

マルチエージェントモデルを用いた 住宅用太陽光発電システムの普及モデリング

論文要旨

日本において、従来の化石エネルギーを利用した大規模集中型の電力供給から、環境負荷の少ない再生可能エネルギーを利用した小規模分散型へと移行していく中で、家庭単位で導入が可能な太陽光発電システムは注目を集めている。しかしながら、初期費用の高さ、金銭的なメリットがない等の理由から普及が進んでいないため、政府としては2009年に、補助金の再開と買取制度の普及支援策を打ち出し、導入目標に基づいて新たな太陽光発電ロードマップが作成されている。その導入目標を達成するため、政策に基づいた詳細かつ妥当な普及予測が必要となっている。現在、対象となるスケールに応じた普及モデルがあるが、本研究では、政策と普及の両ノードを結ぶため、マルチエージェントモデルを用いて、意思決定を行う世帯を対象とし、ミクロな視点からのボトムアップ的なアプローチで普及予測を行った。しかしながら、太陽光に関して提供されているデータは、ほとんど集計データであるため、本研究では新たにアンケート調査を行い、非集計のデータを使ったモデルと集計データによるモデルとの精度比較をする事によって非集計データの必要性を示唆した。さらに、地方行政における政策策定のためのシナリオ分析に向けたモデル環境作りを行った。

キーワード

1 太陽光発電 2 普及予測 3 マルチエージェントモデル 4 買取制度 5 補助金

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

小林 知記

1. 太陽光普及の問題

日本は、長年太陽光発電導入量で一位の座についてきたが、近年急激な成長を遂げたドイツやスペイン等に追い抜かれてしまう結果となってしまう（Fig.1）。このドイツやスペインの急激な成長の要因となった政策が、FIT 制度（Feed-in Tariff）である（図 1）。FIT 制度とは、自然エネルギーによって発電された電力を通常電力に上乗せした価格で売電する事が出来るという導入支援策である。これを受け、環境技術先進国として日本は、2009 年に導入時における補助金の再開と、新たな買取制度（日本版 FIT 制度）として、発電された電力と家庭の消費電力の差分の余剰電力を、電力会社に通常電力価格の 2 倍の価格で売電が可能な政策を打ち出した。これにより、標準的なケースで、新築住宅に 3.5kW のシステムを設置した場合、10 年程度で回収が可能であり、既築住宅の場合でも最長 15 年程度でコスト回収が可能となっている。

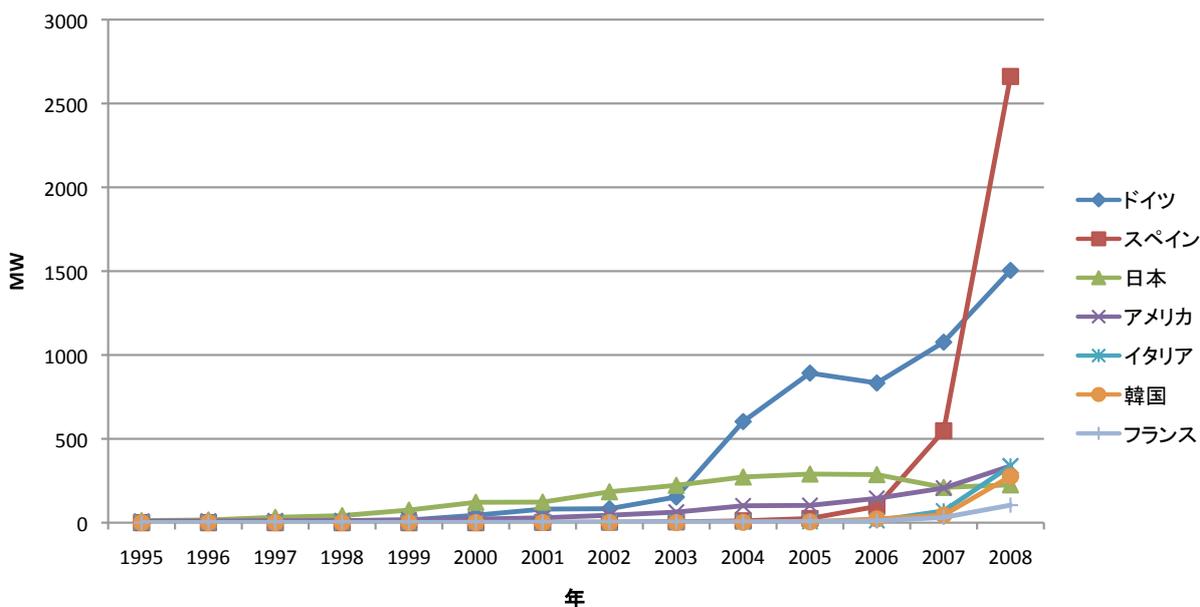


図 1 4 カ国の新規設置容量の推移(MW)

出典：NEDO 海外レポートより作成

今後は、国家主導だけでなく、地域主導で環境負荷の少ない社会を目指した太陽光の普及計画をマネジメントしていく時代であり、このような社会を実現させるためには、普及支援策の予算を効果的かつ効率的に投資していかなくてはならない。そのため、地方自治体では太陽光に関する調査（アンケート等）を行い、それに基づき導入目標へ向けた政策（補助金等）が掲げられている（横

