

S-3 脱温暖化社会に向けた中長期的政策オプションの多面的かつ総合的な評価・予測・立案
手法の確立に関する総合研究プロジェクト

3. 都市に対する中長期的な二酸化炭素排出削減策導入効果の評価

(2) 都市エネルギー供給由来の二酸化炭素排出評価と変革による削減効果

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 藤井康正

[要旨] 本研究では、最終需要端での省エネルギー施策の導入や分散電源の大規模導入が、日本のエネルギー需給とCO₂排出量に与える影響を電源構成やその運用方法の変化も含めて検討することを目的としている。平成16年度は、日本を9地域に分割した最適電源構成モデルを構築した。このモデルは線形計画問題として定式化され、CO₂排出削減技術としてCO₂回収貯留設備も考慮した。平成17年度は、個々の家庭における不確実な電力・熱の負荷曲線を生成するモデルと、確率動的計画法により個々の家庭でのコージェネレーションシステム(CGS)、給湯用ヒートポンプ(HP)の最適運転方法を決定するモデルを構築した。平成18年度は、最適電源計画モデルの改良、ガスインジェクションCGSのモデルの改良、家庭用燃料電池CGSのモデルの構築などを行い、系統電力のCO₂原単位をパラメータとしてCO₂排出削減技術としてのCGSとHPの導入効果を検討した。

平成19年度は、CO₂排出削減技術として注目を集めている電気自動車や住宅用太陽光発電の大規模導入が電力系統に与える影響あるいは導入ポテンシャルを試算した。まず、電気自動車導入に関する研究では、6kWh程度の蓄電池を積載した電気自動車やプラグインハイブリッド車の大規模導入と火力発電所でのCO₂回収貯留の実施により、発電部門と自動車利用に伴うCO₂排出量を6割程度削減できる可能性があることが分かった。太陽光発電導入に関する研究では、全国気象観測データに基づいて日本国内の住宅の屋根に太陽電池を設置した場合に予想される発電出力の変化を10分間隔で推計し、発電電力量の絶対量は大きいものの日単位での出力変動の抑制は難しいことなどが分かった。

[キーワード] 二酸化炭素排出削減、電源構成、電気自動車、太陽光発電、全国気象観測データ

1. はじめに

民生部門では、燃料電池などを利用したコージェネレーションシステム、給湯用電動ヒートポンプ、そして住宅等の屋上に設置した太陽電池の普及が、省エネルギーの推進やCO₂排出量削減の観点から期待されている。また、運輸部門でも、内燃機関自動車に代わり、各種の電気自動車の普及が期待されている。このような新しい電力利用機器の大量普及は、社会全般の電化率を高め、また発電設備の分散化を促すことも考えられ、その結果として従来型エネルギーシステムに大きな変革を迫る可能性がある。本研究では、このような新しいエネルギー利用機器の普及による日本のCO₂排出量削減効果を系統電力の電源構成や設備運用へ及ぼす影響も考慮して評価する。

2. 研究目的

平成18年度までは、最適電源構成モデルの構築と、家庭用の給湯ヒートポンプ(HP)、やコージェネレーション(CGS)の運用シミュレーションモデルを構築し、HPとCGSという省エネルギー性に

優れた機器を日本全国の戸建住宅に導入した場合のCO₂排出削減効果の試算を行った。

平成19年度は、系統電力との相互作用が比較的強い以下の2つのエネルギー利用技術の導入によるCO₂排出削減効果の評価に向けた研究を行った。

(1) 電気自動車の大規模導入によるCO₂排出削減効果の評価

CO₂排出削減技術として昨今注目を集めている電気自動車（プラグインハイブリッド車も含む）の大規模導入によるCO₂排出削減効果を、最適電源構成モデルを利用することにより評価する。実際の道路交通センサデータに基づいて自動車の時間帯別の走行パターンを想定し、バッテリーで走行可能な部分と、ガソリンなどのバッテリー以外のエネルギー供給手段で走行する部分とを分離して評価する。

