不確かな情報環境における LQ エネルギー需要ネットワークの VCG メカニズムによる統合

岡 島 佑 介*・平 田 研 二**・内 田 健 康*

Integration of LQ Energy Demand Network Using VCG Mechanism under
Uncertain Information Environment

Yusuke OKAJIMA*, Kenji HIRATA** and Kenko UCHIDA*

We consider a future energy demand network that consists of one utility company and N customers. The utility company purchases energy and sells them to the consumers. In order to optimize the energy consumption the utility company and consumers exchange information and make a schedule of consumption patterns of the whole day previously. In a competitive society selfish consumers' optimization of their own benefits does not generally guarantee maximization of whole network's benefit; in such a case, we say that the network is under the uncertain information environment. We formulate a generic dynamic LQ energy demand network under an uncertain information environment, and propose an optimization-based mechanism that requires the utility company to design an incentive cost (transfer cost) using the VCG mechanism, so that selfish and optimal schedulings of N customers based on their own benefits leads to the whole network's maximum benefit. We demonstrate efficiency of the proposed method by using a numerical example of dynamic 10 customers model.

Key Words: integration, VCG mechanism, optimization, energy network

1. はじめに

近年、電力自由化の進展とともに将来の新しいエネルギー需給システムの構築が議論されている。わが国における現状の電力系統は中央集中型の運用が行なわれ、毎日の電力需要を詳細に予測することで需給バランスを精度よく保ち、安定供給を実現している。一方欧米を中心として分散的な系統運用の実装や研究が進んでいる^{1)~5)}。例として、双対問題により計算される価格を利用して需給バランスという制約式を守らせ、供給側の最適化問題を分散化する研究¹⁾や、各家庭の運用する電化製品のもたらす効用をデマンドレスポンスを用いて最適化することで需要の予測を立て、それを社会全体の利益に結び付ける研究²⁾が挙げられる。このような電力系統の分散的な管理手法は、計算負荷の軽減、分散化の観点から今後再生可能エネルギーが大量に接続されうる系統には親和性の高い手法であると考えられる。今後のわが国のエネルギー需

給システムの在り方の一つとしては、需要者が個々に蓄電池を活用しながら効率的にエネルギーを使用し、発電して売電することが自由に行なえるシステムを目指すことが考えられる。これまでの研究では、電力システムの最適化計算に価格を用いた分散最適化が中心課題である^{1)~5)}。しかし電力自由化の進展に沿った、需要者および供給者の利己的・戦略的な振る舞いを前提とした(この状況を本研究では不確かな情報環境と呼ぶ)研究は数少ない。本研究では、メカニズムデザイン⁶⁾によるアプローチを展開するが、電力システムにメカニズムデザインを応用した先行研究として、平田、内田⁷⁾によるメカニズムデザインの連続時間動的システムへの一般化を試みた研究や、Silva, Wollenberg, Zheng⁸⁾による電気料金の確率分布を仮定して、静的な負荷配分問題に対してベイズ型メカニズムデザインを適用した研究、Samadi, Mohsenian-Rad, Schober, Won⁹⁾による静的な需要最適化問題へ VCG メカニズムを直接適用した研究がある。

本研究は、平田、内田⁷⁾での議論に基づいて、需要者の利己的・戦略的な振る舞いに焦点を絞り、需要者の具体的なモデルを用いてメカニズムデザインによるアプローチを展開する。対象とするエネルギー需給ネットワークは、系統に接続した一つの公益事業体とサービスを受ける各需要者からなり、このネットワークを最適化することを考える。各需要者は利己的かつ戦略的に振る舞うと仮定し、各自の利益を最大化するような消費パターンを計算するものとする。需要者と公益

* 早稲田大学大学院先進理工学研究科
東京都新宿区大久保 3-4-1

** 長岡技術科学大学機械系 長岡市上富岡町 1603-1

* Graduate School of Advanced Science and Engineering,
Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo

** Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University
of Technology, 1603-1 Kamitomiokamachi, Nagaoka
(Received April 21, 2013)
(Revised August 6, 2013)

事業者が通信インフラを利用して情報交換を行ない、公益事業者はその情報を用いて決定した信号、すなわち価格を用いて各需要者の消費を調整し、社会全体の利益を確保する。各需要者は決定された価格をもとに各自の利益を最大化する需要パターンを計算する。競争的な環境下を前提とするため、通信の過程で起こりうる戦略的な虚偽の情報の交換を防ぐために、公益事業者はメカニズムデザインの考え方を適用して移転コストを設計することによってネットワーク全体の利益を確保する。本論文では一般的な設計法を議論するが、特にエネルギー使用により得られる効用と、費やすコストが二次式で評価できる場合について考え、解析的な解を与える。最後に需要者の具体的なモデルに対して数値例を用いたシミュレーションを行ない、手法の有効性を示す。

2. ネットワークのモデル

この章では本研究において最適化の対象とするネットワークの数理モデルを構築する。

Fig. 1 に本論文で想定するネットワークの概略を示す。系統に公益事業者が接続され、 N 個の需要者は公益事業者を介して系統に接続されている。公益事業者は需要者が必要とするエネルギーを系統から購入し、各需要者に配分するものとする。各需要者と公益事業者は通信を行ない、相互に情報を提供しあいながら計算を行なうことによって一日にわたる最適な電力運用と価格を計画する。そのための通信インフラが整備されているものとする。**Fig. 2** に需要者のモデルを示す。各需要者はそれぞれ家電などの消費、蓄電池、太陽光パネル

Fig. 1 Demand side of energy systems

Fig. 2 Consumer i 's model

などの自家発電機を所有し運用するものとする。さらに消費は **Fig. 3** に示すように、照明のような価格に依存しない消費と価格に依存する消費に分けられ、価格に依存する消費はさらにダイナミクスをもつ消費、もたない消費に分けられるとする。本研究においてダイナミクスをもつ消費として空調を想定している。室温は 1 離散時間前の室温、空調出力、外気温に影響を受けるからである。一方ダイナミクスをもたない消費とは、1 離散時間前の状態や入力に影響を受けない消費であり、本研究では TV や PC などの娯楽を想定している。

