

■ 研究論文 ■

自動車交通部門における温暖化抑制技術の評価

Evaluation of Automotive Technologies against Global Warming

今 関 隆 志*

Takashi Imaseki

(1995年11月1日原稿受付・1996年6月12日原稿受理)

Abstract

This paper aims at evaluating automotive technologies against global warming. In the Japanese transport sector, automobiles are still increasing in number even since 1990. And if it keeps the pace, CO₂ emission may multiply in this sector until the first half of 21 century. Therefore, it is very important to study on measures to reducing CO₂ emission in the transport sector. First in this paper, the possible automotive technologies; fuel consumption's improvement and electric vehicles' introduction, are discussed. Second, these effect on reducing CO₂ emission is evaluated in the Japanese transport sector. Third, the acceptance of these technologies to automotive consumers is evaluated, by using the life-cycle cost analysis from initial cost and annual fuel cost point of view. In consequence, it is possible to reduce CO₂ emission in 2025 under the level of 1995 by the scenario of simultaneous implementation of fuel consumption's improvement and electric vehicles' introduction. However, automotive consumers hardly accept these technologies, especially electric vehicles, because of high cost and low economical benefit. It is, therefore, necessary for the public sector to support the introduction of these automotive technologies financially and institutionally in the Japanese transport sector.

1. はじめに

地球温暖化問題は1980年代後半から国際政治の舞台で大きく取り上げられ、議論が重ねられてきた。わが国でも1990年10月に発表された地球温暖化防止行動計画に基づき、さまざまな部門での対策が実施されつつある。その中で最近指摘されるのが、部門別CO₂排出量シェアでほぼ2割を占め、かつ他部門に比べて毎年増加傾向にある運輸部門での対策、特にそのほとんどを占める自動車交通部門における対策の重要性である。

そこで本論文では、わが国の自動車交通部門における今後30年間のCO₂排出量を予想し、この量を1995年のレベル以下に抑制可能な技術とその導入にあたっての課題について検討する。本論文の構成は以下の四部分からなる。まず2. において技術導入のシナリオを設定し、これらの効果を3. で分析する。次に4. において今後の燃料価格変化を考慮した上で、新車購入

時のイニシャルコストと維持に要するランニングコストの総和であるライフサイクルコストの金額を計算し、上記シナリオの市場への受容可能性を分析する。そして最後に5. においてわが国の自動車交通部門における温暖化抑制技術の評価をまとめ、必要な方策を明らかにする。

2. CO₂排出を抑制する自動車の技術

自動車交通部門におけるCO₂排出を抑制できる技術としては、(A)現行の内燃機関自動車において燃費を向上させること、(B)代替燃料自動車の導入をはかることなどが考えられている。

(A) 内燃機関自動車における燃費の向上

現在、自動車の燃費を向上させるリーンバーンエンジン¹⁾、直噴ガソリンエンジン²⁾、無段変速機³⁾などの新技術が実用化され始めている。詳細は参考文献にまかせるが、本論文では、燃費改善に関して20~25%程度の効果の見込まれる直噴ガソリンエンジンと10%前後の効果の見込まれる無段変速機の組み合わせに着目し、一台あたりの燃費はおおよそ30%向上できるとお

* 東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻
〒153 東京都目黒区駒場4-6-1

表1 CO₂排出の削減を目的とした技術の導入シナリオ

<シナリオ-1 : 新車全数に占める (A) の比率を, 毎年 3.3%増とする>
<シナリオ-2 : 新車全数に占める (A) の比率を, 毎年 6.7%増とする>
<シナリオ-3 : 新車全数に占める (B) の比率を, 毎年 1.25%増とする>
<シナリオ-4 : 新車全数に占める (B) の比率を, 毎年 2.5%増とする>
<シナリオ-5 : シナリオ-1 と-3 のミックス>
<シナリオ-6 : シナリオ-2 と-4 のミックス>

なお, (A) の導入は1996年から, (B) の導入は2000年からを想定.

(A) は燃費改善した内燃機関自動車 (B) は電気自動車

く. この結果, 一台あたりのCO₂排出量も30%削減される. また一台あたりの費用追加分は約10万円とする^{注1)}.

