

都市旅客交通のモーダル・シフト政策に伴うCO₂排出量削減効果の推計*

Estimation of Reduction in CO₂ Emission by Modal Shift Policy in Urban Passenger Transport

林 良嗣**、加藤 博和***、木本 仁****、菅原 敏文*****

Yoshitsugu HAYASHI **, Hirokazu KATO ***, Jin KIMOTO ****, Toshifumi SUGAWARA *****

1. はじめに

モータリゼーションの進展による自動車からの排出ガス量増大は、NO_x等による沿道環境悪化を引き起こすとともに、温室効果物質であるCO₂の増加においても無視できない要因である。特に発展途上国においては、今後経済発展と都市への人口集中によって、急速にモータリゼーションが進むことにより、上記の問題が将来深刻化してくることが予想される。

自動車交通に伴うCO₂排出量を削減するには、1) 輸送効率向上・燃費改善などによるCO₂排出原単位(単位輸送量あたり排出量)の削減、2) CO₂排出原単位の少ない機関へのモーダル・シフト、3) 職住近接、通信への代替などによる交通量の削減が考えられる。中でもモーダル・シフトは、各機関の利用者の経済的負担をどの程度にするかや、各交通機関をどれだけ整備するかといった交通政策とも関係する問題である。そこで本研究では、都市交通政策を環境面から評価するために、都市単位での旅客交通に伴うCO₂排出量を推計する簡便なマクロモデルを構築する。更にこのモデルを用いて、モーダル・シフト政策のうち、1) 自動車燃料税/炭素税の増徴、2) 鉄道の整備を行った場合のCO₂排出量削減効果を評価する。

2. CO₂排出量推計モデルに関する既往研究

都市の交通エネルギー消費量および環境負荷発生

* キーワード 環境計画、地球環境問題、交通計画評価

** フェロー会員 工博 名古屋大学教授 工学部地圏環境工学専攻
(〒464-01 名古屋市中種区不老町)
Tel 052-789-2772
Fax 052-789-3837)

*** 学生会員 工修 名古屋大学工学部研究科地圏環境工学専攻

**** 正会員 工修 運輸省第二港湾建設局

***** 正会員 工修 住宅・都市整備公団

量を推計する既往のモデルは、大きく以下の2種類に分けられる。

(1) マクロモデル

都市や地域全体を単位として、交通に伴う環境負荷発生量を、人口密度や交通機関分担率といった集計データを説明変数として表現するもので、計量経済モデルの応用の一種である。この代表例として、松岡・森田・有村¹⁾は、国土内の都市配置の集中・分散度合を分散度として定量化し、輸送部門のCO₂排出量との関係を定式化している。また、国際機関・政府機関等の各種予測もマクロモデルで行われるのが一般的である。

この手法は、比較的整備された集計データを用いることができ、簡易な予測で良い精度が得られる利点がある。したがって、都市全体の交通インフラ整備水準増加や、自動車利用に対する賦課などの、非属地的政策の分析に適する。しかし、交通において重要な立地関係を捨象するため、ネットワーク整備の効果や、環境負荷の発生者と受容者との位置関係が重要となる局地環境負荷の分析には適さない。

(2) ミクロモデル

交通需要予測によって各路線・地点の交通量や走行条件を推計した後、総走行台キロに環境負荷発生原単位(単位走行台キロあたり発生量)を乗じて環境負荷発生量を求める方法である。この方法をとった研究のうち、道路混雑を定式化することによって精緻化を図った例には以下のものがある。森口・西岡・清水²⁾は、各種交通政策代替案の実施による環境負荷発生とその影響を予測するモデルを構築している。また林・加藤・望月³⁾は、都市環状道路整備による環境負荷発生量とその空間的分布の変化を予測している。

これらの研究では、ネットワークの追加整備や有料道路の料金設定など、属地的分析の可能性が示され、実際の道路網計画への応用も期待される。また、沿道濃度といった環境負荷受容側の指標を予測可能である。ただし、一般にモデルシステムが複雑になる欠点がある。

3. CO₂排出量推計モデルの構築

本章では、以上の既往モデル研究を考慮した上で、都市旅客交通のモーダル・シフト政策によるCO₂排出量削減効果を予測するモデルを構築する。

(1) モデル構築の前提条件

本研究では、以下の3つの要件 (a) 都市全体に対して実施するモーダル・シフト政策の効果を分析可能であること、(b) 世界の各都市に適用可能であること、(c) 予測が簡便であること、(d) データ制約・入手可能性を考慮していること、を満たすモデルを構築する。そのために、都市を1つのまとまりとしてとらえるマクロモデルを採用する。すなわち、都市内部の人口分布や交通ネットワークの違いは考慮しない。