Fig. 2 の需要者 i に対して線形離散時間系を考える。

$$x_i[t+1] = A_i x_i[t] + B_i u_i[t] + D_i d_i[t] \quad (1)$$

x_i は状態変数でありここでは室内温度、蓄電池残量からなるベクトルとし、入力 u_i は空調による消費、TV などの過去の状態に依存しない消費、蓄電池に充電される電力、価格に依存しない消費からなるベクトルとする。また外部入力 d_i は室外の気温とする。離散時間系 (1) を全時刻分まとめてつぎのように表わすことができる。

$$x_i = \Psi_i x_i[1] + \Phi_i u_i + \Theta_i d_i \quad (2)$$

電力使用に関する計画を立てる一日を P 分割したものとすると、ここでの表記は

$$x_i = \begin{bmatrix} x_i[2] \\ \vdots \\ x_i[P+1] \end{bmatrix}, u_i = \begin{bmatrix} u_i[1] \\ \vdots \\ u_i[P] \end{bmatrix}, d_i = \begin{bmatrix} d_i[1] \\ \vdots \\ d_i[P] \end{bmatrix}$$

である。また、(2) 式における行列はそれぞれ

$$\Psi_i = \begin{bmatrix} A_i \\ A_i^2 \\ \vdots \\ A_i^P \end{bmatrix}, \Phi_i = \begin{bmatrix} B_i & 0 & \cdots & 0 \\ A_i B_i & B_i & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ A_i^{P-1} B_i & A_i^{P-2} B_i & \cdots & B_i \end{bmatrix},$$

$$\Theta_i = \begin{bmatrix} D_i & 0 & \cdots & 0 \\ A_i D_i & D_i & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ A_i^{P-1} D_i & A_i^{P-2} D_i & \cdots & D_i \end{bmatrix}$$

のようになる。

離散時間系 (1) に対してつぎのグローバル制約を考える。

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{1}^T u_i[t] - q[t] - \sum_{i=1}^N y_i[t] = 0 \quad \text{for any } t \quad (3)$$

この式はネットワーク全体の電力需給のつりあいを表わしてい

Fig. 3 Sorted demand

て、 $q[t]$ は公益事業体が系統から調達するエネルギー、 $y[t]$ は自家発電機による発電量、 $\mathbf{1}$ は全要素 1 の縦ベクトルである。発電機の代表として太陽光パネルを想定している。グローバル制約 (3) を変形して

$$q = K'u - I'y \quad (4)$$

と表わすことができる。ただし E を単位行列として

$$K = \begin{bmatrix} \mathbf{1}^T & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \mathbf{1}^T \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} q[1] \\ \vdots \\ q[P] \end{bmatrix},$$

$$K' = [K \cdots K], I' = [E \cdots E], u = [u_1^T \cdots u_N^T]^T$$

とする。また、各電力消費に上下限を設ける不等式制約は以下のように表現できる。

$$h_i \leq H_i u_i \leq \bar{h}_i \quad (5)$$

以下本論文では記述を簡単にするため、理論展開では不等式制約 (5) は省略して議論する。実際の最適化は射影勾配法¹⁰⁾を利用すること、または新たにラグランジュ乗数を導入することによりこの不等式制約を考慮することができる。

3. ネットワークの分散型最適化

本研究では各需要者の個人的な利益を各自最大化する振る舞いを利用して系統全体の利益を最大化するメカニズムの構築を目標とする。まず、本章では需要者の効用を表わす評価関数やシステムモデルが互いに既知である場合の分散型最適化、すなわち完全情報環境下における分散型最適化を検討する。公益事業体が各需要者に価格および移転コストという信号を送ることによって各需要者の意思決定を社会全体の利益の最大化へ統合するメカニズム、すなわち不確かな情報環境下における分散型の最適化については、次節で議論する。

3.1 評価関数の定式化

各需要者は自己の利益を最大化するため、離散時間系 (1) と制約 (3) の範囲内でつぎの評価関数を最大化させることを目標とする。

$$J_i^0 = \sum_{t=1}^P U_i(u_i[t], x_i[t]) \quad (6)$$

$U_i(u_i[t], x_i[t])$ は各時刻において蓄電池や電力を使用することによって需要者 i が得る効用であり、上に凸関数であるとする。各需要者は入力 u_i を調節することにより各離散時間に得られる効用を時刻 P まで合計したものを最大化しようとするものとする。特に評価関数が x_i, u_i に関する二次形式で表わされる場合を想定して、効用 $U_i(u_i[t], x_i[t])$ をつぎのように表わす。

$$U_i(u_i[t], x_i[t]) = -(u_i[t]^T Q_{1i} u_i[t] + R_{1i} u_i[t]) - (x_i[t]^T Q_{2i} x_i[t] + R_{2i} x_i[t]) + c_i \quad (7)$$

Q_{1i}, Q_{2i} は対角要素がすべて正の対角行列である。 R_{1i}, R_{2i}

はベクトル、 c_i はスカラーである。このように表わされる効用関数 (7) を用いて、各需要者の評価関数 (6) をつぎのように表わすことができる。

$$\begin{aligned} J_i^0 &= - \sum_{t=1}^P (u_i[t]^T Q_{1i} u_i[t] + R_{1i} u_i[t]) \\ &\quad - \sum_{t=1}^P (x_i[t]^T Q_{2i} x_i[t] + R_{2i} x_i[t]) + c_i P \\ &= -u_i^T Q_{1Ti} u_i - R_{1Ti} u_i \\ &\quad - x_i^T Q_{2Ti} x_i - R_{2Ti} x_i + c_i P \end{aligned} \quad (8)$$