(B) 代替燃料自動車の導入

代替燃料自動車にはいくつかの種類が考えられるが, 比較的实现性の高い電気自動車に限定して考察する. 電気自動車の一台あたりのCO₂排出量は, 発電所の一次エネルギー構成で左右される. わが国の場合で検討された文献⁴⁾から引用して, 本論文では一台の電気自動車を導入することによってCO₂排出量は約50%削減されるとおく. またコストに関して研究された文献から, 現状の電気自動車は従来の内燃機関自動車に比べてイニシャルコスト (新車購入代) が2~3倍^{注2)}高いとおき, 一方ランニングコスト (走行距離あたりのエネルギー代) は約23% (深夜電力乙種を想定) と安価であるとおく^{注2)}.

以上のような (A) (B) の技術を導入するための6つのシナリオを, 表1のように設定する.

3. 技術導入の効果の分析

3.1 CO₂排出量削減効果の分析モデル

世界の保有する自動車台数の今後の増加率から自動車交通部門のCO₂排出量を予測したMackenzie 他⁶⁾の研究に基づき, わが国を事例とした題記分析を行う.

まず, わが国における毎年の保有台数 $S(t)$ の増減率を2010年まで年率2%, 以降年率1%と与える. これは, わが国における自動車保有台数の増加率が1990年から1994年までの平均で年率約2%強あったこと⁷⁾, さらに, わが国の自動車普及率は, 世界でもっ

とも高いアメリカの普及率 (現在約77%) を2025年までには越えないとしたことから導いた簡易的な仮定である^{注3)}.

$$S(t+1) = S(t) \times 1.02 \quad (\sim 2010\text{年}) \quad (1)$$

$$S(t) \times 1.01 \quad (2010\text{年}\sim)$$

第 t 年に新車として現状の内燃機関自動車が $o(t)$ 台, 燃費改善された内燃機関自動車が $a(t)$ 台, 電気自動車が $b(t)$ 台導入されると考える. 寿命は10年と仮定すれば, 第 $t+1$ 年に国内で保有する燃費改善した内燃機関自動車台数 $A(t+1)$, 電気自動車台数 $B(t+1)$, 現行の内燃機関自動車台数 $O(t+1)$ は,

$$A(t+1) = A(t) + a(t+1) - a(t-10) \quad (2)$$

$$B(t+1) = B(t) + b(t+1) - b(t-10) \quad (3)$$

$$O(t+1) = S(t+1) - A(t+1) - B(t+1) \quad (4)$$

と求められる. ここで, $a(t)$ と $b(t)$ の値は表1から与える.

以上から, 基準年での値を $C1$ とおいたときのわが国の自動車交通部門のCO₂排出量は,

$$C(t) = C1 \times \{O(t) + A(t) \times 0.7 + B(t) \times 0.5\} \quad (5)$$

と求められる^{注4)}.

3.2 分析結果

以上の計算結果を図-1に示した. この結果, まず無体策ケースの場合, 2025年頃のわが国の自動車交通部門におけるCO₂排出量は, 現在に比べておよそ1.55倍に増加することがわかった.

一方, シナリオ導入の効果を見ると, (A) または (B) の単独の技術を導入したシナリオ-1~4では

注3) 2025年のわが国の人口を約1億2,600万人¹⁰⁾とすれば, 現在のアメリカ並みの普及率 (77%) に相当する自動車保有台数は約9,700万台である. (1) 式の増加率を実現した場合の2025年のわが国の自動車保有台数はこの値にほぼ等しい.

注4) わが国の場合, 自動車一台あたりの年間走行距離の変化は保有台数の増加に比べて小さいため¹⁰⁾, 無視した.

注1) 直噴ガソリンエンジンの価格を, すでに普及している直噴ディーゼルエンジンの価格を参考にして仮定した.

注2) 内燃機関自動車の現在 (1995年) の燃料代は平均約10円/kmである. 一方, 電気自動車の場合は, 電気料金7円/kWh (深夜電力乙種を想定) と走行電力消費率3km/kWh¹¹⁾から計算して, 2.3円/kmである.

