

エネルギー消費技術の改善が二酸化炭素排出量抑制に及ぼす効果のシミュレーション

松岡 譲¹・森田 恒幸²・水野 健太³

¹正会員 工博 名古屋大学教授 工学部地圏環境工学教室 (〒464-01 愛知県名古屋千種区不老町)

²工博 国立環境研究所地球環境研究グループ (〒305 茨城県つくば市小野川16-2)

³正会員 若築建設 (〒153 東京都目黒区下目黒2-23-19)

筆者らは、エネルギー消費技術の進展が二酸化炭素排出量とどのように関係するかを評価するモデルとして、エネルギー消費技術の積み上げを基礎においた排出モデルの開発を行った。本論文は、この開発モデルを詳細に記述し、モデルの適用例として、わが国における家庭、業務及び主要産業部門を対象とした2010年までの二酸化炭素排出量の見通しを報告したものである。本推計結果によると、2010年度の上記部門を合計した二酸化炭素排出量は、各消費技術のサービス分担率を固定したシナリオでは256.6MtC/a、技術を選択するシナリオでは241.6MtC/a、エネルギー転換部門の排出抑制対策を考慮した技術選択シナリオでは224.7MtC/aとなった。すなわち、省エネ型技術の普及とエネルギー転換部門の抑制対策が進めば、2010年度における二酸化炭素の排出削減量は約32MtCとなり、1990年度排出レベルに安定化することは可能であることが示された。

Key Words : *global environment, energy model, carbon dioxide, linear programming*

1. 本研究の概要及び主要な結果

本研究の目的は、わが国におけるエネルギー消費技術の進展と温室効果ガスである二酸化炭素の排出量との係わりを、一定の社会経済シナリオの下で定量的に明らかにする排出モデルを開発することである。

本研究で開発したモデルは、エネルギー消費技術の積み上げを基礎においたボトムアップ型のエネルギー技術モデルである。このモデルでは、個々の技術の持つ工学的、経済的技術特性をモデル内に明示的に記述している。そして、エネルギー価格の変化により技術代替が生じる現象を中心に、エネルギー消費量や二酸化炭素排出量を積み上げ方式で求める。この種のボトムアップアプローチによる省エネメカニズムの把握は、従来型技術のエネルギー効率やコストの改善、新規の省エネルギー技術の普及がもたらす二酸化炭素排出量の削減効果の具体的な検討を可能とする。

本研究では、この開発モデルの適用例として、わが国における家庭、業務、主要産業部門を対象とした1990年から2010年までの二酸化炭素排出量の見通しを行った。この推計において、エネルギー消費技術（サービス機器）の消費者あるいは生産者の機器選択行動に関し3つのシナリオを想定した。

本研究から得られた主要な結果は、以下の通りである。なお、本論文では、二酸化炭素排出量の単位として炭素換算量を用いる（例えば、1MtC/aとは、年間百万炭素トンの排出量を意味する）。

- 1) 各エネルギー消費技術のエネルギーサービス分担率を固定した推計では、家庭、業務及び産業部門を合計した二酸化炭素排出量は、1990年度排出量の約14%増である256.6MtC/aとなった。特に家庭部門の二酸化炭素排出量は、順調に増加し、2010年度の排出量は1990年度の約51%増である57.4MtC/aとなった。
- 2) エネルギー消費技術を経済的基準により選択する場合の推計では、各部門で省エネルギー技術の普及が進み、2010年度の合計排出量は241.6MtC/aとなった。これは、1990年度排出量の約7%の排出量増、サービス分担率固定シナリオ下での排出量の約6%の排出量削減を意味している。特に家庭部門において大きな削減がみられた。
- 3) さらに、エネルギー転換部門の排出抑制対策を織り込んだ技術選択シナリオでは、2010年度には1990年度排出量とほぼ同レベルの排出量である224.7MtC/aとなった。

本研究では、家庭、業務及び産業の3部門について推計を行い、各部門における排出削減の可能性について示した。さらに、ここで扱わなかった運輸部門、廃棄物部門などその他の部門を総合したわが国全体の二酸化炭素排出総量について検討を行う必要がある。これについては別途報告する予定である。

2. ボトムアップ型エネルギー技術モデルの系譜と本モデルの特徴

これまで温室効果ガスの排出量や排出削減費用を評価するモデルは数多く開発されてきた。これらのモデルは、大きく2つのタイプに分類される。第一は、マクロ経済社会指標の推定値をベースとし、市場均衡等を前提としたトップダウン型モデルと呼ばれるモデルである。第二は、個々のエンドユーザーの消費行動やエネルギー消費技術の変化を追跡するモデルで、ボトムアップ型モデルと呼ばれる。トップダウン型モデルでは、エネルギー消費技術が詳細に記述されておらず、このようなモデルでは通常、消費者の行動は集約的に表現される。したがって、消費者や生産者の行動を具体的かつ現実的に把握することは困難である。これに対してボトムアップ型モデルでは、消費行動や技術変化を詳細に記述できるために、計算結果を具体的に評価することができる。これは、ボトムアップ型モデルの大きな長所であり、温室効果ガスの排出量削減に関する新たな政策を導入する際に、政策の具体的な展開の方向性とその効果を説得力をもって説明できる。

ボトムアップ型モデルには、アカウンティング型モデル、技術最適化モデル及び逐次均衡モデルなどのアプローチによるモデルが存在する。第一のアカウンティング型モデルの代表的モデルには、ストックホルム環境研究所が開発したLEAP¹⁾や松橋ら²⁾がある。これらのモデルでは、エネルギー需要サイドの技術データベースを詳細に整備し、与えられた排出量抑制シナリオのもとで二酸化炭素排出量や削減費用を積み上げ方式で算出する。第二の技術最適化モデルとは、資源制約条件、エネルギー需要供給条件及びエンドユーザの需要条件などの制約条件下で、最適な技術の組み合わせを求めモデルである。エネルギー消費システムに係わる総費用を最小にすることを最適化の評価基準とし、線形計画法などで求解計算を行う。アカウンティング型モデルに比べ、種々の技術間のトレードオフを分析することができる点が大きな特徴である。国際エネルギー機関が開発したMARKAL³⁾は、技術最適化モデルの代表的なモデルで、アジア地域や南米など20ヶ国以上のエネルギー及び環境分析に適用されてきた。第三の逐次均衡モデルは、市場均衡状態の明示的な表現を通してエネルギーの市場経済プロセスをモデルに組み込む。市場均衡を左右するマクロ経済社会指標はモデル内にて内生的に決定する。モデルの代表例としてENPEP (ENergy and Power Evaluation Program)⁴⁾が挙げられる。このモデルは、総合的なエネルギー分析やエネルギー転換部門における研究に適用されてきた。

さて、わが国における二酸化炭素の排出量を予測し、

排出抑制のために実行可能かつ具体的な政策を策定、評価するためには、エネルギー需要サイドに立った個々のエネルギー消費技術の変化と消費者の機器選択行動を追跡するモデルが必要となる。この観点から筆者らは、システム総費用を最適化基準とする技術最適化モデルと個々のエネルギー技術の詳細な情報に基づいたアカウンティング型モデルを結合したエンドユーザのエネルギー技術モデルの開発を行った。この開発モデルは、以下のような長所を持つ。

- 1) 技術の代替現象を中心に扱い、その競合効果もたらす省エネ技術の導入状況、二酸化炭素排出量の抑制効果および削減費用負担を具体的な機器選択行動に直結できる。
- 2) 推計計算は、各エネルギー消費主体の費用最小化行動をモデル化し実行している。市場での集約的表現に重点を置くトップダウン型モデルに比べ、本モデルは主体間の利害得失を明示的に表現している。
- 3) さまざまな政策オプションを組み合わせたときの排出抑制効果や削減費用等を比較することができ、排出抑制対策のトレードオフを分析する政策支援ツールとして有利である。

一方、本モデルには、以下のような欠点がある。それらは、

- 1) マクロ経済社会指標は、エネルギーサービス需要のシナリオとしてモデルに外生的に与えられ、内生的に決定されない。したがって、エネルギー消費部門から市場経済全体へのフィードバック効果を記述することができない。
- 2) 消費者の省エネに対する知識や情報の欠如、省エネ技術に対する投資能力など社会的、経済的障害を考慮していないため、予測結果に誤りが生ずる。

