

# MARKAL モデルの地方自治体への適用に関する研究

## STUDY ON ENERGY SYSTEM MODELING FOR JAPANESE LOCAL GOVERNMENT

元木 悠子<sup>1</sup>・小坂 弘行<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.A.(政策・メディア) 慶應義塾大学大学院博士課程 政策・メディア専攻 (E-mail:yjikun@sfc.keio.ac.jp)

<sup>2</sup> 博士(工学) 慶應義塾大学総合政策学部教授 (E-mail:hkosaka@sfc.keio.ac.jp)

本研究は、エネルギーシステムの最適化分析モデル MARKAL (Market Allocation) を用いて、地方自治体のエネルギーに関する中長期計画を策定するための具体的な手法を提案することを目的とする。本研究では、既存の入手可能な統計資料とエネルギーモデルを効果的に組み合わせ、地方自治体のエネルギーシステムをモデル化し、地域がエネルギー計画の策定・実施を進めていく上での効果的な方法を開発した。また、上記モデルを関東地方の1都6県に適用し、自治体レベルでの温室効果ガス削減に向けた取組みの現状を評価した。

**キーワード：**MARKAL, エネルギーシステム, 地方自治体, エネルギー計画, 地球温暖化

### 1. 研究の背景

2008年1月1日、京都議定書の第1約束期間が開始した。わが国の温室効果ガス排出量は1990年比で6.4%増加であり(2006年度)、議定書で定められた目標(6%削減)の達成は極めて難しい状況にある。また、太陽光や風力などの再生可能エネルギー利用も、エネルギー消費中3%程度と低いレベルにとどまっている。

一方、温暖化に対する科学的知見の蓄積は進み、温室効果ガス排出量の増加による地球規模での弊害が明らかになりつつある<sup>1)</sup>。わが国は、京都議定書批准国としての責務を果たすと同時に、2013年以降の国際的取組みを先導していくために、中長期的な視点に立ち、温暖化防止対策を進めていく必要がある。

わが国では、1960年代末より、石油危機を契機とするエネルギーの安定供給を実現するために主に経済産業省(旧通商産業省)のイニシャティブのもとにエネルギー計画が策定されてきた。しかし今日では、温暖化防止をめぐるCO<sub>2</sub>の長期的な排出削減方法と費用に関する評価の視点が不可欠となり、エネルギー・環境・経済を統合したより長期の計画が、国と民間の双方において策定されている。

地球温暖化防止を目的とするエネルギー計画の多くは、世界や国を対象としたものである。この理由としては、エネルギー・温暖化問題は、越境的、政治的、長期的な課題であり、温室効果ガス削減に向けての取組みが国際社会との協力の下に進められている点にある(京都議定書の批准、京都メカニズムの活用など)。一方で、温暖化を回避するための実際の対策(省エネルギーの実践、非化石燃料・新エネルギーの導入など)は、住民・企業など個々の地域

社会で行われることから、エネルギー・温暖化問題の解決に向けては、国と同様、自治体が当該地域の特性に応じた対応を実施する必要がある。

自治体に対する要請は日本の国内法にもみられる。1998年に制定された「地球温暖化対策の推進に関する法律」では、地域主体のエネルギー政策の実施を「自治体の責務」として定める(第4条)とともに、自治体がそのような温室効果ガスの排出の抑制等をするための総合的かつ計画的な施策である「地球温暖化対策地域推進計画」を策定し、実施するよう努めることを定めている(第20条)。その結果、今日では都道府県を中心に上記「推進計画」や新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「地域新エネルギービジョン」、「地域省エネルギービジョン」などエネルギーに関する計画・目標が策定されている。

しかし、これらの多くは、目標年度における削減目標を示すにとどまり、目標に至る道筋を示せずにいる。そのために、各主体が各時点でとるべき行動が何であるか、対策がどの程度進捗しているのかが示されずにいる。そして多くの自治体において、目標年度を間近にして、その実現が極めて困難であることが明らかになった際、未達部分の十分な検証なしに次の新たな目標が定められるという事態が繰り返されている。こうした状況が続く限り、持続可能なエネルギー・温暖化対策の成果を地域レベルで得ることは難しく、その結果として、国レベルでの温暖化対策も遅々として進まぬ状況となる。

今後、地方自治体で具体的なエネルギー計画を策定する際には、エネルギーモデルを用いての合理的なシナリオ作成が不可欠であるが、現状では、有効なツールとして地域に適用できるエネルギーモデルが見当たらない。

## 2. 研究の特徴と意義

### 2.1. 先行研究

ここではまず、エネルギー計画を作成するためのツールとなるエネルギーモデルについて概観する。

エネルギーと環境の問題を分析するモデルは、計算法に応じて計量経済モデル、最適化モデル、一般均衡型モデルなどに大別される。また、分析対象に応じて国モデルや世界モデルに分類される。国モデルは一般に輸出入を与件とし、国内的な環境制約の下でその影響分析、対抗手段の評価に用いられる。世界モデルはグローバルな環境制約が各地域に及ぼすマクロ経済的影響の推定やより複雑な相互波及効果の分析に用いられる。

わが国ではこれまでに、エネルギーシステムや国内経済構造を明示的に取り入れた様々なモデルが開発されてきた。現在では、長期的不確実性を念頭に置いた温暖化影響・適応策の評価を行うモデルとして DNE21 や AIM アジア太平洋統合評価モデルなどが活用されている。こうしたモデルは、経済産業省の需給見通しや、環境省のプロジェクト、さらには IPCC の評価シナリオなどに用いられ、エネルギー・温暖化防止をめぐる政策決定の際の重要な指標となっている。

だが、国や世界を対象とするモデルに比して、地域を対象とするモデル化の実績は乏しい。この点に関しては、「先進的地域エネルギー計画」(Advanced Local Energy Planning: ALEP)<sup>2)</sup> と呼ばれる注目すべき取り組みが欧州にみられる。ALEP は、国際エネルギー機関 (International Energy Agency: IEA) の実施協定に基づく共同研究 (IEA program for Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 33) であり、イタリアやスウェーデンなど複数の国が参加し、トリノ市、マンハイム市、イェーテボリ市など具体的な地域を対象とするケーススタディが実施されている。