外国の都市に関するマクロ指標を得ることは、入手可能性の問題や、データのフォーマットがおおの異なること、都市範囲の定義がまちまちであることなど制約が大きい。本研究では以上の点に留意し、1980年における世界主要32都市（ヨーロッパ・北アメリカ・アジア・オーストラリア）の集計データ⁴⁾を用いて、マクロモデルを構築している。

(2) モデル構成の決定

モデルは、都市内旅客交通に伴う1人1年あたりCO₂排出量を推計するものとする。

モデルの構成や各式の説明変数の決定に際しては、林ら⁵⁾が示した都市交通によるエネルギー消費／環境負荷発生メカニズムを参考にしている。まず、モデルの構成を以下の4段階に整理した。

①自動車の保有

所得水準、自動車購入・保有費用、都市構造（都市形状指標、人口密度など）によって決定される。

②交通機関分担

自動車保有水準や鉄道／道路整備水準、各機関の利用コストによって決定される。

③各機関の走行距離

生成原単位（1人1日あたりトリップ数）、平均トリップ長（1トリップあたり距離：総走行台キロを総トリップ数で除した値）や交通機関分担率によって決定される。

④エネルギー消費／CO₂排出

走行距離にエネルギー消費／CO₂排出原単位を乗じることによって決定される。

このうち、①自動車の保有に関して、乗用車保有率（1000人あたり乗用車保有台数）を説明するモデルを作成した。その結果、所得水準と道路整備水準が統計的に有意な説明変数であり、燃料価格や鉄道整備水準、人口密度は有意でないことを確認した。しかしこのモデルは、以下の理由より予測に利用することは不適格であることが明らかとなっている。

図1は、本研究で用いた各都市の所得水準と乗用車保有率との関係と、東京都における乗用車保有率の時系列変化とを同時に示したものである。この図より、両者の間に大きな違いがあることが分かる。これは、都市間の差異を表す道路整備水準の感度が十分でないことから生じている。したがって、本研究の1時点クロスセクションデータから自動車保有予測モデルを作成することは適当でない。またこのことは、自動車保有は各都市の長期的な構造によって決定されるものであることを示唆している。

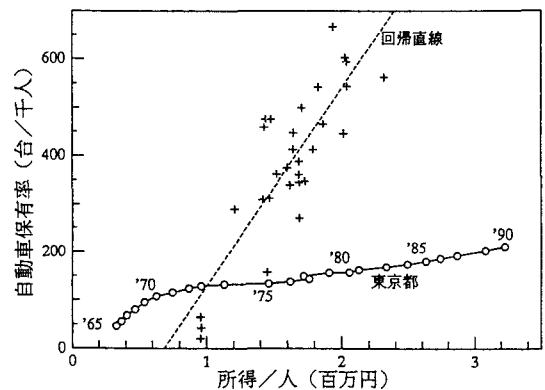


図1 自動車保有率と1人あたり所得の各都市1時点データ（1980）と東京都の時系列データとの比較

また、③各機関の走行距離については、データの入手可能性や信頼性に問題があるため、本モデルではエネルギー消費量を直接自動車分担率から求め、交通量を経由しない構成をとることとした。ただしこれによって、都市構造の影響を大きく受ける平均トリップ長の差を考慮できないという欠点がある。

更に自動車の燃費についても、走行モード・車齢等により大きく変化するものであり、交通エネルギー消費量を決定する重要な要素であるが、マクロには把握しにくいいため、本研究では考慮していない。

以上のことから、本研究で構築するモデルは、(a) 自動車分担率モデル、(b) 交通エネルギー消費量モデル、(c) 炭素排出量・CO₂排出量推計式 の3つからなるものとした。また、乗用車保有率は所与とした。モデルの全体構成を図2に示す。

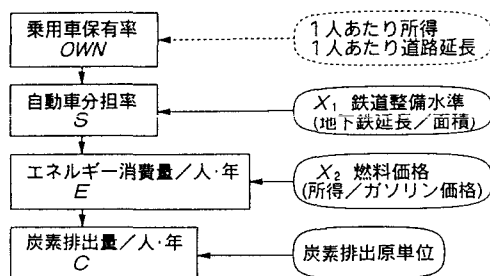


図2 モデルの構成

(3) モデルの推定

(a) 自動車分担率モデル

自動車分担率は、1) 乗用車保有率<自動車の効用水準>、2) 面積あたり地下鉄延長<鉄道の効用水準>で説明できると考える。鉄道整備水準として地下鉄延長を用いるのは、都市内交通機関として整備され、運転間隔や走行速度もそろっており、鉄道のサービス・レベルを表す指標として妥当であると考えられるためである。

