験 市場価格の時間発展の様子を計算機シミュレーションによって確認する。

実験条件を以下のように設定する。参加プレイヤー数  $N = 50$ ，外部電力系統での電力単価  $P_G = 20.0$ ，蓄電上限  $S_{max}^i = 10.0$ ，初期蓄電量  $s_0^i = 5.0$ ，時間単位 30 分間隔 ( $T = 48$ ) とし、各時刻における発電と消費の差  $l_t^i$  を

$$l_t^i = -A^i \cos(2\pi \frac{t + t_0^i}{T})$$

とする。ここで  $t_0^i$  は正規分布  $N(0,1)$  からサンプリングし、これにより世帯毎の需要の多様性を表現する。また  $A^i = 0.4$  とする。また市場取引は 100 日間行う。このように消費電力と発電電力の時系列  $l_t^i$  および蓄電上限を与えると、一連の市場取引を計算することができる。

計算機シミュレーションの結果を図 4, 5 に示す。どちらの図も地域内電力市場における電力単価の時間変化を表している。図 5 は電力単価の値幅に関する日々の変化を示し

ており、図 4 はその値幅を計算するもととなった詳細な計算結果を示している。図 5 から日々の電力単価の値幅が徐々に小さくなっていき、地域内電力市場の時間帯別の電力単価が平準化の方向に進んでいくことが分かる。これは各世帯が電力単価の高い時間帯での購入を控え、安い時間帯で購入するように学習し、また逆に安い時間帯での売電を控え高い時間帯での売電をするように学習していった結果と考えることができる。

N=50

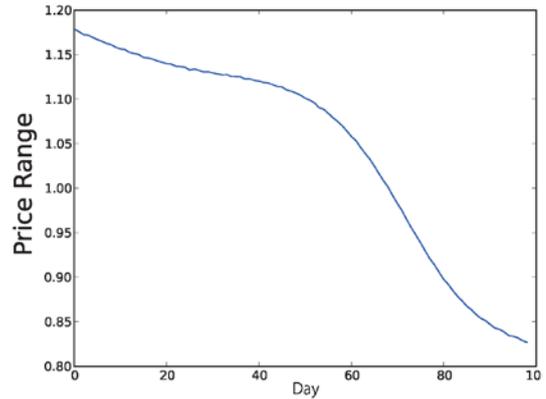


図 5 電力単価の一日の値幅

Fig. 5 Daily changes in the range of price

#### 4. 結言

本稿では地域で発電された再生可能エネルギーを地域内電力市場によって取引することで地域内でのエネルギー最適配分を目指すスマートグリッド *i-Rene* の性質について、動学ゲーム理論に基づいた分析を紹介した。具体的には各世帯の市場取引量に関する最適制御問題を記述し、それを解くことで各世帯の最適取引戦略および最適蓄電戦略を求めた。更に地域内電力市場による配分効率と、市場価格のダイナミクスに関する分析を行った。それらの結果として、地域内電力市場を用いた取引により、システムは初期値依存性なくパレート効率的な Nash 均衡に到達することを示し、また、市場取引により市場価格が単調減少していくことを数値的に示した。

本稿の末尾となったが、*i-Rene* の利点として考えられる性質で、本文中に述べられなかったものを幾つか紹介する。冒頭で述べたように *i-Rene* は電力系統への逆潮流を減らし、同時に地域の電力自給率を向上するという特徴を持つスマートグリッドである。本文中で述べたように、電力の発電設備および蓄電設備は分散型の状況を考えており、また市場価格についても分散的に決定するアルゴリズムを提案している。このように設備と制御の両面で分散化されたシステムは、分散システムの利点を有する。例えば、少ない初期投資からシステムを構築することが可能であり、建

