

■ 研究論文 ■

運輸部門における環境問題対応策の動学的検討

Dynamic Analyses of the Measures of Environmental Issues in the Transport Sector

吉田 好邦*・松橋 隆治**・石谷 久***

Yoshikuni Yoshida Ryuji Matsuhashi Hisashi Ishitani

小林 紀****・武石 哲夫****

Osamu Kobayashi Tetsuo Takeishi

(原稿受付日1996年4月4日, 受理日10月16日)

Abstract

In this paper, we have investigated cost-effectiveness of alternative fuel vehicles as the measure for CO₂ reduction. Computed results indicate that installation of alternative fuel vehicles is much more expensive than fuel switching in industry or power generation sector. However, some economic incentives will make the price go down to the level at which alternative fuel vehicles are competitive with conventional vehicles. At the same time, mass production makes their prices go down although it is rather expensive at present. Then we developed the scenarios in which CO₂ emissions could be stabilized at the level in 1990. In the higher demand case (1.2%/yr.), it is indispensable to introduce alternative fuel vehicles in the market. Our model selects electric vehicles and compressed natural gas vehicles as cost-effective options. In the scenario where carbon tax revenue is not offset by subsidy, we have to impose prohibitively high carbon tax to suppress CO₂. However, CO₂ emissions can be suppressed by reasonable carbon tax if the tax revenue is returned to the market for subsidizing alternative fuel vehicles and the infrastructures.

1. はじめに

地球環境問題の顕在化を背景として、CO₂を主とする温室効果ガスの抑制のための様々な対策・技術が開発されている。その対策の経済性が現実のエネルギーシステムに受け入れられるかを定めるキーポイントになることはいうまでもないが、例えば電気自動車の環境性は電源構成に依存するように、各対策は相互に関連している場合が多く、個別の費用便益分析では十分に検討できない部分が残る。筆者らは現在から将来にわたってエネルギーシステムの概略を再現するためにトータルエネルギーモデルを構築し、総費用を目的関数としてこれを最小化する最適化計算によって様々なCO₂抑制対策のコストエフェクティブネスを検討し¹⁾、また運輸部門における代替燃料車の導入の位置付けを

検討してきた^{2) 3)}。本文では、その拡張として近未来の具体的なCO₂の低減目標値を設定し、これを達成するための動学的シナリオを検討する。

2. モデルの構造と外生変数に関する仮定

2.1 エネルギーモデルの構造

本モデルは1995年を起点として、2030年まで5年毎にシステムの最適化をし、これを接続することにより経年のシミュレーションをする準動学モデルで、最適化1ステップごとのモデルの構造は以下のようになっている。

(1) 需要データなどの前提条件は1年単位で与える計画期間を1年とした線形計画モデルで、対象地域を日本とする。目的関数はシステムの固定費と可変費および炭素税を加えた総費用で、これを最小化するシステムを選択する。

(2) 本モデルはトータルエネルギーシステムの中での運輸部門の対策の位置付けを探るためのものであるから、部分的には最大限の簡略化を行っている。すなわち、他のエネルギーモデルと比較して運輸部門を詳細にし、それ以外の部門ではモデルに取り入れるのプラ

* 東京大学工学部地球システム工学科大学院生

** " " " 助教授

*** " 工学系研究科地球システム工学専攻教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

**** 日産自動車(株)総合研究所社会・商品研究所

〒237 神奈川県横須賀市夏島町1

ントの種類, 需要部門の区分なども必要最小限とした。なお, モデルのエネルギーフロー図を図-1に示す。

(3) 制約式の数約650, パラメータ数はスラック変数を含め, 約1400である。主な制約は次の通りである。

a. 需要制約

下記の各需要セクターについてそれぞれ最終需要の値を設定し, その値を満たすようにエネルギーを配分するという制約。各需要セクターの燃料は以下の様に仮定した。

○航空: ジェット

○石油化学: ナフサ

○船舶: 重油

○産業熱: 石炭・天然ガス・重油・軽油・LPG・原油・電熱・水素

○民生熱: 天然ガス・灯油・LPG

○鉄鋼: 石炭・水素

○電力: 石炭・重油・原油・天然ガス・水力・原子力・太陽光

○自動車: ガソリン・軽油・天然ガス・電気・メタノール・LPG・ハイブリッド(軽油・電気)

