

都市旅客交通に伴う CO₂ 排出メカニズムの定式化と実際都市への適用
 Formulation of CO₂ Emission Mechanism of Urban Passenger Transport
 and its Application to a Real City

加藤 博和*・林 良嗣**

By Hirokazu KATO and Yoshitsugu HAYASHI

1. はじめに

地球温暖化問題に対して交通部門でとるべき対策を議論するにあたっては、まず交通部門の CO₂ 排出量の決定メカニズムを定量的に明らかにしておくことが必要である。ところが日本では、国レベルや都道府県レベルでの分析は多数実施されているものの、都市圏や市区町村レベルでは、基本となる総排出量の推計値が、現状では政令指定都市レベルでさえ満足に存在していない。自動車保有状況や交通施設整備状況は同一都道府県内であっても地域によって大きな隔りがあり、実際に CO₂ 排出削減策を実施していくにあたっては、都市圏や市区町村レベルでの分析が必要不可欠である。

そこで本研究では、旅客交通を対象に CO₂ 排出量の決定メカニズムを明示的に表現した「基本式」を提示し、それに従って、自動車保有状況や交通施設整備状況の違いを考慮可能な、都市レベルでの CO₂ 排出量のマクロ的算定手法を構築することを目的とする。その際、多くの既往研究で捨象されていた、道路走行状況変化による燃費や CO₂ 排出原単位（走行台キロあたり排出量）の違いも組み込む。さらに、構築した推計手法を名古屋市に適用し、推計および感度分析を行う。

2. 都市旅客交通による CO₂ 排出量の分析に

関する既往手法の整理

都市内旅客交通の CO₂ 排出量決定要因に関する既往の分析手法は、a)マクロ分析、b)ネットワーク分析、c)ミクロ分析の3種類に分類できる。

a)マクロ分析：対象範囲全体やそれを分割した各

区域を単位として CO₂ 排出量や原単位を分析するものである。パネル分析による都市間比較研究として、Newman and Kenworthy¹⁾による都市データを用いた分析²⁾、家計調査年報のガソリン購入量を用いた分析³⁾、商業統計から推計した燃料販売量による分析⁴⁾などがあるが、CO₂ 排出量と各種変数との統計的關係を直接的に分析する手法をとるものがほとんどで、具体的な排出量決定メカニズムに踏み込んだ研究事例は少ない。その中で、森本ら⁵⁾は東京都市圏 PT データを用いた輸送エネルギー分析を行っているが、地域による道路混雑状況の違いは考慮されていない。

b)ネットワーク分析：交通需要予測によって各路線の断面交通量を推計し、走行台キロに環境負荷発生原単位を乗じて環境負荷発生量を求め、対象地域内の総和をとる方法である。杉岡らの研究⁶⁾はその典型例であり、各路線の CO₂ 排出原単位を Q-V 式から求められた走行速度の関数として表すことにより、渋滞による燃費低下の影響を考慮している。この方法は、交通網整備や立地政策による変化の分析に適するが、主要道路を走行する車両の CO₂ 排出量しか把握できないことや、Q-V 式によって推定される走行速度は交通量算定のための便宜的な変数であり、それ自体の精度が低いという問題点がある。

c)ミクロ分析：交通行動の非集計分析の応用にあたる。関ら⁷⁾は、東京都市圏 PT 調査のデータから、交通エネルギー消費原単位と個人・地域特性との関連を分析している。この方法では個人特性の寄与が大きく現れる傾向があり、都市構造や交通施設整備状況のような要因が把握しにくいという問題がある。

以上の整理を踏まえ、本研究では、マクロ分析のアプローチをとりつつも、PT データを利用してトリップ特性をできる限り表現するとともに、道路渋滞についても定式化を行い、マクロ分析の問題点を

キーワード：地球環境問題、交通計画評価

*：正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手 地圏環境工学専攻
 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町 TEL 052-789-2773

FAX 052-789-3837 E-Mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp)

**：フェロー 工博 名古屋大学大学院教授 地圏環境工学専攻

解決する推計・分析手法の構築を試みる。

3. 交通活動に伴う環境負荷の基本式

旅客交通に伴って発生する CO₂ 等の環境負荷発生メカニズムは、マクロ的には以下のように定式化できる。これに近い定式化は森本ら⁸⁾によっても示されている。また、この基本式は、変数の読み替えによって、ネットワーク分析やマイクロ分析でもほぼ同じ形となる。

$$E = \sum_k e^k \cdot L^k \quad (1)$$

$$L^k = (1/n^k) \cdot \ell^k \cdot s^k \cdot a \cdot P \quad (2)$$

- E : 環境負荷発生量 [g-C/day]
- e : 環境負荷発生原単位 [g-C/台(車両)和]
- L : 総走行台キロ [台(車両)和/day]
- n : 平均乗車人数 [人/台(車両)]
- ℓ : 平均トリップ長 [人和/トリップ]
- s : トリップ手段構成比 [トリップ^o/トリップ^o]
- a : 生成原単位 [トリップ^o/人・day]、 P : 人口 [人]
- k : 交通手段(自動車を a 、鉄道を r で表す)