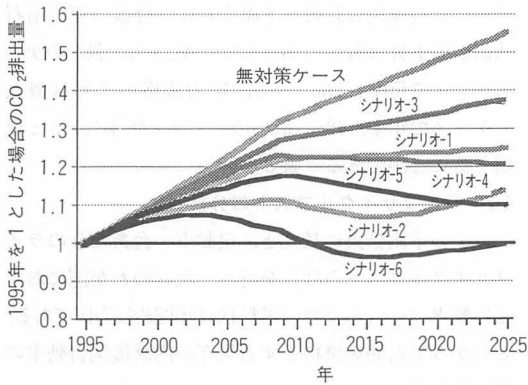


図-1 わが国の自動車交通部門から排出されるCO₂量

CO₂排出量を1995年レベルに抑制することはできないものの、(A)と(B)の両方の技術を同時に導入するシナリオ-6が実現できれば、CO₂排出量は1995年レベルに抑制できることが明らかになった。

4. 技術の受容可能性の分析

ここでは、市場での技術の受容可能性を評価する目的で寿命期間中の前記技術のライフサイクルコストを計算し、消費者にとっての経済性を分析する。

武石他⁹⁾は、車両取得費と燃料代などの維持費とか

ら電気自動車のライフサイクルコストを計算した。その結果、現状の電気自動車の車両価格のレベルでは、ライフサイクルコストは内燃機関自動車に比べて大幅に高く、電気自動車の車両価格が内燃機関自動車の約1.4倍以下になってはじめて電気自動車の経済的なメリットが現れるとしている。このようなライフサイクルコストからみた経済性は、新車購入時(t₀年)のイニシャルコストの増加分ΔC_iと自動車の寿命(T)期間に生じる年間維持費用の減少分ΔC_a(t)を与えた上で、

$$\sum_{t=t_0}^{t_0+T} [\Delta C_a(t)] \geq \Delta C_i \tag{6}$$

という簡単な条件式から評価することができる。この分析ではΔC_a(t)の支配的な要素である燃料代が結果に重要な影響を与えると考えられるため、本論文では最初に燃料価格に関する予測をした上で、(6)式からライフサイクルコストの評価を行う。

4.1 今後の燃料価格の予測

Edmonds and Reilly モデル⁹⁾を使って長期的な石油価格変化の予測を行う。用いたパラメーターの値を表2に示す。計算の結果、わが国における運輸用二次液体燃料価格の変化は、最大のケースで年率約1.6%、最小のケースで年率約0.7% (いずれも2050年

表2 Edmonds and Reilly モデルの計算に用いたパラメーター

人口	2075年で北側諸国 (USA, OECD西欧, OECD太平洋, 中部欧州) 15億人 南側諸国 (中部アジア, 中東, ラテンアメリカ, アフリカ, 東・南アジア) 85億人 出典: IPCC; Climate Change (1990)	
経済成長率	(1) 高成長ケース: 北側諸国2.5%/年, 南側諸国4.0%/年 (2) 低成長ケース: 北側諸国1.5%/年, 南側諸国2.5%/年	
石油究極可彩埋蔵量	(1) 2兆バレルケース (2) 3兆バレルケース	
合成液体燃料の導入	(1) \$4.55/ギガジュールで合成石油燃料が導入されるケース (2) 導入されないケース	

表3 予測された燃料価格の上昇率

石油価格の上昇率	最大のケース 年率2.6%	石油埋蔵量: 2兆バレル 炭素税: 4万円/ト 世界の経済成長率: 高成長 合成石油の導入: なし
	最小のケース 年率1.2%	石油埋蔵量: 3兆バレル 炭素税: 2万円/ト 世界の経済成長率: 低成長 合成石油の導入: あり
電力価格の上昇率	最大のケース 年率2.4%	石油埋蔵量: 2兆バレル 炭素税: 4万円/ト 世界の経済成長率: 高成長 合成石油の導入: なし
	最小のケース 年率1.4%	石油埋蔵量: 3兆バレル 炭素税: 2万円/ト 世界の経済成長率: 低成長 合成石油の導入: あり

までの平均)で上昇することがわかった。また同様に、わが国における電力価格の変化は、最大のケースで年率0.25%、最小のケースで年率約0.2% (いずれも2050年までの平均)となることがわかった。なお本論文での価格は実質値である。

次に炭素税の導入に伴う影響を考える。炭素税額の研究をおこなっている文献¹⁰⁾に基づき、ここでは2020年頃までに約2~4万円/トン(炭素換算)の炭素税課税を仮定する。この結果、上記炭素税課税によってガソリン価格は年率0.5~1.0% (2020年までの平均)で上昇すると考えられる^{注5)}。一方、上記炭素税課税によって深夜電力価格は年率1.2~2.1% (2020年までの平均)で上昇すると考えられる^{注6)}。

以上、Edmonds and Reilly モデルによる計算結

注5) ガソリン1ℓ当りの炭素含有量を1/1,555トンとすれば、2020年頃までの炭素税課税によって、現在およそ100円/ℓのガソリン価格は約13~26円上昇すると考えられる。これを均等な年間上昇率で換算した。

注6) わが国の発電過程のCO₂排出総量を 1.2×10^{11} トン(炭素換算)/kWh¹⁰⁾とおくと、炭素税課税によって現在7円/kWhの深夜電力価格は2020年頃に2.4~4.8円/kWh上昇すると考えられる。これを均等な年間上昇率で換算した。

果に炭素税課税の影響を考慮すれば、今後の運輸用石油価格の上昇は最大のケースで年率2.6%、最小のケースで年率1.2%、一方、電力価格の上昇は最大のケースで年率2.4%、最小のケースで年率1.4%と見積もることができる(表3参照)。

4.2 ライフサイクルコストの分析

以上の予測結果に基づき、自動車一台あたりのライフサイクルコストの計算を行う。現在のわが国における自動車の一台あたりの燃料代は年間約12万円である。したがって石油を燃料とする現在の内燃機関自動車の燃料代Ca0(t)は、

$$Ca0(t) = 12 \times (1+x)^{t-1} \quad (7)$$

と表わすことができる。したがって燃費改善した内燃機関自動車の燃料代Ca1(t)は、

$$Ca1(t) = 12 \times 0.7 \times (1+x)^{t-1} \quad (8)$$

電気自動車の燃料代Ca2(t)は、

$$Ca2(t) = 12 \times 0.23 \times (1+y)^{t-1} \quad (9)$$

とおくことができる。ただし、(7)~(9)式の単位は万円、xは前記で求めた運輸用石油価格の年間上昇率、yは同じく電力価格の年間上昇率である。

この結果、(A)や(B)の技術を導入した場合の

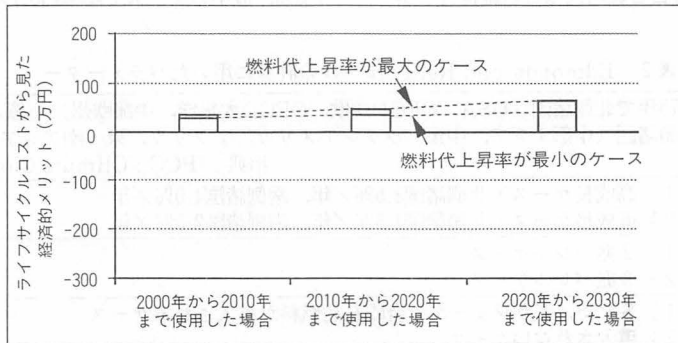


図-2 ライフサイクルコストから見た一台あたりの経済性評価結果(燃費改善した内燃機関自動車の場合)

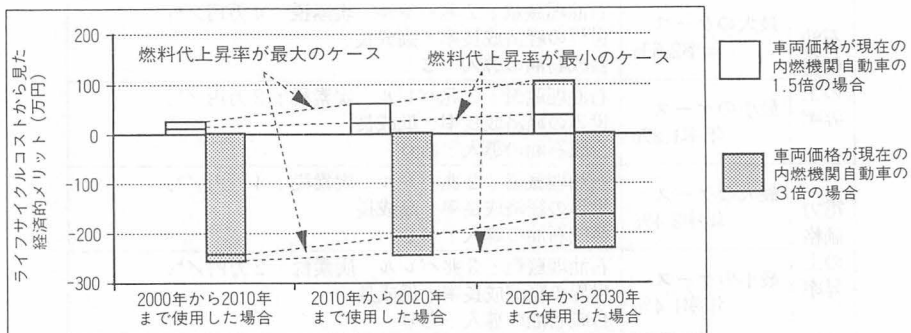


図-3 ライフサイクルコストから見た一台あたりの経済性評価結果(電気自動車の場合)

年間の燃料代の減少分 $\Delta Ca(t)$ は、まず燃費改善した内燃機関自動車を導入した場合、

$$\begin{aligned} \Delta Ca(t) &= Ca0(t) - Ca1(t) \\ &= 3.6 \times (1+x)^{t-1} \end{aligned} \quad (10)$$

電気自動車を導入した場合、

$$\begin{aligned} \Delta Ca(t) &= Ca0(t) - Ca2(t) \\ &= 12 \times (1+x)^{t-1} - 2.76 \times (1+y)^{t-1} \end{aligned} \quad (11)$$

