

H-062 制度と技術が連携した持続可能な発展シナリオの設計と到達度の評価に関する研究
 (2) 技術開発の制度を考慮した目標設定と技術のサステナビリティへの寄与の評価

大阪大学大学院工学研究科環境・エネルギー工学専攻
 〈研究協力者〉 早稲田大学高等研究所

下田吉之・山本祐吾・山口容平
 齊藤 修
 (平成18～19年度は研究参画者)

平成18～20年度合計予算額 25,843千円
 (うち、平成20年度予算額 5,251千円)
 ※上記の合計予算額は間接経費5,968千円を含む

[要旨] サステナブルな社会を達成するための技術・社会転換シナリオ作成支援のため、技術普及の課題を踏まえ、その普及ポテンシャルとシナリオを提示することを目的とし、具体的課題として(1)「技術と制度の連携」による技術普及のケースモデル作成、(2)民生家庭部門のエネルギー需要予測と物質フロー分析、(3)技術が普及した社会システムのサステナビリティ評価、を実施した。(1)では、太陽光発電、太陽熱温水器に対する消費者選好を調査し、普及によって得られるCO₂排出量を推計した。太陽光発電、太陽熱温水器を戸建住宅全てに普及させた場合、それぞれ家庭部門CO₂排出量の3%、16%が削減可能となること、太陽光発電の普及施策では設置費用の補助の方が発電電力の固定費買取制度より費用対効果で優れていること、太陽熱温水器の普及には技術イメージ改善が不可欠であることがわかった。(2)では、上海市の民生家庭部門を対象として、2030年までのエネルギー需要予測と各種省エネルギー手法の普及による効果を推計した結果、各種省エネルギー技術を総合的に導入することによって2030年におけるエネルギー需要の20%程度が削減可能であること、省エネ投資に関する主体の選好を考慮すると、技術普及によるCO₂削減効果は技術ポテンシャルの2/3程度となること、がわかった。さらに、省エネルギー技術への置き換えによって生じる廃家電製品について、ライフスタイルの転換に関する代替案が物質フロー形成やCO₂排出量に及ぼす影響を定量的に明らかにした。(3)では、中国上海市における都市更新に関する代替案の都市サステナビリティへの寄与を評価し、上海での急速な人口集中と都市活動の拡大による資源消費増大に対しては、多極分散型の集積拠点を形成する施策が有効であり、2020年時点の総物質需要量は傾向延長ケースに比して約18%の削減が可能となることを明らかにした。また、都市エネルギー代謝系に着目し、各種対策による持続可能性の変化を表現しうる指標群を提案し、これらを大阪市のエネルギーフロー評価に適用することで、指標の実用性や課題を示した。

[キーワード] 技術普及、制度、太陽光発電、エネルギー需要、サステナビリティ指標

1. はじめに

温室効果ガスの大幅な削減など、21世紀を通じて人類が持続可能な発展を達成するには、科学技術の発展が一つの重要な鍵であることは論を待たない。その際、適切な技術が普及し、持続可能社会の目標の達成に貢献するためには、技術自身の価格や効率などの性能を高めるだけでなく、

技術が普及し、想定された性能を最大限発揮させるための社会制度の設計が同時に必要となる。これまでの技術の発展の歴史を見れば、技術の普及を決める要素が一般均衡モデルで取り扱われるような効率や価格だけでなく、社会制度やデザインといった要素に大きく左右されることを示している。また、環境的に望ましい技術や製品を広く社会に普及させていく上では、技術や製品システム自身の環境性能、持続可能性向上への寄与を定量的に計測することに加えて、そうした技術の開発・選択を促すための制度設計やライフスタイルの転換も併せて検討することが求められている。

そこで本サブテーマは、持続可能な社会を達成するための技術・社会転換シナリオ作成支援のため、サブテーマ(1)との連携により、社会の実情に応じた望ましい技術の普及と最適配置のための制度設計を行い、その成果を統合的に評価できる支援ツールの作成を最終目標とした研究を実施した。

2. 研究目的

サブテーマ(2)では、地球温暖化緩和や循環型社会の達成など、持続可能な発展のために必要とされる技術シーズについて、サブテーマ(1)が制度設計アプローチの成果として示す各技術の普及の課題（消費者選好）を踏まえ、各技術の普及ポテンシャルおよびその普及シナリオを提示する。具体的には以下の3つの課題を実施した。

- (1) 「技術と制度の連携」による技術普及のケースモデル作成と制度比較
- (2) 消費者選好やライフスタイル転換を考慮した民生家庭部門のエネルギー需要予測と物質フロー分析
- (3) 技術が普及した社会システムのサステナビリティ評価

上記(1)および(2)では、対象とする技術・製品の選択や利用の経路に沿って普及のポテンシャル、普及を促す具体的な手立てとその効果を明らかにする。(1)では再生可能エネルギー技術の代表としての太陽光発電・太陽熱温水器を、(2)ではそれを含めた家庭部門の省エネルギー技術全般を取り上げて、技術に対して次の3つのポテンシャルを明らかにし、その違いに基づいて制度設計や広義の製品デザインの重要性を示す。

① 技術ポテンシャル

多様なエネルギー需要が不確実に発生している実際のエネルギーシステムの中で、技術がその省エネルギーあるいは温室効果ガス削減効果を最大に発揮する形で組み込まれたときに実現される省エネルギー・温室効果ガス削減効果

② 経済的ポテンシャル

家計や企業などの各主体が、経済的に合理的な購買行動をとった際に、各技術の普及によって実現される省エネルギー・温室効果ガス削減効果

③ 実際の効果発現

家計や企業などの各主体が実際に行う消費行動は、技術に対する選好や補助金などの制度など、広義の「技術デザイン」によって大きく左右される。これらを勘案した上で、実際に実現される省エネルギー・温室効果ガス削減効果

その過程では、代替的な技術オプションを設定することに加えて、技術普及推進施策の実行による消費者の選好や選択行動の誘導、ライフスタイルの将来変化による技術選択・利用の変化などを明示的に扱うことで、技術・制度・社会システム転換のサステナビリティへの寄与を定量化し、環境的に望ましい技術や製品の普及シナリオや方略として提示する。

その上で、(3)では現在経済成長の著しい中国上海市をケーススタディの対象地として、都市のサステナビリティ評価指標の提案と適用を試みる。なお、(2)および(3)で上海市を取り上げる理由は次のとおりである。

中国都市部におけるエネルギー消費や物質消費は急速に増加しているが、これは人口の増加をはじめ、一人当たり住宅面積や家電など財の所有量の増加、家庭内の暖冷房床面積の増加など、所有する財の使用パターンにかかわる多様な要因に起因する。一方、財の供給では量的な充足が優先されており、性能の低いストックが形成され、長期的には温暖化対策などエネルギー資源関連の課題の解決を困難にすることが予想される。このような状況を避け、低環境負荷型の持続可能なエネルギーシステム、都市システムを構築していく必要がある。

エネルギーシステムや都市システムは技術の複合システムであり、そこでの制度設計は、(1)の課題が対象とする「個人の技術選択において考慮される技術属性の改善により技術普及を支援するもの」だけでなく、その技術や財を提供する生産システムにおける技術基準の制定や、財のライフサイクルを支持する技術システム（例えば家電製品再生システム）の選択など、より広義の制度設計を含めて検討しなければならない。このような制度設計を支援するためには、対象とするシステム全体を捉え、代替案評価を行うことができる枠組みを開発し、技術開発と制度設計による技術普及シナリオを検討した。

3. 研究方法

(1) 「技術と制度の連携」による技術普及のケースモデル作成と制度比較

本課題では、太陽光発電技術に着目して、まず各種文献資料等をベースに太陽光発電の普及段階における各国の諸制度について情報収集を行い、諸制度の分類とそれぞれの分類の利害得失、費用対効果の分析、日独の制度の変遷をまとめた。その結果より、日本においては、明らかに太陽光発電に対して支払い意志額が高く、赤字が予想される状態でも普及が進んだこと、一方、太陽熱温水器についてはその設置数は減少の一途を辿っていることが判明した。これを受けて、サブテーマ(1)との共同で消費者選好調査（チョイスメソッドによる選好調査）を実施し、その結果得られた消費者選好情報を用いて、補助金など各種制度や価格等が考慮できる各技術の普及率推定モデルの開発し、後述の民生家庭部門エネルギー最終需要シミュレーションモデルと併せ、都市・国レベルでの各技術のエネルギー・CO₂排出削減効果を予測するフローを確立した。このように、技術選択に影響を及ぼす要因の抽出とその影響調査、技術普及予測、技術普及によりもたらされる効果の推計と制度評価は他の環境配慮型技術へ応用可能なものであり、このフローを技術評価、技術開発・制度設計の転換シナリオ策定支援のケースモデルとして確立した。

上記の中で、都市・国レベルでの各技術の普及によるエネルギー消費・CO₂排出削減効果を予測するために、住居の形式や大きさ、世帯人員の構成、多様なライフスタイルにより世帯によって

エネルギー消費が大きく異なることを考慮し、また、太陽光発電、ヒートポンプ給湯器やコージェネレーション給湯器、エアコンや省エネ家電、住宅の断熱気密化など、各種の温暖化対策技術が正しく表現できる、都市・国土レベルの民生家庭部門エネルギー最終需要シミュレーションモデルの開発と新しい給湯機器・分散型発電システムに対応した高度化を行った。

普及促進策としては太陽光発電技術に対する補助金、発電電力買取制度、太陽熱温水器に対する補助金のほか、技術開発等による技術受容性（イメージ等）の改善などを考慮し、経済性やCO₂排出量の削減効果から評価を行った。

サブテーマ(1)で実施した太陽熱温水器・太陽光発電の選好調査、各種次世代給湯器の選好調査については、この一連の研究フローに整合するよう、共同でアンケート設計を行い、また太陽熱温水器・太陽光発電の選好調査とコンディショナルロジット分析による普及モデルのパラメータ決定もサブテーマ(1)と合同で実施した。

(2) 消費者選好やライフスタイル転換を考慮した民生家庭部門のエネルギー需要予測と物質フロー分析

本課題では、上海市の民生家庭部門を対象としてエネルギー需要予測モデルを開発し、現在から2030年までのエネルギー需要の予測、各種省エネルギー手法の評価を行った。本課題で開発したモデルは、今後予想されるさまざまな変化（ライフスタイルや家電製品など）によるエネルギー消費の変化を定量的に把握し、住宅の断熱強化などの省エネルギー技術の導入による効果を評価することで、対策立案を支援することが可能である。

民生家庭部門は個々の技術の集合体であり、そのエネルギー需要構造を考慮すると、単一の技術の普及によって温暖化対策が達成されるような革新的技術は存在しない。そこで断熱強化や家電製品、給湯器の高効率化、太陽熱温水器の利用など複数の技術とその組み合わせを対象に、省エネルギーポテンシャルを推計した。さらに、環境行動や投資回収に関する主体の選好に基づいて省エネルギー技術が選択されるという実態面や、政策介入による選択行動の変化を考慮して、省エネルギー技術の選択を通じた家庭部門における低炭素型ストックの形成が将来のエネルギー需要に与える影響を予測・推計した。

他方、よりエネルギー効率に優れた省エネルギー技術・製品の普及が進めば、既設機器類が置き換えられて使用済み製品が生じることになるため、こうした廃製品フローとそれに随伴する環境負荷も併せて制御・管理する必要がある。そこで、家庭用電化製品を事例として取り上げ、上海市およびその周辺地域における機器の普及や利用・廃棄状況などの実態調査に基づいて、家電由来のエネルギー消費と廃棄物発生要因を明らかにし、製品ストック・フロー推計モデルを構築した。その上で、消費者のライフスタイルに関する将来シナリオを作成し、家電消費パターンの転換によるCO₂排出量や資源消費量の変化を分析した。

(3) 技術が普及した社会システムのサステナビリティ評価

製品・技術の選択から普及の過程を主たる対象としている上記(1)および(2)に対して、本課題では、まず巨大な物質的ストックとフローが形成される都市域（中国上海市）をケーススタディの対象地として設定し、都市のエネルギー・物質代謝を算定するとともに、都市更新に関する代替案による都市代謝の改善効果を比較評価した。また、いくつか提案されているサステナビリティ

ティ指標を实在都市の将来変遷過程（1995～2030年）の評価に適用することで、都市更新政策の持続可能性への寄与を評価するとともに、指標活用の実用性や有効性、課題を明らかにした。次に、都市代謝系の中でも特に(1)の研究成果を評価する上で重要となるエネルギーのフローに着目し、そのエネルギー消費の全体像を捉え、各種対策による持続可能性の変化を表現しうる指標群の整理・提案と大阪市を対象とした具体的な計算例を示した。

4. 結果・考察

(1)「技術と制度の連携」による技術普及のケースモデル作成と制度比較

1) 太陽光発電普及制度の整理と課題の抽出

a. 太陽光発電普及促進制度のレビュー

太陽光発電は、近年登場した新しいエネルギー技術の中でも飛躍的な普及を示した代表的な事例であり、かつ再生可能エネルギーシステムの中でも量的なポテンシャルが大きいことから、持続可能社会における主要なエネルギーシステムとして今後更なる発展を遂げることが期待されている。また、現在に至るまで世界各国で様々な種類の支援制度がとられてきたことも特筆される。そこで、太陽光発電技術についてこれまでの技術発展・普及における国内外の諸制度のレビューと分析を行った。

1990年代中盤より、各国で太陽光発電を普及させる支援制度が試みられ、太陽光発電の普及拡大に結びついている。表1に、文献調査¹⁾結果を基に整理した各制度の分類と、筆者による各制度の利点と欠点の評価を示す。各類型についての説明を以下に記す。なお、各種制度を国別に時系列に見ていくと、最初補助金制度（政府や自治体の財政からの支出）で開始されたものが、規模の拡大に伴ってRPSあるいはFeed-in-tariffとして、電力会社に対して購入量あるいは購入価格を義務化し、追加費用は電力消費者に広く負担させるシステムへ移行していく状況が顕著である。

i. 発電者に対する購入時の経済的インセンティブ

ドイツの1000ルーフプログラム(1990)は政府が70%、日本の住宅用太陽光発電システムモニター制度(1994)は当初50%の補助金が与えられている。費用には税金が充てられるので、一般の電力消費者の負担感が低いが、ある程度の普及の後には財政上継続が困難となる。後に議論するように、消費者は収支均衡点を見るよりは、再生可能エネルギーに対する支払い意志額(WTP)を持っているので、それを見極めた補助率の設定が重要である。低利融資や税制優遇の影響は一般の金利や発電主体に依存するが一般に効果はそれほど大きくない。請負、大量調達ではアメリカサクラメント市の公営電力会社SMUDにより実施されたプログラムである。請負としてPV Pioneer I (1993年開始)では顧客が自宅屋根を太陽電池の設置場所として提供し、かつ毎月4\$の協力金を支払う。太陽電池およびその発電した電力はSMUDの所有であり、顧客は電力利用について何ら経済的メリットを受けない。グリーン電力制度にも分類できるが、実際には資金の大半はSMUDが系統連系実験費用として支出している。大量調達は後継のPV Pioneer IIプログラムとして実施されたものであり、2001年で2kWモデルが通常\$9,000であるものを大量購入と補助金で顧客に\$4,800で販売している。いずれも、公営電力の特性を生かして予算を集中的に振り向けた制度といえる。

ii. 発電電力買い取り料金の制度化

太陽光発電を一般電力系統に接続し、発電された電力の一部が系統に売電でき、その価格が系統からの電力価格とほぼ同額である場合、Net Meteringと呼ぶ。我が国では太陽光発電から供給される電力は、余剰電力購入メニューとして電力の小売値と同額に設定されている。

Feed-in tariffはNet Meteringに対して、発電者に更に有利な価格で買い入れている点、長期間(ドイツは20年間)固定価格を約束している点の2点が異なる。

表1 各種太陽光発電システム支援制度のレビューと評価

制度	概要	利点	欠点
1. 発電者に対する購入時の経済的インセンティブ			
補助金	政府、地方自治体が設置される太陽電池発電能力に応じて補助金を与える。	一般に市場への初期段階の浸透を促進するのに効果的で、大規模な導入を通じて生産者の製造規模拡大、価格の低減につながる効果がある。額が収支均衡に達しなくても、家計を中心にWTPを引き出す効果がある。	十分な価格低下が生み出されなければ、以降のPV市場が過度に補助金に依存することになる。政府・自治体の負担が大きい。収支はある程度予想できるが、将来の電力買い取り価格に影響される。
低利融資	金融機関や政府、自治体が再生可能発電事業者に低利融資をおこなう。	政府の財政的負担軽減の問題から、市場の発展につれて補助金から融資制度への変化が必要となる。金利の高いときに効果が大きい。	再生可能エネルギーの投資回収が不可能な状況では、単独では再生可能エネルギー導入には不十分で他の制度との連携を要す
投資に対する税制優遇	税制による再生可能発電促進として①再生可能エネルギーシステムに対する消費税減税②再生可能エネルギーへの投資利益を所得税から控除等	減価償却等を含む税制優遇は基本的に再生可能エネルギー発電者のインセンティブとなる。補助金に比べれば財政支出が少ない。	適否は税制と発電事業者の形態に依存する。例えばアメリカで民間電力事業者と公営電力事業者では効果が異なる。
請負	機関が電力消費者にPVを支給し、消費者(PV所有者)は定期的に少額を返済していく。	大量調達との組み合わせで定常的な需要を生み、産業の育成、価格の低減につながる。消費者側は安価に導入が可能。	機関(公営電力会社等)による長期間の関与が必要。設定によっては機関側の持ち出しが大。
大量調達	小規模発電者を代表する機関がPVシステムを大量買い上げすることで、個別調達より安い価格で発電者に提供。	太陽電池コストを低下させるため規模の経済を利用。	継続的な発電者の需要のあることが前提。
2. 発電電力買い取り料金の制度化			
Net metering	系統に販売された余剰電力は電力会社によりほぼ電力小売価格と同額で購入。	負荷変動に対応できる電源との協調で系統安定上の利点を有する。太陽光発電はピーク電力を賄うので回避コストも大きい。	系統連系太陽電池市場の普及には必要な手段だが、他のインセンティブと組み合わせが必要。
Feed-in tariff	発電余剰電力は電力会社によって長期一定価格(高値)で取引される。	成熟していない技術に対する補助金に続く対策の一つ。技術毎に異なる価格を適用し、最も安い技術だけでなく再生可能エネルギー全体の多様性を保証することが必要。技術が成熟して他の技術と競合可能になれば、他の政策(RPS等)に引き継ぐべき。発電者には収支が当初に想定可能。	固定価格は再生可能発電者にとってコスト低減努力のインセンティブとならない。量的目標との整合は保証されない。一般の電力消費者には高い電力料金を課すことになる。
3. 義務的目標(RPS)			
再生可能エネルギー導入基準の設定	政府が再生可能エネルギー電源の導入義務を全発電量中の比率等で設定。通常取引可能な証書制度とともに実施される。電力会社は①所有する再生可能エネルギー②証書つき再生可能エネルギー購入③証書のみを購入の合計で義務量を満たす。再生可能エネルギーの電力は市場価格で取引され、再生可能エネルギーの追加的コストは環境面の価値として証書取引される	市場が介在するので太陽光発電者には運用改善等で発電コストを下げるインセンティブが働く。電力事業者の内部(需要家を含む)で再生可能エネルギー導入コストの収支をとるので、政府の介入は最小限度。再生可能エネルギーが普及すると証書価格が低下し制度は自動的に終了する。電力自体と別に再生可能エネルギーの付加価値価格が取引されるので、従来の電源と再生可能エネルギーの公平な競争が可能。	全ての再生可能電源について証書価格が同一であれば、太陽電池のようなコストの高い技術は競争力を失う。しかし、二酸化炭素削減を目的とするならば、二酸化炭素排出原単位に差のない風力発電等と価格差を付けることに根拠がない。目標値が高すぎると電力価格を高騰させる。買い取り価格が年度ごとに異なるので収支の予想ができない。
4. 消費者の自発的な追加的電力費用支払い			
グリーン料金	kWh当たり通常を上回る電力料金を支払う顧客に対して、電力会社はその収入を原資にしてグリーン電力を供給する。	電力会社側に顧客・投資家の満足、広報面での利益、競争上の優位性、電力価格を安定させる等の利点。電力消費者のWTPが高いとき効果大。	投資された費用が新規電源開発に投資されているか検証の仕組みが必要。PVは変動電源で、常時一定の割合の再生可能電力を保証するならバイオマス等調整可能電源との組み合わせを要す。
ソーラー電力取引	民間のPV発電で得られた電力を顧客が電力会社から購入。電力会社は取引所の役割。	消費者のWTPをフルに使用でき、また発電側も効率的な運用が期待できる。	顧客と発電事業者のバランスの確保が課題
グリーン電力マーケティング	電力消費者が供給者をグリーン電力発電に変更する。	市場の中で消費者は再生可能エネルギーを選択することができる。	真に自由化された電力市場のみで実施可能。
資金出資者プログラム	消費者が再生可能エネルギー発電所の出資者となり、毎年、投資額に応じた配当を受取る。	これまで自発的な投資のもとでのプログラムとしては最も成功している。パフォーマンス維持が投資家維持、新投資家獲得のため重要	分担の度合は消費者のWTPに依存

iii. 義務的目標 (RPS)

再生可能電源の義務的導入量を規定し証書取引により価格を市場に委ねる制度であり、日本でも2003年度より適用されている。再生可能電源の価値を(電源の種類を問わない)電力としての価値と、再生可能エネルギーとしての価値に分け、後者は証書の形で独立して取引の対象となる。ただし、我が国(2007年現在)においては前述のように太陽光発電電力は電力の小売値と同額に固定されており、RPSではなくNet-Metering制度とみなされる。

iv. 消費者の自発的な追加的電力費用支払い

この制度では、発電設備を所有しない電力消費者に自発的に太陽光発電のコストを負担させるものである。負担額が直接太陽光発電量に結びつくグリーン料金や、再生可能電力発電者と消費者を結びつけるソーラー電力取引制度、グリーン電力マーケティング、組合などが共同で設置する太陽光発電の資金出資者となるプログラム等が行われている。

b. 日独の太陽光発電施設の伸びと制度の影響

太陽光発電の大量普及に成功した国の代表的な例として、日本とドイツを取り上げ、特に住宅屋根置型を対象として、制度の変遷とそれによる発電者の経済的なメリットおよび普及状況への影響について考察する。

図1には、日本における住宅屋根置型(統計上の分類は系統連系・分散型)の毎年の設置量と前年度に対する伸びを、3kWの太陽電池パネルを購入した場合²⁾の20年間での赤字額と共に示す。ここで、計算の前提として耐用年数を20年間、毎年の金利を同年の住宅金融公庫の基準金利として20年間で均等返済とし、容量1kWあたりの発電量は990kWh/年、毎年の保守費が購入金額の1%かかるものとし、毎年の費用を発電によって得られた利益で除したものを毎年の赤字とする³⁾。

1994年より補助事業が開始され、システム価格も順調に低下しているが、20年間の赤字額は1996年以降150万円～200万円程度で一定しており、システム設置容量は年々増加しているものの、前年からの伸び率で見ると変化はあるものの徐々に低下してきている。20年間の赤字額を消費者が太陽光発電の価値として支払う追加コストすなわち一種の支払い意志額(WTP)と捉えると、かなり高額であり、これだけの費用負担意思を持つ消費者が徐々に減少してきたことが、太陽光発電の普及伸び率を抑制しているといえる。

同じ条件⁴⁾でドイツについて計算した結果を図2に示す。ドイツの場合、ここで考慮した以外に自治体単位で各種の取り組みがあること(特に1995～1998の期間)を留意しておく必要があるが、1994年までの補助金制度で伸びた設置量が、その後徐々に減速していった後、2000年のFeed-in tariff導入で大きな伸びを示したことが推測される。1999年には100,000ルーフプログラムによる低金利融資(初年度0%、2年度以降1.9%)も開始されており、総支払額の減少に伴って設置容量の増加が見られるが、設置容量増加効果としてはFeed-in tariffの導入された2000年、購入料金が再値上げされた2004年(同年は100,000ルーフプログラムの終了によって貸出金利が下がっており、総支払額の減少はそれほど大きくない)に設置容量の急激な伸びが観察されることがわかる。このことは、新規制度の導入や、既存制度の経済的利益拡大など、消費者に継続的に新しい刺激を与えることが、正味のコストベネフィットの改善以上に普及の助成に重要であることを示している。なお、ドイツにおいては家庭用電力小売価格がアメリカドル換算で2004年に2000年の1.63

