

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 大学院工学系研究科 原子力国際専攻 藤井康正

平成16～20年度合計予算額 11, 196千円
 (うち、平成20年度予算額 1, 651千円)

※上記の合計予算額には、間接経費 2, 583千円を含む

[要旨] 最終需要端での省エネルギー施策の実施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した。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。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。最適電源計画モデルの改良、各種CGSのモデルの改良・構築を行い、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、プラグインハイブリッド車(PHEV)や住宅用太陽光発電(PV)の全国規模での本格導入が電力系統に与える影響などを試算した。

PHEV、そしてCGSやHPなどの大規模導入が、関連セクターにおけるCO₂排出量限界削減費用に及ぼす影響を統合評価した。家庭部門におけるCGSやHPの導入効果は、それ自体では量的には大きくはないことがわかった。一方、PHEVの普及に関しては、CO₂排出量削減効果の絶対量は比較的大きく、充電のための電力需要量増加による発電部門での限界削減費用の上昇幅も小さく抑制できる結果となった。つぎに、HPに太陽熱温水器を併用したシステムの経済性やCO₂排出削減効果を、シミュレーションモデルを用いて検討した。その結果、太陽熱温水器の併用による相乗効果は小さくなく、特にランニングコストに関しては、単体利用との差異がほとんどないことがわかった。関東地域を対象とした太陽光発電の大規模導入が系統電源の運用や最適電源構成に及ぼす影響を大規模な線形計画問題として評価した。太陽光発電の過剰出力を適宜遮断すれば、太陽光発電設備の設置場所の地域的な広がりによる「ならし効果」と系統内の火力発電所の負荷追従運転により、経済性の観点からは、追加的な蓄電設備はほとんど不要であることなどがわかった。

[キーワード] 電源構成、電気自動車、太陽光発電、ヒートポンプ給湯器、家庭用コージェネレーション

1. はじめに

都市におけるCO₂排出量削減には、最終需要部門における新しい電力供給・利用機器の普及が鍵となると考えられる。ここでいう新しい電力供給・利用機器とは、例えば、家庭での給湯と同時に発電を行うコージェネレーションシステム（Co-generation System：以降はCGSと略記）、環境の熱を利用する高効率の給湯用ヒートポンプ（Heat Pump：以降はHPと略記）、住宅の屋上などを利用した太陽光発電（Photovoltaics：以降はPVと略記）、そして系統電力が利用可能なプラグインハイブリッド車（Plug-in Hybrid Electric Vehicle：以降はPHEVと略記）が挙げられる。政府や民間においても、これらの新しい機器の投入・開発強化が実施されている。日本の家庭部門の最終エネルギー消費における割合は、約15%と他部門と比較すると相対的には小さいものの、ライフスタイルの変化や快適性の追求などにより、今後ともその堅調な増加が予想される。そのため家庭部門における省エネルギー対策実施は、CO₂排出量の大幅な削減に向けて重要であるといえる。また、運輸部門からのCO₂排出量は、わが国全体の排出量の約2割を占めており、その約9割は自動車からのものであるから、電気自動車の導入がCO₂排出量削減対策に及ぼす影響は大きいと判断される。

これらの新しい電力供給・利用機器は、一般には社会全体の電化を促進し、系統電力と密接に関連しているため、それらの大規模な導入は、系統電力の電源設備計画や運用計画にも大きな影響を及ぼすものと考えられる。そのため、これらの機器の導入によるCO₂排出削減効果を適切に評価するためには、個別機器の省エネルギー効果だけでなく、電力系統との間の相互作用も考慮に入れなくてはならない。系統電力のCO₂排出原単位の大きさによっては、新しい利用機器の導入が、逆に社会全体としてのCO₂排出量を増加させることもありうるからである。一方、その系統電力のCO₂排出原単位は、原子力発電所の設備容量や稼働状況、そして火力発電所における二酸化炭素回収貯留（CO₂ Capture and Storage:以降はCCSと略記）の普及度合いにも大きく左右され、不確実性も大きい。

2. 研究目的

本研究では、家庭部門と運輸自動車部門を中心とした最終需要部門における新しい電力供給・利用機器（CGS、HP、PV、PHEV）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、CCSの利用も含めた電源構成やその運用方法の変化も含めて、最適化型のエネルギーモデルのシミュレーションを通して総合的に検討することを目的としている。求められた最適解を評価することにより、各種技術に期待される貢献度に関する情報を得ることができる。今後のCO₂排出量の大幅削減に向けた実効性の高い政策立案に資する指針を導き出すことを目指す。

3. 研究方法

(1) 方法の概要

本研究の目的を達成するために、CGS、HP、PV、PHEV、そしてCCSをそれぞれ対象としたモデルを構築し、それらを組み合わせた計算を行った。ただし、上記の機器の導入効果の全てを同時に分析することは、必要となる時間的・空間的な解像度が非常に大きくなってしまいうため、計算コストの観点で現実的とはいえない。そのため、PVに関してのみは、関東地域を対象とした単一年の静学的モデルによる評価を行った。その他の機器等（CGS、HP、PHEV、CCS）に関しては、日本

全体を対象に2050年までの動学的モデルを用いた評価を行い、電源構成の変化や機器の普及速度なども考慮に入れた検討を行った。

構築したモデルは具体的には次の通りである。

- 1) 最適電源構成モデル：本モデルは与えられた需要に対して、日本全体の発電事業総費用を最小にするような電源構成、運用方法を線形計画法により求めるものであり、電源種別の運用特性や経済特性、そしてCO₂排出量削減対策なども明示的に考慮した解析が可能である。本モデルにおいては日本を9地域に分割し、地域ごとの電力需要の将来シナリオを与えている。なお、関東地域の太陽光発電の大規模導入時のシミュレーションのケースは、関東地域だけを考慮し、時間解像度を10分間隔としたものを使用している。
- 2) 家庭部門におけるCGSとHPの負荷推定モデル：家庭の不確実な電力需要・熱需要に対して運用される個々のCGSやHPの最適な運用を推計し、その結果を数千軒の規模で足し上げること考えることで、CGSやHPの導入が、日本全体の電力負荷や都市ガス消費量に与える影響を評価する。
- 3) 自動車走行パターン推定モデル：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。
- 4) 太陽光発電出力推定モデル：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し、大規模導入された太陽光発電システムの合計出力を評価する。

次に(2)～(5)では、それぞれのモデルについて概説する。

(2) 最適電源構成モデル

本研究で構築した最適電源構成モデルは、「全国モデル」と「地域モデル」の2種類存在する。地域モデルは時間解像度を高めた上に、1年分の負荷データを考慮しているのが特徴である。いずれも、与えられた電力需要の将来シナリオに対して、電源種別の特性やCO₂削減策などを考慮しつつ、発電事業総費用を最小にするような電源構成や運用方法を線形計画法により求めるものである。以下にそれぞれの概要を記す。