などである。これらは、ボトムアップ型モデルが共通して抱える問題の場合もあり、本モデルが発達途上であることに起因するものもある。したがって、本研究結果を解釈するにはこれらの点に注意する必要がある。

3. エネルギー消費技術の選択基準

本モデルでは、各エネルギー消費主体が必要とするエネルギーサービスを、あらかじめ与えられた技術を組み合わせることによって充足させる。この時、機器選択の基準としては、エネルギー供給などの制約条件下にて、その技術使用に係わる費用の現在評価額がもつとも小さい組み合わせを考える。その際、技術ストックの履歴などが問題となるが、本モデルではそれらを明示的に取り扱う。

(1) 費用の評価方法

機器選択において評価の対象となる諸費用とは、エネルギーサービス機器（エネルギー消費技術）に関する固定費用、燃料費用など維持管理に係わる費用を合算したものである。本モデルでは、サービス機器費用の評価方法として以下の二つの方法を採用する。一つは、購入から償却までの費用を、時間的割引を考え年価に換算したALC (Annualized Life-cycle Cost) 法であり、もう一つは、オプション間の初期投資費用増を維持管理費用減で回収する期間長によって評価する回収期間法 (Pay-back Time Method, PTM) である。後者の場合、資本利子率による調整は行っていない。

機器*i*に係わる諸費用を c_i で表すと、ALC法による諸費用の年価は以下の式で算出される。

$$c_{i(ALC)} = P_i \cdot [P \rightarrow M]_{L_i}^0 + \sum_{k=1}^N E_{i,k} \cdot p_k \quad (1)$$

ここに、 P_i は機器*i*の導入時の現価であり、エネルギー費用以外の諸費用はすべて本項に含めるものとする。 $[P \rightarrow M]_{L_i}^0$ は資本回収係数、 $E_{i,k}$ は機器*i*が必要とする第*k*種のエネルギー消費量、 N は使用エネルギー種の数、 p_k は第*k*種のエネルギー価格を表す。資本回収係数は、次式によって算定される。

$$[P \rightarrow M]_{L_i}^0 = \frac{\theta(1+\theta)^{L_i}}{(1+\theta)^{L_i} - 1} \quad (2)$$

ここに、 θ は資本利子率、 L_i は機器の余命を表す。

一方、回収期間法 (PTM) に基づく評価の場合は、次式を使用する。

$$c_{i(PTM)} = \frac{P_i}{\min(T, L_i)} + \sum_{k=1}^N E_{i,k} \cdot p_k \quad (3)$$

ここに、 T は基準回収年長である。

(2) コーホートの入れ替え基準

本モデルで対象とするシステムでは、外部からのエネルギー投入をもとに、エネルギーサービスに転換する機器群が作動し、外生的に定めた量以上のエネルギーサービスを産出する。その際、機器群はシステムへの参入の時期によってコーホート（ビンテージ）に分けられ、耐用期間が終わったものは退役する。技術選択は、時間に沿って区分された期毎に行い、各期の機器ストック量、改良量、退役量及び新規参入量などを考慮し、その期のサービス需要量を満たすことが出来るように調整が行われる。本モデルでは、サービス機器、技術改良などに関し以下の前提を設けている。

- 1) 各サービス機器は、1種類以上のエネルギーを消費し、1種類以上のサービスを産出するものである。
- 2) サービス機器量はその技術を実現している機器の産出サービス量によって計測する。

3) 各技術には改良箇所の付加程度により、1, 2, 3, ... なる改良段階を表す数値を割り振り、これを技術段階と称する。技術段階を表す数値は、導入年が新しいものほど大きくなる。

4) 技術導入年及び技術段階別にサービス効率、エネルギー効率、初期費用が定まっている。技術種及び導入期別の機器の1群をコーホートと称する。各コーホートには、属性としてサービス量供給能力、エネルギー消費特性、余命（機器寿命 - 使用期間）が付与されている。

サービス需要量の変化、機器の退役及び技術改良は、コーホートの入れ替えを発生させる。その際、3種類のコーホート変化が問題となる。第一は、機器の余命が0になったことによる退役及び需要サービス増大に伴う新規機器の導入である。第二は、既参入の機器の改良に伴う変化である。第三は、コーホートの余命が残っているにも拘わらず、新規機器によって既参入のコーホートが代替される場合である。新規機器の導入にあたっては、式(1)、または(3)に示した費用を計上する。既参入機器の改良には、改良前の段階と改良後の段階の固定費用差及び改良後の維持管理費用を年価に換算したものを計上する。第三の場合の費用は、第一の場合と同じである。この場合は、代替される既参入コーホートの未償却費用は考慮せず埋没費用とみなす。

4. 線形計画法による定式化

モデルでは、第3章の機器選択の基準に基づいてエネルギー技術の組み合わせを決定する。具体的な技術の組み合わせは線形計画法にて求解する。ここでは、モデルの定式化について詳述する。

(1) モデルの構成要素

本モデルでは、エネルギー消費技術を中心にして各技術に投入されるエネルギーや各技術の産出するサービスをシステム全体で一体化して扱う。このエネルギーサービスシステムを構成する要素としては、最終サービス、外生エネルギー、サービス機器（エネルギー消費技術）及び中間サービス、内生エネルギーの4種類がある。

最終サービスとは、システム内のサービス機器群によってシステム外に提供されるサービスのことを言う。家庭、業務部門における冷暖房や照明などのサービス、紙・パルプ業における洋紙、板紙など製品生産がその例である。最終サービス需要量の将来推計値は、経済成長率や将来人口推計等の社会経済シナリオに基づいて外生的に与える。

外生エネルギーとは、サービス機器群の作動に必要な

となりその全需要量をシステムの外から持ち込むエネルギーのことを言う。一部あるいは全量をシステム内で生成するエネルギー種はこれに含めず、後述の内生エネルギー種に分類する。ただし、実質的にはエネルギーではないが、サービス機器に投入されるときに温室効果ガスを発生するような関連財（例えば、鉄鋼業及びセメント工業にて使用される石灰石）がある場合、これも便宜上、外生エネルギーとして取り扱っている。

サービス機器とは、1種以上のエネルギー等を消費して1種以上のサービスを提供するものである。サービス機器には、サービス機器種、技術段階、寿命、初期費用、1ストック量あたりのエネルギー消費量及びサービス提供量が基本データとして付与している。ただし、本モデルを用いて複雑なエネルギーシステムを取り扱う場合、実際にエネルギーからサービスへの転換を行わないにも拘わらず、システムに課されている種々の制約条件を取り扱う便宜上、仮想のサービス機器を配置するほうが都合の良い場合がある。こうした仮想機器をフロー制御端と称する。

内生エネルギー／中間サービス種とは、システム内のサービス機器の入力及び出力となるエネルギーあるいはサービスの種類のことである。例えば、システム内で生成・使用される自家発電による電力やコージェネレーション電力、産業部門における中間生成品（鉄鋼業における粗鋼や銑鉄）などをこれに含める。図-1に鉄鋼部門におけるエネルギーサービスシステムのフロー図を示す。これは、第5章にて使用しているもので、外生エネルギーが最終サービスである冷間製品、熱間製品に変換されていく様子を図示している。

以上のモデル構成要素の具体例については次章で説明する。

(2) サービス機器の特性値

サービス機器は、システムへの参入時期によりコーホートに分けられ、各コーホートは技術係数と費用係数で特徴づけられる。技術係数には、 $A_{j,i}$ 、 $E_{i,k}$ 及び L_i があり、それぞれ、第 i コーホート単位が提供する第 j サービスの量、第 i コーホート単位が必要とする第 k エネルギーの量及び第 i コーホートの余命（寿命－使用年数）を表す。また、費用係数とは、 P_i で表し、第 i コーホート単位あたりのコーホート導入時の現価を表す。

(3) システム変数

サービス機器の導入・決定にあたって制御できるシステム変数には以下のものがある。全部で $lp.var$ 種とし、各コーホート毎は[]で示される範囲の変数番号がプログラム中にて割りあてられる。 $lp.var$ は $n4v$ と同

