

機関番号：32407

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560784

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Study on distributed artificial intelligence to implement in the dispersion energy networks

研究代表者

石田 武志（ISHIDA TAKESHI）

日本工業大学・工学部・講師

研究者番号：50438818

研究成果の概要（和文）：本研究はマイクログリッド等の分散エネルギーシステムが、電力・熱配管網及び情報ネットワーク網で相互に接続され、隣接エネルギーシステム間での協調運転、エネルギー融通されることにより、常に最適なエネルギーネットワークが自律的に形成・維持されていくために必要な、分散エネルギーシステムに装備すべき「分散知能（複数のエージェントの相互作用により知的処理を行う人工知能の一種）」の構築を目指したものである。

研究成果の概要（英文）：We aimed at the construction of “the distributed intelligence” (kind of artificial intelligence taking an intellectual step by the interaction of multi agents) to equip dispersion energy systems (such as microgrid). It is necessary to maintain the energy network formation autonomously with by dispersion energy systems which were connected to electricity, heat grid and information network mutually and operating the cooperation driving between the adjacency energy systems.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：環境・エネルギー分野のシミュレーション

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：分散エネルギー、太陽光発電、コージェネレーションシステム、マルチエージェント、マイクログリッド、スマートグリッド

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 分散エネルギーネットワークの研究動向  
近年分散エネルギーのネットワーク化などにより、電力品質の向上及び省エネルギーを両立させる試みが各所で検討・実施され、一部で実証試験なども始められている。一般に自然エネルギーは出力が安定しない等、電力系統側に影響を与えるという課題を抱えるため、大規模な導入が困難であると考えられている。この課題を克服するために、分散

エネルギー間で電力や熱の融通を行い、変動電源である自然エネルギーと、その他の新エネルギーを適切に組み合わせることにより、需要地域内で安定した電力・熱供給を行うことが可能となると期待されている。

一方で、これらの分散電源のネットワーク化の構築時における課題としては、①電力の安定化に必要な新エネルギーの組み合わせ条件の明確化、②電力・熱を有効に利用し省エネルギーを実現する運転条件の明確化、③

最適な需要用途構成の条件の明確化などがあげられる。このように、単に分散エネルギーシステムを相互に接続しただけでは、最適なエネルギー効率が達成できるとは限らない。建物の建替え、入居者の交替など、常に変化していく都市街区の中で、各分散エネルギーシステムが、環境負荷低減のために、それぞれの街区で求められている条件と制約を的確に把握し、各分散エネルギーがうまく協調運転され、最適な電力・熱ネットワークが構成されることが不可欠である。

## (2) 研究代表らによる分散エネルギーネットワークの既往研究

研究代表者らは、分散エネルギーネットワークの最適導入手法の検討の第一段階として、各需要家に設置された分散電源（コージェネレーションシステム及び太陽電池）を隣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変動を吸収しつつ、省エネルギーが実現できる可能性を、最適化手法に基づく基礎的モデルにより検討した。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すことができた。しかしこれらの研究において最適化を行った結果は、分散エネルギーネットワークの構成パターンの一例についてであり、分散エネルギーの組み合わせは様々な種類、構成方法が考えられる。このため、大小様々な分散エネルギーのネットワークに関して、エネルギー源の選択方法、連携方法などを体系的に明確にし、実在街区での最適ネットワークの実現方策を考えていくことが課題として残されていた。

## 2. 研究の目的

様々な構成が考えられる分散エネルギーネットワークにおいて、都市街区の形態・規模・構成要素に適した最適な分散エネルギーネットワークの構成や運用条件を導出するための手法を明確にしていくことを目的とする。具体的には、住宅のエネルギー設備がランダムに更新されていく街区空間において、各需要家（住宅）をエージェントとみたてたマルチエージェントシステムによるシミュレーションモデルを構築したものである。マルチエージェントシステムにより、各エージェントが、設備更新時に簡単なルールに従うことにより、街区空間に以下の機能が創出されることを示したものである。

(1) 分散エネルギー（太陽光発電（PV）、燃料電池コージェネレーション（CGS）などの設備の導入判断において、簡単な導入ルールの設定で、PV の余剰電力が吸収され街区内で出力変動を抑制することができる需要家の組合せの配置が創発される。

(2) 分散エネルギー設備の空間配置にマクロな形状が創発され、複数の分散エネルギー源を構成要素とする「エネルギーコロニー」が自己組織的に形成される。

(3) コロニーが形成されたときに、ロバスト性も獲得されている。ここでのロバスト性は、PV 出力がほとんど無い雨天時などの場合、街区内で CGS により電力の補填が可能かどうかの視点で評価する。

