

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、民生業務・家庭部門における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、日本の電力系統の電源構成や運用方法に影響を与え、その結果として現れる日本のエネルギー需給とCO₂排出量に与える影響を詳細に検討することを目的としている。

平成16年度は、日本全国を9地域に分割した最適電源構成モデルを構築した。この最適電源構成モデルは、大規模な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を構築し、求めた負荷曲線に基づいて、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。このモデルを用いて、全国47都道府県別のCGSとHPの運用シミュレーションを行い、これらの機器が大規模導入された場合の日本の各地域の系統電力の日負荷曲線の形状に与える影響を推定した。

平成18年度は、最適電源計画モデルを今後の大規模化に備えて、より拡張性の高いソフトウェアを用いて再構築するとともに、従来のガスエンジンを用いたCGSのモデルに改良を加えるとともに、燃料電池を利用した家庭用CGSのモデルも新たに作成した。燃料電池CGSは、ガスエンジンのそれに比べて発電効率は高く、部分負荷運転も可能であるという特徴を有している。ただし、機器の特性には非線形性があり、部分負荷運転時の機器の発電効率ならびに廃熱利用率は、定格運転時のそれらよりも低下すると考えられている。日本全国を対象にした数値シミュレーションによるシステム解析結果からは、系統電力のCO₂原単位の値が500~550g/kWhの場合、CO₂排出量の削減という観点では、CGSとHPの優劣は判断しにくく、CGSもHPも導入されない場合からのCO₂排出量削減効果は、いずれの場合でも年間500万t程度と推定される。

[キーワード] 家庭用コージェネレーションシステム、給湯用ヒートポンプ、ガスエンジン、燃料電池、CO₂排出削減効果

1. はじめに

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。政府もコージェネレーションシステム(以降CGSと略記)ならびに給湯用ヒートポンプ(以降HPと略記)に関して導入目標を掲げ、民間においても高効率給湯器やCGSの投入・開発強化が実施されている。

これまでに、家庭部門(戸建住宅)におけるCGSやHPなどの新技術の大規模導入が日本のCO₂排出量に与える影響を評価するために、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、これらの新技術の導入が、日本全体のエネルギー需給やCO₂排出量などのマクロな指標に及ぼす影響を評価してきた。¹⁾ 本年度の研究では特に、これまでの研究で課題として残されてきた貯湯タンク内残湯量に関する終端効果の影響を回避するために、より長期の運用シミュレーションによる収束計算を行い、妥当性を高めた。また、新技術として将来の導入普及が期待されている燃料電池CGSに関しても、ガスエンジンCGSと同様に確率動的計画法に基づく数学モデルを試作し準備的な検討を進めた。

2. 研究目的

本研究は、次のように3つの部分に分けられる。

(1) 家庭での電力・熱の日負荷曲線のボトムアップシミュレーション

家庭での人間の挙動を、乱数を用いた確率的なシミュレーションとしてモデル化し、電力・熱の日負荷曲線を生成する。

(2) 確率動的計画法を用いたCGSやHPの最適運用戦略の導出

ボトムアップシミュレーションにより作成した家庭での電力・熱の日負荷曲線を用い、一軒一軒の家庭にCGSやHPを導入し、確率動的計画法を用いて最適な運用方を決定するとともに系統電力購入量の変化を算出する。