ここで

$$Q_{1Ti} = \text{blockdiag}[Q_{1i} \cdots Q_{1i}], R_{1Ti} = [R_{1i} \cdots R_{1i}], \\ Q_{2Ti} = \text{blockdiag}[Q_{2i} \cdots Q_{2i}], R_{2Ti} = [R_{2i} \cdots R_{2i}]$$

とする。ここで、 u_i によって最適化するため (2) 式を代入して x_i を消去すると、(6) 式はつぎのように表わせる。

$$J_i^0(u_i) = u_i^T Q_i u_i + R_i u_i + C_i \quad (9)$$

ただし

$$\begin{aligned} Q_i &= -(Q_{1Ti} + \Phi_i^T Q_{2Ti} \Phi_i), \\ R_i &= -(R_{1Ti} + 2c_n^T Q_{2Ti} \Phi_i + R_{2Ti} \Phi_i), \\ C_i &= -c_i^T Q_{2Ti} c_n - R_{2Ti} c_n + c_i P, \\ c_n &= \Psi_i x_i[1] + \Theta_i d_i \end{aligned}$$

である。

つぎに公益事業体の評価関数を定義する。公益事業体が系統からエネルギーを購入するコストは購入する電力量 $q[t]$ に関する二次関数として¹¹⁾、公益事業体の効用関数をこのコストを用いてつぎのように表わす。

$$U_0(q[t]) = -(Q_{10} q[t]^2 + R_{10} q[t]) + c_{10} \quad (10)$$

このとき、時刻 P までの効用関数の合計は

$$J_0^0(q) = \sum_{t=1}^P U_0(q[t]) = q^T Q_0 q + R_0 q + C_0 \quad (11)$$

となる。ただし $Q_0 = -\text{diag}[Q_{10} \cdots Q_{10}]$, $R_0 = -[R_{10} \cdots R_{10}]$, $C_0 = c_{10} P$ である。 Q_{10} は正のスカラーである。公益事業体の目的は、ネットワーク全体の利益、すなわち各需要者の効用の和から系統からの調達コストを引いたものを、最大化することであるから公益事業体の最大化すべき評価関数は以下になる。

$$\begin{aligned} J^0(u, q) &= \sum_{i=1}^N J_i^0(u_i) + J_0^0(q) \\ &= u^T Q u + R u + q^T Q_0 q + R_0 q + C \end{aligned} \quad (12)$$

ここで

$$Q = \text{blockdiag}[Q_1 \cdots Q_N], \\ R = [R_1 \cdots R_N], C = \sum_{i=0}^N C_i$$

である。公益事業体はグローバル制約 (3) を満たしつつ、 $J^0(u, q)$ を u, q に関して最大化する。

$$\begin{aligned} \max_{u_1, \dots, u_N, q} J^0(u, q) \\ \text{subject to (3)} \end{aligned} \quad (13)$$

この問題は Q_{1i}, Q_{2i} の正定性から凸最適化問題となる。さらにこの場合は、二次形式の評価関数および線形の制約式を考えていることから (本論文ではこれを LQ 問題と呼ぶことにする)、解析的に解を求めることができる。(4) 式を用いて q を (12) 式から消去すると

$$J^0(u) = u^T Q' u + R' u + C' \quad (14)$$

となる。ただし

$$\begin{aligned} Q' &= Q + K'^T Q_0 K', \\ R' &= R - 2y^T I'^T Q_0 K' + R_0 K', \\ C' &= y^T I'^T Q_0 I' y - R_0 I' y + C \end{aligned}$$

となる。したがって最適解は Q' が正定対称行列であることを利用すれば

$$\frac{\partial J^0(u^*)}{\partial u} = 2Q' u^* + R'^T = 0$$

より

$$u^* = -\frac{1}{2} Q'^{-1} R'^T \quad (15)$$

となる。公益事業体はこうして一日の需要に関する最適解を計算することができるが、解 (15) にはすべての需要者の効用関数やダイナミクスに関する情報が含まれるのでこれらの情報をすべて把握することが前提となる。

3.2 分散型の最適化

問題 (13) を解くにあたって、双対問題を考え、それを分解することによって各需要者と公益事業体が協調的に最適解を求める方法を用いる。この方法に従うと、まず Fig. 1 における各需要者が個別に各自の利益に関する最適化問題を解き、その解によってエネルギー使用を決定する。各需要者が単にそれぞれの効用 (9) を最大化するだけでは公益事業体の目指す最適化 (13) は達成されないため、公益事業体はネットワーク全体の利益を確保するために価格という信号を用いて各需要者の最適解を全体の最適解 (15) へと誘導する。

まず元問題 (13) に対して双対問題¹²⁾を定式化する。

$$\begin{aligned} J(u, q, \lambda) &= \sum_{i=1}^N J_i^0(u_i) + J_0^0(q) \\ &\quad - \lambda^T \left(\sum_{i=1}^N K u_i - q - \sum_{i=1}^N y_i \right) \\ &= \sum_{i=1}^N (u_i^T Q_i u_i + R_i u_i) + q^T Q_0 q + R_0 q + C \\ &\quad - \lambda^T \left(\sum_{i=1}^N K u_i - q - \sum_{i=1}^N y_i \right) \end{aligned} \quad (16)$$

とすれば

$$\min_{\lambda} \max_{u_1, \dots, u_N, q} J(u, q, \lambda) \quad (17)$$

による解は元問題 (13) の解と一致するので、これを解くことを考える。この問題 (17) は各需要者と公益事業体のかかわる項に関して線形な関数なので分解することができる。(16) 式を

$$\begin{aligned} J(u, q, \lambda) &= \sum_{i=1}^N \{ J_i^0(u_i) - \lambda^T (K u_i - y_i) \} \\ &\quad + J_0^0(q) + \lambda^T q \\ &= q^T Q_0 q + (R_0 + \lambda^T) q + C_0 \\ &\quad + \sum_{i=1}^N \{ u_i^T Q_i u_i + (R_i - \lambda^T K) u_i + C_i + \lambda^T y_i \} \end{aligned} \quad (18)$$