値である。一方、コーホートの数は全部で isd とし、下の $n3v$ と同値である。

a) サービス機器ストック量

前期までのサービス機器導入分で、今期は改善せず使用する機器量 $\{1, n1v\}$ 。

b) 改善機器量

前期に使用していたサービス機器のうち、今期は改良して使用する機器量 $\{n1v+1, n2v\}$ 。

c) 新規の機器導入量

今期に新規に導入するサービス機器量 $\{n2v+1, n3v\}$ 。

d) 外部から購入する内生エネルギー量

外部からの購入量を含めた内生エネルギー種の全生成量を内生エネルギー量と称し、そのうち外部から購入する量をシステム変数とする $\{n3v+1, n4v\}$ 。

(4) 制約条件

各システム変数が非負である条件に加えて、ストック機器量、サービス量、外生エネルギー及び内生エネルギー／中間サービス量に関して、以下の制約条件を設ける。

a) 現有機器量（前期以前の導入コーホート）に関する条件

前年での対応するコーホートのストック量 x_{0i} が、今期の未改良量 x_i 及び改良量 $x_{i'}$ の和を下回らないことから、

$$x_i + x_{i'} \leq x_{0i} \quad i = 1 \sim n1v \quad (4)$$

なお、 i' は、コーホート i から改良されて生成されるコーホートの番号を表す。

b) 改善可能量に関する条件

サービス機器 s の今期の改善可能量を $X_{rf,s}$ とすると、

$$\sum_{i=n1v+1}^{n2v} \delta_{sd,s,i} \cdot x_i \leq X_{rf,s} \quad (5)$$

ここに、 $\delta_{sd,s,i}$ は第 i のコーホートの機器種が s の時に1、それ以外の時には0となる関数である。 s は $1 \sim nsd$ の範囲をとる。ここで、 nsd はサービス機器数である。

c) 新規参入可能量に関する条件

コーホート i の今期の参入可能量を $X_{rc,i}$ とすると、

$$x_i \leq X_{rc,i} \quad i = n2v+1 \sim n3v \quad (6)$$

あるいは、機器 s の総ストック量に上限が定められているときには、機器 s の許容最大ストック量を $X_{rc,s}$ として、

$$\sum_{i=1}^{n3v} \delta_{sd,s,i} \cdot x_i \leq X_{rc,s} \quad (7)$$

とする。また、機器 s のサービス種 j へのサービス分担比率に上限が定められているときには、その上限率を

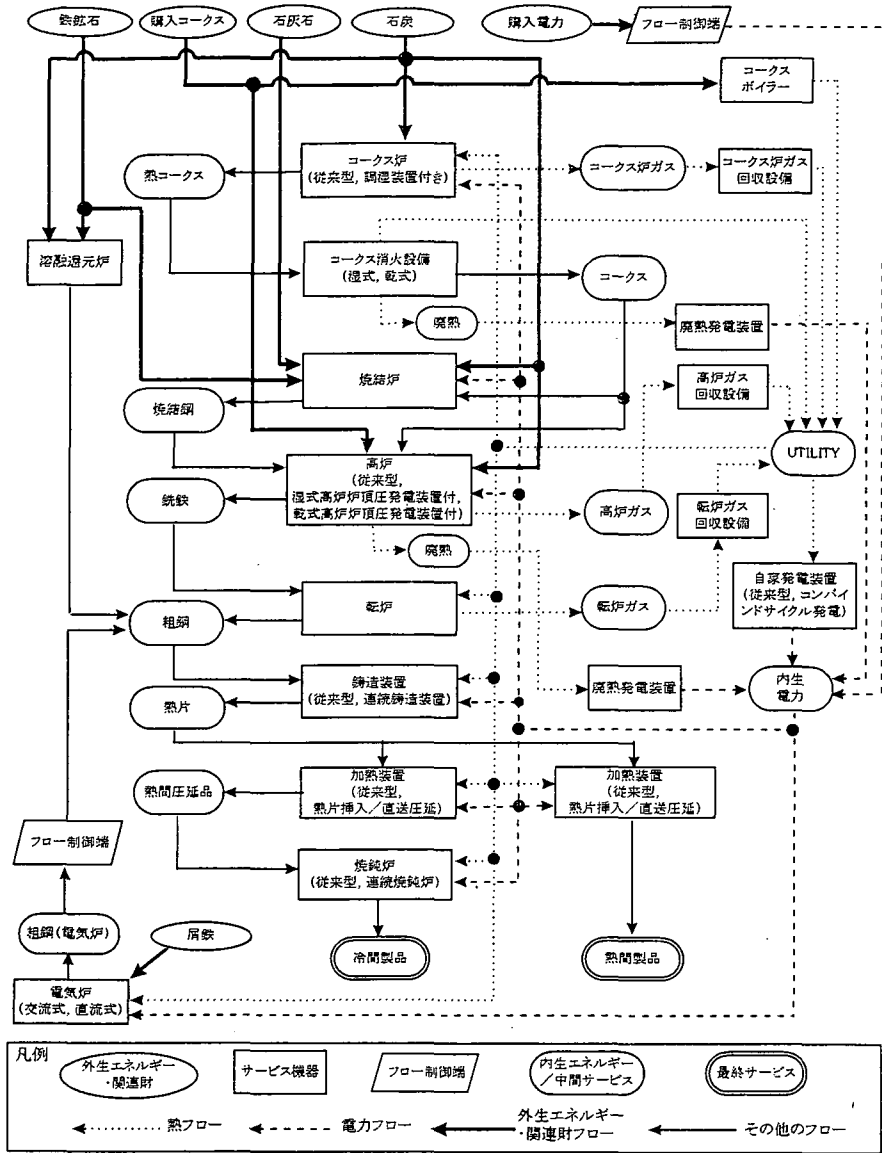


図-1 鉄鋼部門におけるエネルギーサービスシステムのフロー図

$U_{s,j}$ とし、

$$\sum_{i=1}^{n3v} \delta_{sd,s,i} \cdot A_{j,i} \cdot x_i \leq U_{s,j} \sum_{i=1}^{n3v} A_{j,i} \cdot x_i \quad (8)$$

なる条件を課す。s は 1~nsd の範囲をとる。

d) 需要サービス量を満足できる条件

各サービス機器からのサービス提供量は、需要サービス量 S_j を満足していなければならない。

$$\sum_{i=1}^{n3v} A_{j,i} \cdot x_i \geq S_j \quad j = 1 \sim nsu \quad (9)$$

ここに、 S_j は第 j 種の需要サービス量。nsu は最終サービス種と中間サービス種を合わせた数。j が最終サービス種を示すとき、 S_j は最終サービス量となる。j が中間サービス種を示すとき、 S_j は対応する中間サービス量より外部からの内生エネルギー量、すなわち外部購入エネルギー量 x_l を控除したものであるから、

$$S_j = -x_l + \sum_{i=1}^{n3v} x_i \cdot E_{i,l} \quad l = n3v + 1 \sim n4v \quad (10)$$

となる。ここに l は中間サービス種 j に対応する内生エネルギー番号である。 $E_{i,l}$ は、第 i コーホート一単位が消費する第 l 種のエネルギー消費量を表す。

e) エネルギーの制約条件

第 k 種のエネルギーの供給量に制約がある場合は、制約条件を有する第 k 種のエネルギー番号を k' 、その最大供給量を $Q_{k'}$ とし、

$$\sum_{i=1}^{n3v} x_i \cdot E_{i,k} \leq Q_{k'} \quad k' = 1 \sim nengcst \quad (11)$$

となる。内生エネルギー種の場合には、

$$x_k \leq Q_{k'} \quad k' = 1 \sim nengcst \quad (12)$$

となる。ここに $nengcst$ はエネルギーの制約条件式の数である。

(5) 目的関数

以上の制約条件下で、次式の線形和を各期について最小化するサービス機器の組み合わせを求める。

$$\sum_{i=1}^{n3v} C_i \cdot x_i \rightarrow minimum \quad (13)$$

C_i をコスト係数と称す。これは、ALC法の場合、各コーホートに付与する技術係数、費用係数等を用いて、コーホート毎に以下のように表される。

$$C_i = \begin{cases} (1 - \varepsilon \cdot L_i) \cdot \sum_{k=1}^N E_{i,k} \cdot p_k & , \quad i = 1 \sim n1v \\ (1 - \varepsilon \cdot L_i) \cdot \left\{ \Delta P_i \cdot [P \rightarrow M]_{L_i}^0 + \sum_{k=1}^N E_{i,k} \cdot p_k \right\} & , \quad i = n1v + 1 \sim n2v \\ (1 - \varepsilon \cdot L_i) \cdot \left\{ P_i \cdot [P \rightarrow M]_{L_i}^0 + \sum_{k=1}^N E_{i,k} \cdot p_k \right\} & , \quad i = n2v + 1 \sim n3v \\ p_{k'} & , \quad i = n3v + 1 \sim n4v \end{cases} \quad (14)$$