需要の設定は図-1のフロー図の需要部門別に与え, 最終需要値は文献⁴⁾により表1のように仮定した。また電力需要を時間帯別にピーク, ベースの2期に分ける(表2参照)都合上, すべての変数を同様に2分割している。ただし各需要値は1990年の値のため, 動学的分析の起点となる1995年の需要は年1.2%の上昇率を仮定して外挿した。

b. 変動制約

隣接するタイムステップ毎に同種の変数の値の変動幅に上限を与える制約条件である。

c. 原子力・水力制約

原子力発電についてはそのパブリックアクセプタンスを考慮して, 通産省の計画に基き, 総設備容量7500万kW/年を上限とする。水力発電についても立地上の制約から, 現状の出力を超えないものとする。

d. 資源の供給可能性

エネルギーの供給可能性はLPGについてのみ上限を設けた。日本のLPGの消費量(1990)は約14Mt(184Pcal)で, OECD全体の消費量の約16%を占めている。他のエネルギー資源と比較して全体の供給量が少ないことを考慮して, LPGの輸入量はこの値を超えないものとし, 超過分については国内の石油精製プラントから調達するものとする。

表1 各部門の最終需要値(1990年)

		最終需要値
航空機		3.0
船舶		3.3
石油化学		25.8
鉄還元		28.2
産業用熱		91.5
民生用熱		60.8
運輸乗用	普通	17.9
	小型	315.0
	軽	14.9
運輸貨物	長普	39.7
	短普	27.1
	小型	92.4
	軽	85.3
	バス	7.1

(注1) 長普, 短普はそれぞれ長距離普通, を指す。

(注2) 単位は運輸がTm, その他はMtoe

表2 電力需要の仮定

	時間(年)	電力需要(GW)
ピーク時	0.11	122.8
ベース時	0.89	83.7

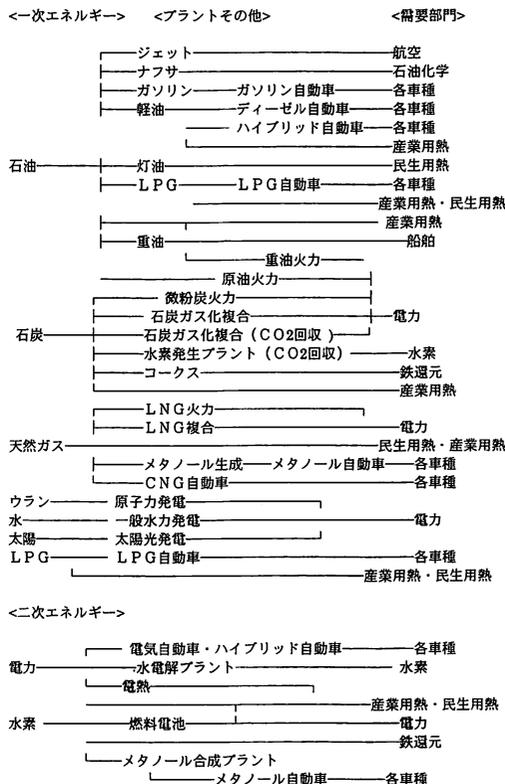


図-1 モデルのエネルギーフロー

2.2 外生変数についての仮定

(1) 需要の伸び率

IEAのETSAPグループの予測より高需要ケース（伸び率1.2%/yr）、低需要ケース（伸び率0.75%/yr）の2通りについて検討する。

(2) 燃料価格（上昇率・割引率）

燃料価格はCIF価格を使用している⁶⁵。表3に示す通りに初期価格を与える。なお、ウランについては明確なデータ入手が困難なため電力単価から推計した。将来的な推移はIEAのESTAPグループによる高価格シナリオ⁶⁶を用いて、2030年までの平均上昇率が石油・LNGは3.3%、石炭は1.3%、ウランは0.7%とする。また、非エネルギーの価格の伸び率は3%とし、割引率は5%/年と仮定する。

表3 燃料価格（1990）

石炭	7990円/t
石油	15800円/t
LNG	25590円/t
ウラン	0.60円/kWh
LPG	23840円/t

3. 分析の手順

以下の3.1から3.3の手順で検討している。

3.1 CO₂抑制目標の設定

本文では、西暦2030年まで各年のCO₂排出量が1990年レベル（320Mt-C/yr）で安定化することを目標とする。

3.2 必要となる対策の決定

前述のエネルギーモデルにおいてCO₂排出量の目標値を上限に設定し、最適化計算をおこなう。その結果得られたエネルギーフローによって、仮定したCO₂排出量の目標値達成のためにどのような対策・技術を導入する必要があるかを決定する。

