

## 複雑系モデルによる分散型太陽光発電普及シミュレーション

村上 朝之\*<sup>1</sup>

### Complex System Simulation on the Penetration of Distributed Photovoltaics

Tomoyuki MURAKAMI\*<sup>1</sup>

**ABSTRACT:** We predict the saturation phase of building-integrated photovoltaics (PV) for which complex-system model coupled with electric power flow analysis are carried out. The detailed power flow analysis determines the probability of reverse current occurrence due to the additional PV installation in a two-dimensional 6.6 kV-scale distribution network consisting 2500 grid-connected individual customers. The agent-based simulation including the customer agent and government agent describes the time-dependent behavior of the PV penetration in an artificial society. Growth of the building-integrated PV is assisted by a battery installation as a reservoir for the reverse current. However, the excessive promotion for the PV penetration by the government results in increase in the cost of reverse current care.

**Keywords:** Complex system, agent-based model, photovoltaics, power flow analysis

(Received September 29, 2015)

#### 1. はじめに

近年、世界的に、地球温暖化を防止する観点から再生可能エネルギーが注目されている。我が国においては、2030年時に再生可能電源導入量の大幅引き上げが目標されている(電源比率目標値20%台半ば)<sup>1)</sup>。広義の再生可能電源とはCO<sub>2</sub>排出を増大させないものを指すが、日本においては太陽光発電(以降本稿では、PV (photovoltaics) と記す)への期待が特に高い。

太陽光発電をはじめ再生可能エネルギーの大量普及した先進的なエネルギー・社会システムを設計するためには、設計者は極めて複雑な系を取り扱わなくてはならない。これは人間社会の営みが、その多様性・反応性の高さゆえに、本質的に詳細な予測が困難であるためである。対象とするシステムを都市レベルに限定したとしても、関連するすべての利害関係者、すべての工学的知識を包含するような設計の試みは現実的ではない。したがって、複雑システムを記述する上で適切な粗視化・モデル化を行うことが重要である<sup>2)</sup>。

ここでは、分散型(家庭用)太陽光発電の普及問題を一つの切り口として、電気・電力工学等(便宜上”ハード”な科学と呼ぶ)と社会学等(便宜上”ソフト”な科学と呼ぶ)とを組み合わせ、エネルギーネットワーク構造・情報伝達構造・社会心理構造等に着目するシミュレーションモデリングを行う。

ある住宅地域に局所集中的に大量に(例えば数百数千軒単位で)家庭用太陽光発電装置が系統連系された場合、太陽光発電装置を持つ需要家から送配電系統に対して大量の電力(余剰電力)が供給される可能性がある。この場合、通常の”順方向”の電力潮流(大規模集中発電所から需要家へと電力供給が為される)に対して、逆向きの電力潮流(逆潮流)が発生する。過度の逆潮流現象に起因して、需要家の受電点電圧が電気事業法で定められた規定電圧の上限値107Vを超過する場合、発電機のインバータが出力を自動的に抑制し電圧を超過しないようにする、すなわち需要家太陽光発電からの送配電系統に対する出力電力が抑制される可能性がある。出力抑制下では、需要家は売電を行うことができない「機会損失(opportunity loss)」を被ることになる。

一般に太陽光発電装置の設置者は地域の電気事業者と逆潮流による売電契約を締結し投資コストの回収を図る

\*<sup>1</sup>: システムデザイン学科 准教授  
(tomo-murakami@st.seikei.ac.jp)

が、上記のような出力抑制が生じる場合には、太陽光発電の実質的な稼働率の低下につながり、稼働率の低下は投資コスト回収期間の不可実性を高めることになる。このことは設置者の不満につながり、社会全体が抱く太陽光発電に対する信頼性を損ねる可能性がある。また同時に潜在的な太陽光発電導入者に対する心理的・経済的な障壁となりかねず、太陽光発電そのものの普及が大きく阻害されることが懸念されている。

上述の問題を取り扱う上では、電力送配電系統網・家庭用太陽光発電装置・系統連系補助機器等に関する主に電気電工学の知識により記述される「工学的要素」のみならず、対象とするシステム（ここでは街レベル）を構成する各需要家が太陽光発電を許容していく様相ならびに社会的な導入奨励施策の寄与等の「社会学的要素」を組み合わせる必要がある。

## 2. モデリング

家庭用太陽光発電装置大量導入に対して、ある特定の目標普及率を掲げ、その達成に関する検討を行う上では、分散型電源の参入を許容する電力ネットワークの工学的側面、および当該分散型電源を導入する人々（社会）の心理的側面の両方を考慮する必要がある。ここでは、「工学的要素を記述する電力潮流シミュレーション」と「社会学的要素を模擬するマルチエージェントシミュレーション

ョン」とを融合させたハイブリット数理モデルを構築する。図1に、モデルの概念図を示す。

### 2. 1 電力潮流解析

対象とする配電系統は、電気の流れで考えると電力系統の中では下流に位置し、設備数が膨大であるという特徴を有する。住宅地域や商業地域へのエネルギー供給を役割として担い、我々の日々の生活と巨大な電力システムとのインターフェースにあたる。配電系統は1フィードあたりの低圧需要家の数は2000軒、柱上変圧器の数だけで100を超える場合がある。したがって、通常の潮流計算においては、全ての柱上変圧器接続点等を考慮することなく、配電線をいくつかの区間に分けて、その区間内の負荷を区間の両端ノードに集中負荷として集約する手法をとる。ところが、太陽光発電に加え、将来的に導入が予想される蓄電池、燃料電池、小型風力など、多様な需要家の考慮やそれらの相互作用を考えると、負荷を集約せずに一軒一軒取扱い、正確な挙動を再現することが必要になる（図2）。

対象とする領域（ここでは街レベルの住宅地）内の含まれる個々の低圧需要家をすべて考慮した住宅地という面的に広がる場の電力需給状況と、電力送配電ネットワークにおける送電端から需要端までの多数の構成要素「高圧配電線」「分岐箇所」「柱上変圧器」および「家庭用太陽光発電装置」「出力抑制に伴う機会損失を補償する

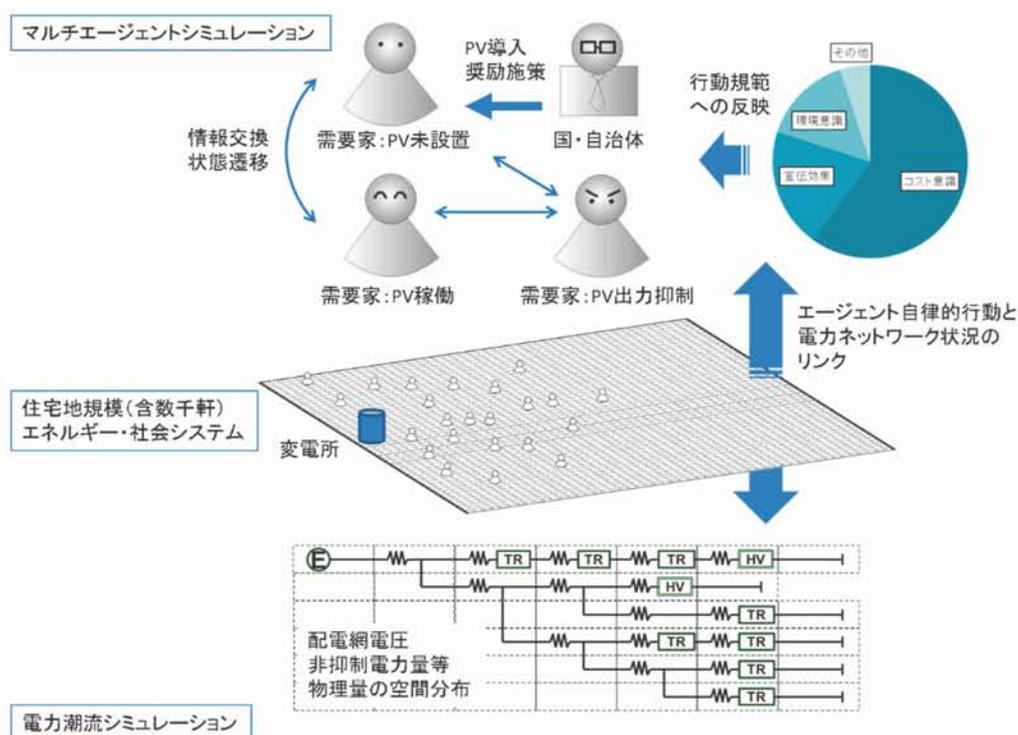


図1 ハイブリットモデル概念図

機器」の連携モデルを開発する(図1下方, 図2参照)。また, 配電用変電所と住宅との幾何的な位置関係を考慮に入れる。

2.2 エージェントシミュレーション

複雑系モデルのひとつであるマルチエージェントシミュレーションを用いたモデリングを行う。図1に示すように, 主なエージェントは多数の需要家であり, 2次元電力ネットワーク空間において生活し, 家庭用太陽光発電装置(図中 PVと記述) 導入に関する固有の意思・行動様式を持つ。その他に, 国・自治体(為政者) エージェントが存在する。国・自治体エージェントは, 需要家エージェントのように相互作用・自律行動を行わない。

需要家エージェントのモデリングにあたっては, 図3右上部に示すように, 家庭用太陽光発電装置導入(購買意思決定) 動機としてのコスト意識・宣伝効果・環境意識などをモデル化し, エージェントの意思・行動様式に反映させる。さらに家庭用太陽光発電装置既設近隣へのシンクロ願望・機会損失がもたらす導入への抵抗感・これに対する補償機器(ここでは蓄電池) 導入による機会損失回避法・国や自治体による導入奨励キャンペーンの存在をモデル化する。このモデリングにより, ネットワークシステム全体の電力需要バランス, 需要家エージェント・政府エージェントの挙動に拠る社会心理・消費心理動向の変遷, 情報の規模(近隣需要家同士の交換する”狭い”情報, 国・自治体が提供する”広い”情報) に応じ, ボトムアップ的相互作用により創発されるマクロな挙動が定量的に把握可能となる。

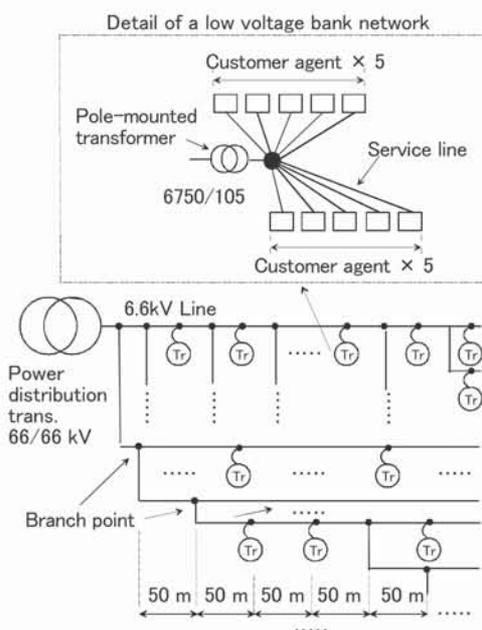


図2 6.75kV-系統 / 2500 需要家送電網回路

図3に人工社会のエージェント相関モデル概念図を示す。また後述する図4に, 正方形の二次元空間の中に2500軒の需要家エージェントが規則正しく隣接した幾何を示す。画面上に状態が表示されるのは需要家エージェントのみで, 為政者エージェントは概念としてのみ存在する。

需要家エージェントは次の4つの状態をもつ。

- $S_0$ : PV を設置していない。
- $S_1$ : PV を設置。出力抑制は発生していない。
- $S_2$ : PV を設置。出力抑制が発生している。
- $S_3$ : PV と蓄電池を設置。

また, 需要家エージェントは3つの抽象的概念「印象値」, 「電力環境状態値」および「状態履歴」をパラメータとして有する。印象値はPV を導入する欲求の大きさを表わし, 周囲からの影響により増減する。図3に正負の影響効果(黒矢印に対応した数値) の相互作用概念図を示す。印象値が増加する作用として, 周囲の需要家エージェントからの影響および為政者(政府) エージェントからのPV設置促進宣伝効果がある。前者は, 状態 $S_1$ にある需要家エージェントからの(PV設置に向けた) 正の影響である。これは, 隣家がPV を設置したことに対する模倣欲求や, PV の普及を後押しする口コミ効果を表現している。図中のFOV(Field of view) とは, 被影響エージェントからみた視野半径(周囲何軒の需要家エージェントから影響を受けるか) を意味する。一方, 後者は政府が家エージェントに対しPV 導入を促す宣伝効果を表現している。その際, 政府は電力会社エージェントから家エージェント毎の出力抑制の発生条件(電力環境状態値) に関する情報を得るものとした。なお前述したように, 政府エージェントは概念として存在するため, 宣伝効果を与える範囲は視野半径として定義するのではなく, 社会に存在する状態 $S_0$  からある確率でランダムに抽出するものとした。印象値を低下させる(PV導入の意欲を低

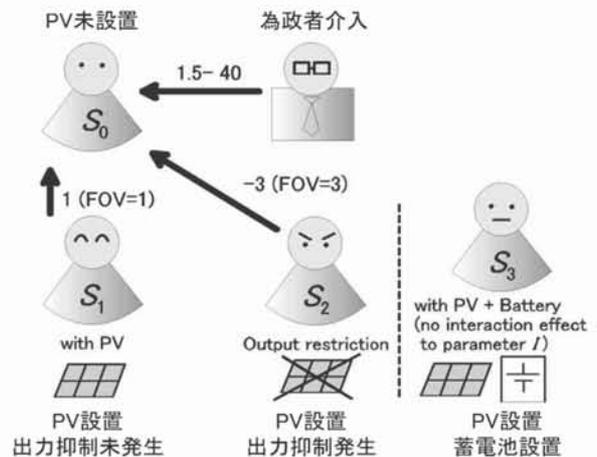


図3 エージェント行動ルール

下させる)作用として、出力抑制を被っているS<sub>2</sub>が、周囲のS<sub>0</sub>へ負の影響を与える。電力環境状態値は、自分の周りのPVの設置密度を表す概念であり、この値が高いほど出力抑制が発生しやすきことを意味する。またエージェントの行動はその状態履歴に影響を受ける。これら三つの概念を用いて以下のようにエージェントの行動ルールを定める(詳細は参考文献3))。

- S<sub>0</sub>: PV に対する印象値が上昇すれば S<sub>1</sub> に遷移する (閾値を与える)
- S<sub>1</sub>: 周囲の印象値を上昇させる。電力環境状態値を算出し、これが上昇すれば S<sub>2</sub> に遷移する (閾値を与える)。
- S<sub>2</sub>: 周囲の印象値を低下させる。電力環境状態値を算出し、これが低下すれば S<sub>1</sub> に遷移する (閾値を与える)。状態履歴に依存し S<sub>3</sub> に遷移する (閾値を与える)。
- S<sub>3</sub>: 本状態に遷移後、他の状態への遷移はしない (出力抑制は解消される)

### 3. 結果

図4は、PVおよび蓄電池設置状況に対応した社会構造の例を示す。社会構造のダイナミクスはエージェントの挙動に依存して時々刻々と変化するため(後述図5)、同図は、ある時点における構造のスナップショットであると解釈できる。

図4左側中央部には変電所が設置されている。白プロットは、PV未設置の需要家を示す。この需要家にとっては、PV購入設置に至る意欲が不十分であったことを示す。濃灰プロットは、PV設置を行い、かつ出力抑制に起因す

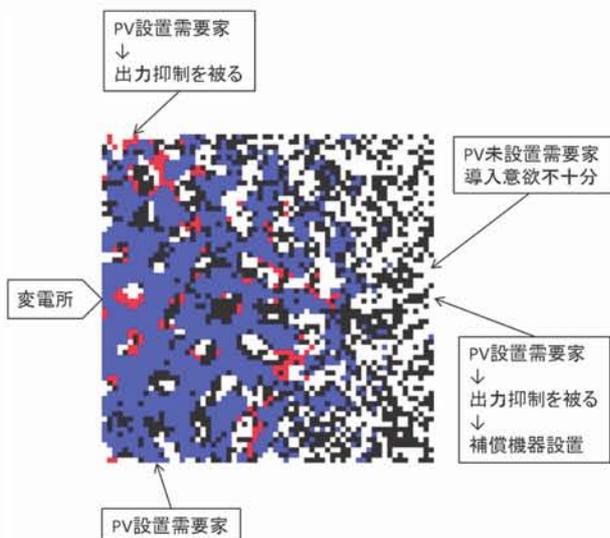


図4 PVおよび蓄電池の設置状況の例

る機会損失を補うための付加的な蓄電池を設置していない需要家を示す。ここで当該需要家が過去の時点で出力抑制を被っていた可能性あるいは将来出力抑制を被る可能性があることに注意が必要である。薄灰プロットは、PVを設置し、現時点で出力抑制・機会損失を被っている需要家を示す。黒プロットは、PV設置を行い、かつ出力抑制に起因する機会損失を被り、それを補うための蓄電池を設置している需要家を示す。