のように書き直すと、公益事業体の最大化すべき評価関数は

$$\begin{aligned} J_0(q, \lambda) &= J_0^0(q) + \lambda^T q \\ &= q^T Q_0 q + (R_0 + \lambda^T) q + C_0 \end{aligned} \quad (19)$$

であり、需要者 i の最大化すべき評価関数は

$$\begin{aligned} J_i(u_i, \lambda) &= J_i^0(u_i) - \lambda^T (K u_i - y_i) \\ &= u_i^T Q_i u_i + (R_i - \lambda^T K) u_i + C_i - \lambda^T y_i \end{aligned} \quad (20)$$

となる。ある λ に対して

$$\begin{aligned} \max_{u_i} J_i(u_i, \lambda) \\ \max_q J_0(q, \lambda) \end{aligned} \quad (21)$$

を行ない、さらに統合化のために λ の決定

$$\min_{\lambda} J(u^*(\lambda), q^*(\lambda), \lambda)$$

を行なうことで双対問題 (17) の最適解を求めることができる。ラグランジュ乗数 λ は、効用関数を全電力使用量で偏微分したものに对应することから、電力使用の単価すなわち価格と解釈することができる。ここで、 $u_i^*(\lambda), q^*(\lambda)$ は問題 (21) を解いた最適解である。LQ 問題においては Q_i, Q_0 が正定行列であることを利用してつぎのように求めることができる。

$$\frac{\partial J_i(u_i, \lambda)}{\partial u_i} = 2Q_i u_i + R_i^T - K^T \lambda$$

より

$$u_i^*(\lambda) = -\frac{1}{2} Q_i^{-1} (R_i^T - K^T \lambda) \quad (22)$$

また

$$\frac{\partial J_0(q, \lambda)}{\partial q} = 2Q_0 q + R_0^T + \lambda$$

より

$$q^*(\lambda) = -\frac{1}{2} Q_0^{-1} (R_0^T + \lambda) \quad (23)$$

となる。このようにして求められた最適解 (22), (23) を (18)

式に代入することで λ の式に直し、同様に導関数を求めることで価格 λ の最適解を

$$\lambda^* = (K'Q^{-1}K'^T + Q_0^{-1})^{-1} \times (K'Q^{-1}R^T - Q_0^{-1}R_0^T + 2I'y) \quad (24)$$

と求めることもできるが、本研究では需要者が公益事業体と何度も通信を行ない、勾配法を用いて逐次的に最適な価格へ収束させる方法を示す。このアルゴリズムは、全体最適化を公益事業体における価格 λ の決定と各需要者の電力使用量の決定（および、それぞれ勾配の計算に必要なシステムの情報）に分割する（したがって、計算負荷の分担ができる）ため、分散型と呼ばれる。具体的な勾配法の計算手順については 5.1 節で説明する。

4. 不確かな情報環境における分散型最適化の統合

前章の分散型最適化は、需要者が自分自身の評価関数やシステムをネットワーク全体の共通の情報とするという合意の成立を前提として、この共通の情報に基づいて公益事業体が最適な価格を決定することにより全体の最適化を図るという方法であった。ところが、各需要者が個別に自己の利益を最大化することでネットワーク全体の最適化を行なうという分散管理型の考え方は、各需要者が利己的・戦略的に振る舞う環境、すなわち不確かな情報環境を想定している。このような不確かな情報環境では、前章の分散型最適化は有効ではない。不確かな情報環境下では、各需要者は個人の評価関数やシステムの情報を戦略的に用いて（たとえば、偽りの情報を流して）個人の利益を増やすことが許されるので、その結果、ネットワーク全体の利益が減少する可能性があるからである。本章では、経済学、ゲーム理論の分野で議論されている VCG メカニズム⁶⁾を用いて、不確かな情報環境における需要者の利己的・戦略的な最適化を全体の最適化に統合する方法を示す。

まず、本章で提案する方法の概略を示す。提案法は二つの決定プロセスに分けて考えることができる。

（プロセス A）公益事業体は、すべての需要者から報告される情報（すなわち、需要者が互いに交信する共通の情報）を真の情報と仮定して、前章の分散型の最適化を行ない最適価格を決定し、同時に、各需要者に課す移転コストを計算する。その結果を各需要者に伝達し、各需要者から移転コストを徴収する。

（プロセス B）各需要者は、伝達された最適価格と公益事業体に支払う移転コストを考慮して、個人の効用を最大化し、その解を実行する。同時に、各需要者はその最大効用をさらに最大化する（可能性のある）情報を選び、公益事業体に報告する。

提案法の骨子は、プロセス A における移転コストを VCG メカニズムを用いて適切に設定することによって、つぎの三点を保証することである。(1) プロセス B で得られる各需要者の最適解がプロセス A で得られる最適解と一致する；(2) プロセス B で選ばれる報告すべき情報と真の情報が一致す

る；(3) プロセス B における各需要者の最適解は、各需要者に損益を与えない（各需要者の最大効用は非負の値となる）。(1) から、各需要者が個人の効用を最大化することによってネットワーク全体の効用が最大化されること、(2) から、各需要者の戦略的な情報伝達とは真の情報を報告することにはかならないこと、さらに (3) から、合理的な需要者はネットワークに参加することに一定の意義を見出すことができることがわかる。以下に述べるように、(2) は誘因両立性の保証を意味し、(3) は個人合理性の保証を意味する。以下では、各需要者の評価関数やシステムに関する個人情報、パラメータベクトルを用いて表現する。