## 3. 研究の方法

図1に示すようなエネルギーコロニーが都市街区に形成されるような、エネルギー設備配置シミュレーションモデルを、マルチエージェントシステムを用いて構築した。

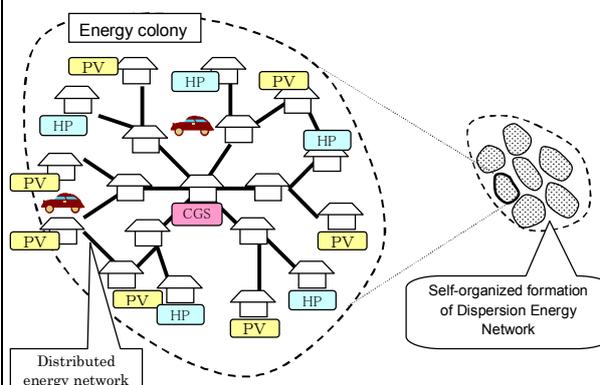


図1 エネルギーコロニーの概要

### (1) シミュレーションモデルの空間

現実の都市街区の建物配置は、基礎モデル構築のためには複雑すぎるため、三角形のメッシュ空間を街区とみたてた。

### (2) 構成要素

各メッシュに配置される戸建住宅は属性として、エネルギー設備の種類と、設備の使用年数を保持している。エネルギー設備の種類は以下の4種類とした。図2に3角形メッシュによる都市街区モデルの概要を示す。

- ①従来型住宅（電力購入＋ヒートポンプエアコン＋ガス給湯器）
- ②PV 導入住宅（PV 発電（一部電力購入）＋ヒートポンプエアコン＋ガス給湯器）
- ③HP 導入住宅（電力購入＋ヒートポンプエアコン＋ヒートポンプ給湯器）
- ④CGS 導入住宅（CGS 発電＋ヒートポンプエアコン＋一部ガス給湯器）

各住宅は設備寿命を10年として、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。住宅種類の初期値として、メッシュ上の全ての住宅が②のPV導入住宅の状態とした。これは、各種施策やコスト低下によりPVが大量導入された後の最適エネル

ギーネットワークの姿を検討するためである。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。

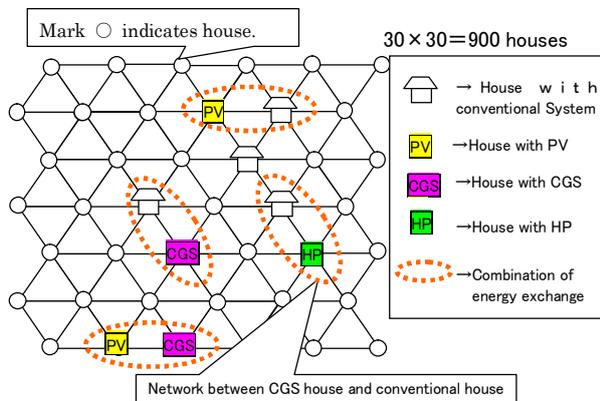


図2. 三角メッシュによる都市エネルギーモデル

### (3) エネルギー融通のモデル化

近接建物間でエネルギーネットワークを構成し、エネルギー融通を行う場合、最適なネットワークの組み合わせは、各住宅のエネルギー負荷や設備容量及びエネルギーの過不足量などで決まり、さらに1日の時間帯や季節で大きく変動する。街区空間のどの範囲までエネルギー融通の範囲とするかにより選択肢も大きく変動する。これら全てを考慮すると、モデルが複雑になるため、最初の基礎モデルとしては以下のように設定した。

- ①各住宅のエネルギー負荷や設備容量は考えずに、設備の種類同士の組み合わせのみを考慮した。例えば、PV住宅に隣接する従来型住宅があれば、PVの余剰電力を隣接の従来型住宅が吸収できるとみなし、メッシュ空間上にPV住宅と従来型住宅が隣接する配置が存在すれば、エネルギー融通が過不足なく成立するとした(図2参照)。PV住宅に対する隣接従来型住宅の数のみパラメータとした(例えばPV住宅一つに対し隣接する従来型住宅が2戸あれば、エネルギーが過不足なく使いきれ組み合わせとするなど)。
- ②各設備は、隣接メッシュの住宅とのエネルギー融通が可能とした。すなわちPV住宅は隣接する8方向に余剰電力の供給が可能とし、従来型住宅やHP住宅は隣接する8方向から電力や熱の融通を受けることを可能とする。
- ③CGSに関しては、容量を大きくすることにより、数メッシュ離れた空間にも電力や熱を供給することができるとした。CGSのみ電力や熱を供給できる範囲をポテンシャル値であらわし、ポテンシャル値PはCGSを中心として正規分布に従うとした。