3.3 動学的分析

3.2の対策をインセンティブ（炭素税・補助金）の対象とし、現状を起点として5年ごとのエネルギーモデルの最適化による動学的分析をおこなう。具体的には仮定したCO₂排出量の目標値を達成するために、炭素税その他のインセンティブの有効性を検討する。

4. 検討結果

4.1 目標となるシステムの検討

1990年の国内CO₂排出量320Mt-Cを上限値として、

総費用が最小となるシステムの構成を求めた。ここで、車両価格は4.2（1）における普及後の価格、インフラ整備費は4.2（2）に基づいて計算をおこなっている。結果は図-2、図-3にまとめられる。

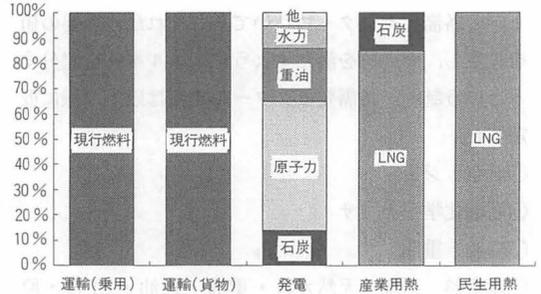


図-2 2030年における最適化結果（低需要ケース）

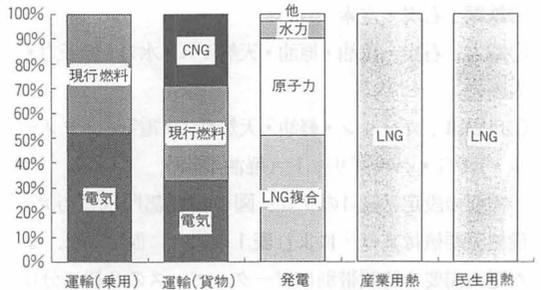


図-3 2030年における最適化結果（高需要ケース）

まず、低需要ケース（伸び率0.75%/yr）では、発電部門と熱部門の燃料転換によって対応可能であることがわかる。発電部門では原子力が容量の上限に張り付き、熱部門では天然ガスへの移行が見られる。

高需要ケース（伸び率1.2%/yr）では、低需要ケースの対策に加えて、運輸部門での燃料代替が求められるようになり、現行燃料から電気、CNGへの移行する。

さてこの計算とは別に、エネルギーモデルで選択された各対策をコスト分析の観点からみるために、CO₂排出量の制約の上限値を様々に変化させて同制約に対するシャドウプライスを求めた結果を図-4に示す。縦軸の数値がシャドウプライスで単位量のCO₂を削減するために要する費用を表している。この感度分析では需要の設定値は1990年レベルで一定とし、CO₂制約のみを変化させているため、需要値を2030年レベルに置いた上述の計算とは結果はやや異なるが、考慮される技術、燃料種等、エネルギーモデルの構成要素は前述のモデルと一致しているため、各対策の炭素削減コス

トを評価することができる。ただし、固定的な需要の下でのシャドウプライスの値は後述する動学的分析における炭素税率とは定量的には一致せず、各対策の相対的なコスト評価を目的としてこの計算をおこなったことを付記しておく。

- 図中の記号A～Dの表す対策は以下ようになる。
- A：(発電・熱部門) 石油・石炭→原子力・LNG
- B：(運輸部門) ガソリン→CNG, (発電) 太陽光
- C：(運輸) 各燃料→電気(ベース電力利用)
- D：(運輸) 各燃料→電気(ピーク電力利用)

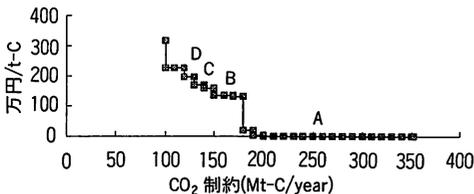


図-4 CO₂制約に対するシャドウプライスの推移

図-4によると領域Aとそれ以降の領域でシャドウプライスが大きく上昇していることが分かる。目標設定の計算のうち低需要ケースの解は、発電・熱部門の燃料転換に留まっていたため比較的シャドウプライスの小さい領域Aに属するが、運輸部門の燃料転換が必要になる高需要ケースの解は、電気自動車を導入される領域Cに属し、そのシャドウプライスは100万円/t-Cを超える値になる。この結果から高需要ケースではCO₂を1990年レベルに抑制するためには炭素税、補助金等の経済的インセンティブが必要となることが示唆される。

