マルチエージェント技術の電力システムへの適用研究事例

正員 永田 武*

Applications of Multi-Agent Technology to Power Systems

Takeshi Nagata*, Member

Currently, agents are focus of intense on many sub-fields of computer science and artificial intelligence. Agents are being used in an increasingly wide variety of applications. Many important computing applications such as planning, process control, communication networks and concurrent systems will benefit from using multi-agent system approach. A multi-agent system is a structure given by an environment together with a set of artificial agents capable to act on this environment. Multi-agent models are oriented towards interactions, collaborative phenomena, and autonomy. This article presents the applications of multi-agent technology to the power systems.

キーワード：マルチエージェント技術，電力系統，自律システム，分散システム，エージェントシミュレーション

Keywords: multi-agent technology, power system, autonomous system, decentralized system, agent simulation

1. まえがき

エージェント (agent) とは，分散人工知能の構成要素を表す用語として用いられていたものである。分散人工知能の起源は，1980 年代にまでさかのぼり，当時はネットワークにより結合された分散計算機システムを用いて，人工知能的な方法によりいかに効率的な仕事ができるかということに主眼が置かれていた。当時わが国の電力システムでは，電力自動化システムの開発が精力的に実施されていた時期であり，地域的に分散した計算機間を電力会社の専用回線により結合し，業務の効率化と電力供給の信頼度化のための電力設備自動化が図られていたが，エージェントという用語が使われることはなかった。

その後，1988 年に発刊された分散人工知能の代表的論文集⁽¹⁾によると，分散人工知能の研究領域は大きく分けて，①分散問題解決（一つの問題を副問題に分割して効率的に解く），②マルチエージェントシステム（概念的，地理的に分散している計算要素であるエージェントが協調しながら問題解決を図る）になることが示されている。そして，1995 年には，第 1 回マルチエージェント国際会議が米国において開催され，この分野の研究が加速されることになった。同年に出版された「エージェント指向コンピューティング」⁽²⁾は，著者の知る限りわが国では初めてのエージェントに関する成書であり，一読をお薦めしたい本の一つで

ある。1990 年代はよく知られているように，オブジェクト指向がソフトウェアの共通技術として普及し定着した時代であり，電力システム分野でも全面的に導入された。

そして，1990 年代の後半からオブジェクト指向の自然な発展形として，本稿で扱うエージェント指向パラダイムが台頭してきた。これは，インターネットやイントラネットの爆発的な普及によりネットワークコンピューティングのソフトウェア技術の重要性が高まったこと，および情報処理技術に対する要求がより一層高度化したことに起因していると考えられる。

一方，電力システムの分野では電力自由化が進展中である。これまで，電力システムの複雑さは，その大規模化に従って増加してきたが，最近では規模だけにとどまらず，電力自由化によってこれまでとは異質な要素がシステムに組み込まれることが，その大きな要因としてクローズアップされている。このような状況の中で，電力システムの分野でも，複数のエージェントから構成されるマルチエージェント技術についての期待が高まっているといえる。

電気学会電力・エネルギー論文誌にエージェントという用語が初めて表れたのが，1998 年の「エージェントモデルによる協調動作型保護システムのコンセプト」という論文⁽³⁾である。また，IEEE Transaction on Power Systems でも，同じ 1998 年に“Intelligent Agent for Negotiation in Market Games Part 1/Part 2”という論文⁽⁴⁾⁽⁵⁾で“agent”という用語が初めて使用された。その後，電力システムの事故復旧，平常時操作，補修計画，発電機起動停止，電力市場シミュレーションなどマルチエージェント技術の適用研究の範囲が拡大している^{(6)~(15)}。また，海外でもマルチエージェント

* 広島工業大学
〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1
Hiroshima Institute of Technology
2-1-1, Miyake, Saeki-ku, Hiroshima 731-5193

の電力システムへの適用研究も盛んになり、2003年には“Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control Operation”⁽¹⁶⁾という300頁余りの成書が発刊されている。本書の著者は、米国、英国、カナダ、ドイツ、ブラジル、スイス、日本である。世界各国で行われている研究がまとめられており、この分野の研究に興味のある方には一読をお薦めする。さらに、2003年のIEEE General Meetingより、“Multi-agent System in Power Engineering”というパネルセッションが継続して企画されており、この分野に関する関心が高まっていることがうかがえる。

本稿では、まずマルチエージェント技術を概観し、次に電力システムへの適用研究事例を紹介する。

2. マルチエージェントシステムの概要

まず、マルチエージェント技術の電力システムへの応用を説明する前に、マルチエージェントシステムとはどんなものかについて説明する。

2.1 エージェント 1995年にS. RussellとP. Norvigにより発刊された人工知能全般について記述された1千頁を超える大書“Artificial Intelligence”⁽¹⁷⁾では、「エージェントは、ある環境を知覚器(sensor)で知覚し、ある環境に効果器(effector)を通して行動(action)するものである」と述べてられている。図1はその様子を示している。これを人間に当てはめてみると、目や耳やその他の器官から情報を知覚し、それを脳で処理し、手、足、口やその他の部分で行動するということになる。この中で、特に脳に対応する人工的な知的メカニズム(intelligent mechanism)をいかに設計し実装するかがエージェント技術のポイントであるといえる。

さて、エージェントを設計する際に重要となる知的メカニズムについて、S. Russellらはこの大書の中で以下の4つに分類している。

(1) 単純反射エージェント 例えば、前の車が減速してブレーキランプが点いたら、運転者はこれに気づき、ブレーキを踏む。これは、画像入力から「前の車が減速した」という状態を得るように処理がなされて、エージェントプログラムに「ブレーキを踏み始めさせる」ようにしたのである。このような関係を、「条件-動作ルール」と呼び以下のように記述する。

If car-in-front-is-breaking then initiate-braking

このように反射的なルールのみ備えたエージェントが「単

純射的エージェント」である。

(2) 内部状態を持つ反射エージェント 上記のエージェントは、現在の知覚に基づいて正しい決定ができる場合にのみ上手くいく。しかし、仕様の異なるテールランプやブレーキランプを搭載した車の場合、必ずしも点灯しているランプの画像入力から、前の車のブレーキが踏まれていると認識はできない。したがって、ブレーキを踏むという単純なルールで済ませ、エージェントはルールを選ぶためにある種の内部状態を持たなければならない(この場合は、前の車の赤いライトの点灯有無の内部状態を保持)。このように単純反射エージェントに内部状態を追加したエージェントが、「内部状態を持つ反射エージェント」である。

(3) ゴール主導エージェント 環境の状態を知っているだけでは意思決定を行うには不十分である。例えば、タクシーは交差点で、左折、右折、直進ができるが、どこにタクシーが向かおうとしているのかにより適切な行動が決定される。すなわち、エージェントには前述の内部状態と同様にゴールに関する情報が必要である。このように、内部状態を持つ反射エージェントにゴールを組み込んだエージェントが、「ゴール主導エージェント」である。

(4) 効用主導エージェント ゴールのみでは高品質の行動を決定できない。例えば、タクシーが目的地まで行くのには多くのルートが存在するが、いかに早く、安全に、安い費用で到着できるかという性能尺度を考えることができる。そこで、この性能尺度を効用関数として組み入れたエージェントを「効用主導エージェント」と呼ぶ。

2.2 マルチエージェントシステムによる協調問題解決

マルチエージェントシステムは、前述のエージェントが多数集まって、相互に依存しあっている分散型システムである。マルチエージェントシステムは、一つのコンピュータ上で動作するシングルエージェントシステムでは対処困難な問題に対して、柔軟に取り組める可能性を持っているため、近年注目を集めている。マルチエージェントシステムによる効果的な協調問題解決のモデルとして考えられている「タスク分配」と「結果共有」について述べる。

(1) タスク分配 タスク分配は、一つのタスクをサブタスクに割り当て実行するモデルである。どのようにして一つのタスクを複数のサブタスクに分解するか、そして、どのようにして分解されたタスクをエージェントに割り当てるかが大きな課題となっている。現状、サブタスクの分解は、システムの設計者の手腕に任されている。エージェントへのタスクの割り当てとしては、図2に示す「契約ネットプロトコル」がよく利用されている。これは、人間社会における契約を手本に考え出されたもので、下記のメッセージの交換によりタスク分配を実現させている。

① タスク通知 他のエージェントに割り当てたいタスクを持つエージェントは、マネージャとなり他のエージェントに対しタスク通知(task announcement)を行う。

② 入札 タスク通知を受け取ったエージェントは、提示されたタスクを自分のところで実行しようとする場合、入

図1 基本的なエージェントの構成

Fig. 1. Basic agent framework.

図2 契約ネットプロトコル

Fig. 2. Contract net protocol.

札 (bid) メッセージをマネージャのエージェントエージェントに対して送る。

③ 落札 マネージャのエージェントは、受け取った入札のメッセージの中から最も適当と判断するエージェントに対して落札 (award) のメッセージを送る。落札を受け取ったエージェントは、コントラクターとなってタスクを実行する。

(2) 結果共有 結果共有とは、サブタスク担当する個々のエージェントの結果を持ち寄って、効率よく問題を解こうというものである。このモデルとして「黒板モデル」がある。黒板モデルは、データを共有する場所としての黒板、黒板に対してデータの読み書きを行う知識源、そして知識源の実行を制御するスケジューラの中から構成される。

3. 電力システムへの適用研究事例

ここでは、マルチエージェント技術の電力システムへの適用事例を述べる。表1は、電力システムへの研究事例を業務(内容)別、年代別にまとめたものである。文献は、電気学会論文誌、技術研究会資料、およびIEEE Transaction Paperを調査したものである。同表からわかるように、電力システムへのマルチエージェント技術は、1998年より盛んになり、現在までに事例数は少ないものの、ほとんどの業務(内容)に対して研究が開始されている状況であることがわかる。この状況から、電力システムへのマルチエージェント技術の適用は、従来の業務への適用研究と、マルチエージェントシミュレーションにより電力市場を理解・分析しようとする2つの流れがあることがわかる。以下では、事故復旧への適用事例⁽⁶⁾と電力市場シミュレーションへの適用事例⁽¹¹⁾について解説する。

3・1 事故復旧への適用事例⁽⁶⁾ 電力システムの事故復旧は、わが国が1980年代に世界に先駆けて人工知能を搭載した実システムを開発した分野である。ここでの適用例は、電力自由化の流れに対応して、従来の「集中型システム」ではなく、「自律分散型システム」として実現しようとするものである。図3が、事故復旧マルチエージェントシステムの構成である。同図に示すように、複数の母線エージェント(以下、BAG)と協調動作を促進する一つのファシリテータエージェント(以下、FAG)から構成されている。系統事故が発生し母線が停電すると、各BAGは、FAGに対して停電になった旨の通知を行う。この情報が、この

表1 電力システムへのエージェント適用事例

Table 1. Agent applications to power systems.

Task \ Year	98	99	00	01	02	03	04
Monitoring			(1)			(2)	
Protection	1 (2)					1	
Control	1				3	2	1
Operation					1		
Restoration			1	3	(1)	1	3
Unit Commitment			1	1			1
Maintenance						1	2
Expansion Planning			1				
Power Exchange			(1)			1	1
Information Sharing			1				
Training					1	1	
Market Simulation		1	(1)	4		1	3

Upper : IEEJ, Lower : IEEE

図3 マルチエージェント事故復旧システム

Fig. 3. Multi-agent restoration system

システムのトリガとなっている。

また、BAGには、幾つかの内部状態を保有しており、外部から得られる情報(信号)により、その内部状態を遷移させながら、自らの行動を決定している。また、柔軟な動作を実現させるために簡単なルールも組み込まれている。事故復旧は組合せ最適化問題として定式化できるが、このシステムは、BAGが局所的探索を担当し、FAGが必要に応じて大域的探索のコントロールを行っていると考えられることができる。しかし、図3に示したように、FAGが全体の動作をコントロールしているという意味で、完全な分散型システムとは言い難いため、このシステムは、BAG(送電線の分岐も仮想母線として定義)のみからなる完全な自律分散システムへと拡張がなされている。

3・2 電力市場シミュレーションへの適用事例⁽¹¹⁾ マルチエージェントシミュレーションは、計算機の中に人工社会を作る方法であり、またその社会を分析する方法である。現在、電力事業の自由化が推し進められ、電力供給システムは市場原理に基づくシステムへと変遷しつつある。ここでの適用例は、市場原理に基づく電力価格の形成過程をマルチエージェントシミュレーションで分析するものである。

この方式では、電力市場価格形成の解析にゲーム理論のナッシュ均衡解を導出して検討している。一般に、ナッシュ均衡解を求めることが困難であるため、この方式では強化学習を導入したマルチエージェントモデルを用いている。

電力市場のモデル化において、発電量に関する効用関数を持つ発電エージェントと、消費量に関する効用関数を持つ需要エージェントの2種類のエージェントを考えている。そして、各エージェントは知覚と行動を繰り返し、環境から報酬を得る。この一連の動作はエピソードと呼ばれる。この際、エージェントの次の行動は、次式の行動価値関数 $Q(s, a)$ (Q 値) に基づいて選択される。

$$Q^{k+1}(s, a) = Q^k(s, a) + \eta [R^k - Q^k(s, a)] \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 s : 状態, a : 行動, k : エピソード, η : 学習速度パラメータ, R^k : 反復 k での報酬である。

マルチエージェントシミュレーションにより、以下の項目の解析がなされており、この方法が有意義であるとの結論が示されている。

- ① プラント別シェアに対する市場価格 (プラント種類のエージェント数が市場価格に及ぼす影響)
- ② 供給信頼性と価格決定の制度設計 (需給逼迫ケース)

4. あとがき

ここでは、電力システムの分野におけるマルチエージェント技術の適用研究事例について解説した。この技術は、未だ発展途上の新しい技術であるが、電力システムにおける従来の業務と電力市場分析への適用が今後益々期待される技術であると思われる。

(平成 16 年 12 月 1 日受付)

文 献

- (1) A. Bound and L. Gasser: Readings in Distributed Artificial Intelligence, Morgan Kaufman Publishers (1988)
- (2) 木下哲男・菅原研次: エージェント指向コンピューティング, ソフト・リサーチ・センター (1995)
- (3) Y. Tomita, C. Fukui, H. Kudo, J. Koda, and K. Yabe: "The Concept for Co-operative Protection System with Agent Model", *T. IEE Japan*, Vol.118-B, No.3, pp.254-260 (1998-3) (in Japanese)
富田泰志・副井千尋・工藤博之・香田 潤・矢部邦明: 「エージェントモデルによる協調動作型保護システムコンセプト」, 電学論 B, **118**, 3, pp.254-260 (1998-3)
- (4) V. Krishna and V.C. Ramesh: "Intelligent Agents for Negotiation in Market Games, Part 1: Model", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.13, No.3, pp.1103-1108 (1998)
- (5) V. Krishna and V.C. Ramesh: "Intelligent Agents for Negotiation in Market Games, Part 1: Model", *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol.13, No.3, pp.1109-1114 (1998)
- (6) T. Nagata, H. Watanabe, M. Ohno, and N. Iba: "A Multi-Agent Approach to Power System Restoration", *T. IEE Japan*, Vol.121-B, No.2, pp.179-185 (2001-2) (in Japanese)
永田 武・渡部英宜・大野益見・井場信彦: 「電力系統事故復旧問へのマルチエージェント技術の適用」, 電学論 B, **121**, 2, pp.179-185 (2001-2)
- (7) T. Nagata, M. Ohno, H. Sasaki, and H. Fujita: "A Multi-Agent Approach to Unit Commitment", *T. IEE Japan*, Vol.121-C, No.10, pp.1641-1646 (2001-10) (in Japanese)

永田 武・大野益見・佐々木博司・藤田秀紀: 「発電機起動停止計画へのマルチエージェント技術の適用」, 電学論 C, **121**, 10, pp.1641-1646 (2001-10)