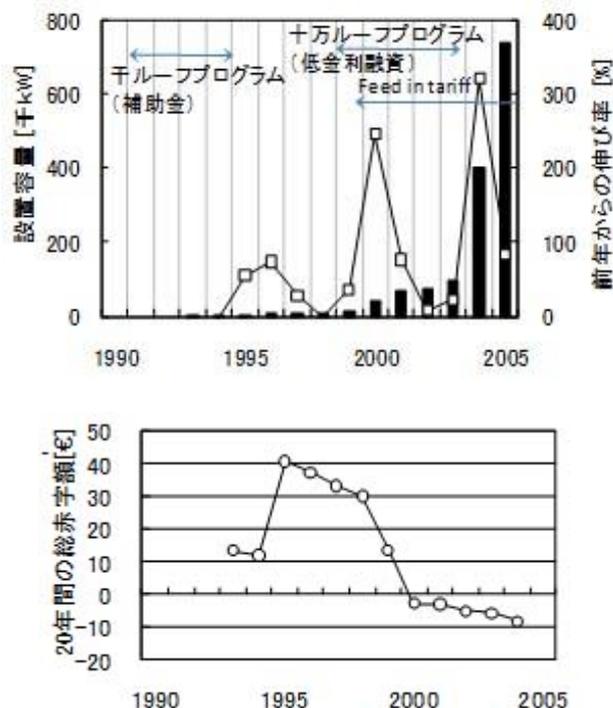
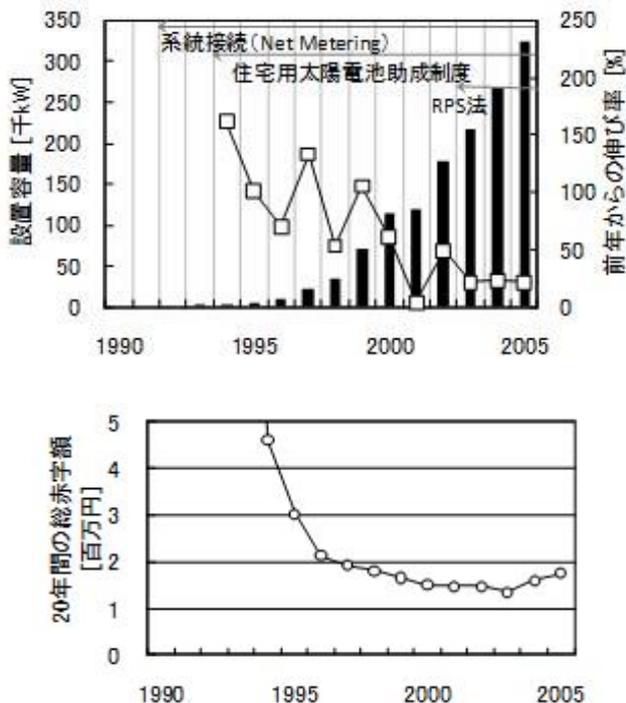


図1 日本における系統連系・分散型太陽光発電容量の伸びと制度（上）、経済的メリットとの関係（下）

図2 ドイツにおける系統連系・分散型太陽光発電容量の伸びと制度（上）、経済的メリットとの関係（下）

倍に上昇しており⁵⁾、これはFeed-in tariffによる費用の転嫁分が含まれているものと考えられる。

c. 太陽熱温水器との比較

上記の制度は、全て再生可能エネルギー発電の促進を目的とするものである。前述のように150万円程度の付加的なコストがかかるにもかかわらず、我が国で太陽光発電がこれまで順調に普及してきた背景には、太陽光発電のデザイン性や制度に誘導された消費者の選好の強さがあると考えられる。一方コストパフォーマンスに優れた太陽熱システムは、現在その伸びが大きく落ち込んでいる。太陽熱システムの中で簡易なタイプである太陽熱温水器について、集熱面積3.0㎡、価格240,000円⁶⁾、システム効率40%、給湯で代替する燃料を都市ガス、保守費が毎年1%として太陽光発電と同じように計算すると、20年間の黒字が8,600円(代替燃料をLPGとすれば23,000円)となる。図3に示すように、1999年度から2004年度にかけて、日本の太陽光発電量は石油換算5.3万k1から27.7万k1まで22.4k1増加したが、太陽熱利用量は98万k1から64万k1まで低下し、太陽光発電の伸びを上回る32万k1の減少となっている。両技術は住宅屋根設置という部分で競争性があり、比較的短期のCO₂削減目標(太陽熱温水器の普及)と、長期の習熟や新技術開発への波及を期待する太陽光発電普及政策が相反する結果になっている。

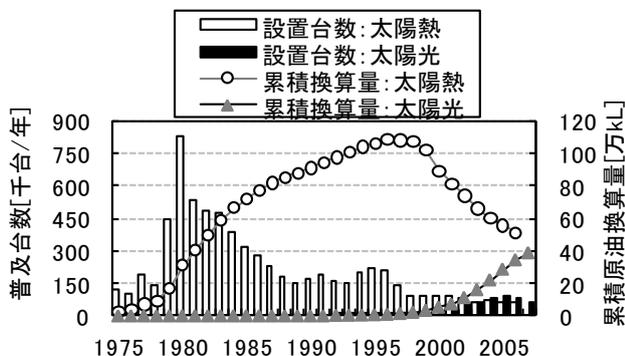


図3 太陽熱温水器と太陽光発電の普及状況比較

d. 太陽光発電と太陽熱温水器の消費者選好に関するアンケート調査の設計

以上の分析の中で、重要と考えられるポイントは以下の通りである。

- ・ 日本においては、ドイツと比較して太陽光発電に対する支払い意思額が高く、赤字が予想される状態でも普及が進んだ。2005年以降、普及が伸び悩んでいる背景にはドイツのように新しい制度を定期的に定めて市場に刺激を与えていないためである(2009年現在では新しい太陽光発電普及制度が設けられ、新たな普及段階に入っている)。
- ・ 一方、太陽熱温水器についてはその設置数は減少の一途を辿っている。これは、中国やヨーロッパで近年太陽熱利用が普及しているのとは対照的である。

以上から、今後の地球温暖化緩和策の中で望ましい技術が普及し、その効果を発揮するためには、以下の3つのポテンシャルのうち、③による評価が特に重要であることを示している。

① 技術ポテンシャル

多様なエネルギー需要が不確実に発生している実際のエネルギーシステムの中で、技術がその省エネルギーあるいは温室効果ガス削減効果を最大に発揮する形で組み込まれたときに実現される省エネルギー・温室効果ガス削減効果

② 経済的ポテンシャル

家計や企業などの各主体が、経済的に合理的な購買行動をとった際に、各技術の普及によって実現される省エネルギー・温室効果ガス削減効果

③ 実際の効果発現

家計や企業などの各主体が実際に行う消費行動は、技術に対する選好や補助金などの制度など、広義の「技術デザイン」によって大きく左右される。これらを勘案した上で、実際に実現される省エネルギー・温室効果ガス削減効果

本研究では、特に経済的に合理的な状態と異なる消費行動をとることが多い家計(民生家庭部門エネルギー消費)に着目し、今後の温暖化緩和策の重要技術である太陽光発電・太陽熱温水器を主たる対象とした。更に今後多様な高効率機器が出現し、太陽熱温水器とともに競合していくと予想される給湯分野のエネルギー消費にも展開できることを考え、以下の研究を実施した。

- ・ 住居の形式や大きさ、世帯人員の構成、多様なライフスタイルにより世帯によってエネルギー消費が大きく異なることを考慮し、また、太陽光発電、ヒートポンプ給湯器やコージェネレーション給湯器、エアコンや省エネ家電、住宅の断熱気密化など、各種の温暖化対策技術が正しく表現できる、都市・国土レベルの民生家庭部門エネルギー最終需要シミュレーションモデルの開発と高度化。
- ・ サブテーマ(1)の実験経済学に基づく消費者選好情報を用いて、補助金など各種制度や価格等が考慮できる各技術の普及率推定モデルを開発し、前述の民生家庭部門エネルギー最終需要シミュレーションモデルと併せ、都市・国レベルでの各技術のエネルギー消費・CO₂排出削減効果を予測するフローの確立。

サブテーマ(1)で実施した太陽熱温水器・太陽光発電の選好調査、各種次世代給湯器の選好調査については、この一連の研究フローに整合するよう、共同でアンケート設計を行い、また太陽熱温水器・太陽光発電の選好調査とコンディショナルロジット分析による普及モデルのパラメータ決定もサブテーマ(1)と合同で実施した。

2) 民生部門を対象としたエネルギー需要の予測モデルの構築

a. 省エネルギー・再生可能エネルギー技術が正しく表現できる民生家庭部門のエネルギー需要予測ツールの開発

民生家庭部門のエネルギー消費は、世帯を基準として原単位化されることが一般的であるが、世帯あたりエネルギー消費は世帯人員、住宅形式、住宅の広さ、機器の効率等により大きく変わる。また、個々のエネルギー消費機器の使われ方も世帯人員や生活パターンに依存する。従って、ある対策が多様な世帯で構成される都市や国レベルでのエネルギー消費・温室効果ガス排出削減にどのように影響するかを定量的に評価することは容易ではない。そのため、研究参画者らは都市・地域内における世帯を世帯人員・世帯構成・住宅形式・住宅規模・住宅熱性能の観点から詳細に類型化し、各類型の世帯に対する年間エネルギーシミュレーション結果を積み上げて都市での民生家庭部門エネルギー消費を推計する家庭用エネルギーエンドユースモデルを開発し、これまで主として大阪市への適用を行ってきた⁷⁻⁹⁾。また、家電や住宅のエネルギー性能向上のためには、機器の更新や住宅の建て替え、改修を待つ必要があり、省エネルギー基準設定などの対策が実際に効果を及ぼすためには相当の時間遅れを伴う。そのため、主要家電製品の効率及び住宅の熱性能を対象に、毎年の製造製品平均性能の変化と出荷台数から、予測対象年における平均性能を推計するストックモデルを別途開発し、エンドユースモデルの入力条件として整備した¹⁰⁾。

本研究では、対象地域内の全世帯を家族構成19区分、住宅構成12区分（戸建・集合毎に床面積6区分）の全228類型に分類する。その世帯毎にNHK生活時間調査¹¹⁾を基に作成した居住者の行動パターン（地域・季節によらず一定とする）より在室状況や各エネルギー消費機器の稼働を決定し、当該世帯の年間エネルギー消費を各機器の積み上げにより5分間隔で求め、対象地域内の各類型別世帯数を乗じて合計することで地域全体の用途別エネルギー消費量を推計している。

なお、各世帯の暖冷房エネルギー消費計算においては、住宅構成区分毎に設定した住宅モデルに対し、4種の熱性能（無断熱、旧基準、新基準、次世代基準）毎に動的熱負荷計算⁸⁾を実行し、結果を当該地域の住宅ストック熱性能構成比で重み付け平均している。

このモデルの特徴として、以下の点が挙げられる。

- ・ 動的熱負荷計算、エアコンCOPの外気温・負荷率に対する関数化、暖冷房発停の確率モデル化等により、暖冷房用エネルギー消費の詳細な推計ができること。
- ・ 行動パターンをベースにした5分ステップのシミュレーションで需要の時間変動を表現できていること。
- ・ 可能な限り原単位化を行わず、人間の行動と建物の熱収支をベースに都市のエネルギー消費を再現することで、生活行動、機器のエネルギー効率から住宅の熱性能に至る各レベルでの省エネルギー施策の効果が同時に扱えること。
- ・ 関西地区の住宅の暖冷房エネルギー実測結果および大阪市における年間エネルギー消費、月別ガス消費、電力気温感応度等との比較において高い精度が示されていること⁹⁾。

モデルの全体フローを図4に示す。本研究では、このモデルに太陽光発電、太陽熱温水器、ヒートポンプ給湯器、潜熱回収給湯器、コージェネレーション給湯器（エンジン、燃料電池）のモデルを組み込み、これら技術の温暖化緩和ポテンシャルを定量化できるようにすること、全国を17地域に区分し、日本全国での温暖化対策シナリオの中に上記各技術が表現できるような高度化を行った。

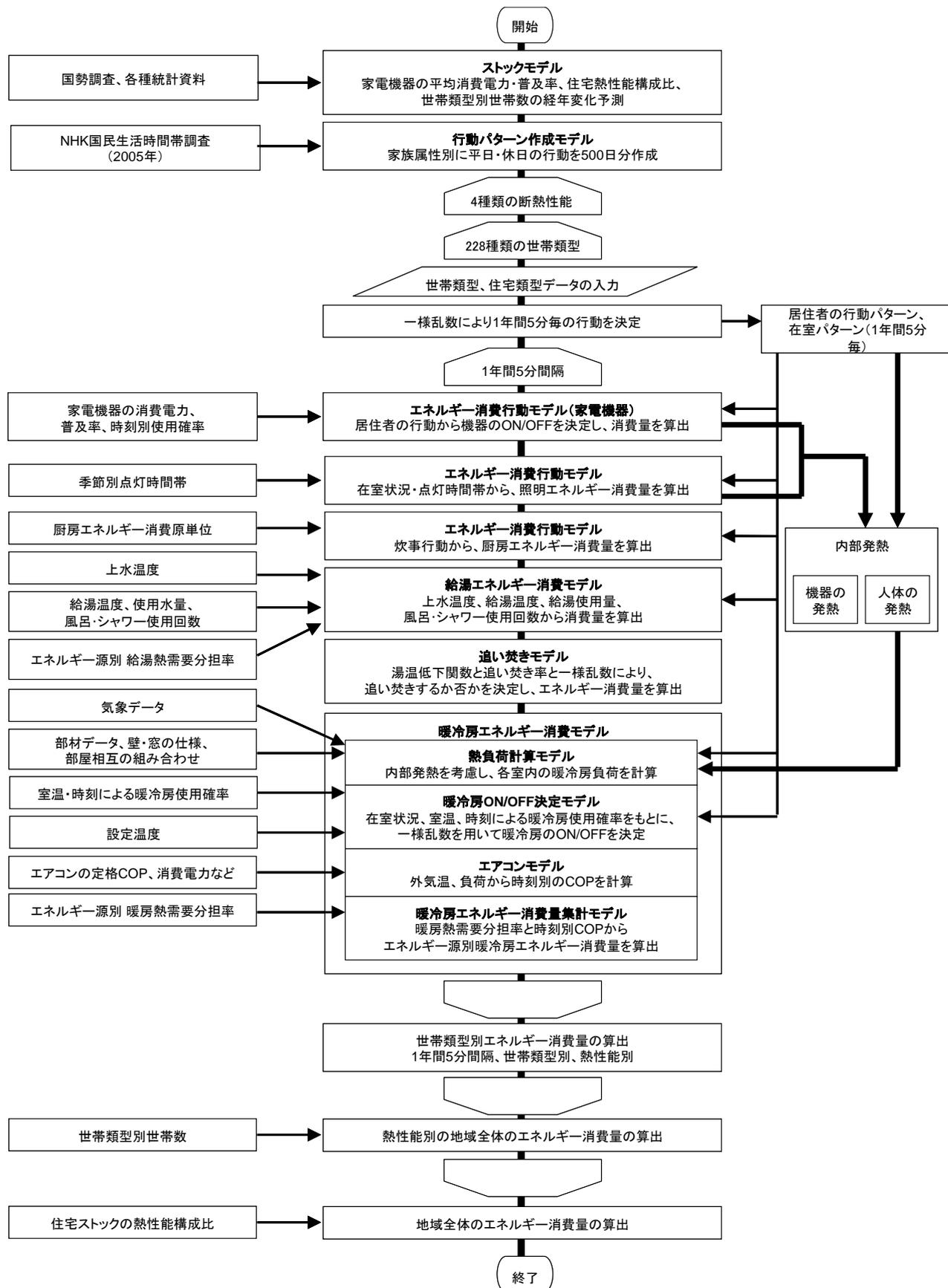


図4 モデル全体のフローチャート

まず、大阪市を対象に、上記再生可能エネルギー・高効率給湯器の技術的最適ポテンシャル、経済的最適ポテンシャルの算出を試みた。世帯類型19区分、戸建て、集合毎に6種類の住宅規模を想定し、それぞれの世帯類型でガスエンジンコージェネレーション(MGE)、ヒートポンプ給湯器(電化HP)、太陽熱温水器(SOLAR)、潜熱回収型給湯器(LHB)、太陽光発電(PV)のいずれが最適となるかを、一次エネルギー削減、CO₂排出量削減、コスト最小の3つの観点から計算した。図5にはCO₂最適計算の結果、図6にはコスト最適計算の結果を示す。また、図7には、導入のない状態から、経済的最適、一次エネルギー最適、CO₂削減最適の3つの観点の最適システムを導入させるため、補助金を与えて20年間で投資回収できるレベルになれば導入されるものとして補助額と市域でのCO₂削減量の関係を示したものである。経済最適では太陽熱温水器が集中して導入されるが、CO₂削減量はCO₂最適のおよそ50%のレベルで限界に達する。CO₂最適の場合、7,000億円程度の費用で50万t程度の削減が可能になるが、ポテンシャルに近くなると、限界的削減コストはかなり高くなる。

次に、全国を17地域に区分し、各地域の気象データ、住宅構成、世帯構成、住宅熱性能構成比、家電機器保有数量、暖房・給湯熱需要の燃料・機器別分担率、系統電源一次エネルギー消費・CO₂原単位等をまず推計し、これらを用いて2025年までの一次エネルギー・CO₂排出量の予測を行った。

まず1990年、2000年、2005年の3時点における全国の家部門エネルギー消費量について、既往研究による推計値と比較したのち、2025年までのエネルギー消費量・CO₂排出量を予測した。その結果、2025年には1990年比7.1%排出量が減少することがわかった。また、1990年から2005年、2005年から2025年までのCO₂排出量変化に対する各要因の影響を見たところ、1990年から2005年までは主として世帯数の増加、機器普及率の増加がCO₂排出量を増大させ、2000年から2025年までは、電力CO₂排出原単位の他、住宅の熱性能の向上と人口減少、家電機器効率の向上がCO₂排出量の低下に寄与することが明らかとなった。最後に、(Step1)家電機器トップランナー基準の強化、(Step2)新築住宅の省エネルギー基準義務化、(Step3)高効率給湯器の導入(CO₂排出量最適化基準でシェアを地域別に決定)、(Step4)待機電力・保温電力の削減、(Step5)集合住宅化の促進、(Step6)ライフスタイルの改善、(Step7)太陽光発電の大量導入の7つの追加的対策が2025年のCO₂排出量に及ぼす影響を検討した。結果として、図8に示すように高効率給湯器の導入(1990年比14%の削減)、待機電力・保温電力の削減(同9%の削減)が大きな効果を及ぼし、これら6種の対策で2025年には1990年比41%削減が可能であること、太陽光発電の大量導入を追加することにより、売電が可能な状況では1990年比56%の削減が可能となることを明らかとした。

	~20 ㎡	20~ 40㎡	40~ 60㎡	60~ 80㎡	80~ 100㎡	100㎡ ~		~40 ㎡	40~ 60㎡	60~ 80㎡	80~ 100㎡	100~ 120㎡	120㎡ ~
単独男													
単独女													
単独高齢男													
単独高齢女													
共働夫婦													
夫婦													
高齢夫婦													
勤労妻と子													
妻と子													
共働夫婦と子													
夫婦と子													
勤労妻と子2人													
妻と子2人													
共働夫婦と子2人													
夫婦と子2人													
共働夫婦と子3人													
夫婦と子3人													
共働、両親と子2人													
夫婦、両親と子2人													

電化HP

PV

図5 CO₂が最も削減されるシステムの世帯別分布(左集合、右戸建)

	集合						戸建					
	~20 ㎡	20~ 40㎡	40~ 60㎡	60~ 80㎡	80~ 100㎡	100㎡ ~	~40 ㎡	40~ 60㎡	60~ 80㎡	80~ 100㎡	100~ 120㎡	120㎡ ~
単独男												
単独女												
単独高齢男												
単独高齢女												
共働夫婦												
夫婦												
高齢夫婦												
勤労妻と子												
妻と子												
共働夫婦と子												
夫婦と子												
勤労妻と子2人												
妻と子2人												
共働夫婦と子2人												
夫婦と子2人												
共働夫婦と子3人												
夫婦と子3人												
共働、両親と子2人												
夫婦、両親と子2人												

図6 経済的に最適なシステムの世帯別分布(左集合、右戸建)

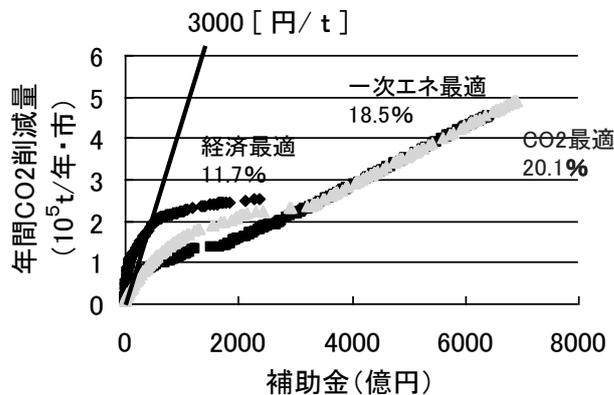


図7 大阪市全体での補助金による導入効果の変化

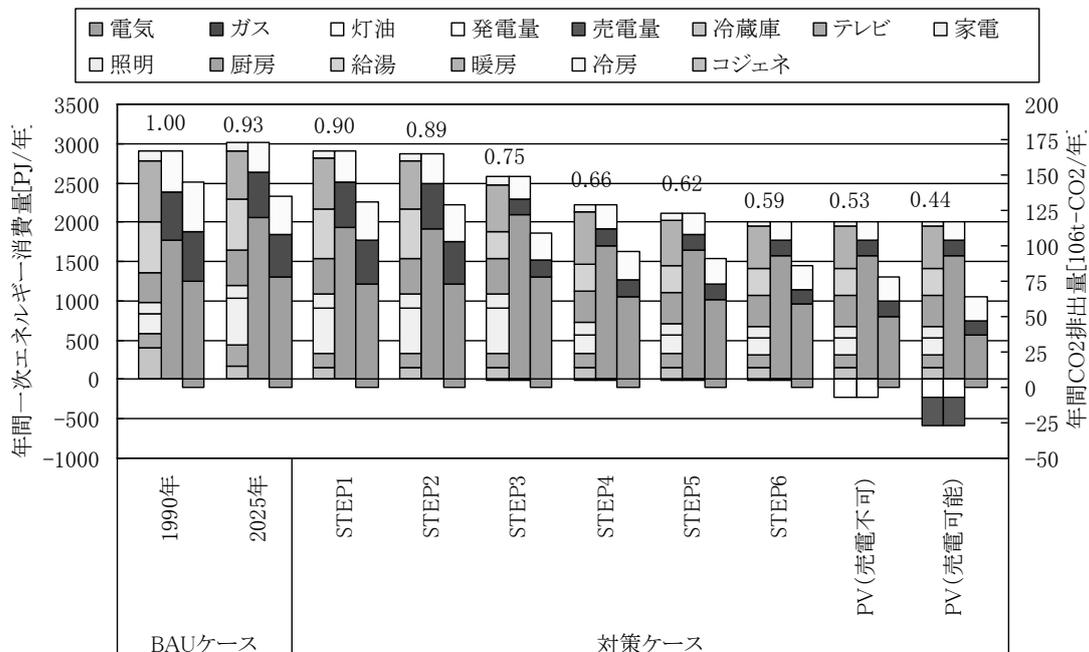


図8 各種追加対策による2025年の全国民生家庭部門一次エネルギー消費・CO₂排出量 (各項目とも左より用途別一次エネルギー消費、エネルギー源別一次エネルギー消費、エネルギー源別CO₂排出量、マイナスの値は太陽電池の発電量を示す。図中の数値は1990年基準のCO₂排出量比率を示す。)

b. 太陽熱温水器・太陽光発電の技術普及予測モデルの構築

サブテーマ(1)と合同で実施したチョイスメソッドによる太陽光発電・太陽熱温水器の選好に関するコンディショナルロジット分析の結果を表2に示す。

表2 選好調査結果

属性	係数	有意性	支払意思額・単位	
3kW太陽光発電の追加購入	1.97	***	123.3	万円/購入
太陽熱温水器の追加購入	-0.41	*	-25.6	万円/購入
追加購入費用(万円)	-0.016	***	1.00	万円/万円
購入時の補助金(万円)	0.029	**	1.80	万円/万円
発電電力販売単価(円/kWh)	0.011	**	0.69	万円/(円/kWh)(販売単価)
光熱費節約額 (万円/20年)	0.0080	***	0.50	万円/万円(20年節約額)
世帯当たりCO ₂ 削減量	-0.065	*	4.07	万円/t-CO ₂
世帯普及率	-0.001		0.03	万円/%

