

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：85502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24561061

研究課題名(和文)分散エネルギー群の自己組織的クラスター形成条件の明確化と有効性の評価

研究課題名(英文)Self-organization model to emerge urban distributed energy cluster

## 研究代表者

石田 武志 (Ishida, Takeshi)

独立行政法人水産大学校・その他部局等・教授

研究者番号：50438818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光発電(PV)などの自然エネルギーが大規模に導入されると、天候による大規模な出力変動や、電力系統の電圧上昇などの問題が発生する。本研究は、需要家(住宅)のエネルギー設備が不規則に更新されていく中で、街区内で適切な設備の組合せを創発させる「設備導入ルール」と、隣接設備間での「エネルギー融通ルール」の構築を行った。生物の群れ形成や生体模様形成の基礎モデルであるチューリングモデルを基礎としたルールにより、分散エネルギーを構成要素とするクラスター群が自己組織的に形成され、電力系統の恒常的安定性とロバスト性(牽索性)が保たれることを、マルチエージェントシステムで示した。

研究成果の概要(英文)：Renewable energy resources are generally unstable and affect the performance of electricity grids when they are fully connected. A distributed energy supply network system is expected to overcome the above problem. Such a system consists of a network system in which electricity and heat can be transferred between dispersion generators and can supply stable energy to an urban district. We have constructed a self-organization model for the formation of dispersion energy network. We demonstrated that the following 2 functions can be realized by the multi-agent model which has rules for introduction of energy facilities. 1) Energy exchange was achieved between neighbor houses and surplus energy was consumed in urban district. 2) "Energy cluster" is formed for self-organizing. Our simulation results indicated that stable energy exchange was possible when "Energy cluster" was formed in the district.

研究分野：エネルギーの数理モデル

キーワード：スマートグリッド 自律分散システム マルチエージェント チューリングパターン 分散エネルギー  
太陽エネルギー 燃料電池 セルオートマトンモデル

1. 研究開始当初の背景

太陽光発電 (PV) に関しては、2030 年で 5300 万 kW 導入という政府目標が掲げられ、各種の導入補助金制度の拡充、全量買取制度の制度化、メガソーラー発電所の設置などにより、今後大規模に導入が進んでいく可能性が高くなってきている。一方で、PV の大規模導入に伴い、1) 天候による大規模な出力変動 (晴天時昼間は余剰電力が大規模に発生、雨天時はバックアップ電源が必要)、2) 電力系統の電圧上昇、3) 電力系統の周波数の不安定化、などの問題が発生する。特に、中間期 (春、秋) の祝日に晴天になると大規模な PV 余剰電力が発生する可能性があり、スマートメータを用いた家庭用 PV の強制的な解列などに迫られ、一般需要家の利益を損ねる可能性もある。

需給バランス解決のためには、蓄電池の大規模整備が考えられるが、多大なコストが必要になるとともに、充放電時のエネルギー損失も蓄電池の導入規模に比例して大きくなると考えられる。現状の電力系統で受け入れることが可能な自然エネルギー源は 1000 万 kW との報告もあり、政府の PV 導入目標達成のためには、このような PV の大規模普及に伴う諸課題を解決し、系統の PV 許容容量を拡大することが緊急の課題となっている。

このような課題の解決のための方策として、研究代表者らは分散エネルギー (コージェネレーションシステム (CGS) 及び PV) を近接需要家間で連動運転することにより、地域内で自然エネルギーの余剰電力を吸収しつつ、省エネルギーが実現できる可能性を、数理計画法に基づくモデルにより既に明らかにしていた。このモデルにより具体的な街区を事例とした評価を行い、エネルギー融通によりさらに数%~10%程度の省エネルギーが可能であることを示した。また戸建住宅群において、変動電源である PV に対し、出力を能動的に制御できる燃料電池 CGS や、余剰電力吸収源となり得るヒートポンプ給湯器 (HP) を適切に組み合わせることにより蓄電池容量を抑制し、さらに地域内の余剰電力を吸収でき、雨天時の電力補填も地域内の CGS により可能となることを示した。