さらに、自動車の CO₂ 排出原単位 e^r は、その決定要因を技術水準と混雑状況とに分けた以下の式で表すことができる。

$$e^r = \alpha \cdot g(v) \quad (3)$$

$$v = v(R, L) \quad (4)$$

- α : 発生源の技術水準を表すパラメータ
- $g(v)$: 平均走行速度 v の関数
- R : 道路整備水準

(3)式で平均走行速度 v を混雑状況を示す変数に採用した理由として、a)石田ら⁹⁾のレビューにより、道路混雑を考慮した原単位の定式化に関する既往研究ではいずれも平均走行速度を説明変数として用いていること、b)大口ら¹⁰⁾による、実測燃費の分析結果と自動車エンジン・車両の理論モデルの検討との比較から、燃費(すなわち CO₂ 排出量)が平均走行速度である程度説明できることを示した研究事例、が挙げられる。また、(4)式はマクロ的な Q-V 式に相当する。

変数 a, s, ℓ, n, α, R は E の直接決定要因であり、それぞれ背景となる社会経済的要因や都市構造、交通施設整備水準などによって規定される。

4. 排出量決定メカニズムを組み込んだ

モデルの構築

以上の定式化をもとに、名古屋市を例として、都市内旅客交通に伴う CO₂ 排出量を推計するモデルを構築する。トリップデータとして、1971, 81, 91 年の 3 回実施されている中京都市圏 PT 調査報告書のデータを用いる。

モデル構築は、(1)~(4)式をベースとし、さらに a)生成原単位および平均トリップ長に関する詳細化、b)手段分担率モデルの推定、c)マクロ Q-V 式の推定、を行っている。

1)基本式の詳細化

本推計においては、総トリップを一単位として扱わず、まず自動車保有者層と非保有者層とで交通機関選択行動やトリップ特性に大きな違いがあるため、この各層で分けるとともに、トリップをトリップ長別に層別化し、各層について生成原単位と手段分担率を与える。そのため、(2)式が以下の(5)式に置き換えられる。

$$L^k = (1/n^k) \cdot \sum_i \sum_c \sum_l (\ell_l \cdot s_{il}^{ck} \cdot a_i^c \cdot P_i^k) \quad (5)$$

- ℓ_l : 距離帯 l の平均距離 (中央値)
- s_{il}^{ck} : 車保有/非保有層(c)別、距離帯(l)別、ゾーン(i)別、手段(k)分担率
- a_i^c : 車保有/非保有層別、距離帯別生成原単位
- P_i^k : 車保有/非保有層別、ゾーン別人口

トリップ長は PT 調査では直接得られないため、トリップ時間に各手段の平均速度を乗じて求める。距離帯は 10 分割とし、2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50km で区分する。保有層人口比率は、単純に世帯あたり乗用車保有台数で与えられるものとする。また、推計にあたっては、中ゾーン(行政区: 全 16 区)単位で集計したデータを用いる。

PT 調査のデータより、生成原単位は、車保有層が非保有層より高く、またトリップ長が大きくなるほどその傾向が強い。さらに経年的には、都市の広域化によって長距離帯へのシフトが生じていることが分かった。

2)交通手段分担率モデル

都市構造や交通施設整備による手段構成比への影響を推計するために、手段分担率モデルを推定する。PT 調査は 3 回行われているため、各回のデータそれぞれについてモデルの推定を行っている。なお、

都市旅客交通による CO₂ 排出の大部分は自動車と鉄道によるため、分担率モデルもこの2手段について作成するものとする。

実際データにおける距離帯区分と手段構成との関係より、0～2kmでは徒歩・二輪車・自動車、2～10kmでは全手段、10km以上では自動車・鉄道という3区分にまとめられることが分かった。そこで、分担率モデルもこの3区分ごとに推定することとした。モデルの形式は集計ロジットタイプとし、重回帰分析によるパラメータ推定を行っている。推定にあたっては、各距離帯について以下のように仮定している。

a) 0～2km：鉄道分担率および車非保有層の自動車分担率をゼロと仮定し、車保有層の自動車分担率のみをモデル化する。

b) 2km以上：自動車と鉄道の2手段選択モデルとする。ただし、2～10kmについてはその他手段が多いため、ダミー変数を導入する。

都市構造や交通施設整備水準に関する各種指標を用いてパラメータ推定を行った結果、いずれの年においても、0～2kmの自動車分担率では人口密度と1人あたり道路延長が、また2km以上では駅密度（面積あたり駅数）の自然対数が各層とも有意となったため、5章の感度分析ではこのモデルを採用する。