*** 1%有意, ** 5%有意, * 10%有意

表2の係数を用いて各システムの効用値 V は次式で示される。

$$V_{in} = \sum \beta_k X_{ik} \quad (1)$$

ここで k は考慮した因子を表し、 X_{ik} は選択型コンジョイントで選択肢 i に与えられた因子 k の数値、 β_k は因子 k の係数である。ただし、太陽熱温水器および太陽光発電の追加購入はダミー変数で与えた。表2の係数は選択型コンジョイントの結果に基づいて係数 β_k を推計する(最尤法により推計)ことで算出したものである。

チョイスメソッドで得られた選択値と上記効用値の関係をみると図9のようになる。ここで2005年における太陽熱温水器、2007年における太陽光発電の選択率実態値は前者が8.4%、後者が9.7%である。また(1)式、(2)式に現在の設置費用等を入力して得られる効用値はそれぞれ-0.33、-0.026である。この点をそれぞれの図にプロットすると、図9の採択率は実際よりも高い値を示した。

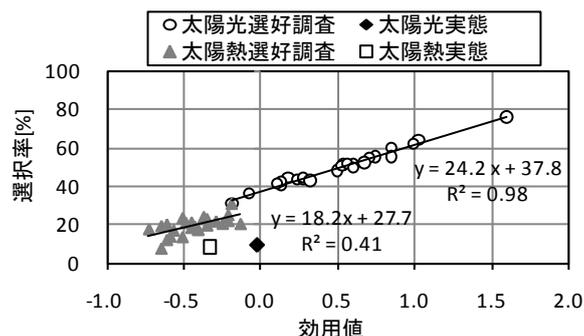


図9 太陽光発電・太陽熱温水器の効用値と選択率の関係

次に、上で得られた消費者選好をベースに、補助金や価格など各種条件の変化による技術の普及率変化を予測できる技術普及予測モデルを、Bassモデル¹²⁾および松本ら¹³⁾の研究を参考に構築する。本研究ではBassの開発した製品の普及予測モデルGeneralized Bass Model(以下、Bassモデル)中のマーケティング影響項に、上述の効用値から得られる選択率を入力できるように改造する。また、製品価格の経年変化には累積生産による学習曲線効果による習熟を考慮する。

Bassモデルはマーケティングサイエンスの分野で確立されたモデルであり、新製品の普及予測などに用いられている。基本式を(3) (4)式に示す。

$$n(t) = p(m - N(t-1)) + q \frac{N(t-1)}{m} (m - N(t-1))$$

$$= (p + qn_{t-1})(1 - n_{t-1})m \quad (2)$$

$$N(t) = N(t-1) + n(t) \quad (3)$$

ここで、 $n(t)$ ： t 期の新規購入者、 p ：革新者係数、 q ：模倣者係数、 m ：潜在的な最終購入者数、 $N(t-1)$ ： $t-1$ 期の累積購入者数、 $N(t)$ ： t 期の累積購入者数、 n_{t-1} ： $t-1$ 期の普及率である。この中で、革新者係数 p 、模倣者係数 q 、潜在普及規模 m がモデルのパラメータとなる。式(3)には、マーケティングや補助金等の普及政策のように外部的な条件の変化を示す変数が含まれていない。そこで、Bassモデルでは(3)式右辺にマーケティングミックス変数 $X(t)$ を乗じることで、このような条件変化を表現している(4)式)。

$$n(t) = (p + qn_{t-1})(1 - n_{t-1})m \cdot X(t) \quad (4)$$

c. 太陽熱温水器の普及予測

i. Bassモデルのパラメータ同定

太陽熱温水器について、1975年から2006年までの販売台数データに基づいて(2)式の各パラメータを推定した。機器寿命を20年として保有数を推計したところ、保有数は1997年頃にピークとなり、その後急激に減少する(図3)。また、1998年以降の新規販売台数は現在までほぼ横ばいとなっている。これは1995年～1998年前後にそれまでと異なる市場規模が形成されていることを意味する。そこで、①1975年に販売された機器が寿命を迎える1995年、②新規販売台数が低位で安定する1998年の2つの境界年を仮定し、革新者係数、模倣者係数、潜在普及規模を最小二乗法により推計した。いずれの期間も買い替え需要を含むものである。結果を表3に示す。境界年以降は境界年以前と革新者係数と模倣者係数の値は変化しないことを想定した。

表3 太陽熱温水器の普及予測パラメータ

ケース	計算期間	革新者係数	模倣者係数	潜在普及規模(万世帯)
①	1975年～1994年	0.020	0.299	580
	1995年～2006年	—	—	300
②	1975年～1997年	0.026	0.216	644
	1998年～2006年	—	—	121

ケース①、ケース②について推計結果を実際の保有台数と比較した。結果を図10に示す。図よりケース②の計算の結果が実態を良く反映しており、本研究では1998年を境界として得られたパラメータを用いる。

ここで、図11にBassモデルで与えられる普及開始からの時間と技術普及率(潜在市場規模に対する普及率)の関係を示す。市場が飽和するまでの時間は革新者係数と模倣者係数によって決定されるが、図からわかるように太陽熱温水器は20年程度でほぼ飽和する。したがって、温暖化対

策技術としての太陽熱温水器の貢献を測るうえで本質的に重要であるのは技術の市場規模である。

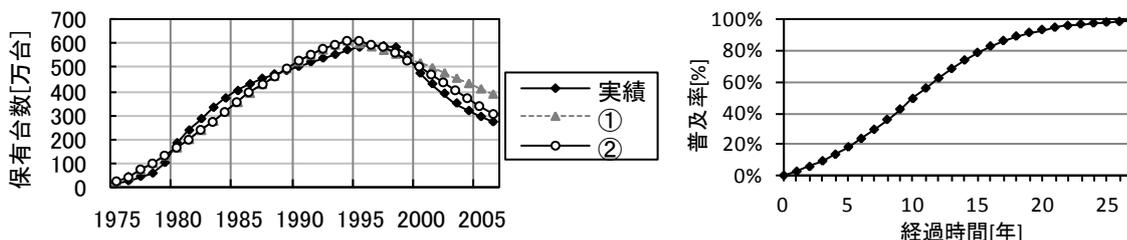


図10 太陽熱温水器保有台数の実績値と予測値 図11 経過時間と普及率の関係 (太陽熱温水器)

ii. 普及台数予測

対策等が行われないBAUケースに加えて、表4のケースを想定し、普及率を予測する。太陽熱温水器の場合、すでに市場が定常状態にあると考えられることから、普及促進策の導入による採用率の変化は市場の拡大として解釈することができる。そこで、現在の効用値に対応する採用率 (図9に示した回帰式で与えられる) と普及促進策導入時の効用値に対応する採用率の比をとり、この比を市場規模の拡大比率とし、市場規模 (121万世帯) に掛け合わせ、設置台数とした。

結果をBAUケースと合わせて図12に示す。図からわかるように、補助金の実施は今後の設置数の減少を抑制する程度の効果は期待できるが、機器本体価格の大半をカバーする20万円の補助金においても、1990年ごろの普及率 (20%前後) に戻すことは不可能である。一方、太陽熱温水器のイメージの改善については大きな効果が期待できる。太陽光発電と同程度のイメージとなることで普及率27%となる。ただし、この場合、太陽光発電や他の次世代型給湯器との競合を考える必要があるうえ。太陽熱温水器に対する選好も変化すると考えられ、普及予測は不確実なものとなる。また、太陽熱温水器のイメージが悪い原因には販売チャンネルの不足、利便性・快適性面の開発の遅れ等も含まれることから¹⁴⁾、社会的・技術的課題も存在している。

表4 太陽熱温水器の普及将来予測条件

条件	設定
燃料の高騰等により太陽熱温水器による年間光熱水費節約額の増加	1) 0.5万円 2) 1万円 3) 2万円 4) 3万円/年の増加
太陽熱温水器設置のための補助金の支給	1) 5万円の補助 2) 20万円の補助
デザインの改訂や社会的努力による太陽熱温水器に対するイメージの改善 (現在のマイナスイメージを表す効用算出式(1)式の太陽熱温水器の追加購入の係数 (BAUは-0.41) の変化として表現する)	1) 現在のマイナスイメージがゼロになる (0に変更) 2) 太陽電池と同程度になる (1.965に変更)

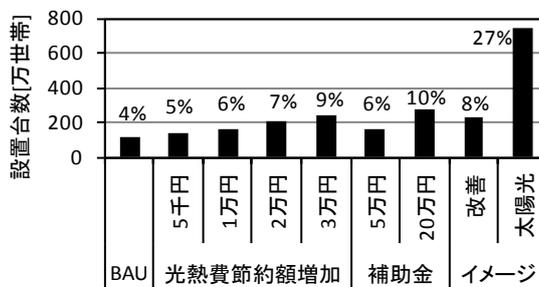


図12 太陽熱温水器の普及予測台数 (グラフ上の数字は普及率を表す)

d. 太陽光発電の普及予測

i. Bassモデルのパラメータ同定

太陽光発電については、1992年から2007年までの販売台数データを利用し、革新者係数を推定した。製品が市場に投入され、わずかに普及している製品に対してBassモデルを適用する場合、類似製品の模倣者係数、市場規模を使用する。太陽光発電はこの条件に当てはまることから、太陽光発電を住宅設備として考え、松本ら¹³⁾による洗面化粧台の模倣者係数を与えることとした。また、潜在普及規模は全国の戸建住宅2814万世帯の76%（チョイスメソッドで得られた採用率最大値、2139万世帯）とした。

ここで、太陽熱温水器と同様に経過時間と普及率の関係を図13に示す。図からわかるように市場の飽和には製品寿命の3倍程度の期間が必要である。そこで、太陽光発電による温暖化緩和技術としての貢献を測るうえで本質的に重要であるのは技術の普及速度であると考え、表5に示すように補助金および固定費買取制度の実施を考慮した二つのケースを設定し、普及速度の増加への貢献を評価する。

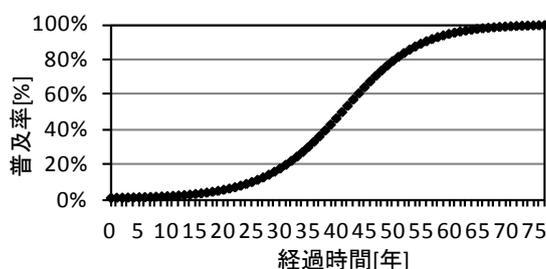


図13 経過時間と普及率の関係（太陽光発電）

表5 太陽熱温水器の普及将来予測条件

条件	設定
補助金の実施	1) 補助金 20 万円を支出 2) 習熟限界補助：習熟曲線の限界（後述する）に達するまで補助金を支出（2008 年には 19 万円/kW 支給だが価格の習熟によって徐々に減少する）
固定費買取制度の実施	発電された電力を全て家庭用買電価格より高い固定価格で買い取る (Feed-in Tariff). 買取価格は 1) 33 円, 2) 38 円, 3) 43 円/kWh とする.

ii. マーケティングミックス変数の設定

松本ら¹³⁾は、現状で競合する製品の中から対象製品が選択される割合を H_0 、同じく t 期において選択される割合を H_t とした場合、 $X(t)$ を両社の比率 H_t/H_0 で表すものとした。本研究も同様に、2007年および当該年の効用値に対応する採用率を図3の回帰式から算出し、それぞれを H_0 、 H_t としてマーケティングミックス変数を与えるものとした。

ただし、太陽光発電については累計生産量が増加するに従い、習熟効果により価格が低下するとする。この関係式は (5) 式で表される。

$$Y_n = AX^{-\beta} \quad (5)$$

ここで、 Y_n は n 年におけるコスト[円]、 A は初年度におけるコスト[円]、 X は n 年までの累積生産量

[kW]、 β は定数である。本研究では過去の累計生産量と価格の関係より内田ら¹⁵⁾による推計から、 A を909万円、 $\beta=0.224$ 、 X の初期値を1993年に0.251とした。ただし、現在ハウスメーカーが新築住宅を対象として提供している太陽光発電の最小価格が45万円/kWであることを考慮し、習熟による価格低下の限界を40万円/kWとした（このとき、発電単価は30円/kWhである）。

iii. 普及予測結果

それぞれの推計結果をBAUケース、習熟を考慮しないケースと併せて図14、図15に示す。まず、BAUケースでは技術の習熟による製品価格の減少により2025年において38%まで普及量が増加する結果となった。前提とした技術の習熟による製品価格低下が想定したよりも高い価格水準で限界を迎える場合BAUケースにおける普及率はより小さくなり、逆の場合、普及率は大きくなる。

補助金の支給は普及速度の増加に寄与し、習熟限界補助ケースで2025年に43%、20万円の定額支給で52%まで普及率が増加する。固定費買取制度は補助金と比較すると大きな変化が見られない。買取価格を38円/kWhとした場合、2025年時点で習熟限界補助ケースと同等の普及量となるが、同ケースの補助総額が6550億円（2010年以降の設置世帯に適用）であるのに対し、固定費買取制度での買取電力費用は25兆円となり、費用の出所は異なるものの費用対効果としては補助金の効率が良い。

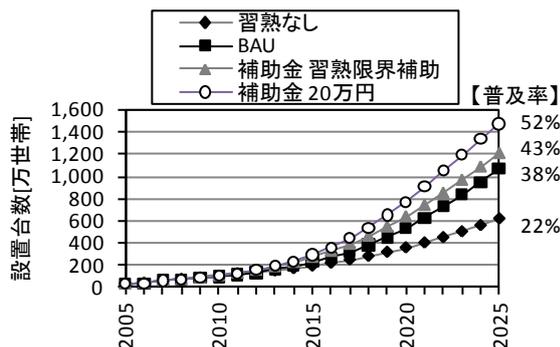


図14 太陽光発電普及予測：補助金制度の実施

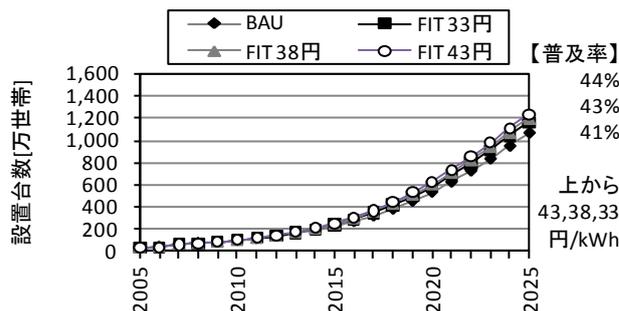


図15 太陽光発電普及予測：固定費買取制度

それぞれの推計結果をベースと合わせて図14、15に示す。補助金の支給は2020年で270万世帯、2025年には500万世帯以上の設置世帯数増加効果を生じる。Feed-in Tariffで33円/kWhの買い取り価格とすると、2025年時点で1,158万世帯の普及となり、補助金20万円のケースの1,151万世帯とほぼ等しくなるが、補助金20万円のケースの補助額の総額が2兆1,988億円（2008年以降の設置世帯に適用）であるのに対し、Feed-in Tariffでの買い取り電力費用は6兆6,357億円となり、費用の出所は異なるものの費用対効果としては補助金の方が効率が良いと言える。

e. 主体別の選好を考慮した省エネルギー技術の選択モデルの構築とエネルギー需要の将来推計

本節では前節で得られた両技術の普及予測に基づいて、技術普及によってわが国の家庭部門より削減されるCO₂排出量を推計する。削減量の予測には前述のエネルギー需要モデルを用いる。本モデルは居住者や住宅の属性を考慮して家庭の熱・電力需要を詳細に算出していることから、太陽熱温水器や太陽光発電等の技術の普及が、家庭部門最終エネルギー需要に及ぼす影響を精度良く評価することができる。同じ世帯への技術導入であっても、その導入効果は地域や世帯の給湯

需要によって異なることから、平均的に普及が進む場合（「線形普及」とする）と、地域別の上記世帯類型のうち最もCO₂削減効果の大きい世帯から技術の普及が進む理想的な条件（「最適普及」）を考え、エネルギー消費・CO₂削減効果を試算した。

太陽熱温水器について、2025年におけるCO₂削減効果推計結果を図16に示す。筆者らの予測では、2025年の家庭部門のCO₂排出量は135百万t-CO₂/年であり（図8）、太陽熱温水器を戸建住宅全てに普及させた場合の排出削減量7百万t-CO₂/年はその3%に相当する。光熱水費削減額の増加・補助金対策ではBAUケースから大きな削減は得られないが、太陽熱温水器に対するイメージを太陽光発電のイメージまで向上させた場合、線形普及で1.8百万t-CO₂/年（1.4%）、最適普及で4.4百万t-CO₂/年（3.3%）の削減量が期待できる。

線形普及と最適普及の差異は大きい。この差異は大きく購入世帯の立地、次に、購入世帯の世帯構成の違いによるものである。温暖な地域であるほど太陽熱温水器で製造される熱量が大きくなり、CO₂削減効果は大きくなる。また、世帯人数の多い世帯であるほど給湯需要が大きく、太陽熱温水器の導入によって得られるCO₂削減効果は大きくなる。

太陽光発電について、2025年におけるCO₂削減効果の推計結果を図17に示す。戸建住宅全てに太陽光発電が普及した場合のCO₂削減量は22百万t-CO₂/年であり、家庭部門CO₂排出量の16%弱に相当する。2025年にはBAUケースでも8.2百万t-CO₂/年（6.1%）の削減が予想されるが、補助金投資回収補助ケース、FIT38円/kWhケースではいずれも9.2百万t-CO₂/年（6.8%）の削減が期待できる。補助金投資回収補助ケースはCO₂排出量1tあたりの排出削減コストは61万円/t-CO₂となる。

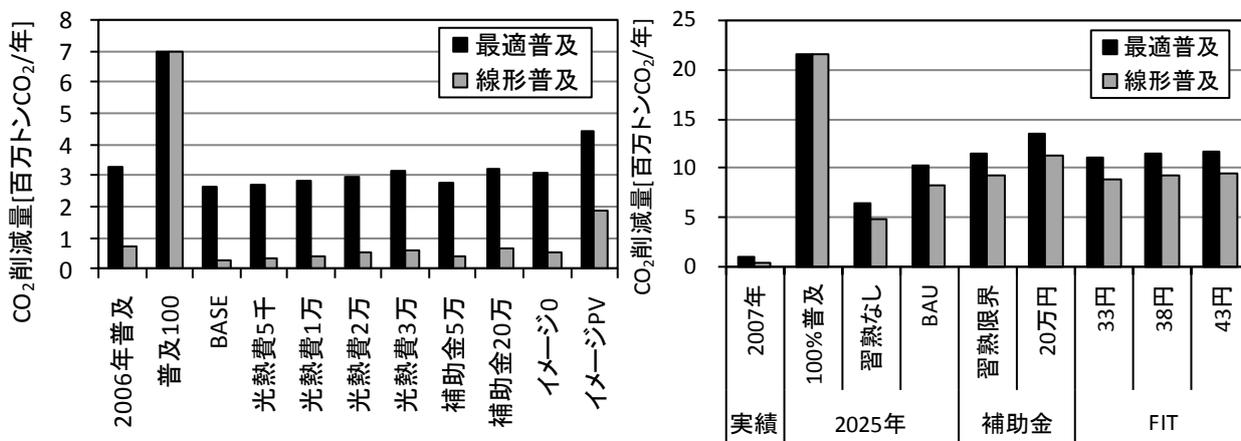


図16 太陽熱温水器の普及による年間CO₂削減量 図17 太陽光発電の普及による年間CO₂削減量

f. まとめ

太陽熱温水器は購入者のライフサイクルコストが30万円強の黒字、太陽光発電では150万円程度の赤字となる。一方、前者は採用率を減少させ、後者は増加させている。大阪府内で実施した両技術の選好調査の結果、太陽熱温水器はデザインなど、経済性や環境性能以外の部分で敬遠されている（購入に対する支払意思額がネガティブである）。太陽熱温水器が地球温暖化緩和技術として貢献するためには、ヨーロッパで実施されているようなデザイン面の改良など、技術イメージの改善が不可欠である。太陽熱温水器が太陽光発電と同程度の消費者選好を得た場合、太陽熱温水器の普及量は現在の6倍となり、日本全国では1.4%のCO₂排出量が削減される。ただし、製品に対する消費者選好が大きく変化した場合、太陽光発電をはじめ、他の次世代型給湯器との競合関

係を考慮する必要がある。また、太陽熱温水器の普及には販路の確保などの社会的・技術的課題も残されている。

太陽光発電は太陽熱温水器とは対照的に技術特性やコストメリット以上に、製品に対する支払意思によってこれまでの普及が支えられてきた。今後の普及については、技術の習熟による初期費用の減少によって普及量が大きく伸びる可能性がある。太陽光発電技術の普及推進策としては、運用時の支援策である固定費買取制度よりも初期費用に対する補助策のほうが費用対効果の面で優れている。この理由は消費者選好において発電電力の販売価格が過小評価されていることに起因する。

本研究は①技術選択にかかわる消費者選好の調査、②得られた消費者選好情報に基づく技術普及の将来予測、③技術普及によって得られるエネルギー・CO₂排出削減効果推計を行うフローの確立を目的としたが、技術普及予測においていくつかの課題が残された。一つは(5)式で与えた技術の習熟の想定である。習熟による製品価格の変化は消費者選好への感度が高く、技術普及予測に大きな影響を及ぼす。もう一つの課題は、技術普及に用いたBassモデルで外的に与えた市場規模、模倣者係数の想定である。二つのパラメータは対象技術の普及経路を決定する主要因である。たとえば今回用いた洗面化粧台は、開発当初高級住宅をニッチとして徐々に普及し、現在では新築・改修の際に標準的に用いられるようになったが、太陽光発電について同様の普及経路を想定したことになる。市場規模についても同様に、長期的には全戸建住宅に太陽熱温水器か太陽光発電が設置される状況を想定し、技術普及予測、普及推進策評価を行った。ここであげた二つの課題により技術の普及予測結果は大きな不確実性を持つ。この不確実性を位置づけるためには技術普及に伴う社会的・技術的变化の位置づけが不可欠であり、この点を今後の課題とする。

(2) 消費者選好やライフスタイル転換を考慮した中国上海市民生家庭部門のエネルギー需要予測と物質フロー分析

1) はじめに

本節では、まず中国上海市を対象としてエネルギー需要モデルを開発し、現在から2030年までのエネルギー需要の予測、各種省エネルギー手法の評価を行った結果を示す。ここで定量化される削減量は前述の「技術ポテンシャル」である。次に、実社会での技術選択は主体の経済合理的判断や技術選好に基づいて行われることを考慮し、エネルギー消費量を推計した。ここでは、上海市家庭部門における省エネルギー技術の代替案をパッケージとして複数設定し、それらが主体の選好特性を反映して選択されることを想定する。ただし、投資回収や技術に対する主観的選好は選択主体が置かれている社会経済的状况によって変化すると考えられることから、2030年までの社会経済シナリオを2通り（「経済成長順調シナリオ」および「経済成長鈍化シナリオ」）作成し、シナリオ別に省エネルギー技術の導入に伴うCO₂排出削減効果の違いを定量的に評価した。