(3) 最適電源構成モデルによる電源構成・運用とCO₂回収貯留の推移の計算

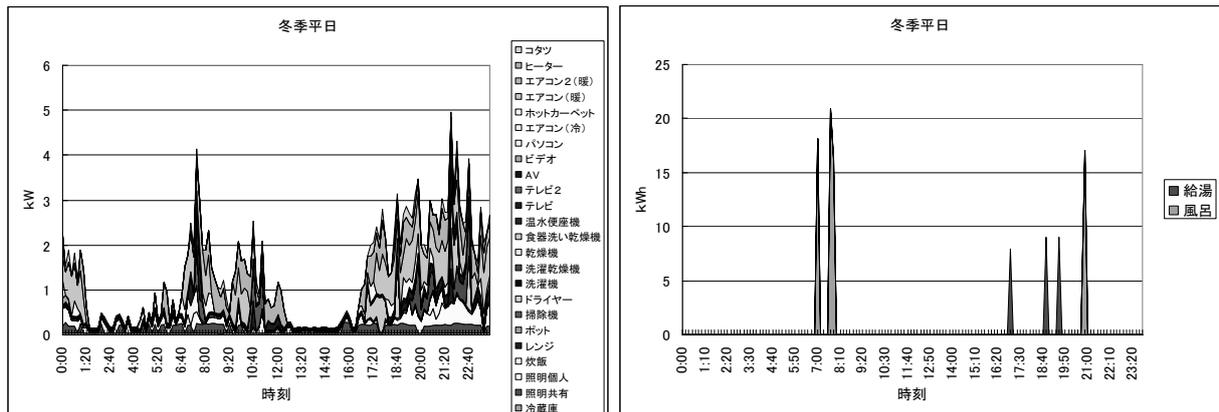
全国47都道府県の4700軒分の家庭を想定した系統電力購入量の変化を推定値を集計し、CGSやHPの導入が系統電力の日負荷曲線の形状に与えるマクロな影響を評価する。そして、2050年までのCGSやHPの普及シナリオを与え、これらの機器の大量導入が、電源構成・運用ならびにCO₂回収貯留の推移にどのように影響を及ぼすかを、最適電源構成モデルを利用して評価する。

3. 研究方法

(1) 家庭での電力・熱の日負荷曲線のボトムアップシミュレーション

本研究で作成した家庭の日負荷曲線推定モデルは、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。²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾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1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。



電力需要

熱（給湯）需要

図1. 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1参照）・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（述べ94000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2には、本研究で想定した都道府県別・世帯類型別の戸建ての存在軒数を示す。⁶⁾⁷⁾⁸⁾

表1. 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

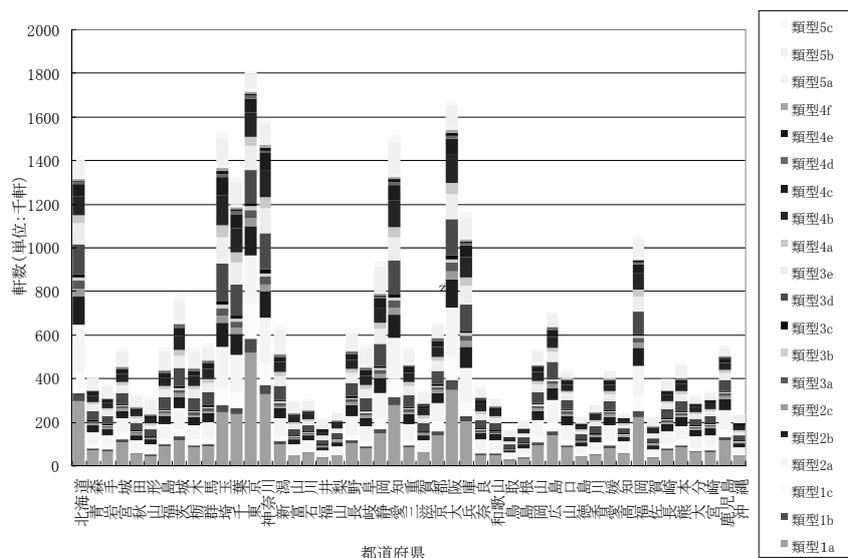


図2. 都道府県別・世帯類型別の一戸建ての存在軒数

(2) 確率動的計画法を用いたCGS・HP最適運用戦略の導出

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。⁹⁾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。

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}) = \min_{a_t} \left(C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, a_t) + \sum_{m=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}; Dh_{t+1,m}) Q_{t+1}(S_{t+1,i}, Dh_{t+1,m}) \right) \quad (1)$$

$$Q_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}) = \min_{a_t} \left(C_t(S_{t,i}, Dh_{t,j}, De_{t,k}, a_t) + \sum_{m=1}^8 \sum_{n=1}^8 P_{t,t+1}(Dh_{t,j}, De_{t,k}; Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) Q_{t+1}(S_{t+1,i}, Dh_{t+1,m}, De_{t+1,n}) \right) \quad (2)$$

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

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3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2～3には、本研究で想定したCGSとHPの仕様を示す。

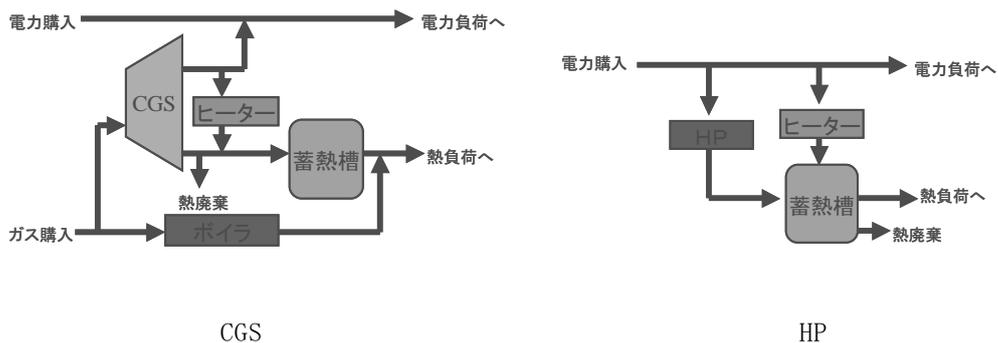


図3. システム構成の概略図

表2 ガスエンジンCGSの想定仕様

項目	仕様	備考
発電出力	1000[W]	
廃熱出力	3250[W]	
効率(発電)	20[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
効率(廃熱)	65[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
総合熱効率	85[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は10分間)
最大ガス消費量	0.4343[m ³ /h]	1時間連続動作時のガス消費量
貯湯タンク容量	20000[Wh]	タンク容量を300[l]とし、元水温を一律60[°C]上昇させるものとする。
補助ボイラ熱効率	80[%]	都市ガス13A低位発熱量(9900[kcal/m ³])基準
ヒーター熱効率	98[%]	余剰電力を熱変換する際のヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

表3 HPの想定仕様

項目	仕様	備考
出力	4500[W]	
COP	4(定格)	外気温に依存して変化
暖機運転時廃熱出力減少率	50[%]	エンジンが停止状態から運転状態に変化した時の熱出力減少率(暖機運転時間は10分間)
貯湯タンク容量	25800[Wh]	タンク容量を370[l]とし、元水温を一律60[°C]上昇させるものとする。
ヒーター熱効率	98[%]	不足した熱需要をまかなうためのヒーター熱効率
タンク保温効率	99.9[%/5min]	電気温水器の保温効率を参考に決定・5分ごとにタンク内熱量が0.1[%]づつ減少

次に燃料電池を発電装置として利用したCGSのシステム解析について述べる。基本的な構成は図3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。確率動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、(2)式における 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。表4には、本研究で想定した燃料電池CGSの部分負荷特性を示す。¹⁰⁾

表4. 燃料電池CGSの部分負荷特性の想定

制御段階	1	2	3	4
出力	300W	500W	750W	1000W
発電効率	27%	30%	31%	31.50%
廃熱効率	24%	33%	38%	41%

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ていた。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。

4. 結果・考察

図4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である。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。