ここに、 ε は、微小な正数である。これに、コーホートの余命 L_i を乗ずることにより、同一コストのときには余命が短いものから機器の置き換えが行われるような効果をもたらす。 N はエネルギー種の数であり、 p_k は第 k エネルギーの価格である。また P_i は第 i コーホートの導入時の現価であり、 ΔP_i とは第 i コーホートの改良費用である。内生エネルギーの外部からの購入分に関するコスト係数 $p_{k'}$ とは、変数番号 i に対応するエネルギー種（番号 k' ）の価格である。回収期間法による評価では、資本回収係数 $[P \rightarrow M]_{L_i}^0$ の替わりに $1/\min(T, L_i)$ を使用する。

5. わが国のエネルギー消費部門に対する適用例について

(1) 主要な設定条件について

本研究では、開発モデルの適用例としてわが国の家庭、業務及び主要産業部門を対象として取り上げ、計算間隔を1年として、2010年までの二酸化炭素排出量の推計を行った。計算基準年は1990年とし、基準年におけるコーホートの調整及び二酸化炭素排出量のキャリブレーションを行った。キャリブレーションに使用した対照データは、環境庁によりまとめられたもの⁵⁾を使用した。費用の評価方法は回収期間法を採用し、基準回収年長を3年とした。

最終サービス需要量の見通しを求める上でベースとなる経済成長率については、1995年12月にわが国政府が策定した新経済計画に基づき、2000年までを年率3.0%とし、それ以後は2.0%と仮定した。エネルギー供給量に関する制約は考慮しないものとした。また、エネルギー価格は、1994年6月に公表された総合エネルギー調査会長期エネルギー需要の見通し⁶⁾に基づいた。

本研究では、技術選択に関し3つのシナリオを想定した。第一はサービス分担率固定シナリオであり、第二、第三は技術選択シナリオである。技術選択シナリオでは、エネルギー転換部門における省エネ・新エネ対策を考慮する場合と考慮しない場合の2つのシナリオを想定した。サービス分担率固定シナリオとは、各サービス機器の各サービス種に対する分担量の比を、データを入手し得る最新年にて固定し、以後、分担率の変化はないとしたシナリオである。したがって、サービス分担量の比を固定した年にて未導入の技術は、将来も選択の対象とならない。一方、技術選択シナリオとは、エネルギー消費主体が費用最小化の基準から技術を選択するシナリオである。その際、機器生産等の観点から機器の最大普及率を想定し、その範囲にて機器選択者は、技術の初期費用の低下やエネルギー価格の変化及びサービス需要の拡大に応じて手持ちの機器を買い換えたり、新しく追加購入したりすることが可能であると仮定した。

エネルギー転換部門の省エネ、新エネ対策を考慮した技術選択シナリオとは、1) 既設の石油、LNGおよび石炭火力発電所を改造し、出力の増加や発電効率の上昇を図るリパワリング、2) LNG火力におけるコンバインドサイクル発電、アドバンストコンバインドサイクル発電の新設、3) 石炭火力における加圧流動床コンバインドサイクル発電、石炭ガス化複合サイクル発電の新設、4) 原子力発電プラントの原子力部以外で出力改善を図るパワーストレッチング、5) 太陽光、風力、廃棄物の新エネルギーの普及、を考慮したものである。電

表-1 家庭部門の技術データ一覧

技術名	サービス/ エネルギー	初期費用 (千円)	寿命 (年)	サービス 量 ¹⁾	エネルギー 消費量 ²⁾
冷房専用エアコン	冷房/電力	129.0	6	0.180	2.132
ヒートポンプエアコン (従来型)	冷房/電力	225.0	6	0.296	23.622
ヒートポンプエアコン (インテグレートタイプ)	暖房/電力	225.0	6	0.430	23.622
ヒートポンプエアコン (ガス暖房、電気冷房)	冷房/電力	260.0	6	0.296	2.786
ヒートポンプエアコン (電気暖房、TWIN CO2型)	暖房/電力	260.0	6	0.430	12.719
ヒートポンプエアコン (石油暖房、電気冷房)	冷房/電力	260.0	6	0.287	9.266
ヒートポンプエアコン (ガス暖房、電気冷房)	暖房/ガス	260.0	6	0.396	43.448
Rooftop Flue エアコン	暖房/電力	260.0	6	0.396	9.266
ヒートポンプエアコン (石油暖房、電気冷房)	冷房/電力	390.0	6	0.316	8.732
ヒートポンプエアコン (暖房/灯油)	暖房/灯油	390.0	6	0.530	6.073
ヒートポンプエアコン (暖房/電力)	暖房/電力	390.0	6	0.530	8.732
石油ストーブ	暖房/灯油	24.0	6	0.242	25.493
石油ファンヒーター	暖房/灯油	70.0	6	0.352	37.046
石油FF式温風機	暖房/電力	70.0	6	0.352	1.582
石油FF式温風機	暖房/灯油	118.0	6	0.358	40.579
石油FF式温風機	暖房/電力	118.0	6	0.358	1.373
ガスファンヒーター	暖房/ガス	49.8	6	0.220	21.456
ガスファンヒーター	暖房/電力	49.8	6	0.220	0.398
ガスFF式暖房機	暖房/ガス	133.0	6	0.440	51.494
ガスFF式暖房機	暖房/電力	133.0	6	0.440	0.406
電気ストーブ	暖房/電力	21.5	6	0.107	10.728
電気セラミックファンヒーター	暖房/電力	33.0	6	0.140	12.874
石油給湯器	給湯/灯油	244.0	15	1.000	40.009
ガス給湯器	給湯/ガス	136.0	15	1.000	44.941
湯熱回収型ガス給湯器	給湯/ガス	149.6	15	1.000	40.419
電気温水器	給湯/電力	190.0	15	1.000	32.807
太陽熱温水器	給湯/太陽熱	550.0	33	0.600	0.000
ソーラーシステム	給湯/太陽熱	190.0	10	0.300	0.000
電力多機能ヒートポンプ	冷房/電力	426.0	6	0.672	50.069
電力多機能ヒートポンプ	暖房/電力	426.0	6	0.885	50.069
電力多機能ヒートポンプ	給湯/電力	426.0	6	0.320	50.069
ガスヒートポンプ	冷房/ガス	1,370.0	6	0.919	187.688
ガスヒートポンプ	暖房/ガス	1,370.0	6	1.055	187.688
石油ヒートポンプ	冷房/灯油	255.0	6	0.919	187.688
石油ヒートポンプ	暖房/灯油	255.0	6	1.055	187.688
断熱材(新設戸建)1	暖房/太陽熱	477.9	33	0.640	0.000
断熱材(新設戸建)2	暖房/太陽熱	391.4	33	0.540	0.000
断熱材(新設戸建)3	暖房/太陽熱	283.3	33	0.550	0.000
断熱材(新設戸建)4	暖房/太陽熱	196.8	33	0.460	0.000
断熱材(新設集合住宅)1	暖房/太陽熱	226.6	33	0.590	0.000
断熱材(新設集合住宅)2	暖房/太陽熱	554.0	33	0.520	0.000
断熱材(既設戸建)	暖房/太陽熱	605.3	33	0.090	0.000
断熱材(既設集合住宅)	暖房/太陽熱	532.8	33	0.070	0.000
白熱灯	照明/電力	0.2	1	0.036	0.500
電球型蛍光灯	照明/電力	2.1	6	0.036	0.132
インバータ蛍光灯	インバータ照明/電力	1.0	7	0.036	0.124
テレビ	テレビ/電力	41.2	5	0.570	1.823
冷蔵庫	冷蔵/電力	67.1	6	0.850	6.326
洗濯機	洗濯/電力	54.7	6	0.950	0.375
掃除機	掃除/電力	29.4	6	0.830	0.823
乾燥機	乾燥/電力	57.7	6	9.920	3.044
電子レンジ	レンジ/電力	58.4	6	2.320	0.981
厨房等その他	厨房等その他/電力、ガス	0.0	6	1.000	6.960
太陽光発電	電力/太陽熱	2.0	20	0.00994	0.000

1) サービス量の単位: サービス/a

2) エネルギー消費量の単位: 10⁸cal/a

- 断熱材(新設戸建)1 : グラスウール 100mm + ペアガラス
- 断熱材(新設戸建)2 : グラスウール 50mm + ペアガラス
- 断熱材(新設戸建)3 : グラスウール 100mm + シングルガラス
- 断熱材(新設戸建)4 : グラスウール 50mm + シングルガラス
- 断熱材(新設集合住宅)1 : ポリスチレン 25mm + ペアガラス
- 断熱材(新設集合住宅)2 : ポリスチレン 25mm + シングルガラス
- 断熱材(既設戸建) : ペアガラス
- 断熱材(既設集合住宅) : ペアガラス

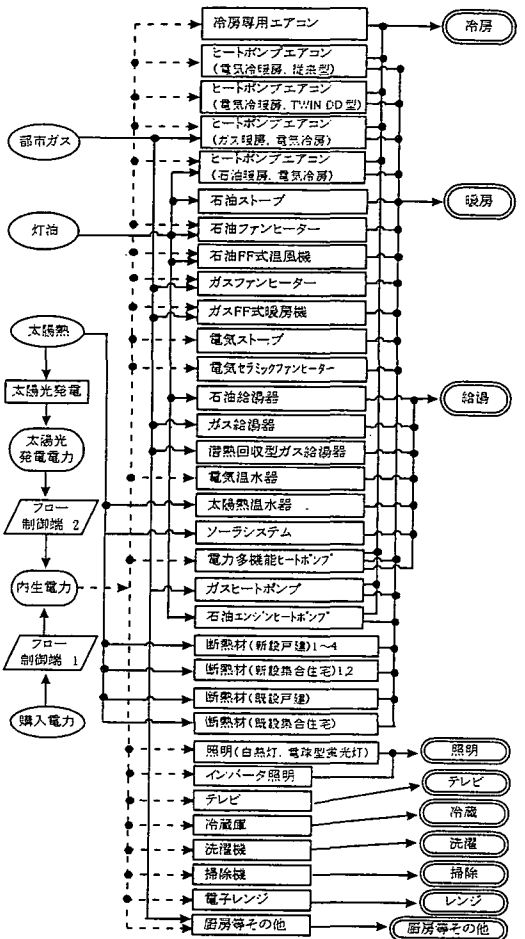


図-2 家庭部門のエネルギーサービスシステムのフロー図(凡例は図-1に同じ)

気事業者の対策により、将来の電力構成が変化し、エネルギー転換部門におけるエネルギー消費量及びエネルギー構成が変化する。その根拠となる各発電施設の発電容量、改良計画スケジュールおよび新エネルギーの将来見通しについては、電気事業審議会需給部会中間報告等⁷⁾⁸⁾に従い算定した。

ただし本モデルでは、エネルギー転換部門を独立の

エネルギー消費部門として扱わず、この部門からの二酸化炭素排出量は家庭、業務、産業各部門に割り振って計上している。

(2) 家庭及び業務部門について

家庭部門及び業務部門のエネルギーサービスシステムのフロー図を図-2及び図-3に示す。家庭部門のエネ

表-2 業務部門の技術データ一覧

技術名	サービス/ エネルギー	初期費用 (千円)	寿命 (年)	サービス 量 ¹⁾	エネルギー 消費量 ²⁾
コージェネレーション (G.E., ガスエンジン)	暖房/ガス	200	30	12.09	58.34
	電力/ガス	200	30	14.53	58.34
	冷房/ガス	200	30	2.53	58.34
コージェネレーション (G.T., ガスタービン)	給湯/ガス	200	30	13.22	58.34
	暖房/ガス	220	30	18.22	103.92
	電力/ガス	220	30	22.16	103.92
コージェネレーション (G.T., ガスタービン)	冷房/ガス	220	30	3.81	103.92
	給湯/ガス	220	30	19.91	103.92
	暖房/重油	220	30	18.22	103.92
コージェネレーション (G.T., ガスタービン)	電力/重油	220	30	22.16	103.92
	冷房/重油	220	30	3.81	103.92
	給湯/重油	220	30	19.91	103.92
コージェネレーション (D.E., ディーゼルエンジン)	暖房/重油	200	30	10.71	77.61
	電力/重油	200	30	27.10	77.61
	冷房/重油	200	30	2.24	77.61
コージェネレーション (D.E., ディーゼルエンジン)	給湯/重油	200	30	11.71	77.61
	暖房/電力	380	10	25.56	9.59
	冷房/電力	1270	20	68.99	233.00
暖房/ガス	1270	20	160.80	233.00	
電気暖房	暖房/電力	580	10	63.60	18.68
石油暖房	暖房/重油	1186	10	240.00	304.13
ガス暖房	暖房/ガス	1186	10	240.00	278.40
石炭暖房	暖房/石炭	1186	10	240.00	304.13
新築断熱建築 ³⁾	暖房/太陽熱	42.4	30	0.34	0.00
石油ボイラー	給湯/重油	1186	20	240.00	304.13
ガスボイラー	給湯/ガス	1186	20	240.00	278.40
太陽熱温水器	給湯/太陽熱	1010	20	30.60	0.00
石炭ボイラー	給湯/石炭	1186	10	240.00	304.13
蓄熱回収型温水ボイラー	給湯/ガス	1304.6	20	240.00	250.56
在来型蛍光灯	照明/電力	14.3	10	0.01	0.51
Hiインバート蛍光灯	照明/電力	10.77	10	0.01	0.33
センサー付照明	照明/電力	11.54	10	0.01	0.24
通常誘導灯	非常口照明/電力	0	10	0.01	0.01
高輝度誘導灯	非常口照明/電力	0	10	0.01	0.00
計算機	計算/電力	6.1	6	0.01	0.02
複写機	複写/電力	0.3	6	0.01	0.02
エレベーター	昇降/電力	6.9	17	0.01	0.03
その他動力	その他動力/電力	0	6	0.01	0.34
ガス厨房	厨房/ガス	0.1	6	0.01	0.16
石炭厨房	厨房/石炭	0.1	6	0.01	0.16
太陽熱発電	電力/太陽熱	3.5	20	0.01	0.00

- 1) サービス量の単位: 冷暖房、給湯サービスは 10^3 cal/a 、
その他は $10^6 \text{ cal/m}^2/\text{a}$
- 2) エネルギー消費量の単位: 10^6 cal/a
- 3) 新築断熱材建築: スタイロフォーム(50mm) + ペアガラス

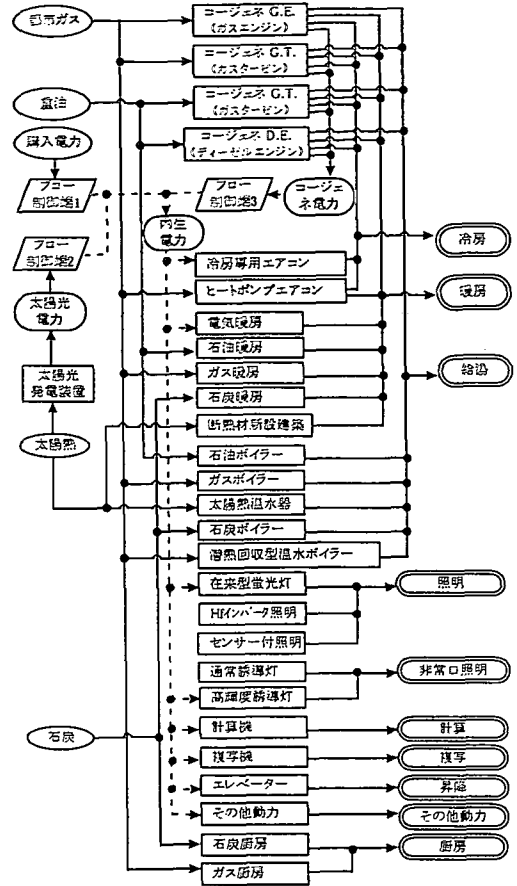


図-3 業務部門のエネルギーサービスシステムのフロー図(凡例は図-1に同じ)