パラメータベクトル r_i を需要者 i の評価関数やシステムに関する真のパラメータとして、 r_i への依存関係を陽に表記すると、離散時間系 (1) において $A_i(r_i), B_i(r_i), D_i(r_i)$ となり、効用関数 (7) において $Q_{1i}(r_i), R_{1i}(r_i), Q_{2i}(r_i), R_{2i}(r_i), c_i(r_i)$ となる。いま、需要者 i が個人情報 $\tilde{r}_i = \sigma_i(r_i)$ を公益事業体に報告したとすると、前章の最適化は $A_i(\tilde{r}_i), B_i(\tilde{r}_i)$ などの報告されたパラメータに対するシステムや評価関数に基づいて行なわれる。なお、

$$\tilde{r}_i = r_i \quad (25)$$

のとき需要者 i は真のパラメータを報告したことになる。この表現を用いると、前章で求めた完全情報環境下における最適化の解は

$$[u^*(r), q^*(r)] = \operatorname{argmax}_{u, q} J(r, u, q, \lambda^*(r)) \quad (26)$$

と表わせる。なお、パラメータ $\tilde{r}$ が報告された場合には、最適解として

$$[u^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r})] = \operatorname{argmax}_{u, q} J(\tilde{r}, u, q, \lambda^*(\tilde{r}))$$

を得る。ただし、 $u^*(\tilde{r}) = [u_i^*(\tilde{r})^T, u_{-i}^*(\tilde{r})^T]^T$ であり、 $u_{-i} = [u_1^T, \dots, u_{i-1}^T, u_{i+1}^T, \dots, u_N^T]^T$ である。また、

$$\sum_{i=1}^N K u_i^*(\tilde{r}) - q^*(\tilde{r}) - \sum_{i=1}^N y_i = 0 \quad (27)$$

が成り立つ。公益事業体はこの解を用いて各需要者に課す移転コスト t_i を計算する。その結果、各需要者の移転コストを含む評価関数はつぎのように与えられる。

$$J_i^\dagger(r_i, u_i, \lambda, \tilde{r}) = J_i(r_i, u_i, \lambda) - t_i(u_{-i}^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r}), \tilde{r}) \quad (28)$$

ただし $\tilde{r} = [\tilde{r}_1^T, \dots, \tilde{r}_N^T]^T$ である。

4.1 誘因両立性の設計

各需要者 i に対する誘因両立性をつぎのように定義する。すなわち、任意の報告 $\tilde{r}_i = \sigma_i(r_i)$ に対して

$$\begin{aligned} J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), r) \\ \geq J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \tilde{r}_i, r_{-i}) \end{aligned} \quad (29)$$

が成立するとき、需要者 i に対して誘因両立性が成立する

という。つまり、ほかの需要者が真のパラメータを報告している場合、需要者 i は虚偽のパラメータを報告しても得をすることはないという性質を表わす。これは、真のパラメータ $r = [r_1^T, \dots, r_N^T]^T$ がパラメータ集合の中で Nash 均衡解となる性質といい換えることもできる。

公益事業体は以下のように移転コストを設計する。

$$t_i(u_{-i}^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r}), \tilde{r}) = -\sum_{k \neq i} J_k(\tilde{r}_k, u_k^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})) - J_0(q^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})) + l_i(\tilde{r}_{-i}) \quad (30)$$

l_i は任意関数である。

このように設計された移転コスト (30) は誘因両立性を保証する。このことを示すために、まず真の報告 $r = [r_1^T, \dots, r_N^T]^T$ が (29) 式の誘因両立性を満たさないと仮定する。すなわちある需要者 i と、需要者 i によるある報告 $\tilde{r}_i$ に対して

$$J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), r) < J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \tilde{r}_i, r_{-i})$$

が成り立つ。右辺の、需要者 i 以外の各需要者が真実を報告したときの評価関数はつぎの式で表わされる。

$$\begin{aligned} & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \tilde{r}_i, r_{-i}) \\ &= J_i(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) - t_i \\ &= J_i(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) \\ &\quad + \sum_{k \neq i} J_k(r_k, u_k^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) \\ &\quad + J_0(q^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) - l_i(r_{-i}) \\ &= J(r, u^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), q^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) - l_i(r_{-i}) \end{aligned}$$

なおここで、 t_i は (30) 式で定義される。同様に、左辺は

$$J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), r) = J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r)) - l_i(r_{-i})$$

となる。前提とした最適性 (26) および (27) 式で $\tilde{r}$ を $(\tilde{r}_i, r_{-i})$ とすることにより、

$$\begin{aligned} & J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r)) \\ &\geq J(r, u^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), q^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(r)) \\ &= \sum_{i=1}^N J_i^0(r_i, u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) + J_0^0(q^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) \\ &\quad + \lambda^{*T}(r) \left(\sum_{i=1}^N K u_i^*(\tilde{r}_i, r_{-i}) - q^*(\tilde{r}_i, r_{-i}) - \sum_{i=1}^N y_i \right) \\ &= J(r, u^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), q^*(\tilde{r}_i, r_{-i}), \lambda^*(\tilde{r}_i, r_{-i})) \end{aligned}$$

である。したがって仮定は成り立たないので誘因両立性 (29) は成立する。

なお、真の報告をすることは Nash 均衡となるので、需要者が合理的であることを前提とすれば、すべての需要者が真の報告をすることになる。また、本論文では各需要者は競争的環境にあると仮定しており、共謀については考慮していない。

LQ 問題においては移転コストをつぎのように表わすことができる。 (30) 式に (19), (20) 式を代入して

$$\begin{aligned} t_i(u_{-i}^*(\tilde{r}), \lambda^*(\tilde{r}), q^*(\tilde{r}), \tilde{r}) = & \sum_{k \neq i} \left[\frac{1}{4} \{ R_k(\tilde{r}_k) Q_k^{-1}(\tilde{r}_k) R_k(\tilde{r}_k)^T \right. \\ & - 2\lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})^* K Q_k^{-1}(\tilde{r}_k) R_k(\tilde{r}_k)^T \\ & \left. + \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})^T K Q_k^{-1}(\tilde{r}_k) K^T \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i}) \right] \\ & + C_k - \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i}) y_k \\ & + \frac{1}{4} \{ R_0 Q_0^{-1} R_0^T + 2\lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})^T K Q_0^{-1} R_0^T \\ & + \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})^T K Q_0^{-1} K^T \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i}) \} + C_0 + l_0(\tilde{r}_{-i}) \end{aligned}$$