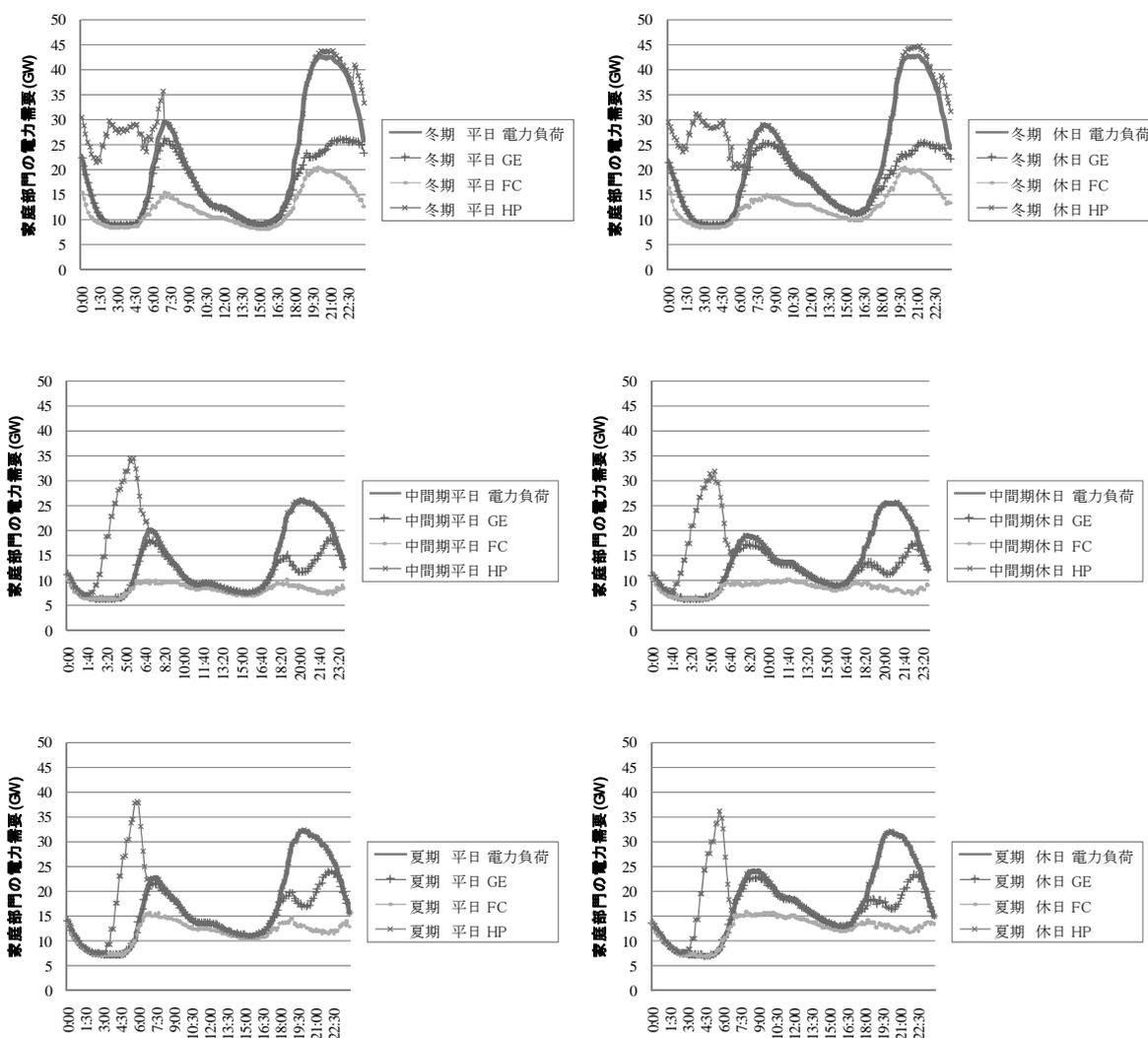


図4. 家庭部門（戸建住宅）の電力日負荷曲線
 （厨房用IHコンロ分は除く）

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たであるが、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5には、東京の4人世帯（世帯類型番号4e）の1日当たりの光熱費を示す。「ベースケース」とは、CGSもHPも導入していない場合のケースである。CGSを導入する場合は、そうでない場合に比べて、一般には光熱費（電気代とガス代の合計）は減少する。ただし、この光熱費にはCGSやHPの設備の導入費用は含まれていない。CGSやHPという設備導入に伴う光熱費の削減効果は一日当たり50～150円であり、1年間に換算しても2～4万円程度と考えられる。この差額で、設備を購入できるかどうか、CGSやHPを実際に普及させる場合には問題となる。光熱費削減効果は世帯類型別に異なり、少人数の世帯では電力や熱の需要も相対的に小さいため、期待される光熱費削減効果も小さくなる。