1) 全国モデル

- ・対象期間：2010年から2050年（5期間）。
- ・地域分割：日本の9地域（北海道・東北・関東・北陸・中部・近畿・中国・四国・九州）
- ・評価関数：対象期間中の発電事業総費用（期間中の割引率は5%で現在価値換算）
- ・制約条件：電力需給制約、供給予備力制約、設備容量制約¹⁾²⁾、発電出力制約、揚水式水力関連制約、電力融通制約、負荷追従制約、LNG消費量制約、CO₂排出量制約、CO₂回収設備制約、CO₂貯留制約
- ・電源種類：原子力、石炭、IGCC、LNG、LNG複合、石油、揚水、一般水力・地熱（外生値）、そして周辺他社からの融通電力
- ・想定負荷曲線：各地域・年度につき24時間帯で構成されたモデル日負荷曲線（年間7パターン、時間帯幅は1時間）を想定³⁾（例、図1）
- ・CO₂回収設備：石炭・IGCC・LNG・LNG複合発電にのみ導入可能

- CO₂貯留：日本の帯水層、油・ガス田、海洋への貯留を考慮⁴⁾

2) 地域モデル

- 対象期間：特定の1年間（本研究では2007年）
- 地域分割：1地域のみ（本研究では関東地域）
- 評価関数：対象期間中の発電事業総費用
- 制約条件：電力需給制約、供給予備力制約、設備容量制約、発電出力制約、揚水式水力関連制約、負荷追従制約、最低出力制約、LNG消費量制約、CO₂排出量制約
- 電源種類：原子力、石炭、LNG、LNG複合、石油、揚水、一般水力・地熱（外生値）、そして周辺他社からの融通電力は割愛
- 想定負荷曲線：1年間を時間帯幅10分間で52,560時点
- CO₂回収設備：考慮せず
- CO₂貯留：考慮せず

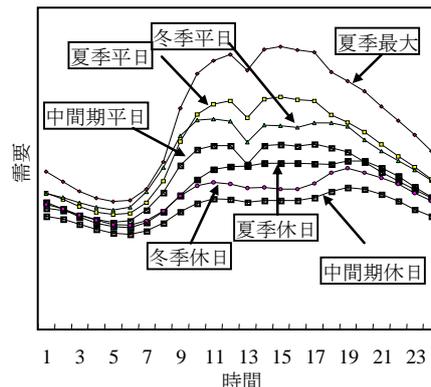


図1. 日負荷曲線の例

また、表1には、本最適電源計画モデルで想定したパラメータの例を示す。また、図2には全国モデルのCO₂排出量無制約時の発電電力量と発電設備容量の試算結果を示す。

表1. 電源種別のパラメータの例

	原子力	石炭	IGCC	LNG	LNG複合	石油	揚水
建設単価[千円/kW]	338	308	308	208	208	287	196
年経費率[%]	9.09	9.05	9.05	9.05	9.05	9.05	5.14
耐用年数[年]	40	40	40	40	40	60	50
発電端効率[%]	100	37.8	48	38.6	46.5	39	100
所内率[%]	4.5	7	7	4.5	3	5	0.5
負荷追従率上限[%]	100	120	110	130	130	130	∞
負荷追従率下限[%]	100	80	90	70	70	70	0
燃料発熱量		6200 [kcal/kg]	6200 [kcal/kg]	13000 [kcal/kg]	13000 [kcal/kg]	9800 [kcal/l]	
CO ₂ 排出原単位		0.61752 [kg-C/kg]	0.61752 [kg-C/kg]	0.7462 [kg-C/kg]	0.7462 [kg-C/kg]	0.78792 [kg-C/l]	

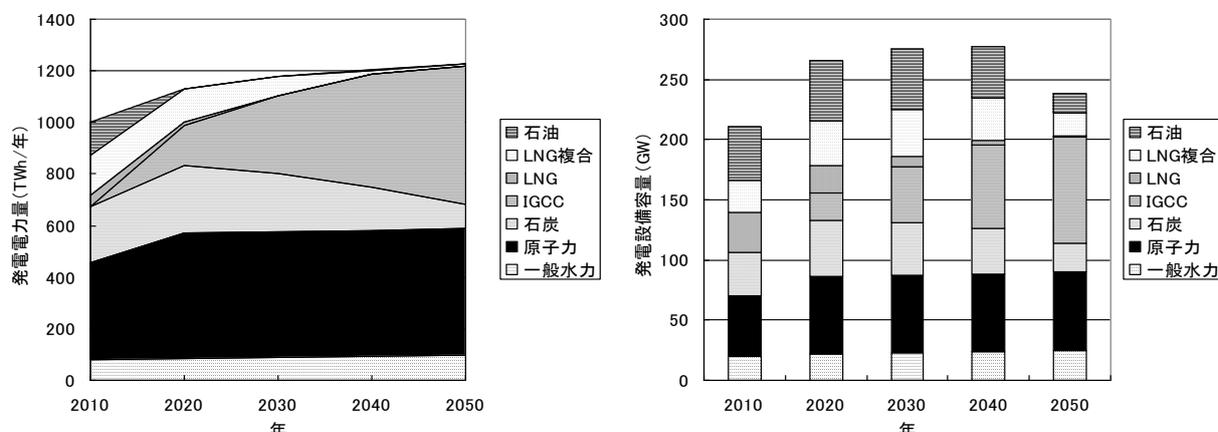


図2. 日本全体のCO₂排出量無制約時の発電電力量（左）と発電設備容量（右）の試算結果

(3) 家庭部門におけるCGSとHPの負荷推定モデル

まず、家庭の日負荷曲線推定モデルについて説明する。このモデルは、家庭の中にある電気・ガス機器個々の時刻別に発生する需要を乱数（モンテカルロ・シミュレーション）により生成し、それらの和として1軒1軒の電力・熱の日負荷曲線を算出するものである。まず、統計調査データを参考に各家庭の世帯構成員とその行動⁵⁾を決め、それぞれの10分毎の各時点での行動や気温などの情報から、各電気・ガス機器の起動確率を求める。そして、求めた起動確率に従って、これらの機器の起動・停止をモンテカルロ・シミュレーションにより決定し、それに機器毎の単位消費エネルギーを掛けることによってその機器の使用エネルギーを求める。そして、それを積分することによって日負荷曲線を生成する。図3には、東京在住の5人家族世帯、冬期平日の電力と熱（給湯）の日負荷曲線の生成サンプルを載せる。急峻なピーク負荷が表れ、不確実な需要となる様子が模擬できていることが見て取れる。なお、厨房用のIHコンロ、ガスコンロは本シミュレーションには含まれていない。