### (4) マルチエージェントモデル

各メッシュ上に存在する戸建住宅をエー

ジェントとみなし、各エージェント(住宅)は、設備寿命を迎えると周囲のエージェントの設備の状態を踏まえて、自身の設備を更新するとした。本来、住宅のエネルギー負荷や隣接住宅の設備種類や容量を考え、エネルギー量の過不足状態から最適な設備の種類・容量を決定することが必要であるが、本モデルでは、エネルギー負荷や容量を考慮せず、隣接の設備種類の状況や数で、自身の住宅の設備容量を決定するエージェントの判断ルールを設定した。実際の住宅設備の更新においても、隣接住宅の詳細な設備容量や負荷状況などは一般に不明であり、設備種類などがわかるのみであり、隣接設備の種類で判断することも妥当であると考えられる。一方で、スマートグリッドの進展により、隣接住宅の設備の情報がより詳細に把握できる環境となった場合のエージェントルールの検討は今後の課題と考えられる。

### (5) エージェントのルール設定

各メッシュのエージェント(住宅)の設備更新ルールは、CGSによる電力と熱のポテンシャル値と、隣接メッシュの住宅の設備種類によって、設備の種類が決定されるとした。CGSのポテンシャル場は、ポテンシャル場を10段階のレベルに分割した。電力と熱のポテンシャル値をそれぞれ2つに区分することにより、図3に示すように、電力と熱のポテンシャル値の大小の組み合わせで、4つの領域(I~IV)に区分できる。そして、それぞれの領域において適用される設備更新ルールを設定した。表1に設備更新ルールを示す。現状では、これらの設備更新ルールの整備方法が、一般論化できていないため、一定の法則に従って自動的にルールを導出する手法などはみつからない。このため、目的の現象の再現を目指して、判断ルールの設定と動作の確認をしながら揃えていく方法をとった。

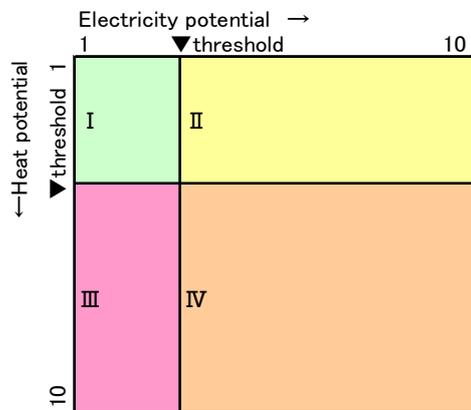


図3. 電力及び熱のポテンシャル場の分類

表 1. 設備更新のための標準ルール

	Number of facility of adjacent mesh	Renewal facility	Classification of potential fields	Explanation of rule
1	CGS=0 & HP=0 & PV=0	CGS	I	If electricity / heat potential are low level and if adjacent mesh are only conventional facility, CGS is introduced.
2	CGS=0 & HP=indefiniteness & PV=indefiniteness	HP	II	If heat potential are low level and if adjacent mesh are not CGS, HP is introduced.
3	CGS=0 & HP=0 & PV ≥ 4	HP	I	If electricity / heat potential are low level, if adjacent mesh are not CGS, HP and if PV are more than 4, HP is introduced.
4	CGS=0 & HP ≥ 2 & PV=indefiniteness	PV	I III	If electricity potential is low level, if adjacent mesh are not CGS and if HP are more than 2, PV is introduced.
5	Conventional facility ≥ 1 & Conventional facility ≤ 3	PV	I II III IV	If adjacent mesh are 1-3 conventional facility, PV is introduced.
6	CGS=indefiniteness & HP=indefiniteness & PV=indefiniteness	Conventional facility	IV	If electricity / heat potential are high level, conventional facility is introduced.
7	CGS=0 & HP=0 & PV ≥ 2	Conventional facility	I III	If electricity potential is low level, if adjacent mesh are not CGS, HP and if PV are more than 2, conventional facility is introduced.