表-3 家庭、業務部門の最終サービス需要量シナリオ

部門	サービス種	需要量の増加要因	基準年 サービス量 ¹⁾	需要量の増加率(基準年を1とする)			
				1990	1993	2000	2010
家庭	冷房	世帯数*世帯面積*冷房強度	4.555×10^8 サービス	1.401	-	2.639	4.810
	暖房	世帯数*世帯面積*暖房強度	11.505×10^8 サービス	1.178	-	1.596	2.080
	給湯	世帯数*湯量*給湯強度	38.500×10^8 サービス	1.151	-	1.451	1.775
	在来型照明	世帯数*明るさ	10.384×10^8 サービス	1.093	-	1.289	1.473
	インバート照明	世帯数*明るさ	17.682×10^8 サービス	1.093	-	1.289	1.457
	テレビ	世帯数*保有率*高性能化	38.500×10^8 サービス	1.175	-	1.602	2.093
	冷蔵庫	世帯数*保有率*高性能化	38.500×10^8 サービス	1.299	-	2.166	3.462
	洗濯	世帯数*保有率	38.500×10^8 サービス	1.085	-	1.260	1.403
	掃除	世帯数*保有率	38.500×10^8 サービス	1.111	-	1.354	1.581
	レンジ	世帯数*保有率	38.500×10^8 サービス	1.225	-	1.817	2.582
	厨房等その他	世帯数等	38.500×10^8 サービス	1.290	-	2.122	3.344
業務	冷房	床面積*冷房強度	$492.8 \times 10^6 \text{ cal}$	1.000	1.089	1.196	1.369
	暖房	床面積*暖房強度	$894.6 \times 10^6 \text{ cal}$	1.000	1.089	1.196	1.369
	給湯	床面積*給湯強度	$737.4 \times 10^6 \text{ cal}$	1.000	1.089	1.196	1.369
	照明	床面積*照明強度	$12.7 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	1.089	1.196	1.369
	非常口照明	床面積*照明強度	$12.9 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	1.089	1.196	1.369
	計算	計算機用電力消費量	$12.7 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	-	-	2.090
	複写	複写機用電力消費量	$12.7 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	-	-	1.728
	昇降	事務所ビルの床面積のうち中層以上の割合	$12.7 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	1.120	1.291	1.786
	厨房	床面積*厨房強度	$12.7 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	1.089	1.196	1.369
	その他	床面積*強度	$12.7 \times 10^3 \text{ m}^2$	1.000	1.089	1.196	1.369

1) サービス量の基準年: 家庭部門は1985年, 業務部門は1990年.

ルギーサービスフローはシンプルな構造をしているが、ヒートポンプエアコンや各種ヒートポンプのように一つの機器で複数のサービスを提供するものが多い。業務部門では、エネルギーを多段利用するコージェネレーションシステムが特徴的である。コージェネレーションシステムは、発電により電力を得ると同時に、燃料消費の際の排熱を冷暖房及び給湯サービスとして有効利用する。

表-1及び表-2には、家庭及び業務部門のサービス機器の技術的、経済的特性値の一覧を示す。これらのデータは各業界へのヒアリングなどにより採取した。

各技術の提供サービス量の計測単位はサービス種ごとに異なる。家庭部門では、基準年の基準住宅（床面積86.5m²）を想定し、基準住宅一世帯が必要とする年間サービスを1サービスと定義した。1サービス当たりの冷房用のエネルギー消費量は、冷房負荷（200W/m²）に基準住宅の各部屋の冷房時間、年間冷房期間及び床面積を乗じ、冷房カロリー量（4,793Mcal/世帯/a）として算定した。この1サービスに必要な消費エネルギー量を機器1ストックでどれだけを満足させることができるかにより、その機器1ストックの提供サービス量を決定する。例えば、従来型ヒートポンプエアコン一台は、この基準住宅の必要とする冷房サービスの29.6%のサービス能力を持つので、表中のサービス量は0.296サービスとなる。

業務部門の場合、冷暖房及び給湯サービスに関しては、機器1ストックが提供する冷暖房、給湯カロリー量を単位サービスとし、照明（一般照明、非常口照明）、計算、複写、昇降、厨房およびその他動力の各サービスに関しては、機器1ストックの床面積当たりの消費エネルギー量を単位サービスとした。

モデルの実行には、基本的な技術データのほかに、1)最終サービス需要量に関するシナリオ、2)サービス分担率に関するシナリオ、3)サービス機器の効率改善に関するシナリオが必要である。1)及び2)は、対象とする全てのサービスあるいは機器に対して必須の設定項目であるが、3)については必要に応じ設定すればよい。

本分析で想定したサービス需要量シナリオを表-3に示す。家庭部門における最終サービス量の単位は、上述の定義と同じ任意に定めた量である。業務部門では、冷暖房、給湯についてはカロリー量を、その他のサービスについては、床面積をサービス単位とした。需要量の変化は、サービス種毎に需要量の増加をもたらす要因を考え、基準年のサービス量とその増加要因の将来変化シナリオから推計した。世帯数の変化は、厚生省人口問題研究所の推計値⁹⁾をもとに算定した。その他の各増加要因の将来変化は、社会経済シナリオとは独立に諸資料および業界ヒアリングに基づき算定した。

サービス分担率の変化シナリオ及び改良シナリオについても、諸資料、メーカーヒアリングに基づき設定した。機器のサービス分担率に制約がない場合は、最大の分担率を100%とし、制度的、経済的な制約がある場合はその制約条件に従った。例えば、家庭部門のソーラーシステムが給湯サービスに占める分担率は、最大で10%であるとした。

(3) 主要な産業部門について

産業部門については、鉄鋼業、紙・パルプ業、セメント工業、石油化学工業及びその他の産業部門に分類し、前者4部門について本論文のモデルを用いた排出量推計計算を行った。その他産業部門については、産業生産額の見通し¹⁰⁾と使用エネルギー構成比から排出量の推定を行った。本研究で扱った産業4部門の技術種は表-4に示す通りである。産業部門の技術数は、約100種に及ぶ。表-5には、例として鉄鋼業における一部のエネルギー消費技術の技術特性値を示した。技術1単位のサービス量およびエネルギー消費量は、粗鋼1トン生産あたりで計測したものである。

産業各部門では、従来型の生産技術に代わる多くの省エネ型技術の導入が見込まれている。中でも鉄鋼業の溶融還元炉と電気炉は、高炉製鉄に代わる技術で、二酸化炭素の排出抑制の効果は大きい。産業各部門では、購入電力のほかに自家発電によって電力を賅っている。エネルギー効率の改善策として燃焼管理を行う発電ボイラー、廃熱発電、自家発電装置のリパワリングやコンバインドサイクル化など多くの省エネ対策が存在する。

産業各部門の最終サービス需要量は、粗鋼、紙・板紙、セメント、エチレンの各生産量の見通し¹¹⁾に基づいて算定した（表-6）。セメント工業については次のような仮定をした。2000年以降の高炉セメント生産量は、セメント生産量に対して一定の割合で生産されるとし、フライアッシュセメントは、1994年以降も1994年における全セメント生産量に対する生産量比を維持するものとした。輸出用ポルトランドクリンカは、他の産業部門での仮定と同様にセメント生産量と等しい増加率で生産されるものとした。ポルトランドセメントは、セメント生産量からフライアッシュセメント及び高炉セメントを控除したものとした。

(4) シミュレーション結果

a) 二酸化炭素排出量の推計結果

家庭、業務及び産業部門の2010年までの二酸化炭素排出量の推計結果を表-7に示す。図-4及び図-5は、これを1990年から2010年の間で時系列的にプロットしたものである。

サービス分担率固定シナリオによる推計では、2000

表-4 産業部門におけるエネルギー消費技術

部門	分野	技術種
鉄鋼業	鉄鋼業	コークス炉 調整装置付きコークス炉 湿式コークス消火設備 乾式コークス消火設備 コークス炉ガス回収設備 高炉 湿式高炉炉頂圧発電付き高炉 乾式高炉炉頂圧発電付き高炉 転炉 転炉排ガス回収設備 铸造装置 連続铸造装置 従来型加熱装置 熱片装入/直送圧延 焼鈍炉 連続焼鈍炉 コークスボイラー 廃熱発電装置 従来型自家発電装置 コンバインドサイクル発電装置 交流式電気炉 直流式電気炉 溶融還元炉
		チェープミル 予備粉砕機 NSP/SPギルツ以外 NSP/SPギルツ
産業	セメント工業	高効率クリンカークラ 流動床式焼成炉 壁型ミル 重油ボイラー 重油ボイラー 石炭ボイラー 回収廃熱発電 自家発電装置 コンバインドサイクル発電装置 ナフサ分解反応装置 高性能ナフサ分解反応装置 従来型低密度ポリエチレン製造装置 高性能低密度ポリエチレン製造装置 高密度ポリエチレン製造装置
	石油化学工業	ポリプロピレン製造装置 高性能ポリプロピレン製造装置 エチレンオキシド製造装置 ステレンモノマー製造装置 アセトアルデヒド製造装置 ポリビレンオキシド製造装置 BTX製造装置 石油ボイラー 燃焼管理石油ボイラー 石炭ボイラー ガスボイラー 自家発電装置 コンバインドサイクル発電装置 コージェネレーション 従来型蒸発装置 予備浸透型蒸発装置 従来型洗浄装置 高性能バルブ洗浄装置 従来型脱リグニン装置 酸系脱リグニン装置 ドラム漂白装置 ディフューザー漂白装置 従来型蒸発缶 液膜流下型蒸発缶 従来型サイズプレス装置 高性能サイズプレス装置 従来型脱水装置 高性能面圧脱水装置 従来型ドライヤーフード 高性能ドライヤーフード
紙パルプ業	紙パルプ業	重油ボイラー 石炭ボイラー 黒液ボイラー 自家発電装置(水力、蒸気) コンバインドサイクル発電装置 古紙パルプ製造装置 機械パルプ製造装置 亜硫酸パルプ製造装置 セミケミカルパルプ製造装置

表-5 産業部門の技術データの一部

技術名	サービス/ エネルギー	初期費用 (円)	寿命 (年)	サービス 量 ¹⁾	エネルギー 消費量 ¹⁾
コークス炉	熱コークス/石炭	5,000	20	36.46	53.89
	熱コークス/電力	5,000	20	36.46	0.226
コークス炉+	熱コークス/石炭	5,450	30	36.46	53.89
	熱コークス/電力	5,450	30	36.46	0.226
コークス調整装置	熱コークス/石炭	5,450	30	7.2	53.89
	熱コークス/電力	5,450	30	7.2	0.226
高炉	鉄鉄/焼結鋼	5,826	20	1.057	1.325
	高炉ガス/焼結鋼	5,826	20	12.2	1.325
	鉄鉄/購入コークス	5,826	20	1.057	4.89
	鉄鉄/コークス	5,826	20	1.057	33.24
	鉄鉄/石炭	5,826	20	1.057	4.86
	鉄鉄/電力	5,826	20	1.057	0.262
炉頂圧発電 (湿式)	電力/焼結鋼	6,496	20	0.084	1.325
炉頂圧発電 (乾式)	電力/焼結鋼	6,526	20	0.139	1.325
転炉	粗鋼/鉄鉄	13,439	20	1	1.057
	粗鋼/電力	13,439	20	1	0.799
	転炉ガス/鉄鉄	13,439	20	1.659	1.057
溶融還元炉	粗鋼/鉄鉄石	22,500	20	1	1.39
	粗鋼/石炭	22,500	20	1	48.51
交流式電気炉	粗鋼/屑鉄	864	20	1	0.96
	粗鋼/購入電力	864	20	1	3.94
直流式電気炉	粗鋼/屑鉄	1,080	20	1	1
	粗鋼/購入電力	1,080	20	1	3.75

1) サービス量およびエネルギー消費量単位は、エネルギーであれば 10³cal/ton-粗鋼、製品であれば、ton/ton-粗鋼である。

年度排出量は、家庭部門において46.4MtC/a、業務部門において37.6MtC/a、産業部門において150.0MtC/aとなる。2010年度排出量は、それぞれ1990年排出量の51.0%増、26.8%増、1.8%増である57.4MtC/a、42.6MtC/a、156.6MtC/aとなる。一方、エネルギー転換部門対策を考慮しない技術選択シナリオでの推計では、2000年度排出量は、家庭部門を除いてサービス分担率固定シナリオでの推計値とほぼ等しい。2000年から2010年にかけては各種の省エネルギー技術の普及が進み、2010年度排出量は、家庭部門において

表-6 産業部門の最終サービス需要量シナリオ

部門	サービス種	需要量単位:万トン		
		1994年 需要量	1994~2000 需要量の伸び(年率)	2001~2010 需要量の伸び(年率)
鉄鋼	(粗鋼生産量の見通し)	10137	-2.04%	-0.62%
	熱間鋼材	7209	-2.04%	-0.62%
	冷間鋼材	3465	-2.04%	-0.62%
紙パルプ	(紙板紙生産量の見通し)	285.2	0.92%	0.54%
	洋紙	166.0	0.92%	0.54%
	板紙	119.2	0.92%	0.54%
セメント	(セメント生産量の見通し)	913.7	-0.51%	-0.20%
	高炉セメントのシェア	-	24.9%	24.9%
	ポルトランドセメント	733.2	-1.87%	-0.20%
	フライアッシュセメント	11.2	-0.56%	-0.19%
	高炉セメント	169.3	4.52%	-0.21%
	輸出用PKリソカ	62.7	-0.51%	-0.20%
	その他石油化学製品	913.7	-1.99%	-0.56%
石油化学	(エチレン生産量の見通し)	612.5	-1.99%	-0.56%
	低密度ポリエチレン	164.5	-1.99%	-0.56%
	高密度ポリエチレン	113.0	-1.99%	-0.56%
	エチレンオキシド	87.0	-1.99%	-0.56%
	ステレンモノマー	262.0	-1.99%	-0.56%
	アセトアルデヒド	36.9	-1.99%	-0.56%
	ポリプロピレン	224.0	-1.99%	-0.56%
	アクリルニトリル	61.0	-1.99%	-0.56%
	プロピレンオキシド	31.4	-1.99%	-0.56%
	BTX ¹⁾	1083.8	-1.99%	-0.56%
BB留分	240.0	-1.99%	-0.56%	

1) ベンゼン、トルエン、キシレン合計

51.0MtC/a、業務部門において38.8MtC/a、産業部門において151.8MtC/aの排出量となる。これは、1990年度排出量と比較して34.2%増、15.4%増、1.3%減の排出量である。

b) 技術選択シナリオ下での技術代替の様子

技術の代替状況を以下に詳述する。

- 1) 家庭部門では、石油系燃料を使用する機器から都市ガスを使用する機器への技術代替が排出量の削減をもたらす。1990年度で給湯サービスに占めるガス給湯器の割合は64%であったが、2010年には94%に

表-7 シナリオ別二酸化炭素排出量の推計結果

排出量単位: MtC/a

部門	1990年度実績値	2000年			2010年		
		サービス分担率固定シナリオ	技術選択シナリオ(転換部門対策無し)	技術選択シナリオ(転換部門対策有り)	サービス分担率固定シナリオ	技術選択シナリオ(転換部門対策無し)	技術選択シナリオ(転換部門対策有り)
家庭	38.0	46.4 (+18.1%)	44.7 (+17.6%)	43.2 (+13.7%)	57.4 (+51.0%)	51.0 (+34.2%)	44.9 (+18.2%)
業務	33.6	37.6 (+11.9%)	37.5 (+11.6%)	36.3 (+8.0%)	42.6 (+26.8%)	38.8 (+15.4%)	35.1 (-4.5%)
産業	153.8	150.0 (-2.4%)	149.5 (-2.8%)	147.6 (-4.0%)	156.6 (+1.8%)	151.8 (-1.3%)	144.7 (-5.9%)

()内の数値は、1990年度排出量に対する増加率(%)