ALEP では、1)アセスメント、2)地域モデルの構築とエネルギー計画策定、3)事業実施、4)モニタリング・フォローアップの確立された PDCA (Plan-Do-Check-Action) のスキームの下に、産官学民の地域関係者が参加・議論し、有機的な連携を図ることにより、地域レベルでの持続可能なエネルギー政策を実施することを目指している。また、2)のモデルの構築と計画策定に関しては、IEA が開発した MARKAL モデルを用いて、統計や地理情報システムなどから得たデータを反映した地域固有のエネルギーモデルを構築している。これにより、現行エネルギーシステムの特徴を明らかにするとともに、将来に向けての削減可能性や課題の特定を行うことができる。さらに、モデルが描くシナリオが政策策定者と地域関係者とのいわば共通言語となり、将来に向けての適切な政策策定に寄与することが期待されている。

ALEP の実績からは、わが国よりも一歩も二歩も先んじる欧州のエネルギー・温暖化対策をみるこ

ができ、学ぶ点が多い。しかし、これをわが国で進めようとしたときに大きな制約となるのが、モデル化の前提となる情報の獲得が困難な点である。欧州では熱・電力供給事業者が地域レベルで存在し、エネルギーの地域集約的運用 (地域冷暖房など) に実績があることから、エネルギーに関する各種統計や分析に必要な情報の収集が比較的容易な状況にある。また、イェーテボリ市等が MARKAL を用いた地域エネルギー計画の策定を 1987 年より行っている背景には、エネルギーの供給・分配・利用計画作成を全ての自治体に義務付けたスウェーデンの「地方自治体エネルギー計画法」など国家的な要請の存在もある。

一方、国内地域を対象とするエネルギー統計が十分整備されていないわが国において、人員や予算に制約のある自治体が統計の整備等を単独で行うことは容易なことではない。温暖化対策の先送りもはやできない状況にあって、地域のエネルギー計画策定を促すにはいかなる方策が必要とされるのだろうか。

### 2.2. 本研究のアプローチ

そこで、本研究では既存の利用可能な統計情報を用いてわが国自治体のエネルギーシステムをモデル化する。

本地域モデルは各自治体に関する 1990 年から 2050 年までのエネルギー需給の推移を描く。そして、現在の政策の下での基準シナリオの分析の他、CO<sub>2</sub> 排出総量や排出量当たりのコストに制約を課したシナリオ、あるいは、政策目標を取り入れたシナリオを分析することを可能とする。これにより、政策の実現に向けての現状がどの程度であるかについての現時点での検討材料を示すことができる。以下に本モデルの主な特徴を二点述べる。

#### (1) 既存統計の活用

第一の特徴は既存統計の活用にある。エネルギーに関する代表的な統計としては、「総合エネルギー統計」(資源エネルギー庁)や「エネルギー・経済統計要覧」(日本エネルギー経済研究所)があるが、いずれも国を対象とするものである。一方、自治体を対象とするものには「都道府県別エネルギー消費統計」(経済産業研究所)または各種計画・ビジョンの中で自治体が独自に推計するものに限られる。自治体固有のこれらの統計は、事業者統計や需要特性に関する情報が反映されやすい反面、推計法の根拠や調査年次のバラつき、データ入手が容易でないなどのデメリットがある。

そこで、本研究では、モデルの汎用化及び同一条件下での複数自治体の分析を行うことに適しているとの観点から、「都道府県別エネルギー消費統計」を用いることとした。上記の統計は、「総合エネルギー統計」の最終消費部門を地域分割し、各都道府県のエネルギー消費量を推計したものである。「行」には産業、業務、家庭、輸送の各部門が位置づけられ、

「列」には石炭、石油製品、電力などのエネルギーキャリアが位置づけられている。

本研究では、産業、業務、家庭の各部門について、「都道府県別エネルギー消費統計」をもとにエネルギーモデルとの接続のための部門再編をした「地域エネルギーバランス表」を作成した。なお、輸送部門については、「都道府県別エネルギー消費統計」の分析対象が自家用乗用車のみであることから、乗用車、バス、トラック 3 部門について燃料種別保有台数に基づく簡易モデルを構築し、独自の集計を行った。

## (2) 既存モデルの活用

第二の特徴は日本原子力研究所が作成した MARKAL 日本モデル (以下、原研モデルと呼ぶ) (佐藤 2005) の活用にある。原研モデルは、エネルギーの供給から需要に至るエネルギーフローを約 500 の技術要素で表現した技術積み上げ型 (ボトムアップ型) モデルである。エネルギーシステム構成や技術個々の変数を変化させることにより、将来にかけての様々なシナリオを設定し、エネルギーシステムを分析・評価することができる。

本研究では「地域エネルギーバランス表」から得られる燃料種別エネルギー消費量の情報を原研モデルで用いられている技術特性データと対照させることにより 1990 年から 2050 年までの地域モデルを構築した。

なお、国モデルの場合には、エネルギー源の採掘から精製、転換、輸送、最終消費に至るエネルギーシステムを表現するのが適当である。しかし、地域を分析対象とする場合、エネルギー輸送の地域分割が困難である問題もあり、システム全体を追うことは現実的でない。

そこで、本研究では、産業、業務、家庭、輸送のエネルギーの最終消費段階に特化したモデルを構築することとした。モデル化の詳細は 4. 以降に述べる。

## 3. MARKAL モデル

### 3.1. MARKAL モデル

地域モデルの構築に先立ち、本研究の基礎となる MARKAL モデルの概要と特徴について述べる。

エネルギーシステムの最適化分析モデル MARKAL (Market Allocation, 市場配分) は、1970 年代末に欧米の研究者を中心に開発が始まった。1981 年、IEA 及びわが国を含む 21 カ国は、エネルギー研究開発の長期戦略の策定を目的とする実施協定に署名し、「エネルギー技術システム分析計画」(Energy Technology Systems Analysis Program: ETSAP) を発足させた。以来、IEA/ETSAP は、実施協定附属書 (Annex) の下に MARKAL などエネルギーシステムの分析手法の改良・拡張を行っている。