(6) 評価指標の検討

対象領域全体でエネルギーネットワークによるエネルギー融通がどの程度実施されているかの評価指標を以下のように2つ定めた。これにより、前述の7つの設備導入ルールに従うことで、領域全体として、どの程度のエネルギー融通が実現できているかがわかる。

①評価指標（晴天時）：以下の条件が成立している設備の合計数

1) CGSの周囲3メッシュ内にかつ、電力・熱ポテンシャルが閾値以上の領域にある従来設備。

2) CGSの周囲3メッシュ内にかつ、電力ポテンシャルが閾値以上、熱ポテンシャルが閾値以下の領域にあるHP設備。

3) 1)以外でPVと隣接している従来設備

さらに、雨天時などのPV発電出力が低下した場合においても、領域内でCGSの出力を上げ電力・熱の供給範囲を広げることにより、PV出力の低下を補填し、外部に出力変動を生じさせない配置がなされることが望ましい。このような雨天時の評価指標を以下のように定めた。

②評価指標（雨天時）：以下の条件が成立している設備の合計数

1) CGSの周囲6メッシュ内にある従来設備、PV、HP。

4. 研究成果

(1) 標準設定による結果

3. で示したモデルの標準設定による設備配置シミュレーションを実施した。計算条件をまとめると以下の通りである。

計算条件（標準条件）

○住宅設備の状態

・各住宅は属性として、以下の4つの設備パターンを持つ。

- ①従来型設備      ②PV設備
- ③CGS設備        ④HP設備

○初期状態

- ・住宅数（エージェント数）：30×30=900戸
- ・初期設備：全てPV設備
- ・経過年数：エージェント毎に初期値1～10年をランダムに設定。
- ・終了条件：100年（100ステップ）経過時の配置を評価

○パラメータ

- ・電力ポテンシャル計算時のパラメータ  $f=0.04$
- ・熱ポテンシャル計算時のパラメータ  $f=0.07$
- ・電力ポテンシャル閾値 = 2
- ・熱ポテンシャル閾値 = 2

○エージェント判断ルール

・表1に示す判断ルールを適用。

図4に100ステップ目（1ステップ=1年として100年目）の住宅設備の分布状況を示す。図中の各丸印の色の分布で設備の種類を示し、丸印の線の色は、評価指標（晴天時）の条件に該当している設備を赤線、該当しないものを緑線で示している。設備分布は、CGS（図中の赤丸）の周囲に従来型設備（黒丸）が分布し、その周囲にPV（黄丸）、HP（緑丸）が分布していることがわかる。標準条件による設備導入ルールを適用すると、CGSと従来設備のコロニーが形成され、その周囲にPVとHP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。

図5に100ステップまでの設備数及び評価

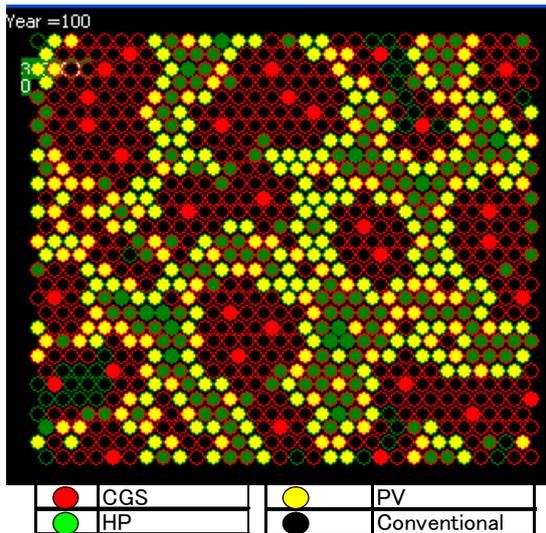


図4. 標準ルールによる設備分布(100ステップ目)

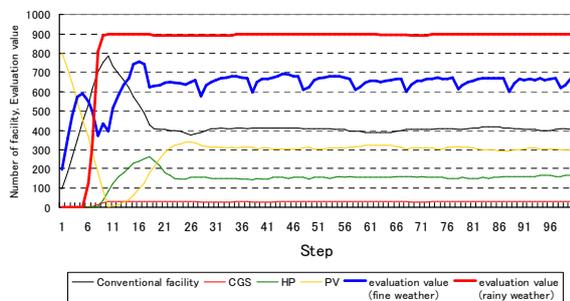


図5. 標準ルールによる設備分布の推移

指標の推移を示す。各設備数は、30ステップ程度までは大きく変動しているが、それ以降ではほぼ一定の構成比で推移していくことがわかる。これより設備更新期間を10年とした場合、およそ30年で図4に示すようなコロニー形成が可能であることがわかる。通常の設定更新は15~20年程度であることから、コロニー形成には長い期間が必要であるが、ある程度、コロニーの形が判明している場合、政策的にコロニーの形になるような誘導をすることにより、早期にコロニーを形成することが可能であると考えられる。