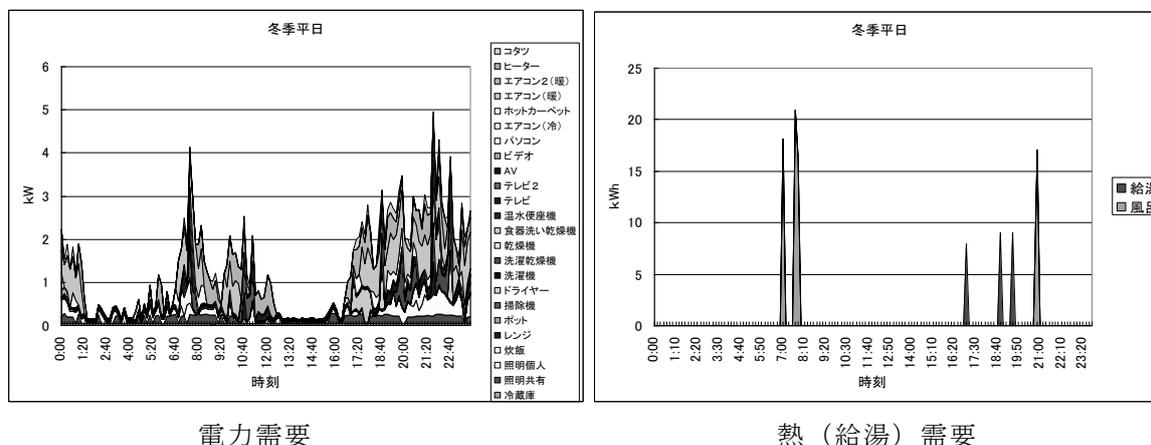


図3. 東京在住の5人家族世帯（冬期平日）の電力と熱（給湯）の日負荷曲線の生成サンプル

都道府県による気温・家族構成比率・行動パターン・機器普及率の違いを考慮して、47都道府県・20世帯類型（表2参照）・6季節・10分単位の電力・熱の日負荷曲線を生成する。本研究では、各家庭での電力・燃料需給の変化を積み上げて、日本全体としての変化を推計している。47都道府県別・20世帯類型別に、それぞれ100軒分（のべ94,000軒）の計算を行う。そして、その100軒分の電力・燃料の日負荷曲線の1軒当たりの平均値に、都道府県別・世帯類型別の一戸建ての存在軒数を乗じて日本全体の家庭部門の日負荷曲線を導出する。図4には、本研究で想定した都道府県別・世帯類型別⁶⁾の一戸建ての存在軒数を示す。

次に確率動的計画法を用いたCGSとHP最適運用戦略の導出について説明する。家庭における電力・熱の日負荷曲線の形状は、毎日毎日異なっており確実に負荷の大きさを予測することは難しい。また、負荷変動が大きく、負荷の集中する時間帯も日々変化するものと考えられる。このような状況下で、CGSやHPの効率的な運用を行なうためには、各家庭での電気・ガス機器の使用傾向を考慮しつつ、CGSやHPの合理的な運用戦略を決める必要がある。本研究では、家庭における電力・熱の需要の時間的な推移を、一種の確率過程によりモデル化できると仮定し、確率動的計画法を用いて、光熱費（電気代と燃料費の和）の期待値が最小となるような最適運用戦略を導出することを考えた。以下に第 t 時点における光熱費の期待値 Q_t を求める関数方程式を示す。式(1)がHPの

ケースであり、式(2)がCGSのケースである。

表2. 世帯類型と構成員

世帯種類	世帯構成員数			
	有職者	家庭婦人	学生	無職
1a	1	0	0	0
1b	0	0	1	0
1c	0	0	0	1
2a	2	0	0	0
2b	1	1	0	0
2c	1	0	1	0
3a	2	0	0	1
3b	1	1	0	1
3c	1	1	1	0
3d	1	1	1	0
3e	2	1	0	0
4a	3	1	0	0
4b	2	1	1	0
4c	1	1	2	0
4d	2	1	1	0
4e	1	1	2	0
4f	1	1	0	2
5a	2	1	2	0
5b	1	1	2	1
5c	1	1	2	1

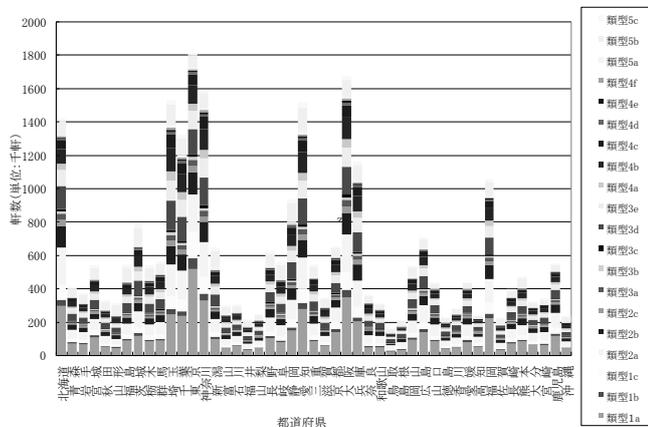


図4. 都道府県別・世帯類型別の一戸建ての存在軒数

式(1)と(2)の $P_{t,t+1}$ は、モンテカルロ・シミュレーションを通して、同一世帯に関して繰り返し需要(例えば10~50日分)を発生させて、その発生頻度から確率を推計する。モンテカルロ・シミュレーションにおいて、たまたま一度も発生しなかった事象の確率については、周辺の事象の確率を利用して正規分布補間を行なうことによって値を想定する。図5には、対象としたCGSおよびHPの想定モデルの概略図を載せる。表3には、本研究で想定したCGSとHPの仕様を示す。

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}) = \min_{a_t} \left(C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, a_t) + \sum_{m=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}; Dh_{t+1,m}) Q_{t+1}(S_{t+1,i'}, Dh_{t+1,m}) \right) \quad (1)$$

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}) = \min_{a_t} \left(C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}, a_t) + \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}, De_{t,k}; Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) Q_{t+1}(S_{t+1,i'}, Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) \right) \quad (2)$$

ただし、 C_t : 第 t 時点における総コスト、 $S_{t,i}$: 第 t 時点に貯湯タンク内残湯量(i : 8段階に離散化)、 $Dh_{t,j}$: 第 t 時点に熱負荷(j : 8段階に離散化)、 $De_{t,k}$: 第 t 時点に電力負荷(k : 8段階に離散化)、 a_t : HPあるいはCGSの制御出力、 $P_{t,t+1}$: 第 t 時点と第 $t+1$ 時点との間における需要の遷移確率

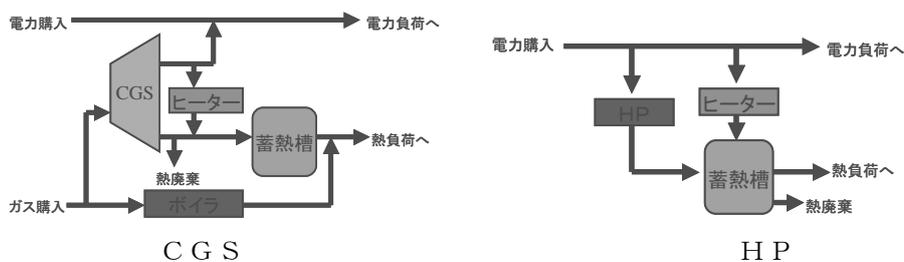


図5. システム構成の概略図

表3. ガスエンジンCGSのHP想定仕様

	効率・COP
コージェネ	出力 1kW 発電効率 20% (LHV) 排熱利用効率 65% (LHV)
追焚ボイラ	ボイラ効率 0.86
HP 給湯器	COP 3 (外気温 16℃)
貯湯タンク	蓄熱ロス 0.1%/10分