1990 年の AnnexIV 以降は、CO<sub>2</sub> の長期的な排出削

減方法と費用に関する評価を中心課題とし、気候変動に関する国際貢献を目的とした分析活動を展開している。Table 1 に ETSAP 附属書のテーマと主な内容を記す。

Table 1 ETSAP 附属書のテーマと主な内容<sup>3)</sup>

Annex I (1981-83) : Energy technology systems analysis programme
Annex II (1984-86) : Information exchange project
Annex III (1987-89) : International forum on energy environment studies
Annex IV (1990-92) : Greenhouse gases and national energy options MUSS (ユーザーインターフェース) のリリース GMARKAL (GAMS-MARKAL) の開発
Annex V (1993-95) : Energy options for sustainable development 一般均衡型 MARKAL の開発
Annex VI (1996-98) : Dealing with uncertainty together 需要弾性型 MARKAL、確率計画法、学習曲線の導入 TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) の開発 ANSWER (ユーザーインターフェース) のリリース
Annex VII (1999-2001) : Contributing to the Kyoto Protocol.
Annex VIII (2002-05) : Exploring Energy Technology Perspectives IEA/ETP (Energy Technology Perspectives) への協力
Annex IX (2003-05) : Energy Models User's Group VEDA (TIMESユーザーインターフェース) のリリース 目標計画法の導入
Annex X (2005-) : Global Energy Systems and Common Analyses TIMES 多地域グローバルモデル、TIMES 統合アセスメントモデルの開発

MARKAL モデルは汎用化、長期化、ボトムアップ型にモデルの特徴があり、1 国 1 地域あるいは複数地域のエネルギーシステムを分析対象とする。現在、わが国を含む世界の約 60 カ国で利用されており、最近では、IEA の "Energy Technology Perspectives" (2050 年のエネルギー技術の潜在的可能性に関する報告書) の基準モデルとしても利用されている。

MARKAL モデルの分析フローを Fig.1 に示す。MARKAL モデルは線形計画法 (Linear Programming) を用いて、所与のエネルギーサービス需要を満足する上での最適なエネルギーキャリア、エネルギー技術を、個々のエネルギー市場での競合過程を経て決定するモデルである。つまり、最適化前はエネルギーキャリアや技術に関する多数の選択肢が存在するが、最適化後は、エネルギーキャリアや技術の一つ一つについて、取引量 (導入規模) と限界生産費用 (潜在価格) が同時決定する。なお、最適化の結果に不適当・非現実的な部分があれば、入力データを修正して最適化計算を繰り返す。

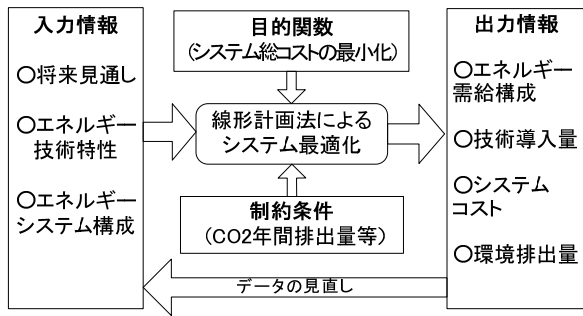


Fig. 1 MARKAL モデルの分析フロー

### 3.2. 原研モデル

1970年代から80年代にかけて、わが国では通商産業省と科学技術庁の所管の下に、電子技術総合研究所と日本原子力研究所が ETSAP の活動に参加していた。これらの機関はわが国のエネルギーシステムをモデル化するにあたり、需要部門及び最終消費部門を電子技術総合研究所が担い、エネルギー転換部門などその他を日本原子力研究所が担い、分担して取組んだ。ただし、80年代末の附属書Ⅲを最後に、通商産業省が ETSAP 参加を取りやめたことから、附属書Ⅳ以降は日本原子力研究所が MARKAL モデルの開発に取り組んでいる。

日本原子力研究所は附属書Ⅳにおいて需要部門を新たにモデル化するともに、エネルギー技術に関する独自のデータベースを構築した。その後、前提条件の見直しや分析期間の拡張、CO<sub>2</sub> の回収・投棄などの技術オプションの追加を行うなどして、MARKAL モデルを維持・管理している。

原研モデルのエネルギーシステムの基本構造を Fig.2 に示す。原研モデルは、31 のエネルギー源、91 のエネルギーキャリア、35 の発電・熱供給施設、104 のエネルギー変換・貯蔵・送電技術、178 の最終消費技術、及び、産業・業務・家庭・輸送の4つに大別され、さらに用途別に分類された38の需要部門で構成される。エネルギーサービス需要の単位には、素材型産業（鉄鋼、セメント、紙・板紙、パルプ）には代表素材の生産量（100万トン）、輸送部門には輸送量（10億人 km、10億トン km）、その他の部門には有効エネルギー量（PJ=10<sup>15</sup>Joule）を与えている。また、エネルギー源の入手段階と利用段階のそれぞれで CO<sub>2</sub> を計量している。

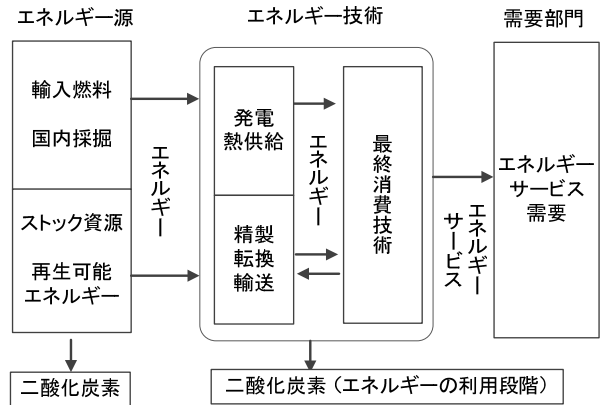


Fig. 2 原研モデルのエネルギーシステムの基本構造

最後に原研モデルの特徴を Table 2 に記す。原研モデルは 2030 年以降、実質 GDP がゼロ成長となること、及び、原子力発電の将来規模が大きくなることを想定している点に特徴がある。その結果、限界削減コストがゼロでも CO<sub>2</sub> 排出量は低減してゆくモデルとなっている。