図5はPV普及率に関する諸量の時間変化を示す。横軸(時間の経過)は、計算ステップを示すが、モデル全体のイメージ捉えるためには例えば「日」の単位で置き換えてもよい。(a)において、まずPV普及率が徐々に上昇することがわかる。これに遅れて出力抑制が発生し始め(b)、続いて蓄電池を導入し始める需要家エージェントが増えていく(c)。最終的にはPV普及率(S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub>+S<sub>3</sub>の合計普及率)が90%に到達する(d)。

これらの結果は、需要家のPV導入行動様式・社会のダイナミクスが、電力潮流シミュレーションにより記述される2次元幾何的(空間的)な配電系統状況(図4)により大きく影響されることを示唆する。すなわち、PVを設置する上は、変電所近隣において大きなメリットがある(出力抑制を被りにくく、蓄電池の設置が要される可能性がより少ない)ことを示す。

エージェント社会の構造(ここではPVの普及率)は様々な様相を伴い、ダイナミックに変化し得る。ここでは詳細を省くが、国・自治体エージェントの施策(電力買取制度等の様々な普及方法)の強度(需要家の意思決定に与える影響の強さ)も社会構造の成り立ちに大きな影響を与える。また、社会コスト(PV普及の対費用効果)の観点からは「PVの普及に際して何らかの対策機器が必要であるとした場合、付加的な機会損失補償機器、ここでは蓄電池の導入費用さらには系統改善費用を含め、いかに社会コストを低減するか」ということが論点となる。

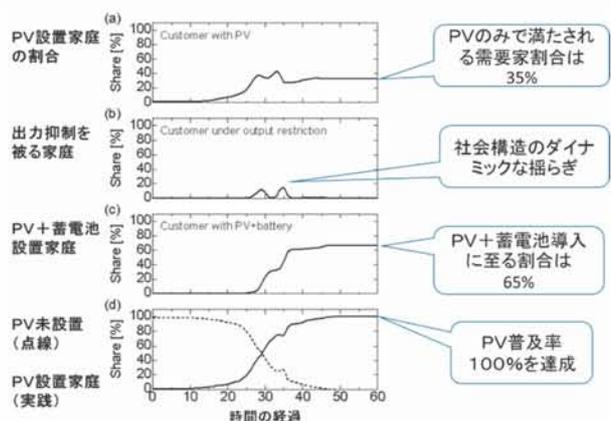


図5 PV普及率の変遷

#### 4. むすび

蓄電池の高度利用が都市規模の電力負荷平準化に寄与するケースとして、1フィーダ規模で電力供給される住宅地における家庭用太陽光発電の普及プロセスについて検討を行った。その結果、変電所付近は太陽光発電装置設置が容易（特別な逆潮流対策が不要）であり、距離が離れるにつれてそれが困難になるという電力系統の状況の問題点を明らかにした。また、普及率の数値目標の達成のみを考え、安易な補助金のばらまきや宣伝により太陽光の導入を急ぐと、達成時期を早めることはできるが、結果として蓄電池のような対策機器がより多く必要になることを示唆した。一方で、系統条件を考慮することで、蓄電池の利用価値が高まり、太陽光発電の効率的な普及が実現できる可能性をも示唆した。ここで得られた知見は、太陽光導入施策に対し重要な示唆を与え、蓄電池の高度利用の可能性を広げる。

現実社会における不確定要因（機器購入の意思決定主体である個々の需要家（世帯）の心理的作用・分散型電源太陽導入政策）を考慮する場合のような「小さな要素・互いにリンクしあう要素」が支配的となる系においてはトップダウン型のシミュレーションは容易でない。これに対し、要素間の局所的相互作用をモデル化しシミュレートする方法、すなわち、複雑系（ボトムアップ型）シミュレーションアプローチが有効であることを示した。

#### 参考文献

- 1) 例えば、総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 長期エネルギー需給見通し小委員会・第8回（平成27年4月28日）等
- 2) 村上朝之、「先進的エネルギー・社会システムの具現化に資するハードな科学とソフトな科学との融合シミュレーション」、日本設計工学会誌、マルチエージェントシミュレーションによる複雑系のデザイン、Vol. 47, No. 12, pp. 573-576, 2012.1
- 3) T. Murakami, "Agent-based simulations of the influence of social policy and neighboring communication on the adoption of grid-connected photovoltaics", Energy Conversion and Management, Vol. 80, pp. 158-164, 2014. 2.