燃料電池を発電装置として利用したCGSのシステムは、基本的な構成は図5に示したCGSに従うものとする。ガスエンジンCGSの運用としては、「運転」と「停止」の2値制御がなされているが、燃料電池の場合は、1kW程度の小容量であっても、部分負荷運転が可能となる点が異なる⁷⁾。確率的計画法に基づいて数学モデルを作成する際には、燃料電池CGSでは、式(2)における a_i の探索空間が広がるため、必要な計算時間も数倍に増加する。

電気料金に関しては、それぞれ地域の一般電気事業者の料金メニューを参考に設定した。また、CGSの燃料費に関しては都市ガス料金に基づいて設定し、簡単のため、それぞれの一般電気事業者の管内では同一とし、それぞれの地域の代表的なガス事業者の料金を参考に設定した。

図6には日本全体の家庭部門の年間の購入電力量と購入ガス量を示す。HPを導入する場合は、ガスコンロ等の厨房器具を除くと、ガスの消費量は0となるものとしている。本モデルでは、厨房用のコンロで消費されるエネルギーは考慮していないため、家庭でのエネルギー消費量の総量を求めるには、これらを考慮する必要がある。燃料電池CGSを連続運転する場合、電力購入量は大幅に減少し、その代りに燃料としてのガスの購入量が2倍以上に顕著に増大する。ガスエンジンCGSの場合は、出力レベルが固定され、運用が硬直的になるため、運転時間も短い。そのため、電力消費量や燃料消費量のベースケースからの変化は、燃料電池CGSの場合と比べてガスエンジンCGSでは少ない。

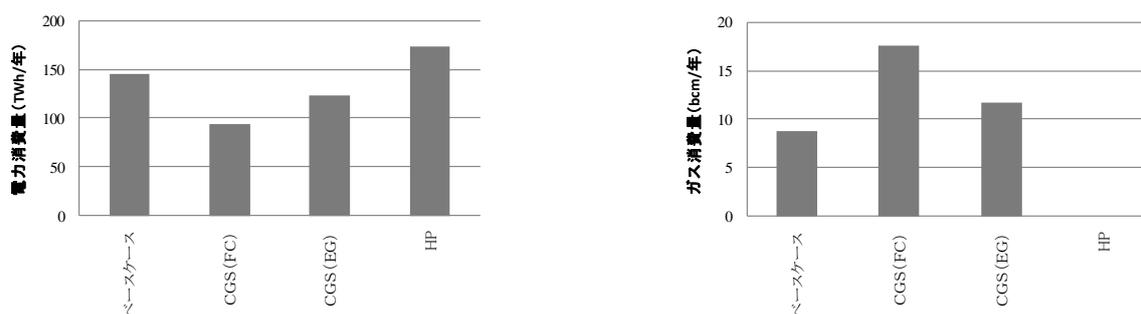


図6. 家庭部門（戸建住宅）の購入電力量（左）と購入ガス量（右）

図7には、各季節の平日、休日別の日本全国を対象とした家庭部門の電力日負荷曲線の推計値を示す。なお、「電力負荷」は、FCとHPがないときの電力であり、「GE」はガスエンジンCGS、「FC」は燃料電池CGS、「HP」は給湯用ヒートポンプが、それぞれ戸建住宅に100%普及した場合の購入電力の日負荷曲線である。ガスエンジンCGSの場合では、朝方のピーク時には起動されることの割合

は少なく、主に夕方からのピーク需要に使用されているのがわかる。一方、燃料電池CGSの場合は、本研究では燃料電池の1日の間での起動回数には上限を設けていないためであるが、部分負荷での柔軟な運用が可能となるため、朝方の小さなピークでも運用されるケースが増えている。また、HPの運転は、深夜料金の適用が終わる明け方に集中する結果となっている。これは各家庭がそれぞれで光熱費の最少化を行ったものであるが、社会全体としてHPの運転時間が分散されるような仕組みや方策が必要とも考えられる。