4.2 シナリオの想定

4.1節の結果より、低需要ケースを想定する限り運輸部門の燃料代替は必要とならず、発電、熱部門での比較的低価格の対策に留まることができる。一方、高需要ケースでは設定したCO₂排出目標を達成するためには運輸部門の燃料代替が求められる。低需要ケースの需要の伸び率は、現状の伸び率から推測しても必ずしも容易に実現可能とは言い難い。そこで、以下では高需要ケースを想定して代替エネルギー車の導入シナリオを検討する。

車両価格の変動などの不確実な要素を考慮すれば、4.1節で得られた目標となるシステムに至る動学的シナリオは無数に仮定することが可能である。本文では車両価格、インフラ整備費用については単一のシナリオを、炭素税については3種類のシナリオを想定して

検討を行った。具体的には(1)-(3)の通りである。

(1) 車両価格

現状では高価格の代替燃料車も、量産化によって価格が低下する。したがって、モデル上では1期の最適化ごとに生産台数によって価格を更新する必要がある。本モデル上での扱いは、ある期で一定レベルの代替燃料車が導入されるという解が得られると、その導入台数に応じて次期の最適化の前提条件となる車両価格が更新されるという仕組みになっている。

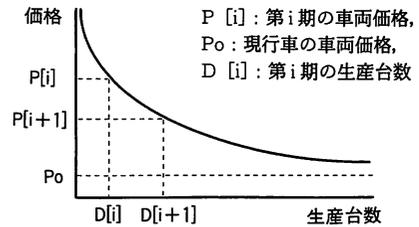


図-5 生産台数と価格の関係

また現状では電気自動車で5-6倍、CNG自動車で2倍強(現行車比)の価格が、量産によって現行車の価格に近い値まで低下するとしている。

(2) インフラ整備費

土地代を100万円/坪とし(石油連盟資料)、建設コストを5000万円/基と仮定する。これらのインフラの費用は燃料によって異なるが、代替燃料車の1台あたりに換算すると車両価格の約3-5割に相当する。

(3) 炭素税

基本的に炭素税をインセンティブの柱として、場合によって補助金による還流を考慮する。具体的には次の3種類のシナリオの検討を行う。

シナリオ I 税収(炭素税)の還流はおこなわない。炭素税はCO₂排出量が目標値を超えないような最小限の税率で、推移させる。

シナリオ II 税収(炭素税)の還流はおこなわない。炭素税率は年毎に徐々に増加させ、最終期の炭素税率が最小化される。

シナリオ III 初期のみ税収(炭素税)の還流をおこなう。すなわち、代替燃料車の価格に量産効果が表れるまでは、そのインフラ・車両に補助金を与え、その後は炭素税のみで普及させる。

4.3 動学的分析による検討

(1) シナリオ I

1990年レベルのCO₂排出量320Mt-Cで安定化させるように、最小の炭素税率でシステムを推移させるシナリオで、結果は図-6～図-8に示される。2020年までは

炭素税率約2万円/t-C程度でCO₂を抑制可能であるが、需要の増加に伴い、2025年以降では運輸部門の燃料代替が必要となり、税率は75~90万円/t-Cと急激に増大する。また、運輸部門ではメタノール、ハイブリッドが一部の車種で選択され、発電部門では太陽光発電が選択されている。これは、運輸部門の対策の導入が遅れることにより、必要以上の対策を選択せざるを得ない状況を示している。このことはCO₂制約に対する感度分析を示した図-4によれば領域AからBに移行する際にシャドウプライスが大きく上昇することに対応している。

(2) シナリオ II

シナリオ I の結果は、単位量のCO₂の削減コストが高価な運輸部門の燃料代替を早期に実施しなければ、2025年以降での炭素税率が極めて大きくなり、本来不必要な対策を導入せざるを得ないことを示している。そこでシナリオ II では、初期での税率をある程度大きく設定し、これを徐々に増加させて最終期での税率を最小化することを検討する。計算結果は図-9~図-11に示される。

