3C4-OS-03b-1

分散電源の「群れ」の自己組織的なネットワーク化による仮想企業体の形成

Formation of the virtual company by self-organized network of distributed energy swarm

石田武志[*1]
Takeshi Ishida

[*1] 国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産大学校 海洋機械工学科
National Fisheries University

Renewable energy resources are generally unstable and affect the performance of electricity grids when they are fully connected. Swarm of distributed energy generators could overcome these problem. Such a system consists of network system in which electricity can be transferred between dispersion generators and the renewable energy resources and can supply stable energy to an urban district. We have constructed a self-organization model for the formation of dispersion energy swarm. We demonstrated that the "Energy cluster" is formed by cellular automata model which has rules for introduction of energy facilities (photovoltaic (PV) systems and conventional system) and Turing pattern model algorithm. Our simulation results indicated that stable energy exchange was possible when "Energy cluster" was formed in the district. It is considered that it is possible to construct the virtual company in a real dynamic urban energy environment by applying the rules determined in this study.

1. 緒言

近年、気候変動への対応などから、分散エネルギーシステム、特に戸建て住宅には、太陽光発電や燃料電池が多く導入されてきている。太陽光発電はその導入規模が大きくなると、気象状況により発電量が変動するなど、電力系統が不安定になる課題がある。しかし、スマートグリッド構築の取り組みの中で、個々の需要家の電力需給を管理することが可能となってきている。さらにこれらのスマートグリッドの動向の中で、不安定な分散電源の発電量予測や電力の需要予測などに人工知能を応用する研究も様々に行われている。

一方で、これらの分散エネルギーシステムが生み出した余剰電力は、現状では固定買取制度により、電力会社による高い単価での買取りが保障されている。しかし、今後エネルギー自由化の流れがさらに進んでいくと、市場価格より高い価格での買取は困難になり、いずれは完全な自由市場になると考えられる。個々の発電システムは、余剰の電力を市場で売っていかないといけない状況も想定される。

このような状況下では、分散エネルギー設備が、人工知能などと組み合わされることにより、電力の自動売買をすることができるかといった点が焦点になる。現行の技術的な流れを考えると、分散電源システムが IoT 技術などを利用して、人工知能ソフトウェアを搭載し、インターネットに接続することは、比較的容易であると考えられる。また、ビットコインに代表される仮想通貨は、ネットワーク上のブロックチェーン技術などを基盤にしており、今後は無人での金銭に決済が可能となっていくと考えられる。

このような技術的な動向を考えると、電力を無人で自動売買するシステムの構築をすることは現行技術でも可能であると考えられる。これは、電力という資源と、仮想通貨による決済手段を持つことができたバーチャルな「商売人」が構築できることである。

このような仮想な商売人は、市況の電力価格を見ながら、余剰な電力を売買して、利益を上げることが可能となる。しかし、単純な売買のであれば、無人でこなすことができるが、長期的な視点を持って、外的環境が変化していく中で、不連続な変動相場を見ながら、「経営」をしていくことは難しいと考えられる。このような経営者を代替する人工知能の開発は、汎用人工知能の開発などを待たないといけないと考えられる。

一方で、これらの分散エネルギーシステムを単体としてではなく、「群れ」と考えて、群れの知能を応用する方向も可能性としては考えられる。個々の分散システムには、高度な人工知能は搭載されていなくても、粘菌が迷路を解く事例や、アリの集団生活の事例などのように、群れ全体では知的な振る舞いを創発し、外的環境の変化に適応していくシステムを構築することが可能であると考えられる。先ほどの仮想な商売人であれば、複数の設備が「群れ」を形成することで、より有利な無人の「企業体」を形成できると考えられる。太陽パネルを用いる企業体であれば、太陽エネルギーを吸収して、電気エネルギーを生み出す群れ（企業体）であり、この群れが社会の中で自律的に持続していくようになれば、新しい社会基盤となっていくと考えられる。

さらに、この群れに複数の種類の分散電源を組み合わせて、高度に制御していくことで、地域内でのエネルギー自給自足も可能となってくる。微生物の中には、水と二酸化炭素だけ生きていける独立栄養微生物がいる（図 1）。これと同じ発想で、地域の中で、太陽パネルとその余剰電力から水素製造する装置、そして水素から電力を発電する燃料電池を、地域の中でネットワーク化し、マネジメントすることで、エネルギーを自給できるグループ（群れ）がつくれると考えられる。イメージを図 1 に示す。この群れは、外部から太陽光と水が与えられれば持続可能である。