浜市, 2009)。しかし、これらの多くの目標は、あくまで目標を示すだけに留まり、目標に至るシナリオを示せずにいると元木らの研究において指摘されている。地域レベルで、実現へ向けたシナリオを現実的な形で示せなければ、国レベルの導入目標の達成は不可能である。従って、目標達成に向けて地方行政で実施可能なシナリオの作成が行えるために、地方自治体レベルでの太陽光の普及モデルが必要となっている。

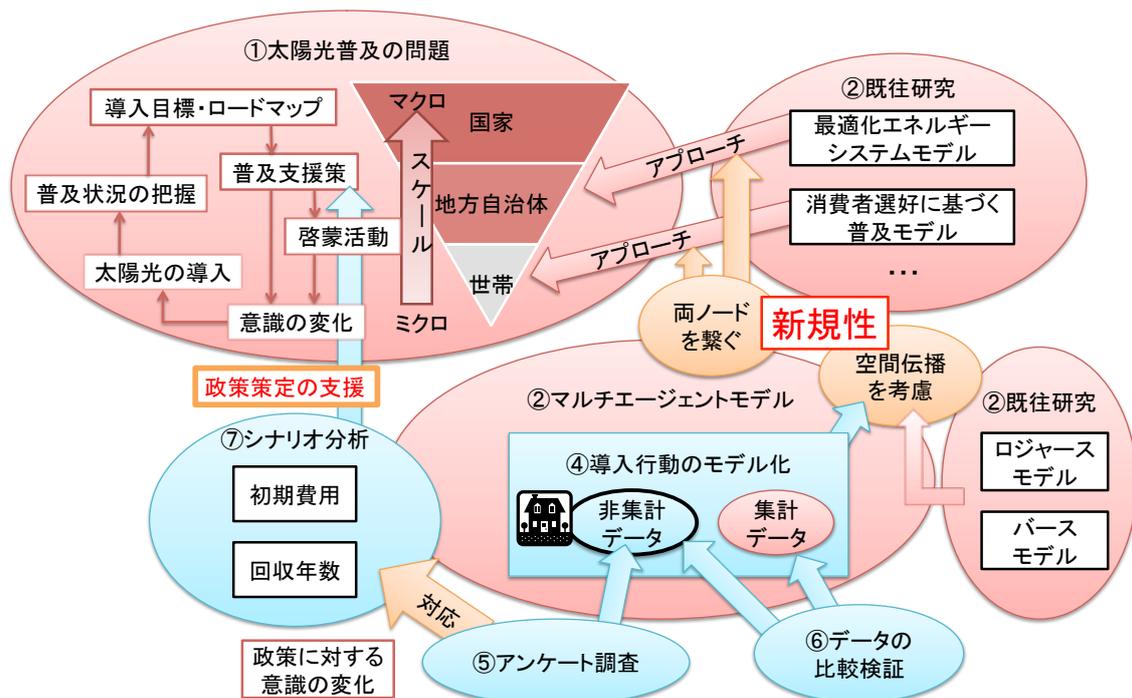


図 2 研究概要図

2. 既往研究

現在、政策的な視点を含んだエネルギーシステムモデルとして、他のエネルギー技術との競合関係に焦点をおいた最適化型のエネルギーシステムモデルが、世界的に多く用いられている。その中の一つに、多目的線形計画法を用いた MARKAL モデルがある。MARKAL モデルは、一つの国あるいは地域スケールで、一次エネルギー供給から最終エネルギー消費までのエネルギーシステムを種々のエネルギー技術とエネルギーキャリアとで表現している。あらかじめエネルギー需要を設定し、それを満足するように最適化をはかる点、および多期間を同時に最適化する点などは、他のエネルギーシステムモデルにも見られるが、技術特性を通じてエネルギー技術を詳細に表現できる点が特徴である（遠藤栄一, 2004）。MARKAL モデルでは変数が多く、遠藤らの研究では、エネルギー技術約 260 種類、エネルギーキャリア約 40 種類でモデル化している。線形

計画問題の規模としては、9期で約6200式、約7500変数としていて、技術開発・競争による変数の時系列変化を考慮したモデルであり、国家規模でのエネルギー政策分析に適したモデルである。また、元木らの研究のように、地方行政でのエネルギー計画の策定・実施に対する効果的な手段として、このMARKALモデルを、国家規模でのモデル化で前提となる情報獲得が困難な地方自治体に対象をダウンスケールし、エネルギーシステム全体を包括的にモデル化した研究も報告されている(元木悠子, 2008)。しかしながら、遠藤らが行った太陽光発電のMAKALモデルでは、コストと二酸化炭素排出量を指標としていて、家庭単位で導入可能な太陽光発電の技術選択において、消費者選好や社会的受容性の面を考慮出来ず、モデルの限界についても同時に指摘している(遠藤栄一, 2004)。

山口らの研究においても、技術のエネルギー性能や経済性だけでなく、消費者の選好が大きく影響するとは指摘されている。特に、太陽光発電の普及過程には、消費者選好の強い影響がみられると述べられている。このような理由から、消費者選好に基づくミクロな視点での太陽光普及モデルの作成が注目されている。山口らの研究では、クリーンエネルギー自動車の普及研究において松本らが確立した、消費者選好に基づくモデルを応用し、太陽熱温水器と太陽光発電について普及モデルを作成した。消費者選考に基づくモデルでは、アンケート調査で消費者選好を調査し、コンジョイント分析に基づいて、価格や環境性能といった技術属性と技術選択率の関係をモデル化して技術進展や普及促進策による技術選択の変化を表現し、ロジスティック曲線により表現される普及予測モデルと統合して普及予測を行っている(山口容平, 2009)。このような消費者選好に基づく普及モデルでは、消費者というミクロな視点から分析が行えるものの、ミクロな視点から逆にマクロなレベルである国家や地方自治体の政策指針の変化に対応したり、地域の将来像を基にした政策シナリオを分析したりする上で、モデルとしての発展性が乏しいと考える。そこで、本研究では、複数の変数の変化にも対応可能な相互作用型モデルであるマルチエージェントモデルを使い、対象を世帯の導入行動まで落とし込んだミクロな視点からボトムアップ的にモデルを作成し、政策シナリオにも対応可能なスケール横断型の普及モデルの作成を試みる。

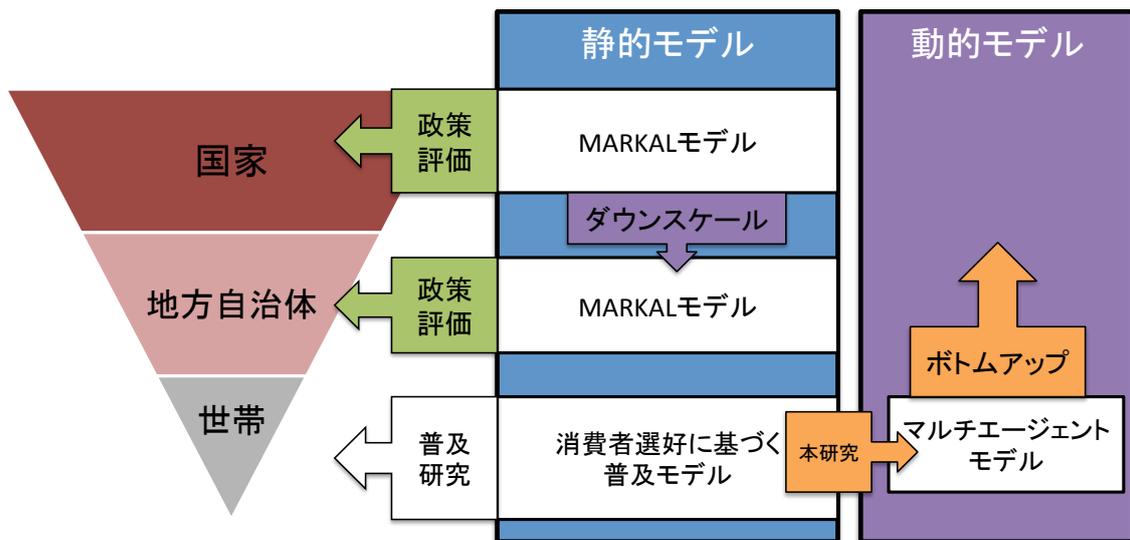


図3 既往研究と本研究の位置づけ

3. マルチエージェントモデルによるアプローチ

各世帯に関するアンケート調査データを基に、現実の再現や予測に耐え得るシミュレーションモデルの開発を行い、適切な政策策定を支援するためのプラットフォーム作りを行う。具体的なプラットフォームのイメージを図4に示す。

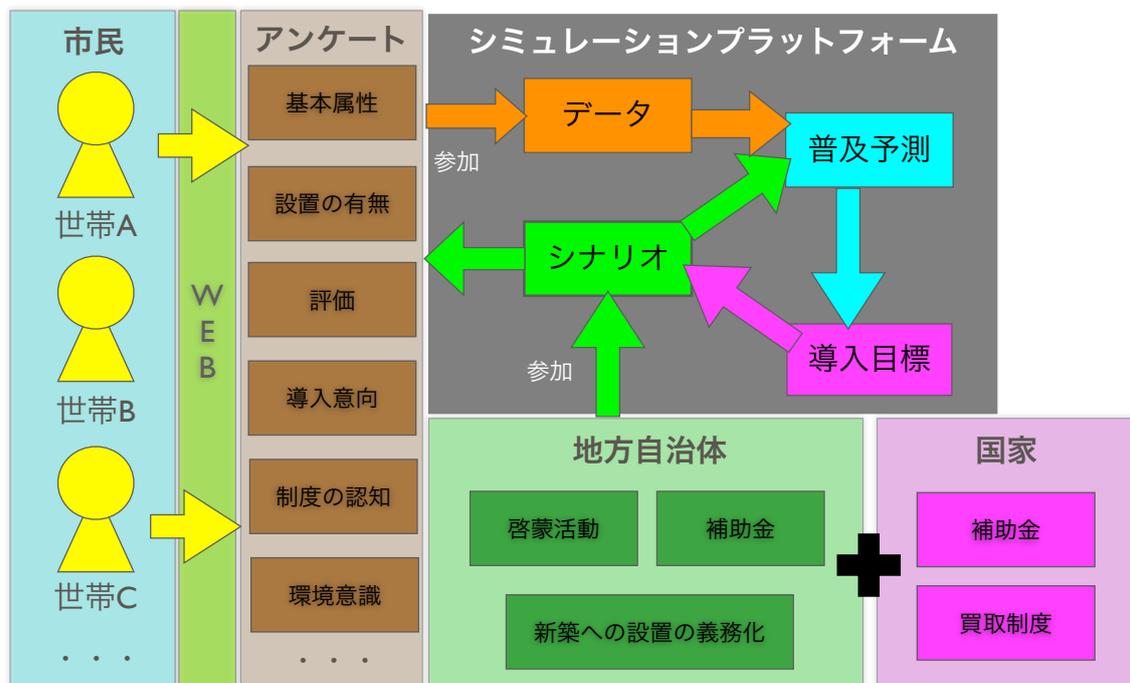


図4 住民参加型のシミュレーションプラットフォーム

WEB アンケート調査として、市民は WEB を介してアンケートデータの提供に協力し、集められたものを非集計の状態でシミュレーションのデータとする。それを基に普及状況を把握し、地方自治体は導入目標を設定する。そして、その目標に向けた政策シナリオをシミュレーションプラットフォーム上で再現をする。そのイメージを図5に示す。

政策策定者は政策シナリオを設定し、それらの情報が各世帯へと送られ導入行動の閾値が変化する。そして、それらの結果を地域レベルで集計する事によって導入目標が達成出来るかを検証する。達成出来ない場合は、再び政策シナリオを再設定するというサイクルを行う。

このように、今まで実態の把握だけに留まっていたアンケート調査のデータを活用し、政策シナリオの妥当性を検討する事が可能となり、適切な政策が行える。そのため、住民にとっても政策策定者にとってもメリットがある。本研究では、このプラットフォームを実用化へ向けた開発の初期段階として、データの選定を行う事を主題としている。

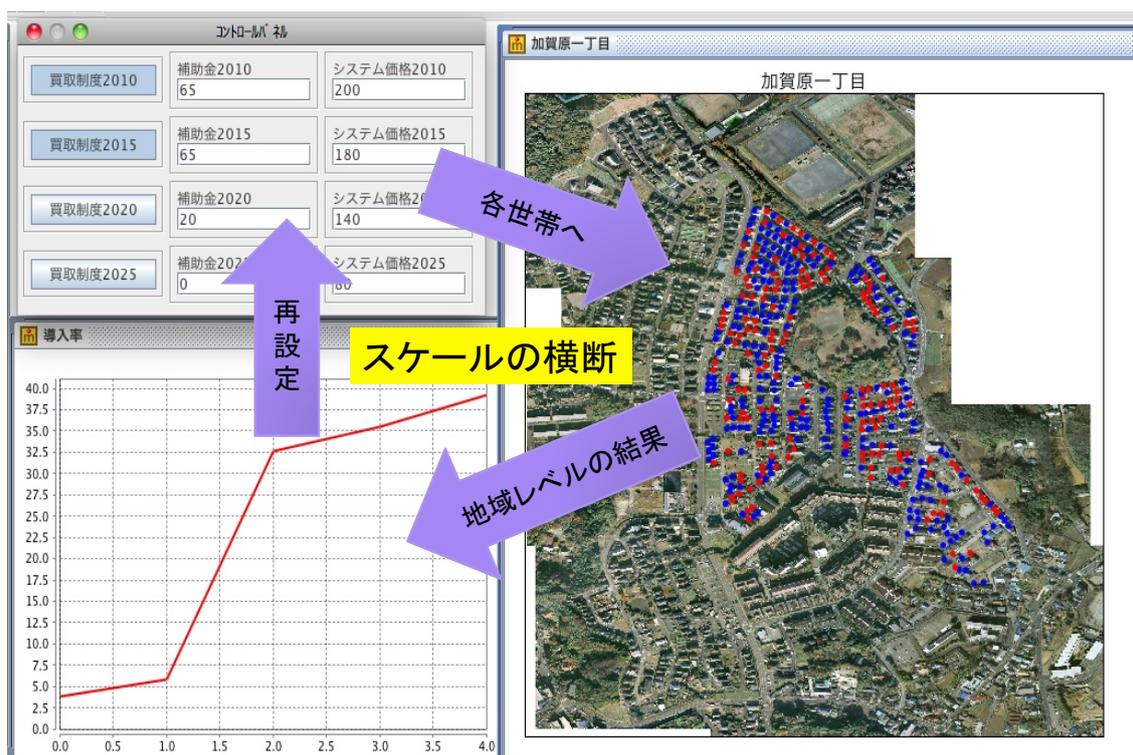


図5 政策策定のための政策シナリオ分析イメージ

4. 導入行動のモデル化

マルチエージェントモデルを用いて導入行動のモデル化を行うにあたり、どのような変数が導入行動に影響を与えているかを明らかにする必要がある。そもそも、世帯が太陽光を導入する際には、システム価格や発電効率、補助金などの政策、世帯の導入意欲、住宅の建築時期など、太陽光の導入条件は複数の要素が複雑絡み合っている。多くの太陽光普及研究では、初期費用や回収年数（本研究では、これらを経済合理性と呼ぶ。）を変数としてモデルが作られている。しかしながら、太陽光に関する数々のアンケート結果から世帯の意思決定プロセスについて見てみると、世帯の意識変化による導入や、新築・改築時における導入等がある事が分かる。

本研究では、経済合理性という軸に加えて、建築的な導入のタイミングを考慮した時間軸である導入適時性と、世帯間コミュニケーションや、地域の導入状況による世帯の意識変化を考慮した空間軸である空間伝播性という軸の3軸で、時空間的に導入行動のモデル化を行う。

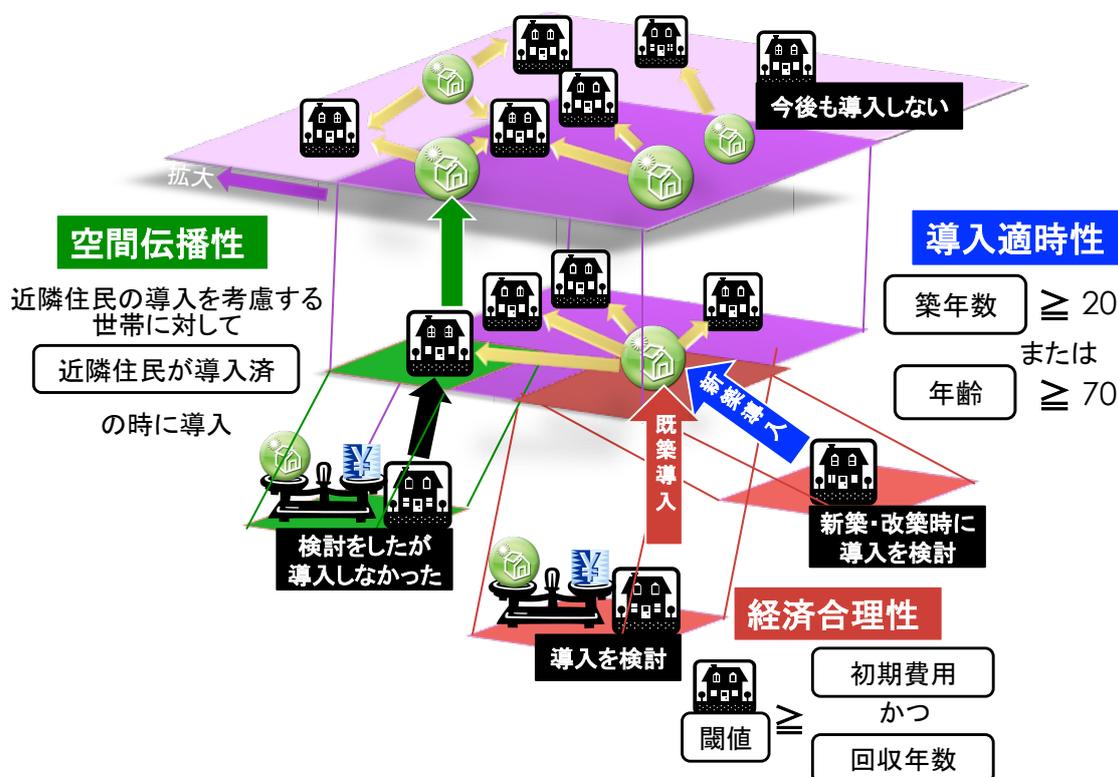


図6 アンケートデータに基づいた導入行動のモデル化

5. 対象地域におけるアンケート調査

環境モデル都市に定められている横浜市では、2005年度CO₂排出量家庭部門において、全国平均である13.5%を大幅に上回る、22.6%となっている。そのため、早急に家庭部門でのCO₂排出量を減らすことが重要な課題となっている。そこで脱温暖化行動指針（CO-DO30）を定め、CO-DO30のロードマップの中では、2025年度までに再生可能エネルギーの利用を10倍化するという目標を掲げている（横浜市, 2009）。10倍化を達成するため、概ね全ての公共施設には太陽光設置、戸建て住宅の半数に太陽光と太陽熱導入、導入の義務化による新築住宅に1万戸/年程度導入、強力な支援策による既築住宅に年間1万戸程度導入等の社会的手法が挙げられている。その中の事業として2009年度、横浜市温暖化対策事業本部は5つの区の自治会・町内会に対して太陽光発電設置の補助を行った。

これらは、太陽光普及ルートとしての役割を担っていて、発電状況や、発電状況・売電状況の公開、見学者の受け入れ、施工中に工事見学会を開催したり、発電開始の式典を催したり、自治会・町内会もあり、実際に設置した太陽光システムを利用した地域の普及啓蒙活動が行われている（吉田肇, 2010）。横浜市としては、補助金助成によるトップダウンのアプローチだけでなく、こうした地域密着型のボトムアップのアプローチとしての啓蒙活動も行っている。自治会に太陽光が設置され今後普及が進んでいくと思われる横浜市都筑区加賀原一丁目に焦点を当て。本研究では、加賀原一丁目の持ち家戸建て住宅の411世帯を対象とした普及モデルを作成する。使用データとして、横浜市が提供している集計データ①と、本研究で行ったアンケート調査の非集計データ②の2つを使用する。

- ① 平成22年3月に、横浜市地球温暖化対策事業本部太陽光発電システムに関するWebアンケート調査を行っている。その報告書の中の基本属性と太陽光に関する回答のデータを使用する。（有効件数：517件）
- ② 平成22年12月に、上記のWebアンケート調査を基にして、新たに加賀原一丁目の戸建て持ち家を対象として、アンケート調査を行った。本アンケート調査では追加項目として、補助金による初期投資の軽減と、買取制度による金銭的なメリットの増加によって、今後住民の導入意向がどのように変わっていくのか調査する項目を追加し、政策シナリオ分析へ向けたデータを取得した。さらに、空間伝播性の部分で近隣住民の導入による意識変化の項目も追加した。



図7 対象地域（横浜市都筑区加賀原一丁目）

6. 使用データの比較検証

集計データと非集計データを用いたシミュレーション結果が図8である。集計データの結果と非集計データの結果を比較すると、集計データの場合はランダム性が高く、予測結果の分散が高い結果となった。一方、非集計データの場合はランダム性が低く、ある程度分散が低い結果を示せる事が分かった。これらの結果を各年で二元配置分散分析した結果、分散に対して統計的に有意な差が見られた。このように、本研究の普及モデルによって、アンケートによるデータを用いて普及予測が行える事が分かる。政策策定への基準となるように、予測結果の分散を少なく精度の高い結果を求める場合、非集計データが必要となる。マーケティングモデルやパーソントリップモデルなどで非集計データが用いられているように、太陽光普及モデルにおいても、地域レベルで詳細な普及モデルを作成する際には、非集計データの提供必要性が求められる。

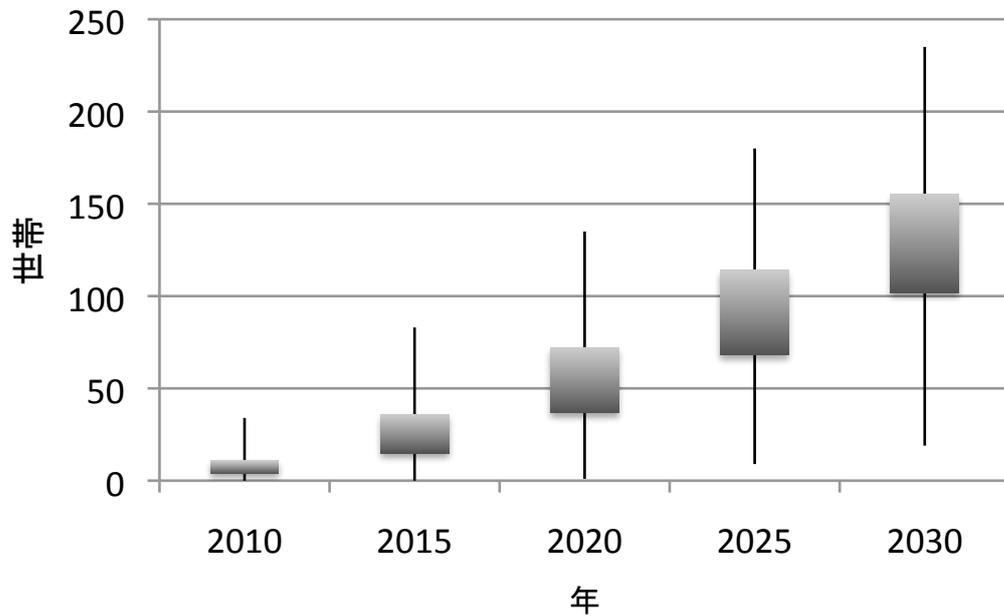


図8 集計データによる予測値の箱ひげ図 (試行回数=1000回)

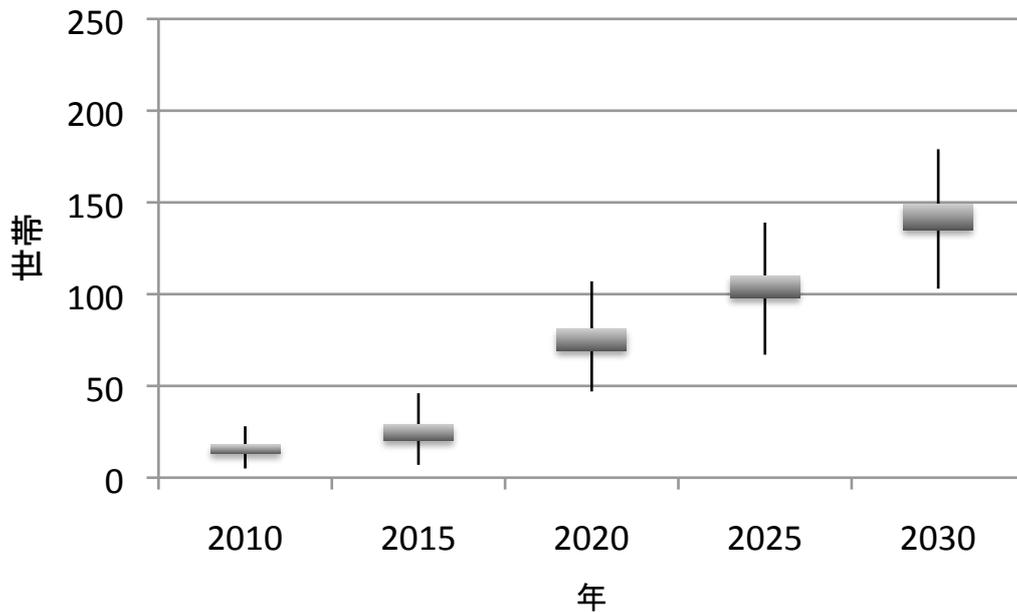


図9 非集計データによる予測値の箱ひげ図 (試行回数=1000回)

7. 政策策定のためのシナリオ分析

最後に、本研究で作成した普及モデルを用いてシナリオ分析の可能性を示唆する。今まで扱ってきたモデルでは、内部変数（世帯主年齢、年収、築年数）

だけが可変であった。シナリオ分析に対応したモデル環境を構築するため、外部変数（補助金、買取制度、システム価格）を操作するためのコントロールパネルを作成し、普及モデルに組み込んだ。これにより、コントロールパネルにシナリオを入力すると加賀原一丁目のアンケート調査結果に基づき導入結果が表示される。今回用いたシナリオとして以下の4つを用意した。

- シナリオ① 買取制度：10年間 補助金：5年間
- シナリオ② 買取制度：10年間 補助金：10年間
- シナリオ③ 買取制度：20年間 補助金：10年間
- シナリオなし 買取制度：20年間 補助金：20年間

これらを用いる目的として、買取制度と補助金のそれぞれが世帯の導入に対してどれほどの効果があるのかを理解するためである。図10の結果をみると、普及支援策を行う事によって、制度開始直後に、政策をしない場合に比べて大きな差が生まれる事が分かった。しかしながら、政策を継続させていかない限り、やがて横ばいになり、最終的に2030の結果として、さほど変わらない普及率となってしまう事が分かった。従って、導入目標値の時系列設定と、政策策定において買取制度と補助金の両輪を回していく事が重要である事が分かる。

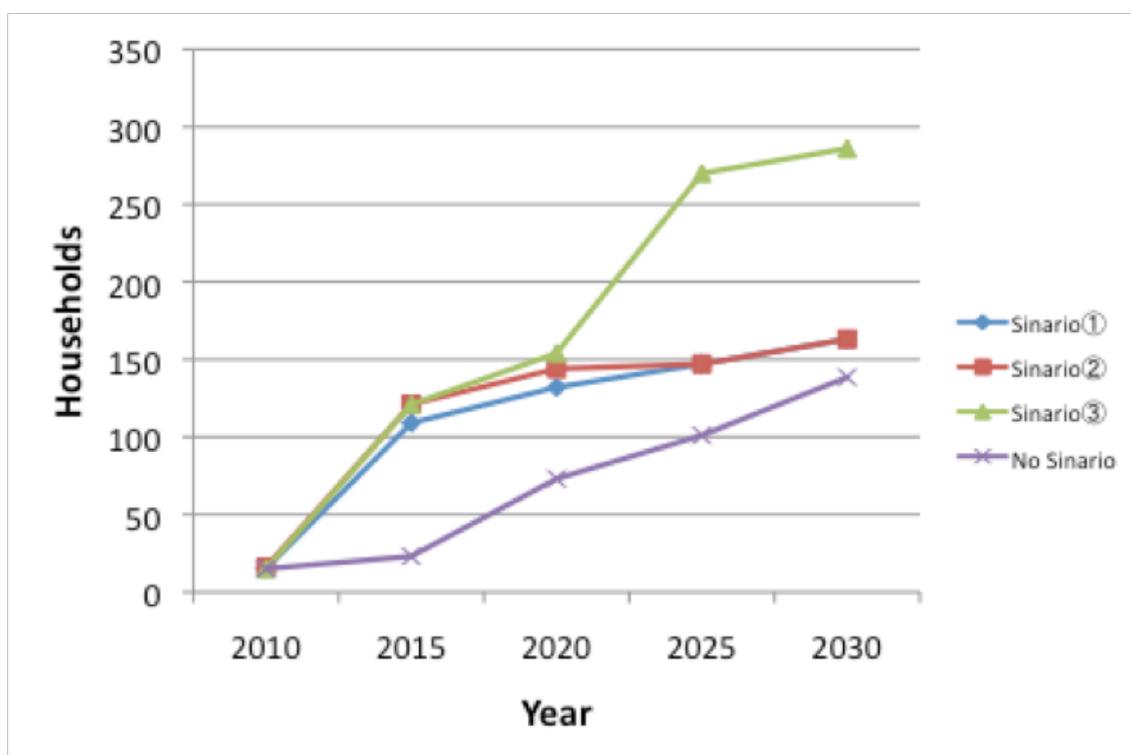


図10 政策シナリオ分析

まとめ

本研究では、経済合理性、導入適時性、空間伝播性の3つの指標を用いたシミュレーションモデルの構築し、世帯と地方自治体のスケールを横断した動的なモデルを作成した。今後、各地方自治体で、建築環境総合性能評価システムであるCASBEEの導入により、一定規模以上の建築物に対して、再生可能エネルギーの導入を検討する事を義務づける条例案などが作成されてきている事を考えると、導入適時性という軸は今後ますます重要になってくると考えられる。

そして、集計データと非集計データによるモデル変数の設定において、両者を比較し、非集計データの有効性を示し、地域レベルで詳細な普及モデルを作成する際には、非集計データの提供必要性を提示した。

最後に、本研究のモデルを用いて、定量的な政策シナリオ分析を行い、地方行政レベルでの導入目標に対する具体的な道筋を描ける可能性を示した。

今後の展望

今後の展望として、以下の3つを挙げる。これらを行う事により、さらに範囲を拡大し、世帯に関する情報が最新の状態で動的に動くモデルが可能になる。

- ① 近隣住民だけでなく、様々なコミュニティ内でより現実的な伝播を考慮したモデル作成
- ② リース事業など新たな取り組みにも対応したシナリオ分析を行うための外部変数の追加
- ③ ウェブを介して住民から情報を提供してもらうプラットフォームを構築する。

【参考文献】

- [1] 石川敦夫. 2007. 太陽光発電の普及とコストペイバックタイム—環境配慮型製品の普及条件—
- [2] 黒川浩助. 太陽光発電に関する最近の状況と展望. 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌) Vol. 128 (2008), No. 7 pp.904-907.
- [3] 沢井啓安. 住宅用太陽光発電システム本格普及へ向けて. シャープ技報(1998) 第70号 1998年4月.
- [4] 遠藤栄一, 一戸誠之. エネルギーシステムモデル MARKAL を用いたわ

が国における太陽光発電の導入条件の分析. 電気学会論文誌B (電力・エネルギー部門誌) Vol. 124 (2004), No. 12 pp.1489-1496.

[5] 元木悠子, 小坂弘行. MARKAL モデルの地方自治体への適用に関する研究. 社会技術研究論文集 Vol. 5 (2008) pp.96-105 .

[6] 松本光崇, 近藤伸亮, 藤本淳, 梅田靖, 槌屋治紀, 増井慶次郎, 李賢映. (2007).クリーンエネルギー自動車の普及評価モデルの構築. Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 29, No. 3.

[7] 山口容平, 赤井研樹, 瀋俊毅, 藤村尚樹, 下田吉之, 西條辰義. (2009).消費者選好に基づく太陽光発電および太陽熱温水器の技術普及予測と普及推進施策評価. Journal of Japan Society of Energy and Resources, Vol. 31, No. 1.

[8] Resnick, M. (1994). Turtles, Termites and Traffic Jams. The MIT Press.

[9] Epstein, Joshua M. and Axtell, Robert. (1996). Growing Artificial Societies. The MIT Press.

[10] Cederman, Lars-Eric. (1997). Emergent Actors in World Politics: How States and Nations Develop and Dissolve. Princeton University Press.

[11] 山影進, 服部正太. (2002).コンピュータの中の人工社会～マルチエージェントシミュレーションモデルと複雑系～. (株)構造計画研究所.共立出版株式会社.

[12] 兼田敏之.(2010).artisoc で始める歩行者エージェントシミュレーション. (株)構造計画研究所.共立出版株式会社.

[13] Frank M. BASS.(1969).A New Product Growth For Model Consumer Durables. Management Science Vol.15, No.5, January,1969.Printed in U.S.A.

[14] 井庭崇, 竹中平蔵, 武藤佳恭. (2001).人工市場アプローチによる家庭用 VTR の規格競争シミュレーション. 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.42, No.SIG14 (TOM5),pp.73-8.

[15] Everett,M.Rogers. (1982). Diffusion of Innovation. A Division of Macmillan Publish,Co.,Inc. (監訳: 青池慎一・宇野善康『イノベーション普及学』産能大学出版部, 1990 年を参照)

[16] Robert Axelrod. (1997). The Complexity of Cooperation: Agent-Based Models of Competition and Collaboration (Princeton Studies in Complexity). Princeton Univ Pr.

[17] Nina Schwarz. (2007). Agent based Modeling of the Diffusion of Environmental Innovations An Empirical Approach. Paper for the 5th International EMAEE Conference on Innovation. "Globalization, Services and

Innovation: The Changing Dynamics of the Knowledge Economy" 17-19 May 2007, Manchester Metropolitan University, UK

[18] 黒川洸. (1995).非集計行動モデルの理論と実際. 土木学会. pp.1-10

【参考資料】

[19] 経済産業省資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部. (2009). 太陽光発電の新たな買取制度について

[20] IEA. (2009). 太陽光発電報告書

[21] NEDO. (2009).2009年・IEA 太陽光発電報告書(その1) ~2008年の実績データ、参加国の状況~. NEDO 海外レポート NO.1054, 2009.11.4 太陽光発電【再生可能エネルギー特集】

[22] NEDO. (2007).スペインの太陽エネルギー事情. NEDO 海外レポート NO.1003, 2007.7.4 太陽エネルギー

[23] 経済産業省資源エネルギー庁新エネルギー対策課. (2009). ソーラー・タウン・ミーティング実施状況について

[24] 経済産業省資源エネルギー庁省エネルギー・新エネルギー部. (2010). 太陽光発電の買取制度について

[25] 横浜市 地球温暖化対策事業本部 地球温暖化対策課担当課長 本田肇. (2010). 平成 22 年度町内会館・太陽光発電プロジェクトへの募集

[26] 横浜市.(2009) 横浜市 CO-DO30 ロードマップ~環境モデル都市アクションプラン~

[27] NEDO「よくわかる！技術解説」

(<http://app2.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/neg/neg01/index.html>)

[28] JPEA(太陽光発電協会)ホームページ (<http://www.jpea.gr.jp/>)

[29]株式会社構造計画研究所 MAS コミュニティ (<http://mas.kke.co.jp/>)

[30] Swarm (http://www.swarm.org/wiki/Main_Page)

[31] StarLogo (<http://education.mit.edu/starlogo/>)

[32] NEDO. (2004). 2030 年に向けた太陽光発電ロードマップ (PV2003)