Table 2 原研モデルの主要前提条件と CO<sub>2</sub> 排出量<sup>4)</sup>

	2000年	2010年	2030年	2050年
人口(百万人)	127	128	117	101
GDP伸び率		1.2%	0.6%	0%
GDP(兆円)	536	604	680	680
原子力発電(GW)	44.9	57	72	75
CO <sub>2</sub> 排出量(億トン)	13.1	12.6	10.8	9.6

(注)原子力発電は設備容量の上限制約を表す。CO<sub>2</sub> は CO<sub>2</sub> 換算。

## 4. 地域モデル

### 4.1. 基準エネルギーシステム

本研究では、上記 3. でみた原研モデルのエネルギーの最終消費段階（最終消費技術と需要部門）に特化した MARKAL 地域モデルを構築する。以下に、本モデルの構造について述べる。

#### (1) 地域モデルの概要

本研究で構築した地域モデルは、原研モデルの最終消費段階（需要部門と最終消費技術）を、地域レベルにダウンスケールしたモデルである。概略を Table 3 に記す。

Table 3 地域モデルの概要

長期割引率	3%(年)
分析期間	1990年から2050年、1期5年、13期
エネルギー単位	TJ(低位発熱量換算)、MW
エネルギーキャリア	電力、熱・その他ガス、石炭、コークス、軽油(小口)、重油(高硫)、重油(低硫)、ガソリン、灯油(小口)、灯油(大口)、LPG(小口)、LPG(大口)、ナフサ、都市ガス(小口)、都市ガス(大口)、メタノール(小口)、水素(大口)、メタノール(大口)、太陽熱、省エネ寄与分
需要部門	その他産業(動力、ボイラ、加熱)、鉄鋼(粗鋼、鑄鍛、精錬)、パルプ(動力、ボイラ)、ガラス他(動力、加熱)、化学(動力、ボイラ、加熱、原料)、紙・板紙(動力、ボイラ)、セメント(動力、加熱) 業務(動力、暖房、給湯、冷房) 家庭(動力、暖房、給湯、冷房) 輸送(乗用車、バス、トラック)
最終消費技術	産業 86 技術、業務 25 技術、家庭 24 技術、輸送 20 技術
環境排出物質	最終消費技術の利用段階でCO2を計上 排出原単位は kt-CO2/TJ

地域モデルは 20 のエネルギーキャリア、155 の最終消費技術、29 の需要部門で構成される。需要部門と技術の対応関係は原研モデルに従っている。ただし、需要部門のうち、鉄道・船舶・航空などの輸送部門の 9 分類 23 技術については、地域分割が困難であるなどの理由から、モデルの構成要素から除いている。

モデルの分析期間は原研モデルと同様、1990 年から 2050 年までの 1 期 5 年、13 期である。TJ (=10<sup>12</sup> Joule)、MW (=10<sup>6</sup> Watt) を基本単位とし、CO2 排出量原単位には kt-CO2/TJ を与えている。CO2 は最終消費技術の使用に伴う排出量を計量している。また、基準エネルギーシステム的前提条件(経済成長率・人口伸び率・原子力発電の導入規模等)は原研モデルに従っている。

**(2) 地域パラメータ**

本研究では、地域モデルの最終消費技術のパラメータの多く(効率、稼働率、入力エネルギー、設備単価、CO2 排出係数、設備寿命、導入開始時期等)は国と同様に推移すると仮定し、原研モデルの値を用いている。

他方、最終消費技術の一部のパラメータ(設備容量制約、新設容量制約、残存設備容量、設置伸率制約、鉄鋼部門の燃料種比率、エネルギーキャリアの輸入量制約、エネルギーサービス需要等)を変化させることにより、エネルギー消費の地域特性を表現している。

本研究では、統計の利用が可能な 1990 年、1995

年、2000 年の 3 期間については、後述する「地域エネルギーバランス表」に示される需要部門別燃料別のエネルギー消費量を原研モデルと対応させ、国モデルのパラメータを地域レベルで再現している。また、設備容量上限下限制約を狭めることにより「地域エネルギーバランス表」各セルとの一致をはかるよう、キャリブレーションしている。

2005 年以降に関しては、原研モデルの最終消費技術のパラメータの対 2000 年値を用いて定めている。従って、2005 年以降は、コストを最小化するという目的関数の下での最適な技術の規模とエネルギーの導入量が決定する仕組みとなっている。なお、MARKAL モデルの最終消費技術の変数の決定に際して考慮する、変数間の関係式を以下に記す。

**変数間の関係式**

(斜体は最適化後に決定するパラメータ)

- DEMAND = CAP.L × CAPUNIT × CF
- FUELUSE = {CAP.L × CAPUNIT × CF / EFF} = {DEMAND / EFF}
- EMIS.CAP = {CAP.L × CAPUNIT × CF} × ENV\_CAP
- CAP.L = Σ INVEST.L (T') + RESID (T)
- INVEST.COST = INVEST.L × INVCOST

(注) 効率 EFF、稼働率 CF、設備容量制約 BOUND (BD)、新設容量制約 IBOND、既存容量 RESID、建設単価 INVCOST、CO2 排出原単位 ENV\_CAP、単位変換係数 CAPUNIT、設備容量 CAP.L (限界容量 CAP.M)、最終エネルギー消費量 FUELUSE、CO2 容量当り CO2 排出量 EMIS.CAP、建設費 INVEST.COST、新設容量 INVEST.L (限界新設容量 INVEST.M)

**4.2. 地域エネルギーバランス表**

ここでは、地域パラメータの決定時に用いる「地域エネルギーバランス表」について述べる。これは、経済産業研究所が刊行する「都道府県別エネルギー消費統計」<sup>5)</sup>の「行」(需要部門)と「列」(エネルギーキャリア)を MARKAL モデルに対応するよう再編したものである。

「都道府県別エネルギー消費統計」は 1990 年から 2004 年までのデータがストックされている(2008 年 2 月現在)。ただし、原研モデルのタイムステップが 1990 年から 2050 年までの 5 年刻みであることから、本研究では 1990、95、2000 年の 3 年間のデータを用いることとした。

