

DEAに基づく都市交通システムの環境効率性評価手法の開発と適用*

Development and Application of an Evaluation Method of Environmental Efficiency in Transportation System Based on Data Envelopment Analysis*

吉野大介**・藤原章正***・張峻屹****

By Daisuke YOSHINO**・Akimasa FUJIWARA***・Junyi ZHANG****

1. はじめに

年々深刻化している環境問題に対する意識は都市交通の分野においても例外でなく高まっている。しかし、持続可能な開発の観点では、環境負荷の最小化のみでなく、ユーザーのモビリティの確保も重要なファクターとなる。しかしながら、交通に起因する環境負荷の最小化とモビリティの維持向上の間には互いに排反する内容が多く、政策提案に際しては都市交通システムの利便性と環境負荷の削減を両立する解の探索が必要となる。1992年にWBCSDが提案した「より大きな価値をより小さな環境負荷で創出する」という環境効率性という概念は、このジレンマを解消する上で有用であると考えられる。

本研究では、途上国と先進国を含む世界46都市の4時点(1960, 1970, 1980, 1990年)データ¹⁾を用い、環境効率性指標をDEA(データ包絡分析法)の概念に基づいて再定義を行うことによって、都市交通システムのエネルギー消費構造を評価する。この世界46都市の4時点データは、国際公共交通連合(UITP)がMurdoch UniversityのKenworthy, Laube両博士の協力の下で収集したもので、人口、土地利用、交通需給、交通エネルギー消費量などに関する情報が、先進国・途上国双方を含む都市圏レベルで収録されている。

2. 既往研究のレビューと環境効率性の再定義

(1) 交通部門における環境効率性に関する既往研究

近年、環境効率性概念を適用して都市交通システムの環境評価を行う研究が進められてきている(e.g. Senbil et al.(2005)²⁾, 吉野ら(2006)³⁾。先行事例における交通部門

*キーワード: DEA, 環境計画, 地球環境問題

**正員, 修(工), 復建調査設計株式会社

(広島県広島市東区光町2丁目10-11,

TEL082-506-1853, FAX082-506-1893)

***正員, 博(工), 広島大学大学院国際協力研究科

(広島県東広島市鏡山1丁目5-1, TEL&FAX082-424-6921)

****正員, 博(工), 広島大学大学院国際協力研究科

(広島県東広島市鏡山1丁目5-1, TEL&FAX082-424-6919)

の環境効率性の評価は、分析フレームワークにおいて若干の差異はあるものの、基本的には何れも環境効率性を輸送強度と環境負荷量の比によって算出する構造を有している。この従来の環境効率性算出法には、大別すると以下の2点において脆弱性が存在すると考えられる。

1 つ目は、都市独自のエネルギー消費特性の表現に関する脆弱性である。各都市の交通の発展の経緯は異なるため、現在のエネルギー消費量を形成している要因は都市によって様々であると考えられる。しかし入出力比で表現される従来の環境効率性算出法では、都市の詳細なエネルギー消費構造の違いを反映できないため改良する必要がある。ただし、DEAの基本モデルも入出力比による効率性算出を基本としているため、この問題に関してはDEAの基本モデルの導入だけでは対処できない。そこで本研究では、入出力比によらない効率性評価モデルとして、DEAモデルの一種であるコスト効率性モデル⁴⁾を採用することで解決を試みる。

2 つ目は、都市・交通形態の多様性の表現に関する脆弱性である。環境効率性を構成する要素は複数存在する。そして各要素に付加されるウェイトの配分は都市のインフラ整備状況、交通投資、土地利用形態等から影響を受けることによって変化する。それにも関わらず、従来の環境効率性算出法では、このウェイトが全都市一律に設定され、全都市で画一的な削減目標を掲げてしまうことに繋がる恐れがある。この課題に関しては、分析対象ごとに可変のウェイトを扱うことのできるDEAの適用によって解決できると考える。

(2) 環境効率性の再定義

コスト効率性モデルのフレームワークの下で交通部門の環境効率性を算出する場合、入力変数を交通需要に関する要素に限定し、環境負荷は入力単価を表すコスト変数として取り入れ、交通需要に関わる要素と環境負荷に関わる要素を分離して効率性を評価することになる。本研究の場合は、入力変数として公共交通および私的交通の年間平均トリップ距離[km]、コスト変数として私的交通および公共交通の輸送人キロあたりのエネルギー消費量(エネルギー効率)[MJ/人キロ]を設定した。また、出

力変数にはモビリティの高さを示唆するトリップ平均速度[km/h]を設定している。

3. 環境効率性モデルの開発

コスト効率性モデルを使用することで、エネルギー消費構造の詳細な評価が可能になることは前章で述べた。本章では都市及び交通機関の多様性を更に詳細に表現するため、以下に示す3つの環境条件をコスト効率性モデルの制約式に取り入れて環境効率性モデルを開発するプロセスを説明する。

(1) 環境条件の導入

(a) 政策的閾値をもつ入力変数の導入

エネルギー効率の高い公共交通の輸送は、エネルギー消費抑制の際には一般に削減の対象とされず、また一度整備した公共交通インフラを放棄することも実際には起こりにくい。そのため、公共交通利用は現状以上を維持するように制約を加え、公共交通年間平均トリップ距離を政策的閾値をもつ入力変数（すなわちその変化量は非負）として設定する。

(b) 都市ごとに異なる交通エネルギー消費システムの下での効率性分析

都市形態や社会経済特性の異なる各都市の交通政策の方向性は様々であり、例えば私的交通型都市や公共交通型都市のように、各都市によってモビリティを向上させる際に力を入れる交通手段は異なると考えられる。従来のDEAでは、異なる都市特性を有する都市の組み合わせの中からある都市の参照集合（非効率的な都市が効率化を目指す上で目標となる都市の集合）を形成する場合、対象となる参照集合所属都市の折衷案をその都市の改善案と成すことになるが、モビリティの形成におけるメカニズムが全く異なる複数都市を折衷させて参照するということは現実的とは考えにくい。そのため、従来のDEAのように、全ての都市の組み合わせが参照集合になり得るモデルでは、得られる改善案が非現実的なものになる可能性がある。

この解決案として、フロンティア（効率的な都市の集合）の形成の際に、私的交通型都市と公共交通型都市の間に凸の生産可能性を成立させない手法がある。つまり、都市は私的交通型・公共交通型都市どちらでもその都市の都市特性に適した都市群を参照集合に設定することが可能であるが、フロンティアを算出する際の参照集合の組み合わせは同じタイプの都市を設定する。この方法論の採用によって、都市の潜在的な成長の可能性を摘み取らず、かつ実行性の高い環境効率性の評価が可能になる。

都市のグループ分けに関しては、効率性分析の前に分析者がアプリオリに付与する必要がある。本研究では分

類の際の恣意性を極力排除するため、クラスター分析によって分類する。分類に使用した変数は道路延長[m/人]及び公共交通路線長[m/人]である。分析の結果、都市は3つのタイプに分類され、それぞれのクラスターの統計量から、私的交通依存型都市、私的交通・公共交通調和型都市、公共交通依存型都市と命名した（表-1参照）。

(c) フロンティア形成不能都市の設定

極端にエネルギー消費規模の小さい途上国都市が参照集合に設定されると、環境効率性が実行性を持たなくなる可能性があるため、先進国都市が途上国都市を参照集合に設定しない制約を課す。

(2) 環境効率性モデルの定式化

以上の環境条件をコスト効率モデルの制約式に加えることにより、都市 k における環境効率性モデルは以下の式(1)-(2)で表される混合整数型問題として定式化できる。

目的関数

$$\text{Min } c_k = \sum_{i=1}^m p_{ik} x_i \quad (1)$$

制約式

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n'} x_{ij} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^{n''} x_{ij} \lambda_{Bj} &\leq x_i, \quad (i=1,2,\dots,m'), \\ x_{ik} &\leq x_i, \quad (i=m'+1,\dots,m), \\ \sum_{j=1}^{n'} y_{rj} \lambda_{Aj} + \sum_{j=n'+1}^{n''} y_{rj} \lambda_{Bj} &\geq y_{rk}, \quad (r=1,2,\dots,s), \\ \sum_{j=1}^{n'} \lambda_{Aj} &= z_A, \\ \sum_{j=n'+1}^{n''} \lambda_{Bj} &= z_B, \\ x_i &\geq 0, \quad (i=1,2,\dots,m), \\ z_A + z_B &= 1, \\ \lambda_{Aj} &\geq 0, \quad (j=1,2,\dots,n'), \\ \lambda_{Bj} &\geq 0, \quad (j=n'+1,\dots,n''), \\ z_A, z_B &= 0 \text{ or } 1. \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 i は入力変数の種類($i=1,2,\dots,m'$ までは政策的閾値をもたない入力変数、 $i=m'+1,\dots,m$ までは政策的閾値をもつ入力変数)、 r は出力変数の種類($r=1,2,\dots,s$)、 A 、 B は入力システムが属するグループ、 j は都市($j=1,2,\dots,n'$ まではシステムA、 $j=n'+1,\dots,n''$ まではシステムBに所属、 $j=n''+1,\dots,n$ まではフロンティア形成不能都市に所属)、 c_k は1人当たりの交通エネルギー消費量[MJ/人]、 x_{ij} は都市 j の i 番目の観測された入力変数の値、 p_{ij} は観測された単位入力あたりのコスト変数値、 y_{rj} は観測された出力変数値である。 x_i は変数としての入力であり、与えられたコスト変数値に沿って、コストが最小になるように決められている。 λ_{Aj} 、 λ_{Bj} はそれぞれ n' 次元、 $n''-(n'+1)$ 次元の非負ベクトル、 z_A 、 z_B は0-1のバイナリ変数を意味する。また、都市 k の環境効率性(EE_k)は式(3)のように算出される。

$$EE_k = \frac{c_k^*}{c_k} = \frac{\sum_{i=1}^m p_{ik} x_i^*}{\sum_{i=1}^m p_{ik} x_{ik}} \quad (3)$$

ここで、 c_k^* は式(1)-(2)によって算出される最小化されたエネルギー消費量[MJ/人]を意味している。これは、現在の出力レベルを最低限保障した上で、私的交通・公共交通エネルギー消費量（入力変数とコスト変数の積）の総和を最小化した値であり、 x_k^* は環境効率性モデル（式(1)-(2)）によって算出される最適解である。構築した環境効率性モデルの概念図を図-1に示している。図の水平及び垂直軸は各々私的交通及び公共交通の効率性指標（入力変数と出力変数の比）を表わしており、原点に近いほうが効率的であることを意味する。A都市が以下のようにプロットされ、A都市のエネルギー等高線が図-1の一点鎖線で表される場合、A都市のフロンティア状態はB都市と一致するため、A、B両都市のエネルギー消費量の比を環境効率スコアとする。

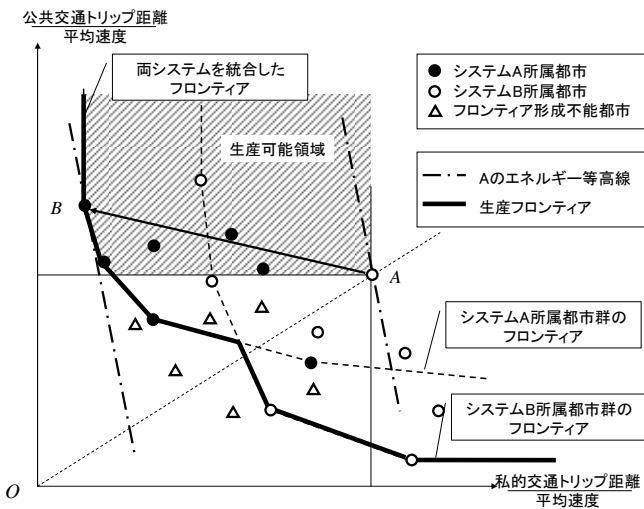


図-1 環境効率性モデルの概念図

(3) パネル分析への拡張

クロスセクショナルな形でDEAを使う場合、DEAに関する記述は、図-2における z_t から z_{t+1} に達した時点で終わるが、時系列の場合、ある期間内でフロンティアのシフトがあるため、そのプロセスに関する説明を更に拡張する必要がある。つまり、 t 期のパフォーマンスを $t+1$ 期のフロンティアで評価し直す必要がある。

x_2/y

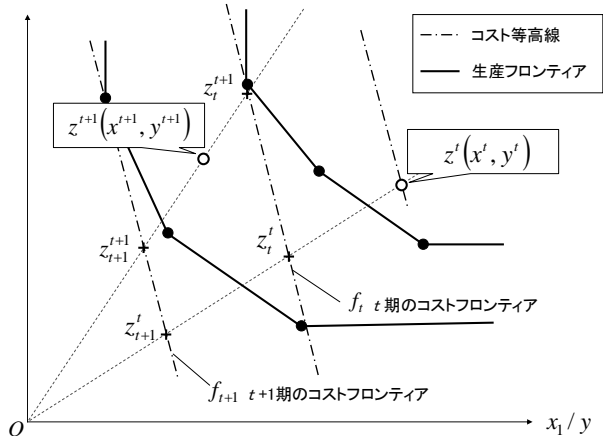


図-2 Malmquistアプローチによる効率性の表現

パネル分析への拡張に関しては、本研究ではMalmquistアプローチ⁴⁾を用いる。Malmquistアプローチは、フロンティアのシフトを考慮して各都市の技術進歩を数量化指標で評価できる方法論である。図-2では、ある都市のパフォーマンスが t 期において z_t 、 $t+1$ 期において z_{t+1} で示されていると考える。また、 t 期において効率的フロンティアは f_t で表されている。 $t+1$ 期も同様で、効率的フロンティアは f_{t+1} で表されている。

k 都市における t 期～ $t+1$ 期でのMalmquist指数の変化率はフロンティアへの近傍度を示すCU指数とフロンティア自体のシフトを表すFS指数の積で計算できることが一般に知られており⁴⁾、以下の式(4)のように定式化される。

$$M_k = CU \text{ Index} * FS \text{ Index} \\ = \frac{F^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})}{F^t(x^t, y^t)} \cdot \left[\frac{F^t(x^{t+1}, y^{t+1})}{F^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})} \cdot \frac{F^t(x^t, y^t)}{F^{t+1}(x^t, y^t)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここで、 $F(x, y)$ は投入要素 x と産出要素 y を持つ都市の効率性を意味しており、 F の添字がフロンティアの観測時点、 x 及び y の添字がそれぞれデータの出典時点を表している。全ての指数は1未満の場合前年度比で技術退化、1を超えると技術進歩をそれぞれ意味する。

4. 都市交通システムの環境効率性評価

開発した環境効率性モデルを適用し、世界各都市の都市交通システムの環境効率性を計測した（表-1）。ここで、本分析は実際には4時点で行っているが、本稿では紙面の関係上、1990年のみの記載となっていることに留意する。表-1において、網掛けをしている都市は効率性が1であることを意味し、太字で記載している都市は参照集合に所属することを意味している。

表-1より、公共交通依存型都市であるCopenhagenやHong Kongが公共交通依存型都市以外でも多くの都市に参照されており、その優位性が確認できるが、自動車依存型都市は自動車依存型都市の中で参照集合を形成している。これらの結果より、各都市において論理上矛盾がなく都市特性に合致した効率性評価が行われていることが伺える。また、Los Angelesのように元々私的交通依存型である都市が公共交通依存型へのシフトを伴ってエネルギー消費構造の更なる改善が可能になるという知見が得られる例も見受けられる。このような結果が得られるのは、参照集合の設定においてクラスター間の越境を許容しているためであり、各都市の潜在的な成長の可能性の表現にも対応することができていることが確認できる。

Malmquist指数の経年的推移に関しては、Malmquist指数をCU指数とFS指数に分解することで、より詳しい考察が可能である。両指数より、フロンティア上の都市とそれ以外の都市とによる環境効率性の動向の相違がネッ

トでMalmquist指数全体を押し上げているかどうか否かによって図-3のように都市のタイプが4つに分けられる。

表-1 都市交通システムの環境効率性評価 (1990年)

都市	環境効率性	エネルギー消費[MJ/人]		参照集合(括弧内の数字はλの値)	
		観測値	理想値		
私的交通 依存型	Boston	0.667	58429	38947	Canberra (0.976), Montreal (0.024)
	Chicago	0.519	56128	29126	Copenhagen (0.835), Hong Kong (0.165)
	Denver	1.000	68275	68275	Denver (1.000)
	Detroit	0.798	62733	50068	Denver (0.954), Winnipeg (0.046)
	Houston	0.877	71603	62767	Denver (0.517), Sacramento (0.483)
	Los Angeles	0.424	62113	26336	Copenhagen (0.847), Hong Kong (0.153)
	Phoenix	0.751	64661	48543	Denver (0.775), Winnipeg (0.225)
	Portland	0.803	70709	56777	Denver (0.676), Winnipeg (0.324)
	Sacramento	1.000	76636	76636	Sacramento (1.000)
	San Diego	0.668	67213	44900	Denver (0.930), Winnipeg (0.070)
	Washington	0.422	60466	25514	Copenhagen (0.728), Hong Kong (0.272)
Winnipeg	0.458	39365	18018	Copenhagen (0.363), Hong Kong (0.637)	
私的・公共 交通調和型	Adelaide	0.608	37099	22557	Copenhagen (0.860), Hong Kong (0.140)
	Amsterdam	0.617	19820	12237	Copenhagen (0.303), Hong Kong (0.697)
	Brisbane	0.906	39296	35614	Denver (0.659), Winnipeg (0.341)
	Brussels	0.659	28902	19039	Copenhagen (0.378), Hong Kong (0.622)
	Calgary	0.629	47157	29665	Copenhagen (0.871), Hong Kong (0.129)
	Canberra	1.000	45010	45010	Canberra (1.000)
	Edmonton	0.561	44026	24684	Copenhagen (0.644), Hong Kong (0.356)
	Frankfurt	0.697	38268	26666	Copenhagen (0.630), Hong Kong (0.370)
	Hamburg	0.407	36744	14949	Copenhagen (0.155), Hong Kong (0.845)
	Melbourne	0.623	38934	24250	Copenhagen (0.778), Hong Kong (0.222)
	Montreal	0.859	77788	66851	Copenhagen (0.588), Hong Kong (0.412)
	Munich	0.797	18195	14508	Copenhagen (0.382), Hong Kong (0.618)
	New York	0.467	51655	24142	Copenhagen (0.483), Hong Kong (0.517)
	Ottawa	0.646	33635	21733	Copenhagen (0.520), Hong Kong (0.480)
	Paris	0.666	24255	16151	Copenhagen (0.208), Hong Kong (0.792)
	Perth	0.534	41396	22086	Copenhagen (0.831), Hong Kong (0.169)
	San Francisco	0.418	65806	27488	Copenhagen (0.770), Hong Kong (0.230)
Sydney	0.508	35053	17822	Copenhagen (0.489), Hong Kong (0.511)	
Tokyo	0.532	18243	9709	Copenhagen (0.077), Hong Kong (0.923)	
Vancouver	0.471	37146	17508	Copenhagen (0.560), Hong Kong (0.440)	
Vienna	0.557	20616	11486	Copenhagen (0.128), Hong Kong (0.872)	
公共 交通 依存型	Copenhagen	1.000	20430	20430	Copenhagen (1.000)
	Hong Kong	1.000	9605	9605	Hong Kong (1.000)
	London	0.648	23351	15126	Copenhagen (0.281), Hong Kong (0.719)
	Singapore	0.753	18078	13610	Copenhagen (0.316), Hong Kong (0.684)
	Stockholm	0.873	26835	23420	Copenhagen (0.541), Hong Kong (0.459)
	Toronto	0.576	33573	19330	Copenhagen (0.352), Hong Kong (0.648)
Zurich	0.666	25230	16816	Copenhagen (0.380), Hong Kong (0.620)	
途上国 都市	Bangkok	0.490	29959	14684	Hong Kong (1.000)
	Jakarta	1.256	9072	11397	Copenhagen (0.064), Hong Kong (0.936)
	Kuala Lumpur	0.525	20003	10497	Copenhagen (0.233), Hong Kong (0.767)
	Manila	1.540	7316	11267	Copenhagen (0.141), Hong Kong (0.859)
	Seoul	1.164	9598	11169	Copenhagen (0.214), Hong Kong (0.786)
	Surabaya	1.286	5606	7212	Copenhagen (0.068), Hong Kong (0.932)

が存在していれば、非効率的な都市への技術のスピルオーバーを促す施策が効果的であると考えられる。例えば、フロンティア都市において滞留している交通環境に関する先端技術(燃料効率の高い自家用車・公共交通車両の製作技術等)の拡散を進めるための人材流動化や共同研究による都市間連携の促進等がその例として挙げられる。

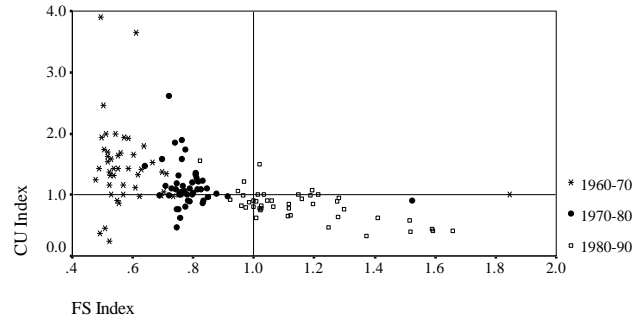


図-4 CU指数とFS指数の関係

5. まとめ

本研究では、都市交通のエネルギー消費構造のパフォーマンスを定量的に評価するために、環境効率性モデルを開発した。更に、提案した環境効率性モデルを適用し、世界各都市の都市交通システムの環境効率性を計測した。また、パネル分析によって、近年各都市とフロンティア上の都市の間において環境技術の格差が広がっていることが確認でき、フロンティア上の都市の先端技術を他の都市に波及させることの必要性が確認できた。

開発モデルに関する課題としては、コストデータの取扱いが挙げられる。本研究ではコストデータであるエネルギー効率を不変量としたが、特に公共交通に関しては、輸送密度の増減によってエネルギー効率の値が変動することが想定される。そのため、より現実のエネルギー消費構造に即した評価を行うためには、各都市の入力変数の増減に応じてコストデータの変動を許容するモデルを検討すべきであると考えられる。

参考文献

- 1) Kenworthy, J.R., and Laube, F.B.: An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities 1960-1990, University Press of Colorado, 1999.
- 2) Senbil, M., Zhang, J., and Fujiwara, A.: Evaluating Energy Efficiency of Urban Transportation Systems in Developing Cities Using a Four-wave Panel Data, 土木計画学研究・講演集, Vol.31, CD-ROM, 2005.
- 3) 吉野大介, センビルメティン, 藤原章正, 張峻屹: 都市交通システムのエネルギー消費効率性の分析, 土木学会中国支部研究発表会発表概要集, pp.343-344, 2006.
- 4) 末吉俊幸: DEA—経営効率分析法—, 朝倉書店, 2001.

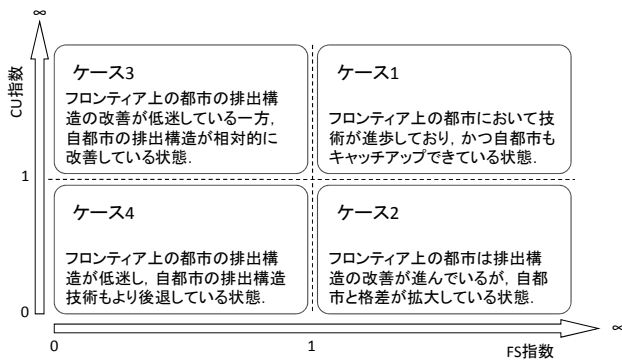


図-3 CU指数・FS指数による都市の分類

図-4 に全都市・全期間の CU 指数と FS 指数の関係を図示している。全都市の平均的な動向として、1960年から1990年にかけて図-3における「ケース3: 先行都市の技術進歩が伸び悩み一方、当該都市の効率性が向上し、世界的に見ると頭打ちの状態」から「ケース2: 先行都市の発展に対し各都市の効率性が悪化し、格差が進んでいる状態」へ移行していることが分かる。このような場合、フロンティア上の都市においてに外部化可能な技術