と求められる。以上から(6)式を計算することにより、一台あたりのライフサイクルコストから見た経済性の評価を行う。計算結果を図-2と図-3に示す。簡単のため、導入された自動車の使用期間を2000年から2010年まで、2010年から2020年まで、2020年から2030年までの3ケースで図示する。

この結果、(A)の燃費改善した内燃機関自動車を導入した場合、いずれの期間でも消費者サイドの経済的なメリットは十分にあることがわかった。特に燃料代の上昇率が大きいほど、経済的メリットも高まることがわかった。一方、(B)の電気自動車の技術を導入した場合は、現在の内燃機関自動車に対する車両一台当たりのインシャルコストの比率を3倍と1.5倍の2通りで示した。まずインシャルコストが3倍の場合、燃料代の上昇に関わらず、ライフサイクルコストから見た消費者サイドの経済的なメリットは常でないことがわかった。次に電気自動車の車両価格が1.5倍になった場合は、すでに2000年頃から経済的なメリットが生じることがわかった。特に、燃料代の上昇率が大きいほど、経済的メリットがいっそう高まることもわかった。

以上のようにライフサイクルコストの計算から技術の受容可能性を見た結果、現在の内燃機関自動車の燃費改善化に関してはすでに消費者において十分な経済

的メリットが予測され、今後の技術開発と普及はある程度自動的に進むものと考えられる。しかし電気自動車の場合は、特に車両の価格を内燃機関自動車の価格に対して1.5倍程度まで下げなければ消費者に経済的なメリットは生じず、技術の普及は進まないことが明らかになった。2倍から3倍している現状の電気自動車の価格レベルから考えれば、このためには技術開発を強く推進させていく努力が必要であると結論できる。

4.3 シナリオ導入の社会的費用と便益の試算

ライフサイクルコストの分析は、一人の消費者にとっての技術の受容可能性を評価する指標である。しかし、わが国の自動車交通部門全体のCO₂排出を抑制していくためには、表1で示したシナリオ-6どおりに技術が普及していかなければならない。そこでこの場合にかかる費用の累計と、社会的に発生する経済的な便益⁷⁾の累計を試算し、このシナリオの社会的な経済性を求め、技術の普及に対する課題の大きさをさらに確認する。なお分析の対象は、すでに課題の大きさが明らかになった電気自動車の場合のみで行う。

社会的な費用SC(t)と便益SB(t)を以下のように定義する。

$$SC(t) = \int_0^t [Cb \times b(t)] dt \quad (12)$$

$$SB(t) = \int_0^t [\Delta Ca2(t) \times B(t)] dt \quad (13)$$

ただし、Cbは現在の内燃機関自動車に対する電気自動車の一台あたりの価格上昇分である。

これより(12)(13)式の値の差を計算することで、わが国の自動車交通部門において、CO₂排出を抑制して行くために必要な技術導入シナリオの社会的な経済性を

注7) ここでの社会的便益は、社会的な燃料消費の節約から得られるものに限定している。

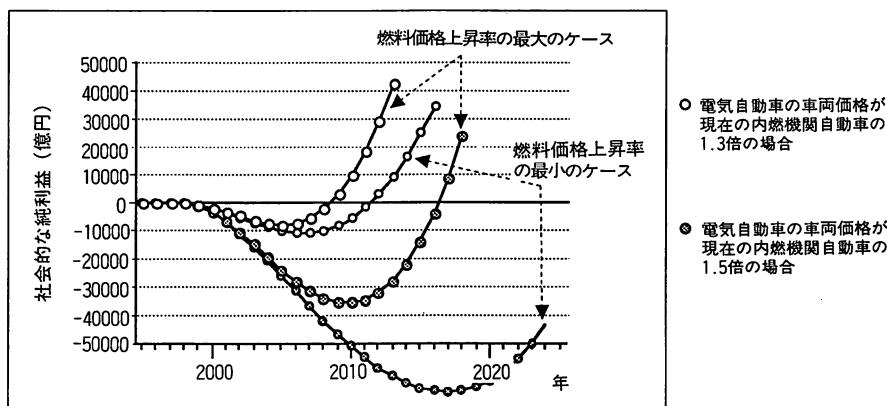


図-4 シナリオ-6によって電気自動車の導入が実現した場合の社会的な純利益

検討することができる。

計算した社会的な費用と便益の差、すなわち社会的な純利益を図-4に示す。この結果、シナリオ-6どおりに2000年からの電気自動車台数の導入を毎年行う場合、電気自動車の車両価格が内燃機関自動車に対して1.5倍になっても、2017年頃になるまで社会的に利益は生じる可能性のないことがわかった。そして電気自動車の車両価格が1.3倍程度にできた場合に、2010年頃から社会的な利益が生まれる可能性のあることが明らかになった。以上のように、わが国の自動車交通部門が電気自動車の普及を毎年進めていくためには、よりいっそう電気自動車の価格を低減する努力が必要であることが明らかになった。