また、科研費 (基盤研究 C、平成 20~22 年度、マイクログリッド等の分散エネルギーネットワークに実装する分散人工知能に関する研究) により、マルチエージェントシステムによる分散エネルギー源の協調、棲み分けの創出などを明らかにしてきた。これは、生物の群れの形成や生体模様の形成を再現する群知能モデルを応用し、エネルギーシステム間の簡単な相互作用 (設備導入を促進する要因と抑制する要因の競合) により、街区内のエネルギー融通が比較的高い頻度で実現し、さらに複数種のエネルギー設備による棲み分け (コロニー) が自己組織的に形成されることをコンピュータシミュレーションで示したものである。

以上の先行研究により、PV の大規模普及に伴う需給の不均衡を解決し PV 許容容量を拡大するためには、出力を調整できる燃料電池 CGS や、余剰電力を吸収できる HP 給湯器、蓄電池などを適切なバランスで導入していくことが望ましく、エネルギーの需要状況が絶えず変化し、設備更新が断続的に行われていく実街区においても、いくつかの設備導入ルール適用により、各種設備の導入構成を一定の比率に導くことができる可能性がわかってきた。一方で筆者らの最適化モデルによる研究は、特定地域の建物条件による結果であるなど、特定の条件下での結果によるものであり、様々な需要家の組合せを網羅した結果ではない。また、自己組織的な棲み分け形成モデルも、比較的抽象度の高いモデルにおいて自己組織化が創発されるパラメータ群を 1 組見出したのみであり、経済性も考慮したうえでの有効性を確認する課題が残されている。

2. 研究の目的

各住宅の設備更新時に、近隣の分散エネルギーの種類や数などの情報に基づく設備導入ルールに従うことにより、街区内の分散エネルギーの最適構成が自己組織的に実現でき、近隣設備間でエネルギー融通を行い電力需給のバランスを維持できるクラスターが自己組織的に形成される地域エネルギーマネジメントシステムの基礎を構築することを目的とする。研究の全体像を図 1 に示す。具体的な研究項目を以下に示す。

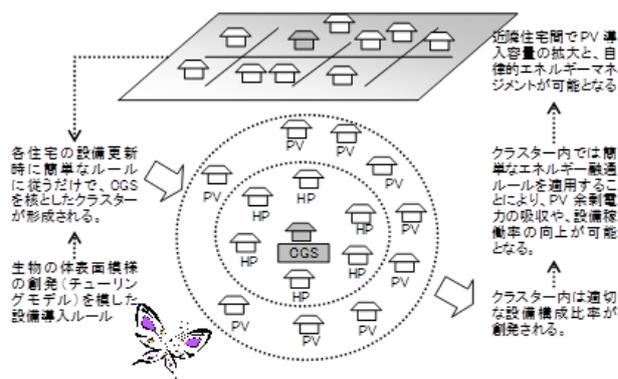


図 1. 研究の概要

(1) 街区内で適切な設備の組合せを創発させる「設備導入ルール」の構築

①適切な設備の構成を検証するための基礎データの整備；設備導入ルール構築のための基礎データとして、街区の需要家の条件 (棟数、建物規模、エネルギー負荷など) に基づき、数理計画法により最適な設備容量の構成比率 (PV, CGS, HP, 蓄電池) を導出しデータベース化する。