今後は、このような分散エネルギーシステムの群れが、自己創発的に形成される条件を明確にしていくことが必要である。設備の中で、全体を統括するリーダーがいれば、「群れ」をつくることは容易であるが、固定されたリーダーは、必ずしも外的な環境変動に強いとは限らない。局所的な相互作用のみから、群れが形成される現象も自然界には多く存在する。

本研究では、このようなエネルギー設備の「群れ」の形成をシミュレーションすることを目的とする。複数の設備が「群れ」を形成するプロセスを、チューリングパターンなどの自己組織化現象を応用することで可能となることを、セルオートマトンモデルを利用して示すものである。

一般に電力系統上では、遠く離れた場所での電力融通が可能であるが、途中に多くの変圧装置を介した電力融通は、電力損失が大きくなる可能性があり、電力の融通は、物理的距離が

連絡先：石田武志　ishida06@ecoinfo.jp

近いほうがよいと考えられる。さらに、燃料電池の排熱の融通なども考慮する場合は、隣接施設であることが条件となる。このように、分散電源設備においても、物理的な距離による「群れ」の考え方は有効である。

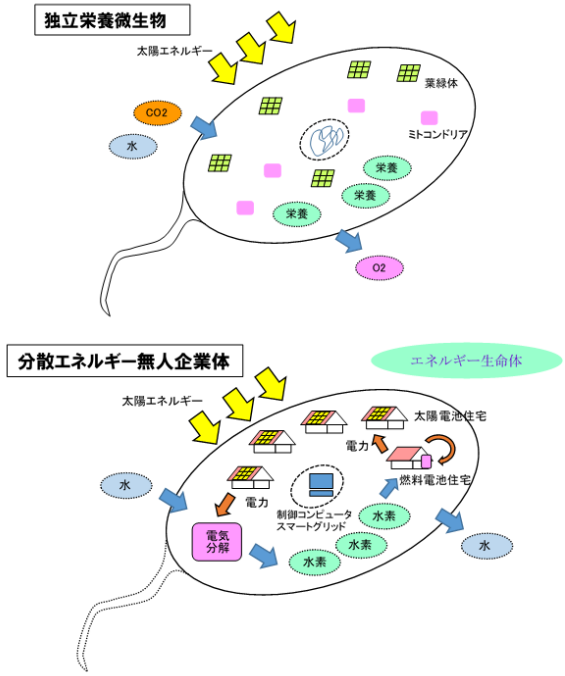


図 1　独立栄養微生物のように、太陽エネルギーを吸収して、電気エネルギーを生み出す分散エネルギーの無人ネットワーク「エネルギー生命体」

2.　モデル

2.1　モデル空間

セルオートマトンモデルの計算空間の概要を以下に示す。ここでは小規模な都市街区を想定し、その都市街区は、戸建住宅が並ぶ新興住宅地や再開発住宅地だと仮定する。街区のイメージを図 2 に示す 6 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。縦横 80 セルの空間を考え、合計 1600(＝80×80)戸の住宅が存在する空間を考えるとする。これは実際の都市街区をかなり抽象化してものであり、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。

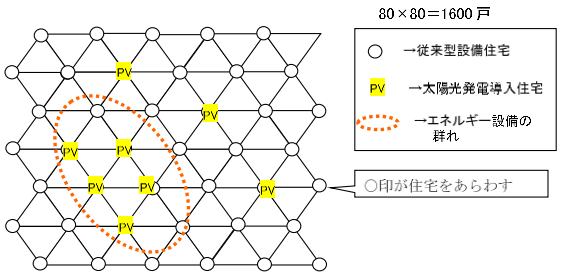


図2　　住宅地の都市街区をモデル化した計算格子

導入される設備は、太陽光発電とした。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太陽光発電設備（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仮想通貨の保有量と、設備の使用年数を情報として保持している。空間に存在するのは、太陽光発電を導入した住宅と、導入をしていない従来型の住宅の2種類である。