(2) 住宅用太陽光発電の導入ポテンシャル評価

全国686地点の日照時間や降雨などの10分間隔の気象観測データに基づき、住宅の屋根に設置する太陽光発電システムの発電出力の時間変動と発電電力量の地点別のポテンシャルを推計する。大規模導入された太陽光発電システムのピーク供給力としての価値を検討するため、日本の住宅の屋根に様に太陽電池が設置された場合の出力の時間変動を評価する。また、地点別のポテンシャルに関しては、住宅屋根の半分に太陽電池を設置できるものと想定し、各地点での家庭用電力需要の大きさと比較する。

3. 研究方法

(1) 電気自動車の大規模導入によるCO₂排出削減効果の評価

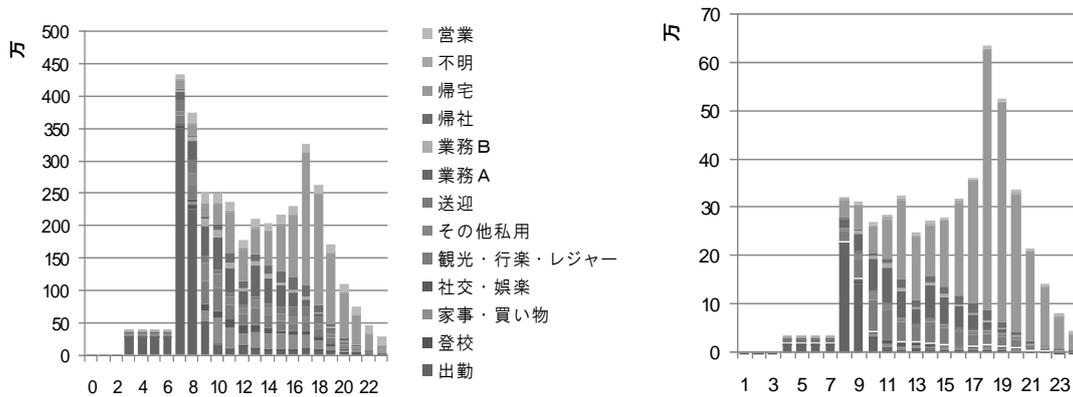
国土交通省が2005年に実施した道路交通センサ自動車起終点調査¹⁾に基づいた自動車の走行距離（トリップ長）と走行台数（発生交通量）の調査結果に基づいて、将来の電気自動車の時間帯別目的別発生交通量を推計する。本研究では、各時間帯の使用目的と台数の関係を表している時間帯別目的別発生交通量と、運行目的別トリップ長分布を求める。次に、(1)式より時間帯別発生交通量とトリップ長分布を統合的に接続する時間帯別目的別発生交通量の期待値を作成する。

$$\sum_x m_{K,i,r} \times \frac{f_{x,i,r}}{F_{i,r}} \times \frac{L_x}{v_{K,i,r}} \times \frac{1}{w_k} = h_{K,i,r} \quad (1)$$

ただし、 K :時間帯、 i :運行目的、 r :地域、 $m_{K,i,r}$:時間帯別発生交通量、 x :トリップ長分布の走行距離を λ に分割したうちの x 番目、 L_x :トリップ長、 $t_{x,i,r}$:走行時間、 $f_{x,i,r}$:運行目的別トリップ長分布、 $F_{i,r}$:合計トリップ数、 $v_{K,i,r}$:走行速度(km/h)、 w_k :時間帯幅、 $h_{K,i,r}$:時間帯別目的別発生交通量の期待値

電気自動車には6kWhの容量のバッテリーが搭載されているものと仮定し、バッテリーに蓄えられた電気エネルギーのみで30kmの走行が可能とする。(1)式で推計した時間帯別目的別発生交通量と、運行目的別トリップ長分布を利用して、各時間帯においてバッテリーで走行している自動車の台数と、バッテリー以外的手段で走行している自動車の台数を推計する。ここで簡単のため、「帰宅」「帰社」目的に関しては、それと同じトリップ長の往路を既に走行しているものとして、バッテリーの残存電力量を見積もる。全国平日乗用車の走行手段別（バッテリーでの走行かバッテリー以外で

の走行)の発生交通量を推計した例を図1に示す。



バッテリーでの走行 (左)

バッテリー以外での走行 (右)

図1. 走行手段別の発生交通量の推計例 (全国平日乗用車)