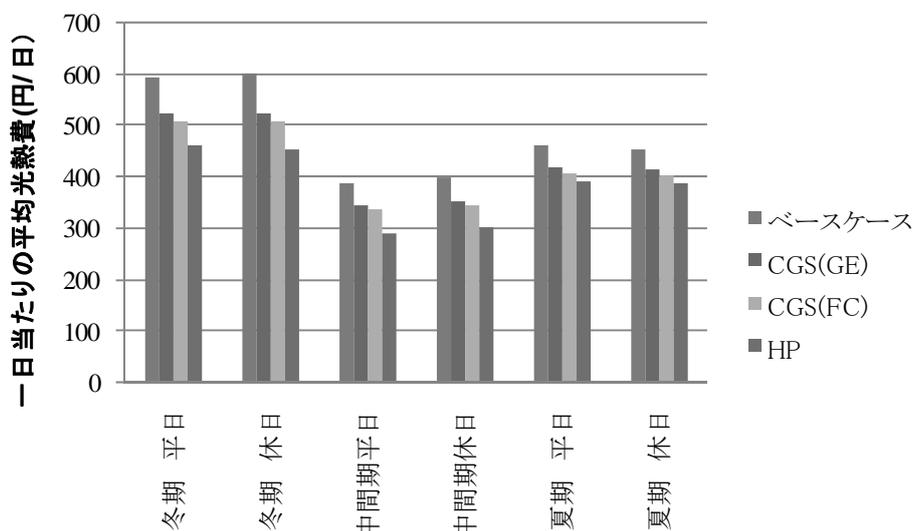


図5. 家庭部門（戸建住宅）の光熱費の推計例
（東京の4人世帯（世帯類型番号4e））

図6には日本全体の家庭部門の年間の購入電力量、図7には購入ガス量を示す。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、その代わ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。

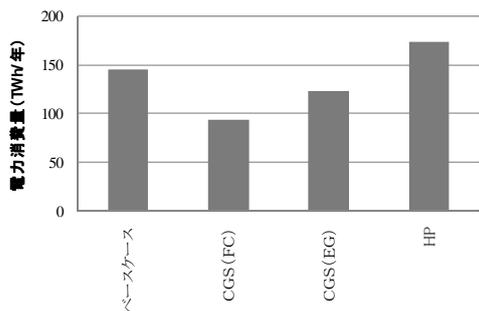


図6. 家庭部門（戸建住宅）の購入電力量

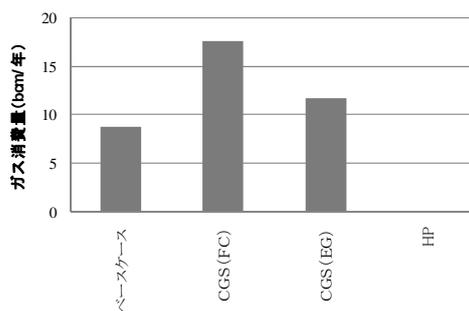


図7. 家庭部門（戸建住宅）の購入ガス量

これらの電力やガスの購入量から、系統電力のCO₂原単位（排出係数）を横軸として、それぞれのケースでのCO₂排出量のベースケースからの差分を図8に示す。CGSの燃料として利用する都市ガスのCO₂排出原単位はと想定している。プロパンガスや灯油を利用する場合は、CO₂排出原単位は大きくなる。

図8に見るように、想定する系統電力のCO₂原単位によって、CGSやHPの導入によるCO₂排出削減量は、約±20Mt/年で変化する。CGSとHPの効果が逆転する境目は、系統電力のCO₂原単位の値が500～550g/kWhとなる。環境省の温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度のCO₂原単位のデフォルト値が555g/kWhであることが興味深い。今後、温暖化対策の進展により系統電力のCO₂原単位が小さくなると考えると、CGSの導入によるCO₂排出量の削減効果は減じられることになる。