また、評価指標を見ると、設備構成比が落ち着いた30ステップ目以降では、評価指標(晴天時)が600~700、評価指標(雨天時)が900程度で推移していることがわかる。これより晴天時は、住宅900戸のうちおよそ600~700戸程度が隣接住宅とのエネルギー融通が実現できていることがわかる。評価指標(晴天時)が10ステップ毎に振動しているのは、CGS設備の導入の際、電力・熱ポテンシャルが1ステップだけ消滅するように設定しているため、評価値も変動している。

評価指標(雨天時)はほぼ全ての住宅がCGSによるエネルギー供給を受けられることがわかる。これは、図4からもわかるようにCGS

を中心したコロニーがほぼ一定の間隔で分布していることにより可能となっている。

本研究により、エネルギーシステムの簡単な相互作用により、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コロニー群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すことができた。このように生物学の共生関係や群れ(コロニー)形成、さらには生態系の恒常性維持機能などの生物の高度な機能を、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、高度な社会システム構築・維持技術の確立につながっていくと考えられる。

今後は、隣接するコロニー群が連携することにより、新たな高次機能(コロニー間の役割分担、コロニーの増殖機能、ネットワークのロバスト性・恒常性の獲得、資源循環の誘発機能)が創発されることを明らかにしていく方向が考えられる。

さらに将来の研究展望をまとめると以下のようなになる。

- ① エネルギーコロニーのプロトタイプ製作；基礎モデルにより示されたエネルギーコロニーが、実際の太陽光パネル群で形成されるかを、小型の太陽電池システムを複数連携することにより確認する。
- ② ハイブリッドエネルギーネットワークの可能性の検討；人工光合成など今後大きな進展が期待される技術と、分散エネルギーネットワークのハイブリッドネットワークモデルを考案する。エネルギーコロニーがCO2吸収や物質循環の起点になることを目指す。
- ③ 気候・生態系恒常性工学の可能性のまとめ；人工光合成や資源循環の機能を有するエネルギーコロニーが地球上に張り巡らされることで、地球の気候や生態系を能動的な制御の可能性を検討し、新たな環境・エネルギー工学分野の展開を検討する。さらに、IBMの提唱する「Smart Planet」や、米ヒューレット・パッカードが進める「世界神経網プロジェクト」との関係を考える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計8件)

- ① 池田真久, 石田武志, スマートグリッドにおける燃料電池CGSによる電力需給調整機能の検討, エネルギー・資源学会 第27回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, p105-108, (2011年1月25日-26日, 東京)
- ② Takeshi Ishida, Supply-Demand Energy Adjustment by Fuel Cells of Smart Grid,

RENEWABLE ENERGY 2010 27 June-2 July,  
Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan  
(CD-ROM, P-Ps-6)

③石田武志, 遺伝的アルゴリズムによる分散エネルギーネットワークの最適構成の導出, エネルギー・資源学会 第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文要旨集, p69, (2010年1月26日-27日, 東京)

④Takeshi Ishida, Evaluated Model of the Distributed Energy Network System of an Urban District, International Conference on Power Engineering (ICOPE-09), Proceedings of the ICOPE-09 vol.2, pp377-382, November 17-18, 2009, Kobe, Japan

⑤石田武志, 古谷恭一, 分散エネルギーネットワークにおける電力及び熱融通による一次エネルギー削減効果, 電気学会B部門大会 (CD-ROM) (2009年8月18-19日, 芝浦工業大学)

⑥石田武志, 遺伝的アルゴリズムによる最適な都市エネルギーネットワークの探索, エネルギー・資源学会 第25回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, p81-84(2009年1月29-30日, 東京)

⑦Takeshi Ishida, Shunsuke Mori, Integrated Assessment Model for Urban Energy Network System, 22nd EnviroInfo 2008 (Environmental Informatics and Industrial Ecology) September 10-12, 2008, Leuphana University of Lüneburg, Germany (CD-ROM)

⑧石田武志, 田口和正, 野原寛之, 気候特性や経済性を考慮した住宅における最適エネルギーシステムの評価, 第17回日本エネルギー学会大会講演要旨集, p278-279(平成20年8月4日~8月5日, 工学院大学)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 武志 (ISHIDA TAKESHI)  
日本工業大学・工学部・講師  
研究者番号: 50438818

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし