

B-14 地球温暖化対策技術の評価及び評価手法の開発に関する研究

(3) 都市、交通関連分野の温室効果ガスアナリシス、対策技術探索、個別技術評価に関する研究

① 交通関連分野の温室効果ガスアナリシス、対策技術探索、個別技術評価に関する研究

研究代表者 東京大学工学部 石谷 久

環境庁 国立環境研究所

地域環境研究グループ 交通公害防止研究チーム

清水浩、森口祐一

社会環境システム部 環境計画研究室

近藤美則

東京大学 工学部

資源開発工学科 開発工学講座

(委託先)

東京大学 石谷 久、松橋隆治、大村昭士

平成3-5年度合計予算額 16,406千円

(平成5年度予算額 4,200千円)

【要旨】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が、現実のエネルギーシステムがそれを受け入れるか否かは、その対策の経済性に依存する。筆者らは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CO₂抑制対策における代替燃料車の導入の位置付けを検討してきた。本研究では、静学モデルによる近未来の具体的なCO₂の低減方策を評価し、次に代替燃料車などの有望な方策が市場に普及するための動学シナリオを開発する。また、自動車交通のエネルギー消費量は、個人のライフスタイルや交通状況（渋滞の有無など）によっても影響を被る。この問題についても回帰分析による調査研究をおこなった。

【キーワード】線形計画法、静学モデル、動学モデル、代替燃料車、ライフスタイル

1. 序

周知の様に交通運輸部門は先進諸国では比較的大きなエネルギー消費のシェアを占めており、従来これが比較的少なかった日本でも近年着実にその消費量が伸びている。その中でも化石燃料を基とする液体燃料に頼る自動車交通はその交通量が多いこととあいまって、交通運輸部門内での二酸化炭素の排出比率が高く日本国内でも87%に達すると見られている。更に日本全体のCO₂排出量の約19%が自動車利用からの排出と推計されており、交通部門における温暖化対策技術としては自動車からのCO₂排出削減対策がもっとも重要である。他方で、自動車からの地域環境負荷、とりわけ効率がよくCO₂削減策として好ましいディーゼル機関による大型車両からのNO_xの排出による大気汚染は極めて深刻な状況にあり、特に交通の集中する都市部においてはもっとも深刻な地域環境問題とみなされている。本研究においては地域、地球環境を改善するための交通関連分野の対策方策として、代替燃料車の長期的な導入シナリオに関する検討を行う。

自動車交通のエネルギー消費量は、個人のライフスタイルや交通状況（渋滞の有無な

ど)によっても影響を被る。この問題については、5章において回帰分析による調査研究をおこなった。

2. 研究目的

現在、地球環境、地域環境の改善、並びに燃料の多様化を目的とした代替燃料車としては3章に示される様な各種の自動車への代替が検討されている。前述のように代替燃料車は道路交通における輸送手段の直接的な対策であって、その大量普及を実現するためには相当の促進策を必要とするので、その根拠と実現性を把握するためにもその評価が極めて重要である。

そこで、本研究では、まず長期的な代替燃料車への転換のシナリオ開発のために、まず線形計画法による静学モデルを開発した。静学分析においては、次の点を目的とした。

(1) エネルギーシステム全体を考慮にいて、環境規制に対する有効な方策の組み合わせを検討する。

(2) 代替燃料車として、上記の環境規制に対する有効な対策となりうるものを探索する。

次の段階では、代替燃料車の中で上記の静学モデルで有望と判断されたものについて、具体的な導入シナリオを検討した。これは、将来の具体的なCO₂の低減目標値を設定し、これを達成するためのもので、1990年を起点として、2030年まで10年毎に最適化を行う準動学モデルである。準動学モデルによる分析では、以下の点を目的とした。

(3) CO₂の削減目標値を達成するために、有効な方策の組み合わせを検討する。

(4) 環境規制に対して有望と判断された代替燃料車について、これを市場に導入するための有効な経済方策（炭素課税など）を探索する。

また、自動車交通のエネルギー消費量は、個人のライフスタイルや交通状況（渋滞の有無など）によっても影響を被る。特に、近年乗用車の大型化が進み、このことが平均燃費を悪化させている。そこで、次の点の分析を目的に含める。

(5) 乗用車の大型化やAT車の増加などが、交通部門のエネルギー消費量に及ぼす影響を分析する。

3. 研究方法

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が、現実のエネルギーシステムがそれを受け入れるか否かは、その対策の経済性に依存する。筆者らは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CO₂抑制対策における代替燃料車の導入の位置付けを検討してきた。本研究では、静学モデルによる近未来の具体的なCO₂の低減方策を評価し、次に代替燃料車などの有望な方策が市場に普及するための動学的シナリオを開発する。以下にその研究方法を述べる。

(1) モデルの構造と外生変数に関する仮定

① エネルギーモデルの構造

本モデルは1990年を起点として、2030年まで10年毎に最適化を行う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になっている。

ア. 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。最適化に際しては線形計画法（linear programming; LP）を用いる。

- イ. 本モデルはトータルエネルギーシステムの性質を検討し、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プラントの種類、需要部門の区分なども必要最小限とした。
- ウ. 運輸部門では、燃料として現行のガソリン・軽油・LPGに加え、CNG・電気・メタノール・ハイブリッド（電気-軽油型）を考慮し、車種は、普通乗用・小型乗用・軽乗用・長距離普通貨物・短距離普通貨物・小型貨物・軽貨物・バスの8種類をモデルに取り入れている。燃料と車種の可能となる組み合わせは表1、2のように仮定する。

表1. 燃料と車種の組み合わせ（乗用）

	普通	小型	軽
ガソリン	○	○	○
軽油	○	○	
CNG	○	○	○
電気	○	○	○
メタノール	○	○	○
LPG	○	○	○
ハイブリッド			

表2. 燃料と車種の組み合わせ（貨物）

	長普通	短普通	小型	軽	バス
ガソリン	○	○	○	○	○
軽油	○	○	○		○
CNG	○	○	○	○	○
電気			○	○	
メタノール	○	○	○	○	○
LPG	○	○	○	○	○
ハイブリッド	○	○	○		○

エ. 需要部門

以下のような各需要部門について1990年のデータに基づき、それぞれ最終需要の値を設定した。

- 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

電力需要はその日変動、季節変動を考慮して、負荷持続曲線で与える必要があるが、最適化の性質上離散化せざるを得ない。そこで、1990年の負荷持続曲線を基に一年を二時間帯に近似した。

オ. 制約条件および目的関数

制約条件は最適化の各場合によって異なるため、ここでは省略する。モデルにおける制約式の数約500、変数の数はスラック変数を含めて約1200である。モデルにおける各変数の値は、総費用の最小化による最適化によって決定される。総費用は固定費（プラント建設費用）と可変費（燃料費）の和（ともに年費用）で与えられる。ただし、炭素税を考慮する場合にはこれを目的関数に入れることになる（動学的分析）。

② 外生変数についての仮定

- ア. 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通りについて分析を行う。
- イ. 価格の上昇率・割引率 燃料価格はIEAのESTAPグループによる高価格シナリオを用いて、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。

(3) 分析の方法

分析は以下の①から③の手順で行う。

- ① CO₂抑制目標の設定 本稿では、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。
- ② 必要となる対策の決定 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、最適化計算を行う。その結果より目標値達成のために導入すべき対策を決定する。
- ③ ②の対策をインセンティブ（炭素税・補助金）の対象とし、現状を起点とする動学的分析を行い、目標値達成のためのシナリオを検討する。

4. 結果

(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、エネルギーシステムの最適化をおこなう。ここで、車両価格は後述する普及後の価格に基づいて計算をおこなっている。結果は表3にまとめられる。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。

表3. 2030年での最適化されたシステム

(低需要ケース)

(高需要ケース)

部門	燃料シェア	燃料シェア
運輸(乗用)	現行燃料100%	電気52%, 現行燃料48%
運輸(貨物)	現行燃料100%	現行燃料38%, 電気33%, C N G 29%
発電	原子力51%, 重油火力21% 微粉炭火力14%, 水力9%, 他5%	L N G 複合51%, 原子力39% 水力7%, 重油火力3%
産業用熱	L N G 85%, 石炭15%	L N G 100%
民生用熱	L N G 100%	L N G 100%

(2) シナリオの想定

(1)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、表4.1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。本稿では車両価格、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、量産化により価格が低下する。したがって、モデル上では最適化1ステップごとに生産台数によって価格を更新する必要がある。現状では電気自動車で5-6倍、C N G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1 : 税収(炭素税)の還流なし。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。

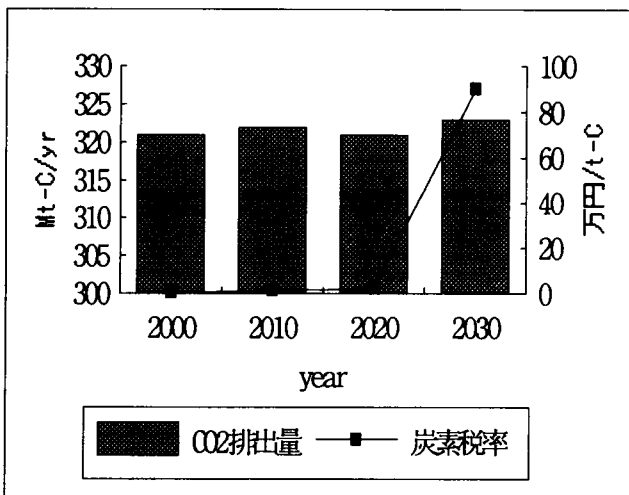
シナリオ2 : 税収(炭素税)の還流なし。炭素税率は年毎に徐々に増加させ、最終期の炭素税率を最小化するようにする。

シナリオ3 : 初期のみ税収(炭素税)の還流を行う。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。

(3) 動学的分析による検討

① シナリオ1

1990年のCO2排出量320Mt-Cを超えないような、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1,2に示される。2020年までは炭素税率約2万円/t-C（現在価値換算）程度でCO2を抑制可能であるが、需要の増加に伴い、2030年では運輸部門の燃料代替が必要となり、税率は89万円/t-Cと急激に増大する。また、運輸部門ではCNG、電気が導入量の上限に達するため、メタノール、ハイブリッドが一部の車種で選択されている。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。



(注) 税率は現在価値換算

図1. 炭素税率とCO2排出量の推移 (シナリオ1)

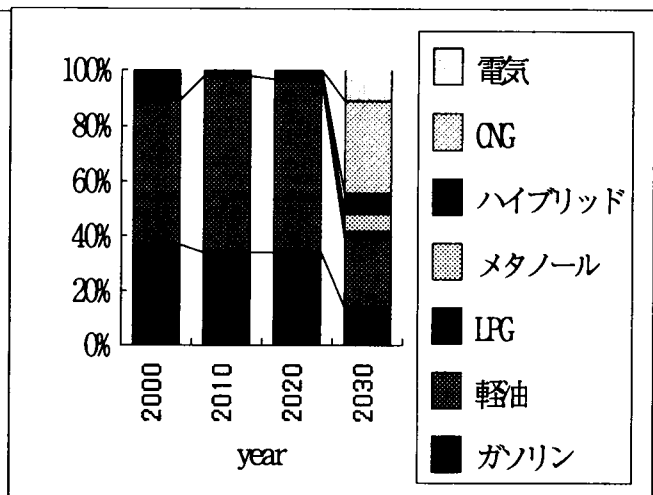
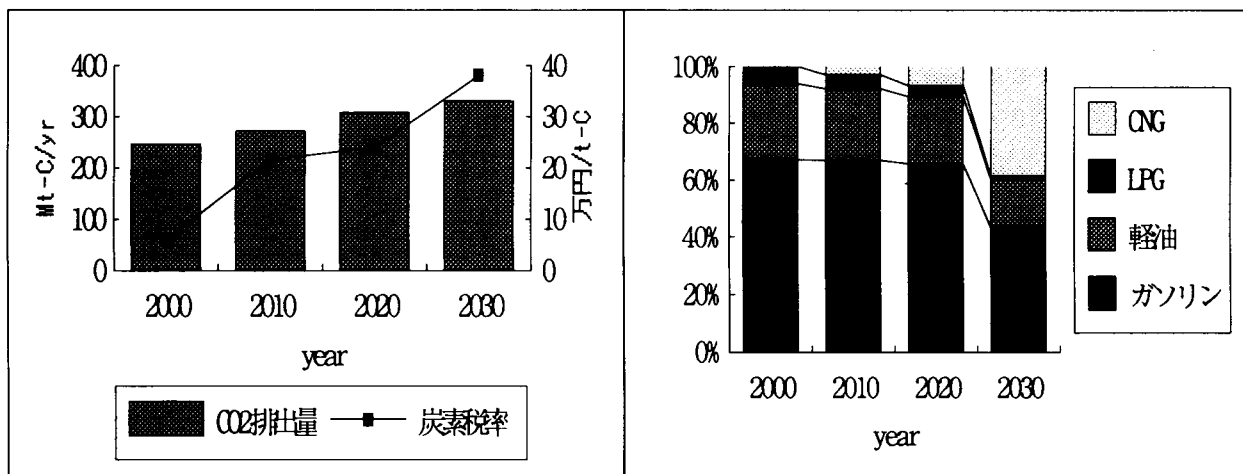