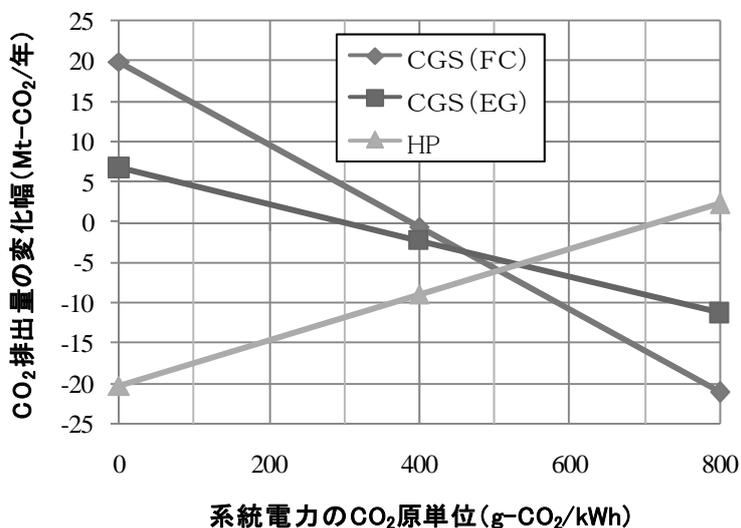


図8. 家庭部門（戸建住宅）のCO₂排出量の変化と系統電力のCO₂原単位

本研究では、家庭部門（戸建住宅）に、各種CGSや給湯用HPの大規模導入が、日本のCO₂排出量にどのような影響を及ぼすかの評価を試みた。図8に見るように、系統電力のCO₂原単位の値が500～550g/kWhの場合、CGSとHPの優劣は判断しにくく、CGSもHPも導入されない場合からのCO₂排出量削減効果は、いずれの場合でも年間500万トン程度と推定される。今後は、集合住宅への適用範囲の

拡大や将来のライフスタイルの変化なども考慮に入れた評価を試みたい。集合住宅の場合、電力や熱の負荷曲線の時間的な変動は相対的に小さくなるため、戸建住宅の場合よりもCGSやHPの運用は効率的になるものと考えられる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、家庭部門（戸建住宅）に、各種CGSや給湯用HPが大規模導入された場合、日本のCO₂排出量にどのような影響を及ぼすかを評価した。47都道府県別・20世帯類型別に100軒分（合計で94000軒）の個々の家庭のエネルギー消費パターンを10分間隔で模擬し、それらの結果を加重平均することにより日本全体として値を求めた。本年度の研究では、系統のCO₂原単位が、環境省の温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度のCO₂原単位のデフォルト値である555g/kWh程度である場合、CO₂排出量削減対策としてのCGSとHPの優劣は判断しにくく、CGSもHPも導入されない場合からのCO₂排出量削減効果は、いずれの場合でも年間500万トン程度と推定された。今後もし、温暖化対策の進展により系統電力のCO₂原単位が小さくなると考えると、CGSの導入によるCO₂排出量の削減効果は減じられることになる。ただし、系統電力のCO₂原単位は時間帯によっても異なるため、より厳密な評価を行うためには、系統電源の運用も含めた包括的な評価を行う必要がある。

(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) 戸張智貴, 他3名: 「家庭用CGS・給湯用HPの大規模導入が日本のエネルギー需給・CO₂排出量に及ぼす影響の評価」, 第22回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 391-394, 2006
- 2) EDMC: 「エネルギー・経済統計要覧」, (財)省エネルギーセンター, 2005
- 3) 西尾健一郎 他: 「ヒートポンプ給湯器や燃料電池CGSなど家庭用エネルギー機器の技術選択分析」, 第24回エネルギー資源学会研究発表会, 2005
- 4) 辻毅一郎 他: 「関西文化学術都市における住宅用エネルギー消費の計測調査報告書(第II部)」, 日本学術振興会, 2001
- 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) 総務省統計局統計センター: 「国勢調査」, 2002
- 7) 総務省統計局資料: 「平成16年全国消費実態調査」, 2005
- 8) 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), 2005
- 9) 鍋島一郎: 「動的計画法」, 森北出版, 1968
- 10) 大阪ガスホームページ: <http://www.osakagas.co.jp/Press/pr03/030619.htm>

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>

なし

(2) 口頭発表(学会)

1) 藤井康正、横山直規、上杉春奈：第26回エネルギー・資源学会研究発表会(2007)

「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」(原稿提出済み)

(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