電気自動車のバッテリーが消耗した場合、運転を継続する手段としては、ここでは2通りの方法を想定する。一つは必要に応じて車外から車載のキャパシタへ断続的に、あるいは架線等から連続的にリアルタイムで直接給電を受ける方法であり、もう一つはプラグインハイブリッド車のように車載の燃料により走行を継続する方法である。ただし、直接給電の場合はインフラも整備する必要があるため実現は容易でないと判断される。電気自動車の普及率の仮定は2010年で0%、2020年で10%、2030年で30%、2040年で60%、2050年で100%となるものとする。

これらの想定から、電気自動車やプラグインハイブリッド車のバッテリー充電に必要な電力量やリアルタイムでの給電に必要な電力を算出し、それを平成18年度の研究で構築した日本を対象とした最適電源構成モデルの入力データに反映させる。バッテリー充電に必要な時間帯別の電力供給に関しては、系統電力の総コストが最小となるように決定されるものとする。

(2) 住宅用太陽光発電の導入ポテンシャル評価

本研究では、日本全国を対象に緯度の違いなどによるマクロ的な地域特性と地形や気象条件などの違いによるミクロ的な地域特性の両方を考慮して、可能な限り短い時間間隔で出力値の推計を行うため、2000年のAMeDAS観測地点686箇所において日照時間、降水量などのデータから、日射量を推計し、10分間隔で単位面積当りの太陽光発電の発電出力を計算する。

水平面全天日射量の推計は、日照時間(10分のうちの日照時間が0、2、4、6、8、10分)、降水の有無、エアマスの値から文献²⁾の手法に基づいて進める。傾斜面日射量は、水平面全天日射量から分離推計された水平面直達日射量と水平面拡散日射量とを用いる。傾斜面(住宅の屋根)の特性としては、方位角は簡単のため南に向いているものとし、傾斜角については住宅の屋根の角度の標準的な値(16°)を全国一律に想定する。

住宅の平均階数としては、戸建住宅では1.8階、集合住宅では4.7階を想定し、床面積から屋根面積を推計する。また、太陽光発電システムの発電効率としては15%程度を想定する。ただし、これにはAMeDASで観測された気温データから太陽電池モジュールの温度を推計し、高温時の太陽光発電の発電効率低下も反映させる。地域別の太陽光発電の出力の計算は、市町村別の住宅統計値

(設置可能屋根面積)と、それぞれの市町村に最も近いAMeDAS観測地点で推計された太陽光発電の単位面積当たりの出力を用いて計算する。太陽光発電出力の推計作業の流れを図2に示す。

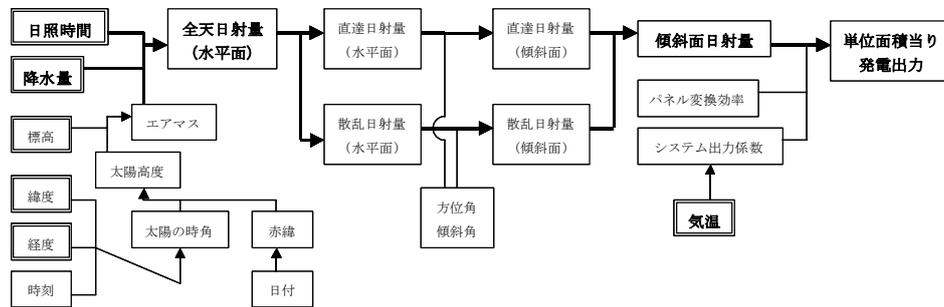


図2. 太陽光発電出力の推計作業の流れ

太陽光発電システムが住宅屋根の南側半分に導入された場合において、各地点における電力の過不足が季節においてどうなるのかを試算する。その際に全国の各地点での家庭用電力需要が必要となるが、これは平成17年度の研究で作成した電力需要曲線生成モデルと同様に、各家庭での個々の電化製品の利用状況を積み上げて算出する。

4. 結果・考察

(1) 電気自動車の大規模導入によるCO₂排出削減効果の評価

電気自動車が普及し、発電部門の2050年時点でのCO₂排出量制約を2010年比の5割となると想定する。図3に電気自動車が100%普及する2050年の全国の夏季最大三日の電力負荷の様子を示す。ここでの計算では、電気自動車のリアルタイム給電で必要となる電力量は1日当たり約80GWhで、バッテリーの夜間充電に必要な電力量は1日当たり約380GWhとなった。