②設備導入ルールの導出；適切な設備容量構成の組合せが自己組織的に形成され、近接設備間で燃料電池 CGS を中核としたク

クラスターが形成される数理条件を明確化（生物の群れ形成の数理を応用、図2参照）する。

(2) 街区内で余剰電力を吸収することができる「設備運用ルール」の構築

設備運用ルールをエージェントシステムにより構築し、比較的単純な運用ルールで、クラスター内のエネルギー需給バランスの保持が可能であることを示す。

(3) 実街区をモデルとしたケーススタディの検討

実街区の配電システムをモデルに電力システムシミュレーションを実施し、クラスター形成の有効性（余剰電力の吸収、PV許容量の増大）、ロバスト性（牽牛性）を確認する。

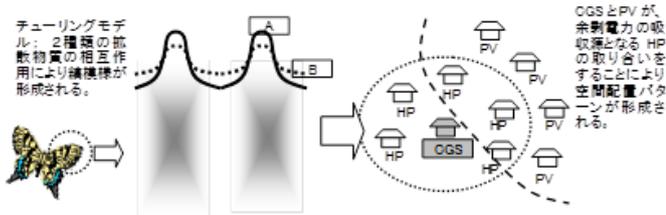


図2. 自己組織的パターンの形成

### 3. 研究の方法

「分散エネルギー・クラスター」が自己組織的に社会に形成される方法を、動物の体模様を生み出すチューリングモデルを用いて構築した。このモデルは全体を統括する司令塔がいなくとも、細胞の相互作用だけから、体模様を自己組織的に生み出すことができるモデルである。そしてこのような自然界の自己組織化現象を利用することで、全体を調整する管理人がいなくとも、隣接する設備の相互作用だけで、グループを形成することが可能となる。簡単な街区を想定したコンピュータシミュレーションによる研究事例を以下に示す。

ここでは小規模な都市街区を想定し、街区のイメージを図3に示す六角形の格子空間でモデル化し、格子の各頂点（セル）に戸建住宅（需要家）が配置されると仮定した。これは実際の都市街区をかなり抽象化したものであり、送電網での相対的な位置関係をモデル化したものである。

そして、各セルに配置される戸建住宅に人工知能を搭載した電力設備（以下、これをエージェントと呼ぶ）を導入する。各エージェントは自分の属性としてエネルギー設備の種類と、設備の使用年数を情報として保持している。エネルギー設備の種類は、①従来型住宅、②太陽電池（PV）導入住宅、③ヒート

ポンプ（HP）導入住宅、④コージェネレーションシステム（CGS）導入住宅、の4種類とした。CGSは、エンジンや燃料電池で発電をしながら、お湯などの熱も供給できるシステムである。

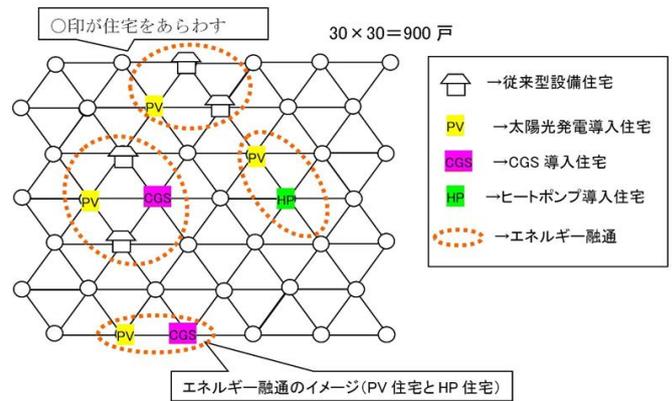


図3 住宅地の都市街区をモデル化した計算格子

さらに計算上ではこれらの各設備の寿命を10年とし、各エージェントは使用年数が10年になると①～④のいずれかの設備に更新されると仮定した。住宅の設備種類の初期値として、①～④の住宅がランダムに配置される状態とした。また設備の使用年数の初期値は、ランダムに0～9年を設定した。そして、各エージェントに以下の2つのルールを適用した。

(a) エージェントの設備導入判断ルール

設備導入判断ルールにおいては、生物の群れの形成や生体模様の形成で有名なチューリングモデルをセルオートマトンモデルに離散化したYoungモデルと呼ばれるものを使用した。これは近隣エージェントの状況と簡単なルールのみを用いることで、空間的に特定のパターンを創発するルールである。