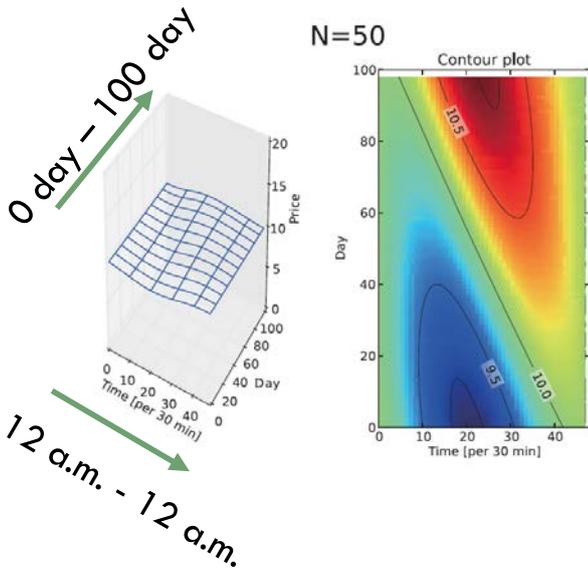


図 4 電力単価の時間発展の詳細

Fig. 4 Time course of the power price in detail

設のリードタイムが短くて済み、ロバスト性が高いなどである<sup>(8)</sup>。このような特徴は、電力系統から遠く送電コストのかかる環境（離島や被災地域など）で短期的に生活する必要がある状況、発展途上国等で当面の電力源を確保する必要がある状況などにおいて大きな利点になると考えられる<sup>(9)</sup>。こういった状況を想定すると、地域内電力資源の配分に市場を用いる利点として、貨幣を用いない融通を行っているスマートグリッドと比較して、将来的に他地域や電力系統と合併することになった場合にスムーズな合併が可能であるということを挙げることができる。また、市場価格を参照して行う家電制御技術など、過去に開発された技術をそのまま利用できるということも、市場による配分を行う利点であろう。

今後の展望としては発電と消費電力に関する予測について不確実性を考慮し、より実際的な条件で本稿のような分析を行うことが重要となる。より具体的に述べると、本稿では、発電と消費、すなわち  $I_t^g$  を確実に予測できるという仮定の下で、各プレイヤーの売買、蓄電における最適戦略を求めた。しかしながら実際は、各時刻の予測と実測を完全に一致させることは困難であるため、予測に際してその不確実性をも予測することが必要となる。状態の時間発展に不確実性を伴う場合の動学ゲームは確率動学ゲームと呼ばれるが、この予測の不確実性を考慮するという事は、この確率動学ゲームの枠組みの上で、システムがパレート効率的な均衡状態に到達できるか、形成される市場価格の確率安定性はどのようなものであるか、といった分析を行うことになる。世帯レベルでの発電データや消費電力データは、近年まで入手困難であったため、発電予測、消費電力予測は現在でも大きな研究分野となっている<sup>(10)</sup>。今後、運用における実用性と安全性の確保のために、それら予測手法の開発と、上記したような確率動学ゲームとしての分析を並行して行うことが必要である。

### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省補助事業「地域イノベーション戦略支援プログラム「電気と熱の地産地消型スマートグリッドシステムの開発」」の研究費によって支援された。

また本研究の一部は、文部科学省科学研究費助成事業「学術創成研究費(19GS0208)」により支援された。

## 文 献

- (1) Fang, Xi and Misra, Satyajayant and Xue, Guoliang and Yang, Dejun: "Smart grid—The new and improved power grid: A survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol. 14, No. 4, pp. 944-980 (2012)
- (2) Ministry of Economy, Trade and Industry: "Countermeasures for the reverse power problem in the HEPCO", News Release Apr. 17, (2013)  
経済産業省:「北海道における大規模太陽光発電の接続についての対応」, News Release 4月17日, (2013)
- (3) Kok, JK., et al.: "PowerMatcher: multiagent control in the electricity infrastructure," *Proceedings of AAMAS 2005*, 4th, pp. 75-82 (2005)

- (4) Vytelingum, P., et al.: "Agent-based microstorage management for the smart grid," *Proc. of AAMAS 2010*, 9th, pp. 39-46 (2010)
- (5) Saad, W., et al.: "Game-Theoretic Methods for the Smart Grid: An Overview of Microgrid Systems, Demand-Side Management, and Smart Grid Communications," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 5, No. 29, pp. 86-105 (2012)
- (6) J. Engwerda: "LQ Dynamic Optimization and Differential Games," Wiley, Chichester, (2005)
- (7) AL Hillman: "Public finance and public policy: responsibilities and limitations of government," Cambridge University Press, (2003)
- (8) Lovins, A.B.: "Small is profitable," *Rocky Mountain Institute* (2002)
- (9) Solangi, KH., et al.: "A review on global solar energy policy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 4, No. 15, pp. 2149-2163 (2011)
- (10) L. Swan and V. Ugursal: "Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, No. 8, pp. 1819-1835 (2009)