モデルはロジット形を仮定し、次のように推定された。

(以下、式において括弧内は係数のt値を表す。)

$$S = \frac{1}{1 + \exp(2.69 - 0.00837OWN + 0.128X_1)} \quad (1)$$

(4.6) (11.2) (-1.86)

R = 0.93

ここで、S : 自動車分担率

OWN: 乗用車保有率 (台/1000人)

X₁: 面積あたり地下鉄延長 (m/ha)

(b) 交通エネルギー消費量モデル

1人あたり交通エネルギー消費量は、1) 自動車分担率、2) 燃料価格<自動車利用コスト指標>によって説明できると考えた。ここでは、自動車利用コスト指標として燃料価格のみを採用しており、駐車コスト、有料道路通行料等に関しては、データ入手が困難なため考えていない。また、燃料価格は各都市の1人あたり所得で規準化した値を用いる。

線形重回帰分析によるモデル推定の結果は次式のようにになった。

$$E = 276S + 119X_2 \quad (2)$$

(4.4) (6.7)

R = 0.95

ここで、E : 1人1年あたり交通エネルギー消費量 (MJ/人・年)

X₂: 燃料価格を1人あたり所得で規準化した値 (所得/ガソリン価格)
((\$/人)/(¥/ℓ))

(c) 炭素排出量・CO₂排出量推計式

自動車燃料はガソリン、軽油等の種類があるため、各燃料別に消費量を求め、それに燃料別の炭素排出原単位 (単位燃料消費量あたり炭素排出量) を乗じて炭素排出量を推計するべきであるが、燃料別の原単位の差は小さい⁶⁾ため、本モデルでは燃料を石油の1種類にまとめて扱うことにする。石油1kgは発熱量44.1MJに相当し、また石油1kgの燃焼により炭素0.86kg (CO₂換算3.17kg<1.63m³>)が発生する。以上の関係より、次式が成立する。

$$C = 19.5E \quad (3)$$

ここで、C : 1人1年あたり交通部門炭素排出量 (g/人・年)

以上(1)~(3)式を連動させた時の精度を確認するために、推定に用いた都市について、実際のCの値とモデルで計算したCの値との相関を調べたところ、

R=0.89となり、十分な現況再現性が確認された。

4. モデルを用いた政策の効果分析

前章で構築したモデルを使用し、1980年の東京都を例にとり、各政策（燃料税／炭素税の増徴、鉄道整備）の1人1年あたり炭素排出量（交通部門）に対する感度分析を行う。燃料税／炭素税の増徴は、モデル式の X_2 （燃料価格）を、鉄道整備は X_1 （面積あたり地下鉄延長）を変化させることによって分析できる。

（1）自動車燃料税／炭素税の増徴

日本も含めて多くの国では、自動車燃料に対して燃料税が課せられており、日本の場合、税抜きガソリン価格に対する燃料税率はほぼ100%に達している。また、炭素税は環境負荷を発生させる生産活動に対して課税する環境税の一種であり、現在西欧の一部の国で導入されている。

環境税はその導入によって、a) 価格メカニズムによって対象主体の行動を変化させることによる排出削減、b) 原因者負担原則（Polluter Pays Principle）に基づいた環境改善目的財源の調達、の2つの効果が期待できる⁷⁾。ここでは、燃料税を更に増徴する場合（炭素税を導入する場合も同様）、以上の2つの効果がどの程度現れるかについて分析を行う。

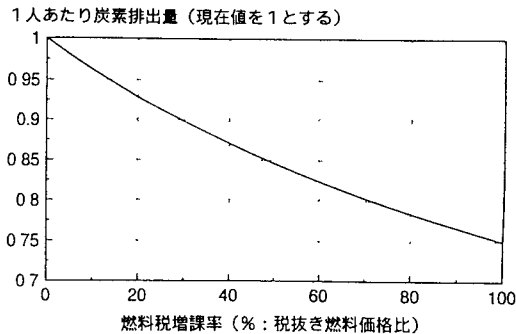


図3 燃料税増徴の効果

図3は、増徴税率（税抜きの燃料価格に対する）と、増徴したことによる1人あたり炭素排出量の変化の関係を示したものである。例えば増徴税率を10%（これは現在のスウェーデンの炭素税率の約3分