最後に、エネルギーシステムの高効率化とその副次的影響について分析する。将来的なエネルギー消費の削減のためにはエネルギー効率の高い製品への置き換えが必要である。しかし、省エネルギー技術・製品の普及（つまり買い替え）が進めば、一方で廃製品フローが生じる。所得格差が拡大傾向にある中国では、都市とその近郊、さらに農村地域での広域な製品（廃製品）フローが形成され、使用済みとなった廃家電のカスケード利用が頻繁に行われている。こうした効率で劣る製品の社会的な長期利用は資源消費の抑制に寄与するものの、エネルギー消費の増加を招くとともに、結果的に農村部での不適切なリサイクルや処理による深刻な環境汚染を引き起こすことが懸念される。したがって、地域の持続可能性を高めようとするとき、都市部におけるエネルギー消費の最適管理だけでなく、製品・廃棄物フローを含めた周辺地域への環境影響のリーケージも併せて制御・管理することが必要である。そこで、製品の所有や利用・廃棄に関する欲求や行動が消費者のライフスタイルによって規定されるものと考え、家庭用電化製品を事例として現地調査等に基づいて将来の製品消費形態を分類し、消費形態別の嗜好性を反映させる製品フロー・ストック推計モデルを構築した。その上で、長江デルタ地域を中心とする1市5省を対象として、主要家電4品目由来の廃棄物発生量とCO₂排出量を評価することで、都市およびその周辺地域における環境インパクトを評価した。

2) 二つの社会経済シナリオ

2030年までの将来予測では、GDP、将来人口、世帯数に差異を持たせた社会経済シナリオとして「経済成長順調シナリオ」および「経済成長鈍化シナリオ」の2通りを作成した。GDPについては、いずれのシナリオにおいても、2010年上海万博の開催まで高い経済成長が続くと仮定し、2008年から2010年までは2003年から2007年までの年平均経済成長率（16%）を維持するものとした。2011年以降は、経済順調シナリオでは、星野ら¹⁶⁾による中国全体の年平均経済成長率、1978年から2006年までの上海GDPの中国全体を占める割合¹⁷⁾、上述で算定された2010年の上海GDP推計値をもとに、年平均経済成長率を5.4%と設定して2030年までの各年のGDPを求めた。一方、経済鈍化シナリオの2011年以降では、まず小宮山ら¹⁸⁾による中部沿岸地域（上海を含む）の2002年から2030年までの年平均GDP成長率、および中部沿岸地域の2002年のGDP¹⁹⁻²¹⁾から、中部沿岸地域全体の2030年までのGDPを算定した。次いで、1978年から2006年までの上海GDPの中部沿岸地域全体に占める割合の平

均値をもとに、2030年における上海GDPを算出した。この数値と先に算定した2010年の上海GDPを用いて、2011年から2030年まで年平均経済成長率（3.2%）を計算し、2011年から2030年まで各年のGDPを算出した。つまり、2010年までは上海市の第11次5ヵ年計画で掲げた経済成長率目標（9%）を上回る経済成長を遂げるものの、2011年以降は、ここで算出した2030年上海GDP値に向けて経済成長が鈍化するとした。得られた結果を図18に示す。

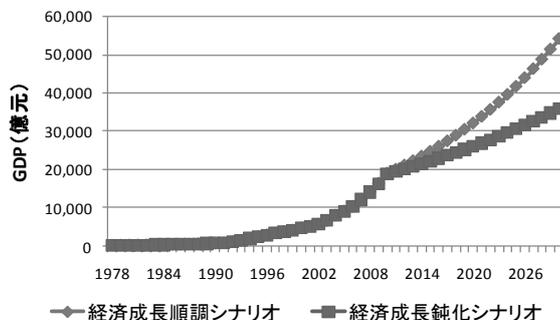


図18 社会経済シナリオ別の上海GDP

人口変動については、戸籍人口と半年以上滞在する外来流動人口からなる常住人口を指標に用いて、将来予測を行った。2つのシナリオともに、戸籍人口は1978年から2005年までの統計値²²⁾と、2010年以降の5年おきの推計値²³⁾から近似曲線を求めることで、2006年以降の値を推計した。外来人口は、まず中国では出稼ぎ農民が流動人口の8割を占めており、経済発展の主力となっていることから、GDPは外来流動人口の増減に寄与すると考え、1995年、2000年、2003～2007年の外来人口とGDPから近似曲線を求めた。なお、1995年の外来人口は、1995年の上海戸籍人口²²⁾と常住人口²³⁾の差から求め、2000年、2003～2007年は統計値である。次に、本研究で推計した各年のGDPから、2017年までの外来常住人口を推計した。2018年以降については、2017年にピークを迎えると予測されている15～64歳の生産年齢人口²⁴⁾の影響を想定し、2007年から2017年までの増加傾向をそのまま延長し、毎年微増することとした。

ここまでは2つのシナリオに共通だが、経済順調シナリオでは、GDPの伸びに連動して外来人口が増す設定としているため、高齢化社会への対応の必要性から、地方において一人っ子政策に代表される人口抑制政策が緩和されることを想定した。ここでは、一人っ子政策の緩和によって、2006～2010年：2.5%/年、2011～2015年：3.5%/年、2016～2020年：4.5%/年、2021～2025年：5.5%/年、2026～2030年：6.5%/年、の戸籍人口増が見込めるものとした。

得られた結果を図19に示す。

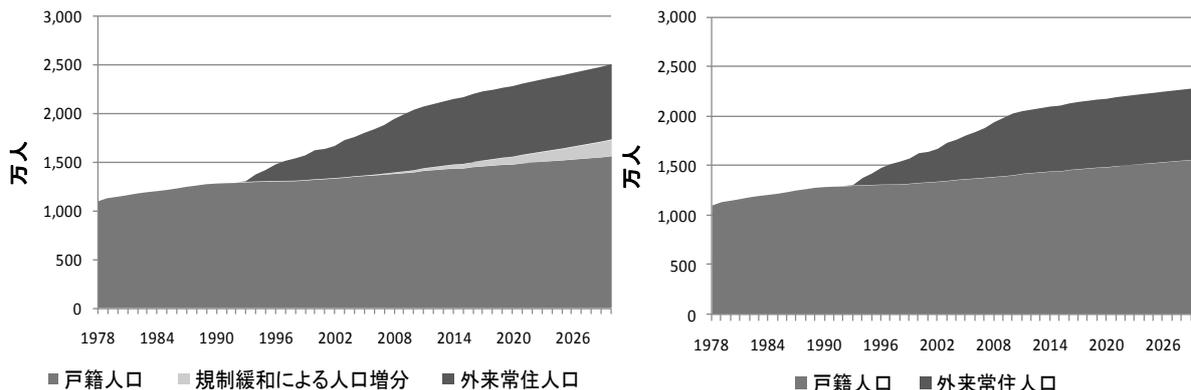


図19 社会経済シナリオ別の上海常住人口（左：経済成長順調、右：経済成長鈍化）

3) エネルギー需要予測モデル

a. モデルの概要

エネルギー需要モデルの構成を図20に示す。基本的な構成は(1)に説明した日本の家庭モデルと同じものである。本モデルは都市・農村の区分、都市については所得階層のほか、世帯区分（家族構成・世帯人員数）、住宅の規模により類型化し、各類型を代表する建物モデルを入力条件としてシミュレーションを行い、世帯当たりのエネルギー消費原単位を推計する。推計では居住者の行動パターンを確率的に発生させ、在室状況や各エネルギー消費機器の稼働を決定し、当該世帯の年間エネルギー消費を各機器の積み上げにより5分間隔で求める。最後に、各類型の世帯数を世帯当たりのエネルギー消費量に乗じて合計し、地域全体のエネルギー消費量を推計する。

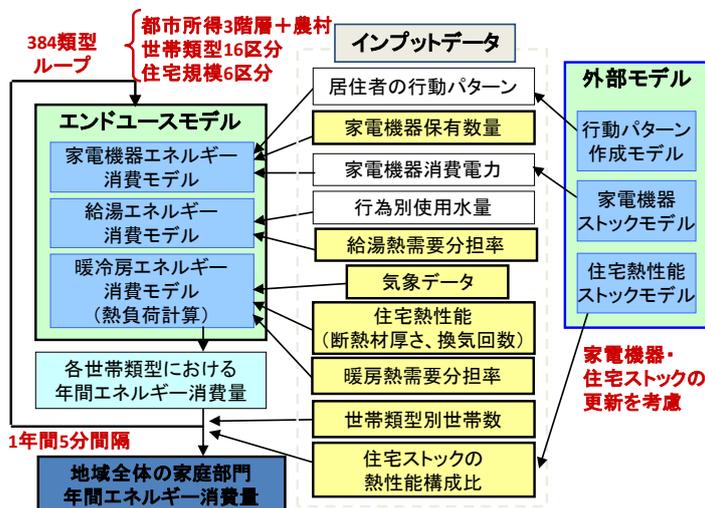


図20 エネルギー需要モデルの構成

現在から2030年までのエネルギー需要を予測するためのデータベースとして、以下のものを開発した。詳細は巻末資料集(2)に説明する。

① 人口のデータベース

社会経済シナリオに対応する人口を都市部・農村部の区分、都市部については所得区分（3階層）に分離した。ただし、所得階層については2003年における所得階層別世帯数比率を用いて

分離し、この比率は2030年まで継続するものとした。

② 世帯区分のデータベース

本モデルは世帯を単位としてエネルギー需要推計を行うことから、人口のデータから世帯数を算出し、家族構成および世帯構成人数により世帯を類型化した。ここでの家族構成とは単身世帯や共働き夫婦世帯などの区分である。

③ 住宅床面積のデータベース

住宅のエネルギー消費は住宅の規模に大きく依存する。そのため、住宅の規模の比率を推計した。

④ 住宅の建物モデル

都市・農村区分、所得階層、世帯類型、住宅の規模を考慮すると384の世帯類型ができる。各類型について建物モデルを設定した。ただし、上海では戸建て住宅の比率が5%未満であることからこれを無視し、すべて集合住宅であるものとした。

⑤ 家電製品のデータベース

日本の家庭部門のモデル（(1)に説明したもの）と同じ種類の機器を考慮し、本研究で実施したアンケート（巻末資料集(1)）の結果を反映するとともに、可能な限り上海統計年鑑²⁵⁾、中国統計年鑑¹⁷⁾から都市部所得階層別、農村部に分けて普及台数を設定した。なお、家電の使用率は所得水準のみに依存するものとした。また、全ての機器の性能は2030年まで変化しないものとした。

⑥ 暖冷房のデータベース

冷房はエアコン、暖房はエアコン、電気ヒーター、ガスヒーター、灯油ヒーター、石炭暖房器具を考慮し、それぞれの分担率（採用比率）を設定した。この比率も2030年まで変化しないものとした。

⑦ 給湯・ちゅう房のエネルギー消費のデータベース

給湯用・ちゅう房用のエネルギー消費を設定した。給湯は洗顔、風呂・シャワー、炊事を考慮し、給湯量を設定した。また、給湯、ちゅう房用のエネルギー源（電気、都市ガス、LPG、石炭、石油）を設定した。

b. 2000年、2006年におけるエネルギー消費量の推計

本モデルによる上海市の家庭部門年間二次エネルギー消費量の推計値を図21に示す。図では統計値および寧ら²⁶⁾の推計値を併せて示す。ここで統計値とは、上海統計年鑑²⁵⁾に掲載されているエネルギー源別の一人あたり年間エネルギー消費量に総人口を乗じた値である。推計値は2000年、2006年ともに統計値に比べて30%、11%小さい。また、エネルギー源別に見ると、電力消費量を大きく（統計値の1.5倍）、逆に石炭を少なく（統計値の0.2倍）推計している。2006年では電気・ガス消費量は統計値と近い値を示しているが、石炭消費は少ない。

得られた推計値から都市部人口一人あたりの年間二次エネルギー消費量を求めて、上海統計年鑑²⁵⁾に掲載されている数値（統計値とする）、寧ら²⁶⁾の推計値と比較した。結果を図22に示す。推計値は2006年においては統計値と非常に近い値を示しているが、エネルギー源別にはガス・石炭の比率が一致していない。一方、2000年においては統計値に比べ小さな値となっており、エネルギー源別には石炭が非常に小さく、電力消費量は統計値と比較して大きい。

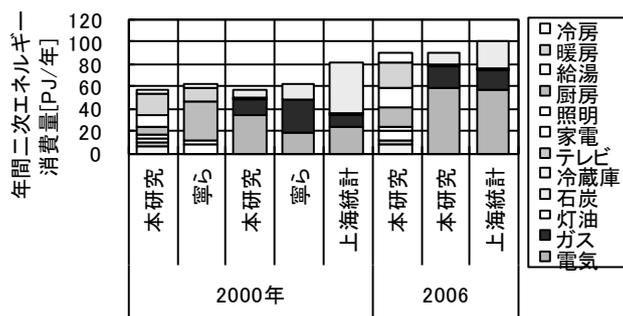


図21 二次エネルギー消費量推計結果

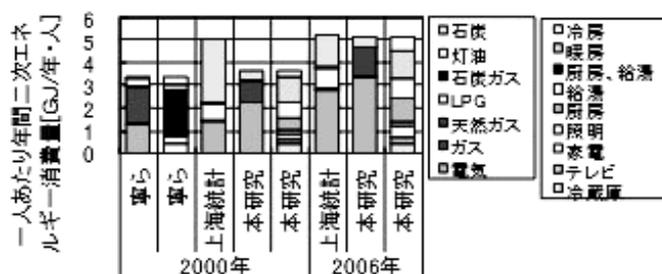


図22 都市部の一人あたり年間二次エネルギー消費量

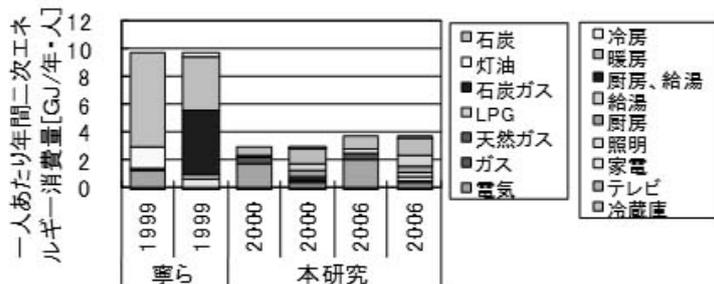


図23 農村部の一人あたり年間二次エネルギー消費量

農村部についても比較した結果を図23に示す。農村部のエネルギー消費量は寧らの結果よりも非常に小さい値となった。またエネルギー源の比率に着目すると、石炭の比率が低く、電気の比率が高い。

上海市における家庭用エネルギー消費量を推計するためにさまざまなデータベースを構築したが、現段階のモデルは日本の設定を代用している部分があり、精度に問題があると考えられる。しかし、都市部では2006年の電力消費量推計値が統計値と近い値を示しており、家電などの設定はある程度妥当な設定ができていると考えられる。また、統計値の情報も信頼性が低いことから、エネルギー消費実態の把握やモデルの改良を今後の課題とし、モデルを用いて2030年までのエネルギー需要推計、省エネルギー対策による効果予測を行う。

4) エネルギー消費量の将来予測と省エネルギー対策の導入による省エネルギーポテンシャル推計

2030年までの上海市家庭部門の年間エネルギー消費量を推計した結果を図24に示す。経済成長順調シナリオでは上海におけるエネルギー需要は2030年までに2006年から40%増加する結果とな

った。これに対して経済成長鈍化シナリオでは2030年までの増加は2006年の32%の増加となる。いずれのシナリオにおいても2000年から2006年の間のエネルギー消費量の増加に対して2010年以降の増加率は緩やかである。これはエネルギー消費の増加要因として人口・世帯数の増加のみを考慮し、所得区分が変わらなければエネルギー消費は増加しないものと想定しているためである。この設定によりエネルギー消費量の増加を過小評価している可能性がある。

この結果を無対策ケースとして、2030年までに省エネルギー技術が普及する状況を想定し、エネルギー消費を予測する。表6に計算ケースを説明する。なお、Case4以降では考慮した対策の導入率を100%とした。結果を図25に示す。

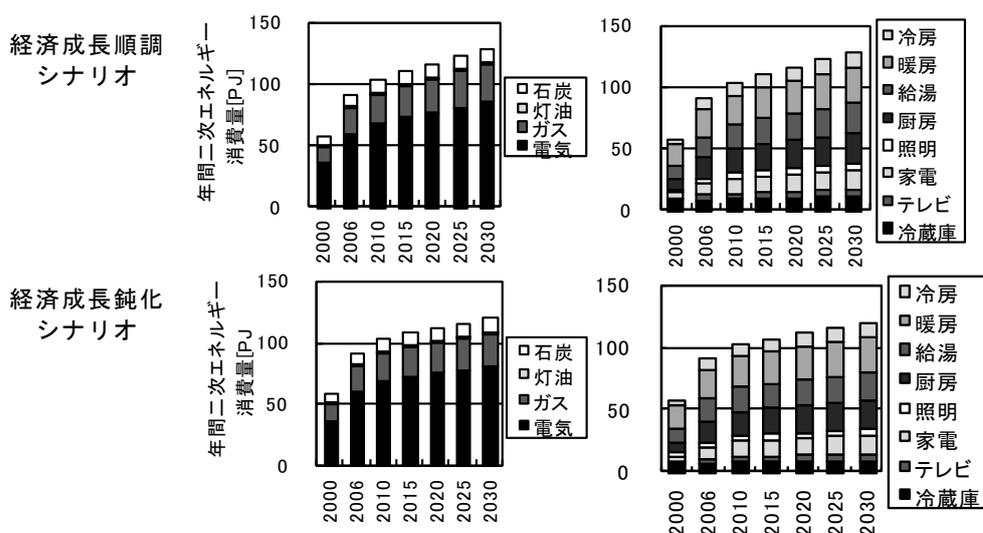


図24 2030年までの年間二次エネルギー消費量予測結果
(左は燃料種別、右は用途別)

表6 計算ケースの設定

ケース	説明
1	家電高効率化 機器寿命を考慮し、新規に供給される家電製品（テレビ、エアコン、パソコン、VTR/DVD）については現在の日本のトップランナー機器の効率を与えた。冷蔵庫は同じ条件で中国の2003年冷蔵庫基準の最高効率グレードを与えた。
2	断熱強化 2006年以降に建設された集合住宅は日本の次世代基準の熱性能を持つものとする。
3	Case1+2 寿命にあわせた家電製品、住宅の更新と性能向上
4	完全断熱化 全ての住宅が次世代基準の断熱性能を持つものとする。
5	断熱+TRエアコン 全ての住宅が次世代基準の断熱仕様を持ち、エアコンに日本のトップランナーエアコンの効率を与えた。
6	潜熱回収型給湯器 全ての給湯器を潜熱回収型給湯器が置き換えるものとした
7	太陽熱温水器普及 太陽熱温水器を集合住宅のベランダに垂直に設置する
8	HP給湯器 全ての給湯機をHP給湯器に置き換えるものとした
9	Case5+6 断熱強化+トップランナーエアコン+潜熱回収給湯器
10	Case5+7 断熱強化+トップランナーエアコン+太陽熱温水器
11	Case5+8 断熱強化+トップランナーエアコン+HP給湯器

経済成長順調シナリオでは、機器ストックの更新、建物ストックの更新を考慮したCase1、Case2

では2030年における二次エネルギー消費量の削減率は1%程度となり、その両方を想定したCase3でも削減率は2.4%にとどまる。すべての住宅が次世代基準となることを想定したCase4では4%、断熱に加えてエアコンが日本のトップランナーエアコンの性能を備えるCase5でも8%の削減となり、今後予想されるエネルギー消費の増加を緩和するうえでは十分ではない。Case6からCase11では給湯器の置き換え、太陽熱温水器の利用を考慮しているが、すべての家庭がトップランナーエアコン、次世代基準断熱、HP給湯器を導入した場合のエネルギー消費量が最も小さく、無対策ケースの約2割（2006年比では約3割）の削減となった。Case11の2030年における二次エネルギー消費量は2000年から79%増加、2006年から14%増加である。

経済成長鈍化シナリオでは無対策ケースにおける二次エネルギー消費量の増加は2006年から32%の増加となった。各対策による削減効果に大きな違いはなく、経済成長の違いによって対策の導入による削減ポテンシャルに大きな違いは現れない。

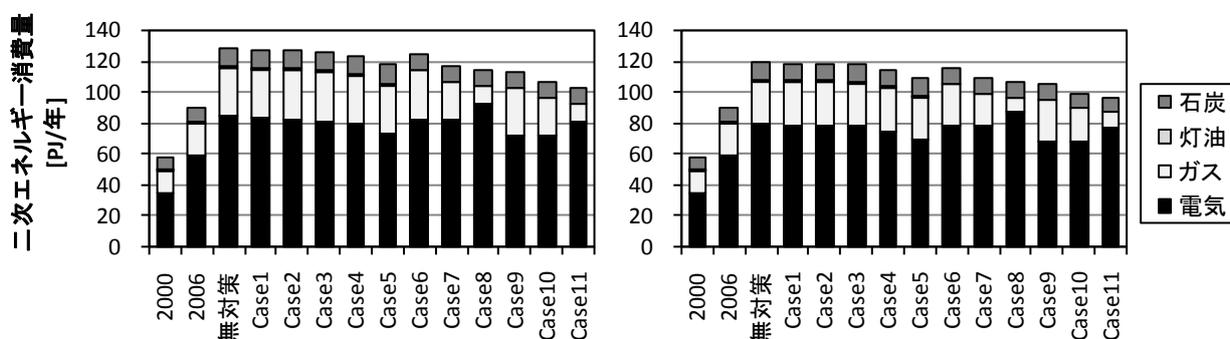


図25 対策ケースの二次エネルギー消費量推計結果
(左：経済成長順調シナリオ，右：経済成長鈍化シナリオ)

5) 主観的選好を考慮した省エネルギー技術選択モデルによるエネルギー需要の将来推計

a. 主観的選好を考慮した家庭部門における省エネルギー技術選択モデルの構築

省エネルギー技術の導入に伴う初期投資額増分を、耐用年数内に発生する将来便益を主観的割引率によって現在価値換算した値で除して投資回収年数を算出し、技術選択に対する需要家別の

表7 主体別の技術選択の判断基準

主体類型	判断基準
A：エコ規範派	投資回収年数の長短にかかわらず、最もCO ₂ 削減に貢献する省エネルギー技術を選択する。
B：投資回収効果関心派	投資回収年数の最も短い省エネルギー技術の中で、コストパフォーマンスが最も優れたものを選択する。
C：初期投資限界留意派	投資回収年数が最も短く、かつ初期投資費用の最も少ない省エネルギー技術を選択する。
D：無関心派	省エネルギー技術を導入しない。

判断基準に基づいて省エネルギー性能別の技術導入量を評価するモデルを構築した。設定した4つの主体類型および主体別の技術選択基準を表7に示す。

まず式(8)より、省エネルギー技術の導入によって得られる将来便益を、主観的割引率を用いて現在価値に換算する。次に、主観的割引率を考慮した主体別・省エネルギー技術別の投資回収年数を式(9)から算出する。

$$PB_i = \sum_{t=1}^n \frac{b_i}{(1+\frac{\gamma}{100})^{t-1}} \quad (8)$$

$$P_{\gamma i} = I/PB_i \quad (9)$$

ここで、 PB ：将来便益の主観的割引率による現在価値、 I ：省エネルギー技術導入に伴う初期投資額増分、 b ：省エネルギー技術に伴う年間便益、 γ ：主観的割引率、 t ：年数、 i ：省エネルギー技術、 $P_{\gamma i}$ ：主体別投資回収年数である。

この省エネルギー技術に対する主体別投資回収年数と技術選択の主体別判断基準によって、主体別の導入技術が決定される。それに主体別世帯数割合、および別途推計される新築・残存住宅の世帯数を乗じることで、省エネルギー技術の主体別導入量を算出する。

主体別の主観的割引率についてであるが、主観的割引率に関して大規模かつ本格的な研究を行った事例²⁷⁾では、「主観的割引率は、銀行ローンや貯蓄金利の範囲内に入るのが妥当である」と述べられている。中国の銀行ローンおよび貯蓄の金利は、それぞれ5.58%と2.52%となっていることから、主体A、主体B、主体Cの主観的割引率をそれぞれ2%、4%、6%と設定した。なお、この主観的割引率は、2030年まで一定値であると仮定した。

主体別世帯数割合は、上海家庭部門を対象としたアンケート調査の結果（巻末資料集(1)）に基づいて設定した。具体的には、まず「あなたが耐久品を購入する場合に、最も重視する点をお選びください」という質問に対して、「どんな素材（例えばリサイクル素材など）を使っているか」「どんな製造方法を取っているか」「環境を損なわないか」と答えた人を主体Aの割合（11.0%）、「健康・安全への配慮がなされているか」と答えた人を主体Bの割合（18.7%）、「デザインが良いか」「商品機能が優れているか」と答えた人を主体Cの割合（30.5%）、「価格が妥当か」「日常に使うための費用が妥当か」「その他」と答えた人を主体Dの割合（39.8%）と見なした。なお、データ制約の理由から採用したこの主体別割合の設定方法は、表7の判断基準と整合しない面がある。意識や行動パターンから主体のライフスタイル類型をモニタリングし、定量化する手続きの確立と、援用データの見直しや感度解析が今後の課題となろう。

次に、環境行動・意識は経済成長に伴って高まると仮定し、経済成長順調シナリオにおける2030年の主体別割合には、環境省が2004年に日本で実施した「環境にやさしいライフスタイル実態調査」²⁸⁾の結果を用いた。調査結果の中で、「買い物の際、同じ種類の製品ならば、高くても環境にやさしい商品を選ぶ」という取り組みについて、「いつも行っている」「大体行っている」と答えた人を主体Aの割合（32%）、「時々している」と答えた人を主体Bの割合（33%）、「あまり行っていない」と答えた人を主体Cの割合（23%）、「全く行っていない」と答えた人および無回答者を主体Dの割合（12%）と見なした。

以上2つのアンケート結果に基づき、主体別割合と各アンケート実施の前年の一人あたりGDPとの相関関数を求め、2030年まで経済成長順調および鈍化シナリオにおける主体別世帯数の割合を推計した。その結果を図26、図27に示す。

b. 選択対象となる省エネルギー技術の設定

断熱性能、エアコン、給湯機の3つのカテゴリで、省エネルギー技術を検討・設定した。また、技術選択・導入時期によって、機器効率や選択しうる技術パッケージに違いを設定した（表8）。

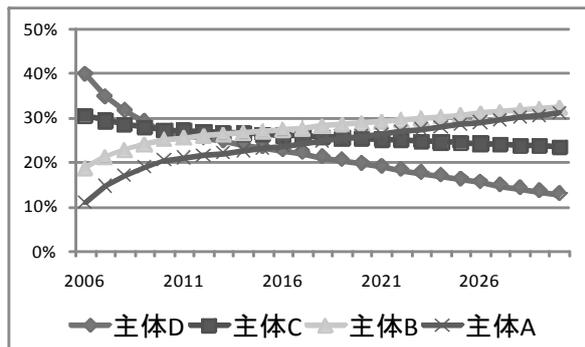


図26 経済成長順調シナリオにおける主体別世帯数割合

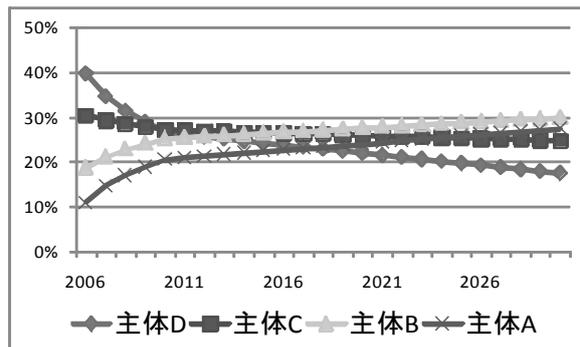


図27 経済成長鈍化シナリオにおける主体別世帯数割合

表8 家庭部門における省エネルギー技術

	2006-2010年	2011-2015年	2016-2020年	2021年-
断熱性能	旧省エネ基準	旧省エネ基準	旧省エネ基準	旧省エネ基準
	現省エネ基準	現省エネ基準	現省エネ基準	現省エネ基準
	—	—	新省エネ基準	新省エネ基準
	—	—	—	断熱強化
エアコン	COP=3-4	COP=3-4	COP=3-4	COP=3-4
	COP=4-5	COP=4-5	COP=4-5	COP=4-5
	—	COP=5以上	COP=5以上	COP=5以上
給湯器	潜熱回収型 導入しない	潜熱回収型	潜熱回収型 ヒートポンプ式	潜熱回収型 ヒートポンプ式

※耐用年数・・・エアコン：10年、潜熱回収型給湯器：10年、ヒートポンプ式給湯器：15年

各技術パッケージの省エネルギー効果は、(2)-1) で示した家庭用エネルギー最終需要モデルを用いて算出した。

また、省エネ投資の初期費用額は、断熱性能は文献・資料²⁹⁾⁻³¹⁾、エアコンは市販品の冷房時COPと価格の関係³²⁾、給湯器は資料³³⁾⁻³⁵⁾をもとに日中間で価格調整し、設定した。

c. 家庭部門におけるCO₂排出量予測モデルの構築

CO₂排出量の予測では、世帯数、世帯あたりエネルギー消費量（技術導入による省エネルギー効果を含む）、主体別世帯数割合、およびエネルギー源別CO₂排出原単位をモデルの変数とした。

d. 分析ケースの設定

2つの社会経済シナリオに対して、それぞれ4つの分析ケースを設定した（表9）。「理想普及」ケースでは、さまざまな省エネルギー技術が理想的に普及した状況下でのCO₂削減ポテンシャルを

表9 設定した分析ケース

ケース	概要
傾向延長	省エネルギー技術が今後導入されないとする、リファレンスケース。ただし、エネルギー消費原単位は経済成長に伴って上昇すると仮定。
市場任せ	主体別の主観的割引率および技術選択基準に基づいて、省エネルギー技術が選択されるケース。
規制介入	省エネ設計基準（上海市で2006年より施行）を満たす省エネルギー技術を導入させる制度との連携ケース。
理想普及	全主体が、最もCO ₂ 排出量の削減に寄与する省エネルギー技術を選択するケース。

推計するのに対して、「市場任せ」ケースでは、選択主体の選好を加味した省エネルギー技術の普及量に基づいてCO₂削減効果を算定することになる。「規制介入」ケースは、環境的に望ましい製品や技術が、その普及を促進させる制度の設計と介入によっていかに低炭素ストックの形成に寄与するか、を明らかにすることを狙っている。

e. 分析結果

分析結果を図28、図29に示す。主体の技術選好を考慮した「市場任せ」ケースでは、省エネルギー技術の理想的な普及を想定したケースほどのCO₂削減ポテンシャルを実現しえないことがわかる。それでもリファレンスケースに比して、経済成長順調・鈍化シナリオにおける2030年のCO₂排出量削減率は、それぞれ13.4%と7.47%となった。

また、いずれのシナリオにおいても、「規制介入」による効果はわずかしき現れないことがわかった。これは、本分析で設定した省エネ技術パッケージには住宅建築の断熱性能と機器両方の対策が含まれており、住宅建築の外皮のみを規制対象とする上海の家庭部門向け省エネルギー設計基準よりもはるかに省エネルギー効果を有するためであると考えられる。

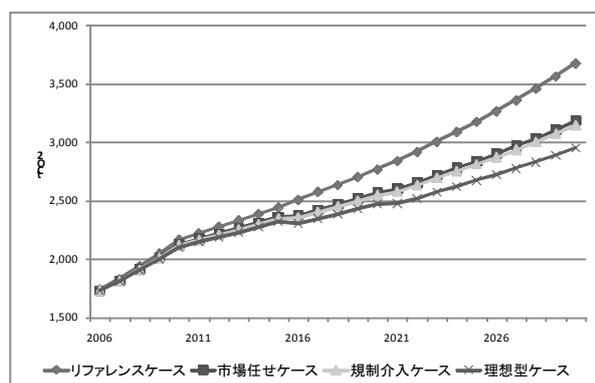


図28 経済順調シナリオにおけるCO₂排出量
(単位：万t-CO₂)

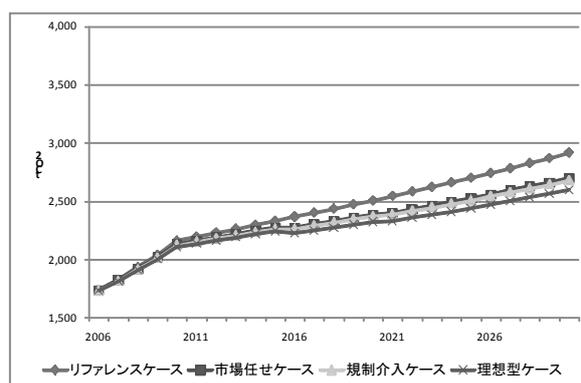


図29 経済鈍化シナリオにおけるCO₂排出量
(単位：万t-CO₂)

6) ライフスタイルの転換シナリオが製品・廃棄物フローの形成とCO₂排出に及ぼす影響の評価

将来的なエネルギー消費の削減において、よりエネルギー効率の高い製品への置き換えを促進する必要があることは論を待たない。しかし、上記4) および5) で示したような省エネルギー技術・製品の選択や普及が進めば、一方で廃製品フローが生じることになる。したがって、地域の持続可能性を高めようとするとき、都市部におけるエネルギー消費の最適管理だけでなく、製品・廃棄物フローを含めた周辺地域への環境影響のリーケージも併せて制御・管理することが必要である。そこで、(2)-1) で取り上げた省エネルギー手法のうち、家庭用電化製品を事例として取り上げ、現地調査等に基づいて将来の製品消費形態を分類し、消費形態別の嗜好性を反映させる製品フロー・ストック推計モデルを構築した。その上で、長江デルタ地域を中心とする1市5省を対象として、主要家電4品目由来の廃棄物発生量とCO₂排出量を評価することで、都市およびその周辺地域における環境インパクトを評価した。

a. 上海家庭部門における家電由来のエネルギー消費と廃棄物発生要因の分析

上海市とその周辺都市を対象として実施した、家庭部門の機器普及・利用等の実態調査結果（巻末資料集(1)）に基づき、上海における2030年での家電（4品目）由来のエネルギー消費量と廃家電品発生ポテンシャルをマクロ推計した。具体的には、2030年の人口予測から世帯数を算出し、それに本調査で得られた世帯数あたりの家電保有台数原単位を乗じて市全体で保有台数を求めた。2030年の家電保有台数原単位は、日本の現状の水準と同等とした。2030年の家電機器効率は日本の現状でのトップランナー機器と同等とした。廃家電品排出量は、日本における保有台数あたりの使用済家電の排出台数の実績データから家電品毎に廃棄率を算出し、それを両市の家電保有台数に乗じて推計した。上海の世帯人員とエアコンの年間使用日数と日使用時間、並びにテレビの日使用時間については、実態調査結果に基づいて平均値を最頻値とする確率分布をそれぞれ与えた。このような条件でモンテカルロ分析を一万回行って、最終的なエネルギー消費量と廃棄物発生量の予測結果を得た。

その結果、2030年での主要家電由来の電力消費量は、世帯数中位予測（世帯人員が現状維持と仮定）で上海では現状より17%増加（17,707 GWh/year）と予測された（図30）。使用済家電の排出量は439万台/年（中位予測、重量換算15.5万t/年）と予測された。これにより、エネルギーではエアコンの寄与率が高く、廃棄物という意味では冷蔵庫の寄与率が高いことがわかった。モンテカルロ分析の結果、エネルギー需要に関しては、2030年での予測の90%信頼区間が15,631～19,936 GWh/yearであること、要因としては世帯人員、エアコンの日使用時間、世帯あたりのエアコン保有台数、テレビの日使用時間、エアコンの年間使用日数などの要因が特に重要である（効いている）ことを見出した（図31）。同様に、使用済家電に関しては、2030年での予測の90%信頼区間が13.3万～16.4万t/yearであること、要因としては世帯人員、エアコンの廃棄率、世帯あたりの冷蔵庫とテレビの保有台数、冷蔵庫の廃棄率などの要因が効いていることがわかった。

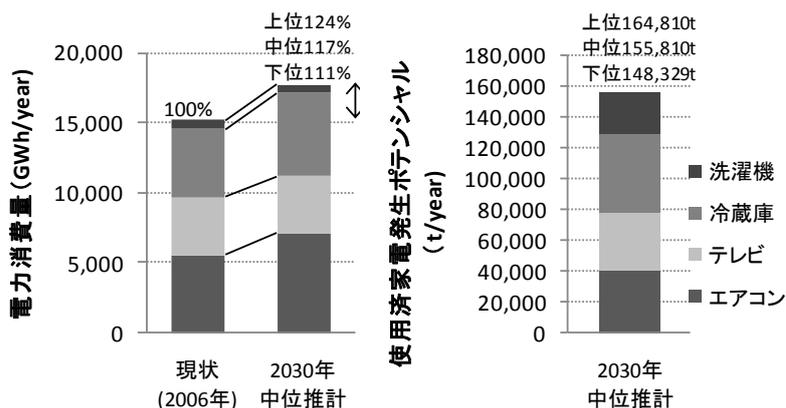


図30 2030年での主要家電由来の電力消費量と使用済家電発生ポテンシャルの推計結果

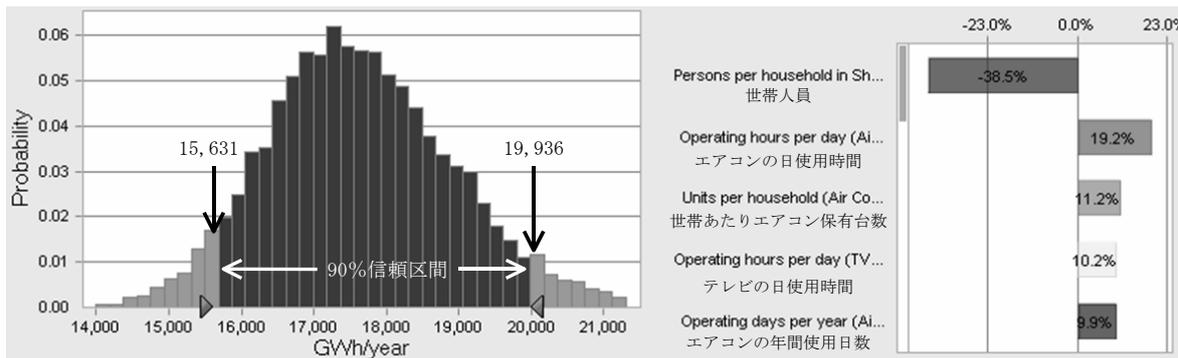


図31 上海の家電由来のエネルギー需要予測結果（左：予測結果頻度分布、右：感度分析結果）

b. 持続可能な製品消費形態に関する将来の代替案

資源・エネルギー効率の高い製品循環システムを設計するためには、消費形態の代替案を提示・評価し、より持続可能なものへと消費者を誘導していく必要がある。既往文献³⁶⁻³⁸⁾に描かれた持続可能な消費形態を調査した結果、①高度省エネ技術の開発を促進し、高効率だが高価な製品をメンテナンス等を行いながら使用し、リサイクルにより環境負荷を低減するシナリオ、②リース・レンタルを通じた製品の社会的な共同管理により、製品の再利用を進め、環境負荷を低減するシナリオ、の2種類が共通して描かれていることがわかった。さらに、実態調査結果から現在の消費者の嗜好性について主成分分析およびクラスター分析を行った（図32）。

系列2は価格・消費電力に対する嗜好性が高い一方、デザイン・新品への嗜好性は低く、技術・デザイン面で古いものでも気にしない傾向があると考えられる。その点で①に近いと考えられる。系列4は、多機能性・性能・静音性への嗜好性が高く、価格の嗜好性は低いことから、高価格だが高性能・高機能型の製品を好む傾向がある一方で、新しい製品やデザイン性に関する志向性も低く、②に近いと考えられた。そこで、この2系列をそれぞれ「使い回し型」、「技術重視型」とした。

残る2つの系列は、既往研究で見られた持続可能な消費形態とはやや異なる嗜好性を有していた。系列1は新品への嗜好性のみが他と比較して高く、それ以外は他系列と比較するとやや高いものの、大きな差ではない。したがって、中古品の購入は選択肢になく、新製品の中で価格・性能・デザイン等をバランス良く重視して製品を選択するという、現在の一般的な嗜好性に近いと考えられた（BAU型）。なお、「BAU型」では、中国における今後の経済発展によって製品の買い替え需要が増大し、現在よりも製品寿命が短期化することを想定した。系列3は、デザイン・新品に対して強い嗜好性ある一方、価格への嗜好性も低いことから、より新しいものへと積極的に買い替える消費者といえる

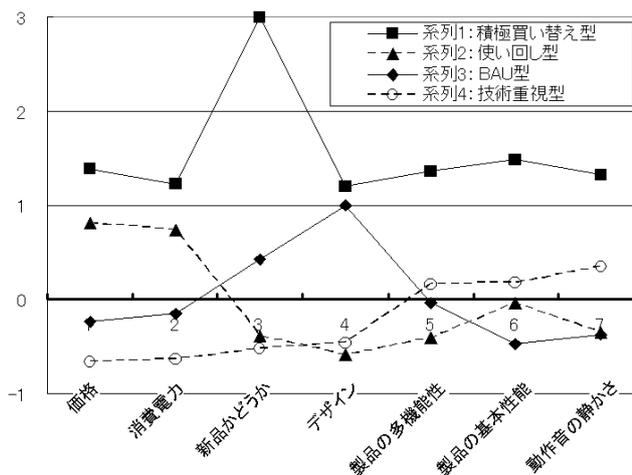


図32 クラスタ分析による分類

(積極買い替え型)。

以上、生活者のライフスタイルを反映した将来の消費形態に関する代替案として、「BAU型」、「積極買い替え型」、「使い回し型」、「技術重視型」の4類型を想定した。

c. 消費形態別のCO₂排出および物質フロー分析の結果

定量分析に際し、各消費形態の行動特性を設定した(表10)。人口および所得に関する将来推計を行った上で、各消費形態に基づく2006～2030年の製品ストック・フロー推計モデルを構築した(図33)。

製品ストック台数の将来変化推計値を、図34に示す。経済の発展に伴う世帯あたりのエアコン保有台数の増加により、エアコンストックが急激に増加する。一方、洗濯機・冷蔵庫はすでに世帯あたりの所有台数がほぼ飽和状態に達しているため、人口および世帯数の増加が主たるストック増因であった。

図35および図36に、「BAU型」を基準とした各消費形態での廃棄物発生量、CO₂排出量を示す。廃棄物発生量は、「BAU型」で2010年に2.1Mt、2020年2.7Mt、2030年3.2Mt、CO₂排出量は2010年に約120Mt-CO₂、2020年約141Mt-CO₂、2030年約157Mt-CO₂である。2030年における各消費形態の廃棄物発生量は、「積極買い替え型」で+4.9%、「使い回し型」で-31%、「技術重視型」で-11%となった。「積極買い替え型」と「技術重視型」では、製品寿命の変化が廃棄物発生量に影響を与えた一方で、「使い回し型」では中古品の活用が廃棄物発生に大きく寄与した。本分析では、中古品の寿命は新品に比べて3分の1程度と短く設定したが、それでも中古品の利用による廃棄物削減への効果が大きいことが示された。

2030年におけるCO₂排出量は、「積極買い替え型」で-9.5%、「使い回し型」で-11%、「技術重視型」で-18%であった。「技術重視型」と「積極買い替え型」では、効率の悪い製品の置き換えによって効率向上を図られたことがCO₂排出量削減の要因であり、加えて「技術重視型」では高効率製品の積極的な導入の効果が顕著に現れた。一方、「使い回し

表10 将来の消費形態の特徴

消費形態	製品寿命	中古品嗜好性	高性能製品
BAU	-20%	Low	Normal
積極買い替え	Normal	Low	Normal
使い回し	Normal	High	Low
技術重視	Long	Never	High

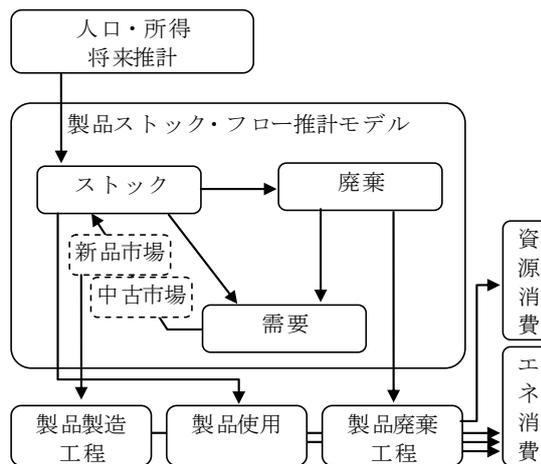


図33 モデル推計による環境負荷評価

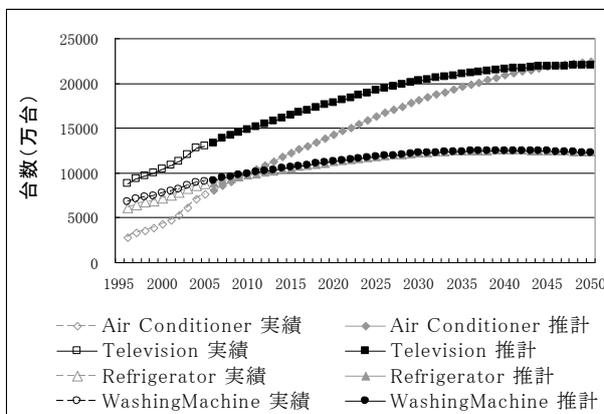


図34 製品ストック台数の将来推計

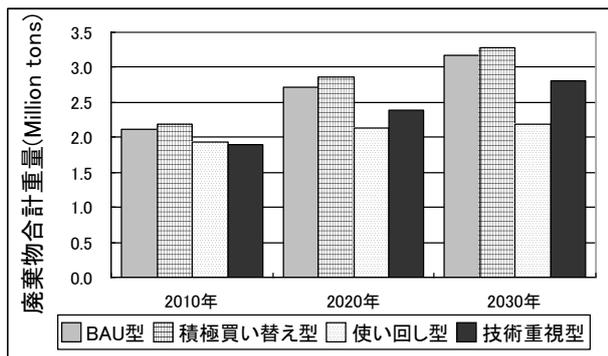


図35 廃棄物発生量の推計結果

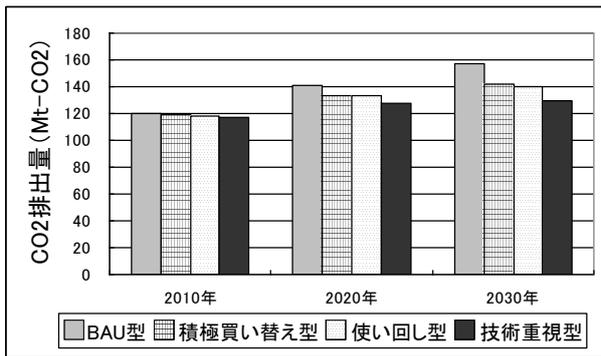


図36 CO₂排出量の推計結果

型」では新品への置き換えがあまり進まなかったが、中古品利用において高効率製品のリユースが積極的に行われたことでCO₂排出量が削減され、「積極買い替え型」を上回る削減率の達成が可能である。

d. 考察

2030年に廃棄物発生量が最も小さかった「使い回し型」と「BAU型」との廃棄物発生量の差分は約0.97Mtであったが、これは福建省にある政府指定のリサイクル工業特区、福建全通資源再生工業園に予定される最大処理量（6.5Mt/年）の約15%に相当する。この削減効果を投資額に換算すると、3,300万米ドル以上を抑制することが可能となる。さらに他の機器や他の地域で発生する廃棄量を考慮すると、廃棄物削減の効果は大きなものとなる。

また、「使い回し型」と「技術重視型」を比較すると、廃棄物発生量とCO₂排出量にトレードオフ関係が生じる（図37）。中古品の利用は高効率な新製品の導入を阻害する可能性があるが、家電製品による生活質の向上の面への影響を鑑みても、安価な中古品の利用は否定できるものではない。本分析で示されたように、特に粗悪な中古品を排除して、適切に効率の悪い中古品を置き換えていくことで、エネルギー効率の悪化は一定程度防止可能である。そのため、中古品利用を認めつつ、特に性能の劣る製品の再利用や過度に長期間の利用を防止する枠組みが必要である。同時に、流通する中古品に対する品質の規制の厳格化や、農村部の家庭で使用される製品の効率に対する市民の意識を高めていくことも欠かせない。

他方、不適切な処理による汚染被害が特に懸念されるのは、廃棄物に含まれるプリント基板中の銅・鉛・錫・カドミウム等であるが、本分析では廃棄物1tあたり平均34kgのプリント基板が含まれると推計された。既存の中古品・廃製品の流通ネットワークを法の枠組みに組み込み、廃電機・電子機器を適切に管理することは、エネルギー消費と廃棄物発生抑制に加えて、地域環境汚染の防止の目的にも合致する施策といえる。

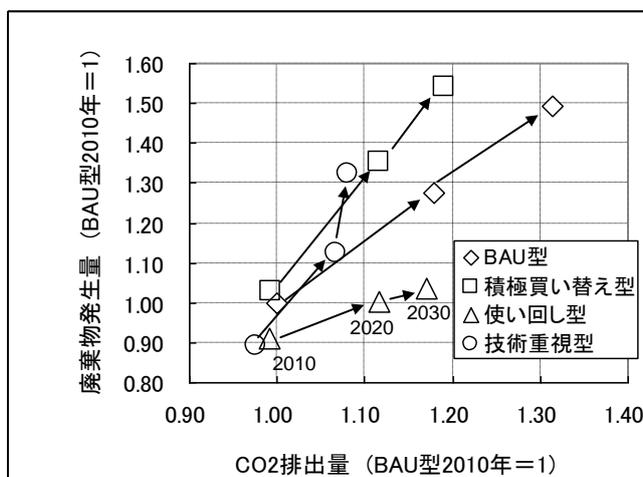


図37 廃棄物発生量とCO₂排出量の比較

7) まとめ

以上、本研究課題から得られた主要な成果を以下に述べる。

- 上海の住宅部門を対象として、2030年までのエネルギー消費量を予測した。所得階層別のエネルギー消費パターンに変化がない場合、2006年から2030年までに30%から40%二次エネルギー消費量が増加する。特に電気と都市ガスの増加量大きい。また、現在から2030年までのエネルギー消費の増加は2000年から現在までの増加よりも緩やかに増加する。
- 建物の断熱強化策、家電製品の高効率化、給湯器の置き換えなどの対策を個別に実施した場合、削減効果は2030年の二次エネルギー消費量予測値の10%にも満たない。エネルギー消費の増加を抑えるためには、総合的なエネルギー効率の向上が不可欠である。トップランナーエアコン、次世代基準断熱、HP給湯器の普及による省エネルギーポテンシャルは20%程度である。削減率でみる場合、技術ポテンシャルは経済成長にほとんど依存しない。
- 主観的割引率を評価モデルに組み込むことで、市場での実効的な省エネルギー技術の普及量、およびそれによるCO₂排出削減ポテンシャルを定量的に明らかにすることができた。また、現地での調査・モニタリング結果や既存文献などに基づいて、環境行動を類型化、定量化する手続きを提示し、環境行動の選好に結びつけたCO₂削減の将来予測シミュレーションを行うことができた。投資回収に対する選好性を考慮すると、CO₂削減ポテンシャルは技術ポテンシャルの2/3程度となることがわかった。このように技術ポテンシャルと発現するポテンシャルの差異が小さい理由は、サブテーマ(1)で明らかにされたように、中国では比較的経済合理的な行動がとられるためと考えられる。
- 中国上海市の家庭部門では、現行制度をベースとした省エネルギー設計基準（外皮のみ）に関する規制介入の有無にかかわらず、経済合理性の高い選択肢を市場に投入すれば、合理的判断のもとで省エネルギー技術の選択・普及が進むと期待できる。
- 中国上海市およびその周辺地域におけるライフスタイルに関する将来シナリオとして、「BAU型」「積極買い替え型」「使い回し型」「技術重視型」の4つの消費形態を作成することができた。これらの消費形態ごとに家電製品フローに伴う環境影響（CO₂排出量、廃棄物発生量）の現れ方が異なるため、それぞれに応じた製品管理政策が必要となる。

(3) 技術が普及した社会システムのサステナビリティ評価

1) 都市活動の拡大や都市更新パターンが資源枯渇・温暖化・空間占有に及ぼす影響の評価

a. はじめに

都市や地域における社会経済活動が、都市、産業および生態系システムとそれらの相互作用・相互依存関係から構成されるとするならば、そこでの物質・エネルギー代謝は図38のような図式で表現することができる³⁹⁾。都市システムに注目すると、人口や都市活動が集積する都市では、地下から掘り出された鉱物や地上（地表）から採取されたバイオマス資源などを資材として構造物が建てられ、都市空間に巨大な物質のストックが形成される。それらは時間経過とともに減耗・腐朽して、代謝・除去される。このようなマクロな様相は、地域の中で最大規模の物質代謝である。また、電気やガス、水などを利用あるいは輸送・制御し、都市での経済活動や生活の根幹を支えている人工的な装置・製品群は、その生産・運用・廃棄の過程でCO₂排出や資源消費、廃棄物発生を増大を集約的にもたらし。

そこで、巨大な物質的ストックとフローが形成される中国都市域（上海）をケーススタディの対象地として取り上げ、いくつか提案されているサステナビリティ指標を实在都市の将来変遷過程（1995～2030年）の評価に適用することで、指標活用の実用性や有効性、課題を明らかにした。さらに、都市サステナビリティの改善施策として都市更新・土地利用に関する施策代替案を検討し、その効果を定量的に評価した。

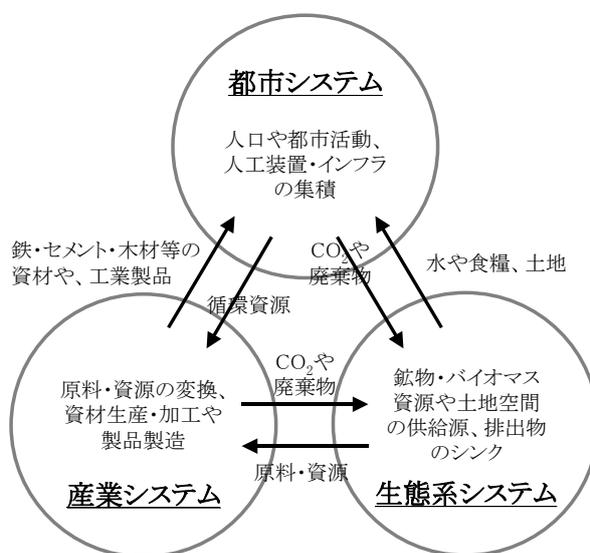


図38 都市や地域レベルでの産業物質代謝

b. 都市におけるエネルギー・物質代謝の評価モデルの構築

都市代謝は、経済成長や人口増加に呼応した都市インフラの整備によってストック財が形成され、そこで社会経済活動が営まれ、交通移動や民生活動などによるフロー財の消費が誘発されるという構造的特徴を持つ。この特徴を反映させ、建設活動、電力消費、交通移動、食糧および水資源消費の各代謝量について、将来推計モデルを構築した（図39）。また、ストックおよびフロー財が地下資源、地表資源、大気資源の容量限界に及ぼす直接・間接的な影響を、それぞれ総物質需要量（TMR; Total Material Requirement）、エコロジカル・フットプリント（EF; Ecological Footprint）、CO₂排出量の3つのサステナビリティ指標を用いて評価した。

構築したサブモデルの概要は、以下のとおりである。

i. 建設構造物にかかわる資材投入量、蓄積量および解体量

構造物別の蓄積床面積と人口に関する過去の動向⁴⁰⁾から、一人あたりストック床面積の経年変化を分析し、さらに一人あたりGDPとの相関関係を表す近似式を求めた。これにより、将来人口と

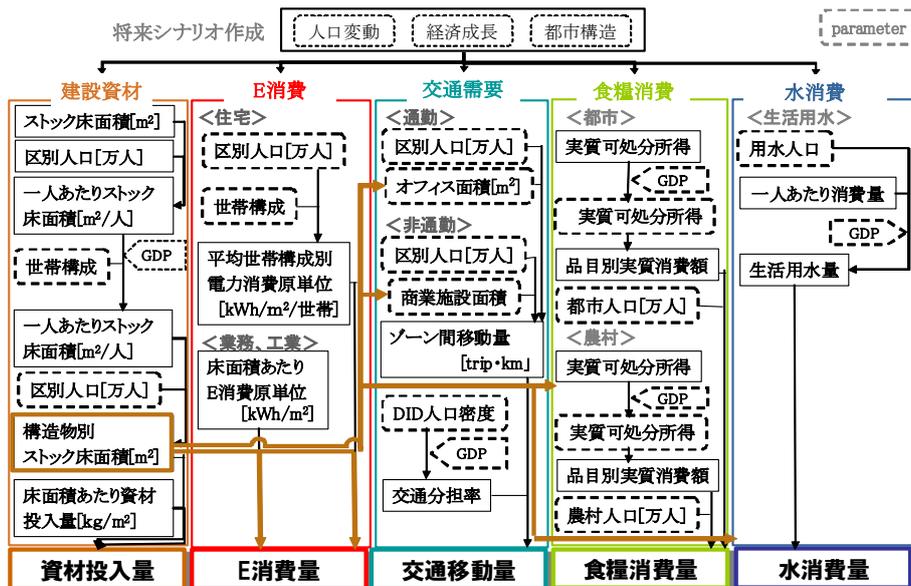


図39 都市代謝評価モデルの全体構造

GDPを変数として、蓄積床面積を推計することができる。

解体される建設床面積は、建設構造物の寿命の確率密度関数と過去の着工床面積から解体量を予測する手法を用いた⁴¹⁾⁴²⁾。この手法は、構造物の寿命および確率密度関数の経年的な変化を考慮しておらず、実態を反映した手法とは言えないが、詳細なデータが入手困難な際に適用することが可能である。残存率関数の各パラメータには、及川ら⁴³⁾が推計した日本の建設構造物のデータを用いた。構造物に固定されている鉄、セメント、木材の資材量は、谷川ら⁴⁴⁾、坂本ら⁴⁵⁾の調査による固定量原単位を乗じることで推計した。また、建設物構造別（鉄骨鉄筋コンクリート造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造・木造）の割合は、台湾の構造割合（1985～2005年）⁴⁶⁾を援用した。

ii. 民生家庭および業務部門でのエネルギー消費量

家庭部門のエネルギー消費量については、田中ら⁴⁷⁾によって世帯構成人数とエネルギー消費量の関係が調査されており、その結果から回帰式を得た。その上で、世帯構成人数を変数として求められた一人あたりエネルギー消費量に人口を乗じることで、都市全体の消費量を推計した。一方、業務部門は、関連施設の構造物床面積あたりエネルギー消費原単位⁴⁸⁾を用途別蓄積床面積に乘じることで算定した。

iii. 交通移動量

ストック財の形成によって交通移動などの都市活動が誘発される構造をモデルに反映させるため、人口および蓄積床面積を変数とした総流動制約型の重力モデル⁴⁹⁾によって、交通移動量を推計した。通勤移動量ではオフィス面積を、非通勤移動量では商業店舗の床面積を吸引力要素として設定し、Pan Haixiaoら⁵⁰⁾が1995年、2004年に上海市で実施したパーソントリップ調査の結果、および上海市統計年鑑データ⁴⁰⁾を用いて重力モデルのパラメータを推定した。さらに、通勤／非通勤別の流動量に対して徒歩、自転車、自家用車、バス、タクシー、地下鉄の各交通分担率⁵¹⁾を考慮することで、移動手段別の総移動量を求めた。

iv. 食糧消費量

食糧消費量は、所得と食糧の相対価格の影響を受けて中長期的に変化する。牧野ら⁵²⁾は、消費関数として実質可処分所得、品目および食料品全体の消費者物価指数を説明変数とする対数線形モデルを仮定し、品目別の食糧消費額変化を分析している。そこで、過去の統計データ⁴⁰⁾からパラメータを推定し、各品目の一人あたり消費額と消費量に関する回帰データから、一人あたり消費量を算出した。その上で、それに人口を乗じることによって、都市全体の食糧消費量を推計した。

v. 水資源消費量

ここでは、家庭部門における生活用水の消費量を推計した。生活用水は、水資源量に関する制約がなければ経済成長に伴って増加する。そこで、一人あたりGDPと一人あたり生活用水消費量の相関関係から、回帰式を導出した。これにより、GDPを変数として、将来の一人あたり水資源消費量を推計することができる。これに人口を乗じることによって、都市全体の生活用水量が算出した。

vi. 各代謝量に伴うTMR、EF、CO₂排出量

TMRは、都市域での建設資材（鉄・セメント・木材）、発電および交通で消費する石油・石炭などの直接資源消費量を対象にして、その隠れたフローを推計した。EFでは、域内での直接的な負荷として都市構造物による生産能力阻害地面積を、間接的な負荷として建設資材、エネルギー資源、食糧、水の各消費に要する土地資源の占有面積を評価対象とした。一方、CO₂排出量は、建物での冷暖房利用等による電力消費および交通由来を直接負荷、鉄・セメントの建設資材の生産プロセス由来を間接負荷と定義して推計した。

以上の3指標値は、代謝量に原単位⁵³⁻⁵⁷⁾を乗じることによって算定した。

c. エネルギー・物質代謝の将来推計の結果

(2)で述べた2つの社会経済シナリオ、すなわち経済成長順調シナリオ（シナリオ-1）、鈍化シナリオ（シナリオ-2）を設定し、1995～2030年の都市代謝や持続可能性指標を比較評価した。ここでは、シナリオ-1の結果のみを示す。

まず、図40に各代謝量の将来推計の結果を示す。建設資材投入量は、2000年初頭の建設バブルによる旺盛な需要によって2004年で最大となる。その後、新規竣工の建設活動は落ち着くものの、2030年にかけて更新需要等によって再び段階的な増加傾向を示す。また、他の代謝量は、都市インフラが整備されるにつれて概ね増加していく。特に、電力消費量と交通移動量の増加が顕著であり、2020年では2004年に比べてそれぞれ104.3%、

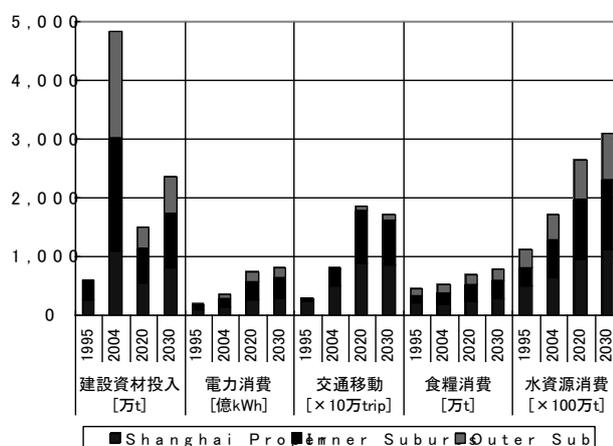


図40 各代謝量の将来推計結果

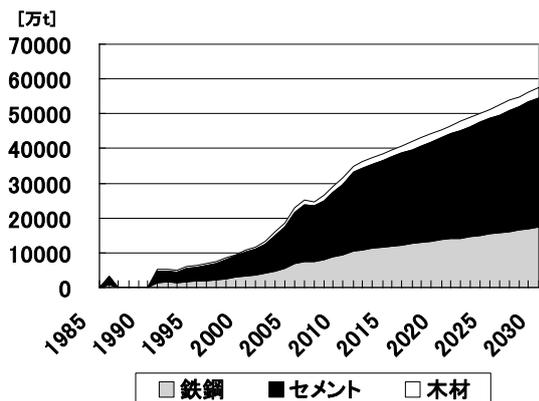


図41 建設構造物のストック量

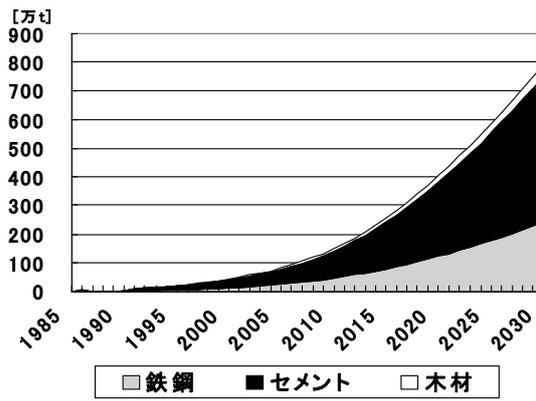


図42 建設構造物の解体廃棄量

126.3%の増加率となる。

他方、上海市での各代謝量の空間的な特徴をみると、建設バブル期には市街地周辺郊外地域（Inner Suburbs）および郊外地域(Outer Suburbs)での都市ストック形成が支配的となるが、それ以外では、中心市街地域（Shanghai Proper）と市街地周辺郊外地域に都市活動が集中することがわかる。

次に、図41および図42に、建設構造物にかかわる資材投入量、蓄積量および解体量の推計結果を示す。2020年時点で見ても、建設構造物としてストックされる資源量は2004年に比べて約2.5倍に、解体廃棄物量は約5.6倍に増大する。そのため、今後時間経過とともに減耗・除去される地上資源ストックの資源効率、リサイクル率を高めるためには、資源循環システムを整備・高度化させるとともに、都市更新の方法に関する代替案を検討・選択していく必要があると言える。

最後に、以上で推計された都市代謝によるTMR、EF、CO₂排出量の算定結果を図43に示す。間接影響を含めたサステナビリティ指標の経年変化を見ると、TMRは経済発展とともに増加し、2020年では2004年に比べて最大で80.4%の増加となる。また、建設資材由来の負荷よりも、移動交通や電力消費による化石燃料消費起因の間接負荷が支配的となる。これらはCO₂排出量の増加要因でもあるため、発電や産業生産プロセスでの省エネ化、交通移動量の削減に寄与するコンパクトな都市構造の実現、などが対策として必要となると言える。しかし、省エネルギー効果の高い都市インフラや生産技術への置き換えを急ぐ

と、社会ストックの資源効率が低下し、資源投入と廃棄物排出の巨大なフローが生まれてしまうので、政策実行の際には注意が必要である。

EFは、建設バブルによる旺盛な建設需要が影響し、2004年で高負荷となる。特に都市の急成長期には、建設資材由来の間接負荷が大きくなる。したがって、建て過ぎあるいは壊し過ぎの傾向を制御することが重要な政策課題となる。一方、安定成長期には、都市活動の拡大に伴っ

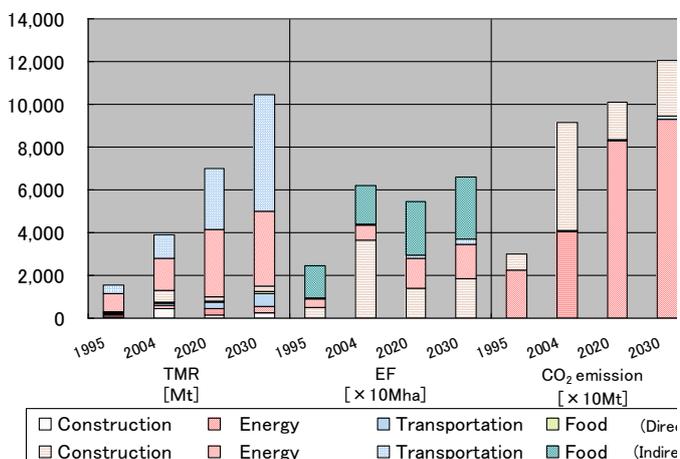


図43 サステナビリティ指標の評価結果

て食糧や電力由来の間接負荷が大きくなる。食糧生産は域外の地表資源に依存しているため、域内で食糧自給率を高め、フードマイレージを小さくする政策が考えられる。しかし、結局は域内での直接EFに移行することになるため、域内と域外の土地生産性（土地利用効率）の違いや変化を踏まえ、トータルでのEFが増加しないよう配慮が必要となる。

2020年のCO₂排出量は、2004年に比べて最大で10.3%の増加となるが、特に都市発展に伴うエネルギー消費による直接的な影響が増大する傾向を示す。

d. 都市更新パターンによる都市代謝の変化

都市更新パターンの計画・選択が都市のサステナビリティ改善に与える効果を明らかにするため、Case-1：「現状傾向分布型」、Case-2：3つの拠点への集積を図る「新都市分布型」、Case-3：一極集中を進める「中心市街地集中型」、Case-4：「周辺郊外拡散型」の4つの都市更新代替案を設定し（図44）、2020年時点にこれらの都市構造が実現したときの環境負荷削減効果を3つのサステナビリティ指標で比較評価した。なお、図44中の各ケースに記載した就住分布割合および世帯構成人数の3つの数値は、左から順に上海中心市街地域、市街地周辺郊外地域、郊外地域の設定値を表している。

その結果、多極分散型のコンパクト化拠点の形成を図るCase-2において、TMRの削減効果が顕著となり、2020年ではCase-1に対して約18%の削減が可能となることが分かった（図45）。一方、一極集中型のコンパクト化を図るCase-3では、3つの指標すべてにおいて負荷量が最大になる結果となった。したがって、急速な人口集中と都市活動の拡大が進む上海では、多極分散型の集積拠点を形成する都市更新施策による資源消費抑制が有効である。また、EFやCO₂排出量で見ると、Case-2は最も望ましい代替案ではない。すなわち、どの指標に沿って政策や計画の効果を測り取るか、どの指標改善を最上位の政策目標とするかによって、取るべき対策や望ましい代替案は異なると言える。

e. まとめ

以上、本分析から得られた主要な成果を以下に述べる。

- ① 都市の発展・変遷過程によって、3つのサステナビリティ指標変化の特

設定	Case-①(BC)	Case-②	Case-③	Case-④
2020年	現状傾向分布型	新都市分散型	中心市街地集中型	周辺郊外拡散型
概略図				
就住分布割合	0.38, 0.36, 0.26	0.43, 0.38, 0.19	0.44, 0.30, 0.26	0.32, 0.35, 0.33
世帯構成人数	2.20, 2.27, 2.22	2.42, 2.28, 2.13	2.38, 2.17, 2.09	2.24, 2.26, 2.22

図44 都市更新代替案の概要

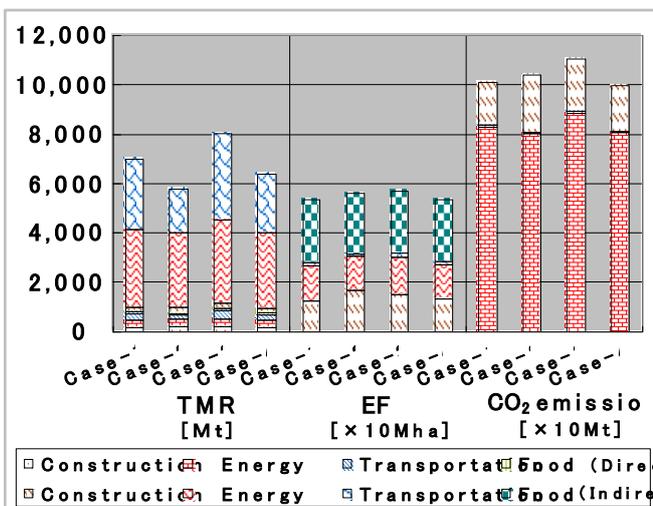


図45 都市更新代替案の評価結果

徴や違いが明らかになった。また、指標ごとに影響感度の高いアクティビティを定量的に把握・評価することができた。

- ② 併置的に指標を用いることによって間接的な影響が明確になり、持続可能な発展に資する方策を示すことができた。
- ③ 上海での急速な人口集中と都市活動の拡大による資源消費増大に対しては、多極分散型の集積拠点を形成する都市更新施策による抑制が有効である。

2) 都市エネルギー消費の持続可能性指標の提案と評価

次に、本研究で太陽光発電や太陽熱温水器の普及に用いた都市エネルギー最終需要シミュレーションの結果を用いて、都市全体のエネルギーフローを対象としたサステナビリティ指標の提案と具体的な計算例を示す。

エネルギーフローの持続可能性評価指標として、以下の3種を考えた。

a. 都市・地域・地球環境に与える環境負荷の大きさ

図46には、大阪市のエネルギー消費に伴う、SOx, NOx, CO₂排出量を、全部門および民生部門のみについて示す。民生部門のエネルギー消費量は全部門の39%を占めているが、これら環境負荷の比率はこれよりもかなり小さくなっており、これは民生部門が電力や天然ガスなど比較的汚染物質排出の少ないエネルギーソースに依存していることによる。

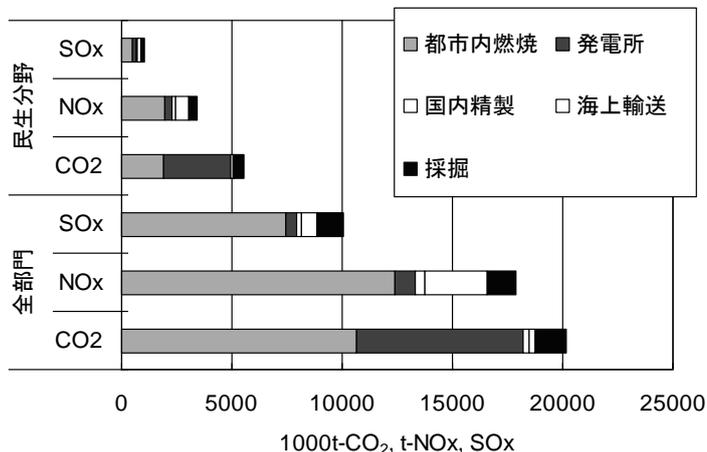


図46 都市・地域・地球環境に与える環境負荷の大きさ

b. 非再生資源の消費速度

非再生エネルギー資源である化石燃料とウラン鉱石の消費速度を、標準重み付き資源消費速度 *NWR* で評価する。

$$NWR = \sum_j \frac{\text{資源}(j)\text{の人口一人あたり年間消費量}}{\text{資源}(j)\text{の確認埋蔵量}} \tag{10}$$

結果を表11に示す。ウラン鉱石と天然ガスの消費速度の影響が大きいことが解る。民生分野の資源消費速度は全セクターの40%に相当し、CO₂排出28%よりかなり大きい。すなわち、都市内で原子力発電電力や天然ガスを利用することには、低炭素化と資源枯渇リスクのトレードオフが存在することを示している。

表11 資源消費速度

	大阪市全体		大阪市民生分野全体	
	一人あたり資源消費費	NWR(j) ($\times 10^{-12}$ /年)	一人あたり資源消費費	NWR(j) ($\times 10^{-12}$ /year)
石炭	227.6kg	0.25	114.1kg	0.13
石油	760.0ℓ	3.98	101.6ℓ	0.53
天然ガス	1296.6kg	9.57	204.0kg	1.51
ウラン鉱石	49.4g	10.77	35.2g	7.67
合計		24.56		9.84

表12 環境効率指標

指標	大阪市		日本	
	全セクター	民生部門	全セクター	民生部門
人口/エネルギー(Person/TJ)	11.1	28.6	8.2	29.4
GDP/エネルギー(Mil. Yen/TJ)	90.9	250.0	34.5	125.0
人口/CO ₂ (Person/t-CO ₂)	0.13	0.47	0.11	0.33
GDP/CO ₂ (Mil. Yen/t-CO ₂)	1.06	3.83	0.46	1.38

c. 要求されたサービスに対するエネルギー利用効率

このカテゴリーでは、環境効率指標（環境負荷あたりのサービスの大きさ）およびエクセルギー（エネルギーの有効活用）指標で評価する。表12には環境効率指標による算出結果を示す。

これらの結果によれば、大阪市のCO₂排出あたり、一次エネルギー消費あたりの人口、GDPはほとんどの指標で日本の平均値を上回っている。これは大阪市の第3次産業中心の産業構造、都市による公共交通利用の高さ等が寄与しているものと思われる。ただし夜間人口と昼間人口の区別など、指標化に当たっては議論すべき点も多く残されている。

また、熱力学的指標として、エネルギーの質を示す指標であるエクセルギーを指標として評価を行った。結果を図47に示す。図より、給湯/暖房/冷房など熱利用に係わる部分でのエクセルギー損失の大きいことが明らかであり、エネルギーフローの持続可能性向上の上で、冷暖房給湯部分の改善、特に本研究で扱った太陽熱温水器や高効率給湯器の導入効果が大きいことを示している。



図47 大阪市民生部門のエクセルギーフロー図

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

以下に本研究により得られた科学的知見を示す。

- ・ 太陽光発電の技術開発と普及の歴史、およびそれを支えてきた制度の変遷を調査・評価し、制度と技術普及・技術開発の関連を整理した。
- ・ 日本および中国上海市の民生家庭部門を対象として、多様な省エネルギー、再生可能エネルギー技術の普及、あるいは、床面積拡大の制御など政策的対応によってもたらされる省エネルギー効果、CO₂排出量の削減効果を住宅や取り上げる技術の特性、地域性を考慮して精度良く定量化できる民生家庭部門エネルギー最終需要シミュレーションモデルを開発した。
- ・ アンケートや経済実験の結果として得られる消費者選好情報を用いて、補助金など各種制度や技術開発による技術特性の改善などによる技術の普及率(選択行動)推定モデルを開発し、前述の民生家庭部門エネルギー最終需要シミュレーションモデルにより都市・国レベルで各技術の普及によってもたらされるエネルギー・CO₂排出削減効果を予測するフローを、環境配慮型技術の技術評価、技術開発・制度設計の転換シナリオ策定支援のケースモデルとして確立した。これは低炭素都市形成に関する政策目標の設定や優先順位づけに貢献しうる。
- ・ 上海における実態調査に基づき、人口、世帯数、世帯あたりの機器の保有台数とその使用時間、機器単体の効率などを変数とする家庭部門の環境負荷推計モデルを構築した。このモデルを用いることで、複数の政策シナリオの定量的な効果を示すことが可能となった。
- ・ 中国では、都市とその近郊、さらに農村地域での広域な製品(廃製品)フローが形成されるという特徴を持つことから、それを所得水準などの社会経済変数やライフスタイルによって規定される製品選択や利用に関わる変数で説明するモデルを構築し、消費形態の違いが階層的なリユースを含む製品・廃棄物フローおよびエネルギー消費に及ぼす影響を定量的に評価した。
- ・ 建設、交通移動、電力消費、食糧・水消費などの都市活動(ストックおよびフローの形成)に伴う環境インパクト評価は、これまで個別にモデル化や推計が行われてきた傾向があるが、本研究では、社会経済変化の将来シナリオに連動してこれらを統合的に推計・評価するモデルのプロトタイプを構築し、それを中国上海市での将来予測に適用して検証した。
- ・ いくつか提案されているサステナビリティ指標を实在都市(中国上海市)の将来変遷過程の評価に適用することで、都市活動が地下資源、地表資源、大気環境の持続可能性にもたらす直接・間接影響を定量的に示すとともに、指標活用に関する実用面の意義や課題を明らかにした。

(2) 地球環境政策への貢献

以下に本研究で得られた地球環境政策への貢献を示す。

- ・ 日本では太陽光発電技術の普及には初期費用支援策である補助金制度が有効であり、固定費買い取り制度よりも経済性で優れることを明らかにした。また、太陽熱温水器では技術受容性(イメージ等)の改善によりCO₂排出量の削減を拡大しうることを明らかにした。加えて、中国と日本では技術選好が異なり、日本での成功経験に基づく制度設計よりも中国における技術選好を考慮した制度設計が必要であることを示した。
- ・ 本研究で太陽光発電、太陽熱温水器をケースモデルとして開発した枠組みは他の環境配慮型技術の技術評価、技術開発・制度設計の転換シナリオ策定支援に適用しうる。

- ・ 構築した推計モデルを用いて、経済発展の著しい上海を対象に2030年までの家庭部門でのエネルギー需要量と使用済家電発生ポテンシャルを推計した。このモデルでは、各変数の将来変動と不確実性を加味した政策効果（トップランナー機器の普及等）の定量化や各変数の感度分析が可能であることから、政策ターゲットの設定や優先順位づけに貢献しうる。
- ・ 主観的選好を考慮した省エネルギー技術選択およびエネルギー需要予測モデルは、実社会での実効的な省エネルギー技術の普及量とそれによるCO₂排出削減ポテンシャルを評価することができるため、家庭部門の温暖化対策に関する政策目標の設定や達成度評価に資する。また、構築したモデルには、アジア各国の社会経済変数や地域性、環境規制などに関するデータの inputs が可能であるので、今後それらの国や地域で普及が期待される環境技術・製品やそれを促す制度、さらに普及による脱温暖化効果の定量化など、環境政策上有用な知見を得ることができる。
- ・ 中国版WEEE（廃電気・電子機器）指令の中で重要課題として位置づけられている製品リユースについて、資源消費面、エネルギー消費の側面、およびそれらのトレードオフの関係を示した。今後、中国版WEEEの制度設計や、EuP指令への対応を議論する上で有用となるモデルを構築することができた。また、都市部でのエネルギー消費や製品フローだけでなく、周辺地域への環境影響のリーケージも併せて制御・管理する政策に資する知見を得ることができた。
- ・ ライフスタイルや消費パターンと、耐久消費財に伴う環境インパクトとを関連付けてモデル化し、製品環境政策の効果を分析した内容は、UNEP等による「持続可能な消費」イニシアティブなどの国際的関心に一致するものである。
- ・ 巨大な物質的ストックとフローが形成される都市における資源消費抑制や低炭素化を図るとき、個別の環境技術・製品の開発や普及に加えて、都市構造そのものをつくり替えてゆくことが重要との視点に立ち、都市更新に関する政策代替案を提示し、その効果を定量的に明らかにすることができた。急速な人口集中と都市活動の拡大が進む中国上海市の場合、多極分散型の集積拠点を形成する都市更新施策が有効であることを見出した。
- ・ 限定的な指標についてのみではあるが、異なる環境指標間でのトレードオフを定量的に示すことができた。今後、資源生産性や環境効率、エコロジカル・フットプリントなどの指標についても、その実用面での役割や限界を示すことができれば、サステナビリティ指標の開発や環境計画における指標活用に対して有用な情報を発信しうる。また、エネルギーフローに関しては都市・地域・地球環境に与える環境負荷の大きさ、非再生資源の消費速度、要求されたサービスに対するエネルギー利用効率の3つの評価軸を立て、いくつかのトレードオフ関係を示すことができおり、今後の温暖化対策評価の有用なツールとなりうる。

6. 引用文献

- 1) R. Haas: Renewable & Sustainable Energy Reviews 7, 271-315 (2003)
“Market deployment strategies for photovoltaics: an international review”
- 2) NEDO:<http://www.nedo.go.jp/nedata/index.html>, アクセス日2007年5月12日
「新エネルギー関連データ」
- 3) 産業技術総合研究所, 電気安全環境研究所: (2002)
「平成13年度新エネルギー・産業技術総合開発機構委託業務成果報告書 太陽光発電技術研究開発 大量導入に向けた共通基盤技術の研究開発及び調査 太陽光発電システム評価技術の研究開発」
- 4) Lothar Wissing, Forschungszentrum Jülich, Projektträger Jülich: (2007)
“IEA Photovoltaic Power Systems Programme, National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2006”
- 5) 日本エネルギー経済研究所: p. 369 (2007)
「EDMCエネルギー・経済統計要覧」
- 6) 新エネルギー財団: <http://www.nef.or.jp/solarthermal/iroiro01.html>, アクセス日2007年5月12日
「太陽熱温水器」
- 7) 藤井拓郎, 下田吉之, 森川貴夫, 水野稔: 日本建築学会環境系論文集, 589, 51-58 (2005)
「熱負荷計算を組み込んだ都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発 世帯詳細区分型都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発と応用(1)」
- 8) Yoshiyuki Shimoda, Takahiro Asahi, Ayako Taniguchi, Minoru Mizuno: Energy, 32-9, 1617-1633 (2007)
“Evaluation of city-scale impact of residential energy conservation measures using the detailed end-use simulation model”
- 9) 下田吉之, 中尾寿孝, 鳴海大典, 羽原宏美, 水野稔, 辻毅一郎: エネルギー・資源, 160, 431-437 (2006)
「都市家庭部門エネルギー最終需要モデルの検証と気温上昇影響」
- 10) 谷口綾子, 下田吉之, 旭貴弘, 山口幸男: 日本建築学会環境系論文集, 632, 1217-1224 (2008)
「日本の住宅エネルギー最終需要のモデル化と住宅熱性能改善の影響評価」
- 11) NHK放送文化研究所: (2006)
「データブック国民生活時間調査2005《全国》」
- 12) Vijay Mahajan, Eitan Muller, Frank M. Bass: Journal of Marketing, 54, 1-26 (1990)
“New product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research”
- 13) 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: エネルギー・資源学会論文誌, 29, 3 (2008)
「クリーンエネルギー自動車の普及評価モデルの構築」
- 14) John A. Norton and Frank M. Bass: Management Science, 33, 9, 1069-1086 (1987)
“A Diffusion Theory Model of Adoption and Substitution for Successive Generations of High-technology Products”

- 15) 木村幸：電力中央研究所研究報告 Y08002 (2008)
「太陽熱温水器の普及はなぜ停滞しているのか」
- 16) 星野優子, 杉山大志：電力中央研究所報告, (財) 電力中央研究所(2007)
「温暖化制約下の世界エネルギー需給シナリオプランニング—中国は「省エネ大国」になるか—」
- 17) 中華人民共和国国家統計局：中国統計出版社 (2007)
「中国統計年鑑・2007年版」
- 18) 小宮山涼一, 張平, 呂正, 李志東, 伊藤浩吉：IEEJ (2006)
「中国31省・行政区別での2030年長期エネルギー需給予測—省別での統計整備の実施と計量モデルによる予測の基本的検討—」
- 19) 上海統計局：中国統計出版社 (2008)
「上海統計年鑑・2008年版」
- 20) 浙江省統計局・国家統計局浙江調査総隊：中国統計出版社(2007)
「浙江統計年鑑・2007年版」
- 21) 江蘇省統計局：中国統計出版社(2007)
「江蘇統計年鑑・2007年版」
- 22) 上海統計局：中国統計出版社(2006)
「上海統計年鑑・2006年版」
- 23) Jia Lingyun, Men Kepei：理論新探、14-16 (2006)
「上海人口の将来予測に関する研究」 (中国語文献)
- 24) 若林敬子編著, 筒井紀美訳：ミネルヴァ書房 (2006)
「中国人口問題のいま—中国人研究者の視点から—」
- 25) 上海統計局：中国統計出版社 (2007)
「上海統計年鑑・2007年版」
- 26) 寧ら：Journal of the Japan Institute of Energy, 85 (2006)
「中国都市部家庭部門におけるエネルギー消費構造に関する研究(I) —経年動向 1981～2000—」
- 27) 晝間文彦：早稲田大学・消費者金融サービス研究所 (2001)
「消費者の主観的割引率について—アンケート調査の結果から—」
- 28) 環境省：中央環境審議会総合政策部会 (第20回) 議事次第・配布資料・資料3 (2004)
<http://www.env.go.jp/council/02policy/y020-20b.html>
「アンケート結果について」
- 29) (有)ADS計画研究所：<http://www.ads-network.co.jp/seinou/se-1/se-0105.htm>
「断熱化のコストと融資」
- 30) NEDO技術開発機構：(2008)
「平成20年度住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業—住宅に係るもの— (公募要領)」
- 31) NEDO技術開発機構：(2007)
「平成20年度住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業システム提案概要(住宅)」

- 32) ヨドバシカメラ：<http://www.yodobashi.com/>
- 33) 本地宝：http://tuan.sz.bendibao.com/product/show_1803.htm
「万家樂冷凝式燃氣熱水器 JSQ20-12U1」
- 34) 上海国美電気：<http://www.gome.com.cn/areaindex-51819.htm>
- 35) TSSグループ：http://denki.tssshop.com/shop/onsuiki?gclid=CJ3R_4nfyJcCFQ8upAod5lrKSw
- 36) Sustainable Household：<http://www.sushouse.tudelft.nl/not/frames.htm>, アクセス日2006年6月5日
- 37) 未踏科学技術協会：(2002)
「平成15年度版持続可能な消費に向けた指標開発とその活用に関する研究報告書」
- 38) 木村雄二, 山本祐吾, 吉田登, 齊藤修, 盛岡通：環境情報科学論文集, 21, 261-266 (2008)
「シナリオ・ライティング手法を用いた持続可能なライフスタイルの作成と環境負荷の評価」
- 39) 山本祐吾, 盛岡通：日本LCA学会誌, 4, 3, 216-221 (2008)
「地域社会のエコデザイン：低炭素・資源循環型の持続可能な地域社会の形成」
- 40) 上海市統計局：上海市統計年鑑各年版
- 41) 日本政策投資銀行：日本政策投資銀行調査第33号(2002)
「都市再生と資源リサイクル - 資源循環型社会の形成に向けて -」
- 42) 東京都環境局：(2001)
「東京都産業廃棄物処理計画について「最終のまとめ」」
- 43) 及川智, 占部武生：東京都環境科学研究所年報, 182-190(2002)
「建設廃棄物の発生抑制に関する研究(その1) - 東京23区の建築ストック量と建築物の寿命, 解体建築物床面積の将来予測 -」
- 44) 谷川寛樹, 井村秀文：土木学会論文集, 671, VII-18, 35-48(2001)
「都市建設にともなう総物質必要量の定量化と評価に関する研究 - 住宅地整備のケーススタディ -」
- 45) 坂本辰徳, 谷川寛樹, 橋本征二, 森口祐一：環境情報科学論文集18, 271-276(2004)
「地域マテリアルフロー推計に用いる都市構造物の資材投入原単位と耐久年数の推計」
- 46) 中華民国内政部統計局, <http://www.moi.gov.tw/>
- 47) 田中昭雄, 長澤淳司, 柳美樹, 山下ゆかり, 伊藤浩吉：日本エネルギー経済研究所(2006)
「住宅エネルギー消費と世帯属性・地域性の要因分析 - 遺伝的アルゴリズムによる未知データの最尤推定 -」
- 48) 柳亚东, 徐强：JSKJ(2007)
「上海市公建用能特征与节能策略」
- 49) 矢野桂司：シリーズ人文地理学3, 杉浦芳夫編, 第3章, 朝倉書店(2003)
「空間的相互作用モデル, 地理空間分析」
- 50) Pan Haixiao, Dr. Zhuo Jian and Dr. Liu Bing：Mobility for Development (M4D) Project at the World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (2008)
“Mobility for Development -Shanghai Case Study, the background information for a Stakeholder Dialogue”
- 51) 陆锡明, 薛美根, 李俊豪, 陈必壮：上海市城市综合交通规划研究所(2000)

「上海市综合交通发展战略分析与预测评估」

- 52) 牧野文夫, 羅歆鎮: 日本貿易振興機構アジア経済研究所, 調査研究報告書, 中国・上海の市場と福島県食品の展望, 菅沼圭輔編, 第3章(2004)

「上海における食料品の消費者動向・消費者選好」

- 53) K. Harada, K. Ijima: *Materia Japan*, 43, 4, 264-269 (2004)

“Resource Productivity of Magnesium”

- 54) 谷川寛樹, 井村秀文: 土木学会論文集, 671, VII - 18, 35 - 48(2001)

「都市建設にともなう総物質必要量の定量化と評価に関する研究 - 住宅地整備のケーススタディ - 」

- 55) Wackernagel, M. and W. E. Rees: *Philadelphia, New Society* (1995)

“Our ecological footprint: Reducing human impact on Earth”

- 56) 日本統計年鑑 2005年度版

- 57) 日本電気工業会: (2006)

「各国における発電部門CO₂排出原単位の推計調査報告書 - Ver. 3 - 」

7. 国際共同研究等の状況

2007年10月には、大阪大学と上海交通大学の学术交流協定に基づいた上海交通大学の訪問プログラムで、同大学法学研究科環境法担当のWang Xi教授他のグループに対して、家庭用最終需要モデルなど本研究プロジェクトについて説明し、助言を得た。また、2008年10月には同済大学の譚洪衛教授を訪問し、本プロジェクトについて助言を得た。譚教授とは2009年2月にも大阪で打ち合わせをおこない、本プロジェクトの研究成果を上海市内の地域に適用し、エネルギーマネジメント研究の実施を共同研究として予定している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Yukio Yamaguchi, Yoshiyuki Shimoda, Ayako Taniguchi: *Proceedings of the World Sustainable Building Conference 2008*, pp. 2521-2528 (2008)

“Evaluation of Energy Saving Measures in Long-term Scenario in Japanese Residential Sector”

- 2) Shimoda, Y., Yamaguchi, Y., Kishi, C., Yamaguchi, Y.: *Proceedings of the World Sustainable Building Conference 2008*, pp. 983-990 (2008)

“Evaluation on sustainability of urban energy system by energy flow analysis”

- 3) 下田吉之, 山口幸男, 岡村朋, 谷口綾子, 山口容平: *エネルギー・資源学会論文誌*, 30, 3(2009)

「家庭用エネルギーエンドユースモデルを用いた我が国民生家庭部門の温室効果ガス削減ポテンシャル予測」

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) 張焜、山本祐吾、齊藤修、盛岡通：土木学会地球環境委員会、第15回地球環境シンポジウム講演論文集、195-200 (2007)
「上海の民生部門におけるエネルギー需要の将来予測とCO₂排出削減ポテンシャルのマクロ分析」
- 2) 齊藤修、和田直樹、原圭史郎、山本祐吾、下田吉之、盛岡通：土木学会第35回環境システム研究論文発表会講演集、pp. 143-149 (2007)
「アジア地域における発展段階の違いに応じた持続可能なエネルギー・資源循環シナリオ構築に向けてー上海市とホーチミン市の家庭部門を対象としてー」
- 3) 中久保豊彦、齊藤修、山本祐吾、盛岡通：土木学会第35回環境システム研究論文発表会講演集、pp. 159-166 (2007)
「中国農村部の経済発展に応じたバイオマス利用の高度化による地域発展モデルの構築」
- 4) 齊藤修、和田直樹、山本祐吾、下田吉之：第27回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集、pp. 153-156 (2008)
「上海市とホーチミン市の家庭部門のエネルギー・資源消費実態と将来シナリオに関する研究」
- 5) 岸千尋、山口幸男、東真太郎、下田吉之：第27回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文要旨集、pp. 37-40 (2008)
「エネルギーフロー解析による都市の持続可能性評価」
- 6) Chihiro Kishi, Yukio Yamaguchi, Shintaro Higashi, Yoshiyuki Shimoda: Proceedings of the Eighth International Conference on Eco Balance 2008, Tokyo, Japan (CO-ROM) P-062, (2008)
“Sustainability Evaluation of City by Energy Flow Analysis”
- 7) 藤村尚樹、下田吉之、西條辰義、瀋俊毅、赤井研樹：第27回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文要旨集、pp. 305-308 (2008)
「太陽熱温水器と太陽光発電の技術評価と将来予測」
- 8) 下田吉之：日本建築学会 サステイナブルシティ研究公開勉強会第3回資料、pp. 13-17 (2009)
「自治体・制度面のグッドプラクティス②再生可能エネルギーの制度など（太陽光と対予熱を例として）」
- 9) Naoki Wada, Yugo Yamamoto, Osamu Saito, Akihiro Tokai, Tohru Morioka: Asian Conference on Risk Assessment and Management 2009, Beijing, China (2009)
“Effects on products flow and multiple risks from alternative consumption patterns”
- 10) 下田吉之、藤村尚樹、山口容平：第28回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集、印刷中 (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」
- 11) 山口容平、山口幸男、下田吉之：エネルギー・資源学会、第28回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集、印刷中 (2009)
「上海家庭部門のエネルギー需要予測と省エネルギー技術評価」

(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

- 1) 地球環境講演論文賞、2008年8月（張焜、山本祐吾、齊藤修、盛岡通：「上海の民生部門におけるエネルギー需要の将来予測とCO₂排出削減ポテンシャルのマクロ分析」）

資料集

(1) 上海民生部門におけるエネルギー消費実態調査の結果

1) 上海市とその周辺都市における家庭部門の機器普及・利用等の実態調査

a. 基本属性

平均世帯人員は上海2.76人、昆山3.00人、湖州2.98人であった。上海、昆山、湖州では、3人までの世帯比率が90%、80%、88%であった。上海では、本人夫婦とその子供からなるいわゆる核家族が70%、単身者が16%を占めるが、昆山と湖州での単身者の比率はそれぞれ5%、7%であった。調査サンプルの所得構成は、上海の所得が周辺の昆山や湖州よりも1,000～2,000元程度多く、富裕層が含まれる比率が高かった（図48）。

居住環境は、上海、昆山、湖州ともにマンション形式の中高層の集合住宅が主流となっているが、湖州では5%が戸建て住宅であった。世帯あたりのベッドルーム数は、昆山と湖州では3部屋以上がそれぞれ28%、31%に対し、上海では3部屋以上がわずか1%（99%が2部屋以下）と世帯あたり部屋数が少ないことがわかった。