図2. 運輸部門の燃料シェアの推移 (シナリオ1)

② シナリオ2

シナリオ1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、末期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2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3,4に示される。第1期の炭素税率は6万円/t-C程度で、最終期には38万円/t-Cまで上昇する。第2期で運輸部門で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推移する。



(注) 税率は現在価値換算

図3. 炭素税率とCO2排出量の推移(シナリオ2)

図4. 運輸部門の燃料シェアの推移 (シナリオ2)

③ シナリオ3

税収の還流なしで運輸部門の燃料代替を行えば、システム2のように非常に大きな炭素税率を課すことになる。したがって、税収の還流によって、代替燃料車導入のインセンティブを施す必要がある。補助金は市場原理を逸脱する側面をもち、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3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。具体的には表3に基づき、CNGおよび電気自動車を対象とする。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、

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

$$P[i+1]=price(D[i+1]),$$

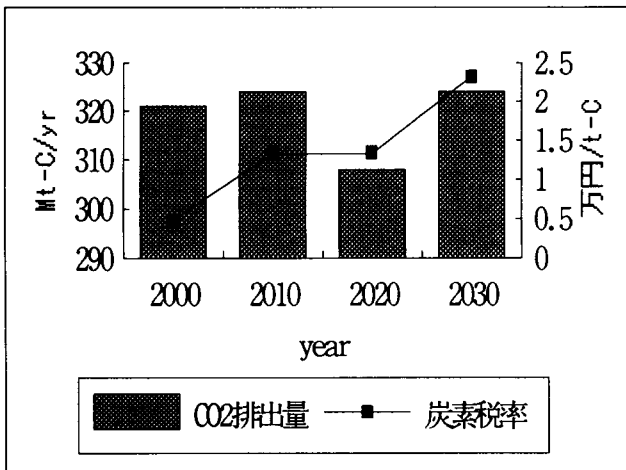
(注) *P*[*i*] : 第*i*期の車両価格,

*P*₀ : 現行車の車両価格,

D[*i*] : 第*i*期の生産台数

としてこれを繰り返す。ここで、*price*()は自動車価格の生産台数に関する関数を示す。

計算結果は図5,6に示される。炭素税率は期間を通して、0.5-2.3万円/t-C程度で推移する。税収は第1期の全額、第2期の約2割を運輸部門の燃料代替の補助金に還流させる。この結果、運輸部門でCNG、電気のシェアが大きくなる。また、発電部門では原子力が制約の上限に張り付いて、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。



(注) 税率は現在価値換算

図5. 炭素税率とCO2排出量の推移 (シナリオ3)

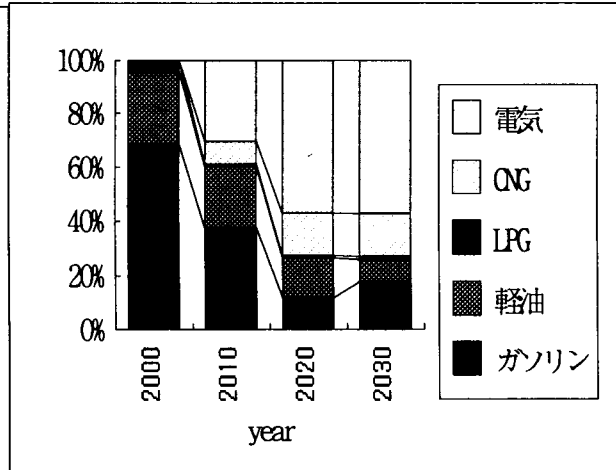


図6. 運輸部門の燃料シェアの推移 (シナリオ3)

5. 車の高級志向による燃料消費量への影響の分析

大型車は小型車よりは燃費が悪く、またAT車もマニュアル車に比べて燃費が悪いことが知られている。このような高級志向によるエネルギー消費量の増加について分析する。高級志向にはこの他パワーステアリング、エアコン、パワーウィンドウ等の設備も考えられるが、これらについては統計が無く、現状の普及率を考えると今後の燃費悪化要因ではないと思われるので考慮しないこととした。