の1に相当する）としたとき、1人あたり炭素排出量は増徴前に比べて3%減少することが分かる。

税抜き燃料価格比10%の燃料税／炭素税増徴によって燃料消費量／CO₂排出量が3%減少するということは、燃料の価格弾力性（税込み価格／税抜き価格の約2倍）に対して）が約0.15であることを意味する。またこれとは別に、1981～89年における日本全国のデータ⁸⁾を用いてガソリンの価格弾力性を推計した結果、約0.23という値が得られた。したがって、本モデルの燃料税／炭素税の感度は、この値よりやや低めになっている。

以上のようなガソリンの価格弾力性の値から、炭素税の税率レベル（10%程度）では削減効果は数%程度にとどまるが、現在日本で行われている高税率（100%程度）の燃料課税は、CO₂削減に大きな効果を持つことが分かる。

一方、財源調達の効果については、前の例と同様に増徴税率10%の場合、東京都の燃料税／炭素税収増は230億円程度が見込まれる。ただし、この値は単純に燃料消費量に税率を乗じて算出したものであり、増税による生産活動抑制効果は考慮していない。

炭素税を環境改善目的財源に充当する場合、その税率の決定にあたっては、CO₂排出によって生じる地球環境悪化の費用と炭素税収とが等しくなることが望ましい。したがって、ここで推計された230億円という金額が妥当かどうかを判断する（すなわち税率を決定する）ためには、CO₂排出によって生じる費用を別に算定する必要がある。

（2）鉄道整備

次に、東京都を対象として鉄道整備（地下鉄新線建設）の、1人あたり炭素排出量に対する感度分析を行った。結果を図4に示す。

これによると、1人あたり炭素排出量を、（1）の増徴税率10%の場合と同じく3%減少させるためには、新たに75kmの地下鉄建設が必要になる。近年の日本の地下鉄建設費は1kmあたり100～300億円程度であり、ここでは1kmあたり295億円（営団地下鉄半蔵門線、1987年の場合⁹⁾）とすると、2.21兆円の資金が必要になる。

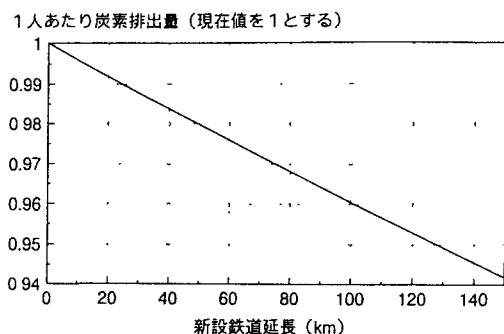


図4 鉄道整備の効果

（3）燃料税と鉄道整備の効果の比較

（1）、（2）の結果より、東京都の例では、燃料税増徴に比べて鉄道整備では、1年単位で同一の排出量削減効果を得るためには約100倍のコストがかかることが分かった。しかし、燃料税の直接効果は課税年のみに発生する（フローの効果）のに対し、鉄道整備の効果は整備後継続して発生する（ストックの効果）ことを考慮する必要がある。すなわち、燃料税と鉄道整備の各政策によるCO₂排出量削減は、鉄道整備効果が約100年間持続することによって、ほぼ同一の費用対効果を持つといえる。

5. 結論

（1）本研究の成果

本研究の成果を以下に述べる。

- 都市旅客交通に伴う1人あたりCO₂排出量を、都市のマクロ指標から推計するモデルを構築した。このモデル形式は、利用可能なデータの少ない発展途上国への適用が容易である。ただし本研究において構築したモデルでは、先進国の1時点データを用いているため、発展途上国に直接適用することはできない。
- モデルを用いて、燃料税／炭素税増徴と鉄道整備によるCO₂排出量の削減効果を定量的に評価するとともに、各政策の実施に伴う費用を推計した。その結果、鉄道インフラの耐用期間を考えると、前者と後者は同レベルの費用対効果があることが分かった。
- 自動車燃料の価格弾力性が小さいため、炭素税

導入によって期待される効果のうち交通部門における排出削減効果は、現在ヨーロッパで実施されている税率レベルでは数%程度にとどまり、自動車燃料税のように高税率の場合に初めて大きくなることが分かった。