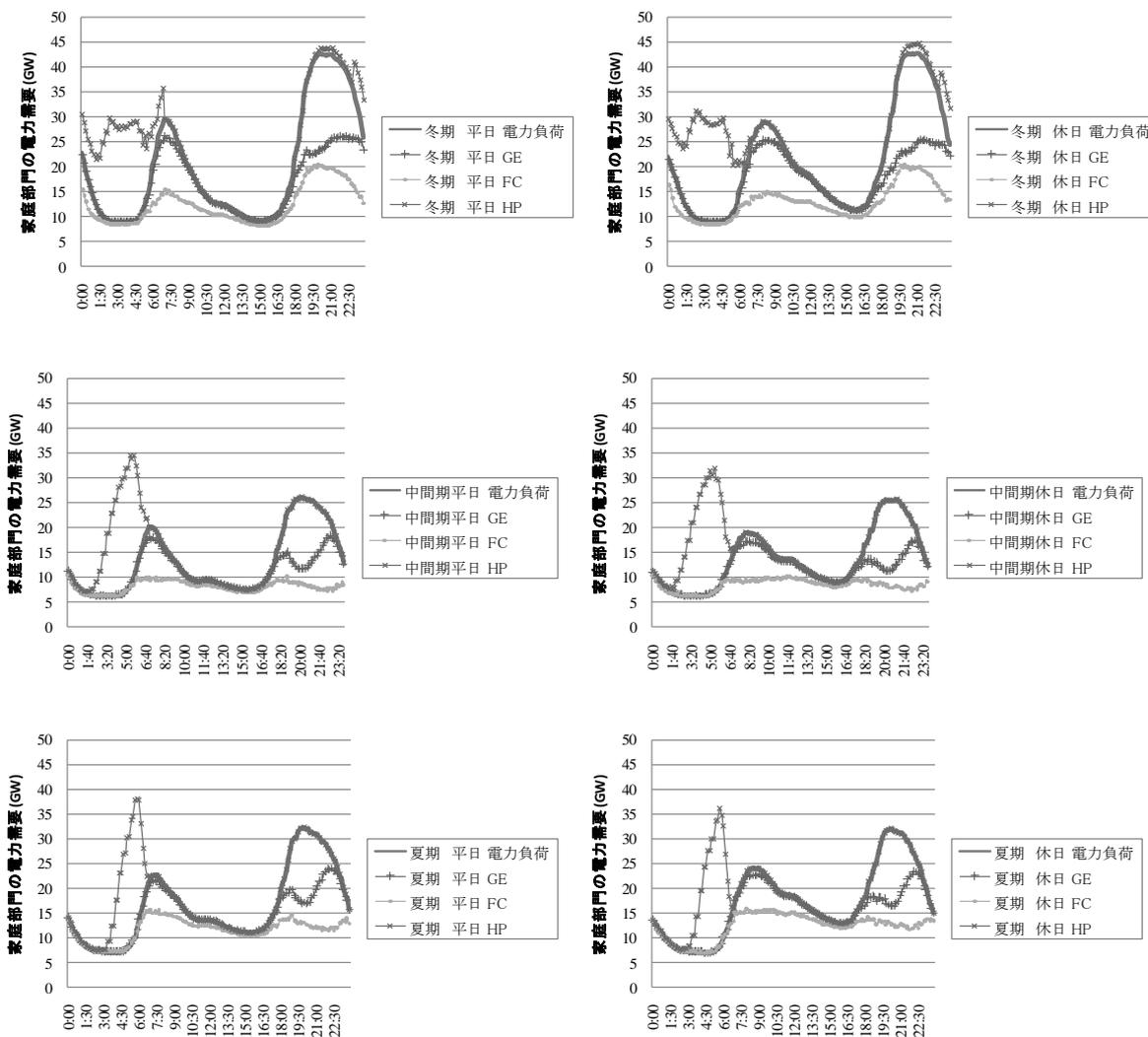


図7. 家庭部門（戸建住宅）の電力日負荷曲線
（厨房用IHコンロ分は除く）

そして、本節の最後に、平成20年度の研究で構築したHPと太陽熱温水器の併用システムのシミュレーションモデルについて述べる。太陽熱温水器（ソーラーシステム：以降はSSと略記）もPVと同様に、都市におけるCO₂排出量を削減する技術として注目を集めている。本システムではSSで沸き上げるタンクと、HPで沸き上げたお湯を貯めるタンクを分け、給湯時にはそれぞれのお湯を適宜混ぜて使用するものとする。想定システムを図8に示す。SSはタンクA下部を温め、HPはタンク

クA下部から水を引き、タンクB上部に貯湯する。貯湯分がタンクB下部からタンクA上部へ移動する。使用時はタンクAのお湯を優先して使い、タンクAが利用温度以下ならばタンクBのお湯とタンクAのぬるま湯を混ぜて使用する。給水はタンクA下部に行われタンクBのお湯を使用した場合はタンクA上部からタンクB下部へ移動するものとする。HPとSSの併用システムでは、貯湯タンク内部の温度分布を明示的に考慮する必要があるため、状態変数の次数が高くなり、計算時間が大幅に増大する問題点がある。図8のシステムの場合、貯湯タンク内部の温度分布を6次元の状態変数で表現している。ただし、図9に示すように、HPとSSの併用システムは、HP単独の場合と比較して有意な経済的なメリットを見出しにくいと東京都内を想定した4世帯のシミュレーションで試算されたため、本研究ではその全国的な大規模導入を想定した評価は行っていない。

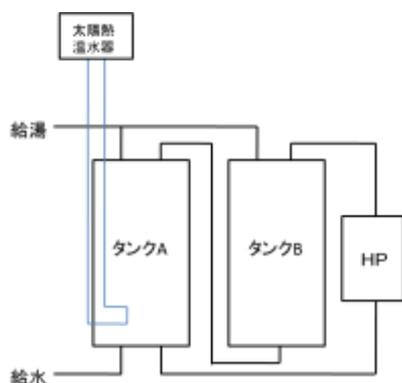


図8. SSを併用したHPシステム

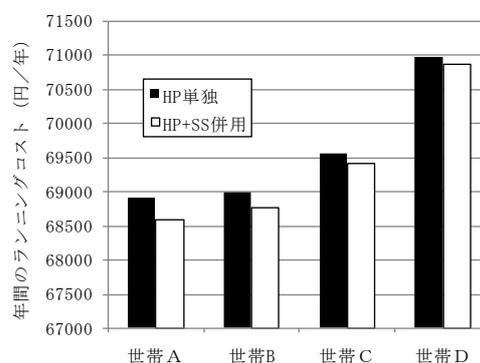


図9. HP単独とSS併用時のランニングコスト

(4) 自動車走行パターン推定モデル

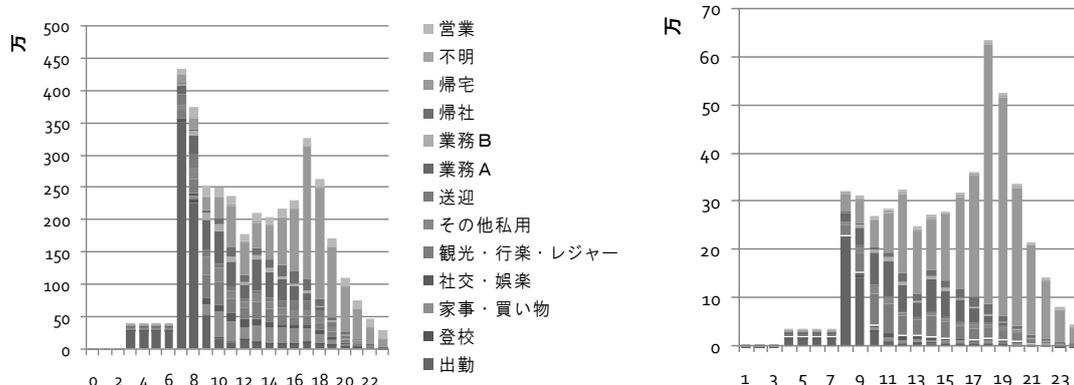
国土交通省が2005年に実施した道路交通センサス自動車起終点調査⁸⁾に基づいた自動車の走行距離（トリップ長）と走行台数（発生交通量）の調査結果に基づいて、将来の電気自動車の時間帯別目的別発生交通量を推計する。本研究では、各時間帯の使用目的と台数の関係を表している時間帯別目的別発生交通量と、運行目的別トリップ長分布を求める。次に、式(3)より時間帯別発生交通量とトリップ長分布を統合的に接続する時間帯別目的別発生交通量の期待値を作成する。

$$\sum_x m_{K,i,r} \times \frac{f_{x,i,r}}{F_{i,r}} \times \frac{L_x}{v_{K,i,r}} \times \frac{1}{w_k} = h_{K,i,r} \quad (3)$$

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 X に分割したうちの x 番目、 L_x :トリップ長、 $\tau_{x,i,r}$: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。式(3)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、バッテリー以外の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10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10. 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PHEV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。

図11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。電気自動車としてPHEVのみを想定する場合は、このリアルタイム給電の部分が、搭載したエンジンによる発電で賄われるものと考ええる。