5. まとめ

本論文では、自動車技術の導入によってわが国の自動車交通部門におけるCO₂排出量を現在（1995年）レベルに抑制できるかどうかを検討した。

まず、わが国の自動車保有台数の増加率から予測して、30年後にはわが国の自動車交通部門におけるCO₂排出量が現在に比べておよそ1.55倍に増加する可能性のあることを明らかにした。次に、現在考えられるCO₂排出量を抑制する効果のある自動車の技術導入シナリオを設定し、今後30年間のCO₂排出量の抑制効果を分析した結果、燃費改善した内燃機関自動車の導入と電気自動車の導入とをあわせて実施していくシナリオが実現できれば、わが国の自動車交通部門からのCO₂排出量は1995年レベルに抑制できる可能性のあることを明らかにした。

一方、これらの技術の市場への受容可能性を評価するため、今後予想される燃料価格の上昇を考慮してライフサイクルコストから見た消費者サイドの経済性を分析した。その結果、燃費改善した内燃機関自動車には十分経済的メリットはあるものの、電気自動車は、現状の車両価格を大幅に引き下げなければ消費者サイドに経済的なメリットは生じないことが明らかになった。

以上、現在考えられる自動車技術の導入をはかることによって、わが国の自動車交通部門におけるCO₂排出量を長期的に現在（1995年）レベル以下に抑制していくためには、その実現への一つの鍵である電気自動車の導入に関して、技術の開発と普及を積極的に推進するための政府による経済的および制度的な支援策が不可欠であると結論づけることができる。

現在の自動車交通部門はそのエネルギー源を100%石油に依存している。今後の石油供給体制の変化に対応するためにも、自動車交通部門がCO₂の排出を抑制し、化石燃料消費を削減できる技術を積極的に導入していく方策は必要である。

謝辞

本研究にあたっては、Edmonds and Reilly によるパーソナルコンピュータ用シミュレーションプログラムを使用させていただきましたことを作者に感謝いたします。また上記シミュレーションの実施にあたって、お世話になった東京大学工学部地球システム工学科石谷研究室の大学院生村上純一氏に深く感謝いたします。

引用文献

- 1) 岡野博志；トヨタにおけるリーンバベンエンジン、自動車技術会リーンバベンエンジンシンポジウム講演論文集（1992）、20～25。
- 2) 日経メカニカル、8月号（1995）、38～44。
- 3) 中島泰夫；21世紀の自動車社会を考える、資源環境対策、vol.31（1995）、32～44。
- 4) 小林紀；各国の電源構成によって異なる電気自動車導入のCO₂低減効果、自動車交通（1993）、日産自動車、22～25。
- 5) 総合研究開発機構；電気自動車の導入とその社会、経済環境・エネルギー的インパクトの研究（1991）。
- 6) Mackenzie J. J. and Walsh M. P.；Driving Forces：Motor Vehicle Trends and their Implications for Global Warming, Energy Strategies, and Transportation Planning, World Resources Institute（1990）。
- 7) 自動車産業ハンドブック（1994）、日刊自動車新聞社。
- 8) 武石哲夫、小林紀；代替エネルギー車の受容性研究、第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集（1996）、37～42。
- 9) Edmonds J. and Reilly J.；A Long-term Global Energy-Economic Model of Carbon Dioxide Release from Fossil Fuel Use, Energy Economics, April（1983）。
- 10) Dean A. and Hoeller P.；Costs of Reducing CO₂ Emissions：Evidence from six Global Models, The Economic Costs of Reducing CO₂ Emissions, OECD（1992）、15～47。
- 11) 武石哲夫、小林紀；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、自動車交通（1993）、日産自動車、18～21。
- 12) 厚生省人口問題研究所；人口の動向、日本と世界～人口統計資料集、厚生統計協会（1993）。
- 13) 自動車産業関連統計（1994）、日本自動車工業会。
- 14) 日本エネルギー経済研究所；エネルギー経済統計要覧（1995）。