以下に「地域エネルギーバランス表」の作成手順の概要を記す。

「地域エネルギーバランス表」の作成手順

- 1) 「都道府県別エネルギー消費統計」の3ヶ年データを用意する。本統計は、「行」(非製造業2、製造業4、業務5、家庭1、輸送1)と「列」(石炭、石炭製品、原油、軽質油、重質油、石油ガス、都市ガス、電力、熱等)の構造を持つ。エネルギー消費量は固有単位と発熱量換算(TJ、高位発熱量)で表示されている。
- 2) 需要部門のうち、産業部門については、原研モデルの業種区分に対応するよう『工業統計』の業種別製造品出荷額等を用いて「都道府県別エネルギー消費統計」の部門を7つに再編する。輸送部門については『車種別自動車保有台数』や『自動車輸送車両数月報』を用いて、乗用車、バス、トラックに関する車種別燃料消費量を算出する。エネルギーキャリアについては、『石油等消費動態統計』を用いて「都道府県別エネルギー消費統計」の軽質油をナフサ、ガソリン、灯油、軽油の4種に分割する。
- 3) 市町村を分析対象とする場合には、製造品出荷額、従業員数、一般世帯数の対都道府県比率を適用し「都道府県別エネルギー消費統計」を按分する。輸送部門については、上記2)と同様、乗用車、バス、トラックの車種別燃料消費量を算出する。
- 4) 原研モデルの需要部門別燃料投入比を、2)ないし3)に外挿し、20のエネルギーキャリア、29の需要部門からなる自治体固有の「地域エネルギーバランス表」を作成する。単位は、MARKALモデルに合わせてTJ(低位発熱量換算)に変換する。
- 5) 「地域エネルギーバランス表」で示された需要部門別燃料別最終エネルギー消費量を原研モデルの最終消費技術のパラメータ(設備容量制約など)と対照させ、個々の自治体に関する固有のパラメータを導出する。これをモデルに組み込み最適化をはかる。
- 6) 最適化の結果示される基準年の最終エネルギー消費量を「地域エネルギーバランス表」の各値と照合する。また、最適解が得られないなど問題のある場合には、再度5)に戻り、燃料利用可能制約を緩めるなどの調整を行う。出力結果(部門別・技術別エネルギー消費量、設備容量、部門別・技術別CO2排出量等)を評価し、必要に応じて、エネルギー消費量やCO2排出量に制約を加えるなどの代替シナリオを設定し、最適化を繰り返す。

5. モデルの適用

5.1. 関東1都6県の結果

本項では上記4.で示した地域モデルを関東地方1都6県に適用した結果を紹介する。ここで想定しているシナリオは原研モデルの基準シナリオに対応している。なお、最適化の処理や最適化後の出力結果の分析にはユーザーインターフェースANSWERを利用した。

関東地方1都6県の最終エネルギー消費量の推移をFig.3とFig.4に、CO2排出量の推移を次頁Fig.5に示す。

Fig.3より、関東1都6県の最終部門のエネルギー消費量は千葉が最も多く、東京、神奈川、茨城、埼玉、栃木の順に並んでいることがわかる。Fig.4の最終エネルギー消費の部門別内訳をみると、産業部門では、千葉、神奈川、茨城など工業コンビナートを抱える自治体が上位となり、業務部門については東京都が最も大きい値となっている。

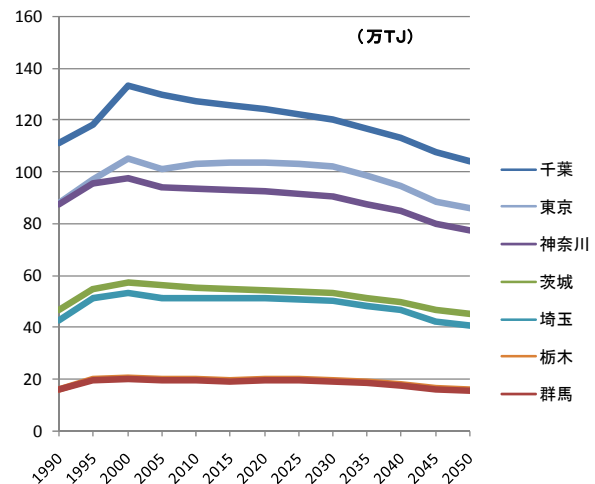


Fig.3 1都6県最終エネルギー消費量

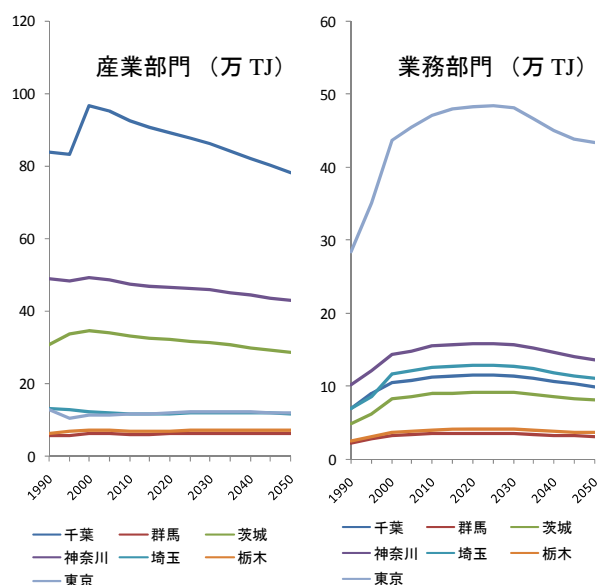


Fig.4 1都6県部門別最終エネルギー消費量

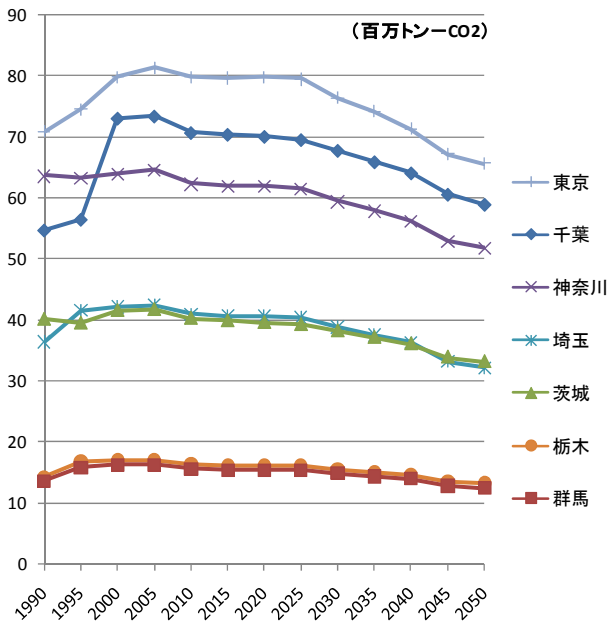


Fig. 5 1都6県CO2排出量

上記Fig. 5ではCO2排出量の大小及び推移をみる事ができる。関東1都6県でみると、東京、千葉、神奈川、埼玉、栃木、群馬の順に排出量が大きい。これらを時系列でみると、1990年から2005年にかけて総排出量は293.9百万トンから333.9百万トン(CO2換算)に増加し、その後減少し、2050年には267.7百万トンとなる。