3) 端末交通手段の考慮

鉄道の端末交通分については、データからの推計が困難であったため、乗車・降車端末各1kmを端末交通のトリップと仮定する。1991年における圏域での端末交通の自動車分担率は約7%であるので、この値を用いて端末交通の自動車トリップ長を算出し、車の総トリップ長に加えることにより、端末交通分の補正を行っている。

4) CO₂ 排出原単位

a) 自動車：(4)式の CO₂ 排出原単位 e^i には、日産自動車交通研究所の燃費曲線¹¹⁾を用い、その逆数にガソリンの比重と kg あたり CO₂ 排出量を乗じることによって推計を行う。

また、(5)式のマクロ Q-V 式には、神崎ら¹²⁾が提案している式を参考に、下式の形式を採用する。

$$v = -\rho_1 \cdot (L^i / ROAD) + \rho_2$$

ROAD: 道路面積 [m²]、 ρ_1 , ρ_2 : パラメータ

ρ_1 , ρ_2 の推定に際して、 v , L^i , ROADには道路交通センサスのデータを用いた。回帰分析の結果、 $\rho_1 = 0.03$, $\rho_2 = 40$ ($R^2 = 0.91$) が得られた。

b) 鉄道：車両あたり乗車人数 n^i が運行事業者によって決定されることや、車両キロあたり CO₂ 排出量 e^i が n^i の影響を受けるという関係がある。本研究では簡便のためにこれらの関係を捨象し、 $(e^i \cdot n^i) < \text{人キロベースの原単位} >$ を用いる。鉄道（私鉄、民鉄）統計年報より算定した、1981～91年の名古屋市内の鉄道走行エネルギー原単位は経年的にほとんど変化していなかったため、この平均値である 191kcal/人キロを用いる。また、電気エネルギーから CO₂ への換算値として、日本の標準的な値である 1.1857kg-C/10⁶kcal を用いる¹³⁾。

5. モデルによる CO₂ 排出量の推計

モデルを用いて、名古屋市発着旅客トリップの1971, 81, 91年における CO₂ 排出量を推計する。また、1991年に関しては、手段分担率モデルを用いて駅密度と乗用車保有率の感度を分析する。

1) CO₂ 排出量の推移

図1は各年の名古屋市の旅客交通による1日あたり CO₂ 排出量を推計し、1971年の総排出量を1としてその推移を示したものである。図中の数値は各年での自動車/鉄道の CO₂ 排出量の比率を表したものである。これを見ると、71年から91年にかけて、総排出量は約2倍に伸びていることが分かる。また、自動車/鉄道の比率は、自動車の比率が90%以上であり大きな変化はない。鉄道端末交通としての自動車の占める比率は非常に小さい。

2) 乗用車保有率の感度

図2は世帯乗用車保有率の感度分析の結果を示している。図中の数値は自動車/鉄道それぞれの変化を、1991年実績値を1として表現したものである。乗用車保有率は、東京都区部と福岡市の、1991年の名古屋市とおよそ同じ所得レベルの時点での値を適用した。この図より、名古屋市において乗用車保有率が東京都区部並みになれば、CO₂ 排出量は5割強減少するという結果が得られた。

3) 駅密度の感度

駅密度の感度分析の結果を図3に示す。推計ケースは、a)各ゾーン(行政区)の駅密度が名古屋市平均(0.499[駅数/km²])以下の区は平均値に、平均以上の区は変化しないとする、b)全区を最も駅密度の大きい中区のレベル(1.68[駅数/km²])とする、c)全区を最も駅密度の低い港区のレベル(0.109[駅数/km²])とする、の3つである。これを見ると、駅密度が増えると鉄道寄与分が増えるが、自動車寄与分の減少が卓越しており、鉄道整備によってCO₂排出をかなり削減できることが分かる。

6. 結論

本研究では、旅客交通に伴う都市レベルでのCO₂排出をマクロ的に推計するモデルを構築した。モデルでは、都市構造の影響を受けるトリップ長別頻度分布、自動車保有水準、交通施設整備水準といった指標が説明変数になっているとともに、道路走行速度による燃費変動を組み込むことによって、CO₂排出量決定メカニズムを明示的に考慮した排出量変化の推計が可能になった。ただし、データ制約の関係から、モデルの中に多くの仮定条件が存在しており、その再検討が必要である。特に、本研究でモデルを適用した名古屋市はPT調査が実施されデータ制約も比較的少ない例であり、他の都市への適用を考える場合には、生成原単位・平均トリップ長・手段構成比に関するデータ制約が大きいため、全国PT調査や国勢調査等のデータを利用して、データ制約を補う手法の開発が必要である。

今後は、自動車保有水準やトリップ長別頻度分布の決定モデルを組み込むことにより、都市の成長とともに交通活動がどのように変化し、その結果CO₂排出量が長期的にいかなる経路をたどるかについて推計が可能なモデルへの拡張を目指す。

なお本研究は、文部省科学研究費補助金(基盤研究(B)(2))の補助を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) P.Newman and J.Kenworthy: Cities and Automobile Dependence, 1989.
- 2) 例えば、松岡・森田・有村: 都市構造及び都市配置と地球温暖化=都市計画論再考=、環境研究 No.86, pp.51-65, 1992.6.
- 3) 鳴井・中村・岩崎: 家庭のガソリン消費と都市の形態に関する研究、土木計画学研究・講演集 No.20(2), pp.607-610, 1997.11.
- 4) 鈴木: 全国主要都市におけるエネルギー消費構造に関する比較分析、第31回都市計画学会学術研究論文集, pp.751-756, 1996.11.
- 5) 森本・小美野・品川・森田: 東京都市圏におけるPTデータを用

CO₂排出量(1971年値=1)

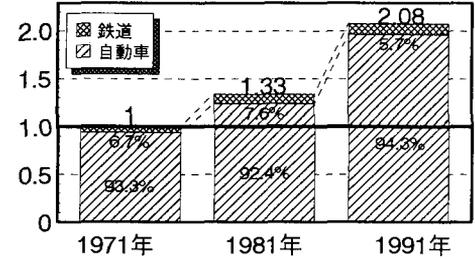


図1 名古屋市発着トリップのCO₂排出量の推移

CO₂排出量(1991年実績値=1)

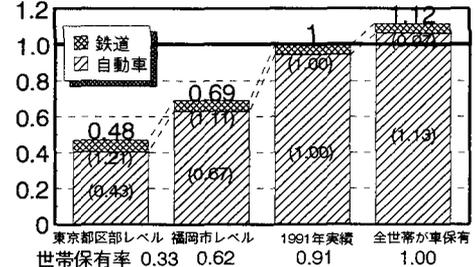


図2 乗用車保有率によるCO₂排出量の変化

CO₂排出量(1991年実績値=1)

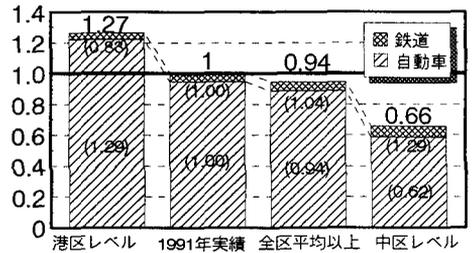


図3 駅密度によるCO₂排出量の変化

いた輸送エネルギー推計と都市構造に関する実証的研究、土木計画学研究・論文集 No.13, pp.361-368, 1996.8.

6) 杉岡・室町・原田・太田: 仙台における交通部門でのCO₂排出に関する研究、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第IV部, pp.524-525, 1997.9.

7) 関・石田: 東京都市圏における交通部門のエネルギー消費量と個人特性・地域特性との関連性、土木計画学研究・講演集 No.19(1), pp.537-540, 1996.11.

8) 森本・古池: 都市構造が運輸エネルギーに及ぼす影響に関する研究、第30回日本都市計画学会学術研究論文集, pp.685-690, 1995.12.

9) 石田・小島・岩倉・七元: 旅客交通の大気汚染排出原単位に関する比較考察、土木計画学研究・講演集 No.19(2), pp.105-108, 1996.11.

10) 大口・谷口・岡本: 道路交通における自動車の燃費に影響を与える要因について、土木計画学研究・講演集 No.18(2), pp.569-572, 1995.12.

11) 日産自動車交通研究所: 自動車交通1993, pp.34-35, 1993.11.

12) 神崎・山中: 都市規模に応じた道路整備必要量の推計モデル、土木計画学研究・講演集 No.12, pp.575-582, 1989.12.

13) 運輸経済研究センター: 環境と運輸・交通, 1994.8.