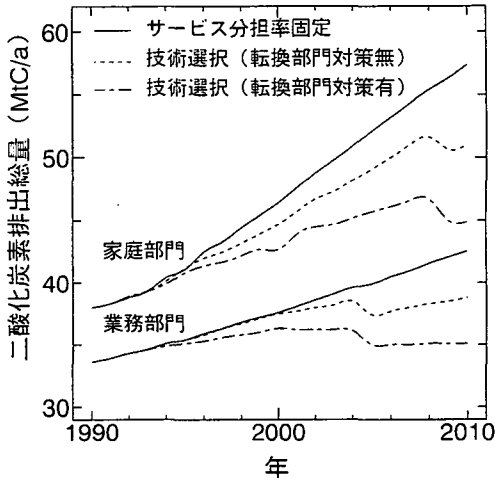


図-4 家庭、業務部門の二酸化炭素排出量

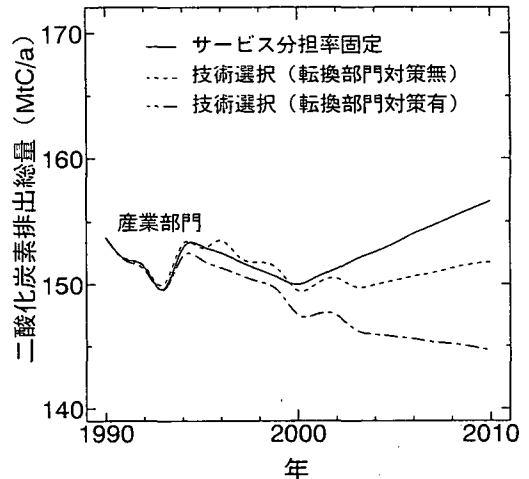


図-5 産業部門の二酸化炭素排出量

- 拡大する。ただし、より省エネ型の潜熱回収型ガス給湯器の普及はコスト面での障害から1.8%に留まる。冷暖房サービスでは、冷房専用エアコンや従来型ヒートポンプエアコンに代わり、ツインデジタルロータリー型を代表機器とした省エネ型ヒートポンプエアコンの普及が進む。また、2010年には電球型蛍光灯が100%の技術代替を達成する。
- 2) 業務部門におけるコージェネレーションシステムの普及は僅かな量である。ガスエンジン、ガスタービン、ディーゼルエンジンを合計した2010年度におけるコージェネレーションシステムのサービス分担率は、1990年度の0%に対して、冷房サービスでは0.8%、暖房サービスでは2.0%、給湯サービスでは2.7%に留まる。業務部門において排出量の削減をもたらすのは、石油暖房に代わるガス暖房や在来型蛍光灯に代わるHfインバータ照明及び通常誘導灯に代わる高輝度誘導灯の普及である。ヒートポンプエアコンやセンサー付照明、太陽光発電および新築断熱建築は、初期費用が依然として高価であるために2010年ではほとんど普及しない。
 - 3) 産業部門では、鉄鋼業において溶融還元炉及び直流式電気炉、紙・パルプ業において酸素脱リグニン装置、セメント工業において粉碎工程の堅型ミル、そして、石油化学工業において燃焼管理ボイ

ラーなどの省エネ技術が普及する。また、どの産業部門においても買電に代わりコンバインドサイクル自家発電などの自家発電装置が普及する。自家発電装置の普及は、重油等の化石燃料消費の増加を意味する。これにより、省エネ技術の普及による二酸化炭素の排出削減は相殺される。

- 4) 各部門を総合すると、排出量の削減は石油系からガス系へのエネルギー転換に寄与するところが大きい。特に家庭及び業務部門でその傾向は強い。2010年度における家庭部門の消費エネルギーの内訳を見ると、サービス分担率固定シナリオによる推計では、ガス32.8%、石油系燃料19.9%、電力47.3%である。これに対して技術選択シナリオでは、ガス50.2%、石油系燃料7.7%、電力42.1%とガスのシェアが拡大する。業務部門においても同様の傾向が見られる。
- 5) サービス分担率固定シナリオと比較した場合、技術選択シナリオ(エネルギー転換部門対策考慮)下での排出削減量は、2010年において32MtC/aである。これは太陽光発電、ソーラーシステム、断熱構造化などの抑制対策技術の効果をほとんど含んでいないことから、将来、これらの技術がコスト的に改善されれば、更なる削減量を期待できる。

6. 今後の課題

本研究では、サービス機器の進展と二酸化炭素排出量との係わりを明らかにする排出モデルについて詳述し、このモデルの適用例としてわが国における家庭、業務及び産業部門の3部門について2010年までの二酸化炭素排出量の見通しを報告した。本研究は、筆者らの開発したボトムアップ型の技術最適化モデルを使用して、技術代替に伴う二酸化炭素排出量の抑制効果を定量的かつ具体的に検討することに主眼をおいたものである。その結果、エネルギー消費主体が自己の負担するエネルギー関連費用を最小化するように省エネ技術を選択し、エネルギー転換部門での抑制対策が進めば、家庭、業務及び産業3部門における2010年度の全二酸化炭素排出量を1990年度排出レベルに安定化させることが可能であることが判った。また、それを実現する技術の削減の貢献度を詳細に把握することもできた。しかし、この推計結果に関しては、エネルギーサービスの需要量シナリオに左右されている部分が大きく、適切な社会経済環境の設定が排出量安定化の大きな鍵となる。

一方、より広範囲な社会、経済条件の下で二酸化炭素の排出削減目標に向けていっそう強力な行動を模索する場合、排出賦課金や補助金などの政策オプションの評価が重要となり、それらを取り扱い得るように本研究のエンドユーズ型最適化モデルを進展させる必要がある。今後は、技術データ及び社会経済データの更新を図るとともに、これらの検討事項について随時報告していく予定である。

謝辞： 本研究は、富士総合研究所日比野剛氏ならびに吉田雅哉氏との共同研究である。また、本研究の遂行にあたっては環境庁地球環境研究推進費の援助を受けた。これを記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) SEI-B(Stockholm Environment Institute - Boston) : The Long-range Energy Alternatives Planning System. Overview for LEAP version 94.0, 1993.
- 2) 松橋隆治, 石谷久, 茅陽一, 永田豊, 山田憲二: CO₂放出量低減策の経済性評価, エネルギー・資源, Vol.12, No.5, pp.62-69, 1991.
- 3) Fishbone, L.G. and H.Abilock : MARKAL, a linear-programming model for energy systems analysis, technical description of the BNL version, *Energy Research*, 5, 1981.
- 4) Buehring, W.A., Hamilton, B.P., Guziel, K.A., Cirillo, R.R., Conzelmann, G., and Koritarov, V. : ENPEP An Integrated Approach for Modeling Energy Systems, Argonne National Laboratory, Argonne, 1994.
- 5) 環境庁地球環境部編: 温暖化する地球・日本の取り組み, 大蔵省印刷局, 1994.
- 6) EDMC (日本エネルギー経済研究所 エネルギー計量分析センター) 編: エネルギー・経済統計要覧, pp.270-271, 省エネルギーセンター, 1995.
- 7) 電気事業審議会需給部会: 電気事業審議会需給部会中間報告, 1994年6月.
- 8) 地球温暖化技術評価検討会: 平成7年度地球温暖化技術評価調査(エネルギー転換部門)報告書, 1996年3月.
- 9) 厚生省人口問題研究所: 日本の世帯数の将来推計(平成5年10月推計), 厚生統計協会, 1995.
- 10) 通商産業省産業政策局: 21世紀の産業構造, 通商産業調査会, 1994.
- 11) 通商産業省資源エネルギー庁: エネルギー[新世紀へのシナリオ], 通商産業調査会, 1994.

(1996.10.17 受付)

PROJECTIONS OF CARBON DIOXIDE EMISSION AND THE IMPROVEMENTS OF ENERGY CONSUMPTION TECHNOLOGY

Yuzuru MATSUOKA, Tsuneyuki MORITA and Kenta MIZUNO

We developed end-use-type energy model which is based on the accounting of energy devices. The model can evaluate the relation between the improvements of energy consumption technology and carbon dioxide emission. In this paper, we described the formulation of the model and the projected carbon dioxide emission to 2010 in Japan. The sectors we calculated are residential, commercial, and industrial sectors. Based on the projections, we report that the carbon dioxide emission in 2010 will reach 256.6MtC/a(technology share fixed case), 241.6MtC/a(technology selection case), and 224.7MtC/a(technology selection and electric generation technology improvement case). Based on the third case, it is possible to establish the national carbon dioxide reduction target, that is stabilizing total carbon dioxide emission at 1990 level by 2010 as for the 3 sectors.