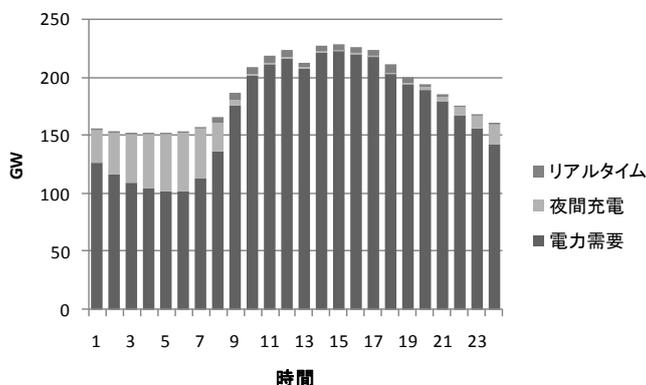


図11. 2050年の全国の夏季最大三日の電力負荷の様子

これらの想定から、電気自動車やPHEV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、それを最適電源構成モデルの入力データ（負荷データ）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。

（５）大規模導入時のPV出力の推計

本研究では、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、AMeDAS観測地点における日照時間、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PV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⁹⁾¹⁰⁾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。なお、屋上以外に設置されるPVも、ここでは簡単のため 16° の傾斜角で設置されるものと想定する。PV出力の推計作業の流れを図12に示す。

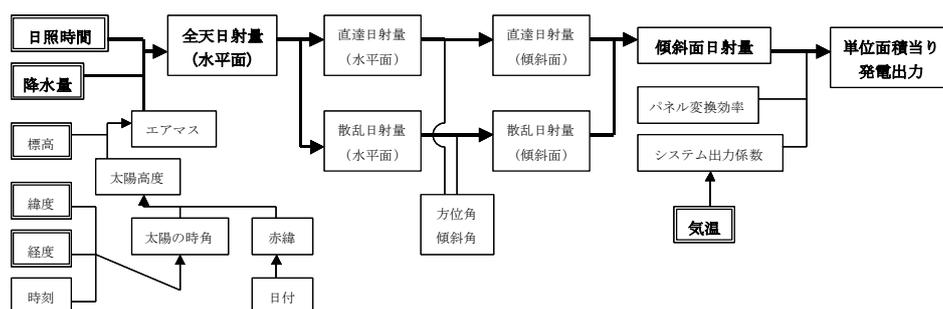


図12. PV出力の推計作業の流れ

図13には、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PV出力の推計値を示す。

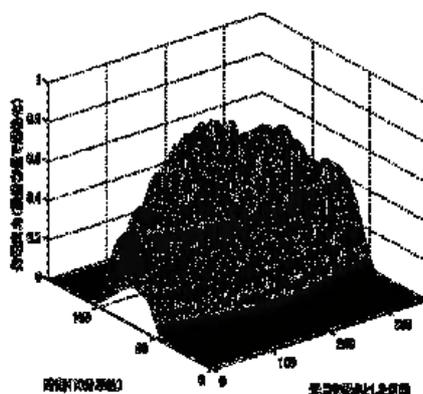


図13. 日本全体のPV出力の推計値

全国にPVを設置しても、ならし効果には限界があり、日々の変動は比較的大きいことが見て取れる。日本全体のPV設備の稼働率が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った。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。

4. 結果・考察

(1) PHEV、CGS、HPという新しいエネルギー利用機器の大規模導入に関して

発電部門からのCO₂を2050年までに2005年比70%削減する場合の発電電力量と、発電部門からのCO₂排出量・貯留量の推移を図14に示す。図14（左）に示すように、天然ガスの輸入可能量に上限を設けたこと、原子力発電所の建設容量に上限を設けたことなどから、石炭火力やIGCC（石炭ガス化複合発電）でのCO₂回収が、主なCO₂排出削減方策となっている。図2の無対策時の結果と比較すると、LNG複合の割合がやや大きくなっている。また発電電力量が図2と比べて増加しているのは、CCSで消費されるエネルギーを電力等価で表現して加えているためである。なお、PVの導入に関しては、後述するように別途評価したため、ここでは考慮されていない。

なお、図14(右)に見るように、ここではCO₂の海洋貯留が可能と仮定したシミュレーションを実施したが、その可否や貯留可能量に関しては別途検討が必要である。CCSに関する現在の国際的な世論の動向から判断する限り、当面は海洋貯留の実施は困難と判断される。一方、わが国における地中貯留容量に関しては、現在調査が継続的に進められているが、わが国全体のCO₂排出量のおよそ100年分が貯留できる可能性も示唆されており¹¹⁾、海洋貯留の代替方策となる可能性もある。そのため、図14(右)に示した試算結果よりも、帯水層貯留が大きく増える可能性はある。

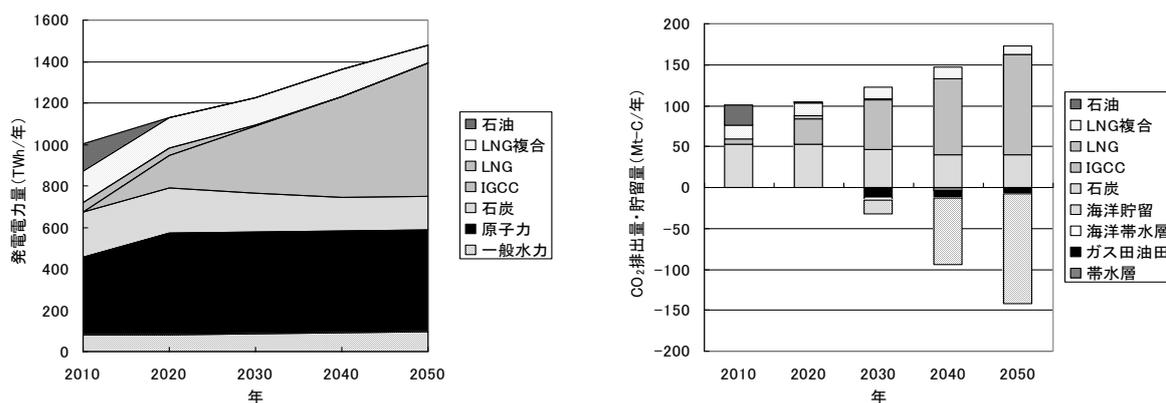


図14. 日本全体のCO₂排出量削減時の発電電力量（左）とCO₂排出量・貯留量（右）の試算結果

また次の図15には、2050年の発電部門と運輸部門（自動車）、都市ガス（家庭給湯+CGS）からのCO₂排出量を示す。無対策ケース以外では、発電部門からのCO₂排出量を2005年比70%削減する排出制約を課している。HPやCGSを導入した場合は、都市ガス起源のCO₂排出量の変化分で上限値を補正した発電部門のCO₂排出制約を課している。PHEVに関しては、その導入の有無によ