第1期の炭素税率は0.5万円/t-C程度で、最終期には65万円/t-Cまで上昇する。2020年で運輸部門でCNG車が導入される、電気自動車はその初期導入コストが極めて大きく、税率の負荷が過大となるため選択されていない。発電・熱部門では第1期より燃料転換がなされ、CO₂排出量は第1期では排出目標を大きく下回り、最終期で目標レベルの排出量まで達する形で

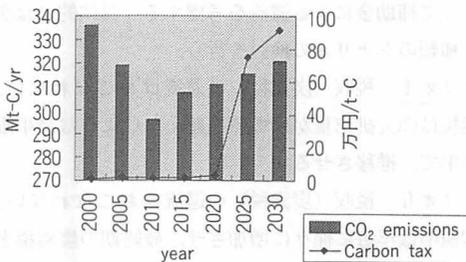


図-6 炭素税率とCO₂排出量の推移 (シナリオ I)

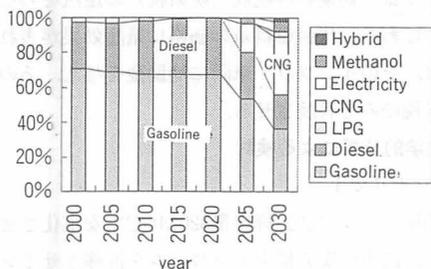


図-7 運輸部門の燃料シェアの推移 (シナリオ I)

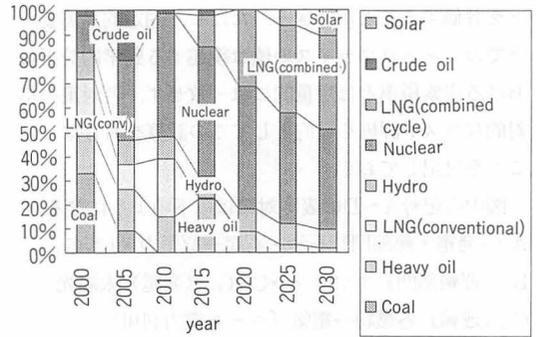


図-8 電源構成の推移 (シナリオ I)

推移する。

(3) シナリオ III

税収の還流なしで運輸部門の燃料代替を行えば、シナリオ I, II のように非常に大きな炭素税率を課することになる。したがって、税収の還流によって代替燃料車導入のためのインセンティブを施すことが必要となる。特定部門への補助金は市場原理に反する側面をもち、政策として必ずしも適当ではないが、運輸部門の燃料代替には必要最小限の補助金が必要といわざるを得ない。

シナリオ III では、代替燃料車のインフラ整備費用について補助金による援助を行い、同時に車両コストについても量産効果による価格の低下が定常に達するまでの補助を行うこととする。ここでは図-2, 図-3の最

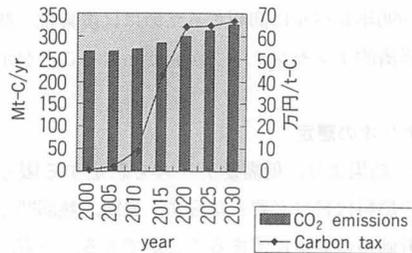


図-9 炭素税率とCO₂排出量の推移 (シナリオ II)

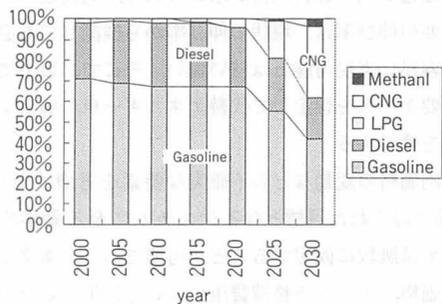


図-10 運輸部門の燃料シェアの推移 (シナリオ II)

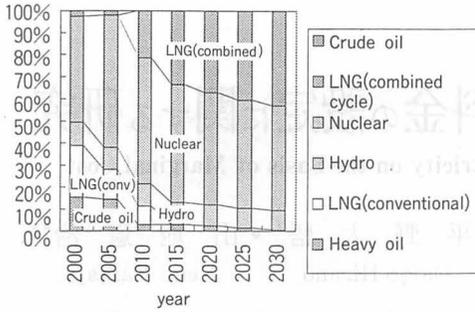


図-11 電源構成の推移 (シナリオ II)