太陽光発電は電力が余剰のときもあれば、不足のときも生じる。電力が余剰のときは、市場に売るよりも電力を消費する近接の従来型住宅に供給するようにする。

2.2　電力市場の設定

電力の自由市場を想定した。この場合、電力を電力会社から買う価格より、余剰電力を電力会社に売る価格が低くなるのが一般的である。このような中では、隣接設備に独自に売ったほうが、託送料を含めても安く売れる可能性がある。

例えば、買ってくる電力価格が 20 円／kWh、市場が買い取ってくれる価格が 15 円／kWh と仮定する。電力が余った場合、設備が単独であれば、市場に売るしかないが、近隣の発電設備と直接売買できるのであれば、電力が不足している近くの電力設備に 19 円／kWh で売ることが可能となる。このとき、送電系統を利用するので、送電系統の管理会社に託送料を 1 円/kWh 支払っても、市場に売るよりも3円多い儲けになる。買うほうも市場の購入価格よりも1円安く購入することができる。

このように、近隣設備同士でうまく需給がバランスできれば、どちらも得をする形になる。そして個別取引を積み重ねることで、エージェントには、仮想通貨が蓄積されていくと仮定した。

また、このような活動は設備単独でも利益を蓄積することが可能であるが、ある程度、近隣の設備同士で「組合」のようなグループを構成し、グループ内部で需給を調整し、余剰分を蓄積して、市場価格の変動に合わせて売っていくほうがより安定した利益が期待できる。新たな設備投資も可能になる。

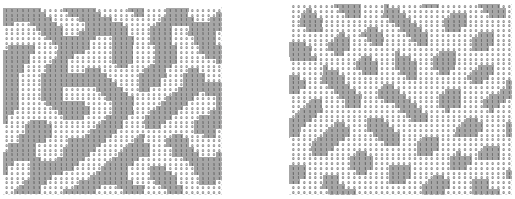
これらを単純化して、本モデルでは 1 タイムステップごとに、各エージェントには、仮想通貨が 1 ずつ蓄積されるとした。そして、蓄積通貨が 5 を超えると、下記の設備の増加アルゴリズムに従って太陽発電設備を増設していくとした。

2.3　群れの形成アルゴリズム

設備の群れ形成においては、生物の生体模様の形成で有名な Turing モデル[Turing 1952]をセルオートマトンモデルに離散化した Young モデル[Young 1984]を使用した。チューリングモデルは、活性因子と抑制因子の相互作用により、生体に見られる斑点模様や縞模様などの様々なパターン形成が可能であることを示したモデルである。図3は Young のモデルにより、チューリングパターンを計算したものである。

このモデルは、状態 0 と 1 の 2 状態の正方セル空間を考えている。あるセルを考えたときに、その周囲 2 セル以内の領域を「内近傍」、4 セル以内の領域を「外近傍」とする。時刻tでの中心セルの状態を状態量 $S_{t,0}$、その近傍セルの状態を状態量 $S_{t,i}$ (i＝1,・・・)と記号で表す。このとき, 内近傍の状態 1 のセル数の合計を $S_{t,c1}$、外近傍の状態 1 のセル数の合計を $S_{t,c2}$ とする。次の時間の中心セルの状態量は、任意のパラメータ w を用いて次式により更新される。パラメータ w の変化により縞模様や斑点模様が創発され、図3のように w が 0.4 程度になると斑点模様が出現し、0.3～0.4 程度で縞模様が出現する。このようにモデル中のパラメータの変化により縞模様や斑点模様が創発される。

$$S_{t+1,0} = \begin{cases} 1 & (S_{t,S1} > \mathrm{w} \cdot S_{t,S2}) \\ 0 & (S_{t,S1} < \mathrm{w} \cdot S_{t,S2}) \\ unchange\ (otherwise) \end{cases}$$



（w＝0.35）　（w＝0.45）

図3　Youngモデルによりチューリングパターンの例

筆者らは Young モデルを 6 角格子に適用し、中心セルの周囲 4 メッシュ以内の領域を「内近傍」, 8 メッシュ以内の領域を「外近傍」とした。w＝0.397 で固定し、斑点模様が形成する条件で計算した。この計算により、設備の群れを形成するためのポテンシャル領域を計算した。状態1のセルをポテンシャル領域と想定し、この領域が斑点状に空間に分布するパターンを創発させた。