って発電部門のCO₂排出制約の上限値を変化させることはせず、ガソリン等の燃料起源のCO₂排出量の削減は、発電部門の削減に追加的に行われるものとした。また、図15には、それぞれのケースでの発電部門での限界削減費用も示す。CGSやHPの導入は、国民の日々の生活に直結するため、ライフスタイルなどに大きな影響を及ぼす可能性はあるが、導入対象が家庭部門に限定されるため、その有無による限界費用の差などは比較的小さいことがわかる。なお、HPの導入ケースでは限界削減費用が若干安価となる状況が見て取れるが、これは電力のCO₂排出原単位が、図14(右)に示すようにCCSの実施などにより大幅に低減されていることが背景にある。もし、電力のCO₂排出原単位の低減が思うように進まなければ、逆にCGSの導入が有利となる可能性はある。一方、PHEVの普及に関しては、CO₂排出量削減効果の絶対量は比較的大きく、充電のための電力需要量増加による発電部門での限界削減費用の上昇幅もそれほど大きくはないという結果となった。これも電力のCO₂排出原単位の大幅な改善が前提となっている。なお、ここで示した発電部門の限界削減費用の計算には、最終需要端におけるHP、CGS、PHEVの導入コスト(設備費など)は含まれていない点には注意が必要である。

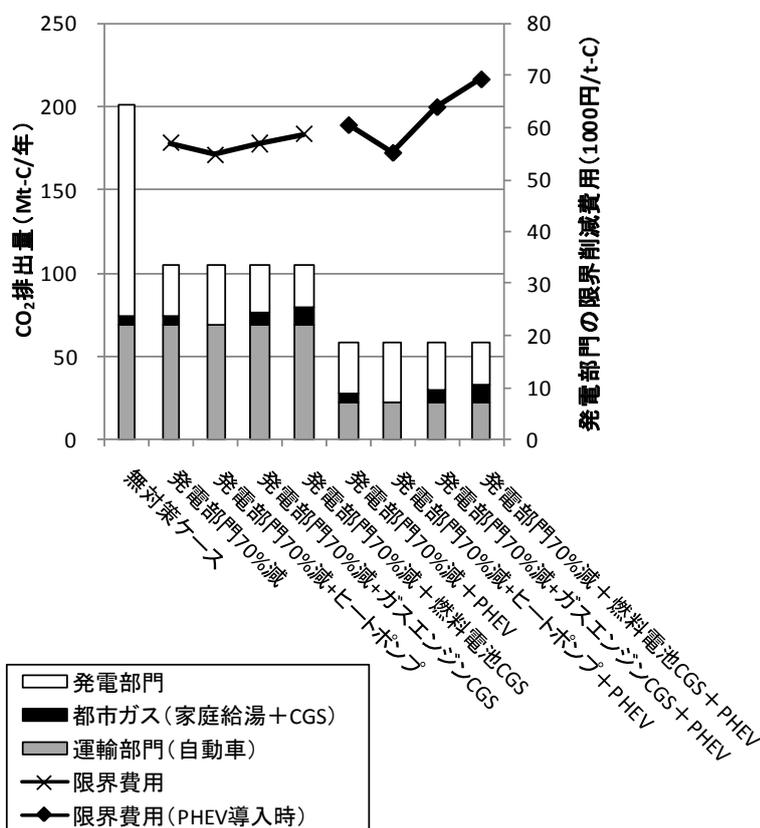


図15. CO₂排出量と限界削減費用(全国2050年)

(2) PVの大規模導入を考慮した最適電源構成の評価

PV出力は図13に推計されるように、地理的に広範な地域に分散導入されたとしても、「ならし効果」による平滑効果は限定されており、その変動は無視できないことがわかる。このようなPVが大規模に導入された場合、電力系統側はPVの出力変動を補償することができなければ、安定し

た電力供給を行えない。そのため、PVの大規模導入を検討する際には、「火力発電所などの大規模電源の容量や運用がどのようになるのが最適か?」、そして「どの程度の電力貯蔵設備を導入すれば良いのか?」などの疑問に答える必要があるが、PVの出力変動を表現する数学モデルが確立されていないこともあり、信頼できる評価結果は得られていなかった。

本研究では、PVの出力変動を表現する数学モデルとして、なんらかの数式で表現される確率過程モデルを想定するのではなく、気象観測データから推計される1年分のPV出力の時系列の変動波形¹²⁾をそのまま用いることにした。そして、そのPV出力の変動波形と1年分の電力負荷曲線（推計値）とに基づいて、最適電源構成と電源運用を評価することにした。このように1年分の時系列データをそのまま利用することで、確率過程モデルを作成する際の恣意性を排除できるとともに、電力貯蔵設備の運用も正確に考慮することができるようになった。

図16には、関東地域を対象にしたPV出力の変動波形と電力負荷曲線の推計値を示す。

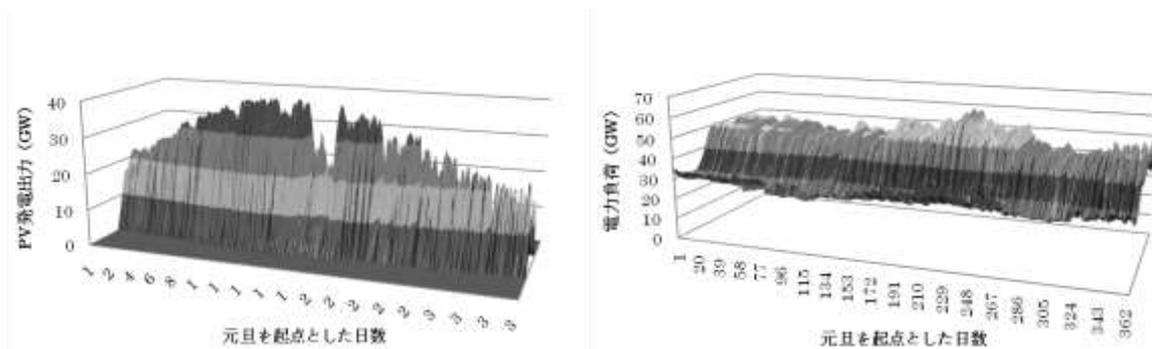


図16. 関東地域を対象にしたPV出力の変動波形（左）と電力負荷曲線（右）の推計値
グラフの奥行き方向は一日の時刻

これらのデータの時間間隔は10分であり、1年分の総時点数は52,560となる。最適電源構成モデルとして、このデータをそのまま入力データとする線形計画問題として定式化すると、その変数の個数は約60万個、制約条件式の本数は約2000万本に達する。

本研究では、系統容量約60GWの関東地域を対象に、そこに40GWのPV設備が導入された場合の最適電源構成と運用を計算した。図17には、2007年の5月に対応する部分の計算結果を示す。負側の黒色部分が未使用電力（遮断電力）である。日照が比較的多い一方で、電力負荷が比較的小さい5月には、PVの過剰出力がしばしば遮断されているのが見てとれる。