（2）今後の課題

課題としては、以下のことが挙げられる。

- モデル構築で用いたデータは1980年の1時点データであるため、長期的な政策の分析への適用は困難である。発展途上国大都市の政策分析を念頭に置く場合には、データ制約の問題はあるが、できる限り時系列データを用いてモデル改善を行っていく必要がある。
- 本研究のモデルは乗用車保有率を与件としているが、実際には所得水準、都市構造や道路・鉄道整備水準等によって差異が生じる。特に都市構造と乗用車保有水準との間には相乗作用があると考えられる。これらを考慮したモデルの精緻化を行う必要がある。
- 本モデルは、エネルギー消費量を直接自動車分担率から求め、交通量を経由しない構成をとったため、平均トリップ長や燃費の差を考慮できないという欠点があり、この点を改善する必要がある。
- 日本においては、自動車利用者は既に多くの税負担をしており、燃料税／炭素税の増徴により更に負担を強いることの妥当性についての考察が必要である。そのためには、従来日本において燃料税を道路財源に充当することの根拠となってきた受益者負担論に加え、環境汚染の原因者負担原則を考慮に入れた、環境に配慮した自動車関連税の課税・使途の枠組みについて検討することが必要である。この検討例の1つとして筆者ら¹⁰⁾は、自動車燃料税収を鉄道整備財源に充当することの環境政策としての妥当性について検討している。

謝辞

本研究は、文部省科学研究費重点領域研究「人間—地球系」（代表 安井至・東京大学教授）の研究補助金による成果の一部分である。また、論文作成

に当たっては、第17回土木計画学研究発表会において、鹿島茂・中央大学教授をはじめ多くの方々からご意見をいただくとともに、査読者の方々にも今後の課題を含め、非常に有益なご指摘をいただいた。以上のことを付記し、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 松岡譲、森田恒幸、有村俊秀：都市構造及び都市配置と地球温暖化 =都市計画論再考=、季刊環境研究 No. 86、1992. 6、pp. 51-65
- 2) 森口祐一、西岡秀三、清水浩：広域的な道路交通公害対策による環境改善効果の予測システムの開発、土木計画学研究・論文集 No. 11、1993. 12、pp. 279-286.
- 3) 林良嗣、加藤博和、望月昇：都市の道路網整備が大気環境に及ぼす効果の分析システム -都市環状道路のケーススタディとともに-、環境システム研究 Vol 21、1993 8、pp. 289-299
- 4) Peter Newman and Jeffrey Kenworthy : Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook, Aldershot, U.K.: Gower, 1989.
- 5) 林良嗣、富田安夫、土井健司、スバラット・リチカ、加藤博和：都市交通によるエネルギー消費およびその環境負荷への影響に関する比較、土木計画学研究・講演集 No. 15(1)、1992. 11、pp. 939-944.
- 6) 科学技術庁科学技術政策研究所：アジアのエネルギー利用と地球環境、1992、pp. 156-161.
- 7) 井村秀文：経済的手法によるCO₂排出削減、季刊環境研究 No. 86、1992. 6、pp. 98-112
- 8) 石油連盟：石油業界の推移
- 9) 土木学会編：交通整備制度 -仕組と課題- 改訂版、1991. 11.、pp. 47-49
- 10) 加藤博和、林良嗣、木本仁：都市交通のモデル・シフト政策実施のための財源調達手法の環境面からみた検討、環境システム研究 Vol 23、1995. 8

都市旅客交通のモデル・シフト政策に伴うCO₂排出量削減効果の推計

林 良嗣、加藤 博和、木本 仁、菅原 敏文

近年、世界中の大都市において、モータリゼーションの進行と交通インフラの不足による道路交通渋滞が発生している。これは都市環境を悪化させるのみならず、温室効果物質であるCO₂の排出量をも増加させる。生産活動全体のCO₂排出に占める交通部門の割合は全世界的に増加しつつある。そこで、交通に伴うCO₂排出量を削減する政策の1つとして、自動車から公共交通機関へのモデル・シフトが注目されている。本研究では、都市旅客交通に伴うCO₂排出量を都市のマクロ指標から簡便に推計するモデルを開発している。このモデルを用いて、モデル・シフト政策のうち、自動車燃料税/炭素税増徴と鉄道整備の効果および実施のための費用を推計した。

Estimation of Reduction in CO₂ Emission by Modal Shift Policy in Urban Passenger Transport

Yoshitsugu HAYASHI, Hirokazu KATO, Jin KIMOTO, Toshifumi SUGAWARA

Recently, due to the rapid increase in motorization and insufficient supply of transport infrastructure, deterioration of the environment can be observed not only at the city level but also at the global level. This study aims at examining alternatives "modal shift" policies which should be taken to tackle such problems. The introduction of fuel/carbon tax and the improvement of railway are treated. To handle the required analysis, several models are developed. Through the analysis, it is proved that such policies can be efficient and can results in a reduction in the exhausts of carbon.