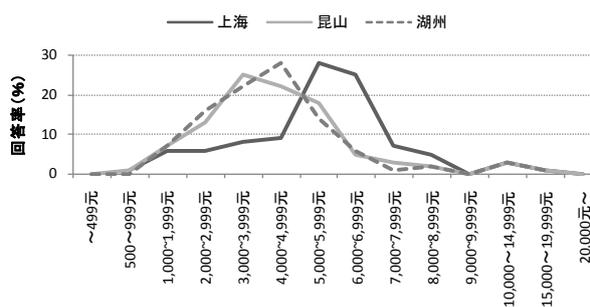


図48 上海市、昆山市、湖州市の所得分布

b. 家電の保有状況と導入時期

上海では、エアコン、テレビ、冷蔵庫、洗濯機の4品目の普及率はほぼ100%であった。上海ではすでにこれらの家電品の普及が一巡し、エアコンは33%以上の世帯が2台以上、テレビは半数以上の世帯が2台以上を保有している。昆山と湖州では、エアコンとテレビの保有台数が上海よりも多い（表13）。これは前述のとおり、ベッドルーム数が3部屋以上の住宅が昆山と湖州に多いことが関係していると考えられる。上海、昆山、湖州では中古品の利用はほとんどなかった。現在の日本の保有台数と比較すると、上海、昆山、湖州のエアコンとテレビでは世帯あたり1台分（100世帯あたり100台）程度の差（伸びしろ）がある。冷蔵庫と洗濯機はもともと世帯あたり1台を大きく超えることはないので、日本との差は小さい。また、昆山と湖州での調査では、パソコンの保有状況も調査したが、その結果、昆山では76台/100世帯、湖州で64台/100世帯と日本の水準に迫る勢いで普及が進んでいることがわかった。

各家電品の導入時期の推移を比較すると、上海ではエアコンの初設置年のピークが1990年代後半、他の3家電品は1980年代後半であった。エアコンについては、昆山、湖州では2000年以降の設

表13 家電の保有台数（台/100世帯）

	エアコン	テレビ	冷蔵庫	洗濯機	パソコン
上海市	136	155	100	100(1)	—
昆山市	160(1)	191	99	95	76
湖州市	175	196(2)	95	99	64(1)
(参考)日本*	255	250	126	109	104

括弧内の数値は中古品の台数（内数）

*エアコン、テレビ、パソコンは2006年3月、冷蔵庫と洗濯機は2004年3月の値（出典：家電製品協会：家電産業ハンドブック2006（平成18年）、2006）

置が多い。昆山と湖州での導入時期の変遷はエアコンではかなり似通っているが、テレビ、冷蔵庫、洗濯機については上海により近い昆山での導入時期が湖州よりも若干早いことがわかった。昆山と湖州でのパソコンの導入時期は、2000年以降に集中している。

c. 家電の使用実態

【エアコン】

エアコンの設置場所は、上海、昆山、湖州では居間と寝室の比率が約1:2であった。エアコンの使用日数は、各市で異なるが、全般的には南に位置する市ほど長くなる傾向がある（表14）。

世帯あたりの日平均稼働時間は、上海11.8時間、昆山10.8時間、湖州9.3時間であった。中国の3市では日中から夜（朝6時から夜10時）に2～5時間、夜間（夜10時から朝6時）3～8時間というパターンが多かった。上海と湖州では、所得水準の上昇に伴い日平均使用時間が増加する傾向が見られたが、昆山では所得は使用時間にあまり関係なかった（図49）。また、同じ上海市内であっても、都市域と近郊域で日平均使用時間に差があり、都市域では一日10時間以上が38%（近郊域12%）と長時間使用の比率が高いことがわかった。

表14 エアコンの使用日数（回答率（%）*）

	30日以下	31-60日	61-90日	90日以上
上海	3	17	62	17
昆山	1	59	33	6
湖州	1	42	28	28

*エアコンを設置しているという回答者数を分母にした場合の比率

【テレビ】

上海、昆山、湖州のテレビの平均使用時間は、それぞれ5.5時間、3.2時間、3.2時間であった。3市とも使用時間と所得の間に明確な相関関係を見いだすことはできなかった。

【冷蔵庫】

上海では80%程度は中型、10%弱が大型の冷蔵庫が使用されている。昆山と湖州では中型がそれぞれ61%、73%、小型が32%、18%であり、大型はあまり普及していない。

【洗濯機】

上海、昆山、湖州では全自動式の洗濯機の比率がそれぞれ73%、76%、74%を占め、二層式が2割強の比率で使用されていた。使用頻度は、上海、昆山、湖州ともに週2～3回が最も多く、次いで上海では毎日（一日一回）が多く、昆山と湖州では週1回以下がそれに続いた。

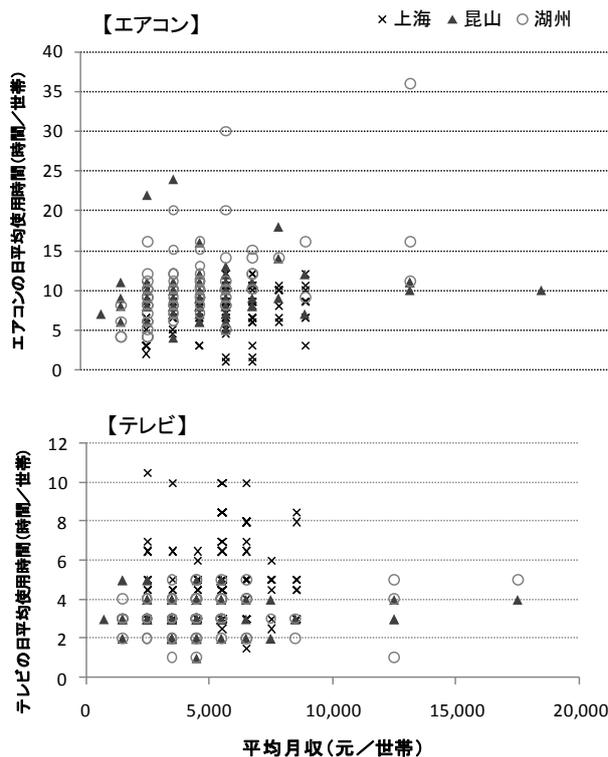


図49 中国3市における所得と家電使用時間との関係

2) 上海業務部門における省エネルギー対策の実施状況の調査

a. 調査の概要

サブテーマ(1)の4(8)に述べたように、上海市の民生業務部門を対象としてエネルギー消費機

器の普及、利用等の実態を調査した。サブテーマ(2)では、この成果をエネルギー需要、廃棄物発生量の将来予測を行うためのデータベースとして用いる。以下では、エネルギー消費機器の普及、利用実態、省エネルギー対策の導入実態について得られた知見をまとめる。

調査対象の約6割が複合テナントビルであり、その95%がオフィスビルであった。また、病院や商業施設、ホテル等の多くはシングルテナントビルであり、全調査対象に占める割合はそれぞれ14%、10%、8%である。調査した業務ビルの多くは築年数が20年以下であり、今後10~20年を経て、立て直しや改修のピークを迎えることが予想される。(図50)

b. エネルギー消費機器の普及、利用実態、運転状況

図51に、各建物用途におけるエアコンの空調方式を示す。商業施設や複合施設、オフィスなどではセントラル方式が多い。一方、学校や劇場、展示施設では個別方式が大きい採用率を占める。

図52、図53に夏季及び冬季におけるエアコンの設定温度を示す。オフィスにおける夏季の冷房設定温度は25度、冬季では24度以上が最も多い。日本のオフィスビルでは、夏季で74.7%が28度、冬季には54%が20度に設定している¹⁾。室内温度設定の緩和による省エネルギーよりも居住者の快適性の確保が優先されていることが予想される。

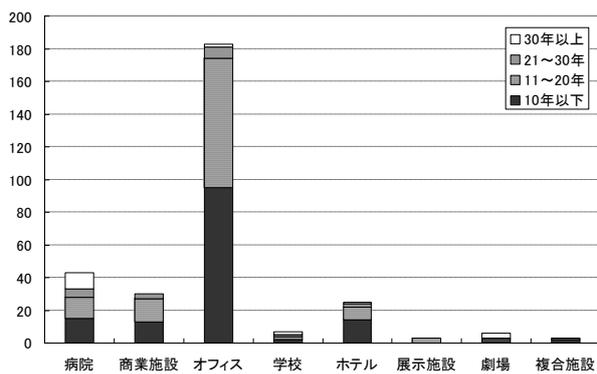


図50 アンケート調査対象の用途別棟数 (建築年数別)

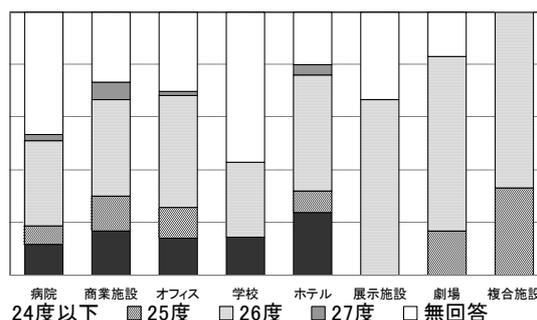


図52 夏時冷房の設定温度

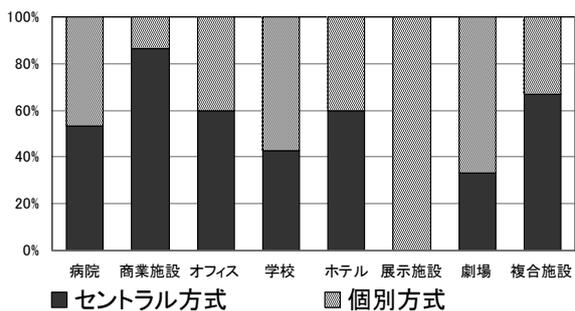


図51 採用空調システム

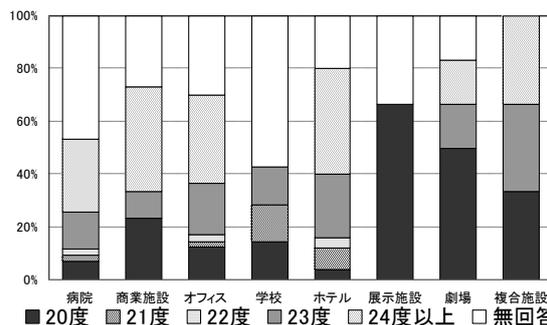
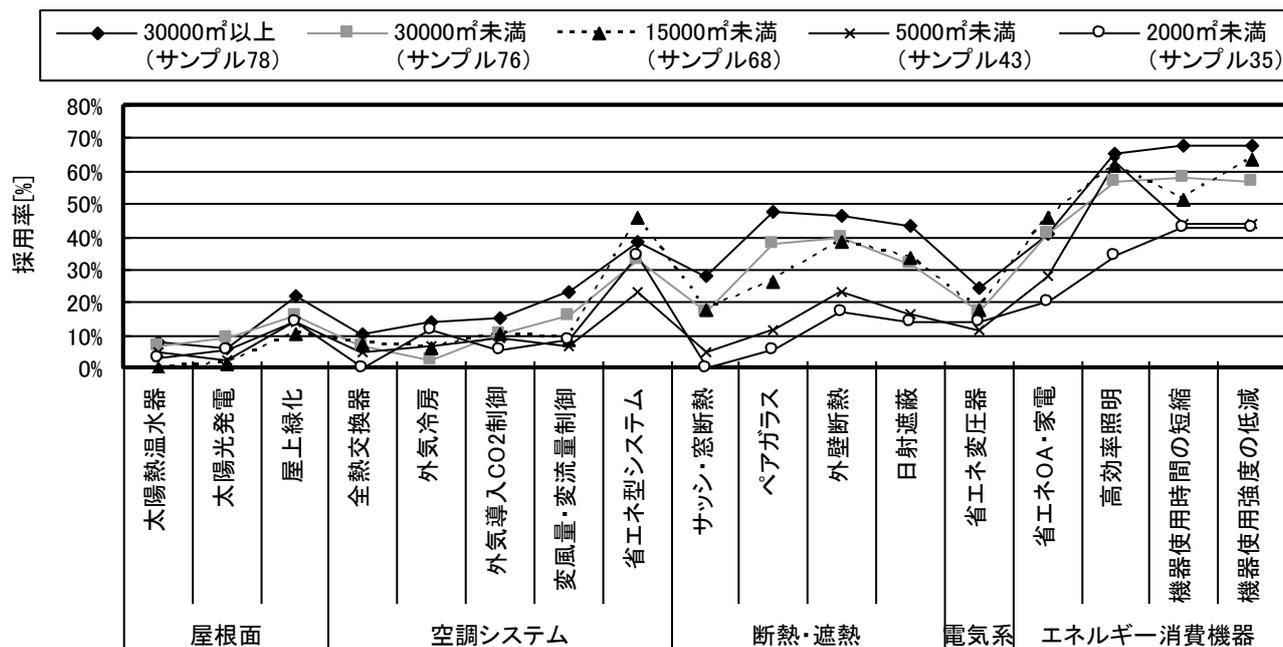


図53 冬時暖房の設定温度

c. 省エネルギー対策の実施状況

17の省エネルギー対策について建物用途別に導入状況を把握した。調査した省エネルギー手法の規模別採用率(件数ベース)を図54に示す。得られた知見は以下の通りである。

- ・ 全体的に、大規模な建物ほど多くの省エネルギー手法を導入している傾向がある。この傾向は



注 凡例の下の数字はサンプル数を表す。採用率は各手法を採用した建物の数を規模別に集計し、サンプル数で除して算出

図54 規模別の省エネルギー対策採用率

日本の業務建築と同様のものである²⁾。

- ・ 屋根面を使用した対策（太陽熱温水器、太陽光発電、屋上緑化）は導入率が低い。
- ・ 空調システムに関連する対策（全熱交換器、外気冷房システム、外気導入におけるCO₂制御、変流量・変流量空調システム、省エネルギー型空調システムの導入）の採用率は日本と比較して低い水準にある。省エネルギーの余地は多く残されていると考えられる。
- ・ 省エネルギー家電の購入、エネルギー消費機器の使用時間の短縮、使用強度の低減は採用率が高い。室内設定温度の緩和のように居住者の快適性が損なわれる可能性がある対策は受け入れられにくい、ここで述べた運用時に実施可能な省エネルギー対策は積極的に導入されているようである。また、延床面積2000m²を超える建物では約半数が高効率照明を採用している。
- ・ 建物の断熱・遮熱は大規模な建物ほど対策が導入されている傾向がある。日本では北海道、東北地方を除いて断熱の採用率はそれほど高くない（10～20%程度）という報告²⁾があるが、この数値と比較すると上海のオフィスのほうが断熱対策の採用率が高い可能性が示唆される。ただし、採用されている断熱性の水準、効果については更なる検討が必要である。

引用文献

- 1) 日本経済団体連合会：(2007)
「地球温暖化防止のためのオフィスや家庭部門での取組みフォローアップ調査結果」
- 2) 資源エネルギー庁：(2007)
「平成18年度省エネルギー対策実態調査報告書」

(2) 上海市家庭部門のエネルギー需要モデルのデータベース

i. 人口のデータベース

上海統計年鑑¹⁾の都市部、農村部の戸籍人口と外来常住人口データを合計し、上海市の人口とした。次に、同文献に掲載されている戸籍世帯の平均世帯人員数で人口を割り、世帯数とした。さらに、都市部の世帯を所得階層別に分離した。所得階層は年間可処分所得8,000元、15,000元を閾値として低所得層、中所得層、高所得層に分類した。所得階層別の世帯数は、上海統計年鑑の「都市部の世帯人員一人当たりの可処分所得水準別世帯数比率(2003年)」を用いて決定した。なお、外来常住人口はすべて都市部世帯とし、80%を低所得層、20%を上記の比率を用いて中・高所得層に割り振った。所得階層については2003年における所得階層別世帯数比率で一定とした。

ii. 世帯の類型化

世帯類型の区分を表15に示す。まず、世帯人数別に世帯数の比率を算出した。日本の国勢調査の結果を分析したところ、世帯人数の出現確率は平均世帯人数を平均値とする二項分布により近似できることがわかった。この結果を上海に適用し、上海統計年鑑に掲載されている平均世帯人員数から二項分布を作成し、構成人数別の世帯比率を作成した。2030年の予測では、平均人員数は上海統計に記載されている1987年から2006年のデータを指数回帰して2030年まで外挿した。次に、(2)に説明したアンケート結果に基づいて家族構成と居住者の属性を設定した。アンケートでは世帯人数別に家族構成の比率を得ており、この比率を用いて表15に示す世帯類型の比率を決定した。ただし、夫婦と共働き夫婦の比率のみ、共働き夫婦の比率が9:1となるように修正した(灰色部分のみ)。なお、この比率は2030年まで一定とした。

表15 世帯類型の区分と世帯人数別の家族構成比率

世帯構成		アンケート		採用比率		世帯構成		アンケート		採用比率	
人数/構成		都市	郊外	都市	郊外	人数/構成		都市	郊外	都市	郊外
1	男	80	55	80	55	4	夫婦と子	50	0	50	0
	無職男	0	9	0	9		夫婦と親	50	0	5	10
	女	20	18	20	18		と子	0	100	45	90
	無職女	0	18	0	18		共働き夫婦	0	100	45	90
2	夫婦	100	60	10	10	5	と親と子	75	100	10	10
	共働き夫婦	0	40	90	90		夫婦と親	75	100	10	10
3	就業男と親	9	11	9	11	6	と子	25	0	90	90
	就業女と親	11	7	11	7		共働き夫婦	25	0	90	90
	夫婦と子	49	41	8	8		と親と子	100	100	100	100
	共働き夫婦と子	31	41	72	73		夫婦と親・子	100	100	100	100

iii. 住宅床面積別世帯数のデータベース

上海統計年鑑によると、2006年における住宅総床面積に占める戸建住宅の割合は3.6%である。そこで本モデルでは戸建て住宅は無視した。集合住宅は住宅規模を30㎡から110㎡まで20㎡間隔で区切り、それぞれを閾値として規模の区分を作成し、所得階層別、世帯人数別に規模の比率を推計した。設定にはサブテーマ(1)が行ったアンケートの結果(サンプル数1200)を用いた。なお、ただし、世帯人数別・床面積別世帯数比率は現状の比率から変化しないものとした。つまり、収入の水準が変わらなければ世帯当たりの床面積は増加しないものと仮定した。

iv. 住宅の建物モデル

住宅の仕様（間取り等）については十分な情報が得られなかったことから日本の集合住宅のモデル（1K、1LDKから4LDK）を代用した。ただし、住宅の熱性能については、文献2）、3）から表16の仕様とした。なお、2030年までの推計では住宅の熱性能は変化しないものとした。

なお、2030年までの推計では住宅ストックの建て替わりを考慮する。まず、上海統計年鑑に掲載されている1978年以降、前年からの世帯数の増分に住宅ストックの減少分を足し合わせ、これを新築戸数とした。住宅ストックの減少分は、日本の集合住宅の平均寿命49.6年と寿命年数に対する残存率を与えて算出した。1978年以前については情報が無いため、1978年の世帯数を住宅戸数とし、すべて新築と想定した。この結果、2006年以降に建設される集合住宅は図55のようになり、2030年において約5割の住宅戸数は2006年以降に建設されたものとなる。

表16 部材の設定

部位	部材	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/m・K]	熱還流率 [W/m ² ・K]
天井	平空洞コンクリート	497	0.81	1.26
外壁	レンガ	240	1.51	1.65
内壁	レンガ/コンクリート	266	0.81	1.83
窓	単層ガラス			6.4

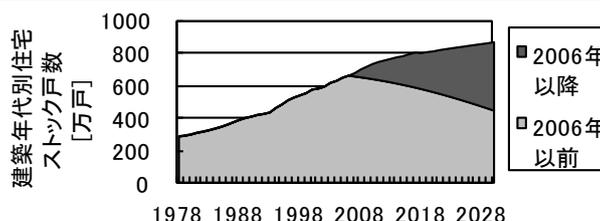


図55 住宅年代別

表17 代表的家電製品の性能と普及比率

機器	低所得	中所得	高所得	農村	性能の設定
エアコン	100%	100%	304%	99%	冷房COP2.3, 暖房1.9
テレビ	100%	100%	304%	167%	使用時消費電力70W
冷蔵庫	100%	100%	100%	94%	310W (容量小) -410W (大)

冷蔵庫は世帯人数が多い・所得階層が高いほど大きい容量とした

v. 家電製品のデータベース

住宅内で使用される家電機器については、日本の家庭部門のモデル（1）と同じ種類の機器を考慮し、(2)で説明したアンケートの結果を反映するとともに、可能な限り上海統計年鑑¹⁾、中国統計年鑑⁴⁾から都市部所得階層別、農村部に分けて普及台数を設定した。家電機器の性能や消費電力は文献5)から8)に基づいて設定した。また、データが得られなかったものについては日本のデータを代用した。代表的家電製品の世帯当たり平均普及台数、性能の設定を表17に示す。

2030年までの推計では、普及率と世帯数から各機器の総ストックを推計し、前の年からの総量の増分は新規家電で供給されるものとした。なお、家電の使用率は所得水準のみに依存するものとした。また、全ての機器の性能は変化しないものとした。

vi. 暖冷房のデータベース

暖房用のエネルギー消費は、熱負荷計算より算出された暖房需要に対して、暖房器具として考慮したエアコン、電気ヒーター、ガスヒーター、灯油ヒーター、石炭暖房器具それぞれのCOPで割り、それを分担率で重みづけ平均することで算出した。分担率は次のように求めた。寧ら⁹⁾は1999年の上海都市部の家庭用エネルギー消費をエネルギー源別・用途別に原単位化している。暖房用のエネルギー消費量を各暖房方式のエネルギー効率で割り戻し、これを分担率とした。ただし、エネルギー効率はエアコンのCOPは1.9、石炭暖房器具は0.8、電気ヒーター1.0、ガスヒーター0.9、灯油ヒーター0.95とした。

毎時の計算では、在室時における暖冷房の時刻別使用確率をYoshinoら⁴⁾による調査結果から与え、それに乱数を振ることで空調のオン・オフを決定した。なお、上海における暖房期間は11月7日から4月21日、冷房期間は5月17日から10月10日とした⁹⁾。また居間と主寝室を暖冷房の対象とした。

なお、2030年までこの設定は変更しないものとした。

vii. 給湯・ちゅう房のエネルギー消費のデータベース

給湯用のエネルギー消費として洗顔、風呂・シャワー、炊事を考慮した。風呂・シャワーの回数は趙ら¹⁰⁾による西安の実態調査結果を用い、その他は毎日行うものとした。なお、各行為の使用水量は湯はり以外を日本の半分の設定¹¹⁾とした。給湯用エネルギーは電気、都市ガス、LPG、石炭、石油を考慮し、寧ら⁹⁾によるエネルギー源別のエネルギー消費量の比率から暖房分担率と同じ方法で分担率を得た。

ちゅう房用のエネルギー源は都市ガスのみを使用するものとした。

引用文献

- 1) 上海統計局：中国統計出版社（2007年）
「上海統計年鑑・2007年版」
- 2) Yoshino et al.: Energy and Buildings, 38, 1308-1319 (2006)
“Indoor thermal environment and energy saving for urban residential buildings in China”
- 3) 中華人民共和国国家統計局：中国統計出版社（2007年）
「中国統計年鑑・2007年版」
- 4) Siwei Lang: Energy and Buildings, 36, 1191-1196 (2004)
“Progress in energy-efficiency standards for residential buildings in China”
- 5) Alan Meier: Energy and Buildings, 36, 1211-1216 (2004)
“Standby power use in Chinese homes”
- 6) Shuqin Chen et al.: Energy and Buildings, 40, 654-665 (2008)
“A statistical method to investigate national energy consumption in the residential building sector of China”
- 7) Wei Lu: Energy Policy, 34, 1583-1589 (2006)
“Potential energy savings and environmental impact by implementing energy efficiency standard for household refrigerators in China”

- 8) 寧ら：Journal of the Japan Institute of Energy, 85 (2006)
「中国都市部家庭部門におけるエネルギー消費構造に関する研究(I) -経年動向 1981～2000-」
- 9) 寧ら：Journal of the Japan Institute of Energy, 85, 2006
「中国都市家庭部門におけるエネルギー消費構造に関する研究(II)-地域特性-, 日本エネルギー学会」
- 10) 趙ら：日本家政学会誌, 56, (2002)
「大都市西安における公共浴池の利用と住宅内衛生間における居住者の入浴習慣の実態 第1報」
- 11) 谷口綾子, 下田吉之, 旭貴弘, 山口幸男：日本建築学会環境系論文集, 632, 1217-1224 (2008)
「日本の住宅エネルギー最終需要のモデル化と住宅熱性能改善の影響評価」