適化結果に基づき、CNGおよび電気自動車を対象とする。また車両への補助金については次のように仮定する。第*i*期の補助金額をT [*i*] とし、生産台数D [*i*]、価格P [*i*] が与えられたとき、第*i*+1期では、

$$D [i+1] = T [i] / (P [i] - P_0),$$

$$P [i+1] = \text{price} (D [i+1]),$$

としてこれを繰り返す。price()は図-5の関数を示す。

計算結果は図-12~図-14に示される。炭素税率は期間を通して、0.5~2.5万円/t-C程度で推移する。税金は1995~2005年の間では運輸部門の燃料代替の補助金に還流させ、それ以降では炭素税のみとなる。代替燃料車の車両とインフラ整備に補助金を施すことにより図-4で示したシャドウプライスの値が非常に大きな対策であるCNG、電気自動車が導入され、導入された台数に応じて生産価格が低下し、2005年以降では炭素税のみで代替燃料車が選択されている。また、発電部門では原子力が上限に張り付いて、LNG複合のシェアが大きくなっている。これは2030年の時点で目標となるシステムをほぼ再現している。

5. 結び

本研究では2030年における我国のCO₂排出量を1990年レベルで安定化させることを想定して、そのために必要な対策と動学的なシナリオを検討した。得られた結果は次のようにまとめられる。

- (1) 需要の伸び率を0.75%/yrとした場合(低需要ケース)では、発電・熱部門での燃料転換によって2030年におけるCO₂排出量を1990年レベルに抑制可能であり、対策は運輸部門にまで及ばない。
- (2) 需要の伸び率を1.2%/yrとした場合(高需要ケース)では、運輸部門での燃料代替が不可欠となり、現行燃料から、電気・CNGへの代替が必要となる。
- (3) 運輸部門の燃料代替を炭素税だけでおこなうことは容易でなく、(シナリオ I・II)、税金の還流によ

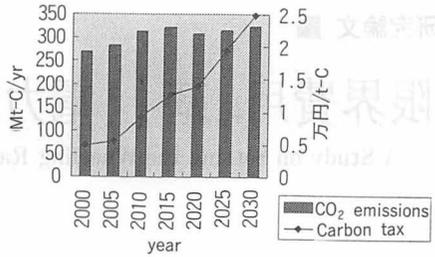


図-12 炭素税率とCO₂排出量の推移 (シナリオ II)

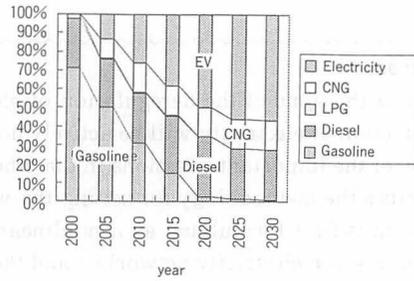


図-13 運輸部門の燃料シェアの推移 (シナリオ II)

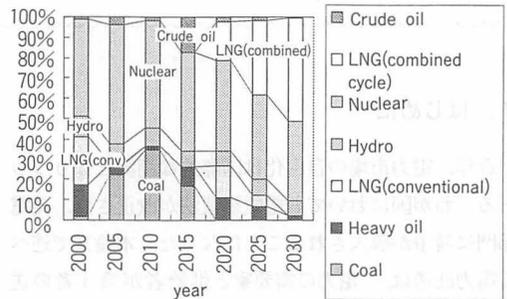


図-14 電源構成の推移 (シナリオ III)

る補助金が必要となる。この場合、2005年までにインフラを補助金で整備することにより、それ以降は比較的軽負荷の炭素税のみで燃料代替を行うことが可能となる(シナリオ III)。

参考文献

- 1) 吉田好邦ほか; CO₂排出量の抑制のための体系的対応策の検討, シミュレーション, 14巻, 1号 (1995), 52~57.
- 2) 吉田好邦ほか; 環境問題を考慮した代替燃料車の導入シナリオ, エネルギー・資源学会第12回講演論文集, (1993), 17~22.
- 3) 武石哲夫ほか; 環境保全効果を考慮した将来エネルギー車導入のコスト・エフェクト研究, エネルギーシステム・経済コンファレンス第10回講演論文集 (1994), 123~128.
- 4) IEA Statistics; Energy Balance of OECD Countries 1990/1991
- 5) (財)日本エネルギー経済研究所; エネルギー経済, 19巻, 2号 (1993), 152-155.
- 6) 小山茂夫ほか; エネルギーシステムモデルMARCALによる価値フローの分析, 電子総合研究所報, 55巻, 6号 (1991), 750-763.