(b) エネルギー融通ルール

設備導入判断ルールにより、複数の設備によるグループが形成された後、グループ内での電力の融通ルールを決めた。ランダムな融通では効率が低下する可能性が高い。また全ての組み合わせを逐一考えて計算していくことも計算量が多くなる。

そこで、余剰エネルギーの融通ルールは、ゲールシャプレイ（Gale-Shapley）による安定配分アルゴリズムを用いた。シャプレイ教授はこの安定配分の理論により2012年にノーベル経済学賞を受賞した。Gale-Shapleyアルゴリズムは各要素間の安定的な組み合わせを導出できるものであり、これを利用して、電力融通のルールを設定した。

計算のタイムステップは1年として、各年における設備更新住宅に対して設備導入ルールを適用し、その後エネルギー融通ルールを適用するという計算を行った。

#### 4. 研究成果

図4に計算結果の一例を示す。初期状態(0ステップ)は、設備の状態をランダムに配置している状態である。図中の各丸印の色の分布で設備の種類を示し、ヒートポンプ(HP)の周囲にCGSが分布し、その周囲に従来設備が分布し、クラスタが構成され、クラスタ間に太陽光発電(PV)が充たされていることがわかる。

図5中の線は、エネルギー融通の組み合わせを示す。チューリングモデルを模した設備導入判断ルールを適用すると、ヒートポンプ(HP)、CGS、従来設備のクラスタが形成され、その周囲に太陽光発電(PV)が分布する棲み分けが自己組織的に創発されることがわかる。CGSの周囲に従来設備が分布していることにより、CGSの余剰熱を隣接の従来設備に供給することが可能となっている。また、余剰電力の供給で競合するCGSと太陽光発電(PV)は、電力の吸収源である従来設備を間に挟んだ配置となっている。さらにこれは、なるべく太陽光発電(PV)の普及を促すという社会的な要求も満たされた配置となっている。

この研究成果を実際の電力設備の導入に応用すると、比較的簡易なルールを用いることで、分散協調制御のシステムを階層的に構築することができる可能性がある。具体的には各電力システムの制御システムに、この研究で明らかになった「設備導入ルール」と「設備運用ルール」を保持させ、これらがインターネットや電力線通信で相互に接続されるようにする。そのようにすると、近隣施設の設備種類や余剰電力情報という限られた情報だけで各設備の導入や運用が判断されて、エネルギー設備のグループが自己組織的に形成されると考えられる。

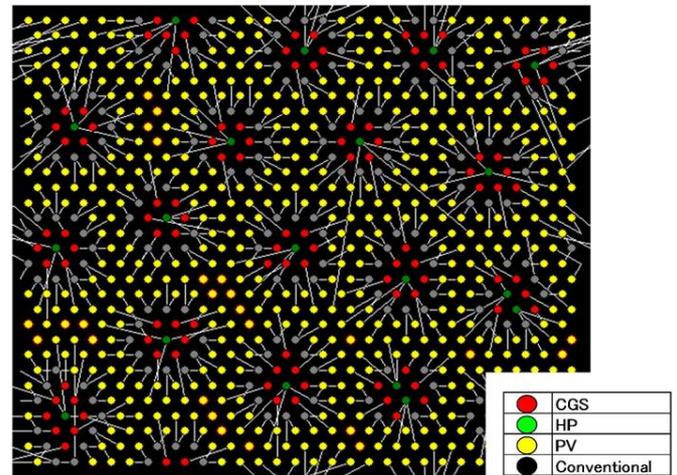


図5 分散エネルギー・クラスタ内での電力融通の様子(線で結ばれたところが電力融通を行っている)

これらの結果に加え、コストを考慮したモデルを作成し結果を取りまとめている。ケーススタディについては、離島の対象としたケーススタディの準備をしている。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4件)