CO2排出量が2005年以降に減少する理由としては、本モデルがパラメータの多くを従っている原研モデルが描く将来にかけての低成長シナリオ(2030年以降実質GDPがゼロ成長)が本モデルに反映されている点にある。

このように、本モデルでは、複数の自治体の最適化の結果を並列してみることができる。これにより、同一(あるいは異なる条件下での)エネルギー消費に関する自治体の特徴の概要をつかむことができる。

以上、関東地方の1都6県について概観した。次に、最終エネルギー消費が最も大きい千葉県を一例として取り上げ、エネルギー消費量とCO2排出量に関するより詳細な報告を行う。

### 5.2. 千葉県の結果

千葉県は、関東南部に位置し、人口が約592万人、世帯数が約217万世帯(2000年)。他方、千葉県は京葉工業地帯を抱えるわが国有数の工業県である。2000年度の県内総生産が約19.5兆円、製造品出荷額が約11.5兆円で全国8番目の規模である(2000年)。

千葉県は、2000年に「地球温暖化防止計画」を策定し、温室効果ガスを2010年時点で90年対比6%削減を定めた。その後、2006年、目標の実現が困難であるとの判断から、目標の見直しを行っている。

### (1) 基準シナリオ

千葉県の最終エネルギー消費量とCO2排出量の現状と将来の見通しをみる。

はじめに、最終エネルギー消費量の推移についてみる。Fig. 6より、1990年から2000年にかけて、電力は13.9万TJから16.9万TJに拡大し、化石燃料も95.3万TJから113.9万TJに増加してことがわかる。今後将来にかけては、電力の使用は増加するものの、化石燃料については徐々に使用が減り、2050年には85.3万TJ(対2000年約75%)となる見通しである。また、化石燃料の構成については、石炭、コークス、ガソリン等の使用が減るのに対して、LPG、灯油、都市ガス等の使用量が増える結果となる。また、2040年以降、輸送部門で水素燃料の使用量が拡大する傾向がみられる。

次頁Fig. 7に、需要部門別のエネルギー消費量の推移を記す。1990年から2000年の実績値をみると、産業が1.15倍、業務が1.49倍、家庭が1.38倍、輸送が1.25倍とそれぞれ拡大している。伸び率は最も小さい産業部門であるが、2000年のエネルギー消費量は96.7万TJで、県全体の約72.5%を占めている。

今後将来については、業務以外すべての部門で2005年以降エネルギー消費量が減少する(業務は2030年以降低減する)見通しである。2050年には、産業78.3万TJ、業務9.9万TJ、家庭8.6万TJ、輸送7.2万TJ、合計104万TJとなり、対2000年72%となる見通しである。

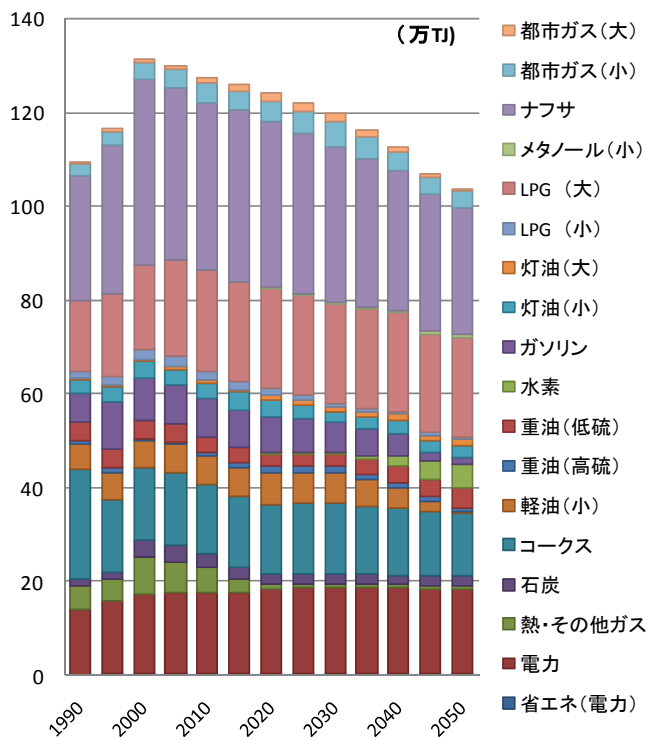


Fig. 6 千葉県燃料別最終エネルギー消費量

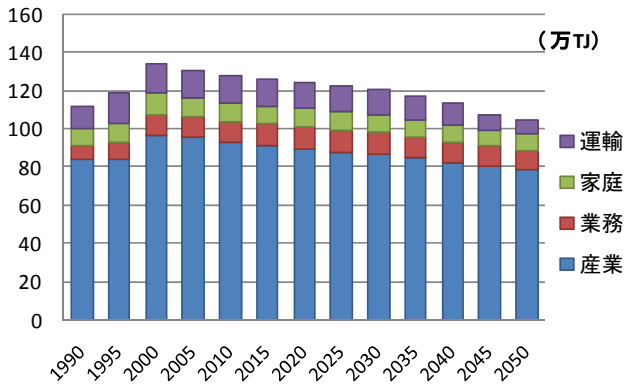


Fig. 7 千葉県部門別最終エネルギー消費量

次にCO2排出量の推移をみる。排出量全体でみると、前述のFig. 5に示したように1990年から2000年にかけては、54.7百万トンから67百万トン(CO2換算)、約1.28倍となっている。