- (8) T. Nagata, H. Nakayama, Y. Nakamura, M. Utatani, and H. Sasaki: "A Multi-Agent Approach to Power System Normal Operation", *T. IEE Japan*, Vol.122-B, No.10, pp.1089-1095 (2002-10) (in Japanese)
永田 武・中山博之・中村頼子・歌谷昌弘・佐々木博司: 「電力系統平常時操作へのマルチエージェント技術の適用」, 電学論 B, **122**, 10, pp.1089-1095 (2002-10)
- (9) K. Sekiguchi, Y. Shirota, M. Shimoo, H. Sugiura, T. Kagami, and T. Nakamura: "Network Centric Approach to Protection, Control and Monitoring for Power Systems", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123, No.9, pp.1030-1039 (2003-9) (in Japanese)
関口勝彦・白田義博・下尾 学・杉浦秀昌・鏡 敏朗・中村 正: 「ネットワーク形保護制御システムの検討」, 電学論 B, **123**, 9, pp.1030-1039 (2003-9)
- (10) T. Nagata, Y. Tao, H. Sasaki, and H. Fujita: "A Multi-agent Approach to Distribution System Restoration", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.1, pp.62-68 (2004-1) (in Japanese)
永田 武・田尾泰弘・佐々木博司・藤田秀紀: 「配電系統事故復旧問題へのマルチエージェント技術の適用」, 電学論 B, **124**, 1, pp.62-68 (2004-1)
- (11) T. Shimomura, Y. Saisho, Y. Fujii, and K. Yamaji: "Analysis of Pricing in Electricity Market using Multi-Agent Model", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.2, pp.281-290 (2004-2) (in Japanese)
下村貴裕・最所祐一・藤井康正・山地憲治: 「マルチエージェントモデルを用いた電力市場における価格形成過程の分析」, 電学論 B, **124**, 2, pp.281-290 (2004-2)
- (12) T. Tsuji, T. Oyama, T. Kumano, Y. Kuno, and I. Isao: "Voltage Control of Demand Area Power by Autonomous Decentralized Method", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.3, pp.386-396 (2004-3) (in Japanese)
辻 隆男・大山 力・熊野照久・河野良之・伊与田功: 「自律的な分散方式による需要地系統の電圧制御」, 電学論 B, **124**, 3, pp.386-396 (2004-3)
- (13) T. Shinmichi and T. Oyama: "Simulation of the Electric Power Market Considering Load Fluctuation and Form of Transaction", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.5, pp.683-689 (2004-5) (in Japanese)
新道 徹・大山 力: 「需要変動・電力取引形態を考慮した電力市場シミュレーション」, 電学論 B, **124**, 5, pp.683-689 (2004-5)
- (14) T. Nagata, Y. Tao, M. Utatani, H. Sasaki, and H. Fujita: "Coordination between Generation and Transmission Maintenance Scheduling by Means of Multi-Agent Technique", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.6, pp.817-823 (2004-6) (in Japanese)
永田 武・田尾泰弘・歌谷昌弘・佐々木博司・藤田秀紀: 「マルチエージェントによる発電機と送電線補修計画の調整方式」, 電学論 B, **124**, 6, pp.817-823 (2004-6)
- (15) T. Nagata, Y. Yamazaki, M. Utatani, H. Sasaki, and H. Fujita: "A Multi-Agent Approach to Cross-Border Trade Planning", *IEEJ Trans. EIS*, Vol.124, No.11, pp.2365-2375 (2004-11) (in Japanese)
永田 武・山崎勇司・歌谷昌弘・佐々木博司・藤田秀紀: 「マルチエージェントを用いた電力自由化市場における地域間電力取引方式」, 電学論 C, **124**, 11, pp.2365-2375 (2004-11)
- (16) C. Rehtanz: Autonomous Systems and Intelligent Agents in Power System Control and Operation, Springer (2003)
- (17) S. Russell and P. Norvig: Artificial Intelligence, Pearson Educational International (1995)

永田 武 (正員) 1954 年 9 月 28 日生。1980 年 3 月広島大学大学院修了。同年 4 月 (株) 東芝入社、国内外の電力系統制御用計算機システムの開発に従事。1989 年松江工業高等専門学校講師, 1991 年助教授, 1997 年広島工業大学助教授, 2001 年同教授, 現在に至る。特種情報処理技術者, 博士 (工学)。電力システムの計画・運用・制御, および知的情報処理に関する研究に従事。システム制御情報学会, 電気設備学会, IEEE 会員。