- ① Takeshi Ishida, Self-Organizing Construction Method of Offshore Structures by Cellular Automata Model, Modelling and Simulation in Engineering Volume 2015 (2015) Article ID 140174, 7 pages  
<http://dx.doi.org/10.1155/2015/140174>
- ② Takeshi Ishida, Simulations of living cell origins using a cellular automata model, Origins of Life and Evolution of Biospheres, 2014 Apr;44(2):125-41.
- ③ Takeshi Ishida: Distributed Autonomous Control System of the Smart Grid Based on the Turing Pattern Model, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering Vol. 8 No. 6, November 2013, 649-651
- ④ 石田武志, 分散エネルギー群の自己組織的コロニー形成モデル, 日本シミュレーション学会論文誌第4巻第2号, pp51-61, 2012

[学会発表] (計 7件)

- ① Takeshi Ishida, Simulation model of living cells origin with cellular automata model, Origins 2014 International Conference, July 6th -11th, 2014, Nara, Japan
- ② Takeshi Ishida, Self-organization Model for the Energy Cluster Formation with Distributed Energy Network, IEEE

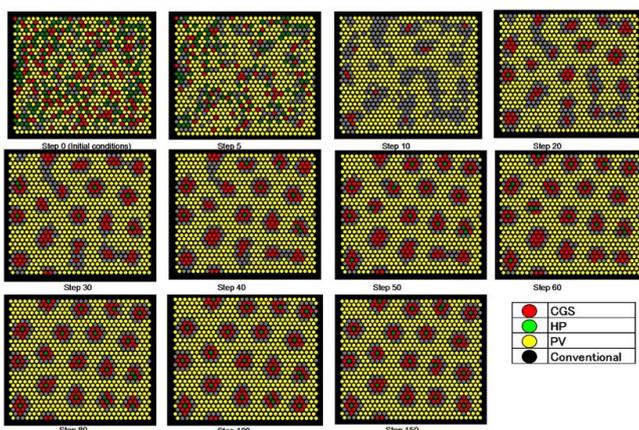


図4 「分散エネルギー・クラスタ」が自己組織的に形成されるシミュレーション

なし

Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE SSCI2013), April 15-19, 2013, Singapore

- ③ Takeshi Ishida, Self-organization Model for the Formation of Energy Independence District with Distributed Energy Network, The 10th International Conference on EcoBalance, 20-23 november, 2012, Yokohama, Japan
- ④ Takeshi Ishida, Self-organization Model for the Formation of Dispersion Energy Network, 2012 Pacific Rim Energy & Sustainability Congress (PRESCO 2012), 5-9 August, 2012, Hiroshima, Japan
- ⑤ Takeshi Ishida, Two-dimensional cellular automata model of microorganism morphosis, HE 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 17th ' 12), January 18-20, 2012, Beppu, Oita, JAPAN
- ⑥ Takeshi Ishida, Hiroki Takahashi, Simulation model to derive recycling routes of reused desktop PCs, EcoDegign Symposium 2011, December 1-3, 2012, Kyoto, Japan
- ⑦ Takeshi Ishida, Simulation of cell-like self-replication phenomenon in a two-dimensional hybrid cellular automata model, 11th European Conference on Artificial Life (ECAL' 11), Paris, August 8-12, 2011

〔図書〕 (計 2 件)

- ① 石田武志, 『人工知能ロボットがつくる「無人自動企業」の可能性 もう一つの人工知能 人工「低」能による群知能がつくる未来』 Amazon Kindle 電子出版 2016年3月15日刊行
- ② 石田武志, 『システム工学で描く持続可能文明の設計図 ー文明設計工学という発想ー』, 大学教育出版 ISBN 978-4-86429-245-0、2014年6月20日刊行

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 武志 (ISHIDA, Takeshi)  
独立行政法人 水産大学校・教授  
研究者番号: 5 0 4 3 8 8 1 8

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者