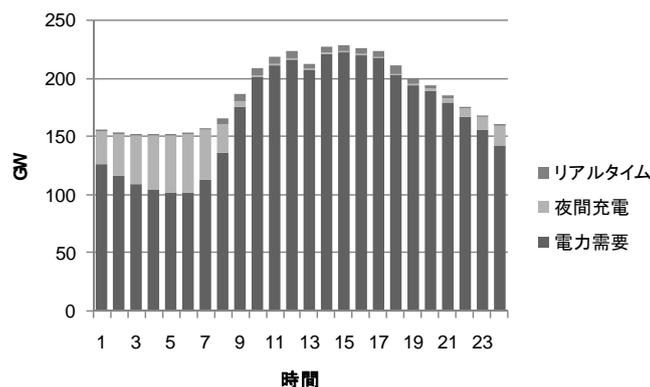


図3. 2050年の全国の夏季最大三日の電力負荷の様子

次に、CO₂排出量制約の下で、電気自動車を導入するケース (EV導入ケース) と導入しないケース (EV非導入ケース) に関して、発電設備容量の推移を図4に示す。電気自動車を導入するケースでは、IGCC発電や石炭火力発電設備の割合が大きくなり、電気自動車導入により電力需要が増加

するため、石炭を燃料とする発電からのCO₂排出量が増加する。ただし、総設備容量自体にはほとんど差異は認められない。電気自動車のバッテリーの充電が、電力需要が落ち込む夜間に行われるからである。

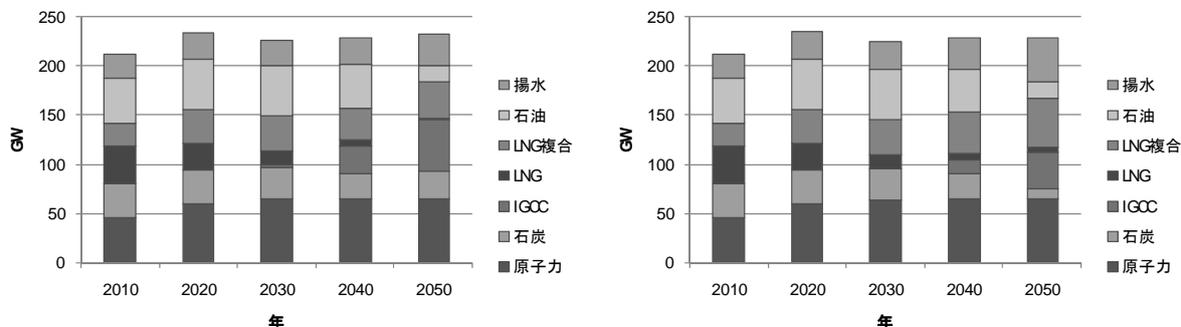


図4. 発電設備容量変化(左:EV導入ケース、右:EV非導入ケース)

図5には、EV導入ケースとEV非導入ケースに関して、2050年時点における電源種別の発電電力量ならびにCO₂排出量・回収貯留量 (CCS:CO₂ Capture and Storage)の比較を示す。これらの絶対量自体は想定シナリオに大きく依存するため、むしろ相対関係に注目してほしい。電気自動車の充電のための発電量の増加に伴い総排出量も増えるが、CO₂回収貯留量も増えるため、大気中への正味のCO₂排出量は増加しない。

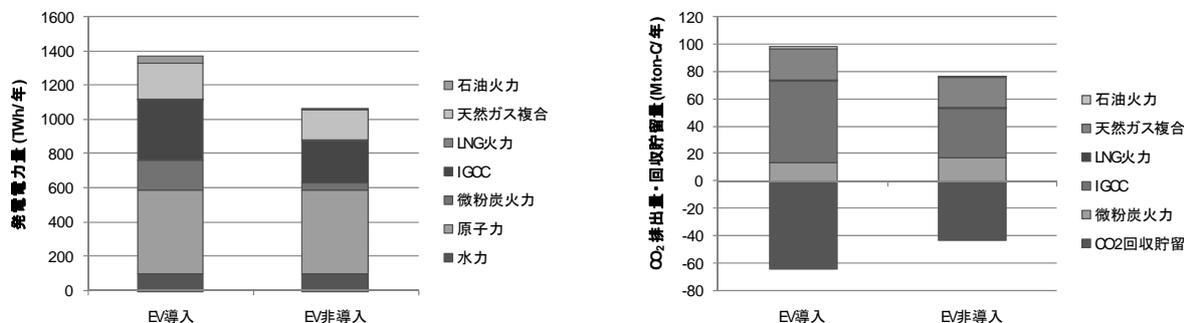


図5. 2050年時点の発電電力量 (左) とCO₂排出量・回収貯留量 (CCS) (右)