2.4 設備の増加アルゴリズム

エージェントは、タイムステップごとに仮想通貨を蓄積し、設備のポテンシャル領域に存在するエージェントであれば、隣接するポテンシャル領域に設備を増設することができる。タイムステップごとに通貨が1ずつ各エージェントに蓄積され、仮想通貨量が5を超えた場合、設備を増設できるとした。また、隣接セルに増設の余裕が無い場合は、離れたポテンシャル領域をランダムに選び、設備を増やすことができるとした。

また、各エージェントは、タイムステップが 20 を超えると老朽化のため、消滅すると仮定した。

2.5 初期値と計算の流れ

計算空間の中央に太陽光発電のエージェントを3つ配置し、その同じセルをポテンシャル領域の初期値とした。計算は、各タイムステップごとに、まずポテンシャル領域を Young モデルに基づき計算し、次にエージェントの増殖アルゴリズムを適用した。最後にタイムステップが 20 を超えるエージェントを消滅させ（ポテンシャル領域も状態 0 に戻す）、残ったエージェントは経過年数と保有通貨をそれぞれ1ずつ増加させる。

3. 結果・考察

図 4 にタイムステップ 20 ごとの計算結果を示す。図中の黄色い○が太陽発電設備のエージェントであり、赤い○が設備のポテンシャル領域を示している。その他の青い部分は、従来設備を表している。

タイムステップ 40 までを見ると、時間を経るごとに赤いポテンシャル領域に、黄色の太陽光設備が増殖していくことがわかる。さらに60ステップ以降では、ポテンシャル領域が2つに分裂していく様子が見られる。一般に Young モデルを単独で計算した場合、今回のような初期値が1か所のみの分布の場合、斑点模様が自己増殖していく過程は観察されない。しかし、本モデルは、設備が消滅すると同時に、ポテンシャル値も0に戻すというゆらぎを与えているため、その刺激により、ポテンシャル領域が増殖していく。タイムステップが 300 程度になると、空間全体に太陽光発電のクラスターが形成されることが観察された。

4. まとめ

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、分散協調システムを構築することができると考えられる。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「群れの形成アルゴリズム」と「設備の増加アルゴリズム」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。これらは、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、エネルギー設備の群れ（グループ）が自己組織的に形成されてくと考えられる。本報告のモデルは、メッシュ空間での計算であったが、今後は実際の地図上の設備配電系統を踏まえて、送電系統上の相対距離を考えていくことが必要である。

このように、設備が群れを形成しグループを組むことで、個々の設備の故障時でも、他の設備が補完して、損失を最小限に抑えることが可能となるとともに、利益をまとめて次の設備投資に回すことができ、設備の規模拡大や高効率化をすばやく進めることができると考えられる。グループを組むことで、経済的にも設備管理上でも有利になり、有利になったグループはさらに、グループの規模を拡大することが可能となる。しかし、あまり規模を大きくすると内部のマネジメントが複雑になり、マネジメントを階層化するなどの必要性が生じ、トップのマネジメント機能などが必要になってくる。また、グループが大き過ぎると、外部の経済環境が変わると、変化に追従できずに、経営が破たんする可能性もある。一方で、グループの規模が小さければ、比較的単純な判断で、取引と設備拡充をすることができるので、現在の IoT 技術や、人工知能技術、仮想通貨技術でも実現可能となると考えられる。

最終的には、一つのグループを大きくして、市場の独占を目指すのではなく、同じような小規模のグループをたくさんつくり、共存していく形が望ましいと考えられる。

またこのように生物学の群れ（グループ）形成、さらには生態系の恒常性維持機能などの生物の持つ高度な機能を、エネルギーネットワーク（スマートグリッド）に導入することで、新たな社会技術のフロンティア開拓につながり、複雑な社会システムの構築・維持技術の確立につながっていくと考えられる。

参考文献

[Turing 1952] Turing A M.: The chemical basis of morphogenesis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* **237:** 37–72 (1952).

[Young 1984] Young D A A.: local activator-inhibitor model of vertebrate skin patterns. Math. Biosci. 72: 51–58 (1984).