CO2排出量の部門別推移をFig. 8に記す。1990年から2000年の実績値をみると、産業1.35倍、業務1.37倍、家庭1.32倍、輸送1.25倍とそれぞれ増加している。排出量全体に占める各部門の割合に大きな変化はみられず、2000年、産業63.8%、業務11.8%、家庭10.3%、輸送10.6%となっている。

2005年以降の今後将来については、産業と輸送は2005年以降、家庭は2010年以降、業務は2035年以降、低減する。2050年には、産業39.6百万トン、業務7.9百万トン、家庭6.2百万トン、輸送5.3百万トンとなり、全体では59百万トン(対2000年80.7%)となる見通しである。

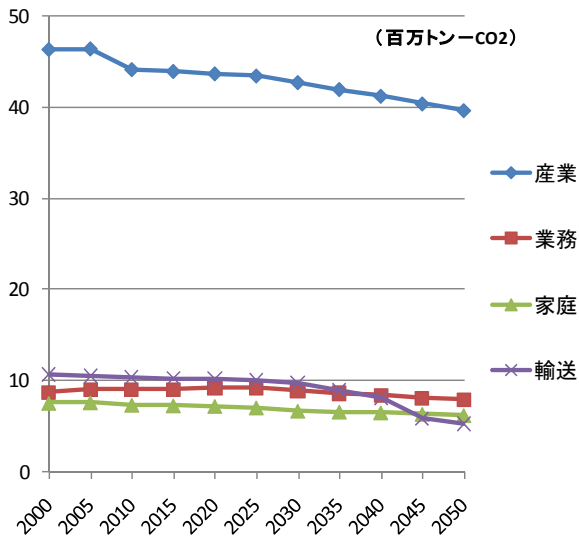


Fig. 8 千葉県部門別CO2排出量

このように、千葉県では、エネルギー消費量、CO2排出量ともに、産業部門が占める割合が大きい。本研究で構築した地域モデルでは、産業部門を7業種に分類し、より詳細な分析の実施を可能としている。

以下、Fig. 9、Fig. 10に産業部門6業種(パルプを除く)に関する2000年から2050年にかけての業種別CO2排出量と最終エネルギー消費量の推移を記す。

CO2排出量をみると、鉄鋼、化学、セメントの3業種は排出量が減少傾向にある。その一方、その他産業、紙・板紙、ガラス他の3業種は同一又は増加傾向にある。

次に、最終エネルギー消費量をみると、その他産業以外の業種についてはエネルギー消費がほぼ同一あるいは減少する見通しであり、エネルギー消費量とCO2排出量の相関の高さを確認できる。

なお、化学部門で消費されるエネルギーのうち、燃焼の伴わない原料利用の分は非エネルギー利用としてCO2排出量に直接カウントされない点を補足しておく。

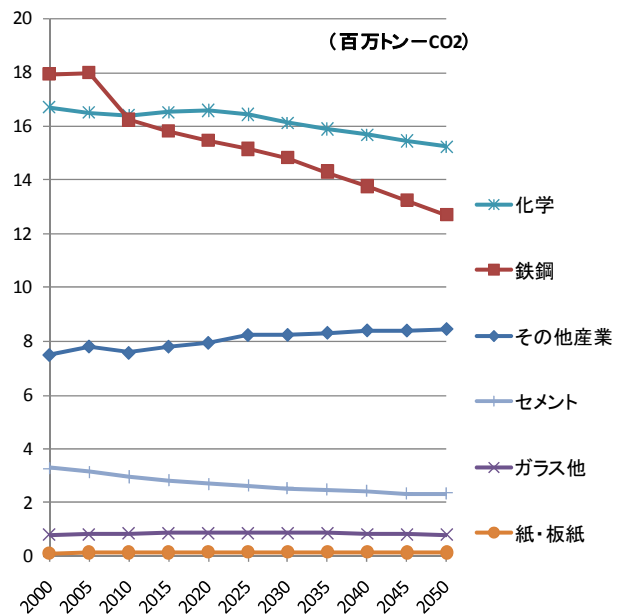


Fig. 9 千葉県産業部門CO2排出量

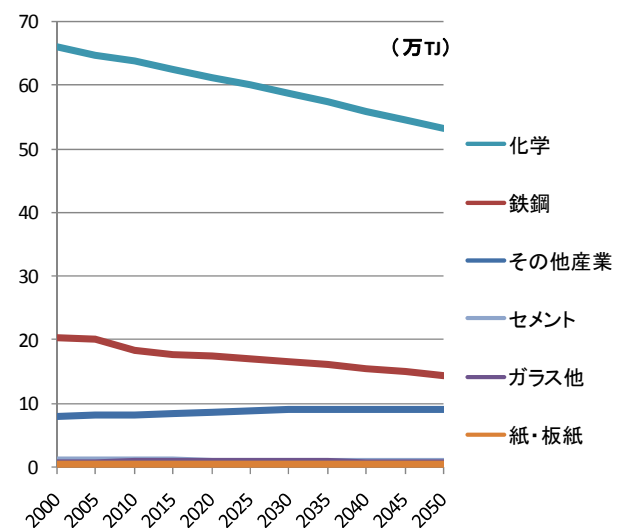


Fig. 10 千葉県産業部門最終エネルギー消費量



## (2) 代替シナリオ

本研究で構築した地域モデルは、前提条件を変化させることにより複数のシナリオのエネルギー需給の比較を可能としている。ここでは、国立環境研究所等による「2050 日本低炭素社会シナリオ」<sup>6)</sup>で示された低炭素社会の将来像（2050 年の需要部門の有効エネルギー量を 2000 年比 60%とする）を千葉県に当てはめる。

基準シナリオ (RES) と代替シナリオ (ALT) の有効エネルギー量を Fig. 11 に示す。代替シナリオは基準シナリオよりも、2010 年 5.3%、2030 年 20.6%、2050 年 30.5%、値が小さくなっており、原研モデルの描く将来像よりもより省消費型の社会経済を描く。