この式は価格 $\lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})$ を通して $\tilde{r}_i$ に依存している。 $\lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})$ の具体的な関数形は (24) 式で与えられる。 $\tilde{r}_i$ の関数として与えられる移転コスト $t_i(u_{-i}^*, \lambda^*(\tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i}), q^*(\tilde{r}), \tilde{r}_i, \tilde{r}_{-i})$ の数値例を次節に示す。

4.2 個人合理性の設計

個人合理性とは、需要者がシステムに参加することで損をすることはないという性質である。本論文の定式化では、需要者 i が「システムに参加しない」とは、需要者 i のシステムモデル (1) において $u_i = 0$ であり、グローバル制約 (3) において $u_i = 0$ である場合に相当する。このとき、需要者 i は電力料金および移転コストを負担する必要はなく、需要者 i の効用は $J_i^0(r_i, 0)$ で表わされる。以上の前提のもとに、需要者 i に対する個人合理性をつぎのように定義する。すなわち、最適化された評価関数 $J_i^\dagger$ に対して、

$$J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), r) \geq J_i^0(r_i, 0) \quad (31)$$

が成立するとき、個人合理性が成立するという。ここで、移転コスト (30) によって需要者 i は真のパラメータを公益事業体に報告することを前提としている。

個人合理性を成立させるために任意関数 l_i を設計する。まず、 $u_i = 0$ とする。このときの u_{-i} に関するつぎの最適化問題

$$\begin{aligned} & \max_{u_{-i}, q} J(r, 0, u_{-i}, q) \\ & \text{subject to (3)} \end{aligned} \quad (32)$$

を解き、その最適解を $u_{-i}^\#(r_{-i}, 0)$, $q^\#(r_{-i}, 0)$, 対応するラグランジュ乗数を $\lambda^\#(r_{-i}, 0)$ と表わす。ここで、誘因両立性により、ほかの需要者からは真のパラメータが報告されることを用いている。これを用いて任意関数 l_i をつぎのように構成する。

$$l_i(r_{-i}) = J_{-i}^0(r_{-i}, u_{-i}^\#(r_{-i}, 0)) + J_0^0(q^\#(r_{-i}, 0)) \quad (33)$$

このとき、需要者 i について評価関数を計算すると

$$\begin{aligned} & J_i^\dagger(r_i, u_i^*(r), \lambda^*(r), r) \\ &= J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r)) - l_i(r_{-i}) \\ &= J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r)) \\ &\quad - J_{-i}^0(r_{-i}, u_{-i}^\#(r_{-i}, 0)) - J_0^0(q^\#(r_{-i}, 0)) \\ &= J(r, u^*(r), q^*(r), \lambda^*(r)) \\ &\quad - J(r, 0, u_{-i}^\#(r_{-i}, 0), q^\#(r_{-i}, 0), \lambda^\#(r_{-i}, 0)) \\ &\quad + J_i^0(r_i, 0) \end{aligned}$$

u^*, q^* の最適性と誘因両立性の証明と同様な議論を用いると、最後の式の第 1 項と第 2 項の和は非負であるので、個人合理性 (31) が成立する。以上のように移転コストを設計することで誘因両立性、個人合理性をもつ評価関数にすることができ。また、LQ 問題なので任意関数はつぎのように与えられる。(33) 式に (19), (20) 式を代入して

$$l_i(r_{-i}) = -\frac{1}{4}R'_{-i}Q'^{-1}_{-i}R'^T_{-i} + C'_{-i} \quad (34)$$

ただし

$$\begin{aligned} Q'_{-i} &= Q_{-i} + K'^T_{-i}Q_0K'_{-i}, \\ R'_{-i} &= R_{-i} - 2(y^T I'^T - \bar{u}_i^T K^T)Q_0K'_{-i} + R_0K'_{-i}, \\ C'_{-i} &= (y^T I'^T - \bar{u}_i^T K^T)Q_0(I'y - K\bar{u}_i) \\ &\quad - R_0(I'y - K\bar{u}_i) + C, \\ K'_{-i} &= [K \cdots K] \quad ((N-1)P \times 4P) \end{aligned}$$

である。

5. 数値実験

これまでの議論では需要ネットワークの分散型最適化を行なう手法を示し、情報が不確かな場合を考慮してシステムに誘因両立性、個人合理性を付与することによってネットワーク全体の利益を確保するメカニズムを提案した。本章では数値シミュレーションによって提案手法を評価する。本シミュレーションでは 2 章で設定したモデルに基づいて、一日の始めにその日一日分の消費と価格の推移を決定する。まずその日の外的条件 (すなわち気温・日射の変化予測) を取得し、需要者が公益事業体に報告したシステムや評価のパラメータをもとに、5.1 節で示す計算方法によって、3 章で与えられた最適化を行なう。それから公益事業体は 4 章で与えられた移転コストを決定する。移転コストの設計により誘因両立性が保証されるので、競争的环境下においても情報が確かな場合について最適解を求め、それを使って移転コストを計算する。本章では、勾配法が収束し最適解に到達することと、移転コストの設計によって需要者が虚偽のパラメータを報告した場合、それに基づいて最適化を行なったときにその需要者の利益が減少することを示す。

5.1 アルゴリズム

最適解に収束させるために勾配法を用いて公益事業体と各需要者の間で逐次的に通信を行ない、情報を更新する。 k 回目の反復で以下のような計算が行なわれる。(22), (23) 式を用いて

$$\begin{aligned} u_i^k &= -\frac{1}{2}Q_i^{-1}(R_i^T - K^T\lambda^k) \\ q^k &= -\frac{1}{2}Q_0^{-1}(R_0^T + \lambda^k) \end{aligned}$$

