

都市交通システムのエネルギー消費効率性の分析

広島大学大学院国際協力研究科 学生会員 ○吉野 大介

広島大学大学院国際協力研究科 正会員 センビル メティン

広島大学大学院国際協力研究科 正会員 藤原 章正

広島大学大学院国際協力研究科 正会員 張 峻屹

1. はじめに

近年、都市の持続可能性への関心が高まっている中、交通システムのエネルギー消費構造の見直しが求められている。一方、このようなエネルギー消費について似通った都市特性を有する都市でも効率性がばらついているのが実情である。本研究では、都市交通部門のエネルギー消費の効率性に関する評価モデルを提案し、都市間と都市内の比較を通じて、モデルの有効性を実証すると同時に、エネルギー消費の効率性を分析する。

2. 研究の方法

本研究では、都市交通システムのエネルギー消費効率性を評価するため、2段階推定モデルを構築する。このモデルの第1段階では、確率的フロンティア分析(SFA)モデルを用いてエネルギー消費効率性指標を算出し、都市間比較を行う。SFA手法の適用可能性の検証は効率性に関する既往研究において適用例の多いデータ包絡分析(DEA)手法との比較分析によって行う。SFA手法とDEA手法は両者とも効率性を計測できる手法であるが、SFA手法はパラメトリック手法であり、ノンパラメトリック手法であるDEA手法と比較して誤差部分を統計的に扱うことが出来るという利点がある。そのためSFA手法のエネルギー消費効率性測定への応用は学術的に意義があることであると考えられる。第2段階ではトビットモデルを使用してエネルギー消費効率性に影響する要因を統計的に分析する。

3. 使用データの概要

分析に際して、都市の人口、交通システムの需要・供給、エネルギー消費などに関するクロスセクションデータ、Millennium Cities Database¹⁾を使用した。

4. 効率性評価のための2段階推定モデル

本研究で用いる2段階推定モデルのフローは図1に示した通りであり、第1段階サブモデルと第2段階サブモデルの2部で構成されている。

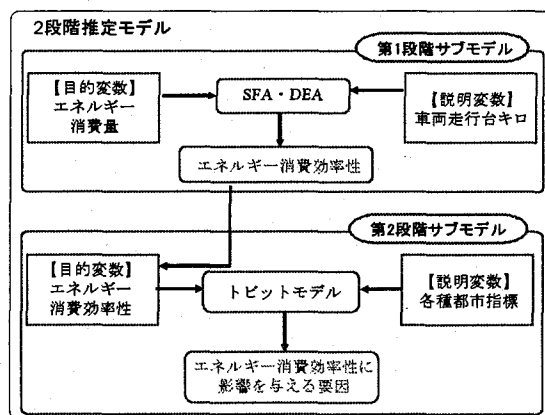


図1: 2段階推定モデル

4.1 第1段階サブモデル

(1) SFA

本研究では、費用関数はCobb-Douglas型に特定化する。Cobb-Douglas型の関数は式(1)の通りである。

$$\ln(y_i) = \beta' x_i + v_i + u_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

ここで、 y_i は i 都市のエネルギー消費量(MJ)、 x_i は i 都市の車両走行台キロ(車両数・km)の対数、 β は未知のパラメータである。 u_i は y_i の非効率性を表す指標であり $u \sim iidN^+(0, \sigma_u^2)$ に従う。また v_i は誤差項であり $v \sim iidN(0, \sigma_v^2)$ に従う。非効率項 u_i は都市によって異なるため、確率効果という概念を導入し、以下の推定量を算出する。

$$E[u_i | \varepsilon_i] = -\gamma \varepsilon_i + \sigma_A \left\{ \frac{\phi(\gamma \varepsilon_i / \sigma_A)}{1 - \Phi(\gamma \varepsilon_i / \sigma_A)} \right\} \quad (2)$$

ここで $\sigma = \sigma_u^2 + \sigma_v^2$, $\lambda = \sigma_u / \sigma_v$, $\sigma_A = \sqrt{\gamma(1-\gamma)\sigma^2}$, $\varepsilon_i = \ln(y_i) - \beta' x_i$ であり、 $\phi(\cdot)$ ・ $\Phi(\cdot)$ は標準正規確率密度関数・分布関数である。以上の条件付き期待値 $E[u_i | \varepsilon_i]$ を用い、効率性は以下の式によって示される。

$$EFF_i = \exp(-E[u_i | \varepsilon_i]) \quad (3)$$

EFF_i は0から1の値をとり、この値が1に近づくほど効率性が良いと解釈できる。

(2) DEA

本研究ではDEAの最も基本的なモデルであるCCR

モデルを採用した。式形は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{Max. } & \sum_k u_k y_{k,j} \\ \text{s.t. } & \sum_i v_i x_{i,j} = 1 \\ & \sum_k u_k y_{k,j} \leq \sum_i v_i x_{i,j} \forall j, \quad u_k, v_i \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで j は都市、 i はインプットの種類、 k はアウトプットの種類、 $x_{i,j}$ はエネルギー消費量、 $y_{k,j}$ は車両走行台キロ、そして u_k と v_i はウェイトを示しており、エネルギー消費効率性の算出式は以下の通りとなっている。

$$EFF_i = \frac{\sum_k u_k y_{k,j}}{\sum_i v_i x_{i,j}} \quad (5)$$

4.2 第2段階サブモデル：トビットモデル

エネルギー消費効率性指標 EFF_i は0から1という制限された範囲の値をとるため、式(6)のトビットモデルを第2段階サブモデルとして用い、エネルギー消費効率性に影響を与える要因の分析を行う。

$$\begin{aligned} EFF_i^* &= \theta' s_i + \delta_i \\ EFF_i &= \begin{cases} EFF_i^* & 0 < EFF_i^* < 1 \\ 0 & EFF_i^* \leq 0 \\ 1 & 1 \leq EFF_i^* \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 s_i は説明変数ベクトル、 θ は未知のパラメータベクトル、 δ_i は誤差項である。

5. 分析結果

5.1 エネルギー消費効率性分析

表1にエネルギー消費効率性指標の算出結果を示した。これによるとヨーロッパ等の公共交通指向型都市で効率性が高く、北米等の私的交通指向型都市で効率性が低くなる結果となった。エネルギー消費効率性の大きさに関してはDEA、SFA間で類似した傾向が見られた。

表1: エネルギー消費効率性の結果 (抜粋)

		SFA	DEA			SFA	DEA		
欧州	Bolobna	0.946	1.000	東南 アジア	Manila	0.749	0.700		
	Zurich	0.896	0.845		Bangkok	0.566	0.591		
	London	0.887	0.833		Shanghai	0.532	0.573		
先進国	Houston	0.642	0.633	途上国	Tel Aviv	0.751	0.701		
	北米	New York	0.598		0.608	中東・ アフリカ	Riyadh	0.618	0.619
	Toronto	0.526	0.561		Cairo	0.526	0.517		
	Tokyo	0.572	0.593		Mexico City	0.526	0.559		
その他	Sydney	0.751	0.700	中南米	Rio	0.642	0.633		
	Singapore	0.656	0.641		Bogota	0.526	0.507		

5.2 エネルギー消費効率性の要因分析

第2段階サブモデルを用いたエネルギー消費効率性

への影響要因を分析した結果(表2)、私的交通と公共交通のエネルギー消費効率性はともに公共交通の整備・利用促進により改善されることがわかった。また図2の部分効用の分析結果より、公共交通乗車人数キロ等に代表される公共交通のモビリティ指標が効率性に及ぼす影響は他の指標と比較して大きな割合を占めるという知見を得た。

表2: トビットモデルの推定結果

説明変数(log)	パラメータ推定値	t値
定数項	1.130	4.643 **
都市特性	先進国ダミー(先進国=1, 途上国=0)	-0.070 -1.391
指標	人口密度(人/ha)	-0.007 -0.340
インフラ	公共交通専用路線延長(m/ha)	0.057 3.934 **
	平均道路速度(km/h)	-0.115 -1.724 +
	公共交通車両数(units/100万人)	0.027 0.955
モビリティ	公共交通平均トリップ距離(km)	0.144 2.315 *
	公共交通乗車数(回/人)	0.146 2.435 *
	公共交通乗車人数キロ(人・km/人)	-0.167 -2.420 *
交通財政	公共交通料金収入(USD/車両数・km)	0.014 1.183
	公共交通投資(USD/人)	-0.029 -2.094 *
	σ	0.120 12.806 **
	Log-Likelihood	-57.630
	Likelihood Ratio(Chi-Sqr)	81.076

** : 1%有意, * : 5%有意, + : 10%有意

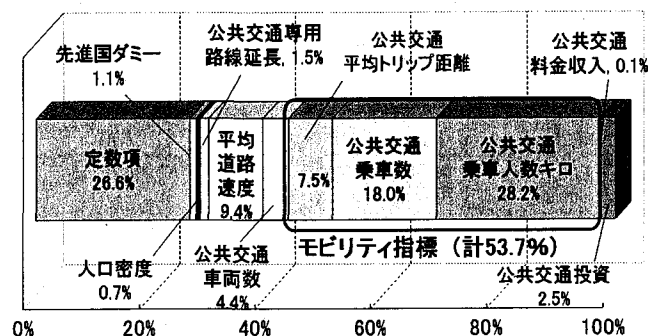


図2: エネルギー消費効率性の部分効用の割合 (SFA)

6. まとめ

本研究では、都市交通システムのエネルギー消費効率性を評価する2段階推定モデルの方法論を提案し、その有効性を示した。加えてモデルの説明変数の統計的な変動を柔軟に表現できるSFAモデルは都市交通システムのエネルギー消費効率性を評価するツールとしてDEAモデルより適用性が高いことが明らかとなった。また、エネルギー消費効率性は各都市の都市特性から多大な影響を受けており、公共交通の整備や利用促進がエネルギー消費効率性を向上させる効果があり、特に公共交通のモビリティ能力の向上は効率性に与える影響が大きいことが判明した。

参考資料

- UITP: *The Millennium Cities Database for Sustainable Transport*, CD-ROM, 1995