[石田 2016] 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 Kimdle 電子出版　2016 年 3 月 15 日刊行

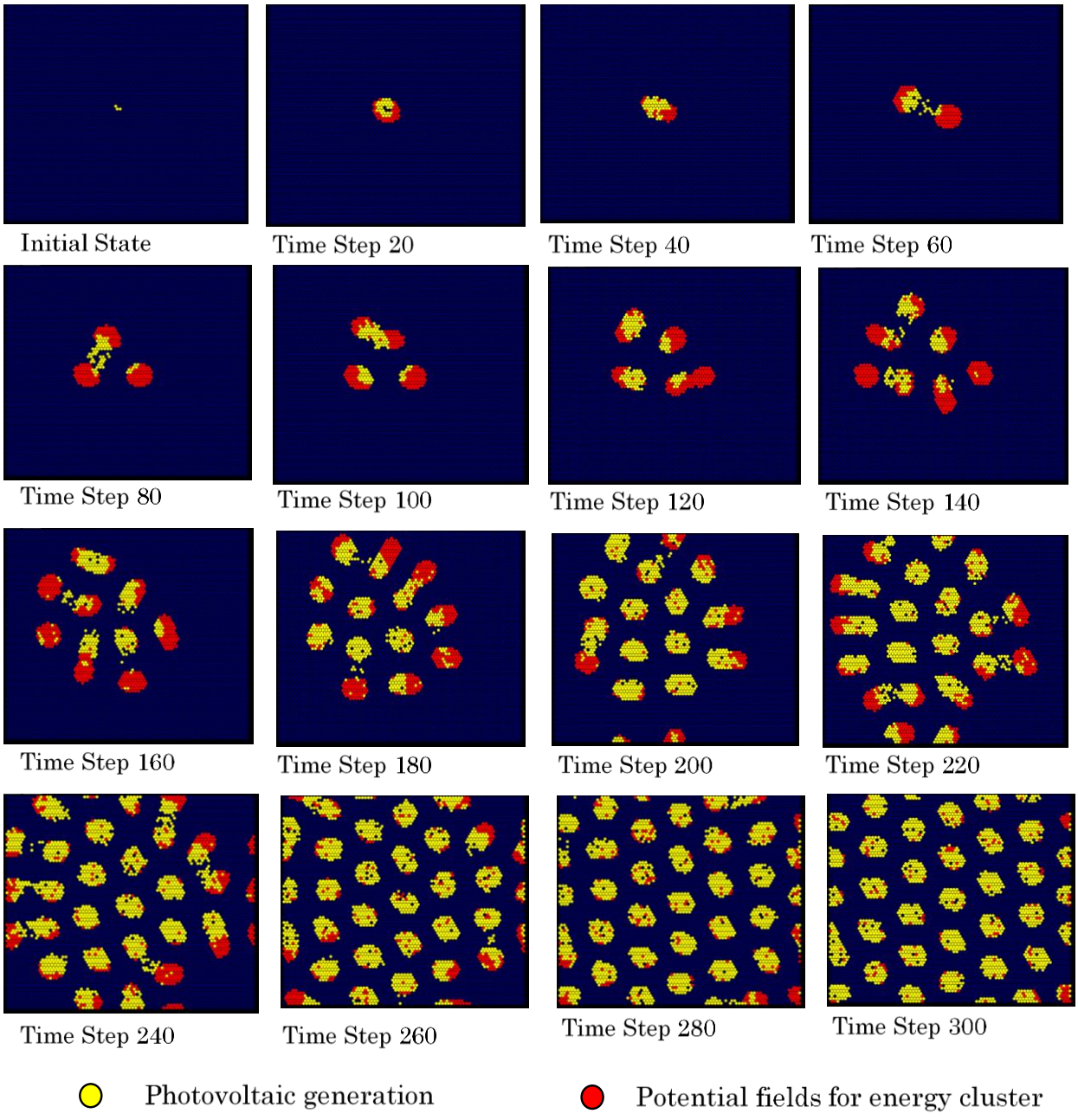

Initial State
Time Step 20
Time Step 40
Time Step 60
Time Step 80
Time Step 100
Time Step 120
Time Step 140
Time Step 160
Time Step 180
Time Step 200
Time Step 220
Time Step 240
Time Step 260
Time Step 280
Time Step 300
Photovoltaic generation
Potential fields for energy cluster

図 4　計算結果