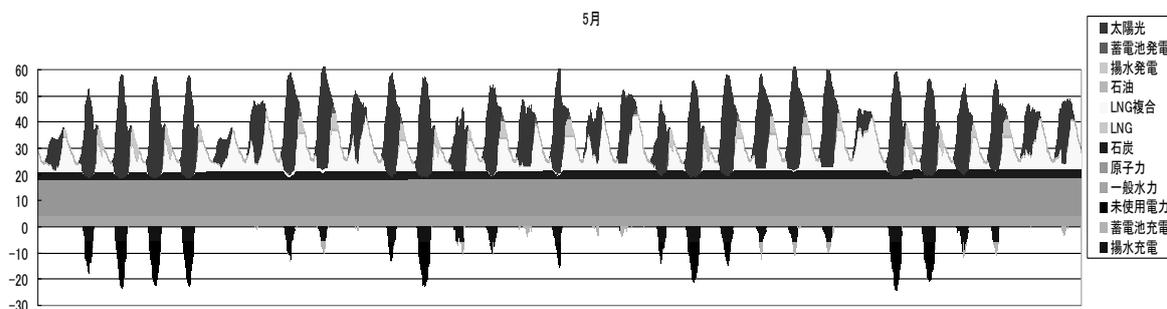


図17. 2007年の5月の電力供給の様子（縦軸単位：GW）

また、図18には2007年の各種発電所の累積発電電力量や、電力貯蔵量、そしてPVの過剰出力の累積的遮断量を示す。年間の累積値で見ると、PVの遮断量（負側の黒色部分）は無視できる量となっていることもわかる。また、揚水発電所以外の電力貯蔵装置の導入もほとんど不要となる可能性があることもわかる。関東地域に40GWのPVを導入すると、全電力消費量の約15%がPVで賄われる計算となる。

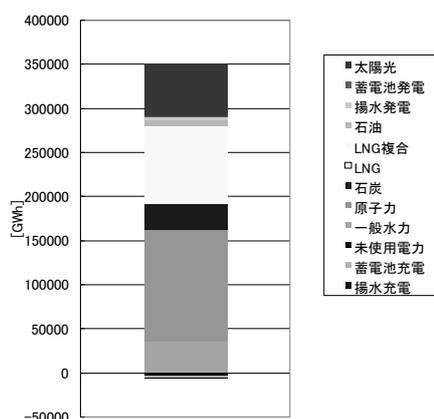


図18. 関東地域の電力供給の様子（年間累積値）

この計算では、火力発電所の負荷追随率や最低出力などに関する様々な制約を考慮するために制約条件式を明示的に考慮しているが、現実の火力発電所の運用を適切に反映できているかはさらなる検討が必要である。また、ここでの計算は、地域全体のPV出力は変動するものの、その将来時点（例えば翌日）の大きさは正確に予測できるものとしている。もし、予測が困難であるとすると、計算結果の解釈には注意が必要である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

PHEV、そしてCGSやHPなどの新しいエネルギー利用機器の大規模導入が、関連セクターにおけるCO₂排出量限界削減費用に及ぼす影響を統合評価した。家庭部門におけるCGSやHPの導入効果は、その有無による限界削減費用の差異は比較的小さいことが分かった。一方、PHEVの普及に関しては、CO₂排出量削減効果の絶対量は比較的大きく、充電のための電力需要量増加による発電部門での限界削減費用の上昇幅は、CCSなどの大規模な実施により電力のCO₂排出原単位の削減が実現できれば、小さく抑制できる可能性があることがわかった。

PVの大量導入の電力系統への影響は、これまでは確率的な考察に基づくものしかなかった。本研究では、関東地方のPVの1年分の出力を気象観測データから10分間隔の時系列で推計し、太陽光発電容量に応じた電力貯蔵の必要量を明示的に考慮した大規模最適電源計画モデルを構築し、太陽光発電の導入が電源構成に与える影響を解析した。その結果、火力発電所の出力調整能力が高ければ、電力貯蔵設備の導入はそれほど大規模に行う必要はなく、経済的な負担もそれだけ少なくなる可能性があることが明らかとなった。

(2) 地球環境政策への貢献

本研究の成果は、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発表されている。関連分野の専門家の間での合意形成に、何らかの影響を及ぼすことができたのではないかと考える。今後も引き続き、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) EDMC「エネルギー・経済統計要覧」, (財)省エネルギーセンター, 2005
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部会編:「平成16年度電源開発の概要49」
- 3) 小宮山涼一著:「エネルギー市場自由化の下でのオンサイト電源導入可能性評価」(博士論文), 2002
- 4) エンジニアリング振興協会, 石油開発環境安全センター:「CO₂地中貯留技術調査 平成5年度報告書」, 1994
- 5) NHK放送文化研究所:「国民生活時間調査」, 日本放送出版協会, 2001
- 6) 国立社会保障・人口問題研究所:「日本の世帯数の将来推計(都道府県別推計)」(2005年8月推計)
- 7) 大阪ガスホームページ <http://www.osakagas.co.jp/Press/pr03/030619.htm>
- 8) 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)
- 9) 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
- 10) 日本気象協会:「太陽光発電システム実用化技術開発 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
- 11) RITE:平成19年度 二酸化炭素固定化・有効利用技術等対策事業 二酸化炭素地中貯留技術研究開発 成果報告書, 2008
- 12) 気象庁:「アメダス10分値データ(2007年)」, 気象庁業務支援センター, 2007

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

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会)

- 1) 戸張智貴, 藤井康正, 山地憲治:「CO₂排出量制約下での日本における最適電源構成の中期見通し」, 2005年電気学会全国大会, 2005年3月
- 2) 戸張智貴, 藤井康正, 山地憲治:「家庭用CGS・給湯用HPの大規模導入時が日本のエネルギー

需給・CO₂排出量に及ぼす影響の評価」, エネルギー・資源学会・第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2006年1月

- 3) 戸張智貴, 横山直規, 藤井康正, 山地憲治: 「負荷の不確実性を加味した家庭用CGS・給湯HPの運用が日本のエネルギー需給・CO₂排出量に与える影響評価」, 平成18年電気学会全国大会, 2006年3月
- 4) 藤井康正, 横山直規, 上杉春奈: 「家庭用CGSと給湯用HPの普及が日本のCO₂排出量推移に与える影響」, 第26回エネルギー・資源学会研究発表会, 2007年6月
- 5) 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年1月
- 6) 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年6月
- 7) 井上淳, 藤井康正: 「全国・PHEV及び家庭用CGS/HPの導入拡大による排出削減評価」, 2009年電気学会全国大会, 2009年3月
- 8) 細谷佳文, 藤井康正, 井上貴至, 福田桂, 渡邊裕美子: 「太陽熱併用ヒートポンプ給湯器の経済・環境性能に関するシステム分析」, 2009年日本エネルギー学会大会 (アブストラクト提出済み)
- 9) 藤井康正, 横山直規: 「太陽光発電の大量導入時における関東地方の最適電源構成に関する研究」, 2009年電気学会電力・エネルギー部門大会 (アブストラクト提出済み)

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。