図6には、2050年時点における発電部門と運輸部門から排出されるCO₂排出量を示す。ここでは、EV非導入ケース、EV導入ケース、そしてプラグインハイブリッド車導入ケース (PHEV導入ケース)の3ケースを比較して示す。プラグインハイブリッド車の場合、バッテリーが消耗した際にはリアルタイムの給電ではなく、車載された燃料 (ガソリンを想定) を消費するため、CO₂排出量は電気自動車の場合よりもやや大きくなる。

CO₂回収貯留などにより、発電部門からのCO₂排出量を大幅に削減できる技術がある場合は、プラグインハイブリッド車を含め6kWh程度のバッテリーを有する電気自動車を普及させることにより、発電部門と自動車利用からのCO₂排出量の6割程度的大幅な削減が可能となることがわかる。なお、発電部門のCO₂排出量の削減には、原子力発電や太陽光発電などの非化石エネルギーを利用した発

電所の利用拡大も考えられる。

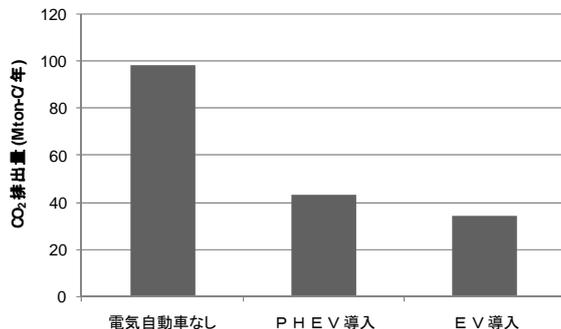


図6. 2050年時点の発電部門と運輸部門から排出されるCO₂排出量

電気自動車の普及には、リアルタイム給電のための社会インフラの整備が必要なため実現に向けて障害も多いと考えられる。特別なインフラの整備が不要なプラグインハイブリッド車の普及によるCO₂排出量削減は費用対効果大きいかもしれない。また、バッテリー充電の制御に関しては、今回は日本全体の系統電力のシステム総コストが最小となるように決めたが、実際には電気自動車の所有者の意思にも左右されるものと考えられ、厳密な想定は難しい。

(2) 住宅用太陽光発電の導入ポテンシャル評価

2000年のAMeDAS観測地点686箇所における日照時間、降水量などのデータと、全国の区市町村の住宅屋根面積の分布から推計された2000年の1年分の10分間隔での日本全体の太陽光発電の発電出力の推計値を図7に示す。また、図8には8月の31日分の日本全体での発電出力の推計値を示すが、全国に太陽電池が分散配置されているため、発電出力の曲線を日別に見ると比較的滑らかであり、雲の移動などによって発生する時間オーダーでの太陽光発電の出力の不規則変化はある程度抑制されているのがわかる。