が求められ、 u_i^k が公益事業体へ報告される。これらをもとに価格の決定を行なう。

$$\frac{\partial J(u, q, \lambda)}{\partial \lambda} = -(K'u - q - I'y)$$

から勾配を用いて

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + \epsilon(K'u^k - q^k - I'y)$$

を計算し、求まった価格 λ を更新し、各需要者に送信する。なおここでステップサイズ $\epsilon > 0$ は公益事業体が定める定数である。この反復によって公益事業体と各需要者は自身の解を更新する。

5.2 システム設定

各需要者のシステムをつぎのように設定する¹³⁾。なお、移転コストや、効用関数・蓄電池のダメージを含む評価関数は金銭の単位で計算される。移転コストは適当なタイミングで (たとえば電気料金の徴収と一緒に) 支払われるものとする。

5.2.1 ダイナミクスをもつ需要

本研究ではダイナミクスをもつ需要として空調を想定している。空調の出力は 1 離散時間前の室内気温に依存する。そのダイナミクスを以下のモデルで表わす。

$$T_i[t+1] = T_i[t] + \alpha_i(T^{out}[t] - T_i[t]) + \beta_i d_{i,d}[t] \quad (35)$$

ここで T_i は室温とし、 T^{out} は室外気温とする。空調の時刻 t における消費は $d_{i,d}[t]$ である。本シミュレーションにおいて、ダイナミクスは各需要者で共通のパラメータを利用した。 $\alpha_i = 0.9, \beta_i = -0.005$ と設定した。効用関数 $U_{i,d}$ は以下のように設定する。

$$U_{i,d}[t] = c_{i,air} - b_{i,air}(T_i[t] - T_i^{comf})^2 \quad (36)$$

T_i^{comf} は最も快適な室温とする。 $T_i^{comf} = 25$ と設定した。また、需要者数は 10 であり、評価に関する各パラメータは需要者 1 から順に

$$\begin{aligned} b_{i,air} &= 14538, 14710, 14845, 14300, 13636, 14833, 14509, \\ &\quad 14166, 14500, 13576 \\ c_{i,air} &= 17504, 16277, 17078, 16455, 16858, 16456, 17232, \\ &\quad 16505, 17181, 16889 \end{aligned}$$

とした。

5.2.2 ダイナミクスをもたない需要

ダイナミクスをもたない需要は以下のように、使用電力量 $d_{i,s}$ に応じて効用 $U_{i,s}$ が得られるとする。

$$U_{i,s}[t] = -a_{i,s}d_{i,s}^2[t] + b_{i,s}d_{i,s}[t] \quad (37)$$

電力価格に反応する需要で、かつダイナミクスをもたないものとしてテレビやパソコンなどの娯楽に使われる電力を想定している。評価のパラメータは需要者 1 から順に

$$\begin{aligned} a_{i,s} &= 0.2120, 0.2135, 0.2016, 0.2165, 0.2092, 0.2026, \\ &\quad 0.2026, 0.2135, 0.2154, 0.2123, \\ b_{i,s} &= 200.7, 212.0, 217.9, 213.3, 204.3, 203.1, \\ &\quad 213.6, 217.2, 213.0, 211.3 \end{aligned}$$

とした。

5.2.3 蓄電池

蓄電池の残量は、充放電量と 1 離散時間前の残量に依存するという意味でダイナミクスをもつ。蓄電池のダイナミクス

Fig. 4 Temperature in Tokyo

Fig. 5 PV output

Fig. 6 Demand for air conditioner

Fig. 7 Demand for entertainment

を以下のように表わす.

$$b_i[t+1] = b_i[t] - k_{i,b} p_{i,b}[t] \quad (38)$$

$b_i, k_{i,b}$ はそれぞれ残量, インバータ効率の逆数, $p_{i,b}[t] > 0$ は放電量, $p_{i,b}[t] < 0$ のとき充電量である. $k_{i,b} = 1.064$ とした.

蓄電池に関する効用は, 蓄電池を使用することによって蓄電池に与えられるダメージで評価する. 本研究ではつぎのような二次形式で評価する.

$$U_{i,b}[t] = -\xi_{i,1} p_{i,b}^2[t] - \xi_{i,2} (b_i[t] - b_i^{comf})^2 \quad (39)$$

第1項は充放電による消耗, 第2項は蓄電目標値 b_i^{comf} から外れた量, すなわち過充電・過放電状態へのペナルティとして評価する. $b_i^{comf} = 500$ とし, 評価のパラメータは需要者1から順に $\xi_{i,1} = 0.0323, 0.0345, 0.0340, 0.0350, 0.0331, 0.0316, 0.0351, 0.0309, 0.0323, 0.0355$, $\xi_{i,2} = 0.0559, 0.0561, 0.0549, 0.0507, 0.0582, 0.0517, 0.0580, 0.0544, 0.0509$ とした.

5.3 シミュレーション条件

系統につながれた公益事業体と, それからサービスを受ける $N = 10$ 個の需要者からなるシステムにおいて一日を $P = 24$ 分割して最適な需要パターンを計算する数値実験を行なった. 外的条件として, 2011年9月1日東京の気温と日射量を使用した. 自家発電機として太陽光パネルを想定している. Fig. 4に東京の気温, Fig. 5に自家発電量を示す. 太陽光パネルの面積には個人差をもたせている. 移転コストの設計の際に用いた, 個人情報を表わすパラメータ r_i として, 本シミュレーショ

Fig. 8 Discharge from battery

Fig. 9 Price

ンでは (36) 式における $b_{i,air}$ を用いた. すなわち, $r_i = b_{i,air}$ として需要者1のみの評価関数の重みに相当する部分を戦略的に変化させた. また, ステップサイズは $\epsilon = 0.0001$ とした.