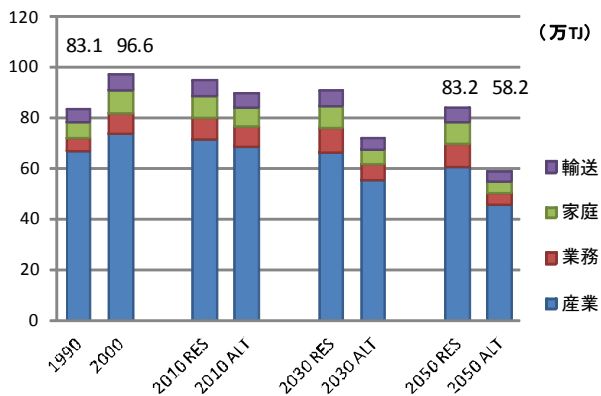


Fig. 11 千葉県シナリオ別有効エネルギー量

代替シナリオにおける最終エネルギー消費量と CO2 排出量の推移を Fig. 12 に記す。

最終エネルギー消費量は、有効エネルギー量の推移にほぼ対応して減少し、2050 年 75.5 万 TJ (2000 年比 56.6%) となる。CO2 排出量は全ての部門で今後一律に減少を続け、2050 年には、産業 30.3 百万トン、業務 4.4 百万トン、家庭 3.2 百万トン、輸送 3.2 百万トン、全体では 41.2 百万トン (対 2000 年 56.4%) となり、基準シナリオよりもより大幅な削減が可能であるとの見通しが示された。

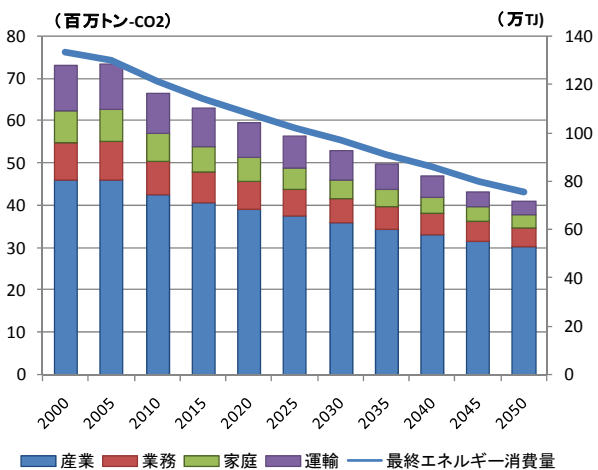


Fig. 12 千葉県代替シナリオ最終エネルギー消費量と CO2 排出量

## 6. まとめと今後の課題

本研究では、「都道府県別エネルギー消費統計」などの既存の統計資料をもとに作成した「地域エネルギーバランス表」とエネルギーシステムの最適化分析モデル MARKAL を用いて、地方自治体を分析対象とするエネルギーモデルを構築した。さらに、本モデルを稼働させ、関東地方の 1 都 6 県についてのエネルギー需給の現状と推移を分析した。

本モデルは、基本的な分析対象を都道府県とするものの、一般世帯数、製造品出荷額等のいくつかの指標を用いることにより、わが国 1800 余の市町村に関するエネルギー需給シナリオも得ることができる。さらに、個々の自治体が最終エネルギー消費量や CO2 排出量に関する削減目標を定めた場合に、その削減目標に合致した代替シナリオを求めることができる。

現在、わが国において、地域のエネルギー需給を描く有効なモデルが見当たらない中、複数の自治体の取組みを扱う際に、本モデルを有効に活用できると考える。

今後、モデルの精度を高めて、汎用化を図るとともに、地域固有のシナリオ (将来像) の作成方法について検討を加えていく。

## 参考文献

- 1) IPCC(2007)IPCC Fourth Assessment Report Working Group III,III (Summary for policy makers): <http://www.ipcc.ch> [2007, October 25]
- 2) IEA/Annex33(2000), *Advanced Local Energy Planning A Guidebook*: [http://kea.bitux.de/downloads/ALEP\\_Guidebook.pdf](http://kea.bitux.de/downloads/ALEP_Guidebook.pdf) [2007, July 14]
- 3) Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), *Official Document*: <http://www.etsap.org/official.asp> [2007, October 5].
- 4) 佐藤治(2005)「我が国の長期エネルギー需給シナリオに関する検討」『JAERI-Research, 2005-012』日本原子力研究所.
- 5) 経済産業研究所, 都道府県別エネルギー消費統計:<http://www.rieti.go.jp/users/kainou-kazunari/energy/index.html> [2007, October 25]
- 6) 「2050 日本低炭素社会」プロジェクトチーム, 「2050 日本低炭素社会シナリオ: 温室効果ガス 70%削減可能性検討」:<http://www.nies.go.jp/whatsnew/2007/20070215/shiryoy2.pdf> [2007, October 25]

## 謝辞

本研究の実施にあたって、MARKAL モデルの作成者であり、また、IEA/ETSAP の活動にわが国を代表して参加されてきた、独立行政法人日本原子力研究開発機構の佐藤治様よりご指導いただきました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

---

## STUDY ON ENERGY SYSTEM MODELING FOR JAPANESE LOCAL GOVERNMENT

Yuko Motoki<sup>1</sup>, Hiroyuki Kosaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.A. (Media and Governance) Graduate School of Media and Governance (E-mail:yjikun@sfc.keio.ac.jp)

<sup>2</sup> Ph.D. (Engineering) Professor, Keio University, Dept. of Policy Management (E-mail:hkosaka@sfc.keio.ac.jp)

This study demonstrates the local energy system modeling with MARKAL (Market Allocation) model. Our regional MARKAL model assumes long-term energy demand and supply composition from 1990 to 2050. This model receives a lot of technology information (efficiency, life, start years, unit cost, etc) from Japanese MARKAL model developed by Japan Atomic Energy Agency, but also, some particular parameters (capacity bound, demand level, etc) are obtained from the “local energy balance table”. The optimization is performed considering future economic growth, energy intensity, energy cost, and advancement of energy technologies. The energy system modeling in regional level will contribute to policy argument and activities on reducing CO2 emission.

**Key Words:** *MARKAL, Energy System modeling, Global Warming, Japanese Municipalities, Local Energy Planning*