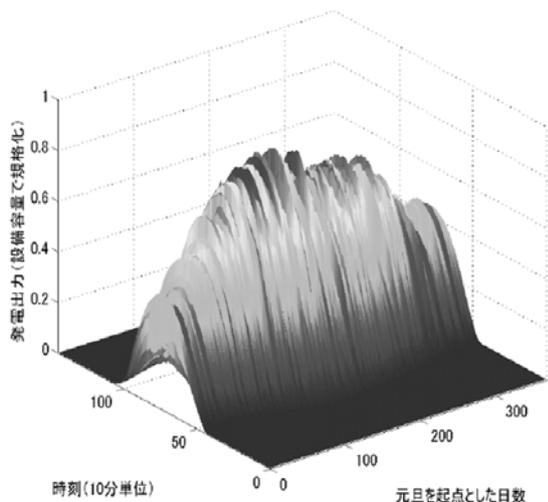


図7. 日本全体の太陽光発電出力の推計値

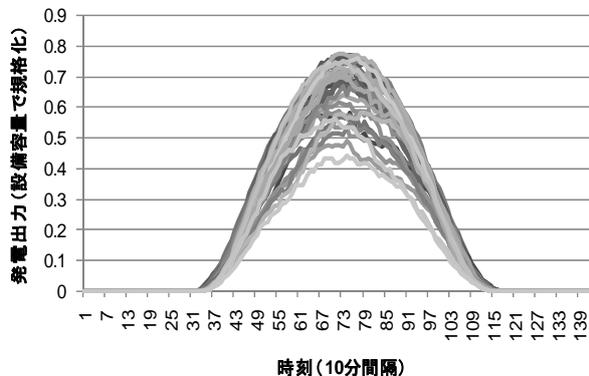


図8. 2000年8月1日～31日の太陽光発電出力推計値

次の図9には、図7の正午における断面図を示す。全国に分散配置された太陽光発電の発電出力の12:00からの10分間平均値が、日本全体でも設備容量の20%を下回る日が年間に数日(10日ほど)発生する可能性があることがわかる。太陽電池を全国に分散配置しただけでは、安定した電力が得られないと予想され、太陽電池の大規模導入に向けては、やはりバックアップ電源や電力貯蔵装置などが付加的に設置することが必要となると考えられる。太陽光発電のピーク供給力としての設備価値は、かなり限定されるものと考えられる。

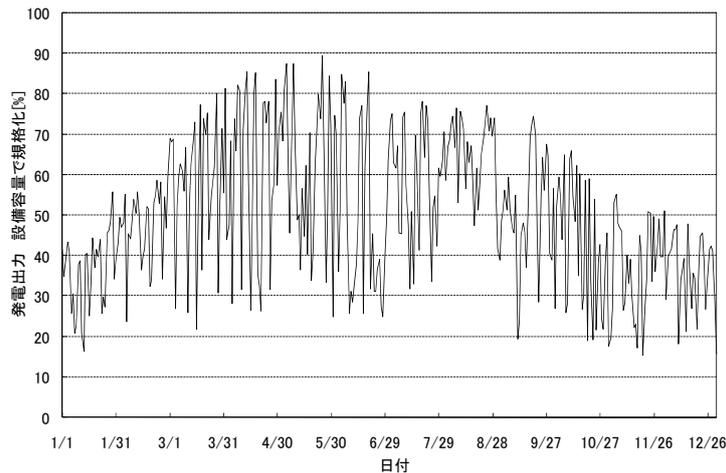


図9. 2000年毎日の正午における日本全体発電出力の推計

次に、家庭用太陽光発電の出力と全国各地点での家庭での電力需要の推定値を基に、太陽光発電システムが住宅屋根の南側半分を導入された場合に予想される各地点における太陽光発電による余剰電力量(=太陽光発電による発電電力量-家庭での消費電力量)の家庭での消費電力量に対する比を試算した結果を図10に示す。