5.4 シミュレーション結果

Fig. 6~Fig. 9に需要が最適化された結果を示す. それぞれ空調による消費, ダイナミクスをもたない需要の消費, 蓄

Fig. 10 Total energy from system for time-variable price

Fig. 11 Total energy from system for constant price

Fig. 12 Convergence of social welfare

電池の使用量，価格の推移である。

Fig. 10 に系統から購入した総需要の推移を示す。また、Fig. 11 に価格を一定に設定したときの総需要の推移を示す。Fig. 10 と比べると今回の価格が変動する手法の結果では価格を一定にするより需要のパターンが平滑化されていることがわかる。また、効用関数の評価重み $b_{i,air}$, $a_{i,s}$ の値を小さくするとよりピーク時の電力使用が抑えられる。勾配法の収束状況を Fig. 12, Fig. 13 に示す。Fig. 12 はネットワーク全体の利益、Fig. 13 はグローバル制約を逸脱した量である。勾配法により収束しているようすがわかる。なお、収束までの反復回数が 200~300 回と大きいのが、本論文の最適化は一日の初めに前もって計算する方式なので、収束時間は許容できると考えられる。

各需要者の一日の支出 (電力料金と移転コストを合わせたもの) は、需要者 1 から順に $-1.9948 \times 10^9, -1.9422 \times$

Fig. 13 Convergence of constraint abuse

Fig. 14 Effect of transfer: the total benefit of a consumer with variable parameter

$10^9, -1.9400 \times 10^9, -1.9483 \times 10^9, -1.9584 \times 10^9, -1.9404 \times 10^9, -1.9452 \times 10^9, -1.9503 \times 10^9, -1.9452 \times 10^9, -1.9591 \times 10^9$ であった。

つぎに移転コストの設計による効果を Fig. 14 に示す。

今回の数値実験では虚偽の報告があるパラメータとして需要者 1 の気温に関する効用のパラメータ、すなわち (36) 式における $b_{1,air}$ を真の値 14538 の周りで変化させ、それによりこの需要者の利得がどのように変化するかを示した。ここで移転コストは (24) 式を用いて計算できる。簡単のため個人的合理性を保証する任意関数は 0 とした。真の値を頂点として利得が下がっていることがわかる。

6. ま と め

需要ネットワークのモデルに基づいて、分散型の最適化を行なう手法を示した。各需要者が戦略的に振る舞うと仮定して、それにより生じる不完全情報環境においてネットワーク全体の利益を確保するための移転コストを設計する手法を提案した。移転コストによりシステムに誘因両立性、個人合理性が保証されることを示し、数値シミュレーションによってその効果を確認した。

本論文の最適化は一日の始めに一回だけ行なわれる開ループ計算であり外的条件は一日前の予測値を用いた。実時間での外的条件の変化に対する検討が今後の課題である。

謝辞 本研究は JST・CREST の支援を受けています。

参 考 文 献

- 1) A. Jokic, M. Lazar and P.P.J. Van Den Bosch: Price-based Optimal Control of Power Flow in Electrical Energy Transmission Networks, *Hybrid Systems: Computation and Control 2007*, LNCS 4416, 315/328, Springer (2007)
- 2) N. Li, L. Chen and S. Low: Optimal Demand Response Based on Utility Maximization in Power Networks, *Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 1/8 (2011)
- 3) A. Papavasiliou, H. Hindi and D. Greene: Market-Based Control Mechanisms for Electric Power Demand Response, *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*, 1891/1898 (2010)
- 4) P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V.W.S. Wong and J. Jatskevich: Optimal Real-time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid, *Proceedings of the First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, 415/420 (2010)
- 5) A. Kiani and A. Annaswamy: Wholesale Energy Market in a Smart Grid: Dynamic Modeling and Stability, *Proceedings of the 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 2202/2207 (2011)
- 6) N. Nisan: Introduction to mechanism design (for computer scientists), *Algorithmic Game Theory*, N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos and V. Vazirani (Eds.), 209/241, Cambridge University Press (2007)
- 7) 平田, 内田: 分散化と統合化の制御理論, 計測と制御, **51**-1, 55/61 (2012)
- 8) C. Silva, B.F. Wollenberg and C.Z. Zheng: Application of Mechanism Design to Electric Power Markets (Republished), *IEEE Transactions on Power Systems*, **16**-4, 862/869 (2001)
- 9) P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, R. Schober and V.W.S. Won: Advanced Demand Side Management for the Future Smart Grid Using Mechanism Design, *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**-3, 1170/1180 (2012)
- 10) D.G. Luenberger: *Linear and Nonlinear Programming*, 330/333, Addison-Wesley Publishing Company (1989)
- 11) C.E. Lin and G.L. Viviani: Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-103**-6, 1170/1175 (2007)
- 12) D.P. Bertsekas: *Nonlinear Programming*, 2nd edition, 368/374, Athena Scientific (2008)
- 13) 塚越, 岡島, 内田: 電力需要者の効用最大化行動に基づくモデル予測型プライシング手法, 第12回計測自動制御学会制御部門大会, 0000-P0011 (2012)

平 田 研 二 (正会員)

1994年九州工業大学工学部卒業。99年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了(情報システム学専攻)。同年大阪大学大学院工学研究科助手。2006年長岡技術科学大学機械系准教授。2008~2009年カリフォルニア大学サンタバーバラ校 Visiting Research Scholar。拘束条件を有するシステムやハイブリッドシステムの解析と制御, 情報通信を利用した制御系の設計や応用, などの研究に従事。

内 田 健 康 (正会員・フェロー)

1971年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。76年同大学院理工学研究科博士課程修了。83年より早稲田大学教授(現在理工学術院電気・情報生命工学科に所属)。制御系の情報構造, ロバスト制御および最適化制御の理論と応用, 生物や環境エネルギーシステムの制御, などの研究に従事。システム情報制御学会, 電気学会, IEEEなどの会員。

[著 者 紹 介]

岡 島 佑 介 (学生会員)

2011年早稲田大学先進理工学部電気・情報生命工学科卒業。2013年同大学大学院先進理工学研究科電気・情報生命専攻修士課程修了。同年同専攻博士後期課程入学。