(1) データの状況と分析結果

燃費は自動車輸送統計月報 ('80.4~'93.6) によった。サンプル調査のため、細かい分類での分析は無理である。車種構成は初年度登録別残存台数年次報告書によった。AT車比率は新車販売統計年報によった。これは当該年次の販売比率なので、初年度登録別残存台数統計によって、過去の累積を考慮した比率に加工した。

自家用乗用車の燃費は'80年代を通じ向上していたが、'90年頃から反転して燃費が悪くなっていった。一方、販売されている車の種類では税制改革に伴いこの頃から車の大型化が目立ち始めている。また、AT車は'80年代に立ち上がり'92年には新車販売に占める割合が74.7%にもなっている。燃費の反転の時期とは対応しないが、新旧の車が利用されているタイムラグを考慮すれば無視できない関連があるものと思われる。

以上から、大型車、AT車比率を説明変数にして以下のモデル式をつくった。

$$P = Q^{**t} \times L^{**b1} \times A^{**b2} \quad \text{--- (1)}$$

ここで、Pは燃費 (km/リットル)、Qは技術革新等燃費向上要素
 Lは登録車の中での大型車比率 (0.0~1.0)、AはAT車比率 (0.0~1.0)
 これを重回帰分析により以下のようにパラメータを決定した。

$$\ln(P)=1.4981 + 0.03116*t - 0.13552*\ln(L) - 0.02589*\ln(A) \quad (R^2=0.9666) \quad \text{---(2)}$$

(10.906) (4.753) (-6.772) (-1.551)

燃費向上要素の項は $\exp(0.03116)=1.0316$ すなわち年率3.16%の改善であり、これはかなり大きな値である。内容は技術革新によるものに相違ないであろうが、旧登録車が数年を経て廃棄されることによる蓄積効果が反映されていることに注意しなければならない。従って、これをそのまま将来に伸ばすことはできない。

結果からはやはり大型化の影響がAT化に比べてはるかに大きいことが分かる。仮に、新車販売における大型車の割合が'92年時点から増えないとしても登録車割合では増え続けるので、これだけで2000年には'92年より全体で10.7%燃費が悪化することが見込まれる。

(2) 実走行燃費の要因分析

貨物・旅客の管別燃費（'88.1～'94.6の平均）を比較してみると、乗用車では関東、近畿等の大都市圏で燃費が悪く、次いで、中部が悪い。大都市圏では渋滞がその要因と思われ、中部が悪いのは山岳等の地形によるものかも知れない。北海道、東北、新潟では他の地域に比べて季節変動が大きい、これは降雪、気温等の影響によるものと思われる。一方、貨物ではかなり様子が異なっている。貨物の場合、登録場所と実際に走っている場所は異なっている場合があり、また、活動範囲が広域なものも手伝って、旅客のような地域差とはならないものと思われる。次いで、季節変動をながめてみると貨物では明瞭に冬季と夏季の違いが見られる。乗用車でも同様であるが、12月、1月は冬季でも燃費がよく長距離走行の結果と思われる。これらについては今後更に定量的に分析してみたいと思っている。

6. まとめ

- (1) 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1・2）、税収の還流による補助金が必要となる。この場合、第2期（2010年）までにインフラを補助金で整備することにより、それ以降は軽負荷の税率で燃料代替を行うことが可能となる（シナリオ3）。
- (2) 自動車交通のエネルギー消費量は、個人のライフスタイルや交通状況（渋滞の有無など）によっても影響を被る。特に、近年乗用車の大型化が進み、このことが平均燃費を悪化させている。また、AT車の増加なども燃費を悪化させる要因となる。そこで、これらの要因についても回帰分析による調査研究をおこなった。

研究発表の状況

- 1) 石谷, 清水, 近藤, 交通分野における対策技術計測と制御, Vol.31, No.5(1992).
- 2) 近藤, 森口, 清水, 石谷, 素材生産に伴う二酸化炭素の排出原単位と自動車生産過程への適用, エネルギーシステム・経済コンファレンス第8回講演論文集(1992).
- 3) 渡辺, 石谷, 松橋, 道路の効率利用のための経済的介入の効果について, シミュレーション学会論文誌, 第12巻1号(1993).
- 4) 吉田, 石谷, 松橋他, 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).
- 5) 吉田, 石谷, 松橋他, 運輸部門における環境問題対応策の動学的検討, 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).
- 6) 武石, 小林, 石谷, 松橋, 吉田, 環境保全効果を考慮した将来エネルギー車のコスト・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).