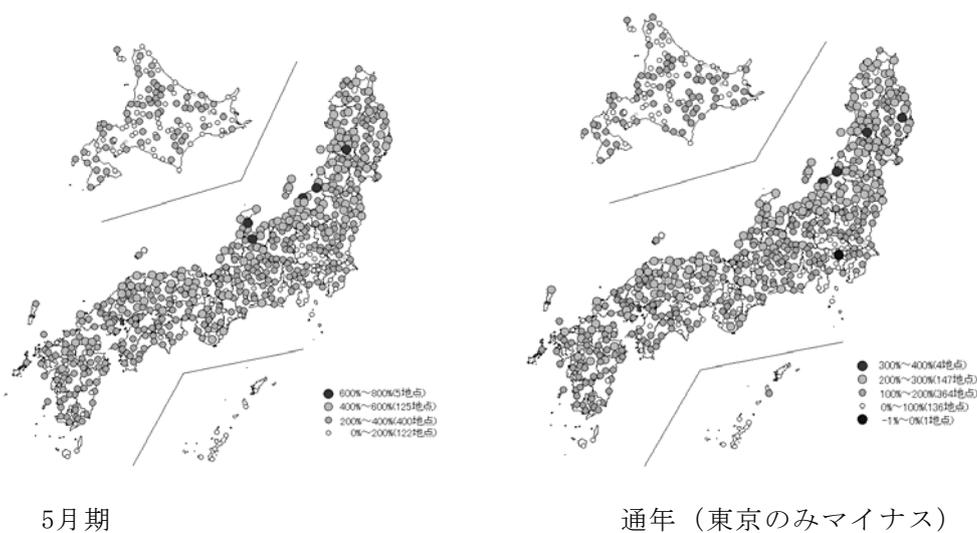


図10. 太陽光発電による余剰電力量の家庭消費電力量に対する比

東京都心部以外では、通年での売電電力量が買電電力量を上回り、東北および北陸においても太陽光発電の余剰電力量が大きくなることが推計される。また、太陽光発電の出力が低下し、逆に家庭の電力需要が上昇する冬季においても、少なくとも2000年時点でのデータに基づくと、70%以上の地域で家庭での電力供給量に余剰が発生する可能性がある。ただし、将来的に暖房機器や給湯機器の電化が進むと考えられ、本研究の試算結果よりも家庭での太陽光発電による余剰電力は少なくなるものと考えられる。

太陽光発電を導入した多くの家庭では、多量の余剰電力量の発生が予想され、電力貯蔵装置の導入に加えて、逆潮流のニーズも高まるのではないかと考えられる。太陽光発電の出力が大きくなる昼間時間帯は、家庭での電力需要は一般にはあまり大きくはないことに加え、昼間時間帯の系統電力の限界発電費用も高価となることから、社会厚生的にも逆潮流が望まれることになる。ただし、需要端に分散配置された太陽光発電からの逆潮流の大規模な実施には、様々な技術的・制度的な課題があるといえる。より具体的な検討のためには、配電ネットワークの構成や電気回路の特性、需要や発電設備の地理的な分布と時間的不確実な変動、そして経済的利得の最大化を目指す電力貯蔵装置の戦略的運用も考慮に入れなくてはならない。今後は、電力貯蔵装置の適当な運用方法などを仮定するなど、問題設定を簡略化しつつ、太陽光発電の最適導入規模などに関する検討を進めることが考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

今回の評価結果をまとめると以下ようになる。

1) 電気自動車の大規模導入によるCO₂排出削減効果の評価

6kWh程度のバッテリーを利用した電気自動車が普及すれば、火力発電所でのCO₂回収貯留を実施できることにより、大幅なCO₂排出削減が期待できると考えられる。また、電気自動車が大規模に導入されても、深夜電力を利用するため、発電設備を大幅に増やす必要性は低いと考えられる。ただし、電力消費量自体は顕著に増加するが、その際は発電部門での石炭の消費量が大きく増加するものと考えられる。

2) 住宅用太陽光発電の導入ポテンシャル評価

今回は太陽電池の設置場所として住宅建物の屋上に限定したが、太陽光発電の潜在的なエネルギー供給量はとても大きく、太陽光発電システムの設備費が十分安価になった場合の電気事業に与える量的な影響は、家庭から電力系統への大規模な逆潮流などとして、大きなものになると予想される。また、全国各地に太陽電池を分散配置し、全国規模での利用ネットワークを構築できたとしても、発電出力の日毎の変動を平滑化することはできず、太陽光発電の出力低下時に備えるための付加的発電設備が必要となると考えられる。

(2) 地球環境政策への貢献

今後、電気学会、エネルギー・資源学会、日本エネルギー学会などの主要なエネルギー関連学会での発表やシンポジウム等での議論を通じ、関連業種の専門家における本モデルの認知度を高め、その妥当性の向上を目指すとともに、政策評価の道具としての説得力を高めるように努める。

6. 引用文献

- (1) 国土交通省：「道路交通センサス 自動車起終点調査」（平成 17 年実施）
- (2) 日本気象協会：「太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発（最適設計のための気象データの調査研究）」 平成11年度NEDO委託業務成果報告書，2000

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

〈論文（査読あり）〉

なし

〈査読付論文に準ずる成果発表〉

なし

〈その他誌上発表（査読なし）〉

なし

(2) 口頭発表（学会）

- 1) 上杉春奈、藤井康正：「電気自動車の普及が電源構成に与える影響と二酸化炭素削減効果」，第24回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス，東京，2008
- 2) 藤井康正：「全国気象データに基づく家庭用太陽光発電のポテンシャル評価」，第27回エネルギー・資源学会研究発表会，大阪，2008

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

なし

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし